

シザーズ構造を応用した応急展開橋の力学特性

Mechanical property of deployable emergency bridge
based on the scissors structures

中沢 正利*・有尾 一郎**

Masatoshi NAKAZAWA, Ichiro ARIO

*工博 東北学院大学工学部建設環境工学科 (〒985-8537 多賀城市中央1丁目13-1)

**博士(工学) 広島大学大学院工学研究院社会基盤環境工学専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

Many natural disasters such as floods, earthquakes have been attacked to Japan in recent years. So, we must consider to protect and survive from them at first. And unfortunately we had many damages from them, we should rescue immediately for helping human life. To repair the damaged structures such as roads, bridges, essential traffic line, Japanese government stocks the emergency bridges in some places in our country. However, these bridges need much time to construct, because they are designed to carry the heavy tracks. This elapse time is not so small to save the life of damaged human, hence we think that the more light-weight bridge with rapid erection is necessary.

In this paper, one type of light-weight deployable bridge is considered as a smart structure. The scissors structure can straighten its leg for long distance, and joint hinge can carry the bending moment. The aim of this paper is to investigate the basic mechanical property of this deployable scissors structure. We employed here the prototype of mobile bridgeTM in order to obtain the critical response of member force for the case of before and after the deployment.

Key Words : *Scissors structure, Deployable structure, Emergency bridge, Mobile bridge, Critical member force*

キーワード：シザーズ構造, 展開構造, 応急橋, モバイルブリッジ, 最大断面力

1. はじめに

地震, 台風や集中豪雨¹⁾による地すべりなどの自然災害が発生した場合には, 避難路や救援物資輸送のための交通網の確保を迅速に行う必要があることは論を待たない。しかし, 現場ごとに異なる被災状況や二次災害などの発生も想定されることから復旧工事には慎重な対応が必要であり, あらかじめ日本の各拠点に配備されている応急橋を用いた復旧対策においても, その架設には比較的長い時間がかかるのが現状であろう。例えば, 国土交通省の応急橋(ポニーワーレントラス40m)²⁾は, トラックの走行を前提とした25トン対応であるが, トラッククレーンを用いても架設に40時間以上を要する(写真-1)。

陸上自衛隊の81式自走架柱橋^{3),4)}は一支間10mで60mまで延長可能であるが, 軍事車両の走行を前提としており, 油圧操作を含めて多くの工程を要する。よって, 災害復旧のための重車両を想定する前に, まず緊急避難や人命



写真-1 国土交通省の応急橋架設状況(岩手県石淵ダム: 東北地整)

救助のための緊急交通路確保がもっと考慮されるべきであろう。そこに, 災害発生のと短時間での臨時交通路の確保およびバイクなど軽

車両の走行のみを可能とする軽量の応急展開橋^{6),7),8),9)}の存在価値が出てくる．ここでは、軽量で応急展開可能な橋梁形式として、シザーズ構造を応用した応急展開橋¹⁰⁾を提案し、あまり取り上げられることのなかったその基本的な力学特性について報告する¹⁾．

ハサミ状に骨組みを組み合わせて構成されるシザーズ構造は、収納および展開が容易であるため、建築系の張弦構造、架設構造物などに対する応用例が数多く提案されている．シザーズ構造の基本は2本のストラットがX形状に交差し、その交点で開閉可能に接続されている単位シザーズからなり、さらに隣接する単位シザーズの端部同士がジョイントによって接合されている．よって、展開・収納が容易であるだけでなく、変形は大きいが発生応力は小さい．

被災地に設置されるべき応急仮橋(緊急仮橋)では、交通路の一刻も早い確保が必要であり、展開性能に優れたシザーズ構造を橋梁構造に応用する利点は大きい．ここでいう「仮橋」とは、基礎を必要としない一時的な橋を意味する．しかし、単なるトラス構造としての軸力のみだけではなく、ラーメン構造としての断面力も発生するため、まず基本的な力学特性の把握が必要になってくる．

そこで本研究では、比較的単純なシザーズ構造を想定し、発生断面力の計算手法をまとめ、さらに基本的な力学特性を明らかにする．

2. 応急橋の現状

地震や水害等による橋梁の損壊、道路崩壊などに対して、臨時的な道路機能の確保のための応急組み立て橋を応急橋と定義すれば、日本では、国土交通省の各地方拠点に配備されているものと陸上自衛隊所有の2系統が存在すると考えられる．

