## 論文 腐食生成物の力学的特性に関する研究

足助 美岐子\*1·後藤 成道\*2·大下 英吉\*3

**要旨**:鉄筋コンクリート構造物の劣化予測を行うためには、鉄筋から発生する腐食生成物の力学的特性を適切に評価する必要がある。本研究では、腐食生成物の弾性係数およびポアソン比といった力学的特性の定量的評価を目的として、特殊装置による側面水圧実験を実施し、理論式モデルとの併用によりそれらの同定ならびに拘束圧依存性の検討を行った。

キーワード:腐食生成物,弾性係数,電食試験,側面水圧実験

#### 1. はじめに

近年,既存の鉄筋コンクリート構造物において経年劣化による耐久性能や構造性能の大幅な低下が深刻な問題となっている。特に我が国においては,高度経済成長期に建設された構造物の56%が経年40年以上を迎えるため,それらの維持管理が急務である。

RC 構造物における各種劣化現象の中でも、塩害や中性化による鉄筋の腐食は、構造体として機能する鉄筋量を減少させるとともに腐食膨張によるかぶりコンクリートへのひび割れの発生、鉄筋とコンクリートの付着性能の低下等、構造性能に及ぼす影響が大きい要因である。したがって、鉄筋の腐食性状を適切に評価することが不可欠であり、併せてその性状を評価可能なモデルを構築することが、RC 構造物の構造性能評価を行う上で非常に重要な位置付けにある。

このような背景から、鉄筋腐食によるコンクリートの腐食性状に関する研究は、これまでに多数実施されている。現在までのところ、腐食ひび割れの発生機構や鉄筋の腐食性状と腐食ひび割れの関連性などがある程度明らかにされているが、それらの定量化には至っていない。その一要因として、腐食生成物の弾性係数およびポアソン比が未解明であることが挙げられる。既往の研究<sup>1)</sup>では、吉岡らによって非拘束条件下の腐食生成物は塑性的

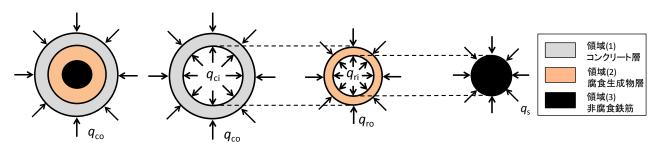
性質が強く,拘束条件下では弾性的性質が強いことが確認されている。しかしながら,既往の実験では,腐食の生成方法が電食試験法により一次元的に発生させたものであるとともに実現象を忠実に再現したものではない。本来,コンクリート中の鉄筋表面から生成される腐食生成物は,その種類やコンクリートによる拘束度すなわちかぶり厚,コンクリートの強度,腐食ひび割れの有無や幅などによって,その弾性係数やポアソン比といった力学的特性は異なることが予測される。これら状況下にある腐食生成物の力学的特性を評価するためには,当然コンクリート内部で生成された腐食物を対象としなければならない。

本研究では、コンクリート内部の鉄筋に生じる腐食生成物の弾性係数およびポアソン比の定量的評価を目的として、特殊装置による側面水圧実験を実施し、理論式モデルとの併用によりそれらの同定ならびに拘束圧依存性の検討を行った。

## 2. 腐食生成物の力学的特性評価モデル

## 2.1 モデルの概要

一般に、鉄筋の腐食はその数倍もの体積を有する腐食物を生成し、鉄筋表面に堆積する。したがって、コンクリートには、腐食率に応じた膨張圧が生じ、強度との関



(a) コンクリートに作用する圧力 (b) 腐食生成物に作用する圧力 (c) 鉄筋に作用する圧力

図-1 各層に作用する応力

\*1 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学部土木工学科

\*3 中央大学 理工学部都市環境学科 教授 工博 (正会員)

連性からひび割れが発生することとなる。本研究ではこのような一連の挙動を厚肉円筒理論によりモデル化を行うこととする $^{2}$ 。

側圧水圧により力が作用するのは、コンクリート層、腐食生成物層、および鉄筋層の3層であり、それぞれの層に生じる変位の適合条件から、腐食生成物の弾性係数とポアソン比を求めることとする。

