

# 論文 引張力を受ける鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に伴う材料劣化

松尾 豊史<sup>\*1</sup>・松村 卓郎<sup>\*2</sup>・金津 努<sup>\*3</sup>

要旨：本研究は、鉄筋腐食が生じた鉄筋コンクリートの両引き実験に基づいて、腐食程度や腐食ひび割れが鉄筋やコンクリートの材料特性および鉄筋とコンクリートの付着特性に及ぼす影響を評価した上で、有限要素解析に用いる鉄筋腐食に伴う材料劣化のモデル化を行ったものである。腐食鉄筋については、平均腐食量に基づいて鉄筋の断面積を、最大腐食量に基づいて鉄筋の降伏強度をそれぞれ低減することにより、材料劣化をモデル化した。また、鉄筋腐食に伴って発生する腐食ひび割れを考慮するために腐食膨張ひずみを作用させるとともに、コンクリートと鉄筋の付着劣化はコンクリートの引張応力-ひずみ曲線下の面積を低減させることにより考慮することとした。

キーワード：鉄筋コンクリート、腐食ひび割れ、付着劣化、両引き実験、有限要素解析

## 1. はじめに

臨海鉄筋コンクリート構造物では、経年化に伴って塩害などの劣化が進行すると、鉄筋腐食が生じる。鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートでは、腐食により鉄筋の断面積が減少するだけではなく、鉄筋の腐食膨張によるひび割れの発生と進展、鉄筋とコンクリートの付着劣化などの種々の現象が生じる。鉄筋腐食に関して、現在までに、数多くの研究がなされているが、鉄筋腐食が鉄筋コンクリートの材料特性に与える影響は必ずしも明確にはなっていない<sup>1)</sup>。また、有限要素解析に用いる適切な材料劣化のモデル化手法についても確立しているとは言い難い。

李ら<sup>2)</sup>は、鉄筋の引き抜き試験により腐食した鉄筋コンクリートの付着特性を評価し、付着要素の構成則を組み込んだ有限要素解析を行っている。しかしながら、腐食形態などの実験定数が多く、腐食ひび割れは考慮していない。また、Kukritら<sup>3)</sup>は腐食ひび割れの影響を考慮した解析的な検討を行っているが、腐食膨張係数や付着係数などの定量的な評価は十分には行われていない。

そこで、本研究では、鉄筋腐食を伴う鉄筋コンクリート構造物の耐荷性能を評価するための解析手法を構築することを目的として、鉄筋腐食が鉄筋コンクリートの材料特性に及ぼす影響を評価した上で、有限要素解析に用いる鉄筋腐食に伴う材料劣化のモデル化について検討したものである。

## 2. 鉄筋腐食が生じた鉄筋コンクリートの両引き実験

### (1) 試験体の仕様

試験体の形状を図-1に示す。試験体長さは100cmである。試験体の断面寸法は、6cm×6cm、10cm×10cm、

15cm×15cmの3種類であり、かぶりはそれぞれ2cm、4cm、6.5cmである。鉄筋は、D19鉄筋(SD345)であり、試験体中央に配置した。

コンクリートと鉄筋の材料試験結果を表-1に示す。コンクリートの実験時圧縮強度は、32.5N/mm<sup>2</sup>である。最大骨材寸法は20mmで、セメントは早強ポルトランドセメントを用いた。

### (2) 腐食方法

鉄筋腐食を生じさせるために、比較的短期間に鉄筋を腐食させることが可能な電食を実施した。電食では、試験体の中央90cmのみが3%NaCl溶液に接するような容器を作製し、鉄筋を陽極(+)、鋼製エキスパンダメタルを陰極(-)とし、直流電流6A一定で通電した。

鉄筋腐食量は、試験体ごとに質量差に基づく方法と強度差に基づく方法の2通りの方法で求めた。質量差に基づく方法は、10%クエン酸二アンモニウム溶液に約3日間浸漬後、腐食生成物を除去して約3日間浸漬後、腐食生成物を除去して鉄筋の質量を測定し、電食していない鉄筋を同様に処理した後の質量との差を腐食量とした。強度差に基づく方法は、電食した鉄筋の見かけの引張強度と電食していない鉄筋の引張強度との差から鉄筋の断面積の減少率を同定し、これを腐食量とした。

