

基盤の逆断層変位に伴う地盤の変形と応力について

Deformation in Grounds and Bedrock Stress Induced by Reverse Dip-Slip Faults

鬼塚 信弘*・伯野 元彦**・岩下 和義***・鈴木 崇伸****

Nobuhiro ONIZUKA, Motohiko HAKUNO, 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(〒350-0815 埼玉県川越市鯨井 2100)

***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(〒350-0815 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. This is true, especially, in designing linear structures, such as roads, tunnels, and bridges. The purpose of this paper is to examine the deformation of model grounds, shear zones and bedrock stress, and to compare the position of shear zones reaching the ground surface in the model tests with the ones in the prototype. This paper presents the results of a series of laboratory model tests, in which the effects of the reverse dip-slip faults in the bedrock are measured through the aluminum rods 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, deformation of grounds, bedrock stress

1. はじめに

現在, 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的手法, トレンチなどの地質学的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的手法も取り入れた総合的な評価が必要となる。

Cole and Lade¹⁾は断層の発生に伴う基盤の変位が沖積層内に及ぼす断層形状について, 通常重力(1g [gは重力加速度を示す])における砂箱実験により基盤の断層傾斜角とダイレイタンシー角から地表の断層出現位置を特定できる式を提案している。Roth, Scott and Austin²⁾は通常重力(1g)の50倍(50g)

の遠心载荷模型実験により, 地盤の間隙比と断層変位速度を変化させたせん断層の発達構造の違いについて報告している。上田ら³⁾は1gにおける砂箱実験により, 正断層, 逆断層の基盤の傾斜角を変化させてせん断層の形状および地表到達位置について報告している。谷山ら⁴⁾は逆断層が砂質の堆積物で覆われている場合について, 45°傾斜角の1gの砂箱実験を行い, 基盤変位量, 砂地盤の変形量・破壊伝播の関係について報告している。

既往の研究では, 重要な構造物を対象とした地盤の影響評価をしているのが大部分である。そこで, 本研究はDEM解析と対比することを念頭において, 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も考察した。

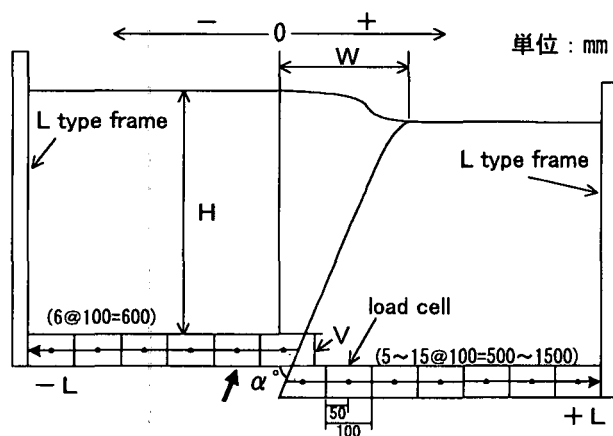


図-1 実験装置概略図

2. 実験装置

実験装置の概略図を図-1に示す。本装置は筆者らが用いてきたこれまでの装置⁵⁾よりも5倍のスケール実験(層厚500mmまで可)が行えることにより、断層変位に伴ってせん断層が地表に到達した位置などの寸法効果がより「詳細に」吟味できるようになった。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45°、60°、75°、90°になるように上方に移動することで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。ロードセルは逆断層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

実験ケースは表-1の通りで、層厚50、100、200、300、400mm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3.0mm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した結果⁶⁾などから得られており、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。また、小型の鉛直断層変位模型実験時に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により決定した⁵⁾。模擬地盤の初期間隙比は0.25である。内部摩擦角は高さ50mm×長さ200mm×奥行き50mmの摩擦

表-1 逆断層型(R)の実験ケース

基盤の断層 傾斜角(°)	層厚: H (mm)
45	50, 100, 200, 300, 400
60	
75	
90	

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⁵⁾。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10~25mm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。

4. 実験結果および考察

4.1 アルミ棒積層体のミクロ的変形構造

移動基盤の逆断層変位(90°、75°、60°、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スラインが緩やかに変形(撓曲)し、その後すべり面に明瞭なせん断すべり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)。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。そのようなことは逆断層の傾斜とは関係なく共通した現象である。

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盤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を発達させている。砂層モデル³⁾と比較すると、せん断層の発達形態は異なっている。1本1本のせん断層をミクロ的に捉えた変形構造は実験モデル材料の粒子形状や間隙比の違いによるものと考えられる。

