

鋼製組立網に用いられる金網の弾塑性解析

阿部和久¹・深谷克幸²

¹正会員 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)

²共和ハーマテック(株) 技術・研究部 (〒 950-0971 新潟市近江 155 番地 1)

鋼製組立網に用いられる金網の弾塑性解析手法を構成した。面内変形を対象に、金網を力学的に等価な二次元連続体によりモデル化した。構成式は、金網を構成するユニットセルの頂点における列線作用力の変位微係数を含むかたちで与えられる。有限要素解析での剛性方程式の作成において、列線作用力を応力評価点毎に効率よく求めるため、ニューラルネットワークを導入し、その学習結果に基づき任意変形下での列線作用力の評価を行った。金網の引張り試験との比較を通し、本手法の妥当性を確認した。

Key Words : wire mesh, effective stiffness, neural network

1. はじめに

鋼製組立網は、「じゃかご」や「ふとん籠」など古くから河川護岸に用いられていたかご工法に、強度・耐久性の面で改良を加えて作られたものである。当該工法の利点は可撓性、透水性、施工の容易性にあり、近年、近自然工法に対する関心の高まりと共に、河川護岸を初め擁壁などにおいてもさかんに採用されるようになってきている。その構造形式は図-1に示すように、棒鋼で作った骨組に鋼製網柵を取り付けたパネルを組み立ててできた「かご」であり、内部に石材を充填し外力に抵抗させる構造となっている。寸法は高さ0.5～1.5m、幅(奥行き)1.5～2m、長さ2～5mのものが主に用いられており、これを連結することによって擁壁などの構造全体が形作られる。かご工法自体は長い歴史を持つが、その力学的特性は未だ十分に把握されておらず、具体的な設計方法についても確立されていないのが現状である¹⁾。また、鋼製網単体についても、それを構成する列線の線径や網目寸法と剛性や強度などとの関係は明らかでなく、力学的根拠に基づいた網の選定には、その力学的特性の把握と有効な解析手法の確立が不可欠となる。

本研究では、鋼製組立網の力学的評価に向けての最初の試みとして、鋼製網(金網)に対する弾塑性モデルを構成し、実験との比較を通し提案手法の妥当性を検討する。以下では、まず本研究で行った金網の面内引張り試験について述べ、次に金網の解析モデルを構成する。金網は三次元的に編まれた多数の列線の集合体であり、列線自体を有限要素などで直接離散化することは効率的でない。そこで、本研究では金網と力学的に等価な二次元連続体モデルを誘導し、それに基づき解析を行う

方法を採用。導出された金網の巨視的応力-ひずみの増分関係の具体的評価には、金網のユニットセル当たりにおける列線のカ-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。従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、列線のカ-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い、上述の問題点の改善を図る。最後に解析結果と実験との比較を行い、提案手法の妥当性について検証する。

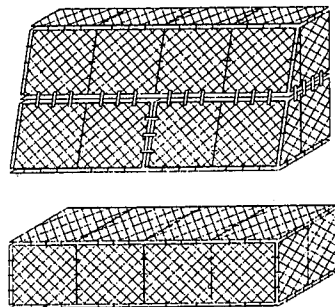


図-1 鋼製組立網の概要

2. 実験概要

本研究では、鋼製組立網に多用されている図-2に示すような菱形金網を対象とする。菱形金網は螺旋状に成形された列線を編んで作成され、列線の長手方向を

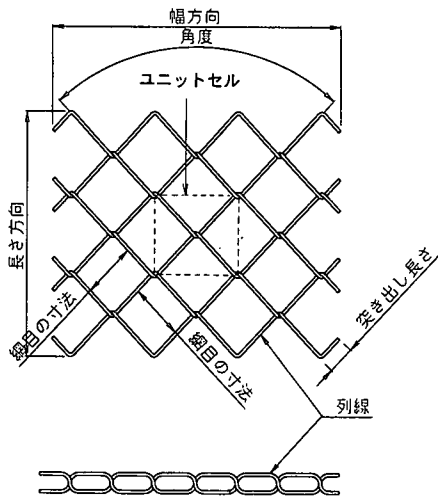
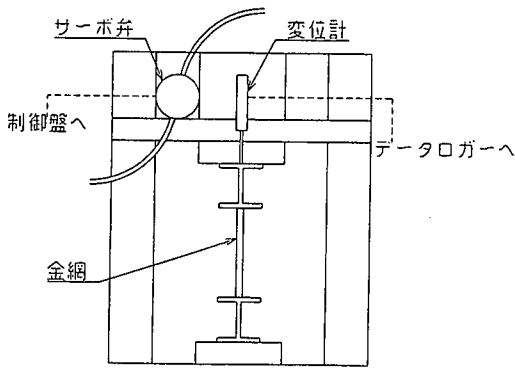
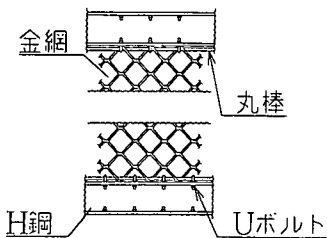


図-2 菱形金網



(a) 実験装置



(b) 金網取り付け状況 (下:Case1, 上:Case2)

図-3 実験概要

「幅方向」、それに直交する方向を「長さ方向」と呼ぶ。実験では金網の長さ方向に荷重を加え引張試験を行った。供試体には網径 $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 6\text{mm}$ の 2 種類の金網を用いた。なお、網目の寸法はいずれも約 65mm であり、前者は溶融亜鉛アルミ合金めっき鉄線を、後者は亜鉛めっき鉄線を使用している。供試体には幅方向に列線約 9 波長分、長さ方向に列線 16 段とした約 0.8m 四方

