

# 論文 海洋環境に暴露されたコンクリートにおける酸素拡散性状と鉄筋腐食の関係

山路 徹\*1・小牟禮建一\*2・濱田秀則\*3

要旨：海洋コンクリート構造物における酸素拡散性状と鉄筋腐食状況の関係について検討を行うため、海上数メートルの位置に 15 年間暴露されたコンクリート試験体における塩化物イオン浸透状況、酸素拡散性状、鉄筋腐食状況などについて測定を行った。その結果、コンクリートの含水率と酸素拡散性状には良い相関があり、また、コンクリート中の鉄筋腐食速度と酸素拡散性状の間には良い相関があることが確認された。

キーワード：海洋環境、コンクリート、塩化物イオン、鉄筋腐食、酸素拡散性状

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性は鉄筋腐食に依存することが多い。海洋環境に位置するコンクリート構造物において、この鉄筋腐食を開始させる要因となるのは外部から浸透してくる塩化物イオンである。また、鉄筋腐食の進行速度は鉄筋への酸素の供給量や塩化物イオン量等に依存する。この塩化物イオンおよび酸素の供給量は暴露環境により大きく影響を受ける。

海洋環境に位置するコンクリート構造物は、海中部・干満帯・飛沫帯と、鉛直方向に少し位置が変わるだけでコンクリートの含水率が大きく変化し、すなわち、コンクリートの酸素拡散性状も大きく変化する。より合理的な劣化予測を行うためには、コンクリートの酸素拡散性状を考慮する必要がある。しかしながら、コンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす酸素拡散性状の影響について実験的に検討した事例は少ない。

本研究では、コンクリートの酸素拡散性状と鉄筋腐食状況の関係について検討を行うため、海水飛沫を受ける実際の環境に 15 年間暴露されたコンクリート試験体を用いて、コンクリートの酸素拡散係数等のコンクリート品質に関する調査およびコンクリート中の鉄筋腐食状況に関する調査を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体形状を図 - 1 に、試験体配合を表 - 1 に示す。W/C は 37%および 50%の 2 種類である。使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は台湾産川砂（密度 2.66g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.17%），粗骨材は酒匂川産砕石（最大粒径 20mm，密度 2.76g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.06%），練混ぜ水は水道水である。試験体は打設後 1 日で脱型し、材齢 3 日まで湿潤養生、材齢 28 日まで室内気中養生を行った。また、試験体は 15\*15\*80cm の角柱であり、13mm の丸鋼が

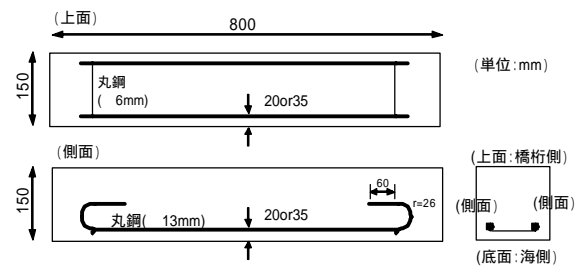


図 - 1 試験体

表 - 1 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
37	36.4	178	481	609	1080
50	44.5	165	330	804	1061

\*1 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官 工修 (正会員)

\*2 ショーボンド建設(株) 営業本部 (正会員)

\*3 独立行政法人港湾空港技術研究所 材料研究室長 工博 (正会員)

表 - 2 試験体一覧

試験体	W/C (%)	かぶり (mm)	暴露環境	各調査時の試験体状況							
				8年	10年	12年	15年				
37-20	37	20	P4	S	-	S	S	-	-	S	-
37-35	37	35		S	S	S	S	S	S	S	-
50-35	50	35		S	S	S	C	S	S	C	-
50X-35	50	35	P1	S	S	S	S	S	S	S	C

S: 健全, C: ひび割れ発生

2本埋設されている。かぶりは20および35mmの2種類である。試験体一覧を表-2に示す。暴露後8,10,12および15年時に各1~2体ずつ試験に供した。なお,50X-35において,試験体にひび割れが生じていたものは50X-35(C),健全なものは50X-35(S)と呼ぶことにする。

