

基盤の逆断層運動の数値実験における地盤変形の解析

Analysis of Ground Deformation on Numerical Experiment of Reverse Faulting

鬼塚 信弘*・堀 宗朗**・岩下 和義***・鈴木 崇伸****

Nobuhiro ONIZUKA, Muneco HORI, Kazuyoshi IWASHITA and Takanobu SUZUKI

*正会員 博(工) 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 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 埼玉県さいたま市下大久保 255)

****正会員 博(工) 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 formation of surface earthquake fault is a hot topic in earthquake engineering, as it could cause fatal damage to near-by structures. This paper presents results of numerical experiment of the reverse fault formation using granular materials. The numerical experiment is carried out by using the simulation of Modified Distinct Element Method (MDEM). The deformation of shear bands and the incremental distribution of maximum shear strains are observed to vary in the displacement speed of bedrock fault and the rigidity of surface grounds. It is shown that displacements of the top surface and positions reaching the top surface of shear bands hardly vary in the cohesion of surface grounds.

Key Words : reverse fault formation, numerical experiment, Modified Distinct Element Method

1. はじめに

近年、地震動のみならず、地表地震断層のずれによって構造物が被害を受けるという問題が注目されるようになってきた。既に、基盤の縦ずれ断層運動に関しては、せん断層にジョイント要素を配した有限要素法 (FEM) モデルと砂箱模型実験による地盤の変形場を比較した解析が試みられている^{1), 2)}。しかし、この FEM モデルではせん断層の分岐現象が明瞭に表現されず、地盤の変形はマクロ的にとらえたせん断層が表現されているにとどまっている。著者らが行ったアルミ棒を用いた模型実験³⁾ではせん断層の分岐現象が観察されており、そのような粒状体地盤を解析するためには不連続体の解析に有効な個別要素法 (DEM)⁴⁾などが適していると判断した。

地震時の基盤の断層変位速度は 1.0(m/sec) 以上といわれている⁵⁾。層厚とも関係するが、静的な模型実験³⁾では地震時の基盤の断層変位速度を再現することが不可能である。また、模型実験はその装置に適合した実験材料により剛性や粘着力が固定されてしまうという欠点も併せて持っている。要素試験の解析において、従来の DEM では内部摩擦角が小さく出ることから、本研究では DEM に対して粒子

接点にモーメントの伝達を考慮した修正個別要素法 (MDEM)⁶⁾による基盤の逆断層運動の数値実験を行うことにした。本論文では基盤の逆断層運動による地表面変状を推定するために、地盤断面の解析と併せて、基盤の断層変位速度の影響、表層地盤の剛性の影響、表層地盤の粘着力の影響について検討した。

2. 数値実験方法

本論文の逆断層 45° 型で用いられるパラメータを表-1に、数値実験モデルの概略図を図-1に示す。地震動では断層問題を半無限弾性体として取り扱っていることが多い。しかし、基盤の逆断層運動に伴う表層地盤の変形については、影響を及ぼす範囲が有限であると考えられ、特に表層地盤に粒状要素を配置する場合にはその影響範囲をどのように設定するかが課題となっている。そこで、本論文ではアルミ棒の模型実験で得られた結果³⁾を利用することにした。逆断層 45° 型では地表に出現したせん断層の位置 ($H/H=0.76\sim 1.22$) と基盤上の鉛直方向応力比の変動がない範囲 ($-0.76 < x/H < 1.53$) を考慮して、要素のパッキングを行うことにした。 H は上盤・下盤境界からせん断層が地表に到達した位置ま

での水平距離を表し、 x は基盤上の位置を表す。いずれも地盤層厚 H で正規化しているため、現実の地盤のシミュレーション問題に適用できるようになっている。正負の符号は上盤・下盤境界から下盤（固定基盤）方向を+、上盤（移動基盤）方向を-とした。

粒子数、時間刻みは数値実験によって計算機の時間から考案した。要素は直径 1.6m と 3.0m の円柱要素である。その 2 要素の配合比はアルミ棒の模型実験³⁾と同様な重量混合比を採用し、1.6m と 3.0m は 3 対 2 とした。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、初期寸法を決定した。要素に働く力と運動自由度の力学モデルを図-2に示す。法線方向ばね定数 (k_n) はヘルツの弾性円柱の接触理論⁷⁾より求めた。接線方向ばね定数 (k_s) は岩下⁶⁾を参考にして、 k_n に対する減減率 (s) を 0.665 とした。その他の定数は MDEM の数値実験で検証された岩下⁶⁾から引用し、要素間の粘着力は 0 とした。

