

博 士 論 文

コンクリート中の気泡の空間構造の
点過程としての評価に関する研究

金沢大学大学院

自然科学研究科 環境デザイン学専攻

学籍番号 1424052001

氏名 古東 秀文

主任指導教員名 五十嵐 心一教授

提出年月 2016 年 6 月

コンクリート中の気泡の空間構造の 点過程としての評価に関する研究

第1章 序論

1.1 概説	2
1.2 論文の構成	6
参考文献	8

第2章 実験概要

2.1 使用材料	10
2.2 供試体の配合および作製	10
2.2.1 セメントペースト供試体の配合および作製	10
2.2.2 モルタル供試体の配合および作製	12
2.2.3 コンクリート供試体の配合および作製	13
2.3 画像取得および画像解析手順	13
2.3.1 スキャナによる画像取得	13
2.3.2 セメントペーストの画像解析手順	14
2.3.3 モルタルおよびコンクリートの画像解析手順	15
2.4 コンクリートのスケーリング試験	17
2.5 気泡間隔係数の測定	18
参考文献	20

第3章 ステレオロジーと空間統計量の概要

3.1 序論	22
3.2 ステレオロジー	22
3.3 2次のステレオロジー	24
3.4 2点相関関数(共分散)	25
3.5 点過程統計量	27
3.5.1 概要	27
3.5.2 点密度(λ)	28
3.5.3 K[関数および L 関数	28
3.5.4 点の間引き過程の K 関数	31
3.5.5 L 関数による偏差の有意性判定	32
3.5.6 最近傍距離関数(G 関数)	33
3.5.7 接触分布関数(F 関数)	36
参考文献	38

第4章 セメントペースト中の気泡の空間分布構造の定量評価

4.1 序論	41
4.2 フレッシュ特性と硬化後の気泡体積率の関係	42
4.3 セメントペースト中の気泡分布構造評価に必要な観察領域	45
4.4 硬化後のセメントペースト中の気泡画像	45
4.5 空気量と気泡の点密度の関係	47
4.6 セメントペースト中の気泡分布のランダム性	49
4.7 セメントペースト中の気泡の距離特性	51
4.8 結論	53
参考文献	54

第5章 モルタルおよびコンクリート中の
気泡の空間分布構造の定量評価

5.1 序論	57
5.2 モルタルおよびコンクリートの フレッシュ特性と硬化後の気泡体積率の関係	58
5.3 モルタルおよびコンクリート中の気泡分布構造評価に必要な観察領域	63
5.4 硬化後のモルタルおよびコンクリート中の気泡画像	64
5.5 モルタルおよびコンクリートの空気量と気泡の点密度の関係	69
5.6 モルタルおよびコンクリート中の気泡分布のランダム性	71
5.6.1 モルタルおよびコンクリート中の気泡の空間分布特性	71
5.6.2 モルタルおよびコンクリート中の気泡の間引き過程	74
5.7 モルタルおよびコンクリート中の気泡の距離特性	76
5.8 結論	79
参考文献	80

第6章 点過程から得られる距離に関する気泡間隔特性値と
耐凍害性評価との対応

6.1 序論	83
6.2 メディアン距離	84
6.3 気泡間隔特性値の定義	87
6.4 気泡分布構造としての気泡間隔特性値と気泡間隔係数との対応	91
6.5 気泡から得られる特徴量とスケーリングとの対応	92
6.6 結論	89
参考文献	99

第 7 章 気泡の 2 次のステレオロジー量から求める
気泡間隔係数の簡便な推定方法

7.1 概要	102
7.2 気泡間隔係数と類似する気泡間隔特性式	103
7.3 点密度から得られる気泡間隔係数と類似する気泡間隔特性式	106
7.4 気泡間隔特性式から求める気泡に関する特性図	108
7.5 結論	111
参考文献	112

第 8 章 結論

8.1 結論	114
--------	-----

第 1 章

第 1 章

序論

1.1 概説

平成 26 年度のコンクリートの国内出荷量は、約 9401 万 m^3 であり¹⁾、ここ数年間は減少傾向であるものの、コンクリートは主要な建設資材の一つである。CO₂ 排出削減が叫ばれる今日ではあるが、鉄筋コンクリート造、鉄骨造および木造等のいずれの構造種別においても、コンクリートは依然として多用されている。コンクリートは、その構造物に要求される供用期間中において、要求される性能を満足する必要がある、一見メンテナンスフリーのように扱われることもあるがそうでは無い。構造物の設置された環境や負荷条件はさまざまであるが、構造物は使用が開始されるとともに、何らかの劣化現象が生じていく。この劣化現象の一つに、凍害がある。コンクリートが水分を含んだ状態で、気温が零度以下の環境下に置かれたときコンクリートには凍害劣化が発生する²⁾。凍害による劣化は、長期にわたる凍結と融解の繰り返しにより発生し、コンクリート表面にスケーリング、ひび割れおよびポップアウトなどの現象として現れる³⁾。凍害は、低温側の気温の影響や気温の変動幅に影響されることから、日本建築学会では、気象資料を用いて作成した凍害危険度の分布図を示している⁴⁾。図 1-1 に凍害危険度の分布図を示す。

図 1-1 より、凍害の予測程度がやや大きいと判定される凍害危険度 3 以上の地域は、東日本の山間部に分布し、東北地方や北海道では平野部にも広がっている。また、コンクリート打設後の硬化に対する配慮では、寒中コンクリートを定義し、養生期間中にコンクリートが凍結を発生しないように注意を促している。金沢市では 1 月から 2 月にかけて、寒中コンクリートの適用を求めている。法律においても、凍害に対する内容が制定されている。住宅品質確保促進法には凍害に対する対策を行なうことが盛り込まれている。そこには、「沖縄県その他日最低気温の平滑平年値の年間極値が 0℃を下回らない地域以外の地域にあっては、コンクリート中の空気量が 4%から 6%までであること。」⁵⁾と定められ、凍害対策として空気量総量の規定を定めている。この空気量総量による対策は、一定の空気量が確保されているコンクリートは、耐凍害性を有しているとの考えによるものである。住宅品質確保促進法に記述されている「日最低気温の平滑平年値の年間極値が 0℃以下」となる条件の地域には、多くの都市部も該当する⁶⁾。これらの都市部は図 1-1 に示した凍害危険度の分布図に示された凍害危険度が小さな地域にも存在し、凍害に対する配慮が伺える。

第1章

1. ○内の数値は凍害危険度.

凍害危険度	凍害の予想程度
5	極めて大きい
4	大きい
3	やや大きい
2	軽微
1	ごく軽微

2. 凍害重み係数 $t(A)$: 良質骨材, または AE 剤を使用したコンクリートの場合.
 3. コンクリートの品質が良くない場合には, ----- 内の地域でも凍害が発生する.



図 1-1 凍害危険度の分布図⁷⁾

凍害が起こるメカニズムは、必ずしも明確にされているわけではない。現在考えられている主な内容を、表 1-1⁸⁾にまとめる。いずれの説においても、水と細孔が関係しており、コンクリート中に存在する空気量の確保が重要であると考えられている。長谷川ら⁹⁾の指摘によればコンクリートの耐凍害性の向上には、AE 剤を使用しエントレインドエアを連行し、5%前後の空気量を確保することを推奨している。また、気泡の距離についても言及し、気泡間の距離が近いほど、コンクリートの凍結による圧に対して有効であるとしている。換言すると、コンクリート中の気泡構造が、緩衝材のような役割を果たし、耐凍害性の性能を確保しているといえる。気泡間距離に着目した特性値に、気泡間隔係数¹⁰⁾がある。気泡間隔係数は、1949 年 Powers により提案された気泡の距離に関する特徴量を得ようとしたもので、セメントペースト中において、同一寸法の気泡の球体を同じ大きさの立方体格子に配置したとき、立方体の対角線の $1/2$ の長さから気泡の半径を引いた距離として仮定された距離である。この気泡間隔係数は、ASTM C457¹¹⁾に測定方法が規定されている。測定には顕微鏡観察が必要で、相当な走査線長

表 1-1 凍害によるコンクリートの劣化のメカニズム⁸⁾

		説明
①水圧説		コンクリートの細孔中の水が凍結し、膨張が発生する。その膨張による水の移動圧により凍害が発生
浸透圧説	②膨張	粗大径の毛細管中の水が先に凍結し、微小な細孔にある未凍結水のアルカリ濃度が増加する。周囲のゲル水が未凍結水中に拡散し、凍結による膨張圧が発生する
	③収縮	空気泡に拡散された水が凍結し、毛細管中の氷晶とともに周囲の水を吸収し、吸収された分だけ収縮が発生する

さが要求され、労力を必要とするものであるが、耐凍害性の評価において気泡間隔係数の値が凍害の実現象と良く一致することから、現在においても重要なパラメータとして用いられている。林ら¹²⁾の研究によれば、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下であるコンクリートは、耐凍害性を有していると述べている。また、この研究での気泡間隔係数の測定は、ASTM C457 に規定されているリニアトラバース法に準じて測定しており、多大な労力を必要としたと想像するには難しくない。そこで、気泡間隔係数の測定に必要な労力を低減することや、気泡間の距離特性をより忠実に観察し、気泡構造の特徴を取得しようとする試みも行なわれている。濱ら¹³⁾の研究では、リニアトラバース法に変わる方法として浮力法を用いて気泡間隔係数の測定をおこなっている。また、杉山ら¹⁴⁾の研究では X 線 CT によりモルタルの気泡の大きさや気泡間隔係数を求め、気泡の 3 次元での定量化を行なっている。しかし、これらの測定方法には専用の装置や施設が必要なことから、普及にはいたっていない。そこで実務上、耐凍害性を担保する判断に用いられているのが、空気の総量の測定である。この考えは、気泡間隔係数の値が小さいことは、気泡間距離が短いことと相当し、気泡間距離が短いことは、空気量が多いことに相当すると考えているためである。気泡間隔係数をコンクリートの製造工場や建設場で測定することは困難であり、耐凍害性を確保するために空気総量を定め監理することが一般的に行なわれている。先程の住宅品質確保促進法に規定されている空気の総量により耐凍害性を確保する方法も同様である。

気泡の点間距離の特徴量を表す重要なパラメータの気泡間隔係数ではあるが、その測定だけでは耐凍害性を評価するのには十分ではないとの報告もある。坂田ら¹⁵⁾の研究では、気泡間隔係数が同じ程度であっても気泡分布構造が大きく異なることがあり、

第1章

150 μ m 未満の気泡を多く連行している場合には、耐凍害性が高い傾向にあったと述べている。これらの研究成果からコンクリート中の気泡の分布構造の特徴を得ること、および、気泡間の距離に関する特性値を得ることができれば、耐凍害性の評価をより定量的に行えると考えられる。

近年では、気泡の幾何学的特徴を得る方法として、画像解析の方法が普及している。そこでは、ステレオロジーの考えを導入し、3次元の特徴を2次元の断面から取得する方法が提案されている。その方法の一つが点過程統計量である。点過程統計量では、観察する対象相の大きさは考えず、対象相を点で表し、点の分布の特徴や点間距離の特徴を得ようとする統計量である。本研究では、コンクリート中の気泡を点と置き換え、点過程の考えを導入し、気泡の配置に関する仮定を導入することなく、気泡の分布構造、および気泡の距離に関する特徴を得ることを目的とした。さらにそのようにして得られた特性値とコンクリートの耐凍害性との対応を明らかにすべく、スケーリング試験を行った。そして、気泡の空間構造の評価法として、および耐凍害性を判定するための手段としての2つの観点から点過程としての取り扱いの有用性について論ずることを目的としている。

第1章

1.2 論文の構成

本論文では、コンクリート中の気泡の空間構造について定量的な評価を行うことを目的として点過程の考えを導入しその有用性を明らかにするために、より単純な系から複雑な系へと適用している。本論文の構成は以下の通りである。

第2章においては、本研究で使用したセメントペースト、モルタルおよびコンクリート供試体の配合を示し、気泡抽出のための画像解析の方法を詳述した。また、気泡から得られた点過程の特徴と耐凍害性を評価するために ASTM C672 に準じたスケーリング試験を行うものとし、その方法について述べた。

第3章においては、気泡の空間分布特性を得るために用いた点過程統計の考え方および定量評価のために用いた2次のステレオロジー量と呼ばれる関数についてその考え方および計算方法について述べている。

第4章においては、最も単純かつ基本となる系としてセメントペーストを考え、気泡が他の粒子の存在により分布制限を受けない場合として空間分布構造を評価した。

第5章においては、モルタルおよびコンクリート供試体を用いて、気泡の分布特性の検討を行った。これらの供試体には骨材が存在しており、骨材の存在による気泡の空間分布構造への影響を考察した。

第6章においては、セメントペースト、モルタルおよびコンクリート供試体の気泡間の距離に関する最近傍距離関数から得られるメディアン距離を用いて、気泡の点間距離の特徴を表す気泡間隔特性値を定義した。さらに、従来用いられてきた気泡間隔係数と、実際の気泡分布構造から得られる特徴量である気泡間隔特性値を比較することにより、両者の幾何学的な類似点と相違点の考察を行なった。さらに、気泡間隔特性値の有用性を確認するため、コンクリート供試体のスケーリング試験を行い耐凍害性の確認を行なっている。

第7章においては、点密度から気泡間隔係数と同等な距離特性を推定する方法を提案している。本研究で用いた供試体にて、推定式により得られる想定気泡間隔係数と実際に測定された気泡間隔係数の相関性を確認し、画像解析を利用し気泡の空間分布構造の特徴量を得ることの簡便性について記述している。

第8章においては、本研究の成果をまとめ、結論を記述している。

上記の各章に対するフロー図を、図 1-2 に示す。

第1章

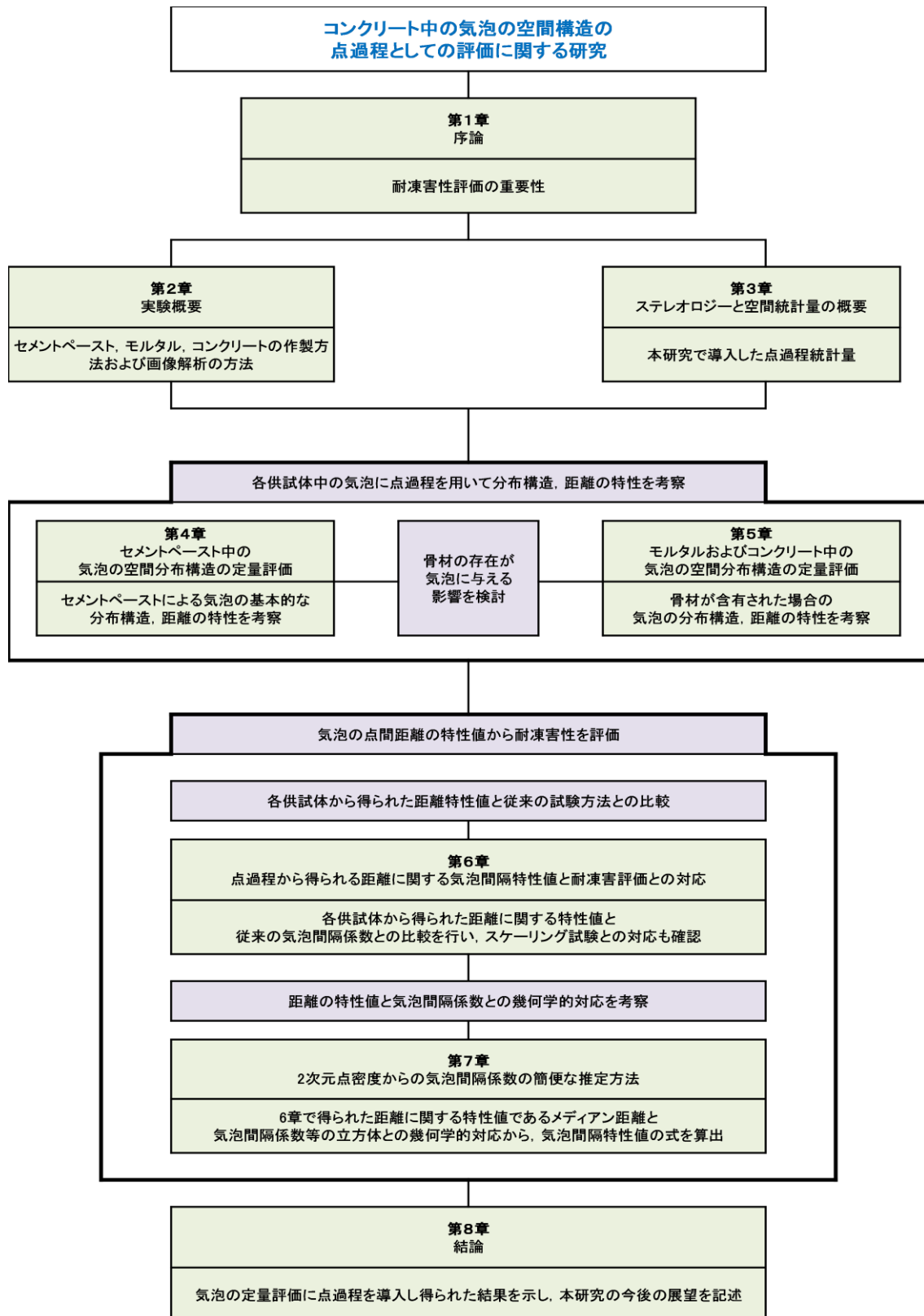


図 1-2 本論文のフロー図

参考文献

- 1) 国土交通省 土地・建設産業局 建設市場整備課 労働資材対策室：平成 27 年度
主要資材建設材料需要見通し，国土交通省報道発表 平成 27 年 10 月 9 日，2015.
- 2) 川村満紀，S.チャタジー：コンクリートの材料科学，森北出版，2002.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '04 [基礎編]，日本コンクリ
ート工学協会，2004.
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート工事 JASS5，丸善出版，2015.
- 5) 国土交通省住宅局住宅生産課監修：日本住宅性能表示基準・評価方法基準技術解説，
工学図書，2015.
- 6) 長谷川拓哉，千歩修，福山智子：コンクリートの凍害劣化を対象とした劣化予測手
法および気象データの違いによる耐用年数の比較，コンクリート工学年次論文集，
Vol.37, No.1, pp.859-864, 2015.
- 7) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメン
ト技術年報，Vol.29, pp.248-253, 1975.
- 8) 北海道土木技術会コンクリート研究委員会：凍害により材料劣化が生じたコンクリ
ート構造物の構造性能評価に向けて，北海道土木技術会，pp.83-90, 2014.
- 9) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害，技報堂出版，
1988.
- 10) Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the
Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949 .
- 11) ASTM C457: Standard Recommended Practice for Microscopical Determination
of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened
Concrete, ASTM Standards, Part 14.
- 12) 林大介，坂田昇，中島賢二郎，奥紀仁，関博：コンクリートの凍害劣化予測に関す
る研究，土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.142-159, 2008.
- 13) 濱幸雄，太田宏平：フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研
究，コンクリート年次論文集，Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004.
- 14) 杉山隆文，志村和紀，畠田大規：高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙
構造の透視，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.3, pp.351-360,
2011.
- 15) 坂田昇，菅俣匠，林大介，橋本学：コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関
する考察，コンクリート工学論文集，第 23 巻第 1 号，pp.35-47, 2012.

第 2 章

第 2 章

実験概要

第2章

2.1 使用材料

使用したセメントは、普通ポルトランドセメント（密度： 3.15g/cm^3 ，比表面積： $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。骨材は、手取川産の川砂（密度： 2.60g/cm^3 ，吸水率：2.05%）および川砂利（密度： 2.60g/cm^3 ，吸水率：1.81%，最大骨材寸法：25mm）のそれぞれを、細骨材と粗骨材として用いた。混和剤には、以下の3種類を使用した。

- AE 減水剤：リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする「マスターボゾリス No.70」
- AE 剤：アルキルエーテル系陰イオン活性剤を主成分とする「マスターエアー 303A」
- 高性能減水剤：ポリカルボン酸エーテル系の「マスターグレニウム 8000W」

2.2 供試体の配合および作製

2.2.1 セメントペースト供試体の配合および作製

セメントペースト供試体は、水セメント比によるセメントペーストの粘性の違いによる気泡の分布状態を比較するため $W/C=0.40$ と $W/C=0.45$ の2種類を作成した。AE 減水剤および AE 剤の量を変化させ、空気量の異なる供試体を作製した。JIS R 5201 に準じてセメントペーストを練り混ぜ、フロー測定を行った（図 2-1，図 2-2）。その際、過度のブリーディングや材料分離がないことを確認している。ブリーディングや材料分離が生じた供試体は、ワーカブルな状態でないと判断し破棄することとした（図 2-2）。また、小型エアメーター（図 2-3）を用いてセメントペーストの空気量を測定し、その後 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ の角柱型枠に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生（ 20°C ）を行った。

作製したセメントペースト供試体、配合および得られたフレッシュ特性を表 2-1 に示す。AE 減水剤および AE 剤量を調整して $W/C=0.40$ では空気量を約 2% から 9% まで、 $W/C=0.45$ では約 4% から 10% まで変化させた。

第2章



図 2-1 ワーカブルなセメントペーストのフロー試験結果の例（CP1-④）



図 2-2 ワーカブルではないセメントペーストのフロー試験結果の例



図 2-3 小型エアメーター

表 2-1 セメントペーストの名称，配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C	AE減水剤量 (C × %)	AE剤量 (C × %)	フロー (mm)	空気量 (%)
CP1-①	0.40	—	—	195	2.4
CP1-②		0.05	—	203	3.3
CP1-③		0.10	—	213	3.4
CP1-④		0.25	—	222	4.9
CP1-⑤		0.50	—	249	6.4
CP1-⑥		0.25	0.01	228	6.0
CP1-⑦		0.25	0.02	227	8.5
CP2-①	0.45	—	—	228	3.5
CP2-②		0.25	—	259	4.9
CP2-③		0.50	—	288	6.2
CP2-④		0.25	0.01	263	5.8
CP2-⑤		0.25	0.02	267	9.5

第2章

2.2.2 モルタル供試体の配合および作製

モルタルの水セメント比は 0.40 とし，セメント：砂=1：1 および 1：2 の 2 種類の供試体を作成した．AE 剤（原液）の量を変化させ各骨材比に対して空気量の異なる 3 つの供試体を作製した．JIS R 5201 に準じてモルタルを練り混ぜ，フロー測定を行った（図 2-4，図 2-5）．フロー値は 200mm 程度を目標とし，事前に高性能減水剤量を変化させてモルタルを練混ぜ，フロー値が 200mm 程度になるように高性能減水剤量を決定した．また，過度のブリーディングや材料分離がないことを目視にて確認した．小型エアメーターを用いて空気量を測定し，その後 40mm×40mm×160mm の角柱型枠に打ち込み 20℃の恒温室に静置した．打ち込み後 24 時間にて脱型し，材齢 7 日まで水中養生（20℃）を行った．作製したモルタル供試体の名称および配合を表 2-2 に示す．



図 2-4 ワーカブルなモルタルのフロー試験結果の例（M2-①）



図 2-5 ワーカブルではないモルタルのフロー試験結果の例

表 2-2 モルタルの名称，配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C	C:S	高性能 減水剤量 (C × %)	AE 剤量 (C × %)	フロー (mm)	空気量 (%)
M1-①	0.40	1:1	0.1	—	198	2.0
M1-②				0.06	197	5.5
M1-③				0.1	198	7.2
M2-①	0.40	1:2	0.45	—	202	5.7
M2-②				0.002	217	8.6
M2-③				0.006	218	11

2.2.3 コンクリート供試体の配合および作製

コンクリートの水セメント比は $W/C=0.40$ と $W/C=0.55$ の2種類とした。AE 減水剤はセメント質量に対して 0.25%の基準量とし、AE 剤の量を変化させ水セメント比ごとに3種類の空気量の異なる供試体を作製した。JIS R 5201 に準じてコンクリートを練り混ぜ、スランプ測定を行った。その後、エアメーターを用いて空気量を測定し、100mm×100mm×400mm の角柱型枠に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生（20℃）を行った。

実験では、水セメント比毎に単位水量と単位セメント量を一定とし、各配合の空気量の違いに応じて骨材量を変化させた。また水セメント比の選定は、実際の構造物に比較的多く用いられる配合とし、低水セメント比として $W/C=0.40$ 、高水セメント比として $W/C=0.55$ とした。作製したコンクリートの名称、示方配合および得られたフレッシュ特性を表 2-3 に示す。

表 2-3 コンクリートの名称、示方配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				単位量 (cc/m ³)		測定結果	
					W	C	G	S	AE 減水剤	AE 剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
C1-①				2.5±0.5			1033	686		438	13.0	2.8
C1-②	0.40	39.9	15±2	4.5±0.5	175	438	1002	665	4380	876	17.0	5.0
C1-③				7.0±0.5			963	639		5256	16.0	7.2
C2-①				2.0±0.5			1045	785		—	17.0	1.7
C2-②	0.55	42.9	15±2	4.5±0.5	175	318	1008	754	3180	636	16.5	4.0
C2-③				9.0±0.5			941	707		3816	17.0	9.0

2.3 画像取得および画像解析手順

2.3.1 スキャナによる画像取得

供試体の養生終了後、セメントペーストおよびモルタル供試体では厚さ 10mm 程度の板状試料とし、コンクリート供試体では骨材の大きさを考慮し 15mm 程度の厚さの板状試料を切り出した。深さ方向の影響が出ないように供試体の切り出しを行った。耐水研磨紙を用いて切断面の研磨を行い、ブローアを用いて研磨面の水分を素早く除去した。

第2章

その後、フラットベッドスキャナを用いて試料断面のカラー画像を取得した(図 2-6(a))。さらに、セメントペースト相と同色の骨材を抽出するため、供試体の研磨面に対して 1%フェノールフタレイン水溶液の噴霧を行い、セメントペースト相の染色を行った。呈色後、余分な水分をブローアで除去し画像を取得した(図 2-6(b))。画像を取得後、研磨面を黒色インクまたは黒色フェルトペンで塗り潰した。その後、表面の凹部に気泡を白色粉末(炭酸カルシウム粉末、粒径範囲 12~13 μm)で充填した。充填後、試料表面に残った余分な粉末を丁寧に除去し、白黒の 2 値化画像を取得した(図 2-6(c))。本研究では、各画像の気泡面積率や気泡個数の変動を考慮し、取得する画像数は 10 とし供試体内の無作為に選んだ断面の画像を取得した。セメントペーストおよびモルタルにおいては解像度を 1200dpi とし、1 画素を約 21.2 μm に相当する画像とした。なお、ブリーディングの影響で試料の縁部では黒色インクの均一な染色がなされない領域が存在する場合があるため、40mm $\times$ 40mm の断面に対して、中心から 30mm $\times$ 30mm の領域を解析領域とした¹⁾。なおこの場合であっても、代表領域の面積よりも十分に大きいことを確認している¹⁾。また、コンクリートにおいては観察面積が大きいので、画像取得の簡便性を考慮し、解像度を 847dpi、1 画素は約 30 μm に相当する画像を取得した。解析領域は、100mm $\times$ 100mm の断面に対して、中心から 60mm $\times$ 60mm の領域とした。

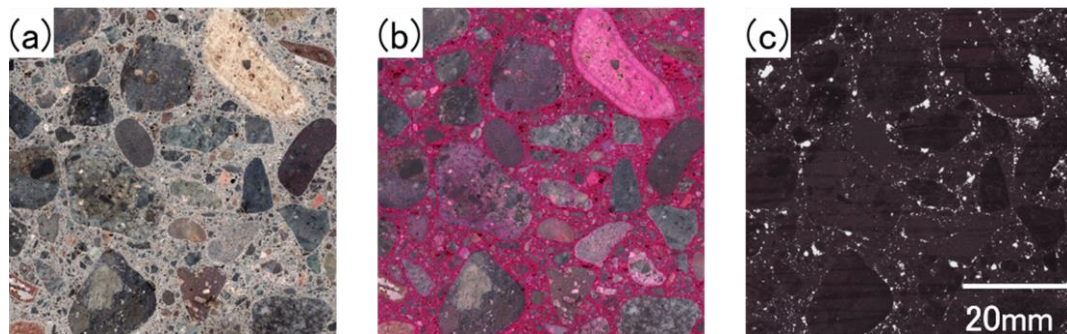


図 2-6 取得した画像の例(コンクリート)

2.3.2 セメントペーストの画像解析手順

セメントペーストにおいては、骨材が存在しないので、気泡の 2 値画像のみを取得した。取得した白黒画像(図 2-7(a))に対して、モノクロ変換を行った。その後、平滑化フィルター処理を 2 回行ってノイズを除去し、エッジ鮮鋭化処理(ラプラシアンフィルター)を 1 回行ってグレースケールに基づく 2 値化処理(TOKS 法 1, 鮮明度 255)を

行い、気泡の 2 値画像を取得した。さらに、目視で判断できる未抽出箇所のみに対して手動補正を施した。また、AE 剤にて連行される気泡径の範囲はおおよそ $30\sim 250\mu\text{m}$ であること²⁾および、ステレオロジーの観点から、試料に現れた多くの微細な気泡が、すべて大きな球の端部の切断による円形断面として一斉に特定の断面に現れたとは考えられないことから、 $30\mu\text{m}$ 以下白色部は気泡以外の表面凹凸部もしくはその他の空隙であると判断し、これを除去した。残された白色部が気泡であると考え、これを気泡の 2 値化画像とした (図 2-7 (b))。取得した気泡の 2 値化画像から気泡面積率を算出し、ステレオロジーの考え方にに基づき、これを気泡体積率とした。さらに、画像解析ソフトウェアの機能を用いて、個々の気泡の重心点位置座標を求め、これを位置ベクトル $\mathbf{x}_i$ とみなして点過程 $X=\{\mathbf{x}_i; i=1, \dots, n\}$ とした画像 (図 2-7 (c)) を取得した。この点過程画像から、セメントペースト中の気泡の空間分布の解析を行った。

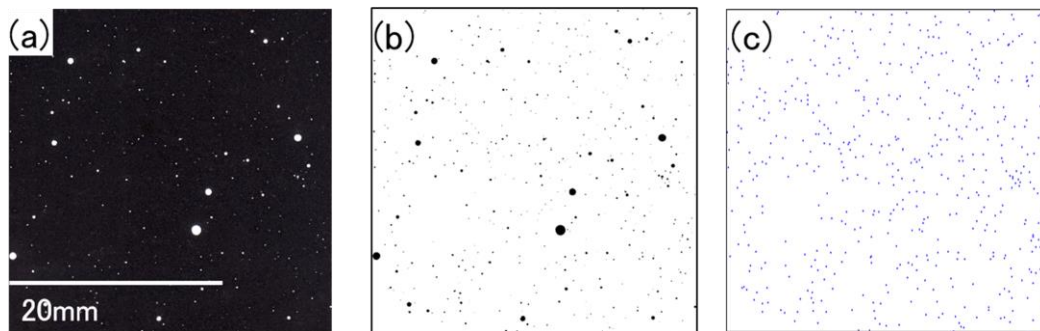


図 2-7 セメントペースト中の気泡の画像例

2.3.3 モルタルおよびコンクリートの画像解析手順³⁾

セメントペーストは骨材を含まないため、気泡の抽出は比較的簡単である。一方、モルタルおよびコンクリートは、骨材が気泡の空間分布に影響を与える可能性がある。このため骨材粒子の空間分布を評価するために、骨材を抽出した 2 値画像が必要となる。そのため、セメントペーストとは異なる手順を用いて骨材および気泡の 2 値画像の取得を行った。2.3.1 にて取得した断面画像 (図 2-10 (a))、フェノール呈色画像 (図 2-6 (b)) および白黒画像 (図 2-6 (c)) からそれぞれ青成分 (図 2-6 (a))、緑成分 (図 2-6 (b)) および赤成分 (図 2-6 (c)) を加算した RGB 画像を取得した。これらの RGB 情報を持つ画像を重ね合わせることにより、骨材相、セメントペースト相および気泡をそれぞれ異なる色で表示したカラー画像を得た (図 2-8 (d))。重ね合わせた画像中における骨材

色は様々であるため、明度および色度に対して解析時に示される濃度ヒストグラムから閾値を設定することで目的とする骨材粒子の 2 値画像を得た。最終的に目視で判断できる未抽出箇所に対して手動補正を施し、骨材粒子の 2 値化画像とした (図 2-8(e))。また、気泡については、白黒画像に対して 2.3.2 と同様の方法で気泡の 2 値化画像を取得した。このとき、骨材粒子中に存在する白色部分が抽出されるため、画像間演算の減算「気泡の 2 値画像－骨材の 2 値画像」を行い、骨材上の白色部分を除去した。また、2.3.2 と同様な理由から 30 μ m 以下の白色部を除去した。残された白色部が気泡であると考え、これを気泡の 2 値化画像とした (図 2-8(f))。この 2 値化画像に対して気泡面積率を画像解析により求め、気泡体積率とした。さらに、個々の気泡の重心点座標 $x_i(i=1,\dots,n)$ を求め、これを気泡の位置ベクトル x_i とみなし、気泡を点で代表させた点過程 $X=\{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。この点過程画像から、モルタルおよびコンクリートの気泡空間分布の解析を行った。

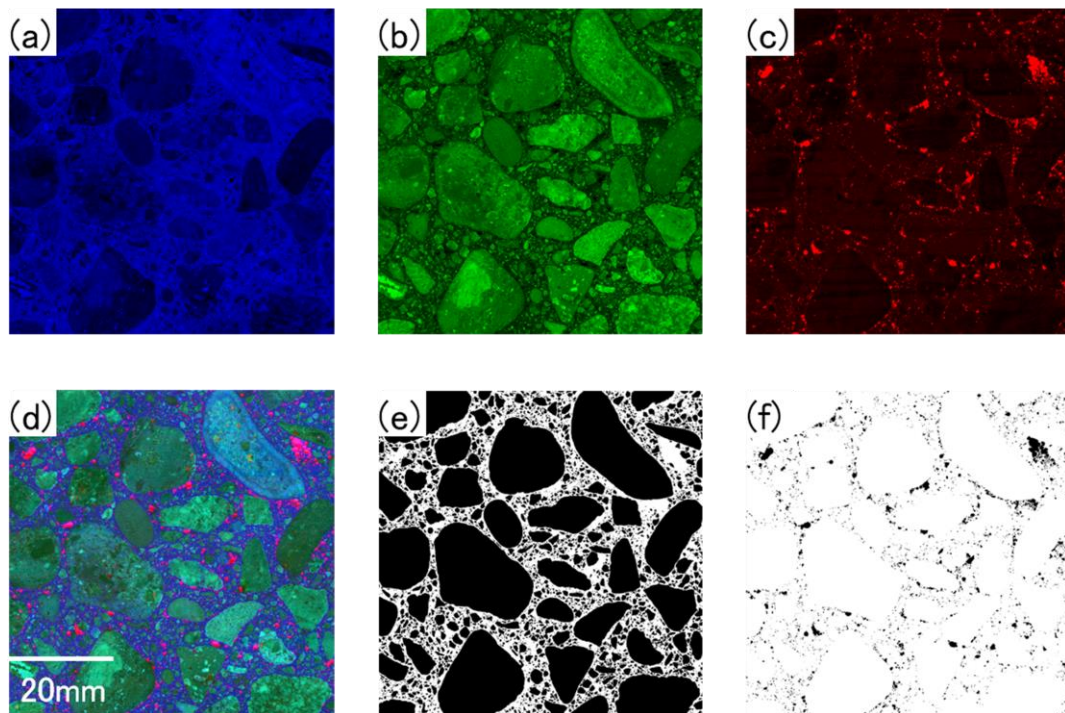


図 2-8 RGB 情報抽出による骨材分離と白色粉を用いた気泡の抽出例 (コンクリート)

2.4 コンクリートのスケーリング試験

JSCE-K 572⁴⁾, RILEM CDF⁵⁾および ASTM C 672⁶⁾を参考にスケーリング試験を行った。供試体および試験面に関しては JSCE-K 572, 試験液の吸水方法に関しては RILEM CDF, 温度条件および試験サイクルに関しては ASTM C672 に準じてスケーリング試験を行った。2.2.3にて作製したコンクリート供試体に対し, 材齢 14 日まで水中養生 (20℃±2℃) を行った。その後, 供試体を 100mm×100mm×100mm に切断し, 各配合に対して 6 個ずつの供試体にてスケーリング試験を行った。また, 供試体側面を試験面とし, 試験面以外からの劣化を防ぐために, 試験面以外の面をエポキシ樹脂で被覆した。図 2-13 のようにスペーサーを設置した容器に供試体を設置し, 7 日間の乾燥養生 (相対湿度 60%, 温度 20℃) を行った。また, 乾燥養生終了後の 7 日間にわたって, 濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液を試験面から浸漬深さが 5mm となるように入れ, 下面吸着法による試験液の吸水を行った。乾燥養生終了後, 供試体を, 冷温槽 (温度 -20℃) にて 18 時間静置した。その後, 冷温槽から取り出し, 温度 20℃ にて 6 時間静置した。以上, 合計 24 時間を 1 サイクルとしてコンクリートに凍結融解の繰り返しサイクルを与えた。以上の供試体作製から凍結融解サイクルを与えるまでのスキームを図 2-10 に示す。凍結融解 5 サイクルごとにスケーリング量を計測し, 50 回まで行った。n サイクル後のスケーリング量を計測し, 式(2-1)より単位面積当たりの累積スケーリング量を求めた。

$$S_n = \frac{\sum m_n}{A} \quad (2-1)$$

ここに,

S_n : サイクル後の累積のスケーリング量

m_n : n サイクル後のスケーリング片の質量

A : 試験面の面積

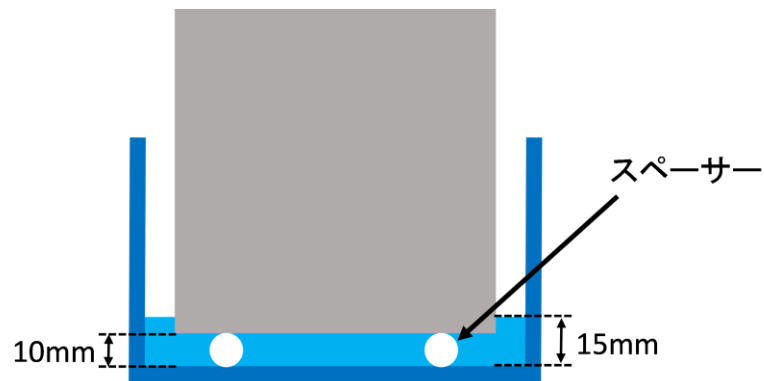


図 2-9 スケーリング試験用供試体の模式図

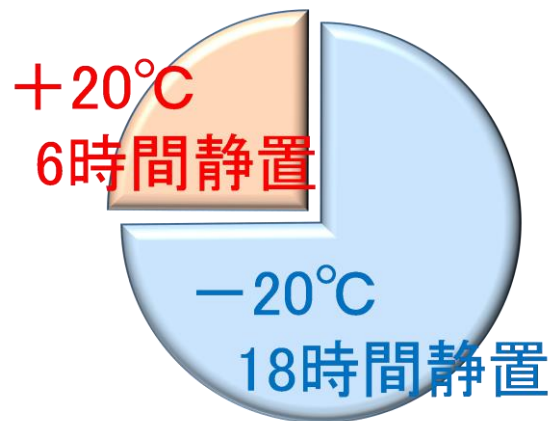


図 2-10 スケーリング試験の 24 時間サイクル

2.5 気泡間隔係数⁷⁾の測定

ASTM C 457 に従って気泡間隔係数を式(2-2)より求めた。

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \sqrt[3]{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad (P/A \geq 4.342) \quad (2-2)$$

$$L = \frac{P}{A\alpha} \quad (P/A \leq 4.342) \quad (2-3)$$

ここに、 α ：気泡の比表面積

P ：ペースト容積比

A ：硬化コンクリートの空気量

本研究では、2値画像から得られる結果から気泡の比表面積 α を式(2-3)から求めた¹⁰⁾。

$$\alpha = \sqrt{6\pi/\bar{a}} \quad (2-4)$$

ここに、 $\bar{a}$ ：気泡面積の平均値である。

図2-15に気泡間隔係数を求めるために Powers により仮定された気泡の空間分布構造を模式的に示す。仮定された気泡の空間分布とは、セメントペースト上に様々な寸法の気泡が存在する実際の空間分布配置を（図 2-14(a)）、同一径の気泡が立方体の中心に配置されているような規則的配置として仮定している（図 2-14(b)）。この配置は、同一径の気泡が立方体の格子点に規則的に配置されているような配置に置き換えることができる（図 2-14(c)）。この配置において、気泡表面からセメントペースト中の点に至る最大距離が気泡間隔係数 L となる。立方体の1辺の長さはセメントペーストの割合 P 、気泡体積率 A 、気泡個数 N を用いて $\sqrt[3]{(P+A)/N}$ と表せる⁸⁾。

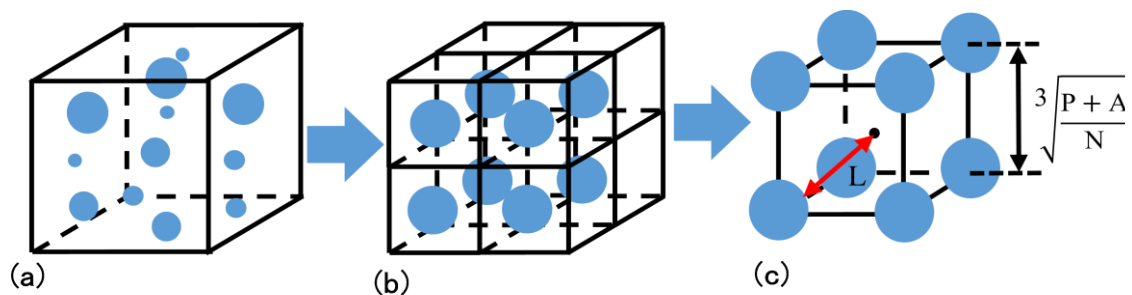


図 2-15 Powers の気泡間隔係数を求めるための気泡配置

参考文献

- 1) Hoang, D. G., 五十嵐心一, 内藤大輔: コンクリート画像からの骨材相の抽出と粒度分布の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2065-2070, 2009.
- 2) 川村満紀: 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996.
- 3) 横田光一郎, 五十嵐心一: RGB情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構成相の空間分布特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1759-1764, 2013.
- 4) JSCE-K 572-2012 けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案), けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案), pp. 81-114, コンクリートライブラリー137, 土木学会, 2012.
- 5) Setzer, M. J., Fagerlund, G. and Janssen, D.J.: RILEM Recommendation (TC 117-FDC), CDF Test-Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-tests with sodium chloride solution, Materials and Structures, Vol.29, No. 9, pp.523-528, 1996.
- 6) ASTM C672/C672M-12 Standard Test method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, 2012.
- 7) Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949.
- 8) 小長井宣生, 大橋猛, 根本任宏: 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論, 土木試験所月報, No.396, pp.2-8, 1986.

第 3 章

ステレオロジーと空間統計量の概要

3.1 序論

一見、密実に見えるコンクリートも多く細孔を含んでいる孔質材料である。この細孔構造がコンクリートの耐久性に影響を与えるため、この細孔構造を観察し、その特徴とコンクリートの物性との関係を明らかにする必要がある。細孔の幾何学的特徴を観察する代表的な方法は、顕微鏡観察である¹⁾。現在では、電子顕微鏡を用いることも多く、これにより幅の広い範囲で細孔径の特徴が観察できる。一方、近年ではAV機器の発展、普及に伴い、画像のデジタル化が可能となった。観察対象の大きさに応じてデジタルマイクロスコープやデジタルカメラやフラットベッドスキャナなど、様々な機器を用いて得られた画像データを利用し画像解析を行う方法が普及している。ここで重要な点は、取得した画像から“見える、見えない”すなわち“存在する、存在しない”を判断するだけでは無く、見えている対象相に対して定量的な指標に基づいて評価することである。

コンクリート中のセメント硬化体組織内に含まれる細孔構造の定量評価では、従来、反射電子像を対象とした画像解析が有用な方法となってきた²⁾。このとき評価の対称は毛細管空隙量や未水和セメント量であり、2値化された画像からこれらの値を直接求めている。これより画像内に分布している対象物の量が定量的に評価されるということに加え、初期のセメント量を既知とすれば、セメントの水和反応の進行の程度も評価できるということになる。画像内に見えている特徴から、供試体全体における特徴量を推定するにはステレオロジーの考え方が用いられる。ステレオロジーとは、簡単に言うと、2次元断面に現れた特徴から3次元における特徴量を合理的に推定する学問分野である。背景としては、標本調査の考え方がある³⁾。一般の標本調査では母集団から一部の標本を抽出して、その結果から全体の特性を推定する。この場合の標本は母集団の要素であり母集団と標本の「次元」は一致する。これによってステレオロジーでは3次元の物質の特性を推定するのに、3次元の要素（標本）を抽出するのではなくより低い次元の標本を抽出していることになる。低次元の標本、例えば対象物質の多くの切断面（2次元標本）を観察し、統計学に基づいてその結果を精査していくことになる。

3.2 ステレオロジー

上述のように、低次元の幾何学的特徴からより高次元における特徴量の推定を行うのがステレオロジーの主題であるが、これには大きく分けて2つの考え方がある。一つは、従来から用いられてきたモデルベースのステレオロジーであり、もう一つはデザインベ

第3章

ースのステレオロジーである。前者は調査対象に対して等方性で均一的にランダム (Isotropic, Uniformly Random ; IUR 条件) であることと仮定する。この場合は、任意の断面は空間的に均質である対象の現れであり、標本、すなわち断面に現れる量の変動は、対象の局所的な変動が現れたものと考えることができる。これに対して、後者は標本の抽出箇所をランダムに行い、その結果の変動をランダムな抽出場所に関連付ける。簡単に言うと、対象がランダムであることを仮定しているのがモデルベースのステレオロジーで、対象にランダム性は必ずしも仮定しないが、抽出をランダムに行なうことで不偏量を得ているのがデザインベースのステレオロジーと言うことになる。

コンクリート組織の定量評価に従来用いられてきたのは、モデルベースのステレオロジーであり、一般に式(3-1)で表される Delesse's の原理を用いて判断する。

$$V_V = A_a \quad (3-1)$$

式(3-1)は、断面に現れたある特徴の面積率が、3次元の対象物質内の体積率に等しいことを示している。一般の標本調査同様、断面の観察は複数個所にて行なわれ、これを平均することにより面積率を得ているので、式(3-1)は平均が2次元と3次元で一致することを示した式であるともいえる。この面積率が体積率に等しいという考え方は、その後さらに拡張され式(3-2)が成り立つことが知られている。

$$V_V = A_a = L_l = P_p \quad (3-2)$$

ここに、
 V_V : 対象相の体積率
 A_a : 対象相の面積率
 L_l : 対象相の長さ率
 P_p : 対象相の点の割合

L_l は2次元の平面内に走査線を引いたとき、全走査線長さに対する評価対象部分を横切った部分の長さの和の比が、体積率や面積率に等しいことを示す。また、 P_p は検討対象の面内に複数の点を配置したとき、全点数に対する対象物に載った点の比が、体積率や面積率に等しいことを主張している。前者は Rosiwal⁴⁾による提案式であり、後者は Glagolev⁵⁾ and Thompson⁶⁾の提案による。これらは、従来、コンクリート材料科学の分野においては気泡システムの評価に用いられており、それぞれリニアトラバース法および修正ポイントカウント法として ASTM C457 に規定されている⁷⁾。

3.3 2次のステレオロジー

コンクリートの組織観察において、Delesse の原理を用いて評価される値は面積率が主であり、ある着目する特徴の量を2次元断面の情報(面積率)から3次元物体中の量(体積率)として推定している。この場合、その特徴がどのような分布をしているのかは評価対象になってはいない。例えば、図 3-1 に示すような一定寸法の円が平面内に観察されるとき、(a)のように近接して分布している場合も、(b)のように離れて分布している場合も面積率としては等しくなる。このため、Delesse の原理より求めた面積率という値では、(a)と(b)の分布状態の相違を区別することができない。このような面積率や体積率、線分率や点率を一般的には1次のステレオロジー量と称している。

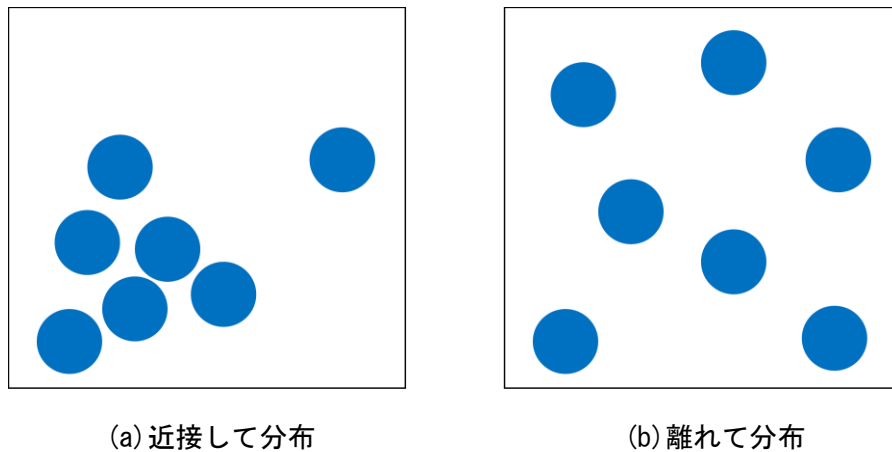


図 3-1 面積率の評価に関する模式図

これに対して、2次のステレオロジー量は空間内の量だけでなく、その分布を評価することを目的とする。直観的にいうと、ある着目する幾何学的特徴がどれぐらいの距離を離れて存在するとか、全体に均質に分布している、もしくは互いに凝集し合うように分布しているなど、目視で判断できる分布の特徴を数学的に表現、評価するのが2次のステレオロジーの主眼である。このとき、評価値相は離散的な粒子でも連続領域でもかまわない。単純に標本調査の考え方を2次に拡張すれば、2次のステレオロジー量が得られる。一般には、2次元平面に現れた特徴の相対的な位置関係、分布の評価に用いられ、評価対象が面積を有する場合と面積を持たない場合がある。前者を面積を有した粒子が空間に分布していることから粒子過程と呼び、後者は点過程と称している。例えば空間粒子過程と空間点過程を模式的に表すならば、図 3-2 のようになる。

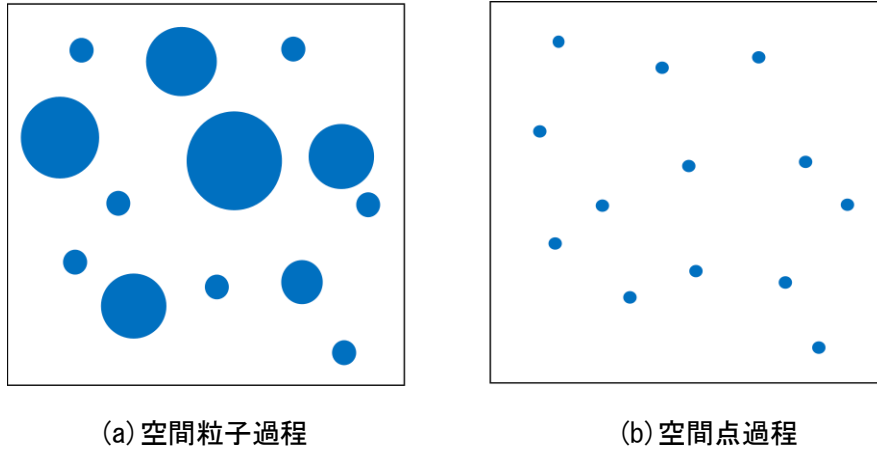


図 3-2 空間粒子過程と空間点過程の模式図

3.4 2点相関関数（共分散）^{8), 9)}

図 3-3 のような決まった形を持たない大きささまざまの粒子が分布している場合を考える．このとき，この粒子の相を Φ とする．相 Φ の面積率は既述の 1 次のステレオロジ一量であり，画像解析を用いるならば，これを容易に求めることができる．しかし，この面積率は Delesse の原理から，この領域内に均一にランダムな点を落としたときに，その点が相 Φ に落ちる確率を表している．ここで点ではなく，ある特定の長さの線分をランダムに領域内に落とすことを考える．その線分の両端を点 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ として，それぞれの点 $\mathbf{x}_i (i=1,2)$ が相 Φ に載るかどうかを，次の指示関数を用いて表す．

$$I(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} 1(\mathbf{x}_i \in \Phi) \\ 0(\mathbf{x}_i \notin \Phi) \end{cases} \quad (3-3)$$

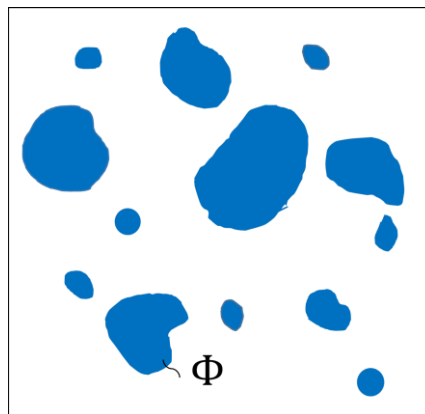


図 3-3 粒子相 Φ の模式図

$x_i \in \Phi$ である確率を $P\{I(x_i)=1\}$ とすると、任意の長さの線分の両端 x_1, x_2 が着目相に載ることは、同時確率 $P\{I(x_1)=1, I(x_2)=1\}$ で与えられる。これより2点相関関数 $S(r)$ （または共分散 $C(r)$ ）は式(3-4)にて定義される。

$$S(r)=C(r)=\langle I(x_1)I(x_2) \rangle = P\{I(x_1)=1, I(x_2)=1\} \quad (3-4)$$

ここに、 $r=|x_1 - x_2|$ は2点間距離を表わし、 $\langle \rangle$ は期待値を意味する。 r を変化させながら観察視野内に線分を落とす操作をくり返せば、ある距離離れた2点 x_1, x_2 同じ相に載る確率が大きいのかどうかを判断する。2点相関関数の初期値（ $r=0$ すなわち y 切片）はランダムに落とした点が着目相上に載る確率であり、これは前述の通り着目相 Φ の体積率 V_V を表す。一方、関数値は2点間距離の増大とともに減少し、ある距離離れて相関性がなくなると両端点 x_1, x_2 が着目相に載る確率は単純に体積率の積になるので、理論上は体積率の自乗値（ V_V^2 ）に収束する性質を持つ(図3-4)。関数が最初に自乗値と交わるまでの距離はその空間構造を特徴づける距離（構造距離）であり、これは2点の相関性がランダム分布より大きな正の相関を示す範囲（相関距離）でもある。2点相関関数の模式図を図3-5に示す。この図3-5より空間内の着目相の体積と相互的な位置関係が判断できることになる。構造距離は空間分布における構造単位としての意味を持つ。すなわちこの距離以上では着目相が影響しあうことなくランダムに存在することを示す。すなわちこの距離が短いときは、すぐに2点は相関性がなく、逆に大きいときはより長距離まで影響しあっていることになる。よって、例えば体積率(y 切片)が同じであっても構造距離の大きい場合はより長距離の範囲にわたって構造を観察することが必要ということになる。このことはより不均質な構造であるために広範囲を観察する必要があると解釈することもできる。

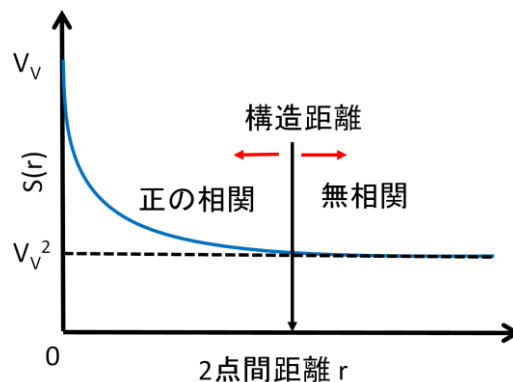


図 3-4 2点相関関数の模式図

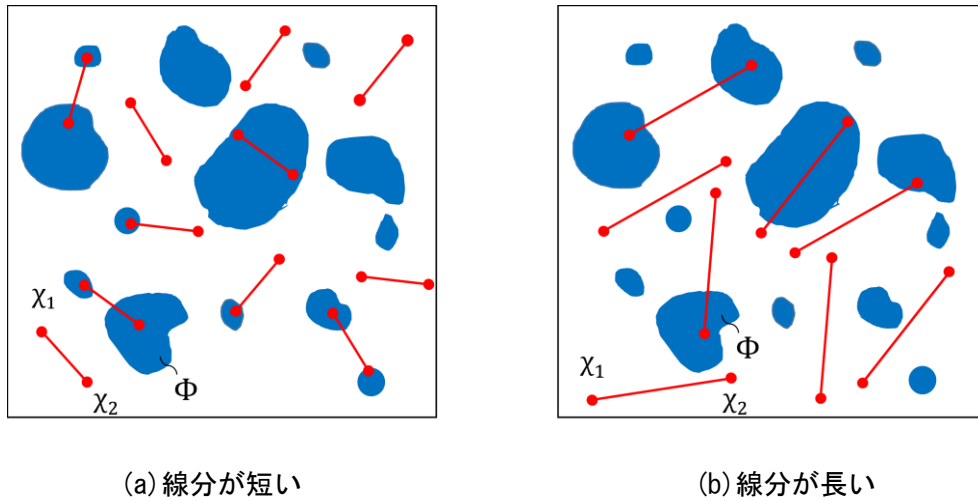


図 3-5 2 点相関関数の 2 点間距離の長さの違いによる模式図

3.5 点過程統計量^{10), 11), 12)}

3.5.1 概要

点過程統計量とは、観察視野 W においてランダムに分散している点過程 X 内の点 x_i に関して、距離を変数としてその分布の特徴を定量化し、点の空間分布特性を評価する 2 次のステレオロジーに関する統計量である。点過程統計量は、現在多くの分野で用いられている。例えば、地震工学では地震発生データに基づく地震活動の空間分布解析、都市工学では GPS で得られた交通解析、また、生態学分野では森林の植生分布の解析などが挙げられる。これら点過程の分析では、点と見なした配置そのものに特性値を持つことが多い。点の配置の分布パターンの代表は、特定の場所に凝集することなく規則性も持たない「ランダム分布」、特定の場所周辺に凝集する「凝集分布（クラスター分布）」、また、一定間隔ごとに均等の分布をする「規則分布」がある。特に、ランダム分布は、点間同士の関係性で相互作用を持たない特徴がある。点過程統計量で用いられる関数の多くは、点の配置の分布がランダムであるかどうかを点間同士の相互作用や依存性の関係を用いて検証を行っている。図 3-6 に示すように領域 W 内に点 x_i が分布する状態を考え、これを 2 次元の点過程 $X = \{x_i : i=1, 2, \dots, n\}$ とする。この点過程に対して以下の特性値および関数を定義する。

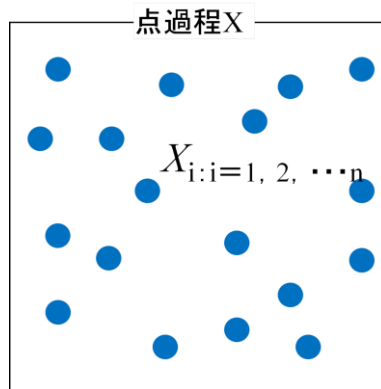


図 3-1 点過程の模式図

3.5.2 点密度 (λ)

点過程統計量における基本的なパラメーターとして、単位面積当たりの点の個数を表わす点密度 λ がある。観察領域 W 内にある点($\mathbf{x}_i \in X$)に関して、点の個数 $N(W)$ を領域面積 $A(W)$ で除して求めた (式(3-5))。

$$\lambda = \frac{N(W)}{A(W)} \quad (3-5)$$

点過程統計量を扱う際、視野すなわち参照空間の大きさ $A(W)$ を一定として評価する場合が多くその際には点の分布の傾向は点個数 $N(W)$ に強く左右される。点密度は、一般に対象とする特徴量と相関すると考えられるので、その総数は1次のステレオロジー量と類似の特性値となる。しかし、2次元で得られた個数をそのまま3次元での個数と関連付けることはできないことに注意しなければならない。また、分布に関しては $N(W)$ に依存しない相対的な計算結果を得るためにも使用される。

3.5.3 K 関数および L 関数

K 関数とは、観察視野に分布している点 $\mathbf{x}_i \in X$ に関して、距離を変数としてその分布パターンを定量化し、点の分布特性を評価する点過程統計量の1つである。任意の点か

第3章

ら半径 r の円を描き、その円内に存在する他の点個数の期待値を反映する。点密度 λ で正規化されているため、点の個数に関わることなくそのランダム性を判定することができる。K 関数は式(3-6)によって求められる¹³⁾。

$$K(r) = \frac{1}{\lambda^2} \sum_{i \neq j} \frac{\mathbf{1}(|x_i - x_j| \leq r)}{s(x)} \quad (3-6)$$

$$K(r) = \pi r^2 \quad (\text{完全ランダム分布の時の K 関数})$$

ここに、 $\mathbf{1}()$ は $()$ が真であるときに1、偽のときは0を返す指示関数である。また、 $s(x)$ はエッジ補正の項であり、式(3-7)により与えられる。

$$s(x) = ab - x(2a + 2b - x)/\pi \quad (3-7)$$

$$x = |x_i - x_j|$$

ここに、 a 、 b は観察領域の辺長を表わす。

エッジ補正係数とは、2次元断面に対して点過程を適用する場合、その画像の縁の影響（エッジ効果）を補正するために用いる係数である。また、本関数で用いたエッジ補正係数は Ohser の方法と呼ばれるものである。これは点の位置に関係なく、点の間隔のみで定まる式を使用しているため、厳密な計算方法に比べて容易に算出することができる補正法である。

図 3-7 に主な点の分布パターン例を示す。点の分布はランダム分布（図 3-7(a)）、凝集分布（図 3-7(b)）、規則分布（図 3-7(c)）の大きく3つに分けられる。K 関数はこの3つの分布パターンを、関数値の完全ランダム分布の値からの偏差にて判定することができる。

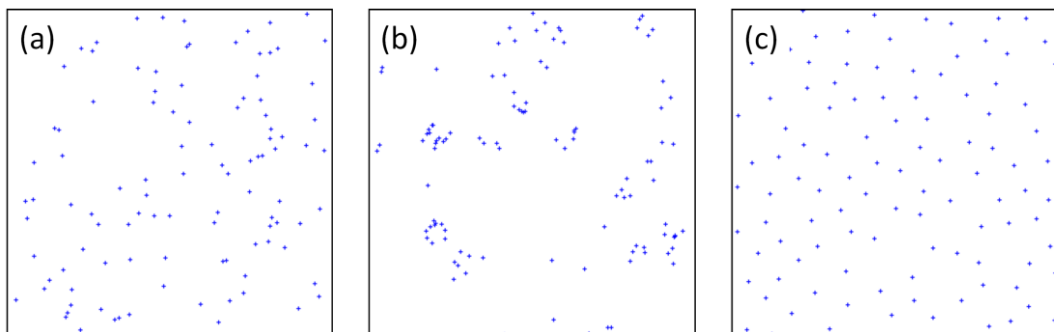


図 3-7 主な点の分布パターン

図 3-8 に K 関数の例を模式図を示す。図中の黒破線は、点が完全ランダム分布に相当する K 関数を示し、今調べようとしている点の分布パターンがランダムに分布している場合 (図 3-7(a))、その K 関数は完全ランダム分布の時の K 関数とほぼ一致する (図 3-8(a))。観察視野内に存在する点同士が近接し凝集配置している場合 (図 3-7(b)) は、K 関数はランダム分布よりも大きな値となる (図 3-8(b))。一方、ある程度の間隔を有した規則配置の場合には (図 3-7(c))、黒破線で示したランダム分布よりも K 関数値は小さくなる (図 3-8(c))。

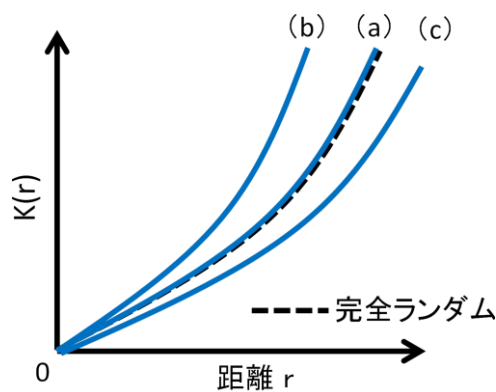


図 3-3 K 関数の模式図

K 関数のグラフを視覚的に理解しやすくするために、式(3-6)を直線表示へと変換し、関数値の相違を明確化したものに L 関数がある。L 関数は式(3-8)により与えられる。

$$L(r) = \sqrt{K(r)/\pi} \quad (3-8)$$

$$L(r) = r \quad (\text{完全ランダム分布のときの L 関数})$$

図 3-9 は L 関数の模式図を示したものである。グラフが示す特徴は K 関数と同様であり、図中の黒破線はランダム分布の L 関数を示している。また、K 関数と同様に、ランダム分布の場合は黒破線と一致し (図 3-9(a))、凝集分布を示す場合はランダム分布の上方に位置し (図 3-9(b))、規則分布の場合はランダム分布の下方に位置するため (図 3-9(c))、空間分布特性の評価が可能である。

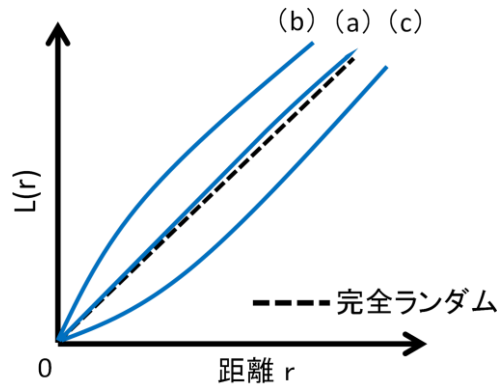


図 3-4 L 関数の模式図

3.5.4 点の間引き過程の K 関数

3.3.3 の K 関数および L 関数は、観察視野全体を対象として点分布の特性を簡便に分析する場合に用いられる。例えばセメントペースト供試体中に含まれる気泡の空間配置を点として代表させ、その空間分布の特性を評価することは可能である。しかし、モルタルやコンクリートでは骨材が存在し、気泡はセメントペースト部分のみに存在する。したがって、気泡の存在領域は制限されていることになり、観察領域全体を参照空間として全体のランダム性を検討する K 関数は意味を持たない。したがって、モルタルやコンクリートの場合は、気泡の存在可能領域のみを参照空間とした K 関数を算出する必要がある。このように点の分布が制限される場合の K 関数は点を間引く（希薄化）処理によって求めることができる¹⁴⁾。

骨材を含まないセメントペーストを考え、観察視野全体には点の存在が可能であるとす領域に任意の点密度で点を分散させて、その点を基本点過程 X_b とする。基本点過程 X_b の K 関数 K_b は式(3-6)によって求められる。また、モルタルおよびコンクリート中のセメントペーストマトリックス領域を Φ とし、その観察領域断面内での点の分布を点過程 X_s とする。モルタルまたはコンクリート中のセメントペーストマトリックス領域の面積率は配合により定まり一定であるが、その領域形状は全く不規則であり、いわゆるランダム場となる。基本点過程 X_b の点の中で、ランダム場であるセメントペーストマトリックス領域のみの点が残存したと考えるならば、 $X_s = X_b \cap \Phi$ と表わされる。換言すれば、単純に基本点過程 X_b の分布を骨材の補集合領域としてのランダムなセメントペースト領域で単純に切り取ったと考えた場合、その切り取られた領域中の点の K 関数 K_s は、モルタルまたはコンクリート中のセメントペーストマトリックス領域の幾何学的特徴を表わす 2 点相関関数 $S(r)$ （または共分散 $C(r)$ ）と基本点過程 X_b の K 関数 K_b を用いて、

式(3-9)により与えられる.

$$K_S(r) = \frac{1}{p^2} \int_0^r S(x) dK_b(x) = \frac{1}{p^2} \int_0^r C(x) dK_b(x) \quad (3-9)$$

ここに, p は対象とする領域であるセメントペーストマトリックス領域の面積率を表す. このようにして得られた点過程を妨げられた点過程もしくは間引き点過程と呼ぶ.

