

論文 高強度 PCa コンクリートの強度管理に関する考察

大野 吉昭*1・鹿毛 忠継*2・榊田 佳寛*3・大串 浩治*1

要旨: PCa コンクリート部材製造工場における高強度コンクリート($60 < F_c \leq 120 \text{N/mm}^2$)を対象に, 材料・調査と管理用供試体・構造体コンクリートに関する実機実験データを収集し, 強度関係式と mSn 値の算出方法等, 強度管理手法に関する検証を行った。

高強度の構造体コンクリートは, 単位セメント量が多く, 部材によっては大断面になる場合もあり硬化過程で熱の影響を受けるため, 従来の管理用供試体の発熱傾向と異なり実際の部材と強度が異なっている。その為, 構造体コンクリートの強度と管理用供試体の構造体強度補正值(mSn 値)を実験結果により決めておく必要が有るが, この際に強度関係式や mSn 値の算出の方法は, 明確に定められていない。本研究では収集されたデータより, 同一の強度管理手法による実験データの比較検証を行った。

キーワード: 高強度コンクリート, PCa コンクリート, 強度管理手法, 構造体強度補正值, 強度関係式

1. はじめに

近年, 建築用 PCa コンクリート部材の高強度化に伴い, 設計基準強度(F_c)で 60N/mm^2 を超える高強度コンクリートも市場に多く出荷されてきている。高強度 PCa コンクリート部材は, 構造体として使用されることが多く, 部材によっては大断面になることもある。併せて, 高強度コンクリートは単位セメント量が多く初期硬化過程で熱の影響を大きく受けるため, 長期材齢の構造体コンクリートの圧縮強度の増進が停滞する傾向にあり, 構造体コンクリートと管理用供試体とでは, 強度差が生じる。そのため, 構造体コンクリートの圧縮強度を確保するための調査強度を定めるためには, 管理用の材齢 m 日標準養生供試体の強度と構造体コンクリートの保証材齢 n 日のコア強度差(mSn 値)などを調べておく必要がある。

しかし, 実験結果から求められる強度関係式や mSn 値の算出方法は, 特に定められていないため, 製造工場毎に強度管理手法が異なり, 構造体コンクリートの強度が確保されるように mSn 値を設定できているかは, 検証できる資料も少ないため判断するのが難しい。

本論文では, PCa コンクリート部材製造工場における高強度コンクリート($60 < F_c \leq 120$)を対象に, 材料・調査と管理用供試体・構造体コンクリートに関するデータの収集を行い, 現状で使われている強度関係式や mSn 値の算出方法を分類し, 強度管理手法に関する検証を行った。

検証はセメントの種類毎にコア強度と構造体強度補正值の比較, 結合材水比と標準養生供試体の強度の比較を行い, 工場毎に異なっている強度関係式や mSn 値の算出方法を同じ方法で置き換えた場合に結合材水比(B/W)の算出結果について行った。

2. 実機実験の概要

2.1 使用材料

実機実験に使用された材料は, セメントが JIS R 5210(ポルトランドセメント)または JASS 5T-701(高強度コンクリート用セメントの品質基準(案))に適合するもの, 細骨材及び粗骨材は, JIS A 5005(コンクリート用砕石・砕砂)または高強度 PC 部材製造基準¹⁾に適合するものが使用されている。混和剤は, JIS R 6204(コンクリート用化学混和剤), 混和材は, JIS A 6207(コンクリート用シリカフューム)及び JASS 5T-701 の附属書 3(スラグせっこう系混和材の品質基準(案))に規定するスラグせっこう系混和材に適合する材料が使用されている。練混ぜ水は, JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)に示される品質基準を満たしたもので, 回収水は用いていない。使用材料の概要を表-1 に示す。

表-1 使用材料の概要

項目	種類
水結合材比	15~42 (%)
セメント	普通ポルトランドセメント(N) 中庸熱ポルトランドセメント(M) 低熱ポルトランドセメント(L) シリカフュームセメント(SFC) 特殊結合材(VKC)
骨材	砕石・砕砂・陸砂*2・山砂*2
混和剤	ポリカルボン酸系減水剤
混和材*1	シリカフューム等
その他	ポリプロピレン繊維