図-1に示すように、同図(a)に示すコンクリート外径に作用する圧力を $q_{co}$ (側面水圧)とすると、内径には腐食生成物による拘束圧 $q_{ci}$ を受けることとなる。一方、鉄筋には同図(c)に示す拘束圧 $q_s$ が作用し、作用反作用の関係から腐食生成物層は同図(b)のように、外径には $q_{ro}$ ( $=q_{ci}$ )、内径には $q_{ri}$ ( $=q_s$ )を受けることとなる。

#### 2.2 各層の変位と変位の適合条件

## (1) コンクリートの変位

まず、コンクリートの内側には何もない状態を仮定し、外圧 $q_{co}$ が作用するものとする。内径の自由な変位 $u_{ca}$ および外径の自由な変位 $u_{cb}$ は、平面応力状態を仮定するとそれぞれ式(1)、式(2)で表される。

$$u_{ca} = \frac{\varphi_r}{2E_c(K_0^2 - 1)} \{ (0 - q_{co} \cdot K_0^2)(1 - \nu_c) + (0 - q_{co})(1 + \nu_c)K_0^2 \}$$

$$u_{cb} = \frac{\varphi_c}{2E_c(K_0^2 - 1)} \{ (0 - q_{co} \cdot K_0^2)(1 - \nu_c) + (0 - q_{co})(1 + \nu_c) \}$$
(2)

ここで、 $\nu_c$ はコンクリートのポアソン比、 $E_c$ はコンクリートの弾性係数、 $K_0$ はコンクリートの外径と内径の比 (= $\varphi_c/\varphi_r$ )である。コンクリートの自由な変形後の内径 $\varphi_{ci}$ と外径 $\varphi_{co}$ は、この自由な変位 $u_{ca}$ および $u_{cb}$ を用いてそれぞれ式(3)、式(4)で表される。

$$\varphi_{ci} = \varphi_r + 2u_{ca} \tag{3}$$

$$\varphi_{co} = \varphi_c + 2u_{ch} \tag{4}$$

また,鉄筋中心から半径方向にr離れた位置でのコンク リートひずみは式(5)で表される。なお,本研究では鉄筋 中心から半径方向のコンクリートゲージの中心位置まで の距離をr=45 とした。

$$\varepsilon_{c} = \frac{1}{2E_{c}(K_{1}^{2} - 1)} \left\{ (q_{ci} - q_{co} \cdot K_{1}^{2})(1 - \nu_{c}) + \frac{1}{r^{2}} (q_{ci} - q_{co})(1 + \nu_{c})K_{1}^{2} \right\}$$
(5)

ここで、 $K_1$ は $\varphi_{co}/\varphi_{ci}$ である。コンクリート内径の変位は式(6)で表される。

$$u_{ci} = \frac{\varphi_{ci}}{2E_c(K_1^2 - 1)} \{ (q_{ci} - q_{co} \cdot K_1^2) (1 - \nu_c) + (q_{ci} - q_{co}) (1 + \nu_c) K_1^2 \}$$
(6)

## (2)鉄筋の変位

鉄筋は外圧 $q_s$ の圧縮力を受けることとなり、それによ

る半径方向のひずみ $\epsilon_s$ ,変位 $u_s$ はそれぞれ式(7),式(8)で表される。

$$\varepsilon_s = \frac{q_s(1 - \nu_s)}{E_s} \tag{7}$$

$$u_{s} = \varepsilon_{s} \cdot \varphi_{si}/2 \tag{8}$$

ここで、 $\nu_s$ は鉄筋のポアソン比、 $E_s$ は鉄筋の弾性係数である。

#### (3)腐食生成物の変位

腐食生成物は、内径 $\varphi_{si}$ 、外径 $\varphi_r$ の一様な厚さを有する 円筒であると仮定する。腐食生成物が、内圧 $q_{ri}$ 、外圧 $q_{ro}$ を受けると、内径の変位 $u_{ra}$ および外径の変位 $u_{rb}$ はそれ ぞれ式(9)、式(10)で表される。

$$u_{ra} = \frac{\varphi_{si}}{2E_r(K_2^2 - 1)} \{ (q_{ri} - q_{ro} \cdot K_2^2) (1 - \nu_r)_{(9)} + (q_{ri} - q_{ro}) (1 + \nu_r) K_2^2 \}$$

$$u_{rb} = \frac{\varphi_r}{2E_r(K_2^2 - 1)} \{ (q_{ri} - q_{ro} \cdot K_2^2) (1 - \nu_r) + (q_{ri} - q_{ro}) (1 + \nu_r) \}$$
(10)

