シリカフュームの品質が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及ぼす影響

INFLUENCE OF QUALITY OF SILICA FUME ON WORKABILITY AND STRENGTH IN STRUCTURE OF HIGH STRENGTH CONCRETE

陣内 浩 —*1 早川光敬 —*1
 廣島明男 —*2 久保田 賢 —*2
 石崎元嗣 —*3 米道 修 —*3

Hiroshi JINNAI —*1 Mitsutaka HAYAKAWA —*1
 Akio HIROSHIMA —*2 Ken KUBOTA —*2
 Motoshi ISHIZAKI —*3 Osamu YONEMICHI —*3

キーワード:

シリカフューム, 高強度コンクリート, 構造体コンクリート強度, ワークビリティ, 結合材, 混和材

Keywords:

Silica fume, High strength concrete, Strength in structure, Workability, Binder, Admixture

The influence of the quality of silica fume on the workability and strength of high strength concrete was investigated, and the following results were obtained. (1) High strength concretes using 4 types of silica fume were all found to have good workability. (2) There was no difference in the strength of high strength concrete structures using the 4 different types of silica. (3) High strength concretes using silica fume as a mixed binder and as an admixture were both found to satisfy quality requirements.

1. はじめに

シリカフュームは、高強度コンクリートの施工性および強度発現性状の改善において極めて有効な混和材料と考えられている。1990年代には、シリカフュームの品質がコンクリートの性質に与える影響について多数の報告^{1)~5)}がなされている。また、現在までにシリカフュームを設計基準強度 60N/mm² 以上の高強度コンクリートに適用した例も多数報告^{6) 7)}されてきた。

シリカフュームの研究が盛んに行われていた 1990 年代に入手できたシリカフュームは、主に北欧やカナダから輸入されたものであった。2000 年に制定された JIS A 6207「コンクリート用シリカフューム」⁸⁾の解説には、1990 年代後半に日本に流通していた代表的なシリカフュームを共通サンプルとして分析した結果が掲載されている。これによれば、1990 年代後半に用いられていたシリカフュームは、現行の JIS 規格を満足するものであったと考えられる。しかし、現在、日本の市場に存在するシリカフュームは、エジプト、ロシア、中国などからも輸入されており、品質も多様化している。また、1990 年代前半に行われていた研究では、現在の日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5「鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS5 と称する) 19 節 高強度コンクリート⁹⁾に示されるような構造体モデルを作製し、シリカフュームの品質が構造体コンクリート強度に及ぼす影響までを調べたものは極めて少ない。そこで、筆者らは現在の日本で入手できるノルウェー産、エジプト産、ロシア産、中国産のシリカフュームを対象とし、シリカフュームの品質が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及ぼす影響を検証した。

写真1 比較したシリカフュームの電子顕微鏡写真

2. 比較したシリカフュームの品質

実験に用いたシリカフュームは、ノルウェー産、エジプト産、ロシア産および中国産の4種類である。実験に用いたシリカフュームの電子顕微鏡を写真1に示す。これより、いずれのシリカフュームも形状の良い球形であることがわかる。また、エジプト産シリカフュームは若干粒形が大きいことがわかる。これは、後述する表1の比表面積の測定結果にも表れている。

*1 大成建設技術センター 建築技術研究所
 (〒245-0051 神奈川県横浜市名瀬町344-1)

*2 第一セメント(株) 営業部

*3 第一コンクリート(株) 生産部

*1 Building Engineering Research Institute, Technology Center, Taisei Corporation

*2 Sales Division, Daiichi Cement Corporation

*3 Production Department, Daiichi Concrete Corporation

表1 比較したシリカフェームの品質と規格値

		JISA 6207 ⁸⁾	日本建築学会 ¹⁰⁾	土木学会 ¹¹⁾	品 質			
産 地		-	-	-	ノルウェー	エジプト	ロシア	中国
記 号		-	-	-	N	E	R	C
密度 (g/cm ³)		-	-	-	2.24	2.23	2.26	2.27
二酸化けい素 (%)		85 以上	85 以上	85 以上	94.23	95.01	89.49	92.19
酸化マグネシウム (%)		5.0 以下	5.0 以下	5.0 以下	0.47	0.52	1.23	2.34
三酸化硫黄 (%)		3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	0.09	0.14	0.36	0.19
遊離酸化カルシウム (%)		1.0 以下	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0
遊離けい素 (%)		0.4 以下	-	-	0.1 未満	0.1 未満	0.38	0.1 未満
塩化物イオン (%)		0.1 以下	-	-	0.015	0.092	0.066	0.026
強熱減量 (%)		5.0 以下	5.0 以下	5.0 以下	0.88	1.23	2.23	0.97
湿分 (%)		3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	0.61	0.45	0.40	0.22
比表面積 (m ² /g)		15 以上	10 以上	10 以上	18.7	14.8	20.7	19.0
活性度指数 (%)	材齢 7 日	95 以上	90 以上	95 以上	112	93	96	110
	材齢 28 日	105 以上	100 以上	105 以上	121	103	104	117

