

シザーズ機構を持つ「モバイルブリッジ」の架設動の実験とその解析

古川祐輔*・有尾一郎**・田中義和***・近広雄希****・作野裕司***・椿涼太**

Dynamical experiment and analysis of Mobile bridge with scissors structure

Yusuke FURUKAWA, Ichiro ARIO, Yoshikazu TANAKA, Yuki CHIKAHIRO,
Yuji SAKUNO and Ryota TSUBAKI

Recently, many kinds of natural disasters such as earthquakes and floods have happened in the world. It is so important to be able to do the rescue very quick so that we may survive from the disaster. In order to recover network of roads and/or infrastructure, the new emergency bridge that can be rebuilt up to be quick is needed. There has never been this type of a folding bridge. So, we propose the creation design for a new emergency bridge called “a mobile bridge”. In this research, we produce the prototype of the mobile bridge, and investigate the vibration property and basically physical behavior by the structural experiments.

Key words: Foldable bridge, Mobile bridge, Deployable structure, Emergency bridge

1. 研究背景

近年、国内外で地震・台風・集中豪雨による地すべりなどの自然災害が多発している。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等の発生も想定されることから、復旧工事は一般に復旧計画を策定しながら対応が進められるため長期化する傾向にあった。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・救出等、迅速な対応が求められるようになっており、新しい災害復旧技術が望まれている。最近の事例として、H21.8.9台風9号による兵庫県佐用郡と宍粟市の豪雨災害¹⁾において橋脚や橋本体が流される被害が報告されている(写真-1を参照)。H22.7.16の庄原市の短時間豪雨による土石流被害もまだ記憶に新しいところであり、災害に対する迅速な復旧法が望まれている。

現況の復旧方法として応急仮設橋があり、非常時に備えて保持し、架設訓練を行っている都道府県も見受けられる。しかし、これら既存の応急仮設橋の建設は数週間かかり、短時間での架設に対応していない。また、仮設部材の運搬にも大型トラックや重機を必要とするなどの課題がある。そこで、復旧活動に迅速に取り掛かるための課題を解決する上で、緊急車両一台でも通行可能で仮設に日数のかからない新しい応急仮設橋の開発・研究を行うことは、今後も予想される災害に備えておくためにも重要な研究課題であるといえる²⁾⁻¹⁴⁾。

この研究では、迅速展開可能な応急仮設橋を実現させるために構造最適化¹⁵⁾とスマート構造概念を活用し、



写真-1 H21.8.9 兵庫県佐用郡の集中豪雨の被災構造物¹⁾

展開機構を持つシザーズ構造を用いたプロトタイプを実際に製作した。その構造体の基本的な耐力実験を実施し、昨年度広島県が管理する大学敷地内の角脇川に架設実験を実施したので、本研究報告として記す。

2. シザーズ構造体

この章では、展開機構を橋に導入させるための、シザーズ構造について述べる。

2.1 シザーズ機構

シザーズ構造¹⁶⁾⁻¹⁸⁾とは、ハサミ状の骨組みを組み合わせた展開構造の総称であり、収納性・合理性を有する展開構造の代表的な構造である。骨組み同士をつなぐジョイントはヒンジによる接合であり、骨組みの交差部分に

*修士学生 広島大学大学院 博士課程前期 工学研究科 社会基盤環境工学専攻 **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

***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

****学部生 広島大学工学部第四類環境・建設系

はピボットと呼ばれるピン接合が存在する。

伸縮・展開可能なシザーズ構造を応用し、その構造を連ねて、仮設の伸縮できる構造体に応用したものである。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く、展開後に活荷重が作用する場合は組立て補強材として上/下弦材を組み込むことができる、全く新しい施工手順による構造物を創出できる可能性がある。

2.2 本構造体の力学的優位性^{19),20)}

本構造形式の最大の機能として橋が伸縮できることと、迅速な組立てが可能である。構造物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。また、ケーブルを用いる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安定化させることが可能となる。

