

逆断層運動の模型実験における地盤変動の定量的解析

Quantitative Analysis of Ground Movement on Model Experiment of Reverse Faulting

鬼塚 信弘*・堀 宗朗**・佐藤 恒明***・金井 太一****

Nobuhiro ONIZUKA, Muneo HORI, Tuneaki SATOH and Taichi KANAI

*正会員 博(工), 木更津工業高等専門学校講師, 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, 木更津工業高等専門学校助教授, 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 木更津工業高等専門学校技官, 環境都市工学科(〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

Recent earthquakes, such as Kocaeli in Turkey and Chi-Chi in Taiwan, produced earthquake surface fault, which damaged many near-by structures due to dynamic displacement. The objective of this paper is to quantitatively evaluate the influence of reverse fault movements, in order to clarify the faulting mechanism as a fundamental element for constructing construction structures. A series of model experiments using image processing system 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 aluminum rods are measured, normal and shear stresses acting on the basement 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.

Key Words: reverse faulting, model experiment, ground movement, image processing system

1. はじめに

1999 年の台湾集集(チーチー)地震, トルコ・コジャエリ地震では, 地表に出現した地震断層の真上にあつた多くの構造物が, 断層の食い違い変位により甚大な被害を受けた。近年になって, ここ日本でも数多くの地震が発生しており, 将来, 断層が地表に出現する可能性が十分ある¹⁾。特に, 大都市部では高層ビルや地下街などの建築構造物を多く有し, 地表地震断層の食い違い変位による被害を最小限にするためには, 表層地盤における断層の食い違い変位の挙動について詳細な評価をすることが重要になる。

現在, 日本における地震断層の食い違い変位に対する構造物設計は, 原子力発電所やダムに限られており, これらの構造物は推定される活断層の位置をはずし, 固い岩盤上に建設されている。ところが, 軟らかい表層地盤の場合, 基盤の断層食い違い変位がそのまま真っ直ぐ地表に現れるのではなく, 途中で曲がり分岐し何本もの食い違いとなって現れて, 地表まで到達せずに途中で止まってしまう場合もあることなどが分ってきた^{2), 3)}。

本研究は, 表層地盤を粒状体地盤と仮定し, 地盤の変形や破壊現象を解明する上で重要な粒状体の個々の挙動を追跡するために, 高解像度デジタルカメラ(高解像度カメラ)を使用し, 最適な画像計測システムを構築した。本論

文は, 基盤に動的変位を与えた逆断層運動に伴う地盤の変動状況をアルミ棒状材料の模型実験により基盤上の応力と地盤の変形について定量的に解析する。

2. 実験装置および画像計測システム

実験装置および画像計測システムの概略図を図-1 に, 本論文で用いる記号を図-2 に, 基盤上に作用する応力方向の定義を図-3 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。アルミ棒地盤を支えるため, 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。アルミブロックとロードセルが一体化した部品から構成する基盤は移動可能な上盤と固定した下盤に分けられる。上盤を水平より 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ことが可能で, 各々の実験を逆断層 30° , 45° , 60° , 75° , 90° 型とする。ロードセルは平均鉛直方向応力(平均鉛直応力)が測定できる1方向型ロードセルと平均鉛直方向応力(平均鉛直応力)と平均せん断方向応力(平均せん断応力)が測定できる2方向型ロードセルの2種類を用いている。いずれも基盤に動的変位を与えた時の模擬地盤の応力が測定できる。ロードセルの数は逆断層型によらず上盤側

に6個、下盤側に15個を配置し、そのうち2方向型ロードセルは実験開始時における基盤の上盤ずれ先端を基準として上盤側に5個、下盤側に7個を配置した。なお、ロードセル番号は実験装置前面の上盤左端から下盤右端に向かって順に付けた。

既往の模型実験²⁾では鉛直方向に対する断層変位速度を1 (mm/min) で上昇させてV/H=0.5 (%)毎に静止し、応力測定や写真撮影、スケッチ、メモを取るなどを行っていた。静止中に、せん断層の発達に伴って圧縮・膨張した領域にアルミ棒の自重がかかるため、再スタートさせることによって、せん断層の発達形状や基盤上に作用する応力について影響が出てくることが考えられた。しかし、模型実験で見られたせん断層を解明するための当時の画像処理機器は充実していなかったため、撮影機器をモノクロで鮮明な画質が得られる光学系のカメラに依存せざるをえなかった。また、実際の地表地震断層はほとんどが動的変位のため、既往の模型実験のように基盤に静的変位を与えた実験からせん断層を解明できるかどうかの妥当性が問われていた。そのため、本研究では基盤に動的変位を与えることにし、地盤変動やせん断層を解明するための最適な画像計測システムを構築することにした。

近年におけるデジタルカメラなどの画像計測機器の機能向上には目覚ましいものがあり、同時にその画像を解析するためのアプリケーションソフトも充実してきた。本研究の目的の1つはせん断層の解明であるため、市販の汎用デジタルカメラやデジタルビデオを用いるのではなく、縦横に画像ひずみの影響が出ないような特殊レンズを取り付けて、画像を非圧縮の状態でパソコンに取り込むことができる高解像度カメラを用いた。パソコンは高解像度カメラから高速および大容量のデータがメモリに記録されるため、2GBのメモリと120GBのハードディスクを搭載したマシンである。画像計測ソフトは模型実験の状況をライブで見られる画像入力ソフトとハードディスクに記録したデータの画像処理を行うことができる動画解析ソフトの2種類を用いた。