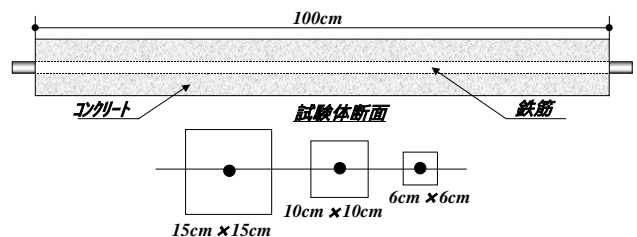


図-1 試験体の仕様

\*1 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 上席研究員 工博 (正会員)

\*3 電力中央研究所 広報グループ 参事 工博 (正会員)

### (3) 載荷方法

両引き実験では、試験体両端の鉄筋を固定し、試験体上端の鉄筋を変位制御で単調に引張載荷した。

試験体の一部には、鉄筋のひずみを計測するために、鉄筋に溝を彫り、鉄筋ひずみゲージを貼付した上で、コーティングしたものが含まれている。鉄筋ひずみゲージは、防水加工されていれば、腐食は進行しないため、電食後も計測可能であった。しかし、腐食が著しいものに関しては、防水加工していない箇所からの腐食が進行して、計測不能になる場合もあった。

### (4) 実験ケース

実験ケースを表 - 2 に示す。実験パラメータは、腐食程度(通電時間)と試験体寸法(かぶり)である。

通電時間は 0 時間、4 時間、8 時間、48 時間、96 時間の 5 段階とし、表 - 3 に示す目視による鉄筋腐食区分<sup>4)</sup>におおよそ対応させて設定した。試験体寸法は、前述のとおり 3 種類であり、同一要因の試験体は 3 体とした。

## 3. 両引き実験に基づく鉄筋腐食の影響評価

### (1) 電食結果および考察

#### a) 鉄筋腐食量の計測

質量差と強度差に基づく腐食量の関係を図 - 2 に示した。今回の実験では、強度差に基づく腐食量と質量差に基づく腐食量には概ね線形関係があり、かぶりに関わら

表 - 1 材料試験結果

#### (a) コンクリート

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
32.5	3.15	24.4

#### (b) 鉄筋

降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
395	584	187

表 - 2 実験ケース

試験体寸法 (かぶり)	通電時間 (時間)	試験体名称
10cm × 10cm (4cm)	0	M0-1 ~ 3
	4	MA-1 ~ 3
	8	MB-1 ~ 3
	48	MC-1 ~ 3
	96	MD-1 ~ 3
6cm × 6cm (2cm)	48	SC-1 ~ 3
15cm × 15cm (6.5cm)	48	LC-1 ~ 3

表 - 3 目視による鉄筋腐食度の区分<sup>4)</sup>

腐食度	腐食状態
腐食なし	腐食を認めず
A	点錆び程度の表面的な腐食
B	全体に表面的な腐食
C	浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食
D	断面欠損の明らかな著しい腐食

ず強度差に基づく腐食量は質量差の腐食量の約1.3倍となっていることが分かる。これは、質量差から求めた腐食量は、腐食した区間の平均値に対応する腐食量であるのに対して、強度差から求めた腐食量は腐食した区間の最大値に対応する腐食量であるためである。

#### b) ひび割れ幅と鉄筋腐食量

鉄筋腐食量(強度差)と腐食ひび割れの最大ひび割れ幅の関係を図 - 3に示す。各試験体の最大ひび割れ幅は、クラックスケールにより目視で読み取ったひび割れ幅のうちで最大のものとした。これによると、腐食ひび割れ発生後には、最大ひび割れ幅は鉄筋腐食量に比例的であることが分かる。最大ひび割れ幅については、かぶりの大きさにはあまり影響しなかった。これは、腐食ひび割れ発生後には、腐食に伴う膨張量がそのままひび割れ幅の増加につながるためであると考えられる。

