シザーズ機構を持つ仮橋プロトタイプの力学的検討

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
東北学院大学	正会員	中沢正利	広島大学大学院	正会員	田中義和
施工技術総合研究所	正会員	谷倉泉	施工技術総合研究所	正会員	小野秀一

1. 研究背景

X 状に交差した、2 本の骨組部材から構成されるシザーズ構造は、伸縮機構を持った展開機構に利用される。中央部をピン(ピボット)により連結することで、互いに回転を許容し、伸縮を可能にしている。そのため建築構造物の屋根や昇降機などに応用され、使用時にはコンパクトに収納した状態から迅速に展開が可能である。しかし、このような構造が橋梁形式に用いられたシステムは皆無である。そこで本研究では、このシザーズ機構の基本的な力学特性を把握するとともに、迅速に展開・収納できる特長を活かした仮設橋モデルの力学的検討をする。

2. 単位シザーズ構造の力学

Fig .1 に単位シザーズモデルを示す。部材長を L_0、進展傾斜角を θ とすると、格間長λおよび高さ 2h は $L_0\sin\theta=\lambda$, $L_0\cos\theta=2h$ と表され、展開・収納状況は角度 θ を用いて表すことができる。この単位シザーズ構造は力の釣合条件から解くことができ、作用する種々の外力 V_A,H_A～V_E,H_E に関する 6 つの釣合式と交差する各部材 AE および BD に注目した場合のピボット周り C 点における 2 つのモーメントの釣合式より、**Table 1** と表される。ただし、$C=L_0\cos\theta$, $S=L_0\sin\theta$ である。

例として **Fig .1** の片持ちモデルを考える。与条件より、$H_B=V_B=0$, $H_E=0$,集中荷重 $V_E=P$ として解くと、反力 $R_A=P$, $R_D=0$, $H_A=-H_D=P\tan\theta$ が求まり、断面力 $M_C=P/L_0\sin\theta$, $S_{AC}=S_{CE}=P\sin\theta$, $N_{AC}=P\tan\theta\sin\theta$, $N_{CE}=-P\cos\theta$, $N_{DC}=-P/\cos\theta$ を得る。発生する断面力は **Fig .3** に示すように、軸力、せん断力、曲げモーメントと種々の力が作用していることが分かる。θ とそれに依存する断面力の関係を **Fig .2** に示す。構造体を展開するにつれ θ が増加するため、軸力 N_{CE} は θ の増加とともに減少していく。しかし、残りの反力および断面力は増加し、特に部材長に依存する曲げモーメント項が支配的な断面力となる。このことから、シザーズ構造の部材には軸力だけでなく曲げモーメントが発生することに注意しなければならない。また単位シザーズを基本とし、1,2,…,n と格間数を増加する場合においても同様に、力の釣合式を解いていくことで全体の未知反力を順に求めることが可能であり、任意の断面力を算定することができる。

3. 部材曲げ解析の結果

単位シザーズの釣合条件から、1 部材に対して曲げモーメントの抵抗力を把握しておく必要がある。そこでシザーズ骨組の実構造物を想定した、$I=1146.33\text{cm}^2$,$L=1.5\text{m}$ の構造部材を用いて 3 次元 FEM 解析を実施し、弾性範囲内における応力の進展状況を計測した。**Fig .4** と **Fig .5** は 43kN 時の解析結果をそれぞれ示す。曲げによる縁応力よりも、ピボット周りに高い応力が発生していることが分かる。 **Table 2** に解析結果および理論値より算定した、降伏荷重を示す。中心線上にある、下縁部分と上縁部分およびピボット周りの応力集中部に着目した。

以上より、曲げモーメントの影響よりも、ピボット周りの応力集中部での影響に注意しなければならないことが分かる。

4. 3 格間骨組構造モデルの FEM 解析の結果

軽車両荷重に耐えうる仮設橋を設計する。シザーズの

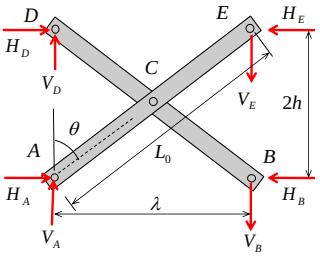


Fig .1 単位シザーズの FBD

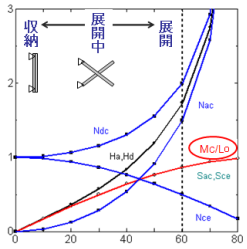
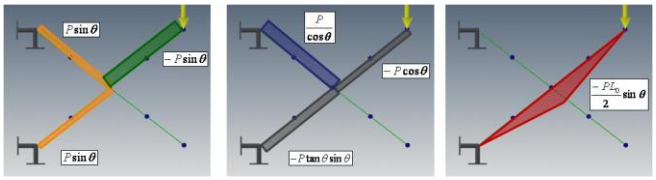


Fig .2 断面力と θ の関係



(a) 軸力図　(b) せん断力図　(c) モーメント図

Fig .3 単位シザーズに作用する種々の断面力

Table 1 単位シザーズの平衡力学

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

釣合式を解くことで、発生する曲げ応力を算定し、各作用応力値が使用限界応力内に収まるように検討する。降伏応力である 180MPa に安全率 1.5 を考慮して、120MPa までを使用限界応力とする。

Fig .6 に軽自動車が通行を考えた、3 格間のシザーズ骨組構造を持つ、スパン長 10.5m、横幅 1.97m、高さ 2m の解析モデルを示す。解析は片持ち展開状態時と展開後の両端支持状態の 2 パターンを行った。片持ち状態では自重のみを、両端支持状態では、自重に加え、軽車両を想定した T1 荷重を考慮し解析を行った。

