

論文 鉄筋腐食によりせん断耐力が低下した RC 梁部材の曲げせん断挙動

今北 美緑*1・岸本 一蔵*2・内田 将成*1

要旨: 電食によりせん断補強筋, 主筋を腐食させた鉄筋コンクリート梁部材に対し曲げせん断実験を行った。対象とした梁部材はせん断補強筋の降伏が引張主筋の降伏に先行して起こるものであり, 以下の結果を得た。

1) 鉄筋腐食した RC 梁の終局せん断耐力はせん断補強筋の腐食率が 15%程度であれば靱性指針式の終局せん断耐力式で精度良く評価できた。2) 最大耐力以降の耐力低下程度はせん断補強筋の腐食率が大きくなると大きくなった。3) 鉄筋腐食させた RC 梁では変形の大きい領域でひび割れ幅が急拡大する。4) 鉄筋腐食させた RC 梁ではさせない場合に比べて変形が小さい領域でせん断補強筋の降伏が発生する可能性が高い。

キーワード: RC 梁, 電食, 曲げせん断実験, 鉄筋腐食, ひび割れ幅

1. はじめに

鉄筋コンクリート建物の経年劣化による構造性能低下の主要因は鉄筋腐食であるが, 構造系分野におけるその方面の研究は全く不足している。筆者等は, 鉄筋腐食による鉄筋コンクリート梁の曲げせん断挙動についてどのように影響するか検討するため, 鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート梁部材を対象とした実験を継続的に行っている。既往の研究では, 引張主筋の降伏がせん断補強筋の降伏に先行して生じる部材を対象に曲げせん断実験を行い, その特徴について報告した^{1) 2) 3)}。本論文では, 腐食により部材のせん断破壊が曲げ破壊に先行して発生する梁部材を対象に曲げせん断実験を行い, その結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

鉄筋コンクリート(以下 RC と略記)梁部材を対象に, せん断補強筋および主筋に腐食が発生した場合の部材

の曲げせん断性状の変化を検討することを目的に実験を行った。図-1に示すような長方形断面をもつ梁試験体4体(No.1~4)で, 鉄筋の腐食量以外は全て同じ条件である。図-2に各鉄筋の名称を示す。なお, 以後の説明の便利のため, 試験体の側面の4面を東西南北の名称, 主筋およびせん断補強筋を図-2に示す名称で呼ぶものとする。

a) 鉄筋量の設定

表-1に計画時の試験体の各種諸元, 材料特性, 目標腐食率および計算耐力を示す。鉄筋量は全試験体において, 腐食をさせない基準試験体(No.1)のせん断余裕度が1.0程度になることを目標に設定した。一般に RC 梁部材を確実にせん断破壊させるためには, せん断余裕度を1.0よりかなり小さくする必要があるが, 過年度の実験より鉄筋腐食させた試験体は, 腐食させていない試験体よりもせん断破壊しやすい傾向がみられた。そこで本研究では, せん断余裕度がやや大きめであってもせん断破壊が先行することを想定して鉄筋量, 腐食量を設定し

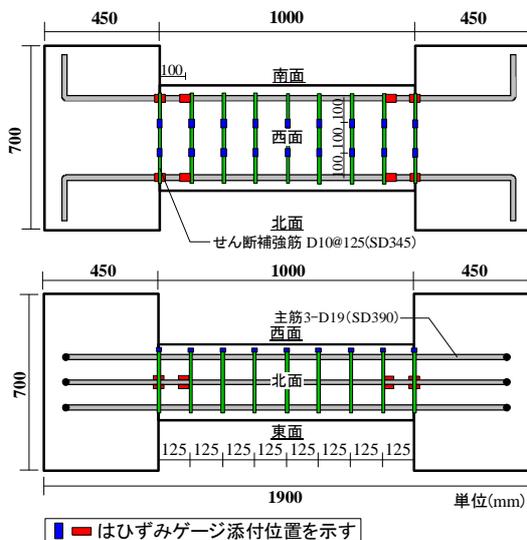


図-1 試験体概要

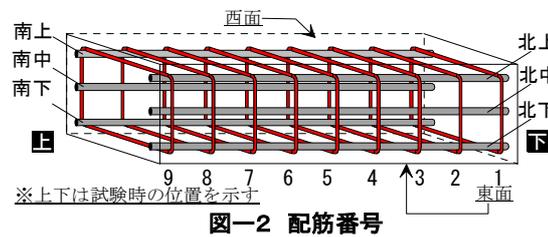


図-2 配筋番号

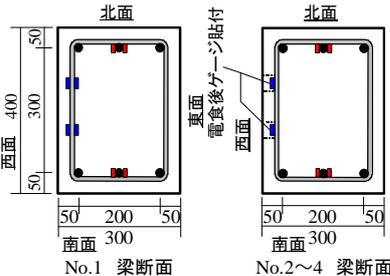


写真-1 電食中の試験体

*1 近畿大学大学院 総合理工学専攻 (正会員)

