設計基準強度 300N/mm² 高強度コンクリートを実現する材料・調合および養生方法の実験研究

EXPERIMENTAL STUDY OF MATERIALS, MIX PROPORTION AND CURING CONDITIONS TO ACHIEVE 300 N/mm² HIGH STRENGTH CONCRETE

小島正朗 ——— * 1 松下哲郎 ——— * 2
辻 大二郎 ——— * 3 小山智幸 ——— * 4

Masaro KOJIMA ——— * 1 Tetsuro MATSUSHITA — * 2
Daijiro TSUJI ——— * 3 Tomoyuki KOYAMA — * 4

キーワード：
300N/mm², 高強度コンクリート, シリカフェーム, 調合,
養生方法

Keywords:
300N/mm², High-strength concrete, Silica fume, Mix design, Curing
method

This study experimentally investigated how to make 300N/mm² ultra-high-strength concrete. The fine aggregate type was found to significantly influence compressive strength development, and the use of quartz fine aggregates yielded the highest strength. The strength of the mortar specimens made of blended cement containing silica fume reached 350 ~ 400N/mm² with a two-stage heat curing scheme. For concrete, the type and maximum size of coarse aggregates greatly affect the strength; the use of rhyolites up to 10mm resulted in approximately 300N/mm². The use of homogenous high-strength aggregates does not necessarily yield high concrete strength, likely due to the difference in Poisson's ratio.

1. はじめに

建築物の超高層化の実現, 柱断面の縮小や柱間隔の大スパン化を目的に, コンクリートの超高強度化が進んでいる。これまでに筆者らは, 60 階クラスの超高層 RC 造を合理的に実現するために, 設計基準強度 200N/mm² の圧縮強度と高流動性に加え, 耐火性と靱性も向上させた超高強度・高性能コンクリートを開発してきた¹⁾。これに続き, 80 階クラスまでの更なる超高層化の実現や, 柱の更なる小径化による空間自由度の向上をねらいとして, 圧縮強度を 250~300N/mm² まで高めた超高強度・高性能コンクリートの開発を行っている。

本研究では, コンクリートの超高強度化の手法に関して, 基礎的な実験検討を行った。まず, マトリクスモルタルを対象に, 材料, 調合および養生方法が圧縮強度に及ぼす影響を把握した (シリーズ I)。これを踏まえて, 粗骨材の種類や最大寸法, 粗骨材かさ容積が強度発現性に及ぼす影響を検討し, 300N/mm² 以上の圧縮強度のコンクリートを実現するための基本条件を検討した (シリーズ II)。

2. シリーズ I : マトリクスモルタルの検討

2.1 実験概要

コンクリートで 300N/mm² を実現するためには, マトリクスモルタルは, さらに高い圧縮強度が必要になる。シリーズ I では, マトリクスモルタルの圧縮強度の発現に及ぼす各種要因について検討した。

実験因子と水準を表 1 に示す。まず, ①細骨材の種類が強度発現に及ぼす影響を検討し, ここで選定した細骨材を用いて②養生方法の検討を行った。選定した細骨材および養生方法で, ③結合材の構

成 (混和材の種類と置換率および水結合材比 (W/B)) を変化させて強度発現を検討した。

使用材料を表 2 に示す。セメントには, 低熱ポルトランドセメントをベースセメントとし, JIS A 6207 に適合する粉末状シリカフェームを内割りで 17.5% 添加した高強度コンクリート用セメントを用いた。化学混和剤には, 水結合材比 (W/B) が 15% 以下の低水結合材比でも高い分散性を発揮する特殊ポリカルボン酸系のものを使用した。細骨材には, 高強度コンクリートで使用実績の多い安山岩系および硬砂岩系の 2 種類の砕砂と, 石英系と銅スラグの砂を使用した。

養生方法は, 標準養生とプレキャスト部材を想定した高温養生 7 種類の合計 8 種類とした。蒸気養生は, 最高温度 90℃ を 72 時間保持 (昇温および降温速度 10℃/h) とした。加熱養生は, 蒸気養生が終了した後に, 最高温度 100℃, 150℃, 180℃, 210℃, 250℃ を 24 時間保持 (昇温および降温速度 100℃/h) の 5 種類とした。オートクレーブ養生は, 蒸気養生が終了した後に, 最高温度 180℃ 10 気圧を 24 時間保持 (昇温および降温速度 20℃/h) とした。

