

## (54) FRP製簡易展開式橋梁点検足場の開発

辰巳 輝<sup>1</sup>・鈴木 康夫<sup>2</sup>・日比 英輝<sup>3</sup>・杉浦 邦征<sup>4</sup>・松村 政秀<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 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)

E-mail:tatsumi.akira.44n@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学大学院助教授 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)

E-mail:suzuki.yasuo.7c@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社ヒビ (〒503-1337 岐阜県養老郡養老町直江613-1)

E-mail: hidekey@hibi-frp.co.jp

<sup>4</sup>正会員 京都大学大学院教授 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)

E-mail:sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 京都大学大学院准教授 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)

E-mail:matsumura.masahide.4s@kyoto-u.ac.jp

既存橋梁の劣化が著しく、橋梁の定期点検が必要となる昨今、地方自治体が管理する多数の中小規模橋梁の効率的な近接目視点検を実現するために、設置と移動が容易で軽量のFRP製簡易展開式橋梁点検足場を提案する。そして、提案した足場の力学性状を実験及び解析により明らかにし、その安全性及び使用性について検討する。提案する足場は、伸縮可能なトラス形式の主構造を桁下空間で拡張展開し、その上にデッキパネルを設置するという形式である。まず解析では、足場パネル及び主構造のモデルを作成する。死荷重、活荷重載荷時の発生応力と許容応力度を比較し、最適なモデルを構築する。その後、デッキパネルの載荷試験、主構造の載荷試験及び実橋梁下での架設試験を行う。これらの結果を元に、提案した足場の実用可能性について示す。

**Key Words :** Bridge inspection, Scaffolding, Truss structure, FRP

### 1. 研究背景及び目的

国内のインフラ構造物の多くは1960年代の高度経済成長期に整備されており、建設後50年を超える橋梁の数が年々増加している。既に始まりつつある橋梁の劣化に対応すべく、国土交通省より、橋梁定期点検要領が発刊され、5年毎の定期点検が義務付けられるようになった。この定期点検では、近接目視点検を実施することが原則とされており、点検を実施する際、橋梁点検車を利用するか、点検用足場を架設するのが一般的である。しかし、従来の点検方法にはさまざまな課題があり、特に地方自治体では定期点検の実施が困難な状況にある。このような背景を踏まえ、本研究では、設置と移動が容易で軽量のFRP製簡易展開式橋梁点検足場を提案し、提案した足場の力学性状を解析により明らかにし、許容応力度設計法の考え方にに基づき、その安全性及び使用性について検討することを目的とする。

### 2. 足場の概要

本章では、本研究で提案するFRP製簡易展開式足場の概念を示す。

#### (1) 提案足場のコンセプト

橋梁点検等に用いられる従来の足場は、架設と解体に数日から数週間程度の時間を必要とするため、数日で完了する橋梁点検のみのために用いることは効率的とはいえない。また、従来の足場に使用されている主な材料は鋼材であるため、比較的重量物となる。そのため、桁下空間で人力のみで架設・解体を行うことは困難な場合が多く、事前に入念な架設計画が必要とされ、点検員による橋梁点検を実施する前段階としての準備工に多くの時間と費用を要しているのが現状である。

また、橋梁点検車を用いた点検では、足場を用いた点検に比べて橋梁点検の前段階としての準備工は少ないと考えられるが、オペレーターの人件費を含めた費用は高

く、特に、本研究で対象としているような地方自治体が管理する中小規模の橋梁の点検に用いるには、費用対効果が小さいと考えられる。さらに、点検対象橋梁の側方及び桁下に十分な空間がない狭隘な環境にある橋梁の場合には、橋梁点検車を利用した点検が実施できないなどの課題もある。

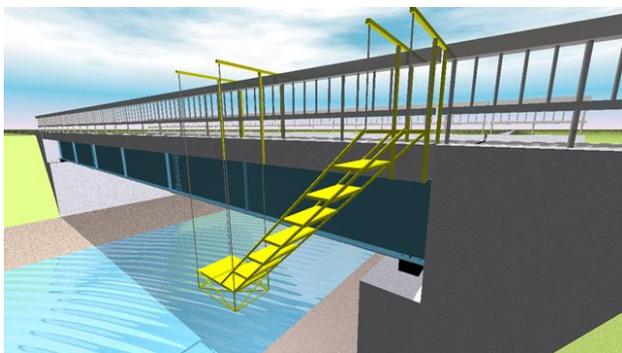
そこで、本研究ではこれらの課題を解決し、中小規模の橋梁に対して効率的な近接目視点検を実現するために、橋梁点検員自身が、点検と同時に重機や特殊機材を使用せずに容易に組み立てと解体ができる簡易な足場を提案する。