基盤の断層変位速度を変化させたケース、表層地盤の剛性を変化させたケース、表層地盤の粘着力を考慮したケースのパラメータを表-2に示す。基盤の断層変位速度の影響については Type1 と Type2 で比較し、速度 0.022(m/sec) とその 100 倍に相当する 2.2(m/sec) の 2 タイプである。地震断層の基盤の断層変位速度は 1.0(m/sec) 以上であるため後者の速度に近い。参考までに記すと、静的な模型実験³⁾の基盤の断層変位速度は 1.67×10^{-5} (m/sec) である。表層地盤の剛性の影響については Type2 と Type3, Type4 で比較し、Type2 のばね定数は $K_n=3.11E+10$ (N/m), $K_s=2.07E+10$ (N/m) で、その 10 分の 1 に相当する $K_n=3.11E+9$ (N/m), $K_s=2.07E+9$ (N/m), 100 分の 1 に相当する $K_n=3.11E+8$ (N/m), $K_s=2.07E+8$ (N/m) の 3 タイプである。参考までに波動伝播速度も併せて記している。1 平方メートルあたりのばね定数は Type2 の 1.6m の要素で $K_n=1.54E+10$ (N/m), $K_s=1.03E+10$

表-1 逆断層 45° 型モデルのパラメータ

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	0.2
接点上の相対回転角の上限 (θ_{max})	0.02 rad
回転ばねのばね定数 (k_r)	700.0 Nm/rad
回転粘性定数 (C_r)	0.01Nm sec/rad

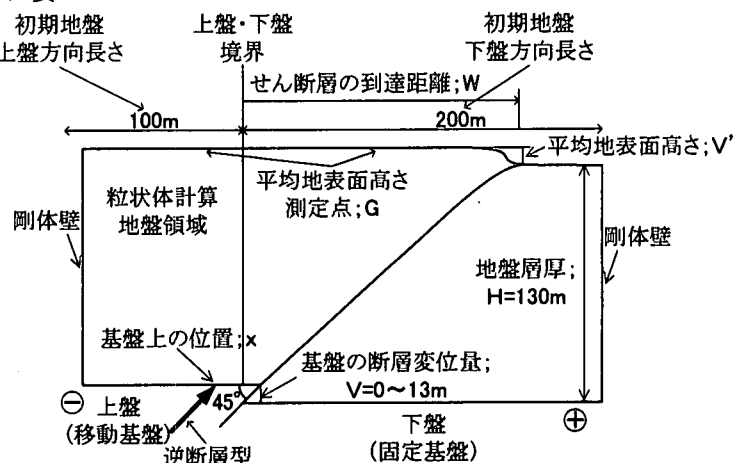


図-1 数値実験モデルの概略図

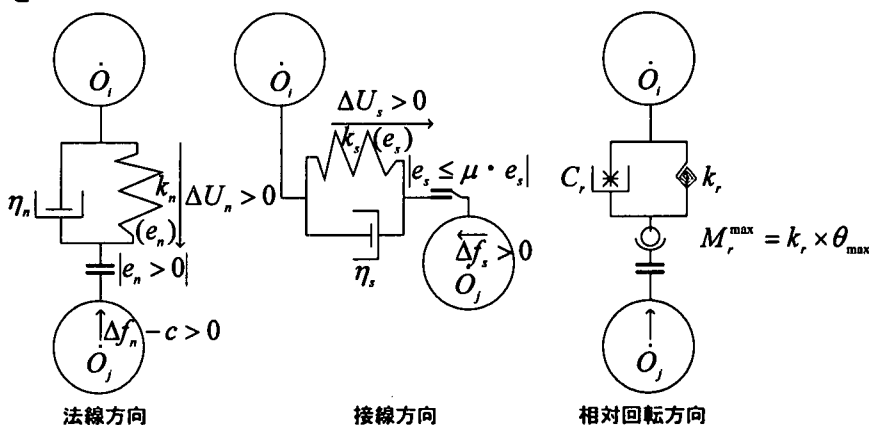


図-2 要素に働く力と運動自由度の力学モデル (岩下⁶⁾に加筆)

(N/m) になり、3.0m の要素では $K_n=4.40E+9$ (N/m), $K_s=2.93E+9$ (N/m) になる。Type3, Type4 では各々のばね定数が Type2 に対して 10 分の 1, 100 分の 1 になる。Type2, Type3 は重要構造物が建てられる固い地盤で、Type4 は軟弱な地盤を想定した剛性である。表層地盤の粘着力の影響については Type2 と Type5, Type6 で比較し、各々の粘着力は $c=0$ (N), $c=1$ (N),