表 1 実験因子と水準 (シリーズ I)

実験因子		水準
①細骨材の種類		石英系, 安山岩系, 硬砂岩系, 銅スラグ (4 水準)
②養生方法 ^{注)}		W, J, J+K100, J+K150, J+K180, J+K210, J+K250, J+AC180 (8 水準)
③ 結合材 の構成	混和材種類	シリカフェーム A, 石英微粉, 石灰微粉, 高炉スラグ微粉, なし (5 水準)
	置換率	内割 0, 13, 23, 31% (外割 0, 15, 30, 45%)
	水結合材比	8.7~15.0%

注) 記号 W: 標準養生, J: 90℃ 蒸気養生, K: 加熱養生 (100℃ の場合は K100), AC180: 180℃ オートクレーブ養生

¹⁾ 榊竹中工務店技術研究所建設材料部構造材料グループ グループ長・工修 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

²⁾ 榊竹中工務店技術研究所建設材料部構造材料グループ 主任研究員・博士 (工学)

³⁾ 榊竹中工務店技術本部技術プロデュース部 副部長・工修

⁴⁾ 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 准教授・工博

¹⁾ Group Leader, Structural Materials Group, Construction Material Engineering Dept., Research & Development Institute, Takenaka Corporation, M. Eng.

²⁾ Chief Researcher, Structural Materials Group, Construction Material Engineering Dept., Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

³⁾ Senior Manager, Technology Producing, Technology Department Head Office, TAKENAKA CORPORATION, M. Eng.

⁴⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu Univ., Dr. Eng.

各実験の実験条件を表3に示す。①細骨材の種類の検討では、W/B=11.3%とし、石英微粉をセメントの13%内割置換率して細骨材の種類による強度発現性を評価した。②養生方法の検討では、強度発現性が良好であった細骨材を選定して、強度発現の良好な養生方法を選定した。③の結合材の構成の検討は、表4に示す、a)セメント単味のW/B=15%の調査に混和材を外割で15～45%混入(内割13～31%)して水結合材比を小さくした場合、b)混和材の置換率を外割15%(内割13%)一定として水結合材比を変化させる場合を、c)セメント単味の場合と比較した。この時の化学混和剤の添加量は、結合材量に対し、W/B=15.0%では3.0%、W/B=13.0%と11.5%では3.5%(他より粉末度の高いシリカフュームAを混入したW/B=11.5%では4.5%)、W/B=11.3%と11.0%では4.5%、W/B=10.3%以下では5.0%(他より粉末度の低い石英微粉を混入したW/B=10.3%では4.5%)とした。

練混ぜ量は10Lとし、ソイルミキサ(容量15L)に結合材と砂を投入して空練りを30秒した後、水と化学混和剤を投入して5分間練り混ぜ、かき落し後さらに5分間練り混ぜた。その後、オムニミキサに投入し、3分間攪拌して巻き込み空気を排出した。

試験項目および試験方法を表5に示す。フレッシュモルタルに対し、0打フローおよび空気量の測定を行った。圧縮強度試験は、φ5×10cm供試体を用い、材齢2週で行った。また、養生方法による強度増進効果を検証する目的で、水結合材比10%のセメントペーストを練り混ぜ、φ5×10cmの供試体を成型し、標準養生(W)、蒸気養生(J)、蒸気養生後に180℃加熱養生(J+K180)、250℃加熱養生(J+K250)、およびオートクレーブ養生(J+AC180)を行い、粉末X線回折法による組成とポロシメータによる細孔構造の変化を調べた。

