

逆断層運動に伴う表層地盤の変形シミュレーション

Numerical Simulation of Deformation in Subsurface Grounds Induced by Reverse Faulting

鬼塚 信弘*・伯野 元彦**・堀 宗朗***・岩下 和義****・鈴木 崇伸*****

Nobuhiro ONIZUKA, Motohiko HAKUNO, Muneo HORI, Kazuyoshi IWASHITA and Takanobu SUZUKI

*正会員 修士(工学) 木更津工業高等専門学校助手 環境都市工学科 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

**正会員 工博 東洋大学教授 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

***正会員 Ph.D. 東京大学助教授 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

****正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

*****正会員 工博 東洋大学助教授 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

The structure design method, which takes into consideration the influence of the earthquake faults on the ground, has not yet been established. The purpose of this paper is to do MDEM simulation, which a boundary condition was decided as from the experiment result of the deformation of model grounds, shear zones and bedrock stress. This paper presents the results of a series of MDEM simulation of two speeds about the reverse dip-slip faults of bedrock, which made the granular materials in the subsurface ground. The results have an influence greatly by the setup of about the reverse dip-slip faults step of bedrock.

Key Words : reverse fault, MDEM simulation, deformation of grounds, bedrock stress, model test

1. はじめに

1999 年の台湾集集大地震, トルコ・イズミット大地震では, 多くの構造物が地震動による被害のみならず地震断層の変位に伴い甚大な被害を受けた。現在日本では, 地震断層の変位に対する地盤の影響を考慮した設計が行われているのは大規模重要構造物のダムや原子力発電所などに限られている。その他の構造物は地震断層の変位に対する影響を設計に取り入れられてはいないため, 被害を受けることが十分に考えられる。そこで, 構造物の被害を最小限にするためには, まず基盤の断層運動が表層地盤に及ぼす影響, すなわち変形帯の幅と様式を明らかにしなければならない。その影響を明らかにする方法として, 空中写真判読をする地形学的方法, トレンチをする地質学的方法, 模型実験や数値解析をする力学的な方法が挙げられ, 本研究では力学的な方法に注目した。

従来から基盤の断層運動メカニズムを解明する力学的な方法として, 相似則に基づいた模型実験や数学的モデルによる数値解析が行われている。模型実験では砂箱実験を行った Cole and Lade¹⁾や上田ら²⁾などが挙げられる。数値解析では FEM 解析を行っ

た谷³⁾や谷山ら⁴⁾が挙げられる。双方の方法はいずれも変形場に注目している。一方, 筆者らは模型実験と数値解析の結果を双方に連結させるために必要な変形場, 応力場に注目したアルミ棒の粒状材料を使用した静的模型実験を行い, 基盤の逆断層運動が模擬地盤に及ぼす変形やせん断層ならびに基盤上に作用する応力について明らかにしている⁵⁾。

そこで, 基盤の逆断層運動問題について, 本研究ではある距離を離れると断層変位の影響が収束するという模型実験結果⁵⁾から, 計算領域地盤内に粒状要素を配置した。そして, 要素の移動による動的運動方程式を時間について前進差分的に解く MDEM (修正個別要素法, Modified Distinct Element Method) 解析により, 基盤の逆断層変位速度を変化させて相似則に基づいた模型実験結果⁵⁾と比較検討し, 基盤の逆断層運動問題に対する MDEM 解析の適用性についても考察した。

2. 個別要素法による数値解析

従来, 断層変形問題を FEM による数値解析が多く試みられた^{3), 4)}が, 模型実験⁵⁾で見られたミクロ的なせん断層に相当するようなせん断層は明瞭に表

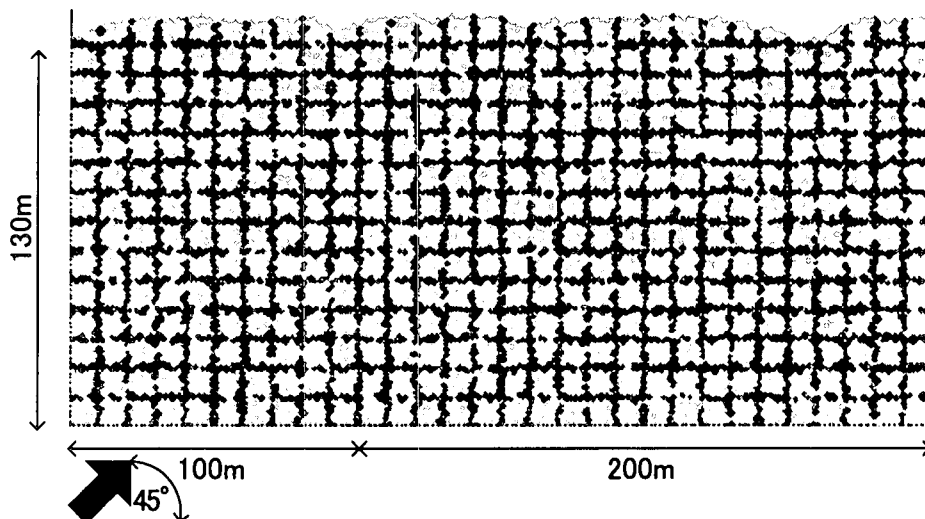


図-1 逆断層 45° 型の初期地盤 ($V/H=0\%$)

