

論文 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

松下 綾太*1・高橋 良輔*2・斉藤 成彦*3

要旨：鉄筋腐食した RC はりの曲げ挙動についてはこれまでに精力的に研究がなされており、耐荷性能については徐々に解明されつつある。しかし、鉄筋腐食が変形性能に与える影響については十分に整理、検討がなされていない状況である。そこで、本研究では、鉄筋量の異なる 2 種類のはりを電食させ、載荷試験を行い、鉄筋腐食後の鉄筋量と変形性能の関係など、鉄筋腐食が曲げ変形性能に与える影響について検討した。その結果、健全時の鉄筋比が大きく、より圧縮破壊しやすい場合には、鉄筋腐食による付着劣化が破壊の局所化を促し、腐食により低鉄筋比となっても終局変位が増加しない傾向が明らかとなった。

キーワード：鉄筋腐食、変形性能、曲げ、RC はり、付着劣化

1. はじめに

公共事業費の減少や、供用予定期間を迎えつつある高度経済成長期に建てられた多くの構造物を有効利用する観点から、供用予定期間を超えて長期にわたり社会基盤構造物を利用する傾向にある。そのため、今後ますます適切な維持管理が重要になると考えられる。現時点の構造物の保有性能を定量的に評価し、要求性能と比較することができれば、構造物の補修・補強のより合理的な判断ができ、適切な維持管理に貢献できると思われる。しかし、鉄筋腐食した RC はりなど、材料劣化した部材が設計時の前提を満たさないことや、材料劣化の情報を構造物全体に対して詳細に収集することが極めて困難であることから、定量的な評価は容易ではない。

鉄筋腐食した RC はりの曲げ挙動を定量的に評価する試みについては、これまでに精力的に研究がなされている。耐荷性能については徐々に解明されつつあり、例えば定着が十分確保されている場合、最大腐食量を用いれば曲げ耐力を概ね評価できることが報告されている^{1),2)}。また変形性能については、主筋の腐食により、低鉄筋比のはりに見られる終局変位の増大や主筋の破断による終局変位の減少など、様々な挙動を示すことが分かっている³⁾。しかし、鉄筋腐食が変形性能に及ぼす影響については、耐荷性能ほど十分に整理、検討がなされていない状況である。そこで、本研究では、同一断面で鉄筋比の異なる 2 種類の RC はりを電食させて載荷試験を行い、鉄筋腐食が変形性能に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

岡田ら⁴⁾は、同一断面で鉄筋比の異なる健全な RC はりの曲げ載荷試験を行い、曲げ破壊時のポストピーク挙

動を明らかにした。本研究では、岡田らと同一寸法の実験供試体を用いることとし、そのうち同一断面で主筋径が D10, D16 と異なる 2 種類の供試体を選択した。これは、腐食による鉄筋量の減少のほか、鉄筋比や鉄筋径の影響についても検討するためである。

本研究で用いた供試体の概要を表-1 に、形状寸法を図-1 に示す。腐食程度は部材平均の腐食量が平均で 10%, 30% の 2 水準とした。なお、岡田らの実験では端部定着を付着によるものとしているが、本研究では端部鉄筋の腐食による定着不良を防ぐため、半円フックによる定着とした。

2.2 腐食促進試験

電食は図-2 のように、直流電源装置の陽極と供試体の主筋、陰極と銅板を接続し、供試体と銅板を 10%NaCl 水溶液の入った水槽に浸して、通電させる方法を用いた。支間内の主筋のみを腐食させるため、主筋以外の鉄筋と主筋の定着部はブチルゴム系の絶縁テープにより防食した。また、腐食ひび割れから腐食生成物が流出するのを極力抑えるため、水位は主筋位置より下となるように調節した。電食に用いる腐食減量、通電時間および電流値の関係には田森らの実験式⁵⁾を用いた。

2.3 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験での載荷方法を図-3 に示す。載荷は 2 点載荷で、供試体の載荷位置および支持位置には幅 200mm の鋼板を石膏により接着した。

変位については、岡田らの計測方法⁴⁾と同様に、大変形による支点移動の影響を無視できるように、支点直上のコンクリートにアルミフレームをピンで設置し、アルミフレームの中央変位と供試体下縁の変位差を計測する

