

災害復旧支援に向けた応急橋の開発（続報）

小野 秀一

1. はじめに

我が国ではこれまでに、多くの尊い命を脅かす地震、津波や台風（豪雨）など幾多の甚大な自然災害を経験し、また、繰り返されるゲリラ的な自然災害は後を絶たず、今後もそれらの災害の脅威と共存していかなければならない。地震、大雨、地すべり等の自然災害に伴う道路崩壊や橋梁破損による交通路の遮断は、被災地の孤立を招くと同時に、その被災地の人々にとっては生命線の切断となることから、交通路の迅速な復旧法の開発は最も重要な課題である。

このような自然災害（豪雨や地震、津波等）によって寸断された橋や道路の復旧の一つに、緊急車両や工事車両の走行が想定された応急橋の開発・整備がある。また、軍用に開発された仮橋を災害発生時に使用することもある。これまでの応急橋^{1)~4)}は、写真—1~3に示すように、鋼製のトラス型式やI桁型式といった組立てを主とした構造を有する橋梁であり、構造的には安定し、重荷重にも対応しているものの、組立てに必要な仮設ヤードの確保や、運搬や組立て、架設に時間が掛かるなどの課題もある。

一方で、迅速な組立てや架設を実現するためには、構造的に安定な橋梁をはじめから想定するだけでなく、架設後に必要部材を取り付けて安定化させるという考えや、一刻を争う人命救助等を目的とした比較的軽荷重、たとえば小型車両一台程度の通行を前提にしたもの、展開式のプレファブ構造のような橋梁を折り畳んで保管・運搬し、現場で伸長した後に補強部材を取り付けるなどして、安定した橋梁構造物に変更するという考えも必要であると考えられる。

当研究所では、広島大学や東北学院大学、信州大学、星軽金属工業(株)、三協立山(株)、(株)アカシン、(株)横山基礎工事らとともに、被災現場で容易かつ迅速に架設し、寸断された道路インフラの確保とともに、速やかな人命救助に主眼を置いた緊急仮設橋の開発を進めてきており、既発行の当機関誌においても開発コンセプトや概要を紹介している⁵⁾。また、その後においても、引き続き研究開発を進め、小型自動車が走行可能な緊急



写真—1 応急組立橋（新潟防災センター）¹⁾



写真—2 パネル橋 MGB（筆者撮影）



写真—3 国内に現存する Bailey 橋（筆者撮影）

仮設橋の開発に成功し、その成果については各種メディアや展示会、学会・シンポジウム等を通じて広く紹介してきている^{6)~9), 11), 12)}。

本稿では、これまでに公表してきている論文等と内容が重複するが、小型車両走行が可能なモバイルブ

リッジの構造的特徴を述べるとともに、実際の河川で行った架橋実験から本橋の架設状況、今後の実用化に向けた展開方針について紹介する。

なお、本稿で述べる「緊急仮設橋」は既存の橋梁が流出したり、重大な損傷を受けたりした災害発生時等の早期仮復旧や人命救助を目指して開発されたものあるいは開発が進められているものであり、既設橋梁の代替として用いられる仮橋、一般に「応急橋」と呼ばれているものとは、使用目的の違いから両者を区別して述べることとしている。また、特にここで紹介する緊急仮設橋については、折り畳んで運搬し、現地で迅速に架設ができることから「モバイルブリッジ」と称している。

2. 緊急仮設橋「モバイルブリッジ」の概要

(1) 開発コンセプト

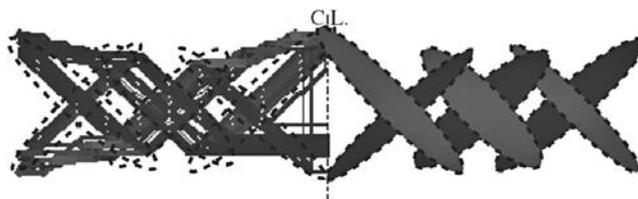
緊急時に現地で行われる仮橋の組立作業が、急速架設の観点でクリティカルであることを考慮するとともに、「架橋速さ」と「作業安全性」を両立させるべく、橋の機械化（ロボット化）といった新しい架設技術が必要であると考えている。また機械化が進むことによって、より少人数で、かつ容易に架橋が可能となると考えられる。本研究開発で目指す緊急仮設橋「モバイルブリッジ」は、橋本体を折り畳んで運搬でき、災害時の緊急的な人命救助システムを迅速に構築するために、軽自動車程度の小型車両を通行可能にする機動性の高い展開橋システムを想定している。

