

# 論文 超高強度コンクリートの調合設計段階における力学特性評価

渡邊 悟士\*1・太田 貴士\*2・陣内 浩\*3・黒岩 秀介\*4

**要旨：**プレキャスト部材製造工場の 150N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度コンクリートについて、材料コストの低減などを目的として、筆者らの提案する力学特性評価方法<sup>3),4),5)</sup>をもとに既存調合の見直しを行い、試し練りによる検証を行った。調合条件が材齢 91 日におけるヤング係数、構造体強度補正值および標準養生供試体の圧縮強度に及ぼす影響を評価することで、要求される力学特性を満足すると推定される範囲で、単位水量を小さく、単位粗骨材絶対容積を大きく設定した。試し練りによるコンクリートの性能確認により、施工性や自己収縮の要求性能を満足し、力学特性についても、事前に推定したとおり要求性能を満足することを確認した。

**キーワード：**高強度コンクリート、配（調）合設計、骨材、構造体コンクリート、圧縮強度、ヤング係数

## 1. はじめに

コンクリートの配（調）合（以下、調合）設計では、コンクリートの性能への影響に関する標準的な傾向などをもとに調合条件を事前に設定し、試し練りで確認・調整を行う方法が採られている<sup>1)</sup>。建築分野の普通強度のコンクリートでは、構造体コンクリートと標準養生供試体の圧縮強度の差である構造体強度補正值（以下、 $m_{Sn}$ ）の標準値が与えられている<sup>2)</sup>。要求される構造体コンクリート強度にこの値を加えた調合管理強度を標準養生供試体で満足するように、水セメント比もしくは水結合材比（以下、W/B）を事前に設定する方法が採られている。

一方、設計基準強度が 100N/mm<sup>2</sup> を超える高強度コンクリート（以下、超高強度コンクリート）では、骨材の種類などにより  $m_{Sn}$  が大きく異なり、W/B だけでなく単位水量や単位細・粗骨材量が圧縮強度に及ぼす影響が大きいため、筆者らはこれらの影響の評価方法の検討を行ってきた<sup>3),4)</sup>。また、ヤング係数については、建築工事標準仕様書・解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS 5）に、標準的な傾向の評価方法が示されているが、筆者らは粗骨材のヤング係数などの情報による詳細な評価方法の検討も行ってきた<sup>5)</sup>。これらの成果をもとにコンクリートの力学特性への影響を評価し、調合条件を事前に設定することで、より合理的な超高強度コンクリートの調合設計が可能になると考えられる。

本報では、プレキャスト（以下、PCa）部材製造工場の超高強度コンクリートの調合の合理化を目的として、提案する力学特性評価方法をもとに既存調合の見直しを行い、試し練りにより検証を行った結果について述べる。

## 2. 超高強度コンクリートの調合設計の方針

表-1 に示す 150N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度コンクリートの既存調合に対して、調合条件の見直しを行った。筆者らは、超高強度コンクリートの製造では、全ての工場で骨材も含めて同じ材料を使用し、PCa 部材製造工場でもレディーミクストコンクリート工場と同様な調合を採用してきた。しかし、PCa 部材には、柱部材の横打ちなどの製造方法が採用されており、コンクリートに必ずしも現場打ちほどの高い施工性は求められない。そこで、本検討では、力学特性や耐久性に悪影響のない範囲で、単位水量・結合材量を低減させて材料コストの低減を図った。

図-1 に調合設計の手順を示す。既存調合と同等以上の力学特性を得るために、W/B は既存調合と同じ 15% とする。また、耐久性に関しては、超高強度コンクリートでは、自己収縮によるひび割れの抑制が重要であるため、自己収縮が既存調合以下となるように、単位水量は既存調合以下、単位粗骨材絶対容積（以下、 $V_g$ ）は既存調合以上とする。さらに、3 章では力学特性に悪影響のない範囲での単位水量の低減および  $V_g$  の増加を試みる。

表-1 検討対象とした 150N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度コンクリートの既存調合

調合 No.	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	$V_g$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤量 (B×%)	繊維量 (kg/m <sup>3</sup> )
					結合材 B	水 W	細骨材 S	粗骨材 G		
既存	60	1.5	15	0.312	1067	160	409	817	2.5	2.2

結合材：高強度用結合材 {普通ポルトランドセメント：スラグせつこう系混和材：シリカフェーム=7：2：1、密度 2.99g/cm<sup>3</sup>}  
 細骨材：大月産安山岩砕砂 {表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>} 粗骨材：大月産安山岩碎石 {最大寸法 20mm、表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>}  
 混和剤：ポリカルボン酸系高性能減水剤 {収縮低減型} 火災時対策用繊維：ポリプロピレン繊維

