

論文 自己収縮を低減した 150N/mm² 級超高強度コンクリートの耐久性能

日紫喜 剛啓^{*1}・盛田 行彦^{*2}・玉井 譲^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨：プレストレストコンクリート構造への適用を考慮して自己収縮を低減した 150N/mm² 級超高強度コンクリートを開発した。その基礎的な耐久性能を把握するため、自己収縮低減の有無を要因として、促進中性化試験、塩化物イオン拡散係数試験、アルカリ骨材反応試験ならびに凍結融解試験を実施した。その結果、自己収縮低減の有無にかかわらず優れた耐久性能を示すこと、自己収縮を低減した場合、塩化物イオン拡散係数が小さくなるなどの結果を得た。

キーワード：超高強度コンクリート、中性化、塩化物イオン拡散係数、アルカリ骨材反応

1. はじめに

圧縮強度 100N/mm² を超える超高強度コンクリートの実用化は、力学特性が向上するとともにセメントマトリックスの緻密化によってコンクリートの耐久性が飛躍的に向上することから、今後プレストレストコンクリート（以下、PC）構造を始めとする多様な土木構造物において構造の合理化と高耐久化に貢献するものと期待される。

これまで 100N/mm² を超える超高強度コンクリートの力学特性については、高層建物への適用に際して検討され始めている¹⁾が、耐久性、特に塩化物浸透性等についての報告は、極めて少ないのが現状である。

一方、高強度コンクリートでは大きな自己収縮が生じ²⁾、PC 構造における有効プレストレスの低下や初期ひび割れの原因となる可能性があり、力学特性のみならず耐久性にも影響を与えることが考えられる。

そこで、著者らは、コンクリート部材の軽量化や耐久性向上にメリットが大きいと考えられる 150 N/mm² 級の超高強度コンクリートの実用化と PC 構造への適用に当たって、自己収縮を低減した超高強度コンクリートを開発した³⁾。

ここでは、開発した超高強度コンクリートの耐久性能を把握するため、特に、自己収縮低減の有無に着目して、促進中性化試験、塩化物イオン拡散係数試験、アルカリ骨材反応試験ならびに凍結融解試験について実施したので、報告する。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-1 に本試験に用いたコンクリートの配合を、表-2 に材齢 91 日における圧縮強度ならびに自己収縮の試験結果を示す。

配合 B は自己収縮を低減しない基本配合を示している。水セメント比を 17%とすることによって圧縮強度 200N/mm² 程度を得た。セメントには低熱ポルトランドセメントに 10%のシリカフュームを混入したセメントを使用した。

超高強度コンクリートの自己収縮を低減する方法として、著者らは、①膨張材、②収縮低減剤、③人工軽量骨材を使用する方法の有効性を確認している³⁾。自己収縮の低減を図った今回の配合としては、人工軽量骨材（置換率：粗骨材容積の 20%）と収縮低減剤（添加率 C×0.5%）を併用した配合 JLR と収縮低減剤（添加率 C×

*1 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ リーダー 工修（正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ 研究員 工修（正会員）

*3 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 工修（正会員）

*4 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 工博（正会員）

表－1 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					SP 剤 (C×%)	RA 剤 (C×%)	AE 減水剤 (C×%)
			W	C	S	G	JL			
B	17.0	1.5	155	912 ^{※1}	622	798	—	1.5	—	—
JLR	17.0	1.5	155	912 ^{※1}	622	638	108	1.5	0.5	—
R	17.0	1.5	155	912 ^{※1}	622	798	—	1.5	2.0	—
NN	55.0	4.5	182	331 ^{※2}	790	996	—	—	—	0.25

C：セメント，S：細骨材，G：粗骨材，JL：人工軽量骨材，RA：収縮低減剤，SP：高性能減水剤

※1 シリカフュームを混入したセメント

※2 低熱ポルトランドセメント

表－2 圧縮強度ならびに自己収縮

試験結果（材齢 91 日）

配合	圧縮強度 (N/mm ²)	自己収縮 (×10 ⁻⁶)
B	199.0	500 程度
JLR	160.0	150 程度
R	176.0	—
NN	49.7	—