図 3-10 に間引き点過程を模式図として示す. 観察領域のランダムに発生させた点過程 X_b 中の点 (K 関数 K_b) は, 実際にはセメントペーストマトリックス領域 (2 点相関関数 $S(r)$ または共分散 $C(r)$) にしか存在できない. よって点過程 X_b と骨材粒子を重ね合わせると, セメントペーストマトリックス領域以外の相 (骨材相) に存在する点は存在し得ない点であるため, この点を間引くことにする. ここで点を気泡と考えることにすれば残された点過程 $X_S (= X_b \cap \Phi)$ の点の分布と実際のモルタルまたはコンクリート中の気泡の分布を比較し, 両者が一致すれば実際のモルタルやコンクリート中の気泡は他の気泡に影響を受けていない分布ということになる. また, 別の見方をすれば, 骨材粒子は気泡の空間配置に関して単純に気泡を消去するだけの役割しか果たしていないということにもなる.

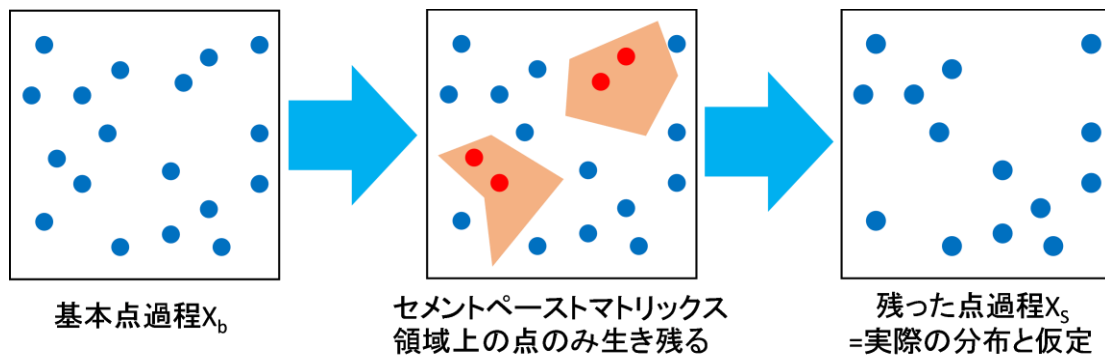


図 3-10 間引き過程のイメージ図

3.5.5 L 関数による偏差の有意性判定^{15),16)}

画像から得られる気泡の空間分布には気泡の特性が含まれており, 得られる特性値には当然ある程度の変動が含まれる. よって, 気泡を点で代表させたとき, 気泡が少ないときは点密度も小さくなり, そのような点密度が小さい分布データでは, 変動が大きくなることが予想される. したがって, ある配合について気泡を表す点の K 関数および L

関数が得られたとき、それがランダム分布との関数値の差を生じることになるが、この差が単純に統計的な変動の範囲とみなされるのか、または有意な差であるのかを判断する必要がある。この判断する方法として一般的に用いられるのがシミュレーションを用いる方法である。試料より得られた点密度と同じ点密度に相当する点数をランダムに発生させる。発生させた点過程に対して偏差が見やすい L 関数を計算する。この過程を 200 回繰り返す、その都度 L 関数を求め関数値の上下 5 番目（95%信頼区間において、 $200 \times 2.5\% = 5$ ）の値をプロットすることで 95%信頼区間を決定した¹⁷⁾。モルタルやコンクリート中の気泡の分布を表す関数が 95%信頼区間内に入る場合は、ランダムに点を発生させる場合に起こり得るばらつきと考える。これに対してこの区間以外に L 関数が存在する場合、その点過程はランダムで無いと判断した。

図 3-11 に L 関数と 95%信頼区間の模式図を示す。図 3-11 のように得られた L 関数値が 95%信頼区間内であれば（図 3-12(a)）、この分布はランダム分布と判定される。一方、前述のように L 関数値が 95%信頼区間を上側にある場合（図 3-12(b)）は、凝集性分布と判定される。逆に下側にある場合（図 3-12(c)）は、規則性分布と判定される。

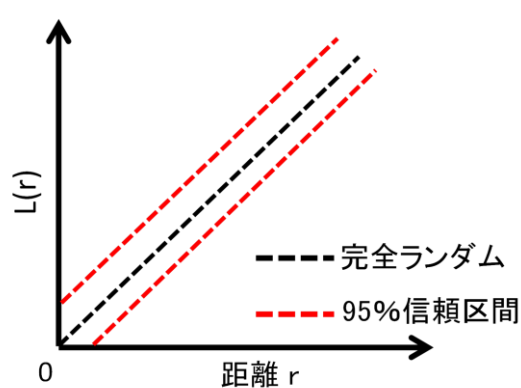


図 3-11 L 関数の 95%信頼区間図

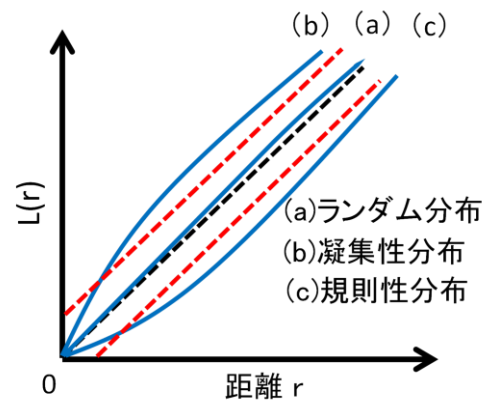


図 3-12 L 関数の分布特性による模式図

3.5.6 最近傍距離関数(G 関数)

最近傍距離関数とは、点過程の点 $x_i \in X$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j (i \neq j)$ を見出す確率である。これを観察視野内の点個数に対する累積確率で表わしたものである。図 3-13 に最近傍距離関数の定義のイメージ図を示す。

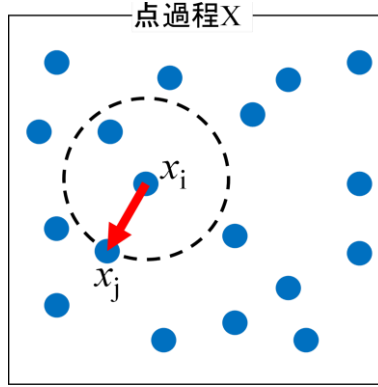


図 3-13 最近傍距離関数の定義のイメージ図

全ての点 x_i の座標を基にして、各点ごとの最近傍点までの距離 s_i を計算し、エッジ効果を考慮した Hanisch 法を用いて、最近傍距離関数 $G(r)$ を式(3-10)により求めた。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{1}(s_i \leq r) \cdot \mathbf{1}(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N \mathbf{1}(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (3-10)$$

$$G(r) = 1 - \exp(-\lambda \pi r^2) \quad (\text{ランダム分布のときの最近傍距離関数})$$

ここに、 s_i は最近傍距離、 b_i は各点 x_i から画像縁までの最短距離である。また、 $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、前述の s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数である。観察視野 W の辺長を x , y とすると、式(3-11)により与えられる。

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i) \cdot (y - 2s_i)\}^{-1} \quad (3-11)$$

図 3-14 に最近傍距離関数から得られる曲線を示す。図中の破線は観察視野内に存在する点配置がランダム分布を形成する場合の最近傍距離関数値を表わす。破線で示したランダム分布よりも上側に関数値が示された場合は凝集分布となり、下側に現れた場合は規則分布となる。また、関数値 1.0 は確率関数で表わされる最近傍距離関数の収束値（収束距離）であり、この収束距離以上の距離においては、必ず他点を見つけることができることを示している。ランダム分布のときの関数値との偏差によって分布特性を判断することができるが、分布特性は K 関数および L 関数においても評価することが可能である。最近傍距離関数からは点過程に基づく点の距離特性を評価することとした。

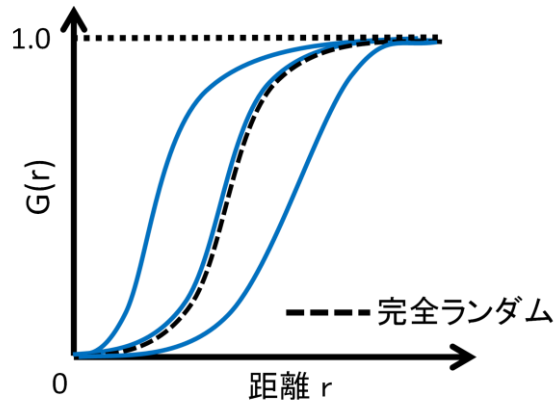


図 3-14 最近傍距離関数の模式図

最近傍距離関数は、点間の距離に関する特徴が取得できる．本研究では累積確率分布で表された距離の特徴量として、第2四分位点（メディアン）を用い、これをメディアン距離 R_{50} と定義した．メディアン¹⁴⁾とは、データを大きさの順に並べたとき、ちょうど真中に位置する観測値のことであり、中央値とも言う．本研究では、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートに含まれる気泡を点過程と評価した場合の重要な指標として用いている．式(3-10)の最近傍距離関数に関して、メディアン距離 R_{50} を模式的に表すと図 3-15 のようになる．

$$G(r)=1 - \exp(-\lambda\pi r^2) = 0.5 \quad (3-12)$$

また、式(3-12)から得られる最近傍距離関数は、図 3-15 のように示される．

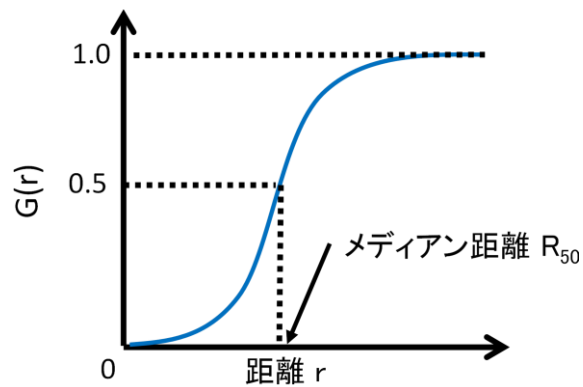


図 3-15 最近傍距離関数とメディアン距離の関係の模式図

3.5.7 接触分布関数(F関数)

接触分布関数は、点過程 $X=\{x_i; i=1, \dots, n\}$ が与えられたとき、画像内の任意の点 $u \notin X$ から最も近い点 $x_i \in X$ までの距離に関する確率関数であり、その定義を式(3-13)に示す。

$$F(r) = P\{N(b(u, r)) > 0\} \quad (3-13)$$

$$F(r) = 1 - \exp(-\lambda \pi r^2) \quad (\text{ランダム分布のときの接触分布関数})$$

ここに、 $b(u, r)$ は点 u を中心とする半径 r の円であり、 $N(b(u, r))$ はその円の中にある点過程 X の点数である。

接触分布関数は、任意点において適当な半径 r を与えたとき、着目相に存在する点までの距離 r に関する累積確率関数であることから、最近傍距離関数と非常に良く似た関数となる。特に着目相として表れる点の分布がランダム分布の場合、両関数は、式(3-14)に示す関係が得られる。

$$F(r) = 1 - \exp(-\lambda \pi r^2) = G(r) \quad (3-14)$$

点過程 X において、最近傍距離関数は点過程 X にある点 x_i から距離 r の範囲に点が存在する累積確率関数であり(図 3-16)、接触分布関数は点過程 X 内に任意点 u を配置した場合の距離 r の範囲に点が存在する累積確率関数となる(図 3-17)。観察される点個数が十分に大きくかつ点過程 X がランダム分布となる場合は、式(3-14)の関係から最近傍距離関数と接触分布関数は一致する。つまり、ランダム分布の点過程 X 内に任意のある一点 u を配置した場合においても、点過程 X のランダム分布は保持され距離に関する特性値も同じとなる。

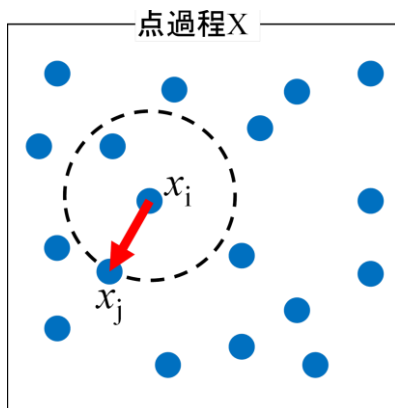


図 3-10 最近傍距離関数の定義のイメージ

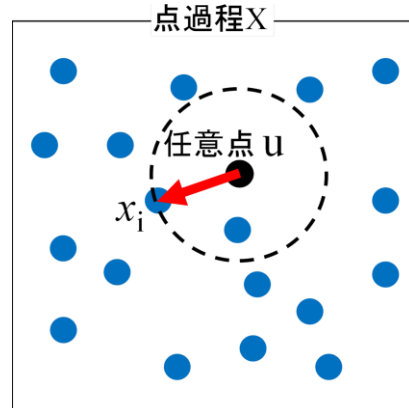


図 3-11 接触分布関数の定義のイメージ

図 3-18 に示すように観察領域にランダム分布の点を配置した場合のシミュレーションでは、最近傍距離関数と接触分布関数が完全に一致している(図 3-18)。

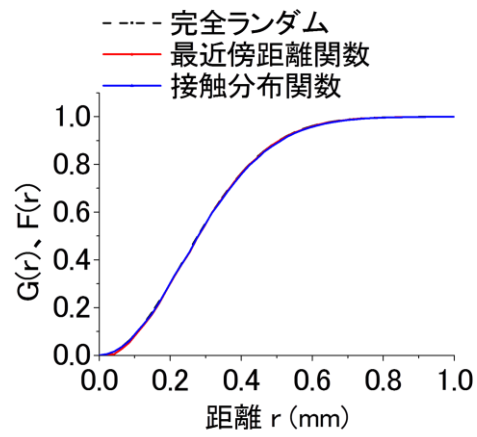


図 3-18 ランダム分布の場合の最近傍距離関数 $G(r)$ と接触分布関数 $F(r)$

参考文献

- 1) 五十嵐心一：細孔構造の可視化（画像データからの細孔情報の抽出），コンクリート工学，Vol.53，No.5，pp388-393，2015.
- 2) Scrivener, K.L. and Pratt, P.L.: Back-scattered electron images of polished cement sections in scanning electron microscope, Proceedings of 6th International Conference on Cement Microscopy, New Mexico, pp.145-155, 1984.
- 3) Baddeley, A. and Vedel Jensen, E.B.: Stereology for Statisticians, Monographs on Statistics and Applied Probability, 103, Chapman & Hall, 2005.
- 4) Rosiwal, A.: Über geometrische Gesteinsanalysen. Ein einfacher Weg zur ziffermabigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandteile gemengter Gesteine, Verhandlungen der Kaiserlich-Königlichen Geologischen Reichsanstalt Wien, pp.143-175, 1898.
- 5) Glagolev, A.A. : On geometrical methods of quantitative mineralogic analysis of rocks, Trans. Inst. Econ. Min., Vol.59, pp.1-47, 1993.
- 6) Thomson, E. : Quantitative microscopic analysis, Journal of Geology, Vol.38, pp.193-222, 1930.
- 7) ASTM C672/C672M-12 Standard Test method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, 2012.
- 8) Torquato, S. and Stell, G. : Microstructure of two-phase random media .I. the n-point probability function, Journal of Chemical Physics, Vol.77, No.4, pp.2071-2077, 1982.
- 9) Coker, D. A. and Torquato, S. : Extraction of morphological quantities from a digitized medium, Journal of Applied Physics, Vol.77, No.12, pp.6087-6099, 1995.
- 10) Stoyan, D., Kendall, W. S. and Mecke, J. : STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd, 1995.
- 11) 島谷健一郎：点過程による樹木分布地図の解析とモデリング，日本生態学会誌，Vol.51，No.2，pp.87-106，2001.
- 12) Ripley, B.D.: The second-order analysis of stationary point processes, Journal of Applied Probability, Vol.13, pp.255-266, 1976.
- 13) Ohser, J.: On estimators for reduced second moment measure of point processes, Math.

Operationsf. Statist., ser. statist, Vol.14, pp.63-71, 1983.

- 14) Ripley, B.D.: Analyses of nest spacings, Statistics in Ornithology (Eds. Morgan, B.J.T. and North, P.M.) Springer Lecture Notes in Statistics, 29, Springer-Verlag, Berlin, pp.151-158, 1985.
- 15) Ripley, B.D.: Spatial Statistics, John Wiley & Sons, 2004.
- 16) Hanisch, K.H.: Some remarks on estimators of the distribution function of nearest neighbor distance in stationary spatial point patterns, Math. Oberforsch. Statist. Ser. Statist, Vol.15, pp.409-412, 1984.
- 17) Reed, M.G. and Howard, C.V.: Edge-corrected estimators of the nearest-neighbor distance distribution function for three-dimensional point patterns, Journal of Microscopy, Vol.186, No.2, pp.177-184, 1997.

第4章

セメントペースト中の気泡空間分布構造の定量評価

4.1 序論

コンクリートへの気泡の連行は、ワーカビリティや耐凍害性の改善など、コンクリートの物性改善において重要な役割を果たす。所定量の空気連行の確認はフレッシュコンクリートにてエアメーターを使用し測定されるが、実際に耐凍害性に関して重要なのは、空気量よりも気泡間隔係数である。これは気泡の周囲の毛細管空隙を含む任意のセメントペースト領域が、最寄りの気泡によって保護されるとする保護領域の考え方に基づいており¹⁾、一般には気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下になるようにすれば、凍害に対してすぐれた抵抗性を有すると判断される。このときの気泡間隔係数は Powers の提案²⁾に基づき、ASTM C 457 に規定される方法によって求めることになっている。この規定は何回かの改訂がなされたようであるが、基本的には全走査線分長に対する対象物を横切った線分長（弦長）の線分比、もしくは面内に規則配置された全点数のうち対象物上に載った点数の比が対象物の体積率に等しいという 1 次のステレオロジー量に関する基本関係式(式(3.1), (3.2))を、それぞれリニアトラバース法および修正ポイントカウント法として用いている。実際の計測においては、顕微鏡観察により所定のトラバース長を走査したり、必要断面数を確保したりすることが求められ、その労力の負担はかなり大きい。

1980 年代に入り、画像解析法が一般化されると、旧来の手順の簡単化を可能とする多くの手法が提案されるようになった^{3) 4)}。一方で改訂された ASTM C 457 の規定の中にもパーソナルコンピューターを使用した画像取得が記述されるようになった。しかし、評価に必要な観測領域は旧来と同様のままのようである。可動顕微鏡を用いて目視による観察に基づく旧来の手順に比べれば労力は全体として大幅に軽減されたが、必要とされるトラバース長や観察視野数は依然として大きいままであり、簡単に実施できる試験として一般的に普及しているとは言い難い面がある。

一方、画像解析技術の導入とその後の画像取得機器の発展により画像取得が容易になるにつれて、従来の ASTM C457 の評価対象以外の画像中の詳細情報に着目されるようにもなっている。ASTM C457 では気泡頻度と平均径が評価対象であって、気泡径分布の詳細を求めることは、気泡間隔係数の計算上はこれを必要とない。しかし、例えば、坂田らは⁵⁾、2次元断面に現れる気泡径分布が比較的容易に得られることを利用し、気泡間隔係数が同程度であっても気泡径分布は大きく異なることがあると指摘している。

一方、画像取得とその画像中の様々な特徴の解析が容易になっていく過程にて、気泡間隔そのものを再考することにもなされてきた。ASTM C 457 にて定義される気泡間隔係数は、気泡がすべて同一寸法の球であって、それが規則的な立方体格子点に配置され

た状態を仮定し、セメントペーストの任意の点が最寄りの気泡表面から最も遠い位置にあるときの平均距離を表す。したがって、実際のコンクリート中の気泡間隔を直接表した距離ではなく、また気泡径も実際とは異なる。これに対して、同一寸法球の気泡だけでなく、寸法の異なる気泡がランダムに分布する状態を考慮できるようにして、より現実の分布に近い状態での気泡間隔の評価を行うための数値解析法も提案されてきた⁶⁾。例えば Snyder⁷⁾はいくつかの気泡間隔に関する評価式を比較し、気泡を粒子として表現し、気泡径分布も考慮できる Lu and Torquato⁸⁾式が有用であると述べている。

以上のように、気泡の連行に関しては、気泡の空間分布に関わる特性値としての気泡間隔もしくは任意のセメントペースト位置から気泡までの距離が重要であり、これを簡単に求めることができれば、コンクリートの耐凍害性の理解、および混和剤開発において有用なものと思われる。このような空間内に分布した粒子の分布構造を定量的に評価しようとする要請に応えるのが点過程理論⁹⁾である。粒子寸法を考えないことにより定式化が粒子を対象とする場合よりも簡略化され、また、確率に裏付けられた値としてその特性値の理解も容易である。これを適用すれば、気泡は2次元平面にランダムに分散した点として表され、気泡間隔に対応しうる点間の距離や気泡間隔係数に対応する点の周囲の任意点から点までの距離などが容易に求められる。なお、この理論においては、気泡径を点の属性値とする定式化もなされているので、必要に応じて気泡寸法を考慮することも可能である。

本章^{9)・10)}では、セメントペースト中に分布している気泡を点過程としてとらえ、その空間分布における統計量を求める。気泡構造評価に点過程統計量を導入することの有用性について論ずることを目的とする。

4.2 フレッシュ特性と硬化後の気泡体積率の関係

表 4-1 にセメントペーストの名称および配合を示す。また、表 4-2 にセメントペーストのフレッシュ特性と画像から得られた気泡特性の一覧を示す。作製したセメントペースト供試体のフロー値は、 $W/C=0.40$ で約 200mm となり、 $W/C=0.45$ では約 250mm となっている。低水セメント比の供試体のフロー値が小さくなる傾向があり、セメント量の多い低水セメント比の配合ではフレッシュ時の粘性が高かったと考えられる。フレッシュ時の空気量は $W/C=0.40$ および $W/C=0.45$ のいずれの場合においても、混和剤を添加していない供試体が最も小さく、AE 減水剤・AE 剤の添加量の増加に伴い空気量も大きくなっていく傾向が現れた。また、画像から取得した硬化後の気泡体積率にお

いても、フレッシュ時に得られた空気量の大きさの順序は保たれ、混和剤の添加と共に、硬化後の気泡体積率も大きくなる結果となった。表 4-2 の気泡残存率は、フレッシュ時の空気量に対する硬化後の気泡体積率の割合として求めたものである。W/C=0.40 および W/C=0.45 のいずれも、混和剤を添加していない供試体の気泡残存率が最も低かった。エントラップトエアのみでは、供試体の打ち込みから締め固め過程において空気量の損失が大きいことが分かる。混和剤を添加した供試体では、混和剤の添加量の増加に伴い、気泡残存率も大きくなる傾向を示した。エントレインドエアが多く含まれている場合は、打ち込みから締め固めまでの過程における損失空気量の割合が小さくなった。セメント量に対する混和剤の添加量が同じで水セメント比の異なる CP1-④と CP2-② および CP1-⑤と CP2-③について比較しても低水セメント比で混和剤量が多い CP1 の系のほうで気泡残存率が大きくなっており、AE 助剤を添加した場合においても同じ結果となった。このことから混和剤を添加しエントレインドエアが存在する気泡構造を持つ配合では、打ち込みから締め固め過程におけるフレッシュ時の空気量の多くが残存し、より安定的な気泡系が構成されているのは明らかである。

表 4-1 セメントペーストの名称、配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C	AE減水剤量 (C × %)	AE剤量 (C × %)	フロー (mm)	空気量 (%)
CP1-①	0.40	—	—	195	2.4
CP1-②		0.05	—	203	3.3
CP1-③		0.10	—	213	3.4
CP1-④		0.25	—	222	4.9
CP1-⑤		0.50	—	249	6.4
CP1-⑥		0.25	0.01	228	6.0
CP1-⑦		0.25	0.02	227	8.5
CP2-①	0.45	—	—	228	3.5
CP2-②		0.25	—	259	4.9
CP2-③		0.50	—	288	6.2
CP2-④		0.25	0.01	263	5.8
CP2-⑤		0.25	0.02	267	9.5

表 4-2 セメントペーストのフレッシュ特性と画像から得られた気泡特性

W/C	0.40							0.45				
名称	CP1							CP2				
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	①	②	③	④	⑤
点密度 (個/mm ²)	0.46	0.80	0.89	2.02	2.43	2.89	3.06	0.51	1.87	1.99	2.69	2.57
平均気泡径 (μm)	123	135	138	120	118	100	126	134	117	122	96	129
フレッシュ時の空気量 (%)	2.4	3.3	3.4	4.9	6.4	6.0	8.5	3.5	4.9	6.2	5.8	9.5
硬化後の気泡体積率 (%)	1.0	1.9	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3	1.2	3.0	3.7	3.5	6.9
気泡体積率の変動係数	0.13	0.15	0.05	0.06	0.12	0.04	0.06	0.11	0.08	0.09	0.10	0.09
気泡残存率 (%)	41.7	56.6	63.1	72.2	69.0	62.0	85.9	34.2	62.1	59.9	60.1	72.9
フロー (mm)	195	203	213	222	249	228	227	228	259	288	263	267

図 4-1 にフレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の関係を示す。混和剤を添加した W/C=0.40 および W/C=0.45 のいずれの配合においても、気泡残存率は 60 から 70% となり、空気量の絶対量としては 1% から 3% の空気量の減少となった。よって図 4-1 にて等値線の上方にすべての配合がプロットされている。この原因として画像の 2 値化への処理過程で 30 μm 以下の白色粒子を除去したことも一因と考えられるが、混和剤を添加した場合に連行される気泡径は 30 μm から 250 μm との報告¹¹⁾もあり、気泡の最小径である 30 μm 以下の白色粒子を除去したことの影響は小さいと考えられる。このことから、硬化後の空気量の減少は、供試体作製時の打ち込みから締め固め過程において失われたと判断される¹¹⁾。

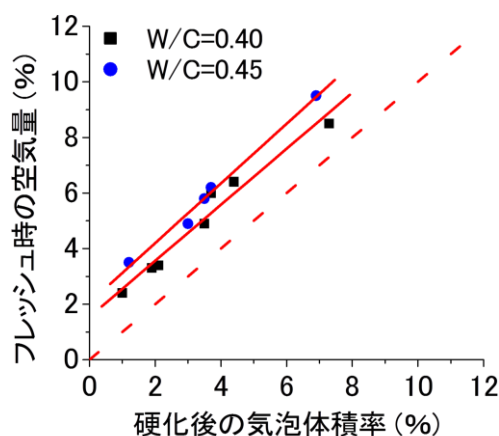


図 4-1 フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の関係

4.3 セメントペースト中の気泡分布構造評価に必要な観察領域

図 4-2 には気泡の 2 点相関関数を、示したものである。図 4-2 の結果より、 $W/C=0.4$ の CP1 の系および $W/C=0.45$ の CP2 の系のいずれも 2 点相関関数は 1mm 程度で収束している。よって気泡分布の構造単位である構造距離は約 1mm までを考慮すればよいと判断される。すると着目粒子である気泡の観察に必要な観察領域は、工学的判断では構造距離の 3~5 倍程度あればよいので¹²⁾、セメントペースト中の気泡の評価に必要な観察領域は、 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 以上あれば空間構造を把握することが可能であるといえる。本研究では観察領域を $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ としているため、気泡の空間構造を評価する領域を満足していると判断できる。

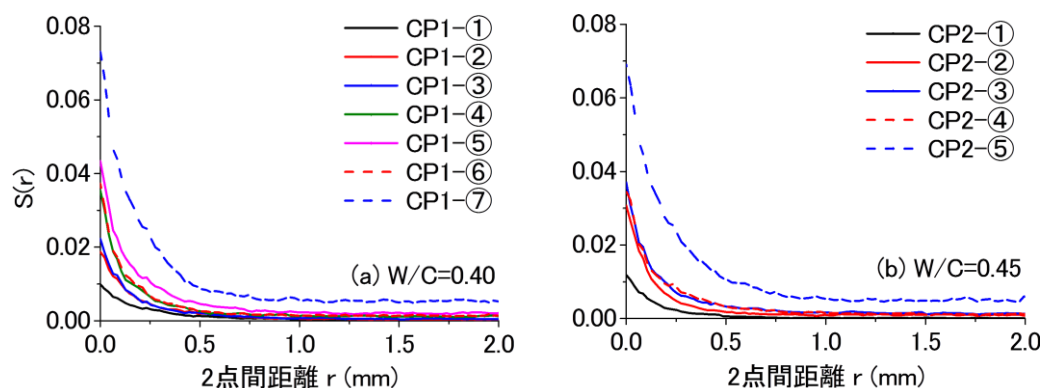


図 4-2 セメントペースト中の気泡の 2 点相関関数

4.4 硬化後のセメントペースト中の気泡画像

セメントペースト供試体断面を黒色で塗りつぶし、気泡に白色粉末を充填した画像を図 4-3(a) に示す。このスキャナー取得画像に対してノイズ処理等を行って求めた 2 値化画像を図 4-3(b) に示す。また図 4-3(b) にて気泡と同意された白色部分を「点」に置き換えたのが図 4-3(c) である。断面の白黒画像と 2 値画像による相違は小さく、気泡の抽出もできていると判断される。よって画像解析による 2 値化処理が適正に行われていると考えられる。画像から空気量が大きくなるとともに気泡の個数が増加していることは明らかである。硬化後の気泡体積率は図 4-3 の左から順に 1.0%, 3.5%, 7.3% である。また表 4-2 に示すように平均気泡径は約 $120\mu\text{m}$ でほぼ同一径であることから、空気量の増加による気泡構造の変化は、気泡径が大きくなることではなく気泡個数の増加とし

て表れており，このことは2値画像の目視観察の認識とも一致する．気泡を点として置き換えた画像の図4-1(c)でも，気泡の増加による点個数の変化は明白である．2次元断面に現れる粒子数，すなわち今の場合で言う点の個数はステレオロジーの視点に立つと，3次元における粒子数と直接関連づけることには注意が必要である．なぜなら大きな粒子ほど断面に現れる確率が大きくなるためである¹³⁾．しかし図4-3の結果を見ると表4-2に示した点密度は，単純に空気量が大きくなったことの現れとして理解してよいと思われる．

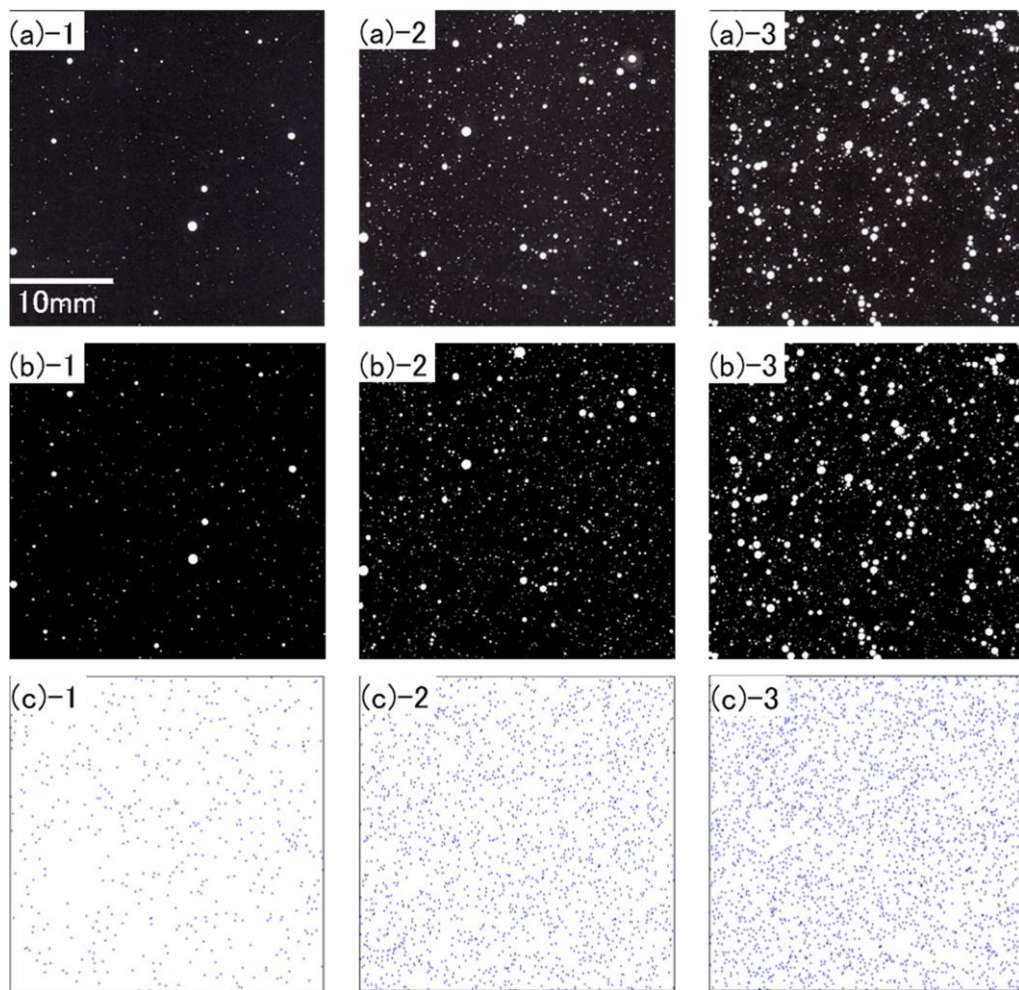


図4-3 セメントペースト中の気泡の画像解析の例（1:CP1-①，2:CP1-④，3:CP1-⑦）

図4-3に示した試料に対してマイクروسコープを用いて観察した気泡の拡大画像を図4-4に示す．倍率は50倍で1画素当たり約 $5.5\mu\text{m}$ になる．このような拡大観察画像においても $30\mu\text{m}$ を下回る気泡は，それ程多く存在していないことが確認された．

よって、このことから、フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の差は、画像処理過程による損失ではなく、供試体作製時の打ち込みから締め固め過程において実際に失われた気泡の影響の方が大きいと考えられる。

図 4-4(c) にしめすように気泡同士が接触している様子が認められる。試料 CP1-⑦の硬化後の気泡体積率は 7.3% であり、全供試体で最も大きな気泡体積率であった。空気量の増加に伴い気泡個数が増加し気泡同士の距離が小さくなったため、気泡同士の接触の現象が発生したと考えられる。このことは点密度の解析結果と良く一致している。CP1-①と CP1-④の硬化後の気泡体積率は 1.0% と 3.5% であり、点密度は 0.46 個/mm² と 2.02 個/mm² との関係から、気泡体積率の増加とともに点密度も増加している。一方、CP1-④と CP1-⑦では、硬化後の気泡体積率が 3.5% と 7.3% であるが、点密度は 2.02 個/mm² と 3.06 個/mm² となり、気泡体積率の増加の割合に比べて点密度の増加割合が小さくなっている。図 4-4(c) で見られる気泡の接触により、点密度の増加割合に影響を与えたと考えられる。

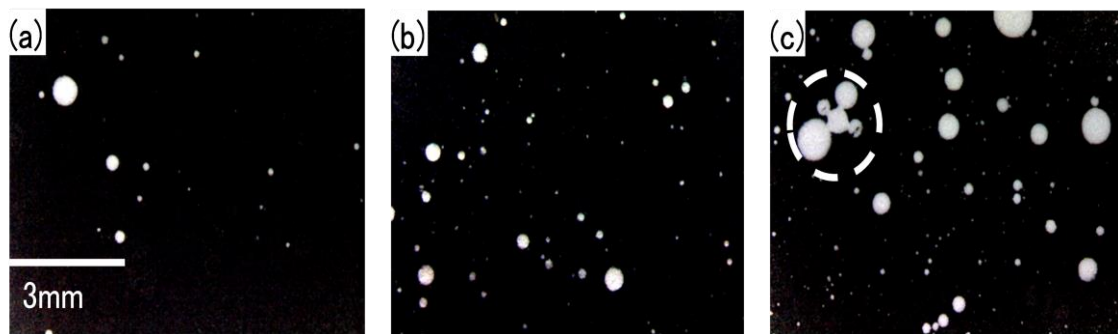


図 4-4 マイクロスコープを用いた拡大観察の例（左から：CP1-①，CP1-④，CP1-⑦）

4.5 空気量と気泡の点密度の関係

図 4-4 にフレッシュ時の空気量と硬化後の気泡点密度の関係を示す。フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡点密度の両者の間には、直線で近似できる関係が存在する。ただし、フレッシュ時の空気量が 6.0% を超えている系については、この相関性から乖離している。空気量が 6.0% を超えている供試体は CP1-⑦と CP2-⑤の供試体であり、フレッシュ時の空気量は 8.5% および 9.5% と非常に大きな空気量を有している。これら 2 つの供試体から得られる 2 値画像では、図 4-4(c) で示したような気泡の合一の現象が見られており、複数個の気泡が 1 個の点で表されるため直線的な相関性から外れている。

と考えられる．実際のコンクリートを打設する場合，JIS A 1128に規定された試験方法を用いてフレッシュ時の空気量を測定している．また空気量の管理値はJIS A 5308に規定されており， $4.5\% \pm 1.5\%$ (3%～6%)の許容差が認められ，建設工事に用いられる基準書^{14) 15)}の多くにもその記載がある．図4-5に示された直線近似の関係から離れている2つの系（CP1-⑦，CP2-⑤）については，JIS A 5308¹⁶⁾の規定値からは大きく外れている値である．よって，実務上使用が認められているコンクリートの空気量の範囲では，フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡点密度の関係には，正の相関性があると判断してよいと思われる．

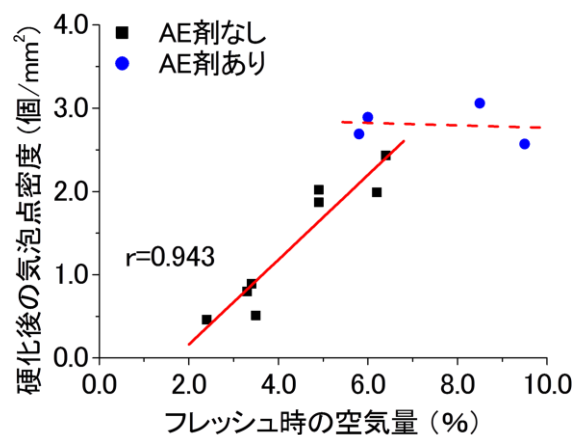


図 4-4 フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡点密度の関係

図4-5は，硬化後の気泡体積率と気泡の点密度の関係を示したものである．フレッシュ時の空気量との間に正の相関性が認められた供試体については，打ち込みから締め固めにより空気量の減少があるものの，硬化後の気泡体積率との関係においても，直線で示される相関性は保たれている．また，図4-4と同様にCP1-⑦とCP2-⑤の系については，図4-5に示す相関性から乖離している現象もそのままである．このことは図4-1の結果からも示される．硬化後の気泡体積率が，約4.0%を超えると気泡の点密度との相関性は保持されないようである．

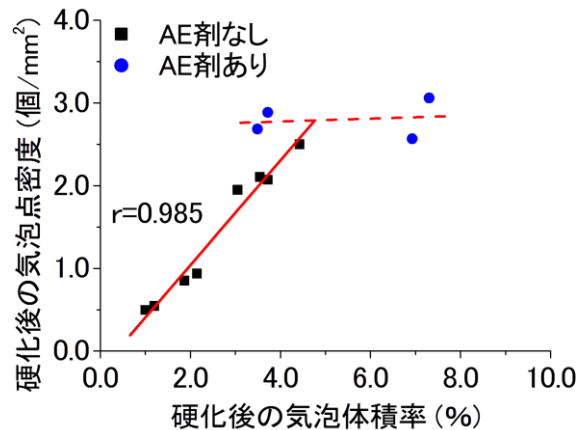


図 4-5 硬化後の気泡体積率と硬化後の気泡点密度の関係

図 4-4 および図 4-5 の結果より、フレッシュ時の空気量および硬化後の気泡体積率と、気泡の点密度の間には、正の相関性があると考えられる。一般的に用いられるコンクリートは、AE 減水剤等を使用しフレッシュ時の空気量が JIS A 5308 に規定されている 3.0%から 6.0%の範囲であることから、空気量の評価に点密度を用いることには妥当性があると考えられる。これは、点過程統計量の点密度が空気量の重要なパラメーターであることを強く示している。

4.6 セメントペースト中の気泡分布のランダム性

図 4-6 に AE 剤、AE 減水剤を使用していないセメントペースト中の気泡(エントラップトエア)の K 関数を示す。W/C=0.40 セメントペースト(CP1-①)のエントラップトエアの K 関数は、ほぼ完全ランダム分布に一致する結果となった。W/C=0.45 のセメントペースト(CP2-①)のエントラップトエアの K 関数を見ると、距離 r が約 0.3mm を超えると、ランダム分布よりも上側に示される凝集側分布の傾向が認められる。この凝集側の分布の有意性を評価するために L 関数による 95%信頼区間のシミュレーションを行った。すなわち同じ点密度でランダムに点を発生させるシミュレーションを行い、その 95%信頼区間を求めた。図 4-7 に L 関数の結果を示す。W/C=0.40 では、K 関数と同様にランダム分布と判断できる結果となった。また、W/C=0.45 でも、L 関数の 95%信頼区間の範囲内に収まり、セメントペースト中の気泡はランダムに分布していたと判断される。以上の K 関数および L 関数の結果から、セメントペースト中のエントラップトエアの気泡は、ランダムな分布を形成していると考えられる。ただし、混和剤を添

加せずエントラップトエアが多く存在する場合は、その気泡構造が不安定になりやすいので^{17), 18)}水セメント比やフロー値などのフレッシュ特性によって気泡構造に変動が生じやすくなると予想される。

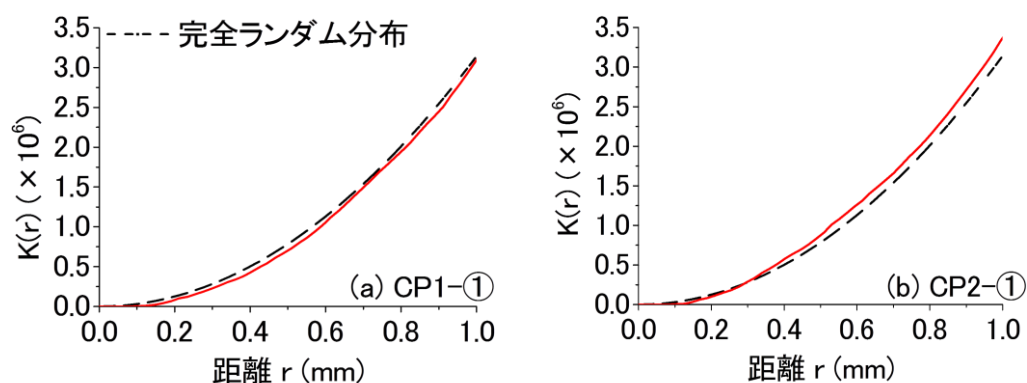


図 4-6 セメントペースト中のエントラップトエアの K 関数

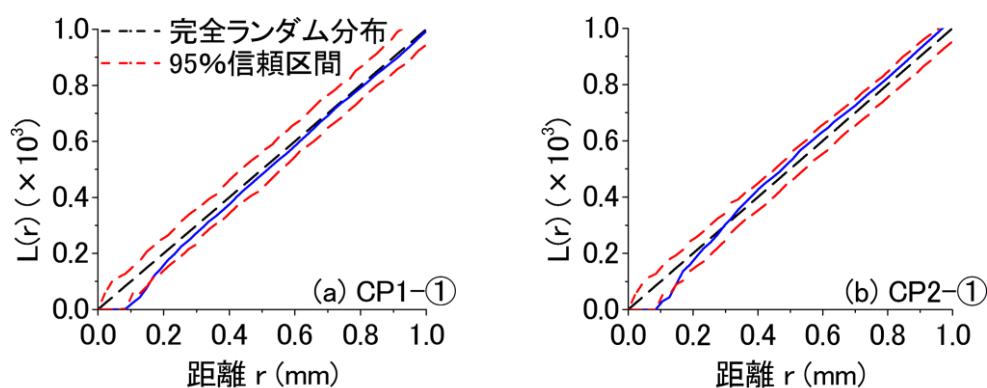


図 4-7 セメントペースト中のエントラップトエアの L 関数

図 4-8 には、セメントペースト中のエントラップトエアとエントレインドエアを合わせた気泡全体の K 関数の結果を示す。いずれの配合においても気泡の配置はランダム分布の傾向を示した。混和剤を添加せずエントラップトエアのみの場合は、前述のように気泡の分布特性が不安定なものとなるが、エントレインドエアが連行される系では、打ち込みから締め固め過程において気泡の損失が生じてても(図 4-1)、気泡の空間分布はランダムな状態を保持し、より安定な系であると考えられる。

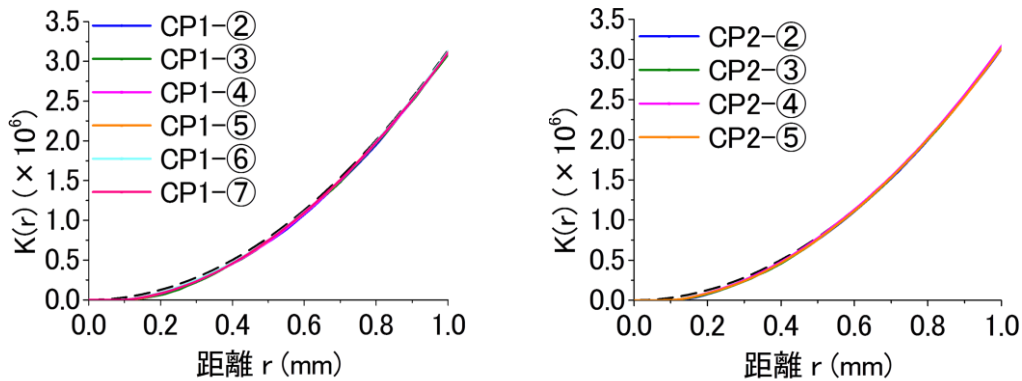


図 4-8 セメントペースト中の気泡の K 関数

4.7 セメントペースト中の気泡の距離特性

図 4-9 にセメントペースト中の気泡の最近傍距離関数 ($G(r)$) の結果を示す. いずれの配合においても X 軸切片値を有しており, その大きさは気泡の平均気泡径とほぼ一致している. すなわち, 気泡そのものが実際には点ではなく大きさを持っていることの影響が評価されている. $W/C=0.40$ (CP1)の系では, 空気量の最も小さい CP1-①の最近傍距離関数の勾配が小さくなり, 空気量の増加とともに勾配が大きくなる傾向が表れている. この結果, $G(r)=1.0$ となる距離 r の収束距離は, 空気量の大きいものが最も小さな収束値を示すことになった. $W/C=0.45$ (CP2)の系についても, 最近傍距離関数から得られる特性は CP1 と同様になり, 空気量が大きくなると気泡個数が増加し, 気泡相互の距離間隔が小さくなることを示している. この最近傍距離関数の収束距離が空気量の増大とともに小さくなるのは当然の帰結であるが, K 関数では全体の分布に関する情報であったことに対して, 最近傍距離関数はより局所的な点間距離に関する情報を与える. さらにその収束距離は図 4-3 の認識と同じオーダーであり気泡構造の距離を測度として直感的に理解できる結果となっている.

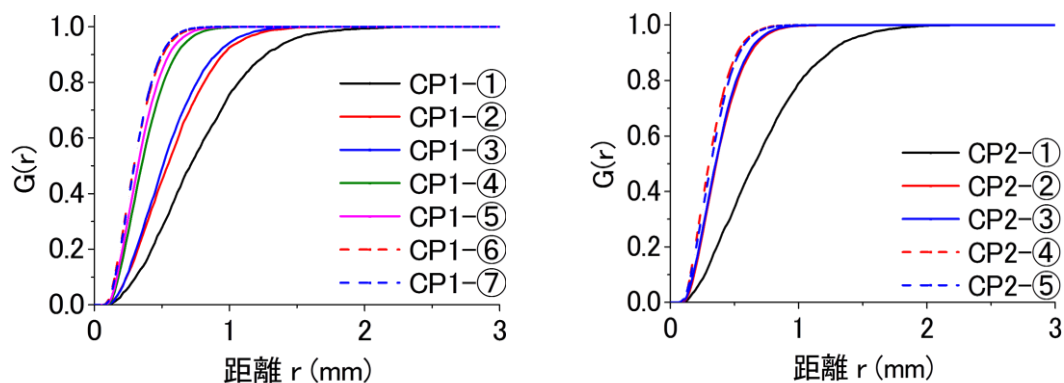
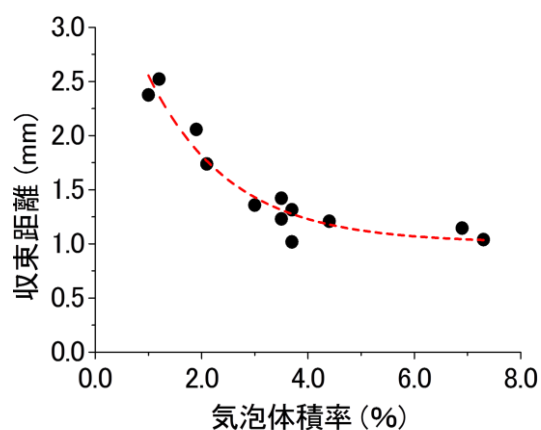
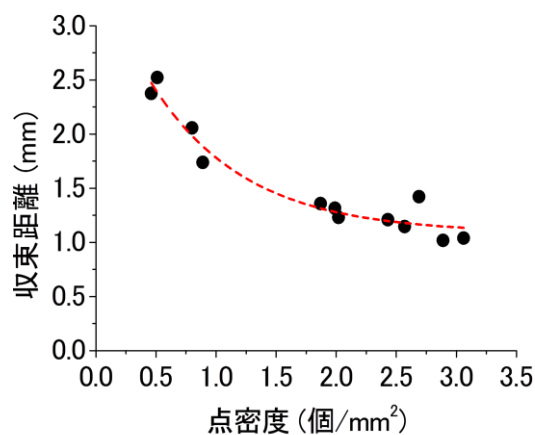


図 4-9 セメントペースト中の気泡の最近傍距離関数

気泡体積率と最近傍距離関数の収束距離の関係を図 4-10 に示す．また最近傍距離関数の収束距離と点密度の関係を図 4-11 に示す．両結果とも，曲線で近似される関係性を伺わせる結果となった．図 4-10 より，気泡体積率の増加とともに，最近傍距離関数の収束距離が小さくなっていくがある程度以上の気泡体積になると収束距離は変化しない．点密度に関しても同様である．図 4-11 の点密度の値は約 2.0 個/mm² から 3.0 個/mm² の範囲に多くの点がプロットされ，その場合の距離は約 1.0mm 程度の収束値を持つ結果となった．

図 4-10 最近傍距離関数の収束距離と
気泡体積率の関係図 4-11 最近傍距離関数の収束距離と
気泡点密度の関係

4.8 結論

セメントペースト中の気泡分布に点過程の考え方を導入し、気泡の基本特性の評価を行った。本章で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 2点相関関数から得られる構造距離の結果より、セメントペースト中の気泡構造の評価に必要な観察領域は $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 以上となった。本研究で用いた観察領域は $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ としていることから、気泡の分布構造評価には十分な領域であると考えられる。
- (2) セメントペースト中の気泡から得られる2値画像からは、空気量の変化による気泡の分布傾向が目視で確認できる。また、点過程統計量を用い気泡構造を点として表示した場合においても、気泡の分布傾向を直感的に理解できる。
- (3) フレッシュ時の空気量および硬化後の気泡体積率の増加とともに気泡点密度は増加するが、フレッシュ時の空気量が約6.0%以上および硬化後の気泡体積率が約4.0%以上の場合は、気泡の合一現象により点密度は増加を示さなくなる。
- (4) セメントペースト中の気泡の空間構造は、ランダム分布とみなしてよく、いずれの配合においても二項点過程として求めたランダム分布の信頼区間内の分布を示す。
- (5) セメントペースト中の気泡構造の最近傍距離関数は、空気量の大きな試料では関数の勾配が大きくなり、また、 $G(r)=1.0$ となる収束距離も小さくなる。また、点密度は収束距離との間にも相関性があることが示された。

参考文献

- 1) Larsen,T. and Malloy,C.J. : The protected-paste volume concept using new air-void measurement and distribution techniques,Journal of Materials,Vol2,No.1,pp.202-224,1967.
- 2) Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949 .
- 3) 鮎田耕一, 桜井宏, 田辺寛一郎 : 硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析, 土木学会論文集, No.420, Vol.13, pp81-86, 1990.
- 4) 小長井宜生, 大橋猛, 根本任宏 : 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論, 土木試験所月報, No.396, 1986.
- 5) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学 : コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012.
- 6) Snyder, K., Natesaiyer, K. and Hover, K.:The stereologi and statistical properties of entrained air voids in concrete: A mathematical basis for air void system characterization, Materials Science of Concrete VI (Eds. Mindess, S. and Skalny, J.), The American Ceramic Society, pp.129-214, 2001.
- 7) Snyder, K. A. : A Numerical Test of Air Void Spacing Equations, Advanced Cement Based Materials, Vol.8 , No.1, pp.28-44, 1998.
- 8) B. Lu and S. Torquato : Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle systems, Physical Review A, Vol.45, No.8, pp.5530-5544,1995.
- 9) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 吉川峻生 : 気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応, コンクリート年次論文集, Vol.37, No.1, pp841-846, 2015.
- 10) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一, 吉川峻生 : 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp493-498, 2015.
- 11) 川村満紀 : 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996.
- 12) 米山義広, 五十嵐心一 : シミュレーションにより再現された組織と電子顕微鏡観察像に空間構造の比較, コンクリート工学論文集, 第19巻第2号, 2008.
- 13) 五十嵐心一, 池崎由典, 渡辺暁央 : 残存未水和セメント粒子の粒度分布の評価に基づく水和度と水セメント比の推定, コンクリート工学論文集, Vol. 16, No. 1, pp. 87-95, 2005.
- 14) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修 : 公共建築工事標準仕様書, 一般社団法人公共

第4章

建築協会，2013.

- 15) 日本建築学会：鉄筋コンクリート工事(JASS5)，一般社団法人日本建築学会，2015.
- 16) JIS A5308：レディーミクスコンクリート，日本工業規格，2003.
- 17) 川村満紀，S.チャタジー：コンクリートの材料科学，森北出版，2002.
- 18) 宮川豊章，六郷恵哲：土木材料学，朝倉書店，2012.

