

論文 150N/mm²を超える超高強度コンクリートの各種性状

都築 正則*¹・一瀬 賢一*²・神代 泰道*²

要旨：特殊シリカ質微粉末を用い、実強度 150N/mm²を超える超高強度コンクリートの各種性状について検討したところ、以下のことが得られた。(1)W/Bによらず、自己収縮ひずみは1m角ブロック中心部において700 μ程度であった。(2)コア試験体の圧縮強度は、W/B=14%の場合、材齢91日で178N/mm²、材齢1年で192N/mm²であった。(3)乾燥収縮試験は材齢850日の長期材齢において250～400 μ程度であり、W/Bが低いほど小さい値を示した。(4)中性化深さは全て0mmであった。凍結融解試験による相対動弾性係数の低下はなかった。

キーワード：超高強度コンクリート、自己収縮、乾燥収縮、中性化、凍結融解

1. はじめに

都心部において、集合住宅を中心とした超高層RC造建築物の施工実績が増加し、100N/mm²を超える超高強度コンクリートが実用化され始めている。このような超高強度コンクリートの製造を可能にするには、シリカフュームの利用が不可欠である。筆者らは、このシリカフューム選定に当り、特殊シリカ微粉末(以下ZF：非晶質のSiO₂が主成分であり、平均粒径が1 μm程度の球形粒子。従来のシリカフュームより比表面積が小さい。)を用いたコンクリートの性状を検討し、適用性を報告した¹⁾。

本研究では、ZFを用いた150N/mm²を超える超高強度コンクリートの各種性状の把握を目的として水結合材比(以下W/B)14～20%のコンクリートについて、フレッシュ性状および圧縮強度の他、実機試験では沈下量、自己収縮性状、曲げ・割裂引張強度、室内試験では乾燥収縮、促進中性化、凍結融解抵抗性の各種性状を検討した。

2. 実機試験練りにおける検討

2.1 実験水準と使用材料

対象となるコンクリートは、W/B=14, 17, 20%の3水準とした。使用材料を表-1に示す。セ

メントは中庸熟セメント(M)、混和材にはZFをコンクリート練混ぜ時に使用した。細骨材(S)および粗骨材(G)は安山岩砕砂・碎石。化学混和剤(Ad)はポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能減水剤を使用した。自己収縮低減用²⁾として石灰系膨張材を、爆裂防止用として有機繊維(PP)を使用した。

2.2 調合

調合を表-2に示す。調合は、W/B=14, 17, 20%とし、単位水量を150～155kg/m³(高性能減水剤を含む)、目標空気量を2%以下、繊維混入後の目標スランプフローを65±10cmとした。ZFと膨

表-1 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	M	中庸熟セメント, 密度3.21g/cm ³
混和材	ZF	特殊シリカ質微粉末, 密度2.30g/cm ³ , 比表面積8.7m ² /g
	EX	石灰系膨張材, 密度3.19g/cm ³
砂	S	安山岩砕砂, 表乾密度2.64g/cm ³
砂利	G	安山岩碎石, 表乾密度2.63g/cm ³
減水剤	Ad	ポリカルボン酸系高性能減水剤
添加材	PP	(爆裂防止用)有機繊維

表-2 調合表

調合記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						Ad 使用量 (B×%)
			W	B			S	G	
				M	ZF	EX			
MZ20EX	20	43.9	155	639	116	20	657	842	0.85
MZ17EX	17	39.1	155	752	137	23	538	842	1.02
MZ14EX	14	33.0	150	884	161	27	412	842	1.33

* 1 (株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 工修(正会員)

* 2 (株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 工博(正会員)