表－3 各試験項目と用いた配合の対比表

試験項目		配合			
		B	JLR	R	NN
促進中性化		○	○	—	—
塩化物イオン拡散係数		○	○	—	○
アルカリ骨材反応	元配合	○	○	○	—
	アルカリ増量	○	○	○	—
凍結融解		—	○	—	—

2.0%) を用いた配合 R とした。なお，人工軽量骨材は，内部の保有水が水和反応に伴う自己乾燥を補償する効果によって自己収縮の低減を図るものであり，比較的高い強度と高い吸水率を併せ持つもの⁴⁾を使用した。

表－3 に各試験項目と用いた配合との対比表を示す。各試験項目に用いた配合は B と JLR を基本としたが，塩化物イオン拡散係数試験では，水セメント比を一般に用いられている 55% に設定した配合 NN を比較用として検討した。アルカリ骨材反応試験では，収縮低減剤のみで自己収縮を低減した配合 R も比較用として検討した。また，凍結融解試験では，一般に人工軽量骨材を用いているコンクリートでは凍結融解抵抗性が劣ることから，配合 JLR のみを対象とした。

2.2 試験項目および試験方法

(1) 促進中性化試験

試験方法は，高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説⁵⁾の「コンクリートの促進中性化試験方法（案）」に準拠して実施した。

中性化深さの測定は，所定の材齢で供試体を割裂して，そのコンクリートの割裂面に 1% フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧して調

べる方法によって実施した。

試験条件は試験方法に準じて，温度 20±2℃，相対湿度 60±5%，炭酸ガス濃度 5±0.2% とした。計測は，促進中性化試験開始後を標準として，試験方法（案）に示された 1, 4, 8, 13, 26 週の他に 39, 52 週の材齢を追加して実施した。

(2) 塩化物イオン拡散係数試験

超高強度コンクリートは，塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が大きいと考えられるため，「JSCE-G571-2003 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」⁶⁾によって，実効拡散係数を求めることとした。供試体数は配合ごとに 3 本とした。また，参考として「JSCE-G572-2003 浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」⁶⁾も並行して実施した。

実効拡散係数の算出方法については，以下の式(1)，(2)に基づいて算出した。

$$J_{Cl} = \frac{V}{A} \frac{\Delta c_{Cl}}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで， J_{Cl} は塩化物イオンの定常状態における流束(mol/(cm²・年))， V は陽極側の溶液体積(L)， A は供試体断面積(cm²)， $\Delta C_{Cl}/\Delta t$ は陽極側塩化

物イオン濃度の増加割合((mol/L)/年)である。

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 D_e は実効拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 R は気体定数($8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)、 T は絶対温度測定値(K)、 Z_{Cl} は塩化物イオンの電荷($= -1$)、 F はファラデー定数($96,500\text{C}/\text{mol}$)、 C_{Cl} は陰極側の塩化物イオン濃度測定値(mol/L)、 $\Delta E - \Delta E_c$ は供試体表面間の測定電位(V)、 L は供試体厚さ(mm)である。

また、実効拡散係数と見掛けの拡散係数との関係は、前記規準案の附属書⁶⁾によれば、次式(3)で表される。

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (3)$$

ここで、 D_{ae} は電気泳動試験による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 k_1 はコンクリート表面におけるコンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣合いにかかわる係数、 k_2 はセメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象にかかわる係数である。なお、 k_1 、 k_2 は、規準案に示されているように W/C との関係で示されている。しかし、W/C が小さい領域ではデータがないため、今回の試験結果の整理においては、外挿することによって求めることとする。

(3) アルカリ骨材反応試験

超高強度コンクリートに使用する骨材は、安山岩を使用しており、「JIS A 1145-2001 骨材のアルカリシリカ反応性試験法（化学法）」では、無害であると確認済であるが、超高強度コンクリートでは単位セメント量が多く、アルカリ総量が Na_2O 換算で $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ を超える強アルカリのコンクリートとなる。そのため、このような強アルカリのコンクリートのアルカリシリカ反応に対する抵抗性を調査するためには、現状で最も確実な方法とされる「JCI-AAR-3-1987 コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法(コンクリート法)（案）」に準拠して試験を実施した。測定期間は、試験方法（案）では 6 ヶ月までとなっているが、10 ヶ月まで追加して実施した。