第 5 章

モルタルおよびコンクリート中の 気泡の空間分布構造の定量評価

5.1 序論

気泡はセメントペーストマトリックスにのみ存在でき、モルタルやコンクリート中では、含有されている骨材により、気泡の存在できる領域に影響を与えることが考えられる。耐凍害性を付与することを考える場合には、気泡間隔係数を $200\sim 250\mu\text{m}$ 程度以下にすることが必要であるとされ^{1), 2)}、その気泡間隔係数を実際に求める場合には、ASTM C457³⁾に規定された方法に則って計測がなされる。その計測には多大な労力を要するので、空気量と気泡間隔係数の間には有意な関係が存在することを利用し、フレッシュ時の空気量の測定をもって気泡間隔係数の条件を満足しているものとみなすのが一般的である⁴⁾。しかし、実際には AE 剤によって連行される気泡は必ずしも安定な存在とはいえない切れず、様々な要因によって失われる。例えば、コンクリートの粘性が低い場合にはコンクリートの運搬や打ち込みの過程にて失われやすく、また過剰な締固めもコンクリートの気泡を減少させる要因となる⁵⁾。すなわち、フレッシュ時に存在した所定の空気量は必ずしも打ち込まれたコンクリートにて確保されていることにはならない。硬化体中の気泡間隔を必要とする場合には、ASTM C 457 の方法などを用いて硬化コンクリートについて顕微鏡観察を行わねばならないことになる。

このように、耐凍害性評価における重要なパラメータである気泡間隔係数であるが、これは実際の気泡構造の距離に基づく特性値ではない。気泡間隔係数は気泡がすべて同一寸法の球で存在し、それがセメントペースト内に規則的な立方体格子点に配置された状態を仮定している。そして、セメントペーストマトリックス領域の任意の点が最寄りの気泡表面から最も遠い位置にあるときの平均的な距離を表わすものである⁶⁾。このため、気泡間隔係数が同程度であっても気泡径分布が異なり、特にフライアッシュなどの混和材を混入したコンクリートでは、耐久性指数との相関が得られないという報告もある⁷⁾。原因の一つとして考えられるのが、気泡間隔係数は、コンクリート中の気泡を仮定の空間に配置している距離の特性値であるのに対して、実際のコンクリート中の気泡は、規則的な配置では存在していないためと考えられる。コンクリート中にはセメントペースト、空気および骨材が存在し、気泡として存在する空気の領域は、セメントペーストに限られている。骨材の大きさやその割合により、気泡が分布できる領域は制限されており、気泡間隔係数では、これら骨材による気泡の分布特性は反映されていない。実際のコンクリート中の気泡の分布構造を定量的に求めることは、コンクリートの物性を評価するためには重要な事項と考えられる。硬化コンクリート断面から実際の気泡間隔をより合理的に評価する試みは、コンクリート画像取得技術と数値解析手法の発展にともない、積極的に行われてきている。例えば、Snyder⁸⁾はいくつかの気泡間隔に関する評

価式を比較し、気泡を単一粒径ではなく、多様な寸法の球からなる気泡径分布を考慮できる Lu and Torquato 式⁹⁾が有用であると指摘している。

本来、3次元の情報をそのまま抽出し、対象相に関わる特徴を取得することができればよいが、特徴量を得るためのデータの取得方法および高次元での解析手法が複雑化してしまう。そこで、2次の断面から取得できる情報から3次元の特徴を得ようとする、ステレオロジーの考えを導入することになる。2次元でのステレオロジーの手法として簡便な手法として確率されている理論に、点過程がある。気泡に点過程を用いるならば、多様な寸法を有している気泡は全て点で代表させることになる。気泡がセメントペーストマトリックス内にのみ存在できることを利用し、気泡の基本的な分布構造の特徴を得るために、4章での実験を行なった。気泡の2値画像に対し、点過程を導入し、気泡の分布構造および気泡の距離に関する特徴を得ることができた。気泡の分布構造の結果では、セメントペースト中の気泡の分布はランダム分布^{10),11)}であったが、次は一般的に使用される頻度の高いモルタルやコンクリートでの気泡の分布構造の評価が必要となる。細骨材の存在するモルタル、また、細骨材と粗骨材の存在するコンクリートに点過程を導入し、実際の気泡分布構造を評価することは、モルタルおよびコンクリートの物性を把握するために必要と考えられる。

本章においては、骨材による分布の制限を受けるモルタルおよびコンクリートに対して気泡を点とみなした点過程を考え、空気量と気泡の点密度や気泡の空間分布特性、さらに気泡間距離を評価できる最近傍距離関数から、気泡の分布特性を明らかにすることを目的とする。さらに、間引き過程¹²⁾によりセメントペーストマトリックス相にランダムな点を発生させるシミュレーションを行い、シミュレーションによって再現された分布から実際のモルタルおよびコンクリート中の気泡分布に関する特性を推定することの可能性について論ずる。

5.2 モルタルおよびコンクリートのフレッシュ特性と硬化後の気泡体積率の関係

表 5-1 にモルタルの名称および配合を示す。また、表 5-2 にモルタルのフレッシュ特性と画像から得られた気泡特性の一覧を示す。モルタルの配合は、水セメント比を 0.40 で統一し砂の量を変化させた。作製したモルタル供試体のフロー値は、セメント：砂＝1：1(M1 系)の配合で約 200mm、セメント：砂＝1：2(M2 系)の配合で約 210mm となり、砂量の多い M2 の系のフローがやや大きな傾向を示した。また、砂量の多い M2 の系の方が空気量を増やすために必要な AE 剤量が小さくなる傾向が見られ、AE 剤によ

り連行されるエントレインドエアが安定していると考えられる。M1 の系と M2 の系を比較した場合、フレッシュ時の空気量は M2 の系の方が大きく、AE 剤により連行されるエントレインドエアの量が増加し、僅かながらもフローに影響したと考えられる。AE 剤により連行される空気量は、フレッシュ時の空気量および硬化後の気泡体積率とともに、AE 剤の添加量の増加にもとない空気量が大きくなっている。この傾向はセメントペーストと同様であった。

気泡の平均気泡径については、モルタルの場合ではいずれの配合において約 140～170 μm となり、W/C=0.40 のセメントペーストの場合では 120 μm 程度であったことと比較すると、モルタルの方が大きな平均気泡径となった。また、セメント：砂=1：1 の M1 の系とセメント：砂=1：2 の M2 の系の配合で平均気泡径の比較を行うと、M1 の平均気泡径が約 140 μm であるのに対して、M2 の系の方は約 160 μm となり、M2 の系の方の平均気泡径が大きくなる結果となった。セメントペーストからモルタルの M1 の系、またモルタル M1 の系から M2 の系へと気泡の存在領域が制限されるに従い、気泡の存在できる領域が小さくなっていく。このため、気泡の接触および合一の影響により平均気泡径が大きくなる傾向を示したと考えられる。点密度についても、同様の考察が可能となる。モルタルの M1 の系と M2 の系を比較すると空気量の増加とともに点密度も大きくなるが、硬化後の気泡体積率がほぼ同じである M1-③(6.5%)と M2-②(6.5%)の場合では、M1-③の点密度が 3.03 であるのに対して M2-②の点密度は 1.66 となり、相違が生じている。M1 の系と比べて砂量の多い M2 の系では、気泡が存在できるセメントペースト領域が砂によってさらに制限され、気泡の接触等の影響からセメントペーストに存在する気泡個数が減少したと考えられる。

表 5-1 モルタルの名称，配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C	C:S	高性能 減水剤量 (C×%)	AE剤量 (C×%)	フロー (mm)	空気量 (%)
M1-①	0.40	1:1	0.1	—	198	2.0
M1-②				0.06	197	5.5
M1-③				0.1	198	7.2
M2-①	0.40	1:2	0.45	—	202	5.7
M2-②				0.002	217	8.6
M2-③				0.006	218	11

表 5-2 モルタルのフレッシュ特性と画像から得られた気泡特性

C:S	1:1			1:2		
名称	M1			M2		
	①	②	③	①	②	③
点密度 (個/mm ²)	0.60	2.18	3.03	0.83	1.66	2.80
平均気泡径 (μm)	144	145	142	175	158	157
フレッシュ時の空気量 (%)	2.0	5.5	7.2	5.7	8.6	11
硬化後の気泡体積率 (%)	1.6	5.3	6.6	4.7	6.5	9.5
気泡体積率の変動係数	0.11	0.10	0.11	0.14	0.08	0.06
気泡残存率 (%)	81.8	96.4	91.7	82.7	75.6	86.4
フロー (mm)	198	197	198	202	217	218

図 5-1 にフレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の関係を示す。セメント：砂＝1：1 の M1 の系では、気泡残存率が 81%以上となり、セメント：砂＝1：2 の M2 の系では 75%以上の気泡残算率となった。いずれの配合においても高い気泡残存率を示した。空気量の絶対量としてのフレッシュ時からの減少は、約 1%から 2%にとどまっている。セメントペースト供試体の気泡残存率が 60%から 70%であったことと比較すると、モルタル供試体の気泡の方がより安定した分布構造になっていると推定され、打ち込みから締め固め過程において失われる気泡が砂の影響により損失しにくい状態になっていると考えられる。

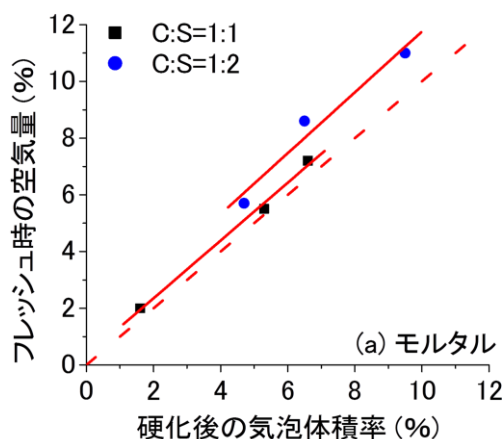


図 5-1 フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の関係

表 5-3 にコンクリートの名称および配合を示す。また、表 5-4 にコンクリートのフレッシュ特性と画像から得られた気泡特性の一覧を示す。コンクリートの配合は、水セメント比を 0.40 と 0.55 とし、実務に使用する配合と同等のものとした¹⁴⁾。単位水量を一般的な値である 175kg/m³で統一し¹⁵⁾、¹⁶⁾、単位セメント量を変化させて、所定の水セ

メント比とした．各水セメント比で AE 減水剤量を同一とし，エントレインドエアの連行による空気量の調整は AE 剤の添加量を加減することにより所定の空気量を得られるようにした．スランプは 15cm を目標とし，一般的に用いられている仕様書^{17) 18)}を参考に許容差の範囲を $\pm 2.0\text{cm}$ と設定した．

表 5-3 コンクリートの名称，示方配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				単位量 (cc/m^3)		測定結果	
					W	C	G	S	AE 減水剤	AE 剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
C1-①				2.5 ± 0.5			1033	686		438	13.0	2.8
C1-②	0.40	39.9	15 ± 2	4.5 ± 0.5	175	438	1002	665	4380	876	17.0	5.0
C1-③				7.0 ± 0.5			963	639		5256	16.0	7.2
C2-①				2.0 ± 0.5			1045	785		—	17.0	1.7
C2-②	0.55	42.9	15 ± 2	4.5 ± 0.5	175	318	1008	754	3180	636	16.5	4.0
C2-③				9.0 ± 0.5			941	707		3816	17.0	9.0

表 5-4 に示した気泡の平均気泡径については，W/C=0.40 の C1 の系で平均約 $130\mu\text{m}$ となり W/C=0.55 の C2 系では平均約 $150\mu\text{m}$ となったことから，骨材量の多い C2 の系の方がやや大きい平均気泡径になる結果となった．C1-②と C2-②の比較を行うと，硬化後の気泡体積率が C1-②では 3.0%に対し C2-②は 3.9%となっている．平均気泡径の比較では，硬化後の気泡体積率の小さい C1-②の平均気泡径が $131\mu\text{m}$ であり，硬化後の気泡体積率の小さい C2-②の平均気泡径が $156\mu\text{m}$ と大きくなった．空気量の増加とともに気泡個数が多くなることで現れる気泡の接触や合一の影響より平均気泡径が大きくなることも考えられるが，C1-②と C2-②の比較では，骨材による気泡の存在領域に与える影響が原因であると考えられる結果となった．

硬化後の気泡体積率と平均気泡径の比較では，C1 の系ではフレッシュ時の空気量および硬化後の気泡体積率の値が大きくなっても，平均気泡径はほぼ一定し約 $130\mu\text{m}$ となっている．一方，C2 の系の比較では，フレッシュ時および硬化後の空気量の増加とともに平均気泡径が大きくなる傾向が現れた．これは C1 の系に比べ骨材量の多い C2 の系では，空気量の増加とともに気泡個数も多くなる．また，骨材による気泡の存在領域の制限により気泡の接触や合一の影響から平均気泡径の値が大きくなったと考えられる．空気量の増加により気泡個数が多くなることの平均気泡径への影響はセメントペーストの場合にも現れた結果と同様である．さらに骨材が存在する場合は，気泡の存在領域が狭くなる影響により気泡構造の接触や合一が発生することが考えられる．

点密度については，コンクリートの C1 の系および C2 の系とも，空気量の増加とともに点密度が大きくなる傾向を示した．この傾向は，セメントペーストおよびモルタル

の供試体についても見られた結果と同じである。空気量の増加は、一部の気泡の接触および合一として平均気泡径を大きくする影響はあるものの、その気泡の構造分布の特徴は気泡個数の増加として現れる。空気量の増加は点密度の増加として検証することが可能と考えられる。C1 の系と C2 の系を比較した場合、骨材量の大きい C2 の系にて、気泡の存在領域の制限により気泡構造に接触および合一が発生していると考えられる結果が得られた。C1-②と C2-②の比較では、硬化後の気泡体積率が C1-②で 3.0%, C2-②で 3.9%となり C1-②の方が大きな気泡体積率となっているが、点密度については、C1-②が 1.36, C2-②が 1.10 となった。硬化後の気泡体積率が大きい供試体では、本来気泡個数が多くなると考えられるが、C1 の系と C2 の系の比較では、空気量の小さな C1 の系の方の点密度が大きくなった。C2 の系は C1 の系よりも骨材量が多く気泡の存在領域が小さいため、空気量の増加にともなう気泡個数の増加傾向はあるものの、気泡の接触および合一により気泡個数の増加割合が小さくなったと考えられる。この現象は C1-③と C2-③の比較においても同様に確認され、空気量の変化が気泡の点密度に与える影響とともに、気泡の存在領域が気泡に与える影響の大きさも無視できないものであることを示している。

表 5-4 コンクリートのフレッシュ特性と画像から得られた気泡特性

W/C	0.40			0.55		
名称	C1			C2		
	①	②	③	①	②	③
点密度 (個/mm ²)	1.00	1.36	2.30	0.58	1.10	1.55
平均気泡径 (μm)	124	131	133	131	156	171
フレッシュ時の空気量(%)	2.8	5.0	7.2	1.7	4.0	9.0
硬化後の気泡体積率(%)	2.0	3.0	5.2	1.6	3.9	7.8
空気量1%当たりの点密度	0.49	0.46	0.44	0.38	0.28	0.20
気泡残存率(%)	73.2	59.7	72.2	91.5	98.6	86.7

図 5-2 にコンクリートのフレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の関係を示す。W/C=0.40 の C1 の系の気泡残存率は約 65%, C2 の系の気泡残存率は約 90%となった。硬化後の気泡体積率はフレッシュ時の空気量よりも小さくなり、セメントペーストおよびモルタル供試体の結果と同じであった。空気の絶対量としての減少は約 1 %から 2% となり、モルタル供試体の場合とほぼ同じとなった。コンクリートの打ち込みから締め固め過程において、コンクリート棒形振動機を用いた。しかし、この場合であっても気泡残存率が比較的高い値を示していることから、AE 剤により連行されたエントレインドエアは安定的な性状を保有していたと考えられる。

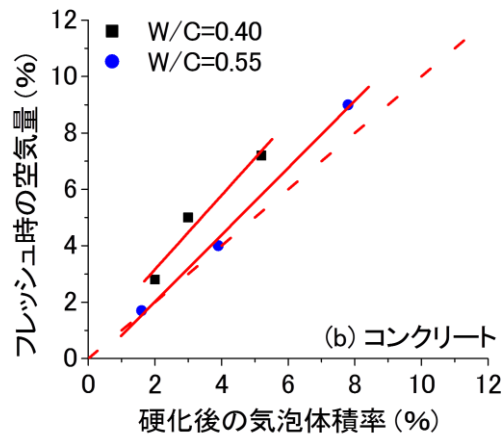


図 5-2 フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の関係

5.3 モルタルおよびコンクリート中の気泡分布構造評価に必要な観察領域

図 5-3 にモルタルおよびコンクリートの気泡分布の 2 点相関関数を示す。モルタルのセメント：砂＝1：1 の配合（図 5-3(a)）では 2 点相関関数が 1.5mm 程度で収束しており，セメント：砂＝1：2 の配合（図 5-3(b)）では 2.5mm 程度で収束している。よって気泡の構造単位である構造距離は，モルタル供試体の場合，約 2.5mm までの距離に分布の特徴が現れている。着目粒子である気泡の観察に必要な観察領域は工学的判断により構造距離の 3～5 倍程度が必要¹⁹⁾ とするならば，モルタル中の気泡評価に必要な観察領域は 12.5mm×12.5mm 以上あれば空間構造を把握することが可能であるといえる。本研究ではモルタルの観察領域を 30mm×30mm としているため，気泡の空間構造を評価できる領域を満足していると判断できる。

コンクリート供試体の W/C=0.40 の配合(図 5-3(c))および W/C=0.55 の配合(図 5-3(d))の 2 点相関関数の収束距離は 4.0mm 程度になっている。このことから，上述の考え方に基つけば，コンクリートの気泡構造に必要な観察領域は 20mm×20mm 以上と考えられる。すなわち骨材寸法が大きくなることにより観察すべき領域は確かに拡大している。本研究ではコンクリートの観察領域を 60mm×60mm としているため，気泡の空間構造を評価できる領域を満足していると判断できる。

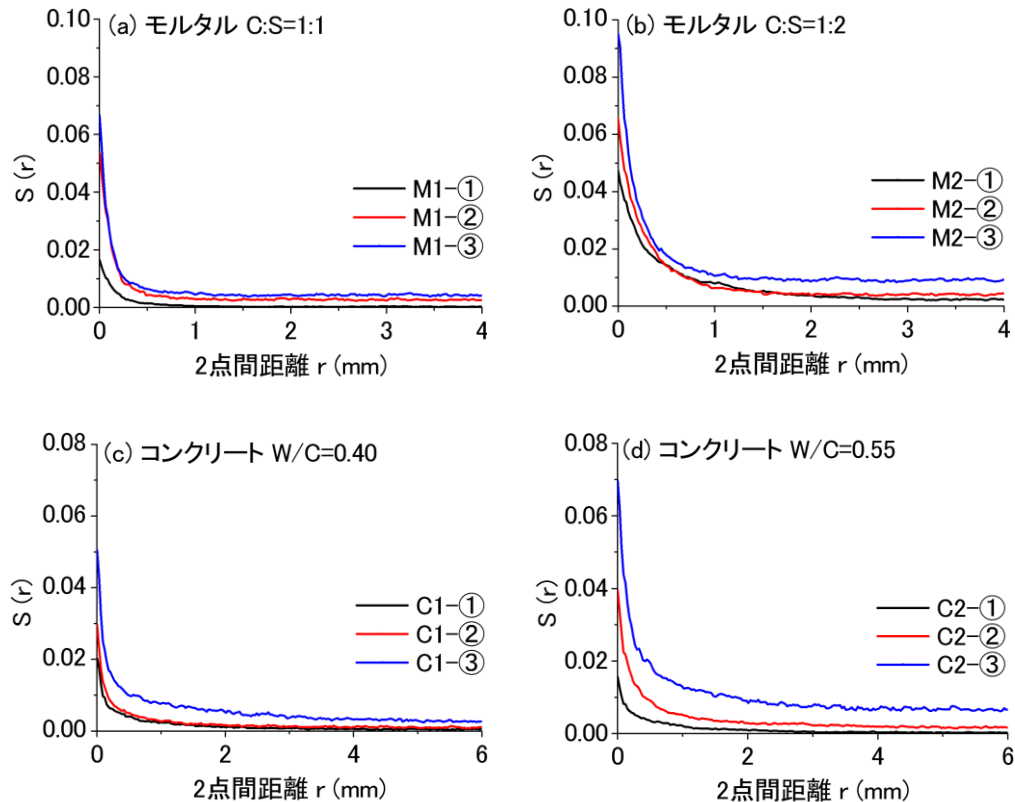


図 5-3 モルタルおよびコンクリート中の気泡の 2 点相関関数

5.4 硬化後のモルタルおよびコンクリート中の気泡画像

図 5-4(a) に、モルタル供試体断面を黒色で塗色した後に気泡に白色粉末を充てんした画像を示す。このスキャナー画像に対してノイズ処理等を行って求めた 2 値画像を図 5-4(b) に、また気泡と同定させた白色部分を点に置換した点過程の画像を図 5-4(c) に示す。供試体から得られる白黒画像と 2 値化画像による相違は目視では認識できず気泡の抽出は適切に行なわれていると判断され、2 値化処理が適正になされたと考えられる。硬化後の気泡体積率は、図 5-4 の左から順にセメント：砂＝1：1 の M1 の系で 1.6%，6.6% (図 5-4(a)-1, (a)-2)，また、セメント：砂＝1：2 の M2 の系で 4.7%，9.5%(図 5-4(a')-1, (a')-2)である。画像の目視から、それぞれの系で空気量が大きくなると気泡の個数が増加していることは明らかである。表 5-2 に示すように、M1 および M2 の系の平均気泡径は、変動が小さくほぼ一定値であるため、空気量の増加による気泡構造への変化は気泡径が大きくなることではなく、気泡個数の増加として現れている。このことは 2 値画像の目視観察の認識とも一致している。気泡を点として置き換えた画像の図 5-4(c) でも空気量の増加による点個数の変化は明白である。砂量の違う M1 と M2

の系の比較では、M2の系の気泡構造には接触や合一の現象が現れている。砂量の増加により気泡の存在領域が小さくなり、気泡相互の距離が近づいたことによる影響と考えられる。気泡分布を点に置き換えた図5-4(c)および(c')の目視観察からは、点の配置において何らかの特性を持っているようには見えない。セメントペーストの点分布とほぼ同様であり、ランダムな配置をしていると考えられる。

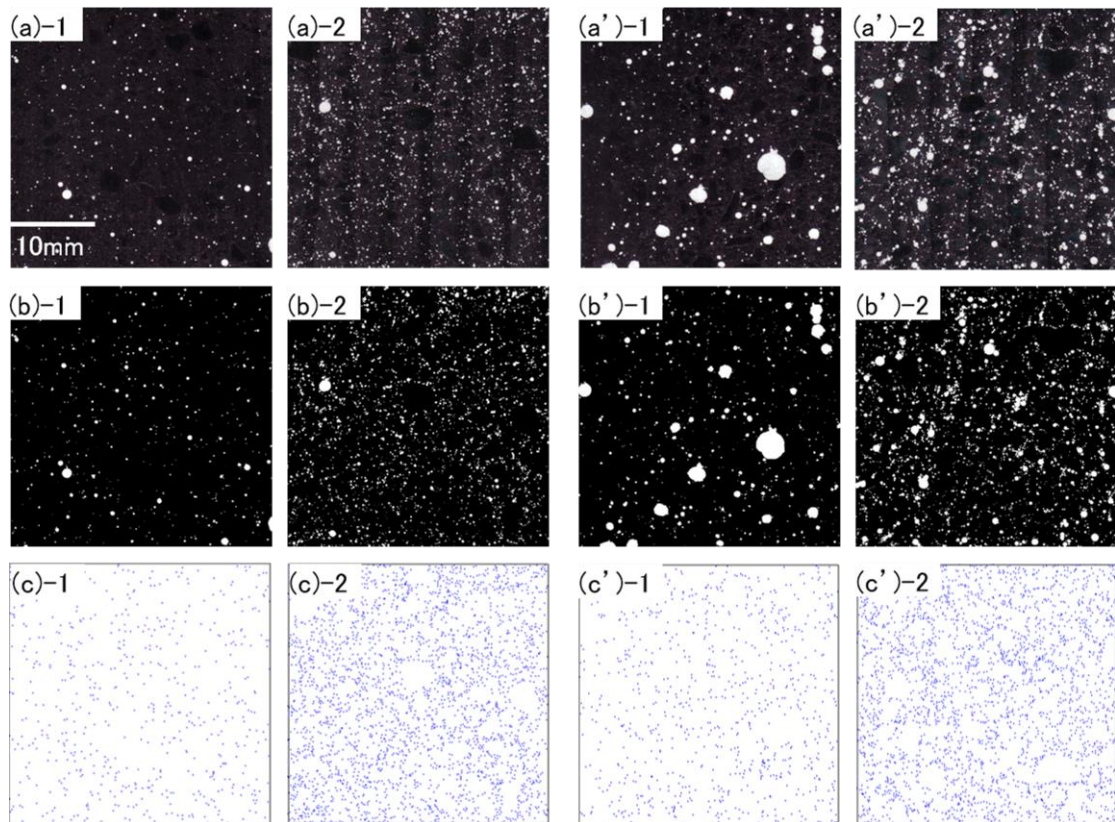


図 5-4 モルタル中の気泡の画像解析の例（左から：M1-①，M1-③，M2-①，M2-③）

図 5-5(a)に、コンクリート供試体断面を黒色で塗りつぶし気泡に白色粉末を充てんした画像を示す。この画像に対してモルタル供試体と同じ処理を行ない求めた2値画像を図 5-5(b)に示す。また、気泡の白色部分を点に置換した点過程の画像を図 5-5(c)に示す。いずれの画像においても、供試体断面から得られる白黒画像と2値化画像および点過程画像から目視で確認できる気泡の変化はほぼ同様であり、画像処理が適正に行われていると考えられる。硬化後の気泡体積率は、図 5-5の左から順に $W/C=0.40$ の C1 の系で 2.0%, 3.0% (図 5-5(a)-1, (a)-2), また, $W/C=0.55$ の C2 の系で 1.6%, 3.9%(図 5-5(a')-1, (a')-2)である。各画像の目視観察からも、それぞれの系で空気量が大き

くなると気泡の個数が増加していることが視認できる。表 5-4 に示すように、C1 の系では気泡の平均気泡径は $130\mu\text{m}$ とほぼ一定値になり、C2 の系は平均気泡径が約 $130\mu\text{m}\sim 170\mu\text{m}$ と多少の変動があるが目視で判断できるほどではない。表 5-4 に示した気泡特性および目視による観察から空気量の増加と気泡の点密度との関係は、気泡構造への変化は気泡径が大きくなることの特徴には現れず、気泡個数の増加現象として確認される。2 値画像の観察においても、気泡である白色部分の数が増加していることが確認できる。点過程の画像の図 5-5 (c) でも空気量の増加による点個数の増加傾向は 2 値画像と一致している。モルタルおよびコンクリートの 2 次元断面に現れる粒子数、すなわち点の個数は、ステレオロジーの視点に立つと 3 次元での粒子個数と直接関連づけることには注意が必要である。なぜなら大きな粒子ほど画像に表れる確率が大きくなり、2 次元の個数が 3 次元の個数と単純には対応するとはいえないためである。しかし、空気量が増加しても気泡の寸法には大きな変化が認められないことから(図 5-4, 5-5)、表 5-2 および 5-4 に示した点密度は単純に空気量が大きくなったことの結果と理解してよいと思われる。

骨材量の違う C1 と C2 の系の比較では、C2 の系の気泡構造には接触や合一の現象が現れている。骨材量の増加により気泡の存在領域が小さくなり、気泡相互の距離が近づいたことによる影響と考えられる。

気泡分布を点に置き換えた図 5-5 (c) および (c') の目視観察から点の配置においては、粗骨材の存在が点の配置に影響をもたらしていることが明確に表れている。図 5-6 に示す通り点の分布にはいくつかの基本的なパターンがある。セメントペース供試体は粗骨材が存在していないため、気泡である点の配置は一様な状態で配置され、図 5-6 (a) に示すランダム分布であることが示された(図 4-6, 4-7, 4-8)。一方、コンクリート供試体の場合は、粗骨材によって気泡の存在領域が制限され、気泡がまったく存在していない領域が確認できる。このような点の分布構造は、おおよそ図 5-6 (b) に示す分布状態に類似しており、コンクリート中の気泡は全観測視野を参照空間とみなした場合には、凝集分布であることは明らかである。

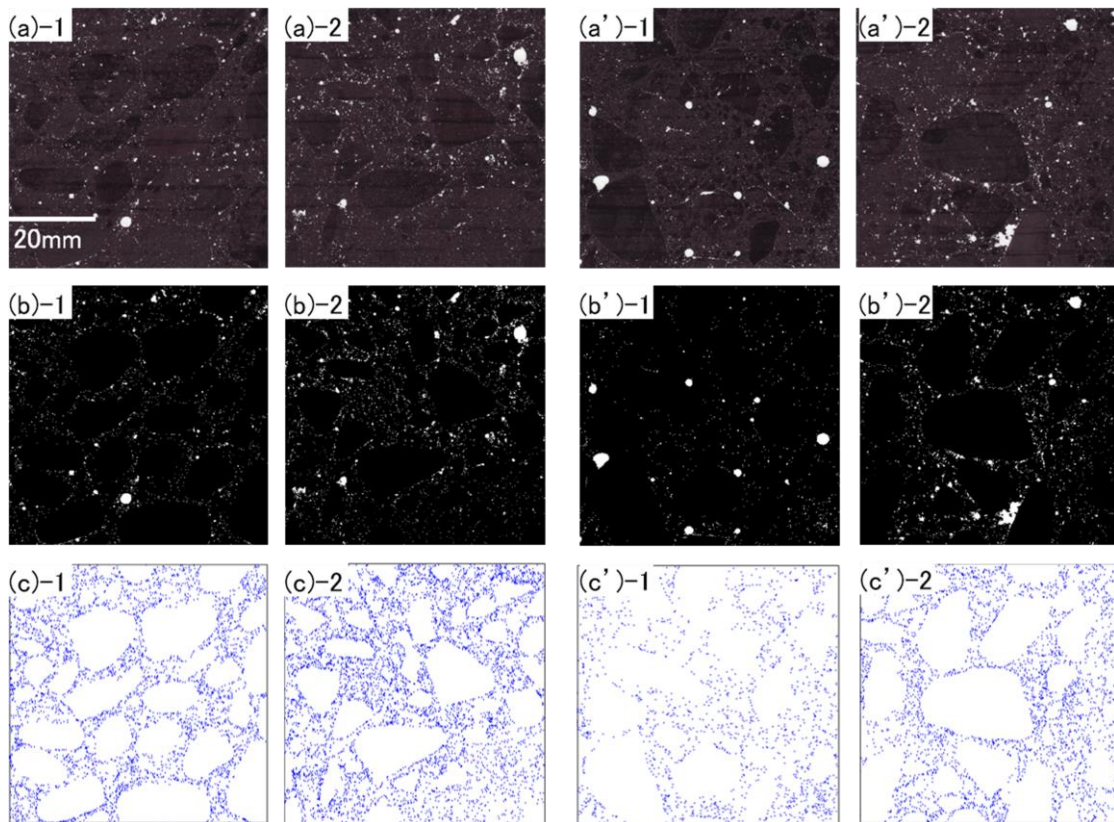
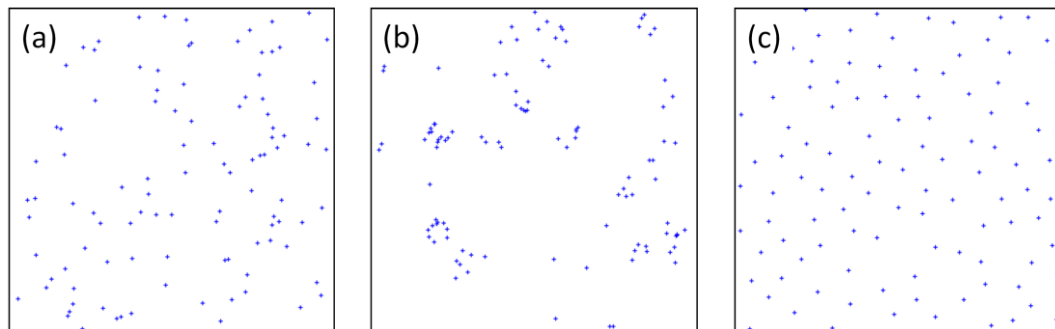


図 5-5 コンクリート中の気泡の画像解析の例（左から：C1-①，C1-②，C2-①，C2-②）



(a) ランダム分布，(b) 凝集分布，(c) 規則分布

図 5-6 主な点の分布パターン

図 5-7 には気泡の点密度がほぼ等しい結果となったコンクリートとモルタルの点過程を比較して示す。図 5-7(a)はコンクリート供試体で $W/C=0.55$ の系の C2-①であり点密度は 0.58 である。また、図 5-7(b)はモルタル供試体で $W/C=0.40$ ，セメント：砂＝1：1 の系の M1-①であり点密度は 0.60 である。モルタル供試体では、配合している程を比較して示す。図 5-7(a)はコンクリート供試体で $W/C=0.55$ の系の C2-①であり点密度は 0.58 である。また、図 5-7(b)はモルタル供試体で $W/C=0.40$ ，セメント：砂＝1：1 の系の M1-①であり点密度は 0.60 である。モルタル供試体では、配合している骨材が細骨材であるためその粒径範囲は小さい。また、骨材の体積率も大きくはないのでセメントペースト内に存在できる気泡分布への影響も小さい。そのため、図 5-7(b)の目視から、気泡を表す点の配置は画像全体にたいして一様に存在し、図 5-6(a)および図 4-3 に示したランダム分布に近いと考えられる。一方、図 5-7(a)に示すコンクリート供試体の場合は、粗骨材の存在により気泡がまったく存在できない領域があり、気泡の存在できる範囲は限定的なものとなる。モルタル供試体と比較した場合、点の配置で示される気泡の分布構造はモルタル供試体のランダム分布とは明らかに異なる。図 5-7(a)の黒丸で囲んだ部分は、粗骨材が近接していて、その間のセメントペースト中の点の配置は狭い領域に制限されている。また、赤丸で囲んだ部分では粗骨材が疎な状態となり比較的広い空間が存在し、点の配置は制限が少ないように考えられる。モルタル供試体では点の配置が一様に存在していることに対して、コンクリート供試体の点の配置には、存在領域の制限に起因した濃淡があり、モルタルに比べて不均質な空間分布構造を有していると考えられる。

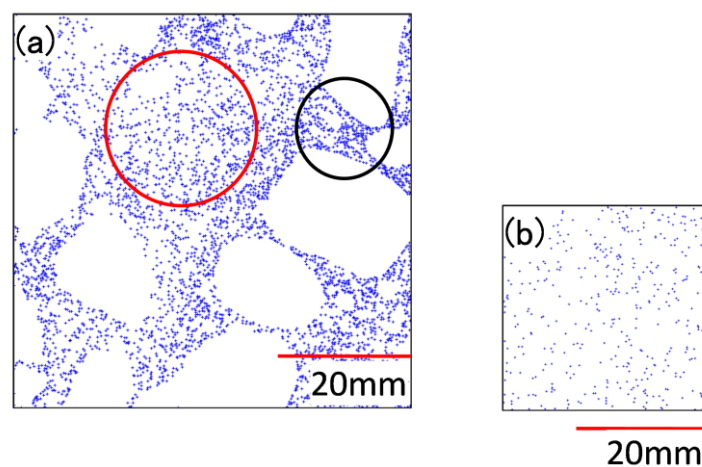


図 5-7 気泡点密度がほぼ等しい系の点過程の例 ((a):C2-①, (b):M1-①)

5.5 モルタルおよびコンクリートの空気量と気泡の点密度の関係

第4章で述べたように、セメントペースト供試体では、フレッシュ時の空気量および硬化後の気泡体積率と気泡の点密度の間には、正の相関関係があることが確認された。モルタルおよびコンクリート供試体についても、同様の関係が存在するかどうかについて検討する。図5-8にモルタルおよびコンクリート供試体のフレッシュ時の空気量と気泡の点密度の関係を示す。モルタルおよびコンクリート供試体にもフレッシュ時の空気量と気泡の点密度の間には、直線で近似できる強い相関関係が見られた。モルタル供試体では、セメント：砂＝1：1と1：2のそれぞれの配合ごとに、直線で近似できる相関性が認められる。また、コンクリート供試体においては水セメント比ごとに直線近似の相関性が見られた。図5-8のモルタル供試体ではM1の系とM2の系によるそれぞれのプロット位置は独立しており、系による違いが明確に現れた。一方、コンクリート供試体の場合、点密度が約1から2の試料では、水セメント比ごとの気泡の点密度とフレッシュ時の空気量との相違が少なく、C1の系とC2の系による明確な相違は現れなかった。コンクリート供試体について各系による明確な違いが現れなかった要因として考えられるのは、画像解析時の骨材面積率の違いにあると考えられる。

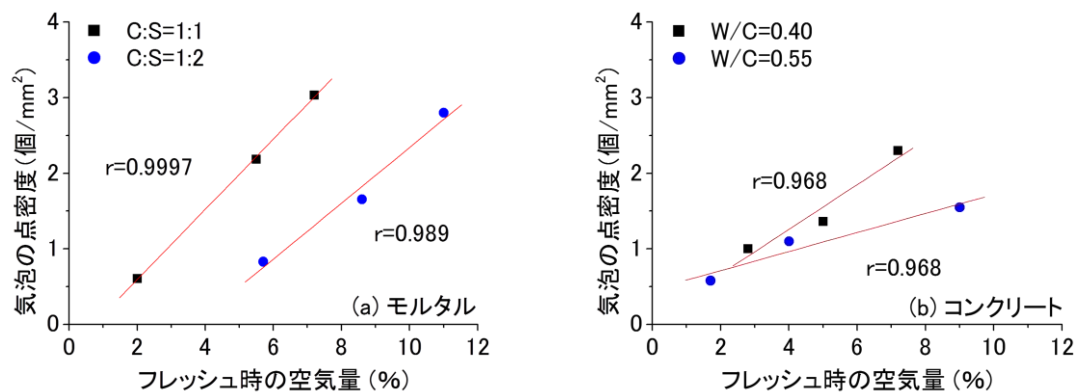


図 5-8 フレッシュ時の空気量と気泡の点密度の関係

表5-5にモルタルとコンクリート供試体の配合値から求めた骨材体積率と、画像解析から得られた骨材体積率の関係を示す。モルタルのM1の系の配合値からの骨材体積率は約33%であり、M2の系では約47%となり、それぞれの系で骨材体積率が異なる。一方、コンクリートのC1の系とC2の系では、骨材体積率が約63%と67%となり、モルタルに比べて相違が小さい。モルタル供試体では、M1の系とM2の系による骨材体積

率に相違があるため、気泡の存在できる領域にも違いが表れ、気泡の点密度とフレッシュ時の空気量の関係において、系ごとに独立した相関性が得られたと考えられる。一方、コンクリート供試体については、骨材体積率の相違が小さいため、気泡が存在するセメントペースト領域が類似し、気泡の点密度とフレッシュ時の空気量の関係では、系による明確な違いが現れなかったと考えられる。コンクリートの C1 と C2 の系では、水セメント比が 0.40 と 0.55 の配合とし違いを設けたが、空気量と気泡の点密度の関係については、水セメント比の影響は小さく、骨材体積率によるセメントペースト領域に与える影響の方が大きいと考えられる。

表 5-5 骨材体積率の配合値と画像解析値の一覧

名称	モルタル						コンクリート					
	M1			M2			C1			C2		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
配合値 (%)	34.4	32.9	32.3	48.7	47.2	46.0	65.8	64.1	61.2	70.7	67.9	63.4
画像解析値 (%)	30.8	32.7	31.4	45.0	40.0	41.8	64.5	64.9	61.2	66.5	67.2	67.2

図 5-9 にモルタルおよびコンクリート供試体の硬化後の気泡体積率と点密度の関係を示す。図 5-8 と比較すると、打ち込みから締め固め過程における損失により硬化後の気泡体積率は小さくなったと考えられる。勝畑ら²⁰⁾の研究においても、コンクリートの打設中の振動や衝撃により硬化後の空気量は減少するとの報告がある。しかし、空気量の減少をともなった場合についても、気泡の点密度と空気量の関係は、正の相関関係を保っている。モルタルおよびコンクリート供試体においても、セメントペースト供試体と同様に、空気量と点密度には直線近似できる相関関係がある。特にコンクリートの場合気泡体積が 8%と過剰な配合を除いて考えると、一般的な空気量の範囲で点密度と気泡体積には水セメント比に関わらず、一つの直線で近似できるような正の相関性が存在するようにも見える。このことを考慮すると、フレッシュ時の空気量から硬化後の気泡の点密度を推定することも可能であると考えられる。

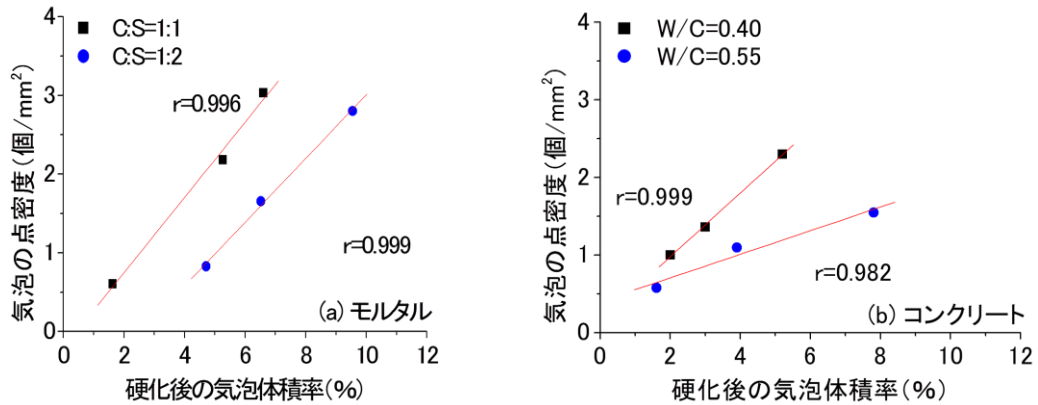


図 5-9 硬化後の気泡体積率と硬化後の気泡点密度の関係

5.6 モルタルおよびコンクリート中の気泡分布のランダム性

5.6.1 モルタルおよびコンクリート中の気泡の空間分布特性

図 5-10 にモルタル中の気泡の K 関数を示す. 図 5-10(a) より, 距離 r を 7mm まで考慮した K 関数では, モルタル中の気泡分布はランダム分布を示しているように見えるが, 図 5-10(b) に示す距離 r を 1mm までの短距離で評価した場合は, 凝集側の分布傾向を示している.

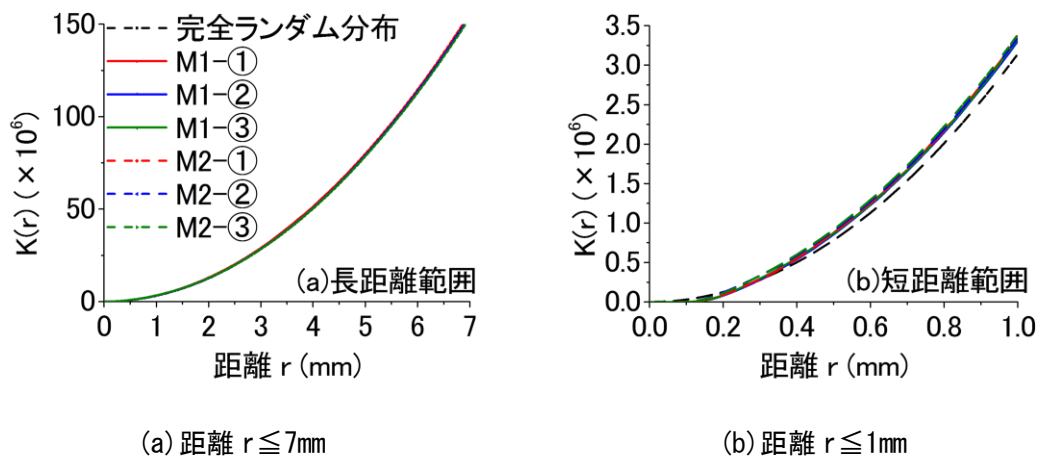


図 5-10 モルタル中の気泡の K 関数

K 関数に示された凝集側の分布の有意性を評価するため L 関数による 95%信頼区間の検定を行なった。図 5-11 にモルタル中の気泡の短距離範囲の L 関数の結果を示す。K 関数の $r=1\text{mm}$ までの短距離区間で示された凝集側の分布の偏差は、信頼区間の上限に接するか、その区間外になっている。また、 $0\sim0.2\text{mm}$ 程度までの短距離では逆に規則性側にプロットされ、特に横軸に切片を持つ分布となっている。後者については明らかに気泡がそれ自身の大きさを持つため、極めて近距離には他の粒子が存在できないためである。一方、 $0.2\sim0.3\text{mm}$ を超えた範囲にて、信頼区間外にプロットされる傾向は、空気量が増すと強く現れるようである。このような凝集性の分布は明らかに細骨材粒子が存在するためであり、図 5-7 (b) に示したように目視ではランダムのように見える分布も L 関数のシミュレーション結果と比較することによって適切に凝集側と判定できていることになる。

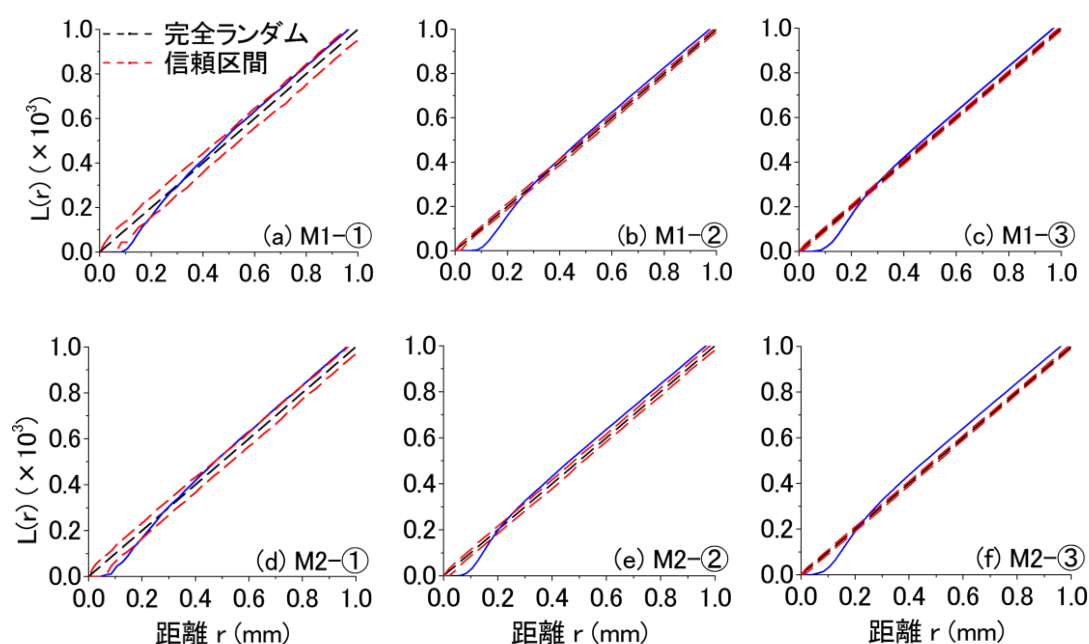


図 5-11 モルタル中の気泡の L 関数

図 5-12 にコンクリート中の気泡の K 関数を示す。図 5-10 (b) は、モルタル中の気泡の K 関数との比較のために距離 r の最大値を 1.0mm とした長さの結果を示す。コンクリートの場合は、いずれの配合についてもランダム分布の上方に K 関数が示され、明らかに凝集分布である。

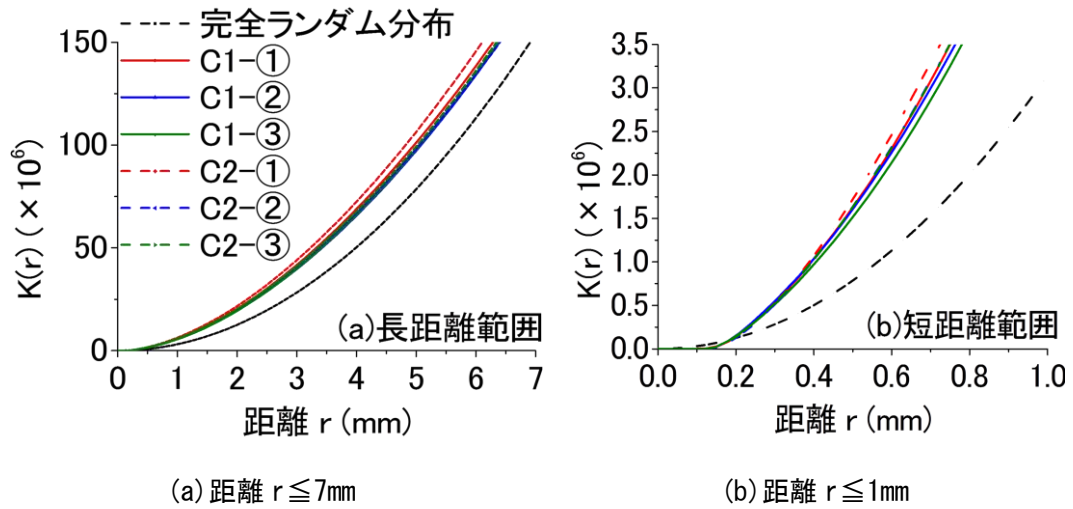


図 5-12 コンクリート中の気泡の K 関数

コンクリート中の気泡による L 関数の 95%信頼区間の結果を図 5-13 に示す. K 関数で示された凝集分布の傾向は L 関数の偏差となって現れ, モルタル供試体の場合よりも強い凝集性が認められる. モルタルとコンクリートにおいて帰無仮説であるランダム分布からの偏差に大きな差を生じているのは, 粗骨材の有無による.

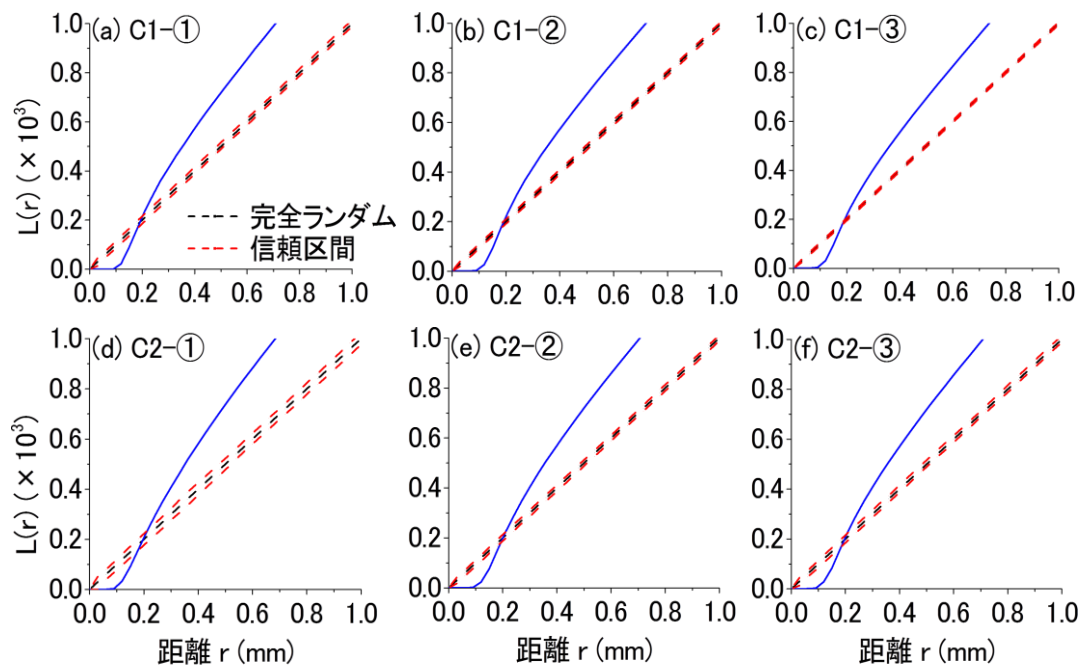


図 5-13 コンクリート中の気泡の L 関数

以上の結果より，全観察視野を参照空間とみなして K 関数や L 関数を用いれば，骨材によって気泡の分布領域が制限されて凝集性を示す程度が定量的に評価できると結論される．さらに，モルタルとコンクリートの L 関数の比較から，その凝集性が骨材によるものであることも明確に認識できるようである．

5.6.2 モルタルおよびコンクリート中の気泡の間引き過程

上述のように，モルタルやコンクリート中では全視野内にて気泡は凝集性の分布であると判断される．これは骨材を含めた領域を参照空間としているため，当然の帰結であるともいえる．しかし，その一方にてセメントペーストマトリックス内のみに着目した場合，気泡がどのような分布構造であるのか，前述の K 関数とその解析過程では判断することはできない．換言すれば，骨材粒子と気泡の空間配置に関して相互作用が存在するのかどうかは不明である．そこで，骨材粒子の気泡の空間分布構造への影響を評価するため，モルタルおよびコンクリート供試体中の気泡の空間分布と完全ランダム過程から骨材体積率に対応する点を除去したときの空間分布の比較を行なう．そして両者が一致したならば，モルタルやコンクリート中の気泡は単純なランダム分布の一部が観察されたとみなすことができ，骨材と気泡の間に相互作用は存在しないことになる．一方，両者が一致しない場合は，気泡は単純に存在可能領域に分布しているのではなく，骨材粒子による相互作用を受けた結果として，そのような分布形態になったと判断することになる．

図5-14に点密度が対応しているランダム点過程から点を消去した間引き過程の K 関数 K_{Mt} と，実際のモルタル気泡分布から求められる K 関数 K_{Mr} を示す．セメント：砂＝1：1のM1の系および，セメント：砂＝1：2のM2の系のいずれについても， K 関数の K_{Mt} と K_{Mr} は一致している．ランダムに発生させた点過程 X_b から細骨材の領域にある点を消去し残された点の点過程 X_s から求めた K 関数 K_{Mt} と実際の気泡分布から得られる K 関数 K_{Mr} が一致するということは，モルタル供試体のセメントペーストマトリックス相に存在する気泡分布はランダム分布であり，本来存在すべき気泡が，細骨材により間引きされただけということになる．すなわち，モルタル中の気泡は他の気泡の存在や骨材の影響は受けていないことになる．また，細骨材量の違うM1とM2の系を比較すると，気泡の存在領域の大きさに相違はあるものの気泡の分布特性には影響を与えないことを示す結果となった．以上より，モルタル供試体の全体を観察領域とした場合の気泡の分布構造は凝集性を示す(図5-11)が，気泡の存在するセメントペースト領域

を対象領域とした場合の気泡の分布構造はランダム分布になっている(図 5-13)ことが示されたことになる。

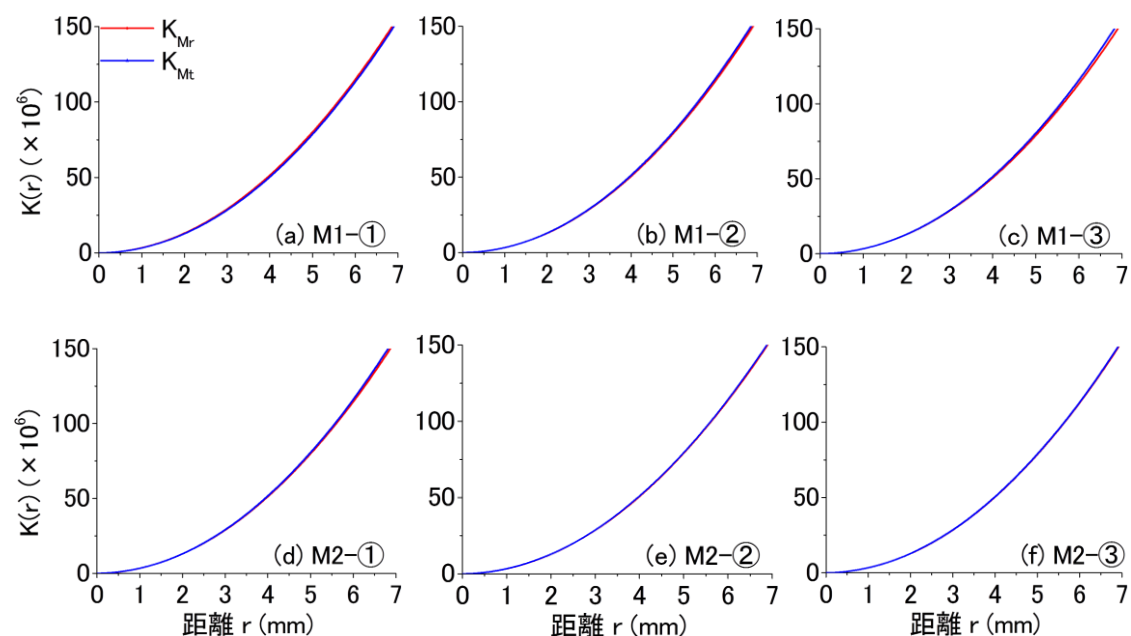


図 5-14 間引き過程の K 関数と実際のモルタル中の気泡の K 関数の比較

図 5-15 にコンクリート中の気泡の間引き過程の K 関数 K_{Ct} と実際の気泡分布から求められる K 関数 K_{Cr} を示す。この場合もいずれの配合においても、K 関数 K_{Ct} と K 関数 K_{Cr} は、ほぼ一致する結果となった。モルタル供試体と同様に、気泡の存在領域に影響を与える骨材量の違う C1 と C2 の系を比較した場合についても、骨材の存在は気泡の存在領域を単純に消去する役割しか果たしていない。すなわち、コンクリート供試体においても、セメントペーストマトリックス相に存在する気泡は、他の気泡による影響は受けていないことが示された。

セメントペースト供試体での気泡の分布構造は、骨材が存在しておらずランダム分布であった(図 4-8)。モルタルおよびコンクリート供試体では、骨材を含有するために、気泡の分布構造は骨材による気泡の存在領域の制限から凝集性を示す結果となるが、気泡の存在できるセメントペーストマトリックス内で考えるなら、気泡のランダム性は保たれ気泡同士の相互作用が無いことになる。言い換えると、モルタルやコンクリート中の気泡分布に関してはランダム分布という帰無仮説は棄却されないことになり、このことは後述する。二時点過程としてのシミュレーションにおいて重要な意味を持つ。

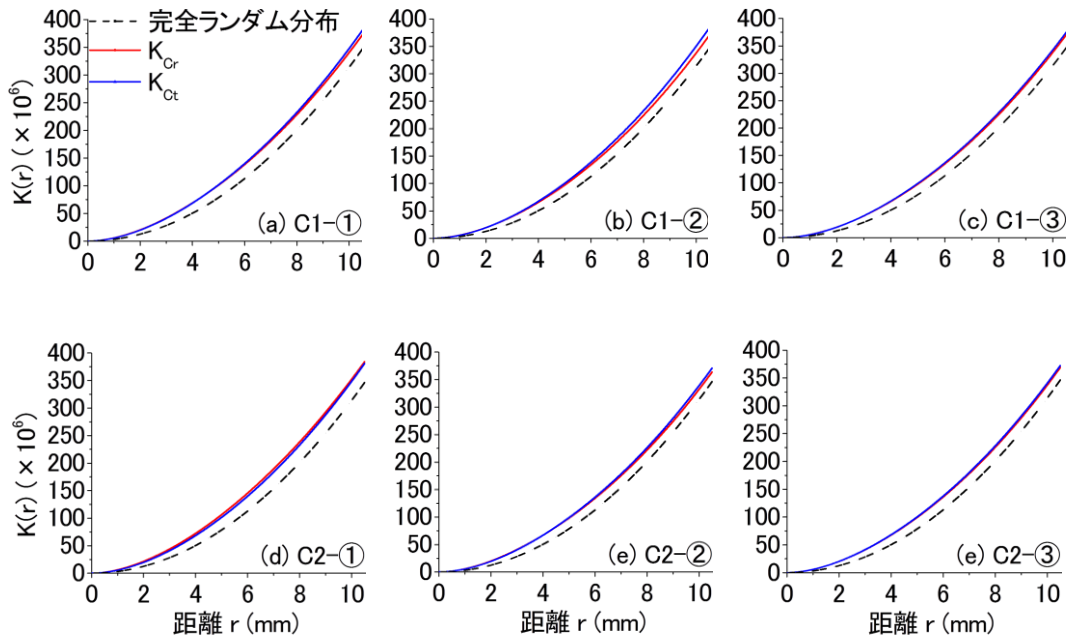


図 5-15 間引き過程の K 関数と実際のコンクリート中の気泡の K 関数の比較

5.7 モルタルおよびコンクリート中の気泡の距離特性

図 5-16 にモルタル中の気泡の最近傍距離関数を示す。セメント：砂＝1：1 の M1 の系およびセメント：砂＝1：2 の M2 の系のいずれの場合についても，空気量が大きくなるとともに最近傍距離関数の勾配が大きくなる。また，最近傍距離関数の勾配が大きくなるとともに， $G(r)=1.0$ となる収束距離は小さくなる。これらの傾向は，セメントペースト供試体と同様であり，空気量の増加により気泡の個数が多くなり，気泡相互の距離間隔が小さくなることを示している。

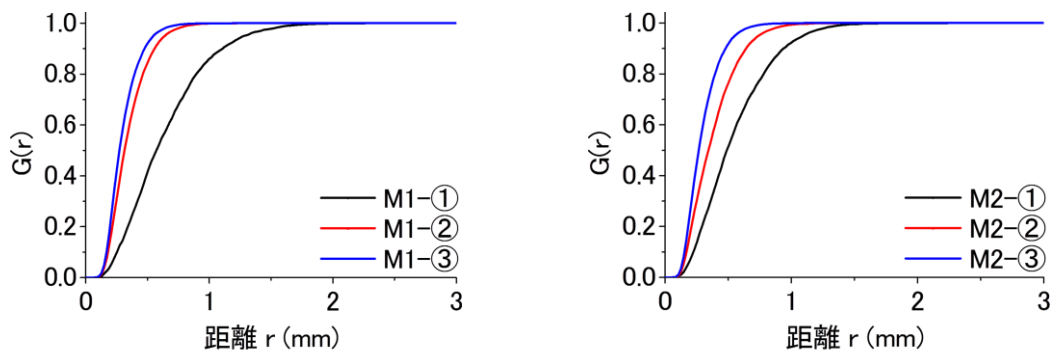


図 5-16 モルタル中の気泡の最近傍距離関数

図 5-17 にコンクリート中の気泡の最近傍距離関数を示す。W/C=0.40 の C1 の系および W/C=0.55 の C2 の系のいずれの場合についても、空気量の増加により気泡の点個数が増え、最近傍距離関数の勾配が大きくなる。気泡の点間距離が短縮されたことによる結果である。また、同様の理由により最近傍距離関数の収束距離も小さくなる。これらの傾向は、セメントペースト、モルタルおよびコンクリート供試体のいずれについても出現する特徴であり、骨材の有無の違いでは無く気泡点間の距離に依存したものである。

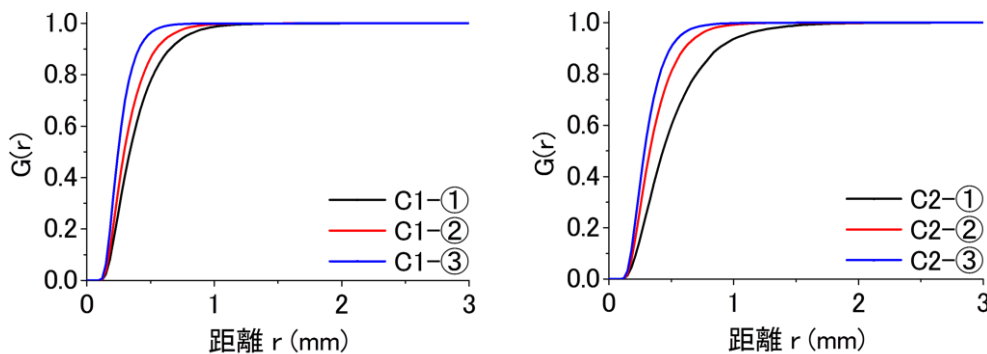


図 5-17 コンクリート中の気泡の最近傍距離関数

図 5-18 に気泡点密度がほぼ等しいモルタルとコンクリート中の気泡の最近傍距離関数の比較結果を示す。モルタル供試体は M1-①であり点密度が 0.60，コンクリート供試体は C2-①であり点密度が 0.58 である。気泡の平均気泡径も大差が無く，M1-①が $144\mu\text{m}$ ，C2-①が $131\mu\text{m}$ である。モルタル供試体およびコンクリート供試体とも，点密度と平均気泡径が同等であることから気泡の分布構造は類似していると考えられる。最近傍距離関数に現れた違いは，両供試体の相違点である粗骨材による影響といえる。モルタルに比べてコンクリートの最近傍距離関数の勾配は大きく，気泡の凝集性が示されている。コンクリート中の気泡は，粗骨材の存在により気泡の存在領域が小さくなり，凝集分布の傾向を示したと考えられる。これは表 5-5 の骨材体積率にも現れている。モルタル供試体の M1-①の骨材体積率の配合値は 34.4%であり，コンクリート供試体の C2-②では 70.7%と約 2 倍の骨材体積率である。骨材体積が大きいことは，気泡の存在領域が小さいということと同意であり，図 5-17 に示された最近傍距離関数の結果とも一致している。

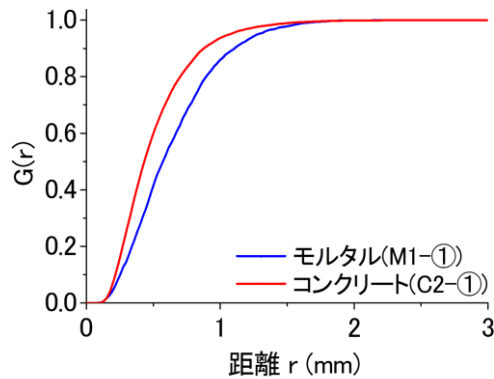


図 5-17 気泡点密度がほぼ等しいコンクリートとモルタル中の気泡の最近傍距離関数

以上より，セメントペースト中の気泡の分布は，骨材による制限が無い場合ランダム分布になり，モルタルおよびコンクリート供試体の場合では，間引き過程との比較により，セメントペーストマトリックス相での気泡のランダム分布が確認された．また，モルタルおよびコンクリートの骨材が存在する観察領域では，気泡の存在領域に制限が発生するために凝集分布の傾向を示す．また，凝集分布の傾向は，粗骨材の存在するコンクリート供試体の方がより強く現れる結果となった．気泡の凝集性を示す分布特性は， K 関数および L 関数の 95%信頼区間の検証においても同様の結果であり，セメントペーストマトリックス相に存在する気泡に対して点過程統計量を用いると分布パターンに加えて距離に関する情報も得られたことになる．

5.8 結論

モルタルおよびコンクリート中の気泡分布に点過程の考え方を導入し、気泡の基本特性の評価を行った。本章で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 2 点相関関数から得られる構造距離の結果より、モルタルおよびコンクリート中の気泡構造の評価に必要な観察領域は、 $12.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ 以上と $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 以上となった。本研究で用いた観察領域はモルタル供試体で $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ であり、コンクリート供試体では $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ としていることから、気泡の分布構造評価には十分な観察領域であると考えられる。
- (2) モルタルおよびコンクリート中の気泡から得られる 2 値画像からは、空気量の変化による気泡の分布特性が目視でも確認できる。また、点過程統計量を用いて気泡構造を点として表示した場合においても、気泡の分布構造を直感的に理解できる。コンクリート中の点過程の画像からは、粗骨材の存在により点として表示される気泡の分布構造に密な部分と疎な部分が見られる。
- (3) フレッシュ時の空気量および硬化後の気泡体積率の増加とともに気泡点密度は増加し、直線で近似できる正の相関関係が見られる。また、空気量と気泡点密度の相関関係に現れる関数の傾きの割合には、骨材の体積率が影響していると考えられる。
- (4) K 関数および L 関数の 95%信頼区間の検証から、モルタルおよびコンクリート中の気泡の分布構造は、骨材の存在により凝集分布の傾向を示す。しかし、間引き過程の検証から、セメントペーストマトリックス相に着目した場合の気泡の分布特性はランダム分布となる。
- (5) モルタルおよびコンクリート中の気泡構造の最近傍距離関数は、空気量の増加とともに、最近傍距離関数の勾配が大きくなり、 $G(r)=1.0$ となる収束距離も小さくなる。また、モルタルとコンクリートについて気泡の点密度がほぼ等しい供試体を比較すると、コンクリート供試体の方が最近傍距離関数の勾配は大きくなる。これは粗骨材により気泡の存在領域がより大きく制限されたためと考えられる。

参考文献

- 1) 林大介, 坂田昇, 中島賢二郎, 奥紀仁, 関博: コンクリートの凍害劣化に関数研究, 土木学会論文集, Vol.64, No.1, pp142-159, 2008.
- 2) A. M. Neville: ネビルのコンクリートバイブル、技報堂出版株式会社, 2004.
- 3) ASTM C457: Standard Recommended Practice for Microscopical Determination of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, ASTM Standards, Part 14.
- 4) 笠井芳夫: コンクリート総覧、技術書院, 1998.
- 5) 高橋和雄: コンクリート製品の振動による空気量の減少について、農業土木学会論文集、第143号、pp.69-77, 1989.
- 6) T. C. Powers: The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949.
- 7) 坂田昇ほか: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察、コンクリート工学論文集、Vol.23、No.1、pp.35-47, 2012.
- 8) K. A. Snyder: A Numerical Test of Air Void Spacing Equations, Advanced Cement Based Materials, Vol.8, No.1, pp.28-44, 1998.
- 9) B. Lu and S. Torquato: Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle systems, Physical Review A, Vol.45, No.8, pp.5530-5544, 1995.
- 10) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 吉川峻生: 気泡の空間分布構造の距離に関する特微量と気泡間隔係数との対応, コンクリート年次論文集, Vol.37, No.1, pp841-846, 2015.
- 11) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一, 吉川峻生: 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp493-498, 2015.
- 12) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一: モルタル中の気泡の点過程としての特徴と間引きシミュレーションによる空間分布の再現, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp146-153, 2015.
- 13) 川村満紀: 土木材料学、森北出版株式会社, 1996.
- 14) コンクリート委員会規準関連小委員会: コンクリート標準示方書, 土木学会, 2013.
- 15) JIS A5308: レディーミクスコンクリート, 日本工業規格, 2003.
- 16) 国土交通省住宅局住宅生産課: 日本住宅性能表示基準・評価方法基準技術解説, 工学図書, 2014.

第5章

- 17) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：公共建築工事標準仕様書，2013.
- 18) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，丸善出版，2015.
- 19) Garboczi,E.j. and Bentz,D.P.：The effect of statistical fluctuation,finite size error,and digital resolution on the phase percolation and transport properties of the NIST cement hydration model,Cement and Concrete Research,Vol.31,No.1,pp.1501-1514,2001.
- 20) 勝畑敏幸，古賀裕久，渡辺博志，渡邊健治：コンクリートの施工がエンタレインドエアに及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.68，pp.291-298，2014.