2.2 実験結果および考察

(1) 細骨材の種類と圧縮強度発現

細骨材の種類とモルタルの0打フローおよび圧縮強度の関係を図1に示す。細骨材によって0打フローに違いがあったが、いずれも25cm以上と良好な流動性が確保できた。圧縮強度は、蒸気養生した条件で石英系骨材を使用したものが最大約280N/mm²であるのに対し、最も強度の小さかった銅スラグ骨材を使用した場合は約220N/mm²と、60N/mm²小さかった。細骨材の種類による強度発現の違いは、粒子の硬さや強度、セメント水和物との付着性、粒径等の様々な影響が考えられる。本検討では、高強度コンクリート用に使用される安山岩系、硬砂岩系の細骨材よりも、SiO₂純度が高く粒径が小さい石英系の細骨材を用いた場合に圧縮強度が高くなった。高い圧縮強度のコンクリートを実現するためにはマトリクスモルタルの圧縮強度を高くすることが重要であり、本研究では、実験の範囲で最も強度発現が大きかった石英系細骨材を、以後の検討で使用した。

(2) 養生条件とモルタルの圧縮強度発現

養生条件ごとの圧縮強度を図2に示す。養生方法によって強度発現が大きく異なり、180℃加熱までは養生温度が高くなるほど圧縮強度が高くなり、400N/mm²近い圧縮強度が得られた。180℃を超えて加熱養生温度が210℃、250℃となると圧縮強度は低下する傾向となった。また、オートクレーブ養生は、最高温度が180℃加熱養生と同じであるが、若干圧縮強度が低くなった。これは、オートクレーブ養生の場合は養生時に乾燥しないため、強度試験時の供試体の含水状態が異なることが一因と考えられる。加熱養生は、電気炉内で加熱する間に水分が逸散し、水和反応が生じずに強度増進に悪影響を

表2 使用材料(シリーズI)

種 類	産地・性質
セメント	高強度コンクリート用セメント(密度3.01g/cm ³)
混和材	石英微粉(密度2.60g/cm ³ 、比表面積5100cm ² /g)
	石灰石微粉(密度2.70g/cm ³ 、比表面積23000cm ² /g)
	高炉スラグ微粉末(密度2.91g/cm ³ 、比表面積12000cm ² /g)
	シリカフュームA(密度2.20g/cm ³ 、比表面積73000cm ² /g)
細骨材	シリカフュームB ^(注) (密度2.20g/cm ³ 、比表面積200000cm ² /g)
	石英系(密度2.60g/cm ³ 、吸水率0%、最大径0.5mm)
	安山岩系(密度2.63g/cm ³ 、吸水率1.46%、最大径5mm)
	硬砂岩系(密度2.66g/cm ³ 、吸水率1.07%、最大径5mm)
化学混和剤	銅スラグ(密度3.50g/cm ³ 、吸水率0.50%、最大径1.2mm)
	特殊ポリカルボン酸系化学混和剤、消泡剤

注) セメントにブレックスされたもの

表3 実験条件(シリーズI)

実験因子	固定条件
①細骨材の種類	W/B: 11.3%, 混和材: 石英微粉を内割置換率13% 化学混和剤の添加率: 結合材量×4.5% 細骨材量: 27vol%, 養生: 標準養生W, 90℃蒸気養生J
②養生方法	W/B: 10.0%, 混和材: なし 化学混和剤の添加率: 結合材量×4.5% 細骨材: 石英系, 細骨材量24vol%
③結合材の構成	細骨材: 石英系, 細骨材量24vol% 養生: 90℃蒸気養生+180℃加熱養生(J+K180)

表4 調査条件(シリーズI)

a) 混和材を外割0～45%混入					b) 混和材の置換率一定					c) セメント単味		
W/B(%)	W	C	P	R(%)	W/B(%)	W	C	P	W/B(%)	W	C	P
15.0	0.15	1	0	0	13.0	0.15	1	0.15 (R=13%)	15.0	0.15	1	0.15
13.0			0.15	13	11.3	0.13			13.0	0.13		
11.5			0.30	23	10.0	0.115			11.0	0.11		
10.3			0.45	31	9.6	0.11			10.0	0.10		
					8.7	0.10			9.0	0.09		

記号: W(水), C(セメント), P(混和材)の質量比, R: 混和材の内割置換率

表5 試験項目および方法(シリーズI)

試験項目	試験方法
フレッシュ性状	0打フロー(JIS A 6207), 空気量(JIS A 1128)
圧縮強度	JIS A 1108(φ5×10cm)
組成変化 ^(注)	粉末X線回折法(Rigaku製)
細孔構造 ^(注)	水銀圧入式ポロシメータ(島津製)

