

優秀論文賞 (2)

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

広島大学大学院 工学研究科	近広 雄希
広島大学大学院 工学研究院	有尾 一郎
施工技術総合研究所 研究第二部	小野 秀一
東北学院大学 工学部	中沢 正利

1. はじめに

最近、九州北部豪雨(2012.7)や東日本大震災(2011.3)などの広域な地域災害をはじめ、自然災害に起因する社会基盤構造物の被害は世界中で後を絶たない。特に、写真-1に示す流橋や地すべり等の被害による交通ネットワークの断絶は、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、早期回復を優先すべき課題の一つである。しかしながら、一般的な災害現場は切迫した危険と物理的に制約された条件が多く、工事車両や緊急車両等の進入が困難であり、十分な作業エリアが確保できないなどの問題がある。また各地方整備局が所持している応急組立橋を用いた交通路復旧法でさえ、被災後の出動要請から供用に至るまで1週間以上を要する¹⁾。

一方で、橋梁パーツを予めモジュール化することにより現場施工作业を簡略化させる技法²⁾やFRP³⁾、空気膜⁴⁾などの軽量素材を用いた新しい応急組立橋の開発研究を各橋梁メーカーが行っている。しかし、これらの応急組立橋もまた重機や架設ヤードの使用など現場依存性を持つため、根本的な早期復旧法の改善には至っていない。

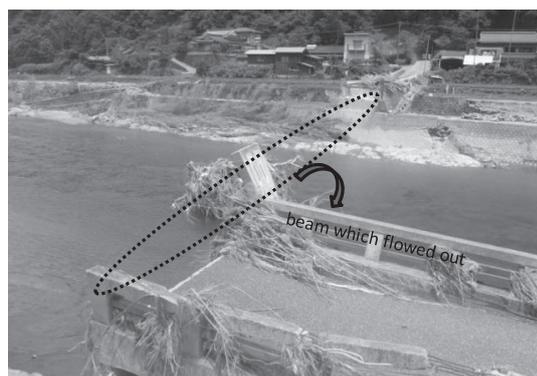


写真-1 集中豪雨による流橋被害例 (2012.7)

以上のように、災害が多い我が国でさえ「復旧スピード」を最優先としたツールは乏しく、今後の被災に備えた新しい緊急仮設システムを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、「人命救助」や「緊急輸送路の確保」を主眼に、被災直後の緊急対応性を重視し、数時間で緊急的にも仮復旧が可能な折畳み仮設橋システム(モバイルブリッジ、以下MBと称す)をこれまでに提案している^{5), 6)}。本稿では、現在開発中であるMBの概要と実車両を用いた載荷試験結果について報告する。

2. 緊急折畳み橋モバイルブリッジについて

MBはMichellの構造最適化問題における研究⁷⁾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する緊急折畳み橋で、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体から構成される。このように、構造物全体を折り畳める構造にすることで、優れた収納性・運搬性・架設性を生み、これまで問題であった重機による組立や架設ヤードの確保が不要となり、現場ニーズに即した施工問題に対応できると考えられる。

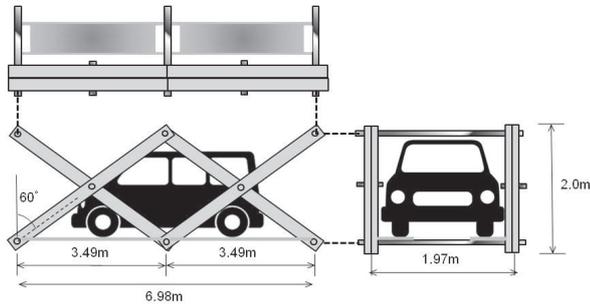
しかし、シザーズ構造系をはじめ折畳み構造体は仮設ドーム、昇降機、宇宙構造物以外に積極的な活用がされてこなかった。まして橋梁構造になると自重の影響に加えて、車両等の活荷重が問題視されるため、構造力学上では実現不可能もしくは不安定構造物と認識され、土木構造物への応用はこれまでに少ない。例えば、歩道橋⁸⁾やアルミニウム合金製応急組立橋⁹⁾などへのデザイン設計や解析的検討までに留まり、軍事橋などの特殊な例を除いては実現に至っていない。そのため、設計概念や力学的に未明な部分も多い。