\*1 大成建設（株） 技術センター 主任研究員 博士（工学）（正会員）

\*2 大成建設（株） 技術センター 研究員 工修（正会員）

\*3 東京工芸大学 工学部建築学科 教授 博士（工学）（正会員）

\*4 大成建設（株） 技術センター チームリーダー 博士（工学）（正会員）

具体的には、まず既報<sup>5)</sup>の成果をもとに  $V_g$  の増加によるヤング係数への影響を評価し、JASS 5 の規定を満たす  $V_g$  の範囲を求める。併せて、既報<sup>3)</sup>の成果をもとに  $mS_n$  を評価する。既存調合では、模擬部材作製により  $mS_n$  が負の値であることを確認し、JASS 5 の規定から調合設計上の  $mS_n$  を  $0N/mm^2$  に設定していたが、今回の見直しの範囲でも  $mS_n$  の設定値が同じでよい ( $mS_n$  が負の値である) ことを確認する。次に、既報<sup>4)</sup>の成果をもとに単位水量の低減および  $V_g$  の増加による標準養生供試体の圧縮強度への影響を評価し、既存調合と同等の圧縮強度が得られる単位水量および  $V_g$  の範囲を求める。その範囲でできる限り単位水量を小さく、 $V_g$  を大きく設定する。

設定した調合条件で試し練りを行い、必要な施工性が得られない場合には前述した単位水量および  $V_g$  の範囲で設定値を調整する。なお、本検討では、単位量とともに結合材の見直しも行う。つまり、高強度用結合材中の普通ポルトランドセメント以外の成分をプレミックスした高強度用混和材に置換し、結合材における混和材部分の比率を 25% と高強度用結合材よりも小さくして、さらに材料コストの低減を試みる。既往の研究<sup>6)</sup>で、結合材における高強度混和材の比率を 20% としても力学特性への影響は小さかったため、結合材の見直しの影響は、3 章では考慮せず、試し練りで主に施工性への影響を確認する。施工性を考慮して調合条件を調整した後に供試体を作製して、自己収縮が既存調合以下、標準養生供試体の圧縮強度が既存調合と同等であることを確認する。これらを満足しない場合、設定値の調整が必要になるが、自己収縮に関しては性能低下が単位量の見直しによるものとは考えづらいため、結合材を高強度用結合材に戻すなどの調整が必要になる。最後に、模擬部材作製により

$mS_n$  が負の値であることを確認し、新調合を決定する。

### 3. 力学特性の評価に基づく調合条件の設定

本章では、図-1 に示す調合設計の手順のうち、力学特性(ヤング係数、 $mS_n$ 、標準養生供試体の圧縮強度)の評価に基づく単位水量および  $V_g$  の設定について述べる。なお、標準養生供試体による試験材齢  $m$  日と構造体コンクリート強度の保証材齢  $n$  日はいずれも 91 日を想定し、力学特性の評価を行う材齢はいずれも 91 日とした。

#### 3.1 ヤング係数の評価

##### (1) ヤング係数の評価方法

既報<sup>5)</sup>の成果に基づいて、モルタル部分と粗骨材のヤング係数(以下、 $E_m$  と  $E_g$ ) および  $V_g$  をもとに、式(1)でコンクリートのヤング係数を推定した。なお、高強度用結合材および安山岩砕砂を使用する超高強度コンクリートを対象とした本検討では、モルタル部分の圧縮強度(以下、 $F_m$ )をもとに、 $E_m$  を式(2)で推定する。

$$E_c = \frac{\left\{ \begin{matrix} (1-V_g)E_m + (1+V_g)E_g \\ (1+V_g)E_m + (1-V_g)E_g \end{matrix} \right\} E_m - 0.61}{0.88} \quad (1)$$

$$E_m = 0.39F_m^{0.46} \quad (2)$$

なお、 $E_c$  : コンクリートのヤング係数 { $\times 10^4 N/mm^2$ }

$E_m$  : モルタル部分のヤング係数 { $\times 10^4 N/mm^2$ }

$E_g$  : 粗骨材のヤング係数 { $\times 10^4 N/mm^2$ }

$V_g$  : 単位粗骨材絶対容積 { $m^3/m^3$ }

$F_m$  : モルタル部分の圧縮強度 { $N/mm^2$ }

既報<sup>4)</sup>では、本検討と使用材料および W/B が同じ条件で、細骨材の容積比(以下、 $V_s/V_m$ )が 0.27 以下では、細骨材の混入による  $F_m$  の低下が小さいことを確認した。3.3 節の検討では、標準養生供試体の圧縮強度が既存調合と同等となるように、 $V_s/V_m \leq 0.27$  の範囲で調合条件を設定するため、本検討でも、 $F_m$  を既報<sup>4)</sup>の  $V_s/V_m = 0.09$  の実験結果 ( $184N/mm^2$ ) と同等として評価した。また、大月産安山岩砕石の過去の試験結果(表-2 参照)をもとに、 $E_g$  の範囲を  $3.55 \times 10^4 \sim 6.50 \times 10^4 N/mm^2$  (平均値  $\pm 3 \times$  標準偏差)として評価した。