ここで、 $K_2$ は $\varphi_r/\varphi_{si}$ 、 $\nu_r$ は腐食生成物のポアソン比、 $E_r$  は腐食生成物の弾性係数である。なお、腐食生成物に作用する内圧 $q_{ri}$ 、外圧 $q_{ro}$ は式(11)で表される。

$$q_{ri} = q_s$$

$$q_{ro} = q_{ci}$$

$$(11)$$

## (4)変位の適合条件

コンクリートの自由な変形によって生じる腐食生成物外径と,コンクリート内径の拘束変位および鉄筋外径と腐食生成物内径の変位の適合条件は,式(12)のように表される。

$$u_{ca} = u_{rb} - u_{ci}$$

$$u_s = u_{ra}$$
(12)

## 2.3 力学的特性の算出手法

2.2 節の式(1)~式(12)を腐食生成物の弾性係数および ポアソン比を未知数とした連立方程式を解くことにより, 両者が求まることとなる。

## 3. RC 円柱供試体の側圧水圧実験

## 3.1 試験体概要

試験体は、図-2に示すような φ 150×300mmRC 円柱 供試体であり、鉄筋は事前に腐食させた D19(USD685A) 鉄筋コンクリート用高強度異型棒鋼を用い、中央に配筋 した。実験パラメータは、表-1に示すように腐食方法 と水セメント比である。比較のため健全鉄筋の供試体も 作成した。水セメント比は 60%と 30%の 2 水準である。 コンクリートの配合は表-2に示す通りでる。なお、セ メントには早強ポルトランドセメントを用いた。表-3 に各試験体の圧縮強度と弾性係数を示す。両者とも、同 ーの水セメント比のものにおいては比較的近い値が得ら れた。なお、再現性の確認のため各パラメータに対し2 体および3体ずつ作成した。

#### 3.2 腐食方法

本研究では、鉄筋の腐食手法として電食試験法を採用した。具体的な手法であるが、図-3に示すように、腐食生成物の発生環境による緻密さの違いを区別するため、鉄筋単体で腐食させ疎な腐食生成物を作成する方法(A)と、コンクリート内部で腐食させ密な腐食生成物を作成する方法(B)の二通りを実施した。

方法(A)においては、腐食生成物が水中に流れ出すのを防止するため、鉄筋に脱脂綿を巻き布で覆った状態で電食した後、恒温恒湿機にて乾燥させ、鉄筋を取り出した。 方法(B)においては、コンクリート中で鉄筋を電食した後、24時間自然乾燥させ、試験体からはつり出した。

水槽内には、5%NaCl水溶液を満たした状態で鉄筋お

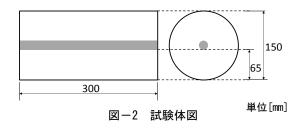


表-1 実験パラメータ

試験体名	鉄筋径	目標腐食率	腐食生成物	W/C
W/C60%-A			疎	60%
W/C30%-A		10%	坏	30%
W/C60%-B	D19		密	60%
W/C30%-B				30%
W/C60%-C			なし	60%

表-2 コンクリートの配合

$G_{max}$	W/C	SL	Air	単位量(kg/m³)				
(mm)	(%)	(cm)	(%)	W	С	S	G	ΑE
20	60	10	5	174	290	798	100	2.9

$\mathbf{G}_{max}$	W/C	SL	Air	単位量(kg/m³)				
(mm)	(%)	(cm)	(%)	W	С	S	G	ΑE
20	30	10	5	165	550	617	992	5.5

表-3 各試験体の圧縮強度と弾性係数

	圧縮強度(N/mm²)	弾性係数(kN/mm²)		
W/C60%-A	20.9	20.9		
W/C30%-A	35.9	26.8		
W/C60%-B	16.6	19.7		
W/C30%-B	31.2	25.1		

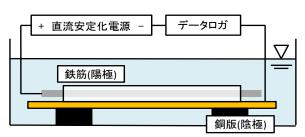
よび鉄筋コンクリートを設置し、鉄筋を陽極側、銅板を 陰極側に接続した後、所定の積算電流量に到達するまで 直流定電流を通電した。

本研究では、鉄筋腐食の評価指標として、式(13)で表 わされる腐食率、すなわち試験前後の鉄筋の質量減少率 を用いることとした。

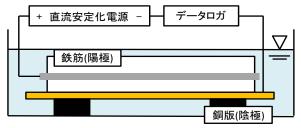
$$\alpha = (W_b - W_a)/W_b \times 100 \tag{13}$$

