

論文 コンクリート中における鋼材の腐食生成物の変形特性に関する実験的検討

山口 貴幸*1・小池 耕太郎*2・下村 匠*3

要旨：劣化した鉄筋コンクリート構造物の現有性能を評価するためには、内部の鋼材の腐食量を的確に測定する必要がある。本研究では、膨張を拘束するリングの拘束の程度を変えた状態でコンクリート中の鉄筋を電食によって腐食させ、鉄筋腐食によって生じる膨張挙動を実測する方法を提案し、それによる実験結果と力学モデルによる計算結果の比較から、腐食生成物の体積弾性率を同定した。これは、鉄筋周囲の空隙やひび割れへの腐食生成物の侵入の影響を含んだ、みかけの値である。

キーワード：腐食ひび割れ、腐食生成物、体積弾性率、腐食膨張率、電食試験

1. はじめに

鋼材の腐食による劣化が進行している RC 構造物の現有性能を評価するには、内部の鋼材の腐食量を的確に知る必要がある。そのために、構造物表面の腐食ひび割れ等の外観変状から内部の鋼材腐食状況を推定する方法の確立が求められている。腐食ひび割れ幅と内部の鋼材の腐食量の関係を力学モデルにより評価する試みはこれまでいくつか行われている¹⁾。両者の関係を力学モデルにより結びつけるには腐食生成物の膨張率、ならびに弾性変形、クリープを含む変形特性が必要である。しかし、それらは実測困難であることに加え、たとえば変形特性は腐食生成物のひび割れや空隙への侵入の影響を含んだみかけの物性であるので化学組成から理論的に推定することも困難である。このため、鋼材腐食によるコンクリートの腐食ひび割れの発生・開口の計算では、これらの物性値は仮定した数値を用いることが多い。

本研究では、従来困難であったコンクリート中の鉄筋腐食により生じる腐食生成物の変形特性を実験により導出することを試した。鉄筋周辺の空隙やひび割れ内への腐食生成物の侵入の影響を含んだ形で実測することに特徴がある。外部からの拘束の程度を変化させてコンクリ

ート中の鉄筋を電食により腐食させ、腐食膨張圧とひび割れ開口を測定し、力学モデルによる計算値と実測値との比較から腐食膨張率および体積弾性率を同定した。

2. 電食試験による腐食膨張圧測定

2.1 実験概要

実験装置の概要を図-1、試験体の詳細を図-2、示方配合を表-1、試験体一覧を表-2 に示す。試験体には、塩化ビニル管(VU または VP、呼び径 75mm)または鋼管(STKM11A、外径 89mm)を、所定の拘束率となる長さで切断して拘束リングとして使用した。これと、同種の管を所定の長さで切断したものを組合わせて鋼製バンドで連結して1組の型枠とした。この型枠の中心に、電極を取付けた鉄筋(D13)を配置してコンクリートを打設し、養生後、拘束リングとする部分以外の型枠を取り除いて作

表-1 示方配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
	水	セメント	細骨材	粗骨材	NaCl	混和剤
60	168	280	842	985	5	1.40

