

機関番号：13501

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760353

研究課題名 (和文) 統計パラメータを用いた腐食 RC 部材の平均引張挙動モデルの開発

研究課題名 (英文) Development of average tensile constitutive model for corroded RC member by using statistic parameter

研究代表者

高橋 良輔 (TAKAHASHI RYOSUKE)

山梨大学・医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：10371783

研究成果の概要 (和文)：本研究では、腐食鉄筋の平均断面減少量と平均腐食ひび割れ幅の相関は、断面減少率の平均区間が大きいほど高くなる傾向が認められ、腐食後の平均引張モデルを腐食ひび割れ幅により整理できる可能性が示された。一方、腐食 RC はりの曲げ試験と解析から、付着が耐荷力と変形性能に大きく影響し、特に腐食が激しく破壊が局所化する場合には、平均引張モデルを用いた曲げ性能の評価は難しいことも明らかとなった。

研究成果の概要 (英文)：In this study, the correlation between the average corroded sectional area loss of reinforcement and average corrosion crack width becomes higher when the sectional area loss is averaged in larger average interval. The result shows possibility of tensile model using parameter relating crack width. However, this study also shows the difficulty of using average tensile model for evaluation of the flexural performance of corroded RC member especially when local fracture is caused by heavy corrosion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：鉄筋腐食, 曲げ, 付着劣化, FEM

1. 研究開始当初の背景

現在の RC 構造物の一般的な維持管理では、外観調査により判断された劣化度に基づき詳細な調査や緊急的な補修の必要性が判断される。本来であれば、その調査項目や補修の判断基準は要求性能と残存性能に基づくべきであるが、現在は考慮が不十分である。今後、維持管理費の増加と公共工事費への投資の減少を考えると、定量的な残存性能評価に基づく判断も組合せた、より合理的な維持管理が望まれる。しかし、既往の研究でも確

認されているように、劣化による材料特性の変化を設計式に考慮するだけでは、残存性能の定量評価に限界がある。FEM などの数値解析による評価は、この解決方法の一つであり、既に数値解析による劣化構造物の性能評価に関する取組みも行われている。

実構造物レベルの解析では、簡便性から、一般的に鉄筋をコンクリート要素内で平均化した分散鉄筋モデルが多く用いられる。このモデルは、鉄筋とコンクリートの相互作用をそれぞれの平均応力ひずみ関係に陰に考

慮したモデルであり、例えば腐食劣化問題に適用する場合、腐食鉄筋とコンクリートの相互作用を考慮する必要があるが、この相互作用と、腐食分布がその作用に与える影響は十分に明らかではない。よって、FEMを用いた腐食 RC 構造物の定量評価の発展には、腐食分布と腐食鉄筋とコンクリートの相互作用を考慮した分散鉄筋モデルが必要である。

また既往の研究では、鉄筋の腐食分布は統計パラメータによって整理できる可能性が示されている。この腐食分布を表す統計パラメータを用いて平均応力ひずみ関係を整理することができれば、点検調査による限定された情報から腐食の分布状況を推定することが可能となり、点検調査と有限要素解析を結びつけることが可能となる。

2. 研究の目的

背景から以下を目的とし、本研究を実施した。

- (1) 腐食鉄筋の断面分布状況と腐食ひび割れ幅の統計パラメータの関係を明らかにする。
- (2) 鉄筋腐食した RC 部材中の鉄筋とコンクリートの平均応力ひずみ関係を明らかにする。
- (3) 腐食に関する統計パラメータを考慮した分散鉄筋モデルを構築する。
- (4) 付着が関係と考えられる曲げ変形性能や曲げ破壊の変化などについて実験と解析により分散鉄筋モデルの適用性を検証する。

3. 研究の方法

研究目的(1)~(4)の達成のため、以下の3つの項目に対して研究を行った。各研究項目毎に分けて研究方法を示す。

- (1) 腐食後平均引張モデル構築に関する研究
本研究は目的の(1)~(3)に対応する。
角柱コンクリートの断面中央に鉄筋を1本配置した供試体を作成し、その鉄筋を腐食させて1軸引張試験を行い、腐食後鉄筋コンクリートの平均応力ひずみ関係を調べた。健全時の鉄筋径は3種類用いた。

腐食後の鉄筋断面は3Dスキャナにより詳細に測定した。また同時に腐食により発生する腐食ひび割れの開口幅の計測も行った。

- (2) 腐食 RC はりの曲げ変形性能の研究
本家研究は目的(4)に対応する。

健全時鉄筋比、鉄筋腐食量、かぶり厚さを実験変数として曲げ荷重を行い、鉄筋腐食の曲げ挙動、特に変形性能への影響を調べた。

同一断面で主筋径が D10, D16 の供試体 (表

表 1 曲げ実験供試体概要

供試体	目標重量減少率 (%)	主鉄筋	鉄筋比 (%)
S1000	0	2D10	0.634
S1010	10		
S1030	30		
S1600	0	2D16	1.765
S1610	10		
S1630	30		