力学的特長として近似的に一定断面からなる梁構造と見なし、構造物に自重の死荷重 q を作用させる。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、構造系は一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でこの構造体の力学的効果を発揮する。

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。具体的なモデルを考えた時、**図-2**のCase1のように張り出した根元に

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

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、構造体にかか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 qL 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-2**のCase3に示すように曲げモーメント $M_2 \Rightarrow M_3 \leq |M_0|$ で積載可能となり、活荷重は自重の3倍($q_{live}=3q$)まで理論的に載荷できることになる。

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

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

と表される。

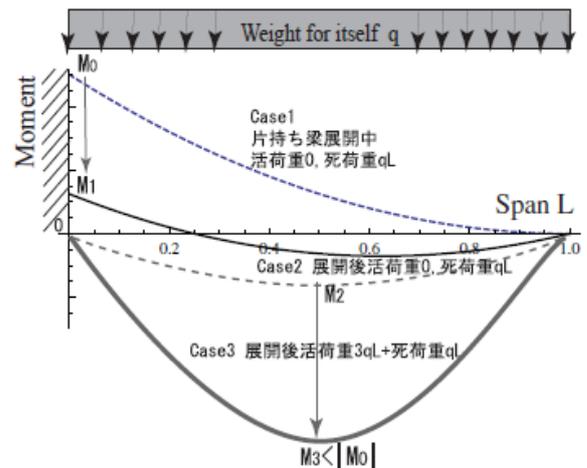


図-2 境界条件の変化に伴う曲げモーメントの力学的利点

3. 縮小プロトタイプの解析モデル

3.1 プロトタイプ構造の仕様

新しい展開型の応急仮設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。骨組構造の構成は、**図-3**に示すように、1体の部材長さが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。

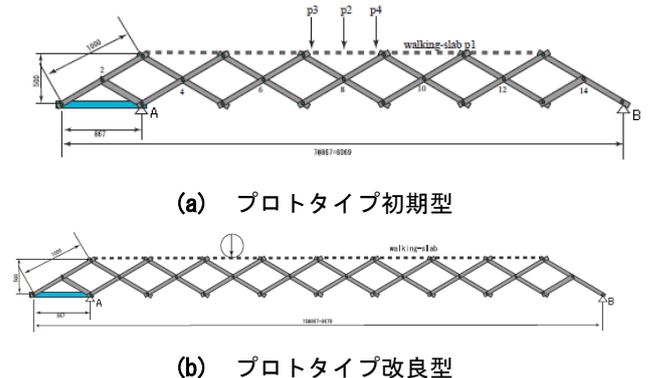


図-3 プロトタイプ初期型と改良後

表-1 載荷試験荷重ケース

| 荷重ケース(P _i) | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 荷重(N) | 196 | 882 | 1499.4 | 2116.8 |

静的強度実験を行うにあたって**表-1**に示す荷重ケースに基づいて載荷試験を行い、展開時と展開後それぞれ負担が大きくなると予想される部材を中心にひずみゲージを貼り、ひずみの値を測定した。

3.2 プロトタイプの3次元FEM解析

本解析においてAutodesk社の解析ソフトウェアを用いた。このソフトウェアは、3次元CADデータをFEM解析用データに変換するため詳細な解析データを作成する必要がなく、要素分割も自動メッシュジェネレータで作成され、要素はソリッド要素で構成される。

使用材料のデータとして、材料の引張強度試験から得られた、A6063-T5の材料特性を解析時の材料入力データとして、プロトタイプの解析モデルに反映させた。

FEM解析は展開時と展開後の境界条件の異なる2つの状態においてそれぞれ解析を行った。展開時において先端が対岸に着岸する直前の負荷の大きい展開状態を想定し、その解析モデルについて述べる。展開時の解析条件を実験条件と同様になるように次のように設定した。

- ・荷重としてシザーズ骨組の自重(617N) と架台左端に人荷重によるカウンターウェイト687Nを想定。
- ・架台下に挟んだ角材は変形せず、摩擦によって動かないと仮定し、完全固定とした。架台左端の下面も同様に完全固定とした。

