

(29) AFRPロッドとコンクリート部材の付着強度に関する解析的研究

岡部 航大¹・大西 弘志²・盛合 将和³
岩根 颯太郎⁴・松原 澄行⁵

¹ 学生員 岩手大学大学院 総合科学研究科 (〒020-0114 岩手県盛岡市上田 4-3-5)
E-mail: g0119012@iwate-u.ac.jp

² 正会員 岩手大学准教授 理工学部システム創生工学科 (〒020-0114 岩手県盛岡市上田 4-3-5)
E-mail: onishi@iwate-u.ac.jp

³ 学生員 岩手大学大学院 総合科学研究科 (〒020-0114 岩手県盛岡市上田 4-3-5)
E-mail: g0118047@iwate-u.ac.jp

⁴ 正会員 いであ株式会社 社会基盤本部 (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢 3-15-1)
E-mail: iwn21906@ideacon.co.jp

⁵ 正会員 株式会社竹入製作所 アラミド複合材料事業部

我が国において、コンクリート道路橋の上部構造における主な架替理由として、塩害による破損を含む桁の亀裂・剥離がある。塩害に伴う鉄筋の腐食に伴う損傷に対する対策の1つとして、鉄筋をFRPで置き換えることが考えられる。FRPには、様々な種類が存在するが、著者らはアラミド繊維を用いたAFRPに着目した。AFRPロッドを鉄筋の代わりにコンクリート部材に適用する際の課題として、AFRPロッドとコンクリートとの間の付着力の確保がある。著者らの研究ではAFRPロッドに珪砂を散布するなどの表面処理を施すことにより付着力確保できる可能性が認められた。本研究ではさらに数値解析による実験の再現を行い、付着強度とコンクリート部材の性能の関係を確認することを試みた。

Key Words: AFRP, Surface treatment, Pullout loading, bond strength

1. はじめに

我が国における社会基盤を構成する構造物の一部は供用経過年数50年を超過し、各種構造物の老朽化が進んでいる¹⁾。コンクリート道路橋の上部構造における架替理由の調査ではRC橋の5割、PC橋の6割において塩害による破損を含む桁の亀裂・剥離が主な理由として挙げられる。塩害に伴う鋼材の腐食による劣化が著しくなった場合、劣化の進行を抑制することは極めて難しい²⁾。

塩害に伴う鉄筋の腐食損傷に対する根本的な対応策の1つとして、繊維補強樹脂(Fiber Reinforced Plastic: FRP)の利用が挙げられる。本研究で著者らはFRPの1つであるアラミド繊維補強樹脂(Aramid Fiber Reinforced Plastic: AFRP)に着目した。

AFRPに使用されるアラミド繊維の特徴として、引張強度は鋼材の4倍、比重は鋼材の1/6であること、耐候性に優れていること、絶縁性に優れ磁化しない等がある³⁾。

また、AFRPロッドの課題として、AFRPロッドとコン

クリートとの間の付着力の確保がある。著者らの既往の研究ではAFRPロッドに表面処理を施すことで付着力が向上する可能性が高いことが確認されている⁴⁾。そこで本研究では、写真-1に示す表面処理を施したAFRPロッドについて両引き試験を実施することにより付着の程度について確認を行った。加えて、数値解析による検証も実施した。



写真-1 AFRPロッド(珪砂付き)

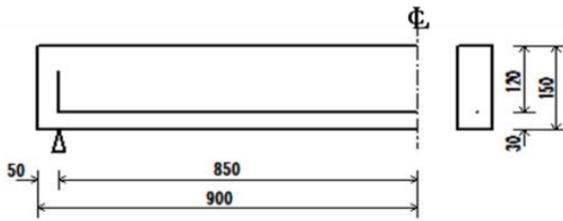


図-1 短径断面梁(単位：mm)

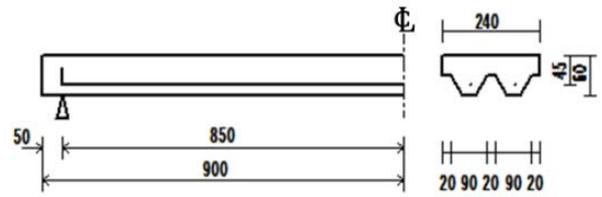


図-2 π型断面梁(単位：mm)

