

論文 鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性

松尾 洋^{*1} ・ 五角 亘^{*1} ・ 下村 匠^{*2}

要旨：内部鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の力学性状に関する基礎的知見を得るため、実験室的に腐食の程度を変化させた鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を行い、腐食状態と力学特性の関係について検討した。腐食の進行により、鉄筋とコンクリートの付着が損なわれ、コンクリートの引張剛性が低下すること、腐食の進行にともない鉄筋に沿った腐食の分布の不均一性が增大すること、鉄筋の腐食が著しい鉄筋コンクリートでは、降伏近くの挙動が、平均腐食断面積よりも、局所的に最も腐食した断面積により支配される場合があることを明らかにした。

キーワード：鉄筋腐食, 付着劣化, コンクリートの引張剛性, 平均腐食量

1. はじめに

塩害による内部鋼材の腐食は、鉄筋コンクリート構造物の力学的な性能を経時的に低下させる代表的な劣化現象である。それゆえ、構造物の設計において、鋼材腐食への対策を講じることが、古くから重要視されてきた。その基本的な方法論は、鋼材腐食による実質的な性能低下が生じないように、材料・構造に関する設計諸元を定め、かつ適切な維持管理を行うことであると解釈できる。耐久設計に関して最も先進的な考え方を取り入れた、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕－耐久性照査型－¹⁾では、鋼材腐食に関する定量的な照査方法が導入されたものの、鋼材の腐食が発生する時点を限界状態に設定することを推奨している。

現状の予測技術では鋼材が腐食を開始した後の劣化過程を精緻に予測することは困難であること、腐食開始時点を限界状態と設定することは、予測が比較的簡単で信頼性が確保でき、かつ安全側の判断となること、これらを考えあわせると、腐食開始以降の性能低下を予測し設計に反映させる経済メリットは現状では小さく、鋼材腐食による性能低下が実質的に生じないよ

うにする現状の設計思想は賢明であるといえる。

一方、内部鋼材の腐食が開始しても、構造物の力学的な性能がただちに損なわれるものではないことも事実である。鋼材腐食開始以降の構造物の性能劣化過程を精緻に予測すべく予測技術を開発することは、設計の自由度を広げ、将来のより進んだ耐久設計に寄与するものと著者らは考えている²⁾。

内部鋼材の腐食は、鋼材の有効断面積を欠損させるだけでなく、鋼材周囲への腐食生成物の堆積、かぶりコンクリートの腐食ひび割れにより鋼材とコンクリートの付着性状を変化させ、ひいてはひび割れ分散性やコンクリートの引張剛性を低下させると考えられる³⁾。本研究では、電食により内部鋼材を腐食させた鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を行い、腐食状態と部材の力学性状について実験的に検討する。

2. 実験概要

2.1 供試体

実験に用いた供試体は、図-1 に示すように、100×100×1000mm のコンクリート角柱の中心に D19 異形鉄筋を 1 本埋め込んだものである。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 博士 (工学) (正会員)

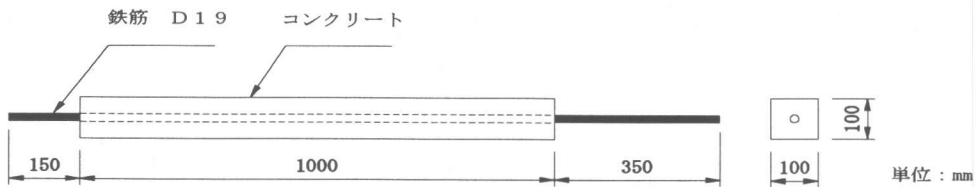


図-1 供試体形状・寸法

表-1 供試体の種類

供試体番号	鉄筋	積算電流量 (Ahr)
No.0	A	0.0
No.1	B	44.5
No.2		107.7
No.3	A	202.7
No.4		346.8

表-2 コンクリートの示方配合

水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)					
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	AE助剤
55	165	300	813	1016	0.93	0.09

