

論文 塩水を噴霧した PC 鋼材の応力腐食挙動

上田隆雄^{*1}・溝口 茂^{*2}・芦田公伸^{*3}・宮川豊章^{*4}

要旨：塩害により劣化した PC 構造物の耐久性を評価するためには、PC 鋼材の応力腐食挙動とそれに起因する遅れ破壊感受性の変化を検討する必要がある。本研究では、PC 鋼材と RC 用鉄筋の塩水噴霧試験を 3 ヶ月間行い、孔食を伴う腐食促進を行った上で、これらの鋼材を用いて低ひずみ速度引張試験および吸蔵水素量測定を行うことにより、鋼材腐食に起因する遅れ破壊感受性の変化を評価した。この結果、PC 鋼材の孔食深さや吸蔵水素量は緊張力を与えることにより増大する傾向を示し、これに伴い、緊張力を与えた PC 鋼材の遅れ破壊感受性も無緊張の場合よりも若干高いと判断することができた。

キーワード：塩害、PC 鋼材、孔食、応力腐食、吸蔵水素

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) 構造物は、高強度コンクリートと高強度鋼材を組み合わせ、プレストレスを付加することにより、鉄筋コンクリート (RC) 構造物で発生する構造ひび割れを原則として許さない構造であることから、その耐久性も高く評価されてきた。これに対して、近年ではグラウトの充填不足などの初期欠陥や、塩害などの厳しい環境条件に起因して、PC 構造物においても比較的早期に劣化が顕在化する事例が報告されている¹⁾。

コンクリート中の鋼材腐食による構造物としての性能低下を考えた場合、RC 構造物と PC 構造物ではそのメカニズムが異なることが考えられる。すなわち、RC 構造物の場合は、鋼材腐食により発生する腐食生成物の膨張圧により、コンクリート断面が欠損し、同時に鋼材断面も減少していくことから、構造物としてのじん性や耐荷力が失われていくことになる。PC 構造物の場合は、腐食が進行する PC 鋼材にあらかじめ緊張力が付加されていることから、腐食孔を起点とする応力腐食割れや腐食反応で発生する水素に起因する水素脆化割れにより、遅れ破

壊的に PC 鋼材が破断する可能性が発生する。

この場合、鋼材腐食が発生するまでの時間は RC 構造物よりも長いとしても、腐食開始後は比較的短期間で PC 鋼材が破断し、構造物としての耐荷力が脆性的に低下する状況も考えられる。

そこで本研究では、PC 構造物の耐久性評価を行うための基礎的検討として、塩水を噴霧することにより腐食を発生させた PC 鋼材を用いて、低ひずみ速度引張試験および吸蔵水素量測定を行うことにより、遅れ破壊感受性の評価を試みることにした。

2. 実験概要

実験に用いた PC 鋼材は高周波誘導加熱焼入れ焼戻しを施した PC 鋼棒とし、 $\phi 13 \text{ mm}$ の C 種 1 号を用いた。PC 鋼棒、および、比較用に用いた RC 用鉄筋 ($\phi 13 \text{ mm}$) の諸性質を表 1 に示す。これらの鋼材に対して塩水噴霧を行い、腐食を促進させた。PC 鋼材は応力腐食の影響を検討するために、無緊張状態の鋼材と緊張状態の鋼材を用意した。緊張力は PC 鋼材引張強度の 60% とし、鋼製の緊張棒で反力を保持した。鋼材の長さは 1 m とし、腐食促進部分は中央部分

*1 徳島大学助手 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*2 高周波熱錬(株)製品事業部営業部 (正会員)

*3 電気化学工業(株)特殊混和材事業部 (正会員)

*4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

表-1 PC鋼棒および鉄筋の性質

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	化学成分(%)					
				C	Si	Mn	P	S	Cu
C種1号 SBPR 1080/1230	1228	1273	8	0.35	1.74	0.74	0.020	0.007	0.01
RC用鉄筋 SR 235	313	442	30	0.11	0.15	0.45	0.025	0.044	-