第6章

点過程から得られる距離に関する気泡間隔特性値と
耐凍害評価との対応

6.1 序論

コンクリートに含まれるべき空気量は JIS A5308¹⁾に規定されており、基準値が 4.5% であり、許容差を±1.5%としている。コンクリートの構成要素を、セメント、水、骨材、空気とした場合、空気量は最も小さい体積率である。しかし、コンクリート中の空気が物性に与える影響は小さくはない。フレッシュ時ではスランプやワーカビリティ、硬化後のコンクリートでは、強度や耐凍害性に影響を与える。空気量を適正量確保することは、耐凍害性には有効であるが、空気量が多くなりすぎると強度の低下を招くこととなる。一般的には、空気量 1%の増加によって、圧縮強度は 4～6%低減する²⁾。よって、耐凍害性が求められる場合、コンクリートに含有されるべき空気量は 4～6%程度を推奨している。この空気量は、一般には JIS A 1128 に規定される「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に従いその総量を測定している。しかし、耐凍害性の評価においては空気量の総量だけでは十分でなく、より詳細に耐凍害性を考える場合には、硬化コンクリート中の気泡の分布構造や気泡間の距離が重要な意味を持つ。

Powers³⁾により提案された耐凍害性の指標である気泡間隔係数は、凍害の発生したコンクリートと気泡間隔係数のパラメーターとの間に相関性があることが確認された結果、気泡間隔係数を $250\mu\text{m}$ 以下にすることにより、耐凍害性を有していると判断している⁴⁾。1949年に気泡間隔係数の考えが発表されて以来、約 60 年以上も用いられてきているが、実際には気泡間隔係数はコンクリートに配合されている骨材による影響を考慮せず、セメントペースト内に存在する気泡を等間隔で配置した仮想の空間を想定して求められている。また、気泡間隔係数の測定では、顕微鏡観察を基本としているため、測定にかかる労力が大きくなり、人為的な誤差の発生も考えられる。これに対して、近年では別の測定手法で気泡間隔係数を求めようとする研究も活発になされている。例えば、濱ら⁵⁾は浮力法によって簡便に気泡間隔係数を求めている。また、杉山ら⁶⁾は X 線 CT 法によって 3 次元空隙画像を取得し、より詳細に気泡間隔係数を求める手法を提案している。以上の研究はこれまで多くの研究報告がなされ、信頼に足るパラメーターである気泡間隔係数を簡便に評価することを目的としているが、専用の測定装置が必要となり、広く普及するにいたっていない。

現在、気泡間隔係数の測定の問題点として、測定について多大な労力が必要であり、ASTM C457 に規定されている方法も含め、簡便な装置を使用しただちに求められないことが挙げられる。また、気泡間隔係数自体が、コンクリート中に存在する骨材の影響を反映させた気泡間の距離の特性値でないことも再考の余地がある。本研究ではこれまでにセメントペースト中の気泡に関して、気泡分布の基本的な特徴を確認した^{7),8)}。続

いてモルタルおよびコンクリート供試体について、同様に市販のフラットベッドスキャナを用いて気泡の2値画像を取得し、気泡の分布特性および距離に関する特性値の考察を行なった。特に、モルタルやコンクリート供試体については、骨材の影響を反映した気泡の分布特性が凝集側になることを明らかにした。また、最近傍距離関数では、骨材の影響により気泡の点間距離が短縮され、最近傍距離関数の勾配が大きくなること、および、収束距離が点間距離に依存していることを確認している。骨材による分布制限を受けた気泡の距離特性と従来まで用いられてきた気泡間隔係数を比較することにより、コンクリート中の気泡に対して、点過程を導入することの有用性を検証できることになる。また、コンクリート中にて気泡が存在しうる領域はセメントペーストマトリックス相であり、この相の形状や大きさは当然のことながら骨材量や骨材寸法の影響を受ける。よって、実際のコンクリート中の気泡の距離特性値を求めようとするならば、骨材による存在の制限と空間分布のランダム性を考慮する必要がある。これらのことを比較的簡単に行える手段が点過程であると考えられる。

本章においては、気泡の距離に関する特徴量として、最近傍距離関数から得られるメディアン距離を指標として採用し、従来までの気泡間隔係数との比較から、気泡の空間分布構造の距離に関する考察を行なう。低倍率の画像データから得られる最近傍距離関数のメディアン距離から気泡の平均気泡径の1/2を差し引き、その距離に関する特徴量を‘気泡間隔特性値’と定義する。その気泡間隔特性値を、骨材の存在しないセメントペーストだけでは無く、骨材の含有により気泡の存在領域に制限を有するモルタルおよびコンクリートにも適用し^{9)・10)}、その有用性を評価した。また、気泡の画像データから得られる特徴量と凍害性試験であるスケーリング試験との対応性を明らかにし、気泡の画像データから得られる2値画像を基本とした点過程による評価が耐凍害性評価の手段となりうることを示す。

6.2 メディアン距離

図6-1に最近傍距離関数から求められるメディアン距離 R_{50} と点密度の関係を示す。第3章で示したとおり、メディアン距離とは、最近傍距離関数での第2四分位点であり、中央値ともいう^{11)・12)}。セメントペースト、モルタル、コンクリート供試体のいずれの場合についても、点密度が大きくなるとメディアン距離が小さくなる相関性があり、その関数は曲線で表される結果となる。フレッシュ時の空気量および硬化後の気泡体積率の増加により、4章、5章で述べたように、気泡の点密度が大きくなる。また、空気量

の増加にともなう点密度の増加により、最近傍距離関数が確率 1.0 に収束する距離が小さくなり、最近傍距離関数の勾配が大きくなる傾向も得られている(図 4-9, 5-15, 5-16). 図 6-1 においても気泡の点密度の増加により気泡の点間隔距離の代表値であるメディアン距離 R_{50} が減少していくのは、最近傍距離関数の傾向と矛盾していない。また、いずれの供試体についても、点密度がある程度大きくなると、メディアン距離の減少割合が小さくなっている。これは、気泡個数の増加により気泡同士の接触や合一の現象が現れ、気泡間隔の距離特性に空気量の増大の影響が現れにくいことを示している。

図 6-1 には、骨材による気泡の距離特性への影響の結果も示されている。セメントペースト、モルタルおよびコンクリート供試体において、点密度 1.5 の場合のメディアン距離は、セメントペーストが約 $400\ \mu\text{m}$ 、モルタルが約 $370\ \mu\text{m}$ 、コンクリートが約 $300\ \mu\text{m}$ となり、コンクリートが最も小さな値となる。気泡の分布構造は、各供試体により特性が異なっていて、セメントペースト供試体では、気泡の空間構造の特性はランダム分布となり、モルタル供試体では細骨材を含有することで K 関数および L 関数の結果より凝集分布の傾向を示した(図 5-10, 5-11)。さらに、コンクリート供試体では粗骨材の存在により、気泡の存在できるセメントペーストマトリックス相の分布にさらなる制限が加わり、観察視野全体を参照空間とみなすならば、気泡の空間分布構造は強い凝集性を示していた(図 5-12, 5-13)。ある点密度から得られる各供試体のメディアン距離に違いが発生した原因は、骨材の存在の有無や骨材の大きさによる気泡の分布特性への影響であり、気泡の空間構造の相違が距離特性に反映されたものと考えられる。

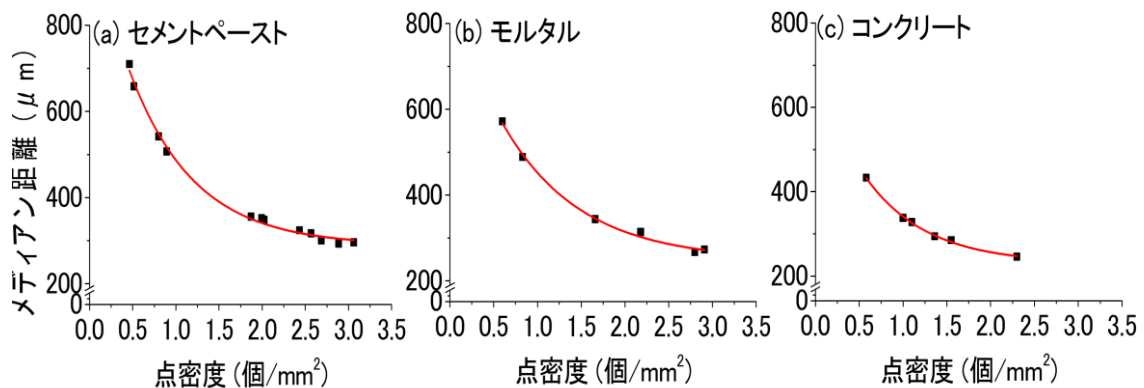


図 6-1 最近傍距離関数から求めたメディアン距離と気泡点密度の関係

以上より、最近傍距離関数から得られる第 2 四分位点であるメディアン距離 R_{50} は、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートにおける気泡の空間構造分布の相違を反映する距離特性値とみなせるようである。

気泡同士の接触や合一の現象により、気泡間隔の距離特性の変化割合が小さくなる傾向は、硬化後の気泡体積率と点密度の関係からも理解される。コンクリートのフレッシュ特性と画像から得られた気泡特性の結果を、表 6-1 として再掲する。また、図 6-2 に、最近傍距離関数の結果を再掲する。C2-②と C2-③では硬化後の気泡体積率で約 2 倍の相違がある(C2-②=3.8%, C2-③=7.8%)。一方、点密度の増加割合は、約 1.4 倍にとどまる(C2-②=1.10, C2-③=1.55)。C2-②と C2-③では硬化後の気泡体積率の増加が直接的に点密度の増加として現れていないことになる。このような増加割合の相違は、気泡の 2 値画像でも確認でき、気泡の点密度の増大により気泡の接触および合一現象が観察されている(図 5-5)。図 6-2 の空気量の異なるコンクリート C2-②と C2-③の最近傍距離関数を比較すると両者の関数の勾配は同程度であり、収束距離にも大きな差は認められない。

表 6-1 コンクリートのフレッシュ特性と画像から得られた気泡特性

W/C	0.40			0.55		
配合名	コンクリート(C1)			コンクリート(C2)		
	①	②	③	①	②	③
点密度 (個/mm ²)	1.00	1.36	2.30	0.58	1.10	1.55
平均気泡径 (μ m)	124	131	133	131	156	171
フレッシュ時の空気量(%)	2.8	5.0	7.2	1.7	4.0	9.0
硬化後の気泡体積率(%)	2.0	3.0	5.2	1.6	3.9	7.8
空気量1%当たりの点密度	0.49	0.46	0.44	0.38	0.28	0.20
気泡残存率(%)	73.2	59.7	72.2	91.5	98.6	86.7
スランプ (cm)	13.0	17.0	16.0	17.0	16.5	17.0

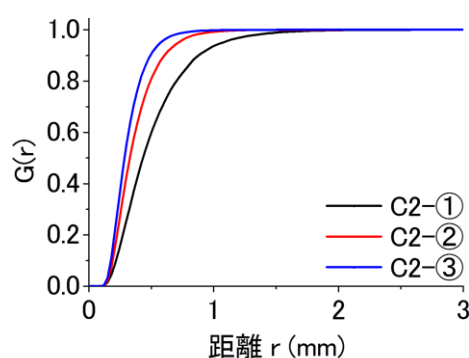


図 6-2 コンクリート中の気泡の最近傍距離関数 (C2 の系)

以上より、気泡の距離特性は、フレッシュ時の空気量や硬化後の気泡体積率よりも気泡の点密度に対して相関性が有すると考えられる。現在のコンクリートの受け入れ、打ち込み工程では、フレッシュ時の空気量を JIS A 1128 に準拠し測定しているが、この方法はフレッシュ時の空気量の総量の測定を行なうのみである。しかし、上述のようにコンクリート中の気泡構造は単純に空気量と相関するわけではないので、空気量総量の測定だけでは無く、気泡の距離特性を把握することは重要であると考えられる。

6.3 気泡間隔特性値の定義

従来のコンクリートの耐凍害性に関する多くの研究では Powers によって提案された気泡間隔係数 L を評価パラメーターと考え、気泡間隔係数と耐凍害性の関係を明らかにしてきた^{13), 14), 15)}。例えば林ら¹⁶⁾の研究では、硬化後のコンクリートの空気量を 3.0% 以上とし、気泡間隔係数を $250\mu\text{m}$ 以下にすれば、長期間にわたり構造物の供用期間を延ばせることを明らかにしている。

気泡間隔係数は、セメントペースト中にコンクリート中の気泡が全て同一径の球体で存在し、その単一寸法球が規則的に立方格子中に規則配置されている状態を仮定している。立方体の対角線の長さの $1/2$ から気泡半径を引くことにより、気泡間隔係数は求められる。つまり気泡が周囲のセメントペーストを凍害から保護していると考えたとき、最寄の気泡から最遠点の距離を考え、ここが保護に関して一番不利な場所となる。この部分がある一定の距離以下になるようにすれば、コンクリートは耐凍害性を有すると判断していることになり、いわゆる保護領域という考え方に基づいて空気空間構造を評価している¹⁷⁾。図 6-3 に気泡間隔係数で仮定された気泡の空間分布構造の模式図を示す。

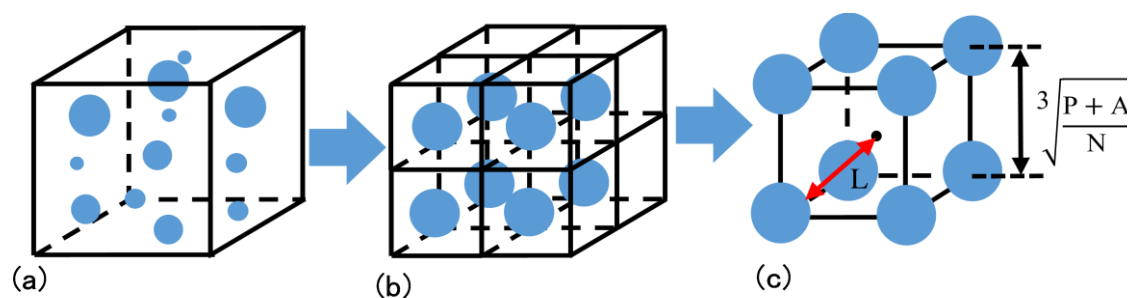


図 6-3 Powers の気泡間隔係数を求めるための気泡配置

気泡を点過程とした場合に定義したメディアン距離は、気泡間隔係数同様、気泡間の距離を表すパラメータである。また、メディアン距離は、気泡の空間分布に関しては何ら仮定を行わず確率論に基づいて気泡の空間分布構造を代表させた特性値である。しかし、ともに距離に着目していることから、両者の対応について検討を考えてみる。ただし、メディアン距離は気泡を点で表したときの点間距離であるため、気泡の大きさ、いわゆる気泡径を考慮していないことに留意しなければならない。そこで、気泡間隔係数との類似性を念頭において、点過程の距離特性に気泡の平均気泡径を考慮することにし、メディアン距離から平均気泡径の 1/2 を差し引きし、この値を気泡間隔特性値 L' として定義している。気泡間隔特性値 L' を式(6-2)に示し、図 6-4 に気泡間隔特性値 L' の概念図を示す。

$$L' = R_{50} - D/2 \quad (6-2)$$

ここに、 R_{50} ：メディアン距離

D ：平均気泡径

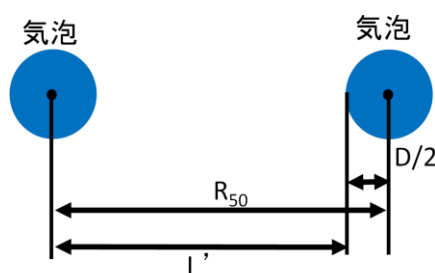
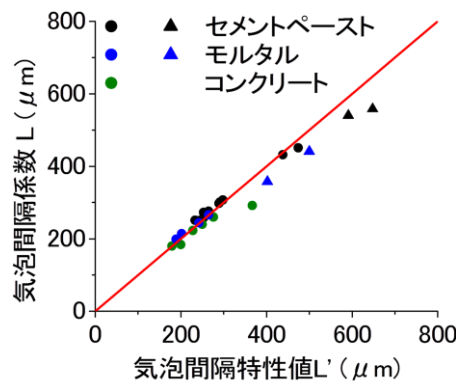


図 6-4 メディアン距離と気泡間距離特性の概念図

図 6-5 には、セメントペースト、モルタルおよびコンクリート供試体について、式(6-2)より求めた気泡間隔特性値 L' と式(2-2)により求めた気泡間隔係数の関係を示す。また、表 6-2 には気泡間隔係数 L と気泡間隔係数 L' を一覧にして示す。図 6-5 より気泡間隔係数 L と気泡間隔特性値 L' の両者には直線で近似できる高い相関性があり、両者の値も近似している。図 6-5 ではエントラップトエアのみの供試体を三角(Δ)で示し、エントレインドエアの連行されている供試体を丸($\circ$)で示している。エントラップトエアのみの供試体(Δ)では、図中の $L=L'$ の直線からの乖離が見られるが、エントレインドエアが連行されている供試体($\circ$)では、多くの供試体で $L=L'$ の直線の近くにてプロットされている。

図 6-5 気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 L の関係

△：エントラップトエア，○：エントレインドエア

セメントペースト供試体の CP1-①，CP1-②および CP2-①では，気泡間隔特性値と気泡間隔係数との間で $L=L'$ の直線からの乖離が見られる．CP1-①と CP2-①は混和剤を添加していないエントラップトエアのみの供試体であり，CP1-②では AE 減水剤の添加量が少量でエントレインドエアの量は小さいと考えられる．セメントペースト供試体ではエントレインドエアの連行が無い場合や，非常に少ない場合については，正の相関性がやや弱くなる結果となった．また，エントレインドエアが連行されているものの，フレッシュ時の空気量および硬化後の気泡体積率の大きな CP1-⑦と CP-⑤についても，気泡間隔係数と気泡間隔特性値との差がやや大きくなる．これらの供試体は 2 値画像より気泡同士の接触や合一の現象が現れていた供試体である．気泡同士の接触や合一が発生した場合は，空気量の増加による気泡の点密度の増加には直接的には反映されにくくなり，合わせて気泡間隔の距離特性にも変化が現れにくくなる．気泡間隔特性値 L' は，空気量の増加にともない点密度が大きくなることで，気泡間距離が小さくなるため，空気量の増加とは負の相関性があるが，気泡の接触および合一の現象によりその相関性が弱くなったと考えられる．そのため，CP1-⑦および CP2-⑤については，気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 L との間で差が生じたと考えられる．

モルタル供試体についても AE 剤を添加していない M1-①と M2-①の供試体では，気泡間隔特性値と気泡間隔係数との間で若干の差が生じている．この結果は，セメントペースト供試体と同様である．モルタル供試体についてもエントレインドエアを含有している供試体については，気泡間隔特性値と気泡間隔係数の値がほぼ同程度となる正の相関関係が現れている．

コンクリート供試体について，AE 剤を添加せず AE 減水剤のみの配合では，気泡間隔特性値と気泡間隔係数の差が $75 \mu\text{m}$ となり，エントラップトエアの含有が多いと考

えられる配合についてはやや相関性が弱くなっている。一方、エントレインドエアが多く存在する供試体では、正の相関関係は保たれている。

表 6-2 気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 L の一覧

セメントペースト												
	CP1							CP2				
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	①	②	③	④	⑤
$L' (\mu m)$	648	474	438	289	265	243	233	591	298	291	253	253
$L (\mu m)$	558	451	432	298	276	250	251	540	307	301	258	273
$ L'-L $	90	24	6	9	11	7	18	51	9	10	6	21
モルタル						コンクリート						
	M1			M2			C1			C2		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
$L' (\mu m)$	500	242	202	402	265	189	276	228	179	367	250	200
$L (\mu m)$	441	244	214	358	266	199	260	223	180	292	240	184
$ L'-L $	59	2	12	44	1	10	15	4	1	75	10	16

以上の結果より、セメントペースト、モルタルおよびコンクリート供試体のいずれについても、気泡間隔特性値と気泡間隔係数との間には直線で近似できるような正の相関性があり、両者の値はほぼ同等と見なせる結果となった。またエントラップトエアが多く存在する場合は、相関性がやや弱くなるが、エントレインドエアを連行している供試体については、非常に強い相関性が確認された。ただし、非常に空気量が多く気泡同士の接触や合一の影響が現れる場合には、両指標の値に若干の差が生じることになった。

一般的に用いられているコンクリートでは、AE 減水剤や高性能 AE 減水剤が用いられており、エントレインドエアを多く連行している。また、実際に打設されるコンクリートは JIS A5308 に規定される空気量の許容差が遵守され、 $4.5\% \pm 1.5\%$ の範囲になっている。本研究の供試体において、空気量の上限值である 6% では、気泡の接触および合一の現象の頻度は小さく、気泡間隔特性値と気泡間隔係数との相関関係は保たれている。図 6-7 に示された気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 L の正の相関関係をみると、実務で用いるコンクリートの配合において、 $L' \approx L$ と考えても支障が無いと判断できるように思われる。現在にいたるまで多くの労力により測定されてきた気泡間隔係数であるが、本研究で用いた気泡の 2 値画像から取得できる画像データを利用し、点過程統計量を導入することによって、簡便に気泡間隔係数を含め、空間分布構造の特性値が得られると考えられる。

6.4 気泡分布構造としての気泡間隔特性値と気泡間隔係数との対応

セメントペースト、モルタルおよびコンクリート供試体において、セメントペーストマトリックス相に存在する気泡の空間分布構造はランダム分布であり、気泡の点間距離の特性を示すパラメーターとしてメディアン距離を用いてきた。気泡を再現する点の配置がランダム分布の場合、最近傍距離関数 $G(r)$ は、式(6-5)のように示される。

$$G(r)=1-\exp(-\lambda\pi r^2) \quad (6-5)$$

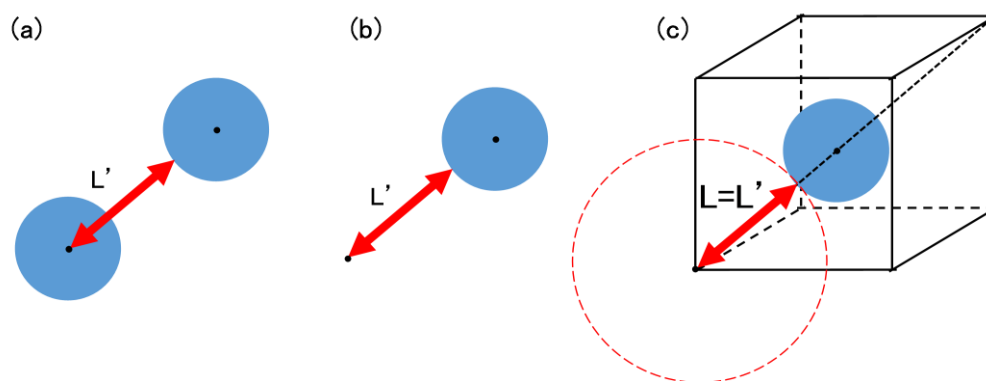
また、気泡間隔係数と類似の視点に立って定義される接触分布関数 $F(r)$ についても、点の配置がランダム分布である場合、式(6-6)のように示される。

$$F(r)=1-\exp(-\lambda\pi r^2) \quad (6-6)$$

すなわち、点の配置がランダム分布である場合、2つの関数は一致する。

接触分布関数では空間内に点過程の点では無い任意の位置に点を考え、この点から最寄りの点過程の点までの距離を表す。岩崎¹⁸⁾の確率論に基づいた研究によれば、硬化コンクリート中の気泡の特性値を得るためには、600個程度の気泡の観察が必要とされている。本研究の画像データから得られる気泡個数のデータは、コンクリートのC2-①の最も点密度が小さい供試体で、約2100個であり十分な気泡が観察されていると考えられる。

気泡間隔係数は、同じ大きさの立方格子内に配置された気泡に対して、立方体のある格子点からの対角線の1/2から気泡の半径を指し引いた距離である。気泡間隔係数 L を求める際に基点となる立方体の格子点を、接触分布関数の任意点と考えれば、最近傍距離関数から得られる距離特性と同様ということになる。この位置的關係を、図6-6に示す。

図 6-6 気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 L の位置対応

気泡間隔特性値 L' を求める式(6-2)では、最近傍距離関数から求められるメディアン距離から平均気泡径の $1/2$ を差し引いており(図 6-6(a)), 気泡間隔係数 L との位置関係(図 6-6(c))を比較すると、メディアン距離 $\equiv$ 立方格子の対角線の $1/2$ であり、そこから気泡の平均気泡径の $1/2$ (半径)を差し引くことになる。気泡の空間分布構造の最近傍距離関数から得られる中央値であるメディアン距離が、規則的に配置された同じ大きさの立方格子の対角線の $1/2$ と非常に近い値を示し、気泡画像データから得られる平均気泡径が、気泡間隔係数で仮定した同じ大きさの気泡の球径が同等となることから、気泡間隔特性値 $L' \equiv$ 気泡間隔係数 L となったと考えられる。

よって先に定義した気泡間隔特性値は、耐凍害性の評価において指標として用いられてきた気泡間隔係数の代用として用いることが可能であると考えられる。

6.5 気泡から得られる特徴量とスケーリングとの対応

表 6-2 に気泡間隔係数 L と本研究で定義した気泡間隔特性値 L' に示している。これら気泡の距離に関する特性値と耐凍害性の関係を確認するため、スケーリングの試験を行った。

図 6-7 にスケーリング試験の結果を示す。 $W/C=0.40$ の C1 の系および $W/C=0.55$ の C2 の系のいずれについても、フレッシュ時の空気量が 3.0%以下であり、エントレインドエアの連行が少ない C1-①と C2-①では、スケーリング量が大きくなっている。C1-①と C2-①の比較では、水セメント比が小さい($W/C=0.40$)C1-①のスケーリング量が、C2-①よりも小さくなった。硬化後の気泡体積率は 2.0%と 1.6%であり大きな相違はない。C1-①の方が、水セメント比が小さくより高強度であるため、スケーリング量に違いが現れ

たと考えられる。その他の供試体については、水セメント比や空気量の相違があるものの、スケーリング量には相違は現れていない。

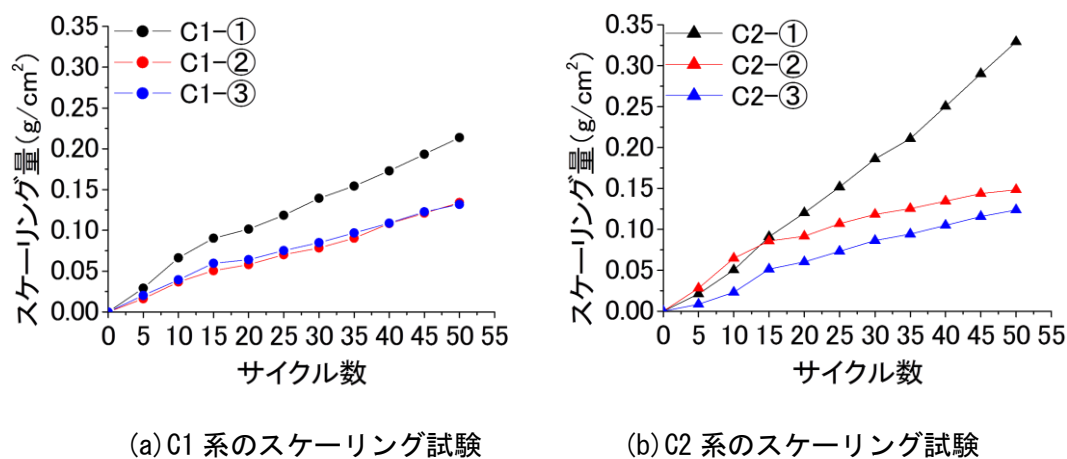


図 6-7 コンクリートのスケーリング試験の結果

図 6-8 には、50 サイクル時のコンクリートのスケーリング試験面の写真を示す。フレッシュ時の空気量が 3.0% よりも小さい C1-① と C2-① の供試体では、試験面の劣化が著しく、部分的に粗骨材も見えており、ポップアップを生じている。C1-① と C2-① の比較をすると、C1-① の劣化では小さな剥離が多数見られるが、C2-① については、面積が大きくて深い剥離が発生している。空気量の大きなその他の供試体については、C1 と C2 の系で明確な相違は目視では確認されなかった。ASTM C672 の評価基準では、スケーリングの外観からコンクリートの劣化度を示している¹⁹⁾ (図 6-9)。はく離の比較的多い C1-① と C2-① の劣化は、劣化度 3 程度であり、C1-②, C1-③, C2-②, C2-③ については、劣化度 1 程度と考えられる。

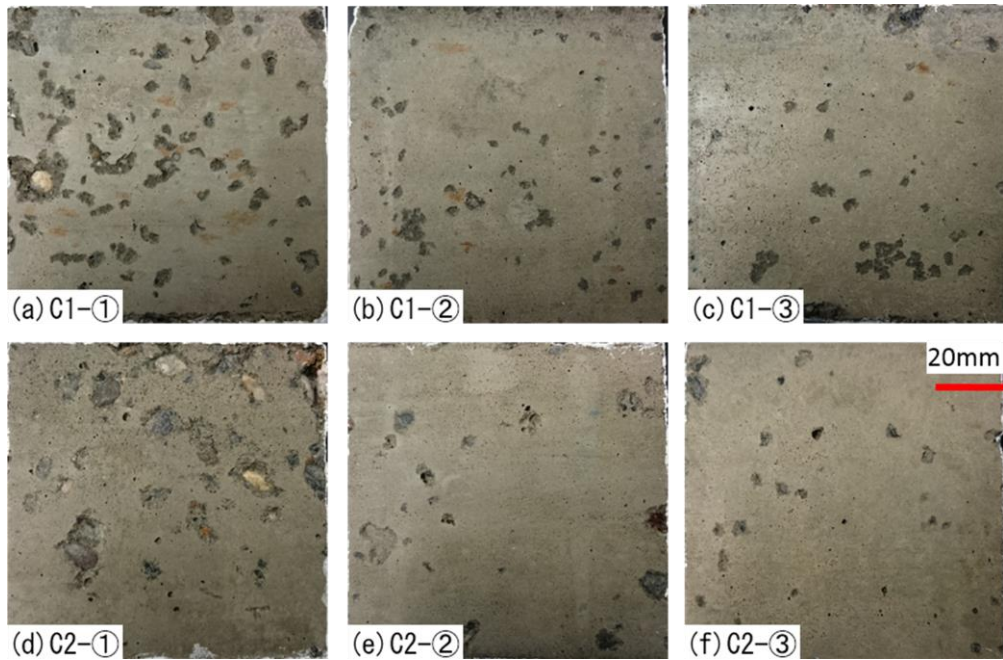


図 6-8 50 サイクル時のコンクリートのスケーリング試験面

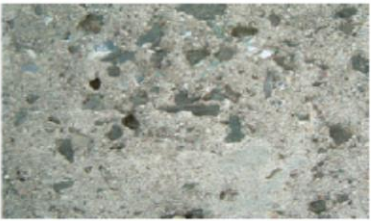
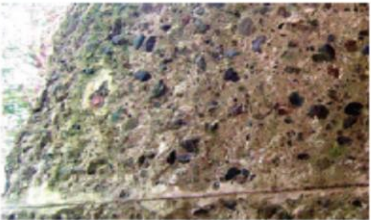
点	劣化事例写真	点	劣化事例写真
0	 なし	1	 粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離
2	 評価1と評価3の中間程度の剥離	3	 粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	 評価3と評価5の中間程度の剥離	5	 粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

図 6-9 ASTM C672 による外観の劣化度の事例¹⁹⁾

図 6-10 に硬化後の気泡体積率と 50 サイクル時のスケーリング量の関係を示す。硬化後の気泡体積率が 3.0%を下回るとスケーリング量が大きくなり、気泡体積率の減少とともにスケーリング量が増加していく。この結果より、硬化後の気泡体積率とスケーリング量には相関関係があり、耐凍害性を確保するには硬化後の気泡体積率が重要な指標であることは明らかである。また、凍結融解作用による表層スケーリングは毛細管空隙の水分が凍結することによる膨張と静水圧の発生だけで単純に説明することはできないが^{20),21)}少なくとも図 6-10 の結果からはスケーリングは空気量と関係しているとみなしてよいと考えられる。

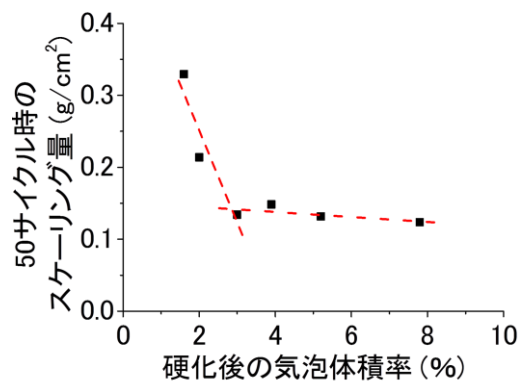


図 6-10 気泡体積率とスケーリング量の関係

図 6-11 に硬化後の気泡点密度とスケーリング量の関係を示す。気泡の点密度では約 1.0 を境界にして、耐凍害性の有無があるように考えられる。点密度が 1.0(/mm²)以上の供試体では、スケーリング量に大きな違いは無く、ほぼ一定である。一方、点密度 1.0 を下回ると、点密度の減少とともにスケーリング量が増加していく。

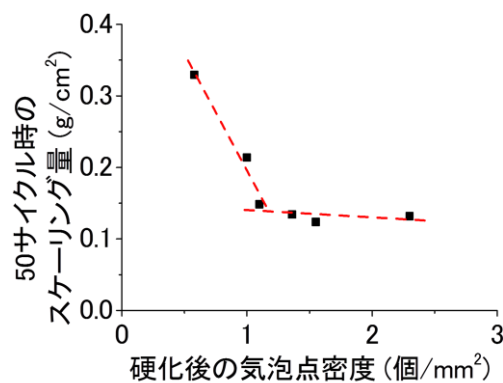


図 6-11 気泡点密度とスケーリング量の関係

図 6-12, 図 6-13 に 50 サイクルスケーリング量と, 気泡間隔係数 L および気泡間隔特性値 L' との関係を示す. 一般的に耐凍害性の指標として用いられている $250\ \mu\text{m}$ を閾値として, スケーリング量の変化傾向が大きく異なることが確認できる. 気泡間隔係数 L は, 気泡間隔特性値 L' とほぼ等しいので(図 6-7), いずれの距離に関する指標についても同様の傾向が認められる. $250\ \mu\text{m}$ 以下の供試体については, スケーリング量に大きな違いは認められず, $250\ \mu\text{m}$ を越えると, スケーリング量が大きくなっている.

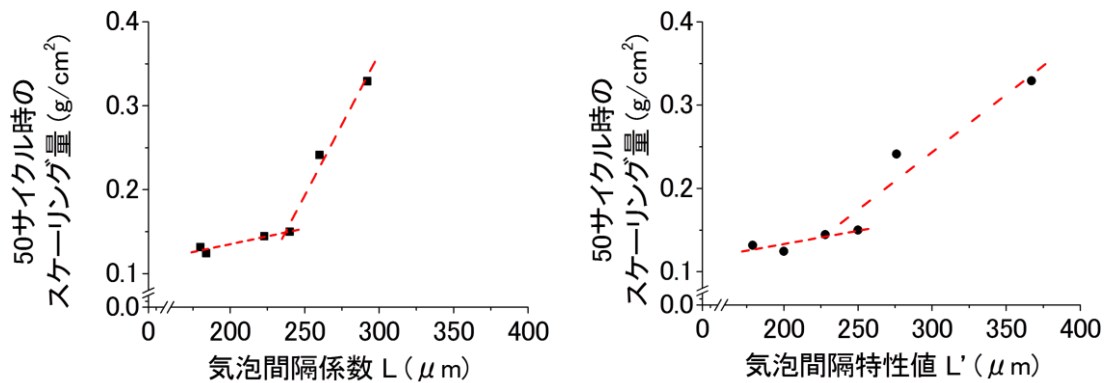


図 6-12 気泡間隔係数 L と 50 サイクル時の スケーリング量の関係 図 6-13 気泡間隔特性値 L' と 50 サイクル時のスケーリング量の関係

本研究で得られた気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 L は, 空気量の小さな供試体 (CP1-①, CP2-①, M1-①, M2-①, C2-①) について, それぞれの距離に関する特性値に差が生じた. C1-①と C2-①の気泡間隔特性値は, C1-①が $276\ \mu\text{m}$, C2-①が $367\ \mu\text{m}$ となり $91\ \mu\text{m}$ の違いがある. 一方, 気泡間隔係数は, $260\ \mu\text{m}$ と $292\ \mu\text{m}$ でありその差は小さい. 柏野ら²²⁾の研究によると, 耐凍害性の指標の一つである耐久性と水セメント比の影響について実験を行っており, 低水セメント比の場合では耐久性指数が高くなる傾向を示している. しかし, 硬化後のコンクリートと細孔構造との関係, および耐久性指数との関係において変動があったことも述べており, 細孔構造の状態を十分に測定できていない可能性も考えられる. また, 低水セメント比のコンクリートを作製する場合, 使用される頻度が高い低熱ポルトランドセメントを使用した中村ら²³⁾の研究によれば, $W/C=0.30$ の供試体において, 凍結融解抵抗性の閾値を $300\sim 400\ \mu\text{m}$ と述べている. 一般的に用いられる気泡間隔係数の閾値が $200\sim 250\ \mu\text{m}$ であることを考えると, 低水セメント比による影響からコンクリート強度が高くなり, 凍害に対する抵抗性が向上することで, 気泡間隔係数の閾値が一般的な値よりも大きくなったとも考えられる.

参考文献より得られた結果および図 6-7 に示した C1-①と C2-①のスケーリング量の違

第6章

いから、従来まで用いられてきた気泡間隔係数よりも、気泡の骨材による分布特性を反映している気泡間隔特性値のほうが、耐凍害性評価において正しい結果のようにも考えられる。また、両供試体は水セメント比が 0.40 と 0.55 であるため、低水セメント比の C1-①のスケーリング量が小さくなったとも考えられる。

本研究では、簡便に気泡の空間分布構造の特徴量を取得することを一つの目的としている。気泡の 2 値画像はフラットベツトスキャナを使用すれば簡便に得られ、ASTM C457 に規定される低倍率(50 倍)の条件も満足していないにも関わらず、同程度の距離パラメーターが得られ耐凍害性の判定にも齟齬はない。よって本研究に示した手法は従来の気泡間隔係数の評価に代わるひとつの方法と考えてよいものと思われる。

6.6 結論

点過程から得られる距離に関する特徴量と、従来用いられてきた気泡間隔係数との対応の評価を行った。また、コンクリート供試体を用いてスケーリング試験を行い、気泡の特徴量と耐凍害性の有無を確認した。

- (1) セメントペースト，モルタルおよびコンクリート中の気泡の点密度が増加すると，気泡の距離特性値であるメディアン距離は減少していく。これは点密度の増加とともに気泡の点間距離が近接していくためと考えられる。
- (2) 最近傍距離関数の中央値であるメディアン距離から平均気泡径の $1/2$ を差し引いた距離特性値を気泡間隔特性値と定義した。この気泡間隔特性値は，従来，耐凍害性の指標として用いられてきた気泡間隔係数と直線で表される正の相関関係が認められた。
- (3) 気泡間隔特性値はスケーリング量とよく対応し，従来の気泡間隔係数を用いた場合と同様の判断が可能であった。気泡間隔特性値は，従来の気泡間隔係数の代わりのパラメーターとして利用できる可能性が考えられる。
- (4) 気泡間隔特性値を得るために用いた気泡の点過程画像は，フラットベツトスキャナを用いて気泡の2値画像から取得でき，簡便な方法であることから，汎用性もあると考えられる。

参考文献

- 1) JIS A5308 : レディーミクスコンクリート, 日本工業規格, 2003.
- 2) 宮川豊章, 六郷恵哲 : 土木材料学, 朝倉書店, 2012.
- 3) T. C. Powers : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949
- 4) 日本建築学会 : コンクリートの調合設計指針・同解説, 丸善出版, 2015.
- 5) 濱幸雄, 太田宏平 : フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004
- 6) 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規 : 高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視, 土木学会論文集, Vol.67, No.3, pp.351-360, 2011
- 7) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 吉川峻生 : 気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.841-846, 2015.
- 8) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一 : 吉川峻生 : 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価, コンクリート年次論文集, Vol.37, No.1, pp.493-498, 2015.
- 9) 室谷卓実, 五十嵐心一 : モルタル中の骨材が気泡の空間分布のランダム性に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70, pp.945-946, 2015
- 10) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 山本瑞希 : コンクリート中の気泡の点過程としての特徴量と凍結融解抵抗性の対応, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, 2016(投稿中)
- 11) 中村隆英, 新家健精, 美添泰人, 豊田敬 : 統計入門, 東京大学出版会, 2008
- 12) 谷口慶治 : 画像処理工学, 共立出版図書, 2011.
- 13) 石橋登志雄, 坂本信義 : 各種混和剤が硬化コンクリートの耐凍害性に及ぼす気泡相系の影響について, 土木学会年次学術講演会, V-207, pp.413-414, 2003.
- 14) 渡部宏, 堺孝司 : 中空微小球を用いたコンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.1, 1993.
- 15) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学 : コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, 第 23 巻第 1 号, 2012.
- 16) 林大介, 坂田昇, 中島賢二郎, 奥紀仁, 関博 : コンクリートの凍害劣化予測に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.142-159, 2008.
- 17) Natesalyer, K., Hover, K. A. and Snyder, K. A. : Protected-paste volume of air-entrained

- cement paste : Part1, Journal of Materials in Civil Engineering , Vol.4, No.2, pp.166-184, 1992.
- 18) 岩崎訓明：確率論に基づいた硬化コンクリート中の気泡径分布，空気量および気泡相諸特性の測定方法の提案，土木学会論文集，No.557，V-34，pp55-64，1997.
- 19) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書(案)，独立行政法人土木研究所寒地土木研究所，pp.参 4-4-参 4-15，2011.
- 20) Liu,Z. and Hansen,W. : A hypothesis for salt frost scaling in cementitious materials,Journal of Advanced Concrete Technology,Vol.13,pp.403-414,2015.
- 21) Valenza,J.J. and Scherer,G.W. : Mechanisms of salt scaling,Materials and Structures,Vol.38,pp.479-488,2005.
- 22) 柏野謙二，鎌田英治，桂修：高強度コンクリートの耐凍害性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，12-1，pp.691-696，1990.
- 23) 中村士郎，内田美生，枝松良展，安本礼持：低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの凍結融解抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.717-722，2002.

第 7 章

気泡の 2 次のステレオロジー量から求める

気泡間隔係数の簡便な推定方法

7.1 序論

コンクリートに対して凍結融解作用が繰り返されることが予想される場合、使用するコンクリートの凍害に対する性能(耐凍害性)を評価する必要がある、実際にコンクリートを使用する前に、その性能を確認する試験が行われる。性能を確認する試験としては、本研究でも取り上げたスケーリング試験や気泡間隔係数¹⁾の測定の他に JIS A1148 : 2010 の水中凍結融解試験が最も一般的に行われている。この他に骨材の吸水率を測定し骨材の安定性を確認する試験等がある(JIS A1109,1110,1122)²⁾。スケーリング試験や水中凍結融解試験は、実際にコンクリートに凍結融解作用を繰り返し与えて、その間の劣化を直接評価する。これに対して ASTM C457 は気泡の分布を評価することが目的であるので、長期間にわたって凍結融解を繰り返すことを必要としない。気泡間隔係数は、気泡がすべて同一寸法であり、その気泡が立方体格子点に規則的に配置されている分布を仮定することで得られる気泡間距離である。気泡間隔係数を求める際に使用する計算式(式(2-2))では、空気量の測定が必要である。一般に空気量の測定は、JIS A1128³⁾に基づいてフレッシュ時に測定されている。しかし、フレッシュ時の空気量は打ち込みや締め固めから運搬までの間にある程度の損失を生じるため^{4) 5) 6)}、フレッシュ時の空気量から耐凍害性を有したコンクリートであると判定されたとしても、必ずしも凍害による劣化が起こらないとは限らないと考えられる。しかしながら、気泡間隔係数に関する研究は数多くなされ、また、多くの実測データの蓄積もあり、一般的には、耐凍害性を有している場合の閾値として、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下にすることが推奨されている。林らの研究⁷⁾では約 40 年間使用した RC 水路からコンクリートコアを採取し、気泡間隔係数の凍害に及ぼす影響を確認し、閾値 $250\mu\text{m}$ の有効性も評価している。

近年では、デジタル機器の進歩により画像の取得は非常に簡便になっている。また、様々な統計解析ソフトウェアや画像解析ソフトウェアなどがあり、ソフトウェアの信用性も高いことから統計解析をとまなう様々な分野で広く用いられている。これらのソフトウェアを用いれば、コンクリートの物性を決定づける幾何学的な特徴を、より詳細な計量指標として得ることができる。前章までにおいても、画像解析の技術を用いることによって、セメントペーストマトリックスに存在する気泡の分布特性および気泡の距離に関する特徴量の考察を行った。また、従来用いられてきた気泡間隔係数 L と同等の値が得られる気泡間隔特性値 L' を定義し、両者の値がほぼ等しくなることを示してきた⁸⁾。

本章では、気泡の 2 値画像から得られる画像データに点過程を導入し取得した気泡の特徴量を用いて、従来まで用いられてきた気泡間隔係数と同等なパラメーターの算出を

行なう．大きな労力を要する気泡間隔係数の測定に比べて，同様のパラメーターが簡単に得られることを示すことにする．

7.2 気泡間隔係数と類似する気泡間隔特性式

前章までにおいて最近傍距離関数から得られるメディアン距離 R_{50} と，気泡間隔係数の仮定する 3 次元立方体の対角線の 1/2 がほぼ等しいことを示した^{10), 11)}．この両者の位置関係を図 7-1 に示す．

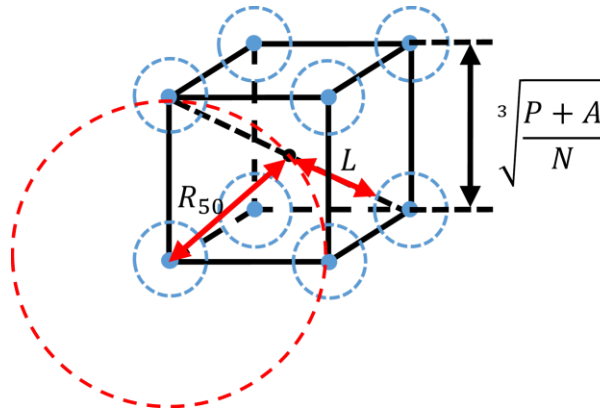


図 7-1 気泡間隔係数が想定する気泡配置と R_{50} の対応

ここに P はセメントペースト容積率(%), A は硬化コンクリートの空気量(%), N は気泡の個数である．

メディアン距離 R_{50} を気泡間隔係数で仮定している 3 次元立方体の変数で表すと，式 (7-1) となる．

$$R_{50} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{P+A}{N}} \quad (7-1)$$

メディアン距離 R_{50} は，2 次元の気泡データから得られる最近傍距離関数の中央値である．一方，気泡間隔係数は 3 次元の立方体格子配置を仮定した気泡の距離特性であるため，両者を直接的に関連づけることはできない．しかし，粒子形状と粒子寸法を仮定すれば，2 次元の点個数を 3 次元の点個数(粒子数)と関連づけることができる．気泡は球状であるので形状は球とし，個数については Dehoff ら¹²⁾の仮定を採用する．着目粒

第 7 章

子がすべて球体であると仮定した場合，単位体積あたりの点数 N_V は，単位面積あたりの点数 N_A と球の平均球径 D_V を用いて式 (7-2) にて求められる．

$$N_V = \frac{N_A}{D_V} \quad (7-2)$$

単位体積あたりの点密度である N_V の逆数 $1/N_V$ は，気泡 1 個あたりの体積となる．この気泡 1 個あたりの体積は，気泡間隔係数を求める際に仮定している 3 次元立方体格子と同じである．

本研究で得られる 2 次元の気泡点密度 λ を，式(7-2)に代入すると 3 次元の点密度 λ_{3D} が得られる．気泡自体はセメントペーストマトリックス相にのみ存在するため，セメントペースト領域内での点密度を求めるため，2 次元点密度 λ をセメントペースト領域の面積率(=体積率) p で除す．また，気泡径(D)については，2 次元の平均気泡径と 3 次元の球体の気泡径を等しいと仮定すれば，3 次元における点密度が式(7-3)により求められる．

$$\lambda_{3D} = \frac{\lambda}{pD} \quad (7-3)$$

式(7-3)により得られた 3 次元の点密度 λ_{3D} の逆数 $1/\lambda_{3D}$ は点 1 個あたりの体積となり，これを気泡間隔係数の導出過程にて仮定された 3 次元の立方体の体積とみなせば，三平方の定理より立方体の対角線の $1/2$ を求めることができる．これまで述べてきたように，最近傍距離関数から得られるメディアン距離 R_{50} が，3 次元の立方体の対角線の $1/2$ とほぼ等しくなることに注意すれば，式(7-1)と(7-3)より，式(7-4)の関係が導かれる．

$$R_{50} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{pD}{\lambda}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{P+A}{N}} \quad (7-4)$$

式(7-4)より，2 次元断面に出現する気泡の平均径(D)を，メディアン距離 R_{50} ，メントペースト面積比 p および 2 次元の点密度 λ を用いて表すと式(7-5)を得る．

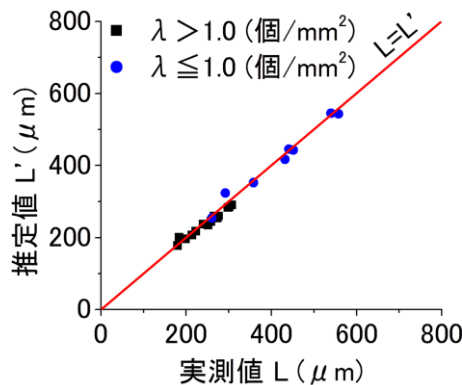
$$D = \frac{8}{3\sqrt{3}} \times \frac{\lambda}{p} R_{50}^3 \approx 1.54 \frac{\lambda}{p} R_{50}^3 \quad (7-5)$$

第 6 章で定義した気泡間隔特性値 L' は、気泡間隔係数 L との間で $L' \doteq L$ となる正の相関関係が認められた (図 6-7)．式(7-6)には $L' \doteq L$ となる両者の関係に対して、実験から得られるメディアン距離 R_{50} と平均気泡径 D との式を示す．また、式(7-6)の平均気泡径 D に式(7-5)より算出される平均気泡径を代入し、式(7-6)を用いると式(7-7)を得ることができる．

$$L' = R_{50} - D/2 \approx L \quad (7-6)$$

$$L' = R_{50} - \frac{1.54\lambda}{2p} R_{50}^3 \approx \left(1 - 0.77 \frac{\lambda}{p} R_{50}^2\right) R_{50} \quad (7-7)$$

図 7-2 に式(7-7)を用いて算出される、気泡間隔特性値 L' と、2 値画像から実測された気泡間隔係数 L の関係を示す．図 7-2 からは、 $L' = L$ とみなして良いと考えられる正の相関性が得られ、気泡間隔特性値と気泡の実測により得られる気泡間隔係数 L の値はほぼ一致している．6 章に示した図 6-7 にて、気泡の 2 値画像データから得られたメディアン距離 R_{50} と平均気泡径を用いて、気泡間隔特性値と気泡間隔係数との関係を比較したが、エントラップトエアを含有する系にて、両者の間に若干の相違が認められた．一方、式 (7-7) を用いて得られる気泡間隔特性値 L' は、式(7-6)を変形し求められる関数であるが、平均気泡径 D は式(7-5)を用いて算出している．式(7-5)での変数は、点密度 λ とセメントペースト面積率 p およびメディアン距離 R_{50} であり、図 6-3 より点密度 λ とメディアン距離 R_{50} との間には相関性があることが示されている．換言すると、式 (7-5) の平均気泡径 D は、点密度 λ とセメントペースト面積率 p による関数と考えられる．図 7-2 に示された関係から、点過程統計量より得られる特徴量と Dehoff の式を組み合わせで算出した平均気泡径を用いることによって、従来まで用いられてきた気泡間隔係数とほぼ同等と考えられる値を算出することが可能であることがわかる．

図 7-2 気泡間隔係数の推定値 L' と実測値 L の関係

ASTM C457 に規定されている方法に従って手動、目視にて気泡間隔係数値の測定を行なうとしたら、大きな労力を必要とする。しかし、式(7-7)にて必要な変数は、いずれも気泡の 2 値画像から得られる値であり、インターネットにはこれらを計算するための信頼できるソフトウェアも存在している。よって、式(7-7)を用いることは、簡便かつ信頼性のある方法とみなしてよいものと思う。

7.3 点密度から得られる気泡間隔係数と類似する気泡間隔特性式

式(7-7)は、メディアン距離 R_{50} 、気泡の点密度 λ 、セメントペーストの面積比 p の 3 つの変数から、気泡間隔係数に類似する気泡間隔特性値の算出を行なうものである。ここでは、メディアン距離 R_{50} が最近傍距離関数から求められることを利用し、式(7-7)の変数を点密度 λ とセメントペーストの面積比 p の 2 つの変数となるように、式(7-7)をさらに整理することにする。

着目相の点の分布がランダム分布であり、距離 r がメディアン距離 R_{50} であるとき、最近傍距離関数 $G(r)$ は、式(7-8)のように示される。なお、本研究では、セメントペーストマトリックス相に存在する気泡の分布はランダム分布を示すことを確認している。

$$G(R_{50}) = 1 - \exp(-\lambda\pi(R_{50})^2) = 0.5 \quad (7-8)$$

式(7-8)を R_{50} について解くと、式(7-9)を得る。

$$R_{50} = \sqrt{\frac{\ln 0.5}{-\lambda \pi}} \approx \frac{0.47}{\sqrt{\lambda}} \quad (7-9)$$

よって，最近傍距離関数から得られるメディアン距離 R_{50} は，式(7-9)に示されるように，点密度 λ の関数となる．式(7-9)を式(7-7)に代入すると，気泡間隔特性値 L は，点密度 λ とセメントペースト相の面積率 p で近似的に表すことができる．これを L_λ として，式(7-10)に示す．

$$L_\lambda = \left\{ 1 - 0.77 \frac{\lambda}{p} \left(\frac{0.47}{\sqrt{\lambda}} \right)^2 \right\} \frac{0.47}{\sqrt{\lambda}} \approx (0.47p - 0.08) \frac{1}{p\sqrt{\lambda}} \quad (7-10)$$

以上より，気泡間隔係数 L に類似の気泡間隔特性値 L_λ は点密度 λ とセメントペースト相の面積率 p を用いて算定できることになる．

式(7-10)に示されたセメントペースト面積率 p は，コンクリート断面画像から，気泡の面積率を差し引き，さらに骨材の面積率を引くことにより，求められる．また，コンクリートの配合が既知の場合は，セメントペースト面積率＝体積率は配合から計算することもできる．断面画像から求める場合は，モデルベースのステレオロジーの基本式(7-11)を用いればよい．

$$V_V = A_A \quad (7-11)$$

本研究では，表 5-5 に示したように，配合から求められる骨材体積率は，画像から得られる骨材の面積率とほぼ同じであることを確認している．結局のところ，コンクリート断面の 2 値画像から気泡の点密度 λ が既知になれば，従来の気泡間隔係数 L とほぼ同じ値を簡便に推定できることになる．

図 7-3 に式(7-10)から得られる気泡間隔特性値 L_λ と，画像から得られた値を用いて求めた従来の気泡間隔係数との関係を示す．両者の値は $L_\lambda \doteq L$ のライン上にプロットされている．エントラップトエアのみが存在する点密度 $\lambda \leq 1.0$ の場合においても正の相関関係は保たれている．

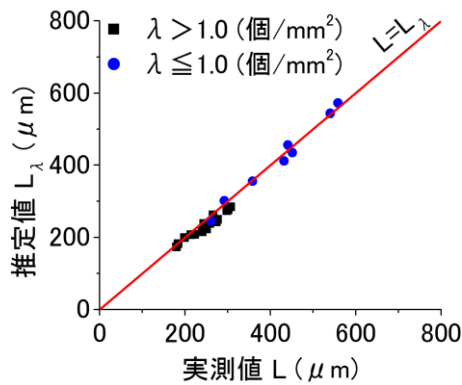


図 7-3 式(7-10)から求めた気泡間隔係数 L_λ と従来の気泡間隔係数 L の関係

7.4 気泡間隔特性式から求める気泡に関する特性図

式(7-10)を利用すると、あらかじめ計算されたセメントペースト相の面積率から、泡間隔特性値と点密度の関係を示した関数が得られる。

図 7-4 にセメントペーストの面積率 p をパラメトリックに変化させたときの、推定される気泡間隔特性値 L_λ と点密度 λ の関係を示す。セメントペースト面積率 p によって異なる曲線が得られる。セメントペースト面積率 p は、配合計画書があれば骨材の体積率と 2 値画像の気泡面積率から求めることができる。同じく、気泡の 2 値画像から点密度 λ と気泡の面積率が得られる。これらの関係を利用すれば、コンクリートの断面画像から 2 値画像を作成し、図 7-4 をモノグラフのように使用することによって気泡間隔特性値が得られ、その値は気泡間隔係数とほぼ等しいものとなる。

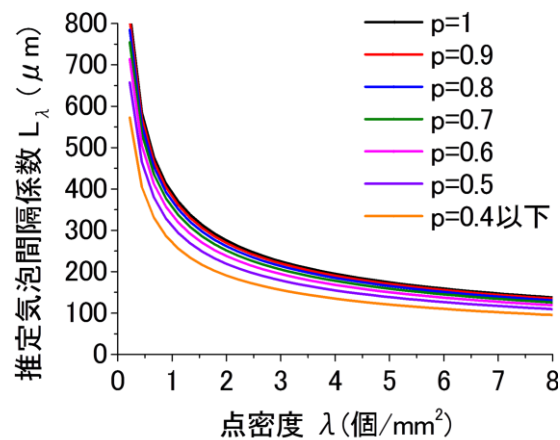


図 7-4 点密度から決まる気泡間隔係数曲線

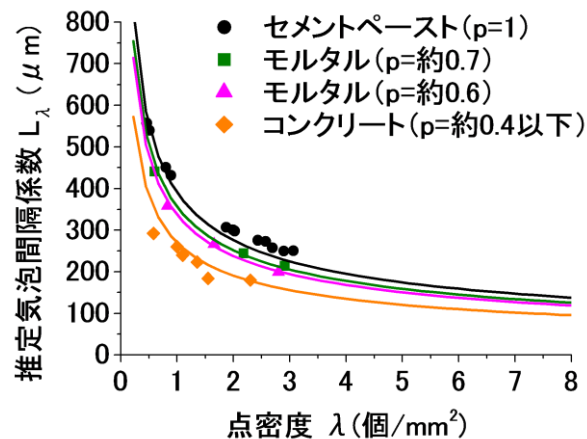


図 7-5 気泡間隔係数をプロットした曲線

図 7-4 で得られた気泡間隔特性値 L_λ と点密度 λ から得られた曲線の有効性を確認するために、セメントペースト、モルタルおよびコンクリート供試体から得られた気泡間隔係数の値をプロットしたものを図 7-5 に示す。本研究で用いた供試体では、式(7-10)にて表される関数の近くに気泡間隔係数はプロットされている。このことから、式(7-10)から得られる気泡間隔特性値は、気泡間隔係数に代わる特性値として用いることができるようである。

気泡間隔係数は 1949 年に Powers によって提案されて以来、耐凍害性と相関性があったことから重要なパラメーターとして認識され、 $250\mu\text{m}$ を閾値として凍害に対する抵抗性を判断してきた。気泡間隔係数を採用する場合の問題点は、ASTM C457 に規定された測定方法が労力を必要とすること、および、気泡間隔係数での気泡が全て同一寸法の気泡径であり、その気泡が立方体に規則的に配置されている仮想の状態を想定していることにある。実際のコンクリート中の気泡は、細骨材や粗骨材により存在領域に強く制限を受けている。また、コンクリートの配合によるスランプ値や骨材の体積率の違い、また混和剤の添加量により連行されるエントレインドエアの量も様々であり、耐凍害性を評価するためには、実際の気泡の分布構造の観察が必要不可欠と考えられる。コンクリート中の気泡構造が耐凍害性に影響を与えることはこれまでも検討されていたが、気泡の空間分布構造を直接的に評価したものはそれ程多くはない。

本研究で用いた画像による気泡の特徴量の取得は、簡便なもので特別な実験装置を必要としていない。打設前のコンクリートに対し、事前の試験を行い気泡に関する特徴量を取得することが短期間で行なえる。また、既存の構造物からのコア供試体を採取した

第 7 章

場合においても同様の確認が行なえる．さらに，混和剤の開発等，気泡の空間構造評価を行う場合についても，2 値画像から点過程統計量を用いることは，汎用性も合わせ持つものと考えられる．画像解析による気泡の分布構造の研究をさらに推し進めていけば，耐凍害性の評価だけではなく，気泡の分布構造がコンクリートに与える影響を解明する上で新たな知見が得られると期待できる．

7.5 結論

2 次元の画像データから得られた特性値に対してステレオロジーの考えを導入し、Powers の提案した気泡間隔に関する特性値（気泡間隔係数 L ）を数理的に求めた．本章で得られた結論は、以下の通りである．

- (1) これまで用いられてきた気泡間隔係数は、その測定に労力が必要であったが、気泡の距離に関する特性値を利用することにより簡単な数式で表される．また、その数式から得られる推定気泡間隔特性値は、従来の気泡間隔係数とほぼ同じ値が得られる．
- (2) 気泡間隔特性値は、セメントペーストの面積率 p と点密度 λ を変数としており、配合表と気泡の 2 値画像から求めることができるため簡便性に優れている．
- (3) 気泡間隔特性値を表す関数に対して、セメントペーストの面積率 p をパラメトリックに変化させると、気泡間隔特性値と気泡点密度 λ の関係が得られる．本研究で用いた供試体においては、その関係式から推定した値と実測値は良く一致していた．
- (4) 気泡の空間分布構造に点過程を導入することにより、実際の気泡の距離特性や分布特性を反映する値を簡単に取得することができる．これにより、気泡の分布構造がコンクリートの物性に与える影響をより詳細かつ定量的に検討することが可能になると期待される．

参考文献

- 1) T. C. Powers : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949.
- 2) 独立行政法人土木研究所寒冷土木研究所寒地基礎技術研究グループ：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書(案)，独立行政法人土木研究所寒地土木研究所，pp. 参 4-1-参 4-15，2011.
- 3) JIS A 1128：フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法，日本工業規格，2005.
- 4) 高橋和雄：コンクリート製品の振動による空気量の減少について，農業土木学会論文集，第 143 号，pp.69-77，1989.
- 5) 笠井英志，清水正弘，牛島栄，坂ノ上宏：コンクリート製品の空気量および凍結融解抵抗性に及ぼす影響 その 1 振動機締め固め時間とフレッシュ時の空気量，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-206，pp.411-412，2003.
- 6) 坂ノ上宏，牛島栄，笠井英志，清水正弘：コンクリート製品の空気量および凍結融解抵抗性に及ぼす影響 その 2 硬化後の空気量測定および凍結融解性試験，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-205，pp.409-410，2003.
- 7) 林大介，坂田昇，中島賢二郎，奥紀仁，関博：コンクリートの凍害劣化予測に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.64，No.1，pp.142-159，2008.
- 8) 古東秀文，室谷卓実，五十嵐心一：モルタルの低倍率画像から得られる気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp.395-402，2015.
- 9) D.Zalocha and J.Kasperkiewicz : Estimation of structure of air entrained concrete using a flatbed scanner, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.2041-2046, 2005.
- 10) 古東秀文，室谷卓実，五十嵐心一，吉川峻生：気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.841-846，2015.
- 11) 古東秀文，室谷卓実，五十嵐心一，山本瑞希：コンクリート中の気泡の点過程としての特徴量と凍結融解抵抗性の対応，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，2016.
- 12) Dehoff,R.T. and Rhines,F.N. : 計量形態学，牧島邦夫監訳，内田老鶴圃新社，1972.

