

R C 超高層建物用高強度コンクリートの開発

設計基準強度100N/mm²を超える高強度コンクリートの各種性状

— 瀬 賢 — 川 口 徹

High-Strength Concrete for High-rise Reinforced Concrete Buildings

Performance of high-strength concrete with a design strength exceeding 100 N/mm²

Kenichi Ichise Toru Kawaguchi

Abstract

The strength properties of concrete in a structure, the reduction effect of autogenous shrinkage strain by mixing an expansive additive, the effect of spalling prevention by mixing of vinylon fiber were examined for high-strength concrete with a design strength of over 100 N/mm². The following conclusions were made.

(1) It is possible to produce high strength concrete of up to 120 N/mm² at a commercial ready mixed concrete plant. (2) Autogenous shrinkage strain can be greatly reduced by mixing an expansive additive in high-strength concrete with a design strength exceeding 100 N/mm². (3) Spalling of high-strength concrete with a design strength of up to 120N/mm² was prevented by vinylon fiber.

概 要

設計基準強度(以下Fc)100N/mm²を超える高強度コンクリートを対象とし、構造体コンクリート強度の発現性状、膨張材混入による自己収縮ひずみの低減効果およびビニロン繊維混入による火災時の爆裂防止効果について検討し、以下のこと確認した。(1)Fc120N/mm²級までの高強度コンクリートの製造が、1年を通して市中実機プラントにて可能である。(2)Fc100N/mm²を超える高強度コンクリートに膨張材を混入することにより、自己収縮ひずみを大きく低減できる。(3)ビニロン繊維を混入することにより、Fc120N/mm²級までの高強度コンクリートの火災時の爆裂を防止または抑制できる。

1. はじめに

近年、首都圏では40層以上の高層集合住宅を中心として、設計基準強度(以下Fc)100N/mm²級の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造(以下RC造)が設計・施工されてきている。これは、柱部材のスレンダー化、居住性の向上、有効面積の増加、自由度の高い居住空間を実現している。今後もコンクリートの設計基準強度の更なる高強度化が進むと考えられる。また高強度鉄筋との組合せにより、今後アスペクト比の大きい塔状建物も建設されるものと予想される。Fc100N/mm²程度までの研究・報告は、数多く発表されているが、Fc100N/mm²を超えるものは、試験室レベルのものが多く、実機レベルでの報告が少なく^{1)~3)}、今後のデータの蓄積が期待される。またFc100N/mm²を超える高強度コンクリートにおいては、自己収縮ひずみによる内部ひび割れの防止対策と火災時の爆裂防止対策が課題として残っている。

そこで本研究では、市中実機プラントを用い、Fc100N/mm²を超える高強度コンクリートを対象とし、構造体コンクリート強度の発現性状の確認、膨張材混入に

よる自己収縮ひずみの低減効果およびビニロン繊維混入による火災時の爆裂防止効果について実験的に検討・考察した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件をTable 1に示す。強度発現性状の確認実験は、水結合材比(以下W/B比)3水準、打設時期3水準(標準期、夏期、冬期)、膨張材混入の有無をパラメータとした。自己収縮ひずみの低減効果の確認実験は、冬期のコンクリートを用い、W/B比、膨張材混入の有無をパラメータとした。またビニロン繊維混入による火災時の爆裂防止効果の確認実験は、標準期のコンクリートを用い、W/B比をパラメータとした。

2.2 使用材料と調合

使用材料は、低熱ポルトランドセメントをベースとし、シリカフュームをプレミックスしたセメント(以下SPC、密度:3.08g/cm³)、細骨材に富津産山砂、粗骨材

に岩瀬産硬質砂岩砕石を使用した。骨材の品質をTable 2に示す。膨張材には、石灰系特殊クリンカーを主成分とする無機系膨張材（密度：3.19g/cm³）を使用した。化学混和剤は、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。また火災時の爆裂防止繊維としてビニロン繊維（以下VF，密度：1.3g/cm³，繊維径：100μm，繊維長さ：12mm）を混入した。VFの混入量は、コンクリート容積比の0.3%とした。調合条件は、VF混入後の目標スランブフロー値を65±7.5cmとした。目標空気量は、2.0±1.0%とした。各コンクリートの調合をTable 3に示す。化学混和剤の使用量は、打設時期によりTable 3に示す範囲で調整した。

