

論文 補修履歴を有する RC はりのせん断破壊に関する実験的検討

鈴木 瞭^{*1}・中田 裕喜^{*2}・渡辺 健^{*3}

要旨：地震により損傷した RC ラーメン高架橋の中層はり等は、損傷の程度に応じてひび割れ注入や断面修復が行われるが、補修後に再度地震動を受け、複数回の補修履歴を有する構造物も散見される。本研究では、せん断破壊と補修を繰り返す RC 単純はりの耐荷機構や剛性、耐力を評価することを目的に載荷実験を行った。斜めひび割れに対して十分にひび割れ注入を行うことで、注入した斜めひび割れに近接して新たにひび割れが発生し、複数回の損傷と補修であっても、補修履歴の無いはりのせん断補強鉄筋降伏後の剛性よりも回復すること、無損傷の RC はりよりも最大せん断力が向上すること等がわかった。

キーワード：補修履歴、繰返し損傷、せん断破壊、ひび割れ注入、断面修復

1. はじめに

RC 構造物では、地震等により部材が損傷した場合、一般に損傷の程度に応じてひび割れ注入や断面修復が行われる。例えば、既設の RC ラーメン高架橋の中層はりでは、これまでの地震被害において、せん断力による斜めひび割れの発生やせん断破壊の事例が多くみられる¹⁾。中層はりに斜めひび割れやせん断破壊が生じると、高架橋全体系の剛性や耐力が低下するため、損傷後にひび割れ注入や、断面修復等の補修が行われている。近年では、建設後に複数回の大きな地震動を経験し、複数回の補修履歴を有する構造物も存在するが²⁾、このような都度補修を行う事例は今後増加することが想定される。

既往の研究では、曲げ破壊形態の柱に対し、損傷と補修を繰り返した実験を実施し、損傷の程度と補修方法による効果の関連について明らかにされている²⁾。一方で、せん断破壊形態の部材に対しては、複数回の載荷履歴に対するひび割れ注入や、断面修復による剛性や耐力の回復の程度に関する研究はほとんど無く、ひび割れ注入を一回施した RC はりにおいて、多くの実験で剛性は低下するが、耐力は概ね回復あるいは向上することが示されるに留まっている³⁾⁴⁾⁵⁾。文献 3)において、ひび割れ注入の前後で斜めひび割れの進展や耐荷機構が変化することが示されていることを踏まえると、複数回にわたるひび割れ注入に対する斜めひび割れや耐荷機構の変化と、剛性や耐力の関連について明らかにする必要がある。

ここで、ラーメン高架橋の中層はりとは両端固定支持であり、斜めひび割れや軸方向鉄筋に沿ったひび割れが発生するとともに、せん断スパン比 a/d が小さい場合には両端を結ぶ斜めひび割れも発生し、端部でコンクリートが圧壊することで破壊する。本研究では、特に斜めひび割れに対する複数回のひび割れ注入と耐荷機構等との関連を明らかにすることを目的とし、単純支持条件下の RC はり部材を対象とした。

2. RC はり実験の概要

2.1 供試体概要

図-1 に供試体諸元を示す。供試体は断面幅 b_w を 300mm、高さ h を 450mm、有効高さ d を 400mm、せん断補強鉄筋比 p_w は 0.21%とした。せん断スパン長 a は 1200mm で、せん断スパン比 a/d は 3.0 である。斜めひび割れの補修効果に着眼しているため、スレンダーな RC はりとし、せん断補強鉄筋の貢献を小さく設定している。なお、この供試体は、補修履歴の無いせん断破壊形態の RC はりと比較するため、文献 6)の供試体 SB30-02 (以下、既往供試体)と同様の寸法、配筋である。

2.2 計測項目および載荷方法

図-1 に、変位およびひずみの計測位置を示す。計測項目は、鉛直荷重、鉛直変位、引張側の軸方向鉄筋 (以下、引張鉄筋) およびせん断補強鉄筋のひずみである。なお、引張鉄筋に設置するひずみゲージは上下二面、せ