本研究で提案する簡易足場の概略を図-1に示す。本研究で提案する簡易足場は、ユニット化された部材を桁下空間で人力のみで組み立てと解体をすることを想定しているため、使用材料は、従来の足場よりも軽量の繊維強化ポリマーとしている。

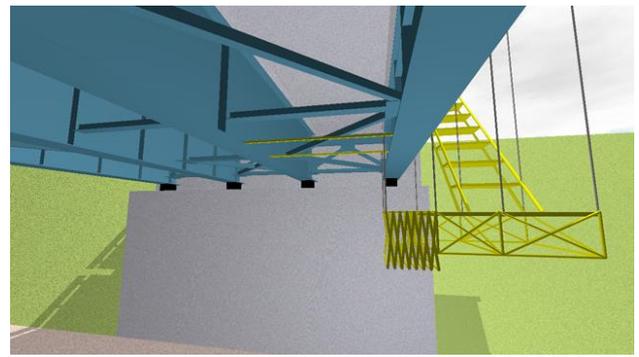
## (2) 架設手順

本研究で提案するFRP製簡易展開式足場の設置方法の概略を図-2に示す。

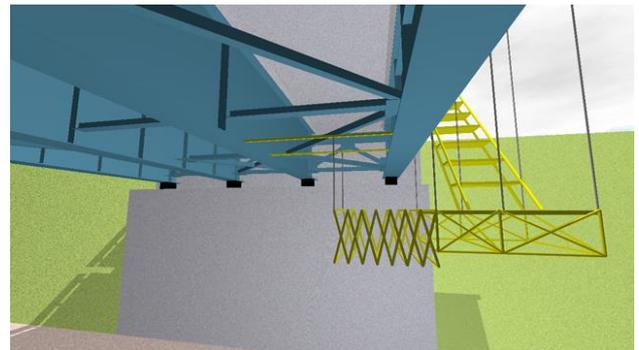
ここで提案する展開式足場は、伸縮可能なトラス形式を主構造とする足場である。本提案足場では、トラス主構ユニットを点検対象橋梁の桁下空間へ運搬した後、図-2(a)に示す作業ステージ上から展開用補助レールを主桁フランジ間に設置する。次に、図-2(b)に示すように仮受ワイヤを介してトラス主構ユニット先端部を吊り下げ、図-2(c)に示すように、トラス主構ユニットを拡張展開する。その後、図-2(d)に示すように、上弦材及び足場パネルを順次設置する。上弦材及び足場パネルの設置が完了した後、展開用補助レールに掛けた仮受ワイヤを隣接する主桁に盛替え、展開式足場を固定する。その後、必要に応じて、上記の手順を繰り返し、橋軸方向及び橋軸直角方向へ足場を展開する。



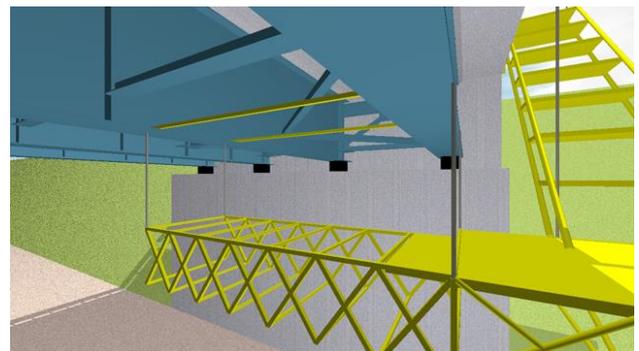
(a) Step1 昇降階段及び作業ステージの設置



(b) Step2 主構ユニット及び展開用補助レールの設置



(c) Step3 主構ユニットの展開



(d) Step4 上弦材及び足場パネルの設置  
図-2 FRP製簡易展開式足場の設置方法

## (3) 提案足場の概略設計

### a) 主構ユニットの概略設計

ここで提案するFRP製展開式足場では、完成形ではなく図-2(d)に示すように上弦材及び足場パネルを順次設置する際に、応力度とたわみが最も発生すると考えられる。そこで、足場パネルを1枚ずつ設置する過程における各状態に対して、FEM解析を実施し、各ステップにおける作用応力と発生たわみを照査した。パネル設置完了後スパン中央に作業員による活荷重を載荷した状態を図-3に示す。