試験ケースは、1つの配合に対して、水酸化ナ

トリウムを添加しないでそのままの配合を用いた場合（アルカリ総量の計算値 $4.86\text{kg}/\text{m}^3$ ）と、その配合に対してアルカリ量の最大値を勘案し（各材料の最大アルカリ量の組合せ）、その差分を水酸化ナトリウムで補充した場合（アルカリ総量の計算値 $6.90\text{kg}/\text{m}^3$ ）の 2 水準を実施した。

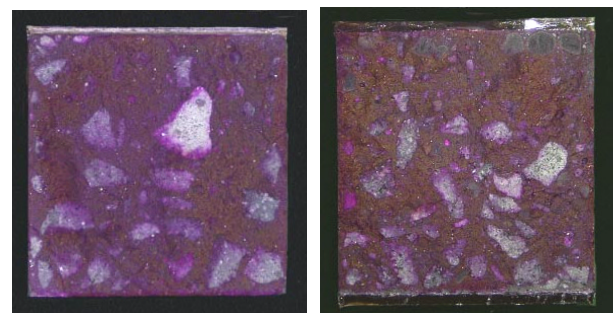
(4) 凍結融解試験

超高強度コンクリートの空気量は 1.5%程度であること、特に配合 JLR では人工軽量骨材を混入していることから、凍結融解抵抗性を確認することとした。凍結融解試験は「JIS A 1148-2001 コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して実施した。なお、試験ケースは試験機器の都合から、配合 JLR について、上記試験法の B 法（気中凍結水中融解試験方法）で実施した。凍結融解試験は 300 サイクルまで実施し、相対動弾性係数によって凍結融解抵抗性を評価した。

3. 試験結果

(1) 促進中性化試験

写真－1 に促進中性化試験結果の一例として、促進中性化開始後 52 週の試験結果を示す。試験は 52 週まで追加して実施したが、写真で分かるように、中性化深さの計測結果は自己収縮低減対策の有無にかかわらず、いずれも 0 mm の結果となり、優れた抵抗性を有することが確認できた。陣内ら¹⁾も、W/C=15%とした圧縮強度 $150\text{N}/\text{mm}^2$ 級のコンクリートについて促進中性化試験を実施して同様な結果を報告しており、超高強度コンクリートの中性化の照査は、一般の使



