

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

Experimental Construction of Moving and Foldable Bridge “Mobile bridge™” for
Recovery and Rescue after Disaster

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****

Ichiro ARIO, Yoshikazu TANAKA, Masatoshi NAKAZAWA, Yuki CHIKAHIRO,
Yuji SAKUNO, Ryota TSUBAKI, Izumi TANIKURA and Syuichi ONO, Yusuke
FURUKAWA

*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)

**博士(情報工学) 広島大学大学院工学研究院輸送・環境システム専攻 (同上)

***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)

****学生 広島大学工学部第四類環境・建設系 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

†博士(工学) 広島大学大学院工学研究院輸送・環境システム専攻 (同上)

‡工修 施工技術総合研究所 第二研究部長 (〒417-0801 富士市大淵 3154)

§博士(工学) 施工技術総合研究所 第二研究次長 (同上)

In recent years, we have many natural disasters such as earthquakes, floods, Tsunami and so on in the world. It is necessary to develop a new rescue structure to survive from them. We have to consider how to recover a damaged construction or how to rebuilt up a new type of the rescue system as soon as possible after a disaster because time is so important to save lives after emergent situation. Deployable structures are so useful tools which can be stored and transported in a compact folded configuration and then deployed rapidly into a load bearing configuration, however they apply to the specialized condition for the aerospace technology. The structures are stable and stress-free in the folded and the deployed configuration, but exhibit a highly nonlinear behavior during deployment. This is good skill to form new design for the objection of a light structure or high stiffness under a condition in mechanics. So, we have good idea based on this deployable skill to apply to the problem of natural disaster. To design a new emergency bridge which is called as “Mobile Bridge™”, we review originally experimental construction with the expanding and foldable equipment test of the bridge as the virtual disaster near a stream in the university.

Key Words : *Foldable bridge, Mobile bridge™, Deployable structure, Emergency bridge*

キーワード: 折畳める橋, モバイルブリッジ™, 展開構造, 応急仮設橋

1. はじめに

世界各地で、地震、台風、集中豪雨による地すべりなどの自然災害が多発し、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想定されることから、復旧工事は慎重な対応が必要であり長い時間がかかっていた。しかしながら、河川閉塞(天然ダム)の発生や被災地への救助・救出など迅速な対応が求められるようになっており、新しい災害復旧法が望まれている。特に、四川大地震、ハイチ地震のような大規模地震ではライフラインに致命的な被害をもたらすため、このような災害発生直後に、迅速にリカバリーさせる手段や方法を具体的なハード面の技術開発を念頭におきながら研究しておくことは、今後も予

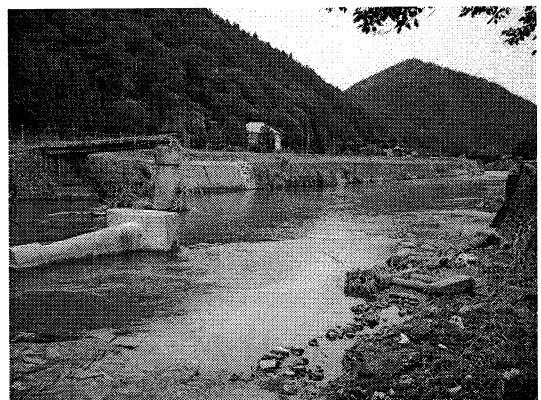


写真-1 兵庫県南光町千種川 H21.8.9 豪雨による流橋被害¹⁾

想される災害に備えておく意味からも我が国の重要かつ緊急の研究課題である。

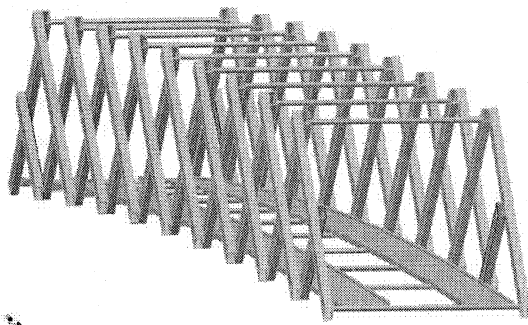


図-1 折畳める橋「モバイルブリッジ」の開発構想図

最近の具体的事例として、H22.7.16の庄原市の短時間豪雨による土石流被害が発生し、また昨年の(H21.8.9)台風9号による兵庫県佐用郡(千種川水系)・宍粟市(揖保川水系)の豪雨災害¹⁾においては、実際に橋脚や橋本体が流され、ライフラインが寸断するという、地方で生々しい橋構造物の流失と損傷現場が発生していた(写真-1を参照)。