プロトタイプが展開すると、先端の支持部が対岸の地盤に支持されるので、構造モデルとしては単純支持となる。このときの、解析条件を実験条件と同様になるように次のように設定した。

- ・自重と床版の荷重(830N)を加えて、活荷重を中央の床版に集中荷重(1923N)として作用させる。
- ・境界条件は架台下に挟んだ角材は変形せず、摩擦によって動かないように、完全固定とし、展開部先端は接地支持されているものとした。

これらのうち、研究報告では活荷重が載ることになる展開時についての結果について解析条件による構造解析の結果を図-5と実験値との比較を図-6に示す。

両者とも、概ねグラフの傾向が一致しているが最大応力の部分について、1.5倍ほどの応力差が生じている。これらの差は、床版部の複雑な形状による、剛性評価が不確定な入力値も考えられるのでFEM解析による応力値が実験値よりも低い値で結果が出たものと考えられる。そこで、次に床版を実物とほぼ同じ様に網状にしたエキスパンドのモデルを作成し、同じ条件下で解析を行った。解析モデルを図-7に、その解析結果の比較図を図-8にそれぞれ示す。

解析結果として、実験値と同等の値を解析値として得ることが出来たため、改良前のモデルにおける応力値の減少は床版における剛性評価に左右され、解析精度が異なることが明らかになった。

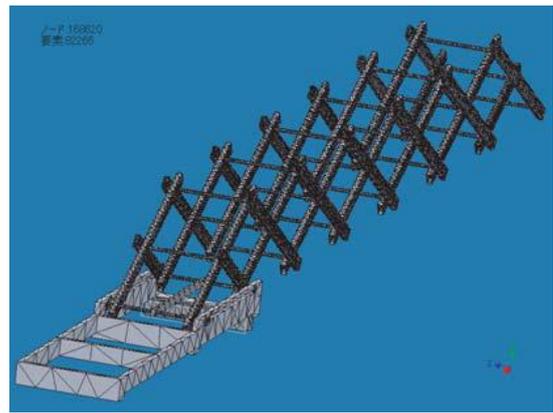


図-4 FEM分割図(節点数168620, 要素数82266)

