

歩道拡幅用FRP床版に関する実験的研究 (ブラケット支持タイプ)

Experimental Study on the FRP Sidewalk Deck for Widening (Bracket Supporting Type)



久保圭吾^{*1}
Keigo KUBO



田村修一^{*2}
Shuichi TAMURA



保呂秀次^{*3}
Hidetsugu HORO



角間恒^{*4}
Ko KAKUMA



岡田慎哉^{*5}
Shinya OKADA



松井繁之^{*6}
Shigeyuki MATSUI

要 旨

近年の交通安全対策の観点から、歩道の拡幅要望が増加しており、特に道路橋では必要幅員が確保されない橋梁が数多く存在することから、橋梁の歩道拡幅が急務となっている。このような背景の下、軽量で耐食性に優れるガラス繊維強化プラスチックを用いた道路橋の歩道拡幅構造を考案した。本研究では、既設の橋梁や橋台に設置したブラケットおよび支持桁で支持されたFRP床版を対象に、実物大床版供試体を用いて群集荷重および高欄への水平荷重に着目した静的耐荷力実験を実施した。また、FRP床版に適用する舗装を検討するため、各種舗装の付着試験を実施した。これらの耐荷力試験の結果、いずれも実用上十分な耐荷力を有していることが確認できた。また、舗装の種類としては、いずれの舗装も適用上問題ないことが確認できたが、FRP床版上への適用に際しては、死荷重軽減の観点からニート舗装が良いことが確認できた。

キーワード：歩道拡幅，FRP，耐荷性能，舗装

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、既存の道路橋においては、建設当時の基準で作られていることから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。

このような場合、死荷重が過剰にならないように鋼製歩道を添架する方法が考えられるが、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、耐食性に優れる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の工法についての検討^{1) 2)}を行ってきた。

本研究では、**図-1**に示すブラケット支持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試験を実施した。

さらに、FRP床版の歩行面にはすべり止めとして舗装を施すがFRP床版の変形への追従性およびFRPとの接着

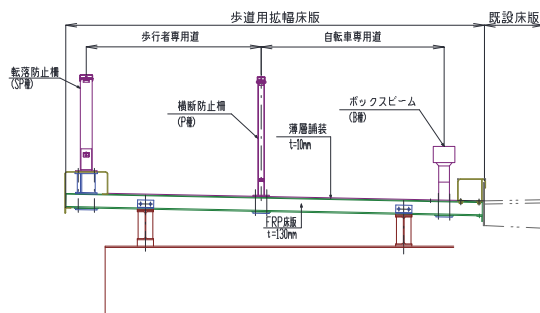


図-1 FRP拡幅床版の構造

*1 営業本部橋梁営業部 FRP・保全開発グループ担当リーダー

*2 千葉工場技術研究所生産技術グループ副主任

*3 千葉工場技術部設グループ係長

*4 (国研) 土木研究所寒地土木研究所

*5 北海道開発局留萌開発建設部

*6 大阪大学名誉教授

性が課題となる。このため、舗装材料を変えた要素試験を実施し、適用性の検証を行った。

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報告する。

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に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(3.95kN)を設計荷重とした。表-1に、使用したFRP素材の材料特性