*2 近畿大学 建築学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

た。せん断余裕度の計算にあたっては、終局曲げ耐力を $Mu=0.9d \cdot a_s \cdot \sigma_s$ (d :有効せい, a_s :引張鉄筋断面積, σ_s :引張鉄筋の降伏強度), 終局せん断耐力を鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説⁵⁾(以下靱性指針)のせん断耐力式により求めた。

b) 電食方法

直流の定電流 $6.6A/m^2$ を鉄筋に流す電食により鉄筋を腐食させた。電食は鉄筋に正極を接続し、負極にイオン化傾向の小さい厚さ $0.1mm$ の銅板を接続した。銅板を梁試験体の4面それぞれに密着させ、これらを布で巻き、外側からPPバンドで締めて銅板を固定した。その上で、塩水を循環形式で試験体上部より流した³⁾(写真-1)。試験体コンクリート通電時間は田森式⁶⁾を参考に予備実験を行い、同式の係数を補正した $W=0.383I_t$ (W :腐食量, I_t :積算電流量)により求めた。No.2は15.8日, No.3は25.2日, No.4は41日間通電させた。また、鉄筋を電食させる際に、東面(梁下側)において銅板とコンクリート面の接触が不十分であったことが判明したため、腐食量が規定値に達していない懸念があった。そこで、No.2は東面のみさらに15.8日間, No.3とNo.4は17日間の電

食を行った。

c) 腐食率

主筋およびせん断補強筋の腐食量は、载荷実験後コンクリート中よりはつり出すことにより求めた。主筋は梁部材両端部においてスタブの際よりおよそ $150mm$ の長さで切り出した。せん断補強筋は東西南北の各面で直線部分(東西面約 $280mm$, 南北面約 $180mm$)を切り出した。切り出した鉄筋を質量濃度 10% のクエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬し除錆し(写真-2), その後、天秤量計(最小表示 $0.001g$)にて質量を計測して求めた。図-3にせん断補強筋の腐食結果一覧を示す。同図は、せん断耐力に直接影響する断面のせい方向、つまり東、西面のせん断補強筋の腐食率とその平均値を示している。図-3に示すように、同じ試験体であっても腐食率はせん断補強筋の位置により大きく異なる結果となった。そのため、これらのばらつきを考慮したうえで各試験体の腐食率を評価する必要がある。評価法としては、例えばせん断補強筋の腐食率の最大値をとる、或いはすべての補強筋の平均値などの方法も考えられるが、せん断ひび割れは複数の補強筋を横切る形で形成されるため、ここ

表-1 計画時の耐力, 目標腐食率

試験体名	目標腐食率		材料強度				計算耐力				諸元
	主筋	せん断補強筋	コンクリート	鉄筋		終局曲げ耐力 ※1	せん断耐力		付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度	Q(Mu) ※2	
				主筋	せん断補強筋		荒川mean式 ※3	靱性指針式			
	(%)		(N/mm ²)			(kN·m)	(kN)				
No.1	0	-	18	390	345	211	235	220	246	1.04	
No.2	0	10					230	216	237	1.02	
No.3	0	16					227	213	239	1.01	
No.4	0	26					222	203	222	0.96	

※1.終局曲げ耐力... $Mu=0.9d \cdot a_s \cdot \sigma_s$, d :有効せい, a_s :引張鉄筋断面積, σ_s :引張鉄筋の降伏応力度
 ※2.Q(Mu)...せん断耐力(靱性指針式)/終局曲げ耐力
 ※3せん断補強筋の負担分は約3.5割(荒川mean式⁴⁾より)