JASS 5 では、コンクリートの圧縮強度(以下、 $F_c$ )などをもとに式(3)で計算した値(以下、AIJ 式計算値)に対して、コンクリートのヤング係数が 80% 以上の値となることを事前に確認することとされている。そこで、式(1)および式(2)によるコンクリートのヤング係数推定値が、AIJ 式計算値の 80% 以上となる  $V_g$  の範囲を求めた。

表-2 粗骨材のヤング係数の試験結果

ヤング係数 ( $\times 10^4 N/mm^2$ )				試験回数 (回)	試験時期 (年)
最小値	平均値	最大値	標準偏差		
3.88	5.02	5.86	0.49	28	2003-2010

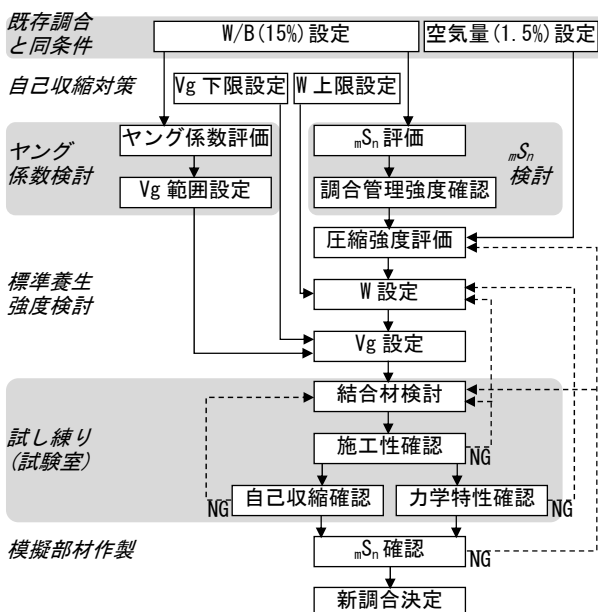


図-1 本検討における調合設計の手順

$$E_{AIJ} = 3.35 \times \left( \frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left( \frac{F_c}{60} \right)^{1/3} \quad (3)$$

なお、 $E_{AIJ}$  : ヤング係数の AIJ 式計算値 { $\times 10^4 \text{N/mm}^2$ }  
 $\gamma$  : コンクリートの単位容積質量 { $\text{t/m}^3$ }  
 $F_c$  : コンクリートの圧縮強度 { $\text{N/mm}^2$ }

コンクリートの単位容積質量は、既報<sup>5)</sup>と同様に  $2.4 \text{t/m}^3$  として評価した。また、 $F_c$  は  $V_g$  が大きくなるほど小さくなる傾向にあるが、これを  $F_m$  と等しいとすることで AIJ 式計算値は実際よりも大きく、コンクリートのヤング係数を安全側に評価することになる<sup>5)</sup>。そこで、ここでは  $F_c = F_m (=184 \text{N/mm}^2)$  と仮定して評価した。

## (2) ヤング係数の評価結果

JASS 5 では、コンクリートのヤング係数の下限値が規定されているため、まずはコンクリートのヤング係数が最も小さくなる、 $E_g$  の下限値  $3.55 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  に対する検討を行った。図-2 に、 $V_g$  と AIJ 式計算値に対する式(1)および式(2)によるコンクリートのヤング係数推定値の比の関係を示す。 $E_m$  が  $4.29 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  と前述した  $E_g$  の下限値より大きいため、 $V_g$  が大きいほどコンクリートのヤング係数が小さくなり、AIJ 式計算値に対する比が 0.80 以上となる  $V_g$  の範囲は  $0.33 \text{m}^3/\text{m}^3$  以下であった。

