

論文 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

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、梁断面のせい方向に位置する片側のせん断補強筋の付着を3通りに取り除いた梁部材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。その結果、付着を切る範囲が最も少ないケース（片側のせん断補強筋のせい方向長の半分について半周の付着を切った試験体）であっても、ひび割れ発生状況や損傷部位に違いがみられ、せん断補強筋の付着が部材の変形に伴う損傷状態に影響を及ぼすことがわかった。

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

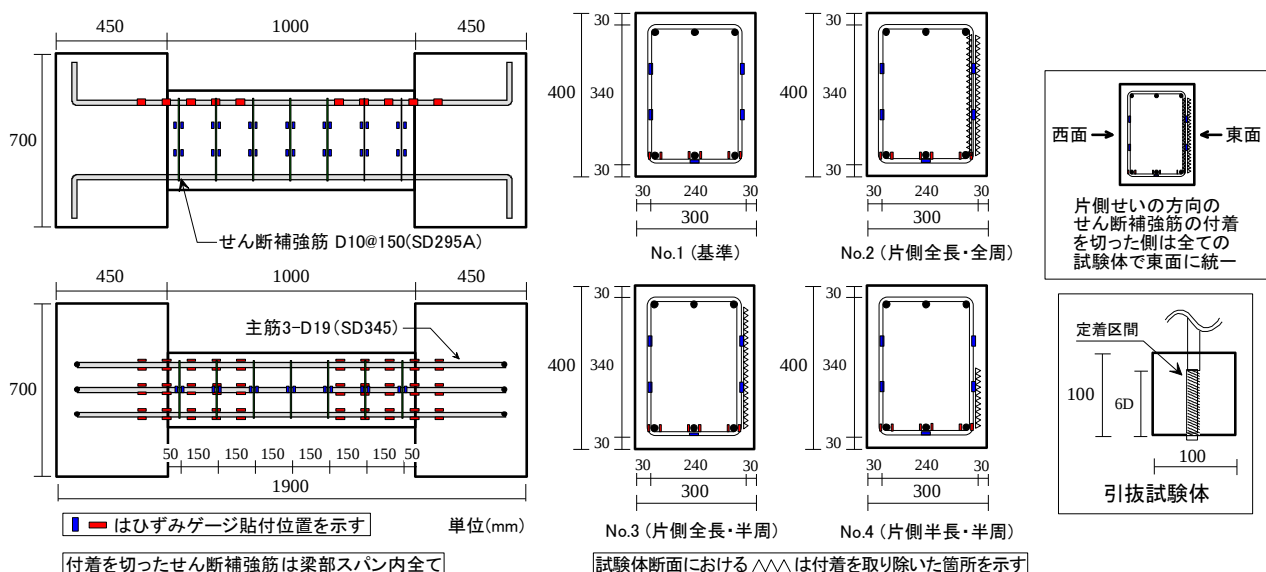
1. はじめに

鉄筋コンクリート建物では、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。鉄筋腐食は構造的な性能を低下させるが、腐食に関する研究は主に材料系の分野で行われており、建築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、腐食の観点からは主筋よりも部材の外側に位置するためより厳しい条件にある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。著者等は既往の論文¹⁾において、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、部材の破壊形式に変化が起これるとともに、最大耐力、ひび割れ発生性状も変化する可能性があることを示した。そこで、本論文では、せん断補強筋の付着喪失が構造性能に及ぼす影響をより詳細に検討するため、前回の実験

に引き続き付着を切る位置を変化させた梁部材に対し曲げせん断実験を行った。具体的には、せん断補強筋の断面せい方向の片側のせん断補強筋の付着を3通りに取り除いた梁部材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

図-1に示すような梁試験体に対し曲げせん断実験を行い、せん断補強筋に腐食が発生し、その結果せん断補強筋－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について検討した。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の影響を端的に検討するため、理想的に付着を取り除い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、図-2に示すように鉄筋の節による突起が見えなくなるように（節頭からの厚み1mm程度）せん断補強筋にコーキング剤を施すことによりせん断補強筋－コンクリート間に付



