

論文

AFRP ロッドを適用した床版の押し抜きせん断試験による耐力の検討

岩根颯太郎*, 大西弘志**, 天野順弘***, 松原澄行****

*岩手大学, 大学院総合科学研究科修士課程地域創生専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)

**博(工), 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)

***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)

****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)

鉄筋コンクリート床版に発生する主な損傷であるコンクリートの浮きや剥離・剥落は、鉄筋の腐食が原因とされる場合が多い。本研究では鉄筋の腐食を根本的に解決するために、RCに鉄筋の代替物としてAFRPロッドを適用することを考えた。著者らは、AFRPに表面処理を施すことによる付着力の向上が可能であるのかどうかを、押し抜きせん断試験を行い検討した。

キーワード: AFRP, 付着強度, 表面処理, 押し抜きせん断試験

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期以降に大量に整備された社会資本の老朽化が進み、補修、補強や更新を行わねばならない時期を迎えている¹⁾。

社会資本の1つである鋼道路橋上部工の架替理由の内訳は鋼材の腐食と床版の損傷が全体の9割以上を占めている。

過積載車等の重車両を含む自動車の輪荷重を直接支えている道路橋床版の損傷の発生は、安全で円滑な交通の維持を困難にするとともに、地域の社会経済活動や激甚化する気象災害への対応に悪影響を及ぼす恐れがある。

床版の損傷の大部分は輪荷重の繰り返し載荷に伴う疲労損傷であるが、疲労損傷の発生や進展を助長する要因の主なものにはコンクリート自体の材料劣化や床版内部に配置される鉄筋等の鋼材における腐食損傷が考えられている。

これらの損傷のうち鉄筋における腐食損傷に対する根本的な解決策の一つとして、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(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(AFRP)に着目した。

AFRPで製造された補強材(ロッド)の特徴として、引張強度は鋼材の4倍、比重は鋼材の1/6であることに加え、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²⁾。

しかし、AFRPをコンクリート部材の補強材として用いる際の課題点として、AFRPとコンクリートとの間の



写真-1 AFRP ロッド

付着力の確保がある³⁾。

そこで本研究では、写真-1に示すAFRPロッドに表面処理を施したもので補強された床版の押し抜きせん断試験を行い、RC床版との耐力の比較検討を行った。

RC床版では既往の損傷事例調査により、最終破壊まで到達したRC床版の破壊性状は、そのほとんどが押し抜きせん断破壊を呈していることが分かっている⁴⁾。本研究ではAFRPが床版において鉄筋の代替物となり得る可能性があるのかどうかを検討するため静的耐荷力を調査した。

2. 試験概要

2.1 材料特性

表-1 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(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	鉄筋(D6)		各1体
A-RC	AFRP (φ5)		
AA-RC		分子結合	
AS-RC		珪砂付き	

