

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

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	古川 祐輔
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, 台風, 集中豪雨などによる自然災害が多発し, 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かかっていた. しかしながら, 災害直後の被災地へのライフラインの復旧方法など迅速なりカバリー対策が緊急の課題として求められ, 新しい災害復旧手段や安全なシステム開発が切望されている(写真1参照¹⁾).

既往の応急橋の構造様式は, 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. 特に小型の仮設橋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に問題を抱えている現状にある.

そこで, 自旋式構造によって, 基礎工事は極力省き, 早急に通行が可能となる新しい仮設応急橋を開発・構築しておくことは, 防災上必要不可欠なツールと考える. 本研究では, 宇宙構造物の構造制御技術を駆使し, 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基本的な構造概念を考案している. 例えば, Holnicki ら²⁾が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, 接触問題と不安定臨界点を伴う非線形力学挙動に対するアクティブ制御実験を行っている. 本研究は, このMFMのスマート折畳構造の機構概念と構造最適化研究から迅速施工可能なモバイルブリッジの開発を研究対象とする.

展開構造物の機構理論に関しては, Guest & Pellegrino³⁾, Zhao et al⁴⁾, ならびに Gantes et al⁵⁾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がある⁶⁾. 軽量展開構造物は非線形形状で不安定化し飛移り現象や分岐現象を起こす問題⁷⁾が潜在的に含まれ, 設計上克服しなければならない課題であった.

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,



写真1 兵庫県佐用郡・宍粟市 H21.8.9 豪雨による流橋被害事例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)

展開後の安定化, 剛性の確保といった課題が存在するが, 本研究は原型プロトタイプによってそれらの問題点を工学的利点に置換えて研究対象としている.

2. 位相最適化手法による最適骨組モデル

両端固定で中央に帯分布荷重 P 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った問題があった. 本解析では, 図1のようなレイアウト結果が得られた.

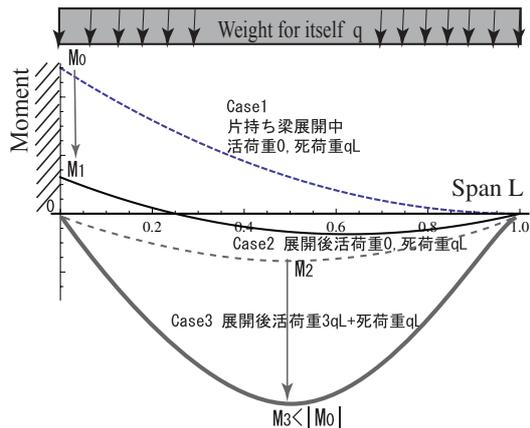


図 2 境界条件の変化に伴う曲げモーメント図の力学的利点

3. シザーズ機構による展開仮設法

ここでは、展開機構を橋に導入させるための、シザーズ構造体について述べる。シザーズ構造とは、はさみ状の骨組みを組み合わせる展開構造のことを総称し、優れた収納性・合理性を有する展開構造の代表的な機構である。

一般のトラス橋では、上弦材と下弦材が曲げモーメントに抵抗する主要部材であるが、この研究成果ではその一部が欠けた構造でも抵抗できるとともに、構造体の伸縮が可能でシザーズ構造を応用することによって、展開時に強度が十分であれば上弦材と下弦材に頼る必要がない。あるいは、展開後に活荷重が作用する場合には、組立て補強材として上(下)弦材を組み込めばよい。要するに、既往の設計法より展開施工を考慮した構造力学的な利点である、本体の境界条件の変化に伴う断面力の縮小化を活用するとともに、展開後に設計活荷重に耐えうるような補強を施すという優位な設計概念を採用する。

4. 本システムの架設時の力学的優位性

この仮設橋の最大の特長は、折り畳み状態から伸縮可能なことである。ここでは、近似的に一定断面からなる梁構造と見なし、その構造体に自重の死荷重 q を作用させる。主要骨組構造の展開時には片持ち梁とし、構造体の先端が対岸で支持できれば、構造系は 1 次不静定梁の境界条件が変化し、それに伴う断面力の減少分を、活荷重に置換することによって、この構造体の最大の優位性を発揮することを特徴とする。展開中の最大負荷は、最大の長さを有するときで、先端部が反力を確保する寸前である。近似的に、図 2 の Case1 のように張り出した根元に $M_0 = -qL^2/2$ と最大曲げモーメントが発生する。

次に、先端部が対岸で反力を得ることによって、構造体に係る断面力は大きく低減する。すなわち、根元の最大曲げモーメントは $M_0 \rightarrow M_1$ のように低減する。ここで、カウンターウェイトを取り除いて単純梁状態に境

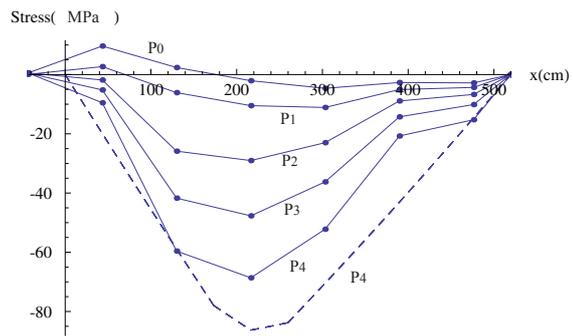


図 3 プロトタイプ部の部材交差部の応力値の分布

界条件 Case2 に変化させると、この自重荷重に対する最大モーメントは構造体の中央で $M_2 = qL^2/8$ の最大値を示す。もしこの部材の抵抗曲げモーメントが根元の最大曲げモーメントの絶対値 $|M_0|$ まで耐え得るものと考え、図 2 の Case 3 に示すように曲げモーメント $M_2 \rightarrow M_3 \leq |M_0|$ まで積載可能となり、活荷重は自重の 3 倍 ($q_{\text{live}} = 3q$) まで理論的に載荷できることになる。すなわち、

$$M_0 = M_2 + M_{\text{live}} = \frac{qL^2}{8} + M_{\text{live}},$$

$$M_{\text{live}} = \frac{qL^2}{2} - \frac{qL^2}{8} = 3\frac{qL^2}{8}, \quad q_{\text{live}} = 3q$$

と表される。それを裏付ける、プロトタイプ実験によるピボット部の曲げ応力度を図 3 に示す。

5. まとめ

構造最適化計算手法により、軽量かつ丈夫な構造形態を創生し、最適な構造形態から、折畳める構造物として創造することによって、「モバイルブリッジ」の実現可能性と工学的価値を示唆することができた。

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) J. Holnicki-Szulc, P. Pawlowski, M. Wiklo (2003); High-performance impact absorbing materials - the concept, design tools and applications, *Smart Materials and Structures*, No. 12 (2003), pp. 461-467.
- 3) S. D. Guest, S. Pellegrino A new concept for solid surface deployable antennas *Acta Astronautica*, 38(2),(1996)103-113
- 4) Jing-Shan Zhao, Fulei Chu, Zhi-Jing Feng, The mechanism theory and application of deployable structures based on SLE, *Mechanism and Machine Theory* 44 (2009) 324-335
- 5) C.J. Gantes, E. Konitopoulou, Geometric design of arbitrarily curved bi-stable deployable arches with discrete joint size *International Journal of Solids and Structures* 41 (2004) 5517-5540
- 6) G. W. Hunt and I. Ario, Twist buckling and the foldable cylinder : an exercise in origami, *Int. J. of Nonlinear Mechanics*, 40(6) (2005) 833-843.
- 7) 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.