一方、逆断層75°、60°、45°型では固定基盤側に発達し、せん断層の出現する本数は少なくなる。そして、逆断層90°型に比して1本1本のせん断層は近接している。

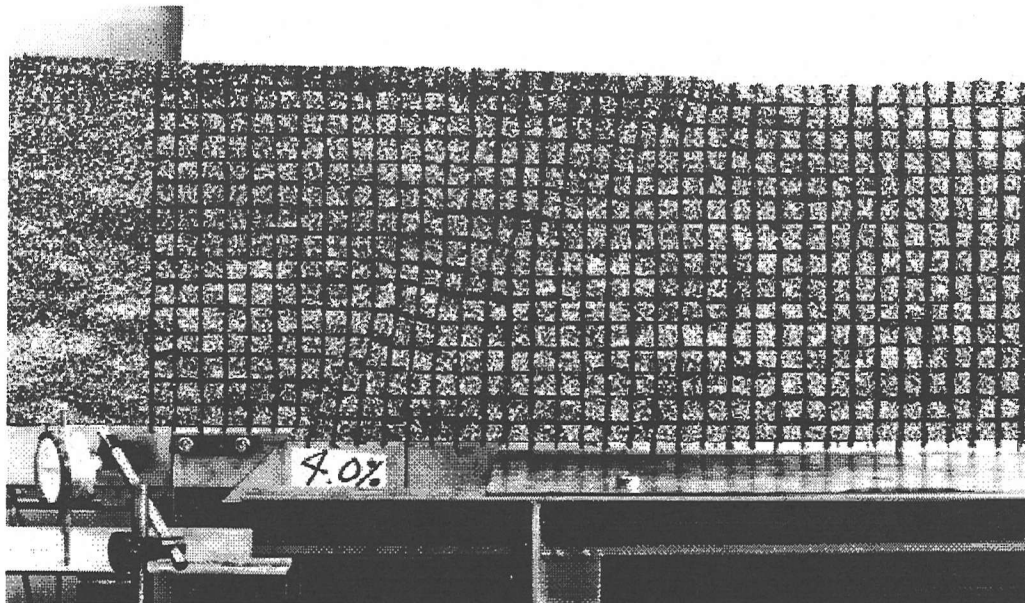


写真-1 アルミ棒地盤内の変形構造 (R45° , H=300mm, V=12mm)

4.2 アルミ棒積層体のマクロ的変形構造

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図-2にハッチで示した。

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。そのせん断層群はマクロ的な変形構造として位置付けて、砂層モデル⁸⁾でも同様に見られたので、粒子形状、間隙比に依存しないことがわかる。

逆断層 75° , 60° , 45° 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、その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。また、谷の解析モデル⁹⁾でも砂層の地盤表面の最大主応力は水平方向 (受働状態) であるといっている。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。

4.3 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 (a) ~ (d) に示す。逆断層 90° 型の層厚 50, 100, 200, 300, 400mm のせん断層は V/H=4.5~6.5 (%) 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 が固定基盤側で平均 0.40, 移動基盤側で平均 -0.23 となった。W/H と V/H とともに層厚の変化による顕著な寸法効果は見られなかった。また、砂層モデル³⁾と比較してみると 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。砂層モデルの方がアルミ棒積層体モデルより V/H がより小さい段階でせん断層が地盤表面に到達し、模擬地盤を構成している粒子形状や間隙比の違いが大きく依存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=5.0~6.0 (%) で地盤表面に到達する。W/H は層厚の変化によらず約 0.3~0.68 であるが、せん断層の本数が層厚 200~400mm では 3 本出現するのに対し、層厚 50~100mm では 1, 2 本しか出現しない。あまりにも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 60° 型ではせん断層が層厚 100~400mm において V/H=3.5~6.0 (%) で地盤表面に到達するのに対し、層厚 50mm では V/H=0.9 (%) で地盤表面に到達する。W/H は約 0.5~0.95 でせん断層が 2~3 本到達するが、層厚 50mm と層厚 100~400mm の変形構造は異なっている¹⁰⁾ことから、V/H の違いが見られることと関連づけられる。また、層厚 50mm と層厚 100~400mm 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とミクロ的に見たアルミ棒積層体の ϕ が関係していることが考えられる。