(1) B 配合

(2) JLR 配合

写真－1 促進中性化試験結果（促進後 52 週）

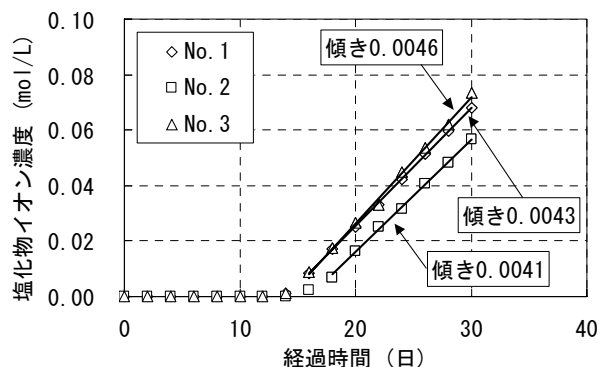
用条件では実用上無視できると言える。

(2) 塩化物イオン拡散係数試験

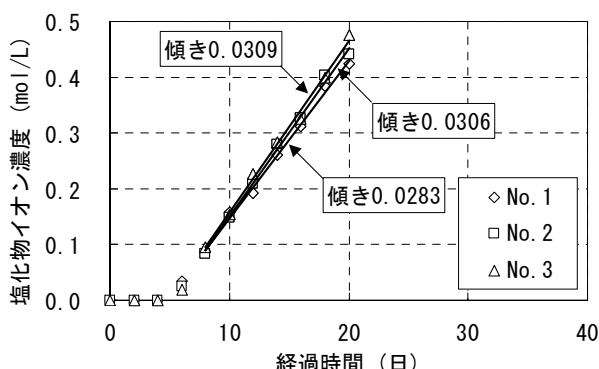
図-1 に一例として、配合 JLR および NN の供試体における陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化を示す。水セメント比が 55% である配合 NN の場合では、通電開始後 6 日で陽極側に塩化物イオンが検出され始めているが、配合 JLR のケースでは水セメント比が 17% と非常に小さいため検出開始まで 15 日程度かかっている。また、配合 JLR では塩化物イオン濃度も配合 NN の場合と比べて極めて小さな値となった。定常状態に達してからはいずれの配合の供試体についても値のばらつきは少なく、塩化物イオン濃度はほぼ直線的に増加している。定常状態に達してからの直線の傾きについては、直線的に増加していると判断した点から 7 測定点について最小二乗法を用いて算出した。

表-4 に各配合の実効拡散係数の平均値を示す。今回の試験で得られた実効拡散係数は比較用の NN が $2.76 \text{ (cm}^2\text{/年)}$ であったのに対して、超高強度コンクリートの JLR では $0.407 \text{ (cm}^2\text{/年)}$ 、B では $0.675 \text{ (cm}^2\text{/年)}$ と極めて小さい値であった。実効拡散係数を NN との比率で見れば、NN/JLR = 6.78, NN/B = 4.09 となり、超高強度コンクリートの場合、通常の水セメント比の低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの約 1/7 ~ 1/4 の実効拡散係数であることが分かった。また、収縮低減を図った JLR の実効拡散係数は、B の約 2/3 と小さくなった。

水セメント比の小さい高強度コンクリートでは、骨材粒子が周囲のセメントペーストマトリックスの収縮を拘束することにより微細なひび割れの領域が存在するが、この領域に水分供給があった場合には、微細ひび割れが低減するという報告⁷⁾がある。このことを考慮すると、配合 JLR の実効拡散係数が小さくなったのは、軽量骨材の自己乾燥補償効果による収縮低減によって骨材粒子周りの微細ひび割れ領域が低減されてマトリックスの緻密性が強化され、軽量骨材のポーラス性の影響よりも上回ったためと考え



(1) 配合 JLR



(2) 配合 NN

図-1 塩化物イオン濃度の経時変化

表-4 実効拡散係数の比較

配合	実効拡散係数 D_e (cm ² /年)
B	0.675
JLR	0.407
N	2.76

られる。

今回は試験方法に準拠して試験開始材齢を 28 日目からとしたが、超高強度コンクリートに用いているセメントは低熱ポルトランドセメントをベースとしているので、水和反応も進行中であり、養生日数を大きくすることによりさらなる実効拡散係数の減少が考えられる。

次に、見掛けの拡散係数 D_{ae} について検討するため、規準案附属書⁶⁾の参考図の低熱ポルトランドセメントの場合を参照して、 $k_1 \cdot k_2$ をグラフから外挿することによって求めた。

表-5 には、 $k_1 \cdot k_2$ の外挿曲線を次式(4)として、 D_{ae} を算出した結果を示す。

$$k_1 \cdot k_2 = 2.461(W/C)^{1.439} \quad (4)$$

また、並行して実施した浸せき試験結果 (試

験 6 ヶ月) から求めた見かけの拡散係数 D_{ap} も併せて示す。JLR および B については、6 ヶ月では表面から 0.5cm しか塩分を検出できず、 D_{ap} を算出することができなかった。

見掛けの拡散係数 D_{ae} としては、超高強度コンクリートは、NN に比べて 1/20~1/37 になっており、通常のコンクリートと比較して塩化物イオンの拡散に対する抵抗性に優れていることが確認できた。なお、NN において、 D_{ae} と D_{ap} と比較した場合、 D_{ae} の方が若干小さく評価されていることが分かる。

