

論文 載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート接着による曲げ補強効果

栗橋 祐介^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・AbdelAziz Mohamed Ali^{*4}

要旨: 本研究では、載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート接着による曲げ補強効果を検討することを目的として、あらかじめ曲げひび割れや残留変位等の損傷を与えた RC 梁に AFRP シートを接着して静的 4 点曲げ載荷実験を行った。その結果、1) AFRP シート曲げ補強 RC 梁の初期剛性や降伏強度に及ぼす事前載荷の有無や事前載荷レベルの影響は小さい、2) 事前載荷により生じた上縁コンクリートの残留圧縮ひずみやひび割れの影響により、上縁コンクリートの圧壊やシートの剥離が早まる傾向にあること、などが明らかになった。

キーワード: RC 梁, 載荷履歴, AFRP シート, 曲げ補強, ピーリング作用

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修補強工法として、連続繊維 (FRP) シート接着工法が広く採用されている。FRP シートを RC 部材の引張力作用面に接着して曲げ補強する場合には、RC 部材は上縁コンクリートの圧縮破壊の他、FRP シートの破断や剥離により終局に至ることが想定される。シートの剥離が圧縮破壊に先行して生じる場合、RC 梁はシートの完全付着を仮定した計算耐力や計算変位を下回って破壊するため設計的に極めて危険側となる可能性がある。

そのため、著者らはこれまで FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状やシートの剥離挙動に関する数多くの実験的研究を行ってきた^{1)–3)}。その結果、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、1) 主鉄筋降伏後剛性勾配が計算結果のそれを下回り、計算耐力や計算終局変位を下回る状態でシートが剥離して終局に至る剥離破壊型と、2) 主鉄筋降伏後においても計算結果と同様の剛性勾配を示し、計算耐力および変位を上回った状態で圧縮破壊に至る曲げ圧壊型に分類できることを明らかにしている。また、FRP シートの剥離は、等せん断力区間において載荷点近傍の下縁かぶりコンクリートに発生する斜めひび割れ先端部がシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用によって生じることや、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、計算終局モーメント M_u に対する計算降伏モーメント M_y の比 M_y/M_u を用いて推定可能であること、などを明らかにしている。

一方、長期間供用されている既設 RC 構造物の中には、経年劣化や活荷重増加ならびに地震の影響等により、ひび割れや残留変位を生じているものも見られる。しかしながら、FRP シート接着による RC 部材の補強効果に関する研究は、これまで国内外において数多く実施されているものの^{4),5)}、著者らの研究も含め、載荷履歴を有し

ない試験体を対象とした検討が多い。FRP シート接着工法による既設 RC 構造物の補強効果を適切に評価するためには、新設のみならず載荷履歴を有する RC 部材を対象とした検討も重要であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート接着による曲げ補強効果を検討することを目的として、あらかじめ曲げひび割れや残留変位等の損傷を与えた RC 梁に AFRP シートを接着して静的 4 点曲げ載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、無補強試験体の他、シート補強量を 2 種類、事前載荷レベルを 3 種類に変化させた全 7 体である。なお、シートには保証耐力が 588 kN/m のアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを 1 層もしくは 2 層用いている。

表中、試験体名の第 1 項目の英文字 S に付随する数値は AFRP シート層数、第 2 項目の英文字 L に付随する数

表-1 試験体一覧

試験体名	主鉄筋	シート層数	事前載荷レベル	M_y/M_u	予想される破壊形式
N		-	-	-	-
S1-L0	D16	1	無し	0.75	曲げ圧壊型
S1-L1			レベル 1		
S1-L2			レベル 2		
S2-L0	2	2	無し	0.68	境界型
S2-L1			レベル 1		
S2-L2			レベル 2		

M_y : 計算降伏モーメント, M_u : 計算終局モーメント
(計算は断面分割法による)

*1 室蘭工業大学大学院講師 工学研究科 暮らし環境系領域 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株)技術開発開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (非会員)

