

連鎖シザーズ構造体の簡易設計法と部材構成上の設計パラメータの検討

広島大学大学院 学生会員 ○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緊急折畳み橋、モバイルブリッジ™(以下、MBと称す)を提唱してきた¹⁾。本構造体は、軸力比べ、曲げモーメントの影響が支配的であるということが実験的に明らかとなっている。この時、曲げモーメントは中央のピン連結部(以下、ピボットと称す)で最大、両端のピン結合部で0となるように分布する。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 λ 、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_1, B_1 が、展開後の単純梁モデルでは、 B_1, B_{n+1} 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)され静

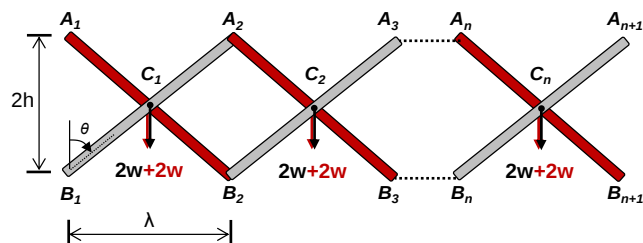


図-1 各ユニットに死荷重が作用する n 格間MB

的に釣り合っているものと仮定するなら、近似的に梁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ピボット(C_1)に生じる最大曲げモーメント M_1 は、次式となる。

$$M_1 = -W\lambda n(n-1) \quad (1)$$

展開完了後の単純梁時の最大曲げモーメント M_2 は、格間数 n に応じて、次式のように区分される。

$$M_2 = \begin{cases} = \frac{W\lambda(n^2+1)}{4} & \dots \quad n = \text{奇数} \\ = \frac{W\lambda n^2}{4} & \dots \quad n = \text{偶数} \end{cases} \quad (2)$$

もちろん、式(1)と(2)は、使用材料の降伏曲げモーメント M_y と設計曲げモーメント M_a に対して

$$M_y \geq M_a \geq |M_{1,2}| \quad (3)$$

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。

$$\frac{M_3}{M_2} = \begin{cases} = \frac{3n^2-4n-1}{n^2+1} & \dots \quad n = \text{奇数} \\ = \frac{3n-4}{n} & \dots \quad n = \text{偶数} \end{cases} \quad (4)$$

すなわち、展開後に積載可能な活荷重は、格間数 n が $n=2, 3, 4, \dots$ 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。

キーワード モバイルブリッジ, 緊急橋, 連鎖シザーズ構造, 最適設計

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4-1

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 M_a 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 θ を用いて $\lambda = l \sin \theta$ 、密度 ρ 、断面積 A を用いて $2W = \rho A l$ とそれぞれ表すと、次の関係性を得る。

$$|M_1| = \frac{\rho A l^2 n(n-1) \sin \theta}{2} \tag{5}$$

すなわち、一定の断面形状を持つ、同一部材使用のもと 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 $|M_1|$ 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) に対して、展開後の展開角を $\theta = 45^\circ$ とし、 $A = 28.0\text{cm}^2, \rho = 2.7\text{g/cm}^3$ を具体的に与えた場合、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、既往の部材曲げ耐力実験²⁾をもとに、MB のシザーズ部材の設計曲げモーメントを $M_a = 10.0\text{kNm}$ とした場合、 $n = 8$ では最大部材長 $l_{\max} = 2.6\text{m}$ 、 $n = 7$ では $l_{\max} = 3.0\text{m}$ 、 $n = 6$ では $l_{\max} = 2.5\text{m} \dots$ 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 $M_a = 10.0\text{kNm}$ 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概ね 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 MB の試作機の格間数を上限とする $n \leq 9$ として扱う。

式(5) と図-2 より得られた最大部材長 $l_{\max}$ 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 λ 、高さ $2h$ 、全長 L の変化を表-1 にまとめる。表-1 より、 $n = 5$ にて最大となる全長 $L_{\max} = 14.8\text{m}$ を得た。また、 $n \geq 5$ 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

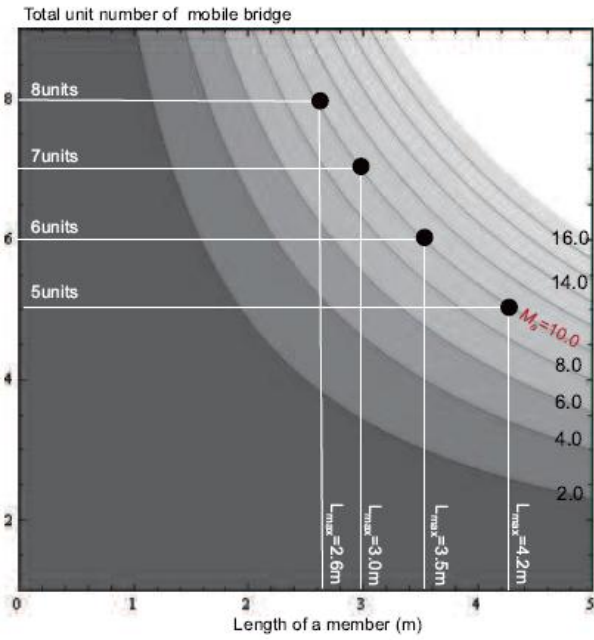


図-2 部材長と格間数が曲げモーメントに及ぼす関係

表-1 最大部材長と格間数に応じた MB の全長の変化

格間数	最大部材長	格間長	高さ	全長
n	$l_{\max}(\text{m})$	$\lambda(\text{m})$	$2h(\text{m})$	$L(\text{m})$
1	5.0	3.5	3.5	3.5
2	5.0	3.5	3.5	7.1
3	5.0	3.5	3.5	10.6
4	5.0	3.5	3.5	14.1
5	4.2	3.0	3.0	14.8
6	3.5	2.5	2.5	14.8
7	3.0	2.1	2.1	14.8
8	2.6	1.8	1.8	14.7
9	2.3	1.6	1.6	14.6

- 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。
- 格間数、展開角、部材長などの各種パラメータに応じた曲げモーメントの変化を明らかとした。
 - 設計曲げモーメントと展開角を例示的に与え、MB の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.
- 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.