

鋼製組立網に用いられる金網の 面外変形解析に関する研究

新潟大学大学院 学生会員 小嶋里志
新潟大学工学部 正会員 阿部和久
共和ハーモテック(株) 非会員 深谷克幸

1. はじめに

鋼製組立網は、「じゃかご」や「かごマット」など古くから河川護岸に用いられてきたかご工法を改良して作られたものであり、近年の近自然工法に対する関心の高まりと共に見直されてきている。しかし、その力学的特性については未知な部分が多く、金網についても評価手法は確立していない。そのため、著者らは面内変形を対象に、金網の弾塑性有限要素解析手法を構成し、実験との比較によりその妥当性を確認した¹⁾。

本研究では、文献¹⁾に構成した手法を面外変形の問題に拡張し、実験との比較を通し本手法の妥当性を確認する。また、本手法による解析に基づき、面外変形下での金網の力学的特性について検討する。

2. 実験の概要

供試体には、線径 $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 6\text{mm}$ の2種類の金網を対象に、一辺 0.75m の正方形に成形したものを用いた。(図1)

荷重は金網の中央部分におかれた $0.1 \times 0.1\text{m}$ の載荷板に加え、変位計で載荷点のたわみを測定した。また、金網は四辺拘束とし、丸棒を金網の外枠に設置して、Uボルトで固定した。

3. 要素間の回転ばねのモデル化

金網には主に面内力が作用するものと仮定し、文献¹⁾に構成したモデルを適用する。また、変形は微小ひずみ有限変形とし、面外変形を考慮する。金網は巨視的に等価な力学的特性を持つ二次元連続体でモデル化し、図2に示すような金網の網目1ユニット(ユニットセル)の力-変位関係に基づき構成式を誘導する。また、列線間の相対的なずれを考慮するためにユニットセルの中心点に x_1 方向と x_2 方向に接触ばねを導入する。(図3)

金網の巨視的応力とひずみの増分関係は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= \frac{1}{2}(A_{ijkl} + A_{jikl})d\varepsilon_{kl}, & A_{ijkl} &= \frac{1}{2A}(a_{ijkl} - \bar{b}_{pq}C_{ijp}C_{qlk}), \\ a_{ijkl} &= \sum_m^2 F_{i,k}^m n_j^m n_l^m, & C_{ijk} &= \sum_m^2 F_{i,k}^m n_j^m, \\ \bar{b}_{ij} &= b_{ij}^{-1}, & b_{ij} &= \bar{k}_{ij} + \sum_m^2 F_{i,j}^m, & A &= \sin\theta \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 θ は網の交差点間を結ぶ線と x_1 軸のなす角度、 $F_{i,j}^m$ は網のユニットセルの頂点 m に作用する力の変位導関数、 n_i^m はユニットセルの重心から頂点 m の方向への単位ベクトル、 $\bar{k}_{ij}$ は中心点の接触点に設けたばねのばね定数である。

金網の巨視的応力とひずみの増分関係の具体的評価には、金網を構成するユニットセル当りにおける列線の力-変位関係が必要となるが、その弾塑性挙動は変形過程に依存する。したがって有限要素解析に適用する場合、要素内の応力評価点毎に列線の弾塑性解析を併せて行う必要があり、解析効率上問題がある。そこで、ユニットセル当りの列線の力-変位関係をニューラルネットワークにより学習させ、学習結果に基づき任意の変形過程における列線の作用力の評価を行っている。

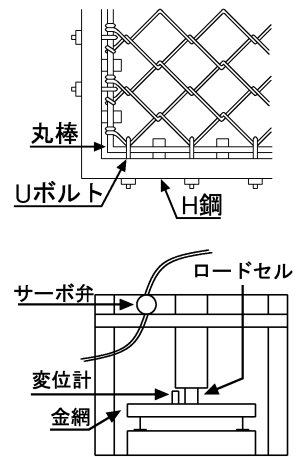


図-1 実験概要 (上:金網取り付け状況, 下:実験装置)

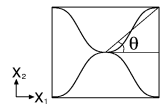


図-2 ユニットセル

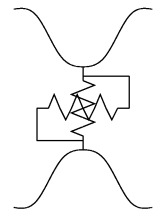


図-3 中心点の接触ばね

また、金網は列線方向にわずかに曲げ剛性を有している。そこで図4に示すように各有限要素間に回転ばねを導入し、それをモデル化する。なお、面外変形下での増分計算には、弧長増分法を用いた。

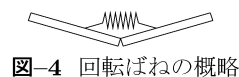


図-4 回転ばねの概略

4. 有限要素解析

解析では対象条件により金網全体の1/4を有限要素分割した。その様子を図5に示す。なお、有限要素には三角形定ひずみ要素を用いた。

初期段階においては金網同士の接触が不完全であるため、金網の面外剛性は比較的低い。この接触は変形の進行と共に回復して行くが、その過程をも解析で再現するのは容易ではない。そこで、初期たわみを調整することで実験における荷重-変位曲線との一致を試みた。なお、単位長さ当りの回転ばねのばね定数は、線径 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ それぞれ924, 1775(N/rad)とした。