写真-2 除錆後切断したせん断補強筋

表-2 主筋腐食率一覧

		No.2	No.3	No.4	
北面側主筋	北上	上	1.94	5.49	7.74
		下	3.13	5.29	8.22
	北中	上	2.16	4.28	4.21
		下	0.70	1.80	2.88
	北下	上	4.53	6.88	4.45
		下	1.96	5.02	4.91
南面側主筋	南上	上	1.72	5.70	6.11
		下	2.19	3.27	11.05
	南中	上	0.64	3.95	0.20
		下	0.26	2.43	4.10
	南下	上	3.03	10.49	3.49
		下	2.69	5.55	3.94
平均		2.08	5.01	5.11	

※表中の名称は図-2を参照

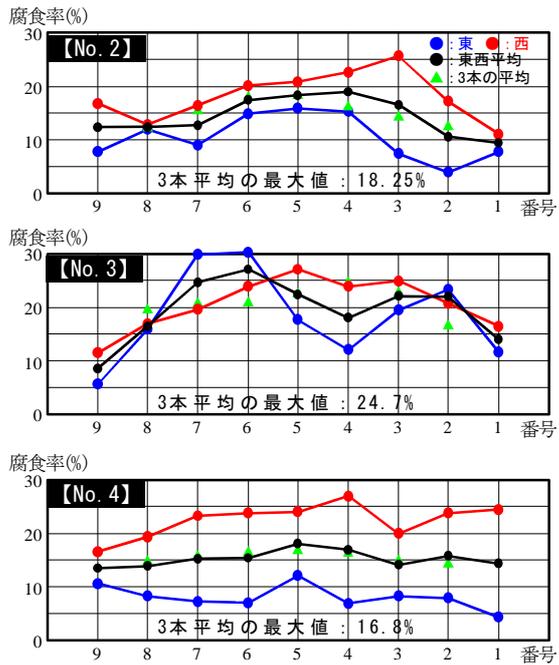


図-3 せん断補強筋腐食率一覧

では各せん断補強筋とその両隣を合わせた3本の腐食率を平均して腐食率を求め、それらのうち最大のものをそ

表-3 材料特性一覧

(a)コンクリート				(b)鉄筋			
F _c	圧縮強度	割裂強度	ヤング係数	鉄筋径	鋼種	降伏強度	降伏ひずみ
	(N/mm ²)					(N/mm ²)	(μ)
18	20.8	2.1	2.5×10 ⁴	D10	SD345	372.8	2228
				D19	SD390	426.3	2384

表-4 実際の耐力, 腐食率

試験体名	実際の試験体							実験値	
	腐食率		終局曲げ耐力	せん断耐力		付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度	Q _{耐性式} /Q(Mu) ※1	最大耐力 ※2	実/計 ※3
	主筋	せん断補強筋		荒川 mean 式	靱性指針式				
	(%)	(%)	(kN・m)	(kN)	(kN)	(kN)	(%)		
No.1	—	—	231	250	246	265	1.06	249	101
No.2	2.1	18.3	226	240	235	248	1.04	236	100
No.3	5.0	24.7	220	235	227	242	1.03	222	98
No.4	5.1	16.8	219	240	237	250	1.08	238	100

※1. Q_{耐性式}/Q(Mu)・・・せん断耐力(靱性指針式)/終局曲げ耐力
 ※2. 正方向・負方向の最大耐力を平均した値
 ※3. せん断耐力(靱性指針式)に対する実験での最大耐力の比率(%)

