

粗骨材の最大寸法と養生条件が高強度コンクリートの強度特性に及ぼす影響

(株)富士ピー・エス 正会員 工修 ○正木 守
(株)富士ピー・エス 正会員 工博 徳光 卓

Abstract

This research investigated the influence of the size of coarse aggregate on strength characteristic of the high-strength concrete. The compressive strength of the high-strength concrete became larger with using the small size coarse aggregate or using the mortar mixture under the condition of both same water-binder ratio and same curing condition. In the case of using Silica fume for a part of binders, the compressive strength of the acceleration-cured concrete was higher than the standard-cured concrete under the condition of both using the same coarse aggregate size and the same water-binder ratio.

Key words : maximum size of coarse aggregate, curing condition, strength of cement paste, silica fume

1. はじめに

近年、わが国では高層鉄筋コンクリート建築物を中心として設計基準強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超えるコンクリートの適用事例が増加してきている¹⁾。このような高強度コンクリートでは、粗骨材の品質がコンクリートの圧縮強度に大きな影響を及ぼす。そのため、一般的に高強度コンクリートの製造にあたっては、特別に選定した高品質の粗骨材を用いることが多い²⁾。しかし、最近では、良好な天然骨材資源が枯渇してきたばかりでなく、環境保全の観点から、骨材の採取や採掘に対する制約が増加し、良質な骨材を得るのが困難になりつつあり³⁾、特別に選定した骨材を用いなくとも高強度コンクリートを得る技術の確立が求められている。

この課題を克服するため、これまでにさまざまなアプローチが行われている。その中の一つが、粗骨材の最大寸法に着目したものであり、粗骨材の最大寸法が小さくなるほど圧縮強度は大きくなることが確認されている。これはモルタルと粗骨材との界面が狭くなり、骨材間の空隙が減少するとともに付着強度が増大するためとされている⁴⁾。日本ではコンクリート建築物に用いられる粗骨材の最大寸法は20mmが一般的であるが、既報の知見に従えば、同じ品質の粗骨材を用いる場合でも、その最大寸法を小さくすることで高い圧縮強度が得られると考えられる。すなわち、高強度コンクリート用に選定された粗骨材を用いなくとも、ある程度の圧縮強度を期待することができると考えられ、これは特定の天然骨材の枯渇防止に役立つ。粗骨材の最大寸法が高強度コンクリートの強度特性に及ぼす影響について言及された報告は多々あるが⁵⁾⁻⁷⁾、著者の知る限り、セメントペースト量を固定した条件の下で行われた報告はないようである。そこで、本研究では粗骨材の最大寸法を20mm, 15mm, 5mm(粗骨材無し)の3種類に設定し、粗骨材の最大寸法が高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を検討した。

また、設計基準強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超えるような高強度領域では、結合材の一部にシリカフュームを用いることが必須とされている。シリカフュームはポゾラン反応やセメント粒子の分散効果により、高強度コンクリートのフレッシュ性状や圧縮強度を大きく改善させる。通常のコンクリートにおいては、養生によりコンクリートに与えられた積算温度からコンクリートの強度発現を概ね予測することができる⁸⁾。しかし、シリカフュームを用いた高強度コンクリートにおいては、 60°C を超えるような高い温度履歴(例えば簡易断熱養生による温度履歴)によってシリカフュームが活性化された場合、同じ積算温度であっても高温養生した高強度コンクリートのほうが標準養生よりも圧縮強度が大きくなることが報

表-1 使用材料

結合材	早強ポルトランドセメント：C（比重 3.14 g/cm ³ ，ブレン比表面積 4510 cm ² /g）： 高炉スラグ微粉末：BS（比重 2.89 g/cm ³ ，ブレン比表面積 4490 cm ² /g）= 7:3 シリカフュームプレミックセメント：SFC（比重 3.06 g/cm ³ ，ブレン比表面積 5980 cm ² /g）
細骨材	福島県東白河郡棚倉産 硬質砂岩 砕砂 A（表乾密度 2.61 g/cm ³ ，吸水率 2.02 %）
粗骨材	福島県東白河郡棚倉産 硬質砂岩 砕石 2005（表乾密度 2.62 g/cm ³ ，吸水率 1.30 %） 福島県東白河郡棚倉産 硬質砂岩 砕石 1505（表乾密度 2.62 g/cm ³ ，吸水率 1.22 %）
化学混和剤	高性能減水剤

