

学位申請論文

各種測定条件の影響を考慮した表層透気性の評価方法と
構造体コンクリートの中性化進行に関する研究

Study on evaluation method of air permeability of cover concrete
considering influence of various testing conditions
and prediction of progress of carbonation of structural concrete

平成30年3月

山 崎 順 二

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3
第2章 表層透気性に関する既往の研究	11
2.1 はじめに	11
2.2 国内外で提案されている透気性試験方法	11
2.3 まとめ	23
第3章 各種の透気性試験の関連性および透気領域に関する検討	29
3.1 はじめに	29
3.2 実験概要	29
3.2.1 実大コンクリート壁試験体	29
3.2.2 各種透気性試験	31
3.2.3 共通試験（ラウンドロビン・テスト）の概要	36
3.3 各種の透気性試験における透気性測定値の関係	41
3.3.1 測定の概要	41
3.3.2 RILEM 法と DC(TPT)法・SCM 法・FIM 法との関係	41
3.3.3 DC(TPT)法と SCM 法・FIM 法との関係	44
3.4 各種の透気性試験における透気領域の検討	45
3.4.1 供試体の概要	45
3.4.2 透気領域検討のための圧力分布測定結果および考察	47
3.5 まとめ	54
第4章 測定誤差を考慮した実用的評価手法に関する検討	59
4.1 はじめに	59
4.2 共通試験における透気性測定値の変動量	59
4.2.1 DC(TPT)法における変動係数の検討	59
4.2.2 SCM 法および FIM 法における変動係数の検討	65
4.3 繰返し測定が透気性の試験結果に及ぼす影響	69
4.3.1 圧力計測の概要	69
4.3.2 圧力計測に供した透気性試験	69

4.3.3	繰返し測定に関する実験の結果および考察	70
4.4	透気試験機の測定精度確保のための点検方法に関する検討	79
4.4.1	はじめに.....	79
4.4.2	検定器の概要	79
4.4.3	検定器を用いた透気性試験機の点検方法.....	81
4.4.4	測定結果および考察	82
	(1) DC(TPT)法における透気性の測定精度に関する検討	82
	(2) FIM 法における機差の検定と測定精度の点検.....	84
4.5	透気性測定値の取扱いについて	85
4.5.1	はじめに.....	85
4.5.2	測定値の検定	85
4.6	測定点数（サンプリング数）に関する検討.....	89
4.6.1	はじめに.....	89
4.6.2	構造体コンクリートを評価する際のサンプリング数の考え方.....	89
4.7	まとめ	92
第5章	打放し面での透気性とかぶり厚さによる中性化進行評価に基づく耐久性評価	97
5.1	はじめに.....	97
5.2	本実験に適用した透気性試験の種類.....	97
5.3	室内試験練りにより作製したコンクリート供試体による中性化深さと透気性	98
5.3.1	コンクリート供試体による実験の概要	98
5.3.2	中性化深さ試験の結果および考察	99
5.3.3	中性化速度係数と透気性試験値との関係.....	99
5.3.4	透気性の評価値による中性化進行予測の考え方.....	101
5.3.5	透気性試験値の試験方法による比較.....	103
5.3.6	透気性試験値と中性化深さの到達期間	104
5.4	実大 RC 壁における透気性試験の評価	105
5.4.1	実大 RC 壁の概要および試験概要.....	105
5.4.2	実大 RC 壁での透気性試験の位置選定および算出手法.....	106
5.4.3	φ15×5cm 供試体の RILEM 法による透気性試験結果.....	107
5.4.4	実大 RC 壁での RILEM 透気係数とその変動係数	108
5.4.5	実大 RC 壁での透気性とサンプリング手法	109
5.5	かぶり厚さと透気性による耐久性評価手法の提案	110
5.6	まとめ	113

第6章 結論および今後の課題	117
6.1 はじめに	117
6.2 結論	117
6.3 今後の課題	119
－Appendix－（今後の課題）	123
1 仕上材付き構造体コンクリートの透気性による中性化進行評価に関する検討	123
1.1 はじめに	123
2 実験概要	124
2.1 シリーズⅠにおける模擬壁試験体	124
2.2 シリーズⅡにおけるコンクリート供試体	124
2.3 仕上材付きコンクリートに適用した透気性試験	125
3 実験結果および考察	126
3.1 シリーズⅠにおける模擬壁試験体の透気性試験結果	126
3.2 シリーズⅠに適用した各種の透気性試験結果の相関性	127
3.3 シリーズⅡにおけるコンクリート供試体の透気性試験結果	129
4 透気性試験の複合による仕上材付きコンクリートの透気性評価に関する検討	130
5 おわりに	132
本論文に関する研究論文および発表論文リスト	135
1. 本論文に関する研究論文および筆頭著者論文	135
2. コンクリートの透気性に関する連名論文	137
謝 辞	143

第 1 章

序 論

第1章 序論

1.1 研究の背景

20世紀は建設の世紀であったが、21世紀は維持管理の世紀と言われ、既存構造物の維持管理が極めて重要な時代となっている。また、高度成長期に大量に建設された鉄筋コンクリート構造物はもちろん、今後建設される構造物の維持管理もまた、LCCの立場から注目されている。今や、コンクリート構造物を造るだけでなく、造り使いこなす時代となった。高速道路や橋梁、下水道など社会生活を支えているインフラの多くは、1960年～1970年代を中心とした高度経済成長期に建設されている。その量は、国内の橋梁では40%、トンネルの約25%が高度成長期に建造されたものである。それらの構造物が今後一斉に老朽化の時期を迎えることになる。

構造物の耐用年数には明確な判断基準がなく、それぞれの施工状況や構造物がおかれる周辺環境によって大きく異なる。しかし、構造物の劣化が進行してから順次補修したり更新したりする方法では費用が莫大となり、いずれは対応しきれなくなることが予測される。昨今の厳しい財政の中で、これらの構造物の長寿命化を図るためには、調査・診断結果に基づくLCCを考慮した適切な時期での補修・補強が必要となる。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性や構造安全性は、一般に鉄筋腐食の度合いによって定義される。内在塩分など鉄に対する有害物質が存在しない限り、腐食の進行はかぶりコンクリートの品質に大きく左右され、その部分における物質透過性が小さいほど、鉄筋腐食の進行が抑制されることになる。この鉄筋コンクリート構造物の耐久性確保のために重要な要因となるかぶりコンクリートの物質浸透性を適切に評価することは、構造物の竣工時点での耐久性予測、経過年数に応じた寿命予測、健全性評価、補修時期の立案などに関して、極めて有用な情報を得ることにつながると考えられる。

これまで、鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価のための指標の1つとして、コンクリートの中性化深さが用いられてきている。これは、コンクリートに内在塩分が存在しない場合、かぶりコンクリートの中性化深さが鉄筋位置付近にまで到達することによって、アルカリ環境下において鉄筋表面に形成されている不動態被膜が破壊され、水分と酸素の供給によって鉄筋腐食が進行しやすくなるためである。

一方、コンクリートの中性化深さの測定は、通常、構造体コンクリートから破壊もしくは微破壊により採取されたコンクリートコア供試体やドリル削孔粉を用いて、実測により評価することが一般的である。その他、既往の研究により提案[1]されている、調査条件、使用材料、環境条件に応じた係数などを含んだ中性化進行予測式により推定する場合もある。しかし、実構造物においては降雨の影響や仕上材の影響などによって中性化の進行の程度が影響を受けることなどにより、中性化予測式による推定精度は必ずしも高いとは言

えないことから、建物の耐震診断において中性化深さを把握する際には、構造体コンクリートからコアを数本採取して実測評価しているのが現状である。しかし、コア採取などの破壊試験による中性化深さの評価は、鉄筋コンクリート構造物のある部材の局所的な評価であり、採取本数も少なく採取位置も限定される場合が多いことから、鉄筋コンクリート構造物全体の耐久性の評価としては情報量が不十分となる場合も考えられる。

このことから、竣工前の鉄筋コンクリート構造物や既存構造物に対して、構造物のおかれる環境状態や測定条件の影響を適切に考慮してかぶりコンクリートの物質透過性、ここでは中性化深さの進行評価が可能となり、かつ、経過年数に応じて経時的にそれが把握できるような測定技術を提案することは、耐久性評価や健全性評価のためには有用である。

1.2 研究の目的

鉄筋コンクリート構造物の原位置において適用できる表層コンクリートの物質透過性評価には様々な試験方法が提案されており[2][3], その中でも透気性による定量的な評価は、鉄筋コンクリート構造物の中性化の進行に基づく耐久性評価に適していると考えられる[4]。

本論は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を確保するために重要な要因となる表層コンクリートの物質浸透性を、竣工前の新設の鉄筋コンクリート構造物もしくは既存構造物の原位置つまり構造体コンクリートにおいて非破壊もしくは微破壊にて適切に評価することを主眼として、中性化の進行速度と高い相関関係にあるとされる透気性に着目し、透気性の測定および評価に影響を及ぼすと考えられる測定条件や、各種の透気性試験の関連性とそれらによるコンクリート内部の透気領域の検討に加え、測定精度を向上させるための手法などについて検討を行った結果について述べるものである。

ここで、本研究範囲内の各種の透気性試験は、RILEM-CEMBUREAU 法を除いて鉄筋コンクリート構造物の原位置において実施できるが、現時点では、評価目的に応じた透気性試験の選択方法や試験方法の決定のための情報が必ずしも十分に整備されているとは言えない。また、透気性の良否に関する閾値や評価指標についても、構造物の耐久性評価の現状に即した判定基準を示すまでには至っていない。ひいては各種の透気性の試験方法自体も規格化されたものは国内にはない。これは土木分野においても同様であり、近年、かぶりコンクリートの吸水性試験（SWAT）とともに主として施工中の表層コンクリートの品質評価として透気試験が適用されるようになってきてはいるものの、測定結果の判定基準については、Swiss Standard などにに基づき評価・判定されているのが現状のようである。

このような現況の中、表層透気性試験による構造体コンクリートの中性化進行に基づく耐久性評価手法を確立するにあたり、主として国内で研究されている構造体コンクリートの原位置に適用できる 3 種類の表層透気性試験を選定し、各種の透気性試験の関連性、コ

ンクリートの表層から内部に至る透気領域の検討，透気性試験の測定条件や実大コンクリート部材における測定値の変動とその取扱い，測定値の変動要因に関する検討，測定点数，測定機の検定方法などについて検討した。

加えて，コンクリートの打放し面における中性化進行評価手法の提案のみではなく，今後の課題として，主として建築構造物を対象とした仕上材表面からの測定による表層透気性の評価手法についても検討を試みた。本論の付録として添付する。

以上，本研究は，竣工前の鉄筋コンクリート構造物や既存構造物を対象とし，構造体コンクリートの打放し面における各種の測定条件を考慮した表層透気性試験による中性化進行に基づく耐久性評価のための手法を提案することを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1.3-1 に示す。本論は全 6 章および今後の課題で構成される。以下に各章の概要を示す。

第 1 章「序論」

研究背景や目的について述べる。

第 2 章「表層透気性に関する既往の研究」

コンクリートの耐久性評価として位置づけられる主として国内で研究開発されている各種の透気性試験方法について，主なものを既往の研究として述べる。

第 3 章「各種透気性試験の関連性および透気領域に関する検討」

構造体コンクリートの原位置における中性化進行に基づく耐久性評価のための非破壊・微破壊的な手法として，主として国内外で研究開発されている，ダブルチャンバー法（DC(TPT)法），シングルチャンバー法（SCM 法）およびドリル削孔法（FIM 法）を代表的な表層透気性試験方法として本研究において抽出し，これらの透気性試験を実大のコンクリート壁を用いた共通試験（ラウンドロビン・テスト）に適用した。

本章では，まず，共通試験の概要を説明し，その試験結果の一部を用いて，透気性のベンチマーク試験として位置付けられる RILEM・CEMBUREAU 法による測定結果と，各種の原位置に適用できる透気性試験による測定結果との比較，加えて，各種の表層透気性試験による測定値の相関性について述べる。さらに，透気性試験時のコンクリート表面から内部への透気領域について，モルタル供試体を用いて検討した結果について述べる。

第4章「測定誤差を考慮した実用的評価手法に関する検討」

3章の共通試験に示した実大コンクリート壁を用いて、ダブルチャンバー法（DC(TPT)法）による同じ試験機構成および仕様の8台の測定機を用いたラウンド・ロビンテストを実施し、測定機の違いやコンクリートの表層品質の違いに起因する透気性測定値の変動係数を把握することに加え、シングルチャンバー法（SCM法）およびドリル削孔法（FIM法）における測定値の変動係数の把握する。その上で、構造部材の平均的な評価を行うことを目的とした場合の Grubbs の棄却検定を適用した透気性測定値の特異値の取扱いや測定点数（サンプリング数）の考え方について述べる。

また、透気性試験の測定方法による変動を低減することを目的として、ダブルチャンバー法（DC(TPT)法）、シングルチャンバー法（SCM法）およびドリル削孔法（FIM法）を用いて、同じ位置で繰返し測定する場合に透気性試験値が受ける影響について検討し、直前の測定に影響されない正確な測定値を得るために必要となる測定時間間隔（インターバルタイム）について検討し提案する。さらに、透気性試験機の測定精度を確保するための試験機の点検について、試作した検定器を使用した手法を提案する。

また、同じ位置を複数回繰返し測定する場合の時間間隔が透気性の測定値に及ぼす影響を確認するため、透気性試験時のコンクリート内部の圧力変化を測定し、内部圧力の深さ方向の変化から、各種の透気試験における影響深さについても検討する。

なお、本章末尾には、評価目的に応じた透気性評価値を得るための実用的なフローを示している。フローに従って得られる透気性評価値を、第5章に示す耐久性評価つまり中性化進行予測のための中性化速度係数の導出に関する考え方に適用することによって、構造体コンクリートの耐久性評価が可能になる。

第5章「打放し面での透気性とかぶり厚さによる中性化進行評価に基づく耐久性評価」

本章では、評価する構造物の構造体コンクリートの品質変動に起因する透気性の変動を適切に設定し、第4章に準じて得られた透気性評価値を用いて中性化速度係数を予測し、それに基づく耐久性評価を行うための標準的な手法を示すことを目的とし、水セメント比 30～100%の範囲のコンクリート供試体に加え、呼び強度 21,27 および 36 の3種類のコンクリートを用いた実大の鉄筋コンクリート壁を用い、室内での RILEM-CEMBUREAU 法と、原位置でドリル削孔法（FIM法）およびシングルチャンバー法（SCM法）による透気性試験を行い、中性化速度係数と透気性測定値との相関性を確認する。この相関関係を適用することによって、第4章に示した各種の透気性試験における変動を考慮した透気性測定値による中性化速度係数の推定式が得られることを示し、この推定式による中性化進行がかぶり厚さに到達した時点を構造物の寿命もしくは供用期間と想定することによる、透気性測定値とかぶり厚さに基づく構造体コンクリートの耐久性評価のためのチャートを提案する。

第 6 章「結論」

本研究で得られた知見について要約し、今後の検討課題を述べる。

今後の課題（Appendix）

「仕上材付き構造体コンクリートの透気性による中性化進行評価に関する検討」

仕上材付き構造体コンクリートの透気性評価手法の検討を行うことを目的として、建築物に汎用される 3 種類の仕上材をコンクリート面に塗布し、各仕上面において各種の透気性試験を適用する。シングルチャンバー法（SCM 法）もしくはダブルチャンバー法（DC(TPT)法）の表面法のみでは評価が困難となる、主として建築構造物の位ように仕上材が塗布された構造体コンクリートの透気性をドリル削孔法（FIM 法）と組み合わせることによって評価する手法「透気ハイブリッド法」の可能性について検討する。

現時点で実験および検討を継続中であり、今後、仕上材付き構造体コンクリートの表層透気性による中性化進行に基づく耐久性評価手法としての複合型透気性試験「透気ハイブリッド法」の確立を目指す所存である。

「各種測定条件の影響を考慮した表層透気性の評価方法と
構造体コンクリートの中性化進行に関する研究」

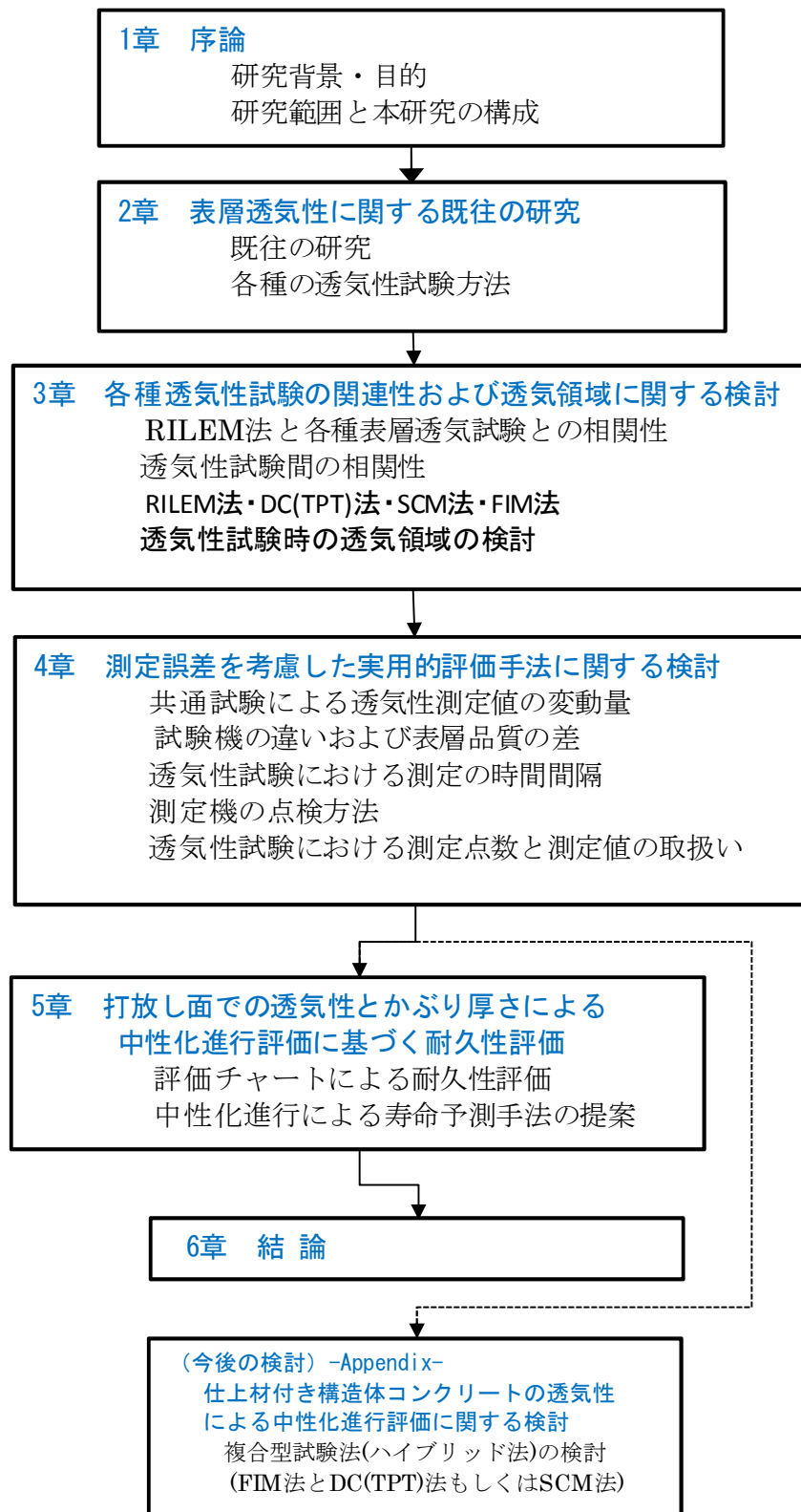


図 1.3-1 本論文の構成

【第 1 章の参考文献】

- [1] 例えば，日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説，
pp.92-108, 2004.3
- [2] 今本啓一，下澤和幸，山崎順二，二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験
方法に関する研究の現状，日本コンクリート工学会，Vol.44,No.2, pp.31-38, 2006.2
- [3] 今本啓一：コンクリートの表層透気試験方法の現状と課題，コンクリート工学，Vol.53,
No.7, pp.606-613, 2015.7
- [4] 下澤和幸，山崎順二，永山勝，二村誠二：かぶりコンクリートの透気性に基づく RC
構造物の耐久性能検証に向けた基礎的研究－各種試験方法における透気性の指標値
と中性化深さの関連－，日本建築学会構造系論文集，Vol.638, pp.593-599, 2009.4

第 2 章

表層透気性に関する既往の研究

第 2 章 表層透気性に関する既往の研究

2.1 はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性は、JASS5 において一般的な劣化及び特殊な劣化作用に対して、計画供用期間に鉄筋腐食やコンクリートの重大な劣化が生じないものとされている[1]。JASS5 に示す一般的な劣化とは、鉄筋コンクリート構造物の置かれる環境条件や表層コンクリートへの二酸化炭素や酸素もしくは塩化物イオンや水の浸入による作用である。つまり、コンクリート中に塩化物イオンやアルカリシリカ反応の原因となる反応性鉱物を含む骨材などが内在しない限り、二酸化炭素や塩分などの劣化因子はコンクリート表面から内部に浸入する。このことから、鉄筋コンクリート構造物の耐久性は、表層コンクリートの物質透過性つまり気密性もしくは密実性によって評価できると考えられる。

そこで本研究では、二酸化炭素や酸素など、構造体コンクリートの劣化因子となる物質の透過性を評価するための手法として、透気性試験に着目し、表層コンクリートの透気性の測定および評価に影響を及ぼすと考えられる測定条件や各種の透気性試験における測定値の変動などについて検討を行った。

本章では、主として国内で研究および開発が行われているコンクリートの透気性試験方法を抽出し、既往の研究としてその概要を整理する。

2.2 国内外で提案されている透気性試験方法

コンクリートの透気性に関する試験方法は日本国内では規格化された方法は存在せず、現在、表層コンクリートの透気性試験として、ダブルチャンバー法による透気試験機（通称、トレント法）を用いた手法が主として土木分野において汎用されているのみである。その評価方法については、Swiss standard SIA 262:2003 において規格化されたものが運用されている[2]。

日本国内における耐久性向上に向けた社会的取り組みとして、主として土木分野においては、山口県が平成 19 年にひびわれ抑制対策としての「コンクリート構造物品質確保ガイド」を提案し運用しており[3]、この他には、国土交通省東北地方整備局が人口減少や効率的な構造物の維持管理に向け「コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）」（平成 27 年 12 月）を提案している[4]。この手引きでは、山口県の「コンクリート構造物品質確保ガイド」に加え、コンクリートの表層品質確認方法（表層透気性試験（トレント法）と表面吸水試験（SWAT）の両方）を記述した内容となっており、表層品質の確保およびその評価方法の重要度が高まってきている。この手法は、今後、コンクリート系構造物の表層

品質評価を有意とする自治体や都道府県に徐々に波及していくものと想定される。

一方、国外では、1999 年に RILEM（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）の TC116-PCD から試験方法の提案および実験結果や評価の報告がなされている[5]。この手法は試験室内において供試体を使用して測定する試験であり、構造体コンクリートの原位置での測定に適用できる物ではないが、現時点では国内外で透気性のベンチマーク試験として位置付けられる試験方法である。

コンクリートの透気性に関する試験方法は、コンクリート表面に一定の圧力で気体を印加し、コンクリート断面内を透過する流量を測定する定圧方法と、コンクリート表面に所定の圧力（減圧または加圧）を作用させた後、その圧力の経時変化量を測定する変圧方法の 2 種類に分類される。定圧方法は基本的には透水試験における水を気体に換えたものであり、透水試験のアウトプット法において水の代わりに気体を用いる。

図 2.2-1 にコンクリートの透気性試験方法の分類を示す。変圧方法の中でも、本研究の範囲で取り上げている構造体コンクリートの原位置において透気性を評価する際に適用できる透気性試験方法を「簡易法」として区分している。

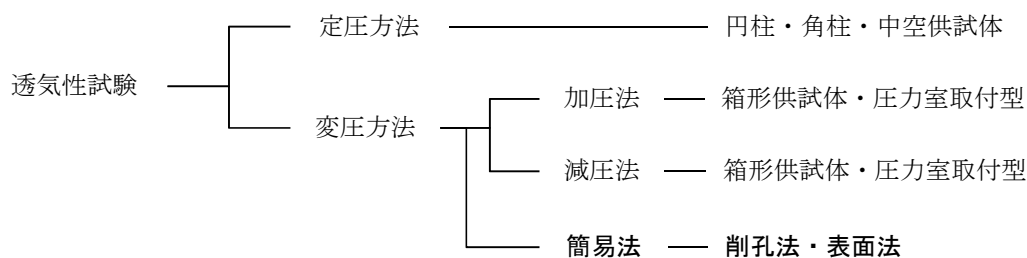


図 2.2-1 コンクリートの透気性試験方法の分類[6]

本研究では、透気性試験のベンチマーク試験に位置付けられている定圧方法に区分される RILEM-CEMBUREAU 法と、原位置で実施出来る簡易法に区分される各種の透気性試験方法との関連性を評価することによって簡易法による透気性試験方法の有効性を示し、主として簡易法による構造体コンクリートの原位置における中性化進行の評価手法について検討している。

以下に、主として国内で研究および開発が行われているコンクリートの透気性試験方法の概要を列記する。

(1)定圧方法

定圧方法は、試験体表面に一定圧力の気体（窒素や空気など）を供試体表面に作用させ、気体の流れが定常状態になった後に、気体を印加した反対の面から透過する気体の流量を

測定し、ダルシー則を適用して透気係数を求めてコンクリートの気密性を評価する方法である。この方法は、コンクリート自体の透気性を評価することに適しており、比較的小型の供試体によって試験を行うことができる。供試体の形状は、直径 15cm～10cm, 厚さ 5cm のものが一般的であるが、この円盤状の供試体に加え円柱、角柱のものや中空円筒形を用いたものなどがある。図 2.2-2 に定圧方法による透気性試験装置の例を示す。

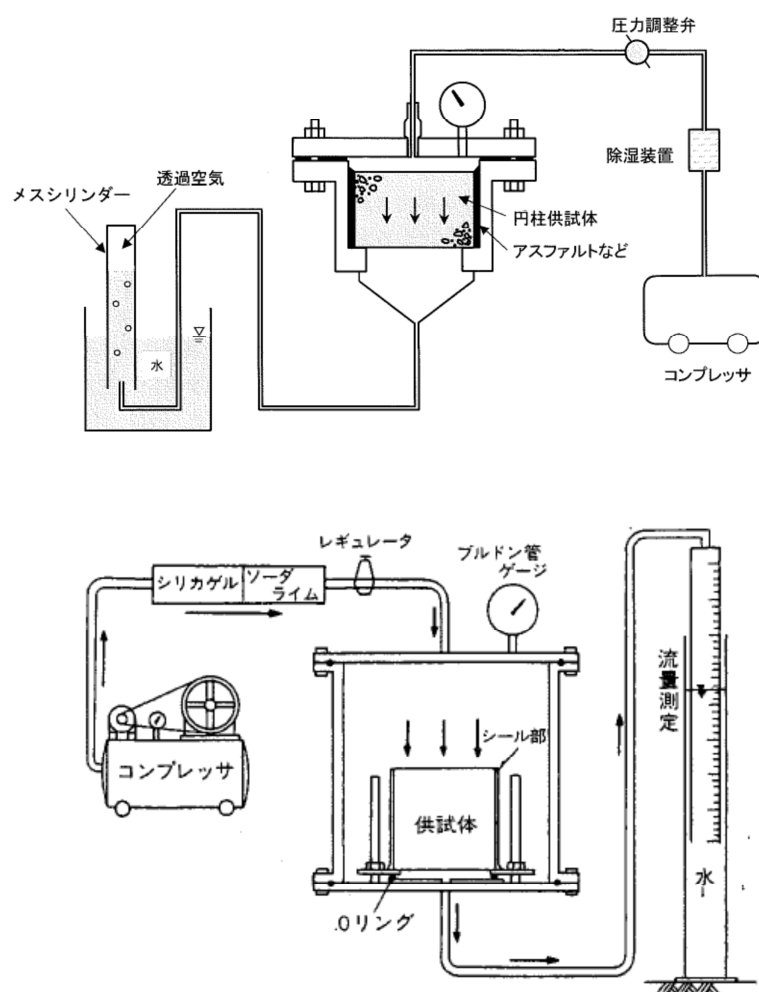


図-2.2-2 定圧方法による透気性試験装置の例[7]

定圧方法の代表的なものに、図-2.2-3 に示す RILEM-CEMBUREAU 法があり、この方法によるコンクリートの透気性試験が、現時点では国内外で透気性のベンチマーク試験として位置付けられているものである。以下に、RILEM TC 116-PCD 法 (Cembureau 法) について概説する。

「コンクリートのガス透気性に関する試験方法(案)」(Cembureau 法) は、J.J.Kollek が 1989 年に発表し、RILEM TC 116-PCD 法 (Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability) によって 1999 年に提案された方法[5]である。

試験方法は、試験室内で作製されたコンクリート供試体または原位置から採取したコア供試体のうち、材齢 28 日を超えたコンクリートを対象としている。供試体の形状は、直径 $\phi 150\text{mm}$ 、厚さ 50mm （寸法誤差はそれぞれ $\pm 1\text{mm}$ ）に成形した円盤状の供試体を用いる。試験時には供試体内部の水分状態を均衡にしておくことが重要となるため、温度 50°C の乾燥機によって供試体質量の乾燥に伴う質量減少の変化量が 5% 以下になるまで乾燥させる。

$$K = \frac{2 \cdot Q \cdot P_a \cdot L \cdot \eta}{A(P^2 - P_a^2)} \quad (2-1)$$

ここに、

K：	透気係数	$[\text{m}^2]$
Q：	透気量	$[\text{m}^3/\text{s}]$
P_a ：	大気圧	$[\text{N}/\text{m}^2]$
L：	試験体の厚さ	$[\text{m}]$
η ：	使用したガスの粘性	$[\text{Ns}/\text{m}^2]$
A：	試験体の断面積	$[\text{m}^2]$
P：	印加時の気圧	$[\text{N}/\text{m}^2]$

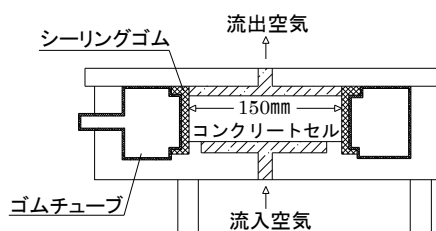
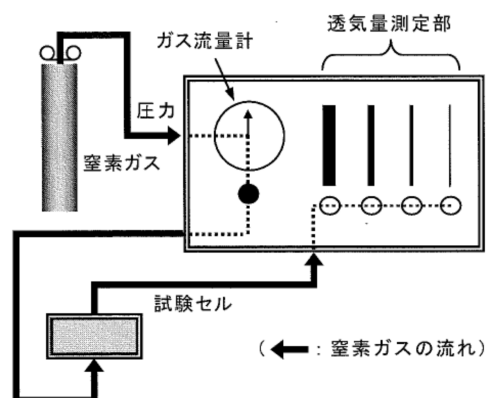
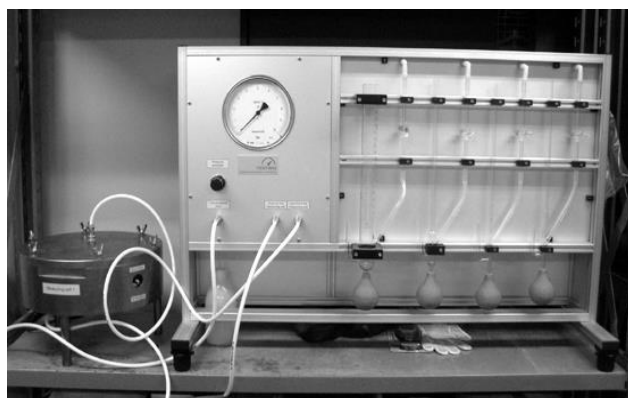


図-2.2-3 RILEM-CEMBUREAU 法

この試験では、図 2.2-3 に示した試験装置により、酸素または窒素を印加ガスとして用いる。供試体を試験セル内に設置し、供試体側面から印加ガスが漏気しないようにするため、供試体周囲のチューブ内の圧力を 7bar(0.7MPa)まで上昇させ、チューブを供試体側面に密着させる。その後、供試体の試験面(下面)に圧力を 1.5bar(0.15MPa)としてガスを印加し、供試体上面に透過したガスが計測シリンダー内を満たす時間を計測する。その後、印加する圧力を 2.0bar(0.2MPa)および 3.0bar(0.3MPa)まで上げて測定を行い、それぞれの圧力における透気係数を式(2-1)によって算出し、それら 3 つの圧力における透気係数の平均値を求めて得られた値が、試験対象とした供試体の透気係数 K (m^2) となる。

(2) 変圧方法

変圧方法は、試験体に設けられた空間や供試体表面に取り付けられた圧力室内を加圧または減圧し、所定の圧力を作用させた後に圧力作用を停止し、その時点からの圧力変化と経過時間を測定することによって、コンクリートの透気性を評価する方法である。この方法は、実構造物における構造体コンクリートの気密性を調査する方法として用いられており、供試体の大きさは、圧縮強度試験用供試体程度のものから実構造物にも広範囲に適用できる。図 2.2-4 に変圧方法による透気試験装置の例(概略図)を示す。

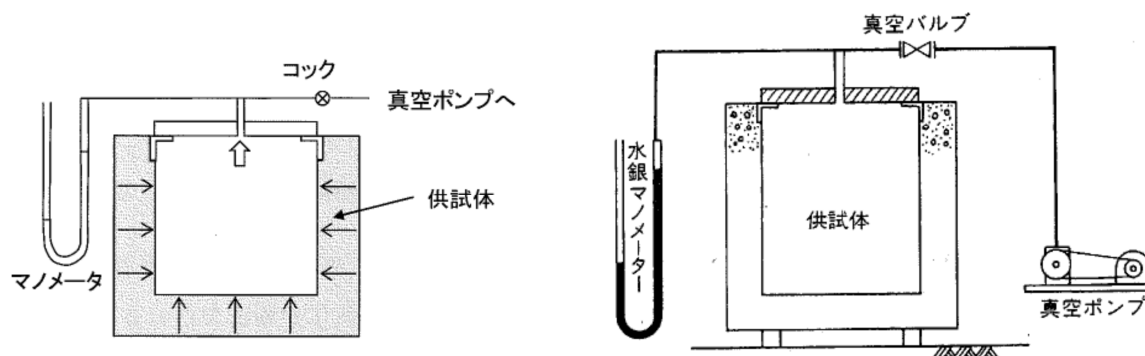


図 2.2-4 変圧方法による透気試験装置の例[7]

また、変圧方法の一部である簡易法として、構造体コンクリートの原位置におけるコンクリートの透気性を評価する方法については、主として欧州において研究が行われている。図 2.2-1 に示したように、簡易法には微破壊試験である「削孔法」と、非破壊試験である「表面法」とが含まれる。表 2.2-1 に簡易法における試験方法の分類を示す。削孔法は、コンクリート表面に空けたドリル孔などを利用して測定する方法であり、表面法は、コンクリート表面にチャンバー（圧力室）などを取り付けて測定する方法である。

以下に、削孔法の例として「ドリル削孔法」、表面法の例として「シングルチャンバー法」、「シール法およびシール削孔法」、「ダブルチャンバー法」および「トリプルチャンバー法」の概要を示す。

表 2.2-1 簡易法における透気性試験方法の分類

試験方法		研究者
削孔法	減圧	Figg ⁴⁾ 笠井ら ¹²⁾
	加圧	Reinhardt ら ⁹⁾ Hong ら ¹³⁾ Paulman ⁹⁾ Hansen ら ⁹⁾
表面法	シングルチャンバー法	Schönlin ¹⁴⁾ Autculam ⁹⁾ 氏家ら ¹⁵⁾
		Germann ⁹⁾
	ダブルチャンバー法	Torrent ¹⁶⁾ Zia-Guth ¹³⁾ 蔵重ら ¹⁷⁾

a) ドリル削孔法

1974 年、Figg によって開発されたドリル削孔法は、構造体コンクリートの表層透気性を評価した試験機である[8]。日本国内では、笠井らによって提案されたドリル削孔法は、野中らによってさらに改良が進められ、ドリル削法を用いた簡易透気試験方法として提案されている。本試験機は表 2.2-1 に示される仕様に基づいて運用される。図 2.2-5 に示すコンクリート面に対し直径 10mm×50mm の削孔（n=3 以上）を行い、シリコン栓を用いて密封処理を行う。続いて注射針、フレキシブルホース、圧力計、真空ポンプを接続し、21.3kpa から 25.3kpa の真空度の低下に要する時間（真空度低下に要する時間が 10 秒以下の場合 は 13.3kpa から 33.3kpa とする）から式(2-2)を用いて透気速度を求めるものである[9]。

$$K = (X_1 - X_2)/t \quad (2-2)$$

ここに、

K：	透気速度	[kpa/s]
X1：	時間測定開始時の真空度	[kPa]
X2：	時間測定終了時の真空度	[kPa]
t：	真空度の低下時間	[s]

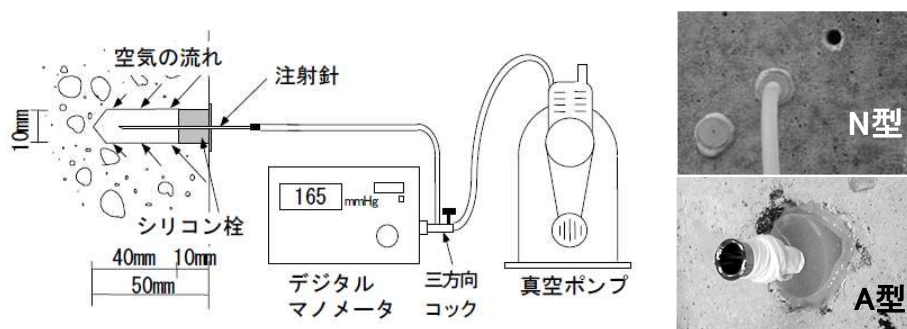


図 2.2-5 笠井らが示すドリル削孔法[9]

表 2.2-1 ドリル削孔法の仕様[9]

測定機器	仕 様
振動式電動ドリル	携帯型で JIS C 9605 に規定されている振動式のもの
ドリル刃	振動ドリルに対応したコンクリート削孔専用で、直径 10mm のもの
真空計 (デジタルマノメータ)	6.7kpa(50mmHg)から 40.0kpa(300mmHg)の圧力計測が可能なもので、指定した圧力範囲において真空度の低下に要する時間を自動的に小数点第 1 位まで計測できるもの（ただし U 字真空計とストップウォッチでこの機能を補ってもよい）
真空ポンプ	削孔内部を指定した圧力(12kPa(90mmHg))まで減圧出来る能力を有するもの
シリコン栓	直径 10mm 長さ 10 のシリコン製のもの
注射針	外径 0.75mm、内径 0.50mm、長さ 38mm の静脈用のもの
ビニールホース	外径 10mm、内径 5mm、長さ 100cm で減圧時に管がつぶれずフレキシブルなもの

また、下澤らによって、ドリル削孔による透気性試験法による単独評価ではなく、削孔を利用した四電極法比抵抗測定（Wenner 法）による両者の組合せからなる「ドリル PR 法」[8]が提案されている[10]～[12]。この手法は、簡易透気速度によりコンクリートの物質移動性を横軸で評価し、縦軸に比抵抗測定値をとってコンクリート中の環境状態を評価し、両者を複合した指標として鉄筋腐食抑制性能を評価している。

b) シングルチャンバー法

日本国内におけるシングルチャンバー法は、これまでに今本ら福島らによって提案されている[13][14]。図 2.2-6 に示されるシングルチャンバー法はコンクリート表面にチャンバーを密着させ、コンクリート表層部の透気性を計測するものであり、式(2-3)に示されるチャンバー内の圧力変化と測定時間の関係から透気指数（A.P.I.）を求め、評価するものである。コンクリートの表面は、フレッシュコンクリートを型枠に打設することによって、型枠・コンクリートの界面や床版上部にブリーディング発生し見かけ上の水セメント比が増大するためコンクリートのごく表層部に脆弱部（Skin）を形成する。シングルチャンバー法はこの脆弱部に支配されることが多く、高いばらつきを持つ。しかし、多くの建築物はコンクリート表面に塗装やモルタルによる仕上げを施されているため、ごく表層の品質を評価されるシングルチャンバー法を使用することによって、仕上材の劣化度や健全性を透気性によって示すことが出来ると推測される。

$$A.P.I = \frac{33.3-16.0}{T} \quad (2-3)$$

ここに、

A.P.I. : 透気指数 [kPa/s]

T : 33.3(kPa)～16.0(kPa)に要する時間 [s]

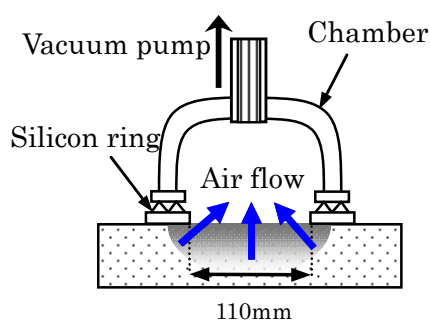


図 2.2-6 シングルチャンバー法

c) シール法およびシール削孔法

シール法は氏家らによって提案された方法である[15]。本試験は、シングルチャンバー法などの表面法に示される透気評価領域の不明確さを図 2.2-7 に示されるコンクリート表面に樹脂膜を施すことによって、半球状の透気領域を形成させ明確化させた試験方法である。チャンバー設置カ所のシール内径 r_1 とシール部のシール外径 r_2 から半球状の透気領域を仮定し、式(2-4)に示される計算式より算出するものである。

また、シール法とドリル削孔法を併用したシール削孔法は、式(2-5)によって演算され、削孔深さ毎に示されるコンクリートの平均的な透気性を示す試験方法である。削孔深さを深くすることによって、透過量は増大するが透過量の増加率は徐々に低下するとされ、コンクリート深度における含水状態に起因する影響が示唆されている[16]。

$$K = \frac{Q_1 P_1 \eta}{2\pi(P_2^2 - P_1^2)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{※シール法} \quad (2-4)$$

$$K = \frac{Q_1 P_1 \eta}{2\pi h (P_2^2 - P_1^2)} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad \text{※シール削孔法} \quad (2-5)$$

ここに、

K :	透気指数	(m^2)
P :	圧力	(N/m^2)
Q :	流量	(m^3/sec)
η :	粘性抵抗	(Ns/m^2)
r_1 :	シール内径	(m)
r_2 :	シール外径	(m)
h :	削孔深さ	(m)

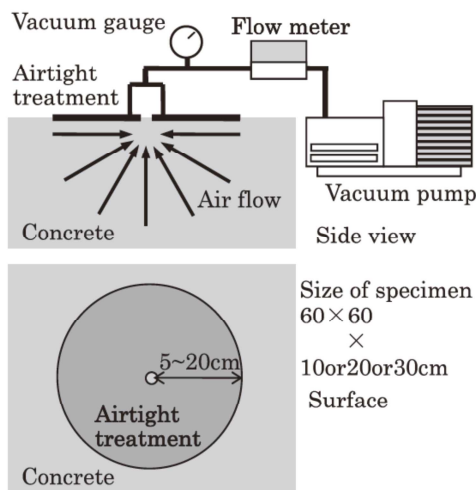


Fig. 1 Outline of seal method

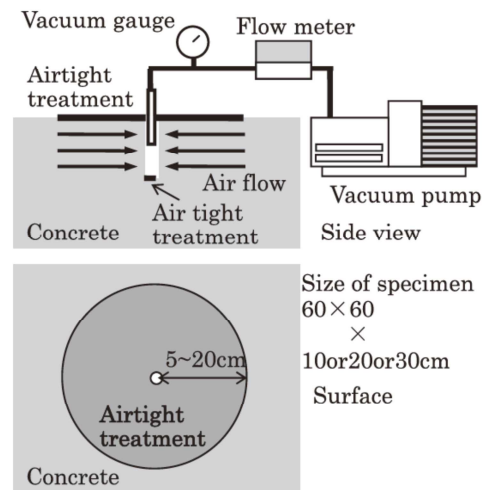


Fig. 2 Outline of seal intrusive method

図 2.2-7 シール法およびシール削孔法[14]

d) ダブルチャンバー法

ダブルチャンバー法は独立二重チャンバーを有した構造を持つ試験機とされ、R.Torrent に提案されたトレント法透気試験機に代表される試験方法である。トレント法を図 2.2-8 に示す。本試験方法に示される最大の特徴は、シングルチャンバー法における弱点であるコンクリート表層部にある脆弱部（Skin）の影響を、外部に配置されたチャンバーの圧力を内部チャンバーの圧力と同等になるようにコントロールすることによって、物理的にチャンバー外部から流入する空気の流れを遮断し、脆弱部の影響を限りなく排除出来る構造を有している点である[17]。

本試験機は、コンクリート表面にダブルチャンバーを設置し、絶対圧 30mbar まで減圧を行った後、設置後 60 秒後からの圧力変化量 ΔP と測定時間 t の関係から式(2-6)に示されるハーゲンポアユイズ則によって演算される。内部チャンバーの圧力変化に伴うコンクリート中の空気の流れは、チャンバー断面方向の一次元の流れを表しており、一次元方向の空気の透過量を評価する RILEM CEMBUREAU 法とほぼ等価(図 2.2-9)であると示されている[18]。

本試験方法は Swiss standard SIA 262:2003 として広く運用されており[2]、日本国内では、今本・筆者らのグループ、早川ら、蔵重らによって中性化・ブリーディング・含水率といった影響について多く検討されている[19]～[21]。

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \cdot \frac{\mu}{2 \cdot \varepsilon \cdot P_a} \cdot \left\{ \frac{\ln \frac{P_a + \Delta P}{P_a - \Delta P}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}} \right\}^2 \quad (2-6)$$

ここに、

kT :	透気係数	(m^2)
V_c :	内部チャンバーの体積	(m^3)
A :	内部チャンバーの断面積	(m^2)
μ :	空気の粘性	(Ns/m^2)
ε :	空隙率 (0.15)	—
P_a :	外気圧	(N/m^2)
ΔP :	$t_0 \sim t_f$ 間の圧力増分	(N/m^2)
t_f :	計測の終了時間	(s)
t_0 :	計測開始時間 (60 秒)	(s)

