

# 人工軽量細骨材を使用した低環境負荷型高強度コンクリートの 収縮特性と凍結融解抵抗性に関する研究

## Study on Shrinkage Properties and Freeze-thaw Resistance of High-strength Concrete with Low Environmental Impact using Artificial Lightweight Fine Aggregate

建設基盤技術部 峯 竜一郎 RYUICHIRO MINE

建設基盤技術部 臺 哲義 AKIYOSHI DAI

建設基盤技術部 飛鷹 晶子 AKIKO HIDAKA

建設基盤技術部 恩田 陽介 YOSUKE ONDA

建設基盤技術部 松田 拓 TAKU MATSUDA

超低水結合材比条件で単位水量を通常よりも低減し、細骨材に人工軽量骨材を用い、結合材の約 6 割が副産物で構成された低環境負荷型高強度コンクリートを対象として、その収縮特性および凍結融解抵抗性を確認した。水結合材比を 18, 20, 25% の 3 水準とし、単位水量 110~140kg/m<sup>3</sup> の範囲で十分に吸水させた人工軽量細骨材を使用し、AE 剤を使用しない条件で室内試験を実施した。その結果、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみはどちらも全水準で少ない結果となったが、凍結融解試験の結果には調合条件による違いが確認された。実験結果から、凍結融解抵抗性が求められる場合に推奨される調合条件の範囲を提案した。

**キーワード：**高強度コンクリート、人工軽量細骨材、低環境負荷、単位水量、収縮ひずみ、凍結融解

Shrinkage and freeze-thaw resistance properties were investigated on high-strength concrete with ultra-low water binder ratio of which unit water content was reduced than conventional concrete. In particular, the studied concrete was with low environmental impact in which about 60% of the binder was composed of by-products and containing artificial lightweight aggregate. The water-binder condition is an ultra-low water binder ratio that has a reduced unit water amount than conventional concrete. Laboratory tests using saturated artificial lightweight fine aggregate were conducted under the condition that the water-binder ratio was set to three levels: 18, 20 and 25%. Unit water content was set around 110 to 140 kg / m<sup>3</sup>, and no AE agent was used. As a result, although both autogenous and drying shrinkage were small at all levels, some differences were confirmed from the results of the freeze-thaw test. From the experimental results, we proposed the range of recommended mix proportion when freeze-thaw resistance is required.

**Key Words:** High-strength concrete, Artificial lightweight fine aggregate, Low environmental impact, Unit water content, Shrinkage, Freeze-thaw

### 1. はじめに

既往の研究によれば、超低水結合材比条件下で吸水率が大きいフェロニッケルスラグ細骨材を用い、単位水量を極力低減すると、自己収縮と乾燥収縮のどちらも極めて少ない高強度コンクリートが得られる<sup>1)</sup>。その際に自己収縮が低減されるメカニズムは、内部養生効果に起因すると考察されている<sup>2)</sup>。

骨材の内部養生効果を利用した例として、近年では

人工軽量細骨材を使用した超高強度コンクリートの自己収縮を低減する技術が報告されている<sup>3)4)</sup>。また、著者らは人工軽量細骨材を用いることで、乾燥収縮と自己収縮を著しく低減できることを報告している<sup>5)</sup>。

一方、人工軽量骨材の吸水率は天然骨材よりも高いため、人工軽量骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性は、天然骨材を使用したものと比較した場合に低下する傾向にあると言われている<sup>6)</sup>。しかし、それらの報告は軽量 1 種もしくは軽量 2 種のコンクリートにおけ

表-1 使用材料

記号	種類	物性値
W	水	上水道水, 密度: 1.00g/cm <sup>3</sup>
NC	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3,290cm <sup>2</sup> /g
BF	高炉スラグ微粉末	密度: 2.89g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 4,630cm <sup>2</sup> /g,
SF	シリカフェーム	密度: 2.25g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 200,000cm <sup>2</sup> /g
LWS	人工軽量細骨材	表乾密度: 1.85g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 13.6%
G	硬質砂岩碎石	栃木県鹿沼産, 表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.6%
SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸系
AF	消泡剤	エステル脂肪酸系

