

# 論文 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

栗橋 祐介<sup>\*1</sup>・三上 浩<sup>\*2</sup>・鹿嶋 辰紀<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

**要旨：**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、形状寸法が異なる2種類のRC梁に対して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)せん断キーを配置しない場合にはコンクリートと水中接着樹脂との界面で剥離するのに対して、せん断キーを配置した場合には水中接着樹脂とAFRP板との界面に剥離が移行すること、2)断面寸法によらずせん断キー間隔比を0.75程度にすることにより、曲げ補強効果が効率的に発揮されること、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、連続繊維シート(以後FRPシート)接着工法による耐震補強工事が数多く採用されている。これは、耐震設計法の改定に伴い、既設鉄筋コンクリート(RC)橋脚を対象とした補強工事が盛んに行われているためである。しかしながら、耐震補強を必要とする構造物は陸上の橋脚だけではなく、当然のことながら河川橋脚も含まれる。耐震補強工法は多岐にわたるが、いずれの補強工法においても河川橋脚を対象にした場合には、橋脚基部周辺に仮締切工事を行い、施工部を予め乾燥状態にする必要がある。従って、河川橋脚の耐震補強工事は陸上での補強工事に比較して膨大なコストが必要となることから、限定的にしか行われていないのが現状である。

そのため著者らは、仮締切が不要で、水中での施工が可能なFRPシートにエポキシ系樹脂を含浸硬化したAFRP板を水中接着樹脂を用いて水中接着補強する工法を考案した。なお、FRPシートはしなやかで伸び性能に優れるアラミド繊維製FRPシート(以後、AFRPシート)を使用することとしている。

既往の研究では、提案の水中接着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<sup>1)</sup>。その結果、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作用荷重の大きい領域における接着性能は気中接着補強の場合よりも劣ることが明らかになっている。そのため、著者らはせん断キーを設ける力学的手法に着目し、接着性能が改善可能であることを明らかにしている<sup>2)</sup>。しかしながら、せん断キーの配置間隔やRC梁の断面寸法が耐荷性状に及ぼす影響については明らかにされていない。

このような観点より、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、コンクリート表面にせん断キーを設ける方法に着目し、断面寸法や

せん断キー間隔を変化させたAFRP板水中接着曲げ補強RC梁の静載荷実験を行った。

## 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、断面寸法およびせん断キーの配置間隔を変化させた全9体である。梁Aおよび梁Bの断面寸法はそれぞれ150×150mm、220×220mmである。試験体名の内、第1項目はRC梁の種類(A:梁A、B:梁B)、第2項目の英文字Gに付随する数値はせん断キーの配置間隔(mm)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。梁Aは、純スパン長1.8mの複鉄筋RC梁である。上下端鉄筋にはSD345D13を2本ずつ配置し、スターラップにはSD345D6を用い50mm間隔で配置している。梁Bは、純スパン長2.4mの複鉄筋RC梁である。上下端鉄筋にはSD345D16を2本ずつ配置し、スターラップにはSD345D6を用い50mm間隔で配置している。梁の下面には梁A、Bともに表-2に示す保証耐力392kN/mのAFRP板を接着している。梁A、Bにお