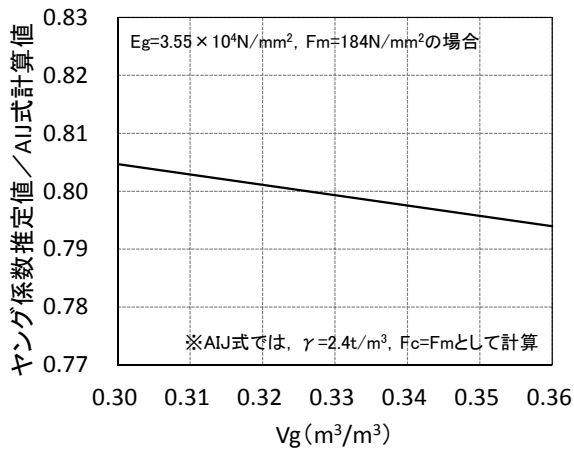


図-2  $V_g$  がコンクリートのヤング係数に及ぼす影響

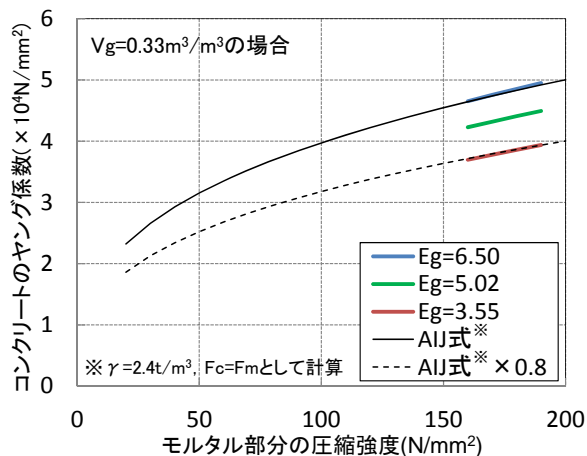


図-3 コンクリートのヤング係数推定値

図-3 に、 $V_g = 0.33 \text{m}^3/\text{m}^3$  の場合の、 $E_g$  の下限・平均・上限値に対するコンクリートのヤング係数推定値を示す。ここでは、本検討と同じ材料を用いる調合 ( $W/B=15 \sim 19\%$ ) の  $F_m$  の範囲 ( $160 \sim 190 \text{N/mm}^2$  程度) を対象とした。図中には AIJ 式計算値およびその 80% の値も併せて示した。 $V_g = 0.33 \text{m}^3/\text{m}^3$  の場合のコンクリートのヤング係数は AIJ 式計算値の概ね 80~100% となった。ただし、図中の AIJ 式計算値は  $F_c = F_m$  として計算したものであり、3.3 節で後述するように、実際には  $F_c$  は  $F_m (=F_p)$  の 0.86 倍程度であり、図-3 の横軸を  $F_c$  に変えると、各推定値は左側にスライドするため、本節における AIJ 式計算値に対する比は安全側の評価となっている。

## 3.2 構造体強度補正值の評価

### (1) 構造体強度補正值 ${}_{91}S_{91}$ の評価方法

既報<sup>3)</sup>では、結合材水比 (以下、 $B/W$ ) と温度条件をもとに、材齢 56 日の構造体強度補正值 ( ${}_{56}S_{56}$ ) を標準養生供試体の圧縮強度で除した値 ( $S_{xy}$ ) を評価する方法を提案している。既報<sup>3)</sup>の試し練りにおける材齢 91 日のデータをもとに、材齢 91 日の構造体強度補正值 ( ${}_{91}S_{91}$ ) を標準養生供試体の圧縮強度で除した値 (以下、 $S_{xy}'$ ) の、 $B/W > 5.0$  ( $W/B < 20\%$ ) に関する推定式を既報<sup>3)</sup>と同様な手順で導き出すと、式(4)のようになる。ここでは、 $B/W=15\%$  および既報<sup>3)</sup>で得られた高強度用結合材を用いた場合の温度条件の情報をもとに、式(4)で  $S_{xy}'$  を評価した。さらに、 $S_{xy}'$  に標準養生供試体の圧縮強度を乗じることで、 ${}_{91}S_{91}$  推定値の設定値  $0 \text{N/mm}^2$  に対する余裕度を確認した。

$$S_{xy}' = \{Kt \cdot (Tx - T_{20})\} + \{Kb \cdot B/W + \alpha\} \quad (4)$$

(安山岩砕石使用では、 $Kgy' \cdot Tx' + \beta y' = 0$  のため)

なお、 $S_{xy}'$  :  ${}_{91}S_{91}$  を材齢 91 日の標準養生供試体の圧縮強度で除した値

$T_x$  : 構造体コンクリートの最高温度 { $^{\circ}\text{C}$ }

$W/B < 20\%$  では、 (=夏期 87, 標準期 79, 冬期 63)

$T_{20}$  : 標準養生供試体の養生温度 (=20) { $^{\circ}\text{C}$ }

$B/W$  : 結合材水比 (=100/15)

$T_x'$  : 温度変化量 (=  $T_x$  - 練上がり温度) { $^{\circ}\text{C}$ }

(練上がり温度は、夏期 31, 標準期 23, 冬期 12)