表-2 示方配合

配合名	W/B (%)	Gmax (mm)	Wc/Ws	C (kg)	SFC (kg)	BS (kg)	W (kg)	S (kg)	G (kg)	SP/B (%)
HB25-G20	25.0	20	0.98	459	-	197	164	671	913	0.8
HB25-G15	25.0	15	0.98	459	-	197	164	671	913	0.8
HB25-G0	25.0	5	0.42	459	-	197	164	1565	0	2.0
SFC20-G20	20.0	20	1.11	-	755	-	151	681	850	0.95
SFC20-G15	20.0	15	1.11	-	755	-	151	681	850	0.95
SFC20-G0	20.0	5	0.50	-	755	-	151	1516	0	2.25
SFC15-G20	15.0	20	1.95	-	980	-	147	502	850	1.2
SFC15-G15	15.0	15	1.95	-	980	-	147	502	850	1.2
SFC15-G0	15.0	5	0.73	-	980	-	147	1336	0	2.95

告されている⁹⁾⁻¹⁰⁾。そこで本研究では、前述した3種類の骨材を用いた高強度コンクリートについて、養生温度が圧縮強度に及ぼす影響も併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。結合材には早強ポルトランドセメント（C）とシリカフュームがプレミックされたセメント（以下SFC）を用いた。早強ポルトランドセメントを用いた配合では水和熱の抑制を目的として、セメント質量の30%を高炉スラグ微粉末で置換した（以下HB）。細骨材には福島県東白河郡棚倉産硬質砂岩砕砂、粗骨材には福島県東白河郡棚倉産硬質砂岩砕石を使用した。粗骨材は2005、1505の2種類を使用した。骨材の母岩の一軸圧縮強度は207.7N/mm²であった。化学混和剤にはポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能減水剤を使用し、空気量調整のために適宜消泡剤を使用した。

2.2 示方配合

実験で使用した示方配合を表-2に示す。配合名は結合材種類、水結合材比、粗骨材の最大寸法で表している。HB25とはHBを結合材とした配合の水結合材比25%を、SFC20、SFC15とはSFCを結合材とした配合のそれぞれ水結合材比20%、15%を意味している。また、ハイフン以降は骨材の条件を表しており、G20は粗骨材2005を、G15は粗骨材1505を用いた配合を表し、G0は粗骨材を用いない配合（モルタル）を表している。以下、これら略号を用いて説明する。水結合材比はセメントペースト強度の異なる3水準とし、それぞれのセメントペースト強度の配合において粗骨材の最大寸法を変化させた。G0の配合については、粗骨材の全数量を細骨材で体積置換した。目標スランプフロー、空気量は60±10cm、2.0±1.5%とし、それぞれ目標値内に入るように高性能減水剤の添加率を変更した。G0配合においては消泡剤を用いて空気量を調整した。

2.3 供試体作製および実験方法

練混ぜは水平二軸式強制練りミキサ (容量 60L) を用いて、モルタル先行練り方式で行った。練混ぜ量は 40L とした。練上がり後、スランブフローおよび空気量の試験を行い、結果が目標値内に収まっていることを確認した後、JIS A 1132 に従い圧縮強度試験用供試体 (φ100×200 mm) を 3 本ずつ作製した。標準養生供試体は材齢 1 日まで 20℃の室内にて養生し、それぞれ脱型後、材齢 7 日、28 日、56 日、91 日まで 20℃の水中で養生した。また、促進養生供試体は材齢 7 日までは標準養生と同様に 20℃水中で養生し、材齢 7 日で水中から取り出し、30~60℃に制御された蒸気養生室内にて材齢 28 日まで促進養生を行った¹¹⁾。

供試体の圧縮強度試験は所定の各材齢にて実施した。試験方法は、JIS A 1108 に従って、1 シリーズにつき 3 個の供試体について行い、3 個の試験結果の平均値をコンクリートの圧縮強度とした。積算温度 (°DD) は次式により求めた。

$$M = \sum (\theta + 10)$$

ここに、 M : 積算温度 (°DD)

θ : 日平均養生温度 (°C)

各材齢における積算温度は、標準養生においては 28 日: 840°DD, 56 日: 1680°DD, 91 日: 2730°DD, 促進養生においては 28 日: 1250°DD であった。