注) ②養生方法の検討シリーズのみ実施

図1 細骨材の種類が0打フロー、圧縮強度に及ぼす影響

図2 養生方法とモルタルの圧縮強度発現

及ぼすことを当初は懸念したが、180℃までの加熱養生であれば、強度増進の養生として有効であることがわかった。

(3) セメントマトリクスの組成および細孔構造の変化

粉末 X 線回折結果を図 3 に示す。養生温度が高くなるほど、未水和セメント (C_2S , C_3S) の存在で生じるピーク (2θ = 約 32.2, 32.6°) が減少し、一方で水和の進行とともに生じる C-S-H 水和物のピーク (2θ = 約 29.4°) が大きくなっていることがわかる。

図 4 は水銀圧入式ポロシメータの累積細孔量の測定結果を示しており、養生方法を W から J、さらに J+K180 とすると細孔量は減少し、細孔径も小さい方向にシフトしている。一方、養生方法を J+K250 とした場合は、J や J+K180 とした場合よりも 0.1~1 μm 程度の径の細孔量が増大し、総細孔量は蒸気養生の場合よりも多くなっている。

図 3 および図 4 の結果から、高温で養生するほど反応は促進されるが、加熱温度が 180℃を超えると細孔構造が疎になってゆくため、加熱養生の温度が高くなると圧縮強度が増進しなかったと考えられる。高温加熱養生によってゾノトライトやトバモライトなどの水和物が生成するが、180℃以上の温度ではそれらの生成量が変化するため²⁾、空隙構造が変化し、圧縮強度に影響したものと推察される。高い圧縮強度を実現するためには、高い温度での養生が有効であるが、その際の最高温度は 180℃程度までとするのが良いといえる。したがって以後の検討では、90℃蒸気養生の後に 180℃加熱養生する養生方法を基本として検討を行う。

(4) 結合材の構成と強度発現

図 5 (a) に、a) セメント単味の W/B=15% に混和材を外割 15~45% 混入 (内割 13~31%) して水結合材比を小さくした場合と、c) セメント単味の場合の、圧縮強度、0 打フローおよび空気量を比較して示す。圧縮強度に関し、混和材を外割 15% 混入した条件 (内割 13%) では、セメント単味の場合より高い圧縮強度が得られているものもあるが、混和材をさらに増やしても圧縮強度は増進していない。混和材を増やし W/B が小さくなるにつれ、粘性が高くなり、0 打フローは小さく、空気量が多くなる傾向であった。特に、他より粉末度が大きいシリカフェューム A を使用した場合は、混入率の増大に伴う流動性の低下が大きかった。本実験の範囲では、高強度コンクリート用セメントに、混和材を内割で 13% 置換した条件が良好であった。

図 5 (b) に b) 混和材の置換率が内割 13% 一定の場合と、c) セメント単味の場合の、圧縮強度、0 打フローおよび空気量の比較を示す。いずれも W/B=10% 程度で圧縮強度がピークとなる傾向であった。混和材を混入したものは、セメント単味の場合より、若干圧縮強度が低い傾向であったが、シリカフェューム A を用いた場合は、セメント単味と同等以上の圧縮強度が得られるものがあつた。0 打フローは、混和材を内割 13% で使用する条件では、概ねセメント単味の場合より大きくなった。W/B を小さくすると共に粘性が高くなり、0 打フローは小さくなる。0 打フローが 20cm 程度まで小さくなると空気量が 2% を超え、圧縮強度は低下している。高い圧縮強度を実現するためには、高い流動性を、より低い W/B で確保することが重要といえる。

以上のマトリクスモルタルの基本構成を検討した結果、粘性を低く抑え流動性を確保して巻き込み空気量が増大しない範囲で、水結合材比を小さくすることが、高い圧縮強度を実現するうえで重要となることがわかった。実験の範囲では、細骨材は石英系、結合材は高強度コンクリート用セメント単味またはシリカフェューム A を内割

図 3 粉末 X 線回折

図 4 累積細孔量

(a) 外割混入 (内割置換率 13~31%)