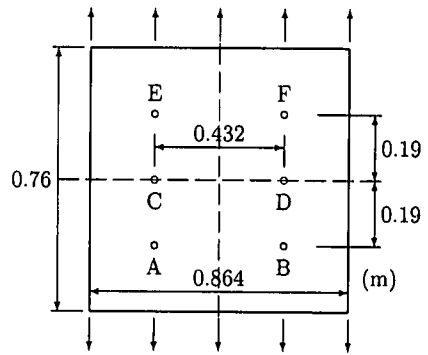


図-4 水平方向収縮変位の測定点

の矩形に成形した金網を用い、図-3 に示すように金網の幅方向を水平にし、下端を固定するかたちでハイドロパルス試験機に取り付けた。供試体の試験機への取り付けは、図-3 (b) のように丸棒を網の上下端に通し、試験機にボルト留めされた H 鋼と丸棒とを U ボルトで締結する方法によった。また、金網全体が比較的一様に变形する場合と非一様に变形する場合の例として、金網上下端の取り付け部が水平方向(幅方向)に丸棒に沿ってスライドできるように締結した場合 (Case1) と、金網と丸棒との交差部を U ボルトで固定し、金網取り付け部の水平方向変位を完全に拘束した場合 (Case2) の 2 ケースにつき実験を行った。実験では、金網全体の鉛直方向(長さ方向)変位と引張荷重の測定に加え、金網の水平方向(幅方向)の収縮量を見るため、図-4 に示す A-B, C-D, E-F 間の距離を逐次測った。なお、金網全体の鉛直方向変位は、H 鋼に取り付けた変位計により測定した。

3. 金網と力学的に等価な連続体モデルの導出

(1) 金網のモデル化

本研究では、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ぶ。図-2 に示したユニットセルの部分を取り出し、それを図-5 のような簡略化した力学モデルで表現する。なお、金網の幅方向が x_1 軸、長さ方向が x_2 軸と一致するように座標系を導入し、 x_1-x_2 平面に垂直な方向に座標軸 x_3 をとる。ここではユニットセル内にある上下列線の 4 つの端点を頂点 ①～④、列線どうしの交点を中心点と呼ぶこととする。金網は長さ方向の引張に対し抵抗するが圧縮には抵抗せず、列線の交点では、長さ方向圧縮変形時に列線どうしの接触が離れ、逆に引張時に抵抗力が発生する。また、せん

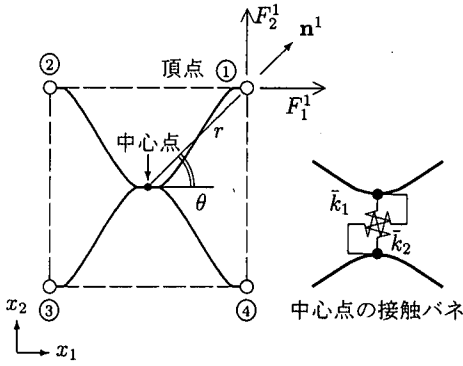


図-5 金網のユニットセルの力学モデル

断変形下では上下の列線間で幅方向にずれを生じ得る。そこで、交点における列線間のこれらの相対的なずれを解析で考慮するため、モデル化に当たり中心点の x_1 軸方向と x_2 軸方向に接触バネ \bar{k}_1, \bar{k}_2 を設定した。なお、金網の交点における幅方向のずれは摩擦すべりを伴う可能性があるが、ここでは簡単のため線形バネによるモデル化を行い、その妥当性は実験との比較を通して確認することとした。

(2) 巨視的変位

二次元平面内の微小変形場を対象に考える。金網に等価な連続体の導出に当たり、金網の解析領域に対する網目サイズの比を無限小にとり、ユニットセルにおいて一様変形場を考える。このとき、中心点と頂点 m との間の相対変位増分 du_i^m は次式で与えられる。

$$du_i^m = r du_{i,j} n_j^m \quad (1)$$

ここで、 r は中心点と頂点間の距離、 $du_{i,j}$ は一様変形場における変位勾配の増分、 $(\cdot)_{,j} = \partial/\partial x_j$ である。 n_j^m は中心点と頂点 m を結ぶ方向の単位ベクトル成分であり、繰り返し指標は総和規約に従うものとする。

du_i^m はさらに次式のように書き表すことができる。

$$du_i^m = r(d\varepsilon_{ij} + d\omega_{ij})n_j^m \quad (2)$$

ここで、 $d\varepsilon_{ij}, d\omega_{ij}$ は次式で与えられるひずみと回転テンソルの増分である。

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(du_{i,j} + du_{j,i}), \\ d\omega_{ij} &= \frac{1}{2}(du_{i,j} - du_{j,i}) \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)で剛体回転に関する成分を除去したものを $d\hat{u}_i^m$ と定義する。

$$d\hat{u}_i^m = r d\varepsilon_{ij} n_j^m \quad (4)$$

(3) 巨視的応力

粒状体などの不均質場における巨視的応力は、多くの文献において応力の体積平均に基づき定義されている²⁾⁻⁴⁾。また、仮想仕事の原理などエネルギー原理に基づいた考察からも同一の巨視的応力を得ることができる^{5),6)}。金網においても、両方法によって巨視的応力を誘導することができると考えられるが、前者の方法による場合、三次元構造を有する列線内部の応力の体積平均をとる際に必要となるユニットセル内の空隙率が必ずしも明確に定義できない。よって、ここでは仮想仕事の原理に基づいて二次元場の巨視的応力を定義する。

図-5 に示したユニットセルに作用する力は各頂点 $m(m = 1, \dots, 4)$ の作用力 F_i^m である。なおこの作用力は、実際には頂点位置における列線の断面に作用する断面力である。この断面力で面内変形に対し重要となるものとして、面内作用力 F_i^m の他に、面に垂直な軸 (x_3 軸) 回りの曲げモーメントがある。曲げモーメントは金網の長さ方向および幅方向に一樣な引張変形(幅方向では圧縮変形においても)を加えた際に発生するが、この一樣変形下ではユニットセルの変形の対称性より、頂点に回転(たわみ角)を伴わないのでエネルギーには寄与しない。一方、せん断変形下では頂点に回転を生ずるが、後述のように、せん断変形をも考慮するとニューラルネットワークの学習パターンが多くなるため、ここでは曲げモーメントによる仕事は相対的に小さいものと仮定し特に考慮しない。このときユニットセルに作用する力によってなされる仮想仕事 δW は主に面内作用力に関するものより構成され、次式で与えられる。

$$\delta W = \sum_m^4 F_i^m \delta u_i^m \quad (5)$$

作用力 F_i^m がユニットセルに対してモーメントのつり合いをみたとことを考慮すると、多少の計算の後、式(5)において剛体回転成分が除去され、次式を得る。

$$\delta W = \sum_m^4 F_i^m \delta \hat{u}_i^m \quad (6)$$

よって、巨視的応力を σ_{ij} とすると次式が成り立つ。

$$\sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} \Delta A = \sum_m^4 F_i^m \delta \hat{u}_i^m \quad (7)$$