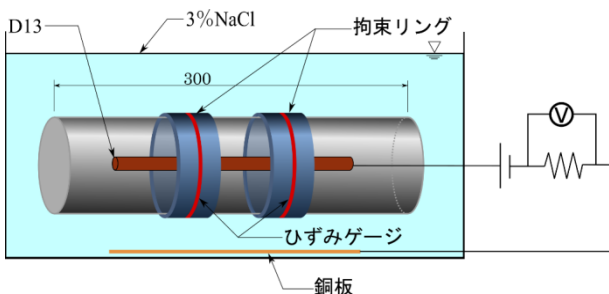


図-1 電食試験概要

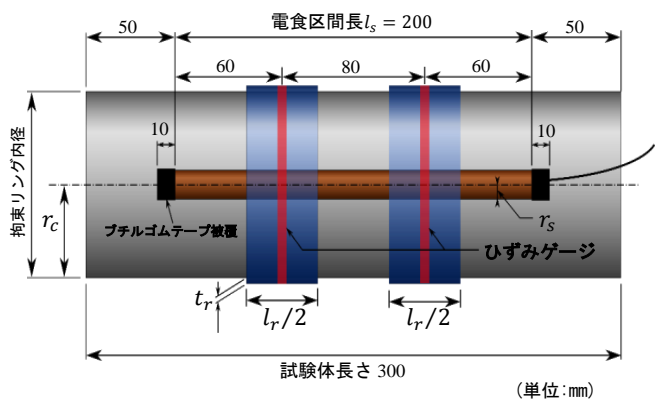


図-2 試験体詳細

*1 長岡技術科学大学 技術支援センター (正会員)

*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

*3 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 工博 (正会員)

表-2 試験体一覧

試験体名	鉄筋	拘束リング							
		種類	内径 mm	厚さ mm	長さ mm	弾性係数 MPa	ポアソン 比	拘束度 ^{※1} N	拘束度の 比 ^{※2}
VU	D13	塩化ビニル管 VU75	83.6	2.7	40×2	3334	0.38	720144	1.0
VP	公称半径	塩化ビニル管 VP75	78.0	5.5	40×2	3334	0.38	1466960	2.0
S	6.35mm	鋼管 STKM11A	85.8	1.6	32×2	21000	0.30	2150400	3.0

※1：拘束度＝厚さ×長さ×弾性係数

※2：拘束度の比＝VU 試験体の拘束度に対する割合

製した。このため、コンクリートの外径は、拘束リングの内径と同じになる。また、拘束リングの配置は離散的で、拘束状態が軸方向で変化する。膨張圧による変形が拘束リングに十分伝達されるように、かぶりに対して拘束リングの間隔が大きくなるように配慮した。拘束リングの違いにより拘束の程度が異なる試験体を各1体作製した。

電食による腐食の進行を促進するため、水に対して3%の塩化ナトリウムを練混ぜ水に添加した。養生終了後、試験体と銅板を濃度3%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬し、直流電源装置に接続して電食試験を行った。電流密度は1.30mA/cm²、目標腐食減量率は25%とした。シャント抵抗の電流を経時的に測定し、積算電流量を算出した。腐食膨張による変形は、拘束リングのひずみによって測定した。ゲージ長90mmのひずみゲージを拘束リング1本あたり3枚使用して、それぞれの拘束リングの外側円周方向に、全周にわたってなるべくすき間ができないように貼付した（拘束リング外周長279mmに対してひずみゲージ90mm×3枚＝270mm）。拘束リングの剛性（断面積×弾性係数）を試験体ごとに变えることで、腐食膨張の拘束の程度を変化させている。

試験体解体後、鉄筋を10%クエン酸二アンモニウム水溶液（60℃）に24時間浸漬して除錆し、電食試験前後の質量差を測定し、これを元の質量で除して最終腐食減量率とした。電食試験の途中における腐食減量率は、ファラデーの法則のに基づき、積算電流量と腐食による質量減量が比例関係にあるとして算出した。

2.2 実験結果

図-3に、拘束リングひずみと腐食減量率の関係を示す。これは試験体1体あたり6枚のひずみゲージの結果をそれぞれの試験体ごとに平均したものである。いずれの試験体も、①腐食減量率1%程度まではひずみが小さく、その後ひずみが増加しはじめる折れ点が現れ、②腐食減量率に対して線形的に増加する段階を経る。試験体Sでは腐食減量率2%付近でひずみの増加が一時的に停滞しているが、これは拘束度が他より大きいことでひび割れの進展が段階的となっていることが原因と考えられる。ひび割れの進展を伴わない膨張圧の上昇は、今回の