第 8 章

第 8 章

結論

8.1 結論

本研究では、コンクリート中の気泡の空間分布構造の評価に点過程統計量を導入し、気泡の空間分布の特性および気泡の点間距離の特微量を簡便に得ることを目的として行なったものである。初めにセメントペーストにより気泡の基本的な性状を把握し、続いてモルタルおよびコンクリート供試体について骨材による気泡への影響を検討した。また、気泡の距離に関する特微量と従来の気泡間隔係数との関係についても比較を行なった。さらに、気泡の距離の特微量と気泡間隔係数との幾何学的位置関係の類似性から、従来の気泡間隔係数と同等の値が求められる関数式を提案した。

本研究において得られた主な結果を、以下にまとめ本論文の結論とする。

1 章では、我が国における凍害危険度を示しながら、耐凍害性評価の重要性について述べた。さらに、耐凍害性を判断する試験方法の歴史について述べ、それらの問題点から本研究にて用いようとする評価法の意義について述べた。

2 章では、本研究で用いた実験方法について記述した。特に、気泡の 2 値画像から気泡の重心点位置を点とみなした点過程画像取得法および骨材を含む場合の画像処理手段について詳しく説明を行なった。また、耐凍害性の判断では一般的に JIS A1148:2010 の水中凍結融解試験の方法が用いられるが、本研究ではより簡便な方法として ASTM C672 の方法を用いているので、その手順について説明を行なった。

3 章では、本研究で用いた点過程統計量について基本的な意味について説明した。

4 章では、セメントペースト供試体について気泡の分布構造の評価を行った。セメントペーストは骨材を含有していないため、気泡の存在領域に制限がなく、また気泡の抽出も簡便に行なうことができる。主な結論は、以下の通りである。

- (1) セメントペースト中の気泡の 2 値画像からは空気量の変化による気泡の分布性状の変化を目視で確認できる。また、点過程を導入し気泡を点として表示した場合においても、気泡の分布性状の変化が理解できる。
- (2) セメントペースト中の空気量の増加とともに、気泡点密度が増加する。ただし、フレッシュ時の空気量が約 6.0%以上、および硬化後の気泡体積率が約 4.0%以上の場合は、気泡の合一現象により点密度の増加傾向は小さくなる。
- (3) セメントペースト中の気泡の分布特性は、ランダム分布である。
- (4) セメントペースト中の空気量が多くなると、最近傍距離関数の勾配は大きくなり、

$G(r)=1.0$ となる収束距離も小さくなる。

5 章では、モルタルおよびコンクリート供試体を用いて、骨材が含有された場合の気泡の分布構造および気泡の距離に関する特徴の検討を行った。前章より、セメントペースト供試体について気泡の分布構造はランダム分布であること、および空気量の増加にともない気泡個数が増加し、気泡間距離が近づいていくことが確認されている。それらのことを念頭に骨材の影響について考察した。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) モルタルおよびコンクリート供試体の 2 値画像や点過程画像からは、空気量の増加による気泡の分布構造の変化が目視にて確認できる。コンクリート中の気泡では、粗骨材の存在により気泡の存在領域が制限され、非常に密な分布が視認された。
- (2) モルタルおよびコンクリート中の空気量が増加すると、気泡の点密度も大きくなり、両者の間には正の相関関係が認められた。
- (3) モルタルおよびコンクリート中の気泡分布は、凝集分布の傾向を示し、コンクリートの場合はより強い凝集性を示す。しかし、間引き過程の検証からセメントペーストマトリックス相の気泡分布の特性は、ランダム分布となる。
- (4) モルタルおよびコンクリート中の空気量が増加すると、最近傍距離関数の勾配が大きくなり、 $G(r)=1.0$ となる収束距離が小さくなる。また、気泡の個数がほぼ同等のモルタルとコンクリートの比較では、コンクリートの方が最近傍距離関数の勾配が大きくなった。これは、コンクリートに含まれる粗骨材の影響により、気泡間の距離が短くなったためと考えられる。

6 章では、セメントペースト、モルタルおよびコンクリート中の気泡の距離に関する特性値について検討し、従来の気泡間隔係数との対応を明らかにした。また本章で定義した特性値に対してスケーリング試験を行い、特性値を耐凍害性評価に用いることの有用性を明らかにした。主な結論は、以下の通りである。

- (1) セメントペースト、モルタルおよびコンクリート中の気泡の点密度が増加すると、最近傍距離関数から得られるメディアン距離が小さくなる。これは、点密度の増加とともに点間距離が近づくためと考えられる。
- (2) メディアン距離 R_{50} から平均気泡径 D の $1/2$ を差し引いた値を、気泡間隔特性値 L' (式(8-1))と定義し、従来の気泡間隔係数 L との間に $L' \approx L$ となる関係が得られた。

$$L' = R_{50} - D/2 \quad (8-1)$$

- (3) コンクリート供試体にスケーリング試験を行い、気泡間隔特性値を耐凍害性評価に用いることの有効性を確認し、気泡間隔係数の代用としてのパラメーターとして

利用できる可能性が示唆された。

7 章では、気泡間隔特性値が耐凍害性評価において有効なパラメーターであることが、前章までに示されたことから、最近傍距離関数から得られるメディアン距離 R_{50} と気泡間隔係数にて仮定する立方体格子の対角線の $1/2$ が実験的にほぼ一致することに着目し、従来の気泡間隔係数と同等な値が得られる気泡間隔特性値の推定式の作成を行なった。その結果、式(8-2)のように変数をセメントペースト面積率 p と気泡の点密度 λ で示される関係式が得られた。

$$L_{\lambda} = \left\{ 1 - 0.77 \frac{\lambda}{p} \left(\frac{0.47}{\sqrt{\lambda}} \right)^2 \right\} \frac{0.47}{\sqrt{\lambda}} \approx (0.47p - 0.08) \frac{1}{p\sqrt{\lambda}} \quad (8-2)$$

その他の主な結論は以下の通りである。

- (1) 気泡間隔特性値の変数は、気泡の 2 値画像から求めることができ簡便性がある。
- (2) 式(8-2)についてセメントペースト面積率 p をパラメトリックに変化させると、気泡間隔特性値と点密度 λ の関係が得ることができ、本研究の実測値とは良く一致する結果となった。

以上が、本研究で得られた主な結論である。気泡の空間分布や気泡の距離に関して点過程を導入することにより、気泡の特徴量が簡便に得ることができ定量的な検討が行える。また、距離に関する特徴量から従来の気泡間隔係数と同等の値が取得できることも成果の一つと考えられる。

これらの内容に基づき、今後の展望についてはいくつかの展開が考えられる。

- コンクリート供試体において骨材の抽出を行わずに取得した場合の気泡間隔特性値の有用性の確認。
 - 混和剤の効果に気泡の分布および距離に関する特徴量を導入した定量評価。
 - 従来の仮定された気泡間隔係数では無く、実際の気泡分布を考慮した耐凍害性の評価のさらなる確認
 - ASTM C457 に規定された気泡間隔係数を得る方法の代用となる測定方法への展開
- 本研究には、簡便、安価というキーワードがある。このキーワードの条件を基に気泡の特徴量が得られたことは有意義な成果であると確信する。コンピューターやデジタル機器の発達している今、本研究の手法が採用されるなら、多くの研究者、技術者が遂行可能な評価法であり、さらなる展開が可能と考えられる。

本研究に関連する発表論文リスト

以下すべて査読付き論文

1. 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一, 吉川峻生: 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.493-498, 2015.7.
2. 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 吉川峻生: 気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.841-846, 2015.7.
3. 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一: モルタル中の気泡の点過程としての特徴と間引きシミュレーションによる空間分布の再現, セメントコンクリート論文集, Vol.69, pp.146-153, 2016.2.
(第44回セメント協会論文賞受賞 総合題目: 点過程としてのモルタル中の気泡分布の特徴と気泡間隔特性値の提案)
4. 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一: モルタルの低倍率画像から得られる気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応, セメントコンクリート論文集, Vol.69, pp.395-402, 2016.2.
(第44回セメント協会論文賞受賞 総合題目: 点過程としてのモルタル中の気泡分布の特徴と気泡間隔特性値の提案)
5. 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 山本瑞希: コンクリート中の気泡の点過程としての特徴量と凍結融解抵抗性の対応, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.987-992, 2016.7.
6. 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一, 山本瑞希: コンクリート中の気泡の空間分布の特徴と分布の再現, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.609-614, 2016.7.
7. Kotou, H., Murotani, T. and Igarashi, S.: Correlation between characteristic distances of air voids as point process and spacing factors in mortars, Proc. Intl. Conf. on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering -MSSCE 2016 (掲載決定)
8. 吉川峻生, 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一: 空間統計量による気泡の空間分布の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.721-726, 2015.7.

論文 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価

室谷 卓実^{*1}・古東 秀文^{*2}・五十嵐 心一^{*3}・吉川 峻生^{*4}

要旨：市販のフラットベッドスキャナを用いて取得したセメントペーストの低倍率画像中の気泡の定量評価を行った。その結果、AE 減水剤を用いた場合、点密度と気泡体積率には非常に強い相関がみられ、ステレオロジーの観点から3次元における気泡個数とは関連付けられない2次元の点密度が、気泡体積をある程度反映していることが示唆された。また、エントレインドエアはエントラップトエアと比べて打ち込みから硬化までの損失が小さく、ランダムな分布を形成することが明らかになった。さらに、点密度および空気量が増加しても最近傍距離は一樣に小さくなるとは限らず、ある値に収束する傾向が存在することが示された。

キーワード：画像解析, 点過程統計量, 空間分布, 気泡, スキャナ

1. 序論

コンクリートの微視的構造を明らかにすることは、コンクリートの性能を理解するうえで重要であり、画像解析法はその幾何学的特徴を定量的に評価できる点から注目されている。この画像解析法の発展により、例えばコンクリート中の気泡分布に関して ASTM C 457 に規定された肉眼による顕微鏡観察に要した労力が著しく軽減され、現在ではパーソナルコンピュータを用いた自動計測法も確立されている。例えば、仁木ら¹⁾は表面を黒色スタンプ液で着色し、気泡に白色充填剤を充填することで気泡部の識別を明確にし、画像解析によって2値化画像を取得し、従来では多大な労力と時間を要した気泡組織測定が比較的容易に得ることができると報告している。さらに、ASTM C 457 の修正ポイントカウント法との比較を行い、正の相関が得られることも報告している。また、鮎田ら²⁾は照度差を利用した画像解析法により取得した2値画像を用い、ASTM C 457 の手順に従って修正ポイントカウント法およびリニアトラバース法を適用して、自動処理によって簡便に気泡組織を測定できることを示している。さらに、従来の肉眼による方法との比較から、画像解析によって得られた結果の信頼度が高いものであることを報告している。

従来の ASTM C 457 の手順では、点解析である修正ポイントカウント法と線解析であるリニアトラバース法が用いられるが、これらの方法に代わる新しい解析方法を用いて気泡組織を評価した研究もある。小長井ら³⁾は画像解析による硬化コンクリートの気泡パラメータ測定法の理論的根拠を明確にし、さらに計量形態学の分野での面積解析の原理を応用した新しい画像解析法を提案し、

その基礎理論を体系化している。また、太田ら⁴⁾は画像解析法を用いた気泡組織の測定を自動で行うことができる自動画像解析システムを開発し、従来法と比べて大幅な省力化および測定精度の向上を可能とした。さらに、面積解析の理論に基づいて気泡パラメータの計算が可能であると報告している。また近年では、従来の狭い領域を数100視野以上測定する部分解析ではなく、比較的安価なフラットベッドスキャナやデジタルカメラなどによって取得した画像を用いて、少ない視野でコンクリート表面の全体解析を行うことを目的とした検討も行われるようになっている^{5) 6)}。

以上のように、画像解析を用いてコンクリート中の気泡組織や気泡パラメータなどを評価した例は比較的多い。しかし、その研究の多くは耐凍害性と直接関連付けられる ASTM C 457 の試験で定められた気泡パラメータ、すなわち気泡量に加えて気泡間隔係数を求めることを目的としている。また、気泡間隔係数は仮想的に配置された気泡間の距離を反映した値であり、必ずしも実際に存在する気泡分布構造を再現する特性値とはいえない。これに対して、近年では画像情報を空間統計学に基づき、対象に対して何ら仮定を行うことなく定量的に評価することが一般的手段として確立している。この手順に従うならば、気泡分布構造を実際の距離をパラメータとして理解することが可能となる。そのような手段の一つとして着目粒子を点で表し、粒子の空間分布を定量化して評価する点過程理論がある。本法によれば、分布のランダム性や点間距離が確率に裏付けられた値として評価される。本研究においては、気泡の空間分布の基本特性を明らかにすることを目的とし、この点過程理論を骨材が存在せ

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

*4 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

表ー1 各試料の名称および混和剤量

水セメント比	名称	AE減水剤量 (G×%)	AE助剤量 (G×%)
0.4	Ref	—	—
	AE0.05	0.05	—
	AE0.10	0.10	—
	AE0.25	0.25	—
	AE0.50	0.50	—
	AE0.25-助剤0.01	0.25	0.01
	AE0.25-助剤0.02	0.25	0.02
0.45	Ref	—	—
	AE0.25	0.25	—
	AE0.50	0.50	—
	AE0.25-助剤0.01	0.25	0.01
	AE0.25-助剤0.02	0.25	0.02

ず分布上の拘束が小さいと考えられるセメントペーストの低倍率画像中の気泡に適用した。そして、気泡を点として簡便に処理することの妥当性を気泡体積との相関性および空間分布特性の差異の表現の可能性から検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、比表面積 3310cm²/g）を使用し、セメントペーストの水セメント比を 0.40 および 0.45 とした。混和剤にはリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤および、アルキルエーテル系陰イオン活性剤を主成分とする AE 剤（以下 AE 助剤と称す）を用い、使用量を変化させることによって空気量を変化させた。作製したセメントペーストの配合の名称および混和剤の量を表ー1 に示す。JIS R 5201 に準じてセメントペーストを練り混ぜ、市販の小型エアメーターを用いて空気量を測定した。その後、40mm×40mm×160mm の角柱供試体を作製した。なお、本研究では木槌の打撃による締固めを行った。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生（20℃）を行った。

2.2 試料の作製および画像取得

養生終了後、各供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し、切断面の研磨を行った。研磨終了後、試料断面を黒色インクで塗り潰し、乾燥後に白色粉末（炭酸カルシウム微粉末、粒径範囲 12～13μm）を気泡に充填

させた。その後、市販のフラットベッドスキャナを用いて等倍率の断面画像を取得した（図ー1 (a)）。本研究では簡便性を考慮して取得する画像枚数は 10 枚とした。このときの解像度は 1200dpi とし、1 画素は 21.2μm に相当する。なお、試料の縁部では黒色インクの均一な染色がなされない領域が存在する場合があるため、中心から 30mm×30mm を解析領域とした⁷⁾。また、デジタルマイクロスコープを用いて高倍率での気泡観察も行った。

2.3 画像解析

画像解析ソフトウェアを用いて、2.2 にて取得した画像に対し、モノクロ変換を行った。その後、平滑化フィルタ処理を行ってノイズを除去した後、グレースケールに基づく 2 値化処理を行い、気泡の 2 値画像を取得した。目視で判断できた未抽出箇所のみに対して、手動補正を施し気泡の 2 値画像とした（図ー1 (b)）。取得した気泡の 2 値画像から気泡面積率を算出し、ステレオロジーの考え方に基づきこれを気泡体積率とした。さらに、画像解析ソフトウェアの機能を用いて、気泡の重心点位置座標を求め、これを位置ベクトル x_i とみなして点過程 $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$ とした（図ー1 (c)）。

2.4 点過程統計量^{8), 9)}

(1) 点密度

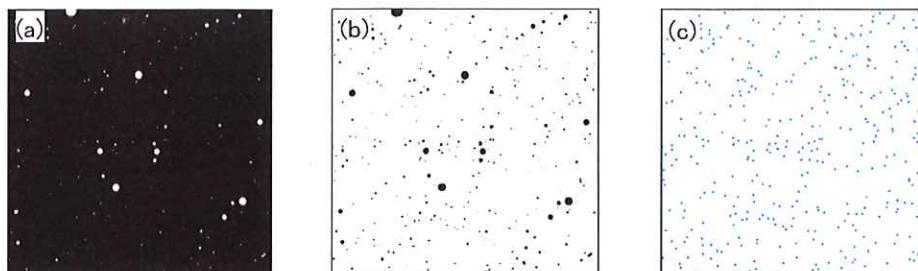
点過程統計量とは、観察領域 W においてランダムに分散している点 $x_i \in X$ に関して、距離を変数としてその分布パターンを定量化し、点の分布特性を評価する確率関数である。その関数の計算において基本となるパラメータとして点密度 $\hat{\lambda}_p$ がある。点密度は単位面積あたりの点の個数を表し、式(1)により定義される。

$$\hat{\lambda}_p = N_p(W)/A(W) \quad (1)$$

ここに、 $A(W)$ は視野 W の面積、 $N_p(W)$ は視野 W 中の点の個数である。

(2) K 関数^{8), 9)}

K 関数とは、任意の点から半径 r 以内に存在する他の点個数の期待値を正規化して表わしたものである。K 関数を用いることにより、点密度に関わらず、分布している点が 2 次元ランダム分布に比べて、規則性や凝集性を持った分布であるのかどうかを判定することができる。前



図ー1 セメントペースト中の気泡の重心点抽出の例 (W/C=0.40—Ref)

(a) 気泡の画像 (b) 気泡の 2 値画像 (c) 重心点抽出結果

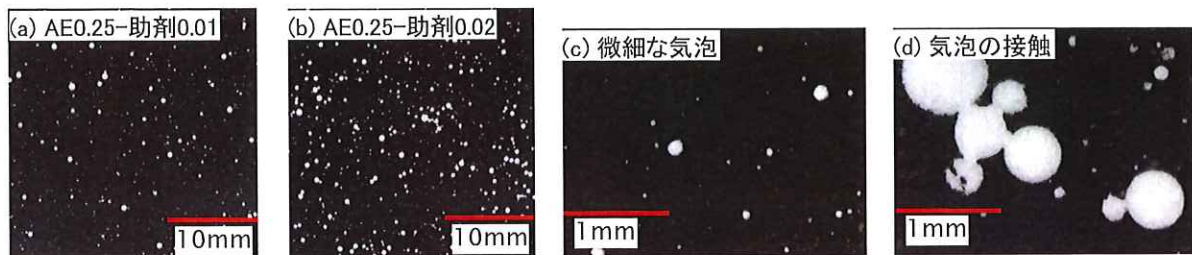


図-2 セメントペースト中の気泡の画像 (W/C=0.40)

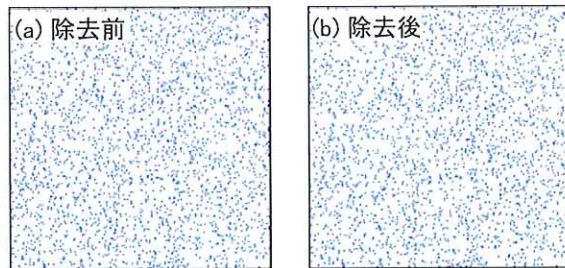


図-3 気泡の重心点の画像 (W/C=0.40)

述の点 $x_i \in X$ を中心とする半径 r の円領域 $b(x_i, r)$ 内に、他の重心点 $x_j \in X (i \neq j)$ が存在するかどうかを判定し、K関数を式(2)より計算した。

$$\hat{K}(r) = \frac{1}{\hat{\lambda}_p^2} \sum_{i \neq j} \frac{1(|x_i - x_j| \leq r)}{s(x)} \quad (2)$$

ここに、 $1(\cdot)$ は $(\cdot)$ 内が真であれば1、偽であれば0を与える指示関数である。エッジ補正係数 $s(x)$ は式(3)にて与えられ、式中の a, b は観察画像領域の辺長を表わす。

$$s(x) = ab - (2a + 2b - x)x/\pi \quad (3)$$

$$x = |x_i - x_j|$$

また、算出したK関数を式[4]によりL関数に変換した。

$$\hat{L}(r) = \sqrt{\hat{K}(r)/\pi} \quad (4)$$

(3) L関数による分布の有意性検定

K関数値の2次元ランダム分布からの偏差の有意性を判断するために、点密度から決定される点を二項点過程としてランダムに発生させるシミュレーションを繰り返す、このときのL関数値の95%信頼区間を決定した。実際の分布のL関数値と95%信頼区間を比較し、偏差の有意性の検定を行った。

(4) 最近傍距離関数⁹⁾

最近傍距離関数は点過程中の任意の点 $x_i \in X$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j \in X (i \neq j)$ が存在する確率を求める関数であり、式(5)により求められる。

$$\hat{G}(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (5)$$

ここに、 s_i は最近傍距離、 b_i は各点から画像縁までの最短距離である。また、 $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、前述の s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積

の逆数である。観察視野 W の辺長を x, y とすると、式(6)により与えられる。

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i) \cdot (y - 2s_i)\}^{-1} \quad (6)$$

3. 結果および考察

3.1 画像中の気泡の特徴

図-2 に市販のフラットベッドスキャナで取得したAE助剤使用のセメントペースト中の気泡の画像を示す。これより、セメントペースト中には様々な径の気泡が存在し、混和剤を使用することによって気泡が増加したことが目視でも確認できる。また、顕微鏡を用いた拡大観察を行うと(図-2(c))、 $30\mu\text{m}$ 程度の微細な気泡が存在することが確認できる。これより、白粒は微細な気泡にも充填されていると考えられる。また、いずれの水セメント比の場合も、混和剤を過度に混入した場合には(図-2(b))、比較的径の大きな気泡が多く見られ、中には気泡同士が接触した大きな気泡が多数観察された(図-2(d))。作榮¹⁰⁾は、AE剤により連行された気泡はブリーディング水により気泡の凝集体が形成されれば、それらの気泡同士が合わさって1つの気泡となる合一や気泡が消失する破泡という現象が起こることを指摘している。本研究においては、気泡の分散する空間はセメントペーストマトリックス全体であり、骨材を含んでいない。それにもかかわらずこのような気泡同士の接触が比較的多数認められるということは、実際の骨材の存在する系では骨材による分布の制限があり、より高い頻度で接触を生ずると推察される。

図-3(a)に図-2(b)の気泡画像を、画像解析ソフトウェアを用いて重心点に置き換えた画像を示す。図-2と比較すると、点の数が多く感じられるが、これは図-2中には寸法が1画素程度の微細な白色部分が存在するためである。一般にAE剤を使用した場合は、直径が $30 \sim 250\mu\text{m}$ 程度の範囲の気泡が一様に形成されるようである¹¹⁾。よって、1画素程度(約 $20\mu\text{m}$)の白色部分は必ずしも気泡とは限らないと考えられる。さらに、そのような多数の白色の微細粒子が1断面に存在することから、大きな気泡が一様に配置されていてその端面の切断面が一斉に現れているとは考えられない。よって、本研究にお

表-2 画像から得られた気泡の情報

水セメント比	0.40							0.45				
名称	Ref	AE0.05	AE0.10	AE0.25	AE0.50	AE0.25 -助剤0.01	AE0.25 -助剤0.02	Ref	AE0.25	AE0.50	AE0.25 -助剤0.01	AE0.25 -助剤0.02
点密度 (個/mm ²)	0.46	0.80	0.89	2.02	2.43	2.89	3.06	0.51	1.87	1.99	2.69	2.57
平均気泡径 (μm)	123	135	138	120	118	100	126	134	117	122	96	129
フレッシュ時の空気量(%)	2.4	3.3	3.4	4.9	6.4	6.0	8.5	3.5	4.9	6.2	5.8	9.5
硬化後の気泡体積率(%)	1.0	1.9	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3	1.2	3.0	3.7	3.5	6.9
気泡体積率の変動係数	0.13	0.15	0.05	0.06	0.12	0.04	0.06	0.11	0.08	0.09	0.10	0.09
残存率(%)	41.7	56.6	63.1	72.2	69.0	62.0	85.9	34.2	62.1	59.9	60.1	72.9
フロー値	195	203	213	222	249	228	227	228	259	288	263	267

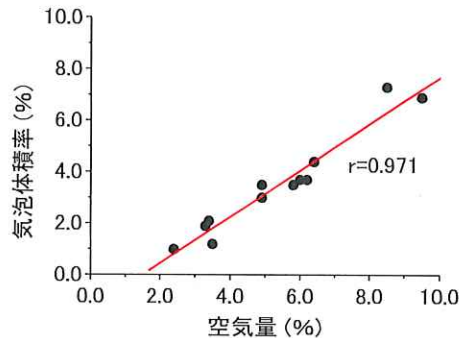


図-4 空気量と気泡体積率の関係

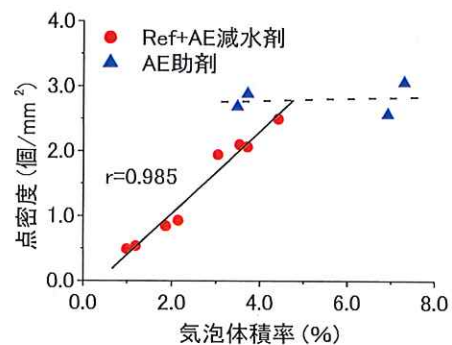


図-5 気泡体積率と点密度の関係

いては、30μm 以上を気泡とし、それ以下は気泡以外の表面の凹凸部に起因したものとみなして除去を行った。30μm 以下の微粒子の重心点を除去した結果を図-3(b)に示す。この場合でもかなりの点が存在し、AE 助剤により細かい気泡がいかにも多数連行されているかが理解される。ASTM C 457 では観察のための最低倍率が規定され、スキャナにより取得した低倍率画像はその倍率条件を満足していない。しかし、上述のように気泡径の範囲は可視であること、また十分な個数の気泡が存在することから、その解析により気泡の空間分布を特徴づけることは可能であると判断した。

表-2 に 30μm 以下の粒子を除去した画像から得られた気泡の情報の一覧を示す。また、図-4 にエアメータにより測定した空気量と画像解析により求めた気泡体積率の関係を示す。フレッシュ時の空気量と硬化時の気泡体積率には非常に強い相関が認められるが、両者の間にはほぼ一定の差があり、常に画像から求めた気泡が2%程度低くなっている。この原因としては打ち込みから締固めの際に失われた気泡および30μm 以下の微小な気泡の存在などが考えられる。しかし、上述のように30μm 以下の微細な気泡が気泡体積に占める割合はそれほど大きくないことを考えると、この差は打ち込みから締固めまでの間に失われた気泡による影響が大きいと考えられる。また、エントレインドエアが混入された系の気泡の残存率はエントラップトエアのみの場合よりも高くなっており、また低水セメント比のほうが残存率が高い(表-2)。これより、練り混ぜの際に巻き込まれるエントラ

ップトエアは混和剤によって連行されるエントレインドエアよりも失われやすく、その損失は水セメント比やフロー値の相違によって変化すると考えられる。さらに、概して気泡体積率の変動もそれほど大きくはないようであり、特にエントレインドエアが連行されるようになると変動係数も概ね小さくなる傾向がみられる。

3.2 気泡面積率と点密度の関係

図-5 に気泡体積率と点密度の関係を示す。AE 減水剤の混入量を変化させた場合(図-5 中の赤点)は、水セメント比に関係なく気泡体積率と点密度の関係は直線近似が可能で、非常に強い相関がみられる。2 次元断面に現れる粒子数、すなわち点個数はステレオロジーの観点からは3次元空間内における個数情報と直接結びつけることはできない。したがって、点密度から対象粒子の体積率を直接求めることはできない。しかし、図-5 に示すような相関が認められることは、点密度が気泡量の有効なパラメータになりうることを示し、点過程統計の適用の可能性を示すものと考えられる。しかしその一方で、AE 減水剤に加えてさらに AE 助剤を添加した場合(図-5 中の青点)、前述のような直線とは明らかに異なる傾向を示している。このことについてはさらに検討を要するが、前述のように気泡個数が増加して気泡の間隔が狭くなり、気泡の合一の影響が現れていると考えられる。

3.3 気泡の空間分布特性

図-6 に混和剤を使用していないときの気泡、すなわちエントラップトエアの K 関数を示す。図中のポアソンは、2 次元ランダム分布に相当する K 関数を示している。

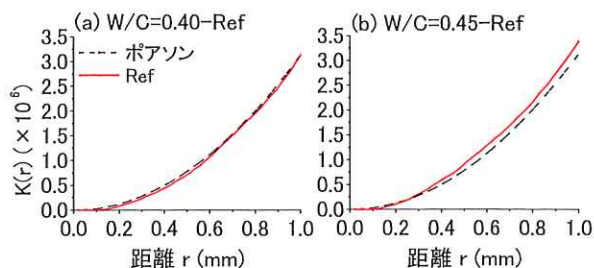


図-6 エントラップトエアのK関数

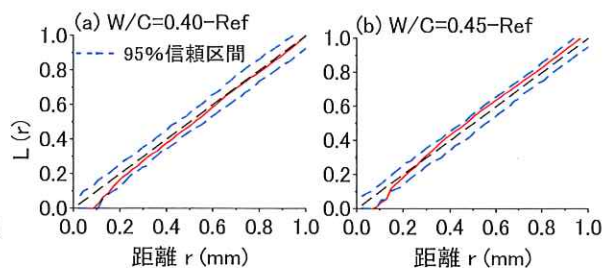


図-7 エントラップトエアのL関数

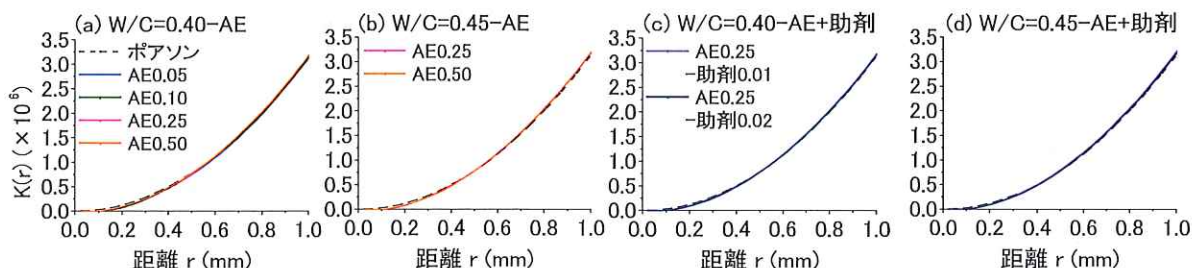


図-8 エントレインドエアのK関数

水セメント比が0.40の場合はほぼランダム分布に一致しており、気泡はランダムに空間内に分布している。これに対して水セメント比が0.45の場合は凝集側と判断されるような分布を示している。この偏差の有意性を評価するため、同じ点密度の二項過程としてシミュレーションを行った。L関数の95%信頼区間との対応を図-7に示す。L関数は信頼区間内にプロットされており、ポアソン過程であるとする帰無仮説は棄却されずランダムに分布しているとみなされる。よって、セメントペースト中のエントラップトエアは基本的にランダム分布を形成するが、水セメント比やフロー値などのフレッシュ特性の違いによって変動が現れやすいものと思われる。

図-8に混和剤を加えた場合のK関数を示す。いずれの場合も気泡はほぼ完全にランダムに分布している。つまり、エントラップトエアのみでは若干不均質な分布にもなりうるセメントペースト中の気泡の空間分布も、エントレインドエアが連行されれば、本研究における打ち込みから締め固め過程において気泡の損失を生じたとしても、ランダムな空間分布を形成すると考えられる。

図-9に混和剤を添加した場合の気泡の最近傍距離関

数を示す。図中の破線はその試料における気泡が2次元ランダム分布を示す場合の最近傍距離関数を表す。距離の短い範囲にて、気泡そのものが点ではなく大きさを持つことの影響によるハードコア領域(x 切片値)がいずれのセメントペーストにも認められ、その距離はほぼ等しくなっている。その後、最近傍距離関数はほぼ完全なランダム分布に従って変化している。これらの図において、関数値1.0は累積確率関数で表される最近傍距離関数の収束距離であり、この収束距離以上の距離においては点が必ず最近傍点が存在することを示している。

図-10に最近傍距離関数の収束距離と点密度の関係を示す。また、図-11に最近傍距離関数の収束距離と気泡体積率の関係を示す。いずれも同様な傾向を示しており、このことから点密度と気泡体積率には相関関係があることがうかがえる。また、点密度および空気量の増加にともない収束距離が短くなっている。これは、セメントペーストマトリックス中に点が増えたことにより、点間距離が全体として小さくなっていることを示す。しかし、空気量もしくは点密度が増えても、収束距離は単調に減少するとは限らず、約1.0mm程度にて収束するよ

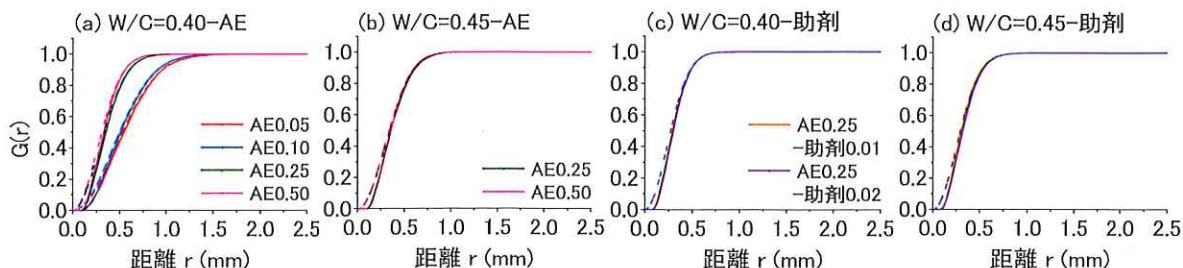


図-9 セメントペースト中の気泡の最近傍距離関数

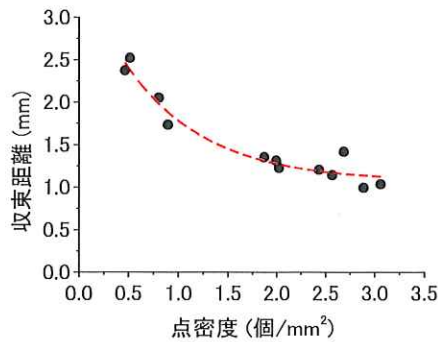


図-10 収束距離と点密度の関係

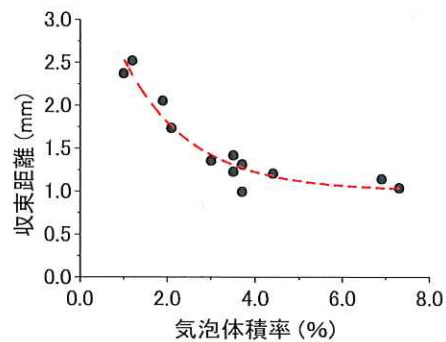


図-11 収束距離と気泡体積率の関係

うにみえる。これは、空気が増加して気泡個数が増えても、ある量に達すると必ず最近傍点を見出せる最大距離が変わらなくなることを示唆しており、気泡分布を点で表わしたときの分布を特徴づける距離に変化がなくなることを意味する。言い換えれば、点で気泡分布を考える場合の分布の構造単位が小さくなり、より狭い範囲によって分布を特性化しうることを示すものと考えられる。

4. 結論

骨材が存在せず分布上の拘束が小さいと考えられるセメントペースト中の気泡の空間構造を点過程統計量により評価し、基本特性を明らかにした。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) エントラップトエアはエントレインドエアよりも失われやすく、その損失はフレッシュ特性によって変化しやすいと考えられる。
- (2) AE 減水剤を用いた場合、気泡体積率と点密度には非常に強い相関があり、点個数が気泡量の有効なパラメータになりうることを示唆された。しかし、AE 助剤を用いた場合は異なる傾向を示し、これは気泡の合一の影響が現れていると考えられる。
- (3) セメントペースト中の気泡の空間分布は、エントラップトエアのみでは若干不均質な分布にもなりうる。しかし、エントレインドエアが連行されれば、打ち込み過程において気泡の損失を生じたとしてもランダムな空間分布を形成すると考えられる。
- (4) 空気量もしくは点密度が増えると、最近傍点の収束距離は約 1.0mm 程度にて収束する傾向がみられ、セメントペースト中の気泡分布はより狭い空間単位によって分布を特性化しうると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号：24560564、研究代表者：五十嵐心一）の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 仁木孟伯, 地頭菌博, 原田克己: 画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法について, セメント・コンクリート論文集, Vol.39, pp141-145, 1985
- 2) 鮎田耕一, 桜井宏, 田辺寛一郎: 硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析, 土木学会論文集, No.420, Vol.13, pp81-86, 1990
- 3) 小長井宣生, 大橋猛, 根本任宏: 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論, 土木試験所月報, No396, 1986
- 4) 太田利隆, 大橋猛, 小長井宣生, 根本任宏: 自動画像解析システムを用いた硬化コンクリートの気泡パラメータの測定方法について, コンクリート工学年次論文集, Vol.8, No.0, pp.389-392, 1986
- 5) 安部洋平, 青木正雄, 辻厚志, 中村良太: 硬化コンクリートの気泡組織分布判定に関する研究, 農業土木学会全国大会講演要旨集, pp572-573, 2005
- 6) Zalocha, D. and Kasperkiewicz, J.: Estimation of structure of air entrained concrete using a flatbed scanner, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.2041-2046, 2005
- 7) 五十嵐心一, 米山義広: 若材齢におけるセメントペーストの組織の特徴とその定量評価, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.115-122, 2007
- 8) Stoyan, D. and Kendall, W. S. and Mecke, J.: STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd, 1995
- 9) 島谷健一郎: 点過程による樹木分布地図の解析とモデリング, 日本生態学会誌, Vol.51, No.2, pp.87-106, 2001
- 10) 作榮二郎, 橋本学, 菅俣匠, 坂田昇: 中庸熟フライアッシュセメントを用いたコンクリートの気泡組織に及ぼすブリーディングの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1408-1413, 2014
- 11) 川村満紀: 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996

論文 気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応

古東 秀文*1・室谷 卓実*2・五十嵐 心一*3・吉川 峻生*4

要旨：セメントペースト中に分布している気泡を点過程としてとらえ、気泡間の距離に着目した。点過程における最近傍距離関数から得られた特性値と従来の気泡間隔係数の対応を明らかにし、気泡構造評価に点過程統計量を導入することの有用性について検討を行った。その結果、最近傍距離関数をもとに実際の空間分布を特徴づける距離として定義した気泡間隔特性値が、Powers の定義した気泡間隔係数と極めて強い相関性を有しており、またそれぞれの値もほぼ一致することが確認された。これにより、従来用いられてきた気泡間隔係数を点過程統計量から簡単に推定できる可能性が示唆された。

キーワード：画像解析、気泡、最近傍距離関数、メディアン距離、気泡間隔係数

1. はじめに

コンクリートへの気泡の連行は、ワーカビリティや耐凍害性の改善など、コンクリートの物性改善において重要な役割を果たす。所定量の空気連行の確認はフレッシュコンクリートにてエアメーターにより行われるが、実際に耐凍害性に関して重要なのは、空気量よりも気泡間隔係数である。これは気泡の周囲の毛細管空隙を含む任意のセメントペースト領域が、最寄りの気泡によって保護されるとする保護領域の考え方にに基づいており、一般には気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下になるようにすれば、凍害に対してすぐれた抵抗性を有すると判断される。このときの気泡間隔係数は T. C. Powers の提案に基づき¹⁾、ASTM C 457 に規定される方法によって求めることになっている。この規定は何回かの改訂がなされたようであるが、基本的には全線分長に対する対象物を横切った線分長（弦長）の線分比、もしくは面内に規則配置された全点数のうち対象物上に載った点数の比が対象物の体積率に等しいという 1 次のステレオロジー量に関する基本関係式を、それぞれリニアトラバース法およびポイントカウント法として用いている。実際の計測においては、顕微鏡観察により所定のトラバース長を走査したり、必要断面数を確保したりすることが求められ、その労力としての負担は大きい。

1980 年代に入り、画像解析法が一般化されるにともない、旧来の手順の単純化を可能とする多くの手法が提案されるようになり^{2) 3)}、一方で改訂された ASTM C 457 の規定の中にもパーソナルコンピューターを使用した画像取得が記述されるようになった。しかし、評価に必要な観測領域は旧来と同様のままのようである。したがって、目視による顕微鏡観察に基づく手順に比べれば労力は全体として大幅に軽減されたが、必要とされるトラバ

ース長や観察視野数は依然として大きいままである。よって現在では、マイクロスコープと可動ステージを組み合わせた自動解析装置も開発されて久しいが、簡単に実施できる試験として一般的に普及しているとは言い難い面がある。

一方、画像解析技術の導入とその後の画像取得機器の発展により画像取得が容易になるにつれて、従来の ASTM C 457 の評価対象以外の画像中の詳細情報に着目されるようになっている。ASTM C 457 では気泡頻度と平均径が評価対象であって、気泡径分布の詳細を求めることは、気泡間隔係数の計算上はこれを必要とない。しかし、例えば、坂田らは⁴⁾、2 次元断面に現れる気泡径分布が現代では比較的容易に得られることを利用し、気泡間隔係数が同程度であっても気泡径分布は大きく異なることがあることを指摘している。

一方、画像取得とその画像中の様々な特徴の解析が容易になっていく過程にて、気泡間隔そのものを再考することもなされてきた。ASTM C 457 にて定義される気泡間隔係数は、気泡がすべて同一寸法の球であって、それが規則的な立方体格子点に配置された状態を仮定し、セメントペーストの任意の点が最寄りの気泡表面から最も遠い位置にあるときの平均距離を表す。したがって、実際のコンクリート中の気泡間隔を直接表した距離ではなく、また気泡径も実際とは異なる。これに対して、同一寸法球の気泡だけでなく、寸法の異なる気泡がランダムに分布する状態を考慮できるようにして、より現実の分布に近い状態での気泡間隔の評価を行うための数値解析法が提案されてきた。例えば Snyder⁵⁾はいくつかの気泡間隔に関する評価式を比較し、気泡を粒子として表現し、気泡径分布も考慮できる Lu and Torquato 式が有用であると述べている。

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

*4 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

以上のように、気泡の連行に関しては、気泡の空間分布に関わる特性値としての気泡間隔もしくは任意のセメントペーストから気泡までの距離が重要であり、これを簡単に求めることができれば、コンクリートの耐凍害性の理解、および混和剤開発において有用なものと思われる。このような空間内に分布した粒子の分布構造を定量的に評価しようとする要請に対して、近年積極的に導入が検討されている手法の一つとして、空間に分布する粒子を点で代表させ、その分布を定量的に評価する点過程理論⁹⁾がある。粒子寸法を考えないことにより定式化が粒子を対象とする場合よりも簡略化され、また、確率に裏付けられた値としてその特性値の理解も容易である。これを適用すれば、気泡は2次元平面にランダムに分散した点として表され、気泡間隔に対応する点間の距離や気泡間隔係数に対応する点の周囲の任意点から点までの距離などが、容易に求められる。なお、この理論においては、気泡径を点の属性値とする定式化もなされているので、必要に応じて気泡寸法を考慮することも可能である。

本研究においては、気泡分布における距離に着目することにして、セメントペースト中に分布している気泡を点過程としてとらえ、その空間分布における統計量、特に距離に関する確率関数である最近傍距離関数を求める。そして、この関数における確率分布の特性値と従来の気泡間隔係数の対応を明らかにし、気泡構造評価に点過程統計量を導入することの有用性について論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。セメントペーストの水セメント比を 0.40 および 0.45 とし、それぞれに対して AE 減水剤および AE 助剤の使用量を変化させて、空気量を変化させた。作製したセメントペーストの配合および名称を表-1 に示す。

2.2 試料の作成と画像解析

JIS R 5201 に準じてセメントペーストを練り混ぜ、市販の小型エアメーターを用いて、フレッシュ状態の空気量の測定を行った。空気量の測定後、 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ のセメントペースト角柱供試体を作製した。供試体は打ち込み後 24 時間にて脱型し、水中養生（ 20°C ）を行った。材齢 7 日にて供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し、耐水研磨紙を用いて断面の研磨を丁寧に行った。研磨終了後、試料を 50°C の乾燥炉に入れ、10～15 分間程度乾燥させた。その後、研磨面に黒色インクを塗布した。黒色インクの乾燥後、炭酸カルシウム微粉

表-1 各試料の名称および混和剤量

水セメント比	名称	AE減水剤量 (C×%)	AE助剤量 (C×%)
0.4	Ref	—	—
	AE0.05	0.05	—
	AE0.10	0.10	—
	AE0.25	0.25	—
	AE0.50	0.50	—
	AE0.25-助剤0.01	0.25	0.01
	AE0.25-助剤0.02	0.25	0.02
0.45	Ref	—	—
	AE0.25	0.25	—
	AE0.50	0.50	—
	AE0.25-助剤0.01	0.25	0.01
	AE0.25-助剤0.02	0.25	0.02

末（粒径範囲 $12\sim 13\mu\text{m}$ ）を充填し、スライドガラスを用いて上から押し付けるようにして余分な炭酸カルシウム微粉末を除去した。そして気泡部分が白色、セメントペースト部分が黒色となるようにし、気泡とセメントペーストの識別が可能となるように断面を処理した。その後、市販のフラットベッドスキャナを用いて断面の画像を取得した。このとき 画像の解像度は 1200dpi とし、1 画素は約 $21.2\mu\text{m}$ に相当する。1 試料に対して 10 断面の画像を取得した。また、デジタルマイクロスコープを用いて高倍率での気泡観察も行った。

2.3 画像解析

2.2 にて取得した画像に対して、ノイズ除去等の処理を行って解析用の 2 値画像とした。このとき、AE 剤にて連行される気泡径の範囲はおおよそ $30\sim 250\mu\text{m}$ であること⁷⁾、およびステレオロジーの観点から多くの微細な粒子がすべて大きな球の端面の切断による円形断面とは考えられないことから、画像分解能の $30\mu\text{m}$ 以下の微細な白色部分は気泡以外の表面凹凸部であると判断し、これを除去した。残された白色部を気泡であると考え、この 2 値画像に対して気泡の面積率を画像解析により求め、ステレオロジーの考え方にに基づきこれを気泡体積率とした。さらに、個々の気泡の重心座標 $x_i (i = 1, \dots, n)$ を画像解析ソフトウェアの機能を用いて求め、これを位置ベクトル x_i とみなして、2 次元断面内の点過程 $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$ とした。

2.4 点過程統計量⁹⁾

点過程 X に対して、以下の特性値および関数値を求めた。

(1) 点密度

点過程によって得られる関数値や特性値の計算において基本となるパラメータとして点密度 $\hat{\lambda}_p$ がある。点密度は単位面積あたりの点の個数を表し、式[1]により定義される。

$$\hat{\lambda}_p = \frac{N_p(W)}{A(W)} \quad [1]$$

表-2 画像から得られた気泡の情報

水セメント比	0.40							0.45				
名称	Ref	AE0.05	AE0.10	AE0.25	AE0.50	AE0.25 -助剤0.01	AE0.25 -助剤0.02	Ref	AE0.25	AE0.50	AE0.25 -助剤0.01	AE0.25 -助剤0.02
平均気泡径 (μ m)	123	135	138	120	118	100	126	134	117	122	96	129
空気量 (%)	2.4	3.3	3.4	4.9	6.4	6.0	8.5	3.5	4.9	6.2	5.8	9.5
硬化後の気泡体積率 (%)	1.0	1.9	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3	1.2	3.0	3.7	3.5	6.9
気泡体積率の変動係数	0.13	0.15	0.05	0.06	0.12	0.04	0.06	0.11	0.08	0.09	0.10	0.09
空気量と気泡体積率の差	1.4	1.4	1.3	1.4	2.0	2.3	1.2	2.3	1.9	2.5	2.3	2.6
残存率 (%)	41.7	56.6	63.1	72.2	69.0	62.0	85.9	34.2	62.1	59.9	60.1	72.9

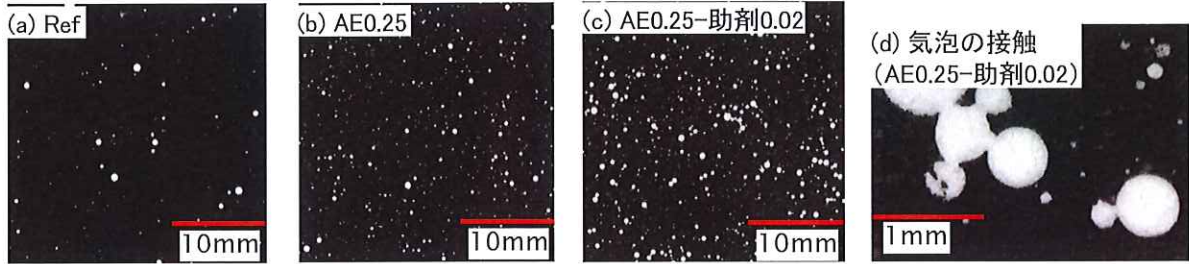


図-1 セメントペースト中の気泡の画像 (W/C=0.40)

ここに $N_p(W)$: 視野 W 中の点の個数

$A(W)$: 視野 W の面積

(2) 最近傍距離関数⁶⁾

最近傍距離関数は点過程の要素である任意の点 $x_i (x_i \in X)$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j (x_j \in X, x_i \neq x_j)$ が存在する確率を表す。式[2]によりこれを求めた。

$$\hat{G}(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad [2]$$

ここに s_i : 最近傍距離

b_i : 各点から画像縁までの最短距離

また, $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり, 前述の s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数であり, 観察視野 W の辺長を x, y とすると, 式[3]により与えられる。

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i) \cdot (y - 2s_i)\}^{-1} \quad [3]$$

(3) 気泡間隔係数

ASTM C 457 に従って, セメントペースト供試体中に分散した気泡であることを考慮して, 気泡間隔係数 $\bar{L}$ を [4] 式により求めた。

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \sqrt{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad [4]$$

ここに $\bar{L}$: 気泡間隔係数 (mm)

α : 気泡の比表面積 (mm^2/mm^3)

P : ペースト容積比 (%)

A : 硬化コンクリートの空気量 (%)

なお, 本研究においては画像解析により取得した 2 値化画像から得られる結果から, 気泡の比表面積 α を以下の式により求めた³⁾。

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{\bar{a}}} \quad [5]$$

ここに $\bar{a}$: 気泡面積の平均値

3. 結果および考察

3.1 供試体の空気量

表-2 にセメントペースト供試体のフレッシュ時の空気量と画像により求めた空気量を一覧にして示す。フレッシュ時の空気量と画像解析により求めた気泡体積率の間には 1~3% 程度の差が生じた。このような差異は 1 画素程度の微細な空気泡を除去したこと, および打ち込みから締固めの過程にて失われた空気量が原因と考えられる。しかし, 前述の手順にて除去した微細な白色部分が全体の空気量に占める割合は多くはないことを考えると, これは締固めの過程において失われた空気量によるところが大きいと判断される。また, フレッシュ時の空気量の測定値に対する硬化後の画像解析から求めた気泡体積率の割合を残存率として求めた結果をみると, 混和剤を使用していないエントラップトエアだけを含むセメントペーストでは残存率は 30~40% 程度であるが, AE 減水剤を用いた供試体では, 空気残存率は 60% 程度以上となった。これより, エントラップトエアはエントレインドエアに比べて打ち込みから締固めの際に失われやすいと考えられる。

図-1 に水セメント比 0.40 の気泡画像の例を示す。AE 減水剤および AE 助剤の添加にともない, 気泡の個数が増加することが目視でも明瞭に認識できる。また, 供試体によっては図-1 (d) のように気泡が接触したものも確認された。

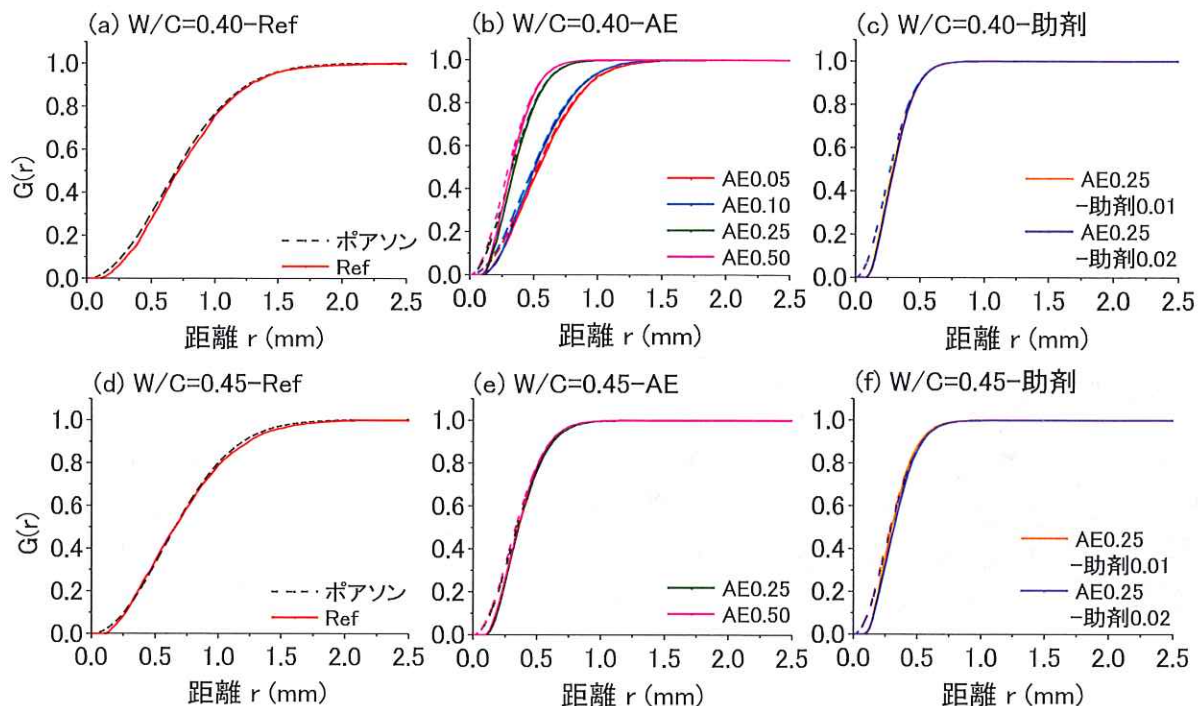


図-2 セメントペースト中の気泡の最近傍距離関数

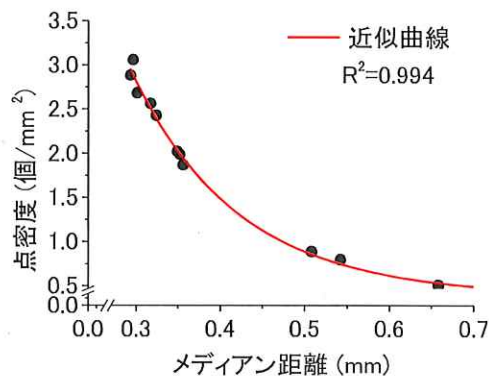


図-3 点密度とメディアン距離の関係

3.2 最近傍距離関数

図-2 にセメントペースト中の気泡の最近傍距離関数をそれぞれ示す。図中の破線は、完全なランダムに気泡が分散している場合（ポアソン分布）の最近傍距離関数を示している。水セメント比 0.40 の場合（図-2 (a), (b), (c)），AE 減水剤，AE 助剤により空気量を大きく変化させたとしても，気泡の最近傍距離関数はポアソン分布の場合の最近傍距離関数と一致し，2 値画像内において気泡がほぼランダムに分散していることを示している。また，空気量の増加にともない最近傍距離関数値が 1 となる距離が小さくなっていく。これは，空気量の増加にともない，独立して存在する気泡が多くなり，気泡間隔が小さくなっていることを示している。水セメント比が 0.45 の場合についても（図-2 (d), (e), (f)），水セメ

ント比 0.40 と同様に気泡はランダムに分布している。また，空気量の増加にともない収束距離が小さくなっていく傾向も，水セメント比が 0.40 の場合と同様である。

3.3 メディアン距離と点密度の関係

最近傍距離関数は気泡を点で表したとき，任意の点から最も近い他点を見出す確率を，距離を確率変数として累積確率分布として表したものである。この確率分布の代表値として第 2 四分位点（メディアン）に相当する距離をメディアン距離 R_{50} とし，これをランダムに分散した気泡間距離を代表する特性値として用いることにする。

表-3 に点過程として求めた各配合における気泡パラメータを一覧にして示す。また，図-3 に点密度とメディアン距離の関係を示す。なお，図-3 には，水セメント比が 0.40 と 0.45 の結果を合わせて示してある。この結果より，点密度とメディアン距離の間には，双曲線で近似できるような関係が存在することがわかる。気泡量が増大して点密度が増すことにより点間隔は小さくなるためメディアン距離は減少していくが，点密度がある程度大きくなるとメディアン距離の変化が小さくなる傾向が認められ，気泡自体が点ではなく自分自身の寸法を持つこと，および気泡間隔が狭くなってくると，気泡は他の気泡の存在の影響を受ける場合があるためと考えられる。例えば，空気量を増大させても平均気泡径には大きな変化は認められないが，図-1 (d) に示したように気泡同士が極端に近づき，接触状態になると気泡の合一⁸⁾によりメディアン距離にその特徴が表れにくくなる可能性

表-3 画像で得られた点過程での気泡パラメータ

水セメント比	0.40							0.45				
名称	Ref	AE0.05	AE0.10	AE0.25	AE0.50	AE0.25- 助剤0.01	AE0.25- 助剤0.02	Ref	AE0.25	AE0.50	AE0.25+ 助剤0.01	AE0.25+ 助剤0.02
点密度 (個/mm ²)	0.46	0.80	0.89	2.02	2.43	2.89	3.06	0.51	1.87	1.99	2.69	2.57
R50 (μ m)	710	542	508	349	324	293	296	658	356	352	301	317
L' (μ m)	648	474	439	289	265	243	233	591	298	291	253	253
気泡間隔係数 (μ m)	558	451	432	298	276	250	251	540	307	301	258	273
L'-気泡間隔係数	90	24	7	9	11	7	18	51	9	10	6	21

が考えられる。

3.4 メディアン距離 R_{50} と気泡間隔係数 $\bar{L}$ との関係

本研究にて定義したメディアン距離は、気泡の中心間距離の特性値であり、気泡寸法は考慮していない。一方、気泡間隔係数はセメントペーストマトリックスの任意の点から最も近い気泡表面までの距離の最遠距離という意味を持つ。そこでメディアン距離 R_{50} に対して平均気泡径 D の1/2、すなわち平均気泡半径を差し引いた値を求め、これを気泡間隔特性値 L' として定義する (式[6])。

$$L' = R_{50} - D/2 \quad [6]$$

ここに、 R_{50} : メディアン距離

D : 平均気泡径

表-3 に式[6]にて求めた気泡間隔特性値 L' と式[4]により求めた気泡間隔係数 $\bar{L}$ を示す。また、図-4に気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 $\bar{L}$ の関係を示す。気泡間隔特性値 L' は気泡間隔係数 $\bar{L}$ との間に直線で近似できる極めて高い相関性が見られる。また、気泡間隔係数 $\bar{L}$ は気泡間隔特性値 L' より小さな値を示しているが、その差は大きくなく、両者はほぼ一致している。

3.5 気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 $\bar{L}$ の幾何学的対応

前述のように気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 $\bar{L}$ の間にはきわめて良好な相関性が存在し、その絶対値もほぼ一致している。このことは、従来用いられてきた気泡間隔係数が点過程統計量から簡単に推定できる可能性を示唆するものである。以下において気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 $\bar{L}$ の対応に関する考察を試みる。

図-5は Powers の気泡間隔係数を求めるために仮定された気泡分布構造を模式的に示したものである。様々な寸法の気泡が存在する実際の空間配置を (図-5 (a))、

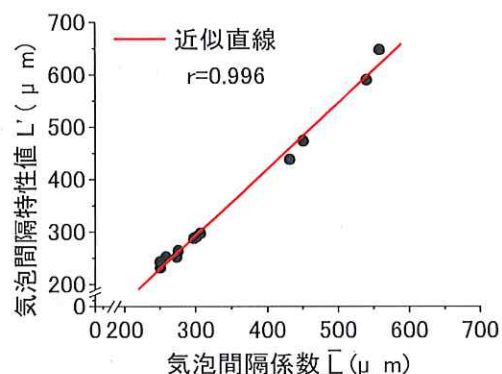


図-4 気泡間隔係数 $\bar{L}$ と気泡間隔特性値 L' の関係

一定寸法の気泡が立方体の中心に配置されているような規則的配置を仮定している (図-5 (b))。この配置は一定寸法の気泡が立方体の格子点に規則的に配置されているような配置に言い換えることができる (図-5 (c))。この配置において、気泡表面からセメントペースト中の点に至る最大距離が気泡間隔係数 $\bar{L}$ となる。立方体の1辺の長さは、セメントペーストの割合 P 、気泡体積率 A 、気泡個数 N を用いて $\sqrt[3]{(P+A)/N}$ と表せる³⁾。

これに対して、点過程におけるメディアン距離 R_{50} を用いて空間配置を考えた場合、図-6のようなランダムに分布した点の内の任意の点から平均的なメディアン距離 R_{50} に相当する距離にて、必ず気泡重心点が見出せる確率が高いことを意味する。これを3次元空間に適用した場合、任意の点から R_{50} を半径とする球上に点を必ず見出さうる分布となる。Powers の仮定した空間配置とメディアン距離を用いた空間分布との対応を模式的に表したものを図-7に示す。このように本研究では、メディアン

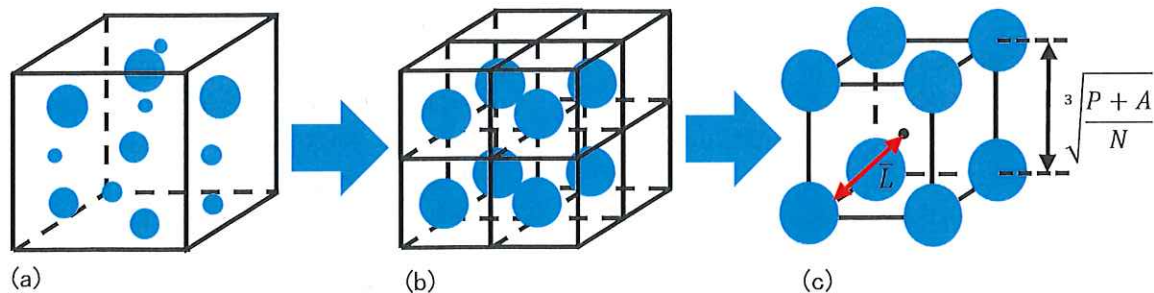


図-5 Powers の気泡間隔係数を求めるための気泡配置

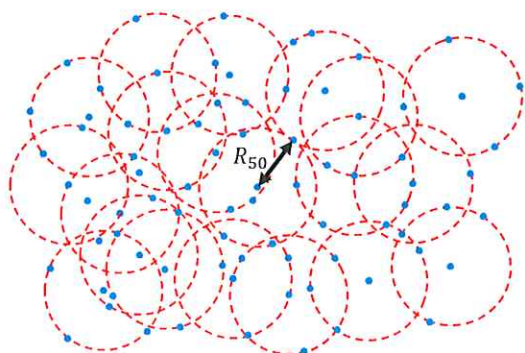


図-6 ランダムな点過程中の R_{50} の模式図

距離 R_{50} が、立方体の対角線の半分とおおよそ一致するような対応関係があることになる。この関係により、本研究で提案した気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 $\bar{L}$ の値がほぼ一致するような結果が得られたと考えられる。換言すると、ランダムに分布した点過程における最近傍距離関数の平均的な値が気泡間隔係数に対応づけられることを意味している。

以上のようにセメントペーストの場合、点過程理論を用いて気泡間隔係数の推定は可能なようである。しかし、骨材が存在するモルタルやコンクリートでは、骨材による気泡の空間分布の制限があると推測されるため、気泡間隔特性値 L' はセメントペーストの場合とは異なることも予想される。しかし、そのような場合であってもランダム分布が再現されるならば、点過程特性値を求めることは容易であり、この点については今後の課題としたい。

4. 結論

点過程統計量の一つである最近傍距離関数から得られる特性値と従来の気泡間隔係数の対応を明らかにし、気泡構造評価に点過程統計量を導入することの有用性について評価を行った。本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) フレッシュ時の空気量と硬化時の気泡体積率では 1～3%程度の差があり、これは打ち込みから締め固めの過程にて失われたものと考えられる。また、エントラップトエアのほうがエントレインドエアに比べて残存率が低く、比較的失われやすいと考えられる。
- (2) 最近傍距離関数から気泡はセメントペースト内ではほぼランダム分布に従うことが確認された。
- (3) 最近傍距離関数から得られる特性値としてのメディアン距離は点密度と強い相関性があり、点密度が大きくなると、メディアン距離が小さくなる傾向を示した。また、その変化量は点密度がある程度大きくなると小さくなる傾向が認められた。
- (4) 本研究で定義した気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数

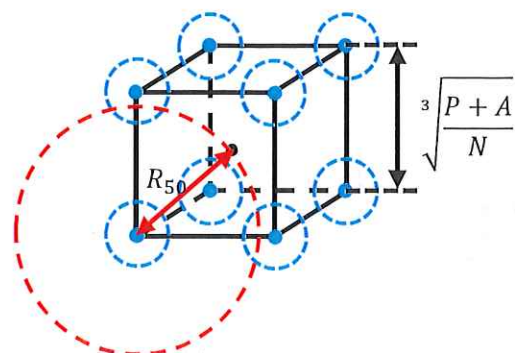


図-7 気泡間隔係数が想定する気泡配置と R_{50} の対応

$\bar{L}$ には直線で近似できる極めて高い相関性がみられ、それぞれの値もほぼ一致することが確認された。

- (5) セメントペーストにおいて、点過程統計量から気泡間隔係数の推定は可能なようである。モルタルやコンクリートは、骨材による気泡の空間分布の制限があると推測されるため、さらなる検討が必要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号：24560564、研究代表者：五十嵐心一）の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949
- 2) 鮎田耕一, 桜井宏, 田辺寛一郎: 硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析, 土木学会論文集, No.420, Vol.13, pp81-86, 1990
- 3) 小長井宜生, 大橋猛, 根本任宏: 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論, 土木試験所月報, No.396, 1986
- 4) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012
- 5) Snyder, K. A. : A Numerical Test of Air Void Spacing Equations, Advanced Cement Based Materials, Vol.8, No.1, pp.28-44, 1998
- 6) Stoyan, D. and Kendall, W. S. and Mecke, J. : STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd, 1995
- 7) 川村満紀: 土木材料科学, 森北出版株式会社, 1996
- 8) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 作榮二郎: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.59-69, 2012

モルタル中の気泡の点過程としての特徴と 間引きシミュレーションによる空間分布の再現

室谷卓実^{*1} 古東秀文^{*1} 五十嵐心一^{*2}

^{*1} 金沢大学 大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

^{*2} 金沢大学 理工学域環境デザイン学類(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

要旨：モルタル中の気泡の空間分布構造を点過程として定量的に評価した。さらに、点過程に対する間引きシミュレーションによって再現した気泡の空間分布と実際のモルタル中の空間分布の比較を行い、骨材による分布の制限が実際の分布に及ぼす影響および、空間分布の再現可能性について検討した。セメントペースト中の気泡はランダムに分布するが、骨材の存在するモルタル中の気泡は骨材による分布の制限によって、凝集側の分布を示すことが確認された。また、間引きシミュレーションによって実際のモルタル中の気泡分布の特徴および点間距離が再現可能であることが示唆された。

キーワード：気泡、画像解析、スキャナ、点過程、空間分布、間引き、シミュレーション

1. 序論

コンクリートの構成相として骨材とセメントペーストおよび気泡が挙げられる。このうち気泡は体積率としては他に比べてかなり小さいが、コンクリートのフレッシュ特性、強度や物質透過性および凍結融解抵抗性など様々な物性に関わる重要な構成相である。よって、この構造を評価することはコンクリートの物性を理解するうえで重大な意味を持つ。コンクリート中の気泡組織の評価は ASTM C 457 に規定される目視による顕微鏡観察によって行われてきた。しかし、測定に多大な労力を要することから近年では、簡便に測定することを目的として画像解析法を用いた評価が行われるようになってきている。気泡組織評価における画像解析法の適用に関しては、小長井ら¹⁾がその理論的根拠を明確にした。さらに従来の点解析(修正ポイントカウント法)や線解析(リニアトラバース法)の代わりとなる方法として、面積解析の原理を応用した新しい画像解析法を提案し、その基礎理論を体系化した。これにより画像解析法による気泡組織評価が明確となった。一方、画像解析においては対象を適切に抽出して2値化することが前提であることから、画像内の気泡部分の識別抽出を行う手法についての検討も行われてきた。例えば仁木ら²⁾は丁寧な研磨を行ったコンクリート表面を黒色スタンプ液で着色し、気泡部に白色充填剤を充填させる方法で気泡の識別を試み、検討した中では充填剤として酸化亜鉛とパラフィンの混合物が充填剤として良好な結果が得られたと報告している。また、この方法を用いて得られた結果は従来の修正ポイントカウント法による結果と相関することも報告している。西山ら³⁾は取扱いが容易で優れた浸透性を

