

# 論文 150N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートの硬化性状

都築 正則\*1・一瀬 賢一\*2・神代 泰道\*2

要旨：市中プラントにて，シリカフェームプレミックスセメントを用いた実強度150N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートの硬化性状について実験的に検討し，以下の事が得られた。(1)水結合材比の低下とともに，強度は大きくなる傾向となり，コア試験体強度で最大180N/mm<sup>2</sup>を示した。(2)水中養生試験体は長期にかけての強度発現は大きい，水結合材比14%において，材齢91日でもコア試験体強度を上回らない結果となった。(3)自己収縮ひずみは，水結合材比17%において，ブロック試験体中心部で約 - 800 μを示し，膨張材を混入すると約300 μの収縮ひずみが低減された。

キーワード：超高強度コンクリート，強度発現，収縮ひずみ，膨張材，温度履歴

## 1. はじめに

近年，集合住宅を中心とした高層建築物の需要増加に伴い，設計基準強度(以下Fc)100N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートが実用化され始めている。また，150N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートの研究・報告<sup>1),2)</sup>も発表され，コンクリートの超高強度化は，更に進むものと予想されており，今後のデータ蓄積が期待される。

このようなFc100N/mm<sup>2</sup>以上の超高強度コンクリート材料の一つとしてシリカフェームが挙げられる。しかしながら，それらを用いた低水結合材比のコンクリートは大きな自己収縮ひずみが生ずる<sup>3)</sup>とされ，実際の構造躯体に使用された場合，鉄筋や部材間の拘束によるひび割れが懸念される。コンクリートの超高強度化を進めるのにあたり，これら超高強度コンクリートの収縮性状は確認・検討の必要がある。

そこで本研究では，市中プラントにおいて，収縮低減対策として効果があると報告されている膨張材<sup>4)</sup>を混入した調合も含め，シリカフェームプレミックスセメントを使用した水結合材比(以下W/B比)14~25%の超高強度コンクリートを製造し，硬化性状(強度発現性状，収縮性状)の比較・検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用材料を表 - 1 に示す。セメントは，低熱ポルトランドセメントをベースとしシリカフェームをプレミックスしたセメント(SPC)，細骨材(S)は安山岩砕砂，粗骨材(G)は安山岩砕石を使用した。練混ぜ水(W)はプラント内の上水道を，高性能減水剤(Ad)はポリカルボン酸系化合物を使用した。膨張材(EX)は石灰系膨張材を使用し，爆裂防止対策用として有機繊維(F)を使用した。

### 2.2 調合

コンクリートの調合を表 - 2 に示す。調合は，W/B = 14% ~ 25%とし，単位水量を150 ~ 155kg/m<sup>3</sup>(高性能減水剤を含む)，目標スランプフローを65 ± 10cm，目標空気量を2%以下とした。高性能減水剤の添加量は目標スランプフ

表 - 1 使用材料

記号	仕様
SPC	シリカフェームプレミックスセメント：密度3.08g/cm <sup>3</sup>
S	安山岩砕砂：表乾密度2.64g/cm <sup>3</sup>
G	安山岩砕石：表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup>
EX	石灰系膨張材：密度3.19g/cm <sup>3</sup>
Ad	高性能減水剤：主成分：ポリカルボン酸系化合物
F	有機繊維：長さ10mm, 密度0.9g/cm <sup>3</sup>

\* 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)

ローを満足するよう調整した。膨張材混入量はメーカー推奨量として、セメント量の内割りで $30\text{kg}/\text{m}^3$ とした。爆裂防止用有機繊維はコンクリートに外割りで $1\text{kg}/\text{m}^3$ 混入した。

### 2.3 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、プラント内の水平2軸ミキサー(容量 $3.3\text{m}^3$ )を使用し、1バッチ当たり $1\text{m}^3$ の2回練りとした。練混ぜの手順は、材料投入後空練り10秒、練混ぜ水投入後、モルタル先練り(50秒~240秒)を行い、粗骨材投入後(50秒~120秒)練混ぜを行った。練混ぜ時間は、モルタル及びコンクリートの性状をミキサー内モニターでの目視により定めた。W/B比が小さくなるにつれ、練混ぜ時間は長くなる傾向となった。有機繊維の練混ぜは、ベースコンクリートの試験体を採取した後、アジテータ車のドラムに投入し、2分高速攪拌を行った。

