

折り畳み構造を有する応急橋の模型試作

平沢 秀之¹・佐藤 史織²・戸沼 淳³

¹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

²学生会員 函館高専専攻科 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)

³正会員 戸沼崎建設株式会社 (〒042-0932 函館市湯川町2丁目21番2号)

災害時の応急橋としての用途に使用できる木製折り畳み式橋梁を開発した。施工時間の短縮と施工の省力化を目的としている。本研究では、折り畳んだ状態から展開させるためのメカニカルな機構を試作し、模型実験を実施した結果について報告する。メカニカルな機構とは、棒部材とヒンジから構成されるシザース構造(玩具等で見られるマジックハンド、鉄道車両のパンタグラフなど)をいう。また、この展開機構を人力で作動させるために、回転運動を伸縮運動に変換させるギヤボックスを製作した。これにより小さな力で橋梁上部工を展開させることが可能となった。本研究では更に、人が歩行できる規模の模型を製作し、部材接合方法、折り畳みの精度、展開動作について検討した。

Key Words: *folding bridge, emergency bridge, timber bridge, natural disaster, Howe truss*

1. はじめに

我が国では、毎年のように自然災害が発生し、道路が分断され集落が孤立する事態が各地で発生している。集落の住民への物資の運搬や人々の移動のために、緊急に橋を必要とするケースも多い。著者らは、このような災害時用の応急橋として、または工事用の仮設橋梁として、木製トラス橋を平成22年に開発した¹⁾。この橋梁は、部材寸法の統一化、接合方法の統一化が図られており、少ない作業人数で短時間架設(4時間半ほど)が可能となっている。このほか、鋼材を使用した応急橋が鋼橋関連企業等において実用化されている例が見られる²⁾。

一方、我が国では政府の施策として「国土強靱化」を掲げ、迅速な復旧復興を基本目標の一つとしている。これは、ひとたび災害に見舞われても、速やかに回復を図ることを意味している。そこで、本研究では、上記の木製トラス橋の例や、これまでの実用化した応急橋の例より一層の短時間架設を可能とする橋梁を開発しようとするものである。

橋梁の形式は、木製折り畳み式トラス橋である。この形式は、折り畳んだ状態で災害現場までトラック輸送し、骨組構造を展開させて橋梁構造物を形成させることができる。本体は保管場所でほぼ完成させた状態で折り畳み、現地での施工は展開作業だけとなる。これまでの研究で

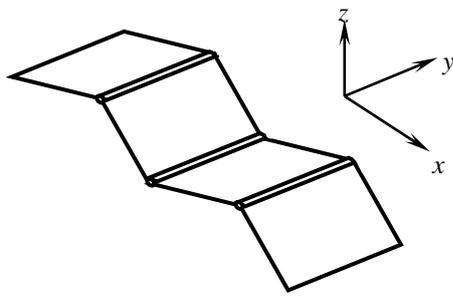
は、折りたたむことによって大幅なコンパクト化と木材利用による軽量化が、5分の1スケールの室内模型実験により確認されている³⁻⁵⁾。

実際の災害現場では、対岸に渡ることができず、架設作業を両方の支点位置で行うことが不可能な場合も考えられる。折り畳み式の構造であれば、一方の支点側で展開作業を行い、橋の先端部を対岸へ到達させることができる。展開のための作業には特別な重機等を必要とせず、人力のみで行える方法を考案した。すなわち、シザース構造(マジックハンド、パンタグラフ)と歯車を組み合わせ、歯車の回転運動をシザースの伸縮運動に変換するギヤボックスを開発した。歯車の直径と歯数を適切に選択して小さな人力で大きな伸縮力を発揮できるようにした。

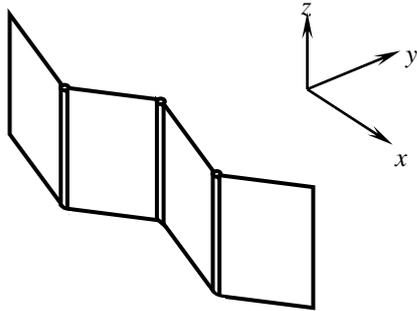
本研究では、人力作業を可能にするギヤボックスの仕組みについて詳説し、更に人が歩行できる規模の模型を製作して折り畳みによるコンパクト化、展開動作の確認を行った。トラス部材の接合部にはアルミ板木ねじ接合と鋼板ボルト接合を併用する方法を採用した。

