

論文 **せん断キー配置間隔を変化させた AFRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷性状**

栗橋 祐介^{*1}・三上 浩^{*2}・河本 幸子^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨：本研究では，AFRP 板を用いた RC 梁の水中接着補強工法における接着性能改善策の提案を目的として，AFRP 板接着部のコンクリート表面にせん断キーを等間隔に配置し，その配置間隔が曲げ補強効果に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果，1) せん断キーが AFRP 板の付着性能向上に有効に作用する場合には，部分剥離の起点となる斜めひび割れが分散して発生する傾向にあること，2) せん断キー配置間隔が小さい場合には多くの曲げひび割れが誘発されて接着樹脂が損傷し早期の全面剥離に至りやすいこと，3) 接着性能改善のための適切なせん断キー配置間隔比は 0.6～0.9 程度であること，などが明らかになった。

キーワード：RC 梁，AFRP 板，せん断キー，水中接着曲げ補強，水中接着樹脂

1. はじめに

近年，地震規模の拡大や走行車両の大型化などに起因する既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐力不足に伴い，その補強工事が盛んに行われている。補強を要する構造物には，河川橋脚等の水中構造物も含まれており，この種の構造物の場合には，事前に補強対象部位を乾燥状態にするための仮締切工事を行う必要がある。このように，水中構造物の補強工事には陸上に比べ膨大なコストが必要となるため，施工が十分に進捗していないのが現状である。従って，仮締切が不要で水中での施工が可能な補強工法を開発することが急務となっている。

著者らは，これまでの研究において，アラミド繊維シートにエポキシ系接着樹脂を含浸硬化して製作したアラミド繊維板 (以後，AFRP 板) を水中硬化型接着樹脂を用いて接着補強する工法を提案している。既往の研究では，提案の工法を用いて曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行っている¹⁾。その結果，提案工法により RC 梁の曲げ耐力を向上可能であるものの，鉄筋降伏後の比較的荷重の大きい領域における AFRP 板の接着性能は，気中接着の場合よりも劣ることを確認している。また，水中接着時における AFRP 板の接着性能改善策として，RC 梁の接着面にせん断キーを設ける方法を提案し，その接着性能改善効果や適切なせん断キー配置間隔に関する検討を行っている²⁾。

しかしながら，これまでの研究は，AFRP 板の剥離よりも上縁コンクリートの圧壊が先行する「曲げ圧壊型」の梁を対象に検討されており，AFRP 板の剥離が先行する「剥離破壊型」の梁を対象とした検討は行っていない。特に，「剥離破壊型」の場合には，設計計算値を下回る荷重で終局に至るため，安全率の確保には十分な配慮が必要であるものと考えられる。

表－1 試験体一覧

試験体名	せん断キー配置間隔	備考
S0	-	せん断キー無し
S50	50	-
S75	75	-
S100A	100	せん断キーをスターラップ位置に配置
S100B		せん断キーをスターラップ間隔の中央に配置
S150	150	-
S200	200	-

表－2 AFRP 板の力学的特性値 (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
830	1176	0.572			

このような観点より，本研究では AFRP 板を用いた RC 梁の水中接着補強工法における適切な接着性能改善策の提案を目的として，剥離破壊型の AFRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁を対象に，せん断キー配置間隔を 7 種類に変化させた静的 4 点曲げ載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