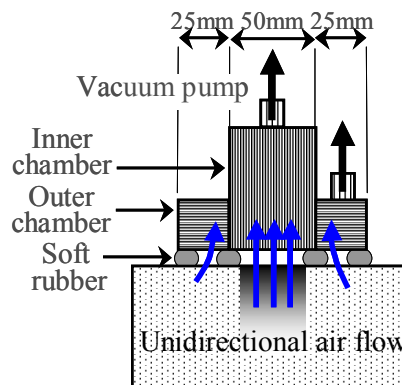


図 2.2.8 ダブルチャンバー法（トレント法）

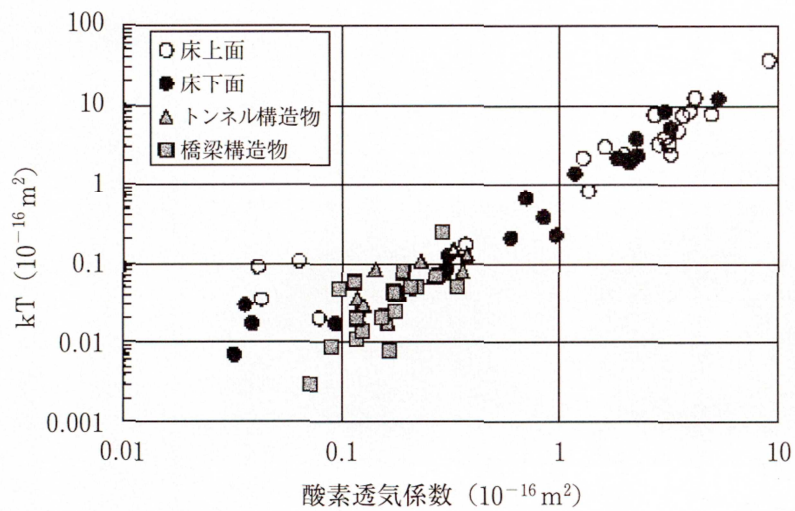


図 2.2-9 RILEM-CEMBUREAU 法とトレント法の関係[18]

e) トリプルチャンバー法

図 2.2-10 に示される独立する 3 つのチャンバーを有するトリプルチャンバー法は，蔵重らに考案された試験方法である。本機はシール削孔法で検討されたコンクリート内部の透気係数分布を表面から得る目的で適用できる。同心円状に配置された独立の 3 つのチャンバーの圧力変化から逆解析によってコンクリートの品質を評価するものとして提案されている[22]。

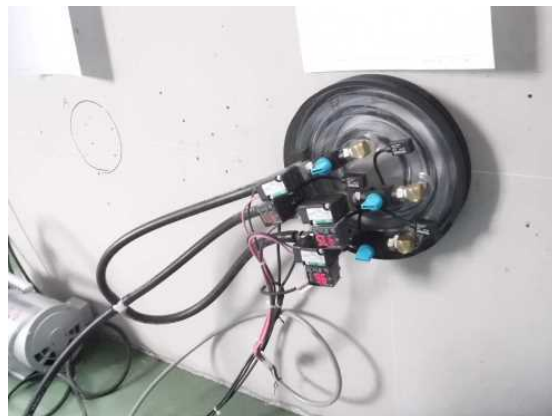
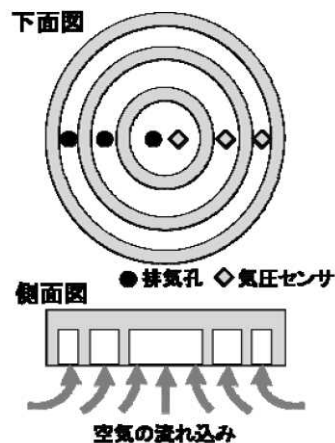


図 2.2-10 トリプルチャンバー法

以上の試験方法も含め、コンクリート構造物の原位置におけるかぶりコンクリートの透気性試験方法に関する既往の研究の系譜を図 2.2-11 および表 2.2-2 に示す。

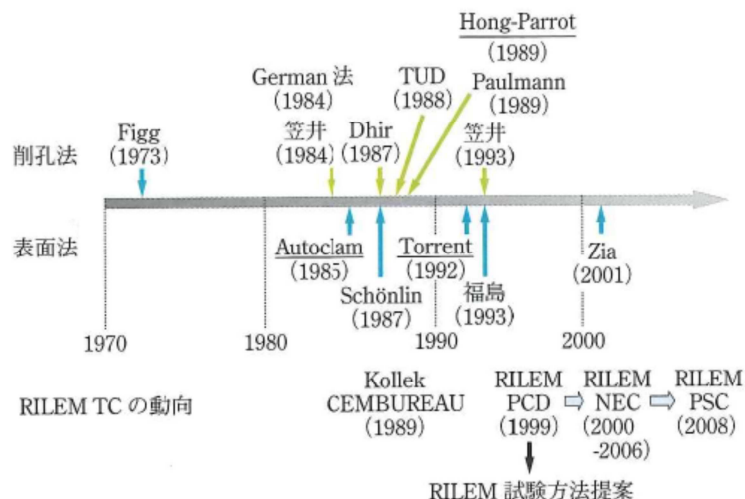


図 2.2-11 表層透気性試験の研究の系譜[23]

表 2.2-2 各種の表層透気性試験方法の概要[23]

研究者	試験方法	試験領域	圧力の状態	透気性の評価	含水状態への対応
RILEM TC-PCD : CEMBUREAU 法	コア	直径 15cm 厚さ 5cm	一軸定常流	ダルシー則の透気係数	50℃乾燥
J. W. Figg	削孔法	φ10 × 40mm	減圧	50 ～ 55kPa の経過時間 (s)	晴天時に実施
笠井ら	削孔法	φ10 × 40mm	減圧	一般に、25.3 ～ 21.3kPa の経過時間 (s)	—
Dhir ら	削孔法	φ13 × 50mm	減圧	55 ～ 45kPa の経過時間 (s)	—
H. W. Reinhardt ら	削孔法	φ10 × 40mm	加圧 (窒素ガス)	50 ～ 35kPa の経過時間 (s)	—
C. Z. Hong ら	削孔法	φ20 × 35 (先端 15) mm	加圧 (空気)	50 ～ 35kPa の経過時間 (s)、透気領域をおおむね孔周辺の 35mm であることを実験的に確認している	—
K. Paulmann	削孔法	φ11 × 40 ～ 45mm	加圧 (窒素又は空気)	0.02 ～ 0.05kPa の経過時間 (s)	—
A. J. Hansen ら	削孔法	コンクリート表面 60mm 径 (圧力センサ挿入)	加圧 (CO ₂)	0.1 ～ 0.4kPa 加圧時の圧力変化より透気係数算定	孔内部の相対湿度を 90%以下に減圧
K. Schönlin	表面法	約 10cm	減圧	5 ～ 30kPa の経過時間 (s)	ドライヤーによる表面部分の乾燥
P. A. M. Basheer ら	表面法	約 5cm	加圧 (空気)	50 ～ 98kPa の経過時間 (s)	—
R. Torrent	表面法	約 5cm	減圧	内外チャンバーの気圧バランスによって栓流としての透気係数算定	Wenner 法により比抵抗を評価
P. Zia ら	表面法	約 10cm	減圧	5 秒ごとの圧力変化を計測	—

- ・物質移動特性 (透気係数) に直接的に結びつけることのできる (検討をした) 方法: RILEM CEMBUREAU 法 (ベンチマーク試験として位置づけられる), Torrent 法 (非破壊), German (Paulmann) 法
- ・定性的だが (補正係数を乗じることにより透気係数への変換は可能: 図 9), 非破壊で簡便な方法: シングルチャンバー法 (K. Schönlin), Autoclam (P. A. M. Basheer), Zia 法
- ・定性的だが透気試験と同時に他の情報 (中性化深さ等) を得ることができる方法: 削孔法 (Figg 法, 笠井法, TUD 法 (Reinhardt), Hong-Parrot 法)

2.3 まとめ

本章では、国内外で研究開発されている主な透気性試験方法についてまとめた。コンクリートの耐久性評価におけるコンクリートの透気性は、ベンチマーク試験とされる RILEM-CEMBUREAU 法では、供試体を 50℃環境下で恒量になるまで乾燥させて試験に供する。また、原位置で適用可能なドリル削孔法、シングルチャンバー法、ダブルチャンバー法（通称：トレント法）などにおいては、例えば含水率が透気性の測定値に影響を与えるため、コンクリート中の水分状態を把握しておくことも重要となる。

加えて、測定時の環境条件や、施工に起因する打込み欠陥や表層コンクリート表面の微細なひび割れ、測定値の違いによる表層コンクリートの品質の違い重なることによって、透気性の測定値が大きく変動し、それらの測定値をそのまま耐久性の評価に用いた場合には、必ずしも適切に評価しているとはいえない可能性がある。

以上のことから、透気性測定値を用いた中性化進行の評価を実施するためには、表層コンクリートの透気性を評価する際の測定条件の影響、測定方法、測定値の取扱い方法、透気性測定による表層コンクリートの影響範囲などについて検討しておくことが重要となる。

【第2章の参考文献】

- [1] 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, 2015
- [2] F. Jacobs, R. Torrent: Swiss standards SIA 262:2003, a step towards performance-based specifications for durability, Concrete in aggressive aqueous environments - Performance, Testing, and Modeling, pp.532-539, 2009.06
- [3] コンクリート構造物ひび割れ対策資料【対策資料】, 山口県土木建築部, 平成 19 年 10 月
- [4] コンクリート構造部の品質確保の体引き (案) (橋脚, 橋台, 函渠, 擁壁編), 国土交通省東北地方整備局, 平成 27 年 12 月
- [5] RILEM TC-116 PCD, 'Recommendations of TC-116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM-Cembureau method, Mater.& struct., 32 .176-179, 1999.
- [6] 笠井芳夫編: コンクリート総覧, 技術書院, pp.453-455, 1998.6
- [7] 長瀧重義, 氏家勲: コンクリートの透気性, セメント・コンクリート, No.455, pp.24-31, 1985.Jan.
- [8] 笠井芳夫・松井勇・湯浅昇・野中英: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法(その 1)~(その 2), 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.699-702, 1999
- [9] 野中 英, 湯浅 昇: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.700, pp.689-696, jun., 2014
- [10] 下澤和幸, 田村博, 永山勝, 今本啓一: かぶりコンクリートの非破壊耐久性評価に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.523-528, 2001
- [11] 下澤和幸, 田村博, 永山勝: かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する研究 (その 1), 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.1007-1008, 2004
- [12] 下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二: かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する研究 (その 2), 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.1179-1180, 2005
- [13] 今本 啓一・山崎 順二・下澤 和幸・永山 勝・二村 誠二: 構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性の検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol.607, PP.31-38, 2006.9
- [14] 福島 礼規, 谷川 : 構造体コンクリートの透気性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.911-912, 1993.9
- [15] 氏家 勲, 土屋 崇, 岡崎 慎一郎: 実構造物でのコンクリートの透気性の測定方法に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.62, pp.197-204, セメント協会, 2008
- [16] 氏家 勲, 岡崎 慎一郎, 中村 翼: 実構造物における現場透気試験方法の改善に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, pp.189-195, セメント協会, 2009

- [17]R, Torrent : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials & Structures, vol. 25, No.150, pp.358-365, July, 1992.
- [18]Torrent, R.,und Ebensperger, L.: Studie tiber Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Uberdeckungsbetons auf der Baustelle-Teil 1, p 119, Office Federal des Routes, Suisse, Zurich, Januar 1993
- [19]今本 啓一, 山崎 順二, 下澤 和幸, 永山 勝, 二村 誠二: かぶりコンクリートの透気性に基づく RC 構造物の耐久性能検証に向けた基礎的研究 -各種試験方法における透気性の指標値と中性化深さの関連-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.38, pp.538-599, 2009.4
- [20]早川 健司,水上 翔太,加藤 佳孝: 表層透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究,土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.4, pp385-398,2012.12
- [21]蔵重 勲, 廣永 道彦: 透気係数の含水依存性を考慮したコンクリートの非破壊評価法の一提案, セメント・コンクリート論文集 Vol.65, No.1, pp.225-232, 2011
- [22]蔵重 勲, 廣永 道彦: コンクリートに内在する深さ方向の透気性分布を評価可能な非破壊試験方法の開発, 土木学会第 67 回年次学術講演集, V-009, pp.17-18, 2012
- [23]今本啓一: 委員会の設立主旨と各種の透気試験共通試験の概要, 非破壊検査, Vol.66, No.3, pp.104-111, 2017
- [24]田中章夫: 表層透気性を用いた鉄筋コンクリート構造物の中性化評価手法に関する研究, 東京理科大学博士論文, 2017.3
- [25]下澤和幸: 鉄筋コンクリート構造物におけるかぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能評価法に関する研究, 東北大学博士論文, 2010.1
- [26]野中英: 簡易透気試験による構造体コンクリートの品質評価方法に関する研究, 日本大学博士論文, 2015.3

第 3 章

各種の透気性試験の関連性および 透気領域に関する検討

第3章 各種の透気性試験の関連性および透気領域に関する検討

3.1 はじめに

構造体コンクリートの原位置における中性化進行予測に基づく耐久性評価のための非破壊・微破壊的な手法として主として国内外で研究開発されている、ダブルチャンバー法[1]、シングルチャンバー法[2]およびドリル削孔法[3]を代表的な表層透気性試験法として抽出し、これら各種の透気性試験を、実大のコンクリート壁を用いた共通試験（ラウンドロビン・テスト）に適用した。

本実験では、透気性試験により表層コンクリートの品質を評価することを主眼として、ダブルチャンバー法による同仕様の8台の測定機を用いたラウンド・ロビンテストを実施した。実験結果から、3章では、透気性のベンチマーク試験として位置付けられるRILEM-CEMBUREAU法[4]による測定結果と各種の透気性試験結果との関連性、各種の透気性試験間の相関性について検討する。

加えて、3種類のもルタルで作製した供試体を用いて、各種透気性試験における透気領域に関する検討を行う。

3.2 実験概要

3.2.1 実大コンクリート壁試験体

実大コンクリート壁に使用したコンクリートは、レディーミクストコンクリート工場にて製造した、呼び強度27、33および40の3種類のコンクリートと、同様にレディーミクストコンクリート工場で製造した圧縮強度が15N/mm²程度（以下、呼び強度15）となるように水セメント比85%として調合した合計4種類とした。コンクリートの使用材料とその品質を表3.2-1に、コンクリートの調合概要、フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度を表3.2-2および表3.2-3に示す。いずれのコンクリートも単位水量を180kg/m³とし、計画スランプ値を呼び強度15のみ15cm、それ以外は18cmとして調合設計した。呼び強度15については、ブリーディングを抑制することに加えて適度なコンシステンシーを確保することに配慮し、混和材料(P)として碎石粉40kg/m³を細骨材と置換して混合使用した。これ以外のコンクリートは全てJISマーク表示品である。化学混和剤は、呼び強度15のコンクリートには標準形の高機能タイプAE減水剤(AE)を、それ以外には標準形の高性能AE減水剤(SP)を使用した。

実大コンクリート壁に打ち込んだフレッシュコンクリートの性状と圧縮強度を表3.2-3に示しているが、フレッシュコンクリートの性状は全てJIS A 5308に示される許容範囲を満足する良好な状態であった。また、材齢28日まで標準養生した円柱供試体の圧縮強度は、呼び強度15についてはほぼ目標強度の通り、それ以外の呼び強度27,33,40のJISコンクリートについては呼び強度の1.2~1.3倍程度の良好な強度発現が得られた。

実大コンクリート壁試験体は、幅 1,800mm、高さ 900mm、厚さ 200mm の無筋コンクリートとし、呼び強度ごとに 2 体ずつ計 8 体を作製した。コンクリートはレディーミクストコンクリート工場での製造後、約 15 分間運搬し、容量 0.5m³ のコンクリートバケットを用いて壁の高さ方向に 2 層に分けてコンクリートを流し込み、その都度、層毎に棒状バイブレータで締固めを行いながらコンクリートを打ち込んだ。打込み後、材齢 7 日までの湿潤養生の後に壁のせき板を脱型し、共通試験に供する材齢 3 ヶ月の時点まで、雨がかりのない屋内環境に静置して気中養生した。

表 3.2-1 実大コンクリート壁に使用した材料

Material	Properties	Density (g/cm ³)	F.M. or Solid content
Cement: C	Ordinary Portland Cement	3.15	—
Water: W	Recycled water (supernatant water)	—	—
Fine aggregate: S	Crushed sand:S1	2.66	2.8
	Pit sand:S2	2.57	2.8
Coarse aggregate: G	Crushed stone	2.69	58.0 (%)
Admixture: P	Crushed stone powder	2.70	—
Chemical admixture	Air-entraining and high-range water-reducing admixture: SP	—	—
	Air-entraining and water-reducing admixture: AE	—	—

表 3.2-2 コンクリートの調合概要

Nominal strength	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)						
			C	W	S1	S2	G	P	Admixture
15	85	47.8	210	180	442	424	974	40	2.40 (AE)
27	54	49.2	333	180	436	424	915	-	2.90 (SP)
33	47	47.3	383	180	410	398	925	-	2.99 (SP)
40	40	44.9	450	180	378	365	936	-	3.51 (SP)

表 3.2-3 フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度

Slump (cm)	Air (%)	Compressive strength at 28 days(N/mm ²)
13.0	3.7	14.7
19.0	4.1	34.0
15.5	5.2	42.8
19.0	5.8	53.2

3.2.2 各種透気性試験

実大コンクリート壁試験体における透気性試験は、ダブルチャンバー法（以下、DC(TPT)）、シングルチャンバー法（以下、SCM）およびドリル削孔法（以下、FIM-N、FIM-G または FIM-A）の 3 種類とし、ベンチマーク試験として実大コンクリート壁試験体と同じコンクリートを用いて作製した供試体による RILEM 法も併せて実施した。以下に共通試験を実施した各種透気性試験の詳細を再掲する。

(1) ダブルチャンバー法（DC(TPT)法）

表面法である DC(TPT)法の原理は、図 3.2-1 に示すように、内部チャンバーと外部チャンバーの二重セル構造をもつチャンバーと真空ポンプおよび制御装置で構成されており、減圧開始 60 秒後からある特定の圧力に達するまでの到達時間から透気係数 $kT(\times 10^{-16} \text{m}^2)$ を求めるものである。最大の特徴は、測定部の内部と外部のチャンバーが独立しており、常に外部チャンバーが内部チャンバーの圧力変化と同じ圧力になるようにコントロールされるため、外部チャンバーによってごく表層の脆弱層から内部チャンバーに流入する空気の流れが物理的に遮断される。そのため、DC(TPT)法では、図 3.2-1 に示したような栓流がコンクリート内部に形成され、この流れは透気性試験のベンチマークとして位置付けられる RILEM TC 116-PCD によって提案された RILEM-CEMBUREAU 法[4]のそれと近い形態となり、この栓流によりコンクリート断面の一次元方向の耐久性に関する品質を原位置で評価できると考えられている。

DC(TPT)法による測定位置での透気性は、内部チャンバーの圧力の変化量と経過時間から、式(1)によって透気係数 $kT (\times 10^{-16} \text{m}^2)$ を得ることができる。DC(TPT)法による透気係数 $kT (\times 10^{-16} \text{m}^2)$ は、測定前に校正用のアクリル板を用いてセル内への漏気がない状態で 12 分間のキャリブレーションを行うことによりチャンバー内に漏れる空気の量を測定し、コンクリート面における測定値から差し引いて算出している。併せて、式(1)から得られた kT を用いて、試験により影響を受けたと想定される透気深さ $L (\text{mm})$ が式(2)から算出される。

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a - \Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}} \right)^2 \quad (1)$$

$$L \approx 1000 \left\{ \frac{2kTP_a t_f}{\varepsilon \mu} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

ここに、

kT : 透気係数 (m^2)

V_c : 内部セルの容積 (m³)
 A : 内部セルの断面積 (m²)
 μ : 空気の粘性係数 (=2.0×10⁻⁵Ns/m²)
 ε : かぶりコンクリートの空隙量 (=0.15m³/m³)
 P_a : 大気圧 (N/m²)
 ΔP_{ieff} : 試験終了時内部セルの有効圧力上昇 (N/m²)
 t_f : 試験終了時間 (s)
 t_0 : 試験開始時間 (=60s)
 L : 透気深さ (mm)

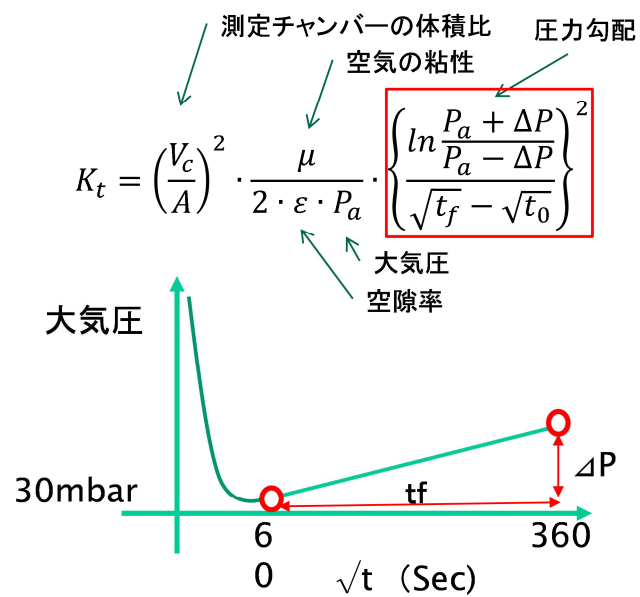
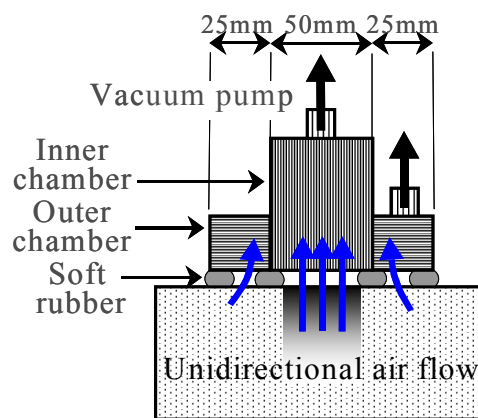


図 3.2-1 ダブルチャンバー法 (DC(TPT)) のレイアウト

(2) シングルチャンバー法（SCM(-R,-N)法）

表面法である SCM 法[2]は図 3.2-2 に示すようにコンクリート表面に設置したチャンバー内部を減圧した後，ある特定圧力に戻るまでに要する時間から透気指数 A.P.I. (kPa/s) を求めるものである。この測定方法は試験に要する時間がその他の透気性試験よりも短く，試験機器類も比較的調達しやすいことが特徴である。SCM 法による透気指数 A.P.I.は，式(3)により算出される。

$$A.P.I. = \frac{x_2 - x_1}{T} \quad (3)$$

ここに，

A.P.I. : 透気指数 (kPa/s)

x_1 : 測定開始時の真空度 : 21.3 (kPa)

x_2 : 測定終了時の真空度 : 25.3 (kPa)

T : x_1 から x_2 まで復圧するのに要する時間 (sec)

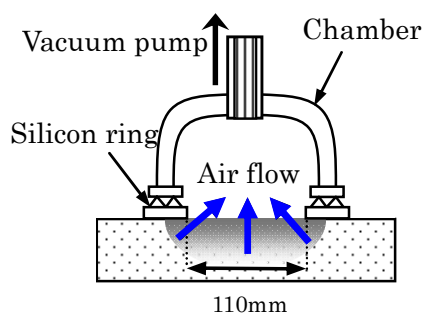


図 3.2-2 シングルチャンバー法（SCM-N）の概要

(3) ドリル削孔法（FIM(-N, -G, -A)法）

ドリル削孔法[3]は，試験位置のコンクリート面にドリル孔(直径 10mm×深さ 50mm)を削孔し，シリコン栓の側面にエポキシ樹脂を塗布して削孔孔に密封し，孔内を注射針と真空ポンプを用いて減圧した後，孔内部の圧力が 21.3(kPa)～25.3(kPa)に復圧するまでに要する時間から透気速度 P.V. (kPa/s) を求めるものである。SCM 法と FIM 法の違いは，透気領域，つまり，SCM 法ではコンクリート表面に設置したチャンバーによる測定であり設置したチャンバー内部のコンクリートの主として表層部の透気性を評価しており，FIM 法ではコンクリートの表面から深さ 50mm までのコンクリート断面内の透気性を主として評価していると考えられる。なお，チャンバー以外の試験機器の構成は両者とも同様である。一方，FIM 法では，図 3.2-3 に示すハット型(-N および -G)とコーン型(-A)の 2 種類の形状のシリコン栓を用いている。FIM-A 法においてコーン型を用いている理由は，シリコン栓設置時の作業性改善による試験時間の短縮を主眼としたものである。

FIM 法による透気速度 P.V. (kPa/s) は、式(3)の左辺に示す透気指数 A.P.I.を、透気係数 P.V.と読み替えて算出される。

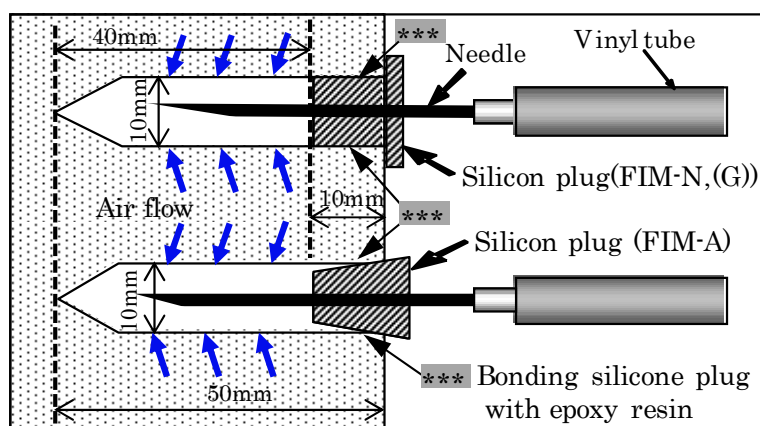


図 3.2-3 ドリル削孔法 (FIM) の概要

(4) RILEM-CEMBUREAU 法

透気性のベンチマーク試験として位置づけられている RILEM- CEMBUREAU 法 [4](RILEM TC 116-PCD" Permeability of Concrete a Criterion of its Durability, 以下 RILEM 法) による透気性の測定には、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を 4 種類の実大コンクリート壁試験体と同時に作製し、打込み直後から実大コンクリート壁試験体と全く同じ環境下で養生した円柱供試体を用いた。本実験では、この円柱供試体の中央部から切り出した $\phi 100 \times 50\text{mm}$ の円盤状試験体を試験体セルに格納し、試験体周囲をゴムチューブを用いて気密性を保持した状態で空気を印加し、その状態における透気量から透気係数 $K(\times 10^{-18}\text{m}^2)$ を測定した。供試体形状以外の試験方法の詳細は、RILEM TC-PCD の提案に準拠した。写真 3.2-1 に RILEM 法試験機および試験体セル内の円柱供試体の例を示す。

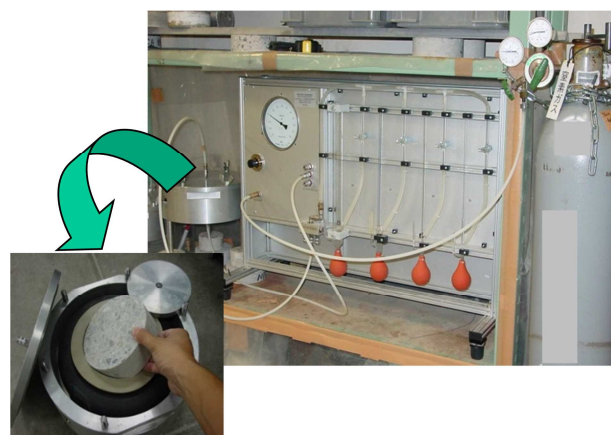


写真 3.2-1 RILEM 法試験機および試験体セル内の円柱供試体の例

表 3.2-4 に各種の透気性試験方法における試験条件について，チャンバー径，コンクリート表面への接着方法，試験時の圧力，試験時間，試験回数などを一覧表に示す。

表 3.2-4 各種の透気性試験方法における試験条件などの一覧

Test name	Chamber size or Drill hole size	Sealing method	Testing pressure	Testing time	Number of measurement
DC(TPT)	Internal chamber diameter:50mm Outer chamber diameter:100mm	Soft Rubber ring	The pressure difference from 60 seconds after the start of the pressure reduction until reaching the specific pressure	6 minutes or less	1 time
SCM-N	Diameter 110 mm	Silicone rubber ring	Range from 21.3 kPa to 25.3 kPa (Measuring the time from 21.3 kPs to 25.3 kPa)	Different depending on air permeability of concrete (About 1min. to 6 min.)	3 times (Second time to forth time except first time)
SCM-R	Diameter 100 mm	Soft Rubber ring			
FIM-N	A drill hole with a diameter of 10 mm and a depth of 50 mm (Type of Silicon plug -N, -G: Hat type -A: Cone type)	Bonding silicone plug with epoxy resin			
FIM-G					
FIM-A					

3.2.3 共通試験（ラウンドロビン・テスト）の概要

共通試験は、実大コンクリート壁が材齢3ヶ月を経過した時点で、打放し面において全て同時に実施した。共通試験では、DC(TPT)法による同じ測定原理をもつ8機間が保有する透気性試験機を8台（試験機の記号：N, D, C, E, H, A, T, R）準備し、実大コンクリート壁のほぼ同位置においてそれぞれの透気性試験を実施し、各測定位置での試験機の差による変動係数、測定位置の違いによるコンクリートの表層品質の差に起因する変動係数、測定位置のずれが変動係数に及ぼす影響などについて検討した。

また、SCM法についてはチャンバー形状の異なる2台の試験機を、FIM法においては試験機構成およびシリコン栓の形状が異なる3台の試験機を準備し、各試験により得られる測定値の変動係数やそれぞれの透気性測定値の関連性などについて検討した。

共通試験におけるそれぞれの透気性試験の測定位置は、図3.2-4に示すように、DC(TPT)法およびSCM法では実大コンクリート壁1体につき高さ450mmの位置の中央部とその左右（それぞれ450mm間隔）の3カ所とし、呼び強度ごとに壁2枚ずつ計6カ所（A,B,CおよびD,E,F）とした。測定回数は1カ所につき1回ずつとした。また、FIM法については削孔を伴う微破壊試験であることから、DC(TPT)法などと全く同じ位置での試験が同時に実施できないため、高さ450mmの上記の3つの測定位置の間の2カ所にドリル孔を1カ所あたり2孔ずつ削孔し、呼び強度ごとに壁2枚ずつ計4カ所（a,bおよびc,dの4カ所で計8孔）で測定した。

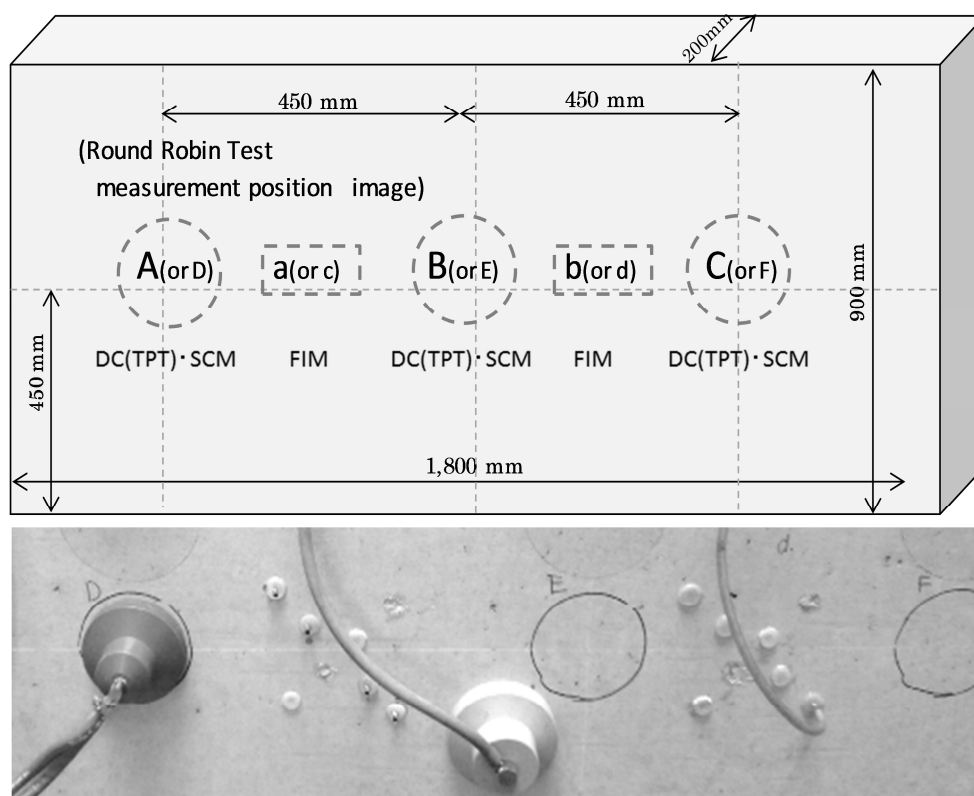


図 3.2-4 実大コンクリート壁を用いた RRT における各種透気性試験の測定位置

測定回数については、DC(TPT)法においては1カ所につき1回ずつ、同一カ所での測定は直前の測定から15分以上の間隔を空けて順次行った。これらの理由は、DC(TPT)法を用いて同一カ所で連続して測定する場合の時間間隔について検討した結果、直前の透気性の測定によるコンクリート内部での圧力残存などが測定値に及ぼす影響を回避するためには測定時間の間隔を10～15分程度とすれば良いこと、また、時間間隔を15分程度とすれば、同一カ所における1回目の透気係数の測定結果とそれ以降の測定結果とがほぼ同等となるためである。この詳細は4.3節に示す。なお、DC(TPT)法における壁部材としての透気性の評価には6点の平均値を用いることとした。

ここで、DC(TPT)法およびSCM法による測定カ所数を6点としたのは、4.6節に詳細に示す通り、サンプル数を6点とすることによって、図3.2-5に示すように平均値 $500(\times 10^{-18}\text{m}^2)$ に対して標準偏差が $100(\times 10^{-18}\text{m}^2)$ と大きい場合でも、概ね平均値に収束することが示されるためである。加えて、SIA262[6]においては、測定点数増やすほど検査精度は向上するが、コストが増加するため、これまでの経験から合理的と考えられる必要十分な測定数として、ある一つの検査エリア(1ロット)から無作為に6点を抽出することと記されている。さらに、6測定点のうち5測定点以上の透気係数 kT が基準の透気係数 kTs 以下であれば合格とし、もし2点以上が基準の kTs を上回った場合には、同一ロット内において新たに6点の追加測定を無作為に行うこととしている。

次に、SCM法およびFIM法については、測定回数は1カ所(もしくは1孔)につき4回連続で測定し、1回目を除いた2回目から4回目の測定値の平均値をその測定点における測定結果(A.P.I.もしくはP.V.)とした。1回目の測定値を除く理由は、1回目の測定値のみが2回目以降の測定値と比べて透気性が高くなる傾向が認められるためであり、これは、1回目の測定時には空気の定常流に関与しない空気を取り込まれることが原因である[3]と指摘されている。

一方、透気性の測定値は、測定位置の表層コンクリートの含水率に影響を受け、含水率が5.5%程度以上になるとその影響が顕著となり、FIM法においては透気速度が極めて小さくなる[7]。そこで、静電容量法による水分計を用いて測定した共通試験実施時のコンクリートの表面含水率の指示値を表3.2-1に示す。また、図3.2-6に、5.3節に示すコンクリート供試体による簡易透気速度と含水率指示値の関係を示す。

図3.2-6から、含水率指示値の大きさによって、透気性の測定値ここでは簡易透気速度が影響を受け、含水率が低い領域ではその影響が顕著となることが分かる。本実験における実大コンクリート壁における測定結果によると、呼び強度が大きいコンクリートほど表面含水率の指示値がやや高くなる傾向にあるが、全ての測定位置における指示値の範囲は4.1～4.9%、さらに呼び強度ごとの測定値である6カ所での差は0.1%～0.3%の範囲であり、これらの数値は、透気性の測定値に影響を及ぼす程度の表面含水率の値およびその差では

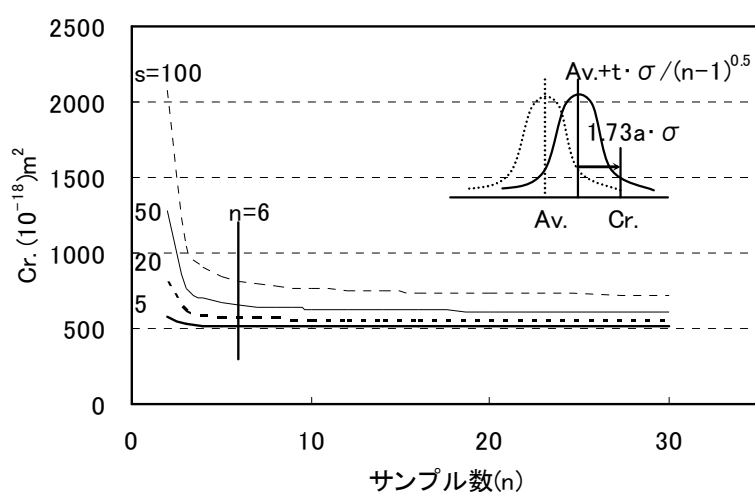


図 3.2-5 サンプル数 n と基準 Cr の関係

表 3.2-1 静電容量法による共通試験時の表面含水率の指示値

Nominal Strength	Moisture content (%)					
	A	B	C	D	E	F
15	4.2	4.1	4.3	4.3	4.4	4.3
27	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.5
33	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
40	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.9

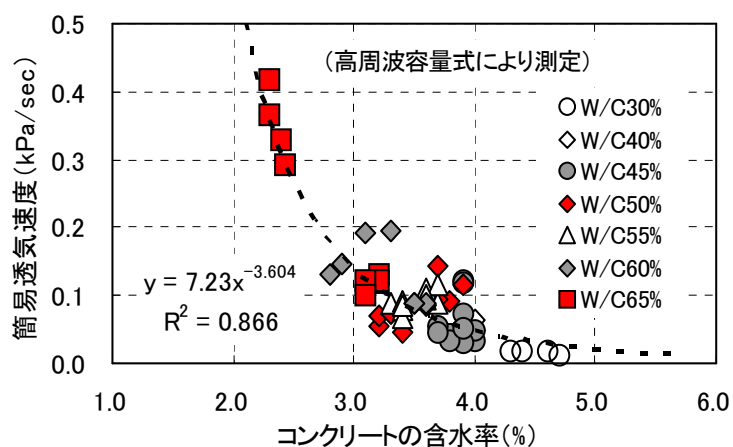


図 3.2-6 コンクリート供試体による簡易透気速度と含水率指示値の関係[5]

ない[5]と判断できる。

Swiss Standard 262 : 2003[6]においては、透気試験における測定値は温度やコンクリートの含水状態の影響を受けることがあるとし、試験を実施する際のコンクリートの状態を規定している。その中で、試験材齢は 28 日～90 日、コンクリートの表面温度は原則 10℃以上（直射日光を避ける、熟練者は 5℃以上でも測定可能）としている。

さらに、測定時の水分については、表面接触電気抵抗試験によって計測したコンクリートの絶対含水率が 5.5%以下、Wenner 法で計測した電気抵抗が 15℃を超え 25℃未満の場合に 10～20k Ω .cm 以上と規定している。加えて、コンクリートが上記のような状態になるためには、養生の終了から 3～4 週間が経過し、雨や霧などによる水の接触から 2～5 日以上経過したときにおおよそ満たされるのが標準であると付記されている。

図 3.2-7 に、コンクリートの乾燥材齢と透気係数 kT の関係[9]を示す。同図には深さ 1cm から 5cm までの透気性試験時の圧力分布が併せて示されている。図から、表面からの深さ 2cm までの真空圧は材齢とともに上昇するが、1cm の深さでの圧力は材齢 28 日で概ね安定している。透気係数 kT の測定値は、材齢が進むにつれ深さ 2cm の内部圧力の増大共にやや増大する傾向が伺える。

図 3.2-8 に室内環境下に静置したコンクリート供試体の乾燥日数（材齢）と表面含水率および透気係数 kT の関係[9]を示す。表面含水率と透気係数は、材齢 28 日までの若材齢においては変化が大きく、表層コンクリートの乾燥に伴い透気係数が大きくなる傾向が伺える。雨がかりがない環境下においては、呼び強度 21 程度のコンクリートの表面含水率は、材齢約 1 年程度で概ね 3.5～4%程度に収束している。

また、図 3.2-9 に、雨がかりのある屋外環境下に静置した同調合（呼び強度 21-スランプ 18cm）のコンクリートの材齢（乾燥日数）と透気係数および降雨の状況[9]を示す。透気係数 kT の経時変化は、図 3.2-8 の室内環境下の供試体と同様に、材齢 28 日程度までは表層コンクリートの降雨による乾湿の影響を受けながら徐々に大きくなるが、それ以降は降雨の影響を一時的に受けるものの緩やかに増加する傾向にある。

以上のように、透気性の測定値はコンクリートの表面含水率の影響を受けて変動するが、材齢 28 日以降においては、表面含水率の変化や透気係数の変化は小さくなり、ある程度材齢が経過したコンクリートの自然環境下における表面含水率は、コンクリートの種類に応じて概ね 3%～5%の範囲に収束すると考えられる。この表面含水率の違いは、強度などコンクリートの品質の違いに由来するものであり、降雨直後の極端に湿潤状態にある場合や過度な乾燥状態にある場合を除き、自然環境下で概ね安定した状態（定常状態）にあるコンクリートにおいては、含水率の大きさを含めた透気性が評価されると考えられる。

そのため、本論における透気性の評価においては、表面含水率に極端に大きな差がないことを確認した上で、透気性の評価に含水率の影響を考慮しないこととした。

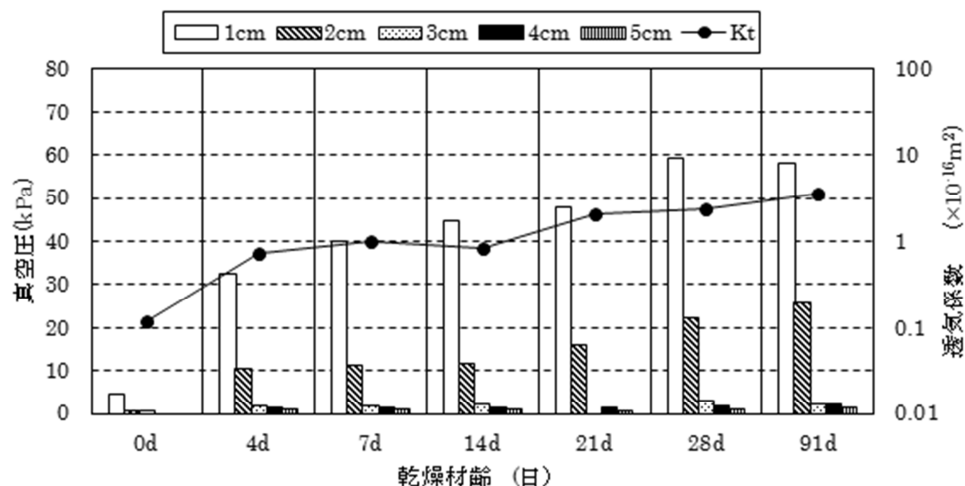


図 3.2-7 乾燥材齢と透気係数および圧力分布[9]

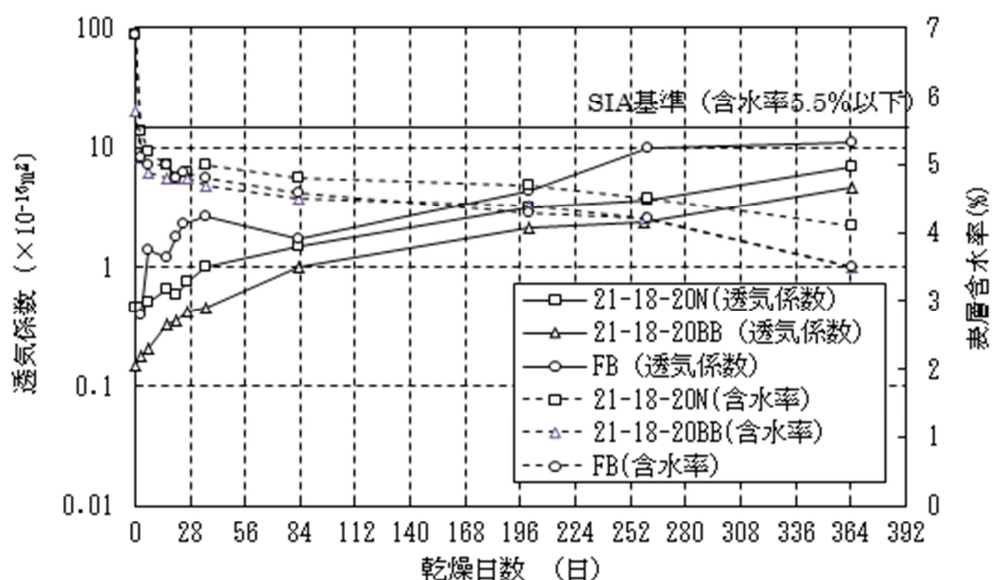


図 3.2-8 屋内環境における透気係数および表面含水率の材齢による変化[9]

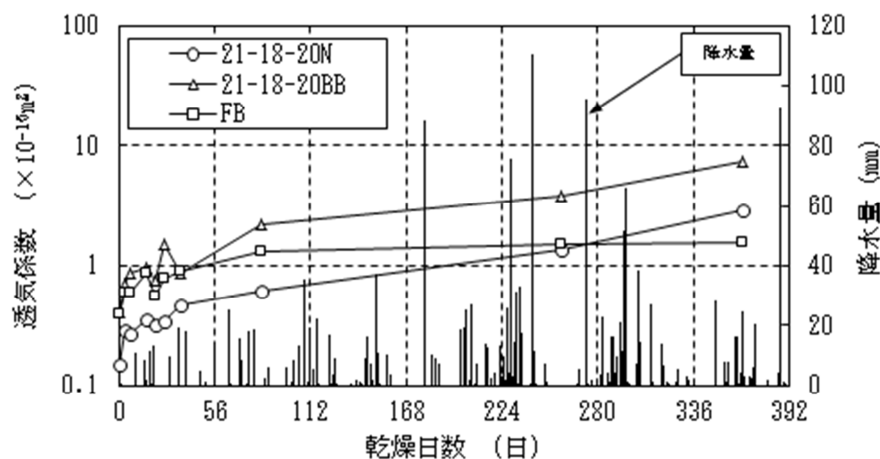


図 3.2-9 屋外環境における透気係数の材齢による変化と降水量[9]