(b) 内割置換率 13%

図 5 水結合材比と圧縮強度、0 打フロー、空気量の関係

13%程度置換した W/B=10%程度の調合とし、養生方法は、90℃蒸気養生 72 時間の後に 180℃加熱養生 24 時間を採用することが、強度発現性と流動性の両面から良いことがわかった。

3. シリーズⅡ：コンクリートの構成の検討

3.1 実験概要

本節では、前節のマトリクスモルタルの検討結果を踏まえ、コンクリートに用いる粗骨材の岩種 (産地)、最大寸法および粗骨材かさ容積が、圧縮強度発現に及ぼす影響の把握を試みた。また、粗骨材

原石およびコンクリートからスクリーニングして採取したマトリクスモルタルの力学特性についても評価を行い、コンクリートの圧縮強度 300N/mm² を実現するための基本構成について検討した。

実験因子と水準を表 6 に示す。粗骨材には、150～200N/mm² クラスの高強度コンクリートへの適用実績のある 3 つの岩種（産地）を選定した。粗骨材の最大寸法は、一般に使用されている最大寸法 20mm のほか、15mm（6 号砕石として製造されるものは 13mm）、10mm の 3 種類とした。粗骨材かさ容積は 0.5、0.3m³/m³ の 2 水準とした。

使用材料を表 7 に、調合条件を表 8 に示す。セメントと化学混和剤はシリーズ I と同じとし、細骨材はシリーズ I で選定した石英系とした。単位水量は、粗骨材かさ容積に応じて設定した。粗骨材かさ容積 0.3m³/m³ の条件では、粗骨材最大寸法を表 8 の 2 水準とした。

試験項目および試験方法を表 9 に示す。コンクリートの試験は、フレッシュ性状の確認試験と硬化コンクリートの圧縮強度、ヤング係数（コンプレッソメータ）とした。また、縦・横のひずみゲージを貼り付け、ポアソン比を測定した。

コンクリートの試験のほか、粗骨材やマトリクスモルタルの力学特性がコンクリートの圧縮強度発現に及ぼす影響を評価する目的で、砕石の原石コアおよびコンクリートからスクリーニングしたモルタルについても同様の試験を行った。

砕石の原石コアは、人頭大の岩から切り出し、φ5×10cm に成型した。コンクリート割裂面の粗骨材の状況と、整形したコアの外観を写真 1 に示す。硬砂岩系は、比較的均質であるため、採取部位は区分しなかった（一般部）。安山岩系は、骨材粒子中の約 7 割を占める緑色系の一般部と、約 3 割を占める赤色系に変色した部位（風化部）からコアを採取した。流紋岩系は、一般部（さび色あり含む）と、約 1 割の割合で骨材粒子に含まれる密度が高いひん岩部分（硬質部）からコアを採取した。試験体数はコアを採取して整形できた範囲とし、各岩種で N=9～15 本、同部位の区分で N=2～12 本とした。

スクリーニングモルタルは、フレッシュコンクリートを 5mm 篩でふるって採取し、φ5×10cm に成型した（調合と養生条件毎に N=3）。

コンクリートの練混ぜは、強制 2 軸ミキサにセメントと骨材の投入後 30 秒間空練りを行い、注水後 5 分攪拌した後にかけ落しを行い、さらに 5 分攪拌した。化学混和剤の添加量は、いずれの調合も結合材量の 5% とし、消泡剤は結合材量の 0.02% とした。

コンクリートおよびモルタルの養生は、標準養生 W、最高温度 90℃ を 72 時間保持する蒸気養生 J、蒸気養生後に 180℃ 加熱を 24 時間保持する養生 J+K とした。試験材齢は 4 週とした。

3.2 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの試験結果

各調合のスランブフローを図 6 に示す。いずれも目標通り 60cm 以上のフローが得られた。粗骨材かさ容積が 0.5m³/m³ の場合は、硬砂岩系を除くと、粗骨材最大寸法が小さいほどスランブフローが小さくなる傾向となった。これは粗骨材の表面積が増えるためと考えられる。一方、粗骨材かさ容積を 0.3m³/m³ まで少なくすると、最大寸法が小さくなくてもスランブフローは低下せず、逆に大きくなった。粗骨材の表面積が増えても十分なマトリクス量があるため流動性の低下が生じず、逆に大きな粗骨材が無いほうが流動時の抵抗が生じにくかったためと考えられる。なお、空気量は、いずれも目標範囲で、流紋岩系のかさ容積 0.3m³/m³、最大寸法 15mm の条件で 3.7%

