

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870283

研究課題名(和文)鉄筋腐食RC部材の耐震性能評価に関する基礎研究

研究課題名(英文)Basic study on evaluation for seismic performance of corroded RC beam

研究代表者

高橋 良輔 (TAKAHASHI, Ryosuke)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：10371783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では鉄筋腐食RC部材の耐震性能評価を目的とし、腐食による付着劣化と繰返し荷重が引張主筋腐食RCはりの曲げ破壊挙動に及ぼす影響と、圧縮主筋の腐食ひび割れが曲げ破壊挙動に及ぼす影響を実験と解析により検討した。その結果、リブの損失や表面に達しない腐食ひび割れは終局変位にほとんど影響せず、引張鉄筋比の減少と腐食ひび割れが終局変位に影響を及ぼすこと、また、ひび割れ幅の大きい圧縮主鉄筋の腐食ひび割れは終局変位を減少させることを明らかにした。FEM解析における初期ひび割れや接合要素による腐食ひび割れは、圧縮抵抗断面の減少により実挙動を評価できず、圧縮主筋腐食ひび割れのモデル化のさらなる検討が必要である。

研究成果の概要(英文)：Influence of corroded bond action and cycle loading to flexure behavior of corroded RC beam is investigated. Effect of corrosion crack in compressive area is also investigated. In the result, it is clarified that loss of rib on re-bar and corrosion crack which does not appear on beam surface give no influence to ultimate deformation in flexure. Wider corrosion crack appearing on beam surface decreases ultimate deformation in the flexure. In FEA, corrosion crack model expressed by initial cracking and interface element does not evaluate failure behavior seen in the experiment because an effective area in compression zone in the analysis is decreased by the corrosion crack model. Therefore, more effective model is required to evaluate the influence of corrosion crack in compression zone to the flexural failure behavior of RC beam.

研究分野：工学

キーワード：鉄筋腐食 曲げ 付着劣化 腐食ひび割れ 圧縮鉄筋 変形性能

1. 研究開始当初の背景

劣化 RC 構造物は、材料特性の不均一性、想定とは異なるひび割れ、損傷による鉄筋とコンクリートの一体性の損失など、設計時の前提条件が崩壊し、前提条件により担保されていた破壊形態や変形性能が大きく変化する可能性がある。耐震性能は、耐荷性に加えて変形性、履歴特性、さらに破壊挙動全体を対象とする総合的な性能であることから、劣化による耐震性能の低下は十分に考えられる。劣化した鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物の定量的な構造性能評価に関する研究が盛んだが、その多くは耐荷性能の評価に主眼を置いており、我が国にとって重要である耐震性能の評価までを対象とした研究はまだ十分であるとは言えない。

鉄筋腐食は、断面減少や鉄筋位置のひび割れにより、鉄筋とコンクリート間の付着性能を大きく低下させる材料劣化現象である。したがって、鉄筋腐食により変形性能が大きく変化することが考えられる。耐震性能には変形性能が含まれるが、材料劣化した部材に対する確立した変形評価式は存在しない。また、耐震性能全体を評価する為には数値計算が必要となるが、その適用性についても検討例は少ない。

2. 研究の目的

背景から以下を当初の研究目的とし、本研究を実施した。

- (1)主鉄筋の断面と付着、圧縮破壊領域、終局変位の関係を明らかにする。
- (2)鉄筋腐食量と主鉄筋量の減少、付着劣化の相関を明らかにする。
- (3)腐食 RC 部材の破壊時の変位予測式を構築する。
- (4)FEM 解析による腐食 RC 部材の変形性能評価への適用性を明らかにする。
- (5)鉄筋腐食の繰返し載荷への影響を明らかにする。
- (6)FEM 解析による繰返し載荷条件下での腐食 RC 部材の破壊挙動評価への適用性を明らかにする。

3. 研究の方法

当初の研究目的達成のため、4 項目に対して研究を行った。以下、研究項目毎に分けて研究方法を示す。

(1) 鉄筋腐食による付着劣化が終局変位に及ぼす影響の解明

本研究は目的の(1)~(3)に対応する。

腐食のばらつきの影響を避け、鉄筋量減少・付着劣化という腐食が内包する2つの影響因子を分離し、それぞれが終局変位に与える影響を調べるため、リブ損失と腐食ひび割れをモデル化した RC はりの曲げ載荷実験を行った。4 種類の異なるリブ高さ(表1)に加工した引張主鉄筋を用いた供試体と引張種鉄筋位置にスリットによる擬似クラックを設けた供試体の曲げ載荷試験(図1)を行