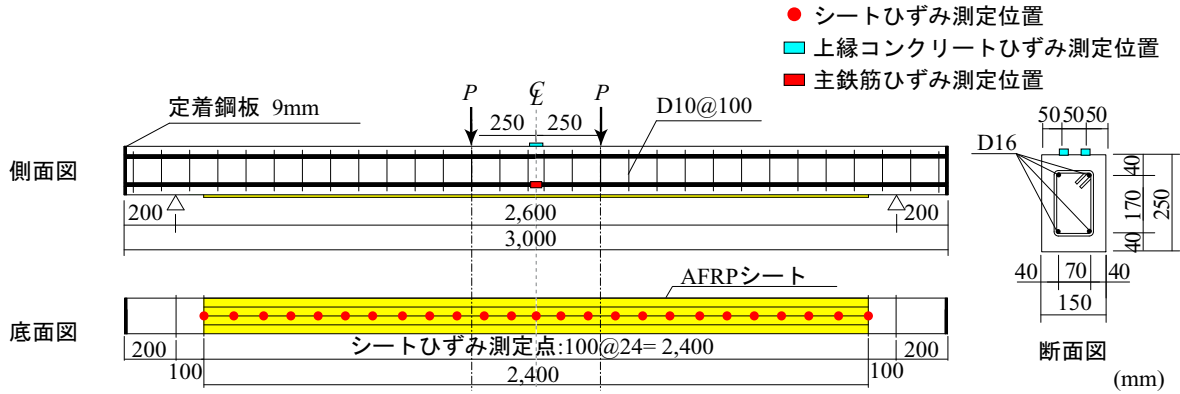


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

表-3 事前載荷時における実験結果

試験体名	最大荷重時				除荷後		
	荷重 (kN)	変位 (mm)	主鉄筋ひずみ (μ)	上縁コンクリートひずみ (μ)	変位 (mm)	主鉄筋ひずみ (μ)	上縁コンクリートひずみ (μ)
S1-L1	53.9	9.5	1,911	-1,092	1.3	270	-100
S2-L1	51.0	10.2	1,873	-1,407	2.1	420	-378
S1-L2	57.5	18.8	16,609	-3,043	9.6	11,510	-1,665
S2-L2	56.8	19.5	16,847	-2,259	10.3	14,560	-1,035

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

値は事前載荷レベルを示している。ここで、事前載荷レベルは、無補強試験体の実験結果を参考にして設定しており、レベル1,2はそれぞれ主鉄筋が降伏に至る載荷レベルおよびスパン中央部の残留変位が純スパン長の0.4% (10.4 mm) 程度となる載荷レベルとした。なお、著者らが提案した破壊形式予測式¹⁾から、計算終局モーメント M_u に対する計算降伏モーメント M_y の比 M_y/M_u が0.70以上の場合には曲げ圧壊型、0.65以下の場合には剥離破壊型で終局に至るものと推定される。従って、表-1より、S1梁は曲げ圧壊型、S2梁はどちらの破壊形式にも分類されない境界型と推定される。

図-1には、本実験に用いた試験体の概要を示している。試験体は、断面寸法(幅×高さ)15×25 cm、純スパン長2.6 mの複鉄筋RC梁である。上下端鉄筋にはSD345 D16を2本ずつ配置している。曲げ補強シートの幅は、梁幅と同様とし、梁中央部から両支点の100 mm手前までの範囲に接着した。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は29.5 MPaであった。また、鉄筋の降伏強度は392 MPaであった。表-2には、AFRPシートの力学的特性値(公称値)を示している。

2.2 実験方法

著者らはAFRPシート補強する場合には、RC梁底面に深さ1~2 mm程度のブラスト処理を施すこととしている。本実験では、事前載荷の前にRC梁底面にブラスト処理を施すこととした。また、事前載荷終了後、試験体を反転させて補強範囲にプライマーを塗布し、含浸接着樹脂を用いてAFRPシートを接着した。樹脂硬化後、再度RC梁を実験装置に設置し、梁が終局に至るまで荷重を行った。これらの載荷実験は、容量500 kNの油圧ジャッキを用いて行った。