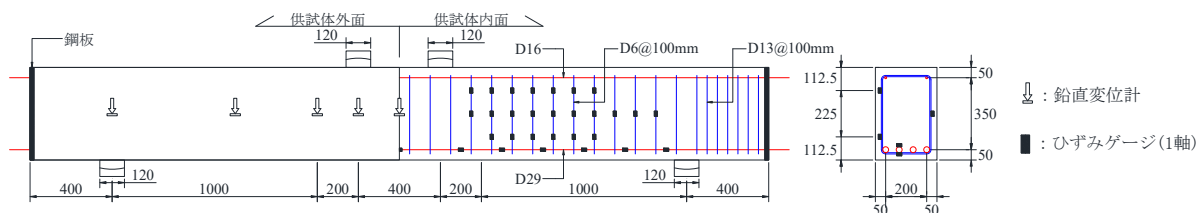


図-1 供試体諸元と変位およびひずみの計測位置 (単位: mm)

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士 (工学) (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (工学) (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (学術) (正会員)

表-1 各セットの载荷・補修パターン

セット No.	あらかじめ定めたイベント	载荷パターン 1 回目(kN), 2 回目(kN), ...	载荷後の補修方法	
			注入	断面修復
1	斜めひび割れ発生	43,145,128,180,180	実施	—
2	最大荷重直前*	45,143,128,181,180,234,232	実施	—
3	最大荷重直後	47,143,130,180,180,233,325	実施	実施
4	押し切り	40,142,129,180,181,231,334	—	—

※文献 6) の SB30-02 供試体の最大荷重 (276kN) を目安にした。

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート

セット No.	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
(打設後)	28	32.3	29.5	2.70
1	104	38.4	32.8	2.62
2	112	(実施無し)		
3	120	42.3	30.1	2.67
4	138	40.8	28.6	2.65

(b) 鉄筋

使用箇所	呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
せん断補強鉄筋	D6	439	190
	D13	387	185
軸方向鉄筋	D16	383	187
	D29	716	196

表-3 コンクリートの示方配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	W/C (%)	細骨材 率 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
20	67.0	49.6	184	275	876	932	2.75

表-4 修復材の材料特性

(a) ひび割れ注入材 (エポキシ樹脂)

圧縮降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張せん断接着強度 (N/mm ²)	接着強度 (N/mm ²)
76.4	2.2	43.4	20.4	10.8

※JIS 規格に従い計測した製品のカタログ値

(b) 断面修復材 (断面修復用ポリマーセメントモルタル)

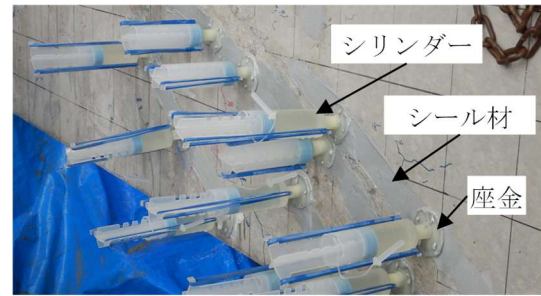
材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
14	41.5	36.9	2.62

ん断補強鉄筋に設置するひずみゲージは片面とした。

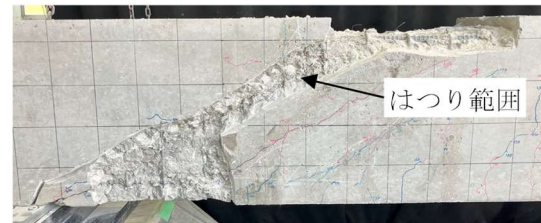
载荷方法は、図-1 に示すように、载荷点および支点位置での一方向 4 点曲げ载荷とした。支点と载荷点には、鋼板を供試体奥行方向全面に設置し、回転および水平移動が可能な支承を設置した。

2.3 载荷と補修のパターン

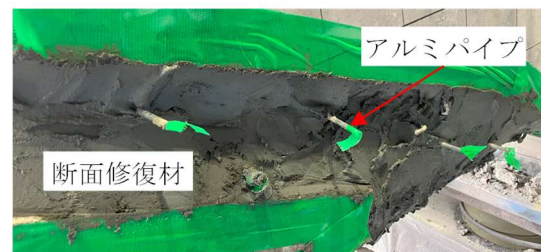
表-1 に、载荷と補修のパターンを示す。本稿では、あらかじめ定めたイベントまでを载荷セットと呼ぶこととし、各载荷セットでは、ひび割れの開口に伴う剛性低下を再現するため、複数回の繰返し载荷を行った。1 回目は曲げひび割れが発生した 43kN 程度、2, 3 回目はせん断補強鉄筋が降伏した 125~145kN 程度、4, 5 回目は 180kN 程度まで载荷し、1 セット目での除荷時の斜めひび割れが最大で 0.50mm 程度となるようにした。2 セット目以降では 7 回目まで载荷を行った。2 セット目の 6 回目、7 回目は 230kN 程度まで载荷し、除荷時の斜めひび割れ幅が最大で 0.80mm 程度となるようにした。3, 4