2. 折り畳み方向

橋軸方向を x 軸、幅員方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とおく。橋梁構造物は橋軸方向寸法が大きな構造物であるため、折り畳み回転軸を y 軸または z 軸とすることにより、



(a) 折り畳み回転軸をy軸に取った場合



(b) 折り畳み回転軸をz軸に取った場合

図-1 折り畳み方向

折り畳んだ際にコンパクト化が可能となる。回転軸をx軸に取ると、折り畳んでも桁長のサイズは短くならない。図-1は、これらの折り畳みの回転軸を表したものである。図(a)は床版を折り畳む場合には適した方法と考えられるが、主桁やトラス主構を展開する場合は、最も展開させた場合(伸ばした場合)、桁高または主構高がほとんどゼロになってしまう。このため、完全に伸ばし切前の状態で、完成時の橋梁構造体としなければならない。参考文献6)の応急橋モデルは、図(a)のタイプであり、主構高を確保しながらx軸方向に展開させている。

一方、図(b)は折り畳みまたは展開の途中において、桁高または主構高は不変であり、完全に伸ばし切った状態が力学的にも橋梁構造体として適している。折り畳めばx軸方向長さを非常に小さくすることができ、運搬の際に都合が良い。以上より、本研究では折り畳みの方法として図(b)を採用することとした。

3. 折り畳み式ハウトラス橋試作モデル

図-2は本研究で試作した5分の1スケールの模型概略図である。ここでは実物大の支間長を12 m程度と想定している。橋梁本体は24 mm角の製材を用いたハウトラス構造であり、左端部は固定端を形成するため大型の三角フレームとカウンターウエイト(16 kgfの重り)から成る。部材断面については、ここでは折り畳み・展開の動作に

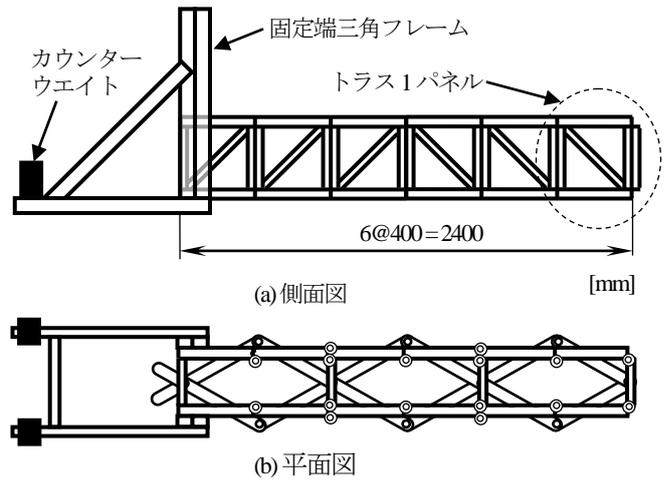


図-2 折り畳み式応急橋の模型概略図

着目しているため、強度面から断面寸法を決定しておらず、材料の価格と製作性に基いて決定した。三角フレームとトラス橋本体はボルト接合され、容易に取り外すことができる。トラスは上弦材・下弦材・垂直材・斜材から構成される1パネル(縦400 mm, 横400 mm)が、橋軸方向に6パネル連結される。これらのパネルどうしは金属製の蝶番(縦76×横41×板厚1 mm)で連結されており、折り畳むことができる。平面図において◎で示した箇所が蝶番の取り付け箇所である。固定端三角フレームを除く橋梁本体の重量は89 Nである。

図-2の側面図は展開後の状態を示したもので、左端が固定端、右端が自由端となる片持ち状態になっている。架設時はこの状態の後に自由端を地面に接地させ、両端が支持される。ハウトラス形式は、片持ちの状態では必ずしも全ての斜材が圧縮材とはならないものの、両端支持の状態であれば木製トラス橋には適した構造である。

4. 展開機構

図-2の平面図に示すように、下弦材の下部にはシザーズ構造が取り付けられ、左端部の操作により伸縮動作を行うことができる。シザーズの棒の端部どうしはφ5のピンで結合されている。シザーズの棒の中央部および両端部はピン結合されていると同時にトラス橋の横梁ともピン結合されている。したがって、トラスの伸縮動作は、シザーズから横梁を通じて橋軸方向の力が伝達されてなされる仕組みとなっている。