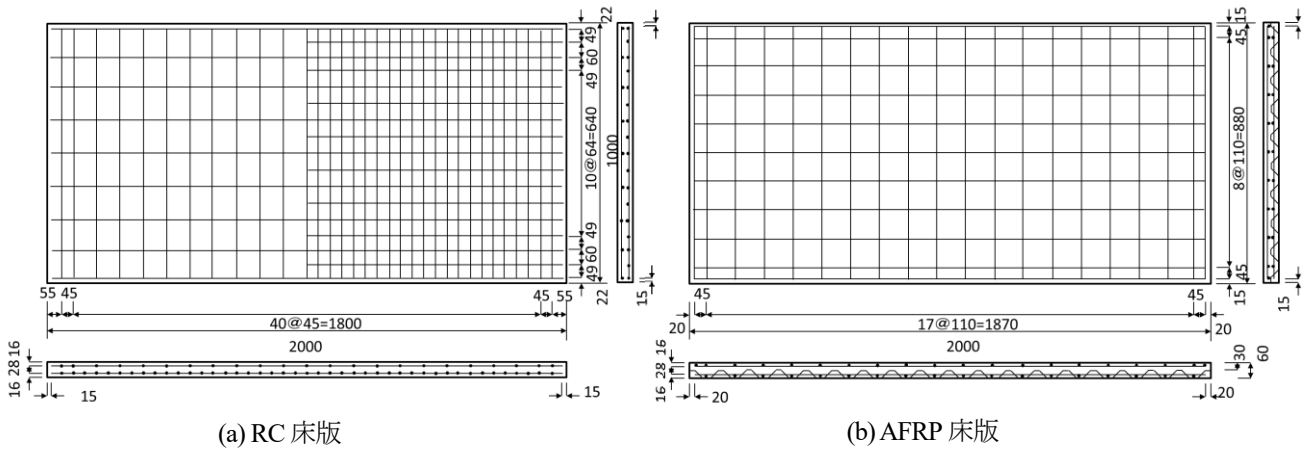


図-1 供試体形状および配筋図(mm)

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。鉄筋は D6、AFRP ロッドは φ5 のものを使用しており、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²⁾を表示している。

2.2 供試体寸法・配筋および変位計位置

供試体の一覧を表-2 に示す。A-RC 床板には表面処理がされていない AFRP ロッドを、AA-RC 床板には化学的な表面処理が行われた AFRP ロッドを、AS-RC 床板には表面に珪砂を付着させた AFRP ロッドを使用している。本試験で使用する RC 床版の寸法は幅 1000mm、長さ 2000mm、床版厚は 60mm で複鉄筋配置としている。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、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、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-1 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

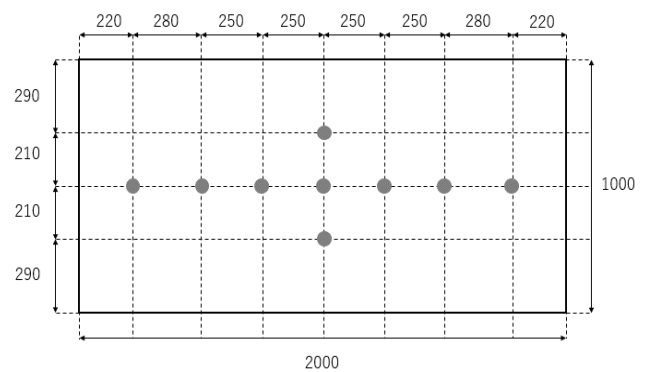


図-2 変位計設置位置(mm)

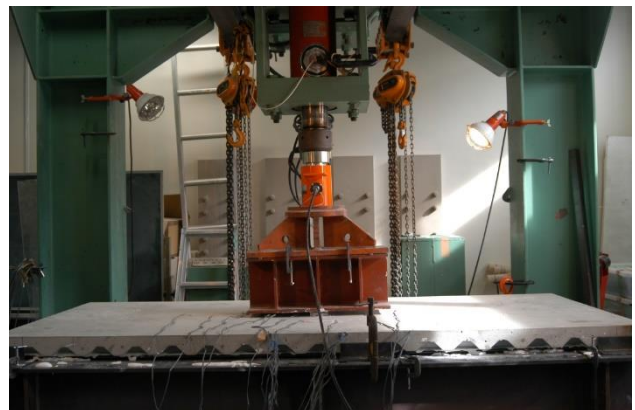
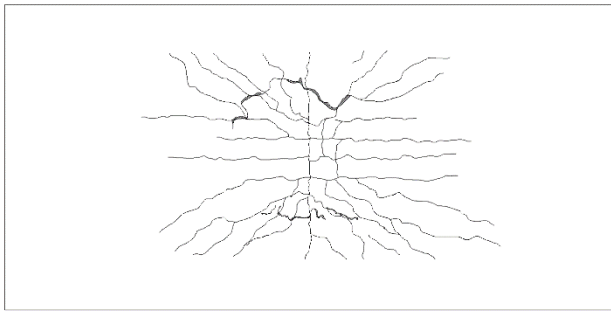
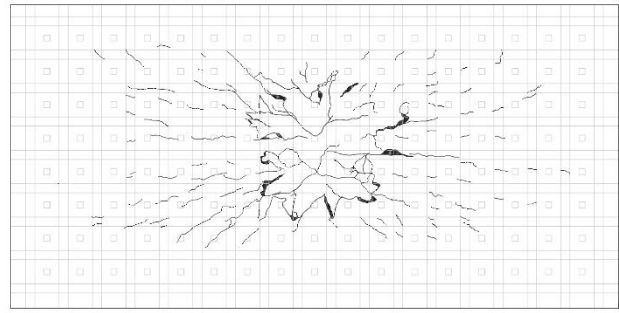


