

コンクリート内部に生じる腐食生成物の力学的特性の推定に関する研究

中央大学理工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○足助 美岐子

中央大学理工学部土木工学科 学生会員 後藤 成道

中央大学理工学部土木工学科教授 正会員 大下 英吉

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各種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など、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¹⁾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報告されている。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、前報で報告した特殊な装置による加圧载荷を実施し、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

前報の実験装置は図-1に示すように、鋼製の円筒容器であるセルの中央部に $\phi 150 \times 300\text{mm}$ の試験体が設置される。試験体側面とセルの隙間には水が満たされており、ジャッキを介して水に加圧することにより、試験体側面にのみ水圧が作用することとなる。なお、セルの上下端には漏水を防止するために、Oリングとバックアップリングが配置されている。

試験体は、同図に示すように鉄筋とその表面に堆積した腐食生成物およびコンクリートからなっており、コンクリート表面には側面水圧が一樣に作用することとなる。したがって、試験体の変形挙動を理論的に表現するには、平面応力状態を仮定した厚肉円筒理論が適用可能となる。

側面水圧によって圧力が作用するのは、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、それぞれの層の外径と内径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-2(a)に示すように、コンクリート外径に作

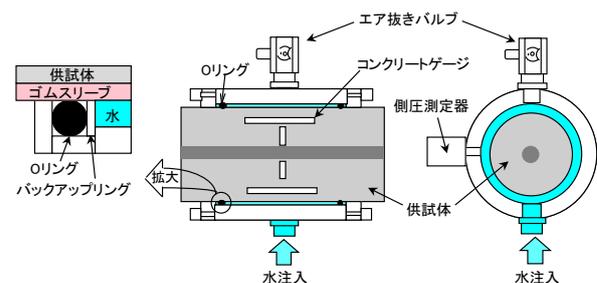


図-1 実験装置の断面概略図

キーワード 腐食生成物 鉄筋腐食 弾性係数 電食試験 側面水圧実験

連絡先 〒112-0003 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 TEL 03-3817-1892

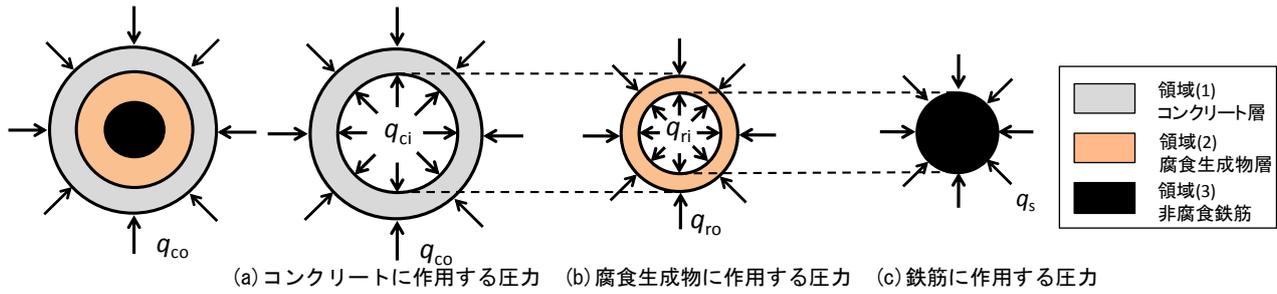


図-2 各層に作用する応力

用する圧力を q_{co} (側面水圧)とすると、内径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 腐食した鉄筋とコンクリートの変形

(1) コンクリート

まず、コンクリートの内側には何も無い状態を仮定し、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。

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

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

ここで、 ν_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 φ_{ci} と外径 φ_{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。

$$\varphi_{ci} = \varphi_r + 2u_{ca} \quad (3)$$

$$\varphi_{co} = \varphi_c + 2u_{cb} \quad (4)$$

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。

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2E_c(K_1^2 - 1)} \left\{ (q_{ci} - q_{co} \cdot K_1^2)(1 - \nu_c) + \frac{1}{r^2} (q_{ci} - q_{co})(1 + \nu_c)K_1^2 \right\} \quad (5)$$