ここで当初目指したモバイルブリッジの仕様は下記のとおりである。

- ①支間長 20 m 程度
- ②架設完了までの時間 6 時間以内
- ③軽自動車（車両重量 10 kN）が通行可能

これらの仕様を満たすため、軽自動車一台（10 kN）の荷重対応の橋構造体を容易に収納・可搬・移動・伸長・架設することができる折畳み構造とするとともに、様々な制約条件下の現場でも迅速にシステム施工できる機構を開発する必要がある。

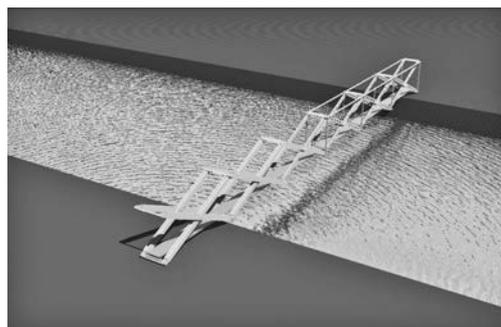
モバイルブリッジには機動性と、その役割から軽量化と強度を同時に具備していなければならない。それらを満足するため、使用部材の形状は数値シミュレーションを繰り返して決定した。ここで用いたマイクロトラス手法による最適構造の骨組レイアウト例を図一1に示すが、解析結果は、X形の形態に着目し、図中の破線で示すように、マジックハンドのようなシザーズ構造となった⁶⁾。この最適化レイアウト解析結果の特徴



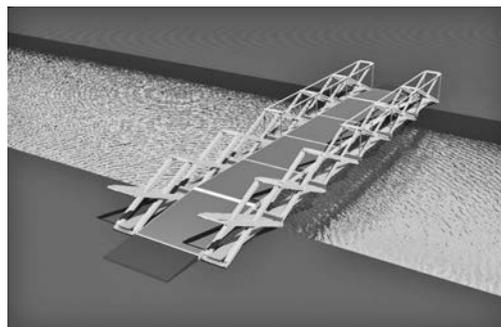
図一1 マイクロトラス手法による位相最適化構造解析結果（赤：圧縮力の領域、青：引張力の領域）⁶⁾

は、周期位相構造と大局的な対称性が力学的な平衡バランスで調和していることである。その周期対称性を利用して折畳むことができれば、コンパクトな展開構造「Deployable Structures」とすることが可能となると考えられる。折畳み構造は軽量構造物に適用されることが多いが、橋などの重量構造物への適用は不可能と思われがちである。しかし、設計荷重などの要求性能を明確化し、設計方法等を整理・分析した上で、それぞれの状況に応じて設計することにより実現は可能であると考えている。「折畳み」構造は、折紙に代表されるように日本のお家芸的な製品が多いが、橋を折畳むにはその特性を分析し、高度で繊細なバランス制御が必要である。

以上の検討結果から、モバイルブリッジは、展開・収納を考慮して、下路タイプの主構面がダブルワーレントラスのようなX形をしたシザーズ構造を主とした橋梁構造として開発を進めている。モバイルブリッジの展開後のイメージを図一2に示す。ここで図一2



(a) 歩行者・小型車両用



(b) 車両用（歩行者用の発展型）

図一2 モバイルブリッジの展開後イメージ

(a) は歩行者や小型車両等の比較的軽荷重に対応したものであり、同 (b) に示すモバイルブリッジは今後想定される、大型車両への対応を目指したもので、モバイルブリッジ2基を並列に設置することで、より重荷重に耐えうるように考えたものである。

(2) 構造的特徴

モバイルブリッジはX形をしたパンタグラフ状のシザーズ構造を有し、X状に組み立てた部材を水平方向に伸長し、所定の橋長で固定する方式としている。シザーズ構造は、宇宙、建築、機械分野で広く使われており、簡易テントや膜構造、一般住宅や工事現場の門扉、空港の昇降機、マジックハンドなどの玩具にも応用されている。

