

論文 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

増田 駿祐^{*1}・岸本 一蔵^{*2}

要旨：せん断補強筋が腐食を受ける場合の基礎研究として、腐食によりせん断補強筋-コンクリート間の付着が失われる場合の力学特性の変化について、梁の曲げせん断実験を行い検討した。具体的には、せん断補強筋の付着を切った梁試験体に対し載荷実験を行い、その力学性能およびひび割れ性状がどのように変化するかについて考察を行った。その結果、断面せい方向に位置するせん断補強筋の付着が失われた場合、部材の破壊形式の変化が起こるとともに、最大耐力、ひび割れ発生性状も変化する事が確認された。一方、断面幅方向のせん断補強筋の付着切れは大きな影響を及ぼさなかった。

キーワード：RC 梁, せん断補強筋の付着, 曲げせん断実験, ひび割れ幅, 鉄筋腐食

1. はじめに

建築の長寿命化は時代の趨勢であり、結果「高齢化」した建物が地震に遭遇する確率も確実に高くなる。今後建物の経年劣化の推定は益々重要なテーマになると考えられる。一方、鉄筋コンクリート建物では、主として鉄筋腐食が構造的な劣化を左右することになるが、腐食に関する研究は主に材料系の分野で行われており、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。また、鉄筋コンクリート部材を対象として鉄筋腐食と力学挙動の関連に関する研究は主筋を対象としたものが主であり、腐食の観点からはより厳しい条件にある（主筋よりも部材の外側に位置するため）せん断補強筋の腐食を対象とする研究はほとんどない。せん断補強筋の腐食は部材耐力の低下につながるだけでなく、破壊形式にも影響する

ことから重要なテーマであり研究の進展が強く望まれる。

本論文は、せん断補強筋が腐食を受ける場合の基礎研究として、腐食によりせん断補強筋-コンクリート間の付着が失われる場合の力学特性の変化について検討を行った。具体的には、せん断補強筋の付着を切った梁試験体に対し曲げせん断実験を行い、その力学性能およびひび割れ性状がどのように変化するかについて考察を行った。

2. 実験概要

梁部材を対象に、せん断補強筋に腐食が発生し、その結果せん断補強筋とコンクリート間の付着が失われ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。今回の実験では、せん断補強筋-コンクリート間の付着切れが部材性能にどのように影響を及ぼ

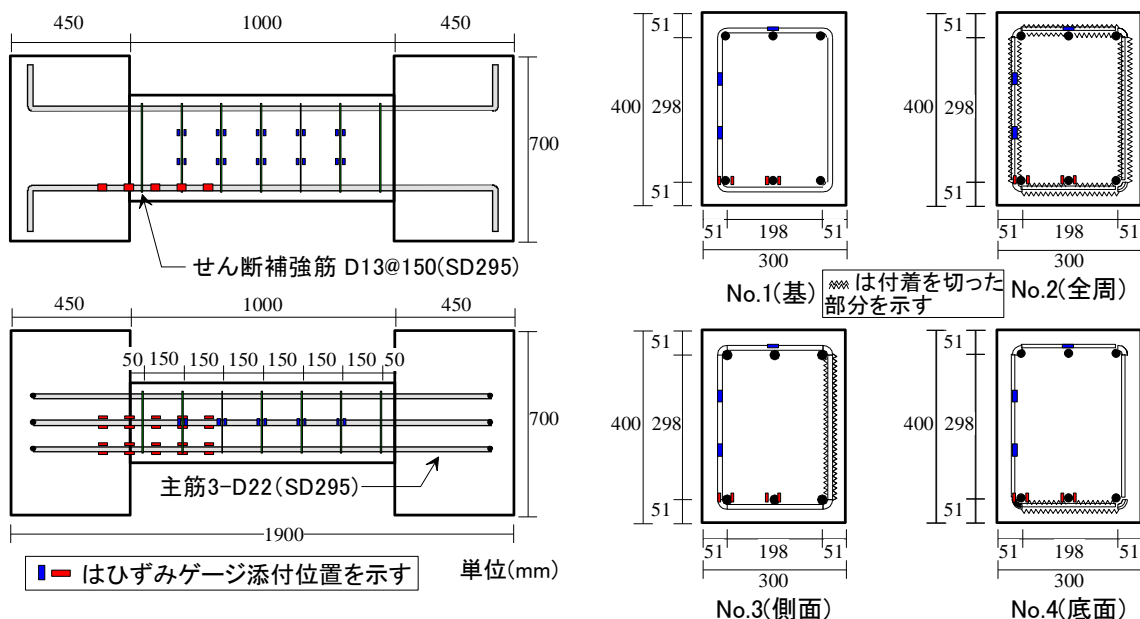


図-1 試験体概要

*1 近畿大学大学院 総合理工学研究科 環境系工学専攻 大学院生 (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)

