論　文

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

近広　雄希[1]・有尾　一郎[2]・小野　秀一[3]・中沢　正利[4]

[1] 広島大学大学院 工学研究科 博士課程後期在学中（〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4-1）
E-mail：d131584@hiroshima-u.ac.jp
[2] 広島大学大学院助教 工学研究院（〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4-1）
E-mail：mario@hiroshima-u.ac.jp
[3] 施工技術総合研究所 研究第二部 次長（〒417-0801 静岡県富士市大渕3154）
E-mail：ono@cmi.or.jp
[4] 東北学院大学教授 工学部（〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1）
E-mail：naka@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

伸縮可能なシザーズ機構を橋梁の構造形式に採用したモバイルブリッジは，アルミニウム合金押出材を主要な構造部材に用いた軽量構造物であるため，輸送時間や架設時間が大幅に短縮されるなどの工学的メリットが極めて大きく，被災後の緊急復旧ツールの一つとして注目されている．プロトタイプ機を用いた既往の基礎研究では，モバイルブリッジの基本的な展開機構や設計概念を構築してきたが，それらが実用レベルでも同様に成り立つかを検討する必要があった．本研究では，車両の通行を想定した実スケール規模の二格間シザーズ橋を実験的に試作し，実車両を用いた載荷実験により，その性能を評価した．また，車両載荷実験の結果をベースに，開発中である本橋の設計モデルを考案し，その設計値と実験値を比較，検証することにより，このモバイルブリッジの設計法を提案した．

キーワード：*Mobile Bridge™, Movable Bridge, Scissors Structure, Vehicle Loading Test, Frame Analysis*

1. はじめに

平成26年8月豪雨(2014.8)や九州北部豪雨(2012.7)をはじめ，近年，自然災害に起因する社会基盤構造物の被害が世界中で後を絶たない．特に，**写真-1**に示すような，落橋や洗掘等の橋梁被害により生じる交通ネットワークの断絶は，被災地住民の生活を脅かすのみならず，被災後の復旧対応やレスキュー活動を大きく左右するため，早期回復が求められる．しかしながら，一般的な災害現場は切迫した危険性と物理的な制約が多く存在するため，工事用車両や緊急車両の進入が困難であったり，十分な作業エリアを確保できないなどの問題が生じる．また，仮設現場の被災状況の程度にもよるが，国土交通省が所管している応急組立橋を用いた仮復旧工法でさえ，被災後の出動要請から供用に至るまで一週間以上の時間を要するのが現状である[1)]．

一方で，橋梁専門メーカーなどによる，橋梁パーツを予めモジュール化することで，現場施工の簡略化を図った技法や新しい軽量材料に着目した応急組立橋の開発研究の報告がある．しかし，これらの応急組立橋もまた，

写真-1　平成26年8月豪雨による
橋梁被害の一例（2014.8）

重機や架設ヤードの確保を前提とした現場依存性を持つため，根本的な早期復旧法の改善には未だ課題が残っており，復旧スピードを最優先とした対応策を事前に構築しておくことは，必要不可欠な要件である．

そこで著者らは，被災直後に人命救助や物資輸送を可能とする緊急アクセス路を迅速に確保するため，数時間での仮復旧を目標とした伸縮可能な仮設橋システム(Mobile Bridge™，以下MBと称す.)をこれまでに提案している[2),3)]．MBはMichellの構造最適化問題における研究成果[4)]をヒントに，はさみのようなX状の連鎖

機構を橋梁の構造形式に採用した展開，折畳み可能な緊急橋で，従来の上 / 下弦材を有するトラス橋とは本質的に異なる構造体である．展開構造の分野では，この機構をシザーズ機構と呼び，はさみ状の骨組み部材をピン回動で組み合わせた構造ユニットから構成される．

MB の当初の開発では，人が渡れる程度の小型実験橋を用い，シザーズ構造体の基本的な力学特性を明らかとしてきた[5)～10)]．しかし，MB の実用化を考える上で，小型実験橋の開発で培った要素技術や設計概念が実スケールサイズでも同様に成り立つかという寸法効果の影響を検討する必要があった．また，MB の設計法を構築する上で，シザーズ橋の計算・解析手法について理解を深める必要がある．

本研究では，MB の実用化のための基礎的な知見を得るために，小型車両の通行を想定した実スケールサイズの二格間シザーズ橋（以下 MB1.0[1)] と称す．）を試作し，基本的な性能評価を行う．MB1.0 の性能を評価するにあたり，実車両を用いた載荷実験を行い，その力学特性を明らかとする．また，既往の研究成果をベースに MB1.0 の解析モデル，理論モデルを考案し，それらの値と実験値を，比較，検証することで，実スケールサイズの MB に対する設計手法の有用性を明らかにする．

2. モバイルブリッジの設計概念

MB は折畳まれたシザーズユニットを対岸に向かって展開させ，先端部が対岸に着岸することで使用可能な状態となる．本体の先端部が対岸に届くことにより，両岸から反力を得ることができるため，本システムは，展開時および展開後と二種類の境界条件を持つことが想定される．そのため，シザーズユニットの展開状態に応じて，MB の断面力は大きく変化する．

本システムの優位性について，**図-1** に示す一定断面の連続体からなる梁構造を近似的に考える．展開中の最大負荷は，図中の Case1 に示すように伸展した片持ち状態で起きる．すなわち，シザーズ先端部が対岸側で反力を確保する寸前である．この時，根元部分に，

$$M_0 = -\frac{qL^2}{2} \tag{1}$$

の最大曲げモーメントが発生する．ここで q は自重による等分布荷重強度を示す．先端部が対岸で反力を得ることによって，構造体の境界条件が片持ち状態から，図中の Case2 に示すような単純梁状態となる．最大曲げモーメントは梁の中央部において，次式となる．

