折り畳み式木製トラス橋の開発

函館工業高等専門学校　平　沢　秀　之

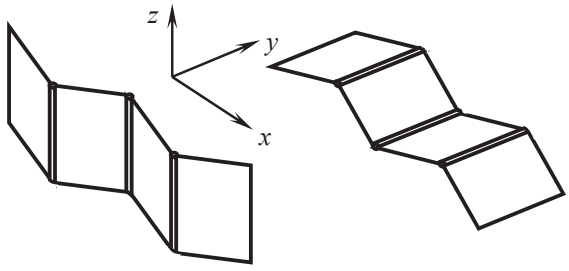
■はじめに

日本では毎年多くの自然災害が発生し，人的被害を伴う大規模災害もしばしば起きています。最近の例としては，令和元年8月26～28日の九州北部豪雨や10月11～12日に関東から東北を襲った台風19号，平成30年9月6日における北海道胆振東部地震などがあげられます[1)]。こうした災害が起きると交通路が分断され，物資輸送や人命救助に支障をきたすこともあります。災害後の復旧において，交通路の確保は重要で優先度は高いと言えます。

これまで著者を含む研究グループは，自然災害により集落が孤立して人々の往来が遮断されたケースを想定し，素早く橋を架けて通行させることのできる折り畳み式橋梁の開発を行ってきました[2-4)]。橋本体を折り畳んで小型化し，運搬を容易にすること，架設時間を短縮することを目的としています。本報告では，2019年に行った折り畳み式橋梁模型による静的載荷実験と屋外架設実験について紹介したいと思います。既に実用化されている従来の鋼製応急橋[5)]は，実際に災害時に供用された実績がありますが，架設時間は数日程度を要しています。ここで報告する折り畳み式橋梁は，木製でありながら十分な強度を有し，短時間での架設が可能で，人命に関わるような緊急性の高いケースにも適用できることを目指しています。

■折り畳み構造

座標軸を，橋軸方向(橋の長さ方向)をx軸，幅員方向をy軸，高さ方向をz軸とし，橋の橋軸方向の長さを短くする折り畳みを考えます（**図1**）。折り畳むためには回転部を設けますが，その回転軸は**図1(a)(b)**のように鉛直方向と水平方向が考えられます。鉛直回転軸を採用した場合，桁高あるいはトラスの主構高(z方向の高さ)は折り畳み時と展開時で変化しません。一方，水平回転軸を採用した場合，主構高さは折り畳み時が最大で，展開するにつれて減少し，最も展開した時(伸ばし切った時)，主構高が最小となります。このため，橋梁構造で水平回転軸を採用する場合は，所定の剛性を確保するためにある程度の主構高が必要なことから，x方向への展開をある程度制限する必要があります。**図1(a)**の場合は，完全に伸ばし切った状態まで展開が可能で，その状態において，載荷時のy方向への面外変形が起こりにくく，構造として安定します。よって本研究では，折り畳む方向として鉛直回転軸を採用します。



(a)鉛直回転軸　　(b)水平回転軸

図1　折り畳む方向

■実験供試体概要

実験供試体として，**図2**に示すような支間長6000mm，幅員600mmのハウトラス橋を製作しました。トラス部材には60×60mmの断面の道南スギを使用しています。**図2**中の下横構と床版は，展開した後に設置します。一つのトラスパネルは上下弦材，斜材，垂直材から成り，それぞれの端部の部材同士の接合は，アルミ板を両面で挟んで木ねじで固定する方式としています(**写真1**)。