表-3 鉄筋の物性値

	降伏強度 (N/mm ²)	断面積 (mm ²)	降伏ひずみ (×10 ⁻⁶)	ヤング係数 (N/mm ²)
A	322.0	283.5	1760	183000
B	339.0	283.5	1730	195000

本実験は、鉄筋に直接引張力を作用させる方法で加力するため、両端部において鉄筋をそれぞれ150mmと350mm露出させている。鉄筋を腐食させない供試体1体、腐食の程度を変化させた供試体4体の計5体を試験した。供試体の種類を表-1に示す。

実験に使用したコンクリートの配合を表-2に、鉄筋の物性値を表-3に示す。すべての供試体は同一バッチのコンクリートを用いて作製した。打設後の供試体は、実験室内において11週間湿布養生を行い、その後順次鉄筋を腐食させた。所定の段階まで通電した供試体は、載荷試験時まで実験室内に静置した。すべての供試体の載荷試験は同一週に行った。載荷試験時のコンクリート強度は、圧縮強度40.2N/mm²、引張強度2.69N/mm²であった。

2.2 鉄筋の腐食の方法

供試体中の鉄筋を腐食させる方法は、電解液中で強制的に鉄筋に通電する方法によった。電食装置を図-2に示す。鉄筋を陽極、側面に配置した銅板を陰極とし、直流安定化電源を使用し通電した。なお、供試体両端部より露出させた部分の鉄筋は、腐食を防ぐため、水槽内に入らないようにした。水槽内の電解液は、腐食を推進するため海水相当の食塩水(NaCl:3%)とした。電流の大きさは装置の限界に近い0.65A

に設定した。電流は一定時間ごとにデータロガーにより測定し、積算電流量を求めた。

各供試体の腐食の程度は、積算電流量を目安として調整した。目標とした積算電流量に達した供試体は、水槽より取り出し、電食を終了した。腐食ひび割れが生じた供試体は、4面においてひび割れ幅の分布を50mm間隔でクラックスケールにより計測した。ただし、ひび割れ幅の実験結果については、紙面の都合上、本論文では割愛する。

2.3 載荷試験

載荷試験は、供試体の自重による曲げの影響を排除するために、供試体を反力フレーム内に垂直に設置し、行った(図-3)。供試体の端部よ

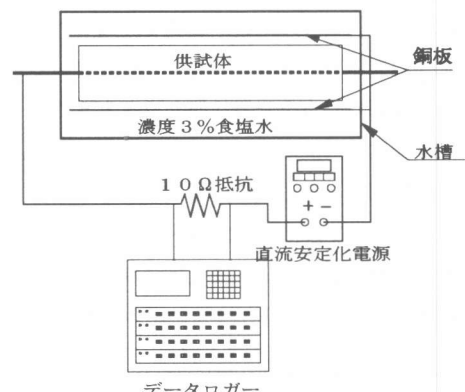


図-2 電食実験装置

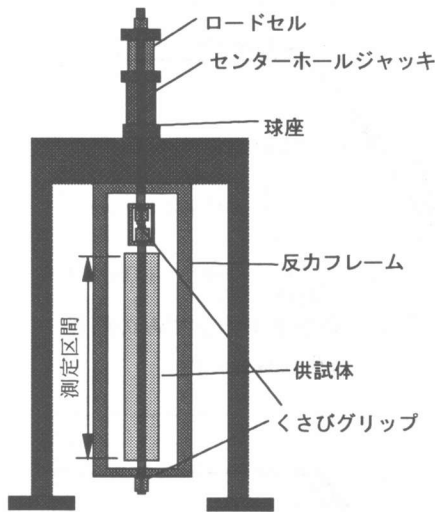


図-3 荷重方法

り露出させた鉄筋をくさびグリップにより固定し、加力した。

荷重は加力側（上側）において、ロードセルにより測定した。鉄筋の平均ひずみは、コンクリート両端部において鉄筋に取り付けたアルミ治具を介して鉄筋の変位を変位計により測定し、長さ変化を測定区間長で除することにより求めた。荷重は単調荷重とした。