表-1 試験体諸元一覧

試験体名	付着を切った箇所	曲げ耐力 ^{※1} (kN)	せん断耐力		付着割裂耐力 ^{※2} (kN)	諸元
			荒川 mean式 (kN)	靱性指針式 (kN)		
No.1	-	283	282	278	302	断面積：300×400(mm) 部材長さ：1000mm せん断スパン比：1.43 主筋：3-D22(SD295A) 引張鉄筋比：1.11% せん断補強筋 ：2-D10@150(SD295A) 補強筋比：0.32% σ_B ：31.1(N/mm ²)
No.2	全周					
No.3	片側面					
No.4	下面					

(注) ※1：引張鉄筋降伏時耐力
※2：付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度



写真-1 せん断補強筋の付着を切った部分

すのかを端的に検討するため、理想的に付着を切った試験体に対して実験を行った。つまり、せん断補強筋に腐食を発生させて付着切れを発生させたのではなく、鉄筋の節による突起がみえなくなるように（節頭からの厚み1mm程度）粘土を巻き付けさらにラップで被服することによりせん断補強筋-コンクリート間に付着が発生しないようにした（写真-1）。試験体は、図-1に示すような長方形断面をもつ梁試験体4体で、せん断補強筋の付着状況以外は全て同じ条件である。各試験体の付着を切った場所、および試験体諸元一覧を、表-1に示す。試験体は、「引張主筋の降伏が先行するが、せん断余裕度も小さい」という条件を目標に設計した。具体的には、曲げ耐力の値（RC規準¹⁾に示される梁の曲げ耐力算定式を用いた鉄筋降伏時の曲げ耐力）とせん断耐力（荒川mean式¹⁾、靱性指針式²⁾）がほぼ同じとなるように設計した（※せん断耐力算定式の精度は曲げ耐力算定式の精度に比べてばらつきが大きく一般に安全側に評価されることから、両者の値を同じくすることで前述の条件を満足させることを目標とした）。せん断補強筋の付着状態については各試験体に以下のように設定した（図-1参照）。No.1（基）：基準試験体。せん断補強筋に対する付着切りは行っていない。

表-2 材料特性一覧

(a) コンクリート

F_c	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	割裂強度 σ_t (N/mm ²)
24	31.1	3.19

(注) 試験体：3本の平均値

(b) 鉄筋

使用部位	呼び名	鋼種	σ_y [※] (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ϵ_y (μ)
梁主筋	D22	SD295A	388	1.80×10^5	2158
横補強筋	D10	SD295A	370	1.69×10^5	2201

※ σ_y ：降伏点強度（3本の平均値）

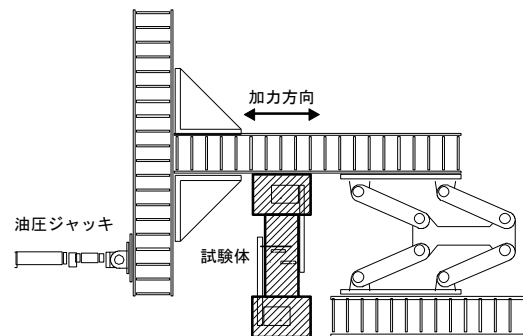


図-2 荷重装置

No.2（全周）：全周の付着を切った試験体。
No.3（片側面）：断面せい方向に位置するせん断補強筋の片側のみの付着を切った試験体。これは建物の外縁に位置する梁で、外側に位置する側面が塩分飛来等により発錆した状況をイメージしている。
No.4（下面）：断面幅方向に位置するせん断補強筋の片側のみの付着を切った試験体。雨水等により梁下部が高湿となり発錆した状況をイメージしている。
表-2に鉄筋およびコンクリートの材料特性一覧を示す。図-2に荷重装置図を示す。荷重履歴は、部材角R=1/2000, 1/1000, 1/500, 1/250, 1/130, 1/100のそれぞれ一回ずつの正負交番とした。なお変形角（R）はスタブの相対垂直変位を梁長さで除した値である。部材変形は、試験体に設置した変位計により測定した。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ロスコープを用いて測定した。また、ひび割れの推移を測定するために地面に固定したデジタルカメラにより撮影を行った。ひび割れ幅測定および撮影は図-1に示す断面の右側の側面を対象とした。

