

報告 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの mSn 値に関する研究

梅本 宗宏^{*1}・篠崎 徹^{*2}・寺井 靖人^{*3}

要旨：本報告では、低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの実大模擬柱打込み実験を実施し、コア供試体および標準養生供試体の圧縮強度結果についてまとめ、調合時の強度補正值（mSn 値）について考察した。実験の結果、 $_{28}S_{91}$ 値は冬期と標準期には $-5\sim 7\text{N/mm}^2$ の範囲に分布するものが多く、夏期は $_{28}S_{91}\leq 0$ のものが多いこと、 $_{56}S_{91}$ 値および $_{91}S_{91}$ 値は、コア強度との相関は低くばらつきも大きいこと、構造体コンクリートの強度補正值に季節変動が影響することがわかり、骨材の種類が $_{28}S_{91}$ 値に与える影響は見られなかった。コア強度の変動係数は 10%以下で、8%以下が多い結果となった。

キーワード：強度補正值、低熱ポルトランドセメント、コア強度

1. はじめに

近年、超高層 RC 造構造物や CFT 構造を中心に設計基準強度(以下 Fc)60～80N/mm²クラスの高強度コンクリートが採用される例が多くなっている^{1),2)}。NewRC 施工標準³⁾や JASS 5 (1997 年版)⁴⁾では、高強度コンクリートの調合および強度管理に、構造体コンクリート強度の強度補正值(以下 mSn 値)を組み込むことを規定し、JASS 5 では以下の式(1)で定義している。

$$\begin{aligned} mSn &= (\text{標準養生材齢 } m \text{ 日の圧縮強度}) \\ &\quad - (\text{構造体コンクリート材齢 } n \text{ 日の} \\ &\quad \text{圧縮強度の推定値}) \quad (1) \end{aligned}$$

これらの高強度コンクリートでは、部材の大型化や単位セメント量の増大から若材齢時に高温履歴を受け、構造体コンクリートの強度増進に与える影響が指摘されており⁵⁾、現状では強度補正值のデータも少なく現場ごとの個別対応実験が求められている。

筆者らは、Fc58.8N/mm²(600kgf/cm²)を採用した超高層 RC 造建築物の高強度コンクリートの施工に際し、高ピーライト系の低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの実大

規模の模擬柱打込み実験を実施し、構造体コンクリート強度および mSn 値について検討してきた^{6),7)}。本報告では、これらの実験結果についてまとめ、若干の考察について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体および水セメント比の水準

表-1 に、実験に使用した各レディーミクス トコンクリート工場、試験体および水セメント

表-1 各工場の試験体および
水セメント比の水準

工場	実験場所	試験体の形状 (mm)	W/C (%)
T 工場	つくば市	□850×H3000	25～30
J 工場	文京区	□850×H2500 □850×H1000*	27～40
S 工場	古河市	□850×H2500 □850×H1000*	27～50
Y 工場	草加市	□850×H1000*	27～42
K 工場		□850×H1000*	30～42
H 工場		□950×H1000*	27～50
W 工場	江東区	□950×H1000*	27～50
J2 工場		□950×H1000*	27～50
E 工場	松戸市	□900×H1000*	27～42

*ポリスチロール(厚さ 200mm)で上下断熱、W/C:水セメント比

*1 戸田建設(株)技術研究所材料グループ 工修 (正会員)

*2 戸田建設(株)技術研究所材料グループプロジェクトチームマネージャー (正会員)