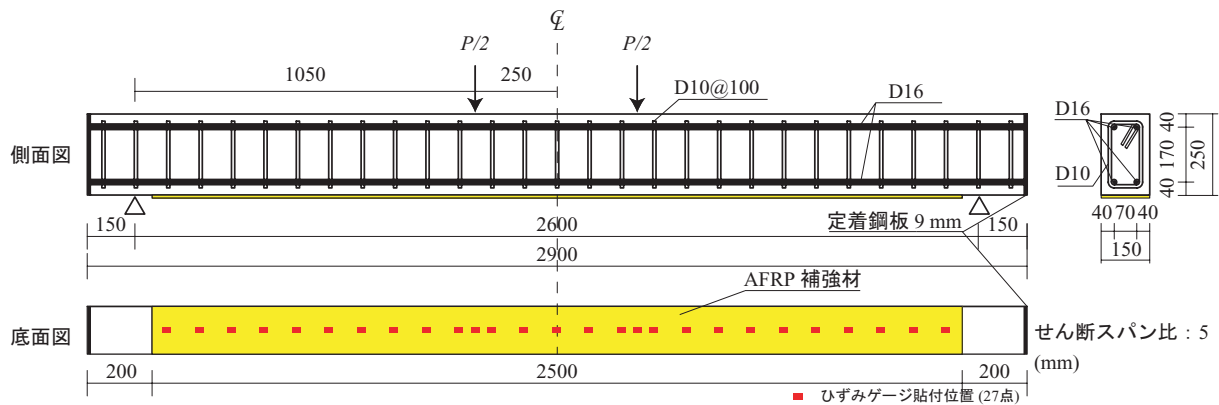
表－1 には，本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は，せん断キーの配置間隔および配置位置を変化させた水中接着曲げ補強 RC 梁全 7 体である。試験体名は英文字の S とせん断キー配置間隔 (mm) の組み合わせとして示している。また，試験体名末尾の A および B は，それぞれせん断キーをスターラップ位置に配置

*1 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博 (工) (正会員)

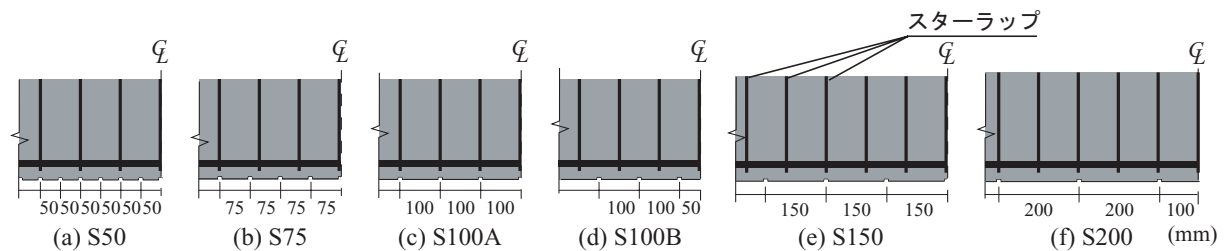
*2 三井住友建設 (株) 技術研究開発本部 技術開発センター 上席研究員 博 (工) (正会員)

*3 日本シビックコンサルタント (株) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)



図－１ 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要



図－２ せん断キー配置状況

表－３ 水中接着樹脂の力学的特性値

圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	伸び率 (%)
74.4	33.1	16.4	1,627	1.0

するケースとスターラップ間隔中央に配置するケースを示している。

図－１には、試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。本実験で使用した試験体は、断面寸法 150 × 250 mm、純スパン長 2.6 m の複鉄筋 RC 梁である。上下端鉄筋には D16 (SD345) を 2 本ずつ配置している。スターラップには D10 (SD345) を用い 100 mm 間隔で配置している。表－２に、AFRP 板の力学的特性値を示す。AFRP 板は、目付量 415 および 830 g/m² のアラミド繊維シートを 2 枚重ねて、目付量 1245 g/m² としたものにエポキシ系樹脂を含浸硬化させ、1 枚の板状に成形した。AFRP 板の幅は 150 mm であり、梁軸方向の補強範囲はスパン中央部から両支点の 50 mm 手前までとしている。

図－２には、コンクリート表面のせん断キーの配置状況を示している。せん断キーの幅および深さは、せん断キーの配置間隔や配置位置によらず、それぞれ 10 mm、5 mm と設定した。S50/75/150 試験体は、RC 梁の中央にせん断キーを配置し、中央から等間隔にそれぞれ 50、75 および 150 mm 毎にせん断キーを配置した。S100A 試験体は、スターラップ直下にせん断キーを 100 mm 間隔で配置し、S100B 試験体は、各スターラップの中間に配置して

