# 連鎖シザーズ構造の設計のための最適部材構成の検討

広島大学大学院	学生会員	〇近広	雄希
広島大学大学院	正会員	有尾	一郎

### 1. はじめに

連鎖シザーズ構造は、両端部と中央部の3点に回転 ヒンジを持つ2本の棒材をX形のはさみ状に組み合 わせた基本ユニットからなる代表的な展開システムの 一つである.著者らは、Michellの構造最適化問題にお ける研究をもとに、この機構を橋梁の構造形式に採用 した折畳み緊急橋、モバイルブリッジ™(以下、MBと 称す)を提唱してきた<sup>1)</sup>.実験橋を用いた既往の構造実 験により、軸力に比べ曲げモーメントの負荷が支配的 であり、特に、ピボットと呼ばれる二つのシザーズ部 材の交差部にて、曲げモーメントが最大となることが 分かっている.しかしながら、部材長や展開角などの 各種設計パラメータが曲げモーメントに与える影響に ついて述べられていない.

本研究では、梁理論をベースとした簡易設計モデル をもとに、曲げモーメントに関する MB の簡易評価式 を提案する. さらに、具体的な数値計算により、部材 長、展開角、格間数の相関性を明らかとし、MB の最適 設計のための知見を得ることを目的とする。

## 2. 曲げモーメントに着目した簡易設計概念

MB の簡易設計モデルについて、図-1 に示す一定断 面からなる n 格間のシザーズ構造を考える.ここで、 本構造体は曲げモーメントのみに抵抗するものとして、 弱点となるピボット部の断面力を考える.基本となる シザーズユニットは、格間長え、高さ 2h であり、各部 材の死荷重 2W が重心位置である各ピボット部にそれ ぞれ集中荷重として作用する.MB は片岸から収納さ れたシザーズのユニットを対岸まで展開させ、着岸す ることで使用可能な状態となるため、展開中は片持ち 梁状態、展開完了後は単純梁状態と二つの境界条件を 持つことになる.展開時の片持ち梁モデルでは、図中 のA<sub>1</sub>, B<sub>1</sub> が,展開後の単純梁モデルでは、A<sub>1</sub>, A<sub>n+1</sub> が 境界条件として拘束される.

このシザーズ構造体が水平方向に固定(静止)され、

キーワード モバイルブリッジ,緊急橋,シザーズ機構,最適設計 連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4-1



図-1 各ユニットに死荷重が作用する n 格間 MB

静的に釣り合っているものと仮定するなら,近似的に 張り構造物として考えることができる.この時,片持 ち時の根元部近傍の二つのシザーズ部材の各ピボット (C<sub>1</sub>)に生じる最大曲げモーメント*M*<sub>1</sub>は,次式となる.

$$M_1 = -W\lambda n(n-1) \tag{1}$$

展開完了後の単純梁時の最大曲げモーメント *M*<sub>2</sub> は,格 間数 *n* に応じて,次式のように区分される.

$$M_{2} \begin{cases} = \frac{W\lambda(n^{2}+1)}{4} & \dots & n = \widehat{f} \bigotimes \\ = \frac{W\lambda n^{2}}{4} & \dots & n = (\operatorname{fl} \bigotimes ) \end{cases}$$
(2)

もちろん,式(1)と(2)は、使用材料の降伏曲げモーメント *M*<sub>v</sub>と設計曲げモーメント *M*<sub>a</sub>に対して

$$\left|M_{1,2}\right| \le M_a \le M_y \tag{3}$$

の関係を満たす必要がある.仮に抵抗曲げモーメント が片持ち時の $|M_1|$ まで耐え得ると考えるなら, $M_3 = |M_1|$  $-M_2$ の範囲で活荷重を積載することができる.展開後 に許容される最大曲げモーメント $M_3/M_2$ は,nに応じ て,次式で表される.

$$\frac{M_3}{M_2} \begin{cases} = \frac{3n^2 - 4n - 1}{n^2 + 1} & \dots & n = \hat{m} \\ = \frac{3n - 4}{n} & \dots & n = \\ \end{cases}$$
(4)

すなわち,展開後に積載可能な活荷重は,格間数 n が n=2,3,4… と増加するに従い,自重のみの場合の1,1.4, 2,…倍となり,格間数 n が大きくなるに従い,活荷重 は最大で自重の3 倍まで載荷できる.