*3 戸田建設(株)建築工事技術部主任

表－２ 使用材料

セメント	各工場	低熱ポルトランドセメント： 密度 3.20g/cm ³ ，比表面積 4170cm ² /g，C ₂ S 量=46%
細骨材	T 工場	鹿島産陸砂：表乾密度 2.60 g/cm ³ ，FM2.60 (70%) 葛生産砕砂：表乾密度 2.66 g/cm ³ ，FM2.70 (30%)
	J 工場	麻生産陸砂：表乾密度 2.60 g/cm ³ ，FM2.50 (60%) 葛生産砕砂：表乾密度 2.66 g/cm ³ ，FM3.00 (40%)
	S 工場	思川産川砂：表乾密度 2.59 g/cm ³ ，FM2.66
	Y 工場	鹿島産陸砂：表乾密度 2.61 g/cm ³ ，FM2.69
	K 工場	鹿島産陸砂：表乾密度 2.60 g/cm ³ ，FM2.67
	H 工場	万野田産山砂：表乾密度 2.58 g/cm ³ ，FM2.62
	W 工場	市原産山砂：表乾密度 2.60 g/cm ³ ，FM2.60
	J2 工場	木更津・葛生産混合砂(80:20)：表乾密度 2.59 g/cm ³ ，FM2.65
	E 工場	鹿島産陸砂：表乾密度 2.58 g/cm ³ ，FM2.65
	T 工場	岩瀬産砕石：表乾密度 2.64 g/cm ³ ，FM6.68，実績率=60%
粗骨材	J 工場	葛生産砕石：表乾密度 2.70 g/cm ³ ，FM6.60，実績率=62%
	S 工場	葛生産砕石：表乾密度 2.73 g/cm ³ ，FM6.67，実績率=59.2%
	Y 工場	葛生産砕石：表乾密度 2.71 g/cm ³ ，FM6.58，実績率=59.5%
	K 工場	鹿沼産砕石：表乾密度 2.65 g/cm ³ ，FM6.60，実績率=60%
	H 工場	住田産砕石：表乾密度 2.70 g/cm ³ ，FM6.61，実績率=60%
	W 工場	八戸産砕石：表乾密度 2.70 g/cm ³ ，FM6.63，実績率=61.0%
	J2 工場	津久見産砕石：表乾密度 2.71 g/cm ³ ，FM6.65，実績率=60.4%
	E 工場	葛生産砕石：表乾密度 2.72 g/cm ³ ，FM6.53，実績率=59.6%
混和剤	各工場	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)

[注]各材料の試験値はそれぞれの代表的な数値，()内は混合比

比の水準を示す。各試験体とも無筋で在来型枠とし、高さ 1000mm の試験体は上下を断熱材で覆った。実験は、季節変動の要因を考慮するため、各工場とも夏期・標準期(春季または秋季)・冬期に分けて実施した。

2.2 使用材料および調合

表－２に、各工場における使用材料の一覧を示す。表－３に、コンクリートの調合の概要を示す。セメントはすべて低熱ポルトランドセメントを用い、各調合とも現着時のフレッシュコンクリートの品質が管理基準を満足するよう、季節に応じて混和剤の添加量を調整した。

2.3 実験項目

表－４に、実験項目を示す。コンクリートは、ブーム付ポンプ車、コンクリートバケットもしくはトラックアジテータ車のシュートから直接打込み、棒状バイブレータ(φ50)を用いて締固めた。また、試験体に熱電対を埋め込み、

温度計測を行った。

表－３ 調合の概要

工場	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)
T 工場	45～60*	3	165
J 工場	21～23	3	165～170
S 工場	21～23	4	165
Y 工場	40～50*	3	165～170
K 工場	40～50*	3	165
H 工場	40～55*	3	170
W 工場	40～55*	3	165
J2 工場	40～55*	3	165
E 工場	45～55*	3	165

*スランブフロー値

表－４ 実験項目

フレッシュコンクリート	硬化コンクリート
スランブ・スランブフロー試験、空気量試験、コンクリート温度(出荷時・受入れ時)塩化物量(受入れ時)	圧縮強度： 標準水中養生 (材齢 7・28・56・91 日) コア供試体 (材齢 28・56・91) 温度履歴測定

