

論文 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

一瀬 賢一^{*1}・川口 徹^{*2}

要旨：市中プラントで製造した設計基準強度 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 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について以下のことがわかった。(1) 水セメント比20～14%のコンクリートにPVA繊維を容積比0.3%混入しても良好なワーカビリティおよび強度を確保できる。(2) 設計基準強度 $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超える超高強度コンクリートのコンクリート強度補正値を得ることができた。(3) 構造体コンクリート強度の変動係数は、5%程度である。(4) 設計基準強度 $130\text{N}/\text{mm}^2$ 級までのコンクリートの製造が、1年を通して市中プラントにて可能である。

キーワード：超高強度コンクリート，構造体強度，簡易断熱養生，PVA繊維，温度履歴

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 F_c ） $100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の超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。しかし、超高強度コンクリートの構造体コンクリート強度に関する研究・報告は、 $F_c100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度までは比較的多く発表^{1)～3)}されているものの、 $F_c100\text{N}/\text{mm}^2$ を超えるものは、まだ発表数も少なく^{4), 5)}、今後のデータの蓄積が期待される。

そこで本研究では、市中プラントを使用し、水セメント比、打設時期をパラメータとして製造した $F_c100\text{N}/\text{mm}^2$ を超える超高強度コンクリート（水セメント比20～14%）の構造体コンクリート強度の発現性状を中心に検討・考察した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件は、表-1に示す水セメント比（以下W/C比）3水準、打設時期3水準（冬期、標準期、夏期）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、シリカフェームをプレミックスしたセメント（以下SFC、密度： $3.08\text{g}/\text{cm}^3$ ）、細骨材に万田野産山砂、粗骨材として両神産砕石（硬質砂岩）を使用した。骨材の品質を表-2に示す。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

表-1 実験条件

項目	摘要	水準数
水セメント比	20%, 17%, 14%	3
打設時期	冬期, 標準期, 夏期	3

表-2 骨材の品質

工場	記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm^3)	粗粒率
A	G	両神産 硬質砂岩	2.70	6.60
	S	万田野産 山砂	2.59	2.62

*1 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ長 博(工)(正会員)

*2 同 室長 工博(正会員)

火災時の爆裂防止対策用としてポリビニルアルコール繊維（以下PVA繊維，密度：1.3g/cm³，繊維長さ：12mm，繊維径：100 μm）を使用した。PVA繊維の混入量は，コンクリート容積比の0.3%とした。

調合条件は，PVA繊維混入後の目標スランプフロー値を70 ± 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表-3に示す。混和剤の使用量は，打設時期により表-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（スランプフロー，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，簡易断熱養生），模擬部材供試体から採取したコア強度とした。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，100φ×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。簡易断熱養生は，900×900×200mmの断熱材を3段重ね，その中段中央部に封かんした供試体を入れた。模擬部材試験体は，1000×1000×高さ：1000mm（冬期のみ1200mm）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図-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，100φ×200mmとし，各採取位置につき4本（冬期のみ5本）採取した。

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5m³の水平二軸強制練りミキサを使用し，各調合について2.5m³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/C比の低いものを長くした。PVA繊維は，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（標準養生のみ）採取後，トラックアジテータ内に投入し，約2分間高速攪拌した。PVA繊維混入後は，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。簡易断熱養生供試体は，材齢7日まで断熱材中で養生し，以降現場封かん養生とした。また模擬部材は，材齢7日に側面の型枠を脱型した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-4に示す。またPVA繊維混入の有無によるスランプフロー，空気量の試験結果を図-2，3に示す。スラン

表-3 コンクリートの調合

工場	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 対セメント(%)
		W	C	S	G	
A	20	160	800	642	842	1.5~1.65
	17	155	912	562	842	1.65
	14	150	1071	440	842	2.3~2.5