表-2 基盤の断層変位速度、ばね定数、粘着力のパラメータ

	基盤の変位増分 (Δd)	基盤の変位速度	法線方向ばね定数 (kn) (P波速度 (V_p))	接線方向ばね定数 (ks) (S波速度 (V_s))	粘着力 (c)
Type1	2.2 mm/10000	0.022 m/sec	3.11E+10 N/m (3980 m/sec)	2.07E+10 N/m (3247 m/sec)	0 N
Type2	2.2 mm/100	2.2 m/sec	3.11E+10 N/m (3980 m/sec)	2.07E+10 N/m (3247 m/sec)	0 N
Type3	2.2 mm/100	2.2 m/sec	3.11E+9 N/m (1259 m/sec)	2.07E+9 N/m (1027 m/sec)	0 N
Type4	2.2 mm/100	2.2 m/sec	3.11E+8 N/m (398 m/sec)	2.07E+8 N/m (325 m/sec)	0 N
Type5	2.2 mm/100	2.2 m/sec	3.11E+10 N/m (3980 m/sec)	2.07E+10 N/m (3247 m/sec)	1 N
Type6	2.2 mm/100	2.2 m/sec	3.11E+10 N/m (3980 m/sec)	2.07E+10 N/m (3247 m/sec)	10 N

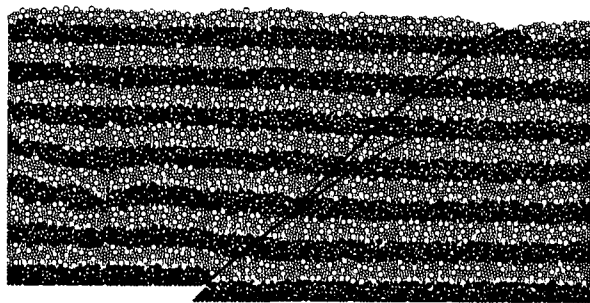


図-3 Type1の地盤の変形形態 (V/H=6.0%)

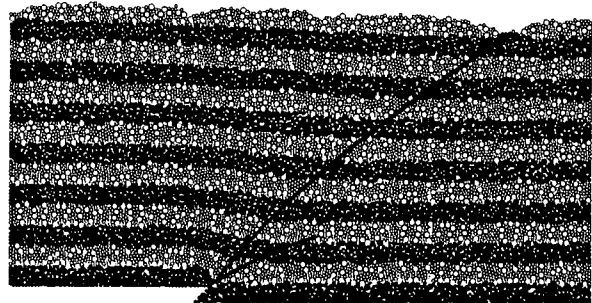


図-4 Type2の地盤の変形形態 (V/H=6.0%)



(a) V/H=1.0~2.5%



(a) V/H=1.0~2.5%



(b) V/H=4.0~6.0%



(b) V/H=4.0~6.0%

図-5 Type1の4%以上の最大せん断ひずみ増分分布

図-6 Type2の4%以上の最大せん断ひずみ増分分布

$c=10(N)$ の3タイプである. 1平方メートルあたりの

粘着力は Type5 で $c=0.49(N)$ になり, Type6 で

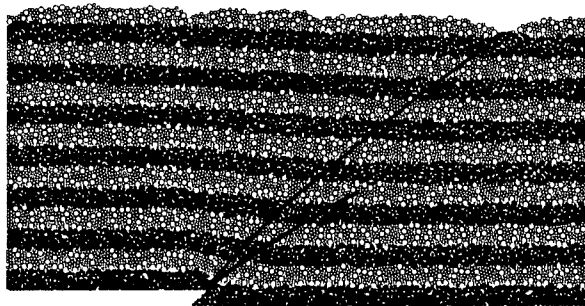


図-7 Type3の地盤の変形形態 (V/H=6.0%)

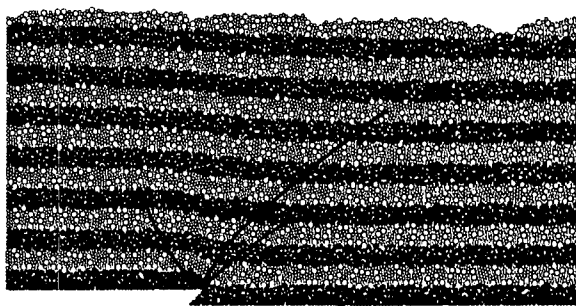
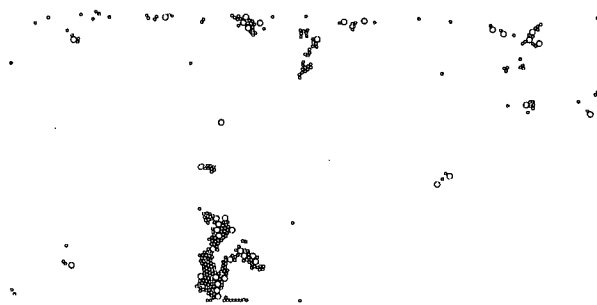


