AFRPロッドを適用したRC床版の耐力と 付着強度の関係

岩根 颯太朗1・大西 弘志2・天野 順弘3・松原 澄行4

1学生会員 岩手大学大学院 総合科学研究科地域創生専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5) E-mail:g0117004@iwate-u.ac.jp

²正会員 岩手大学准教授 理工学部システム創成工学科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5) E-mail:onishi@iwate-u.ac.jp

³サカイ産業株式会社 繊維事業部 (〒427-8512 静岡県鳥田市細鳥1349-1) E-mail:norihiro-amano@sakai-grp.co.jp

⁴株式会社 竹入製作所 アラミド複合材料事業部 (〒498-0002 愛知県弥富市東中地1-200) E-mail:matsubara@takeiri.com

道路橋RC床版に認められるコンクリートの浮きや剥離・剥落等の損傷は、塩害等による鉄筋の腐食が 原因となっている場合が多い、本研究では、鉄筋の腐食に伴う劣化損傷を根本的に防止するために、RC 床版の鉄筋の代替物としてAFRPロッドを適用することを考えた、AFRP(Aramid Fiber Reinforced Polymer) は腐食しない材料であり、強度等については十分な性能を有しているが、コンクリートとの付着力が低い ことが問題となるものと考えられる。著者らは、AFRPロッドに表面処理を施すことによる付着強度の改 善やそれに伴うRC床版の耐力の変化について検討を行った。

Key Words : AFRP, bond strength, punching shear test, tension test

1. はじめに

近年,社会基盤の長寿命化に向けた補修補強において 腐食損傷を生じることがないなど耐久性に優れ,従来の 材料と比較して軽量で機械的性能も遜色ない材料として FRPが着目されている.また,同様に新設構造物に用い る材料としてもFRPの活用を提案している研究もある. ここで,著者らは,道路関係構造物の中でも特に維持管 理に多大な費用を要しているRC床版に着目した.RC床 版においては疲労による損傷も大きな劣化要因ではある が,それと同時に床版に使用される鉄筋の腐食損傷に伴 うコンクリートのうきや剥離も大きな問題となっている. そこでRC床版の鉄筋の代替としてAFRP用いることによ り腐食損傷を根本的に回避することを考えた.

AFRPで製造された補強材(ロッド)の特徴として、繊維の引張強度は鋼材の4倍、比重は鋼材の1/6であることの他に、耐候性に優れていることや、絶縁性に優れ磁化しないこと、-80℃の極低温環境にも耐えうるなどの点がある^り.

しかし, AFRPロッドを鉄筋の代替補強材として用い

る際の課題点として、AFRPロッドとコンクリートとの 間の付着力が低いことがある³.

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い、このロッドを用いた RC床版の押し抜きせん断試験を行うことにより押し抜 きせん断耐力が改善されるかどうかについての検討を行 った.



写真-1 AFRP ロッド(珪砂付き)

表-1 各種部材の材料特性値

材料	压縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm²)
コンクリート	33.7		25.4
鉄筋(D6)		526	195
鉄筋(D10)		548	188
AFRP ロッド		1,150	68.6

2. 材料特性

供試体に使用したコンクリート,鉄筋,AFRPロッド の材料特性を表-1に示す.コンクリートは材齢28日での 強度である.またAFRPロッドについては、参考値¹⁰を表 示している.供試体の一覧を表-2に示す.A-RCには表 面処理を行わないAFRPロッドを、AA-RCには化学的な 表面処理が行われたAFRPロッドを、AS-RCには表面に 珪砂を付着させたAFRPロッドを使用している.両引き 試験では鉄筋はD10、AFRPロッドはφ9のものを使用し、 床版の押し抜きせん断試験では鉄筋はD6、AFRPロッド はφ5のものを使用している.

