

# 急速架設できる緊急スマート仮橋の車両通行公開実験

## 産学共同研究としての車両用モバイルブリッジ™の試作1号機による、「かけはし」開発作戦

有尾 一郎

世界各地で、地震、津波、豪雨（台風）などの自然災害が発生し、特に3.11東日本震災以降シビアアクシデントに対する危機対応の重要性が再認識され、被災現場における迅速な復旧技術開発の必要性を痛感した。筆者は座屈研究をもとに2004年に復旧手段となる折りたためる橋を創案し、橋そのものを折り畳んで運ぶというもので、レオナルド・ダ・ビンチの手稿「モバイルブリッジ」の可動橋にあやかって、モバイルブリッジ™（以下、MBと称す）と名付けた。MBの開発協力者と共に、車両通行用に大型化した1号機（MB1）を試作し、このたび車両を走行させた実証実験を公開した。このMBの安全設計思想と将来の広範囲な現場で活躍できるように、その秘めたるMBの可能性と今回の公開実験までの概要を紹介する。

キーワード：仮橋、スマートブリッジ、折りたためる橋、災害復旧、防災、モバイルブリッジ

### 1. はじめに

我々は昔から自然の中で災害に対する教訓を学び、多くの知恵をつけてきたにも関わらず、繰り返される多様でゲリラ的な自然災害は後を絶たず、世界各地で発生しており、多くの尊い命が奪われている。「備えあれば憂い無し」と言われるように、災害発生後の国民の財産と人命を守るために、この分野の研究開発の必要性と災害に強い国土（防災基盤）づくりの具体的な開発貢献を、新しい枠組みや取組みで将来の技術発展に確実につながるように、備え、防災、復旧法の開発、人材づくり、モノづくりの技術産業の強化をセットにして、発展させていくことは、災害の教訓を活かす上でも我が国の国際成長戦略のヒントがあるかも知れない<sup>1)</sup>。

これまでに津波、台風、梅雨、集中豪雨などの水害によって、橋が流される事象が各地で発生し、橋を迅速に復旧させる設計と技術が求められている。また、小さな橋は数も多く、建設コストを抑えるために、橋を短期に建設することは重要なことである。既存の国内のインフラ復旧用の応急橋は、大型車両の荷重を基に設計されるため、短い橋であっても重厚な構造物の組み立てとなり、時間がかかるほか、被災者の救助・救援の緊急仕様にはなっていない。時間が最優先される被災現場であるにもかかわらず、橋の組み立てに時間がかかってしまう点は、喫緊の課題であり危機管理上

の脆弱さを露呈してしまう。災害に限らず、一般の構造物の架設法である、張出し工法やベント支持工法、押出し工法などが用いられるが、その架設の工期も長期化する問題があった。

例えば、橋そのものが安全に伸縮でき、自立安定し、橋システムが可搬できるようにコンパクトに収納できれば、多様な現場で機動的な運用が可能となる。しかしながら、新しい防災復旧システムの技術開発は必要不可欠なツールにもかかわらず、「速く渡す／渡る」の要素基礎技術が大変遅れている現状にある。筆者は、座屈・展開構造の基礎研究をもとに、2004年中越地震の被災調査から、“はさみ状に伸縮できるシザーズ式”の伸びる橋を考案し、開発を続けてきた。災害に強い基盤づくりとして、構造最適化の概念「スマートブリッジ」に基づく設計思想のもと、2009年には人が載れる程度のシザーズ機構を持つ橋模型を実際に試作し、折りたためる橋の原理と要素技術を培ってきた<sup>2)~11)</sup>。災害による「村の孤立化」を減らす復旧技術の一つの手段として、迅速に展開可能な移動仮設橋MBの試作を目標に産学共同研究プロジェクトに至っている。

本稿では、車両通行用のMB1号機の開発を通して、平成24年10月26日に車両通行用の折りたためる仮橋の実験試作橋の公開実験に至るまでの概要を紹介し、詳細な実験内容に関しては、参考文献並びに今後の成果発表に譲ることとする。この折りたためる緊急

