

鋼製組立網に用いられる金網の面外変形解析

Out-plane deformation analysis of wire mesh used for box gabions

阿部和久*・小嶋里志**・深谷克幸***

Kazuhisa Abe, Satoshi Kojima and Katsuyuki Fukaya

*工博, 新潟大学助教授, 工学部建設学科 (〒 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050 番地)

**新潟大学大学院自然科学研究科

***共和ハーモテック(株) 技術・研究部 (〒 950-0971 新潟市近江 155 番地 1)

A numerical method is developed for the analysis of deflection in wire mesh that is used for box gabions. The wire mesh is modeled as a membrane in which the stiffness occurs due to the deflection under the existence of in-plane stresses. In the formulation, the macroscopic strain is assumed to be small, and the solving method is constructed by virtue of the finite displacement theory. The constitutive relation which has been derived by the authors for plane problem is employed to describe the macrocontinuum. Validity of the developed method is examined by comparing the numerical results with the experiments. As a result, it is proved that the present method is applicable to deflection analysis of the wire mesh except for extremely large deformation. Finally several mechanical properties of the wire mesh are investigated based on the numerical results.

Key Words : wire mesh, deflection, elasto-plastic analysis

1. はじめに

鋼製組立網は、図-1 に示すように、棒鋼で作った枠組に金網を取り付けてできたパネルから成り、それらを組み立ててかご状にしたものである。内部に石材(中詰材)を充填することで強度と可撓性とを合わせ持った構造とすることができ、主に河川護岸や擁壁、砂防ダムなどに用いられている。構造全体としての強度は、中詰材と鋼製組立網との相互作用によって発現されることとなるが、その力学特性については殆ど未解明であり、力学的根拠に基づいた設計手法が確立されていないのが現状である。鋼製組立網単体としての力学特性に限って見ても、それは上述のように鋼製枠と金網とからつくられており、特に金網の力学挙動については既往の研究も殆ど無く¹⁾、未知な部分が多い。

そこで著者は、鋼製組立網に用いられる金網の力学特性の評価を目的に、面内変形を対象とした弾塑性有限要素解析手法を構成した²⁾。文献 2) においては、金網をそれと力学的に等価な連続体によりモデル化し、弾塑性解析において必要となる金網列線の作用力と変位との関係をニューラルネットワークにより学習・評価する方法を採った。その結果、面内変形に関しては実験結果との良い一致を得ることができ、提案手法の妥当性を確認することができた。

しかし、鋼製組立網に用いられる金網は、面内変形だけではなく、中詰材との相互作用の下に面外変形も受けており、そのような変形状態下での力学挙動についても解析することが必要である。特に、面外力の作用の下で金網が有する強度、剛性、金網面内のひずみや応力の分布、周囲の枠組に作用する荷重とその分布特性などは、鋼製組立網の設計において重要な基礎的なデータとなるものであり、数値解析はそれらの知見を

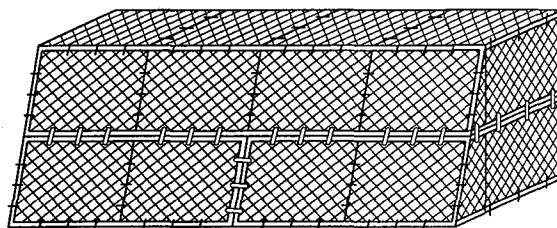


図-1 鋼製組立網

得る上で実験結果を補完する有用な手段となる。

そこで本論文では、文献 2) に示した解析手法を面外変形問題に拡張する。具体的には、金網を主に面内力を受け持つ膜構造としてモデル化し、面内剛性の評価には、文献 2) に構成した手法を適用する。また、金網の面内変形を微小ひずみと仮定し、全体の変形は有限変位問題として定式化する。なお、金網を構成する列線は、その長手方向に僅かに曲げ剛性を有する。これのモデル化には、各要素境界辺上に回転バネを分布させる方法を採用した。

以下では、まず本研究で実施した金網の面外載荷実験の概要について述べる。次に、構成した解析手法について説明する。最後に実験結果との比較を通し、解析手法の妥当性について検討し、解析結果に基づき金網に作用する巨視的面内応力の分布や、金網周辺境界に作用する応力とその分布特性などについて考察する。

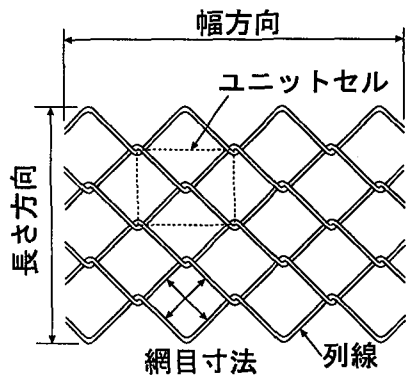


図-2 菱形金網

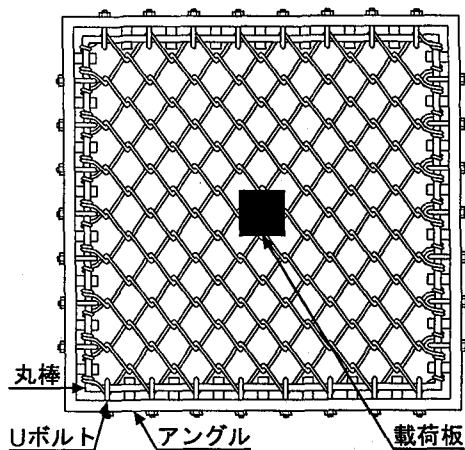


図-3 金網の取付け状況

2. 金網の面外載荷実験の概要

鋼製組立網では、図-2 に示すような菱形金網が一般に多用されている。菱形金網は螺旋状に成形した列線を編んで造られている。列線の長手方向を「幅方向」、それに直交する方向を「長さ方向」と呼ぶ。