3. 両引き試験

(1) 供試体寸法および載荷状況

両引き試験で使用した供試体の寸法は、ロッド長さ 2000m、コンクリート部分が100mm×1000mm×1000mmの 正方形断面である(図-1).供試体寸法図を図-1に示す. 供試体の補強材の上下2箇所に取り付けた固定冶具をジ ャッキにより引き上げ、載荷を行った.極力偏心荷重が 生じないように、供試体の軸線と試験機の中心線が一致 するように注意をし、供試体を正しく設置した.載荷状 況を写真-2に示す.

(2) 載荷方法

載荷に際して金属冶具を用いると、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 のため、エポキシ樹脂および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-3).本 実験では供試体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.

表-2 供試体の一覧

供試体名	主筋(両引)	主筋(押し抜き)	表面処理
RC	鉄筋(D10)	鉄筋(D6)	
A-RC			
AA-RC	AFRP (φ9)	AFRP (φ5)	分子結合
AS-RC			珪砂付き



図-1 両引き供試体寸法(mm)



写真-2 載荷状況



写真-3 定着状況



図-2 両引きひび割れ図

(3) 実験結果

各タイプの試験結果の一例を表-3に示す.

a) 最大荷重の比較

最後に横ひび割れが発生するまでの最大荷重は表-3に 示すように、AFRP-RCの最大荷重がRCの値を上回る結 果となった.これはAFRPロッドの引張強度が高く降伏 をしない特徴を示しているものだと考える.

b) 破壊状況

本試験における供試体のひび割れ状況を図-2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後, 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 分では付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.

一般的に付着が良好であるとひび割れ本数が多く, 不良であるとひび割れ本数が少ないとされている.今 回の実験では,A-RCが一番ひび割れ本数が少なく,AS-RCがRCよりも本数が多く広い範囲で発現する結果となった.このことから,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の弱さが改善される可能 性がある.

4. 押し抜きせん断試験

(1) 供試体寸法および載荷状況

押し抜きせん断試験で使用した RC 床版の寸法は,幅

表-3 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	26.9	-	3
A-RC	33.1	1.23	1
AA-RC	35.5	1.32	2
AS-RC	35.6	1.33	4



図-3 供試体形状および配筋図(mm)



図-5 押し抜きせん断試験ひび割れ状況

1000mm,長さ2000mm,床版厚は60mmで複鉄筋配置である.一方,AFRP-RC床版の寸法は幅,長さおよび床版厚については RC床版と同様であるが,床版底面はAFRPの腐食しない特徴を生かし, π 型断面としている.鉄筋よりも比重の小さいAFRPロッドを補強材に用い,さらに断面積を小さくすることでコンクリート量を減らすことができるため,RC床版と比較すると軽量化されている.

RC床版およびAFRP-RC床版の供試体の形状寸法と配筋を図-3に示す.RC床版供試体は,引張側の主鉄筋を 45mm間隔,配力筋を64mm間隔で配置している.AFRP-RC床版供試体は,引張側の主鉄筋および配力筋を 110mm間隔で配置している.また,RC床版の圧縮側に は引張鉄筋量の1/2を配置し,AFRP-RC床版には引張側 と同様の配置としている.有効高さはどの供試体も 44mmとした.供試体底面に設置した変位計の位置を図-4に示す.



写真-5 AA-RC 床版の破壊状況

(2) 載荷方法

供試体は長辺方向を単純支持,短辺方向を弾性支持とした.供試体の四隅には,載荷に伴う支点上の浮き上がりを抑制することを目的に冶具による固定を施している. 載荷に際しては150×60mmの載荷板を供試体中央に設置し,ジャッキを使用して20kNごとに載荷と除荷を繰り返す,繰り返し載荷を実施した.載荷状況を写真-4に示す.



