構成割合を変えた高強度コンクリートの施工性と構造体コンクリート強度に関する一考察

CONSIDERATION IN WORKABILITY AND STRENGTH OF CONCRETE IN STRUCTURE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE CHANGED COMPONENTS RATIO

中田善久 — * 1 大塚秀三 — * 2
春山信人 — * 3 斉藤丈士 — * 4
梶田秀幸 — * 5

Yoshihisa NAKATA — * 1 Shuzo OTSUKA — * 2
Nobuhito HARUYAMA — * 3 Takeshi SAITO — * 4
Hideyuki KAJITA — * 5

キーワード：

高強度コンクリート, 構成割合, ポンプ圧送性, 左官仕上げ性, 構造体コンクリート強度

Keywords:

High-strength concrete, Components ratio, Pumpability, Finishability, Strength of concrete in structure

Investigate the influence of changes in unit volume of water and sand-total aggregate ratio in high-strength concrete, results of pumping experiments by actual concrete pumps, finishing experiments by plaster craftsman and compressive strength tests by imitated concrete column are described.

1. はじめに

筆者らは、これまでに水セメント比ごとに単位粗骨材かさ容積を一定として単位水量すなわちセメントペーストの容積 ($V_c + V_w$) を変えた高強度コンクリートの性質に及ぼす影響と傾向について検討を行った¹⁾。このセメントペーストの容積 ($V_c + V_w$) の変化が流動性, 分離抵抗性, 強度, ヤング係数, 乾燥収縮および耐久性にどの程度の影響を及ぼすかとその傾向を明らかにしてきた。さらに、同一水セメント比においてセメントペーストの容積 ($V_c + V_w$) を一定として細骨材率すなわち単位粗骨材かさ容積を変えた高強度コンクリートの性質に及ぼす影響と傾向について検討を行った²⁾。この細骨材率の変化が流動性, 分離抵抗性, 凝結, ブリーディング, 脱水率および強度にどの程度の影響を及ぼすかとその傾向を明らかにしてきた。

一方、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」³⁾ (以下、JASS 5 という。) の「17 節 高強度コンクリート 17.5 調合 a.」において「計画調合は、17.3 に示す品質を満足し、設計が要求する構造体の性能が得られるように、試し練りおよび施工試験によって工事監理者の承認を受ける。試し練りは、実機プラントを用いて実施し、施工試験は、実際の施工にできるだけ近い条件で行うものとする。ただし、十分な資料が得られている項目については、試験を省略することができる。」と述べられ、「施工試験を行う場合は、次の①～⑦の項目について調査し、調合選定の資料とするとよい。」と解説されている。この施工試験の調査項目は、①運搬による空気量およびワーカビリティの変

化, ②ポンプ圧送性, ③打込み, 締固め性, ④左官仕上げ性, ⑤養生方法, ⑥水セメント比と圧縮強度の関係および⑦構造体コンクリート強度の7つと解説されている。

しかし、これまでの研究対象とした構成割合を変えた高強度コンクリートが施工試験の結果にどのような影響を及ぼすかは不明確な点がある。

そこで、本報告は、これまでに研究対象とした高強度コンクリート^{1), 2)}におけるセメントペーストの容積 ($V_c + V_w$) および細骨材率の変化が施工試験におけるポンプ圧送性, 左官仕上げ性および構造体コンクリート強度に及ぼす影響を明らかにするために、これまでの調合の中から代表的な調合について施工試験の結果を述べたものである。ここでは、構成割合を変えた高強度コンクリートとして、普通ポルトランドセメントを用いて水セメント比を35%とし、単位水量すなわちセメントペーストの容積 ($V_c + V_w$) を変えた高強度コンクリート (以下、本報告では単位水量を変えた調合という。) の3調合と細骨材率すなわち単位粗骨材かさ容積を変えた高強度コンクリート (以下、本報告では細骨材を変えた調合という。) の3調合の合計6調合について施工試験の中の主にポンプ圧送性, 左官仕上げ性および構造体コンクリート強度を調べた。なお、本報告は、以前の研究⁴⁾のようにセメントペーストの絶対容積 (P) を細骨材の絶対容積 (S) で除した P/S の観点から検討したのに対して、新たにこれまでの研究^{1), 2)}を踏まえて考察を加筆検討したものである。

¹⁾ 日本大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)
(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

²⁾ ものつくり大学技能工芸学部建設学科 教授・博士 (工学)

³⁾ フジミ工研㈱

⁴⁾ 日本大学生物資源学部生物環境工学科 准教授・博士 (工学)

⁵⁾ 前田建設工業技術研究所 上級技師長

¹⁾ Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

²⁾ Prof., Dept. of Building Technologists, Monotsukuri Institute of Technologists, Dr. Eng.

