

FRP歩道用拡幅床版の実橋への 適用性に関する研究

田村 修一¹・保呂 秀次²・久保 圭吾³
角間 恒⁴・岡田 慎哉⁵・松井 繁之⁶

¹正会員 修（工）宮地エンジニアリング株式会社 技術部（〒103-0006東京都中央区日本橋富沢町9番19号）

E-mail: tamura.shuichi@miyaji-eng.co.jp

²正会員 宮地エンジニアリング株式会社 技術部（〒103-0006東京都中央区日本橋富沢町9番19号）

E-mail: horo.hidetsugu@miyaji-eng.co.jp

³正会員 博（工）宮地エンジニアリング株式会社 技術部（〒103-0006東京都中央区日本橋富沢町9番19号）

E-mail: kubo.keigo@miyaji-eng.co.jp

⁴正会員 博（工），（独）土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号）

E-mail: kakuma@ceri.go.jp

⁵正会員 博（工），（独）土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号）

E-mail: okada@ceri.go.jp

⁶正会員 工博，大阪大学名誉教授（〒565-0824吹田市山田西4-2-70-1006）

E-mail: shigeyuki.matsui@oit.ac.jp

既設橋梁に添架して歩道を拡幅する場合、大幅な死荷重増を避ける必要性から軽量の床版構造が望まれている。このため、軽量で耐食性に優れたFRP歩道用拡幅床版を開発した。本研究では、FRP床版材料単体の載荷試験を実施し、これに合わせたFEM解析結果と試験結果との比較により、材料特性の同定を行った。また、FRP床版の実橋への適用性を確認するため、実物大床版供試体を用いて、高欄への水平荷重に着目した静的耐荷力実験および、群集荷重や集中荷重による鉛直載荷試験を実施した。さらに、主桁とFRP床版の取付部における、風荷重による上揚力に対する耐荷性状を調べるため、取付部に着目した要素試験を実施した。本論文では、これらの試験結果について報告するとともに、実橋床版への適用性に関して考察する。

Key Words：歩道拡幅FRP,耐荷性能

1. はじめに

歩道および歩行者自転車道においては、道路構造令で歩行者、自転車、車いす同士がスムーズにすれ違うために確保すべき幅員が規定されているが、道路橋においては、必要幅員が確保されていない橋梁が数多く存在しており、歩道の拡幅による使用者の安全対策が求められている。

橋梁で歩道を拡幅する場合、死荷重が過剰にならないように鋼製歩道を添架することがあるが、上部工重量の増加により既設桁の補強や下部工の補強等が必要となる場合もあり、さらなる軽量化が望まれている。また、路面の滞水による鋼材の腐食はもとより、海岸部や凍結防止剤を散布する積雪寒冷地では、塩害により鋼材の腐食が促進されることから、耐食性に優れた材料の選定が必

要となる。このような背景のもと、軽量、高強度で、耐食性に優れたGFRP製(ガラス繊維強化プラスチック、以下、FRP)の床版を用いた歩道拡幅工法を考案し、過年度の研究において床版上載タイプ¹⁾の工法についての検討を行ってきた。

本研究では、図-1に示すブラケット支持桁タイプの自転車歩行者道の拡幅構造を対象に、実橋への適用性を確認するため、実物大の試験体を用いた静的載荷試験を実施した。

また、FRP床版上に地覆、高欄を設置する場合、高欄基部の耐荷性状の検討が必要となる。このときの防護柵としては、(1)自動車に対するボックスビーム(車両用防護柵)、(2)自転車道と歩道の境界部の横断防止柵、(3)歩道用の転落防止柵が考えられ、3種の実物大の防護柵を模擬した供試体に、水平荷重に対する静的載荷実験を実

施した。

さらに、FRP床版は軽量であることから、風荷重の上揚力による主桁とFRP床版の取付部の耐荷性状が課題となる。このため、取付部に着目した要素試験を実施した。本論文では、これらの一連の実験結果に関して報告し、実橋床版への適用性に関して検討する。

2. FRPパネル（単体）の材料特性確認試験

(1) 試験概要

FRP材単体の耐荷性状を調べるため、 π 形断面のGFRP引抜成形材一枚を用いた載荷試験を実施した。このときの供試体の概要を図-2に示す。試験は、全長3900mm、幅600mmの π 形断面のFRP材を用い、支間2400mmの単純支持とした。荷重は、リブ2本に均等に載荷できるよう200mm×500mmの載荷板を用い、支間中央に載荷した。このとき、設計計算による群集荷重での曲げモーメント（7.916kN・m/m）と等価となる載荷荷重（3.95 kN）を設計荷重とした。表-1に、使用したFRP素材の材料特性を示す。

