

立命館大学理工学部
 Monash University Faculty of Engineering
 立命館大学 R-GIRO
 立命館大学理工学部
 立命館大学理工学部

学生会員 ○鳥居 文也
 正会員 Ha Hong BUI
 学生会員 酒匂 一成
 正会員 里深 好文
 正会員 深川 良一

1. はじめに

近年、土木分野において流体の大変形の解析を行う際に SPH 法が適用されるようになってきた^{1), 2)}。それを受け、さらに、土-構造物モデルに SPH 法を適用しての解析が試みられてきたが、土と構造物の接触面に作用する力をうまく表現することができなかった。そこで、本研究では、土-構造物の接触面に作用する力を、DEM の手法を応用した手法によりモデル化する³⁾。そして、アルミを用いたモデル実験と解析結果の比較によって、土-構造物間におけるモデルの妥当性の検証を行う。

2. 土-構造物の相互作用を考慮した変形解析

土と構造物の接触面に作用する力はばねとダッシュポットによりモデル化する。これを soft-contact model と呼ぶこととする。土-構造物境界付近のモデルは図-1 のように表される³⁾(土、構造物に適用するモデルは参考文献 3)参照)。また、法線方向と接線方向に作用する力のモデルは図-2 のように表せ、それぞれ次式のように表すことができる⁴⁾。

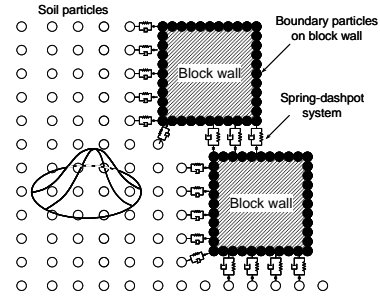
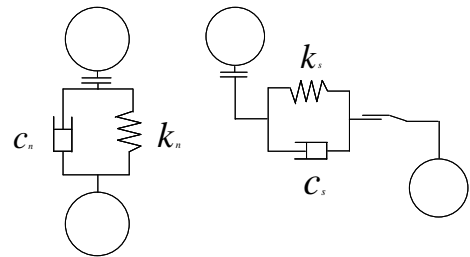


図-1 土-構造物境界付近のモデル



(a) 法線方向 (b) 接線方向

図-2 土-構造物モデルにおける相互作用を表す soft-contact model

$$\vec{f}_{nij} = -k_n \cdot \Delta \vec{n} - h \cdot c_n \cdot \vec{v}_{nij} \quad (1)$$

$$\vec{f}_{sij} = -k_s \cdot \Delta \vec{s} - h \cdot c_s \cdot \vec{v}_{sij} \quad (2)$$

ここに、 \vec{f}_{nij} , \vec{f}_{sij} : 各方向の力, k_n , k_s : 各方向のばね定数($k_n = k_s$), $\Delta \vec{n}$, $\Delta \vec{s}$: 各方向の変位, h : 減衰項の補正定数($0 \leq h \leq 1$), c_n , c_s : 減衰定数, \vec{v}_{nij} , \vec{v}_{sij} : 各方向の速度。ここで、 c_n , c_s はそれぞれ次式で表すことができる。

$$c_n = 2 \sqrt{k_n \cdot \frac{m_i \cdot m_j}{m_i + m_j}} \quad (3)$$

$$c_s = 2 \sqrt{k_s \cdot \frac{m_i \cdot m_j}{m_i + m_j}} \quad (4)$$

ここに、 m_i , m_j : i, j 粒子の質量。

接線方向の力に関しては、クーロンの摩擦法則より以下の条件を持つ。

$$\vec{f}_{s \max} = \left| \vec{f}_{nij} \tan \phi \right| \quad (5)$$

$$\vec{f}_{s \max} \leq \vec{f}_{sij} \quad (6)$$

ここで、 $\vec{f}_{s \max}$ は粒子同士に作用する最大の摩擦力である。式(2)が条件式(6)を満たさないとき、接線方向の力 \vec{f}_{sij} は、以下のように表すことができる。

$$\vec{f}_{sij} = - \left| \vec{f}_{nij} \tan \phi \right| \text{sign}(\vec{v}_{sij} \cdot \vec{s}) \cdot \vec{s} \quad (7)$$

