

劣化したコンクリート部材の数値解析モデリング高度化を目的とした

腐食鉄筋周辺に作用する膨張圧推定に関する研究

玉井宏樹¹、桑原功旺²、園田佳巨³

^{1,3}九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門

²九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻

本研究では、鉄筋腐食によるRC構造物の力学性能低下を統一的に解ける高度な数値解析モデリングならびにその手法を構築することを最終目標とし、その第一段階として、鉄筋の腐食率と周辺コンクリートに作用する膨張圧の関係を実験・解析を組み合わせて評価することを試みた。また、得られた腐食程度と膨張圧の関係を用いて、ひび割れが発生する時点における腐食率の推定を行った。

1. はじめに

近年、社会基盤施設の老朽化に伴う問題が数多く報告されており、維持管理に対する関心が急速に高まっている。特に四方を海で囲まれている我が国では、塩害に起因する鉄筋コンクリート（以降、RCと称す）構造物内部の鉄筋腐食による劣化が顕著であり、このようなRC構造物の残存耐力を適切に評価することは、維持管理技術の発展に必要不可欠である。ここで、鉄筋腐食による劣化を対象としたRC構造物の耐荷性能を評価する既往の研究を概観すると、促進劣化により製作した劣化RC部材を用いた載荷実験や、腐食による鉄筋の断面積減少やそれに伴う付着強度の低下をモデル化した解析モデルを用いたFEM解析など、これまでにいくつかの研究が遂行されてきている^{1)~4)}。しかし、それらには多くの仮定が存在するとともに、劣化後の状態を初期状態として捉えているため、実際の腐食環境を適切に捉えた劣化状態となっておらず、結果の解釈は難しいと言える。

そこで、本研究では鉄筋腐食による劣化のメカニズムを適切に捉え、「鉄筋腐食⇒発錆⇒膨張圧による周辺コンクリートのひび割れ⇒付着力・剛性の低下⇒外荷重に対する耐荷性能の低下」という一連の流れを統一的に解くことのできる高度な数値解析モデリングならびにその手法を構築することを最終的な目標とした。この目標を達成するためには、様々な知見が不足しているが、その中の一つに鉄筋の腐食程度と、それにより周辺コンクリートに作用する膨張圧の関係がある。本研究では、腐食程度を定量的に表す指標として鉄筋の質量減少率である腐食率(%)を用いて、実験と解析を組み合わせた手法により腐食率-膨張圧関係を推定することを試

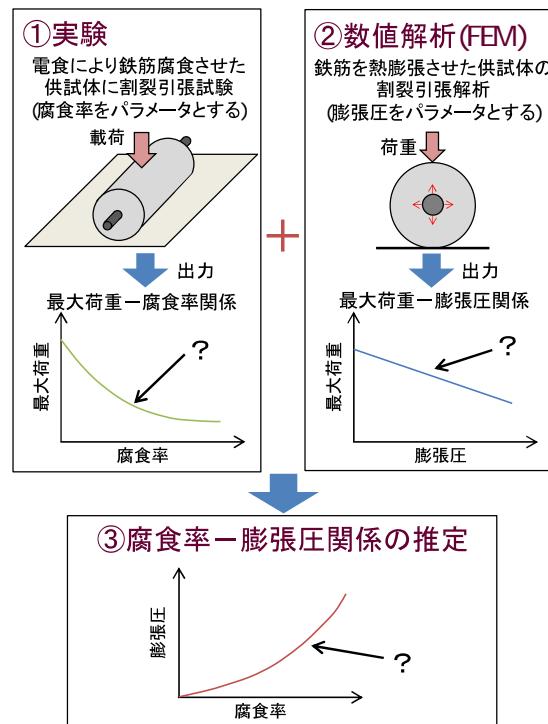


図-1 推定の流れ

みた。実験においては、まず、中心に鉄筋を有するモルタル円柱供試体を電食法により腐食させることで劣化供試体を複数作製した。これらの供試体に対して割裂引張試験を実施することで、腐食率と最大荷重の関係を算出した。解析においては、有限要素法を用いて鉄筋腐食による体積膨張を鉄筋部の熱膨張として再現したモデルに対し、割裂引張試験の再現解析を行い、膨張圧と最大荷重の関係を算出した。これらの二つの関係の最大荷重をパラメータとして、腐食率-膨張圧関係の推定を試みた（図-1 参照）。