### (2) 載荷結果および考察

#### a) テンション・スティフニング効果

載荷で得られた引張荷重と試験体全体の平均ひずみ関係の主な実験結果を図 - 4 に示す。試験体全体の平均ひずみは、試験体長 100cm 区間の鉄筋変位から、試験体端部の抜け出し変位を減じ、試験体全長で除したものである。これは、鉄筋コンクリートと鉄筋単体の剛性急変部において、鉄筋の伸び出しが生じるためである<sup>5)</sup>。

図 - 4(a)に示すように、全体的に腐食度が進むにしたがって、テンション・スティフニング効果は小さくなるとともに、鉄筋が降伏する荷重は健全な場合の 110kN 程度から低下する傾向にあった。腐食度 A であれば、腐食がない場合と大きな差異は認められない。腐食度 B なら

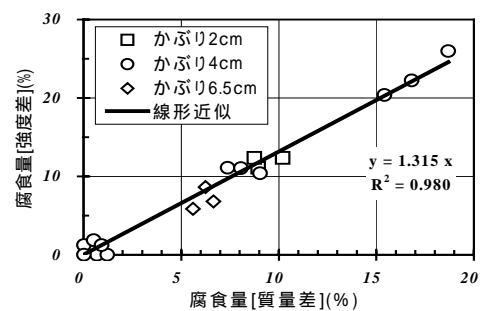


図 - 2 質量差と強度差に基づく腐食量の関係

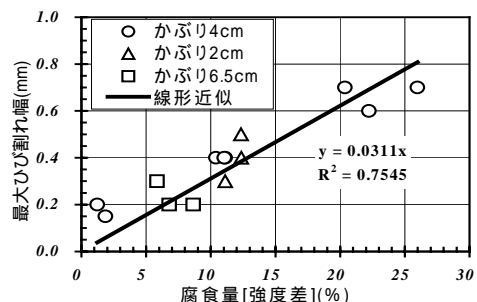


図 - 3 鉄筋腐食量と最大ひび割れ幅の関係

びに C になると、テンション・スティフニング効果が低下している。これは、試験体に軸方向ひび割れが入り、鉄筋とコンクリートとの付着力が低下するためと考えられる。さらに、腐食度 D では、テンション・スティフニング効果は大きく低下する。図 - 4(b)に示すように、断面寸法が大きい方がコンクリートの断面積も増加するため、同じ腐食度 C の場合は、図中の曲線下の面積も増加し、テンション・スティフニング効果は大きくなった。断面寸法が小さい 6cm×6cm のものでは、殆どテンション・スティフニング効果は認められない。これは、コンクリートの断面積が小さいことに加えて、鉄筋が腐食することにより、鉄筋とコンクリート間で付着力が小さくなるためであると考えられる。

b) ひび割れ状況とひずみ分布

図 - 5 に試験体で得られた鉄筋ひずみ分布とひび割れ状況の対応を示す。図中の 1) ~ 5) は、ひび割れ発生の有無や程度など実験で特徴的な変化を示した各段階を概ね等間隔で示している。ひび割れ状況は、腐食ひび割れが発生した面を示している。試験体の解体後には、内部で生じた腐食ひび割れにも錆び汁が付着している状況が確認できたが、腐食ひび割れが試験体表面まで達するのは、一面のみであり、他の面には発生しなかった。

図 - 5(a)のように、鉄筋が腐食していない場合は、ひび割れが発生した箇所鉄筋ひずみは大きく、その他の箇所は小さくなり、その差が大きい。荷重の増加にしたがって、