表 6 実験の因子水準（シリーズ II）

因 子	水 準
粗骨材の岩種	硬砂岩系，安山岩系，流紋岩系
粗骨材最大寸法	20，15(13 ^{注)} ，10mm
粗骨材かさ容積	0.3，0.5m ³ /m ³

注) 6 号砕石

表 7 使用材料（シリーズ II）

種 類	産地・性質
セメント	高強度コンクリート用セメント（密度 3.01g/cm ³ ）
細骨材	石英系（密度 2.60 g/cm ³ ，吸水率 0%，最大径 0.4mm）
粗骨材	硬砂岩系（密度 2.66 g/cm ³ ，実積率 ^{注)} 61.0，61.0，55.8%）
	安山岩系（密度 2.62 g/cm ³ ，実積率 ^{注)} 60.6，58.3，60.1%）
	流紋岩系（密度 2.59 g/cm ³ ，実積率 ^{注)} 57.8，57.4，57.7%）
化学混和剤	特殊ポリカルボン酸系化学混和剤，消泡剤

注) 順に最大寸法 20，15(13)mm，10mm の値

表 8 調合条件（シリーズ II）

水結合材比 (%)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位水量 (kg/m ³)
10	60 以上	3±1.0	20	0.5	120
			15(13)		
			10		
			15(13)	0.3	139
			10		

表 9 試験項目および試験方法（シリーズ II）

区 分	試験項目および試験方法
フレッシュコンクリート	スランブフロー (JIS A 1150)
	空気量 (JIS A 1128)
硬化コンクリート ^{注)}	圧縮強度 (JIS A 1128) φ10×20cm (N=3)
	ヤング係数 (JIS A 1149)，ポアソン比 (N=3)

注) 砕石の原石コア，スクリーニングモルタルも実施（φ5×10cm）

写真 1 原石骨材コア φ5×10 とコンクリート中の粗骨材の状況

と大きめであったが、他は 2.4～3.0% と安定していた。また、スクリーニングモルタルの空気量は、2.5～3.5% の範囲であった。

本検討の範囲では、コンクリートの流動性を高めるために最適な最大寸法、粗骨材かさ容積を明らかにすることはできないが、検討した範囲の調合で、10% と極めて低い水結合材比でも十分な流動性が確保できることが確認できた。今後、火災時の爆裂防止用の有機繊維

維や鋼繊維を混入した際の流動性について検討してゆく必要がある。

(2) 原石コア、スクリーニングモルタル、コンクリートの力学特性

図7に圧縮強度およびヤング係数の試験結果を示す。碎石の原石コア強度を比較すると、堆積岩である硬砂岩系は、ばらつきが比較的小さく、圧縮強度の平均値は 350N/mm^2 程度と高かった。安山岩系は、全般的に圧縮強度が低く、碎石のうち約3割を占める風化部は、一般部に比べて圧縮強度、ヤング係数ともに小さかった。流紋岩系は、硬質部については高い圧縮強度が得られているが、9割を占める一般部は 220N/mm^2 程度と低かった。しかし、ヤング係数については硬質部と一般部で圧縮強度ほどの差がみられなかった。

スクリーニングモルタルの圧縮強度は、粗骨材の種類によらず同等であった。養生 J+K の場合の圧縮強度が 340N/mm^2 程度であり、シリーズ I の同じ水結合材比で得られた 380N/mm^2 程度に比べ低かった。これはスクリーニングモルタルの空気量が2.5~3.5%と若干多いこと、5mmふるいを通じた粗骨材起源の粒子が含まれており、骨材の粒径が大きくなったことが理由として考えられる。