国土交通省の資料²⁾によれば、最大支間長40m、車道幅員6.5mのポニーワーレントラスには25トンのトラックでも走行可能なB活荷重を想定している．また、最大支間長40m、車道幅員6mでT20、L14荷重に対して設計されたトラスガーダー橋もある．これらはトラッククレーンによる主構一括架設あるいは橋体一括架設および手延機による送り出し架設が可能であるが、橋を組み立てるには周囲に大きなヤードが必要である．

一方、81式自走架柱橋^{3),4)}は戦車等を通させることを目的とし、74式戦車(38トン)以下

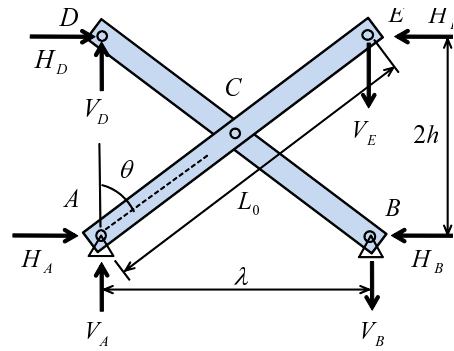


図-1 X形状の単位シザーズ構造

の重量の車輛であれば通行可能である．74式大型トラックに導板と架橋装置を搭載して現地に向かい、導板先端に設置された伸縮可能な架柱を立ててトラックから切り離し、導板と架柱からなる1セットを連結して6両で60mを確保できる．しかし油圧を用いた組み立てには時間がかかり、数名の隊員によって連結していく作業は比較的複雑なようである．

また、92式浮橋⁵⁾は積載した浮体を河水・河川に降ろして橋梁等を架設し、90式戦車(50トン)を含む重車輛などを迅速に渡河させるための装備である．二つ折りになった蒲鉾型の浮体を運搬車から水面に滑り落とすと、この浮体が自動的に展開し橋節となり、これを繋いでいく事で浮橋を構成できる．浮体は約7.5mの橋間橋節が12基、浮橋の両端に取り付ける約7mの橋端橋節が2基で1セットとなり、最大長約104mの橋になる．これらの設置は比較的短時間で済むが、浮体構造を繋いでいく作業のために動力ボートと人員が必要となる．

3. シザーズ構造の基本的力学特性と断面力

3.1 基本モデル

基本モデルを図-1に示す．X形状の単位シザーズ構造をここでは格間とも呼び、ストラット長 L_0 、配置傾斜角を θ とすると、格間長 λ および高さ $2h$ は $L_0 \sin \theta = \lambda$ 、 $L_0 \cos \theta = 2h$ と表され、展開・収納状況は角度 θ で表現される．このラーメン構造は力のつりあい条件のみから解くことができ、単位シザーズ構造のつりあい式は、作用する種々の外力 $H_A, V_A \sim H_E, V_E$ に関するつりあい式6本、および個別部材のストラット交差部でのモーメント連続条件2本より