表-1 逆断層 45° 型モデルの共通パラメータ

初期モデル寸法	300W×130H×1D m
粒子数	12,000
粒子半径	1.5 m, 0.8 m
時間刻み (Δt)	1.00E-05
粒子の密度	2500 kg/m ³
壁面の摩擦係数	0.00
粒子間摩擦係数	0.500
法線方向ばね定数 (k_n)	3.11E+10 N/m
接線方向ばね定数 (k_s)	2.07E+10 N/m
減衰乗数 h	0.2
θ_{max}	0.02 rad
kr	700.0 Nm/rad
Cr	0.01Nm sec/rad

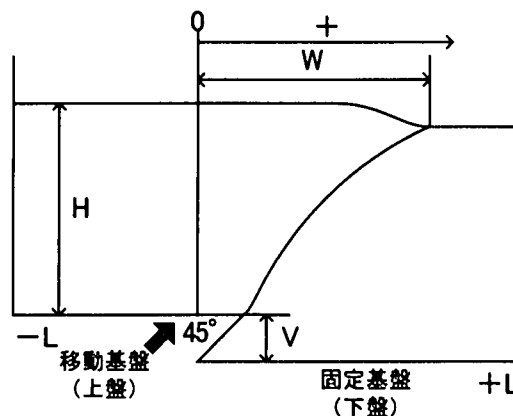


図-2 解析および模型実験結果の記号概略図

表-2 基盤の逆断層変位速度パラメータ

<Type 1>	
基盤の変位増分 (Δd)	2.2 mm/10000
基盤の変位速度	0.022 m/sec
<Type 2>	
基盤の変位増分 (Δd)	2.2 mm/100
基盤の変位速度	2.2 m/sec

現されていない。表層地盤はその下の地盤に比べて軟弱であり、粒子同士のかみ合わせによって成り立っていると考えられる。ここでは粒状材料集合体の動的挙動に適した個別要素法 (DEM) により、模型実験結果⁵⁾を踏まえて基盤の逆断層変位が表層地盤に及ぼす影響範囲を考慮した数値解析を行うことにした。DEMはCundallモデル⁶⁾ではなく、粒子接点での相対変位をすべりと相対回転という基本量に分解してモーメントを求めた岩下モデル (MDEM (修正個別要素法))⁷⁾を採用した。そのモデルの概要は付録に記す。

3. 数値解析方法

本研究では基盤の逆断層変位速度が異なる2種類の逆断層 45° 型モデルについて数値解析を行った。2種類のモデルに共通する解析パラメータを表-1に、基盤の逆断層変位速度のパラメータを表-2に示す。初期モデルの寸法は実際の表層地盤厚さを想定し、かつ模型実験結果⁵⁾から決定した。要素は直径1.6mと3.0mの円柱要素である。その2要素の配合比を模型実験⁵⁾と同様の重量混合比を採用し、1.6mと3.0mは3対2とした。なお、本数比で換算すると1.6mと3.0mは10,080本と1,920本になる。要素のパッキングは予め左右および下面の剛体壁を設定し、要素を自由落下させて作製した。パッキング中に要素同士の微小な振動が残るが、その影響がなくなるまで収束させ、それを初期地盤とした。作製された初期地盤を図-1に示す。また、4., 5., 6. で用いる記号概略図を図-2に示す。各要素は10m四方の格子状に含まれている要素とそれ以外の要素に分けて表示した。基盤の逆断層変位速度は極めて遅い速度 0.022 (m/sec) とその速度の100倍の速度 2.2