3.3 各種の透気性試験における透気性測定値の関係

3.3.1 測定の概要

本実験における各種の透気性試験における透気性測定値の有効性とそれらの関連性について検討するため、透気性試験のベンチマーク試験として位置付けられる RILEM 法による透気性の測定を、実大コンクリート壁試験体と同時に作製したコンクリート供試体を用いて実験室内にて実施した。その結果と、RILEM 法とその他の原位置で適用可能な透気性試験である DC(TPT)法、SCM 法および FIM 法による測定結果との関連性についてそれぞれ検討した。

本実験における DC(TPT)法、SCM 法および FIM 法の 3 種類の透気性試験について、SCM 法および FIM 法は、各試験装置構成のチューブ径や長さ等の仕様がやや相違しているため、ここでは、SCM 法を SCM-N、SCM-R の 2 種類に、また FIM 法を FIM-N、FIM-G、FIM-A の 3 種類に測定機ごとに分けて評価することとした。実大コンクリート壁試験体での測定位置は、前述の通り、呼び強度ごとに SCM 法および TPT 法は 6 カ所 (A,B,C および D,E,F)、FIM 法は計 4 カ所 (a,b および c,d の 4 か所、計 8 孔) とした。

3.3.2 RILEM 法と DC(TPT)法・SCM 法・FIM 法との関係

呼び強度と RILEM 法による透気係数 K の関係を図 3.3-1 に示す。図 3.3-1 には、各呼び強度に対応する圧縮強度と透気係数 K の関係についても併せて示した。コンクリートの中性化抵抗性と関連性の高い水セメント比つまり圧縮強度は、RILEM 法による透気係数 K との間にいずれも寄与率 $R^2=0.96$ と極めて高い相関が認められ、円盤状試験体を用いた RILEM 法による透気係数 K は、圧縮強度の増大に伴い小さくなることが確認できた。

なお、図 3.3-1 に示す回帰式については、Y 軸の対数表示に応じて最も相関の高い回帰式として自然対数による指数近似として示したものであり、物理的な意味はもたない。

一方、透気性は圧縮強度と同様に細孔構造に依存すると考えられるが、これらと中性化進行との物性的な関連性については今後の検討課題とする。

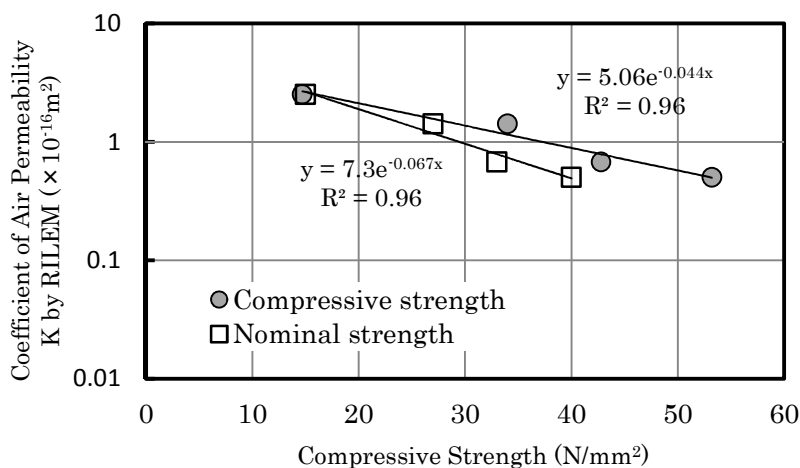


図 3.3-1 RILEM 法による透気係数 K と圧縮強度および呼び強度の関係

RILEM 法に供した試験体は実大コンクリート壁と同一の養生環境にあることから、透気性のベンチマーク試験としての RILEM 法による測定値は、実大コンクリート壁の呼び強度ごとの透気性を概ね評価しているものと判断することができる。この結果に基づき、以下の透気性試験方法の関連性に関する検討を行う。

図 3.3-2～図 3.3-4 に RILEM 法と各種の透気性試験結果を示す。測定データの取扱いについて、図 3.3-3 および図 3.3-4 に示した SCM 法による透気指数 A.P.I.と FIM 法による透気係数 P.V.は、各測定位置から得られた値を相乗平均したものであり、また、図 3.3-2 に示した DC(TPT)法による透気係数 kT は、部材全体の評価のために平均的な透気性の測定値を得ることを目的として、後述する共通試験における同一呼び強度の実大コンクリート壁の全測定値から、6 点の測定位置の違い、つまり表層コンクリートの品質の変動による特異値と、概ね同一位置における 8 台の測定機から得られた測定値の機差による特異値（特異値）を、それぞれ除いた（棄却されずに残った）測定値を用いて相乗平均したものである。なお、特異値の検定については、JIS Z 8402-2 による Grubbs の検定を適用し、有意水準 5%で棄却検定を行い判断したものである。例としては、図 4.2-1 に示す呼び強度 15 の B 点や呼び強度 40 の F 点の測定値などが特異値として扱われるものである。なお、Grubbs の検定による測定データの処理の考え方については 4.5 節にて後述する。

図 3.3-2～図 3.3-4 より、RILEM 法による透気係数 K が増大するのに伴いいずれの測定値も増大する傾向にあり、特に図 3.3-4 に示す FIM 法においては FIM-A を除いて寄与率 $R^2=0.96\sim0.98$ と極めて高い相関を示した。また図 3.3-2 の DC(TPT)法は、Torrent による研究結果[1][8]によると、実構造物の原位置での DC(TPT)法による透気性試験結果と RILEM 法による供試体での測定結果とに良い一致が認められたことが示されており、本実験においても寄与率 $R^2=0.89$ と高い相関を示した。これは、DC(TPT)法が RILEM 法と同様に次元方向の空気の流れを評価しているためと考えられる。

また、図 3.3-3 に示す SCM 法は、一般にコンクリートの表層部の品質の影響をその他の試験方法よりも強く受けると考えられる。2 種の方法でチャンバー形状が異なるために透気指数自体は乖離しているものの、RILEM 法と SCM 法との関連性は両者とも概ね類似している。これは、共通試験に供した実大コンクリート壁は 7 日間の十分な湿潤養生を行っており表層部の品質を低下させないように配慮したことによるものと考えられる。

一方、図 3.3-4 に示す FIM-A 法については、透気性の低い領域、つまりここでは呼び強度 33 および呼び強度 40 における測定値が、その他の FIM 法による測定値と乖離している。この原因は測定機のホース接続部からごく僅かの漏気が生じていたためと考えられる。、測定機からの僅かな漏気の影響が、透気性の低い緻密なコンクリートの測定時において顕著に表れた[6]ものである。

これらより、DC(TPT)法と FIM 法による透気性測定値は、ベンチマーク試験である RILEM 法と高い相関が認められることから、試験方法または試験機ごとに検量線を作成することで、原位置での透気性試験により表層コンクリートの品質評価が可能となる。

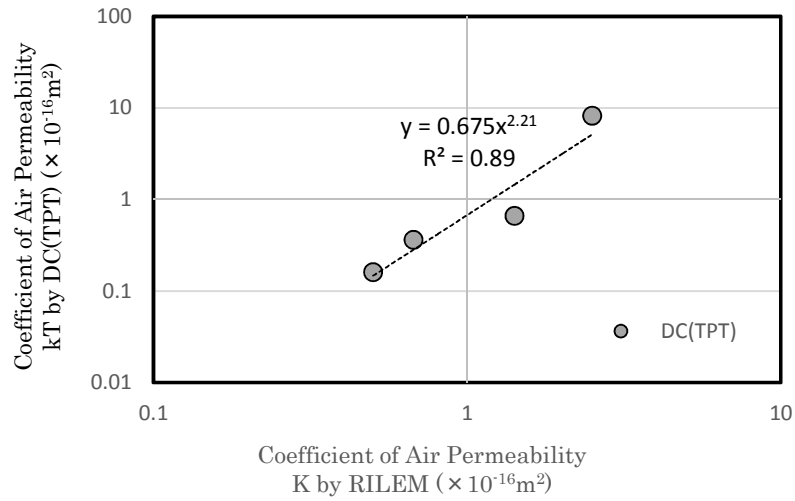


図 3.3-2 RILEM 法による透気係数 K とダブルチャンバー法による透気係数 k_T の関係

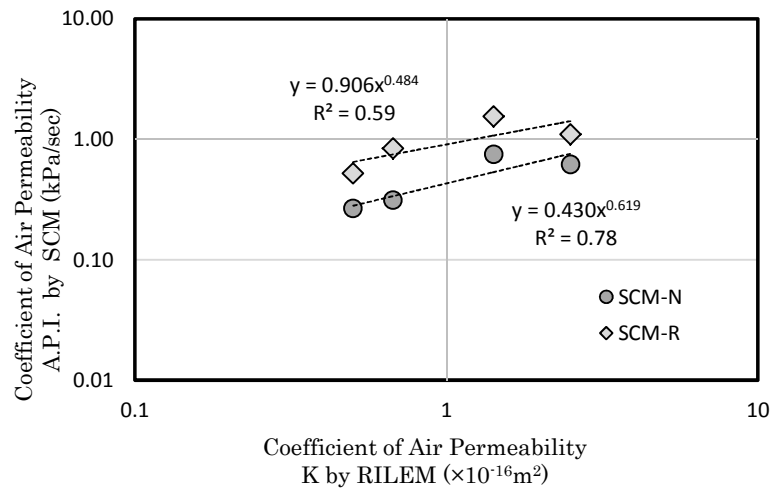


図 3.3-3 RILEM 法による透気係数 K とシングルチャンバー法による透気係数 A.P.I.の関係

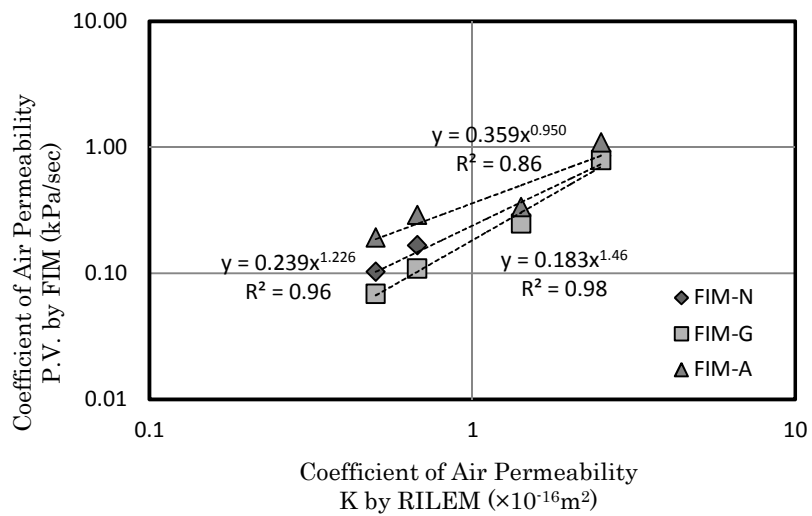


図 3.3-4 RILEM 法による透気係数 K とドリル削孔法による透気速度 P.V.の関係

3.3.3 DC(TPT)法とSCM法・FIM法との関係

DC(TPT)法とSCM法の関係を図3.3-5に示す。表面法である両者の関係は、RILEM法との関係と同様に透気係数が大きくなるのに伴い透気指数 A.P.I.もやや増大する傾向が認められるものの、その相関は高くない。これは、SCM法はコンクリート表面部の品質の影響をその他の試験方法よりも強く受けるためと考えられる[2]。

コンクリートのごく表層部(skin) [1]は、締固めや養生、表面の微細ひび割れなどの影響によってその品質が不安定となる場合がある。SCM法では試験方法の性質からその影響を比較的強く受けるために測定位置ごとの測定値の変動が大きくなり、結果として両者の相関係数が低下したものと考えられる。

一方、図3.3-6にDC(TPT)法とFIM法の関係を示す。両者の関係には寄与率 $R^2=0.96 \sim 0.99$ と極めて高い相関が認められた。これは、FIM法ではドリル削孔の内面つまり深さ50mmまでのコンクリートの品質が透気性の主な評価範囲であり、表面法であるSCM法と比較してコンクリートの表層部の品質つまりごく表層部の粗密や微細ひび割れなどの影響をほぼ受けないためと考えられる。

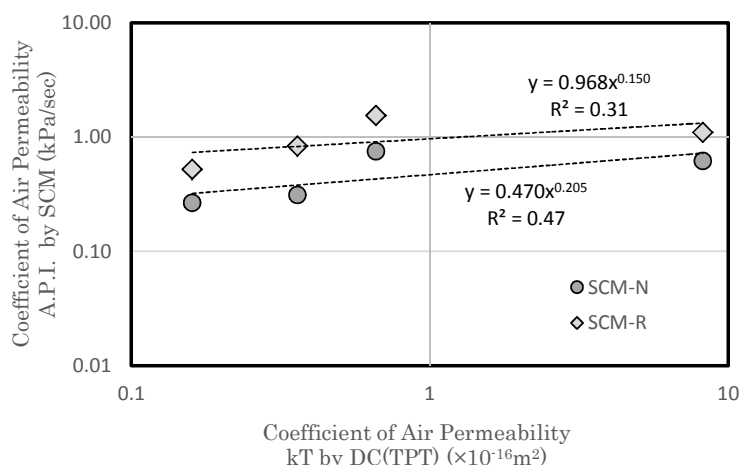


図 3.3-5 RILEM 法による透気係数 K とシングルチャンバー法による透気係数 A.P.I.の関係

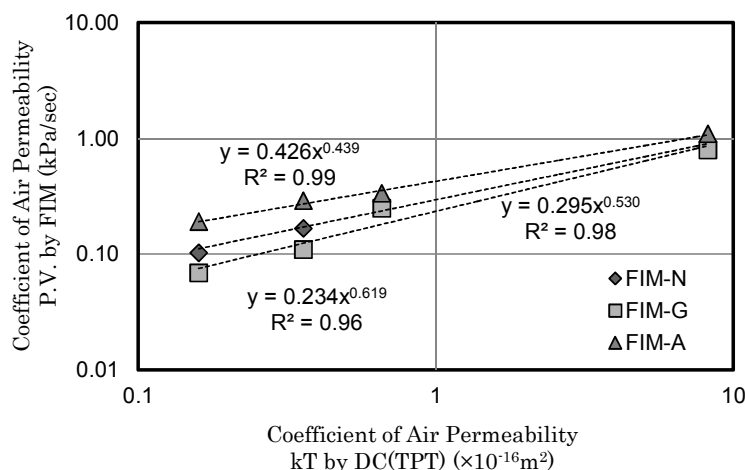


図 3.3-6 RILEM 法による透気係数 K とドリル削孔法による透気速度 P.V.の関係

3.4 各種の透気性試験における透気領域の検討

3.4.1 供試体の概要

透気領域の検討に用いた供試体のイメージ図を図 3.4-1 に示す。供試体の寸法は一辺が 200mm の立方体であり，図の左側の測定面（打込み側面）から，図 3.4-1 に○印で示す位置に内径 $\phi 1\text{mm}$ 外径 $\phi 2\text{mm}$ のステンレスパイプを設置して打ち込んだ。供試体には，表 3.4-1 に示す 3 種類のコンクリートを使用した。これらは水セメント比 45%，55% および 45% の 3 水準，単位水量を 172kg/m^3 の一定とした AE 減水剤使用コンクリートである。

コンクリートの練り混ぜ後，5mm ふるいを用いてウェットスクリーニングしたモルタルを，DC(TPT)法・SCM 法（チャンバー径 $\phi 100\text{mm}$ および $\phi 50\text{mm}$ ）に適用する供試体と，FIM 法に適用する供試体にそれぞれ打ち込んだ。材齢 91 日まで封かん養生した後，ステンレスパイプの先端に圧力センサを取り付け，透気試験開始時からコンクリート内の圧力が大気圧に戻るまでの圧力分布をデータロガーにより測定することによって，透気領域の検討を行った。写真 3.4-1 に，それぞれの供試体と圧力センサの設置状況を示す。

表 3.4-1 供試体を使用したコンクリートの調合概要

単位: (kg/m^3)

No.	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G
1	45	46.2	172	382	789	947
2	55	48	172	313	846	947
3	65	49.1	172	265	885	947

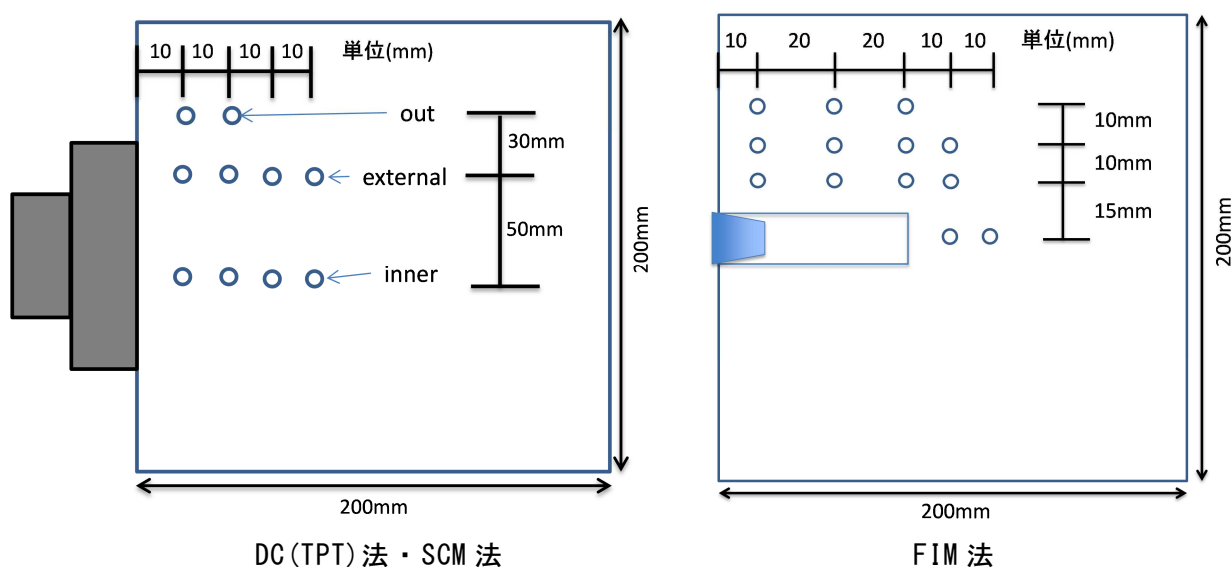
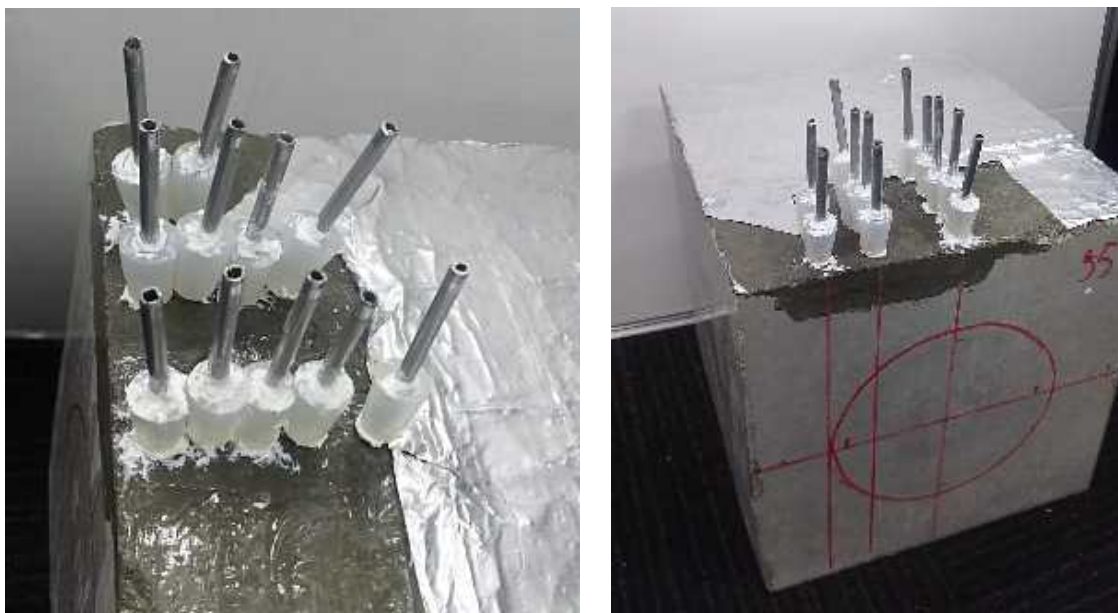
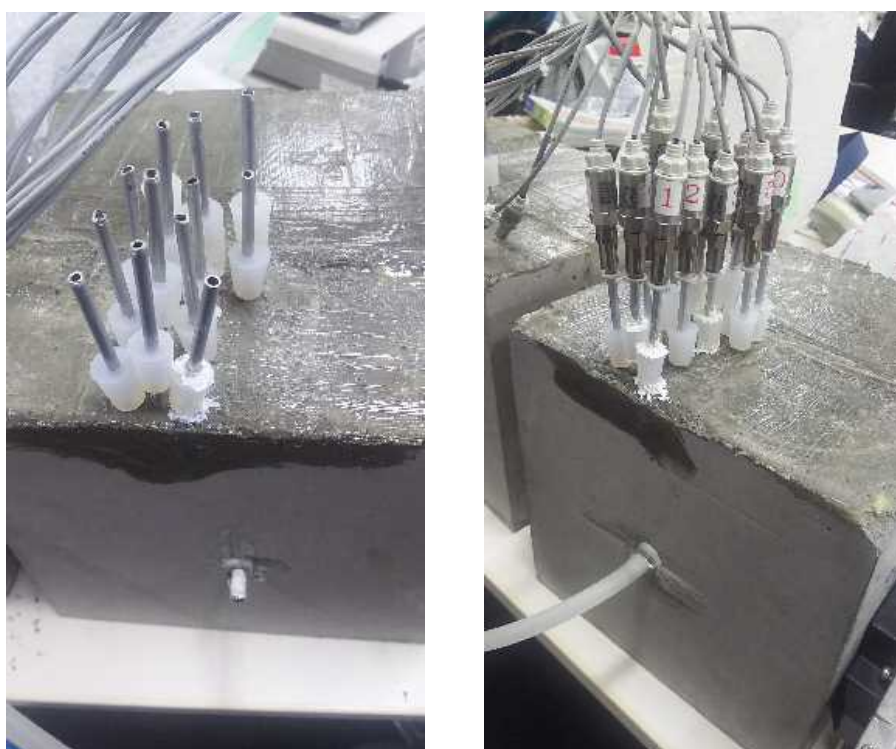


図 3.4-1 透気領域の検討に使用した供試体のイメージ図



DC (TPT) 法・SCM 法に適用した供試体



FIM 法に適用した供試体の例（左）と圧力センサ設置状況（右）

写真 3. 4-1 透気領域の検討のための供試体と圧力センサ設置状況

3.4.2 透気領域検討のための圧力分布測定結果および考察

(1) DC(TPT)法

表 3.4-1 に示した 3 種類のモルタル供試体における DC(TPT)法による透気係数 kT を表 3.4-2 に示す。No.2 の W/C55%の供試体が最も透気性が大きく $kT=1.9(\times 10^{-16}m^2)$ となり、次いで No.3 の W/C65%, W/C45%の順となった。

表 3.4-2 DC(TPT) 法による透気試験結果

No. (W/C)	No.1(W/C45%)	No.2(W/C55%)	No.3(W/C65%)
透気係数 kT	$0.4 \times 10^{-16}m^2$	$1.9 \times 10^{-16}m^2$	$0.87 \times 10^{-16}m^2$

DC(TPT)法による透気性試験時における、図 3.4-1 に示した位置でのコンクリート内部の圧力の経時変化を図 3.4-2 に示す。各図の inner はダブルチャンバーの内部セルの位置の圧力を示しており、external は外部セル、out はチャンバーの外の位置の圧力を示している。それぞれ 1 回の測定開始から測定終了後に各位置の圧力差がなくなるまでの間の経時変化の状況が示されている。透気係数が最も大きかった No.2(W/C55%)のモルタル供試体においては内部セルおよび外部セルとも、深さ 20mm の位置までの圧力変化が生じていることが分かる。また、No.3 および No.1 では深さ 10mm までの圧力変化しかみられない。

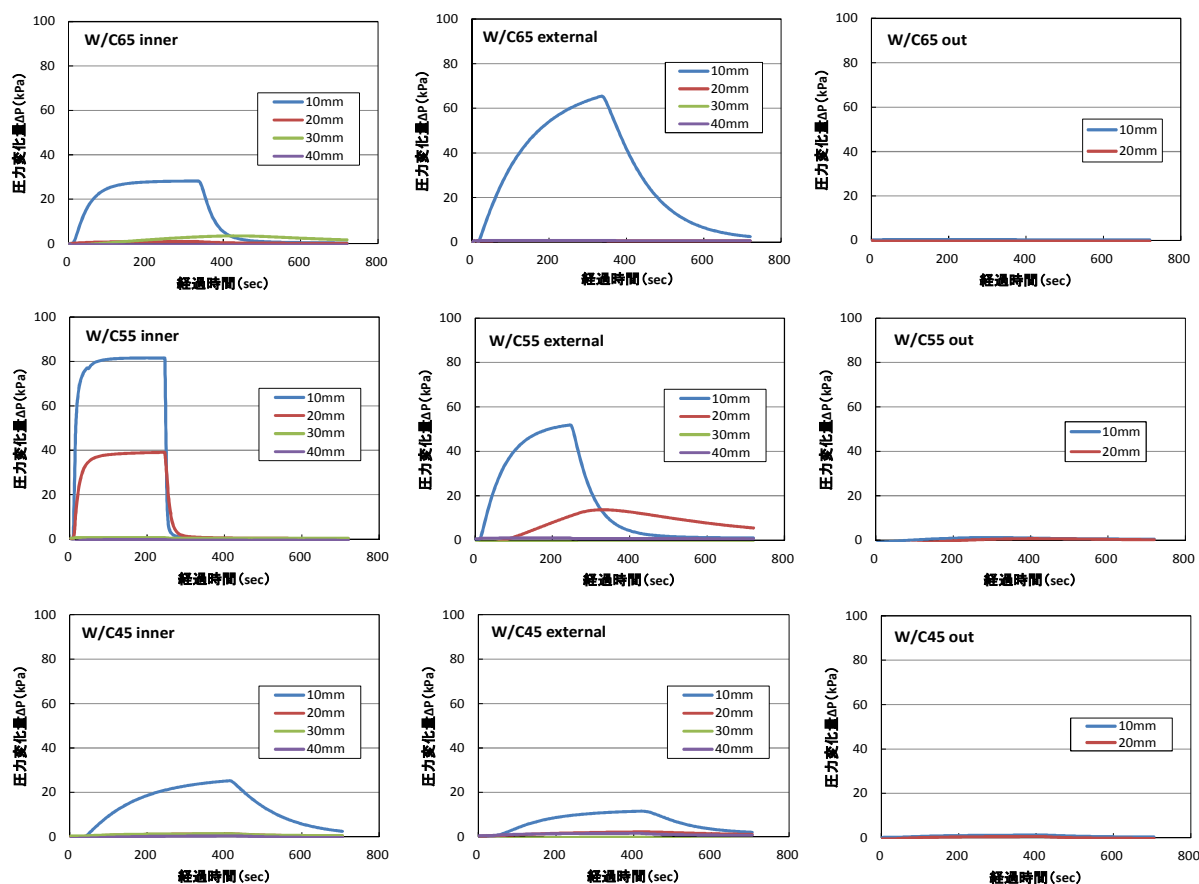


図 3.4-2 DC(TPT) 法による透気性試験時のコンクリート内部の圧力変化

図 3.4-3 にチャンバー中心からの距離とコンクリート表面からの深さ方向の圧力変化量をそれぞれ示す。各図の原点の位置がチャンバーの中心であり内部セルの位置の圧力変化を，50mm の位置が外部セルの位置の圧力変化を二次元的に断面で表現している。

No.2(W/C55%)のモルタル供試体においては内部セルおよび外部セルとも，深さ 20mm の位置までの圧力変化が生じていることが分かる。

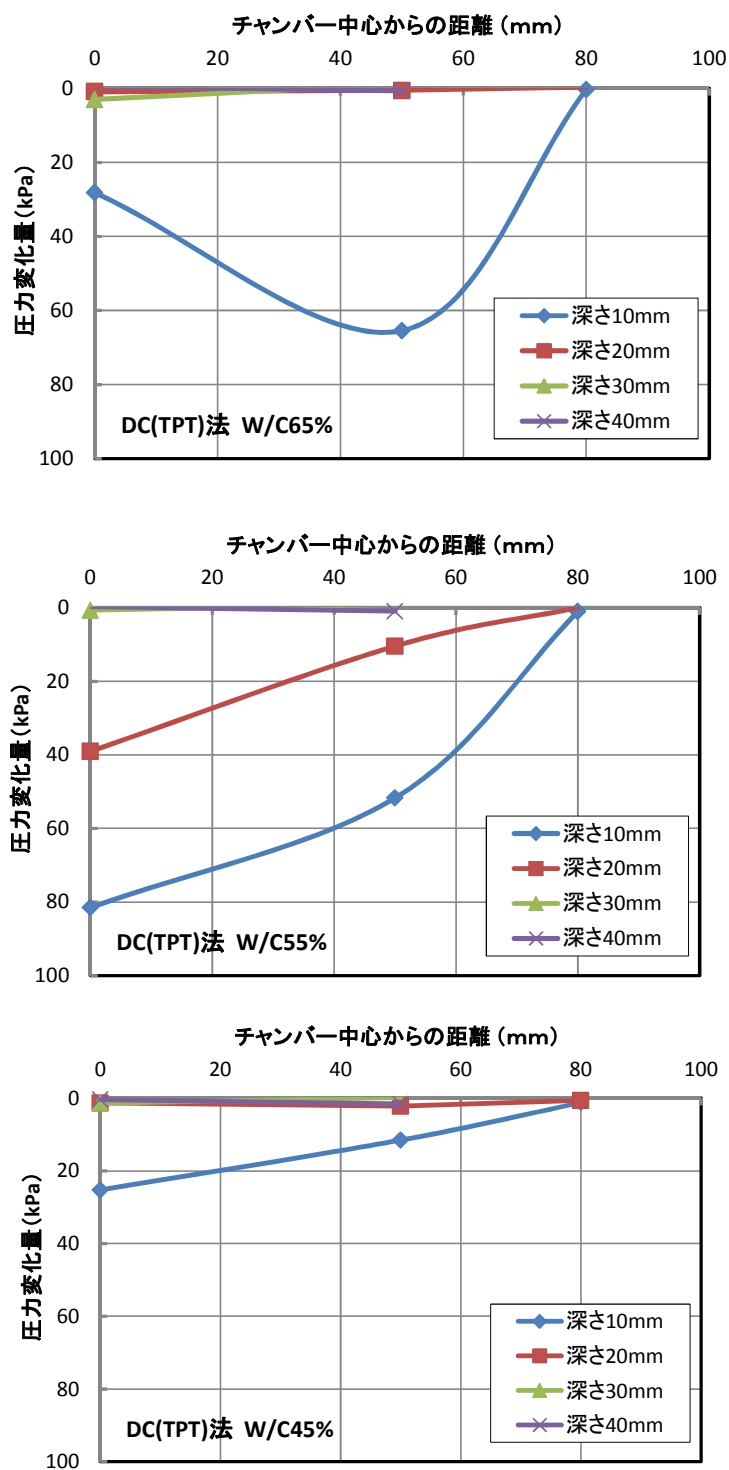


図 3.4-3 DC(TPT)法による圧力変化量

(2) SCM(ϕ 100mm)法

図 3.4-4 に、 ϕ 100mm の SCM 法における、DC(TPT)法と同じ図 3.4-1 に示した位置でのコンクリート内部の圧力の経時変化を示す。圧力測定時は真空ポンプを吸引したままとした。 ϕ 100mm の SCM 法では、シングルチャンバーであるために、inner はチャンバーの中心の位置の圧力を、external も同じチャンバー内の中心から 50mm の位置、out はチャンバーの外の位置の圧力を示している。

DC(TPT)法と同様の傾向であり、圧力変化の大きさは異なるものの、SCM 法においても深さ 20mm 程度までの圧力変化が認められた。図 3.4-5 に SCM(ϕ 100mm)法におけるチャンバー中心からの距離とコンクリート表面からの深さ方向の圧力変化量をそれぞれ示す。特に W/C55% の供試体にみられるように、の圧力変化量はチャンバー中心部が最も大きく、外周部かつ深さ方向に徐々に小さくなっており、チャンバーがコンクリート表面に接する円に対して半球状に圧力変化が生じていることが伺える。つまりこの領域が透気領域と考えられる。SCM 法では、表層コンクリートの密実さによって透気領域が異なり、透気係数 kT によって評価された供試体の透気性の大きさと、SCM 法による圧力変化量との間に関連性がみられ、透気係数が大きいほど深い位置までの圧力変化が生じかつ圧力変化量も大きくなっている。

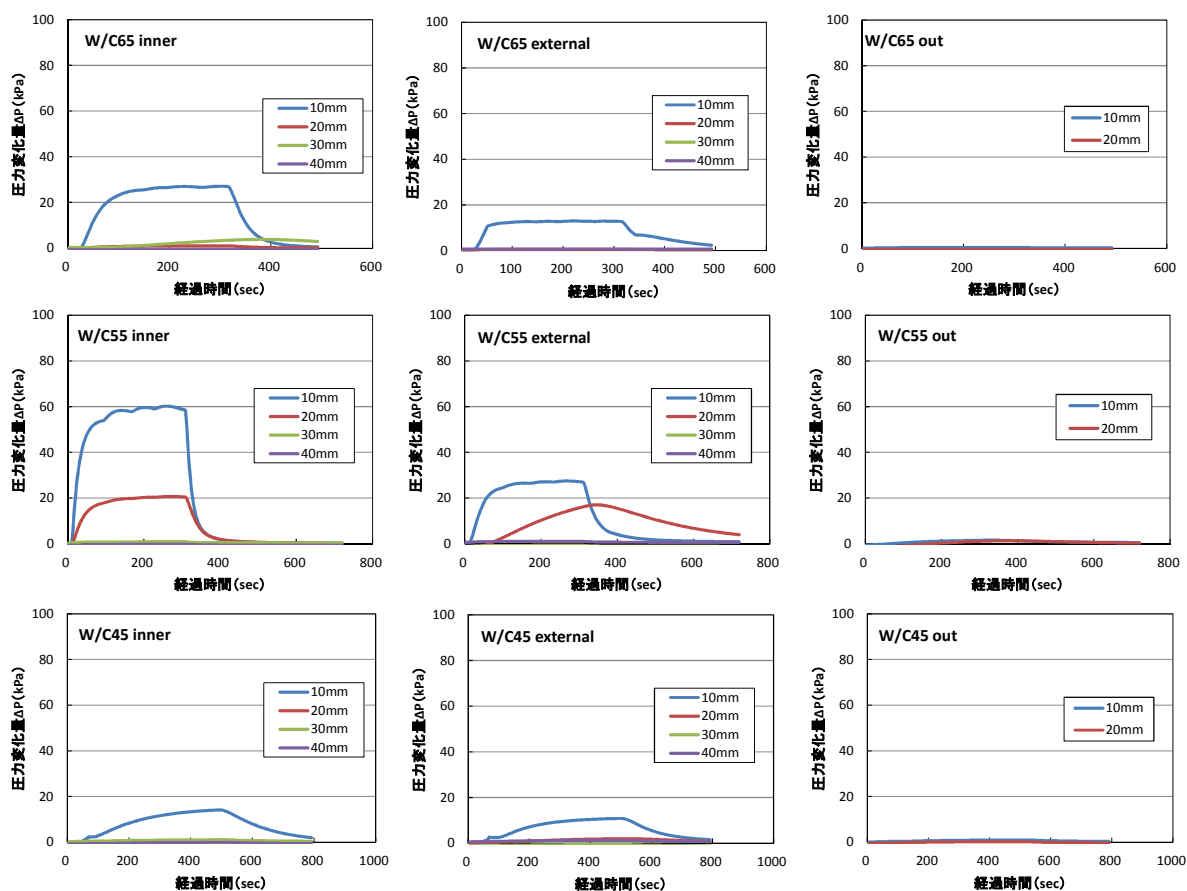


図 3.4-4 SCM(ϕ 100mm)法による透気性試験時のコンクリート内部の圧力変化

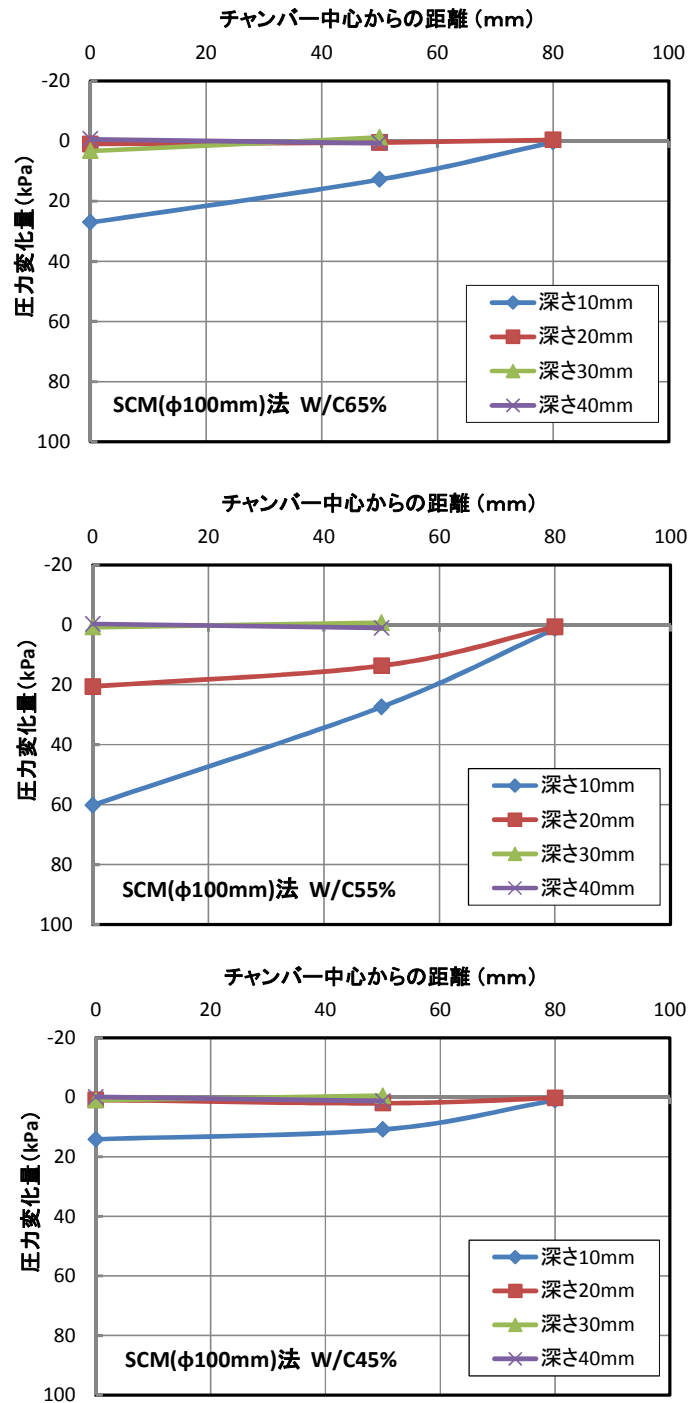


図 3.4-5 SCM(φ100mm)法による圧力変化量

(3) SCM(φ50mm)法

図 3.4-6 に、φ50mm の SCM 法における、DC(TPT)法と同じ図 3.4-1 に示した位置でのコンクリート内部の圧力の経時変化を示す。φ50mm の SCM 法では、inner はチャンバーの中心の位置の圧力を、external と out はチャンバーの外の位置の圧力を示している。

図 3.4-7 に SCM(φ50mm)法におけるチャンバー中心からの距離とコンクリート表面からの深さ方向の圧力変化量をそれぞれ示す。

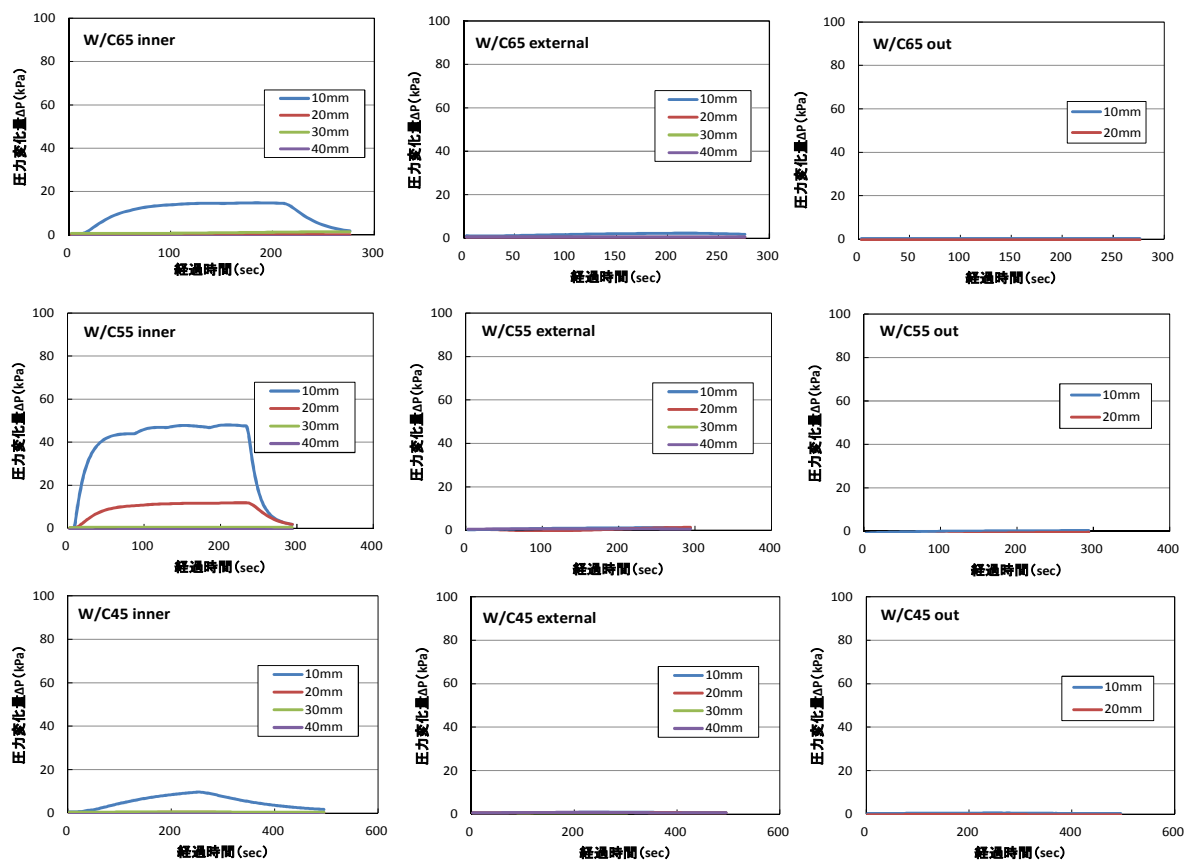


図 3.4-6 SCM (φ 50mm) 法による透気性試験時のコンクリート内部の圧力変化

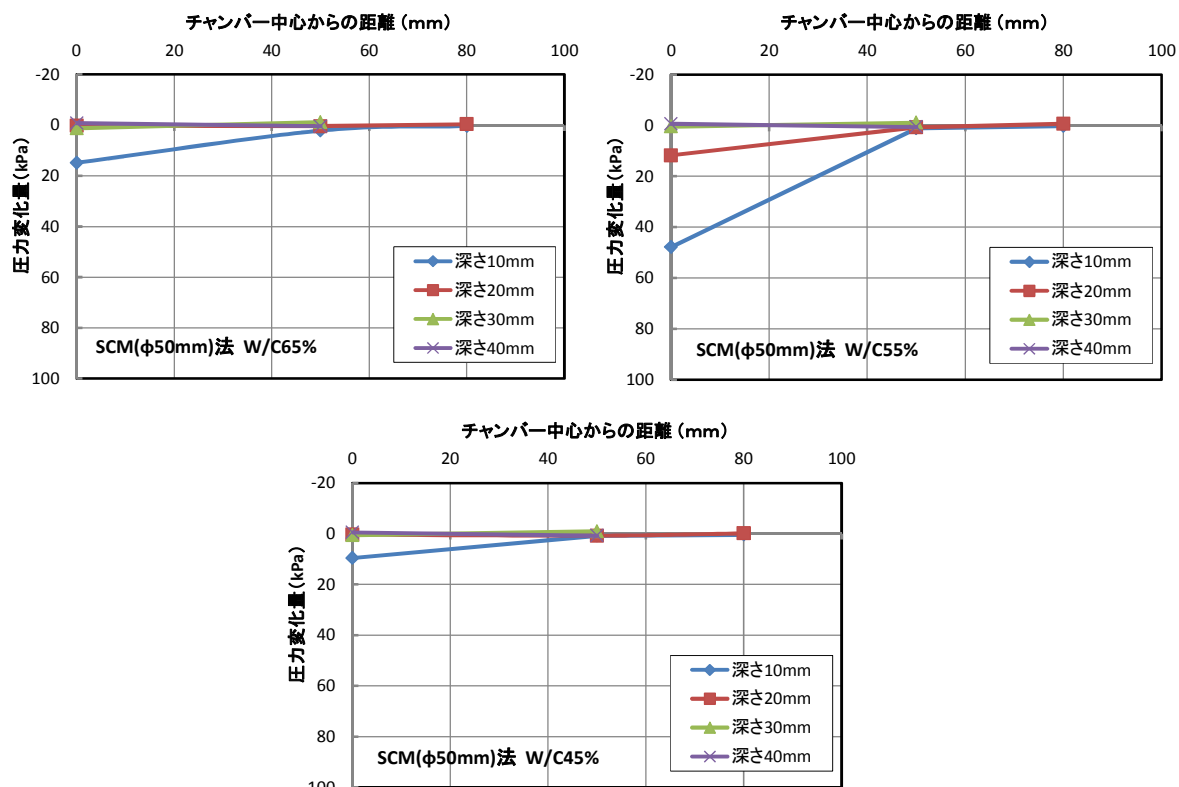


図 3.4-7 SCM (φ 50mm) 法による圧力変化量

(4) FIM-A 法

図 3.4-8 に、FIM-A 法における図 3.4-1 に示した位置でのコンクリート内部の圧力の経時変化を示す。圧力測定時は真空ポンプを吸引したままとした。測定時の圧力は約 10kPa であった。FIM 法による圧力変化は、表面からの深さ 30mm～50mm の位置が表面から 10mm の位置よりも大きくなっており、コンクリート表面からの空気の流入よりもドリル孔側面からの空気の流入の方が大きいことがわかる。つまり、FIM 法による透気性試験では、コンクリート表面からの透気ではなく、表層部のコンクリート内部の透気性を主として測定していると考えられる。言い換えれば、FIM 法はコンクリート表面の脆弱層や微細ひび割れの影響をあまり受けずに表層コンクリートの透気性の測定が可能となる。