橋の安全設計思想と将来の広範囲で迅速な施工が求められる多様な可能性を持つ、MBの秘めたる可能性と、技術アイデアを紹介する。MB開発の発案と経緯に関しては、文献<sup>12)</sup>を参照していただきたい。

## 2. 技術的課題とMBの隠れたアイデアとブレークスルー

開発中のMBは、従来の上弦材と下弦材を有するトラス橋とは本質的に異なり、主要な構造部材はハサミのようなX形の連鎖機構から構成され、展開構造の分野では、シザーズ機構と呼ばれる。これまでのシザーズ機構は、橋などの大型の建造物には適用されてこなかった。その理由として、設計思想や解析研究、橋としての実現性、材料の比強度の問題、局部応力集中を考慮した構造力学的な検証、設計法が考究されてこなかったことに尽きる。また、機能に対する効用が少なく、制御装置を伴うために製造コストが割高となる、構造体として制御部材を入れないと不安定な構造体になりかねない、一方向は堅牢な剛性を持つがフレキシブル構造体なので揺れやすいという問題も予想される。さらに、部材交差部のヒンジ部（ピボット）の存在による応力集中や摩耗、ガタなど構造強度に対する保証が設計上難しい課題があった。

しかしながら、橋を速く架設するという目的を達成するために、できる限りシンプルな構造で、運搬、収納及び展開が容易で展開時には安定した構造となるシザーズ式伸縮構造を活用することはメリットが大きい。課題を解決するための手段として、3次元FEMを駆使し、有効な肉厚押出断面によって応力の低減を図るとともに、実部材のひずみ計測による構造実験を実施し、その強度の安全性を確認している。そのほかに、床版も構造材あるいは補強部材に位置付け、床版も折り畳まれる機構と連動していることで、1組の床版が格間長さの定尺長になると抑制固定されるので、床版の数分だけ水平抑止を伴う補強部材となり、多重のフェールセーフの安全率を高めるアイデアを採用している。さらに、展開中はピンの効果によって伸縮を可能とし、展開後は図-1に示す、せん断抑止部材によって、ピンの負担を低減するとともに、それ以上展開させない工夫をいくつも導入させることによって、半剛性ジョイントを持つフレキシブル構造体を実現させている<sup>10), 11)</sup>。この技術によって、本体の撓み抑制も図れ、シザーズ機構のフレキシブル構造が展開後に剛体化するような一体化構造に変身することができる。また、展開後には曲げモーメントに抵抗するように水平部材

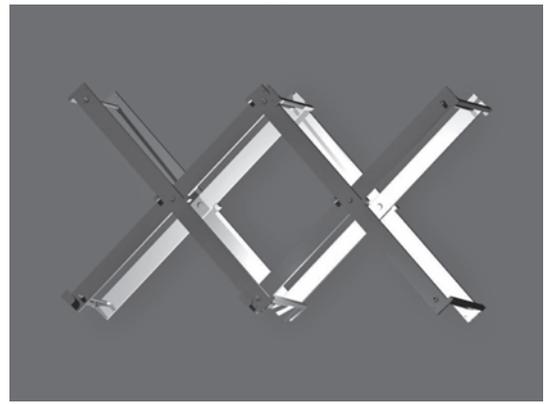


図-1 半剛性ジョイントによるせん断抑止材付きシザーズ構造<sup>10), 11)</sup>

を補強することによって、従来のトラスのような形態を構成することも可能である。この構造形式は全てのピンがロックした状態を一体化ととらえるとフィレンディールに近い構造形式と言える。厳密には施工手順が根本的に異なるが、画期的な橋の急速架設が実現できる。さらに、展開中に使用したケーブルを展開後に、例えば橋中央部を吊り上げることによって、活荷重や死荷重による負担を軽減することも可能であるので、合理的で自由度が高く、多重な安全性を担保できる上に、急速架設ができる新しいタイプの仮橋と位置付けられる。さらに、床版の位置もピン部を利用し、上路・中路・下路の位置に対応させることも可能であるので、現場の状況に合わせた路面高さを調整することができるメリットもある。