ここで、 ΔA はユニットセルの面積であり、次式で与えられる。

$$\Delta A = 4r^2 A, \quad A = \sin \theta \cos \theta \quad (8)$$

式(7)に(4),(8)を代入し、接触点の対称性を考慮して次の巨視的応力を得る。

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2Ar} \sum_m^2 F_i^m n_j^m \quad (9)$$

応力増分 $d\sigma_{ij}$ は同様に次式で与えられる。

$$d\sigma_{ij} = \frac{1}{2Ar} \sum_m^2 dF_i^m n_j^m \quad (10)$$

(4) 巨視的応力-ひずみ関係

頂点の作用力増分 dF_i^m は変位増分に伴うものであり、次のように与えられる。

$$dF_i^m = \frac{\partial F_i^m}{\partial \bar{u}_k} d\bar{u}_k^m = F_{i,k}^m(\bar{u}) d\bar{u}_k^m \quad (11)$$

ここで、 $d\bar{u}_i^m$ は変位増分 $d\bar{u}_i^m$ から中心点のバネの伸び $d\bar{u}_i$ を除いた成分で、列線の変形量に相当する。

$$d\bar{u}_i^m = d\bar{u}_i^m - d\bar{u}_i \quad (12)$$

式(12)を(11)に代入して次式を得る。

$$dF_i^m = F_{i,k}^m(r d\epsilon_{kl} n_l^m - d\bar{u}_k) \quad (13)$$

また、バネ \bar{k}_i の作用力増分 $d\bar{F}_i$ は次式で与えられる。

$$d\bar{F}_i = \bar{k}_i d\bar{u}_i \quad (i \text{ について和をとらない}) \quad (14)$$

バネの作用力と頂点の作用力とのつり合い条件は次式で与えられる。

$$d\bar{F}_i = \sum_m^2 dF_i^m \quad (15)$$

式(15)に(13),(14)を代入すると次式を得る。

$$(\bar{k}_{ij} + \sum_m^2 F_{i,j}^m) d\bar{u}_j = r \sum_m^2 F_{i,k}^m n_l^m d\epsilon_{kl} \quad (16)$$

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

式(16)において、

$$b_{ij} := \bar{k}_{ij} + \sum_m^2 F_{i,j}^m \quad (17)$$

と定義し、 b_{ij} の逆行列を \bar{b}_{ij} とおくと、式(16)より $d\bar{u}_i$ を $d\epsilon_{kl}$ により表わした次式を得る。

$$d\bar{u}_i = r \bar{b}_{ij} \left(\sum_m^2 F_{j,k}^m n_l^m \right) d\epsilon_{kl} \quad (18)$$

式(18)を(13)に代入し $d\bar{u}_k$ を消去し、さらにその結果を式(10)に代入すると最終的に次の応力-ひずみの増

分関係式を得る。

$$d\sigma_{ij} = A_{ijkl} d\epsilon_{kl}, \quad A_{ijkl} = \frac{1}{2A} (a_{ijkl} - \bar{b}_{pq} C_{ijp} C_{qek}), \quad (19)$$

$$a_{ijkl} = \sum_m^2 F_{i,k}^m n_j^m n_l^m, \quad C_{ijk} = \sum_m^2 F_{i,k}^m n_j^m$$

なお、式(19)の誘導過程においてユニットセル全体のモーメントのつり合い条件を陽なかたちで課していない。そこで、解析では剛体回転の影響を除去するため、次式により応力評価を行う²⁾。

$$d\sigma_{ij} = \frac{1}{2} (A_{ijkl} + A_{jikl}) d\epsilon_{kl} \quad (20)$$

4. ニューラルネットワークによる頂点作用力の学習

式(19)に示したように、金網の応力-ひずみの増分関係の評価には、ユニットセルの頂点に作用する力の変位微係数 $F_{i,j}^m$ が必要となる。塑性変形下においてこの値は変形過程に依存するので、有限要素解析に適用した場合、全ての応力評価点に対し別途 $F_{i,j}^m$ を求める必要がある。この値の具体的評価方法としては、各応力評価点毎に変形の進行に合わせ列線の弾塑性解析を並行する方法が考えられるが、この場合 $F_{i,j}^m$ の計算に膨大な時間を要することとなるので現実的でない。もう一つの方策として、事前にくつかの変形パターンを解析を行っておき、その結果を補間する方法が挙げられる。高野・座古⁷⁾は織物複合材料の、破壊と大変形下での非線形解析を均質化法の下で効率良く行うため、微視構造における破壊解析を非線形均質化法により別途行い、その結果をデータベース化し、それを参照することで巨視的破壊解析を進める方法を探っている。また、一種のデータ補間の方法としてニューラルネットワークによる手法も有効と思われる。材料の非弾性挙動のモデル化や、パラメータ同定などにニューラルネットワークを適用した例は、Ghaboussi ら⁸⁾によるコンクリートなどの構成則のモデル化を初め、近年多くの報告がなされている⁹⁾⁻¹⁰⁾。本研究ではいくつかの変形パターンに対して、ユニットセルの頂点に作用する力 F_i^m と変位 \bar{u}_i^m との関係を弾塑性解析により別途求めておき、それを学習パターンとしてニューラルネットワークに学習させ、その結果を用い任意変形下での F_i^m の評価を試みる。なお、実際の解析では F_i^m の変位微係数 $F_{i,j}^m$ が必要となるが、この値はニューラルネットワークにより得た F_i^m の差分によって求める。

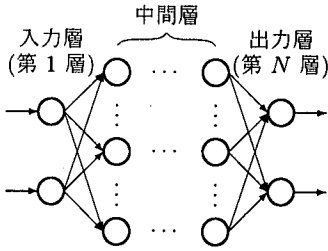


図-6 階層型ニューラルネットワーク

(1) ニューラルネットワーク

図-6 に示すような階層型ニューラルネットワークを考える。なお、ニューラルネットワークの詳細については文献 17) 等を参照されたい。ニューラルネットワークは入出力層といくつかの中間層より成る。また、各層にはいくつかのユニットがおかれ、隣接層間のデータは重み付けされ伝達される。第 k 層 i 番目のユニットからの出力 v_i^k は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} v_i^k &= f(u_i^k), \\ u_i^k &= \sum_j w_{ij}^{k,k-1} v_j^{k-1} - \theta_i^k \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 u_i^k は第 k 層 i 番ユニットの内部状態変数、 $w_{ij}^{k,k-1}$ は第 $k-1$ 層 j 番ユニットと k 層 i 番ユニットとの結合係数、 θ_i^k はしきい値である。また f は応答関数と呼ばれる出力を規格化する関数である。