*1 工場後添加を行う場合は, 集計対象外とした。

*2 陸砂, 山砂は高強度 PC 部材製造基準に適合するものとした

*1 (財) ベターリビング つくば建築試験研究センター 構造・材料試験部 (正会員)

*2 (独) 建築研究所 建築生産研究グループ Ph.D (正会員)

*3 宇都宮大学工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

2.2 実機実験について

実機実験では、全ての工場で模擬部材試験体は 1m×1m×1m の立方体のコンクリートからコア供試体を採取し、コア強度を求めている。模擬部材試験体は、工場内で製造されたものであり実製造を反映した打込み・締固めで行われている。コア供試体の採取は、JASS 5T-704(コア供試体による構造体コンクリート強度の推定方法(案))に準拠した方法で採取されている。

3. 構造体強度補正值(mSn 値)と強度関係式の設定方法

3.1 構造体強度補正值(mSn 値)の設定方法

高強度 PC 部材製造基準などにおける高強度コンクリートの調合強度(mF)は、設計基準強度(Fc)が 80N/mm²を超える場合、下に示す式(1)及び式(2)を満足するように定めており、式中の mSn 値を「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によるコンクリート強度の補正值」と定義している。

$$mF \geq Fc + mSn + 2\sigma \quad (1)$$

$$mF \geq 0.9(Fc + mSn) + 3\sigma \quad (2)$$

$$\sigma = 0.1(Fc + mSn) \quad (3)$$

一般に調合強度を定める場合、目標とする強度レベル(Fc)ごとに、一定の mSn 値(階段状)を定めたり、実験結果の最大の mSn 値を包括するように 1 次式で mSn 値を定めたりする。また、製造実績が少ない場合は、標準偏差 σ は式(3)によるが、例えば、図-1 に示すように強度レベルに応じた mSn 値の分布は確認されなかった。そのため、強度レベル毎の整理ではなく、全てのデータをまとめて取り扱うこととした。

ここでは、実機実験の模擬部材のコア強度と標準養生供試体強度の差から求められる値から 2σ の範囲内で実験データの最大値を mSn 値として算出を行った。

PCa 製造工場における mSn 値の設定は、以下の 2 パターンに分類することができる。また、mSn 値の算出方法(例)を図-2 に示す。

- (1) 実験データを全て包括し、最も大きい mSn 値で設定を行う方法
- (2) 実験データから回帰直線を求め、回帰直線が全データを包括するような補正回帰式で mSn 値を設定する方法

mSn 値は、PCa 製造工場の多くで実験データの最大値を用いて設定しているが、実験データのバラツキによって mSn 値が過大になる場合は、これまでの工場の実績等を判断した上で mSn 値を設定している。また、PCa 製造工場毎にばらつきが有るため、全製造工場のデータから標準偏差 σ を求め、使用されるセメント種別毎にコア強度と mSn 値の関係を検証した。

3.2 強度関係式の設定方法

PCa 製造工場における高強度コンクリートは、蒸気養生を行うことは無いが、現場打ちと異なり必ずしも保証材齢によって調合強度が決まるわけではなく、脱型時の強度によって調合強度が決まる場合もある。

強度関係式は、図-3 に示すように実機実験結果から標準養生供試体の圧縮強度と結合材水比(B/W)の関係より回帰直線を求め、その回帰直線に安全率を設定し定められている。

安全率の設定方法は、以下に示す(A)~(C)の 3 パターンに分類することができる。

- (A) 関係式に安全率(α)を乗じる方法
- (B) 関係式の切片を一定量(β)引下げる方法
- (C) 関係式の切片を全実験データを包括するように設定する方法

それぞれの安全率設定方法において PCa 製造工場ごとに調合強度(mF)を同一にした場合、強度関係式から求められる水結合材比(W/B)の差異について、検証を行った。