金網の面外載荷実験の供試体には、線径 $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 6\text{mm}$ の 2 種類の金網を対象とし、一辺約 75cm の正方形に成形したものをを用いた。なお、いずれの線径の金網においても、網目寸法はほぼ等しく 65mm である。金網の周囲には、図-3 に示すように、直径 9mm の丸棒で作成した枠組を取付け、それを U ボルトでアングルに固定した。さらに、枠組の面外変形を完全に拘束する目的で、各 U ボルトの間にアングルから支持板を張り出させ、それにより枠組を支えるようにした。なお、金網幅方向に平行な境界辺 (図-2 の上下の辺) では、金網列線が丸棒に巻き付いている箇所を U ボルトで固定しているの、金網は丸棒に沿った方向の変位についても拘束されている。一方、金網長さ方向に平行な境界辺 (図-2 の左右の辺) では、金網が丸棒に沿ってある程度スライドできるようになっている。なお、これらの境界辺での境界条件の設定については「4. 解析結果」で検討する。

載荷実験に当り、図-4 に示すように金網を水平に設

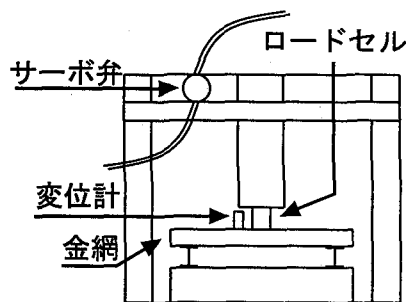


図-4 載荷方法

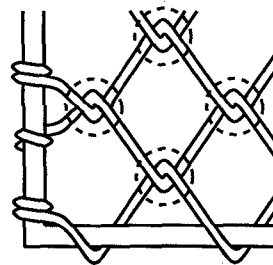


図-5 残留変位の測定位置

置し、金網中央に置かれた $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の载荷板にハイドロパルス試験機により荷重を加えた。載荷実験中は、载荷板に取り付けた変位計により載荷点のたわみを測定した。また実験終了後に、金網の各交差点部 (図-5) における残留変形を測定した。具体的には、鉛直たわみと、幅方向および長さ方向に隣接する交差点間の距離を測定し、それに基づき幅方向と長さ方向の巨視的ひずみ量を求めた。

3. 解析手法

3.1 金網のモデル化

金網を構成する列線は、その長手方向に曲げ剛性を有するので、金網全体も幅方向にたわみ剛性を持つ。しかし、金網が実際に受ける面外荷重は、この剛性が無視し得る程度に大きく、それらは主に金網の面内応力によって支持されるものと考えられる。そこで、本研究では、金網を基本的には曲げ剛性を持たない膜構造によりモデル化し、面外剛性は金網のたわみにより発現されるものとする。ただし、比較的荷重レベルの低い段階においては、上述の列線が有する曲げ剛性の影響も無視し得ないものと思われる。そこで、列線の剛性を回転バネによりモデル化し、隣接する有限要素との境界辺上に分布させる方法を採用した (図-6)。

金網の面外変形解析に当り、金網の面内ひずみは微小、変位は有限とし、有限変位理論に基づき定式化を行った。また、金網面内の微小ひずみ下での応力-ひずみの増分関係には、文献 2) に構成した巨視的に等価な連続体の弾塑性構成式を用いた。

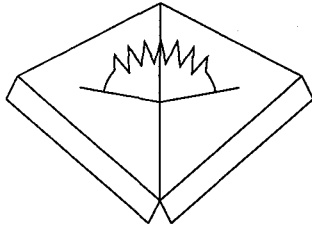


図-6 回転バネの設定

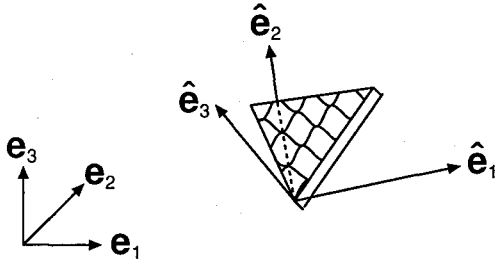


図-7 固定座標系と移動座標系

3.2 接線剛性行列

各要素内でのひずみは微小とし、剛体変位・回転は無視し得ない程度に大きいものと仮定した有限変位理論の考え方自体は、多くの研究者により検討がなされている^{3),4)}。ここでは、本解析で必要となる接線剛性行列の誘導過程について、その概略を述べる。

なお、解析に当り、有限要素には三節点三角形要素を用いる。このとき、変形過程において要素は常にある平面内の三角形により与えられる。

図-7 に示すように、空間に固定されたデカルト座標系 e_i と、有限要素と共に移動する座標系 $\hat{e}_i$ を考える。それらの間の座標変換行列を $\hat{T}$ とし、次式のように定義する。

$$\{\hat{e}\} = [\hat{T}]\{e\} \quad (1)$$

ここで、 $\{\hat{e}\} = [\hat{e}_1 \hat{e}_2 \hat{e}_3]^t$ 、 $\{e\} = [e_1 e_2 e_3]^t$ 、であり、 $[\]^t$ は転置を意味する。