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。

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

(2) 鉄筋

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 ε_s 、変位 u_s はそれぞれ式(7)、式(8)で表される。

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

$$u_s = \varepsilon_s \cdot \varphi_{si}/2 \quad (8)$$

ここで、 ν_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

腐食生成物は、内径 φ_{si} 、外径 φ_r の一樣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。

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

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

ここで、 K_2 は φ_r/φ_{si} 、 ν_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。

$$q_{ri} = q_s \quad (11)$$

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

(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。

$$u_{ca} = u_{rb} - u_{ci} \quad (12)$$

$$u_s = u_{ra}$$

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。

腐食生成物の外径 φ_r は、本研究では腐食後の鉄筋の重量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、鉄筋軸方向に一律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 は腐食生成物の重量、 φ_{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、 ρ_s は鉄筋の密度(=7.87g/cm³)、 l は鉄筋の長さ、 ρ_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ほとんどがヘマタイトであることが確認できたので、 $\rho_r = 5.30\text{g/cm}^3$ とした。

式(13)～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。そして、腐食生成物の外径 φ_r は、鉄筋の直径 φ_{si} と腐食生成物の厚さ r を用いて式(16)のようにして表される。

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

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	D19	10%	疎	60%
W/C30-A				30%
W/C60-B			密	60%
W/C30-B				30%

表-2 解析に用いたパラメータ

	弾性係数(N/mm ²)		ポアソン比
	W/C60%-A	W/C30%-A	
コンクリート	20958	29429	v _c =0.2
	19741	28922	
	W/C60%-B	19741	
	W/C30%-B	28922	
鉄筋	E _s =210000		v _s =0.17

3 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

本実験の载荷は0.01MPa/secで油圧ポンプを使って行い、鉄筋ひずみとコンクリートのひずみを測定した。実験パラメータは、表-1に示すように腐食生成物の緻密さと水セメント比である。腐食試験方法には電食試験法を採用し、鉄筋単体で腐食させ腐食生成物が疎なものを作成する方法(A)と、コンクリート中で腐食させ密なものを作成する方法(B)の2水準とした。水セメント比は、60%と30%の2水準である。計4パラメータの試験を行った。

2章で構築したモデルに本実験の条件を代入し、モデル評価の検討を行うこととする。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-2に示す。コンクリートの弾性係数には圧縮試験から得られた値を用いた。

図-3に荷重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荷重载荷初期段階では大きなばらつきがみられるものの、荷重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¹⁾と同様の傾向である。さらに、荷重が増加すると、弾性係数は小さくなるという傾向を示している。これは、腐食生成物に荷重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。

弾性係数の同定値は以下の順である。

$$W/C60\%-A < W/C60\%-B < W/C30\%-A < W/C30\%-B$$

鉄筋の腐食方法に着目すると、コンクリート中で腐食した(c)(d)は鉄筋単体で腐食した(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収束は良い。鉄筋単体で腐食した腐食生成物は、収束後もばらつきが生じるなど、塑性挙動がみられる。弾性係数が小さいほどコンクリートが受ける側圧を腐食生成物に伝達するのが早くなるためだと考えられる。