粗骨材の種類によるコンクリートの圧縮強度の違いは、標準養生ではほとんど強度差がないが、養生 J, J+K では差がみられ、流紋岩系が最も高く、次いで安山岩系、硬砂岩系の順となった。粗骨材の種類の違いによって 30N/mm^2 程度の強度差が生じている。これを碎石の原石コア強度と比較してみると、コンクリートの圧縮強度は、必ずしも粗骨材の原石コア強度と相関がみられない。 $50\sim 180\text{N/mm}^2$ 程度の高強度コンクリートを対象に、粗骨材のヤング係数が低いほうが圧縮強度は高くなるという報告³⁾があるが、本研究では、原石コアのヤング係数が高い流紋岩系を使用したコンクリートの圧縮強度が最も高くなった。既往の研究に比べ、圧縮強度が $150\sim 300\text{N/mm}^2$ と高い範囲を対象としていること、高強度コンクリートに適した粗骨材の中から、さらに強度発現に有利な粗骨材を検討していることが、このような違いとなった理由と考えられる。

流紋岩系のコンクリートの圧縮強度が最も高かったのに対し、碎石の原石コア（一般部）の強度が低かった理由として、 $\phi 5\times 10\text{cm}$ のコアは試験片が大きく、内在欠陥を含んでいた可能性がある。そこで、流紋岩系の原石の硬質部 A、一般部 B、風化部 C、風化部 D を2cm厚にスライスし、写真2に示す $\phi 1\times 2\text{cm}$ のコアを切り出し、両端面を研磨して専用球座を用いて圧縮試験を行った（ $N=10$ ）。比較のために、硬砂岩系と安山岩系の一般部についても試験を行った。図8に $\phi 1\times 2\text{cm}$ コアと $\phi 5\times 10\text{cm}$ コアの圧縮強度試験結果を比較して示す。硬砂岩系と安山岩系の一般部は、コア寸法による違いは比較的小さかった。これに対し流紋岩系では、 $\phi 1\times 2\text{cm}$ コア強度は、一般部で 300N/mm^2 を超える圧縮強度であり、風化部もばらつきがあるが平均で 300N/mm^2 を超えており、コンクリートの圧縮強度より高い結果となっている。 $\phi 5\times 10\text{cm}$ の一般部の原石コアには潜在欠陥があり、強度を低く評価していた可能性が考えられる。

図9に、スクリーニングモルタルとコンクリートの圧縮強度の比較を示す。左は凡例を粗骨材の最大寸法で区分し、右は粗骨材の種類で区分して示している。コンクリートの圧縮強度が $50\sim 180\text{N/mm}^2$ の場合は、ベースモルタルに対するコンクリートの強度比が0.8~1.0の範囲になることが報告³⁾されているが、圧縮強度がさらに高い本研究の範囲では、0.75~1.0の範囲となった。安定的にコンクリートの圧縮強度 300N/mm^2 を達成するためには、マトリクスモルタル

図6 各調合のコンクリートのスランプフロー

図7 原石コア、モルタルおよびコンクリートの圧縮特性

写真2 原石の小径コア（ $\phi 1\times 2\text{cm}$ ）試験体と専用球座

図8 $\phi 1\times 2\text{cm}$ と $\phi 5\times 10\text{cm}$ の原石コアの圧縮強度の比較

ルの圧縮強度として 400N/mm^2 程度必要と言える。

(3) 調合要因が力学特性に及ぼす影響

図10に、粗骨材の最大寸法とコンクリートの力学特性の関係を示す。いずれの粗骨材の種類、養生方法においても、粗骨材の最大寸法を小さくすることで圧縮強度、ヤング係数ともに高くなる傾向が

ある。粗骨材の最大寸法は 15(13)mm 以下とするのが良いと言える。

図 11 に、粗骨材かさ容積による力学特性の比較を示す。粗骨材かさ容積は、圧縮強度にはほとんど影響していないが、ヤング係数は、粗骨材かさ容積が大きいほうが若干高くなる傾向が認められる。

