

基盤の逆断層変位に伴う表層地盤の変形メカニズムについて —模型実験と修正個別要素法—

鬼塚 信弘

木更津工業高等専門学校

Deformation Mechanism in Subsurface Ground Induced by Reverse Dip-Slip Faults —Model Tests and Modified Distinct Element Method—

Nobuhiro ONIZUKA

Kisarazu National College of Technology

Abstract

A structural design method, which takes into consideration the influence of earthquake faults on the ground, has not yet been established. This is true, especially, when designing linear structures, such as roads, tunnels, and bridges. The purpose of this paper is to examine deformation of model ground, shear zones, and bedrock stress, and to carry out a MDEM simulation and obtain the boundary condition from the results. This paper presents the results of a series of laboratory model tests, in which the effects of reverse dip-slip faults in the bedrock use granular materials set on the subsurface ground. The results suggest the significance of considering the deformation and stress of the ground in designing linear structures.

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

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構造物設計はダムや原子力発電所などに限られており、これらの構造物は断層の位置を外し、固い岩盤上に建設されている。しかし、確立された設計法はなく、特に道路、トンネル、橋梁などの線状構造物は、地震断層による影響を設計に取り入れられてはいない。さらに、防災対策の側面から見た場合、これらの線状構造物も被害を最小限にすることが重要である。線状構造物を対象とした設計法を確立するためには、空中写真判読などの地形学手法、トレンチなどの地質学手法のみでは不可能である。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の力学手法も取り入れた総合的な評価が必要となる。

既往の研究として、模型実験では砂箱実験を行った COLE and LADE (1984) や上田・他 (1993) などが挙げられる。一方、数値解析では FEM 解析を行った谷 (1994) や谷山・他 (1998) が挙げられる。双方の手法はいずれも変形場に注目しており、上田・他 (1993) は

重要な構造物を対象とした地盤の影響評価をしている。

そこで、本研究は最初に表層地盤にアルミ棒材料を用いた基盤の逆断層の模型実験を行うことにした。ここでは、地殻の断層そのもののメカニズムを明らかにすることではなく、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することを目的とし、せん断層が地表に到達した位置を現地調査と比較検討した。また、得られた知見から線状構造物を対象とした設計法に関する地盤の影響評価について考察し、粒状体計算領域の境界条件を設定した MDEM (修正個別要素法, Modified Distinct Element Method) 解析を行い、基盤の逆断層運動問題に対する適用性についても考察した。

2. アルミ棒積層体模型実験

2.1 実験装置および方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。本装置はアルミ棒積層体を支えるために装置両端を L 型フレームで覆っているが、前背面はアルミ棒が自立するので覆っていない。移動基盤を水平より 45° , 60° , 75° , 90° になるように上方に移動すると逆断層変位を模擬する。基盤は各アルミブロックから構成され、ロードセルによりアルミ棒地盤に働く平均鉛直方向応力 (平均直応力) が測定できるようになっている。なお、本装置の詳細は鬼塚・他 (1999) を参照していただきたい。実験ケースは層厚 50, 100, 200, 300, 400 mm の模擬地盤を作製した。地盤材料は重量比 3:2 で混合した直径 1.6 および 3.0 mm の 2 種類のアルミ棒を用いた。模擬地盤の初期間隙比は 0.25 である。内部摩擦角は $\phi=28^\circ$ である (鬼塚・他 (1997))。模擬地盤断面にはせん断層を明確に判別できるように、黒色マジックで 10~25 mm 間隔のマスを引いた。基盤の逆断層変位を 1 (cm/min) 程度の速度で上昇させ、 V (鉛直変位量)/ H (模型地盤層厚)=1.0 (%) まで 0.1 (%) ごとにデータロガーで各点の平均直応力を測定し、写真を撮りながら観察した。その後 $V/H=0.5$ (%) ごとに前述と同様な方法で行い、 $V/H=10$ (%) で終了した。

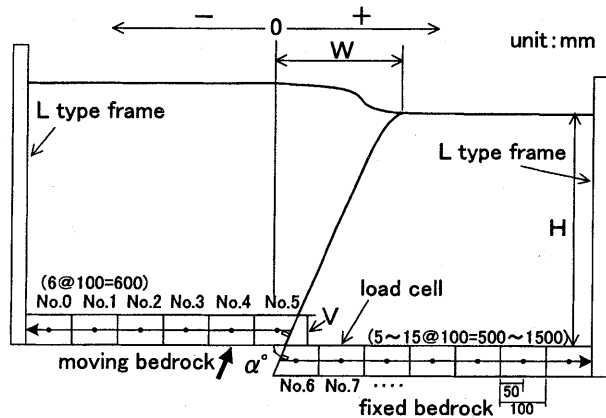


Fig. 1. Outline of model test and used symbol.