橋の仮設はライフラインを早急にリカバリーさせる技術的課題を解決する上で、その対象物と想定される。よって、緊急車両一台でも迅速に通行が可能となる新しい応急橋¹を開発・構築しておくことは、自然災害が多発する我が国にとっては必要不可欠な復旧支援構造物と考える。

一方、既往の仮設橋はこれまで多くの実績があるにもかかわらず、災害復旧のために迅速に渡橋できる応急仮設橋は安全な急速施工システムが必要となるために、現状では皆無である。特に冒頭で述べた災害レスキュー的な仮設構造物の開発ではその機動性が求められ、部材の軽量化と高強度化が必要とされる傾向となり、高品質な材料を使用することは、加速度的に材料コストを引き上げかねない。そこで、構造物の構造形態による高い剛性を目標とする最適化配置設計と最適部材形状を決定させる概念や方法が必要となる^{2)~13)}。

この論文では、構造最適化³⁾とマルチフォールディング技術^{14),15)}を活用し、プロトタイプを実際に製作し、折畳める橋の現場架設実験を実施したので、それをレビューする。

2. シザーズ構造体

この章は、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

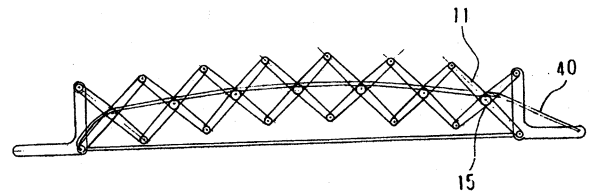


図-2 モバイルブリッジ構造のアイデア¹⁷⁾

の代表的な方式である。

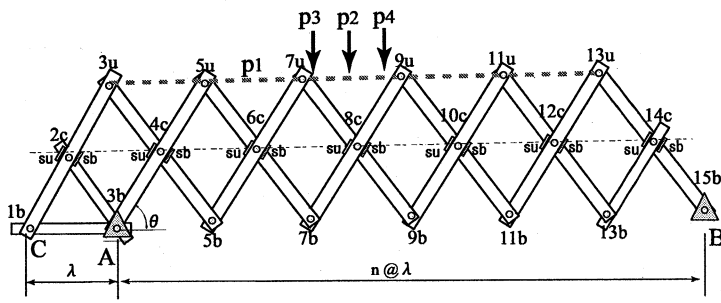
一般のトラス橋では、上弦材と下弦材が曲げモーメントに抵抗する主要部材であるが、この研究成果ではその一部が欠けた構造でも抵抗できるとともに、折畳みを持たせた構造体にするためには、積極的に取り入れることによって全く新しい構造物を創生できる可能性がある。また、構造最適化法³⁾と折畳み構造研究「MFM概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発」から、今回具体的な災害復旧のための折畳み-展開可能なトラス構造の仮設橋の開発とその適用性を考える。その一例として、部材の伸縮が可能なシザーズ構造を応用し、その構造を並べて、部材中央で交差するはり部材に置換することによって、仮設の伸縮できる骨組み構造体に応用したものである。このように、この構造体では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。

2.1 シザーズ構造の特長と用途

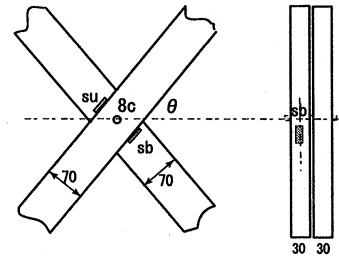
シザーズ同士の骨組をつなぐジョイントはフレキシブルなヒンジによる接合であり、はさみ状の骨組みの交差部分には「ピボット」と呼ばれるピン接合部分が存在する。しかしながら、この構造系はこれまで、重力の負担が少ない宇宙空間や、上載荷重の少ない屋根に利用する以外はほとんど活用されてこなかった。まして、橋構造体になると支間長さによる自重もさることながら、車両等の活荷重が問題視され、構造力学上ほとんど実現不可能な構造物という認識が常識的であった。