2.3 測定項目と測定方法

測定項目は、フレッシュ性状（スランブフロー，空気量，単位容積質量，温度），温度履歴性状（模擬部材内部温度），管理用供試体圧縮強度（標準養生），模擬部材試験体から採取したコア強度，模擬部材中心部の自己収縮ひずみとした。各測定は、それぞれのJISに準じて実施した。管理用供試体は、100×200mmとし、3材齢（材齢28日，56日，91日）にて各3本ずつ採取した。模擬部材試験体は、1000×1000×1000mmとし、上下面を厚さ200mmの断熱材で覆った。熱電対埋込み位置およびコア供試体の採取位置をFig. 1に示す。熱電対は、模擬部材高さ方向の1/2部分に埋込んだ。コア供試体は、100×200mmとし、各採取位置につき4本採取した。

自己収縮ひずみは、埋込型ひずみ計（標点距離104mm）を模擬部材中心部に縦方向に埋込み、打設時より計測した。

耐火試験は、400×400×1200mmの柱部材を作製し、Fig. 2に示す水平炉（梁・床用耐火炉）にて実施した。試験体の種類と配筋条件をTable 4に示す。試験体は、耐火炉内の加熱が2面から行われるため、各試験体の4面を均等に加熱できるように、試験体側面を耐火炉の加熱バーナーに対して45度ずらして配置した。加熱は、標準加熱曲線（ISO 834に規定）に従い、1時間行った。耐火試験の測定項目は、内部温度（側面中央部の帯筋，隅角部の帯筋，試験体中心），爆裂面積および爆裂深さとした。内部温度の測定には、被覆型熱電対を用いた。また

Table 3 コンクリートの調合
Concrete Mixing Proportion

種類*	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤対B(%)	
		W	B		S		G
			C	EX			
SPC14	14	155	1108	-	385	843	1.7~2.1
SPC17	17	160	942	-	514	843	1.15~1.65
SPC20	20	160	800	-	634	843	1.2~1.6
SPCE14	14	155	1078	30	385	843	1.6
SPCE17	17	160	912	30	514	843	1.3
SPCE20	20	160	770	30	634	843	1.15

*：SPC(膨張材未混入)，SPCE(膨張材混入)，数字はW/B

Table 4 耐火試験用柱部材の種類
Concrete Column Specimens of Fire Resistance Test

試験体名	SPC14C	SPC17C	SPC20C
断面寸法 (mm)	400×400		
試験体高さ (mm)	1200		
コンクリートW/B比	14	17	20
主筋 P _g (%)	12-D16(SD490)		1.99
帯筋 P _w (%)	4-D6@60		0.53