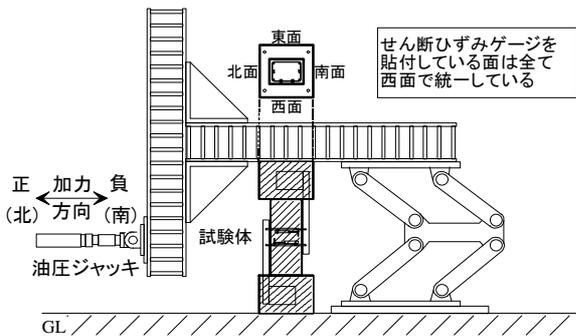


図-4 荷重装置の概略図

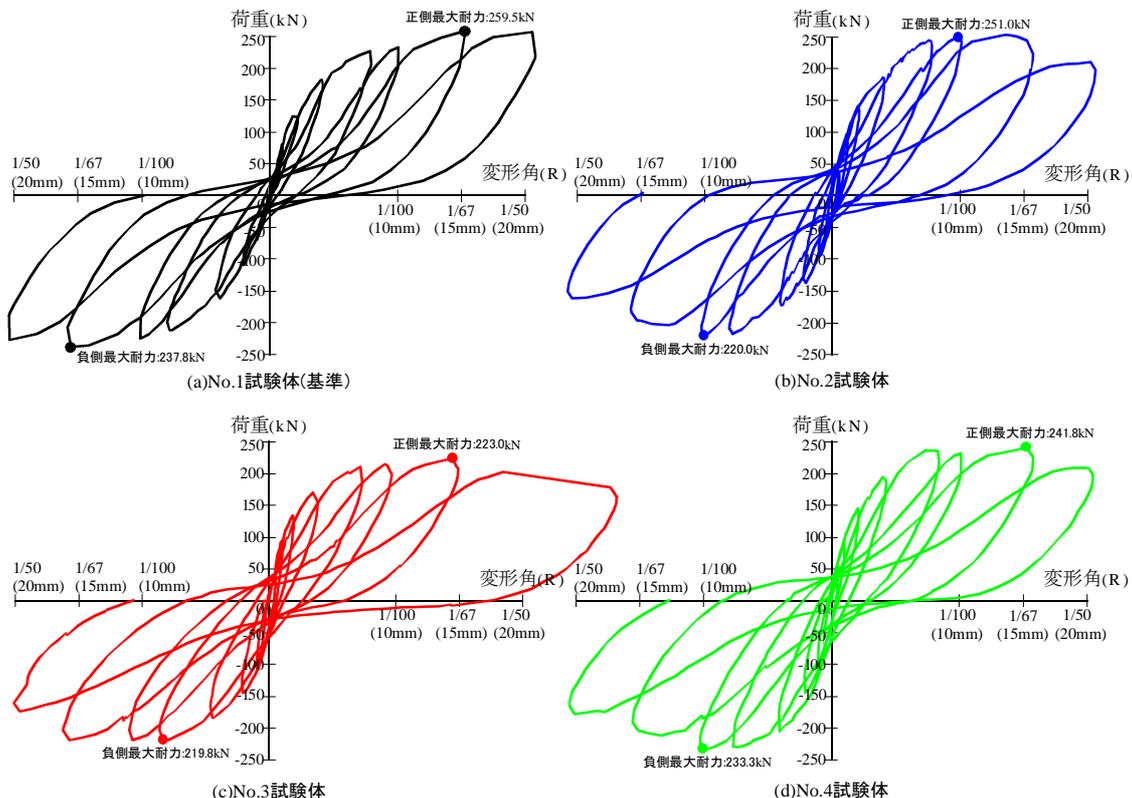


図-5 各試験体の荷重-変形関係

の部材の腐食率として評価した。図-3には3本の平均腐食率も併記している(緑▲印)。表-2に主筋の腐食率を示す。主筋の腐食率は、直接腐食用の電源と接続されていないこと、せん断補強筋より太径でありかつ部材内側に存在することから、せん断補強筋に比べ小さい。そのため、ここでは主筋の腐食量評価は全ての鉄筋(部材両端の断面片側3本(両側6本)の主筋、6×2=12か所の値)の平均値とした。(表-2参照)

以上より、表-3にコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を、表-4に各試験体の実際の腐食率一覧をまとめて示す。同表より、腐食率は、No.2~No.4で、主筋はそれぞれ2.08%, 5.02%, 5.11%, せん断補強筋はそれぞれ18.25%, 24.67%, 16.75%となった。せん断補強筋の腐食率はNo.3試験体が最も大きく、No.2とNo.4試験体ではほぼ同じ値となった。同表には、これらの腐食率を鉄筋の断面欠損として式中のせん断補強筋断面積を小さくすることにより耐力計算したものを示している。

d) 荷重方法

図-4に曲げせん断試験の荷重状況図を示す。荷重履歴は、部材変形角 R=1/2000, 1/1000, 1/500, 1/250, 1/130, 1/100, 1/67, 1/50 のそれぞれ一回ずつの正負交番とし、試験体を引きで荷重する方向を正側荷重としている。なお、部材変形角 (R) は上下スタブの相対変位を梁長さで除した値である。

e) 鉄筋ひずみ・ひび割れ幅測定方法

主筋のひずみは全ての試験体について、図-1に示す

赤■印位置において計測した(No.1~No.4：梁端部および梁端部より100mm,両側に貼付,コンクリート打設前に貼付)。せん断補強筋のひずみは同じく図-1に示す青■印位置において計測した(No.1：梁せい方向の両端部より100mm,両側に貼付,コンクリート打設前に貼付, No.2~4：梁せい方向の両端部より100mm,片側に貼付,打設後,鉄筋腐食促進工程後に貼付)。ひび割れ幅については,ひび割れが発生した時点でひび割れ幅が最も大きい箇所を目印をつけ,以後同点のひび割れ幅を,デジタルマイクروسコープを用いて測定した。また同時に,ひび割れの進展状況推移を観測するためにデジタルカメラにより撮影を行った。鉄筋ひずみはひずみゲージを用いて測定した。