2.4 鉄筋の腐食状態の計測

鉄筋を腐食させた供試体では、荷重試験終了後に、コンクリートから鉄筋をはつり出し、10% クエン酸アンモニウム溶液に浸漬し、腐食状態を計測した。腐食区間の鉄筋質量の減少量を測定することにより、単位表面積あたりの平均腐食量と、腐食後の平均断面積を算出した。また、鉄筋軸に沿った腐食後の直径の分布を50mmごとに計測し、断面積の分布を求めた。直径は図-4に示すように、縦リブを含む方向の直径D1と、その直交方向の直径D2を計測し、両者の平均値を用いて断面積を計算した。直径D2の測定箇所は、横リブの間の部分とした。

3. 実験結果

3.1 鉄筋の腐食量

荷重試験終了後に供試体から取り出した鉄筋

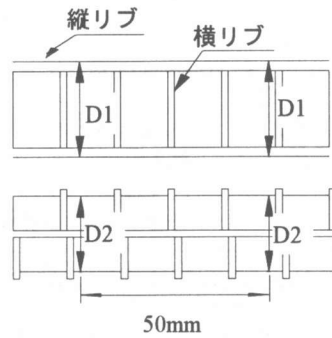


図-4 鉄筋直径測定位置

表-4 鉄筋腐食量

供試体 番号	平均腐食量 (mg/mm ²)	平均断面積 (mm ²)	断面積欠損率 (%)
No.0	0	283.5	0
No.1	0.435	280.2	1.16
No.2	0.888	276.9	2.34
No.3	2.370	265.7	6.29
No.4	5.118	245.3	13.46

の質量より求めた、平均腐食量、平均断面積、断面積欠損率を表-4に示す。

3.2 供試体の荷重と平均ひずみの関係

図-5に、各供試体の荷重と平均ひずみ関係を示す。図中には、表-4の平均断面積より計算される腐食後の鉄筋単体の荷重と平均ひずみの関係も示している。腐食の最も顕著なNo.4供試体において、降伏後の鉄筋単体の荷重の計算値が鉄筋コンクリートの荷重の実験値よりも大きくなっているのは、前者を鉄筋断面積の平均値を用いて計算したためである。鉄筋コンクリート供試体中では、腐食の分布が一樣ではなく、鉄筋の断面積がより小さい断面で、早く降伏していると考えられる。腐食の分布については、実測値をもとに後に検討するが、本結果は、腐食の程度の大きなNo.4供試体は腐食の不均一性も大きいことを示唆するものである。

3.3 コンクリートの引張剛性

図-5の結果をもとに、以下の処理を行うことにより、付着によりコンクリートが負担する平均応力を求めることができる。

$$\sigma_{c,av} = \frac{P - A_{s,av} E_s \varepsilon_{av}}{A_c} \quad (1)$$

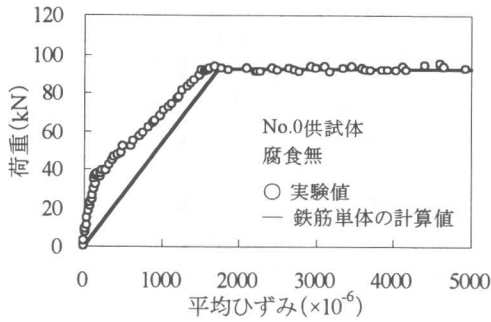


図-5a 荷重と平均ひずみの関係
(供試体 No. 0)

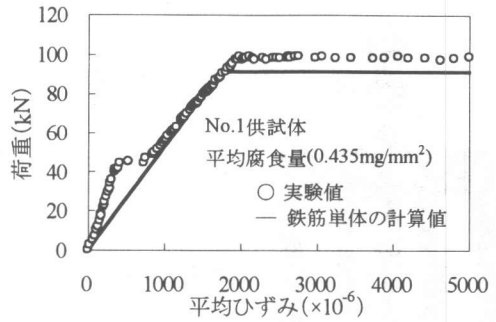


図-5b 荷重と平均ひずみの関係
(供試体 No. 1)