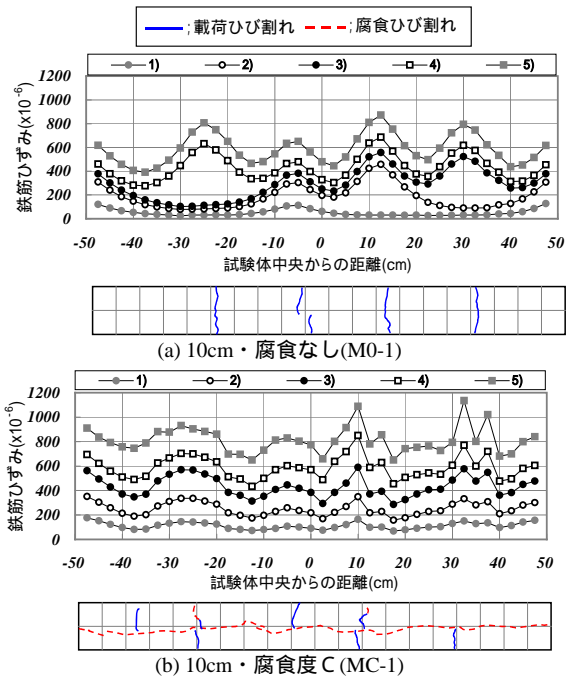


図 - 5 試験体の鉄筋ひずみ分布とひび割れ状況

試験体にひび割れが進展していくが、ひび割れ発生箇所と鉄筋ひずみが相対的に大きくなる箇所は非常に良く一致していた。また、図 - 5(b)に示されるように、腐食が進行した場合にも、ひび割れ発生箇所の鉄筋ひずみが大きくなる傾向にあり、ひび割れ発生箇所と鉄筋ひずみが大きくなる箇所はよく対応していた。しかし、鉄筋が腐食していない場合に比べて、その傾向が緩やかであった。これは、鉄筋とコンクリートとの付着力が低下しているために、ひずみが平均化されるためであると考えられる。すなわち、局所的に発生する鉄筋の応力、ひずみはひび割れ位置かどうかや付着力の低下程度で異なるものの、鉄筋コンクリートをマクロ的にみれば、テンション・スティフニング効果の低下現象として表れることを示している。

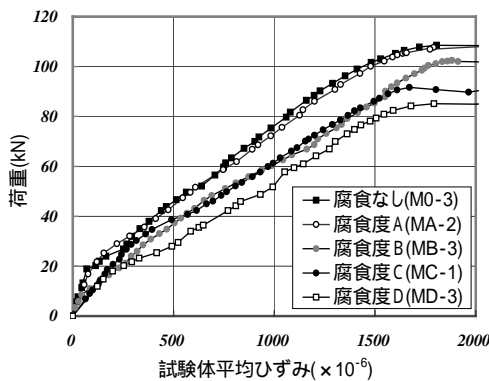
(3) 鉄筋腐食が材料特性に及ぼす影響

a) 鉄筋の降伏強度

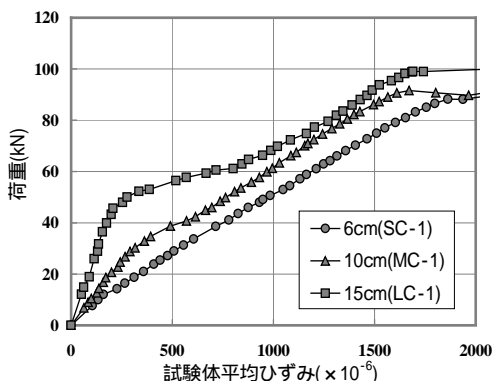
鉄筋腐食が鉄筋の降伏強度および引張強度に及ぼす影響を調べるために、電食した試験体と健全な試験体における降伏荷重の差分から求めた鉄筋腐食量と最大引張荷重の差分から求めた鉄筋腐食量を比較した結果を図 - 6 に示した。なお、最大引張荷重の差分から求めた鉄筋腐食量が前述の強度差に基づく腐食量に対応している。これによると、降伏荷重から求めた鉄筋腐食量は、最大引張荷重から求めた鉄筋腐食量とほぼ正比例していることが分かる。これは、両腐食量ともに試験体の腐食量の最大値に対応しているためであると考えられる<sup>6)</sup>。

b) 鉄筋とコンクリートの付着特性

図 - 4 で得られた引張荷重から質量差に基づく腐食量に



(a) 腐食程度の影響(かぶり 4cm)



(b) 断面寸法の影響(電食 48 時間)