本実験の測定項目は、載荷荷重、スパン中央点における変位、主鉄筋および上縁コンクリートひずみ、AFRPシート各点のひずみ分布である。また、実験時にはRC梁のひび割れ進展状況やシートの剥離・破断状況をデジタルカメラを用いて連続的に撮影している。

3. 実験結果および考察

3.1 事前載荷時の結果

表-3には、事前載荷時における各試験体の実験結果を一覧にして示している。表には、最大荷重時および除荷後における荷重、変位、主鉄筋および上縁コンクリートのひずみを示している。表より、事前載荷レベル1の場合には、最大荷重時における主鉄筋ひずみが降伏ひずみ(1,920 μ)程度となっていることが分かる。事前載荷レベル2の場合には、除荷後の変位(残留変位)が10 mm程度となっており、設定値(10.4 mm)とほぼ対応していると

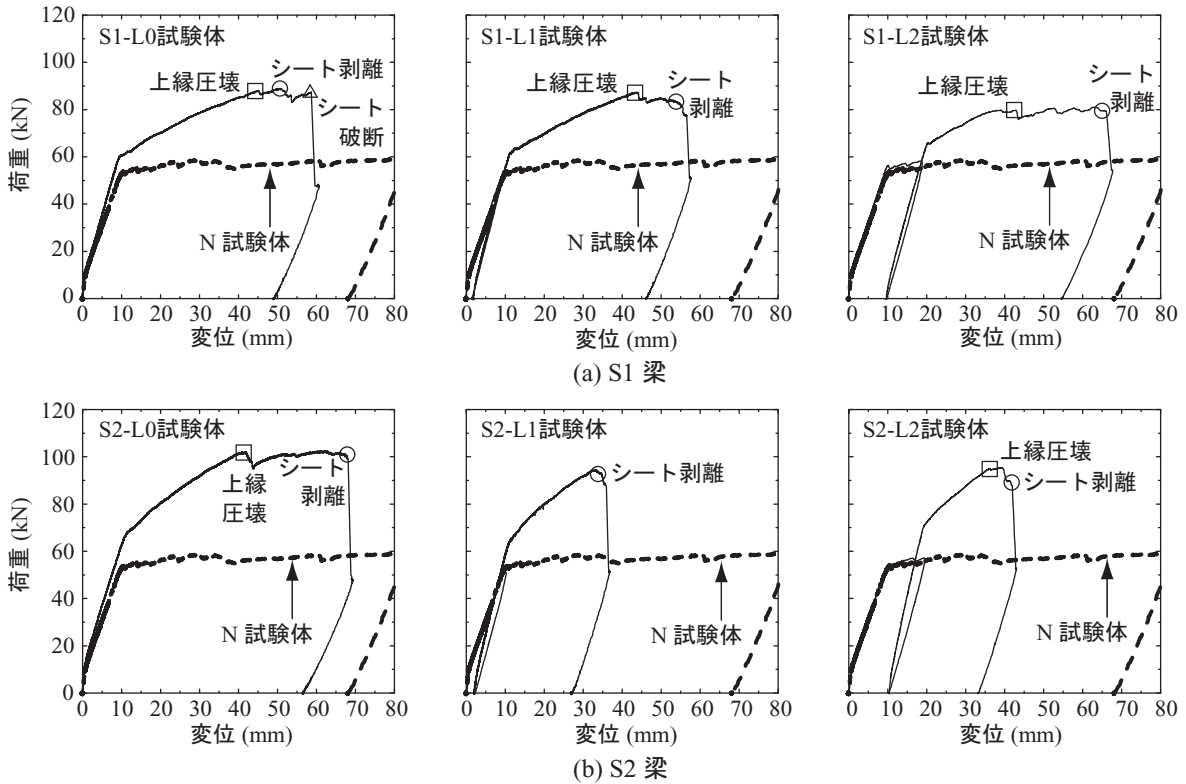


図-2 各試験体の荷重-変位関係に関する実験結果

表-4 実験結果および計算結果の一覧

試験体名	降伏荷重			最大荷重			実験結果の破壊性状
	計算結果 P_{yc} (kN)	実験結果 P_{ye} (kN)	荷重比 P_{ye} / P_{yc}	計算結果 P_{uc} (kN)	実験結果 P_{ue} (kN)	荷重比 P_{ue} / P_{uc}	
N	54.5	53.6	0.98	54.7	59.4	1.09	上縁コンクリート圧壊
S1-L0	59.4	60.5	1.02	78.9	88.8	1.13	曲げ圧壊型
