

論文    AFRP 帯で水中接着せん断補強した RC 梁の耐荷性状

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

**要旨：**本研究では、せん断破壊型 RC 梁に対して、AFRP 帯を水中で巻き付けてせん断補強した場合の補強効果を検討することを目的に、静載荷実験を実施した。その結果、1) 提案の補強工法により、水中接着の場合においても破壊形式を曲げ破壊型に移行可能であること、2) 水中せん断補強した RC 梁は気中せん断補強した梁と同程度の耐荷性能を発揮すること、3) 施工・養生環境にかかわらず、AFRP 帯幅を広くすることで、ひび割れの開口や AFRP 帯の発生ひずみを効率的に抑制可能であること、などが明らかになった。

**キーワード：**RC 梁, AFRP 帯, 水中接着せん断補強, 水中接着樹脂

1. はじめに

近年、地震の巨大化や発生頻度の増加に伴い、耐震補強工事が急速に進められている。最近では、耐震補強工法の 1 つとして連続繊維シート (以後、FRP シート) 接着工法が数多く採用されている。ここで、河川橋脚等の水中構造物の耐震補強の場合には、いずれの補強工法に対しても施工部を乾燥状態にするために構造物周辺の仮締切工事を行うことが通例である。そのため、この種の構造物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を要することより、未だ限定的に実施されているのが実情である。これより、仮締切工事が不要で安価かつ効率的な工法の開発が喫緊の課題となっている。

著者らはこのことに着目し、予めアラミド繊維製 FRP シート (以後、AFRP シート) にエポキシ系樹脂を含浸硬化した AFRP 帯を水中接着樹脂を用いて接着補強する工法を考案し、その適用性について検討を行ってきた。既往の研究では、提案の工法を用いて曲げ補強した RC 梁や巻付け補強したコンクリート円柱試験体に関する載荷実験を行い、気中接着と同程度までの耐力の向上が可能であることを明らかにしている<sup>1), 2)</sup>。しかしながら、RC 梁に带状の AFRP 帯 (以後、AFRP 帯) を巻き付けて補強

する水中せん断補強法の確立やその効果に関する研究は未だ行われていないのが現状である。また、水中構造物の耐震補強においては、せん断耐力の向上が求められる場合も多いことから、提案工法によるせん断補強効果を検討することにより、その汎用性を広げることが可能になるものと考えられる。

このような背景より、本研究では提案工法のせん断補強効果の検討を目的に、AFRP 帯を水中で巻付けた RC 梁の静載荷実験を行い、せん断補強効果や AFRP 帯のひずみ分布性状について検討を行った。

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および各種計算結果を示している。なお、表中の設計曲げ耐力  $P_u$  および設計せん断耐力のコンクリート分担分  $V_c$  は土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に準拠し、コンクリート実圧縮強度  $f'_c = 30 \text{ MPa}$ 、軸方向鉄筋の実降伏強度  $f_y = 395 \text{ MPa}$  を用いて算出した。また、AFRP 帯の設計せん断耐力分担分  $V_{AF}$  はアラミド補強研究会の「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領