基盤の逆断層変位に伴う表層地盤の変形メカニズムについて

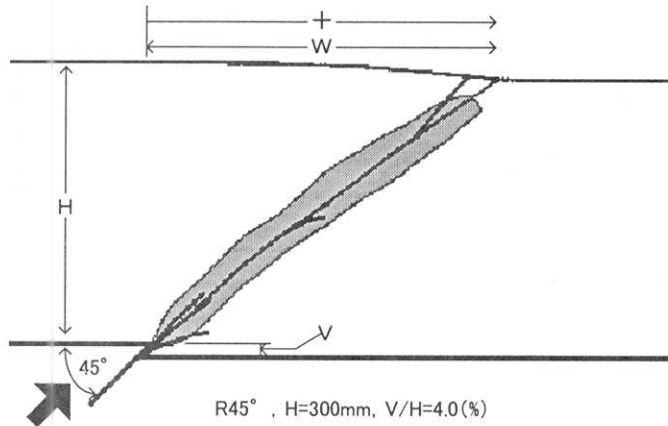


Fig. 2. Ground deformation and shear zones extending from tip of bedrock fault to ground surface.

2.2 実験結果および考察

2.2.1 アルミ棒積層体の変形構造

以下, 2.2.1~3 では逆断層 45°型について述べる.

せん断層をミクロ的に見た変形構造は, 移動基盤の逆断層変位 (45°の上昇方向) が増加すると, 模擬地盤断面上にマス目状に引いたマーカークラインが緩やかに変形 (撓曲) し, その後せん断破壊が生じて移動基盤先端よりせん断層が形成される. 1本のせん断層が移動基盤先端から地盤表面へ連続的に発達するのではなく, 複数のせん断層が分岐や雁行状に配列して発達する様子が確認された.

同一方向に複数のせん断層が雁行状に近接して発達するゾーン, すなわち同じ方向へ進展する同じ性状のせん断層群を Fig. 2 に図示した. せん断層をマクロ的に見た変形構造は, 上方に凸の曲線形状のせん断層群が1つ見られた. 逆断層は σ_H (水平主応力) $>$ σ_V (鉛直主応力) の関係でせん断層が発達するといわれている. 一般に砂地盤内に帯基礎が大きく押し込まれてから観察されるせん断面で, 最終的に現れる地盤表面近傍のせん断面は平面ひずみ伸張状態になり, σ_H が σ_V に比してより大きくなっている. 本実験のせん断層内の σ_H/σ_V も地盤表面に近づくにつれて σ_H が σ_V に比してより大きくなり, 凸の曲線形状が現れたものと考えられる.

2.2.2 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 (模型地盤の層厚) と V/H との関係を図 3 に示す. 逆断層 45°型の層厚 50, 100, 200, 300, 400 mm のせん断層は $V/H=1.5\sim 5.5$ (%) で地盤表面に到達し, 固定・移動基盤境界線 (固定基盤先端すなわち断層部) を 0 とした W/H は層厚の変化によらず約 0.6~1.3 でせん断層が到達し, 層厚の変化による顕著な違いは見られない.

2.2.3 寸法効果を考慮した基盤上に作用する応力と位置

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 4 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

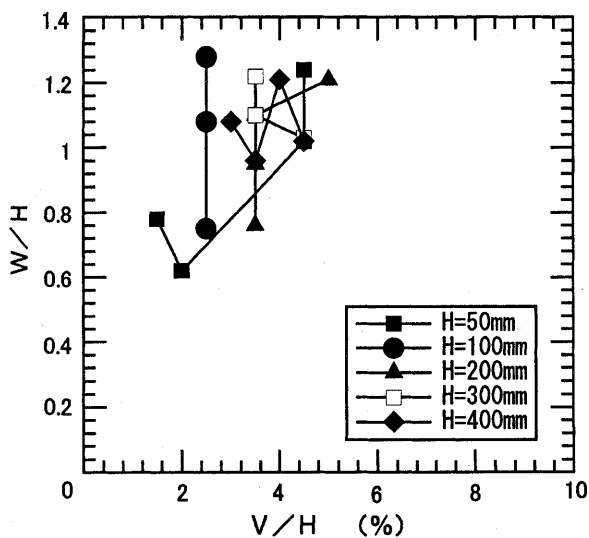


Fig. 3. Relationship between deformed position of ground surface and vertical displacement of bedrock with a scale effect.

