# 7. ファインバブル水を用いたコンクリートの基礎的実験

# Fundamental Experiment of Concrete Using Fine Bubble Water

加藤 猛\*1 山崎 順二\*1

# 要 旨

直径 100μm 以下の微細な泡であるファインバブルを発生させた水を,コンクリートの練混ぜ水として用いることで フレッシュ性状や硬化後のコンクリートの物性値の違いについて検証を試みた。その結果、フレッシュ性状については スランプおよび空気量に変化はほとんどなく、硬化後のコンクリートにおいても JIS の試験方法における結果に差は少 なかった。しかし、リニアトラバース法や水銀圧入法の詳細な分析から、気泡間隔係数が小さくなっていることや遷移 帯の細孔径とされる 50nm 以上の細孔量が少なくなっていることが確認された。

キーワード:ファインバブル/フレッシュ性状/硬化後の物性値/遷移帯/細孔量

## 1. はじめに

ファインバブル (Fine Bubble: 以下 FB) は直径 100µm 以下の微細な泡で、ミリバブルやセンチバブルなどの目 に見える気泡と比べると水中に長時間滞留する。さらに 気泡表面がマイナスの電荷を帯びており、物体の吸着や 反発等の表面活性作用がある<sup>例えば1),2)</sup>とされる。その特徴 から、コンクリートの練混ぜ水として FB 水を用いること で, 微細な泡のボールベアリング効果による混和剤使用 量の低減や FB がマイナス電荷を帯びたことによりコン クリートと鉄筋との付着強度が向上するなどの効果が期 待される。

本実験では、コンクリートの練混ぜ水に FB 水を用いる ことでフレッシュ性状や硬化後のコンクリートの物性値 の違いについて検証した結果を示す。

## 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および調合

実験に用いるコンクリートの使用材料を表-1,計 画調合を表-2に示す。練混ぜ水には上澄水(以下 RW)を用いており、FBは上澄水に対して発生させて いる。なお、FB発生装置を 60 分程度稼働した後の水 を FBW としている。コンクリートの呼び強度は 24, 30 および 36 の 3 種類とした。

2.2 FB 発生後の確認

RWにFBを発生させたことの確認を簡易に実施す るため, RW および FBW の溶存酸素量を測定した。 また,経時変化を測定するために,FB発生直後,7, 14 および28日で測定した。

#### 2.3 フレッシュ性状

練混ぜ後のコンクリートに対して、スランプ (JIS A 1101)および空気量(JISA 1128)試験を実施した。

## 2.4 硬化後の物性値

硬化後のコンクリートの物性値の試験として,表-3に示す試験を実施した。圧縮強度,長さ変化,促進 中性化および凍結融解の試験は JIS に則り行った。

透気試験および加圧透水試験の供試体寸法はΦ125 ×250mmとし、材齢28日まで、標準養生を行った 後, 材齢 91 日まで温度 20℃, 湿度 60%の恒温恒湿の 部屋に静置した。また測定面は、打込み面と反対の面

材料名	種類および物性				
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)				
水	上澄水(RW)またはファインバブル水(FBW)				
細骨材	砕砂(S1) (表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.24%, 粗粒率 2.88)				
	石灰砕砂(S2) (表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.76%, 粗 粒率 2.85)				
粗骨材	砕石(G1 2010)(G2 1505) (表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup> , 吸水 率 0.53%, 実積率 59.7%)				
混和剤	高性能 AE 減水剤				

表-2 計画調合

調合	W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
			W	С	S1	S2	G1	G2	Ad
24-18-20N	57	51.6	180	316	556	370	440	440	2.94
30-18-21N	50	49.9	180	360	527	351	445	445	2.92
36-18-22N	44	48.2	180	409	497	330	449	449	3.15

\*1技術研究所建築材料研究グループ

としている。透気試験は NDIS 3436-2 に示されるダブ ルチャンバー法を実施した。加圧透水試験は, GWT

(Germans Water-permeability Test)を用いて,野中ら が検討した結果<sup>3)</sup>を参考に印加圧力は 30kPaで,1回 目の 300 秒の測定結果は棄却し,連続した2回目の 300 秒の測定結果を透水速度とした。

