

論文 AFRP ロッドを適用した床版と RC 床版の押し抜きせん断試験による耐力の関係

大西 弘志*1・盛合 将和*2・天野 順弘*3・松原 澄行*4

要旨： 著者らは RC に鉄筋代替物として AFRP ロッドを適用することを考え、表面処理を施した AFRP ロッドを適用した床版と RC 床版に対し押し抜きせん断試験を行った。鉄筋を用いた床版を含め、全ての供試体は押し抜きせん断破壊を生じた。押し抜きせん断破壊荷重の実験値と評価式による推定値を比較すると、AFRP を適用した供試体において AFRP の表面処理により押し抜きせん断耐力を向上できる可能性が確認できた。

キーワード： AFRP, 表面処理, 押し抜きせん断耐力

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すでに供用経過年数 50 年を超過し、高度経済成長期に建造された構造物をはじめとした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・剥離が架替の理由として挙げられている。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一つとして、鉄筋を腐食しない素材で置き換えることが考えられる。この手法に活用できる材料の一つに繊維補強樹脂 (Fiber Reinforced Plastic: FRP) 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°C の極低温環境にも耐えうるなどの点がある³⁾。

AFRP ロッドを鉄筋代替材として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⁾。

既往の損傷事例調査においては輪荷重の繰り返し作用が原因と推定された RC 床版の破壊形態は、押し抜きせん断破壊が多いことが分かっている⁵⁾。そこで本研究では、AFRP ロッド (写真-1) を使用した際の RC 床版の破壊形態の確認を行い、AFRP ロッドが鉄筋の代替物



写真-1 AFRP ロッド

となり得る可能性があるのかどうかを検討するため、表面処理を施した AFRP ロッドを適用した床版と RC 床版の押し抜きせん断試験を行い、押し抜きせん断耐力の確認を行った。

2. 試験概要

2.1 材料特性

供試体を使用したコンクリート、鉄筋、AFRP ロッドの材料特性を表-1、供試体の一覧を表-2 に示す。AFRP ロッドを適用した供試体のうち、AA-RC 床版供試体には化学的表面処理が行われた AFRP ロッド、AS-RC 床版供試体には表面に珪砂を付着させた AFRP ロッドを使用している。鉄筋は D6、AFRP ロッドは $\phi 5$ であり、コンクリート強度や弾性係数は材齢 28 日でのものである。また AFRP ロッドについては、参考値³⁾を表示している。

2.2 供試体寸法・配筋および変位計位置

RC 床版供試体の寸法は幅 1000mm、長さ 2000mm、床版厚は 60mm で複鉄筋配置である。一方、AFRP-RC 床版

*1 岩手大学 理工学部システム創成工学科 准教授 博 (工) (正会員)

*2 岩手大学大学院 総合科学研究科修士課程地域創生専攻

*3 サカイ産業株式会社 繊維事業部

*4 株式会社竹入製作所 アラミド複合材料事業部

表-1 各種部材の材料特性

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(D6)		526	195
AFRP ロッド(φ5)		1,150	68.6

表-2 供試体の一覧

供試体名	主筋	表面処理	供試体数
RC 床版供試体	鉄筋(D6)		各 1 体
A-RC 床版供試体	AFRP (φ5)		
AA-RC 床版供試体		化学的 表面処理	
AS-RC 床版供試体		珪砂を表面 に付着	

供試体の寸法は幅、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 の腐食しない特徴に基づき、かぶりを少なくした 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軽量化が可能となる。

RC 床版供試体は、引張側の主鉄筋を 45mm 間隔、配力鉄筋を 64mm 間隔で配置している。AFRP-RC 床版供試体は、引張側の主筋および配力筋を 110mm 間隔で配置している。また、RC 床版供試体の圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置し、AFRP-RC 床版供試体には引張側と同様の配置となっている。補強材の有効高さはどの供試体も 44mm としている。RC 床版供試体および AFRP 床版供試体の形状寸法と配筋を図-1 に示す。また、実験時に供試体底面に設置した変位計の位置を図-2 に示す。実験は、各供試体 1 体ずつの計 4 体に対して実施した。