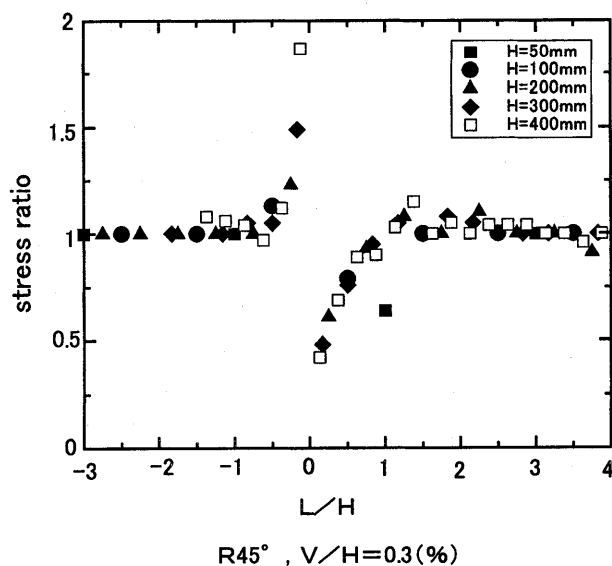


Fig. 4. Relationship between stress ratio and position of load cell on the bedrock with a scale effect.

の変化による寸法効果を検討するために、水平距離 (L) を層厚 (H) で除している。Fig. 4 では層厚 50, 100, 200, 300, 400 mm の結果がプロットされている。層厚 50 mm は散布図から固定基盤側、移動基盤側双方にはずれているのが分かる。層厚 50 mm を除いた $V/H=1.0$ (%) 時の、固定・移動基盤境界 (断層部) 付近における固定基盤上の応力比は減

少し、移動基盤上の応力比は増加している。ただし、固定基盤側で $L/H = \text{約} 2.8$ 以上、移動基盤側で $L/H = \text{約} -0.8$ 以上断層部から離れた点では、顕著な応力比の変化は見られない。基盤上の応力比は、断層変位量が増加しても層厚の変化による影響、すなわち寸法効果が見られない。

2.2.4 断層傾斜角別の基盤上に作用する応力と位置

2.2.3のような逆断層の傾斜が 45° の L/H と応力比の関係は、その傾斜が $60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の場合でも $V/H = 4.0$ (%) になるとほぼ同様な応力分布を示した。そこで、断層傾斜角別の応力分布を比較するために、 $V/H = 4.0$ (%) 時の断層傾斜角別の近似曲線を Fig. 5 に示す。

まず、固定基盤側について考えてみると固定・移動基盤境界線(断層部)付近の応力比が最小値となり、断層傾斜角によらずほぼ同じ値を示す。その境界から離れるにつれて、すなわち L/H が大きくなるにつれて最大になる点があるが、断層傾斜角が低角度になるほど、最大値を示す位置は L/H が大きくなる位置にずれていく。

一方、移動基盤側では固定・移動基盤境界線(断層部)付近の最大値は断層傾斜角が低

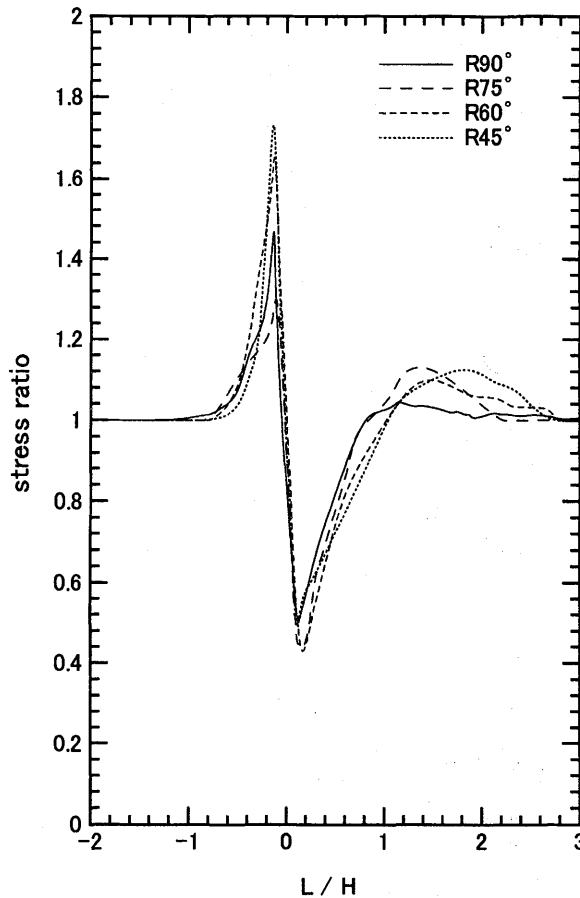


Fig. 5. Stress distribution on the surface of bedrock and its scale effect.