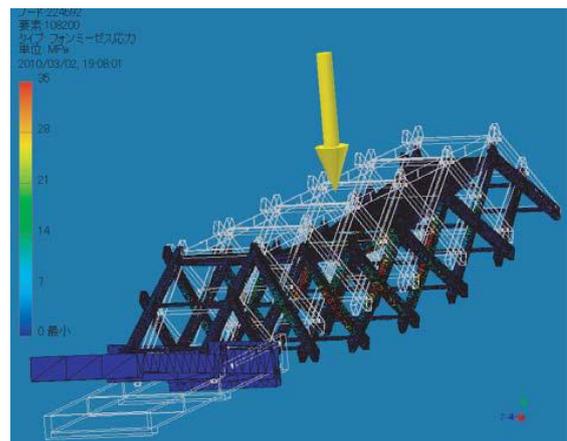


図-5 展開後の応力状態

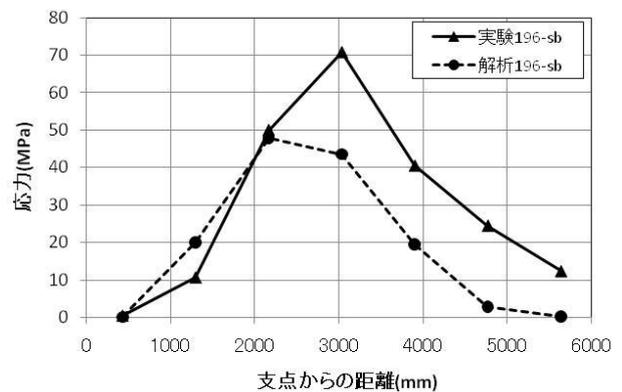


図-6 実験値と解析値の応力値比較

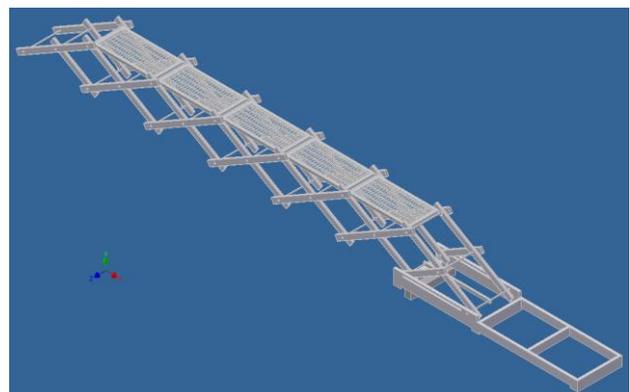


図-7 床版改良した解析モデル

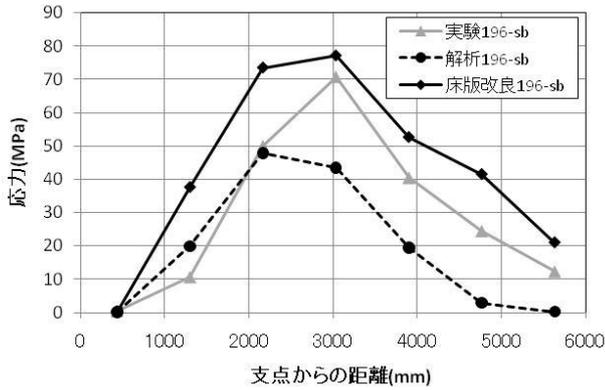


図-8 改良後の実験値と解析値の比較図

4. モバイルブリッジの架設実験

平成21年11月8日(日)に広島大学東広島キャンパス内にある角脇川の思案橋付近を被災フィールド実験地と想定し、モバイルブリッジの架設実験を行った。プロトタイプは、試作当初の約6mから約9mに展開部を延長し、トレーラーで積載と運搬を行い、迅速に展開できる拡張されたプロトタイプを一般に公開した(写真-2)。本実験は、災害現場での迅速な架設、橋を被災現場に運搬、展開施工することを前提に、気球による上空撮影、地上測量と連携²¹⁾して、初の運搬と架設実験を実施した。上空撮影の画像と測定点・算定結果をそれぞれ図-9と表-2に示す。

4.1 プロトタイプの運搬と現場架設

このプロトタイプは、折り畳んだ時のシザーズ本体の長さが1mに、架台含めても2.5mまでに収納ができ、ポートトレーラーに積載することが可能である。これによってモバイルブリッジを車両で容易に被災地付近まで運搬することができる。実験フィールド近くまでプロトタイプを搬入し、その後橋を積み下ろし、架台に装着したキャスターにて人力で架設位置まで運び込んだ。迅速に展開施工できるという工学的利点を生かし、据え付けた後に、人力によって2分程度でシザーズ全体を展開し、その後踏み板を固定して、橋が完成する。このとき架設に要した総時間は7分程度で、学生5人のみによって無事完了させた。写真-2は架設実験当日の様子であり、1時間あたり44名の一般者が本橋を渡ることができた。

4.2 架設実験時の動的実験結果

架設完了後に、図-10のように、橋の中央①とL/4の位置②に、無線加速度センサー(SOCTED社製QP-2000)2台を用いて、人が渡橋する際の橋の3次元方向の加速度を計測した。研究報告ではこの中央に位置する①の結果についてのみ述べる。



(a) 運搬方法



(b) 架設後の渡橋の様子

写真-2 モバイルブリッジの運搬と架設実験風景



(a) 空撮画像(赤点は幾何変換用の標定点)



(b) 幾何補正画像(赤線の距離を算出)

図-9 仮想被災フィールド上空撮影図

表-2 川幅の算定精度

| 測線記号 | 実測距離 (m) | 算定距離 (m) | 誤差 (%) |
|------|-------------|-------------|-----------|
| a | 6.2 | 5.96 | -3.8 |
| b | 9.96 | 10.06 | 1 |
| c | 6.18 | 6.04 | -2.3 |