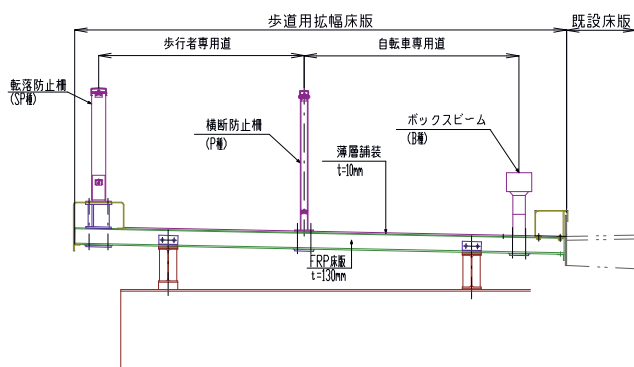


図-1 FRP 拡幅床版の構造

表-1 FRP 素材の材料特性

	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)	曲げ強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)
底板長手方向	379.0	28.0	-	-
底板幅方向	78.0	10.0	156.0	16.0

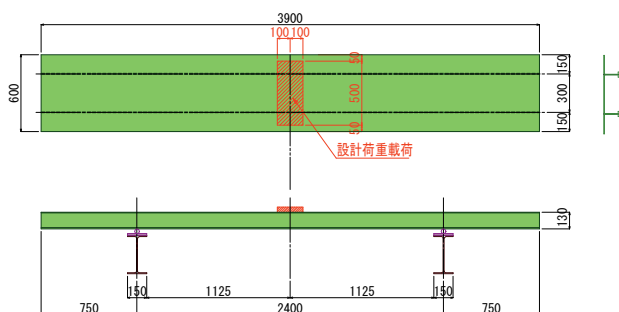


図-2 材料特性確認試験の供試体概要図

(2) 実験結果

図-3に、載荷点直下フランジにおける荷重と変位の関係を示す。ここで、図中のFEMは、FRP成形材を直交異方性材料でモデル化した幾何学的非線形を考慮した大変形FEM解析の結果である。実験では、荷重の増加とともに変位が線形的に増加し、20kN程度の載荷初期の状態では、FEM解析結果による荷重-変位関係とおおむね一致している。しかしながら、荷重25kNを変曲点に剛性が変化し、実験値の傾きが小さくなった。これは、この頃から生じていた、写真-1に示すようなFRP床板上フランジの面外変形の影響であり、その後1体目は荷重53.9kNで、2体目は58.1kNで荷重が低下し破壊に至った。この得られた最大荷重は、いずれも設計荷重3.95kNの14倍程度であり、FRP床版が極めて高い耐荷力を有することがわかった。

FRP材の破壊は、写真-1の供試体破壊時の写真より、載荷板エッジからの上フランジとリブの隅角部におけるせん断破壊の後、フランジのガラス繊維界面における板厚方向のき裂が発生する形態となった。なお、FRP床版では、隣接するFRP材と接着剤とブラインドリベットで固定されることから本実験のような自由端はなく、実構造物ではフランジの面外変形が拘束される。このため、実際のFRP床版での破壊荷重は、実験値より大きくなると推察される。

3. 鉛直力載荷試験

(1) 試験概要

FRP床版には、活荷重として群集荷重が載荷される。このため、活荷重に対する耐荷性状を確認するため静的載荷試験を行った。図-4,5に、鉛直力載荷試験に使用する供試体の概要を示す。供試体は、全長3900mm、幅600mmのFRP材を橋軸方向に4枚並べ、継手部をエポキ