著者を含む当研究開発グループでは、これまでに人が渡れる程度の小型実験橋に基づいた基礎実験を実施し、力学特性の把握やMBの設計法の構築についての基礎研究を重ねてきた^{10)~15)}。しかしながら、歩道橋スケールでのMBの設計計算や解析手法が実スケールサイズのシザーズ構造体でも同等に成立するかどうかの確認が必要である。そこで本研究では、MBの使用限界の評価として小型車両1台程度の通行を想定した2格間部分試作機(以下MB1.0と称す)を実験的に試作し、力学実験を実施する。活荷重として実車両を用いた車両通行実験をすることにより、MB1.0上における車両位置と応力分布の変化を捉え、車両通行

時におけるシザーズ橋の安全性および力学特性についての評価を試みる。また、MB1.0の簡易的設計モデル、解析モデルを構築し、実験値との整合性を比較することにより、設計モデルの妥当性を検証した。

3. 実験用モバイルブリッジの概要

車両通行を想定したモバイルブリッジの2格間実験橋(MB1.0)の概略図を図一1に示す。MB1.0は、2つのシザーズユニットが連なる下路橋タイプの折畳み可能なシザーズ橋である。展開後(シザーズ展開角:60°の場合)、全長6.98m、全高2.00mを想定しており、本体フレームとシャフト、ピン等の構造部品を含め全重量8.50kN(867kgf)となった。軽量化のために、シザーズ構成部材にはアルミニウム合金A6N01材を用い、車両走行路には押出材からなるアルミニウム合金A6063材の床版を用いている。アルミニウム合金製床版は、自重低減のために1枚当たりの幅を1車輪相当に制限しており、シザーズ1格間につき左右輪分の2枚が敷設されている。また格間ごとの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。



図一1 実験橋概要図

MB1.0の収納状態からシザーズ展開完了までの様子を写真一2(a)から(d)にそれぞれ示す。展開構造体であるMB1.0は、写真一2(a)のように収納時にはコンパクトに折り畳まれ、横倒しとした状態で保管が可能である。使用の際には、本体シザーズ部を架台部から起立させ、展開することにより橋となる(写真一2(b)-(d))。収納時に折り畳まれた状態であったアルミニウム合金製床版は、シザーズ部材の展開動作に連動して展開され、展開完了後に走行路となる。このことにより、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。展開されたアルミニウム合金製床版は格間ごとに定尺長で設置され、ジョイント材がシャフト上に重なる形で固定され、弦材のように橋を補強する構造となる。

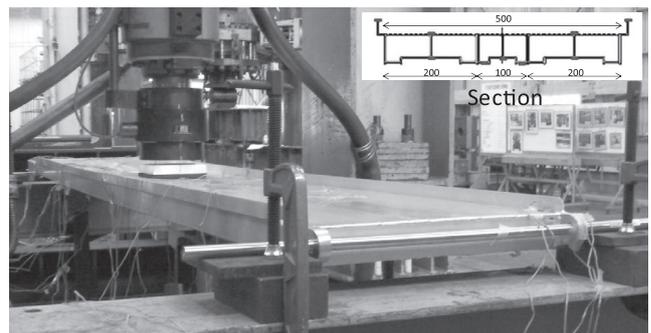


4. アルミニウム合金製床版の耐荷力実験

車両通行実験用走行路であるアルミニウム合金製床版の曲げ耐荷力および特性について評価した。

(1) アルミニウム合金製床版概要

車両走行用のアルミニウム合金製床版を写真一3に示す。アルミニウム合金製床版は1枚当たり全長3200mm、幅500mm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200mmと幅100mmの押出中空材を溶接接合することにより構成している。1枚当たりの重量は0.49kN(50kgf)である。



写真一3 車両走行用アルミニウム合金製床版(星軽金属工業株提供)

(2) 実験概要

アルミニウム合金製床版1枚当たりの輪荷重に対する耐荷力を把握するため、3点曲げによる耐力実験を実施した。ジョイント部とアルミニウム合金製床版の接合部である両端ピン部にφ20mmの丸鋼を通し、MB1.0上での支持状況を再現した。荷重は試験機により、アルミニウム合金製床版の中央部に与えた。載

