計算数理工学論文集　Vol.5（2005 年 6 月）論文 No.05-062402　JASCOME

# 中詰材に粒状体モデルを用いた鋼製組立網の変形解析

## DEFORMATION ANALYSIS OF BOX GABIONS USING GRANULAR MODEL FOR FILLING MATERIALS

阿部 和久 [1)]，細谷 栄作 [2)]，小関 徹 [3)]
Kazuhisa ABE, Eisaku HOSOYA and Toru KOSEKI

[1)]新潟大学工学部建設学科　(〒 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050)
[2)]米沢市
[3)]共和ハーモテック (株)　技術・研究室　(〒 943-3114 新潟県中頸城郡大潟町上小船津浜 361-4)

Filling materials used for box gabions are modeled by a granular assembly. Each grain is represented by a polyhedron. In order to simplify and ensure the contact criterion, the polyhedron is approximated by a number of voxels. The evaluation of contacting forces is achieved based on spheres locating at voxels which contact with each other. The cage fabricated by wire mesh panels is discretized by finite elements. The wire mesh is modeled by an elasto-plastic membrane. The developed method is applied to a vertical loading problem. The numerical result is compared with experiments and a finite element analysis in which the filling material is modeled by an elasto-plastic continuum. Through the comparison the applicability of the method is investigated.

***Key Words :*** *box gabion, filling material, granular model, interaction analysis*

## 1. はじめに

鋼製組立網とは，鉄筋 (丸棒) でつくられた矩形枠に鋼製網 (金網) を張りパネル状にしたものをさらに箱状に組み立て (鋼製網枠)，内部に石材 (中詰材) を充填した構造形式のものである．当該構造物は河川護岸や擁壁などに用いられるが，上述のように金網や石材から構成されているため，その力学挙動は複雑で未解明な点が多い．また，実験では中詰材と鋼製網枠間の力の伝達など詳細を知ることが難しく，数値モデルを用いた検討が有効な手段となり得る．そのため，著者らはこれまで鋼製組立網を対象とした数値解法の構成を試みてきた[1),2)]．その際に，中詰材は弾塑性連続体としてモデル化を行った．

しかし，実際の鋼製組立網における中詰材には，粒径 10 ～ 20cm の石が用いられる．これに対し，鋼製組立網自体は一辺 1m 程度の金網パネルを箱状に組み立てたものである．したがって中詰材の粒径寸法は，鋼製組立網の寸法と比較して必ずしも十分に小さいとは言えない．そのため，弾塑性連続体によるモデル化では適切に再現することが困難な，粒状体としての力学特性が顕著に現れ得るものと考えられる．例えば，粒径や粒度分布の違いは全体挙動に何らかの影響を及ぼすものと考えられる．さらに，金網パネルの周囲に取付けてある鉛直丸棒の座屈波長は，中詰材の粒径と同程度のものとなる．この場合，座屈した鉛直丸棒近傍の中詰材は丸棒の変形に完全に追従せず，結果として鋼製網枠と中詰材との間に剥離 (隙間) を生ずる可能性がある．また，中詰材・鋼製網枠間の接触力にはバラツキが大きく，離散的に分布する．

以上のことより，より現実に近いモデルの構築には，中詰材を粒状体として表すことが理想的である．そこで本研究では，中詰材を粒状体としてモデル化した鋼製組立網全体系の連成解析手法の構成を試みる．なお，その際に鋼製網枠には，これまで著者らが構築してきた有限要素モデルを用いる．一方，中詰材は多面体で近似する．その接触解析においては，解析効率およびアルゴリズムの簡易さから鈴木ら[3)]により提案されたボクセルベース衝突判定アルゴリズムを用いる．また，鋼製組立網の鉛直載荷解析を行い，過去に行った実験や有限要素解析との比較等を通し，その適用可能性について検討する．

## 2. 粒状体による中詰材のモデル化

粒状体の代表的解析手法として個別要素法[4)]がある．当該手法における粒状体間の接触は，接触点に設けられたバネやダッシュポットにより評価され，粒子変形は直接考慮されない．一方，粒子の変形までモデル化した手法としては不連続変形法 (DDA) が挙げられる．近年では，これらの手法を用いた二次元多角形粒状体の解析なども試みられている[5)]．これに対して，三次元解析の場合，多面体どうしの接触には，頂点・辺・面の相互間での接触が可能性としてあり，それらを適宜判定する必要がある．この接触判定を適切且つ効率良く実行するのは必ずしも容易ではなく，そのため各粒子を多面体によりモデル化した三次元解析はまだ実用的段階になく，適用例は決して多くない．

