

FRP 製階段の使用性ならびに限界状態に関する検討

Experimental Study on Serviceability and Limit State of FRP Staircase

大塚浩介*, 日比英輝**, 西崎到***, 橋本国太郎****, 北根安雄*****, 杉浦邦征****
Kosuke Otsuka, Hideki Hibi, Itaru Nishizaki, Kunitaro Hashimoto, Yasuo Kitane, Kunitomo Sugiura

- * 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士課程(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
** 株式会社ヒビ(〒503-0008 大垣市楽田町 2 丁目 81 番地)
*** 独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ 新材料チーム(〒305-8516 つくば市南原 1 番地 6)
**** 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
***** 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Recently, FRP staircase has been constructed additionally to an existing foot bridge in Gifu prefecture on a trial basis. In this paper, ultimate and serviceability limit state of the FRP staircase are experimentally investigated.

First, static loading tests of the main girder composed of FRP U-channels are carried out in order to investigate the bending stiffness and strength of the girder, and it is checked whether the deflection of beam under a live load of 3.5kN/m^2 is smaller than an allowable deflection ($L/600$). Next, for investigation on the strength of bolted joints connected main girders with steps by stainless-steel fittings, other static loading test is carried out.

Key Words: FRP staircase, serviceability, limit state, bolted joint
キーワード: FRP 製階段, 使用性, 限界状態, ボルト接合

1. はじめに

GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) は, 優れた耐食性を有する, 軽量かつ高強度であるなどの特長をもつことから, 自重の軽減, 施工性の向上や維持管理費の軽減を実現できる材料として期待されている. 近年, 沖縄県における「伊計平良川線ロードパーク歩道橋」¹⁾をはじめ, 歩道橋の主部材に FRP が採用される例が報告されてはいるものの, 設計基準整備のための基礎的なデータは十分得られていないのが実状である.

今回, 岐阜県大垣市に位置する横断歩道橋において, 利便性の向上を目的として階段を増設する計画が立てられ, そこで GFRP 製の階段を試験的に施工した. 図-1 に階段の全体像を, 表-1 に設計諸元を示す. 主桁には, ハンドレイアップによって成形された GFRP 製の溝型断面部材 (C300×90×12×12) が用いられている. また, 同断面部材を 1.5m 幅の踏板としても活用し, 主桁にステンレス製 (SUS304) の取り付け金具およびボルトにより接合している. 図-2 に階段の一般図を示す.

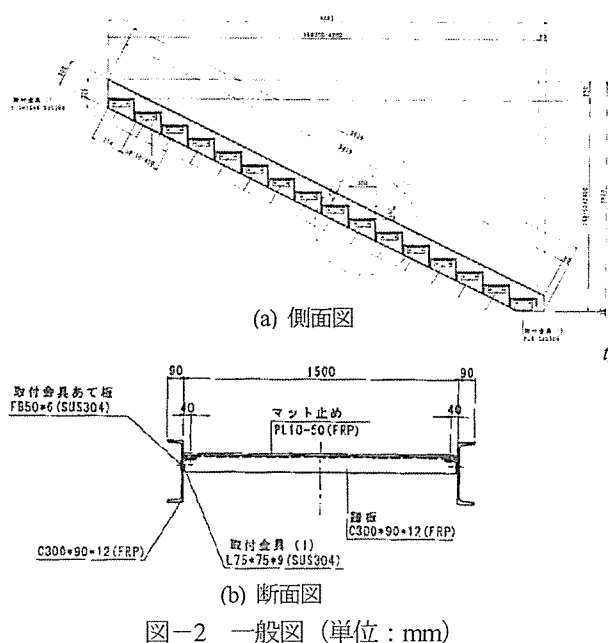
本論文は, 増設される GFRP 製階段の使用性ならびに限界状態を実験的に検討した一事例として報告する.