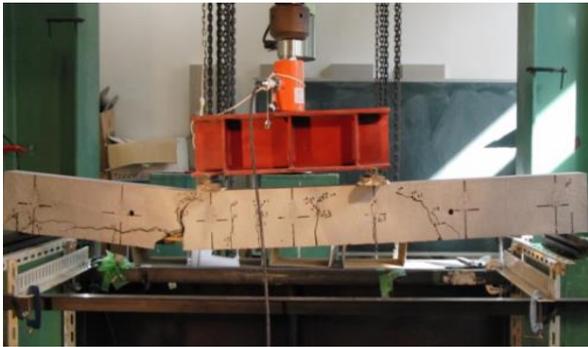


写真-2 破壊形状(付着破壊)



写真-3 破壊形状(曲げ破壊)

2. 既往の研究

既往の研究では、コンクリートとAFRPとの間の付着性の向上を目的とし、鉄筋と表面処理の異なるAFRPロッドを数種類用意して静的載荷試験及び片引き試験を行った。各試験の結果を比較し、コンクリートとAFRPロッドとのAFRPロッド表面処理による付着性向上の関係を検討した。

(1) 静的載荷試験⁵⁾

AFRPとコンクリートとの間の付着特性を確認するためにRC梁とAFRPロッドを補強材として適用した図-1に示す短径断面を有する梁の曲げ耐力の比較を行った。この試験ではAFRPロッドの付着特性により梁の曲げ耐力が変化する可能性があるため、鉄筋と2種類のAFRPロッド(通常製品、表面珪砂接着)を用いた梁に対して静的載荷試験を行った。

実験結果としては、AFRPを用いた梁の曲げ耐力は鉄筋を用いたRC梁より大きくなったが、AFRPロッドを適用した試験体については全て損傷が進行した時点でAFRPロッドとコンクリートとの間で付着切れを起し、付着破壊に至った(写真-2)。

次に、上記の試験では中央に十分な継手長を持たせた

表-1 既往研究(曲げ試験結果)

試験体	破壊荷重 P_u (kN)	計算値 P_{cal} (kN)	破壊荷重の 計算値との比 P_u/P_{cal}	最大変位 δ_{max} (mm)
RC	3.33	3.65	0.91	70.6
A-RC	4.5	5.55	0.81	112.4
AS-RC	5.16		0.93	112

重ね継手を配置していたものの継手部分で付着ずれが発生していたことから、継手を持たないAFRPロッドを用いて以前の試験と同様の静的載荷試験を行った。また、この試験では、以前の短径断面ではなくπ型断面を有したものを製作した。図-2に試験体概要を示す。

これは、断面に関して腐食損傷を生じないというAFRPの特徴を生かすためにかぶりを小さくした場合の梁の曲げ耐力に関して検討を試みたものである。

実験結果を表-1に示す。終局状態における破壊荷重はRCの場合3.33kNであった。これに対して製品のAFRPロッドを用いたA-RC、珪砂接着したAFRPロッドを用いたAS-RCではともに最大荷重の増加が見られ、その増加割合はA-RCで35.1%、AS-RCで55.0%に達した。RCの計算値と比較しても、A-RCで23.3%、AS-RCで41.4%の増加に相当する向上となる。

破壊荷重と計算値との比較では、A-RCよりAS-RCの方が実験値と計算値の整合性が取れているのに対し、AS-RCの実験値と計算値との間でRCのそれと同等の誤差を示した。この実験では継手のないAFRPロッドを用

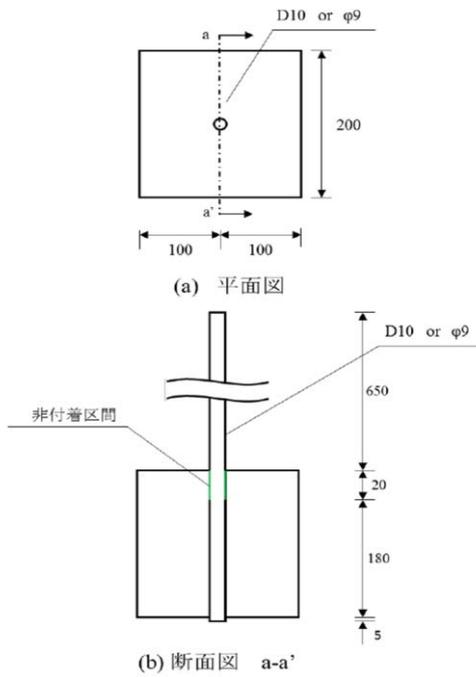


図-3 供試体形状

表-2 各種部材の材料特性値

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
コンクリート	33.7		25.4
鉄筋(D10)		548	188
AFRP ロッド (Φ9)		1,150	68.6