表-2 コンクリートの配(調)合条件

NO.	記号	W/B (%)	目標 空気量 (%)	s/a (%)	単位 粗骨材 かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
						W	B	NC	HC	BF	SF	LWS	G
1	18-W140	18.0	3.5±1.5	55.0	0.408	140	778	296	0	404	78	567	662
2	18-W130				0.429	130	722	274	0	376	72	596	697
3	18-W120				0.450	120	667	253	0	347	67	626	731
4	18-W110				0.472	110	611	232	0	318	61	655	766
5	20-W140	20.0			0.427	140	700	266	0	364	70	594	693
6	25-W140	25.0			0.462	140	560	213	0	291	56	644	750
7	25-W110				0.515	110	440	167	0	229	44	715	836
比較	40-W165	40.0	4.5±1.5	43.0	0.609	165	413	0	413	0	0	530	998 <sup>※</sup>

※岩瀬産硬質砂岩碎石を使用

る試験結果であり、細骨材のみを人工軽量細骨材としたコンクリートの報告は少ない<sup>7)</sup>。

凍結融解抵抗性を向上させる手法として、AE 剤を使用し、空気量を増加させるとともに、コンクリート中にエントレイドエアを導入させる手法がある。しかし、人工軽量骨材を使用したコンクリートの場合、それだけでは十分ではなく、骨材の含水率を小さくする必要があるとされている<sup>8)</sup>。施工の観点では、人工軽量骨材を使用したコンクリートの場合、プレウェッティングした骨材を使用しないとワーカビリティの低下やポンプ圧送時に閉塞する危険性が高まるため、十分に吸水させた骨材を使用することが望ましい。一方、高強度コンクリートの場合、セメントペースト部の組織が緻密であるため、空気量が少なく、AE 剤を用いない条件でも凍結融解抵抗性に優れることも知られている<sup>9)</sup>。このことは、十分に吸水させた人工軽量細骨材を使用したコンクリートであっても、高強度コンクリートであれば AE 剤を使用せずとも凍結融解抵抗性に優れる条件が存在する可能性を示唆する。

本研究は、既報<sup>7)</sup>で提案された低収縮な高強度コンクリートにおいて、結合材の約 6 割を副産物とし、かつ細

骨材に表乾状態の人工軽量骨材を使用したものを対象とし、AE 剤を使用せずに、単位水量と水結材比を変化させた場合における収縮特性および凍結融解抵抗性を確認したものである。

## 2. 使用材料とコンクリートの配(調)合条件

使用材料を表-1 に示す。結合材 (B) を普通ポルトランドセメント (NC)、高炉スラグ微粉末 (BF)、シリカフェーム (SF) の 3 成分系とした。高炉スラグ微粉末は 4000 ブレーン相当のものを使用した。細骨材は、原料が膨張性頁岩の人工軽量細骨材 (LWS) を 24 時間以上水道水に浸漬することで十分に吸水させたものを使用した。粗骨材は最大粒径が 20mm の硬質砂岩碎石 (G) とした。高性能減水剤 (SP) は、主成分がポリカルボン酸系のものを使用した。コンクリートの配(調)合条件を表-2 に示す。なお、表中には後述する凍結融解抵抗性を比較した調合条件も併せて記載した。結合材は質量比で NC : BF : SF=38 : 52 : 10 とした。目標スランプフローは設定せず、SP 添加量を調整し、スランプフロー試験後のコンクリートを目視で材料分離の生じない範囲で

表-3 フレッシュ試験結果

NO.	記号	SP [B×%]	AF [B×%]	スランブフロー [cm]				スランブ [cm]	50cmスランブ フロー到達時間 [Sec]	停止 時間 [Sec]	空気 量 [%]	単位 容積質量 [kg/m <sup>3</sup> ]	練上がり 温度 [°C]	室内 温度 [°C]
				1	×	2	平均							
1	18-W140	0.85	0.005	66.5	×	65.8	66.2	-	7.6	64.0	3.8	2158	22.1	19.7
2	18-W130	0.85	0.005	52.0	×	49.5	50.8	-	35.0	60.0	4.0	2180	21.4	19.1
3	18-W120	0.95	0.005	48.5	×	47.0	47.8	-	-	58.0	2.9	2247	22.2	19.7
4	18-W110	1.00	0.005	47.0	×	46.5	46.8	-	-	51.2	3.2	2238	22.4	19.9
5	20-W140	0.80	0.005	60.0	×	57.0	58.5	-	8.0	61.5	4.6	2118	21.6	20.2
6	25-W140	0.75	0.005	65.5	×	65.5	65.5	-	4.2	44.7	3.7	2156	21.4	19.7
7	25-W110	0.75	0.005	38.0	×	37.5	37.8	21.0	-	31.4	4.8	2151	21.5	19.8
比較	40-W165	0.40 <sup>*</sup>	0.004	38.0	-	-	-	8.5	-	-	6.5	-	21.9	20.4