2.3 荷重方法

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、荷重に伴う支点上の浮き上がりを抑制することを目的に治具による浮き上がり防止を施している。荷重に際しては 150mm×60mm の鋼製荷重板を供試体中央に設置し、ジャッキを使用して 20kN ごとに荷重と除荷を繰り返す、繰り返して漸増荷重を実施した。荷重状況を写真-2 に示す。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

各供試体の試験終了時（押し抜きせん断破壊発生時）における底面のひび割れ状況を図-3 に示す。また、破

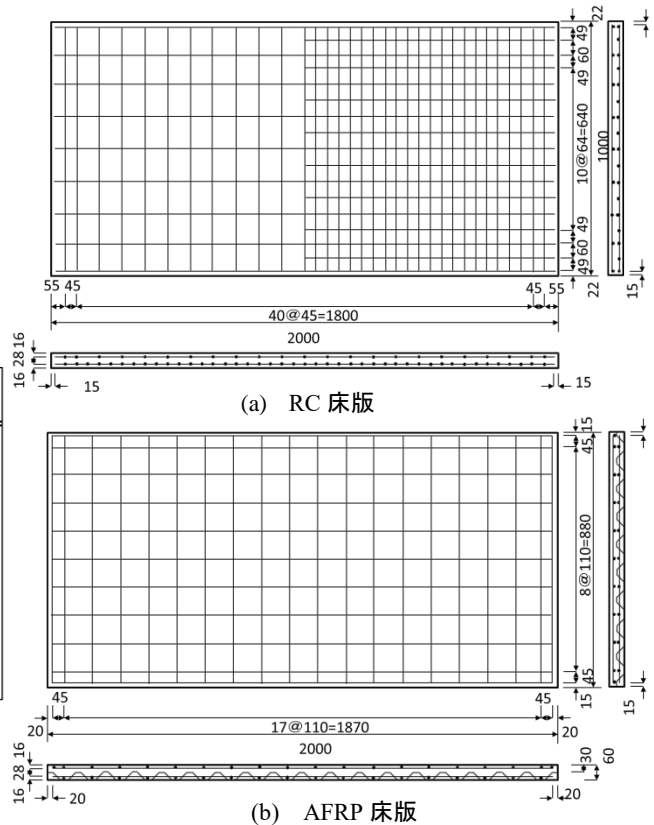


図-1 供試体形状および配筋図 (単位: mm)

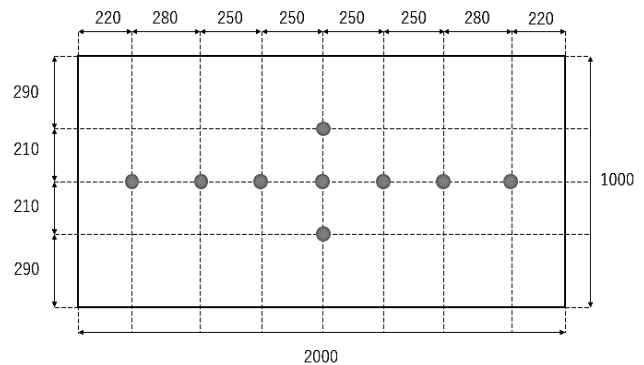
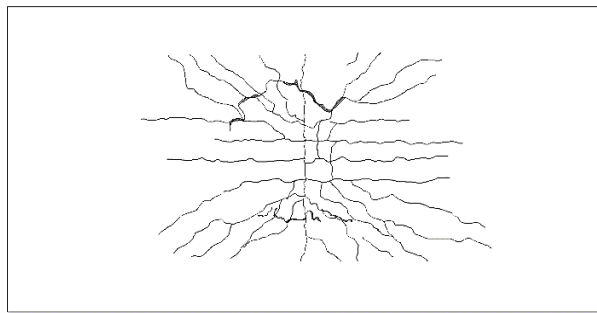


図-2 床版下面変位計設置位置 (単位: mm)