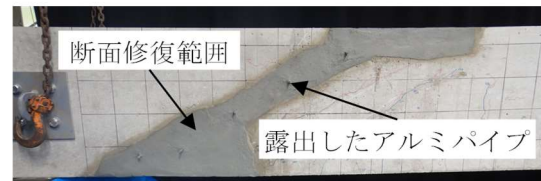
(a) コンクリート表面へのひび割れ注入



(b) 断面修復箇所はつり後



(c) 断面修復箇所へのひび割れ注入



(d) 断面修復完了

図-2 補修の状況 (3 セット目载荷後)

セット目の 6 回目は、2 セット目と同等まで、7 回目は最大荷重まで载荷を行った。最後の 4 セット目を除き、各セットの载荷終了後に荷重を 0 に戻した後、ひび割れ注入や断面修復を行い、次のセットを行った。1 セット目と 2 セット目では、注入材のみによって複数回補修した状況を再現するため、斜めひび割れを発生させる程度とし、3 セット目の载荷で、断面修復を必要とする程度まで損傷させることを目標とした。2 セット目の载荷目安である最大荷重直前は、既往の実験での最大荷重を目標とし、3 セット目の载荷目安である最大荷重直後は、本実験における最大荷重を超過し、ある程度荷重が低下した点を目標とした。

なお、コンクリートの材料試験は、1, 3, 4 セット目に実施した。表-2 に材料試験結果を、表-3 に使用したコンクリートの示方配合を示す。配合は 18-18-20N とした。

2.4 補修方法

表-4 に、補修材料の材料特性を示す。ひび割れ注入

材（以下、注入材）は、低圧注入用のエポキシ樹脂、断面修復材は、左官工法用のポリマーセメントモルタルであり、いずれも鉄道構造物の地震後の補修において使用される、市販の一般的な材料である。

図-2 に、補修の状況を示す。ひび割れ注入は、はりの両側面から、ひび割れ幅が概ね 0.2mm 以上の斜めひび割れを対象に、表面ひび割れから概算される体積以上の注入材が注入されるようにした。コンクリートのひび割れに対して注入を行う場合は、図-2(a)に示すように一定の間隔で注入座金を設置し、ひび割れ全体にわたって注入材が漏れ出ないようにシール材を塗布した。ひび割れ内部に空気が溜まること、座金から注入材が漏れることを防止するため、すべての座金にシリンダーを設置してから、供試体の下方から注入を行った。各座金に対して、注入できなくなるまで注入を繰り返し、対象とするひび割れ全体に注入材が充填されるようにした。また、断面修復時に、はつりにより露出したせん断補強鉄筋よりも内側のコンクリートに注入を行う場合は、図-2(c)、(d)に示すように座金を設置する箇所にアルミパイプを差し込み、先に断面修復を行い、断面修復完了後に、表面より飛び出たアルミパイプに座金を設置し、コンクリ

ート表面のひび割れに対する場合と同様に注入を行った。

断面修復は、3 セット目終了後に、コンクリートのうきが確認された箇所のかぶりコンクリートをはつった（図-2(b)）。断面修復は型枠を設置してモルタルを充填する工法と、左官によって成型する工法がある。本実験では、修復範囲が比較的狭いことやひび割れ注入のためのアルミパイプがあることを考慮し、左官工法で修復を行った。断面修復材が適切に接着するように、1 回につきおよそ 20mm 厚で塗り重ねた。

3. 実験結果

3.1 損傷状況

図-3 に、各セットのせん断力 V の上限値 V_{imax} (i : セット No.) に達した直後のひび割れ発生状況と、主なひび割れの発生荷重(kN)を示す。比較のため、単調載荷によりせん断破壊させた既往供試体のせん断力が最大値 V_{u2020} に達した直後の斜めひび割れ発生状況も示す。せん断力は、載荷荷重の 1/2 とした。なお、本実験では鉄筋は破断することはない、ひび割れ注入をした箇所が再度開口することはない。