*1 奈良県庁（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	付着を除いた箇所	計算耐力				実耐力				諸元
		終局曲げ耐力※1	せん断耐力		付着割裂耐力※2	正側載荷		負側載荷		
			荒川 mean式	靱性 指針式		最大耐力	※3 実/計	最大耐力	※3 実/計	
							(kN)		(kN)	
No.1	-	216.5 (187.3)	257.8 (226.7)	254.9 (210.6)	245.8 (205.5)	—	—	244	112	断面積：300×400(mm) 部材長さ：1000mm せん断スパン比：1.42 主筋：3-D19(SD345) 引張鉄筋比：0.82% せん断補強筋 ：2-D10@150(SD295A) 補強筋比：0.32% σ _o ：27.5 (N/mm ²)
No.2	全長全周					172	79	243	112	
No.3	全長半周					238	109	256	118	
No.4	半長半周					230	106	239	110	

(注)：() 内の数値は設計時耐力
 ※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
 ※3. 計算終局曲げ耐力に対する最大耐力の比率を示す

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)	ヤング係数 E_c [※] (N/mm ²)
21	27.5	2.8	2.5×10^4

(b) 鉄筋 ※ E_s ：1/3割線弾性係数

使用部位	呼び名	鋼種	σ_y [※] (N/mm ²)	ϵ_y [※] (μ)
梁主筋	D19	SD345	376.7	2015
横補強筋	D10	SD295A	340.8	1705

※ σ_y ：降伏点強度(c) 引抜試験 ※ ϵ_y ：上昇伏点のひずみ

試験体名	付着を取り除いた箇所	鉄筋径 (mm)	最大付着応力度 τ (N/mm ²)
A	-		11.1
B	全周	9.5	0.4
C	半周		2.8

※表-2の値は3本の平均値

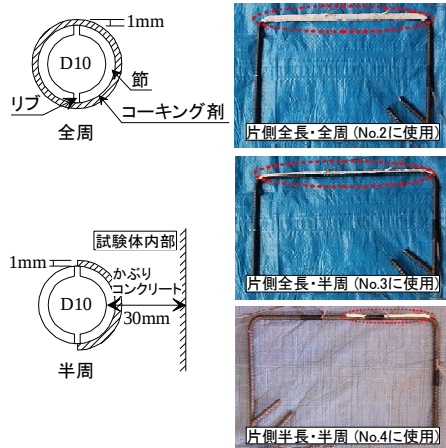


図-2 せん断補強筋付着の取り除き方

着が発生しないようにした。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。

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、ストレスブロック係数 ($k_1 k_3 = 0.83$, $k_2 = 0.41$) を用いた計算から求めた終局曲げ耐力とせん断耐力 (荒川 mean 式²⁾、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 (以下 靱性指針) のせん断耐力式³⁾ との差が2割程度となるように設計した。また、主筋の付着割裂破壊がその他の破壊形式に先行することを避けるために、靱性指針の付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度が、終局曲げ耐力よりも高くなるように設計した。せん断補強筋の付着状態は、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、試験体毎に以下のように設定した (図-1、表-1)。

各試験体の概略を以下に示す。

No.1 (記号：基準)：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。

No.2 (記号：片側全長・全周)：せい方向のせん断補強筋の片側について、その全長にわたり鉄筋断面全周にコーキングを

行い、付着を取り除いた試験体。これはせん断補強筋の腐食の程度が大きく、かぶりコンクリートの剥落等により起きるせん断補強筋とコンクリート間の付着が完全に切れる状態を想定している。

No.3 (記号：片側全長・半周)：せん断補強筋の片側の全長にわたって、かぶり側の半周分の付着を取り除いた試験体。これは腐食発生によりかぶりコンクリートに浮きが生じるが、せん断補強筋のコンクリート断面内側に位置する部分では付着が健全である状態を想定している。

No.4 (記号：片側半長・半周)：せん断補強筋の片側の半長について半周分の付着を取り除いた試験体。これはせん断補強筋の腐食が断面せい方向全長にわたってではなく、(例えば雨がかりの関係で) 下側半分だけが腐食しているような状況を想定している。