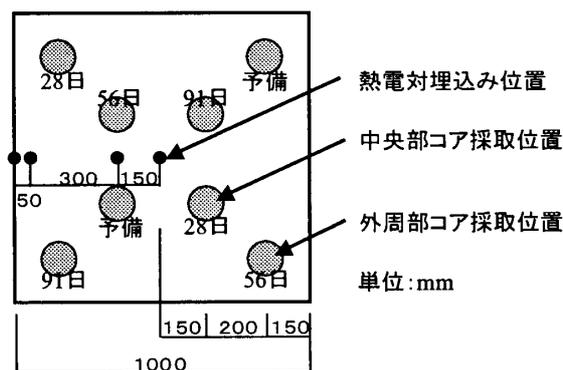


図-1 温度測定およびコア採取位置

表-4 フレッシュ性状

打設時期	W/C (%)	PVA 繊維 混入	スランプ フロー (cm×cm)	空気量 (%)	単位容 積質量 (kg/m ³)	温度 (°C)
冬	14	無	79.0×77.0	2.4	2516	14.0
		有	72.0×70.5	2.5	2514	15.0
	17	無	77.0×76.0	2.2	2504	13.0
		有	71.0×71.0	2.2	2499	13.0
	20	無	73.5×73.5	2.2	2481	12.0
		有	70.0×69.0	2.1	2473	11.0
標準	14	無	72.0×72.0	1.9	2530	25.0
		有	67.0×66.0	2.3	2520	25.0
	17	無	74.0×73.0	1.0	2497	23.0
		有	68.5×68.0	1.6	2477	23.0
	20	無	67.5×68.5	1.4	2480	23.0
		有	62.0×61.0	1.8	2469	24.0
夏	14	無	75.0×73.5	1.4	2530	32.0
		有	67.5×66.0	1.8	2520	32.5
	17	無	76.0×76.0	1.3	2481	30.0
		有	71.0×70.0	1.5	2481	31.0
	20	無	75.0×75.0	1.8	2465	30.0
		有	70.0×69.0	1.9	2446	30.0

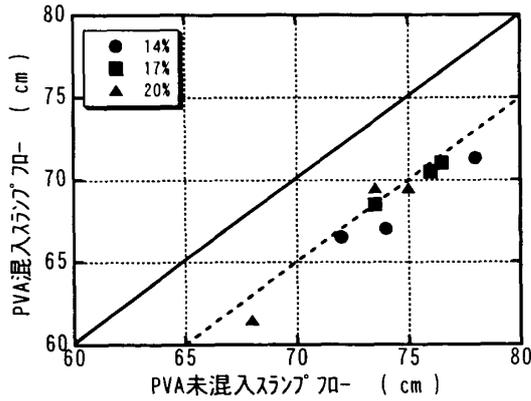


図-2 スラップフロー

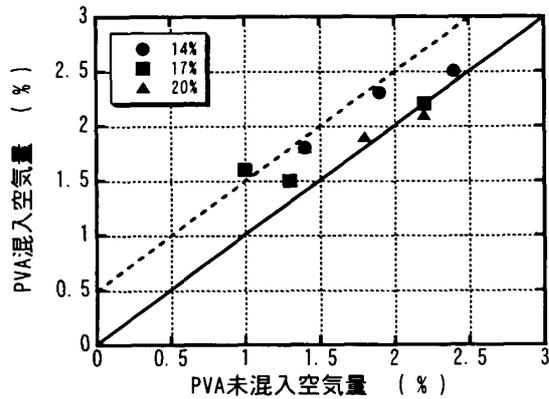


図-3 空気量

プフローは、PVA繊維の混入により約5~7cm小さくなった。空気量は、PVA繊維混入により0~0.5%程度大きくなった。PVA繊維混入後のコンクリートは、特に繊維のかたまりもなく、良く分散できた。またフレッシュ性状も概ね目標値を満足しており、PVA繊維を容積比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図-4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/C比の低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、冬期33~35時間後、標準期27~29.5時間後、夏期24.5~26時間後であり、打設時期の違いに比べW/C比の違いによる影響は小さかった。各打設時期における模擬部材、簡易断熱養生および外気温の温度履歴曲線の一例を図-5~7に示す。これらの図から以下のことがわかる。各打設時期において、材齢7日後には