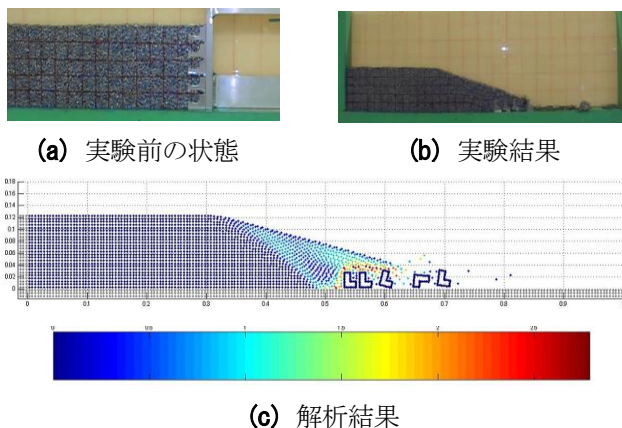


図-2 構造物モデルを鉛直状に5段積んだ場合の実験結果および解析結果の比較

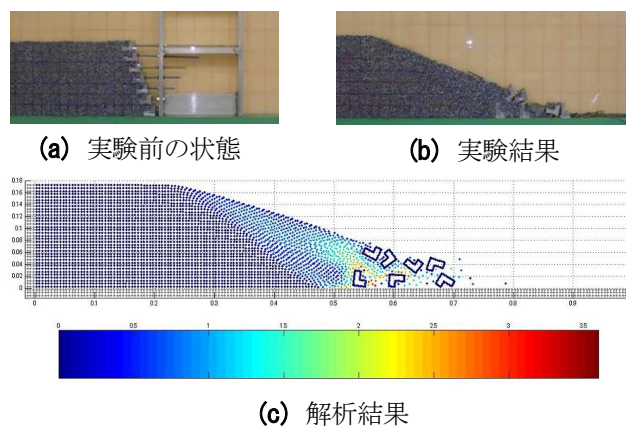


図-3 構造物モデルを階段状に7段積んだ場合の実験結果および解析結果の比較

3. モデル実験の結果と解析結果の比較

3.1 アルミを用いたモデル実験 構造物背後の構造物および構造物をそれぞれアルミによりモデル化した。実験を行うモデルには、(1)モデルを鉛直に積む、(2)モデルを階段状に積む、という2つの条件を設定した(図-2(a), 図-3(a))。

3.2 解析条件 本解析に用いたパラメータは表-1, 表-2の通りである。単位体積重量, 内部摩擦角および接触面における摩擦係数は実際に測定した値を用いたが, 他のパラメータに関しては実験結果と比較しながら試行錯誤で決定した。

表-1 アルミ棒とアルミ構造物の物理特性

パラメータ	アルミ棒	アルミ構造物
γ : 単位体積重量(kN/m ³)	23.02	26.03
c : 粘着力(kN/m ²)	0.0	-
ϕ : 内部摩擦角(deg)	19.8	-
E : ヤング係数(MPa)	10.0	1×10^7
ν : ポアソン比	0.3	0.3

表-2 接触面の解析パラメータ

パラメータ	アルミ棒-アルミ構造物	アルミ構造物-アルミ構造物	アルミ構造物-アクリルの箱
K_n : 法線方向弾性定数(N/m)	1×10^9	1×10^9	1×10^9
μ : 摩擦係数	0.56	0.62	0.58
h : 補正係数	1.0	1.0	1.0

3.3 解析結果 図-2, 図-3 にモデル実験の結果および解析結果を示す。図-2, 図-3 のコンター図は破壊に伴う塑性ひずみの分布を示している。崩壊後の形状においては、構造物モデルを階段状に積んだ場合においてはほぼ類似していたが、鉛直状に積んだ場合においてはモデル実験のほうが大きな変位を示していた。一方で、構造物モデルを鉛直状に積んだ場合および階段状に積んだ場合の2つの場合において崩壊後の形状はほぼ類似していた。また、積み方の違いによる崩壊後の形状の違いも再現することができていた。

4. おわりに

本研究では、裏込め土や構造物をアルミによってモデル化したモデル実験を行い、またモデル実験の結果と SPH 法による数値シミュレーション結果を比較することで soft-contact model の土-構造物モデルに対する適用の妥当性の検証を行った。その結果、擁壁モデルの設置の違いによる崩壊後の形状を再現できており、ある程度の妥当性を確認することができた。一方で、擁壁モデルの変位がモデル実験結果と解析結果において大きな違いが見られた場合も存在した。より精度の高い解析を行うために、soft-contact model の改良を行ってきたい。

謝辞：本研究は、(株)箱型擁壁研究所から多大な御支援および貴重な御助言を頂きました。ここに謝意を示します。

<参考文献>

- 1) H.H.Bui, R.Fukagawa, K.Sako and S.Ohno : Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.32, pp.1537-1570, 2008.
- 2) 前田健一, 酒井守 : Smoothed Particle Hydrodynamics 法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発, 土木学会応用力学論文集, Vol.7, pp.775-786, 2004.
- 3) 酒匂一成, H.H.Bui, 里深好文, 深川良一 : 箱型擁壁に作用する地盤内応力分布に関する二次元 SPH 解析, 第 55 回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, pp.5-6, 2011.
- 4) P.A.Cundall and O.D.L.Starack : A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.