

# 災害復旧用折り畳み橋の性能確認試験

佐藤 史織<sup>1</sup>・平沢 秀之<sup>2</sup>・小泉 楓<sup>3</sup>・戸沼 淳<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 函館高専専攻科2年 社会基盤工学専攻 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)

<sup>2</sup>正会員 函館高専教授 社会基盤工学科 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)  
E-mail: hide@hakodate-ct.ac.jp

<sup>3</sup>函館高専 社会基盤工学科5年 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)

<sup>4</sup>正会員 戸沼岩崎建設株式会社 (〒042-0932 函館市湯川町2丁目21番2号)

災害復旧用の緊急仮設橋として、短時間に架設が可能な折り畳み式木製トラス橋を開発し、その構造性能を確認するために静的載荷実験を実施した。橋梁形式はハウトラスであり、斜材が全て圧縮材となることから木橋に適した形式である。トラスの格間長は1mであり、折り畳めるよう1パネル毎に蝶番で連結されている。この実験模型は支間長が6mの大きさを有するため、本校所有の室内載荷試験機にセットすることができない。このため角形鋼材による重り(1個当たり20kg)を複数個載せ、たわみ及び木部材のひずみを測定した。たわみとひずみは、荷重にほぼ比例し、支間中央に関して対称な部材のひずみは互いに等しい測定結果を得た。それらは構造解析から得られた値ともほぼ整合し、ハウトラスとしての構造性能を有していることが判明した。

**Key Words:** *folding timber bridge, howe truss, natural disaster, emergency bridge, static loading test*

## 1. はじめに

平成30年9月6日に発生した北海道胆振東部地震(マグニチュード6.7)では、厚真町で震度7を観測し、山間部での広範囲に渡る斜面崩壊(写真-1)や道路の寸断、住宅の全壊・半壊等多大な被害が発生した。この他、7月7日の西日本における記録的豪雨(倉敷市において堤防決壊による浸水被害や土石流発生)、9月30日に和歌山県に上陸した台風24号(西日本から東北にかけて家屋・農地被害、塩害による停電)等、近年では自然災害が多発している。更に今後は非常に高い確率で数十年以内に南海トラフ大地震が起きると予想され、最大32万人の犠牲者が出ると推計されている<sup>1)</sup>。

今後予想される大規模災害に対し、被害を最小限に留める対策や災害後の復興計画の策定は当然重要であるが、被災直後は人命救助や緊急物資の輸送など、短時間で遂行すべきことがある。特に人命に関わるケースでは、72時間以内の救助がしばしば求められる。このような災害直後の緊急性が高い活動として応急橋の架設が挙げられる。著者らはこれまで短時間で架設可能な木製トラス橋の開発を行ってきた<sup>2-5)</sup>。それらは架設時間が短縮できることに加えて、製作架設方法も単純化が図られている。特に折り畳み式木製トラス橋<sup>5)</sup>では、運搬時は折り畳ま

れてコンパクト化されており、現地では、展開→連結部ボルト締め→ブレース材補強→床版設置、の工程で素早く架設を完了させることができる。

本論文では、この折り畳み式木製トラス橋を対象として行った静的載荷実験について報告する。この橋梁は上弦材、斜材、下弦材が各1本と垂直材が2本の計5本のトラス部材で1パネルを構成し、折り畳むためにパネルとパネルが蝶番で連結されている。このため通常のトラス構造と同様な挙動を示すか、また、トラスに対する通常の骨組構造解析手法を用いて計算が可能かどうかを確認することを目的とした。



写真-1 平成30年北海道胆振東部地震による被害

## 2. 実験供試体概要

実験供試体は図-1に示す支間長6mの木製ハウトラスで、トラス部材は60mmの角材を使用している。樹種はすべて道南スギとした。幅1000mmのトラスパネルは上下弦材、斜材、左右の垂直材から構成される。部材接合部は木材同士を木工用接着剤で接着し、更に1.5mm厚のアルミ板を木ねじで固定している。パネル同士は蝶番で連結されている。垂直材には橋軸直角方向のトラスパネル(幅600mm, 高さ330mm)が蝶番により取り付けられており、その上面に床版が敷かれている。この床版は図-1の点線で示されている。床版は橋軸方向長さが1mの板を使用し、その両端が橋軸直角方向トラスパネルで支持されている。