*1 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 土木環境工学専攻 (正会員)

*2 山梨大学大学院 医学工学総合研究部准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 山梨大学大学院 医学工学総合研究部准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 供試体概要

| 供試体 No. | せん断 スパン(mm) | 有効高さ (mm) | 部材高さ (mm) | 目標平均質量 減少率 (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 主鉄筋 | 鉄筋比 (%) | |
|---------|----------------|--------------|--------------|-------------------|------------------------------|------|------------|-------|
| S1000 | 850 | 150 | 200 | 0 | 41.6 | 2D10 | 0.634 | |
| S1010 | | | | 10 | 41.8 | | | |
| S1030 | | | | 30 | 43.4 | | | |
| S1600 | | | | 0 | 40.6 | 2D16 | | 1.765 |
| S1610 | | | | 10 | 38.5 | | | |
| S1630 | | | | 30 | 43.1 | | | |

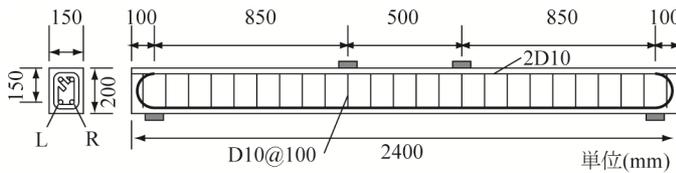


図-1 供試体形状・寸法

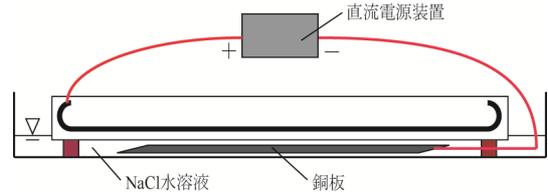


図-2 電食試験装置

方法を用いた。計測にはワイヤー変位計を用い、供試体下縁にワイヤー端を留め、フレームに滑車を設置した。本研究においては、目視および音によるコンクリート圧壊と鉄筋破断、および最大耐力後の十分な荷重の低下を確認後、荷重を終了した。

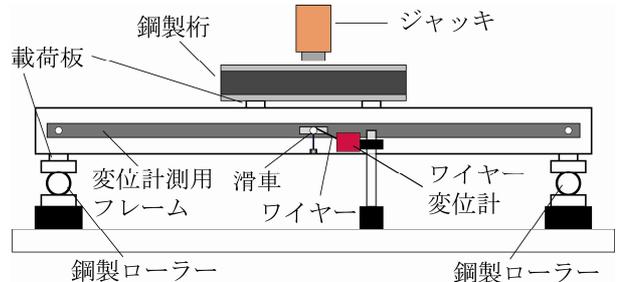


図-3 荷重試験方法

3. 試験結果

3.1 腐食促進試験

(1) 腐食ひび割れ

腐食促進試験終了後、供試体側面のひび割れ幅を、クラックスケールを用いて5cm間隔で測定した。表-2に各供試体の腐食ひび割れ幅の平均値と最大値を示す。ここに示す平均値および最大値は、側面の区別なく供試体全体に対するものである。図-4に腐食ひび割れ性状、図-5に各供試体の腐食ひび割れ幅の分布を示す。なお、図-1の供試体断面に示すように、2本の主筋をL、Rと分類し、それに対応する側面をL、R面とした。

腐食ひび割れは電食させた全ての供試体で確認した。腐食ひび割れ性状を見ると、主筋径に関わらず、目標平均質量減少率30%の供試体では側面全体に腐食ひび割れが連続して生じているのに対し、目標平均質量減少率10%の供試体では断続的に生じている。これは、目標平均質量減少率10%の供試体は腐食初期の段階であり、これが徐々に進展することで、目標平均質量減少率30%のような全体に広がったひび割れ性状になったことを示していると考えられる。

腐食ひび割れ幅はS16シリーズの方が平均、最大ともに大きくなった。これは、断面が同一であることから、S16シリーズの方がS10シリーズに比べてかぶりが小さく、腐食ひび割れが生じやすかったためと考えられる。