### 2.2 暴露環境

沖縄県那覇港の臨港道路に位置するA橋橋脚P1およびP4の側面に架台を設置し,その上に試験体を暴露した。この場所は海上約6~7mの位置にあり,常時波しぶきや潮風の影響を受ける厳しい塩害環境にある。また,P1およびP4のいずれも海上に位置しているが,P1の方がP4より海岸線近くに位置しており,波の跳ね返りを受けやすい状況にある。なお,試験体50X-35は塩化物イオンの浸透を早めるため,A橋近くの波除堤壁面(干満帯)に15ヶ月間暴露した後,P1位置に移動させたものである。コンクリート表面にフジツボ等の貝類の付着跡が残っていたことから,その当時海水に浸漬していた時間は比較的長かったものと推測される。

### 2.3 試験内容

#### (1) 外観観察

コンクリート表面に生じたひび割れなどの観察を行った。

#### (2) 圧縮強度

暴露15年後に採取したコア(68mm)を用い,JIS A 1108に準拠して圧縮試験を行った。

#### (3) 中性化深さ

暴露15年後の試験体端部の切断面に対して,フェノールフタレイン1%溶液を噴霧後,中性化深さを20点測定し,その平均値を求めた。

#### (4) 全塩化物イオン量

暴露15年後の試験体底面(海側)のひび割

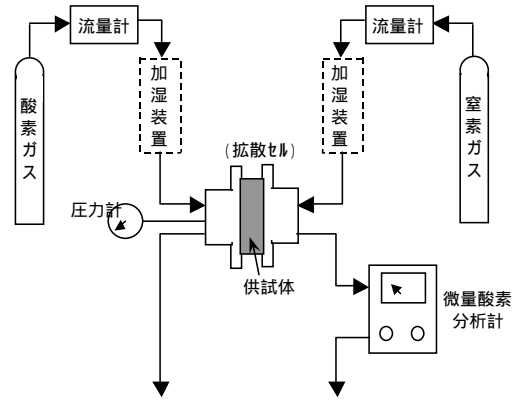


図 - 2 酸素拡散試験

れの無い箇所からコア(68mm)を採取し,全塩化物イオン量をJCI-SC4に準拠して測定した。試料採取位置は0~10,15~25,30~40,50~60mmの4点である。また,測定した全塩化物イオン量分布をFickの第二法則の解で近似させることにより,表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数を求めた。

#### (5) コンクリートの酸素拡散係数

暴露15年後の試験体底面(海側)のひび割れの無い箇所から採取したコア(68mm)を用い,JCI-DD5に準拠してコンクリートの酸素拡散係数を求めた(図-2参照)。試験体数は1体である。試験体の片方から一定圧力・流量の酸素ガスを流し,反対側に出てくる酸素濃度が定常状態になったときの値を式(1)に代入し,酸素拡散係数が算出される<sup>1)</sup>。

$$D_{O_2} = \frac{Q \cdot L}{S \cdot \Delta C} \quad (1)$$

ここで, $D_{O_2}$ : 酸素拡散係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $Q$ : 1気圧下で供試体を通る酸素の流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ ),  $L$ : 供試体厚さ(4 cm),  $S$ : 供試体の測定部分の面積( $12.6 \text{ cm}^2$ ),  $C$ : 供試体両面の酸素濃度差(1.00)である。酸素拡散係数の値はコンクリートの含水状態により値が変化するため,含水率を設定する必要があるが,現地の状態が不明なため,特に含水率の調整は行わず,試験体を切り出した後,室内に約2ヶ月間放置した後,試験を行った。なお,含水率の測定は試験後の重量,飽和時および絶乾時の重量を測定することにより

求めた。

(6) 空隙率

暴露 15 年後の試験体底面から採取したコアの表面部(0-10mm)および内部(50-60mm)の 2 箇所において、粗骨材を取り除きながら 5mm 程度に砕いたモルタル片を採取し、水銀圧入法により細孔径分布測定を行い、空隙率を求めた。測定した細孔径の範囲は 0.003-400 μm である。