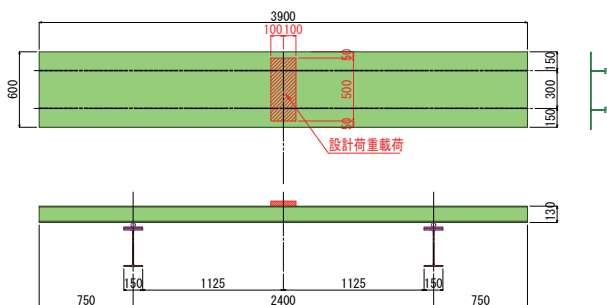


図-2 材料特性確認試験の供試体概要図

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

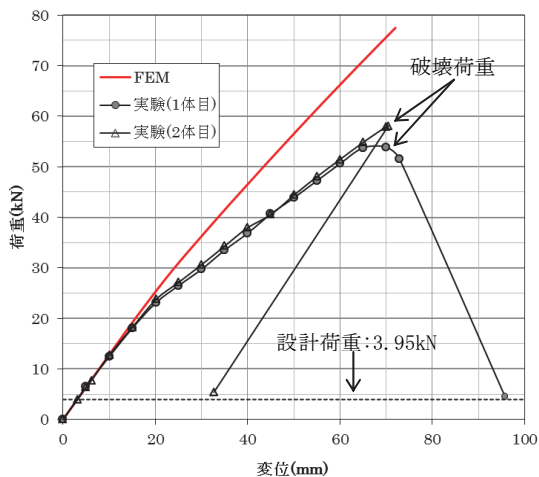


図-3 荷重と鉛直変位の関係（単体パネル）

を示す。

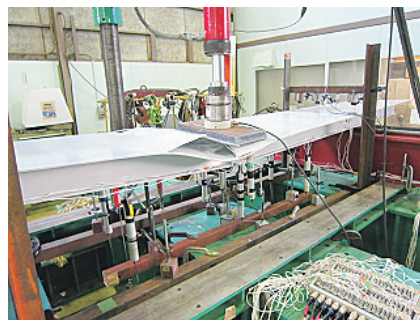
(2) 実験結果

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、



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

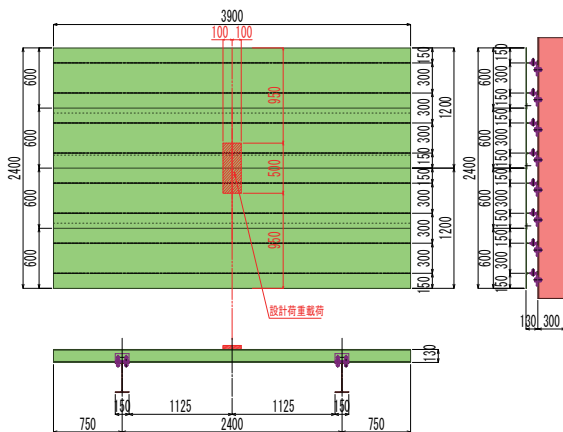


図-4 鉛直力載荷試験（分布荷重）の供試体概要図

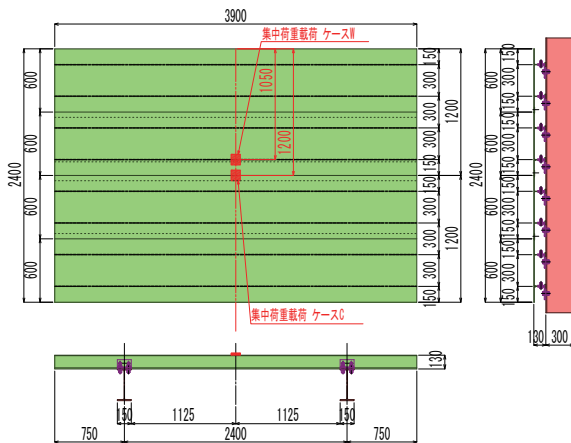


図-5 鉛直力載荷試験（集中荷重）の供試体概要図

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

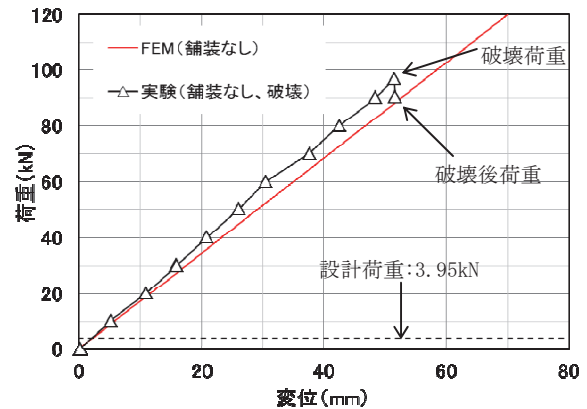


図-6 荷重と鉛直変位の関係（等分布荷重）

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（3.95 kN）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