2. 腐食した鉄筋を有するモルタル供試体への割裂引張強度試験

2.1 供試体概要および電食法による促進劣化

本実験で用いた供試体の寸法を図-2に示す。鉄筋はD22を用い、かぶりの影響を検討するために直径がφ100mmとφ150mmの2パターンの供試体を作製した。なお、本実験では割裂引張強度のばらつきを低減するためにコンクリートよりも均質なモルタルを用いている。また、供試体は全て同じ材料で同時に作製しており、JISに基づき測定したモルタルの圧縮強度、引張強度および静弾性係数はそれぞれ 61.5MPa、2.56MPa、27.1GPaである⁵⁾。

本研究では供試体の促進劣化手法として、既往の研究において実施例が多く、比較的早期に目標とする腐食レベルが得られる電食法を採用した⁶⁾。電食法による促進劣化試験の概要を図-3に示す。図のように直流電源装置の陽極と供試体の鉄筋、陰極と銅板をそれぞれリード線で接続し、3%NaCl溶液の入った水槽に浸漬させ、150mAの電流により通電することで劣化を促進させた。通電時間については事前に実施した電食試験の結果に基づき、目標とする腐食率に応じて設定した。なお、鉄筋とリード線の接続部においては水分の侵入による局所的な腐食を避けるため、エポキシ樹脂により防水コーティングを施している。

ここで、実験ケースを表-1に示す。供試体名については、腐食あり供試体をC、腐食なし供試体をNとしている。また、Sがφ100mmの供試体、Lはφ150mmの供試体を表しており、ハイフン以後の数字は腐食率が小さいものから順に番号を振っている。

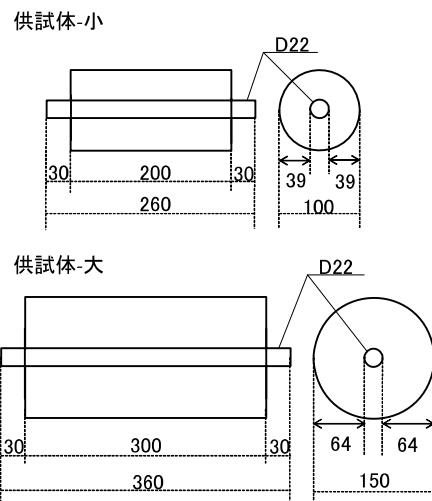


図-2 供試体寸法 (単位:mm)

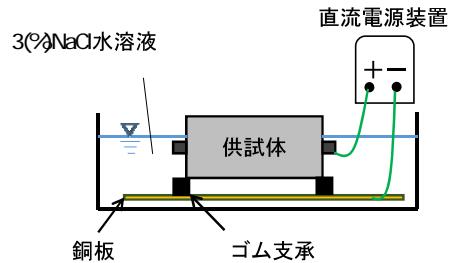


図-3 電食法による促進劣化試験の概要図

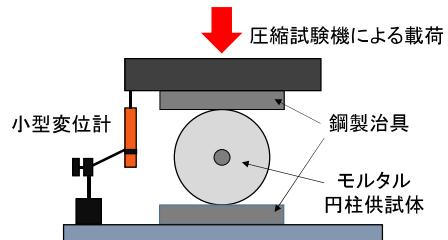


図-4 割裂引張強度試験の概要図

表-1 実験ケースおよび実験結果

供試体名	腐食率 (%)	平均ひび割れ幅 (mm)	最大荷重 (kN)	供試体名	腐食率 (%)	平均ひび割れ幅 (mm)	最大荷重 (kN)
N-S	0.00	ひび割れ無し	84.2	N-L	0.00	ひび割れ無し	174.9
C-S1	0.43	0.06	77.3	C-L1	0.24	ひび割れ無し	140.2
C-S2	0.69	0.03	78.2	C-L2	2.02	0.08	137.0
C-S3	0.84	0.05	75.2	C-L3	2.33	0.09	112.0
C-S4	1.28	0.04	68.2	C-L4	5.52	0.37	64.8
C-S5	3.07	0.31	57.8	C-L5	5.85	0.71	63.5
C-S6	3.14	0.30	64.8	C-L6	6.00	0.34	91.5
C-S7	3.34	0.07	63.2	—	—	—	—
C-S8	4.12	0.30	43.8	—	—	—	—

2.2 実験概要

図-4 に示すように万能載荷試験装置を用いて割裂引張強度試験を実施した。測定項目は荷重と変位であり、ひび割れを有している供試体に関してはひび割れ面が載荷面となるように供試体を設置した。なお、載荷は変位制御で行った。本実験は鉄筋の腐食による膨張圧の作用やそれに伴うコンクリートのひび割れ進展によって、鉄筋を有するモルタル円柱供試体の割裂引張強度が低下すると仮定して実施したものであり、鉄筋の腐食率と割裂引張強度試験の最大荷重の関係を検討したものである。

