被災後に瞬速展開可能なシザーズ構造の平衡力学とその検証

有尾一郎	正会員	広島大学
○津村大樹	正会員	鳥取県
近広雄希	学生会員	広島大学

1. 研究背景·目的

近年,地震や大雨などの自然災害が多発し,橋の損 傷や流橋被害も生じている.これにより,交通路が遮 断されることで被災現場の人命救助や復旧活動など に時間がかかり,ライフラインを迅速に復旧できる 緊急橋が必要である.本課題に対して,シザーズ構造 を用いた緊急橋「モバイルブリッジ」(以降, MB と 称す)の開発が行われている^{(1),(2)}.連鎖シザーズ構造 は,規則性があるものの,そのユニット単位の離散力 学の解法は十分に活用されておらず,効率的な平衡 方程式の一般化は未着手であった.そのため,既往の 研究では,モデル化・解析計算に汎用性を意識した整 合した節点記号(一般性)がなかった.

本研究では、次の2点を検討する.

- 一般的なシザーズ構造(MB)の平衡方程式の解法 の提案
- 2) その解法の正確性,妥当性の検証

シザーズを汎用構造体として,これらのメカニズ ムを解明し,MBの設計に反映させることが本研究 の目的である.



一般的なシザーズ構造モデルを図-1 に示す.シザ
 ーズ部材のピン部の節点力 b は、格間番号 i とその
 高さの位置(A_i, B_i, C_i)、左側(L)・右側(R)を表す

節点位置から構成されるものと定義する. すなわち, $(O_i^*) \equiv b \left(\{A: \, \bot \, \complement' \, \lor, B: \, \Box \, \varUpsilon' \, \lor, C: \, \boxdot \, \varUpsilon' \, \lor' \}_i^{<L,R>} \right)_{<x,y>}$ で

表す.略記として $b(O_i^*)$ を (O_i^*) と表記する.

各節点に作用する力は力の釣合条件式から導くこ とができる.任意の *i* 格間目の単位ユニットに着目 すると,水平方向と鉛直方向の力の釣合より式(1)と 式(2)が求まる.

$$\sum H = \left\{ \left(B_i^L \right)_x + \left(B_i^R \right)_x \right\} + \left\{ \left(A_i^L \right)_x + \left(A_i^R \right)_x \right\} + (C_i)_x$$
(1)
= 0

$$\sum V = \left\{ \left(B_i^L \right)_y + \left(B_i^R \right)_y \right\} + \left\{ \left(A_i^L \right)_y + \left(A_i^R \right)_y \right\} + (C_i)_y$$

= 0 (2)

A^RB^L 部材と *A^LB^R* 部材間で曲げモーメントの伝達が ないことから,中央ピボット(*C_i*)での曲げモーメント の釣合より式(3)と式(4)が求まる.

$$\sum M_{C} = \frac{\lambda}{2} (B_{i}^{L})_{y} - \frac{\eta}{2} (B_{i}^{L})_{x} - \frac{\lambda}{2} (A_{i}^{R})_{x} + \frac{\eta}{2} (A_{i}^{R})_{x} = 0 \quad (3)$$
$$\sum M_{C} = \frac{\lambda}{2} (B_{i}^{R})_{y} + \frac{\eta}{2} (B_{i}^{R})_{x} - \frac{\lambda}{2} (A_{i}^{L})_{y} - \frac{\eta}{2} (A_{i}^{L})_{x} = 0 \quad (4)$$

式(1)~(4)から平衡方程式を

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\eta & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & \lambda \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (B_1^L)_x \\ (B_1^L)_y \\ (B_1^R)_x \\ (B_1^R)_y \end{pmatrix} = -\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \eta & -\lambda \\ -\eta & -\lambda & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (A_1^L)_x \\ (A_1^L)_y \\ (A_1^R)_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (C_1)_x \\ (C_1)_y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
(5)

と表すことができる.また各ユニットの結合部の平 衡を以下のように定義する.