図 3.4-9 に FIM-A 法におけるドリル孔側面からの距離とコンクリート表面からの深さ方向の圧力変化量をそれぞれ示す。W/C45%の深さ 50mm の位置のように局所的に圧力変化が大きくなる位置が存在する。これは、FIM 法では、表層部の影響よりもドリル孔側面近傍に存在する微細なひび割れや空隙に大きな影響を受けるためと考えられる。

表 3.4-1 に示した 3 種類のモルタル供試体における FIM-A 法による透気速度 P.V.を表 3.4-3 に示す。DC(TPT)法における測定結果と同様に、No.2 のモルタル供試体の透気性が最も大きくなった。

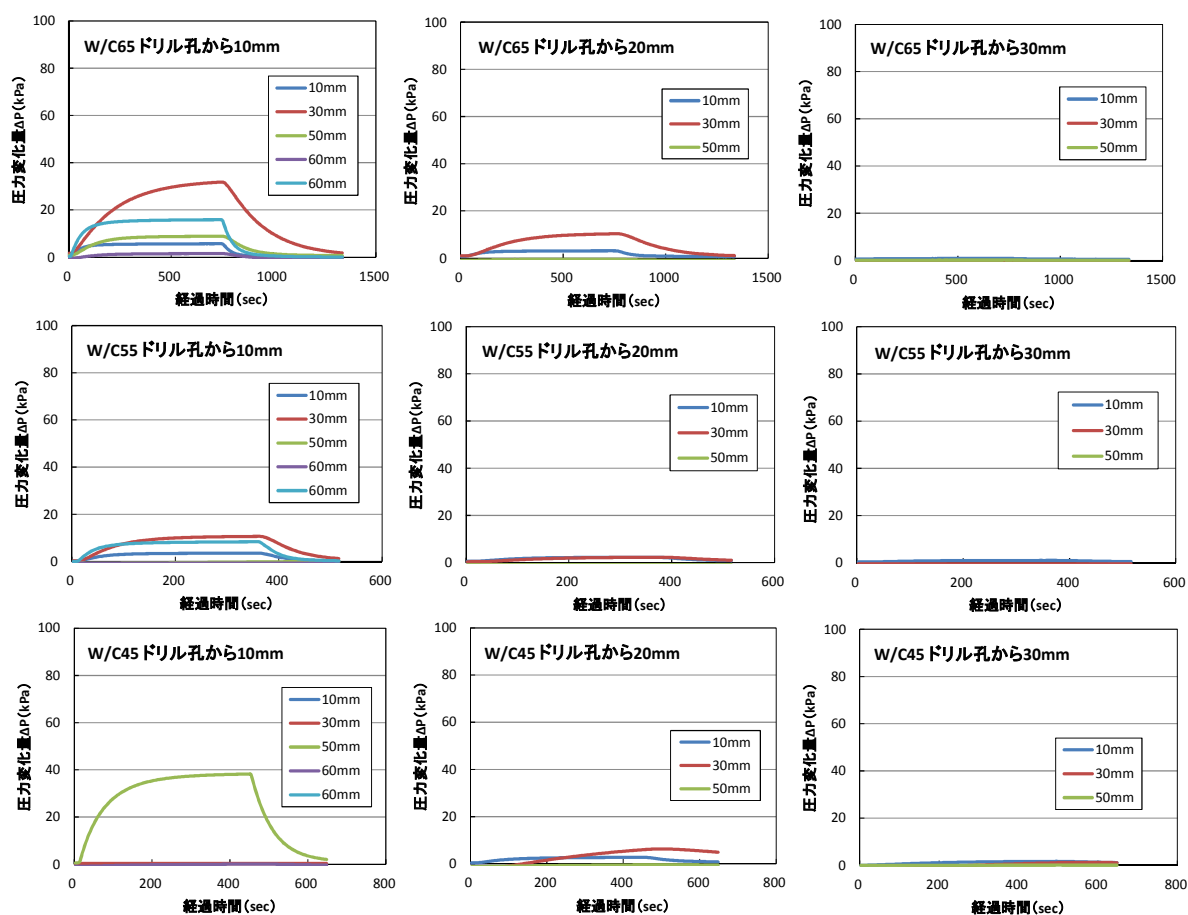


図 3.4-8 FIM-A 法による透気性試験時のコンクリート内部の圧力変化

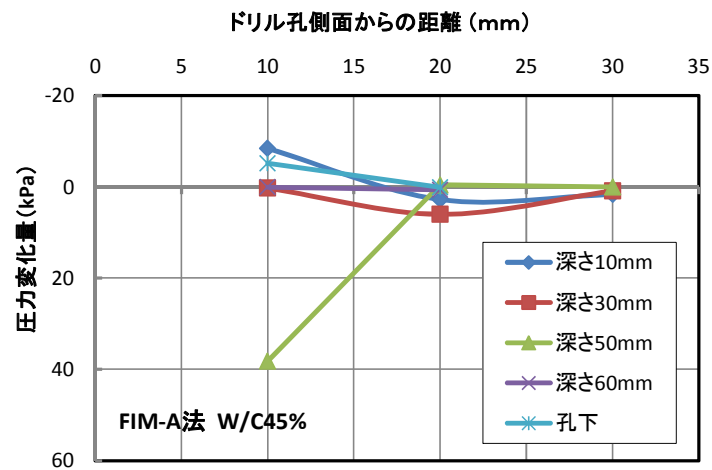
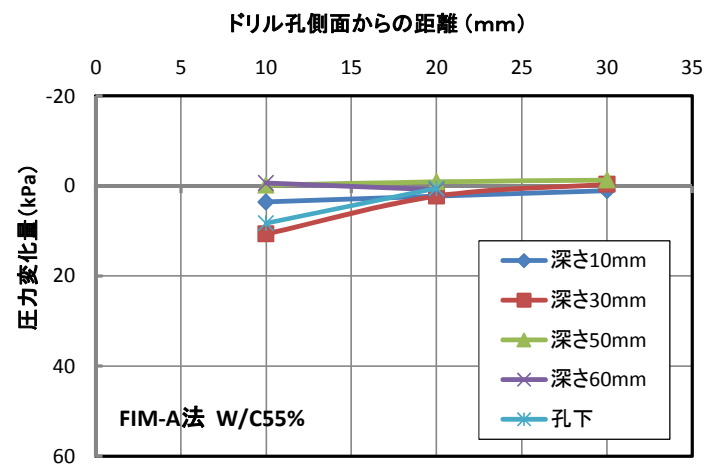
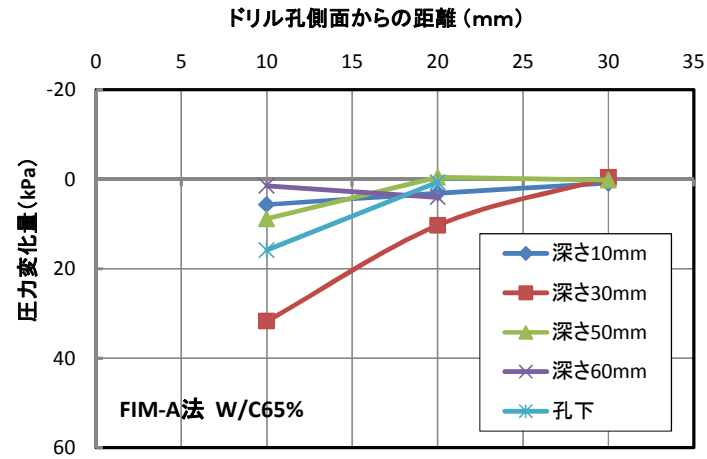


図 3.4-9 FIM-A 法による圧力変化量

表 3.4-3 FIM 法による透気試験結果

No. (W/C)	No.1(W/C45%)	No.2(W/C55%)	No.3(W/C65%)
透気速度 P.V.	1.5(kPa/sec)	4.0(kPa/sec)	0.6(kPa/sec)

3.5 まとめ

4 種類の実大コンクリート壁に各種の透気性試験を適用し、それぞれの試験結果の相関性について検討した。また、透気性試験時の表層コンクリートの内部の圧力変化を測定することによって、各種の透気性試験方法における透気領域について検討した。実験結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) RILEM 法による透気係数 K は、実大コンクリート壁の呼び強度ごとのコンクリートの品質を的確に評価している。DC(TPT)法および FIM 法は、ベンチマーク試験である RILEM 法と相関が高く、FIM 法は DC(TPT)法との相関が極めて高い。
- (2) SCM 法の試験時の圧力変化の関係から、透気係数の大きさと圧力変化量には関連性がみられ、透気係数が大きいほど深い位置までの圧力変化が生じかつ圧力変化量も大きくなる。
- (3) FIM 法による透気性試験では、コンクリート表面からの空気の流入よりもドリル孔側面からの空気の流入の方が大きくなる。つまり、FIM 法による透気性試験では、コンクリート表面からの透気ではなく表層部のコンクリート内部の透気性を主として測定している。

【第3章の参考文献】

- [1] Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater. & Struct., Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992.7
- [2] 今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: 構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第607号, pp.31-38, 2006.9
- [3] 野中英, 湯浅昇: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第700号, pp.689-696, 2014.6
- [4] RILEM TC116-PCD, Recommendation of TC116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. Measurement of gas permeability of concrete by RILEM-CEMBUREAU method, Mater. & Struct, Vol.25, No.150, pp.358-365, July, 1992
- [5] 山崎順二, 今本啓一, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: 簡易透気性試験によるコンクリートの耐久性評価に関する研究, その1, 簡易透気速度に影響を及ぼす各種要因に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, A-1, pp.1177-1178, 2005.9
- [6] Roberto Torrent, Frank Jacobs: Swiss Standard SIA 262: 2003, A step towards performance-based specifications for durability, Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling, Toulouse, France, pp.532-539, 2009.6
- [7] 山崎順二, 今本啓一, 田中章夫, 加藤猛: 透気性試験における繰返し測定および試験機の検定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1921-1926, 2017.7
- [8] 今本啓一: コンクリートの表層透気性試験方法の現状と課題, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.606-613, 2015.7
- [9] 田中章夫: 表層透気性を用いた鉄筋コンクリート構造物の中性化評価手法に関する研究, 東京理科大学学位論文, 2017(H29). 3

第 4 章

測定誤差を考慮した実用的評価手法 に関する検討

第4章 測定誤差を考慮した実用的評価手法に関する検討

4.1 はじめに

ダブルチャンバー法による測定機の違いやコンクリートの表層品質の違いに起因する透気性測定値の変動係数を把握することに加え、シングルチャンバー法およびドリル削孔法における測定値の変動係数の把握、測定位置の微妙なずれが透気性の測定値の変動に及ぼす影響などについて、3.2節で述べた共通試験の結果に基づき検討する。

また、コンクリート構造物の表層透気性を評価するために、ダブルチャンバー法（DC(TPT)法）およびシングルチャンバー法（SCM 法）を用いて同一箇所を複数回繰り返して測定する場合における試験間の時間間隔が、透気性の試験値に及ぼす影響について、コンクリート内部の圧力変化を用いて検討した。

さらに、透気試験機の点検方法について検討するため、新たな検定器を試作し、DC(TPT)法試験機と3台のドリル削孔法（FIM 法）による試験機を用い、同一試験機における透気係数の測定精度や試験機の機差の確認、試験機の点検方法などについて検討した。

加えて、3.2.3項に示したDC(TPT)法による8台の試験機を用いた共通試験における透気係数 kT の測定データを用いて、透気性測定値の評価方法および処置方法について、つまり詳細には、Grubbs 棄却検定による特異値（特異値）の選別、測定値の平均値の計算方法、構造体コンクリートでの透気性試験におけるサンプリング数（測定点数）について検討する。

4.2 共通試験における透気性測定値の変動量

4.2.1 DC(TPT)法における変動係数の検討

DC(TPT)法における共通試験から得られた、測定機ごともしくは測定位置ごとの透気係数の変動係数を調査するとともに、その変動係数の大きさが中性化速度係数に及ぼす影響についても検討した。図4.2-1に、8台の測定機における呼び強度ごと6か所の測定位置における透気係数 kT を示す。各図には変動係数に相当するエラーバー（誤差範囲）を付記した。強度の増加とともに透気係数は低下する傾向を示しているが、同一呼び強度のコンクリートにおいても、測定機の差に加え、表層コンクリートの粗密さや微細ひび割れなどの影響によって測定位置ごとに透気係数 kT が異なっている。

一方、呼び強度ごと6か所の測定位置から得られた8台の試験機の測定値（対数値）をそれぞれ相乗平均して得られた透気係数 kT と、呼び強度に対応する圧縮強度との関係を図4.2-2に示すが、圧縮強度と透気係数 kT には寄与率 $R^2=0.96$ と極めて高い相関が得られている。このことから、部材としての透気性の評価を目的とする場合においては、測定点数6点のサンプリングから特異値を除いて相乗平均した値で透気性を表現することによって、その部材のおおよその品質の差異を評価できる可能性が示されている。

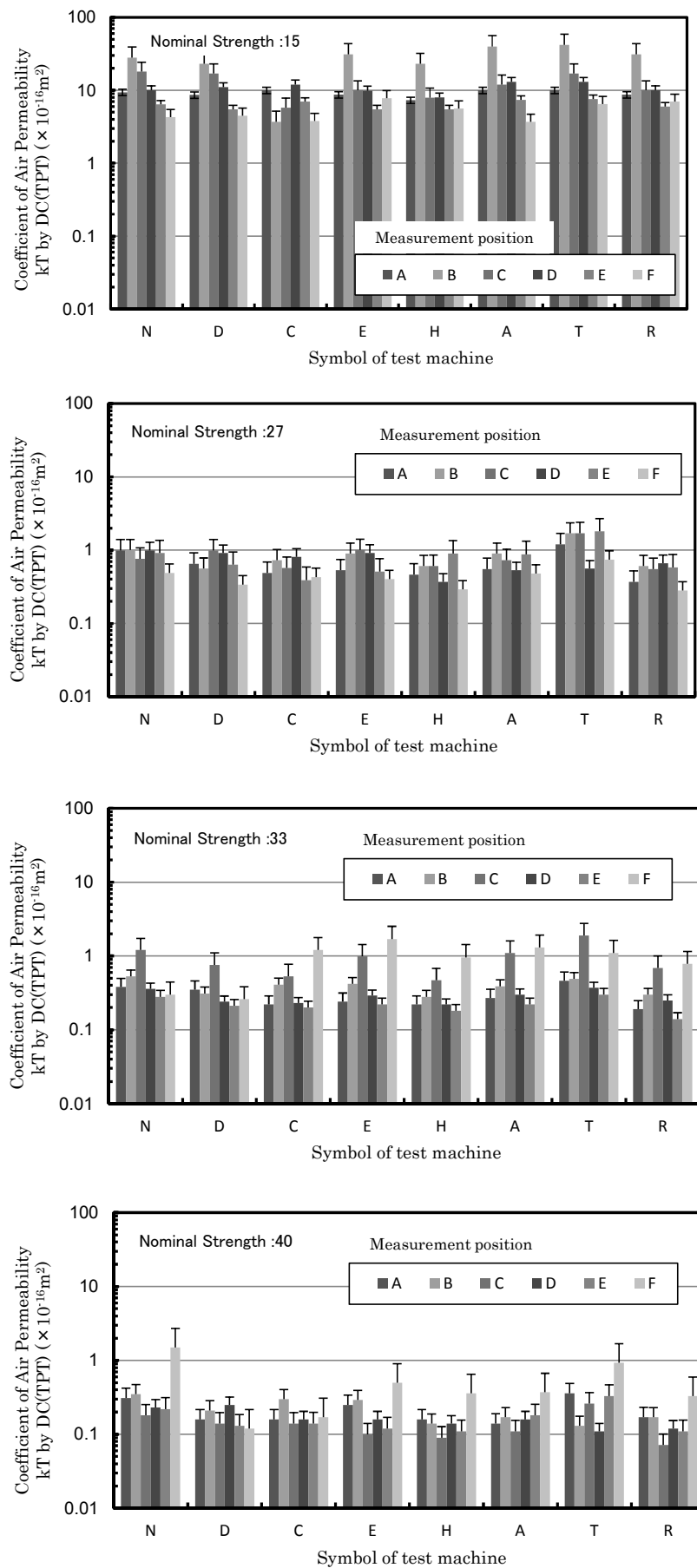


図 4.2-1 共通試験におけるダブルチャンバー法による試験機ごとの透気係数 kT

なお、図 4.2-2 の上図には圧縮強度の変動（10%と仮定）に相当する誤差範囲を，下図には透気係数 kT の変動に相当する誤差範囲を付記した。

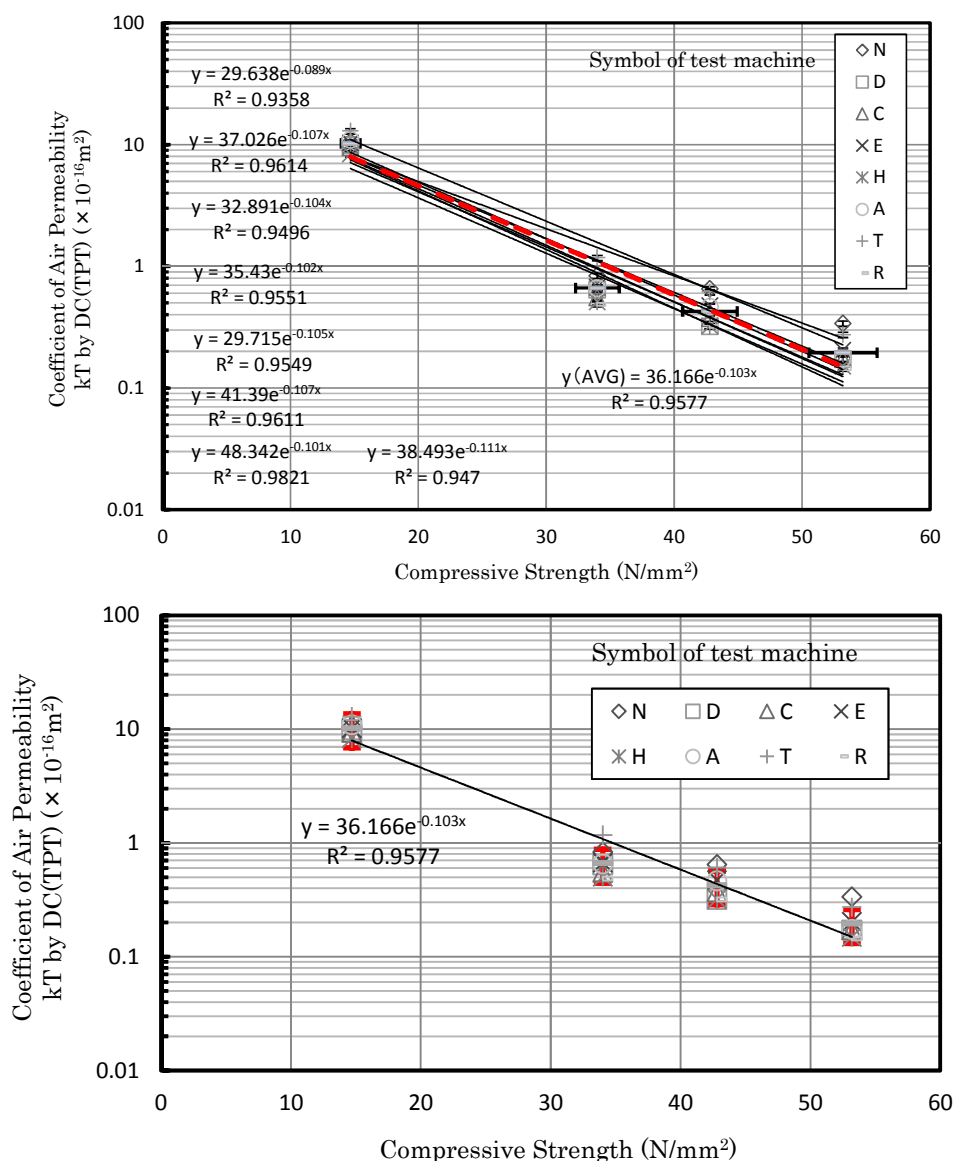


図 4.2-2 ダブルチャンバー法による透気係数 kT と圧縮強度の関係

共通試験における透気係数 kT の変動係数について，まず，図 4.2-3 に 8 台の測定機ごとの変動係数を示す。呼び強度ごと 6 点の平均値から求めた測定機ごとの変動係数は 20%～140%の範囲にあり，いずれの測定機においても呼び強度との関連は認められない。また，全ての試験機において呼び強度 27 の変動係数が最も低く 20%～40%であり，その他のコンクリートと比較して表層コンクリートの変動が少ないことが伺える。

ここで，図 4.2-3 に示す変動係数には，測定機による差のみではなく，測定時にコンクリート表面に設置するチャンバーの図 3.2-4 の写真のコンクリート表面に円形で記されている各測定位置からの数 cm 程度の位置のずれによって生じる表層コンクリートの粗密さ

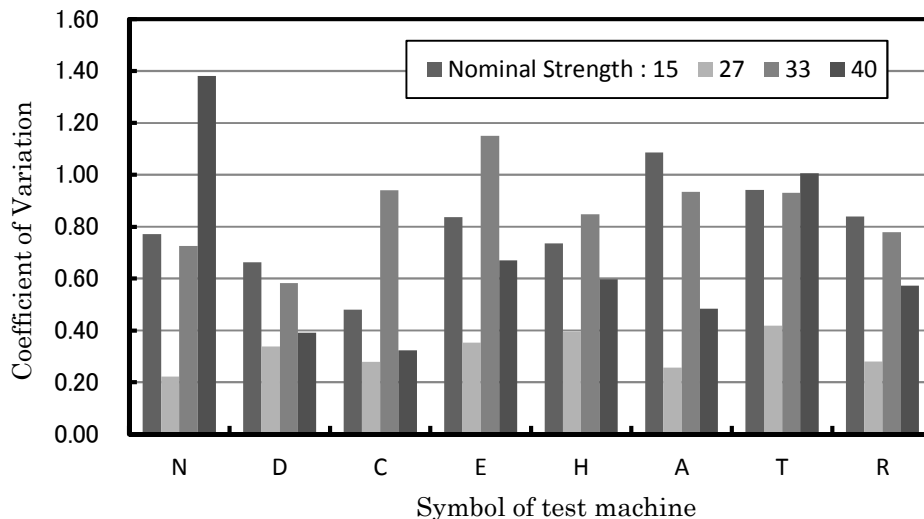


図 4. 2-3 試験機ごとのダブルチャンバー法による透気係数 kT の変動係数

の違いや微細ひび割れの存在の有無による影響も含まれている。このことから、コンクリートの品質変動や測定機の差を含めた変動係数は、図 4. 2-3 に示した変動係数の平均値として約 65%程度となることがわかった。

次に、測定位置ごとの変動係数を図 4. 2-4 に示す。明確ではないが、8 台の試験機による概ね同じ位置での測定値の相乗平均から求めた変動係数は、呼び強度が大きくなるに伴い変動係数が徐々に大きくなる傾向がみられた。これは、呼び強度が高いほど透気係数 kT の測定値が小さな値となるために、測定値の変動の影響が相対的に大きくなったためと考えられる。

また、図 4. 2-4 には測定点 A～F の平均値を付記 (Ave,(A-F)) しているが、本実験の範囲における概ね同じ (チャンバー設置位置の数 cm のずれを含む) 位置での 8 台の試験機による測定値から求めた透気係数 kT の変動係数は、呼び強度 40 の測定点 F のみ 80%と大きな値であるが、それ以外は概ね 20%～40%程度であった。

ここで、測定機 R を用い、同じ測定位置において直前の測定による影響を回避するために 15 分の間隔を空けて 5 回測定した場合の変動係数と、図 4. 2-4 の測定点 A～F の変動係数を平均した値 (Ave,(A-F)) を比較して図 4. 2-5 に示す。これによると、全く同じ位置において同じ測定機で繰返し測定した場合の変動係数は 10%程度以下となることがわかる。さらに、図 4. 2-6 には、図 4. 2-4 に示した呼び強度ごとの 6 点の測定位置に対して、変動係数が概ね大中小となる 3 点を選定し、チャンバーの設置位置を厳密に一致させて 7 台の試験機 (N, C, H, A, T, G, F) を用いて測定した透気係数 kT の変動係数を比較して示した。チャンバー設置位置のずれを無くすことで変動係数が小さくなり、表層コンクリートの品質による影響を排除した変動係数つまり試験機の差による変動のみを把握することができる。

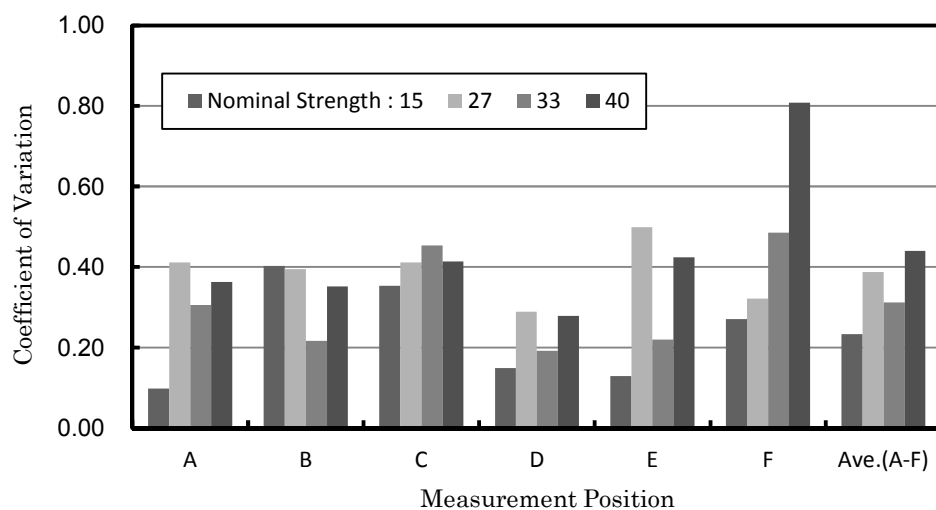


図 4.2-4 測定位置ごとのダブルチャンバー法による透気係数 kT の変動係数

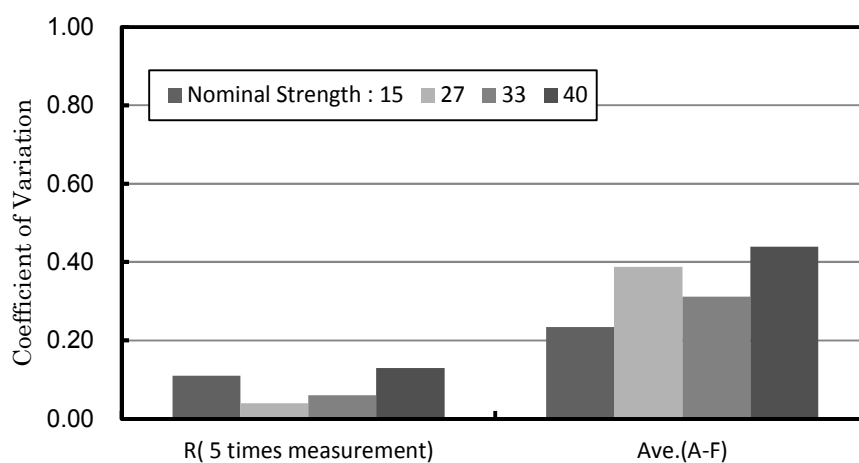


図 4.2-5 試験機 R を用いて同一測定位置において 5 回測定した場合の変動係数

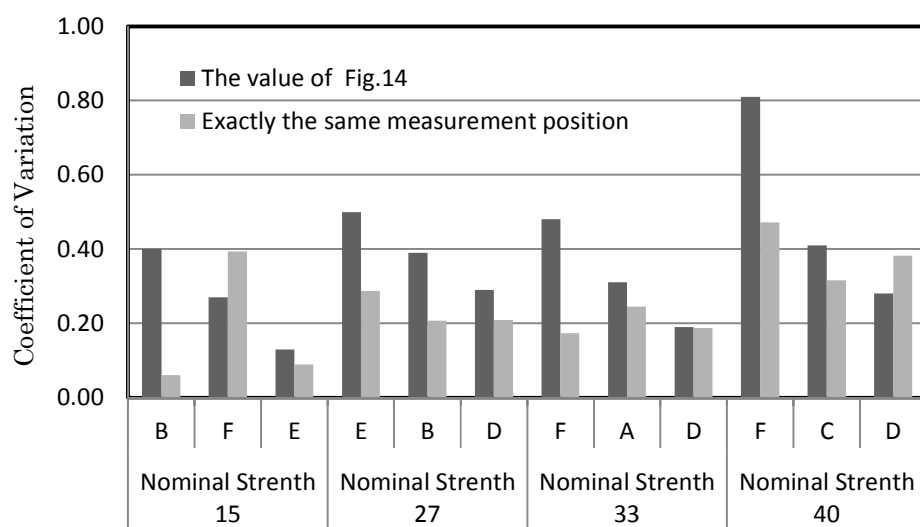


図 4.2-6 チャンバーの設置位置のズレを無くした場合の変動係数

以上のことから、DC(TPT)法における透気係数 kT の変動係数は、図 4.2-6 に示した測定機の差のみによるものが平均 25%(10%~45%)であり、これにチャンバー設置位置の数 cm のずれによって生じる表層コンクリートの品質の違いによる影響を含んだ場合には、図 4.2-5 の平均値として約 30%(20%~40%)、さらに、実大コンクリート壁全体から 6 点をサンプリングした際の変動係数は、図 4.2-3 より平均約 65%(20%~140%)となった。

つまり、変動係数を単に減算することはできないが、目安として、打込み、締固めの程度、圧密、養生などの施工要因の影響や環境要因などによって生じる表層コンクリートの品質の微妙な違いによる透気係数 kT の変動係数は、図 4.2-6 に示した測定位置のずれを排除した主として試験機の差のみによる変動係数とみなせる 25%を、図 4.2-3 に示した試験機ごとの A~F での測定位置の違いによる変動係数から除くことで得られるとすれば、その大きさは概ね 40%程度になると考えられる。

また、全体の変動量である 65%に占める試験機の差による変動の割合は約 40% ($(25/65) \times 100 = 38.5\%$) であると考えれば、表層コンクリートの品質の違いによる変動は全体の変動量の約 60%を占めていることになる。

一方、既存 RC 構造物における中性化深さの変動係数は、中性化深さが大きくなるほど小さくなる傾向にあるが、平均中性化深さが 15mm 程度以下の場合を除けば概ね 20%~40%程度[1]とされている。また、旧建設省マンション総プロでは、日本建築学会「鉄筋コンクリート造構造物の耐久設計施工指針(案)・同解説」[2]に示されている 10%よりも大きく、その変動係数を 40%と報告している。透気係数 kT とコンクリートの中性化速度係数には高い相関のあることが示されている。既往の研究[3]によって得られた実構造物における構造体コンクリートの透気係数 kT と中性化速度係数の相関を俯瞰すると、対数軸で表現される透気係数から中性化速度係数を推定するにあたって、透気係数のこの変動（本共通実験ではコンクリートの表層品質の違いに起因する変動係数として概ね 40%）が中性化速度係数に及ぼす影響は僅かである[4]と考えられる。

4.2.2 SCM 法および FIM 法における変動係数の検討

SCM-N および SCM-R に用いたチャンバー形状を写真 4.2-1 に、また FIM-N (-G) に用いるハット型および FIM-A に用いるコーン型のシリコン栓を設置した状況を写真 4.2-2 に示す。シリコン栓の詳細は図 3.2-3 に示した通りである。それぞれの透気試験を写真 3.2-4 に示した位置において実施し、測定位置の違いによる透気指数 A.P.I.もしくは透気速度 P.V.の変動係数について調査した。

図 4.2-7 およ図 4.2-8 に、SCM 法および FIM 法での測定位置ごとの透気性試験結果を示す。なお、両図に示した測定値は、呼び強度ごとの各測定位置（6 ヲ所または 4 ヲ所）における 2 回目から 4 回目までの測定結果を相乗平均して得たものである。また両図には、測定方法ごとの変動係数に相当するエラーバー（誤差範囲）を付記した。

まず、図 4.2-7 に示した SCM 法について、SCM-N と SCM-R の測定結果は、チャンバーの容積や形状、ホースの径や長さが異なるために透気指数 A.P.I.の絶対値はやや乖離しているものの、いずれの測定方法においても概ね相対的な測定結果が得られる傾向にあることが伺える。

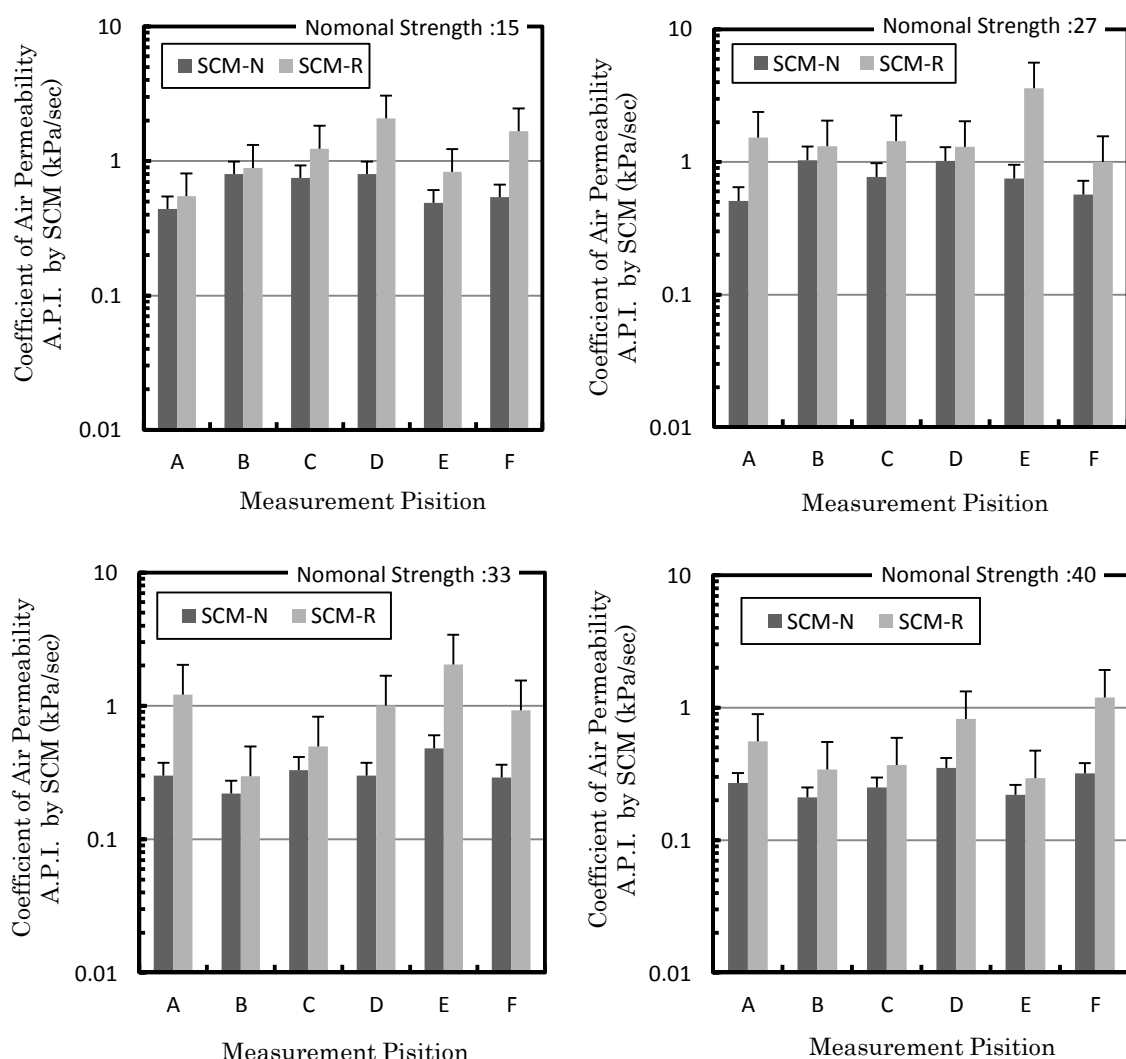


図 4.2-7 共通試験における SCM 法による透気指数 A. P. I.

次に、図 4.2-8 に示す FIM 法については、試験機 FIM-N と FIM-G がほぼ同じ仕様の試験機構成であり FIM-A のみがシリコン栓の形状や接続ホースが異なるものの、透気速度 P.V. は一部の測定値、例えば呼び強度 33 の測定位置 d の FIM-A や、呼び強度 40 の測定位置 b の FIM-G などを除けば、測定機の違いによる明確な傾向は認められなかった。

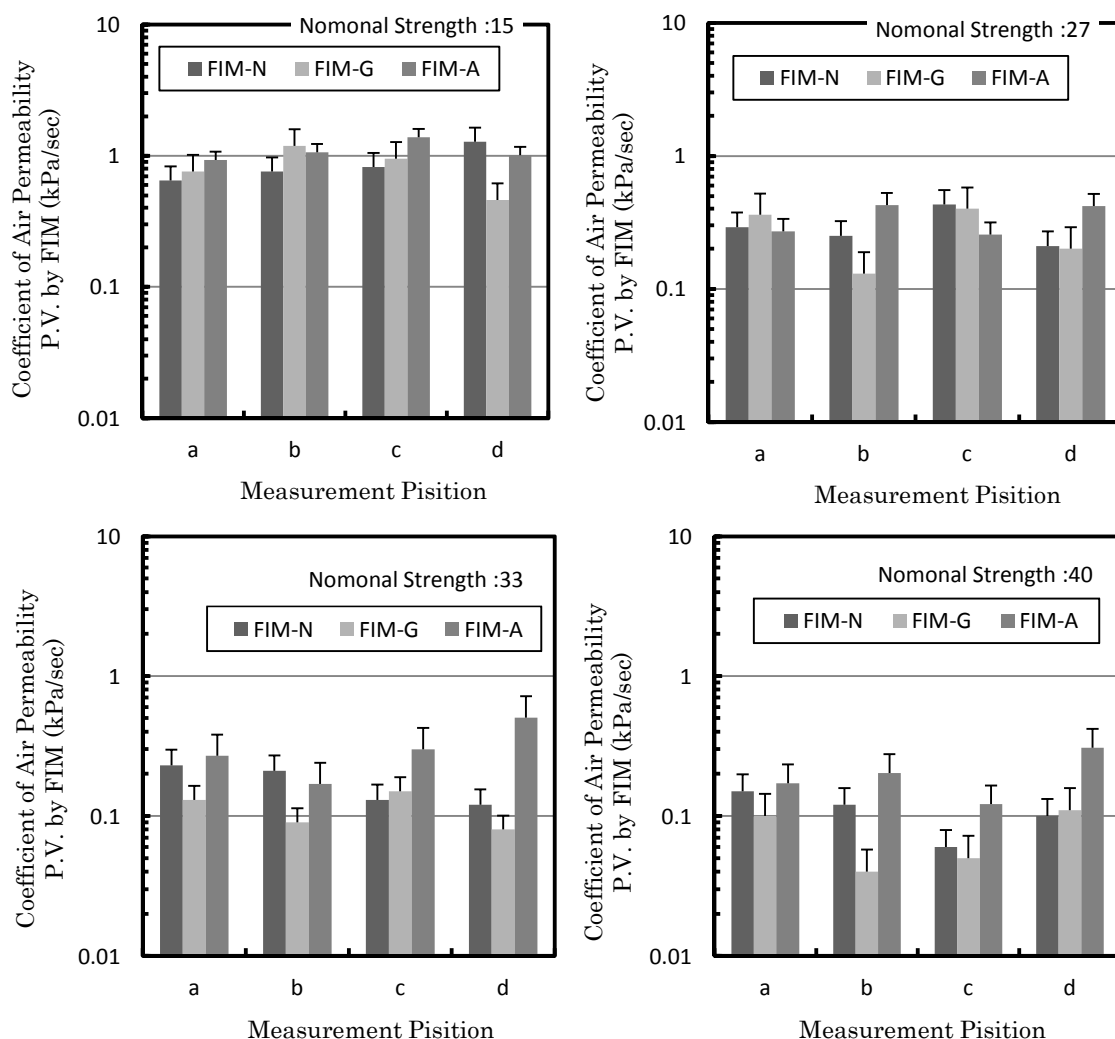


図 4.2-8 共通試験における FIM 法による透気速度 P.V

図 4.2-9 に SCM 法における A～F の 6 点の測定値を相乗平均した結果と圧縮強度の関係を、また、FIM 法における a～d の 4 点の測定値を SCM 法と同様に整理した結果を図 4.2-10 に示す。SCM 法については前述の通り SCM-N と SCM-R による測定値が乖離しているが、FIM 法では概ね良く一致しており、さらに低強度側ではいずれの測定機でもほぼ同じ透気速度 P.V. が得られている。これは、SCM 法はチャンバーの容量などの形状の違いが直接現れるが、FIM 法ではいずれの手法でも同じ容積のドリル削孔内部が測定対象となるため、試験機構成の若干の違いによる影響が小さくなるためと考えられる。

さらに、圧縮強度と透気性の関係については、SCM-N 法では寄与率 $R^2=0.60$ となっているが、FIM-N 法では寄与率 $R^2=0.99$ と極めて高い相関が認められ、圧縮強度に対する透気速度 P.V.の変化も SCM 法による透気指数 A.P.I.よりも大きくなっている。また、SCM 法では、呼び強度 15(圧縮強度 14.7N/mm²)と呼び強度 27(圧縮強度 34.0N/mm²)の透気指数 A.P.I.の大小関係が逆転しているが、これは、呼び強度 15 の試験体では共通試験を実施した材齢 3 ヶ月の時点で中性化深さが 7mm 程度進行していたため、表層部の組織が緻密化していたことが一つの要因であると推測される。SCM 法は他の透気試験よりもより表層部のコンクリートの透気性を評価していると考えられるため、中性化による表層部の物質透過性の変化を捉えることができた可能性もある。この点については今後の検討とする。

以上のことから、コンクリートの表面から深さ 50mm までのドリル削孔を透気性の測定に適用する FIM 法は、表面法である SCM 法よりも、表層コンクリートの品質の違いをより明確に評価できる試験方法であるといえる。

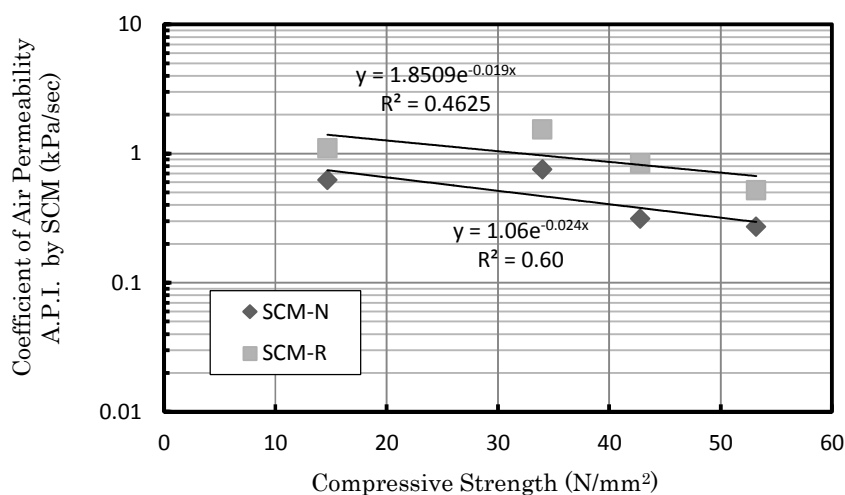


図 4.2-9 シングルチャンバー法(SCM)による透気指数 A. P. I. と圧縮強度の関係

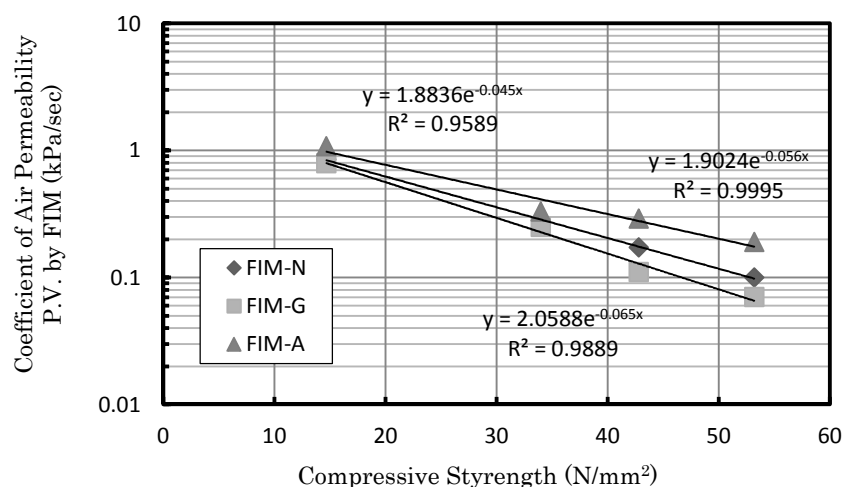


図 4.2-10 ドリル削孔法(FIM)による透気速度 P. V. と圧縮強度の関係

図 4. 2-11 に、SCM 法および FIM 法における透気係数の変動係数を呼び強度ごとに示す。変動係数は、SCM-N が平均 24%であるのに対し、SCM-R では平均 58%（SCM 法の全平均は 41%）となった。これは、SCM-R に用いたチャンバーに付属するパッキンの幅（図 3. 2-2 より SCM-N では幅 2cm であるが SCM-R では幅が 1cm 弱）による影響[5]と考えられる。