本実験では、流紋岩系で粗骨材最大寸法を 10mm、養生を J+K とすることで、コンクリートの圧縮強度 300N/mm² を達成できている。

(4) ポアソン比が強度発現性に及ぼす影響の検討

図 12 に、圧縮応力度が 10N/mm²、50N/mm²、それ以降の 50N/mm² 間隔、および最大圧縮応力度の 98% の時点における、原石コア、スクリーニングモルタルおよびコンクリートのポアソン比を示す。なお、コンクリートは粗骨材最大寸法 15(13)mm、かさ容積 0.5m³/m³ の場合であり、スクリーニングモルタルも同コンクリートから採取したものである。いずれも载荷当初のポアソン比は 0.2 程度だが、硬砂岩系と安山岩系の原石コアは、圧縮応力度が高くなるにつれポアソン比が大きくなっている。一方、流紋岩系は、圧縮応力度が高くなってもポアソン比が増大する傾向は無く、スクリーニングモルタルにの値に近い。岩石のポアソン比が応力度とともに高くなる理由は、内部に生じたマイクロクラックによる変形が、拘束のない横方向に進行するため⁴⁾と言われている。マトリクスモルタルと粗骨材のポアソン比の差が大きいと、不均質なひずみにより内部欠陥が生じやすく、このため、硬砂岩系の粗骨材は均質で圧縮強度が高いにも関わらず、コンクリートとしては圧縮強度が低くなったと考えられる。

4. まとめ

設計基準強度 300N/mm² 級のコンクリートを実現する材料・調合および養生方法について検討を行い、得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 細骨材の種類によって圧縮強度発現は大きく異なり、石英系の細骨材を使用した場合が実験の範囲で最も高い強度が得られる。
- (2) シリカフェームを含む高強度コンクリート用セメントを用い、90℃蒸気養生を 72 時間の後に、180℃加熱養生を施すことで、結合材の反応が進み、細孔構造が緻密化され圧縮強度が増進する。
- (3) 細骨材の種類、養生方法に加え、結合材を選定することで、圧縮強度 350～400N/mm² のモルタルが得られる。
- (4) 粗骨材の岩種、最大寸法は圧縮強度発現に大きく影響する。流紋岩系のものを用い粗骨材最大寸法を 10mm とすることで、概ね 300N/mm² の圧縮強度を達成できる。
- (5) 粗骨材の原石の圧縮強度が高く均質でも、必ずしもコンクリートの圧縮強度は高くない。マトリクスモルタルと粗骨材の高圧縮応力下でのポアソン比の違いが影響していると考えられる。

参考文献

- 1) Kenro MITSUI, Masaro KOJIMA, Toshio YONEZAWA, Masahiro SUGATA, Hirozo MIHASHI: DEVELOPMENT OF 150-200N/mm² HYBRID FIBER AND APPLICATION TO A BUILDING STRUCTURE, AIJ J. Technol. Des. Vol. 16, No. 32, pp.21-26, 2010.2 (in Japanese)
三井 健郎, 小島 正朗, 米澤 敏男, 菅田 昌宏, 三橋 博三: 設計基準強度 150～200N/mm² 超高強度繊維補強コンクリートの開発と実建物への適用, 日本建築学会技術報告集 第 16 巻 第 32 号, pp.21-26, 2010.2
- 2) 浅本晋吾, 塚原美晴, 伊藤貴康, 松井久仁雄: 200℃ に曝露された坑井セメントペーストの強度特性と物性の検討, 材料, 68 巻 6 号 pp.491-497, 2019.6
- 3) Satoshi WATANABE, Shusuke KUROIWA, Hiroshi JINNAI, and Satoru NAMIKI:

図 9 粗骨材種岩種と強度特性

図 10 粗骨材の最大寸法と強度特性

図 11 粗骨材かさ容積と強度発現

図 12 圧縮応力度におけるポアソン比

STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES OF COARSE AGGREGATE WHICH AFFECTS COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH STRENGTH CONCRETE, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 588, pp. 21-27, 2005.2 (in Japanese)

渡邊 悟士, 黒岩 秀介, 陣内 浩, 並木 哲: 高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 588 号, pp.21-27, 2005.2

- 4) 金子勝比古, 村田健司, 柴 拓海, 大見美智人: 花崗岩の弾性率とその評価— 岩盤の変形性の評価法に関する基礎的研究(第 2 報)—, 日本鉱業会誌, 103 (1187), pp.9-15, 1987.1

[2020 年 2 月 5 日原稿受理 2020 年 3 月 16 日採用決定]