このような状況の下，三次元粒状体の簡易且つ効率的な接触解析法が鈴木ら[3)]により提案された．当該手法は，

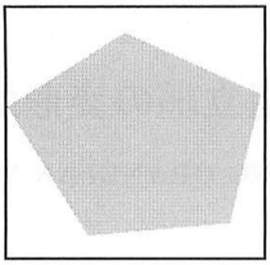


Fig. 1　Polyhedron (polygon) and voxel (pixel) of level 0.

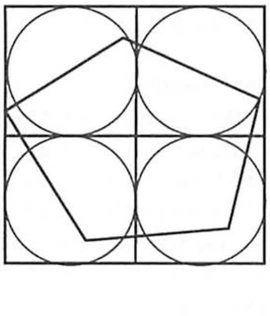


Fig. 2　Voxels and voxel spheres of level 1.

多面体の表面をボクセル球で覆い，多面体同士の衝突判定をボクセル球レベルで行うものである．そのため，多面体を構成する面・辺・頂点毎の複雑な接触判定は不要となり，簡易なアルゴリズムによる判定が可能となる．

以下では，鈴木らの手法による接触判定に基づく粒状体解析法の構成について，その概略を述べる．

### 2.1　多面体のボクセル球による近似

多面体形状をボクセル近似で与える．簡単のため，二次元問題で考える．この場合，多面体は多角形に，ボクセルはピクセルになる．以下では三次元モデルを想定した表現を用いて説明する．

多面体を包含する最小の立方体を階層 0 のボクセルと呼ぶ (Fig.1)．さらに，階層 0 のボクセルの各辺を 2 等分して得られる 8 つの小ボクセル (2 次元問題なら 4 つの小ピクセル) を階層 1 のボクセルと呼ぶことにする．以降同様にして階層 $m$ のボクセルを定義する．各階層のボクセルに対して，それに内接する球をボクセル球と呼ぶことにする (Fig.2)．なお，鈴木ら[3]はボクセルに外接する球をボクセル球と定義している．これをボクセル球として与え接触判定する場合，かなり深い階層レベルまで解像度を上げない限り，実際の多面体同士が幾何学的に接触していない段階でも接触と判定され，挙動が多少不自然になる傾向が認められたため，ここでは内接球を用いた．

以上の操作により，多面体はその表面に位置する多数のボクセル球の集合体により近似されることとなる．また，ボクセル階層を深くすることで，その近似精度を上げることができる．適用例を Fig.3,4 に示す．Fig.3 は近似対象となる多面体である．Fig.4 はそれを第 4 階層のボクセル球により近似したものである．

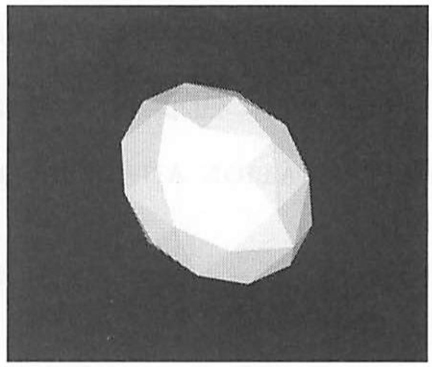


Fig. 3　An example of polyhedron.

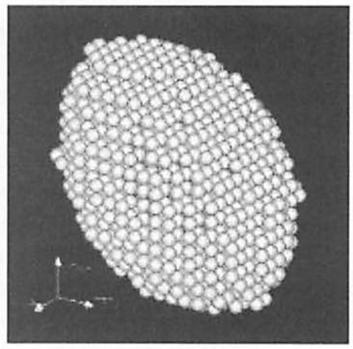


Fig. 4　Approximation of the polyhedron by voxel spheres with level 4.

