

# 論文 超高性能コンクリートの耐久性に関する研究

田中 斉\*1・牛島 栄\*2・来海 豊\*3・星野 実\*4

**要旨:** 高強度, 高耐久および自己充填性 (高流動性) を兼ね備えた高性能コンクリートを対象として, 耐久性を中心として実験的な検討を行い, 次の結果を得た。

①超高強度域のコンクリートの圧縮強度に及ぼす空気量の影響, 静弾性係数, ポアソン比を把握した。②いずれの配合も, 空気量3.5%以上では良好な凍結融解抵抗性を示すが, 2.0%では高炉スラグ微粉末を用いた配合と超高強度域の配合のみに良好な凍結融解抵抗性が得られた。③目標配合強度が96, 120 (N/mm<sup>2</sup>)の範囲では, 促進による中性化は生じない。また, 目標配合強度60, 72 (N/mm<sup>2</sup>)では中性化進行は遅い。

**キーワード:** 高性能コンクリート, 凍結融解抵抗性, 促進中性化静弾性係数, ポアソン比

## 1. はじめに

近年, コンクリート構造物に対する大型化, 長寿命化等の社会要請に伴い, それらに用いるコンクリートについても高度化, 多様化が求められている。特に, 高強度, 高耐久や自己充填性等を特長とするコンクリートの研究・開発が盛んに推進されている。

本研究は, 高強度, 高耐久および自己充填性 (高流動性) を兼ね備えた, いわゆる高性能コンクリート<sup>1)</sup>を対象として, 耐久性を中心とする各種性能について実験的な検討を行ったものである。

なお, これらの研究は, 「S. Q. C構造物 開発・普及協会」に設置された耐久性部会の調査, 研究活動の一環として実施したものである。

## 2. 実験の概要

### 2. 1. 実験の計画

前述の高性能コンクリートの各種性質や耐久性を把握するために, 表-1に示す計画の実験を行った。配合強度は, 高強度コンクリートとして実用的な強度範囲を考慮して, 設計基準

強度60, 80, 100 (N/mm<sup>2</sup>)に於ける3水準とし, それら配合強度に応じて結合材の種類を選んだ。なお, 配合強度を得る材齢は, 結合材の強度発現性を考慮して材齢56日とした。また, 比較のために普通ポルトランドセメントを用いた通常のコンクリートについても同様の試験を行った。

表-1 実験計画

区分	水準・範囲
配合強度	72, 96, 120 および 29 [比較用] (N/mm <sup>2</sup> )
スラブ厚	60, 65 (cm)
空気量	2.0, 3.5, 5.0 (%)
結合材種類	1) 低熱ポルトランドセメント 2) 普通ポルトランドセメント+フライアッシュ 3) 普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末 4) 高強度・高流動コンクリート用ビークライトセメント 5) 高強度・高流動コンクリート用ビークライトセメント+シリカフューム 6) 普通ポルトランドセメント [比較用]
主な検討	圧縮強度, 静弾性係数 凍結融解, ポアソン比 促進中性化, 乾燥収縮

\*1 飛鳥建設(株)技術研究所 材料研究室 室長 (正会員)

\*2 青木建設(株)研究所 材料研究室 室長 工博 (正会員)

\*3 (財)鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 主幹技師 工博 (正会員)

\*4 竹本油脂(株)第三事業部 開発研究グループ 主任部員 (正会員)