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、今後検討する必要がある。

腐食生成物に三次元的な拘束を与えることにより

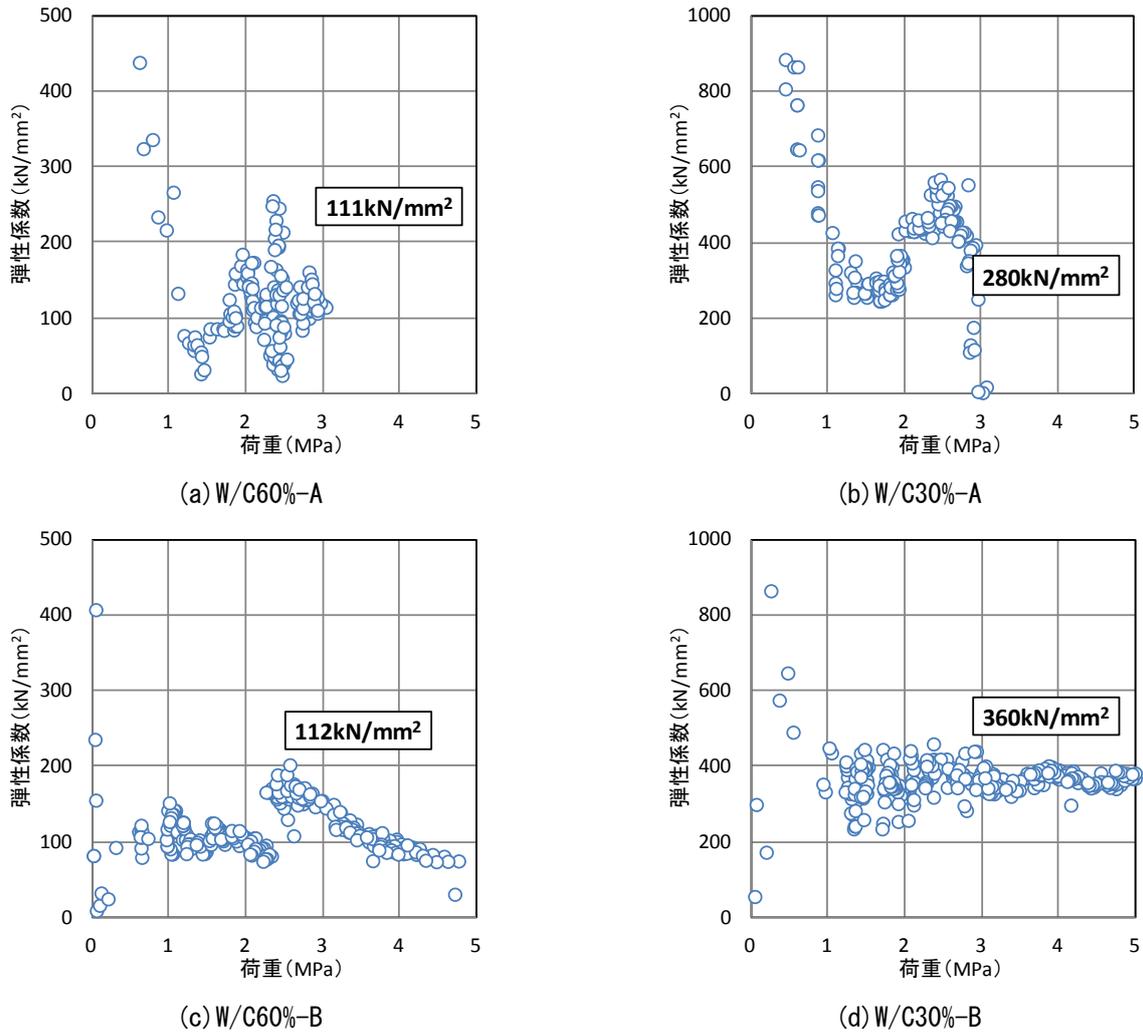


図-3 腐食生成物の弾性係数

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。

本研究では、水セメント比と腐食生成物の緻密さの違いのみに着目したが、今後パラメータを増やした実験を行うとともに、モデルの改良を行う必要がある。

4. 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)腐食生成物の弾性係数は、ある荷重で一定値に収束しその後値は小さくなる傾向を示した。

(2)腐食生成物が緻密であるほど、弾性係数の収束が良い。

(3)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。

(3)本モデルでは、腐食生成物の弾性係数については比較的良い結果が得られたが、ポアソン比については再度検討する必要がある。

(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た実験を行いモデルの改良を行う。

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
- 2) 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