このシザーズ構造の詳細図を図-3に示す。シザーズは40×5 mmの断面を有するヒノキ材である。ピン結合部を中心とする円周に沿って回転運動させると、容易にx方向に伸びていく。これまでの実験で、手動で端部Aを操作することによりトラス構造の伸縮が可能であることが実証されている。しかし実物大スケールでは、一人の力でこの操作をすることは困難であると想定される。そ

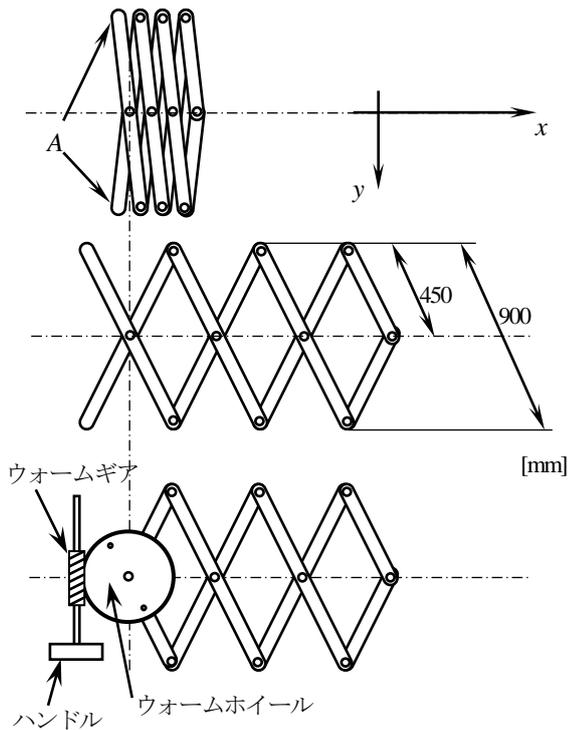


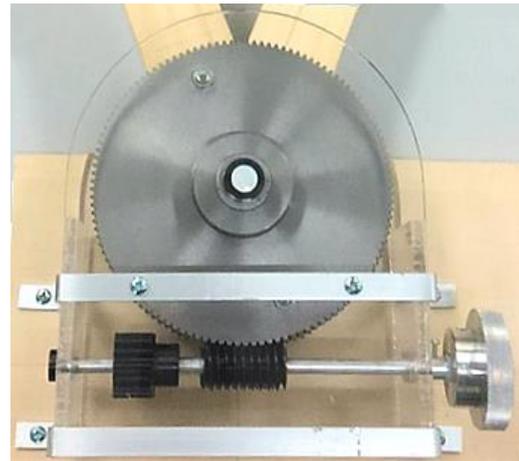
図-3 シザーズ構造

ここで本研究では、歯車を組み合わせてギヤボックスを構成し、回転運動をギヤに与えてその動きをシザーズの伸縮に利用することを考案した。

5. ギヤボックス

本研究では、使用するギアとしてウォームギヤとウォームホイールを採用する。ウォームホイールは設置場所のスペース及び作業性の面から直径123 mmのものが適切と判断し採用した。また、強力な回転力を得るためにウォームギヤの歯数は120とした。図-3に示すシザーズ端部Aを短くカットし、回転の中心を一致させながらウォームホイールを取り付ける。このウォームホイールを回転させるためのウォームギヤを噛み合わせ、その回転軸の端部には手動で回転させるためのハンドルを取り付ける。

ウォームホイールは2枚重ねて設置し、互いに逆回転できる仕組みとなっている。それぞれにシザーズの端部が固定される。写真-1にウォームギヤとウォームホイールを設置した状態を示す。ウォームギヤは2軸となっていて、平歯車を介して1軸を回転させると他方の軸が逆回転する。この回転がそれぞれのウォームホイールに伝達され、シザーズを伸縮させる。図-4にウォームホイールからシザーズへの力の伝達の状況を示す。シザーズを回転させようとする、橋梁本体の死荷重や蝶番の摩擦による抵抗があるため、それに打ち勝つ回転力をウォームホイールに与えなければならない。そのためにウォ