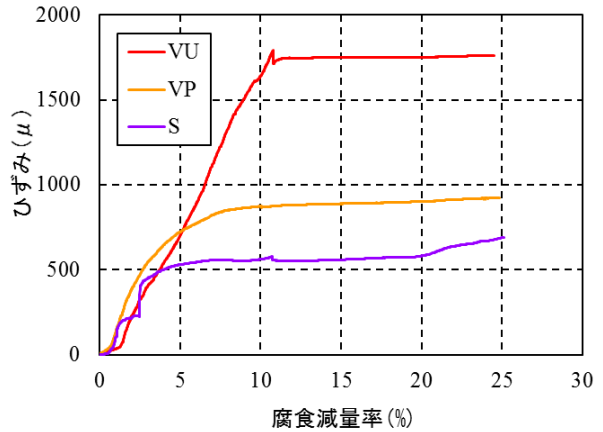


図-3 拘束リングひずみー腐食減量率の関係



図-4 腐食生成物の流出（腐食減量率:約35%）

方法では測定できないので、実際の膨張圧は、他の試験体と同様に、線形的に増加していると考えられる。③腐食減量率5~10%程度以降は腐食減量率が増加してもひずみが増加しないようになる傾向がみられた。これらは、以下の3段階の現象が対応していると考えられる。①腐食減量率1%前後までは、鉄筋周囲のブリーディング層や空隙に腐食生成物が充てんされ、膨張圧は発生しない。さらに腐食膨張してひび割れが生じるが、まだコンクリート表面まで到達せず、拘束リングひずみが生じない。②腐食減量率1%前後でひび割れがコンクリート表面に達し、腐食膨張によって拘束リングが押し広げられはじ

める。その後の膨張で 5~10%まで線形的にひずみが増大する。③5~10%以降は、ひび割れ幅が十分大きくなり、腐食生成物のほとんどがひび割れから流出しひび割れをそれ以上押し広げることができないため、拘束リングひずみが増加しなくなる。本実験の前に行った予備実験でも、腐食が著しく進行して十分にひび割れ幅が開口すると腐食生成物が流出すること(図-4)が確認された。このことから、本研究では、ひび割れが表面まで到達し腐食生成物がひび割れを開口させる上記の段階②での現象を主たる検討対象とする。段階③になると、腐食生成物がひび割れ内を流動することになり、腐食の進行が膨張圧の上昇につながらないので、本研究の検討対象にはできない。

3. 腐食膨張モデル

3.1 腐食膨張モデルにおける仮定

腐食生成物の挙動を検討するにあたって、本研究では以下の仮定を設ける。①コンクリートは、ひび割れが表面まで貫通した後は剛体として扱う。②鉄筋周囲にブリーディングによる空隙や腐食減量率 1%前後の小さい範囲で鉄筋周囲に生じる腐食ひび割れが腐食生成物で満たされたのちに、膨張圧が発生する。膨張圧が生じ始める時点までの鉄筋の体積増加量を初期空隙体積と呼ぶ。

3.2 腐食膨張圧

仮定により、ひび割れが表面まで貫通したのち、鉄筋表面で生じる腐食膨張圧がコンクリートを介して拘束リングに伝達される。鉄筋表面位置で腐食生成物とコンクリートの間で作用している膨張圧 P は、下記の式(1)、(2)で算出される。