これに対し、FIM 法では FIM-N と FIM-A が平均 30%(16%～42%)、FIM-G が平均 37%(26%～45%、FIM 法の全平均は 34%)となり、DC(TPT)法による測定位置の違い、つまりコンクリートの表層品質の違いに起因する変動係数の大きさ（概ね 40%程度、）と概ね一致する結果となった。すなわち、DC(TPT)法と FIM 法については、いずれもコンクリートの表層を含む品質の違いを概ね評価し得ると考えられる。

一方、SCM 法は圧縮強度との相関が図 4. 2-2 や図 4. 2-10 と比較して緩やかであることから、その他の試験方法とは異なる領域、つまりごく表層のコンクリートの透気性のみを評価していると推測される。SCM 法に用いるチャンバーのパッキン形状などに配慮すれば表層品質の評価が可能になる[5]と考えられるが、それぞれの透気性試験における透気領域（深さ）に関する検討については後述する。

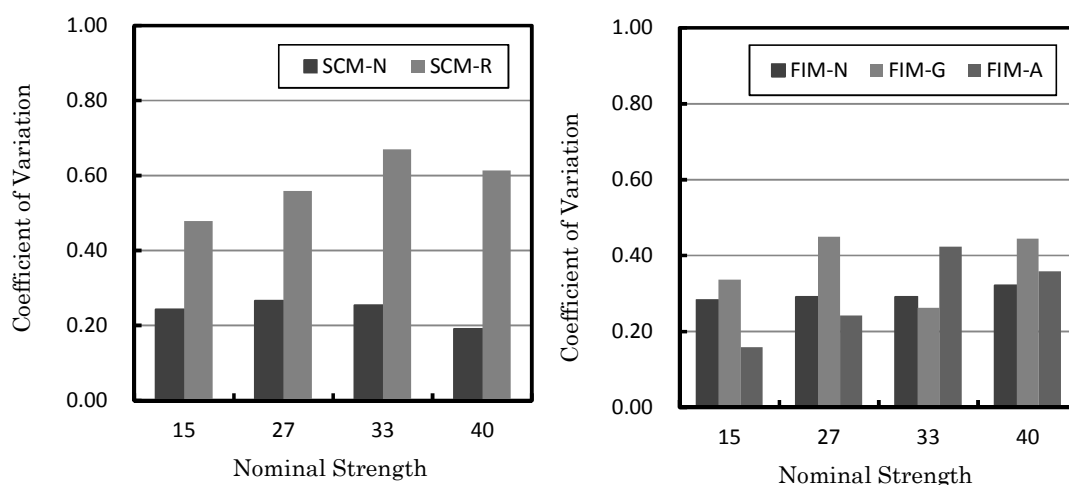


図 4. 2-11 SCM 法による透気指数 A.P.I.および FIM 法による透気速度 P.V.の変動係数

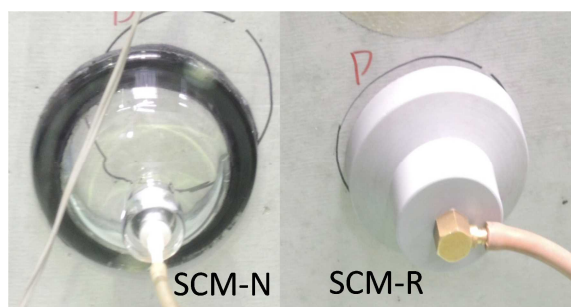


写真 4. 2-1 SCM-N および SCM-R のチャンバーの形状

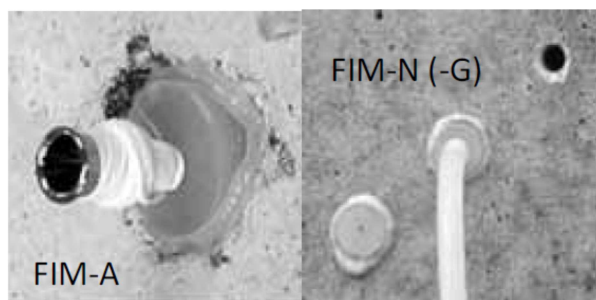


写真 4. 2-2 FIM-N(-G)のハット型および FIM-A のコーン型のシリコン栓

4.3 繰返し測定が透気性の試験結果に及ぼす影響

4.3.1 圧力計測の概要

(1) 圧力計測に供した試験体の概要

透気試験において表層コンクリートに作用する内部圧力を計測するため、一辺 200mm 角の直方体の表層（測定面）中央部の深さ 10mm、20mm、30mm および 40mm の位置に真鍮パイプを設置し、その先端に圧力センサを取り付けて透気試験中の表層コンクリート内部の圧力分布を計測した。図 4.3-1 に、圧力計測に供した試験体と DC(TPT)法による試験状況例の写真と、表層コンクリート内部への真鍮パイプの設置位置のイメージ（断面）図を示す。

なお、試験体は、レディーミクストコンクリート工場で製造される呼び強度 27 (27-15-20N, W/C=53%, 単位水量 175kg/m³, s/a=46.5%) の普通コンクリートを用いて作製したものである。

4.3.2 圧力計測に供した透気性試験

繰返し測定を実施した透気性試験は、3.2.2の(1)に示すダブルチャンバー法(DC(TPT)法)と、(2)に示すシングルチャンバー法(SCM法：φ10cm および φ5cm)の2種類とし測定時の内部圧力の変化を測定した。

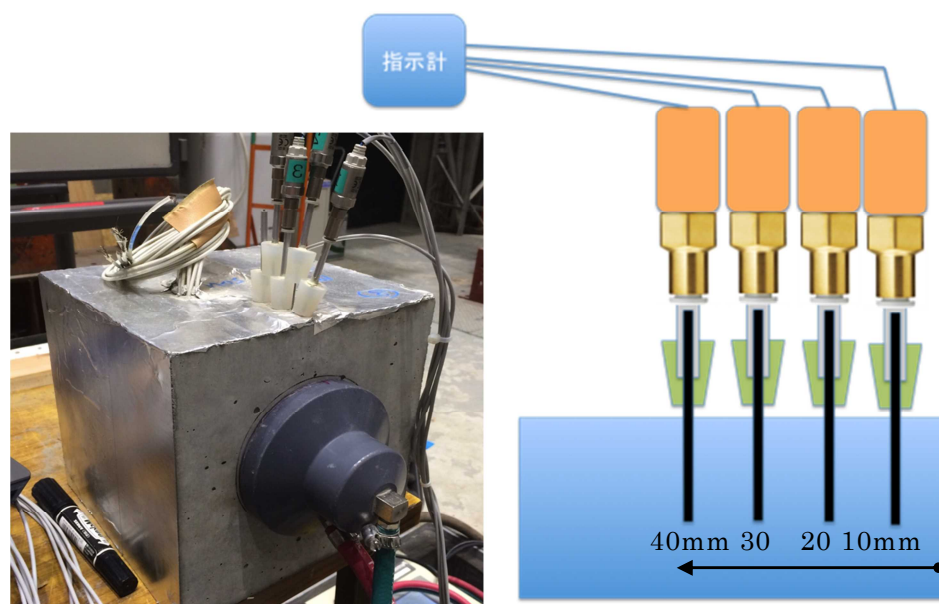


図 4.3-1 表層コンクリートの内部圧力の計測状況と圧力性設置イメージ

4.3.3 繰返し測定に関する実験の結果および考察

(1) 連続測定による影響

DC(TPT)法または SCM 法（ $\phi 10\text{cm}$ および $\phi 5\text{cm}$ ）において、表層コンクリートの同一箇所を連続して測定した際に得られる透気性測定値が受ける影響を、表層コンクリート内部の圧力変化を計測することによって検討した。連続測定では、DC(TPT)法および SCM 法（ $\phi 10\text{cm} \cdot \phi 5\text{cm}$ ）とも、表層コンクリートにチャンバーを装着した状態のままで 5 回繰り返して測定した。コンクリートの内部圧力の計測は、1 回目の測定開始時から 5 回目の測定が終了するまで継続し、1Hz でサンプリングした。

図 4.3-2～図 4.3-4 に、DC(TPT)法による透気係数 kT および SCM 法（ $\phi 10\text{cm} \cdot \phi 5\text{cm}$ ）による透気指数 $A.P.I.$ を、連続で 5 回測定した結果をそれぞれ示す。

連続測定における透気性の測定には、前述の呼び強度 27 コンクリートを用いて作製した同一の試験体を用いているが、3 つの試験方法の測定原理やチャンバー内径などが異なるため、透気性の測定値自体はそれぞれの試験方法によって異なっている。しかし、DC(TPT)法では 4 回目以降、SCM 法ではどちらのチャンバー径でも 3 回目以降の測定値が等しくなっている。

一方、ドリル削孔法³⁾においては、1回目の測定値のみが2回目以降と比較して透気性が高くなる傾向が認められており、この理由を空気の定常流に關与しない空気を取り込むことが影響しているとして、連続で4回測定した値の2回目～4回目の平均値をその測定位置における透気速度として扱うこと[6]とされている。

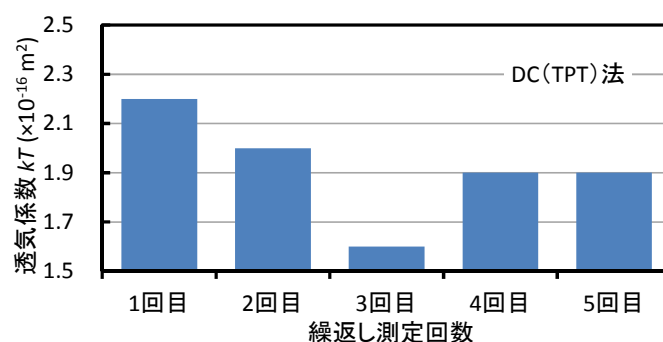


図 4.3-2 DC(TPT)法での連続測定時の透気係数 kT

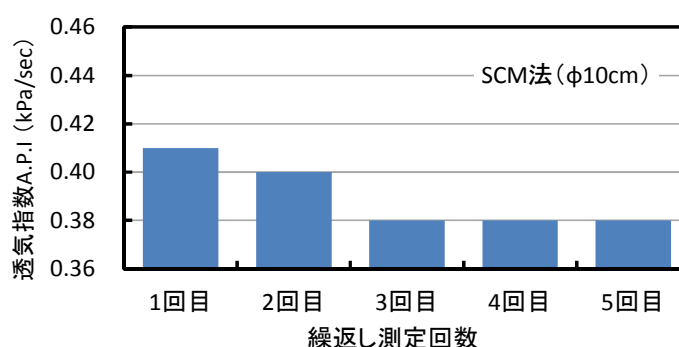


図 4.3-3 SCM 法 ($\phi 10\text{cm}$) での連続測定時の透気指数 A. P. I.

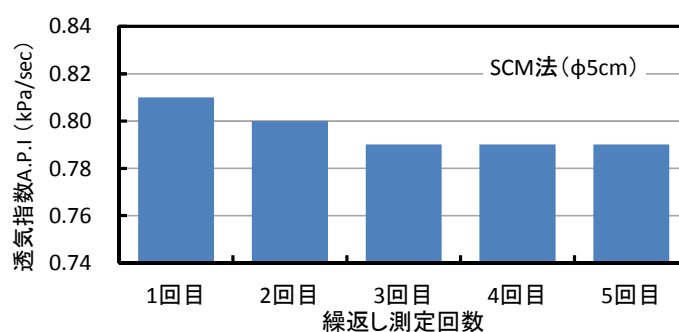


図 4.3-4 SCM 法 ($\phi 5\text{cm}$) での連続測定時の透気指数 A. P. I.

DC(TPT)法による透気係数 kT および SCM 法 ($\phi 10\text{cm} \cdot \phi 5\text{cm}$) による透気指数 A.P.I. を、連続で 5 回測定した際の表層コンクリート内部の圧力について、図 4.3-1 に示す試験体の測定面中央の表層から深さ 10・20・30・40mm の位置での内部圧力の推移を図 4.3-5 ～図 4.3-7 に示す。

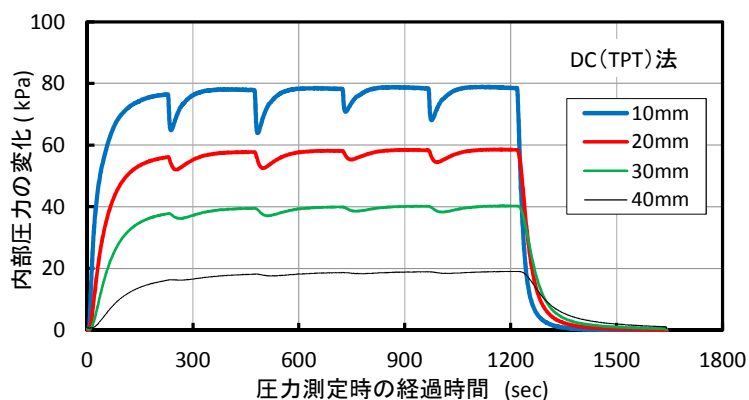


図 4.3-5 DC (TPT) 法での連続測定時の内部圧力

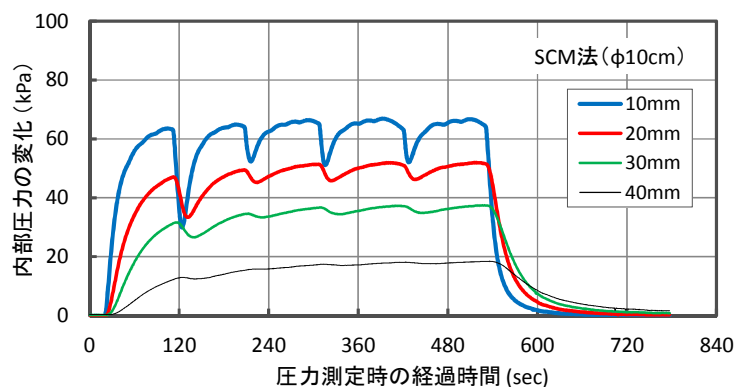


図 4.3-6 SCM 法 ($\phi 10\text{cm}$) での連続測定時の内部圧力

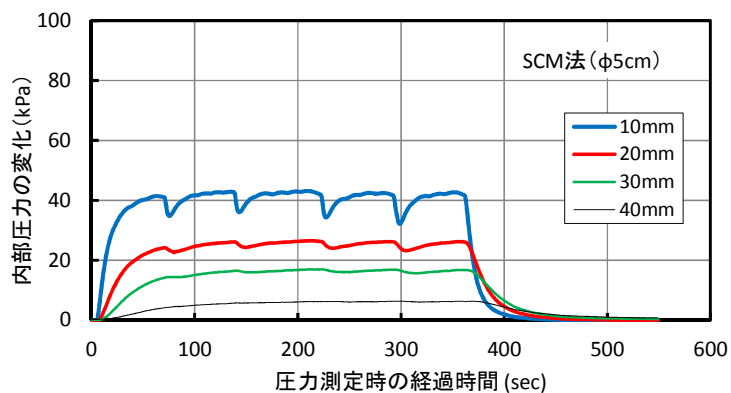


図 4.3-7 SCM 法 ($\phi 5\text{cm}$) での連続測定時の内部圧力

1 回の透気性試験に要する時間が試験方法により異なるため、5 回の測定が終了するまでの経過時間は DC(TPT)法が最も長く、SCM 法($\phi 5\text{cm}$) が最も短くなる。また圧力の大きさも試験により異なり、SCM 法ではチャンバーの内径が大きい $\phi 10\text{cm}$ の方が内部圧力も大きくなっている。しかし、表層コンクリートの深さ 40mm までの位置において圧力の波形はいずれの試験方法とも類似しており、同一箇所で連続測定した場合は、直前の測定時に作用した圧力がコンクリート内部に残存した状態で、次の測定に移行していることが分かる。また、DC(TPT)法および SCM 法($\phi 10\text{cm}$) における深さ 40mm の内部圧力は、連続測定の 3 回目終了時付近まで微増する傾向にあり、SCM 法($\phi 5\text{cm}$) においては深さ 30mm までの位置においてそれと同様の傾向が伺える。写真 4.3-1 に、内径 $\phi 5\text{cm}$ のシングルチャンバーを示す。

ここで、DC(TPT)法と SCM 法($\phi 5\text{cm}$) について、測定開始時および測定終了時におけるコンクリートの内部圧力を図 4.3-8 および図 4.3-9 に示す。なお、DC(TPT)法については測定原理を考慮し、計測開始後 60 秒の時点での圧力を採用した。測定開始時の圧力は、1 回目と 2 回目以降の測定において差が大きく、3～5 回目においては深さ 40mm までの範囲で概ね同等の圧力となっている。また、測定終了時の圧力は、2～5 回目においてほぼ同等の圧力となっていることが分かる。

このことから、透気性の測定値は、直前の測定において表層コンクリート内部に残存した圧力（気圧）の影響を受けて 2 回目に透気性が低くなったように評価され、さらに 3 回目以降の測定では測定開始時の圧力と終了時の内部圧力がほぼ安定するため、透気性の測定値が概ね同等の値を示すことになると考えられる。



写真 4.3-1 シングルチャンバー（ $\phi 5\text{cm}$ ）

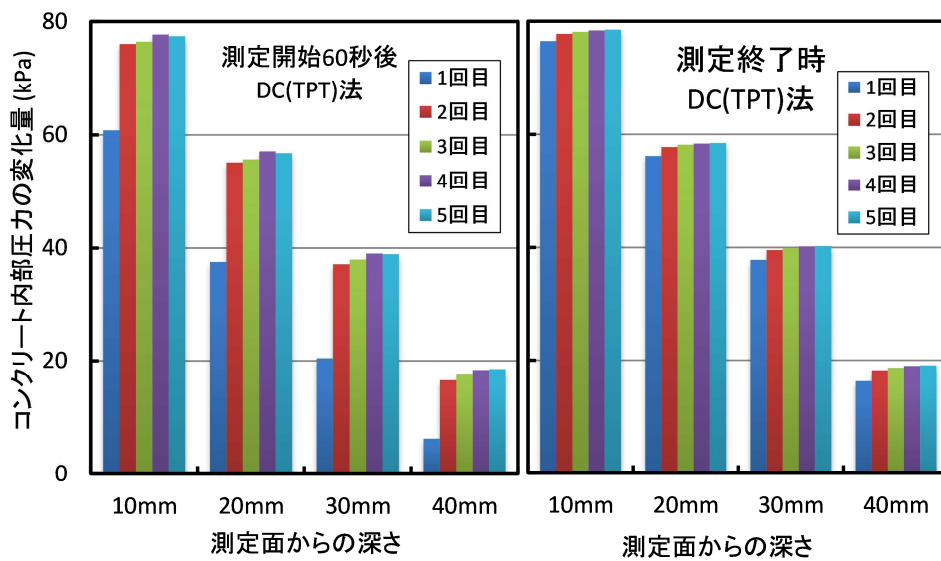


図 4.3-8 DC (TPT) 法による測定開始時と終了時の内部圧力

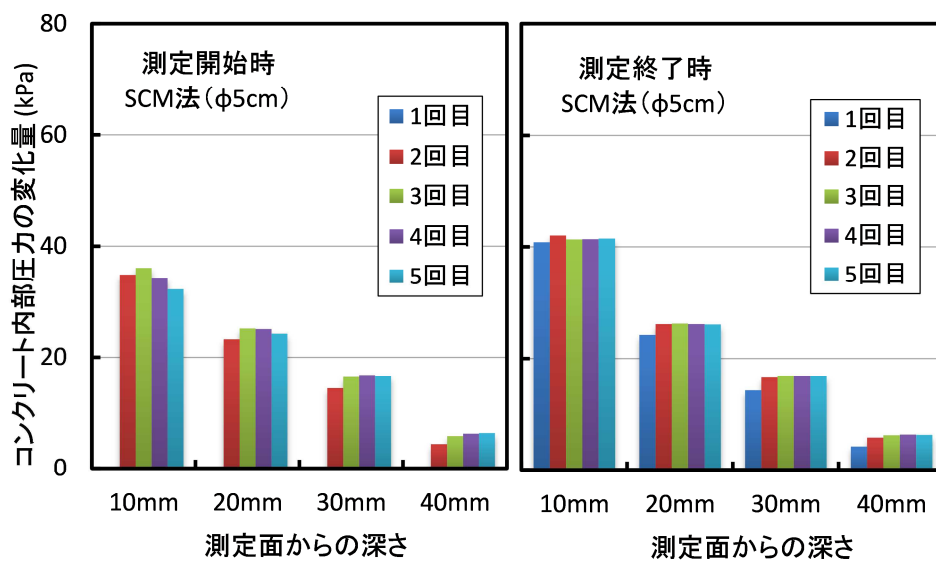


図 4.3-9 SCM 法 (φ 5cm) における測定開始時と終了時の内部圧力

(2) 測定時間の間隔による影響

これまでの結果から、同位置で連続して透気性試験を行った場合は、表層コンクリート内部に残存した圧力が 2 回目以降の透気性測定値に影響を与えていることが分かった。そこで、同一箇所における透気性の測定時に、直前の測定の影響を受けずにその位置の表層コンクリートの透気性を評価するために必要となる時間間隔（インターバル）を把握するための実験を行った。

ここでは、連続測定に供したものと同一図 4.3-1 に示した試験体を用いて実験を行った。透気性試験の種類についても、連続測定の場合と同様に、DC(TPT)法および SCM 法（ $\phi 10\text{cm} \cdot \phi 5\text{cm}$ ）の 3 種類とした。

各透気性試験における測定の時間間隔は、直前の測定終了から 15 分後・10 分後・5 分後・3 分後・1 分後および直後と、徐々に測定間の時間間隔を短くした。

DC(TPT)法による透気係数 kT および SCM 法（ $\phi 10\text{cm} \cdot \phi 5\text{cm}$ ）による透気指数 A.P.I. の時間間隔ごとの測定結果を図 4.3-10～図 4.3-12 に示す。

またこれらの透気性の測定と併せて、コンクリート内部の圧力を測定した結果を図 4.3-13～図 4.3-15 に示す。各図の最左の波形が測定時間間隔が 15 分後の圧力測定結果であり、その右側に直前の測定終了から 10 分後、5・3・1 分後、最右側に直後（連続測定と同条件）の波形が示されている。これらの圧力波形は連続測定の場合と同様に、透気性の測定値や表層コンクリート内部圧力の大きさはそれぞれの試験方法により異なるものの、波形の形状はいずれの試験方法においても類似していることが分かる。

図 4.3-16 および図 4.3-17 に、連続測定の場合と同様に、DC(TPT)法と SCM 法($\phi 5\text{cm}$)について、測定開始時および測定終了時におけるコンクリートの内部圧力を示す。

コンクリートの内部圧力に及ぼす時間間隔の影響は、測定開始時において、特に SCM 法において顕著であり、連続測定の結果と同様に直後の測定条件において大きな影響を受けている。しかし、DC(TPT)法においては直前の測定終了から約 10 分、SCM 法においては約 5 分の間に、表層コンクリートの深さ 40mm の位置においてコンクリート内部に残存していた直前の測定による圧力がほぼ初期の状態に復圧している。この時間の差は、試験時に作用している圧力の大きさの違いによると考えられる。

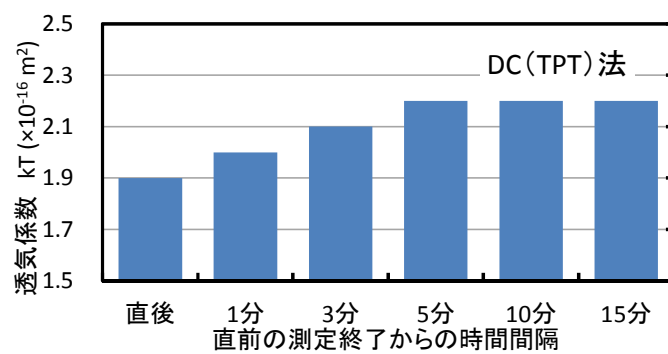


図 4.3-10 測定時間間隔と透気係数 DC(TPT) 法

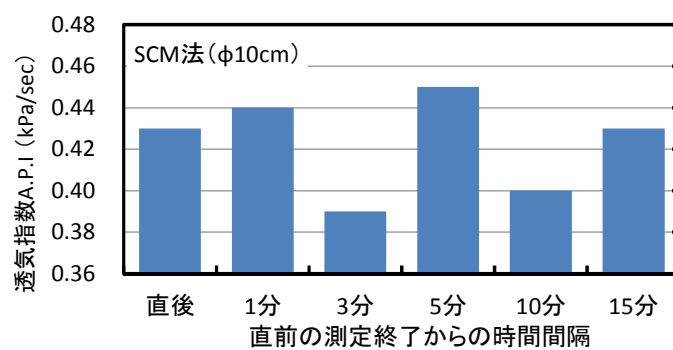


図 4.3-11 測定時間間隔と透気指数 SCM 法 (φ 10cm)

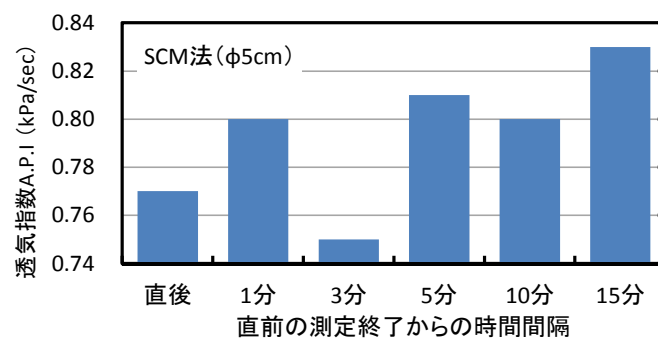


図 4.3-12 測定時間間隔と透気指数 SCM 法 (φ 5cm)

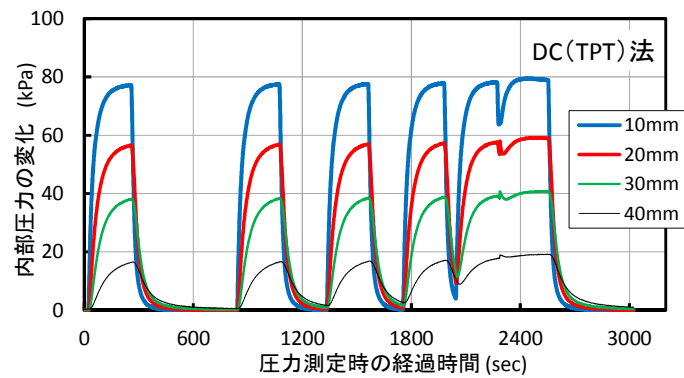


図 4.3-13 DC(TPT)法における測定時間間隔と内部圧力

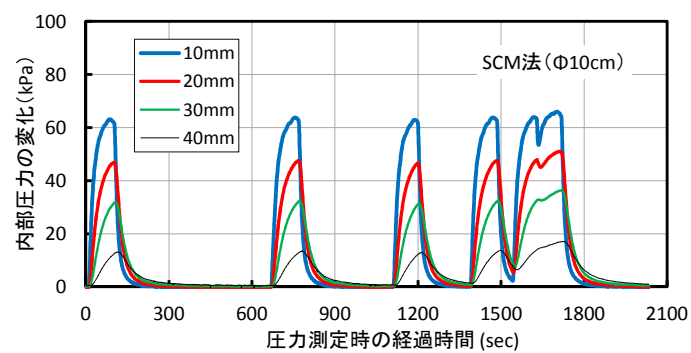


図 4.3-14 SCM 法 (φ 10cm) における測定時間間隔と内部圧力

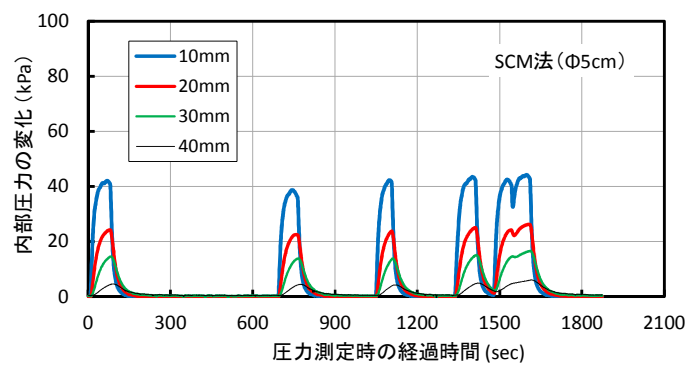


図 4.3-15 SCM 法 (φ 5cm) 測定時間間隔と内部圧力

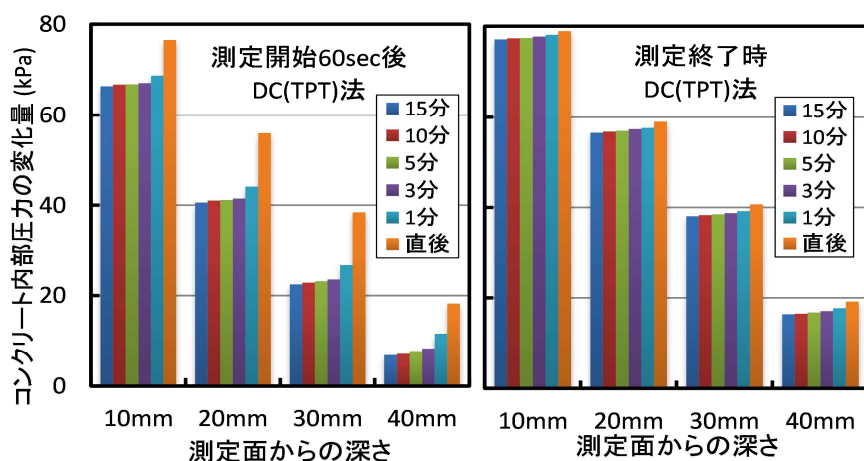


図 4.3-16 DC (TPT) 法による測定開始時と終了時の内部圧力

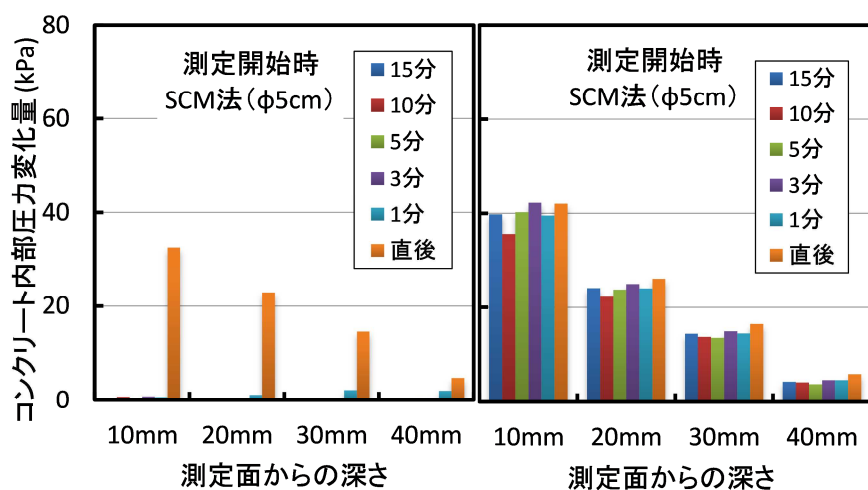


図 4.3-17 SCM 法 (φ5cm) における測定開始時と終了時の内部圧力

以上の内容と図 4.3-10～図 4.3-12 に示した透気性の測定値の両方を鑑みると、同一箇所において直前の測定の影響を受けずに表層コンクリートの透気性の評価を行うための測定終了からの時間間隔は、コンクリートの強度レベルによってやや差異が生じるもの推察されるが、概ね 10 分～15 分以上が適切であると考えられる。

4.4 透気試験機の測定精度確保のための点検方法に関する検討

4.4.1 はじめに

コンクリートの耐久性を評価する透気性試験は、様々な仕様のものが提案され、性能や問題点について多く検討されている。透気性試験による測定値は、表層コンクリートの品質、つまり細孔構造、内部に存在する僅かな打込み欠陥、表面の微細なひび割れなどの影響によって変動する。それに加え、例えば FIM 法のように透気性試験機の機器構成が異なる場合や、SCM 法ではチャンバー容積の相違、DC(TPT)法では使用状況によるチャンバーのコンクリート表面への密着状態の微妙な差によっても測定値が変動することになる。さらに、3章に示したように DC(TPT)法においても測定機による差やばらつきが生じることになる。

透気性試験については、反発度法におけるテストアンビルのような測定器が検定できるような、JIS Z 8103 : 2000「計測用語」に定義される標準器（ある単位で表された量の大きさを具体的に表すもので、測定の基準として用いるもの）[7]を用いた定量的な精度評価を実施することができない。

そのため、透気性試験機の測定精度や、同じ手法による透気性試験において試験機構成の異なる測定機の機械による測定値の差を定量的に評価できる標準機を見い出すことができれば、異なる試験機を用いて測定した透気性測定値をそれらの相関性を考慮して同じ基準を用いて表層コンクリートの透気性の評価が可能になると考える。

そこで、透気試験機に適用可能な検定器（標準機）を作製し、その有効性および透気性試験機の測定精度の検証、機差の評価、試験機の点検方法などについて検討を行う。

4.4.2 検定器の概要

試作した検定器の概要を図 4.4-1 におよび写真 4.4-1 に示す。検定器は、ニードルバルブ、圧力センサおよびアクリル板で構成される。使用した精密バルブは、正三角形スパイラルスリット溝構造を有した特殊形状をしており、ダイヤル回転数と流量との間に一定の線形性（ログリニア特性）があり、ダイヤル回転数 0.00～24.00 (0.1-1000 ml/min, 100kPa, 窒素ガス) の範囲のニードルバルブを用いた[8]。ニードルバルブのイメージ図を図 4.4-2 に、窒素ガスを用いた際のダイヤル回転数と流量との関係を図 4.4-3 に示す。

圧力センサは相対圧力（-100kPa, 分解能 0.1kPa）を測定できるものとし、データロガーを用いて透気試験時におけるチャンバー内の圧力変化を計測した。

DC(TPT)法の検定は、チャンバーを試験面であるアクリル板に装着し、内側のチャンバーへの流量のみを制御して計測した。また、ドリル削孔法の検定は、写真 4.4-1 に示したような削孔形状を模擬したアクリル製の専用チャンバー（内径 $\phi 10$ mm×長さ 50 mm）を作製し、試験面にシリコングリスを用いてそれを固定、密着させて測定した。

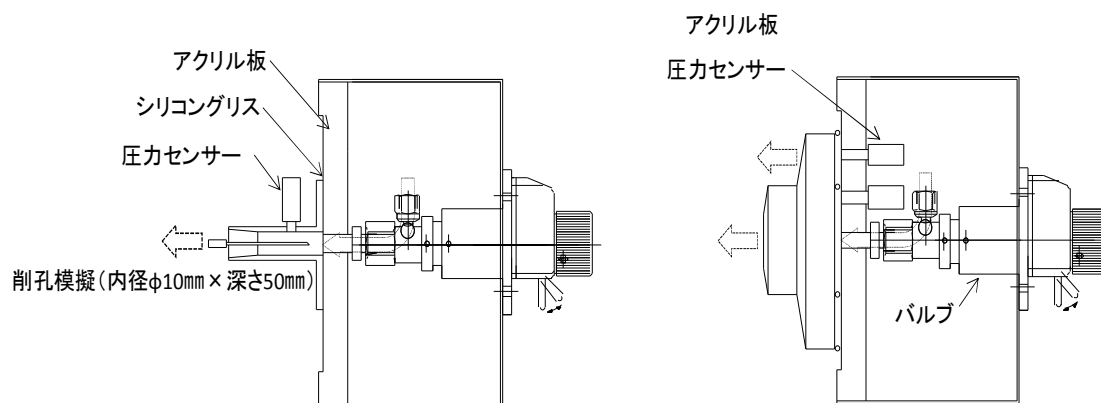


図 4.4-1 検定器の概要 (左：ドリル削孔法・右：DC (TPT) 法)

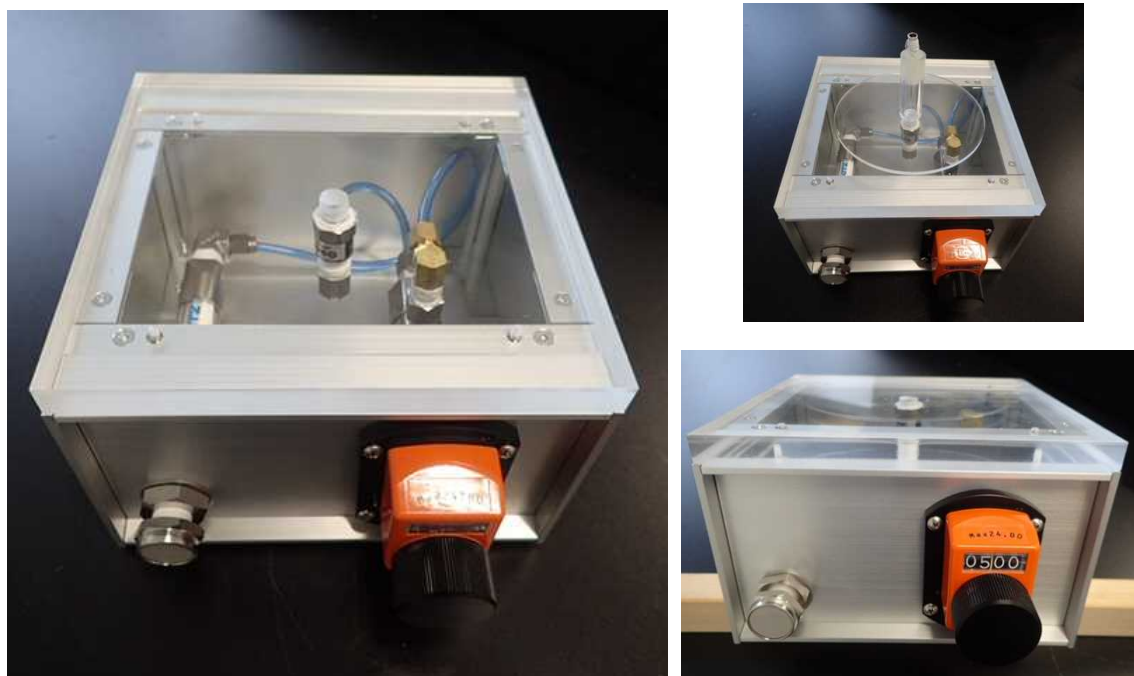


写真 4.4-1 試作した検定機器

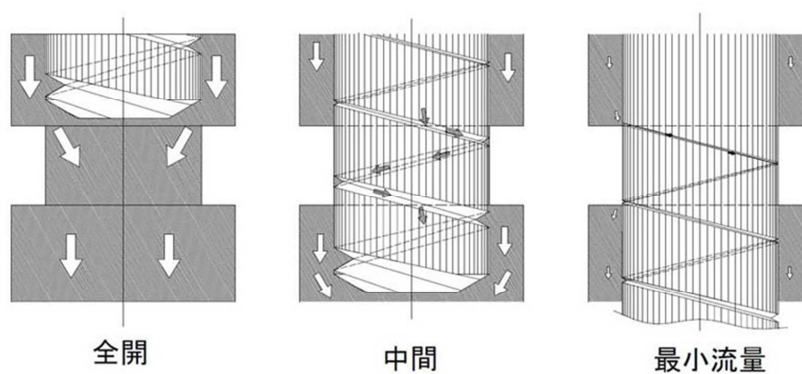


図 4.4-2 ニードルバルブのイメージ図

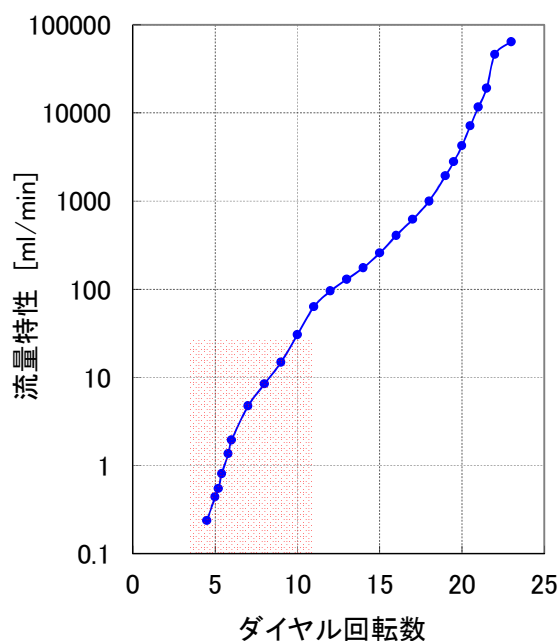


図 4.4-3 流量とダイヤル回転数の関係(窒素ガス)

4.4.3 検定器を用いた透気性試験機の点検方法

試作した検定器を用いて、ダイヤル回転数を 2.00 から 10.00 まで 1.00 ピッチで順次増加させ、チャンバー内もしくはアクリル製の模擬ドリル削孔内への空気の流入を制御することによって、DC(TPT)法および FIM 法による透気性を測定した。DC(TPT)法試験機では 20 分の暖気運転を実施後、660sec 時のキャリブレーション結果が 5.0mbar 以下あることを確認した上で試験を実施した。

試験機の測定精度および測定値の再現性の確認については、DC(TPT)法による 1 台の試験機を用いて 10 回連続して測定した結果を用いて評価した。

また、機差の確認については、DC(TPT)法については、新品相当機から高い使用頻度までの、同じ計測システムではあるが接続ホースなどの機器構成のみ若干異なる 10 台の試験機 (G,R,A,H1,H2,C,N,T,D,F)を用いて、試験機間の測定値の差の検討を行った。さらに、ホース長さや径、シリコン栓の形状など機器構成が異なる 3 台の FIM 法による透気性試験機 (3 章に示した FIM-A, FIM-N, FIM-G の 3 種類)を用い、測定値の差および測定精度の検証を実施した。

これらの測定結果から、試作した検定器の適用性および有効性について検討し、透気性試験機の点検方法について考案する。

4.4.4 測定結果および考察

(1) DC(TPT)法における透気性の測定精度に関する検討

1 台の DC(TPT)法試験機を用いて、各ダイヤル回転数において 10 回繰り返して測定した結果を図 4.4-4 に示す。凡例の数値が測定回を示している。連続測定におけるダイヤル回転数は 0.5 ずつ増加させた。

ダイヤル回転数を増加させることによって DC(TPT)法における内部チャンバー内への空気の流入量が増加するのに伴い透気係数 kT が徐々に大きくなり、ダイヤル回転数が 6.0 以上の領域において 5.5 以下の部分とは線形性が異なり、 kT が直線的に増加していることが認められる。この関係は、図 4.4-2 に示した流量特性とダイヤル回転数の関係と類似している[8]。

図 4.4-5 に、10 回の連続測定におけるダイヤル回転数ごとの透気係数の変動係数を示す。変動係数の全平均は 20% 程度であるが、ダイヤル回転数 5.5 以上（透気係数では $0.26 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以上）においては、変動係数が 10% 以下となっている。

一方、ダイヤル回転数 3.5～4.5 の間の変動係数は、40% を超えており、相対的に大きな値となった。ここで、図 4.4-5 に測定開始 60 秒後の圧力の経時変化を示したが、ダイヤル回転数が 4.5 以下の範囲は、透気性測定中のチャンバー内の圧力変化が 0.5kPa 以下の微少な圧力変化領域であることが分かる。この領域は透気性がかなり低い領域であるため

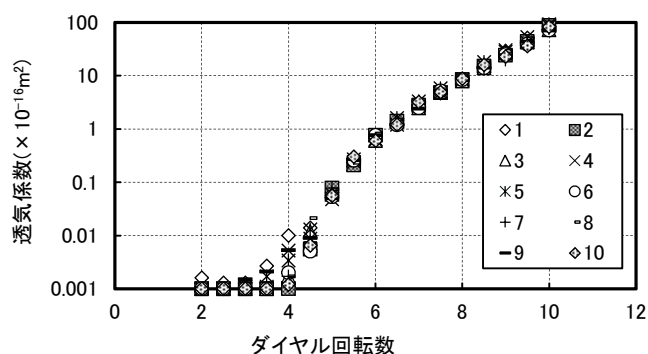


図 4.4-3 DC(TPT)法における同一試験機での透気係数とダイヤル回転数

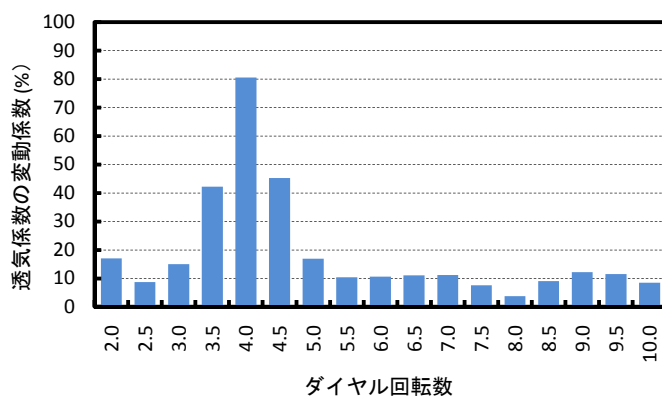


図 4.4-4 透気係数の変動係数とバルブ開放値の関係

に、チャンバーと試験機のホース接続部やチャンバーとコンクリートの接触面のパッキンの劣化に起因する若干の漏気が透気性の測定に影響したことにより、その領域の透気係数の変動係数が極端に大きくなったと考えられる。つまり、ダイヤル回転数 4.5 における透気係数の平均は概ね $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下であり、この値は一般的なコンクリートにおいて極めて緻密であり中性化がほぼ進行せず表層コンクリートからの物質透過による劣化は生じにくい領域である[9]ことを考慮すると、この変動量は、DC(TPT)法を用いた透気性の評価には大きな影響を与えないものと考えられる。

また、DC(TPT)法による透気試験機 10 台を用いて検定器により透気性をそれぞれ測定した。ダイヤル回転数と透気係数とその変動係数を図 4.4-6 に示す。

変動係数の全平均は約 20% であるが、ダイヤル回転数 4.5～5.0 以上の範囲での変動係数は 10% 以下、それ以下の領域では変動係数が大きくなっている。これは、1 台での連続測定の結果と同様に、微少な透気領域においては試験機の使用頻度や測定環境によって生じる可能性のある試験機の経路内での若干の漏気が透気性測定値に大きく影響したためと考えられる。

これより、DC(TPT)法による試験機の測定精度の点検については、透気係数が $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以上に相当するダイヤル回転数 4.5～5.0 程度以上の領域において実施することによって、測定値の直線性の確認を行うことが有効な手法であると考えられる。