この構造の特長と用途は、1) 仮設構造の場合、1格間のストロークで簡単に伸縮機能を持たせることができる、2) ハサミのようなピボットを有している、3) 構造体全体が有限的な大変形の伸縮性を持っている、4) この構造体は制御可能である、5) この構造体を連なることが可能である、などが挙げられる。このシザーズ構造を橋に応用し、その基本的な力学特性を論文¹⁶⁾として提出している。

¹ ここでは、その開発目標から「モバイルブリッジ™」と呼ぶこととし、現在登録商標申請中。



(a) 格子トラスの全体



(b) 縁ひずみゲージ位置 (例 No.8 の su と sb)

図-3 格子トラスの荷重ケース $P_1 \sim P_4$ とひずみゲージ位置

2.2 多重折畳み機構を取り入れた橋への適用可能性

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成立できるとともに、多重折畳み機構を持たせた構造体を積極的に取り入れることによって全く新しい構造物を創生できる可能性がある。

また、この構造最適化法と折畳み構造研究「MFМ 概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発」から、今回具体的な災害復旧のための折畳み-展開可能なトラス構造の仮設橋の開発とその適用性を考える。

一つの考え方として、図-2に示すように、構造体の両端にタイドケーブルやタイドバーを設けることによって、自碇式の安定な構造体にすることができる。このことは、橋を伸縮できる利点が生まれるとともに、運搬等の移動が可能となり、迅速な橋の組み立てが可能となるメリットも生まれる¹⁷⁾。あるいは、タイドケーブル等の代わりに、展開後に水平部材を一箇所固定することによっても構造体を安定化させることが可能である。

それを確かめるために、構造最適化手法³⁾と折畳み構造概念を組み合わせて、図-3に示すような特許技術の内容を盛り込んで、人が載れる程度の設計荷重を想定してプロトタイプを製作し、架設実験を実施した。

2.3 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

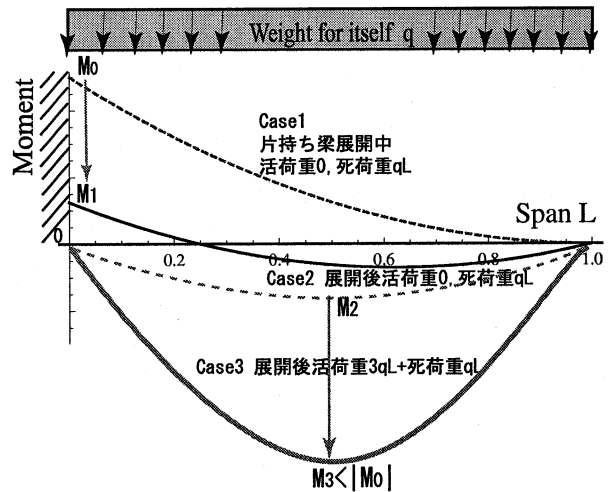


図-4 境界条件の変化に伴う曲げモーメント図の力学的利点

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、この構造物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。このとき、図-4のCase1のように張り出した根元に

$$M_0 = -\frac{qL^2}{2} \quad (1)$$

の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界条件が変化したとすると、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

$$M_2 = \frac{qL^2}{8} \quad (2)$$

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-4 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、

$$M_0 = M_2 + M_{\text{live}} = \frac{qL^2}{8} + M_{\text{live}}, \quad (3)$$

$$M_{\text{live}} = \frac{qL^2}{2} - \frac{qL^2}{8} = 3\frac{qL^2}{8}, \quad (4)$$

と表される。

3. プロトタイプのカ学挙動実験

モバイル仮設橋のプロトタイプを展開した状態でのカ学挙動特性を理解するために、基本的なカ学実験を以下の通り実施した。

3.1 実験条件と計測値

カ学実験の条件は、使用範囲内の非破壊実験を前提に、人による上弦載荷荷重をプロトタイプに与えた。ここでは、各荷重条件下に対して、主として設計基礎データを得るために、基本的な変形量の計測を行った。

3.2 プロトタイプ構造の仕様

新しい展開型の応急橋のプロトタイプを製作するにあたり、様々な検討を実施した。最終的には、入手可能な材料でコストが廉価な規格品、アルミニウム合金 A6063-T5 の角パイプ材を主要骨組材として選定した。材料引張試験より 0.2%耐力は 180MPa あり、この材料の使用限界応力は 130MPa とした。骨組構造の構成は、図-3(a) に示すように、長さ 120cm で、両端ピン間は 100cm、部材中央で X 型に交差するピン構造から構成される、伸縮可能なパンタグラフトラス構造仕様とした。支点としては、構造的バランスを考えて、暫定的に図中のように A 点と B 点とした。