(3) 実験結果

a) 破壊状況

本実験の破壊時における底面のひび割れ状況を図-5に 示す.また,AA-RC床版の底面中央部における破壊状況 を写真-5に示す.床版上面では,載荷板直下で載荷板の 形状通りに上面コンクリートに陥没した.床版底面では, 軸直角方向にひび割れが発現したのち,細かいひび割れ が四隅に向かい進展していた.床版底面の一部ではコン クリートのはく離が確認出来ており,さらにはコンクリ ートのはく落や鉄筋またはAFRPロッドの露出が確認で きた.これは,押し抜きせん断破壊に伴うダウエル作用 によるものである.

b) たわみ分布

各タイプの床版長手方向のたわみ分布を図-6に示す.

たわみは荷重の増加に伴い供試体中央を中心として対称 に増加していることがわかる.RC床版に対してAFRP-RC床版は全体的に大きなたわみを生じており,荷重が 20~30kN付近を超過したころから特にRC床版との板剛 性が全体的に乖離していることが確認できた.AFRP-RC 床版で比較すると,AS-RC床版が他のAFRP-RC床版(A-RC床版,AA-RC床版)よりも供試体中央における変位が

表4 最大押し抜きせん断耐荷力

供試体	最大 耐荷力(kN)	RC との 比較	A-RCとの 比較
RC	76.9		
A-RC	38.0	0.494	
AA-RC	41.3	0.537	1.09
AS-RC	44.6	0.580	1.18

小さいことがわかる.両引き試験にもみられた,AS-RC が付着に対して優位である可能性が影響しているのでは ないかと考察できる.

c) 押し抜きせん断耐荷力

本実験における各種RC床版の最大耐荷力を表-4に示 す.この最大耐荷力は載荷試験における供試体破壊時に 確認された最大押し抜きせん断耐荷力である.RC床版 とAFRP-RC床版を比較すると、AFRP-RC床版がRC床版 の0.49~0.58倍となっている.これは、断面形状が異な ることから、破壊に抵抗できるコンクリート量の違いに 大きく起因するものであると考えられる.また、表面処 理を行っていないアラミド補強材を使用しているA-RC 床版と他のAFRP-RC床版(AA-RC床版, AS-RC床版)を比 較すると、どちらの床版もA-RC床版より高い耐荷力を



図-7 荷重-変位関係

示した.特に,AS-RC床版はA-RC床版に対して約18%高い値を示している.表面処理による付着強度の変化が床版の耐荷力に影響を与えていると考えられる.

d) 荷重-変位関係

各タイプの床版の供試体中央における荷重と変位の関 係を図-7に示す.載荷荷重が20kN増加するごとに除荷 と載荷を繰り返す,繰り返し載荷を行ったが,この図で は床版の性状の変化を把握しやすくするためにグラフで は包絡線を表示している.RC床版では載荷に伴い単調 に荷重と変位が増加し,変位が10.54mmに至った時点で 押し抜きせん断破壊を生じた.A-RC床版では19.33mm, AA-RC床版では20.53mm,AS-RC床版では18.82mmの変位 で押し抜きせん断破壊を生じた.このことから,RC床 版に比べAFRP-RC床版が荷重に対して大きく変形するこ とが確認できた.これはAFRPロッドと比べ,鉄筋は弾 性係数が大きいため床版自体の剛性に差が生じている事 実を反映しているものである.

e) 荷重-ひずみ関係

本実験における供試体中央に配置した主鉄筋および配 力筋の荷重とひずみの関係を図-8に示す.

軸直角方向に配置した引張側主鉄筋のひずみは図-8(a) に示すとおりである.この位置では、RC 床版では試験 終盤に至って 2000µを超過していることが確認できる. AFRP-RC 床版の 3 体では、荷重が 20kN を超過した付近 から荷重増加とともにひずみが大きく増加しており、そ の中でも AS-RC 床版は他の AFRP-RC 床版よりもひずみ の値が大きくなる傾向を示している.

橋軸方向に配置した引張側配力筋のひずみの変化を図 -8(b)に示す.主鉄筋のひずみと比較すると、A-RC 床版 のひずみの値が大きくなり、AS-RC 床版では載荷開始時 から荷重 20kN 付近までのひずみ値は小さく、その後急 激に増加するという主筋と同様の測定結果を示した.図



図-8 荷重-ひずみ関係



図-9 押し抜きせん断破壊モデルに対する応力分布とその範囲

-8(a)~(c)より, AA-RC 床版は他の AFRP-RC 床版と比較して,荷重の増加に伴うひずみの発生量が低くなる結果となっている.