(a) 平面図



(b) 正面図

写真-1 ウォームギヤとウォームホイール

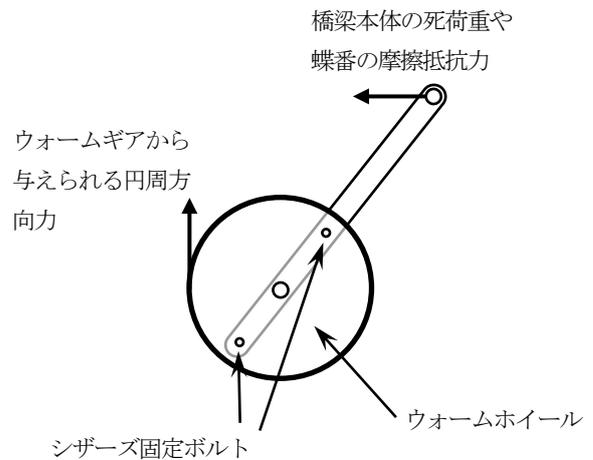


図-4 シザーズへの力の伝達

ームギヤを回転させて、強力に回転力をウォームホイールに伝達させる。

ウォームギヤを回転させると、ウォームホイールに回転を生じさせる。一方、ウォームホイールを回転させてウォームギヤに回転を伝達させることはギヤの構造上不可能である。すなわち、ウォームギヤがウォームホイールの回転を妨げている。このことは、トラス構造本体に外力(自重や風荷重など)が作用して勝手に伸縮しようとする動きを抑制する効果があり、安全な架設を行う上で有効である。

6. 展開実験

ウォームギヤ、ウォームホイール、平歯車、ハンドルから成るギヤボックスをトラス橋本体に取り付け、手動による回転を与えてトラス橋の展開動作の確認を行なった。写真-2は固定端側から自由端の方向へ見た状況を表している。手前側にギヤボックスがあり、ギヤボックスの右側に取り付けたハンドルを回すことにより、シザーズの角度が変化する。

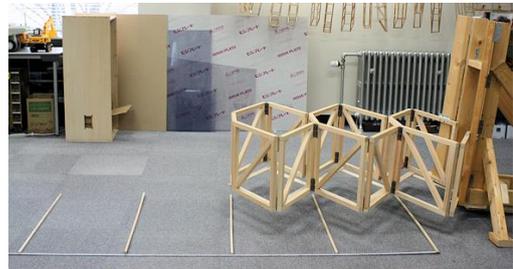
写真-3は展開実験の状況を表したものである。写真の右側に固定端となる大型三角フレームが設置されている。シザーズはトラス下弦材の下部に取り付けられているが、下弦材と床の間は100 mm程度の隙間があり、伸縮動作はスムーズである。

展開前は橋軸方向に約200 mm程度のコンパクトな状態で折り畳まれている。この状態からハンドルを回転させる。「(b) 展開中」の写真はハウトラス構造の全長の1/2まで展開した状況である。この位置まで伸ばすにはハンドルを約8回転させる必要がある。「(c) 展開完了」にはハンドルを21回転して到達させることができた。

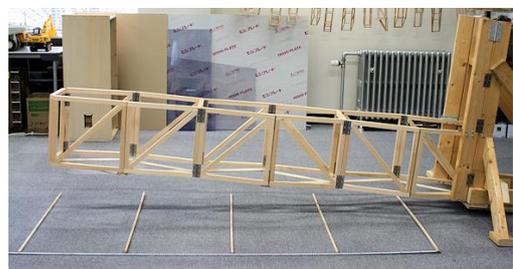
展開の方向は、写真の通りやや上向きとなっているため、自重のためハンドルを回すのに多少の力を要するが、休まず連続的に回し続けることができた。3回の展開実験で、展開時間は平均99秒となった。一方、完全に伸び



(a) 展開前



(b) 展開中



(c) 展開完了

写真-3 展開実験



写真-2 ギヤの動きとシザーズの展開

た状態から折り畳む操作も3回実施し、完全に折り畳まれた状態に達するまでの時間を計測したところ、平均15秒となった。これは、展開時とは逆に自重による力が折り畳む方向に作用しているため、ハンドルを回す手の力が小さくて済んだためである。しかしながら、その自重による作用のみでトラス構造が折り畳むことはない。