³⁾ FUJIMI KOKEN CO., LTD.

⁴⁾ Assoc. Prof., Dept. of Bioenvironmental and Agricultural Engineering, College of Bioresource Science, Nihon Univ., Dr. Eng.

⁵⁾ Senior Professional Engineer, Technical Research Institute, MAEDA Corporation

表 1 構成割合を変えた高強度コンクリートの施工試験の概要

構成割合を変えた高強度コンクリートの調査条件	実験の時期	セメントの種類	W/C (%)	目標 SF*2 (cm)	目標 空気量 (%)	単位水量 W (kg/m³)	s/a (%)	Gbv*3 (m³/m³)	単位量(kg/m³)				混合骨材の実積率 (%)	セメントペースト容積 (L/m³)	余剰セメントペースト量*6 (L/m³)	施工試験の検討項目
									W	C	S*4	G*5				
単位水量を変えた調査	夏期 (8月)	N*1	35	50 ± 7.5	4.5 ± 1.5	170	44.9	0.55	170	486	769	945	76.6	369	176	・ 圧送実験によるポンプ圧送性の検討 ・ 印象評価による左官仕上り性の検討 ・ 柱模擬部材による構造体コンクリート強度の検討
						185	42.3		185	529	691	945	76.3	397	210	
						200	39.5		200	571	614	945	75.5	426	239	
細骨材率を変えた調査	標準期 (11月)	N*1	35	50 ± 7.5	4.5 ± 1.5	185	52.8	0.45	185	529	862	774	77.0	397	217	
						185	42.3	0.55	185	529	691	945	76.3	397	210	
						185	31.8	0.65	185	529	520	1117	73.1	397	176	

*1 N:普通ポルトランドセメント, *2 SF:スランブフロー, *3 Gbv:単位粗骨材かさ容積, *4 細骨材の表乾密度:2.71g/cm³, *5 粗骨材の表乾密度:2.72g/cm³,

*6 余剰セメントペースト量(L/m³)=セメントペースト容積(L/m³)-混合骨材の空隙量(L/m³)

図 1 コンクリートポンプと輸送管の構成

2. 構成割合を変えた高強度コンクリートの施工試験概要

2.1 構成割合を変えた高強度コンクリートの調査

構成割合を変えた高強度コンクリートの施工試験の概要を表1に示す。構成割合を変えた高強度コンクリートの調査は、普通ポルトランドセメントを用いて水セメント比を35%、目標スランブフロー（以下、目標SFとする）を50±7.5cmおよび目標空気量を4.5±1.5%にそれぞれ一定とし、荷卸し地点においてスランブフローおよび空気量が目標値を満足するように化学混和剤の使用量により調整した。施工実験は、大きく2つに分けて単位水量を変えた調査の3調査を夏期（8月）に行い、細骨材を変えた調査の3調査を標準期（11月）に行った。使用材料は、水に上水道水、骨材に埼玉県秩父郡小鹿野町両神産の砕砂および砕石2005、化学混和剤にポリカルボン酸系高性能AE減水剤およびアルキルエーテル系AE剤とした。また、コンクリートは、実機プラントにより製造した。表中には、C. T. Kennedyが示した余剰ペーストの定義（空気を含むセメントペーストの容積から骨材の空隙量を差し引いた容積）⁵⁾の(1)式から求めた余剰セメントペースト量を示している。

$$\begin{aligned}
 P_{exc} &= (C + W + A) - B_v \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \\
 &= (1000 - G_a) - \frac{G_a}{G} \times 100 \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \\
 &= 1000 - \frac{G_a}{G} \times 100 \quad (1)
 \end{aligned}$$

P_{exc} : コンクリート1m³中の余剰セメントペースト量(L/m³)

$C \cdot W \cdot A$: セメント・水・空気容積(L/m³)

B_v : 混合骨材(細骨材+粗骨材)のかさ容積(L/m³)

G^* : 混合骨材(細骨材+粗骨材)の実積率(%)

G_a : 混合骨材(細骨材+粗骨材)の絶対容積(L/m³)