表-2 実験要因一覧

鋼材種類	C種1号						鉄筋		
緊張レベル (%)	0			60			0		
塩水噴霧期間 (月)	0	1	3	1	3	0	1	3	

の10 cmとした。腐食促進部分以外はビニールテープを巻き付けて塩水の付着を防いだ。腐食部分にはガーゼを巻き付け、塩水の保持が可能な状態とした上で、1週間に2回、5.0%のNaCl溶液を噴霧した。試験体はすべて20℃の恒温室内に静置し、湿度調整は行わなかったが、塩水の噴霧を行う直前にはガーゼは乾燥しており、乾湿繰り返し条件での腐食促進となった。塩水噴霧期間は1ヶ月および3ヶ月の2水準とし、その間、ガーゼは1ヶ月ごとに新しいものに交換した。実験要因の一覧を表-2に示す。なお試験体の本数は各要因に対して3体ずつとした。

緊張力を与えたPC鋼材は、応力腐食の影響で塩水噴霧期間中に破断する状況も考えられたが、今回の実験では3ヶ月の塩水噴霧を行った場合も破断した鋼材はなかった。

所定の促進腐食終了後に、鋼材の遅れ破壊感受性を評価する目的で、鋼材の吸蔵水素量測定および低ひずみ速度引張試験を行った。また、塩水噴霧による腐食程度を評価するために、腐食減量および孔食深さの測定も併せて行った。なお、塩水噴霧を終了した後、試験を行うまでの期間は、水素の気中拡散を防ぐために、各種鋼棒を-30℃以下で冷凍保存した。

吸蔵水素量の測定は、ガスクロマトグラフを用いた昇温式の水素分析により行った。鋼棒の腐食部分を冷却しながら約50 mm (質量約50 g)に切断した後、アセトン中で超音波洗浄したものを試験片とした。この試験片をアルゴンガス(50 ml/min)中で100℃/hrの昇温速度で室温か

ら600℃(873 K)まで加熱し、その間に試験片から放出された水素を5分間隔で定量した。

PC鋼材の低ひずみ速度引張試験を行う際の引張ひずみ速度は、 1.6×10^{-5} /secで一定とした。引張荷重は容量20 tfのロードセルで測定し、PC鋼材腐食部分のひずみは塑性ゲージ2枚の平均値として測定した。さらに、载荷を行った万能試験機のクロスヘッド変位量を容量50 mm(感量0.01 mm)の変位計で測定した。また、破断後の鋼材絞り ϕ を次式により求めた。なお、鋼材断面積はJIS Z 2241に従い測定した。

$$\phi = (A_0 - A) / A_0 \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここに、 A_0 : 孔食深さを考慮した原断面積(mm^2)、 A : 破断後の最小断面積(mm^2)

なお、RC用鉄筋は破断時のひずみが大きく、低強度であることから一般に遅れ破壊の可能性は小さいことから、引張ひずみ速度をPC鋼材の場合の10倍として引張試験を行った。

鋼材の腐食減量は、切り取った腐食部分を60℃の10%クエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸漬することにより腐食生成物を除去して重量減少を測定した。なお、この際健全な鋼材を用いて黒皮分の補正を行った。

孔食深さは、腐食部分から約20 mmの長さの試料を切り出し、さらにこの試料を鋼材軸方向に半分に切断したものを樹脂に埋め込み、研磨した後、光学顕微鏡で拡大観察して求めた。この際、測定区間(約20 mm)を長さ1 mmのブロックに分割し、それぞれのブロックにおける最大