7. 2分の1スケールモデル

人が実際に歩行できるサイズで、且つ屋内で実験を行うことのできる2分の1スケールの模型を試作した。図-5はその側面図を表している。格間長1000 mm、支間長6000 mmを有するハウトラスモデルであり、トラス部材は60 mm角のスギを使用している。1トラスパネルは写真-4のような正方形パネルとなっており、部材接合部は木材同士を木工用接着剤で接着し、更に1.5 mm厚のアルミ板を木ねじで固定している。

部材接合部の詳細を写真-5に示す。接合用アルミ板は、垂直材と上弦材または下弦材、及び斜材を接合するために使用している。トラスパネル同士の連結には、蝶番と補強鋼板を使用している。蝶番は垂直材の上下にそれぞれ

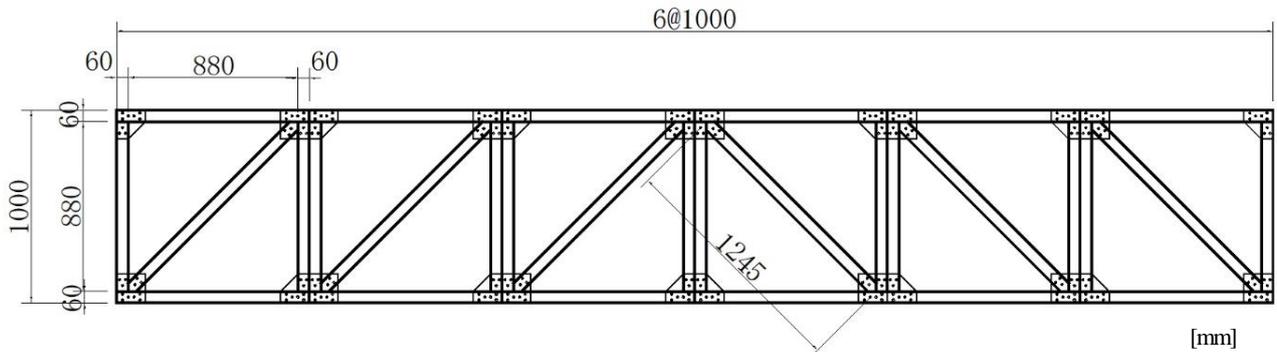


図-5 2分の1スケールモデル

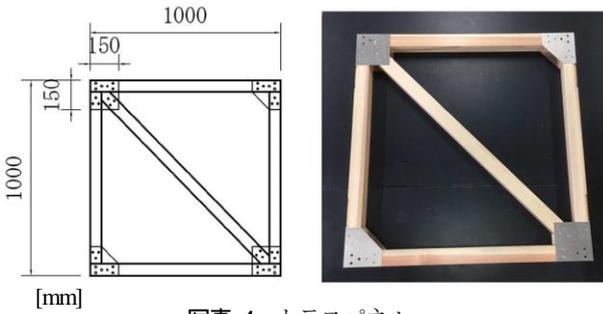


写真-4 トラスパネル

れ1枚使用し、接合用アルミ板と重ならない位置に木ねじで固定している。固定端から3パネルまでの連結部には、縦126×横80×板厚2.0 mmの蝶番を使用し、自由端から4パネルまでの連結部には、縦100×横70×板厚1.8 mmの蝶番を使用している。なお、蝶番は横桁と主構を連結するためにも使用しており、縦100×横70×板厚1.8 mmのサイズの蝶番を用いている。

補強鋼板は上弦材同士と下弦材同士を連結するために使用している。木部材を挟んで2枚の鋼板(縦60×横160×板厚3.2 mm)によりボルト接合(M10)としている。トラス構造を展開する最中は、補強鋼板を使用せず、パネル同士は蝶番のみで連結されている。展開終了後に、連結部のアルミ板の上から補強鋼板をボルトで固定する(写真-5参照)。供用時には死荷重と活荷重による軸力が上下弦材に生じるが、補強鋼板がこれに円滑に抵抗する。