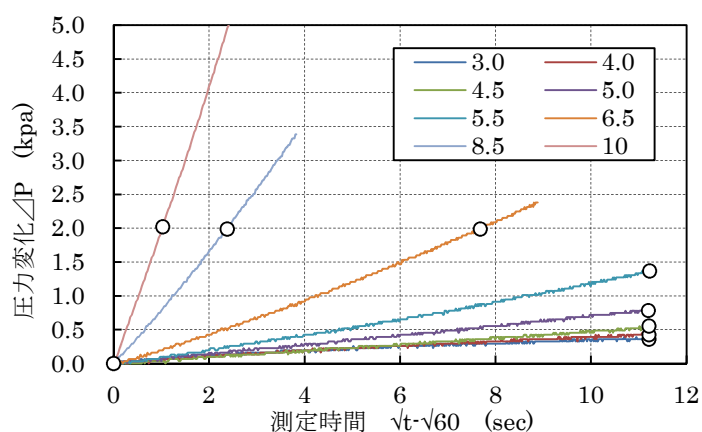


図 4.4-5 内部チャンバーの圧力経時変化

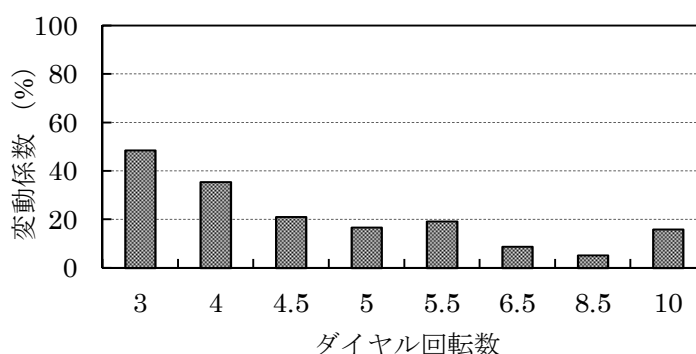


図 4.4-6 10 台の DC(TPT)法試験機によるダイヤル回転数と変動係数 kT の変動係数

(2) FIM 法における機差の検定と測定精度の点検

FIM 法における 3 台の試験機（3 章に示した FIM-A、FIM-N、FIM-G）を用いて、写真 4.3-1 に示した検定器によって透気速度 P.V.を測定した結果を図 4.4-7 に示す。

ダイヤル回転数と透気速度には線形性が認められるが、□のマーカで示した FIM-A のみダイヤル回転数 6.0 付近以下の範囲において測定値が乖離している。この領域は上記 4.4.4 の(1)に記した通り透気性の低い領域であり、この乖離の原因は、試験機を構成するホース接続部などからの漏気起因する現象と考えられる。

図 4.4-7 に示す検定器によるバルブ開放値と FIM 法による透気速度の関係から、ホースなど測定機の経路から漏気が生じている場合は、FIM-A に示されるようにバルブ開放値の低い領域つまり透気性の低い緻密な領域において透気速度 P.V.が顕著な影響を受ける。漏気がない場合は FIM-A'や-G、-N のような直線関係が得られるため、試験前に検定器使用して点検することによって正確な測定が可能となる。加えて、シリコン栓とコンクリート面に充填するエポキシ樹脂接着部からの漏気が生じないように配慮することも重要である。

つまり、FIM-A において装置の整備を実施し漏気の可能性のあるホース接続部の気密性を確保し、再度検定器により測定した結果、図 4.4-7 に FIM-A' として■で示したようにその他の FIM 法と同等の関係が得られた。

このことから、透気性試験の前に検定器で透気速度の測定値をダイヤル回転数を変えて数点確認しておくことによって、図 4.4-7 に示した相関性との対比により、FIM 法による試験機の漏気の有無や測定精度、さらには複数台の試験機の機差を定量的に把握することができる。

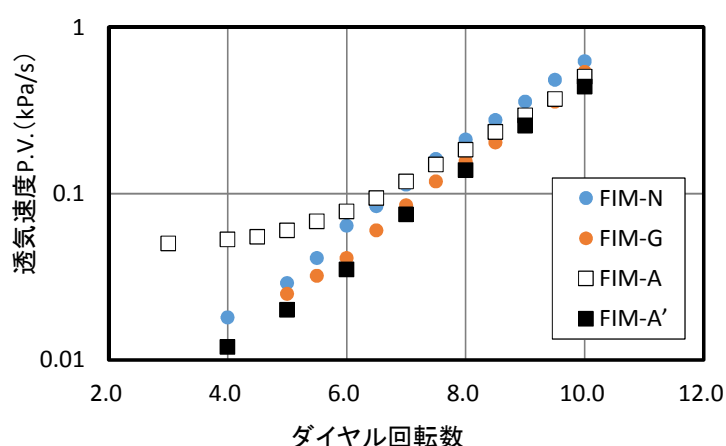


図 4.4-7 3 台の FIM 法試験機による透気速度とダイヤル回転数

4.5 透気性測定値の取扱いについて

4.5.1 はじめに

3章に示した DC(TPT)法による 8 台の試験機を用いた共通試験における透気係数 kT の測定データを用いて、透気性測定値の評価方法および処置方法について、詳細には、Grubbs 棄却検定による特異値（特異値）の評価、測定値の平均値の計算方法、構造体コンクリートでの透気性試験におけるサンプリング数（測定点数）について検討する。

4.5.2 測定値の検定

表層透気性試験による透気性の測定値は、コンクリート表面に生じた微細なひび割れや、表層コンクリートに潜む局所的な打込み欠陥の存在などにより大きく変動することがある。そのため、局所的な異常値を含めて平均化して透気性さらには耐久性を評価すると、構造物全体としての耐久性を適切に評価できないおそれがある。

そこで、 N 個の測定値（本論では 8 台の試験機による 8 個の測定値）のうち、最大値または最小値を特異値（特異値）として棄却できるかどうかの判別を、JIS Z 8402-2 [10] による Grubbs の検定により行うこととした。具体的には、式(4-1)により統計値 T を求め、Grubbs の棄却検定表に基づき有意水準 5%（ $\alpha=0.05$ ）で棄却検定を行った。

$$T = \frac{n - m}{\sigma} \quad (4-1)$$

ここに、

T : 統計値

n : 各測定位置における 1 回の測定値

m : 同じ位置で測定した N 個の測定値の平均

σ : 同じ位置で測定した N 個の測定値の標準偏差

棄却検定表を表 4.5-1 に示す。

表 4.5-1 グラブズ・スミルノフの棄却検定表

N	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	n	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
3	1.153	1.155	8	2.032	2.221
4	1.462	1.493	9	2.110	2.323
5	1.671	1.749	10	2.176	2.410
6	1.822	1.944	11	2.234	2.484
7	1.938	2.097	12	2.285	2.549

図 4.5-1 に、3 章に示した共通試験における呼び強度ごと 6 点の測定位置に対して、8 台の DC(TPT)法による透気性試験機を用いて測定した 8 個の透気係数を相乗平均した値 kT と、その変動係数を呼び強度ごとに示す。

相乗平均は、有意水準 5%において検定した結果、特異値と判定される測定値を棄却する前と後でそれぞれ算出し、図中の点線（棄却前）と実線（棄却後）で併記している。

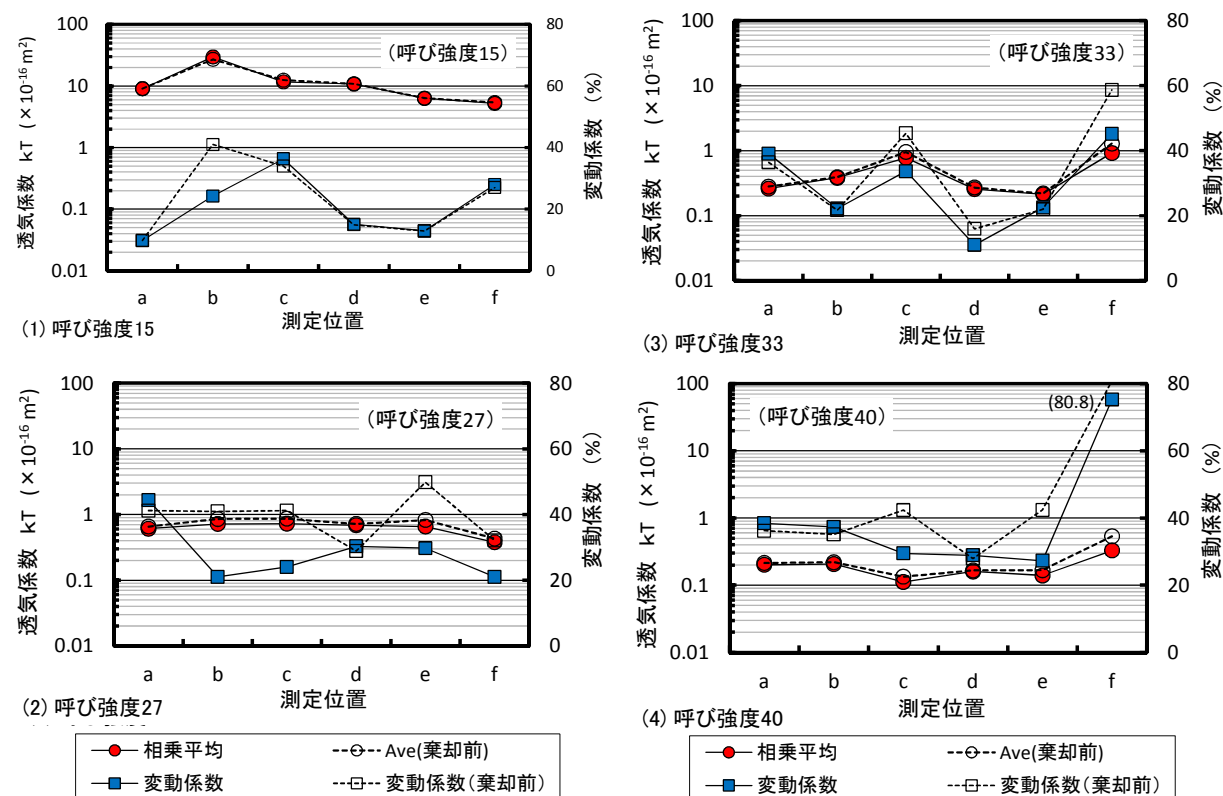


図 4.5-1 各測定位置における 8 台の試験機による透気係数 kT の平均値とその変動係数

表 4.5-2 同一試験機における測定位置の違いに対する Grubbs の棄却検定の結果

試験機 記号	測定位置 (呼び強度 15)					
	a	b	c	d	e	f
N	9.40	28.0 *	18.00	10.00	6.40	4.30
D	8.60	23.0	17.00	11.00	5.50	4.50
C	10.00	3.70	5.80	12.00	7.00	3.80
E	8.70	26.0 *	12.00	9.90	5.50	7.80
H	7.30	23.0 *	7.90	8.00	5.50	5.60
A	10.00	40.0 *	12.00	13.00	7.40	3.70
T	10.00	42.0 *	17.00	13.00	7.60	6.50
R	8.70	31.0 *	10.00	10.00	6.00	7.00
試験機 記号	測定位置 (呼び強度 27)					
	a	b	c	d	e	f
N	0.99	1.00	0.76	0.99	0.91	0.49 *
D	0.65	0.56	0.99	0.91	0.63	0.34
C	0.49	0.73	0.57	0.81	0.39	0.43
E	0.53	0.72	1.00	0.92	0.51	0.40
H	0.46	0.61	0.61	0.37	0.90	0.29
A	0.55	0.90	0.73	0.53	0.88	0.48
T	1.20	1.70	1.70	0.56	1.80	0.74
R	0.37	0.61	0.55	0.66	0.58	0.28
試験機 記号	測定位置 (呼び強度 33)					
	a	b	c	d	e	f
N	0.38	0.53	1.20	0.36	0.28	3.00 *
D	0.35	0.31	0.76 *	0.24	0.21	0.26
C	0.13	0.41	0.53	0.23	0.20	1.20 *
E	0.24	0.42	0.99	0.29	0.22	1.70 *
H	0.22	0.28	0.47	0.22	0.18	0.96 *
A	0.27	0.39	1.10	0.30	0.22	1.30
T	0.46	0.49	1.90 *	0.27	0.30	1.10 *
R	0.19	0.30	0.69	0.25	0.14	0.78
試験機 記号	測定位置 (呼び強度 40)					
	a	b	c	d	e	f
N	0.31	0.35	0.18	0.23	0.22	1.50 *
D	0.16	0.21	0.12	0.25	0.13	0.12
C	0.16	0.30 *	0.14	0.16	0.14	0.17
E	0.25	0.29	0.10	0.16	0.12	0.50 *
H	0.16	0.14	0.09	0.14	0.11	0.36 *
A	0.14	0.17	0.11	0.16	0.18	0.37 *
T	0.36	0.13	0.26	0.11	0.33	0.93 *
R	0.17	0.17	0.07	0.12	0.11	0.33 *

図 4.5-1 から, Grubbs の検定によって測定位置ごとに特異値を棄却することによって, 透気係数の平均値の変化は小さいが, 変動係数が顕著に低減していることが確認できる。

次に, 表 4.5-2 に, 同じ試験機で測定した 6 カ所 (a,b,c,d,e,f) の測定値に対して Grubbs の棄却検定を行った結果を呼び強度別に示す。表中の数値は透気係数 kT の測定値を示しているが, 数値に * (アスタリスク) を付した値が, 同じ試験機における測定位置間での測定値に対する検定の結果, 有意水準 5% ($\alpha=0.05$ において 1.822 以上) で特異値 (特異値) と判別された測定位置である。図 4.5-1 に示した透気係数 kT は, 呼び強度 15 では測定位置 b, 同様に呼び強度 33 では測定位置 c と f, さらに呼び強度 40 では測定位置 f における測定値が, 多数の試験機において特異値として棄却される結果となった。

これらの位置の測定値が棄却された原因は, 同じ測定位置における試験機間での測定値の差異が比較的小さい傾向にあることから, 打込み時の締固めやブリーディングなどの影響によって, 表層コンクリートの密実性がその他の測定位置と異なったことによるものと考えられる。図 4.5-1 に示す相乗平均の測定位置間の変化を俯瞰しても, 棄却された測定位置の透気係数 kT は, その他の測定位置の kT とはやや乖離していることが伺える。

さらに, 表 4.5-3 に, 図 4.5-1 に示した呼び強度ごとの測定位置間の透気係数 kT の有意差の有無を, t 検定により評価した結果を示す。「+」は有意水準 0.5% で有意差あり, 「++」は有意水準 1% で有意差あり, 「0」は有意差無しを表す。

呼び強度 15 については貧調合かつ低強度であり, 表層コンクリートの品質の差異がブリーディングなどの影響によってその他の呼び強度のコンクリートよりも大きくなるため, 有意水準 1% または 5% で有意差ありと評価される測定位置の組合せが多くなっている。また, 呼び強度 27 の測定位置 f や, 呼び強度 33 の測定位置 b については, その測定位置のみが, その他の測定位置の表層コンクリートの品質とは異なる特異点であったとみなすべきことが認められる。

表 4.5-3 呼び強度別の測定位置間での t 検定結果

呼び強度	測定位置					呼び強度	測定位置				
15	b	c	d	e	f	33	b	c	d	e	f
a	++	0	+	++	++	a	+	++	0	0	++
b	-	++	++	++	++	b	-	++	++	++	++
c	-	-	0	++	++	c	-	-	++	++	0
d	-	-	-	++	++	d	-	-	-	0	++
e	-	-	-	-	0	e	-	-	-	-	++
呼び強度	測定位置					呼び強度	測定位置				
27	b	c	d	e	f	40	b	c	d	e	f
a	0	0	0	0	+	a	0	+	0	0	0
b	-	0	0	0	++	b	-	++	0	+	0
c	-	-	0	0	++	c	-	-	+	0	0
d	-	-	-	0	++	d	-	-	-	0	0
e	-	-	-	-	++	e	-	-	-	-	+

+: 有意水準 5% (+: 1%) で有意差あり, 0: 有意差なし

以上の結果から、今回の共通試験に用いた実大コンクリート壁の2面程度の面積を構造物の耐久性調査の範囲と仮定すると、得られた測定値を Grubbs の棄却検定に基づき異常値（特異値）を選別した後に相乗平均することによって、表層コンクリートの透気性を概ね適切に評価することができると考えられる。

一方、平均値の取扱いとして、本論では算術平均ではなく、透気係数の性質上、相乗平均を採用している。計算式を下記に、さらに図 4.5.2 に、両者の計算値を比較して例示する。これらの値は、共通試験に用いた実大コンクリート壁の DC(TPT)法による Grubbs の棄却検定後の平均値である。

$$\text{算術平均} : (N1 + N2 + \dots + Nn) / n$$

$$\text{相乗平均} : (N1 \times N2 \times \dots \times Nn)^{1/n}$$

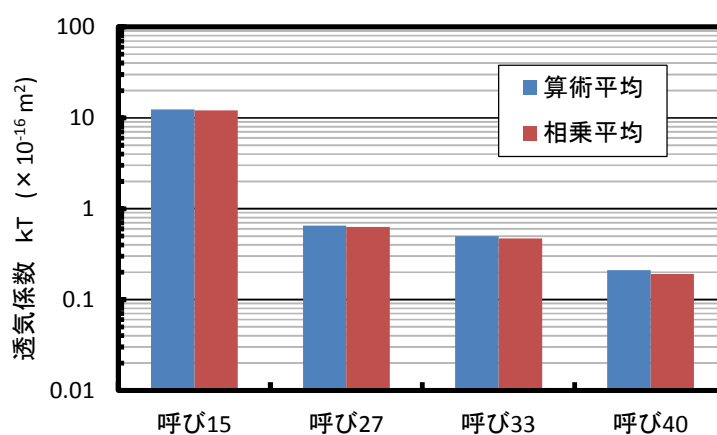


図 4.5-2 算術平均と相乗平均の比較

4.6 測定点数（サンプリング数）に関する検討

4.6.1 はじめに

実大コンクリート壁 2 体程度の面積をコンクリート構造物の耐久性調査のための 1 つの調査範囲と仮定して、表層コンクリートの品質の違いを含めた呼び強度ごとの透気係数 kT の変動を調査するために、3 章に示した共通試験では、同一呼び強度の 2 体の実大コンクリート壁に対して測定位置を 6 カ所とした。

ここでは、構造体コンクリートの透気性を原位置で評価する際の測定点数の決定に関する考え方について検討する。ここでは透気性試験におけるサンプリング数と試験結果の評価方法について基本的な考え方を示す。

4.6.2 構造体コンクリートを評価する際のサンプリング数の考え方

この手法はコンクリートの調合設計の考え方に基本的に準じる。ただし、サンプルデータから母集団の平均値と標準偏差を推定する点が異なっており、この点において母集団の実態を数理的に評価でき、かつ実施可能なサンプリング数を決定することが本評価の要諦（キーポイント）となる。

(1) 母集団（部材）透気性の平均値の信頼区間[11]

母集団の分散が正規（ガウス）分布することを仮定すれば、 $(X - \mu) / (\sigma / n^{0.5})$ の確率分布は、自由度 $(n-1)$ の t 分布に従う。これより、確率変数 $(X - \mu) / (\sigma / n^{0.5})$ について、式(4-2)に示すような確率的表現が可能となる。

$$P\left\{-t_{\alpha/2, n-1} < \frac{(X - \mu)}{(\sigma / n^{0.5})} \leq t_{\alpha/2, n-1}\right\} = 1 - \alpha \quad (4-2)$$

ここに、

μ : 母集団の推定平均値

$t_{\alpha/2, n-1}$: 自由度 $(n-1)$ の t 分布の確率に対応する値

X : サンプルの平均値

σ : サンプルの標準偏差

α : 有意水準（95%信頼区間を求める場合、 $\alpha = 0.05$ ）

式(4-2)を整理して、例えば上側信頼限界を問題とした場合、 $(1 - \alpha)$ 信頼限界は式(4-3)のように示される。

$$\langle \mu \rangle_{1-\alpha} = X \pm t_{\alpha/2, n-1} \frac{\sigma}{(n-1)^{0.5}} \quad (4-3)$$

(2) 母集団（部材）透気性の標準偏差の不偏推定値

母集団の推定標準偏差は下式(4-4)で示される。ここに右辺の a はサンプル数 n に応じて表 4.6-1 の値をとる。

$$E(\sigma') = a \cdot \sigma \quad (4-4)$$

表 4.6-1 サンプル数 n に応じた標準偏差の補正係数 a

サンプル数 n	a
2	1.77
3	1.38
4	1.25
5	1.19
6	1.15
7	1.13
8	1.11
9	1.10
10	1.08
20	1.04
30	1.03

これより、サンプル数とサンプルの平均値、標準偏差より、母集団の分布が、ある信頼区間をもって求められる。

母集団の上側信頼限界において、例えば RILEM-Cembureau 法[7]における "Average" の品質上限[8]である $700(\times 10^{-18})\text{m}^2$ を超える確率が 4%以下となるためには、下式(4-5)を満足する必要がある。すなわち、

$$\begin{aligned} Cr &= \langle \mu \rangle_{1-\alpha} + 1.73 E(\sigma') \leq 700 \cdot 10^{-18} \\ \Leftrightarrow X &\leq 700 \cdot 10^{-18} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{\sigma}{(n-1)^{0.5}} - 1.73 \cdot a \cdot \sigma \end{aligned} \quad (4-5)$$

ここで、仮にサンプル群の平均値を $500(\times 10^{-18})\text{m}^2$ とし、サンプル群の標準偏差を $5\sim 100(\times 10^{-18})\text{m}^2$ に変化させた場合の、サンプル数 n と Cr の関係は図 4.6-1 に示すものとなる。同図より、サンプル数が 3 程度と少ない場合、特に標準偏差の大きい場合において母集団（部材）の推定平均値および推定標準偏差を過大に見積もる必要のあることが示されている。この値はサンプル数の増加とともに一定の値 ($500(\times 10^{-18})\text{m}^2$) に収束するが、部材全体の評価を目的とした場合のサンプル数としては、経験的に実施可能な回数の観点も考慮して、6 回を一応の目安とすることが考えられる。

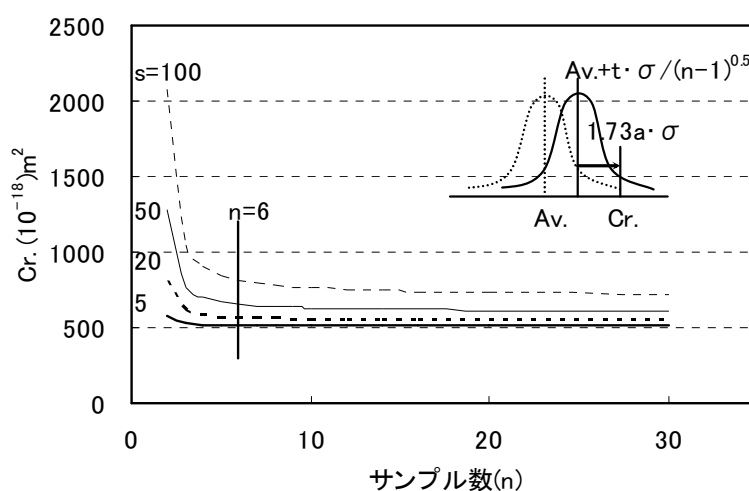


図 4.6-1 サンプル数 n と基準 Cr の関係

4.7 まとめ

4 種類の実大コンクリート壁に国内外で研究されている各種の透気性試験を適用し、それぞれの試験結果の相関性や透気性測定値の変動係数などについて検討するために共通試験を実施した。また、透気性試験における繰返し測定および試験機の点検方法に関する検討を行った。得られた結果を以下に述べる。

- (1) DC(TPT)法における透気係数 kT の変動係数は、測定機の差のみによるものが 25%、実大コンクリート壁での 6 点の測定値を平均した場合には平均 65%である。これより、コンクリートの表層品質の違いによる透気係数 kT の変動係数は 40%程度となり、既存 RC 構造物の中性化深さの変動係数と同程度である。
- (2) FIM 法における透気速度 $P.V.$ の変動係数は約 35%程度であり、上記(2)に示した DC(TPT)法によるコンクリートの表層品質の違いに起因する変動係数の大きさと概ね一致する。
- (3) DC(TPT)法において、同じコンクリートから 6 カ所で測定した透気係数 kT の平均値は圧縮強度との相関が高い。また FIM 法は SCM 法と比較して圧縮強度との相関が極めて高く、圧縮強度の変化に対する透気速度 $P.V.$ の変化も顕著となる。
- (4) ダブルチャンバー法もしくはシングルチャンバー法において同一箇所でも繰返し測定を行う場合、透気性測定値が直前の試験による影響を受けないようにするためには、試験間の時間間隔を 10～15 分程度以上とすれば良い。
- (5) DC(TPT)法による試験機の測定精度の点検については、透気係数が $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以上に相当するダイヤル回転数 5.0 程度以上の領域において実施することによって、測定値の直線性の確認を行うことが有効な手法である。
- (6) 透気性試験の前に検定器を用いてダイヤル回転数を変えて透気速度の測定値を数点確認しておくことによって、FIM 法による試験機の漏気の有無や測定精度、さらには複数台の試験機の機差を定量的に把握することが可能になる。
- (7) 試作した検定器によって、透気性試験機の測定精度や試験機の劣化の程度、機差の確認、測定前の漏気の有無の点検などが可能となること、また、試験機間の検量線を整備することによって異なる透気性試験の結果の相互評価が可能となることなど、検定器を透気性試験に適用することの有効性が確認できた。

以上の結果から，本研究で使用した透気性試験機は，表層コンクリートの品質を適切に評価していると考えられ，得られた透気性試験における測定値は中性化の進行評価に関する有効な指標として扱うことができると考えられる。

次に，透気性測定値の評価方法および処置方法について，詳細には，Grubbs 棄却検定による特異値（特異値）の評価，測定値の平均値の計算方法，構造体コンクリートでの透気性試験における測定点数（サンプリング数）について検討した結果を以下に述べる。

(8) Grubbs の棄却検定に基づき異常値（特異値）を選別した後に相乗平均することによって，表層コンクリートの透気性を概ね適切に評価することができると考えられる。

(9) 部材全体の評価を目的とした場合のサンプル数としては，経験的に実施可能な回数の観点も考慮して，6 回を一応の目安とすると良いことが考えられる。

ここで，評価目的に応じた透気性の評価値を得るためのフローを図 4.7-1 に示す。本論においては，局所的な欠陥や品質のばらつきを検知する目的よりも，構造部材としての平均的な評価を行うことを主眼としている。

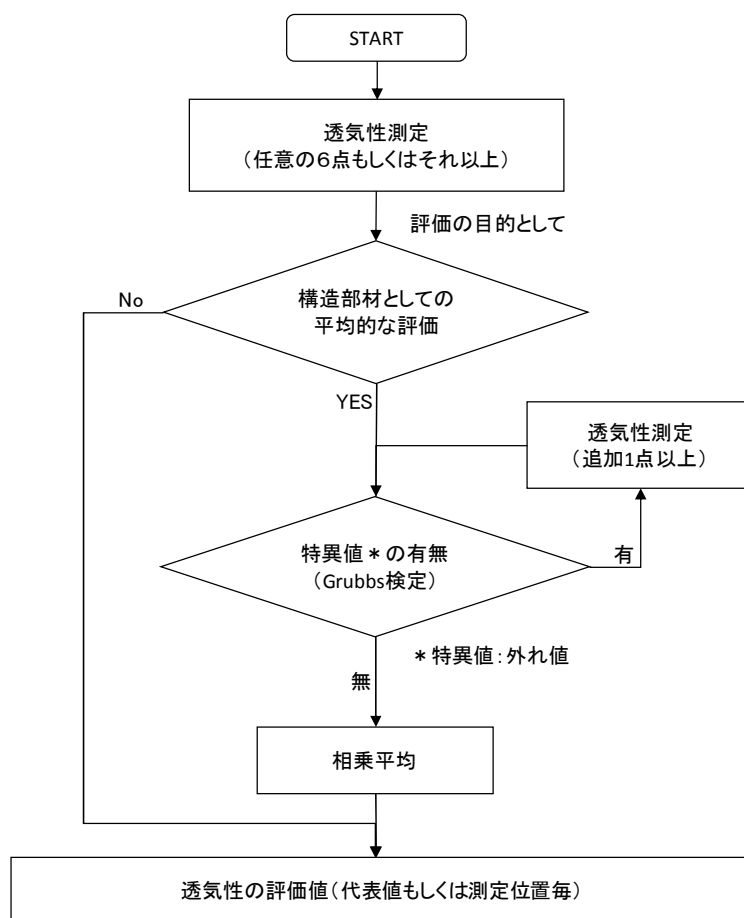


図 4.7-1 評価目的に応じた透気性評価のためのフロー

【第4章の参考文献】

- [1] 平松和嗣：既存RC建物構造体の実用的な耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.831-836, 2007.7
- [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造物の耐久設計施工指針(案)・同解説，p.108, 2004.3
- [3] 田中章夫，今本啓一，下澤和幸，山崎順二：ダブルチャンバー法を用いた既存鉄筋コンクリート造建築物の中性化予測に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1691-1696, 2011.7
- [4] Kei-ichi Imamoto, Kazuyuki Shimozawa, Masaru Nagayama, Junji Yamasaki and Akio Tanaka: Relationship between air permeability and carbonation progress of concrete in Japan PRO 89: RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability, pp.325-332, Zagreb, Croatia, 2014.
- [5] 今本啓一，山崎順二，下澤和幸，永山勝，二村誠二：構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性の検討，日本建築学会構造系論文集，第607号，pp.31-38, 2006.9
- [6] 野中英・湯浅昇：ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案，日本建築学会構造系論文集 第79巻第700号, pp.689-696, 2014年6月
- [7] JIS Z 8103 : 2000 「計測用語」，日本工業標準調査会
- [8] 前田 真人:10万倍以上の流量範囲を微調節可能にした正三角形のスパイラル溝構造，日本工業出版「配管技術」 Vol.51(日工 No.2009.1.08.50),(2009)
- [9] Roberto Torrent, Frank Jacobs : Swiss Standard SIA 262: 2003, A step towards performance-based specifications for durability, Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling, pp.532-539, Toulouse, France, 2009.6.
- [10] JIS Z 8402-2, 7.3.4
- [11] 高橋 磐郎他：統計解析，培風館.

第 5 章

打放し面での透気性とかぶり厚さによる
中性化進行評価に基づく耐久性評価

第5章 打放し面での透気性とかぶり厚さによる中性化進行評価に基づく耐久性評価

5.1 はじめに

かぶりコンクリートの品質は、使用材料や調合条件だけでなく、施工時の締固めの程度、収縮ひび割れの存在、養生方法などの施工条件によって大きな影響を受ける。そのため、RC 構造物の耐久性に重要な役割を担うかぶりコンクリートの原位置における物質浸透性を適切に評価することは、構造物の竣工時点での耐久性の評価、経過年数に応じた構造物の寿命予測、補修時期などの立案のために有用な情報となることは前述の通りである。

本章では、水セメント比 30～100%のコンクリート供試体を用いて、RC 構造物の原位置での試験に適用できると考えられるドリル削孔法（FIM）およびシングルチャンバー法（SCM）による透気性試験に加えて、透気性試験のベンチマークとして位置付けられている RILEM-CEMBUREAU 法による透気性試験を行った。

また、呼び強度 21～36 の範囲の 5 種類のコンクリートを用いて実大 RC 壁試験体を作製して透気性試験を行い、実大 RC 壁における透気性試験値の変動量を調査した。

ここでは、まず、室内試験練りにより作製したコンクリート供試体における透気性と中性化深さの関連性を把握し、これらの関係に基づいた RC 構造物の耐久性評価や寿命予測のチャートの案を示す。さらに、実大 RC 壁における透気性試験のデータサンプリング手法、計画供用期間と部材のかぶり厚さに応じた透気性試験値の閾値についても検討する。

5.2 本実験に適用した透気性試験の種類

本実験に適用した表層透気性試験は、ドリル削孔法（FIM-A および FIM-G）およびシングルチャンバー法（SCM-R）に加えて、透気性試験のベンチマーク試験として位置付けられている RILEM-CEMBUREAU 法の 3 種類であり、ダブルチャンバー法（DC(TPT)）は実施していない。なお、試験方法の詳細や透気性測定値の算出方法は、3 章に詳細に示した通りである。試験の状況を写真 5.2-1 に示す。

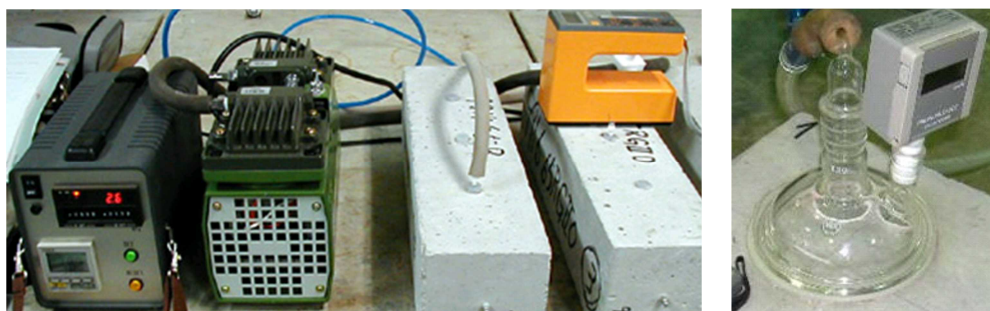


写真 5.2-1 FIM 法および SCM 法による透気性試験の状況

5.3 室内試験練りにより作製したコンクリート供試体による中性化深さと透気性

5.3.1 コンクリート供試体による実験の概要

水セメント比 30%～100%までの全 16 種類の計画調合によるコンクリートを用いて室内試験に供する供試体を作製し、JIS A 1153 に準じた促進中性化試験、材齢約 4 年までの雨がかりのない屋外自然暴露による中性化試験および透気性試験（FIM 法(FIM-A, FIM-G) および SCM-R 法）を行った。加えて、透気性試験値のベンチマークとなる RILEM 法による透気性試験を行った。コンクリートの使用材料を表 5.3-1 に、16 種類の調合計画を表 5.3-2 に示す。

コンクリート供試体の種類は、促進中性化深さ測定のための 10×10×40cm 供試体、縦打ちした高さ 30×幅 30×厚 10cm の小型試験体および RILEM 透気性試験のための φ15×30cm 円柱供試体とし、測定には円柱供試体を厚さ 5cm にスライスして試験に供した。

表 5.3-1 コンクリート供試体の使用材料

使用材料	品 質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント：密度3.16g/cm ³
水 (W)	上水道水
細骨材 (S)	山砂（枚方産）：表乾密度2.57g/cm ³ , FM：2.75
粗骨材 (G)	碎石（高槻産）：表乾密度 2.68g/cm ³ , 実積率：58.0%
混和剤 (Ad)	SP：ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
	AE：AE減水剤

表 5.3-2 コンクリート供試体の計画調合の概要

供試体記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad C×(%)
			W	C	S	G	
30-175	30	46.8	175	583	734	870	SP:1.2
40-175	40	45.7	175	438	754	933	SP:0.6
40-197	40	45.7	197	438	754	933	SP:0.6
40-219	40	45.7	219	438	754	933	SP:0.7
45-175	45	46.8	175	398	787	933	SP:0.6
50-162	50	47.4	162	360	805	933	AE:1.0
50-180	50	47.4	180	360	805	933	AE:1.0
50-198	50	47.4	198	360	805	933	AE:1.0
50-216	50	47.4	216	360	805	933	AE:1.0
55-180	55	48.2	180	327	831	933	AE:1.1
60-165	60	48.8	165	300	853	933	AE:1.3
60-180	60	48.8	180	300	853	933	AE:1.3
60-195	60	48.8	195	300	853	933	AE:1.3
65-180	65	50.2	180	277	887	917	AE:1.5
80-200	80	53.5	200	250	977	886	0
100-200	100	54.5	200	200	1018	886	0

(SP:高性能 AE 減水剤, AE:AE 減水剤)

5.3.2 中性化深さ試験の結果および考察

JIS A 1153 に準じた促進中性化試験による中性化速度係数と、材齢約 4 年までの雨がかりのない屋外自然暴露における中性化深さを図 5.3-1 に示す。なお、供試体 100-200 の材齢 26 週での促進中性化深さは材齢 13 週までの促進中性化深さから計算により求めた数値を用いた。

促進試験および材齢 4 年までの自然暴露による中性化深さは、水セメント比が大きいほど、また同一水セメント比において単位水量が大きいほど大きくなっている。

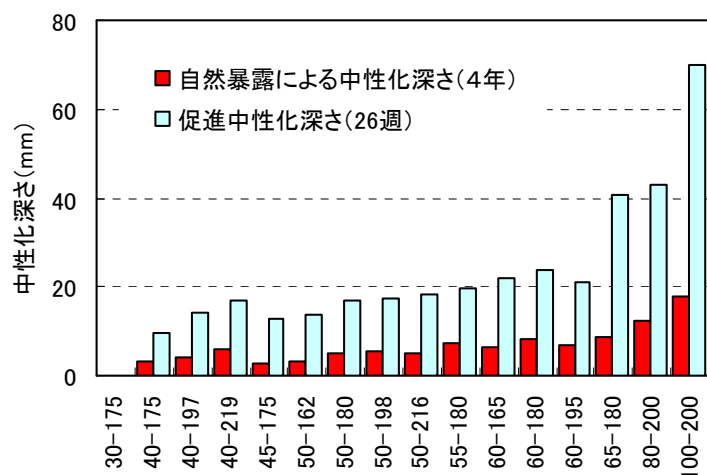


図 5.3-1 コンクリート供試体の中性化深さ試験結果

5.3.3 中性化速度係数と透気性試験値との関係

水セメント比 30%～100%の供試体において、材齢約 4 年の自然暴露試験体における中性化試験結果から求めた中性化速度係数と各種の透気試験結果との関係を図 5.3-2～図 5.3-5 に示す。

各図中にはそれぞれの回帰式 ($A = \alpha \ln(x) + \beta$) を示した。相関係数は $R=0.88\sim0.96$ となり、試験法によってやや差はあるがいずれも高い相関が認められた。この関係を適用することによって、中性化の進行の程度を透気性試験の結果から予測できることになる。

なお、透気性を評価したコンクリート供試体は全て同じ環境に静置していたものであるが、試験時の供試体の表面含水率は W/C が小さいほど大きくなる傾向にあり、図 3.2-6 に示したように $W/C65\%\sim W/C30\%$ において 2.3%～4.7%の範囲となっている。図 5.3-2～図 5.3-5 に示した回帰式は、 W/C などコンクリートの品質に起因する表面含水率の違いを含んだ透気性と中性化速度係数の関係を示している。

一方、図 5.3-2 および図 5.3-3 には、材齢 26 週までの促進中性化試験による中性化速度係数と、RILEM 法および FIM (FIM-A)法との関係を併せて示した。促進試験による中性化速度係数に対する材齢約 4 年までの自然暴露における中性化速度係数は概ね $1/10$ 程度 ($\sqrt{(0.035/5.0)}=0.084$) であった。

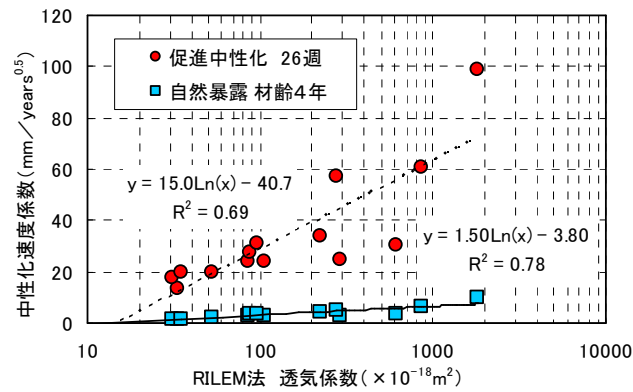


図 5.3-2 中性化速度係数と RILEM 法による透気係数 K の関係

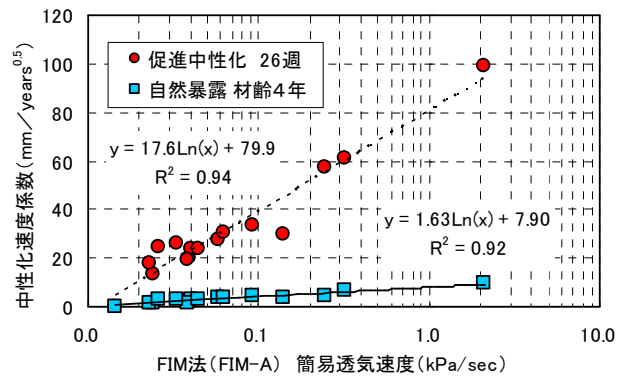


図 5.3-3 中性化速度係数と FIM-A 法による透気速度 P.V. の関係

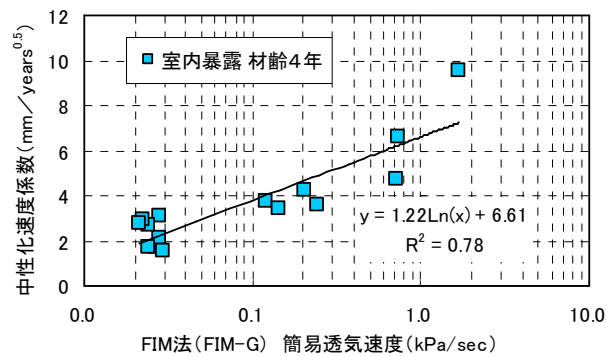


図 5.3-4 中性化速度係数と FIM-G 法による透気速度 P.V. の関係

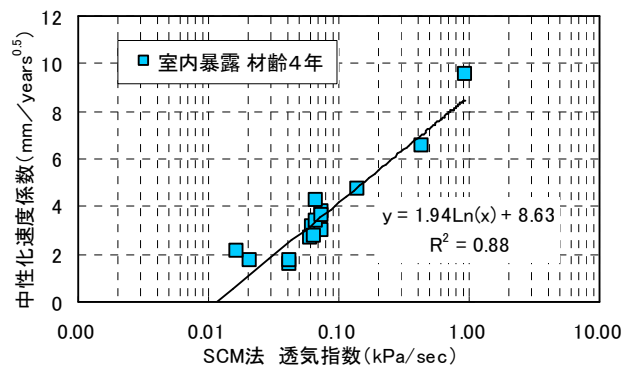


図 5.3-5 中性化速度係数と SCM 法による透気指数 A.P.I. の関係

5.3.4 透気性の評価値による中性化進行予測の考え方

図 5.3-6 に中性化進行予測のための中性化速度係数の導出のためのイメージ図を示す。ある部材から任意の 6 点をサンプリングし、Grubbs の検定により特異値を除いた個々の測定値を相乗平均した透気係数（図中の A 点）に対して、コンクリートの品質に起因する透気性測定値の変動を考慮して割り増した値（図中の B 点）を中性化進行速度係数の導出のための透気性の評価値として扱う。

これにより、コンクリートの品質に起因する透気性測定値の変動を考慮した中性化速度係数を得ることができる。図中の実線から破線への割増しについては、構造物の評価目的や、竣工前もしくは供用後などの調査時期に応じ、構造物または構造部材ごとにそれぞれ固有の値を設定すれば良い。

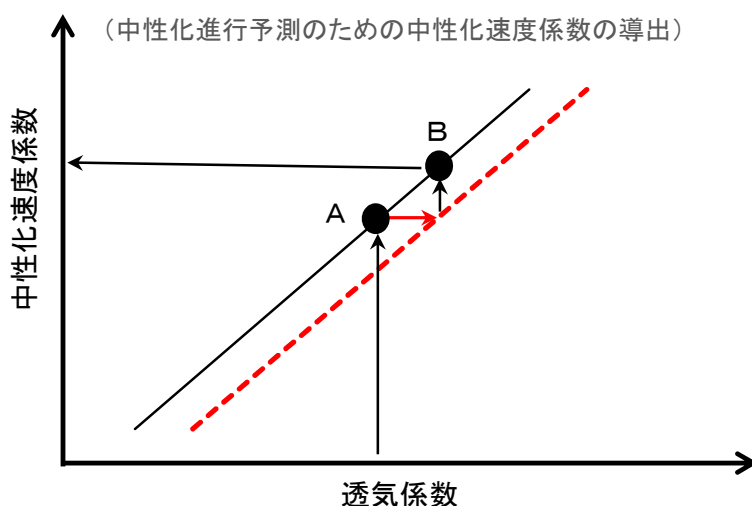


図 5.3-6 中性化進行予測のための中性化速度係数の導出のためのイメージ

ここで、図 5.3-3 および図 5.3-5 に対して、図 5.3-6 に示した考え方に基づき、透気性の変動と中性化速度係数の変動を加筆したものを図 5.3-7～図 5.3-8 に例示する。これらの図では、4.2 節に示した実験から得られた結果を、それぞれの透気試験における変動係数の標準値として扱った。変動係数の大きさは、FIM 法が 34%、SCM 法が 41%とした。図 5.3-9 には、3.2 節に示した実大コンクリート壁の実験結果による DC(TPT)法と中性化速度係数の関係を示した。DC(TPT)法による変動係数は実験結果から 40%とした。

以上、本節では、構造物の耐久性評価を行う際に、局部的な不具合や欠陥部などを検出する目的ではなく、構造部材の平均的な評価を行うことを目的とする場合に適用できる、コンクリートの品質に起因する透気性測定値の変動を考慮した透気性の評価値による中性化進行予測のための 1 つの手法を示した。