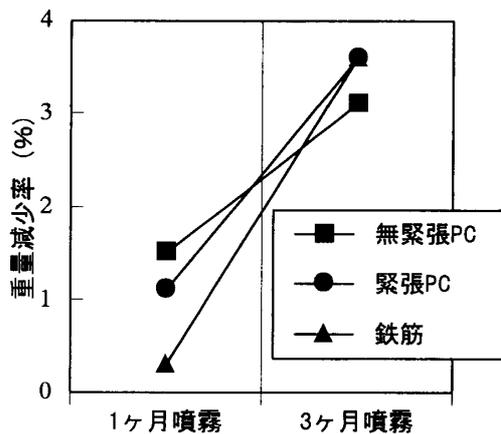


図-1 塩水噴霧による鋼材重量減少率

孔食深さを測定した上で、後述の方法で腐食部分全体における最大孔食深さを推定した。

3. 腐食程度の評価

3.1 重量減少率

塩水噴霧による各種鋼材の腐食重量減少率を図-1に示す。1ヶ月の塩水噴霧によるRC用鉄筋の重量減少率はPC鋼材の場合と比較して小さく、3ヶ月の塩水噴霧ではRC用鉄筋の重量減少率が大きく増加している。この理由として、RC用鉄筋は鋼塊として一般にリムド鋼を使用し、PC鋼材はキルド鋼を使用していることが関係している可能性がある²⁾。リムド鋼は脱酸をわずかに行き、内質には不純物を多く含むが、鋼塊表面部分には不純物の少ないリム層が形成される。これに対してキルド鋼は脱酸を十分に行い、内部には気泡が全くないが、表面肌はリムド鋼に劣ると言われている。このような違いにより、RC用鉄筋は初期の腐食速度は比較的小さいが、その後大きな腐食速度を示したものと考えられる。また、緊張力を与えたPC鋼材は、無緊張の場合と比較して、重量減少率の増加程度が若干大きくなっており、応力の影響で腐食反応自体が活性化したことも考えられる。

3.2 最大孔食深さの推定

腐食現象はその損傷形態から均一腐食と局部腐食とに大別される。均一腐食では、平均的な腐食速度が求めれば材料の寿命予測が可能となるが、孔食や応力腐食などの局部腐食は最大値

や最小値を扱う極値問題に属する。そこで、ここでは極値統計の考え方³⁾により、腐食部分の最大孔食深さを推定することを試みる。

腐食データの最大値 x の統計処理には一般にGumbel分布とよばれる2重指数分布が用いられる。Gumbel分布の分布関数 ($F_1(x)$) は次式で表される。

$$F_1(x) = \exp\left[-e^{-(x-\lambda)/\alpha}\right] \quad (2)$$

ここに、 λ : 位置パラメータ (最頻値)

α : 尺度パラメータ ($(\sqrt{6}/\pi)\sigma$)

σ : 標準偏差

2重指数分布における規準化変数 y は、

$$y = (x - \lambda) / \alpha \quad (3)$$

で定義され、その分布関数は次式で与えられる。

$$F_1(y) = \exp(-e^{-y}) \quad (4)$$

ここで、測定値として得られている値 x_i は、試料を長さ1mmのブロック N 個に区切り、それぞれのブロックで測定された最大孔食深さである。これら N 個のデータを小さいものから順に並べ、 i 番目のデータに対応する $F_1(y)$ は平均ランク法により次式で求まる。

$$F_1(y) = i / (N + 1) \quad (5)$$

(5)式で求めた $F_1(y)$ を(4)式に代入すると、 x_i に対応する y_i が求まることになる。ここで得られた (x_i, y_i) をプロットしたときに直線関係が得られれば、測定値はGumbel分布に従っていると考えることができ、この直線で $y=0$ に対応する x の値が位置パラメータ λ を、直線の勾配 $(x-\lambda)/y$ が尺度パラメータ α を与えることになる。これらの値をグラフから読みとることも可能であるが、ここでは、MVLUE法 (最小分散線形不偏推定子法)³⁾ を用いて計算によりこれらのパラメータを推定することとした。 λ と α が計算されると、(3)式により、 y と x の直線関係が得られる。3ヶ月の塩水噴霧を行ったPC鋼材の測定値を用いて作成した (x_i, y_i) のプロットと、MVLUE法により求めた直線を図-2に示す。これによると、測定された孔食深さ x と規準化変数 y との間に直線関係を認めることができ、Gumbel分布に

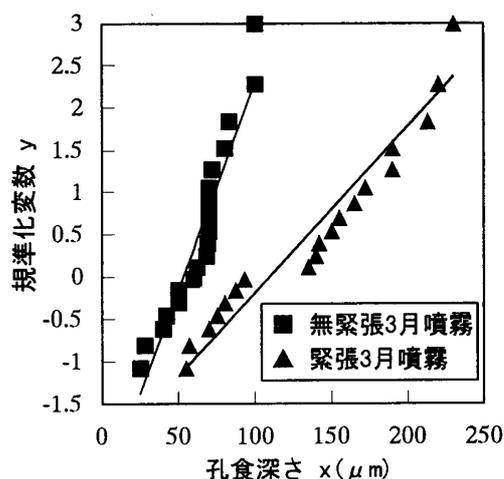


図-2 最大孔食深さの極値統計処理例

よる極値統計が妥当であることがわかる。また、MVLUE法により得られた直線は、これらの直線関係を十分に表現しており、パラメータ λ および α の推定が精度良く行えたと言える。