1）MB2.0 以降の最新の MB 開発では，今回の実験の床版とシザーズ部材とは異なるスペックのものを使用している．

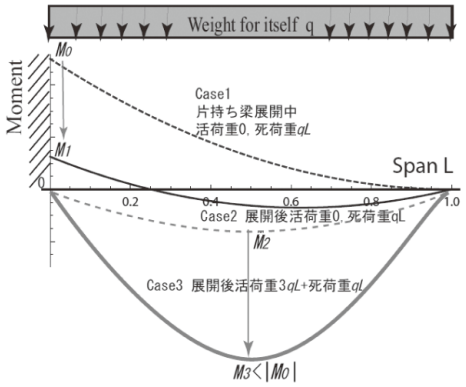


図-1　境界条件の違いによる MB の曲げモーメントの変化

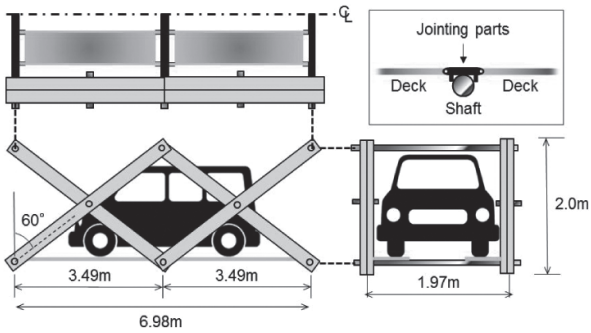


図-2　MB1.0 の概要図

$$M_2 = \frac{qL^2}{8} \tag{2}$$

ただし，

$$M_0 < M_a < M_y \tag{3}$$

を満たす必要がある．ここに，M_y は使用材料の降伏曲げモーメント，M_a は使用材料の設計曲げモーメントをそれぞれ示す．設計曲げモーメントは安全率 α を用いて，

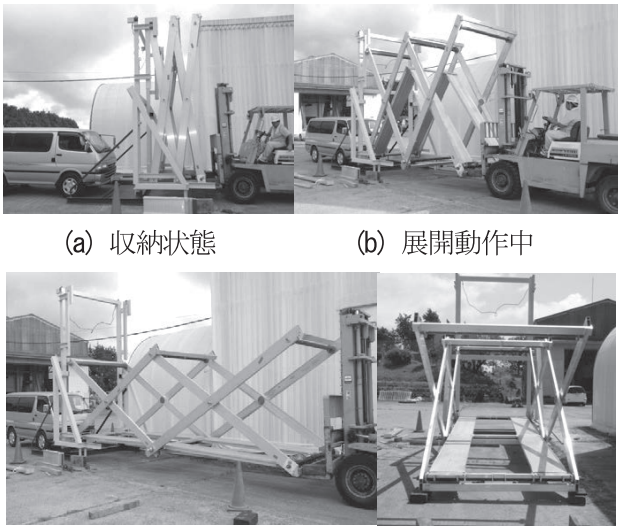
$$M_y = \alpha M_a \quad （ただし\alpha > 1） \tag{4}$$

と表される．例えば，抵抗曲げモーメントが根元部材の最大曲げモーメント $|M_0|$ まで耐え得ると考えるならば，活荷重を受ける梁の最大曲げモーメント M_3 は，Case3 に示すように $M_2 + M_{live} = M_3 \leqq |M_0|$ の範囲で使用可能となる．この時，活荷重 M_{live} は式(5)に示すように理論的に死荷重の三倍まで載荷可能となる．

$$\begin{aligned} |M_0| &= M_2 + M_{live} = \frac{qL^2}{8} + M_{live} \\ \therefore M_{live} &= \frac{qL^2}{2} - \frac{qL^2}{8} = \frac{3qL^2}{8} = 3M_2 \end{aligned} \tag{5}$$

3. 実験橋の概要

試作した MB1.0 の概要図を**図-2** に示す．MB1.0 は，二つのシザーズユニットが連なる伸縮可能な下路橋タイ



(a) 収納状態　(b) 展開動作中

(c) 展開完了　(d) 正面図

写真-2　展開動作時の MB1.0 の挙動

プのシザーズ橋である．展開後（シザーズ展開角：60° の場合），全長 7.0 m，全高 2.0 m となり，本体フレームとシャフト，ピン等の構造部品を含めた全質量はおよそ 860 kg となる．本体の軽量化のため，シザーズ構成部材にはアルミニウム合金 A6N01 材，床版にはアルミニウム合金 A6063 材を用いた押出材をそれぞれ使用している．さらに，自重による影響を低減させるために床版は，有効幅を一車輪相当に制限しており，シザーズ一格間ごとに左右の車輪分の二枚が敷設されている．また床版同士は，溝形材をベースとしたジョイント材を介して連結されている．前章の梁理論による MB の設計概念が MB1.0 でも同様に近似できると考えるならば，最大で死荷重の三倍，つまり約 2.5 t までの活荷重に耐えられることになる．

シザーズ部材が収納された状態から展開動作が完了するまでの MB1.0 の様子を**写真-2 (a)～(d)** にそれぞれ示す．展開構造体である MB1.0 は，**写真-2 (a)** のように，収納時にはコンパクトな状態で折畳まれている．使用の際には，**写真-2 (a)～(c)** のように本体シザーズ部を展開させることで架設され，橋として使用できる．また，収納時に折畳まれた状態であった床版は，シザーズ部材の展開動作に連動して展開され，本体シザーズ部の展開が完了すると同時に対岸への移動が可能となる．この機構により，シザーズ展開後に床版を敷設する時間が省かれ，架設時間を大幅に短縮することができる．展開された床版は格間ごとに定尺長で設置され，**図-2** 中に示されるように，MB 中央部の下シャフトの上部にジョイント材が重なる形で固定される．

4. アルミニウム合金製床版の曲げ耐荷力実験

本橋の車両載荷実験における，アルミニウム合金製床版の持つ曲げ耐荷力を実験的に評価する．

4.1　アルミニウム合金製床版の概要

MB1.0 に使用した車両走行用のアルミニウム合金製床版を**図-3** に示す．床版は一枚当たり全長 3200 mm，幅 500 mm であり，両端部には脱輪防止縁部が備わっている．材質は A6063-T5 材を用いており，幅 200 mm と幅 100 mm の押出中空材を溶接接合することにより断面を成形している．一 枚当たりの重量は 50 kgf である．

4.2　実験概要

アルミニウム合金製床版の輪荷重に対する曲げ強度を把握するため，三点曲げによる耐荷力実験を実施した．実験の様子を**写真-3** に示す．ジョイント部と床版の接合部である両端のピン部に ϕ 20 mm の丸鋼を通し，MB1.0 上での支持状況を再現した．荷重は床版の中央部に設置した載荷板を通じて，試験機により与えた．載荷板には Eurocode の橋梁デザインより，小型車両のタイヤ接地面積相当の 175 mm × 175 mm の鋼板とゴム板を使用した[11]．

4.3　実験結果

床版中央部の載荷点位置における荷重－変位曲線を**図-4** に示す．縦軸は試験機により与えた荷重（kN）を，横軸は試験機ヘッド部分の変位量（mm）をそれぞれ示す．荷重値が 1 kN まで 0.2 kN 刻みで，荷重値が 1 kN 以降