表-1 試験体一覧

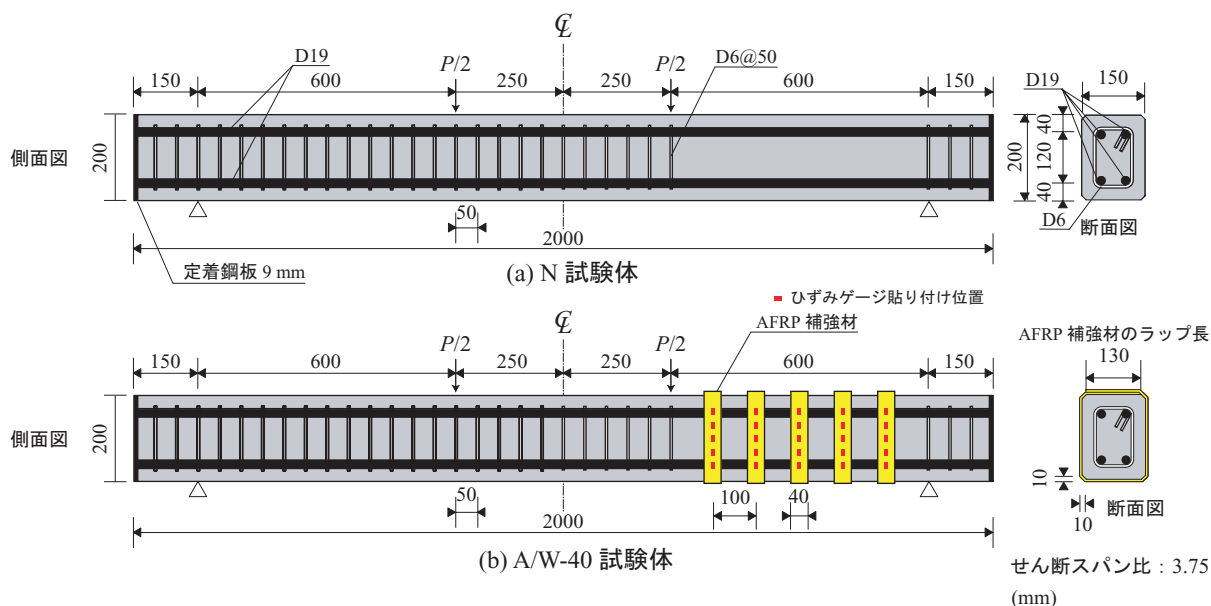
| 試験体名 | 施工・養生環境 | AFRP 帯幅 (mm) | 設計曲げ耐力 $P_u$ (1) (kN) | 設計せん断耐力 $2 \times V_u$ (kN) |                             |        | せん断余裕度 (2) / (1) |
|------|---------|--------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------|------------------|
|      |         |              |                       | コンクリート分担分 $2 \times V_c$    | AFRP 帯分担分 $2 \times V_{AF}$ | 合計 (2) |                  |
| N    | 気中      | -            | 100.4                 | 59.8                        | -                           | 59.8   | 0.60             |
| A-20 |         | 20           |                       |                             | 26.6                        | 86.4   | 0.86             |
| A-40 |         | 40           |                       |                             | 53.1                        | 113    | 1.12             |
| A-60 |         | 60           |                       |                             | 79.7                        | 139    | 1.39             |
| W-20 | 水中      | 20           | 100.4                 | 59.8                        | 26.6                        | 86.4   | 0.86             |
| W-40 |         | 40           |                       |                             | 53.1                        | 113    | 1.12             |
| W-60 |         | 60           |                       |                             | 79.7                        | 139    | 1.39             |

\*1 室蘭工業大学大学院工学研究科 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (学生会員)

\*2 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)

\*3 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)

\*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，配筋状況およびせん断補強概要の一例

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             |

(案)」(以後，補強設計要領<sup>4)</sup>)に準拠し，下式(1)により算出した。

$$V_{AF} = A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) z / s \quad (1)$$

ここに， $A_w$ ：せん断補強面における AFRP 帯の総断面積， $f_{wyd}$ ：AFRP 帯の引張強度， $\alpha$ ：AFRP 帯と部材軸とのなす角度， $z$ ：圧縮力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離(=  $d/1.15$ )， $d$ ：有効高さ， $s$ ：AFRP 帯の配置間隔である。なお，AFRP 帯の引張強度は補強設計要領に準拠し，表－２に示す値に 0.6 を乗じて評価している。

試験体数は，無補強試験体および施工・養生環境，AFRP 帯の幅を変化させた全 7 体である(表－１参照)。試験体名の内，第 1 項目は施工・養生環境(A：気中，W：水中)，第 2 項目は AFRP 帯幅(単位：mm)を示している。

図－１には，試験体の形状寸法，配筋状況およびせん断補強概要の一例(A/W-40 試験体)を示している。試験体は断面寸法 150 × 200 mm，純スパン長 1.7 m の複鉄筋 RC 梁である。なお，断面の四隅には 10 mm の面取りを施している。上下端鉄筋には D19(SD345)を 2 本ずつ配置している。スターラップには D6(SD345)を用い片側の等せん断力区間を除き 50 mm 間隔で配置している。AFRP 帯による巻付け補強位置はスターラップを配置していない等せん断力区間の 6 等分点とし，表－２に示す保証耐力 392

表－３ 水中硬化型接着樹脂の力学的特性値 (公称値)