### 2.4 試験項目および試験方法

試験項目および測定方法を表-3に示す。試験項目はフレッシュ性状、温度履歴、収縮ひずみ、沈下量、圧縮強度、静弾性係数とした。

圧縮強度は、標準養生試験体、簡易断熱養生試験体、1m角ブロック試験体(以下ブロック試験体)から採取したコア試験体を対象とした。試験体寸法はどれも $100 \times 200\text{mm}$ とし、1材齢につき、標準養生試験体、簡易断熱養生試験体は各3本、コア試験体はブロックの内側と外側で各4本の計8本とした。標準養生試験体は、サンプル採取直後、ポリフィルムで封緘とし、翌日脱型のうえ、20℃の水中養生槽にて静置した。簡易断熱養生試験体は、標準養生と同様に封緘した後、厚さ200mmの断熱材からなる養生箱に静置した。コア試験体の採取位置、埋込型ひずみ計取付け位置を図-1に示す。

収縮ひずみは、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 試験体(以下角柱試験体)と、ブロック試験体を対象とした。ブロック試験体の埋込型歪計は、コア試験体を採取する角ブロック型枠に、高さ1/2の場所に打設面に対して垂直に取り付けた。角柱試験体は、型枠内部にテフロンシートを貼付し、コン

表-2 調合表

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				Ad (P×%)	
			W	P		S		G
				SPC	EX			
SPC25	25	48.7	155	620	—	803	842	1.00
SPC20	20	43.3	155	775	—	655	855	1.19
SPC17	17	37.6	155	912	—	526	868	1.45
SPC17EX	17	37.6	155	882	30	526	868	1.56
SPC14EX	14	29.5	150	1042	30	376	894	2.60

表-3 試験項目および測定方法

試験項目	試験方法	対象試験体
フレッシュ性状	各JIS等による	—
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生試験体 簡易断熱養生試験体 コア試験体
静弾性係数	JIS A 1149	コア試験体
収縮ひずみ	埋込型ひずみ計にて測定	角柱試験体 1m角ブロック
沈下量	レーザー変異計にて測定	測定型枠: $150 \phi \times 300\text{mm}$

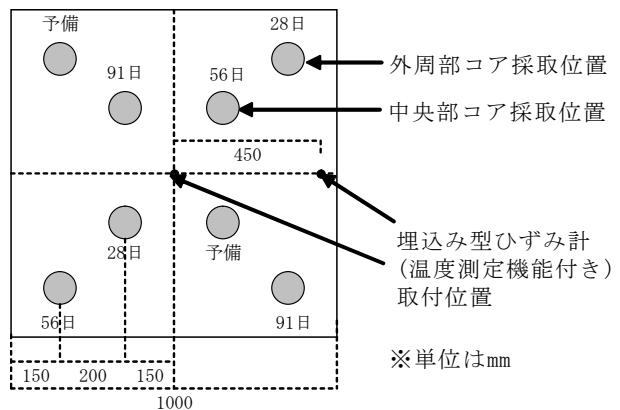


図-1 コア採取および、ひずみ測定位置

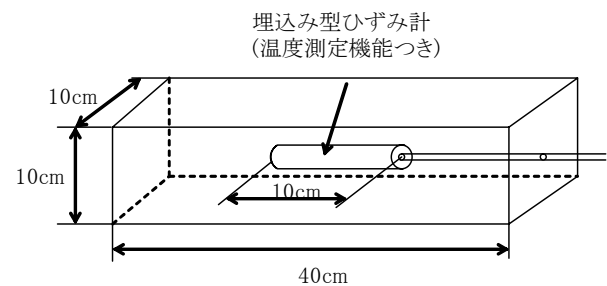


図-2 角柱試験体ひずみ測定位置

クリートを拘束しないようにした。ひずみ計取り付け位置を図-2に示す。打設後、室外にてポリフィルムで打設面を封緘し、翌日脱型のうえ、全面封緘として、測定終了まで静置した。試験体数は1調合当たり2体とし、平均値を測定値とした。測定は、打設終了直後を始点とし、その経過日数約21日までとした。