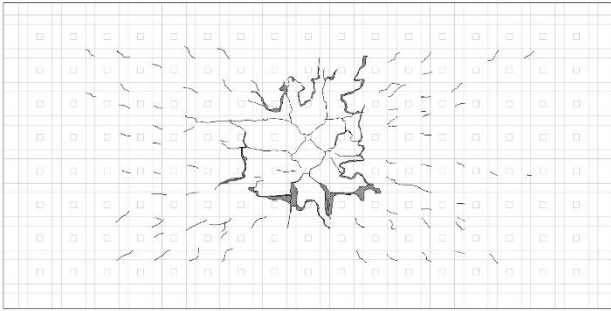
写真-2 載荷状況



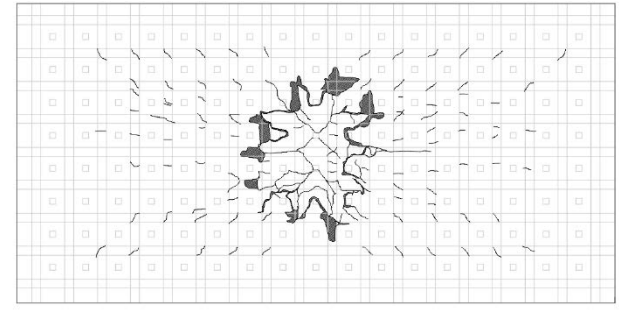
(a) RC



(b) A-RC



(c) AA-RC



(d) AS-RC

図-3 ひび割れ状況

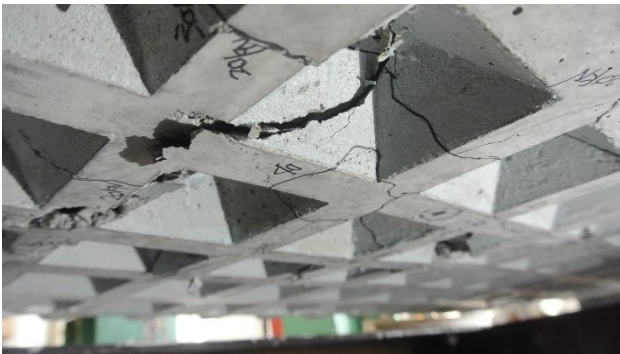


写真-3 A-RC 床版の破壊状況

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-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固定を施している。荷重に際しては 150×60mm の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

表-3 最大押し抜きせん断耐荷力(kN)

供試体	最大耐荷力	RC との比較	A-RC との比較
RC	76.923		
A-RC	37.962	0.49	
AA-RC	41.292	0.54	1.09
AS-RC	44.622	0.58	1.18

本実験の破壊時における底面のひび割れ状況を図-3 に示す。また、A-RC 床版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、荷重板直下で荷重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離や鉄筋または 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。

3.2 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-3 に示す。この最大耐荷力は荷重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