式(21)において結合係数やしきい値が問題に対応して適切な値で与えられていれば、任意の入力に対して妥当な出力を得ることができる。これらの値の設定は、何パターンかの教師用入出力データに基づく学習過程を通じた修正によりなされる。この学習過程は誤差逆伝播学習と呼ばれる以下に示す方法により実行される。なお、学習方法には学習パターン毎に学習を進める逐次型と、全パターンの学習を同時に進める一括型とがある。本研究では後者に基づいた学習方法を用いる。

出力の誤差 E を各学習パターン毎の誤差 E_p の総和で定義する。

$$E = \sum_p E_p, \quad E_p = \frac{1}{2} \sum (v_i^N - y_i)^2 \quad (22)$$

ここで、 y_i は教師用出力データ、 v_i^N はニューラルネットワークからの出力データであり、ネットワークは入出力層も含め N 層で構成されているものとする。結合係数としきい値の修正は、最急降下法に基づき次式

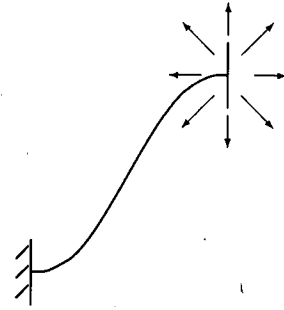


図-7 頂点変位の学習パターン

より与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij}^{k,k-1} &= \sum_p \Delta v_{i(p)}^k f'(u_{i(p)}^k) v_{j(p)}^{k-1}, \\ \Delta \theta_i^k &= -\nu \sum_p \Delta v_{i(p)}^k f'(u_{i(p)}^k) \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 $(\)_{(p)}$ は第 p 番目の学習パターンに関する値であり、 f' は応答関数の導関数である。また、 $\Delta v_{i(p)}^k$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta v_{i(p)}^N &= -\varepsilon (v_{i(p)}^N - y_{i(p)}), \\ \Delta v_{i(p)}^k &= \sum_j \Delta v_{j(p)}^{k+1} f'(u_{j(p)}^{k+1}) w_{ji}^{k+1,k} \end{aligned} \quad (24)$$

なお、式(23),(24)の ν, ε は正の定数である。

モーメント法による場合の各係数の修正は次式のようになされる。

$$\begin{aligned} w_{ij}^{k,k-1}(t) &= w_{ij}^{k,k-1}(t-1) + \Delta w_{ij}^{k,k-1}(t) \\ &\quad + m \Delta w_{ij}^{k,k-1}(t-1), \\ \theta_i^k(t) &= \theta_i^k(t-1) + \Delta \theta_i^k(t) + m \Delta \theta_i^k(t-1) \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、 m は学習の収束性を安定化させるパラメータであり、 (t) は修正の反復回数を表わしている。誤差 E が十分収束するまで式(25)による修正を繰り返す。

(2) 本研究におけるニューラルネットワークの構成

頂点の作用力は厳密には変形履歴にも依存すると考えられるが、ここでは作用力は変位量のみにより与えられるものと仮定し、入力としてユニットセルの頂点の変位ベクトル $(\tilde{u}_1, \tilde{u}_2)$ を、また出力として頂点の作用力 (F_1, F_2) を用いる。なお、これらの値は学習パターンに用いた最大変位と最大作用力の 1.2 倍の値により規格化しておく。学習パターンに用いる変形過程には、図-7 に示すように一様引張(圧縮)変形場を対象に、変形の対称性に基づき、中心点と頂点の x_3 軸回りの回転を拘束したかたちで線列の $1/2$ 波長部分を取り出し、放射方向に頂点変位を課したものを考えた。厳密には

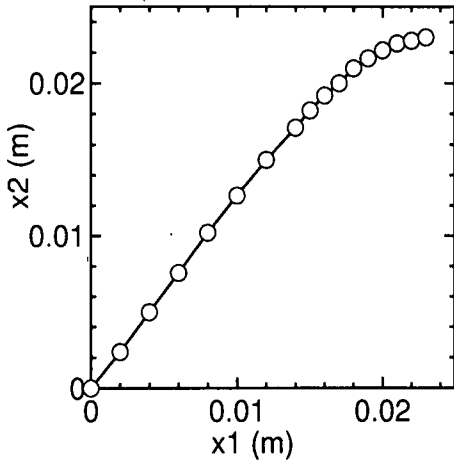


図-8 列線の離散化 ($x_1 - x_2$ 平面：線径 $\phi 5\text{mm}$)

この変形パターンの他にせん断変形を考慮したものも採用するのが望ましいと考えられるが、この場合、一様引張とせん断変形との組み合わせまで入れると学習パターン数が多くなる。そのため本研究では一様引張の変形場のみ学習パターンとして採用した。

学習パターンにおける頂点変位は、 x_1, x_2 軸に関し正負両方向課されるので、変位と作用力共に $(-1, 1)$ の範囲で規格化する。そのため、応答関数 f としては -1 と 1 に漸近する次のような関数を用いる。

$$f(u) = \frac{2}{1 + e^{-u/T}} - 1 \quad (26)$$

ここで、 T は温度と呼ばれる関数形状を特徴づけるパラメータである。

(3) 教師用学習データの作成

ニューラルネットワークの学習に用いる教師用データは列線の弾塑性解析により求める。解析は、図-7 に示した問題の対称性に基づき、列線の $1/4$ 波長部分を対象に行う。なお離散化に際し、列線を多数の三次元直線より要素により近似した。線径 $\phi 5\text{mm}$ の列線の離散化状況を図-8 に、その三次元形状を図-9 に示す。図では 17 節点、16 要素により列線を離散化している。また、弾塑性解析に際し Prandtl-Reuss の式を用い、剛性方程式の作成において、列線を構成する各要素を軸方向と断面内についてさらに部分領域に細分割し、その部分領域単位で応力や弾塑性状態を評価している。断面における部分領域分割の様子を図-10 に示す。要素軸方向の部分領域は、場所により異なるが要素当たり 3 ~ 5 分割で与えている。なお、線径 $\phi 6\text{mm}$ の列線においても同様の要素分割を行っている。

