

床版橋形式GFRP歩道橋の曲げ耐荷力 およびパンチングシア耐力

北山 暢彦¹・前田 研一²・中村 一史³・渡辺 哲也⁴

¹正会員 株式会社IHIインフラシステム 技術本部都市高速部 (〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12)
E-mail:nobuhiko_kitayama@iis.ih.co.jp

²フェロー会員 首都大学東京 教授 大学院都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:maeda-kenichi@tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京 准教授 大学院都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:hnaka@tmu.ac.jp

⁴正会員 AGCマテックス株式会社 提案企画部 (〒252-0212 神奈川県相模原市中央区宮下1-2-27)
E-mail:watanabe@agm.co.jp

本研究は、新たに提案したGFRP引き抜き成形材の接着接合断面による床版橋形式歩道橋の実現可能性を明らかにするために、その安全性と使用性について検討したものである。本形式では、たわみの大幅な低減による経済性の画期的な向上を図るために、アンカーボルトを用いた擬似両端固定支持条件とすることを提案していることも大きな特色である。本論文では、実橋を想定した試設計に基づく実大模型試験によって、接着接合箱型断面の主桁(床版)の曲げ耐荷力、および、接着接合シートのDeck Plateのパンチングシア耐力を検討する。さらに、既に報告した疑似両端固定支持構造の耐荷力試験結果も併せて、十分な耐荷性能があることを確かめ、新形式GFRP歩道橋の開発の妥当性の検証を完遂する。

Key Words : slab type footbridge, GFRP pultrusion profile, adhesive bonded cross section bending strength, punching shear strength

1. 緒言

社会基盤施設の再構築や、架設作業および維持管理の合理化などの重要性が指摘されるなかで、比強度が高く、耐食性に優れた革新的構造材料として繊維強化プラスチック(FRP)が注目されている。

FRPを従来材料に代わる主要土木構造材料として活用することにより、軽量化による下部工費の低減と耐震性の向上、および、省力化施工と工期短縮が可能になるからである。さらに、紫外線等による表面劣化を防護するために、強化繊維の一部として不織布を最外層に配したり、ゲルコートと呼ばれる表面被覆層を設けたりすることなどの必要はあるものの、塩害・酸害など環境面で極めて不利な地域への適応性に優れ、維持管理労力の軽減、長寿命化等によるライフサイクルコストの縮減などでも大きな効果が期待されるからである。

橋梁分野においては、特にガラス繊維強化プラスチック(Glass Fiber Reinforced Plastic; GFRP)製の歩道橋が世界各国で着実に実績を積みつつある^{1)~5)}。欧州において

1996年に取り纏められたFRP構造物の設計コードであるEUROCOMP⁶⁾は歩道橋も対象としており、2008年には、アメリカのAASHTOがFRP歩道橋の設計ガイドライン⁷⁾を発行している。我が国においても、土木学会によりFRP歩道橋の設計・施工指針(案)⁸⁾が取り纏められるとともに、既に5橋の実橋が架けられている^{9)~10)}。

しかしながら、特殊な場合を除き、材料コスト増により、鋼やコンクリート歩道橋に比べてイニシャルコストでかなり劣る場合が多いことが大きな障害となっており、我が国におけるGFRP歩道橋の普及のスピードは極めて遅いといえる。一方、アメリカにおいて既に数百橋の実績があるポニー形式のシステムトラス橋は、高い経済性を誇っているが、主構部が路面よりも高い位置にあるため、自転車や自動二輪車、電動車いす等の衝突、および、利用者の悪戯などによる損傷が安全性に大きな影響を及ぼすことが問題となっている¹¹⁾。

そこで、著者らは、そのような問題もなく、イニシャルコストでも十分に競合できるようにするため、たわみ制限¹²⁾(使用性)により断面決定されることが多い

GFRP 歩道橋の超低コスト化を図って、

- 1) GFRP 引き抜き成形材を組合せた接着接合断面を用いることにより、低コストで高たわみ剛性の大断面を得る。
- 2) 床版橋形式とすることにより、通常の桁橋形式では非合成で非構造部材の床版部も、構造部材の抵抗断面の一部として、主桁（床版桁）のたわみ剛性に寄与させ、構造的かつ経済的にも GFRP の適用効率を高める。
- 3) 主桁（床版桁）の両端支持条件として、通常の単純支持条件に代えて、独特の擬似両端固定支持条件を採用し、GFRP 歩道橋の構造設計における断面決定で一般に支配的となる たわみを大幅に低減することにより、コストを飛躍的に縮減する。