なお便宜上、解析では $\hat{e}_1$ を金網の幅方向、 $\hat{e}_2$ を要素面内で $\hat{e}_1$ と直交する方向、 $\hat{e}_3$ を面に垂直な方向にとる。

$\hat{e}_i$ 系での 1 要素当りの接線剛性行列を $\hat{K}_T$ とすると、次式が成り立つ。

$$\hat{K}_T d\hat{u} = d\hat{f} \quad (2)$$

ここで、 $d\hat{u}$ 、 $d\hat{f}$ は $\hat{e}_i$ 系での節点変位増分と節点力増分である。

なお、 $d\hat{f}$ は次式で与えられる。

$$d\hat{f} = d\hat{T}f + \hat{T}df \quad (3)$$

ここで、 f 、 df は e_i 系での節点力とその増分、 $d\hat{T}$ は増分変位に伴う $\hat{T}$ の増分である。なお、式(3)以降における $\hat{T}$ は、式(1)で与えられた 3×3 の座標変換行列 $\hat{T}$ を対角に持つ 9×9 の行列を表わすものとする。

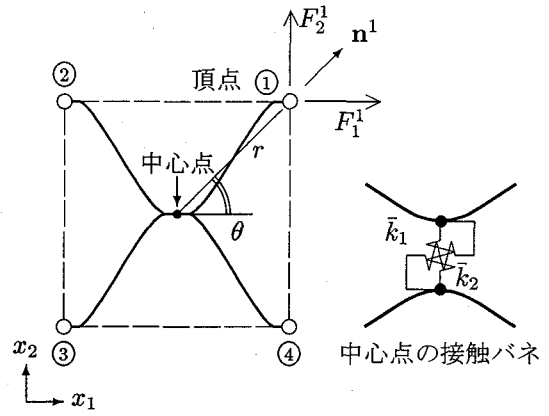


図-8 金網のユニットセル

式(3) を(2) に代入して次式を得る。

$$\hat{T}^t [-d\hat{T}f + \hat{K}_T \hat{T} du] = df \quad (4)$$

ここで、 du は e_i 系での節点変位増分である。

現段階での $\hat{T}$ を $\hat{T}(t)$ 、増分後のそれを $\hat{T}(t+dt)$ とすると次式を得る。

$$\begin{aligned} \hat{T}(t+dt) &= \hat{T}(t) + d\hat{T} \\ &= \delta\hat{T}\hat{T} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\delta\hat{T}$ は $\hat{e}_i(t)$ から $\hat{e}_i(t+dt)$ への座標変換行列である。

よって、 $d\hat{T}$ は次のように書き表わすことができる。

$$\begin{aligned} d\hat{T} &= \Delta\hat{T}\hat{T}, \\ \Delta\hat{T} &:= \delta\hat{T} - I \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 I は恒等行列である。

式(6) を(4) に代入し、 $\hat{T}f = \hat{f}$ に注意すると次式を得る。

$$\hat{T}^t [-\Delta\hat{T}\hat{f} + \hat{K}_T \hat{T} du] = df \quad (7)$$

さらに、 $\Delta\hat{T}$ は $d\hat{u}$ を含むので、その線形項のみ用いると、 $\Delta\hat{T}\hat{f}$ は形式的に次のように書き表すことができる。

$$\Delta\hat{T}\hat{f} = \hat{G}d\hat{u} \quad (8)$$

ここで、行列 $\hat{G}$ の成分は $\hat{f}$ の関数として与えられる。

式(8) を(7) に代入すると最終的に次式を得る。

$$\begin{aligned} K_T du &= df, \\ K_T &:= \hat{T}^t [\hat{K}_T - \hat{G}] \hat{T} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 K_T は固定座標系 e_i での接線剛性行列である。

3.3 面内剛性の定式化

式(2)における $\hat{K}_T$ の作成には、文献 2) に構成した巨視的応力-ひずみ関係を用いる。以下にその概要を示す。なお、詳細については文献 2) を参照されたい。

まず、金網のパターンを構成している最小単位をユニットセルと呼び、それを図-2のように定義する。図-8に示すように、1つのユニットセルにおいて、列線どうしが交差する点を中心点、4つの角を頂点、中心点と頂点との間の距離を r と定義する。また、金網面内の幅方向に x_1 軸、長さ方向に x_2 軸を設定し、中心点と頂点①を結ぶ線と x_1 軸とのなす角度を θ 、 m 番頂点における x_i 方向作用力を F_i^m 、 r 方向単位ベクトルを $\mathbf{n}^m$ と定義する。さらに、列線交差部(中心点)における列線間の相対変位を考慮するため、図-8のように中心点の x_1, x_2 軸方向に接触バネ $\bar{k}_1, \bar{k}_2$ を設定する。