*Gは、該当する細骨材率ごとに試験によって求めた。

2.2 圧送実験によるポンプ圧送性の検討

コンクリートポンプと輸送管の構成を図1に示す。輸送管の構成は、コンクリートポンプから実長約50mの直管配管(5B)を基本として先端にフレキシブルホース(4.5B)とした。使用したコンクリートポンプ(N社製:DC-SL1100BD-M26)は、高圧仕様において最大理論吐出量が68m³/hであり、最大理論圧力が8.2N/mm²の性能を有し、コンクリートシリンダの内径×ストローク長が205×1800mmの2本を有したピストン式である。圧送方法は、高強度コンクリートであるため、すべての調査を高圧圧送とした。構成割合を変えた高強度コンクリートのポンプ圧送性は、圧送前後におけるコンクリートの品質変化およびP1とP3における水平管1m当り(5B)の管内圧力損失から検討した。

(1) 圧送前後におけるコンクリートの品質変化

圧送前後におけるコンクリートの品質変化は目標吐出量30m³/hで圧送した場合について調べた。また、圧送前のコンクリートは、いずれの調査もコンクリートポンプのホッパーに投入する直前のものとし、圧送後のコンクリートは筒先から吐出したものとした。コンクリートの圧送前後の品質変化の項目は、スランブフロー、空気量、コンクリート温度および材齢28日および91日における圧縮強度とし、試験方法はいずれもJISに準じた。

(2) 管内圧力損失

管内圧力は、コンクリートを目標吐出量20m³/h(回転数1,000rpm)および目標吐出量30m³/h(回転数1,200rpm)で圧送した場合とし、ダイヤフラム式圧力測定器を用いて10ストローク以上の安定した輸送管内圧力が測定できるまで圧送した。また、図1中の2点の圧力測定箇所(P1およびP3)における管内圧力の差を、2点の圧送距離(39.5m)で除して水平管1m当り(5B)の管内圧力損失を求めた。

2.3 印象評価による左官仕上り性の検討

左官仕上り性は、3名の左官工により試験体に打ち込んだコンク

図4 圧送前後におけるコンクリートの品質

行ったにもかかわらず、配管に養生などを行わなかったが、比較的短距離な圧送であったことや圧送前から圧送後までの経過時間が短かったためと思われる。また、単位水量を変えた調査と細骨材率を変えた調査のいずれの調査も調査の変化要因とコンクリート温度の変化量に明確な傾向は認められなかった。

圧縮強度は、以前の研究⁶⁾と同様に材齢28日と材齢91日のいずれの材齢において圧送前後に明確な傾向を示さず、若干低下する傾向を示した。また、単位水量および細骨材率の変化が圧縮強度に及ぼす影響に明確な傾向は見られなかった。

以上のことから、圧送距離(5B)が40m程度であれば、調査の変化要因が圧送前後のコンクリートの品質変化に及ぼすこと影響が小さいと考えられる。

(2) 管内圧力損失

調査の変化要因ごとの管内圧力損失を図5に示す。単位水量を変えた調査における管内圧力損失は、いずれの目標吐出量において単位水量が大きいほど小さくなる傾向を示した。これは、単位粗骨材かさ容積が一定であるにもかかわらず、表1に示したように余剰ペースト量が多くなったことにより圧送抵抗が小さくなり管内圧力が小さくなったためと考えられる。

一方、細骨材率を変えた調査における管内圧力損失は、いずれの目標吐出量において細骨材率すなわち単位粗骨材かさ容積が大きくなっても大きな変化が見られなかった。これは、細骨材率すなわち単位粗骨材かさ容積が大きくなっても、表1に示したようにペースト容積が同様であるため、圧送抵抗に大きな影響を及ぼさなかったため管内圧力損失が同程度になったと考えられる。また、これまでのコンクリートポンプ施工指針・同解説⁷⁾に示されるように、スランプが小さいものすなわち粗骨材量が多いものの方が管内圧力損失が大きくなると考えられる。しかし、細骨材率すなわち単位粗骨材かさ容積が大きくなっても本実験の高強度コンクリートのように、単位セメント量が大きくセメントペースト量が一定以上のコンクリートの場合、余剰ペースト量が小さくなっているものの骨材を除

図5 調査の変化要因ごとの管内圧力損失

図6 単位水量を変えた調査における評価項目ごとの尺度値の関係

いたモルタル分の中の細骨材の減少による圧送抵抗の減少と粗骨材量の増加による圧送抵抗の増加により相殺され、細骨材率を変えても管内圧力損失が同程度になった可能性があると思われる。