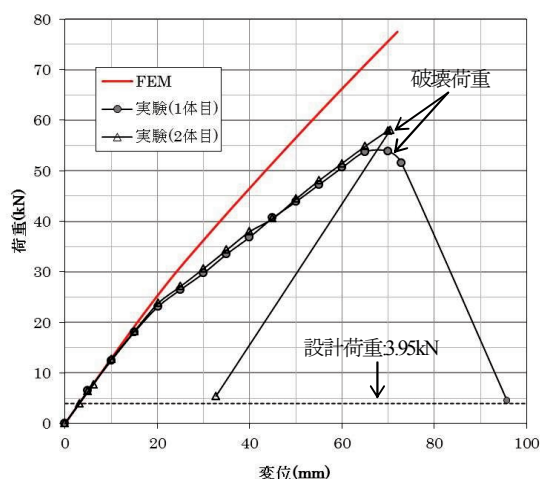


図-3 荷重と鉛直変位の関係（単体パネル）



載荷途中



供試体破壊後

写真-1 単パネル鉛直力載荷試験の状況

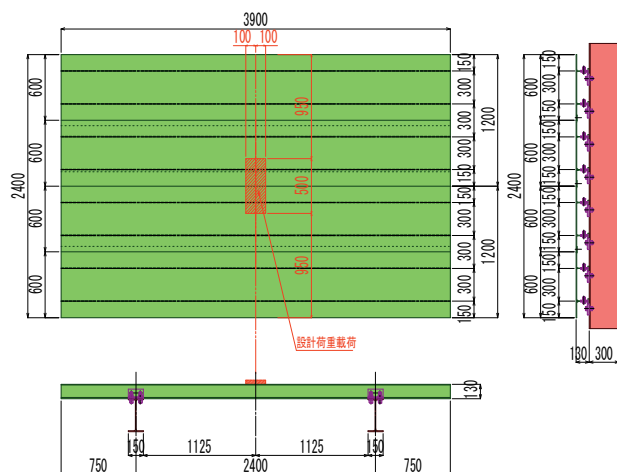


図-4 鉛直力載荷試験（分布荷重）の供試体概要図

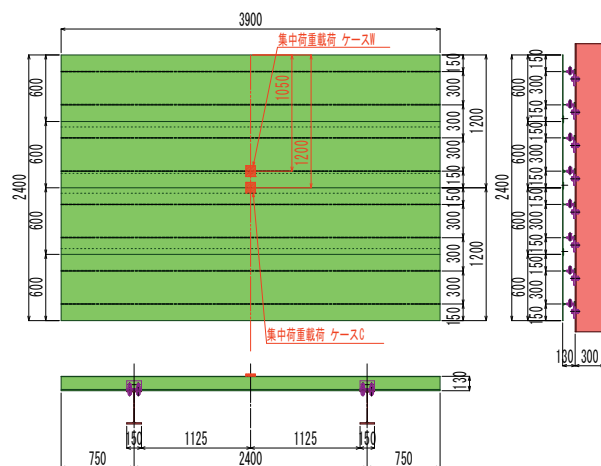


図-5 鉛直力載荷試験（集中荷重）の供試体概要図

シ樹脂系接着剤とブラインドリベットで接合した。載荷は、群集荷重を想定した等分布荷重載荷と、人が爪先で立った時を想定した集中荷重載荷の2ケースとした。なお、等分布荷重載荷では、床版面上に均等に荷重を載荷できないことから、荷重の偏載を考慮して中央2本のリブ上の支間中央に200mm×500mmの載荷板を介して載荷した。このとき、供試体中央の曲げモーメントが、群集荷重による設計曲げモーメント（7.916kN・m/m）と等価となる載荷荷重（3.95kN）を設計荷重とした。一方、集中荷重載荷では、人の荷重を想定した1.5kN（面積：100mm×100mm）をリブ間およびリブ上に載荷した。

(2) 実験結果

図-6に、等分布載荷時の載荷点直下フランジにおける荷重と変位の関係を示す。図中には、線形FEM解析を行った結果も併記した。これより、実験値は荷重の増加とともに変位が線形的に増加し、荷重60kN程度で剛性がわずかに低下した後、96.9kNで荷重が低下し破壊に至った。パネル単体での載荷試験と比べて破壊荷重が30kN程度大きな値となっているが、これはパネルを組み合わせることによる床板の面外変形が抑制されることと、隣接するFRP材への荷重の分配によるものと考えられる。このときの最大荷重96.9kNは、設計荷重3.95kNの

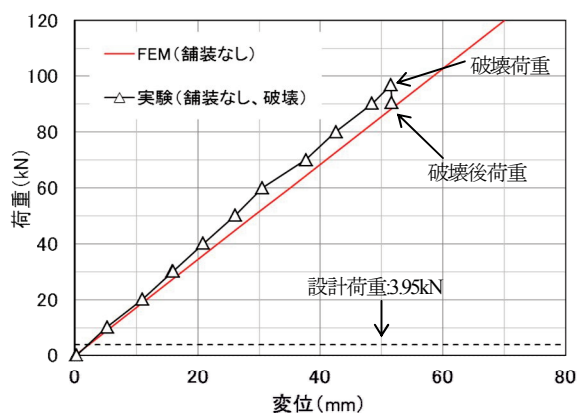


図-6 荷重と鉛直変位の関係（等分布荷重）

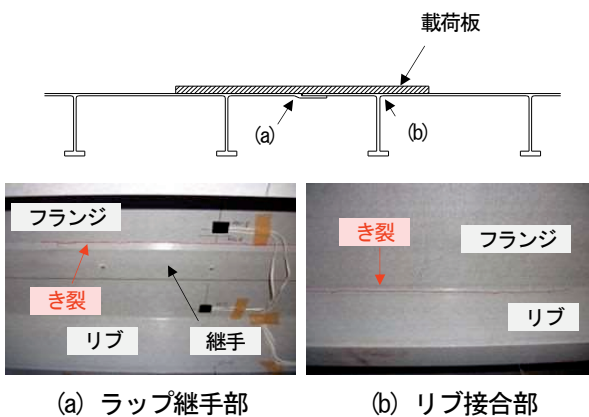


写真-2 鉛直力載荷（分布）試験の供試体損傷状況

24.5倍であり、FRP床版が活荷重に対して極めて高い耐荷力を有することが確認できた。また、実験結果とFEM解析結果は概ね一致しており、破壊荷重は推定できないものの破壊に至るまでの挙動についてFEMで概ね再現できると考えられる。