この供試体は、実物大に対して2分の1の縮尺を想定した模型であるが、幅員が600mmあるため人が歩行することが可能である。歩行者のためには床版の位置を下方にすることが望ましいが、左右のトラス同士の連結を考慮し、更にポニートラスになることを避けるため、図-1のような中路形式とした。支持条件は、図-1の支点位置に幅100mmのH鋼を置き、H鋼の上フランジの面で供試体の下弦材端部下面を支持する方式とした。

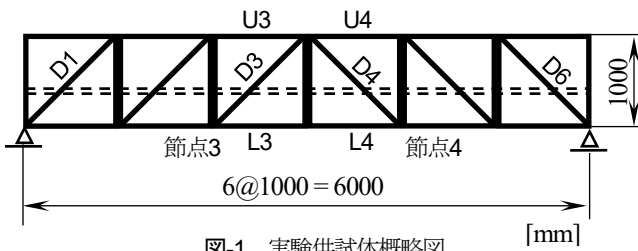
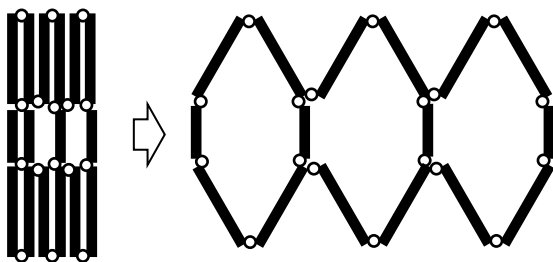


図-1 実験供試体概略図

## 3. 折り畳み構造

図-2は実験供試体を折り畳んだ状態(a)、および展開中の状態(b)を上方から見た概略図である。○印は蝶番のヒンジを表している。蝶番は軸部とプレートから構成され、プレートがトラス部材に木ねじ接合されている。図-2(a)の折り畳んだ状態では、6枚のトラスパネルが折り重なっている。蝶番の軸部があるため、数mmの隙間が生じている。6枚のトラスパネルの厚さは、この隙間も考慮して約390mmである。これを展開し、完全に伸ばした状態にす