なお、コーキング剤による付着切りの状態を確認するため図-1に示すような一辺100mmの立方体

を用いて引抜試験を行った。定着区間は6D (Dは鉄筋公称直径) である (図-1参照)。表-2に鉄筋とコンクリートの材料試験結果、および引抜試験の結果を示す。同表より、全周にコーキングをした場合付着は殆ど失われており、半周施した場合ではコーキングをしない場合に比べておよそ1/4程度に低下している。

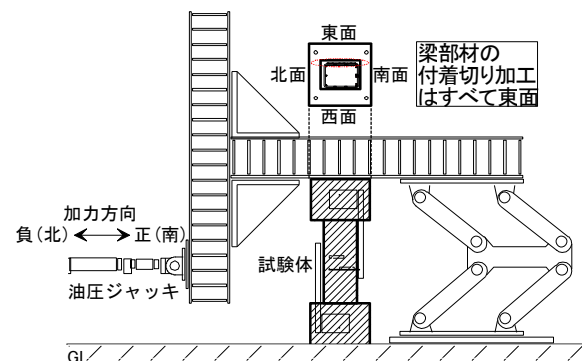


図-3 荷重装置図

図-3に曲げせん断試験の荷重状況図を示す。

荷重履歴は、部材角 $R=1/2000$, $1/1000$, $1/500$, $1/250$, $1/130$, $1/100$, $1/67$, $1/50$ のそれぞれ一回ずつの正負交番とした。なお変形角 (R) は上下スタブの相対変位を梁長さで除した値で