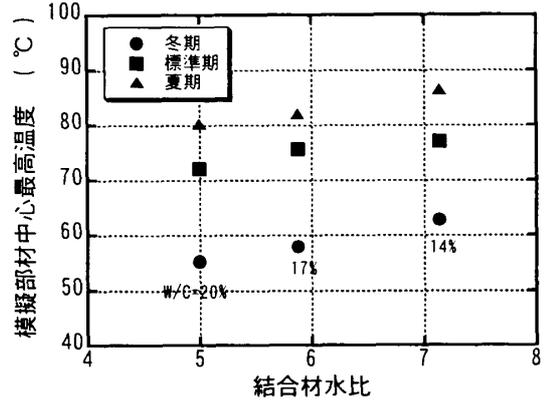


図-4 模擬部材中心の最高温度

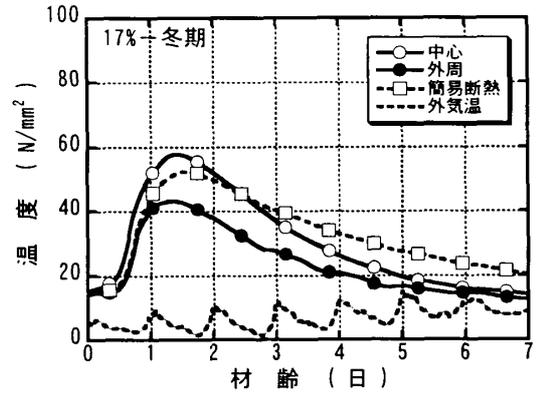


図-5 温度履歴曲線 (冬期)

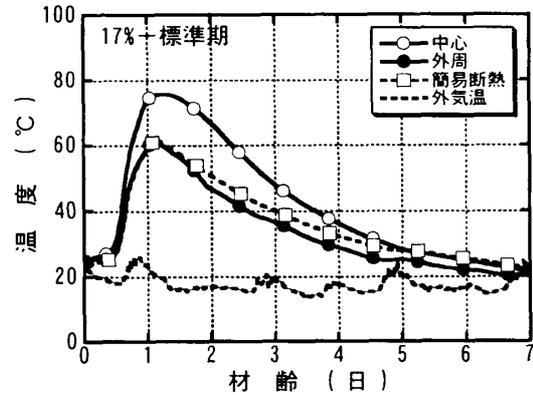


図-6 温度履歴曲線 (標準期)

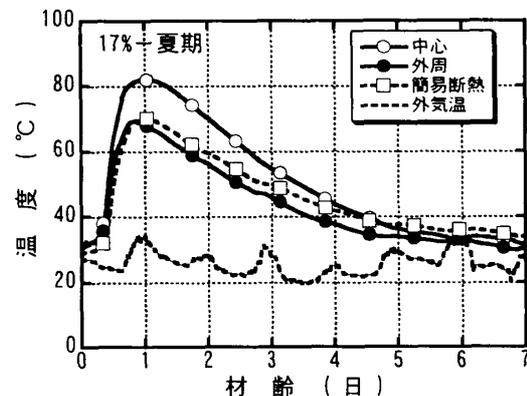


図-7 温度履歴曲線 (夏期)

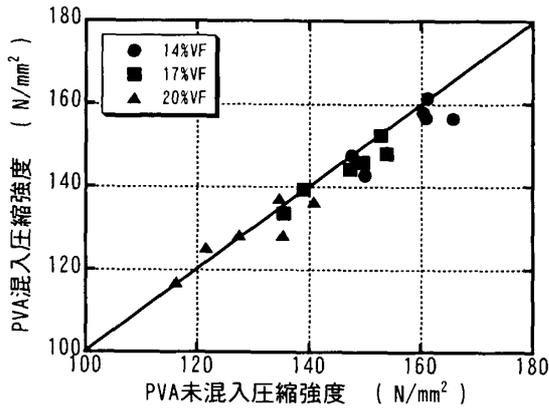


図-8 圧縮強度 (PVA 繊維混入の有無)

中心部と外周部 (側面から 50mm の位置) の温度はともに外気温まで下がることがわかる。また中心部と外周部の最大温度差は、冬期 15.8℃, 標準期 14.9℃, 夏期 12.8℃ を示し、外気温が高い時期ほど温度差が小さくなった。W/C=14%, 20% でも同様の結果を示した。

簡易断熱養生の温度履歴は、冬期では模擬部材中心部と同程度の履歴を示した。しかし、標準期、夏期では、外周部と同程度の温度履歴を示した。W/C=14%, 20% も概ね同様の結果を示した。