## 2. 2 使用材料

用いた材料を表-2に示す。

## 2. 3 試験方法

試験方法を表-3に示す。

## 3. 実験に用いたコンクリート

### 3. 1 コンクリートの配合

用いたコンクリートの配合を表-4に示す。

### 3. 2 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、下記によった。

#### 1) 使用ミキサ・練混ぜ量

2軸強制練りミキサ(容量100ℓ)を用いて60~70ℓを練混ぜた。

#### 2) 練混ぜ手順・時間

ミキサにより下記の手順で練混ぜを行った。

①結合材と細骨材を混合した。

②更に練混ぜ水を加えて練混ぜた。

③続いて粗骨材を加えて練混ぜて、コンクリートとした。

また、上記③の練混ぜの際にミキサの負荷電流を測定し、配合や結合材の種類に応じた練混ぜ

ぜ時間の設定を行った。ミキサの負荷電流をもとに設定した練混ぜ方法を表-5に示す。

表-2 使用材料

材料種別	材料名および物性
セメント	普通ポルトランドセメント(OPC) (比重:3.16) 低熱ポルトランドセメント(LC) (比重:3.26) 高強度・高流動コンクリート用ハイライトセメント[BL] (比重:3.20)
混和材	フライアッシュ[FA] (比重:2.11, 比表面積: 3,480cm <sup>2</sup> /g) 高炉スラグ微粉末[BS] (比重:2.89, 比表面積: 5,830cm <sup>2</sup> /g) シリカフューム[SF] (比重:2.20, 比表面積:200,000cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	川砂(表乾比重:2.54, 吸水率:2.70%, 粗粒率:2.61)
粗骨材	硬質砂岩2005碎石(表乾比重:2.65, 粗粒率:6.52, 実積率:60.1%)
混和剤	高性能AE減水剤(リガリカルボン酸系) AE減水剤(リガリコンスルボン酸系)

表-4 コンクリートの配合

配合名	結合材種別	目標配合強度	目標空気量	目スランプリングプロ	水結合材比	細骨材率	単位水量
		(N/mm <sup>2</sup> )	(%)		(%)		
LC-60-C	LC	60	5.0	60.0	39.0	51.0	165
LC-72-A			2.0		53.3		
LC-72-B		72	3.5		36.0	52.2	
LC-72-C			5.0			51.1	
LC-96-C		96	5.0		29.0	49.3	
FA-60-C	OPC +FA	60	5.0	60.0	37.0	49.2	165
FA-72-A			2.0			51.0	
FA-72-B		72	3.5		33.0	49.8	
FA-72-C			5.0			48.6	
FA-96-C		96	5.0		27.0	46.2	
BS-60-C	OPC +BS	60	5.0	60.0	36.0	49.4	165
BS-72-A			2.0			51.2	
BS-72-B		72	3.5		32.0	50.1	
BS-72-C			5.0			48.8	
BS-96-C		96	5.0		26.0	46.4	
BL-72-B	BL	72	3.5	65.0	36.0	52.2	165
BL-96-A			2.0			52.1	
BL-96-B		96	3.5		30.0	50.9	
BL-96-C			5.0			49.7	
BL-120-B		120	3.5		20.0	45.3	
SF-96-B	BL +SF	96	3.5	65.0	30.0	50.3	165
SF-120-A			2.0			45.6	
SF-120-B		120	3.5		20.0	44.1	
SF-120-C			5.0			42.4	
OPC-29-C	OPC	29	5.0	*1 12.0	60.0	47.0	160

\*1: 目標スランプリング

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	
フレッシュコンクリート試験	スランプリング試験	JIS A 1101 による
	スランプリングフロー試験	土木学会「高流動コンクリートに関する技術の現状と課題」に示される試験方法(案)による
	70-50cm到達時間測定	(練上り15分後に試験を実施)
	V漏斗を用いた流下試験	
	U型容器を用いた充填性試験	
	空気量試験	
ミキサ負荷電流測定	クランプメータによる	
硬化コンクリート試験	圧縮強度試験	JIS A 1108 による(試験材齢28, 56, 91日)
	静弾性係数測定 ポアソン比測定	JSCE G 502 に準拠(試験材齢56日)
	凍結融解試験	JSCE G 501 による(試験開始材齢14日)
	乾燥収縮試験	JIS A 1129 による(試験開始材齢7日)
	促進中性化試験	日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」付1.コンクリートの促進中性化試験方法(案)による

#### 4. 実験結果および考察

##### 4. 1 実験結果

フレッシュ時および硬化後のコンクリートの実験結果を表-6に示す。

フレッシュ時の試験および供試体の採取は、コンクリートの練上がり後、15分間静置し切返しを行って実施した。

##### 4. 2 強度発現

###### (1) 水結合材比

今回の試験結果と水結合材比や空気量の関係から、水結合材比が25%および35%であり、かつ空気量が5%の場合における材齢に伴う強度発現の推移を推定したものを図-1に示す。

表-5 練混ぜ方法

投入材料	練混ぜ時間 (秒)								
	目標配合強度 および 配合区分	60, 72 (N/mm <sup>2</sup> )	96 (N/mm <sup>2</sup> )			120 (N/mm <sup>2</sup> )		29 (N/mm <sup>2</sup> )	
			LC BL SF	BS	FA	SF	BL	OPC	
結合材+細骨材	15	15			15		15		
練混ぜ水	30	45			60				
粗骨材	90	120	150	300	150	510	90		
合計時間	135	180	210	360	225	585	105		