実験に用いたシリカフェームの品質を表1に示す。一般にシリカフェームの密度は 2.2g/cm³ 程度と考えられているが、今回の実験に用いたロシア産や中国産シリカフェームは、密度の測定値が 2.26~2.27g/cm³ と若干高い値を示した。化学成分の中でも最も多く含まれる二酸化けい素の含有量は、ノルウェー産やエジプト産が 95%程度であるのに対し、ロシア産は 90%を下回っていた。強熱減量と湿分は、いずれのシリカフェームも規格値に対して十分低い値となった。比表面積は、他のものに比べてエジプト産シリカフェームの値が小さく、日本建築学会および土木学会の規格は満足するものの、JIS 規格の下限値を若干下回った。材齢 28 日における活性度指数は、ノルウェー産>中国産>ロシア産>エジプト産の順に高い値を示し、ロシア産とエジプト産は、日本建築学会の規格は満足するものの、JIS 規格に対しては若干下回る結果となった。

3. 室内実験

3.1 実験計画

室内実験では各産地のシリカフェームを用いた高強度コンクリートのフレッシュコンクリートの性能および圧縮強度を比較した。

使用材料を表2に示す。結合材としては、普通ポルトランドセメント、スラグ石膏およびシリカフェームを 7:2:1 の質量比で混ぜ合わせて使用した。混合するシリカフェームは表1に示す4種類とし、それぞれを混合した4種類の結合材を作製した。ここで使用しているスラグ石膏¹²⁾とは、高温下におけるコンクリートの圧縮強度の改善を目的として用いられる高炉スラグと石膏を混合した混和材（密度：約 2.9g/cm³、比表面積：約 7000 cm²/g）である。骨材としては、硬砂岩系の碎石・砕砂を使用した。混和剤としては、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。調合を表3に示す。水結合材比は 18%とした。練り混ぜ直後の空気量およびスランプフローの許容範囲は 2.0±1.0%および 60±10cm とした。練り混ぜには容量 60 リットルの水平二軸式強制練りミキサを使用し、1 回に 30 リットルづつ練り混ぜた。

試験項目を表4に示す。フレッシュコンクリートの試験では、練

表2 使用材料一覧

結合材 B (密度 2.99g/cm ³)	普通ポルトランドセメント OP	密度 3.16g/cm ³
	スラグ石膏 BG	密度 2.92g/cm ³
	シリカフェーム SF	表1に示す4種
細骨材 S	津久井産硬砂岩系砕砂（表乾密度 2.64g/cm ³ 、吸水率 1.1%、F.M.3.11）	
粗骨材 G	津久井産硬砂岩系砕石（表乾密度 2.66g/cm ³ 、吸水率 1.0%、粒形判定実積率 60.2%）	
混和剤 SP	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	

表3 調合（室内実験）

W/B (%)	空気量 (%)	スランプフロー (cm)	単位量 (kg/m ³)					
			結合材 B			水 W	細骨材 S	粗骨材 G
			OP	BG	SF*			
18	2.0	60	583	167	83	150	536	926

*シリカフェームの密度は 2.2g/cm² で計算している

表4 試験項目（室内実験）

フレッシュコンクリート	スランプフロー	JIS A 1150
	50cm フロー時間	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	温度計による
硬化コンクリート	全塩化物イオン量	JCI-SC4
	圧縮強度（材齢 7 日、28 日）	JIS A 1108

り混ぜ直後に表4の項目を試験するとともに、練り混ぜから 120 分後までのスランプフローと空気量の経時変化を確認した。硬化コンクリートの試験では、標準養生圧縮強度を確認した。また、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」¹³⁾によって、ブリーディング量が少ないためにフレッシュコンクリー