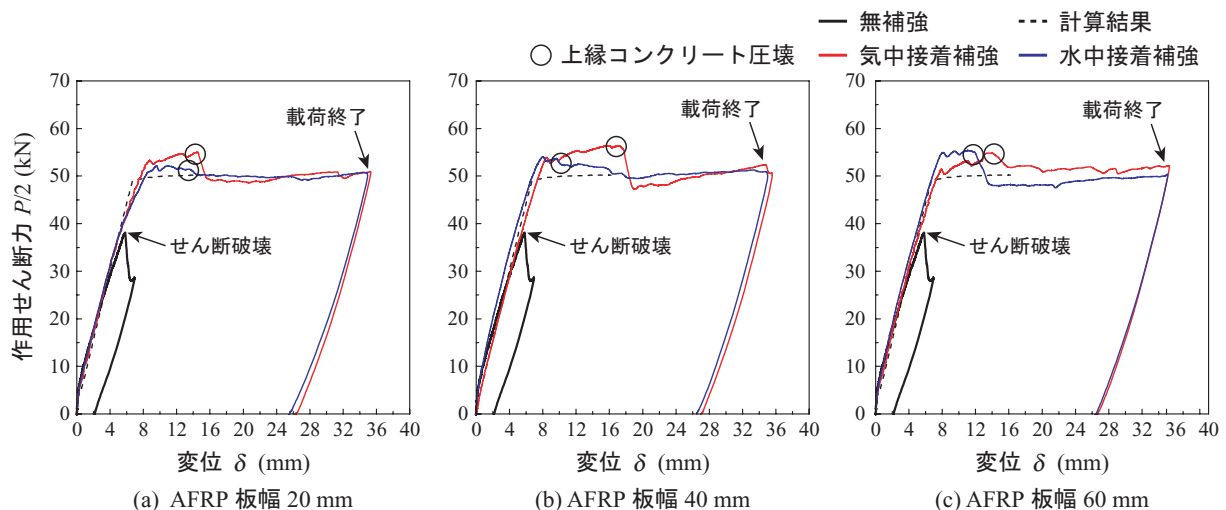
| 接着材種類       | 材料特性 | 物性値 (MPa) | 測定方法         |
|-------------|------|-----------|--------------|
| パテ状<br>接着樹脂 | 圧縮強度 | 53.0      | JIS K - 6911 |
|             | 曲げ強度 | 32.4      | JIS K - 6911 |
|             | 引張強度 | 15.0      | JIS K - 6911 |
| 液状<br>接着樹脂  | 曲げ強度 | 40.0      | JIS K - 6911 |
|             | 圧縮強度 | 35.0      | JIS K - 6911 |

表－４ パテ状接着樹脂の材料組成および性状

|      | 主剤               | 硬化剤        |
|------|------------------|------------|
| 主成分  | 変成エポキシ樹脂         | 変成ポリアミドアミン |
| 概観   | 白色パテ状            | 暗灰色パテ状     |
| 比重   | 1.85             | 1.78       |
| 配合比  | 1:1              |            |
| 可使時間 | 30 分 (at. 25 °C) |            |
| 硬化時間 | 2 時間 (at. 25 °C) |            |

kN/m の AFRP 帯を接着している。

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 種類であり，いずれも 2 種混合型のエポキシ系接着樹脂である。AFRP 帯とコンクリートの接着には，主剤，硬化剤ともに表－４に示す材料組成および性状のパテ状の接着樹脂を用い，AFRP 帯のラップ部分には，液状の接着樹脂を用いた。なお，パテ状の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」<sup>5)</sup>における「連続繊維シートとコンクリートの接着試



図－２ 各試験体における作用せん断力 ( $P/2$ )－変位関係の実験結果および計算結果の比較

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、破壊時における強度の平均値は 2.0 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判断される。

液状水中接着樹脂については、継手長を 10 cm 程度以上とすることで AFRP 帯の保証耐力以上の付着力を確保できることを確認している。従って、AFRP 帯の継手長は RC 梁上面において 13 cm とした。

## 2.2 RC 梁の水中接着補強方法および実験方法

RC 梁の水中接着補強は、大型の水槽を用いて 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。
- 2) 気中で AFRP 帯と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、上記の水中接着は専用の装置を用いて一面づつ圧着し、接着樹脂の可使時間 (30 分程度) 内にすべての面の接着を完了している。樹脂の厚さは圧着後 3 mm 程度になるように施工した。なお、気中接着補強の場合には、AFRP シートを汎用の含浸接着樹脂を用いて接着した。

