

# 論文 各種セメントを使用した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

—瀬 賢—<sup>\*1</sup>

要旨：首都圏のレディーミクストコンクリート工場を対象として各種セメントを使用した高強度コンクリートの構造体コンクリート強度データを検証し，以下のことがわかった。(1)各セメント別のセメント水比と標準養生強度の関係は，工場間にかんがりのバラツキがある。(2)各セメント別の標準養生した材齢28日強度と材齢91日強度の相関性は高い。(3)材齢28日から材齢91日までの強度増進は，標準養生強度およびコア強度ともに低熱系のセメントほど大きい。(4)各セメント別のコンクリート強度の補正値を提案した。コンクリート強度の補正値は，低熱系のセメントが小さい。

キーワード：高強度コンクリート，コンクリート強度の補正値，コア強度，標準養生

## 1. はじめに

現在，建築工事で使用する高強度コンクリートは，2000年6月の建築基準法の改正および2003年12月のJIS A 5308（レディーミクストコンクリート）の改正により，建築基準法第37条第二号に基づき国土交通大臣の認定を取得した工場またはJIS A 5308の規定に適合する区分03の「高強度コンクリート」の表示認定を受けた工場から製造・出荷されている。現状としては，後者の表示認定を受けた工場は少なく，適用範囲も呼び強度60までに限られており，ほとんどが前者の認定を取得した工場である。この大臣認定の取得には，各レディーミクストコンクリート工場ごとに構造体コンクリート強度を保証できるデータを保有しなければならない。しかし初めて認定を受ける場合は，使用セメントごとに数点の水セメント比を設定し，実機プラントを用いて2～3シーズンのデータを取得した後，認定を受けることになる。しかも実際取得したデータが妥当なものであるか比較・評価できる文献が少なく<sup>1),2)</sup>，標準的な値の提案が望まれている。

本研究では，首都圏のレディーミクストコンクリート工場を対象として実機プラントを用いて実施・取得した各種セメントを使用した高強度コンクリートの標準養生強度，構造体コンクリート強度のデータを検証し， $F_c 36\text{N/mm}^2 \sim 80\text{N/mm}^2$ の範囲におけるコンクリート強度の補正値を提案する。

## 2. 対象とした工場

本研究では，首都圏（ここでは東京，神奈川，埼玉，千葉）の38工場のデータを対象とした。38工場の使用材料の概要を表-1に示す。セメントは，普通ポルトランドセメント（Nセメント），中庸熱ポルトランドセメント（Mセメント），低熱ポルトランドセメント（Lセメント），高炉セメントB種（BBセメント）の4種類とした。細骨材は，全工場が山砂を使用しており，28工場が石灰砕砂または硬質砂岩砕砂を併用している。粗骨材は，すべての工場が砕石を使用している。そのうち27工場が石灰岩砕石，4工場が硬質砂岩砕石，7工場が石灰岩砕石と硬質砂岩砕石を併用している。練混ぜ水は，上水

\*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)

表 - 1 使用材料の概要

使用材料	種類・産地
セメント	普通ポルトランドセメント (Nセメント)
	中庸熱ポルトランドセメント (Mセメント)
	低熱ポルトランドセメント (Lセメント)
	高炉セメントB種 (BBセメント)
細骨材	山砂 (市原, 君津, 富津, 鹿島, 神宮寺, 熊谷, 佐原, 麻生, 上里)
	石灰砕砂 (高岡, 佐野, 葛生, 田沼, 八戸, 奥多摩, 横瀬) 硬質砂岩砕砂 (青梅, 八王子, 津久井)
粗骨材	石灰砕石 (上磯, 気仙, 美称, 葛生, 八戸, 名栗, 津久見, 高岡, 田沼, 横瀬, 奥多摩, 佐野) 硬質砂岩砕石 (両神, 青梅, 岩瀬, 岩舟, 日の出, 八王子)
練混ぜ水	上水道水, 工業用水, 地下水, 井戸水
混和剤	高性能 AE 減水剤

道水または JIS A 5308 附属書 3 に適合する工業用水, 工業用水, 地下水および井戸水を使用している。化学混和剤は, すべて JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) に適合する高性能 AE 減水剤を使用している。