張材は結合材重量(=B)の内割りとして15% ,2.5% 混入した。爆裂防止用有機繊維は ,コンクリート外割りで1.0kg/m³(0.11%/vol)添加した。

2.3 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは ,材料投入後 ,空練り10秒 ,水投入後 ,モルタル先練り(60 ~ 120秒)を行い ,粗骨材投入後(60 ~ 120秒)練混ぜを行った。練混ぜ時間は ,低W/Bの調合ほど長く ,十分な練混ぜを確認するまでとした。有機繊維は ,ベースコンクリートのフレッシュ性状を確認後 ,アジテータ車に投入し ,2分高速攪拌した。

2.4 試験項目および測定方法

試験項目および測定方法を表 - 3 に示す。圧縮強度試験体において ,1材齢につき ,標準水中養生 ,簡易断熱養生(厚さ20cmの発泡スチロール製養生箱にて封緘養生を行ったもの)は各3本 ,コア試験体はマスブロックの内側と外側で各4本の計8本とした。

自己収縮性状は ,1m角ブロックの中心に ,打設面に対して垂直方向に埋込型歪計を設置し ,測定した。測定は打設時直後を始点とし ,材齢約10日までとした。コア試験体の採取位置および ,埋込型歪計取付位置を図 - 1 に示す。

曲げおよび割裂引張強度の試験体はそれぞれ ,10 × 10 × 40cmの角柱試験体 ,10 × 20cmの円柱試験体とした。試験体は1材齢につき ,各3本とした。沈下量は ,15 × 30cmの鋼製型枠内部にテフロンシートを貼付し ,コンクリート打設直後から ,レーザー変位計にて測定した。

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表 - 4 に示す。空気量はベースコンクリートで0.8 ~ 1.4 ,繊維混入後で1.7 ~ 2.0%となり上昇する傾向となった。これはアジテータ車ドラム内での繊維攪拌時の巻き込み空気が原因と考えられる。コンクリート温度は15.0 ~ 17.0 程度であった。コンクリートの粘性はW/Bが小さくなるにつれ増大し ,0口ートの流下時間は長くなった。その傾向はW/

表 - 3 試験項目および測定方法

試験項目	測定方法	対象試験体
フレッシュ性状	各JIS等による	
温度履歴性状	熱電対による	1m角ブロック 簡易断熱試験体
自己収縮	埋込型歪計による	1m角ブロック
圧縮強度	JIS A 1108	標準水中養生試験体 簡易断熱試験体 コア試験体
静弾性係数	JIS A 1149	コア試験体
曲げ強度	JIS A 1106	標準水中養生試験体
割裂引張強度	JIS A 1113	標準水中養生試験体
沈下量	レーザー変位計	気中(15φ×30cm)

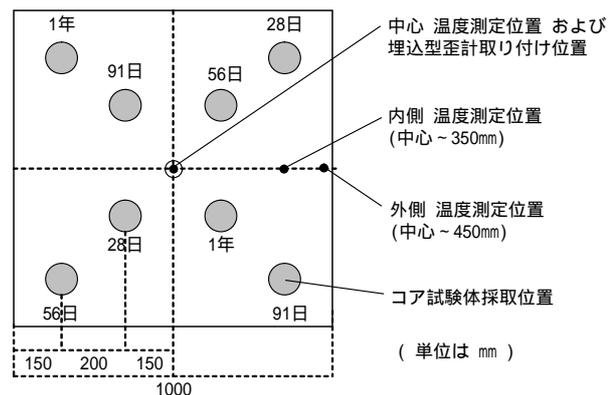


図 - 1 コア採取・温度測定・ひずみ測定位置

表 - 4 フレッシュ性状

記号	PP 繊維	Air (%)	CT (%)	スランプフロー (cm)	0口ト (S)	単位容積質量 (kg/m ³)
MZ20EX	無	1.4	15.5	79.0 × 79.0	19.2	2447
	有	1.8	15.0	70.0 × 70.0	18.6	2435
MZ17EX	無	0.8	17.0	71.0 × 70.5	21.3	2468
	有	1.7	17.0	66.0 × 65.0	20.2	2450
MZ14EX	無	1.3	17.0	78.0 × 78.0	44.0	2484
	有	2.0	17.0	73.5 × 73.5	37.2	2474