リニアトラバース法は、気泡間隔係数、硬化後の空 気量および各平均気泡径の気泡比率を測定した。

水銀圧入法では、コンクリートをウエットスクリー ニングしたモルタルを用い、養生方法は透気試験およ び加圧透気試験の供試体と同様にした。試験片は、モ ルタルから2,3mm角の小片を採取し、48時間の脱気 乾燥を行った後に水銀圧入法を実施した。

## 3. 実験結果

#### 3.1 FBW の溶存酸素量

図-1に示すように、水温が高いほど飽和溶存酸素 量は小さくなる。測定日によって水温が異なっていた ため、測定時の飽和溶存酸素量に対する溶存酸素量を 飽和度として、溶存酸素量を測定した結果を図-2に 示す。

図-2より, FBW について FB 発生直後は, RW よ り飽和度が 2.5 割程度大きく, 微細な泡が水中に滞留 していることが考えられる。時間の経過とともに減少 し, 28 日において飽和度 0.9 程度であり, RW の飽和 度の初期値と概ね同等の値を示した。

## 3.2 フレッシュ性状

表-4にコンクリート練混ぜ後のフレッシュ性状を 示す。FBW の微細な泡によって, RW よりもフレッシ ュ時の空気量が多く, 微細な泡のボールベアリングで スランプが大きくなることが推察されたが, 呼び強度 24 および 30 では, スランプ, 空気量ともに同等もし くは RW よりも小さい値を示した。図-2 にも示した ように, 練混ぜ前では FBW は, 微細な泡が水中に滞 留していることが考えられるが, 混和剤の影響もしく はミキサーでの練混ぜ中に微細な泡が消失しているこ とが推察される。

#### 3.3 硬化後の物性値

#### (1) 圧縮強度試験

図-3 に圧縮強度試験結果を示す。呼び強度 24 の FBW については、計量間違いが発覚したため、欠測 値としている。なお、以降の試験については圧縮強度 試験用と異なるバッチで練混ぜられている。図-3 よ り、呼び強度が大きくなるにつれて圧縮強度が大きく

表-3 硬化後コンクリートの物性値試験

試験項目	概要	測定材齢	
	JIS A 1108	3d,7d,28d,91d	
目と本小	UC A 1120 2	1w,3w,5w,8w,13w,26	
長さ変化	JIS A 1129-2	w	
促進中性化	JIS A 1153	1w,4w,8w,13w,26w	
凍結融解	JIS A 1148	30cycle ごと 300 まで	
透気試験	NDIS 3436-2	91d	
加圧透水試験	GWT	91d	
リニアトラバース法	-	91d	
水銀圧入法	-	91d	

#### 表一4 フレッシュ性状

	配合	練混ぜ水	スランプ (cm)	フロー (cm)	空気量 (%)
24-	24 10 20 N	RW	18.2	29.4	4.7
	24-18-20 N	FBW	18.2	29.2	4.4
20	20 19 201	RW	19.2	30.7	4.6
	30-10-2010	FBW	18.6	30.4	4.6
36-18-20N	26 19 20N	RW	17.9	29.1	4.4
	FBW	19.2	30.8	5.0	



図-1 蒸留水の 1atm における各温度の飽和溶存酸 素量



図-2 飽和度の経時変化



なることが確認できる。各呼び強度でのRWとFBW に圧縮強度の差は、ほとんどないことがわかる。

## (2) 長さ変化試験

長さ変化の経時変化を図-4に示す。図-4より,材齢の経過とともに収縮率は大きくなっている。呼び強度の 違いおよび練混ぜ水が RW か FBW の違いによる収縮率 の差はほとんどなく,乾燥材齢 182 日で 720~750μの収 縮率を示した。

## (3) 促進中性化試験

中性化の促進材齢 1, 4, 8, 13 および 26 週における中性 化族度係数の平均値を図-5 に示す。呼び強度が大きいと 中性化速度係数は小さくなる。練混ぜ水が RW か FBW の 違いによる中性化速度係数の大小は各呼び強度で異なっ ていることが確認できる。呼び強度 30 で概ね同程度の中 性化速度係数を示し,呼び強度 24 で FBW の中性化速度 係数が 1 割程度大きく,呼び強度 36 で FBW の中性化速 度係数が 3 割程度小さい値を示した。