データの対象とした水セメント比の範囲は, 23 ~ 50% である。単位水量は 160 ~ 175kg の範囲である。またコンクリートの打設時期を 3 つに分け, 夏期 (6月 ~ 8月), 冬期 (12月 ~ 2月), 標準期 (3月 ~ 5月, 9月 ~ 11月) とした。コア強度は, 上下面を断熱材で養生した 1000mm 角の模擬部材から縦方向にコア (100mm) を抜き取り, 約 200mm に切断・研磨したコア供試体 3 ~ 8 本による平均圧縮強度とした。

### 3. 検討結果と考察

#### 3.1 標準養生強度

各セメント別のセメント水比と材齢 28 日の標準養生強度の関係を図 - 1 ~ 図 - 4 に示す。各セメント水比における圧縮強度は, かなりバラツキが大きく, 最大 30N/mm<sup>2</sup> 以上の差が認められた。これは, 各工場間の骨材の違い, 打設時期の違いも影響しているが, 打設後から標準養生するまでの供試体からの水分逸散対策や養生温度の管理の違いが大きく影響したものと推察する。各セメントの材齢 28 日標準養生強度を回帰式で比較すると, 大きな差はないものの

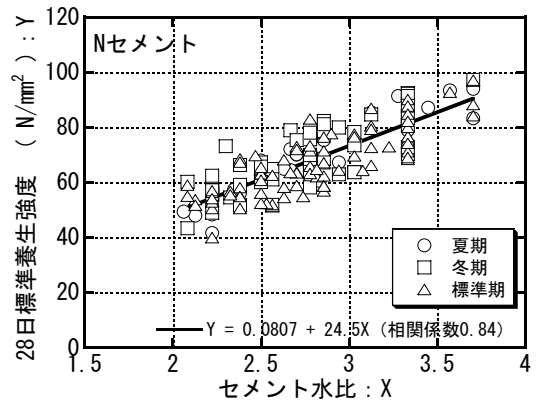


図 - 1 セメント水比と標準養生強度 (N)

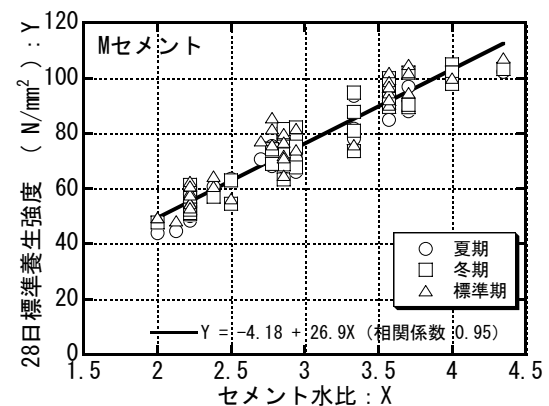


図 - 2 セメント水比と標準養生強度 (M)

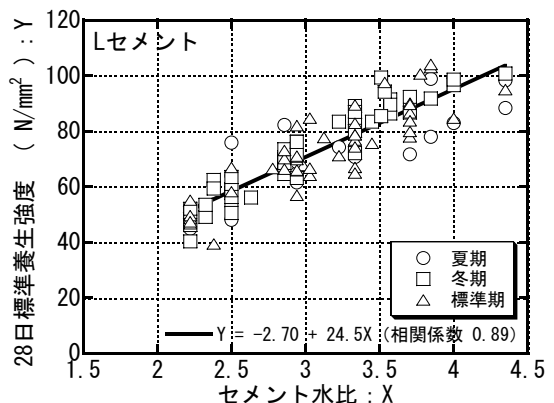


図 - 3 セメント水比と標準養生強度 (L)

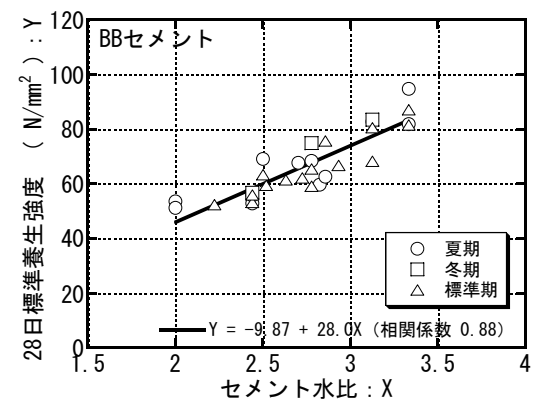


図 - 4 セメント水比と標準養生強度 (BB)