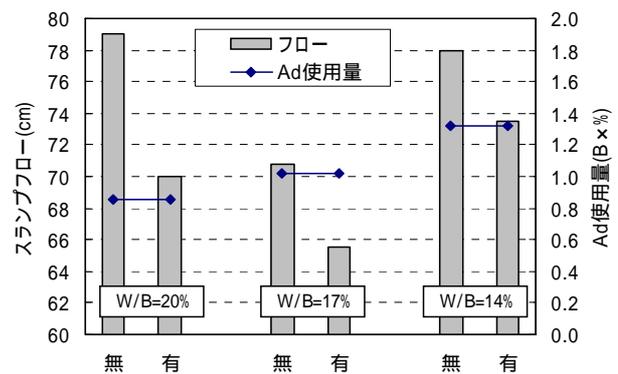


図 - 2 Ad使用量とフローの関係(繊維有無)

B=14%において特に顕著であった。

図 - 2 にスランプフローと高性能減水剤使用量の関係を示す。高性能減水剤の使用量は ,W/B が低くなるにつれ ,多くなった。フロー値全体では 66cm ~ 79cm の範囲を示し ,繊維混入後のフロー

値は5～9cm程度低下した。W/Bが大きいほど繊維混入後のフロー低下は顕著であった。これは、W/Bが大きいほど高性能減水剤使用量が少なく、フローの保持性能が小さいためと考えられる。

3.2 温度履歴性状

コンクリート温度は測定箇所・調合によらず、打設時から1～1.5日前後で最高温度に到達し、その後、材齢10日前後で外気温(約10℃)と同程度となった。

図-3に簡易断熱試験体と1m角ブロックの各測定位置における最高温度を示す。W/Bが低くなるにつれ、1m角ブロックおよび簡易断熱養生試験体共に最高温度は高くなる結果となった。1m角ブロック中心温度は62～73℃を示し、外側(中心から450mm外側の位置)温度は中心温度から20℃前後低い値となった。簡易断熱試験体の最高温度は47～54℃を示し、同一調合内の1m角ブロックの外側温度とほぼ同程度であった。

3.3 沈下量試験結果

図-4に沈下量の経時変化を示す。沈下量は計測開始から4時間程度(プラントミキサー内での水投入時刻から5時間程度)でほぼ収束し、その値は両W/Bで1mm程度であった。

3.4 自己収縮性状試験結果

図-5に、埋込型歪計によって測定した1m角ブロック中心における自己収縮ひずみの経時変化を示す。ひずみは埋込型歪計ごとに校正した値から、コンクリートの線膨張係数を $10\mu/\text{mm}$ と仮定して、熱膨張ひずみを取り除いた。初期値の0点はコンクリート打設直後の値とした。

図より、コンクリートのひずみは、測定開始から0.2日程度(=5時間程度)から著しく大きくなり、材齢2～3日程度でほぼ収束した。その値はW/Bに関わらずほぼ700 μ 程度であった。自己収縮ひずみはW/Bが小さくなるにつれ大きい値を示すことが考えられるが、今回の実験ではそのような傾向は見られなかった。この理由として、膨張材の混入率が結合材に対して同じであるため、W/Bが小さいもののほど膨張材単位数が多いことが原因と考えられる。

