

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：13601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06840

研究課題名(和文) 災害被災地への迅速架橋を目的としたシザーズ型緊急橋の耐震安全性評価

研究課題名(英文) Earthquake safety of scissors-type of emergency bridge for rapid construction on disaster area

研究代表者

近広 雄希 (CHIKAHIRO, Yuki)

信州大学・工学部・助教(特定雇用)

研究者番号：10778905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、72時間以内での迅速架橋を目的としたシザーズ型緊急橋を対象に、その動的特性を解明し、さらには、被災現場における余震などを想定した激しい揺れに対する耐震性を分析することにある。固有値解析では、シザーズ橋の固有モードは、伸縮方向の挙動が顕著であるものの、概ね梁と似た傾向を示した。また地震下では、架橋時の根本部材のピボット近傍において高い曲げ応力が生じていることが分かった。今回のパラメトリック解析の範囲内では、最大曲げ応力は、静的解析と比べ約3倍の値を示した。言い換えると、地震下での主部材の安全率を考えると3倍以上の値が必要になると言える。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to evaluate the dynamic characteristics and the earthquake safety at the disaster site of the scissors-type emergency bridge aiming for rapid construction within 72 hours. In the eigenvalue analysis, the vibration mode of the scissors bridge showed a tendency similar to that of a beam structure, although the expansion direction was remarkable. Under the earthquake, high bending stress occurred near the supporting point of the pivot. Within the parametric analysis, the maximum bending stress was approximately three times as large as the static analysis. In other words, when considering the safety factor of the main member, it is required over three times under the earthquake.

研究分野：構造工学・橋梁工学

キーワード：緊急橋 シザーズ橋 動的挙動 耐震性能

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災(2011.3)では、被災現場のライフラインが寸断されると救援活動や避難路のアクセスが阻害され、緊急対応の「速く渡す/渡る」のインフラの迅速な法は最重要課題であることを強く経験した。その中でも交通ネットワークを形成する橋は、ライフラインの要であり、その復旧時間が、救命・救援・避難などの「一刻を争う」問題に繋がる。そこで、図-1のような、災害後の緊急復旧活動を支援する折畳めるシザーズ型緊急橋「Mobile Bridge」の開発研究が行われている。橋と展開技術が組み合わせられることにより、1): 完成した橋全体が折畳まれ、一括して現場まで可搬、2): 重機による組立などの現地作業が不要、などの迅速施工が可能となる利点が生じる。

本橋の主構造である「シザーズ機構」は、図-2のように、2本の骨組み部材がX状に交差した基本ユニットから成り立ち、ピボットと呼ばれる中央のピン結合部がその開閉動作を可能とする。この基本ユニットを縦・横方向に繋げ合わせられることによって、シザーズ構造は多格間に拡張される。従来この構造系は、建築分野・宇宙展開構造物などの限られた分野で活用されてきた背景もあり、橋のような重量構造物としての利用は極めて少ない。そのため、既往の研究開発では、シザーズ橋の基礎研究として 1): 基礎力学特性の評価、2): 設計評価手法の構築の2点を重点的に取り組んだ。1)では、人用・車両用と用途別の実験橋を試作し、その性能評価実験から、部材が交差したピン結合部(ピボット部)に高い負荷が生じることを明らかとした。2)では、力の釣合式をベースとした設計理論を提唱し、断面力や展開角度に応じた基本的な構造特性を明らかとし、シザーズ橋の試設計手法を提示した。

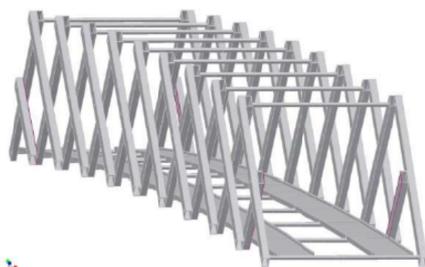


図-1 シザーズ型緊急橋「Mobile Bridge」  
(有尾ら, 2010)

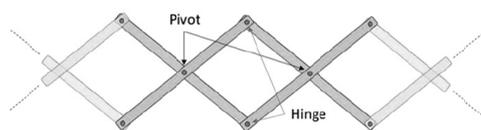


図-2 シザーズ構造の基本ユニット  
(Y. Chikahiro et al., 2016)

2. 研究の目的

本研究の目的は、72時間以内での迅速架橋を目的としたシザーズ型緊急橋「Mobile Bridge」を対象に、その動的特性を解明し、さらには、被災現場における余震などを想定した激しい揺れに対する耐震性を分析することにある。本研究の遂行によって、被災現場における橋の安全性をより現実的な観点から評価でき、シザーズ型緊急橋の実用化を大きく促すことが期待される。