※高性能 AE 減水剤を使用

ワーカビリティが確保できているかを判断することとした。目標空気量は  $3.5 \pm 1.5\%$  とした。また、人工軽量骨材の影響を確認するため、全水準で細骨材率 (s/a) を  $55.0\%$  とした。水結合材比 (W/B) =  $18.0\%$  のシリーズについては、単位水量を 110, 120, 130,  $140 \text{ kg/m}^3$  の 4 水準とした。W/B =  $20.0\%$  のシリーズは、単位水量が  $140 \text{ kg/m}^3$  の 1 水準、W/B =  $25.0\%$  のシリーズは単位水量が 110,  $140 \text{ kg/m}^3$  の 2 水準とし、計 7 水準とした。

### 3. 実験方法

#### (1) 試験体作製手順

コンクリートの練混ぜには強制 2 軸ミキサを使用した。普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、人工軽量細骨材を投入し、10 秒攪拌後に水と化学混和剤を投入し 180 秒間練り混ぜた。その後、硬質砂岩碎石を投入し 180 秒間練り混ぜ、コンクリートとした。1 バッチの練量は 50L とした。練混ぜ完了後、フレッシュ試験を実施し、供試体を作製した。

#### (2) 圧縮強度試験およびヤング係数測定方法

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠した。試験材齢および養生条件は、 $20^\circ\text{C}$  封かん養生材齢 7 日、標準水中養生材齢 28 日、 $90^\circ\text{C}$  加熱封かん養生材齢 7 日の 3 水準とした。なお、 $90^\circ\text{C}$  加熱封かん養生については、供試体作製後、 $20^\circ\text{C}$  一定の恒温室で 24 時間養生後、 $90^\circ\text{C}$  に設定した養生槽に入れ、試験材齢まで養生した。

ヤング係数の測定は JIS A 1149 に準拠した。試験材齢は標準水中養生材齢 28 日とし、圧縮強度試験と並行で実施した。ひずみ測定器はひずみゲージを用いた。

#### (3) 凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148 A 法に準拠して実施した。養生条件は  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  の水中養生とし、試験開始材齢は材齢 28 日とした。なお、比較として、谷口ら<sup>3)</sup>の論文に示される配(調)合条件(水セメント比  $40\%$ 、単位水量  $165 \text{ kg/m}^3$ 、早強ポルトランドセメント、人工軽量細骨材、高性能 AE 減水剤)の供試体を作製し、試験を実施した。

#### (4) 収縮ひずみ

収縮ひずみの測定は、 $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$  の供試体を用いて実施した。供試体の中央部に低弾性の埋込み型ひずみ計を設置し、作製したコンクリートをすみやかに打設し、測定を開始した。収縮ひずみの基点はコンクリート打設直後とし、線膨張係数を  $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  と仮定して収縮ひずみを求めた。養生条件は、打設完了直後から  $20^\circ\text{C}$  封かんとしたものと打設から材齢 7 日まで  $20^\circ\text{C}$  封かん養生を行い、その後脱枠し、 $20^\circ\text{C} 60\% \text{ RH}$  の環境で乾燥させた 2 水準で測定を実施した。なお、収縮ひずみの測定は、18-W140, 18-W110, 20-W140, 25-W140, 25-W110 の 5 水準とした。

## 4. 実験結果

#### (1) フレッシュ性状

フレッシュ試験結果を表-3 に示す。スランブフロー値は  $37.8 \sim 66.2 \text{ cm}$  の範囲であった。W/B =  $18.0\%$  に着目すると、スランブフロー値は  $46.8 \sim 66.2 \text{ cm}$  の範囲であった。SP 添加率は  $0.85 \sim 1.00\%$  の範囲であり、単位水量が小さくなると SP 添加率を大きくしてもスランブフロ