なお、腐食前の鉄筋の質量 $W_b$ は配筋前に計測し、単位 長さ当りの質量は一様と仮定した。載荷試験終了後に、 鉄筋を試験体からはつり出し、10%濃度クエン酸二アン モニウム溶液に 24 時間浸漬させ、腐食生成物を除去した 後に質量 $W_a$ を計測した。鉄筋の腐食率の測定箇所は、 50mm 間隔に切断し、一本あたり 6 ヶ所を対象とした。

図-4 に各試験体の鉄筋の平均腐食率と腐食率分布を示す。端部は局所的に腐食しやすいため、防食加工を施した。そのため端部の腐食率は小さくなっているが、端部以外では鉄筋軸方向でほぼ一様な腐食率が得られた。



(A) 鉄筋単体で電食



(B) コンクリート内部で電食 図-3 電食実験方法

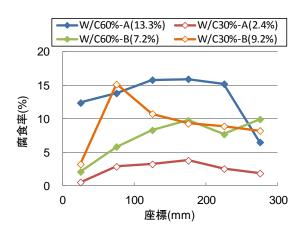


図-4 各試験体の鉄筋の平均腐食率と腐食率分布

#### 3.3 実験装置

実験装置は確立されたものがなかったため、特殊な装置を使用する必要があった。図-5に実験装置の外観と断面概略図を示す。本装置は外径 290mm、内径 168mm、高さ 247mm の円筒状の銅製容器からできており、その中央部にゴムスリーブに入れた RC 円柱供試体を設置する。装置の下部に水の注入口があり、上部には水圧計を設置した。なお、試験体を設置する際、漏水を防ぐため供試体全体をゴムスリーブで覆った状態で試験器に設置した。また、試験器の両端にはバックアップリングとゴム製の O リングを装着し、摩擦を低減するためゴムスリーブ表面にグリスを塗った。

#### 3.4 載荷方法と測定項目

実験の載荷は、油圧式のポンプにより水を試験機内に注入することで装置内の水圧を上昇させ、試験体 200mm の範囲にかかる側面水圧を計測する。なお、側圧の載荷速度は 0.01MPa/sec で増加させ、試験体が破壊するまで行った。

測定項目は、コンクリート縦方向のひずみ、コンクリート横方向のひずみ、鉄筋の軸方向ひずみである。コンクリートのひずみの測定については、図-6に示す位置にコンクリートゲージを埋め込み測定を行った。一方、鉄筋の軸方向ひずみの測定にあたり、ひずみゲージを鉄筋表面へ貼り付けた場合、鉄筋腐食に伴いゲージが破損するため、貼り付け位置は鉄筋内部とし、図-7に示すように鉄筋を軸方向に切断した後、その断面に2mm×4mmの溝を掘り、ひずみゲージを貼り付けた3。ひずみ

ゲージのリード線は、鉄筋内の溝を這わせて、端部から取り出した。その後、2対の切断された鉄筋をエポキシ樹脂接着剤により接合し一本の鉄筋とした。なお、鉄筋の接合面は載荷試験終了後のはつり出しにより、腐食が生じていないことが目視により確認されている。ひずみゲージの貼り付け間隔は、50mm間隔の計5箇所とした。

## 3.5 腐食生成物層の厚さの仮定

腐食生成物の外径 $\varphi_r$ は、本研究では腐食前後の鉄筋質量差より腐食生成物層の厚さを近似的に求めることとした。腐食生成物は、鉄筋軸方向に一様な厚さであると仮定し、電食終了後の鉄筋の質量 $W_c$ 、その後腐食生成物を取り除いた質量 $W_{si}$ から、以下のような関係式が得られる。

$$W_r = W_c - W_{si} \tag{13}$$

$$\left\{ \left(\frac{\varphi_{si}}{2}\right)^2 \pi - A_a \right\} \rho_s \cdot l = W_{si} \tag{14}$$

$$\left\{ \left( \frac{\varphi_{si} + 2r}{2} \right)^2 \pi - \left( \frac{\varphi_{si}}{2} \right)^2 \pi \right\} \rho_r \cdot l = W_r \tag{15}$$