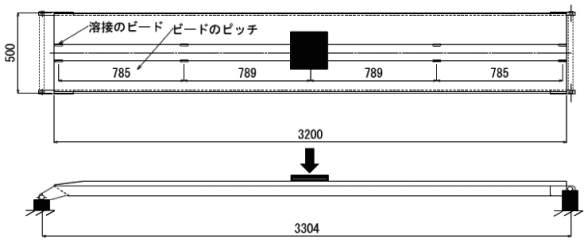


図-3　車両走行用のアルミニウム合金製床版

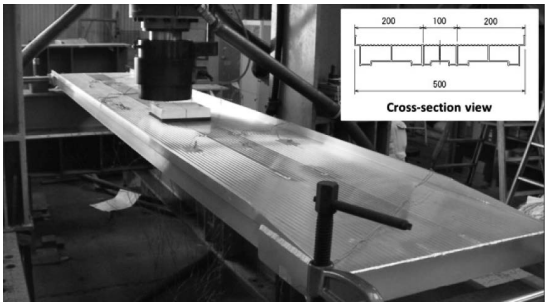


写真-3　三点曲げ実験の様子

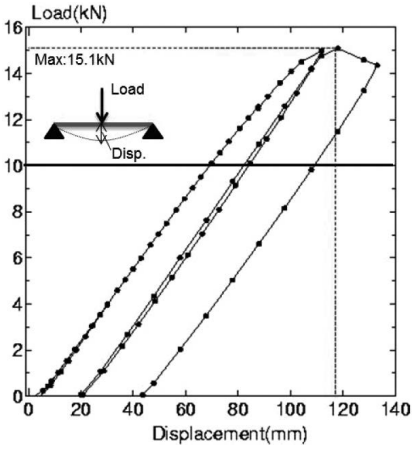


図-4　床版中央部の荷重－変位曲線

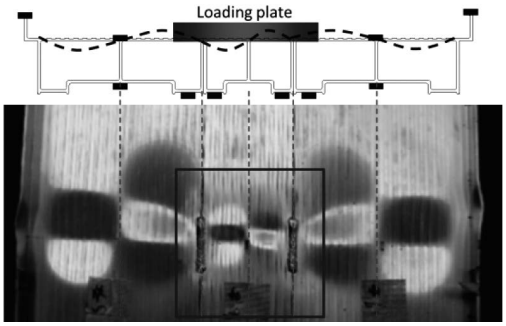


写真-4　床版中央部に生じた局部座屈の様相

は 1 kN 刻みで 15 kN まで載荷後，荷重を一旦除荷し，床版に生じた塑性ひずみと残留変位を計測した．荷重を除荷した後，試験機の操作を変位制御に切り替え，変位を 10 mm ごとに増分させることで再載荷した．床版は，最大荷重 15.1 kN，中央変位が 117.3 mm 時に表面の中央部が局所的に座屈破壊し，耐荷力を失った．

床版の中央部に発生した局部座屈のパターンを**写真-4** に示す．写真内の実線部は載荷板の設置位置を，破線部は床版の断面内に存在するリブ材の位置をそれぞれ示す．また，断面図内に示す破線部は，除荷後に観測された床版表面の凹凸形状を示す．この時，表面の座屈形状に着目すると，リブ材の位置に応じて座屈の凹凸形状が変化していることが分かる．これは，断面内のリブ材が補剛材のような役割をしており，床版の表面で局所的な座屈が生じているためである．

4.4　床版中央部における応力分布状態

試験機による荷重値が 4.5 kN，5.0 kN，5.5 kN 時における，床版中央部の応力分布状態を**図-5** に示す．**図-5** の断面図内にグレーの長方形でマーキングされた箇所は，ひずみゲージを貼付した位置を示す．また**図-5** の図中に示す σ_y ラインは，JIS 規格により最低保証される A-6063 材の降伏応力の値である σ_y=110 MPa を示す．

図-5 より，荷重値が 5.0 kN の時に下面側の凸状部が先行して降伏したことが分かる．よって本実験から，MB1.0 に適用したアルミニウム合金製床版は，一枚当たり 5.0 kN までの荷重に対して降伏応力内で使用できることが明らかとなった．また**写真-2(d)** のように，MB1.0 には一格間当たりに二枚の床版が設置されているため，車軸単位で 10.0 kN 以内の車両の通行が可能であることが示された．

5.　MB1.0 を用いた車両載荷実験

5.1　車両載荷実験の概要

写真-2(c) のように単純支持状態とした MB1.0 を用いて車両の載荷実験を実施した．**図-6** に本実験における車両の載荷位置を示す．一格間目の床版中央部と本体中央部に着目し，前輪，車両中央部，後輪が一致した場合に車両を MB1.0 上で停車させ，静的なひずみ値を計五

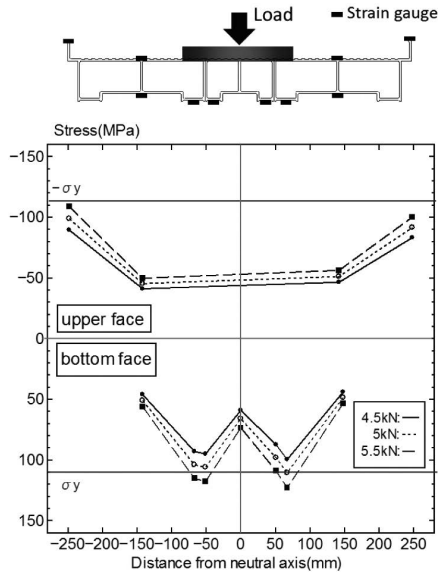


図-5　床版中央部における断面内の応力分布状態

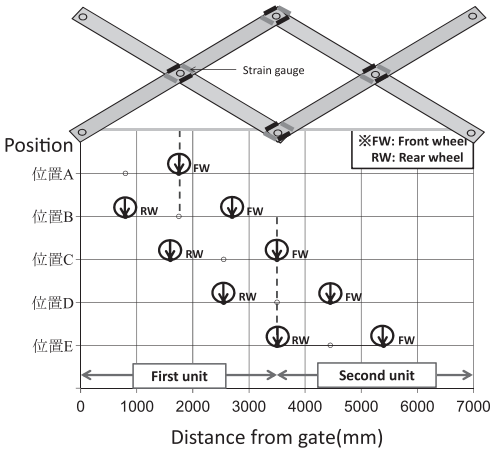


図-6　ひずみゲージ位置と車両載荷位置の関係図

パターン測定した．位置 A と位置 B では床版の中央部に，位置 C ～位置 E では MB1.0 の中央部に着目して計測を行った. この時, ひずみゲージは図中に示すように，各ピボット部およびヒンジ部の上，下縁部にそれぞれ貼付した.