い、変形性能の違いを調べた。机上理論から、鉄筋量と付着の破壊時変位への相関は、圧縮破壊領域の寸法変化により説明できる。そこで実験においては圧縮破壊領域の寸法、終局変位の関係式を見出すため、圧縮破壊領域の測定も行った。破壊領域の観測は、目視観測と内部ひずみ分布計測により行った。擬似クラックは幅 16mm、厚さ 0.3mm のアルミ板を鉄筋に沿って水平、鉛直方向に設置することにより作成した。

表1 モデル実験供試体概要

供試体	主鉄筋	リブ高 (mm)	リブ高減少率 (%)	仮想腐食率 (%)
D1600	D16	1.00	0	0
D1610		0.23	38	10
D1620		0.62	77	20
D1625		0.00	100	25
DC1600		1.00	0	0

*擬似ひび割れ供試体

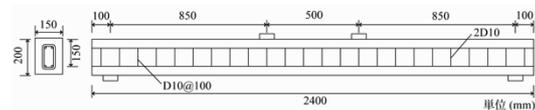


図1 モデル実験供試体形状寸法

(2) RC はりの繰返し載荷に及ぼす腐食引張主鉄筋の影響の解明

本研究は目的の(5)(6)に対応する。

付着挙動の繰返し履歴において、腐食が及ぼす影響は十分に明らかではない。そこで、図1の供試体を用いて繰返し載荷試験を行い、その影響を調べた。破壊挙動に影響する要因を限定するため、腐食は引張主鉄筋のみとし、負方向の載荷をしない片振り載荷とした。鉄筋は電食により断面減少させた。

表2 繰返し載荷実験供試体概要

供試体 No.	鉄筋	載荷方法	有効高さ (mm)	平均断面減少率 (%)
RS1610	2D16	片振り	150	9.1
YS1610		片押し		9.0

(3) 圧縮主鉄筋の腐食ひび割れに対する FEM 解析の適用性の検討

本研究は目的の(4)~(6)に対応する。

既往の研究において、FEM 解析における鉄筋断面減少および付着劣化に対するモデル化は概ね確立され、適用性も確認されてきている。しかし、腐食ひび割れに対しては不十分である。既往の実験において、せん断圧縮破壊において圧縮主鉄筋のひび割れが応力流れに影響し、せん断耐力を向上させる例が示されている。地震時挙動においては、圧縮側に腐食ひび割れが発生していることが考えられる。そこで、既往の実験の FEM 解析を行い、圧縮側に腐食ひび割れを有する場合のモデル化方法と、FEM 解析の適用性を検討した。

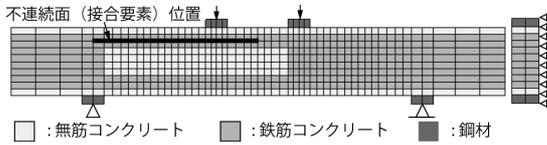


図2 解析メッシュの例

表3 解析ケース

No.	解析要因	f_c N/mm ²
A	健全	36.4
B	初期ひび割れ導入	
C1	不連続面ずれ剛性: 10^{-1} N/mm ³	
C2	不連続面ずれ剛性: 10^{-2} N/mm ³	
C3	不連続面ずれ剛性: 10^{-5} N/mm ³	

腐食ひび割れのモデル化は、圧縮主鉄筋位置に接合要素により不連続面を導入する方法と、載荷前に鉛直方向引張力を作用させてひび割れを導入する方法の2通りとした。また不連続面を導入する場合においては、不連続面のずれ剛性を解析パラメータとした。

(4) 圧縮主鉄筋の腐食ひび割れがRCはりの曲げ破壊挙動に及ぼす影響の解明

本研究は目的の(5)に対応する。

圧縮主鉄筋の腐食ひび割れがRCはりの曲げ破壊挙動に及ぼす影響について調べるため、圧縮鉄筋を腐食させたRCはりの実験を行った。

供試体は図3に示すように圧縮鉄筋のみを電食により腐食させた。圧縮主筋の鉄筋径は複数用い、引張主筋はD10で統一した。また、ひび割れによる不連続面のみ影響を調べるため、圧縮鉄筋位置に厚さ0.3mmのステンレス板を設置し、不連続面を形成したYC1000を製作した。