安全率等の設定方法は、表-2 に示すように、方法(A)で α (0.97, 0.95, 0.90) を 3 条件、方法(B)で β (5N/mm², 10N/mm²) を 2 条件、方法(C)で実験データの下限値の 1 条件として検証を行った。

表-2 安全率等の設定方法のパラメータ

方法	詳細
(A)	安全率乗算 α : 0.97, 0.95, 0.90
(B)	一定量減算 β : 5N/mm ² , 10N/mm ²
(C)	実験データの下限值

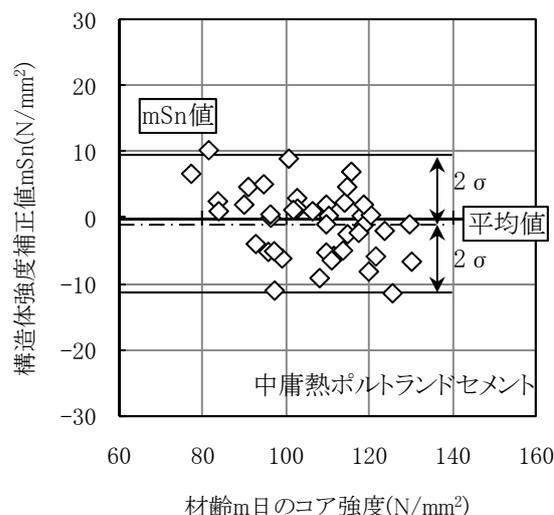


図-1 mSn 値の算出方法の概要

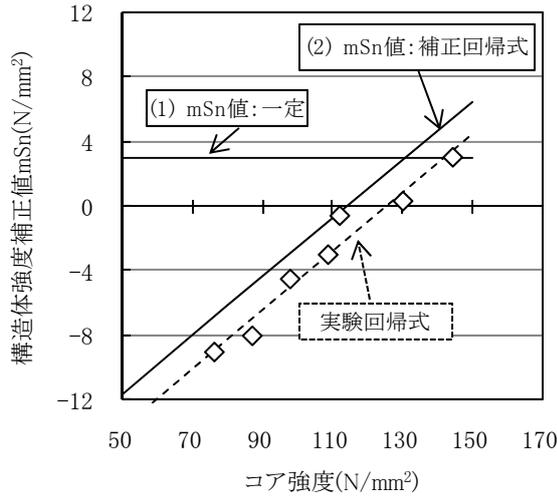


図-2 実験値からのmSn値の算出方法(例)

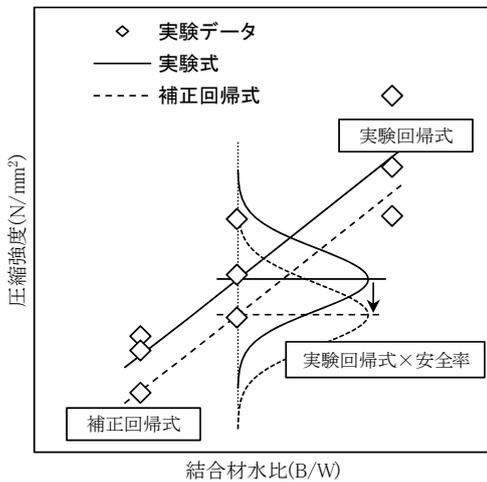


図-3 強度関係式の安全率の設定方法

4.強度管理方法による構造体強度補正值(mSn 値)と強度関係式の検証

4.1 構造体強度補正值(mSn 値)の設定について

セメントの種類毎の構造体強度補正值(mSn 値)とコア強度の関係を図-4に示し、 $m=28$ 日、 $n=91$ 日の実験データ(普通・中庸熱・低熱・シリカフェームセメントを対象。VKCは $_{28}S_{91}$ のデータがないため除外)で比較を行った。それぞれの構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は、表-3に示すように普通(12.2N/mm^2)、中庸熱(4.7N/mm^2)、低熱(17.0N/mm^2)、シリカフェームセメント(3.8N/mm^2)となった。mSn 値の実験データの最大値は、ほぼ 2σ 上限値付近を示したが、シリカフェームセメントの場合は、 $_{28}S_{91}$ 値が負の方向に分布するため、 2σ 上限値が実験データの最大値よりかなり上になった。mSn 値を設定するにあたり、シリカフェームセメント以外は最大値と 2σ 上限値は近い値を示した。