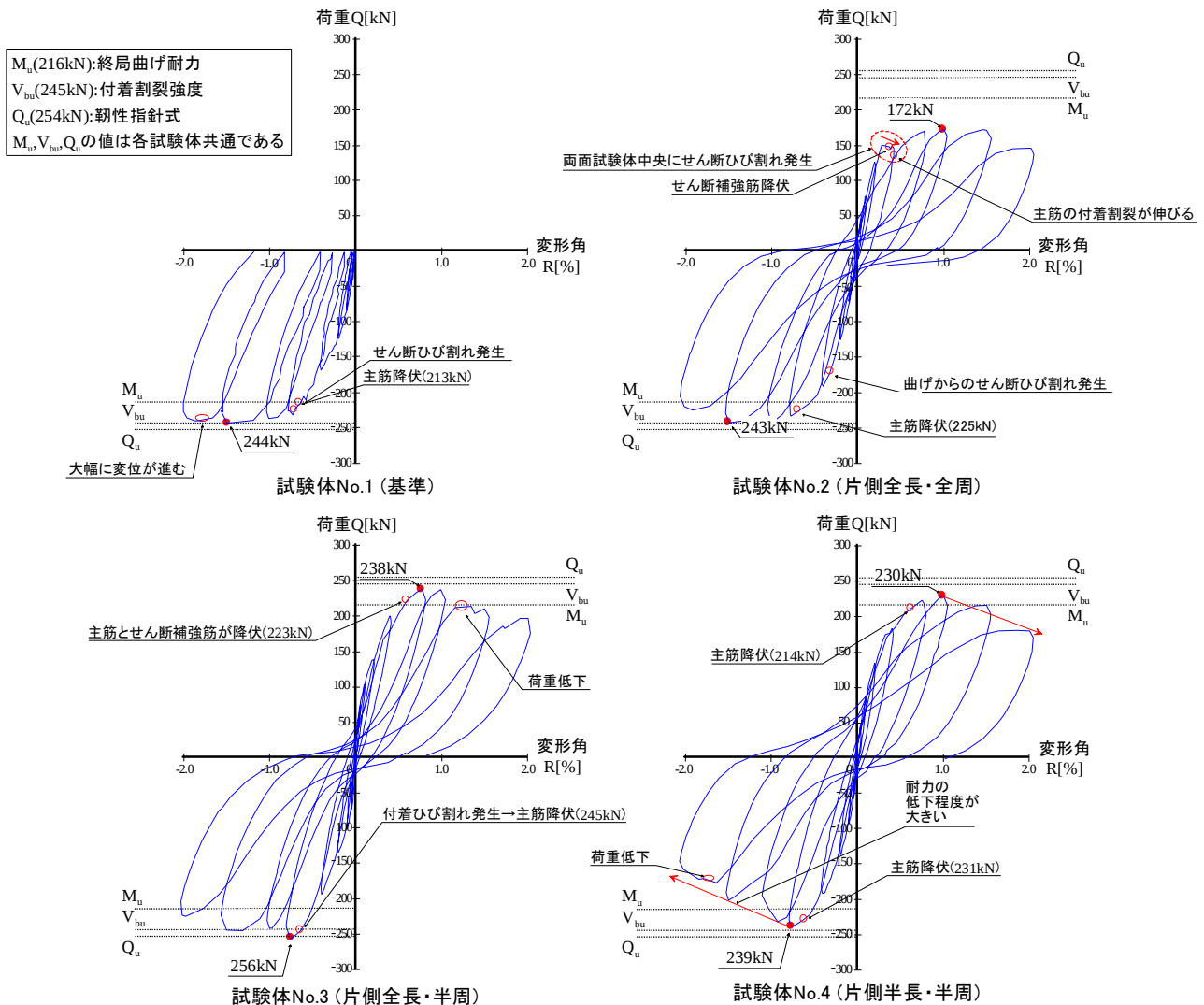


図-4 荷重-変形角関係図

ある。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に目印をつけ、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。

3. 実験結果

図-4に全試験体の荷重-変形角関係を示す。同図には表-1で示した終局曲げ耐力、せん断耐力、付着割裂耐力の値、および引張鉄筋、せん断補強筋がそれぞれ降伏したポイントを併記している。なお、No.1 (基準) では荷重装置への試験体取付け時にスタブ部が損傷し、荷重時の負荷によるスタブ部の損傷拡大が懸念されたため、一方向のみの繰り返し荷重として実験を行った。

図-5に $R=1/130, 1/67$ 時におけるひび割れ図を示す。なお、ひび割れ図は東面、西面の2面について示している。

3.1 荷重-変形角関係と破壊形式

No.1の基準試験体では、負側荷重時に主筋が引張降伏しており、最大耐力は終局曲げ強度を越えている。また、変形増

大に伴う耐力低下程度は小さく、他の試験体に比べて履歴形状は安定していることがわかる。ひび割れは、部材両端部において曲げひび割れ、および曲げひび割れから進展したせん断ひび割れが発生している(図-5)。一方向の繰り返しのみの荷重であるため、完全な対比は出来ないが、付着を切った試験体にみられるような部材全長に渡って発生するせん断ひび割れや、主筋に沿った付着割裂ひび割れは発生しなかった。これに対し、最も付着切れの領域の大きい No.2 (片側全長・全周) では、正側荷重時の耐力が負側荷重時の耐力に比べて大幅に低くなった。正側荷重変形角 $1/250$ 時に部材端部を結ぶせん断ひび割れが発生し(東、西の両面とも)、ひび割れ発生と同時に付着を切っていない西側のせん断補強筋(端部より350mmの位置)のひずみ(2197μ)が降伏ひずみ(1705μ)を超えた(図-6)。これに対し、同図に示す同じ補強筋の東側(付着を切っている側)ではひずみの値はおおよそ 800μ と西側の半分以下であり、せん断補強筋の付着が切られている東側のせん断補強筋のひずみは平均化されていることがわかる。また、同時点でのひび割れ幅は西側 0.989mm 、東側 0.683mm となっており、付着の切られていない西側で大きい