### 2.2　接触ボクセル球の抽出

多面体間の接触判定は，最深階層のボクセル球同士の接触により近似評価する．最深階層において多面体表面と接し，且つ相手の多面体上のボクセル球と接しているボクセルの抽出手順について述べる．

**(1)**　階層 0 のボクセルどうしで多面体間の接触の可能性を判定する．接触の可能性がなければ，次の多面体に移り同様の判定を繰り返す．

**(2)**　階層 0 で接触の可能性のある場合，階層 1 のボクセルにレベルを移動する．まず，各ボクセル球とそれが属している多面体表面の三角形面素との接触判定を行い，接触しているボクセルのみ抽出する．

**(3)**　(2) で抽出されたボクセル球に対して，相手の多面体のボクセル球との接触を判定し，接触しているボクセル球のみ抽出する．

**(4)**　階層をさらに 1 つ上げ，(2),(3) の判定を繰り返す．

**(5)**　(4) の操作を所定の階層に到達するまで繰り返す．

### 2.3　ボクセル球間の接触力の計算

**2.2** に述べた手順で抽出したボクセル球間で接触力を計算する．Fig.5 に示すように，ボクセル球 $i$ と $j$ の中心点座標を $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$，速度を $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ とする．ボクセル球 $i$ が属

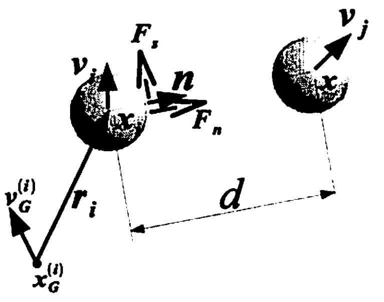



Fig. 5 Voxel spheres and contact forces.

する多面体の重心位置を $\mathbf{x}_G^{(i)}$，速度を $\mathbf{v}_G^{(i)}$，回転速度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}_G^{(i)}$ とする．このとき，$\mathbf{v}_i$ は次式で求められる．

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_G^{(i)} + \boldsymbol{\omega}_G^{(i)} \times \mathbf{r}_i \tag{1}$$

ここで，$\mathbf{r}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_G^{(i)}$ である．

ボクセル球間の中心点間距離を $d$，各ボクセル球の半径を $\bar{r}_i, \bar{r}_j$ とする．$d < (\bar{r}_i + \bar{r}_j)$ の場合に作用するボクセル球間の法線方向 $(\mathbf{n})$ の接触力 $\mathbf{F}_n$ は次式で与えられる．

$$\mathbf{F}_n = \{-k[(\bar{r}_i + \bar{r}_j) - d]^{3/2} + \eta(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i)\cdot\mathbf{n}\}\mathbf{n} \tag{2}$$

ここで，$k, \eta$ はバネ定数とダッシュポットの減衰係数である．なお，法線方向接触力は Hertz の弾性接触モデルで評価するものとし，バネ定数 $k$ を次式で与える．

$$k = \frac{\sqrt{2R}}{3}\cdot\frac{E}{1-\nu^2} \tag{3}$$

式(3) による接触力評価の際には，多面体を代表半径 $R$ の球体で近似評価している．また，$E, \nu$ は多面体の弾性係数とポアソン比である．

$\mathbf{n}$ に直交する方向の相対速度 $\mathbf{v}_s$ は次式で与えられる．

$$\mathbf{v}_s = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) - [\mathbf{n}\cdot(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i)]\mathbf{n} \tag{4}$$

接線方向力 $\mathbf{F}_s$ は摩擦力で与える．

$$\mathbf{F}_s = \mu|\mathbf{F}_n|\mathbf{s}, \quad \mathbf{s} = \frac{\mathbf{v}_s}{|\mathbf{v}_s|} \tag{5}$$

ここで，$\mu$ は摩擦係数である．

ボクセル球 $i$ が属する多面体には接触力 $\mathbf{F}_n, \mathbf{F}_s$ が，ボクセル球 $j$ が属する多面体には $-\mathbf{F}_n, -\mathbf{F}_s$ が作用する．また，$\mathbf{F}_n, \mathbf{F}_s$ によるモーメント $\mathbf{M}$ は次式で与えられる．