図 - 4 荷重と試験体平均ひずみの関係の比較

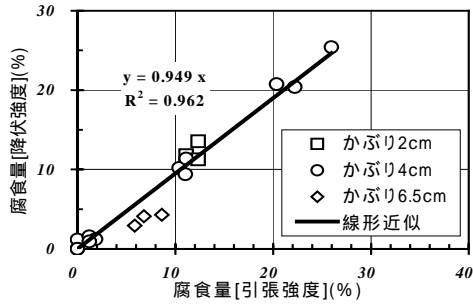


図 - 6 降伏強度と引張強度に基づく腐食量の関係

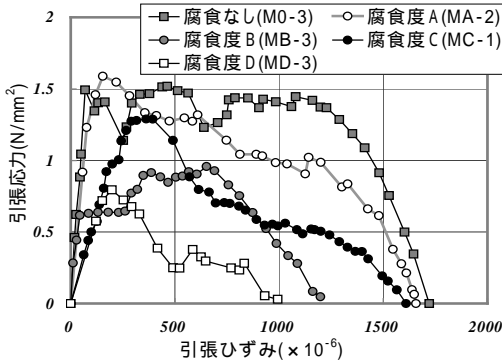


図 - 7 コンクリートの引張応力-ひずみ関係

応じて断面積を低減させた鉄筋分担力を減じてコンクリートの断面積で除することにより、コンクリートの引張応力-ひずみ関係を求めた結果を図-7に示す。これによると、鉄筋の腐食度が大きいほど、引張応力-ひずみ曲線下の面積が減少していく傾向にあることが分かる。これは、鉄筋の腐食程度が増加するにしたがって、鉄筋とコンクリートとの付着力が低下していくことを示している。

#### 4. 鉄筋腐食に伴う材料劣化の力学モデル

##### (1) 鉄筋の材料劣化

鉄筋が腐食した場合には、健全な場合と比べて鉄筋の断面積は低減するので、見かけのヤング係数は低下することになる。鉄筋は必ずしも均一には腐食しないが、見かけのヤング係数については、区間の平均的な剛性に対応すると考えられる。そこで、鉄筋のヤング係数については腐食した場合も変化しないこととし、腐食した鉄筋における見かけのヤング係数の低下については、鉄筋の断面積を平均腐食量に基づいて低減することにより評価することとした。

鉄筋は均一に腐食しないため、鉄筋の降伏強度については、最大腐食量に基づいて評価することとした。最も腐食が激しい箇所の鉄筋降伏強度は変化しないという条件を設定すると、鉄筋腐食が生じた場合の見かけの鉄筋降伏強度は式(1)のように導くことができる。

$$f'_{sy} = \frac{1 - \gamma_{max}}{1 - \gamma_{ave}} f_{sy} \quad (1)$$

ここに、 $f_{sy}$ ：鉄筋の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_{sy}$ ：腐食鉄筋の見かけの降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\gamma_{ave}$ ：鉄筋腐食による断面積減少率の平均値、 $\gamma_{max}$ ：鉄筋腐食による断面積減少率の最大値

鉄筋の腐食性状にはばらつきを有するが、鉄筋腐食量の平均値と最大値を用いてモデル化することにより、塩害や電食などの腐食形態によらず、腐食鉄筋の材料劣化を考慮することが可能となる。なお、鉄筋降伏以降の剛性については鉄筋腐食が生じても変化がないものとみなした。

##### (2) コンクリートの材料劣化

一般に、鉄筋腐食により、コンクリート強度そのものは変化しないとみなされる。しかし、腐食ひび割れの発生に伴うコンクリート強度の低下については適切に考慮する必要がある。腐食ひび割れの影響を含んでコンクリート強度の低下を間接的に評価する場合もあるが、腐食ひび割れの影響を初期引張ひずみとして考慮すれば、鉄筋腐食に伴うコンクリート強度の低下は解析上で考慮されることになる。

鉄筋が腐食膨張すると、図-8に見られるように腐食生成物によって、コンクリートに引張ひずみが発生し、ひび割れが生じることになる。腐食は初期には概ね同心円状に生成されるが、腐食が進行するとひび割れが発生し、腐食生成物がひび割れ内に充填される。本解析では、文献<sup>3),7)</sup>を踏まえて、鉄筋の腐食膨張に伴ってコンクリートに発生する腐食ひび割れを初期引張ひずみとして、式(2)に示す腐食膨張ひずみ量を考慮することとした。腐食に伴う膨張量を鉄筋の配置間隔および腐食鉄筋が存在する要素幅で平均している。

$$\varepsilon_{cor} = \alpha A_s \gamma_{ave} / w / l \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_{cor}$ ：腐食膨張ひずみ量、 $\alpha$ ：腐食膨張係数(腐食度 A=6.0、腐食度 B=4.0、腐食度 C=1.5、腐食度 D=1.0)、 $A_s$ ：健全鉄筋の断面積(mm<sup>2</sup>)、 $w$ ：鉄筋の配置間隔(mm)、 $l$ ：腐食鉄筋が存在する要素長さ(mm)