ことがわかる。これらの現象を基に考えると、せん断補強筋に発生する力が東、西面において異なり、そのためせん断補強筋の降伏時期の差が発生し、梁部材の左右面の剛性の不均衡が発生する可能性がある」と推察できる。また、せん断補強筋の半周の付着を切った No.3,4 では、正側、負側載荷共に主筋が引張降伏しており、最大耐力は計算曲げ終局耐力を越えている。しかしながら、No.4 試験体は最も付着が切れている範囲が小さい（片側の半長・半周）にもかかわらず、変形増大に伴う耐力低下程度が No.3 に比べて大きい。この原因はひび割れ発生の順序の違いが影響していると考えられる。詳述すると、図-5の 〇印のひび割れ状況より $R=1/130$ 時に付着が切られている範囲の広い No.3 では No.4 に先行して東面（付着が切られている面）に付着割裂ひび割れが発生している。次に $R=1/100$ の状況を図-7に示す。同図によれば No.3 では西面において、両側の主筋に付着割裂ひび割れが発生している。これに対し、No.4 では、($R=1/130$ 時には付着割裂ひび割れは発生していないもの、) $R=1/100$ 時（図-7）にせん断補強筋の付着が失われた部分に配筋されている主筋が位置する、断面せい方向の片側にだけ、主筋に沿った付着割裂ひび割れが東西両面に発生している。更に変形が進み、 $R=1/67$ 時には、No.3 では東面においても両側主筋位置に発生しているのに対し、No.4 では $R=1/100$ 時と変わらず、東西両面片側主筋位置にだけ発生しており、ひび割れ幅も大きい。具体的に示すと、図-7より、 $R=1/67$ 時のひび割れ幅は No.3 では 0.4～

※ひび割れ状況図は右図の斜線部を示す

※図中のアルファベット文字はひび割れを測定したポイントを示す

※No.4の塗りつぶしは、せん断補強筋の付着切れ加工側を示す

※赤線は正方向載荷、黒線は負方向載荷を示す

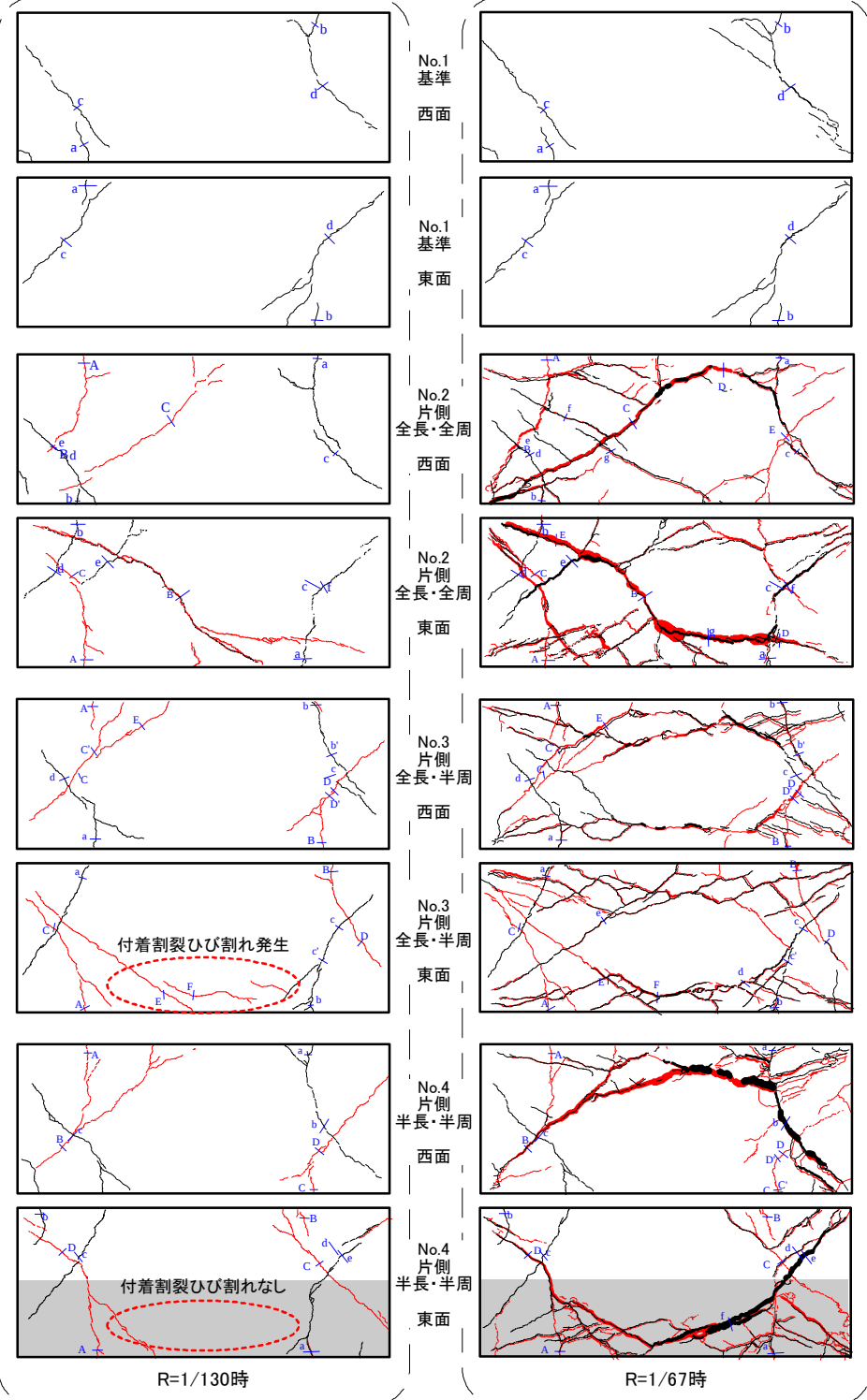
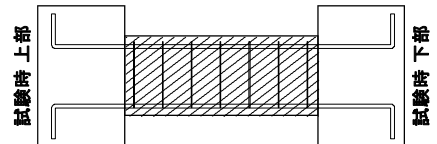