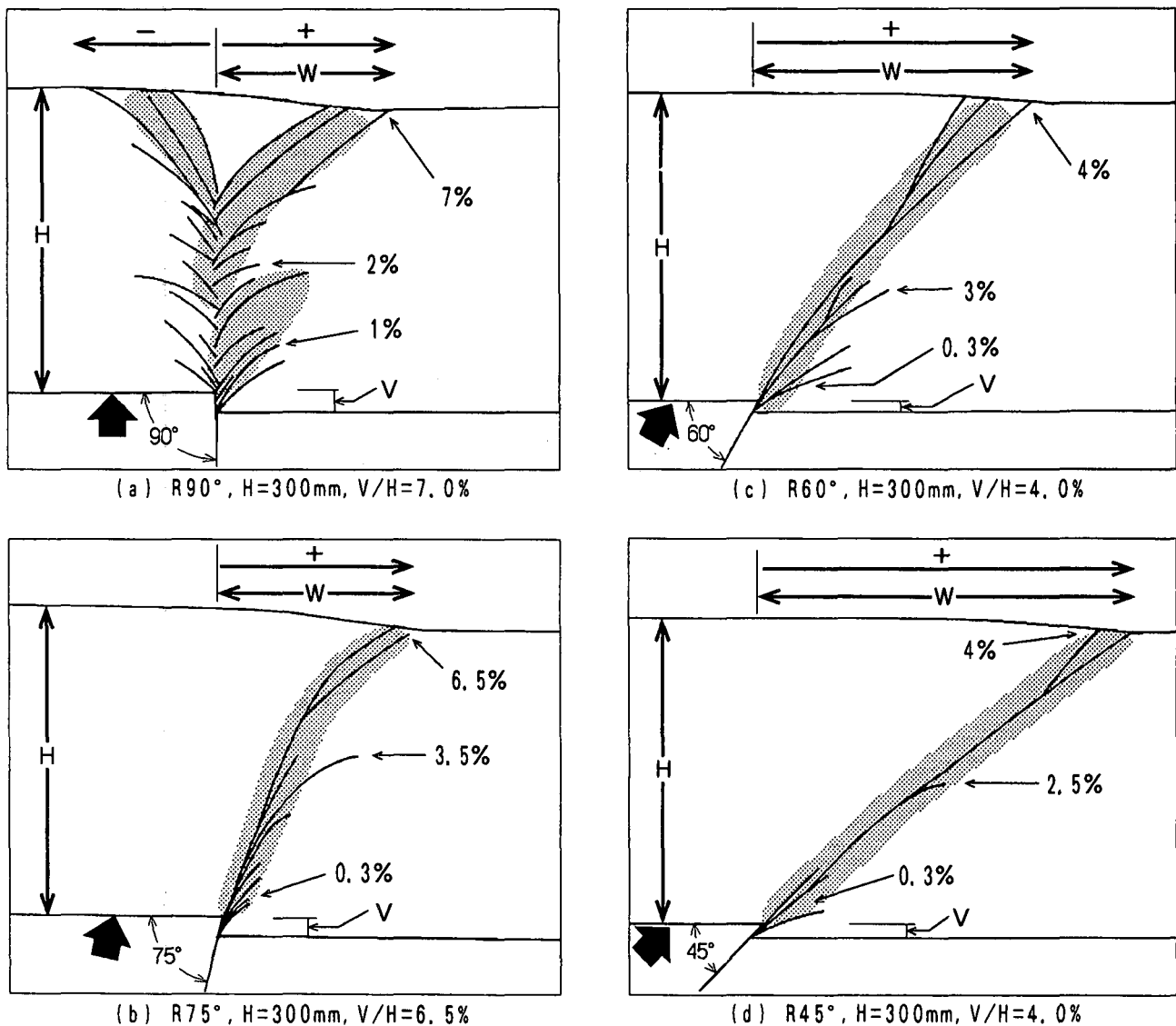


図-2 セン断層の形状 (地盤表面到達時)

逆断層 45° 型ではせん断層が $V/H=1.5\sim5.5(\%)$ で地盤表面に到達するが、層厚 50, 100mm は早い段階で到達する。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。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。

以上より、せん断層が地盤表面に到達した位置 (W/H) と断層変位量 (V/H) は逆断層の傾斜により多少の違いはあるものの、層厚 200~400mm で寸法効果は見られなかった。

4.4 セン断層の発達過程から見た基盤上に作用する応力と位置

図-2 (a)~(d) のように、せん断層は逆断層型により本数や発達形状が異なるが、移動基盤先端から地

盤表面に向けて発達する現象は逆断層型によらず共通である。そこで、せん断層の発達過程から V/H をせん断層形成初期時、形成中期時 (層厚高さ半分程度)、地盤表面到達時の 3 つに分類し、それぞれの基盤上の応力について述べる。

逆断層 90° 型の固定・移動基盤境界線 (固定基盤先端すなわち断層部) を 0 とした水平距離と基盤上の応力との関係を図-4 (a) に示す。縦軸は基盤上に作用する応力を初期応力で除しており、横軸は固定・移動基盤境界線から平均直応力測定点 (固定基盤側を +, 移動基盤側を -) の位置を記している。図-4 (a) では層厚 300 mm の $V/H=1.0, 2.0, 7.0(\%)$ 時に測定した結果をプロットし、近似線で結んでいる。固定・移動基盤境界線 (断層部) 付近の平均直応力点は断層変位量が増加にするにつれて、固定基