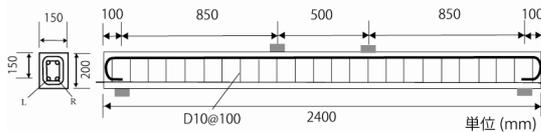


図3 圧縮鉄筋腐食供試体形状寸法

表4 圧縮鉄筋腐食供試体概要

供試体 No.	圧縮主筋	有効高さ (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	平均断面減少率 (%)
Y1000	2D10	150	37.8	0
Y1010			42.5	2.4
Y1030			40.6	17.8
YC1000			38.4	0
Y1310	2D13		37.5	10.5
Y1600	2D16		14.0	0
Y1610		18.0	7.5	
Y1630		13.5	8.3	

4. 研究成果

以下、研究項目毎に研究成果を述べる。

(1) 鉄筋腐食による付着劣化が終局変位に及ぼす影響の解明

実験結果および考察

リブ減少による付着劣化により圧縮破壊領域が部材軸方向に局所化することで、終局変位が健全に比べて小さくなる想定であったが、図4の荷重変位関係ではリブ減少による終局変位への影響はほとんど見られなかった。リブ高さが77%減少したD1620では終局変位の減少は見られたが、健全との差はわずか2mm程度であった。また、リブ高さを100%減少させたD1625ではリブ損失による鉄筋断面減少の影響でむしろ終局変位が増加した。

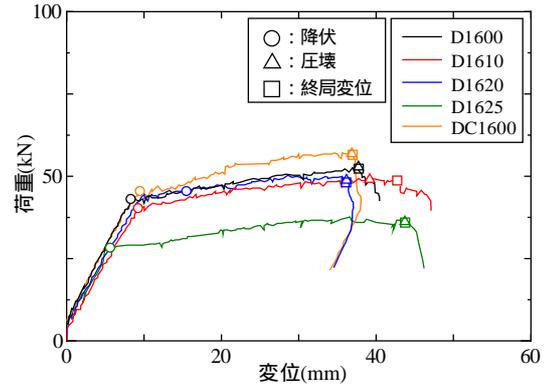


図4 荷重変位関係

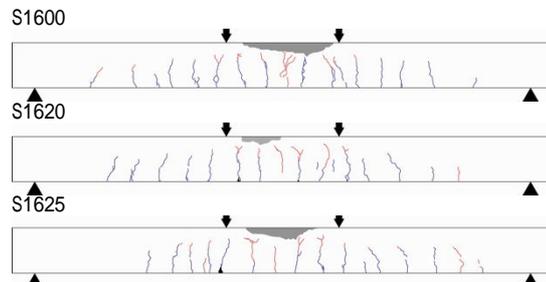


図5 ひび割れ性状

図5のひび割れ性状では、終局変位が小さくなったD1620で圧縮破壊領域の減少が見られた。しかし、曲げひび割れ間隔にはほとんど違いが見られずリブが全く無いS1625においても違いが見られなかった。丸鋼を用いた場合には一般的にひび割れ間隔が大きく、局所的な破壊を示す。今回はリブを削ったため、その僅かな凹凸による摩擦が影響したと考えられる。腐食生成物により、コンクリートと腐食鉄筋間の摩擦が完全に消失しないことを考えると、リブの損失による付着劣化が曲げ終局変位に与える影響はほとんどなく、実験で観察される終局変位の変化は腐食ひび割れと鉄筋比の減少によるものと言える。

擬似ひび割れ供試体は健全時の挙動とほとんど変わらず、腐食ひび割れの影響は見られなかった。ひび割れが表面に貫通していないため、付着が十分に保たれていることが考えられる。

本研究の成果まとめ

本研究において、腐食による引張主鉄筋リブの減少が終局変位にほとんど影響しないことが明らかとなった。また、腐食ひび割れが発生していても表面に達しない限り付着

は十分保持されている可能性がある。

(2) RC はりの繰返し载荷に及ぼす腐食引張主鉄筋の影響の解明

実験結果および考察

载荷履歴による荷重変位関係の違いを図 6 に示す。片振りの繰返し载荷を行った場合、荷重変位関係の包絡線は単調片押し载荷の荷重変位関係に一致する。終局変位は、繰返し载荷の RS1610 が単調载荷の YS1610 に比べて大きくなるが、その差は僅かで 10mm 以下となった。このことから、引張主鉄筋の腐食が 10%程度では繰返しによる曲げ破壊挙動への影響はほとんどないと言える。