図-1 FRP 製階段の概観

表-1 設計諸元

名称	FRP製階段
形式	2主桁FRP階段
長さ	4,880 mm
幅員	1,500 mm
蹴上高	150 mm
踏み幅	300 mm
設計活荷重	群集荷重(主桁) 3.5 kN/m^2 (踏み板) 5.0 kN/m^2



本研究では、まず、2本のGFRP製溝型材を背面接着して成型したI形断面部材に対して静的曲げ試験を実施し、当該FRP部材の曲げ剛性ならびに曲げ耐力を検討するとともに、設計活荷重²⁾3.5 kN/m²に対するたわみ度の検証を行った。また、踏み板を有する実物大階段模型に対して載荷実験を行い、取り付け金具あて板を用いたボルト接合部が5.0 kN/m²の群集荷重に対して十分な接合耐力を有するかを検証した。

2. GFRP製はり部材の曲げ試験

2.1 試験概要

供試体は、荷重のし易さを考慮して、GFRP製溝型材2本を背面接着してI形断面の部材に成型した。供試体の寸法を図-3に示す。供試体は、溝型材2本を一体としたI型部材(供試体名: FB-1)と、下フランジ下面に厚さ46mmのGFRP製プレートを接着して剛性を高めたI型部材(供試体名: FB-2)の2体である。なお、補強用プレートは、18mm+18mm+10mmの3枚の板を接着して一枚板としている。FB-2には、横ねじれ座屈耐力を向上させるために、支点部と載荷点位置にGFRP製で厚さ30mmの垂直補剛材をウェブの両側に接着した。支点間長は2,500mmであり、油圧ジャッキ(定格容量5,000kN)を使用して支間中央部を載荷した。載荷点には、応力集中による局所破壊を防止するために厚さ19mmの鋼製の載荷板を用いている。

供試体には、載荷点における桁の鉛直変位量を計測する変位計1体と、支点部の沈下量を計測するための変位計2体を設置した。また、桁断面の曲げ挙動を調べるために、載荷点から支点までの長さの1/3の断面(図-3の断面A)にひずみゲージを貼付けて部材軸方向のひずみを測定した。供試体の設置状況を図-4に示す。

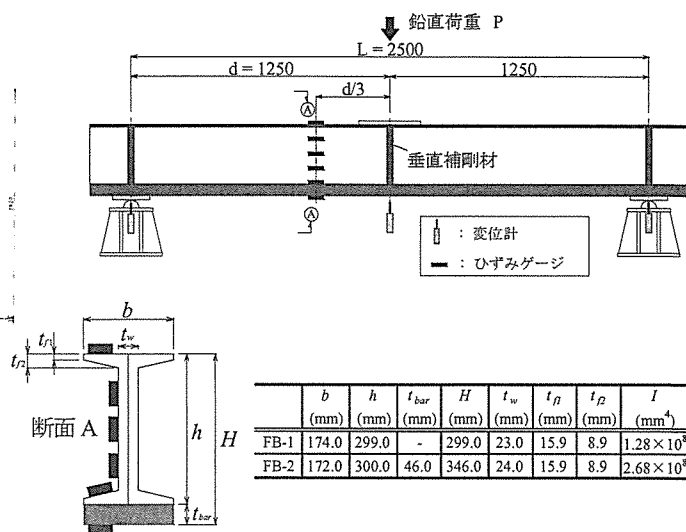


図-3 供試体形状および計測器の設置状況

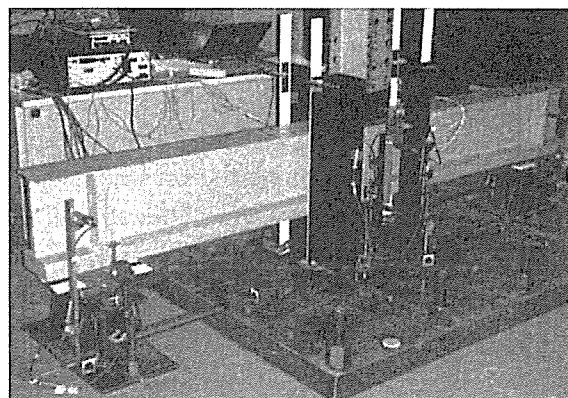


図-4 供試体設置状況

また、GFRP部材の材料特性を把握するために、引張および曲げ試験を行った。試験片は供試体製作時に生じた端切れ材から各々5体ずつ、部材軸方向に切り出して製作した。得られた結果の平均値を表-2に示す。引張試験ではいずれの試験片においても、応力-ひずみ曲線上で明確な第二勾配が見られたため、表中には第二勾配の弾性係数も記した。破壊形式としては、引張試験においては繊維と樹脂間に層間剥離が生じて破壊し、曲げ試験では引張側表面のグルコート層がひび割れると同時に、引張側で層間剥離が生じて脆性的に破壊した。

