

基盤の縦ずれ断層運動に伴う表層地盤の 破壊伝播に関する模型実験

鬼塚 信弘¹・伯野 元彦²・鈴木 崇伸³・岩下 和義⁴・堀 宗朗⁵

¹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)

²フェロー会員 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)

³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)

⁴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)

⁵正会員 Ph.D. 東京大学教授 東京大学地震研究所 (〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1)

近年、台湾集集(チーチー)大地震、トルコ・コジャエリ大地震が相次いで起こり、地震動のみならず断層変位によって多くの構造物が被害を受けた。断層変位を考慮した構造物設計法を確立するためには、まず基盤の断層運動が表層地盤に及ぼす影響を明らかにしなければならない。本研究は表層地盤に砂以外の粒状体材料としてアルミ棒を用いて、基盤の縦ずれ断層運動が、模擬地盤における変形やせん断層について定性的な評価を行い、さらに基盤の縦ずれ断層運動に伴う地表面の変位量やせん断層の地表面到達位置、基盤上に作用する応力の定量的な評価も行った。その結果、基盤の正・逆断層運動による模擬地盤の破壊伝播の違いが明らかになった。

Key Words : dip-slip fault, model experiment, deformation of surface grounds, shear zones, stress on basement

1. はじめに

1999年の台湾集集(チーチー)大地震、トルコ・コジャエリ大地震では、地震動による被害のみならず、地震断層により地表に出現し、多くの構造物が甚大な被害を受けた。現在、そのような断層の進展による大きな地盤変形を考慮した構造物設計法は確立されていない。わずかに主要断層、あるいは明瞭な小断層から離して構造物を建てるという米国カリフォルニア州の活断層法¹⁾があるだけである。しかし、日本のように国土が狭く都市部に比較的軟弱な地盤層が形成されている地域では、この活断層法は適用できない。断層の進展による大きな地盤変形を考慮した設計法を確立するためには、まず基盤の断層運動が表層地盤に及ぼす影響として変形帯の幅やパターンなどを明らかにしなければならない。

既に地表地震断層の研究が行われており、その研究は空中写真判読を用いる地形学分野やトレンチを行う地質学分野、相似則に基づいた模型実験や数学的モデルを用いた数値解析を行う力学分野に大別される。力学分野の模型実験としては、1gの砂箱実験を行った Cole and Lade²⁾や上田³⁾、谷山⁴⁾、50gの遠心載荷模型実験を行った Roth, Scott and Austin⁵⁾

が挙げられる。

既往の研究では、砂を用いた模型実験により基盤変位量に伴うせん断層の地表面到達位置を明らかにしているが、せん断層の発達性状を含む変位場は定性的な評価にとどまっており、地表面の変位量については明らかにされていない。また、地表に大きな断層変位が生じた場合を想定した構造物設計法を確立するためには模型実験と数値解析の相互連携による評価が必要となってくる。

本研究では表層地盤に砂以外の粒状体材料として、アルミ棒を用いた模型実験を行うことにした。アルミ棒を用いた模型実験では、箱型の装置のように側壁面摩擦の影響を受けず、地盤破壊現象が直接的に観察できることや地盤応力が基盤上で直接的に計測できるという利点がある。本実験では基盤の縦ずれ(正・逆)断層運動が模擬地盤に及ぼす変形やせん断層について定性的な評価を行い、さらに基盤の正・逆断層運動に伴う地表面の変位量、せん断層の地表面到達位置、基盤上に作用する応力の定量的な評価も行った。

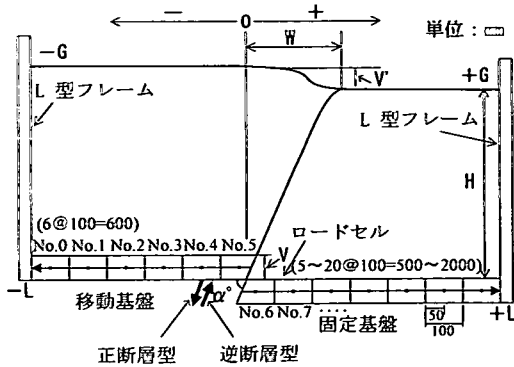


図-1 実験装置概略図と本論文で用いる記号

2. 実験装置

実験装置の概略図および本論文で用いる記号を図-1に示す。基盤の断層傾斜角を α 、模擬地盤の層厚を H 、基盤の断層変位量(鉛直変位量)を V とした。 L は固定・移動基盤境界線(0線)から応力測定点までの水平方向距離で、 G は0線から地表測定点までの水平方向距離である。 V' は地表測定点の鉛直変位量であり、 W は0線から地表にせん断層が到達した地点までの水平距離である。0線からの方向は固定基盤側を+とし、移動基盤側を-とした。アルミ棒積層体を支えるため、装置両端は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 30° 、 45° 、 60° 、 75° になるように下方に移動すると正断層変位を模擬し(以下、正断層型とする。)、移動基盤を水平より 30° 、 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(以下、逆断層型とする。)。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積層体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。正断層型実験のロードセルは正断層 30° 、 45° 、 60° 型で移動基盤側に6個、固定基盤側に10個、正断層 75° 型で移動基盤側に6個、固定基盤側に5個を配置した。逆断層型実験のロードセルは逆断層 30° 、 45° 型で移動基盤側に6個、固定基盤側に20個、逆断層 60° 、 75° 型で移動基盤側に6個、固定基盤側に15個、逆断層 90° 型で移動基盤側に6個、固定基盤側に10個を配置した。