ことなどを考え、図-1 に示す単径間の擬似両端固定支持・床版橋形式 GFRP 歩道橋を提案した^{4), 5), 8), 13)-18)}。

本形式の開発の妥当性を検証して、その実現可能性がきわめて高いことを確かめるために、これまで、材料設計と材料試験、実橋を想定した構造設計、および、種々の実大部分模型試験を実施し、試設計断面に基づき作製した実大部分模型による 4 点曲げ荷重試験を行った結果から、主桁（床版桁）の接着接合断面のたわみ性能が明らかになるとともに、せん断変形の影響を考慮できる設計たわみ算定公式も誘導されている^{8), 14)-16)}。

また、ワンサイド締め付けが可能で狭隘部の施工に適したブラインドリベットを、主桁（床版桁）の現場連結部の接合材料に採用し、新たに提示したフェールセーフ設計法に基づく実大部分模型を作製して、4 点曲げ荷重による耐荷力試験を行った結果、および、設計反力算定公式を誘導し、アンカーボルトによる擬似両端固定支持条件を模した片持ち構造の実大部分模型を作製して、自由端での曲げ荷重による耐荷力試験を行った結果からは、ともに十分な耐荷性能と高い安全性を有することが確かめられている^{8), 16)-18)}。

本論文は、残された課題であった、主桁（床版）の接着接合箱型断面の曲げ耐荷力、および、歩行路面となる接着接合シートの Deck Plate のパンチングシア耐力について、実大部分模型試験を行って、耐荷性能と安全性を検討し、新形式 GFRP 歩道橋の開発の妥当性の検証を完遂することを目的としたものである。

2. 新形式 GFRP 歩道橋の提案とその特色

本形式は、図-2 に示すように、等間隔に敷並べた I 形材 (I300) の上下面に、Deck Plate, Bottom Plate として、シート材 (F1000) をそれぞれ積層し、工場建屋内におい

てプレス下で接着接合して構造部材断面を一体化するものである。GFRP 引き抜き成形材の既製品を用い、床版部を含めた構成断面のすべてを構造部材の抵抗断面と見做せることから、経済効率の高い形式であるとともに、使用性に影響する路面高を低くできる利点もある。高欄や地覆も非構造用 GFRP 引き抜き成形材の既製品を用い、舗装材料は熱影響を考慮してモルタルとしている。