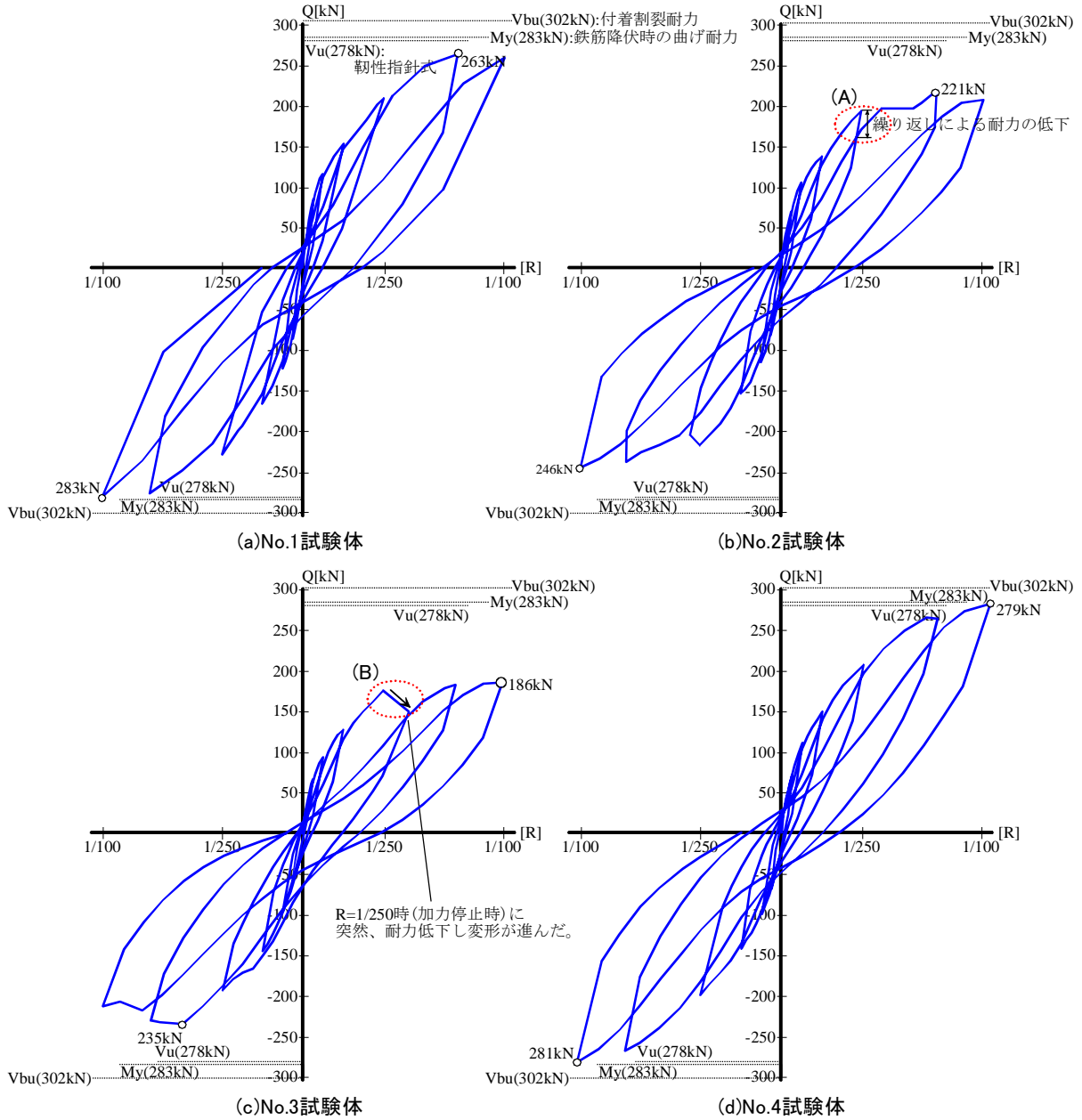


図-3 荷重-変形関係図

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係と破壊形式

図-3に全ての試験体の荷重-変形関係を示す。同図には表-1で示した鉄筋降伏時の曲げ耐力，せん断終局耐力，付着割裂強度の値も併記している。いずれの試験体も付着割裂強度 V_{bu} (302kN) に達していない。また，No.1 (基) と No.4 (下面) では，ほぼ鉄筋降伏時の曲げ耐力 M_y (283kN)，せん断終局耐力 (Q_u 荒川 mean 式 282kN， V_u 靱性指針式 278kN) に達しているものの，断面せい方向の付着を切った No.2 (全周)，No.3 (片側面) は No.1, No.4 に比べ著しく耐力が低く，また No.2 (全周) (図-3 (b) No.2 試験体中の(A))，にみられる

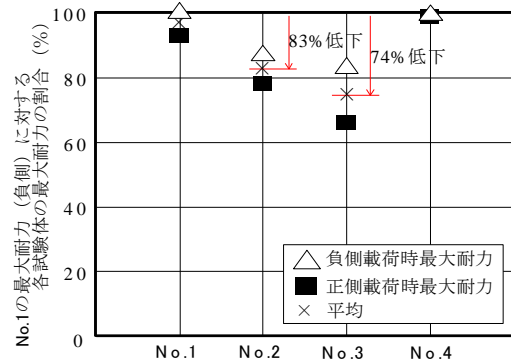


図-4 最大耐力の比較

ように、耐力が上昇している変形域 (R=1/250) においても付着劣化が原因と考えられる繰り返し時の耐力低下がみられる。

このことから、No.2 (全周) についてはせん断補強筋の付着が失われたことにより、せん断補強筋が主筋を拘束する程度が小さくなりその結果主筋の付着割裂が早期に発生したと思われる。一方、同じく断面せい方向のせん断補強筋の付着を切った No.3 (片側面) については図-3 (c)No.3 試験体中の(B)にみられるように、R=1/250 時において突然耐力の低下および変形の増大が生じた。このとき図-5(No.3(e))のひび割れ図に示されるように、部材の両端を対角線状に結ぶひび割れが発生しており、以後本試験体の耐力は殆ど上昇しなかった。

図-4に、No.1 (基) 試験体の負方向荷重時の最大耐力を基準値として各試験体の最大耐力を比率で示したものを示す。同図より、No.4 (下面) の耐力は No.1 (基) と同等であり、梁幅方向に付着を切ることによる耐力への影響はないことがわかる。これに対し、断面せい方向の付着を切った試験体

(No.2 (全周), No.3 (片側面)) では、前者で約 83%、後方で 74%と大きく低下している。全周の付着を切った No.2 よりも断面せい方向の片側みの付着を切った