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。水中接着補強した RC 梁の載荷実験は、試験体を水から引き揚げた後、ひずみゲージを貼り付けた後直ちに行うこととしている。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 AFRP 帯各点の巻付け方向ひずみである。また、実験時には RC 梁のひび割

れを連続的に撮影し、実験終了時には破壊状況を撮影している。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 荷重－変位関係

図－2 には、各試験体の作用せん断力 ( $P/2$ )－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>3)</sup>に準拠して断面分割法により算出したものである。

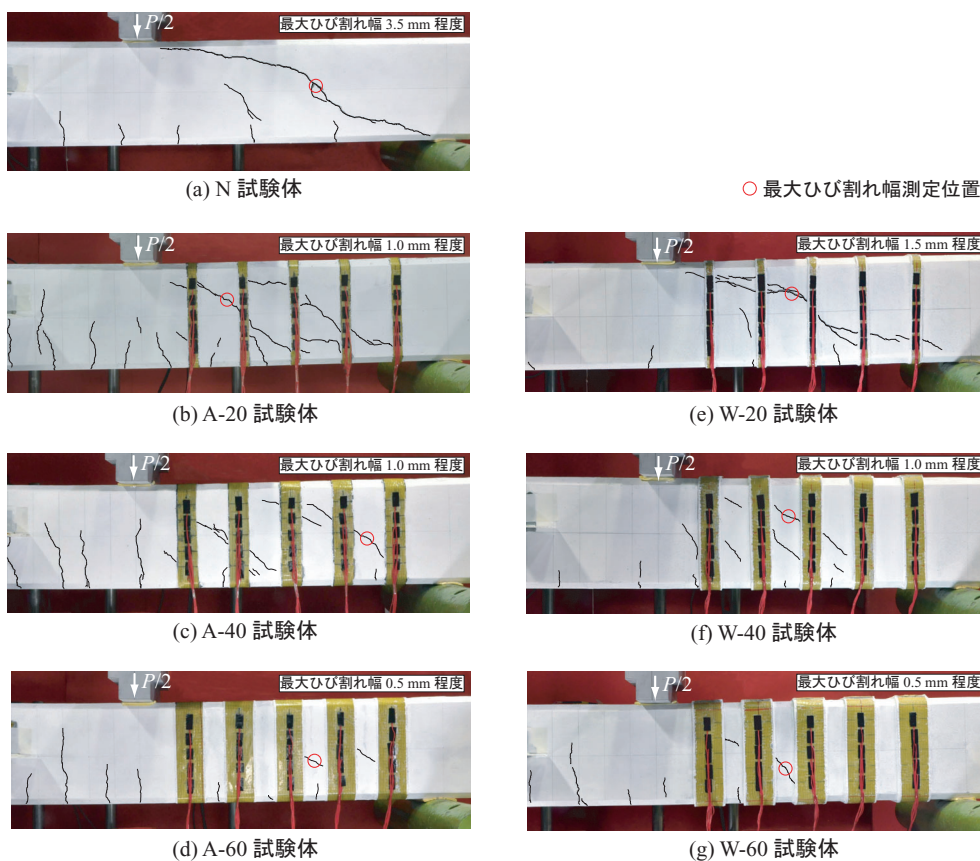
図より、無補強の N 試験体は 40 kN 程度までほぼ線形に増加した後、急激に低下していることが分かる。実験時には、後述するようにスターラップを配筋していない片側せん断スパンのせん断破壊により終局に至っていることを確認している。

一方、補強試験体の場合には、いずれも荷重が 40 kN に到達した後も増加していることが分かる。また、荷重が 50～55 kN 程度で剛性勾配が急激に低下していることから、この時点で主鉄筋降伏に至っていることが分かる。これより、AFRP 補強材の幅や施工・養生環境にかかわらず、AFRP 帯を用いて水中せん断補強したことにより RC 梁の破壊形式がせん断破壊型から曲げ破壊型に移行したことが分かる。