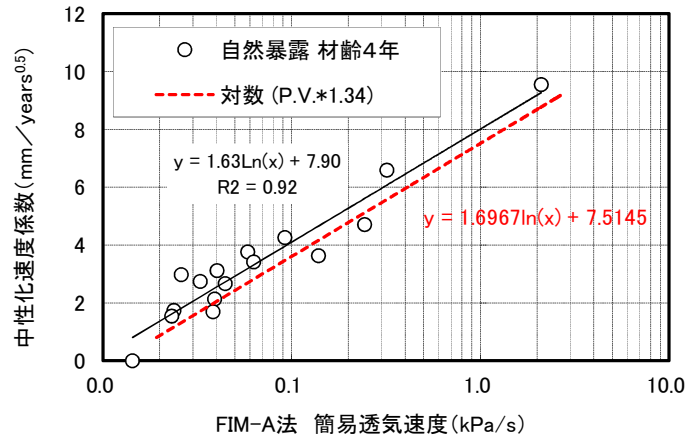


図 5.3-7 中性化速度係数と FIM-A 法による透気速度 P. V. の関係

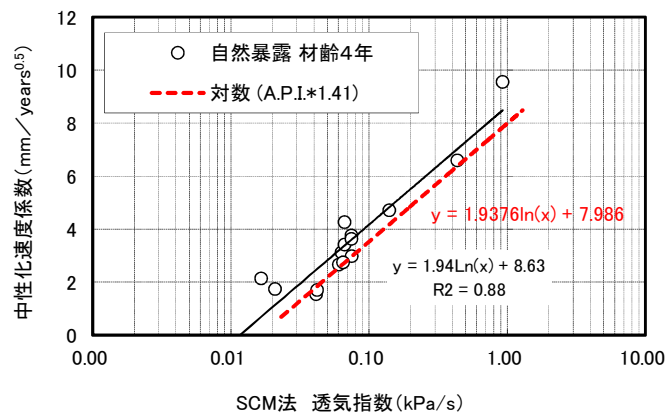


図 5.3-8 中性化速度係数と SCM 法による透気指数 A. P. I. の関係

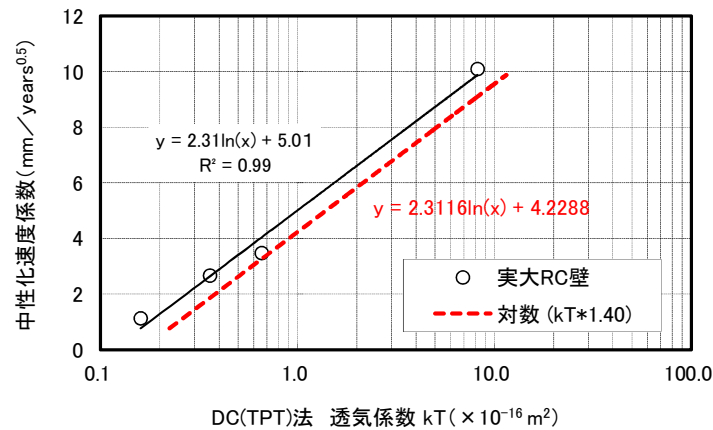


図 5.3-9 中性化速度係数と DC (TPT) 法による透気係数 kT の関係

図 5.3-7～図 5.3-9 に例示した関係は、本研究から得られた変動係数を標準値として適用したものである。透気性と中性化速度係数の回帰式の係数 ($\alpha \cdot \beta$) や透気性測定値の変動係数は、何らかの根拠に基づき評価しようとする建物毎に固有の値を適切に設定することによって、5.5 節に示す耐久性評価チャートを用いた透気性による供用期間の精度の高い評価が可能となる。

5.3.5 透気性試験値の試験方法による比較

透気性試験のベンチマークとして扱われる RILEM 法による透気係数と、本報で用いた FIM-A 法、FIM-N 法および SCM 法による透気性試験値の関係を図 5.3-10～図 5.3-12 に示す。また、FIM-A 法と FIM-N 法による透気速度の関係を図 5.3-13 に示す。コンクリート供試体を用いた実験の結果、それぞれの試験方法において、RILEM 法との透気性試験値の間に高い相関が認められた。これらの中でも、コンクリート表面からチャンバーを用いて透気性を測定する RILEM 法と SCM 法において、また、ドリル削孔を用いて測定する FIM-A 法と FIM-N 法において、より高い相関が認められた。

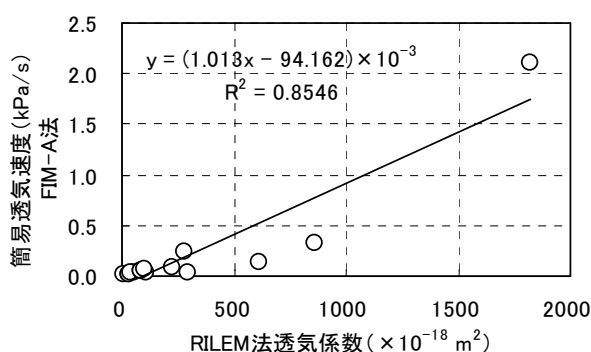


図 5.3-10 FIM-A 法と RILEM 法との関係

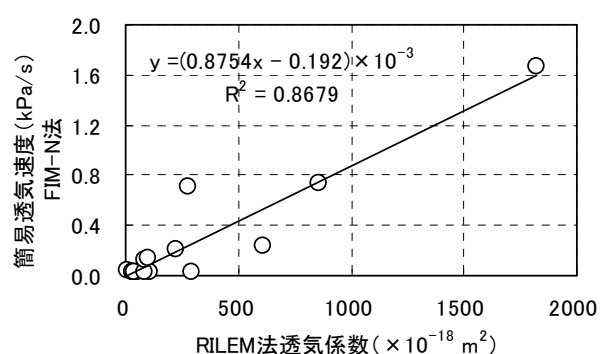


図 5.3-11 FIM-N(G) 法と RILEM 法との関係

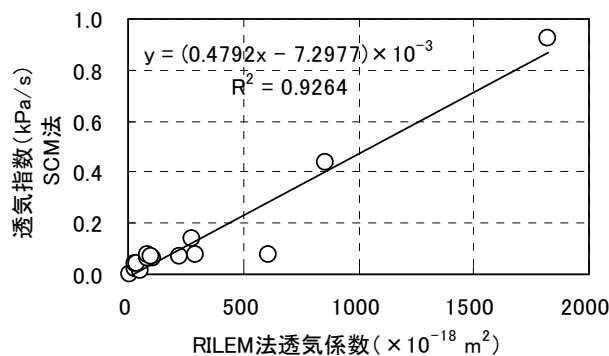


図 5.3-12 SCM 法と RILEM 法との関係

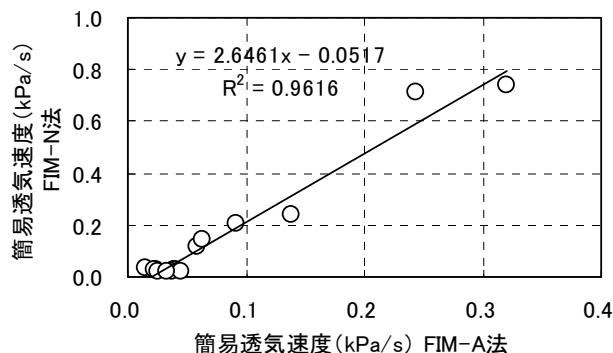


図 5.3-13 FIM-A 法と FIM-N(G) 法との関係

5.3.6 透気性試験値と中性化深さの到達期間

鉄筋コンクリート造建築物の構造体および部材は、設計耐用年数の期間内は中性化によって設計限界状態に達しないように配慮して設計されるが、施工品質の程度や条件によっては所要の品質が確保されない場合がある。このような場合、建物竣工時に簡易な透気性試験を行うことによってかぶりコンクリートの品質を適切に評価する手法が考えられる。

そこで、日本建築学会 JASS5 に示される部材ごとかつ計画供用期間ごとに定められた設計かぶり厚さに到達するまでの各透気試験値との関係について、前述の材齢 4 年の自然暴露試験体の中性化速度係数に基づき算出した結果を図 5.3-14～図 5.3-17 に示す。これらの関係を用いれば、かぶりコンクリートが中性化する期間が透気性試験値によって予測できることになる。さらに、後述する実大 RC 部材での透気性試験値の変動係数を適切に設定することにより、計画供用期間の級に対して必要となる部材のかぶり厚さごとの透気性試験値の目標値（閾値）を得ることができる。

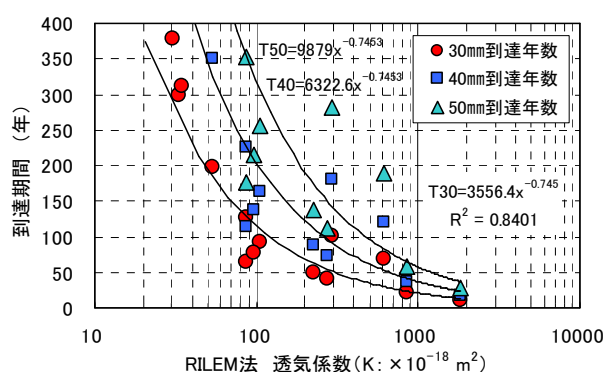


図 5.3-14 RILEM 法による透気係数 K と中性化深さ到達期間との関係

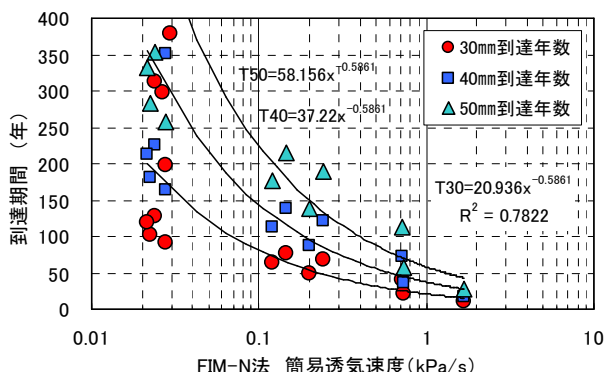


図 5.3-15 FIM-N(G)法による透気係数 $P.V$ と中性化深さ到達期間との関係

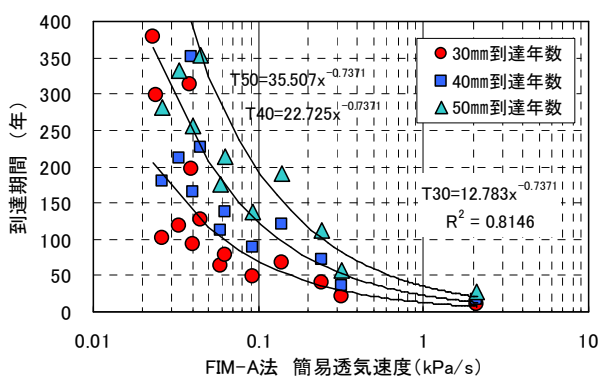


図 5.3-16 FIM-A 法による透気係数 K と中性化深さ到達期間との関係

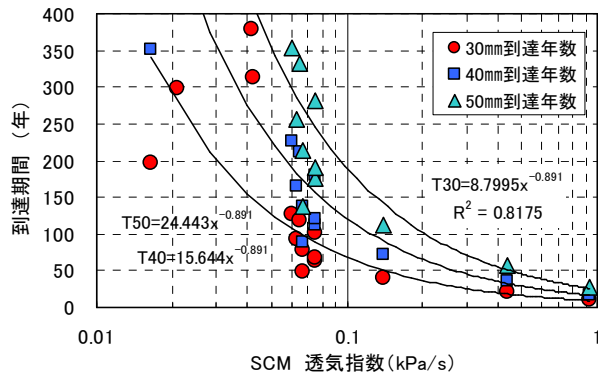


図 5.3-17 SCM 法による透気係数 $A.P.I$ と中性化深さ到達期間との関係

5.4 実大 RC 壁における透気性試験の評価

5.4.1 実大 RC 壁の概要および試験概要

実際の RC 構造物において原位置で FIM-A 法、FIM-N 法および SCM 法による透気性試験を行った場合の測定値の変動係数は、そのコンクリートが受ける環境条件や打込み欠陥などの施工品質の影響によって、供試体レベルでの変動係数よりもかなり大きくなることが予測される。そこで、5.3 節に示したコンクリート供試体につき、写真 5.4-1 に示すような高さ 3.6m×幅 2.4m×厚さ 0.2m の実大 RC 壁 (R) [1] を呼び強度 21,27 および 36 の 3 種類のコンクリートを用いて作製し、各種の透気性試験を行って透気性試験値の変動量を調査した。

3 種類の実大 RC 壁に使用したコンクリートの材料を表 5.4-1 に、調合計画および物理的性質を表 5.4-2 に示す。壁の型枠はコンクリート打込み後 2 日目に脱型した。壁の西面 (W) は空気と日射に暴露されており、東面 (E) は建物が隣接する日陰面であり、打込み後 7 日間ビニールシートで封かん状態とした。

これに加えて、呼び強度 30 (高さ 3.5m×幅 2.0m×厚さ 0.2m) の実大 RC 壁 (S) [2] および呼び強度 24 (高さ 2.2m×幅 6.5m×厚さ 0.18m) の実大 RC 壁 (K) [3] においても同様に透気性試験を行った。なおこれらの実大 RC 壁に打ち込んだコンクリートは、いずれもスランプ 15~18cm の建築用の普通コンクリートであった。

表 5.4-1 実大鉄筋コンクリート壁に使用したコンクリートの材料

使用材料	品 質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント：密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
水 (W)	上水道水
細骨材 (S)	山砂 (城陽産)：表乾密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$, FM : 2.80、混合率70%
	砕砂 (高槻産)：表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$, FM : 2.80、混合率30%
粗骨材 (G)	碎石 (高槻産)：表乾密度 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$, 実積率：58.0%
混和剤 (Ad)	SP：ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
	AE：AE減水剤

表 5.4-2 打ち込んだコンクリートの調合計画および圧縮強度

呼び 強度	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm^2)
			W	C	S	G				
21	63.0	46.6	184	292	826	974	AE	16.0	5.9	32.0
27	54.0	49.2	180	333	860	915	SP	9.5	5.0	38.7
36	44.0	48.7	180	409	821	890	SP	21.5	5.5	44.4

5.4.2 実大 RC 壁での透気性試験の位置選定および算出手法

(1) 透気性試験の位置の選定

実大 RC 壁試験体における透気性の測定は、統計的理論に基づき各試験法とも 1 面あたり 6 ヶ所以上[4] もしくはそれ以上の位置で実施することとした。呼び強度 21,27,36 の実大 RC 壁における原位置でのかぶりコンクリートの透気性試験は、写真 5.4-1 に○印で示すように高さ方向に 3 段（上部、中央部および下部）とし、呼び強度ごとに 2 列とした計 6 ヶ所の位置において FIM-A 法、FIM-G 法および SCM 法の 3 種類の透気性試験を行った。また、呼び強度 24 および 30 の実大 RC 壁においては、1 面あたり高さ方向に 5 段×4 列の計 20 ヶ所の位置で透気性試験を行った。なお、実大 RC 壁の試験時の高周波容量式による含水率は 4～5%の範囲[5]であった。

さらに、写真 5.4-1 に●印で示した 9 ヶ所から $\phi 15\text{cm}$ のコアを水平に貫通させて採取し、コア両端(W 表面および E 表面)から厚さ 5cm ずつを供試体(西面コア(W)および東面コア(E))とし RILEM 法透気性試験に供した。

また、実大 RC 壁の作製と同時に、縦打ちした高さ 30×幅 30×厚み 10cm の小型試験体をそれぞれ 2 体ずつ作製した。養生条件として、「A：標準」は脱型後 1 ヶ月間 20℃水中養生の後 20℃-60%RH の気中養生したもの、「C：気中」は脱型後 2 ヶ月間 20℃-60%RH の気中養生したものである。これらの初期養生の後、全ての試験体を 20℃-60%RH の室内環境下に静置してコンクリートの含水率を安定させ、30×30cm の面の端部より約 5cm 以上内側の位置において、材齢約 2 ヶ月で透気性試験を実施した。

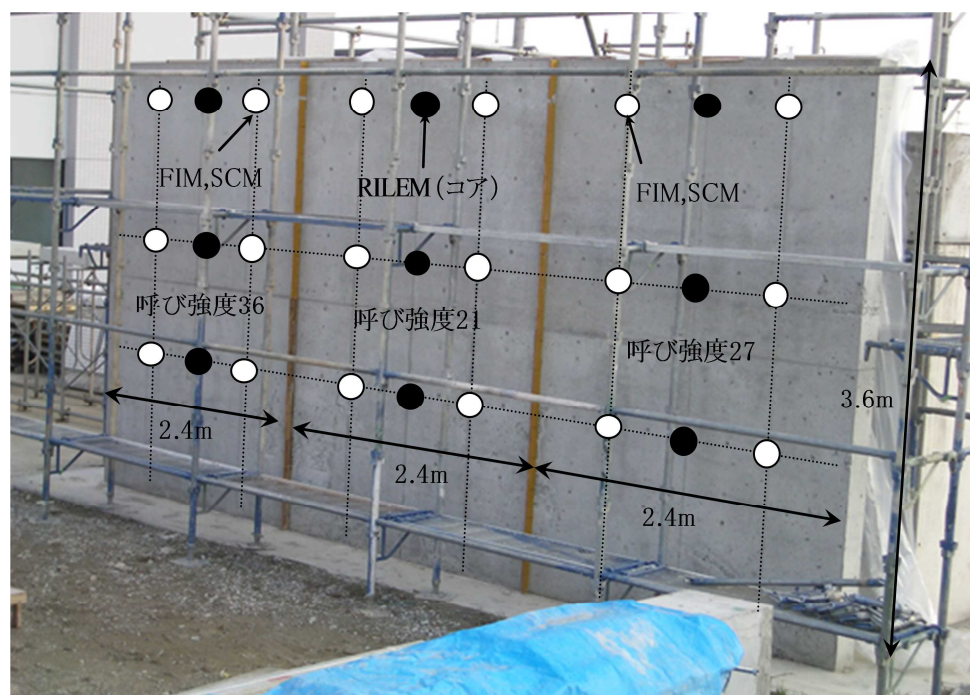


写真 5.4-1 の実大鉄筋コンクリート壁 (R) 3.6m×幅 2.4m×厚さ 0.2m

(2) 透気性試験方法と試験値の算出方法

まず、ドリル孔を用いる FIM-A 法および FIM-N 法においては、1 孔当たり 4 回の測定を連続して行い、1 回目の測定値を除いた 2～4 回目の 3 回の平均値をこの孔の透気速度として扱う。同じ位置における透気速度の測定は 10～20cm の距離をおいた 2 孔を用いて行い、1 孔当たりの測定回数 3 回×2 孔の計 6 回の測定結果からその位置の透気速度を求める。さらに、同じ高さで 1～2m の間隔で 2 つの位置で 6 回（3 回×2 孔）の測定を行い、合計 12 回の測定値の平均値からその領域もしくはその壁の透気性試験値を得ることとする。高さ位置を合わせて透気性を評価することとしたのは、コンクリートの打込み時の圧密などによる影響を少しでも軽減することにより、透気性試験値の変動係数の低減を図ろうとしたためである。

一方、チャンバーを用いる SCM 法においては、FIM 法と同様に同じ高さ位置で 2 点を設定し、各位置とも 3 回の測定を行い、3 回×2 点の合計 6 回の測定によりその領域の透気指数を求めることとする。

5.4.3 φ15×5cm 供試体の RILEM 法による透気性試験結果

実大鉄筋コンクリート壁と同時に作製して標準養生を行った φ15×30cm 円柱供試体から φ15×5cm にスライスした供試体を、透気性試験値のベンチマークとなる RILEM 法による試験に供した。なお、透気性試験の前に供試体を温度 50℃の環境下に静置し、供試体の含水率を安定させた。

φ15×5cm 供試体による RILEM 法による透気性試験結果および JIS A 1153 による促進材齢 26 週までの中性化深さを表 5.4-3 に示す。RILEM 法による透気係数は、呼び強度 21, 27, 36 に対して、それぞれ、738, 168, 112×10⁻¹⁸m²と、3 種類のコンクリートの品質の違いを明確に表している。また、呼び強度が小さほど変動係数が大きくなる傾向にあるが、変動係数は 2%から 14%の範囲(平均 7.3%)と小さい数値であった。さらに RILEM 透気係数と促進試験による中性化深さには明瞭な相関が認められた。

これより、標準養生を行い十分に管理された供試体レベルのコンクリートであれば、透気性試験によりコンクリート自体(ポテンシャル)の品質の違いを精度良く評価できることが分かった。

表 5.4-3 RILEM 法による透気係数 K と促進中性化深さ

呼び 強度	RILEM法 透気係数 (×10 ⁻¹⁸ m ²)				変動係数 (%)	中性化深さ 促進26週 (mm)
	TP1	TP2	TP3	平均値		
21	640	734	840	738	13.6	34.4
27	157	176	172	168	6.0	16.7
36	112	110	115	112	2.2	5.5

5.4.4 実大 RC 壁での RILEM 透気係数とその変動係数

実大壁から採取したコア両端面の厚さ 5cm の部分で測定した RILEM 透気係数を図 5.4-1 に、その変動係数を図 5.4-2 に示す。両図には表 5.4-3 に示した $\phi 15\text{cm}$ 供試体での結果（呼び強度ごと 3 本の試験体の結果）を併せて示した。図 5.4-1 には部位ごと（西面コア(W)および東面コア(E)の 3 つのデータはそれぞれ左からコア採取位置の上中下の順）の透気係数を示した。

コアの変動係数の平均は約 40%（E：40.4%，W：38.8%）であった。呼び強度 21 においては、実大 RC 壁の西面コア(W)および東面コア(E)とも壁の上部と下部で RILEM 透気係数が大きく異なり、これが実大 RC 壁の変動係数を大きくしている。この理由は、打込み時の圧密の影響や養生条件などにより部位ごとの品質が異なることが影響しているためと考えられる。この他、透気性試験値の変動は、FIM 法では骨材の偏在に伴うばらつきの影響を、SCM 法では FIM 法(-A,-N)よりもかぶりコンクリートの表層組織の影響を大きく受ける[6][7] と推察される。この点については更なる検討が必要であるが、いずれの透気性試験法も、コンクリートの表層の粗密の程度を概ね評価し得ていると考えられることから、本研究に用いている透気性試験は、一般的なコンクリートの品質（かぶりコンクリートの密実さ）の違いを評価することができると考えられる。

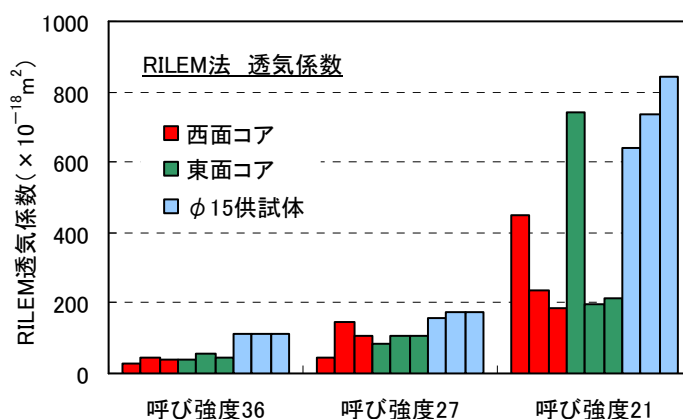


図 5.4-1 実大コンクリート壁(R)における RILEM 法による透気係数 K

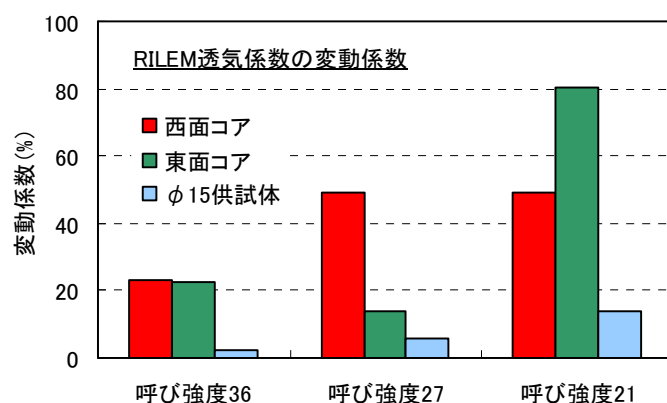


図 5.4-2 RILEM 法による透気係数 K の変動係数

5.4.5 実大 RC 壁での透気性とサンプリング手法

実大 RC 壁試験体での表層透気性の測定は、4.6 節に示した統計的理論に基づき各試験法とも片面につき 6 ヶ所[6]にて実施した。原位置での透気性試験から得られた測定値の範囲は、FIM 法(-A,-N)では $0.05 \sim 0.73(\text{kPa/s})$ 、TPT 法では $0.17 \sim 1.75(\times 10^{-16} \text{m}^2)$ 、SCM 法では $0.42 \sim 1.19(\text{kPa/s})$ と、いずれの試験法においても広範な結果となった。図 5.4-3 に示すように、小型試験体の変動係数の平均は約 33%であるのに対し実大 RC 壁試験体では 66%であり、実大 RC 壁試験体の変動係数は小型試験体の 2 倍程度となった。

一方、5 種類の呼び強度の実大 RC 壁における原位置での透気性試験から得られた合計 102 点の透気性試験値の範囲は、いずれの透気性試験においても呼び強度や実大 RC 壁の試験体の違いによらず広範な結果であった。そのため、5.4.2 項(2)に示した位置および算出方法で求めた全ての透気性試験値を採用した場合の変動係数は、図 5.4-4 に示すように最大 160%程度となった。

以上の結果から、実際の構造体コンクリートの部材を対象とする透気性試験においては、構造物の局部的な欠陥や品質のばらつきを評価する場合、もしくは構造部材の平均的な透気性に基づく中性化進行の程度を評価する場合など、試験を行う際の評価目的に応じて選択的に測定データをサンプリングすることも必要と思われる。

具体的には、前者の場合は測定された全ての値を用いて品質の差異の程度を評価することが必要となるが、後者の場合は、同一部材において複数ヶ所 (6 ヶ所以上[4])で測定し、4.5 節に示した Grubbs の棄却検定により特異値を除くことや、測定値の平均から大きく外れているデータをトリム平均により特異値を棄却するなどの考え方を導入することが必要と考える。なお、これらの特異値が生じる原因は、表層コンクリートの局部的な打込み欠陥の存在や微細な表面ひび割れの影響によるものと考えられる。

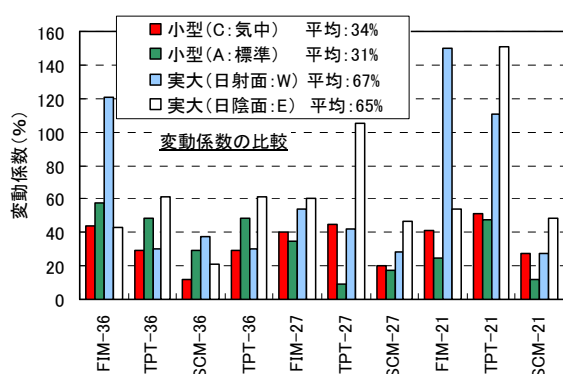


図 5.4-3 実大 RC 壁と小型試験体の
変動係数の比較
(DC(TPT)法・FIM法・SCM法)

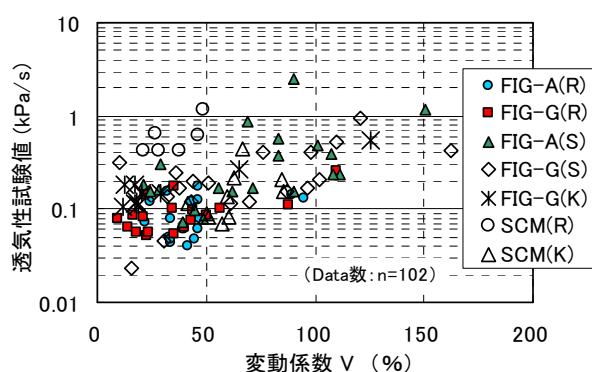


図 5.4-4 実大 RC 壁全ての測定値の
変動係数
(FIM法・SCM法)

5.5 かぶり厚さと透気性による耐久性評価手法の提案

耐久性予測の手法として、中性化深さがかぶり厚さ(C)に到達した時点、言い換えれば中性化深さが鉄筋位置に到達した時点建物の供用期間と定義すると、Torrent の考え方[8]に基づき、中性化深さがかぶり厚さ(C)に達する材齢を構造物の供用年数(S.L.)とすると、これらの関係は式(5.5-1)として表すことができる。

つまり、

$$\begin{aligned} \text{中性化深さ} &= \text{中性化速度係数} \times \sqrt{\text{時間}} \\ \text{かぶり厚さ } C &= A \times \sqrt{(S.L.)} \\ A &= \alpha \cdot \ln(R_{air}) + \beta \end{aligned} \quad (5.5-1)$$

ここに、

A : 中性化速度係数 (mm/year^{0.5})

R_{air} : 透気試験結果 (透気係数 kT, 透気指数 A.P.I, 透気速度 P.V.)

C : かぶり厚さ (= 中性化深さ)

α, β : 環境や材料などに応じた係数 (中性化速度係数と透気性の関係から定まる)

なお、耐久性予測に用いるかぶり厚さの設定値は、施工等による標準偏差が通常 10mm[9]とされているが、原位置で測定したかぶり厚さのばらつきを考慮して設定値を決定する必要があると考えられる。

図 5.5-1 に、式(5.5-1)によるかぶり厚さと、DC(TPT)法による透気性試験に基づくチャート(JASS5-2009 による供用期間 SL30・65・100・200 年)を示す。係数 α および β は、図 5.3-9 に示した DC(TPT)法と中性化速度係数の関係を適用した。

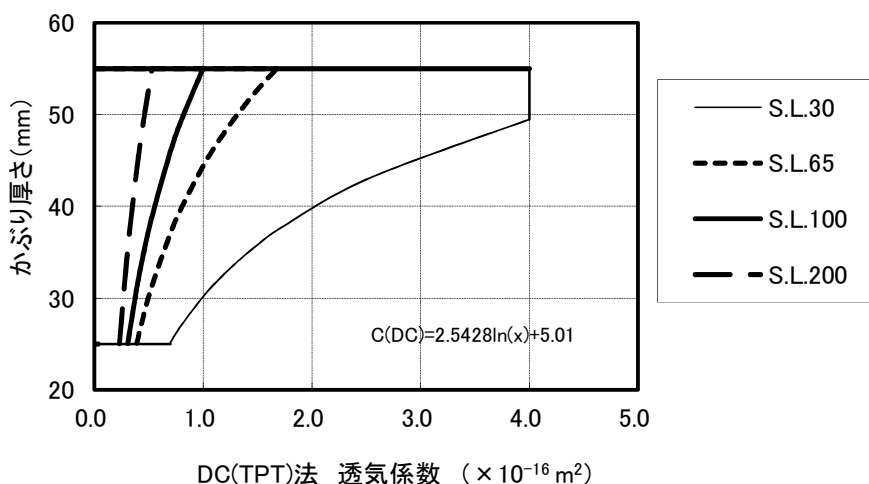


図 5.5-1 耐久性の評価チャート例：DC(TPT)法

このチャートによれば、透気性の測定結果がプロットされた領域によって、透気性とかぶり厚さに応じた構造物の供用期間（S.L.）が予測できるので、経過年数に応じた構造物の寿命予測、竣工時点での耐久性予測や補修時期を、原位置における構造物コンクリートの透気性の測定によって立案することが可能になると考えられる。

図 5.5-2 および図 5.5-3 に、式(5.5-1)によるかぶり厚さと FIM-A 法および SCM 法による透気性試験に基づくチャート(JASS5-2009 による供用期間 SL30・65・100・200 年)を示す。係数 α 、 β は図 5.3-7 および図 5.3-8 に示した透気性と中性化速度係数の関係を適用した。

さらに、5.4 節に述べた 3 種類の実大 RC 壁における各透気試験結果および文献[10]に示した実大壁での測定（各図中の nS30：呼び強度 30）を、呼び強度(nS)別にそれぞれのチャート上にプロットした。各図中の大きなプロットで示した値がその構造物の代表値を表している。各種の透気試験結果ごとに変動がみられるが、かぶり厚さが同じ場合、呼び強度が高いほど構造物の供用年数が長く評価されていることがわかる。

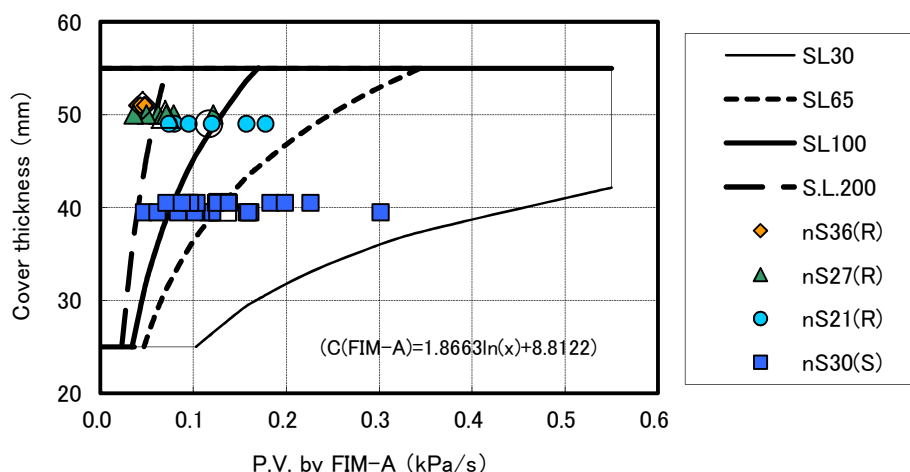


図 5.5-2 耐久性の評価チャート例：FIM-A 法

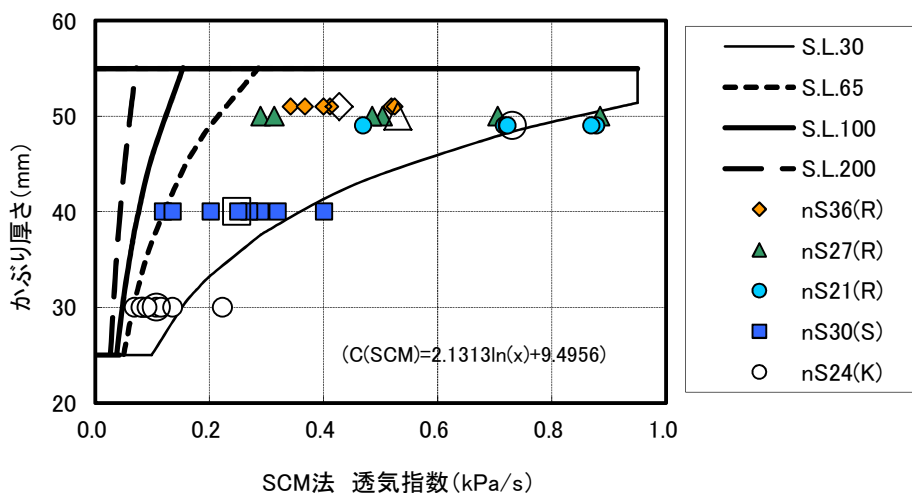


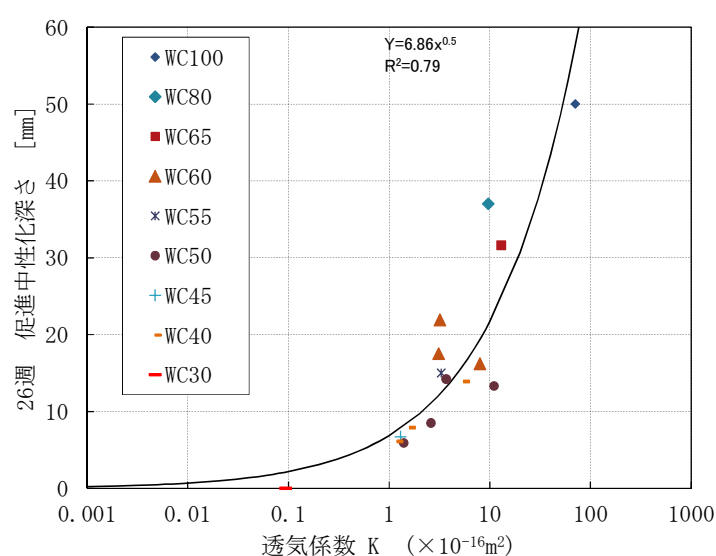
図 5.5-3 耐久性の評価チャート例：SCM 法

また、表 5.5-1 に、所要の供用期間と RC 構造物の部材ごとのかぶり厚さに応じた透気性試験値の目標値（閾値）について、実大 RC 壁における変動係数を、文献[11]より FIM 法では 40%，SCM 法では 20%，RILEM 法は 8%と設定し、図 5.3-15～図 5.3-18 の関係に基づき求めた閾値の案を示す。

これらの閾値は、本報に示した透気試験によって RC 構造物の供用期間に対する耐久性の照査を行う際などに参考となり得る値と考えられる。

表 5.5-1 計画供用期間と部材のかぶり厚さによる透気性試験値の閾値（案）

供用期間の級	透気性試験法	部材のかぶり厚さ		
		30mm	40mm	50mm
超長期 200年	FIM-A (kPa/s)	0.04	0.09	0.15
	FIM-N (kPa/s)	0.035	0.10	0.20
	SCM (kPa/s)	0.04	0.08	0.15
	RILEM ($\times 10^{-18} \text{m}^2$)	50	100	200
長期 100年	FIM-A (kPa/s)	0.10	0.25	0.40
	FIM-N (kPa/s)	0.12	0.30	0.70
	SCM (kPa/s)	0.09	0.15	0.30
	RILEM ($\times 10^{-18} \text{m}^2$)	150	300	550
標準 65年	FIM-A (kPa/s)	0.20	0.40	0.75
	FIM-N (kPa/s)	0.25	0.65	1.50
	SCM (kPa/s)	0.15	0.25	0.45
	RILEM ($\times 10^{-18} \text{m}^2$)	250	500	1000
短期 30年	FIM-A (kPa/s)	0.55	1.20	2.20
	FIM-N (kPa/s)	0.90	2.50	5.20
	SCM (kPa/s)	0.35	0.65	1.10
	RILEM ($\times 10^{-18} \text{m}^2$)	700	1500	2700



（参考図）RILEM 法による透気係数 K と促進中性化深さの関係

5.6 まとめ

かぶりコンクリートの透気性を原位置で評価することによって RC 構造物の寿命予測や耐久性を評価する手法を提案することを目的とし、コンクリート供試体および実大 RC 壁を作製して各種の透気性試験を適用して検討を行った。得られた結果を以下に述べる。

- (1) 4 年間の屋外暴露による中性化深さの測定結果から得られた中性化速度係数と、透気性試験結果との間には高い相関が得られた。
- (2) コンクリートの品質変動に起因する透気性の変動係数を評価目的や評価しようとする建物に応じて適切に設定することによる透気性の変動を考慮した中性化速度係数の導出のための手法を示した。
- (3) (2)の手法により得られた中性化速度係数を用い、透気性評価値の変動係数を本研究の結果を参照して設定することによって、かぶり厚さと透気試験の結果に基づく構造物の耐久性予測のためのチャートを作成した。

以上、原位置での各種の透気性試験とかぶり厚さの測定によって、鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価や竣工時の健全性評価や寿命予測などに有用となる情報を与えると考えられる。将来的には、中性化速度係数に加え、材料・調合、養生条件などと透気試験結果とを関連付けることにより、かぶり厚さとの関係に基づく合理的な耐久性予測手法への展開が期待できる。

【第5章の参考文献】

- [1] 山崎順二・今本啓一・下澤和幸・永山勝：原位置での簡易透気性とかぶり厚さによる RC 構造体の耐久性評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.31，No.1，pp.1999-2004，2009.
- [2] 山崎順二ほか：簡易透気性試験によるコンクリートの耐久性評価に関する研究(その2)，日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp.141-142，2006
- [3] 下澤和幸ほか：かぶりコンクリートの耐久性評価に関する研究（その2），日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp.1179-1180，2005
- [4] 永山勝・下澤和幸・今本啓一・成田瞬・山崎順二・二村誠二：構造体コンクリートの各種表層透気試験法と評価，日本建築学会学術講演梗概集 A-1（中国）pp.1253-1254（1619），2007
- [5] 山崎順二・下澤和幸・今本啓一・二村誠二：簡易透気性試験による構造体コンクリートの耐久性評価手法に関する研究，コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集（Vol.2），非破壊検査協会，pp.297-302，2006.8.
- [6] Dhir,R.K., Hewlett, P.C. and Chan, Y.N., Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods, Magazine of Concr. Res., Vol.39, No.141, pp.183-195, Dec. 1987
- [7] Torrent, R. A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater.& Struct., Vol.25, No.150, pp.358-365, July 1992
- [8] Torrent R.J., Performance-based specification and conformity control of durability, International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, 19-21 March 2006, Madrid, Spain
- [9] 日本建築学会(AIJ)：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説，p.92,2004
- [10] 山崎順二，今本啓一，下澤和幸，永山勝，二村誠二：簡易透気性試験によるコンクリートの耐久性評価に関する研究 その2. 実大壁モデルでの簡易透気性試験の適用性に関する検討，日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工「オーガナイズドセッション」，pp.141-144，2006.9
- [11] 下澤和幸・山崎順二・今本啓一・永山勝・二村誠二：国内のコンクリートを対象とした各種透気性試験の閾値の提案，日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp.803-804，2008

第 6 章

結論および今後の課題

第 6 章 結論および今後の課題

6.1 はじめに

本研究では、表層透気性試験による構造体コンクリートの中性化進行評価に基づく耐久性評価手法について検討するにあたり、透気性試験の測定条件や実大コンクリート部材における測定値の変動とその取扱い、測定点数、透気深さ、各種の透気性試験方法の関連性などについて検討した。加えて、コンクリートの打放し面における中性化進行評価に基づく耐久性評価のみではなく、主として建築構造物を対象とした仕上材表面からの測定による構造体コンクリートの透気性の評価手法についても検討した。

本研究で得られた成果と要約を下記に示し、次節に今後の課題について述べる。

6.2 結論

第 1 章「序論」として、研究背景や目的について述べた。

第 2 章「表層透気性に関する既往の研究」では、主として国内で研究または開発されている各種の透気性試験方法を抽出し、既往の研究について整理し、本研究の意義を示した。

第 3 章「各種透気性試験の関連性および透気領域に関する検討」では、構造体コンクリートの原位置における中性化進行予測に基づく耐久性評価のための非破壊・微破壊的な手法として、主として国内外で研究されているダブルチャンバー法、シングルチャンバー法およびドリル削孔法を代表的な透気性試験方法として抽出し、これらの透気性試験を実大のコンクリート壁を用いた共通試験（ラウンドロビン・テスト）を実施した。

実験の結果から、RILEM 法による透気係数 K は、実大コンクリート壁の呼び強度ごとのコンクリートの品質を的確に評価していること、DC(TPT)法および FIM 法はベンチマーク試験である RILEM 法と相関が高く、FIM 法は DC(TPT)法との相関が極めて高いことを示した。また、モルタル供試体を用いた透気領域に関する検討の結果、DC(TPT)法および SCM 法においては、コンクリート表面から概ね 2cm 程度の深さまでの領域の透気性を評価していること、また FIM 法においては、コンクリート表面からの空気の流入よりもドリル孔側面からの空気の流入が卓越しており、FIM 法では表層コンクリートの内部の透気性を評価していることを示した。

第4章「測定誤差を考慮した実用的評価手法に関する検討」では、3章に述べた共通試験の結果に基づき、DC(TPT)法における透気係数 kT の変動係数は、測定機の差のみによるものが25%、実大コンクリート壁での6点の測定値を平均した場合には平均65%であることが分かった。

これより、コンクリートの表層品質の違いによる透気係数 kT の変動係数は40%程度となり、既存RC構造物の中性化深さの変動係数と同程度であること、FIM法における透気速度P.V.の変動係数は約35%程度、SCM法では平均41%となり、いずれもDC(TPT)法によるコンクリートの表層品質の違いに起因する変動係数の大きさと概ね一致した。

また、ダブルチャンバー法およびシングルチャンバー法を用いて同じ位置を複数回繰り返して測定する場合の時間間隔が測定値に及ぼす影響について、コンクリート内部の圧力変化を用いて検討した。併せて、内部圧力の深さ方向の変化から、ダブルチャンバー法およびシングルチャンバー法での透気試験における影響深さについて検討した。また、試験機の測定精度に関する点検方法について検討した。さらに、透気性測定値の異常値の取扱い方、構造体コンクリートの表層透気性の評価を行うために必要となる測定点数の考え方についても検討を加えた。

検討の結果、ダブルチャンバー法もしくはシングルチャンバー法において同一箇所を繰り返し測定を行う場合、透気性測定値が直前の試験による影響を受けないようにするためには、試験間の時間間隔を10～15分程度以上とすれば良いことを示した。

また、試作した検定器によって、透気性試験機の測定精度や試験機の劣化の程度、機差の確認、測定前の漏気の有無の点検などが可能となること、また、試験機間の検量線を整備することによって異なる透気性試験の結果の相互評価が可能となることなど、検定器を透気性試験に適用することの有効性が確認できた。

さらに、Grubbsの棄却検定に基づき異常値（特異値）を選別した後に相乗平均することによって、表層コンクリートの透気性を概ね適切に評価できること、部材全体の評価を目的とした場合のサンプル数としては、経験的に実施可能な回数の観点も考慮して6回を一応の目安とすることが有効であることを示した。

本章の最後に構造部材の平均的な評価を行う際に必要となる透気性評価値を得るための実用的なフローを示した。フローに従って得られた透気性の評価値を5章に示す耐久性の評価のための中性化速度係数の推定に用いることによって、コンクリート構造体の耐久性評価が可能になると考えられる。

第5章「打放し面での透気性とかぶり厚さによる中性化進行評価に基づく耐久性評価」として、水セメント比30～100%の範囲のコンクリート供試体に加えて、呼び強度21,27および36の3種類のコンクリートを用いた実大鉄筋コンクリート壁を作製し、中性化速度係数と透気性測定値との相関性、かぶり厚さとかぶりコンクリートの透気性に基づく構造体コンクリートの耐久性評価や寿命予測について検討した。

その結果、中性化速度係数と透気性試験結果との間には高い相関が得られ、それらの関係を用いて、コンクリートの品質変動に起因する透気性の変動係数を評価目的や評価しようとする建物に応じて適切に設定することによる透気性の変動を考慮した中性化速度係数の導出のための手法を示した。この手法により得られた中性化速度係数を用いてかぶり厚さと透気試験の結果に基づく構造物の耐久性予測のためのチャートを作成した。

6.3 今後の課題

表層透気性試験における各種の測定条件の影響に関して各種の実験を行い、構造体コンクリートの中性化進行評価に基づく耐久性の評価手法について検討した。得られた成果は6.2節に示した通りである。

本実験的研究によって得られた知見に加えて、中性化進行評価に基づく表層透気性試験による構造体コンクリートの耐久性評価手法を確立するために必要となる技術的な検討課題の一部を以下に示す。

- (1) 原位置での各種の透気性試験とかぶり厚さの測定によって、鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価や竣工時の健全性評価、寿命予測等のために有用となる耐久性評価のためのチャートを示した。将来的には、中性化速度係数に加え、材料・調合、養生条件などと透気試験結果とを関連付けることにより、かぶり厚さとの関係に基づく合理的な耐久性予測手法への展開が期待される。
- (2) 透気性と中性化速度係数には相関関係があると思われるが、本論文では中性化進行の結果が得られていないため、中性化抵抗性と関連性の高い水セメント比つまり圧縮強度と、ベンチマーク試験である RILEM 法による透気性との関係を示した。透気性は圧縮強度と同様に細孔構造に依存していると考えられているが、本質的には中性化との関係において今後透気性を論ずるべきであると考えている。
- (3) 本研究においては部材としての中性化の評価を行うことを主眼として平均的な値を用いたが、一方で、目的に応じて最弱な値を評価することも重要と考える。部材の評価の考え方とその手法については今後の課題と考える。SCM 法によるごく表層の評価もこの考え方に含まれると思われる。
- (4) 各種試験方法の性能評価一覧表を作成することは実用上有意義であると考えているが、現時点では試験方法の信頼性や中性化進行評価のデータが完備されておらずこの一覧表