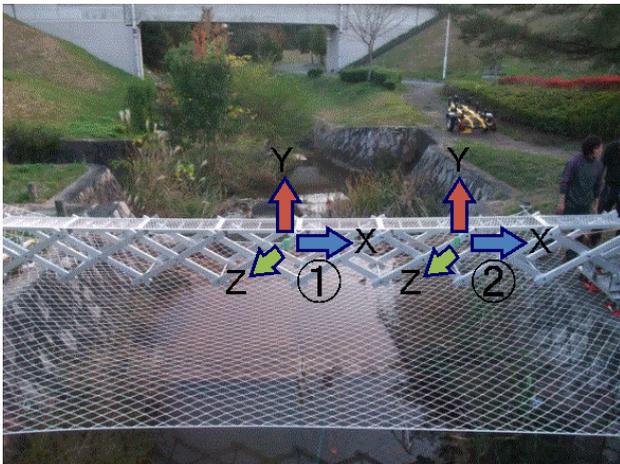


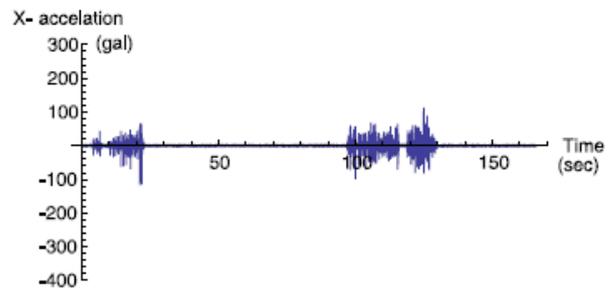
図-10 モバイルブリッジの動的実験風景

橋の中央位置①で計測したX, Y, Zの3方向の加速度をそれぞれ $\ddot{u}_{x1}(t)$, $\ddot{u}_{y1}(t)$, $\ddot{u}_{z1}(t)$ と示す. それらの実験結果を図-11に, それぞれ示す. 最初の加速度波形は子供が25秒かけて, その後の経過時間100(sec)からの応答波形は大人が30秒かけて渡橋した際の加速度の波形である. このとき, 鉛直(Y)方向の加速度 $\ddot{u}_{y1}(t)$ はX, Z方向に比べて, 歩行時の加速度変動に大きく影響する結果となった. また, 子供より大人の歩行時の変動が大きい結果を示した. 位置①で計測した軌跡の結果であるY-Z方向加速度の軌跡図を図-12に示す. 軌跡は, ほぼ左右対称形を示し, 構造体の動的安定性を保持していると判断できる.

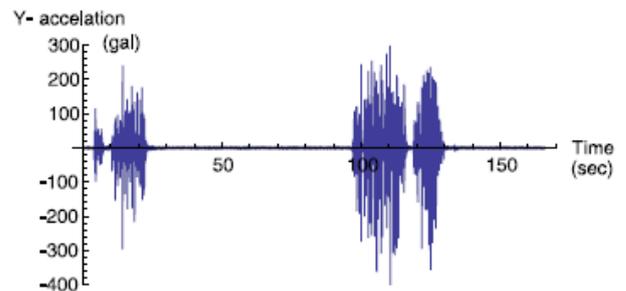
一方, ここには示さないが, 位置②の計測値の外形はそれより少し小さくひし形の外形軌跡を描いた. この結果から, 橋中央部の振幅の大きい4次振動モードの影響が大きいことが実験により明らかになった.