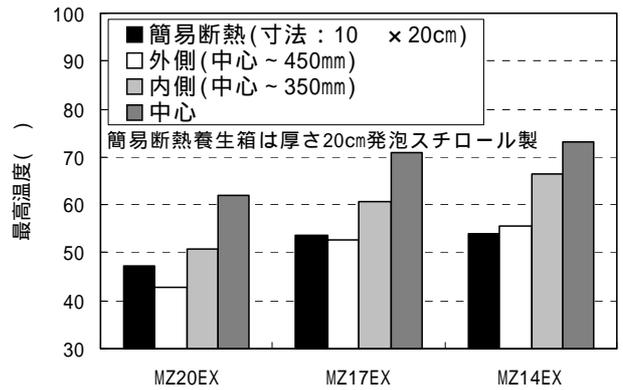


図-3 コンクリートの最高温度

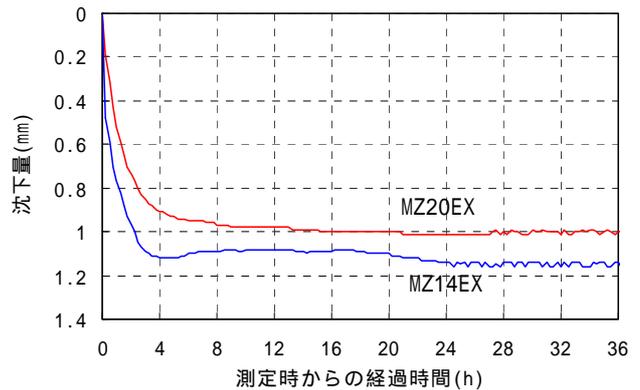


図-4 沈下量の経時変化

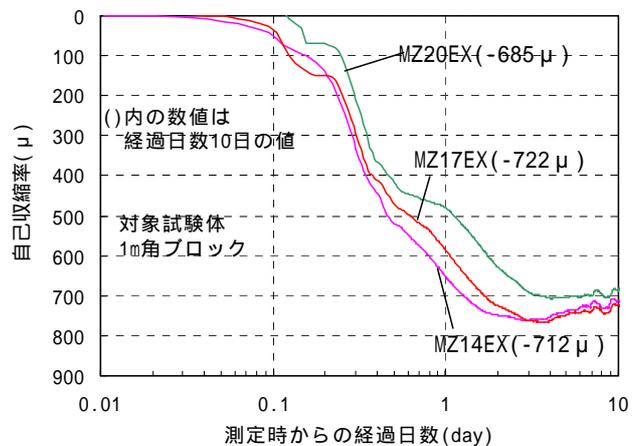


図-5 自己収縮ひずみの経時変化

3.5 圧縮強度試験結果

(1) 標準水中養生における強度

材齢28～91日における標準水中養生の強度試験結果を図-6に示す。材齢28日では、結合材水比(以下=B/W)によらず152N/mm²程度で強度の頭打ちが見られた。材齢56日および91日においては、W/B=20%の強度が一番大きい結果となった。(W/B=14%の91日強度は、28日より低い値となっている。試験体加圧面の精度が影響したと思われるが定かではない。)今試験では、B/Wと

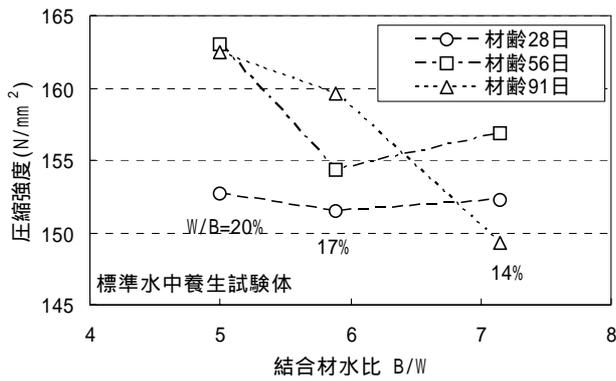


図 - 6 結合材水比と圧縮強度

強度の間に比例関係は確認できなかった。

(2) 標準水中養生とコア試験体の強度発現性状

標準水中養生とコア試験体の強度発現性状を図 - 7 に示す。標準水中養生試験体の圧縮強度は、材齢 91 日では、150 ~ 160N/mm² 程度であった。W/B=14% のコア試験体強度は、材齢 91 日で 178N/mm²、材齢 1 年で 192N/mm² であった。