3.3 人荷重載荷による荷重ケース

プロトタイプの節点番号とひずみ位置を図-3(a) に示す。例えば、No.8 のひずみゲージ位置は、図-3(b) に示すように部材交差部の上縁側 (su) と下縁側 (sb) に対応する。プロトタイプのカ学実験と照合させるために、幾つかの荷重 p_i を図-3 のように考える。プロトタイプの骨組だけの状態を P_0 の既定値 (ゼロリセット) とし、荷重ケース P_k は各荷

表-1 上弦載荷条件による構造体中央の No.8 付近の計測値

| 荷重ケース P_i (N) | 計測 変位 (cm) | ひずみ 理論値 $ \epsilon $ (μ) | 上縁側 計測値 ϵ_{su} (μ) | 下縁側 計測値 ϵ_{sb} (μ) |
|--------------------|------------------|--------------------------------------|--|--|
| $P_0 = 0$ | 0.0 | 0 | -34 | 36 |
| $P_1 = 196$ | 0.4 | 77 | -172 | 171 |
| $P_2 = 882$ | 1.9 | 556 | -476 | 498 |
| $P_3 = 1499$ | 2.7 | 987 | -782 | 809 |
| $P_4 = 2117$ | 3.8 | 1414 | -1125 | 1160 |

重 p_i の累加

$$P_k = \sum_{i=1}^k p_i, \quad k = 1, \dots, 4$$

として表すこととする。荷重ケース P_1 はアルミニウム合金製のエキスパンドメタルで製作された簡易床版 (4kgf/1 格間) を構造体の上路部分にセットした ($P_1 = 196\text{N}$ (20kgf))。荷重ケース P_2 は節点 8c の部材交差部に位置する部分に一人 686N (70kgf) が載り、合計 $P_2 = 882\text{N}$ (90kgf) とする。荷重ケース P_3 は節点 8c をはさんで、二人と床版の荷重合計 1499N (153kgf) が載り、ケース P_4 は三人と床版の荷重合計 2117N (216kgf) が載った状態をそれぞれ示す。解析ではトラスの片面を対象とし、それぞれの荷重値を $p_i^* = p_i/2$ として扱うこととする。

3.4 プロトタイプの変位と荷重の関係

プロトタイプに上述の人荷重を載荷したときの変位の計測を実施した。近似的に曲げモーメント分布は、ほぼ中央に集中荷重が載荷したときの三角形分布とみなすことができるので、中央のたわみ量を予測し、実験値と比較する。最初に、自重状態を既定値 (ゼロリセット) として、それぞれの荷重状態に対する、構造体中央付近の節点 8c における計測値を表-1 に示す。これらの計測結果から、両者はほぼ線形関係にあることがわかった。

3.5 各荷重ケースに対する部材交差部のひずみ

構造体中央付近の部材交差部 No.8c に着目し、その上下縁端部にひずみゲージを図-3(b) に示すように部材軸方向に貼り、その計測値を表-1 に示す。表中の理論値は、フックの法則に基づく応力-ひずみ関係と、曲げモーメントから算定した値である。この結果、ひずみの理論値は実験値に対して大きめに算定されており²、実験値は理論値よりもひずみが低く抑制される結果となった。両者のひずみは、各荷重に対してほぼ線形関係となり、その差も荷重の増加につれて大きくなった。