ここでのFEM解析では、60mm×32mm×t4mの箱型断面形状のはり要素を用い、それぞれの部材が連結される格点部はピン結合とした。なお、断面形状は、入手が容易な引抜成型型FRP材のうち、断面二次半径が最大となる箱型断面部材より選択した。

境界条件は、主桁あるいは展開用補助レールにトラス主構ユニットを吊り下げを想定し、図-3に示す解析モデルの左上端節点に単純支持条件を与えた。なお、解析に用いた主な材料物性値を表-1に示す。

载荷荷重は、まずトラスの自重をモデル全体に等分布载荷し、次に各ステップにおいて足場パネルを作業員が順次設置することを想定して、足場パネルの自重(50N)及び活荷重(1,050N)を各上弦材に载荷した。ここで、足場パネルの自重は1枚当たりの質量を10kgと想定し、トラス主構1面当たりの荷重として载荷した。また、活荷重は、足場工・防護工の施工計画の手引き(鋼橋架設工事用)<sup>1)</sup>を参考に、作業員700N、工具等175N、及び衝撃係数20%と設定し、それらの合計である1,050Nとした。

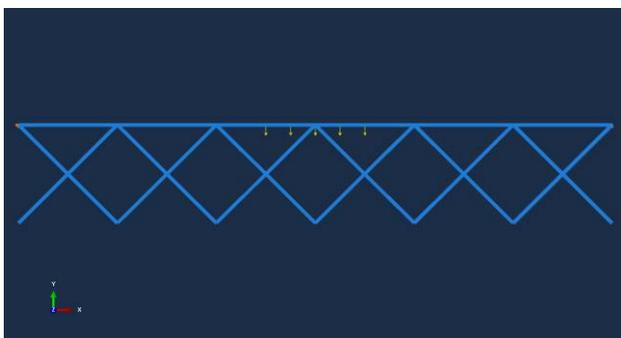
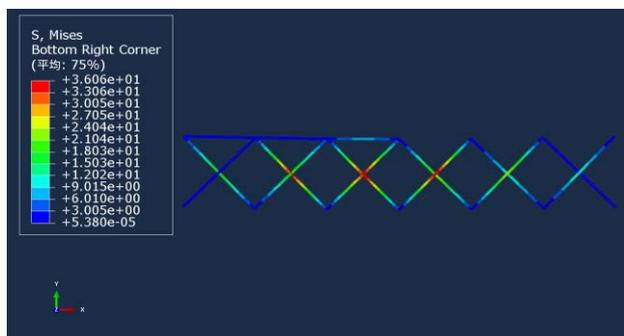
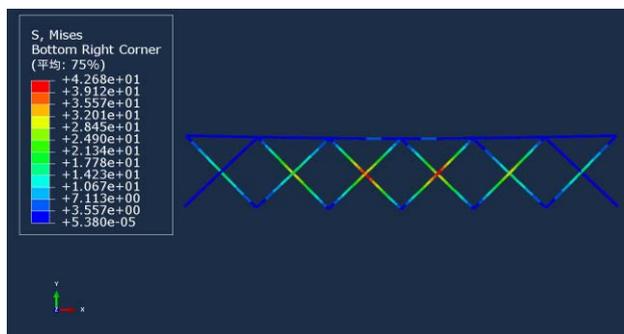