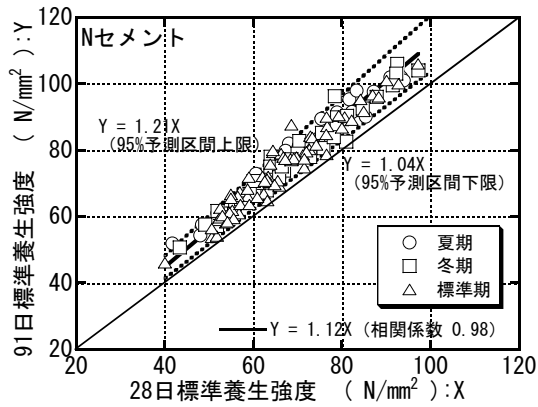


図 - 5 標準養生強度(N: 28日と91日)

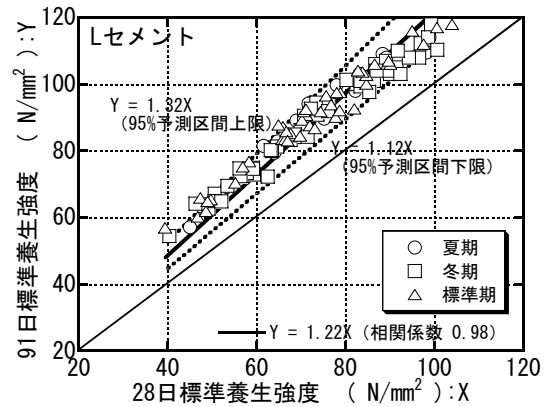


図 - 7 標準養生強度(L: 28日と91日)

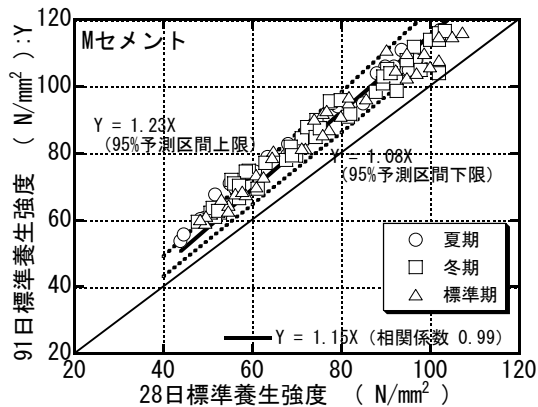


図 - 6 標準養生強度(M: 28日と91日)

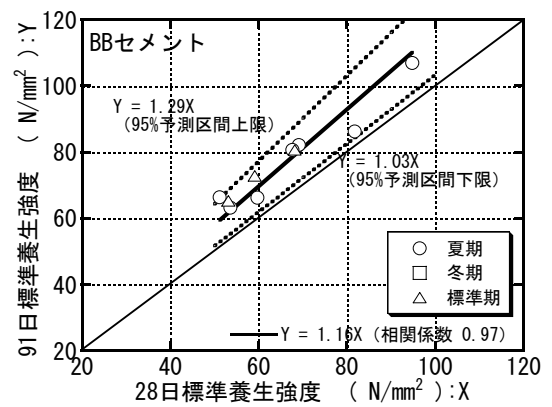


図 - 8 標準養生強度(BB: 28日と91日)

Nセメント, Mセメント, BBセメントに比べLセメントの強度発現が若干低い。

図 - 5 ~ 図 - 8 は, 各セメント別の材齢28日と材齢91日の標準養生強度の関係を示す。この関係は, 相関係数0.97 ~ 0.99と相関性が高い。標準養生強度における材齢28日から材齢91日までの強度は, 12 ~ 22%増加し, Lセメント > BBセメント Mセメント > Nセメントの順に低熱系セメントやBBセメントが大きい。これは, LセメントやMセメントの場合, クリンカ中のケイ酸二カルシウム(以下C<sub>2</sub>S)が多く, 長期強度発現に寄与したことによる。

### 3.2 標準養生強度とコア強度

図 - 9 ~ 図 - 12 は, 各セメント別の材齢28日の標準養生強度と材齢91日のコア強度の関係を示す。Nセメントの場合は, 材齢91日のコア強度が材齢28日の標準養生強度より約7%低い。Mセメントの場合は, 材齢28日の標準養生強度と材齢91日のコア強度が概ね等しい。Lセ