表-2 電食結果

| 供試体 No. | 鉄筋質量減少率 (%) | | 腐食ひび割れ幅 (mm) | |
|------------|----------------|------|-----------------|-------|
| | 平均 | 最大 | 平均 | 最大 |
| S1010 | 17.7 | 21.9 | 0.22 | 4.00 |
| S1030 | 31.9 | 45.3 | 0.42 | 2.50 |
| S1610 | 16.1 | 21.2 | 0.76 | 10.00 |
| S1630 | 30.9 | 44.1 | 1.44 | 6.00 |

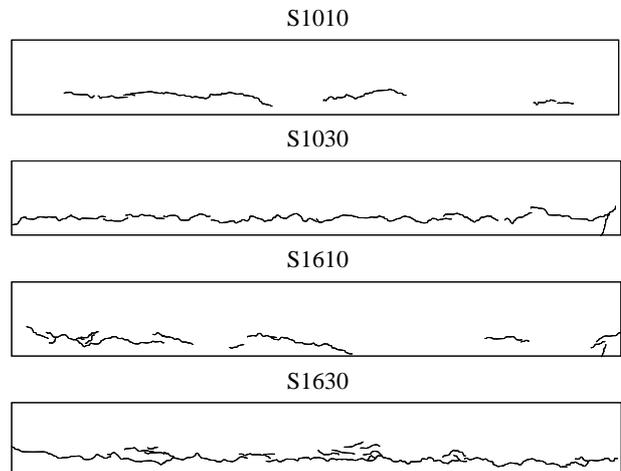


図-4 腐食ひび割れ性状(鉄筋L側)