$$\begin{cases}
\begin{pmatrix}
\begin{pmatrix}
B_{i}^{R} \\
x \\
(B_{i}^{R} \\
y \\
(A_{i}^{R} \\
(A_{i}^{R} \\
x \\
(A_{i}^{R} \\
y \\
\end{pmatrix} +
\begin{pmatrix}
\begin{pmatrix}
B_{i+1}^{L} \\
(B_{i+1}^{L} \\
y \\
(A_{i+1}^{L} \\
(A_{i+1}^{L} \\
y \\
\end{pmatrix} =
\begin{cases}
\begin{pmatrix}
(B_{i,i+1})_{x} \\
(B_{i,i+1})_{y} \\
(A_{i,i+1} \\
(A_{i,i+1} \\
y \\
\end{pmatrix}$$
(6)

式(5)と式(6)より,任意の格間数のシザーズ構造に おける部材力が求まり,さらに部材力が求まればた わみも導出することができる.

連絡先 〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻 TEL082-424-7828

キーワード シザーズ構造,平衡方程式,折畳める緊急橋

本研究では、一般化させたこれらの平衡方程式を、 数式処理ソフトウェア「Mathematica」を用いて、 その理論に基づくプログラムを作成し、その理論と 解析計算の妥当性を検証した.

3. シザーズ構造のたわみの一例

図-2 に示すようなシザーズ先端に載荷された場合 のたわみ理論(式(7))を導出した。ここに、荷重 *P* を 与えた部材長 *L*, 展開角θ, 部材の弾性係数 *E*, 断面 積 *A*, 断面二次モーメント *I* を示す.

 $-\frac{5LP\sec^2\theta(17(AL^2-12I)\cos 4\theta-17AL^2+768I\cos 2\theta-660I)}{96AEI}$ (7)

このように条件を与えることで式(7)のたわみを導出 できる.また各節点に任意に荷重を与えることが可 能であり,一般性を持つ.

4. 理論値と実験値の比較

片持ち5格間シザーズの各ピボットに等価な荷重 を作用させ、平衡力学の式(5)と(6)より各部材力が求 められる、それらの部材力から導出されるひずみ(理 論)とMB3号機の展開実験から得られたひずみ(実験) を比較した.最大ひずみを示す,張出1格間部材のピ ボット周辺の縁ひずみに着目した. 図-3は各ひずみ の位置を示している. 図-4は展開スパンとひずみの 関係図を示す.ここに、1格間目の内側部材のひずみ の理論値を実線で示し,実験値を点で示す.理論ひず みは図-3の位置で算出した各縁ひずみを、実験ひず みはMB3号機の展開実験から得られた左面と右面の シザーズ部材の各縁ひずみを、それぞれ示す.実験で はスパン0(折畳んだ状態)で3mほど片持ち状態であ り、初期ひずみはその値を反映している結果である. 理論ひずみは初期ひずみを換算していないが、両者 の傾きはほぼ一致するものと考えられる. この理論 値に初期ひずみ分を考慮すると正確な理論ひずみを 得られるものと考えられる.

5. 結論

- 1) シザーズ構造の規則性を利用し,一般的な本構 造の平衡方程式の解法を提案することができた.
- 2) シザーズ構造のたわみと荷重条件,部材条件の

関係性を理論的に明らかにした.

3) 本シザーズ平衡理論によって導出した理論値と MB3 号機の展開実験から得られた実験値の増 加傾向が整合し、本理論の妥当性が確認できた.



図-4 片持ち展開時における1格間目内側部材の 実験ひずみと理論ひずみの変化

謝辞 本研究開発は,経済産業省「橋渡し」研究事業の成 果の一部であり,共同研究企業各社に謝意を表す.

6. 参考文献

- I. Ario, P. Pawlowski, J. Holnicki, Analysis and development of deployable structures with lighter and energy-absorbing mechanics for disaster, Proc. of Academic research in Chyugoku area in Civil engineering (2009) (in Japanese)
- (2) I. Ario *et al.*: DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE DEPOYABLE BRIDGE BASED ON ORIGAMI SKILL, Automation in Construction, Volume 32, July 2013, 104 - 111.