2.3 腐食程度の調査および実験結果

(1) 目視によるひび割れの確認

電食試験終了後のひび割れ状況の例を図-5 に示す。また、表-1 にはひび割れの発生が確認できた供試体に対して、平均的なひび割れ幅を示している。まず、ひび割れ状況からもわかるように、ひび割れは円周上の 1 方向に卓越しており、腐食によって割裂に至る供試体は確認されなかった。また、表-1 より、腐食率が増加するにしたがって発生したひび割れ幅は増加傾向にあり、腐食生成物の膨張により損傷が大きくなっていることが確認できた。

(2) 腐食率

鉄筋の腐食率を測定するために割裂引張強度試験終了後の鉄筋を写真-1 に示すように 10% クエン酸二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬することで腐食生成物を除去し、除去後に付着している腐食生成物を十分に洗い落とした。その後、十分に乾燥させ鉄筋質量を測定し、式(1) を用いて腐食率を算出した。また、各供試体の腐食率を表-1 に示している。

$$w = \frac{m_0 - m_c}{m_c} \quad (1)$$

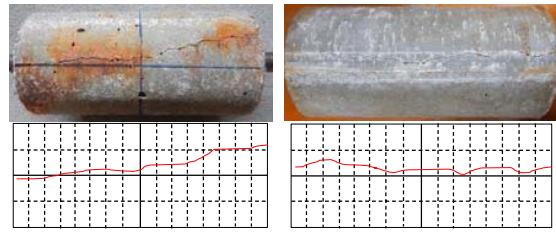
ここで、 w : 腐食率(%)

m_0 : 腐食させていない鉄筋の質量(g)

m_c : 腐食した鉄筋の除錆後の質量(g)

(3) 実験結果

割裂引張強度試験より得られた各供試体の最大荷重を表-1 に示す。さらに、図-7 は大小それぞれの供試体における最大荷重と腐食率の関係をプロットしたものである。これらの図と表からわかるように、かぶりの異なる $\phi 100\text{mm}$ の供試体と $\phi 150\text{mm}$ の供試体ともに腐食率の増加



C-S6 (3.14%) C-L6 (6.00%)

図-5 ひび割れ状況

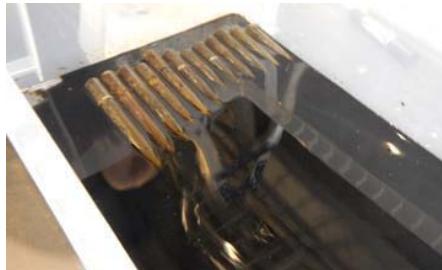
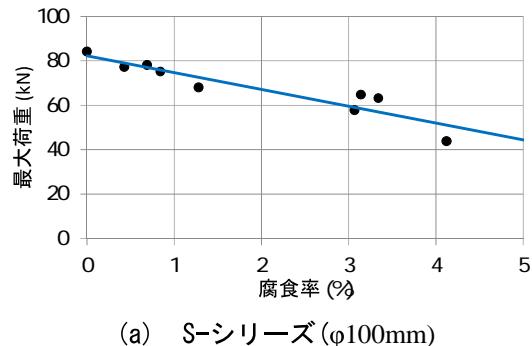
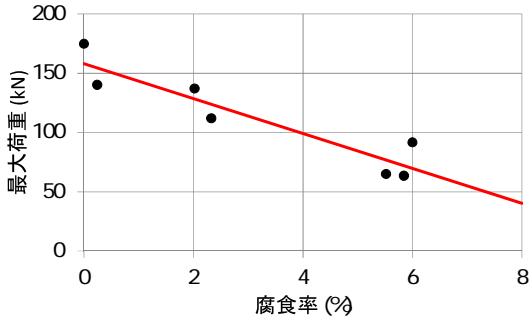


写真-1 クエン酸二アンモニウムでの除錆



(a) S-シリーズ ($\phi 100\text{mm}$)



(b) L-シリーズ ($\phi 150\text{mm}$)