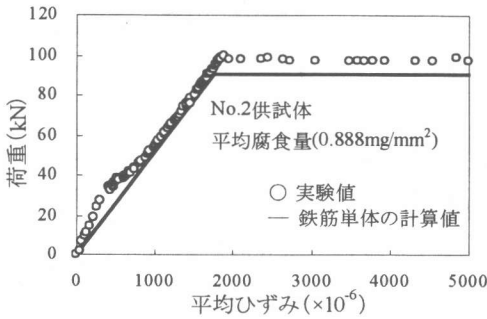


図-5c 荷重と平均ひずみの関係
(供試体 No. 2)

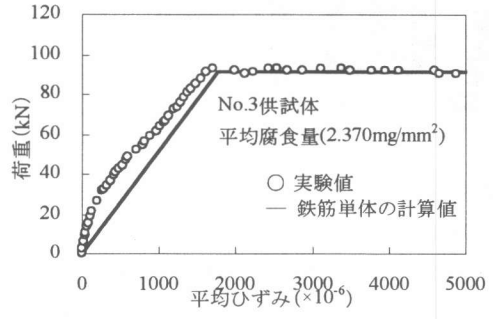


図-5d 荷重と平均ひずみの関係
(供試体 No. 3)

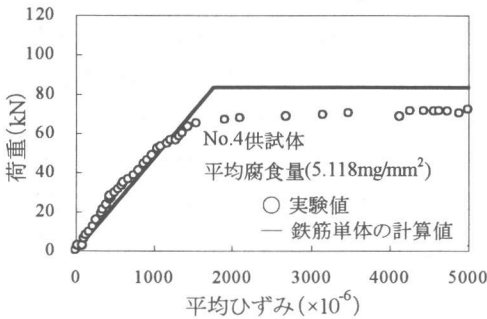


図-5e 荷重と平均ひずみの関係
(供試体 No. 4)

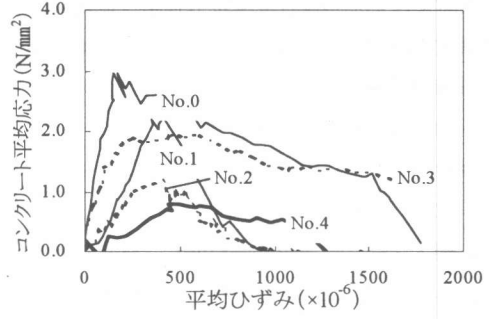


図-6 コンクリート平均応力と
平均ひずみ関係

ここに、 $\sigma_{c,av}$: コンクリートの平均応力、 P : 作用荷重、 $A_{s,av}$: 鉄筋の平均断面積、 E_s : 鉄筋の弾性係数、 ε_{av} : 平均ひずみ、 A_c : コンクリートの断面積である。ただし、式(1)は鉄筋降伏前においてのみ成立する。この処理により導出したすべての供試体のコンクリートの平均応力と平均ひずみの関係を図-6 に示す。No.3 供試体を除けば、腐食の程度が増加にともない、附着によりコンクリートに伝達される引張応力が小さくなるのがわかる。

鉄筋の腐食と附着性状の定量関係をさらに明瞭に表すために、図-6 の曲線下に囲まれた面積（ここでは平均附着破壊エネルギーと呼ぶ）を算出し、平均腐食量との関係を示したのが図-7 である。平均附着破壊エネルギーは、鉄筋とコンクリートの附着性能の指標となる。鉄筋腐食に関する現状の予測技術では、平均腐食量を予測するのがせいぜいであるため、平均腐食量とこのような力学特性値との関係を明らかにしておくことが重要と考えられるのである。図-7 よ