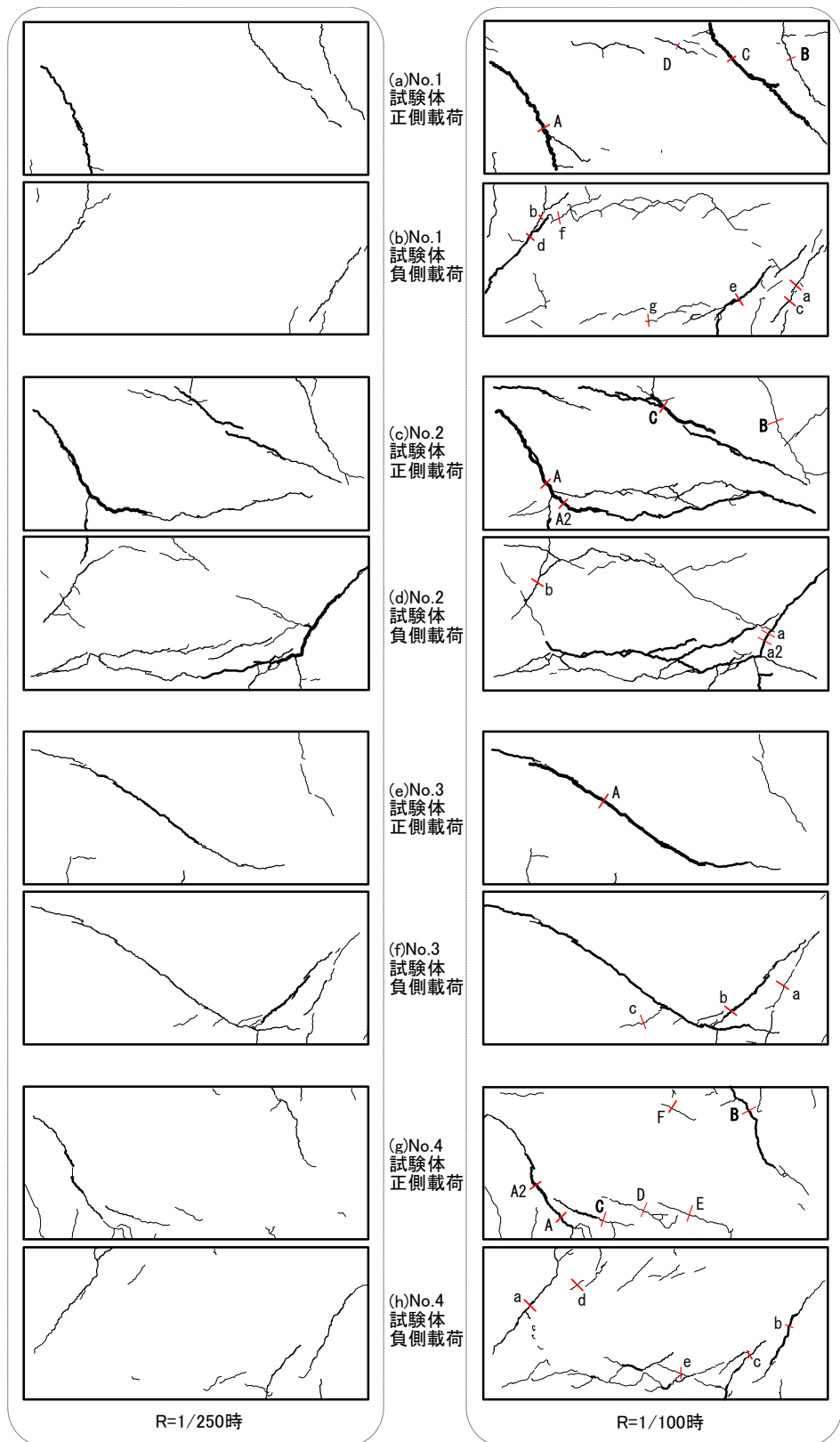


図-5 ひび割れ状況図

No.3 の耐力が約 9%も低い、これは先に述べたように、せん断ひび割れの入り方 (図-5) が原因しているものと思われるが、その理由についての推測は後述する。

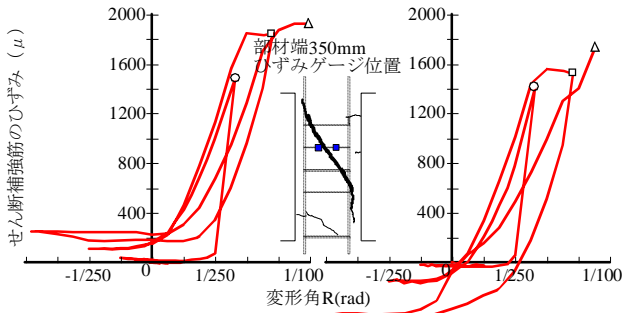


図-6 セン断補強筋のひずみの推移 (No.3(片側面))

いずれの試験体も、 $R=1/250$ 時では部材端部のせん断ひび割れ(曲げひび割れが最初に発生し、その後そのひび割れがせん断ひび割れに移行)が先行して発生している。また、前述のように、No.3(片側面)試験体では正側加力時に部材の両端を対角線状に結ぶひび割れが発生した。