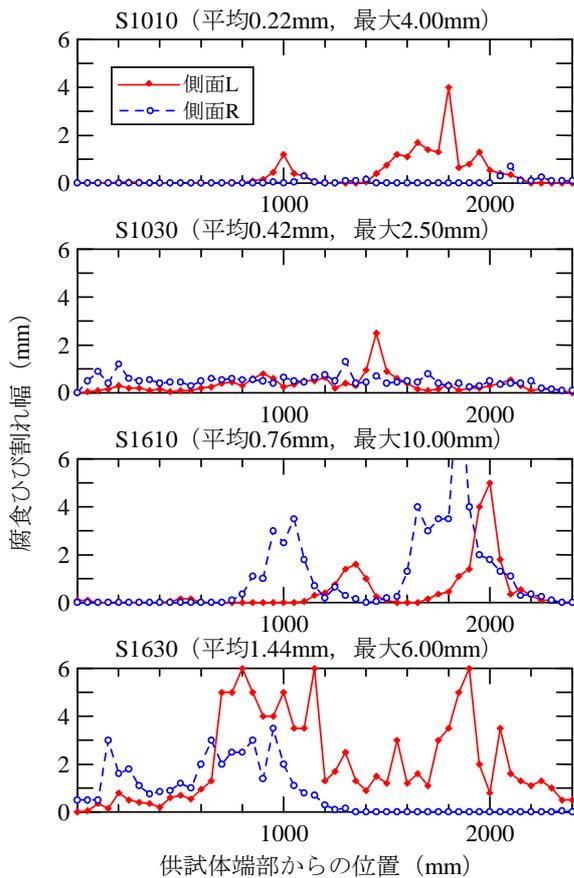


図-5 腐食ひび割れ幅分布

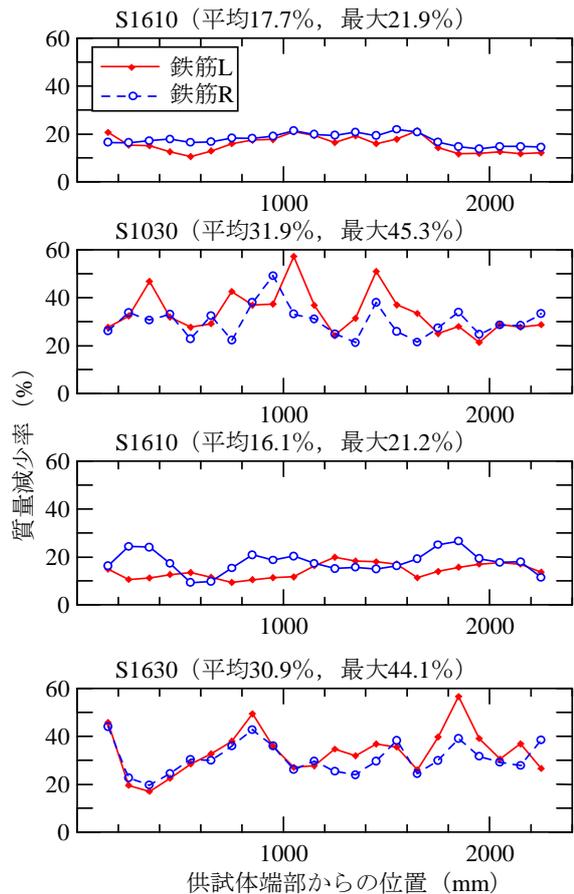


図-6 質量減少率分布

(2) 鉄筋の質量減少率

載荷試験後に主筋を取り出して、腐食量を測定した。鉄筋は約 10cm 間隔で切断し、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に 48 時間以上浸漬して除錆した後、重量を測定して質量減少率を求めた。表-2 に各供試体の質量減少率の平均値と最大値を、図-6 に各供試体の質量減少率分布を示す。ここで、表中の最大質量減少率は、2 本の主筋の平均値の最大、つまり鉄筋量が最小の断面の質量減少率である。以降、特に断りが無い限り、最大質量減少率にはこの値を用いる。

表から、目標平均質量減少率 10%の供試体では、平均質量減少率が 16%から 18%程度、目標平均質量減少率 30%の供試体では、平均質量減少率が 30%から 32%程度となり、ほぼ目標の質量減少率を得た。質量減少率分布からは、目標平均質量減少率が 10%の供試体はばらつきが小さく、30%の供試体ではばらつきが大きいことが分かる。鉄筋径による分布形状や、質量減少率の差は確認できなかった。

3.2 載荷試験

表-3 に各供試体の載荷試験結果を、図-7 に各シリーズの荷重-変位関係を示す。図中にはコンクリート圧壊の発生を○、鉄筋破断の発生を△で示した。ただし、

これらの発生の確認は、圧壊によるひび割れの目視と、鉄筋の破断音によるものである。また図-8 に載荷試験後のひび割れ図を示す。

破壊形式はすべての供試体で曲げ引張破壊であり、主筋径が D10 で目標平均質量減少率が 30%の S1030 を除く全ての供試体で圧壊が見られた。S1030 では、荷重 7kN 付近で曲げひび割れの発生と同時に急激に変位が増加し、鉄筋の破断音を確認した。試験後に確認したところ、鉄筋は 2 本とも破断していたが異なる位置であった。このうち鉄筋断面が小さい方の断面でのみひび割れが発生しており、さらにひび割れ発生後に荷重が低下していることから、破断音は確認できなかったが、この位置の鉄筋破断により、ひび割れと急激な変位の増加が発生したものと考えられる。鉄筋破断は、他に S1610 でも確認されたが、これは最大荷重を迎え、コンクリート圧壊が確認された後の破断であった。

剛性については、S1010 のみ降伏までの剛性が健全時とほぼ一致している。これは、S1010 の等曲げ区間における腐食ひび割れ領域が少なく、幅も小さいこと、また質量減少率も小さいことから、この区間の付着劣化がほとんどなかったためと考えられる。その他についてはひび割れ後の剛性が健全に比べ低下する傾向が見られた。また、特に腐食ひび割れ幅が大きく、付着劣化が大きい