荷板は、Eurocode の橋梁デザインよりタイヤ接地面相当の 175 mm×175 mm の鋼板とゴム板を使用した。

(3) 実験結果

アルミニウム合金製床版中央部の載荷点位置における荷重-変位曲線を図-2 に示す。縦軸に試験機による与えた荷重 (kN) を、横軸に試験機ヘッド部分の変位 (mm) をそれぞれ示す。1 kN まで 0.2 kN 刻みで、1 kN 以降は 1kN 刻みで荷重 14 kN を計測後、除荷し再び残留ひずみ、アルミニウム合金製床版の変形状態を確認した。除荷後、変位 10 mm ごと増加させた。最大荷重 15.1 kN 付近でアルミニウム合金製床版は表面にセル状の座屈を生じ耐荷力を失った。最大荷重時におけるアルミニウム合金製床版の中央たわみは 117.3 mm であった。

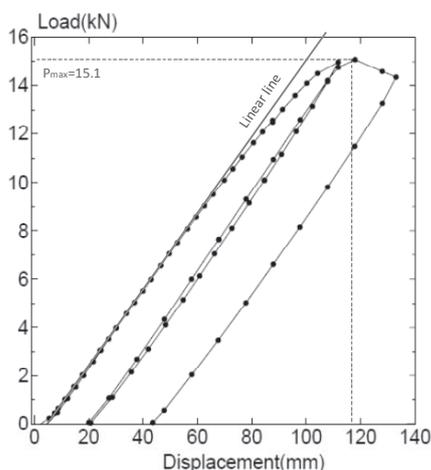


図-2 荷重-たわみ曲線

(4) 中央断面における応力分布状態

アルミ合金床版の中央部における応力分布図を図-3 に示す。図-3 上図の赤くマークされた箇所はひずみゲージを貼付した位置を、図-3 下図は各荷重値が 4.5kN, 5 kN, 5.5 kN 時の中央断面における応力分布図を、それぞれ示す。応力分布図において、縦軸は応力値 (MPa)、横軸は断面中央からの距離 (mm) をそれぞれ示す。また図中の赤ラインは、JIS 規格により最低保証される A-6063 材の降伏応力である $\sigma_y = 110 \text{ MPa}$ を示す。

図-3 より、荷重値が 5 kN 時に下面側の凸状部が先行して降伏した。よって、今回のアルミニウム合金製床版 1 枚当たりの使用限界荷重は 5 kN までであることが確認でき、MB1.0 上において、左右輪で 10 kN 以内の軸荷重を持つ車両の通行が可能であることが示された。

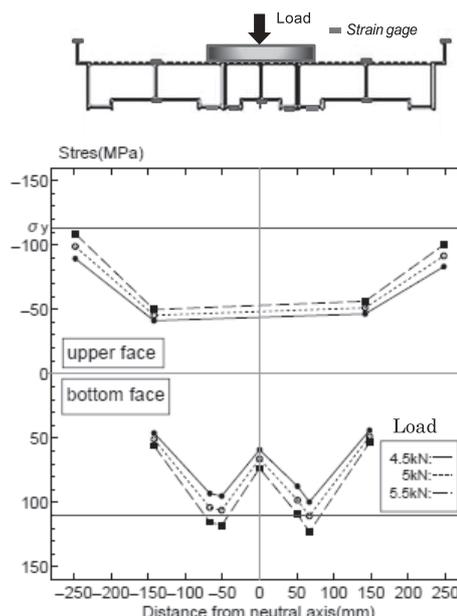


図-3 中央断面位置における応力分布

5. 小型車両を用いた静的載荷実験

(1) 実験概要

単純梁状態とした MB1.0 を用いて車両通行実験を実施した。ひずみ値は前輪、車両中央、後輪が特定箇所に来た場合に停車し、静的に計測した。表-1 に MB1.0 上での車両停車位置を示す。車両停車は 1 格間目の床版中央部、本体中央部に着目し、5 パターンで測定した。車両はスロープを通り MB1.0 内に入入り、架台側の設置したスロープを通過する。ひずみゲージは応力集中が生じると考えられるピボット部およびヒンジ部周辺およびその上縁と下縁部分にそれぞれひずみゲージを貼付した。