ここで得られた直線関係を用いて、腐食部分全体の最大孔食深さを推定する。今回の実験では、長さ1mmの測定ブロックで最大孔食深さを測定している。これに対して、鋼材の腐食部分は全長100mmであるので、腐食面積の倍率は $100/1=100$ である。この値を再帰期間 T といい、累積分布関数 $F_1(y)$ との関係は次式となる。

$$F_1(y) = 1 - 1/T \quad (6)$$

この式から $T=100$ に対応する $F_1(y)$ を計算すると、0.98となり、この値を(3)式および(4)式に代入すると、腐食部分全体における最大孔食深さの推定値 x_m が計算できる。この推定結果を図-3に示す。図-3によると、3ヶ月の塩水噴霧により、RC用鉄筋の最大孔食深さがPC鋼材よりも大きくなっている。実際に、腐食生成物を除去した鋼材表面を観察すると、PC鋼材の場合は、比較的小さい凹凸が全面的に広がっていたのに対して、RC用鉄筋の場合は、表面の凹凸が激しく、所々に大きな孔食が見られた。図-1に示したように、3ヶ月の塩水噴霧による重量減少率には、RC用鉄筋とPC鋼材で大きな差は認められなかったが、孔食の発生状況は異なる結果となった。この理由としては、前述したようにPC鋼材の場合、RC用鉄筋よりも不

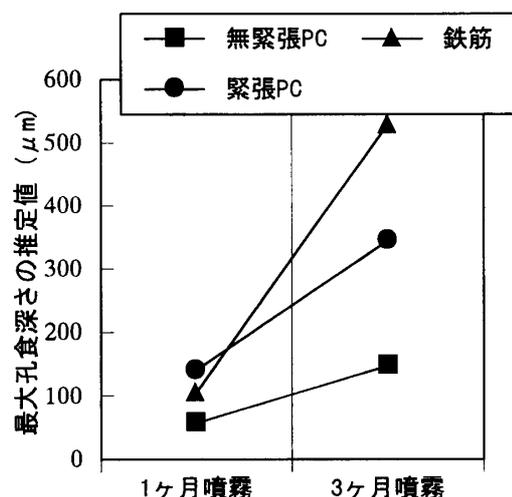


図-3 最大孔食深さの推定結果

純物が少なく均質性が高いために、孔食の進展が遅いものと考えられる。また、PC鋼材の中では、緊張力を与えた鋼材の方が孔食深さが大きくなっており、応力腐食の影響が明確に認められた。

4. 鋼材の水素吸蔵状況

各鋼材の塩水噴霧1ヶ月時点および3ヶ月時点における水素吸蔵量測定により得られた水素放出曲線を図-4に示す。特にPC鋼材のような高強度鋼の場合、腐食反応のアノード反応による断面欠損に加えて、カソード反応による水素脆化が遅れ破壊の一因となることが考えられる。水素放出曲線で、450K付近に最大点をとるピークは、水素脆化の直接的な原因となる拡散性水素であることが指摘されている⁴⁾が、図-4に示されている水素は550Kから600K付近が最大点となっており、比較的拡散性の小さい水素であると考えられる。著者らがコンクリート中に埋め込んだPC鋼材に対して行った試験結果⁵⁾においても、拡散性水素が検出されたのは、鋼材のカソード分極を行った場合のみであり、腐食反応により検出された水素の放出温度は今回の実験結果と同程度であった。ただし、放出水素量は今回の方が総じて大きくなっている。これは、本実験ではコンクリートを介さずPC鋼材に直接塩水噴霧を行ったため、酸素、水分、 Cl^- のいずれの供給量も大きく、より活発に腐食