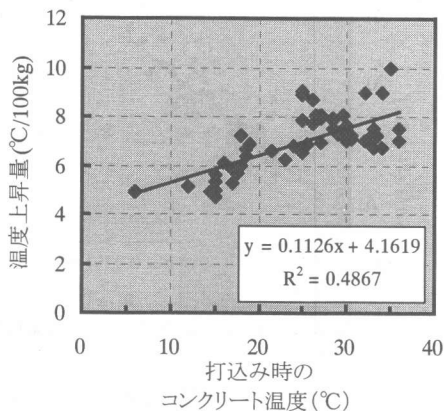


図-1 打込み時のコンクリート温度と単位セメント量 100kg 当たりの温度上昇量の関係

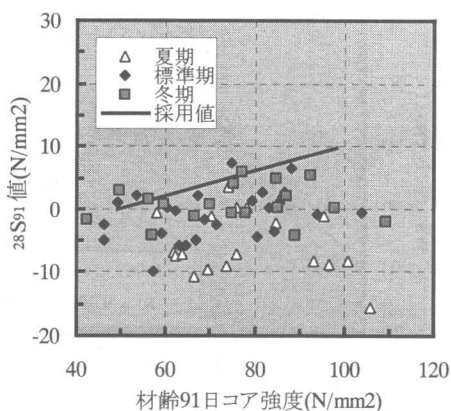


図-2 材齢 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ 値の関係

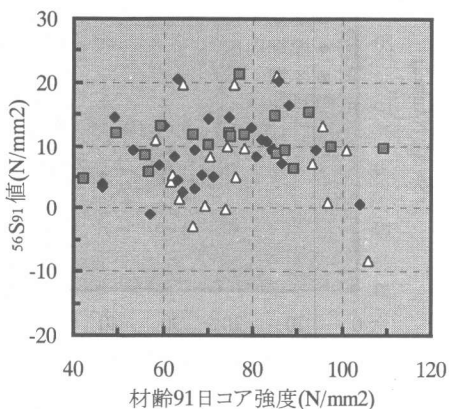


図-3 材齢 91 日コア強度と $_{56}S_{91}$ 値の関係

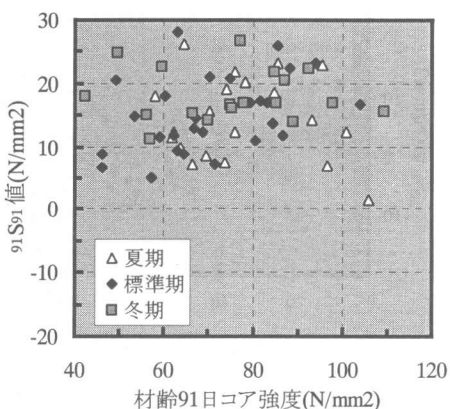


図-4 材齢 91 日コア強度と $_{91}S_{91}$ 値の関係

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリート温度上昇量

図-1 に、打込み時のコンクリート温度と単位セメント量 100kg 当たりの温度上昇量の関係を示す。低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの打込み時のコンクリート温度と単位セメント量 100kg 当たりの温度上昇量は、ばらつきはあるものの線形の傾向にあり、打込み時のコンクリート温度が高い季節ほどコンクリート温度上昇量が大きくなることがわかる。

3.2 コア強度と mSn 値の関係

mSn 値を求める構造体コンクリートの圧縮強度の推定値に、材齢 n 日コア供試体の圧縮強度を用いた。図-2～図-4 に、各実験における、実験季節ごとの材齢 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ 値、 $_{56}S_{91}$ 値および $_{91}S_{91}$ 値の関係をそれぞれ示す。 $_{28}S_{91}$ 値は、冬期と標準期には $-5 \sim 7 \text{ N/mm}^2$ の範囲に分布するものが多い、夏期は $_{28}S_{91} \leq 0$ のものが多い。図中に、各工事で採用した調査時の採用値を示す。安全側で評価すると、コア強度が大きくなると $_{28}S_{91}$ 値を大きくする必要