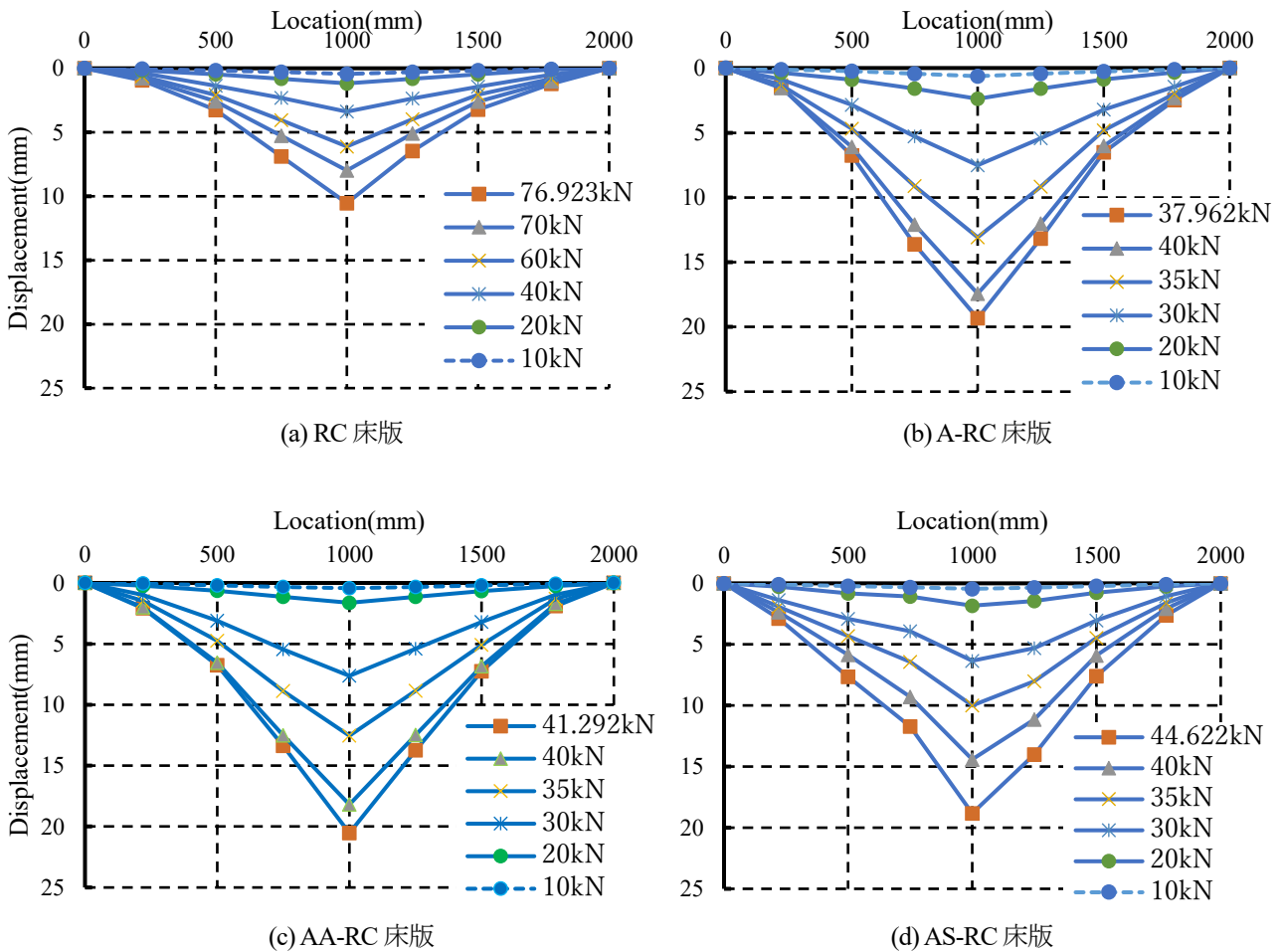


図-4 たわみ分布図

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示した。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 床版は A-RC 床版に対して約 18%高い値を示している。