有するシリノアクリレートに蛍光塗料を混合したものを気泡部に充填し、紫外線を照射することで気泡部の識別を試み、精度の良い測定と従来のリニアトラバース法や修正ポイントカウント法よりも迅速、簡便な解析が可能であると報告している。さらに表面の研磨や気泡部の充填などの前処理を行わずに、コンクリート表面に3方向から1方向ずつ同じ明るさの光を照射し、各方向から照射した画像を取得し、その照度差から気泡部の識別を試み、前処理なしで硬化コンクリートの気泡組織を短時間で測定することを可能としたという報告もある⁴⁾。このように従来の ASTM C 457 の顕微鏡観察の手順を画像処理に適用する場合は、視認対象の抽出という点においてやや煩雑な手順、工夫が必要となる。また、労力の軽減に関する別の視点からの検討として観察視野数に着目し、従来の狭い領域を数百視野以上測定する部分解析の代わりとして、比較的安価なフラットベッドスキャナやデジタルカメラなどによって取得した少ない画像数で全体解析を行うことの妥当性についても検討されている^{5,6)}。

画像解析法の導入によりコンクリート中の気泡の評価は従来法と比べて著しく容易となったが、ASTM C 457 の手順のままに評価を行う場合、安価とは言えない専門機器やソフトウェアが必要なようである。このため近年ではより簡便な手法によってフレッシュコンクリート中の気泡径分布を評価し、これから ASTM C 457 に規定される気泡間隔係数を求める手法も提案されている⁷⁾。

上述の気泡組織の評価方法、手順においては空気量および気泡間隔係数をいかに簡便に評価するかが主眼であり、換言すれば対象とする気泡組織がランダム性を有し、

Table 1 Mix proportion of specimens

	W/C	Name	C : S	Super plasticizer (C×%)	AE water reducing admixture (C×%)	AE admixture (C×%)
Cement Paste	0.40	C-Ref	1 : 0	—	—	—
		C-AE①			0.25	—
		C-AE②			0.25	0.02
Mortar	0.40	M1-Ref	1 : 1	0.1	—	—
		M1-AE①				0.06
		M1-AE②				0.1
		M2-Ref	1 : 2	0.45	—	—
		M2-AE①				0.002
		M2-AE②				0.006

等方的かつ均質であるとするモデルベースのステレオロジーをもとに気泡間隔係数を求めることが目的となっている。しかし、実際のコンクリートにおいては、気泡が存在しうるのはセメントペーストマトリックス中であって、必ずしも観察視野内にランダムに分布することはできない。さらにセメントペーストマトリックス内であっても骨材粒子間距離の制限を受けることから、存在できる気泡の寸法にも場所によって制限があると考えられ、さらにはブリーディングの影響による気泡の破泡や合一⁸⁾などもあって、これらもランダム性を変化させる可能性がある。このような対象物の分布のランダム性の程度を簡便に定量評価する手法として点過程理論がある。対象物を点に置き換え、その点の空間内の分布状態を確率に裏付けられた値として評価する点過程理論を適用すれば、分布の凝集性や規則性がランダム分布からのずれとして簡単に評価でき、さらに点間距離として気泡間隔をとらえることも可能となる。

著者⁹⁾はセメントペースト中の気泡に対して点過程理論を適用し、セメントペースト中の気泡はランダムに分布していることを確認している。しかし、上述のように骨材の存在する場合における気泡の分布のランダム性は明らかになっていない。したがって本研究においては、低倍率の画像に対して点過程理論を適用し、モルタル中の気泡の分布構造を定量的に評価することを目的とする。さらに骨材による分布の制限を点の間引きによって表わし、この操作によって再現されたモルタル中の気泡の空間分布と実際の分布の比較を行い、骨材の存在および骨材体積が気泡の分布に及ぼす影響について検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体の作製

セメントには普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³、比表面積 3,310cm²/g)を使用し、骨材には川砂(密度: 2.60g/cm³、吸水率: 2.03g/cm³)を用い、水セメント比 0.40 のセメントペーストおよびモルタルを作製した。モルタルはセメント: 砂=1:1、1:2 の配合条件とした。また、モルタルにおいては、混和剤と

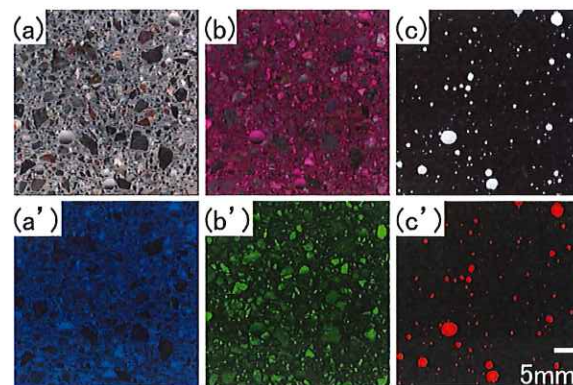


Fig. 1 Example of images processed and extraction of RGB components

してポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を使用し、締固めが可能なワーカビリティになるようにした。また、リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤および、アルキルエーテル系陰イオン活性剤を主成分とする AE 剤を用い、これらの使用量を変化させることによって空気量を変化させた。JIS R 5201 に準じてセメントペーストおよびモルタルを練り混ぜ、フロー測定を行った。また、小型エアメーターを用いて空気量を測定した。その後、40mm×40mm×160mm の角柱型枠に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生(20℃)を行った。作製した供試体の配合を Table 1 に示す。

2.2 画像取得

(1) セメントペースト画像の取得

養生終了後、各供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し、耐水研磨紙を用いて切断面の研磨を行った。研磨終了後、試料を 50℃ の乾燥炉に入れ、10 分程度乾燥させた。その後、試料断面を黒色インクで塗り潰し、乾燥後に白色粉末(炭酸カルシウム微粉末、粒径範囲 12~13μm)を気泡に充填させた。その後、市販のフラットベッドスキャナを用いて等倍率の断面画像を取得した。

(2) モルタル画像の取得¹⁰⁾

モルタル試験体においては、同様にフラットベッドスキャナを用いて試料断面のカラー画像(Fig. 1(a))を取得した。その後、セメントペーストマトリックス領域と同色の骨材を抽出するために、試料の研磨面に対して 1% フェノールフタレイン水溶液の噴霧を行い、セメントペースト相のみの染色を行った。呈色後、余分な水分を拭き取り、画像(Fig. 1(b))を取得した。画像を取得後、研磨面を黒色インクで塗り潰し乾燥させた。その後、気泡を白色粉末で充填した。充填後、試料表面に残った余分な粉末を除去し、白黒の断面画像(Fig. 1(c))を取得した。

本研究では簡便性を考慮して、取得する画像枚数は 10 枚とした。このときの解像度は 1,200dpi とし、1 画素は約 21.2μm に相当する。なお、試料の縁部では黒色インクの均一な染色がなされない領域が存在する場合

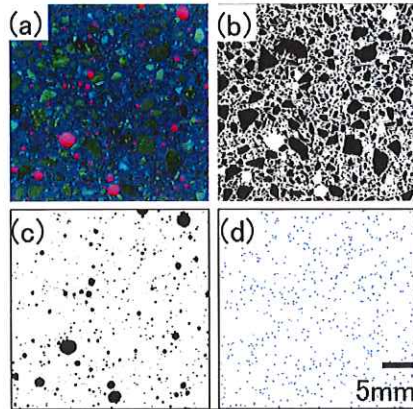


Fig. 2 Binary segmentation of aggregate and air voids and their conversion to a point process

があるため、中心から 30mm×30mm の領域を解析領域とした。

2.3 画像解析¹⁰⁾

2.2 において取得した断面画像から青成分、緑成分および赤成分を加算した画像 (Fig. 1(a')、(b')、(c')) を取得した。なお、画像を構成する階調値は狭い範囲に集中しており、閾値の設定が困難であるため、あらかじめコントラストを調節し補正を行った。これらの RGB 情報を持つ画像を重ね合わせるにより、骨材相、セメントペースト相および気泡をそれぞれ異なる色で表示したカラー画像を得た (Fig. 2(a))。この画像における骨材相とセメントペースト相の明度、色度の違いを利用して骨材相の抽出を行った。なお、カラー画像中における骨材色は様々である。よって、明度および色度に対して閾値を設定することによって骨材粒子を抽出した。最終的に目視で判断できた未抽出箇所に対して手動補正を施し、骨材粒子の 2 値画像とした (Fig. 2(b))。セメントペースト相の 2 値画像においては、骨材相の 2 値画像を白黒反転させることで得た。その後、画像解析ソフトを用いてモルタル中のセメントペーストマトリックス領域の面積率を求めた。また、気泡の 2 値画像においては、Fig. 1(c) の画像から画像解析ソフトを用いて取得した (Fig. 2(c))。このとき、AE 剤にて連行される気泡径の範囲はおおよそ 30~250 μ m であること¹¹⁾、およびステレオロジーの観点から多くの微細な粒子がすべて、大きな球の端面の切断による円形断面として現れているとは考えられないことから、微細な白色部は表面凹凸部であると判断し、これを除去した。残された白色部を気泡であるとみなし、この 2 値画像に対して気泡の面積率を画像解析により求め、ステレオロジーの考え方に基づきこれを気泡体積率とした。さらに個々の気泡の重心点位置座標 x_i ($i=1, \dots, n$) を求め、これを位置ベクトル x_i とみなし、気泡を点で代表させた点過程 $X = \{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした (Fig. 2(d))。

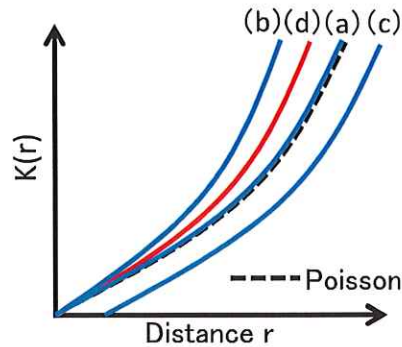


Fig. 3 Schematic graph of K function (a) random distribution, (b) clustered distribution, (c) regular distribution, (d) K function of a thinned process

2.4 点過程統計量による気泡分布の評価と再現

(1) 点密度

観察領域 W 内にある点 ($x_i \in X$) に関して、 W 内の点の個数 $N_p(W)$ を領域面積 $A(W)$ で除して点密度 $\hat{\lambda}_p$ を式[1]から求めた。

$$\hat{\lambda}_p = \frac{N_p(W)}{A(W)} \quad [1]$$

(2) K 関数

K 関数とは、任意の点 ($x_i \in X$) から半径 r 以内に存在する他点 ($x_j; i \neq j$) の個数の期待値を反映する関数である。前述の点 $x_i \in X$ を中心とする半径 r の円領域 $b(x_i, r)$ 内に、他の重心点 $x_j \in X$ ($i \neq j$) が存在するか否かを判定し、K 関数を式[2]より計算した^{12, 13)}。式中の $1(\cdot)$ は $(\cdot)$ 内が真であれば 1 を与え、偽であれば 0 を与える指示関数である。また、 $s(x)$ はエッジ補正係数であり、観察画像領域の辺長を a, b とすると、式[3]にて与えられる。

$$\hat{K}(r) = \frac{1}{\hat{\lambda}_p^2} \sum_{i \neq j} \frac{1(|x_i - x_j| \leq r)}{s(x)} \quad [2]$$

$$s(x) = ab - x(2a + 2b - x)/\pi \quad [3]$$

$$x = |x_i - x_j|$$

Fig. 3 に K 関数を模式的に示す。図中の黒破線 (a) は、点が完全にランダム (ポアソン分布) に分布するときの K 関数 ($\hat{K}(r) = \pi r^2$) を示している。求めた K 関数がこの黒破線の上下にずれることによって ((b)、(c))、その分布が規則性を持った分布なのか凝集性を持った分布なのかを判定することができる。

(3) L 関数による分布の有意性検定

K 関数を式[4]によって L 関数に変換した。

$$\hat{L}(r) = \sqrt{\hat{K}(r)/\pi} \quad [4]$$

ポアソン分布のときの L 関数 ($\bar{L}(r)=r$) に対して、対象とする分布が上下にずれたとき、この差異の有意性を判断するために、点密度から決定される点数を観察領域 W 内に二項点過程としてランダムに発生させた。この二項点過程分布に対して同様に L 関数を求めた。この手順を 200 回繰り返し、このときの L 関数の 95 % 信頼区間を決定した。これと実際の分布に対する L 関数との比較を行い、差異の有意性を判断した¹³⁾。

(4) 最近傍距離関数

最近傍距離関数とは、点過程の要素である任意の点 $x_i (x_i \in X)$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j (x_j \in X, x_i \neq x_j)$ が存在する確率を表わし、式[5]で与えられる¹²⁾。式中の $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、 s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数である。観察視野 W の辺長を x, y とすると、式[6]にて与えられる。

$$\bar{G}(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad [5]$$

$$w(s_i) = \{(x-2s_i) \cdot (y-2s_i)\}^{-1} \quad [6]$$

ここに、 s_i : 最近傍距離

b_i : 各点から画像縁までの最短距離

本研究においては気泡を点で表わしているので、この距離を変数とする関数によって、実際の分布における気泡間の距離特性を代表させていると考えることができる。

(5) セメントペーストマトリックス領域の特性化

モルタル中のセメントペーストマトリックス領域はランダムな形状となりうる。これを特性化するためにその共分散 (2 点相関関数) を求めた。共分散 $C(r)$ とは、距離 r 離れた 2 点が同一相上に載る確率関数である。セメントペーストマトリックス領域を Φ とし、2 点を $u, u+r$ ($|r|=r$) とすると、共分散 $C(r)$ は式[7]のように定義される。

$$C(r) = \Pr(u \in \Phi, u+r \in \Phi) \quad [7]$$

(6) 間引き過程の K 関数

(1) にて求めた点密度とモルタル中のセメントペーストマトリックス領域の面積率 p から、モルタル中のセメントペーストマトリックス領域 Φ に対する気泡の点密度を算出した。そして、視野全体が骨材の存在しないセメントペーストであるとして、この点密度に相当する点を全体に発生させるシミュレーションを行い、各点の座標を算出した。シミュレーションによって発生させた点過程を基本点過程 X_b として、その K 関数 K_b を求めた。また、モルタル中の骨材による制限を受けた点過程を X_p とする。もし基本点過程 X_b のうち骨材位置にある点が間引かれ、セメントペーストマトリックス領域にある点だけが生き残った結果が X_p であると考えられるならば、 $X_p = X_b \cap \Phi$ と表わされる。このとき、間引き後に残っ

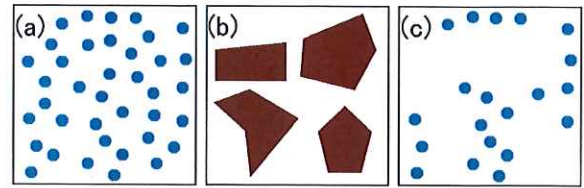


Fig. 4 Procedure of thinning points by superposition (a) basic point pattern X_b , (b) aggregate phase Φ_a , (c) points process X_s left after deleting points $x_i \notin \Phi_a$

た点過程 X_p の K 関数 K_p はセメントペーストマトリックス領域のランダム場としての空間分布を表わす共分散 $C(r)$ を用いて式[8]にて与えられる¹²⁾。

$$\bar{K}_p(r) = \frac{1}{p^2} \int_0^r C(x) d\bar{K}_b(x) \quad [8]$$

間引かれた点過程の K 関数 K_p は骨材部分の点がすべて消去されるので、結果として凝集性が現れたようになりポアソン分布よりも凝集する関数値を示すと考えられる (Fig. 3(d))。この間引き過程の K 関数 K_p と実際のモルタル中の気泡の K 関数 K_M を比較することによって骨材の影響を評価できることになる。

(7) 気泡を表わす点の間引きシミュレーション

(6) と同様に点過程 X_b をシミュレーションによって発生させた。その点過程とモルタル中の骨材相 $\Phi_a (= \Phi^c)$ の 2 値画像を直接重ね合わせ、骨材と重なった点を除去した。残った点を点過程 $X_s = X_b \cap \Phi_a^c$ とし、間引きによって得られるモルタル中の仮想的な気泡の分布とした。以上の手順を Fig. 4 に模式的に示す。点過程を発生させて、骨材の 2 値画像と重ね合わせ、点の間引きを行うシミュレーションを繰り返し、残った点の K 関数 K_s および最近傍距離関数 G_s を求め、実際の分布との比較を行った。

3. 結果および考察

3.1 画像から得られた気泡特性

Table 2 はセメントペーストおよびモルタルのフレッシュ性状および画像から得られた気泡特性を一覧にして示したものである。表中の気泡の残存率はフレッシュ時の空気量に対する硬化後の気泡体積率の割合を意味する。骨材量が増えると平均気泡径が大きくなる傾向がみられる。また Table 1 から、骨材量が多いほど空気を増やすために必要な AE 剤量が少なくなる傾向も見られる。いずれもフレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率には差がみられる。セメントペーストにおいては、空気がエントラップトエアのみの場合には硬化後の空気量はフレッシュ時の測定値の 2 分の 1 であり、空気量は半分程度損失している。しかし、AE 剤を用いてエントレインドエアが連行されると、その損失は小さくなるようである。一方モルタルにおいては、いずれも 75 %

Table 2 Fresh properties of the specimens and air voids characteristics obtained from images

	Cement paste (C : S = 1 : 0)			Mortar (C : S = 1 : 1)			Mortar (C : S = 1 : 2)		
	Ref	AE①	AE②	Ref	AE①	AE②	Ref	AE①	AE②
Flow value	195	222	227	198	197	198	202	217	218
Point density (/mm ²)	0.46	2.02	3.06	0.60	2.18	2.91	0.83	1.66	2.80
Average air void diameter (μm)	123	120	126	144	145	142	175	158	157
Air (fresh) (%)	2.4	4.9	8.5	2.0	5.5	7.2	5.7	8.6	11
Air (hardened) (%)	1.0	3.5	7.3	1.6	5.3	6.6	4.7	6.5	9.5
Coefficient of variation of the air volume (hardened)	0.13	0.06	0.06	0.11	0.10	0.11	0.14	0.08	0.06
Residual rate of air void (%)	41.7	72.2	85.9	81.8	96.4	91.7	82.7	75.6	86.4

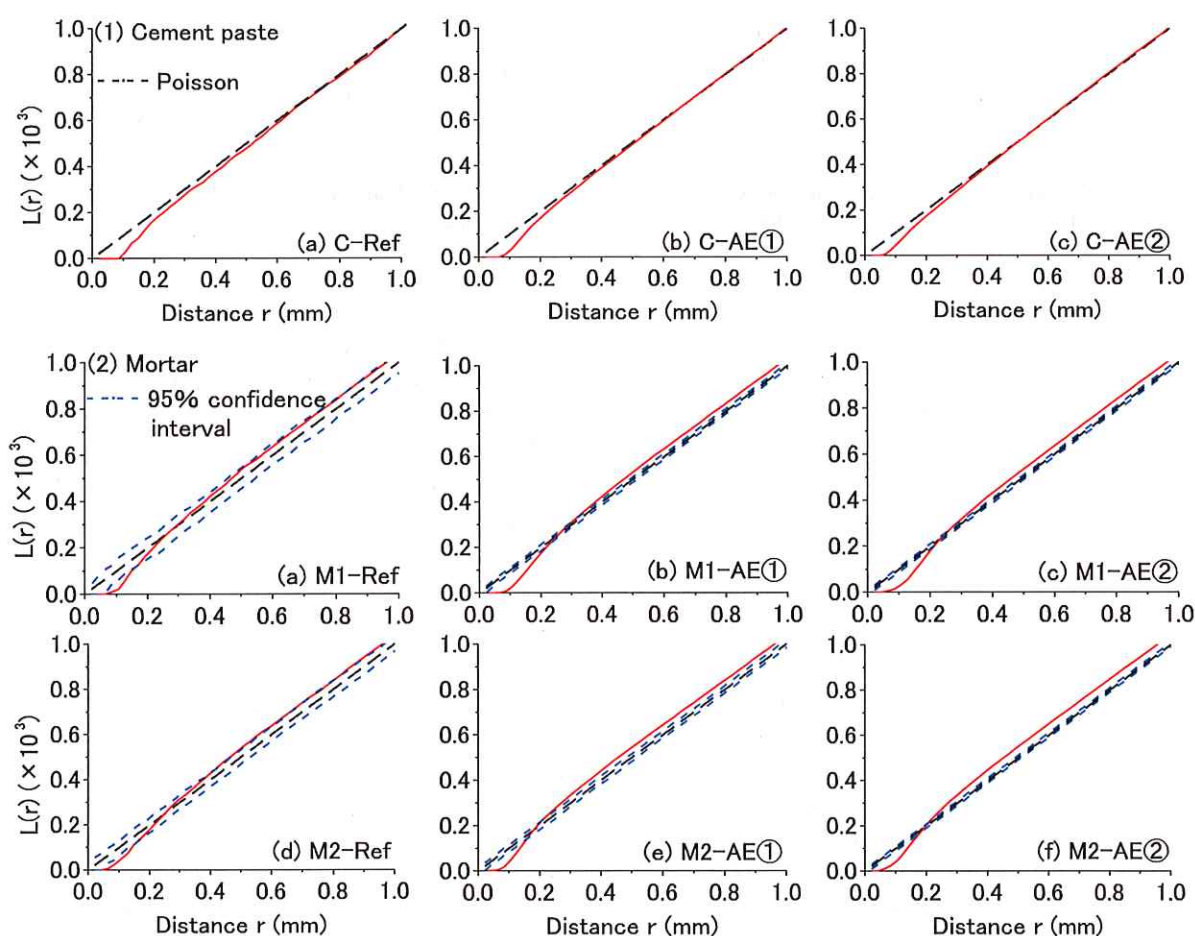


Fig. 5 L-function for air voids in cement pastes and mortars

以上残存しており、硬化時における損失は小さい。また、エントレインドエアが連行されると変動係数も小さくなる傾向が認められ、気泡体積率はより安定した特性となるようである。

3.2 骨材の影響による気泡の空間分布の変化

Fig. 5 はセメントペーストおよびモルタル中の気泡の L 関数を示したものである。図中の黒破線は、2 次元ランダム分布に相当するポアソン分布のときの L 関数を示している。いずれも距離の短い範囲において、ポアソン分布よりも関数値が明らかに低い。また、値がゼロの

範囲(横軸切片)が認められる。これは気泡そのものが大ききを持つためにその範囲には他点が存在し得ないためである。セメントペースト中の気泡においては(Fig. 5 (1))、この範囲を超えると関数値は増大してポアソン分布に一致するようになる。これより巻き込み空気であるエントラップトエアと混和剤によって連行されるエントレインドエアのいずれも、気泡径程度以上のスケールで眺めたとき、気泡はセメントペースト中においてはランダムに分布していると判断される。換言すればセメントペースト中の気泡は点をランダムに発生させるだけでそ

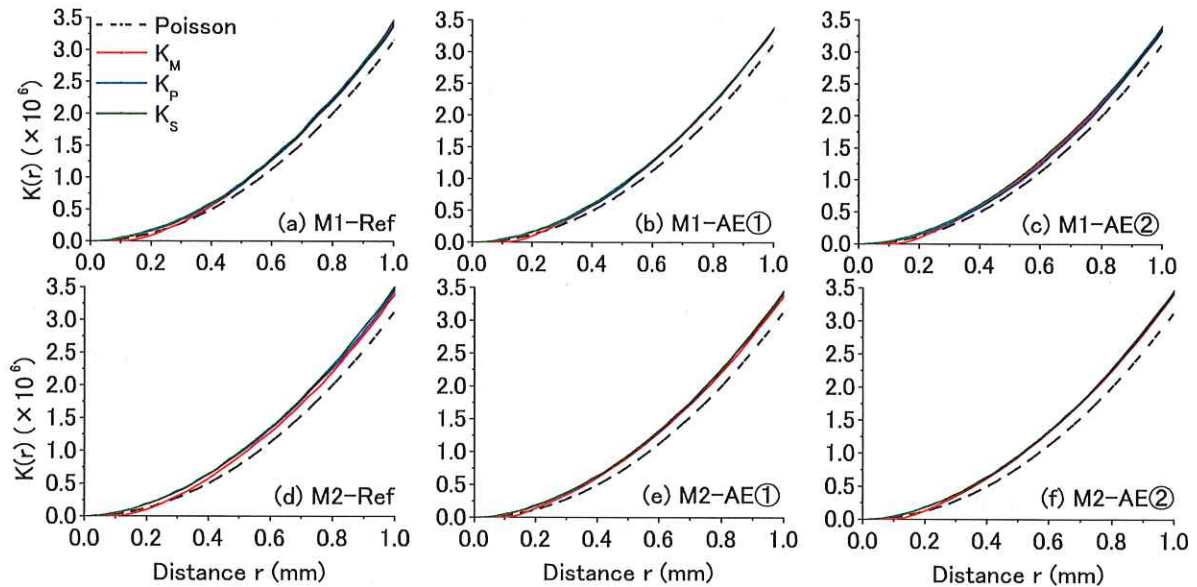


Fig. 6 Comparison of K-function for air voids in mortars (K_M : Real distribution in mortars, K_P : Interrupted point process, K_S : Point pattern thinned by superposition of aggregate images)

の分布を再現できることを意味する。また、エントレインドエアが連行され、点密度が大きくなるほど関数値はより短距離にてポアソン分布に従うようである (Fig. 5 (1)-(b), (c))。以上より間引き処理を行う際に発生させる視野全体をセメントペーストとした基本点過程 X_b は、同様にランダムな分布でよいと判断される。一方モルタル中の気泡においては、関数は黒波線より上方にプロットされるがポアソン分布よりも若干大きな値を示している程度である。これがランダム分布からの有意な差であるかどうか判断するために同じ点密度の二項点過程として点をランダムに発生させるシミュレーションを 200 回行い、95 %信頼区間 (図中青波線) を求めた。その結果、いずれの L 関数も 95 %信頼区間を外れている。また、点密度が増えるとランダム分布のばらつきが小さくなり、信頼区間の範囲が小さくなるため、その差がより顕著に表れている。これよりモルタル中の気泡はポアソン過程であるとする帰無仮説は棄却され、予想通りモルタル中の気泡は凝集性を有すると判断される。前述のように骨材の存在しないセメントペースト中では、気泡はランダムに分布している。このことからモルタル中の気泡は骨材の存在によってその分布が制限され、凝集側の分布を示したことは明らかである。また、径の影響がみられる範囲はいずれの骨材比の場合も、一般的にエントレインドエアよりも径が大きいエントラップトエアのみが存在する Ref (Fig. 5(2)-(a), (d)) の方が若干大きくなっている。さらに骨材量が増えるとより短い距離でポアソン分布より大きな値を示すようになる。これは骨材量が増えると気泡の分布がより制限され、より短い距離にて凝集性を有するようになったためと考えられる。

3.3 間引き処理による空間分布の再現

前述のように観察領域 W 全体がセメントペーストの

ときの気泡はランダムに分布するため、その分布を再現することは可能である。一方骨材が存在するモルタル中の気泡の分布は凝集性を有しているため、単純にその位置を再現することはできない。そこで前述の間引き処理の考え方をを用いて、骨材が気泡の分布に与える影響を評価し、分布の再現可能性を考察する。Fig. 6 は実際のモルタル中の気泡の K 関数 K_M 、セメントペーストマトリックス領域が点の存在可能領域で、間引き処理でその領域上の点を残存させたときの K 関数 K_P および、基本点過程 X_b と骨材の 2 値画像を直接重ね合わせて点を間引いて再現された分布の K 関数 K_S をそれぞれ比較したものである。いずれの骨材比においても、 K_P および K_S が実際のモルタル中の気泡の K 関数とほぼ一致している。換言すれば実際の気泡分布とランダムに点を消去して得た気泡の分布が完全に一致している。これより骨材は点の存在領域をランダムに制限する以上の影響を与えていないと判断される。つまり、モルタル中の気泡は視野全体で判断すると凝集性を示すが、気泡が存在できるセメントペーストマトリックス中ではランダムに分布しているといえる。さらに点過程として考えた場合、気泡粒子間には相互作用がなく、結果としてモルタル中の気泡の分布は、シミュレーションでランダムに発生させた基本点過程 X_b から、重ね合わせた画像中の骨材と重なった点を間引くだけで再現可能であると考えられる。

Fig. 7 は実際のモルタル中の気泡の最近傍距離関数 G_M および、基本点過程 X_b と骨材画像を直接重ね合わせて点を間引くシミュレーションを行って再現されたモルタル中の気泡の最近傍距離関数 G_S を示したものである。これらの図において、関数値 1.0 は累積確率関数で表わされる最近傍距離関数の収束距離であり、最大で

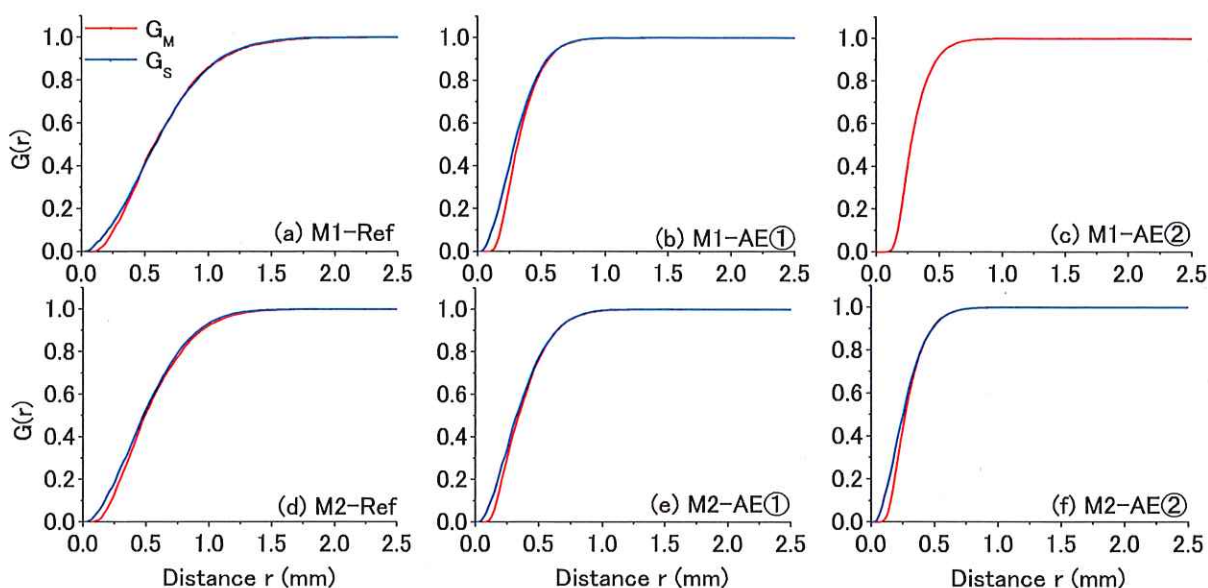


Fig. 7 Nearest-neighbor distance function for air voids in mortars (G_M : Real distribution in mortars, G_S : Point pattern thinned by superposition of aggregate images)

この収束距離以内の距離においては少なくとも他点が必ず存在することを意味する。実際のモルタル中の関数 G_M においては、 L 関数と同様に距離の短い範囲にて関数値がほぼゼロの範囲が認められる。また、空気量が増加すると収束距離が短くなっている。これは空気量および点密度が増加することにより、点がより短い距離で他点を見出すことが可能となるためである。また、収束距離が短くなることは、気泡分布を点で考える場合の分布の構造単位が小さくなることと同義であり、空気量が増えたとより狭い範囲で分布を特性化できることを示している。

再現された関数 G_S は距離の短い範囲において、実際のモルタル中の気泡の関数 G_M よりも大きな関数値を示している。これは大きさを持たない点で再現された分布は大きさを持つ実際の気泡分布とは異なり、より近距離にて他点を見出せるためである。この範囲を超えると関数値は G_M といずれの収束距離もほぼ一致している。これより間引きシミュレーションによって再現された点の分布は、実際のモルタル中の気泡の分布の特徴だけではなく、それぞれの気泡間の距離特性も再現していると考えられ、気泡の空間分布評価におけるシミュレーションの有用性を示唆する。またステレオロジーの観点からは、2次元断面に現れた点数は3次元での点数に単純に関係づけることはできない。しかし、著者ら⁹⁾は配合によっては点密度が気泡体積率と相関性を有することを確認している。よって、点密度はモルタル中の気泡量とも関係づけられることが期待され、点過程としての気泡空間分布の取扱い是有用であると考えられる。

4. 結論

本研究ではモルタル中の気泡の分布構造を点過程とし

て定量的に評価した。さらに間引きシミュレーションによって再現された気泡の分布と実際の分布の比較を行い、骨材の存在が実際の分布に及ぼす影響と、間引きシミュレーションによる分布の再現と関連づけながら考察した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) モルタル中の気泡は骨材の存在によってその分布が制限され、セメントペースト中の気泡の分布とは異なり、凝集性の分布を示すことが確認された。
- (2) モルタル中の骨材は気泡の分布に対して存在領域をランダムに制限する以上の影響を与えておらず、モルタル中の気泡は、気泡が存在できるセメントペーストマトリックス中ではランダムに分布していることが K 関数により定量的に確認された。
- (3) 骨材の2値画像を直接重ね合わせて点を間引くシミュレーションによって、実際のモルタル中の気泡の空間分布および気泡間の距離特性を再現することが可能であり、気泡の空間分布評価におけるシミュレーションの有用性が示唆された。

謝辞：

本研究の実施にあたり日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)、課題番号：24560564、研究代表者：五十嵐心一)の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献：

- 1) 小長井宣生、大橋猛、根本任宏：気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論、土木試験所月報、No. 396、pp. 2-8 (1986)
- 2) 仁木孟伯、地頭蘭博、原田克己：画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法について、セメント・コンクリート論文集、No. 39、

- pp. 141-145 (1985)
- 3) 西山孝ほか：シリノアクリレートによる硬化コンクリート中の気泡組織の染色と観察、セメント・コンクリート論文集、No. 42、pp. 212-214 (1988)
 - 4) 鮎田耕一、桜井宏、田辺寛一郎：硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析：土木学会論文集、No. 420、V-13、pp. 81-86 (1990)
 - 5) 安部洋平ほか：硬化コンクリートの気泡組織分布判定に関する研究、農業土木学会全国大会講演要旨集、pp. 572-573 (2005)
 - 6) D. Zalocha and J. Kasperkiewica : Estimation of the structure of air entrained concrete using a flatbed scanner, Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 10, pp. 2041-2046 (2005)
 - 7) 浜幸雄、太田宏平：フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 26、No. 1、pp. 669-674 (2004)
 - 8) 坂田昇ほか：コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察、コンクリート工学論文集、Vol. 23、No. 2、pp. 59-69 (2012)
 - 9) 室谷卓実ほか：点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価、コンクリート工学年次論文集、Vol. 37、No. 1、pp. 493-498 (2015)
 - 10) 横田光一郎、五十嵐心一：RGB 情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構成相の空間分布特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 35、No. 1、pp. 1759-1764 (2013)
 - 11) 川村満紀：土木材料学、森北出版株式会社 (1996)
 - 12) D. Stoyan et al. : STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd (1995)
 - 13) 島谷健一郎：点過程による樹木分布地図の解析とモデリング、日本生態学会誌、Vol. 51、pp. 87-106 (2001)

QUANTITATIVE EVALUATION OF AIR VOIDS AS A SPATIAL POINT PROCESS AND COMPARISON OF THEIR DISPERSION BETWEEN REAL AND SIMULATED POINT PATTERNS

Takuma MUROTANI^{*1} Hidefumi KOTO^{*1} and Shin-ichi IGARASHI^{*2}

^{*1} KANAZAWA UNIVERSITY, Department of Civil and Environmental Engineering (Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan)

^{*2} KANAZAWA UNIVERSITY, Institute of Science and Environmental, School of Environmental Design (Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan)

ABSTRACT : Spatial structure of air voids in concrete is crucial for not only frost resistance but also strength and permeability of concretes. In this study, spatial distribution of air voids were quantitatively evaluated by applying the point process theory to cement pastes and mortars. Air voids distribution in mortars were simulated by thinning operation for basic point processes. For the sake of easy handling of images, cement paste and mortar images were acquired by flatbed scanner. Then all the air voids visible in images were converted to points. As expected, air voids in cement paste specimens are distributed randomly regardless of air contents. On the other hand, in mortars, random dispersion of air voids is not observed since aggregate partials interfere in spatial arrangement of air voids. Cement paste matrix in mortar can be regarded as a random field. The clustered distribution of air voids in actual mortars was simulated by the thinning operation for a random point process. The simulated patterns have the same spatial characteristics as real distribution in mortars. Furthermore, characteristic distances of air voids in actual mortar are also comparable to those of the simulated patterns. Point process statistics and thinning operation for the point process are useful for evaluating and estimating air void systems in mortars.

KEY WORDS : Air voids, Image analysis, Flatbed scanner, Point process, Spatial distribution, Thinning, Simulation

モルタルの低倍率画像から得られる気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応

古東秀文^{*1} 室谷卓実^{*1} 五十嵐心一^{*2}^{*1} 金沢大学 大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻(〒920-1192 石川県金沢市角間町)^{*2} 金沢大学 理工学域環境デザイン学類(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

要旨：モルタル中の気泡分布を点過程とみなし、その最近傍距離関数から得られた特性値と気泡間隔係数との対応を評価した。さらに点の間引きシミュレーションによって再現された気泡分布と実際の分布を比較し、シミュレーションによる気泡の空間分布再現の妥当性について距離の観点から検討した。最近傍距離関数から得られたメディアン距離と気泡間隔係数には良好な相関性が認められ、実際の分布から得られた特性値は気泡間隔係数を反映する値とみなせるようである。また、再現された気泡分布に対して得られた特性値と気泡間隔係数との対応も確認され、点過程としてシミュレーションすることによって気泡間隔係数を推定することが可能と考えられる。

キーワード：気泡、画像解析、最近傍距離関数、気泡間隔係数、間引き、メディアン距離

1. 序論

コンクリート中の気泡は物質透過性や強度および凍結融解抵抗性など、コンクリートの物性に影響を与える重要な構成相の一つである。特に耐凍害性を付与することを考える場合には、気泡間隔係数を 200~250 μm 程度以下にすることが必要であるとされ^{1,2)}、その気泡間隔係数を実際に求める場合には、ASTM C 457 に規定された方法に則って計測がなされる。しかし、その計測には多大な労力を要するので、空気量と気泡間隔係数の間には有意な関係が存在することを利用し、フレッシュ時の空気量の測定をもって気泡間隔係数の条件を満足しているものとみなすのが一般的である³⁾。しかし、実際には AE 剤によって連行される気泡は必ずしも安定な存在とは言いきれず、様々な要因によって失われる。例えばコンクリートの粘性が低い場合にはコンクリートの運搬や打ち込みの過程にて失われやすく、また過剰な締固めもコンクリートの気泡を減少させる要因となる⁴⁾。すなわち所定の空気量は必ずしも打ち込まれたコンクリートにて確保されていることにはならないため、硬化体中の気泡間隔を必要とする場合には、ASTM C 457 の方法などを用いて硬化コンクリートについて顕微鏡観察を行わねばならないことになる。

以上のように耐凍害性評価における重要なパラメータである気泡間隔係数であるが、これは実際の気泡構造の距離に基づく特性値ではない。気泡間隔係数は気泡がすべて同一寸法の球で存在し、それが規則的な立方体格子点に配置された状態を仮定している。そして、セメントペーストマトリックス領域の任意の点が最寄りの気泡表面から最も遠い位置にあるときの平均的な距離を表わす

ものである。このため気泡間隔係数が同程度であっても気泡径分布が異なり、特にフライアッシュなどの混和材を混入したコンクリートでは、耐久性指数との相関が得られないという報告もある⁵⁾。硬化コンクリート断面から実際の気泡間隔をより合理的に評価する試みは、コンクリート画像取得技術と数値解析手法の発展にともない積極的に行われてきている。例えば Snyder⁶⁾はいくつかの気泡間隔に関する評価式を比較し、気泡を単一粒径ではなく、多様な寸法の球からなる気泡径分布を考慮できる Lu and Torquato 式⁷⁾が有用であると指摘している。

このような断面の情報から 3 次元的な空間分布を推定することはステレオロジーの分野における主題であるが、この分野にて近年理論が体系化され、簡便な手法として確立されつつあるのが 2 次のオーダーのステレオロジーと称される手法の一つである点過程としての取り扱いである。この考え方をを用いるならば、多様な寸法の気泡は全て点で代表させられ、その分布パターンを統計に基づいて解析していくことが可能となる。さらに気泡間隔が点間距離に対応した量として容易に評価することが可能となり、例えば ASTM C 457 がそうしているように同一寸法の気泡球を仮定するならば、気泡間隔係数に相当する距離を規則的配置ではなく実際のランダムな分布構造に対して求めることも可能となる。さらに ASTM C 457 にて許容される倍率の画像と同程度の分解能を有する画像の取得も比較的容易であって、現代では安価な機器で取扱いできる低倍率のデジタル画像であっても、かつての画像と同様の分解能を有する。すなわち、そのような低倍率画像に点過程の考え方を適用すれば、簡単に気泡分布を評価できると期待される。

Table 1 Mix proportion of specimens

	W/C	C : S	Name	Super plasticizer (C×%)	AE water reducing admixture (C×%)	AE admixture (C×%)
Cement paste	0.40	1 : 0	C-Ref	—	—	—
			C-AE①		0.10	
			C-AE②		0.25	
			C-AE③		0.50	
			C-AE④		0.25	0.01
			C-AE⑤		0.25	0.02
Mortar	0.40	1 : 1	M1-Ref	0.1	—	—
			M1-AE①			0.06
			M1-AE②			0.1
		1 : 2	M2-Ref	0.45	—	—
			M2-AE①			0.002
			M2-AE②			0.006

本研究においては骨材による分布の制限を受けるモルタルに対して気泡を点とみなした点過程を考え、従来の気泡間隔係数と類似の見方から気泡間距離を評価できる最近傍距離関数を求める。この関数に対して気泡間隔に関する特性値を定義し、これと従来の気泡間隔係数の対応を明らかにすることを目的とする。さらに仮想的な立方体格子配置とは異なる空間分布を有する気泡構造を、ランダムな点過程として再現するシミュレーションを行い、シミュレーションによって再現された分布から実際のモルタル中の気泡間隔に関する情報を推定することの妥当性について検討することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体の作製

セメントには普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3,310\text{cm}^2/\text{g}$)を使用し、骨材には川砂(密度: 2.60g/cm^3 、吸水率: 2.03g/cm^3)を用い、水セメント比 0.40 のセメントペーストおよびモルタルを作製した。混和剤にはポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を使用した。また、リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体を主成分とする AE 減水剤および、アルキルエーテル系陰イオン活性剤を主成分とする AE 剤を用い、使用量を変化させることによって空気量を変化させた。JIS R 5201 に準じてセメントペーストおよびモルタルを練り混ぜ、小型エアメーターを用いて空気量を測定した。その後、空気量の損失を最小限に抑えるため木槌による打撃で締固めを施しながら⁴⁾、 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を作製した。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生 (20°C) を行った。作製した供試体の配合を Table 1 に示す。

2.2 画像の取得

(1) セメントペースト画像の取得

養生終了後、各供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し、耐水研磨紙を用いて切断面の研磨を行った。研磨終了後、研磨面を黒色インクを用いて一様色になるように塗りつぶした。インクの乾燥後、白色粉末を気泡に

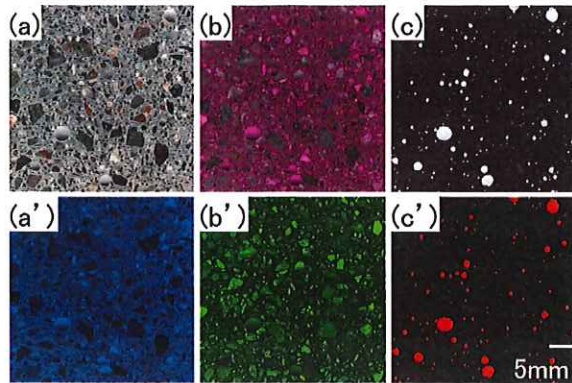


Fig. 1 Example of images processed and extraction of RGB components

充填させた。なお、白色粉末には粒径範囲が $12 \sim 13\mu\text{m}$ の炭酸カルシウム微粉末を使用した。その後、市販のフラットベッドスキャナを用いて断面画像を取得した。

(2) モルタル画像の取得⁸⁾

モルタル試料においては、(1)にて述べた手順と同様にして試料断面のカラー画像(Fig. 1(a))を取得した。本研究においては川砂を使用しており、その骨材色は多様である。これに対してセメントペースト部の色相は白色で一様であることから、試料の研磨面に対して 1 % フェノールフタレイン水溶液を噴霧することでセメントペースト相のみの染色を行い、画像(Fig. 1(b))を取得した。画像を取得後、研磨面を黒色インクで塗り潰し、気泡を白色粉末で充填した。充填後、表面に残った余分な粉末を除去し、白黒画像(Fig. 1(c))を取得した。

本研究では簡便性およびモルタル中の骨材粒子の体積代表領域があまり大きくはないことを考慮し⁹⁾、画像枚数を 10 枚とすれば、代表領域を含んだ十分に大きな領域が抽出されているとした。このとき解像度は $1,200\text{dpi}$ 、1 画素は $21.2\mu\text{m}$ に相当する。なお、取得した画像に対して断面中央部の $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ の領域を解析領域とした。

2.3 画像解析⁸⁾

2.2 にて取得したそれぞれの画像に対して、画像解析ソフトを用いて 3 枚の画像の座標位置を一致させた。その後、位置を調整した画像(Fig. 1(a))から青成分のみの情報を抽出した画像(Fig. 1(a'))を得た。同様に Fig. 1(b)、(c)の断面画像から緑成分および赤成分を加算した画像(Fig. 1(b'), (c'))を取得した。これらの RGB 情報を持つ画像を重ね合わせることで、骨材相、セメントペースト相および気泡をそれぞれ異なる色で表示したカラー画像を得た(Fig. 2(a))。このカラー画像における骨材相とセメントペースト相の明度、色度の違いを利用して骨材相の抽出を行った。重ね合わせた画像中における骨材色は様々であるため、明度および色度に対して解析時に示される濃度ヒストグラムから閾値を設定することで目的とする骨材粒子の 2 値画像を得た¹⁰⁾。最終的に目視で判断できた未抽出箇所に対して手動補正

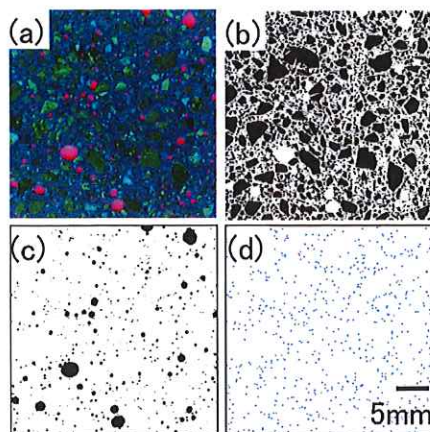


Fig. 2 Binary segmentation of aggregate and air voids and their conversion to a point process

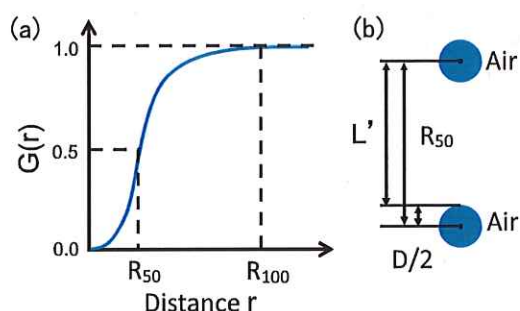


Fig. 4 Schematic drawings : (a) nearest-neighbor distance function, (b) relationship between median distance R_{50} and characteristic distance L'

を施し、骨材粒子の2値画像とした(Fig. 2(b))。また、セメントペーストマトリックス相の2値画像は骨材相の2値画像を白黒反転させることで得た。その後、画像解析によってセメントペーストマトリックス相の面積率を求めた。また、気泡の2値画像においては、Fig. 1(c)の画像のグレースケール値から直接画像解析ソフトを用いてこれを取得した(Fig. 2(c))。このときAE剤にて連行される気泡径の範囲はおおよそ30~250 μm であること¹¹⁾およびステレオロジーの観点から、多くの微細な粒子がすべて大きな球の端面の切断による円形断面として一斉に特定の断面に現れたとは考えられないことから、1画素程度の孤立した白色部は気泡以外の表面凹凸部もしくはその他の空隙であると判断しこれを除去した。残された白色部が気泡であると考え、この2値画像に対して気泡の面積率を画像解析により求め、ステレオロジーの考え方に基づきこれを気泡体積率とした。さらに個々の気泡の重心点位置座標 $x_i (i=1, \dots, n)$ を求め、これを気泡の位置ベクトル x_i とみなし、気泡を点で代表させた点過程 $X = \{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした(Fig. 2(d))。

2.4 点過程統計量による気泡分布の評価と再現

(1) 点密度

観察領域 W 内にある点($x_i \in X$)に関して、 W 内の点

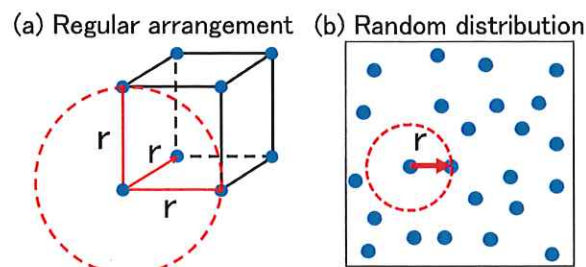


Fig. 3 Point distribution and nearest-neighbor distance r

の個数 $N_p(W)$ を領域面積 $A(W)$ で除して点密度 λ_p を式[1]から求めた。

$$\lambda_p = \frac{N_p(W)}{A(W)} \quad [1]$$

(2) 最近傍距離関数

最近傍距離関数は、点過程の要素である任意の点 $x_i (x_i \in X)$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j (x_j \in X, x_i \neq x_j)$ が存在する確率を表わす。例えば気泡間隔係数の計算において仮定している立方体配置の場合、気泡を表わす任意点から他点までの最短距離(最近傍距離)はFig. 3(a)のような立方体の一辺に相当することになる。また、2次元断面にランダムに分散している点においては、Fig. 3(b)のような任意点から最も近い点までの距離を意味することになる。最近傍距離関数は式[2]で与えられる¹²⁾。式中の $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、 s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数である。観察視野 W の辺長を x, y とすると、式[3]にて与えられる。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad [2]$$

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i) \cdot (y - 2s_i)\}^{-1} \quad [3]$$

ここに、 s_i : 最近傍距離

b_i : 各点から画像縁までの最短距離

Fig. 4(a)は最近傍距離関数を模式的に示したものである。この関数は累積確率で表わされており、関数値1.0は確率関数で表わされる最近傍距離関数の収束距離 R_{100} であり、任意の点 $x_i \in X$ の周囲にてこの収束距離の範囲までを探索すれば他点が必ず存在することを意味する。

(3) 骨材の存在を考慮した間引き処理

(1)にて求めた点密度と2.3にて求めたセメントペーストマトリックスの面積率から、モルタル中のセメントペースト相における気泡の点密度を算出した。算出した点密度に相当する点過程を基本点過程 X_b とし、この点過程をシミュレーションによって発生させた。著者ら¹³⁾

は点過程統計量を用いて、セメントペースト中の気泡がランダムに分布していることを確認している。よってシミュレーションでは観察領域に相当する画素数の範囲にて点数に相当する整数乱数をランダムに発生させ、各点の座標とした。領域全体をセメントペーストとして点をランダムに発生させた点過程 X_b に対して、実際には骨材粒子が存在するために、骨材粒子位置に存在する点は除去されなければならない。そこで基本点過程 X_b と骨材相 Φ_a を抽出した画像を重ね合わせ、骨材と重なった点を除去した。残された点過程 $X_s (= X_b \cap \Phi_a^c)$ を間引き処理によって得られたモルタル中の気泡の点過程とした。以上の手順に従い、基本点過程を 10 回発生させるシミュレーションを行った。それぞれの点の分布パターンに対して骨材画像を重ね合わせる処理を繰り返し、点過程 X_s を求めた。以上の処理手順を Fig. 5 に模式的に示す。

2.5 気泡間隔係数

ASTM C 457 に従い気泡間隔係数 L を式[4]より求めた¹⁾。また、気泡の比表面積 α は画像解析により取得した 2 値画像から得られる結果を用いて、式[5]より求めた¹⁴⁾。

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1.4^3 \sqrt{\frac{P}{A}} + 1 - 1 \right] \quad [4]$$

$$\alpha = \sqrt{6\pi/\bar{a}} \quad [5]$$

ここに、 α : 気泡の比表面積

P : ペースト容積比

A : 硬化コンクリートの空気量

$\bar{a}$: 気泡面積の平均値

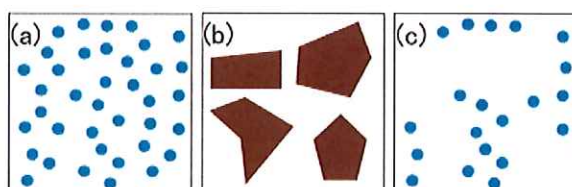


Fig. 5 Procedure of thinning points by superposition (a) basic point process X_b , (b) aggregate phase Φ_a , (c) point process X_s left after deleting points $x_i \subset \Phi_a$

3. 結果および考察

3.1 画像から得られた気泡特性

Table 2 は各試験体のフレッシュ性状および画像から得られた気泡特性を示したものである。セメントペーストにおいては、フレッシュ時のエアメーターにより測定した空気量と硬化後の画像から求めた気泡体積率の間には 1~2 % 程度の差が認められる。この原因として 2 値化の処理過程にて 1 画素の孤立の白色粒子を除去したことが一因と考えられるかもしれないが、実際にはそのような孤立粒子が全体の気泡面積に占める割合はそれほど多くなかった。よって空気量の差は打ち込みから締固め過程において失われた空気量によるところが大きいと考えられる⁴⁾。また、フレッシュ時の空気量の測定値に対する硬化後の気泡体積率の割合を残存率として求めた結果をみると、混和剤を使用していないエントラップトエアのみを含むセメントペーストが約 40 % と一番低い。これよりセメントペースト中ではエントラップトエアはエントレインドエアに比べて打ち込みから締固めの際に失われやすいと考えられる。一方、モルタルにおいては打ち込みから締固めの過程での空気損失は比較的小さい。残存率はいずれも 75 % 以上であり、エントラップトエアであってもセメントペーストに比べて硬化までの損失は明らかに小さい。また、Table 1 と Table 2 から、骨材量が多くなると空気を単位量増大させるのに必要な AE 剤量が小さくなっており、骨材は AE 剤の空気連行効果にも影響を与えていると考えられる。さらにセメントペーストとモルタルのいずれも、エントレインドエアが連行されるようになると空気量の測定値の変動係数が小さくなる傾向が認められ、エントラップトエアに比べてエントレインドエアは安定した空気の相であるといえる。

3.2 気泡間距離の変化

Fig. 6 はセメントペーストおよびモルタル中の気泡の最近傍距離関数を示したものである。いずれも距離の短い範囲にて、関数値がゼロの範囲が認められる。これは気泡そのものが大きさを持つためにその範囲には他の気泡が近寄ることはできないことを表わしている。また、エントレインドエアが連行され、空気量が増加すると収束距離が短くなる傾向が認められる。空気量の増大に対応して点密度が増加するために気泡が近距離にて他の気

Table 2 Fresh properties of specimens and air voids information obtained from images

	Cement paste (C : S = 1 : 0)						Mortar (C : S = 1 : 1)			Mortar (C : S = 1 : 2)		
	Ref	AE①	AE②	AE③	AE④	AE⑤	Ref	AE①	AE②	Ref	AE①	AE②
Flow value	195	213	222	249	228	227	198	197	198	202	217	218
Point density (/mm ²)	0.46	0.89	2.02	2.43	2.89	3.06	0.60	2.18	2.91	0.83	1.66	2.80
Average air void diameter (μm)	123	138	120	118	100	126	144	145	142	175	158	157
Air (fresh) (%)	2.4	3.4	4.9	6.4	6.0	8.5	2.0	5.5	7.2	5.7	8.6	11
Air (hardened) (%)	1.0	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3	1.6	5.3	6.6	4.7	6.5	9.5
Coefficient of variation of the air volume (hardened)	0.13	0.05	0.06	0.12	0.04	0.06	0.11	0.10	0.11	0.14	0.08	0.06
Residual rate of air void (%)	41.7	63.1	72.2	69.0	62.0	85.9	81.8	96.4	91.7	82.7	75.6	86.4

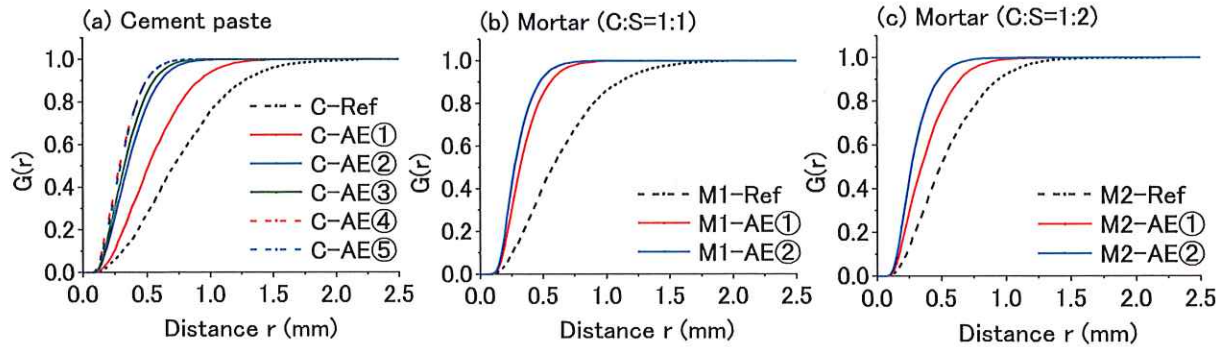


Fig. 6 Nearest-neighbor distance function for air voids in cement pastes and mortars

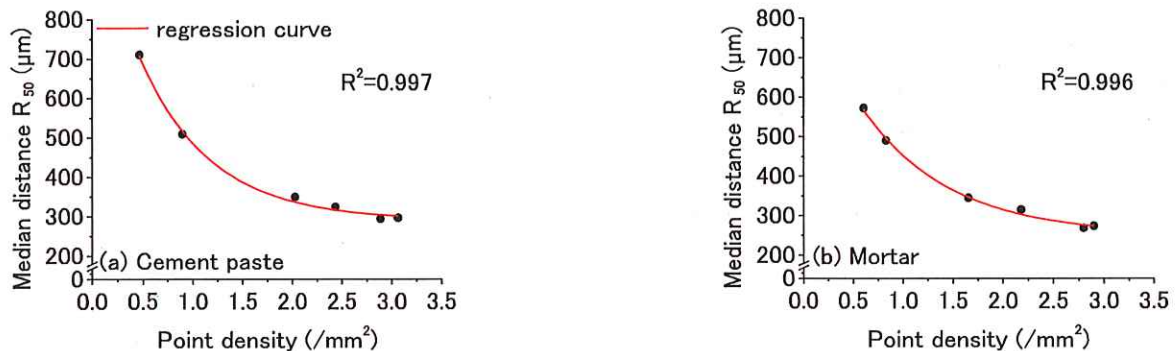


Fig. 7 Relationship between the median distance of nearest-neighbor points and point density

泡の点を見出す確率が増し、それが点間距離の短縮として現れていると考えられる。前述のように最近傍距離関数は気泡を点で表わしたとき、任意の点から最も近い他点を見出す確率を、距離を確率変数とし累積確率分布として表わしたものである。ここで、このような累積確率分布関数に対して、その代表値として第2四分位点(メディアン)に相当する距離をメディアン距離 R_{50} (Fig. 4(b))と定義し、これを実際の分布を反映した気泡間隔を代表する特性値として用いることとする¹⁵⁾。

Fig. 7はセメントペーストおよびモルタル中の気泡の点密度とメディアン距離 R_{50} の関係を示したものである。また、Table 3に各試料から得られたメディアン距離を示す。なお、モルタルはC:S=1:1と1:2の結果を合わせて示してある。これらの結果より点密度とメディアン距離の間には双曲線で近似できるような負の相関関係が存在していることは明らかである。空気量が増加して点密度が増加することにより点間距離は短くなるためメディアン距離は減少していくが、点密度がある程度大きくなるとメディアン距離の変化が小さくなることを示している。気泡自身が大きさを有することや、気泡の合¹⁶⁾などの気泡同士が及ぼす影響によって、点密度が増加して気泡同士が接近するとメディアン距離にその特徴が表われにくくなるためと考えられる。また、点密度がほぼ同じであってもモルタル中の気泡の方が、メディアン距離が短い。ランダムに分布する骨材によって気泡が存在できる領域が減少することで、中には大きな

気泡の存在し得ない領域が増加し、結果として気泡同士がより接近したためと考えられる。

3.3 気泡間隔係数と気泡間隔特性値の対応

上述のメディアン距離は実際の気泡を点で表わした時の点間距離の特性値であり、気泡径は考慮していない。一方従来から用いられている気泡間隔係数は、セメントペーストマトリックス領域の任意の点から最も近い気泡の表面までの距離の最遠距離という意味を持つ。そこで本研究では点過程統計量から得られた点間距離の特性値に対して気泡の径を考慮するために、単純にメディアン距離 R_{50} から平均気泡径 D の1/2を差し引き、これを気泡間隔特性値 L' として定義した(Fig. 4(b))。つまり気泡間隔特性値 L' を式[6]によって定義する¹⁵⁾。

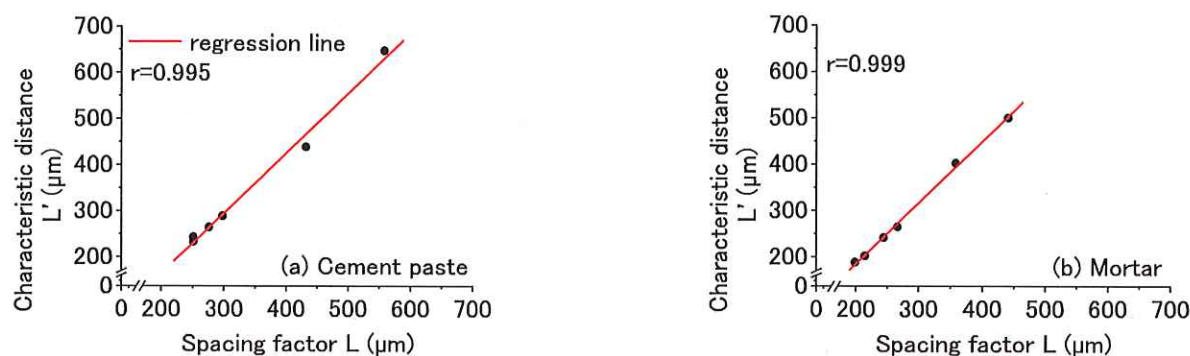
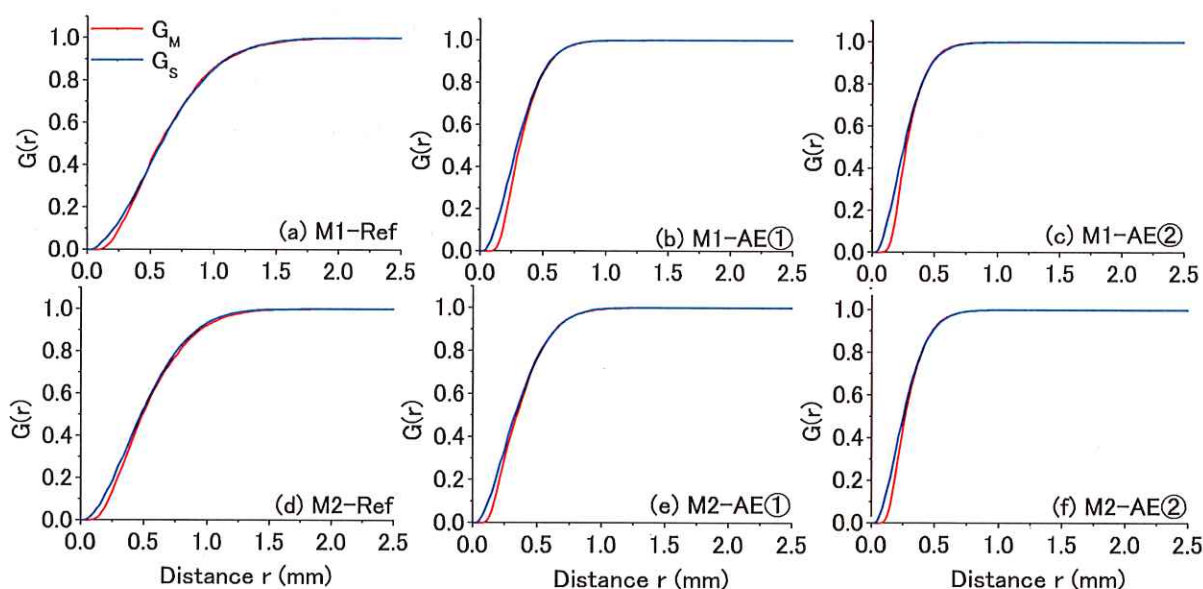
$$L' = R_{50} - D/2 \quad [6]$$