いる。S200 試験体は、試験体中央から左右に 100 mm の地点を起点として、200 mm 毎にせん断キーを配置した。

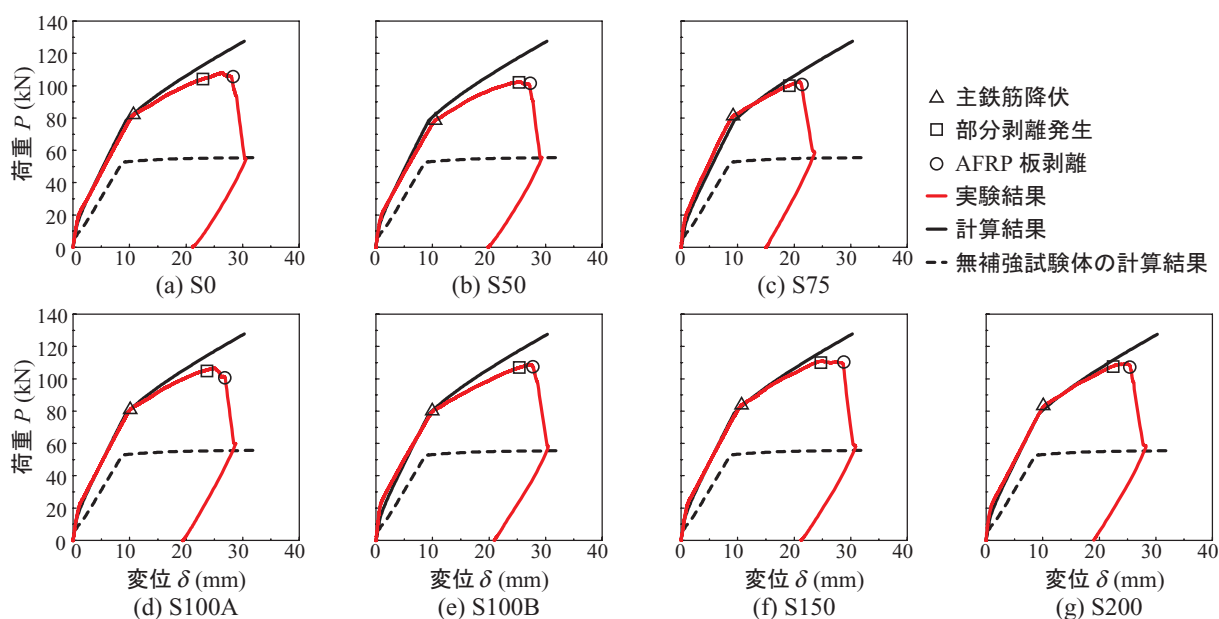
実験時におけるコンクリートの圧縮強度は $f'_c = 35.1$ MPa であり、軸方向鉄筋の降伏強度は $f_y = 380$ MPa であった。

表－３には、使用した水中接着樹脂の力学的特性値の一覧を示している。本研究に用いた水中接着樹脂は、2 種混合型のエポキシ系接着樹脂であり、主剤、硬化剤ともにパテ状である。また、水中接着樹脂の接着性能は、土木学会「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」³⁾における「連続繊維シートとコンクリートの接着試験方法（案）」に準拠して評価しており、接着材料としての性能を満足していることを確認している²⁾。

