

個別要素法を用いた地震時における副断層の出現解析

○東北大学工学部 学生員 新井 夏海
 東北大学大学院 正 員 京谷 孝史
 東北大学大学院 正 員 寺田 賢二郎
 東北大学大学院 正 員 加藤 準治

1. はじめに

日本の耐震設計において、確率論的変位ハザード手法を用いた解析が高尾ら¹⁾によって提案されている。これは実際の地震データを用いて、地震が発生した際に地表面に現れる断層変位の評価式を与えるものである。考慮されている断層変位は、震源断層と密接に関係する主断層と、そうではないが地表面に断層変位を生じさせる副断層の2種類である。しかし、副断層が出現するような地震の頻度は小さく、データが乏しい中で、副断層の変位量を断層評価式で予測するのは不十分である。そこで、本研究ではこれらの不足を補うために力学的観点から個別要素法を用いて副断層発現のシミュレーションを行い、副断層の発生を調べる。

2. 個別要素法

個別要素法は、Cundall²⁾によって1971年に提案されたもので、粒状体のような離散体の力学挙動を解析するための手法である。離散体を対象とするため、地盤の破壊解析等に広く用いられる。

個別要素法は接触している要素に力が働くため、まず接触判定を行う。接触判定は、式(1)で求める。接触している要素間に働く接触力を求める。接触している全ての要素について求めた接触力を運動方程式に代入し、次のステップの変位を求める。

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \quad (2)$$

ここで、添え字 i, j は要素の番号であり、 r は要素の半径である。式(2)を満たしていた場合、要素は接触していると考えられ、要素間に働く作用力 \mathbf{f} を式(3)式(4)で求める。

$$\mathbf{f}_n = K_n \mathbf{u}_n + \eta_n \dot{\mathbf{u}}_n \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_s = K_s \mathbf{u}_s + \eta_s \dot{\mathbf{u}}_s \quad (4)$$

ここで、添え字 n, s は接触点の法線方向と接線方向を意味し、 K はバネ定数、 η は粘性係数、 \mathbf{u} は要素 i の変位を表している。加速度 $\ddot{\mathbf{u}}$ は式(5)に示すように要素 i と接触しているすべての要素の接触力を合計して質量 m で除したものである。また、速度 $\dot{\mathbf{u}}$ および変位 \mathbf{u} は以下の式で得られる。

$$\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \sum_{j=1}^{n_c} \frac{\mathbf{f}_j}{m_i} \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + \ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \Delta t \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \Delta t \quad (7)$$

ここで、 n_c は要素 i と接触している要素の数、 m_i は要素 i の質量、 Δt は時間増分である。

3. 数値解析例

3.1 砂箱を用いた実験との比較

本解析例では、豊浦標準砂を詰めた砂箱を用いた実験³⁾を対象とし、数値解析により副断層の発現の数値シミュレーションを行う。実験に倣って 45° の断層変位角度を想定し、砂箱の高さは 5cm に統一した。また、変位角度方向に押し上げるようにして 3.5cm の強制変位を与えた。ここでは、Table1に示すように、各々のパラメータを変化させた3つのモデルを用いて解析を行った。

表-1 パラメータ

パラメータ	case1	case2	case3
平均粒径 (mm)	1		0.5
時間ステップ (sec)	1.0E-06	6.0E-07	
粒子密度 (kg/m ³)	2600		
砂箱高さ (cm)	5		
法線方向のバネ定数	2.0E+05	1.00E+05	
接線方向のバネ定数	2.0E+05	1.00E+05	
接線方向の粘性係数	7.38E-1	1.84E-1	
法線方向の粘性係数	7.38E-1	1.84E-1	
摩擦角 (°)	30		
転がり摩擦係数	0.05	0.02	0.05
載荷速度 (cm/sec)	0.02		

なお、これらのパラメータは中瀬⁴⁾を参考にした。実験で用いられた砂を再現するため、平均粒径を1としたとき、粒径が ± 0.2 の間に入るように設定した。case-1 は、実験を極力忠実に再現した基本モデルであり、case-2, case-3 はそれぞれ case-1 から転がり摩擦を変化させたもの、および粒径を変化させたものである。case-3 は、case-1 に対し平均粒径のみを小さくするよう意図したものであり、それ以外は case-1 と同等の条件となるようにバネ定数と粘性係数を補正した。

一連の解析は砂箱を敷き詰めるパッキング、高さを揃える切り取り、砂をならすための載荷、そして強制変位の4工程で行った。パッキングではランダム配置の一手法である落下法を用いた。落下法は発生させた粒子に重さを持たせて砂箱に敷き詰めていく手法であり、三軸圧縮試験での試料の作成法から考えても適していると判断した。