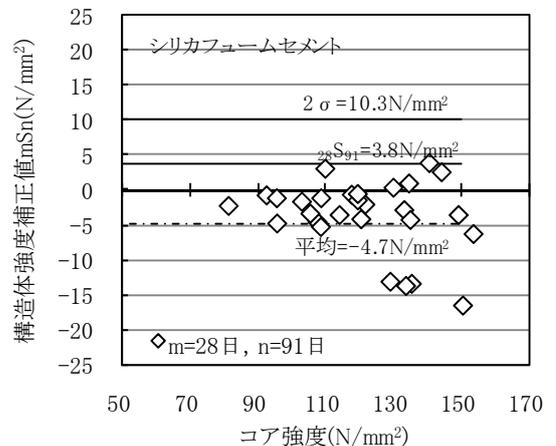
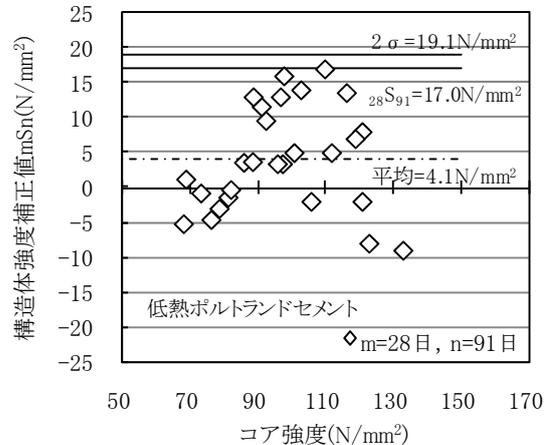
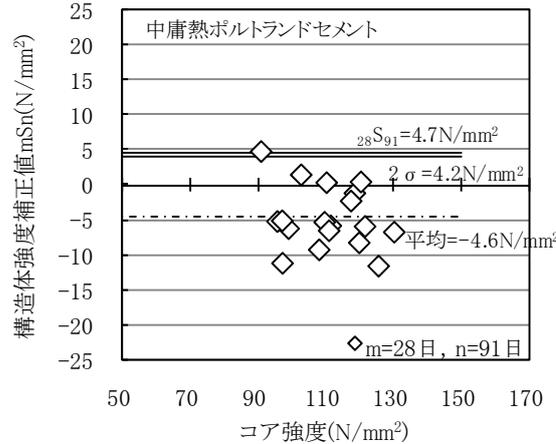
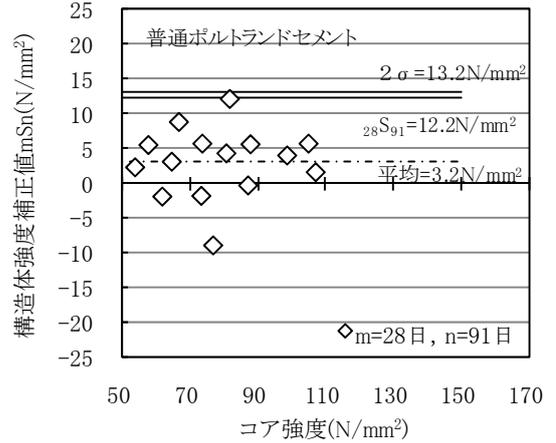


図-4 コア強度と構造体強度補正值の関係

表-3 構造体強度補正值(mSn 値)

種類	$_{28}S_{91}$ 値(N/mm ²)			
	平均	標準偏差	2σ 上限値	最大値
N	3.2	5.0	13.2	12.2
M	-4.6	4.4	4.2	4.7
L	4.1	7.5	19.1	17.0
SFC	-4.7	7.5	10.3	3.8