3. 実験結果

a) 荷重-変形関係(最大耐力, 剛性, 耐力低下程度, 残留変形)

図-5に,各試験体の荷重-変形関係を示す。鉄筋腐食させたいずれの試験体も次のような特徴を示した。

1) 最大耐力が低下した。2) 小変形領域での剛性が高くなった。3) 最大耐力以降の耐力低下程度が大きくなった。4) 残留変形量が大きくなった。これらについて以下に具体的に示す。なお, No.1 試験体では主筋降伏がひずみゲージの値より判断でき曲げ破壊が先行したことが確認できた。一方, 腐食試験体では電食により主筋に貼付したひずみゲージが損傷したため信頼できる値が得られなかった。ただし, No.1 試験体に対し耐力が低いこと, 後述するせん断ひび割れの発生状況(写真-3)から

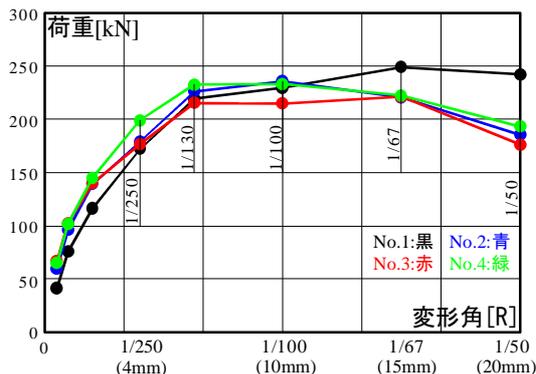


図-6 各載荷階ピーク時の正・負載荷時の荷重平均値

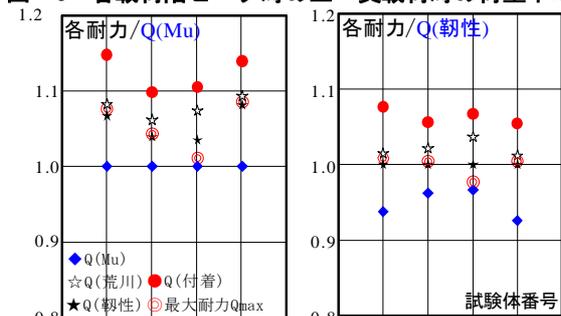


図-7 各最大耐力を終局せん断力で除した値

せん断破壊したと判断している。

図-6に,荷重-変形関係における正側,負側載荷の平均値の包絡線を示す。同図より,基準試験体 No.1 ($Q_{max}:259.5kN, R=1/67$)に比べ,腐食させたいずれの試験体も最大耐力が低下していることがわかる。最大耐力および各試験体の腐食を考慮した各種の耐力計算値を表-3に示す。同表には,実験で得られた最大耐力を靱性指針式による終局せん断耐力($Q(靱性)$)で除した値および終局曲げ耐力のせん断力($Q(Mu)$)に対する靱性指針式による終局せん断耐力($Q(靱性)$)の割合も示している。なお, $Q(靱性)$ の値は,同算定式中の等価せん断補強筋比(p_{we})を腐食率に応じて低下させた値を用いることにより算定した。これらの値を図示したものが図-7である。いずれの試験体も最大耐力(Q_{max})は終局曲げ耐力時のせん断耐力計算値($Q(Mu)$)を超えているが,靱性指針式によるせん断耐力($Q(靱性)$)の $Q(Mu)$ に対する比率($Q(靱性)/Q(Mu)$)の値が小さいほど, $Q_{max}/Q(Mu)$ の比率は小さくなっていることが分かる。また, No.1 試験体だけでなく,腐食させた試験体の最大耐力も靱性指針のせん断耐力計算値とよく一致していることがわかる。ただし,腐食率が24.7%と最も高く $Q(靱性)/Q(Mu)$ が小さい No.3 試験体では Q_{max} が $Q(靱性)$ の値を下回っており,腐食程度が上がることにより算定精度が低下することが考えられる。

