

個別要素法を用いた地表断層変位評価のための基礎的検討

ジェイアール総研エンジニアリング 正会員 ○日野 篤志
埼玉大学 正会員 谷山 尚 西條 生
鉄道総合技術研究所 正会員 豊岡 亮洋

1. はじめに

1999年のトルコ・コジャエリ地震や台湾・集集地震の際には、地表断層変位によって土木構造物に甚大な被害が発生した。国内においても、北伊豆地震による丹那トンネル水抜抗の被害などが発生している。地表断層変位は、表層付近の地盤の影響を強く受けることから、変位量や影響範囲を予測することは容易では無い。変位量や影響範囲の予測を行うにあたっては、数値解析によるものがほとんどであり、有限要素法（FEM）や個別要素法（DEM）などによる解析が挙げられる。本稿では、DEMを用いて地表断層変位をシミュレーションするための基礎的な検討として、入力パラメータの設定方法に関する検討を実施し、効率的なパラメータの設定方法について提案する。本検討においてDEMを選定した理由としては、非連続解析であることから、地表断層変位のように数メートル規模にもなる地盤の変形を直接扱うことが可能であるためである。

2. 個別要素法について

(1) モデル化手法 個別要素法¹⁾²⁾などは、解析の対象体を粒子の集合体としてモデル化し、個々の粒子の動きを粒子間の接触力に基づいて求めていく解析手法で、地盤材料に対して多く用いられている。

本検討では、まず粒子を沈降させ地盤を構築したうえで、地盤底面に強制変位を入力することで地表断層変位を評価している。

構築する地盤モデルは、左右を側壁に囲まれた条件とし、前背面に周期境界を用いて奥行の影響を無視した2次元のモデルとする。地盤を構築する際には、2.1cm～3.5cmの粒径分布を持つ球形粒子を各方向に並べることでモデルの大きさを定めている。粒子間の接触点において、法線・接線方向の力に加えてモーメントも伝達するものとし、1つの接触点に作用するモーメントの上限値（ M_{max} ）を次のように与えた。

$$M_{max} = \alpha B f_n$$

ここで、 f_n は粒子間の法線方向の接触力、 B は接触面の長さで、 α は伝達されるモーメントの大きさ（転がり抵抗の大きさ）を規定する係数である³⁾。ばね定数や減衰係数などのパラメータの値は、せん断弾性波速度に依存するため¹⁾ $V_s=100\text{m/s}$ として表1の解析パラメータを設定した。なお、本モデルに対して V_s の値を1.5倍と0.5倍とした検討を実施したが、地表面の変形形状に大きな差異は生じなかった。時間積分間隔は、 $5.0\times10^{-5}(\text{s})$ として加速度を積分することで粒子の動きを求めた。

前述のばねに対しては、上限値として摩擦係数を設定する必要がある。この摩擦係数は砂のモール・クーロンの破壊基準を基に設定するが、これは地盤が破壊する際つまり地盤に対して断層変位が作用する際の上限値の設定と言える。そこで、次節では摩擦係数を対象とした上限値の設定方法について検討を行うこととする。

(2) 摩擦係数のパラメータスタディー 前述したように、地盤を構築する際と地盤に断層変位を入力する際の2つのフェーズに対して摩擦係数を適切に設定する必要がある。DEMでは、地盤を構築する際には摩擦係数が小さい場合に密な地盤となり、断層変位を入力する際には摩擦係数が大きい場合に強固な地盤となる特徴がある。

これらの特徴を元に、簡易モデルによるパラメータスタディーを実施することで、摩擦係数の値の効率的な設定方法について検討を実施する。簡易モデルとは、図1に示すような小規模な側壁内に粒子を沈降させ、側壁を持ち

表 1 解析パラメータ

粒子半径	2.1 – 3.5 cm
ばね定数（法線方向）	$1.2\times10^9 \text{ N/m}$
ばね定数（接線方向）	$4.0\times10^8 \text{ N/m}$
粘性減衰係数（法線方向）	$2.4\times10^5 \text{ N/m}\cdot\text{s}$
粘性減衰係数（接線方向）	$1.6\times10^5 \text{ N/m}\cdot\text{s}$
転がり抵抗の係数	0.5

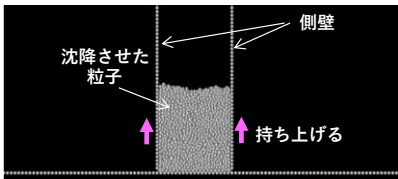
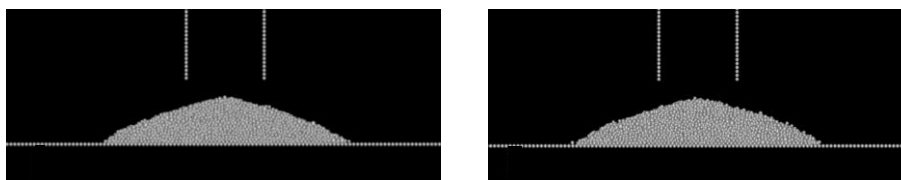