表-3 載荷試験結果

| 供試体 No. | 質量減少率(%) | | 降伏荷重 | | 終局荷重 | | 終局変位 | | 破壊形式 |
|---------|----------|------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|-------|
| | 平均 | 最大 | 実験値 (kN) | 健全との比 | 実験値 (kN) | 健全との比 | 実験値 (mm) | 健全との比 | |
| S1000 | 0.00 | 0.00 | 17.0 | 1.00 | 23.9 | 1.00 | 52 | 1.00 | 圧壊 |
| S1010 | 17.7 | 25.9 | 16.0 | 0.94 | 22.6 | 0.95 | 127 | 2.26 | 圧壊 |
| S1030 | 31.9 | 57.3 | 7.50 | 0.44 | 7.50 | 0.31 | 6 | 1.16 | 鉄筋破断 |
| S1600 | 0.00 | 0.00 | 46.7 | 1.00 | 51.8 | 1.00 | 40 | 1.00 | 圧壊 |
| S1610 | 16.1 | 26.7 | 38.3 | 0.82 | 45.9 | 0.89 | 32 | 0.85 | 圧壊後破断 |
| S1630 | 30.9 | 56.7 | 14.8 | 0.32 | 19.5 | 0.38 | 32 | 0.83 | 圧壊 |