次に,図-6の $R=1/250$ 以下の各試験体の剛性についてみると,腐食させた全ての試験体において,同じ変形時における耐力は基準試験体の耐力を上回っており,部材剛性が高くなっていることがわかる。これは,既往の論文³⁾で示した実験でも見られた現象であり,腐食鉄筋の付着強度および,付着強度-すべり関係におけるごく初期の剛性(付着剛性)が高くなること³⁾に起因する現象である。

次に,最大耐力(Q_{max})以降の耐力低下程度についてみると,いずれの腐食試験体も No.1 試験体に比べ低下程度が大きいことがわかる。低下程度と腐食率の関係をみるため各試験体の Q_{max} 、 $Q(R=1/67)$ 、 $Q(R=1/50)$ の値を No.1 試験体の Q_{max} の値で除したものを図-8に示す。同図より, $Q(R=1/50)$ の耐力低下率は腐食率が大きくなると耐力低下率は大きくなっていることがわかる。一方, $Q(R=1/67)$ についてはその傾向は明確ではない。図中には, $Q(R=1/50)$ の点に対し, No.1 試験体の $R=1/50$ 時の耐力を示す座標(0,0.974)の点を通る一次関数で近似したラインを記載している。限られた範囲での検討であるため一次関数での近似の良否については更なる検討が必要であるが,本実験で用いた部材の場合,腐食率が15%以上に推移すると $R=1/50$ 時に最大耐力の80%を確保できなくなると考えられる。

図-9に各変位における残留変形率を示す。前述の履歴形状の比較の所でも述べたように、小変形域では腐食した梁では腐食させていない No.1 試験体に比べ明らかに大きな残留率を示すことが分かる。その値は腐食率によらずほぼ同じである。一方、小変形域から変形が大きくなるに従い残留率は No.1 試験体の値に近づくものの、常にその値は No.1 試験体に比べ大きく、また R=1/100 を超える領域では再びその差は拡大する傾向がある。図-10は試験体 No.1 の残留率を1としたときの各試験の残留率の比率を表したものである。各試験体のばらつきは大きい、平均すると R=1/100 時には試験体 No.1 に対して2割程度(残留率約40%)、R=1/50時には同4割程度(残留率約60%)大きくなっている。

b) ひび割れ発生状況

図-11にひび割れ発生状況(R=1/130、R=1/50ともに東面)を示す。ひび割れ発生はだまかには以下のように発生した。1) 曲げひび割れの発生→2) 部材端部においてせん断ひび割れの発生(曲げひび割れから分岐して

せん断ひび割れと繋がる) → [No.1 の場合] 3) 端部のせん断ひび割れが開くと同時に主筋に沿った付着ひび割れにつながり拡大、 → [No.2~4 の場合] 3') 部材の両端部の隅角部を結ぶラインにせん断ひび割れが発生し、それらが拡大。写真-3に各試験体の R=1/50 時の写真を示す。この写真よりわかるように、No.1 試験体では部材端部のひび割れが拡大しているものの部材中央部にはひび割れは少ないのに対し、腐食試験体では端部より部材中央に伸びるせん断ひび割れが拡大しており、明らかに破壊形式が異なっていることがわかる。

図-12に各試験体の各変形時のせん断ひび割れのひび割れ幅と、残留ひび割れ幅(荷重=0 時ひび割れ幅)の推移を示している。同図より、いずれの試験体もひび割れ幅は変位の増加とともに増大し、変形が小さい領域ではいずれの試験体も大きな差は無い。一方、変形が R=1/67 を越える領域では、腐食試験体でのひび割れの増大率が No.1 試験体に比べ高くなる傾向があり、また No.4 試験体にみられるように新たに発生したひび割れの値が急拡大するものもある。