このとき、金網の巨視的な応力-ひずみの増分関係式は次式で与えられる²⁾。

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= \frac{1}{2}(A_{ijkl} + A_{jikl})d\epsilon_{kl}, \\ A_{ijkl} &:= \frac{1}{2A}(a_{ijkl} - \bar{b}_{pq}C_{ijp}C_{qlk}), \\ a_{ijkl} &:= \sum_{m=1}^2 F_{i,k}^m n_j^m n_l^m, \\ C_{ijk} &:= \sum_{m=1}^2 F_{i,k}^m n_j^m \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $d\sigma_{ij}, d\epsilon_{kl}$ は金網の巨視的な応力とひずみの増分、 $A = \sin\theta \cos\theta$ 、 $F_{i,k}^m$ は頂点作用力 F_i^m の x_k 方向頂点変位による導関数であり、繰り返し指標は総和規約に従うものとする。

また、 $\bar{b}_{ij}$ は次式で定義された b_{ij} の逆行列である。

$$b_{ij} := \bar{k}_{ij} + \sum_{m=1}^2 F_{i,j}^m \quad (11)$$

なお、 $\bar{k}_{11} = \bar{k}_1, \bar{k}_{12} = \bar{k}_{21} = 0, \bar{k}_{22} = \bar{k}_2$ である。

式(10)により巨視的な応力-ひずみの増分関係を得るには、頂点作用力の変位導関数 $F_{i,j}^m$ が必要である。文献2)では、その評価を効率良く実行する目的で、頂点変位と頂点作用力との関係をニューラルネットワーク⁵⁾により学習させ、その結果に基づき $F_{i,j}^m$ を求める方法を採用した。なお、ニューラルネットワークには階層型のものを用い、頂点変位を入力、頂点作用力を出力とし、誤差逆伝播則に基づき学習を行った。また、学習データの作成には、列線1/4周期部分を対象とした三次元弾塑性解析の結果を用いた²⁾。

3.4 列線の曲げ剛性のモデル化

前述のように、列線の曲げ剛性は要素境界辺上に分布した回転バネでモデル化する。なお、列線の曲げ剛性の影響を無視できないのは、荷重が比較的小さな段階であり、その時点で列線は一般に弾性挙動を示すと考えられる。したがって解析に当り、回転バネには弾性成分のみ考慮した。

任意方向を向いている要素境界辺上に分布している回転バネのバネ定数は次式により与える。

$$\bar{k} = k_\theta |\hat{\mathbf{e}}_1 \cdot \mathbf{a}| \quad (12)$$

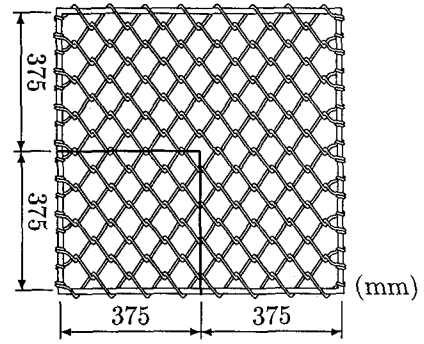


図-9 金網の解析領域

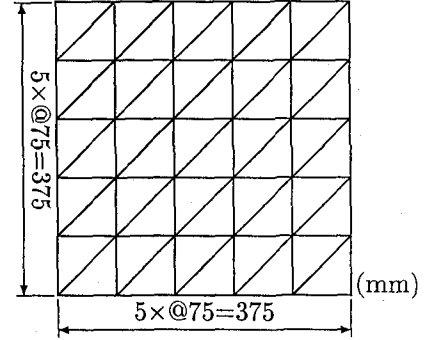


図-10 有限要素分割

ここで、 $\mathbf{a}$ は要素境界辺に直交する単位ベクトル、 $\hat{\mathbf{e}}_1$ は3.2に定義したように列線方向(幅方向)の単位ベクトル、 k_θ は単位幅当りの列線の曲げ剛性に等価なバネ定数であり、次式で与えられる。

$$k_\theta = \frac{S_b}{hr \sin\theta} \quad (13)$$

なお、 S_b は列線1本当りの面外方向曲げ剛性、 h は有限要素の代表長である。また、要素の回転成分は、要素節点の各変位により評価する。

4. 解析結果

4.1 解析条件

文献2)の検討結果に基づき、金網ユニットセル中心点の接触バネ定数は $\bar{k}_1 = 10^5(\text{N/m})$ 、 $\bar{k}_2 = 10^9(\text{N/m})$ とした。また、列線の弾性係数は $1.91 \times 10^2(\text{GPa})$ 、降伏応力は $0.35(\text{GPa})$ 、降伏後の接線係数と弾性係数との比は0.02と設定した。

解析では、問題の対称性を考慮して、金網全体の1/4部分(図-9左下部分)を取り出し離散化した。図-10に有限要素による分割の様子を示す。なお、解析に際し、要素分割数を変え、荷重とたわみの関係に基づき精度を確認した結果、図-10のように各辺5等分割(36節点、50要素)したものを採用した。当該分割条件における k_θ の値は、式(13)に基づき線形 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ に対しそれぞれ924、1775(N/rad)とした。