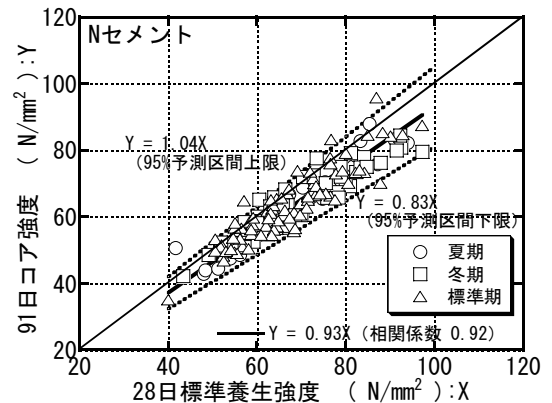


図 - 9 標準養生強度とコア強度(N)

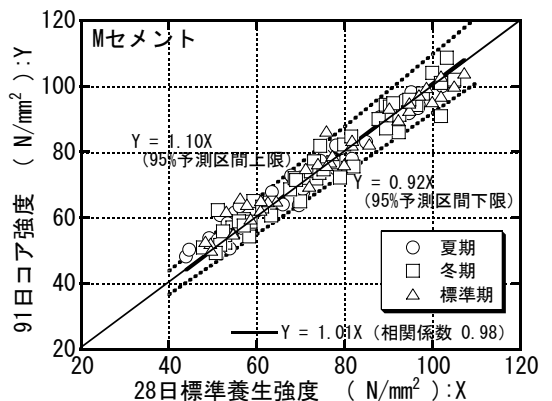


図 - 10 標準養生強度とコア強度(M)

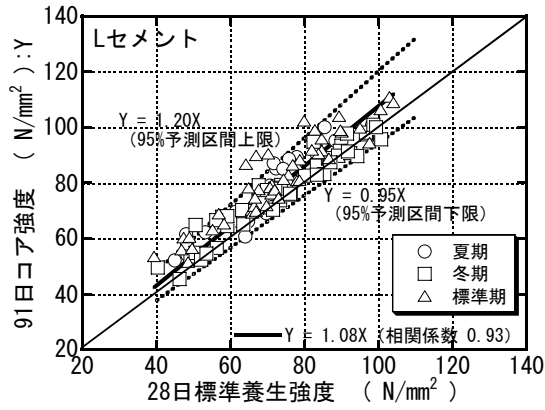


図 - 11 標準養生強度とコア強度(L)

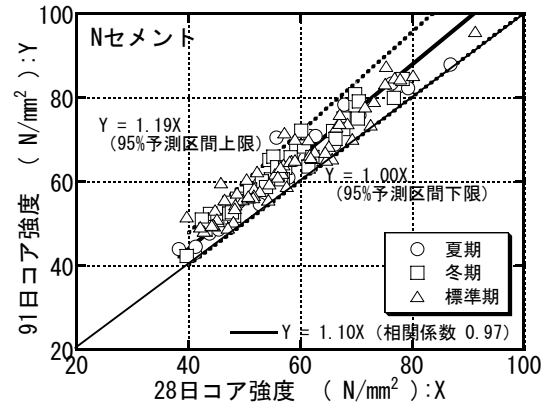


図 - 13 コア強度(N: 28日と91日)

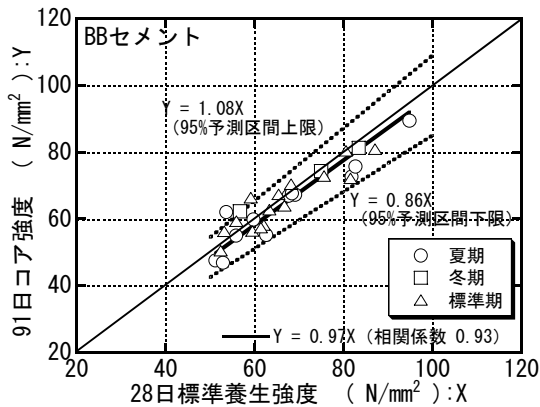


図 - 12 標準養生強度とコア強度(BB)

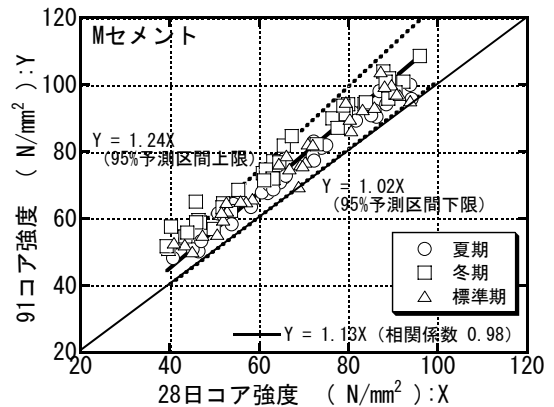


図 - 14 コア強度(M: 28日と91日)