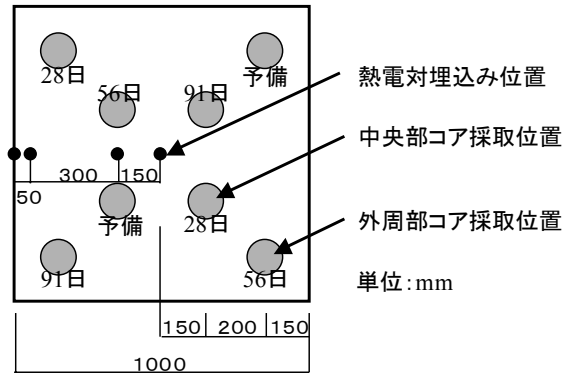


Fig. 1 温度測定およびコア採取位置
Temperature Measure points and Core Sampling points

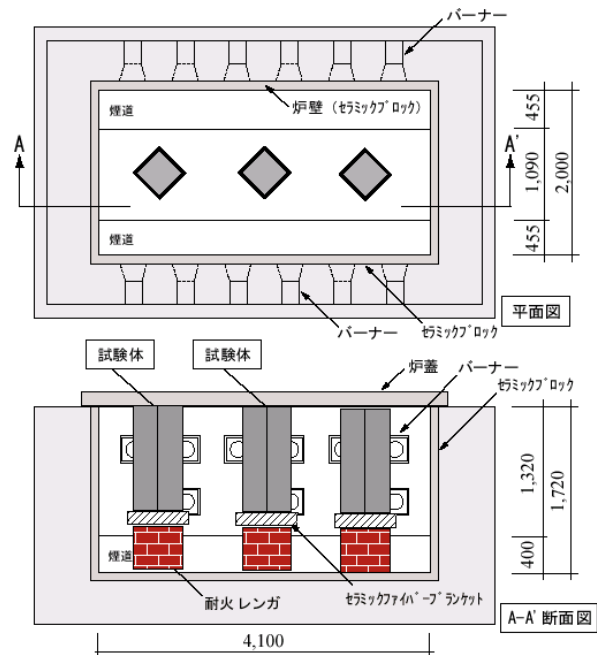


Fig. 2 耐火炉
Refractory Fire Pit

Table 1 実験条件
Test Conditions

項目	摘要	水準数
水結合材比	14%，17%，20%	3
打設時期	標準期，夏期，冬期	3
膨張材混入	有（冬期のみ），無	2

Table 2 骨材の品質
Quality of Aggregates

記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率
G	岩瀬産砕石	2.64	6.60
S	富津産山砂	2.62	2.64

爆裂面積は、各面トレースして求め、爆裂深さは、スケールにより測定した。

2.4 コンクリートの製造・打設および養生

コンクリートは、容量3.25m³の水平二軸強制練りミキサーを使用し、各調合について1.5~2.0m³ずつ混練した。練混ぜ方法は、モルタル先練りとし、モルタルを2~5分間練混ぜ、その後粗骨材を投入して2~3分間練り混ぜた。練混ぜ時間は、4分間、6分間、8分間とW/B比の小さいものを長くした。VFは、ベースコンクリートのフレッシュ性状の確認および管理用供試体採取後、トラックアジテータ内に投入し、約2分間高速撹拌した。VF混入後は、フレッシュ性状の確認、管理用供試体の採取を行い、模擬部材および耐火試験用柱部材を打設した。標準養生供試体は、翌日脱型し養生を開始した。模擬部材および耐火試験用柱部材は、材齢7日に側面の型枠を脱型し、その後気中養生とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状は、スランプフロー、空気量ともに概ね目標値を満足した。またVF混入の有無によるスランプフロー、空気量の試験結果をFig. 3, 4に示す。スランプフローは、VFの混入により最大7cm小さくなった。空気量は、-0.1%~0.2%の範囲となり、VF混入による変動が小さかった。VF混入後のコンクリートは、繊維の固まりもなく、良く分散できており、VFを容積比0.3%混入しても良好なワーカビリティを確保できることがわかった。

3.2 温度履歴性状

各模擬部材中心の最高温度をFig. 5に示す。模擬部材の中心温度は、夏期>標準期>冬期の順に高く、同一打設時期では、W/B比の小さい方が若干高くなった。また中心部が最高温度に達する時間は、SPCの場合、標準期22~31時間後、夏期18~25時間後、冬期29~37時間後であり、打設時期の違いに比べW/B比の違いによる影響は小さかった。また膨張材を混入したSPCEは、SPCに比べ最高温度に達する時間が冬期において2~7時間程度早く、上昇温度も3~7程度高くなった。各打設時期ごとの模擬部材の温度履歴曲線の一部をFig. 6~8に示す。各打設時期において、中心部と外周部(側面から50mmの位置)の温度は、材齢7日後概ね外気温まで下がることがわかる。また中心部と外周部の差は、SPCの場合、標準期13.9~15.3、夏期12.0~14.3、冬期13.1~14.6を示し、夏期の温度差が小さくなった。SPCEの場合は、13.9~15.2を示し、SPCに比べ温度差が大きくなった。

3.3 強度発現性状

3.3.1 管理用供試体の強度試験結果 VF混入の有無による圧縮強度の比較をFig. 9に示す。140N/mm²前後までの強度では、繊維混入の有無による差異はないが、