図-8 Type4の地盤の変形形態 (V/H=6.0%)



(a) V/H=1.0~2.5%



(a) V/H=1.0~2.5%



(b) V/H=4.0~6.0%



(b) V/H=4.0~6.0%

図-9 Type3の4%以上の最大せん断ひずみ増分分布

図-10 Type4の4%以上の最大せん断ひずみ増分分布

$\sigma=4.94(N)$ になる。

3. 地盤断面の解析

3.1 基盤の断層変位速度の影響について

Type1, Type2ともに要素が上盤の上昇に伴って変形し、その後せん断破壊が生じて上盤先端よりせん断層が形成される(図-3, 4)。1本のせん断層が上盤先端から地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た。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は上盤先端に近い1点のみである。基盤の断層変位速度を速くすると、せん断層の分岐点は層厚下部の1点に集中する。これはせん断層が分岐する付近の要素に応力集中して、複数のせん断層が発達したこと

によるものと考えられる。

図-5(a), (b)はType1, 図-6(a), (b)はType2の最大せん断ひずみ増分分布を示す。最大せん断ひずみ増分は岩下ら⁸⁾のラグランジュのひずみテンソル式を引用して算出した。白い中抜きは全粒子の中心ごとに求めた4(%)以上の最大せん断ひずみ増分を受けている粒子を示し、その他の最大せん断ひずみ増分を受けている粒子は省略している。各V/H間において、最大せん断ひずみ増分分布を明瞭に判別できるためには4(%)以上の最大せん断ひずみ増分を受けている粒子について表示することが適当であると判断した。V/H=1.0~2.5(%)の最大せん断ひずみ増分分布はType1, Type2ともに上盤先端から上方に凸のような形状で層厚下部まで広がっている。V/H=4.0~6.0(%)では、Type1の最大せん断ひずみ増分分布は層厚下部に集中し、層厚中部から2方向に

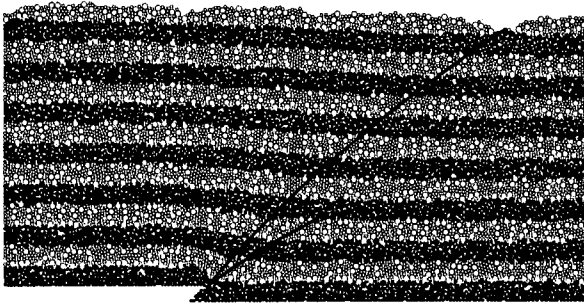


図-1 1 Type5の地盤の変形形態 (V/H=6.0%)

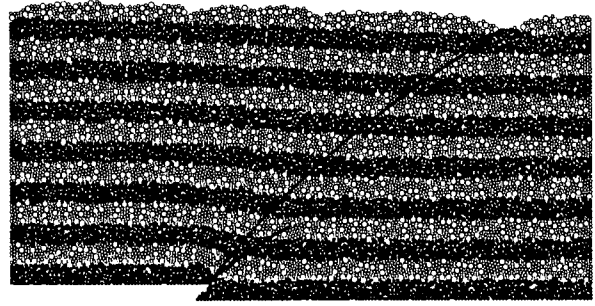
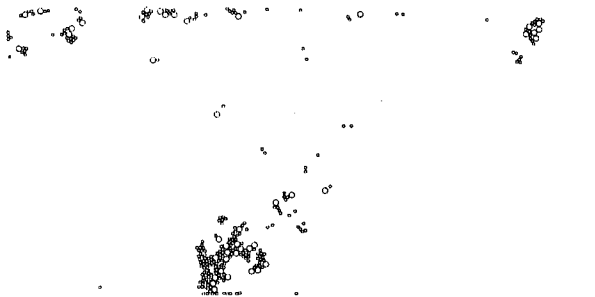
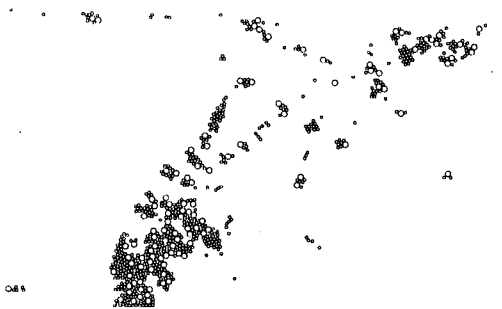