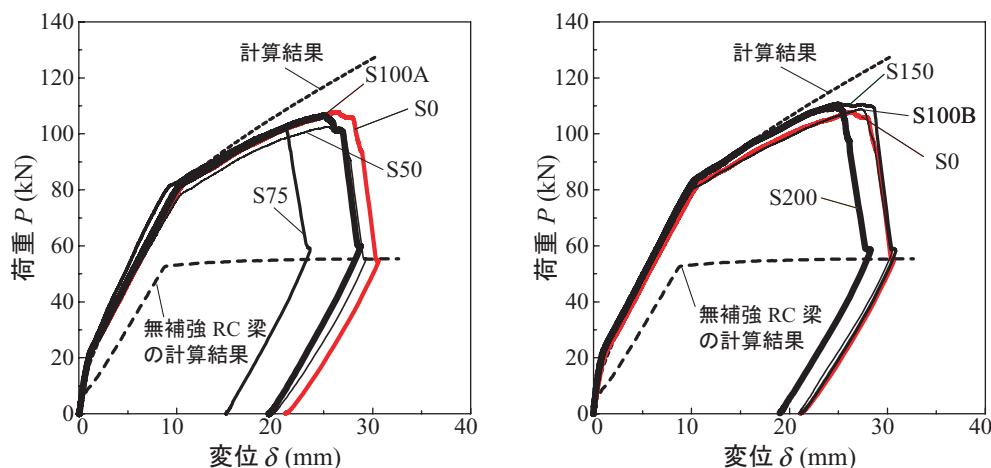
2.2 RC 梁の水中接着補強方法および実験方法

水中接着補強は、水中接着樹脂を気中で一体化させた AFRP 板を大型水槽内に設置した RC 梁の所定の位置に配置し、圧着した状態で 5 日間程度養生する工程で実施した。なお、既往の研究結果³⁾により、接着面を異形化することにより AFRP 板とコンクリートの付着性能が向上することが明らかになっている。このことから、AFRP 板の接着面には、5 号珪砂による砂付処理を施した。また、コンクリート表面には、レイタンス除去のためショットブラスト処理（処理深さ 1 mm 程度）を施している。

載荷実験は、RC 梁を単純支持状態で設置し、容量 200 kN の油圧ジャッキを用いて 4 点曲げ載荷試験法により行った。なお、載荷試験は、試験体を水から引き上げた後、直ちに行うこととしている。本実験の測定項目は、静荷重測定用ロードセルによる載荷荷重、非接触型レーザ



図－3 各試験体における荷重－変位関係の実験結果と計算結果の比較



図－4 各試験体における荷重－変位関係の実験結果と計算結果のまとめ

式変位計によるスパン中央点変位およびひずみゲージによるシート各点の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC梁のひび割れやAFRP板の剥離状況を連続的に撮影し、実験終了後には、RC梁のひび割れを撮影した。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重－変位関係

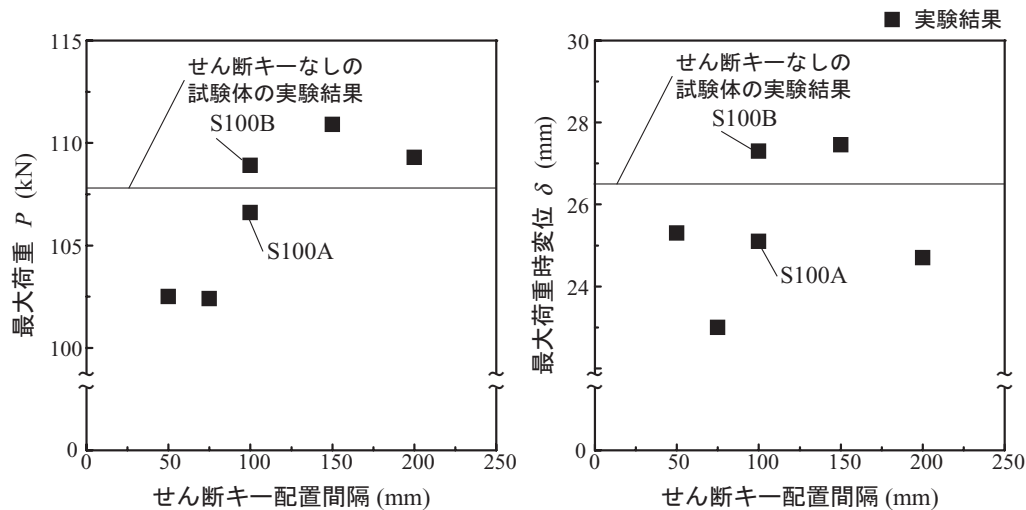
図－3には、各試験体の荷重－変位関係に関する実験結果と計算結果および無補強RC梁の計算結果を示している。計算結果は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に準拠して断面分割法により算出したものである。なお、計算ではAFRP板とコンクリートの完全付着を仮定している。水中接着樹脂は前述の弾性係数および引張強度を用いて完全弾性体と仮定した。なお、水中接着樹脂の厚さは実測平均値2.6mmとした。