境界条件としては、右側と上の辺に対称条件を課している。また、2.で述べたように、下の辺は変位が完全に拘束されたかたちとなっているが、左側の辺では

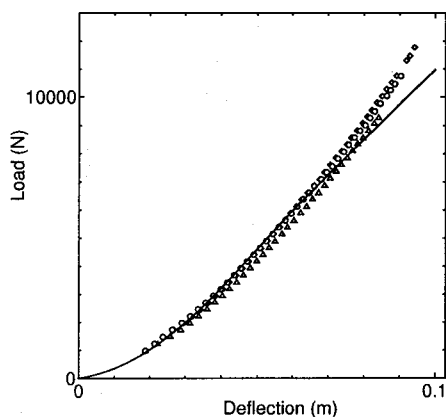


図-11 荷重-変位曲線 (φ5mm, 実線:完全拘束, 破線:スライド, マーク:実験結果)

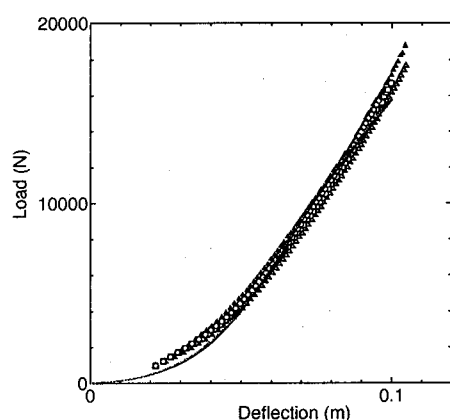


図-12 荷重-変位曲線 (φ6mm, 実線:完全拘束, 破線:スライド, マーク:実験結果)

金網が枠組に沿ってある程度スライドできるようになっている。载荷中に金網がスライドする際、金網と枠組(丸棒)の間には摩擦力が作用する。したがって、厳密な解析にはこの摩擦滑りの考慮が必要である。なお、摩擦力の作用下での挙動は、摩擦力の全く作用しない「スライド条件」と、摩擦滑りの発生を許さない「完全拘束条件」の両境界条件下での挙動の中間状態に位置したものとなると考えられる。そこで、以下の解析では、左側の枠組に沿った境界条件として、スライド条件と完全拘束条件の2ケースを設定し、境界条件の違いが結果に及ぼす影響や、設定境界条件の妥当性について検討する。

なお、増分解析に当り弧長増分法^{6),7)}を用い、各増分ステップでの不釣り合い力が十分小さくなるまで収束計算を実行した。

4.2 実験結果との比較

金網中央の载荷点におけるたわみと荷重との関係について、実験と解析とで比較した結果を図-11 (φ5mm)、図-12 (φ6mm) に示す。ここで、図中の各マークは、それぞれ同一条件で行った実験結果を示したものである。

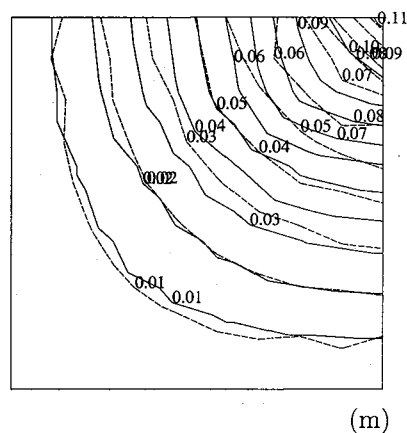


図-13 たわみの比較 (φ5mm, 実線:解析結果, 破線:実験結果)

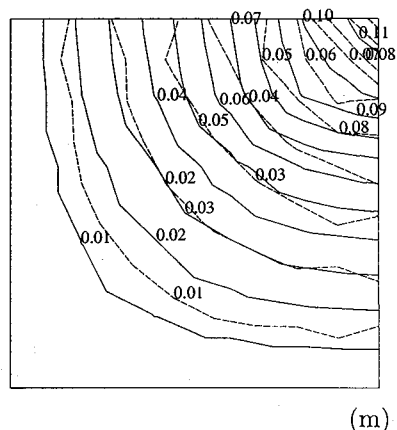


図-14 たわみの比較 (φ6mm, 実線:解析結果, 破線:実験結果)

なお、実際の金網には、初期たわみ、列線どうしの交差部や枠組取付部における緩みなどが存在している。これらの初期不整は荷重-変位関係、特に初期の关系到影響を及ぼすものと思われるが、その存在を適切に考慮するのは容易でない。そこで解析では、これらの影響を等価な初期たわみで表現し、試算を通し最適な値を見出す方法を採用した。図-11, 12 に示した解析結果は、载荷点の初期たわみをそれぞれ 2.2cm, 0.0cm に設定して得られたものである。初期たわみの違いは、上述のように低い荷重レベルにおける荷重-変位関係に比較的影響を及ぼすが、ある程度大きな荷重レベルにおける荷重-変位の曲線形状は、その影響を殆ど受けて、全体に平行移動したものとなる。

なお、初期たわみ形状は次式で与えた。

$$w_0 = \delta_0 \frac{x_1}{H} \frac{x_2}{H} \left(\frac{x_1}{H} - 2 \right) \left(\frac{x_2}{H} - 2 \right) \quad (14)$$

ここで、 δ_0 は载荷点での初期たわみ、 $2H$ は金網一辺の長さであり、座標原点は金網左下角点にとっている。

解析はたわみが約 10cm に達するまで実行した。線径 φ5mm の場合、たわみが 7cm を超えたあたりから解析結果と実験結果との差が顕著になりだしているが、それ以下のたわみにおいては比較的良好な一致が