表-1 試験体一覧

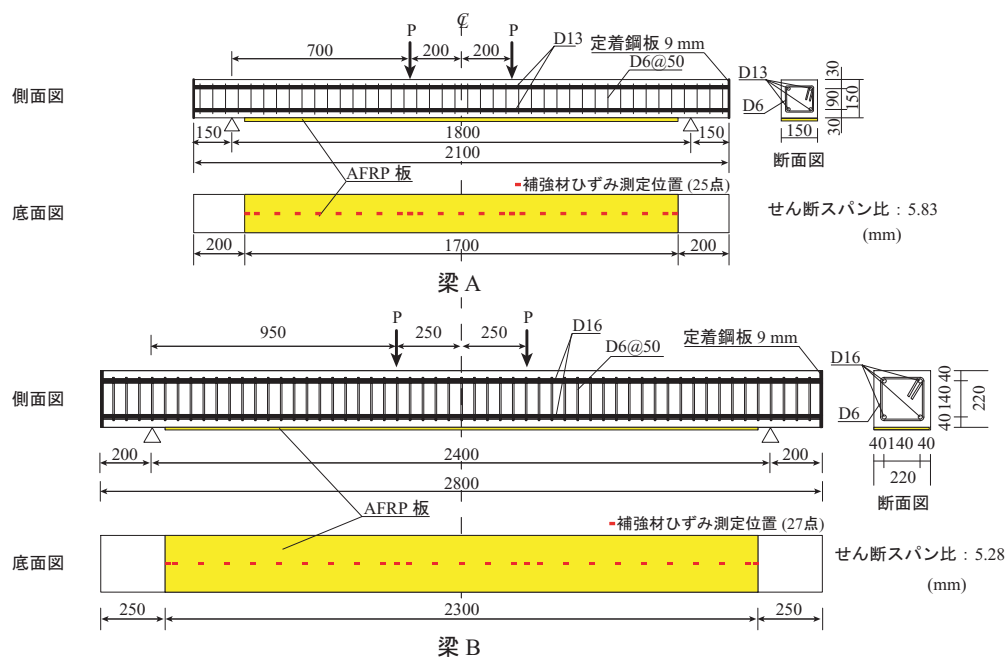
| 試験体名   | 梁の種類             | せん断キー間隔(mm) |
|--------|------------------|-------------|
| A-G0   | A<br>(150×150mm) | なし          |
| A-G30  |                  | 30          |
| A-G60  |                  | 60          |
| A-G90  |                  | 90          |
| B-G0   | B<br>(220×220mm) | なし          |
| B-G30  |                  | 30          |
| B-G60  |                  | 60          |
| B-G90  |                  | 90          |
| B-G135 |                  | 135         |

\*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 副センター長 博(工) (正会員)

\*3 北海道開発局 旭川開発建設部 (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

表－２ AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

| 繊維<br>目付量<br>(g/m <sup>2</sup> ) | 保証<br>耐力<br>(kN/m) | 厚さ<br>(mm) | 引張<br>強度<br>(GPa) | 弾性<br>係数<br>(GPa) | 破断<br>ひずみ<br>(%) |
|----------------------------------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 280                              | 392                | 0.193      | 2.06              | 118               | 1.75             |

表－３ 水中接着樹脂の力学的特性値 (公称値)

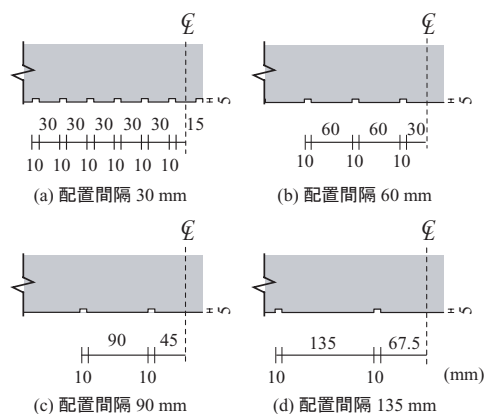
|      | 物性値 (MPa) | 測定方法         |
|------|-----------|--------------|
| 圧縮強度 | 44.4      | JIS K - 6911 |
| 曲げ強度 | 22.5      | JIS K - 6911 |
| 引張強度 | 9.3       | JIS K - 6911 |

る AFRP 板の幅は、それぞれ 150 および 220 mm であり、梁軸方向の補強範囲は梁の種類によらず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梁の種類によらず、それぞれ 10 mm、5 mm と設定した。また、梁 A、B の実験時におけるコンクリート圧縮強度はそれぞれ  $f'_c = 38.6, 34.8$  MPa であり、軸方向鉄筋の降伏強度は  $f_y = 377$  MPa であった。

表－３には、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、AFRP 板とコンクリート面との接着および養生を水中で行い、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」<sup>3)</sup>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)」に準拠して評価した。