図-3 パネル設置完了後スパン中央載荷時

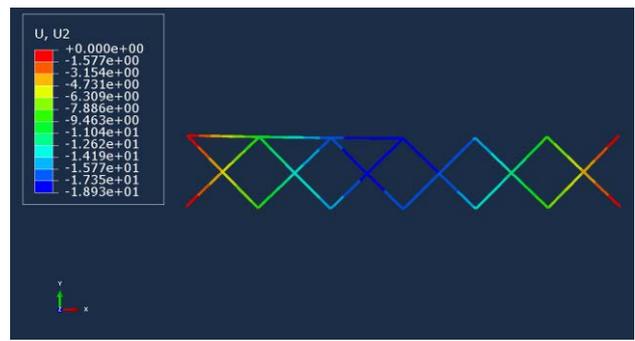


(a) 3枚目パネル設置時

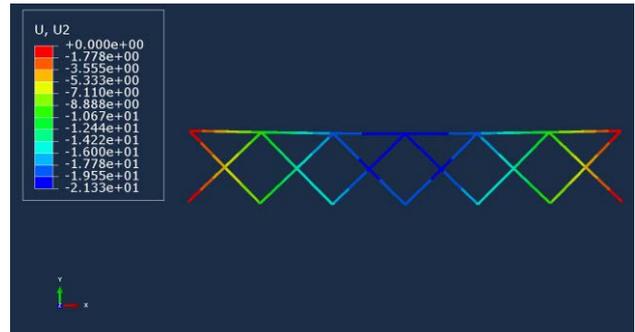


(b) パネル設置完了後スパン中央載荷時

図-4 von Misesの相当応力コンター図 (単位: MPa)



(a) 3枚目パネル設置時



(b) パネル設置完了後スパン中央載荷時

図-5 鉛直方向変位コンター図 (単位: mm)

表-1 解析に用いた主な材料物性値

比重	弾性率 [GPa]	ポアソン比
2.0	30.8	0.257

解析結果として、3枚目足場設置及びパネル設置完了後スパン中央載荷時における von Mises の相当応力コンター図及び鉛直方向変位コンター図をそれぞれ図-4及び図-5に示す。

図-4より、施工途中段階で作用応力が最大となる3枚目パネル設置時で、最大作用応力は36.06MPaであることがわかる。また、全パネル設置後、作業員を想定した活荷重をスパン中央に载荷した際の最大作用応力は42.68MPa程度であり、GFRP材料の引張試験により得られた引張強度(235MPa)の1/5~1/6程度であることがわかる。

図-5より、施工途中段階でたわみが最大となる3枚目パネル設置時で最大たわみは18.93mmであることがわかる。また、全パネル設置後、作業員を想定した活荷重をスパン中央に载荷した際のたわみは21.33mm程度であり、スパンの1/100を想定した許容たわみ(30mm)の約71%程度に収まっていることがわかる。

なお、ここで想定した断面を有するトラスユニットの1構面当たりの質量は約15.7kgであり、作業員1人でも運搬と設置が可能と考えられる。

## b) 足場パネルの概略設計

ここでは、主構ユニットに設置するFRP製足場パネルについてFEM解析を実施し、概略設計を行った。ここで検討した足場パネルの概要を図-6に示す。

足場パネルの寸法は、側溝用蓋等に用いられる市販のFRP製グレーチング板の寸法を参考に、縦1502mm、横489mmとした。足場パネルは、板厚2mmのFRP板に、縦60mm、横32mm、厚さ4mmのFRP製角パイプを補剛材として取り付けている。図中に示すType-1モデルは、FRP板の長手方向に、補剛材を3本取り付けたモデルであり、Type-2モデルは、Type-1モデルの補剛材に加え、スパン中央部にスパン直角方向にも補剛材を取り付けたモデルである。

解析モデルは、すべて4節点低減積分シェル要素で分割し、シェル要素の厚さ方向の積分点を5点とした。なお、FRP板と補剛材の接合には結合拘束を用い完全結合状態を仮定した。

荷重は、FRP製足場パネルの自重と作業員による活荷重を考慮した。活荷重は、足場パネル中央部300mm四方の箇所に作業員1人と工具類の重量に相当する1,050Nを等分布載荷した。

解析結果として、図-7に各モデルのvon Misesの相当応力コンター図を示す。Type-1及びType-2ともに荷重直下の補剛材接合部近傍に応力集中箇所がみられるが、作用応力はType-1で37.7MPa、Type-2で21.98MPaであり、許容応力度80MPaより小さいことが確認できた。