図-7 腐食率-最大荷重

に伴い、最大荷重が低下する傾向が確認できた。また、鉄筋の腐食率に比べて、最大荷重の低下率は大きいことがわかった。

なお、最大荷重と腐食率の関係を推定するために最小二乗法を用いて実験結果を線形近似した。その結果を図-7 および、式(2) と式(3) に示す。相関係数は大小それぞれの供試体において 0.85 以上と比較的高い相関を得ることができた。

$$L_{s_{max}} = -7.55w + 82.24 \quad (2)$$

$$L_{L_{max}} = -14.74w + 158.22 \quad (3)$$

ここで、 $L_{s_{max}}$: $\phi 100\text{mm}$ 供試体の最大荷重(kN)

$L_{L_{max}}$: $\phi 150\text{mm}$ 供試体の最大荷重(kN)

w : 腐食率(%)

3. 腐食鉄筋を有する円柱供試体のFE解析

3.1 解析概要

本解析では、腐食鉄筋を有する円柱供試体に対して行った割裂引張試験を有限要素法を用いて再現することを試みた。腐食によって発生する膨張圧に関しては鉄筋を熱膨張させることで再現し、その後、強制変位を与えて載荷することで解析を行った。つまり、本解析では実現象での腐食生成物による膨張圧と解析上での鉄筋の熱膨張による膨張圧が等価であると仮定し、膨張圧とそれに伴う最大荷重低下の関係を検討したものである。

本解析では、汎用有限要素解析ソフト MSC Marc を用いて解析を行った。なお、鉄筋からコンクリートに作用する膨張圧は奥行き方向の影響を受けないと仮定し平面ひずみ問題として2次元解析を行った。また、図-8に示すように、鉄筋とモルタルとともに4節点平面要素を用いており、断面寸法は実験で用いた供試体と等しくなるようにモデルを作成した。材料特性は表-2に示す通りであり、モルタルに関しては実験で得られた特性を、鉄筋に関しては一般的な値を導入している。なお、鉄筋に関しては弾性体とし、モルタルに関しては簡易的に圧縮側で von Mises の降伏条件式を仮定し、引張側は線形軟化を仮定した。

解析の流れとしては、まず、鉄筋部に熱を与える腐食による膨張を模擬した熱膨張を周辺コンクリートに作用させる。その後、モデル下部節点の変位を固定した状態で、モデル上部の節点に強制変位を与えることで割裂引張強度試験を再現した。鉄筋に付与する温度を変化させて同様の解析を実施することで最大荷重と膨張圧の関係を算出した。なお、膨張圧は図-10に示すように鉄筋の表面部4点に作用する法線方向の応力の平均値とし、最大荷重は荷重・変位関係におけるピーク値とした。

3.2 解析結果

表-3に解析ケースと解析結果を示す。解析

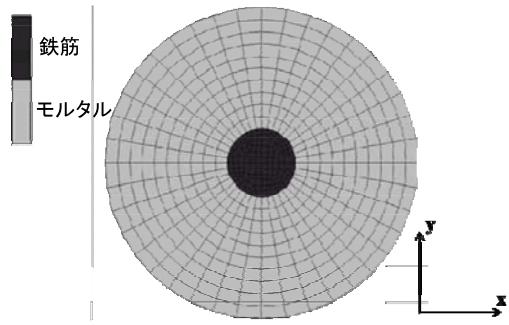


図-8 モデル図

表-2 材料特性値

材料特性	モルタル	鉄筋
ポアソン比	0.184	0.3
静弾性係数(GPa)	27.1	200
圧縮強度(MPa)	61.5	-
引張強度(MPa)	2.56	-
線膨張係数(1/K)	-	1.0×10^{-5}

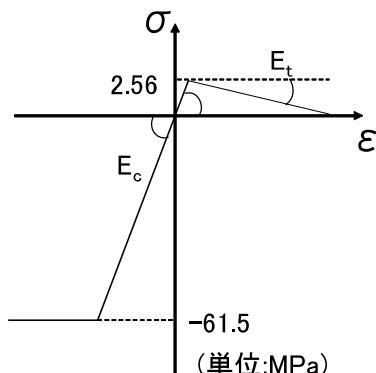


図-9 モルタルに仮定した材料構成則

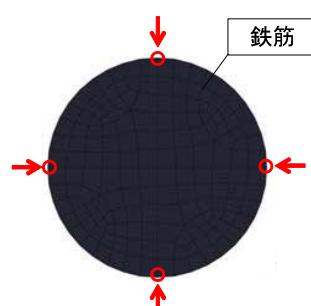


図-10 膨張圧測定位置

ケースについては S が $\phi 100\text{mm}$ の供試体、L が $\phi 150\text{mm}$ の供試体のモデルであり、ハイフン以後の数字は与えた温度増分 Δt ($^{\circ}\text{C}$) を表している。表からわかるように温度増分が大きくなるにつれて膨張圧が増加し、最大荷重が低下していることが確認できる。よって、本解析は実験と同様の傾向を捉えていると言える。なお、解析ケース S-25 については、膨張圧の作用によってコンクリートのひび割れが大きく進展したため、明確な最大荷重を得ることができなかつた。また、図-11 には解析結果とその線形近似曲線を示し、その近似式を式(4)と式(5)に示す。