図より、各試験体の実験結果は、主鉄筋降伏時までは

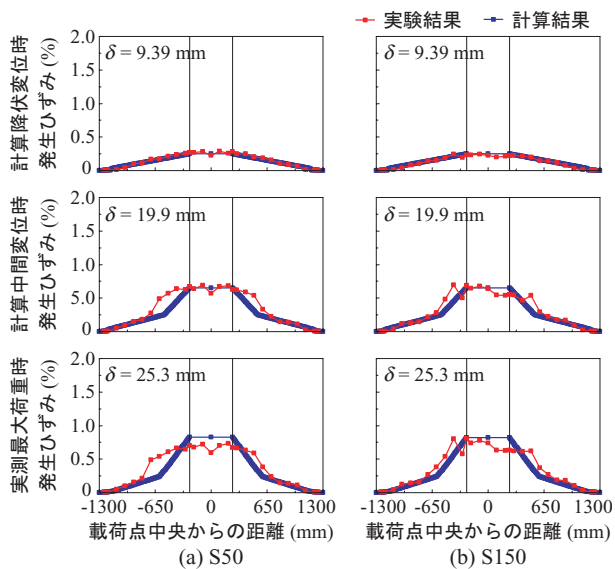
計算結果とほぼ対応しており、その後計算結果よりも小さな剛性勾配を示し、最終的には計算耐力を下回る荷重でAFRP板の剥離により終局に至っていることが分かる。このことから、各補強RC梁の破壊形式は、剥離破壊型であることが分かる。なお、終局時の破壊性状は、いずれの試験体も載荷点近傍の下縁かぶりコンクリート部で発生した斜めひび割れがAFRP板を下方へ押し出し引き剥がすピーリング作用によるAFRP板の剥離破壊であった。

図－4には、各試験体の実験結果を直接比較して示している。図は、実験結果が比較的類似の性状を示しているため、S50/75/100A試験体とS100B/150/200試験体に分けて示すこととした。また、これらの結果は、S0試験体の実験結果と断面分割法による計算結果とを比較する形で示している。

図より、変位 $\delta = 20$ mm程度まではいずれの試験体もほぼ同程度の耐荷性状を示しているものの、S50/75/100A



図－5 各試験体における最大荷重および最大荷重時変位とせん断キー配置間隔の関係



図－6 S50/150 試験体の AFRP 板軸方向ひずみ分布図

試験体の最大荷重や最大荷重時変位は S0 試験体のそれを下回っていることが分かる。一方、S100B/150/200 試験体の最大荷重や最大荷重時変位は S0 試験体の値を多少上回っている。

図－5 には、このような傾向を明確にするために、最大荷重および最大荷重時変位とせん断キー配置間隔との関係を整理して示している。図より、最大荷重および最大荷重時変位ともに、S100B および S150 試験体で大きいことが分かる。このことから、本実験に用いた試験体における最適なせん断キー配置間隔は、100～150 mm 程度であるものと考えられる。

3.2 ひずみ分布性状

図－6 には、AFRP 板の軸方向ひずみ分布性状の一例として、S50 および S150 試験体に関する計算主鉄筋降伏時、中間変位時および S50 試験体の最大荷重時における AFRP 板の軸方向ひずみ分布性状の実験結果を計算結果と比較して示している。ここで、中間変位とは、計算主鉄筋降

伏変位と計算終局変位の中間の変位である。なお、計算結果は AFRP 板とコンクリートの完全附着を仮定して算出した断面分割法の結果に基づいて算出したものである。

図より、計算降伏変位時の実測ひずみ分布は、計算ひずみ分布とよく対応していることがわかる。また、中間変位時では S150 試験体の実測ひずみは計算結果と比較的良好に対応しているものの、S50 試験体の実測ひずみは、等せん断力区間の載荷点近傍において計算ひずみよりも大きな値を示している。このような傾向は実測最大荷重時においてさらに顕著に示されている。これらのことから、S50 試験体の AFRP 板は、S150 試験体の場合に比べて、早期に部分剥離が生じているものと考えられる。