$$P = \varepsilon_r B \quad (1)$$

$$B = \frac{E_r l_r t_r}{r_s l_s (1 - \nu_r / 2)} \quad (2)$$

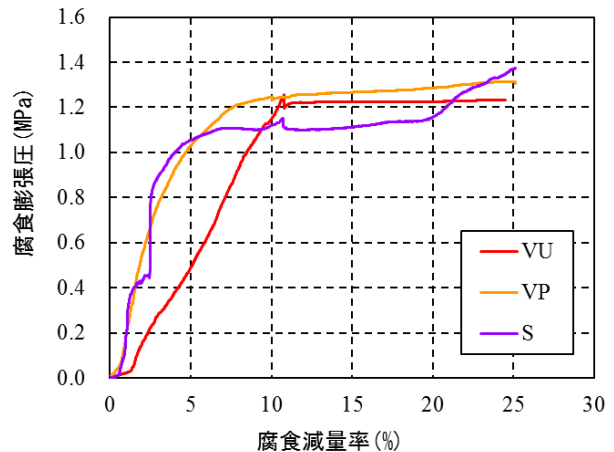


図-5 腐食膨張圧-腐食減量率の関係

ここで、 ε_r : 拘束リングひずみ、 E_r : 拘束リング弾性係数、 l_r : 拘束リング長さ(2本の合計)、 t_r : 拘束リング厚さ、 r_s : 鉄筋の半径、 l_s : 鉄筋電食区間の長さ、 ν_r : 拘束リングのポアソン比である。 B は、コンクリートを介して拘束リングが鉄筋の腐食膨張を拘束する度合いを表す定数である。今回の実験で計測された拘束リングひずみから式(1)、(2)によって算出される腐食膨張圧を図-5に示す。

3.3 腐食生成物の体積と体積弾性率

電食によって生じる腐食生成物の体積は、式(3)で算出される。

$$V_{cp} = \beta \gamma \pi l_s r_s^2 \quad (3)$$

ここで、 β : 腐食減量率、 γ : 腐食膨張率である。この V_{cp} は非圧縮状態での腐食生成物体積である。拘束を受けている条件下では腐食生成物体積は圧縮されて V_{cp} よりも小さくなる。

拘束を受けて圧縮された腐食生成物体積の模式図を図-6に示す。仮定①により、鉄筋の腐食膨張によるコンクリートの半径方向の変位 Δr_c は鉄筋近傍での値とコ

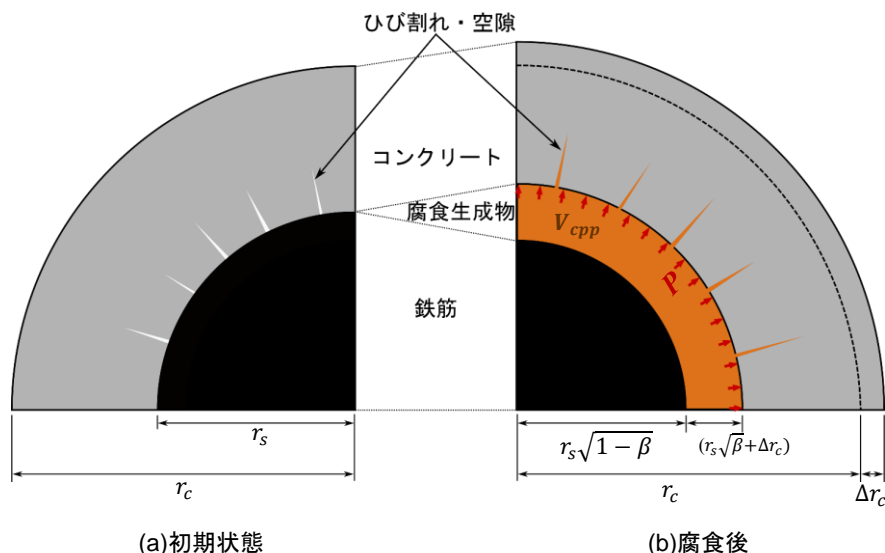


図-6 腐食膨張モデル

表-3 既往の研究における腐食生成物の各物性値

	須田ら ²⁾	森川ら ³⁾	足助ら ⁴⁾	鈴木ら ⁵⁾	高谷ら ⁶⁾
弾性係数 E	-	245MPa	20000MPa	-	-
体積弾性率 $K(=E/1.2)$	-	200MPa	16500MPa	-	-
腐食膨張率 γ	3.02~3.20	2.5	-	1.10~1.50	2.1~6.9
ポアソン比	-	-	0.3	-	-