3. 実験方法

実験ケースを表-1に示す。正断層型、逆断層型ともに層厚 $H=50, 100, 200, 300, 400\text{mm}$ の模擬地盤

表-1 実験ケース

基盤の断層傾斜角(°)		層厚:H(mm)
正断層型	逆断層型	
30	30	50, 100, 200, 300, 400
45	45	
60	60	
75	75	
—	90	

を作製した。表層地盤における砂質土の2次元モデルとして、地盤材料は重量比3:2で混合した直径1.6および3.0mmの2種類のアルミ棒を用いた。この重量比は粒径加積曲線が豊浦標準砂の粒径加積曲線と平行になるように調整されたもの⁶⁾であり、支持力や落とし戸実験⁷⁾でも同様の重量比で行われている。この重量比を用いた小型の鉛直断層変位模型実験⁸⁾において、せん断層が地表に到達した位置や変位量が適切であることより決定した。模擬地盤の初期間隙比は0.25である。アルミ棒内部摩擦角は高さ50mm×長さ200mm×奥行き50mmの摩擦角測定装置にアルミ棒を積み上げて30秒に 10° の割合で傾斜させた時の崩落する角度を読み取った。その内部摩擦角は $\phi=28^\circ$ である⁸⁾。模擬地盤断面にはせん断層を明確に判別できるように、黒色ペイントで10~25mm間隔のマス目を引いた。本論文の目的は、基盤の逆断層運動が模擬地盤に及ぼす変形やせん断層、地表面の変位量、基盤上に作用する応力の解明であるため、1(mm/min)の緩い速度で基盤の正断層変位を下降、逆断層変位を上昇させた。 $V/H=1.0(\%)$ 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、 $V/H=10(\%)$ で実験を終了した。

4. 地盤の変形とせん断層の発達過程

移動基盤の正断層変位(30° 、 45° 、 60° 、 75° の下降方向)、逆断層変位(30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 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(写真-1, 2)。1本のせん断層が移動基盤先端から地表面へ直線的に発達するのではなく、最初に移動基盤先端からせん断層が数本出現し、地表面に向けて進展するせん断層から新たなせん断層が出現するというせん断層の分岐

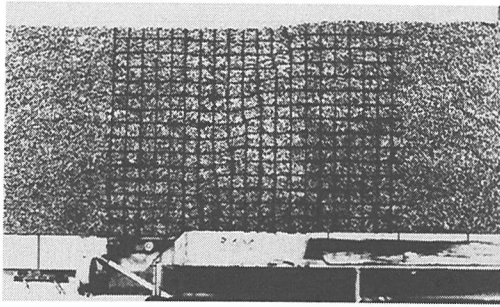


写真-1 基盤の正断層運動に伴うアルミ棒地盤内の変形 (正断層 45° 型, H=300mm, V/H=3.0%)

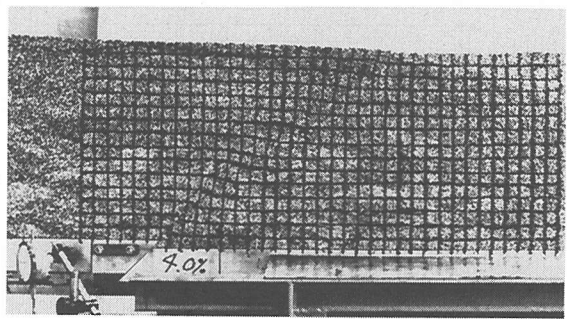
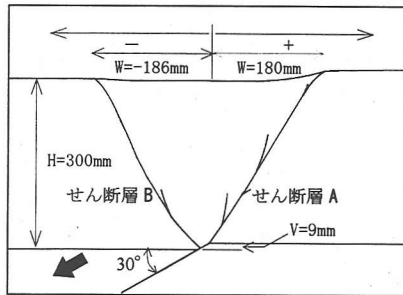
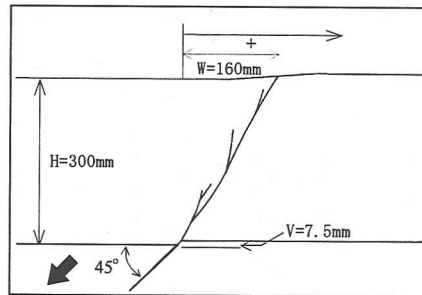


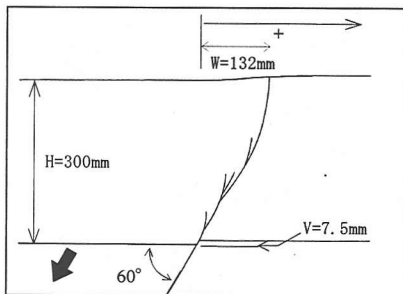
写真-2 基盤の逆断層運動に伴うアルミ棒地盤内の変形 (逆断層 45° 型, H=300mm, V/H=4.0%)



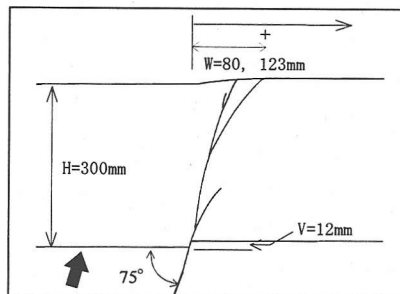
(a) 正断層30° 型, V/H=3.0%



(b) 正断層45° 型, V/H=2.5%



(c) 正断層60° 型, V/H=2.5%



(d) 正断層75° 型, V/H=4.0%

図-2 正断層型のせん断層の形状 (H=300mm, 地表面到達時)