表-1 車両停車位置

Measure condition	
A	FW is the center of first slab
B	Middle of the vehicle is the center of first slab
C	FW of the vehicle is the center of MB
D	Middle of the vehicle is the center of MB
E	RW of the vehicle is the center of MB

※ FW=Front wheel, RW=Rear wheel

車両はホンダ製 STREET と日産製 AD バンの 2 種類の車両を用い、3 ケースの荷重を与えた。使用した車両重量の概要を表-2 に示す。STREET は全長×全幅×全高が 3195 mm×1395 mm×1870 mm、重量が 7.9 kN、車軸間距離は 1900 mm からなる。運転手込みで 9.6 kN および 11.8 kN の 2 通りを計測した。

表一 2 車両概要

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

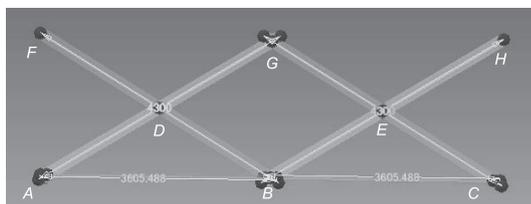
ADバンは全長×全幅×全高が4370 mm×1895 mm×1510 mm, 車量が12.3 kN, 車軸間距離は2535 mmからなり, 運転手を含み最大重量は13.8 kNであった。

(2) 平面骨組解析概要

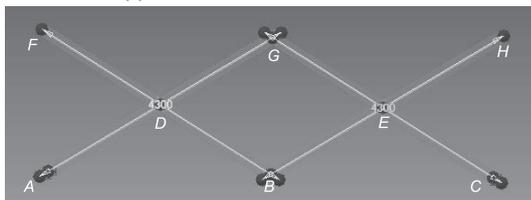
本解析はAutodesk社のCAD内に連動する内部プログラミング(ANSYS)を用い, 骨組解析を行った。本車両通行実験は車両通行に耐える使用限界内での使用を前提としているため, 解析は全て弾性解析とした。また要素は全て梁要素を用いた。

①解析条件

解析モデルを図一4に示す。便宜上, 節点AからHを定義する。図一4(a)は床版を考慮したモデル, 図一4(b)は床版を考慮していない簡易解析モデルである。部材交差部であるヒンジおよびピボットについては, 図一5に要素モデルを示すように, 回転を許容する要素を節点に共有させることでシザーズの連結を再現している。また床版については, 節点AB間およびBC間に対してそれぞれ梁要素を与えている。要素端部をモーメントフリーなピン結合とすることにより, MB1.0を簡易的に模している。図一4(a)より, 床版を考慮したモデルでは, アルミ合金床版上において車両が停車した位置に相当する場所に輪荷重を作用させる。図一4(b)より, 簡易解析モデルでは, アルミ合金床版に作用した車両重量を, シザーズ部材が

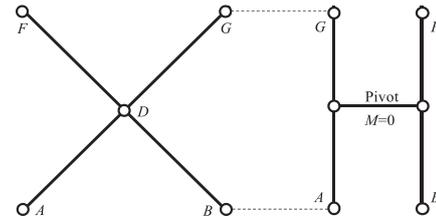


(a) 床版を考慮した解析モデル



(b) 骨組のみの簡易解析モデル

図一4 平面骨組モデル



図一5 ピボット部のモデル化

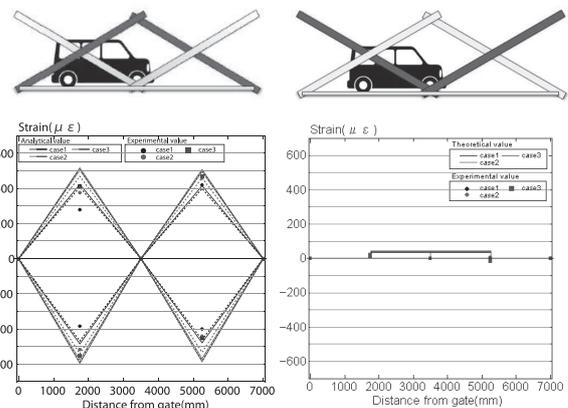
交差するピン接合部(点A, B, C)に等価節点外力として作用させる。境界条件として, 両端部のシャフト部である点Aと点Cをピン固定とし, 単純梁状態とする。