ンクリート表面での値が同じになる。拘束リングひずみから、コンクリートの変位を式(4)によって算出する。

$$\Delta r_c = r_c \varepsilon_r \quad (4)$$

ここで、 r_c ：コンクリート半径、 ε_r ：拘束リングひずみである。

実際には腐食生成物は流体的な性質も帯びているため、圧縮力が作用すればひび割れや空隙に侵入することが見かけの体積減少として観察されていると考えられるが、ここでは腐食生成物を圧縮性を有した固体とみなすと、圧縮された下での腐食生成物体積 V_{cpp} は、コンクリートが押し広げられて出来た部分の体積と、鉄筋の腐食減量体積、仮定②で述べた初期空隙体積の合計であり、式(5)で算出される。

$$V_{cpp} = \pi l_s [(r_s + \Delta r_c)^2 - r_s^2 (1 - \beta)] + V_v l_s \quad (5)$$

ここで、 V_v ：単位長さあたりの初期空隙体積である。

式(3)で算出される腐食生成物体積と、式(4)、(5)で算出される圧縮された腐食生成物体積、および拘束によって腐食生成物に生じる圧力 P は、弾性変形、クリープ変形を含むすべての変形成分の総和に対する体積弾性率 K を用いて以下の式(6)の関係で表される。

$$P = K \left(1 - \frac{V_{cpp}}{V_{cp}} \right) \quad (6)$$

腐食膨張率 γ 、体積弾性率 K 、初期空隙体積 V_v を仮定すると、式(6)により各腐食減量率の時点における腐食膨張圧が算出され、実験の拘束リングひずみから算出される腐食膨張圧の実験値と比較することができる。

4. 腐食生成物の物性値の検討

4.1 既往の研究における腐食生成物の物性値

鉄筋の腐食膨張に関する研究は、これまでも多く行われている。それらの中で、腐食生成物の物性値を扱った研究での値を、表-3にまとめた。これらの物性値は計算仮定と連動するので研究によって大きな違いがあることがわかる。

腐食生成物の物性値として、既往の研究では体積弾性率ではなく弾性係数が扱われているので、弾性理論に基づき、弾性係数と体積弾性率が式(7)の関係にあるとして換算することにした。

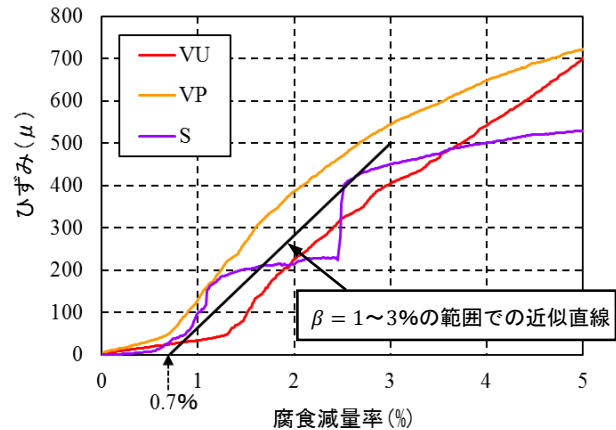


図-7 初期空隙体積の検討

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (7)$$

腐食生成物のポアソン比を文献4)を参考に0.3とし、 $K=E/1.2$ と換算して、表-3の体積弾性率を示した。

4.2 提案モデルにおける腐食生成物の物性値

本研究のモデルで実験結果をシミュレーションするには、腐食膨張率 γ 、体積弾性率 K 、初期空隙体積 V_v を設定する必要があるが、以下の手順で行う。

(1) 腐食膨張率

まず、腐食膨張率 γ の値は既往の知見をもとに設定することとする。鈴木ら⁵⁾は、ひび割れ発生限界腐食量のFEM解析と実験の比較から腐食生成物がコンクリートに対して作用する力を検討し、腐食膨張率は1.10~1.50としている。一方、腐食生成物の化学組成から検討した須田ら²⁾、高谷ら⁶⁾はこれよりも大きい値を提案している。鈴木らの値は、何らかの要因を含んだ見かけの体積膨張を表している可能性があるが、本研究の力学モデルにより表される様態は鈴木らの解析モデルに近いと考え、腐食膨張率を鈴木らの示した範囲の中間値である1.3とした。