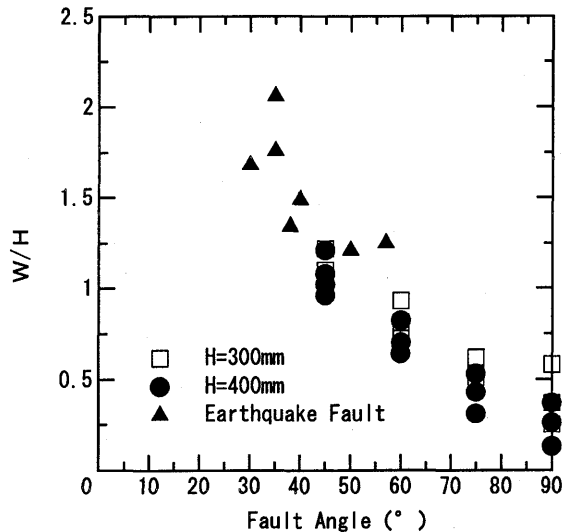


Fig. 6. Comparison between position on ground surface of earthquake fault and results of aluminum rod model experiment.

角度になるほど大きな値を示すが、逆断層 90°、75°型はほとんど同じ値を示している。断層傾斜角が低角度になるほどせん断層が固定・移動基盤境界線（断層部）から離れた位置に発達するため、せん断層を形成する周辺のアルミ棒積層体の移動容量が相対的に大きいことがいえる。

2.3 アルミ棒モデルと地震断層の地表到達位置

逆断層型の地震断層が地表に到達したケースは日本をはじめ諸外国でもあまり例はないが、その中でも上田は基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況について報告している（上田（1993））。その記載された中で地震断層の地表到達位置と前述で最も信頼性の高い層厚 300、400 mm のアルミ棒積層体モデルのデータを断層傾斜角別に比較したものを Fig. 6 に示す。地震断層のデータは川舟断層や深溝断層、そして南カリフォルニアの断層形成地点であり、本実験データと合わせたものである。地震断層は基盤の断層傾斜角が 30°~60° で低角度から中角度までが多い。本実験における基盤の最小断層傾斜角は 45° であるが、断層傾斜角が小さくなるほど断層部直上の点から遠い位置にせん断層が到達し、双方のデータが概ね整合している。いいかえれば、せん断層が地表に到達する位置は基盤の断層傾斜角に大きく依存するといえる。

なお、地震断層のせん断層が地表に到達した時の基盤の断層変位量はアルミ棒積層体モデルと比すると 7 倍程度以上の違いが見られたが、地層構造や地震時の振動などの動的な要素によるものと考えられる。

2.4 基盤の逆断層変位が地盤に及ぼす影響について

基盤の逆断層変位が地盤に及ぼす影響について、2.2.2~3 を踏まえた概念図 (Fig. 7) により考察する。断層部付近から地盤のせん断破壊が進行し、せん断層が形成され、地表に到達する。基盤上の平均直応力分布は鬼塚らの正断層型モデル（鬼塚・他（1999））のように断層変位によって大きく変動しないことから、せん断層が形成される初期の時点で移動