連鎖シザーズの収納効率も高く、伸縮倍率による伸縮スピードも増幅される特長を持つ。すなわち、1格間分の制御伸縮量はその格間数分に増幅されて、MB架設時の伸縮スピードは向上する。構造物が折りたたむことによって、これまでの構造物の部材の運搬や、架設ヤード、仮組立てなどの作業工程が不要となり、現場のニーズに即した収納性、可搬性、機動性、施工性を高める効果が望める。また、共通モジュールを用いることによって、自由度の高い構造体を容易に速く構築することができる利点は計り知れないものと考えられる。

## 3. MB開発による多様な適用可能性

MBの架設時と供用時に前述のシザーズ機構を、これまでの他の構造物や構造体に最大限うまく利用することによって、以下の広い用途が考えられる。

- ①舟浮橋への適用可能性：複数の浮棧橋（ポンツーン）間を、MBで連鎖させると、橋脚や橋台が不要なので、容易に渡橋システムを構築できる。いくつかの

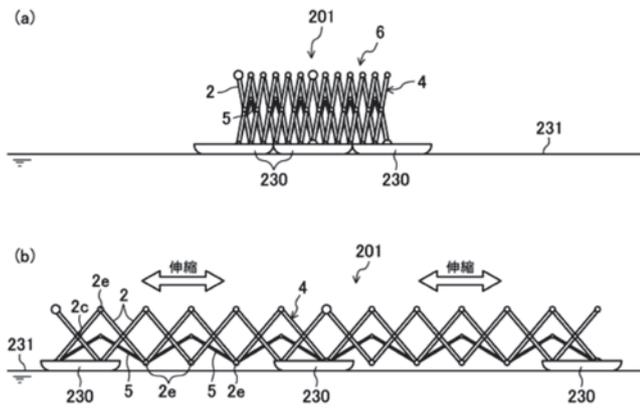


図-2 シザース式伸縮橋 MB を活用した浮体橋案の創造  
(上図は MB の収納状態を、下図は展開中の MB)

ポンツーンをコンパクトに集約させることによって、目的の所まで曳航させることが可能であり、それ自体大きな舟橋システムによる渡橋可能な状態を構築できる(図-2)。

- ②仮設吊橋への活用：フレキシブルな吊橋の補剛材を十分強度がある連鎖シザースを用いてプレキャストで施工すると、迅速な施工が可能であることは容易に予測できる。現場での自由度の高い組み合わせが可能であり、災害現場での困難な復旧施工にも対応策の選択肢を増やし、現場での適用可能性を向上させる可能性がある。
- ③老朽化した橋の補剛と補強構造体としての活用：老朽化してきた橋の寿命を延命的にリペアする際にも、車両制限を行った上で、橋本体の伸縮構造体を利用して古い橋全体を補剛することによって、老朽化した橋の負担を緩和することが可能である。
- ④栈橋への利用：漁港や港湾の栈橋に本システムを利用する価値は大きい。栈橋利用の制限や台風、高潮による損傷を避けることができ、橋を利用するときだけ架設できることは MB の原点であり、管理者や利用者にとってメリットがある。
- ⑤船上からの折畳みタラップの利用：船上から着岸の目的で「渡し」が必要な場合(特に、港湾施設も大きく被災した現場を想定した場合)に、船上にコンパクトな MB が装備されていると、機動的な運用が可能となるとともに、船から別の船に移動する場合にも、安全に渡ることが可能となり、汎用性がある。
- ⑥外気との仕切を構成する膜を利用することによって、迅速に仮設住宅や仮設テントを設置できるので、例えば災害現場で風雨をしのぐことができ、撤去も容易である。