沈下量は、内寸法150 × 300mmの鋼製型枠内部にテフロンシートを貼り付け、コンクリート打設後、レーザー変位計にて測定を行った。

### 3. 試験結果

#### 3.1 フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状の各試験結果を表 - 4 に示す。空気量は0.7~2.0%を示し、どの調合においても、繊維混入後、増加する傾向が見られた。これはアジテータ車ドラム内で繊維攪拌の際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19~27 の範囲を示し、W/B比が小さくなるにつれ上昇する傾向が見られた。また、同様にW/B比の低下とともに、コンクリートの粘性は大きくなり、フロー停止時間、0ロート流下時間が長くなった。W/B = 14%において、その傾向は特に顕著であった。

調合別にみた混和剤添加量とフロー値を図 - 3 示す。混和剤添加量はW/B比が小さくなるに従い、多く必要とした。特にW/B = 14%になると、添加量も大幅に上がる結果となった。スランプフローは65cm~75cmの範囲を示し、繊維混入後のフロー値は5~10cm程度低くなる結果となった。W/B比が大きいほどその減少値は大きい結果となったが、これは、混和剤量添加率が少ないことが原因と考えられる。

#### 3.2 温度履歴性状

測定例としてSPC17EX(W/B = 17%, 膨張材混入)の各測定箇所(図 - 1参照)における打設時からの温度履歴を図 - 4 に示す。コンクリート温度は測定箇所に関わらず、材齢1日~1.5日前後で最高温度に到達し、外気温と等しくなるのは、材齢10日前後であることが確認できた。

調合別にみたコンクリートの最高温度を図 - 5 に示す。簡易断熱養生試験体の最高温度はW/B比の低くなるにつれ、高くなる結果となった。ブロック試験体の中心温度は70~80 を示し、膨張材を混入したものが、温度が高い結果となった。また、外側温度は50~60 を示し、中心温度から15度前後低い値となり、その

表 - 4 フレッシュ性状試験結果

記号	繊維有無	Air (%)	CT (°C)	スランプフロー (cm)	フロー停止時間	0ロート流下時間	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )
					(sec)	(sec)	
SPC25		1.9	19	67.5×67.5	77.2	36.3	2412
SPC20		1.8	19	76.0×72.5	92.9	27.0	2445
	○	1.9	20	55.0×53.0	58.6	32.7	2428
SPC17		1.6	21	70.0×68.5	102.2	42.1	2470
	○	1.7	21	63.0×63.0	79.2	35.1	2466
SPC17EX		0.7	23	72.0×70.0	121.9	43.5	2484
	○	1.8	24	60.0×59.5	103.0	49.5	2465
SPC14EX		1.5	26	66.0×65.0	173.2	147.3	2519
	○	1.9	27	62.0×61.0	165.7	121.9	2494