メントの場合は、材齢28日の標準養生強度に較べ材齢91日のコア強度の方が約8%大きい。またBBセメントの場合は、60N/mm<sup>2</sup>以上になると材齢91日のコア強度が材齢28日の標準養生強度を確保できなくなる。以上の結果から、材齢28日の標準養生強度に対する材齢91日のコア強度は、Lセメント>Mセメント>BBセメント>Nセメントの順に大きい。これは、Nセメントの場合、C<sub>2</sub>S量が少なく、打設後の水和熱による温度上昇量が大ききことにより、強度発現が停滞したものと推察する。

### 3.3 コア強度

図 - 13 ~ 図 - 16は、各セメント別の材齢28日と材齢91日のコア強度の関係を示す。回帰式からLセメントの強度増進が19%と大きく、続いてMセメント13%、Nセメント10%、BBセメント8%となった。また打設時期を比較すると、すべてのセメントにおいて冬期の強度増進が最も大きく、続いて標準期、夏期の順となっ

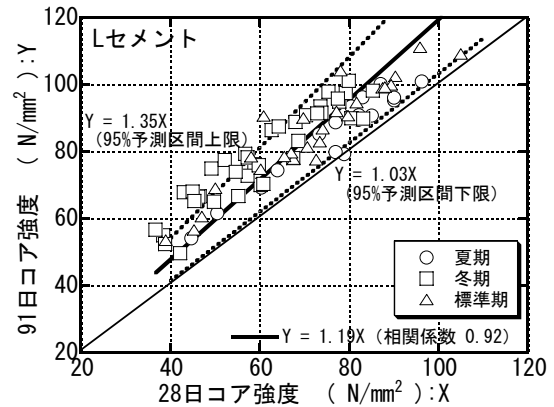


図 - 15 コア強度(L: 28日と91日)

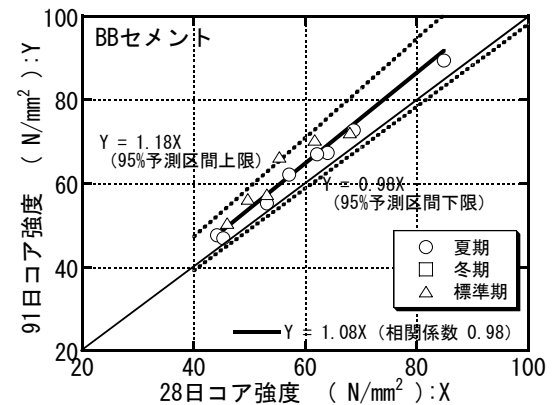


図 - 16 コア強度(BB: 28日と91日)



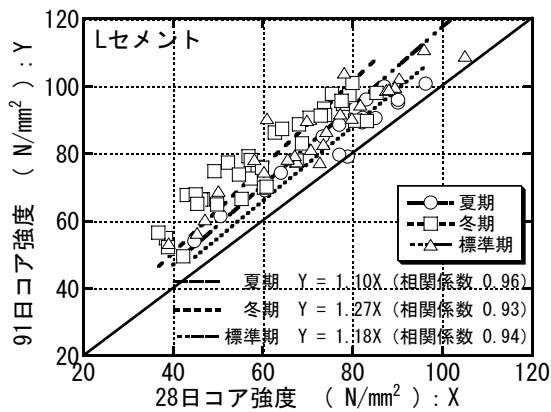


図 - 17 コア強度(L: 打設時期の比較)

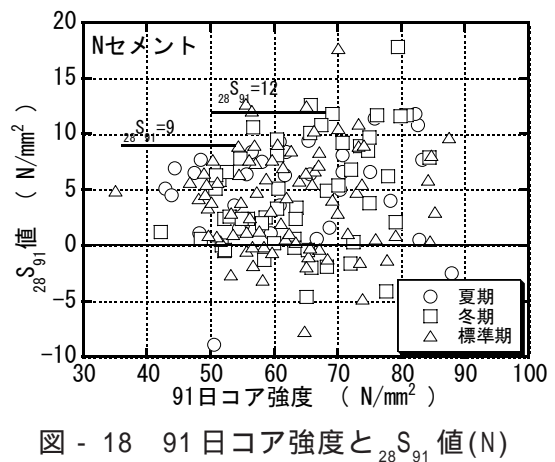


図 - 18 91日コア強度と $_{28}S_{91}$ 値(N)