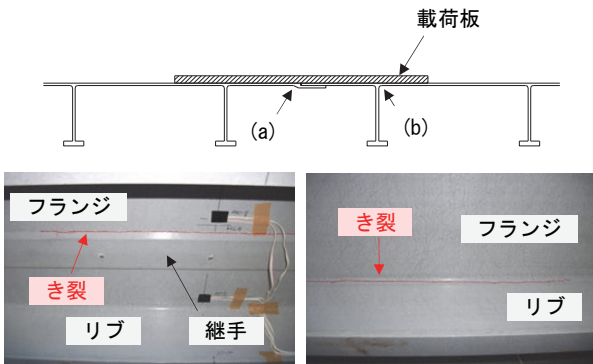
図-6に、等分布載荷時の載荷点直下フランジにおける荷重と変位の関係を示す。図中には、線形FEM解析を行った結果も併記した。これより、実験値は荷重の増加とともに変位が線形的に増加し、荷重60kN程度で剛性がわずかに低下した後、96.9kNで荷重が低下し破壊に至った。パネル単体での載荷試験と比べて破壊荷重が30kN程度大きな値となっているが、これはパネルを組み合わせることに伴う床版の面外変形が抑制されることと、隣接するFRP材への荷重の分配によるものと考えられる。このときの最大荷重96.9kNは、設計荷重3.95kNの24.5倍であり、FRP床版が活荷重に対して極めて高い耐荷力を有することが確認できた。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、床版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、等分布荷重をリブ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荷重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。