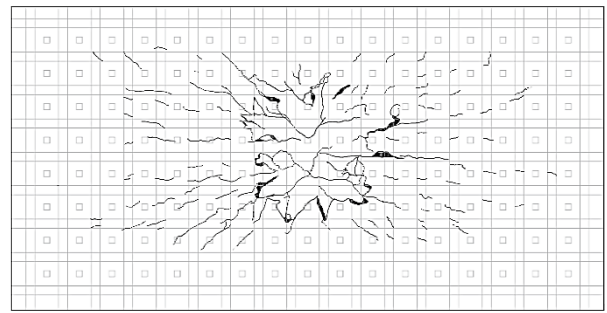


写真-2 荷重状況

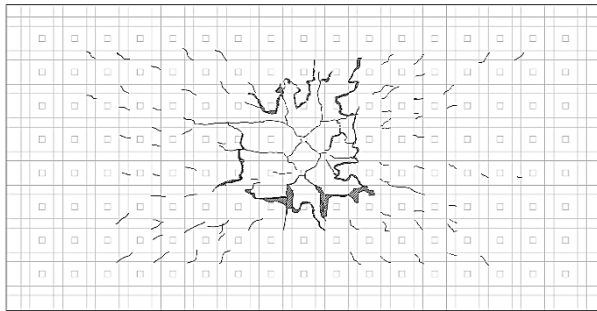
壊状況の一例として A-RC 床版供試体の底面中央部における破壊状況を写真-3 に示す。床版上面では、荷重板の形状通りに上面コンクリートが陥没した。床版底面では、



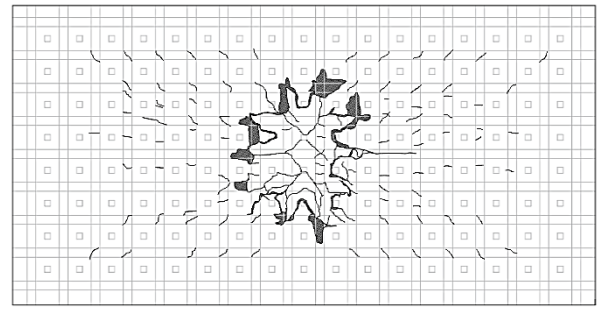
(a) RC



(b) A-RC



(c) AA-RC



(d) AS-RC

図-3 ひび割れ状況



写真-3 A-RC 床版の破壊状況

軸直角方向にひび割れが発生した後、細かいひび割れが四隅に向かい進展した。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、床版の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。

3.2 押し抜きせん断耐力

本実験で得られた各供試体の押し抜きせん断耐力を表-3に示す。RC 床版供試体と AFRP-RC 床版供試体を比較すると、AFRP-RC 床版供試体が RC 床版供試体の 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、押し抜きせん断破壊に抵抗できるコンクリート量に違いがあることが一つの要因であると考えられます。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 床版供試体と他の AFRP-RC 床版供試体(AA-RC 床版供試体, AS-RC 床版供試体)を比較すると、どちらの床版も A-RC 床版供試体より高い押し抜きせん断耐力を示した。

表-3 最大押し抜きせん断耐力

供試体	最大耐力 (kN)	RC との比較	A-RC との比較
RC 床版	76.923		
A-RC 床版	37.962	0.49	
AA-RC 床版	41.292	0.54	1.09
AS-RC 床版	44.622	0.58	1.18

特に、表面に珪砂を付着させている AFRP ロッドを使用した AS-RC 床版供試体は A-RC 床版供試体に対して約 18%高い値を示している。

3.3 たわみ分布

各供試体の床版長手方向のたわみ分布を図-4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。試験終了時まで RC 床版供試体は供試体中央で 10mm, AFRP-RC 床版供試体では 20mm の変位を生じた。本研究では RC 床版供試体に対して AFRP-RC 床版供試体は版としての剛性が小さいこともあり全体的に大きなたわみを生じたものと考えられる。

3.4 荷重-変位関係

各供試体の中央における荷重と変位の関係を図-5に示す。本研究では実験時に載荷荷重が 20kN 増加するごとに除荷と載荷を繰り返す、繰返し漸増載荷を行ったが、この図では各供試体の性状を把握しやすくするため、荷重-変位曲線の包絡線を表示している。RC 床版供試体