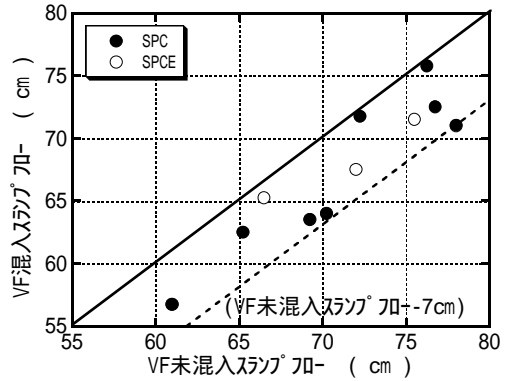


Fig. 3 スランプフロー Slump Flow

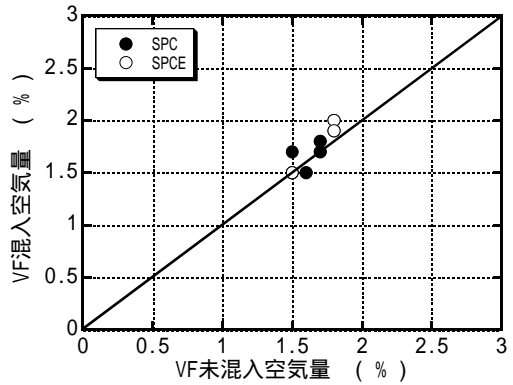


Fig. 4 空気量 Air Content

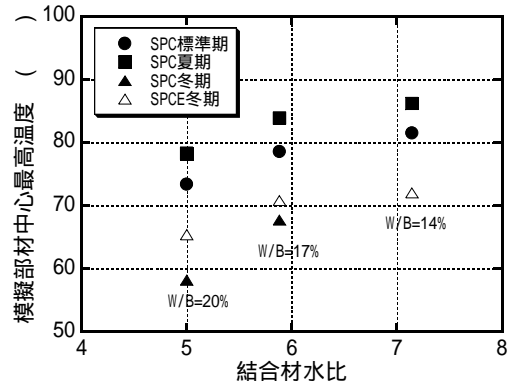


Fig. 5 模擬部材中心の最高温度 Maximum Temperature of the Center of Mock Up Member

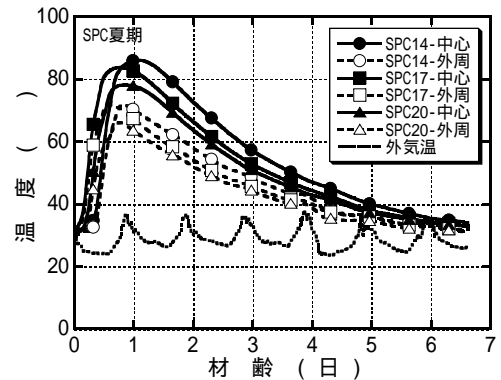


Fig. 6 模擬部材の温度履歴曲線 (SPC夏期) Temperature History Curves of Mock Up Member (SPC Summer Season)

140N/mm²を超える強度では繊維混入により若干強度が低下する傾向が認められる。これは、繊維混入による空気量の増加が影響していると考えられる。

標準養生供試体の材齢28日と91日の結合材水比と圧縮強度の関係をFig. 10に示す。SPCの場合、材齢28日の夏期強度が、標準期、冬期に比べ10N/mm²程度低い。しかし材齢91日では、標準期、冬期と概ね同等の強度まで強度増進を示した。この原因は、コンクリートの練り上がり温度と水中養生するまでの養生温度の違いによる水和反応の違いが強度に影響したものと推察する。しかし、夏期の結果のように材齢28日に対する材齢91日の強度増加が、標準期、冬期よりも大きくなることは、理解しにくい。今後、SPCの強度発現のメカニズムについて検討する必要がある。SPCEは、W/B=20%程度ではSPCと同程度の強度発現を示す。しかしW/B=17%, 14%と低水結合材比になるほどSPCとの強度差が大きくなる傾向を示した。

3.3.2 コア供試体の強度試験結果 各打設時期のコア供試体の強度発現性状をFig. 11~14に示す。冬期SPCの場合、材齢28日では中央部と外周部の強度差が13.2~17.2N/mm²と大きい。中央部の強度に比べ外周部が低いのは、材齢初期の履歴養生温度の差が影響しているものと推察する。しかし材齢91日では中央部と外周部の強度差が5.0~5.7N/mm²と小さくなり、外周部強度が中央部の強度に追いついている。標準期、夏期の場合は、冬期ほどの強度差はないが、材齢28日では外周部より中央部の強