表-6 試験結果

配合名	フレッシュコンクリート試験						硬化コンクリート試験							
	スランプリップロー (cm)	50cm フロー 到達時間 (秒)	V 漏斗 流下時間 (秒)	U 形 充填 性 試験 高さ (cm)	空 気 量 (%)	コン クリ ート 温 度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			静 弾 性 係 数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポ ア ソ ン 比	耐 久 性 指 数 (%)	促 進 性 化 深 さ (mm)	乾 燥 収 縮 率 (%)
							材齢 28日	材齢 56日	材齢 91日					
LC-60-C	57.5	6.3	—	—	4.7	19.5	53.3	69.0	75.0	33900	0.20	—	4.8	—
LC-72-A	57.0	5.9	—	—	2.3	20.0	70.5	82.7	95.3	35700	0.18	3	2.2	—
LC-72-B	57.0	7.2	—	—	3.7	20.0	67.0	78.8	86.3	33800	0.18	100	2.3	—
LC-72-C	59.5	6.3	9.4	35.5	5.3	20.0	58.8	65.4	74.8	33300	0.20	102	2.4	0.0880
LC-96-C	63.5	7.0	—	—	5.4	20.0	70.3	83.7	93.7	33700	0.18	—	0.7	—
FA-60-C	60.5	7.6	—	—	4.8	20.5	56.7	62.8	84.2	34700	0.20	—	7.2	—
FA-72-A	58.0	12.2	—	—	1.9	21.0	74.9	84.6	98.2	35200	0.22	17	3.9	—
FA-72-B	61.0	8.3	—	—	3.8	21.0	69.8	77.2	94.5	34900	0.21	102	4.8	—
FA-72-C	58.5	8.4	13.5	33.5	4.9	21.0	66.4	76.2	87.7	33600	0.20	101	4.9	0.0773
FA-96-C	62.5	9.2	—	—	4.7	21.5	86.3	91.9	100.5	36300	0.21	—	0.4	—
BS-60-C	61.0	5.3	—	—	5.1	20.0	68.5	75.1	84.2	34400	0.20	—	3.4	—
BS-72-A	62.0	7.8	—	—	1.9	20.0	85.3	95.4	98.2	36400	0.21	106	1.5	—
BS-72-B	59.5	7.8	—	—	3.6	20.0	83.6	87.1	94.5	37300	0.20	107	1.7	—
BS-72-C	59.5	9.6	12.1	35.0	4.9	20.0	74.9	82.7	87.7	34700	0.20	105	3.1	0.0749
BS-96-C	62.5	7.7	—	—	4.8	20.5	87.6	96.9	100.5	37000	0.21	—	0.4	—
BL-72-B	66.0	2.7	12.2	—	3.7	20.5	77.3	88.2	93.5	35300	0.20	—	1.4	—
BL-96-A	66.5	5.4	—	—	1.9	21.0	99.5	110.3	117.2	37600	0.20	28	0.5	—
BL-96-B	65.0	5.1	13.5	—	3.8	21.0	94.0	104.3	108.1	36400	0.20	100	0.0	—
BL-96-C	65.5	4.0	—	—	5.2	22.5	84.7	96.4	100.4	35900	0.21	104	0.4	0.0811
BL-120-B	64.5	12.5	44.4	35.5	3.3	26.5	122.1	131.0	138.2	40400	0.20	—	0.0	—
SF-96-B	66.0	3.7	—	—	3.3	20.5	97.2	109.4	118.1	37700	0.21	—	0.4	—
SF-120-A	61.0	13.4	—	—	2.1	21.5	135.8	142.3	149.8	41200	0.22	101	0.0	—
SF-120-B	68.5	7.2	29.1	35.0	4.0	22.5	124.8	131.3	139.0	39900	0.22	103	0.0	0.0648
SF-120-C	62.5	9.8	—	—	4.9	23.5	117.7	123.2	135.2	38700	0.20	102	0.0	—
OPC-29-C	スランプリップ 11.0	—	—	—	5.0	20.5	32.1	37.1	36.5	29700	0.18	97	12.0	0.0837

今回対象とした結合材の中では、低熱ポルトランドセメント[LC]が、やや強度発現の小さい傾向があり、それは水結合材比25%の場合に顕著にみられた。ただし、材齢91日には他の結合材と同様の強度となっている。

また、高強度・高流動コンクリート用ピーライトセメント[BL]は、その開発目的に合致して、強度発現の大きなものであった。その傾向は、水結合材比35%の場合に良く現れているが、強度の高い水結合材比25%では、やや小さくなっている。