斜めひび割れは、既往供試体において概ね $V=150\text{kN}$ ま

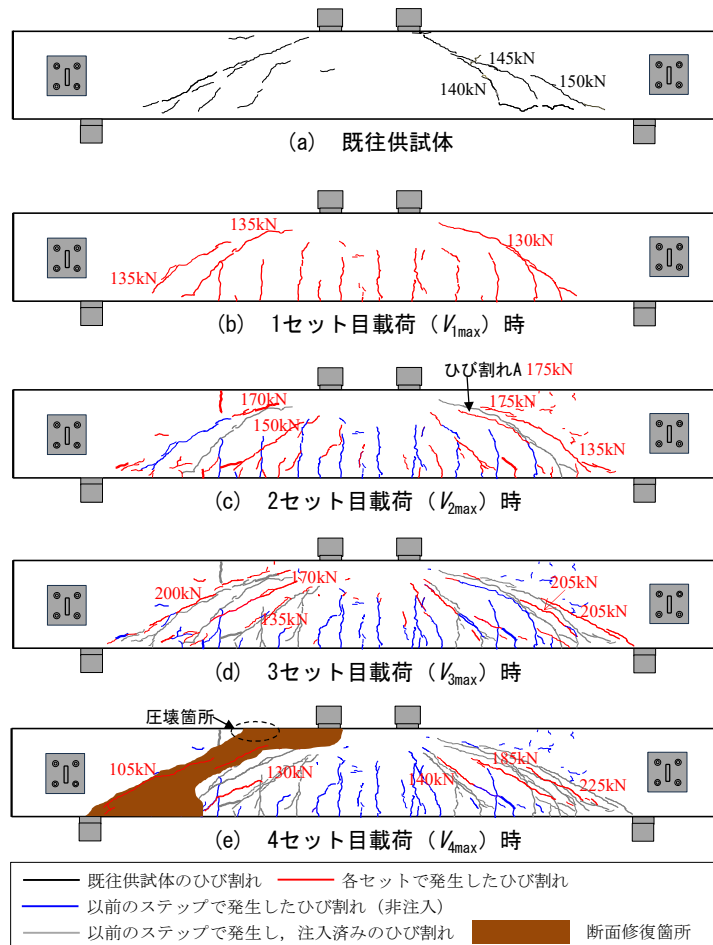


図-3 損傷および補修状況

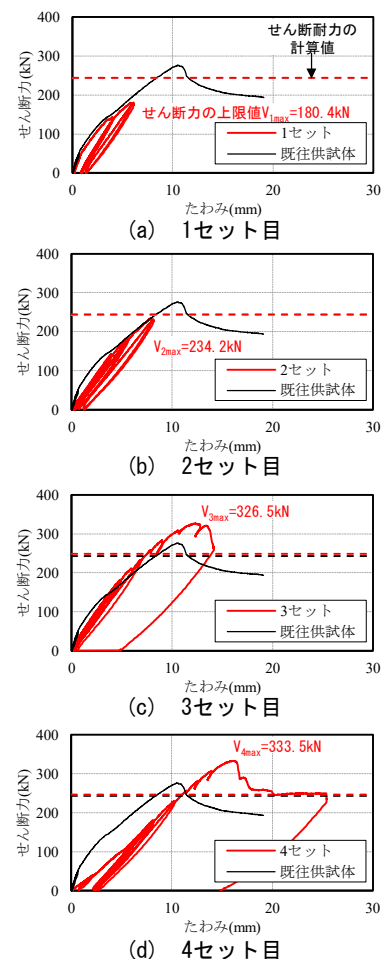


図-4 せん断力-たわみ関係

で発生しており、本実験においても2セット目の $V=150\text{kN}$ 前後までに概ね発生した。また、本実験では、 $V=170\text{kN}$ 以上の時に、図-3(c)のひび割れAのように、注入済みのひび割れに近接して新たに発生するひび割れ（以下、近接ひび割れ）が見られた。これは、注入材の引張強度および注入材とコンクリートの付着強度が、コンクリートの引張強度に比べて大きく、注入箇所が再度開口する前に、近傍のコンクリートが引張強度に達したためと考えられる。近接ひび割れの発生は、2セット目では 170kN 前後であったものが、3セット目では 200kN 前後、4セット目の右スパンでは 225kN と補修履歴を重ねるにつれて近接ひび割れの発生荷重が大きくなった。なお、3セット目以降に発生したひび割れは、ほとんどすべてのひび割れが、近接ひび割れであった。