塩化物イオンの拡散に対する抵抗性をより明確にするため、土木学会コンクリート標準示方書に準じて、一例としてコンクリートの塩化物イオン濃度について次式(5)により計算した結果を図-2 に示す。

$$C_d = \gamma_{cl} C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) \quad (5)$$

ここで、 C_d は鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値(kg/m³)、 γ_{cl} は C_d のばらつきを考慮した安全係数(一般; 1.3, 高流動コンクリート; 1.1)、 C_0 はコンクリート表面における塩化物イオン濃度(cm²/年)、 c はかぶり(mm)、 t は年数(年)、 D_d は塩化物イオンに対する設計拡散係数(cm²/年)、 $\operatorname{erf}(X)$ は誤差関数である。

計算条件としては、 $c = 35\text{mm}$ (NN についてのみ、 $c = 200\text{mm}$ も計算)、 $\gamma_{cl} = 1.0$ 、 $C_0 = 2.0$ (海岸からの距離 500m の場合)、 $D_d = D_{ap}$ とした。なお、B および JLR の D_{ap} は、NN における D_{ae} と D_{ap} との比率が変わらないものとして算出した。

鋼材腐食発生限界濃度を土木学会コンクリート標準示方書に準じて 1.2 kg/m³ とした場合、図から分かるように、NN ($c = 35\text{mm}$) の場合は 5 年程度で限界値に達するのに対し、B および JLR の超高強度コンクリートの場合は、かぶり 35mm でも 100 年以上経過しても達しないことが分かる。また、NN において超高強度コンクリートと同程度の塩化物イオン濃度に抑えるためには、かぶりが 200mm 程度必要であることが分かる。

以上より、超高強度コンクリートは普通コン

表-5 見かけの拡散係数 D_{ae} および D_{ap}

ケース	W/C	D_e	$k_1 \cdot k_2$ 設定値	$D_{ae} = k_1 k_2 \cdot D_e$	D_{ap}
B	0.17	0.675	0.192	0.130	—
JLR	0.17	0.407	0.192	0.078	—
NN	0.55	2.760	1.041	2.874	3.40

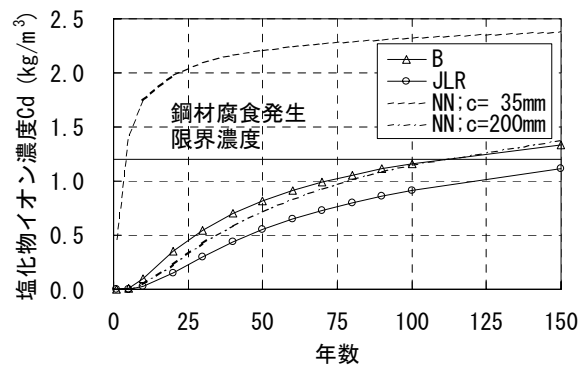


図-2 塩化物イオン濃度の推定

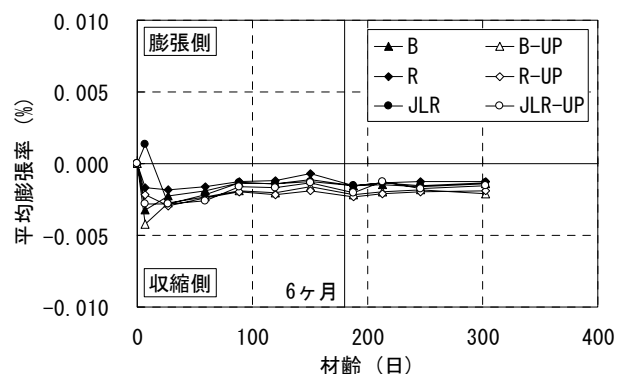


図-3 アルカリ骨材反応試験の結果

クリートに比べて優れた塩化物イオンの拡散に対する抵抗性を有することが確認できた。

(3) アルカリ骨材反応試験

図-3 にアルカリ骨材反応試験の結果として、各配合における平均膨張率の結果を示す。いずれのケースも収縮側であり、かつ膨張側への増加も 10 ヶ月時点でもほとんど見られない。また、総アルカリ量の違いによる差も見られないことから、アルカリ骨材反応は特に問題のないことが分かる。試験方法によると 6 ヶ月後に 0.1% 未満であれば、「反応性なし」と判断されるため、十分な安全性を有していると言える。