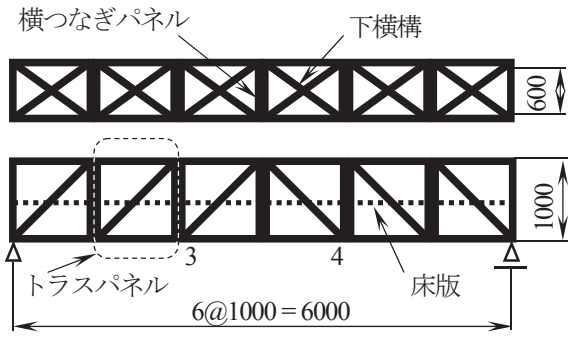


図2　折り畳み式橋梁の概略図（展開後）

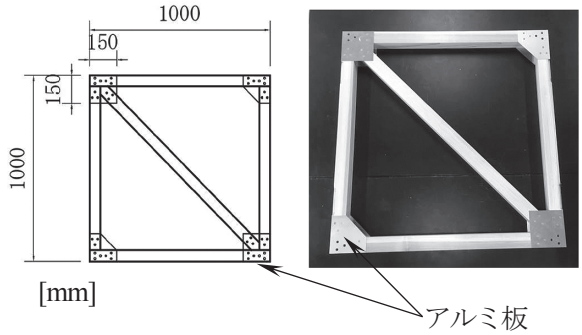
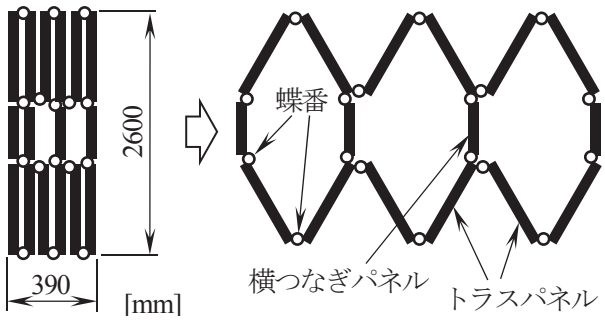
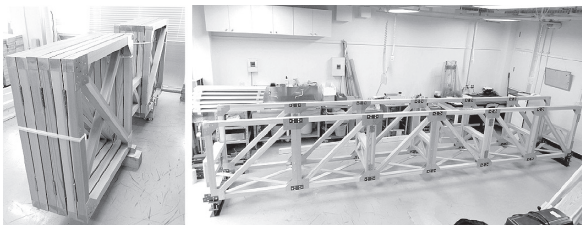


写真1　トラスパネルの製作



(a)折り畳み状態　　(b)展開途中の状態

図3　折り畳みー展開のしくみ(平面図)



(a)折り畳み状態　　(b)展開後

写真2　完成した橋梁模型

このトラス橋の折り畳んだ状態から展開中の状態を表すと，**図3**のようになります。保管及び運搬時は**図3(a)**のように極めてコンパクトなサイズになります。**図3(b)**の展開は，架設専用の台を架設現場に置き，台の上で人力で折り畳み橋を展開します。トラスパネル同士及びトラスパネルと横つなぎパネルは鋼製のヒンジ(蝶番)により連結されています。

展開完了後，上弦材同士，下弦材同士を鋼板を用いたボルト接合により連結します。ボルトはM10の六角ボルトを使用しています。更に，1m当たり2本の下横構をクロスに配置して端部をボルト接合します。床版は**図1**の点線の箇所に，横つなぎパネルの上に板材を敷き並べて設置します。

完成した実験供試体を**写真2**に示します。

■荷重載荷実験

トラス橋としての構造性能を有しているかを確認するため，荷重載荷実験を行いました。実験供試体のサイズが大きいため，油圧載荷装置を使用することができず，今回は**写真3**に示すような重りを載荷して実験を行うことにしました。重りは100×100×250mmの鋼材でできており，取っ手を含めてちょうど20kgfの重量があります。この重りを載せながら段階的にたわみを測定し最大20個(400kgf＝3920N)まで載せることとします。

実験結果の一例として，載荷点を支間中央部，測定点を支間長の3分の1及び3分の2の点(**図1**の節点3及び4)とした場合の荷重－たわみ関係を**図4**に示します。実験値は▲，●でプロットされ，理論値は直線（――）で表されています。ここで，理論値とはトラス要素を用いた平面骨組構造解析から得た計算値です。解析に用