現象が確認された。この現象は正、逆断層および傾斜に関係なく観察された。

(1) 正断層型

正断層 30° 型では (図-2(a) 参照) 移動基盤の下降に伴い、固定基盤側に移動基盤のずれ先端、すなわち断層部からせん断層 A が出現する。せん断層 A は直線的に発達するのではなく、分岐を繰り返しながら地表面に到達する。せん断層 A が地表面に到達した後、移動基盤側にもう 1 本のせん断層 B がせん断層 A と同様に断層部から分岐を繰り返して地表面に到達する。双方のせん断層が地表面に到達した位置は固定・移動基盤境界線 (0 線) を境に左右対称になっており、すり鉢状の形状をしている。

一方、正断層 45°、60°、75° 型では、移動基盤の下降に伴い、固定基盤側にせん断層が断層部から分岐を繰り返して地表面に到達する (図-2(b)~(d))。そのせん断層が地表面に到達した後、新たなせん断層は発達しない。形成されたせん断層を境に地盤が二分され、移動基盤側の地盤が移動基盤に引っ張られるように沈降していくのが観察された。個々のせん断層の発達形状は層厚を変化させることにより違いが見られるが、同一方向に発達して近接するせん断層を 1 つの群としてとらえると、正断層 45°、60° 型は下に凸の曲線形状で、正断層 75° 型は上に凸の曲線形状を示し、層厚を 200~400mm と変えてもほぼ同様の形状であった。

正断層 45°、60°、75° 型の砂地盤モデル³⁾ と比

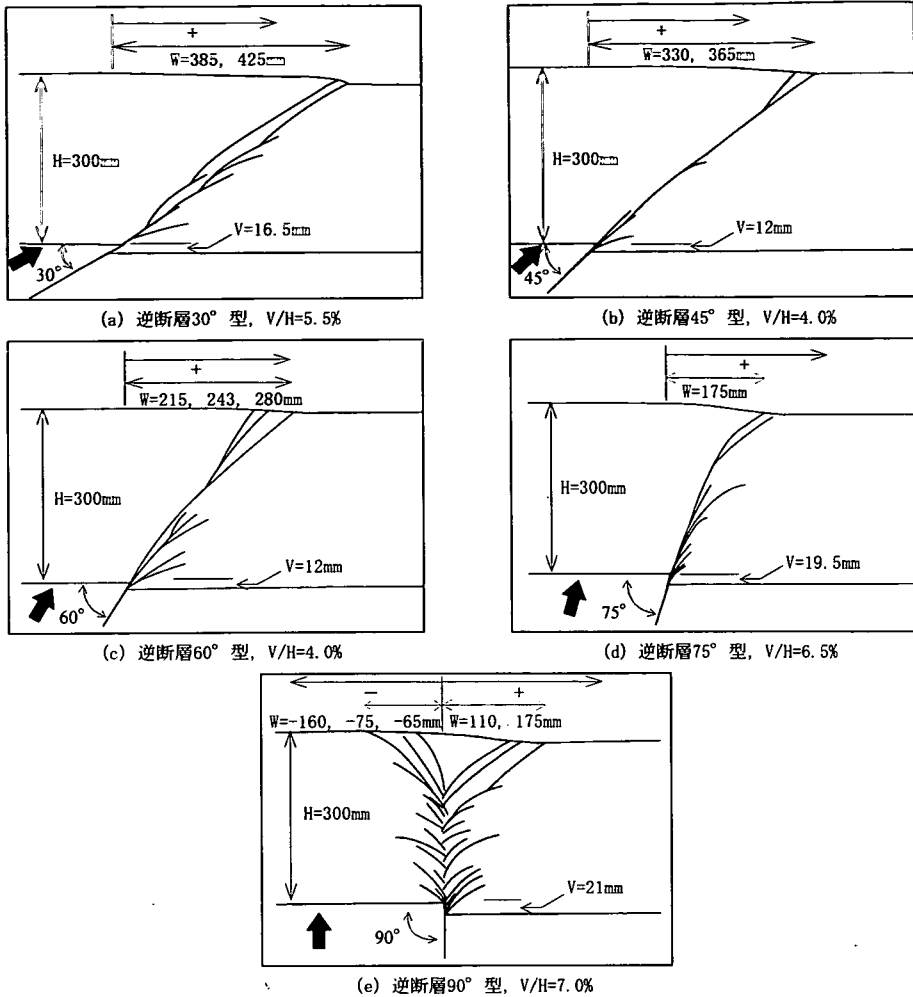


図-3 逆断層型のせん断層の形状 (H=300mm, 地表面到達時)

較すると、砂地盤モデルではせん断層がすり鉢状の形状を示したのに対し、アルミ棒積層体モデルではせん断層が下に凸の曲線形状、あるいは上に凸の曲線形状を示した。せん断層が地表面に到達した位置は砂地盤モデルよりもアルミ棒積層体モデルの方が断層部から遠く離れた位置に出ていた。これはアルミ棒積層体モデルの初期地盤間隙比 0.25 と砂地盤モデルの初期地盤間隙比 0.68 の違いよりも、せん断層が発達する時に現れたアルミ棒と砂粒子における粒子長軸の卓越配列に違いによるものと考えられる。

(2) 逆断層型

逆断層 90° 型では、せん断層が固定基盤側に発達し、その後、移動基盤側にも発達する。これらのせん断層は地表面に到達するまで、固定、移動基盤側の双方に繰り返し出現するが、固定基盤側のせん断

層が先行し、追って移動基盤側のせん断層が発達する (図-3(a))。砂地盤モデル³⁾と比較すると、アルミ棒積層体モデルの方が初期地盤間隙比 0.43 ほど密な地盤で大きなダイレイタンスを伴ったため、せん断層の発達形態が異なったものと考えられる。一方、逆断層 30°、45°、60°、75° 型では、せん断層は固定基盤側に発達し、出現する本数が少なくなる (図-3(b)~(e))。逆断層 90° 型と比較して 1 本 1 本のせん断層は近接している。