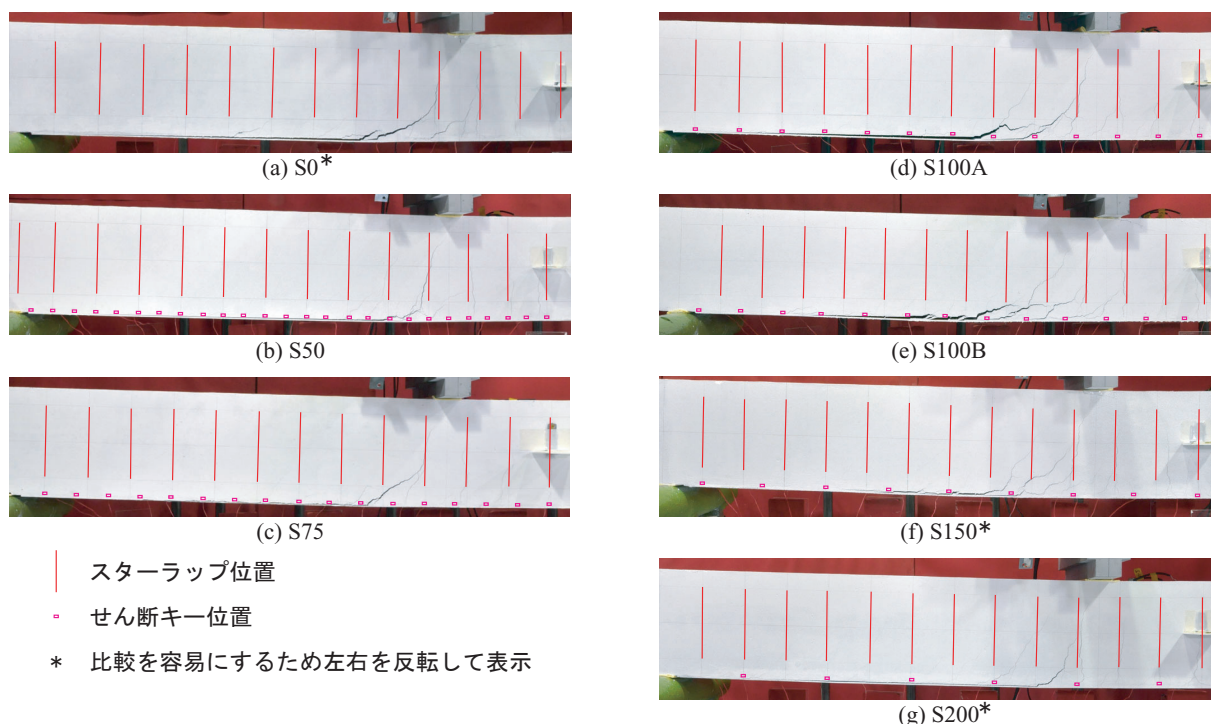
3.3 ひび割れ性状

写真－1 には、各試験体の終局直前のひび割れ性状を示している。

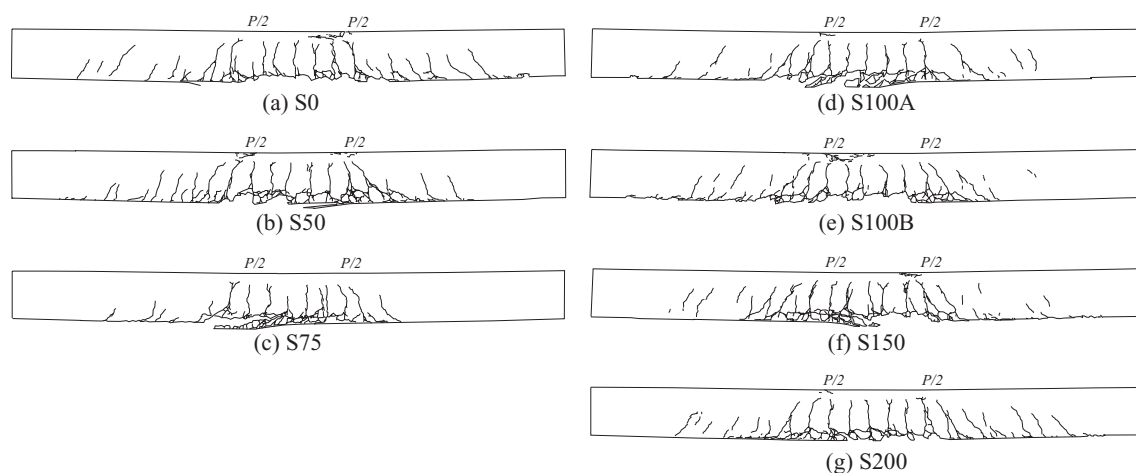
写真より、いずれの試験体も下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れが AFRP 板を下方に押し出して引き剥がすピーリング作用により部分剥離を生じていることがわかる。また、せん断キーを配置した試験体は、総じて載荷点近傍のせん断キー付近から斜めひび割れが発生していることがわかる。

S50/75 試験体の場合には、S0 試験体の場合と同様に、1 本の斜めひび割れが起点となって部分剥離が発生させている。これに対し、S100A/100B/150 試験体の場合には、2～3 本の斜めひび割れから部分剥離が発生している。これは、最も載荷点側の斜めひび割れの発生・開口により部分剥離が発生した後、せん断キー位置で剥離の進展が抑制され、全面剥離には至らず、支点側に新しい斜めひび割れが発生したことによるものである。

前述のように、S50/75 試験体において、斜めひび割れの分散効果が発揮されなかったのは、せん断キー間隔が小さいため、多数の曲げひび割れが発生して水中接着樹脂が損傷し、シートの全面剥離を誘発したためと推察さ



写真－１ 終局直前における各試験体のひび割れ性状



写真－２ 実験終了後における各試験体のひび割れ性状