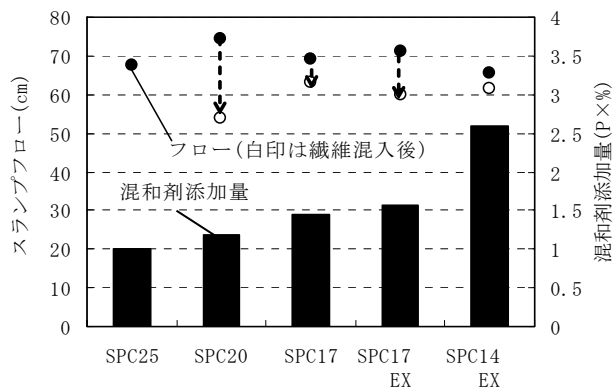


図 - 3 フローと混和材添加量

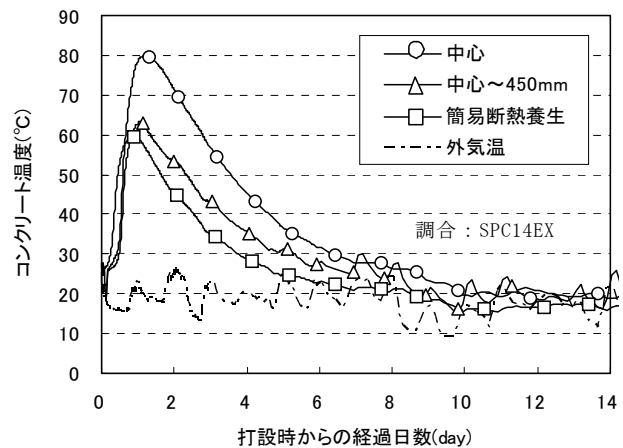


図 - 4 コンクリートの温度履歴性状

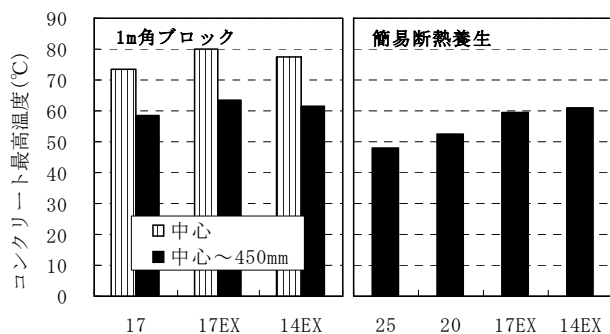


図 - 5 コンクリートの最高温度

最高温度は同調合で比較すると簡易断熱試験体と同程度となった。

### 3.3 収縮性状

W/B = 17%のブロック試験体および角柱試験体の収縮ひずみ経時変化を図 - 6 に、W/B比と収縮ひずみの関係図 - 7 に示す。ひずみの測定値は、埋込ひずみ計ごとに校正した計算値から、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}$ と仮定して熱線膨張ひずみを取り除いたものである。ブロック試験体中心の収縮ひずみは、-550 ~ -800  $\mu$ 、角柱試験体の収縮ひずみは-300 ~ -550  $\mu$ を示し、ブロック試験体の収縮ひずみは、角柱試験体のものより、約250  $\mu$ 前後大きい値となった。試験体の種類に関わらず、膨張材の収縮ひずみ低減効果は打設後から約1日には現れている事を確認した。

調合別に見るとW/B比の低下とともに、収縮ひずみは大きい値を示した。これは、セメント量の増加とともに水和反応による体積変化も大きくなるためである。W/B = 17%において膨張材を混入したものは、角柱試験体では240  $\mu$ 、ブロック試験体では300  $\mu$ の収縮ひずみが低減された。また、ブロック試験体において、中心から450mm外側の測定箇所では、中心部よりも約150  $\mu$ 収縮ひずみが小さい値となった。

同調合のコンクリートにおいて、試験体の寸法もしくは測定箇所の違いにより、その収縮ひずみが異なる大きな原因の一つとして、型枠等の拘束条件の違いの他に、内部コンクリートの温度履歴が異なること<sup>3),5)</sup>が考えられる。しかし、今回の試験でのSPC14EXについては、試験体の種類によらず、ほぼ同程度の収縮ひずみを示しており、温度履歴から収縮ひずみを定量的に把握するには、更なる検討が必要であると考えられる。

### 3.4 沈下量

沈下量試験結果を図 - 8 に示す。練り混ぜ時における水投入時刻から3~5時間程度で沈下量はほぼ収束し、その値は0.8~2.0mmであった。調合別に見ると、SPC14EX > SPC17 >