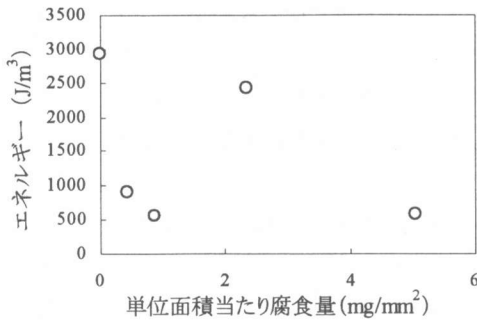


図-7 平均付着破壊エネルギーと平均腐食量の関係

り、腐食の増大により、付着性能が低下する傾向が読み取れる。ただしこのような処理によっても、No.3 供試体は全体の傾向から逸脱している。その理由は明らかではない。

なお、鉄筋が腐食した RC 部材の耐荷性状を実験的に検討した既往の研究⁴⁾では、腐食の程度が小さい供試体では、無腐食の供試体に比べて、付着性状の向上がみられたことが報告されている。鉄筋の腐食は膨張をとまなうこと、錆びにより摩擦が向上することを考えればこのことは、感覚的には納得できるものの、本実験ではそのような結果は得られなかった。腐食水準の設定や試験方法にもよると思われる。

3.4 鉄筋の腐食の分布

載荷試験後の供試体から鉄筋を取り出し、腐食後の鉄筋断面積の分布を実測した結果を図-8に示す。本結果より、鉄筋の腐食による断面欠損の分布は一様ではないことが明らかである。その不均一性は、平均腐食量が大きいほど大きく、No.4 供試体では特に著しい。載荷試験より予想される結果と符合するものである。なお、本実験は電食により鉄筋を腐食させているので、この結果は実環境におけるコンクリート中の鉄筋の腐食状態そのものを表すのではないが、腐食が一樣な現象でない以上、平均腐食量が大きい段階ほど平均的な腐食断面積と局所的に最も腐食が進行した箇所の断面積との差異が大きくなることは、実構造物でも共通していると考えられる。

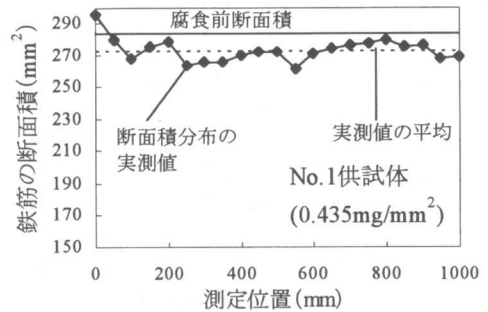


図-8a 腐食後の鉄筋の断面積分布 (供試体 No. 1)

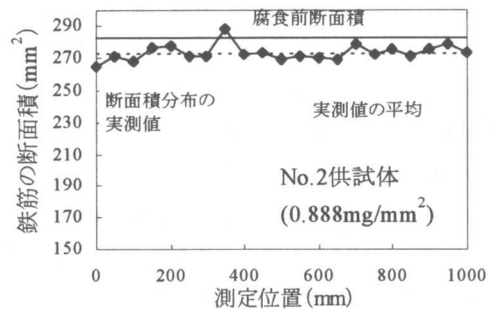


図-8b 腐食後の鉄筋の断面積分布 (供試体 No. 2)

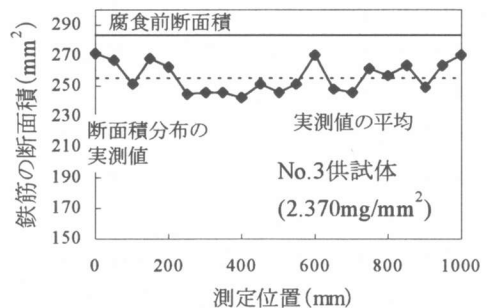


図-8c 腐食後の鉄筋の断面積分布 (供試体 No. 3)