表5 練り混ぜ直後のコンクリートの試験結果と全塩化物量

シリカ フェーム	混和剤 使用量 (B×%)	スラン プロー (cm)	50cm フロー時間 (秒)	空気 量 (%)	コンクリート 温度 (℃)	全塩化 物量* (kg/m ³)
ノルウェー	1.60	66.5× 66.0	15.5	1.6	15.0	0.100 (0.068)
エジプト	1.55	62.0× 61.5	13.9	1.3	15.0	0.125 (0.132)
ロシア	2.00	61.5× 60.0	20.7	1.8	15.0	0.075 (0.110)
中国	1.50	61.5× 61.5	17.0	1.3	16.0	0.100 (0.077)

*コンクリートの単位容積質量を $2.5t/m^3$ として算出
() 内はコンクリートに含まれる塩化物量の計算値

トの状態では測定しにくいコンクリート中の全塩化物イオン量を測定した。

3.2 実験結果

練り混ぜ直後のフレッシュコンクリートの性状と全塩化物量測定結果、および材料試験結果から得られた全塩分量計算結果を表5に示す。試験室の室温は15℃程度であった。いずれのコンクリートも目標とするスランプフローが得られたが、ロシア産のシリカフェームを用いた場合は他に比べて混和剤の使用量が多くなった。目視の観察でも、ロシア産のシリカフェームを用いたコンクリートは若干粘性が高いように見えた。この傾向は、同等のスランプフローが得られたエジプト産のシリカフェームを使用したコンクリートに対し、50cmフロー時間が1.5倍程度かかることにも表れている。全塩化物イオン量に関しては、計算値と測定値に多少の違いがあるものの、測定値としてはJASS5 19節 高強度コンクリートの規定値を満足する結果となった。

スランプフローの経時変化を図1に、空気量の経時変化を図2に示す。これより、いずれのシリカフェームを使用したコンクリートも、目標とするスランプフローおよび空気量を、練り混ぜから120分間保持できたことがわかる。目視観察の結果、シリカフェームの種類により前述したようなフレッシュコンクリートの粘性の差が生じるものの、いずれのコンクリートも練り混ぜから120分間の範囲では型枠内に密実に充填できる流動性を保有していると考えられた。

標準養生した供試体の圧縮強度試験結果を図3に示す。いずれのシリカフェームを用いたコンクリートも材齢7日で100N/mm²を超える高い圧縮強度を発現した。次に、これらの絶対値を統計的に比較するため、練り混ぜた4種類のコンクリートが使用したシリカフェームの種類によらずに同じコンクリートであると仮定して、材齢毎に圧縮強度の平均値、標準偏差および変動係数を求めた。結果を表6に示す。データ数に限りがあるものの、4種類のコンクリートは統計上4.0%以下の変動係数であったことがわかる。一般に、同じ調合のコンクリートを製造したときの圧縮強度の変動係数は10%程度と考えられている。両者を直接比較することには議論の余地が残るが、変動係数10%を一つの安定製造の目安とした場合、今回検討範囲では、シリカフェームの種類によらず、ほぼ同じ圧縮強度のコンクリートが製造できたと考えられる。

ここまでの結果から、4種類の異なる産地のシリカフェームを用いたコンクリートの性能を比較すると、混和剤の使用量やフレッシュコンクリートの粘性に若干の違いが見られるものの、スランプフ

図1 スランプフローの経時変化 (室内実験)

図2 空気量の経時変化 (室内実験)

図3 圧縮強度試験結果 (室内実験)

表6 圧縮強度試験結果の統計的検討 (室内実験)

材齢	圧縮強度 (N/mm ²)					標準 偏差 (N/mm ²)	変動 係数 (%)
	N	E	R	C	平均		
7日	115	116	110	109	113	3.51	3.1
28日	134	128	129	127	130	3.11	2.4

ローや空気量は練混ぜから 120 分間目標値を保持することが可能であり、圧縮強度にも大きな違いが見られないことが確認できた。そこで、次に実大柱構造体モデルを用いた構造体コンクリート強度確認実験を行うこととした。