図-1 2 Type6の地盤の変形形態 (V/H=6.0%)



(a) V/H=1.0~2.5%



(b) V/H=4.0~6.0%

図-1 3 Type5の4%以上の最大せん断ひずみ増分分布



(a) V/H=1.0~2.5%



(b) V/H=4.0~6.0%

図-1 4 Type6の4%以上の最大せん断ひずみ増分分布

分れて地表まで伸びている。一方、Type2において、最大せん断ひずみ増分分布は上盤先端付近から地表まで伸びているが、Type1とはやや異なっている。 $V/H=6.0\sim10.0(\%)$ では、Type1、Type2ともに最大せん断ひずみ増分分布は地表面まで明瞭なゾーンを形成する。

3.2 表層地盤の剛性の影響について

Type3、Type4はType2と同様に、せん断層は上盤の上昇に伴って、上盤先端から分岐を繰り返しながら地表面へ発達する(図-7、8)。剛性が小さくなるType4になるほど、せん断層が進展する速さはType2に比して遅い。また、Type4ではせん断層が上盤側方向にも出現する。これはType4の剛性が小さいため、層厚下部の要素において応力集中が分散したことによるものと考えられる。

図-9(a)、(b)はType3、図-10(a)、(b)はType4の最大せん断ひずみ増分分布を示す。Type2の図-6(a)、(b)も併せて参照していただきたい。Type3において最大せん断ひずみ増分分布はType2と同様に $V/H=1.0\sim2.5(\%)$ で上盤先端付近から層厚下部に広がっている。特にその増分分布はType2と異なり層厚下部から2方向に分れて集中している。 $V/H=4.0\sim6.0(\%)$ で最大せん断ひずみ増分分布は上盤先端付近から地表まで進展し、 $V/H=6.0(\%)\sim10.0(\%)$ でType2と同様に最大せん断ひずみ増分分布は明瞭なゾーンを形成している。Type4では最大せん断ひずみ増分分布はType2と異なり、 $V/H=1.0\sim2.5(\%)$ で上盤先端付近から上方に層厚中部まで広がっている。 $V/H=4.0\sim6.0(\%)$ で最大せん断ひずみ増分分布は層厚下部と上盤の上昇方向に伸張した地表付近に集中しているが、層厚中部であまり見られない。地盤の

変形形態と併せて解析すると、せん断層が上盤先端付近から地表まで進展したことから、層厚中部では4(%)未満の最大せん断ひずみ増分を受けている粒子が多いといえる。 $V/H=6.0\sim10.0(\%)$ でType2と同様に最大せん断ひずみ増分分布は明瞭なゾーンを形成する。

3.3 表層地盤の粘着力の影響について

Type5, Type6ともに要素が上盤の上昇に伴って変形し、その後せん断破壊が生じて上盤先端よりせん断層が形成される(図-11, 12)。1本のせん断層が上盤先端から地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た。Type5, Type6の複数のせん断層が発達する分岐点は上盤先端に近い1点のみで、粘着力を変化させた傾向が見られない。

図-13(a), (b)はType5, 図-14(a), (b)はType6の最大せん断ひずみ増分分布を示す。Type5, Type6では最大せん断ひずみ増分分布がType2と同様に $V/H=1.0\sim2.5(\%)$ で上盤先端付近から層厚下部に広がっている。 $V/H=4.0\sim6.0(\%)$ で最大せん断ひずみ増分分布は上盤先端付近から2方向に分れて地表まで進展し、 $V/H=6.0\sim10.0(\%)$ でType2と同様に最大せん断ひずみ増分分布が明瞭なゾーンを形成する。

4. 地表面の解析

4.1 基盤の断層変位速度の影響について

基盤の断層変位速度を変化させた断層変位量別の V'/V と G/H の関係を図-15(a)~(c)に示す。 V' は地表から初期地盤層厚の約10%に相当する13mまでの10~30程度の要素の平均地表面高さであり、 $V/H=0(\%)$ 時の地表面高さを基準として、その高さを $V'=0$ と定義した。 G は $V/H=0(\%)$ 時の上盤・下盤境界からの V' までの水平距離とした。表-3には V'/V の区分を示す。 $V'/V>0$ は地表面高さが上昇する、 $V'/V=0$ は地表面高さが変動しない、 $V'/V<0$ は地表面高さが下降することを意味する。ただし、 $V'/V=1$ は地表面高さが基盤の断層変位量と同じである。