など、MB は緊急橋以外にも、この構造体の汎用構造

体としての利活用の用途や場面は多いものと思われる。

#### 4. 車両通行用の MB1 号機の製作から車両通行公開実験まで

平成 24 年 3 月広島県福山にて写真-1 に示す車両用 MB の第 1 号試作機が各社の協力によって産声を上げた。組上げ後に、展開を想定した片持ち保持状態の基本的な物理挙動を計測し、解析理論と照合させた。実験後に部分的に分解し、摩耗状態や各部位の結合状況を確認し、観察と調査、実測を重ねた。車両走行のために設計してきた MB1 を実際に構造体の強度を確認するために、静岡県富士にある施工技術総合研究所に運び、8 月には写真-2 のように屋外に据付けることができた。9 月には百点以上のひずみゲージ計測点を取り、入念にモニタリングを行いながら、写真-3 に示すように車両荷重を積載する前に鉄板荷重を積み上げることによって車両の実輪荷重値を求めた。段階



写真-1 工場内で MB1 号機の組上げ時



写真-2 施工技術総合研究所での MB1 の据付作業



写真一三 初期 MB1 の輪荷重予備実験

的な作業によって、車両を積載できる重量のキャパシティを予測し、実際に車両の輪荷重を計測しながら、慎重に車両を積載し実測を行った。橋の最内幅は2m程度の狭隘設計としている。これは、大型車を物理的に排除させ、運用時には橋の前方に、橋のクリアランスと同等のゲートを設けることによって、大型車を橋に進入させない工夫や信号等の活用が必要である。

一方、実際の流橋被災対応や復旧方針と対策を理解する目的で、国土交通省の実務担当者を招き、平成23年8月新潟・福島豪雨に伴う国道252号二本木橋の災害応急復旧工事の講演を拝聴した。切迫した現場での困難な課題や実情について意見交換するとともに、その機会にMBも見学して頂いた(写真一四)。



写真一四 初期タイプ MB1 の完成記念写真

その後、種々の車両を用いて詳細にMBの強度評価を実施するとともに、1格間分延長することになった。理論的には格間数が偶数より奇数の場合の耐力評価が重要になる。その際、工場出荷されたMBから、実際の延長方法も開拓するために、部材追加に伴う格間延長の現場接続法と自由度を想定し、最適な現場での延長法も写真一五のように開発した。MB1号機の1格間延長の試作実験橋が完成し、MBの両端シャフト間長は10.5mとなった。延長後、実験値に基づく



写真一五 現場での MB1 の格間延長法の開発

設計車両輪荷重値を逆算し、予備確認実験を行った上で、延長されたMB1号機の車両積載実験を実施した。その前に、アルミニウム合金製の床版の強度実験を実際に行い、床版の保証強度を確認しておくことは重要であり、積載車両(緊急車両としての制限)重量に対して十分な耐力(5kN/m<sup>2</sup>以上)を得た。これに基づいて、延長されたメイン部材と床版にもひずみゲージを貼付することによって、モニタリングしながら車両積載の強度保証値を確認した。その結果、予想以上の橋の剛性を得るとともに、上述の多重の安全装置にも余裕値が十分あることを確認できた。特に、展開用に設置した手動式ウィンチのケーブルをMB本体の2格間目の上部に吊り緊張させることによって、ひずみが大幅に緩和されることを確認した。

これらの実験結果を踏まえ、我々はMBに実際の車両を通行させる、耐力実験を公開することになった。しかし、このMB1ではあくまでも車両による強度確認を前提にしたため、展開装置はウィンチ以外装備していないので、片持ちの展開状態は屋外の現場では想定していない。しかしながら、この橋の最大の特徴である橋の折りたたみ、関係者にこの伸縮機構をより理解してもらうために、先端側にタイヤを装着して機動性を向上させた。写真一六は公開前の手動ウィンチによるMB1の展開確認実験である。今回のMB1は、川を跨ぐような空中を浮かせる張出し架設ではない



