

スマートブリッジ概念に基づく迅速展開架設可能なモバイルブリッジ™

広島大学大学院	正会員	○ 有尾 一郎
広島大学大学院	学生会員	近広 雄希
広島大学大学院		田中 義和
東北学院大学	正会員	中沢 正利
施工技術総合研究所	正会員	谷倉 泉
施工技術総合研究所	正会員	小野 秀一

1. はじめに

地震, 津波, 集中豪雨などによる自然災害が多発し (例えば, 東北沿岸部の津波被害 (2011.3.11), 佐用豪雨による被害 (2009.8.9) **写真 1**), その災害復旧の現状としては, 現場ごとに異なる状況や二次災害などの発生も予測されることから, 復旧活動に長い時間が必要である. しかしながら, 災害直後の被災地への道路や橋の復旧方法など迅速なリカバリー対策に緊急の課題があり, 新しい復旧手段や安全なシステム開発の必要性を訴えてきた^{2)~21)}

既往の応急仮橋の構造様式は, ブロック単位の組立構成される場合が多く, 運搬方法と架設条件に多くの課題を持つ. 特に小型の仮設であっても既存の復旧方法に基づくため, 基礎工事に時間がかかり, 機動性と現場適用性等の問題を抱えている. ここでは, 仮橋は重厚な基礎を必要とせず, 暫定的な現場の条件を満たす橋とする.

本原稿では, 最新の展開構造技術をインフラリカバリーに利用するための合理的なスマート構造概念を考案している. 例えば, Holnicki ら^{23),24)}はハニカム状の骨組部材からなるアクティブ制御可能なマルチ・フォールディング概念 (MFM) を提唱し, MFM のスマート折畳構造の機構概念^{4),5),9)}と構造最適化研究¹⁷⁾を用いて, **スマートブリッジの構造概念**を提唱するとともに, 具体的なシザーズ機構を持つ展開構造系の仮橋を提案している.

展開構造物の機構理論に関しては, Guest & Pellegrino²⁵⁾の興味深い研究がある. また, 円筒シェル構造体の座屈研究を基礎に, 折紙スキルより展開構造の構造最適化の研究^{6),22),26)}がある. 軽量展開構造物は非線形状態で不安定化する分岐現象を起こす問題が存在する.

一方, シザーズ構造は, これまで主に建築分野の仮設屋根部材として培われてきた経緯はあるが, 実用化された事例は限られる. 一般的なシザーズ構造は, 曲げ抵抗, 展開後の安定化, 剛性の確保といった課題が存在するが, シザーズ構造体を利用した仮橋「モバイルブリッジ™」を提唱して, そのものの工学的, 学術的特長について,

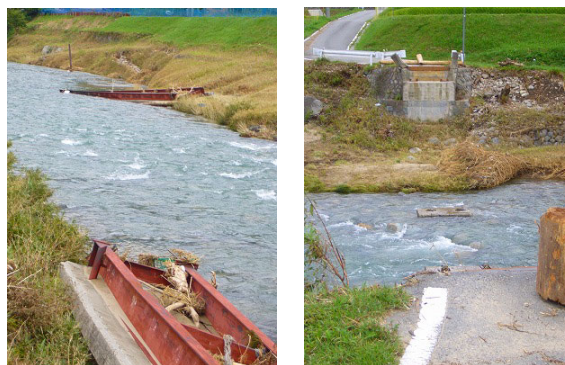


写真 1 兵庫県佐用郡・宍粟市 H21.8.9 豪雨による流橋被害¹⁾



図 1 位相最適化による骨格形態形成の解析結果 (20×80 分割)

実際にプロトタイプを製作し, 力学的検証を行っている.

2. 位相最適化手法によるスマート構造概念

両端固定で中央に帯分布荷重が作用する領域を設計領域としたレイアウト最適化問題を考える. この問題に関しては, Ramm and Maute によるアダプティブ位相最適化法による解がある. この手法は, 均質化設計法で位相を求めて (位相最適化 (topology optimization)), 次に有限要素メッシュを切り, さらにその形状における位相を求める (形状最適化 (Shape optimization)) といった手順を数回繰り返すものである. この手法は, 滑らかな境界を持ち非常に明解なものとなっているが, 計算コストがかかりすぎるという問題があった. **図 1** に示す本解析結果では, 一部シザーズ機構と類似する.

