

シザーズ構造のFEM要素解析の開発

広島大学大学院 学生会員 山下 達也
 広島大学大学院 学生会員 横谷 祐樹
 広島大学大学院 正会員 有尾 一郎

1. はじめに

ハニカムなどの周期構造をセル構造体と呼び、その基本最小ユニットはセル構造と呼ばれ、R. Hooke¹⁾はそれを観察した。近年になり、L.J.Gibson²⁾によってセル構造の力学特性が解明されてきた。しかし、その解析には個々の材料特性とセル構造の幾何学的構造より、非線形な変形問題が存在するので、既往の離散化手法に基づく解析であった。計算機の発達に伴って、構造物の解析がFEMによって行われるようになった。そこで、C.T.Sun³⁾らによってユニットセル(RVE)を用いたFEM(マルチスケールや均質化法等)が提唱された。それら解析上の課題と、重要な周期構造における対称性の利用や接続などの体系的な視点からシザーズ構造⁴⁾の位相構造に着目する。特殊構造における数値解の不定を回避するセル単位の新たなFEM要素法を開発した。

2. 本解析手法の着眼点

離散化された周期構造物のFEM要素を解析するにあたり、セル構造体と同様にその周期構造に着目し、それを基本要素として同変なFEM要素と考える。本研究では、その周期性を利用し、ピボット回動の独立、構造不安定の回避、支持・荷重などの自由度の高いFEM要素を開発することを考える。そのシザーズ1ユニットの周期性を利用し、全体構造の剛性方程式を解析する(RVE手法)。n格間シザーズを1格間シザーズに離散化した後、1格間シザーズのFEM要素を構築し、n格間シザーズ全体のFEM要素を構築した。

3. FEM要素の構築

1格間シザーズ要素(1ユニット)を構築する方法を説明する。変位と荷重の関係を式で表す剛性方程式に

ならない、剛性行列を求めることによって、構造の変形を解析する事が出来る。ここで、シザーズ構造は、軸力も曲げにも影響を受けるラーメン構造体である。X形状からなるシザーズ構造は、4つの骨組要素から構成されたものを、シザーズ要素と呼ぶ。ここで、本研究では1部材要素の剛性行列を $\bar{k}^{(m)}$ を用いて表す。骨組要素 $\bar{k}^{(m)}$ を用いて、1格間シザーズ(1ユニット)の剛性行列 $K_{sc}^{(1)}$ を構築するには、m部材に対する座標変換行列 $T(\phi_m)$ を用いて、

$$\begin{aligned}
 K_{sc}^{(1)} &= \sum_{m=1}^4 k^{(m)} \\
 &= \sum_{m=1}^4 T(\phi_m)^T \bar{k}^{(m)} T(\phi_m) \\
 &= \left(\begin{array}{c|c|c} k_{sc}^{ll} & k_{sc}^{cl} & O \\ \hline k_{sc}^{lc} & k_{sc}^{cc} & k_{sc}^{rc} \\ \hline O & k_{sc}^{cr} & k_{sc}^{rr} \end{array} \right) \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

となる。ここで、シザーズ構造の特徴である部材中央のピボットは、部材間で変位は共有するが、回転は共有しないため、回転に関する剛性はそれぞれの部材ごとに、独立に取り扱う。式(1)で示される上付き添字は、それぞれ、lは左接続にcは中央部にrは右接続に対応する成分である。この1格間シザーズよりn格間シザーズにするには、1格間シザーズ要素をRVE手法のように、左右の接続条件を一致させていく。そこから、多格間シザーズの剛性は、1ユニットの剛性が周期性をもち、n格間分の剛性行列が構成される。

また、境界条件である左右の結合はピン結合で接続されているので、シザーズの節点変位と荷重ベクトルの回転自由度を増やし、シザーズ要素の為のFEM要素を開発した。また、シザーズ構造の補強に関しては、本研究では各ユニットの上部に上弦材を入れ補強とす

キーワード 展開構造, シザーズ構造, 迅速展開, 変位解析, 有限要素法
 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
 TEL082-424-7792