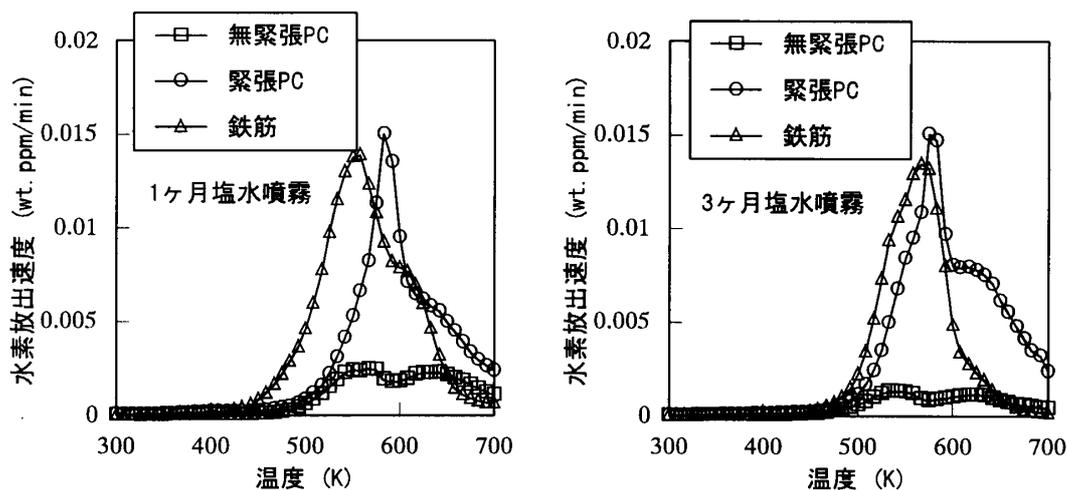


図-4 水素放出曲線

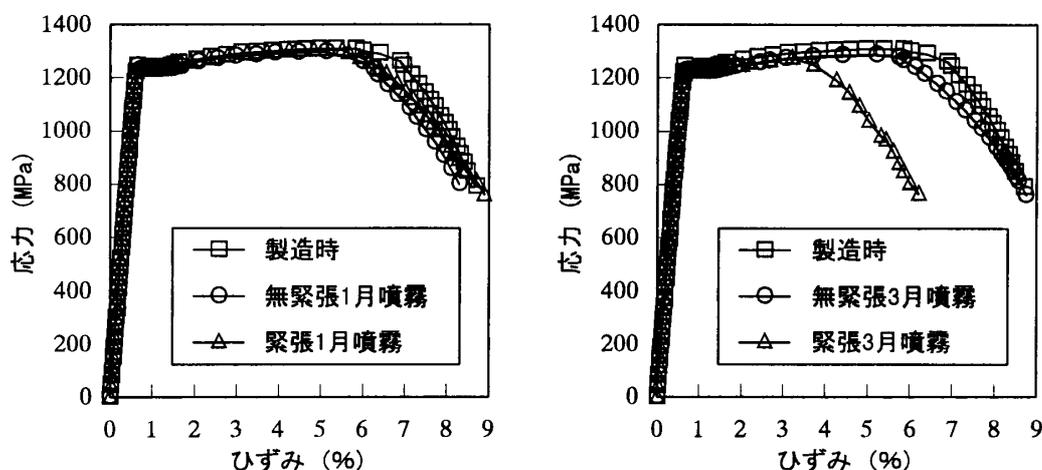


図-5 PC鋼材の応力-ひずみ曲線

反応が進行したことが原因であろう。

図-4において特に顕著な水素が検出されているのは、RC用鉄筋と緊張力を与えたPC鋼材である。RC用鉄筋は初期状態で既に内部組織にマイクロポイドのようなトラップサイト(原子を捕らえることのできる結晶中の欠陥部分)をPC鋼材よりも多く含んでいることが原因と考えられる。PC鋼材は、初期状態ではRC用鉄筋よりも純度が高く、無緊張状態では水素吸蔵量は小さいが、緊張力を与えることにより、鋼材に新たなひずみが導入され、これが水素のトラップサイトとなっていることが考えられる。また、塩水噴霧1ヶ月時点と3ヶ月時点の水素吸蔵状況を比較すると、各種鋼材の水素放出曲線に顕著な違いは認められない。このことから、鋼材の腐食反応速度は既に定常状態に

あるものと考えられる。

5. 低ひずみ速度引張試験

低ひずみ速度引張試験から得られたPC鋼材の応力-ひずみ関係を図-5に、RC用鉄筋の引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を図-6に示す。これらの曲線においてひずみの値は基本的に鋼材に貼り付けたひずみゲージの値を用いたが、破断直前の局部伸びの段階ではひずみゲージによる測定は不可能となることから、万能試験機クロスヘッドの変位と、鋼材ひずみの間の線形関係を用いて、終局ひずみを算出した。線形関係を求めるために用いた鋼材ひずみの範囲は、PC鋼材の場合で3~5%、RC用鉄筋の場合で10~12%付近としたが、鋼材によって若干のばらつきが生じた。