$$\mathbf{M} = \mathbf{r}_i \times (\mathbf{F}_n + \mathbf{F}_s) \tag{6}$$

これらの力とモーメントを全ての接触点に対して加算することで，多面体全体に作用する合力と合モーメント $\mathbf{M}_i$ が求められる．

## 3. 時間積分

### 3.1 並進移動

多面体 $i$ に作用する合力を $\mathbf{F}_i$ とすると，多面体 $i$ の加速度 $\mathbf{a}_i$ は次式で与えられる．

$$\mathbf{a}_i = \frac{\mathbf{F}_i}{m_i} \tag{7}$$

ここで，$m_i$ は多面体質量である．

式(7) に基づき時間積分することで，新たな時間ステップにおける多面体位置の更新がなされる．なお，本研究では石と鋼製網枠との連成問題が対象であり，通常の陽的時間積分スキームでの安定解析には，極めて短い時間増分 $(\Delta t)$ の設定が必要となる．ちなみに，Euler スキームによる場合，$\Delta t$=$10^{-6}$sec としても安定解を得ることができなかった．

本解析の目的は鋼製組立網の準静的な応答を捉えることにある．したがって，動的応答特性はさほど重要でなく，安定解析が確保でき，準静的挙動の評価が適切になされれば十分である．ただし，粒状体と鋼製網枠との連成を静的解析する場合，不平衡力の収束計算を要し，実効性に欠ける．そこで，動的緩和法と同様の適用を念頭に，陽的に安定解を得ることを目的に，次の時間積分スキームを用いることとした．

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_G^i(n+1) &= \mathbf{v}_G^i(n) + \frac{\Delta t}{2}\mathbf{a}_i,\\ \mathbf{x}_G^i(n+1) &= \mathbf{x}_G^i(n) + \Delta t(\mathbf{v}_G^i(n) + \frac{\Delta t}{2}\mathbf{a}_i)\end{aligned} \tag{8}$$

ここで，$(n)$ は第 $n$ ステップ目の解を意味する．

式(8) による場合，動的成分が適切に評価されなくなるが，バネ–質点系でのスペクトル半径が 1 となるため，静的つり合い状態への移行は安定に計算可能となる．

### 3.2 回転移動

多面体 $i$ の角加速度 $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ は次式で与えられる．

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \mathbf{I}_i^{-1}\cdot\mathbf{M}_i \tag{9}$$

ここで，$\mathbf{I}_i$ は慣性モーメント行列である．

式(9) より，多面体 $i$ の第 $n+1$ ステップにおける角速度は，式(8) の時間積分スキームに基づき次式で更新される．

$$\boldsymbol{\omega}_i(n+1) = \boldsymbol{\omega}_i(n) + \frac{\Delta t}{2}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \tag{10}$$

多面体要素の主軸を要素座標に設定し，その下で定義した多面体内任意点の座標を $\mathbf{r}$ とする．このとき，第 $n$ ステップにおける当該点の全体座標ベクトル $\mathbf{r}^n$ は次式で与えられる．

$$\mathbf{r}^n = \mathbf{R}^n\cdot\mathbf{r} \tag{11}$$

ここで，$\mathbf{R}^n$ は第 $n$ ステップにおける多面体の回転テンソルである．なお，簡単のため式(11) では全体座標の原点を多面体重心にとっている．

第 $n$ から $n+1$ ステップの間の増分回転ベクトルは，式(8) と同様の時間積分により $\Delta t(\boldsymbol{\omega}_i(n) + \Delta t/2\dot{\boldsymbol{\omega}}_i)$ と与えられる．ここで，このベクトルの大きさを $\theta$，その方向の単位ベクトルを $\mathbf{t}$ とすると，次式が成り立つ．

$$\Delta t(\boldsymbol{\omega}_i(n) + \frac{\Delta t}{2}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i) = \theta\mathbf{t} \tag{12}$$

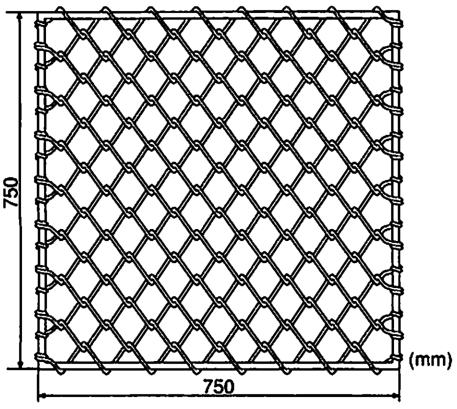



Fig. 6　A wire mesh panel.