調合別にみると、W/B=20% の場合、材齢 91 日までは標準水中養生試験体がコア試験体よりも 10N/mm² 程度大きいですが、材齢 1 年までに同程度の強度となった。W/B=17% では、試験体種類に関わらずほぼ同程度の強度であった。W/B=14% の場合、全ての材齢でコア試験体が、約 20N/mm² 上回り、標準水中養生試験体強度が長期においても、コア試験体強度に追いつかない結果となった。

材齢 28 日および 56 日における、コア試験体強度は、外側よりも内側のほうが大きく、W/B が大きいほどその差は顕著であった。しかし、材齢 91 日になると内外の強度差は小さくなり、W/B=20% では、材齢 91 日、1 年後の強度は外側のほうが大きくなった。これは、1m 角ブロック内の内外コア採取位置での最高温度が異なったため、その強度発現に違いが生じたためと考えられる。

(3) 簡易断熱とコア試験体強度の関係

簡易断熱とコア試験体強度の比較を図 - 8 に示す。材齢 28 日では、W/B=14% のコア試験体強度に大きいものが見られるが、材齢 56、91 日では W/B によらずほぼ同程度であった。このことから材齢 56 および 91 日において、簡易断熱養生試験体によりコア強度試験体強度を概ね推定できることが分かった。

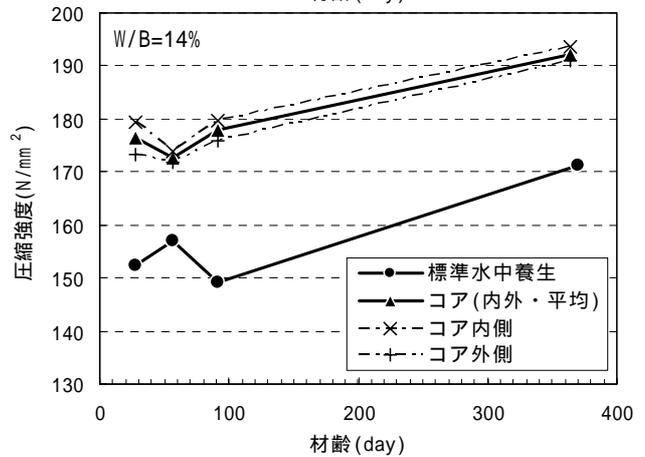
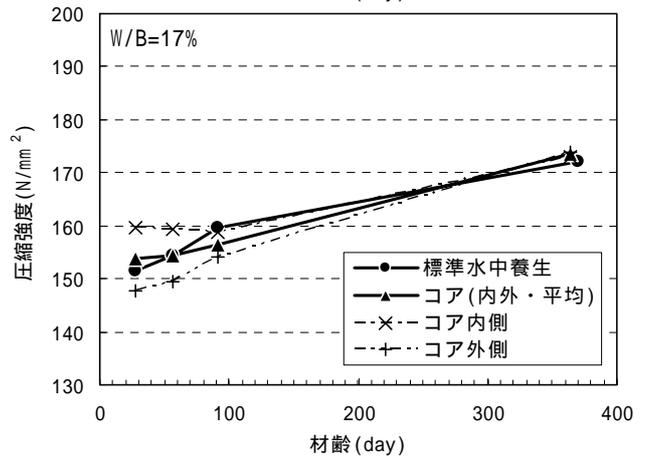
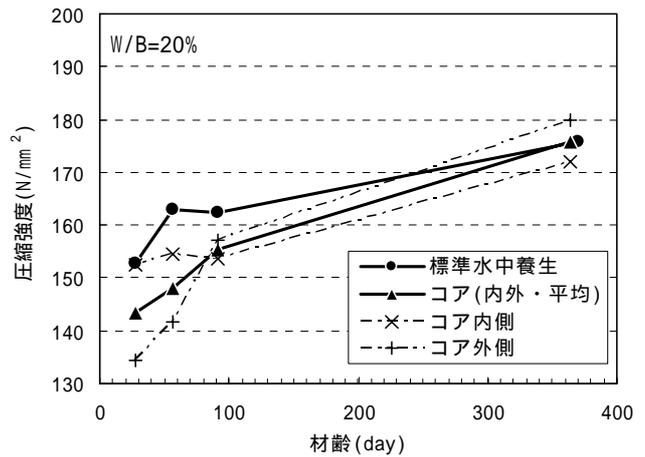