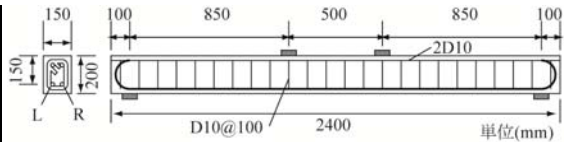


図 1 曲げ実験供試体

1, 図 1) を作成し、腐食後、荷重試験により荷重変位を計測し破壊状況を観察した。腐食ひび割れ幅を測定し、荷重試験終了後に 10cm 区間毎の鉄筋の重量減少率を測定した。

- (3) 各種鉄筋モデルの腐食 RC 部材解析への適用性に関する研究

本研究は目的(4)に対応する。

研究方法(2)の実験結果のうち、鉄筋断面減少量が大きく、破壊が局所化した S1630 について付着モデルなど鉄筋のモデル化に関する解析的検討を行った。

図 2 に示すメッシュを作成し、3次元非線形 FEM プログラムを用いて解析した。解析ケースは、腐食分布データの精度、鉄筋モデル (平均引張モデルを用いる分散鉄筋と付着を直接考慮する離散鉄筋モデル)、離散鉄筋における付着モデルの違いを検討するため決定した (表 2)。離散鉄筋における付着モデルには、剛結、腐食による付着強度低下を考慮し付着軟化の無いモデル、軟化を考慮し付着強度低下に伴い剛性が低下するモデル A、軟化を考慮し軟化開始時期が早くなるモデル B を用いた (図 3)。

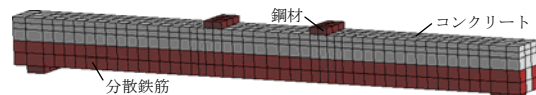
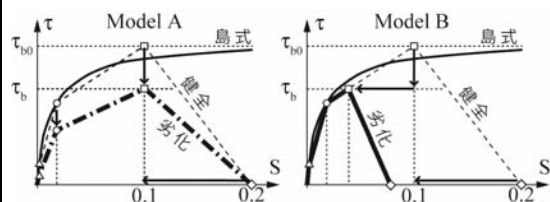


図 2 解析メッシュ例 (分散モデル)

表 2 解析ケース

No.	鉄筋モデル	腐食データ	付着モデル
1	離散	重量	A
2	離散	断面	A
3	離散	断面	B
4	離散	断面	剛結
8	分散	断面	-



τ_{b0}: 健全時付着強度, τ_b: 劣化時付着強度,
S: 鉄筋径で正規化したすべり (すべり s/ 鉄筋径 D)

図 3 付着モデル

4. 研究成果

以下、研究項目毎に研究成果を述べる。

- (1) 腐食後平均引張モデル構築に関する研究
形状スキャナによる鉄筋断面分布は重量計測によるものと一致し、さらに鉄筋の断面分布は重量計測による分布に比べ、より局所的な分布を把握可能であることを確認し

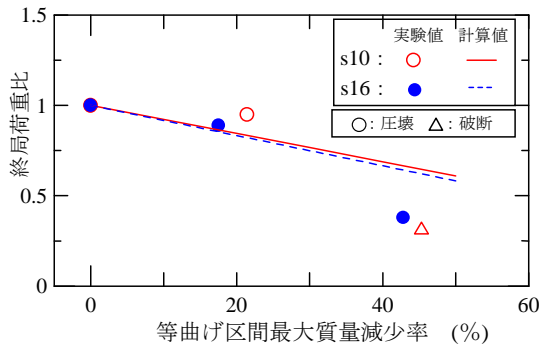


図4 終局荷重の比と平均腐食率の関係

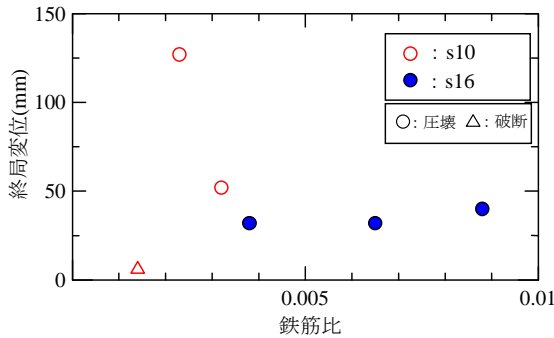


図5 終局変位と鉄筋比の関係

た。腐食統計パラメータの検討を行うため、形状スキャナーの鉄筋断面計測結果と腐食ひび割れとの相関を調べたところ、断面を平均化する区間が大きくなると、平均断面減少率と平均腐食ひび割れ幅の相関が高くなる傾向が認められた。引張試験では有意なデータを得ることができず、本研究では分散鉄筋モデル構築には至らなかったが、モデルを外観調査結果の平均腐食ひび割れ幅で整理できる可能性が示された。