(2) 初期空隙体積

次に、仮定②で述べた初期空隙体積について検討を行う。本研究では、鉄筋周囲の空隙や腐食減量率1%前後の小さい範囲で鉄筋周囲に生じる腐食ひび割れがあり、この初期空隙が腐食生成物で充てんされたのちに、膨張圧が生じるとしてモデル化している。実際には、腐食ひび

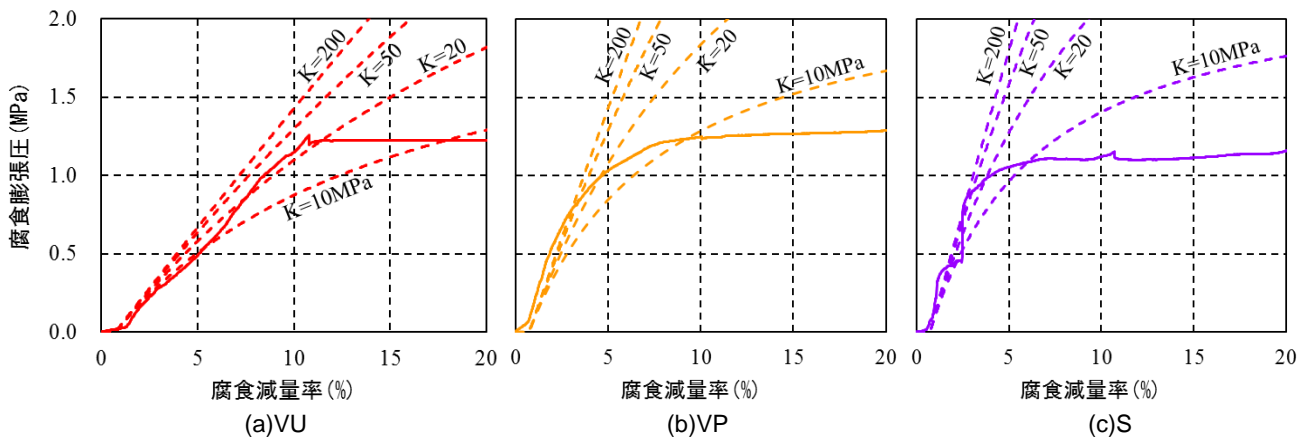


図-8 体積弾性率Kの検討

割れがコンクリート表面に達したときに拘束リングひずみが生じ始める。したがって、初期空隙体積は、拘束リングひずみが生じ始める腐食減量率から同定する。腐食減量率と拘束リングひずみの関係(図-7)において、線形的に膨張が進行しているとみられる $\beta=1\sim3\%$ の範囲での近似直線と横軸(ひずみ=0)との交点で、元の鉄筋から膨張した分の体積と初期空隙体積が等しくなり、コンクリートに膨張圧が作用し始めたと考えられる。このときの平均腐食減量率は0.7%であった。この時点での腐食生成物の体積から、初期空隙体積は以下の式(8)によって算出される。

$$V_p = \beta \pi r_s^2 (\gamma - 1) \quad (8)$$

これに腐食減量率 $\beta = 0.7\%$ 、腐食膨張率 $\gamma = 1.3$ を代入すると、初期空隙体積 $V_p = 0.266 \text{ mm}^3/\text{mm}$ が得られた。

(3) 腐食生成物の体積弾性率

ここまでで得られた入力値を用いて、体積弾性率 K をパラメータスタディにより同定する。本研究の主眼は、腐食生成物の生成に応じて線形的に膨張圧が増加する範囲であるので、その範囲の計算値と実測値との比較から体積弾性率 K を同定する。その結果を図-8に示す。

まずは既往の研究で用いられている体積弾性率の値を検討した。森川ら³⁾の200MPaと足助ら⁴⁾の16500MPaを入力した場合は、検討している腐食減量率の範囲内では結果はほとんど同じであった。これは、体積弾性率が200MPaより大きい場合、腐食膨張圧が1.0MPa程度以下の低い状態では、腐食生成物の圧力が生じて体積圧縮がほとんどなく、腐食生成物を非圧縮性とみなしたのと同じような挙動を示すためである。