図 - 7 圧縮強度発現性状

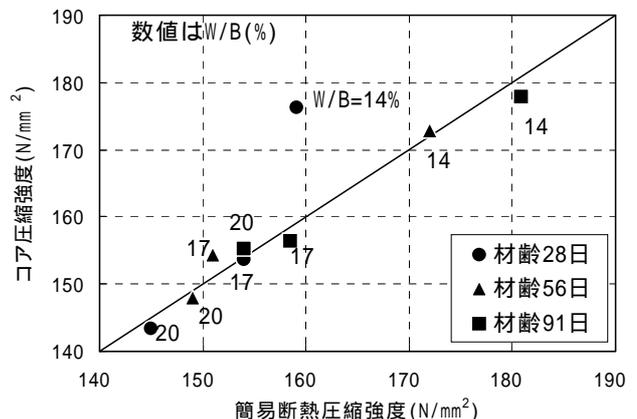


図 - 8 圧縮強度の比較(簡易断熱とコア)

(4) 静弾性係数試験結果

各コア試験体の 静弾性係数と圧縮強度の関係を 図 - 9 に示す。静弾性係数は, $4.0 \times 10^4 \sim 4.7 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ の範囲であった。材齢 28 日 ~ 1 年の全ての材齢において New RC 式³⁾で概ね推定できる結果となった。

(5) 曲げ・引張強度試験結果

図 - 10 に材齢91日の圧縮強度と曲げ・割裂引張強度の関係を示す。曲げ強度は $9.2 \sim 9.7 \text{N/mm}^2$ (圧縮強度の 1/17 程度), 引張強度は $4.7 \sim 5.2 \text{N/mm}^2$ (圧縮強度の 1/32 程度) であった。野口らの提案式⁴⁾と比較すると今回の試験結果は, 曲げ・割裂引張強度共に小さい値を示し, 提案式の 2/3 程度であった。今後, さらなるデータの蓄積が必要であると思われる。

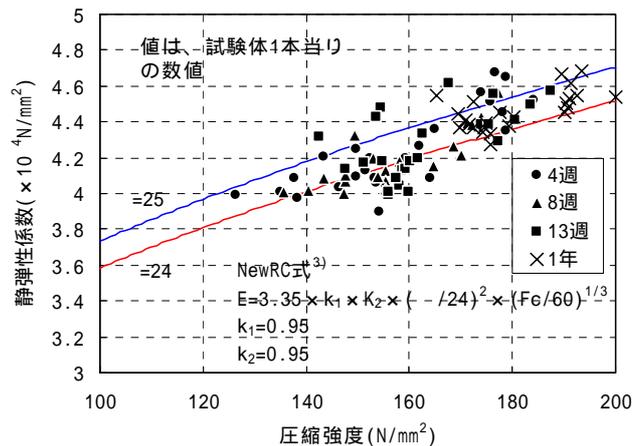


図 - 9 圧縮強度と静弾性係数

4. 室内試験練りにおける検討

4.1 実験概要と実験項目

室内試験練りでは, 乾燥収縮性状, 促進中性化, 凍結融解抵抗性の各種性状について検討した。コンクリートの使用材料は, 実機試験と同等のもの(表 - 1 参照)を用いたが, ここでは爆裂防止用繊維添加の有無は行っていない。