(3) 車両走行実験結果

実験および解析結果として, MB1.0中央部に前輪が一致したCase Cの着色したひずみ分布を図一6に, MB1.0中央部に車両の中央部が一致したCase Dの着色したひずみ分布を図一7にそれぞれ示す。横軸は車両進入部からの距離を示し, 縦軸は部材に発生したひずみ分布を示す。また図(a)は赤く着色した「八」型に配置された部材のひずみ分布を, 図(b)は着色した「V」型に配置された部材のひずみ分布状態をそれぞれ表す。グラフ内において実験値は点で, 床版を考慮したモデルの解析結果は実線で, 床版を考慮していない簡易モデルの解析結果を破線で, それぞれ示す。

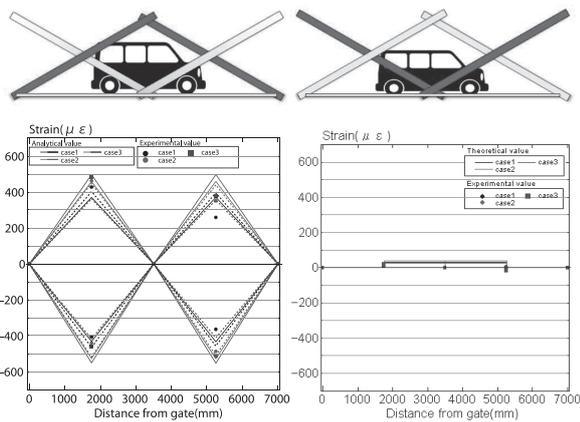
実験および解析結果より, 「八」型に配置された部材が車両による荷重に対して抵抗し, 「V」型に配置された部材にはほとんどひずみが生じていない。これは, 「V」型に配置された部材の端部はフリーな状態であるため, ほとんど抵抗しなかったと考えられる。

「八」型に配置された部材に着目したとき, 部材中央部の縁ひずみにおいて最大値/最小値が確認された。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あり, 人用実験橋



(a) 八型に配置された部材 (b) V型に配置された部材

図一6 Case C ひずみ分布



(a) 入型に配置された部材 (b) V型に配置された部材

図-7 Case D ひずみ分布

による既往研究^{10)~12)}と同様の傾向が得られた。また図-6 (a), 図-7 (a) より, 車両重量の変化に伴い部材中央部の上/下縁ひずみ分布は増加していることが確認できる。最大ひずみは, ADバン (13.8 kN) 積載時で $512 \mu\epsilon$ と弾性範囲内に収まった。同車種を用いた STREET でのひずみ増分変化に着目すると, 2.2 kN の輪荷重増加に伴い発生したひずみが8から13%ほど増加した。また車両の重心位置がある格間上において, $50 \mu\epsilon$ から $100 \mu\epsilon$ ほど圧縮ひずみの方が引張ひずみに比べ大きいことが確認できる。これは車両の重心が位置する格間上の部材に対して圧縮力が作用するためと考えられる。

「V」型に配置された部材に注目したとき, 端部からピボット部分までは無応力であるが, ピボット部からヒンジ部にかけてひずみが生じている。これはピボット接合部において内力が生じるため, ピボット-ヒンジ間において, 軸力が生じているためだと考えられる。図-6 (b) と図-7 (b) では共に 10μ 程度のひずみが確認でき, 軸力として 250 N 程度の力が作用していることが分かる。

(4) 解析結果および実験値との比較

解析モデルが結果に与える影響について比較した。図-6, 7より, 床版を考慮した解析モデルの方が簡易解析モデルより3%から6%ほど高いひずみ分布を示した。よって二つの解析モデルからは大きく異なった結果は生じないことが分かった。またひずみについて実験値と解析値と比較すると, ひずみの分布傾向が局所的に異なる部分はあるものの, 両モデルとも最大もしくは最小ひずみを6%程度の誤差で捉えられており, 解析結果は実験値に比べ安全側の結果となった。