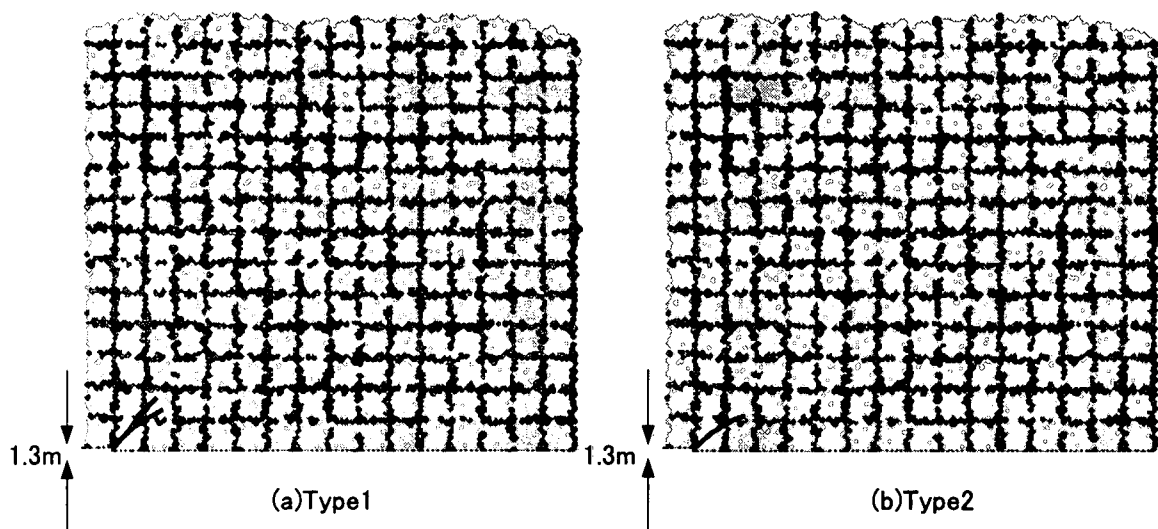


図-3 せん断層の形状 ($V/H=1.0\%$, せん断層形成初期時)

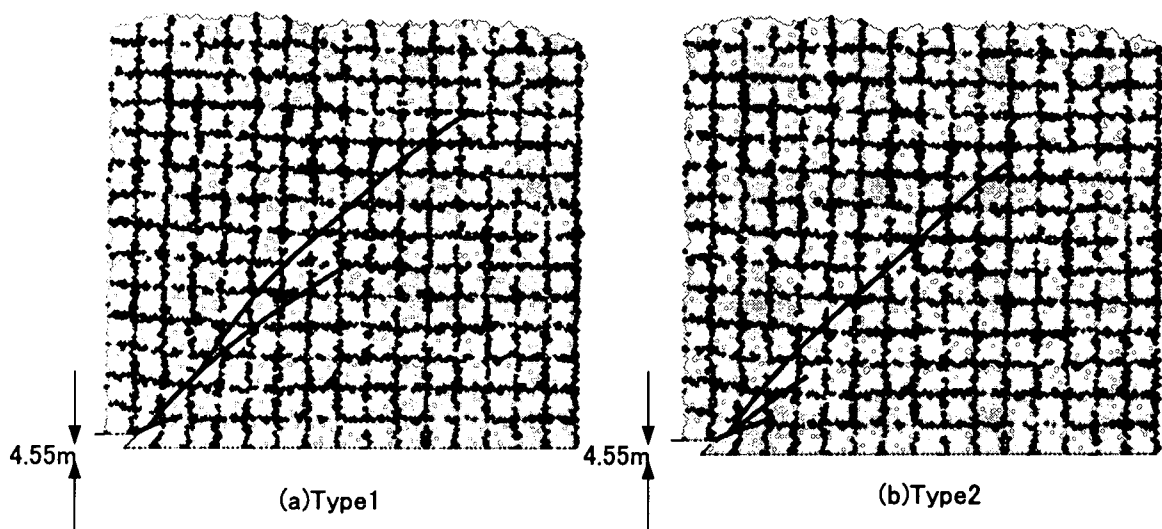


図-4 せん断層の形状 ($V/H=3.5\%$, せん断層分岐明瞭時)

(m/sec) の 2 タイプである。実際の地震断層速度は 1.0 (m/sec) 以上であるため後者の速度に近い。一方、静的な模型実験の逆断層変位速度は $1.67 \times 10^{-5} \text{ (m/sec)}$ である。地盤の変形解析は V (鉛直変位量)/ H (層厚) $= 0.5 (\%)$ ごとに得られた要素の座標データに基づいて各要素を描画し、これらの静止画を動画に変換して行った。その動画から格子状に配置した要素が変形し、明らかに格子が切れた箇所を追ってせん断層を判別した。