列線の材料特性は直線材の一軸引張試験により求め

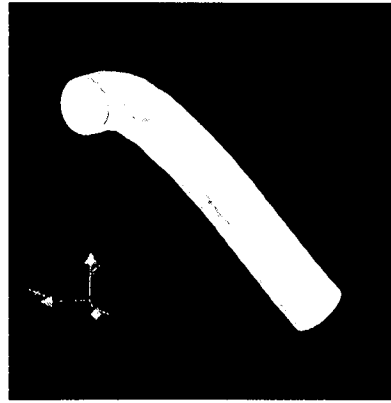


図-9 列線の三次元形状 (線径 $\phi 5\text{mm}$)

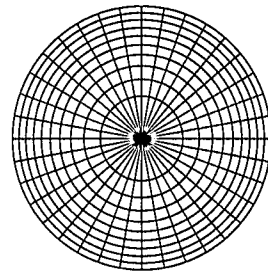


図-10 要素断面の部分領域分割

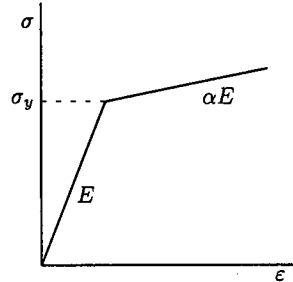


図-11 列線材の材料特性

た。その結果に基づき、列線材の応力-ひずみ曲線を図-11 に示すような双一次曲線で近似した。なお、弾性係数 $E = 1.91 \times 10^2 \text{GPa}$ 、降伏応力 $\sigma_y = 0.35 \text{GPa}$ 、降伏後の接線係数と弾性係数との比 $\alpha = 0.02$ とした。また、列線は成形過程で加工硬化を受けており、降伏点は初期降伏 σ_y と異なっていると考えられる。そこで、成形時に主に曲げ変形を受けたものと仮定し、成形後の曲率より各部の変形量を評価し、それに基づき降伏応力を部分領域毎に設定した。

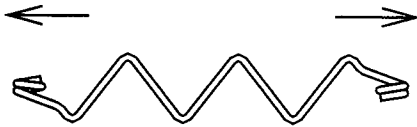


図-12 列線の幅方向引張試験

列線の弾塑性解析の妥当性を確認する目的で、列線 1 本の幅方向引張試験と解析との比較を行った。供試体は図-12 に示すもので、両端に曲げが作用しないように引張荷重を与え、荷重-変位関係を求めた。結果を図-13 に示す。実線と破線は弾塑性解析の結果で、それぞれ $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 6\text{mm}$ の場合である。また、プロットされている各マークは実験結果である。図は列線 1 ピッチ当たりの変位量に換算したものを示している。線径 $\phi 6\text{mm}$ の列線では降伏後において解析値が実験値に比べ幾分小さ目となっているが、全体としては概ね一致した結果が得られており、弾塑性解析の妥当性が確認できる。

教師用データには図-7 に示したように、頂点に放射方向変位を与えた場合の変位と頂点作用力との関係を用いる。なお、当初変形パターンとしては 10° 間隔、合計 36 方向に最大変位 6mm まで変形を与えたものを用いた。しかしこの場合、第 2,4 象現方向への変位に対し十分な学習効果が得られなかった。そこで、第 2,4 象現においては 5° 間隔に変形パターンをとり、各変位方向毎に約 18 回の変位増分を与え、合計約 1000 個のデータに基づき学習を実行することとした。

ネットワーク構造として、入出力層を含め全層数を 4 層としたものと 5 層としたもの、および中間層のユニット数を 2~5 ユニットとしたものについて学習状況を調べた。5 層の場合の誤差 E の収束状況を図-14 に示す。なお、図-14 は線径 $\phi 5\text{mm}$ の場合であるが、 $\phi 6\text{mm}$ に対しても同様の結果を得た。また、4 層に比べ 5 層の方が誤差はより小さな値に収束していた。5 層の場合で見ると、ユニット数の多い方が誤差はより小さな値を示しているが、ユニット数を増やすにつれ誤差がある限界値に漸近している様子が窺える。ここでは学習回数を 100 万回までとっているが、5 層 5 ユニットの場、30 万回程度で学習は一定の精度に収束している。なお、ここに示したニューラルネットワークで設定した諸パラメータの値は表-1 のとおりである。また、以上の検討結果を参考に、以降の解析ではネットワーク構造を 5 層 5 ユニットとし、誤差 E の許容値

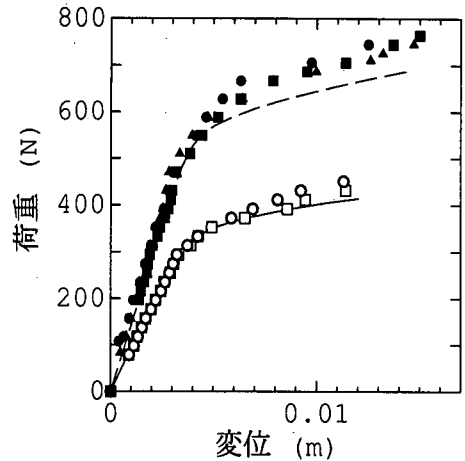


図-13 荷重-変位関係の実験と解析との比較。実線： $\phi 5\text{mm}$ の解析結果、破線： $\phi 6\text{mm}$ の解析結果、マーク：実験結果。

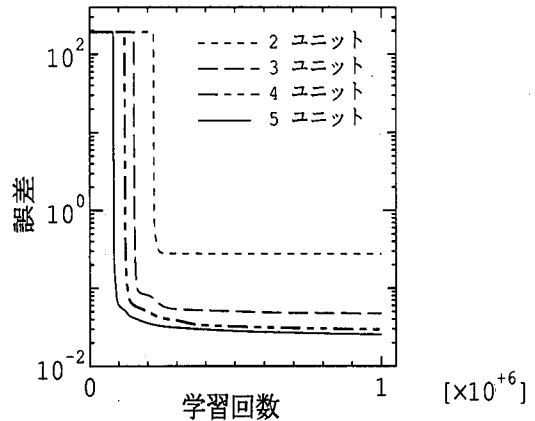


図-14 誤差 E の収束状況 (5 層の場合)