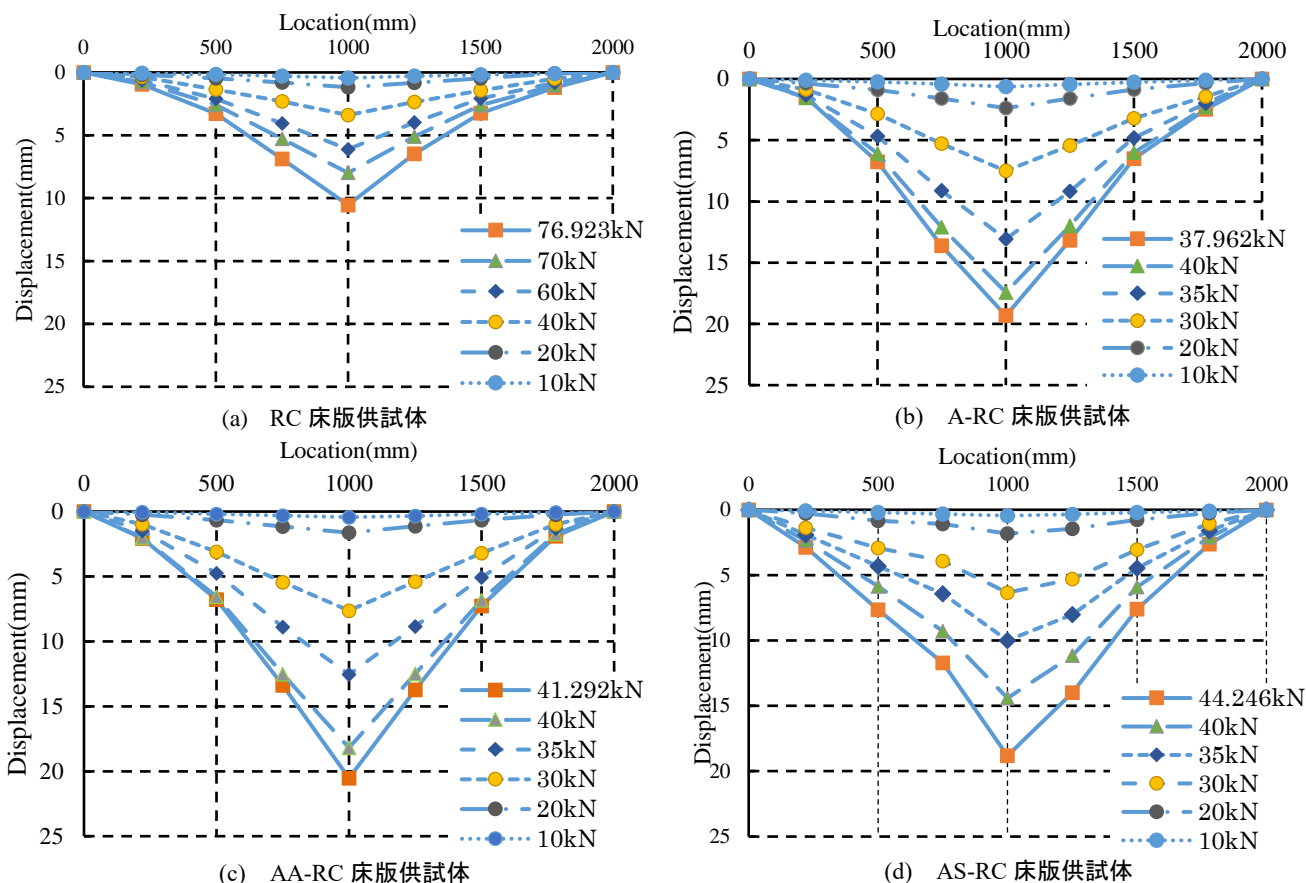


図-4 たわみ分布図

では荷重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 床版供試体では 19.33mm, AA-RC 床版供試体では 20.53mm, AS-RC 床版供試体では 18.82mm の変位で押し抜きせん断破壊を生じた。RC 床版供試体と AFRP-RC 床版供試体を比較すると、荷重が 15~20kN に満たない初期の時点では各供試体の剛性に大きな差は出ていないが、荷重が 20kN を超過する付近から版剛性に大きな差が生じていることが確認できた。これは AFRP ロッドと鉄筋の弾性係数や配置数の差が各供試体の版剛性の差として明確に表れたものと考えている。RC 床版供試体と A-RC, AA-RC, AS-RC 床版供試体の 20kN 以上の剛性の比は、それぞれ 0.24, 0.11, 0.17 となり、剛性の差が大きいと判断できる。