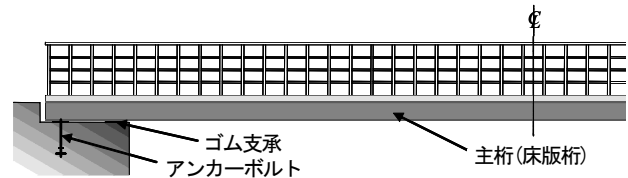


図-1 擬似両端固定支持・床版橋形式単径間 GFRP 歩道橋

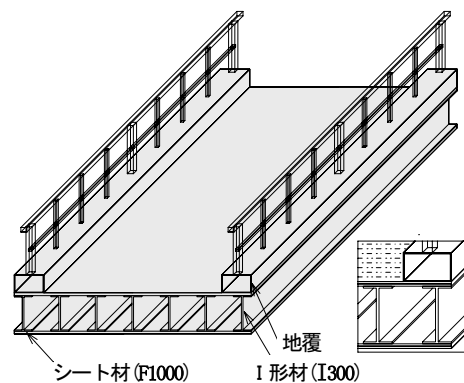


図-2 引き抜き成形材を組合せた接着接合による構造断面

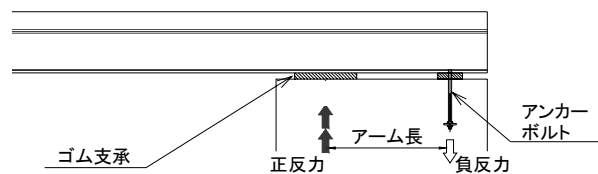


図-3 擬似両端固定支持条件とその力学的原理

図-3 に示すように、両橋端にはゴム支承とアンカーボルトを配置し、正反力の一部と、絶対値がそれに等しい負反力とが、両者の距離をアーム長とするトルクを生じてモーメント反力となることによって、両端固定支持条件とほぼ同様のいわゆる擬似両端固定支持条件が付与される。GFRP 歩道橋の構造設計は一般に、応力照査ではなく、たわみ制限により断面が決定されることから、通常の単純支持条件に比べて最大たわみ量をほぼ 1/5 にできることによって、コストを飛躍的に縮減できる。

3. 材料設計、材料試験、および、構造設計

(1) 材料設計

2 種の引き抜き成形材のマトリックスは熱硬化性のビ

ニルエステル樹脂とし、強化材は E-Type のガラス繊維として、**図-4** に示すような各基材の組成とした。±45° の方向の長繊維から成るバイアスニットは、せん断剛性の確保に配慮したもので、ランダムな方向の短繊維から成る CSM は、同様の配慮と外周面の保護のために設けたものである。なお、接着接合用材料は、接着表面の不陸を吸収するために、CSM で強化されたビニルエステル樹脂接着層(マットイン)とした。

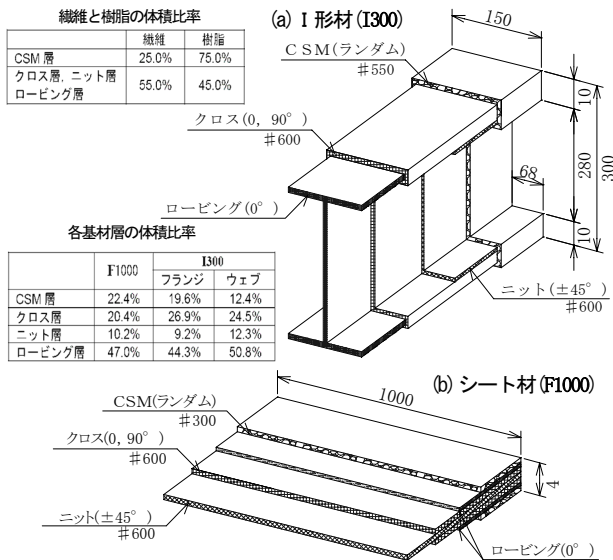


図4 引き抜き成形材断面と各基材の組成

(2) 材料試験

JIS に基づく試験の結果、引張・圧縮弾性率は、F1000 と I300 のウェブが 29.0kN/mm²、I300 のフランジが 35.0kN/mm²であった。引張・圧縮強度は、I300 のウェブの引張強度 253 N/mm²を除き、400N/mm²を超えていた。

なお、せん断弾性率については、45°法では顕著な非線形性がみられたことから、ショート・ビーム法と呼ばれる JIS K 7057 に規定された FRP の特殊な試験方法を応用して、せん断変形に支配的な部位である I300 のウェブのみの実測値 3.65kN/mm²を求めた。