3. モバイルブリッジの2格間シザーズモデル

図 2 に示す2格間のシザーズ構造に中央下部に鉛直方向の集中荷重 f が載荷する場合の平衡を考えよう. 荷重載荷点の節点周りで平衡を考えるにあたり, 対称条件から部材力 N_1 と N_2 は等価な関係 ($N = N_i$) にあるので,

キーワード 構造最適化, 折畳み構造, モバイルブリッジ, 展開構造, 応急仮橋, スマートブリッジ
連絡先 〒739-8527 広島県市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究院社会基盤環境工学専攻 TEL082-424-7792

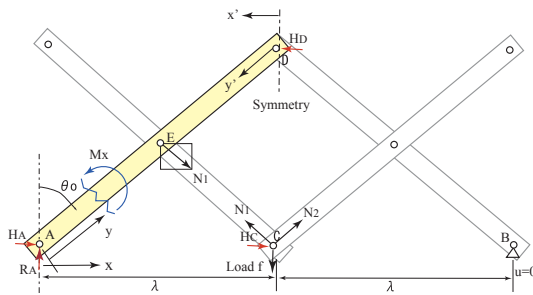


図 2 2 格間のシザーズ構造の断面力

$$2N \cos \theta_0 - f = 0, \quad N = \frac{f}{2 \cos \theta_0} \quad (\text{引張力}) \quad (1)$$

となる。また、この部材力は部材 CE 間に働いているので、これをピボット E にて水平方向と鉛直方向にそれぞれ力を分解すると、

$$P_h^E = N \sin \theta_0 = \frac{f \sin \theta_0}{2 \cos \theta_0} = \frac{f}{2} \tan \theta_0, \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$P_v^E = N \cos \theta_0 = \frac{f}{2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

となる。これを 1 部材の力の釣合いより、各反力は

$$\sum V_i = 0 : R_A - f/2 = 0, \quad R_A = \frac{f}{2}, \quad \dots \dots (4)$$

$$\sum M_A = 0 : -H_D L_0 \cos \theta_0 + \frac{f}{2} \lambda = 0$$

$$H_D = \frac{f}{2} \tan \theta_0 = -H_C \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\sum H_i = 0 : H_A - H_D + H_C = 0, \quad H_A = 0 \quad (6)$$

と求められる。部材 AD に作用する任意の断面力を求めるにあたり、支点 A を座標原点として、水平方向を x に取ると、A 点から x までの部材軸方向の平衡は

$$\sum M_i = 0 : R_A x - M(x) = 0, \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$M(x) = \frac{f}{2} x, \quad 0 \leq x \leq \frac{\lambda}{2} \quad \dots \dots \dots (8)$$

となる。区間 $\lambda/2 \leq x \leq \lambda$ は、D 点から x', y' を取ると

$$\sum M_i = 0 : M(x') - H_D y' \cos \theta_0, \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$M(x') = \frac{f}{2} \tan \theta_0 \left(\frac{x'}{\sin \theta_0} \right) \cos \theta_0, \quad \dots \dots (10)$$

$$= \frac{f}{2} x', \quad \frac{\lambda}{2} \leq x \leq \lambda \quad \dots \dots \dots (11)$$

となり、シザーズ部材はラメン部材からなる連鎖構造体である。ピボットでの $M_{\max}(\lambda/2) = f\lambda/4$ が作用する。

4. まとめ

モバイルブリッジのシザーズ部材は、部材内部にピン構造があっても、軸力、せん断力、曲げモーメントの各断面力が展開角に依存する、ラメン骨組部材として考える必要がある。その意味で、部材の $M_{\max}, Q_{\max}$ の耐力算定は設計上必要である。