### (2) 空気量の影響

材齢56日における圧縮強度と空気量の関係を図-2に示す。空気量が増すに従って圧縮強度が減少した。空気量1%増減あたりの強度値への影響は、3~7%程度であり、強度の高い配合の方がやや影響が大ききようである。この空気量が強度値に及ぼす影響の程度は、既往の報告<sup>2)</sup>による約2.8%よりやや大きなものであった。これは、今回の実験で比較的高強度

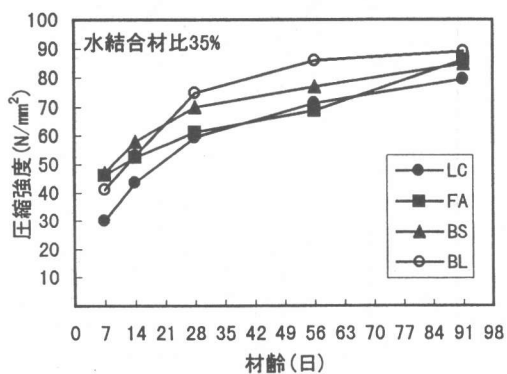
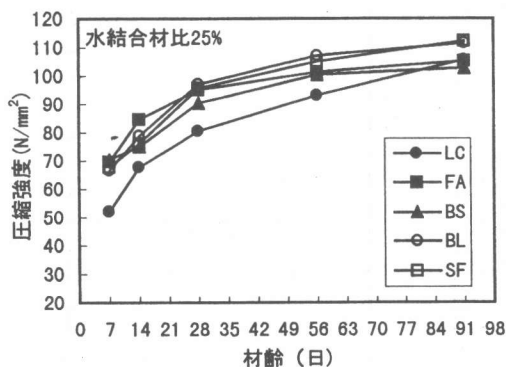


図-1 圧縮強度試験結果



域を対象としたために、空気量の影響が敏感に強度に影響したものと考えられる。

### 4. 3 静弾性係数

材齢56日における静弾性係数と圧縮強度の関係を図-3に示す。結合材の種類に関係なく、静弾性係数は圧縮強度の増加に伴い大きくなっている。

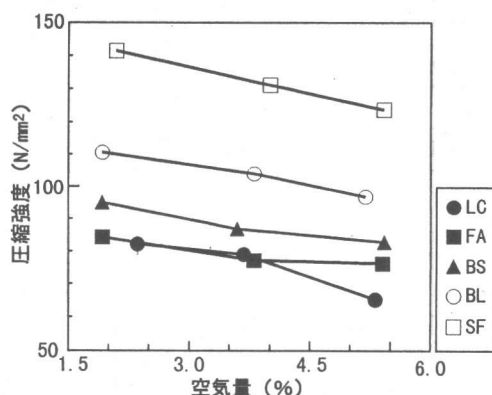


図-2 圧縮強度と空気量の関係(材齢56日)

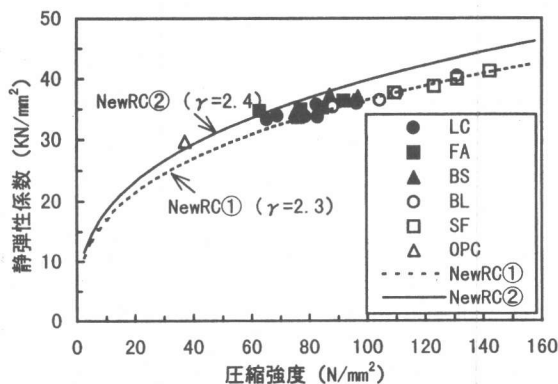


図-3 静弾性係数と圧縮強度の関係

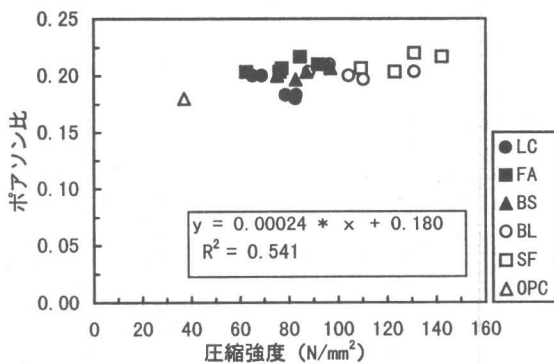


図-4 ポアソン比と圧縮強度の関係

今回の結果による静弾性係数と圧縮強度の関係を見ると、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」による提案式(New RC式)<sup>3)</sup>と一致するものであった。