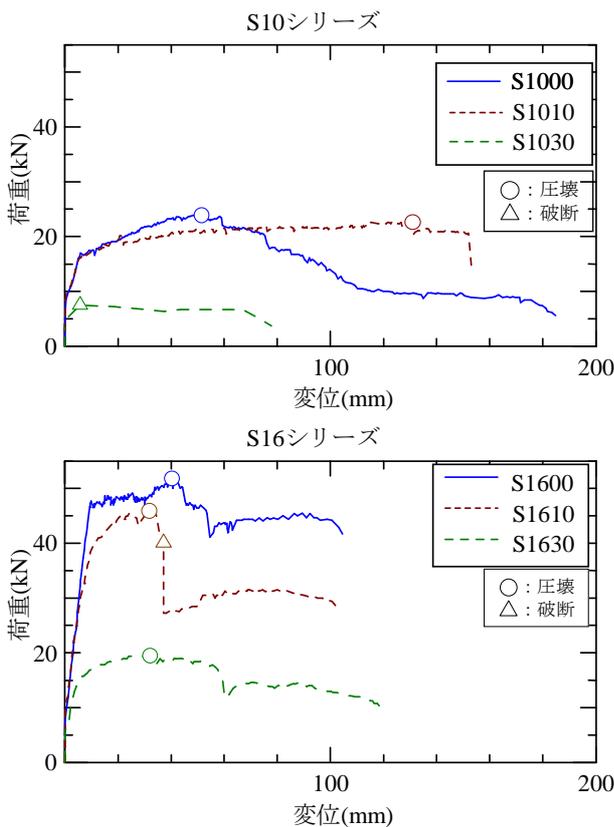


図-7 荷重-変位関係

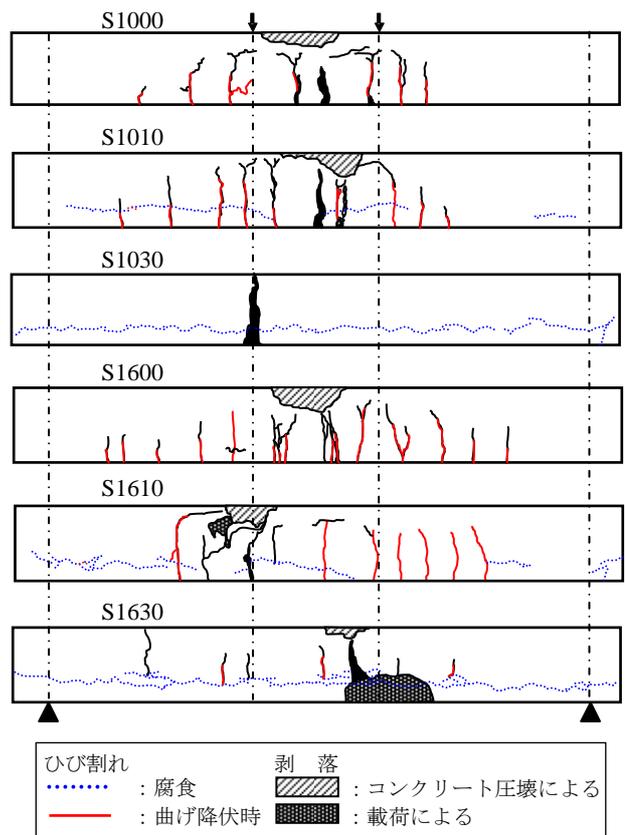


図-8 ひび割れ図

と思われる S16 シリーズの場合、降伏による剛性変化が健全に比べ不明瞭である傾向も見られた。

4. 鉄筋腐食が耐荷性能に及ぼす影響

図-9 に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質量減少率の関係を示す。本研究では、最大荷重時を終局と定義する。また図中には、鉄筋の質量減少率を断面減少率として鉄筋量を減少させ、コンクリート標準示方書⁹⁾の方法により終局荷重を算出した、終局荷重比と質量減少率の関係を示した。0 両シリーズの供試体はいずれも、等曲げ区間内の最大質量減少率が大きくなるにつれ、終局荷重が小さくなる傾向が見られる。鉄筋径に関わらず、最大質量減少率

が 20%程度までは、断面減少により最大荷重が低下する傾向が実験値と計算値でほぼ一致する。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。これは質量減少率が 10cm 間隔の平均であり、局所的に大きな断面減少が考慮されていないことなどの影響が考えられる。また、付着劣化により平面保持が成り立たないと考えられること、鉄筋破断の破壊形式も見られることなどから、このレベルの腐食に対しては健全時の仮定に基づくような計算方法は、適用が難しいということが分かる。

5. 鉄筋腐食が変形性能に及ぼす影響

5.1 終局変位と鉄筋比の関係

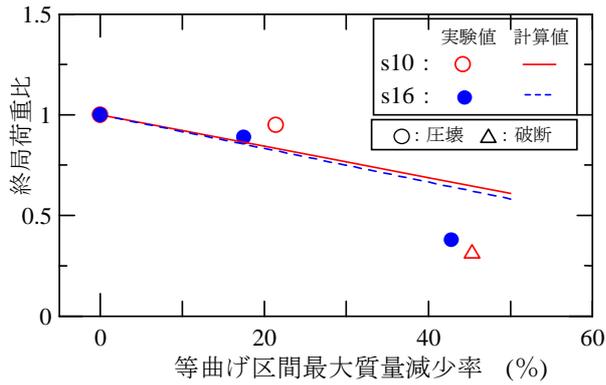


図-9 最終荷重比と等曲げ区間最大質量減少率の関係

ここでは変形性能を最大荷重時の変位、すなわち最終変位とし、鉄筋腐食が最終変位に及ぼす影響について調べた。図-10に最終変位と鉄筋比の関係を示す。ここでの鉄筋比は、等曲げ区間の断面の最大鉄筋質量減少率を鉄筋の断面減少率とし、腐食後の鉄筋断面積から求めたものである。岡田らの研究⁴⁾のように、鉄筋比の減少に伴い最大荷重時の変位が増加する関係にはならず、健全時の鉄筋比によって大きく傾向が異なる。低鉄筋比のS10シリーズは鉄筋比が減少すると、ちょうど低鉄筋比RCはりの曲げ挙動のように最終変位が大きく増加する。しかし、さらに腐食が進むと破壊モードが鉄筋破断となり、最終変位は健全時よりかなり小さくなる。一方、S16シリーズの供試体は、腐食により鉄筋比が減少すると、わずかに最終変位の減少が見られた。

図-8のひび割れ図を見ると、S1000に比べS1010は、中立軸が上昇しているが、圧縮破壊領域はほぼ一致している。一方、最終変位がほぼ等しいS1610、S1630は、S1600に比べ圧縮破壊領域が小さくなっている。さらに、その領域下の曲げひび割れが、他のひび割れに比べ極端に大きく開いており、この位置で変形が局所化していたと見られる。S16シリーズは鉄筋比が大きいことから、もともと圧壊しやすい傾向にあるが、この変形の局所化が圧壊を促進させ、結果的に最終変位が大きくならなかったのではないかと考えられる。そこでS16シリーズでの腐食による最終変位の減少傾向について検討した。