4セット目の载荷において、ポストピークまで载荷を続けると、圧縮側の断面修復箇所とコンクリートの境界付近で圧壊した（図-3(e)）。

3.2 セン断力とたわみの関係

図-4に、せん断力-たわみ関係と、比較のため、既往供試体の結果も示す。ここで、たわみはスパン中央の変位から支点の変位を差し引くことで算出した。また、各図は、以前のステップの残留変位は引き継がずに、各セットの開始時のたわみを0としている。図より、各セットでは、繰返し载荷によって剛性が低下するものの、補修により、次のセットの初期载荷時には、前の最終载荷時に比べて、剛性がいくぶん回復することが確認された。なお、4セット目の1, 2回目の载荷では、3回目と比べて剛性が小さく、残留変位も大きい、供試体の観

察においては、大きな変形はみられなかった。これは、左官工法によるコンクリートと断面修復材の界面が、载荷によって両者がかみ合ったためと考えられるが、この影響の程度については不確かなため、本実験では、4セット目の1, 2回目の载荷は参考値として扱うこととした。

図-4に、既往供試体と本供試体のそれぞれのせん断耐力の計算値を示す。せん断耐力の計算値は、せん断スパン比 a/d の影響を考慮した二羽らによる提案式⁷⁾によって算出した。既往供試体のせん断耐力 $V_{\text{ucal}2020}$ は 242.7kN 、本供試体のせん断耐力 V_{ucal} は 247.0kN であった。本供試体の最大せん断力 $V_{\text{uexp}} (=V_{4\text{max}})$ は、計算値の1.35倍と、既往供試体の1.14倍に比べて大きく増加している。すなわち、本実験においては、ひび割れ注入により最大荷重が増加し、その後大きな損傷を受けて断面修復を行った場合でも、最大荷重が回復することがわかった。

3.3 鉄筋ひずみ

図-5に、1セット目と3セット目のせん断力の上限值に達した時の、はり高さ方向中央部におけるせん断補強鉄筋のひずみを示す。比較のため、既往供試体の結果を破線で示す。図より、1セット目において右スパンで降伏ひずみを超過する鉄筋は、既往供試体、本供試体ともに1本だけであったが、本供試体の3セット目では、4本の鉄筋が降伏ひずみに達していた。このことから、ひび割れ注入により斜めひび割れ位置が変化することで、2セット目、3セット目においてせん断力を受け持つせん断補強鉄筋の本数が増加する。このため、せん断補強