## (4) 凍結融解試験

凍結融解試験結果を図-6に示す。呼び強度が大きいほ ど相対動弾性係数は大きく,各呼び強度でRWとFBWは 概ね同程度の動弾性係数の経時変化を示している。呼び 強度36では300サイクルで約80%となり,耐凍害性を 有するコンクリートであることがわかる。呼び強度30で は300サイクルで約30%を示し,呼び強度24では150ま たは180サイクルで約10%を示し,以降の測定は不能と なった。

## (5) 透気試験(ダブルチャンバー法)

ダブルチャンバー法の試験結果を図-7に示す。呼び強 度が大きいと透気係数は小さくなるが、呼び強度 24 と 30 における透気係数の差は小さい。また、同一呼び強度であ れば FBW の透気係数が若干小さい傾向にある。透気係数 は中性化速度係数と高い相関関係がある<sup>例えば4)</sup>とされ、図 -7の透気係数の大小は図-5の促進中性化試験結果と概 ね対応している。

## (6) 加圧透水試験 (GWT)

加圧透水試験結果を図-8 に示す。RW に着目すると, 呼び強度が大きいと吸水速度は小さくなるが,呼び強度 30 と 36 における透水速度は同程度である。透気係数では 呼び強度 30 と 36 の間で差が大きくなったが,透水速度 では呼び強度 24 から 30 の間で差が大きくなっている。 コンクリート中の連続する空隙を空気の透過性で評価す る透気試験と加圧下における水の透水量で評価する加圧 透水試験とでは結果の傾向に違いがみられた。

## (7) リニアトラバース法



図-4 長さ変化の経時変化



図-5 促進中性化試験結果



図-6 凍結融解試験結果



コンクリートの硬化後の空気量および気泡間隔係数を 図-9 に示す。呼び強度 24 および 30 における硬化後の 空気量は表-4のフレッシュ時の空気量より 2%程度低下 している。一方,呼び強度 36 では,フレッシュ時から硬 化後の空気量が低下する割合は小さいことが確認できる。

気泡間隔係数は呼び強度が大きいほど小さく,呼び強 度 24 および 30 においては,練混ぜ水を FBW とすること で,気泡間隔係数が 50µm 程度小さくなっている。しか し,図-6の凍結融解試験の結果で示されたように FBW の相対動弾性係数が大きくなり,耐凍結融解性が向上す るほどの差ではなかった。

図-10 に各呼び強度における気泡比率を示す。いずれの呼び強度においても気泡径 25~250µmの微細な気泡の割合は多いことがわかる。また,呼び強度が小さいほど気泡径 25µmの割合が多い傾向にある。

FB が気泡径 100µm 以下の微細な泡であり, ISO/TC281 では 1~100µm をマイクロバブル (Micro Bubble:以下 MB), 1µm 未満をウルトラファインバブル (Ultra Fine Bubble:UFB) と定義される。各強度で RW と FBW の気 泡径 100µm 以下の分布に差がほとんどみられなく, MB は練混ぜ中もしくは硬化中に消失したことが考えられる。

## (8) 水銀圧入法

各呼び強度における水銀圧入法の測定結果を図-11 に 示す。なお,水銀圧入法に用いた試験片は,圧縮強度用に 練り混ぜられたバッチと同様であったため、呼び強度 24 のFBW の結果は欠測値としている。いずれの呼び強度で 200nm 付近から細孔量が急増しており、50~80nm の細孔 範囲でピークが発現している。また、各呼び強度における RW とFBW の細孔径は概ね同様の分布を示している。

骨材とセメントペーストの界面部分には 50nm 以上の 粗大な空隙に富む遷移帯が形成され、50n~2µmの範囲の 細孔量が少ないほど圧縮強度が大きくなる <sup>5</sup>とされてい る。また,中性化の進行においても 40nm 以上の細孔量と 中性化速度係数に関係性があるとされる<sup>9</sup>。そこで,細孔 範囲を 7n~50nm、50n~100nm、100n~2µm、2µ~10µm と して,各範囲の細孔量を図-12 に示す。比較的細孔径の 小さい 7n~50nm の範囲では、呼び強度 24 および 30 の 細孔量が同程度であり、呼び強度 36 でわずかに少なくな