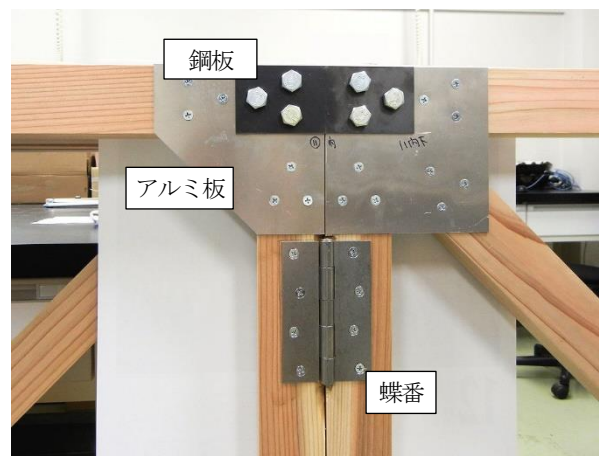
(a) 折り畳み状態

(b) 展開中の状態

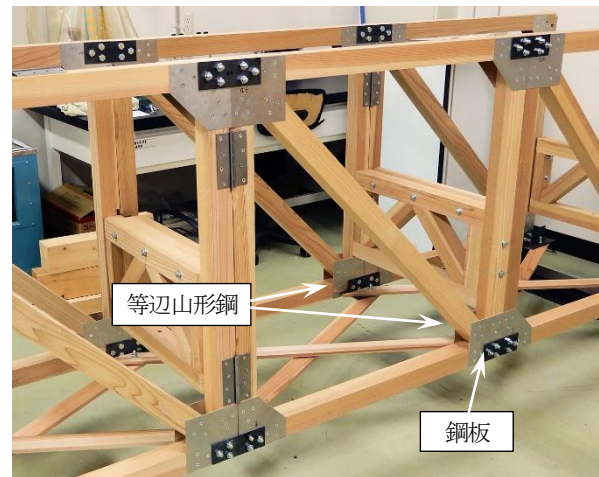
図-2 折り畳み状態と展開



(a) 展開中



(b) 展開後の補強



(c) 下弦材と下横構の連結

写真-2 トラスパネル連結部の状況

ると、全長6000mmとなる。折り畳んだ状態では非常にコンパクトになり、トラック輸送も容易である。

写真-2は隣り合うトラスパネルの連結部を示したものである。アルミ板はトラスパネルの四隅に取り付けている。展開中は、トラスパネル同士は蝶番のみで連結されている。蝶番はトラスパネルの垂直材に固定されている

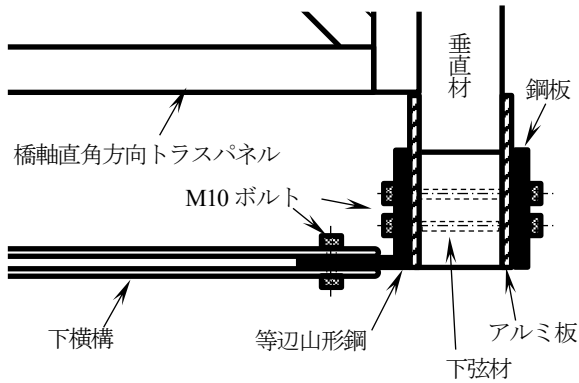


図-3 下弦材と下横構の連結部

が、アルミ板を回避させるために端部から離れた箇所に木ねじで固定させている。

展開後、トラス橋として機能させるために、上弦材同士と下弦材同士を鋼板でボルト接合し、軸力を負担させている。上弦材の連結に使用した鋼板は $160 \times 60 \times 3.2\text{mm}$ の大きさで、ボルトはM10を使用した。下弦材の連結には、下横構を取り付けることを考慮して、 $L4 \times 60 \times 60\text{mm}$ の等辺山形鋼(長さ=160mm)を内側に使用した。下横構は $60 \times 12\text{mm}$ の断面を有する木材で、両端部がこの等辺山形鋼にM10のボルトで結合される。図-3は下横構と下弦材の連結部を示したものである。アルミ板は下弦材と垂直材及び斜材を端部で連結するために使用しているが、緊急架設で繰り返しボルトを抜き差しすることを想定した場合、木材が損傷することを防ぐ役目も果たしている。

このハウトラス橋の垂直材は、両支点上を除いて、 $60 \times 60\text{mm}$ の角材が2本で構成される。ハウトラスの垂直材には、上下弦材や斜材に作用する軸力より小さな軸力しか作用しないため、部材強度に基づく設計法によればかなり余裕のある断面となる。しかしここでは、製作・架設を重視し、強度面での最適な断面は求めない。

#### 4. 静的荷重実験

##### (1) 荷重

静的荷重実験を行うに当たり、実験供試体の規模が大きいため、荷重荷重は荷重試験装置ではなく、重りを載せる方法を取った。重りは写真-3に示すような $100 \times 100\text{mm}$ の四角鋼に取手を取り付けたものを用意した。取手を含めた重さは、1個あたり $20.0\text{kgf}$ である。四角鋼の長さは $250\text{mm}$ 、取手を含めた全長は $379\text{mm}$ である。

重りの製作に要するコスト及び重りを載せるスペース等安全性を考慮し、写真-3に示した重り総個数を20個( $400\text{kgf} = 3920\text{N}$ )とした。重りと取手の形状は、積み重ねることを想定し、重りの上下面が平面で且つ次項で示すフックによる吊上げが容易にできることを考慮している。