以上のことから, 車両積載時における部材のひずみ分布は, 車両から伝わる輪荷重を等価節点外力として

作用させることで簡易的にかつ設計上安全側で算定することができることが分かった。

6. シザーズの平衡力学理論モデルへの反映

既往の研究^{5), 10)}においてシザーズ構造体の設計は梁理論をベースに行われていた。そこで本節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する。図-8 (a) に床版を組み込んだ単位シザーズモデルを, 図-8 (b) に単位シザーズと床版を独立させたFBDを示す。図-8 (a) より, 節点 AB 間に床版を敷くことにより, 車両通行が可能となる。図中に示す輪荷重により, 床版には図-8 (b) のように支点反力が発生する。床版に生じた支点反力は単位シザーズ本体に外力として伝達される。床版から伝わる輪荷重は車輪位置によって変化するため, シザーズ部材および床版に発生する応力とひずみの分布は車両位置に伴い変化する。

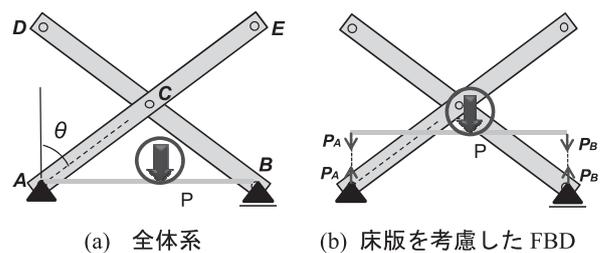


図-8 床版を考慮した単位シザーズ

(1) 単位シザーズの力学

単位ユニットからなる1格間シザーズのFBDを図-9に示す。図中のピン各点に作用する力 (H_i, V_i) の力の釣合式を導く。図中の点Cが回転を許容するピン結合されたピボットが存在する。水平方向と鉛直方向の力の釣り合いより, 次の式 (1) が求まる。

$$\left. \begin{aligned} \sum H &= H_A - H_B + H_D - H_E = 0, \\ \sum V &= V_A - V_B + V_D - V_E = 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

各節点に対するモーメントの釣合式を立てると, 以下の式 (2) を得る。

$$\left. \begin{aligned} \sum M_{atA} &= (H_D - H_E)2h + (V_B + V_E)\lambda = 0, \\ \sum M_{atB} &= (H_D - H_E)2h + (V_A + V_D)\lambda = 0, \\ \sum M_{atD} &= (-H_A + H_B)2h + (V_B + V_E)\lambda = 0, \\ \sum M_{atE} &= (-H_A + H_B)2h + (V_A + V_D)\lambda = 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

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

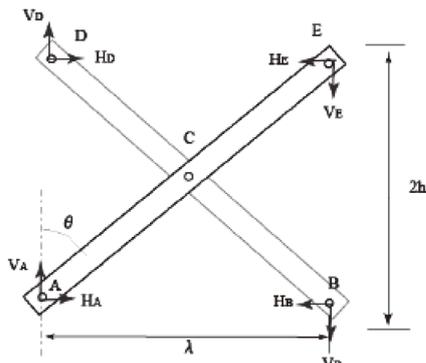


図-9 単位シザーズの FBD

$$\left. \begin{aligned} \text{Member of } AE : M_c &= -H_A h + V_A (\lambda/2) = H_E h - V_E (\lambda/2), \\ &\therefore (-H_A - H_E)h + (V_A + V_E)(\lambda/2) = 0, \\ \text{Member of } DB : M_c &= H_D h + V_D (\lambda/2) = -H_B h - V_B (\lambda/2), \\ &\therefore (H_B + H_D)h + (V_B + V_D)(\lambda/2) = 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