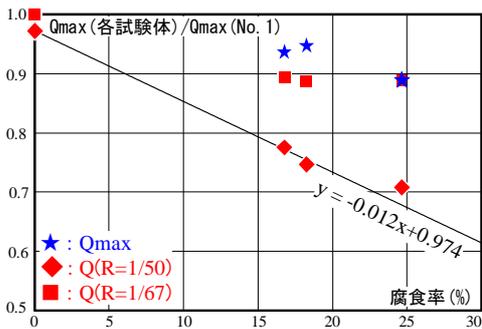


図-8 耐力の低下程度と腐食率の関係

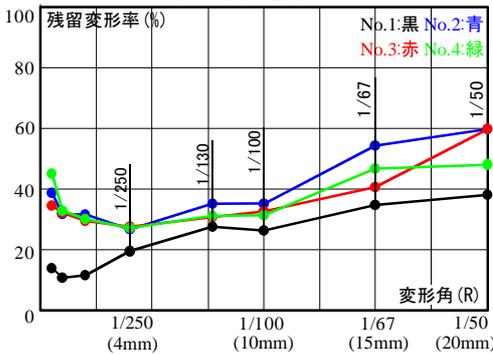


図-9 残留変形率

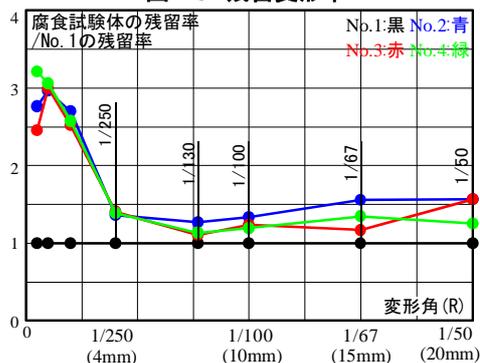
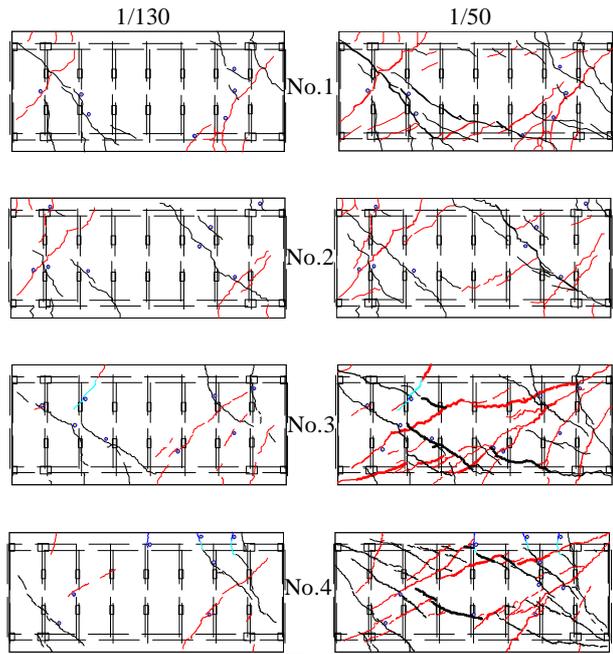


図-10 試験体No.1の残留率を1とした時の各試験体の残留率の比率



※赤線は正方向荷重、黒線は負方向荷重を示す
青線は荷重により拡大した腐食ひび割れ

図-11 R=1/130,1/50時東面ひび割れ図

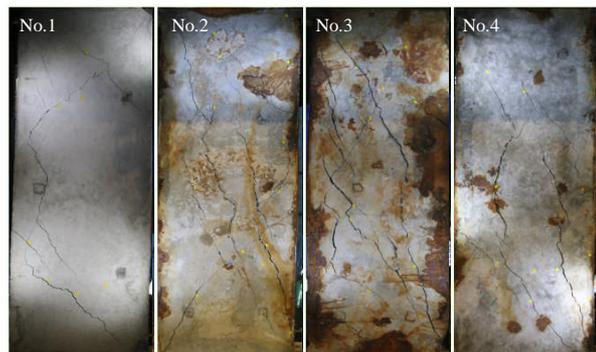


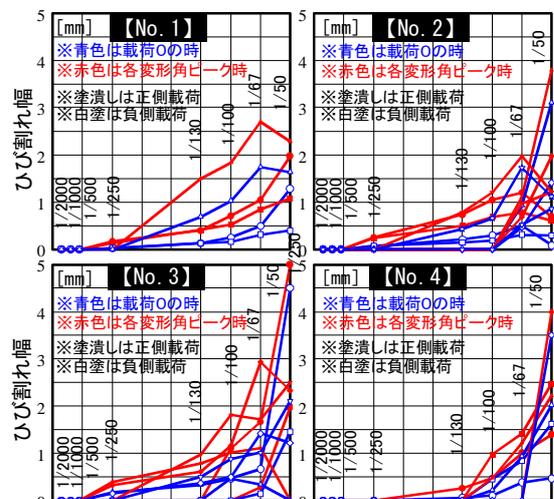
写真-3 ひび割れ状況(R=1/50(正側):東面)