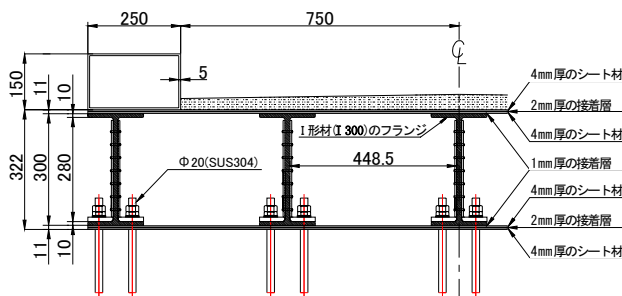


図5 擬似両端固定支持・床版橋形式歩道橋の試設計断面

(3) 構造設計

有効幅員 1.5m、支間長 L=15m (両側の正反力支点間距

離)の実橋を想定し、たわみ制限を L/600¹²⁾ として試設計を行った結果、**図-5** に示す断面構成(桁高 322mm)となった¹⁵⁾。

4. 主桁(床版桁)の曲げ耐荷力の検討

本形式の主桁(床版桁)は、等間隔に敷並べた I 形材 (I300) の上下面に、Deck Plate、Bottom Plate として、シート材 (F1000) をそれぞれ積層した、接着接合箱型断面である。I300 と F1000 の接着、および、F1000 の積層には、接着表面の不陸を吸収するために、それぞれ、1 mm 層厚、および、2mm 層厚のマットインが用いられている。このような主桁(床版桁)の曲げ耐荷力について、実橋を想定した試設計結果に基づいた実大部分模型試験を行って、耐荷性能と安全性を検討した。

(1) 実大部分模型による耐荷力試験

試設計結果に基づいて、**図-5** に示した主桁(床版桁)の断面構成を参照し、実大断面寸法で全長 4.5m の**図-6** に示す部分模型試験体(試験桁)を作製した。材料試験の結果、接着層(マットイン)の引張・圧縮弾性率は 9.1kN/mm²、引張強度は 151.9N/mm²であった。

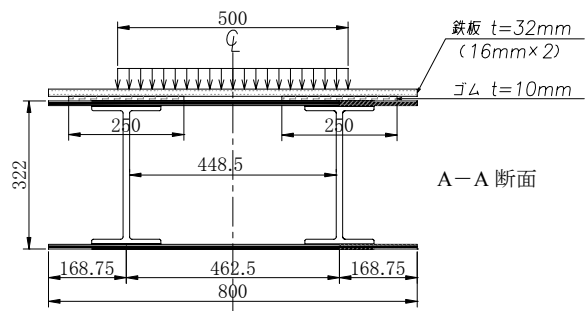


図6 部分模型試験体(試験桁)と載荷板の断面図

試験は 4 点曲げ載荷によるものとし、**図-7** に示すように、支持条件を単純支持、支間長 L を 4,000mm、載荷位置を両支点から 1,200mm、載荷速度を 0.0125mm/sec として、変位制御により破壊に至るまで載荷荷重 P を漸増した。**図-8** に、この 4 点曲げ載荷試験の状況を示す。

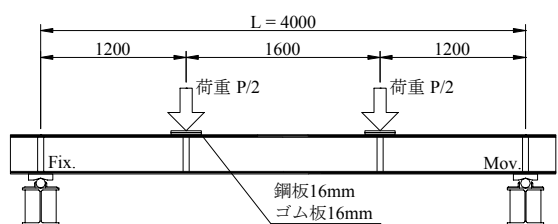


図7 4点曲げ載荷試験の側面図

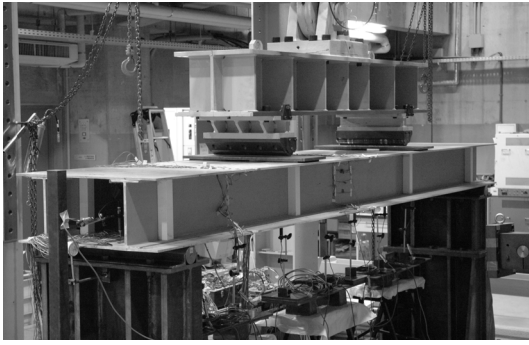


図-8 4点曲げ载荷試験のセットアップ状況

(2) 試験結果と耐荷性能、安全性の評価

载荷荷重と試験桁中央点の鉛直変位の関係を示す図-9から解るように、最大荷重 $P_{max} = 563.5kN$ 、最大たわみ $46.9mm$ で終局を迎えた。この図には、弾性率の異なる材料の合成断面梁とした梁理論に基づく計算値、および、3次元 FEM による解析値も併記しており、実験値と FEM 解析値がよく一致し、Bernouli-Euler 梁理論、せん断変形を考慮した Timoshenko 梁理論に基づく計算値はそれぞれ、危険側、安全側の値を与えることが解る。