その結果、試験は母材コンクリートの引張破壊で終了し、接着強度の平均値は 2.6 MPa であった。この値は、既設コンクリートの補修・補強用接着材料に関する一般的



図－２ せん断キー配置状況

な照査値 (1.5 MPa) を上回っている。従って、本実験に用いた水中接着樹脂は接着材料としての性能を満足しているものと言える。

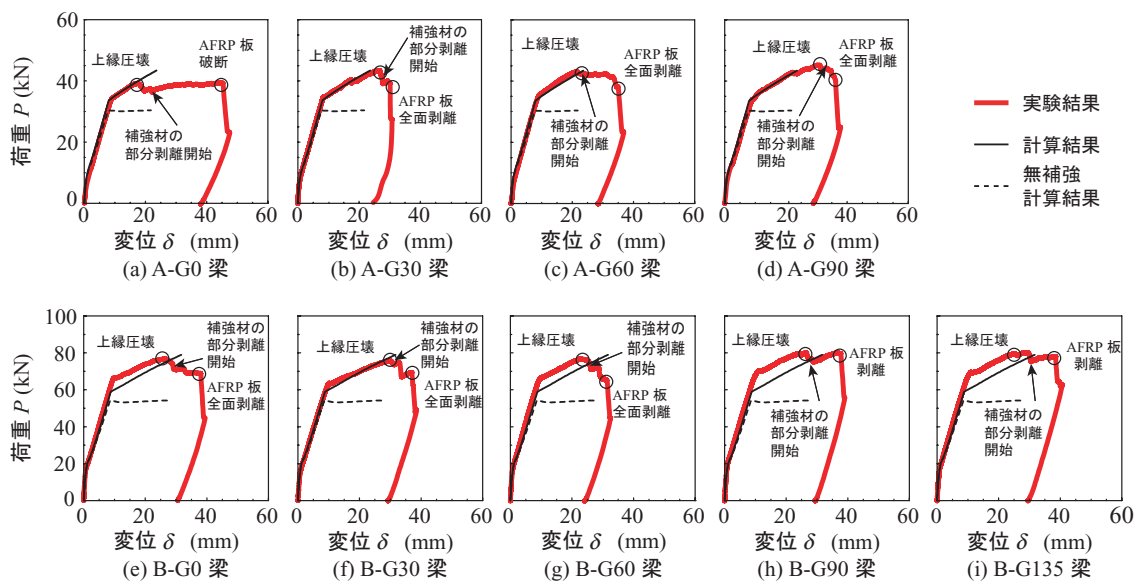
## 2.2 AFRP 板の水中接着補強法および実験方法

AFRP 板には、既往の研究結果に基づき接着界面の接着性能向上を目的に粗面処理として砂付き処理を行った。AFRP 板の砂付き処理は、板表面に汎用の含浸接着樹脂を塗布し、その上に 5 号珪砂を振り掛けて行った。なお、珪砂の使用量は 250 g/m<sup>2</sup> 程度である。また、コンクリートの接着界面処理としてはブラスト処理を行った。ブラスト処理は専用のブラストマシンを用いて深さ 1 mm 程度の処理とした。なお、ブラスト処理は気中で行った。せん断キーは RC 梁製作時に型枠底面の所定の位置に角材を配置して設けた。

RC 梁の水中接着補強は、大型の水槽 (平面寸法 3 × 1 m、深さ 0.5 m) を用いて RC 梁を水没させた状態で行った。

水中接着補強における施工手順は以下の通りである。

- 1) 水中接着樹脂を混合し、厚さ 4 mm 程度に成形する。



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

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 |
|--------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|
|        | 実験値<br>$P_{ye}$<br>(kN) | 計算値<br>$P_{yc}$<br>(kN) | 荷重比<br>$P_{ye} / P_{yc}$ | 実験値<br>$P_{ue}$<br>(kN) | 計算値<br>$P_{uc}$<br>(kN) | 荷重比<br>$P_{ue} / P_{uc}$ |           |
| A-G0   | 33.2                    | 33.6                    | 0.99                     | 40.0                    | 43.4                    | 0.922                    | 上縁圧壊後破断   |
| A-G30  | 34.9                    |                         | 1.04                     | 43.3                    |                         | 0.998                    | 上縁圧壊後剥離   |
| A-G60  | 34.2                    |                         | 1.02                     | 43.4                    |                         | 1.000                    |           |
| A-G90  | 33.1                    |                         | 0.99                     | 45.4                    |                         | 1.046                    |           |
| B-G0   | 66.4                    | 59.0                    | 1.13                     | 76.9                    | 83.2                    | 0.924                    |           |
| B-G30  | 61.8                    |                         | 1.05                     | 75.1                    |                         | 0.903                    |           |
| B-G60  | 65.4                    |                         | 1.11                     | 76.9                    |                         | 0.924                    |           |
| B-G90  | 70.1                    |                         | 1.19                     | 80.3                    |                         | 0.965                    |           |
| B-G135 | 68.3                    |                         | 1.16                     | 80.5                    |                         | 0.968                    |           |