² p_1 の理論値は分布荷重として算出している。

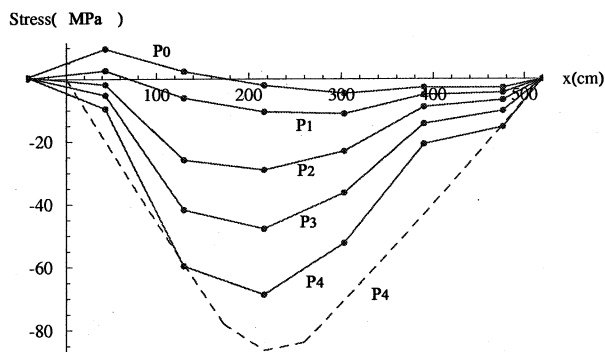


図-5 交差部の応力の実験値と理論値の分布

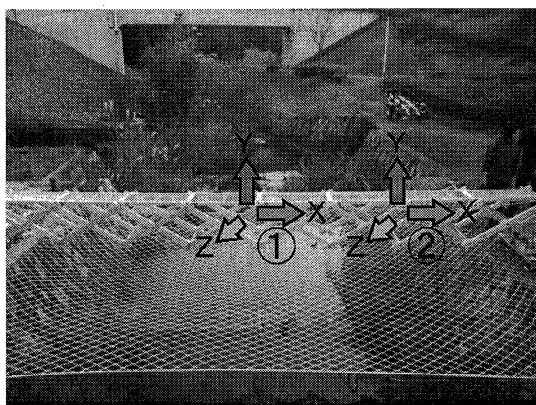


写真-2 モバイルブリッジ歩行時の動的実験風景

3.6 部材交差部に位置する縁端応力値

プロトタイプの一部材交差部全ての縁端ひずみを測定し、それらを材料引張実験から得られたヤング係数を用いて応力値に換算し、ひずみ測定位置と各荷重ケース P_i に対応する関係を図-5に示す。図中の破線は、荷重ケース P_4 の場合の作用曲げモーメントから算出した理論的な縁端応力の曲線である。その結果、理論値が実験値より大きめに算出されており、傾向として相対的に類似な関係になっている。したがって、設計に用いる際には、理論値を参考にするとよいことが分った。理論値の最大曲げ縁端応力は 84.3MPa (860kgf/cm^2) であり、実験による応力算定値は、 69.3MPa (707kgf/cm^2) の降伏応力以下で使用限界範囲内の応力状態であることが確認された。

3.7 モバイルブリッジの現場据付け

迅速に展開できるという工学的利点を優先し、シザーズ構造を橋構造物に応用し、県が管理する河川(川幅 6.2m の現場)を災害現場と見立てて、空撮からの地形情報を分析するとともに架設現場を選定し、写真-3の位置情報をもとに、モバイルブ



写真-3 モバイルブリッジの架設実験風景 2

リッジを無事据え付けることができた¹⁸⁾。写真-4は架設実験当日の様子であり、実質1時間あたり44名の一般者が橋を渡ることができた。

3.8 架設時の動的実験結果

架設完了後のプロトタイプの安定性を把握するために、架設完了後に、写真-2のように、橋の中央(1)と $L/4$ の位置(2)に、無線加速度計センサー(SOCTED社製 QP-2000)を2台用いて、人が渡橋する際の3次元方向の加速度を測定した。その結果を図-6に示す。図中の緑線は(2)の位置で、黒線は(1)の位置に対応する。同図(a)は $y-z$ 面上での加速度軌跡を、図(b)は y 方向加速度の時系列を、それぞれ示す。図(a)は Z 方向に $\pm 200\text{gal}$ を、 Y 方向に $-300 \sim 200\text{gal}$ の範囲内に軌跡が収まっており、ほぼ左右対称形の安定性を維持した。図(b)において、初期の加速度波形は子供が25秒かけて、その後の100(sec)からの波形は大人が30秒かけて渡橋している時の波形である。橋の中央付近では経過時間の13秒後に最大波形を示した。

4. 結論

このようなシザーズ構造物は、これまで屋根構造などの建築構造物で適用されてきた例は存在するが、荷重が載荷されるような仮設橋モデルに適用した例はなく、予算縮小の中、実質上初の試みであったが、設計値と実験値データがほぼ予測どおりの関係を示し、この構造体の可能性を示唆することができた。今後は詳細な検証を進めるとともに、仮設橋の展開方法を含め、様々な挙動特性を調査しながら、開発予算の課題もあるが、防災上必要不可欠な技術であり、確実な技術開発を進めたいと考えている。