4.3 FEMによる固有振動数の結果

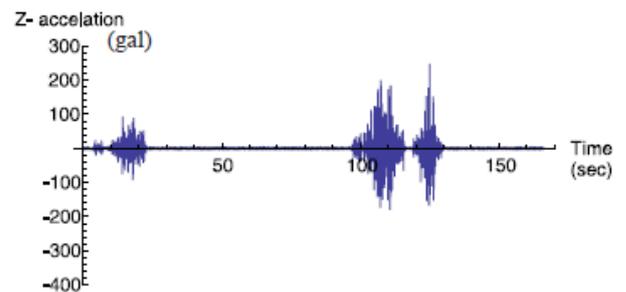
架設実験時のプロトタイプの動的な挙動特性を把握するために, 固有値解析により3次元CADモデルの固有値振動数を求めた. そのときのモード解析結果を図-13に示す. この範囲内の解析では, 橋軸(X)方向の振動モードは現れず, 最小固有振動数(1次振動モード)の解析結果より横(Z)方向に揺れ易い構造体であることが明らかとなった. しかし, 実験結果からは人荷重の衝撃によってY方向の加速度応答が大きくなり, 2次振動モードの振動形態が確認されたと考えられる.



(a) X方向の加速度応答



(b) Y方向の加速度応答



(c) Z方向の加速度応答

図-11 歩行時における橋中央①の各方向の加速度応答

4.4 実験加速度計測値のスペクトル分析結果

橋の中央位置で計測した加速度応答 $\ddot{u}_{x1}(t)$, $\ddot{u}_{y1}(t)$, $\ddot{u}_{z1}(t)$ を高速フーリエ変換(FFT)処理によって, 周波数に対する各方向の加速度応答を分析した. プロトタイプの固有振動数を第3次モードの周波数まで記載した加速度応答のグラフを図-14に示す. その結果, 一般歩行者の歩行の周波数と同様の3~6Hz付近でピークを示した. 特に, Y方向の加速度の高い値は, 周波数(2~6Hz間)で幾つかに分散していることを確認できる. 各方向に対する各図とも, 今回解析で得られた固有振動数と比較すると, いずれもスペクトル分布の高い応答値からずれており, 歩行時の動的インパクトによって, 橋が共振するような特異な動的問題は見られなかった. 今回の動的挙動応答の分析によってモバイルブリッジの基本的な動的挙動特性が明らかになった.

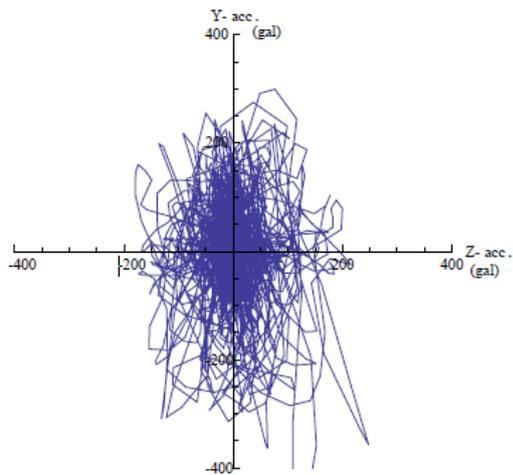
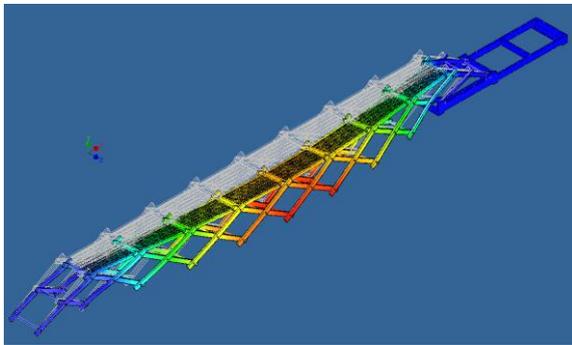
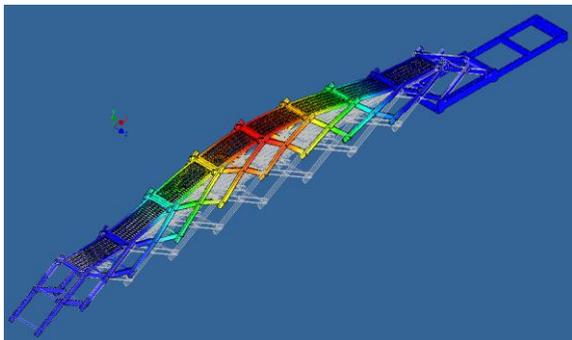