た。特にLセメントの場合は，図 - 17 に示すように打設時期による差が他のセメントより大きく，冬期の強度増進27%に対して標準期18%，夏期10%となった。これは，Lセメントの冬期における若材齢時の強度発現が低いため，材齢28日の強度に対する相対強度が大きくなったことによる。

### 3.4 コア強度とコンクリート強度の補正值

材齢91日のコア強度とコンクリート強度の補正值（以下 $_{28}S_{91}$ 値）の関係を図 - 18 ~ 図 - 21 に示す。 $_{28}S_{91}$ 値とは，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（模擬部材から採取したコア供試体）の材齢91日における圧縮強度の差を示す。なお図中に示す実線は，図 - 9 ~ 図 - 12 に示す確率95%の予測区間下限値を考慮して定めた。Nセメントの場合は， $_{28}S_{91}$ 値が大きく，材齢91日のコア強度60 N/mm<sup>2</sup>に対して $_{28}S_{91}$  = 12N/mm<sup>2</sup>程度必要である。Mセメントの場合は，比較的冬期において $_{28}S_{91}$ 値が大きい。 $_{28}S_{91}$ 値は，Nセメントの場合よりも小さく，材齢91日のコア強度60 N/mm<sup>2</sup>に対して $_{28}S_{91}$  = 5N/mm<sup>2</sup>程度である。Lセメントの場合もMセメントの場合と同様に，冬期において $_{28}S_{91}$ 値がプラス側になる場合が多い。 $_{28}S_{91}$ 値は，材齢91日のコア強度60 ~ 80 N/mm<sup>2</sup>に対して $_{28}S_{91}$  = 3N/mm<sup>2</sup>程度となる。また冬期を除けば $_{28}S_{91}$  = 0N/mm<sup>2</sup>とすることも可能である。BBセメントの場合は，Nセメントと傾向が似ており，夏期の $_{28}S_{91}$ 値が大きい。 $_{28}S_{91}$ 値

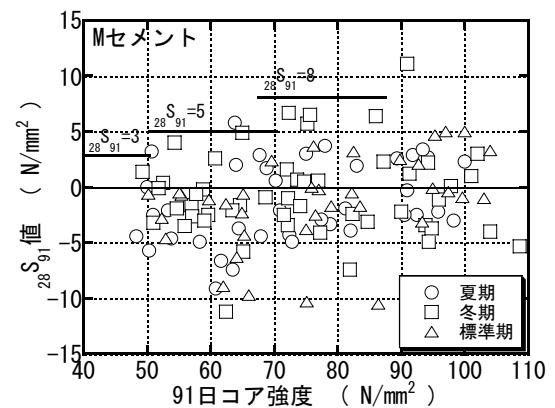


図 - 19 91日コア強度と $_{28}S_{91}$ 値(M)

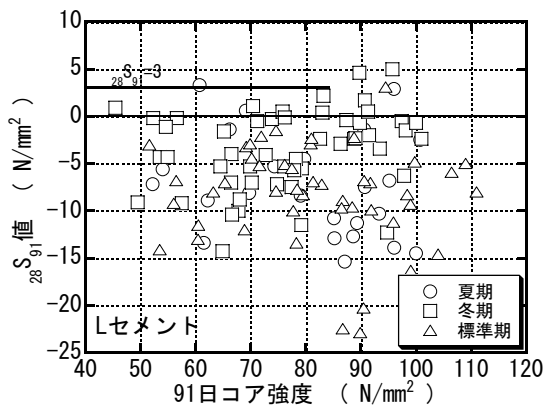


図 - 20 91日コア強度と $_{28}S_{91}$ 値(L)

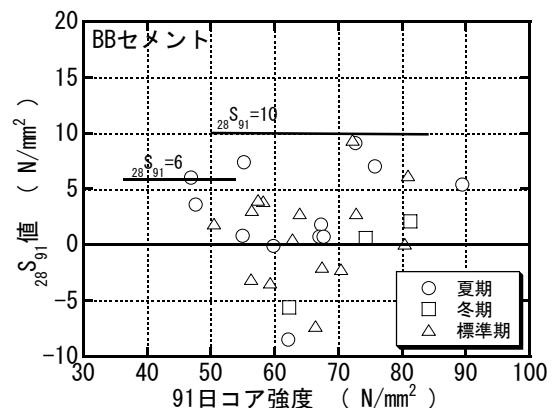


図 - 21 91日コア強度と $_{28}S_{91}$ 値(BB)