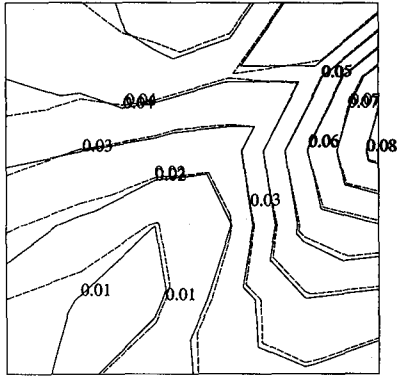


図-15 ひずみ分布 ($\phi 5\text{mm}$, 実線:完全拘束, 破線:スライド)

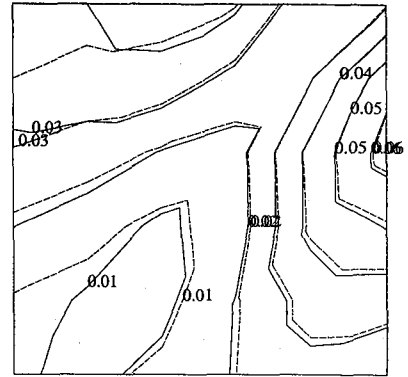


図-17 ひずみ分布 ($\phi 6\text{mm}$, 実線:完全拘束, 破線:スライド)

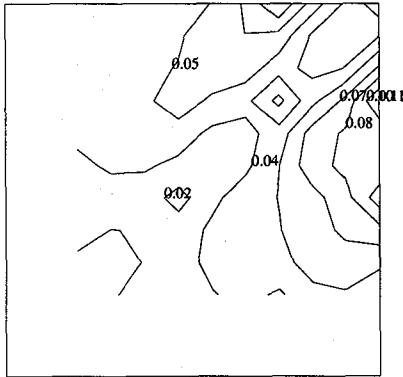


図-16 ひずみ分布 ($\phi 5\text{mm}$, 実験結果)

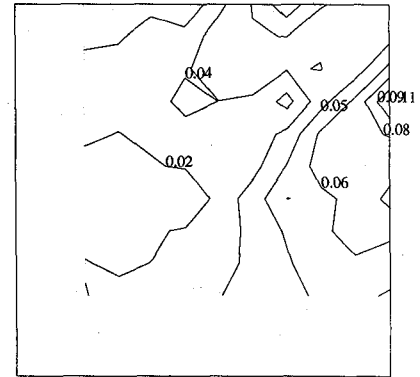


図-18 ひずみ分布 ($\phi 6\text{mm}$, 実験結果)

認められる。なお、たわみが 10cm 程度になると、後で述べるように金網の変形は載荷点近傍に集中し、たわみも載荷点の周囲で局所的に大きな値を示すようになる。これは載荷点近傍の金網が大きく塑性変形したことによるものであるが、解析では金網の面内変形は微小と仮定しており、この仮定が成立し得ない程度に大きな変形を生じたことが主な原因で、上述のような解析と実験との差違を生じたものと考えられる。ちなみに、実験では 20000N 近くまで載荷を試みた場合もあったが、その範囲内で金網全体としての強度低下は全く認められなかった。

また、図には金網左境界辺を完全拘束としたもの(実線)とスライド条件としたもの(破線)とを示したが、それらはほぼ完全に一致しており、荷重-たわみ曲線で見ると、それら境界条件の違いによる影響は無視し得る程度に小さいことがわかる。

次に、金網のたわみ形状について比較した結果を図-13($\phi 5\text{mm}$)、図-14($\phi 6\text{mm}$)に示す。なお、解析結果は完全拘束条件とスライド条件とでほぼ同じものとなったので、図には完全拘束条件に対するものを示した。

実験では、載荷中に各金網交差点でのたわみを測定することが技術的に困難であったため、実験終了後、載荷点にポストロードとして 579N を加え、その下でたわみを測定した。なお、実験結果は最大たわみが約 10cm となるまで載荷したものであるが、除荷後の残留変位の様子から、発生したたわみの大部分は塑性変形によ

るもので、それに比べ弾性成分の寄与は全体の二割程度と小さいことがわかった。したがって、図-13、14の実験結果におけるたわみは、載荷中の最大たわみ発生時のものと完全に一致はしないが、それに概ね等しい値を与えているものと考えられる。一方解析では、実験で載荷した最大荷重に対応した荷重 9800N($\phi 5\text{mm}$)と 14700N($\phi 6\text{mm}$)での結果を示している。

図より、たわみの等高線は載荷点の周囲にほぼ同心円状に分布しており、金網の幅方向と長さ方向での方向性の違いは殆ど影響していないことがわかる。この傾向は解析でも認められ、等高線の形状は実験結果と良く一致している。しかし、載荷点近傍でのたわみ形状について見ると、実験結果の方が局所的に変形が集中している傾向が顕著に現れている。この違いは、載荷点近傍での金網の大きな変形が、本解析手法では十分に表現できなかったことによるものと考えられる。

次に金網面内のひずみ分布について比較した結果を図-15 ~ 18 に示す。なお、図-15($\phi 5\text{mm}$)、図-17($\phi 6\text{mm}$)には完全拘束条件での解析結果を実線で、スライド条件での解析結果を破線で示している。また、図中のひずみには金網のゆがみ具合の目安として、幅方向伸びひずみと長さ方向伸びひずみとの差の絶対値を示した。実験結果と解析結果を比べて見ると、最大ひずみが載荷点より長さ方向に 10cm 程度離れた位置に発生していること、ひずみの比較的小さな領域が金網角部から載荷点に向かってくさび状に分布している