写真-2に、等分布荷重載荷試験後の供試体の損傷状況を示す。FRP床版の破壊は、床板とリブの接合部のせん断破壊、およびFRP材のラップ継手部の断面変化位置における繊維方向のき裂であった。これはFRP引抜成形材が、繊維方向に対して繊維直角方向の強度が小さい異方性材料であることに加え、リブ取付部やラップ継手部の断面急変部では、応力集中が生じるためと考えられる。ただし、供試体が破壊した後も90kN程度の荷重を保持しており、FRP床版が局所破壊しても全体崩壊に至るような破壊形態とならないことが確認できた。

リブ間に集中荷重を載荷したケースの荷重直下のリブにおける荷重と変位の関係を、図-7に示す。実験では、等分布荷重載荷時と同様に荷重の増加とともに変位が線形的に増加し、22.0kNで荷重が低下し破壊に至った。このときの荷重は、等分布荷重載荷時と比較して1/4以下となっており、等分布載荷をリブ1本分に換算したとしても小さい値となっている。これは、載荷板が小さいことから載荷点直下の局所的な応力集中の影響と考えられる。ただし、このときの破壊荷重22.0kNは、想定した集中荷重1.5kNの約15倍であり、集中荷重載荷時において

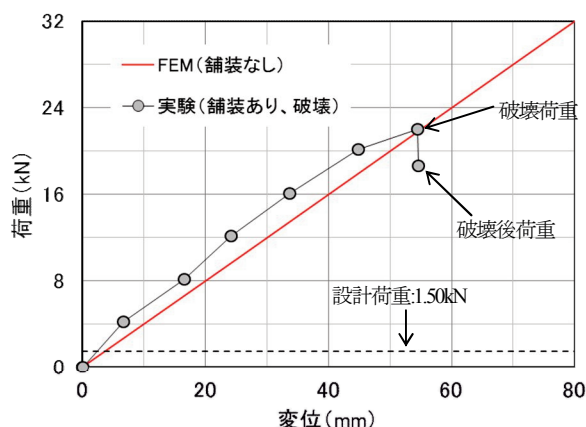


図-7 荷重と鉛直変位の関係 (リブ間集中荷重)



写真-3 リブ間集中荷重載荷試験後の損傷状況

もFRP床版は高い耐荷力を有することが確認された。また、FEM解析結果についても等分布載荷のケースと同様に実験結果とよく一致しており、破壊までの挙動を概ね再現可能であると判断できる。

写真-3に、集中荷重載荷試験後の損傷状況を示す。これより、リブ間に21kN載荷した状態においても、FRP継手部のずれが見られるものの、他に大きな変状はなく、実用上十分な耐荷力を有していることが確認できた。

4. 水平力載荷試験

(1) 試験概要

実験に使用した供試体の概要を図-8に、各高欄の基部の構造詳細を図-9に示す。FRP床版は、 π 形断面のGFRP引抜成形材を用いており、本供試体では、全長3900mm、幅600mmのFRP材を橋軸方向に4枚並べ、継手部をエポキシ樹脂系接着剤とブラインドリベットで接合した。各防護柵基部は、荷重に応じて、転落防止柵はFRPリブ3本、横断防止柵はFRPリブ2本、ボックスビームはFRPリブ6本を、床版上面と下面の鋼材でFRP床版をボルトで挟み込む構造とした。

載荷は、各高欄頂部をチェンブロックで引込むことで実施し、破壊に至るまで荷重を漸増させた。このときの設計荷重は、防護柵に作用する水平荷重(転落防止柵: 6.0kN, 横断防止柵: 1.17kN, ボックスビーム: 25.0kN)である。