図 1 簡易モデルの概念図

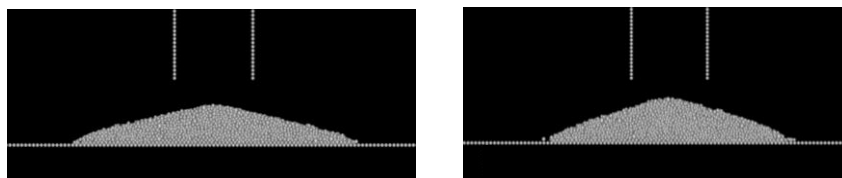
表 2 検討パラメーター一覧

構築する際の摩擦係数	0.1, 0.2, 0.3, 0.5 (4 ケース)
移動させる際の摩擦係数	0.1, 0.2, 0.3, 0.5 (4 ケース)



(a) 移動時摩擦係数 0.3 (b) 移動時摩擦係数 0.5

図2 砂の崩壊状況（地盤を構築する際の摩擦係数 0.2 時）



(a) 移動時摩擦係数 0.3 (b) 移動時摩擦係数 0.5

図3 砂の崩壊状況（地盤を構築する際の摩擦係数 0.3 時）

上げることで、地盤の崩壊を発生させ構築した地盤の安息角を測定するものである。安息角と内部摩擦角は、厳密な意味では一致しないものの、本手法を用いることで、実地盤の内部摩擦角を再現すること可能と考えている。

ここでは、表1の解析パラメータに対して、内部摩擦角が39度となるような摩擦係数の設定方法をパラメータスタディーより求めた（表2）。

砂の崩壊の状況を図2および図3、解析結果の一覧を図4に示すが、粒子が移動する際（断層変位作用時）の摩擦係数が大きくなるにつれて内部摩擦角の値は大きくなっていることがわかる。また、地盤を構築した際の摩擦係数は0.5よりも0.2の場合が最終的には内部摩擦角が大きくなる傾向を示した。これらの結果より、地盤作成時に0.2、断層変位作用時に0.3の摩擦係数を設定することで内部摩擦角が39度となる地盤モデルを構築することができた。

3. 効果確認のための模型実験の再現解析の実施

効果の確認として文献4に示す既往の模型実験の再現解析について、上記の摩擦係数を設定し、再解析を実施した（図5）。なお、対象とした模型実験は、内部摩擦角39度、層厚1mの地盤に対して、鉛直方向に120mmの強制変位を入力した試験である（図6）。

図7に入力した断層変位量に対する地表面の変形形状を模型実験と、再現解析結果の比較として示す。これまでの設定方法である摩擦係数を一律0.2とした場合に比べて、120mm時の地表面の変形形状は、再現性が増していることがわかる。これは、地盤の内部摩擦角を適切に設定したことから、地盤の破壊現象が精度よく表現できたためと考えられる。

4. まとめ

本稿では、DEMを用いた地表断層変位をシミュレーションのために、簡易モデルを用いた摩擦係数の設定方法について提案を行った。その結果、容易な検討で、解析精度が向上することを確認することができた。

参考文献 1)伯野:破壊のシミュレーション,1997 2)谷山:横ずれ断層によって表層地盤に形成されるせん断帯,土木学会論文集C,2008. 3)岩下,松浦,小田匡:粒子接点でのモーメント伝達を考慮した個別要素法の研究,土木学会論文集,1995. 4)日野,室野,押田,月岡,谷山:個別要素法による縦ずれ断層変位実験のシミュレーション,土木学会論文集A1(印刷中)

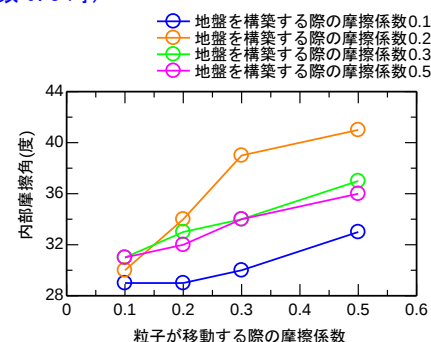


図4 摩擦係数と内部摩擦角の関係

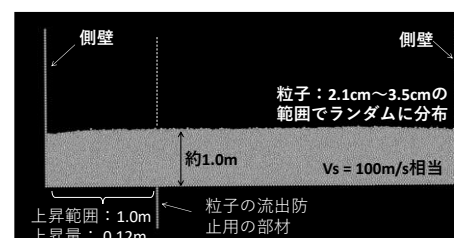


図5 再現解析モデルの概要

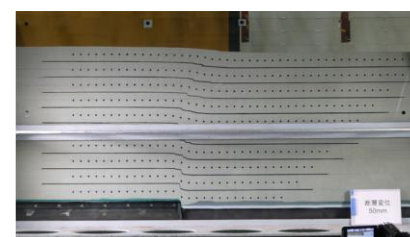


図6 模型実験の状況（上昇量 50mm 時）

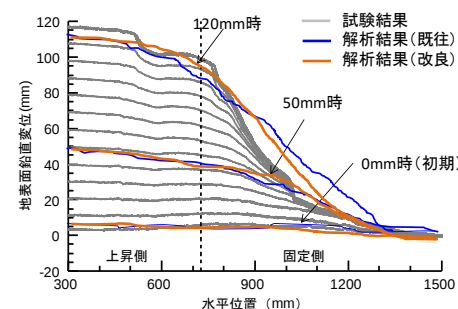


図7 地表断層変位の算定結果