3. 実験結果と考察

3.1 骨材寸法の影響

標準養生した供試体の材齢とコンクリートの圧縮強度との関係を水結合材比ごとにまとめたものを図-1(a)~(c)に示した。図-1(a)に示す HB25 配合の場合、材齢 28 日において G15 の場合のコンクリートの圧縮強度が 3 種類の粗骨材の中で最も大きくなった。しかし、G0 の圧縮強度は材齢 56 日で最大となり、材齢 91 日で最も小さくなっていることから、HB25 配合については骨材寸法による圧縮強度への影響は小さいと判断できる。このことから、本実験で用いた骨材の場合、圧縮強度が 100~120N/mm²程度の領域ではペースト強度の影響のほうが粗骨材の最大寸法の影響よりも大きいと考えられる。

図-1(b)に示す SFC20 配合においては、G15 と G0 の圧縮強度は、ほぼ同様の増加傾向を示した。G20 については材齢 28 日の時点で圧縮強度が他の 2 種類よりも 10N/mm²程度小さくなる傾向が確認

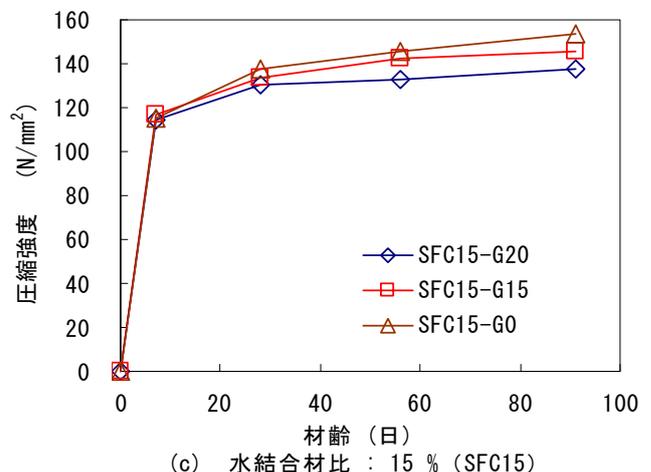
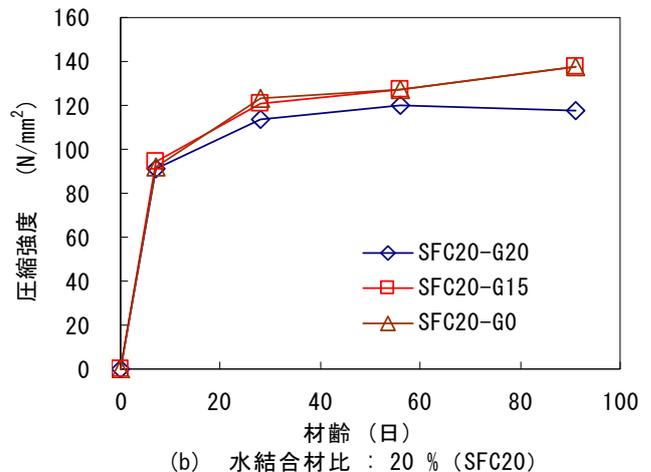
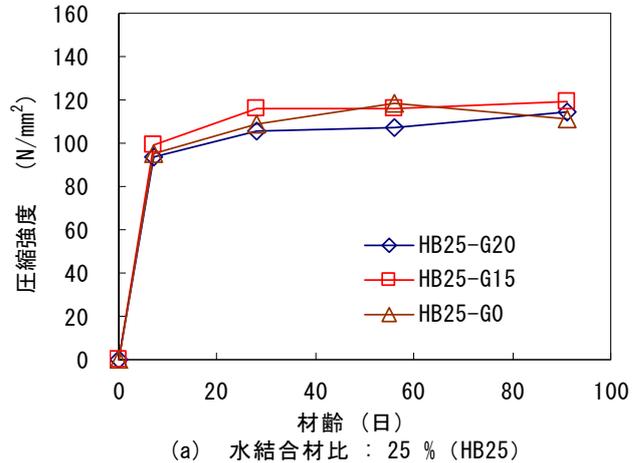