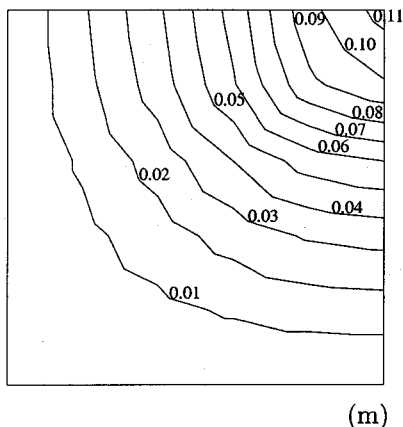


図-19 たわみ分布 ($\phi 5\text{mm}$, 集中荷重)

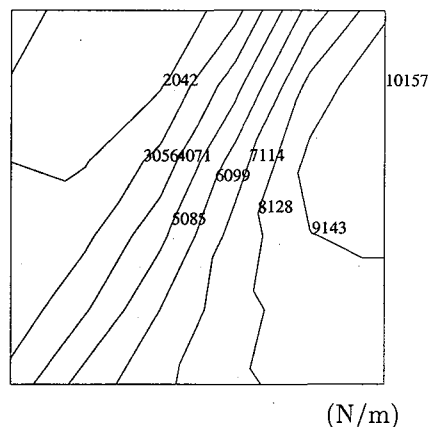


図-21 応力分布 ($\phi 5\text{mm}$, 集中荷重)

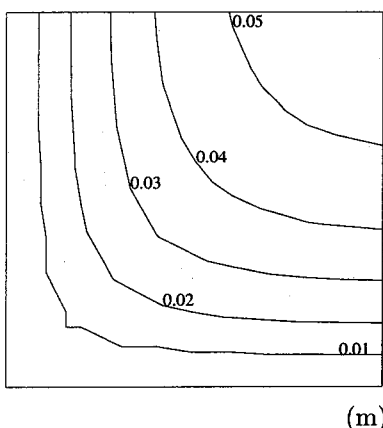


図-20 たわみ分布 ($\phi 5\text{mm}$, 等分布荷重)

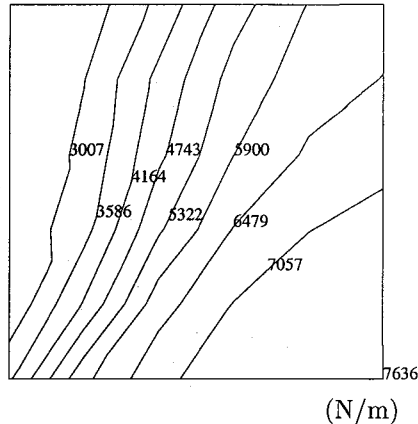


図-22 応力分布 ($\phi 5\text{mm}$, 等分布荷重)

こと、などについて定性的な一致が得られている。また、ひずみの値についても比較的良い一致が認められる。

なお、完全拘束条件とスライド条件とでの差は左の境界付近で僅かに認められるものの、全体としては両者とも同様の結果を与えている。以上より、境界条件の違いがたわみに及ぼす影響と合わせ、完全拘束の場合とスライドの場合とで解析結果に大差はなく、したがって、それらの中間状態にあると考えられる摩擦滑りの条件下でも、結果は同様のものとなることが予想される。よって、解析では完全拘束・スライドいずれの条件でも特に問題は生じない。そこで、以下では完全拘束条件で解析を進める。

4.3 荷重の違いが結果に及ぼす影響

実験結果と解析結果との比較を通し、両者間に多少の差は認められたものの、全体としては比較的良好な一致が得られており、本解析手法の妥当性を確認することができた。以下では、解析結果に基づき、実験で得ることのできない金網の力学特性について考察する。

これまでは金網中央の $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の狭い領域に荷重が作用した場合（集中荷重）を対象としてきた。しかし、実際の鋼製組立網には中詰材圧が何らかのかたちで分布して作用することとなる。実際に作用する中詰材圧は金網と中詰材との相互作用により生ずるもので、現段階では未知な部分が多い。そこで、ここでは集中

荷重と等分布荷重の二つの基本的な荷重分布を対象に、これら荷重分布の違いが変形や応力に及ぼす影響について調べる。なお、解析に当り、線径 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ 各々に対し、作用荷重が 10000N および 15000N となるように、集中荷重または等分布荷重を加えている。

線径 $\phi 5\text{mm}$ におけるたわみの様子を 図-19(集中荷重)、図-20(等分布荷重)に示す。なお、線径 $\phi 6\text{mm}$ の場合においても $\phi 5\text{mm}$ の場合と同様のたわみ形状を得ている。図より、等分布荷重においては、金網周辺の枠組に沿うようにたわみの等高線が分布しており、集中荷重の場合とは明らかに異なったものとなっている。また、当然のことながら、集中荷重の場合の方が金網中央点近傍に変形が集中しており、たわみの値も等分布荷重の場合より大きくなっている。