(7) 鉄筋腐食状況

コンクリート中の鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積率を測定した。また、腐食が激しいものについては腐食減量を測定した。腐食面積率の測定は腐食した箇所(点錆も含む)を透明フィルムに写し取ることにより行った。腐食減量は、腐食が認められなかった鉄筋の重量から、鉄筋をクエン酸水素ニアンモニウム 10%溶液に 1 日浸漬させ、錆を除去した際の重量を減じることにより算出した。

3. 試験結果

3.1 外観

表 - 2 に調査時の試験体外観状況を示す。50-35 においては、暴露 10 年後の 2 体のうち 1 体と暴露 15 年後の 1 体において鉄筋腐食ひび割れが見られた。最大ひび割れ幅はそれぞれ 1.6, 1.1mm であった。50X-35 においては、暴露 15 年後までは鉄筋腐食ひび割れは見られず、暴露 15 年後の 2 体のうち 1 体に鉄筋腐食ひび割れが発生していた。最大ひび割れ幅は 0.7mm であった。一方、37-20, 37-35 についてはひび割れなどの変状は認められなかった。

3.2 圧縮強度

表 - 3 にコアの圧縮強度を示す。37-35 は 50-35 および 50X-35(C)の約 2 倍となっており、W/C の影響が明確に現れている。

表 - 3 圧縮強度および中性化深さ

	37-20	37-35	50-35	50X-35(C)
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	-	51.2	26.5	31.9
中性化深さ(mm)	1.5	1.9	5.6	1.0

3.3 中性化深さ

表 - 3 に平均中性化深さを示す。全体的に値は小さいが、50-35 が最も深くまで中性化しており、圧縮強度同様に W/C の違いが現れている。しかしながら、50X-35(C)の値は 37-35 に比べて小さくなっている。これは、暴露環境 P1 は P4 よりも海水飛沫を受けやすい、すなわちより湿潤した環境であったことが影響していると考えられる。また、初期に 15 ヶ月干満帯に暴露されており、その際にコンクリートの微細構造がより緻密になっていた可能性も考えられる。

3.4 全塩化物イオン量

図 - 3 に全塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)量分布を示す。W/C=50%に比べて、W/C=37%の方が内部への浸透量は少なくなっている。また、37-35 の鉄筋位置(かぶり 35mm)においては腐食発生限界 Cl<sup>-</sup>濃度 1.2kg/m<sup>3</sup> をかなり下回っているが、かぶりが 20mm と小さい 37-20 の鉄筋位置においては 2.0kg/m<sup>3</sup> 程度の Cl<sup>-</sup>が存在している。一方、50-35 については、コンクリート表面部で Cl<sup>-</sup>量が減少している。これは中性化により、セメント水和物中に固定化されていた Cl<sup>-</sup>が溶解

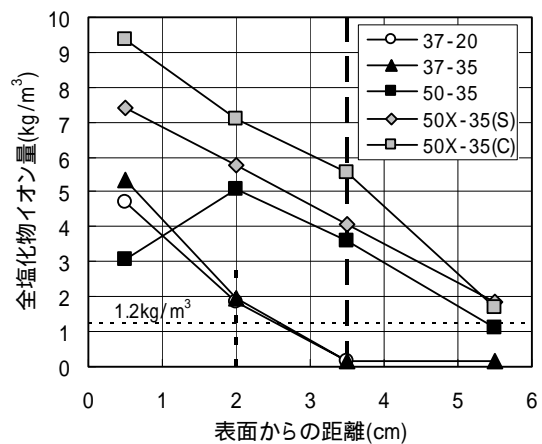


図 - 3 全塩化物イオン量分布

表 - 4 表面塩化物イオン量および拡散係数

	暴露環境	C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D (× 10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)
37-20	P4	5.9	0.37
		6.9	0.39
		8.4	1.68
50X-35(S)	P1	8.1	2.52
50X-35(C)	P1	10.4	2.28

し、コンクリート内部へ移動したためと考えられる<sup>3)</sup>。鉄筋位置においては  $3.0\text{kg/m}^3$  以上の  $\text{Cl}^-$  が存在していた。50X-35 においては、ひび割れが生じていた 50X-35(C) の方が、50X-35(S) より多く内部へ浸透していた。また、同じ W/C である 50-35 と比べて、表面・内部のいずれにおいても量が多くなっている。この理由としては、初期に干満帯に暴露されていたことが考えられる。また、暴露環境 P1 の方が飛沫を受けやすい環境であったことも影響していると考えられる。