3.3 たわみ分布

各タイプ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 付近を超過したところから特に 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。

3.4 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-5 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

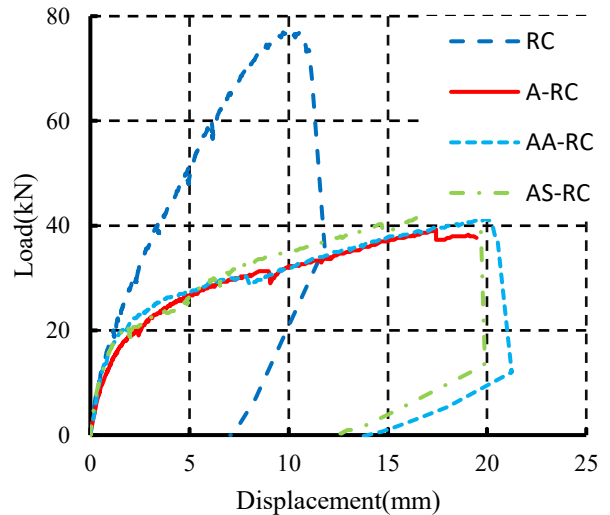


図-5 荷重 - 変位関係

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。

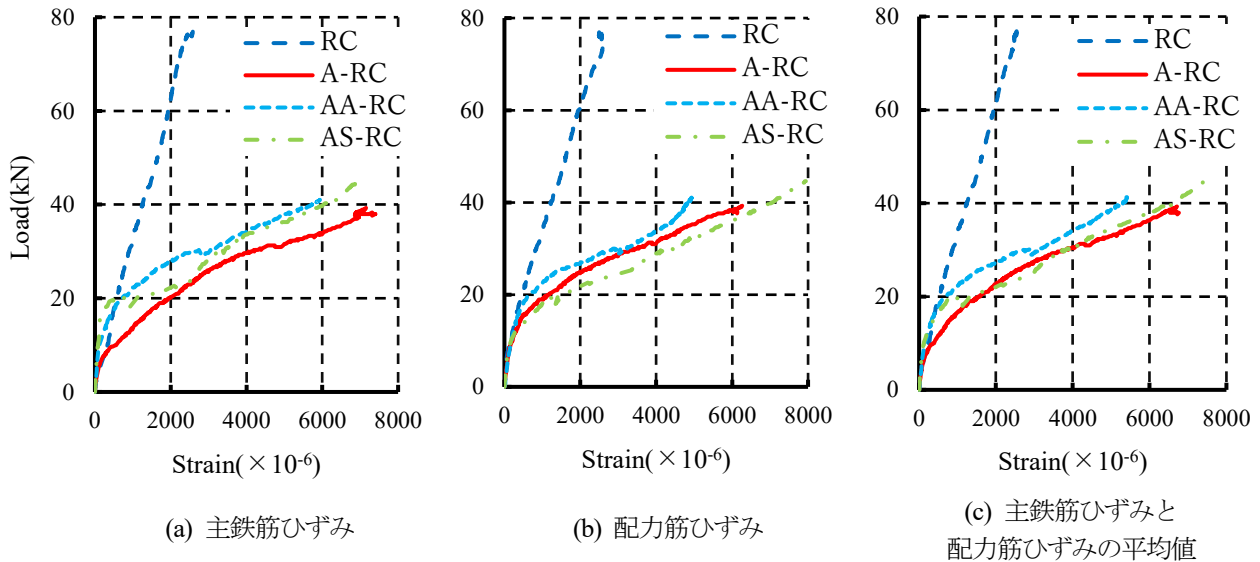


図-6 荷重 - 変位関係

3.5 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-6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-6(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2000 μ 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-6(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-6(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力への影響因子は非常に多いため、これまで多くの耐力機構や耐力算定式