(a) ラップ継手部 (b) リブ接合部

写真-2 鉛直力載荷（分布）試験の供試体損傷状況

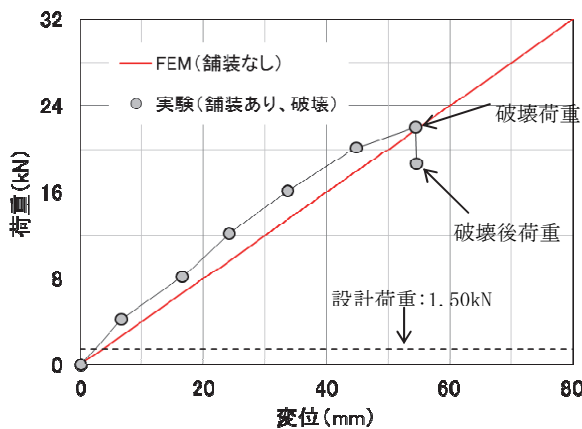


図-7 荷重と鉛直変位の関係（リブ間集中荷重）



写真-3 リブ間集中荷重載荷試験後の損傷状況

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

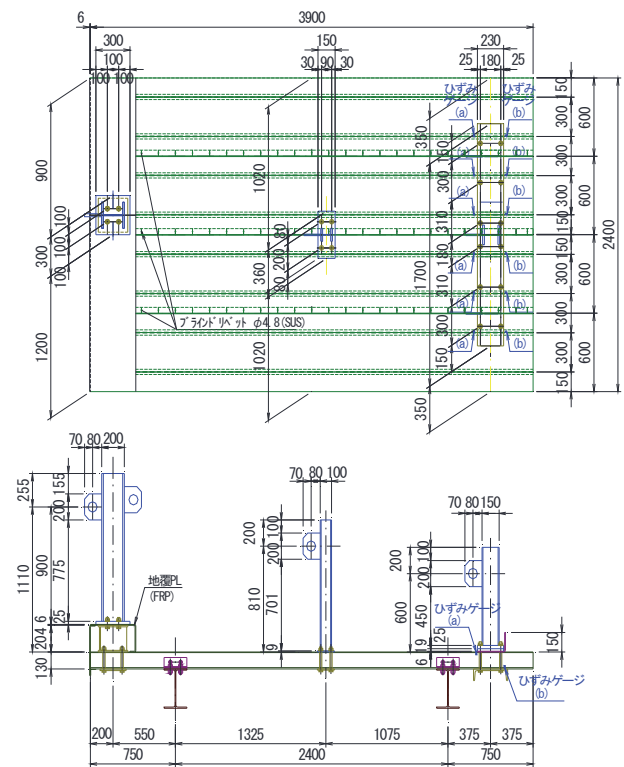


図-8 水平力載荷試験の供試体概要図

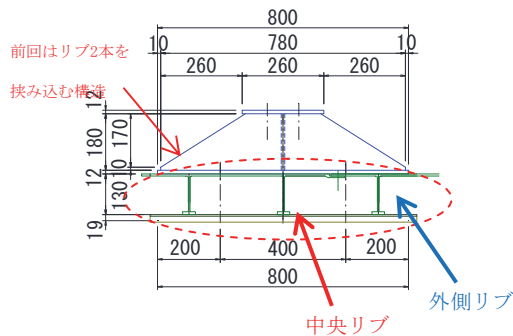


図-12 転落防止柵基部の側面構造

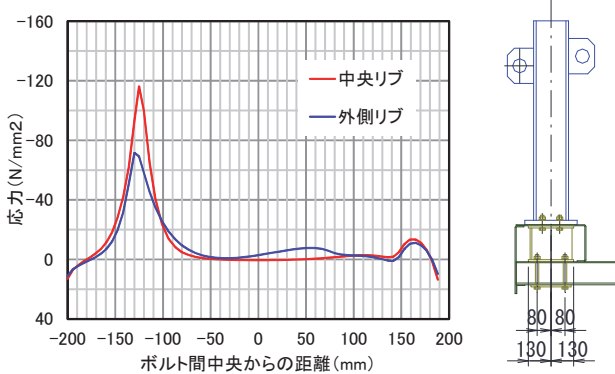


図-13 リブの応力分布 (FEM解析：荷重15kN時)

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からわかる。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

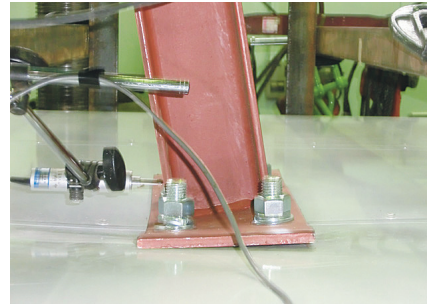


写真-5 横断防止柵基部の鋼材降伏状況

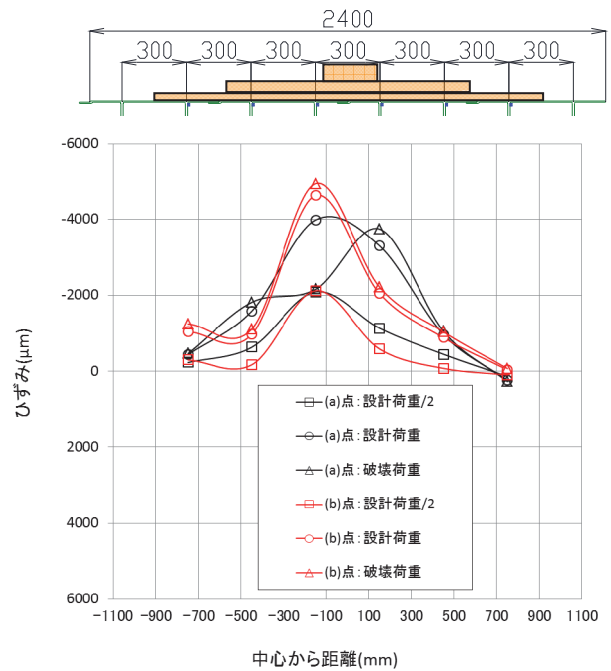



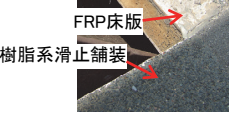
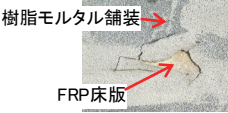