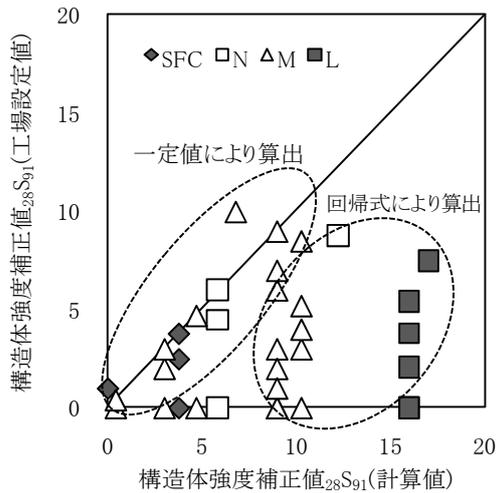


図-5 構造体強度補正值の設定値と計算値の関係

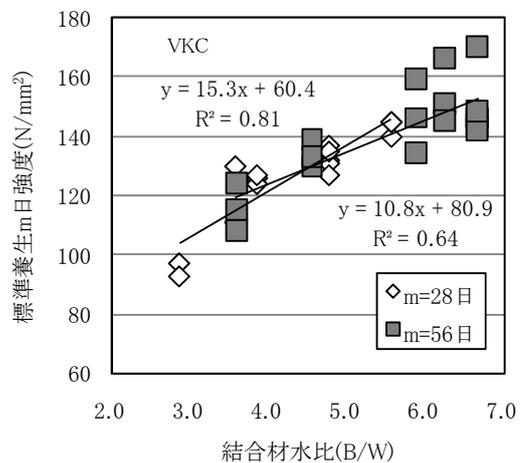
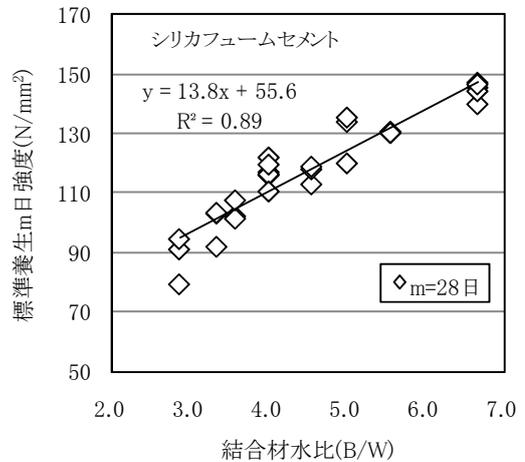
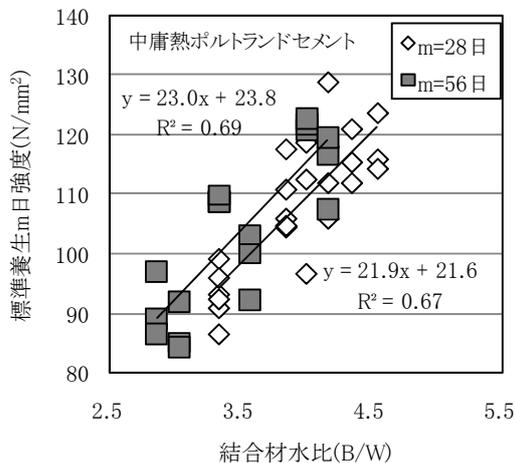
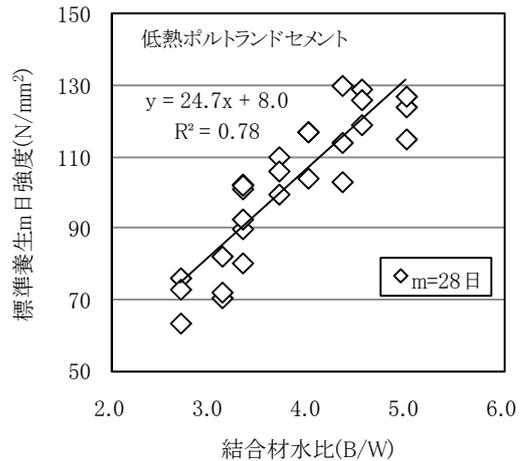
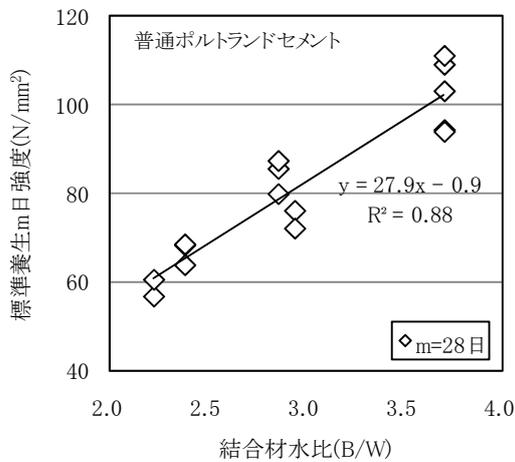