写真-3 荷重実験用の重り

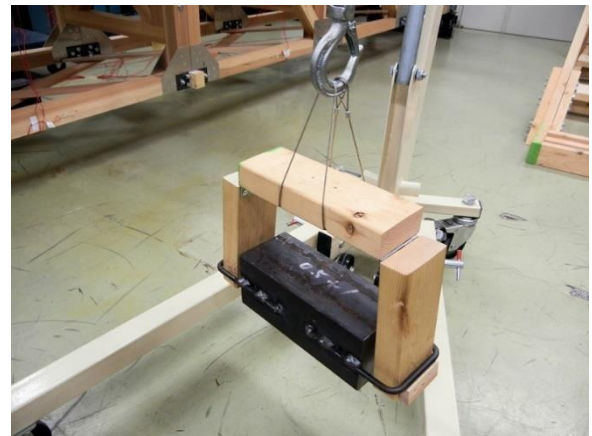


写真-4 フック

##### (2) 荷重方法

荷重荷重を安全に効率よく行うため、写真-4に示す専用のフックを開発した。これは、重りの取手部にフック先端部の突起を引っ掛けて吊り上げる仕組みとなっている。また、重りを置くと、突起が外れ、自動的にフックを重りから離すことが可能となっている。この状況を図-4で説明する。

専用フックは斜線で表した1本の水平部材と2本の垂直部材から成り、それらはヒンジで連結されている。重りを持ち上げるときは、図-4(a)のように重りの取手がフ

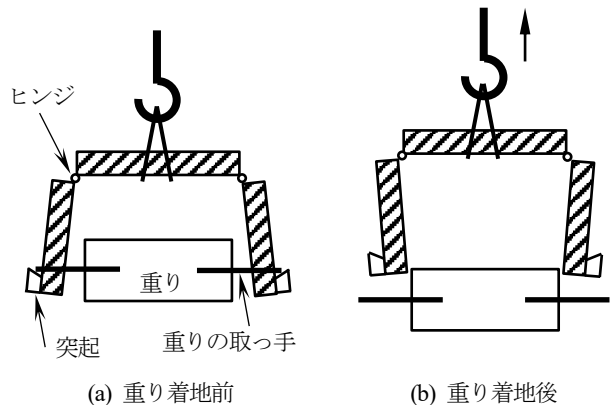


図-4 フックによる重りの着脱



写真-5 手動ウィンチ付きクレーン



写真-6 載荷状況

ックの垂直部材の突起に引っ掛かっている。このとき、垂直部材はわずかに外側に傾斜している。重りを所定の位置に着地させ、フック全体を少し下方に下げると、垂直部材の重力により、図-4(b)のように内側に傾斜し、突起が重りの取っ手から自動的に外れる。そのままフック全体を上方に上げると、手作業を加えることなく重りからフックを外すことが可能となる。重りをフックに取り付ける際は手作業で出来るが、フックから取り外す際は人が橋の上で作業しないと手が届かないため、自動的に外れる構造とした。

静的載荷実験において、重りは実験供試体の床版上に載せる。重りを載せるためには、重りを水平方向に数m、鉛直方向に約1.2m(上弦材を交わして降ろすため)ほど動かす必要がある。このため、写真-5に示す車輪のついた手動のクレーンを使用した。このクレーンはアームを伸ばした状態で100kgfを吊り上げる性能を有している。

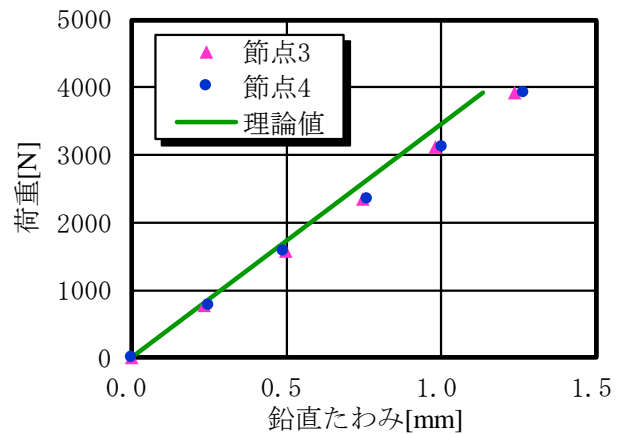
載荷点は支間長の3分の1、支間中央、支間長の3分の2の3か所とし、それぞれの点において床版上に1列に4個並