ここに、 R_{50} :メディアン距離
 D :平均気泡径

この気泡間隔特性値 L' と ASTM C 457 に規定されている気泡間隔係数 L との対応を評価した。Table 3に式[6]にて求めた気泡間隔特性値 L' と式[4]により求めた気泡間隔係数 L を示す。また、Fig. 8に気泡間隔特性値 L' とモルタル中の気泡の気泡間隔係数 L の関係を示す。気泡間隔特性値 L' は気泡間隔係数 L との間に直線で近似できる極めて高い相関性が見られる。また、

Table 3 Air parameters in the point process obtained from images

	Cement paste (C : S = 1 : 0)						Mortar (C : S = 1 : 1)			Mortar (C : S = 1 : 2)		
	Ref	AE①	AE②	AE③	AE④	AE⑤	Ref	AE①	AE②	Ref	AE①	AE②
Median distance R_{50} (μm)	710	508	349	324	293	296	572	314	273	490	344	267
Characteristic spacing L' (μm)	648	439	289	265	243	233	500	242	202	402	265	189
Spacing factor L (μm)	558	432	298	276	250	251	441	244	214	358	266	199
$L'-L$ (μm)	90	7	9	11	7	18	59	2	12	44	1	10

Fig. 8 Relationship between characteristic distance L' and spacing factor L Fig. 9 Nearest-neighbor distance function for air voids in mortars (G_M : real distribution in mortars, G_S : point patterns thinned from basic distribution)

比較的点密度の小さいエントラップドエアのみの場合には、気泡間隔係数 L と気泡間隔特性値 L' とはやや差がみられるが、エントレインドエアが連行され点密度が増加するとその差は小さくなり、空気量が多い範囲では両者はほぼ一致するようになる。これより断面画像から得られた実際のランダムな距離特性を反映させた気泡間隔特性値 L' と、ASTM C 457 に規定される仮想配置を前提とした一般的な特性値である気泡間隔係数 L との間には対応関係が存在すると判断される。これより断面に現れた気泡を点過程に変換し、その気泡間隔特性値 L' を求めれば、従来の気泡間隔係数 L を簡単に推定できると期待される。

3.4 間引き処理による空間分布の再現

Fig. 9 は最近傍距離関数 $G(r)$ に関して、実際のモルタル中の気泡の最近傍距離関数 G_M および基本点過程から骨材部の点を間引くシミュレーションによって再現したモルタル中の気泡の最近傍距離関数 G_S を比較して示したものである。いずれも点密度が増加すると収束距離が短くなっている。また、間引きシミュレーションでは点をランダムに独立に発生させているため、径の大きさによる影響はない。このため短い距離の範囲においても他点が存在することが可能となるため、関数値がゼロの範囲が小さくなり、短距離の範囲にて実際のモルタル中の気泡の最近傍距離関数 G_M よりも大きな関数値を示

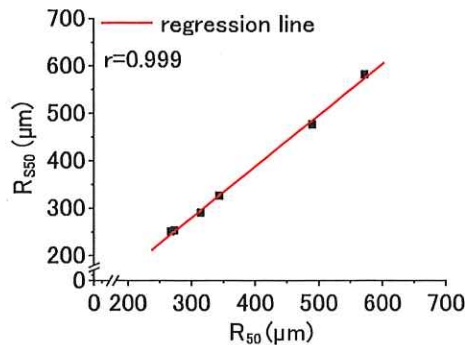


Fig. 10 Relationship between median distances in thinned processes and real distribution of air voids in mortars

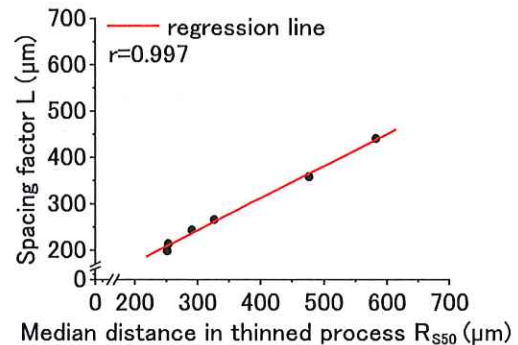


Fig. 11 Relationship between spacing factors in mortars and median distances in simulated processes

す。しかし、この範囲を超えるとシミュレーションの気泡分布の関数値 G_s と実際の分布の関数値 G_M とはほぼ一致している。これより基本点過程 X_b から間引きシミュレーションによって再現された気泡の分布は、実際の気泡分布を十分に再現し、気泡間の距離の特性値を得ることが可能であると考えられる。

Fig. 10 は間引きシミュレーションから得られたメディアン距離 R_{S50} と実際のモルタル中の気泡分布から得られたメディアン距離 R_{50} の関係を示したものである。両者には非常に良好な相関がみられる。さらに両者の値はほぼ一致する。すなわち気泡に対応する点をランダムに発生させ、ランダム配置をとる骨材相当域の点を除去する点過程シミュレーションを行うことにより、実際のモルタル中の気泡のメディアン距離を推定することは可能であると考えられる。Fig. 11 は間引きシミュレーションによって再現されたメディアン距離 R_{S50} と実際のモルタル中の気泡間隔係数 L の関係を示したものである。この場合にも両者の間には直線で近似できる非常に良好な相関性がみられる。以上のことからランダムに発生させた点に対して間引きシミュレーションを行うことにより、実際の気泡の気泡間隔係数 L を推定することは十分可能であると考えられる。つまり耐凍害性の判断や AE 剤によるより効果的な空気連行などを考える場合において、気泡間隔係数と密接に対応した値が単純な低倍率の画像から簡便に得られることになり、低倍率画像への点過程の適用は非常に有用なものと考えられる。

4. 結論

本研究では気泡の分布を点過程で代表させ、点過程統計量から得られた 2 次のステレオロジー量である最近傍距離関数から得られる気泡間距離に関する特性値と、気泡間隔係数との対応を明らかにした。さらに間引きシミュレーションによって再現された分布から得られる特性値との対応も評価し、シミュレーションによる気泡の空間分布評価の有用性についての検討を行った。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 同じ点密度であってもモルタル中の気泡の方がメ

ディアン距離は短く、骨材の存在により気泡がセメントペースト中よりも接近していると考えられる。

- (2) 最近傍距離関数から得られたメディアン距離を用いた気泡間隔特性値と気泡間隔係数は非常に強い相関性があり、実際の気泡分布画像から簡単に得られるメディアン距離を気泡間隔係数に対応づけることが可能である。
- (3) 間引きシミュレーションによって再現された分布から得られたメディアン距離と実際のメディアン距離はほぼ一致し、気泡分布を簡単な点過程シミュレーションとして再現できる。
- (4) 再現された分布から得られたメディアン距離は実際の気泡間隔係数とも非常に良好な相関性が認められた。低倍率画像の気泡を点過程として表わすことは、気泡間隔係数の推定のみならず気泡の空間分布の定量評価の有用な手段である。

謝辞：

本研究の実施にあたり日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)、課題番号：24560564、研究代表者：五十嵐心一)の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献：

- 1) T. C. Powers : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol. 29, pp. 184-211 (1949)
- 2) A. M. Neville : ネビルのコンクリートバイブル、技報堂出版株式会社 (2004)
- 3) 笠井芳夫 : コンクリート総覧、技術書院 (1998)
- 4) 高橋和雄 : コンクリート製品の振動による空気量の減少について、農業土木学会論文集、第 143 号、pp. 69-77 (1989)
- 5) 坂田昇ほか : コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察、コンクリート工学論文集、Vol. 23, No. 1, pp. 35-47 (2012)
- 6) K. A. Snyder : A Numerical Test of Air Void Spacing Equations, Advanced Cement Based Materials,

- Vol. 8, No. 1, pp. 28-44 (1998)
- 7) B. Lu and S. Torquato : Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle systems, *Physical Review A*, Vol. 45, No. 8, pp. 5530-5544 (1995)
 - 8) 横田光一郎、五十嵐心一 : RGB 情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構成相の空間分布特性に関する研究、*コンクリート工学年次論文集*、Vol. 35, No. 1, pp. 1759-1764 (2013)
 - 9) D. Giang Hoang、五十嵐心一、内藤大輔 : コンクリート画像からの骨材相の抽出と粒度分布の推定、*コンクリート工学年次論文集*、Vol. 31, No. 1, pp. 2065-2070 (2009)
 - 10) D. Zalocha and J. Kasperkiewica : Estimation of the structure of air entrained concrete using a flatbed scanner, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 10, pp. 2041-2046 (2005)
 - 11) 川村満紀 : 土木材料学、森北出版株式会社 (1996)
 - 12) D. Stoyan et al. : *STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS*, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd (1995)
 - 13) 室谷卓実ほか : 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価、*コンクリート工学年次論文集*、Vol. 37, No. 1, pp. 493-498 (2015)
 - 14) 小長井宣生、大橋猛、根本任宏 : 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論、*土木試験所月報*、No. 396, pp. 2-8 (1986)
 - 15) 古東秀文ほか : 気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応、*コンクリート工学年次論文集*、Vol. 37, No. 1, pp. 841-846 (2015)
 - 16) 作榮二郎ほか : 中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの気泡組織に及ぼすブリーディングの影響、*コンクリート工学年次論文集*、Vol. 36, No. 1, pp. 1408-1413 (2014)

EVALUATION OF CHARACTERISTIC SPACING DISTANCES BETWEEN AIR VOIDS IN MORTAR IMAGES ACQUIRED AT A LOW MAGNIFICATION

Hidefumi KOTO^{*1}, Takuma MUROTANI^{*1} and Shin-ichi IGARASHI^{*2}

^{*1} KANAZAWA UNIVERSITY, Department of Civil and Environmental Engineering (Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan)

^{*2} KANAZAWA UNIVERSITY, Institute of Science and Environmental, School of Environmental Design (Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan)

ABSTRACT : Spacing factors of air voids are important parameters to determine frost resistance of concretes. However, the procedure to measure the factors are very time-consuming. In this study, aiming at establishing a simple way to estimate the spacing factor, the spatial point process theory was applied to cement pastes and mortars. All the air voids visible in images of a low magnification were converted to points dispersed in the observation field. The nearest-neighbor distance function was calculated for those points. The median distance derived from the function was regarded as a characteristic for a point process. Furthermore, air voids distribution in mortars was represented by using thinning simulation for a basic point process. The simulated patterns were compared with real air voids distribution in actual mortars. The median distances in those point processes were also compared to spacing factors which were calculated in accordance with the definition of ASTM C 457. The median distances are very close to the spacing factors. Furthermore, there were good correlation between the median distances for the simulated point patterns and real spacing factors for actual mortars. These facts suggest that the concept of spatial point process is very useful for evaluating air voids system in mortars, and that thinning operation of point processes is a promising way for simulating real air void systems.

KEY WORDS : Air voids, Image analysis, Nearest-neighbor distance function, Spacing factor, Thinning, Median distance

論文 コンクリート中の気泡の点過程としての特徴量と凍結融解抵抗性の対応

古東 秀文^{*1}・室谷 卓実^{*2}・五十嵐 心一^{*3}・山本 瑞希^{*4}

要旨：コンクリート中の気泡に点過程理論を適用し、最近傍距離関数から得られる気泡間隔特性値と従来からの気泡間隔係数との対応を検討した。また、スケーリング試験結果との対応を基に、耐凍害性評価に距離に関する点過程統計量を導入することの有用性について検討した。その結果、最近傍距離関数から得られる気泡間隔特性値が従来の気泡間隔係数と極めて良好な正の相関を有し、スケーリング量とも良好な対応が存在することが明らかになった。最近傍距離関数から得られる気泡間隔特性値は、耐凍害性の評価において有用な指標となると期待される。

キーワード：点過程、気泡、最近傍距離関数、メディアン距離、気泡間隔係数、スケーリング

1. 序論

耐凍害性を考慮しなければならないとき、コンクリートに存在すべき量として推奨される空気量は一般的に 4～6%程度であり、セメント・水・骨材・空気要素で考えた場合、最も体積率の小さな構成要素である。しかし、体積率の小さい空気がコンクリートの物性に与える影響が小さくないことは周知である。より良いコンクリートには安定した空気の存在が不可欠となる。空気量測定は一般的に JIS A 1128 に規定される「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に従い測定される。しかし、耐凍害性の評価においては空気量の総量だけでは十分でなく、より厳密に耐凍害性を考える場合には、硬化コンクリート中の気泡の間隔が重要な意味を持つ。

Powers¹⁾により提案された耐凍害性の指標である気泡間隔係数は、コンクリート中の気泡組織を定量評価するために、同一径の気泡が規則的に配置されている分布を仮定し、その分布における気泡間の平均距離の最大値を表している。この気泡間隔係数は現在に至るまで耐凍害性を評価する指標となっている。しかし、測定には多大な労力を必要とすることから、より簡便な測定手法で気泡間隔係数を求めようとする研究も活発になされてきた。例えば、濱ら²⁾は浮力法によって簡便に気泡間隔係数を求めている。また、杉山ら³⁾は X 線 CT 法によって 3 次元空隙画像を取得し、より詳細に気泡間隔係数を求める手法を提案している。

以上の研究はこれまで多くの研究報告がなされ、信頼に足るパラメータである気泡間隔係数を簡便に評価することを目的としている。これに対して近年、空間データの数理モデリングが、多くの分野で活発に研究が進めら

れるようになると、これを用いてコンクリート中の気泡の実際の分布をより合理的に適切に評価しようとする研究が進められている。例えば Snyder⁴⁾はこれまでに提案されているいくつかの気泡間隔評価式に関して数値解析によりその妥当性を検討している。しかし、この数値解析においては骨材の存在を無視しており、実際のコンクリート中の気泡間の距離との対応は明確ではない。

コンクリート中にて気泡が存在しうる領域はセメントペーストマトリックス相であり、この相の形状や大きさは当然のことながら骨材量や骨材寸法の影響を受ける。よって、実際のコンクリート中の気泡の距離特性値を求めようとするならば、骨材による存在の制限と空間分布のランダム性を考慮する必要がある。これを比較的簡単に行える手段として点過程の考え方が挙げられ、著者らはセメントペーストやモルタル中の気泡のランダム性と距離特性を評価してきた^{5) 6)}。その結果、低倍率画像として簡単に取得できる画像から求められる距離特性値が、気泡間隔係数と対応した現実の空間分布の距離を代表できることを指摘してきた⁷⁾。

本研究においては、その考え方をコンクリートに適用し、骨材量が大きく、より強い分布制限を受ける空間内での気泡間隔特性値を求める。その特性値と気泡間隔係数の対応、およびスケーリング試験結果との対応性を明らかにし、実際の分布を直接評価しうる気泡間隔特性値の有用性について論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.15

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻（学生会員）

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻（学生会員）

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工)（正会員）

*4 金沢大学 理工学域環境デザイン学類（学生会員）

表-1 示方配合

名称	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	(kg/m ³)				(C×%)	
					W	C	G	S	AE 減水剤	AE 剤
C1-①				2.5±0.5			1033	686		0.001
C1-②	40	39.9	15±2	4.5±0.5	175	438	1002	665	0.25	0.002
C1-③				7.0±0.5			963	639		0.012
C2-①				2.0±0.5			1045	785		-
C2-②	55	42.9	15±2	4.5±0.5	175	318	1008	754	0.25	0.002
C2-③				9.0±0.5			941	707		0.010

g/cm³, 比表面積: 3310cm²/g) を使用し, 骨材には川砂 (密度: 2.60 g/cm³, 吸水率: 2.05%) および川砂利 (密度: 2.60 g/cm³, 吸水率: 1.81%, 最大骨材寸法: 25mm) を用いた。水セメント比は 0.40 と 0.55 とした。混和剤には AE 減水剤および AE 剤を用いた。コンクリートの示方配合を表-1 に示す。本研究では AE 剤量を調整し, 各水セメント比に対して 3 種類ずつ (計 6 種類) の空気量の異なるコンクリートを作製した。JIS R 5201 に準じてコンクリートを練り混ぜ, 100mm×100mm×400mm の型枠に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し, 材齢 7 日まで水中養生 (20°C) を行った。

2.2 試料の作製および画像取得

養生終了後, 各供試体から厚さ 15mm 程度の板状試料を切り出し, 耐水研磨紙を用いて切断面の研磨を行った。Zalocha ら⁸⁾は市販のフラットベッドスキャナによって取得した画像を用いても, ASTM C 457 の実体顕微鏡を用いた画像解析と同等の精度の解析結果が得られると述べている。そこで本研究では, 簡便性も考慮してフラットベッドスキャナを用いて画像を取得した。まず, フラットベッドスキャナを用いて試料断面のカラー画像を取得した。さらに, セメントペースト相と同色の骨材を抽出するために, 試料の研磨面に対して 1%フェノールフタレイン水溶液の噴霧を行い, セメントペースト相の染色を行った。呈色後, 余分な水分を拭き取り画像を取得した。画像を取得後, 研磨面を黒色インクで塗り潰した。その後, 気泡を白色粉末で充填した。充填後, 試料表面に残った余分な粉末を除去し, 白黒画像を取得した。本研究では簡便性を考慮して, 取得する画像枚数は 10 枚とした。このときの解像度は 847dpi とし, 1 画素は約 30μm に相当する。なお, 試料の縁部では黒色インクの均一な染色がなされない領域が存在する場合があるため, 中心から 60mm×60mm の領域を解析領域とした。

2.3 画像解析

取得した断面画像, フェノール呈色画像および白黒画像からそれぞれ青成分, 緑成分および赤成分を加算した画像を取得し, これらの RGB 情報を持つ画像を重ね合わせるにより, 骨材相, セメントペースト相および気泡をそれぞれ異なる色で表示した RGB 画像を得た⁹⁾。重ね合わせた画像中における骨材色は様々であるため,

明度および色度に対して解析時に示される濃度ヒストグラムから閾値を設定することで目的とする骨材粒子の 2 値画像を得た。最終的に目視で判断できた未抽出箇所に対して手動補正を施し, 骨材粒子の 2 値画像とした。また, 気泡の 2 値画像については, 白黒画像のグレースケール値から直接画像解析ソフトを用いて気泡が抽出された 2 値画像を取得した。このとき, AE 剤にて連行される気泡径の範囲はおおよそ 30~250μm であること¹⁰⁾および, ステレオロジーの観点から多くの微細な粒子がすべて大きな球の端面の切断による円形断面として一斉に特定の断面に現れたとは考えられないことから, 1 画素程度の孤立した白色部は気泡以外の表面凹凸部もしくはその他の空隙であると判断しこれを除去した。残された白色部が気泡であると考え, この 2 値画像に対して気泡面積率を画像解析により求め, これを気泡体積率とみなした。さらに, 個々の気泡の重心点位置座標 $x_i (i=1, \dots, n)$ を求め, これを気泡の位置ベクトル x_i とみなし, 気泡を点で代表させた点過程 $X=\{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。

2.4 点過程統計量による気泡分布の評価

(1) 点密度

観察領域 W 内にある点($x_i \in X$)に関して, 点の個数 $N(W)$ を領域面積 $A(W)$ で除して点密度 λ を求めた¹¹⁾。

(2) 最近傍距離関数

最近傍距離関数とは, 点過程の要素である任意の点 $x_i (x_i \in X)$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j (x_j \in X, x_i \neq x_j)$ が存在する確率を表し, 式(1)で与えられる¹¹⁾。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (1)$$

式中の $1(\quad)$ は $(\quad)$ 内が真であれば 1 を与え, 偽であれば 0 を与える指示関数である。また, $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり, s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数である。観察視野 W の辺長を x, y とすると, 式(2)にて与えられる¹¹⁾。

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i) \cdot (y - 2s_i)\}^{-1} \quad (2)$$

ここに, s_i は最近傍距離であり, b_i は各点から画像縁までの最短距離を表す。また, 完全ランダム分布のときの最近傍距離関数は式(3)で表される¹¹⁾。

$$G(r) = 1 - \exp(-\lambda \pi r^2) \quad (3)$$

(3) メディアン距離と気泡間隔特性値

最近傍距離関数は累積確率で表されている。この関数分布から得られる特性値として, 累積確率の中央値をメディアン距離 R_{50} とした (図-1(a))。メディアン距離は任意の点 $x_i \in X$ の周囲にてこの距離範囲までを探索すれば 50%の確率で他点が必ず存在することを意味する。このメディアン距離は実際の気泡を点で表した時の点間距離である。これに気泡の径を考慮するため単純にメディアン距離 R_{50} から平均気泡径 D の 1/2 を差し引き, これを

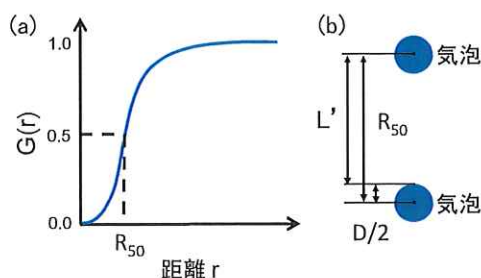


図-1 模式図 (a)最近傍距離関数, (b) R_{50} と L' の関係

気泡間隔特性 L' として定義した (図-1(b))。すなわち気泡間隔特性値 L' は式(4)にて定義する⁷⁾。

$$L' = R_{50} - D/2 \quad (4)$$

2.5 気泡間隔係数

ASTM C 457 に従い気泡間隔係数を式(5)より求めた⁷⁾。

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1.4^3 \sqrt{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad (P/A \geq 4.342) \quad (5a)$$

$$L = \frac{P}{A\alpha} \quad (P/A \leq 4.342) \quad (5b)$$

ここに, α : 気泡の比表面積

P : ペースト容積比

A : 硬化コンクリートの空気量

本研究においては, 2 値画像から得られる結果から気泡の比表面積 α を式(6)から求めた¹²⁾。

$$\alpha = \sqrt{6\pi/\bar{a}} \quad (6)$$

ここに, $\bar{a}$: 気泡面積の平均値

2.6 スケーリング試験

JSCE-K 572, RILEM CDF および ASTM C 672 を参考にスケーリング試験を行った。供試体および試験面に関しては JSCE-K 572, 試験液の吸水方法に関しては RILEM CDF, 温度条件および試験サイクルに関しては ASTM C 672 を参考にした。2.1 にて作製したコンクリートに対して材齢 14 日まで水中養生 (20°C) を行った。その後, 供試体を 100mm×100mm×100mm に切断し, 各配合に対して 6 個ずつ用意した。また, 供試体側面を試験面とし, 試験面以外からの劣化を防ぐために側面以外の面にエポキシ樹脂で被覆した。図-2 のようにスペーサーを設置した容器に供試体を設置し, 14 日間 (材齢 28 日) の乾燥養生 (相対湿度 60%, 温度 20°C) を行った。また, 乾燥養生終了の 7 日前 (材齢 21 日) に濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液を試験面から浸漬深さが 5mm となるよう

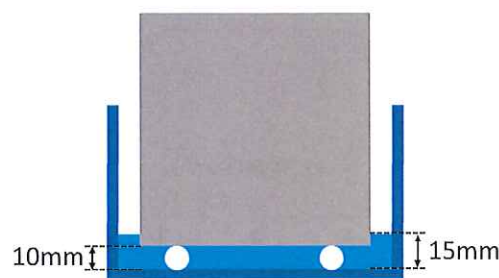


図-2 スケーリング試験用供試体の模式図

に入れ, 下面吸着法による試験液の吸水を行った。乾燥養生終了後, 冷温槽 (温度 -20°C) にて 18 時間静置した。その後, 供試体を冷温槽から取り出し, 温度 20°C にて 6 時間静置した。以上の計 24 時間を 1 サイクルとしてコンクリートに凍結融解のサイクルを与えた。凍結融解 5 サイクルごとにスケーリング量を計測した。n サイクル後のスケーリング量を計測し, 式(7)より単位面積当たりの累積スケーリング量を求めた。

$$S_n = \frac{\sum m_n}{A} \quad (7)$$

ここに, S_n : n サイクル後の累積のスケーリング量

m_n : n サイクル後のスケーリング片の質量

A : 試験面の面積

3. 結果および考察

3.1 気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応

表-2 に画像解析によって得られた気泡特性を示す。W/C=0.40 では点密度が大きくなるに従い, 硬化後の気泡体積率も大きくなっている。この傾向は, W/C=0.55 においても同様であり, 硬化後の気泡体積率が増加すると気泡点密度も同様に増加することが確認された。また, 平均気泡径は, W/C=0.55 よりも W/C=0.40 の方が小さく, 気泡残存率も比較的低いことから, W/C=0.40 の系は締固めの際に径の大きな気泡が多く失われたと推測される。

図-3 にコンクリート中の気泡の最近傍距離関数を示す。最近傍距離関数では, 観察点が規則性を持たずランダムに存在する場合, 図-3 の黒破線で示した曲線で表される。このランダムな状態を示す曲線の左側に最近傍距離関数が示された場合は, 気泡は凝集の傾向を持つと判断される。図-3 から予想通り水セメント比の相違によらず, 骨材の影響によって気泡の存在領域が制限され, 凝集された気泡配置となっている。また, 空気量の増加により, 最近傍距離関数の勾配が大きくなり, $G(r)=1.0$ となる距離 r の収束値が, 小さくなる傾向を示した。これは, 空気量の増加にともない気泡の個数が増加し, 気泡間の距離が短くなったためと考えられる。表-2 においても, 空気量の増加にともない気泡個数が多くなり, 気泡相互の距離が近接する傾向を示すことと一致する。

表-2 画像から得られた気泡特性

水セメント比	0.40			0.55		
名称	C1-①	C1-②	C1-③	C2-①	C2-②	C2-③
点密度 (個/mm ²)	1.00	1.36	2.30	0.58	1.10	1.55
平均気泡径 (μm)	124	131	133	131	156	171
フレッシュ時の空気量 (%)	2.8	5.0	7.2	1.7	4.0	9.0
硬化後の気泡体積率 (%)	2.0	3.0	5.2	1.6	3.9	7.8
気泡残存率 (%)	73.2	59.7	72.2	91.5	98.6	86.7

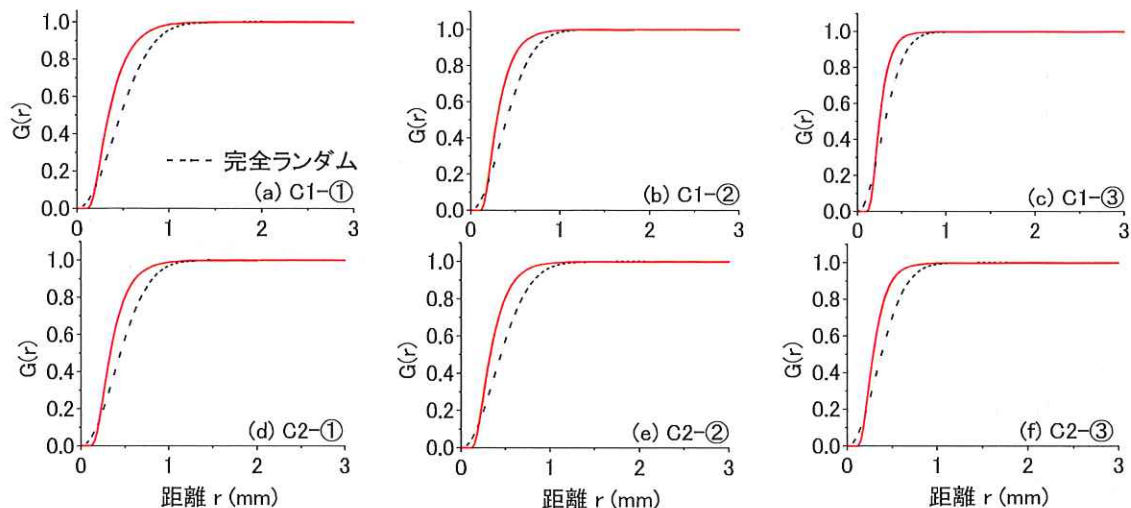


図-3 コンクリート中の気泡の最近傍距離関数

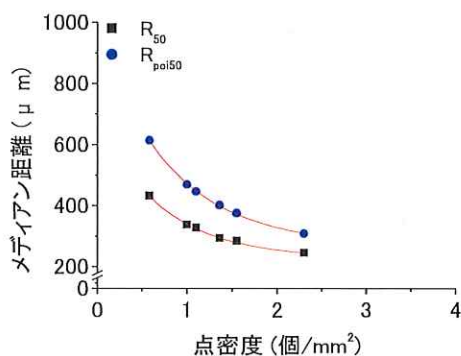


図-4 メディアン距離と点密度の関係

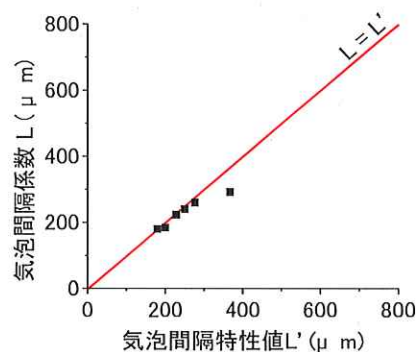


図-5 気泡間隔係数と気泡間隔特性値の関係

以上より、点過程統計量のひとつである最近傍距離関数が気泡間の距離特性を反映していることが確認された。

図-4 に最近傍距離関数から求めた実際のコンクリート中の気泡のメディアン距離 R_{50} 、式(3)から求めた完全ランダム分布のときのメディアン距離 R_{poi50} と気泡の点密度 λ の関係を示す。いずれも空気量の増加により点密度が大きくなるにつれ、メディアン距離は小さくなる。点密度の値が大きくなることは、気泡の個数が増加していることを表しており、気泡個数が増加するとともに短い距離において気泡同士がより近接して存在することを示している。また、点密度が増加すると実際のコンクリート中の気泡のメディアン距離 R_{50} と完全ランダム分布のときのメディアン距離 R_{poi50} の差が小さくなっている。これは、点密度が増加することで分布の多様性がなくな

り、点間距離の中央値の変化が小さくなったためと考えられる。

図-5 に ASTM C 457 の定義に従って求めた気泡間隔係数 L と最近傍距離関数の特性値として求めた気泡間隔特性値 L' の関係を示す。両者には極めて良好な正の相関関係がみられ、またその値もほぼ等しい。このことは、もし耐凍害性の評価に気泡間隔係数を求めることが要求される場合には、気泡を単純な点に置き換えて気泡間隔特性値 L' を求めてやればほぼ同じ値が推定できることを示す。逆に Powers の気泡間隔係数はランダム性や凝集性などの空間配置を考慮していないけれども、その値はランダム分布の確率的な中央値とほぼ一致する値を与えているということになる。

表-3 に気泡間隔係数 L と気泡間隔特性値 L' の値とその差を示す。気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 L の差は、空気量が少ない系(C1-①, C2-①)が大きく、空気量が増えるとその差は小さくなる傾向がみられる。

図-6 に気泡間隔係数が仮定する立方体配置とメディアン距離 R_{50} との対応関係を模式的に示す。単純に気泡間隔係数の計算の前提となる立方体格子にて、気泡間隔係数を与える対角線の1/2がメディアン距離 R_{50} とほぼ一致

表-3 画像から得られた気泡の点過程として特性

W/C	0.40			0.55		
名称	C1-①	C1-②	C1-③	C2-①	C2-②	C2-③
R_{50} (μ m)	338	294	246	433	328	285
L' (μ m)	276	228	179	367	250	200
L (μ m)	260	223	180	292	240	184
$ L'-L $ (μ m)	15	4	1	75	10	16

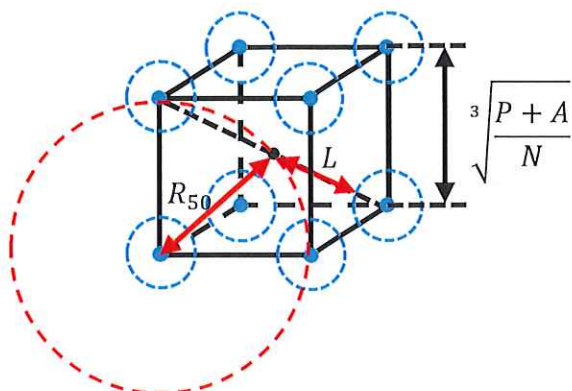


図-6 気泡間隔係数が想定する気泡配置と R_{50} の対応

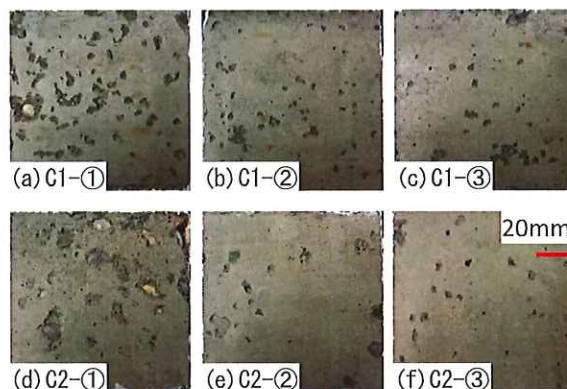


図-7 スケーリング試験後の断面画像 (50 サイクル後)

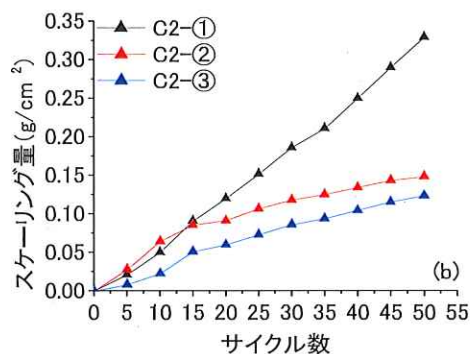
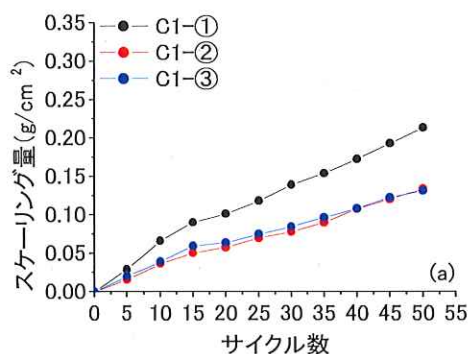


図-8 スケーリング量 ((a) $W/C=0.40$, (b) $W/C=0.55$)

するということを意味する。

3.2 気泡間隔特性値とスケーリング試験との対応

本研究では、コンクリート中の気泡の空間分布の簡便な評価を目的の一つとしている。点過程統計量から得られた特性値が気泡間隔係数と対応する結果が得られたことは、点過程統計量を用いて凍害性評価を簡便に行うことができることを示す。それを確認すべく、耐凍害性との関係があり比較的簡便な耐凍害性評価法であるスケーリング量と、コンクリート中の気泡の等倍率画像から得られる気泡パラメータとの対応を考察する。

図-7 に、50 サイクル時のコンクリートのスケーリング試験面の写真を示す。空気量が3%よりも少ない系(図-7(a), (d))においては、表面の劣化が顕著に現れてい

る。特に水セメント比が高いほうが劣化が大きく、表層のセメントペースト部が剥落して骨材が露出している部分が多く認められた(図-7(d))。ASTM C 672 の表面の目視による評価基準における劣化度3と同程度の劣化である。また、空気量が増えると表面スケーリングの程度に目視的な大きな差は認められなくなる(図-7(b), (c), (e), (f))。ASTM C 672 の評価基準における劣化度1と同程度の劣化である。

図-8 にスケーリング試験の結果を示す。いずれの水セメント比においても空気量が3%よりも少ない系(C1-①, C2-①)がスケーリング量が一番大きい。空気量が増えるとスケーリング量も小さくなり、図-7 の劣化の様子と同様の結果となっている。

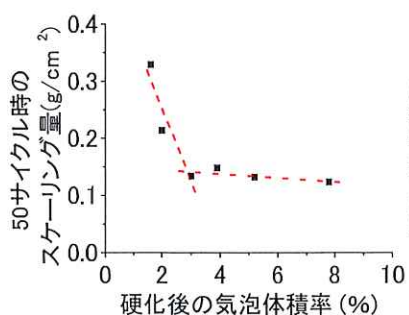


図-9 硬化後の気泡体積率とスケーリング量の対応

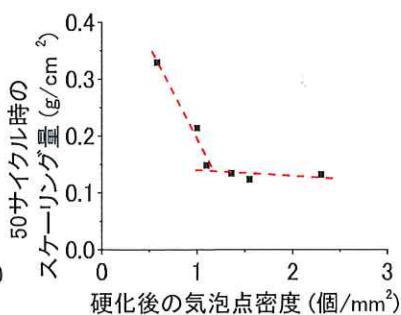


図-10 硬化後の気泡点密度とスケーリング量の対応

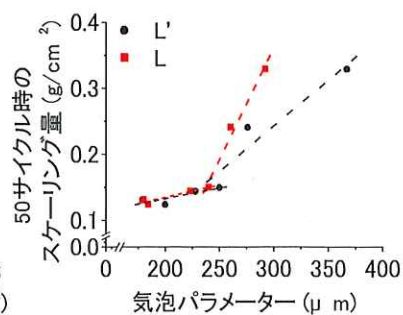


図-11 各種気泡パラメータとスケーリング量の対応

図-9に硬化後の気泡体積率と50サイクル時のスケーリング量の関係を示す。硬化後の気泡体積率が一般に耐凍害性を確保するために必要な最低空気量である3%以上の場合、スケーリング量は小さく一定であるが、3%未満になるとスケーリング量が急激に大きくなっている。すなわち、従来から指摘されているように硬化後の気泡体積率が耐凍害性評価において重要なパラメータであることが確認された。

図-10に硬化後の気泡点密度と50サイクル時のスケーリング量の関係を示す。図-9と同様に点密度もスケーリング量との対応がみられる。本研究では、点密度が1.0個/mm²よりも小さいとスケーリング量が大きくなり、耐凍害性が小さくなると判断される。以上より、点過程における最も基本的なパラメータである点密度を耐凍害性評価に適用できると考えられる。

図-11に気泡間隔係数 L および気泡間隔特性値 L' と50サイクル時のスケーリング量の関係を示す。耐凍害性の指標である、気泡パラメータの閾値を250 μ mと考えた場合、気泡間隔特性値 L' および気泡間隔係数 L が、250 μ mを超えたC1-①とC2-②のスケーリング量が大きくなっている。これらの結果より、骨材が存在し、気泡の存在領域に制限がある環境下においても、点過程統計量を用いて得られる気泡間隔特性値 L' は、従来の指標の気泡間隔係数と矛盾しない関係が得られたこととなる。このことは図-5に示した気泡間隔係数 L と気泡間隔特性値 L' の直線対応と両者の値がほぼ一致することから予想される結果が、実験的にも確認されたことを意味する。

本研究では気泡の簡単な評価を目的として、スキャナ画像を利用し、単純に2値化抽出された気泡の最近傍距離関数を求めることを評価の基本事項としている。一連の手順は簡単であり、この手順で得られる気泡間隔特性値 L' が気泡間隔係数の代わりになりうるならば、従来法に代わる安価で簡便な耐凍害性評価手法になりうることを期待される。

4. 結論

コンクリート中の気泡の空間分布を点過程統計量を用いて評価し、それから得られる距離に関する特性値と気泡間隔係数およびスケーリング試験との対応を考察した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 強い凝集性を示すコンクリート中の気泡の最近傍距離関数から定義したメディアン距離は、点密度の増加とともに減少する。
- (2) 凝集分布であってもその点密度は気泡の分布における距離特性を反映している。
- (3) 気泡間隔特性値 L' は気泡間隔係数 L と正の相関関

係があり、またその値もほぼ等しい。

- (4) スケーリング量と気泡間隔特性値は対応しており、耐凍害性評価において気泡間隔特性値 L' は従来の気泡間隔係数の代わりに用いることが可能と考えられる。
- (5) 本研究のスキャナ画像を用いたコンクリート中の気泡の空間分布評価手法は、従来法に代わる安価で簡便な耐凍害性評価手法になりうることを期待される。

参考文献

- 1) Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949
- 2) 濱幸雄, 太田宏平: フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004
- 3) 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規: 高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視, 土木学会論文集, Vol.67, No.3, pp.351-360, 2011
- 4) Snyder, K. A. : A Numerical Test of Air Void Spacing Equations, Advn Cem Bas Mat, pp.28-44, 1998
- 5) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一, 吉川峻生: 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.493-498, 2015
- 6) 室谷卓実, 五十嵐心一: モルタル中の骨材が気泡の空間分布のランダム性に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70, pp.945-946, 2015
- 7) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 吉川峻生: 気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.841-846, 2015
- 8) Zalocha, D. and Kasperkiewicz, J. : Estimation of structure of air entrained concrete using a flatbed scanner, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.2041-2046, 2005
- 9) 横田光一郎, 五十嵐心一: RGB 情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構成相の空間分布特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1759-1764, 2013
- 10) 川村満紀: 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996
- 11) Stoyan, D. and Kendall, W. S. and Mecke, J. : STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd, 1995
- 12) 小長井宜生, 大橋猛, 根本任宏: 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論, 土木試験所月報, No.396, pp.2-8, 1986

論文 コンクリート中の気泡の空間分布の特徴と分布の再現

室谷 卓実^{*1}・古東 秀文^{*2}・五十嵐 心一^{*3}・山本 瑞希^{*4}

要旨：コンクリート中の気泡の空間分布および骨材が気泡の分布に与える影響を点過程統計量を用いて定量的に評価した。その結果、2次元断面内の気泡の点密度と3次元空間内の気泡体積率の間には正の相関関係があることが確認された。また、コンクリート中の気泡はセメントペーストマトリックス領域に点をランダムに発生させることでその分布を簡単に再現できるようなのである。さらに、点過程統計量から簡単に得られる気泡間隔の距離の特性値は従来の気泡間隔係数と良い相関性を有することが明らかになった。

キーワード：画像解析、点過程統計量、点密度、気泡間隔係数、シミュレーション

1. 序論

耐凍害性を評価するうえでコンクリート中の気泡構造の評価は重要である。耐凍害性の評価においては、空気量、気泡間隔係数¹⁾などの気泡パラメータを測定することで凍害による劣化の可能性を判定してきた。空気量に関してはフレッシュ時にエアメーターを用いて簡便に測定することができる。一方、気泡間隔係数に関しては、ASTM C 457に規定されている実体顕微鏡を用いた目視観察によって測定するため、測定には多大な労力を要する。そのため、空気量と気泡間隔係数には良好な関係があることに着目し²⁾、フレッシュ時の空気量の測定のみでコンクリートの耐凍害性のおおよその判定を行うことが一般的となっている。しかし、コンクリート中の気泡は締固めの際に損失するため³⁾、フレッシュ時に適切な空気量が連行されたとしても必ずしも必要な耐凍害性が保証されているとは限らないと考えられる。そのため、耐凍害性評価において、硬化コンクリート中の気泡観察は依然として重要な評価手段であることに変わりはない。

多大な労力を要していたコンクリートの気泡観察も、画像解析技術の向上により気泡組織評価に関してコンピューターの導入がなされるようになり、測定者の負担は著しく軽減されている。また、ASTM C 457に規定される従来法に代わる新たな手法の体系化や⁴⁾、一連の測定手順の自動化も提案され⁵⁾、気泡組織評価における測定者の負担は近年大きく改善されている。しかし、これらの測定方法の改善はASTM C 457の手順の改善であり、測定手順においては規定された画像の取得とそれを自動的に処理する高価な機器やソフトウェアが必要である。これに対して、近年では高画質なデジタルカメラや高解像度のフラットベッドスキャナが安価で入手できるようになり、これらを用いてより省力化された手順にて従来と同様の評価パラメータを得ようとする研究が行われる

ようになっている。例えば、Zalochaら⁶⁾はマイクロスコープによって取得した低倍率画像やフラットベッドスキャナによって取得した等倍率画像を用いて気泡パラメータの測定を行い、いずれの画像取得機器を用いても気泡パラメータの値に大きな差はないと報告している。

以上のように、コンピューター技術の一般化、普及にともないコンクリート中の気泡構造評価は安価で簡便化されつつある。しかし、気泡組織評価が容易になり画像からより高度な情報も取得できるようになったにも関わらず、気泡の平均的な大きさを仮定し、実際の空間分布とは異なる分布に関するパラメータである気泡間隔係数を求める場合が多い。しかし、高強度コンクリートにおいて気泡間隔係数が250 μm 以下で耐凍害性を有すると判断されても、コンクリートの養生環境によっては耐凍害性が著しく低下するという報告もあり⁷⁾、硬化までに変動する空気量や仮想分布から得る気泡間隔係数だけではなく、実際のコンクリート中の気泡分布の特徴を評価することも重要な意義を有すると考えられる。

気泡はコンクリート中のセメントペーストマトリックス中に存在し、ランダムに分布していると考えられるが、実際には骨材が気泡の存在可能領域を制限するため、ランダムに分布することは不可能である。このため、単純に空気量を評価するのが目的ならば従来法もしくは一般の画像解析ソフトウェアの機能を使えばよいが、気泡間の距離特性を評価することが目的ならば、より高度化された画像解析法を用いる必要がある。近年、それらの手法は空間データ解析技術と結びつき、そのうち体系化された簡便な手法に点過程として取り扱う手法がある。これに従うならば、気泡を点に置き換えることにより気泡の空間分布は点過程となり、分布のランダム性や点間距離を確率論に裏付けられた定量的な値として簡単に求めることができる。著者ら^{8) 9)}はこれまでセメントペース

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

*4 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

表-1 示方配合

名称	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	(kg/m ³)				(C×%)	
					W	C	G	S	AE 減水剤	AE 剤
C1-①				2.5±0.5			1033	686		0.001
C1-②	40	39.9	15±2	4.5±0.5	175	438	1002	665	0.25	0.002
C1-③				7.0±0.5			963	639		0.012
C2-①				2.0±0.5			1045	785		-
C2-②	55	42.9	15±2	4.5±0.5	175	318	1008	754	0.25	0.002
C2-③				9.0±0.5			941	707		0.010

表-2 モルタルの配合と気泡特性

名称	C:S	高性能 減水剤 (C×%)	AE 剤 (C×%)	空気量 (%)	フロー	硬化後の 気泡体積率 (%)	点密度 (個/mm ³)
M1-①			-	2.8	198	1.6	0.60
M1-②	1:1	0.1	0.06	5.0	197	5.3	2.18
M1-③			0.1	7.2	198	6.6	2.91
M2-①			-	5.7	202	4.7	0.83
M2-②	1:2	0.45	0.002	8.6	217	6.5	1.66
M2-③			0.006	11	218	9.5	2.80

トとモルタル中の気泡の空間分布を点過程統計量を用いて定量的に評価し、その有用性を指摘してきた。しかし、粗骨材が大きな体積率を占め、気泡の存在可能領域がより大きく制限されているコンクリートに対して、点過程として気泡分布の特徴を評価した例はないようである。

本研究においては、点過程統計量を用いてコンクリート中の気泡分布を定量的に評価し、存在領域を大幅に制限された条件下で気泡が骨材から受ける影響を、ランダム性の変化の観点から評価することを目的とする。また、そのランダム性の評価に基づき、セメントペーストマトリックス領域に気泡を点として発生させるシミュレーションを行い、実際の気泡分布の再現性について検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³，比表面積：3310cm²/g）を使用し、骨材には川砂（密度：2.60 g/cm³，吸水率：2.05%）および川砂利（密度：2.60 g/cm³，吸水率：1.81%，最大骨材寸法：25mm）を用いた。水セメント比は 0.40 と 0.55 とした。混和剤には AE 減水剤および AE 剤を用いた。示方配合を表-1 に示す。本研究では AE 剤量を調整し、各水セメント比に対して 3 種類ずつ（計 6 種類）の空気量の異なるコンクリートを作製した。また、比較用として W/C=0.40, C:S=1:1, 1:2 の AE 剤を用いて空気量を変化させたモルタルを作製した。モルタルの配合および気泡特性を表-2 に示す。JIS R 5201 に準じてコンクリートを練り混ぜ、100mm×100mm×400mm の型枠に打ち込んだ。締固めは内部振動機を用いて行った。また、モルタルは 40mm×40mm×160mm の型枠に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生 (20℃) を行った。

2.2 試料の作製および画像取得

養生終了後、1 本の供試体に対して厚さ 10～15mm 程度の板状試料を 10 断面切り出し、耐水研磨紙を用いて切断面の研磨を行った。その後、フラットベッドスキャナを用いて試料断面のカラー画像を取得した。さらに、セメントペースト相と同色の骨材を抽出するために、試料の研磨面に対して 1%フェノールフタレイン水溶液の噴霧を行い、セメントペースト相の染色を行った。呈色後、

余分な水分を拭き取り画像を取得した。画像を取得後、研磨面を黒色インクで塗り潰した。その後、気泡を白色粉末で充填した。充填後、試料表面に残った余分な粉末を除去し、白黒画像を取得した。本研究では簡便性を考慮して、取得する画像枚数は 10 枚とした。このときの解像度は 847dpi とし、1 画素は約 30μm に相当する。なお、試料の縁部では黒色インクの均一な染色がなされない領域が存在する場合があること、およびモルタルとコンクリート体積代表領域を考慮し¹⁰⁾、中心から 60mm×60mm の領域を観察領域 W とした。モルタルにおいては、解像度を 1200dpi とし、前述と同様の理由より中心から 30mm×30mm の領域を観察領域とした。

2.3 画像解析

取得した断面画像、フェノール呈色画像および白黒画像からそれぞれ青成分、緑成分および赤成分を加算した画像を取得した。これらの RGB 情報を持つ画像を重ね合わせることで、骨材相、セメントペースト相および気泡をそれぞれ異なる色で表示した RGB 画像を得た。重ね合わせた画像中における骨材色は様々であるため、明度および色度に対して解析時に示される濃度ヒストグラムから閾値を設定することで目的とする骨材粒子の 2 値化を行った。最終的に目視で判断できた未抽出箇所に対して手動補正を施し、骨材粒子の 2 値画像とした。また、気泡については、白黒画像のグレースケール値から直接画像解析ソフトを用いて気泡の 2 値画像を取得した。このとき、AE 剤にて連行される気泡径の範囲はおおよそ 30～250μm であること¹¹⁾および、ステレオロジーの観点から多くの微細な粒子がすべて大きな球の端面の切断による円形断面として一斉に特定の断面に現れたとは考えられないことから、1 画素程度の孤立した白色部は気泡以外の表面凹凸部もしくはその他の空隙であると判断しこれを除去した⁸⁾。なお、この処理によって気泡の空間分布や面積率に大きな変化は生じないことを事前に確認している⁸⁾。残された白色部が気泡であると考え、この 2 値画像に対して気泡面積率を画像解析により求め、気泡体積率とした。また、面積解析の原理⁴⁾に基づき、気泡の 2 値画像から ASTM C 457 に規定される気泡間隔係数⁹⁾を求めた。個々の気泡の重心点 x_i ($i=1, \dots, n$) を求め、これを気泡の位置ベクトル x_i とみなし、気泡を点で代表

させた点過程 $X=\{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。また、観察領域 W 内にある点($x_i \in X$)に関して、単位面積あたりの点の個数である点密度 λ を求めた¹²⁾。

2.4 点過程統計量による気泡分布の評価

(1) K 関数

K 関数とは、任意の点($x_i \in X$)から半径 r 以内に存在する他点($x_j; i \neq j$)の個数の期待値を反映する関数である。点 $x_i \in X$ を中心とする半径 r の円領域内に他点 $x_j \in X (i \neq j)$ が存在するか否かを判定し、式(1)より計算した¹²⁾。式中の $1(\cdot)$ は $(\cdot)$ 内が真であれば 1 を与え、偽であれば 0 を与える指示関数である。また、 $s(x)$ はエッジ補正係数であり、観察領域の辺長を a, b とすると式(2)にて与えられる。

$$K(r) = \frac{1}{\lambda^2} \sum_{i \neq j} \frac{1(|x_i - x_j| \leq r)}{s(x)} \quad (1)$$

$$s(x) = ab - x(2a + 2b - x) / \pi \quad (2)$$

$$x = |x_i - x_j|$$

(2) 最近傍距離関数

最近傍距離関数と点過程の要素である任意の点 $x_i (x_i \in X)$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j (x_j \in X, x_i \neq x_j)$ が存在する確率を表し、式(3)で与えられる¹²⁾。式中の $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、 s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数である。観察視野 W の辺長を x, y とすると、式(4)にて与えられる。式中の s_i は最近傍距離であり、 b_i は各点から画像縁までの最短距離を表す。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (3)$$

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i)(y - 2s_i)\}^{-1} \quad (4)$$

3. 結果および考察

3.1 コンクリート中の気泡の空間分布の特徴

表-3 に画像解析から得られた気泡特性を示す。いずれの水セメント比の場合もフレッシュ時の空気量が増えるにともない点密度も増加している。また、 $W/C=0.55$ の方が空気量 1%あたりの点密度が小さい。さらに、平均気泡径は $W/C=0.40$ では同程度であるが、 $W/C=0.55$ では空気量が増えると大きくなる。以上より、 $W/C=0.55$ の方が径の大きな気泡が比較的多く存在すると考えられる。また、硬化時の気泡体積率はフレッシュ時の空気量よりも小さい。これは、締固めによって空気が失われたためと考えられる。さらに、気泡残存率は $W/C=0.40$ の方が低く、 $W/C=0.40$ では大きな径の気泡が少ない。

図-1 にフレッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の関係を示す。いずれも両者には直線で近似できる非常に良好な相関関係が認められ、硬化までにはほぼ一定量の空気が失われていると考えられる。また、 $W/C=0.40$ と 0.55 では勾配はほぼ等しいが、 $W/C=0.40$ の方が両者の値が等しい時の直線(図中赤破線)から離れており、フレ

表-3 画像から得られた気泡特性

水セメント比	0.40			0.55		
名称	C1-①	C1-②	C1-③	C2-①	C2-②	C2-③
点密度 (個/mm ²)	1.00	1.36	2.30	0.58	1.10	1.55
平均気泡径 (μ m)	124	131	133	131	156	171
フレッシュ時の空気量 (%)	2.8	5.0	7.2	1.7	4.0	9.0
硬化後の気泡体積率 (%)	2.0	3.0	5.2	1.6	3.9	7.8
空気量 1% 当たりの点密度	0.49	0.46	0.44	0.38	0.28	0.20
気泡残存率 (%)	73.2	59.7	72.2	91.5	98.6	86.7
骨材体積率 (%) (配合値)	65.8	64.1	61.2	70.7	67.9	63.4

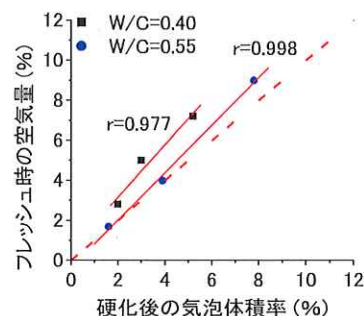


図-1 空気量と気泡体積率の関係

ッシュ時の空気量と硬化後の気泡体積率の差が大きい。表-1 より、 $W/C=0.40$ の方が気泡残存率が低く、大きな径の気泡が少ないことから、これは締固めの際に大きな径の気泡が失われたためと考えられる。

図-2 に硬化後の気泡体積率と点密度の関係を示す。図-1 と同様に両者には非常に良好な正の相関が見られる。また、近似直線の傾きは $W/C=0.55$ の方が大きく、径の大きな気泡が $W/C=0.40$ よりも多く存在することが考えられる。一般に、断面の情報から 3 次元の構造を推定するステレオロジーにおいて、2 次元断面内の粒子(気泡)の個数を 3 次元空間内の粒子の体積率(空気量)に直接関連付けることはできない。しかし図-2 の結果から、気泡を点過程とみなし気泡径や体積率の情報を排したとしても、コンクリート中の空気量の変化を反映した値とみなすことが可能であると考えられる。また、図-1 の結果を合わせると、フレッシュ時の空気量も硬化時の気泡体積率と同様に、気泡点密度と直線近似可能な相関関係があると考えられる。

図-3 に気泡点密度がほぼ等しい系 (M1-①, C2-①) のモルタルとコンクリートの気泡の 2 値画像と点過程を示す。2 値画像と比較すると、点の数が多く感じられるが、これは微細な白色部分が多数存在するためである⁸⁾。モルタル中の気泡は骨材の寸法が小さく、より均一なため観察視野全体で見ると気泡の分布に凝集性はなく、比較的自由に分布していると考えられる。一方、コンクリート中の気泡は粗骨材によって分布に大きな制限があり、モルタル中の気泡よりも気泡間の距離が近く、強い凝集性を有しているのは明らかである。また、骨材の分布はランダムであるため、大きい骨材が密集し気泡の分布が

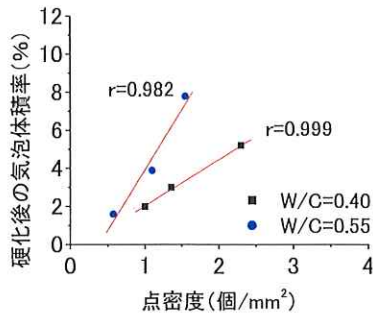


図-2 硬化後の気泡体積率と点密度の関係

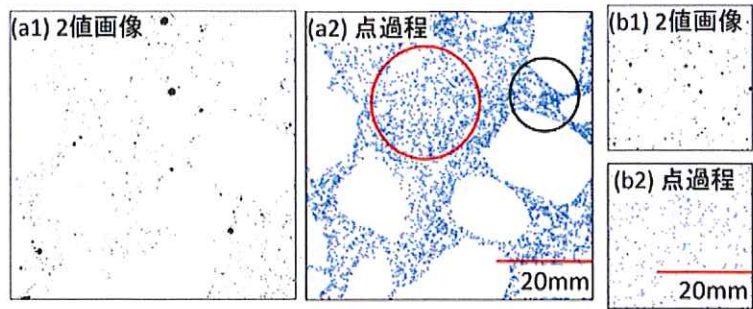


図-3 気泡の2値画像と点過程の例 (a)コンクリート, (b)モルタル

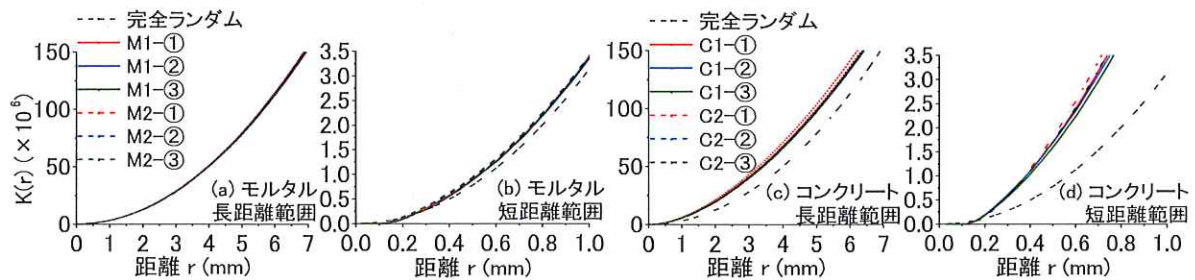


図-4 モルタルおよびコンクリート中の気泡のK関数

大きく制限されている領域（図-3(a2)黒丸）や、大きい骨材が少なく気泡が比較的自由に分布している領域（図-3(a2)赤丸）が存在し、コンクリート中の気泡分布はモルタル中の気泡よりも不均質な空間分布を有している。

図-4にモルタルおよびコンクリート中の気泡のK関数を示す。モルタル中の気泡に関しては、長距離の範囲では気泡はランダムに分布しているように見える（図-4(a)）。しかし、短距離範囲で見ると完全ランダム分布のK関数値を上回っており、モルタル中の気泡は短い範囲にて凝集性を有している判断され（図-4(b)）、細骨材による分布の制限が現れている。一方、コンクリート中の気泡は完全ランダム分布の関数値を大きく上回っており、凝集性の分布が長距離範囲にわたって続いている（図-4(c), (d)）。これは、空気存在できる領域がより減少し、かつ粗骨材によって最寄りの気泡が大きな距離で離れることもあるためと考えられる。

図-5に気泡点密度がほぼ等しいコンクリートとモルタル中の気泡の最近傍距離関数を比較して示す。同じ点密度であってもコンクリート中の気泡の方が最近傍距離関数の勾配が大きく、粗骨材による分布の制限によって気泡間の距離が近づき、より強い凝集性を有していることがこの関数分布からも理解され、図-3にて示した点過程の視覚的印象とも矛盾しない。以上より、コンクリート中にて、気泡の分布はモルタルの場合よりも強い分布制限を受けて、凝集性や距離特性に変化が現れることが点過程統計量によって定量的に確認された。

3.2 コンクリート中の気泡の空間分布の再現

気泡の存在可能領域は骨材以外のセメントペーストマ

トリックス領域である。よって、図-4に示したように観察領域全体を評価対象にしてK関数を求めると、必然的に凝集性分布となり、このことによって凝集性の程度が評価できたことになる。しかし、これは観察領域全体における気泡の分布についての情報であり、セメントペーストマトリックス内の気泡の分布の特徴についての情報は限られてしまう。そこで、2.3にて取得した骨材画像の空間的な補集合領域に同じ気泡点密度に相当する点をランダムに発生させた。そして、これをランダム過程として再現したコンクリート中の気泡分布（帰無仮説）とし、その分布と実際の気泡分布の比較を行った。

図-6に実際のコンクリート中の気泡のK関数 K_C および制限された領域内のランダム点過程として再現した気泡分布のK関数 K_p を比較して示す。いずれの水セメント比においても、気泡点密度が小さい系（図-6(a), (d)）において K_C と K_p に若干の差が見られるが、点密度が大きくなるとその差は小さくなり両関数値はほぼ一致する。これは、点個数が増加すると、ランダム性の観点からは

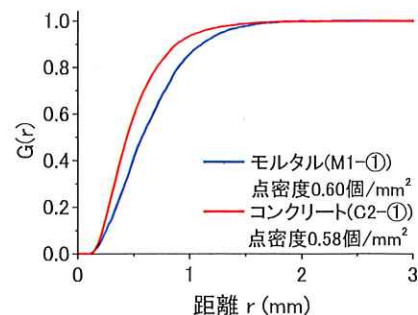


図-5 気泡の最近傍距離関数

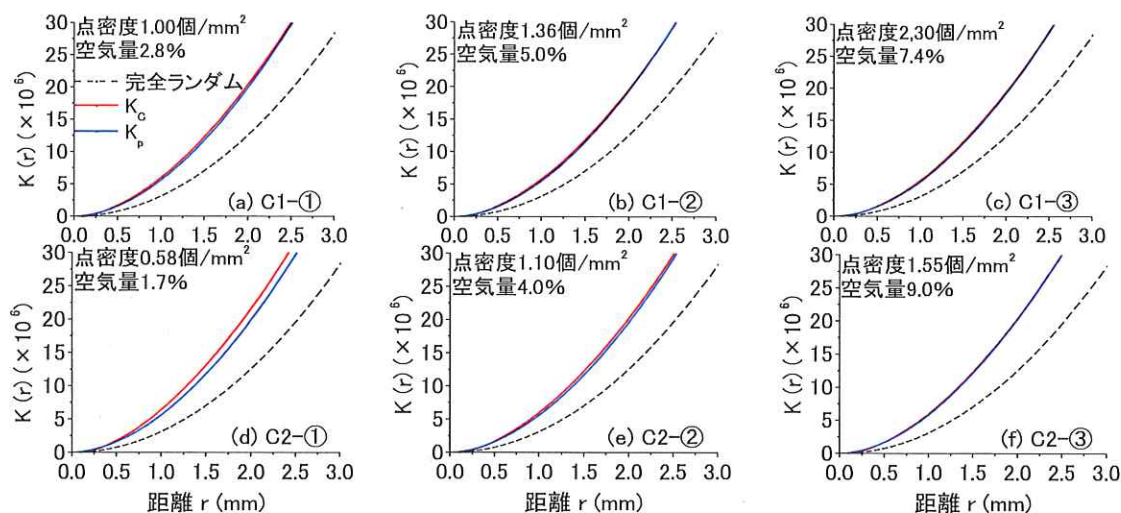


図-6 コンクリート中の気泡のK関数

分布の多様性もしくは変動が小さくなるためと考えられる。これより、コンクリート中の気泡は断面全体を俯瞰的に見ると強い凝集性を有していると判断されるが、セメントペーストマトリックス領域内ではほぼ完全ランダムに分布していると考えられる。換言すれば、コンクリート中の骨材は気泡の分布をランダムに制限するだけであり、気泡の空間分布を点過程として表現するとき、コンクリート中の気泡は存在可能領域であるセメントペーストマトリックス中にランダムに点を発生させることで、実際の気泡の空間分布を再現できると考えられる。

図-7に実際のコンクリート中の気泡の最近傍距離関数 G_c およびランダム分布を仮定して再現した気泡分布から求めた最近傍距離関数 G_p を示す。いずれの水セメント比の場合も点密度が増えると、いずれの最近傍距離関数の勾配が大きくなり、点間距離が短くなっている。また、再現した空間分布の関数 G_p は数 100 μ m 程度の距離の短い範囲において実際の分布の関数 G_c を上回る。

これは、大きさを持たない点を配置することによって分布を再現しているため、実際の分布よりもより近距離にて他点が配置される場合があるためである。この範囲を越えると再現した分布の関数 G_p は実際の分布の関数 G_c とほぼ一致する。よって、セメントペーストマトリックス領域に点をランダムに発生させて最近傍距離関数を求めることによって、コンクリート中の気泡の空間分布だけではなく、その距離特性も再現できると考えられる。

最近傍距離関数は実際のコンクリート中の気泡間の距離を反映した累積確率関数である。そこで、従来用いられてきて多くの研究実績や報告がなされている、同じく距離に関する特性値である気泡間隔係数との関連付けがなされると便利である。そこで、最近傍距離関数の累積確率 50% の距離を単純にコンクリート中の気泡分布の距離に関する特性距離とみなすことにした。

図-8に実際のコンクリート中の気泡分布とランダムシミュレーションの気泡から求めた特性距離の関係を示

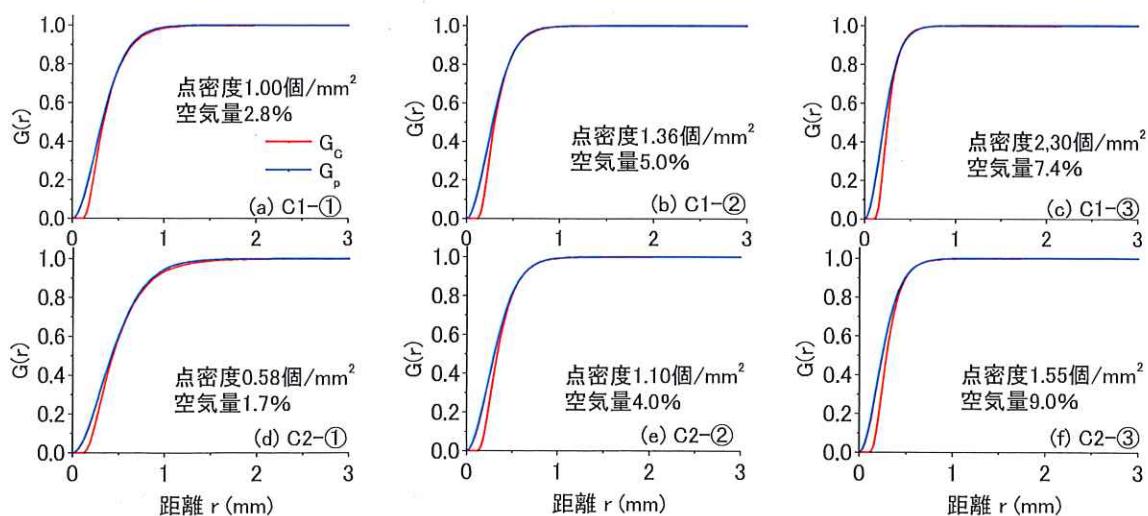


図-7 コンクリート中の気泡の最近傍距離関数

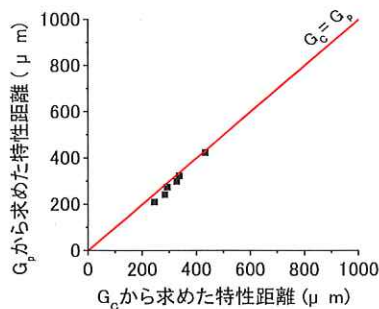


図-8 G_c と G_p から求めた特性距離の関係

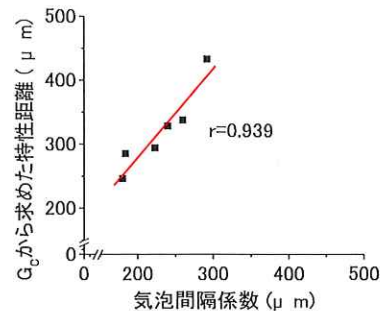


図-9 特性距離と気泡間隔係数の関係

す。両者の値はほぼ等しく、ランダムシミュレーションによって実際のコンクリート中の気泡分布の距離特性は再現できているようである。

図-9に実際のコンクリート中の気泡分布に関する最近傍距離関数 G_c から求めた特性距離と気泡間隔係数の関係を示す。最近傍距離関数から求めた特性距離と気泡間隔係数には直線で近似できる良好な相関関係が見られる。最近傍距離関数は点密度に対応して変化することから、最近傍距離関数から求めた特性距離も点密度に対応して変化する。つまり、上述のように点密度と空気量の関係をより明確にすることで、ASTM C 457に規定される手順に従う従来法よりも簡便に気泡間隔係数の計算が可能となると期待される。さらに、セメントペーストマトリックス領域にランダムに点を発生させるシミュレーションによって得られる分布構造は実構造を再現することから、シミュレーションによって気泡間隔係数を事前に推定することも可能であると思われる。

4. 結論

コンクリート中の気泡分布および骨材が気泡分布に与える影響を点過程として評価した。さらに、セメントペーストマトリックス領域に気泡を表す点を発生させるシミュレーションを行い、分布の再現性に関して検討した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 2次元断面内の気泡点密度は3次元空間内の気泡体積率と正の相関関係があり、空気量評価における点密度の有用性が示唆された。
- (2) コンクリート中の気泡の空間分布の強い凝集性と距離特性がモルタル中の気泡とは異なることが点過程統計量を用いて定量的に評価できた。
- (3) 最近傍距離関数から得られる距離特性値と気泡間隔係数には非常に良好な相関関係が存在する。
- (4) セメントペーストマトリックス領域に点をランダムに発生させることで実際のコンクリート中の気泡の空間分布および距離特性を再現できる。

参考文献

- 1) Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949
- 2) 笠井芳夫：コンクリート総覧，技術書院，1998
- 3) 高橋和雄：コンクリート製品の振動による空気量の減少について，農業土木学会論文集，第 143 号，pp.69-77，1989
- 4) 小長井宣生，大橋猛，根本任宏：気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論，土木試験所月報，No.396，pp.2-8，1986
- 5) 太田利隆，大橋猛，小長井宣生，根本任宏：自動画像解析システムを用いた硬化コンクリートの気泡パラメータの測定方法について，コンクリート工学年次論文集，Vol.8，No.0，pp.389-392，1986
- 6) Zalocha, D. and Kasperkiewicz, J. : Estimation of structure of air entrained concrete using a flatbed scanner, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.2041-2046, 2005
- 7) 三高信吾ほか：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす気泡間隔係数・気泡径分布の影響，日本建築学会学術講演概要集，pp.1141-1142，2005
- 8) 室谷卓実，古東秀文，五十嵐心一，吉川峻生：点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.493-498，2015
- 9) 室谷卓実，古東秀文，五十嵐心一：モルタル中の気泡の点過程としての特徴と間引きシミュレーションによる空間分布の再現，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp.146-153，2015
- 10) Hoang, D. G. , 五十嵐心一，内藤大輔：コンクリート画像からの骨材相の抽出と粒度分布の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.2065-2070，2009
- 11) 川村満紀：土木材料学，森北出版株式会社，1996
- 12) Stoyan, D. and Kendall, W. S. and Mecke, J. : STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd, 1995

CORRELATION BETWEEN CHARACTERISTIC DISTANCES OF AIR VOIDS AS POINT PROCESSES AND SPACING FACTORS IN MORTARS

Hidefumi Koto ⁽¹⁾, Takuma Murotani ⁽¹⁾ and Shin-ichi Igarashi ⁽¹⁾

(1) Kanazawa University, Kanazawa, Japan

Abstract

Images of air voids were acquired with a flatbed scanner. Distribution of air voids in the images was regarded as a spatial point process. The nearest neighbour distance function was calculated for the point process. The median distance determined by the function was proposed as a characteristic average distance between air voids. The median distance in a point process was compared with the conventional spacing factor. In addition, taking account of the presence of aggregate particles, air-void systems in real mortars were simulated as interrupted point processes. The median distances between air voids in real mortars had a strong correlation with the spacing factors. Furthermore, there also exists a good correlation between the median distances of the simulated point processes and the spacing factors of real voids. Thus, conversion of air-void systems to point processes is useful for evaluating actual spatial arrangement of air voids. The point process function enables to estimate the spacing factor easily.