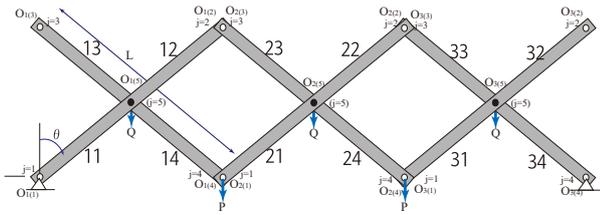


Fig. 1 シザーズ構造

Table 1 解析条件

シザーズ部材長 L(mm)	1000
シザーズの断面積 A(mm ²)	384
展開角 θ (°)	45
シザーズ母材の弾性係数 E(GPa)	70
断面二次モーメント I(mm ⁴)	234592
載荷荷重 P(N)	1000
自重 Q(N)	1000
アルミの弾性係数 E(GPa)	70
鋼鉄の弾性係数 E_s (GPa)	200
シザーズと補強材の剛比 α	0.1

Table 2 各軸力の解析結果

部材	本手法(N)	平衡力学理論(N)	差(N)	相対誤差(%)
11	-2890.353	-2890.350	-0.003	0.00010
12	-2183.247	-2183.250	0.003	-0.00014
13	0.000	0.000	0.000	0.00000
14	583.254	583.254	0.000	0.00000
21	707.107	707.107	0.000	0.00000
23	1661.919	1661.920	0.001	0.00006

る。補強部材は、軸力のみ働くので、全体の剛性行列の補強の対応箇所に軸力の剛性を与え、補強後の剛性行列を求めることができる。

4. 本手法による変位解析解の検証

本手法の妥当性は、Fig.1 に示されるように3格間シザーズの軸力で評価する。なお、今回は無補強材の場合を仮定し、初期条件はTable1に示す。また、構造および解析条件が左右対称であるので、軸力結果を半分のみ示す。今回本手法の比較に用いる手法は、平衡力学理論である。この理論は、各節点力のつりあいより各部材の軸力を求める手法である。結果は、Table2に示されるようになり、相対誤差が極めて小さいことが分かる。よって、この相対誤差は、解析の精度に依存するための誤差と考えることが出来る。従って、本手法による解析解の正確性を示せたと言える。

5. 補強材の効果

補強材の種類によって中央変位がどの程度変わるかを検証するために、剛性の違う2つの補強部材を用意した。鋼鉄の弾性係数 E_s は200GPa、アルミニウム合金の弾性係数 E は70GPaとして中央変位の解析を行う。荷重条件及び初期条件は前項と同様にFig.1とTable1を用いる。また、母材に対する補強材の断面積比を $\gamma (= B/A)$ とし、これをパラメータにとり、それぞれの補強部材で中央変位をどの程度低減できるかを解析を行った。結果は、補強材の断面積比が $\gamma = 0.1$ のとき、無補強時の中央変位と比べ、アルミ製補強材のとき1/10倍、鋼鉄製のとき1/20倍に抑える事ができた。よって、補強材は有効であると言える。また、補強 ($\gamma = 0.1$) を装備すると母材の曲げモーメントも1/12に低減できた。さらに、同条件のとき鋼鉄製の補強材による中央変位が、アルミ合金製の補強材による中央変位に比べ48.5%減少することが分かったので、補強材として鋼鉄製の方が優位であることが証明された。

6. 結論

本解析結果より、多格間シザーズ構造の周期構造を利用し、シザーズ要素で構築し、剛性行列を階層的に組立て、剛性方程式を安定的に変位解析することが出来る新たなFEM要素を開発した。3格間シザーズに着目し、補強材の有無による大きな利点と本手法による解析解の正確性などを示せた。

また、補強材を別条件として剛性行列に与えているので、補強材の材料をアルミ合金または鋼鉄のように自由に変化させることが出来、よって材料の違いによる中央変位の変化を解析することが可能となった。また、この補強材の解析により、鋼鉄製の補強材は、アルミ合金製の補強材と比べ最大で中央変位が51.5%減少することが分かった。

参考文献

- 1) R.Hooke, Micrographia: or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses. With Observations and Inquiries Thereupon *Int. Royal Society*,1665
- 2) L.J.Gibson, M.F.Ashby, 大塚正久訳：セル構造体 - 多孔質材料の活用のために、内田老鶴圃，1993.
- 3) C.T.Sun.,et al. Prediction of composite properties from a representative volume element, *Int. Composites Science and Technology*, No. 56,pp.171-179,1997.
- 4) Y.Chikahiro,I.Ario,P.Pawlowski,et al. Optimization of reinforcement layout of scissor-type bridge using differential evolution algorithm, *Int. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019