表-1 ニューラルネットワークにおけるパラメータ値

ϵ	ν	T	m
0.09	1/9	30	0.5

を 5% として学習させた結果を用いている。

(4) 学習結果の確認

ニューラルネットワークの学習結果と、それによる頂点作用力の評価の妥当性を確認する目的で、変位と頂点作用力との関係を弾塑性解析結果と比較した。図-15,16 はそれぞれ頂点に 25° , 205° 方向および 135° , 315° 方向に変位を与えた場合の結果である。実線が弾塑性解析結果、破線がニューラルネットワークによる結果で

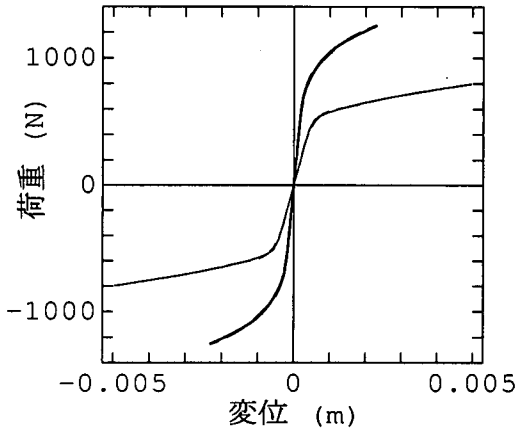


図-15 ユニットセルの頂点変位-作用力. 25°, 205° 方向変位の場合. 実線: 弾塑性解析, 破線: ニューラルネットワーク. 細線: x_1 成分, 太線: x_2 成分.

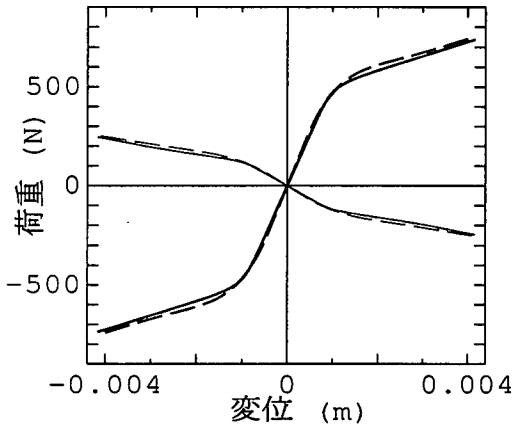


図-16 ユニットセルの頂点変位-作用力. 135°, 315° 方向変位の場合. 実線: 弾塑性解析, 破線: ニューラルネットワーク. 細線: x_1 成分, 太線: x_2 成分.

あり, 細線は x_1 成分, 太線は x_2 成分を示している. 図-15 は未学習パターンであるが, 極めて良い精度の結果が得られている. 一方, 図-16 は学習パターンに相当しているものであるが, 多少の誤差が認められる. 前述のように, 第 2,4 象限方向の変形パターンに対する学習速度が相対的に低いことが窺えるが, 概ね良好な結果が得られており, ニューラルネットワークの妥当性が確認できる. なお, 第 2,4 象限での精度が相対的に低いことの理由は明らかではないが, 学習パターンを 5° 間隔に増やしたことで精度が改善されたことから, 変位方向の変化に対する作用力の変動が第 2,4 象限で急激になっていることが原因として考えられる.

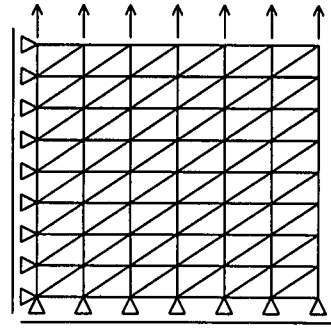


図-17 有限要素分割

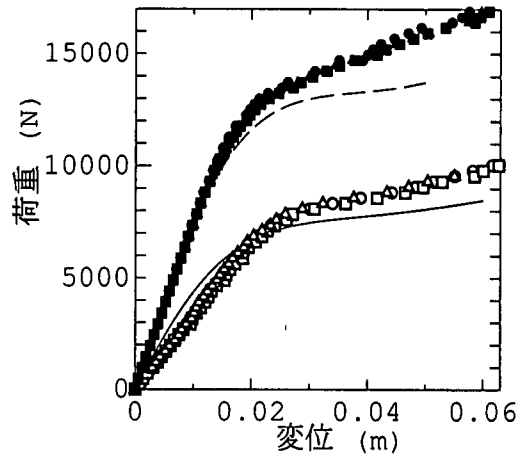


図-18 金網の荷重-鉛直変位曲線 (Case1, 摩擦を無視). 実線: $\phi 5\text{mm}$ の解析結果, 破線: $\phi 6\text{mm}$ の解析結果, マーク: 実験結果.

5. 解析結果

(1) Case1

金網上下端の取り付け部が丸棒に沿って水平方向にスライドできるようにした Case1 を対象に, 解析結果と実験結果との比較を行った. 解析では問題の対称性を考慮し, 図-17 に示すように金網全体の 1/4 を有限要素分割した. なお, 有限要素には三角形定ひずみ要素を用いている.

まず最初に, 金網上下端の取り付け部で金網と丸棒との間に摩擦が作用しないものと仮定し解析を行った. 金網全体にかかる引張荷重と金網上端の鉛直方向変位との関係を図-18 に示す. 図より金網全体の弾塑性挙動は概ね双一次曲線で表現できることがわかる. 線径 $\phi 5\text{mm}$ では弾性域における金網の剛性が解析で大き目に出ている. この理由は明らかでないが, 取り付け部における金網と丸棒との間の遊び, 上下列線の交差部