FRPの材料試験は、通常、長手(繊維)方向のみ実施

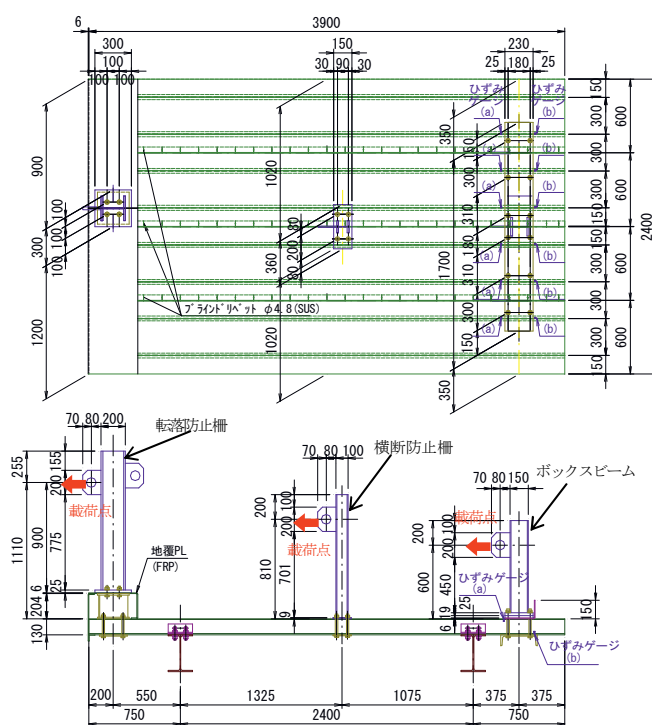
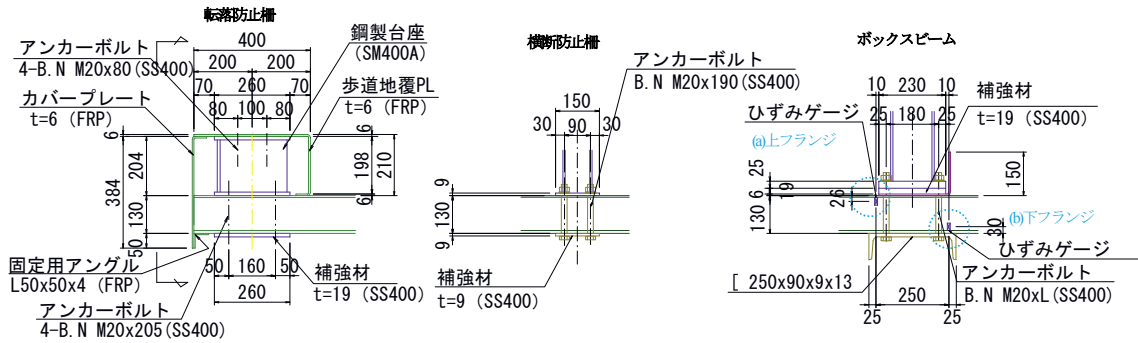
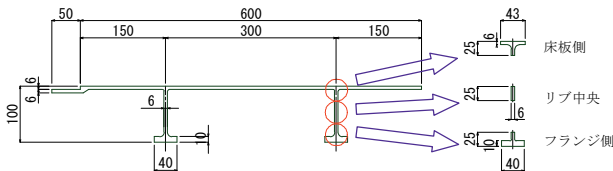


図-8 水平力載荷試験の供試体概要図



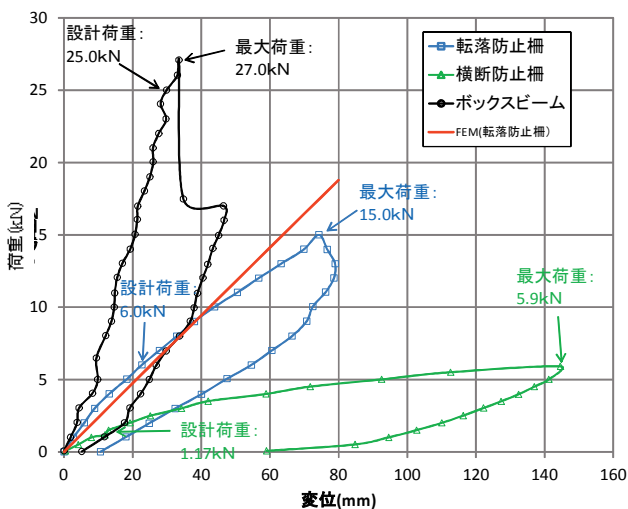
図－9 高欄基部の構造



図－10 圧縮試験の概要

表－2 FRP リブの材料特性

	圧縮強度 (MPa)	圧縮弾性率 (GPa)
床版側	101.0	10.0
リブ中央	101.0	13.0
フランジ側	106.0	11.0

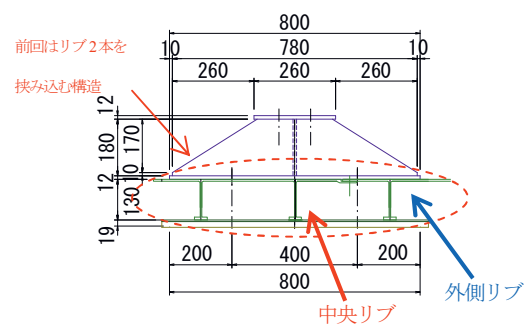


図－11 荷重と水平変位の関係

しているが、高欄基部のFRPリブには幅（繊維直角）方向に圧縮力が作用する。このため、図－10に示す位置の供試体を採取し、JIS K 6911に準じた圧縮試験を実施した。表－2に、FRPリブ材の圧縮試験結果を示す。これより、床版側の強度、弾性率が若干小さいものの、部位による差はほとんどないことがわかった。

(2) 試験結果および考察

実験結果による荷重と水平変位の関係を図－11に示す。なお、転落防止柵については実験を模擬したFEM解析結果も併記した。このときの水平変位の計測点は、図－8に示す各高欄の載荷点の位置である。