図-5 各変形角の変位max時におけるひび割れ状況図

2.3mm 程度であるのに対し、No.4 では 2.8mm～6.1mm 程度となっている。即ち、No.4 ではせん断補強筋の付着が切れている領域が最も小さいにもかかわらず、せん断補強筋が主筋を

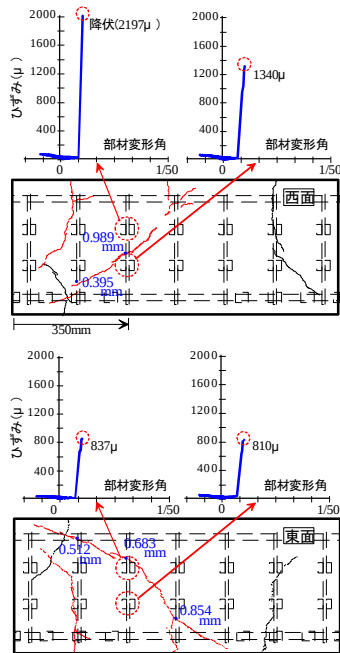


図-6 No. 2 (片側全長・全周)
(R=1/250時)

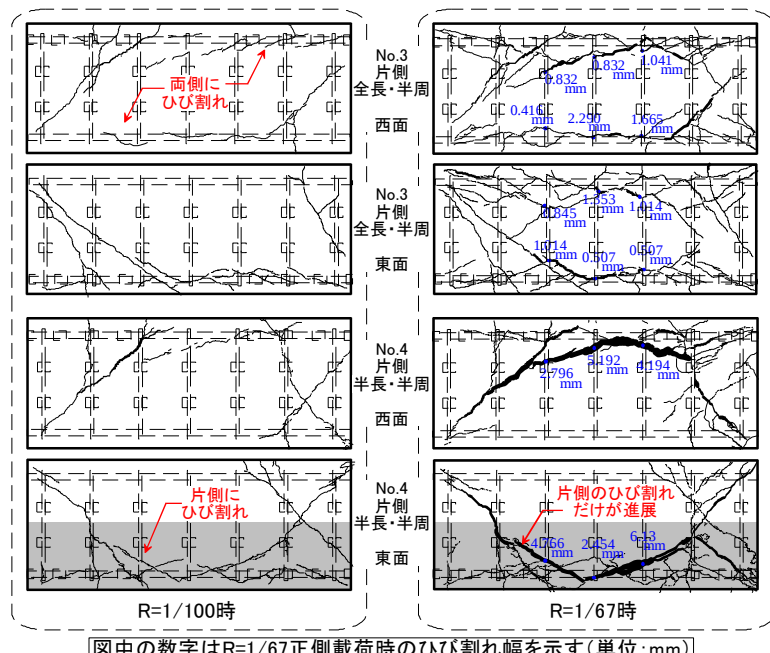
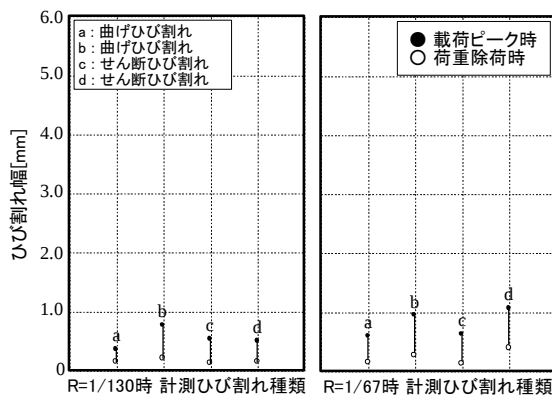
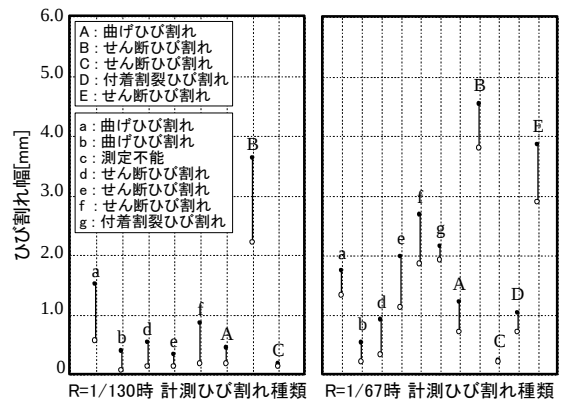


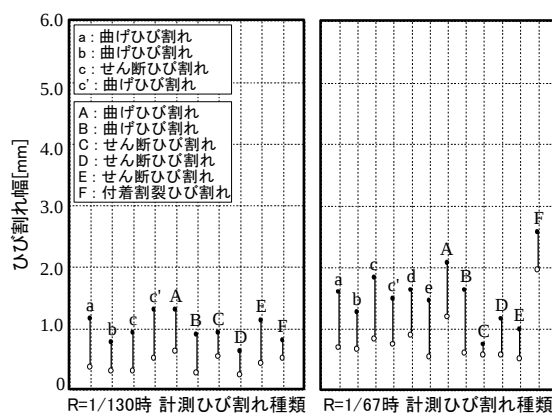
図-7 No. 3, No. 4のひび割れ状況とひび割れ幅 (正側載荷)