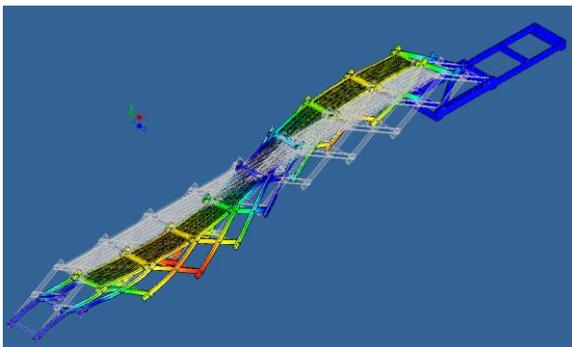
図-12 位置①のY-Z方向の歩行時の加速度応答軌跡



(a) 1次振動モード (12.77Hz)

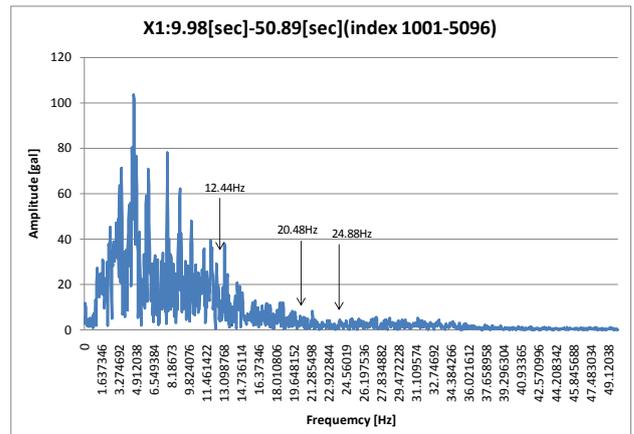


(b) 2次振動モード (20.48Hz)

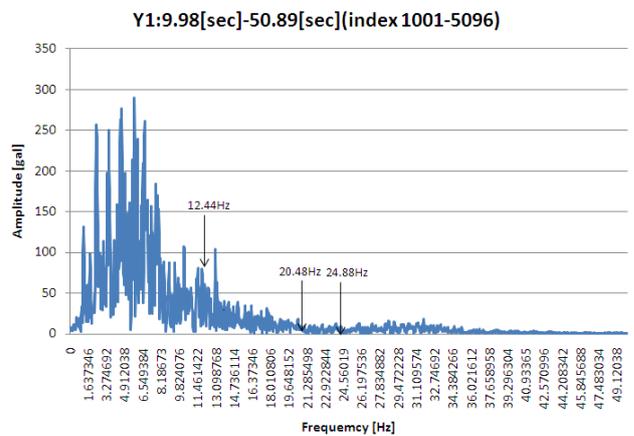


(c) 3次振動モード (24.88Hz)