の緩み、などが考えられる。一方、 $\phi 6\text{mm}$ では弾性域で実験との良い一致が認められる。しかし、降伏荷重を越えた後について見ると、いずれの線径の金網においても実験値が解析で得た強度を上回っており、特に $\phi 6\text{mm}$ においてその傾向が顕著に現れている。解析では上下端の水平方向に摩擦が働かないような境界条件を課しているの、金網は水平方向に一樣収縮しており、一樣な応力・変形場となっている。一方、実験では金網左右の境界辺にわずかにくびれが認められ、金網上下端の取り付け部の水平方向に拘束力が作用しているものと考えられる。そこで、図-17の解析モデルの上辺にジョイント要素を設定し、摩擦滑りを考慮し解析を行った。この解析では金網領域は非一樣な応力・変形状態となり、水平方向収縮変位は場所により異なったものとなる。したがって、ユニットセルの中心に設定した水平方向接触バネ \bar{k}_1 の剛性の違いにより解は異なったものとなる。なお、荷重と鉛直変位との関係は摩擦係数 μ と \bar{k}_1 に対する複数の組み合わせの下で実験値と一致する結果を与え得る。そこで、 μ と \bar{k}_1 の値を一意に決定するため、荷重と鉛直変位および水平変位との関係の両者が同時に実験と最も良く一致する μ と \bar{k}_1 の組み合わせについて検討した。 $\mu = 0.15, 0.17, 0.2$, $\bar{k}_1 = 10^5, 10^7, 10^9 (\text{N/m})$ と各 3 ケースずつの組み合わせの下で解析した結果、線径によらず最適値として $\mu = 0.15, \bar{k}_1 = 10^5 (\text{N/m})$ を得た。なお、 x_2 軸方向のバネ \bar{k}_2 は中心点における上下列線間の相対変位が生じない程度に十分大きなバネ定数として $\bar{k}_2 = 10^9 (\text{N/m})$ と設定している。この場合の結果を図-19, 20 に示す。図-19 は金網に作用する荷重と鉛直変位について、また図-20 は荷重と水平方向収縮変位について、それぞれ実験と比較したものである。なお、図-20 の水平変位は、図-4 に示した測点 C-D 間の収縮変位を变形前の距離で割ったものである。これらの図より、金網上下端に摩擦を考慮することによって良好な結果を得ることができ、本手法により実験結果が十分な精度で再現されていることが確認できる。

(2) Case2

金網上下端の取り付け部が水平変位に対し完全拘束された Case2 の解析を行った。なお、解析に当たりユニットセルの接触バネのバネ定数は、上述の Case1 と同一の値を用いている。金網全体に作用する荷重と鉛直変位との関係を図-21 に、測点 C-D 間の水平方向収縮変位との関係を図-22 に示す。弾性域での剛性は Case2 の方が高く、Case1 の約 1.5 倍となっている。降伏後の荷重-変位曲線の傾きも Case2 の方が大きくなっているが、降伏荷重は両ケースでほぼ等しい値を示している。

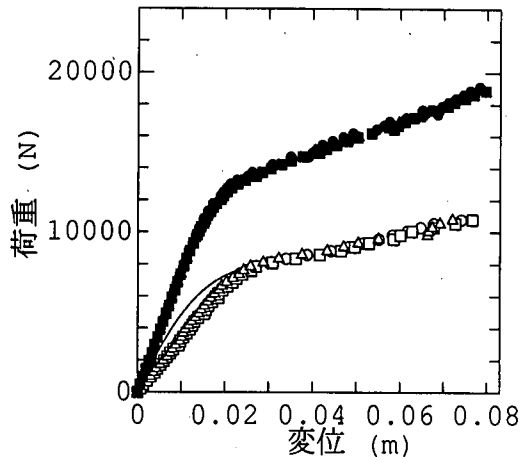


図-19 金網の荷重-鉛直変位曲線 (Case1, 摩擦を考慮). 実線: $\phi 5\text{mm}$ の解析結果, 破線: $\phi 6\text{mm}$ の解析結果, マーク: 実験結果.

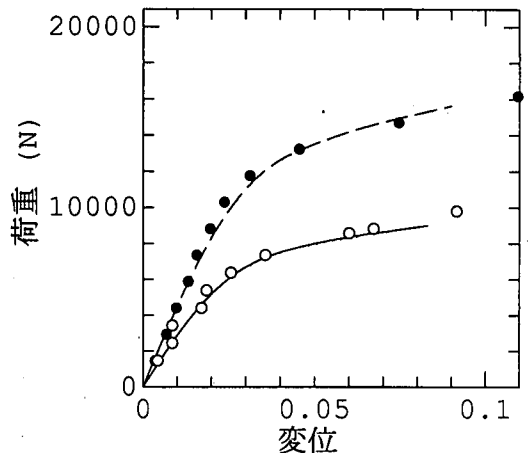


図-20 金網の荷重-水平変位曲線 (Case1, 摩擦を考慮). 実線: $\phi 5\text{mm}$ の解析結果, 破線: $\phi 6\text{mm}$ の解析結果, マーク: 実験結果.

Case2 においても実験との良好な一致が認められる。また、水平方向変位が Case1, 2 共に実験と一致していることより、ユニットセルの中心点の水平方向の接触要素として線形バネを採用したことの妥当性が確認できる。なお、図には示していないが、A-B, E-F の測点間の相対変位についても解析と実験とで良い一致を得ることができた。

実験では、上下の固定辺の端部から対角線に沿って金網の変形が集中しており、応力・変形が不均一なものとなっている様子が確認できた。参考までに解析結果

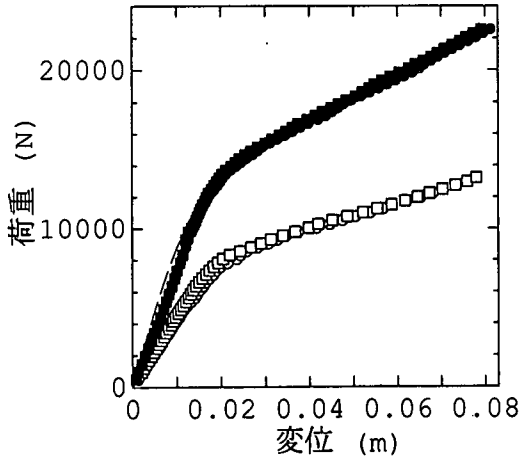


図-21 金網の荷重-鉛直変位曲線 (Case2). 実線: φ5mm の解析結果, 破線: φ6mm の解析結果, マーク: 実験結果.