## 3. 設計計算例とその考察

曲げモーメントに着目して MB のシザーズ部材を設 計するためには,部材の設計曲げモーメント Ma が展開 時の最大曲げモーメント $|M_1|$ 以上でなければならない. 式(1)に対して,部材長 l と展開角  $\theta$  を用いて  $\lambda$ = $lsin\theta$ , 密度  $\rho$ ,断面積 A を用いて  $2W = \rho Al$  とそれぞれ表すと, 次の関係性を得る.

$$\left|M_{1}\right| = \frac{\rho A l^{2} n(n-1) Sin \theta}{4} \tag{5}$$

すなわち,一定の断面形状を持つ,同一部材を使用し MBが構成されると仮定するなら,その最大曲げモーメ ント|*M*<sub>1</sub>|は部材長,展開角,格間数の3つのパラメータ に依存することが分かる.

式(5) において,展開後の展開角を $\theta = 60^{\circ}$ とし,A = 28.0cm<sup>2</sup>, $\rho = 2.7$ g/cm<sup>3</sup>に与えた場合,部材長lと格間数nが $|M_1|$ に及ぼす関係は図-2のように示される.lとnは $|M_1|$ に対して反比例的な関係を持ち,二つの値が大きくなるに従い, $|M_1|$ の値も大きくなることが分かる.また,既往の部材曲げ耐荷力実験<sup>2)</sup>をもとに,MBのシザーズ部材の設計曲げモーメントを $M_a = 10.0$ kNm とした場合,n = 8では最大部材長 $l_{max} = 2.1$ m,n = 7では $l_{max} = 2.3$ m,n = 6では $l_{max} = 2.8$ m...と $M_a$ を満たすlとnの関係性が明らかとなる.

次に, 図-2 より得られた部材長 l と格間数 n を用い て Ma = 10.0kNm を満たす領域内で, MB の全長 L が最 大となる l と n の関係性について検討する. 一般的に市 販されているアルミニウム合金押出型材の定尺長が 4 ~ 6m までであることを踏まえ,  $l \leq 5$  と制約する. さ らに, 格間数 n はこれまでに著者らが開発したプロト タイプ機の格間数を上限とする  $n \leq 9$  として扱う.

式(5) と図-2から得た最大部材長  $l_{max}$  と格間数nの関係を用いて求めた,制約条件下における格間長 $\lambda$ ,高さ 2h,全長Lの変化を表-1にまとめる.表-1より,n=4にて最大となる全長 $L_{max} = 17.3m$ を得た.また, $n \ge 5$ におけるLに着目すると,nが増えるに従い,必ずしも Lが大きくなっている訳ではないことが分かる.また, 最適なパラメータの関係性は上路や下路などの MB の 形式にも影響されると考えられる.

#### 4. 結語

本稿で明らかとなったことを以下に示す.

・ MB の展開時と展開後の両境界条件に応じた曲げ



図-2 各ユニットに死荷重が作用する n格間 MB.

格間数	最大部材長	格間長	高さ	全長
n	/ <sub>max</sub> (m)	∕ (m)	2 <i>h</i> (m)	<i>L</i> (m)
1	5.0	4.3	2.5	4.3
2	5.0	4.3	2.5	8.7
3	5.0	4.3	2.5	13.0
4	5.0	4.3	2.5	17.3
5	3.8	3.3	1.9	16.5
6	3.2	2.8	1.6	16.6
7	2.7	2.3	1.4	16.4
8	2.4	2.1	1.2	16.6
9	2.1	1.8	1.1	16.4

表-1 最大部材長と格間数に応じた MB の全長の変化

モーメントに関する設計式を等価な梁モデルから 構築し,提案できた.

 MBのスパン長が格間数,展開角,部材長などの各種パラメータに応じて変化することを明らかとし, 例示的に最大スパン長とその最適解を示した.

#### 参考文献

- I. Ario, M. Nakazawa, Y. Tanaka, I. Tanikura, S. Ono, Development of a prototype deployable bridge based on origami skill, Automation in Construction, Vol. 32, pp. 104-111, 2013.
- 2)近広雄希,有尾一郎,田中義和,中沢正利,3 室中空押 出型材の曲げ耐荷力実験に基づくシザーズ型展開橋 に関する設計研究,構造工学論文集, Vol. 61. A, pp.1-12, 2015.