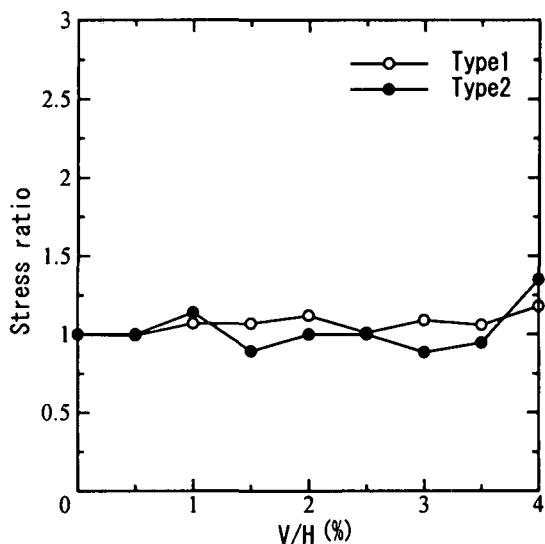
4. 地盤の変形形態

図-1 の左側の基盤を基盤面に対し 45° 方向に、Type1, Type2 の強制変位を与えて上昇させた。Type1, Type2 とともに格子状に含まれている要素が、その基盤の上昇に伴い変形し、その後せん断破壊が生じて移動基盤 (上盤) 先端よりせん断層が形成される (図-3 (a), (b))。1 本のせん断層が移動基盤

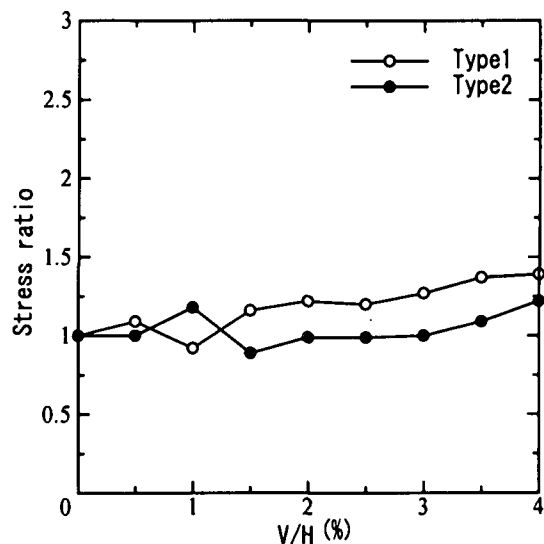
先端から地盤表面に連続的に発達するのではなく、複数のせん断層が分岐しながら配列した (図-4 (a), (b))。しかし、複数のせん断層が発達する分岐点は Type1 で 2 点あるのに対し、Type2 では移動基盤先端に近い 1 点のみである。Type1 のような変形構造は静的な基盤変位速度で行った模型実験⁵⁾でも同様に見られた。基盤の変位速度を大きくすると、せん断層の分岐点は 1 点に集中され、すなわちその領域の要素が応力集中して複数のせん断層を発達させる要因になっていると考えられる。

5. 基盤上に作用する応力と断層変位量

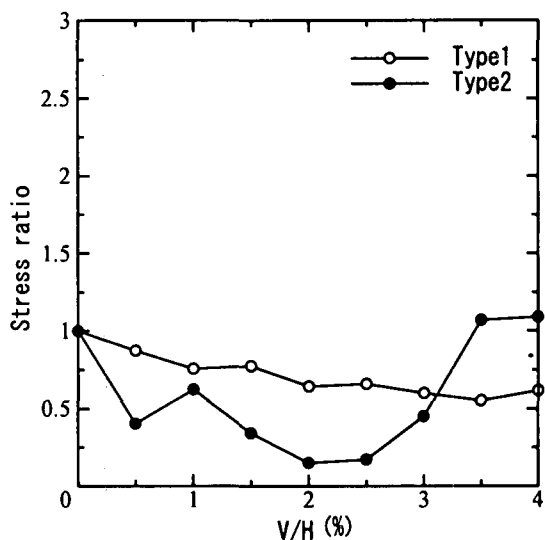
Type1, Type2 の移動基盤側 2 地点 (No. 1, 2), 固定基盤 (下盤) 側 4 地点 (No. 3, 4, 5, 6) における鉛直方向の作用応力/初期応力 (以下、応力比とする) とせん断層が地盤表面に到達するまでの V/H の関係を図-5 (a) ~ (f) に示す。L は図-1 の地盤モデ



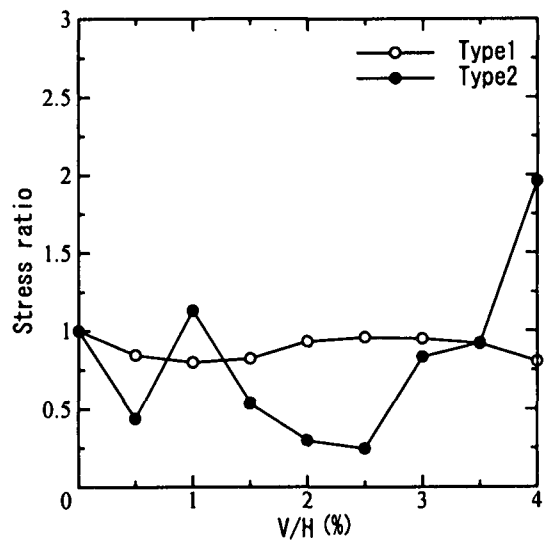
(a) No. 1 (L=-75m)