3. 研究の方法

本節では、シザーズ橋の耐震性を明らかにするために、基礎的な動的解析ならびに地震応用解析の概要とモデル化の妥当性を示すために実施した振動実験の概要を述べる。

3.1. 解析概要

(a) 解析モデル

解析モデルの概要を図-3に示す。本研究では、既往の研究を参考に歩行者用・車両用実験橋



(a) 歩行者用実験橋 (全長 6.1m)



(b) 歩行者用実験橋 (全長 8.7m)



(c) 車両用実験橋 (全長 20.1m)

図-3 開発した実験橋の一例

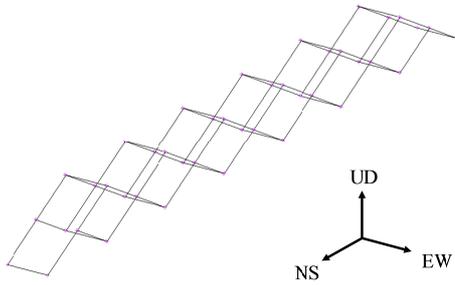


図-4 シザース型緊急橋の骨組モデルの例  
(7 格間歩道橋モデル)

を対象とした。以下は、歩行者用実験橋の概要とモデル化を代表例として説明する。

歩行者用モデルは、図-3(a)のように全長 6.1 m、高さ 0.5 m からなり、改良することによって、最終的には図-3(b)のように全長 8.7 m まで延長されている。主構造であるシザース部材には幅  $w = 30$  mm、高さ 70 mm、板厚  $t = 2$  mm と 3 mm からなる中空アルミニウム合金部材を用いており、鉛直方向から水平方向に対して  $60^\circ$  傾斜している。シザース部材の材料特性として、弾性係数  $E = 62.5$  GPa、降伏応力  $\sigma_y = 180$  MPa、密度  $\rho = 2.71$  ton/m<sup>3</sup> の特性をそれぞれ与えた。また同じ構造部材を用いて、全長を 8.7 m まで拡張したものが図-3(b)である。

モデル化した骨組モデルの一例を図-4 に示す。モデル化には、汎用構造解析ソフトウェア MSC.Marc2016 を用いた。シザース部材・横構ともに梁要素を用いた。上・下ヒンジ、ならびに、ピボットのある部材交差部は、交差する両部材の変位が等しくなりつつ、曲げモーメントは伝達されないように拘束条件を与えた。またここでは、架橋直前の展開状態と架橋後の両端ピン支持状態と二種類の境界条件を想定した。

#### (b) 解析条件

シザース橋の動的特性と耐震性についての基礎知見を得ることに先立ち、実験橋(図-3(b))をベースとした解析モデルを構築し、固有値解析から解析モデルの妥当性を調べた。モデル化の手法が確定した後に、詳細な固有値解析と地震応答解析を実施した。ここでは、格間数に着目した異なる橋のスペンを 4 ケース、境界条件を 2 ケース変えることによるパラメトリック解析を行った。

地震応答解析ではレベル 2 地震動である兵庫県南部地震で計測された地震波を用いた。図-5、6 に適用した地震波とそのスペクトル分布図を示す。この地震波は最大加速度が約 800 Gal であり、卓越周期が 1 から 2 秒となっている。地震応答解析では、計測された 3 方向成分(UD, NS, EW)を考慮しており、固有値解析の結果と見比べながら UD 成分を鉛直方向に、NS 成分を橋軸方向に、EW 成分を橋軸