れる。また、このことがこれらの試験体の耐荷性能が低いことに関連しているものと考えられる。

S200 試験体の場合には、S0 試験体と同様に 1 本の斜めひび割れが部分剥離の起点となっている。これは、せん断キーが有効に作用していないことを示唆しており、耐荷性能が S150 試験体よりも低いことを裏付けるものと考えられる。

S100A と S100B 試験体を比較すると、S100A 試験体の方がかぶりコンクリート部分に発生しているひび割れの数が少なく、大きく開口していることがわかる。一方、S100B 試験体の場合には、下縁かぶりコンクリート部においてひび割れが分散して発生していることがわかる。このことは、前述の荷重－変位関係において、S100A よりも S100B 試験体の方がより高い補強効果を示している

ことと対応している。なお、S100A 試験体でひび割れが集中、開口したのは、せん断キーの配置位置がスターラップの直下であり、かぶりの薄い部分にせん断キーが配置されているためと考えられる。

写真－２には、実験終了後における各 RC 梁のひび割れ性状を示している。図より、いずれの試験体も等曲げ区間近傍の下縁かぶりコンクリートの著しい剥落を伴って AFRP 板が剥離していることが分かる。また、等せん断力区間の下縁かぶりコンクリートのひび割れ性状を見ると、S100B および S150 試験体の場合において、微細なひび割れが多数発生する傾向にあることが分かる。これは、せん断キーが AFRP 板の剥離に対して効率的に抵抗したため、損傷がかぶりコンクリート部に及んだことによるものと推察される。