- 2) 気中でAFRP板と成形した接着樹脂を一体化させる。
- 3) 水槽内に設置されたRC梁の接着面に2)を配置し圧着する。
- 4) 圧着した状態で5日間程度水中養生する。

なお、圧着は専用の圧着装置を用いて接着樹脂の厚さが3mm程度になるように実施した。

載荷実験は、RC梁を単純支持状態で設置し、容量500kN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。本実験の測定項目は、荷重、スパン中央点変位(以後、変位)および補強材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

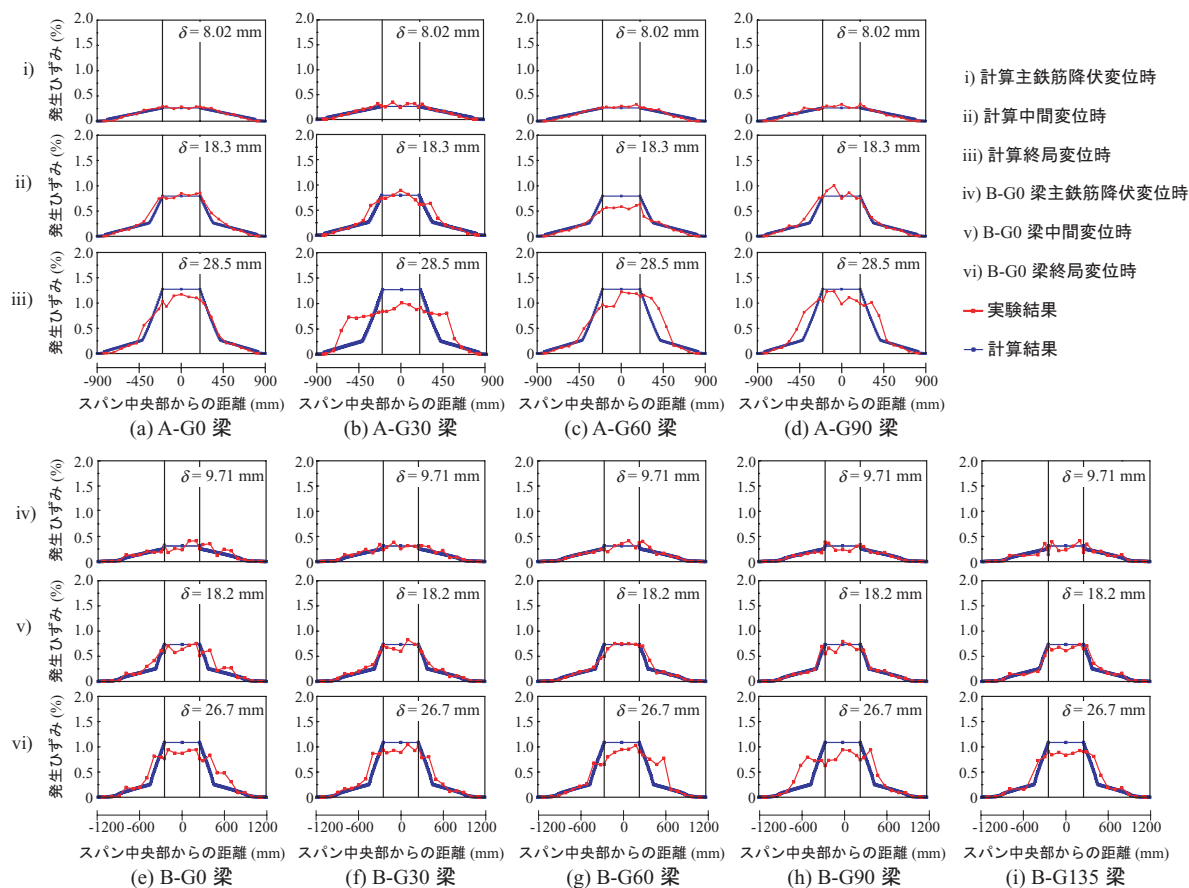
#### 3.1 荷重－変位関係

図－3には、各試験体の荷重－変位関係に関する実験結果および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<sup>4)</sup>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接着を仮定している。その他の詳細な断面分割法の解析条件および材料モデルは文献<sup>5)</sup>を参照されたい。また、水中接着樹脂の厚さや力学的特性は考慮していない。表－4には参考のために、降伏時および終局時における各耐力の実験結果および計算結果を一覧にして示している。なお、実験値の降伏荷重は、荷重－変位関係の剛性勾配変化点の荷重として評価している。