腐食膨張ひずみ量については、図-3に基づいて、ひび割れ幅を試験体断面の一辺の長さで除することにより算出し、腐食膨張係数を式(2)により求めた上で、図-9に示すように腐食度と対応させて整理した。これに基づいて、腐食度と対応させて腐食膨張係数の値を設定した。腐食度 B は、コンクリート表面にひび割れが生じる時点に対応している。腐食度 C 以降では、腐食膨張により、腐食ひび割れ幅が増加し、腐食膨張ひずみ量も大きくなるが、腐食ひび割れの発生と進展および腐食生成物のひび割れからの流出に伴って、腐食による膨張圧が小さくなるため、腐食度が大きい方が腐食膨張係数の値は小さくなっている。

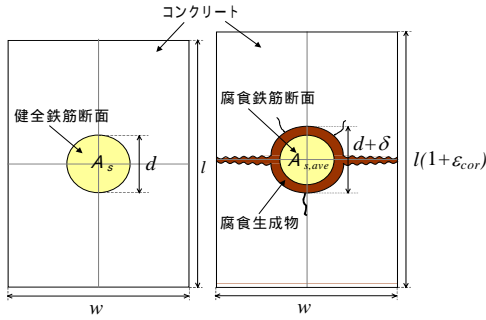


図 - 8 鉄筋腐食に伴うひび割れの模式図

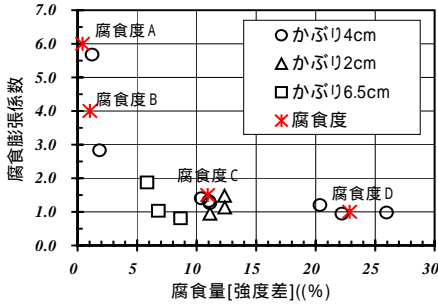


図 - 9 腐食膨張係数と腐食度との対応関係

### (3) 鉄筋とコンクリートの付着劣化

一般に、腐食により、鉄筋とコンクリートの付着性能が低下する。付着劣化については、鉄筋とコンクリート界面での付着強度を評価した研究と鉄筋コンクリートのテンション・スティフニング効果として評価した研究に大きく分かれる<sup>8)</sup>。本研究では、コンクリートと鉄筋の付着特性については、テンション・スティフニングモデル<sup>9)</sup>におけるコンクリートの引張応力-ひずみ関係において、式(3)の中の付着係数  $c$  により考慮することとした。テンション・スティフニングモデルでは局所的な付着滑りなどを含んでマクロ的に評価される。付着係数  $c$  は、鉄筋の付着有効領域においては、異形鉄筋が十分に分散して配筋された場合には 0.4 を用いる。数値が小さい方がテンション・スティフニング効果は大きく、延性的となる。無筋領域や丸鋼など付着が十分ではない場合などには、無筋部分ではひび割れ後の脆性的な挙動を表現するために要素長などに応じた数値が用いられる<sup>7)</sup>。

$$\sigma_t = f_t \left( \frac{\epsilon_{tu}}{\epsilon_t} \right)^c \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_t$ : コンクリートの引張応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $f_t$ : コンクリートの引張強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $c$ : 付着係数(腐食度 A=0.4, 腐食度 B=0.6, 腐食度 C=1.0, 腐食度 D=2.0)、 $\epsilon_t$ : 引張りひずみ、 $\epsilon_{tu}$ : ひび割れ発生ひずみ

付着係数  $c$  の値については、コンクリートに腐食ひび割れが発生する以前においてはテンション・スティフニング効果の低下は少ないことや劣化が進行した段階では、テンション・スティフニング効果がほとんどないことなど実験結果との整合性を考慮して、図 - 7 に示した