正断層型と同様に各々のせん断層を群としてとらえると、逆断層 90° 型では、固定基盤側に 2 つ、移動基盤側に 1 つ、計 3 つのせん断層群が見られた。逆断層 30°、45°、60°、75° 型では、上方に凸の曲線形状のせん断層群がそれぞれ 1 つ見られ、逆断層型が低角度になるほど凸の曲線が緩やかになる。逆断層 30° 型のせん断層は移動基盤の先端から基

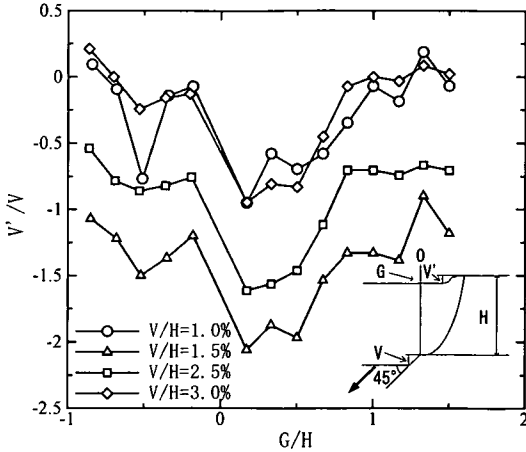


図-4 正断層 45° 型の地表面変位量 (H=300mm)

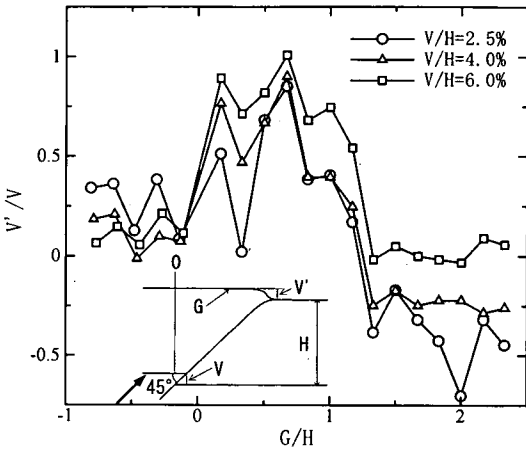


図-5 逆断層 45° 型の地表面変位量 (H=300mm)

盤の水平面に対して 30° 方向に伸張した地表面位置よりやや内側に到達している。

5. 地表面の変位量

(1) 正断層型

正断層 45° 型における H=300mm の断層変位量別の V'/V と G/H の関係を図-4 に示す。 V' は地表面高さであり、基盤の移動量がない $V=0$ (%) 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 $V=0$ (%) 時の固定・移動基盤境界線 (0 線) から V' までの水平距離とした。表-2 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。 G/H によらずせん断層が出現した断層変位量初期に V'/V が大きくなるが、その後断層変位量が大きくなるにつれて V'/V が小

表-2 地表面の変位量区分

$V'/V > 0$ ($V'/V = 1$)	地表面高さ上昇 (地表面高さが基盤の断層変位量と同じ)
$V'/V = 0$	地表面高さ変動なし
$V'/V < 0$	地表面高さ下降

さくなり、せん断層が地表面に到達すると V'/V がまた大きくなる。移動基盤側よりも固定基盤側の地表面位置の変動がより顕著になっている。これはアルミ棒積層体の変形が剛体モデルのように基盤の動きがそのまま地表に伝わるのではなく、ダイレイタンスにより基盤の動きが緩和されて地表に伝わったためと考えられる。

(2) 逆断層型

逆断層 45° 型、 $H=300$ mm の断層変位量別の V'/V と G/H の関係を図-5 に示す。移動基盤側の V'/V は断層変位量が増加するにしたがって減少するが、固定基盤側では増加する。さらに固定基盤側の V'/V は $G=1.25$ を境にして 0 線側が大きく、0 線から離れる側が小さい。これはせん断層が地表面に到達する $V/H=4.0$ (%) までは地盤の変形の局所化が進み、せん断層が地表面に到達した後、局所化された領域を含む地盤全体が変形したためと考えられる。一方、0 線から $G=1.25$ 以上離れた点では、 V'/V が初期に変動するものの、地盤の変形の局所化が見られない領域のため剛体的運動となり、 $V'/V=0$ になる。

6. せん断層の地表面到達時の位置と断層変位量

(1) 正断層型

せん断層が地表面に到達した時の W/H と V/H との関係を図-6 (a) ~ (d) に示す。正断層 30° 型の層厚 $H=50, 100, 200, 300, 400$ mm のせん断層は $V/H=1.5 \sim 3.5$ (%) で地表面に到達する。特に $H=200 \sim 400$ mm では、最初に地表面に到達するせん断層が $V/H=1.5 \sim 2.0$ (%) で、次に地表面に到達するせん断層は $V/H=3.0 \sim 3.5$ (%) で、層厚による違いが見られない。固定・移動基盤境界線を 0 とした W/H は $H=200 \sim 400$ mm で約 $0.6 \sim 0.7, -0.7 \sim -0.5$ で違いが見られない。 $H=50$ mm は移動基盤側のみ出現し、 $H=100$ mm は移動基盤側と固定基盤側 1 本ずつ出現するが $H=200 \sim 400$ mm と比較して 0 線からやや離れた位置に出現する。せん断層は層厚が薄くなると固定基盤側に対して共役方向に出現しなくなる。これはせん断層の発達に必要な粒子の個数が十分でなかったためと考え