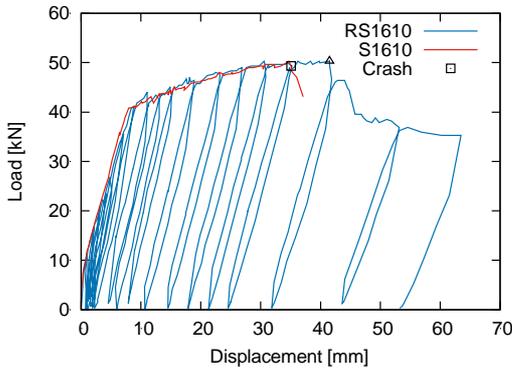


図 6 荷重変位関係

本研究の成果まとめ

本研究において、10%程度の断面減少率であれば、引張主鉄筋が腐食した梁の曲げ破壊挙動に繰返し荷重はほとんど影響しないことが明らかとなった。

(3) 圧縮主鉄筋の腐食ひび割れに対する FEM 解析の適用性の検討

解析結果および考察

図 7 に示す荷重変位関係では、初期ひび割れを導入した場合に、最大荷重は実験で観測されたせん断耐力の 67%程度にまで低下した。実験では圧縮鉄筋の腐食によりせん断耐力が 20%程度増加しており、解析結果は実験の現象を再現できていない。また、不連続面を導入した場合にも、不連続面の摩擦減少に従い、せん断耐力が減少することがわかった。

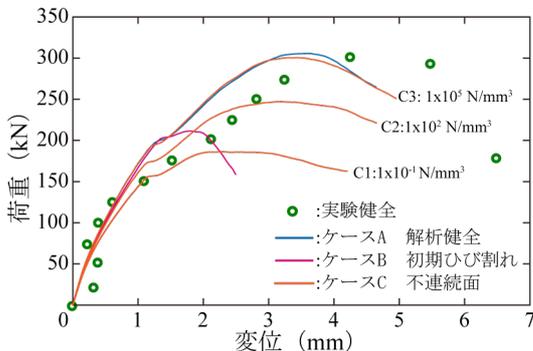


図 7 荷重変位関係

図 8 は最小主応力分布である。この図より、初期ひび割れや不連続面を有する場合に、その上下で重ね梁のようになり、健全時の圧縮域で引張応力が生じていることがわかる。このことより、初期ひび割れや不連続面を有すると圧縮有効断面が減少して耐力が減少すると言える。この解析においては主鉄筋を線材としているが、実際には主鉄筋により上下の重ね梁間で圧縮応力が伝達されている可能性も考えられる。

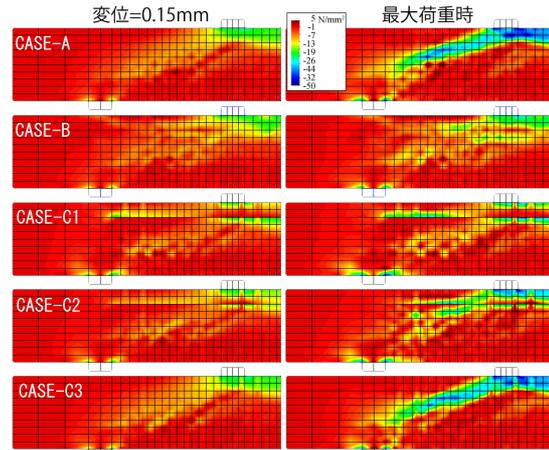


図 8 最小主応力分布

本研究の成果まとめ

FEM において、初期ひび割れや不連続面により圧縮鉄筋の腐食ひび割れをモデル化すると、圧縮抵抗領域が減少することにより健全時に比べせん断圧縮破壊耐力が減少する。このことから、圧縮鉄筋位置のひび割れがせん断圧縮破壊挙動に及ぼす耐力増加の影響を本研究の手法を用いた解析では評価できないことが明らかとなった。

(4) 圧縮主鉄筋の腐食ひび割れが RC はりの曲げ破壊挙動に及ぼす影響の解明

実験結果および考察

表 5 に圧縮主鉄筋が腐食した供試体の曲げ破壊試験結果を示す。健全供試体については、圧縮主鉄筋の増加に伴う耐力の増加は計算値と同様の値を示した。終局変位は、圧縮主鉄筋量の増加により減少する傾向にある。

一方、同一鉄筋径で腐食の影響を見ると、鉄筋径が 10mm では腐食により終局変位が増加した。これは腐食による断面減少の影響と思われる。16mm では腐食量 10%と同程度で、終局変位が増加と減少のいずれの場合も見られた。終局変位が減少した Y1630 の腐食ひび割れ幅は平均で 0.7mm、終局変位が増加した Y1610 では腐食ひび割れ幅は平均で 0.2mm であり、腐食ひび割れの進展が進むと終局が減少することがわかる。人工的に不連続面を導入した YC1000 も健全の Y1000 より終局変位が小さく、このことを裏付けている。