c) せん断補強筋のひずみ

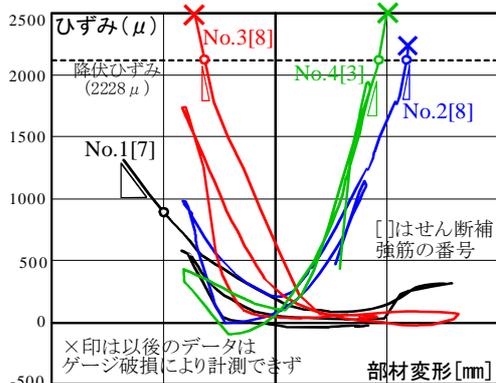
図—13に各試験体で変形角 $R=1/250 \sim R=1/130$ の範囲で最も大きなひずみが発生しているせん断補強筋のひずみの推移を示している。図中の各試験体番号の横に、当該せん断補強筋の番号が[]で示されているが、いずれの試験体も部材端部に位置する補強筋であり(図—2参照)、部材端部に発生したせん断ひび割れによりひずみが増加したケースである。同図より、鉄筋腐食した試験体のひずみは、No.1 試験体に比べて相当大きく、最も腐食程度の大きい No.3 ではおよそ部材変形 3mm(変形角で $R=1/333$)程度でせん断補強筋が降伏している。また、No.2,4 についてもそれぞれ部材変形 5mm, 6.5mm 程度の変形でせん断補強筋の降伏が発生している。これに対し、No.1 試験体では負側 5mm の変形時ではひずみは 800μ 程度と腐食試験体に比べて大幅に小さいことがわかる。これは a) 荷重—変形関係の箇所で述べた理由と同じく、腐食鉄筋の付着強度および、付着強度—すべり関係におけるごく初期の剛性(付着剛性)が高くなること³⁾に起因していると考えられる。

4. まとめ

梁部材のせん断補強筋および主筋の腐食により、せん



図—12 ひび割れ幅(ピーク時、荷重0時)の推移



図—13 部材変形に対するせん断補強筋のひずみ増加程度の比較((正) $R=1/250 \sim$ (負) $R=1/130$)

断破壊が曲げ破壊に先行して起こる試験体について曲げせん断実験を行った。限られた試験体での結果であるが、以下に得られた知見を示す。

- 1) 鉄筋腐食した RC 梁の終局せん断耐力はせん断補強筋の腐食率が 15% 程度以下であれば靱性指針式の終局せん断耐力式で精度良く評価できた。一方腐食率 25% では過大評価した。
- 2) 最大耐力以降の耐力低下程度はせん断補強筋の腐食率が大きくなると大きくなり、変形角 $R=1/50$ で最大耐力の 80% を確保するためには腐食率は 15% 程度以下である必要がある。
- 3) 鉄筋腐食させた RC 梁では変形の大きい領域でひび割れ幅が急拡大する。
- 4) 鉄筋腐食させた RC 梁ではさせない場合に比べて、ひび割れ発生に伴うひずみの増加程度が高い。変形が小さい領域であってもせん断補強筋の降伏が発生する可能性が高い。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(S) 課題番号 16H06363 歴史的建造物のオーセンティシティと耐震性確保のための保存再生技術の開発 代表者 名古屋市立大学 青木孝義教授)の助成により行われたものである。また本研究の実験を実施するにあたり、近畿大学 B4 の志和祐矢氏(現 (株) 鴻池組), B4 の所雄大氏(現 高松建設(株)), B4 の安木啓太氏(現 東鉄工業(株))にご協力頂きました。また、近畿大学コンクリート構造・材料研究室の、M1, B4, B3 の皆様にお手伝い頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 増田駿祐, 岸本一蔵: せん断補強筋の付着切れが RC 梁部材の挙動に及ぼす影響, コンクリート工学会年次論文集, vol.37, No.2, pp.217-222, 2015
- 2) 増田駿祐, 岸本一蔵: せい方向のせん断補強筋の付着を切った RC 梁部材の曲げせん断挙動, コンクリート工学会年次論文集, vol.39, No.2, pp.169-174, 2017
- 3) 内田将成, 盛尾修平, 岸本一蔵: 鉄筋が腐食した RC 梁部材の曲げせん断挙動に関する実験的研究, コンクリート工学会年次論文集, vol.41, No.2, pp.199-204, 2019
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2010
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1997
- 6) 田森晴美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親興: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れに関する研究, コンクリート工学会年次論文集, 10-2, pp.505-510, 1988