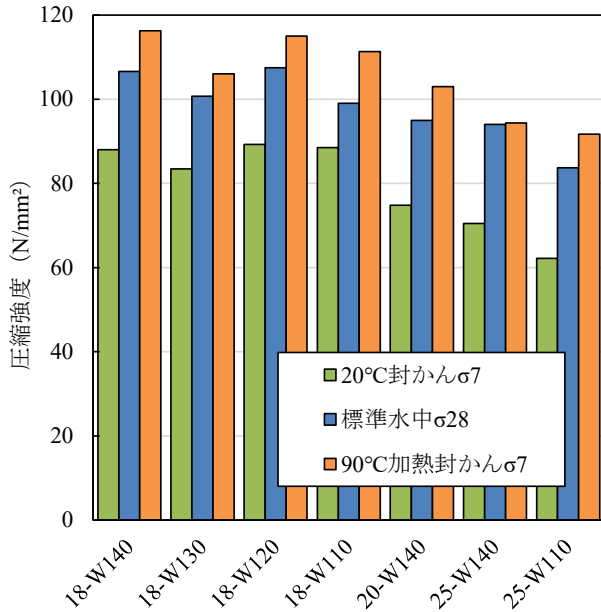


図-1 圧縮強度試験結果

一値が小さくなる傾向が見られた。単位水量の違いやLWSの使用量によってスランプもしくはスランプフローの上限値が異なる可能性があり、今後の検討課題としたい。また、空気量は2.9~4.8%の範囲となった。

### (2) 圧縮強度とヤング係数

圧縮強度試験結果を図-1に示す。一般的なコンクリートと同様に、W/Bが大きくなると圧縮強度が小さくなる傾向が見られた。W/B=18.0%のシリーズの標準水中養生材齢28日の圧縮強度を見ると、99.1~107N/mm<sup>2</sup>の範囲であり、空気量の違いを考慮しても、大きな違いはないと考えられる。W/B=25.0%のシリーズを見ると、25-W140で94.0N/mm<sup>2</sup>、25-W110で83.7N/mm<sup>2</sup>であった。25-W110の圧縮強度が小さくなった理由として、W/Bが大きくなることで、ペースト部分の強度が小さくなったことと、セメントペーストに対する人工軽量細骨材の容積比 (vs/vp) が大きくなったことだと推察される。

ヤング係数と圧縮強度の関係を図-2に示す。図中には、以下に示すヤング係数の推定式<sup>9)</sup> ( $\gamma=2.1\sim 2.4$ )も記した。

$$E = \kappa_1 \times \kappa_2 \times 3.35 \times 10^4 \times (\gamma/2.4)^2 \times (F_c/60)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで、E: ヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\kappa_1$ : 骨材種類により定まる補正係数、 $\kappa_2$ : 混和材種類により定まる補正係数、 $\gamma$ : 単位容積質量 (t/m<sup>3</sup>)、 $F_c$ : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)である。なお、 $\kappa_1 = \kappa_2 = 1.0$ とした。

本研究の調合条件における単位容積質量は  $\gamma=2.09\sim 2.14$ t/m<sup>3</sup>の範囲であるが、全てのプロットが  $\gamma=2.2$ t/m<sup>3</sup>

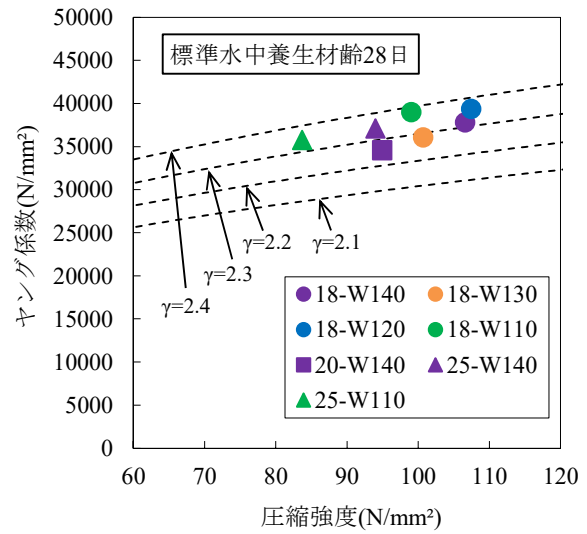


図-2 圧縮強度とヤング係数の関係

の推定式よりも上になっている。一般的に、人工軽量骨材を使用したコンクリートのヤング係数は小さくなる傾向にある<sup>4)</sup>と言われるが、本研究の範囲内においてはそのような傾向は見られず、一般的な高強度コンクリートと同程度の弾性係数を有していると考えられる。