表 - 4 に表面塩化物イオン量  $C_0$  および見かけの拡散係数  $D$  の値を示す。なお、算出の際に 50-35 の表面部のデータは無視した。 $C_0$  は暴露環境の異なる 50X-35 が他に比べて大きな値を示している。 $D$  については W/C=37% の方が拡散係数は小さくなっており、W/C=50% と比べて約  $1/6 \sim 1/4$  程度である。

### 3.5 酸素拡散性状

図 - 4 にコンクリートの含水率と酸素拡散係数の関係を示す。なお、コンクリートが水で飽和している時の含水率を 100% とした。試験体

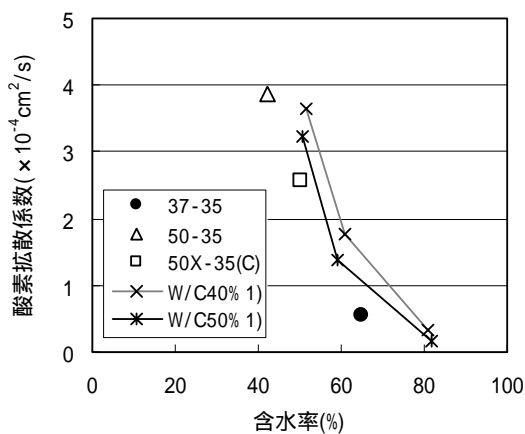


図 - 4 含水率と酸素拡散係数の関係

表 - 5 空隙率

	37-35	50-35	50X-35(C)
表面 (0-10mm)	0.145	0.156	0.174
内部 (50-60mm)	0.162	0.162	0.183

(単位: cc/cc)

によって含水率の値は異なっており、含水率が大きいほど酸素拡散係数は小さくなっている。また、図中に文献 1) における結果を示しているが、今回の結果はほぼ同様な傾向を示した。コンクリートの含水状態が試験体によって異なっていた理由としては、W/C および暴露環境が異なっていたことに起因していると考えられる。すなわち、W/C が小さいもの (37-35) は組織が緻密であるために、現地環境において乾燥を受けにくかったものと考えられる。50-35 と 50X-35(C) の違いは、暴露環境の違いに起因したものと考えられる。

また、今回試験体搬入から試験実施まで約半年間が経過していたため、この含水率の値は現地における値と必ずしも同じではない可能性がある。しかしながら、試験体は搬入後の全ての期間において同じ環境に置かれていたため、搬入時と試験時において含水率が異なっていたとしても、少なくとも 3 試験体間における含水率の値の相対関係は、現地の状況と試験時において同様であると推測される。よって、今回得られた酸素拡散係数の相対関係は現地においても同様であると考えられる。