3.5 荷重-ひずみ関係

荷重と供試体中央に配置した主鉄筋および配力筋に発生したひずみの関係を図-6 に示す。

供試体中央の引張側主筋の荷重-ひずみは図-6(a) に示すとおりである。RC 床版供試体では押し抜きせん断破壊直前には 2500 μ 程度のひずみが鉄筋に発生している。AFRP-RC 床版供試体では、荷重が 20kN を超過した付近から荷重増加に伴いひずみが大きく増加しており、A-RC 床版供試体は他の AFRP-RC 床版供試体よりもひずみの値が大きくなる傾向を示している。

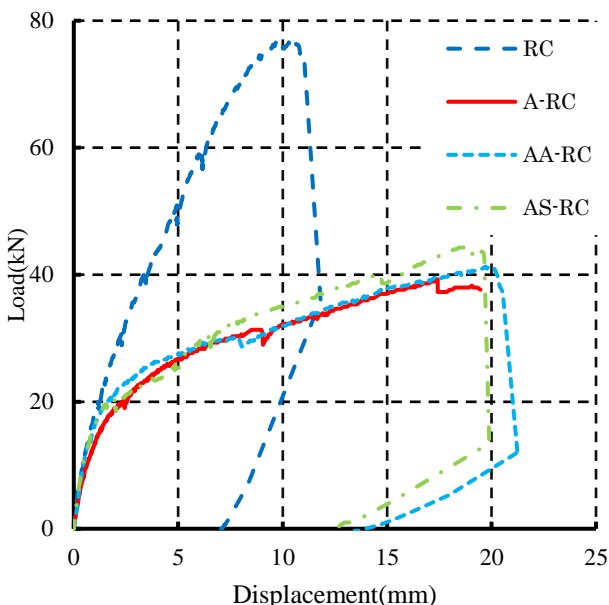


図-5 荷重-変位関係

表-4 推定最大押し抜きせん断耐荷力

供試体	【実験値】 押し抜きせん断 耐荷力(kN)	【松井式】 押し抜きせん断 耐荷力(kN)	実験値/ 松井式
RC	76.923	81.084	0.948
A-RC	37.962	33.812	1.12
AA-RC	41.292	33.812	1.22
AS-RC	44.622	33.812	1.32

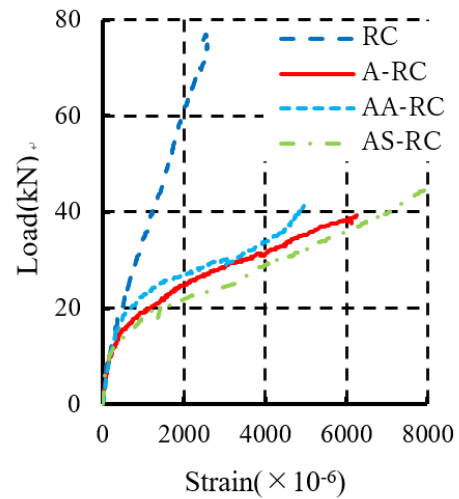
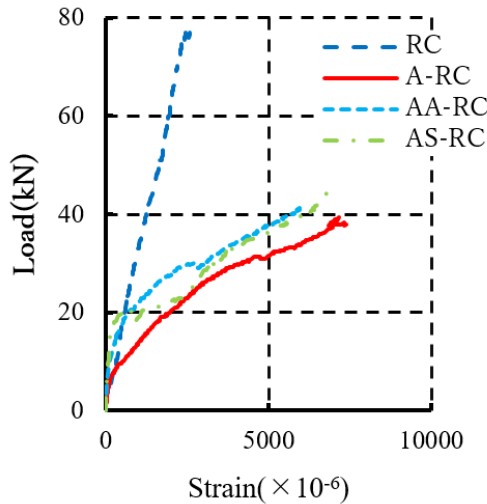