図-6 標準養生 m 日の圧縮強度と結合材水比の関係

4.2 構造体強度補正值(mSn 値)の工場設定値と計算値の比較

図-5に mSn 値の設定を同一方法により計算した結果と工場が設定した mSn 値との比較結果を示す。

製造工場が実施した実機実験の結果によっては、mSn 値とコア強度の関係が右肩上がりなどの傾向を示す場合があるため、回帰直線を用いて mSn 値を設定する場合最大値(一定値)で mSn 値を設定する場合に比べて、mSn 値が小さくなる場合が出てくる。特に回帰直線の傾きが大きくなると設定方法による mSn 値に差が大きくなる。

4.3 標準養生供試体の強度と結合材水比の関係

セメントの種類による標準養生 m 日供試体の圧縮強度と結合材水比の関係は図-6 に示すとおり、ばらつきはあるものの、ほぼ一次式を用いて表される。それぞれの結果は、同一水結合材比に対して供試体 3 本の圧縮強度の平均値を示している。また、実験は標準期・夏期・冬期の 3 シーズンで実施しており全シーズンのデータを示している。標準養生供試体の管理材齢 28 日及び 56 日の強度関係式は材齢に関わらず中庸熱は同様の傾きを、VKC の場合は 56 日がやや低めの傾き方を示した。