図-15(a)~(c)において、 $V/H=1.0, 2.5(\%)$ では上盤側の G/H が小さくなるほどType1, Type2の V'/V の違いが見られるが、下盤側ではほぼ同様な傾向を示している。 $V/H=6.0(\%)$ になると上盤側にType1, Type2の V'/V の違いが見られ、Type2の方が $V'/V=0.1$ ほど大きな値を示している。Type1, Type2ともに上盤の上昇に伴って、地表面が変動する。地表面は基盤の断層変位量がそのまま伝わるのではなく、要素同士の接触によって基盤の動きが地盤内で緩和されたり、あるいは基盤の動きを強く受けて地盤内の要素同士の接触を助長したりする。地

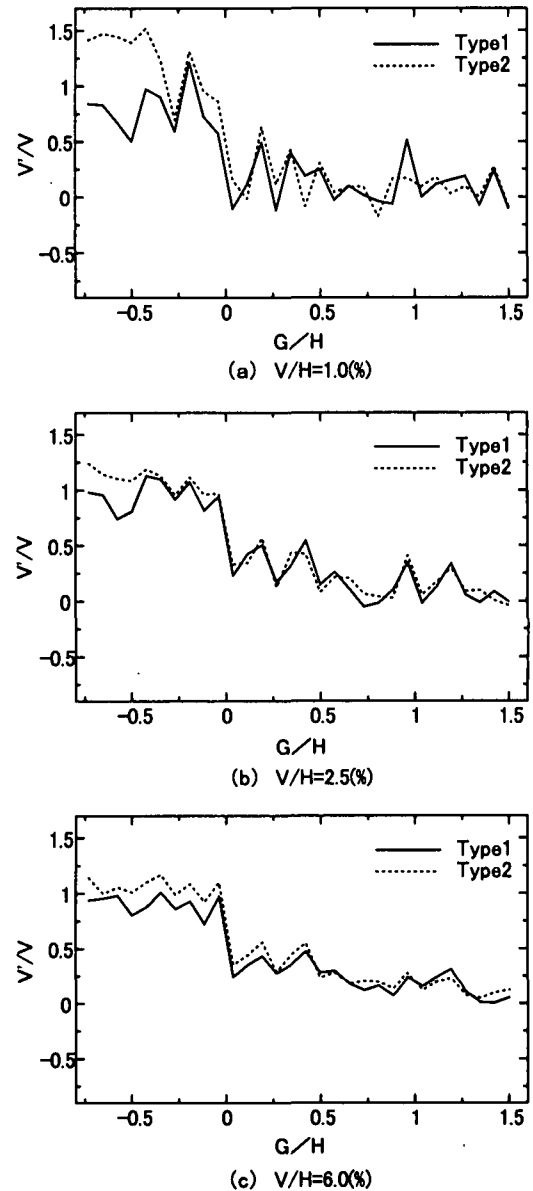
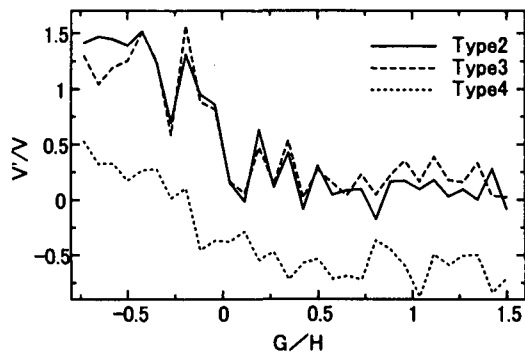


図-15 基盤の断層変位速度別の地表面変動量

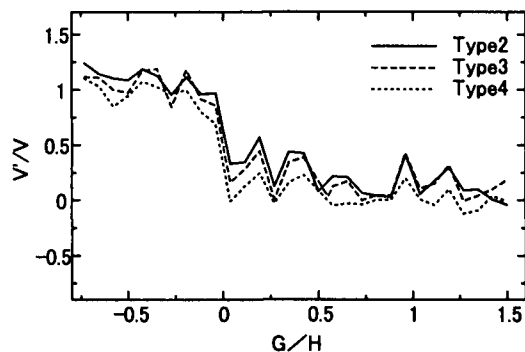
表面は、地盤の変形形態で見られたような複数のせん断層が発達して、せん断層の分岐する点が異なった影響よりも、基盤水平面に対して 45° 方向に上昇させた基盤の断層傾斜角度に依存することが考えられる。