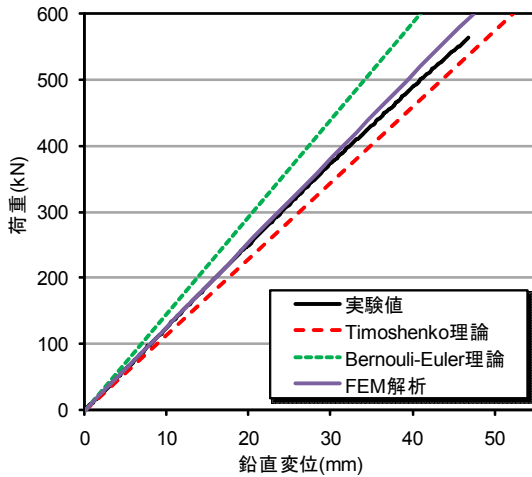


図-9 载荷荷重と試験桁中央点の鉛直変位



図-10 終局時の試験桁の破壊状況

終局時には、図-10 に破壊状況を示すように、両载荷点間で圧縮側の Deck Plate 部が局部座屈を起こし、それに伴ってマットインによる接着接合が界面はく離を生じた。また、図-11 に示す各载荷荷重下の試験桁中央断面でのひずみ分布から解るように、ほぼ終局まで純曲げ区間において平面保持の関係が成り立っていた。

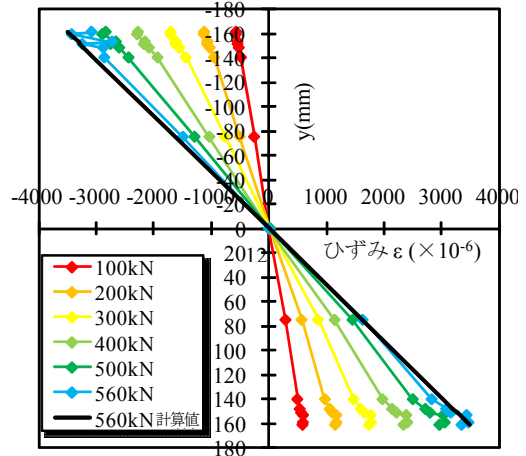


図-11 各载荷荷重下の試験桁中央断面でのひずみ分布

表-1 FEM 解析に適用した材料特性

		F1000	I300		マットイン (接着層)
			フランジ	ウェブ	
弾性係数 (GPa)	E_x	290	350	290	9.1
	E_y	(4.0)	(16.5)	123	
	E_z	143	16.5	(123)	
せん断 弾性係数 (GPa)	G_{xy}	3.65	3.65	3.65	3.65
	G_{yz}	(4.0)	(4.0)	(2.0)	
	G_{zx}	(4.0)	(4.0)	(2.0)	

注：カッコを施した値は実測値ではなく、推定値。

表-1 に示す材料特性による 3次元 FEM 解析の結果からも Deck Plate 部の局部座屈に支配的と考えられた、終局時の試験桁中央断面での圧縮縁応力は、 $101.4MPa$ であった。そこで、試験設計における主桁（床版桁）の正モーメント部について、温度応力 $10.5MPa$ も加えた最大圧縮縁応力 $22.57MPa$ ¹⁵⁾ に対する安全率を求めると 4.49 となり、十分な耐荷性能と高い安全性を有することが確かめられた。

なお、負モーメント部における耐荷性能と安全性については、擬似両端固定支持条件を模した実大部分模型による曲げ耐荷力試験から既に確かめられている¹⁸⁾。

5. Deck Plate のパンチングシア耐力の検討

本形式において歩行路面となる Deck Plate は、厚さ 4mm のシート材(F1000)を 2mm 層厚のマットインによる接着接合で積層したものである。このような Deck Plate

のパンチングシア耐力について、実橋を想定した試設計結果に基づいた実大部分模型を作製し、歩行者の足の踏み面に相当する範囲に分布する荷重による押し抜き試験を行って、耐荷性能と安全性を検討した。