いることで全ての試験体において写真-3 に示すように曲げ破壊まで載荷可能となり、通常の RC 梁に対する AFRP-RC 梁の曲げ耐荷力の向上を確認できた。以上の研究から静的な載荷に対する AFRP を用いた RC 梁の挙動の特徴はある程度明らかになった。

(2) 片引き試験⁶⁾

片引き試験では、図-3 に示すコンクリートの供試体を使用した。使用した AFRP ロッドは φ9、鉄筋は D10 である。供試体の載荷側 20mm に非付着区間を設け、その区間の AFRP ロッド及び鉄筋のコンクリートとの付着を制限した。試験に使用した各部材の材料特性値を表 2、コンクリートの配合を表 3、供試体の一覧を表 4、供試体形状を図 3 に示す。この試験では鉛直方向上向きに載荷し、下方から変位計により AFRP ロッド及び鉄筋の自由端すべり量とその時の荷重を計測した。片引き試験の結果、供試体上部に AFRP ロッド及び鉄筋に沿うようにひび割れが発生した。試験で得られた荷重変位関係 (図 4) を見ると、AS-RC は RC に近い関係にあり、ほかの AFRP 表面処理タイプの約 2.5 倍の最大荷重が得られた

表-3 供試体の一覧

供試体名	主筋	表面処理
RC	鉄筋 (D10)	
A-RC	AFRP (Φ9)	
AA-RC	AFRP (Φ9)	分子結合 A
AP-RC	AFRP (Φ9)	分子結合 P
AS-RC	AFRP (Φ9)	珪砂付き

表-4 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比(%)	細骨材率 (%)
15.5±2.5	4.5±1.5	55	49.9

単位重量(kg/m ³)						
水	セメント	細骨材	粗骨材	膨張剤	減水材	AE 剤
180	327	882	914	0	3.27	0

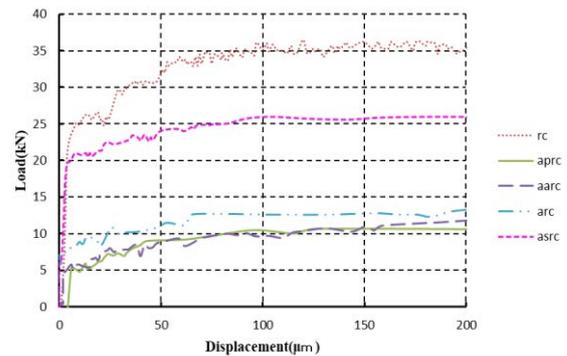


図-4 荷重変位関係

ことがわかる。

3. 研究の目的

静的載荷試験から、コンクリートと AFRP との間の付着が小さいという課題が明らかになった。さらに片引き試験では、珪砂の表面処理を施した AS-RC で付着性能の向上がみられた。片引き試験ではコンクリート部分が圧縮、鉄筋が引張を受けているが、一般の構造物ではこのような応力状態はほとんど見られないため、このまま構造物に適用するのは難しい。したがって、一般の構造物に近い応力状態での付着性状を検討することが必要である。

本研究では、既往の研究を踏まえ、鉄筋と表面処理の異なる AFRP ロッドを 3 種類用意し、両引き試験を実施した。両引き試験のような、梁の引張領域に近い応力状

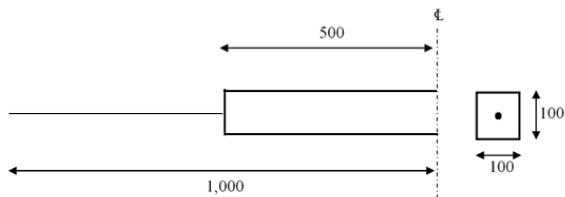


図-5 両引き供試体寸法



写真-4 試験状況

態におけるコンクリートと AFRP ロッドとの AFRP ロッド表面処理による付着性向上の関係を検討することとした。

また、実験に併せて、数値解析による実験の再現を行い付着強度とコンクリート部材の性能の関係を確認することを試みた。

4. 試験概要

(1) 概要

著者らは、鉄筋と表面処理の異なる AFRP ロッドを 3 種類用意して両引き試験を行った。試験の結果から、梁の引張部分のような応力状態におけるコンクリートと AFRP ロッドとの AFRP ロッド表面処理による付着性向上の関係を比較検討した。なお、今回の試験では供試体