図－12 転落防止柵基部の側面構造

転落防止柵は、荷重の増加とともに変位が若干大きくなる傾向はあるものの概ね線形的に増加し、荷重15.0kNのときにFRP床版の防護柵基部のウェブ上端にき裂が発生（写真－4）して荷重が低下した。この破壊荷重は、リブ2本で挟み込む構造とした転落防止柵の載荷試験結果²⁾（最大荷重12.1kN）に対して2割程度が増加している。これは、今回の防護柵基部が、図－12に示すようにリブ3本で挟み込む構造としたことによるものであり、高欄基部の荷重を受け持たせるリブ本数を増やすことで、耐力力が向上することが確認された。また、載荷時の変位に、破壊まで急変箇所が見られないことから、FRP床版、鋼製台座、高欄のそれぞれの間での滑りは生じていないと推察できる。なお、FEM解析による荷重・変位関係は、実験結果と概ね一致している。

リブの荷重分担傾向の詳細を確認するため、FEM解析結果から得たリブの応力分布を図－13に示す。中央リブ、外側リブ共に台座プレートの端部の圧縮応力が卓越する結果となり、この圧縮力をグラフの積分区間の面積から、各リブにおける圧縮力の分担力を算出すると、圧縮力分担比は外側／中央＝0.75となる。これを前回の試験の分担率（リブ2本で分担）と比較すると、耐力が25%増加する結果となり、耐力の増加率が試験結果と同程度となることがわかる。このとき、応力分布の形状はリブ本数によらないため、各リブでの分担率を考慮することで、耐力の計算が可能であることがわかった。

横断防止柵については、最大荷重5.9kNの時点で載荷用柱基部の鋼材が降伏（写真－5）し、変形が大きくな

ったため試験を終了した。

これらより、転落防止柵、横断防止柵共に設計荷重6.0kN、1.17kNに対して2.5倍、5倍程度の最大荷重を持ち、かつ実構造では高欄の剛性による荷重分配も考えられることから、本構造は十分な安全性を有していると考えられる。

一方、ボックスビームは、設計荷重25.0kNとほぼ同程度の最大荷重27.0kNの時点でウェブ上端よりき裂が発生する結果となった。しかしながら、この設計荷重は自動車の衝突を想定して設定されたものであり、今回の拡幅歩道におけるボックスビームは、自転車帯と自動二輪帯の間に設置されることから、過大な設計荷重となっていると考えられる。したがって、実用上想定される衝突荷重においては、十分な耐荷力を持つと推察できる。

図-14にボックスビーム基部のFRPリブ位置における鉛直ひずみの分布を示す。計測位置は図8,9に示す(a)点、(b)点である。これより、鋼材でリブ6本を挟み込んでいるものの、両端のリブのひずみが小さい傾向が見られる。これは、鋼材の剛性による荷重分配が十分でなかったためと考えられる。なお、表-2の試験結果より、FRPの圧壊時のひずみは10000 μ 程度となるが、水平載荷試験の結果では、最大ひずみは5000 μ 程度となっている。これは、リブの水平方向の変形によるせん断力の作用により、圧縮破壊に到達する前にせん断破壊したものと考えられる。

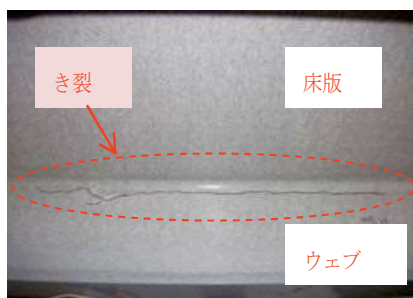


写真-4 ウェブの損傷状況

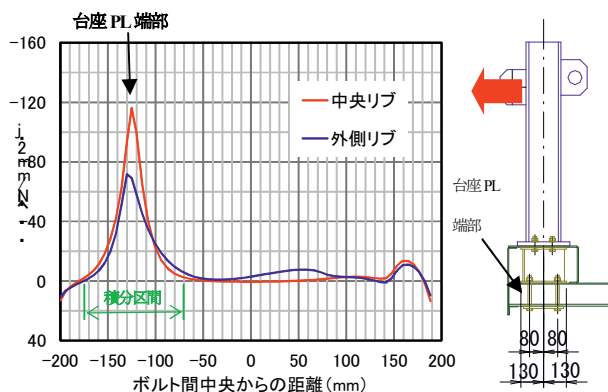


図-13 リブの応力分布 (FEM解析：荷重15kN時)

5. 支持桁取付部の耐荷力確認試験

(1) 試験概要

FRP床版は軽量であることから死荷重が小さく、下面から風が吹いた場合、FRP床版が浮き上がる可能性がある。このため、支持桁の取付部に上陽力が作用することを模擬した静的載荷試験を実施した。実験に使用した供試体の概要を図-15に示す。供試体は、全長1500mm、幅600mmのFRP単体パネルを使用し、支持桁との取り付けは、FRP材のウェブ部分を鋼製のアングル材を介してボルトで接合する構造としている。