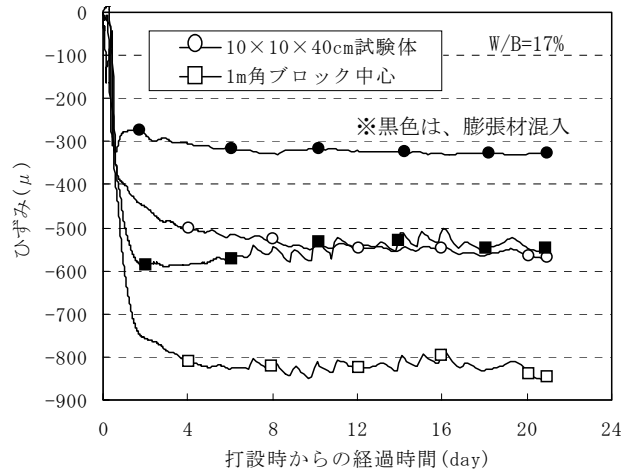


図 - 6 収縮ひずみの経時変化

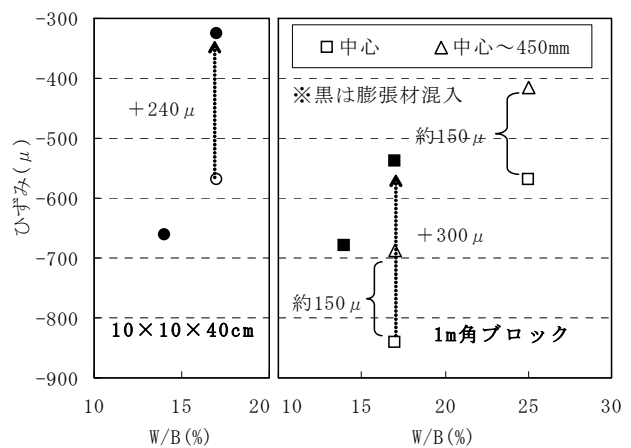


図 - 7 W/B 比と収縮ひずみ

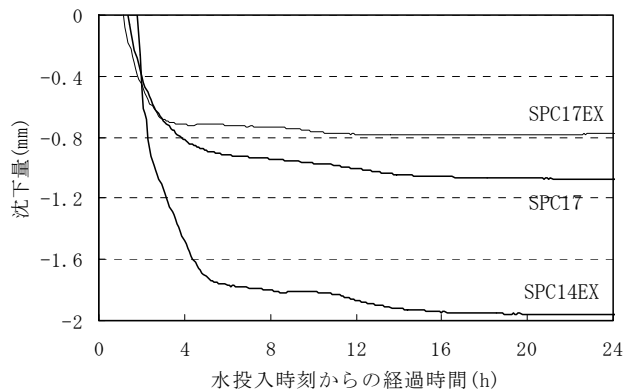


図 - 8 沈下量の経時変化

SPC17EXとW/Bの低下に伴い、大きい値を示し、膨張材の混入により、その値は小さくなった。これは、コンクリートの凝結始発時間が混和剤添加量の増加とともに遅れ、膨張材の混入により早まる為であると考えられる。また、水投入後5時間~16時間の間にかけて、沈下量はさらに増えることが確認した。これはコンクリートの自己収縮が影響していると推察する。

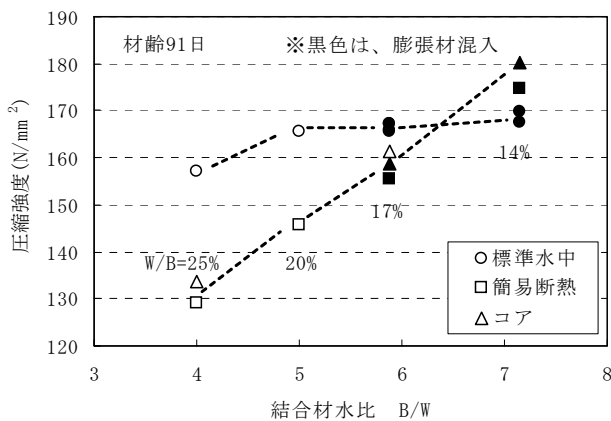


図 - 9 圧縮強度(材齢 91 日)

### 3.5 圧縮強度試験結果

#### (1) 調合別による強度

材齢91日における圧縮強度試験結果を図 - 9 に示す。W/B比が小さくなるほど、強度が大きくなり、W/B = 14%のコア強度が180N/mm<sup>2</sup>と最大となった。膨張材の有無に関わらず、簡易断熱養生およびコア試験体は結合材水比(B/W比)と圧縮強度がほぼ比例関係を示すが、水中養生試験体は、B/W=5(W/B=20%)以上では強度の頭打ちを示した。

#### (2) 試験体養生種別による強度発現性状

試験体養生種別にみた材齢と圧縮強度の関係を図 - 10に示す。各調合とも簡易断熱養生とコア試験体の強度発現性状は類似している。また、材齢28日～91日の強度発現性状は、標準養生試験体で18～25N/mm<sup>2</sup>、簡易断熱試験体で5～16N/mm<sup>2</sup>、コア試験体で1～7N/mm<sup>2</sup>となった。

材齢7日強度はどの調合も簡易断熱養生試験体が標準養生試験体よりも上回っているのに対し、材齢28日強度では、W/B = 25%と20%、材齢56日～91日における強度ではW/B = 25%、20%および17%において標準養生試験体が、簡易断熱試験体およびコア試験体強度よりも上回る結果となった。「標準養生試験体強度 - 簡易断熱(およびコア)試験体強度」はW/B比の低下に伴い小さくなり、W/B = 14%では、材齢91日においても、標準養生試験体はコア試験体を上回らない結果となり、強度は標準養生試験体で170N/mm<sup>2</sup>、コア試験体で180N/mm<sup>2</sup>であった。