以上の8つの式を整理し、行列形で表示すると、

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & S & S & 0 & -C & S \\ 0 & S & 0 & 0 & C & S & -C & 0 \\ -C & 0 & C & S & 0 & 0 & 0 & \lambda \\ -C & S & C & 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ -C & S & 0 & 0 & 0 & 0 & -C & S \\ 0 & 0 & C & S & C & S & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_A \\ V_A \\ H_B \\ V_B \\ H_D \\ V_D \\ H_E \\ V_E \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式(4)からなる関係式を得る。ここに、 $S = \sin \theta$ 、 $C = \cos \theta = 2h/L$ となる。式(4)に境界条件、荷重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。各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(5)のように軸力とせん断力の関係が導出される。

$$\left. \begin{aligned} N_i \sin \theta + S_i \cos \theta &= -H_i \\ N_i \cos \theta - S_i \sin \theta &= -V_i \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_i \\ S_i \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} H_i \\ V_i \end{Bmatrix}$$

$$\therefore \begin{Bmatrix} N_i \\ S_i \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_i \\ V_i \end{Bmatrix} \quad (5)$$

(2) 理論計算値との比較

車両実験の各荷重ケース時に対応した理論計算および実験値と解析値によるひずみの値を表-3に示す。

表-3 ピボット部 (D点) におけるひずみ値

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

ひずみの値は1格目のピボット部であるD点に着目した。活荷重はADバン(13.8 kN)である。また解析値はアルミニウム合金製床版を考慮した結果を示す。理論計算の結果に着目した場合、実験値および解析値と比較すると軸ひずみによる影響が少なく、引張域と圧縮域で近似した値が得られているため、曲げひずみが支配的であると考えられる。実験結果と比較した場合、Case AとBの最小値で20%から25%程度の誤差は生じたものの、残りの車両載荷位置Case CからEでは10%程度の誤差内に収まり、簡易的に最大/最小縁ひずみを予測する設計モデルとして妥当な結果を得た。

7. おわりに

本研究では、MBの実スケール実験橋1.0を用いて、基本的な伸縮動作および車両通行時における力学的特性について検討した。本研究より明らかになったこと以下にまとめる。

- ・最大荷重13.8 kNに対してMB1.0が使用限界範囲内であることを確認し、車両通行時の安全性を示した。
- ・今回使用したアルミニウム合金製床版は、1枚当たり10 kNの荷重まで耐えられることが分かった。
- ・骨組解析を用いて、簡易解析モデルの妥当性を示し、シザーズの理論モデルに適用できた。
- ・今後はより厳密なモデルを理論モデルへと反映し、設計時の予測精度を向上させる。

謝辞

本研究は研究代表者有尾一郎の科学研究費基盤研究(B)の研究課題の成果の一部であり、関係各位に感謝する。また、MB1.0の試作とアルミニウム合金床版の実験供試体にあたり星軽金属工業(株)と(株)アカシン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、貴重なご意見・ご指導を頂いた多くの関係者に感謝申し上げる。

JCM/A

《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) 松尾エンジニアリング(株):災害復旧用の橋として威力発揮、IHI技報、Vol.51, No.4, 2011
- 3) FRP橋梁設計技術小委員会：FRP橋梁設計技術小委員会報告書、構造工学技術シリーズ、No.53, 2006

- 4) 鈴木圭：超軽量エアークラウドの災害復旧への活用，橋梁と基礎，Vol.46, No.8, pp.111-114, 2012
- 5) 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-ROM, 2007
- 6) 中沢正利，有尾一郎，谷倉泉，小野秀一：MFMC 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
- 7) 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
- 8) 西山健一，石井信行：張力安定構造を用いた伸縮式橋梁デザイン，構造工学論文集，Vol.45A, pp.589-596, 1999
- 9) 和光太郎，笠野英行，今井里織，依田照彦：展開可能なアルミニウム製応急橋に関する基礎的研究，土木学会第 59 回年次学術講演会，CD-ROM, 愛知工業大学, 2004
- 10) 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の実験とその解析，広島大学大学院工学研究院研究報告，Vol.59, No.1, 2010
- 11) 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 宇宙構造物材料シンポジウム，pp.104-107, 2009
- 12) 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 宇宙構造物材料シンポジウム，pp.108-111, 2009
- 13) 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
- 14) Masatoshi Nakazawa, Ichiro Ario: Structural Characteristics of Scissors type-Emergency Bridges, Australian Small Bridges Conference, Gold Coast, 2012
- 15) 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院研究報告，Vol.60, No.2, 2011

お断り

この JCMA 報告は，優秀論文賞を受賞した原文とは一部異なる表現をしてあります。