$$L_{S_{max}} = -8.55P + 89.61 \quad (4)$$

$$L_{L_{max}} = -17.19w + 202.8 \quad (5)$$

ここで、 $L_{S_{max}}$: $\phi 100\text{mm}$ 供試体の最大荷重(kN)

$L_{L_{max}}$: $\phi 150\text{mm}$ 供試体の最大荷重(kN)

P : 膨張圧(MPa)

4. 腐食率-膨張圧関係の推定

4.1 腐食率-膨張圧関係の推定

本節では、実験により求めた最大荷重-腐食率関係の近似式と解析により求めた最大荷重-膨張圧関係の近似式を用いて、最大荷重の項を除去することで腐食率-膨張圧関係を推定することを試みた。得られた関係式を式(6)および式(7)に示す。また、そのグラフを図-12 に示す。

$$P_s = 0.88w \quad (6)$$

$$P_L = 0.86w \quad (7)$$

ここで、 P_s : $\phi 100\text{mm}$ 供試体の膨張圧(MPa)

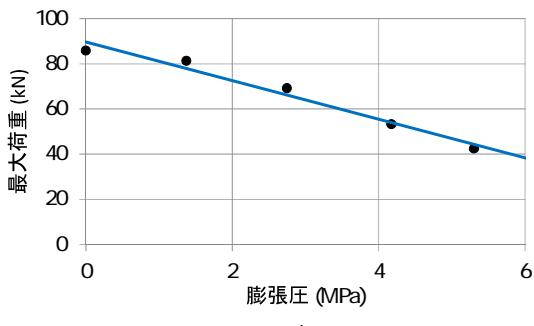
P_L : $\phi 150\text{mm}$ 供試体の膨張圧(MPa)

w : 腐食率(%)

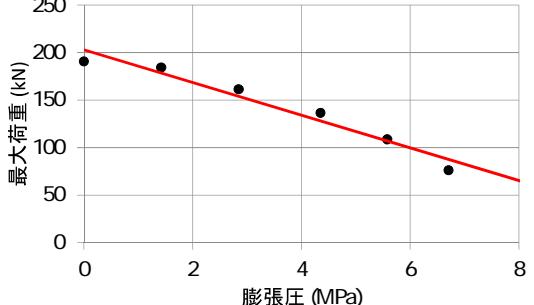
これらの式および図からわかるように、かぶりの異なる 2 パターンの供試体においてほぼ同様の腐食率-膨張圧関係が得られた。よって、本研究での条件内では腐食率-膨張圧関係に対してかぶりは大きな影響を与えないことが確認できた。しかし、実際の RC 構造物のかぶりや鉄筋径は様々であり、それらすべてでこの関係

表-3 解析結果

解析ケース	膨張圧 (MPa)	最大荷重 (kN)
S-0	0	85.8
S-5	1.4	81.3
S-10	2.7	69.2
S-15	4.2	53.2
S-20	5.3	42.4
S-25	6.4	-
L-0	0	190.6
L-5	1.4	184.3
L-10	2.8	161.3
L-15	4.4	136.6
L-20	5.6	108.7
L-25	6.7	76.1



(a) S-シリーズ ($\phi 100\text{mm}$)



(b) L-シリーズ ($\phi 150\text{mm}$)

図-11 膨張圧-最大荷重

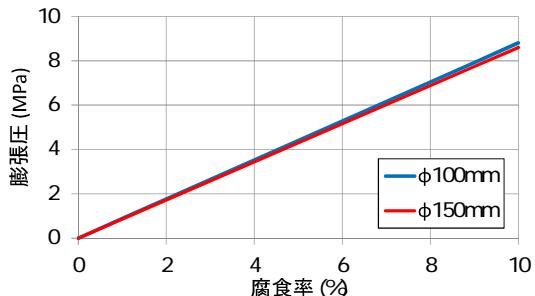


図-12 腐食率-膨張圧関係

性が適用できるか否かについては今後検討する必要がある。よって、かぶりや鉄筋径の影響を次節で解析的に検討した。

4.2 かぶりおよび鉄筋径が腐食率-膨張圧関係に与える影響

かぶりと鉄筋径が膨張圧に与える影響を検討する為にかぶりと鉄筋径を変化させて熱応力解析を実施した。鉄筋径は実験で用いた 22mm と、その 1/2 の 11mm、2 倍の 44mm と極端なモデルを作成し、かぶりに関しては 14~128mm と幅広く設定し解析を実施した。