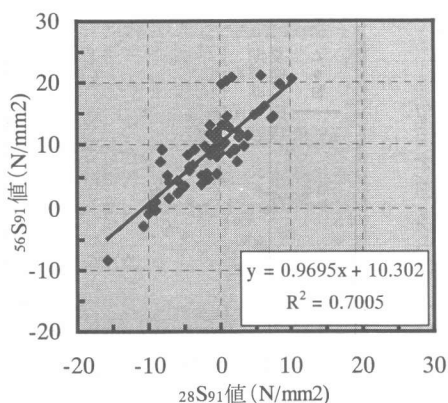


図-5 $_{28}S_{91}$ 値と $_{56}S_{91}$ 値の関係

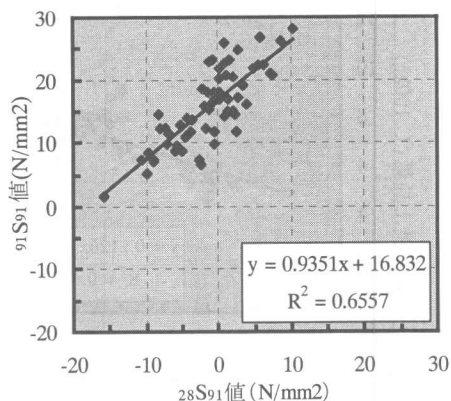


図-6 $_{28}S_{91}$ 値と $_{91}S_{91}$ 値の関係

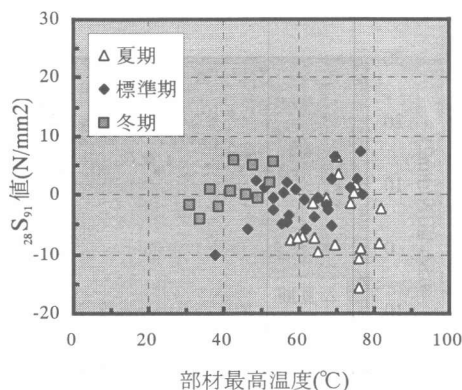


図-7 部材最高温度と $_{28}S_{91}$ 値の関係

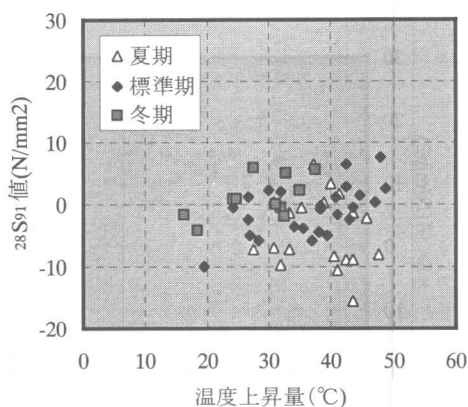


図-8 温度上昇量と $_{28}S_{91}$ 値の関係

があるが、ばらつきが大きい。 $_{56}S_{91}$ 値および $_{91}S_{91}$ 値には、各実験のいずれの季節においても、 $_{56}S_{91}$ 値は $0 \sim 20 \text{ N/mm}^2$ 、 $_{91}S_{91}$ 値は $5 \sim 25 \text{ N/mm}^2$ の範囲に分布しており、コア強度との相関は低く、ばらつきも大きい。

図-5に、 $_{28}S_{91}$ 値と $_{56}S_{91}$ 値の関係を、図-6に、 $_{28}S_{91}$ 値と $_{91}S_{91}$ 値の関係をそれぞれ示す。 $_{28}S_{91}$ 値と $_{56}S_{91}$ 値の関係および $_{28}S_{91}$ 値と $_{91}S_{91}$ 値の関係ともほぼ線形に回帰でき、 $_{28}S_{91}$ 値との関係から $_{56}S_{91}$ 値と $_{91}S_{91}$ 値が決定できる。