基盤の逆断層変位に伴う表層地盤の変形メカニズムについて

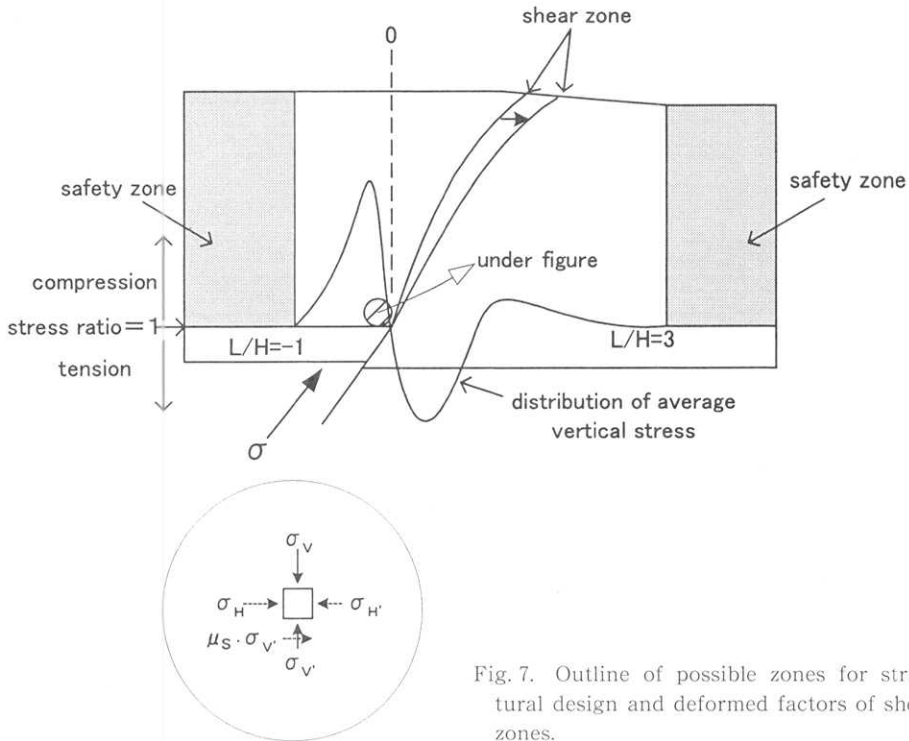


Fig. 7. Outline of possible zones for structural design and deformed factors of shear zones.

基盤側断層部付近に圧縮地盤，固定基盤側断層部付近に引張り地盤が生じているといえる． Fig. 7 のように圧縮地盤におけるある一定領域の平均応力は， Fig. 5 で断層傾斜角が低角度になるほど σ_v が大きくなることから σ_H も大きくなり， $\sigma_v > \sigma_H$ ， さらに $\sigma_H > \sigma_H'$ の関係が成り立っていると考えられる． また，圧縮地盤と基盤間には摩擦力: $\mu_s \cdot \sigma_v$ が働いている． Fig. 2 の初期の時点におけるせん断層の発達形状は断層傾斜角とほぼ同方向であり，主応力: σ もそれに沿って働いていると考えられる． ゆえに，圧縮地盤のある一定領域の平均応力，圧縮地盤と基盤間の摩擦力，断層傾斜角に沿った主応力がせん断層の発達形状に大きく影響を及ぼしたものと考えられる．

次に，基盤の逆断層変位に伴う地盤に構造物が建てられる可能性について考察する．米国のカリフォルニア州の活断層 (HART, E.W. (1992)) (中田 (1990) により解説されている) では，地表の変位が生じないという地質調査を前提に，主要断層から約 500 フィート (150 m 以内)，明瞭な小断層から約 200~300 フィート (60~90 m 以内) から離して構造物を建てることになっている．しかし，この設計法は表層地盤の厚さなどを考慮していないため，詳細な設計が必要とされる線状構造物には適さないと考えられる．

本研究の基盤の平均直応力分布結果から約 $L/H \leq -1$ ，約 $L/H \geq 3$ (例えば，表層地盤厚さ 100 m の場合，主要な断層から相対的に上盤側で 100 m 以上，下盤側で 300 m 以上離れた地点) では，応力比が逆断層変位によって変化しないため，地盤が静止土圧状態で保持され，かつせん断層が形成されないことから構造物が安全側に建てられると推定できる (Fig. 7)．約 $-1 \leq L/H \leq 3$ (例えば，表層地盤厚さ 100 m の場合，主要な断層から相対的に

上盤側で 100 m 以内、下盤側で 300 m 以内の地盤)では、断層部に近い周辺の地盤が圧縮、引張り応力状態になる地点があり、構造物を建てるには極めて危険であると考えられる。せん断層が形成されていない地表に近い地盤では、本研究からは周辺の地盤の応力場(圧縮、引張り状態)が十分に把握できないため、構造物が安全側に建てられるかどうかは推定できない。

3. 修正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(谷(1994)、谷山・他(1998))が、本実験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、2.4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(1971)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(1995)を採用した。

3.1 数値解析方法

本研究では逆断層 45°型モデルについて数値解析を行い、基盤の逆断層変位速度のパラメータを Table 1 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、かつ本実験

Table 1. Parameters of 45° reverse fault.

Item	Condition
Scale of initial model	300W×130H×1D m
Particle number	12,000
Particle radius	1.5 m, 0.8 m
Time step (Δt)	1.00E - 05
Moving step of bedrock (Δd)	2.2 mm/10000
Particle density	2500 kg/m ³
Friction coefficient to wall	0.00
Friction coefficient to particles	0.500
Spring constant in normal direction (kn)	3.11E+10 N/m
Spring constant in shear direction (ks)	2.07E+10 N/m
Dashpot multiplier (h)	0.2
θ max	0.02 rad
kr	700.0 Nm/rad
Cr	0.01Nm sec/rad