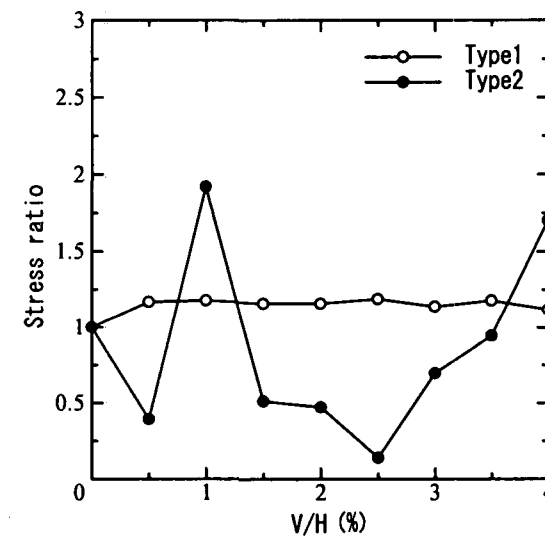
(b) No. 2 (L=-25m)



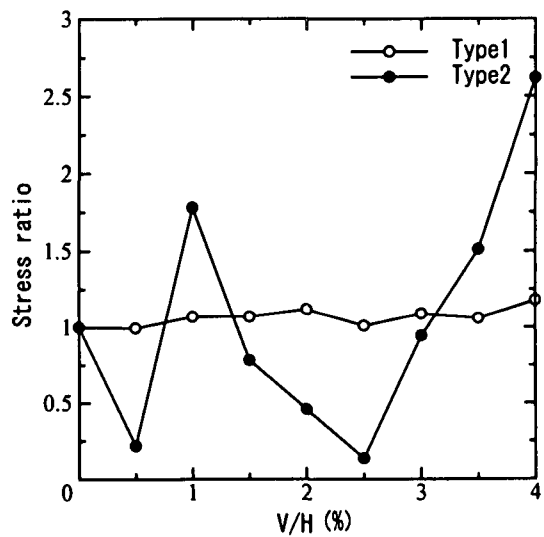
(c) No. 3 (L=25m)



(d) No. 4 (L=75m)



(e) No. 5 (L=125m)



(f) No. 6 (L=175m)

図-5 基盤の断層変位量と応力比

ル横方向の長さを 50m 区間に分割し、その中心点の位置を表している。V/H の増加に伴い移動基盤は変

動するが、図-5 (a) ~ (f) のしは V/H=0 (%) 時の初期位置とした。移動基盤側の No. 1, 2 では Type1, Type2

による応力比の違いはほとんど見られない。固定基盤側で基盤の先端から遠ざかる地点になるほど Type1, Type2 による応力比の違いが顕著に見られる。特に Type2 の応力比は初期に減少して $V/H=1.0(\%)$ になると上昇し、 $2.0\sim3.0(\%)$ で大きく下降し、 $4.0(\%)$ で再び上昇している。これは移動基盤を上昇させた逐次計算ステップ Δd の違いが粒子と基盤面のめりこみ量、それに関連して粒子と粒子のめりこみ量が異なる、すなわち 1.6m の粒子が基盤面、接触する粒子に最大で半径ほど重なるため粒子の反発力が頻繁に変動し、粒子挙動に大きな影響を与えていると考えられる。これは 4. のせん断層の発達構造の違いとも関連付けられる。

6. 数値解析および模型実験結果の比較

6.1 寸法効果を考慮した基盤上に作用する応力と位置

既に、模型実験⁵⁾ では寸法効果を考慮した固定・移動基盤境界周辺の応力分布について解析し、移動基盤先端の応力比が最大値を、固定基盤先端の応力比が最小値を示し、層厚 $200\text{mm}\sim400\text{mm}$ で寸法効果が見られないことが分っている。本節では本研究で得られた数値解析結果を上記の実験結果にプロットし、比較検討した。