$Kt$  : 結合材の  $T_x$  に関する影響係数 { $^{\circ}\text{C}^{-1}$ }

材齢 91 日の評価では、 (=  $-0.00082 \cdot B/W + 0.00301$ )

$Kb$  : 結合材の  $B/W$  に関する影響係数

材齢 91 日の評価では、 (=  $-0.004$ )

$Kgy'$  : 粗骨材起因の  $T_x'$  に関する影響係数 { $^{\circ}\text{C}^{-1}$ }

$\alpha$  : 結合材に対する定数

材齢 91 日の評価では、 (=  $0.074$ )

$\beta y'$  : 粗骨材起因の定数

添字の  $x$  は時期 (夏期 6~9 月, 標準期 4, 5, 10, 11 月, 冬期 12~3 月),  $y$  は粗骨材種類を表す

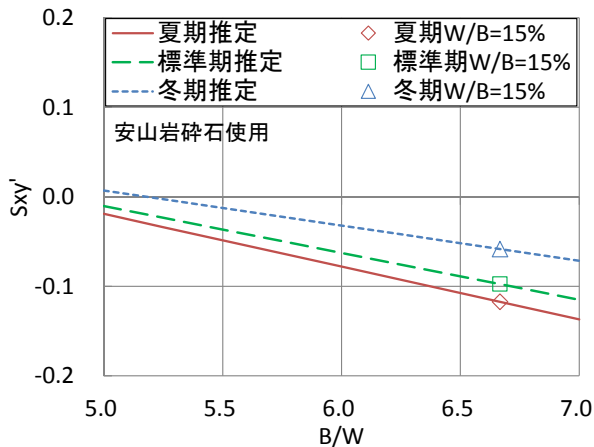


図-4 B/W が構造体強度補正値に及ぼす影響

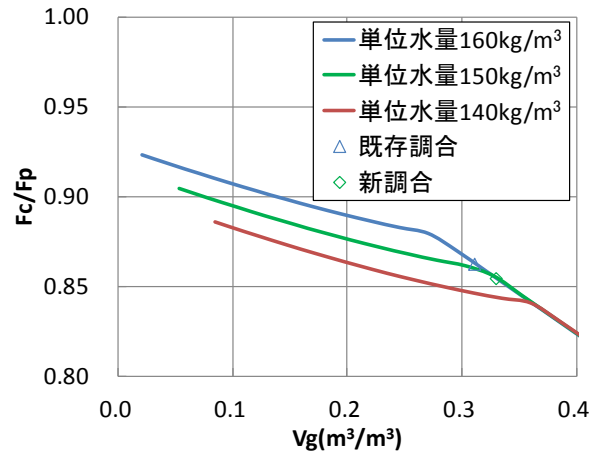


図-5 単位水量および Vg が Fc/Fp に及ぼす影響

## (2) 構造体強度補正値 ${}_{91}S_{91}$ の評価結果

図-4 に、B/W が構造体強度補正値に及ぼす影響を時期ごとに示す。W/B=15%における  $S_{xy}'$  の推定値は、夏期で-0.12、標準期で-0.10、冬期で-0.06であった。これらの  $S_{xy}'$  の推定値に標準養生供試体の圧縮強度 (> 150N/mm<sup>2</sup>) を乗じて得られる  ${}_{91}S_{91}$  の推定値は、設定値 0N/mm<sup>2</sup> に対して十分に小さいと考えられる。したがって、今回の調査条件の見直しの範囲でも  ${}_{91}S_{91}$ 、さらに調査管理強度の設定値は既存調査と同じでよいと考えられる。また、 ${}_{91}S_{91}$  は夏期と標準期で小さく、冬期で大きい傾向が想定されるため、模擬部材作製による確認を行う時期を限定して、年間を通じて同じ調査管理強度で強度管理する場合には、少なくとも冬期について模擬部材作製による確認を実施すべきと考えられる。

なお、既存調査に関する  ${}_{91}S_{91}$  のデータがある今回の場合については、既存調査のデータをもとに評価することも可能であるが、本検討のように多くのデータをもとに作成した推定式による評価を行うことで、例えば時期ごとの  ${}_{91}S_{91}$  の大小関係などの傾向の評価における信頼性を高めることができると考えられる。