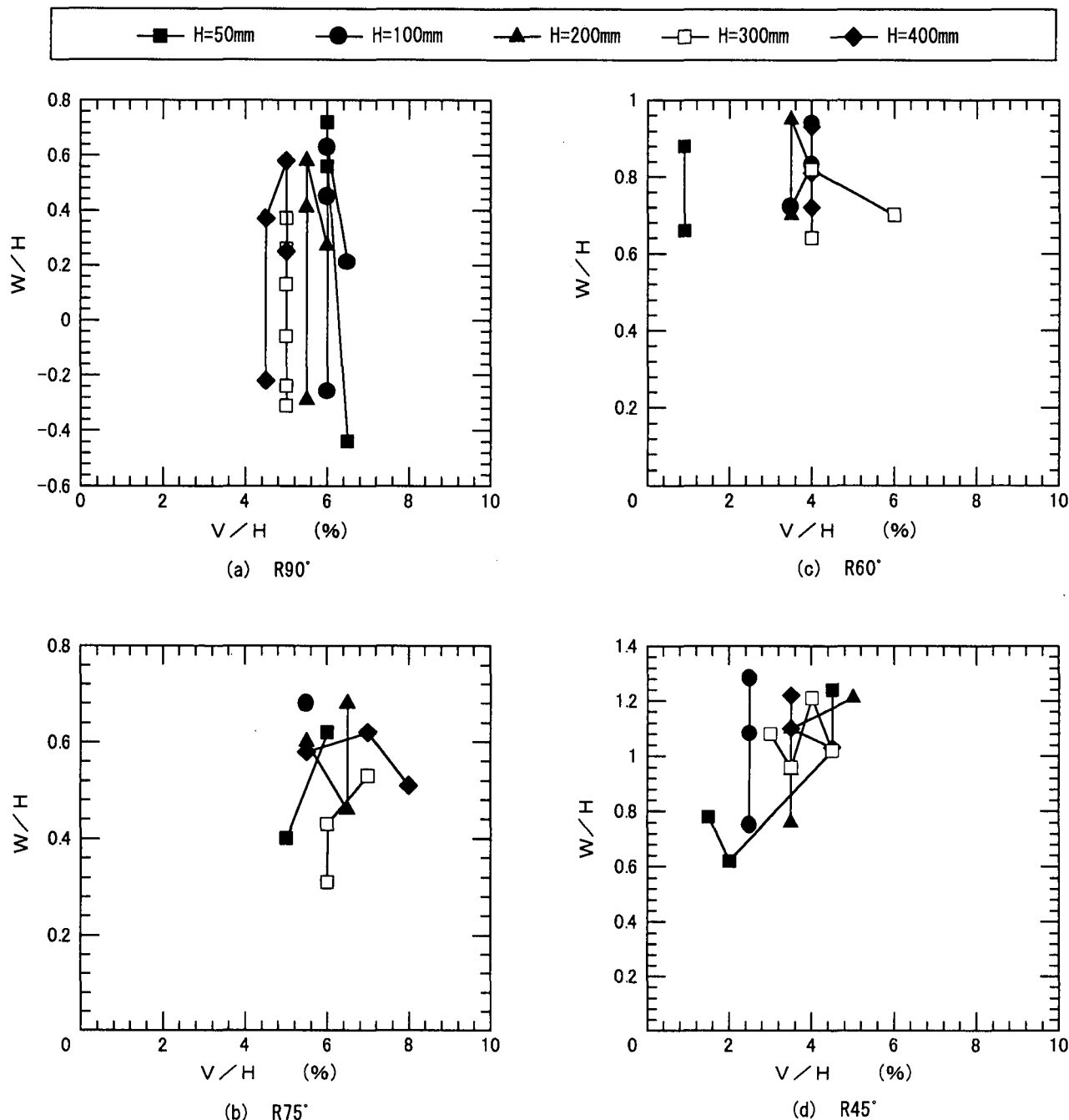


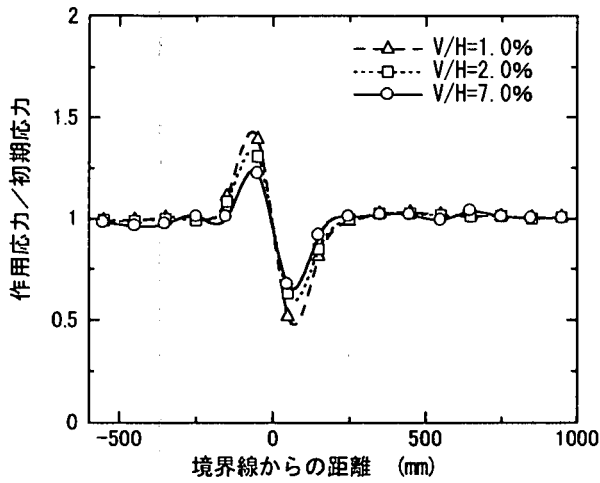
図-3 セン断層が地盤表面に到達した時の位置と断層変位量

盤側の測定点の応力比は最大値を示しながら徐々に減少し、逆に移動基盤側の測定点の応力比が最小値を示したあと徐々に増加する。固定・移動基盤境界線から離れた測定点では応力比が変化しない。