べて1段(80kgf=784N)とし、5段(400kgf=3920N)まで積み上げる。ひずみとたわみは1段荷重を載せ終えるごとに測定した。写真-6は支間中央部に重りを5段載荷させた状況を表したものである。

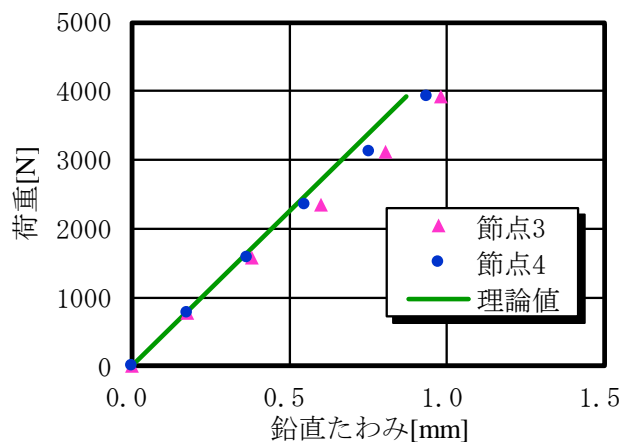
(3) たわみの実験結果

図-5(a)は支間中央部に載荷したときのたわみの実験結果(▲, ●)及び理論値(—)である。ここで、節点3、節点4とは、図-1に示す下弦材の節点である。また、理論値はトラス要素を用いた自前で開発したプログラムによる平面骨組構造解析から得た計算値である。解析モデルは図-1の通りで、節点数を14、要素数を25とし格点部をピン結合としたハウトラス構造としている。解析に用いた材料定数(弾性係数)は、曲げ試験<sup>6)</sup>から得られた $E = 5980\text{N/mm}^2$ とし、すべてのトラス部材に適用した。

実験供試体は対称構造を有するが、対称位置にて測定した節点3と節点4では、たわみがほぼ等しい値となり、対称的にたわんでいることが分かる。また、構造解析から算出した理論値と実験値は非常に良く整合している。重りの制約から小さな荷重状態での実験結果しか得られ



(a) 支間中央載荷時の節点3, 4のたわみ



(b) 節点4載荷時の節点3のたわみ及び節点3載荷時の節点4のたわみ

図-5 たわみの実験値と理論値

なかったが、荷重-たわみの線形関係が明確に表れている。実験値と理論値とのわずかな相違は、材料定数の誤差、本供試体はトラスの1パネル毎に蝶番で連結されていることから、蝶番の軸部のがたつき、すなわち回転軸の僅かな遊間が影響した可能性が考えられる。また、ひずみ、たわみ共に160kgfを超えた頃から理論解との差が生じているが、これは1段目と2段目に载荷した重りによるクリープ変形による可能性が考えられる。

図-5(b)は、節点4上の床版に载荷させたときの節点3のたわみ(▲)と、節点3上の床版に载荷させたときの節点4のたわみ(●)である。両者は非常に良く整合し、相反定理の成立が実験で再現できたと言える。図-5(a,b)より、本供試体は左右対称構造のハウトラスとして妥当な力学的挙動を示していると言える。