写真一六 公開前の各車種による車両積載実験

が、例えば、老朽橋の補強法の一つとして、橋上の路面にこのMB1の展開法を応用すれば、比較的簡単に実現可能であろう。すなわち、補修しなければならない老朽橋などを、架設完了後は老橋に負担をかけずに、その補修工事と同時並行に、車両荷重を制限すれば通行止めにしないうで交通路を確保できる手段であることを意味する。

実験公開日の平成24年10月26日は、MB開発の5者共同研究機関同席のもと、報道機関を含む外部より14名が施工技術総合研究所に来場した。竹之内技師長の挨拶からはじまり、各機関の紹介、MB開発の目的などを概説した。今回公開したプロトタイプ(MB1号機)は、上述の通り、平成21年に広島大学で公開された人用「モバイルブリッジ®」の原型プロトタイプを、小型車両用の部分試作(幅2.5m、長さ1.5~10.5m)に大型化し、3格間仕様に延長したものである(写真一7,8)。現場のデモンストレーションでは、折り畳まれたMBが手動ウィンチだけでMBの自重によって展開され、定尺長になると同時に床版も広げられ、瞬時に車両が通行できる状況を構築でき、各部位に貼付したひずみを同時計測しながら、その後重量1.25tの小型車両が無事通行した。この時の最大ひずみ値は1000 $\mu$ 程度であった。この場合でもせん断抑



写真一9 シンガーズ展開と同時に床版も展開され、その後車両走行

止装置は干渉もなく予想以上に剛性は高く成果があった。仮に2倍のひずみ値まで使用限界を認めると、ほぼ2.5tの車両重量が通行できるものと予測された。報道関係者のリクエストに応じて、車両を6回ほど渡橋させ、無事MB1号機による公開実験の「かけはし」開発の第一歩は完了できた。これをもとに、現在2号機の製作に着手し完成も間近であり、報道関係の皆様からMBの実用化を望む声が多数あったことを付しておく。

## 5. おわりに

この開発の取組みは、緊急性の高い災害復旧現場では急速架設に有用な汎用展開構造体を利用し、ワールドワイドでも類を見ないタイプの仮橋システムの開発構想であり、この公開実験によって、度重なる自然災害に備えて、折りたためる橋があれば、迅速な人命救助やライフラインの確保の一つの手段として、現場での実用化に役立てられれば、開発者一同の願いである。

MBの実用化とモノづくり産業・開発関連の活力を維持させるためにも、現場での実証実験、開発費は欠かせず、今後は協力自治体等の理解とコラボレーションも重要な取り組みが必要であろう。今回の1号機の各種の実験・設計研究の成果に基づいて、将来の多様な場面での国産MBの活躍を期待する。このMB共同研究プロジェクトを通して、人と人をつなぐ真の「かけはし」として役割を担うことを切に望む。

## 謝辞

モバイルブリッジ™共同研究の公開実験にあたり、東北学院大学中沢正利教授、近畿大学松本慎也准教授、同僚田中義和助教、椿涼太助教の研究協力者、大学院生近広君、留学生チェ君ならびに、共同研究企業の一般社団法人日本建設機械施工協会施工技術総合研究所



写真一7 公開直前の手動ウィンチによる展開確認実験



写真一8 公開実験の説明と見学の様子

見波所長, 竹之内技師長, 研究第二部谷倉部長・小野次長・渡辺氏・武田氏, 星軽金属工業株式会社 石川社長・中谷氏, 株式会社アカシン赤松常務取締役・佐藤設計部長・高野氏・佐々木氏, 三協立山株式会社三協マテリアル社花木技術開発部長・中村氏・児島氏・大田氏, 大日本コンサルタント(株)保全エンジニアリング研究所平山所長, 公開日までにお世話になった関係者の惜しまないご尽力とご支援を賜りましたことを, この誌面をお借りして御礼申し上げます。また, 公開前のMB研究会では国土交通省北陸地方整備局道路部道路工事課大口課長補佐, 岩崎係長より, 2011年8月新潟福島豪雨時の「国道252号二本木橋災害応急復旧工事の報告について(豪雨災害発生～応急復旧工事完成まで)」の特別講演を賜り, 深く謝意を表します。