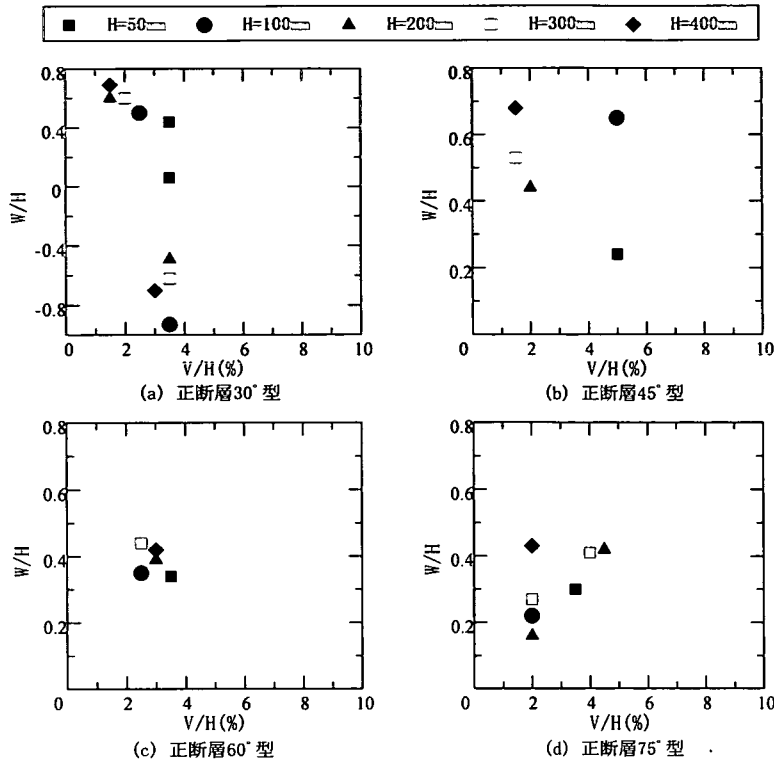


図-6 正断層型のせん断層が地表面に到達した時の位置と断層変位量

られる。

正断層 45° 型においては、せん断層が $H=200\sim 400\text{mm}$ で $V/H=1.5\sim 2.0(\%)$ で地表面に到達するが、 $H=50\sim 100\text{mm}$ では $V/H=5.0(\%)$ で遅く地表面に到達する。せん断層は W/H が約 $0.23\sim 0.68$ でせん断層が到達し、 $H=200\sim 400\text{mm}$ では約 $0.43\sim 0.68$ でせん断層が到達し、層厚の変化による顕著な違いが見られない。正断層 60° 型では、層厚の変化によらずせん断層が $V/H=2.5\sim 3.5(\%)$ で地表面に到達し、 W/H が約 0.40 である。正断層 75° 型では、1 本目のせん断層が $H=50\text{mm}$ を除いて $V/H=2.0(\%)$ で到達し、2 本目のせん断層は $V/H=4.0\sim 4.5(\%)$ で到達する。 W/H は約 $0.16\sim 0.43$ で層厚の変化による顕著な違いが見られない。せん断層が出現する本数はせん断層の発達に必要な粒子の個数とその領域に十分あるかどうかによって変化すると考えられる。

以上より、せん断層が地表面に到達した位置と断層変位量は正断層 75° 型を除いて、 $H=200\sim 400\text{mm}$ で寸法効果は見られなかった。

(2) 逆断層型

せん断層が地表面に到達した時の W/H と V/H との関係を図-7(a)～(e)に示す。逆断層 30° 型の層厚 $H=50, 100, 200, 300, 400\text{mm}$ のせん断層は $V/H=3.5$

$\sim 6.5(\%)$ で地表面に到達し、最初に到達するせん断層は層厚によらず $V/H=3.5\sim 5.0(\%)$ で地表面に到達する。 W/H は約 $0.95\sim 1.60$ でせん断層が 1～2 本到達するが、 $H=50\text{mm}$ と $H=100\sim 400\text{mm}$ で異なり、 $H=50\text{mm}$ が 0 点に近い位置に出現している。

逆断層 45° 型では、せん断層が $V/H=1.5\sim 5.5(\%)$ で地表面に到達するが、 $H=50, 100\text{mm}$ は早い段階で到達する。 W/H は $H=50, 100\text{mm}$ を除いて、約 $0.76\sim 1.21$ でせん断層が地表面に到達する。 V/H の違いは前述と同様に層厚が薄くなるとせん断層が発達しにくくなるといえる。逆断層 60° 型では、せん断層が $H=100\sim 400\text{mm}$ において $V/H=3.5\sim 6.0(\%)$ で地表面に到達するのに対し、 $H=50\text{mm}$ では $V/H=0.9(\%)$ で地表面に到達する。 W/H は約 $0.5\sim 0.95$ でせん断層が 2～3 本到達するが、 $H=50\text{mm}$ と $H=100\sim 400\text{mm}$ の変形形態は異なっている⁹⁾ことから、 V/H の違いが見られることと関連付けられる。また、 $H=50\text{mm}$ と $H=100\sim 400\text{mm}$ で V/H や W/H が異なる傾向を示したのは、層厚の違いによるせん断層の発達進捗が関係していることが考えられる。逆断層 75° 型では、せん断層が層厚の変化によらず $V/H=5.0\sim 6.0(\%)$ で地表面に到達する。 W/H は層厚の変化によらず約 $0.30\sim 0.68$ であるが、せん断層の本数が $H=200\sim 400\text{mm}$ では 3 本出現するのに対し、 $H=50\sim 100\text{mm}$