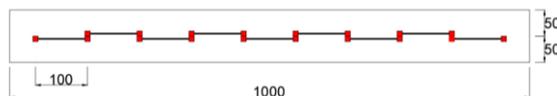


図-6 ひずみゲージ貼り付け位置 (単位: mm)



写真-5 定着用治具



写真-6 ロッド端部に形成した楔

に切欠き等を設けずに、自然なひび割れ発生状態における供試体の軸直角方向に発生するひび割れの分散性から、AFRP の表面処理によるコンクリートとの付着力の変化を評価する。

(2) 材料特性値

両引き試験に用いた各部材の材料特性値を表 2、コンクリートの配合は表 3 に、供試体の一覧を表 4 に示す。

(3) 供試体寸法

本試験で使用した供試体の寸法は、ロッド長さ 2000mm、コンクリート部分が 100mm×100mm×1000mm の正方形断面である。使用した鉄筋は D10、AFRP ロッドは φ9 である。

(4) 供試体載荷方法

載荷に際して、金属治具を用いると掴み部分での摩擦の確保が困難で AFRP ロッドが滑る現象が発生する。そ

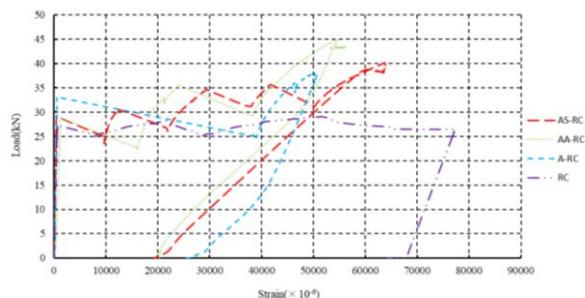


図-7 荷重ひずみ関係

表-5 両引き試験結果

供試体名	最大荷重 (kN)	RCとの比較	ひび割れ本数	
RC	27.3	/	3	
A-RC	33.1		1.23	1
AA-RC	35.5		1.32	2
AS-RC	35.6		1.33	4

のため、エポキシ樹脂及びビショットブラスト用鉄球を用いた楔をAFRPロッドの両端に形成し、定着用冶具にはめ込み、ジャッキによる載荷を行った(写真5)。

5. 試験結果

(1) 荷重ひずみ関係

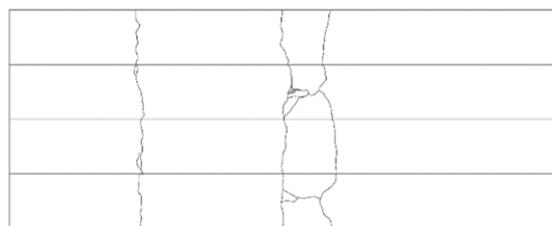
図7に両引き試験における荷重変位関係を示す。試験時においては、荷重が減少し、ひずみが増大する点でひび割れが発生している。各供試体の試験結果を表5に示す。表中の最大荷重は、最後に供試体軸直角方向に発現するひび割れ(以下、横ひび割れ)が発生するまでの最大の荷重を表している。

最大荷重は、図よりAFRP-RCの値がRCの値を上回る結果となった。また、RCは最初の横ひび割れ発生後降伏し、荷重は大きくならなかったが、AFRP-RCはひび割れ発生後も荷重の値が大きくなった。これは、AFRPの引張強度が高く、降伏しない特徴を示していると考えられる。