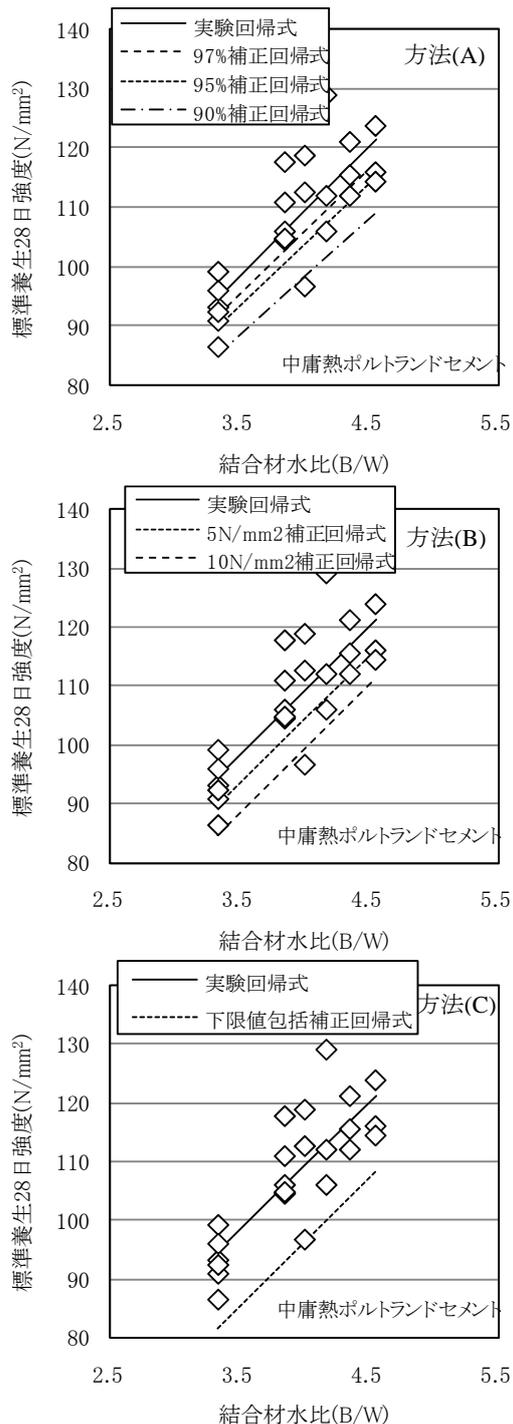


図-7 強度関係式の検証結果（中庸熱）

表-4 は、高強度コンクリート施工指針(案)・同解説²⁾に示されるレディミクストコンクリート工場の調査結果と比較を行った結果を示す。また、それぞれの強度関係式の相関係数は、標準養生 28 日の場合に中庸熱(0.67)が、普通(0.88)・低熱(0.78)・シリカフェームセメント(0.89)・VKC(0.81)より低めの値を示しており、多少ばらつきが認められた。また VKC は、結合材水比(B/W) ≥ 6.0 を超える辺りではばらつきが認められた。使用されている水結合材比(W/B)と標準養生供試体の圧縮強度は、概ね同様の範囲となっている。強度関係式の傾きは、文献と比べると概ね同様の値を示した。また、相関係数の場合、普通以外では低めの値になっている。

表-4 強度関係式の比較(m=28 日)

種類	強度関係式*1			
	W/B (%)	強度範囲 (N/mm ²)	傾き	相関係数
N	25~50	60~100	27.9	0.88
	(25~50)	(40~100)	(23.4)	(0.82)
M	20~40	85~130	21.9	0.67
	(25~50)	(40~110)	(26.6)	(0.95)
L	20~35	60~130	24.7	0.78
	(25~50)	(40~105)	24.3	(0.88)
SFC	15~35	80~150	13.8	0.89
	(15~25)	(110~155)	(12.0)	(0.93)

*1 表中の()内の値は、高強度コンクリート施工指針(案)・同解説を参考

4.4 強度関係式の安全率の検証

強度関係式の安全率の検証は、実験データの最も多い中庸熱ポルトランドセメントで行った。中庸熱における結合材水比(B/W)と標準養生 28 日強度の関係、ならびに示す全ての実験データから求められる実験回帰式と安全率を考慮した補正回帰式を表すものを図-7 に示す。また、方法(A)~(C)でそれぞれの補正回帰式を下回るデータの割合を表-5 に示す。中庸熱ポルトランドセメントにおける実験結果は、調合強度(mF)が 100N/mm²前後のとき、安全率 α を 0.90 乗算した場合、10N/mm²を減算した場合、 $2\sigma (=8.8\text{N/mm}^2)$ 上限値で設定した場合で同程度となった。また、安全率 $\alpha=0.90$ の場合、補正回帰式を下回るデータは 4.2%で正規偏差 $K=1.73$ になる。 $\alpha=0.95$ の場合、5N/mm²減算した場合、 $\sigma (=4.4\text{N/mm}^2)$ 上限値で設定した場合が同程度となり、補正回帰式を下回るデータは 16.7~20.8%で正規偏差 $K=0.81\sim 0.97$ となった。