図-6 床版中央の引張側補強材における荷重-ひずみ関係

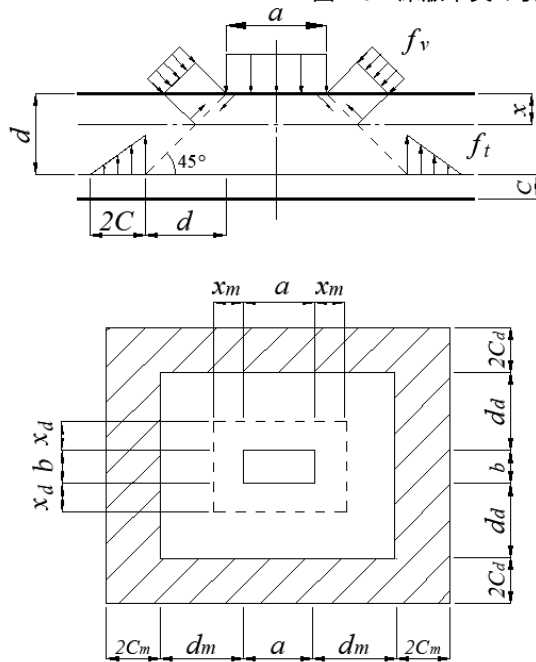


図-7 押し抜きせん断破壊モデルに対する
応力分布とその範囲

供試体中央の引張側配筋の荷重-ひずみ関係を図-6(b)に示す。この図を確認すると、主筋のひずみと同様、RC 床版供試体では 2500 μ 程度のひずみが確認でき、AFRP-RC 床版供試体では載荷荷重が 20kN を超過した以降はひずみが急激に増加し、破壊直前には 5000 μ ~ 8000 μ 程度のひずみを確認できている。

4. 押し抜きせん断耐荷力や破壊性状の評価

本研究では RC 床版供試体と AFRP-RC 床版供試体で断面形状を変化させている。AFRP-RC 床版供試体には π 型断面を用いており、それに伴う配筋やコンクリート量の違いから、RC 床版供試体と AFRP-RC 床版供試体の耐荷力を単純比較しただけでは適切な比較ではない。

そこで、既往の RC 床版の押し抜きせん断耐荷力の算

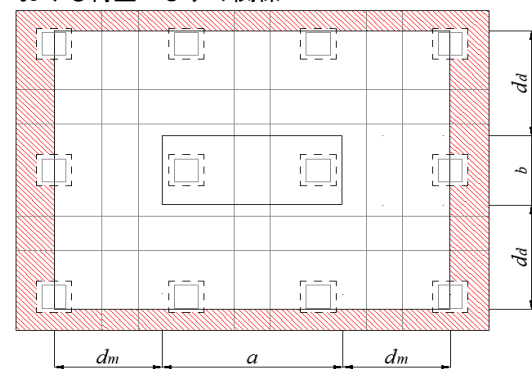


図-8 AFRP 床版供試体の剥離破壊範囲
(点線：中立軸高さ)

定式から求めた推定値と本実験で得られた値の比較を行う。AFRP-RC 床版供試体の押し抜きせん断耐荷力の算定においては補強筋の配筋を考慮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-7 に示す押し抜きせん断破壊モデルに基づいている、長方形載荷版による実験での誤差の少ない松井式⁵⁾に着目し、式(1)~式(3)を用いて各床版供試体の実験値との比較を行う。

$$P_0 = \tau_{smax}\{2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m\} + \sigma_{tmax}\{2(a + 2d_m)c_d + 2(b + 2d_d + 4c_d)c_m\} \quad (1)$$

$$\tau_{smax} = 0.252\sigma_{ck} - 0.000246\sigma_{ck}^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{tmax} = 0.583\sigma_{ck}^{2/3} \quad (3)$$

ここで、a, b: 載荷版の主筋方向、配筋筋方向の辺長(cm), x_m, x_d : 主筋、配筋筋の有効高さ(cm), C_m, C_d : 引張側主筋、引張側配筋のかぶり(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。