試算の結果、線径 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ に対する初期たわみをそれぞれ0.022m, 0mと設定した。荷重と載荷点における鉛直変位との関係を図6, 7に示す。図には解析結果と合わせ実験結果も示した。図より線径 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ 共に実験との良好な一致が得られていることがわかる。

また、図5の黒く示した部分は解析において偏差応力の値が最も大きくなった要素である。その要素における金網の頂点作用力と変位との関係の履歴を図8に示す。なお、図8は線径 $\phi 5\text{mm}$ の場合で、ユニットセルの第1象限に頂点を有するものである。この図から分かるように、この要素の金網は既に塑性域に入っているが、図6に示したように、金網全体の耐力の低下には至っていない。

次に、線径 $\phi 5\text{mm}$ の金網における偏差ひずみの分布を図9に示す。実験においては変形の様子を把握するのが困難であったが、図9より、中央載荷点から列線方向と直交する方向に10cm程離れた位置に変形が集中している様子が確認できる。

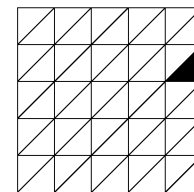


図-5 有限要素分割

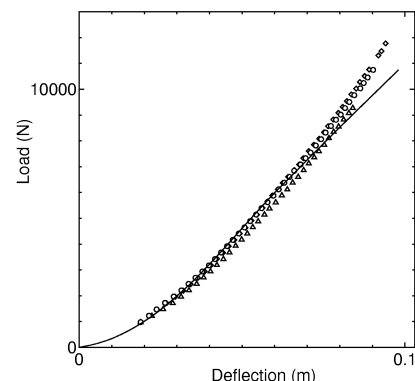


図-6 荷重-変位曲線(線径 $\phi 5\text{mm}$) 実線: 解析結果, マーク: 実験結果

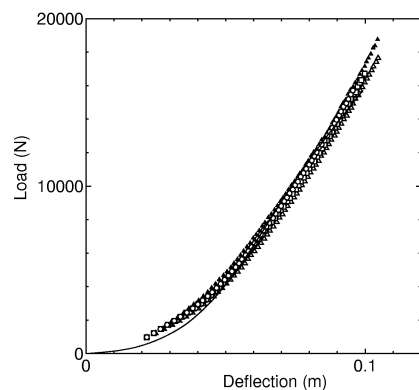


図-7 荷重-変位曲線(線径 $\phi 6\text{mm}$) 実線: 解析結果, マーク: 実験結果

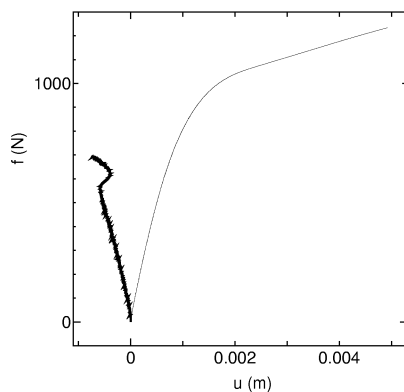


図-8 金網の頂点作用力-変位曲線(線径 $\phi 5\text{mm}$) 太線: x_1 方向, 細線: x_2 方向

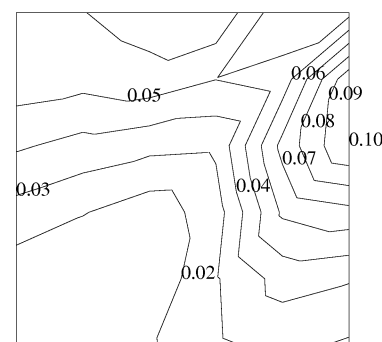


図-9 偏差ひずみ分布(線径 $\phi 5\text{mm}$)

5. おわりに

鋼製組立網に用いられる金網の面外変形解析手法を構成しその適用性について検討した。その際に面内変形を対象に構成した二次元連続体モデルを採用し、面外変形下における面内力の発生過程を表現した。また、金網の列線方向の曲げ剛性を考慮するために、有限要素間に回転ばねを導入した。解析の妥当性を検討するために面外変形実験を行い、解析結果との比較を行った。その結果、線径 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ 共に概ね良好な結果を得ることができ、本研究で構成した手法の妥当性を確認できた。本手法によれば、面外変形下における金網の力学的評価が可能であり、鋼製組立網の力学特性の把握に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 阿部和久, 深谷克幸: 鋼製組立網に用いられる金網の弾塑性解析, 土木学会論文集, No.633, pp.205-215, 1999