4.2 表層地盤の剛性の影響について

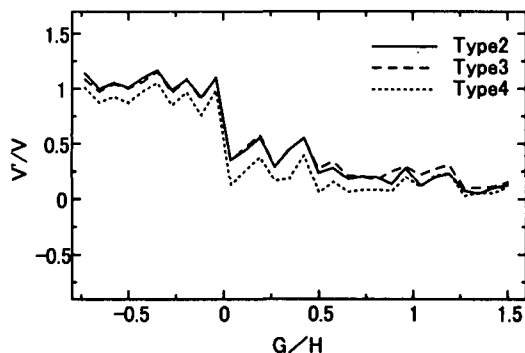
ばね定数を変化させた断層変位量別の V'/V と G/H の関係を図-16(a)~(c)に示す。図-15(a)~(c)でも見られたように、地表面は基盤の断層変位量がそのまま伝わらない。図-16(a)~(c)において、 $V/H=1.0(\%)$ でType4はほとんどの地表面高さが下降するのに対し、Type2, Type3はType4よりも $V'/V=1.0$ ほど大きくなり、違いが見られる。 $V/H=2.5(\%)$ 以降はType2, Type3, Type4の V'/V の大きな違いは見られない。Type4の地表面変動量は、せん断層が上盤側に発達し、下盤にも発達した主要な



(a) $V/H=1.0(\%)$

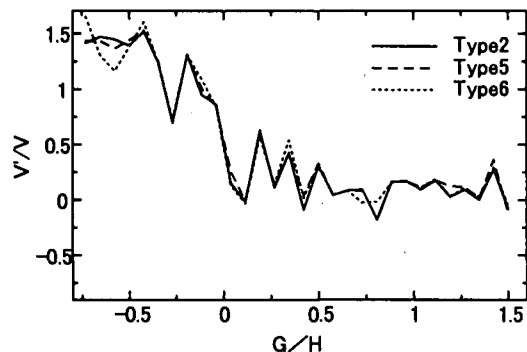


(b) $V/H=2.5(\%)$

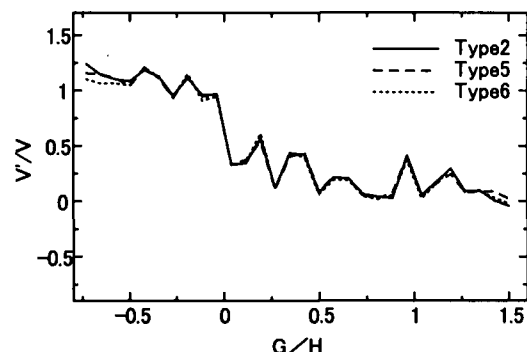


(c) $V/H=6.0(\%)$

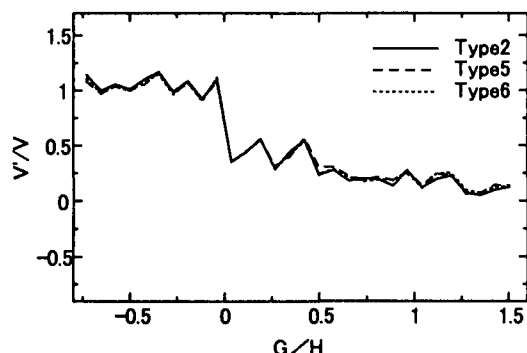
図-16 ばね定数別の地表面変動量



(a) $V/H=1.0(\%)$



(b) $V/H=2.5(\%)$



(c) $V/H=6.0(\%)$

図-17 粘着力別の地表面変動量

せん断層の進展を妨げるというせん断層の発達構造の影響を受けたため、Type2, Type3とは異なった傾向を示したものと考えられる。主要なせん断層が地表面に到達した後では、地盤全体が主要なせん断層を境に上盤側と下盤側に分れて、その相対的なずれ変形が進行したため、地表面変動量に影響を及ぼさない。

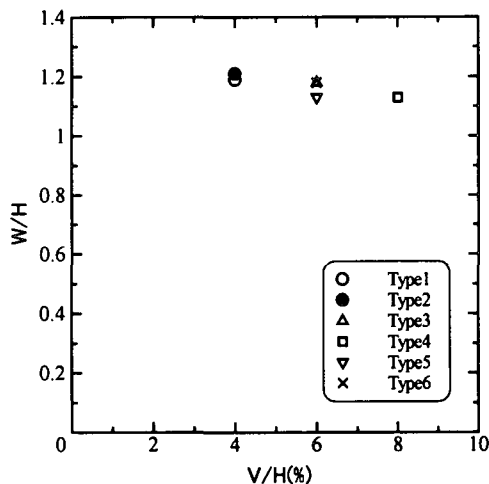
4.3 表層地盤の粘着力の影響について

粘着力を変化させた断層変位量別の V'/V と G/H の関係を図-17(a)~(c)に示す。地表面は図-15(a)~(c)、図-16(a)~(c)と同様に基盤の断層変位量がそのまま伝わらない。図-17(a)~(c)において、Type2, Type5, Type6は V/H が増加しても V'/V の違いがほとんど見られない。これはType2, Type5, Type6のせん断層の発達構造でも違いが見られなかったように、層厚130mの地盤を構成している