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) 有尾 一郎, P. Pawlowski, J. Holnicki, 災害用の軽量衝撃吸収機構を持つ展開構造の開発と解析, 土木学会中国支部年次学術研究講演 (2006) CD.
- 3) 有尾 一郎, P. Pawlowski, J. Holnicki, 災害用の軽量展開構造系の設計概念と構造解析, 全国大会年次学術研究講演 CD (2007)
- 4) I. Ario and A. Watson, Dynamic folding analysis for multi-folding structures under impact loading, *Int. J. of Sound and Vibration*, Vol.308/3-5 (2007) 591-598.
- 5) I. Ario, New Concept of Engineering Design for Folding Structures, 土木学会中国支部年次学術研究講演 第一部門 (2008) CD.
- 6) 有尾 一郎, 「おりがみ」から理想的な構造物への創造, 土木学会中国支部年次学術研究講演 第一部門 (2009) CD.
- 7) 有尾 一郎・田中義和・中沢正利・古川祐輔・近広雄希, 高効率で折畳める橋構造の開発研究 (解析編), 第 25 回 JAXA 宇宙構造・材料シンポジウム (2009) 104-107.
- 8) 田中義和・有尾 一郎・中沢正利・古川祐輔・近広雄希, 高効率で折畳める橋構造の開発研究 (実験編), 第 25 回 JAXA 宇宙構造・材料シンポジウム (2009) 108-111.
- 9) I. Ario, A. Watson and M. Nakazawa, Multi-folding Behaviour of a Tree Structure, *Proc. of 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference*, (2009) CD.
- 10) I. Ario and M. Nakazawa, Dynamic Post-Buckling Analysis of the Micro-folding augusti 3D model with local symmetry-breakings, AIMETA, Italian Theoretical and Applied Mechanics Society at ANCONA, (2009) CD.
- 11) 有尾 一郎・谷倉 泉・中沢正利・小野秀一, 構造最適化と折畳み構造に基づくモバイルブリッジの創造, 土木学会全国大会年次学術研究講演 第一部門 (2009) CD.
- 12) 中沢正利・有尾 一郎・谷倉 泉・小野秀一, MFM 概念とそれを用いたモバイルブリッジの研究開発, 土木学会全国大会年次学術研究講演 第一部門 (2009) CD.
- 13) I. Ario and A. Watson, Structural stability of multi-folding structures with contact problem *Journal of Sound and Vibration*, Volume 324, Issues 1-2, 10 (2009) 263-282.
- 14) 有尾 一郎・古川祐輔・近広雄希・谷倉 泉・小野秀一, 急速展開できる新しい仮設モバイルブリッジの基礎研究開発, 土木学会中国支部年次学術研究講演 第一部門 (2010) CD.
- 15) 有尾 一郎・古川祐輔・中沢正利・谷倉 泉・小野秀一, 移動架設可能な折畳める橋「モバイルブリッジ」開発の創造設計, 土木学会全国大会年次学術研究講演 第一部門 (2010) CD.
- 16) 中沢正利・有尾 一郎・谷倉 泉・小野秀一, シザーズ構造を応用した展開型橋梁の基本的力学特性, 土木学会全国大会年次学術研究講演 第一部門 (2010) CD.
- 17) 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 (2010) 1-12.
- 18) 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) CD.
- 19) 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, 安全問題研究論文, vol.5 (2010) 127-132.
- 20) 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, 安全問題研究論文, vol.5 (2010) 133-138.
- 21) Ichiro Ario, Yoshikazu Tanaka, Masatoshi Nakazawa, Yusuke Furukawa, Yuki Chikahiro, Izumi Tanikura, Syuichi 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) CD.
- 22) I. Ario, M. Nakazawa, Non-linear dynamic behaviour of multi-folding microstructure systems based on origami skill, *International Journal of Non-Linear Mechanics* 45 (2010) 337-347.
- 23) J. Holnicki-Szulc, P. Pawlowski, M. Wiklo, High-performance impact absorbing materials - the concept, design tools and applications, *Smart Materials and Structures*, No. 12 (2003), pp. 461-467.
- 24) J. Holnicki-Szulc and P. Pawlowski, The concept of multifolding and its experimental validation, *the proceedings of XXI ICTAM*
- 25) S. D. Guest, S. Pellegrino, A new concept for solid surface deployable antennas *Acta Astronautica*, 38(2), (1996) 103-113
- 26) G.W. Hunt and I. Ario, Twist buckling and the foldable cylinder : an exercise in origami, *Int. J. of Nonlinear Mechanics*, Vol. 40(6), (2005) 833-843.
- 27) 有尾 一郎・Kim, H.A., 3次元空間における形態形成の Michell 問題, 日本機械学会最適化シンポジウム講演論文集, 7, (2006) 179-184.
- 28) 有尾 一郎, 特許審査中, 構造体及びその主フレームの伸張・縮収装置 (特願 2006-037668) (2006).