図-8 に AFRP 床版供試体の剥離破壊範囲を示す。RC 床版供試体と比較すると、引張領域のコンクリート量が π 型断面により減少していることが分かる。

表-5 コンクリート剥離破壊範囲幅の比較

供試体	【実験値】 剥離範囲幅 (mm)	【松井式】 剥離範囲幅 2C(mm)	実験値/ 松井式
RC	108.14	25.65	4.22
A-RC	113.79	25.65	4.44
AA-RC	136.52	25.65	5.32
AS-RC	150.47	25.65	5.87

4.1 実験値と推定値の比較

(1) 押し抜きせん断耐荷力

本実験で確認された押し抜きせん断耐力と松井式（式(1)～式(3)）を用いて算出した計算値を表-4に示す。AFRP-RC床版供試体では松井式に断面の変化を反映させた評価式として計算値を求めている。松井式による計算値と本実験における押し抜きせん断耐荷力との比は、RC床版供試体では0.948、A-RC床版供試体では1.12、AA-RC床版供試体は1.22、AS-RC床版供試体は1.32となった。

(2) 剥離破壊範囲

本実験における剥離破壊の幅（＝引張応力 f_t の分布幅）を、図-7に示す押し抜きせん断破壊モデルを用いて算定した結果を表-5に示す。本実験における剥離破壊範囲幅は載荷板端からの45°方向線と引張側主筋の中心線との交点を始点として、その点から主筋方向に延びるコンクリートの剥離端部までの距離としている。

AFRP-RC床版供試体では、AFRPロッドの弾性係数が低いため、せん断力の作用に伴うダウエル作用によって、剥離破壊範囲がRC床版供試体よりも小さくなるのが懸念されていたが、RC床版供試体とAFRP-RC床版供試体では明確な低下は確認できず、逆にAFRP-RC床版供試体のほうが、押し抜きせん断耐荷力が小さく、剥離範囲の幅が大きくなる傾向になった。剥離範囲の計算値との差も大きく、これらは鉄筋とAFRPロッドのせん断弾性係数の違いによる影響だと考えられる。実験値の増加と剥離範囲の増加が同じような傾向を示しており、剥離範囲の増分が押し抜きせん断耐荷力の増加に寄与しているものと考えられる。また、AFRP-RC床版供試体の断面をRC床版供試体と同様にした場合の押し抜きせん断耐荷力を計算すると、補強筋の配筋が異なるため、理論押し抜きせん断耐荷力は約60kNとなり、RC床版供試体の実験値に比べて小さくなった。

5. 結論

本研究では、AFRPロッドを適用したAFRP-RC床版とRC床版の基本的な性能を確認するために静的載荷試験により押し抜きせん断耐力を確認し、RC床版とAFRP-RC床版の比較検討を行った。

本実験では、AFRPロッドの特徴を生かした π 型断面を有するAFRP-RC床版と、通常のRC床版について実験を行っている。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、既往の算定式を用いた推定値との比較も行い、以下の知見が得られた。

- (1) 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床版供試体の押し抜きせん断荷重の実験値と算定値を比較すると

差が5%となり近似しているため、実験の妥当性が確認できた。

- (2) AFRP-RC床版供試体の押し抜きせん断荷重の実験値と推定値の比がA-RC床版供試体では1.12、AA-RC床版供試体は1.22、AS-RC床版供試体は1.32となり、実験値が推定値を上回った。また、実験の剥離破壊範囲幅においてはRC床版供試体よりAFRP-RC床版供試体の方が大きくなる傾向を示した。
- (3) 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床版供試体の実験押し抜きせん断耐荷力は表面処理を行っていないAFRPロッドを使用したA-RC床版供試体の1.18倍となった。表面処理により押し抜きせん断耐力を向上できる可能性が確認できた。
- (4) π 型断面のAFRP-RC床版供試体では断面形状の変化に伴う耐力の低下がみられた。長方形断面を採用した際の押し抜きせん断耐荷力の推定値が60kNなので、配筋量を1.5倍程度にするとRC床版供試体と同等の押し抜きせん断耐荷力となる可能性があるため、今後の比較検討を進める必要がある。

謝辞

本研究では岩手大学大学院地域創生専攻 岩根颯太郎氏に実験実施等で協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

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/>（閲覧日：2019年1月14日）
- 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) 松井繁之ほか：道路橋床板 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.10