表-2 材料試験結果

引張強度 σ_t (N/mm ²)	引張弾性係数 (初期勾配) E_{t1} (N/mm ²)	引張弾性係数 (第二勾配) E_{t2} (N/mm ²)	曲げ強度 σ_b (N/mm ²)	曲げ弾性係数 E_b (N/mm ²)
252	2.55×10 ⁴	1.87×10 ⁴	344	1.90×10 ⁴

2.2 載荷試験結果

載荷試験により得られた荷重-変位曲線を図-5に示す。変位は桁中央における鉛直たわみ量である。FB-1は、弾性域内で載荷・除荷を行った後、破壊するまで載荷した。荷重100kN付近から、支点部を節として桁全

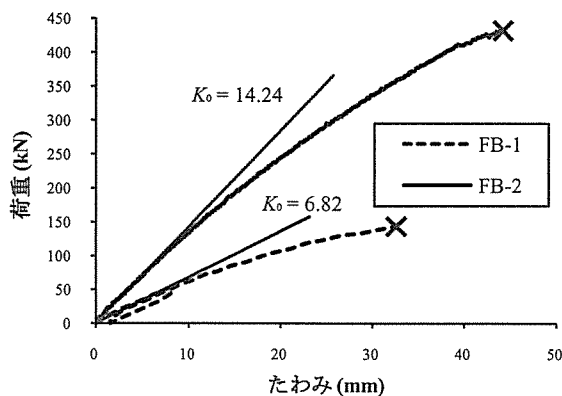


図-5 荷重－変位曲線

表-3 主桁載荷試験結果

	最大荷重 P_u (kN)	最大変位 δ_u (mm)	初期剛性 K_0 (kN/mm)	等価弾性係数 E_{eq} (N/mm ²)
FB-1	144	32.3	6.82	1.56×10^4
FB-2	434	44.1	14.24	1.73×10^4

体が面外方向にたわみだし、荷重 144kN で横ねじれ座屈により、支点から横滑りを起こして崩壊した。一方、FB-2 は垂直補剛材で補強したため横ねじれは生じず、最大荷重 434kN に到達すると、下フランジと補強用プレートの接着面がせん断によって剥離し、同時に剛性の低下に伴って圧縮側フランジおよびウェブでも層間剥離が発生し、構造全体が脆性的に破壊した。

載荷試験の結果一覧を表-3に示す。また、等価曲げ弾性係数は図に示される荷重－変位曲線から、はり理論に基づいた(1)式により算出した。

$$E_{eq} = \frac{L^3 K_0}{48I} \quad (1)$$

ここで、 K_0 は図中に示される初期剛性である。補強用プレートを設置することにより、等価曲げ弾性係数は10%程度増加した。また、活荷重 3.5 kN/m^2 と死荷重を組み合わせた設計主荷重を集中荷重に換算すると 13.2 kN であり、荷重形式の違いから直接比較はできないものの、FB-1 および FB-2 のいずれも十分な耐荷力を有していると考えられる。

次に、載荷試験で得られた GFRP 溝型材の等価弾性係数を用いて、供用時の状態を考慮して設計活荷重 3.5 kN/m^2 に対する 1:2 の傾斜を有する主桁のたわみ度の検証を行った。結果を表-4 に、主荷重作用時の応力度とともに示す。溝型材のみの場合 (FB-1)、たわみ度 1/300 となり許容たわみ度 1/600 を満たさないため、本階段には補強板を接着した溝型材 (FB-2) を使用することとした。また、補強板を用いた場合、発生する応力は極めて小さいものとなり、材料試験により求められた引張強度に対する安全率は非常に大きくなることが分かる。

桁全体の曲げ挙動を検討するため、はり理論による理論値を求め、実験結果と比較を行った。図-6に示され

表-4 活荷重に対するたわみ度照査

	活荷重		主荷重 (活荷重+死荷重)		
	たわみ δ (mm)	たわみ度 δ/L	圧縮応力 σ_c (N/mm ²)	引張応力 σ_t (N/mm ²)	せん断応力 τ (N/mm ²)
FB-1	15.4	1/300	16.4	16.4	2.0
FB-2	6.9	1/673	12.1	6.6	2.1