$R=1/100$ 時では、No.1(基)、No.4(下面)試験体では $R=1/250$ 時にみられる部材両端部に発生したせん断ひび割れが拡大しており、部材両端部でのせん断破壊が進んだものと思われる。これらの試験体は、主筋に沿った付着割裂によるひび割れも発生しており、また $R=1/100$ 以後、部材耐力は上昇せず、曲げひび割れの拡大も小さかったことから付着割裂による破壊も進んだと考えられる。特に No.4(下面)試験体では、付着を切った側に付着割裂のひび割れが多数発生しており、下面のせん断補強筋の付着を切ったことにより付着割裂による損傷がより進んだことを示している。ただし、部材耐力は基準試験体 No.1 とほぼ同じであり、耐力への影響は無かった。一方、No.2(全周)試験体では主筋に沿ったひび割れが大きく開いており、これはせん断補強筋の主筋を拘束する効果が小さく主筋の付着割裂が進行し、その結果部材耐力が基準試験体に比べて低下したと思われる。No.3(片側面)試験体では部材両端部を対角線状に結ぶひび割れが変形の増加とともに大きくなり、他の位置でのひび割れはほとんど進展しなかった。

No.3のせん断補強筋(部材端より350mmの位置)のひずみの推移を図-6に示す。同図より、せん断補強筋のひずみは最大でおよそ 2000μ 、計測位置がひび割れから30mm程度離れた位置であることを考慮すれば、ひび割れ近傍で降伏(せん断補強筋の降伏ひずみ 2201μ)している可能性がある。せん断補強筋が降伏(或いは降伏に近いひずみ状態)となっているにもかかわらず部材耐力がせん断耐力の算定値を大きく下回った理由としては次のようなことが推測できる。断面せい方向の片側みのせん断補強筋の付着を切ったため、No.1(基)に比べ半分のせん断補強筋を偏心した位置にもつ部材と

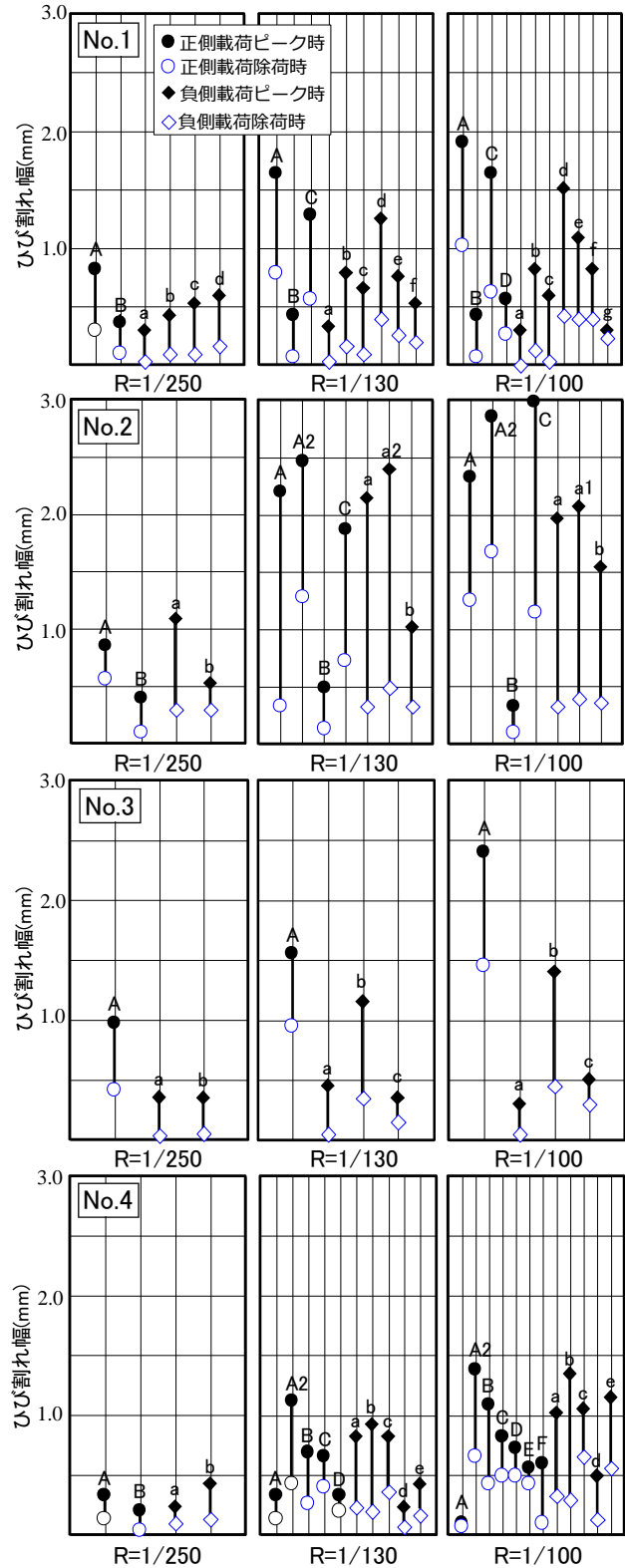


図-7 最大ひび割れ幅と残留ひび割れ幅

なり、せん断ひび割れが他の試験体と異なる(部材の対角線状の)せん断ひび割れを誘発したのではないかと推測する。その結果ひび割れ幅が他の試験体のひび割れに比較して大きくなり、せん断耐力におけるコンクリート部の寄与分が低下したのではないかとと思われる。