3.2 印象評価による左官仕上げ性の検討

(1) 試験体の打込みおよび締固め状況

いずれの調査においても、試験体の上端までコンクリートを打込み作業および棒状バイブレータを用いた締固め作業は支障なく行うことができた。

(2) 単位水量を変えた調査

単位水量を変えた調査における評価項目ごとの尺度値の関係を図6に示す。評価項目の①コンクリートの状態および④感覚的な仕上りの精度は、室内実験におけるコンクリートの状態の印象¹⁾と同様に単位水量が大きいほど尺度値が大きくなる傾向を示した。これは、単位粗骨材かさ容積を一定として単位水量すなわち表1に示したように余剰ペースト量を大きくすると粘性が小さくなる傾向にある¹⁾ことが影響し、①コンクリートの状態および④感覚的な仕上りの精度が良いと判断されたものと考えられる。また、評価項目の③感覚的な仕上りの速さにおける尺度値は、単位水量が185kg/m³と200kg/m³で差が小さいものの、いずれも単位水量が170kg/m³よりも尺度値が大きく、概ね前述したような傾向であった。なお、評価項目の②各器具による均しやすさは、単位水量の違いによる尺度値の差が見られなかった。これは、単位粗骨材かさ容積を一定として単位水量を大きくすると前述のように粘性が小さくなる傾向にある¹⁾ことやブリーディング量が大きくなる傾向にある¹⁾ことが影響して定木や木ゴておよび金ゴてへのまとわりつきが少なくなることと、凝結時間が長くなる傾向にある¹⁾ことの影響で金ゴてによる

図7 細骨材率を変えた調合における評価項目ごとの尺度値の関係

図9 コア供試体と標準養生供試体の圧縮強度

仕上げに手間がかかることが相殺した可能性がある。

(3) 細骨材率を変えた調合

細骨材率を変えた調合における評価項目ごとの尺度値の関係を図7に示す。評価項目の①コンクリートの状態、②各器具による均しやすさおよび③感覚的な仕上りの速さにおける尺度値は、細骨材率の違いによる明確な傾向は見られず、その差も小さかった。これは、セメントペーストの容積を一定として細骨材率を変化させる場合に、細骨材率が著しく大きいと高性能AE減水剤の添加率が顕著に増大し分離抵抗性が損なわれる可能性がある²⁾ものの、分離抵抗性が損なわれない範囲であれば細骨材率の変化が粘性、ブリーディング量、凝結時間などに及ぼす影響は小さい²⁾ため①コンクリートの状態、②各器具による均しやすさおよび③感覚的な仕上りの速さにおける尺度値に明確な傾向が現れなかったと考えられる。また、評価項目の④感覚的な仕上りの精度は、細骨材率が小さいほど尺度値が大きくなる傾向を示した。これは、セメントペーストの容積を一定として細骨材率を小さくするとコンクリート中に占めるモルタル分の容積が小さくなるため、均し面において一度の作業により移動するモルタル分が少なくなり、④感覚的な仕上りの精度が良いと判断されたものと考えられる。

3.3 柱模擬部材試験体による構造体コンクリート強度の検討

(1) 柱模擬部材試験体の打込みおよび締固めの観察状況

いずれの調合においても、柱模擬部材試験体を2層に分けて打込み作業および棒状バイブレータを用いた締固め作業は支障なく行うことができた。

(2) 柱模擬部材試験体の中央部における温度

柱模擬部材試験体の中央部における最高温度と温度上昇量を図8に示す。柱模擬部材試験体の中央部における最高温度および温度上

図8 柱模擬部材試験体中央部における最高温度と温度上昇量

図10 構造体強度補正值: S

高かったことが影響していると考えられる。

(3) 圧縮強度

コア供試体と標準養生供試体の圧縮強度を図9に示す。単位水量を変えた調合におけるコア供試体（中心部）およびコア供試体（端部）の圧縮強度は、単位水量が大きくなって大きな変化は見られず、これまでの研究¹⁾と同様の傾向であった。しかし、材齢91日の標準養生供試体の圧縮強度は、単位水量が大きくなると若干、小さくなる傾向を示した。これは、材齢7日と材齢28日において大きな変化が見られなかったことから供試体採取後および養生初期におけるコンクリート温度が高かった影響⁷⁾による供試体のばらつきが影響していると思われる。また、単位水量が大きいほど材齢28日から材齢91日にかけての増進が小さくなり、コア供試体（端部）の圧縮強度は、単位水量が200kg/m³の場合に材齢7日から材齢28日にかけての増進が小さい傾向を示した。これは、図8に示したように単位水量が大きいほど柱模擬部材試験体内部における最高温度が高くなり、初期材齢において強度が増進するものの、その後の強度が増進しない傾向にある⁷⁾と考えられる。

細骨材率を変えた調合における圧縮強度は、いずれの供試体も細骨材率が大きくなって大きな変化は見られず、これまでの研究²⁾と同様の傾向であった。これは、セメントペーストの容積 ($V_c + V_w$) が一定以上であると細骨材率がこの程度の範囲であれば、圧縮強度に及ぼす影響が小さいものと考えられる。