(4) 理論押し抜きせん断耐荷力

本実験では、RC 床版と AFRP-RC 床版では断面形状が 異なっている. AFRP-RC 床版にはその特徴を生かした π 型断面を採用しており、それに伴い配筋やコンクリート 量等の違いから、RC 床版と AFRP-RC 床版の耐荷力を単 純に比較するだけでは適切な比較とはいえない.

そこで、既往のRC床版押し抜きせん断耐荷力の算定 式から求めた理論値と本実験値の比較検討を行う. AFRP-RC床版の押し抜きせん断耐荷力の算定において は床版の断面形状を反映した算定を試みている.

RC 床版の押し抜きせん断耐荷力への影響因子は非常 に多いため、これまで多くの耐荷力機構や耐荷力算定式 が提案されてきた.筆者らは、図-9に示す押し抜きせん 断破壊モデルに基づかれている、長方形型の床版での誤 差の少ない松井式 ^{3,0}に着目し、((la)~(lc)式)を用いて各 床版の実験値との比から考察を行う.

$$P_{0} = \tau_{smax} \{ 2(a + 2x_{m})x_{d} + 2(b + 2x_{d})x_{m} \} \\ + \sigma_{tmax} \{ 2(a + 2d_{m})c_{d} \\ + 2(b + 2d_{d} + 4c_{d})c_{m}$$
(1a)
$$\tau_{smax} = 0.252\sigma_{ck} - 0.000246\sigma_{ck}^{2}$$
(1b)

$$\sigma_{t\,max} = 0.583 \sigma_{ck}^{2/3} \qquad (1c)$$

ここで、a, b:載荷版の主鉄筋方向,配力鉄筋方向の辺 長(cm), x_m , x_d : 主鉄筋,配力鉄筋の有効高さ(cm), Cm, Cd: 引張側主鉄筋,引張側配力筋のかぶり(cm), τ_{smax} : コンクリートのせん断強度(kgf/cm²), σ_{tmax} : コンクリー トの引張強度(kgf/cm²), σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)とする.

a) 実験値と理論値の比較

表-5 理論値と実験値の比較

供試体	実験 押し抜きせん 断耐荷力(kN)	理論 押し抜きせん 断耐荷力(kN)	理論値 との比
RC	76.9	81.1	0.948
A-RC	38.0	33.8	1.12
AA-RC	41.3	33.8	1.22
AS-RC	44.6	33.8	1.32

本実験における実験押し抜きせん断耐力と松井式((la) ~(lc)式)を用いて算出した理論値の結果を表-5 に示す. 理論値押し抜きせん断耐荷力と本実験における押し抜き せん断耐荷力との比は, RC床版では0.948, A-RC床版で は 1.12, AA-RC床版は 1.22, AS-RC床版は 1.32 となった.

RC床版の実験押し抜きせん断耐荷力は約5%の誤差で あり、理論値に近似しているといえる.そのことから、 採用した RC 床版の理論押し抜きせん断耐荷力の算定式 の妥当性が得られた.AFRP-RC 床版では、AFRP ロッド の材料特性値から弾性が低いために、せん断力に対する 引張鉄筋のダウエル作用に対する耐性が懸念されていた が、どの AFRP 床版供試体も実験値が理論値を上回り、 特に AS-RC 床版は 32%上回る結果となった.

b) ダウエル効果の影響

本実験では、AFRP-RC床版供試体がπ型断面となって いる.そのため表-5の理論値の結果は、図-9に示した松 井式の破壊モデルのダウエル作用が影響を及ぼす範囲に おいて、床板下面のリブ部分について考慮し理論値の算 定を行っている.そこで、AFRP-RC床板の断面をRC床 版と形状にしたものについて計算すると、理論押し抜き せん断耐荷力は約60kNとなった.