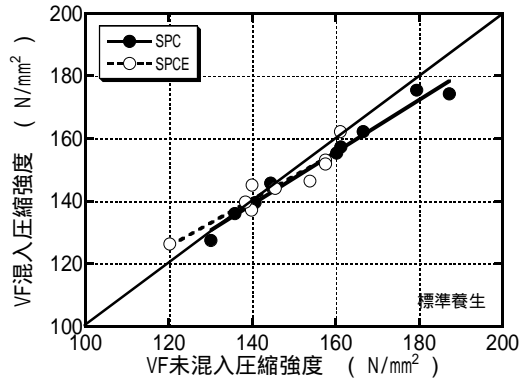


Fig. 9 標準養生圧縮強度(VF混入の有無)
Compressive Strength of Standard Specimen
(Influence of Vinylon Fiber)

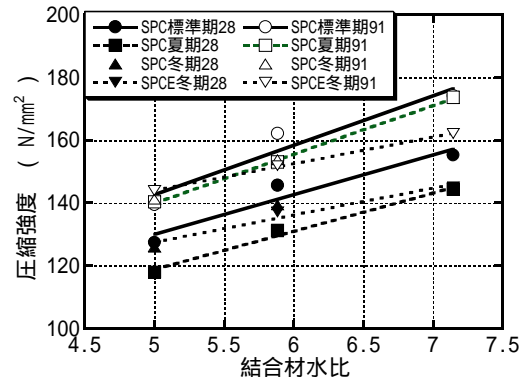


Fig. 10 標準養生圧縮強度
Compressive Strength of Standard Curing Specimen

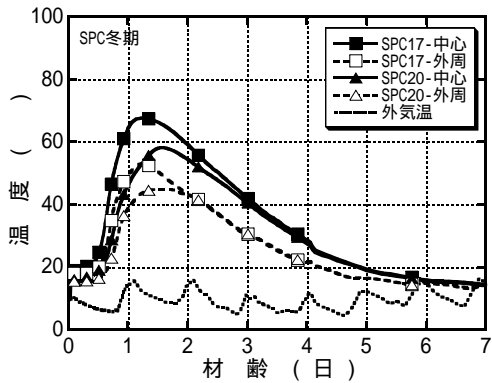


Fig. 7 温度履歴曲線 (SPC冬期)
Temperature History Curves (SPC Winter Season)

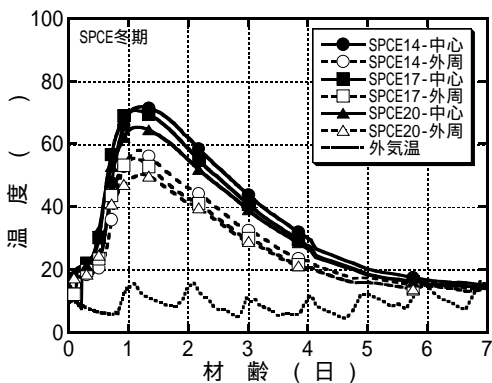


Fig. 8 温度履歴曲線 (SPCE冬期)
Temperature History Curves (SPCE Winter Season)

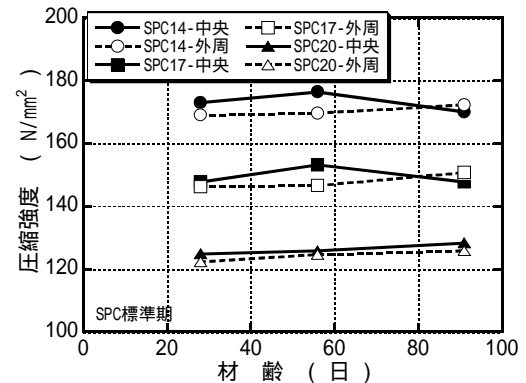


Fig. 11 コア強度 (SPC標準期)
Core Strength (SPC Standard Season)