コンクリートの引張応力-ひずみ関係の曲線下の面積とほぼ等しくなるように、腐食度に対応させて 0.4~2.0 の範囲で設定した。図 - 7 に示したコンクリートの引張応力-ひずみ関係の曲線形状には、鉄筋の腐食分布のばらつきや偏心などの影響も含まれるが、図 - 10 に示すように引張応力-ひずみ曲線下の面積と概ね対応していた。

### (4) 有限要素解析に基づく適用性評価

#### a) 解析概要

解析では、コンクリートに分散ひび割れモデルを適用し、鉄筋コンクリート要素として材料非線形を考慮した。解析コードは、東京大学の前川らにより開発された二次元非線形 FEM プログラム「WCOMD-SJ」(ver7.7)を使用した。詳細については、文献 9) を参照されたい。

解析対象は、2 章で示した鉄筋腐食が生じた両引き実験における試験体とした。解析メッシュを図 - 11 に示す。左端(底面)を固定し、右端(上面)に強制変位を単調载荷した。解析入力物性については表 - 1 の材料試験結果を用いた。

#### b) 鉄筋の材料劣化

鉄筋材料のモデル化手法の妥当性を評価することを目的として、鉄筋の腐食分布に関するパラメータスタディを行った。図 - 12 には、解析ケースと解析における腐食分布を示した。No.3 以外は一様な断面減少量として、No.3 のみ平均断面減少量 20%、最大断面減少量 40%となるように鉄筋断面を変化させた。解析ケース No.1~No.4 は鉄筋の降伏強度は低減していない。No.5 については、式(1)により最大腐食量に基づいてみかけの鉄筋降伏強度を低減した。

解析結果の比較を図 - 13 に示す。これによると、No.4 の解析結果は、No.5 の解析結果と概ね対応していることが分かる。これは、鉄筋の腐食分布が一様でない場合、剛性としては平均腐食量に対応するが、降伏荷重としては最大腐食量に対応することを示している。これより、腐食鉄筋の剛性は平均腐食量に基づいて低下させ、腐食鉄筋の降伏強度は最大腐食量に基づいて低下させることで、コンクリート中における腐食鉄筋の引張特性を概

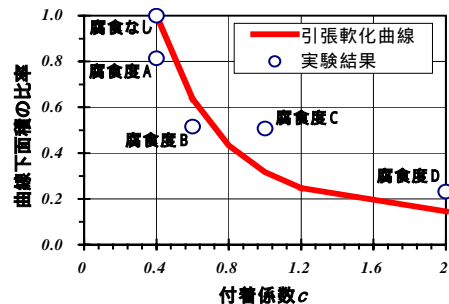


図 - 10 付着係数と腐食度との対応関係

ね表せることを確認した。

c) 鉄筋コンクリートの材料劣化

図 - 14 には、図 - 4 に示した SC-1 試験体、MC-1 試験体および LC-1 試験体の実験結果と解析結果との比較を示した。本解析では、鉄筋の腐食分布は一様であるとし、実験結果における平均腐食量と最大腐食量を用いた。これによると、実験結果に若干の偏心の影響がみられたことなどに起因して、良好な一致は示していないが、大略的な傾向としては概ね捉えている。すなわち、テンション・スティフニング効果や降伏荷重などを本モデル化により解析的に評価可能であると考えられる。