車両はホンダ製 STREET と日産製 AD Van の二種類の車両を用い，三ケースの荷重を与えた．車両載荷実験に用いた車両と，それらの荷重値を**表-1** に示す．STREET は全長 × 全幅 × 全高が 3195 mm × 1395 mm × 1870 mm, 車軸間距離は 1900 mm であり, 運転手を含む 9.6kN と 11.8kN の二通りの荷重を実験に用いた．AD Van は全長×全幅×全高が 4370 mm × 1895 mm × 1510 mm, 車軸間距離は 2535 mm であり，運転手を含む 13.8kN の荷重を実験で用いた．この時，荷重 1 と荷重 2 では車両の荷重増加によるひずみ値の変化を，荷重 2 と荷重 3 では車両の荷重増加と車種の違いによるひずみ値の変化を調べる.

5.2　平面骨組解析

本解析には，Autodesk 社の CAD システムに連動した汎用プログラム（ANSYS）を用い，MB1.0 のモデル化および載荷実験の解析的検討を行った.

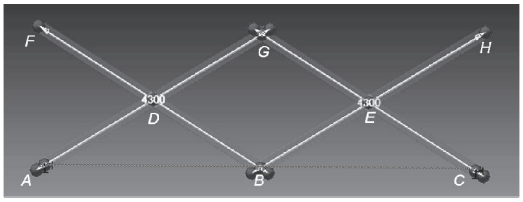
5.2.1　解析モデルの概要

二種類の解析モデルを**図-7 (a)** と **(b)** に示す．**図-7 (a)** は床版を考慮した解析モデル，**図-7 (b)** は床版を考慮していない簡易的な解析モデルである．車両載荷実験は，弾性範囲内での載荷を前提としているため，本解析も弾性解析として行った. また, 要素は全て梁要素を用いた. 床版は，節点 AB 間および節点 BC 間に対して線形の梁要素を与えることで再現した．ピボット部とヒンジ部は，**図-8** の概略図が示すように，各シザーズ部材の結合部に回転を許容する要素を共有させることでモデル化を行った.

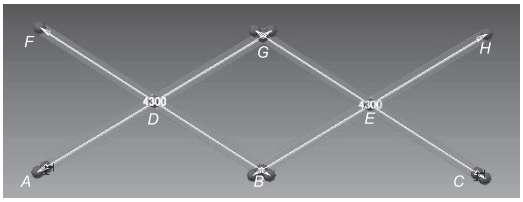
車両の輪荷重は，**図-7 (a)** の床版を考慮した解析モデルでは，床版上の輪荷重の位置に対して，集中荷重として作用させた．**図-7 (b)** の簡易解析モデルでは，床版に作用する輪荷重を，シザーズ部材が交差するピン接合部（点 A，点 B，点 C）に対して，等価節点外力として与えた．境界条件は，両モデルともに端部の点 A と点 C をピン固定とし，両端ピン支持状態の梁とした.

表-1　車両載荷実験における荷重条件

Case	Vehicle	Loading condition(kN)		
		Total	Front axle	Rear axle
荷重 1	STREET	9.6	5.2	4.4
荷重 2	STREET	11.8	6.3	5.5
荷重 3	AD van	13.8	7.5	6.3



(a) 床版を考慮した解析モデル



(b) 骨組のみの簡易解析モデル

図-7　平面骨組解析モデル

5.2.2　平面骨組解析の結果の一例

解析結果の一例として，**表-1** の荷重 1 に相当する STREET（9.6 kN）を MB1.0 の中央に載荷した場合の軸

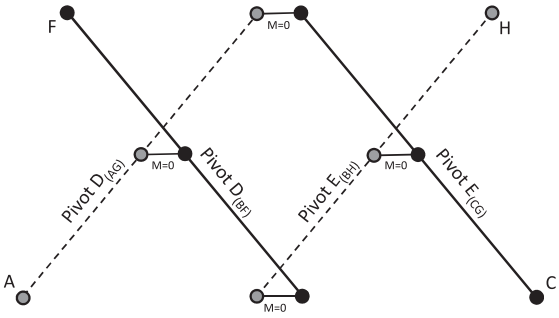
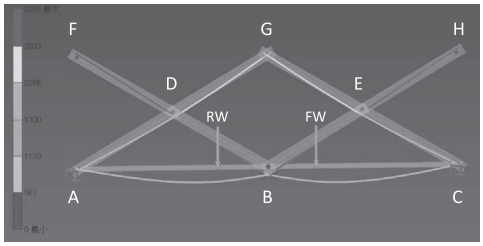
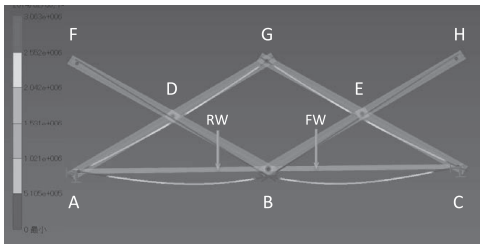


図-8　部材交差部のモデル化



(a) 軸力分布図



(b) 曲げモーメント分布図

図-9　床版を含む MB1.0 解析モデルの解析結果の一例（位置 D）

表-2　一格間目のピボット部における各応力値（MPa）

Model	With deck		Without deck	
	σ_M	σ_N	σ_M	σ_N
位置 A	-9.7	0.32	-10.2	0.34
位置 B	-18.9	0.62	-19.0	0.64
位置 C	-27.0	0.89	-27.4	0.90
位置 D	-26.7	0.88	-26.7	0.89
位置 E	-26.3	0.87	-25.4	0.85

力分布図を**図-9(a)**に，曲げモーメント分布図を**図-9(b)**にそれぞれ示す．軸力分布図に着目した時，中央ヒンジ部の点 B と各ピボット部の点 D，点 E の間に，最大の引張力が発生している．また，曲げモーメント分布図に着目した時，支点部から延びる部材 AG および部材 CG のピボット部で最大値が生じている．これは，載荷により節点 BD，節点 BE 間に強い引張力が作用し，ピボット部の点 D と点 E が内側に向かって引張られることにより，部材 AG と部材 CG に大きな曲げモーメントが生じていると考えられる．