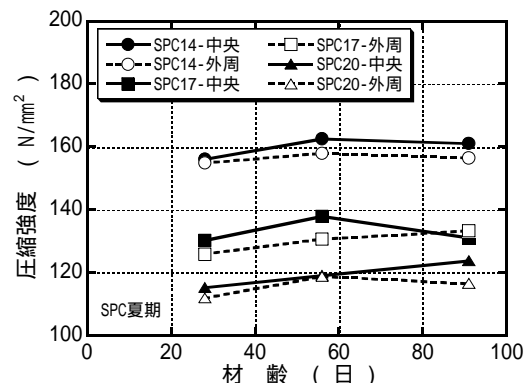


Fig. 12 コア強度 (SPC夏期)
Core Strength (SPC Summer Season)

度が若干高い傾向を示している。また標準期、夏期では、材齢経過による強度の増進が小さい。SPCEの場合も同様で、材齢28日の強度差2.7~10.8N/mm²が材齢91日では0.4~4.3N/mm²と小さくなった。

3.3.3 構造体コンクリート強度の補正值 材齢28日の標準養生強度と材齢91日コア強度の関係をFig. 15に示す。130N/mm²以上では、材齢91日コア強度の方が材齢28日の標準養生強度よりも高くなる傾向にあることがわかる。これは、水和熱とSPC中のシリカフュームのポゾラン反応が影響していることが推察される。

材齢91日コア強度とコンクリート強度補正值 ($_{28}S_{91}$ 値、標準養生した供試体の材齢28日における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢91日における圧縮強度との差)の関係をFig. 16に示す。SPC、SPCE共に、冬期の場合、 $_{28}S_{91}$ 値は5.0N/mm²、標準期と夏期の場合は0に設定できる。

標準養生強度と標準偏差の関係をFig. 17に示す。標準養生供試体強度の標準偏差は、本実験の範囲において圧縮強度の5%以内に収まることわかった。

以上の結果から「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2003, 19節 高強度コンクリート」により調合強度を算定すると以下ようになる。

実験結果から、Fig. 10に示す夏期の回帰式に基づき、構造体コンクリート強度管理用供試体の圧縮強度の標準偏差を構造体補正強度($F_{c+_{28}S_{91}}$)の5%、コンクリート強度補正值 $_{28}S_{91}=5\text{N/mm}^2$ 、許容不良率を4.2%と設定した場合、 $F_{c120\text{N/mm}^2}$ に対する調合強度は135.8N/mm²となり、W/B比は15.7%となる。この結果から、本プラントにおいて $F_{c120\text{N/mm}^2}$ までの超高強度コンクリートを1年通し十分製造可能であることがわかった。

3.4 自己収縮ひずみ低減効果

冬期の模擬部材の中心に埋め込んだ低剛性のひずみ計により測定した自己収縮ひずみの経時変化をFig. 18に示す。測定は、材齢21日まで行った。自己収縮ひずみは、実測値よりコンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/$ と仮定して、熱膨張ひずみを取り除いた値とした。初期値はコンクリート打設直後とした。図よりコンクリート

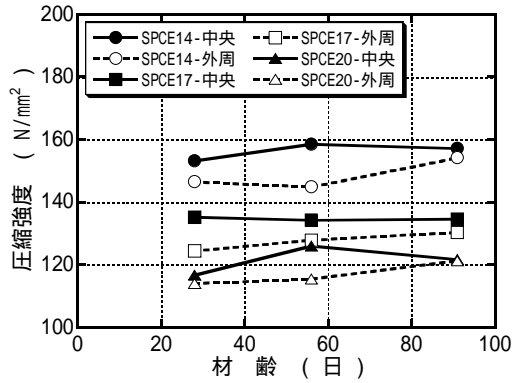


Fig. 14 コア強度 (SPCE冬期) Core Strength (SPCE Winter Season)