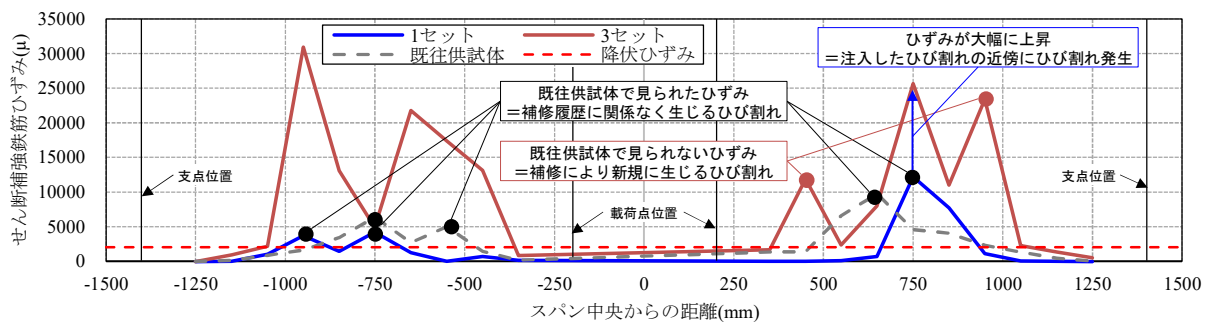


図-5 セン断力の上限值に達した時のはり高さ方向の中央部におけるせん断補強鉄筋のひずみ

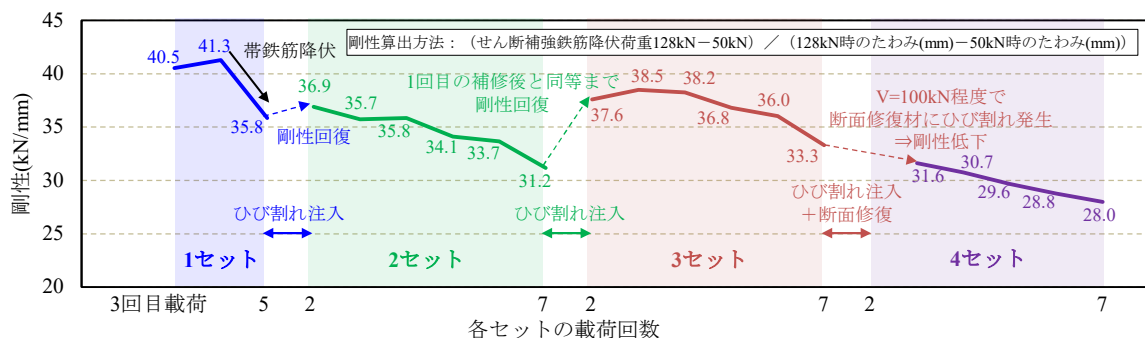


図-6 剛性の変化

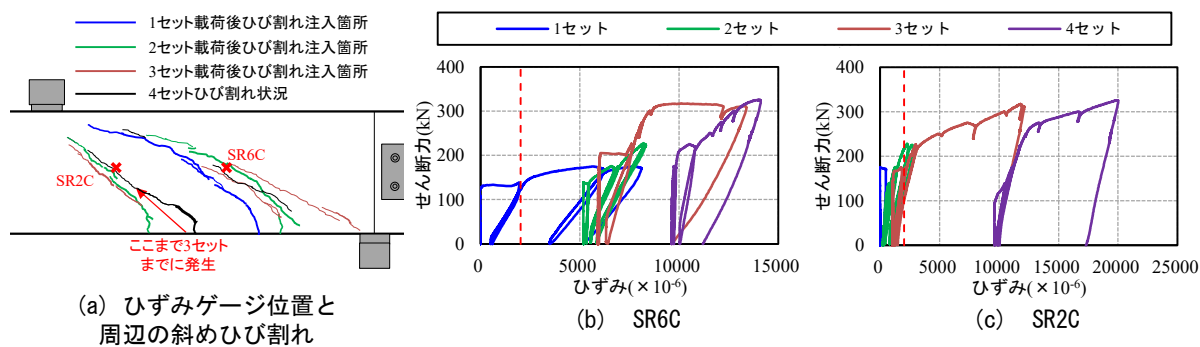


図-7 右スパンのひび割れ注入箇所とせん断力-せん断補強鉄筋ひずみ関係

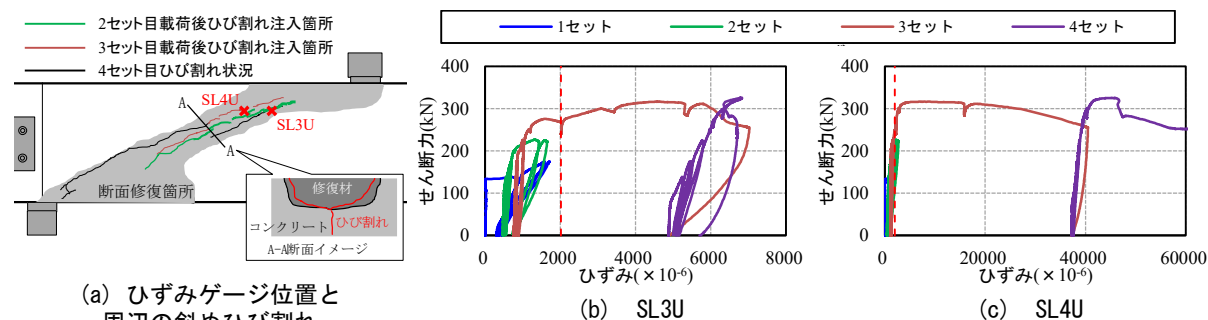


図-8 断面修復箇所のひび割れ発生箇所とせん断力-せん断補強鉄筋ひずみ関係

鋼材による受け持たれるせん断耐力 V_s は増加すると考えられる。また、近接ひび割れは、既往供試体の斜めひび割れの発生荷重に比べて全体的に大きい荷重で発生するため、せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力 V_c は増加すると考えられる。以上のことから、本供試体では、損傷や補修履歴の無い既往供試体に比べて最大せん断力 V_{exp} が増加したと考えられる。