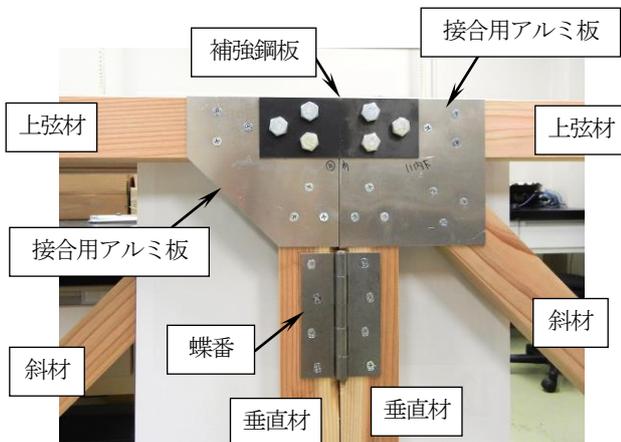


写真-5 部材接合部

展開動作のシザーズ及びギヤボックスを設置する前の半完成の状態で行った。写真-6は展開前の完全に折り畳まれた状態を示す。折り畳みの際の部材同士の隙間はわずかであり、橋軸方向の厚さは約390 mmであった。この長さの内訳は、(木部材の幅+蝶番の板厚)×格間数6+製作誤差などの隙間、となっている。

写真-7は平滑な床面上で展開し、全長6000 mmのハウトラス構造を完成させた状態である。幅員は600 mmを有し、横桁上に床版を設置すれば人の歩行が可能である。構造全体の重量は約830Nと軽量である。本モデルによる展開動作に問題点はなかったため、今後は5分の1スケールモデルと同様に固定端フレームとシザーズ構造及びギヤボックスを設置し、人力による展開実験を実施する予定である。



写真-6 展開前



写真-7 展開後

7. おわりに

災害時用の応急橋として、折り畳み式木製トラス橋を開発し、折り畳み動作の実証実験を行った。伸縮動作を行うために、ギヤによる回転運動を利用した機械的方法を考案し、5分の1スケールモデルに適用した。ギヤボックスはウォームギヤ、ウォームホイール、平歯車から構成され、ハンドルの回転操作により2枚のウォームホイールが回転し、シザーズを伸縮させる仕組みとなっている。この方法によれば、ハンドルを回す手の力だけでトラス構造の展開・折り畳みを行うことが可能である。非常に単純な構造で、電力等のエネルギーが不要であることから、災害時における橋梁架設の方法として有効である。

人の通行を想定した2分の1スケールモデルでは、ヒンジ部に大型の蝶番を採用し、また、部材接合部にアルミ板を使用した。更に展開後の上下弦材の連結を強固にさせるため補強鋼板を使用した。このモデルは、全長6000 mmが折り畳むことにより厚さがわずか390 mmとなり、重量も軽量であることから、実物大を想定しても輸送に極めて有利であると考えられる。今後の研究では、構造体の下部にシザーズを取り付け、展開及び折り畳みの動作チェックを行うこと、大型のギヤボックスを設置し、わずかな人力での展開動作を確認すること、更に、接合

部の強度と橋梁全体の耐荷力を明らかにする予定である。

本研究の遂行に当たり日本学術振興会科学研究費(基盤研究C, 課題番号15K01267, 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) 平沢秀之, 吉田朋哉, 戸沼淳, 佐藤哲也, 渡辺浩: 木材のカスケード利用に適したトラス橋の実証実験, 木材利用研究論文報告集9, 土木学会木材工学特別委員会, pp.112-119, 2010.
- 2) 技術資料 仮橋のラインナップ, 橋梁と基礎Vol.46, 第8号, pp121-130, 2012.
- 3) 平沢秀之, 渋谷大雅: 架設時間を短縮できる災害時応急橋の開発, 木材利用研究論文報告集14, pp.86-89, 2015.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 近広雄希, 有尾一郎, 中沢正利, 田中義和: シザーズ型展開橋の静力学特性とその検証, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1307-1315, 2016.

(2018.8.31 受付)

MODELING OF EMERGENCY BRIDGE WITH FOLDING MECHANISM

Hideyuki HIRASAWA, Shiori SATO and Jun TONUMA

A timber folding bridge is developed in order to keep the trafficability in isolated village in mountain area after natural disasters. This paper reports the results of experiments of the bridge model using mechanical system for folding and unfolding. The mechanical system here is scissors structure (magic hand for toy or pantograph for rail way car etc.) which consists of bars and hinges. To move the unfolding system by human-power, a gear box which can change the rotation movement to elongating movement is developed. It is possible to make the superstructure of the bridge unfolded by small power. And also, the model in the size that a person can walk is built and the connection of members and the unfolding movement are investigated.