### 3.6 空隙率

空隙率を表 - 5 に示す。37-35 と 50-35 においてほとんど差は見られない。50X-35(C) においてやや値が大きくなっている。

### 3.7 鉄筋腐食状況

鉄筋腐食面積率および腐食減量の測定結果を図 - 5 に示す。なお、鉄筋位置における  $\text{Cl}^-$  量も

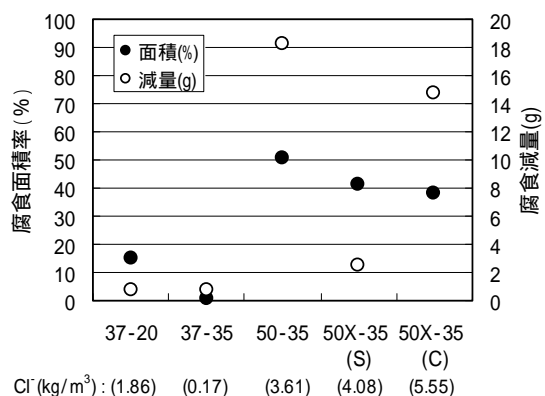


図 - 5 鉄筋腐食面積率および腐食減量

図中に示した。鉄筋位置における Cl 量が腐食発生限界濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  をかなり下回っている 37-35 は腐食がほとんど進行していない。一方、鉄筋位置での Cl 量が  $1.2\text{kg/m}^3$  を上回っている 37-20 および 50X-35(S) については腐食が進行している。また、鉄筋位置における Cl 量がかなり多く、既に鉄筋腐食ひび割れが発生している 50-35 および 50X-35 (C) を比較すると、鉄筋位置での Cl 量が少ない 50-35 の方が腐食量は多くなっていた。通常、鉄筋位置の Cl 量が多い方が鉄筋腐食は進行していると考えられるが、今回において逆の傾向が見られたのは、前述したコンクリートの酸素拡散性状の違いが影響したものと考えられる。また、50X-35(S) と 50X-35(C) を比較すると、腐食面積はほとんど同じであったが、腐食減量においては鉄筋腐食ひび割れが生じていた 50X-35(C) の方が多かった。

図 - 6 に材齢と腐食面積率の関係を示す。なお、図中の直線は各材齢のデータを最小二乗法により直線近似させた結果であり、健全な場合 (S) と、ひび割れが発生した場合 (C) も含めた場合 (S+C) の 2 種類について示した。腐食がまだ進行していない 37-35 を除いて、腐食面積率は概ね直線的に増加する傾向にある。また、材齢 10 年頃までは 50X-35 の方が腐食量は多いが、材齢 10 年頃以降では 50-35 の方が腐食は多くなる傾向が見られた。これは、50X-35 の方が塩化物イオン拡散係数が大きいいため、腐食が開始する材齢が早い、50-35 においても腐食発生限界 Cl 濃度を超え、腐食が開始すると、酸素拡散係数の大きい 50-35 の方が腐食の進行速度が早くなったものと考えられる。また、健全な場合 (C) とひび割れが発生した場合 (S) を比較すると、50X-35 では明確な差が見られないが、50-35 においてはひび割れが発生している方が腐食の進行が早くなる傾向にある。

図 - 7 に酸素拡散係数より算出した酸素流束と腐食面積率および腐食減量の増加速度の関係を示す。なお、酸素流束  $J$  は以下の式により求めた。

$$J = \frac{D_{O_2} \cdot C_{O_2}}{\delta} \quad (2)$$

ここで、 $J$ : 酸素流束 ( $\text{mol/m}^2/\text{s}$ )、 $D_{O_2}$ : 酸素拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $C_{O_2}$ : 表面酸素濃度 ( $\text{mol/m}^3$ )、 $\delta$ : かぶり (m) である。なお、表面酸素濃度  $C_{O_2}$  は気体中や水中のものではなく、コンクリート表面近傍の酸素濃度を用いる必要がある。そのため、表 - 5 のコンクリートの空隙率と図 - 4 の含水率の値を用い、以下の式から算出した<sup>4)</sup>。

$$C_{O_2} = \phi [(1-S) \rho_{gO_2} + S \rho_{dO_2}] \quad (3)$$

ここで、 $\phi$ : コンクリートの空隙率、 $S$ : コンクリートの含水率、 $\rho_{gO_2}$ : 気体酸素密度 ( $8.93 \times 10^{-2} \text{mol/cm}^3$ )、 $\rho_{dO_2}$ : 溶存酸素密度