### (3) 収縮ひずみ

養生条件を20°C封かん養生とした供試体の打込みから100日までの収縮ひずみ測定結果を図-3に示す。既報1)と同様に、測定値は全ての水準で膨張側に推移し、自己収縮ひずみは確認されなかった。これは、人工軽量細骨材の内部養生効果<sup>2)</sup>によるものと考えられる。また、初期の膨張量に単位水量や水結合材比の違いが与える影響は明確ではなく、測定精度も含めて今後の検討課題としたい。養生条件を材齢7日まで20°C封かん養生とし、脱型後20°C60%RH気中養生とした供試体の打込みから100日までの収縮ひずみ測定結果を図-4に示す。全水準において、脱枠し気中養生とした材齢7日の時点から収縮側に推移しており、乾燥収縮ひずみが確認された。乾燥収縮ひずみ量は最も大きいもので約135μmとなっており、一般的な高強度コンクリートの収縮ひずみ量と比較すると、著しく小さくなった。

気中養生を開始した材齢7日時点を基点とし、乾燥収縮ひずみ量について整理した結果を図-5に示す。乾燥収縮ひずみ量は25-W140、18-W140、18-W110、20-W140、25-W110の順に大きくなった。W/B=25.0%の水準については、乾燥開始から約9日後から膨張側へ推移する傾向が確認された。気中養生としたことで、コンクリート中の水分の逸散が始まるが、それに伴い人工軽量