は、Nセメントよりも若干小さく、材齢91日のコア強度60 N/mm<sup>2</sup>に対して $_{28}S_{91} = 10\text{N/mm}^2$ 程度必要である。

以上の結果をまとめ、各セメントを用いた場合の主な設計基準強度に対するコンクリート強度の補正値を表 - 2 に示すように提案する。

#### 4. 調合強度の検討

調合強度は、標準養生した材齢28日における圧縮強度( $_{28}F$ )で表すものとし、下記式(1)および式(2)に基づき、各セメントの主な設計基準強度に対する算定を試みた<sup>3)</sup>。

$$_{28}F = Fc + _{28}S_{91} + 1.73 \quad (1)$$

$$_{28}F = 0.85(Fc + _{28}S_{91}) + 3 \quad (2)$$

: 構造体コンクリート強度管理用供試体の標準偏差

$Fc + _{28}S_{91}$ : 構造体補正強度

調合算定式は、図 - 1 ~ 図 - 4 に示す回帰式を採用した。は、構造体補正強度の10%と仮定し、 $_{28}S_{91}$ 値は、表 - 2 の値を用いた。各セメント別の主な設計基準強度に対する調合強度および水セメント比の算定値を表 - 3 に示す。 $Fc60\text{N/mm}^2$ に対して $W/C=29.0 \sim 33.4\%$ 、また $Fc80\text{N/mm}^2$ に対して $W/C=24.4 \sim 25.0\%$ (Nセメント、BBセメントを除く)の範囲で調合を組むことができる。LセメントやMセメントでは、同一設計基準強度に対してNセメントやBBセメントよりも水セメント比を大きく設定でき、施工性においても有利であることが推察できる。

#### 5. まとめ

首都圏のレディーミクストコンクリート工場を対象として各種セメントを使用した高強度コンクリートの構造体コンクリート強度データを検証し、以下のことがわかった。

- (1) 各セメント別のセメント水比と標準養生強度の関係は、工場間にかんがりのバラツキがある。
- (2) 各セメント別の標準養生した材齢28日強度と材齢91日強度の相関性は高い。

表 - 2 各セメントの主な設計基準強度に対するコンクリート強度の補正値

セメント	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )					
	42	48	54	60	70	80
N	9	9	12	12	—	—
M	3	3	5	5	8	8
L	3	3	3	3	3	3
BB	6	6	10	10	—	—

表 - 3 各セメントの主な設計基準強度に対する調合強度および水セメント比

セメント	算定項目*1	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )					
		42	48	54	60	70*2	80*2
N	$_{28}F$	59.8	66.9	77.4	84.5	—	—
	W/C	41.0	36.6	31.6	29.0	—	—
M	$_{28}F$	52.8	59.8	69.2	76.2	88.0	103.2
	W/C	47.2	42.0	36.6	33.4	29.1	25.0
L	$_{28}F$	52.8	59.8	66.9	73.9	85.6	97.4
	W/C	44.1	39.1	35.2	31.9	27.7	24.4
BB	$_{28}F$	56.3	63.3	75.1	82.1	—	—
	W/C	42.3	38.2	32.9	30.4	—	—

\*1) $_{28}F$ : 調合強度(N/mm<sup>2</sup>), W/C: 水セメント比(%)

\*2) Nセメント, BBセメントは、対象範囲外の水セメント比となるため除外

- (3) 材齢28日から材齢91日までの強度増進は、標準養生強度およびコア強度ともに低熱、中庸熱ポルトランドセメントなど低熱系セメントほど大きい。
- (4) 各セメント別のコンクリート強度の補正値を提案した。コンクリート強度の補正値は、低熱系セメントが小さい。

#### 参考文献

- 1) 梶田佳寛ほか: 高強度コンクリートの構造体中での強度発現性と調合強度, 日本建築学会構造系論文集, 第537号, pp.13-20, 2000.11
- 2) 梅本宗宏ほか: 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 $m_{Sn}$ 値に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1021-1026, 2000.6
- 3) 日本建築学会編: 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, p.441, 2002.7