3.3 部材温度と mSn 値の関係

図-7に、部材最高温度と $_{28}S_{91}$ 値の関係を、

図-8に、温度上昇量と $_{28}S_{91}$ 値の関係を示す。 $_{28}S_{91}$ 値は、ほぼ $-10 \sim 8 \text{ N/mm}^2$ の間に分布しており、冬期と標準期については部材最高温度が高くなると $_{28}S_{91}$ 値が大きくなる。また、温度上昇量においても同様の傾向が見られる。しかしながら、季節変動に注目すると、ある一定の部材最高温度や温度上昇量で強度低下が起こるのではなく、冬期では部材最高温度が 40°C 程度で $_{28}S_{91} > 0$ になるのに対し、標準期では 60°C 付近となる。また、夏期では部材最高温度や温度上昇量が大きいかかわらず、 $_{28}S_{91} \leq 0$ のものが多い。したがって、低熱ポルトランドセメントでは、部材最高温度や温度上昇量が

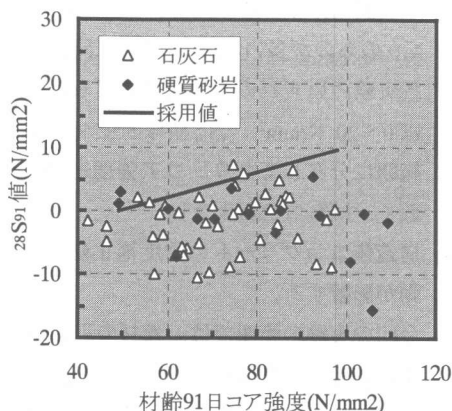


図-9 骨材種類ごとの材齢 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ 値の関係

きいことが構造体コンクリート強度の低下の主要原因となるわけではなく、 mSn 値の決定には部材温度の上昇などとともに打込み時期や養生温度が関わっている。

3.4 骨材種類と mSn 値の関係

図-9に、実験に用いた骨材種類ごとの材齢 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ 値の関係を示す。今回の実験の範囲では、石灰岩と硬質砂岩の骨材の違いが $_{28}S_{91}$ 値に与える影響はほとんど見られなかった。

3.5 コア強度の標準偏差

図-10に、材齢 91 日コア強度と標準偏差の関係を示す。変動係数はすべて 10%以下で、8%以下のものが多く、調合時の標準偏差(σ)としては、最大でコア強度の 8~10%程度の変動係数を見込むことがよいと考えられる。

4. $_{28}S_{91}$ 値の提案

今回の実験結果をもとに、低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの調合計画に用いる強度補正值 mSn 値について考える。JASS 5⁴⁾に基づく、 36N/mm^2 を超えるコンクリートの管理材齢 m 日の調合強度は、構造体モデル実験結果より強度補正值 mSn 値を定め

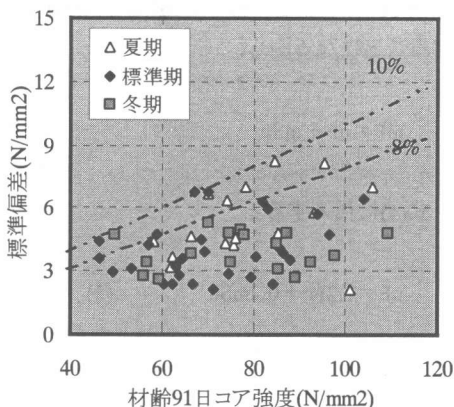


図-10 コア強度と標準偏差の関係

て用いる場合は、 $\Delta F=0$ とすることができるので、品質基準強度 $F_q=F_c$ となり、以下の式で表わすことができる。

$$mF = F_c + mSn + 2\sigma \quad (2)$$

$$mF = 0.9(F_c + mSn) + 3\sigma \quad (3)$$

ここに、

mF : 管理材齢 m 日の調合強度(N/mm^2)