調合を表 - 5 に示す。W/B は 14, 17, 20% とし, 単位水量は 150kg/m^3 とした。目標空気量を 2% 以下, 目標スランプフローを $65 \pm 10 \text{cm}$ とした。ZF は, セメントの内割りりで 10% ~ 15% とした。コンクリートの練混ぜは, 2軸強制練りミキサ(100L)を用いて, 細骨材 + セメント + ZF を投入後 15 秒間空練りし, モルタルで 90 ~ 180 秒間, 粗骨材を投入後 90 ~ 120 秒間練混ぜた。

4.2 試験項目

圧縮強度試験は, 標準水中養生試験体を対象とした。乾燥収縮試験は, JIS A 1129 のコンタクトゲージ法で行った。試験体は翌日脱型後, 材齢 7 日まで標準養生し, 以後, 20 ± 2 , 60 ± 5 %RH の恒温恒湿室にて静置し測定を行った。促進中性化試験は, JIS A 1153 に準じて行った。試験体は材齢 28 日まで標準養生, 材齢 56 日まで恒温恒湿室にて前養生を行い, 試験を開始した。凍

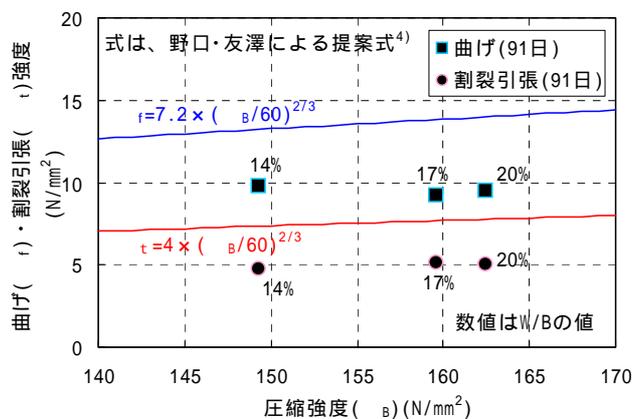


図 - 10 圧縮強度と曲げ・割裂引張強度

結融解試験は, JIS A 1148 の A 法(水中凍結融解試験)で行った。試験体は材齢 28 日まで標準養生を行い, 試験を開始した。

4.3 実験結果

(1) フレッシュ及び強度発現性状

フレッシュ性状試験, 圧縮強度試験結果を表 - 6 に示す。空気量, スランプフロー値共に目標値を満足した。圧縮強度は材齢 91 日で 170N/mm^2

表 - 5 調合表(室内試験練り)

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						Ad 使用量 (B × %)
			W	B			S	G	
				M	ZF	EX			
MZ20EX	20	45.5	150	656	75	19	704	845	1.00
MZ17EX	17	41.3	150	772	88	22	591	845	1.35
MZ14EX	14	32.9	150	884	161	27	413	845	2.15

表 - 6 フレッシュ性状と圧縮強度

記号	Air (%)	スランプフロー (×) (cm)	圧縮強度 (N/mm²)			
			材齢			
			28日	56日	91日	1年
MZ20EX	1.4	76.5 × 74.5	135	160	168	178
MZ17EX	1.3	72.0 × 70.5	154	167	174	188
MZ14EX	1.9	65.0 × 63.5	157	166	172	180

程度，材齢91日～1年では10～15N/mm²程度の強度発現を示した。

(2) 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮ひずみの測定結果を図-11に示す。測定値は材齢200日において250～300μ，材齢850日の長期材齢においても250μ～400μ程度であった。W/Bが小さいほど，その値は小さい結果となった。重量減少率は，0.3～0.6%の範囲であり乾燥収縮率同様，W/Bが小さいほど，その値は小さい結果となった。このことから，W/Bが小さいほどその組織が緻密になり，自由水逸散が少なく乾燥収縮率が小さいことが分かる。

(3) 促進中性化試験結果

促進中性化試験結果の一例として，W/B=17%の呈色状況を写真-1に示す。促進材齢26週における中性化深さは，W/Bによらず，3調合共に0mmであり，中性化の進行は全く認められなかった。