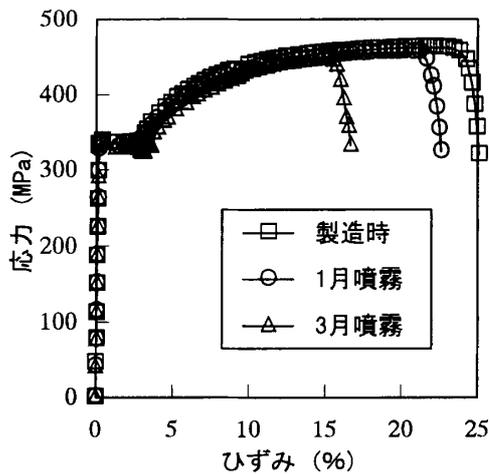


図-6 RC用鉄筋の応力-ひずみ関係

著者らの既往の検討結果^{5), 6)}によると、カソード分極により拡散性水素を吸蔵したPC鋼材や、孔食を模した切欠きを導入したPC鋼材など、遅れ破壊の感受性が高いと判断される鋼材は、低ひずみ速度引張試験を行うと、破断時の荷重降下量が小さくなり、脆性的に破断した。また、これに伴い、破断時の鋼材絞りも大きく低下する傾向を示した。図-5によると、1ヶ月の塩水噴霧を行ったPC鋼材は製造時のPC鋼材とほぼ同じ曲線となっており、遅れ破壊の可能性は小さいと言える。3ヶ月の塩水噴霧を行った場合、緊張力を与えたPC鋼材では荷重降下の開始するひずみが小さくなっている。図-6に示したRC鉄筋の場合も、塩水噴霧による腐食が進行するにつれて、荷重降下の開始するひずみが小さくなっていることがわかる。このような変化が見られる鋼材は、図-3や図-4に示したように最大孔食深さや吸蔵水素量が比較的大きいものであることから、鋼材腐食の進行による遅れ破壊感受性の変化を示していると考えられるが、破断時の荷重降下程度は製造時と同程度であり、著者らの既往の試験結果と比較しても、遅れ破壊の感受性が顕著に高くなったとは言えない。

塩水噴霧による各鋼材破断時の絞りの変化を図-7に示す。これによると、腐食程度の大きかった、RC用鉄筋と、緊張力を与えたPC鋼材は塩水噴霧を行うことにより、製造時より絞

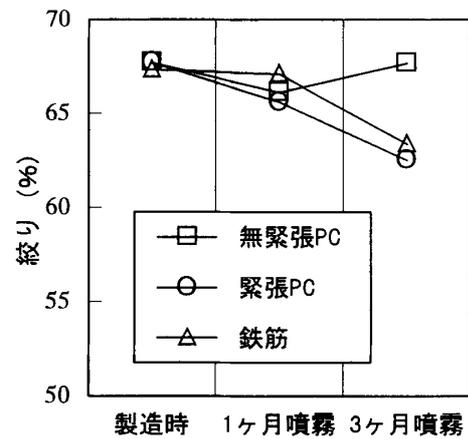


図-7 鋼材の絞りと塩水噴霧期間の関係

りが低下している。ただし、過去の検討結果^{5), 6)}を参考にすると、その低下程度は遅れ破壊の感受性が顕著に高いと判断できるほど大きいとは言えない。

6. 結論

本研究結果をまとめると次のようになる。

- ① PC鋼材に3ヶ月間の塩水噴霧を行った結果、緊張力を加えた鋼材は無緊張の鋼材よりも最大孔食深さが大きくなり、吸蔵水素量も大きくなった。また、遅れ破壊の感受性も若干高くなっているものと推定された。
- ② RC用鉄筋はPC鋼材よりも最大孔食深さが大きくなる傾向を示した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、ご指導いただいた高周波熱錬(株) 田中典男氏、および、実験やデータ処理に協力していただいた、徳島大学 酒井和也君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 金海 鉦ほか：塩害環境下で25年間供用されたPCT桁橋の損傷度調査、コンクリート構造物のハビリテーションに関するシンポジウム論文集, pp. 55-60, 1998
- 2) 棒材・線材マニュアル, 日本鉄鋼協会, 1997
- 3) 腐食防食協会：装置材料の寿命予測入門-極値統計の腐食への適用, 丸善, 1984
- 4) 鈴木信一ほか：鋼材の遅れ破壊特性試験法, 鉄と鋼, Vol.79, No.2, pp.227-232, 1993.9
- 5) 上田隆雄ほか：デサリネーションによるPC鋼材の水素脆化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1101-1106, 1997.6
- 6) 上田隆雄ほか：切欠きを有するPC鋼材の通電処理による水素脆化挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp. 241-246, 1999.7