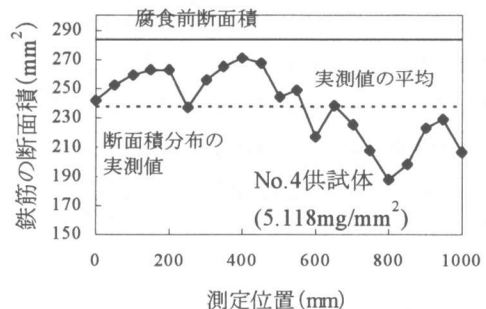


図-8d 腐食後の鉄筋の断面積分布 (供試体 No. 4)

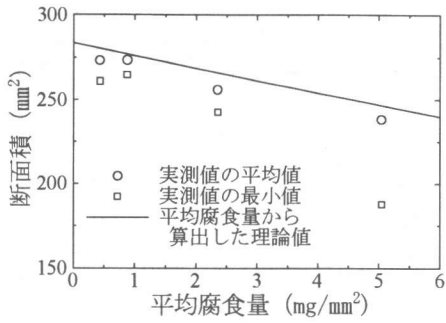


図-9 鉄筋断面積と平均腐食量の関係

図-9には、平均腐食量と、鉄筋断面積の分布より得られた平均値と最小値（断面積欠損率で見れば最大値）の関係を示す。図中には、平均腐食量より計算される平均断面積も示した。いずれの腐食段階においても、断面積の実測値の平均値が、平均腐食量より計算される平均断面積よりも小さいのは、縦リブを含む方向の直径を実測したためであると考えている。リブは突起しているので、それ以外の部分よりも欠損が早期に生じていた。

図-9より、腐食の進行にともない、平均断面積と最小断面積の差が大きくなる傾向が明確に見て取れる。

この結果より、腐食の程度が小さい段階では、平均腐食量により鉄筋コンクリート部材の力学性状を評価しても不都合は小さいと考えられるが、腐食の程度が大きくなるにつれ、腐食の不均一性を考慮する必要性が増すと一般的にいえる。たとえば、本実験のNo.4供試体の実験結果にみられたように、腐食の著しい鉄筋コンクリート部材の降伏近くの挙動は、平均的な腐食断面積ではなく局所的に最も腐食が進行した箇所断面積に支配される場合がある。ただし、No.4供試体の腐食の程度は、実構造物中の鉄筋の腐食から比べると、はるかに腐食の進んだ段階である。

4. 結論

本研究では、内部鉄筋が腐食した鉄筋コンク

リートの力学性状に関する基礎的な知見を得るため、室内実験を行い以下の結論を得た。

- (1) 鉄筋の腐食の進行により、鉄筋とコンクリートの付着が損なわれるため、かぶりコンクリートのテンションステイフネスが低下する場合があることが確かめられた。
- (2) 鉄筋の腐食分布の不均一性は、平均腐食量が大きい腐食段階ほど大きい。これは電食により腐食させた結果であるが、実環境下における腐食でも同様の傾向を示すと考察した。
- (3) 鉄筋の腐食が著しい鉄筋コンクリートでは、降伏近くの挙動が、平均腐食断面積よりも、局所的に最も腐食した断面積により支配される場合がある。

なお、本研究の結果は、コンクリート中に軸方向鉄筋のみが配置された状態で得られたものである。実構造物では、スターラップや帯鉄筋が配置されることから、横方向の鉄筋の腐食も考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：平成11年版コンクリート標準示方書〔施工編〕－耐久性照査型－，2000.1.
- 2) T.Shimomura and K.Maruyama: Experimental and Analytical Approach to Evaluation of Residual Performance of RC Structures Deteriorated by Chloride Attack, Proceedings of the International Symposium on Integrated Life-Cycle Design of Materials and Structures ILCDES 2000, pp.458-463, May 2000.
- 3) 青山敏幸, 下村 匠, 丸山久一: 塩害により鉄筋が腐食したRC部材の曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.883-888, 1998.6.
- 4) 佐々木淳, 丸山久一, 清水敬二, 米田直也: 鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.139-144, 1991.6.