5.2 コンクリート圧壊時の変形と付着劣化の関係

鉄筋が腐食して付着が劣化すると、曲げひび割れ間隔が増大し、コンクリートの変形が曲げひび割れ位置に局所化するはずであり、S16シリーズは破壊断面付近で付着劣化していた可能性が考えられる。そこで、破壊形態がS16シリーズと等しくコンクリート圧壊となる各供試体の曲げひび割れ間隔について調べた。図-8ではS1010及びS1610ではひび割れが分散しているように見える。図中の青線は曲げ降伏時のひび割れであり、このひび割れを見ると、S1610は曲げ降伏時に付着劣化による著し

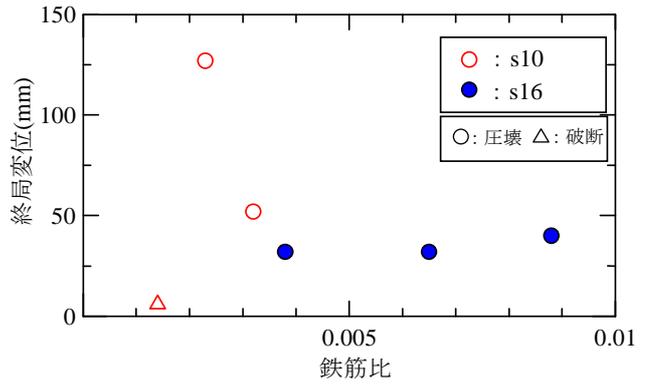


図-10 最終変位と鉄筋比の関係

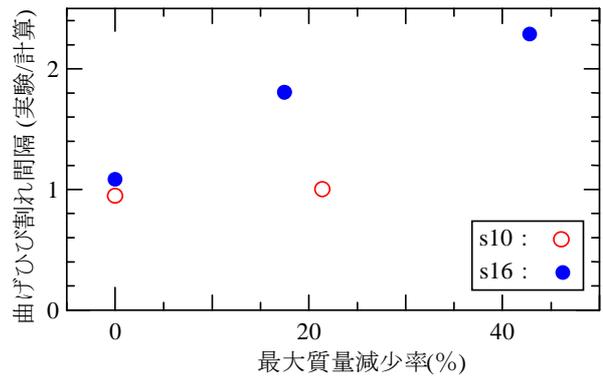


図-11 曲げひび割れ間隔と最大質量減少率の関係

い曲げひび割れ間隔の増大が見られる。そこで、図-11に破壊断面を中心とする長さ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を示す。ここで、縦軸は最大曲げひび割れ間隔の計算式⁷⁾による値との比とした。これより、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シリーズでは著しくひび割れ間隔が増大しており、腐食により破壊断面付近で付着が劣化していることが分かる。図-4より、S1610、S1630いずれの供試体も腐食ひび割れ幅がS10シリーズに比べ大きいことから、健全時の鉄筋比の違いによる傾向の差は、かぶり厚さの違いによる腐食ひび割れ性状の影響が考えられる。

5.3 破壊局所化位置の決定要因

S16シリーズで見られたような破壊の局所化に付着劣化が伴う場合、付着劣化区間において破壊断面位置を決める要因は、その区間内での鉄筋の最小断面であると考えられる。しかし、図-6の質量減少率分布では、測定値が10cm間隔の平均であり、詳細な比較ができない。そこで、レーザー照射方式による3Dスキャナーにより、破壊断面付近の詳細な鉄筋断面分布を計測³⁾した。図-12に得られた分布図を示す。なおここでは、破壊が局所化しているS16シリーズの鉄筋腐食供試体の他に、付着劣化による破壊の局所化が明確である、鉄筋破断した