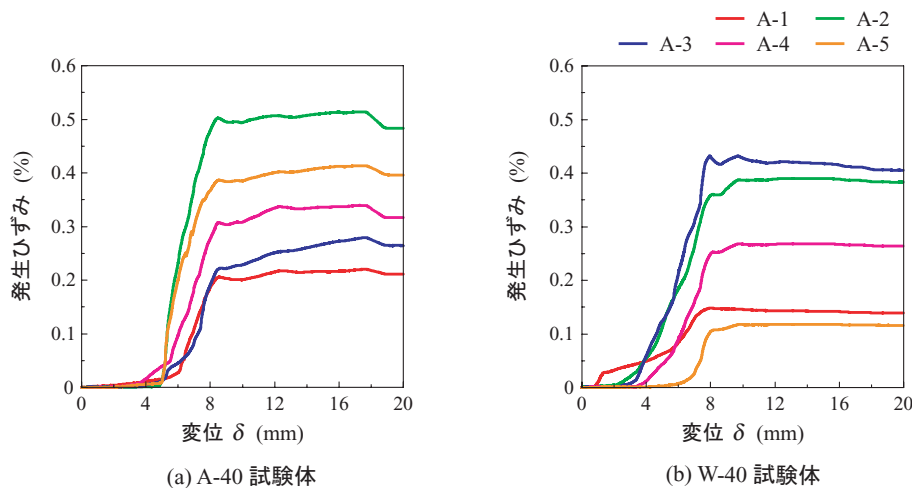
### 3.2 ひび割れ性状

写真－1 には、各試験体の最大荷重時のひび割れ性状を示している。写真より、N 試験体のひび割れは、載荷点から下端鉄筋配置位置近傍までアーチ状に発生し、さらに支点部に直線的に進展しせん断破壊に至っていることが分かる。実験時には、最大荷重到達後これらのひび割れが急激に開口して終局に至った。

一方、せん断補強した試験体のひび割れは載荷点から斜め下方に進展しているものの、ひび割れの本数や開口幅は AFRP 帯幅が大きい場合ほど小さくなる傾向にある。



写真－１ 各試験体の最大荷重時のひび割れ性状



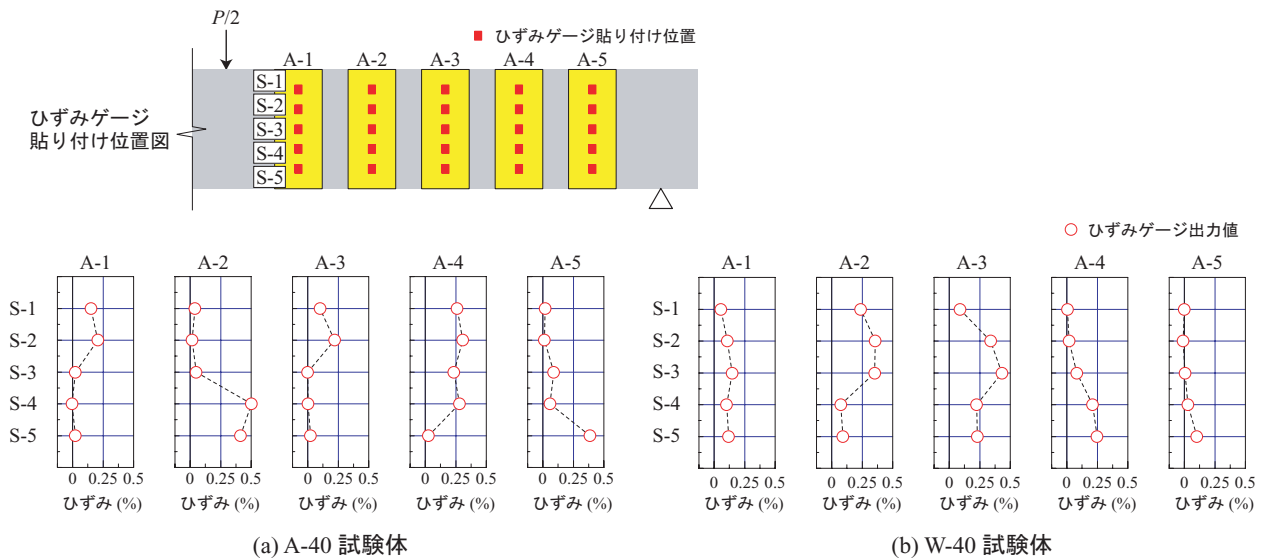
図－３ AFRP 帯のひずみ－変位関係の一例

なお、W-20 試験体の場合には、斜めひび割れの開口に伴って AFRP 帯に発生するひずみが増大し、使用した接着樹脂の伸び率を超えたため、AFRP 帯が部分的に剥離したことを確認している。また、気中および水中接着補強した試験体の結果を見ると、AFRP 帯幅が 20 mm の場合を除き、両者はひび割れの発生位置が若干異なっているものの、ひび割れの本数や開口幅がほぼ同様の性状を示していることより、AFRP 帯に剥離が生じていない場