さらに、RCに比べ、AFRP-RCは横ひび割れ発生時のひずみの値の変化が大きくなっている。

(2) 破壊状況

本試験における供試体のひび割れ状況を図8に示す。荷重増加に伴い、供試体コンクリート部に横ひび割れが発生したが、供試体の各タイプにおいてひび割れ本数に



(a)RC 供試体



(b)A-RC 供試体



(c)AA-RC 供試体



(d)AS-RC 供試体

図-8 ひび割れ状況

差がみられた。1本ずつ横ひび割れが発現していき、新しい横ひび割れの発現がみられなくなった。その後、供試体軸方向に発現するひび割れ(縦ひび割れ)が発生するか、コンクリートがひび割れ部により完全に分断されるに至った。この縦ひび割れ部分では附着が大部分消失していると考えられる。コンクリートが分断された部分では鉄筋もしくはAFRPロッドのみの剛性に移行している。

本試験では、A-RC、AA-RC、RC、AS-RCの順にひび割れ本数が増えるという結果になった。一般に、附着が良好であるとひび割れ本数が多い、不良であるとひび割れ本数が少ない。本試験より、AS-RCのひび割れ本数が最も多い結果が得られた。すなわち、AFRPロッドに

珪砂を付着させることでコンクリートとの付着性を向上させることができる可能性がある。

6. 数値解析

(1) 概要

ひび割れ分散性と付着強度の関係性を検討するため、鉄筋コンクリート静的非線形解析専用プログラム(ATENA3D Ver.5)を用いて、非線形有限要素解析を実施した。解析には完全付着モデルと鉄筋とコンクリート間のすべりを考慮した2種類のモデルを合わせ、計3種類のモデルを使用した。完全付着モデルを **perfect** とし、付着が良好なモデルを **good**、不良なモデルを **poor** とした。

完全付着モデルにおいて、鉄筋とコンクリート間ですべりは発生しないものとする。また、すべりを考慮したモデルの付着応力-すべり関係には Bigaj らのモデルを採用しており、**good** と **poor** の付着強度はそれぞれ 11.26N/mm^2 、 9.15N/mm^2 と算定されている。これらの付着モデルは付着の状態、コンクリートの圧縮強度、鉄筋径に依存する。付着強度の異なる各々のモデルのひび割れ分散性をもとに、実験結果との比較を行う。

(2) 解析モデル

解析モデルを図-9に示す。両引き試験に使用した供試体と同様の $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 1000\text{mm}$ のモデルである。なお、図に示すように、また、供試体両端部では荷重に応じて応力が集中してしまう現象を防ぐため、非付着区間(40mm)を設けている。また、簡単のため、載荷板及び支持板から供試体端部までのロッド長さを 100mm に設定している。コンクリートと鉄筋の物性値には試験概要の物性値を用い、定着用治具に関しては一般的な鋼材の数値を用いた。荷重載荷方法は強制変位による載荷とし、 0.15mm 単位で強制変位を増加させて解析を進めている。

(3) 解析結果と考察

モデル内部と表面に発生したひび割れ状況を図11に示す。解析の結果、 0.5mm 以上のひび割れが **perfect** で4本、**good** で2本、**poor** で1本発現した。鉄筋とコンクリートとの付着強度の値が大きいほど、ひび割れ本数が増加することから、ひび割れ分散性と付着状態は、ひび割れ本数が多いほど付着性能が向上する関係にあることが確認できた。実験結果より、両引き試験では、AS-RCで4本、RCで3本、AA-RCで2本、A-RCで1本のひび割れが発生した。AFRP ロッドに珪砂の表面処理を施したAS-RCが最もひび割れが分散している。