S1-L1		61.6	1.04		87.4	1.11	曲げ圧壊型
S1-L2		65.6	1.10		81.3	1.03	曲げ圧壊型
S2-L0	65.2	67.8	1.04	96.0	102.6	1.07	曲げ圧壊型
S2-L1		65.0	1.00		94.5	0.98	剥離破壊型
S2-L2		71.1	1.09		95.7	1.00	曲げ圧壊型

計算結果の破壊性状は全てコンクリート圧壊

いえる。また、この場合には、主鉄筋および上縁コンクリートともに、荷重レベル1の場合に比較して大きなひずみが残留していることが分かる。なお、事前荷重後にはRC梁の側面に曲げひび割れの発生が認められ、事前荷重レベルが大きい場合ほど、ひび割れ本数やひび割れ幅が大きくなる傾向にある。

3.2 荷重-変位関係

図-2には、各試験体の荷重-変位関係に関する実験結果を事前荷重時の結果および無補強試験体の結果と併せて示している。また、表-4には、参考のため実験結果および後述の断面分割法による計算結果を一覧にして

示している。

図より、いずれの補強試験体も無補強試験体に比較して部材の降伏荷重(以後、部材降伏荷重)が大きく、かつ降伏後においては剛性勾配の低下を伴うものの、変位の増加に伴い荷重が増大していることが分かる。なお、部材降伏荷重、部材降伏後の剛性勾配および最大荷重は、シート補強量の多いS2梁の方がS1梁よりも大きくなる傾向にある。また、S1梁では事前荷重レベルによらず、上縁コンクリート圧壊(図中、□印)後、シート剥離に至る性状を示している。