の記述は今後の課題である。また測定点数 6 点の妥当性についても Swiss Standard を拠り所としているが、より合理的な試験方法の確立を目指したサンプリング手法および測定方法についても併せて検討すべきと考える。

- (5) 今後の課題として、表面法とドリル削孔法を同位置に適用し、両者の測定結果を複合して評価する「透気ハイブリッド法」により、仕上材が施された構造体コンクリートの透気性評価の可能性を示唆した。現時点ではデータがまだ少ないが、この手法によれば、1 つの透気性試験の結果を用いて中性化進行の評価を行う場合よりも少なくとも推定精度が向上すると考えられる。今後、竣工前などの若材齢のコンクリートに加え、経年劣化した既存構造物の構造体コンクリート等からもデータを収集・蓄積することにより、複合型の透気性試験として「透気ハイブリッド法」を確立し、汎用性の高い耐久性評価手法として提案されたとともに、その後の実用化が望まれる。

—Appendix—（今後の課題）

仕上材付き構造体コンクリートの透気性による中性化進行評価に関する検討

－Appendix－（今後の課題）

1 仕上材付き構造体コンクリートの透気性による中性化進行評価に関する検討

1.1 はじめに

かぶりコンクリートの原位置における物質浸透性を適切に評価することは、鉄筋コンクリート構造物の竣工時点での耐久性予測，経過年数に応じた構造物の寿命予測，補修時期の立案などに有用な情報となる。

これまで、コンクリート構造体の健全性や耐久性を評価する手法を確立することを目的として、各種の透気性試験を用いた鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価手法について検討し、透気性と中性化深さの関係によるかぶり厚さと透気性試験に基づく耐久性評価のためのチャート等を提案している[本論 5 章]。

一方、鉄筋コンクリート系建築物の外壁面には、ほとんどの場合コンクリート面に何らかの仕上材が施されており、土木構造物と比較して打放し面は少ない。そのため、これまで実施してきた打放し面による透気性試験における測定値からの検討のみでは、構造体コンクリートの耐久性が適切に評価できない場合があると想定される。特に建築構造物の耐久性を透気試験によって評価する際には、仕上面における測定で評価できる手法を確立しておくことが必要となる。

そこで、仕上材の有無およびその種類が各種の透気性の試験結果に及ぼす影響について調査することを目的に、共通試験に供した実大コンクリート壁試験体と同じ大きさの模擬壁試験体に、建築構造物で主に使用される 3 種類の仕上材を塗布し、原位置で計測可能となる、ダブルチャンバー法、シングルチャンバー法およびドリル削孔法の 3 種類の透気性試験を実施（シリーズⅠ）した。また、5 種類の呼び強度のコンクリート試験体を用いて同様の実験（シリーズⅡ）を行った。

これらの 3 種類の透気性試験を同一仕上材面での透気性の測定に採用した理由は、ドリル削孔法による透気性では仕上材にほとんど影響されずにコンクリート内部の透気性が評価でき、また、シングルチャンバー法およびダブルチャンバ法による表面法では、コンクリート内部よりも主として仕上材の性能や仕上界面の影響を含んだ透気性が評価できると考えたためである。

本章では、2 つのシリーズの実験から、仕上材面に供した透気性試験の結果およびそれらの相関性について述べる。さらに、仕上材付き構造体コンクリートの評価手法として、ドリル削孔法と表面法の結果を複合させることによる手法「ハイブリッド法」の可能性について検討する。

2 実験概要

2.1 シリーズⅠにおける模擬壁試験体

H900×W1800×D200mm の大きさの模擬壁試験体を、呼び強度 18,24,30 においてそれぞれ 2 体ずつ作製し、表 2-1 に示す仕上材を、試験体片面の H900mm×W900mm の領域にそれぞれ塗布し、打放し面と併せて呼び強度ごとに 4 種類の試験面を作製し、各種の透気試験に供した。仕上材は、コンクリート打込み後材齢 4 週が経過した時点で各仕上材に応じた下地処理の後に塗布した。写真 7.2-1 に模擬壁試験体を示す。

2.2 シリーズⅡにおけるコンクリート供試体

シリーズⅡにおける仕上材を塗布したコンクリート試験体は、表 2-2 に示す呼び強度 24, 27, 30, 36 および 40 の 5 種類である。ここで、呼び強度 24 以外はセメント質量の 20% をフライアッシュで内割置換したコンクリートである。これらのフライアッシュを使用したコンクリートは、3 つのレディーミクストコンクリート工場 (T,I,S) にて実機で練り混ぜられたものであり、いずれの生コン工場においても骨材には碎石および砕砂を用いている。

写真 2-2 にコンクリート供試体の例を示す。試験体の形状は、600×600×900mm の柱状試験体である。なお、呼び強度 24 の試験体のみ 600×1200×200mm の壁状試験体を使用した。これらの試験体に、シリーズⅠと同様に表 2-1 に示す 3 種類の仕上材をそれぞれ塗布し、それぞれの仕上面においてドリル削孔法およびダブルチャンバー法の 2 種の透気性試験に供した。表 2-1 には、日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS 5[1]に示される分類別中性化率および種類別中性化率の範囲を仕上材ごとにそれぞれ併記した。ここでの中性化率とは、既往の文献調査と実態調査に基づき、仕上材を施さない打放し面での中性化深さに対する各種の仕上材を施したコンクリートの中性化深さの比を表している数値であり、数値の小さい仕上材の方が中性化抑制効果が高いと判断されている。

なお、透気性試験を実施した時点でのコンクリート試験体の材齢は、1 年半から 2 年程度経過したものであり、それぞれの仕上材は、透気性試験を実施する約 3 週間前に塗布し、試験を行った。



写真 2-1 模擬壁試験体

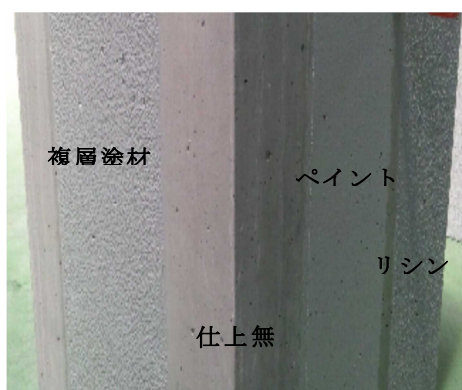


写真 2-2 コンクリート供試体

表 2-1 コンクリートに塗布した仕上材の種類

呼び名	分 類	種類別中性化率 ¹⁾	分類別中性化率の範囲 ¹⁾
外装薄塗E	薄付け仕上塗材 (リシン)	1.02	0.68～1.02
エマルション ペイント	塗料	0.64	0.12～0.81
複層塗材E	複層塗材(アクリル)	0.22	0.00～0.32

1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS 5，

鉄筋コンクリート工事 JASS 5，pp.198-200，2009.

表 2-2 コンクリート試験体の調合概要

呼び強度	スランブ cm	W/(C+FA) %	単位水量 kg/m ³	セメント量 kg/m ³	フライアッシュⅡ種 kg/m ³
24	18	57	180	316	0
27	15	54	170	252	63
30	18	50	175	280	70
36	18	44	175	318	80
40	18	40	175	350	88

2.3 仕上材付きコンクリートに適用した透気性試験

シリーズⅠの模擬壁試験体における透気試験は，その1に示すドリル削孔法（FIM-A法およびFIM-N法），ダブルチャンバー法（DC(TPT)法）およびシングルチャンバー法（SCM法）の4種類とした。4種類の試験面における各種の透気性試験は，仕上材塗布後6ヶ月を経過した時点で実施し，模擬壁試験体の上下端から100mmの位置およびその中間の高さの計3点（上部・中部・下部）においてそれぞれ2カ所ずつ計測した。なお，FIM-A法，FIM-N法およびSCM法については1カ所の測定点につき4回計測し，2回目から4回目の測定値の平均値をその点における透気速度（P.V.およびA.P.I.）とした。

また，シリーズⅡのコンクリート供試体には，FIM-A法およびDC(DC(TPT))法の2種類を適用した。

3 実験結果および考察

3.1 シリーズ I における模擬壁試験体の透気性試験結果

FIM-A 法、DC(TPT)法および SCM 法による各試験面の上・中・下における各測定点の透気試験結果を図 3-1 に示す。

各図の Y 軸の表記は、呼び強度－仕上材種類を示している。なお FIM-A 法と FIM-N 法はシリコン栓の形状のみが異なる同じ手法のドリル削孔法であり、後述の通り両者の結果には相関が得られていることから、ここでは FIM-A 法のみを用いて検討することとする。

図 3-1 から、表面法である DC(TPT)法や SCM 法では、仕上材の種類およびその有無が測定値に与える影響がドリル削孔法である FIM-A 法と比較して大きく変化している。また、DC(TPT)法においては、いずれの試験面においても上中下の位置による差が顕著となり、特に模擬壁試験体の上部において大きな透気係数となった。SCM 法についても同様の傾向であり、模擬壁試験体の上部が圧密の影響等により下部よりも透気しやすいことを示している。

一方、DC(TPT)法や SCM 法に見られる極端に大きな測定値を含めて平均し、その値を試験面を代表する測定値とすると、特異値を含んだ誤った評価となる危険性もあると考えられる。

そこで、本報における測定値の処理の手法として、図 3-1 に示す上中下の 3 点の平均値から 2 倍以上乖離した測定値を欠測値とし、その値を除いた 2 点の平均値を各試験面の透気性の代表値として扱うこととした。

上記のデータ処理の手法により得られた透気試験の結果を図 3-2 に示す。打放し面においては、いずれの試験法においても呼び強度が高い方が緻密となり、表面法である DC(TPT)法および SCM 法においては複層塗材が最も緻密となる結果が得られた。また FIM-A 法による測定結果は仕上材の種類および有無による影響をほぼ受けていないことから、構造体コンクリートの表層から内部の透気性を表現しているものと考えられる。

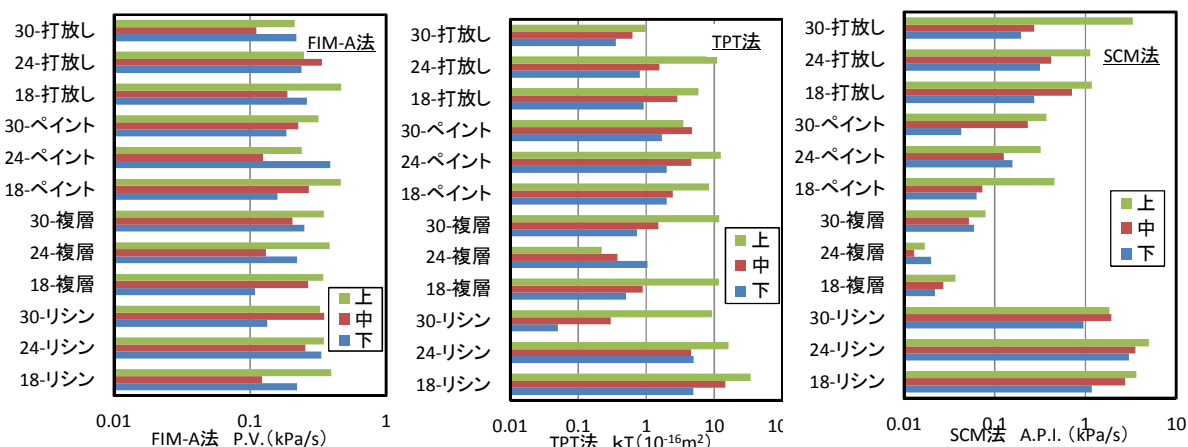


図 3-1 FIM-A 法・TPT 法・SCM 法による測定位置ごとの透気試験結果

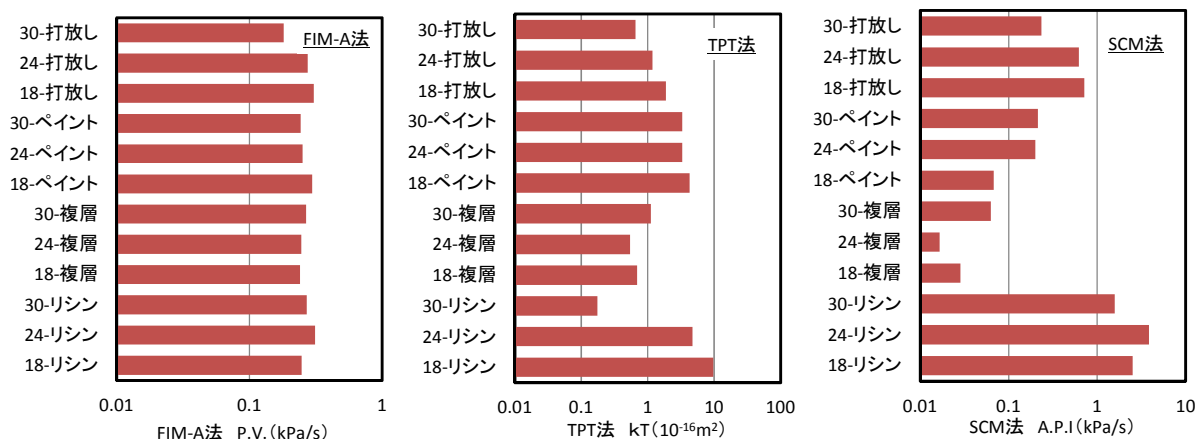


図 3-2 FIM-A 法・TPT 法・SCM 法による各試験面の透気試験結果

3.2 シリーズ I に適用した各種の透気性試験結果の相関性

FIM-A 法と FIM-N 法における透気速度の関係を図 3-3 に示す。等値線から外れた測定値も一部に認められるが、打放し面での両手法による測定結果には、図中に回帰線を示したように相関係数 $R=0.94$ （寄与率 $R^2=0.88$ ）と高い相関が得られている。

図 3-4 に、打放し面において測定した FIM 法、DC(TPT)法および SCM 法の関係をそれぞれ示す。図には文献[2]に示した屋外暴露した材齢 6 年程度の実大壁における透気性の試験結果を併せて示した。模擬壁および実大壁[2]において、各試験方法間にやや高い相関が得られている。ここで、表面法である DC(TPT)法と SCM 法との関係は模擬壁と実大壁によらず概ね類似した相関関係があり、打放し面においては両者の試験方法からは概ね同様の結果が得られると考えられる。

一方、図 3-4 に示した FIM 法に対する DC(TPT)法および SCM 法では、傾向が異なり、コンクリートの種類や材齢による影響を受けるものと考えられる。

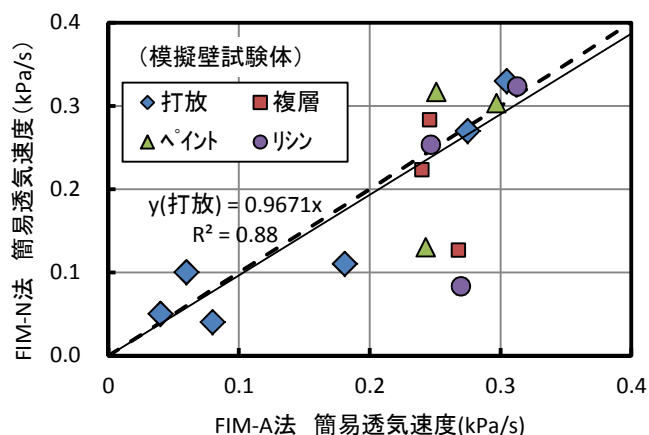


図 3-3 FIM-A 法と FIM-N 法の関係

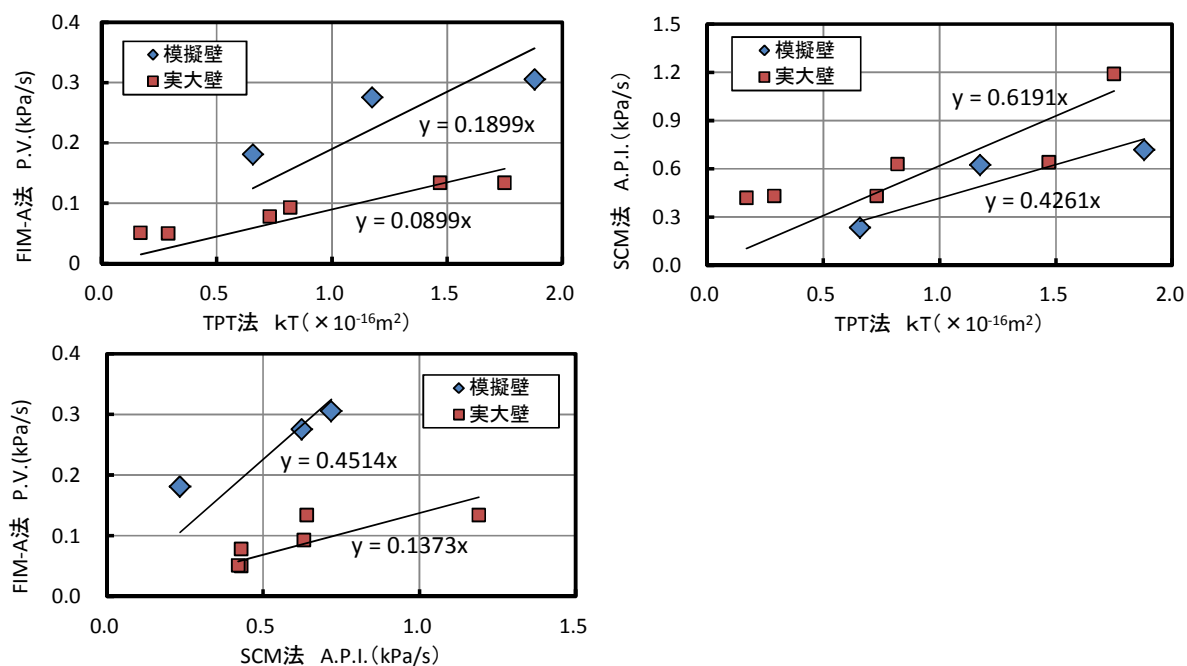


図 3-4 模擬壁試験体の打放し面における FIM-A 法・TPT 法・SCM 法における透気試験結果

図 3-5 に、模擬壁試験体の仕上面における透気試験結果の関係を示す。リシン面での表面法による透気性は打放し面よりも大きく、リシン面への表面法による透気性試験の適用について検討すべき点が残ると思われるが、特に SCM 法と FIM 法の関係からは、表 2-1 に示す種類別中性化率に概ね相当するレベルの透気性の測定結果が得られている。

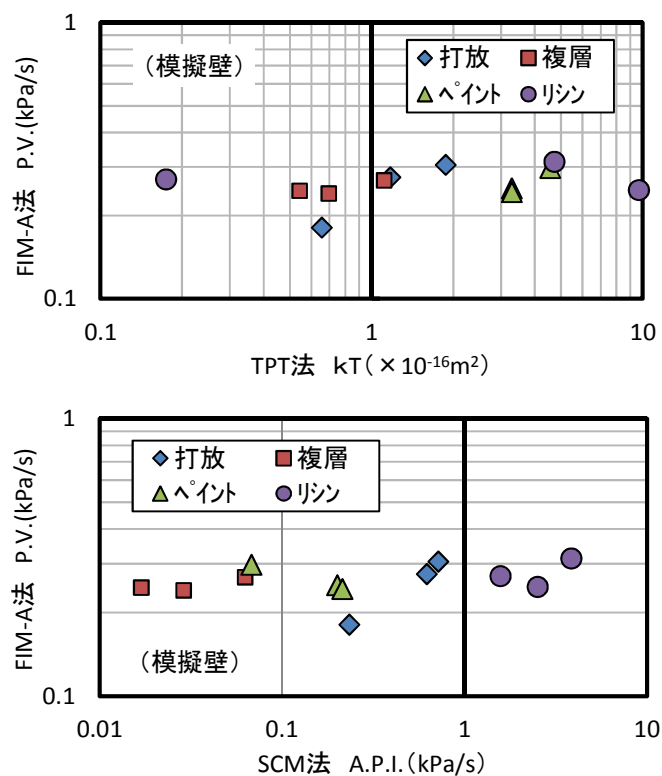


図 3-5 模擬壁試験体の仕上面における透気試験結果

3.3 シリーズⅡにおけるコンクリート供試体の透気性試験結果

FIM-A 法による仕上材ごとの透気速度 P.V.と、DC(TPT)法による透気係数 kT の測定結果を試験体ごとに分けて図 7.3-6 に示す。凡例に示す記号 T,S,I は生コン工場、後の数値は「呼び強度ースランプ」を表している。

図 3-6 から、微破壊試験であるドリル削孔法では、FIM-A 法による透気速度 P.V.が仕上材の有無および種類による影響をあまりを受けずに構造体コンクリート自体の透気性を評価していると考えられるが、表面法である DC(TPT)法では、仕上材の有無および種類の違いによって透気係数 kT が大きな影響を受けていることが認められる。この傾向は図 6.3-5 に示したシリーズⅠの傾向と同様である。

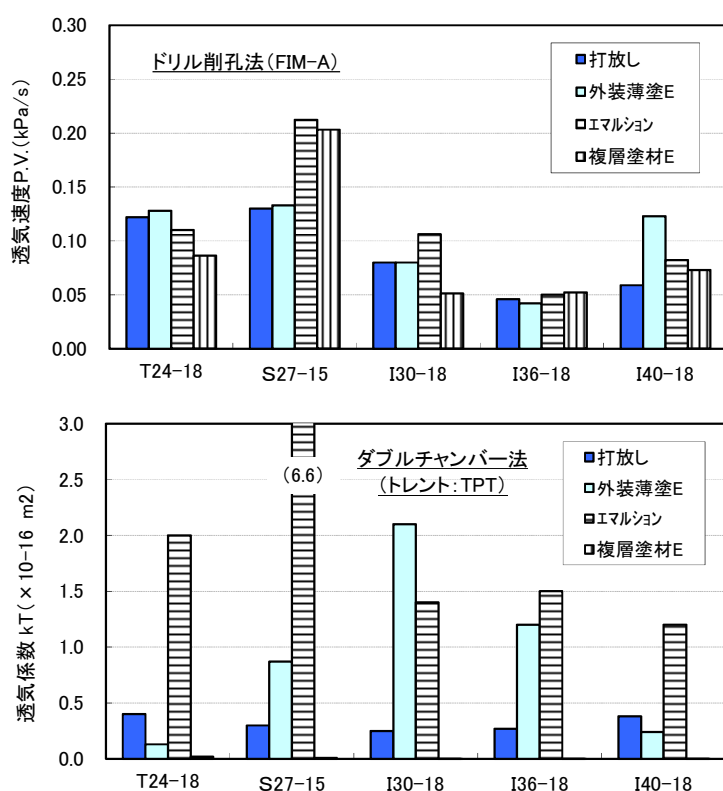


図 3-6 FIM-A 法および TPT 法による透気性

図 3-7 に、透気速度 P.V.と透気係数 kT の関係を示す。透気係数 kT については、仕上材ごとに概ね同じ領域に分布しており、エマルジョンペイントを除いて打放し面の kT に対して、シリーズⅠと同様に概ね表 2-1 に示す種類別中性化率の範囲[2]と同程度の数値であった。

一方、表面法である DC(TPT)法は、打放し面での測定結果よりも透気係数 kT が大きくなるエマルジョンペイントや外装薄塗 E 表面に適用した場合においては、仕上材とコンクリートの微細な界面からの空気の吸い込み等が原因で、仕上材の奥にあるコンクリート表層部を含めた透気性を測定できていない可能性があると考えられる。このことから、表面

法である DC(TPT)法は完全非破壊であることや作業性も簡便であり，コンクリート打放し面での透気性の測定には極めて有用であるが，仕上材が塗布された面での透気性の測定については，正確な透気性の測定および評価が困難となる場合があると考えられる。

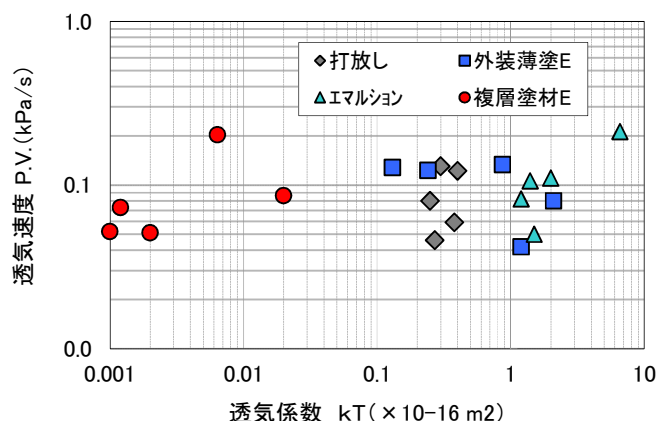


図 3-7 透気速度 P.V. と透気係数 kT の関係

以上のシリーズ I およびシリーズ II の仕上材付きの構造体コンクリート表面における透気性試験結果の関連性から，表面法である DC(TPT)法および SCM 法は，主として仕上材の性能やかぶりコンクリートのごく表層の品質を評価しており，微破壊試験である FIM 法は，深さ約 5cm までのかぶりコンクリート自体の表層から内部における透気性を評価していると考えられる。

4 透気性試験の複合による仕上材付きコンクリートの透気性評価に関する検討

透気性試験と中性化速度係数には，5章に示したように高い相関が認められている。しかし，透気性試験によって仕上材の施された鉄筋コンクリート構造体の中性化進行を評価する際には，ドリル削孔による微破壊を伴う試験である FIM-A 法と，完全非破壊試験としての表面法である DC(TPT)法もしくは SCM 法のそれぞれの短所として，FIM-A 法では仕上材による効果の評価がやや困難となること，逆に，DC(TPT)法もしくは SCM 法では仕上材の性能に大きな影響を受けることによってコンクリート自体の透気性が正確に評価できない可能性がある。

そこで，これら両者の試験上の性格の短所を補うことを考案し，FIM-A 法による透気速度 P.V.と，DC(TPT)法による透気係数 kT もしくは SCM 法による透気指数 A.P.I.の，両者の測定結果を複合して，仕上材が施された鉄筋コンクリート構造体の透気性を評価する手法について検討する。

図 4-1 に、ドリル削孔法（FIM 法）とダブルチャンバー法（DC(TPT)法）を複合した透気性試験「透気ハイブリッド法」のイメージを示す。同じ測定位置において両方の手法で測定を行い、得られた結果を複合してその位置での透気性を表現するものである。

この複合された透気性の値から中性化進行の評価を行えるように整備することが最終的な目標である。

ここで、SCM 法と FIM 法による透気速度 P.V.と SCM 法による A.P.I.は、試験方法が概ね同様であり計測のメカニズムも同じであることから、例えば両者の試験結果に係数を乗じ、重み付けを付加して評価できれば、両者の試験結果を複合することが容易であり、仕上材付きの構造体コンクリートの中性化進行の評価が行えると考えられる。

一方、DC(TPT)法は、FIM 法や SCM 法とは計測メカニズムが異なり、得られた測定値が表現する透気性の表現している物理的意味が異なる。この DC(TPT)法と FIM 法を複合させて評価するためには、両者の透気性の測定値を無次元化して評価することが必要と考える。2 つの透気性試験結果を複合して評価するための手法については、今後の検討課題とする。

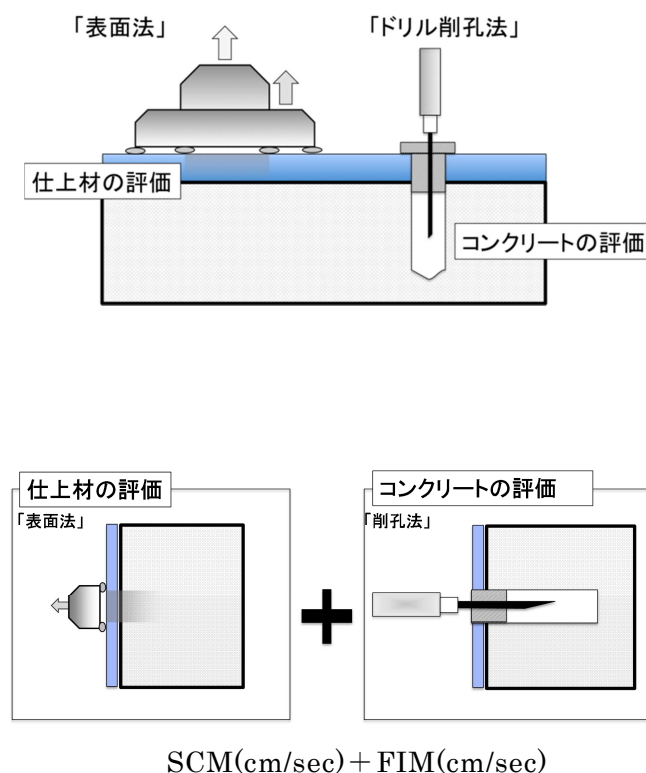


図 4-1 複合型透気試験（ハイブリッド法）による評価イメージ図

5 おわりに

実大レベルの壁試験体の仕上材面に供した透気性試験の結果およびそれらの相関性について検討し、その結果から、仕上材付き構造体コンクリートの透気性の評価手法について検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 打放し面においては、各種の透気試験の間にやや高い相関が認められる。
- (2) 仕上げ面においては、表面法とドリル削孔法では透気性を評価している領域が異なると考えられるため、両者の測定値は異なる傾向を示す。
- (3) 仕上材付きの構造体コンクリート表面における透気性試験結果の関連性から、表面法である DC(TPT)法および SCM 法は、主として仕上材の性能やかぶりコンクリートのごく表層の品質を評価しており、微破壊試験である FIM 法は、深さ約 5cm までのかぶりコンクリート自体の表層から内部における透気性を評価していると考えられる。

以上のことから、表面法とドリル削孔法を同位置に適用し、測定結果を複合して評価することによって、仕上材が施された構造体コンクリートの透気性が表現できる可能性がある。現時点ではまだデータが少ないが、この手法によれば、1 つの透気性試験の結果を用いて中性化進行の評価を行う場合よりも評価の精度が向上すると考えられる。

今後、竣工前などの若材齢のコンクリートに加え、経年劣化した既存構造物の構造体コンクリート等からもデータを収集、蓄積することによって、複合型の透気性試験としての「透気ハイブリッド法」を確立し、汎用性の高い耐久性評価手法として提案するとともにその後の実用化を目指したいと考えている。

【参考文献】

- [1] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS 5,鉄筋コンクリート工事 JASS 5, pp.198-200, 2009.
- [2] 山崎順二・今本啓一・下澤和幸・永山勝：簡易透気性試験による RC 構造体の耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32,No.1, pp.1769- 1774,2010.

本論文に関する研究論文

および発表論文リスト

本論文に関する研究論文および発表論文リスト

1. 本論文に関する研究論文および筆頭著者論文

【3章および4章の関連論文】

- 1) 山崎順二, 今本啓一, 湯浅昇, 下澤和幸: 実大コンクリート壁における各種の透気性試験に関する共通試験, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第746号, pp.515-525, 2018年4月
- 2) 山崎順二, 今本啓一, 湯浅昇, 下澤和幸: 実大コンクリート壁におけるダブルチャンバー法を用いた表層透気性の評価に関する共通試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2013-2018, 2016.7
- 3) 山崎順二, 今本啓一, 田中章夫, 加藤猛: 透気性試験における繰返し測定および試験機の検定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1921-1926, 2017.7
- 4) Junji Yamasaki, Kei-ichi Imamoto: Round-ribin test on evaluation of air-permeability of real-size concrete wall by double-chamber method, KSNT Annual Spring Conference & International Workshop, Daegu, p.8, 2017.5

【5章の関連論文】

- 5) 山崎順二, 今本啓一, 下澤和幸, 永山勝: 簡易透気性試験による RC 構造体の耐久性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1769-1774, 2010.7
- 6) 山崎順二, 今本啓一, 下澤和幸, 永山勝: 原位置での簡易透気性とかぶり厚さによる RC 構造体の耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1999-2004, 2009.7
- 7) 山崎順二, 今本啓一, 下澤和幸, 永山勝: 簡易透気性試験による RC 構造物の耐久性評価手法に関する研究, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集(Vol.4), pp.81-86, 2012.8
- 8) 山崎順二, 今本啓一, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: 原位置での簡易透気性試験による RC 構造体の耐久性評価, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集(Vol.3), pp.329-334, 2009.8
- 9) 山崎順二, 下澤和幸, 今本啓一, 二村誠二: 簡易透気性試験による構造体コンクリートの耐久性評価手法に関する研究, コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集(Vol.2), pp.297-302, 2006.8
- 10) Junji Yamasaki, Kazuyuki Shimosawa, Masaru Nagayama, Keiichi Imamoto, Seiji Nimura, : A recent Japanese trial of air-permeability testers of concrete cover – Part2. Performance-based evaluation of durability of RC structures – Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structure (Concreep 8),

pp.1239-1244, 2008.9

- 11)山崎順二, 下澤和幸, 今本啓一, 永山勝: 既存鉄筋コンクリート構造物の耐久性能評価基準に関する実験的検討ーその 1 長期材齢コンクリートによる実験ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.1151-1152, 2012.9
- 12)山崎順二, 下澤和幸, 今本啓一, 田中章夫, 永山勝: 既存鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価に関する基礎的実験ーその 1 実験概要ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.155-156, 2011.8
- 13)山崎順二, 下澤和幸, 今本啓一, 永山勝: 簡易透気性試験による鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価手法に関する研究ーその 2 実大 RC 壁における透気性試験と耐久性評価ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.1271-1272, 2010.9
- 14)山崎順二, 今本啓一, 下澤和幸, 田中章夫, 永山勝, 二村誠二: コンクリートの施工時品質が表層透気性に及ぼす影響に関する実験的研究 その 1. 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.157-158, 2009.8
- 15)山崎順二, 下澤和幸, 今本啓一, 永山勝, 二村誠二: 透気性とかぶり厚さによる耐久性評価手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.805-806, 2008.9
- 16)山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 二村誠二, 成田瞬: 構造体コンクリートの各種表層透気試験法と評価ーその 2 実大試験壁におけるサンプリングと検定ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.1251-1252, 2007.8
- 17)山崎順二, 今本啓一, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: 簡易透気性試験によるコンクリートの耐久性評価に関する研究ーその 2 実大壁モデルでの簡易透気性試験の適用性に関する検討ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.141-144, 2006.9
- 18)山崎順二, 今本啓一, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: 簡易透気性試験によるコンクリートの耐久性評価に関する研究ーその 1 簡易透気速度に影響を及ぼす各種要因に関する検討ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.1177-1178, 2005.9

【その他の関連論文】

- 19)山崎順二, 今本啓一, 田中章夫, 下澤和幸, 加藤猛, 湯浅昇: RC 造建築物に適用する透気性試験における影響要因と評価手法に関する検討ーその 5. 仕上材を介した透気性評価方法に関する検討ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.553-554, 2017.8
- 20)山崎順二, 今本啓一, 湯浅昇, 下澤和幸, 田中章夫, 加藤猛, 蔵重勲, 本庄敬祐, 野中英, 佐藤大輔: 各種透気試験方法に関する共通試験ーその 1. 実験の概要ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.1237-1238, 2016.8
- 21)山崎順二, 今本啓一, 清原千鶴, 下澤和幸, 田中章夫, 本庄敬祐: 表層透気性によるコンクリートの品質評価に関する研究ーその 5. 模擬壁試験体における各種の透気試験結果の関係ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.367-368, 2015.9

- 22)山崎順二，今本啓一，下澤和幸：簡易透気性試験による仕上材を施した RC 構造体の耐久性評価手法に関する検討，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集 (Vol.5)，pp.273-276，2015.8
- 23)山崎順二，下澤和幸，今本啓一：簡易透気性試験による仕上材を施した RC 構造体の耐久性評価手法に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.1245-1246，2013.8

2. コンクリートの透気性に関する連名論文

- 1) 今本啓一，山崎順二，下澤和幸，永山勝，二村誠二：かぶりコンクリートの透気性に基づく RC 構造物の耐久性能検証に向けた基礎的研究－各種試験方法における透気性の指標値と中性化深さの関連－，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻第 638 号，pp.593-599，2009.4
- 2) 今本啓一，山崎順二，下澤和幸，永山勝，二村誠二：構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性の検討，日本建築学会構造系論文集，第 607 号，pp.31-38，2006.9
- 3) 下澤和幸，今本啓一，山崎順二，田中章夫，加藤猛，湯浅昇：RC 造建築物に適用する透気性試験における影響要因と評価手法に関する検討－その 1. 概要－，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.545-546，2017.8
- 4) 今本啓一，山崎順二，田中章夫，下澤和幸，加藤猛，湯浅昇：RC 造建築物に適用する透気性試験における影響要因と評価手法に関する検討－その 2. 繰返し測定に関する検討－，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.547-548，2017.8
- 5) 田中章夫，今本啓一，山崎順二，下澤和幸，加藤猛，湯浅昇：RC 造建築物に適用する透気性試験における影響要因と評価手法に関する検討－その 3. DC(TPT)および FIM 法における機差の検討－，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.549-550，2017.8
- 6) 加藤猛，今本啓一，山崎順二，田中章夫，下澤和幸，湯浅昇：RC 造建築物に適用する透気性試験における影響要因と評価手法に関する検討－その 4. 仕上材を介した透気性評価に関する検討－，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.551-552，2017.8
- 7) 田中章夫，今本啓一，湯浅昇，下澤和幸，山崎順二，本庄敬祐，蔵重勲，佐藤大輔，野中英，加藤猛：各種透気試験方法に関する共通試験－その 2. RILEM-CEMBUREAU 法と各種透気試験の関係－日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.1239-1240，2016.8
- 8) 加藤猛，今本啓一，山崎順二，田中章夫，下澤和幸，本庄敬祐，湯浅昇，野中英，蔵重勲，佐藤大輔：各種透気試験方法に関する共通試験－その 3. ダブルチャンバー法によ

- る検一，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.1241-1242，2016.8
- 9) 下澤和幸，山崎順二，田中章夫，加藤猛，本庄敬祐，今本啓一，湯浅昇，佐藤大輔，蔵重勲，野中英：各種透気試験方法に関する共通試験－その 4. 各種試験方法の比較－，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.1243-1244，2016.8
- 10) 本庄敬祐，田中章夫，下澤和幸，湯浅昇，今本啓一，野中英，加藤猛，蔵重勲，山崎順二，佐藤大輔：各種透気試験方法に関する共通試験－その 5. 各種試験結果と中性化速度係数の関係－，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.1245-1246，2016.8
- 11) 清原千鶴，今本啓一，下澤和幸，田中章夫，本庄敬祐，山崎順二：表層透気性によるコンクリートの品質評価に関する研究－その 1. 実験概要－，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.359-360，2015.9
- 12) 下澤和幸，清原千鶴，本庄敬祐，山崎順二，今本啓一，田中章夫：表層透気性によるコンクリートの品質評価に関する研究－その 2. 小型試験体の透気性－，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.361-362，2015.9
- 13) 田中章夫，下澤和幸，今本啓一，本庄敬祐，清原千鶴，山崎順二：表層透気性によるコンクリートの品質評価に関する研究－その 3. 水分挙動と透気係数の関係－，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.363-364，2015.9
- 14) 本庄敬祐，田中章夫，下澤和幸，今本啓一，山崎順二，清原千鶴：表層透気性によるコンクリートの品質評価に関する研究－その 4. 仕上材を施した R C 造部材の透気性の検討－，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.365-366，2015.9
- 15) 下澤和幸，山崎順二，今本啓一，：既存 RC 構造物におけるかぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能評価に関する実験的検討，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集(Vol.5)，pp.289-294，2015.8
- 16) 下澤和幸，山崎順二，今本啓一：仕上げ材を施した R C 造建築物への簡易透気試験の適用性に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.1169-1170，2014.9
- 17) 下澤和幸，山崎順二，今本啓一，永山勝：既存鉄筋コンクリート構造物の耐久性能評価基準に関する実験的検討－その 3 評価基準の検証－，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.1243-1244，2013.8
- 18) 下澤和幸，山崎順二，今本啓一，永山勝：既存鉄筋コンクリート構造物の耐久性能評価基準に関する実験的検討－その 2 評価基準の提案－，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），2012.9
- 19) 田中章夫，今本啓一，山崎順二，下澤和幸：ダブルチャンバー法透気試験機を用いた既存鉄筋コンクリート構造物の中性化予測に関する基礎的研究，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集(Vol.4)，pp.63-66，2012.8
- 20) 下澤和幸，山崎順二，今本啓一，永山勝：原位置透気性透気試験の既存鉄筋コンクリート構造物への適用，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集(Vol.4)，pp.87-90，2012.8

- 21)下澤和幸, 山崎順二, 今本啓一, 田中章夫, 永山勝: 既存鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価に関する基礎的実験ーその 2 簡易透気性試験の既存 RC 構造物への適用ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.157-158, 2011.8
- 22)下澤和幸, 山崎順二, 今本啓一, 永山勝: 簡易透気性試験による鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価手法に関する研究ーその 1 供試体による簡易透気性試験と中性化深さに到達期間ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.1269-1270, 2010.9
- 23)下澤和幸, 山崎順二, 今本啓一, 田中章夫, 永山勝, 二村誠二: コンクリートの施工時品質が表層透気性に及ぼす影響に関する実験的研究 その 3. 硬化コンクリートの物性と透気性の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.161-162, 2009.8
- 24)下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二: 各種透気試験における指標と中性化深さの関連についての一考察, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集 (Vol.3), pp.323-328, 2009.8
- 25)下澤和幸, 山崎順二, 今本啓一, 永山勝, 二村誠二: 国内のコンクリートを対象とした各種透気試験法の閾値の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.803-804, 2008.9
- 26)下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 成田瞬, 山崎順二, 二村誠二: 構造体コンクリートの各種表層透気試験法と評価ーその 1 実験概要と小型試験体の検定ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.1249-1250, 2007.8
- 27) 永山勝, 下澤和幸, 今本啓一, 成田瞬, 山崎順二, 二村誠二: 構造体コンクリートの各種表層透気試験法と評価ーその 3 サンプル数とデータの評価方法についてー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.1253-1254, 2007.8
- 28)今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: シングルチャンバー法による透気指数とかぶりコンクリートの耐久性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.137-140, 2006.9
- 29)下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二: かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する研究 (その 3. 透気試験の透気領域と適用性および比抵抗と含水率との関係について), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.145-148, 2006.9
- 30)下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二: かぶりコンクリートの耐久性評価に関する簡易試験法の開発, コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集 (Vol.2), pp.297-302, 2006.8
- 31)今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: チャンバー法によるかぶりコンクリートの非破壊透気性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.691-692, 2005.9
- 32)下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二: かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する研究 (その 2. 室内実験および実大壁実験について), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.1179-1180, 2005.9

謝 辭

謝 辞

本論文は、筆者が株式会社浅沼組技術研究所の研究員として、また、東京理科大学大学院工学研究科における博士後期課程の学生として取り組んできた、コンクリートの透気性を用いた耐久性評価手法に関する一連の研究成果を纏めたものです。

本論文の執筆に際し、多くの関係者の皆様から御指導や御協力をいただきました。ここに御名前を記して謝辞を述べさせていただきます。

恩師であります東京理科大学工学部建築学科の今本啓一教授には、透気性に関する一連の研究を始める以前から、再生骨材コンクリートの品質改善に関する共同研究や、コンクリートの収縮特性などに関してご指導をいただきました。本研究を始めるにあたり、今本先生には、コンクリートの透気性や RC 構造物の調査診断に関する技術的内容、論文に関する考え方などは勿論のこと、国際会議においては語学まで含めたご指導など、コンクリート材料のみならず建築材料全般に関する学術的な指導に加え、日本建築学会やコンクリート工学会の動向、研究者としての姿勢や研究開発の楽しさに至るまで、懇切丁寧に数多くのご指導・ご教示をいただきました。未熟な筆者が本論に示した研究成果を博士論文として纏めることができましたのも、今本先生の根気強く温かいご指導の賜物であり、ここに深く感謝申し上げます。

日本大学生産工学部建築学科の湯浅昇教授には、透気性の研究を始めた頃から数多くのご指導およびご助言をいただきました。筆者が博士後期課程に入学してからも、非破壊検査協会に設置された透気試験方法に関する研究委員会にも参画させていただき、本論の構成の主要な部分に係わる実験を共同研究として実施させていただき、懇切丁寧にご指導をいただきました。湯浅先生には本論文の審査においても貴重なご指摘およびご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

東京理科大学理工学部土木工学科の加藤佳孝教授、東京理科大学理工学部建築学科の兼松学教授におかれましては、以前から学協会の委員会などで同席した際にもご指導いただいておりますが、本論文の審査においても貴重なご指摘およびご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

一般財団法人日本建築総合試験所の下澤和幸様、永山勝様、株式会社八洋コンサルタントの田中章夫様におかれましては、長年にわたり共同研究者として数多くのご助言およびご支援をいただきました。東京理科大学工学部建築学科の加藤猛君には、博士前期課程の学生として実験などにおいて数多くの御協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

また、本研究の遂行に際し、株式会社浅沼組の浅沼健一社長には、東京理科大学大学院工学研究科・博士後期課程への入学許可をいただき、全面的な御支援をいただきました。同社技術研究所の石原誠一郎所長ならびに直属の上司である立松和彦グループリーダーに

は、筆者が博士課程に入学する以前から研究実施に関して数多くのご支援やご助言に加えて励ましのお言葉をいただきました。その他、株式会社浅沼組の全ての関係者には、ここに深く感謝申し上げます。

一方、筆者が大阪工業大学在学中において、大阪工業大学工学部建築学科の恩師である（故）二村誠二先生および（故）松原光彦先生には、卒業研究から修士論文作成まで研究開発の基礎をご指導いただき、さらに株式会社浅沼組に入社後も共同研究などで数多くのご指導をいただきました。両先生は御逝去され、本論文をご報告できなかったことが残念に思います。

最後に、筆者の健康をいつも気にかけて心配してくれる両親 父 一良と母 英子、さらに、いつも家庭と生活を支え続けてくれ、どんなに帰宅が遅くなっても温かく待っていてくれ、疲れやストレスを明るい笑顔でいつも癒してくれる妻 美穂に心より感謝いたします。

平成 30 年 3 月

山崎 順二