このとき，1 ステップ間の回転テンソル $\Delta\mathbf{R}^n$ は次式で与えられる[6]．

$$\Delta\mathbf{R}^n = \mathbf{I} + \sin\theta \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix} + 2\sin^2\frac{\theta}{2} \begin{bmatrix} t_1^2-1 & t_1t_2 & t_1t_3 \\ t_1t_2 & t_2^2-1 & t_2t_3 \\ t_1t_3 & t_2t_3 & t_3^2-1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

ここで，$\mathbf{I}$ は恒等テンソル，$t_j(j=1,\cdots,3)$ は単位ベクトル $\mathbf{t}$ の成分である．

以上より，第 $n+1$ ステップにおける回転テンソルは次式により更新される．

$$\mathbf{R}^{n+1} = \Delta\mathbf{R}^n \cdot \mathbf{R}^n \tag{14}$$

## 4. 鋼製網枠のモデル化

### 4.1 金網のモデル化

鋼製網枠に用いる金網パネルの一例を Fig.6 に示す．ここでは Fig.6 のような菱形金網を対象に，そのモデル化の概略について述べる．なお，詳細は文献 1),7) を参照されたい．

金網はそれと力学的に等価な弾塑性膜としてモデル化する．金網の面内変形には微小ひずみを仮定する．金網の巨視的応力 $\sigma_{ij}$ は，金網を構成するユニットセル (Fig.7) 当りの巨視的応力と金網作用力との仮想仕事の等価性に基づき次式のように与えられる．

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2Ar}\sum_{m=1}^{2} F_i^m n_j^m \tag{15}$$

ここで，$A=\sin\theta\cos\theta$, $\theta$ はユニットセルの中心点と頂点①とを結ぶ線が $x_1$ 軸となす角度，$r$ は中心点と頂点間距離，$\mathbf{F}^m, \mathbf{n}^m$ は第 $m$ 番頂点の作用力と頂点方向単位ベクトルである．頂点作用力 $\mathbf{F}^m$ は各変形段階で有限要素の応力評価点毎に評価する．なお，頂点作用力と頂点変位との関係は，事前にニューラルネットワークで学習させておき，計算の効率化を図っている．

面外たわみを含む全体系での変形に対しては有限変位理論を適用し，節点力評価を行う．

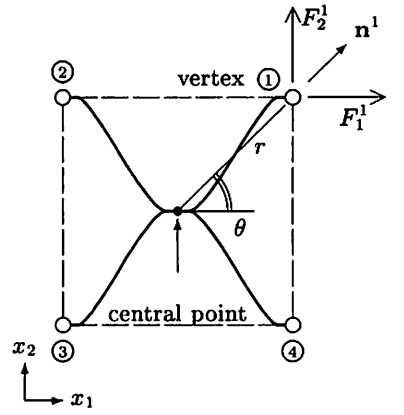



Fig. 7　Unit cell of wire mesh.

### 4.2 丸棒のモデル化

金網の周囲に取付けられている丸棒は，三次元はり要素でモデル化する．なお，その際に金網と同様に有限変位理論を適用する．また，弾塑性解析に際し Prandtl-Reuss の式を用い，はり要素内を断面内と長さ方向に細分割し，各部分領域毎に弾塑性状態下での応力評価を行う．その結果に基づき節点力を求める．

### 4.3 中詰材との接触力評価

中詰材と鋼製網枠との接触解析は，多面体頂点と有限要素間で行う．その際に，接触力は多面体どうしの場合と同様にして評価する．なお，接触点は一般に有限要素節点位置とは一致しない．そのため接触力を要素補間により各節点に割り振り，等価節点力を求める．

### 4.4 動的解析

鋼製網枠の質量分布は集中質量により与える．上述のモデル化に基づき求めた節点力と集中質量とに基づき全自由度の加速度成分を求め，**3.** に述べた時間積分法により逐次解を更新する．