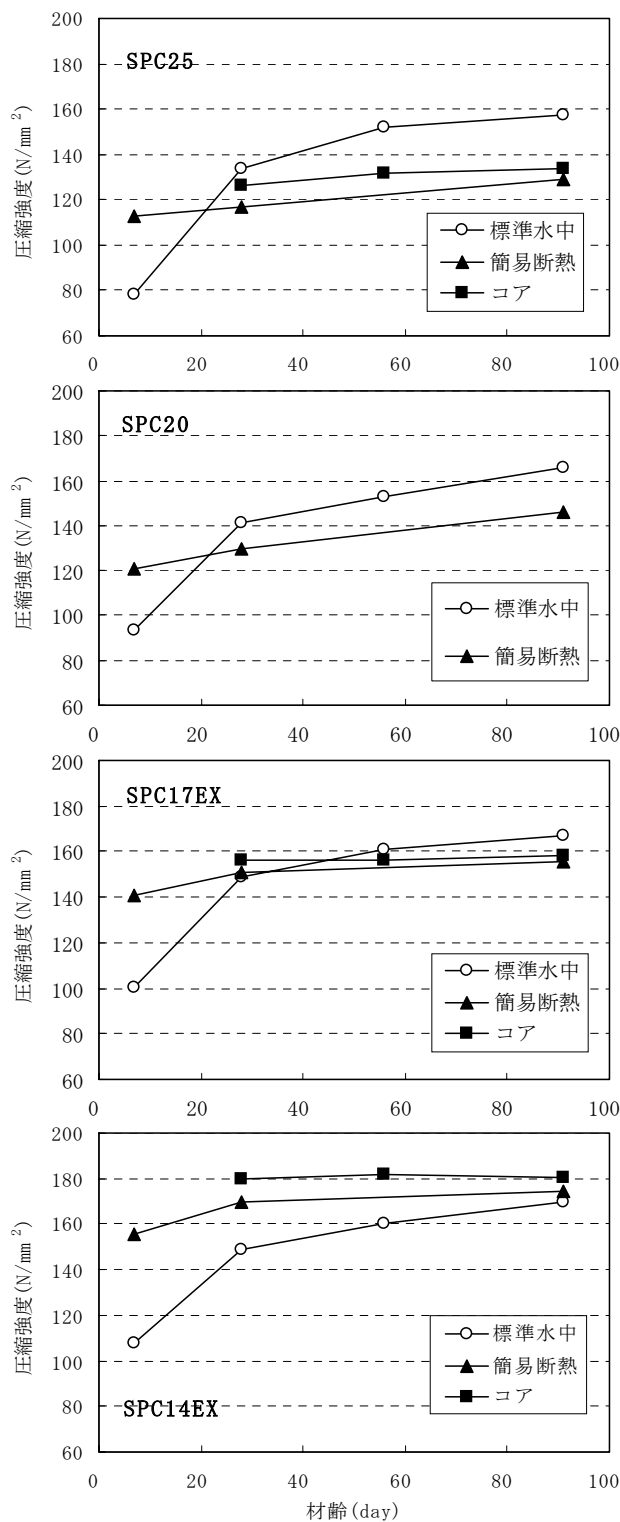


図 - 10 圧縮強度発現性状

#### (3) 膨張材の有無，繊維の有無による強度

膨張材混入の有無による圧縮強度の比較を図 - 11に示す。材齢28日ではやや、ばらつきはあるものの、材齢91日では膨張材混入の有無に関わらずほぼ同程度の値を示した。繊維混入の有無による標準養生試験体の圧縮強度の比較を図 - 12示

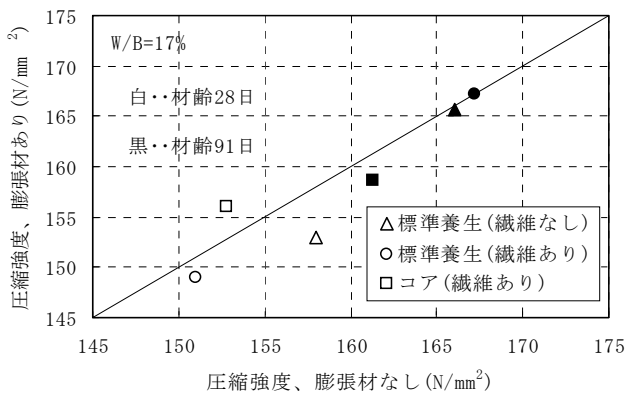


図 - 11 圧縮強度(膨張材の有無)