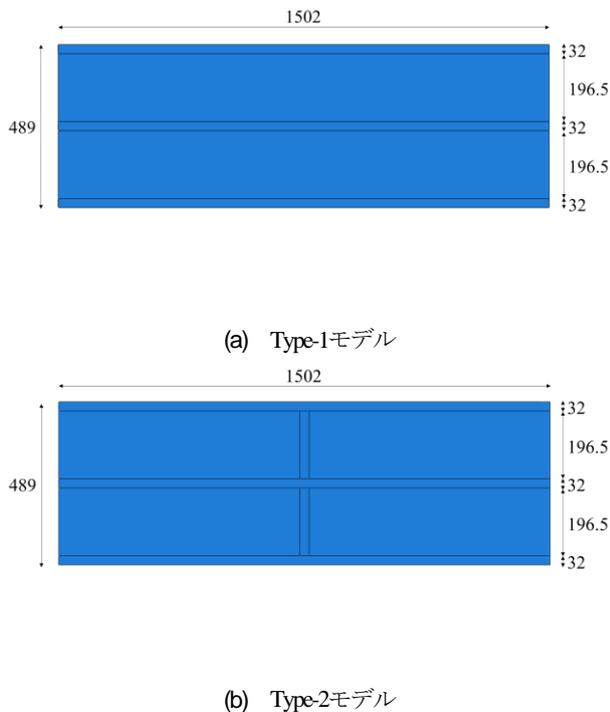
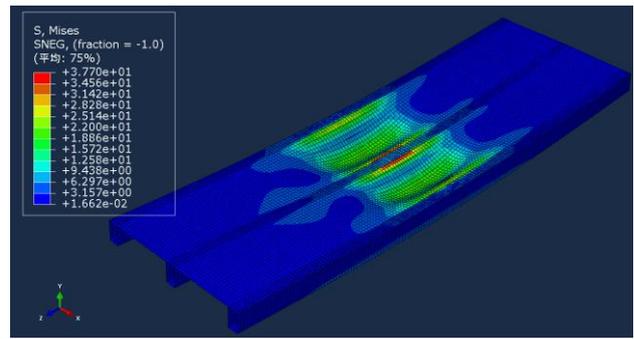
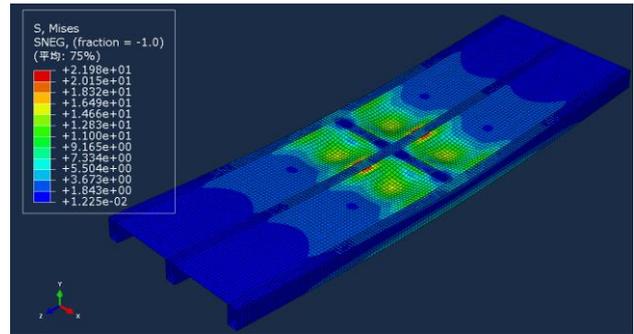


図-6 足場パネルの寸法 (単位 : mm)



(a) Type-1モデル



(b) Type-2モデル

図-7 設計荷重時におけるvon Misesの相当応力コンター図 (単位 : MPa)

## 3. FRP製足場パネルの試作及び載荷実験

本章では、これまでに試設計した足場パネルについて、試作品を用いた載荷試験を実施した。

### (1) 使用性に関する検討

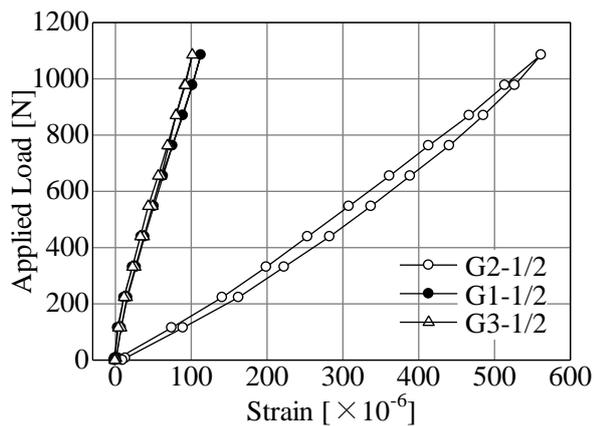
実験に使用した供試体寸法を図-8に示す。実験供試体は、板厚2mmのFRP板に60mm×32mm×4mmのFRP製角パイプをエポキシ樹脂により接着して製作した。なお、図-8中に示した○印の箇所には、ブラインドドリベットを打ち、接着接合と機械接合の併用接合としている。

FRP製足場パネル供試体は、両端から60mmまでの箇所をトラス主構の上弦材を想定したアングル材上に載せ、四隅に空けられた孔にM10ボルトを差し込み、パネルの跳ね上がりを防止した。ここでは、パネル中央部に300mm×300mm×t16mmの鋼板(1枚当たり約110N)を順次追加設置して、設計荷重である1,050Nを載荷した。