図-14 ボックスビーム基部の各リブ位置における鉛直ひずみの分布

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。

表-3 FRP床版への舗装の種類

舗装仕様	ニート舗装	樹脂モルタル舗装	ゴムチップ舗装
	 エポキシ樹脂+セラミック骨材	 エポキシ樹脂+骨材(珪砂)	 ウレタン樹脂+カラーゴムチップ
FRP床版への適用事例	 FRP床版 樹脂系滑止舗装 Bently Creek Bridge-歩道(米国)	 樹脂モルタル舗装 FRP床版 車道のため剥離が生じているが歩道であれば問題ないと思われる Bennetts Creek Bridge-車道(米国)	 ゴムチップ舗装 FRP床版 羽咋巖門自転車道13号橋(石川県)
一般的厚さ	3mm程度	10~20mm	8~20mm
特徴	超薄層で滑り抵抗性が大きい	薄層仕上が可能で滑り抵抗性が大きい	弾性舗装で歩行感が良く透水性が有る

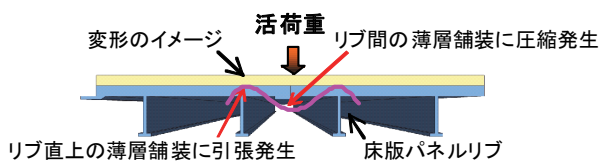


図-15 変形のイメージ

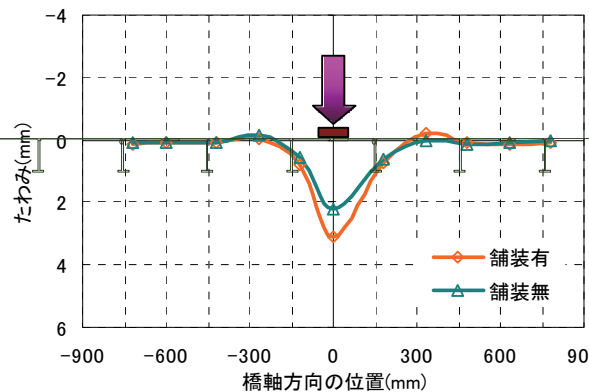
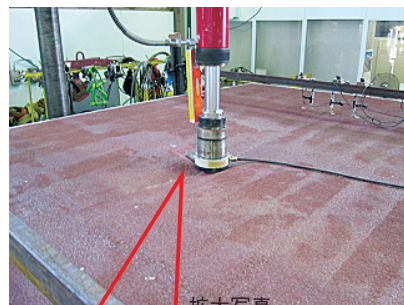


図-16 たわみ分布（設計荷重 1.5kN）



拡大写真

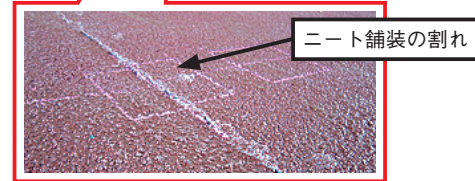


写真-6 試験状況（最大荷重21kN載荷時）

リブ間の変形が大きくなるものの、歩道の活荷重（5.0kN/m²）が等分布荷重のため、リブ間の変形はほとんど生じない結果となる。このため、図-5に示す実物大供試体で、爪先で立った時を想定した荷重1.5kN（面積：100mm×100mm）をリブ間、リブ上に載荷したときのたわみ曲率が等価となるような変位を用いて設計変位を設定した。なお、舗装の有無による変形の違いを調べるため、床版上にニート舗装を施したものと、舗装なしのもので試験を実施した。リブ間に載荷した場合の変形のイメージを図-15に、支間中央部のたわみ分布を図-16に示す。これより、舗装有り供試体のたわみが、舗装無し供試体のものより大きい傾向が見られるが、後述の曲げ試験結果では舗装が剛性に寄与していることから、支持桁取付部のずれ等の影響と考えられる。