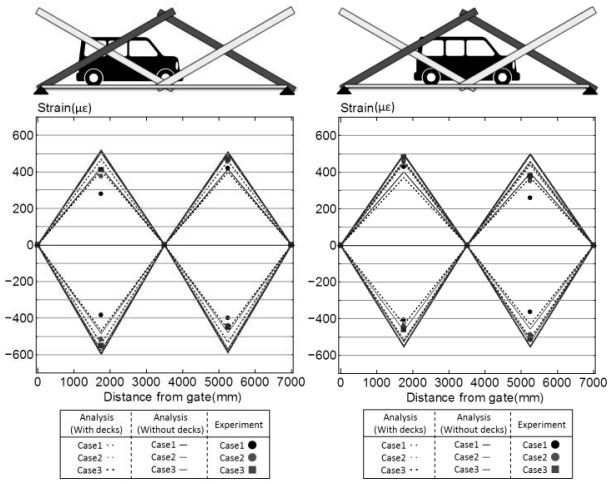
STREET(9.6 kN)を使用した荷重 1 の条件下で，一格間目のピボット部である点 D に生じた各応力値(MPa)を**表-2** にまとめる．**表-2** より，曲げ応力に比べ軸応力の影響は 5%未満とわずかであり，MB1.0 は曲げモーメントによる影響が支配的であることが分かる．発生した曲げ応力の値は，車両が MB1.0 の中央に近づくにつれて大きくなっている．また，両モデルの解析結果を比較した場合，床版を考慮した解析モデルよりも簡易解析モデルの方が大きな応力値を得た．これは，床版の有無により力の発生分布が異なることを示し，床版が存在しない場合の方が部材に生じる負荷が大きいと分かる．しかしながら，最大でも 4.9%と小さな誤差であったため，床版の有無が MB1.0 のモデル化に与える影響は少ないと考えられる．

5.3　実車両を用いた載荷実験の結果

車両載荷実験および骨組解析の結果として，大きなひずみ値が得られた，**図-6** の位置 C と位置 D に相当する二つの載荷ケースについて着目し，MB1.0 に生じたひずみ値を考察する．

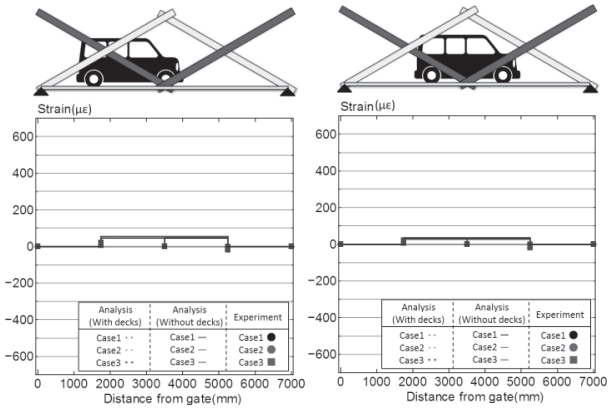
図-10(a)，**(b)**は支点部から延びる「∧型」に配置されたシザーズ部材に生じたひずみ値の分布状態を示す．この時，横軸は車両進入部からの距離を，縦軸はシザーズ構成部材に生じたひずみ値を表す．グラフ内において実験による計測値は点で，床版を考慮したモデルの解析結果は破線で，床版を含まない簡易モデルの解析結果を実線でそれぞれ示す．位置 C と位置 D の両結果に着目したとき，部材中央のピボット部においてひずみ値が最大値／最小値となった．これは，部材中央部でシザーズ部材に対する曲げひずみが最大値／最小値を取るためで，人用の小型実験橋を用いた既往の研究結果[7)～9)]と同様の傾向となった．最大ひずみは，**図-10(a)**より，AD Van(13.8 kN)積載時で 512 $\mu\varepsilon$ となり，弾性範囲内に収まる結果となった．また位置 C では一格間目，位置 D では二格間目の圧縮ひずみが引張ひずみに比べ 50 $\mu\varepsilon$ から 100 $\mu\varepsilon$ ほど大きく，車両の重心位置があるシザーズユニット上での部材圧縮力が増加する傾向が得られた．これは，前後輪の輪荷重差による偏心した荷重が MB1.0 に作用することにより，床版連結部で局所的な曲げモーメントが生じ，各シザーズ構造部材に影響を与えたのではないかと考えられる．

ここで同車種を用いた STREET の最大ひずみの増分変化に着目すると，荷重 1・2 間では 2.2 kN(18.6%)の車両の荷重増加に伴い，最大ひずみ値が 8.5%増加した．また，異車種を用いた荷重 2・3 では 2.0 kN(14.5%)の車両の荷重増加に伴い，最大ひずみ値が 4.8%増加した．



(a) 前輪が MB1.0 の中央　(b) 車両が MB1.0 の中央

図-10　∧型に配置された部材のひずみ値分布



(a) 前輪が MB1.0 の中央　(b) 車両が MB1.0 の中央

図-11　∨型に配置された部材のひずみ値分布

この時，荷重2・3間の最大ひずみの増分が荷重1・2間よりも小さいのは，普通車両であるAD Vanの方がSTREETに比べ，車軸間距離が大きいためである．

図-11(a)，**(b)**は「∨型」に配置されたシザーズ部材に生じたひずみ値の分布状態を示す．**図-11(a)**，**(b)**より，実験値および解析値ともに，10 $\mu\varepsilon$ 程度のひずみが確認でき，250N程度の軸力がピボット－ヒンジ間に作用していることが分かる．これは，ピボット－ヒンジ間においては車両載荷により軸力が生じるが，部材端部は拘束されていないフリーな状態であるため，荷重に対してほとんど抵抗をしていないと考えられる．

以上より，MB1.0のような二格間シザーズ橋では，∧型に配置された部材が車両による荷重に対して主に抵抗し，∨型に配置された部材にはほとんどひずみが生じていないことが分かった．そのため，MB1.0を設計する上で，∧型に配置された部材に生じる負荷の変化に注意しなければならない．

5.4　実験値および解析値の比較

解析モデルの妥当性を評価するため，載荷実験およびフレーム解析により得られた両ひずみ値を比較する．両結果より，最大もしくは最小ひずみを6%程度の差で捉えることができ，かつ解析値は実験値に比べて大きな結果となった．この原因の一つとしては，解析における輪荷重の取り扱い方の影響ではないかと考えられる．すなわち，本解析では輪荷重を集中荷重としたが，実際にはタイヤ接地幅を持つため，差が生じたと考えられる．

以上のことより，車両積載時におけるシザーズ部材のひずみ値分布は，車両の輪荷重を等価節点外力として作用させることで実測値よりも大きく評価され，設計上安全側で算定できることが分かった．

6.　シザーズの平衡力学理論の適用

既往の研究[2),5)]においてシザーズ構造体の設計は，弾性梁理論，釣合条件式による平衡力学理論をベースに行われていた．本章では，簡易解析モデルの考え方を応用し，車両通行を想定したシザーズ構造体の設計モデルの構築について検討をする．