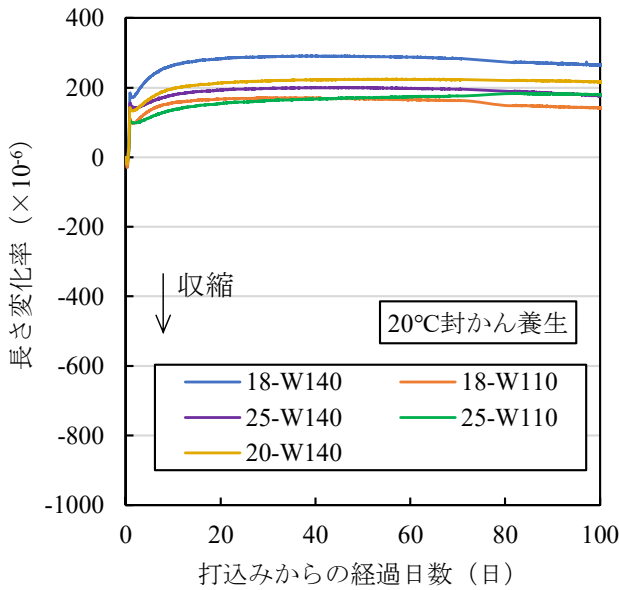


図-3 収縮ひずみ測定結果

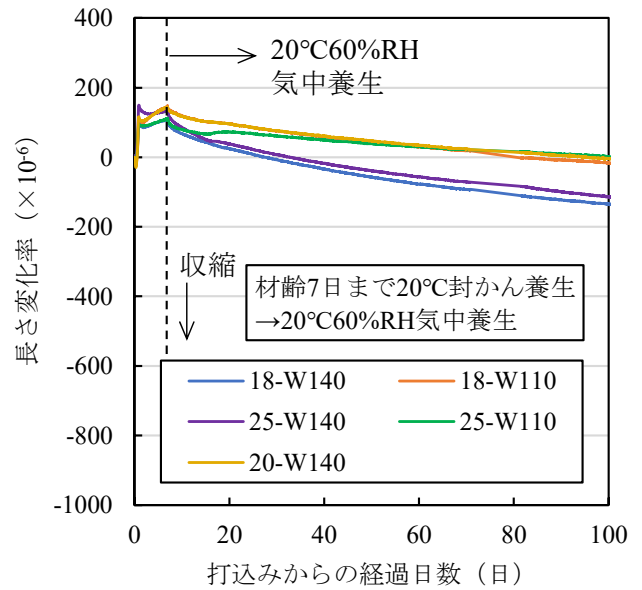


図-4 収縮ひずみ測定結果

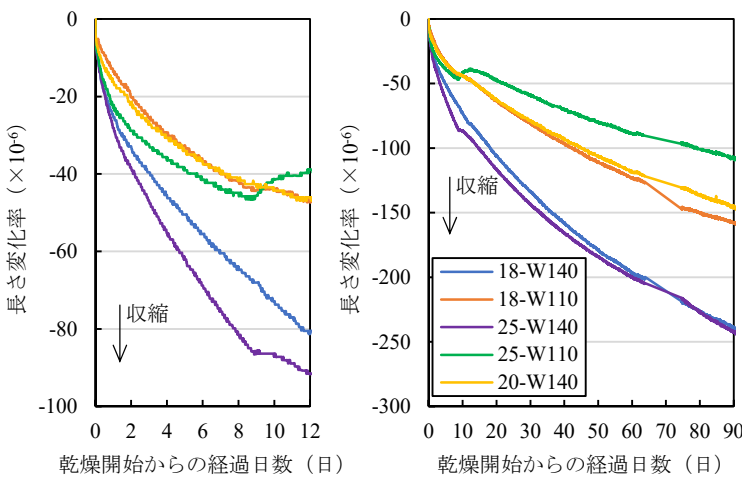


図-5 乾燥収縮ひずみ測定結果

骨材内部の水分がセメントペーストの方へ移動したことによるものと考えられる。材齢初期に確認された膨張と同様に人工軽量骨材の内部養生効果の影響と思われる。本研究の範囲内で、比較的水結合材比が大きいW/B=25.0%で人工軽量骨材からの水分の移動が顕著に表れたものと考えられる。本研究の限られた範囲で発生した現象であり、今後、水結合材比の大きい条件などで確認していきたい。

#### (4) 凍結融解

凍結融解試験結果を図-6に示す。図中には谷口ら<sup>3)</sup>の配(調)合条件の試験結果(記号 40-W165)も併せて示した。W/B=18.0%のシリーズを見ると、300サイクル終了時点の相対動弾性係数は92.6~94.8%の範囲にあり、300サイクル終了時点で相対動弾性係数は60%以上とな

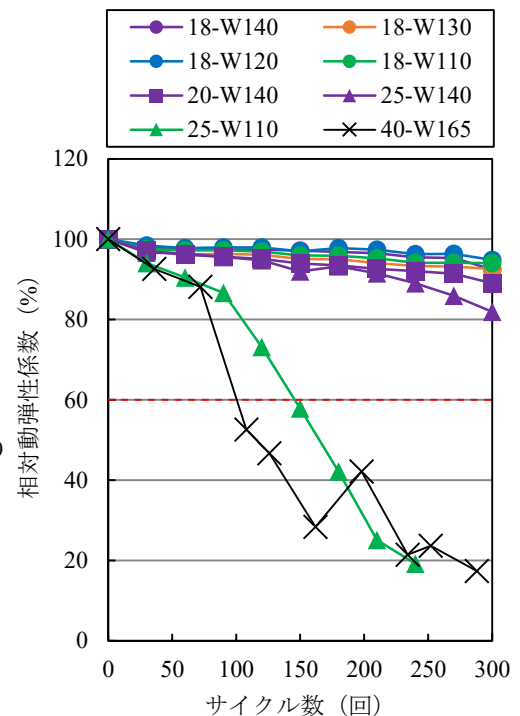


図-6 凍結融解試験結果

った。また、単位水量の違いによる影響は見られなかった。W/B=20.0%を見ると、相対動弾性係数は89.0%であり、こちらも300サイクル終了時点の相対動弾性係数が60%以上となったが、W/B=18.0%のシリーズの相対動弾性係数と比較すると小さくなる傾向が見られた。

W/B=25.0%のシリーズを見ると、25-W140の300サイクル終了時点の相対動弾性係数は81.9%となった。25-W110については、150サイクル終了時点で相対動弾性係数は57.8%となり、300サイクルに到達する前に60%以下となった。240サイクル終了時点で相対動弾性係数