FRPの変形を計測後、舗装有り供試体では、ケースCの載荷位置で破壊まで試験を継続した。この結果、写真-6に示すように、リブ間に21kN載荷した状態においても、FRP継手部の損傷変形によるニート舗装の割れの他

6. 各種舗装の適用性確認試験

(1) 試験概要

舗装は、一般的にアスファルト舗装が用いられているが、歩道の拡幅に用いる場合には死荷重の増加が課題となる。このため、国内外でFRP床版に対して施工実績があり、舗装厚もアスファルト舗装等と比べ薄く死荷重の軽減が図れる表-3に示すニート舗装、ゴムチップ舗装、樹脂モルタル舗装の3種類に関してFRPの付着性、FRPの変形に対する追随性の検討を行うこととした。

(2) 実物大載荷試験結果

舗装の変形に対する追随性を確認するには、FRP床版の変形特性を把握する必要がある。本床版では、300mm間隔に設けたリブを有するπ型断面であることから、リ

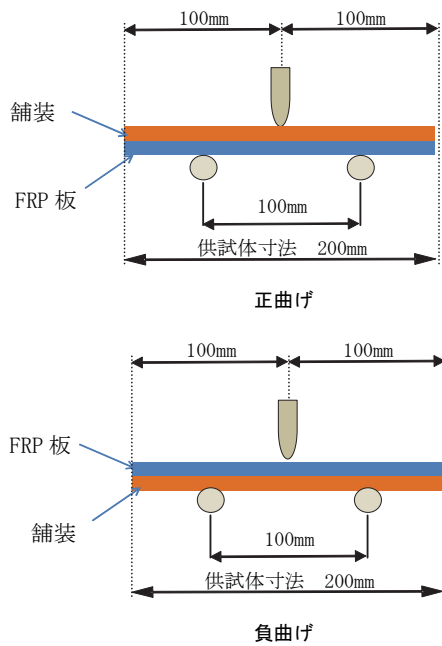


図-19 曲げ試験方法

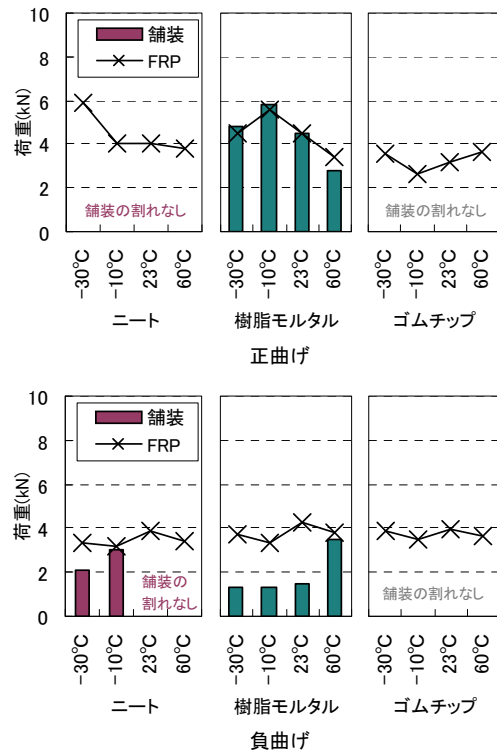


図-21 ひび割れ時の荷重

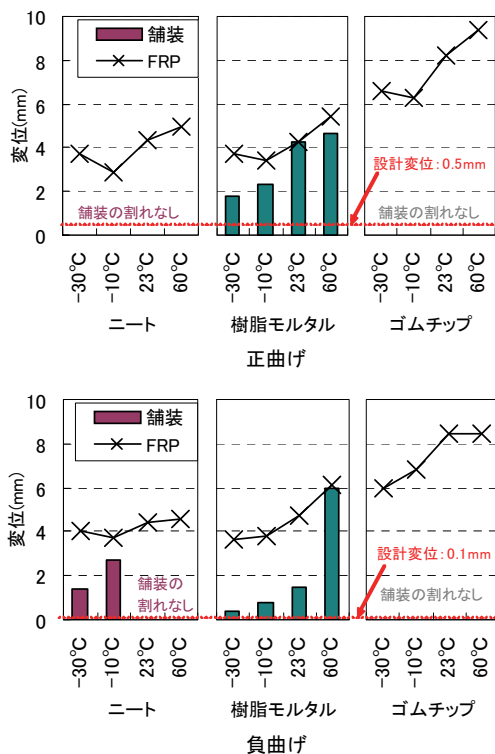


図-20 ひび割れ時の変位量

は大きな変位がないことから、実用上十分な変形追随性を有していることが確認できた。

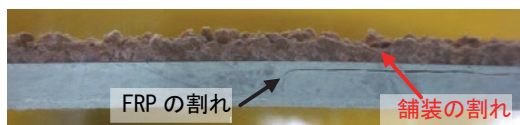
(3) 曲げ試験

各舗装の変形追随性を確認するため、小型試験片による曲げ試験を実施した。試験は、200mm×100mmのFRP

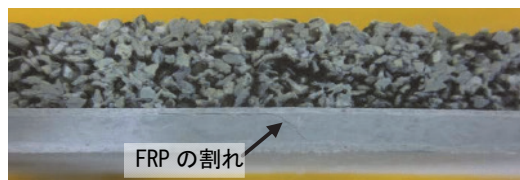
板に舗装を施した供試体を用い、支間100mmの3点曲げ試験とした。図-19に試験方法の概要を示す。このときの設計変位は、図-18の試験結果の変形曲率と本試験による曲率が同等となる変位を設計変位として設定（正曲げ0.5mm、負曲げ0.1mm）した。試験時の温度は、温度の違いによる性状を確認するため、-30℃、-10℃、23℃、60℃の4種類で実施した。