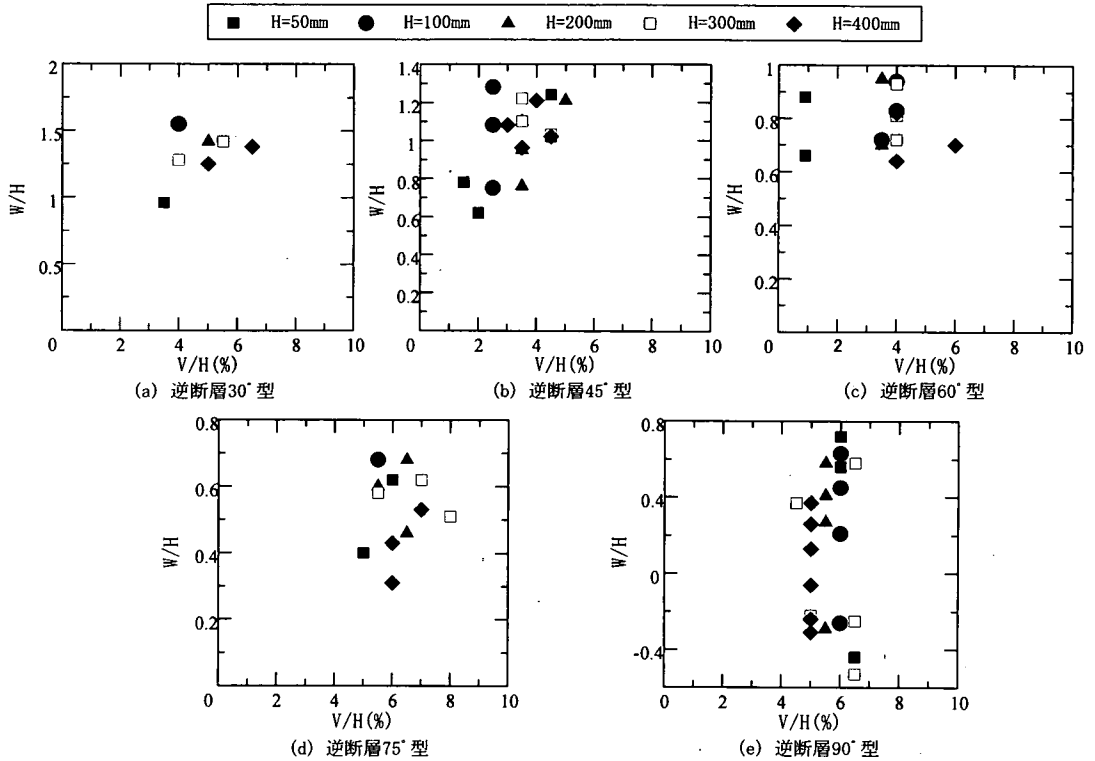


図-7 逆断層型のせん断層が地表面に到達した時の位置と断層変位量

は1, 2本しか出現しない。薄い層厚であるとせん断層が発達しにくくなるといえる。逆断層90°型では、せん断層が $V/H=4.5\sim 6.5(\%)$ で地表面に到達し、 W/H は固定基盤側で平均0.40、移動基盤側で平均-0.23となった。また、砂地盤モデル³⁾と比較してみると、砂地盤モデルの W/H は固定基盤側で平均0.35、移動基盤側で平均-0.12となり、アルミ棒積層体モデルより0に近い位置にせん断層が出現している。 V/H は砂地盤モデルの方がアルミ棒積層体モデルより早い段階でせん断層が地表面に到達する。これはアルミ棒積層体モデルと砂地盤モデルの粒子形状の違い、アルミ棒積層体モデルの初期地盤間隙比0.25と砂地盤モデルの初期地盤間隙比0.68の違いから、ダイレイタンスの差異が現れたものと考えられる。

以上より、せん断層が地表面に到達した位置と基盤の断層変位量は逆断層の傾斜により多少の違いはあるものの、 $H=200\sim 400\text{mm}$ で寸法効果は見られなかった。

7. 寸法効果を考慮した水平距離と基盤上の応力比

4. で見られたように、せん断層の発達と進展はアルミ棒積層体中の個々の初期粒子配置と基盤の断

層傾斜角に大きく左右される。基盤の断層変位量の増加に伴い、平均鉛直方向応力（以下、平均直応力とする）が変化するのは固定・移動基盤境界線（0線）付近であり、その地点からある距離を離れると応力の変化が見られない⁹⁾。本項ではせん断層が形成された初期の基盤上の応力分布について述べる。

(1) 正断層型

正断層30°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-8(a)に示す。縦軸は基盤上に作用する平均直応力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、固定・移動基盤境界線（0線）から平均直応力測定点までの水平距離（ L ）を層厚（ H ）で除している。図-8(a)では固定・移動基盤境界線（0線）を境にして、固定基盤側と移動基盤側で左右対称な応力分布を示している。固定基盤側で $L/H=-1.5$ 以下、移動基盤側で $L/H=1.5$ 以上離れた点では、顕著な応力比の変化が見られない。

正断層45°型では $H=50, 100\text{mm}$ のプロット点の中には他の傾向から外れている点がある（図-8(b)）。応力比は固定・移動基盤境界線（0線）に近くなるほど固定基盤側で大きくなり、移動基盤側で小さくなる分布を示し、正断層30°型の分布とは異なる。