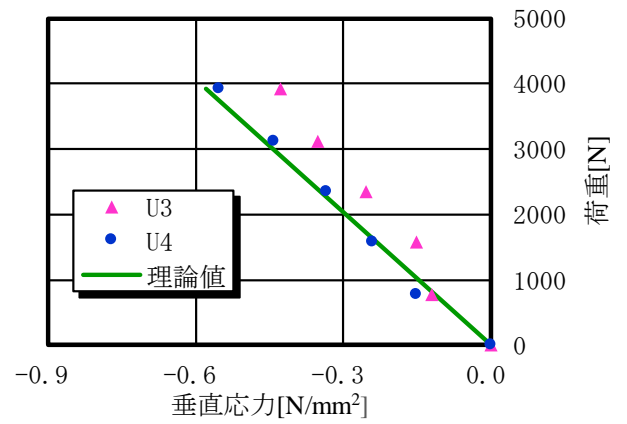
**(4) 部材応力の実験結果**

実験供試体の部材両側面に貼り付けたひずみゲージによりひずみを測定し、両側面の平均値として応力を算出した結果が図-6となる。荷重は支間中央载荷としている。図-1に示す通り、測定箇所U3とU4、D3とD4、L3とL4、及びD1とD6は、それぞれ支間中央に対して対称の位置関係となっており、D3とD4は供試体中央部、D1とD6は供試体端部のトラスパネルの斜材を示す。U3、U4は支間中央部の上弦材であり、最も大きな圧縮力を受ける部材である。また、L3、L4は支間中央部の下弦材であり、最も大きな引張力を受ける部材である。

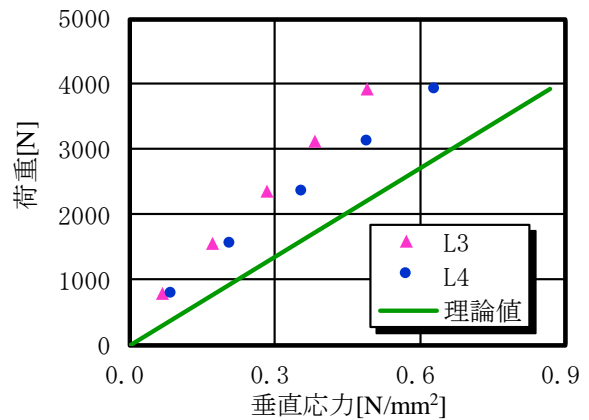
実験値と理論値を比較すると、下弦材(L3,L4)では理論値よりも小さめの応力が発生しているが、その他の部材ではおおむね理論値と近似する結果となった。また、支間中央に関して対称の位置関係にある箇所の応力分布をそれぞれ比較しても、おおよそ等しい値となることが分かった。

理論値と実験値の相違の要因としては、材料定数の誤差の他、木材は年輪や材料の不均一さがひずみに大きく影響し、部材中の応力分布が一定にならないことが考えられる。また、L3、L4に関して、理論値を得るための荷重条件が実際の载荷状況と一致していない可能性がある。すなわち、解析では支間中央節点に集中荷重として外力を与えているが、実験では重りが1点ではなく面で床版に作用するため、図-1の節点3、4にも荷重が分配された可能性がある。荷重がどの程度分配されるかは、床版表面の不陸が影響するため正確に算定することは困難であるが、荷重の分配が起きていれば支間中央部の集中荷重が分散されるので、応力の理論値が実験値に接近すると予想できる。

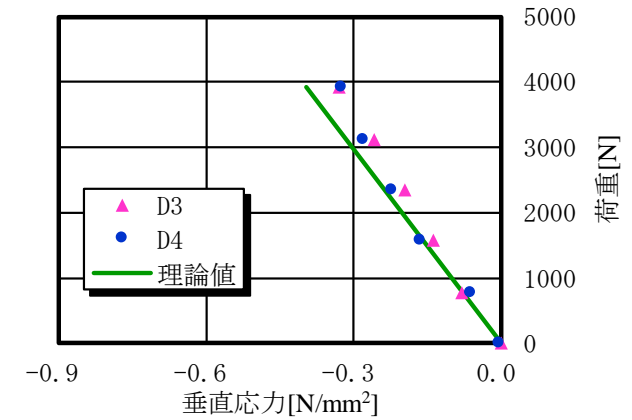
このような部分的な理論値と実験値の相違が見られるものの、本実験での実験結果を全体的に見ると、ハウトラスとしての構造性能を有していると考えられる。