## 5. 解析例

### 5.1 解析条件

解析例として，過去に行った実験[2]に対応したものを設定する．当該実験では，Fig.6 に示した一辺 75cm の金網パネル 6 枚を箱状に組み立てて作成した供試体を用いた．パネル間の接合には U ボルトを用い，各辺 5 ～ 4 箇所を締結した．金網は線形 5mm，網目寸法 65mm のもの (Fig.6 水平，鉛直方向巨視的弾性係数が 138, 336 kN/m) を採用し，丸棒は 9mm 径のものを用いている．中詰材には粒径 10 ～ 15cm 前後の玉石を用い，1 個ずつ手作業でできるだけ密になるように充填した．実験では鋼製組立網の上面を十分に剛な載荷板を介して下方に押込み，その際の載荷重と上面の鉛直変位とを測定した．

以上の実験に対応する解析モデルを Fig.8 に示す．本来は鋼製組立網全体をモデル化すべきであるが，ここでは本手法の適用可能性を検討するための基礎的解析を主目的とし，全体の 1/4 モデルを用い，金網の変形には対称条件を課した．なお，金網は 2 面とも水平・鉛直方向に

6 等分割し，3 節点三角形要素により離散化した．また，丸棒は金網節点と整合するように 6 要素分割した．実際の鋼製組立網では各辺上において，互いに直交する 2 枚のパネルに対応した 2 本の丸棒が存在する．Fig.8 では，1 本の鉛直丸棒のみ示されているが，節点力評価では 2 本分の剛性を考慮している．丸棒および金網の上下端は固定支持とし，過去の解析経験[2)]に基づき，側面に振幅 2cm の sine 半波形状の初期たわみを設定した．なお，解析では丸棒の弾性係数を 204GPa，降伏応力を 300MPa に設定した．鋼製網枠の重量は，中詰材に比べ無視できる程度に小さい．そこで動的解析では準静的解が速やかに得られるように，できるだけ小さな質量を設定することとし，鋼材の質量密度を $100\mathrm{kg/m^3}$ で与えた．

中詰材は Fig.3 に示したような 56 個の多面体で与えた．個々の多面体は，単位球に対応する基準多面体より生成した．具体的には，粒径 (10.6 ～ 16cm) および互いに直交する 3 つの主軸方向の扁平係数 (0.8 ～ 1.1) を一様乱数により与え，各多面体を作成した．解析では，石材の質量密度を $2650\mathrm{kg/m^3}$，弾性係数を 15GPa，ポアソン比を 0.25 とした．また，中詰材どうし，および金網との摩擦係数はいずれも 0.3 と設定した．ただし，対称面上では摩擦は作用しないものとしている．

次に中詰材の充填方法について説明する．まず，上述のように生成した各多面体を，互いに接触し合わないよう空間中の格子点上に発生させる．次に，鋼製網枠と同形状の剛な箱に自由落下させてランダムに充填させる．その後，鋼製網枠と連成させながら概ね静止するまで解析を進め，初期状態を得る．

変形解析では鋼製組立網の上面に剛な板を設定し，中詰材との接触を評価しつつ鋼製網枠上面と共に一定速度 (2.5cm/sec) で下方に移動させ，鉛直変位が 3cm に達するまで計算した．なお，時間増分は中詰材については $\Delta t = 2 \times 10^{-5}\mathrm{sec}$ とし，鋼製網枠に対しては過大な作用荷重の発生を抑制する目的で中詰材の 1step をさらに 10step に細分割し，中詰材から作用する接触力をその間一定として時間積分を実施した．

## 5.2 解析結果

鋼製組立網上面の鉛直変位と鉛直荷重との関係を Fig.9 に示す．図には実験結果と連続体モデルによる有限要素解析結果[2)]も合わせて示した．鉛直荷重 30kN 前後以降において，本解析での全体剛性が他に比べ低い値を示している．また，最大荷重は連続体モデルと同程度となっているが，各変形過程における強度が高目の値を示しているなど，特に実験値との間に差が認められる．しかし，鉛直丸棒座屈後に強度が徐々に低下するなど，定性的傾向については概ね妥当な結果が得られた．なお，全体に強度が高い値を示した原因の一つとしては，ここに採用した時間積分法の影響が考えられる．当該手法では式(8)のように 1step 間の速度増分に対する加速度の寄与が低減されている．そのために安定解析が可能となったものの，上端に与えた強制変位に対する丸棒各節点の変位応