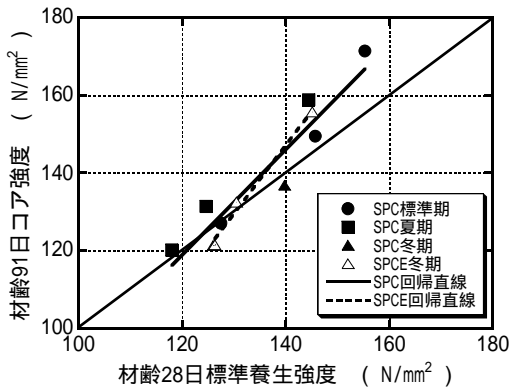


Fig. 15 標準養生強度とコア強度 Standard Curing Strength and Core Strength

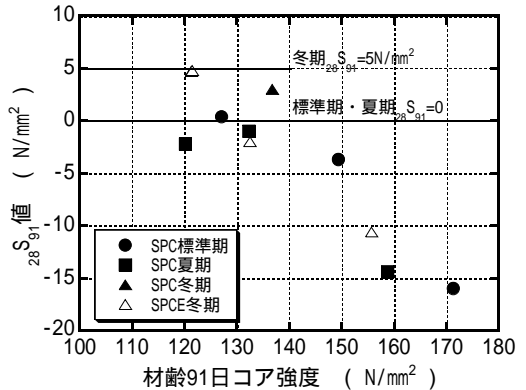


Fig. 16 コア強度と $_{28}S_{91}$ 値 Core Strength and $_{28}S_{91}$ value

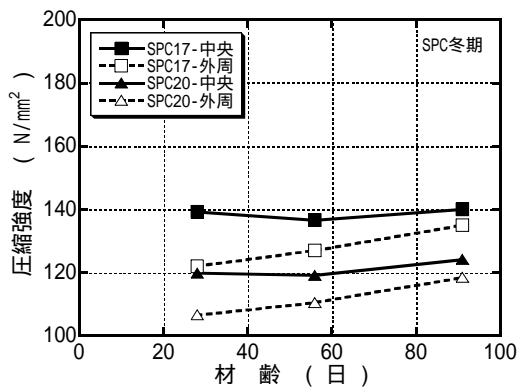


Fig. 13 コア強度 (SPC冬期) Core Strength (SPC Winter Season)

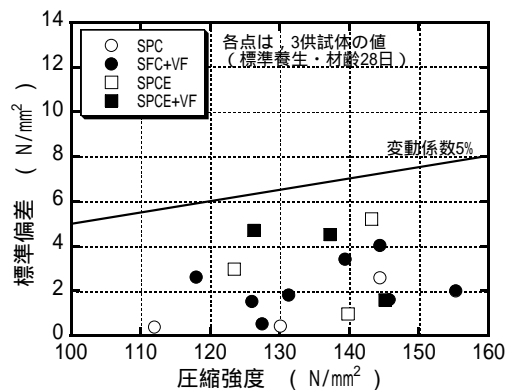


Fig. 17 標準偏差 Standard Deviation

の自己収縮ひずみは $-100 \sim -600 \times 10^{-6}$ の値を示し、絶対値としてSPC17 > SPC20 > SPCE14 > SPCE17 > SPCE20の順に大きな値を示した。自己収縮ひずみは、全調合とも打設直後から大きくなり、打設後2日までに概ね定量となっている。またW/B比が小さいものほど大きい。また膨張材を混入することにより、同一W/B比で $300 \sim 400 \times 10^{-6}$ 低減できることを確認した。この結果から $F_c 100N/mm^2$ を超える高強度コンクリートにおいて、膨張材を混入することにより、自己収縮ひずみを低減でき、内部ひび割れの発生を低減または防止できることを確認した。

3.5 爆裂防止効果

耐火試験は、標準期のRC柱部材を用いて実施した。爆裂は、加熱開始5分後から表層コンクリートが飛散し始め、約30分後まで続いた。耐火試験後の状態をPhoto 1に示す。W/B=20%のRC柱部材では、爆裂がほとんど生じていない(爆裂面積2%)。W/B=17%、14%とW/B比が小さくなるほど爆裂面積が15%、38%と広がった。しかし、爆裂はW/B=14%においてもかぶり厚に収まっており、鉄筋の露出までには至らなかった。 $F_c 100N/mm^2$ 級では、今回使用したビニロン繊維で爆裂防止が可能である。しかし $F_c 120N/mm^2$ 級では爆裂抑制はできているものの広範囲で爆裂が生じており、爆裂を防止できていない。超高強度コンクリートの爆裂防止には、繊維径が細く、長い繊維ほど効果が有ることが指摘されている⁴⁾。しかし、細い繊維や長い繊維を混入した場合、施工性が極端に低下することがある。今後は、 $F_c 120N/mm^2$ 級の超高強度コンクリートの爆裂防止を目標に、施工性、強度を考慮して混入する繊維の仕様を検討する予定である。