3.2 解析結果の比較

図-1は、強制変位前の砂箱モデル、図-2~4は変形後の砂箱モデルである。変形後のモデルでは、基本モデルで副断層が現れ始めたときの値を初期値としたせん断ひずみ増分 ε の値で色付けした。閾値は、 $0.2 \leq \varepsilon$ では赤、 $0.16 \leq \varepsilon < 0.2$ では紫、 $0.12 \leq \varepsilon < 0.16$ では黄色、 $0.08 \leq \varepsilon < 0.12$ では緑、 $0.04 \leq \varepsilon < 0.08$ では白と設定した。



図-1 解析モデル

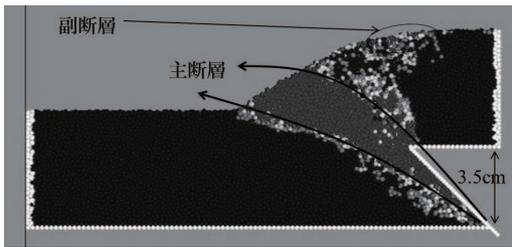


図-2 case-1 (基本モデル)

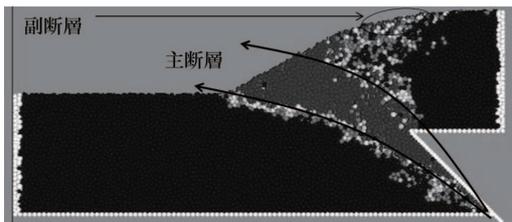


図-3 case-2 (転がり摩擦小)

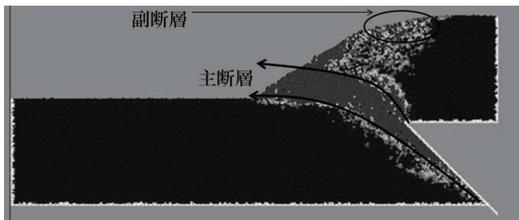


図-4 case-3 (平均粒径小)

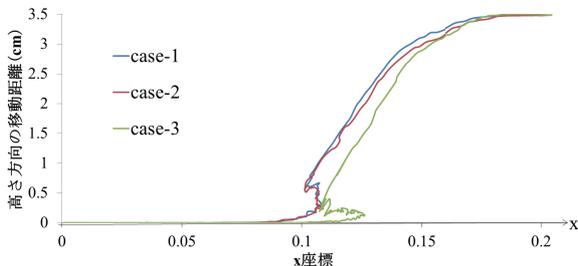


図-5 変形前に表面にあった要素の移動距離

数値解析結果から、副断層の発現は次の基準により判断した。

- せん断ひずみが集中している。
- 表面上の高さ方向の相対変位が最大となる点。

なお、主断層と副断層については、図-2~4に図示した通りである。また、図-5はcase-1~3について砂箱モデルを3.5 cm強制変位させた際、初期状態 $t = 0$ secで表面に存在した要素が高さ方向へ移動した距離を表したものである。縦軸は高さ方向の移動距離、横軸は時間 $t = 0$ secでの x 座標を表す。

case-1とcase-2を比較すると、case-2のほうが表面のせん断ひずみ増分の分布が大きく、図-5で示した表面形状を見ても、case-1の方が0.1~0.15の副断層が現れている箇所での変位量が大きくなっている。これは、case-2の方が表面が大きく崩れ、副断層がより顕著に発生することを表しており、case-2の転がり摩擦係数が小さく粒子間の拘束力が低くなることが原因である。また、case-1とcase-3では、case-3の方が主断層の分布が若干小さく、それに比べ表面のひずみ分布はcase-1より広がっている。表面形状を比較しても、case-3の方が主断層の現れている部分から副断層が発生する部分にかけて高さ方向の移動が小さく、表面がなだらかに崩れており、これは粒径が小さいほうが密度が高くより微小な崩れを示しやすいためである。性質の差を定量的に評価するため、三軸圧縮試験を行う予定である。

4. 結論

本研究では個別要素法を用いて副断層の解析を行った。以下に本研究の主な成果を示す。

- 粒径を細かくすると、せん断ひずみ分布が異なる挙動が起こる。これは粒径の違いによる粒状体モデルの性質が変化するためと考えられる。三軸圧縮試験を行い、モデルの性質を定量的に評価する必要がある。
- 本論文では結果を示していないが、副断層が現れづらい断層変位角度を浅くしたケースについては、転がり摩擦を小さくして解析を行うことで副断層の発生を促進させることができる。

参考文献

- 1) 高尾 誠, 土山 滋郎, 安中 正, 栗田 哲史: 確率論的断層変位ハザード手法の日本における適用, 地震工学会, 2013
- 2) Cundall, P.A: A Computer Model For Simulating Progressive, Large-scale Movements in Blocky Rock Systems., *Symposium, ISRM, Nancy France, Proc, Vol2, pp.129-136, 1971.*
- 3) 電力中央研究所: 逆断層模型実験, 2012
- 4) 中瀬 仁, 本田 中, 西野 隆之: 個別要素法摩擦パラメータを設定するためのねじりせん断シュミレーション, 第36回地盤工学研究発表会, pp503-504, 2001