(4) 凍結融解試験結果

凍結融解試験結果を図-12に示す。空気量を2.0%以下としても，相対動弾性係数は300サイクル終了後でも全く低下せず，凍結融解抵抗性に優れていることを確認した。

5. まとめ

実強度150N/mm²を超えるW/B=14, 17, 20%の超高強度コンクリートの各種性状について，実験により，以下のことが得られた。

- (1) W/Bによらず，1m角ブロック中心における自己収縮ひずみは700μ程度を示した。
- (2) コア試験体の圧縮強度は，W/B=14%の場合，材齢91日で178N/mm²，1年で192N/mm²であった。
- (3) 材齢91日において，曲げ強度は9.5N/mm²程度，割裂引張強度は5.0N/mm²程度であった。
- (4) 乾燥収縮試験は材齢850日においても，250～400μ程度と小さいものであった。W/Bが小さいほど，低い値を示した。
- (5) 中性化深さは全てのW/Bで0mmとなり中性化の進行はなかった。また，凍結融解試験において相対動弾性係数の低下はなく，凍結融解抵抗性に優れていることが分かった。

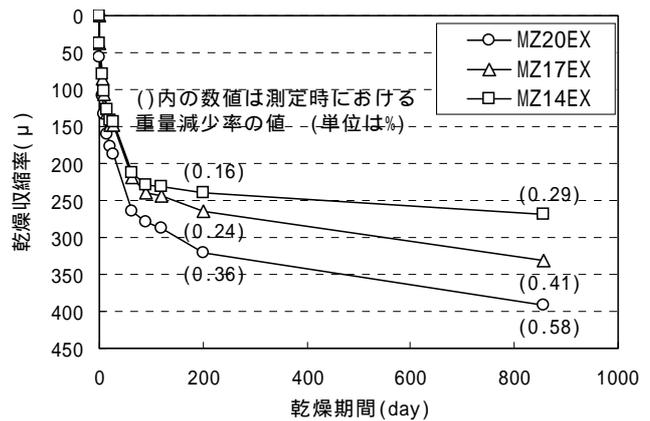


図-11 乾燥収縮ひずみ経時変化

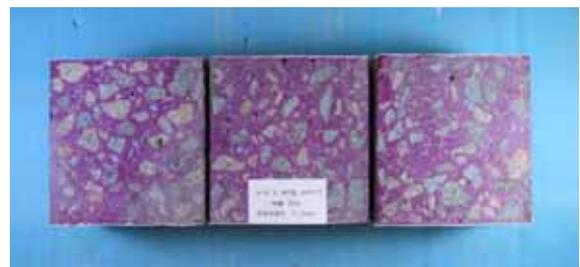


写真-1 中性化試験結果(W/B=17%、材齢26週)

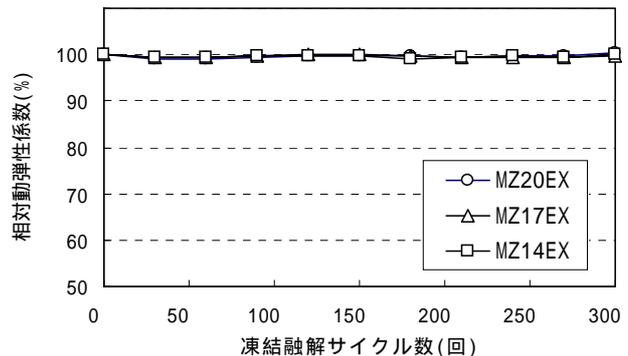


図-12 凍結融解試験結果

参考文献

- 1) 神代泰道ほか: ジルコニア起源シリカ微粉末混合セメントを用いた超高強度コンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1057-1062，2005
- 2) 谷村充ほか: 高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.991-996，2000
- 3) (社)日本建築学会: 鉄筋コンクリートの構造計算基準・同解説，pp.39，1999
- 4) 野口貴文ほか: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性の関係，日本建築学会構造系報告集，No.472，pp.11-16，1995