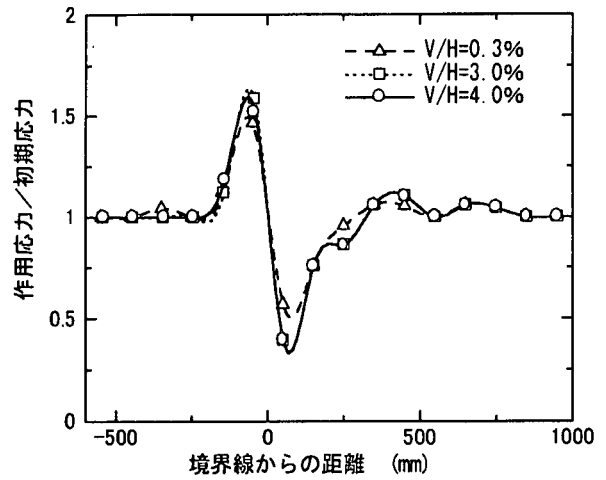
逆断層 75° 型では層厚 300 mm の $V/H=0.3, 3.5, 6.5(\%)$ 時に測定した結果をプロットし、近似線で結んでいる (図-4 (b))。固定・移動基盤境界線 (断層部) 付近の平均直応力点は断層変位量が増加につれて、固定基盤側の測定点の応力比は最大値を示しながら徐々に減少し、逆に移動基盤側の測定点の応力比が最小値を示したあと徐々に増加する。その応力比は逆断層 90° 型に比べて差が小さい。固

定・移動基盤境界線から離れた測定点や固定基盤側の応力比が大きくなる測定点では応力比があまり変化しない。ただし、移動基盤側の L 型フレームに近い測定点に多少の応力比の影響が見られるが、せん断層の発達形状と関連づけると応力比はほぼ 1 になると考えられ、移動基盤を変動させた時における誤差である。

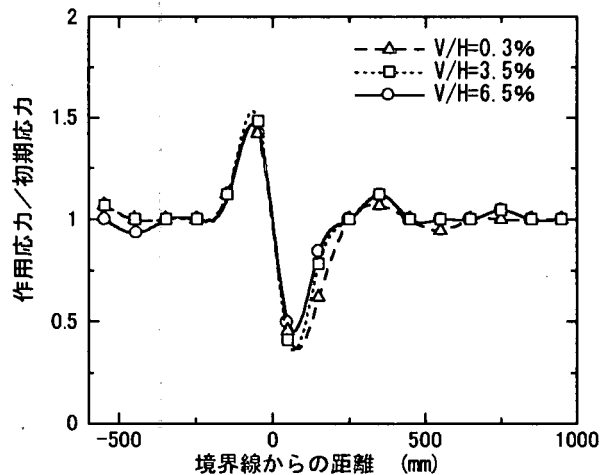
逆断層 60° 型では層厚 300 mm の $V/H=0.3, 3.0, 4.0(\%)$ 時に測定した結果をプロットし、近似線で結んでいる (図-4 (c))。逆断層 90° 型や 75° 型と同様に、固定・移動基盤境界線 (断層部) 付近の平均直応力点は断層変位量が増加につれて、固定



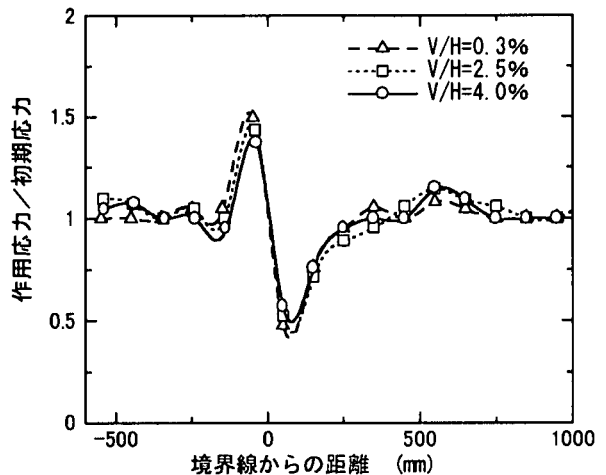
(a) R90°



(c) R60°



(b) R75°



(d) R45°

図-4 セン断層の発達過程における水平距離と基盤上の応力比 (H=300mm)

基盤側の測定点の応力比は最大値を示しながら徐々に減少し、逆に移動基盤側の測定点の応力比が最小値を示したあと徐々に増加する。固定・移動基盤境界線から離れた測定点や固定基盤側の応力比が大きくなる測定点では応力比があまり変化しない。

逆断層 45° 型では層厚 300 mm の $V/H=0.3, 2.5, 4.0$ (%) 時に測定した結果をプロットし、近似線で結んでいる (図-4 (d))。逆断層 90° 型や 75° 型、60° 型と同様に、固定・移動基盤境界線 (断層部) 付近の平均直応力点は断層変位量が増加にするとつれて、固定基盤側の測定点の応力比は最大値を示しながら徐々に減少し、逆に移動基盤側の測定点の応力比が最小値を示したあと徐々に増加する。固定・移動基盤境界線から離れた測定点や固定基盤側の応力比が大きくなる測定点では応力比があまり変化しない。ただし、移動基盤側の L 型フレームに近い測定点に多少の応力比の影響が見られるが、逆断層 75° 型で述べた理由によるものと考えられる。