ここで、 $W_r$ は腐食生成物の質量、 $\varphi_{si}$ は健全鉄筋の直径、 $A_a$ は鉄筋内の切り欠き部分の断面積、 $\rho_s$ は鉄筋の密度 (=7.87g/cm³)、lは鉄筋の長さ、 $\rho_r$ は腐食生成物の密度である。本研究では、X線回折により腐食生成物の大半がヘマタイトであることが確認されたので、 $\rho_r=5.30$ g/cm³ とした。式(13)から式(15)の腐食生成物の厚さrに関する連立方程式を解くことにより、腐食生成物の厚さrが求まることとなる。腐食生成物の外径 $\varphi_r$ は、鉄筋の直径 $\varphi_{si}$ と腐食生成物の厚さrを用いて式(16)で表される。

$$\varphi_r = \varphi_{si} + 2r \tag{16}$$



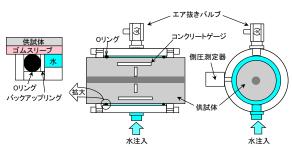


図-5 実験装置の外観と断面概略図

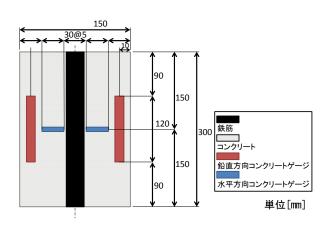


図-6 コンクリートゲージ設置位置

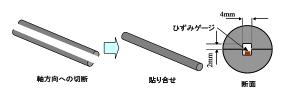


図-7 貼り合わせ鉄筋概要

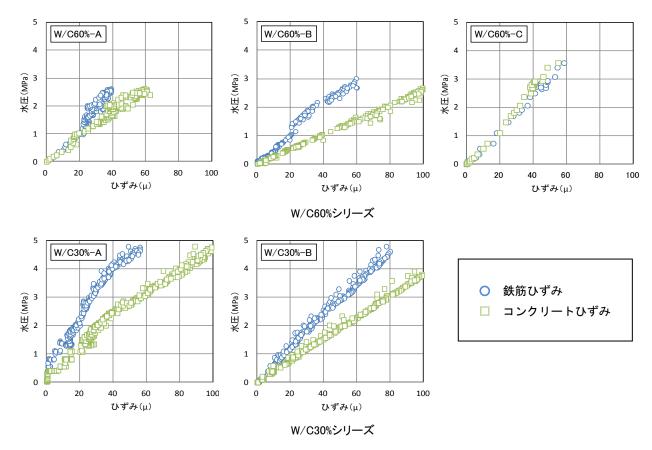


図-8 水圧と鉛直方向ひずみの関係

## 4. 載荷試験結果

## 4.1 側面水圧とひずみの関係

側面水圧実験で得られたコンクリート表面から 10mm の位置でのコンクリートの鉛直方向のひずみおよび鉄筋の軸方向ひずみ分布を図-8 に示す。なお図中の値は各ゲージの平均値である。いずれの試験体においても,鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみは,水圧の増加に伴って単調増加の傾向にある。W/C60%-C の健全鉄筋では,鉄筋とコンクリートの付着があるため,鉄筋とコンクリートのひずみが一致している。他の試験体においては,コンクリートと鉄筋のひずみには大きな差が生じる。これは腐食生成物があることで,鉄筋とコンクリートの付着がなくなるからである。

同じ圧力を作用させたときのそれぞれの鉄筋ひずみの値に着目すると、小さい順に鉄筋単体で腐食させた鉄筋 (A)、健全鉄筋(C)、コンクリート内部で腐食させた鉄筋 (B)となる。すなわち、腐食生成物が緻密であるほど鉄筋が受ける圧力が大きくなる。これは腐食生成物の緻密さが成す剛性の変化によるものである。疎な腐食生成物の場合、剛性が小さいため鉄筋への力の伝達を妨げる。その結果、鉄筋ひずみが小さくなったと考えられる。一方密な腐食生成物の場合は、剛性が大きいので鉄筋への力の伝達が十分に行われ、鉄筋ひずみが大きくなったと考えられる。したがって、腐食生成物の緻密さによる剛性