(1) 実大部分模型による押し抜き試験

試設計結果に基づいて、図-5 に示した主桁（床版）の断面構成を参照し、図-12 に示すように、歩行者の足の踏み面に相当する $100\text{mm}\times 250\text{mm}$ の載荷範囲を考え、2枚の F1000 がマットイン接着接合で積層された $900\text{mm}\times 500\text{mm}\times 10\text{mm}$ の部分模型試験体（試験版）を作製するとともに、必要なジグを製作して図-13 に示す押し抜き試験装置を組み立てた。

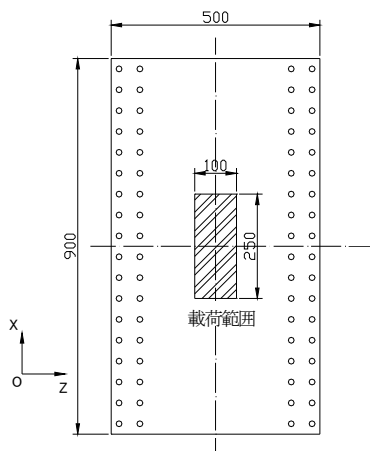


図-12 部分模型試験体（試験版）の平面図と載荷範囲

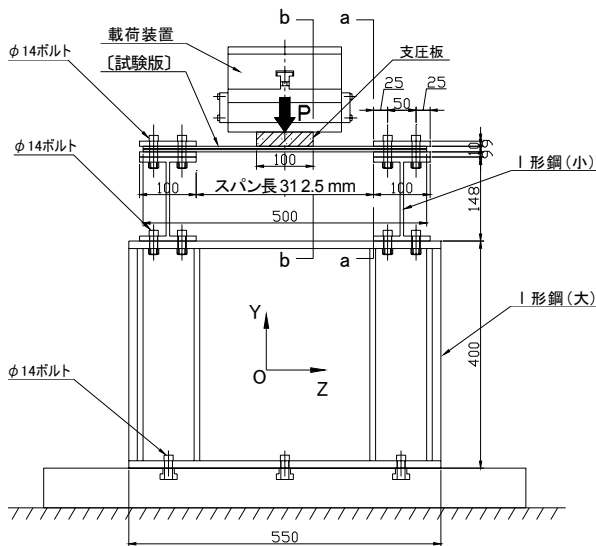


図-13 押し抜き試験装置の断面図と試験版

試験版は、図-5 において隣接する 2本の I300 の内側のフランジ先端間距離に一致するスパン長 312.5 mm で、2 辺固定支持となるように、 $\phi 14\text{mm}$ のボルトで固定した。荷重 P は、踏み面に相当する載荷範囲に合わせ

て $100\text{mm}\times 250\text{mm}\times 25\text{mm}$ の支圧板を 5 mm 厚のゴム板を挿入して試験版上に置き、変位制御により漸増載荷した。図-14 に、この押し抜き試験の状況を示す。



図-14 押し抜き試験のセットアップ状況

(2) 試験結果と耐荷性能、安全性の評価

試験は、10kN までの領域での荷重 P の載荷、除荷を繰り返した後、最終的に最大荷重 $P_{\text{max}}=55.9\text{kN}$ まで載荷したときに終局を迎えた。まず、図-15 は、10kN までの領域の載荷荷重と試験版中心点の鉛直変位の関係を示したものであり、両者の関係がほぼ比例関係を保ち、表-1 に示した材料特性による 3 次元 FEM 解析結果ともよく一致していることが解る。