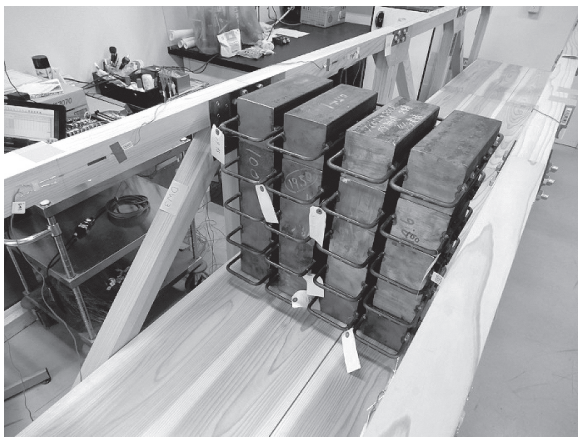


写真3　載荷状況

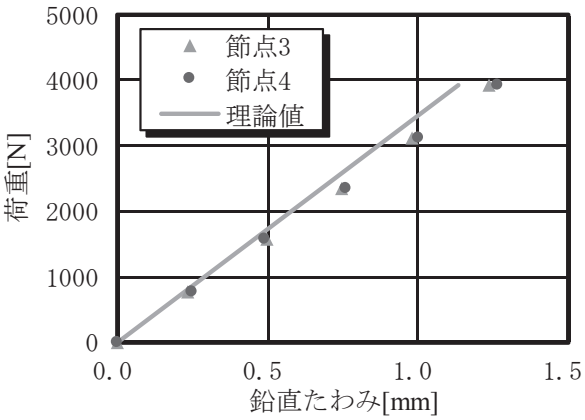


図4　たわみの実験値と理論値

いた材料定数(弾性係数)は，材料試験から得られたE = 5980N/mm²を用いています。

実験供試体は支間中央に対して対称構造を有していますが，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ります。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ます。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ていませんが，荷重－たわみの線形関係が明確に表れています。実験値と理論値とのわずかな相違は，本供試体はトラスの1パネルごとに蝶番で連結されていますので，蝶番の軸部のがたつきが影響した可能性が考えられます。

■屋外架設実験(運搬)

折り畳み式橋梁は，短時間に少人数で簡単な工具類のみで組み立て架設することができるよう考案したものです。これを実証するために屋外架設実験を令和元年9月18日に実施しました。架設場所は函館工業高等専門学校（以下，函館高専）内のグランドとし，折り畳み橋梁を保管している実験室からグランドまでトラックで運搬しました。グランドには，**図5**のように架設地点及び展開作業を行う架設ヤードを想定したエリアを設けました。

架設は6名で，以下の手順で行いました。

①橋梁本体，架設資材等のトラックへの積み込み
②トラックで移動
③架設ヤードに架設台設置，資材等積み降ろし
④架設台上で折り畳み橋の展開
⑤連結金物の取り付け，下横構の取り付け
⑥クレーン一括架設による架設地点への橋梁の設置

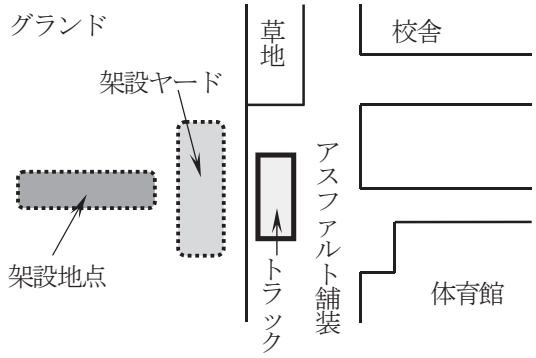
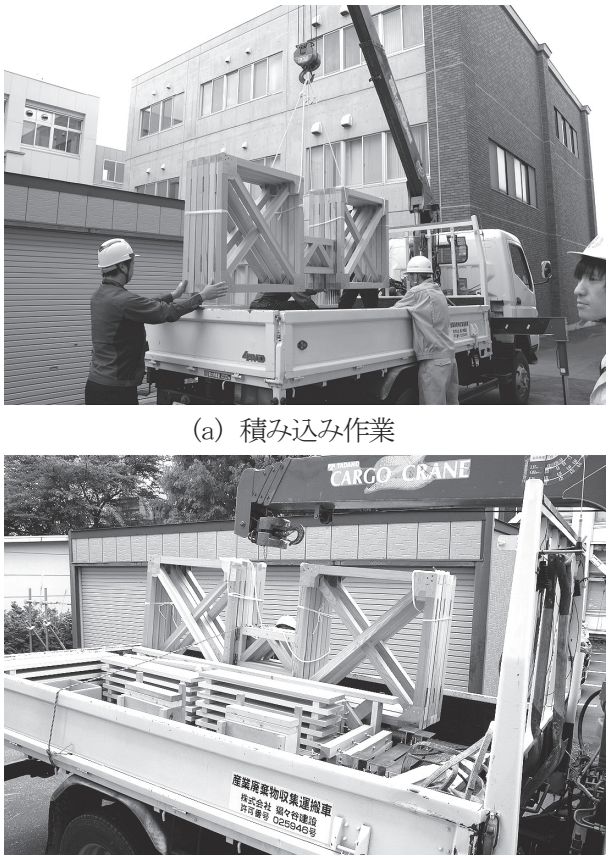