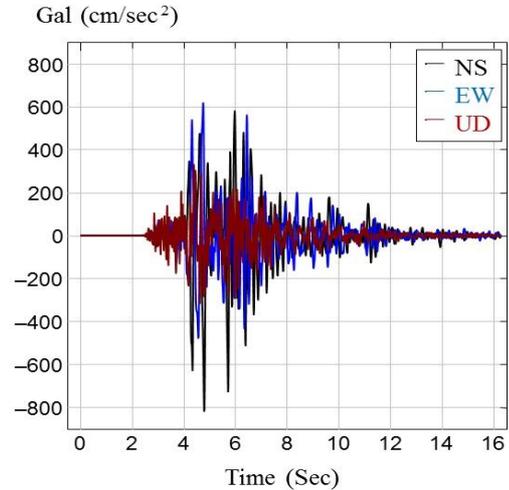


図-5 入力地震波

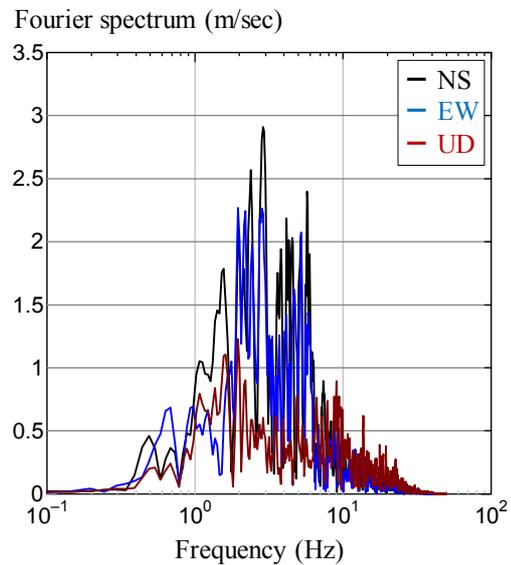


図-6 フーリエスペクトラム

直角方向にそれぞれ与えた。なお、シザース橋の減衰には、以下のようにレイリー減衰を用いて与えた。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

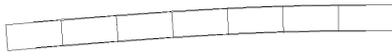
ここで  $[C]$  は全体減衰マトリックス、 $[M]$  は全体質量マトリックス、 $[K]$  は全体剛性マトリックスをそれぞれ示す。

#### 3.2. 実験概要

解析モデルの妥当性を検証するために、図-3(b)に示す歩行者用実験橋を用いた振動実験を行った。振動実験では、橋の固有振動数、振動モードなどの基礎特性を評価した。この計測では、シザース構造体の構造的な弱点となるピボット部をターゲットとして選定し、橋の中央、ならびに  $L/4$ ,  $3L/4$  の 3 点に 3 軸加速度センサーを設置した。架橋後の 3 点支持下で常時微動計測と人力による強制振動を与え、その応答加速度を計測した。



(a) 鉛直方向(2.6Hz)



(b) 面外方向(2.6Hz)



(c) 伸縮方向(4.6Hz)

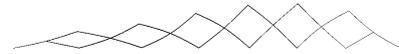
図-7 架橋時の振動モードの例



(a) 鉛直方向(12.1Hz)



(b) 面外方向(12.7Hz)



(c) 伸縮方向(19.3Hz)

図-8 架橋後の振動モードの例

#### 4. 研究成果

##### 4.1. 固有値解析

歩行者用実験橋をベースとした固有値解析を実施した。その結果の一例として、7 格間モデルの架橋直前と架橋後の 1 次振動モードとその固有値を図-7, 8 にそれぞれ示す。固有値解析の結果より、このモデルでは架橋前後のどちらにおいても、鉛直方向の固有モードが始めに見られた。特筆すべき点として、シザース構造が橋の主構造であるため、両図ともに伸縮方向の大きな挙動が生じていることが分かる。一方、全長が 1.4 倍に延びたモデル(図-3(b)を参照)では、鉛直方向ではなく面外方向の揺れがまず生じた。また得られた固有値を比較してみると、架橋直前の結果では、鉛直方向が 1.0 Hz, 面外方向が 0.9 Hz, 伸縮方向が 1.9 Hz と概ね 0.4 倍になった。架橋後では、鉛直方向が 6.1 Hz, 面外方向が 5.1 Hz, 伸縮方向が 10.1 Hz となり、0.4 倍から 0.5 倍の値になった。

##### 4.2. 振動実験

振動実験では、計測した加速度を高速フーリエ変換(FFT)処理することによって、鉛直方向と面外方向に対する固有周期を求めた。計測の結果、鉛直方向の 1 次モードが 4.9 Hz, 面外方向の 1 次モードが 2.6 Hz とそれぞれなった。実験と解析の結果を比較すると、鉛直方向では比較的近い値が得られたが、面外方向は 50%程度の誤差があった。これは実験

時の境界条件の影響であり、架橋後の端部がピン視点よりもローラー支点に近かったためである。また接合部のピン等の質量やモデル化されていない細部も影響している可能性がある。これらを見直し再解析すると、鉛直方向と面外方向の 1 次モードに対する固有振動数はそれぞれ 5.2 Hz と 3.3 Hz となり、実験結果と整合したものとなった。