図-1 材齢と圧縮強度の関係

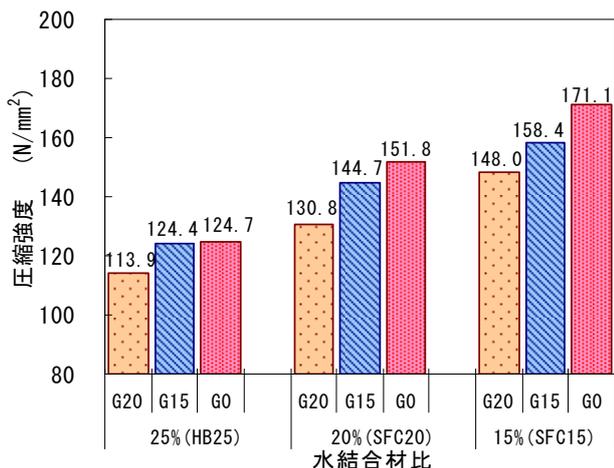


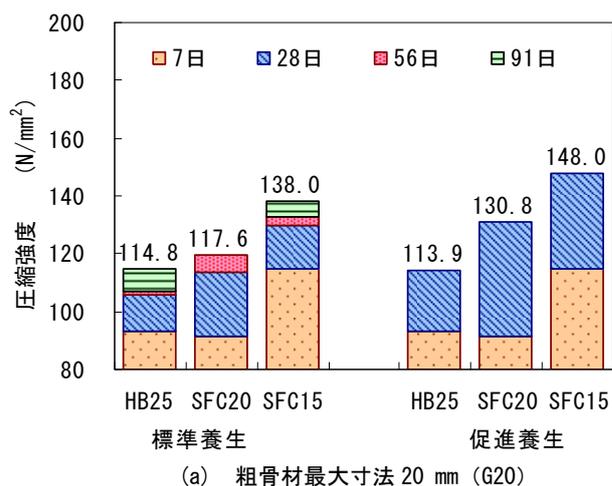
図-2 水結合材比と圧縮強度の関係 (促進養生)

された。その後の圧縮強度の増加はほぼ横ばいとなり、G0 との圧縮強度差は材齢 56 日で 7N/mm^2 程度、材齢 91 日で 20N/mm^2 程度となった。

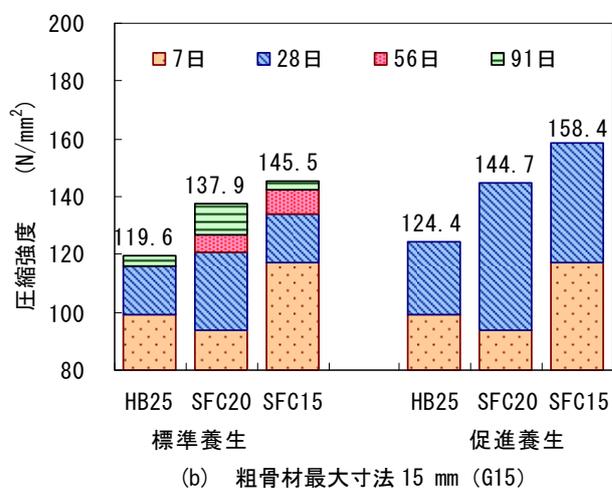
図-1 (c) に示す SFC15 配合の場合、各材齢において粗骨材の最大寸法が小さいほど圧縮強度が大きくなる傾向が確認された。G20 については 28 日以降強度の増加がほぼ横ばいとなり、G15 については 56 日以降強度の増加がほぼ横ばいとなった。材齢 91 日では、G20 に比べ、G15 は 8N/mm^2 程度、G0 では 16N/mm^2 程度圧縮強度が大きくなった。標準養生した SFC20 配合と SFC15 配合の圧縮強度は、G0 が最も高かった。さらに、材齢が長くなると圧縮強度への粗骨材最大寸法の影響は大きくなった。以上のことから、本実験で用いた骨材の場合、セメントペーストの強度が高くなるほど、コンクリートの圧縮強度に与える骨材の最大寸法の影響が大きくなることが確認された。その原因としては、既往の研究で明らかになっているように、コンクリート (モルタル) の構造が均質化されやすいためペースト部分の空隙や欠陥部位が減少し、さらに、せん断破壊の始発点となる骨材と結合材の境界面の滑り領域がより小さくなるためと考えられる。