載荷は、FRPパネルを単純支持し、支持桁を載荷フレームを介して油圧ジャッキにより下方へ押すことで、風荷重による上揚力を模擬した。このときの荷重は、床版下面から風荷重3.0kN/m²が作用するとした場合の支持桁での上陽力14.33kN/mを用い、単材パネル600mm幅に換算した荷重(4.30kN)を設計荷重とした。試験の載荷状況を写真-6に示す。

(2) 試験結果

図-16に、鉛直荷重の載荷によるFRPパネルのリブの変位の推移を示す。計測位置は図-15に示すリブA、Bの支持桁取付部(アングル材)の近傍である。荷重の増加とともに変位が線形的に増加し、いずれの場合も

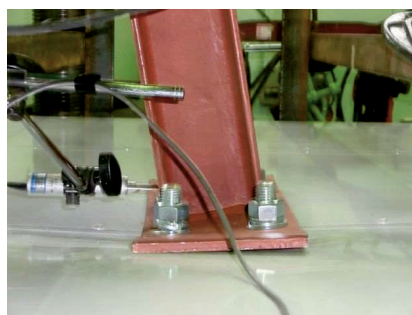


写真-5 横断防止柵基部の鋼材降伏状況

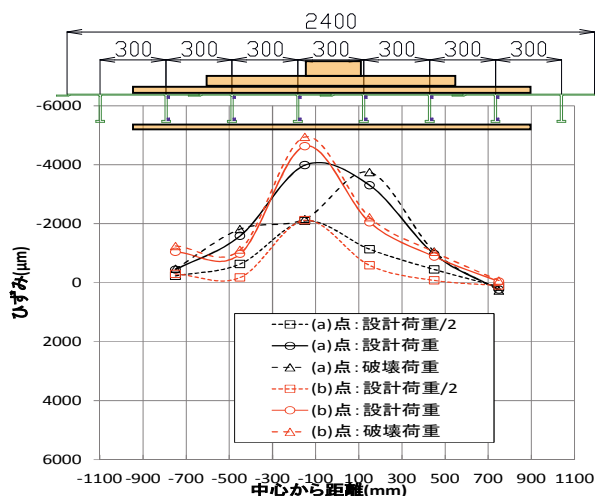
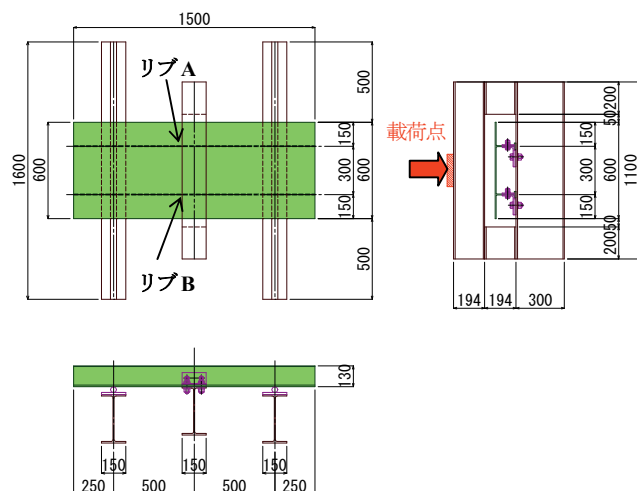


図-14 ボックスビーム基部の各リブ位置における鉛直ひずみの分布

25kNを越えたあたりでアングル鋼材が降伏（写真－7）したため試験を終了した。このときの最大荷重27～29kNは、設計荷重4.30kNの6倍以上あり、FRPパネルの支持桁取付部の耐荷力についても実用上十分な耐荷力を有することが確認できた。

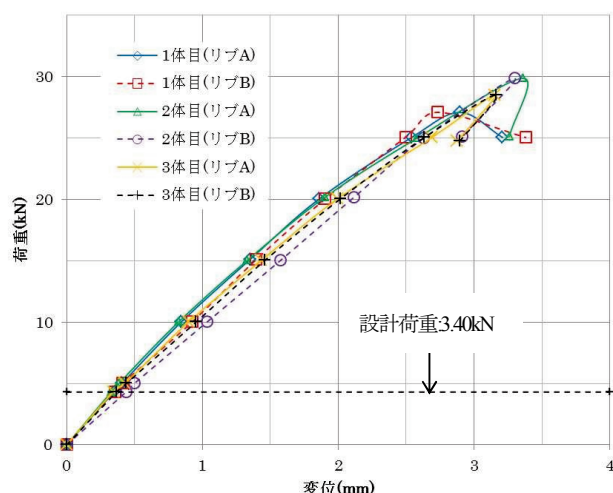
写真－7に、載荷試験後の供試体の損傷状況を示す。これより、上陽力によるFRP材破壊は、アングル材が降伏したことにより、FRPパネルのリブの部分がねじれ、