シザーズ構造の基本形は、図-3に示すように、二本の梁部材の中央でピボットと呼ばれる回転自由なジョイントによって交差させた構造で、この二本の梁は容易に回転でき、曲げモーメントを互いに伝えない¹⁰⁾。各々の梁の端部にヒンジ接合部を作りシザーズ構造を横方向に連結することで、多格間シザーズ構造となり、展開・収納が迅速で容易な構造体とすることが可能である。

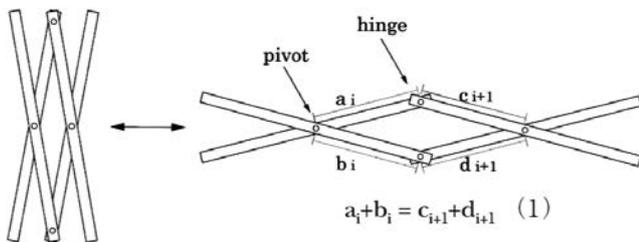


図-3 シザーズ構造の基本形¹⁰⁾

このモバイルブリッジでは、橋の先端が対岸に設置するまでの間は、片持ち梁状態となるため、固定点となる端部の部材が最も大きな断面力を受け持つ。先端が対岸に設置すると、支持状態が片持ち状態から両端支持状態となり、支間中央の部材が最も大きな断面力を受け持つこととなる。この状況を7格間のシザーズ構造で、便宜的に $w = 1 \text{ kN}$, $L_0 = 5 \text{ m}$, $\tan \theta = 3/4$ ($\lambda/2h$)、梁の曲げ剛性/トラス部材の軸剛性の比を3、と仮定した場合の断面力を示したもの¹¹⁾が図-4である。展開時や設置時の折畳み部材のみの状態(シザーズ構造の状態)では、一部材で軸力と曲げを受け持つことになり、一般的なトラスとは異なっている。また、軸力はX形に組み立てた部材の軸方向中央のピボットを対称に引張りと圧縮とが入れ替わるなどの特性を有す。このように、トラスと比べても、複雑な部材力が