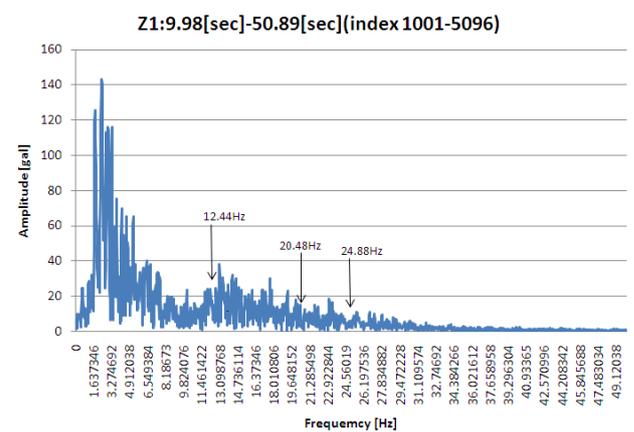
図-13 固有値振動解析による各振動モード解析結果



(a) X方向



(b) Y方向



(c) Z方向

図-14 位置①における周波数と加速度スペクトル結果

5. まとめ

本架設実験とその解析により、以下の点が明らかになった。

- 1) 構造最適化，スマート構造概念を活用し，折畳める応急橋「モバイルブリッジ」の歩行時の基礎データを得た。

- 2) 床版を改良したFEM解析モデルの解析値と実験値の整合性、簡易的ながら理論による設計・解析の妥当性が得られた。
- 3) 境界条件の異なる展開時と展開後における力学的優位性を活かした構造体として、実際に対岸の境界条件による力学的効果を活荷重として反映させることができ、架設実験によってその妥当性を検証できた。
- 4) ワイヤレス加速度センサーを用いた架設実験とFEM固有値解析により、シザーズ構造を用いた「モバイルブリッジ」のプロトタイプの振動特性を把握することができた。
- 5) これまでの実験と解析によって安全性を考えるとこのプロトタイプの仕様では、大人一人までの荷重が限界荷重ではあるが、補強方法の改善、使用材料の高強度化によって実現可能であると考えられる。
- 6) このような迅速性が求められる橋は対岸に架設し、その後、橋を補強していく方法が効果的であり迅速な架設法である。このようなシザーズ構造を用いた構造体の開発研究を進めることで将来的に短時間での架設が可能な応急橋として災害復旧ツールを製作するために有効であると考えられる。

謝辞:本研究を行うにあたり、「モバイルブリッジ」のプロトタイプ製作に尽力して下さった本学校工場の技術員とスタッフの協力に感謝するとともに、本学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を申し上げる。また、日本建設機械化協会施工技術総合研究所との共同研究に深謝する。

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/outhiro/open/hasi-nagare-0810.htm>
- 2) 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, 有尾一郎, P. Pawlowski, J. Holnicki, 土木学会中国支部年次学術研究講演第一部門(2006) CD.
- 3) 災害用の軽量展開構造系の設計概念と構造解析, 有尾一郎, P. Pawlowski, J. Holnicki, 全国大会年次学術研究講演 CD (2007)
- 4) New Concept of Engineering Design for Folding Structures, I.Ario, 土木学会中国支部年次学術研究講演第一部門 (2008) CD.
- 5) 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物の開発研究(解析編), 第25回 JAXA 宇宙構造・材料シンポジウム(2009) 104-107.
- 6) 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物の開発研究(実験編), 第25回 JAXA 宇宙構造・材料シンポジウム(2009) 108-111.
- 7) I. Ario, A. Watson and M. Nakazawa, Multi-folding Behaviour of a Tree Structure, Proc. of 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference, (2009) CD.
- 8) I. Ario and M. Nakazawa, Dynamic Post-Buckling Analysis of the Micro-folding augusti 3D model with local symmetry-breakings, AIMETA, Italian Theoretic a land Applied Mechanics Society at ANCONA, (2009) CD.
- 9) 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.
- 10) 中沢正利, 有尾一郎, 谷倉泉, 小野秀一, MFM 概念とそれを応用し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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) A. G. M. Michell, The limits of economy of material in framed structures, Phil. Mag. (Series 6), 8 (1904)589-597.
- 16) 小倉史崇, 斎藤公男, 岡田章, 宮里直也, 張弦梁システムを有する張弦シザーズ構造の構造特性に関する基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, (2002) 867-868.
- 17) 田中晃, 斎藤公男, 岡田章, 宮里直也, 人力による建方を考慮したヴォールト屋根の風荷重時における構造挙動-張弦シザーズの基本的な構造特性について-, 日本建築学会構造系論文集, (2006)95-102.
- 18) 陶山高資, 原隆, 坂田弘安, シザーズ型展開構造物の構造特性の解析的検討, 日本建築学会大会学術梗概集, (2007) 847-848.
- 19) 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.

20) 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(2010), 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TM」の架設実験, 安全問題研究論文vol.5(投稿中).

21) 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
フォーラム」論文集19 (2010) 65-68.

平成22年10月29日 受理