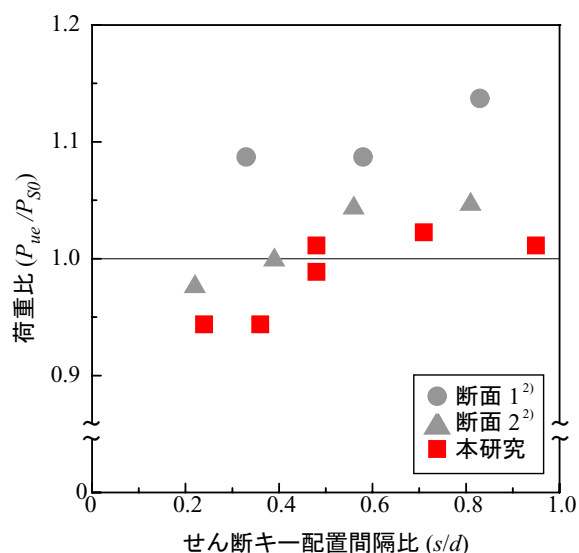


図-7 荷重比とせん断キー配置間隔比との関係

3.4 せん断キーによる耐荷性能向上効果

図-7には、本実験結果および既往の実験結果²⁾におけるせん断キー配置間隔と耐力向上効果との関係を同一の指標で整理するため、縦軸に荷重比、横軸にせん断キー配置間隔比をとって整理した。ここで、荷重比とは実測最大荷重 P_{ue} をせん断キーを配置していない試験体の実測最大荷重 P_{S0} で除したものである。また、せん断キー配置間隔比とはせん断キーの配置間隔 s を有効高さ d で除したものである。

図より、各試験体の荷重比は、梁の断面寸法によらずせん断キー配置間隔比が大きい場合に大きくなる傾向にあることがわかる。また、せん断キー配置間隔比が0.5以上の場合において、荷重比が1.0を超えていることがわかる。このことから、AFRP板の付着性能を確実に向上させるためには、せん断キー配置間隔比を0.6程度以上とする必要があるものと考えられる。なお、本研究における荷重比が全般的に過去の実験結果よりも小さいのは、過去の実験では「曲げ圧壊型」のAFRP板水中接着曲げ補強RC梁を対象としていたのに対し、本研究では「剥離破壊型」の梁を対象としているためである。

また、図より、せん断キー配置間隔比が小さい場合には、曲げひび割れが多数発生して接着樹脂が著しく損傷するため荷重比が小さくなることがわかる。一方、せん断キー配置位置が大きい場合には、せん断キーが配置されていない場合と同程度の荷重比となる傾向にあることがわかる。

また、せん断キー配置間隔比が1.0以上の場合には、その間隔が梁の有効高さ以上となる。そのため、斜めひび割れに起因するシート剥離の進展を抑制できないものと推察される。従って、せん断キーの配置間隔比は1.0未満とすることが適切であるものと考えられる。

前述のように、AFRP板の剥離は、ピーリング作用によ

り発生しているため、せん断キーはピーリング作用の要因となる下縁かぶりコンクリート発生位置に適切な間隔で配置する必要がある。本実験を含めた著者らの実験研究から、適切なせん断キー配置間隔は、RC梁の有効高さ d の6～9割程度であるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では水中接着補強工法における接着性能改善策の提案を目的として、「剥離破壊型」のAFRP板曲げ補強RC梁のコンクリート表面にせん断キーを設け、その補強効果を静載荷実験により検討した。本研究により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) せん断キーがAFRP板の接着性能向上に有効に作用する場合には、部分剥離の起点となる斜めひび割れが分散して発生する傾向にある。
- 2) せん断キー配置間隔が小さい場合には接着樹脂に多数のひび割れが発生し、樹脂が著しく損傷することにより、AFRP板の早期全面剥離を誘発しやすい。
- 3) 接着性能改善のための適切なせん断キー配置間隔は、補強試験体の破壊型式によらず梁の有効高さ d の6～9割程度である。

謝辞:

本研究は、平成24年度日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究(B) 課題番号: 24760356, 研究代表者: 栗橋祐介(室蘭工業大学))の援助により行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 三上 浩, 岸 徳光, 栗橋祐介: 水中硬化型接着樹脂とAFRP版を用いて水中補強したRC梁の静載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.1327-1332, 2010.
- 2) 栗橋祐介, 三上 浩, 鹿嶋辰紀, 岸 徳光: AFRP板水中接着曲げ補強RC梁の耐荷性状に及ぼすせん断キー配置間隔の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013
- 3) 梁の耐荷性状に及ぼす補強材表面処理の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1303-1308, 2011
- 4) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, 2000.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2007.