(2) 腐食 RC はりの曲げ変形性能の研究

①鉄筋腐食が耐荷性能に及ぼす影響

実験値の健全時に対する終局荷重の比と、等曲げ区間内の断面の最大鉄筋重量減少率の関係(図4)において、鉄筋径に関わらず最大質量減少率が20%程度までは実験値と、曲げ耐力算定に最大鉄筋重量減少率により鉄筋断面を減少させた計算値で傾向がほぼ一致する。しかし最大質量減少率が40%程度になると荷重低下率は計算値を下回り、荷重低下の傾向は計算値に比べてより大きい。これは局所的に大きな断面減少が考慮されていないことや、付着劣化により平面保持が成り立たないことが考えられ、このレベルの腐食に対しては健全時の仮定に基づく計算方法の適用が難しいことが示された。

②終局変位と鉄筋比の関係

図5に終局変位と腐食後の鉄筋断面による鉄筋比の関係を示す。関係には健全時鉄筋比によって異なる傾向が見られた。健全時鉄筋比が小さい場合は、健全時同様に鉄筋量が減少すると終局変位が大きく増加するが、健全時

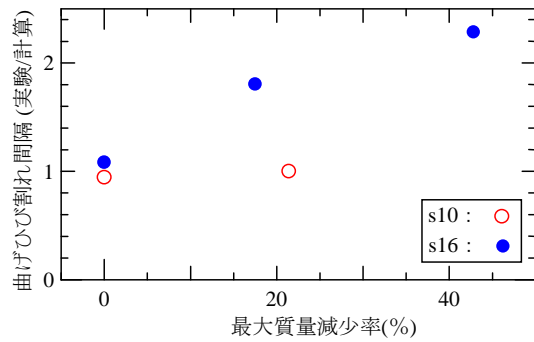


図6 曲げひび割れ間隔と最大質量減少率

鉄筋比が大きい場合は、腐食による鉄筋量の減少に伴う終局変位の増加は僅かであった。

③終局変位と付着劣化の関係

破壊断面を中心とする幅500mm区間の曲げ降伏時の最大曲げひび割れ間隔と、最大質量減少率の関係(図6)を調べると、鉄筋破断したS1030を除くS10シリーズは破壊領域のひび割れ間隔に変化はないが、S16シリーズは著しくひび割れ間隔が増大し、破壊断面付近で腐食により付着劣化していることが示された。S16シリーズの僅かな終局変位増加は、付着劣化による可能性が示された。

④本研究の成果まとめ

健全時の鉄筋比が大きい場合、腐食により発生する付着劣化のため変形が局所化して圧壊が促進され、その結果、鉄筋量が減少しても終局変位がほとんど変化しないことが明らかとなった。すなわち、曲げ変形性能の評価には破壊断面付近の付着劣化の考慮が重要であることが本研究より示された。

(3) 各種鉄筋モデルの腐食 RC 部材解析への適用性に関する研究

①荷重変位関係の評価

重量減少率分布を適用した場合は最大荷重を過大評価した(図7)。一方、断面減少率分布を用いても、分散鉄筋や剛結など、付着を直接考慮しない場合は過大評価となる。

②破壊位置の評価

図8の軸ひずみコンターで分散鉄筋を用いた場合は、実験での破壊位置(図9)とひび割れの局所化位置は近いものの破壊位置は、逆側となり全く異なる結果を見せた。剛結でもこの性状が確認されており、付着を直接考慮しない場合、破壊位置を評価できないことが明らかとなった。一方、離散鉄筋を用いる場合は破壊位置が実験に一致するものと、しないものの両方が見られた。付着モデルにおけるピーク時のずれと軟化勾配によって終局変位のみならず、破壊位置も大きく変わるため、正確な挙動評価のためには直接的な付着の考慮のみならず、付着軟化のモデル化も重要であることが明らかとなった。