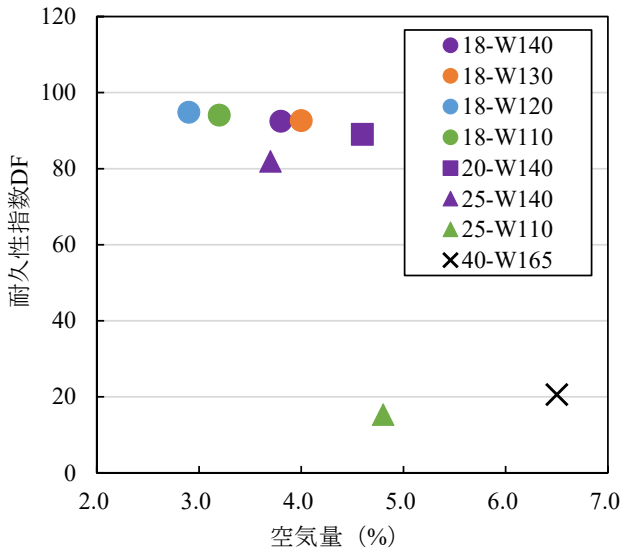


図-7 空気量と耐久性指数の関係

は 19.2%となり、それ以降の測定は不可能な状態となった。40-W165 については、108 サイクル終了時点の相対動弾性係数が 52.6%となり、それ以降の測定値は全て 60%を下回った。

空気量と耐久性指数の関係を図-7に示す。全シリーズの空気量は 2.9~4.8%の範囲であり、空気量が最も大きくなった 25-W110 の耐久性指数が最も小さくなった。W/B=18.0%のシリーズを見ると、単位水量や空気量の違いが耐久性指数に与える影響は少ないと考えられる。また、40-W165 は高性能 AE 減水剤を使用し、空気量が 6.5%であったが、耐久性指数は小さくなる結果となった。本実験の水準は AE 剤を使用していないが、耐久性指数に優れたものが存在している。本実験の範囲内で耐久性指数に影響を与える要因として、空気量や単位水量の影響は小さく、水結合材比や人工軽量細骨材の使用量の影響が大きいと考えられる。

人工軽量細骨材とセメントペーストの単位容積比 (vs/vp) と耐久性指数の関係を図-8 に示す。vs/vp は 0.67~1.30 の範囲にあった。W/B=18.0%のシリーズを見ると、vs/vp は 0.67~1.00 の範囲にあり、vs/vp の増減が耐久性指数に与える影響は少ないと考えられる。W/B=25.0%のシリーズを見ると、25-W140 と 25-W110 の vs/vp はそれぞれ 0.95, 1.30 となっており、vs/vp の大きい 25-W110 が凍結融解抵抗性で劣る結果となった。前述したように、単位水量や空気量が耐久性指数に与える影響は小さいと考えられ、W/B=18.0 のシリーズは、水結合材比を小さくすることで、セメントペースト部の組織が緻密になっているため、vs/vp の増減の影響が小さくなっていると考えられる。25-W110 は本研究の範囲内では、最も水結合材比が大きい調合条件となっており、