4. 構造体コンクリート強度確認実験

4.1 実験計画

構造体コンクリート強度確認実験では、各産地のシリカフュームを用いたコンクリートが、図 4 に示す実大の部材内で、どのような強度発現をするのかについて検討を行った。シリカフュームの使用方法としては、あらかじめ普通ポルトランドセメント、スラグ石膏およびシリカフュームを 7:2:1 の質量比で混合した 3 成分系の結合材として使用することを基本とした。また、エジプト産のシリカフュームでは、スラグ石膏とシリカフュームを 2:1 の質量比で混合した 2 成分系の混和材を製造し、普通ポルトランドセメントと別計量でミキサに投入することも検討した。実験に用いた材料は、室内実験と同じ表 1 および表 2 に示すものとした。混合した普通ポルトランドセメントは同じ工場で生産されたものであるが、異なるロットを使用したため、表 7 に示すような若干の品質の違いがあった。また、混合した結合材および混和材の品質は表 8 に示すものであり、セメント試験のような高い水結合材比では、ノルウェー産とロシア産のシリカフュームを用いた結合材には、強度発現で大きな差が表れた。

調査を表 9 に示す。結合材タイプの調査は各産地のシリカフュームを用いた 4 種類、混和材タイプの調査はエジプト産のシリカフュームを用いた 1 種類とした。コンクリートの水結合材比は、室内実験と同じ 18%とした。練混ぜには容量 3.0m³ の水平二軸強制練りミキサを用い、各調査とも 1.5m³ ずつ練り混ぜた。練り混ぜ方法はモルタル先練り方式とし、まずモルタルを練り混ぜ、その後、粗骨材を投入してコンクリートとした。練り混ぜたコンクリートはトラックアジテータに積載し、柱構造体モデルを打設する場所まで場内運搬した。試験項目を表 10 に示す。各調査とも表 10 に示すフレッシュコンクリートの試験を実施した後、図 4 に示す柱構造体モデルを打設するとともに、標準養生供試体採取した。

4.2 実験結果

各コンクリートの練り混ぜ時間を表 11 に示す。練り混ぜ時間はミキサの負荷を見ながら調整した。いずれのシリカフュームを用いても結合材タイプの練り混ぜ時間にはあまり大きな差は見られなかった。また、結合材タイプと混和材タイプの練り混ぜ時間にもあまり大きな差は見られなかった。

練り混ぜ直後の各コンクリートの試験結果を表 12 に示す。いずれのシリカフュームを用いても施工可能なコンクリートが得られたが、

図 4 柱構造体モデル

表 7 使用した普通ポルトランドセメント (OP) の品質 (実機試験)

シリカフュームの産地	ノルウェー・エジプト	ロシア・中国	エジプト
混合形態*	3 成分	3 成分	2 成分
比表面積 cm ² /g	3290	3270	3290
凝結	始発 h:m	2:20	2:10
	終結 h:m	3:05	3:00
圧縮強さ N/mm ²	3 日	28.6	28.9
	7 日	44.8	44.5
	28 日	63.6	62.4
酸化マグネシウム%	2.37	2.39	2.35
三酸化硫黄%	1.98	1.96	1.99
強熱減量%	0.83	0.75	0.65
全アルカリ%	0.53	0.55	0.54
塩化物イオン%	0.016	0.012	0.009

* 3 成分：普通ポルトランドセメント：スラグ石膏：シリカフューム=7:2:1
2 成分：スラグ石膏：シリカフューム=2:1

表 8 混合した結合材 (B) および混和材 (BG+SF) の品質 (実機試験)

シリカフュームの産地	ノルウェー	エジプト	ロシア	中国
混合形態*	3 成分	3 成分	2 成分	3 成分
密度 g/cm ³	2.97	3.00	2.70	2.98
圧縮強さ N/mm ²	3 日	27.8	22.5	18.6
	7 日	49.4	41.8	28.6
	28 日	71.2	65.0	44.8

* 3 成分：普通ポルトランドセメント：スラグ石膏：シリカフューム=7:2:1
2 成分：スラグ石膏：シリカフューム=2:1

表 9 調査 (実機試験)

調査	使用したシリカフューム	W/B (%)	空気量 (%)	スラグフロー (cm)	単位量 (kg/m ³)				
					結合材タイプ	混和材タイプ		水 W	細骨材 S
						結合材 B	OP BG+SF*		
結合材タイプ	ノルウェー、エジプト、ロシア、中国の 4 種	18	2.0	60	833	-	-	150	536
混和材タイプ	エジプトのみ	18	2.0	60	-	583	250	150	536

*シリカフュームの密度は 2.2g/cm³ で計算している

表 10 試験項目 (実機試験)

フレッシュ コンクリート	スランプフロー	JIS A 1150
	50cm フロー時間	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	温度計による
硬化 コンクリート	柱構造体モデルの中心温度	熱伝対による
	標準養生圧縮強度 (材齢 7 日、28 日)	JIS A 1108
	構造体コア圧縮強度 (材齢 7 日、28 日)	JIS A 1108