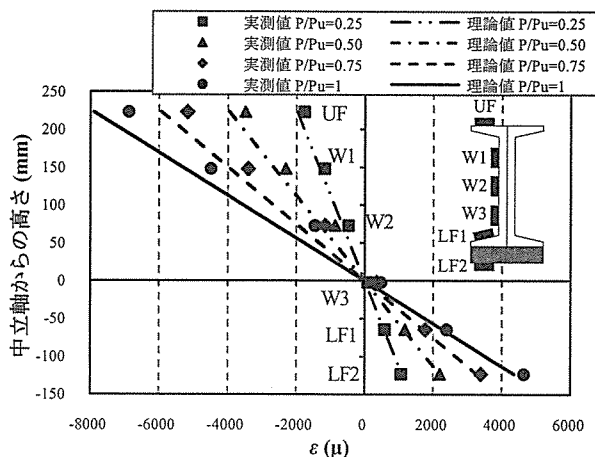


図-6 供試体 FB-2 の部材軸方向ひずみ

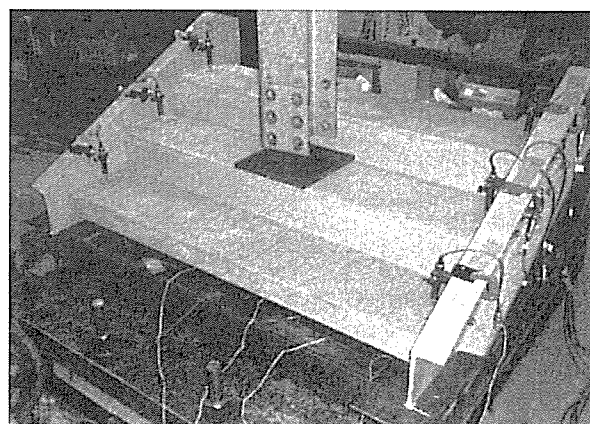


図-7 階段供試体の概容

るように、実験値と理論値はほぼ一致しており、全断面が曲げに対して有効にはたっていることが分かる。また、LF1 (下フランジ上面) と LF2 (下フランジ下面) のひずみの値から、破壊直前まで溝型材と補強板は一体として挙動していることが確認された。

3. 階段模型の載荷試験

3.1 試験概要

供試体の概容を図-7に示す。主桁部材に階段ステップ3段が接合されたものであり、荷重が均一に分布するように、中段ステップの中央部に 300mm 四方の鋼板を設置して載荷した。踏み板の接合方法は実際の階段と同様であり、主桁－踏み板間は図-8のようにステンレス製の当て板 (50×190×6 mm) と L 型金具 (L75×75×190×9 mm) を用いてボルト接合している。主桁との接合に用いた M16 ボルト (SUS304) の導入トルクは 170 Nm

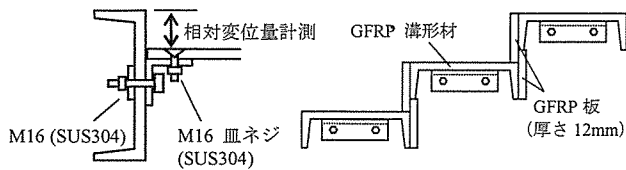


図-8 主桁-踏み板接合部

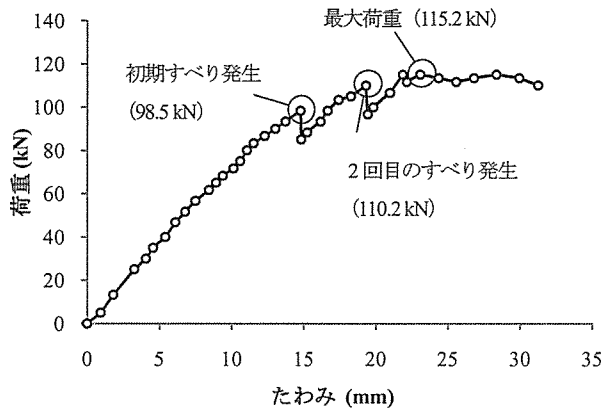


図-9 荷重-たわみ関係

であり、計6か所の接合部において、それぞれすべり量を計測した。また、それぞれの踏み板は隙間のない構造にするため、厚さ 12mm の GFRP 板を介してシングルラップ接合されている。