(4) 凍結融解試験

図-4 に配合 JLR の相対動弾性係数の履歴を示す。気中凍結水中融解の条件ではあるが、凍

結融解 300 サイクルまで相対動弾性係数の低下はほとんど見られなかった。文献 8) では、高強度コンクリートの凍結融解抵抗性について整理し、W/C が 26~27% の場合、AE コンクリートでなくても十分な凍結融解抵抗性が得られる限界点と報告している。今回の超高強度コンクリートは W/C が 17% であり、マトリックスがさらに緻密化されているため、人工軽量骨材を混入した場合でも、高い凍結融解抵抗性を示したものと考えられる。

4. まとめ

自己収縮を低減した 150 N/mm² 級超高強度コンクリートの耐久性能について促進中性化、塩化物イオン拡散係数、アルカリ骨材反応および凍結融解の面から、各種試験を実施して検討した。以下に検討結果の概要をまとめる。

- 1) 中性化促進試験の結果から、自己収縮低減の有無にかかわらず、52 週後も中性化の進行は認められず、超高強度コンクリートは中性化に対して優れた抵抗性を有する。
- 2) 電気泳動法試験によって塩化物イオンの実効拡散係数を求めたが、超高強度コンクリートは普通コンクリート（低熱ポルトランドセメント，W/C=55%）の約 1/4~1/7 程度の値となり、自己収縮を低減した場合の拡散係数がより小さかった。これを見かけの拡散係数として評価した場合には、普通コンクリートの 1/20~1/37 に相当し、海岸からの距離 500 m、かぶり 35mm で試算すると、100 年以上経過しても鋼材腐食発生限界濃度に達しない塩化物イオンの侵入抵抗性を有する。
- 3) アルカリ総量の多い超高強度コンクリートのアルカリ骨材反応試験をコンクリート法に準拠して、無調整のアルカリ量と規定された最大のアルカリ量を仮定した場合についてそれぞれ試験を実施したが、いずれも有意な膨張性状は認められず、特に問題はない。
- 4) 凍結融解試験 B 法に準拠して凍結融解に対する抵抗性を試験したが、人工軽量骨材を使

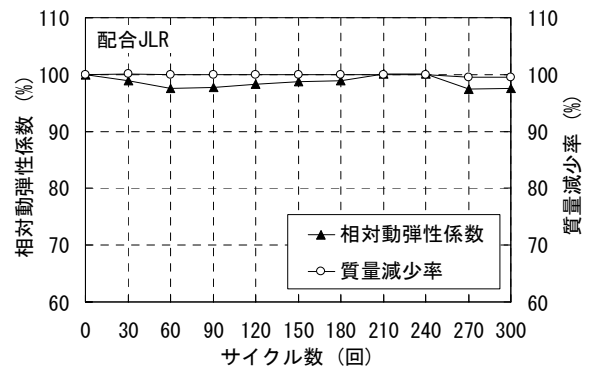


図-4 凍結融解試験の結果

用した配合においても、300 サイクルまで劣化は見られず、凍結融解抵抗性を有するものと考えられる。

参考文献

- 1) 陣内 浩ほか：実用化を迎えた 150N/mm² 級超高強度コンクリートの性能，セメントコンクリート，No.678，2003
- 2) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996
- 3) 日紫喜剛啓ほか：低収縮型超高強度コンクリートの開発について，コンクリートテクノ，Vol.22，No.11，pp.9-12，2003
- 4) 笠井 浩ほか：石炭灰人工骨材を用いたコンクリートのセルフキュアリング効果に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，2000
- 5) 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，1991
- 6) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向，コンクリート技術シリーズ 55，2003
- 7) 五十嵐心一ほか：若材齢における高強度コンクリートの内部組織の特徴と自己収縮拘束特性，土木学会論文集，No.704/V-55，2002
- 8) 国土交通省土木研究所，プレストレストコンクリート建設業協会：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法に関する共同研究報告書，2001