梁Aに着目すると、せん断キーのないA-G0梁の実験結果は計算降伏荷重時まで計算結果とよく対応していることが分かる。しかしながら、計算結果よりも小さい荷重にて載荷状態で上縁コンクリートが圧壊し、その後AFRP板の部分剥離を生じるものの、最終的にはAFRP板の破断により終局に至った。

A-G30梁の実験結果は計算終局荷重時まで計算結果とよく対応していることが分かる。その後、A-G0梁より大きい荷重で上縁コンクリートの圧壊が起こるものの、この荷重レベルは計算結果に比べて若干小さい。また、上縁コンクリート圧壊直後に部分剥離が顕在化し、その後、



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

AFRP 板の全面剥離により終局に至った。

A-G60/90 梁の実験結果は計算終局荷重時まで計算結果とよく対応していることが分かる。また、計算結果と同程度の荷重で上縁コンクリートが圧壊し、その直後に AFRP 板の部分剥離が顕在化し、変位の増大に伴って剥離領域が拡大して最終的には全面剥離に至った。

以上から、せん断キーの配置間隔を大きくすることにより、接着性能が改善され耐荷性能が向上することが明らかになった。

一方、梁 B に着目すると、せん断キーのない B-G0 梁の実測降伏荷重は計算降伏荷重よりも 10 % 程度大きくなっており、また計算結果よりも小さな荷重で上縁コンクリートの圧壊が発生している。その直後に部分剥離が顕在化し、AFRP 板の全面剥離により終局に至っている。

B-G30 梁は計算降伏荷重時まで大略対応しているものの、計算よりも 8 kN 程度低い荷重にて上縁コンクリートが圧壊している。圧壊直後に部分剥離が顕在化し、変位の増大に伴って剥離領域が拡大して最終的には全面剥離に至った。また、B-G60 梁は B-G0 梁と同様に実測降伏荷重が計算降伏荷重よりも 10 % 程度大きくなっており、計算よりも小さな荷重で上縁コンクリートが圧壊している。その後、全面剥離し終局に至っている。

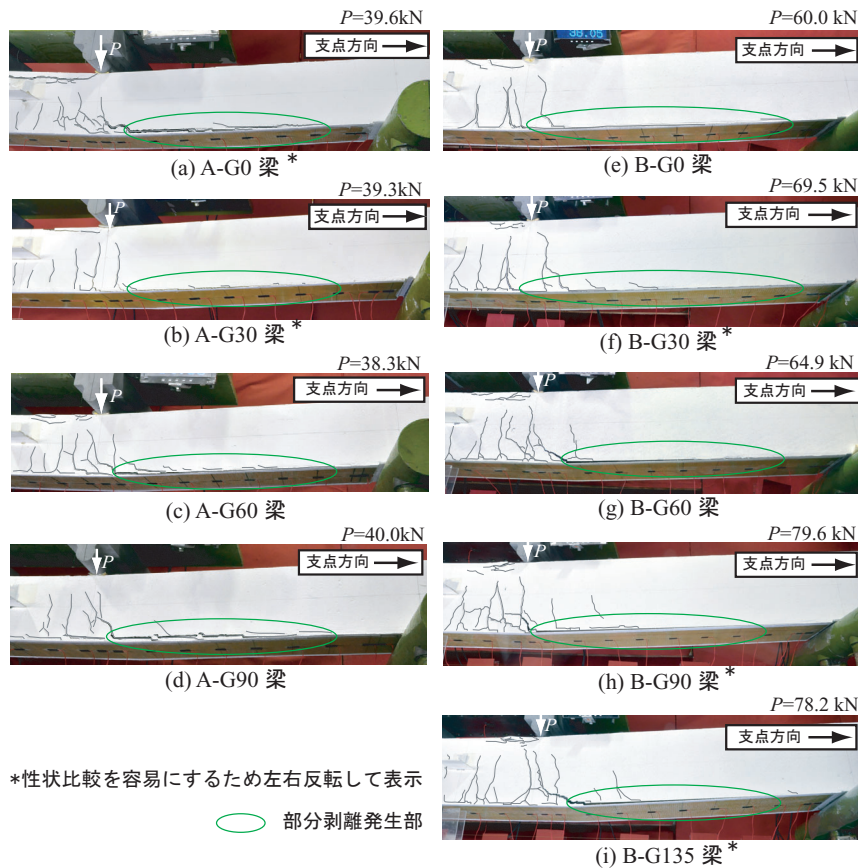
B-G90/135 梁の実測降伏荷重は計算降伏荷重に比較して 15 % 程度大きくなっており。また、計算結果よりも若