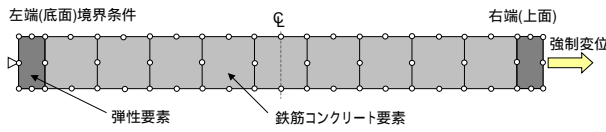


図 - 11 有限要素解析メッシュ図

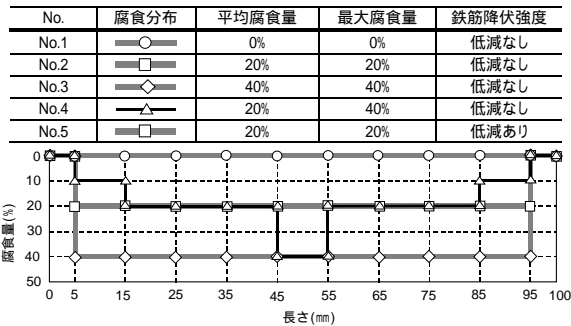


図 - 12 解析ケースと腐食分布

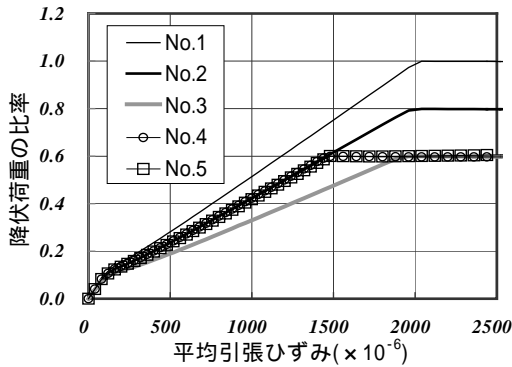


図 - 13 パラメータスタディの解析結果

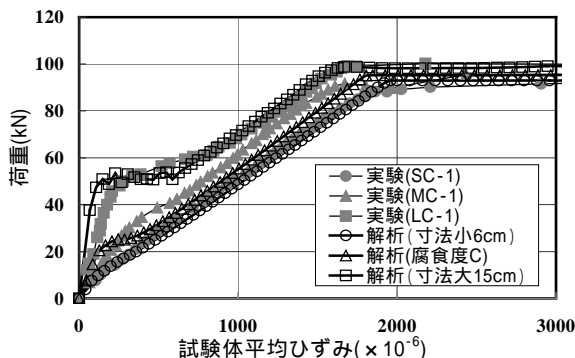


図 - 14 実験結果と解析結果の比較

5. まとめ

本研究で得られた主な成果をまとめると次の通りである。

(1) 両引き実験に基づく鉄筋腐食の影響評価

両引き実験に基づいて、腐食程度やひび割れなどが鉄筋やコンクリートの材料特性および鉄筋とコンクリートの付着特性に及ぼす影響を評価した。その結果、鉄筋のみかけの降伏強度の低下割合は腐食した区間の最大値に相当する腐食量との相関が良いこと、腐食程度が大きいほどテンション・スティフニングも低下する傾向にあること、などを明らかにした。

(2) 鉄筋腐食に伴う材料劣化のモデル化

本研究では、まず、鉄筋については、鉄筋断面積を腐食した区間の平均値に相当する腐食量に応じて、鉄筋の降伏強度を腐食した区間の最大値に相当する腐食量に応じてそれぞれ低減することにより、腐食した鉄筋の材料劣化をモデル化した。次に、鉄筋腐食に伴って発生する腐食ひび割れを考慮するために腐食膨張ひずみのパラメータを設定した。さらに、コンクリートと鉄筋の付着力低下をコンクリートの引張応力 - ひずみ曲線下の面積を低減させることにより考慮した。

平均腐食量 0 ~ 20% までの範囲における両引き実験結果に対して、シミュレーション解析を行った。この結果、本研究で提案する材料劣化の力学モデルは、鉄筋コンクリートの荷重 - ひずみ関係に関する実験結果の剛性や鉄筋の降伏荷重などを概ね良好に評価可能であった。

謝辞：本研究における解析的検討を実施するにあたっては、東京大学大学院工学系研究科の前川教授らが開発された解析コード使用させて頂いた。ここに記して、謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能、コンクリート技術シリーズ、No.71, 2006.
- 2) 李翰承, 野口貴文, 友澤史紀：引張鉄筋の腐食した RC 梁の有限要素解析法による耐力性能評価に関する基礎的研究, 日本建築学会論文集, 第 506 号, pp.43-50, 1998.
- 3) Kukrit TOONGOENTHONG and Koichi MAEKAWA : Computational Performance Assessment of Damaged RC Members with Fractured Stirrups, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.1, No.123-136, 2005.
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2003-, 2003.
- 5) 森田司郎：鉄筋コンクリート部材の引張り試験による付着効果の研究, セメント技術年報, No.17, pp.468-473, 1963.
- 6) 松尾洋, 五角巨, 下村匠：鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23 ,No.3, pp.1327-1332, 2001.
- 7) Koichi MAEKAWA, Amorn PIMANMAS and Hajime OKAMURA : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003.
- 8) 土木学会：非線形解析によるコンクリート構造物の性能照査[手順と検証例 照査例], コンクリート技術シリーズ No.66, 2005.
- 9) 岡村 甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.