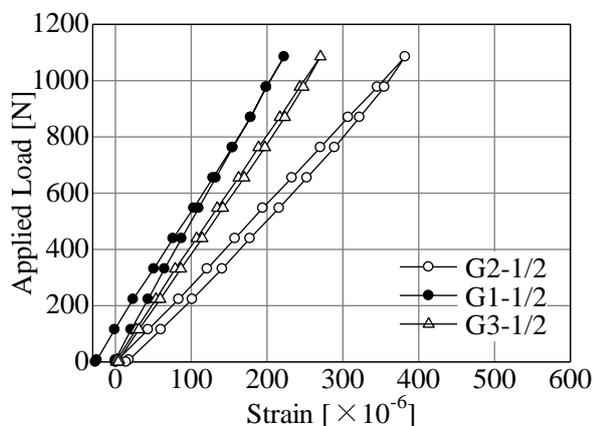
計測項目は、たわみ及び角パイプのひずみとし、変位計は図-9に示す位置に設置した。角パイプの呼び名をG1~G3と決め、G1、G3は2分の1点、G2は2分の1点及び4分の1点、両側の支点に変位計を設置した。また、G1~G3の2分の1点にひずみゲージを付着し、角パイプ中央部におけるひずみを計測した。

写真-1に実験状況を示す。





(a) Type-1供試体



(b) Type-2供試体

図-11 荷重とスパン中央部のひずみの関係

図より、Type-1供試体及びType-2供試体の最大耐荷力はいずれも約30Nであり、終局限界状態では、設計荷重1.05kNに対して30倍程度の安全率を有していることがわかる。

なお、Type-1供試体及びType-2供試体ともに、載荷荷重が10kN～15kNを超えたあたりから補剛材とFRP板との接着剤が剥離し始め、その後、最大荷重に至るまでの間に、複数個のリベットが破断した。

Type-1供試体では、複数個のリベットが破断した後に中央の補剛材（G2）が横倒れ座屈により破壊し、終局状態に至った。

一方、Type-2供試体では、パネル長手方向に設置した補剛材と横繋ぎ材との接合部においてリベットが破断あるいは端抜け破壊を生じ、試験体及び載荷装置が大きく変形したため、危険と判断して載荷を終了した。

なお、実験終了後にFRP板の損傷状況を観察したところ、Type-1供試体及びType-2供試体ともに、載荷点近傍で層間破壊によると考えられる変色は見られたものの、割れ等の損傷は見られなかった。

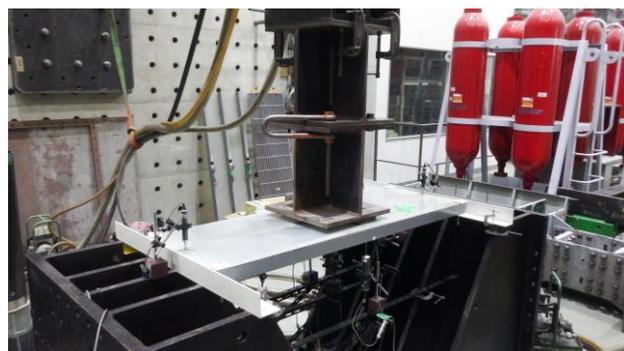


写真-2 実験状況

## (2) 破壊実験

前節では、使用状態における安全性を確認するため、工具類の重量を含む作業員重量を想定した錘を載荷する実験を実施した。その結果、通常の使用状態では、本研究で提案する足場パネルが安全であることがわかった。本節では、終局状態における安全性を検討するために、400kNアクチュエータを用いた載荷試験を実施した。