一方、S2梁において事前荷重のないS2-L0試験体では、最大荷重時に上縁コンクリートが圧壊し、その後シート

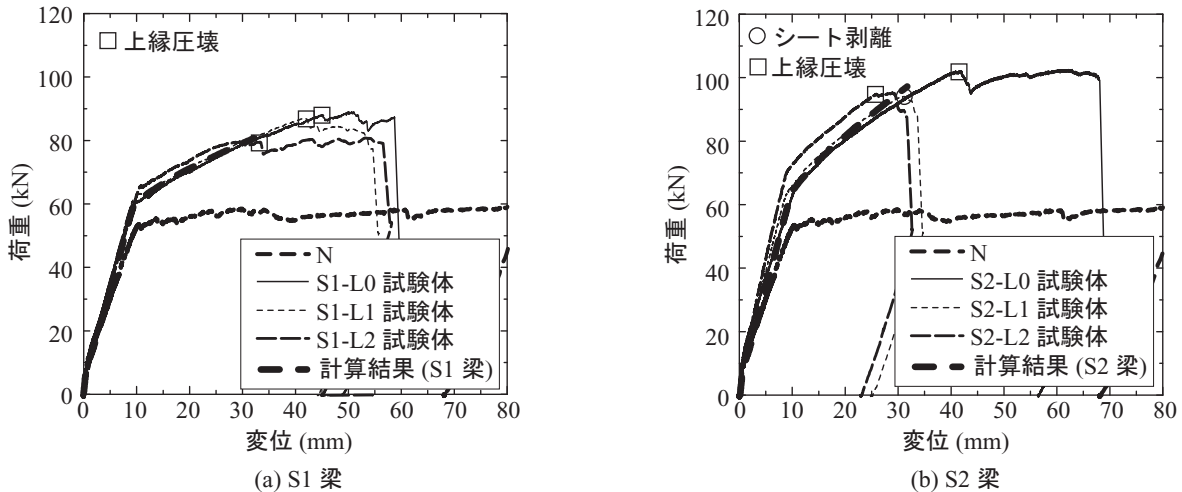


図-3 荷重-変位関係に関する実験および計算結果の比較図

の剥離を生じている。事前荷重レベルの小さい S2-L1 試験体は、S2-L0 試験体の場合よりも小さな荷重および変位でシートが剥離して終局に至っている。一方、事前荷重レベルの大きい S2-L2 試験体は、上縁コンクリートの圧壊に伴って荷重が低下し、その後シート剥離を生じている。

図-3には、荷重-変位関係に関する実験および計算結果の比較図を事前荷重による残留変位を考慮せずに、S1 および S2 梁について整理して示している。なお、計算結果は、前述の各材料特性値を用い土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に準拠して、断面分割法により算出したものである。また、計算では FRP シートとコンクリートとの完全付着を仮定し、上縁コンクリートの圧縮ひずみが終局圧縮ひずみ ($3,500 \mu$) に至った時点を終局としている。

図より、S1/2 梁ともに、部材降伏までの剛性勾配 (以後、初期剛性) は、事前荷重レベルに関わらず荷重履歴を有しない S1/2-L0 試験体と同等程度であることが分かる。すなわち、荷重履歴を有する RC 梁の初期剛性は、AFRP シート補強によって無損傷のシート補強 RC 梁と同等程度にまで改善されるものと考えられる。

部材降伏後の結果から、S1 梁は事前荷重レベルによらず計算耐力および計算終局変位と同程度かそれを上回った後、上縁コンクリートが圧壊して終局に至っていることが分かる。従って、いずれの試験体も曲げ圧壊型で終局に至っており、表-1 の予測結果と対応しているといえる。ただし、上縁コンクリートの圧壊は、事前荷重レベルが大きい場合ほど小さな変位で生じている。これは、表-3 に示しているように、事前荷重レベルが大きい場合ほど上縁コンクリートの残留ひずみが大きいためと考えられる。

一方、S2 梁において、事前荷重のない S2-L0 試験体は曲げ圧壊型の性状を示しているものの、事前荷重した S2-L1/2 試験体は、計算耐力および計算終局変位と同程度

かそれを下回る状態で、それぞれシート剥離および上縁コンクリートの圧壊により終局に至っている。これは、S2-L1 試験体では、事前荷重時に生じたひび割れが前述のピーリング作用によるシート剥離を促進したものと推察される。従って、破壊形式が境界型と予測される場合には、無損傷の状態では曲げ圧壊型で終局に至るものでも、荷重履歴を有する場合には破壊形式が剥離破壊型に移行する可能性があることに留意する必要がある。また、S2-L2 試験体では、表-3 に示しているように、事前荷重により上縁コンクリートに $1,000 \mu$ 程度の大きな圧縮ひずみが残留しているため、上縁コンクリートが早期に圧壊したものと考えられる。

3.3 AFRP シートの軸方向ひずみ分布

図-4には、各試験体における AFRP シートの軸方向ひずみ分布に関する実験および計算結果の比較図を 図-3 を参考に 1) 部材降伏時、2) 計算部材降伏時および終局時の中間の変位時 (以後、中間時点)、3) 終局変位時について示している。なお、計算結果は FRP シートとコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法結果を用いて算出したものである。なお、終局変位時は S2-L2 試験体を除く試験体では計算終局変位時のひずみ分布を示し、S2-L2 試験体では計算終局変位に至る前にシート剥離により終局に至っているため実測終局変位時のひずみ分布を示している。