¹⁾ この形式の橋のプロトタイプ模型は、「モバイルブリッジ」としてすでに広島大学で製作されている．

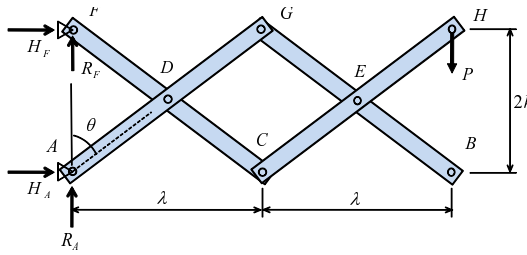


図-2 片持ち2格間モデル

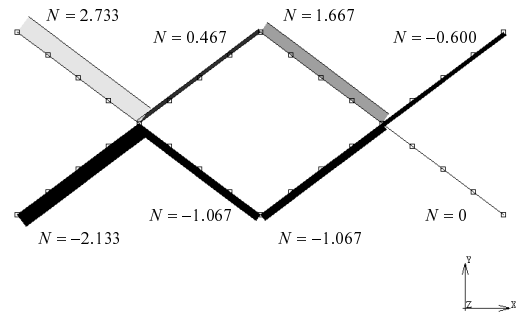


図-3 片持ち2格間モデルの軸力分布 (kN)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & 2h & 0 & -2h & \lambda \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 2h & \lambda & -2h & 0 \\ -2h & 0 & 2h & \lambda & 0 & 0 & 0 & \lambda \\ -2h & \lambda & 2h & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\ -h & \lambda/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h & \lambda/2 \\ 0 & 0 & h & \lambda/2 & h & \lambda/2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_A \\ V_A \\ H_B \\ V_B \\ H_D \\ V_D \\ H_E \\ V_E \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (1)$$

と表される．図-1において片持ちモデルの場合を考え， $H_B=V_B=0$ ， $H_E=0$ ，集中荷重 $V_E=P$ とおいて解くと，

$$\begin{aligned}
 \text{反力 } V_A &= 0, V_D = P, H_A = -H_D = P \tan \theta, \\
 \text{AE 部材の } M_C &= -P(\lambda/2) = -PL_0 \sin \theta/2, \\
 \text{AC 区間のせん断力 } S_{AC} &= -P \sin \theta, \\
 \text{CE 区間のせん断力 } S_{CE} &= P \sin \theta
 \end{aligned}$$

と求まる．すなわち，発生するモーメントの値は格間長のみ比例し，せん断力は荷重の大きさ P を超えない．また，各節点での力のつりあいより求めた発生軸力は，

$$\begin{aligned}
 N_{AC} &= -P \tan \theta \sin \theta, \\
 N_{CE} &= -P \cos \theta, \\
 N_{DC} &= P / \cos \theta, N_{CB} = 0
 \end{aligned}$$

となり，外力 P を超える大きさとなる場合がある．以上より，シザーズ構造は部材の傾斜角度に応じて，トラスとしての軸力と，はりとしての曲げモーメントの両者に注意を払う必要がある．

3.2 2格間シザーズ構造

片持ち2格間モデルを図-2に示す．左右の1格間ごとに式(1)を適用して効率よく解くことができる．この結果，反力 $R_A=0$ ， $R_F=P$ ， $H_A=-H_F=2P \tan \theta$ と求まり，

$$\begin{aligned}
 \text{AG 部材の } M_D &= -P\lambda = -PL_0 \sin \theta, \\
 \text{AD 区間のせん断力 } S_{AD} &= -2P \sin \theta, \\
 \text{DG 区間のせん断力 } S_{DG} &= 2P \sin \theta
 \end{aligned}$$

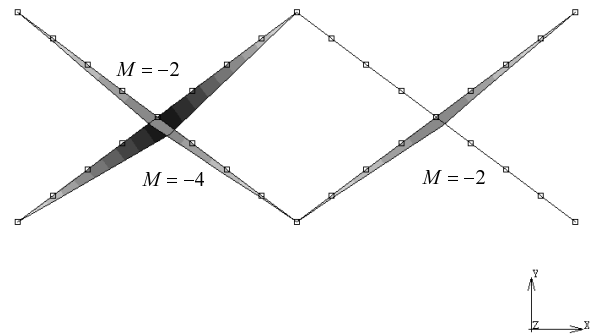


図-4 片持ち2格間モデルの曲げモーメント分布 (kN・m)

と求まる．また，これより

$$\begin{aligned}
 \text{FC 部材の } M_D &= P(\lambda/2) = PL_0 \sin \theta/2, \\
 \text{FD 区間のせん断力 } S_{FD} &= P \sin \theta, \\
 \text{DC 区間のせん断力 } S_{DC} &= -P \sin \theta, \\
 \text{CH 部材の } M_E &= -P(\lambda/2) = -PL_0 \sin \theta/2, \\
 \text{CE 区間のせん断力 } S_{CE} &= -P \sin \theta, \\
 \text{EH 区間のせん断力 } S_{EH} &= P \sin \theta
 \end{aligned}$$

と求まる．発生する断面力の分布を示すために，便宜的に荷重 $P=1\text{kN}$ および $L_0=5\text{m}$ ， $\tan \theta=3/4$ の形状を仮定した場合について，軸力分布を図-3に，曲げモーメント分布を図-4に示す．