表 11 練り混ぜ時間 (実機試験)

	産地	モルタル	コンクリート
結合材 タイプ	ノルウェー	150 秒	120 秒
	エジプト	120 秒	120 秒
	ロシア	150 秒	120 秒
	中国	150 秒	120 秒
混和材タイプ	エジプト	150 秒	120 秒

室内実験と同様に、ロシア産のシリカフュームを用いると混和剤の使用量が増加し、フレッシュコンクリートの粘性も増加する傾向にあった。また、中国産のシリカフュームを用いると、混和剤の使用量が減少する傾向にあった。

混和材タイプは、まず結合材タイプと同量の混和剤で練り混ぜたが、スランプフローの値が大きく、骨材分離が生じたコンクリートとなったので廃棄した。そこで、表 12 に示す使用量で練り混ぜた。今回の実験では、結合材タイプと混和材タイプの相違点は、施工上あまり問題となる違いではないが、両者の違いは材料的な要因以外に練り混ぜるミキサの形式などにも影響されるため、今後もデータを蓄積したいと考えている。

柱構造体モデルの中心温度を図 5 に示す。各調合の柱構造体モデルの中心部の最高温度は、49.5～57.5℃の範囲の比較的広い範囲に分布した。柱が高温となる理由は、主に普通ポルトランドセメントの水和熱によるものであり、シリカフュームの種類に直接影響されるとは考えにくい。しかし、シリカフュームの違いによって生じた混和剤使用量の差に注目すると、混和剤使用量の多いコンクリートほど温度上昇勾配が緩やかになる傾向があること、また混和剤使用量の最も多いロシア産シリカフュームを用いたコンクリートが明らかに他のものより遅延したことがわかる。今回の実験ではこのような遅延傾向と柱構造体モデルの中心部の最高温度の関係を明らかにすることはできないが、シリカフュームの違いは間接的に結合材の水和や構造体コンクリートの最高温度に影響を及ぼすと推察される。

圧縮強度試験結果を図 6 に示す。標準養生供試体の圧縮強度は室内実験とはほぼ同じ結果であり、標準養生圧縮強度にシリカフュームの違いが与える影響はみられなかった。また、結合材タイプと混和材タイプを比較すると、シリカフューム使用方法に関わらず、標準養生供試体の圧縮強度は同等となると考えられた。

表 12 練り混ぜ直後のコンクリートの試験結果 (実機試験)

	シリカ フューム	混和剤 使用量 (B×%)	スランプ フロー (cm)	50cm フロー時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)
結合材 タイプ	ノルウェー	1.70	68.0× 65.5	9.4	1.0	13.0
	エジプト	1.70	62.0× 61.0	9.8	1.6	13.0
	ロシア	1.90	60.0× 57.5	26.1	1.3	13.0
	中国	1.20	61.0× 61.0	9.9	1.3	13.0
混和材 タイプ	エジプト	1.55	57.5× 54.5	19.3	1.3	15.0

図 5 柱構造体モデルの中心温度

図 6 圧縮強度試験結果 (実機試験)

コア供試体は各試験材齢毎に採取し、圧縮強度試験を行った。コア供試体の圧縮強度には大きなばらつきはなく、構造体コンクリート強度は標準養生供試体に比べてやや高めの圧縮強度となった。また、構造体コンクリート強度もシリカフェュームの産地や使用方法に関わらず、同等となると考えられた。

室内実験同様、5種類のコンクリートを同じものと仮定し、材齢毎に平均値、標準偏差および変動係数を求めた。結果を表13および表14に示す。これより、5種類のコンクリートは統計上5.0%の変動係数に収まる比較的近い圧縮強度を保有していることがわかる。また、同様の検討を標準養生供試体の静弾性係数について行ったものを表15に示すが、5種類のコンクリートは静弾性係数も同等であると考察される。

5. まとめ

4つの国から輸入されたシリカフェュームを用いた高強度コンクリートを製造し、施工性と構造体コンクリート強度の発現性状について検証した。また、シリカフェュームをミキサに投入するにあたり、セメント、スラグ石膏と3成分で混合した結合材タイプと、スラグ石膏と2成分で混合した混和材タイプを検討した。この結果、以下の結論を得た。