図より、事前荷重していない S1/2-L0 試験体の実験結果は部材降伏時から終局変位時まで計算結果と良く対応していることが分かる。このことより、荷重履歴のない試験体ではシートとコンクリートとの付着は終局変位時まで十分に確保されているものと判断される。

事前荷重を行った S1/2-L1, S1/2-L2 試験体では中間時点までは実験および計算結果が良く対応している。しかしながら、終局変位時における S1/2-L1 試験体の等曲げ区間の実測ひずみは計算ひずみよりも小さく、主鉄筋降伏領

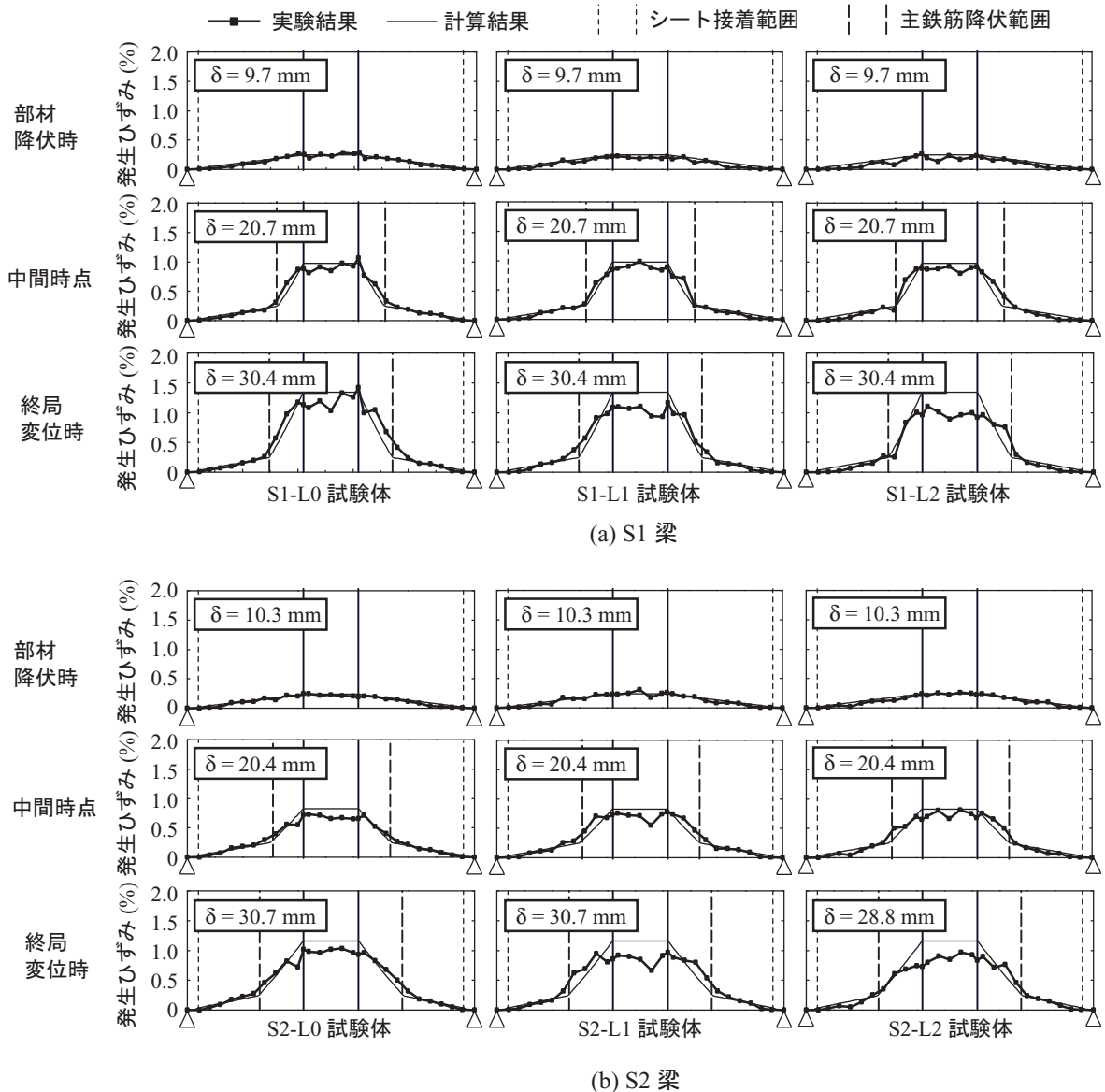


図-4 AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状に関する実験および計算結果の比較

域外においても大きなひずみが発生している。S1-L1 試験体で等曲げ区間の実測ひずみが小さいのは、事前荷重により圧縮ひずみが残留し、早期に圧縮破壊したためと考えられる。一方、S2-L1 試験体で等せん断区間におけるひずみが計算値よりも大きいのは、ピーリング作用による部分剥離が進展したためであり、早期にシート剥離で終局に至ったことと対応している。