##### 4.3. 地震応答解析

7 格間の歩道橋を対象とした地震応答解析の結果を図-9, 図-10 に示す。図中の青線・赤線・黒線は EW 方向・NS 方向・UD 方向の変位をそれぞれ示し、展開時には先端部、展開後には中央ピボット部の変位に着目した。解析結果として、架橋後よりも架橋前の変位が極めて大きいことが分かる。展開時には、面外方向に±150 mm 程度の変位を示しており、鉛直方向の変位よりも挙動が大きいことが分かる。さらには、橋軸方向に対しても鉛直方向と同程度の変位が見られた。これらの挙動について、水平方向と鉛直方向の挙動に着目したものが図-11, 図-12 である。架橋時には水平方向の挙動が卓越しているが、架橋後には水平方向と鉛直方向の変位が同程度であり、極端に偏った挙動は見られなかった。

図-13, 図-14 は、最大加速度を観測した時点での、曲げモーメントの分布図を示す。架橋時には境界条件としてピン支持されている根本近傍部材のピボット部が、架橋後には中央近傍、ならびに、根本近傍で大きな曲げ

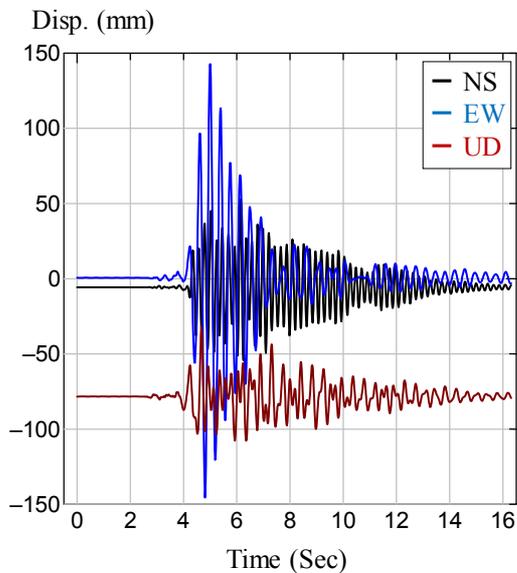


図-9 架橋時の先端部の応答変位図

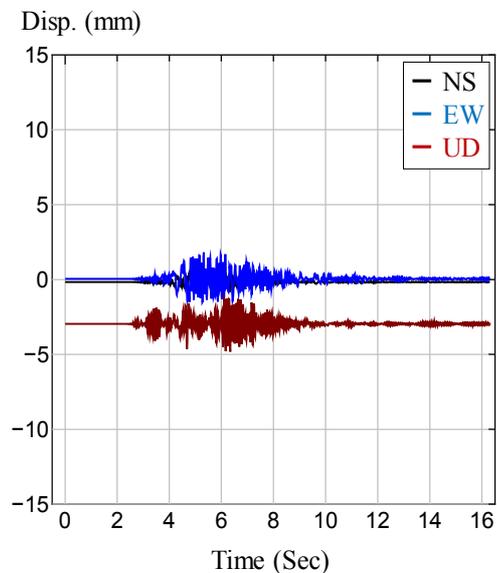


図-10 架橋後の中央部の応答変位図

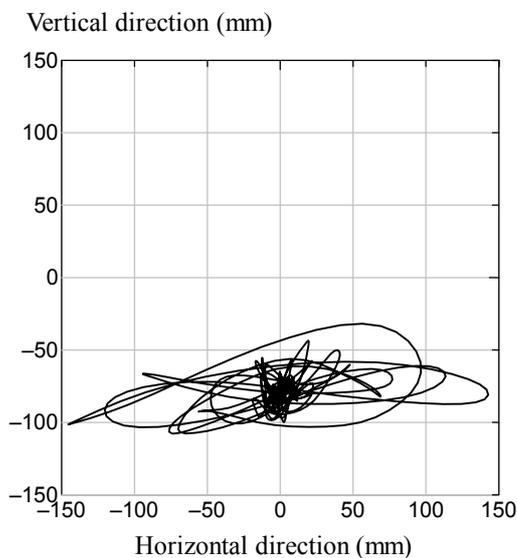


図-11 架橋時の軌跡図

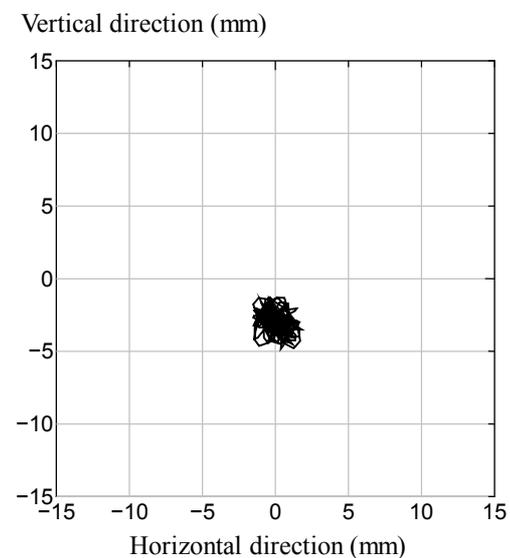


図-12 架橋後の軌跡図



図-13 架橋時の曲げ応力分布図



図-14 架橋後の曲げ応力分布図

モーメントが観測された。生じた最大応力を比較すると、架橋時では 111.4 MPa、架橋後では 15.7 MPa と、この地震下においては、部材の降伏が確認されず、線形挙動に留まった。この理由として、床版を省略した骨組モデルでの検討であったため、展開構造物特有の伸縮動作が顕著に見られ、エネルギーが発散されたためだと考える。

また詳細は割愛するが、歩道者用 10 格間、車両用 6 格間の両モデルにおいても架橋時・架橋後の部材降伏は見られなかった。

#### 4.4. パラメトリック解析

妥当性の得られた歩行者用の解析モデルを基準に、橋のスパンを変化させることにより、地震下で生じる最大応力の変化を検討した。ここでは、前節の 7 格間歩道橋モデルにおいて生じた曲げ応力の大きかった架橋時に着目して述べる。

7 格間歩道橋モデルでは、自重のみでは根本近傍のピボット部において 58.4 MPa の曲げ応力が生じた。これが地震下においては 111.4 MPa と 1.91 倍の応答値になった。同様

に、格間数を 7 から 10 格間の間で検証した時、地震下で生じる最大曲げモーメントは全て弾性域に収まるものであった。また静解析の結果と比較すると、その比率は最大で約 3 倍となった。一方で、軸応力の影響はどのモデルにおいても小さく、地震下においては 10 MPa 以上の値にならなかった。

#### 4.5. まとめ

本研究では、被災地への迅速架橋を目的としたシザーズ型緊急橋の基礎研究として、種々の境界条件下での振動モード、ならびに地震応答特性について検討を行った。シザーズ橋の固有モードは、伸縮方向の挙動が顕著であるものの、概ね梁と似た傾向を示した。また地震下では、架橋時の根本部材のピボット近傍において高い曲げ応力が生じていることが分かった。今回のパラメトリック解析の範囲内では、最大曲げ応力は、静的解析と比べ約 3 倍の値を示した。言い換えると、地震下での主部材の安全率を考えると 3 倍以上の値が必要になると言える。