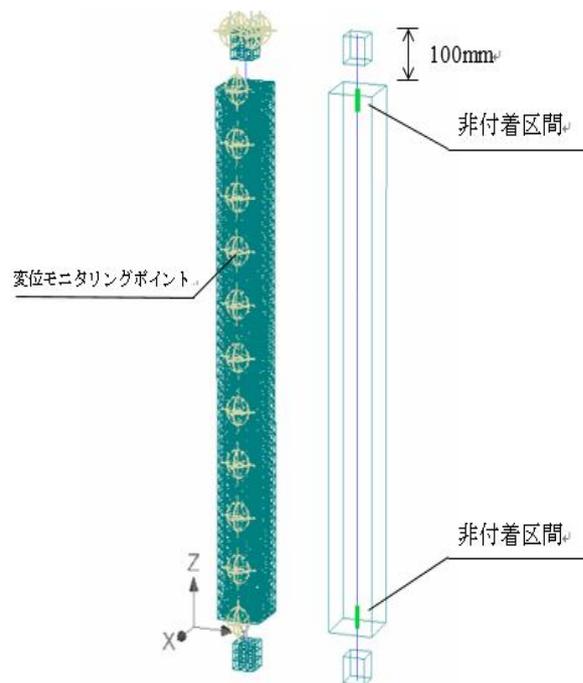


図-9 3次元FEM解析モデル

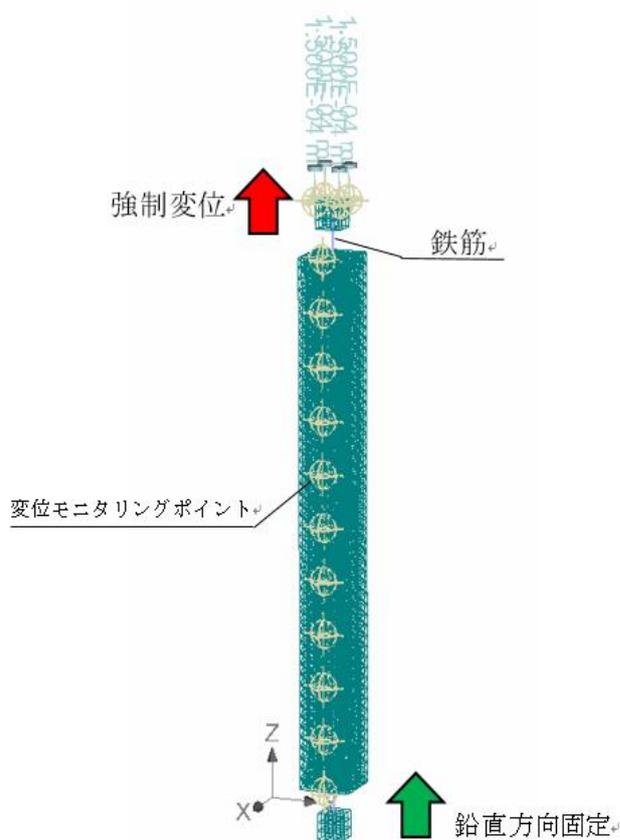


図-10 解析状況

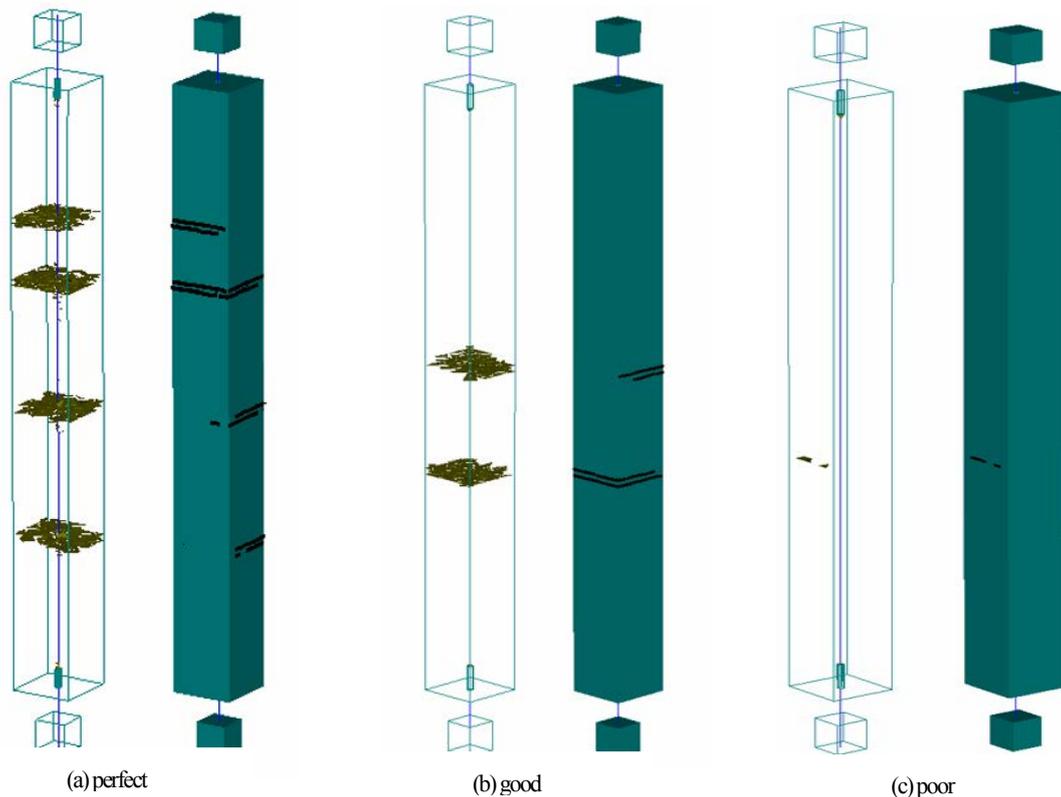


図-11 ひび割れモデル

従って、AFRP ロッドに珪砂の表面処理を施すことで、コンクリートとの付着性が向上すると言える。また、perfect と付着力が良好な good のモデル内部のひび割れ状況より、モデル表面に発現したひび割れは、内部では鉄筋の周りを覆うように発現していることがわかる。これは、Bigaj らのモデルが異形鉄筋を想定しているため、鉄筋のふしにおける支圧抵抗力が作用したためだと考えられる。

7. 結論

本研究では、コンクリートと AFRP ロッドとの AFRP ロッド表面処理による付着性向上の関係を検討することを目的として、鉄筋と表面処理の異なる 3 種類の AFRP ロッドを用いて両引き試験を実施した。

両引き試験は梁の引張側に近い応力状態である。本試験より梁のような応力状態におけるコンクリートと AFRP ロッドとの AFRP ロッド表面処理による付着性向上の関係性が確認できた。さらに、本研究で行った両引き試験の結果を数値解析の結果と比較すると、片引き試験と同様に珪砂の表面処理を施した AS-RC で付着性能の向上がみられた。従って、本研究の結果から以下の知見が得られた。

- (1) 両引き試験では AFRP-RC 全てで RC より大きい最大荷重を示した。これは AFRP ロッドの引張強度が高い影響が表れたためであると考えられる。
- (2) 両引き試験の結果、表面処理によってひび割れ分散性に差が確認できた。中でも、珪砂の表面処理を施した AS-RC では RC より多く広い範囲でひび割れが発生した。
- (3) 解析結果より、ひび割れ本数が多いほど付着性能が向上する関係にあることが確認できた。よって、AFRP ロッドに珪砂の表面処理を施すことで、付着性を向上させることが期待できる。

8. 参考文献

- 1) 土木学会 関西支部：コンクリート構造の設計・施工・維持管理の基本，社団法人 土木学会関西支部，pp335，2009.10
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，公益社団法人 土木学会，pp163，2013.10
- 3) 株式会社竹入製作所
<http://www.takeiri-seisakusyo.jp/tafrod/>
- 4) 岩根颯太郎，大西弘志，天野順弘，松原澄行：AFRP ロッ