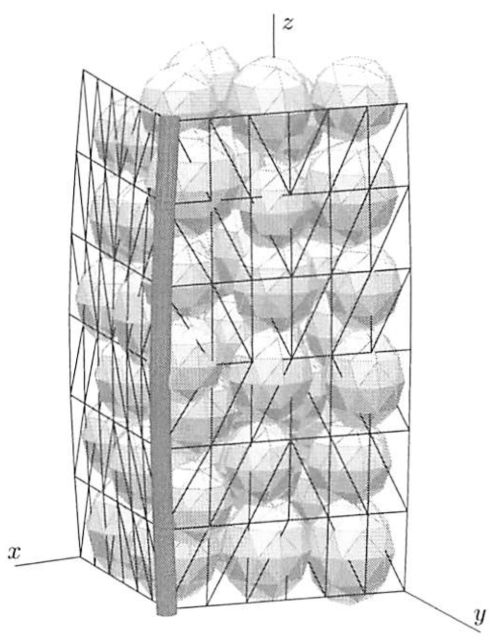



Fig. 8 Initial form of box gabion.

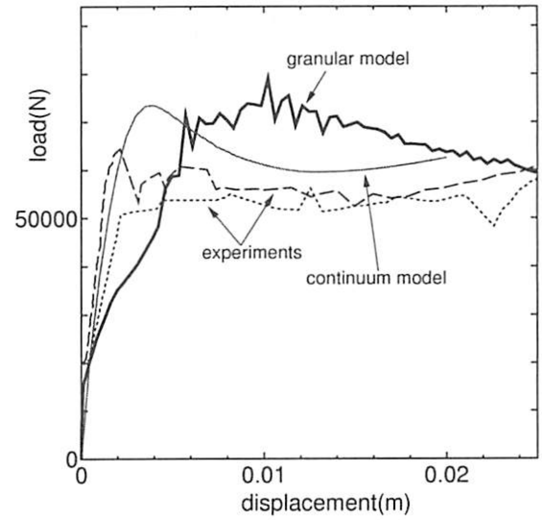



Fig. 9 Vertical load and displacement.

答が過小評価され，結果として過渡応答時の軸ひずみが過大評価されたことによるものと思われる．ちなみに，鉛直丸棒単体の座屈解析を事前に実施した際，座屈前の段階で上述のような過大荷重の発生が認められた．この傾向は時間増分の短縮と共に低減され，本解析における $\Delta t$ の下では，後座屈域での挙動が静的解析と一致することを確認した (図示省略)．

次に，上面鉛直変位 3cm における変形の様子を Fig.10 に示す．鉛直丸棒が座屈し，高さ方向中央部付近の金網がそれに追従するように外側にたわんでいる様子が窺える．また，金網と接触している中詰材の個数は決して多くなく，金網のたわみに伴い中詰材と金網との間の空隙が拡大している箇所も認められる．これらの挙動は構造物の規模に比べ中詰材粒径が比較的大きいことに起因す

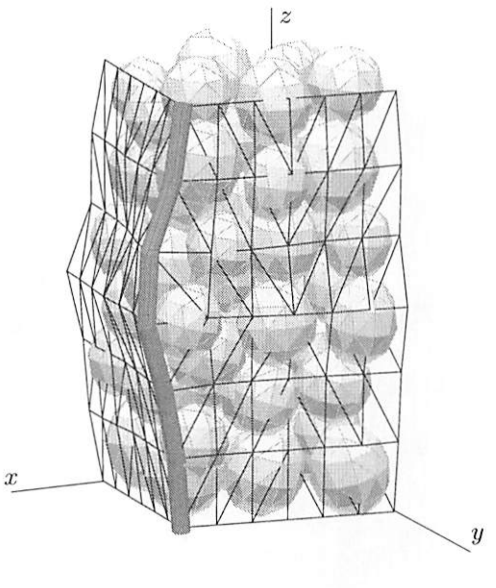



Fig. 10 Deformation of box gabion at vertical displacement of 3cm.