3.2 試験結果

載荷点直下における踏み板における荷重-鉛直たわみ関係を図-9 に示す。漸増載荷中、 $P=98.5\text{kN}$ および 110.2kN の2回、大きなすべりが発生した。最大荷重 $P=115.2\text{kN}$ に達した後、踏み板部材の L 字取り付け金具との接合部に発生したき裂が進展し、たわみの増加とともに荷重は低下した。図-10 より、踏み板のき裂は L 字金具の縁との接触部分から発生しており、せん断によって生じたものと考えられる。

中段踏み板の荷重-相対変位関係を図-10 に示す。 $P=98.5\text{kN}$ および 115.2kN において、中断・左側で大きな相対変位が発生し荷重低下が起きていることが分かる。これは、アングル材と主桁の接合面ですべりが発生したと考えられる。この接合部のすべりは実験後に確認している。一方、右主桁との接合部には大きな相対変位は見られないことから、GFRP 部材とステンレス材の摩擦係数にばらつきがあると推察される。また、載荷終了後の各踏み板のラップ接合部には目立った損傷は見当たらず、十分な接着強度を有していると考えられる。

従って、初めにすべりが生じた $P=98.5\text{kN}$ を初期破壊荷重として、群衆荷重 5.0kN/m^2 に対する照査を行うものとした。 $P=98.5\text{kN}$ を3段の踏み面が均一に受ける分布荷重に換算すると 73.0kN/m^2 となる。設計群衆荷重 5.0kN/m^2 と比較すると、荷重形式の違いを考慮しても、十分な耐荷力を有していると判定した。

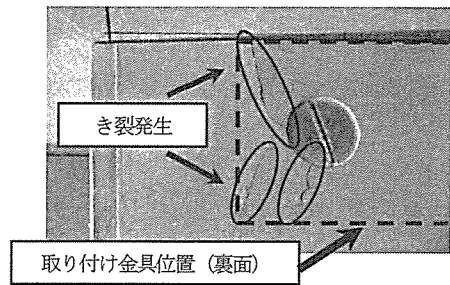


図-10 踏み板接合部の破壊状況

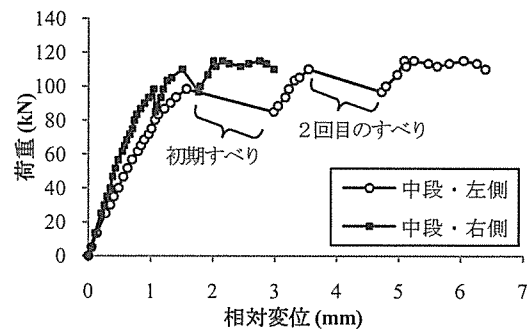


図-11 中段踏み板の相対変位

4. 結論

本研究では、FRP 製階段の使用性ならびに限界状態を実験的に検討した。得られた結果を以下に記す。

(1) GFRP 製はり部材の曲げ試験において、主桁に使用される溝型材は十分な曲げ耐荷性能を有することが分かった。また、溝型材の下部に GFRP 製の板材を接着させることにより、活荷重 3.5kN/m^2 に対して許容たわみ度 $L/600$ を満足することが確認された。

(2) 階段模型の載荷試験により、ステンレス製の取付金具を用いたボルト接合部が 5.0kN/m^2 の群衆荷重に対して十分な接合耐力を有することを確認した。また、階段の終局限界は、接合部における踏み板のき裂の進展という、FRP 特有の破壊状態になることが確認された。

今後は、施工された GFRP 製階段に対して、接着剤劣化の影響など長期耐久性の検証を行うとともに、経済性を追求した設計を考える必要がある。

参考文献

- 1) 北山暢彦, 佐伯彰一, 山城和男: 沖縄ロード・パーク歩道橋の設計, 第1回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 2001
- 2) 日本道路協会: 立体横断施設技術基準・同解説, 丸善, 1979.