3.2 養生温度の影響

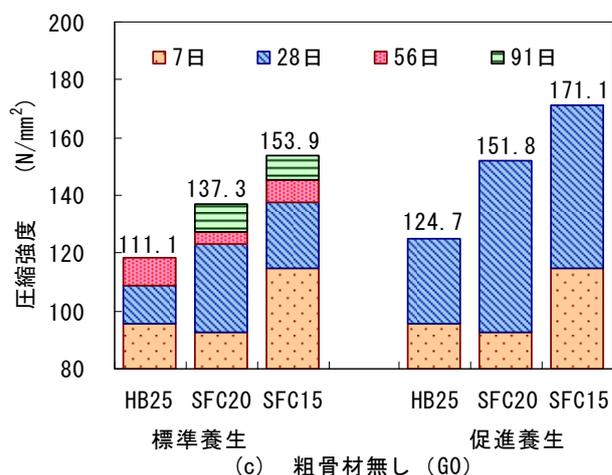
促進養生した供試体の材齢 28 日における圧縮強度を図-2 に示す。HB25 配合においては、G20 の圧縮強度は他の 2 種類の粗骨材よりも小さくなった。G15 と G0 の圧縮強度はほぼ同じであり、G20 よりおよそ 10N/mm^2 大きくなった。SFC20 配合においては、G15 と G0 の圧縮強度は、G20 よりそれぞれおよそ 14N/mm^2 、 21N/mm^2 大きくなった。SFC15 配合においては、G15 と G0 の圧縮強度は、G20 よりそれぞれおよそ 10N/mm^2 、 23N/mm^2 大きくなった。SFC15 配合では、G0 の圧縮強度がすべての配合の中で最も高くおよそ 171N/mm^2



(a) 粗骨材最大寸法 20 mm (G20)



(b) 粗骨材最大寸法 15 mm (G15)



(c) 粗骨材無し (G0)

図-3 養生条件と圧縮強度の関係

表-3 圧縮強度一覧と圧縮強度差

養生条件 と材齢	圧縮強度 (N/mm ²)					圧縮強度差 (N/mm ²)				
	配合	S7	S28	S56	S91	A28	A28-S28	A28-S91	S28-S7	S91-S7
HB25-G20	93.3	105.6	107.3	114.8	113.9	8	-1	12	22	21
HB25-G15	99.3	115.8	115.8	119.6	124.4	9	5	16	20	25
HB25-G0	95.4	109.1	118.3	111.1	124.7	16	14	14	16	29
SFC20-G20	91.5	113.6	119.9	117.6	130.8	17	13	22	26	39
SFC20-G15	94.1	120.7	126.9	137.9	144.7	24	7	27	44	51
SFC20-G0	92.3	123.2	127.3	137.3	151.8	29	15	31	45	59
SFC15-G20	114.7	130.0	133.1	138.0	148.0	18	10	15	23	33
SFC15-G15	116.9	133.8	142.2	145.5	158.4	25	13	17	29	41
SFC15-G0	115.0	137.8	145.2	153.9	171.1	33	17	23	39	56

S : 標準養生 A : 促進養生

となった。促進養生した場合も標準養生の場合と同様に、粗骨材の最大寸法が小さいほど圧縮強度は大きくなり、G20、G15、G0 配合間の圧縮強度差も大きくなる傾向が確認された。

養生条件とコンクリートの圧縮強度の関係を図-3(a)～(c)に示す。表-3にそれぞれの配合における圧縮強度試験結果の一覧と圧縮強度差を示す。圧縮強度の記号はSが標準養生、Aが促進養生を表し、添字は試験材齢を表している。促進養生供試体の圧縮強度は、材齢28日の標準養生供試体より全ての配合で大きくなり、その圧縮強度差(A28-S28)は8～33N/mm²であった。また、その圧縮強度差は水結合材比が低く、粗骨材の最大寸法が小さいほど大きくなった。HB25-G20を除けば、標準養生供試体の材齢91日より促進養生供試体の材齢28日のほうが圧縮強度は大きくなり、それらの圧縮強度差(A28-S91)は5～17N/mm²であった。両者の積算温度は、標準養生供試体の材齢91日が2730°DDであったのに対し促進養生供試体の材齢28日では1250°DDであった。促進養生した場合よりも2倍近い積算温度にも関わらず、標準養生供試体の圧縮強度が小さくなった原因は、養生温度の影響と考えられ、シリカフェームが60℃の高温養生で活性化されたことにより促進養生供試体の圧縮強度は大きくなったと考えられる。逆に言えば、標準養生の場合には、コンクリート中に未反応の結合材が多く残存していると考えられる。