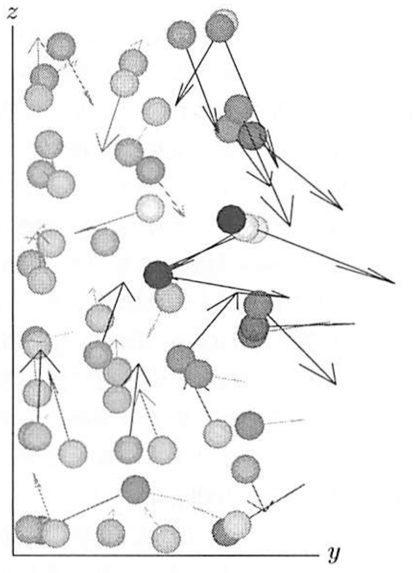
るものであり，中詰材を弾塑性連続体によりモデル化した場合には再現不可能な特徴である．

最後に，初期状態から鉛直押込み変位 3cm までの過程で発生した各中詰材の変位をベクトル描画したものを Fig.11 に示す．図中の小球は各中詰材の変形前の位置を示している．なお，変位ベクトルの大きさは拡大して表示している．図 (a) は $x$ 軸方向から見たものである．図より，高さ方向中央付近の金網近傍に位置している中詰材が，鉛直丸棒の座屈により水平方向に大きく変位している様子が確認できる．また，図 (b) は $z$ 軸方向から見たものである．大きな変位を受けている中詰材が主に金網近傍に位置しており，多くの中詰材が金網のたわむ方向に変位している．特に丸棒近傍 (図中右上隅) の中詰材の変位量が大きな値を示しており，その最大値は 6cm 近くに達している．以上のことより，中詰材全体として見た場合，鋼製網枠の変形に概ね対応するように変位を生じていることがわかる．

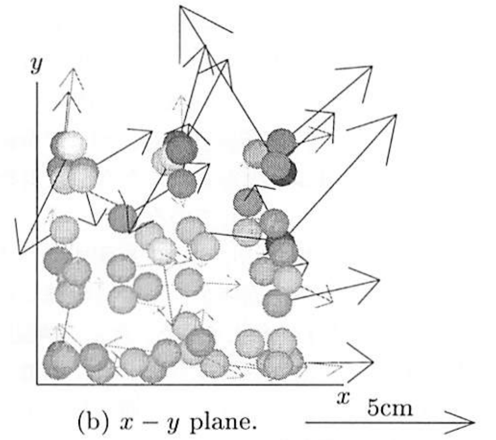
## 6. おわりに

鋼製組立網の中詰材を粒状体でモデル化し，全体解析を試みた．中詰材は多面体で表現し，解析の効率化を図る目的でボクセル球を用いた形状近似を採用した．金網と丸棒は弾塑性有限要素により離散近似し，中詰材との連成解析を実施した．実験結果や，中詰材を弾塑性連続体でモデル化した場合の解析結果との比較を通し，粒状体モデルによる解析の適用可能性について検討した．その結果，鋼製組立網全体の強度は幾分大きめの評価がなされる傾向にあるが，鉛直丸棒の座屈発生後に全体強度が低下に転ずるなど，定性的には妥当な解が得られることが確認できた．

粒状体による中詰材のモデル化は，初期状態の作成に手間を要し，連続体モデルに比べて多大な計算時間を必要とする．そのため，解析効率の面では改善の余地が残されているものの，鋼製組立網のように中詰材の粒径が構造物の大きさに比べ比較的大きな問題においては，連続体モデルで評価し得ない粒状体特有の力学挙動の再現に有効な解析手法であると言える．




(a) $y-z$ plane.




(b) $x-y$ plane.

Fig. 11 Displacement vectors of filling materials.

### 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/I-49, 205-215, 1999.
2) 阿部和久，田嶋史人，小関　徹：鋼製組立網の三次元弾塑性解析，構造工学論文集，Vol.49A, 145-152, 2003.
3) 鈴木克幸，久保田　純，大坪英臣：ボクセルベース衝突解析アルゴリズムを用いた剛体運動シミュレーション，応用力学論文集, 6, 131-139, 2003.
4) 粉体工学会編，粉体シミュレーション入門，産業図書，1998.
5) 相川　明：不連続変形法解析を用いた砕石道床の地震時における内部破壊特性，応用力学論文集，6, 593-602, 2003.
6) 久田俊明：非線形有限要素法のためのテンソル解析の基礎，丸善，21-23, 1992.
7) 阿部和久，小嶋里志，深谷克幸：鋼製組立網に用いられる金網の面外変形解析，構造工学論文集，Vol.47A, 147-154, 2001.