以上より、せん断層の発達過程から断層変位量をせん断層形成初期時、形成中期時 (層厚高さ半分程度)、地盤表面到達時の 3 つに分類してそれぞれの基盤上の応力についてみると、固定・移動基盤境界線近傍の平均直応力点に顕著な応力比の変化が見られた。

4.5 寸法効果を考慮した基盤上に作用する応力と位置

4.4 で見られたように、せん断層が形成される初期に移動基盤端 (断層部) の応力比が最大値を、固定基盤端 (断層部) の応力比が最小値を示すことが分かった。本節では寸法効果を考慮した基盤端周辺の応力分布について、基盤の断層傾斜角別に比較検討した。

逆断層 90° 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-5 (a) に示す。縦軸は基盤上の応力比を初期応力で除しており、

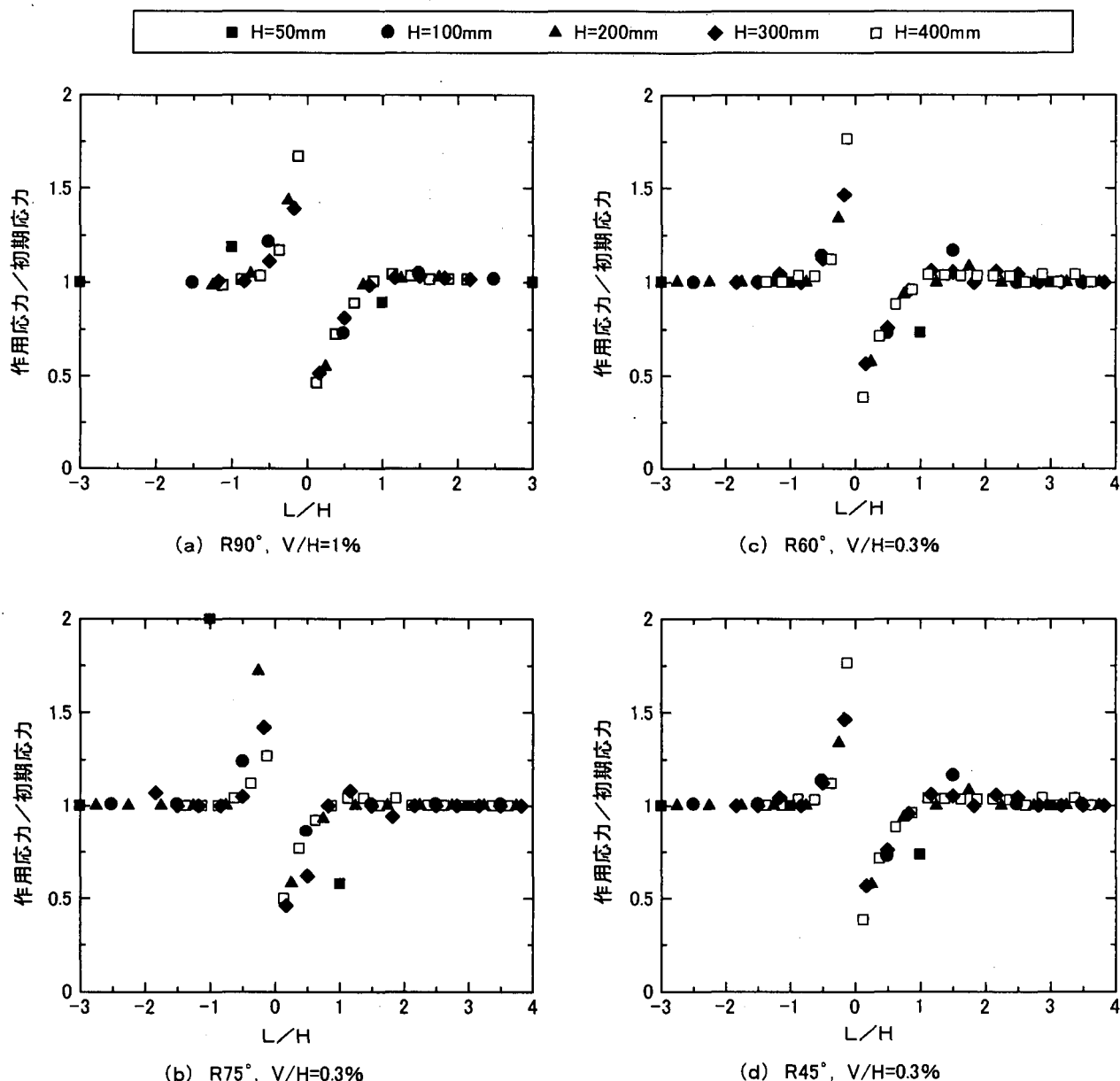


図-5 寸法効果を考慮した水平距離と基盤上の応力比

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)を層厚(H)で除している。図-5 (a)では層厚 50, 100, 200, 300, 400mm の結果がプロットされている。層厚 50mm 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 50mm 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 $L/H \approx 2.2$ 以上、移動基盤側で $L/H \approx -1.2$ 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 100~400mm で層厚の影響、すなわち寸法効果が見られない。