- (1) 現在の日本に流通しているシリカフェュームの品質を調べた結果、比表面積や活性度指数が必ずしもJIS規格に適合するものばかりではないことが確認できた。
- (2) 混和剤使用量とフレッシュコンクリートの粘性に多少の違いはあるものの、今回検討した4種類のシリカフェュームを用いた水結合材比18%の高強度コンクリートは、いずれも十分な施工性を保有していた。
- (3) 今回検討した4種類のシリカフェュームを用いた水結合材比18%の高強度コンクリートは、標準養生供試体および構造体コンクリートとして同等の圧縮強度を保有していた。
- (4) シリカフェュームをミキサに投入するにあたり、3成分系の結合材タイプを用いた場合と2成分系の混和材タイプを用いた場合では混和剤使用量に若干の違いが見られたが、いずれの場合でも施工可能なコンクリートを製造できた。また、いずれの方法でも標準養生供試体および構造体コンクリートとして同等の圧縮強度を得ることができた。

現在の日本に流通するシリカフェュームには、比表面積や活性度指数が現行のJIS規格に適合していないものも存在するが、十分な施工性と強度発現性能を得ることができることがわかった。ただし、本実験は実機試験を冬期という限定された期間に実施しており、今後、他の季節のデータなども蓄積する予定である。

謝辞：本実験にあたり、(株) ポゾリス物産のご協力を得た。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 中込 昭・岸谷孝一・江口 清・梶田秀幸：シリカフェュームの品質評価に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.13, No.1, pp.285~290,1991

表13 圧縮強度試験結果の統計的検討
(実機試験：標準養生供試体)

材 齢	圧縮強度 (N/mm ²)						標準 偏差 (N/mm ²)	変動 係数 (%)
	結合材タイプ				混和材 タイプ	平均		
	N	E	R	C	E			
7 日	117	106	112	113	120	114	5.32	4.7
28 日	134	133	132	132	135	133	1.30	1.0

表14 圧縮強度試験結果の統計的検討
(実機試験：構造体コンクリート)

材 齢	圧縮強度 (N/mm ²)						標準 偏差 (N/mm ²)	変動 係数 (%)
	結合材タイプ				混和材 タイプ	平均		
	N	E	R	C	E			
7 日	133	141	131	137	139	136	4.15	3.0
28 日	140	137	130	140	143	138	4.95	3.6

表15 静弾性係数の統計的検討
(実機試験：標準養生供試体)

材 齢	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)						標準 偏差 N/mm ²	変動 係数 %
	結合材タイプ				混和材 タイプ	平 均		
	N	E	R	C				
28 日	4.41	4.35	4.40	4.27	4.34	4.35	0.056	1.3

- 2) 米澤敏男・古賀吉則・朝倉悦郎・杉本 貢：シリカフェュームの物性が高強度コンクリートの性質に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.13, No.1, pp.291~296,1991
- 3) 三井健郎・米澤敏男・中島 誠・杉本 貢：シリカフェュームの物理化学的性質と高強度コンクリートの特性に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.13, No.1, pp.63~68,1993
- 4) 久田 真・長滝重義・大田信明・北出啓一郎：シリカフェュームの品質が高強度コンクリートの流動性および強度に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.15, No.1, pp.303~308,1993
- 5) 長滝重義：シリカフェュームに関する研究の現況,土木学会論文集, No.508/V-26, pp.1~14,1995.2
- 6) 陣内 浩・黒羽健嗣・並木 哲・黒岩秀介・川端一三・原 孝文・稲津秀明・後藤和正：設計基準強度 100N/mm² の高強度コンクリートを用いた超高層建物の施工,日本建築学会技術報告集,第9号, pp.7~12,1999.12
- 7) 三井健郎・米澤敏男・安藤慎一郎・横田 勉・手塚正道・木之下光男：高強度コンクリートの施工-CNT スーパーブリッジの施工,コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.45~50,1994.7
- 8) JISA 6207「コンクリート用シリカフェューム」
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 J A S S 5「鉄筋コンクリート工事」,2003
- 10) 日本建築学会：シリカフェュームを用いたコンクリートの調合設計・施工ガイドライン,1996.1
- 11) 土木学会：シリカフェュームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案),1995.10
- 12) 陣内 浩・黒羽健嗣・並木 哲・後藤和正：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.16, No.1, pp.255~260,1994
- 13) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防蝕に関する試験方法ならびに規準(案),1987.4

[2003年4月17日原稿受理 2003年7月29日採用決定]