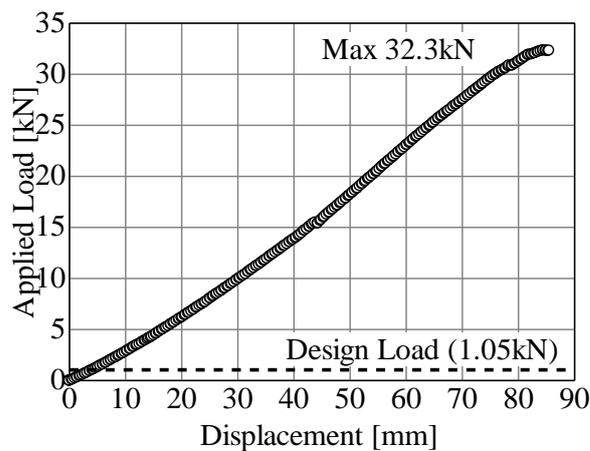
### a) 試験体及び載荷方法

本節では、前節と同様に図に示したType-1供試体とType-2供試体の2種類の供試体を用いた。

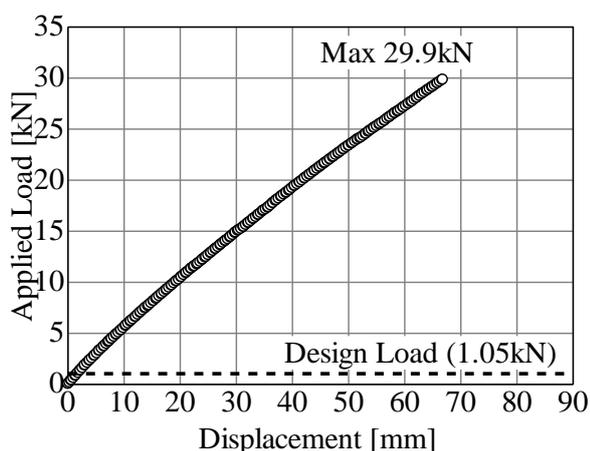
載荷には写真-2に示すように、400kNアクチュエータを用い、前節と同様に載荷面積が300mm×300mmとなるように載荷治具を介して静的荷重を載荷した。

### b) 実験結果

実験より得られた載荷荷重と足場パネル中央部におけるたわみとの関係を図-12に示す。図には、参考のため、足場工・防護工の施工計画の手引き（鋼橋架設工事用）<sup>1)</sup>を参考に設定した活荷重（作業員700N、工具等175N、及び衝撃係数20%の合計である1.05kN）を破線で示す。



(a) Type-1供試体



(b) Type-2供試体

図-11 荷重とスパン中央部のたわみの関係

#### 4. 主構ユニットの試作及び展開実験

##### (1) 主構ユニットの試作

本節では、第2章で概略設計を行った主構ユニットを試作し、格点部等の構造詳細を検討するとともに、製作性及び架設・展開性について課題の抽出を行った。

当初試作品は、写真に示すように、展開状態において、長さ3,000mm×幅1,500mm×高さ500mmとした。一昨年度の調査結果より、主に地方自治体が管理する中小規模の鋼I桁橋の主桁間隔は、おおむね3,000mm未満であることが多いことから、主構ユニットの全長を3,000mmとしている。また、主構ユニット幅（主構パネル間隔）は、作業員が工具を持った状況でも余裕を持ってすれ違って行き来できること、第2章においてFRP足場パネルの概略設計を実施した際に参考にした既存のFRPグレーチング材が約1,500mmであったことから決定した。ただし、試作した主構ユニットの重量は、横繋ぎ材を含めて60kg程度となり、高所において2名程度の作業員が設置展開するには困難であったため、次節以後の展開実験では、主構幅を600mmに変更している。

主構ユニットの重量が60kg程度となったのは、格点部において横繋ぎ材を設置したこと、展開時の形状保持のためのストッパーを設けたこと、格点部を中実断面にする必要があったことなど、第2章における概略設計では考慮していなかった部材等の重量が加わったためである。

##### (2) 主構ユニットの安全性の検討

本節では、主構ユニットの設置段階における安全性を検討するために、試作した主構ユニットを室内に展開設置し、錘を載荷することにより主構ユニット部材のひずみを計測した。

実験では、全ての足場パネルを設置完了した状態を模擬した載荷ケース1及び足場パネルを3枚のみ設置した状態を模擬したケース2の2ケースとした。

載荷方法は第3章と同様とし、試験体中央に300mm×300mm×t16mmの鋼板（1枚当たり約110N）を順次追加設置して、設計荷重である1,050Nを載荷した。なお、計測項目は、軸方向ひずみ及び主構面内の曲げひずみとした。

実験結果として、載荷ケース1及び載荷ケース2のいずれにおいても、主構部材に生じる軸方向ひずみは最大で40 $\mu$ 未満であり、使用材料の破断ひずみ（約15,000 $\mu$ ）に対して十分な安全率を有していると言える。

#### 5. 架設展開実験

前章までに、本研究で提案しているFRP製簡易展開式足場は、十分な安全性を有していることが確認された。そこで、本章では、実橋梁において、試作したFRP製簡易展開式足場を設置・展開するフィールド実験を実施し、実用化に向けた課題の洗い出しを行う。