## 3.3 標準養生供試体の圧縮強度の評価

### (1) 標準養生供試体の圧縮強度の評価方法

既報<sup>4)</sup>の成果に基づいて、 $V_g$  および  $V_s/V_m$  をもとに、式(5)～式(8)で標準養生供試体の圧縮強度を評価した。2章で述べたように、W/B および空気量が既に設定されており、単位水量および  $V_g$  を設定することで  $V_s/V_m$  も含めた調査条件が決まるため、実際にはこれらを変動要因として、標準養生供試体の圧縮強度への影響を評価した。ただし、単位水量および  $V_g$  の見直しでは、ペースト部分の圧縮強度 (以下、 $F_p$ ) はほとんど変わらないことを前提としているため、骨材の混入による圧縮強度の低下の程度を表す  $F_c/F_p$  で評価した。なお、図-1 に示したように、本検討では、3.2 節までの検討で設定された条件も取り込んで、単位水量および  $V_g$  の設定を行った。

<コンクリートの圧縮強度推定式>

( $V_g \leq V_{g0}$  の場合)

$$F_c = F_m \quad (5)$$

( $V_g > V_{g0}$  の場合)

$$F_c = \{1 - K_g \times (V_g - V_{g0})\} \times F_m \quad (6)$$

<モルタル部分の圧縮強度推定式>

( $V_s/V_m \leq V_{s0}/V_m$  の場合)

$$F_m = F_p \quad (7)$$

( $V_s/V_m > V_{s0}/V_m$  の場合)

$$F_m = \{1 - K_s \times (V_s/V_m - V_{s0}/V_m)\} \times F_p \quad (8)$$

なお、 $F_c$  : コンクリートの圧縮強度 {N/mm<sup>2</sup>}

$F_m$  : モルタル部分の圧縮強度 {N/mm<sup>2</sup>}

$F_p$  : ペースト部分の圧縮強度 {N/mm<sup>2</sup>}

$V_g$  : 単位粗骨材絶対容積 {m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>}

$V_s$  : 単位細骨材絶対容積 {m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>}

$V_m$  : モルタル部分の絶対容積 (=1- $V_g$ ) {m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>}

$V_{g0}$  : 強度低下を生じない  $V_g$  の上限値 {m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>}  
既報<sup>4)</sup>より (=0.00)

$K_g$  : 粗骨材の容積比の影響に関する係数

既報<sup>4)</sup>と同じ安山岩砕石使用のため (=0.44)

$V_{s0}/V_m$  : 強度低下を生じない  $V_s/V_m$  の上限値

既報<sup>4)</sup>より (=0.27)

$K_s$  : 細骨材の容積比の影響に関する係数

既報<sup>4)</sup>と同じ安山岩砕砂使用のため (=0.36)

骨材の混入による強度低下が生じない  $V_g$  および  $V_s/V_m$  の上限値である  $V_{g0}$  および  $V_{s0}/V_m$  は、本検討と同様に W/B が 15% 程度について検討した既報<sup>4)</sup>の結果をもとに、それぞれ 0.00m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> および 0.27 に設定した。また、骨材の容積比の影響に関する係数  $K_g$  および  $K_s$  は、本検討と同じ安山岩砕石および砕砂を使用した既報<sup>4)</sup>の結果をもとに、それぞれ 0.44 および 0.36 に設定した。

### (2) 標準養生供試体の圧縮強度の評価結果

図-5 に、単位水量および  $V_g$  が  $F_c/F_p$  に及ぼす影響を示す。既存調査における標準養生供試体の圧縮強度は

158N/mm<sup>2</sup>であった。それに対して、高強度用結合材を使用したペーストの圧縮強度は、3.1 節と同様に、既報<sup>4)</sup>の  $V_s/V_m=0.09$  の実験結果 (184N/mm<sup>2</sup>) と同等として評価できる。これらをもとに計算した、既存調合における  $F_c/F_p$  は 0.86 であり、図-5 中にプロットした既存調合の  $F_c/F_p$  の推定値 ( $\Delta$ ) と概ね合致する。したがって、本検討では図-5 による  $F_c/F_p$  の評価結果が 0.86 以上となるように調合条件を設定する。

自己収縮対策および 3.1 節のヤング係数に関する検討結果から、既に  $V_g$  の範囲は 0.312~0.33m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> に限定されている。図-5 から、この  $V_g$  の範囲で単位水量が 160kg/m<sup>3</sup> の既存調合と同等の  $F_c/F_p$  を得るためには、単位水量が 150kg/m<sup>3</sup> 以上である必要がある。また、単位水量が 150kg/m<sup>3</sup>、 $V_g$  が 0.33m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> の場合の  $F_c/F_p$  は 0.86 (図-5 の  $\diamond$ ) であり、既存調合と同等の標準養生供試体の圧縮強度が期待できる。したがって、2 章に示した方針をもとに、試し練りに先立って設定する調合条件として、単位水量 150kg/m<sup>3</sup>、 $V_g=0.33$ m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> を採用した。