ひび割れ時の変位量を図-20に示す。これより、いずれの供試体も、試験温度によらず設計たわみ量に対して十分な追随性を有していることが確認できた。ただし、樹脂モルタル舗装では正曲げ、負曲げともに舗装の割れがFRP母材より先に生じているが、ニート舗装、ゴムチップ舗装では、負曲げのニート舗装低温時を除いて、FRP母材の破断まで舗装が変形に追随できることがわかった。

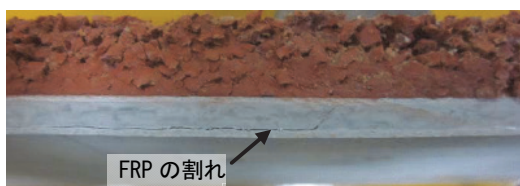
図-21に、ひび割れ時の荷重を示す。正曲げでは、低温時のニート舗装、樹脂モルタル舗装の破壊荷重が、高温時と比べて大きい傾向が見られることから、低温時は、ニート舗装と樹脂モルタル舗装が、床版の剛性に寄与することがわかる。ただし、負曲げでは、いずれの舗装も剛性に寄与しないことがわかる。写真-9に負曲げ-30℃の試験終了時の状況を示すが、FRPの割れは、い



ニート舗装 (FRP板厚5mm)



樹脂モルタル舗装 (FRP板厚10mm)



ゴムチップ舗装 (FRP板厚10mm)

写真-9 試験終了時の状況 (負曲げ-30℃)

ずれもガラス繊維の界面に沿った水平なひび割れとなることがわかった。

7. 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。
- (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床版に対する舗装は、ニート舗装、ゴムチップ舗装、樹脂モルタル舗装のいずれも、-30℃から60℃の温度領域における正曲げ・負曲げに対してFRP床版の変形に追随しており、供用時に想定されるたわみに対しては十分な適用性を有することがわかった。

<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：歩道拡幅用FRP床版に関する実験的研究 (床版上載タイプ)、宮地技報、No.28、pp.5-10、2015.
- 3) 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版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.

2016.7.16 受付