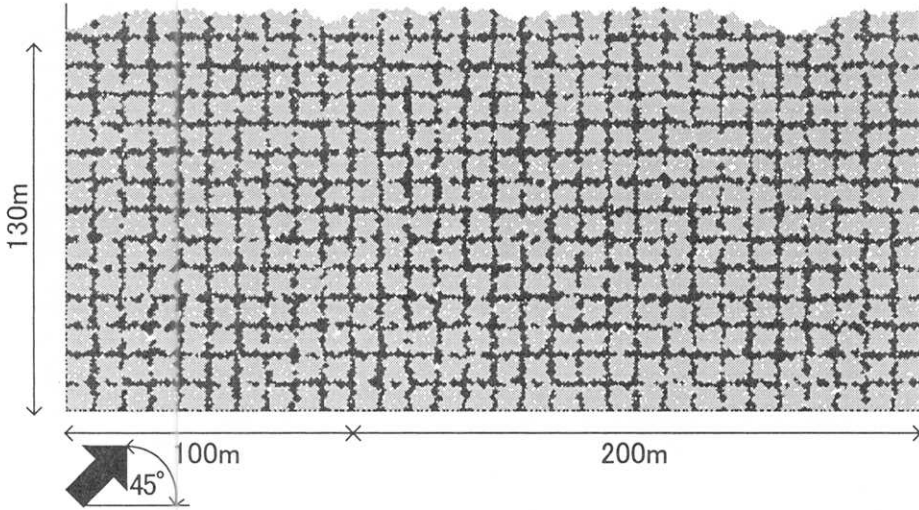


Fig. 8. Initial ground of 45° reverse fault (V/H=0%).

結果から決定した。要素は直径 1.6 m と 3.0 m の円柱要素である。その 2 要素の配合比を模型実験と同様の重量混合比を採用し、1.6 m と 3.0 m は 3 対 2 とした。なお、本数比で換算すると 1.6 m と 3.0 m 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 Fig. 8 に示す。各要素は 10 m 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断層変位量; V (鉛直変位量)/H (層厚) = 1.0 (%/min) に相当する極めて遅い速度 0.022 (m/sec) とその速度の 100 倍、すなわち V/H=100.0 (%/min) に相当する 2.2 (m/sec) であり、地盤の変形解析は V/H=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。

3.2 地盤の変形構造

Fig. 8 の左側の基盤を基盤面に対し 45° 方向に、Table 1 のような強制変位を与えて上昇させた。格子状に含まれている要素が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先端よりせん断層が形成される (Fig. 9)。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 (Fig. 10)。複数のせん断層が発達する分岐点は 2 点ある。その変形構造は静的な基盤変位速度で行った本実験でも同様に見られた。

4. 数値解析および模型実験結果の比較

4.1 寸法効果を考慮した基盤上に作用する応力と位置

2. 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 mm ~ 400 mm で寸法効果が見られないことが分かった。本節では本研究で得られた数値解析結果を

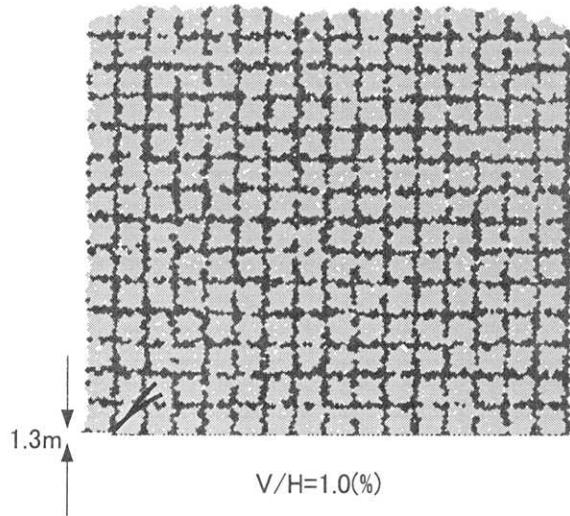


Fig. 9. Deformation of shear zones at first location.

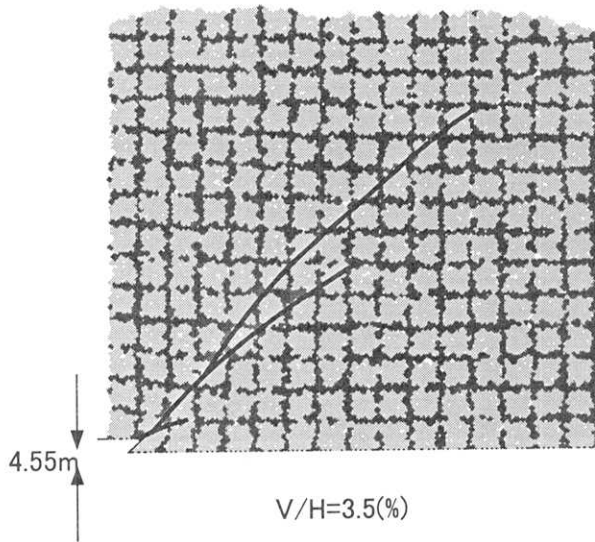


Fig. 10. Deformation of shear zones at clear branch.