F_c : 設計基準強度 (N/mm^2)

mSn : 構造体コンクリートの強度補正值

σ : 構造体コンクリート管理用供試体の圧縮強度の標準偏差

ここで、一般的な標準偏差として、

$$\sigma = 0.1(F_c + mSn)$$

をそれぞれの式に代入すると、式(2)および式(3)はいずれも

$$mF = 1.2(F_c + mSn) \quad (4)$$

と表せる。また、調合強度より期待される構造体コンクリート強度（強度管理材齢 n 日のコア

強度)を nF とすると, mF は nF より mSn だけ上回ることになるから,

$$mF = nF + mSn$$

より, 式(4)に代入すると

$$nF = 1.2Fc + 0.2mSn \quad (5)$$

となる。

また, 強度管理材齢を $m=28$ 日, $n=91$ 日とし, 図-2中の採用値の直線式を

$$_{28}S_{91} = 0.2F - 9.8 \quad (N/mm^2) \quad (6)$$

とすると, 式(5)式(6)の2式から F_c に応じた $_{28}S_{91}$ と nF が求まり, σ , $_{28}F$ がそれぞれ決まる。

$_{28}S_{91}$ 値を式(6)で安全側に季節変動に対して一定とすると, F_c に応じた $_{28}S_{91}$ 値を求まり, 結果を 0.5 N/mm^2 刻みに丸めると, 表-5に示すようになる。

表-5 F_c と $_{28}S_{91}$ 値

F_c (N/mm^2)	$_{28}S_{91}$ (N/mm^2)
60	5.0
54	3.5
48	2.0
45	1.0
42	0.5

5. まとめ

本報告では, 高ピーライト系の低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの実大規模の模擬柱打込み実験を実施し, 構造体コンクリートおよび mSn 値についての実験結果についてまとめ, 若干の考察とともに調合時の $_{28}S_{91}$ 値を提案し報告した。本報告における結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 打込み時のコンクリート温度が高いほどコンクリート部材の温度上昇量が大きくなる。
- (2) $_{28}S_{91}$ 値は, 冬期と標準期には $-5 \sim 7 \text{ N/mm}^2$

の範囲に分布するものが多い, 夏期は $_{28}S_{91} \leq 0$ のものが多い。 $_{56}S_{91}$ 値および $_{91}S_{91}$ 値は, 各実験のいずれの季節においても, $_{56}S_{91}$ 値は $0 \sim 20 \text{ N/mm}^2$, $_{91}S_{91}$ 値は $5 \sim 25 \text{ N/mm}^2$ の範囲に分布しており, コア強度との相関は低く, ばらつきも大きい。

- (3) 構造体コンクリートの強度補正值に季節変動が影響する。
- (4) 今回の実験の範囲では, 骨材の種類が $_{28}S_{91}$ 値に与える影響は見られなかった。
- (5) コア強度の変動係数はすべて 10%以下で, 8%以下のものが多い。

参考文献

- 1) 篠崎・寺井・大野・青木: $F_c 600 \text{ kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートを用いた高層 RC 建物の施工, コンクリート工学, Vol.35, No.6, pp.19-24, 1997.6
- 2) 岩清水・米澤・三井・栗田: $F_c 800 \text{ kgf/cm}^2$ の超高強度コンクリートを用いた鋼管コンクリートの施工, コンクリート工学, Vol.35, No.5, pp.19-24, 1997.5
- 3) NewRC 総プロ: 平成4年度工法分科会報告書, (財)国土開発技術研究センター, 1993.3
- 4) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 1997.1
- 5) たとえば, 一瀬・中根・阿部・岡本: 各種養生した高強度コンクリートの強度発現性状の比較 (NewRC 実大施工実験 その27), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.351-352, 1992.8
- 6) 梅本・篠崎・板谷・平賀: 低発熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの柱構造体強度の検討, コンクリート工学年次論文報告集, 第18巻, 第1号, pp.309-314, 1996.3
- 7) 板谷・他: 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの現場適用(その1~その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.303-308, 1997.9