の変化は、コンクリートから鉄筋へ伝達される力を増減 させる働きをする。また、腐食の発生環境により腐食生 成物自体の剛性が変化することが予測される。

# 4.2 腐食生成物の力学的特性に及ぼすコンクリートの拘束効果の影響

2章で構築したモデルに本実験の条件を代入し、モデルの評価を行うこととする。なお解析に用いた各パラメータは実験値であり、それらを表-4に示す。図-9に水圧増加に伴う腐食生成物の弾性係数の変化と弾性係数の同定値を示す。まず、いずれの試験体においても載荷初期段階では大きなばらつきがみられるものの、水圧の増加とともに腐食生成物の弾性係数は一定値に収束するという傾向を示している。これは既往の研究りと同様の傾向である。さらに(b)(c)では、圧力が増加すると、弾性係数は小さくなるという傾向を示している。これは、腐食生成物に圧力を持続的に作用させることで、腐食生成物が一体性を失って分裂することが原因だと考えられる。

鉄筋の腐食方法に着目すると、コンクリート内部で生成された腐食物である(c)(d)は鉄筋単体で生成された腐食物である(a)(b)と比べて弾性係数が大きくなる。これは腐食生成物の緻密さの違いによるものであり、コンクリート中での発生と自然暴露で発生する腐食生成物では、発生環境により腐食生成物の力学的特性は大きく異なることを示している。また、腐食生成物が緻密であるほど

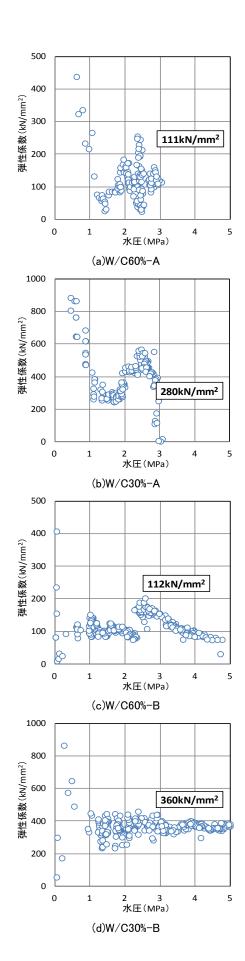


図-9 腐食生成物の弾性係数の変化

表-4 解析に用いたパラメータ

	弾性係数(N/mm²)	ポアソン比
コンクリート	表一3に示す	$v_c = 0.20$
鉄筋	$E_s = 210000$	$v_s = 0.17$

収束が良い。鉄筋単体で腐食した腐食生成物には、収束 後もばらつきが生じるなどの塑性挙動がみられる。

腐食生成物に三次元的な拘束を与えることにより得られた腐食生成物の弾性係数の値は、既往の値と比べると大きな差が見られるが、これは拘束圧の影響の違いによるものである。すなわち拘束圧が解放されずに試験体に作用すると、腐食生成物の弾性係数は非常に大きくなり、逆にひび割れ等が生じると拘束圧の解放により、その後に生成される腐食物の弾性係数は小さくなる。

なお、腐食生成物のポアソン比についてはまだ十分な 結果が得ることができておらず、今後詳細な検討をする ことを課題としたい。

## 5. まとめ

本研究は、鉄筋腐食により発生する腐食生成物の弾性 係数、ポアソン比を算出するモデルの構築を行った。ま た、電食実験および側圧水圧実験を行い、データにモデ ルを適用することにより、以下の結果が得られた。

- (1) 腐食生成物の発生環境により、腐食生成物の弾性係数やポアソン比といった力学的特性は大きく異なる。
- (2) 密な腐食生成物は鉄筋への力が伝達されやすく, 鉄 筋ひずみが大きくなる。また疎な腐食生成物は力の 伝達を妨げる働きを持ち, 鉄筋ひずみが小さくなる。
- (3) 二通りの方法により得られた腐食生成物は, X 線回 折により, 物質は同じものであることが確認された。
- (4) 本研究では水セメント比および電食方法の違いのみの比較であったので、今後パラメータを増やし、モデルの適用性を検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 吉岡保彦,米沢敏男:鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討,土木学会第 39 回年次学術講演会第5部,pp.271-272,1984.11
- 松島学, 堤知明, 関博, 松井邦人:塩害環境下における RC 構造物の設計かぶり、土木学会論文集, No.490/V-23, pp41-49, 1994.5
- 3) 村上祐貴,木下哲秀,鈴木修一,福本幸成,大下英吉:鉄筋腐食を生じたRC梁部材の残存曲げ耐力性 状に関する研究,コンクリート工学論文集,第17 巻,第1号,2006.1