ドを適用した RC 床版の耐力と付着強度の関係, FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2018.11

- 5) 柏翔悟: AFRP 補強材を用いたコンクリート部材の構造性能に関する研究, 岩手大学修士論文, 2018.3
- 6) 岩根颯太郎: 表面処理を施した AFRP ロッドを有する RC 構造の力学的挙動に関する研究, 岩手大学修士論文, 2019.3
- 7) 村田二郎, 河合紘弦: 両引き試験による鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究, 土木学会論文集 第 378 号/V-6, pp.107-115 1987.2

(Received August 30, 2019)

ANALITICAL STUDIES FOR BOND STRENGTH ON BETWEEN AFRP AND CONCRETE MEMBER

Koudai Okabe, Hiroshi Onishi, Masakazu Moriai, Sotaro Iwane and Norihiro Amano

In Japan, the Cracking and peeling of girder including damage due to salt damage is main reasons for replacement of concrete bridge superstructure. So that, AFRP is focused as a countermeasure of corrosion of steel reinforcement. Among them, the authors focused on aramid fiber reinforced plastics (AFRP). The low bond between AFRP and concrete can be cited as a weak point of AFRP rods with respect to applying to concrete. We found the possibility of improving bond between concrete and AFRP rod by surface treatment of AFRP rod.

In this paper, we also try to conduct the relation of bond stress and concrete strength with calculate.