図5　架設地点の概略図



(a) 積み込み作業

(b) 積み込み完了時の状況

写真4　折り畳み橋の運搬

橋梁本体及び連結金物，ボルト・ナット，架設台等の資材を**写真4**の3トン積みトラックで運搬します。折り畳んだ状態での橋梁本体(床版，ボルト等を除く)の重量は85kgfと軽量で，大きさも小さいため小型トラックで問題なく運搬できます。トラックには2.93トンクレーンが付いており，これを利用して積み込みと積み降ろしが容易にできます。積み込みのための作業人員は6名(うち1名はトラックの運転とクレーン操作)でしたが，3名程度でもそれほどの時間をかけずに積み込めると思われました。

■屋外架設実験(現場架設)

図5の架設ヤードを想定した場所の側方にトラックを停車させ，まず橋梁本体と架設資材等をトラックから降ろします。その後，架設ヤード内に架設台を設置します。架設台とは，折り畳み橋を展開させるために製作した，一時的に橋を載せる台を指します。**写真5**にこの架設台を示します。架設台は桁と支点から成り，桁は2本のツーバイフォー材を使用しています。

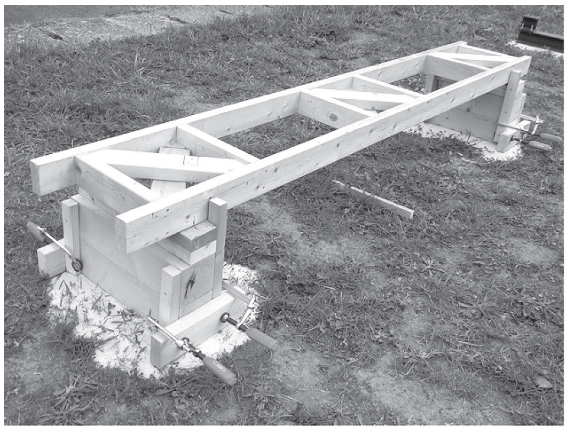


写真5　架設台

写真6　架設台上への折り畳み橋の設置

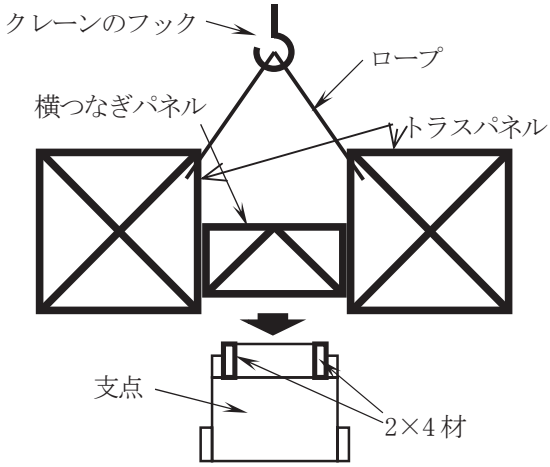


図6　架設台の断面と折り畳み橋の設置

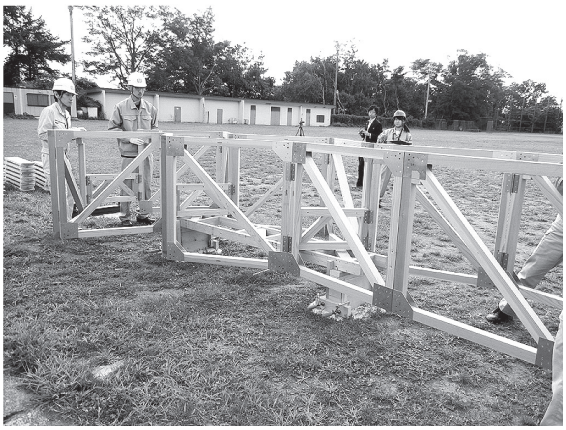


写真7　架設台上での展開作業

その全長は2450mmとしています。

架設台と折り畳み橋の断面を**図6**に示します。この図のように，折り畳まれた状態の橋をクレーンで吊り上げ，架設台上に着地させます。このとき，架設台のツーバイフォー材の上に折り畳み橋の横つなぎ材が接します。着地させた後，ロープを外し折り畳まれた橋本体であるトラスパネルを人力で展開させます。このとき，横つなぎパネルはツーバイフォー材の上を滑りながら橋軸方向に移動します。あらかじめツーバイフォー材の上面を平滑に仕上げ，更にシリコンスプレーを塗布して滑らかな状態にしておきます。

クレーンを用いた折り畳み橋の架設台上への設置の様子と架設台上での展開作業の様子を**写真6**及び**写真7**にそれぞれ示します。展開作業は，橋の端部に各2名，両端で4名を配置し，橋の端部をゆっくり引っ張りながら行います。横つなぎパネルの下弦材を架設台のツーバイフォー材の上を滑らせながら，橋本体を徐々に橋軸方向に伸ばして行きます。このとき，橋の両端で同程度の移動量となるように注意しながら，且つ，もう一人の作業者が橋軸直角方向に大きく移動しないように監視しながら作業を進めました。架設台上を滑る動作において，横つなぎパネルとツーバイフォー材との間に木材同士の摩擦力が生じますが，この摩擦力は小さく，人力で容易に展開させることができました。この展開作業の開始から完了までの所要時間はわずか4分でした。