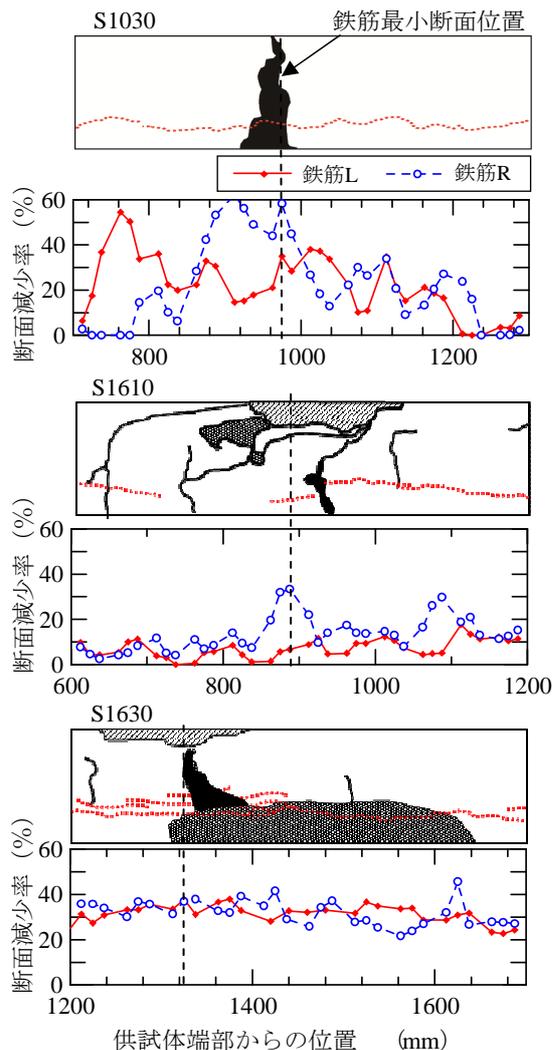


図-12 断面減少率と破壊位置の関係

S1030 を比較することとした。図には破壊断面との対応位置が分かるよう、対応するひび割れ図を合わせて示した。鉄筋断面分布は破壊断面を中心とする 600mm 区間の断面を 1mm ピッチで計測したものを、分布形状が分かりやすいように、約 15mm 区間で平均化している。図中の破線位置は主筋 2 本の平均断面積が最小となる位置を示しており、鉄筋断面が最小となる位置が破壊位置になっていることが分かる。また、鉄筋単体での最小断面の位置が必ずしも破壊断面とはならないことも示されている。

以上から、S16 シリーズの場合、付着劣化により変形が局所化し、その結果、鉄筋量の減少により終局変位がほとんど変化しないこと、また、その際の破壊断面の位置は、主筋断面が最小となる位置で決まることが考えられる。S16 シリーズの実験結果は腐食によりわずかに減少しているとも見られる。また、さらに腐食が進むと鉄筋破断に至り、終局変位がより小さくなることが予想される。S10 シリーズにおいては、腐食で終局変位が増加

するものの、もともとの鉄筋比が小さい分、より破断しやすい。よって鉄筋が腐食した場合には変形性能が低下するとも言える。その場合は設計に対してより危険側となることから、耐荷性能だけでなく変形性能の変化についても十分注意する必要性を本研究は示唆している。

6. 結論

電食させた RC はりの曲げ載荷試験を行い、鉄筋腐食が変形性能に及ぼす影響について検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 耐荷性能の評価は、腐食程度によって曲げ耐力算定式による計算値との違いが見られた。腐食が大きいレベルでは、設計に用いる曲げ耐力算定式は適用できない可能性がある。
- (2) 健全時の鉄筋比の違いにより、腐食による変形性能への影響に違いが見られた。鉄筋比が小さい場合は、鉄筋断面の減少により終局変位が大きくなる場合があるが、鉄筋比が大きい場合は、鉄筋断面が減少しても終局変位はほぼ変わらない。ただし、この違いは、かぶりの違いによる腐食ひび割れ性状の差が一因と考えられる。
- (3) 健全時の鉄筋比が大きく、より圧縮破壊しやすい S16 では、付着劣化が破壊の局所化を促し、腐食により低鉄筋比となっても終局変位が増加しなかったと考えられる。また、その際の破壊断面は、付着劣化区間で主筋断面が最小となる位置である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 85 続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, 2008
- 2) 斉藤成彦, 高橋良輔, 檜貝勇：鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.601-611, 2008
- 3) 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
- 4) 岡田琢之, 斉藤成彦, 檜貝勇：曲げ破壊する RC はりの変形性状に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.403-408, 2003
- 5) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.505-510, 1998
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編], 2007
- 7) 角田與史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリート・ジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970