(R=1/100, 1/67時)



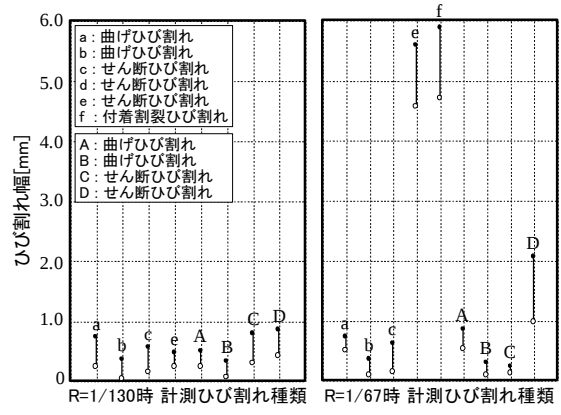
No.1(基準)



No.2(片側全長・全周)



No.3(片側全長・半周)



No.4(片側半長・半周)

図-8 各変形角の最大ひび割れ幅
および残留ひび割れ幅(東面)

拘束する効果が小さい側に付着剥離による損傷が集中、主筋の付着力が低下し、変形増加に伴う耐力低下程度が大きい結果となったと考えられる。

3.2 ひび割れ幅

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。図-8に付着を切った側である東面での最大ひび割れと、残留ひび割れを変形角 R=1/130, 1/67 毎に示す。また、本論文において、最大ひび割れは各変位ピーク時に計測したひび割れ幅、残留