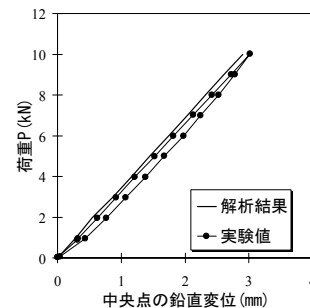


図-15 10 kN までの載荷荷重と試験版中心点の鉛直変位

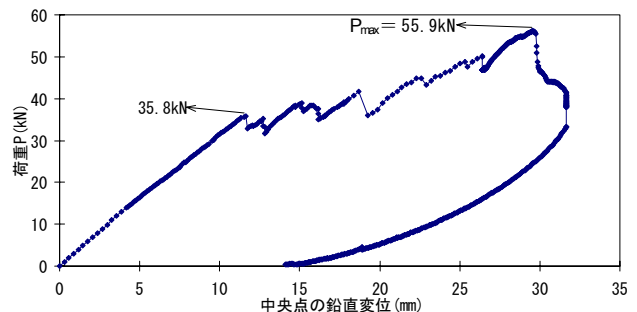


図-16 終局を迎え除荷に至る荷重と中央点の鉛直変位

図-16 は、終局を迎え、除荷に至るまでの載荷荷重と試験版中心点の鉛直変位の関係を示したものであり、初

めて局所的なひび割れが発生した載荷荷重 $P=35.8\text{kN}$ 以降、ひび割れの伸展に伴って、変形が大きくなり、かつ乱れるようになり、最大荷重 $P_{\max}=55.9\text{kN}$ に達して終局を迎えたことが解る。図-17、および、図-18 は、終局時における試験版の変形状況、および、上面、下面の破壊状況を示したものである。

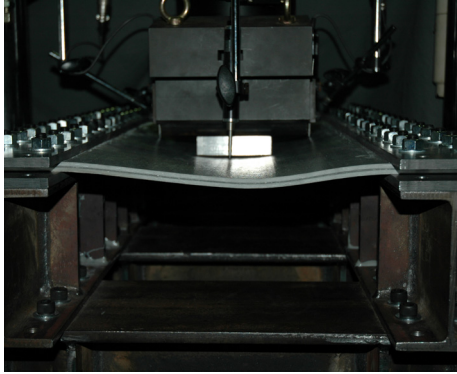


図-17 終局時における試験版の変形状況

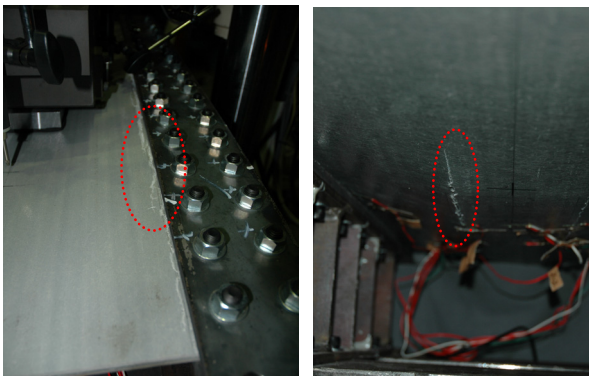


図-18 終局時における試験版の破壊状況

初期ひび割れを生じた載荷荷重 $P=35.8\text{kN}$ の値が、足によって踏み面に作用する歩行者荷重の予測値に比べてきわめて大きいことは明らかであり、Deck Plate のパンチングシア耐力について、十分な耐荷性能と高い安全性を有することが確かめられた。さらに、その約 1.5 倍の最大荷重 $P_{\max}=55.9\text{kN}$ に達し、中央点での鉛直変位が試験版厚の 3 倍を超えてもなお、十分な変形性能を有していたことが解った。

6. 結言

主桁（床版桁）の曲げ耐荷力について、実橋を想定した試設計結果に基づく実大部分模型を用いた 4 点曲げ載荷試験を行って検討した結果、Deck Plate 部が局部座屈して終局を迎え、支配的と考えられた終局時の試験桁中央断面での圧縮縁応力の試設計における最大値に対する

安全率は 4 を大きく超え、十分な耐荷性能と高い安全性を有することが確かめられた。

また、歩行路面となる Deck Plate のパンチングシア耐力について、同様に実大部分模型を作製し、押し抜き試験を行って検討した結果、初期ひび割れを生じた載荷荷重の値が、歩行者荷重の予測値に比べてきわめて大きいことが明らかになり、十分な耐荷性能と高い安全性を有することが確かめられた。さらに、終局時には試験版中央点の鉛直変位が版厚の 3 倍を超えたが、それでもなお、十分な変形性能を有していたことも解った。