展開前は橋軸方向の寸法が390mm(**図1**(a)参照)であったのに対し，展開後は，幅1000mmのトラスパネルが橋軸方向に6枚つながり，支間長が6000mmとなります。このとき，各トラスパネルは鋼製の蝶番のみで互いに連結されています。この連結部を強固に補強するために，鋼板を用いたボルト接合を追加します。上弦材の接合として，160×60×3.2mmの鋼板を2枚用いてM10のボルトを使用し，下弦材の接合として，同じ寸法の平鋼板とL4×60×60mmのアングル材(長さ=160mm)をセットで用いてM10のボルト接合としました。**写真8**はスパナを用いたボルト締めの状況

写真8　連結板の取り付け

写真9　一括架設

を示しています。作業は6名で行いましたが，ボルトをボルト孔に貫通させることが困難な個所が数か所あったため，作業完了まで30分を要しました。

連結板取り付け後，下横構の取り付けを行いました。下弦材の連結板としてアングル材を使用したのは，下弦材同士を連結させる役目に加えて，下弦材と下横構を連結させる役目を持たせるためです。下横構は60×12mmの断面を有するスギ材で，**図2**のように対角線状に配置します。架設台が下横構取り付けの妨げになるため，一旦，クレーンにより橋全体を持ち上げ，架設台を撤去し，両端部にH鋼を敷いてその上に橋を着地させました。クレーンによる上げ下げと下横構のボルト接合に21分を要しました。

最後に，架設ヤードの位置から近接する架設地点へ，クレーン一括架設により橋梁の設置を行いました(**写真9**)。クレーンは橋梁部材の運搬に用いたトラックに備えられたクレーンを使用しました。このクレーンは，本来はトラックへ荷物を載せる，または降ろすためのものであり，橋の一括架設への使用は適切ではありません。今回の実験では，橋が軽量で作業半径が小さく，クレーンの能力の範囲内であったため，一括架設にも使用することにしました。支点位置にはあらかじめH鋼を設置しておき，災害時の簡易的な橋台として使用することを想定して，その上に橋を着地させました。一括架設に要した作業時間は5分でした。**写真10**は架設が完了した状況を示したものです。また，**写真11**は，今回の載荷実験と架設実験に卒業研究として取り組んだ高専の学生(専攻科2年生，本科5年生)が完成直後に歩行している様子です。