各要素に粘着力を考慮しても、その効果が見られないことと関連付けられる。表層地盤のような厚い層厚になると、要素同士の相対的な変形量の方が大きいため、粘着力の影響が見られなくなったことがいえるだろう。

4.4 せん断層の地表到達位置と断層変位量について

せん断層が地表面に到達した時の W/H と V/H の関係を図-18に示す。図-18はType1, Type2, Type3, Type4, Type5, Type6の結果をプロットしている。Type1, Type2は $V/H=4.0(\%)$ で、Type3, Type5, Type6は $V/H=6.0(\%)$ で、Type4は $V/H=8.0(\%)$ でせん断層が地表面に到達する。せん断層が到達する位置は地表面変状によらず $W/H=1.13\sim1.21$ であり、基盤の断層変位速度、ばね定数、粘着力を変化させてもほぼ同じ位置に出現する。これはせん断層の分岐点



図ー 18 セン断層が地表面に到達した時の位置と断層変位量

が層厚下部の1地点に集中したり、あるいはその分岐点から発達するせん断層の構造に違いがあったりしても、基盤の断層傾斜角が水平面から45°であるため、せん断層が地表面に到達する位置はその断層傾斜角に依存すると考えられる。

5. 結論

本論文では基盤の逆断層運動による地表面変状を推定するために、修正個別要素法を用いた数値実験を行った。その結果、得られた結論を要約すると以下の通りである。

- (1) 地表面は基盤の断層変位速度、表層地盤の剛性、表層地盤の粘着力の変化によらず、断層変位が顕著に表れる。基盤の断層変位量がそのまま伝わるのではなく、要素同士の接触によって基盤の動きが地盤内で緩和されたり、あるいは基盤の動きを強く受けて地盤内の要素同士の接触を助長したりしたためである。
- (2) 地表面は表層地盤の剛性が小さくなるほど下盤側のみならず、上盤側にもせん断層が発達して大きく影響を受ける。基盤の断層変位速度、表層地盤の粘着力を変化させると、下盤側に異なったせん断層が発達するが、地表面変動量にはほとんど影響を及ぼさない。
- (3) 主要なせん断層が地表面に到達した後では、地盤全体が主要なせん断層を境に上盤側と下盤側に分れて、その相対的なずれ変形が進行するため、地表面変動量は基盤の断層変位速度、表層地盤の剛性、表層地盤の粘着力を変化させてもほとんど違いが見られ

ない。

- (4) セン断層が地表面に到達した時の断層変位量は表層地盤の剛性、表層地盤の粘着力を変化させると、 $V/H=6.0\sim 8.0(\%)$ で地表面に到達する。せん断層が地表面に到達した時の位置は基盤の断層変位速度、表層地盤の剛性、表層地盤の粘着力の変化によらず、 $W/H=1.13\sim 1.21$ に出現する。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、東洋大学工学部環境建設学科の伯野元彦先生に本研究の御支援をいただき、さらに貴重な御意見もいただいた。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た。関係各位に深謝する次第である。

参考文献

- 1) 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シミュレーション, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム論文集, pp. 215-222, 1994.
- 2) 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, Vol. I-43, pp. 313-325, 1998.
- 3) 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. 2, pp. 533-542, 1999.
- 4) 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.
- 5) 宮武隆:断層近傍の強振動パルスの成因, 地震, Vol. 51, No. 2, pp. 161-170, 1998.
- 6) 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, pp. 145-154, 1995.
- 7) 津村利光:強度設計データブック, 裳華房, pp. 1077-1080, 1962.
- 8) 岩下和義, 小田匡寛: 粒子接点での転がり抵抗を考慮した個別要素法によるせん断帯の微視的変形機構, 土木学会応用力学論文集, Vol. 2, pp. 401-411, 1999.
- 9) Jonathan. D. Bray, Raymond. B. Seed and H. Bolton. Seed : Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil, J. Geotech. Eng., ASCE, Vol.120, No.3, pp.562-580, 1994.
- 10) 鬼塚信弘, 伯野元彦, 堀宗朗, 岩下和義, 鈴木崇伸: 逆断層運動に伴う表層地盤の変形シミュレーション, 土木学会応用力学論文集, Vol. 3, pp. 577-584, 2000.
- 11) 鬼塚信弘: 基盤の縦ずれ断層運動に伴う表層地盤の破壊伝播メカニズムに関する基礎的研究, 東洋大学博士論文, pp. 47-137, 2001.

(2001年4月20日受付)