2. 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 Fig. 11 (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 130 m, 模型実験の層厚 200, 300, 400 mm で除している。Fig. 11 (a)~(c) は数値解析の結果と模型実験の層厚 200, 300, 400 mm の結果がプロットさ

基盤の逆断層変位に伴う表層地盤の変形メカニズムについて

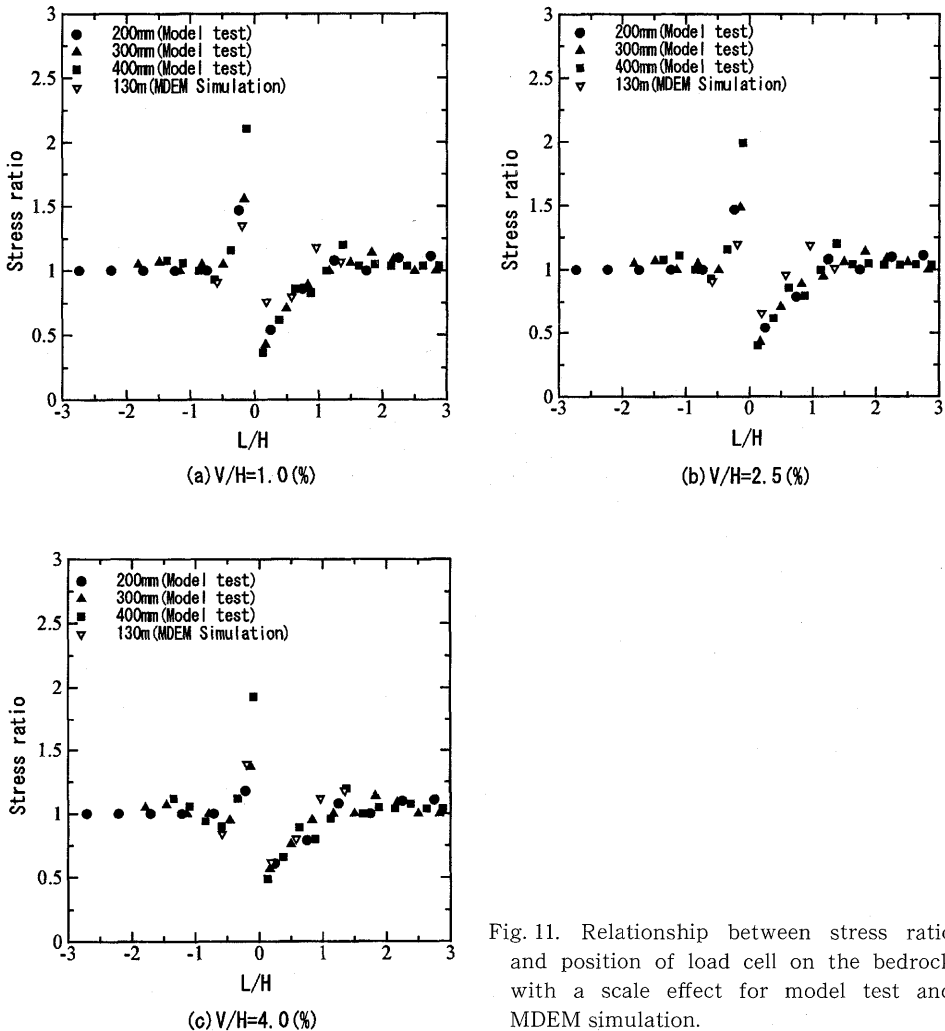


Fig. 11. Relationship between stress ratio and position of load cell on the bedrock with a scale effect for model test and MDEM simulation.

れている。数値解析の結果は 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。

4.2 セン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 Fig. 12 に示す。Fig. 12 は数値解析と模型実験の層厚 200, 300, 400 mm の結果をプロットしている。数値解析と模型実験ともに $V/H=4.0(\%)$ でせん断層が地盤表面に到達する。

以上より、本実験で行ったアルミ棒積層体の粒子の変形挙動は、変形場、応力場ともに数値解析結果と概ね一致することから、2階常微分の運動方程式をたてて差分近似しながら時間領域で前進差分的に解く弾性変形分を考慮した DEM のような変形挙動をしていることが考えられる。