断層変位量 ($V/H(\%)$) 別に見た逆断層 45° 型の固定・移動基盤境界線を 0 とした水平距離と基盤上の応力との関係を図-6 (a)~(c) に示す。縦軸は基盤上の応力比を初期応力で除しており、横軸は縦軸と同様に層厚の変化による寸法効果を検討するために、水平距離 (L) を数値解析の層厚 130m 、模型実験の層厚 $200, 300, 400\text{mm}$ で除している。図-6 (a)~(c) は Type1, Type2 の結果と模型実験の層厚 $200, 300, 400\text{mm}$ の結果がプロットされている。Type1 は V/H に関わらず実験結果の応力分布に概ね整合している。一方、Type2 は $V/H=1.0(\%)$ で移動基盤側の実験結果の分布に概ね整合しているが、それ以外の点は大きく外れている。

DEM で動的問題を扱う場合、 Δt が一定ならば Δd の影響が大きく左右すると考えられる。これは各種要素試験で個別要素法の時間進行の問題を考察した宇野ら⁸⁾ も同様に指摘している。

6.2 せん断層の地盤表面到達時の位置と断層変位量

せん断層が地盤表面に到達した時の W (位置) / H (層厚) と V/H の関係を図-7 に示す。図-7 は Type1, Type2 と模型実験⁵⁾ の層厚 $200, 300, 400\text{mm}$ の結果をプロットしている。Type1, Type2 とともに

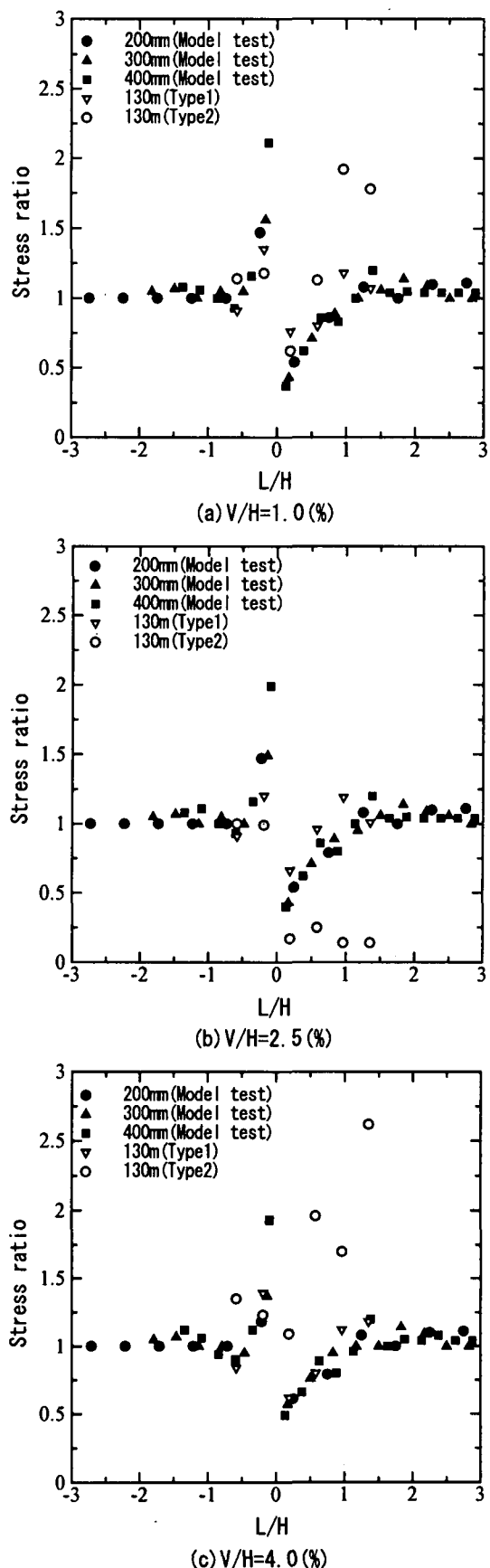


図-6 寸法効果を考慮した基盤上の位置と応力比

$V/H=4.0(\%)$ でせん断層が地盤表面に到達する。Type1, Type2 の地盤表面到達位置は同一の初期地盤である

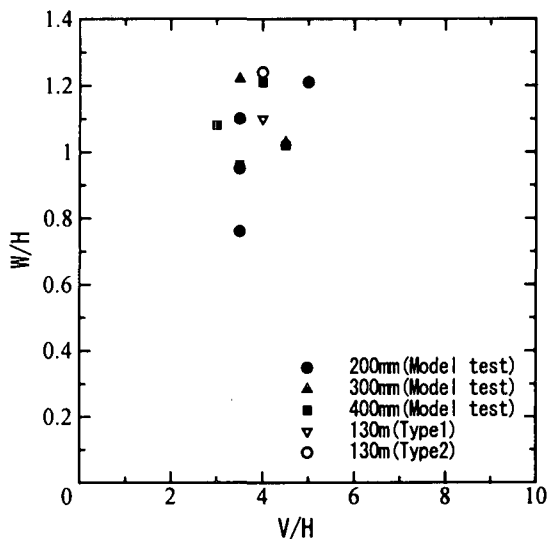


図-7 せん断層地盤表面到達時の基盤の断層変位量と位置

が、Type2の方がやや遠い位置に到達している。これは6.1でも述べた通り Δd が異なることによって、せん断層の発達、基盤上の応力比が影響を受けることから地盤表面到達位置が異なると考えられる。