#### 4. 試し練りによるコンクリートの性能の検証

3 章で設定した調合条件をもとに表-3 のように新調合を作成し、試し練りを行って施工性および自己収縮も含めたコンクリートの性能の確認を行った。なお、2 章でも述べたように、新調合では、単位量の見直しを行うとともに、高強度用結合材中の普通ポルトランドセメント以外の成分をプレミックスした高強度用混和材に置換し、結合材における混和材部分の比率を 25% と高強度用結合材よりも小さくした。

##### 4.1 試験室における試し練りによる確認

水平 2 軸形強制練りミキサ (容量 55L) を用いた試験室における試し練りにより、施工性の確認を行った。

表-4 に、既存調合と新調合の試し練りの結果を比較して示す。新調合では、スランブフローは既存調合と同程度であるものの、単位水量や混和材量 (特に、シリカフェームの量) の低減などにより、50cm フロー到達時間が大きくなる傾向にあった。しかし、PCa 部材の製造に用いるコンクリートとしては、この程度の粘性増大であれば充填性への悪影響はほとんどなく、施工性の面からは問題ないと判断した。

施工性の確認と同様に試験室における試し練りを行って、自己収縮ひずみ測定用供試体 (□100×400mm, 20°C 封かん養生) および圧縮強度試験用供試体 ( $\phi$ 100×200mm, 標準養生) を作製し、自己収縮ひずみ、圧縮強度およびヤング係数の確認を行った。

表-4 に示すように、材齢 28 日の自己収縮ひずみは、 $586 \times 10^{-6}$  と既存調合以下であった。材齢 91 日の標準養生供試体の圧縮強度は 164N/mm<sup>2</sup> で、既存調合以上であった。また、ペースト部分 (192N/mm<sup>2</sup>) に対するコンクリートの圧縮強度の比  $F_c/F_p$  は 0.85 で、3.3 節における推定値および既存調合と同等であった。コンクリートのヤング係数は  $4.65 \times 10^4$ N/mm<sup>2</sup> であった。粗骨材のヤング係数は測定していないが、これは 3.1 節における粗骨材のヤング係数の平均値 ( $5.02 \times 10^4$ N/mm<sup>2</sup>) に対応した推定値と同等で、さらに既存調合とも同等であった。以上の結果から、自己収縮、圧縮強度およびヤング係数の面からも、新調合における調合条件は問題ないと判断した。

##### 4.2 模擬部材作製による確認

水平 2 軸形強制練りミキサ (容量 2.3m<sup>3</sup>) を用いた実機ミキサ試し練りにより、JASS 5T-605 (コア供試体による構造体コンクリート強度の推定方法) に準拠して、□1.0×1.1m の模擬柱部材を作製した。材齢 91 日で、模擬柱部材から採取したコア供試体および標準養生供試体の圧縮強度試験を行い、 $_{91}S_{91}$  および  $S_{xy}'$  の確認を行った。

表-4 コンクリートの性能の試験結果

項目	既存調合 (表-1)	新調合 (表-3)		
		実測値	推定値	
スランブフロー (cm)	59.5	58.5	-	
50cm フロー到達時間 (秒)	23.7	31.8	-	
自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	620	586	-	
ヤング係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	4.56	4.65	4.51 <sup>*1</sup>	
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	158	164	165	
$F_c/F_p$	0.86	0.85	0.86	
$_{91}S_{91}$ <sup>**2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	夏期	-15	-12	-20
	標準期	-16	-16	-17
	冬期	-3	-4	-10
$S_{xy}'$	夏期	-0.09	-0.07	-0.12
	標準期	-0.10	-0.10	-0.10
	冬期	-0.02	-0.02	-0.06

\*1 粗骨材のヤング係数の平均値に対応した推定値

\*\*2 調合設計上の設定値は 0N/mm<sup>2</sup>

表-3 150N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度コンクリートの新調合 (斜体: 見直し箇所)

調合 No.	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	$V_g$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤量 (B×%)	繊維量 (kg/m <sup>3</sup> )	
					結合材 B		水 W	細骨材 S			粗骨材 G
					セメント	混和材					
新調合	55	1.5	15	0.33	750	250	150	453	865	2.5	2.2

セメント: 普通ポルトランドセメント {密度 3.16g/cm<sup>3</sup>}      混和材: 高強度用混和材 {密度 2.64g/cm<sup>3</sup>}  
 細骨材: 大月産安山岩砕砂 {表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>}      粗骨材: 大月産安山岩砕石 {最大寸法 20mm, 表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>}  
 混和剤: ポリカルボン酸系高性能減水剤 {収縮低減型}      火災時対策用繊維: ポリプロピレン繊維