したがって、以上のことから、残された課題を解決することができ、提案している床版橋形式 GFRP 歩道橋の実現可能性と開発の妥当性の検証をほぼ完遂できたといえる。

参考文献

- 1) T. Keller, et al : Advanced Materials, Structural Engineering International, Vol.9, No.4, IABSE, pp.250-301, 1999.
- 2) T. Keller, et al : Advanced Materials, Structural Engineering International, Vol.12, No.2, IABSE, pp.66-116, 2002.
- 3) T. Keller : Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction, Structural Engineering Documents 7, IABSE, 2003.
- 4) 土木学会：FRP 橋梁—技術とその展望—, 構造工学シリーズ 14, 丸善, 2004.
- 5) 土木学会：歩道橋の設計ガイドライン, 構造工学シリーズ 21, 丸善, pp.233-246, 2011.
- 6) J.L. Clarke : Structural Design of Polymer Composites – EUROCOMP Design Code and Handbook, European Structural Polymer Composites Group, E & FN SPON, 1996.
- 7) AASHTO : Guide Specification for design of FRP Pedestrian Bridges, 2008.
- 8) 土木学会：FRP 歩道橋の設計・施工指針(案), 丸善, 2011.
- 9) 北山暢彦, 佐伯彰一, 山城和雄：沖縄ロードパーク歩道橋の設計, 土木学会 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.103-106, 2001.
- 10) 中島和俊, 安波博道, 細沼宏之：全 FRP 橋梁 自転車道 13 号橋の設計, 製作, および架設, 第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.183-186, 2009.
- 11) 土木学会：先進複合材料の社会基盤施設への適用 / [資料] 米国 FRP 橋梁調査, 複合構造レポート 01, 丸善, pp.188-195, 2007.
- 12) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説(昭和 54 年版), 1979.
- 13) 前田研一, 北山暢彦, 中村一史, 林耕四郎, 梶川康男：GFRP 引き抜き成形材を用いた歩道橋の開発と使用性, 構造工学論文集, Vol.50A, 土木学会, pp.375-382, 2004.
- 14) Ken-ichi Maeda, Hitoshi Nakamura, Xian Cui, Nobuhiko Kitayama and Tetsuya Watanabe : Development of a Pedestrian Slab Bridge Using GFRP Pultrusion Profiles, Proc. of Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS'2007, IIFC, pp.1093-1099, 2007.
- 15) 北山暢彦, 前田研一, 中村一史, 渡辺哲也：GFRP 引き抜き成形材を用いた床版橋形式歩道橋の設計と使用性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.258-271, 2011.

- 16) 前田研一, 中村一史, 北山暢彦, 林幸四郎: 超低コスト化を図った新形式 GFRP 歩道橋の開発, 強化プラスチック, 第 57 巻, 第 2 号, 強化プラスチック協会, pp.38-42, 2011.
- 17) Seigo Fujita, Ken-ichi Maeda, Hitoshi Nakamura, Nobuhiko Kitayama and Tetsuya Watanabe: Development and Experimental Verification of a Pedestrian Slab Bridge Using GFRP Pultrusion Profiles, The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2010, pp.168-172, 2010.
- 18) 北山暢彦, 前田研一, 中村一史, 渡辺哲也: 床版橋形式 GFRP 歩道橋の開発と擬似両端固定支持構造の安全性, 鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻, 日本鋼構造協会, pp.41-48, 2011.

BENDING AND PUNCHING SHEAR STRENGTH OF SLAB TYPE FOOTBRIDGE USING GFRP PULTRUSION PROFILES

Nobuhiko KITAYAMA, Ken-ichi MAEDA, Hitoshi NAKAMURA
and Tetsuya WATANABE

This feasibility study examined the safety and the serviceability of a newly proposed pedestrian slab bridge using GFRP pultrusion profiles bonded together by adhesive layers. The innovative feature is the appropriate adoption of semi-fixed support conditions with anchor bolts at both ends, in order to sharply reduce the bending deflection and to drastically improve the economic efficiency. In this paper, the bending strength of adhesive bonded box girder and the punching shear strength of adhesive bonded deck plate are investigated by partial model tests with real size based on a trial structural design. Then, the validity of the development of the new type bridge is completely verified from results of that investigation.