3.3 3格間シザーズ構造

格間(X形状単位シザーズ構造)が増えても基本的には力のつりあい条件から全ての断面力を解くことができるが，FEMの二次元骨組構造解析も容易に適用できる．ストラット同士を繋ぐジョイント部分については，仮定の要素を付加してその曲げ剛性のみを可能な限り小さな値

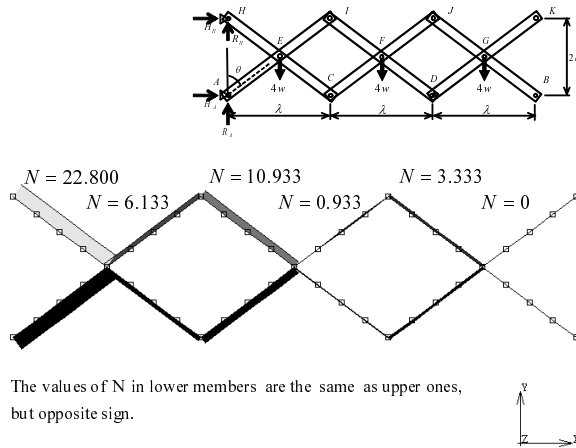


図-5 片持ち3格間モデルの軸力分布 (kN)

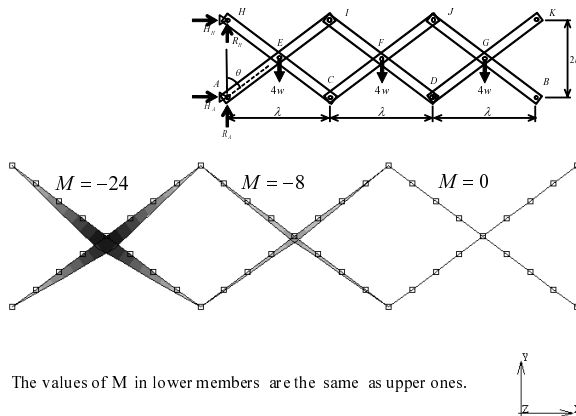


図-6 片持ち3格間モデルの曲げモーメント分布 (kN・m)

に設定すれば一般的なFEMで近似計算することが可能である。

ここでは、自重を受ける場合の3格間シザーズ構造について、片持ち状態に対するFEM解析結果の軸力分布を図-5に、曲げモーメント分布を図-6に示す。ここで、 w はストラット半分の重量を模擬している。固定端近傍に断面力の高い値が集中しており、スパンが長くなるに従って一般はり理論から予想される傾向に近づく。

4. シザーズ構造を応用した応急展開橋の境界条件と力学特性の関係

ここでは応急仮橋の試作⁹⁾に用いられた7格間展開橋¹⁰⁾について、収納状態から張り出し展開中の橋が自重を受けている状態および展開終

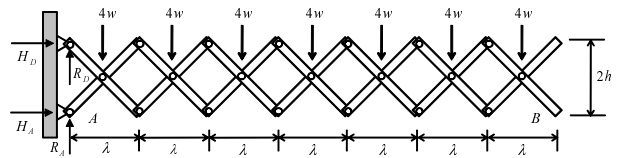


図-7 張り出し展開中の7格間片持ちばりモデル

了後に支点を確保された状態での断面力の発生状況を数値解析によって求め、上述の境界条件の差異による力学特性を比較検討する。

4.1 張り出し展開中の境界条件と自重の仮定

張り出し展開中のシザーズ構造は不静定の片持ちばり状態であり、固定端近傍に断面力の高い値が集中することは容易に分かる。ここでは、図-7に示す7格間展開構造を対象として、線形解析により断面力を求めた。シザーズ構造の配置傾斜角(展開角度)を θ とし、ストラット長や格間は図-1の定義と同様である。