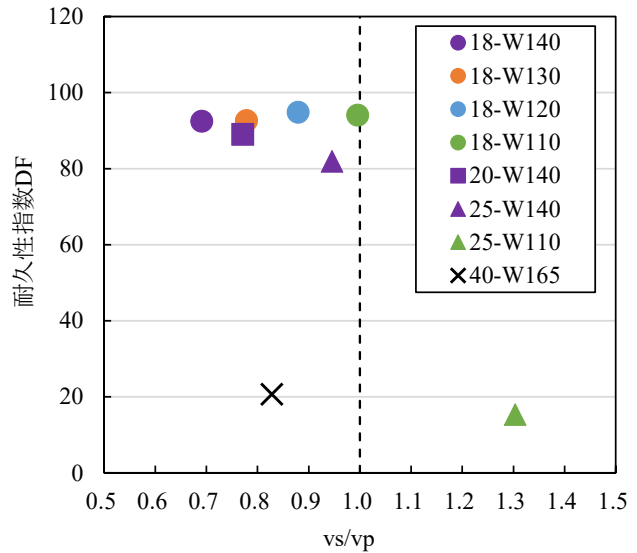


図-8 vs/vp と耐久性指数の関係

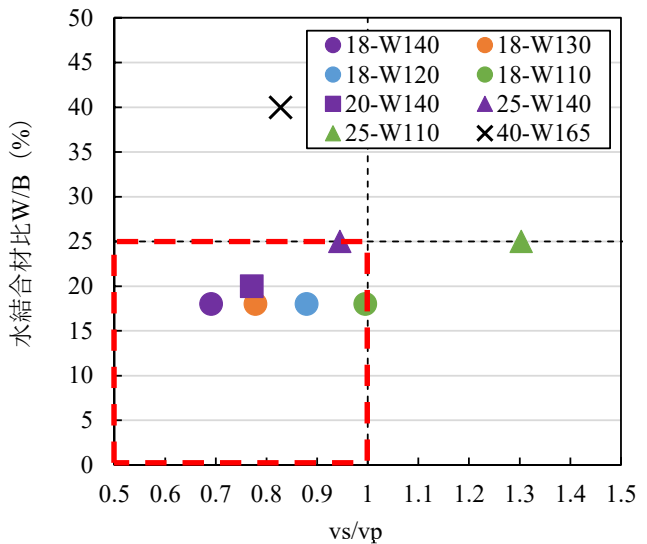


図-9 vs/vp と水結合材比の関係

他の水準と比較すると、セメントペースト部の強度が小さく、かつ人工軽量細骨材の使用量が大きいことから、凍結融解時における膨張圧で破壊が生じてしまったと考えられる。また、40-W165 については、vs/vp は 0.83 であったが、水結合材比が 40.0%であり、膨張圧に対するセメントペーストの強度が小さかったと考えられる。

人工軽量細骨材とセメントペーストの単位容積比 (vs/vp) と水結合材比の関係を図-9 に示す。本研究の範囲内で、十分に吸水された人工軽量細骨材を使用し、AE 剤を使用しない調合条件で、凍結融解抵抗性に優れたコンクリートとするためには、W/B を 25.0%以下とし、vs/vp を 1.00 以下とすることが有効であると考えられる。ただし、これは本研究の限られた調合条件の範囲における実験結果から定めたものであり、AE 剤を併用することで水結合材比が大きい条件においても、凍結融解抵抗

性に優れたコンクリートが製造できる可能性がある。今後は水結合材比の違いや AE 剤使用の有無を水準に加え、実験結果を拡大し検討していきたい。

## 5. まとめ

水結合材比を 18, 20, 25% の 3 水準とし、単位水量 110~140kg/m<sup>3</sup> の範囲で十分に吸水させた人工軽量細骨材を使用し、AE 剤を使用しない条件で収縮測定および凍結融解試験を実施し、以下の知見を得た。

- ① 結合材の約 6 割が副産物で構成され、単位水量が 140kg/m<sup>3</sup> と通常よりも少なく、水結合材比も 18% と著しく小さい条件において、化学混和剤の添加量を調整することで、スランプフローが 60cm を超えるコンクリートが製造できた。
- ② 水結合材比と圧縮強度の傾向は一般的な高強度コンクリートと同等であった。しかし、人工軽量細骨材の使用量が増加すると圧縮強度が低下する可能性がある。
- ③ ヤング係数は一般的な高強度コンクリートと同等の値を有していた。
- ④ 全ての水準で自己収縮ひずみは確認されなかった。
- ⑤ 単位水量を低減することで、乾燥収縮ひずみは小さくなる。
- ⑥ 水結合材比 25.0% 以下、 $v_s/v_p$  を 1.00 以下とすることで凍結融解抵抗性に優れたコンクリートとすることができた。

## 参考文献

- 1) Taku Matsuda, Takafumi Noguchi, Manabu Kanematsu, Ryuichiro Mine: "Ultralow shrinkage and high strength concrete without Portland cement", Proceedings of the fib congress , pp.973-983, 2018
- 2) 黒岩秀介ほか：人工軽量細骨材による高強度コンクリートの自己収縮低減，日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 695 号，pp.19-26，2014
- 3) 谷口秀明ほか：人工軽量骨材を用いた高強度コンクリートの力学的性質と体積変化，三井住友建設技術開発センター報告，第 12 号，pp.47-54，2014.10
- 4) 笠井芳夫ほか：軽量コンクリート，技術書院，2002.11
- 5) 峯竜一郎ほか：人工軽量細骨材を使用した低環境負荷型・超低収縮高強度コンクリートの各種性状，三井住友建設技術研究開発報告，第 18 号，pp.33-37，2020.10
- 6) 石川寛範ほか：軽量細骨材と砕石を用いたコンクリートの基礎的研究，軽量コンクリートの性能の多様

化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，pp.1-4，2000.8

- 7) 橋大介ほか：高強度軽量コンクリートの耐凍害性改善方法について，土木学会論文集，Vol.24, No.496, pp.51-60，1994.8
- 8) 日本建築学会：高強度コンクリート技術の現状，2009.11
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2018，2018.7