JCM A

#### 《参考文献》

- 1) ダビンチもびっくり, 学校工場からモバイル(携帯)な創造物!, 広島大学工学部だより, vol.58, pp.36-39, 2009, [http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/metadb/up/ZZT00003/HE\\_letters58.pdf](http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/metadb/up/ZZT00003/HE_letters58.pdf)
- 2) 高効率で折畳める橋構造物の開発研究(解析編), 有尾一郎・田中義和・中沢正利・古川祐輔・近広雄希, 第25回JAXA宇宙構造・材料シンポジウム, pp.104-107, 2009.
- 3) シザーズ機構を持つ「モバイルブリッジ」の架設動作的実験とその解析, 古川祐輔, 有尾一郎, 田中義和, 近広雄希, 作野裕司, 椿涼太, 広島大学大学院工学研究科研究報告 Vol.59 no.1, 2010, [http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/metadb/up/kiyo/AA11700032/BullGradSchEng-HiroshimaUniv\\_59-1\\_Furukawa-et-al.pdf](http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/metadb/up/kiyo/AA11700032/BullGradSchEng-HiroshimaUniv_59-1_Furukawa-et-al.pdf)
- 4) 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, 有尾一郎, 田中義和, 中沢正利, 古川祐輔, 近広雄希, 土木学会構造工学論文集, Vol.64A, pp.1-12, 2010.
- 5) Nonlinear Dynamic Behaviour of Multi-Folding Microstructure Systems based on Origami Skill, I. Ario and M. Nakazawa, Int. Journal of Non-Linear Mechanics, 45, pp.337-347, 2010.
- 6) 折畳めるモバイルブリッジ™の基礎研究開発, 有尾一郎・田中義和・谷倉泉・小野秀一, 第12回建設ロボットシンポジウム, pp.103-112, 2010.
- 7) 災害復旧・救助を想定した移動して折畳める橋「モバイルブリッジ™」の架設実験, 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, 安全問題研究論文, Vol.5, pp.127-132, 2010.
- 8) DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE DEPLOYABLE BRIDGE BASED ON ORIGAMI SKILL, I. ARIO, M. NAKAZAWA, Y. TANAKA, I. TANIKURA, S. ONO, Proc. of the 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC2011, Seoul, pp. 981-986, 2011.
- 9) スマートブリッジ概念に基づく折畳み型の緊急復旧対策用モバイルブリッジ™の研究開発, 近広雄希, 有尾一郎, 田中義和, 中沢正利, 広島大学大学院工学研究科研究報告, Vol.60, no.1, 2011, [http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/metadb/up/kiyo/AA11700032/BullGradSchEng-HiroshimaUniv\\_60-1\\_Chikahiro-et-al.pdf](http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/metadb/up/kiyo/AA11700032/BullGradSchEng-HiroshimaUniv_60-1_Chikahiro-et-al.pdf)
- 10) 構造体及びその主フレームの伸張・縮収装置, 特許4967117, 有尾一郎, 2006.
- 11) 構造体, 特願2010-131435, 有尾一郎・中谷伸・谷倉泉・小野秀一・田中義和, 2010
- 12) モバイルブリッジの発案と展望, 有尾一郎, 橋梁と基礎, 46巻8月号, pp.115-118, 2012
- 13) Development of a Prototype Deployable Bridge based on Origami Skill, I. Ario, M. Nakazawa, Y. Tanaka, I. Tanikura, S. Ono, Journal of Automation in Construction, In Press 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.012>

#### [筆者紹介]

有尾 一郎(ありお いちろう)  
 広島大学大学院  
 工学研究院 社会空間環境部門  
 社会基盤環境工学専攻  
 助教