6.1　単位シザーズの力学

各節点に集中荷重が作用する単位シザーズのFree Body Diagram（以下，FBDと称す.）を**図-12**に示す．点Cに回転を許容するピボットが存在し，二本のシザーズ部材は互いにピン結合されている．ここで，水平方向と鉛直方向の力の釣合い条件より，次式が求まる．

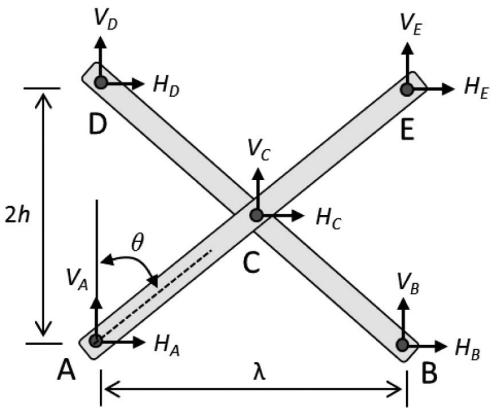


図-12　単位シザーズのFBD

$$\sum H = (H_A + H_D) + (H_B + H_E) + H_C = 0, \tag{6}$$

$$\sum V = (V_A + V_D) + (V_B + V_E) + V_C = 0 \tag{7}$$

また格間長λと高さ$2h$を用いて各節点に対するモーメントの釣合式を立てると，次の式(8)-(11)となる．

$$\sum M_{at\,A} = (H_D + H_E)2h - (V_B + V_E)\lambda - \frac{\lambda}{2}V_C + hH_C = 0, \tag{8}$$

$$\sum M_{at\,B} = (H_D + H_E)2h - (V_A + V_D)\lambda + \frac{\lambda}{2}V_C + hH_C = 0, \tag{9}$$

$$\sum M_{at\,D} = (H_A + H_B)2h - (V_B + V_E)\lambda - \frac{\lambda}{2}V_C - hH_C = 0, \tag{10}$$

$$\sum M_{at\,E} = (H_A + H_B)2h - (V_A + V_D)\lambda + \frac{\lambda}{2}V_C - hH_C = 0 \tag{11}$$

シザーズを構成する各部材（AE，DB）に着目し，ピボット部（点C）回りのモーメントの釣合式を立てる．

$$\text{Member of AE}: M_C = (-H_A - H_E)h + (V_A + V_E)(\lambda/2) = 0, \tag{12}$$

$$\text{Member of DB}: M_C = (H_B + H_D)h + (V_B + V_D)(\lambda/2) = 0 \tag{13}$$

この時，式(8)-(11)の四式を整理すると，

$(8)-(9): (V_B + V_E)\lambda - (V_A + V_D)\lambda = 0 \Rightarrow$ 式（6）に一致,
$(8)-(10): (H_D - H_E)2h - (-H_A + H_B)2h = 0 \Rightarrow$ 式（7）に一致,
$(10)-(11): (V_B + V_E)\lambda - (V_A + V_D)\lambda = 0 \Rightarrow$ 式（6）に一致,
$(9)-(10): (H_D - H_E)2h - (-H_A + H_B)2h = 0 \Rightarrow$ 式（7）に一致

上記のように，全て式(6)，式(7)を用いて表すことが可能であり，独立な式は式(6)，(7)，(12)，(13)の四式のみということになる．この四式を整理し，行列形で表示すると，

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -2h & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2h & \lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_A \\ V_A \\ H_D \\ V_D \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2h & -\lambda \\ -2h & -\lambda & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_B \\ V_B \\ H_E \\ V_E \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} H_C \\ V_C \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow [L_{AD}]\{AD\} = -[R_{BE}]\{BE\} - \{Z_C\} \tag{14}$$

の関係式を得る．ここで，$\{AD\}$ は $\{H_A, V_A, H_D, V_D\}$ から構成される 4 行の外力ベクトルを，$\{BE\}$ は $\{H_B, V_B, H_E, V_E\}$ から構成される 4 行の外力ベクトルを，$[L_{AD}]$ は外力ベクトル $\{AD\}$ に対する 4 × 4 行列の釣合マトリックスを，$[R_{BE}]$ は外力ベクトル $\{BE\}$ に対する 4 × 4 行列の釣合マトリックスをそれぞれ示す．式(14)に境界条件，荷重条件などの与条件を考慮することで未知の支点反力を算定することが可能となる．また部材に発生する断面力は，算出した反力(H_i, V_i)を用いると，式(15)のシザーズ部材に対する軸力 N_i とせん断力 S_i の関係式が導出される．

$$\begin{Bmatrix} N_i \\ S_i \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_i \\ V_i \end{Bmatrix} \tag{15}$$

6.2　MB1.0 の理論モデル化

前節の単位シザーズの平衡力学をベースに MB1.0 の理論モデルを構築する．

6.2.1　二格間シザーズの力学

単純支持状態にある二格間シザーズの FBD を**図-13 (a)** に，各シザーズユニットにおける FBD を**図-13 (b)** にそれぞれ示す．各節点に水平力と鉛直力が作用するとき，前節の単位シザーズの場合と同様に，力の釣合条件式を連立することにより，各ユニットに対して関係式を得ることができる．一格間目のシザーズユニットに対して，

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2h & -\lambda \\ -2h & -\lambda & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_{CL} \\ V_{CL} \\ H_{GL} \\ V_{GL} \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2h & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_A \\ V_A \\ H_B \\ V_B \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} H_D + H_F \\ V_D + V_F \\ 0 \\ 2hH_F + \lambda V_F \end{Bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow [R^1{}_{CGL}]\{CG_L\} = -[Y^1]\{AB\} - \{Z_{DF}\}$$

$$\therefore \{CG_L\} = -[R^1{}_{CGL}]^{-1}[Y^1]\{AB\} - [R^1{}_{CGL}]^{-1}\{Z_{DF}\} \tag{16}$$