3.3 管理用供試体の強度試験結果

PVA 繊維混入の有無による圧縮強度の比較を図-8 に示す。140N/mm² までの強度では、繊維混入の有無による差異はないが、150N/mm² 以上の強度では繊維の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。

標準養生供試体のセメント水比と圧縮強度の関係を図-9 に示す。セメント水比 5.0 以上でもセメント水比と圧縮強度とは概ね比例関係を示している。

各打設時期ごとの標準養生、簡易断熱養生の圧縮強度の発現性状を図-10~12 に示す。標準養生の場合、材齢 28 日以降の強度増加は、W/C 比の大きい方が大きい。W/C=14% の場合は、材齢 56 日以降の強度増加が小さく、頭打ちとなった。簡易断熱養生の場合は、材齢 28 日以降の強度増加が標準養生よりも更に小さく、材齢が長

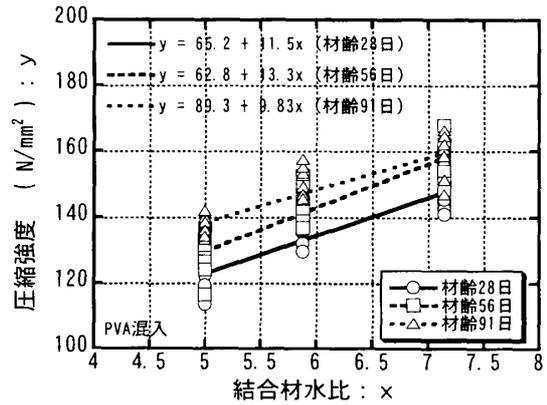


図-9 標準養生供試体強度

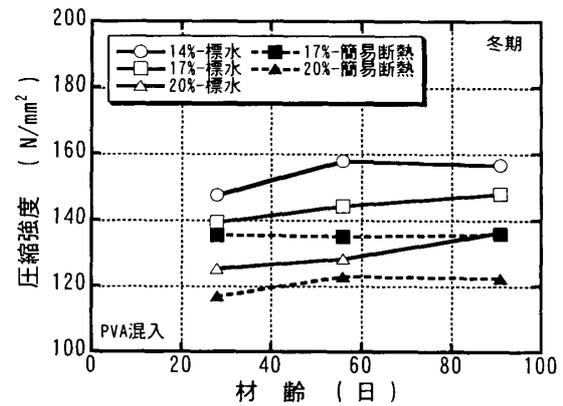


図-10 管理用供試体強度 (冬期)

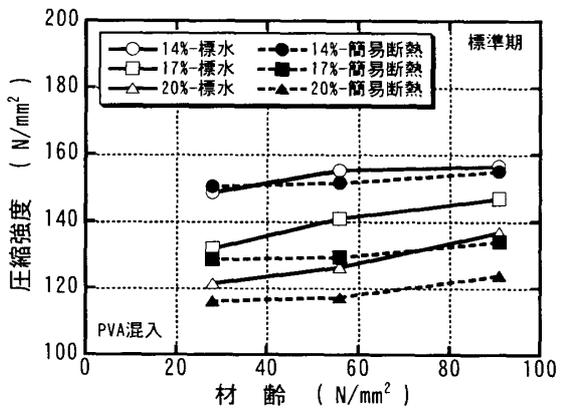


図-11 管理用供試体強度 (標準期)

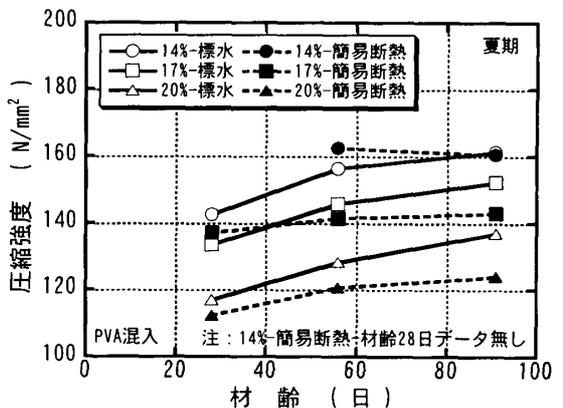


図-12 管理用供試体強度 (夏期)

くなるほど標準養生との強度差は大きくなった。冬期では、全材齢の結果が、標準養生よりも低い値を示した。しかし、標準期ではW/C=14%, 夏期では、W/C=14%と17%が材齢28日において標準養生よりも高い強度を示した。