5. 結論

RC構造において、塩害・凍害による鋼材腐食が問題 視されている中、筆者らはその根本的な解決策として鉄 筋の代わりに、腐食することのないAFRPロッドを適用 する構造に着目した.表面処理が行われたAFRPロッド とコンクリートとの付着性状、AFRPロッドを床版に適 用した際の性能および2つの関係性を検討するために、 両引き試験および静的載荷による押し抜きせん断試験を 行った.

両引き試験では、ひび割れ分散性からAFRPロッドの 表面処理による付着強度の変化を評価した.押し抜きせ ん断試験では、AFRP補強材の特徴を生かしたπ型断面を 有するAFRP-RC床版と、通常のRC床板を用いている. それに伴い配筋等の違いから単純な実測値の比較ではな く、理論値との比較も行い、以下の知見が得られた.

- く, 理論値との比較も110, 以下の知免が待られた.
- (1) 両引き試験において,表面処理によってひび割れ 分散性に差が確認できた.その中でもAS-RCはRC より多く広い範囲でひび割れが発生した.
- (2) RC床版, AFRP-RC床版のすべての供試体において, 押し抜きせん断破壊を生じた. RC実験値と理論値 を比較すると差が5%となり近似しているといえる ため,実験の妥当性が確認できた.
- (3) 鉄筋に比べ、AFRP補強材の弾性が低いことによる 部材せん断耐力の低下が懸念されていたが、実験 値と理論値の比がA-RC床版では1.12、AA-RC床版 は1.22、AS-RC床版は1.32となり、実験値が理論値 を上回った.
- (4) 表面に珪砂を付着させる処理を行ったAFRPロッド を使用したAS-RC床版の実験押し抜きせん断耐荷 力が表面処理を行っていないAFRPロッドを使用し たA-RC床版の1.18倍となった.表面処理による耐

力向上が図られた可能性が見受けられた.

- (5) 両引き試験と押し抜きせん断試験において性能の 向上がみられる供試体のタイプが同一であること から関係性があるのではないかと考えられる.そ のことからAFRPロッドの表面に珪砂を付着させる ことで付着強度が向上する可能性がみられ,その 影響により床版の押し抜きせん断耐荷力が向上し たと考えられる.
- (6) π型断面のAFRP-RC床板については耐力の低下がみ られたものの,断面形状によりRC床版と同等の押 し抜きせん断耐荷力が得られる可能性があるため, 比較検討を進める必要があると考える.

参考文献

- 株式会社竹入製作所 <u>http://www.takeiri-seisakusyo.jp/tafrod/</u>
 ** 初任 エアPP はかけた PL/シュートがける #
- 2) 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
- 村田二郎,河合糺弦: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
- 松井繁之:道路橋床板 設計・施工と維持管理,森 北出版,2007.10
- 5) 大西弘志:橋梁構造における各種損傷の評価とその 対策に関する研究,大阪大学博士学位論文,2005.12
- 6) 阿部忠:道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関 する研究,構造力学論文集 Vol.53A, pp.199-207, 2007.3

THE RELATION BETWEEN BOND STRENGTH AND SHEAR STRENGTH OF RC SLABS REINFORCED BY AFRP RODS

Sotaro IWANE, Hiroshi ONISHI, Norihiro AMANO, Sumiyuki MATSUBARA

Damage such as lifting, peeling of concrete in the RC construction is often caused by corrosion of reinforcing steels due to salt damage. Therefore, in this research, in order to fundamentally solve the corrosion of the reinforcing steels, we considered applying the AFRP rod as a substitute for the reinforcing steels in the RC construction. Although AFRP does not corrode and has sufficient strength, it is a problem that bond with concrete is low. The authors compared the relationship between the bond strength by applying surface treatment to the AFRP rod and the proof strength of the RC slab by comparing the both bar ends pullout test and the punching shear test.