図－15 支持桁取付部の耐荷力確認試験の供試体概要図



写真－6 支持桁取付部の耐荷力確認試験状況



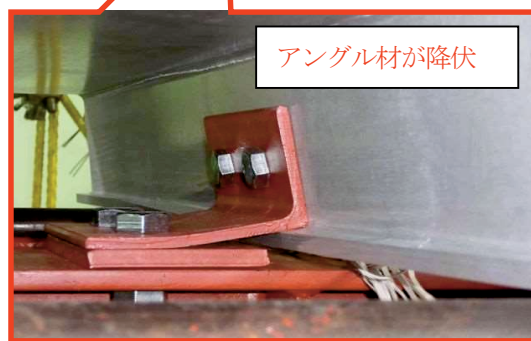
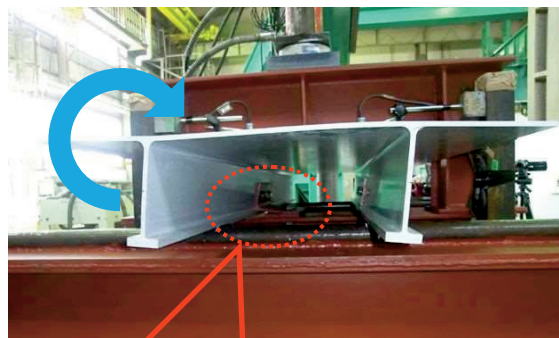
図－16 荷重と鉛直変位の関係
床板とリブの隅角部でせん断破壊する性状となることが

わかった。ただし、実際の床版では、FRP材が橋軸方向に連続することから、このような変形は生じないと考えられ、実際の耐荷力はさらに大きいものと推察できる。

6. まとめ

FRP 床版に対する一連の実験により、以下のことが明らかになった。

- (1) FRP 成形材の単体パネルでの鉛直荷重実験結果は、載荷初期の状態では、FEM 解析結果による荷重-変位関係とおおむね一致しているが、荷重 25kN を変曲点に FRP 床版の面外変形の影響により、剛性が変化し、実験値の傾きが小さくなった。破壊荷重は設計荷重 3.95kN の 14 倍程度であり、FRP 床版が極めて高い耐荷力を有することがわかった。また、実際の FRP 床版での破壊荷重は、隣接する FRP 材と接着剤とブラインドリベットで固定されることから本実験のような自由端はなく、実構造物ではフランジの面外変形が拘束されるため、実験値より大きくなると推察される。
- (2) 鉛直荷重に対しては、設計荷重の 24.5 倍と、極めて高い耐力を有することが確認できた。また、破壊形態は、上フランジとリブの接合部のせん断破壊であるが、せん断破壊しても破壊時と同程度の荷重を保持しており、崩壊に至るような破壊形態とならないことが確認できた。



写真－7 支持桁取付部の試験体損傷状況

- (3) FRP 床版の転落防止柵，横断防止柵の取付部は，設計水平荷重に対して十分な耐力を有していることが確認できた．また，ボックスビームに対しては，自動車の衝突を想定して設定された設計荷重とほぼ同程度の耐荷力であり，自動二輪に対しては十分な耐荷力を持つことがわかった．
- (4) FRP パネルと支持桁との取付部分は風荷重による上揚力に対して十分な耐力を有していることが確認できた．設計荷重の 6 倍程度の荷重が載荷された際に時点で，FRP パネルとボルト接合するアンクル材が降伏した結果より，取付部の構造に耐力

上問題ないことがわかった．

参考文献

- 1) 角間恒，岡田慎哉，久保圭吾，松井繁之：FRP を用いた道路橋歩道拡幅構造の耐荷性能に関する研究，土木学会構造工学論文集，Vol.60A，pp.1150-1158，2014.
- 2) 久保圭吾，角間恒，岡田慎哉，松井繁之：FRP を用いた歩道拡幅床板における高欄基部の耐荷性能，土木学会第 68 回年次学術講演会，I-424，pp.847-848，2013.

A STUDY ON APPLICABILITY OF FRP DECKS FOR SIDEWALK WIDENING OF NARROW HIGHWAY BRIDGES

Shuichi TAMURA, Hidetsugu HORO, Keigo KUBO
Ko KAKUMA, Shinya OKADA, Shigeyuki MATSUI

In the case of sidewalk widening of existing bridges, light-weight deck is desired to reduce the dead load. From the reason, the FRP deck for widening sidewalk was developed to advantage for corrosion resistance and light-weight. In this research, static strength test using the simple specimens were carried out to examine the material nature by comparison with FEM analysis. Moreover, in order to confirm the applicability to the bridge of the FRP deck, the static strength tests of a full-scale specimen were conducted focusing on vertical load on overhang part and horizontal load on protective fence for a pedestrian and a bicycle. Furthermore, in order to investigate the static strength over the upper lift by wind load in the attachment of a main girder and the FRP deck, the element examination which paid its attention to the attachment was carried out. This paper reports these test results and studies the applicability to highway bridge deck.