1. Introduction

Adequate frost resistance of concrete is usually ensured by entraining a proper amount of air. An amount of air is measured at a fresh state of concrete. However, it is empirically known that the measured initial air content is not always kept in hardened concrete. Therefore, in addition to the air content, spacing of air voids is considered as a crucial parameter to ensure the frost resistance of concrete since it is correlated to a durability factor of concrete. The spacing is generally expressed using a spacing factor. The spacing factor is obtained by following the test procedures prescribed in ASTM C457. However, the procedures are quite time consuming. These days, an easy and fast apparatus to measure in accordance with the ASTM procedures has been commercially available, but not spread as a general tool. It should be noted, however,

that the spacing factor of ASTM C457 is a parameter of virtual spatial arrangement where air voids with the same size are regularly arranged in bulk cement paste matrix of concrete. Therefore, it doesn't specify a real distance between air voids in concrete. If void spacing is important in determining the frost resistance of concrete, it should be evaluated from real distribution of air voids in hardened concrete [1]. This is the simple motivation behind this study. These days development of imaging technology and data analysis has made possible to describe spatial arrangements of objects that are irregularly or randomly dispersed in 2D space. It is generally assumed that air voids in concrete are dispersed randomly and uniformly. Strictly speaking, however, complete random distribution of air voids may not be realized in concrete. For example, aggregate particles prevent air bubbles from dispersing randomly. Therefore, it is necessary to evaluate various patterns of spatial arrangements of air bubbles. To describe the geometrical structure of spatial point patterns formed by objects such as air bubbles, point process statistics has been used for recent decades [2]. Each point in a point process shows positions of objects of interest. When free distribution of points is not allowed, their spatial structure can be treated as an interrupted process. Based on second-order stereology, features of the spatial structure can be expressed by means of several statistical functions and probability. Fortunately, there is a useful statistical function which has a similar viewpoint to the spacing factor as a general parameter for the air-void system.

In this study, air voids in images scanned at a low magnification are treated as a spatial point process. Taking account of the fact that the spacing factor is a distance parameter, the nearest neighbour distance function is calculated for those point processes, which represent exact positions of each air void in mortars. A characteristic distance of the point process is defined by a realization probability in the nearest neighbour distance function. Correlation between the characteristic distances and the spacing factors is discussed. Furthermore, spatial distribution of air voids in mortars is simulated as an interrupted point process. The characteristic distances for the simulated point patterns are calculated as well. They are again compared with the corresponding distances in real point patterns of mortars and with the spacing factors. The procedure to apply the point process statistics to air voids distribution is proposed as an easy way to estimate the spacing factor from images of mortars.

2. Experimental

2.1 Materials

The cement used was an ordinary Portland cement with a Blaine fineness value of $331\text{m}^2/\text{kg}$. River sand was used as a fine aggregate. The water/cement ratio was 0.40. The mass ratios of sand to cement in mortar were 1.0 and 2.0. A superplasticizer and an air-entraining (AE) agent were also used. The total air content was measured with a small air meter for mortar. Prism specimens of $40\times 40\times 160\text{mm}$ were produced in accordance with JIS R5201. They were

Table 1 Mix proportion of specimens

	W/C	C/S	Name	Super plasticizer (C%wt)	AE water reducing admixture (C%wt)	AE admixture (C%wt)
Cement paste	0.40	1:0	P-Ref	-	-	-
			P-AE[1]	-	0.10	-
			P-AE[2]	-	0.25	-
			P-AE[3]	-	0.50	-
			P-AE[4]	-	0.25	0.01
			P-AE[5]	-	0.25	0.02
Mortar	0.40	1:1	M1-Ref	-	-	-
			M1-AE[1]	0.1	-	0.06
			M1-AE[2]	-	-	0.1
		1:2	M2-Ref	-	-	-
			M2-AE[1]	0.45	-	0.002
			M2-AE[2]	-	-	0.006

demolded at 24h after casting. They were then cured in water at 20°C for 7d. Mix proportions of cement pastes and mortars are given in Table 1.

2.2 Image acquisition

At the age of 7d, slices about 10 mm thick were cut from the prisms. They were finely polished with abrasive SiC papers. To distinguish between aggregate particles and cement paste matrix, polished surfaces of mortars were treated with a solution of phenolphthalein. Ten images in each specimen were acquired with a conventional flatbed scanner. Then the treated surfaces were dyed with black ink. Air voids on the surfaces were filled with a white powder of calcium carbonate (diameter 12-13µm). The surfaces were scanned again to obtain images of air voids. The resolution of images was 21.1µm/pixel.

2.3 Image analysis

Various images used in the image analysis process are shown in Fig. 1. All the relevant image information was extracted from an original scanned image (Fig. 1(a)). For instance, aggregate particles were segmented on the basis of brightness and chromaticity (Fig. 1(b)). Air voids were directly segmented from images of cross sections treated with black ink (Fig. 1(c)).

It is known that the size of entrained air bubbles is usually in the range between a few tens and several hundreds of µm. Thus small isolated voids of one pixel (21µm) were deleted as noise in the images. Residual voids after deleting the noise were regarded as air bubbles. The area fraction of them was simply obtained by image analysis. Centroids of each air bubble x_i ($i=1, \dots, n$) was also obtained by image analysis. Then all the air bubbles were converted to a set of points of which positions are the centroids of original air bubbles (Fig. 1(d)). The set of those points was regarded as a spatial point process $X=\{x_i: i=1, \dots, n\}$.

2.4 Calculation of point process statistics

(1) Point intensity

The point intensity λ_p of the point process X was determined by the following equation.

$$\lambda_p = \frac{N_p(W)}{A(W)} \quad (1)$$

Where $N_p(W)$ is the total number of points in an observation window W . $A(W)$ is the area of the window.

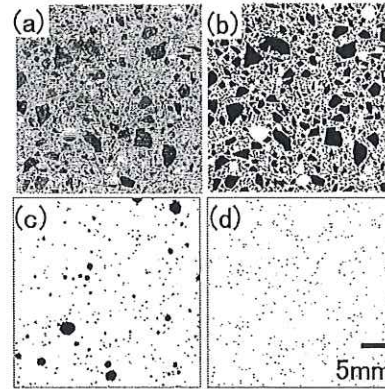


Fig. 1 Binary segmentation of aggregate

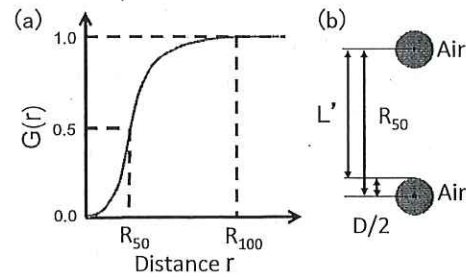


Fig. 2 Schematic drawings: (a) the nearest neighbour distance function and definition of R_{50} (b) characteristic distance L' derived from R_{50}

(2) The nearest neighbour distance function (G-function)

The nearest neighbour distance function (G-function) was calculated using Eq.(2) [3].

$$\hat{G}(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N(W)} 1(S_i \leq r) \cdot 1(S_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^{N(W)} 1(S_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (2)$$

Where $1(\cdot)$ is the indicator function, i.e. equal to one if its argument is true and zero otherwise. r is distance. b_i is the shortest distance from each point x_i to edges of the window W . s_i is the distance to the nearest other point in the point process. $w(s_i)$ is a weighting factor, and given as the inverse of the window area eroded by a circle of radius s_i [3]. A schematic drawing of the nearest neighbour distance function is shown in Fig. 2. It is a distribution function of distance from a point x_i in X to the nearest neighbour x_j ($i \neq j$) in X . The function is expressed as a cumulative probability function. To represent a continuous distribution function by a single characteristic parameter, the median distance R_{50} is defined as a distance corresponding to the cumulative probability of 50% (Fig.2 (a)).

(3) Thinning points lying on aggregate particles

Using the point intensity λ_p for the whole area and the area fraction of cement paste matrix in mortar, a point intensity λ_b of air bubbles in the cement paste matrix was calculated.

A point process with the intensity λ_b was simulated as a Poisson process for the whole area of W . This simulated point pattern was used as a

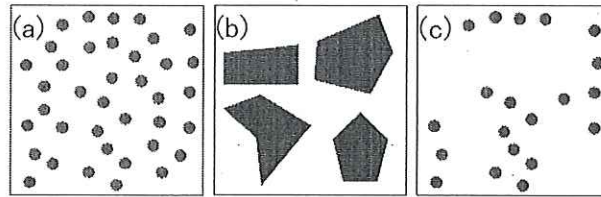


Fig. 3 Procedure to generate thinned point processes; (a) basic process X_b (b) aggregate phase Φ_a (c) thinned point process X_s

basic point process X_b (Fig. 3(a)) where all the air bubbles were not disturbed by aggregate particles. The simulated basic process was superimposed with real images of the aggregate phase Φ_a (Fig. 3(b)). Then points on Φ_a ($x_i \in X_b \cap \Phi_a$) were deleted. The points in cement paste matrix as a random field were survived to make a different point process with less points (Fig.3(c)). This thinned process $X_s (=X_b \cap \Phi_a^c \subset W)$ was regarded as a virtual point process of air bubbles in mortar (Fig. 3(c)). Simulation to generate the basic process X_b was repeated ten times. For each simulated pattern, the thinned process X_s was obtained by deleting points, using the segmented images of aggregate particles. The whole procedure to obtain the thinned point process is schematically shown in Fig. 3.

(4) Spacing factor of air voids

Using the images acquired in 2.2, the spacing factor L of ASTM C457 was calculated by Eqs. (3) and (4).

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \sqrt[3]{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad (\text{for } P/A > 4.33) \quad (3)$$

Table 2 Fresh properties of mixtures and air void properties obtained from scanned images

	Cement paste (C:S=1:0)						Mortar (C:S=1:1)			Mortar (C:S=1:2)		
	Ref	AE[1]	AE[2]	AE[3]	AE[4]	AE[5]	Ref	AE[1]	AE[2]	Ref	AE[1]	AE[2]
Flow value	195	213	222	249	228	227	198	197	198	202	217	218
Point density (/mm ²)	0.46	0.89	2.02	2.43	2.89	3.06	0.60	2.18	2.91	0.83	1.66	2.80
Average air void diameter (μm)	123	138	120	118	100	126	144	145	142	175	158	157
Air (fresh) (%)	2.4	3.4	4.9	6.4	6.0	8.5	2.0	5.5	7.2	5.7	8.6	11
Air (hardened) (%)	1.0	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3	1.6	5.3	6.6	4.7	6.5	9.5
Coefficient of variation of the air volume (hardened)	0.13	0.05	0.06	0.12	0.04	0.06	0.11	0.10	0.11	0.14	0.08	0.06
Residual rate of air void (%)	41.7	63.1	72.2	69.0	62.0	85.9	81.8	96.4	91.7	82.7	75.6	86.4

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{a}} \quad (4)$$

Where α is the specific surface area of air voids. P is the volume fraction of cement paste. A is the volume fraction of air. $\bar{a}$ is the mean area of air bubbles [4]. These values of A , P and $\bar{a}$ are also easily obtained from images by means of an image analysis software.

3. Results and discussion

3.1 Properties of air voids in images

Properties of air voids in the samples are summarized in Table 2. There are differences in the air contents between fresh and hardened states. They are attributed to losses during casting and compacting since the volume ratio of voids deleted as noise in the images was quite low. The residual ratio of air in cement paste specimens without AE agents is the lowest among the mixtures. This suggests that entrapped air in the cement paste is easy to be lost compared to entrained air. In view of the residual ratios of the cement pastes and the mortars, air bubbles in the mortars are more stable than those in the cement pastes even if any AE agents are not used. The amount of AE agents necessary to increase the unit content of air is decreased with

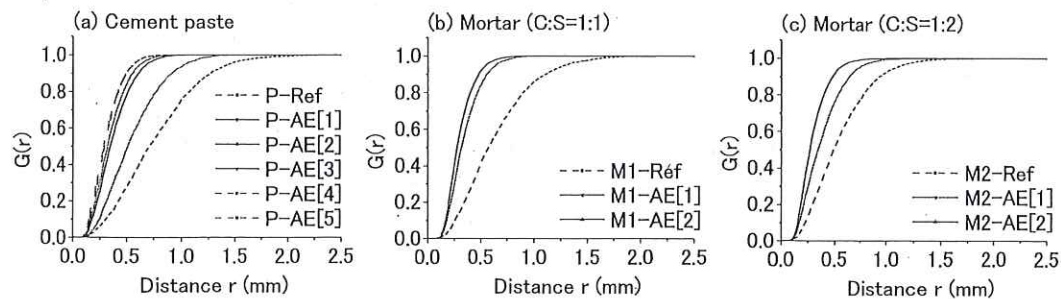


Fig. 4 Nearest neighbour distance function of air voids in cement pastes and mortars

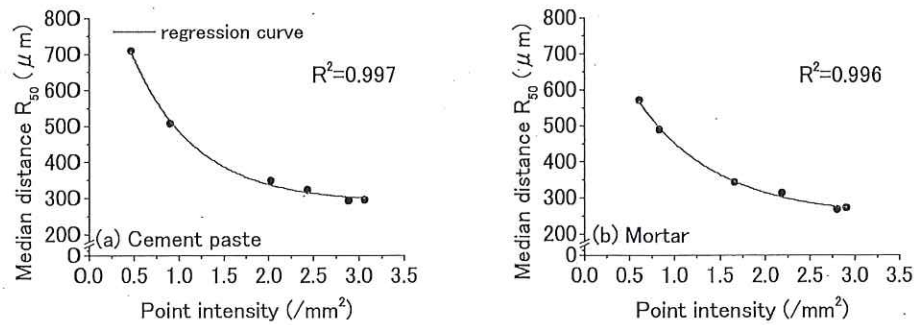


Fig. 5 Median distance vs. point intensity in cement pastes and mortars

Table 3 Air parameters in the point process obtained from images

	Cement paste (C:S=1:0)						Mortar (C:S=1:1)			Mortar (C:S=1:2)		
	Ref	AE[1]	AE[2]	AE[3]	AE[4]	AE[5]	Ref	AE[1]	AE[2]	Ref	AE[1]	AE[2]
Median distance R_{50} (μm)	710	508	349	324	293	296	572	314	273	490	344	267
Characteristic spacing L' (μm)	648	439	289	265	243	233	500	242	202	402	265	189
Spacing factor L (μm)	558	432	298	276	250	251	441	244	214	358	266	199
$L'-L$ (μm)	90	7	9	11	7	18	59	2	12	44	1	10

increasing the amount of aggregate. Aggregate affects the efficacy of the AE agents. Furthermore, the coefficients of variation of the air volumes are smaller in the air entrained mixtures. Entrained air bubbles are clearly more stable than entrapped air.

3.2 Variation of spacing between air voids

Fig. 4 shows the nearest neighbour distance functions $G(r)$ of air voids in cement pastes and mortars. They intersect the horizontal axis at certain distances. This suggests air voids have their own sizes so that other points cannot be present in the vicinity. The distances at which the function curves converge on the unity decrease with the increase in air content. This is because the increase in the point intensity results in a closer neighbour point. The median distance R_{50} which corresponds to a probability of 50% in the cumulative function can be considered as an average spacing between air voids. Fig. 5 shows the relationship between the median distance and the point intensity. There exists a negative association between them. When the point intensity is greater than about 1.5, the rate of change in the median distance is decreased with the increase in the point intensity. This may be attributed to coalescence of air bubbles that have their own sizes. In other words, when two air bubbles approach each other below a certain distance, some interaction between them could form a bigger bubble. Thus the median distance does not decrease proportionally to the point intensity. Furthermore, it should be noted that the median distance in mortar is shorter than in cement paste at the same point intensity. Presence of aggregate particles reduces room for air bubbles. The occupation by aggregate particles simultaneously produces small local regions where large air bubbles cannot exist. As a result,

many small air bubbles get closer each other in the local regions while the total air content is increased.

3.3 Correlation between the spacing factor and a characteristic distance of the points

The median distance mentioned above is defined as a representative distance between points in a point process. However, actual sizes of air voids in real mortar specimens are ignored. On the other hand, the spacing factor of a traditional parameter is defined as the mean farthest distance from any point in cement paste matrix to the surface of a bubble. The mean radius of air bubbles is implicitly taken into account in the calculation of the spacing factor. Therefore, to compare the median distances with the spacing factors, the median distance is modified to consider the sizes of air voids in the point processes. A characteristic spacing L' is simply defined by subtracting half of the average diameter of air voids from the median distance (Eq. (5), Fig. 2(b)).

$$L' = R_{50} - \frac{D}{2} \quad (5)$$

Where D is the average diameter of voids. The spacing factors L and the characteristic spacing L' are given in Table 3. Relationship between L and L' in cement pastes and mortars is shown in Fig. 6. There exists a strong correlation between them. Furthermore, they are almost the comparable values. Compared to time-consuming and boring procedure to obtain L , the derivation of L' is much easier. Therefore, instead of obtaining L directly following the specified procedure, the spacing factor L could be estimated from the characteristic spacing L' of point processes in scanned images. In other words, the spacing factor used generally corresponds well with an average distance of a point process, which is realized in actual mortar.

3.4 Simulation of air voids distribution as a thinned point process

Fig. 7 compares the two nearest neighbour distance functions of air voids. The function $G_S(r)$ is calculated for thinned point patterns, in which points on aggregate particles are deleted from a basic point process. This basic process is simulated as a random process with the same point intensity as in the original image of air voids. The function $G_M(r)$ is directly obtained from the

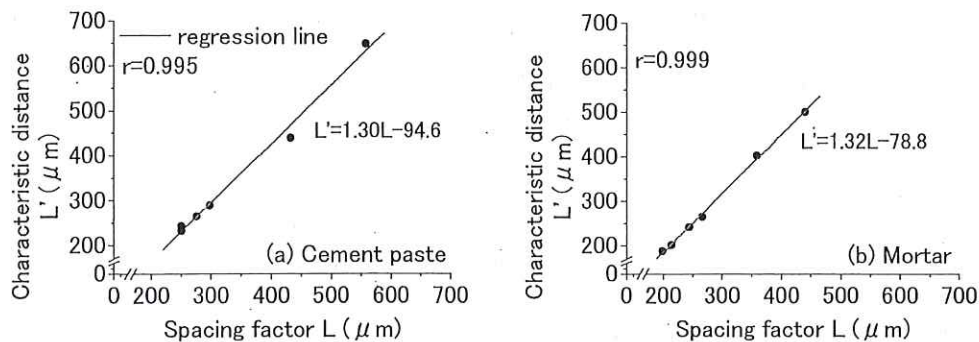


Fig. 6 Relationship between characteristic distances L' and conventional spacing factors L

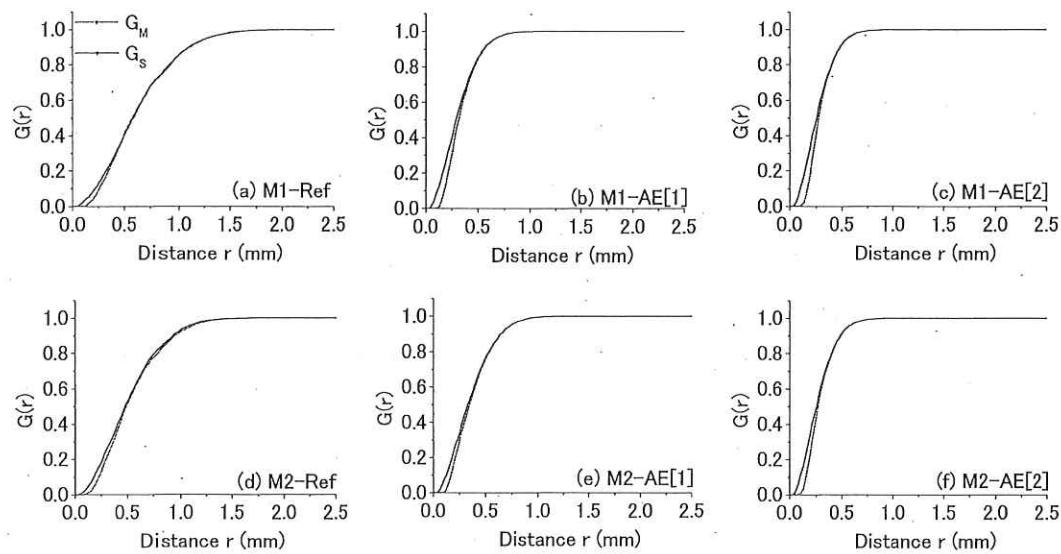


Fig. 7 Comparison of nearest neighbour distance function of air voids in mortars (G_M :real distribution in mortars G_S :point patterns simulated by thinning points from basic distribution)

original images. There is a difference between the two functions in the range of short distances. The curves of $G_S(r)$ are plotted upper than those of $G_M(r)$ in the short range. This is because, as mentioned before, two points can get closer in the simulated patterns since the size of air voids is ignored. Therefore, a probability of finding other points in the short range is greater in the simulated process than in the real distribution. However, there is little difference between the two functions in the range beyond certain distances.

Fig. 8 shows the relationship between the median distance R_{S50} of the thinned patterns and the one R_{50} of the real distribution of air voids in mortars. There again exists a strong correlation between them. Furthermore, they are almost similar values. These results suggest an alternative way to estimate the spacing factor. Once random points with a given point intensity are generated as to simulate air voids distribution, and then they are thinned to leave points in a cement matrix, we can represent spatial distribution of air voids in real mortars. Then following the procedure mentioned above, the median distance of the thinned pattern can be calculated. Fig. 9 shows relationship between the median distances R_{S50} in the thinned patterns (i.e. simulated distribution) and the spacing factors L in real mortars. As expected, there exists a strong correlation between them.

At the present, the spacing factor is still regarded as an important parameter to evaluate the air-void system in concrete. However, it seems that the procedure specified in ASTM C457 is tedious and is built on an old-fashioned technique. Advanced equipment for measuring it automatically is not widely used. However, if a simulation technique of point processes is used for generating air voids as random points, and if those points are thinned to retain air voids in cement paste matrix, then it is possible to represent real distribution of air voids. Using the simulated point patterns, it is also possible to estimate the spacing factor L . From the stereological viewpoint, the number of points in a cross section of concrete cannot be simply interpreted as air volume. However, in practice, there is a good correlation between the point

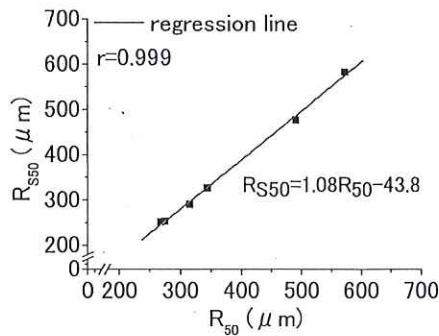


Fig. 8 Relationship between median distances in thinned and real processes of air voids

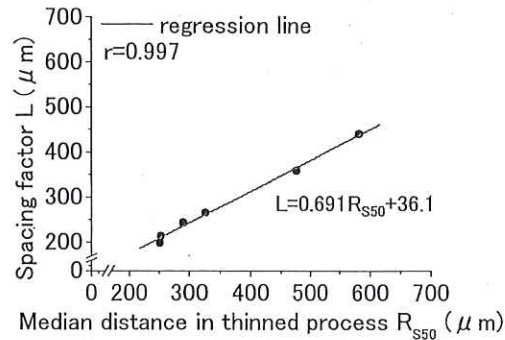


Fig. 9 Relationship between spacing factors and median distances in simulated processes for air voids

intensity and the air content in concrete as long as air-entrained concrete is produced properly [1, 5]. Thus, once a necessary air content is specified, for example 5% or more, the corresponding point intensity is easily determined from the correlation with air contents, which is obtained in advance. Then the specified point intensity can be used as input data to simulate air bubble spatial dispersion in mixtures. This simulation can be executed for mortars and concrete since the both mixtures can be treated by the same procedure of interrupted point processes.

Effectiveness of AE agents must be examined when frost resistance or durability of concrete is an important concern. The spacing factor must be evaluated as a routine parameter to judge the resistance. Following the procedure mentioned above, a characteristic distance that is closely correlated with the spacing factor is easily obtained using simple scanned images and image operations. In particular, images scanned with a commercial flatbed scanner seem to have sufficient resolution, which is comparable to images specified in the ASTM C457 method. Application of the point process statistics to low magnification images of air voids is a useful way to evaluate spacing between air voids.

4. Conclusions

Air voids distribution in mortars was analyzed as a spatial point process in 2D space. Air voids in scanned images were converted to the set of points, which stood for centroids of each void. The nearest neighbour distance function was calculated to compare different air-void systems in mortars with different air contents. A characteristic distance in the point process was defined by a probability specified in the nearest neighbour distance functions. The characteristic distances in mortars were compared with the traditional spacing factor of air void. Furthermore, aiming at easy estimation of the spacing factors, the procedure based on random simulation and image operation for points of interest was proposed. The simulated patterns of air voids were also compared with real distribution of air voids in cast mortar specimens. The major results obtained in this study are as follows;

- (1) The median distances in mortars are shorter than those in cement pastes at the same point intensity. The presence of aggregate particles makes air voids approach each other.
- (2) The median distance between air voids in real mortars has a strong correlation with the spacing factor that has been used as a parameter for air-void system.
- (3) Spatial distribution of air voids in mortar is easily simulated by the thinning operation of random point processes. Simple deletion of points on aggregate particles results in almost the same distribution patterns as in real mortars.
- (4) The spacing factor is estimated by means of the median distance of simulated point patterns. Treating air voids as a spatial point process is a useful way to characterize air void system in mortars.

Acknowledgment

This study was supported by JSPS KAKENHI(Grant Number 24560564).

References

- [1] Mayercsik, N.P. et al., A probabilistic technique for entrained air void analysis in hardened concrete, *Cem. Concr. Res.*, 59 (2014), pp.16-23
- [2] Stoyan, D., Interrupted point processes, *Biom. J.*, 21(7) (1979), pp.607-610
- [3] Stoyan, D. et al., *Stochastic geometry and its applications*, John Wiley and Sons, Chichester, UK (2008)
- [4] Konagai, N. et al., Determination of air void parameters in hardened concrete from measurement of intercepted air void's area, Monthly report of research institute of civil engineering, No.396 (1986) pp.2-8 (in Japanese)
- [5] Murotani, T. et al., Quantitative evaluation of spatial distribution of air voids in cement pastes by point process statistics, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 37(1) (2015), pp.493-498 (in Japanese)

論文 空間統計量による気泡の空間分布の定量評価

吉川 峻生^{*1}・古東 秀文^{*2}・室谷 卓実^{*3}・五十嵐 心一^{*4}

要旨：セメントペースト供試体断面の低倍率画像に現れた気泡に対し、空間統計学に基づく2次のステレオロジーの概念を適用し、気泡組織の定量評価を試みた。その結果、画像解析を用いて取得した低倍率画像内の気泡に対しても、各種関数は気泡の合泡などによる空間分布特性の変化を反映していることが示された。また、2点相関関数および接触分布関数は気泡間隔係数の特性を関数値に反映していると考えられ、従来の空間構造の定量的な評価への関連づけが可能と思われる。さらに、各種関数より、気泡間隔係数が同程度の値を示す試料同士であっても、その空間構造は異なる可能性があることが明らかとなった。

キーワード：粒子過程統計量、気泡間隔係数、2点相関関数、構造距離、接触分布関数

1. 序論

硬化コンクリート中の気泡構造を明らかにすることは、コンクリートの耐凍害性を評価する上で非常に重要である。その評価手段として、ASTM C 457に規定される Powers¹⁾の気泡間隔係数が広く用いられてきた。しかし、肉眼による顕微鏡測定に多大な労力と時間を要することから、実務においてはフレッシュ時の空気量試験の結果をもって気泡間隔係数の条件は満足しているとみなすことが多い。近年では、硬化後のコンクリート断面を簡便に測定可能であるとの理由から、画像解析法が注目されており、気泡組織の評価への導入が積極的に検討されてきた。その結果、画像解析により硬化コンクリート中の気泡組織や気泡パラメータに関して多くの重要な知見が得られており^{2),3),4)}、コンクリートの気泡間隔係数を簡便に測定する方法も提案されてきた。しかし、ここで評価される気泡間隔係数は気泡の規則的な立方体配置を仮定し、気泡間の距離を算出した値に基づくものであり、実際の気泡分布構造の幾何学的特徴、もしくは距離を表した値ではないことに留意すべきである。

一方、画像解析により気泡組織を測定し、従来の気泡間隔係数に加えて各種気泡パラメータを用いた耐久性の評価を検討している事例もある。例えば、坂田ら⁵⁾は画像解析による気泡の測定から、気泡組織と耐久性指数の相関についての分析を行い、配合条件によっては気泡間隔係数の値が同程度であっても気泡分布が大きく異なり、気泡間隔係数と耐久性指数の相関が得られないことを報告している。また、径0.15mm未満の気泡割合が増大するほど、コンクリートは高い耐久性指数を示すことを明らかにしている。さらに、硬化後のコンクリートとフレ

ッシュ時における空気量の変化には、凝結過程におけるブリーディングによる気泡の破泡や合泡の現象が影響している可能性があり、使用するセメントや混和材料の種類によって空気量の変化割合が異なることも報告している。以上のことから、コンクリートの耐久性評価には気泡間隔係数のみでは十分ではなく、実際の気泡の分布特性を定量的に評価することが重要であると考えられる。

気泡組織の特徴の画像からの定量的な評価は、確率論的な根拠に基づいて、2次元断面より得られる情報から3次元空間における特徴を推定するステレオロジーの考え方を背景としている。特に、気泡は球状であることから粒子として分布を表すことに妥当性を有し、また断面寸法から粒度分布や粒子個数などの情報を得ることも比較的容易である。さらに、近年の画像解析技術の発展と2次のステレオロジーの考え方が認識されるにともない、仮想的な距離ではなく実際の距離を評価するための数値解析法も提案されている^{6) 7) 8)}。しかし、これをより簡便な手法として確立するにはいたっておらず、また検討事例も限られるようである⁹⁾。

本研究では気泡組織の基本的な空間統計量を得ることを目的とし、骨材による分布制限を受けないセメントペースト供試体に対し、主として粒子過程統計量を用いて空間構造の評価を行った。さらにこのとき、低倍率で取得した供試体断面画像内の気泡に対して各種関数の適用を行い、気泡組織の差異の評価の可能性から、低倍率画像への適用の有用性について論ずることを目的とした。

2. 実験概要

2.2 使用材料および配合

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*4 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

表一 各試料の名称および混和剤量

水セメント比	名称	AE減水剤量 (G×%)	AE助剤量 (G×%)	フロー値
0.4	Ref	—	—	195
	AE0.05	0.05	—	203
	AE0.10	0.10	—	213
	AE0.25	0.25	—	222
	AE0.50	0.50	—	249
	AE0.25-助剤0.01	0.25	0.01	228
	AE0.25-助剤0.02	0.25	0.02	227
0.45	Ref	—	—	228
	AE0.25	0.25	—	259
	AE0.50	0.50	—	288
	AE0.25-助剤0.01	0.25	0.01	263
	AE0.25-助剤0.02	0.25	0.02	267

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³，比表面積 3310cm²/g）を使用した。セメントペーストの水セメント比は 0.40 および 0.45 とした。混和剤としてリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤および、アルキルエーテル系陰イオン活性剤を主成分とする AE 助剤を使用し，添加量を変化させることによって空気量を変化させた。JIS R 5201 に準じて恒温室（20℃，相対湿度 60%）にてセメントペーストを練り混ぜ，エアメーターを用いて空気量を測定した。その後，40mm×40mm×160mm の角柱供試体を作製した。打ち込み後 24 時間にて脱型し，材齢 7 日まで水中養生（20℃）を行った。作製したセメントペーストの名称，混和剤の量およびフロー値を表一に示す。

2.2 試料作製および画像取得

養生後に供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し，切断面の研磨を行った。研磨後，試料断面を黒色インクにより着色し，乾燥後に白色粉末（炭酸カルシウム微粉末，粒径範囲 12～13μm）を気泡に充填させた。その後，スキャナを用いて等倍の断面画像を取得した。本研究では，簡便性を考慮し各試料の画像取得枚数を 10 枚とした。このときの解像度は 1200dpi とし，1 画素は 21.2μm に相当する。なお，試料の縁部では均一な呈色がなされない領域が存在する可能性があるため，試料中心部から 30mm×30mm の範囲を観察領域とした。

2.3 画像解析

画像解析ソフトを用いて，2.2 にて取得した画像に対し，モノクロ変換を行った。その後，平滑化フィルタ処理によりノイズを除去し，グレースケールに基づく 2 値化処理によって気泡の 2 値画像を得た。抽出した気泡の 2 値画像から気泡面積率を算出し，ステレオロジーの考え方に基づきこれを気泡体積率とした。なお，気泡径の範囲は 30μm 程度以上であることから⁹⁾，30μm 以下の白色部は気泡以外の凹凸に起因するものとしてこれを除去した。以下の関数によって気泡分布の評価を行った。

(1) 円相当径による粒度分布

各気泡を面積の等価な円に置き換え，それらの円を気泡径の順に並び替え，円相当径による粒度分布とした。

(2) 気泡間隔係数

使用する供試体がセメントペーストであることから，気泡間隔係数は空気量に対するセメントペースト量の割合が大きい場合（セメントペースト量/空気量(P/A)>4.33）に相当する。このとき気泡間隔係数は式(1)によって求められる。

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \sqrt{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad (1)$$

ここに， α は気泡の比表面積， P はセメントペースト割合， A は空気量である。本研究では，画像解析法を用いているので，空気量 A および比表面積 α は画像解析から求めたものを用いた。

(3) 2 点相関関数

2 点相関関数は，ある一定長さ r の線分をランダムに画像上に落としたとき，その線分の両端が着目相上に載る確率を表す関数である。着目相を P とし，線分の両端の点 $x_i (i = 1, 2)$ に関して式(2)のような指示関数を定義する。

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i \in P) \\ 0 & (x_i \notin P) \end{cases} \quad (2)$$

$x_i \in P$ である確率を $P\{I(x_i) = 1\}$ とすると，任意の長さの線分の両端 x_1, x_2 がセメントペースト上に載る確率は， $P\{I(x_1) = 1, I(x_2) = 1\}$ で与えられ，これより 2 点相関関数 $S(r)$ は式(3)にて定義される。

$$S(r) = \langle I(x_1)I(x_2) \rangle = P\{I(x_1) = 1, I(x_2) = 1\} \quad (3)$$

ここに $r = |x_1 - x_2|$ は 2 点間距離を表し， $\langle \rangle$ は期待値を意味する。また，関数値の初期値 ($S(0)$) は着目相の体積率を表し， $r = 0$ における関数値の初期勾配は比表面積を反映し，勾配の絶対値が大きいほど比表面積は大となる。距離 r が大きくなるにしたがって関数値は減少し，理論上は体積率の自乗値に収束する。関数が最初に自乗値と交わるまでの距離は，その空間構造を特徴づける構造距離と呼ばれる。

(4) 2 点間直線経路相関関数（パス関数）

2 点相関関数を拡張して考えると，線分の両端だけでなく線分全体が同一相上に載る確率を求めることができる。2 点間直線経路相関関数は，着目相内の直線的な連続経路の有無とその距離を強く反映した関数であり，その定義は式(4)のように定義される。

$$S_L(r) = \langle I(x_1) \cdots I(x_j) \cdots I(x_n) \rangle \\ = P\{I(x_1) = 1, \cdots, I(x_j) = 1, \cdots, I(x_n) = 1\} \quad (4)$$

ここに，点 x_j は始点 x_1 ，終点 x_n を結ぶ直線状の点であり， $|x_n - x_1| = r$ である。

2 点相関関数と同様に関数の初期値 ($r = 0$) は着目相の体積率を表す。関数値は距離の増加にともない減少していくが，同一距離における関数値は 2 点相関関数に比べて小さくなる。また，ある程度距離が増加すると，線

分全体が着目相に載ることは不可能となるため、関数値は0に収束する。

(5) 接触分布関数

接触分布関数は、点過程 $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$ が与えられたとき、画像内の任意の点 $u \in W \setminus X$ から最も近い点 $x_i \in X$ までの距離に関する確率関数であり、その定義を式(5)に示す。

$$H(r) = P\{N(b(u, r)) > 0\} \quad (5)$$

ここに $b(u, r)$ は点 u を中心とする半径 r の円であり、 $N(B)$ は領域 $B \subset W$ 中にある点の数である。接触分布関数はその定義から気泡間隔係数と類似の概念であると考えられる。そこで、本研究においては、気泡粒子を点過程の点の凝集体とみなし、気泡粒子を s として画像上にランダムに点 $u \notin s$ を落とす。その点から画素を単位として r を変化させながら気泡表面までの最短距離を求め、接触分布関数として評価した。

3. 結果および考察

3.1 画像から得られた気泡の情報

表-2 に画像から得られた気泡の情報を示す。フレッシュ時に空気量試験により求めた空気量と、硬化後の気泡体積率には差が生じている。この原因としては、打ち込みの際に気泡が損失したことや画像分解能以下の微細な気泡が存在していることなどが考えられる。また、水セメント比 0.40 に比べ 0.45 の気泡の残存率が比較的低い値を示していることから、気泡の破泡などによる損失にはフレッシュ特性が関係していることを示唆している。気泡体積率の変動は両水セメント比においてそれほど大きくなく、低倍率で画像を取得しても、気泡に関して十分な情報が得られると考えられる。気泡個数は AE 減水剤の使用量に比例して増加しており、エントレインドエ

アが連行されていることが確認できる。また、AE 助剤を 0.01% 添加すると、空気量は大きく変化していないが、気泡個数はさらに増加し、平均気泡径は小さくなっている。これは、AE 助剤が比較的微細な径の気泡を連行する傾向にあることを示している。しかし、AE 助剤使用量 0.02% において、平均気泡径は増大し、セメントペースト領域に占める気泡の割合が増加したことで、気泡粒子の分散可能領域が制限され、気泡同士の結合が生じやすくなったためと考えられる。

図-1 に取得したセメントペースト中の気泡の画像の例を示す。マイクロスコープによって取得した拡大画像(図-1(b))より、炭酸カルシウム微粉末は直径が数10 μ m程度の気泡にも充填されていることが確認でき、さらに、AE 助剤添加量の増加により、空気量および気泡粒子数が増加していることが画像から目視にて確認できる(図-1(a), (c), (d))。

3.2 気泡の粒度分布

図-2 に正規化した累積面積率で表した気泡の粒度分布を示す。AE 減水剤を添加した試料は、混和剤を使用していない試料と比較し初期勾配が大きくなっており、エントレインドエアの連行により約 250 μ m 以下の微細な径の気泡割合が増大したことが確認できる(図-2(a), (c))。しかし、AE 減水剤を 0.50% 添加した試料では、添加量 0.25% の試料に比べ約 500 μ m 以上の気泡の割合が増大しており(図-2(a), (c))、セメントペースト領域における気泡同士の結合が生じているものと推測される。AE 助剤を添加した試料では、粒度分布の形状が大きく変化しており、添加量の増加とともに粗大な気泡の割合が増大し、メジアン径は大きくなっている(図-2(b), (d))。さらに、添加量 0.01% と 0.02% を比較すると 0.02% では微細な気泡割合が減少しており(図-

表-2 気泡の情報

水セメント比	0.40								0.45				
	Ref	AE0.05	AE0.10	AE0.25	AE0.50	AE0.25- 助剤0.01	AE0.25- 助剤0.02		Ref	AE0.25	AE0.50	AE0.25- 助剤0.01	AE0.25- 助剤0.02
空気量(%)	2.4	3.3	3.4	4.9	6.4	6.0	8.5		3.5	4.9	6.2	5.8	9.5
硬化後の気泡体積率(%)	1.0	1.9	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3		1.2	3.0	3.7	3.5	6.9
気泡体積率の変動係数(%)	0.13	0.15	0.05	0.06	0.12	0.04	0.06		0.11	0.08	0.09	0.10	0.09
残存率(%)	41.7	56.6	63.1	72.2	69.0	62.0	85.9		34.2	62.1	59.9	60.1	72.9
気泡個数(個)	417	723	806	1824	2193	2601	2758		463	1686	1797	2420	2313
平均気泡径(μ m)	123	135	138	120	118	100	126		134	117	122	96	129
気泡間隔係数(μ m)	558	451	432	298	276	250	251		540	307	301	258	273

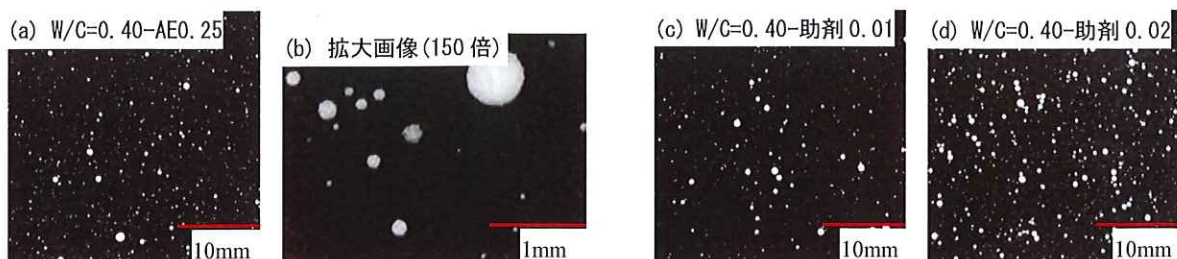


図-1 セメントペースト中の気泡の画像(W/C=0.40)

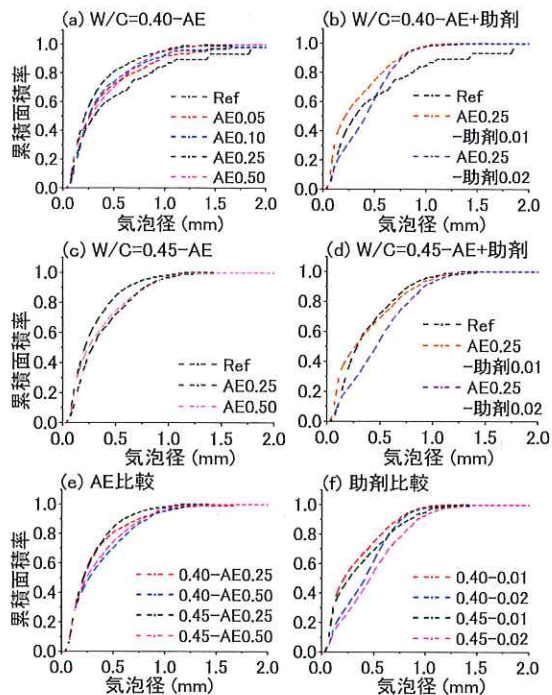


図-2 累積面積率で表した気泡の粒度分布

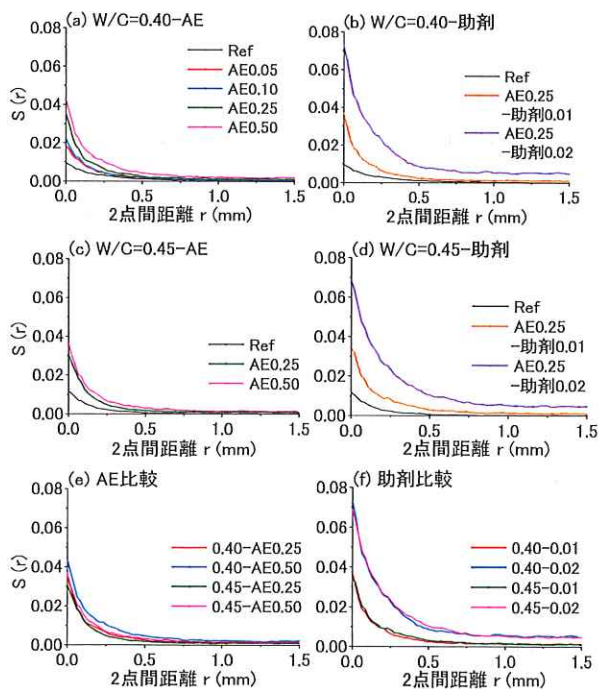


図-3 気泡の2点相関関数

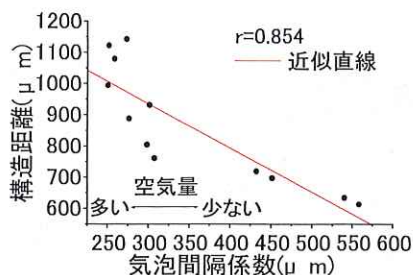


図-4 気泡間隔係数と構造距離の相関

2 (b), (d)), 気泡の合泡によって径の大きな気泡個数が増加していると考えられる。以上より、断面画像から視覚的に理解できる定性的な認識は、粒度分布の定量的な評価と一致するといえる。また、AE 減水剤を添加した試料を水セメント比 0.40 と 0.45 で比較すると、0.45 の方が約 700 μm 以上の粗大な気泡割合が、小さくなっている (図-2 (e))。また、AE 助剤を添加した試料と比較すると、水セメント比 0.40 の試料の方が約 250 μm 以下の気泡割合が大きく、約 700 μm 以上では 0.45 での割合が大きくなっている (図-2 (f))。これは、気泡粒子密度 (単位面積当たりの気泡粒子個数) が增大するほど気泡の合泡が生じやすくなるが、その程度はセメントペーストのフレッシュ性状に影響を受けるためと考えられる。

3.3 2点相関関数

図-3 に着目相を気泡としたときの2点相関関数を示す。いずれの試料においても、関数の初期値は気泡の体積率とほぼ一致している。図-3 (a) および (c) に示すように、初期勾配の変化には、AE 減水剤によってエントレインドエアが連行されたことで、空気量および比表面積が増大したことが表れている。また、統計的な変動のため明確に定めることは困難であるが、関数の傾きに変化が認められなくなる点として定めた構造距離は、エントラップトエアのみが含まれる場合は、0.5~0.7mm 程度である。エントレインドエアが連行されると空気量の増加にともない構造距離は増大すると判断される (図-3 (b), (d))。ここに、構造距離は対象とする2点の相関性がランダム分布よりも大きな正の相関を示す範囲であり、この範囲が大きくなることは分布特性に多様性が現れ、分布を特徴づけるためにはより広い範囲の観察が必要であることを意味する。つまり、気泡の結合により粗大な径の気泡が領域内で観測されるなどの空間構造の変化が、関数値として反映されたと考えられる。また、両水セメント比における収束値は AE 減水剤と AE 助剤どちらの場合においても大きな差はなく、混和剤量が等しければ、空間分布を特徴づける構造距離は水セメント比によって大きく変化していない (図-3 (e), (f))。これは、気泡の合泡および破泡が、観察領域全体でランダムに発生しているためと思われる。

図-4 に2点相関関数において勾配変化が認められなくなる値として定めた構造距離と気泡間隔係数の相関を示す。両者には負の相関がみられる。これは、前述のようにエントレインドエアの連行によりセメントペースト中の気泡個数が増加すると、任意の位置から近距離にて気泡を見出せることになるが、分布には多様性が現れるようになり、不偏的な評価のため観察により広い視野が必要となることを示している。今回用いた試料においては、構造距離は大きくても 1mm 程度であり、本研究では

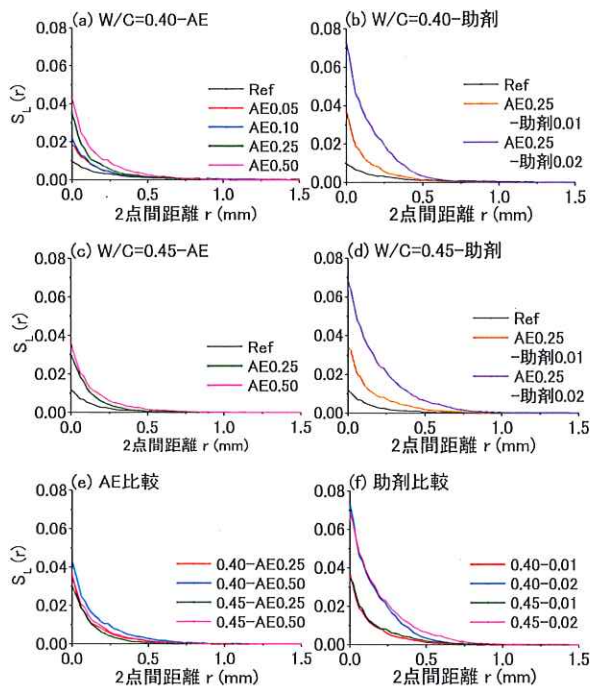


図-5 気泡の2点間直線経路相関関数

30mm×30mmの範囲を観察領域としている。よって視野としては十分な大きさを観察していたと判断される。

3.4 2点間直線経路相関関数（パス関数）

図-5に気泡に着目相としたときの2点間直線経路相関関数を示す。図-5(a), (b), (c), (d)より、空気量の増加にともない気泡が直線的に連続性を持つ確率は大きくなっている。また、収束距離は、空気量の増大とともに大きくなる傾向が認められる。このことは、確率としては小さくてもより大きな気泡が存在することを示し、気泡の結合を反映しているものと考えられる。特に、AE助剤を0.02%使用した試料では気泡が直線的な連続経路を有する確率が大きくなって現れており（図-5(b), (d)）、気泡の合泡による気泡径の増大を関数値として再現しているものと考えられる。さらに、助剤を0.02%添加した水セメント比0.40と0.45の試料を比較すると（図-5(e), (f)）、関数の収束値が0.45の方が大きい。これは、高水セメント比となるほど気泡同士の結合が生じやすくなるためと考えられる。

3.5 接触分布関数

図-6に任意点から気泡表面を見出す確率である接触分布関数を示す。図-6(a)および(b)より、両水セメント比において、空気量および気泡個数の増加にともない関数の収束距離が短くなっている。これは、混和剤の添加によって気泡密度が増大し、気泡間距離が短くなったことで、セメントペーストマトリックス中の任意の点からより近距離にて気泡を見出せるようになるためである。また、AE助剤を0.02%使用した試料の収束距離が最も短

いことから、この関数は気泡個数の増加とそれに伴う気泡の合泡を強く反映していると考えられる。

図-7に接触分布関数の収束距離と気泡間隔係数の関係を示す。両者には正の相関性が見られ、セメントペースト相の任意地点から気泡表面までの距離を求めることは、気泡間距離を求めることと類似した特性であると理解される。以上より、接触分布関数は予想通り気泡間隔係数の特性を関数値として反映していると考えられ、従来の気泡構造の定量的評価法との対応づけが可能と思われる。

図-8に接触分布関数を頻度分布として示す。図-8(a)および(b)より、混和剤によりエントレインドエアが連行されると、気泡粒子密度の増大とともに確率の分布範囲は狭まり、最頻値を示す距離も短くなる。このことから、エントレインドエアはセメントペースト相内の任意の位置から近距離にて気泡表面を見出す確率を高めることは明らかである。また、AE助剤を添加した試料の最頻値までの距離と気泡間隔係数に着目すると、AE助剤の添加により気泡間隔係数が増大する（表-2）のに対し、最頻値までの距離は短くなっている（図-8）。これより、気泡表面に関する接触分布関数は、気泡間隔係数の仮想空間配置による評価とは異なる変化傾向も表す特性値であると考えられる。また、スキャナによって取得した低倍率の画像であっても空気量の変化にともなう空間分布の特徴の変化が現れていることにもなり、低倍率

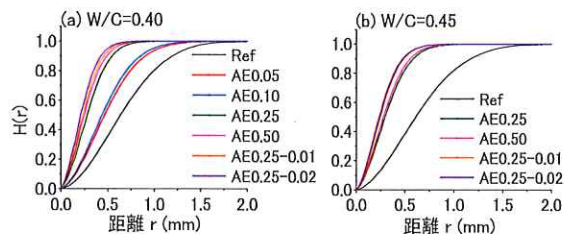


図-6 接触分布関数

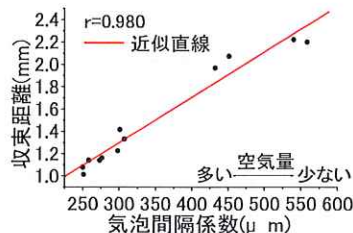


図-7 収束距離と気泡間隔係数の相関

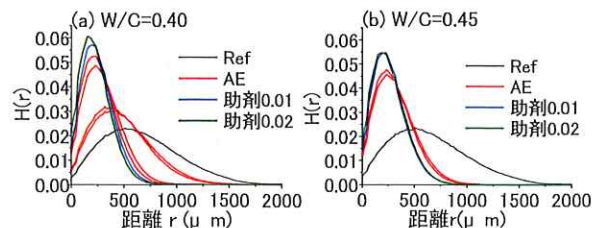


図-8 接触分布関数の頻度分布

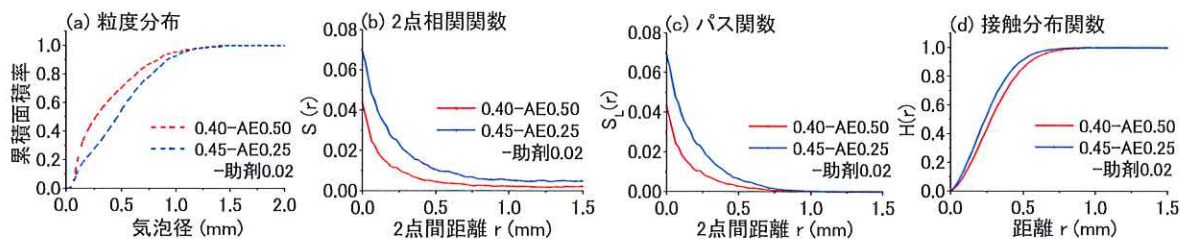


図-9 同程度の気泡間隔係数での各関数の比較

画像でも気泡分布の特性化および評価に対して有用な情報を与えると考えられる。

3.6 同程度の気泡間隔係数での各関数の比較

気泡間隔係数が同程度の値を示した $W/C=0.40-AE0.50$ (気泡間隔係数 $276\mu m$) と $W/C=0.45-AE0.25$ -助剤 0.02 (気泡間隔係数 $273\mu m$) の試料において気泡の空間分布構造を比較する。図-9 に各種関数を示す。図-9(a)より、気泡間隔係数の値が同程度であっても粒度分布は大きく異なり、その勾配から助剤 0.02% の試料は $500\mu m$ 以上の気泡割合が大きいと判断される。また図-9(b)より、2点相関関数での初期値(気泡体積率)は助剤 0.02% の方が大きく、収束距離も大きいことから、前述のように助剤 0.02% の気泡を空間分布には多様性がより大きく現れていることになる。気泡内に直線的な経路が存在する確率も助剤 0.02% の方が大きく(図-9(c))、気泡の結合により粗大な気泡個数が増加していることが理解される。接触分布関数の収束値も、助剤 0.02% の方が小さく、気泡個数と平均気泡径の差が関数値に反映されていると考えられる(図-9(d))。以上のことより、低倍率の画像であっても2次のステレオロジーに基づく空間統計量により実際の気泡の空間構造の相違をより敏感に表すことが可能であり、気泡を示す評価法として有用であると考えられる。

4. 結論

セメントペースト内における気泡の空間構造を粒子過程とみなし空間統計量の関数による評価を行った。本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 気泡粒子密度が増大すると気泡の空間構造は気泡同士の結合などにより変化し、その分布特性には多様性が現れると考えられる。
- (2) 2点間直線経路相関関数は、気泡の合泡による連続性の増大を反映していると考えられる。
- (3) 2点相関関数および接触分布関数は、気泡間隔係数の特性を関数値に反映し、従来の定量評価値への関連付けが可能と思われる。
- (4) 低倍率画像内の気泡に対し、各種関数はその気泡組織の差異を反映しており、低倍率画像への空間統計

量の適用は有用であると考えられる。

- (5) 気泡間隔係数の値が同程度であっても、気泡分布特性は異なることを、空間統計の概念を用いることにより定量的に評価できた。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号: 24560564)の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) Powers, T.C.: The air requirement frost-resistant concrete. Proceedings of the highway Research Board, 29, pp.184-211, 1949
- 2) 仁木孟伯, 地頭蘭博, 原田克己: 画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法について, セメントコンクリート論文集, Vol.39, pp.141-145, 1985
- 3) 小長井宣生, 大橋猛, 根本任宏: 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論, 土木試験所月報, No.396, 1986.5
- 4) 鮎田耕一, 桜井宏, 田辺寛一郎: 硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析, 土木学会論文集, Vol.13, No.420, pp.81-86, 1990
- 5) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.25-47, 2012.1
- 6) Snyder, K., Natesaiyer, K. and Hover, K.: The Stereological and Statistical Properties of Entrained Voids in Concrete: A Mathematical Basis for Air Void System Characterization, Materials Science of Concrete VI (eds. S. Mindess and J. Skalny), The American Ceramic Society, pp.129-214, 2001.
- 7) Lu, B. and Torquato, S.: Nearest-Surface Distribution Function for Polydispersed Particle Systems, Physical Review A, Vol.45, No.8, pp.5530-5544, 1992
- 8) Dequiedt, A.-S., et al: Distances between air-voids in concrete by automatic methods, Cement and Concrete Composites, Vol.23, No.2-3, pp.247-254, 2001
- 9) 川村満紀: 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996