4. 補修の効果

4.1 剛性

図-6 に、曲げひび割れ発生後の 1 セット目 3 回目載荷以降の剛性を示す。剛性は、せん断力-たわみ関係が直線的になる 50kN と、せん断補強鉄筋が降伏した 128kN (3 回目載荷の上限値) を結ぶ線により算出した。

1 セット目において、曲げひび割れ発生後の剛性は 41kN/mm 程度である。4 回目から 5 回目にかけてせん断補強鉄筋が降伏したことで 35.8kN/mm 程度まで剛性が大きく低下した。

ひび割れ注入のみを行った 1 回目の補修後、2 セット目においては、2 回目の剛性は 36.9kN/mm となり、せん断補強鉄筋が降伏した 1 セット目の 5 回目よりも回復した。その後、再度の斜めひび割れの発生に応じて、ゆるやかに剛性が低下し、7 回目では、31.2kN/mm となった。

ひび割れ注入のみを行った 2 回目の補修後である 3 セット目においても、2 回目の剛性は 37.6kN/mm であり、2 セット目の 1 回目と同等の剛性まで回復した。その後、剛性はゆるやかに低下し、7 回目では、2 セット目の 7 回目と同等の 33.3kN/mm となった。

ひび割れ注入に加えて、断面修復を行った 3 回目の補修後である 4 セット目においては、3 回目の剛性は 31.6kN/mm と 3 セット目の 7 回目と同等の剛性となった。この原因として、左官工法で断面修復を行ったことが挙げられる。既往の実験²⁾において、左官工法を採用したケースでは、断面修復材とコンクリートの一体性が十分に確保できていなかったことに起因すると思われる剛性低下が確認されている。本実験においても、2 回目で確認された断面修復材とコンクリートの界面のひび割れが、3 回目で内部まで進展し、断面修復材とコンクリートの一体性が損なわれた可能性があると考えられる。

今回の実験では、注入材が完全に注入されなくなるまで繰り返し注入を行い、また注入時のロス量もわずかであったことから、開口幅の大きい斜めひび割れに対しては、十分に注入されたものと考えられる。本実験では、2.4 に示すように、ひび割れ幅が概ね 0.2mm 以上の斜めひび割れを対象にひび割れ注入を行った。このように十分にひび割れ注入を行った RC 部材に対して、補修後の剛性は、既往の文献と同様に 1 セット目の初期剛性に比べて低下するものの、ひび割れ注入後は近接ひび割れが発生することから、複数回の損傷とひび割れ注入に関わらず、斜めひび割れ発生後にせん断補強鉄筋が降伏した 1 セット目の 5 回目載荷発生後を上回る剛性まで回復することが確認できた。また、断面修復材については、コンクリートに発生する斜めひび割れの発生荷重よりも小さいせん断力で、断面修復材とコンクリートの界面にひび割れが発生した。本実験では、はつりの深さが鉄筋の表面が露出する程度までであり、左官工法を採用したこ