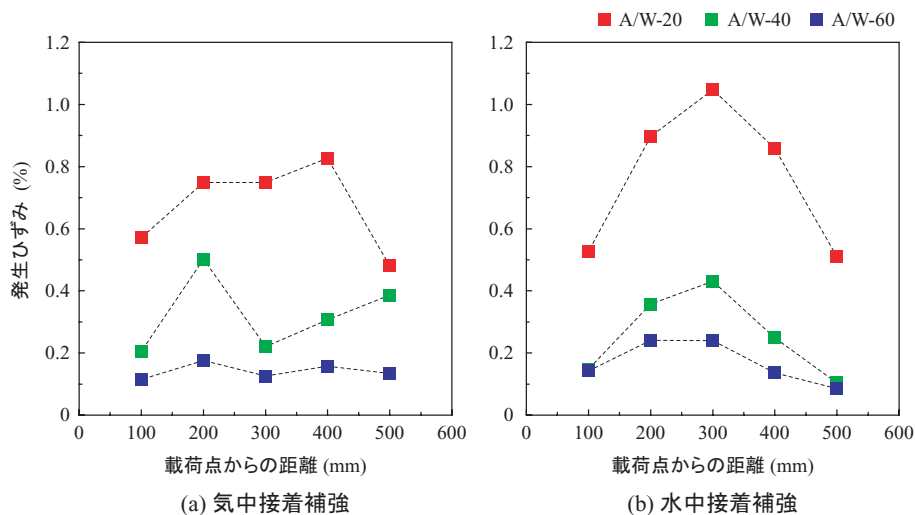
合には水中においても気中で施工した場合と同様の補強効果を発揮しているものと判断される。

### 3.3 AFRP 帯のひずみ－変位関係

図－3 には、AFRP 帯の軸方向ひずみと変位の関係を A/W-40 試験体の場合について示している。ここで、AFRP 帯の呼称を載荷点側から支点側に向かって A-1 ～ A-5 とする。また、図には各 AFRP 帯においてひずみ値が最も大きく示された測定値を示している（ひずみゲージ位置は



図－4 主鉄筋降伏時における AFRP 帯各計測点のひずみ分布性状の一例



図－5 主鉄筋降伏時における AFRP 帯最大ひずみの分布性状

図－4 参照)。

図より、A-40 試験体の場合には、いずれの AFRP 帯も変位  $\delta = 4 \sim 5$  mm 程度において、ひずみが急激に増加していることが分かる。また、変位  $\delta = 8$  mm 程度における主鉄筋降伏時以降では、各ひずみ値がほぼ一定値を示している。これは、主鉄筋降伏後において作用せん断力がほとんど増加していないことと対応している。各 AFRP 帯の最大ひずみは、A-1 の場合が最も小さく、A-2 の場合が最も大きい。これは、後述する斜めひび割れの発生状況と密接に関連している。

W-40 試験体の場合には、ひずみが急増する変位が A-40 試験体の場合よりも若干小さいものの概ね同様の傾向を示している。また、ひずみが急激に増加し、主鉄筋降伏以降後に各ひずみ値がほぼ一定値を示す性状も、A-40 試験体の場合とほぼ同様である。なお、AFRP 帯の最大値

は A-40 試験体の場合よりも  $1000 \mu$  程度小さい。これは、ひび割れ発生部とひずみゲージ貼付部との位置関係の影響が大きいものと考えられる。

これらの結果より、施工・養生環境にかかわらず、AFRP 帯は斜めひび割れ発生後、梁に作用するせん断力に対して有効に抵抗していることが分かる。このような性状は、A/W-20 および A/W-60 試験体においても同様であることを確認している。

### 3.4 AFRP 帯のひずみ分布

図－4 には、主鉄筋降伏時における AFRP 帯の各ひずみ測定点のひずみ分布性状を A/W-40 試験体について示している。図より、A/W-40 試験体ともに、各測定点のひずみ値は  $0.25 \sim 0.5$  % 程度か、もしくは微小な値を示していることが分かる。また、前述のひび割れ性状 (写真－1) と比較すると、大きなひずみの発生位置とひび割れの発