表-4 実験値と理論値の比較

供試体	実験 押し抜きせん断耐力(kN)	理論 押し抜きせん断耐力(kN)	理論値との比
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

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かれている、長方形型の床版での誤差の少ない松井式^{4), 5)}に着目し、((1a)~(1c)式)を用いて各床版の実験値との比から考察を行う。

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

$$\tau_{smax} = 0.252\sigma_{ck} - 0.000246\sigma_{ck}^2 \quad (1b)$$

$$\sigma_{tmax} = 0.583\sigma_{ck}^{2/3} \quad (1c)$$

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), C_m, C_d : 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。

4.1 実験値と理論値の比較

本実験における実験押し抜きせん断耐力と松井式((1a)~(1c)式)を用いて算出した理論値の結果を表-4に示す。理論値押し抜きせん断耐力と本実験における押し抜きせん断耐力との比は、RC床版では0.948、A-RC床版

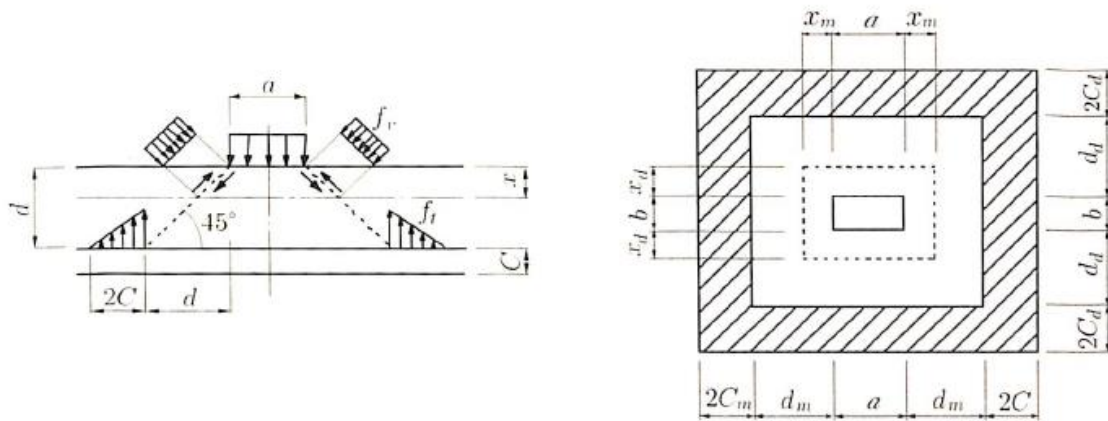


図-7 押し抜きせん断破壊モデルに対する応力分布とその範囲

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-RC 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。

4.2 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-4 の理論値の結果は、図-7 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と床版下面のリブ部分が重なる部分を、応力が分布する範囲とみなし理論値の算定を行っている。そこで、AFRP-RC 床版のコンクリート断面を RC 床版と同様の形状にしたものとして、応力が分布する範囲の面積から計算すると、理論押し抜きせん断耐荷力は約 50kN となった。さらに、コンクリート断面だけでなく配筋においても RC 床版の断面であるとして計算すると、理論値は約 60kN となった。

5. 結論

本研究では、塩害による RC 床版損傷について鉄筋の代替案として、腐食することのない 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る押し抜きせん断耐力により、RC と AFRP を用いたコンクリート部材としての性能の比較検討を行った。

本実験では、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 床版を用いている。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。

(1) RC, AFRP-RC 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。

(2) RC 床版において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 ロッド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。

今後の課題として、 π 型断面の AFRP-RC 床版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か、比較検討を進める必要があると考える。

参考文献

- 1) 第 4 期 国土交通省技術基本計画：国土交通省 2017.3
- 2) 株式会社竹入製作所
<http://www.takeiri-seisakusyo.jp/tafrod/>
- 3) 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
- 4) 松井繁之：道路橋床版 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 床版の押し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

(2018 年 7 月 20 日受付)