今後の展望としては、床版のような伸縮動作を拘束する部材が存在する場合や供用時において、シザーズ型緊急橋の力学特性や耐震性能がどのように変わるかを明らかとする必要がある。また、格点部に生じる応力集中の影響なども検証する必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 6 件)

Y. Chikahiro, S. Zenzai, S. Shimizu, I. Ario : Dynamic analysis of scissors-type deployable pedestrian bridge under earthquake, 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2018), 2018. (発表決定)

南 尚吾, 近広 雄希, 善財 聖也 : シザーズ機構を応用した緊急橋の基礎振動特性に関する検討, H29 年度土木学会中部支部研究発表会, 2018.

Y. Hama, I. Ario, K. Adachi, Y. Chikahiro : Dynamic analysis of a scissors structure, 2018 Joint Conference of the Condensed Matter Divisions of the EPS and the DPG, 2018.

Y. Chikahiro, I. Ario, K. Adachi, S. Shimizu, P. Pawlowski, C. Graczykowski, J. Holnicki-Szulc : Dynamic property of deployable emergency bridge using scissors mechanism, FootBridge 2017 Berlin, 2017.

Y. Chikahiro, I. Ario, K. Adachi, S. Shimizu, S. Zenzai, P. Pawlowski, C. Graczykowski, J. Holnicki Szulc : Fundamental study on dynamic property of scissoring bridge for disaster relief, 9th European Nonlinear Dynamics Conference, 2017.

Y. Chikahiro, I. Ario, J. Holnicki Szulc, P.

Pawlowski, C. Graczykowski : Optimal Reinforcement of Scissor Type of Bridge with Additional Strut Members, International Conference of Civil & Environmental Engineering (ICCEE2016), Hiroshima, Japan, 2016.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

近広 雄希 (CHIKAHIRO, Yuki)  
信州大学・工学部・助教 (特定雇用)  
研究者番号 : 10778905