検討範囲内で拘束率に関わらず腐食膨張圧の実測値と計算値がよく整合したのは体積弾性率が20MPaの場合であった。これを、既往の研究と比較する。①足助ら⁴⁾が得た16500MPaは、電食させたのちにはつり出し、新たに打設したコンクリート内で実験から算出したものである。そのため、鉄筋に付着している固形の腐食生成物

のみを対象としていると考えられる。本研究で対象とした腐食生成物は、液状部分も含んだものであり、なおかつそれがひび割れ等に浸入する影響も考慮しているので、差が大きくなったと考えられる。②森川ら³⁾は、ひび割れ発生腐食量のFEM解析と実験の比較から、245MPaを妥当としている。クリープ係数を0~2.0の範囲として弾性係数を低減した、としておりクリープを大きく考慮した場合、80MPaとなる。これは検討対象がひび割れ発生前の膨張圧であり、本研究で主に検討しているひび割れ後の膨張圧とは異なるが、オーダー的には本研究で同定した値と近くなる。

本研究で得られた腐食生成物の体積弾性率は、前述のとおり、鉄筋周囲の空隙やひび割れへの腐食生成物の浸入の影響を含んだ、みかけの値である。これを用いて、腐食の進行に応じて腐食ひび割れが開く過程の腐食膨張圧を計算によって再現することができた。しかし、実験ではひび割れ幅が大きくなり腐食生成物がひび割れから外部に流出し始めると、腐食膨張圧が上昇しなくなる。この段階の現象は本研究のモデルでは再現できない。この挙動を再現するためには、腐食生成物の流動性を考慮しなければならないと考えられる。

また、今回の実験では電食法で腐食を模擬したが、実構造物で実際に生じる腐食生成物とは物性が異なるとの報告⁶⁾があるので、今回得られた体積弾性率の値は、電食に限られる可能性がある。ただし、実環境での腐食においても、腐食膨張によりひび割れが生じるという現象に本質的には変わらないので、腐食生成物の物性値として適切な入力値を与えることができれば、本研究の手法を適用できると考える。様々な腐食条件での適切な入力値については、今後の課題としたい。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリート中に鉄筋を埋設した供試体を外部か

ら拘束した条件下で電食により鉄筋を腐食させ、腐食量、腐食ひび割れ幅、腐食膨張圧を実測する試験方法を提案した。

- (2) 提案した試験方法による実験結果と、コンクリートを剛体、腐食生成物を弾性体と仮定した力学モデルによる計算結果とを比較することにより、鉄筋周囲の空隙やひび割れへの腐食生成物の侵入の影響を含んだ、腐食生成物のみかけの体積弾性率を同定した。
- (3) 上記の方法で拘束の程度が変わっても腐食膨張圧を妥当に評価する腐食生成物の体積弾性率は20MPa程度の値となった。このような小さな値となったのは、腐食生成物のひび割れへの侵入による圧力の損失を含んでいるためと考えられる。

謝辞: 本研究は総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：科学技術振興機構）の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) 河村圭亮, Tran Khoa Kim, 中村光, 国枝稔: 鉄筋腐

食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1007-1012, 2010

- 2) 須田久美子, MISRA Sudhir, 本橋健一: 腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.751-756, 1992.
- 3) 森川雅行, 関博, 奥村隆: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第378号/V-6, 1987.
- 4) 足助美岐子, 根岸泰彦, 大下英吉: 腐食生成物の力学的特性を考慮した腐食ひび割れ幅進展モデル, コンクリート工学年次論文集 Vol.35, pp.1045-1150, 2013
- 5) 鈴木三馨, 福浦尚之, 丸屋剛: 塩害による腐食劣化予測に対する構造・鋼材腐食連成解析手法の構築, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.3, 301-319, 2014.
- 6) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, 154-165, 2013.