#### 4. 4 ポアソン比

材齢56日におけるポアソン比と圧縮強度の関係を図-4に示す。ポアソン比は、結合材種類によって影響はみられなく、また圧縮強度との関係も明瞭ではない結果であった。

圧縮強度60~140(N/mm<sup>2</sup>)の範囲では、ポアソン比は0.18~0.23程度に分布している。これは、「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)同解説」(日本建築学会)の記述<sup>4)</sup>と一致しており、圧縮強度140(N/mm<sup>2</sup>)程度まではポアソン比が大きく変わらないといえる。

#### 4. 5 凍結融解抵抗性

300サイクルまでの相対動弾性係数の推移を図-5に示す。空気量を2.0%とした配合のうち、[BS-72-A]と[SF-120-A]は、凍結融解抵抗性が確保されていた。[BS-72-A]は高炉スラグ微粉末を添加しており、高炉スラグ微粉末を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性が増すという報告<sup>5)</sup>と一致するものであった。また、[SF-120-A]は材齢56日に142(N/mm<sup>2</sup>)の圧縮強度が得られており、高強度なコンクリートは空気量が少なくとも凍結融解抵抗性に優れるとする報告<sup>6)</sup>と一致するものであった。

図-2にも示したように、コンクリートの高強度化の観点からは、空気量は少ない方が有利であり、凍結融解抵抗性が得られるならば連行空気量の低減が望まれる。今回の実験では、空気量を2.0%を含めた3水準としたが、空気量3.5%ではいずれの配合においても十分に凍結融解抵抗性のあることが確認できた。ただし、2.0%では高炉スラグ微粉末を用いたものと、140(N/mm<sup>2</sup>)に達する高強度域で凍結融解抵抗性の確保されることがわかった。

今回は、従来方法に従い材齢14日から凍結

融解試験を開始しており、対象とした結合材の中には、硬化が進み本来の性能が得られるまで比較的材齢を要するものもあり、本来の性能が充分得られれば、今回の結果より少ない空気量でも凍結融解抵抗性を発揮するものもあると考える。現在、寒冷地での屋外暴露試験を並行中であり、この結果含めて高性能コンクリートの凍結融解抵抗性について後日に報告したい。

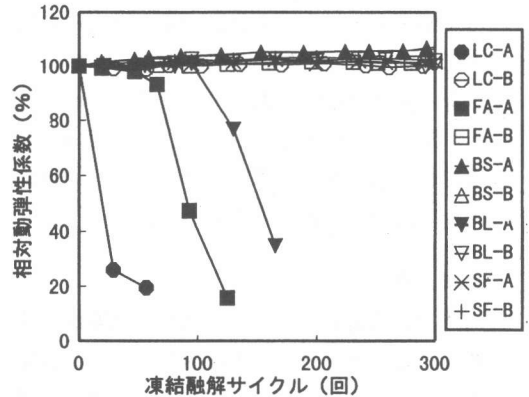


図-5 凍結融解試験結果

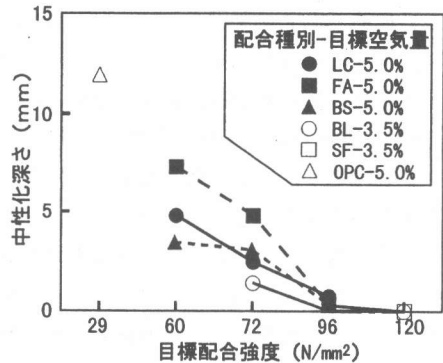


図-6 強度と中性化深さの関係

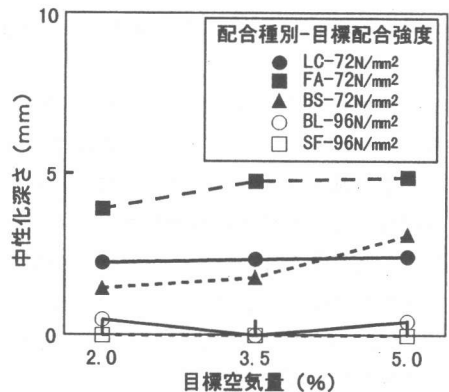


図-7 空気量と中性化深さの関係

#### 4. 6 促進中性化速度

目標配合強度と促進期間3ヶ月の中性化深さの関係を図-6に示す。目標配合強度の増加に伴い中性化の進行が遅くなり、目標配合強度が9.6(N/mm<sup>2</sup>)を超える範囲では、極めて中性化の進行が遅い。また、結合材の種類によっても中性化の進行に違いがみられた。