③終局変位の評価

本解析ではいずれの場合も、実験に比べ終

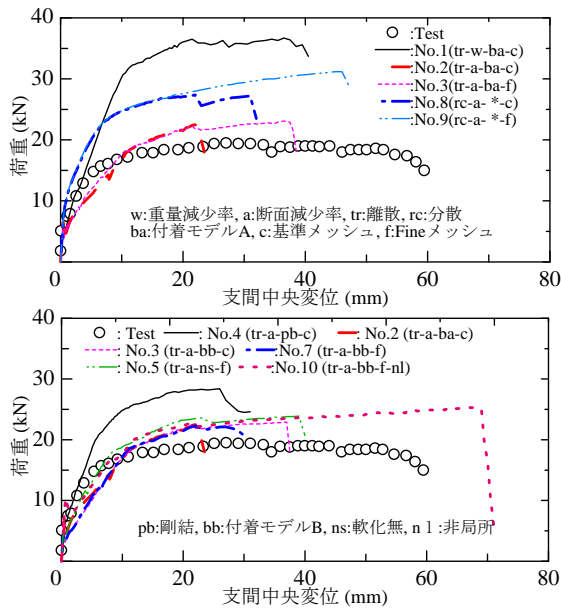


図7 解析結果(荷重変位関係)

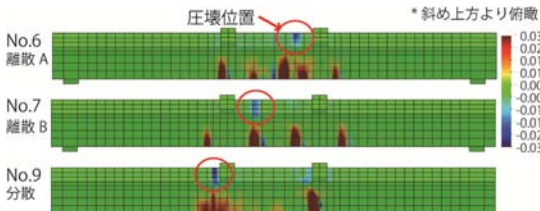


図8 軸ひずみコンター図(荷重低下時)

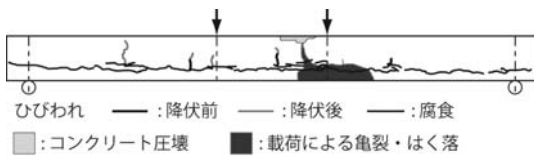


図9 実験ひび割れ図

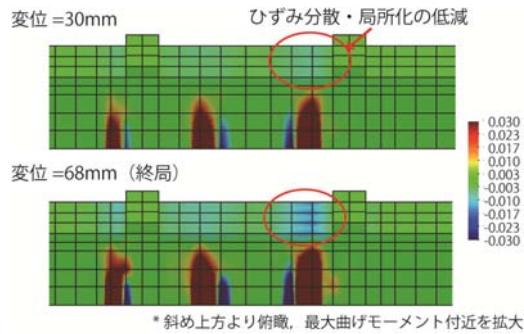


図10 非局所適用後の軸方向ひずみ分布

局変位を過小評価する傾向にある。これは、解析では実験よりも破壊の局所化が著しく、圧縮ひずみが1点に集中するためであることが示された。そこで積分型非局所理論を適用した解析を行ったところ、圧縮ひずみの局所化が緩和され(図10)て終局変位が実験に一致し、積分型非局所理論のこの問題に対する良好な適用性が明らかとなった。

④本研究の成果まとめ

本研究では、鉄筋の腐食レベルが大きく局

所的な曲げ破壊を伴うような場合に、分散鉄筋モデルなど付着を直接考慮できないモデルでは耐力評価できない事が明らかとなった。従来、設計式により耐力は概ね評価できると言われており、本研究の成果はこの設計式の腐食問題への適用範囲を明らかにした。また破壊位置など挙動についてはこれまでの指摘同様に、評価はできないことを示した。

本研究成果から腐食後の平均引張モデル構築の必要性についての再検討、また、離散鉄筋を用いても十分に挙動評価できないことも明らかとなったため、この場合の付着モデルの構築の検討が必要である。さらに、鉄筋モデルの適用範囲が腐食レベルに応じて制限されることが考えられるため、モデルの適用限界についても今後検討すべきである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ①高橋良輔：破壊の局所化を伴う腐食 RC はりの曲げ挙動 FEM 解析, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, 査読無, 2011 年, 掲載決定
- ②松下綾太, 高橋良輔, 斉藤成彦：鉄筋腐食した RC はりの曲げ変形性能に及ぼすかぶり厚さの影響, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, 査読無, V, 2010 年, pp. 399-400
- ③松下綾太, 高橋良輔, 斉藤成彦：鉄筋腐食した RC はりの曲げ変形性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 32 No. 2, 2010 年, pp. 1483 - 1488

[学会発表] (計2件)

- ①松下綾太, 高橋良輔, 斉藤成彦：鉄筋腐食した RC はりの曲げ変形性能に及ぼすかぶり厚さの影響, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 3 日, 札幌市
- ②松下綾太, 高橋良輔, 斉藤成彦：鉄筋腐食した RC はりの曲げ変形性能に関する実験的研究, 第 32 回コンクリート工学講演会, 2010 年 7 月 9 日, さいたま市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 良輔 (TAKAHASHI RYOSUKE)
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授
研究者番号：10371783

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し