(4) 構造体強度補正值

コア供試体の圧縮強度と標準養生供試体の圧縮強度から求めた構造体強度補正值: Sを図10に示す。単位水量を変えた調合における構造体強度補正值_{28S28} (夏期) は、概ね5N/mm²程度と一定であった。

しかし、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ （夏期）は、単位水量が大きくなると僅かに小さくなる傾向を示し、JASS 5¹⁾の表17.1の高強度コンクリートの構造体強度補正值の標準値より小さな値であった。これは、前述した標準養生供試体の材齢91日における圧縮強度が若干、小さくなったことが影響していると考えられるが、単位水量がコア供試体の圧縮強度に及ぼす影響は小さいことと以前に室内で行った実験¹⁾を考慮すると、単位水量の違いが構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ に及ぼす影響が小さいものと推測される。

また、細骨材率を変えた割合における構造体強度補正值 $_{28}S_{28}$ （標準期）および $_{28}S_{91}$ （標準期）は、いずれも一定であった。これは、前述したように、セメントペーストの容積（ V_c+V_w ）が一定以上であると柱模擬部材試験体の内部温度が一定となり、さらに、細骨材率がこの程度の範囲であれば、圧縮強度に及ぼす影響が小さいことによるものと考えられる。

4. まとめ

本報告は、これまでに研究対象とした高強度コンクリート^{1), 2)}における単位水量および細骨材率の変化がポンプ圧送性、左官仕上げ性および構造体コンクリート強度に及ぼす影響を明らかにするために、これまでの割合の中から代表的な割合について施工試験の結果を述べたものである。その結果、次の知見を得た。

- (1) ポンプ圧送性の圧送前後におけるコンクリートの品質変化は、圧送距離（5B）が40 m程度であれば単位水量や細骨材率の違いによる影響は小さいものと考えられる。
- (2) ポンプ圧送性における管内圧力損失は、単位水量が大きいほど小さくなる傾向にあり、細骨材率の変化の影響は小さかった。
- (3) 左官仕上げ性は、単位水量が大きいほど良好となる傾向を示し、細骨材率の変化の影響は小さかった。
- (4) 柱模擬部材試験体の中央部における最高温度および温度上昇量は、単位水量が大きいほど高くなる傾向を示した。また、細骨材率の違いによる明確な傾向は認められなかった。
- (5) コア供試体（中心部）、コア供試体（端部）および標準養生供試体の圧縮強度は、ばらつきがあるものの単位水量や細骨材率

を変えても大きな変化は認められなかった。

- (6) 柱模擬部材試験体から求めた構造体強度補正值は、単位水量や細骨材率を変えても大きな変化は認められなかった。

今後は、これまでに研究対象とした高強度コンクリート^{1), 2)}の割合の中から今回行った代表的な割合以外のものについても施工試験との関係を明らかにしていきたい。

謝辞

本実験の実施にあたり、(株)岡本建設重機、フジミ工研(株)滑川工場PC製造部、日本大学理工学部建築学科中田研究室の学生諸氏（当時）およびものづくり大学技能工芸学部建設学科の学生諸氏（当時）より多大な協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 中田善久，斉藤丈士，梶田秀幸，大塚秀三，春山信人：単位水量の変化が単位粗骨材かさ容積を一定とした高強度コンクリートの性質に及ぼす影響の一考察，日本建築学会構造系論文集，第82巻，第738号，pp.1145-1154，2017.8
- 2) 中田善久，斉藤丈士，梶田秀幸，大塚秀三，春山信人：同一水セメント比における細骨材率の変化が高強度コンクリートの性質に及ぼす影響の一考察，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第748号，pp.751-760，2018.6
- 3) 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，2015.7
- 4) 田村裕介，中田善久，斉藤丈士，春山信人：構成割合が異なる高強度コンクリートにおける施工性および模擬柱部材のコア強度に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.521-526，2010.6
- 5) Kennedy, C.T. : The Design of Concrete Mixtures, Proceeding of ACI, Vol.36, pp.373-400, 1940
- 6) 宮田敦典，中田善久，大塚秀三，岡本圭市：コンクリートポンプ工法における圧送距離が圧送前後の品質変化に及ぼす一考察，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第688号，pp.1035-1044，2013.6
- 7) Portland Cement Association : Design and Control of Concrete Mixtures, 14th edition, 2002

[2018年6月5日原稿受理 2018年7月23日採用決定]