表-4 に示すように、新調合における  $S_{xy}$ ' の実測値は推定値よりもやや大きい傾向にあった。3.2 節では、高強度用結合材を用いた場合の係数をもとに、式(4)から  $S_{xy}$ ' を推定しているため、結合材における混和材部分の比率が力学特性に及ぼす影響が大きければ、その推定値と実測値との間には大きな誤差が生じうる。しかし、新調合と既存調合の  $S_{xy}$ ' は同程度であったことから、調合の見直しによる構造体強度補正值への影響は小さく、前述した  $S_{xy}$ ' の実測値と推定値の差は、3.2 節の推定方法における誤差に起因するものであると考える。 $_{91}S_{91}$  の実測値はいずれの時期も負の値となっており、調合設計上の  $_{91}S_{91}$  は既存調合同様に  $0\text{N/mm}^2$  に設定しても問題ないと判断した。なお、 $_{91}S_{91}$  の時期ごとの傾向については、3.2 節で推定したように、夏期と標準期で小さく、冬期で大きい傾向にあった。

以上の結果をもとに、表-3 に示す新調合を PCa 部材製造工場に適用することを決定した。2 章でも述べたとおり、本検討では、PCa 部材製造工場に必要な施工性を確保しながら、力学特性や耐久性に悪影響のない範囲で、単位水量・結合材量を低減、さらに結合材における混和材部分の比率を低減させることで、材料コストの低減を図ることであった。その成果として、新調合の採用により、既存調合に対して材料コストを 1 割以上低減することができた。

本検討には、筆者らの提案する超高強度コンクリートの力学特性の評価方法を活用した。調合設計をより合理的に行うためには、施工性や自己収縮などについても事前検討に活用できる評価方法の開発が望まれるが、これについては今後の課題としたい。

## 5. まとめ

プレキャスト（以下、PCa）部材製造工場の  $150\text{N/mm}^2$  級の超高強度コンクリートについて、材料コストの低減などを目的として、筆者らの提案する力学特性評価方法<sup>3),4),5)</sup>をもとに既存調合の見直しを行い、試し練りによる検証を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 提案する力学特性評価方法をもとに、調合条件が材齢 91 日のヤング係数、構造体強度補正值（以下、 $_{91}S_{91}$ ）および標準養生供試体の圧縮強度に及ぼす影響を評価することで、要求される力学特性を満足すると推定される範囲で、単位水量を小さく、単位粗骨材絶対容積（以下、 $V_g$ ）を大きく設定した。
- (2) 新調合では、スランブフローは既存調合同程度であるものの、単位水量や混和材量の低減などにより、

50cm フロー到達時間が大きくなる傾向にあったが、PCa 部材の製造に用いるコンクリートとしては、この程度の粘性増大であれば充填性への悪影響はほとんどなく、施工性の面からは問題ないと判断した。

- (3) 新調合では、既存調合よりも単位水量を小さく、 $V_g$  を大きく設定することで、自己収縮ひずみは、 $586 \times 10^{-6}$  と既存調合以下に収まっていた。
- (4) 新調合における標準養生供試体の圧縮強度は、 $164\text{N/mm}^2$  と既存調合以上であり、ペースト部分に対するコンクリートの圧縮強度の比は 0.85 で、提案する評価方法による推定値および既存調合同等であった。
- (5) 新調合におけるヤング係数は  $4.65 \times 10^4\text{N/mm}^2$  で、提案する評価方法による推定値と同等であり、さらに既存調合同等であった。
- (6) 新調合における構造体強度補正值の実測値は、提案する評価方法による推定値よりもやや大きい傾向にあったが、既存調合同程度であった。また、構造体強度補正值の実測値は、推定値と同様に、夏期と標準期で小さく、冬期で大きい傾向にあり、いずれの時期も負の値となっていたため、既存調合同様に  $0\text{N/mm}^2$  に設定した。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要點'17, 日本コンクリート工学会, 2017.9
- 2) 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, 日本建築学会, 2015.7
- 3) 渡邊悟士, 黒岩秀介, 陣内浩, 並木哲：シリカフェームを使用した高強度コンクリートの構造体強度補正值に及ぼす粗骨材種類の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.723, pp.833-841, 2016.5
- 4) 渡邊悟士, 太田貴士, 陣内浩, 黒岩秀介：単位水量および単位細・粗骨材量が超高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1315-1320, 2017.7
- 5) 渡邊悟士, 陣内浩, 黒岩秀介：粗骨材が高強度コンクリートのヤング係数に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.733, pp.321-327, 2017.3
- 6) 久保田賢 ほか：高強度混和材を用いた高強度コンクリートの特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.375-376, 2005.9