表5 圧縮鉄筋腐食供試体実験結果

供試体 No.	降伏荷重 (kN)		終局荷重 (kN)		終局変位 (mm)	重量減少率 (%)	破壊形式
	実験	計算	実験	計算			
Y0600	22.2		28.1	25.3	129.5	0	圧壊
Y1000	17.0		23.7	23.0	49.3	0	圧壊
Y1010	17.3		24.2	23.9	59.1	2.4	圧壊
Y1030	16.5		24.2	23.5	83.1	17.8	圧壊
Y1310	25.8	17.2	30.1	23.3	28.1	10.5	圧壊
Y1600	17.0		27.8	25.7	35.3	0	圧壊
Y1610	17.1		30.3	26.7	45.3	7.5	圧壊
Y1630	19.4		28.9	27.1	30.2	8.3	割裂
YC1000	25.8		33.1	23.0	41.5	0	圧壊

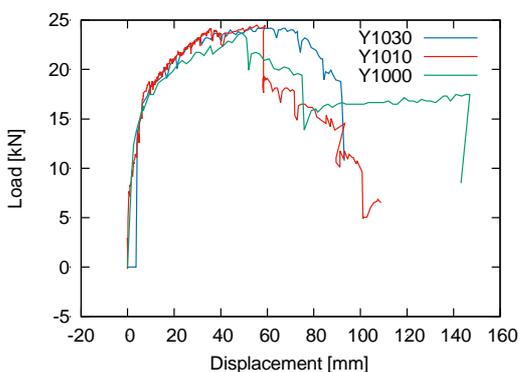


図9 荷重変位関係 (鉄筋径 10mm)

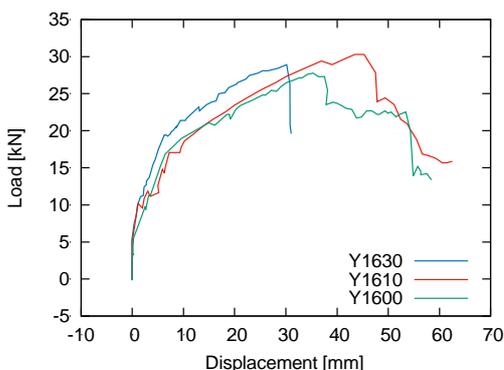


図10 荷重変位関係 (鉄筋径 16mm)

またひび割れ幅が大きく終局変位が減少した Y1630 と、人工不連続面を持つ YC1000 は、かぶり部が浮き上がり終局を迎えた。地震荷重下ではかぶり剥落と鉄筋の座屈により荷重が低下する。圧縮域の腐食ひび割れによって、この現象が小さい変位で生じる可能性がある。

本研究のまとめ

かぶり部の腐食ひび割れにより、終局変位が減少することが明らかとなった。地震荷重下においては、荷重低下のメカニズムにかぶり剥落が関与するため、圧縮域の腐食ひび割れの影響による終局変位の減少がより大きい可能性が考えられる。

(5) 全体のまとめ

・本研究により、腐食による終局変位の変化

は断面減少による鉄筋比の減少と、腐食ひび割れによる付着劣化に起因することが明らかとなった。また、腐食ひび割れが表面に達しない限り付着劣化による終局変位の低下はないと考えられる。

・圧縮主鉄筋の腐食ひび割れがある進展に達していれば、終局変位を減少させることがわかった。その場合には、終局時にかぶり部が浮くことから、地震時挙動に大きく影響する可能性がある。また圧縮域の腐食ひび割れを FEM でモデル化すると圧縮抵抗断面の減少し、耐力が減少して実験とは異なる挙動となる。そのため、圧縮主鉄筋の腐食ひび割れの有効なモデル化を検討する必要がある。

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 1件)

高橋良輔：圧縮主鉄筋の腐食ひび割れがせん断圧縮破壊挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 36 No. 2, 2014年, pp. 476-480

〔学会発表〕(計 1件)

高橋良輔：圧縮主鉄筋の腐食ひび割れがせん断圧縮破壊挙動に及ぼす影響, 第36回コンクリート工学講演会, 2014年7月9日~2014年7月11日, 高松市 サンポート高松

〔その他〕

ホームページ等

<http://sangaku.yamanashi.ac.jp/SearchResearcher/contents/99CB25B150FAF3C4.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 良輔 (TAKAHASHI RYOSUKE)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：10371783