4. まとめ

市中実機プラントで製造した設計基準強度 $100N/mm^2$ を超える超高強度コンクリートの構造体コンクリート強度の発現性状、膨張材混入による自己収縮ひずみの低減効果およびビニロン繊維混入による火災時の爆裂防止効果について実験的に検討し、以下のことがわかった。

- 1) 設計基準強度 $120N/mm^2$ 級の超高強度コンクリートの製造が、季節によらず1年を通して市中プラントにて可能である。
- 2) 設計基準強度 $100N/mm^2$ を超える超高強度コンクリートに膨張材を混入することにより、自己収縮ひずみを大きく低減できる。
- 3) 火災時の爆裂防止としてビニロン繊維を混入することにより、 $F_c 120N/mm^2$ 級までの超高強度コンクリートの爆裂を防止または抑制できる。

参考文献

- 1) 神代泰道他：超高強度コンクリートによるCFT圧入

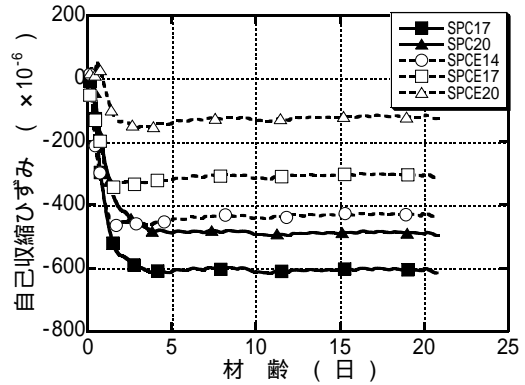


Fig. 18 自己収縮ひずみ
Autogenous Shrinkage Strain

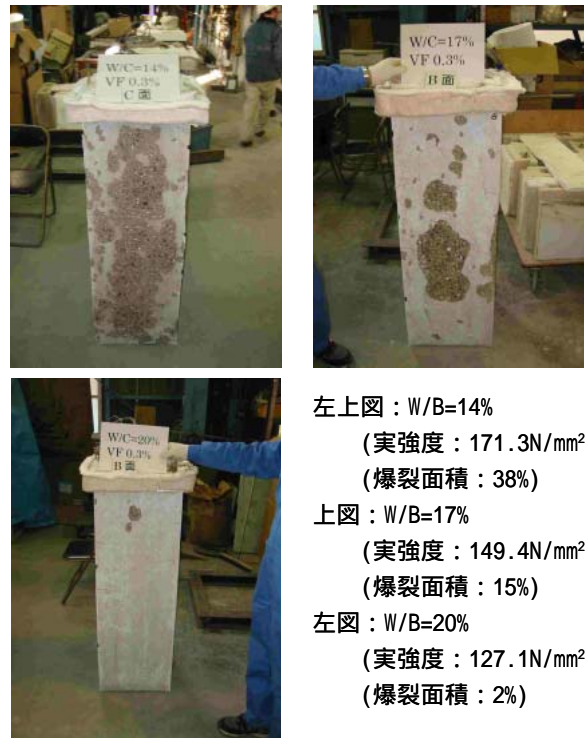


Photo 1 耐火試験結果
Results of Fire Resistance Test

- 左上図：W/B=14%
(実強度：171.3N/mm²)
(爆裂面積：38%)
- 上図：W/B=17%
(実強度：149.4N/mm²)
(爆裂面積：15%)
- 左図：W/B=20%
(実強度：127.1N/mm²)
(爆裂面積：2%)

- 施工に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.989-994，2003.7
- 2) 陣内 浩他：設計基準強度 $150N/mm^2$ 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の検討，日本建築学会技術報告集，第17号，pp.1-5，2003.6
- 3) 一瀬賢一他：超高強度コンクリートの構造体コンクリート強度発現性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1293-1298，2004.7
- 4) 百瀬晴基他：ポリプロピレン繊維を混入した設計基準強度 $150N/mm^2$ の超高強度コンクリートの耐火性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.995-1000，2003.7