自重については、ストラット半分の重量を w とし、シザーズ構造のX状各パネルのピボット部分に集中して作用させた。なお、この構造は一次不静定であるが、構造の上下対称性より $R_A = R_D$ となることより容易に解くことができ、固定端での反力 H_D, R_D, H_A, R_A は

$$R_A = R_D = 14w, \quad H_A = -H_D = 98w \tan \theta$$

と得られ、固定端近傍のパネルにおける発生最大断面力は軸力 $N_{max} = -14w \left(\frac{7 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}{\cos \theta} \right)$ 、曲げモーメント $M_{max} = -42w\lambda$ 、せん断力 $S_{max} = -84w \sin \theta$ となる。また、ここで扱うシザーズ構造は、同じ形状を持つ周期性構造物でもあるので、 n パネルに拡張した場合の断面力も以下の式で予測可能である。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} R_A &= R_D = 2nw, \\ H_A &= H_D = 2n^2w \tan \theta, \\ N_{max} &= -2nw \left(\frac{n \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}{\cos \theta} \right), \\ M_{max} &= -n(n-1)w\lambda, \\ S_{max} &= -2n(n-1)w \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

と得られる。この解析では断面力のみに着目しているため、便宜的に $w=1\text{kN}$ 、 $L_0=5\text{m}$ 、 $\tan \theta = 3/4$ 、梁の曲げ剛性/トラス部材の軸剛性の比を3と仮定した場合の軸力分布および曲げモーメント分布を図-8,9に示す。

4.2 展開終了固定後の境界条件と自重の仮定

シザーズ構造の先端が対岸に着地して支点を確保すると、単純支持状態となり、その水平動

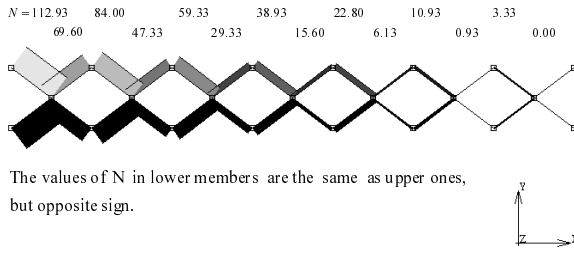


図-8 張り出し展開中の片持ちばりの軸力分布 (kN)

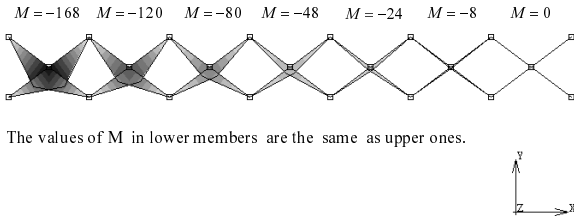


図-9 張り出し展開中の片持ちばりの曲げモーメント分布 (kN · m)

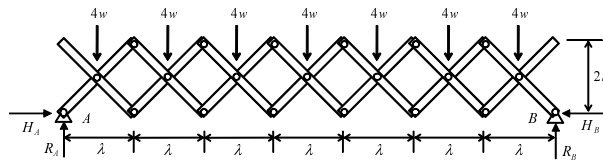


図-10 展開終了後に水平動を固定された7格間単純支持ばりモデル

を拘束して固定することにより使用可能となる(図-10)。

力学的には一次不静定構造となるが、発生する断面力が局所的に集中することはなく、このシザーズ構造は発生断面力を分散させる効果がある。また、曲げモーメントと軸力が主に発生するが、ラーメン部材のジョイントは断面中立軸付近に配置されるので曲げ応力の影響は小さいと予想される。

最大断面力は予想されるようにスパン中央パネルで発生するが、一次不静定であるため、数値解としての軸力分布および曲げモーメント分布を図-11,12に示す。軸力分布からは、シザーズ構造の上半分で圧縮、下半分で引張となるトラス弦材効果が確認されている。

また、これらの結果として得られた最大断面力を表-1にまとめて示す。ここで、断面力は正負の値が混在するので、比較の便のために絶対値で表示している。この結果より、張り出し

表-1 発生断面力の比較 (数値は絶対値で表示)

	N_{max} (kN)	M_{max} (kN · m)	S_{max} (kN)	発生位置
片持ち状態	112.93	168.00	67.20	固定端
単純支持状態	25.60	48.00	19.20	スパン中央

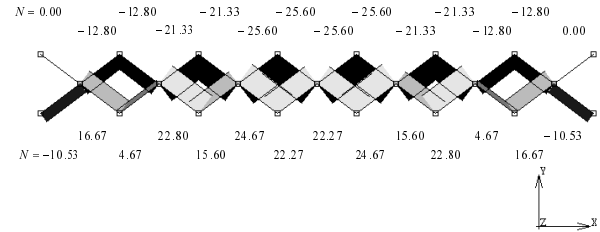


図-11 展開終了固定後中の単純支持ばりの軸力分布 (kN)