とから、十分に鉄筋やコンクリートと断面修復材の付着が確保できず、このような結果になったと考えられる。

4.2 補修箇所と鉄筋ひずみ

図-7 に、ひずみゲージ SR6C, SR2C におけるせん断力-せん断補強鉄筋ひずみ関係を示す。図中には、降伏ひずみを赤破線で示した。ひずみゲージ SR6C に相当する位置は、1 セット目で SR6C の付近に斜めひび割れが発生し、ひずみが急増した。そのひび割れに対して1回目の補修で注入を行った結果、2 セット目では、ひび割れの無いコンクリートに配置された鉄筋と同様に、1 セット目終了時のひずみを保ちながら荷重が増加した。その後、1 セット目と同等のせん断力で、再び斜めひび割れが発生し、ひずみが増加した。2 回目の補修で注入を行うと、3 セット目では、2 セット目終了時のひずみを保ちながら荷重が増加し、2 セット目の斜めひび割れ発生時よりも大きい 200kN 程度で近接ひび割れが発生し、ひずみが急増した。一方で、ひずみゲージ SR2C に相当する位置は、3 回目の補修で SR2C の付近のひび割れに注入を行ったが、SR6C とは異なり、4 セット目ではせん断力が 100kN 前後から、ひずみがゆるやかに増加した。これは、4 セット目において SR2C 付近に発生するひび割れは、図-7(a)に赤矢印で示すように、3 セット目までに発生した幅の小さいひび割れが 100kN 付近で進展したものである。このように、斜めひび割れが新規に発生する場合と、進展する場合で鉄筋のひずみが異なることがわかった。

図-8 に、3 回目の補修で断面修復材によって補修した領域に位置する、ひずみゲージ SL3U, SL4U におけるせん断力-せん断補強鉄筋ひずみ関係を示す。SL4U は、3 セット目にひずみゲージを跨ぐように斜めひび割れが発生する箇所であり、SL3U はその 100mm 載荷点側に位置する。SL4U を跨ぐ斜めひび割れは、3 回目の補修でひび割れ注入をした後に、断面修復を行った。4 セット目では、SL3U の位置に断面修復材にひび割れが発生した。しかし、このとき、SL4U のひずみが急増した一方で、SL3U のひずみは SL4U に比べて増加することはなかった。以上より、図-8(a)に示すように、せん断補強鉄筋よりも内側のコンクリートでは、SL4U の近傍に斜めひび割れが発生し、SL3U の位置に発生したひび割れは、コンクリートと断面修復材との界面に沿ってひび割れが発生したと考えられる。これは 4.1 で示した 4 セット目の 3 回目載荷における剛性低下と整合する。

5. まとめ

本実験では、せん断破壊形態の単純 RC はりを対象に、損傷と補修を 3 回繰り返した。補修は、ひび割れ幅 0.2mm 以上の斜めひび割れを対象にエポキシ樹脂のひび割れ注

入材を十分に注入し、はく離した箇所を対象に左官工法によってポリマーセメントモルタルを用いて断面修復を行った。本実験の条件で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 複数回の損傷とひび割れ注入を実施した場合、新たに斜めひび割れが発生し、せん断力を受け持つせん断補強鉄筋の本数が増加したため、剛性は 1 セット目のせん断補強鉄筋降伏後の剛性よりも回復した。また、最大せん断力は損傷や補修履歴の無い場合よりも増加した。
- (2) 断面修復を実施した場合は、断面修復材とコンクリートの一体性が十分に確保できず、断面修復後の載荷初期に、コンクリートと断面修復材の界面に沿ってひび割れが発生したため、剛性は断面修復直前の剛性と同等になった。また、3 セット目と同等の最大せん断力まで回復した。

謝辞

載荷実験の実施にあたり、鉄建建設株式会社殿にはご助言をいただきました。

参考文献

- 1) 小林将志, 高山充直, 倉岡希樹, 大口亜希子, 渡辺一輝, 安田武道: 福島県沖地震の強震動エリアにおいて損傷した新幹線 RC 構造物の被害と復旧, SED, No.60, pp10-19, 2022
- 2) 仁平達也, 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 岡本大: 地震による損傷と補修を繰り返した RC 部材の性能に関する一考察, 土木学会論文集, Vol.68, No.2, pp.121-132, 2012
- 3) 深澤優一, 斉藤成彦, 高橋良輔: 斜めひび割れを生じた RC 梁の修復効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013
- 4) 尾坂芳夫, 鈴木基行, 石田博樹, 加藤勝美: RC ばりのせん断破壊と補修法に関する研究, 土木学会論文集, 第 360 号, V-3, pp.119-128, 1985
- 5) 松崎育弘, 星野克征, 坂本浩孝, 由利隆之: せん断破壊した RC 部材のエポキシ樹脂の補強効果を知る実験研究, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.541-544, 1984
- 6) 西尾悠吾, 中田裕喜, 渡辺健, 田所敏弥: 接合面およびせん断補強鉄筋量が単純支持 RC はりのせん断耐荷機構に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, 2021
- 7) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号, V-5, pp.167-176, 1986