7. 結論

基盤の逆断層変位速度を変化させたMDEM解析を行った結果、以下の結論に達した。

- (1) 地盤の変形形態は異なり、基盤の断層変位速度が大きくなるほどせん断層分岐点が1地点に集中する。
- (2) 基盤上の鉛直方向応力比は移動基盤側地点で断層変位量に関わらず大きな違いが見られないが、断層変位量が増加するにしたがって固定基盤側地点で大きな違いが見られる。
- (3) 寸法効果を考慮した基盤上の鉛直方向応力比は、断層変位速度 0.022(m/sec)のType1が静的模型実験の応力分布に概ね整合している。
- (4) Type1とType2は静的模型実験のせん断層地盤表面到達位置の分布とほぼ一致する。

基盤の逆断層運動が表層地盤に及ぼす影響の問題をMDEM解析で適用できる可能性が示唆された。しかし、DEMでは Δt が一定であれば Δd の設定によって結果が大きく影響することから、今後はこの問題について検討しなければならない。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、木更津工業高等専門学校環境都市工学科教授の飯竹重夫先生に本

研究の御支援をいただくとともに、貴重な御意見もいただいた。実験は木更津工業高等専門学校環境都市工学科科技官の金井太一氏に手伝っていただいた。なお、本研究は東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助も受けました。関係各位に深謝する次第である。

付録 MDEM (修正個別要素法) について

A. 1 粒子接点モーメントの伝達を考慮した個別要素法

A. 1. 1 接点でのモーメントの伝達を含む釣り合い式

従来DEMにおける各粒子のモーメントの運動方程式は

$$M = \sum_{i=1}^m F_{s_i} r = I \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

M : 粒子に作用する全モーメント

F_{s_i} : 接線方向粒子間力

r : 粒子半径

I : 慣性モーメント

ω : 角速度

m : 各粒子の総接点数

上式により粒子接点に接線方向の力が作用して、モーメントが静的に釣り合わない場合には粒子にモーメントが生じ、粒子が回転する。

これに対し粒子接点において接点モーメント M_i^r の伝達を考慮した運動方程式は反時計方向を M_i^r の正として次式で表現できる。

$$M = \sum_{i=1}^m (F_{s_i} r + M_i^r) = I \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

モーメントの作用反作用の法則を成り立たせるため、接触している2粒子間で同じ大きさで作用方向の異なるを M_i^r 作用させる。なお、並進方向の釣り合い式はCundall⁶⁾などと同一である。

A. 1. 2 すべりと相対回転の分離方法

時刻 t と $t + \Delta t$ 間の粒子1, 2間の接線方向相対変位をすべりと相対回転の2成分に分離する(図-8)。式(3)~(10)はBardetの式⁹⁾、式(11)~(13)は岩下らの式⁷⁾である。以下、粒子は重ならないと仮定する。

粒子の半径を r_1, r_2 とする。時刻 t での中心位置を $X_1=(x_1, y_1)$, $X_2=(x_2, y_2)$ とすれば、接点 C の座標 X_c は、

$$X_c = \frac{1}{r_1 + r_2} (r_1 X_1 + r_2 X_2) \quad (3)$$

時刻 $t + \Delta t$ での中心位置を $X_1'=(x_1', y_1')$,

$X_2'=(x_2', y_2')$ とすれば、接点 C' の座標位置 $X_{c'}$ は

$$X_{c'} = \frac{1}{r_1 + r_2} (r_1 X_1' + r_2 X_2') \quad (4)$$

時刻 t での接点 C の時刻 $t + \Delta t$ での位置を粒子 1 で C_1' , 粒子 2 で C_2' , それぞれ座標は $X_{c1'}$, $X_{c2'}$ とする。

$$X_{c1'} = X_1' + T_1(X_c - X_1) \quad (5)$$

$$X_{c2'} = X_2' + T_2(X_c - X_2) \quad (6)$$

T_1, T_2 は Δt 間での粒子回転角 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ による回転マトリックスを表わす。ここで $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ は反時計方向を正とする。

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_1 & -\sin \Delta\theta_1 \\ \sin \Delta\theta_1 & \cos \Delta\theta_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_2 & -\sin \Delta\theta_2 \\ \sin \Delta\theta_2 & \cos \Delta\theta_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