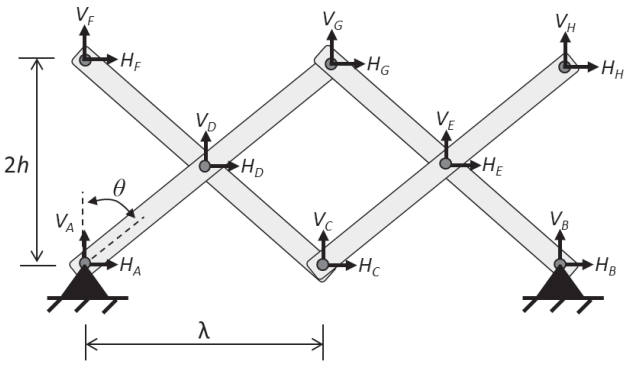
と求められる．ここで，$\{CG_L\}$ は $\{H_{CL}, V_{CL}, H_{GL}, V_{GL}\}$ から構成されるヒンジ部での 4 行の内力ベクトルを，$\{AB\}$ は $\{H_A, V_A, H_B, V_B\}$ から構成される支点部での 4 行の外力ベクトルを，$[R^1{}_{CGL}]$ は内力ベクトル $\{CG_L\}$ に対する 4 × 4 行列の釣合マトリックスを，$[Y^1]$ は支点部に作用する外力ベクトル $\{AB\}$ に対する 4 × 4 行列の釣合マトリックスをそれぞれ示す．次に二格間目のシザーズユニットに対して，

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -2h & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2h & \lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_{CR} \\ V_{CR} \\ H_{GR} \\ V_{GR} \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2h & -\lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_A \\ V_A \\ H_B \\ V_B \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} H_E + H_H \\ V_E + V_H \\ 2hH_H - \lambda V_H \\ 0 \end{Bmatrix}$$

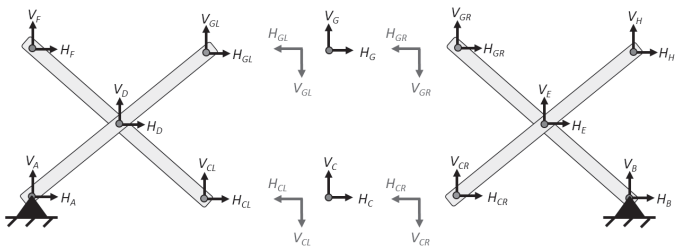
$$\Leftrightarrow [L^2{}_{CGR}]\{CG_R\} = -[Y^2]\{AB\} - \{Z_{EH}\}$$

$$\therefore \{CG_R\} = -[L^2{}_{CGR}]^{-1}[Y^2]\{AB\} - [L^2{}_{CGR}]^{-1}\{Z_{EH}\} \tag{17}$$

となる．一格間目と同じように，$\{CG_R\}$ は $\{H_{CR}, V_{CR}, H_{GR}, V_{GR}\}$ から構成されるヒンジ部での 4 行の内力ベクトル



(a) 全体系



(b) 各ユニットの FBD

図-13　二格間シザーズの FBD

を，$[L^2_{CGR}]$は内力ベクトル$\{CG_R\}$に対する4×4行列の釣合マトリックスをそれぞれ示す．また，二つのシザーズユニットを連結する点C，点Gのヒンジ部について，$\{H_C, V_C, H_G, V_G\}$から構成される4行の外力ベクトル$\{CG\}$は内力ベクトル$\{CG_L\}$，$\{CG_R\}$を用いて表現でき，次式が成立する．

$$\begin{Bmatrix} H_C \\ V_C \\ H_G \\ V_G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_{CL} \\ V_{CL} \\ H_{GL} \\ V_{GL} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} H_{CR} \\ V_{CR} \\ H_{GR} \\ V_{GR} \end{Bmatrix} \tag{18}$$

$$\Leftrightarrow \{CG\} = \{CG_L\} + \{CG_R\}$$

上式に対して，式(16)と式(17)を代入し，整理すると，

$$-([R^1_{CGL}]^{-1}[Y^1]+[L^2_{CGR}]^{-1}[Y^2])\{AB\}=\{CG\}+[R^1_{CGL}]^{-1}\{Z_{DF}\}+[L^2_{CGR}]^{-1}\{Z_{EH}\} \tag{19}$$

の関係性を得る．式(19)の$-([L^1_{CG}]^{-1}[Y^1]+[R^2_{CG}]^{-1}[Y^2])$項が逆行列を持つ時，未知の反力$\{AB\}$を算出することができる．

6.2.2　輪荷重のモデル化

前項をふまえ，MB1.0上を移動する車両の影響を考慮した理論モデルについて検討をする．前輪P_1が支点部よりXの距離に，後輪P_2がX-dの距離に位置する，床版を考慮したMB1.0の理論モデルを**図-14**に示す．ここで，dは車両の車軸間距離を示す．また，床版上の各輪荷重P_1，P_2は，床版を伝わりMB1.0の格点部に節点力V_1-V_3として作用すると考える．この時，床版から格点部に伝達される節点力V_1-V_3は，各輪荷重P_1，P_2の位置によって**表-3**のように変化する．節点力V_1-V_3をMB1.0の各節点A，B，Cにそれぞれ作用させることにより，式(19)を適用することができる．つまり，**図-13**の二格間モデルに対して，$H_C=H_D=H_E=H_F=H_G=H_H=0$，$V_D=V_E=V_F=V_G=V_H=0$，$V_A=-V_1$，$V_B=-V_2$，$V_C=-V_3$を条件として与えることにより，未知である反力，各節点力が導出され，移動荷重下におけるMB1.0の力学特性を把握することが可能となる．

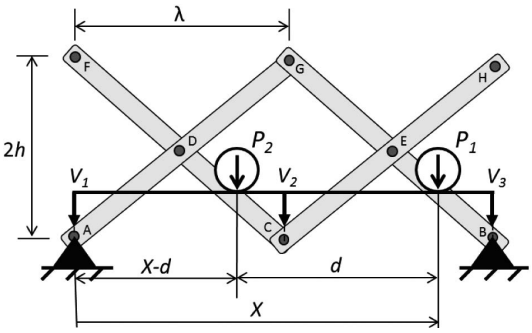


図-14　移動荷重を受けるMB1.0の理論モデル

数値計算の一例として，**表-1**の荷重3に相当するAD Van（13.8 kN）が移動下の，一格間目のピボット部（点D）の縁ひずみ値を**表-4**のScissors theoryに示す．算出した最大縁ひずみは，実験値と同様に，前輪がMB1.0の中央部に一致した位置Cで得られた．また引張域と圧縮域で，ほぼ同程度の縁ひずみの値が得られているため，実験結果と同様に曲げひずみが支配的なことが分かる．

6.3　実験値と解析値との比較

車両載荷実験における理論計算値を，実験値，解析値と比較し，理論モデルの妥当性を評価する．ここで解析値は，床版を考慮した解析結果を示す．実験結果と比較した場合，位置Aの最小値では20％程度の誤差は生じたが，車両を載荷した位置Bから位置Eでは10％程度の誤差に収まり，簡易的に，最大縁ひずみもしくは最小縁ひずみを予測することができた．これらの誤差については，5.4節での考察と同様に輪荷重のモデル化の影響を，さらには寸法効果が与える影響について今後検討する余地がある．また床版を含んだ解析結果と実験値と比較した場合，位置Dでは若干の誤差を含むものの，安全側に10％以内の誤差で評価することができた．そのため，床版の影響を考慮した理論モデルを構築することにより，計算精度はさらに向上すると考えられる．