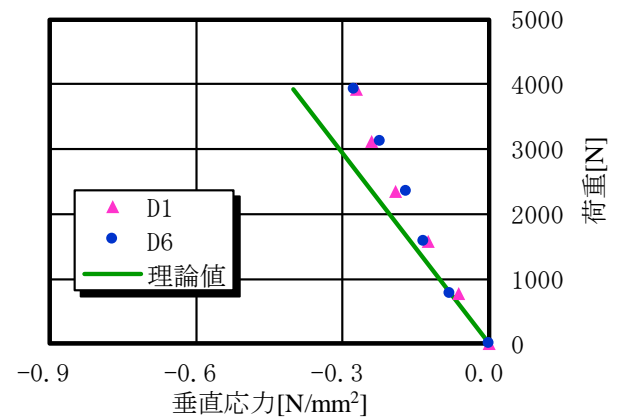
(a) 上弦材の垂直応力



(b) 下弦材の垂直応力



(c) 斜材の垂直応力



(d) 端部斜材の垂直応力

図-6 各部材の垂直応力

## 5. おわりに

災害時の緊急仮設橋として開発した折り畳み式木製トラス橋の2分の1スケールの模型を使用して静的載荷実験を実施した。荷重は1個当たり20kgfの鋼製の重りを用い、クレーンで吊り上げ載荷した。荷重条件は支間中央1点集中載荷とみなし、測定と解析を行った。実験では支間長の3分の1及び3分の2の格点でのたわみと、支間中央部の上弦材、斜材、下弦材の垂直応力、支点部の斜材の垂直応力を測定した。

それぞれの測定値と荷重との関係を求めた結果、たわみ及び応力共にほぼ比例関係を呈することが認められ、骨組構造解析により得られる理論値ともおおむね整合した。たわみに関しては、測定値は理論値とかなり良い一致を示した。本供試体の幾何形状と境界条件は支間中央に関して対称となっているが、たわみ及び応力共におおむね対称性が認められた。これらより、本供試体は蝶番で連結された折り畳み可能な特殊な構造であるが、ハウトラス橋としての性能を有し、トラス部材を用いた骨組構造解析で計算可能と判断できる。

理論値と実験値の相違は、蝶番の軸部のがたつき、材料の不均一さ、材料定数の誤差、荷重条件が原因であると推定した。今後は実物大の大きさを想定した連結部の

改良、本供試体を用いた屋外でのトラック輸送、折り畳み・展開設置の実証実験を実施していく予定である。

**謝辞**：本研究は日本学術振興会科研費(基盤研究C, 課題番号 18K04673)の助成を受けた。ここに謝意を表す次第である。

### 参考文献

- 1) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告），2012.
- 2) 平沢秀之，戸沼淳，小澤暁栄，藤田好彦，渡辺浩，鈴木謙：応急橋に適した木製トラス橋の開発 とリユース，構造工学論文集，Vol.62A, 16-6, 2016.
- 3) 平沢秀之，佐藤香純：折り畳み式応急橋における展開工法の開発，木材利用研究論文報告集15, pp.46-48, 2016.
- 4) 平沢秀之，安齋穂実，戸沼淳：折り畳み式小型軽量木製トラス橋の開発，土木学会第72回年次学術講演会講演概要集(DVD-ROM), V-578, 2017.
- 5) 平沢秀之，佐藤史織，戸沼淳：折り畳み構造を有する応急橋の模型試作，木材利用研究論文報告集17, 77-82, 2018.
- 6) 日本建築学会：木質構造限界状態設計指針(案)・同解説，2003.

(Received August 31, 2019)  
(Accepted November 11, 2019)

## STRUCTURAL PERFORMANCE TESTS OF FOLDING BRIDGE FOR EMERGENCY

Shiori SATO, Hideyuki HIRASAWA, Kaede KOIZUMI and Jun TONUMA

A folding timber truss bridge for emergency in natural disaster is developed and static loading tests of this bridge are executed. The objective of the tests is to confirm that the bridge has structural performance as a truss bridge. The type of this bridge is Howe truss bridge which is suitable for timber bridge. All the diagonal members are subjected to compression force in Howe truss. This bridge has 6m span with 6 truss panels, each panel is connected by steel hinge plates. Since the size of this bridge is large, the loading machine can not be used to this bridge. Therefore, as the method of the tests, steel weights are loaded on the slab on the bridge. In the tests, displacements and strains are measured. The results of the tests show that the relationship of load-displacement and the relationship of load-stress are linear with symmetry and that the experimental value and analytical value are near. It is obtained that this folding timber bridge has structural performance as truss bridge by the distribution of displacements and stresses.