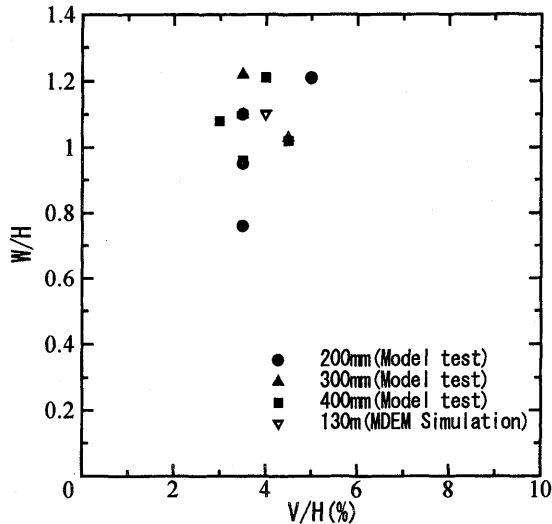


Fig. 12. Relationship between deformed position of ground surface and vertical displacement of bedrock with a scale effect for model test and MDEM simulation.

5. 結 論

(1) 模型実験で見られたせん断層のミクロ的変形構造は層厚の変化により異なるが、マクロ的変形構造では層厚の変化による違いは見られない。

(2) 模型実験におけるせん断層のマクロ的変形構造およびせん断層が地盤表面に到達した時の断層変位量と到達位置、基盤上に作用する平均直応力は断層傾斜角に大きく依存する。

(3) 模型実験の基盤上に作用する応力と寸法効果を考慮した応力点の位置は、逆断層の傾斜に関係なく薄い層厚と他の層厚で異なる。

(4) せん断層が地盤表面に到達した位置は逆断層の現地調査の位置とほぼ一致する。

(5) 数値解析の寸法効果を考慮した基盤上の鉛直方向応力比は、模型実験の応力分布に概ね整合している。

(6) 数値解析のせん断層地盤表面到達位置の分布は模型実験とほぼ一致する。

線状構造物を対象とした断層変位に伴う地盤の影響について、現在、その設計法が確立されていない。本研究では地質調査で得られたデータと力学的な模型実験により、地盤の変形、応力を考慮した設計法が重要であると認識した。また、MDEM解析を行い、基盤の逆断層運動が表層地盤に及ぼす影響の問題に適用できる可能性が示唆された。今後は基盤の逆断層傾斜を変化させた問題について検討する予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、東京大学地震研究所の堀宗朗先生、東洋大学工学部環境建設学科の伯野元彦先生、鈴木崇伸先生、木更津工業高等専門学校環境都市工学科の飯竹重夫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。埼玉大学工学

基盤の逆断層変位に伴う表層地盤の変形メカニズムについて

部建設工学科の岩下和義先生に修正個別要素法のプログラムを供与していただくとともに、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の金井太一技官に手伝っていただいた。(財)電力中央研究所地質部の上田圭一氏に地震断層のデータを提供していただいた。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た。関係各位に深謝する次第である。

参考文献

- COLE, D.A. Jr. and LADE, P.V., 1984, Influence zones in alluvium over dip-slip faults, *J. Geotech. Eng., ASCE*, **110**, No. 5, 599-615.
- 上田圭一・谷 和夫・鬼塚信弘, 1993, 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, 1483-1484.
- 谷 和夫, 1994, 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, 215-222.
- 谷山 尚・渡辺啓行, 1998, 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, 313-325.
- 鬼塚信弘・伯野元彦・岩下和義・鈴木崇伸, 1999, 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, **2**, 533-542.
- 鬼塚信弘・飯竹重夫・金井太一, 1997, アルミ棒を用いた小型鉛直断層模型実験, 木更津工業高等専門学校紀要(第30号), 15-18.
- 上田圭一, 1993, 基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討, 電力中央研究所・研究報告(U93007), 31-32.
- 鬼塚信弘・岩下和義・飯竹重夫・金井太一, 1999, 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, 1189-1190.
- HART, E.W., 1992, Fault-rupture hazard zones in California, Aliquist-Priolo special studies zones act of 1972 with index to special studies zones maps (revised), California Department of Conservation, *Division of Mines and Geology Special Publication*, **42**, 31.
- 中田 高, 1990, カリフォルニア州の活断層法「アルキストープリオロ特別調査地帯法 (Aliquist-Priolo special studies zones act)」と地震対策, 地学雑誌, **99**, No. 3, 289-298.
- CUNDALL, P.A., 1971, A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system, sym. *ISRM, Nancy, France*, **2**, 129-136.
- 岩下和義・松浦浩一・小田匡寛, 1995, 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.
- BARDET, J.P., 1994, Observation on the effect of idealized granular materials, *Mechanics of Materials*, **18**, 159-182.

(Received May 25, 2000)

(Accepted August 28, 2000)