3.4 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図-13~15に示す。冬期の結果から、材齢28日では中央部と外周部の強度差が9.1~15.8N/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56日になるとW/C=17%と20%, 材齢91日ではW/C=14%の外周部強度が中央部の強度に追いついている。このように冬期の場合、中央部の強度の増進に比べ外周部の強度増進が大きいことがわかる。また標準期でも、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度が高く、材齢56日以降では同等の強度を示した。夏期における中央部と外周部の強度は、材齢に関わらずほぼ等しく、材齢経過による強度の増進がほとんどない。

簡易断熱養生の強度は、材齢28日において冬期では中央部、標準期および夏期では外周部のコア強度に近い値を示した。この結果は、温度履歴の結果を反映しているものと言える。

コア強度と簡易断熱養生の強度の関係を図-16に示す。コア強度に対して簡易断熱養生の強度は、概ね±5N/mm²の範囲にある。特に材齢91日では、簡易断熱の強度は、コア強度と同等または若干低い。このことから材齢91日の構造体コンクリート強度をコア強度の代替として簡易断熱養生の強度を用いることも可能である。

3.5 構造体コンクリート強度の補正值

材齢91日コア強度とコンクリート強度補正值(mSn値、標準養生した供試体の材齢m日における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢n日における圧縮強度との差)の関係を図-17に示す。₂₈S₉₁値は、総て0以下、₅₆S₉₁値は、最大6.9N/mm²を示した。

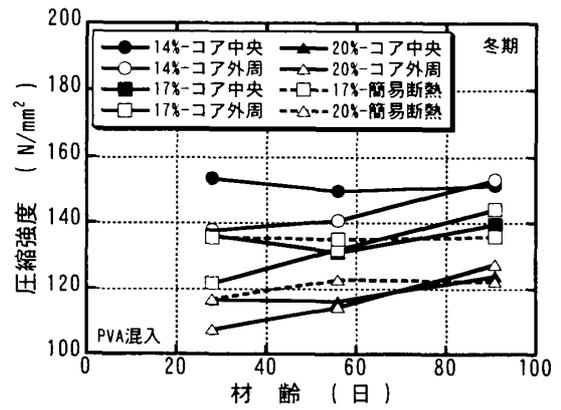


図-13 コア強度 (冬期)

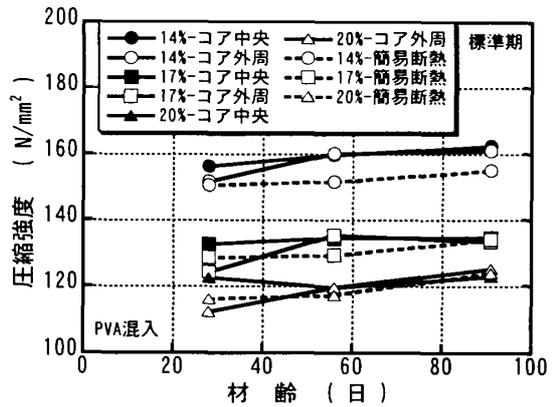


図-14 コア強度 (標準期)

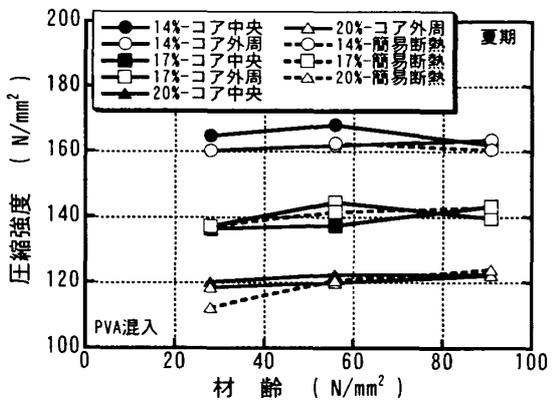


図-15 コア強度 (夏期)