表－５ 主鉄筋降伏時における AFRP 帯の作用引張応力

| 試験体名 | 作用せん断力 (kN) | N に対する荷重増分 (kN) | AFRP 帯の最大ひずみ (%) | AFRP 帯の換算引張応力 <sup>*1</sup> (i) (MPa) | AFRP 帯の最大作用引張応力 <sup>*2</sup> (ii) (MPa) | (ii) / (i) |
|------|-------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------|
| N    | 38.1        | -               | -                | -                                     | -                                        | -          |
| A-20 | 53.3        | 15.2            | 0.83             | 1414                                  | 976                                      | 0.69       |
| A-40 | 53.9        | 15.8            | 0.50             | 737                                   | 592                                      | 0.80       |
| A-60 | 51.4        | 13.3            | 0.18             | 414                                   | 207                                      | 0.50       |
| W-20 | 52.1        | 14.0            | 1.05             | 1304                                  | 1236                                     | 0.95       |
| W-40 | 54.1        | 16.0            | 0.43             | 744                                   | 508                                      | 0.68       |
| W-60 | 54.8        | 16.7            | 0.24             | 519                                   | 285                                      | 0.55       |

<sup>\*1</sup>:式 (1) に基づき N に対する荷重増分から算定, <sup>\*2</sup>: AFRP 帯の最大ひずみから算定

生位置が概ね対応していることが分かる。このことから、AFRP 帯は施工・養生環境にかかわらず、ひび割れ発生位置において、適切に補強効果を発揮しているものと判断される。

図－５には、各補強試験体の最大荷重時における AFRP 帯のひずみ分布を示している。なお、ひずみ値には各 AFRP 帯に貼り付けた 5 点のひずみゲージ出力の最大値を用いている。図より、AFRP 帯の発生ひずみは施工・養生環境にかかわらず、AFRP 帯幅が小さいほど大きく示される傾向にあることが分かる。これは、AFRP 帯幅が小さい場合において、AFRP 帯に生じる引張応力が大きいためである。従って、AFRP 帯幅が大きい場合ほど斜めひび割れの開口を抑制する効果は高いものと判断される。また、AFRP 帯幅が 20 mm の場合において、水中施工された AFRP 帯のひずみが気中施工の場合よりも大きい。これは、W-20 試験体の場合において AFRP 帯が部分的に剥離し、1 本の斜めひび割れが大きく開口したためと推察される。

### 3.5 AFRP 帯の作用引張応力

表－５には、主鉄筋降伏時における AFRP 帯の作用引張応力の一覧を示している。なお、表中の AFRP 帯の換算引張応力は式 (1) に基づき N に対する荷重増分から算定し、AFRP 帯の最大作用引張応力は AFRP 帯の最大ひずみから算定している。表より、いずれの試験体においても、AFRP 帯の最大作用引張応力は換算引張応力よりも小さく示されていることが分かる。特にこの傾向は幅が最も広い A/W-60 試験体で顕著である。これは、AFRP 帯の幅が増加することで補強材の断面積が増大するとともに、コンクリート躯体がより広範囲に補強されて無補強区間が減少し、ひび割れの発生や進展が抑制されることに関連するものと推察される。

以上のことから、施工・養生方法にかかわらず式 (1) の AFRP 帯のせん断耐力分担分  $V_{AF}$  の算定式は、AFRP 帯に作用する引張応力を安全側に評価しているものと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では RC 梁の水中接着補強工法を確立することを目的として、水中接着樹脂と AFRP 帯を用いて水中巻付けせん断補強した RC 梁の静載荷実験を行った。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) 水中せん断補強により、せん断破壊型 RC 梁の破壊形式を曲げ破壊型に移行可能である。
- 2) 水中せん断補強した RC 梁は、気中せん断補強した梁とほぼ同程度の耐荷性能を発揮する。
- 3) 施工・養生環境にかかわらず、AFRP 帯幅を広くすることで、ひび割れの開口や AFRP 帯に発生するひずみの抑制効果が大きくなる。

### 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) 河本幸子, 栗橋祐介, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP 板水中巻付け補強によるコンクリート円柱の耐荷性能向上効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1315-1320, 2013.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2007.
- 4) アラミド補強研究会: アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領 (案), 1998.
- 5) 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.