逆断層 75° 型では層厚 50mm と層厚 100mm のプロ

ット点がある傾向からはずれているのが分かる(図-5 (b))。層厚 50, 100mm の場合を除くと固定・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 $L/H \approx 2.4$ 以上、移動基盤側で $L/H \approx -1$ 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。

逆断層 60° 型では層厚 50mm と層厚 100mm のプロット点がある傾向からはずれているのが分かる(図-5 (c))。層厚 50, 100mm の場合を除くと固定・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。

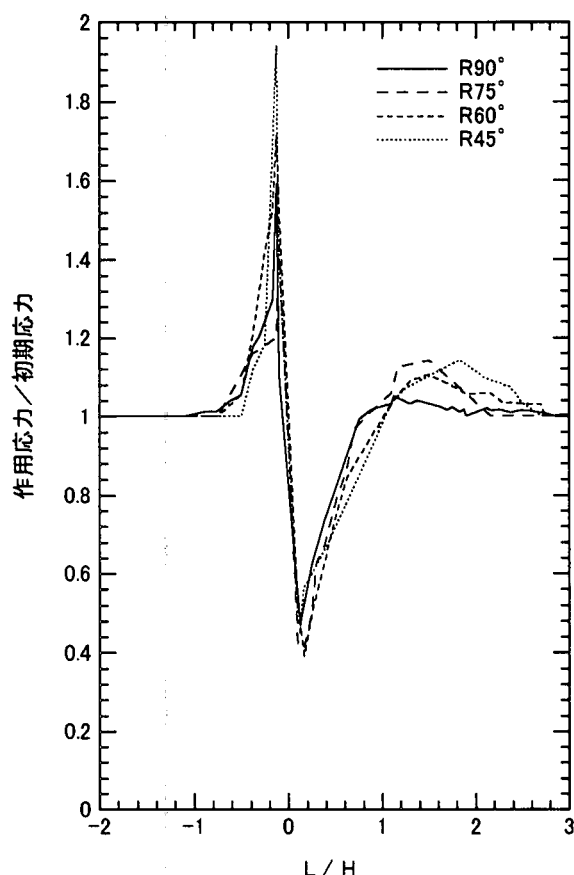


図-6 断層傾斜角別の基盤上の応力分布
($V/H=4.0\%$)

ただし、固定基盤側で $L/H \approx 2.6$ 以上、移動基盤側で $L/H \approx -0.8$ 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。

逆断層 45° 型では層厚 50mm のプロット点が他の傾向からはずれているのが分かる (図-5 (d))。層厚 50mm の場合を除くと固定・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 $L/H \approx 2.8$ 、移動基盤側で $L/H \approx -0.8$ 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。

以上より、基盤上の応力比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ことからせん断層の変形構造と密接な関係があることが示唆された。

4.6 断層傾斜角別の基盤上に作用する応力と位置

4.5のような L/H と応力比の関係は逆断層の傾斜がいずれの場合でも $V/H=4.0\%$ になるとほぼ同

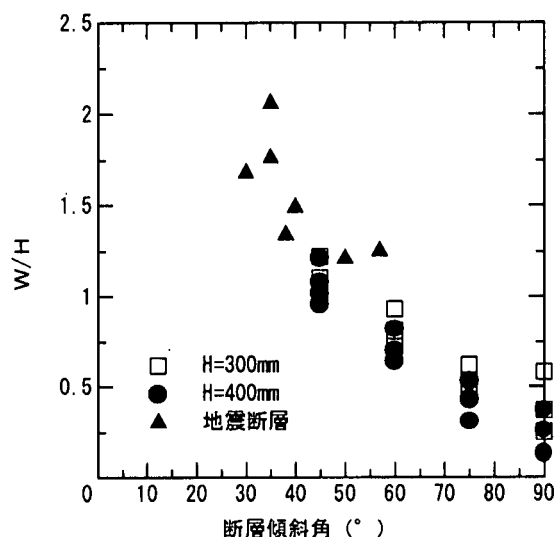


図-7 アルミ棒モデルと地震断層の地表到達位置

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折線を図-6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、逆断層 75° 型が 90° 型に比べて小さく、その 90° 型を除いた断層傾斜角が低角度になるほど大きな値を示す。これは図-2に示したようなマクロ的な変形構造の違いと関連づけられる。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リミ棒積層体の移動容量が相対的に大きいことがいえる。

5. 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¹¹⁾。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 $300, 400\text{mm}$ のアリ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図-7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