各節に、各施工ステップにおける課題及び今後の方針についてまとめる。

##### (1) 準備工

本研究では、主構ユニット及び足場パネルの設置・展開を主な目的としていることから、対象橋梁の桁下に駐車した2tトラックの荷台を作業床と見立てて実験を実施した。

昇降階段及び作業ステージの構造については、今後検討する必要がある。

##### (2) 架設展開用レール設置

本実験では、対象橋梁の主桁間隔に合わせて製作したレールを使用した。現場で様々な主桁間隔の橋梁に対応できるよう、レールの長さを調節できる構造を検討することも必要と考えられる。また、レールの構造詳細について詳細に検討していなかったため、1本当たりの重量が8.7kg程度であった。作業ステージから片持ち状態でレールを設置するのはやや困難であったため、今後は、レールの断面寸法についても詳細な検討が必要である。

##### (3) 吊り材設置

吊り材設置段階では、特に作業上の問題はなかった。なお、本実験では、始点側の吊り材を架設レールに固定したが、実用化の際には、主桁下フランジに万力等で強固に固定する構造とする必要がある。

#### (4) 主構パネル組み立て・吊り下げ

製作誤差の問題や組み立てすべき部品数が増加するなどの問題があり、主構パネルを作業ステージ上で再度組み立てるのは困難であった。

予め組み上げた状態の主構パネルを吊り材に設置するには、作業補助者が必要となり困難であった。

今後は、軽量化あるいは現場で容易に組み立てられる接合構造について更に検討する必要がある。

#### (5) 主構パネル展開

主構パネルの下側格点に吊り材を掛けたことにより、作業者はほとんど力を加えることなく、主構パネルの自重を利用して容易に展開することが可能であり、特に課題は出てこなかった。

#### (6) 足場パネル設置

足場パネルは可能な限り分割して製作すること、主構ユニット吊り材の長さ調整をできるよう、軽量のチェーンブロックを使用することなどが望ましいと考えられる。

## 6. 結論

本研究では、地方自治体が管理している多数の中・小規模橋梁の効率的な点検を目指し、設置と移動が容易で軽量のFRP製簡易展開式橋梁点検足場を開発を目的とした。主な結論は以下の通りである。

1) 提案足場の概略設計では、断面形状が32mm×60mm×t4mm程度の角パイプでトラス構造を構成することで、最大作用応力及び最大たわみをそれぞれ36.4MPa及び

19.1mm程度に抑えることができ、許容応力度及び許容たわみと比べ十分に小さい応答地となることを確認した。

2) 試作パネルを用いた載荷実験では、作用応力及びたわみとともに許容値と比べて十分に小さく、本研究で提案する足場パネルは使用性の面で特に問題がないことを確認した。また、試作した足場パネルは設計荷重(1,050N)に対し、約30倍程度の耐荷力を有していることを確認した。

3) 主構パネルの試作では、格点部を中実断面にしたこと、概略設計の際には詳細を検討していなかった主構パネル間の横繋ぎ材重量が大きく、当初想定していた重量に対して大幅に重量が増加することなどが明らかになった。一方で、載荷実験では、主要部材に発生する作用軸ひずみ及び曲げひずみは非常に小さいことを確認した。

4) 現場での架設展開実験では、これまであまり詳細に検討してこなかった展開用レールに関して、設置する際には、片持ち状態で対象橋梁の主桁間に設置する必要があるため、設置がやや困難であることがわかった。また、主構パネルの重量が大きく、現地で一括設置するには困難であること、主構パネルを分解して現地に搬入する場合には、部材の製作精度に起因して、組み立て時間が大幅に増大することなどが明らかになった。

## 参考文献

1) 社団法人日本橋梁建設協会：足場工・防護工の施工計画の手引き(鋼橋架設工用)，pp.70-73，2009.11.

## DEVELOPMENT OF THE SIMPLE EXPANSION SCAFFOLDING MADE BY FRP FOR BRIDGE INSPECTION

Akira TATSUMI, Yasuo SUZUKI, Hideki HIBI, Kunitomo SUGIURA  
and Masahide MATSUMURA

In this study, in order to realize efficient close visual inspection of a large number of small and medium-sized bridges managed by local governments, a simple expansion scaffolding made by FRP for bridge inspection that is lightweight and easy to install and move are proposed.

Then, the mechanical properties such as stress and deflection of the scaffolding are clarified by experiment and analysis, and the safety and usability are examined.