また、標準養生と促進養生の供試体について、材齢7日から最終材齢までの強度増加を比較した場合、標準養生供試体(S91-S7)では16～45N/mm²、促進養生供試体(A28-S7)では21～59N/mm²となり、促進養生による圧縮強度の増加は標準養生より大きくなった。

以上をまとめると、粗骨材の最大寸法の小径化による圧縮強度の増進効果は、促進養生の条件下でも認められ、両者を組み合わせることで、効率的に圧縮強度を高めることが可能と考えられる。本方法による高強度コンクリートの製造は、養生温度の制御が比較的容易な工場製品において、特に有効な方法と考えられる。

4. まとめ

本研究では粗骨材の最大寸法を20mm、15mm、粗骨材無しの3種類に設定し、粗骨材の最大寸法が高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を検討した。また、高強度コンクリートの圧縮強度が養生条件によってどのような影響を受けるか併せて検討した。以下、今回の実験より得られた知見を示す。

- (1) 今回使用した骨材の場合、高強度コンクリートの圧縮強度は、 $100\sim 120\text{N/mm}^2$ を超える強度領域では、同じ水結合材比と養生条件下において、より小径の粗骨材を用いる配合か、粗骨材を使用しないモルタル配合において大きくなった。この影響は、ペーストの強度が粗骨材の強度より大きくなり、骨材と結合材の境界面の滑り領域の影響が小さくなったためと考えられる。
- (2) 結合材の一部にシリカフュームを使用する配合では、同じ水結合材比と粗骨材寸法において、促進養生したコンクリートの圧縮強度は標準養生したコンクリートの圧縮強度より大きくなった。これは 60°C を超える高温養生によってシリカフュームのポズラン反応が活性化されたためと考えられる。
- 以上の結果より、特別に選定された骨材を使用しない場合であっても、結合材の一部にシリカフュームを使用する配合であれば、粗骨材最大寸法の小径化と高温養生により高い強度発現が期待できる。粗骨材の小径化については、JIS A 5005：2009「コンクリート用砕石および砕砂」において砕石 1005 までが規定されたことから、比較的容易になるものと考えられる。骨材事情が悪化している昨今においては、この手法により特定の骨材の枯渇や品質の低下を低減できるものと考えられる。しかし、粗骨材を小径化するほど高強度コンクリートの弾性係数が減少する傾向にあるため、今後、その影響についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 黒岩秀介・河合邦彦・小田切智明・嵐山正樹： $F_c130\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工，コンクリート工学，JCI，Vol.42，No.10，pp.44-49，2004.10
- 2) 渡邊悟士・寺内利恵子・小田切智明・阿部剛士：高品質粗骨材選定技術による超高強度コンクリートの品質の安定化，コンクリート工学，JCI，Vol.45，No.2，pp.32-39，2007.2
- 3) 國府勝郎：コンクリート用骨材事情とその対応，コンクリート工学，JCI，Vol.46，No.5，pp.123-126，2008.5
- 4) 柿崎正義・枝広英俊：粗骨材の特性が超高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文報告集，AIJ，No.451，pp.19-32，1993.9
- 5) 野口貴文・小野山貫造・友沢史紀：高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響，セメント・コンクリート論文集，JCA，Vol.47，pp.684-689，1993
- 6) 野口貴文・友沢史紀：高強度コンクリートのひずみ特性値と圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響，セメント・コンクリート論文集，JCA，No.588，pp.22-28，1996.2
- 7) 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，AIJ，No.588，pp.21-27，2005.2
- 8) 金武漢・洪悦郎・鎌田英治：モルタルおよびコンクリートの積算温度と圧縮強度発現に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，AIJ，No.355，pp.1-6，1985.9
- 9) 菅俣匠・杉山知巳・梅沢健一・岡澤智：セメント-シリカフューム系結合材の水和反応と強度発現性の関係に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，JCI，Vol.26，No.1，pp.1287-1292，2004
- 10) 菅俣匠・小泉信一・原田健二・岡澤智： 150N/mm^2 級コンクリートの強度発現性に及ぼすセメント-シリカフューム系結合材の水和反応，コンクリート工学年次論文集，JCI，Vol.28，No.1，pp.1193-1198，2006
- 11) 一瀬賢一・神代泰道・都築正則：超高強度コンクリートの強度発現性状におよぼす養生方法の検討，コンクリート工学年次論文集，JCI，Vol.28，No.1，pp.1223-1228，2006