トラックが架設ヤードに到着した時間から，一括架設が完了する時間までを計測した結果，85分となり極めて短時間での架設が可能と実証されました。災害復旧において特に緊急性が高い場合は，このような折り畳み式木製トラス橋が有効と考えられます。

写真10　架設完了

写真11　渡り初め

■実用化に向けた課題

今回の架設実験で使用した供試体は，支間長6000mm(6m)の模型です。実物大のサイズとしては，おおよそ10m～15m程度を想定しています。実用化に向けては，実物大モデルでの架設実験も必要と

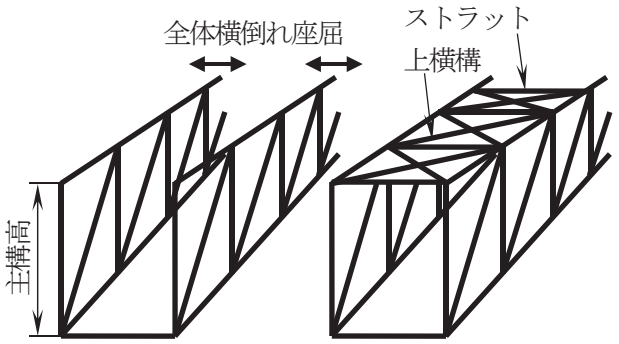
思われます。構造的には以下の検討を進めることも必要です。

(1)床版の設置位置

歩行を容易にさせるため，床版の位置を下方にし，下路橋とします。今回の模型では，中路橋としたため，実際の歩行のためには，1～2段の踏み台が必要となりました。

(2)ストラット・上横構の設置

下路橋にして上弦材に上横構やストラット材を取り付けないと，ポニートラス(**図7**(a))となり，トラスが全体横倒れ座屈を引き起こす危険性があります。それを避けるために上横構とストラットを設置します。歩行空間を確保するため，成人の身長より高い位置にこれらの部材を取り付けなければなりません。これに合わせてトラス主構の高さも検討する必要があります。



(a)ストラット・上横構なし(ポニートラス)　(b)ストラット・上横構あり

図7　下路トラス

また，運用面において以下の課題を解決する必要があります。

(3)橋梁部材の保管場所と管理

災害時に備えて，適切な場所で保管し，保管中に腐朽しないよう管理します。管理者(自治体または民間等への委託など)を定める必要もあります。

(4)災害時の運搬と現場架設の体制の整備

運搬のためのトラック，架設のためのクレーン，架設作業者の確保をどうするか，また，災害時の連絡体制もあらかじめ決定しておく必要もあります。災害時の対応について，協定を結んでいる場合は，災害用応急橋の扱いも盛り込んでおきます。

(5)部材の使用履歴の管理

災害の度に何度も使用することになると，部材は損傷を受け，やがて再利用が困難になり得ます。部材の使用履歴を記録して，必要に応じて部材を新規調達しておく必要もあります。

■おわりに

従来の応急橋よりはるかに素早く架設できる折り畳み式トラス橋を開発し，荷重載荷実験と架設実験を実施しました。函館高専の敷地内で，小型トラックを使用して実際に積み込む，降ろす作業も行いました。架設時間を測定したところ，作業人数を6名として完成まで約1時間半となりました。架設ヤードでの展開，組み立て作業では電動工具類は使用せず，すべて手作業で行いました。橋梁部材や連結金物，その他架設資材は小さく軽量で持ち運びは容易に行うことができました。ただし，折り畳み橋本体の上げ降ろしと架設にはクレーンを使用しました。

実用化に向けた課題として，実物大モデルを製作する際の構造的な課題と，災害時に本橋梁を使用する場合の運用面での課題を示しました。今後も実用レベルに近づけられるよう研究を進めていきます。

本研究は日本学術振興会科研費(基盤研究C，課題番号18K04673)の助成を受けました。ここに謝意を表したいと思います。

■参考文献

1）内閣府：防災情報のページ，http://www.bousai.go.jp/index.html
2）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).
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，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，pp.77-82，(2018).
5）技術資料　仮橋のラインナップ，橋梁と基礎 Vol.46，第8号，pp.121-130，(2012).