図-9 硬化後の空気量(左)および気泡間隔係数(右)



っている。細孔径 50nm 以上の範囲では, 呼び強度が大き いほど, 細孔量が少なくなる傾向にあり, 同一呼び強度に おいて FBW の細孔量は RW より少なくなっていること が確認できる。さらに, 細孔径範囲 50n~2µm の細孔量と 圧縮強度および中性化速度係数との関係について図-13 に示す。既往の研究<sup>5).6</sup>と同様に細孔径 50n~2µm の細孔 量が大きくなると圧縮強度は小さくなり, 中性化速度係 数は大きくなる傾向を示している。細孔量の違いが圧縮 強度および中性化の進行に影響を及ぼすが, 本実験内で は, 同一呼び強度における RW と FBW の細孔量の差は, 圧縮強度や中性化速度に影響を及ぼすほどでなかったと 考えられる。

コンクリート硬化後の物性値について各種試験を行っ た結果, 圧縮強度試験, 促進中性化試験, 長さ変化試験お よび凍結融解試験の結果では, 練混ぜ水に FB を発生させ ても試験結果に差は少なかった。しかし, リニアトラバー ス法や水銀圧入法の詳細な分析から, 気泡間隔係数が小 さくなっていることや細孔径 50n~2µm の細孔量が少な くなっていることや細孔径 50n~2µm の細孔量が少な くなっていることが確認された。ミクロな部分では, セメ ントの水和過程で, 帯電した UFB が化学反応に作用し, 異なる生成物の性質によりセメントペーストと骨材界面 の遷移帯に影響を及ぼした等が考えられるが, 検証のた めには, より詳細な検討が必要と考える。

## 4. まとめ

コンクリートの練混ぜ水にファインバブル水を用いる ことでフレッシュ性状や硬化後のコンクリートの物性値 の違いについて検証した結果を以下に示す。

(1) フレッシュ性状について, 溶存酸素量の測定結果から, FB 発生直後は, RW より溶存空気量は多いが, スランプ および空気量に変化はほとんどなく, 混和剤の影響もし くはミキサーでの練混ぜ中に微細な泡が消失しているこ とが考えられる。

(2) 硬化後の物性値について, 圧縮強度試験, 促進中性化 試験, 長さ変化試験および凍結融解試験の結果では, 練混 ぜ水に FB を発生させても試験結果に差は少なかった。し かし, リニアトラバース法や水銀圧入法の詳細な分析か ら, 気泡間隔係数が小さくなっていることや細孔径 50n~ 2µm の細孔量が少なくなっていることが確認された。

## [謝辞]

本実験に関して,大阪兵庫生コンクリート工業組合「マ イクロバブルを用いたコンクリートの調査研究 WG」の 協力を得ました。関係者各位に感謝の意を表します。



図-13 細孔径範囲 50n~2µm の細孔量と圧縮強度(左図) および中性化速度係数(右図)との関係

[参考文献]

- 高橋正好:マイクロバブルの基礎と半導体洗浄への 応用,精密工学会誌,83,7,pp.636-640,2017
- 2) 柘植秀樹:マイクロバブル・ナノバブルの基礎,日本 海洋学会誌,64(1), pp4-10,2010
- 3) 野中英,三谷和裕,清水峻,湯浅昇:表層透水試験方法に関する検討,シンポジウム、コンクリート構造物の非破壊検査,pp175-180
- 4) 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、日本建築学会構 造系論文集, Vol.74, No.638, pp.539-599, 2009.4
- 5) 内川浩,羽原俊祐,沢木大輔:硬化モルタル及びコン クリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと 強度との関係の検討,コンクリート工学論文集, Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993.7
- 部度連,宇治公隆,國府勝郎,上野敦:養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔 径の評価,土木学会論文集,Vol57,No.718V,pp.59-68, 2002.11