ひび割れは除荷時に計測したひび割れ幅とし、残留率は最大ひび割れ幅に対する残留ひび割れ幅の割合とする。同図中に記載されているアルファベットは大文字が正側、小文字が負側載荷時のひび割れ測定点を表しており、測定箇所は図-5中の $R=1/67$ 時の図中に示されている通りである。なお、曲げひび割れについて、スタブ部と試験体部の境界に発生するひび割れ幅は測定できていない。図-8より、No.1(基準)ではせん断ひび割れ、曲げひび割れ共に小さく、また残留率も小さいことがわかる。これに対し、No.2では $R=1/130$ の正側載荷時にせん断ひび割れが発生しており、このひび割れ幅が拡大している(図中のひび割れB)。「3.1 荷重-変形関係と破壊形式」で示したように、ひび割れ発生とともにせん断補強筋が降伏したため残留率は6割程度と大きく、 $R=1/67$ では他のせん断ひび割れ(ひび割れE)も大きく進展している。また残留率も9割程度と非常に大きくなっている(ひび割れB)。この傾向は、No.4についても同様である。3.1で述べたように、No.4では付着ひび割れがせん断補強筋の付着を切った東面に発生しており、変形増加に伴う部材耐力の低下の原因となった。 $R=1/67$ 時のe, fの値をみると、ひび割れ幅は非常に大きく(約6mm)、残留率も大きい。No.3では、付着割裂ひび割れが $R=1/67$ 時で約2.6mmと進展しており(F)残留率も約8割程度と大きい。No.2, No.4のような極端に大きなひび割れは発生しなかった。

4. まとめ

断面せい方向のせん断補強筋について、片側の付着を3通りに取り除いた梁部材の曲げせん断実験を行った。その結果、いずれの試験体でも荷重-変形関係やひび割れ性状が(付着を切らない場合に対して)変化した。特に、付着を切る範囲が最も少ないケース(片側せん断補強筋のせい方向長の半分について半周の付着を切った試験体)であっても、ひび割れ発生状況や損傷部位に違いがみられ、せん断補強筋の付着が部材の変形に伴う損傷状態に大きく影響を及ぼすことがわかった。以下に具体的に示す。

1) 片側せん断補強筋のせい方向全長にわたり全周の付着を切った試験体では、部材端を結ぶせん断ひび割れの発生によりせん断補強筋の降伏が先行し、正側載荷における耐力が大きく低下した。またせん断補強筋の降伏によって、ひび割れ幅の残留率も非常に大きい値であった。

2) 片側せん断補強筋のせい方向全長にわたり半周の付着を切った試験体では、最大耐力の低下は見られなかった。また、付着割裂ひび割れが両側主筋位置に発生した。

3) 片側せん断補強筋のせい方向半長にわたり半周の付着を切った試験体では、せん断補強筋の付着が失われた部分に配筋されている主筋が位置する、断面せい方向の片側にだけ、東西両面に付着割裂ひび割れが発生した。このひび割れが部材の変形の増大に伴い進展し、ひび割れ幅が拡大することで、最も付着が失われた領域が小さいにも関わらず変形増加に伴う耐力低下の程度が大きかった。

本実験では引張鉄筋降伏時耐力、せん断終局耐力、付着割裂耐力が比較的近い値の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。今後以上の点を踏まえて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、近畿大学の岡澤美月氏(現 関電ファシリティーズ(株))、坂口広和氏(現 (株)類設計室)、曾根拓也氏(現 (株)大林組)、高本芽氏(現 新菱冷熱工業(株))、仲谷智志氏(現 YKK AP (株))、森沢保洋氏(現 (株)大林組)にご協力頂きました。ここに、謝意を表します。

なお本研究は、平成28年度科学研究費補助交付金 基盤研究(S)(課題名: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:青木 孝義)の助成を受けて行われたものである。

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, コンクリート工学年次論文集, vol.37, No.2, pp.217-222, 2015
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2010
- 3) 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