3.2 ひび割れ幅

図-5に示したように、各試験体のひび割れ発生状況は、「部材両端部に発生するせん断ひび割れが主に進展するタイプ」(No.1(基), No.4(梁下面))、「付着割裂ひび割れが主に進展するタイプ」(No.2(全周))、「部材両端を対角線状に結ぶせん断ひび割れが主に進展するタイプ」(No.3(片側面))と多様である。従って本試験体で発生したひび割れに対しその幅を比較することは、例えば曲げ破壊する部材の曲げひび割れ幅のように、ほぼ同じパターンで発生することを前提としたうえで比較を行うことは、その意味が異なる。しかしながら、ひび割れ幅の大きさは鉄筋腐食を促進させる水や酸素、塩化物イオンの部材内への侵入量と直接関係することや、ひび割れの残留率は部材の損傷程度の判定の目安となることから、ここでは上記の観点からひび割れ幅の比較を行う。

図-7に、全試験体の最大ひび割れと、残留ひび割れを変形角 $R=1/250$, $1/130$, $1/100$ 毎に示す。図-7中に記載されているアルファベットは大文字が正方向、小文字が負方向載荷時のひび割れ測定点を表しており、測定箇所は図-5の $R=1/100$ 時の図中に示されている通りである。同図によれば、No.2(全周)では変形の小さい $R=1/250$ 時より最大ひび割れ幅が大きくなる傾向が、また残留ひび割れ幅についても大きくなる傾向がみられる。同じ断面せい方向の付着を切った No.3(片側面)では、対角線状のひび割れのみ、その最大ひび割れ幅、残留ひび割れが大きくなる傾向がみられ、変形の小さい領域での損傷については差が生じた。この傾向は $R=1/130$ 時のひび割れ幅についても同様であり、No.2(全周)の試験体のひび割れ幅が他の試験体に比べて著しく大きいことがわかる。 $R=1/100$ 時では、No.2(全周)に加えて、同じく断面せい方向の付着を切った、No.3(片側面)のひび割れ幅も No.1(基), No.4(下面)に比べて大きくなっていることがわかる。これは図-6に示したように、No.3のせん断補強筋が降伏或いは降伏に近いひずみをうけていることから、ひび割れ幅が大きくなったと考えられる。

4. まとめ

せん断補強筋が腐食により付着力を失った場合、梁部材の曲げせん断挙動がどのように変化するかを模擬した載荷実験を行った。その結果、せん断補強筋の付着が失われると部材の曲げせん断挙動に影響を与えることを確認した。以下に具体的に示す。

- 1) 断面せい方向のせん断補強筋の付着が失われる場合、その箇所が、片側、両側にかかわらず大きく耐力が低下した。ただし、ひび割れ発生状況より耐力低下の原因は片側と両側では異なり、前者ではせん断補強筋の降伏が先行、後者では主筋の付着劣化が先行したと思われる。
- 2) 断面幅方向の片側のせん断補強筋の付着が失われる場合、付着が失われた箇所の主筋の付着力は低下したものの、耐力が低下することはなかった。

本実験では引張鉄筋降伏時耐力、せん断終局耐力、付着割裂耐力が拮抗するような試験体を対象としたものであり、上記の耐力バランスが異なる試験体では当然異なる結果になると考えられる。また、腐食状況についても今回は理想的に付着切れを模擬したものであり実際の状況とは異なる。以上のことを念頭に置き今後研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、近畿大学 M2 の石橋壇氏(現(株)シェルター)、B4の中谷和貴氏(現(株)竹中工務店)、森澤亮介氏(現(株)長谷工コーポレーション)、山田翔吾氏(現伊丹市)にご協力頂きました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1). 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2010
- 2). 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