図-8 で中庸熱ポルトランドセメントを用いた 4 工場(A, B, C, D)の全実験データから求まる回帰式を標準

式とし、製造工場の実験データから求まる回帰式に安全率等に乗じたときの回帰式と比較した結果を示す。

管理材齢 $m=56$ 日の標準式に対する製造工場の回帰式は、C工場において結合材水比(B/W)が大きくなると若干上回り、D工場では下側に設定されている。管理材齢 $m=28$ 日の標準式に対する製造工場の回帰式は、A工場・B工場ともに標準式の下側に関係式が設定された。使用されるセメントの種類と強度関係式の設定方法を統一した場合においても、強度関係式の設定は製造工場毎に差が認められる。中庸熟ポルトランドセメントを用いている製造工場 (A, B, C, D) を対象として、各工場の強度回帰式を用いた場合に、調合強度を $mF=90, 120(N/mm^2)$ とし、水結合材比を算出した結果を表-6に示す。調合強度 $mF=90$ の場合、C工場とD工場における水結合材比で4.5%、 $mF=120$ の場合、A工場とC工場における水結合材比で3.5%の差が認められ、製造工場ごとに差が生じていることが分かった。なお、使用材料による差は確認されなかった。

5.まとめ

PCa コンクリート部材製造工場における高強度コンクリートの構造体強度補正值(mSn 値)及び強度関係式について、いくつかの検証を行った結果、以下のことが分かった。

- (1) mSn 値とコア強度の関係において、強度レベルに応じた mSn 値の分布は確認されなかった。
- (2) シリカフェームセメントを除き、 mSn 値の設定は、実験結果の最大値と 2σ 上限値では、同程度の値を示した。
- (3) mSn 値の設定を回帰直線を用いる場合、一定値で設定する場合に比べて、 mSn 値が小さく設定される場合がある。
- (4) 強度関係式の設定方法を統一して調合強度(mF)を算出すると、中庸熟ポルトランドセメントの場合、PCa 製造工場ごとに水結合材比の違いが認められる。

コンクリートに使用される単位セメント量や水結合材比は、強度関係式や mSn 値の設定方法により異なる。特に、高強度コンクリートにおいては、単位セメント量が多くなる傾向が有り、耐久性確保や CO_2 削減のためにも、安全性を担保した上で合理的にセメント量を低減する必要がある。

そのため、構造体強度の安全性を合理的に担保できるような、強度関係式や S 値の設定を今後検討していく必要がある。

表-5 補正回帰式を下回る実験データの割合

方法	補正回帰式以下のデータ割合(%)			
	回帰式	$\alpha=0.97$	$\alpha=0.95$	$\alpha=0.90$
(A)	58.3	29.2	16.7	4.2
	58.3	20.8	4.2	—
(B)	回帰式	5N/mm ²	10N/mm ²	—
	58.3	20.8	4.2	—
(C)	回帰式	下限値	—	—
	58.3	0.0	—	—

表-6 安全率 0.95 の強度関係式から定まる水結合材比

製造工場	調合強度(N/mm ²)	水結合材比(%)
A工場	90	30.0
	120	20.9
B工場	90	31.6
	120	20.2
C工場	90	34.2
	120	24.4
D工場	90	29.7
	120	21.4

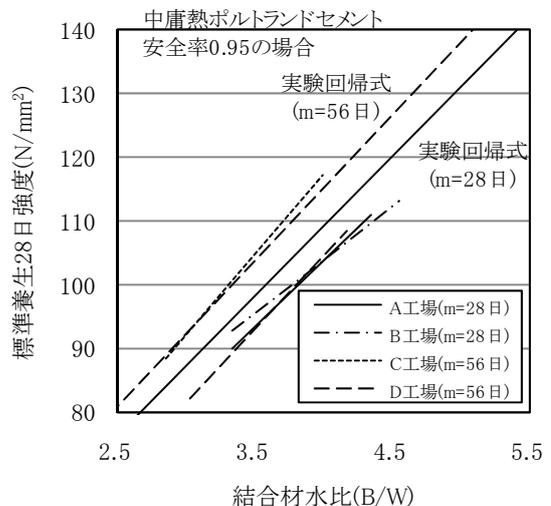


図-8 製造工場による強度関係式の検証結果

[謝辞]

本報告をまとめるに際して、高強度コンクリートの資料等をご提供頂いたPCa製造10工場の方々、(社)プレハブ建築協会の方々へ深謝いたします。

[参考文献]

- 1) 社団法人プレハブ建築協会, 高強度PC部材製造基準, 2005.8
- 2) 日本建築学会, 高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, 2005.1