次に、線径 $\phi 5\text{mm}$ における面内巨視的応力分布を 図-21(集中荷重)、図-22(等分布荷重)に示す。なお、線径 $\phi 6\text{mm}$ においても $\phi 5\text{mm}$ と同様の応力の分布特性を得た。図は巨視的的最大主応力と最小主応力との差をプロットしたものである。図より、集中荷重の場合には金網中央から長さ方向に大きな値の応力が分布しているのに対し、等分布荷重の場合には幅方向に平行な境界辺中央部（図の右下角点）に最大応力が発生しており、応力の分布形態においても両者間に明確な違いが認められる。

最後に金網周辺に作用する応力分布を 図-23, 24 に示す。なお、図は金網境界辺に直交する方向の巨視的

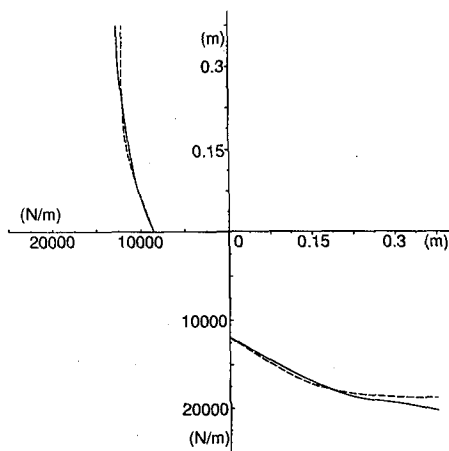


図-23 金網周辺の面内応力分布 ($\phi 5\text{mm}$, 実線:集中荷重, 破線:等分布荷重)

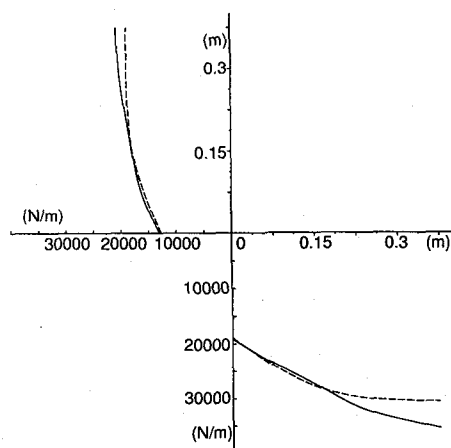


図-24 金網周辺の面内応力分布 ($\phi 6\text{mm}$, 実線:集中荷重, 破線:等分布荷重)

直応力成分の分布を示しており、金網から枠組に作用する荷重の目安となるものである。図-23, 24 はそれぞれ $\phi 5\text{mm}$, $\phi 6\text{mm}$ に対する結果を、また実線は集中荷重、破線は等分布荷重での結果を表わしている。集中荷重の方が、幅方向に平行な境界辺中央部において幾分大きな値を示しているが、金網領域内でのたわみ形状や応力分布に比べ荷重の違いによる差は小さい。また、線径・荷重の違いによらず、境界辺応力は境界辺中央で高い値を示し、特に幅方向に平行な境界辺上で大きな値を持つことがわかる。

なお、分布応力が長さ方向に平行な境界辺上より幅方向に平行な境界辺上でより大きな値を示す、という傾向は、本研究で対象とした金網において認められたことであり、必ずしも一般的傾向であるとは言えない。

金網を構成する列線の三次元形状が異なれば、上述の傾向は異なったものとなり得る。この点については今後さらに検討するつもりである。

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、実験との比較を通しその妥当性を確認した。なお、本研究では金網を力学的に等価な膜構造としてモデル化し、有限変位の仮定の下に解析手法を構成した。また、列線が有する僅かな曲げ剛性は、それと等価な回転バネでモデル化し、有限要素の境界辺上に分布させる方法を採用した。

実験と比較した結果、極端に変形が大きい限り、本解析手法は妥当な結果を与えることが確認できた。また、金網の周囲に枠組を取付けた場合、金網周辺の境界条件を完全拘束としてもスライドとしても解析結果に大差はなく、したがって摩擦滑りまで考慮する必要のないことがわかった。さらに、載荷重を集中荷重とした場合と、等分布荷重とした場合とで比較する限り、たわみや面内応力分布には明らかな差が認められたが、金網周辺境界に沿った応力分布に関しては大きな差は生じなかった。なお、本研究で用いた金網では、金網境界辺応力は長さ方向に平行な境界辺より幅方向に平行な境界辺上において、より大きな値を持つことが明らかになった。

謝辞：本研究における実験の実施に当たり、新潟大学工学部・阿部憲一技官に協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Agostini, R., Cesario, L., Conti, A., Masetti, M. and Papetti, A.: *Flexible gabion structures in earth retaining works*, Officine Maccaferri S.p.A., 1987.
- 2) 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, 205-215, 1999.
- 3) 吉田 裕, 増田陳紀, 松田 隆: 薄板で構成される立体構造の弾塑性・大変位離散化要素解析法, 土木学会論文報告集, 第 288 号, 41-55, 1979.
- 4) 増田陳紀 編: 構造工学における計算力学の基礎と応用, 第 3 章, 土木学会, 1996.
- 5) 矢川元基 編: ニューラルネットワーク, 培風館, 1992.
- 6) 吉田 裕: 有限要素法による幾何学的非線形構造解析法の現状と課題, 土木学会論文集, 第 374 号, 25-37, 1986.
- 7) 鷲津久一郎 他: 有限要素法ハンドブック, II 応用編, 培風館, 1983.

(2000 年 9 月 14 日 受付)