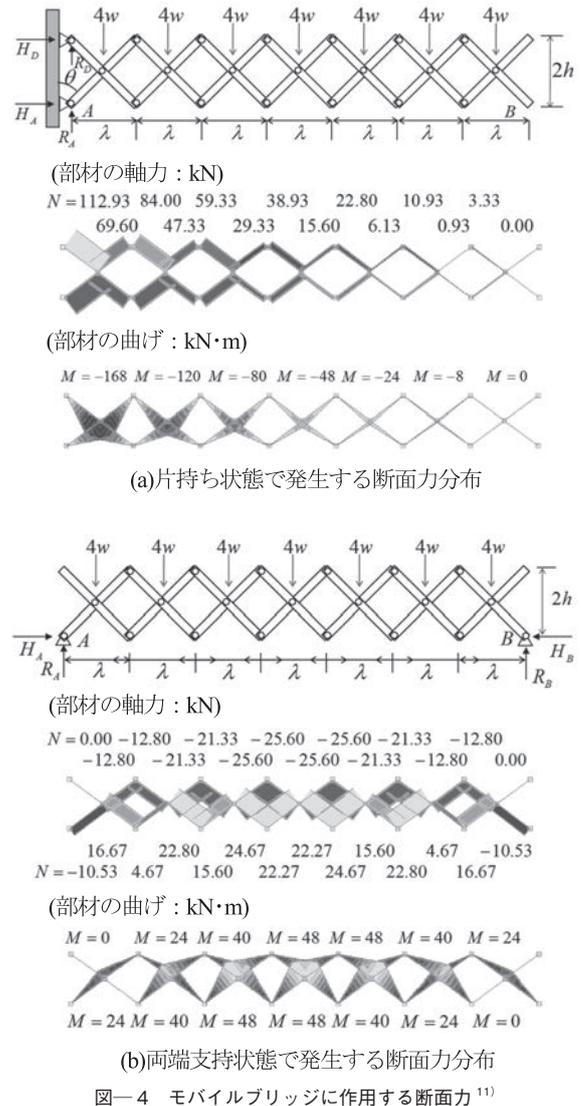


図-4 モバイルブリッジに作用する断面力¹¹⁾

生じることが、モバイルブリッジの構造的特徴と考えている。

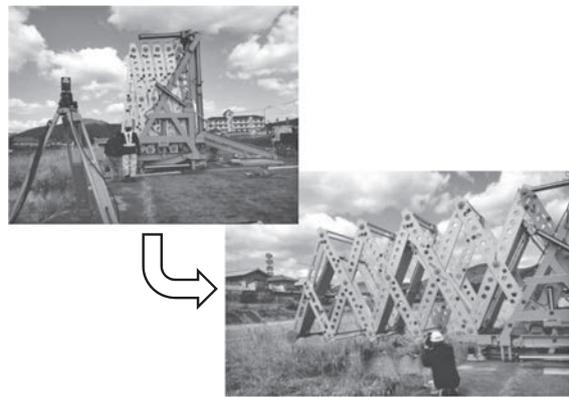
(3) プロトタイプによる架設実験

実機製作に向けた基礎データの収集と課題の整理を行うことを目的として、軽自動車荷重(ここでは10 kNと設定)を設計荷重とした支間長17 m程度のプロトタイプを製作した。このプロトタイプでは、展開・収納機構の確認や、各部のひずみ測定から応力変形挙動の把握を行った。展開時に大きな断面力を受ける基部の部材については鋼部材(SS400)を採用し、その他の部材には死荷重軽減のため軽量なアルミニウム合金(A6N01)を使用した。アルミニウム合金製部材の断面形状は幅60 mm×高さ400 mmの中空矩形断面として、今回のプロトタイプのために特別に押出成形して製作した。

事前の載荷試験や解析で構造的に安全であることを確認した上で、実河川(広島県福山市本郷町)での架



(a)モバイルブリッジの運搬



(b)架設状況 (伸長状況)



(c)架設後



(d)小型車両の走行実験

写真—4 実河川での架設実験状況 (筆者撮影)

設実験を行った¹²⁾。その状況を写真—4に示す。このモバイルブリッジプロトタイプは、現場での架設時間の短縮を目指すほかに、架設に必要な作業員の省力化も目指し、本体に油圧駆動システムを搭載し、トレーラ運搬現着後、自動降車、自動展開、自動収納を可能とする装備を備えている。また、床版も自動敷設機能が付与され、橋梁本体の伸長に連動して展開される。写真に示すように、本体をトレーラによって運搬し、その後は油圧駆動システムによって自動で展開し、架設が完了した。展開中は本体収納用フレームの自重がカウンターウェイト (約 20 kN) となって片持ち状態でも安定した架設が可能であったことも確認している。架設に関わった作業員は、誘導員含めて 5 名程度 (実際の架設作業には 2 名) あり、搬入から架設完了まで約 4 時間 (各種の計測作業を含む。実際の架設時間は 1 時間程度) を要した。

小型自動車走行試験では、1500 cc クラスの乗用車 (車両重量約 14 kN) を走行させた。部材各部で計測したひずみデータ等の掲載はここでは省略するが、部材の座屈や降伏などを伴う非線形挙動は認められず、設計で想定した条件かつ弾性範囲の橋梁構造として成立することが確認された。

この基本構造概念に基づいた技術開発を進めることにより、わが国のような災害の多発する国において、モバイルブリッジは地域の災害復旧ツールとして重要な役割を担うことが可能であると考えている。今後は、この折畳み構造とケーブルあるいは上支材等を組み合わせ、フレキシブルな本橋をより高強度・高剛性にすべく、更なる改良を加えていく方針である。また、架設マニュアル (取扱説明書) と言った解説書の整備も同時に進め、緊急時には少ない作業員で、安全、容易かつ急速な架設が可能な緊急仮設橋「モバイルブリッジ」の更なる開発を進めていきたいと考えている。

3. おわりに

救援物資や復旧工事に必要な資機材の運搬等の、資機材輸送路の速やかな確保および既存道路橋の応急復旧を目的として、道路橋示方書に基づいた設計基準により設計・製作された応急組立橋については、全国の地方整備局に配備されるなど、重要な場面においての使用実績もあり、一定の目標は達成できているものと考えられる。しかし、さらに緊急を要する人命救助や孤立地域の早期解消といった観点、比較的中小規模で