干小さな荷重にて上縁コンクリートが圧壊しているものの、せん断キーの配置間隔が小さい場合に比較して、最大荷重が大きいことが分かる。また、部分剥離発生後も早期にはひび割れが開口せず、部分剥離の進展が抑制されて変位が増大したものの最終的には AFRP 板の剥離により終局に至った。

以上のことより、断面寸法にかかわらず、せん断キーの配置間隔を大きくすることにより、接着性能が改善され耐荷性能が向上することが明らかになった。なお、梁 B において、実測降伏荷重が計算降伏荷重の 10 ～ 15 % 程度大きい傾向にある。この原因としては、計算結果にパテ厚を考慮していないことなどが挙げられるが現在のところ不明である。今後検討する必要があるものと考えている。

### 3.2 AFRP 板の軸方向ひずみ分布性状

図－4 には、梁 A の場合に関する計算主鉄筋降伏時、中間変位時および計算終局変位時における 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。また、梁 B の場合には、計算終局変位に達していない梁があるため、せん断キーを施していない B-G0 梁の主鉄筋降伏変位時、中間変位時および終局変位時を基準にし、これと同一変位時の各試験体の実験結果を計算結果と比較して示している。なお、計算結果は AFRP 板とコンクリートの完全接着を



写真－１ 各試験体の補強材剥離および破断直前のひび割れ性状

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。

梁 A の場合には、いずれの試験体においても実験結果は計算中間変位時まで計算結果と大略一致している。従って、AFRP 板とコンクリートとの接着は計算中間変位時まで確保されているものと判断される。しかしながら、いずれの試験体も計算終局変位時には、等せん断力区間において実測ひずみが計算ひずみを大きく上回り、一方で、等曲げ区間のひずみは若干小さくなっている。これは、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り、部分剥離が発生していることによるものと考えられる。

梁 B の場合には、いずれの試験体も B-G0 梁の中間変位時まで計算結果と大略一致している。このことより、B-G0 梁の中間変位時までは AFRP 板とコンクリートとの接着は確保されていると判断される。しかしながら、計算終局変位時においては、各試験体の等せん断力区間において、実測ひずみが計算ひずみを大きく上回る傾向にあることが分かる。これは、梁 A の場合と同様に、ピーリング作用により AFRP 板の部分剥離が発生したことによ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 AFRP 板剥離および破断直前

のひび割れ性状の比較を示している。写真より、AFRP 板とコンクリートの剥離は断面の種類によらず、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り顕在化していることが分かる。また、せん断キー間隔が 60 mm 以上の場合において、ひび割れ発生範囲が大きくなる傾向が見受けられる。これは、せん断キー間隔が大きい場合において、AFRP 板とコンクリートとの接着性能が高く、ひび割れ分散効果が効率的に発揮されているためと考えられる。

なお、実験終了時において、接着界面の性状を観察したところ、せん断キーのない A-G0 および B-G0 梁では、コンクリートと水中接着樹脂の界面で剥離が生じているのに対し、せん断キーを配置した梁では、水中接着樹脂と AFRP 板の界面において剥離が生じていることを確認している。このことは、せん断キーを配置することにより、コンクリートと水中接着樹脂の接着性能が改善されたことを示すものと考えられる。

図－５には、これまでの実験結果を整理し、等せん断力区間における AFRP 板の剥離挙動をモデル化して示している。図－５(a) に示しているように、せん断キーを配置しない場合はコンクリートと水中接着樹脂との接着界面でひび割れが発生することが明らかになっている。