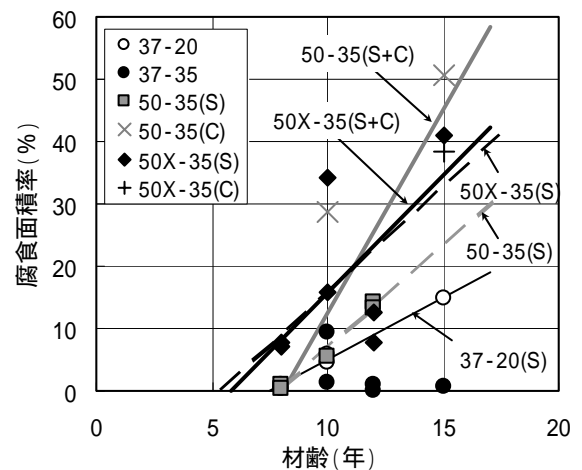


図 - 6 材齢と腐食面積率の関係

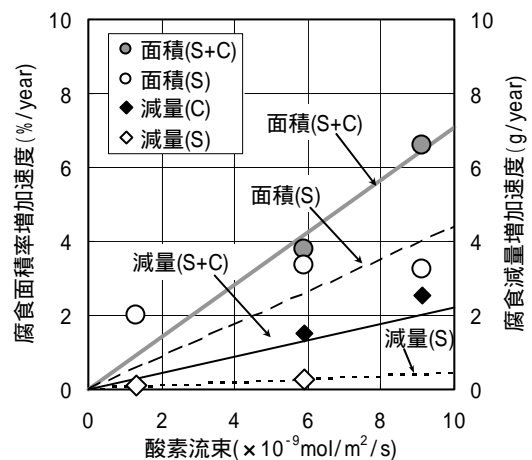


図 - 7 酸素流束と腐食面積率・腐食減量の増加速度の関係

( $2.77 \times 10^{-2} \text{mol/cm}^3$ )<sup>5)</sup>)である。縦軸の腐食面積率の増加速度は図 - 6 中の近似直線の傾きであり、腐食減量の増加速度は図 - 5 の腐食減量を腐食開始後の経過時間で除すことにより求めた。なお、腐食開始後の経過時間は、暴露年数(15年)から腐食開始時期(図 - 6 中の近似直線の横軸切片)を減じたものとした。また、図 - 7 中の直線は各データを最小二乗法により直線近似させた結果であり、健全な場合(S)と、ひび割れが発生した場合(C)も含めた場合(S+C)の2種類について示した。

図 - 7 において、腐食面積率および腐食減量の増加速度のいずれにおいても、酸素流束との間には良い相関関係が見られ、腐食の進行には鉄筋表面への酸素供給量が影響を及ぼすことが確認された。この傾向は(S)の場合だけでなく、(S+C)の場合においても同様であった。これは、ひび割れが生じた後も、ひび割れ近傍におけるコンクリート部分の酸素拡散性状の影響があるためと考えられる。

以上の結果から、コンクリートの酸素拡散係数およびコンクリート表面の酸素量を考慮することで、鉄筋の腐食速度が推定される可能性が示された。ただし、腐食ひび割れ発生以降については、より詳細な検討が必要である。また、本論文において、鉄筋の腐食速度に及ぼす塩化物イオンの影響については考慮しなかったが、その影響程度についても今後の検討が必要である。

#### 4. まとめ

海水飛沫を受ける実際の環境に15年間暴露されたコンクリート試験体を用いて、コンクリートの酸素拡散性状などの諸性能および鉄筋腐食状況について各種調査を行った結果、得られた知見を以下にまとめる。

1) コンクリートにおける中性化深さ、塩化物イオン浸透状況および酸素拡散性状は水セメント比および暴露環境の影響を大きく受けていた。

2) コンクリートの酸素拡散係数より推定した鉄筋表面における酸素供給量と鉄筋腐食速度の間には良い相関が認められた。すなわち、コンクリートの酸素拡散係数から鉄筋の腐食速度が推定される可能性が示された。ただし、更なるデータの蓄積が必要であり、また、腐食ひび割れが発生した以降については、より詳細な検討が必要である。

#### 謝辞

本論文において行われた長期暴露試験は、沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所(試験開始当時は那覇港工事事務所)が実施した「昭和62年度那覇港臨港道路PC橋の劣化対策調査」の中で計画され、1987年に開始されたものである。また、材齢15年目までの試験の実施については、旧港湾技術研究所材料研究室の皆様のご尽力により実施されました。また、ショーボンド建設(株)材料研究室の皆様には15年目の実験の遂行の際にご協力いただきました。関係していただいた皆様に対して厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 出頭圭三：セメント系材料の酸素拡散性状に関する研究、前田技術研究所報、Vol.29-1、1988
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)、2002
- 3) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究、土木学会論文集、No.433/ -15、pp.1-14、1991.8
- 4) 石田哲也：微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム、東京大学博士論文、1999.3
- 5) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書( )、pp100、1994.10