の緊急仮設橋の設置といった観点など被災状況に応じて求められる内容が多様であること、加えて被災地では状況が混乱していることから、緊急仮設橋には様々な高度かつ緻密な性能が求められると考えられ、それぞれに対応すべく緊急仮設橋については、まだまだ開発の余地はあると考える。

以上のように、緊急事態発生時に使用する緊急仮設橋として、想定される様々な用途や目的に応じて、橋として支持すべき荷重の大きさの他に、架設スピード、支間長といった橋の規模、耐久性などを考慮して、緊急仮設橋の開発に必要な項目の整理および検討が必要であると考えており、徐々にではあるが検討を進めていきたいと考えている。

本稿では人命救助用を想定した緊急仮設橋「モバイルブリッジ」を主に紹介したが、ここでは紹介していないが同様あるいは似たコンセプトで、それぞれに様々な特徴を有する緊急仮設橋が他にも幾つか存在する（例えば、参考文献13）～17）など。各地で生じる多種多様な災害に備え、被災地の状況に柔軟に対応すべく、ひいては尊い人命の救助が速やかに行われるようにするために、迅速かつ簡易に組立てあるいは架設が可能な仮橋の開発が進められることを期待するとともに、著者らが進める緊急仮設橋についても早期実用化を目指して今後も鋭意、研究開発を進めてきたいと考えている。

JCM A

《参考文献》

- 1) 宮島実, 小林弘朗: 応急組立橋の架設と供用上の課題について, 第27回 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, No.6019, 2009.11.
- 2) 佐々木一夫: 東日本大震災における国道の対応, 橋梁と基礎, pp.7-

- 10, 2012.8.
- 3) 稲垣孝: 応急組立橋の架設と供用上の課題, 橋梁と基礎, pp.87-90, 2012.8.
- 4) 中沢正利: 海外の仮橋事情, 橋梁と基礎, pp.100-103, 2012.8.
- 5) 谷倉泉, 小野秀一: 災害復旧支援に向けた応急橋の開発, 建設の施工企画, pp.51-53, 2009.10.
- 6) Ario, I., Nakazawa, M., Tanaka, Y., Tanikura, I., and Ono, S.: Development of a prototype deployable bridge based on origami skill, *Automation in Construction*, Vol.32, pp.104-111, 2013.7.
- 7) 近広雄希, 有尾一郎, 小野秀一, 中沢正利: 緊急小型車両の通行を想定した新しい緊急橋の実験的研究, 建設施工と建設機械シンポジウム, 2013.11.
- 8) 近藤慎輔, 有尾一郎, 小野秀一, 中沢正利: 車両の通行を想定した伸縮可能な緊急橋の力学特性と簡易評価手法に関する実験的研究, 建設機械施工, Vol.67, No.1, pp.89-98, 2015.1.
- 9) 小野秀一: 招待論文 急速展開を実現すべき構造を有する緊急仮設橋の開発, 土木学会構造工学シンポジウム, 構造工学論文集 Vol.62A, 2016.3.
- 10) 近藤慎輔, 川口健一: シザーズ型展開構造物の単層ラチスドームへの適用に関する研究, 東京大学生産技術研究所, 生産研究 Vol.52, No.4, pp.197-200, 2000.4.
- 11) 中沢正利, 有尾一郎: シザーズ構造を応用した応急展開橋の力学特性, 土木学会安全問題研究論文集 Vol.5, No.22, 2010.11.
- 12) http://www.hiroshima-u.ac.jp/news/show/id/22997/dir_id/0
- 13) 今井祐三: 緊急仮設橋の開発について, 建設マネジメント技術, pp.58-68, 2015.9.
- 14) 平沢秀之: 応急橋を想定した木製トラス橋の研究, 橋梁と基礎, pp.107-110, 2012.8.
- 15) 山田聖志, 熊田哲規: ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) を用いたトラス歩道橋, 橋梁と基礎, pp.97-100, 2012.8.
- 16) 陸好宏史: ハイブリッドFRP桁の開発と歩道橋への適用事例, 橋梁と基礎, pp.101-104, 2012.8.
- 17) 鈴木圭: 超軽量エアームの災害復旧への活用, 橋梁と基礎, pp.111-114, 2012.8.

【筆者紹介】

小野 秀一 (おの しゅういち)
 (一社) 日本建設機械施工協会
 施工技術総合研究所 研究第二部
 次長