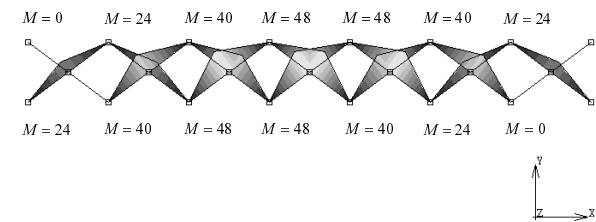


図-12 展開終了固定後中の単純支持ばりの曲げモーメント分布 (kN · m)

展開中は発生断面力が高負荷状態であるのに対して、展開終了固定後には、軸力で23%、曲げモーメントで29%と約1/3まで大幅に低減される。よって、張り出し展開中に耐えられる構造設計をしておけば、展開終了固定後には自重 w の3倍程度の積載荷重にも耐えられることが分かる。

最後に、このようなシザーズ構造を実現させるために残された工学的検討課題は、ヒンジを構成するピボット部分に対する応力集中と接合部強度、および振動などに対する動的安定性である。

5. 結論

1. ストラット中間部のヒンジは可動であるが、モーメントを負担することが可能であり、よってこの構造はトラスとはりの中間的な力学特性を示すことを、基本的なモデルにより明らかにした。
2. 主に発生する断面力は曲げモーメント M と軸力 N であり、ここで取り扱ったシザーズ構造ではスパンにわたる分散効果がある

- が、最大断面力の発生位置は、一般はり理論から予想される傾向と一致する。
3. 展開時と展開終了固定後の断面力比較を行った結果、展開終了固定後に発生する断面力は約 $1/3$ に低減されることが数値的に明らかにされた。また、発生最大断面力の推定式の一部を示した。

参考文献

- 1) 台風9号に伴う兵庫県西部佐用・宍粟・美作の千種川水系と揖保川水系の豪雨災害被災記録誌(流橋調査), <http://home.hiroshima-u.ac.jp/bridge2/out-hiro/open/hasi-nagare-0810.htm>
- 2) 国土交通省東北地方整備局道路部, <http://www.thr.mlit.go.jp/road/gakusyu/tohgi/oukyuu.htm>
- 3) wikipedia, 81式自走架柱橋(1), <http://ja.wikipedia.org/wiki/81>
- 4) wikipedia, 81式自走架柱橋(2), <http://rightwing.sakura.ne.jp/equipment/jgsdf/engineers/type81tb/type81tb.html>
- 5) wikipedia, 92式浮橋, <http://rightwing.sakura.ne.jp/equipment/jgsdf/engineers/type92pontoonbridge/type92pontoonbridge.html>
- 6) 中沢正利・有尾一郎・谷倉 泉・小野秀一: MFM概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発, 土木学会全国大会第一部門, 2009.
- 7) I.ARIO, Y.FURUKAWA, Y.TANAKA, Y.CHIKAHIRO, S.MATSUMOTO, M.NAKAZAWA, I.TANIKURA, and S.ONO: DYNAMIC VIBRATION OF A PROTOTYPE DEPLOYABLE BRIDGE BASED ON MFM, The proceedings of the 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM 2010).
- 8) I.ARIO, Y.TANAKA, M.NAKAZAWA, Y.FURUKAWA, Y.CHIKAHIRO, I.TANIKURA, S.ONO: Development of the Prototype of a New Emergency Bridge based on the Concept of Optimized Structure, Proc. of China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2010.
- 9) 有尾一郎・田中義和・中沢正利・古川祐輔・近広雄希: 最適化構造概念に基づく新しい応急仮設橋のプロトタイプ技術開発, 土木学会構造工学論文集, Vol.56A, pp.1-12, 2010.3.
- 10) 有尾一郎・田中義和・中沢正利・近広雄希・作野裕司・椿 涼太・谷倉 泉・小野秀一・古川祐輔: 災害・救助を想定した移動して折畳める橋「モバイルブリッジTM」の架設実験, 土木学会安全問題研究論文集, Vol.5, 投稿中.

(2010年8月6日受付)