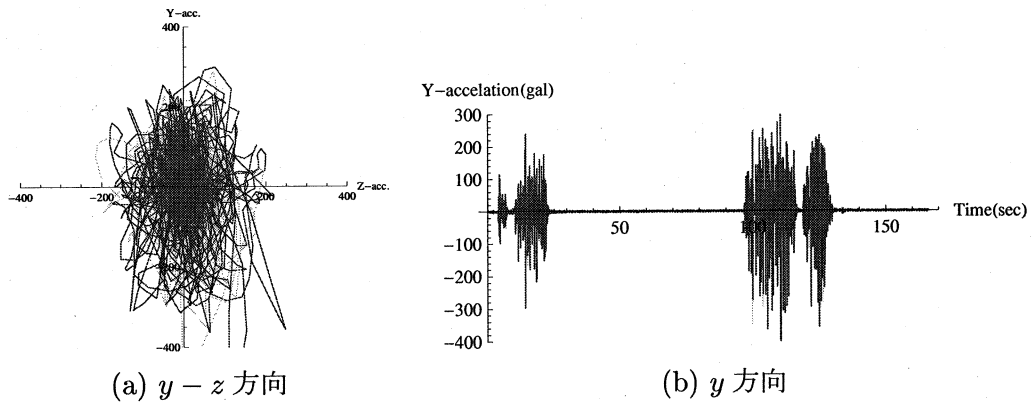
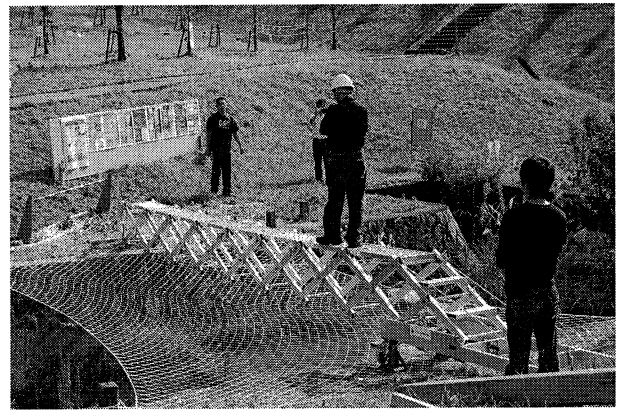


図-6 歩行時のモバイルブリッジの加速度計測



(a) 運搬状況



(b) 河川に架設実験

写真-4 モバイルブリッジの架設実験風景

謝辞: 本プロトタイプ製作にあたり、本学学校工場の技術員・スタッフの多大な協力に感謝するとともに、本学工学研究院建築学専攻松本慎也助教からの無線加速度計の借用に感謝する。

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) J. C. Maxwell, Scientific Papers, Vol.2, 175, 1869.
- 3) 有尾一郎・Kim, H.A. (2006), 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, pp.179-184.
- 4) W. Hamp, Theory of structural design, Report214, AGARD, October 1958.
- 5) A. G. M. Michell (1904), The limits of economy of material in framed structures, Phil. Mag. (Series 6), 8, pp.589-597.
- 6) H. Cox, The Design of Structures of Least Weight, Pergamon, Oxford, 1965.
- 7) F. Shanley, Weight-Strength Analysis of Aircraft Structure, Dover, New York, 1960.
- 8) G. Gerard, Minimum Weight Analysis of Compression Structures, New York, University Press, 1956.
- 9) J. Taylor (1969), Optimal design of structural systems, an energy formulation, AIAA J., 7, pp.1404-1406.
- 10) V. Venkayya (1956), Design of optimum structures, Computers and Structures, 1, No.1/2, pp.265-309.
- 11) R. A. Gellatly and L. Berke, Optimal structural design, AFFDL-TR-70-165, February 1971.
- 12) R. K. Livesley, The automatic design of structural frames, Quart. J. Mech. Appl. Math., 9, Part3 1956.
- 13) 成岡昌夫監修: 骨組み構造物最適設計, 日本鋼構造協会 JSSC Vol.7, No.63 - Vol.9 No.93, 1971-73.
- 14) G.W. Hunt and I. Ario (2005), Twist buckling and the foldable cylinder: an exercise in origami, *Int. J. of Nonlinear Mechanics*, Vol.40(6), pp.833-843.
- 15) 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, pp.461-467.
- 16) シザーズ構造を応用した応急展開橋の力学特性, 中沢正利・有尾一郎, 安全問題研究論文 vol.5 に投稿中.
- 17) 有尾一郎, 特許審査中 (2006), 構造体及びその主フレームの伸張・縮収装置 (特願 2006-037668).
- 18) 作野裕司・有尾一郎・田中義和・椿涼太・古川祐輔・近広雄希, 気球とモバイルブリッジを利用した自然災害時の早期情報収集・救助システム開発の紹介, 生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用ホーム」論文集 19 (2010) 65-68.

(2010年8月6日受付)