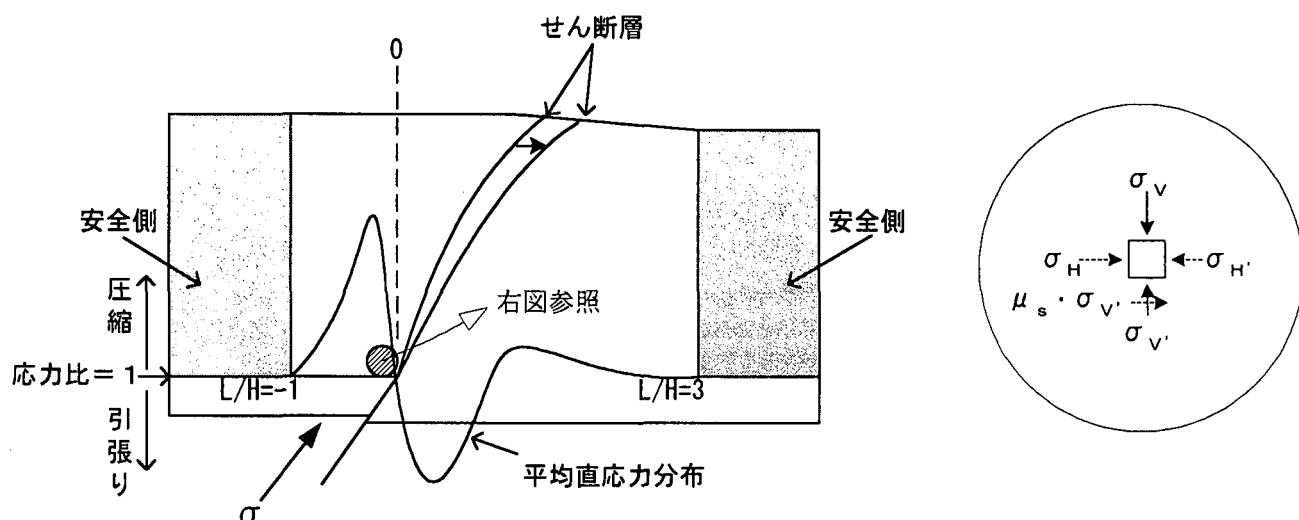


図-8 せん断層形成要因と構造物設計可能ゾーンの概念図

角が $30^\circ \sim 60^\circ$ 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べると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。

6. 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、4., 5. を踏まえた概念図(図-8)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¹²⁾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。図-8のように圧縮地盤におけるある一定領域の平均応力は、図-6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、 $\sigma_v > \sigma_v'$ 、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。図-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、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¹³⁾(中田¹⁴⁾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(150m以内)、明瞭な小断層から約200~300フィート(60~90m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、線状構造物の設計法には適さないと考えられる。

本研究の基盤の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100mの場合、主要な断層から相対的に上盤側で100m以上、下盤側で300m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(図-8)。約 $-1 \leq L/H \leq 3$ (例えば、表層地盤厚さ100mの場合、主要な断層から相対的に上盤側で100m以内、下盤側で300m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。

7. 結論

- (1) 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) 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) せん断層の発達過程から分類した断層傾斜角別の基盤上の応力は、固定・移動基盤境界線（断層部）付近の平均直応力点に顕著な応力比の変化が見られる。
- (4) 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。
- (5) 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。

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。今後は固定・移動基盤境界（断層部）付近や地表付近の地盤の変形、応力状態を推定するために、DEM解析などを行い、その設計法を確立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。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図面の作成をしていただいた。（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。関係各位に深謝する次第である。

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) 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.
- 3) 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.
- 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, 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.
- 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, 上田圭一, 谷和夫, 田中芳則: 室内鉛直断層模型実験で観察された寸法効果に関する考察, 木更津工業高等専門学校紀要 (第 28 号), pp. 59~64, 1995.
- 9) 谷和夫: 基盤の断層変位に伴う砂層内の不連続面の形状と位置 (第 3 報), 第 30 回地盤工学研究発表会, pp. 1247~1250, 1995.
- 10) 鬼塚信弘, 飯竹重夫, 田中芳則, 金井太一: アルミ棒の逆断層模型実験で見られた応力と変形に関する考察, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp. 1297~1298, 1998.
- 11) 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.
- 12) 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, 投稿中, 1999.
- 13) Hart, E. W.: 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, pp. 31, 1992.
- 14) 中田高: 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, Vol. 99, No. 3, pp. 289~298, 1990.
- 15) 脇坂安彦: 活断層の調査法と調査結果の反映, 「地質・地盤と地震防災」講習会, 日本応用地質学会, pp. 1~14, 1997.
- 16) 龍岡文夫: 土の強さと地盤の破壊入門 (入門シリーズ 13), 地盤工学会, pp. 103~110, 1987.
- 17) 谷和夫, 上田圭一: 地質工学における地盤の破壊・変形の局所化, 地盤の破壊とひずみの局所化, 地盤工学会, pp. 77~87, 1994.
- 18) 鬼塚信弘, 飯竹重夫, 黒川章二, 金井太一: 基盤の鉛直断層変位に伴うアルミ棒積層体模型実験, 木更津工業高等専門学校紀要 (第 31 号), pp. 7~10, 1998.
- 19) 鬼塚信弘, 飯竹重夫, 田中芳則, 宮内崇裕, 金井太一: アルミ棒を用いた模型実験による断層破壊挙動について, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp. 619~624, 1998.
- 20) 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.

(1999 年 4 月 23 日受付)