その結果を図-13 に示す。この図は各モデルの温度増分とそのとき作用する膨張圧の関係を示している。各モデルにおいて、この関係はほぼ一定の勾配となっている事が確認できる。つまり、鉄筋の体積膨張率が同じであれば、その際に作用する膨張圧はかぶりや鉄筋径に依らず同じ値となる結果を示しており、腐食率-膨張圧関係においても、かぶりや鉄筋径の影響を受けないことが推察される。よって、本研究において、かぶりの異なる供試体で同様の腐食率-膨張圧関係を得たことは妥当な結果であったと言える。

5. 結論

本研究では、鉄筋の腐食に伴って発生する膨張圧を実験と FE 解析を用いて推定したものである。本研究で得られた成果は以下に示す通りである。

- (1) 中央に鉄筋が配されたモルタル円柱供試体を対象に、電食法による促進劣化により腐食程度が様々異なる供試体を作成し、それに対して、割裂引張強度試験を実施することで、腐食程度を表す指標である腐食率と最大荷重の関係を明らかにした。その結果、腐食率が大きくなると最大荷重は低下すること、ならびにその傾向は線形関係にあることが確認できた。なお、この傾向はかぶりには拘らないこともわかった。
- (2) 実験と同じ供試体を対象に、腐食による鉄筋の膨張を熱膨張と等価であると仮定し、鉄筋に膨張を与える解析を実施した後に、割裂引張強度試験を模擬して、静的荷重により圧縮載荷する解析を FEM により実施することで、膨張圧と最大荷重の関係を明らかにした。その結果、膨張圧が大きくなると最大荷重は低下し、その傾向は線形関係にあることが確認できた。

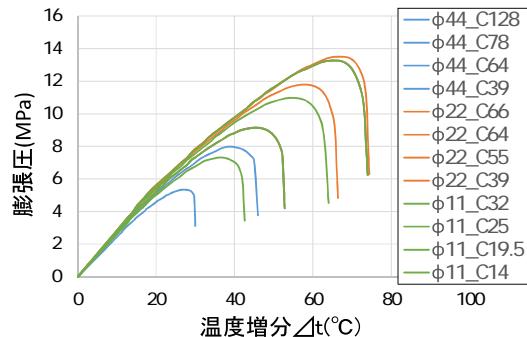


図-13 温度増分-膨張圧関係

- (3) 実験により得られた腐食率-最大荷重関係と、FEM 解析により得られた膨張圧-最大荷重関係を用いて、腐食率-膨張圧関係を推定した。その結果、腐食率-膨張圧関係は線形関係を有し、その係数はかぶりや鉄筋径には拘らないことが確認できた。
- (4) かぶりと鉄筋径をパラメータとした多数のモデルに対して膨張を付与した解析を実施し、ひび割れ発生時の膨張圧を表す最大膨張圧を算出したところ、最大膨張圧はかぶりと鉄筋径の比である C/φ に拘らないことが確認できた。

参考文献

- 1) 田中泰司、山口貴幸、下村匠：塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の載荷試験と数値解析による評価、土木学会論文集 E、Vol.66、No.4、pp.466-482、2010
- 2) 大屋戸理明、金久保利之、山本泰彦、佐藤勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響、土木学会論文集 E、Vol.62、No.3、pp.542-554、2006
- 3) 黒田一郎、村上将也、山本佳士、古屋信明：鉄筋腐食させた RC 梁の非破壊検査に基づく残存曲げ耐力算定に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol.55A、pp.833-841、2009
- 4) 長岡和真、阿部哲雄、番場俊介、村上祐貴：主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価、コンクリート工学論文集、第 24 号、第 2 号、pp.29-42、2013
- 5) 土木学会：土木材料実験指導書 [2011 年改訂版]、pp.97-111、2011
- 6) 村上祐貴、董衛、大下英吉、鈴木修一、堤知明：鉄筋腐食により定着不良を生じた RC はり部材の耐荷性状評価、土木学会論文集 E2 Vol.67、No.4、pp.605-624、2011