す。材齢28日強度では、繊維無混入が繊維混入より大きいのに対し、材齢56, 91日強度では同程度であった。

#### (4) 静弾性試験結果

コア試験体の静弾性係数と圧縮強度の関係を図 - 13に示す。静弾性係数は $4.0 \times 10^4 \sim 4.7 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ の範囲であり、New RC式<sup>6)</sup>と比較しても、膨張材有無に関わらず、おおむね推定できると考えられる。

#### 4. まとめ

市中プラントにて、W/B比14~25%、実強度150N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートの硬化性状について、実験的に検討したところ、以下の事が得られた。

- (1) W/B比の低下とともに、コア試験体強度は大きくなる傾向となり、で最大180N/mm<sup>2</sup>を示した。材齢91日の水中養生試験体強度は、W/B比20%からほぼ頭打ちとなった。
- (2) 水中養生試験体は長期にかけての強度発現は大きい、W/B比14%において、材齢91日でもコア強度を上回らない。
- (3) 収縮ひずみは、W/B比17%において、ブロック試験体中心部では約 - 800  $\mu$ 、角柱試験体では約 - 500  $\mu$ を示した。膨張材混入のものは、約300  $\mu$ のひずみが低減された。

#### 5. 参考文献

- 1) 菅俣匠ほか：セメント - シリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性の関係に関

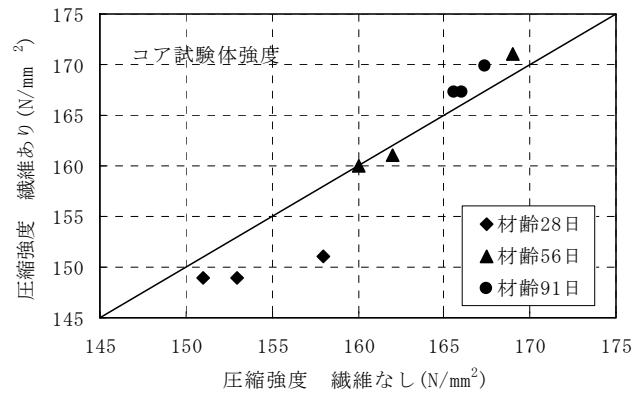


図 - 12 圧縮強度(繊維の有無)

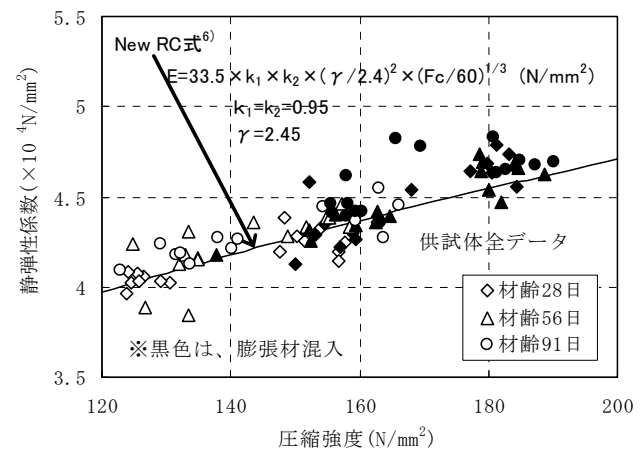


図 - 13 圧縮強度と静弾性係数

する - 考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.1, p.1287-1292, 2004

- 2) 陣内浩ほか：設計基準強度150N/mm<sup>2</sup>クラスの高強度コンクリートによる実大RC柱の施工性と構造体強度発現性の検討、日本建築学会技術報告集、第17号、p.1-5, 2003.6
- 3) 今本啓一ほか：高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究、コンクリート工学年次論文集報告集、Vol.17, No.1, p.1061-1066, 1995
- 4) 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, p.991-996, 2000
- 5) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書、p.40-p64, 1996
- 6) (社)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、p.39, 1999