これに対し、図－５(b) および (c) のようにせん断キーを

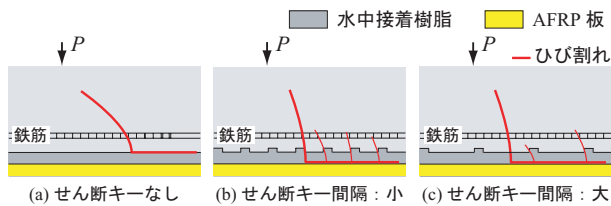


図-5 等せん断力区間における AFRP 板の剥離挙動

配置した場合には、コンクリートと水中接着樹脂との接着性能が向上し、ひび割れが水中接着樹脂と AFRP 板との接着界面に移行したものと考えられる。ただし、せん断キーの配置間隔が小さい A-G30 梁の場合には、A-G60/90 梁の場合よりも耐荷性能が低く、かつ B-G30 梁の場合にはせん断キーを配置しない場合よりも耐荷性能が低い。実験ではせん断キーの配置箇所から微細なひび割れが多数発生していることを確認している。従って、図-5(b)に示すように、このひび割れが水中接着樹脂と AFRP 板界面における早期剥離を助長すると推察される。

### 3.4 せん断キーによる耐荷性能向上効果

図-6 には、荷重比-せん断キー配置間隔比を示している。ここで、荷重比とは実測最大荷重  $P_{ue}$  を計算最大荷重  $P_{uc}$  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。ここで、せん断キー配置間隔  $s$  を有効高さ  $d$  で除したのは、シートの剥離は前述のとおり斜めひび割れの発生に起因するピーリング作用によるものであり、せん断キー配置間隔は少なくとも有効高さ  $d$  よりも小さい必要があると考えたためである。

図より、梁の種類によらず、せん断キー配置間隔比を大きくすることによって荷重比が増大することが分かる。特に断面寸法が小さい場合には向上効果が顕著になっている。また、荷重比は断面寸法によらずせん断キー配置間隔比が 0.75 程度で最大であることが分かる。

以上より、本研究の範囲内では、断面寸法によらずせん断キーを配置することにより、コンクリートと水中接着樹脂との接着性能が向上するものの、配置間隔が小さい場合には水中接着樹脂と AFRP 板の界面における剥離を助長することが明らかになった。

## 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、形状寸法が異なる 2 種類の RC 梁に対して AFRP 板接着部のコンクリート表面に等間隔にせん断キーを配置し、配置間隔が曲げ補強効果に及ぼす影響を静載荷実験により検討した。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) せん断キーを配置しない場合にはコンクリートと水中接着樹脂との界面で剥離するのに対して、せん断

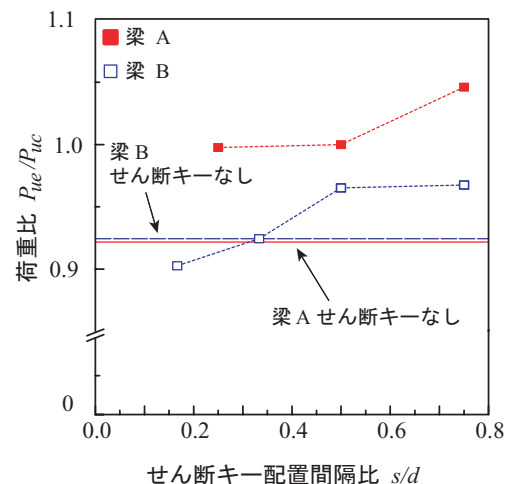


図-6 荷重比とせん断キー配置間隔比との関係

キーを配置する場合には水中接着樹脂と AFRP 板との界面に剥離が移行する。また、この剥離は上縁コンクリートの圧壊後に生じる。

- 2) 断面寸法によらずせん断キー間隔比を 0.75 程度にすることにより、曲げ補強効果が大きくなる傾向にある。この傾向は特に断面寸法の小さい梁で顕著である。

## 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) 池下 雄哉, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介: せん断キーを設けた場合の AFRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の静的耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, 2012.
- 3) 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.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2007.
- 5) N.Kishi, Y.Kurihashi and H.Mikami: Load-Carrying Behavior of Pre-Cracked RC Beams Reinforced with Pre-tensioned AFRP Sheet, Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, June.2012.