また、事前荷重レベルの大きい S1/2-L2 試験体の終局変位時における等曲げ区間の実測ひずみは、ともに計算ひずみよりも小さい。これは、S1-L1 試験体と同様に事前荷重により上縁コンクリートに大きな圧縮ひずみが残留したため早期に圧壊したものと考えられる。

以上から、事前荷重の有無が終局変位時におけるシートのひずみ分布性状に及ぼす影響は顕著であり、曲げ圧壊型の S1 梁および S2-L2 試験体では等曲げ区間のひずみレ

ベルに、剥離破壊型の S2-L1 試験体では等せん断区間のひずみ分布に顕著な影響が現れることが明らかとなった。

3.4 破壊性状

写真-1 には、図-4 に示した終局変位時における RC 梁側面のひび割れ性状を示している。写真より、S1/2 梁ともに事前荷重レベルが大きい場合ほどひび割れの発生および開口が顕著であることが分かる。特に、下縁かぶりコンクリートにおいては、角度の浅い斜めひび割れが発生・開口しており、そのひび割れの先端部がシートを押し下げるピーリング作用によってシートが部分剥離していることが分かる。

なお、S2-L2 試験体では、ピーリング作用によるシートの部分剥離と上縁コンクリートの圧壊が確認できる。実験時には、シートの部分剥離範囲が拡大する過程において上縁コンクリートが圧壊し、荷重が低下したことを確