目標空気量と促進期間3ヶ月の中性化深さの関係を図-7に示す。空気量の違いによる中性化進行の違いは、明瞭にみられない。一般に、空気量が多いと中性化進行が速い<sup>7)</sup>とされているが、その傾向が現れなかった。その理由として明確ではないが、いずれもコンクリートが比較的高強度であったためと考えられる。

#### 5. まとめ

高強度、高耐久および自己充填性(高流動性)を兼ね備えたコンクリートを対象に、耐久性を中心として実験的な検討を行い以下の結果を得た。

- (1) 低熱ポルトランドセメント[LC]は、やや強度発現の小さい傾向がみられたが、材齢91日には他の結合材と同様の強度となった。高強度・高流動コンクリート用ビーライトセメント[BL]は、その開発目的に合致して、強度発現の大きなものであった。
- (2) 空気量の増加に従って圧縮強度が減少した。空気量1%増減あたりの強度値への影響は、3~7%程度であり、既報告よりやや大きい傾向であった。
- (3) 今回の結果による静弾性係数と圧縮強度の関係をみると[New RC提案式]と一致するものであった。
- (4) 圧縮強度60~140(N/mm<sup>2</sup>)の範囲では、ポアソン比は0.18~0.23程度であった。
- (5) 空気量3.5%以上については、いずれの配合も良好な凍結融解抵抗性が得られた。また、空気量を2.0%とした配合の中では、高炉スラグ微粉末を用いたものと、140(N/mm<sup>2</sup>)に達する高強度域の配合で良好な凍結融解抵抗性が得られた。
- (6) 配合強度の増加に伴い中性化の進行が遅

くなり、目標配合強度が9.6(N/mm<sup>2</sup>)を超える範囲では、極めて中性化の進行が遅い。

#### 6. むすび

S.Q.C構造物開発・普及協会では、「特別な補修・補強を必要としない期間が100年程度以上、かつ適切な維持管理により500年程度耐用するコンクリート構造物」を開発コンセプトとして、超高性能コンクリートに関する調査・研究を行っている。

今後、耐久性部会では、酸性雨の影響を観点としたコンクリート耐久性試験や屋外暴露および海洋暴露試験などを推進中であり、結果が得られ次第報告する予定である。

#### [謝辞]

本研究の計画、実施に当たっては、東京大学岡村甫教授、前川宏一教授、元東京大学助教授小澤一雅氏および(財)鉄道総合研究所のご指導を頂きましたことを付記し、謝辞と致します。

#### [耐久性部会構成会社](50音順)

青木建設、奥村組、花王、国光製鋼、熊谷組、サンフロー、新日鐵化学、住金鹿島鋳化、住友大阪セメント、大同コンクリート工業、竹本油脂、秩父小野田、鉄建建設、鉄道総合技術研究所、東亜建設工業、戸田建設、飛鳥建設、間組、フジタ、不動建設、ポゾリス物産、前田建設工業、三井建設、三菱マテリアル[(株)、(財)省略]

#### [参考文献]

- 1) 超高性能コンクリート構造物設計施工指針に関する委員会編:超高性能コンクリート構造物設計施工指針(案),1996.7
- 2) 羽木宏・榊田佳寛・阿部道彦・橋爪進:高強度コンクリートの空気量が圧縮強度および耐凍害性に及ぼす影響(その1圧縮強度),日本建築学会大会学術講演集A,PP.533~534,1989.10
- 3) (財)国土開発技術研究センター:建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発」平成4年度高強度コンクリート分科会報告書,1993.5
- 4) 日本建築学会編:高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)同解説,PP.36~37,1997.1
- 5) 加藤元久・榊田佳寛・阿部道彦ほか:高強度コンクリート用混和剤に関する研究(II)(その3.硬化コンクリートの乾燥収縮と凍結融解性),日本建築学会大会学術講演集A,PP.753~754,1991
- 6) 中黒英二・児玉和己・御所窪邦男・中川脩:高性能AE減水剤を用いたコンクリートの耐久性について,日曹マスター・ブルダース研究所報,NO.4,PP.17~24,1981
- 7) 柳啓・友沢史紀・榊田佳寛・阿部道彦・田中斉・和泉意登志:コンクリートの中性化進行予測に関する研究(その2中性化速度に及ぼす水セメント比、炭酸ガス濃度の影響),日本建築学会大会学術講演集A,PP.247~248,1987