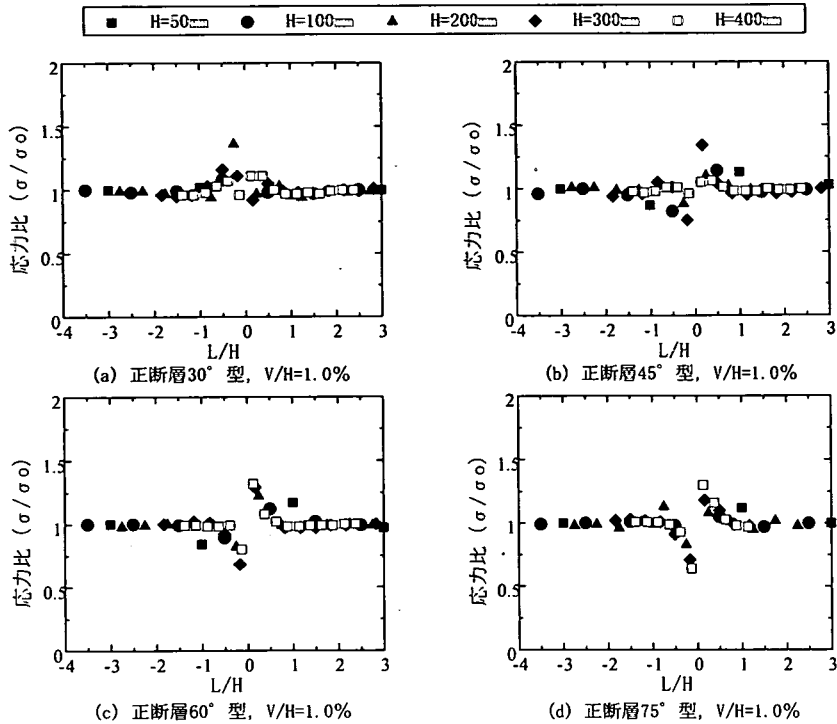


図-8 正断層型の寸法効果を考慮した水平距離と基盤上の応力比

固定基盤側で $L/H = -1.5$ 以下, 移動基盤側で $L/H = 1.5$ 以上離れた点では, 顕著な応力比の変化が見られない。

正断層 60° 型で $H = 50\text{mm}$, 正断層 75° 型では $H = 50, 100\text{mm}$ のプロット点の中には他の傾向から外れている (図-8(c), (d)). 応力比は固定・移動基盤境界線 (0 線) に近くなるほど固定基盤側で大きくなり, 移動基盤側で小さくなる. 固定基盤側で $L/H = -1.5$ 以下, 移動基盤側で $L/H = 1.5$ 以上離れた点では, 顕著な応力比の変化が見られない。

以上より, 正断層型が高角度になるほどほぼ同様な応力分布を示す. せん断層が発達して進展する方向の固定基盤側の応力比は圧縮領域になることが示唆された。

(2) 逆断層型

逆断層 30° 型の固定・移動基盤境界を 0 とした水平距離と基盤上の応力との関係を図-9(a) に示す. 図-9(a) では応力比は固定・移動基盤境界線 (0 線) に近くなるほど固定基盤側で小さくなり, 移動基盤側で大きくなる. 固定基盤側で $L/H = -1.5$ 以下, 移動基盤側で $L/H = 2.3$ 以上離れた点では, 顕著な応力比の変化が見られない。

逆断層 45° 型で $H = 50\text{mm}$, 逆断層 60° 型では $H = 50, 100\text{mm}$, 逆断層 75° 型では $H = 50, 100\text{mm}$, 逆断層 90°

型では $H = 50, 200\text{mm}$ のプロット点が他の傾向から外れているのが分かる (図-9(b) ~ (e)). 応力比は固定・移動基盤境界線 (0 線) に近くなるほど固定基盤側で小さくなり, 移動基盤側で大きくなる. 固定基盤側で $L/H = -1.5$ 以下, 移動基盤側で $L/H = 3.0$ 以上離れた点では, 顕著な応力比の変化が見られない. 7. (1) の正断層型と比較すると, 正断層 30° 型を除いて, 固定・移動基盤境界線 (0 線) を境に左右相反するような応力分布を示している. 固定・移動基盤境界線 (0 線) 近傍の最大, 最小の応力比の差は正断層型に比べて逆断層型の方が 50 (%) ほど大きいのが分かる。

以上より, 逆断層型が高角度になるほど応力比が変化する L/H の範囲は小さくなる. せん断層が発達して進展する方向の固定基盤側の応力比は 7. (1) で見られた正断層型の応力分布とは対照的に膨張領域になることが示唆された。

8. 結論

本論文では表層地盤が粒状体で構成されていると考えた. 粒状体材料としてアルミ棒を用い, 基盤の正・逆断層運動の模型実験を行った. その破壊伝播について定性的, 定量的な解析をすることができた。