時刻 t および $t + \Delta t$ における粒子の中心を結ぶ単位法線ベクトル n, n' は、以下のように求まる。

$$n = \frac{1}{r_1 + r_2} (X_2 - X_1) \quad (9)$$

$$n' = \frac{1}{r_1 + r_2} (X_2' - X_1') \quad (10)$$

β を n, n' のなす角とする。 β は粒子 1 において n 方向を基線として反時計方向を正とする。円弧 $C_1' C_1$ と $C_2' C_2$ をそれぞれ $\Delta a, \Delta b$ とすれば、

$$\Delta a = r_1 (\Delta\theta_1 - \beta) \quad (11)$$

$$\Delta b = r_2 (\Delta\theta_2 - \beta) \quad (12)$$

ここで $\Delta a, \Delta b$ はそれぞれの粒子にとり反時計回転方向を正とする符号を持つ量であり、符号は時間 Δt 間の接点の移動方向を示す。 $\Delta a, \Delta b$ はそれぞれすべりと相対回転の成分を含む。すべり成分は考えている 2 粒子それぞれに接線方向相対成分は異符号とし

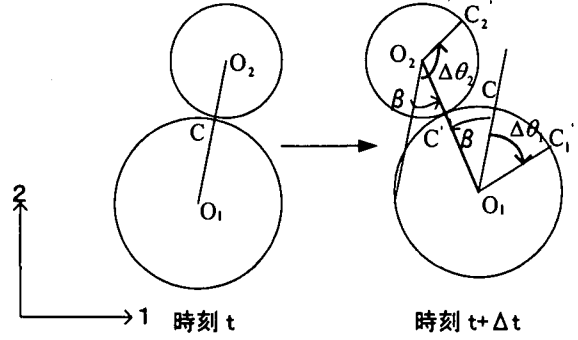


図-8 接触点の変位
(岩下ら⁷⁾による)

て含まれる。そこでそれぞれに含まれるすべり成分を ΔU_s , 相対回転成分を ΔU_r とし, Δa に含まれる

ΔU_r を正とすれば

$$\begin{aligned} \Delta a &= \Delta U_r + \Delta U_s \\ \Delta b &= -\Delta U_r + \Delta U_s \end{aligned} \quad (13)$$

と表わされる。これより以下, ΔU_s と ΔU_r に分離することができる。

$$\begin{aligned} \Delta U_r &= \frac{\Delta a - \Delta b}{2} \\ \Delta U_s &= \frac{\Delta a + \Delta b}{2} \end{aligned} \quad (14)$$

増分 $\Delta U_s, \Delta U_r$ が求まるので全量 U_s, U_r も求まる。なお、詳細は参考文献⁷⁾を参照していただきたい。

参考文献

- 1) Cole, D. A. Jr., and Lade, P. V.: Influence zones in alluvium over dip-slip faults, *J. Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 110, No. 5, pp. 599~615, 1984.
- 2) 上田圭一, 谷和夫, 鬼塚信弘: 基盤の断層変位に伴う砂層の変形, 第 28 回地盤工学研究発表会, pp. 1483~1484, 1993.
- 3) 谷和夫: ジョイント要素を用いた FEM による逆断層の模型実験のシミュレーション, 地盤の破壊と歪みの局所化に関するシンポジウム発表論文集, pp. 215~222, 1994.
- 4) 谷山尚, 渡辺啓行: 逆断層運動に伴う砂質表層地盤の変形に関する研究, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 313~325, 1998.
- 5) 鬼塚信弘, 伯野元彦, 岩下和義, 鈴木崇伸: 基盤の逆断層変位に伴う地盤の変形と応力について, 土木学会応用力学論文集, Vol. 12, pp. 533~542, 1999.

- 6) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive, large scale movement in blocky rocksystem, sym. *ISRM, Nancy, France, Vol. 2*, pp. 129 ~ 136, 1971.
- 7) 岩下和義, 松浦浩一, 小田匡寛 : 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, No. 529, III-33, 145~154, 1995.
- 8) 宇野浩樹, 樋口雄一, 末岡徹 : 個別要素法における時間進行に関する一考察, 第34回地盤工学研究発表会, pp. 453~454, 1999.
- 9) Bardet, J. P. : Observation on the effect of idealized granular materials, *Mechanics of Materials, Vol. 18*, pp. 159~182, 1994.
- 10) 鬼塚信弘, 岩下和義, 飯竹重夫, 金井太一 : 正断層型と逆断層型の模型実験の応力と変形に関する比較について, 第34回地盤工学研究発表会, pp. 1189~1190, 1999.

(2000年4月21日受付)