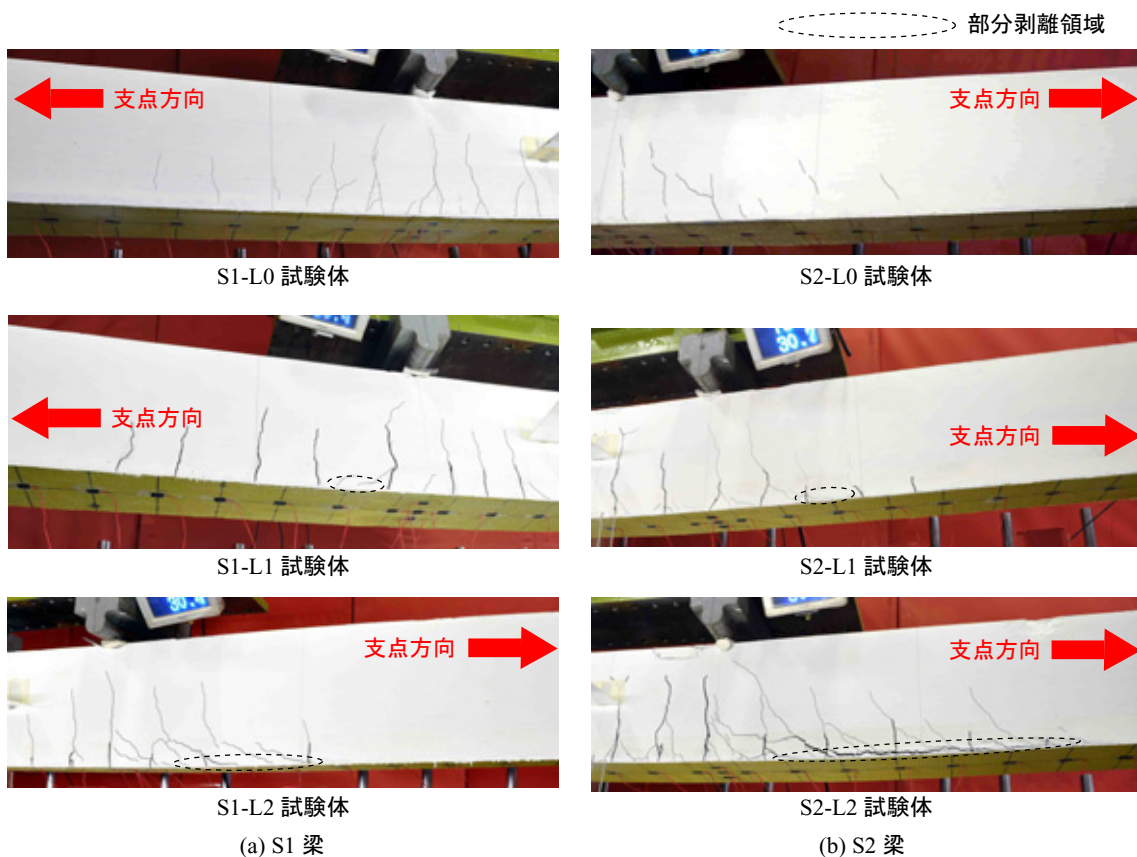


写真-1 各補強試験体におけるAFRPシートの剥離進展状況

認している。

4. まとめ

本研究では、荷重履歴を有するRC梁のAFRPシート接着による曲げ補強効果を検討することを目的に、事前荷重により曲げひび割れや残留変位等の損傷を与えたRC梁にAFRPシートを接着して静的4点曲げ荷重試験を行った。本実験により得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) RC梁をAFRPシートで補強した際の初期剛性や降伏荷重に及ぼす事前荷重の有無や事前荷重レベルの影響は極めて小さい。
- 2) 曲げ圧壊型と予想された梁は、事前荷重レベルが大きい場合ほど早期に上縁コンクリートの圧壊に至る傾向にある。これは、事前荷重により上縁コンクリートに大きな圧縮ひずみが残留したためと考えられる。ただし、事前荷重レベルによらず荷重比は1.0以上であり、無損傷を想定した計算値は安全側の評価を与えている。
- 3) 境界型と予測された梁は、無損傷の場合には曲げ圧壊型を示すものの、荷重履歴を有する場合には剥離破壊型に移行する場合がある。ただし、事前荷重レベルが大きい場合には、上縁コンクリートの残留ひずみの影響により、シートの部分剥離が拡大する過

程において上縁コンクリートが圧壊して終局に至る。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683/V-52, pp. 47-64, 2001
- 2) Kishi, N., Mikami, H., Matsuoka, K. G., and Kurihashi, Y.: Failure behavior of flexural strengthened RC beams with AFRP sheet, Proceedings of FRPRCS-5, Cambridge, England, pp.87-95, 2001
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: FRPシート曲げ補強RC梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 711/V-56, pp. 91-109, 2002
- 4) 岳尾弘洋, 松下博通, 佐川康貴, 牛込敏幸: せん断スパン比を変化させたCFRP補強梁の曲げ荷重実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp. 205-210, 1999
- 5) Naaman, A. E., Park, S. Y., Lopez, M. M., and Till, R. D.: Parameters Influencing the Flexural Response of RC Beams Strengthened using CFRP Sheets, Proceedings of FRPRCS-5, Cambridge, England, pp.117-125, 2001
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2007