シザーズの釣合式から導く最大発生応力は、片持ちモデルの場合、根元交差部分で 29.9MPa、両端支持モデルの場合、中央交差部で 56.0MPa である。また、ピボット周りの応力集中部の応力値を、応力集中部での降伏値と曲げによる降伏値の比率を用いて簡易的に算定する。

α=応力集中部での降伏荷重/下縁部分=43 /62=0.683

これは、応力集中部での降伏応力値が最大縁応力値の 0.683 倍であることを示す。このことを適用すると、ピボット周りの応力集中部での最大応力値は、片持ちモデルの場合 43.8MPa、両端支持モデルの場合 82.1MPa 相当であると予測できる。

Fig .7 、**Fig .8** に片持ちモデルと両端支持モデルの解析結果をそれぞれ示す。**Fig .9**(a),(b)に、各展開条件での最大応力値部分の拡大図をそれぞれ示す。**Table 3** は理論値と解析による結果をそれぞれまとめたものである。

Fig .7 は片持ちモデルの解析結果である。モデル中央のピボット部分の下縁部分で最大縁応力値 40.1MPa、円孔付近で 30.1MPa を得た。これらは許容限界応力内に十分収まる。理論値との差を比較すると、それぞれ 10.2MPa、13.7MPa であり、25.4%、45.7%の誤差がある。

Fig .8 は両端支持モデルの解析結果である。モデル中央のピボット部分の下縁部分で最大縁応力値 52.4MPa、円孔付近で最大応力値 111.9MPa を得た。これらは許容限界応力内に収まる。理論値と比較すると、差がそれぞれ 3.6MPa と 29.8MPa であり、6.84%、26.6%の誤差が生じた。

5. 結語

本研究の結論と今後の課題を以下に述べる。

1) シザーズ構造の平衡力学を考えることによって、この展開構造の基本的な力学特性を把握することができた。

2) 部材曲げ解析を元にシザーズ骨組構造モデルに組み込み、FEM 解析および理論設計による検証を行い、軽車両荷重に耐えうるシザーズ構造の可能性を示唆した。

3) 簡易的に応力集中部の応力を把握し、解析値との整合性を確認した。

4) 今後は、応力集中部の状態や接触圧の影響をより考えていく必要があり、力学的実験や FEM 解析を通して、理論値との整合性を確認する。

参考文献

(1) Ichiro Ario, Yuki Chikahiro, Yoshikazu Tanaka : Dynamic analysis for the prototype of a new type of Mobilebidge, EUROMECH-ENOC, 2011(submitted)

Table 2 単位シザーズの平衡力学

着目部分	理論値	FEM 解析
下縁部中央	63.4kN	63kN
上縁部中央	63.4kN	68kN
応力集中部	46.2kN	43kN

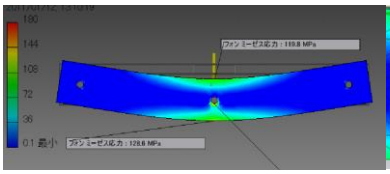


Fig .4 部材解析結果

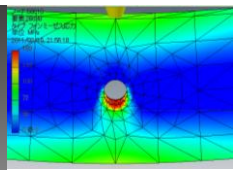


Fig .5 ピボット拡大部

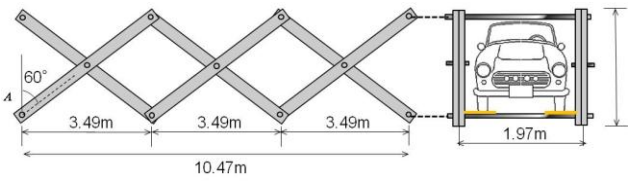


Fig .6 3 格間シザーズ骨組構造モデル

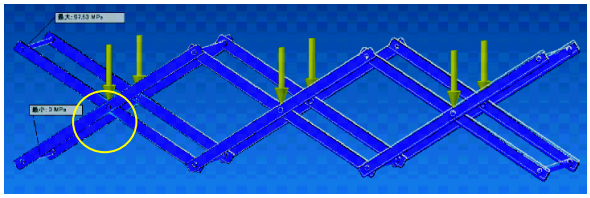


Fig .7 片持ちモデルのミーゼス応力分布

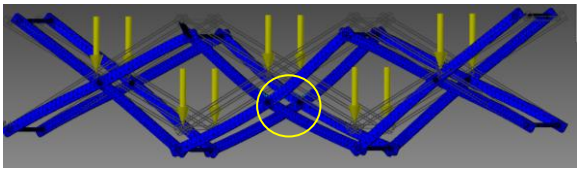
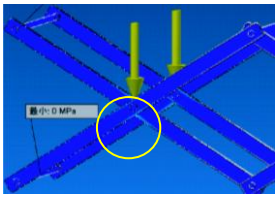
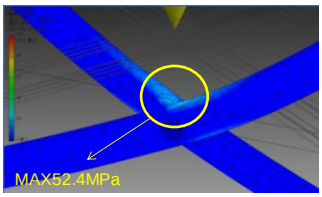


Fig .8 両端支持モデルのミーゼス応力分布



(a) 片持ちモデル



(b) 両端支持モデル

Fig .9 最大応力値付近の拡大図

Table 3 理論値と解析値の比較

着目部分	最大縁応力		ピボット周りの最大応力	
展開状態	片持ち	両端支持	片持ち	両端支持
理論値(MPa)	29.9	56.0	43.8	82.1
FEM解析値(MPa)	40.1	52.4	30.1	111.9
理論値と解析値の差(MPa)	10.2	3.6	13.7	29.8
理論値と解析値の誤差(%)	25.4	6.8	45.7	26.6