表-4　ピボット部（点D）における縁ひずみ値

Case	Experiment		FE analysis		Scissors theory	
位置A	-285	215	-247	215	-207	203
位置B	-487	374	-483	421	-406	396
位置C	-550	411	-596	517	-511	499
位置D	-459	486	-552	497	-487	475
位置E	-468	346	-491	476	-462	452

表-3　前輪の位置Xにおける節点力の変化

Nodal force	Section				
	$0 \le X \le d$	$d \le X \le \lambda$	$\lambda \le X \le \lambda + d$	$\lambda + d \le X \le 2\lambda$	$2\lambda \le X \le 2\lambda + d$
V_1	$P_1(1-\frac{X}{\lambda})$	$P_1(1-\frac{X}{\lambda})+P_2(1-\frac{X-d}{\lambda})$	$P_2(1-\frac{X-d}{\lambda})$	0	0
V_2	$\frac{P_1 X}{\lambda}$	$\frac{P_1 X}{\lambda}+\frac{P_2(X-d)}{\lambda}$	$\frac{P_1(2\lambda-X)}{\lambda}+\frac{P_2(X-d)}{\lambda}$	$\frac{P_1(2\lambda-X)}{\lambda}+\frac{P_2(2\lambda+d-X)}{\lambda}$	$\frac{P_2(2\lambda+d-X)}{\lambda}$
V_3	0	0	$\frac{P_1(X-\lambda)}{\lambda}$	$\frac{P_1(X-\lambda)}{\lambda}+\frac{P_2((X-d)-\lambda)}{\lambda}$	$\frac{P_2((X-d)-\lambda)}{\lambda}$

7. 結語

本研究より明らかになったことを以下にまとめる.

1) MB の実スケール規模の実験橋を試作し，基本的なシザーズ骨組および床版の連動展開動作が成り立つことを実証した.
2) アルミニウム合金製床版を用いた三点曲げ実験より，終局強度および破壊形状を明らかとし，車両載荷に対する床版の安全性を評価した.
3) 車両載荷実験を通じ，MB1.0 のシザーズ部材に生じたひずみ値の分布状態を明らかとし，支点部から延びる「∧型」に配置された部材に対する曲げモーメントの影響が支配的であることが分かった.
4) 最大 13.8 kN の車両の荷重に対してシザーズ部材が弾性ひずみ内であることを確認し，車両通行時の安全性を示した.
5) 二種類の骨組解析から，MB1.0 の簡易モデルの妥当性を示唆した．また，シザーズの平衡力学理論を応用することにより，MB1.0 の理論モデルを構築した.
6) 解析値および理論値を車両載荷実験の結果と比較した場合，最大縁ひずみと最小縁ひずみはいずれも 10% 以内の誤差となり，MB の設計を行う上で妥当な値を得た.

謝辞：本研究は研究代表者有尾一郎の平成 23-25 年度科学研究費基盤研究(B)の研究成果の一部である．また，MB1.0 の試作とアルミニウム合金床版の実験供試体の提供にあたり，星軽金属工業株式会社，株式会社アカシン，三協立山株式会社三協マテリアル社の協力を頂いたので，ここに深く感謝申し上げる．さらに，MB 開発にあたり，貴重な意見とアドバイスを頂いた多くの関係者に感謝申上げる.

参考文献

1) 稲垣考：応急組立橋の架設と供用上の課題，橋梁と基礎，Vol.46，No.8，pp.87-90，2012.
2) 有尾一郎，P. Pawlowski，J. Holnicki-Szulc：災害用の軽量展開構造系の設計概念と構造解析，土木学会全国大会年次学術研究講演，CD - ROM，2007.
3) 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，土木学会全国大会第一部門，CD - ROM，2009.
4) 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，Vol.7，pp.179 - 184，2006.
5) 古川祐輔，有尾一郎，田中義和，近広雄希，作野裕司，椿涼太：シザーズ機構を持つモバイルブリッジの架設動的実験とその解析，広島大学大学院工学研究院研究報告，Vol.59，No.1，2010.
6) 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，pp.104 - 106，2009.
7) 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，pp.108 - 111，2009.
8) 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，Vol.5，pp.133 - 138，2010.
9) Masatoshi Nakazawa and Ichiro Ario : Structural Characteristics of Scissors type-Emergency Bridges : Australian Small Bridges Conference 5th, Gold Coast, 2012.
10) 近広雄希，有尾一郎，田中義和，中沢正利：スマートブリッジ概念に基づく折畳み型の緊急復旧対策用モバイルブリッジの研究開発，広島大学大学院工学研究科研究報告，Vol.60，No.2，2011.
11) Luca Sanpaolesi and Pietro Croce : Handbook 4, Design of bridges, Book by Leonardo da Vinci Pilot Project, 2005.
12) 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，平成 25 年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集，pp.49 - 54，2013.

（2014.3.26 受付，2014.11.14 採用決定）

EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL PROPERTY AND SIMPLE DESIGN METHOD OF FOLDING TYPE OF EMERGENCY BRIDGE

Yuki CHIKAHIRO[1], Ichiro ARIO[2], Syuichi ONO[3] and Masatoshi NAKAZAWA[4]

[1] Graduate Student, Graduate school of Civil & Environmental Engineering, Hiroshima University
[2] Associate Professor, Graduate school of Civil & Environmental Engineering, Hiroshima University
[3] Vice manager, Second Research Division, Japan Construction Method and Machinery Research Institute, JCMA
[4] Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Tohoku Gakuin University

Mobile bridge which is applied scissors mechanism to structural form of bridge is developed as a rapid restoration tool after a disaster, because it is the lightweight structure with use of aluminium alloy materials to the main member and has the engineering merits such as reduction of transit time and construction time. From the previous study, although we had been studying about the basic design concept and deployment mechanism based upon an experimental small bridge, it was necessary to consider whether these were established in the real sized mobile bridge as with the experimental small bridge. In this study, we produced the two unit scissors type of mobile bridge experimentally which is assumed to load the vehicle, and we did performance evaluation by vehicle loading test. Moreover, the simple design and the analysis model based on the vehicle loading test were built. In the design of the bridge engineering, basically validation for real-sized mobile bridge was obtained by comparing the consistency among the experimental, analytical and theoretical results.