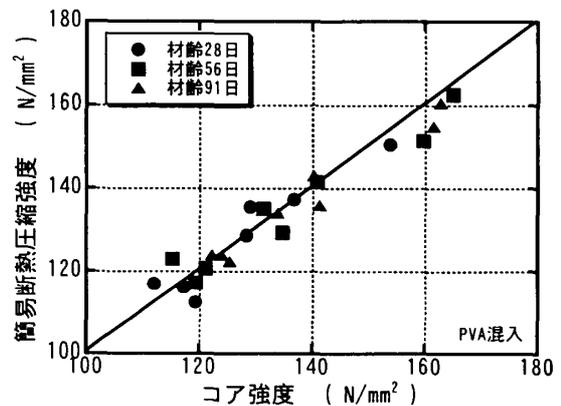


図-16 コア強度と簡易断熱強度

コア強度および標準養生供試体強度と標準偏差の関係を図-18に示す。冬期における材齢28日のコア強度の結果を除けば、構造体コンクリート強度および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%以内に収まることがわかった。

以上の結果を基に「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のようなになる。

実験結果から構造体コンクリート強度の変動係数を5%, コンクリート強度補正值 $_{28}S_{91}=0$, $_{56}S_{91}=6.9\text{N/mm}^2$, 許容不良率を4.2%と設定すると, 例えば $F_c130\text{N/mm}^2$ を満足する調合強度は, 材齢28日で定める場合 141N/mm^2 , 材齢56日で定める場合 148N/mm^2 となる。各調合強度に対するW/C比は, 15.1%, 15.6%となり, $F_c130\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートが, このプラントにて1年を通し十分製造可能であることがわかった。

4. まとめ

市中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について以下のことがわかった。

- (1) 水セメント比20~14%のコンクリートにPVA繊維を容積比0.3%混入しても良好なワーカビリティおよび強度を確保できる。
- (2) 設計基準強度 100N/mm^2 を超える超高強度コンクリートのコンクリート強度補正值を得ることができた。
- (3) 今回の実験の範囲では, 構造体コンクリート強度の変動係数は, 5%程度である。
- (4) $F_c130\text{N/mm}^2$ 級までの超高強度コンクリートの製造が, 1年を通して市中プラントにて可能である。

参考文献

- 1) 陣内 浩ほか：設計基準強度 100N/mm^2 の高

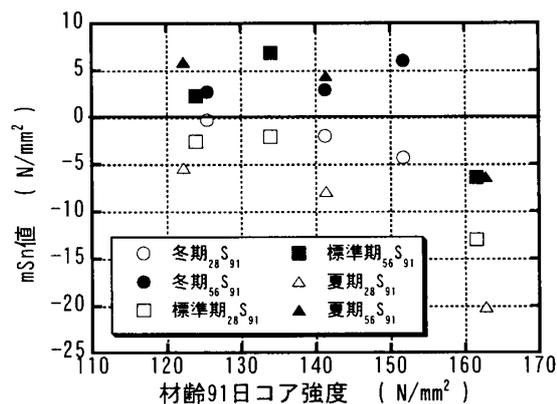


図-17 コア強度と mSn 値

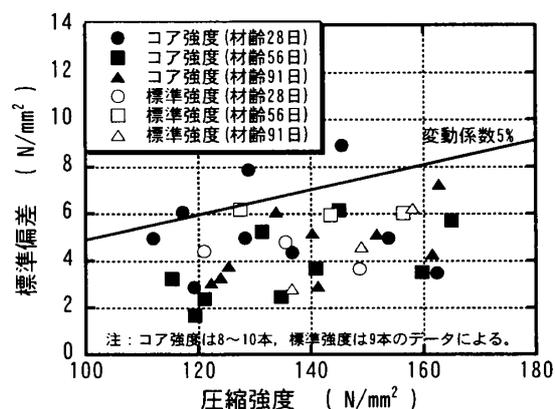


図-18 標準偏差

強度コンクリートを用いた超高層建物の施工, 日本建築学会技術報告集, 第9号, pp. 7-12, 1999. 12

- 2) 並木 哲ほか：計画供用年数200年中宅の施工, コンクリート工学, Vol. 40, No. 7, pp. 41-46, 2002. 7
- 3) 寺井靖人ほか：超高層RC造集合住宅に用いた 100MPa 級高強度コンクリートの品質, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), A-1, pp. 997-998, 2003. 9
- 4) 神代泰道ほか：超高強度コンクリートによるCFT圧入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
- 5) 陣内 浩ほか：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