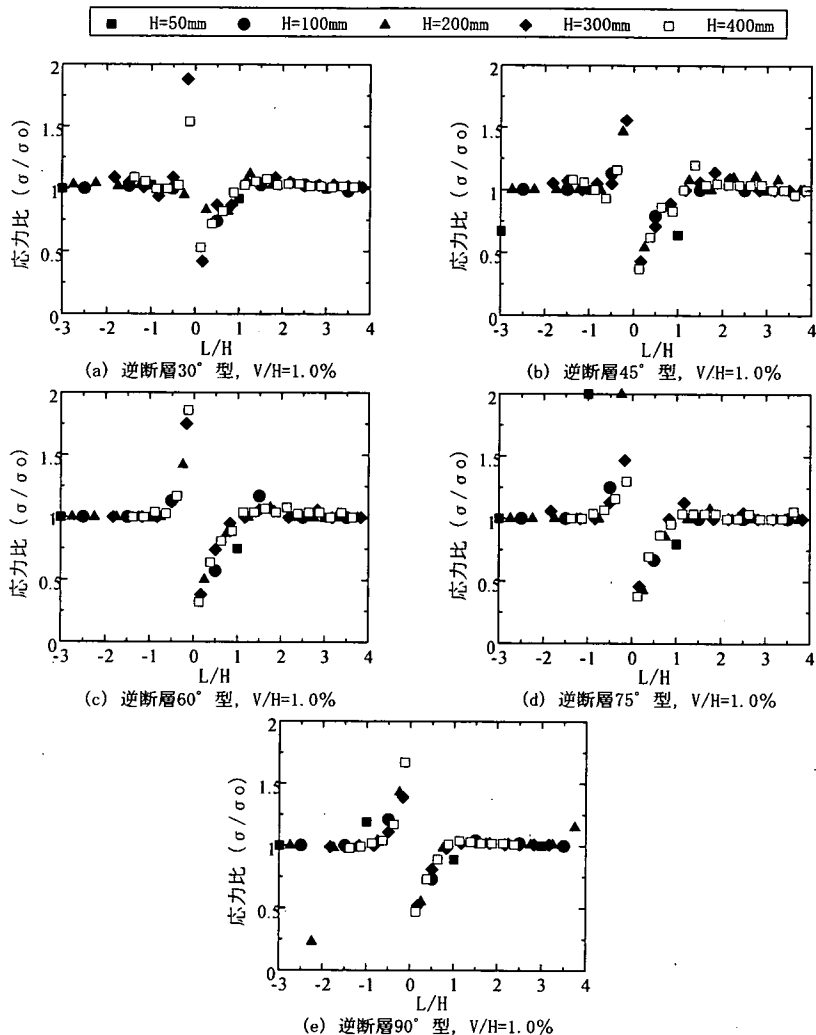


図-9 逆断層型の寸法効果を考慮した水平距離と基盤上の応力比

主要な結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 移動基盤の変位による地盤内の変位パターンに関しては、正、逆断層および傾斜に関係なく、せん断層が移動基盤先端から複数に分岐し、さらに進展したせん断層が分岐を繰り返しながら地表まで発達する。
- 2) 個々のせん断層の発達性状は、正断層型、逆断層型ともにその断層傾斜角の影響を受けて、せん断層の進展する方向や形状、本数が異なる。
- 3) 大局的にとらえた地盤の変形では、1つないしは2つのせん断層群が出現する。せん断層群は正断層30°、75°型を除いた他の正断層型で下方に凸の形状を示し、逆断層90°型を除いた他の逆断層型で上方に凸の形状を示す。

- 4) 地表面は、基盤の断層変位量の増加に伴い、逆断層45°型に比べて正断層45°型の方が大きく変動する。
- 5) せん断層が地表面に到達した位置と基盤の断層変位量は、正断層75°型を除いて、層厚200~400(mm)で寸法効果が見られない。基盤の断層傾斜角の変化による違いは正断層型に比べて逆断層型が大きい。
- 6) 寸法効果を考慮した水平距離と基盤上の直応力比は、正断層30°型を除いて、固定・移動基盤境界の0の縦軸を境に左右相反するような応力分布を示す。固定・移動基盤境界線(0線)近傍の最大、最小の応力比の差は正断層型に比べて逆断層型の方が50(%)ほど大きい。
- 7) 正断層型の寸法効果を考慮した水平距離と基盤上の応力比は、基盤の断層傾斜角が高角度

になるほどほぼ同様な応力分布を示す。

- 8) 逆断層型の寸法効果を考慮した水平距離と基盤上の応力比は、基盤の断層傾斜角が高角度になるほど応力比が変化する影響範囲は狭まる。

今後は本結果と対比するためにDEM解析を行って検討し、断層変位に対する表層地盤の影響について吟味をしたいと考えている。

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名誉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。木更津工業高等専門学校環境都市工学科技官の金井太一氏には実験および図面の作成をしていただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中田高：カリフォルニア州の活断層法「アリク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，Vol. 99，No. 3，pp. 289～298，1990。
- 2) 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。

- 3) 上田圭一：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)，pp. 31～32，1993。
- 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) Roth, W. H., Scott, R. F. and Austin, I.: Centrifuge modeling of fault propagation through alluvial soils, *Geophy. Res. Lett.*, 8, pp. 561～564, 1981。
- 6) 村山朔郎，松岡元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，(第 187 号)，pp. 95～96，1972。
- 7) 足立紀尚，田村武，木村亮，荒巻智：落とし戸実験における土圧分布，第 29 回地盤工学研究発表会，pp. 1989～1992，1994。
- 8) 鬼塚信弘，飯竹重夫，金井太一：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)，pp. 15～18，1997。
- 9) 鬼塚信弘，飯竹重夫，黒川章二，金井太一：逆断層模型実験の基盤上の応力に関する考察，木更津工業高等専門学校紀要 (第 32 号)，pp. 11～16，1999。

(2000. 8. 15 受付)

MODEL EXPERIMENT ON RUPTURE PROPAGATION OF SURFACE GROUNDS DUE TO DIP-SLIP FAULT MOVEMENTS OF BACEMENTS

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

Recent large earthquakes, such as Kocaeli in Turkey and Chi-Chi in Taiwan, produced earthquake surface fault, which damaged many near-by structures due to displacement. It is thus required to consider such damage due to faulting in design structures since faulting is not a subject of design codes. The objective of this paper is to qualitatively evaluate the influence of vertical fault movements, in order to clarify the faulting mechanism as a fundamental element for establishing design codes. A series of model experiments are being made for this purpose. Surface deposit in which a fault propagates is modeled as a set of aluminum rods. As well as deformation of rods are measured, stress acting on the base are measured. It is shown that a large moment works at the tip of the fault, which drives the fault propagation. It is also shown that depending on the fault type, the fault propagation changes and there is some common tendency for it. Although these results are for model experiments, they will serve as basic findings for faulting.