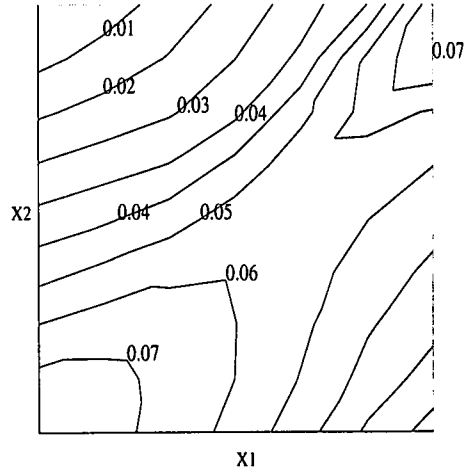


図-23 金網のひずみ分布 (φ6mm: 鉛直変位 6cm での解析結果)

ことがわかった。

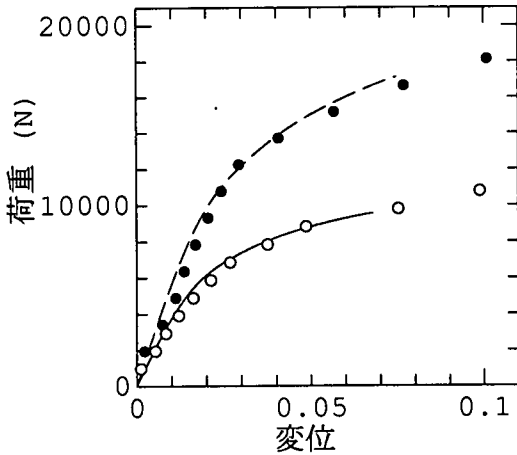


図-22 金網の荷重-水平変位曲線 (Case2). 実線: φ5mm の解析結果, 破線: φ6mm の解析結果, マーク: 実験結果.

のひずみ分布を図-23 に示す。図-23 は鉛直変位 6cm の下での φ6mm の金網全体の 1/4 部分における偏差主ひずみを示したものである。実験では変形の様子が目視できるものの、正面から撮った写真等ではその確認が困難な程であったが、解析では対角線に沿って変形が集中している様子が窺える。式(19) に示した構成式は、網目寸法が解析領域に比べ十分小さい場合に有効となるものであるが、金網全体の強度や変位量など実験を通して検証できる内容に関する限り、本解析は良好な結果を与えており、式(19) がここに示した解析例程度の網目 / 金網寸法比の問題には十分適用できる

6. おわりに

鋼製組立網に用いられる菱形金網の弾塑性解析手法を構成した。その際に、金網と力学的に等価な二次元連続体モデルを誘導し、その弾塑性解析にニューラルネットワークを適用することで解法の効率化を図った。また、解析手法の妥当性を確認するため、矩形金網の引張試験を実施し、解析結果と実験結果との比較を行った。金網上下端の取り付け部に水平変位を許す Case1 に対しては取り付け部の摩擦の影響を考慮することで実験との良い一致を得ることができた。また、Case1 および金網取り付け部の水平変位を拘束した Case2 の両実験に対し、良好な解析結果を得たことから、本手法で誘導した二次元連続体モデルの妥当性とニューラルネットワークによる列線の弾塑性挙動の評価の有効性が確認できた。本手法によれば、任意の線径、網目寸法を有する金網の弾塑性解析が可能であり、鋼製組立網の力学的評価において提案手法が有用となるものとする。

謝辞：本研究の実施にあたり、新潟大学工学部・阿部憲一技官および同学部生・宇津木悟史氏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) Christoffersen, J., Mehrabadi, M.M. and Nemat-Nasser, S.: *A micromechanical description of granu-*

- lar material behavior, *J. Appl. Mech.*, **48**, pp.339-344, 1981.
- 3) Thornton, C. and Barnes, D.J. : Evolution of stress and structure in particulate material, Chap.11, in : *Applied Solid Mechanics -1*, (eds) A.S. Tooth and J. Spence, Elsevier, 1986.
 - 4) Endres, A.L. : The effect of contact generation on the elastic properties of a granular medium, *J. Appl. Mech.*, **57**, pp.330-336, 1990.
 - 5) 金谷健一 : 粒状体の粒子モデルと仮想仕事の原理, 土質工学会論文報告集, **20**, No.3, pp.111-116, 1980.
 - 6) Chang, C.S. and Ma, L. : Modeling of discrete granulates as micropolar continua, *J. Eng. Mech.*, ASCE, **116**, pp.2703-2721, 1990.
 - 7) 高野直樹, 座古 勝 : 微視的破壊を考慮した均質化法による織物複合材料の非線形解析, *材料*, **44**, pp.1231-1237, 1995.
 - 8) Ghaboussi, J., Garrett, J.H. and Wu, X. : Knowledge-based modeling of material behavior with neural networks, *J. Eng. Mech.*, ASCE, **117**, pp.132-153, 1991.
 - 9) 山本広祐 : ニューラルネットワークによる履歴挙動のモデリングと数値解析への応用, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.85-94, 1992.
 - 10) 野田 茂, 星谷 勝, 小淵康義 : 構造化学習による非線形履歴振動系の同定, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.781-794, 1994.
 - 11) 松田泰治, 栂山義規, 入江達雄, 高山智宏 : ニューラルネットワークの動的非線形問題への適用に関する研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.635-644, 1996.
 - 12) 矢茸 亘, 栂山義規, 松田泰治 : ニューラルネットワークによる高減衰積層ゴム履歴曲線の認識, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.843-848, 1997.
 - 13) Sato, T. and Sato, M. : Structural identification using neural network and Kalman filter algorithms, *Struct. Eng. / Earthq. Eng.*, JSCE, **14**, pp.23s-32s, 1997.
 - 14) 松田泰治, 大塚久哲, 栂山義規, 矢茸 亘 : ニューラルネットワークによる高減衰積層ゴムの非線形履歴挙動の認識と動的解析への適用, 土木学会論文集, No.605, pp.29-36, 1998.
 - 15) Ghaboussi, J., Pecknold, D.A., Zhang, M. and Haj-Ali, R.M. : Autoprogressive training of neural network constitutive models, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **42**, pp.105-126, 1998.
 - 16) Furukawa, T. and Yagawa, G. : Implicit constitutive modeling for viscoplasticity using neural networks, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **43**, pp.195-219, 1998.
 - 17) 矢川元基 編 : ニューラルネットワーク, 培風館, 1992.

(1999.3.31 受付)

ELASTOPLASTIC ANALYSIS OF WIRE MESH USED FOR BOX GABIONS

Kazuhisa ABE and Katsuyuki FUKAYA

Elastoplastic analysis method is developed for wire mesh of box gabions. The wire mesh is modeled as a macrocontinuum. Constitutive relation of the continuum model is derived using the principle of virtual work, in which the equivalency of energy stored in the wire mesh to that in the continuum is taken into account. The derived expression of stress-strain relationship contains the term of forces which take place at the wire ends in a unit cell of the mesh. In order to save the computational effort, evaluation of the forces is carried out by using neural network. The nonlinear behavior of the wire is then described by the neural network. The analysis method is developed base on finite element method. Numerical analyses are compared with experimental results and good agreement is obtained.