3. 実験方法

実験ケースを表-1に示す。逆断層型の実験は全て層厚H=300 (mm)の模擬地盤を作製した。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3.0 (mm)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⁴⁾であり、支持力や落とし戸実験⁵⁾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⁶⁾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。アルミ棒地盤の内部摩擦角は高さ50 (mm)×長さ200 (mm)×奥

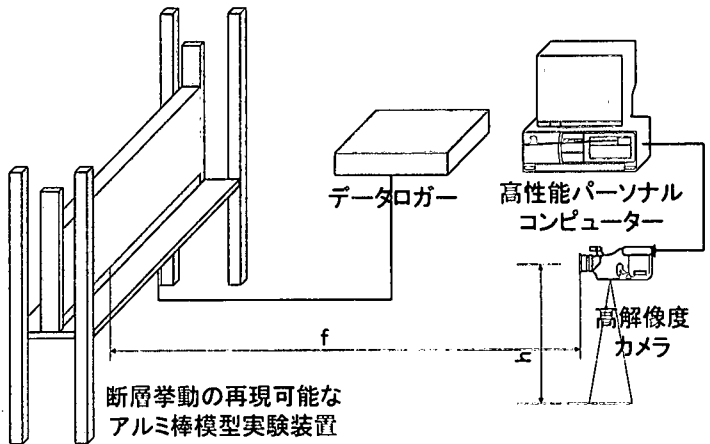


図-1 実験装置および画像計測システム概略図

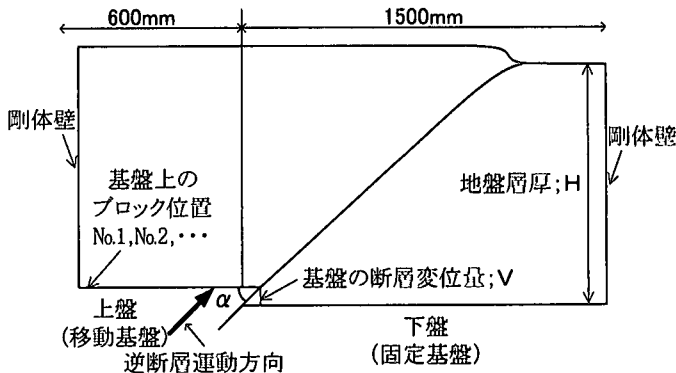


図-2 本論文で用いる記号

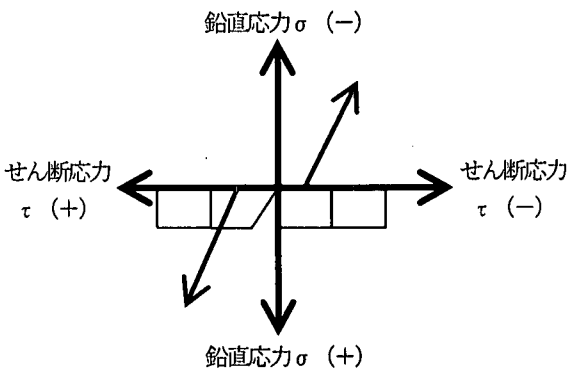


図-3 基盤上の応力方向の定義

表-1 逆断層型の実験ケース

逆断層型	マーキング 間隔 (mm)	カメラ位置 (mm)		撮影幅 (mm)
		焦点距離:f	高さ:h	
30°	20	2540	1100	900
45°	20	2540	1100	900
60°	10	1605	1010	550
75°	10	1100	1055	470
90°	10	1075	1050	380

行き 50 (mm) 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⁶⁾。

本実験の画像計測・解析過程は以下の通りである。

- ①任意の層厚および角度から定めた重量のアルミ棒を実験装置に配置し、基盤のずれ先端の角度に沿って断層変位を上方に変位させる。
- ②断層変位の開始と同時に高解像度カメラで撮影した画像を画像入力ソフトにより動画 (1 秒間に 1 枚撮影した連続静止画像) としてコンピューターに取り込む。
- ③取り込んだ動画を微小範囲の変化が捉えられる動画解析ソフトを用いて任意の測定点を追跡し、測定点の変位量や速度の値を得る。ただし、本研究で使った動画解析ソフトは、測定する範囲の光度が低いと追跡できないことがある。
- ④動画解析ソフトより得られた結果を解析する。

本実験の画像計測をするにあたって、撮影時の照明は自然光を用いて測定点のアルミ棒を明確にした。動画解析ソフトでの追跡を円滑にするために、3 (mm) のアルミ棒前面の測定点には 10~20 (mm) のマス間隔に蛍光塗料を塗り、その他のアルミ棒前面には黒く塗って解析の精度を上げる工夫をした。高解像度カメラの位置は被写体を撮影可能範囲になるように、実験ケースによってカメラ高さやカメラから被写体までの焦点距離を変えた (表-1)。基盤の断層変位は動的に変位させた時の画像計測と $V/H=1.0$ (%) ごとにデータロガーで各点の平均鉛直応力および平均せん断応力が測定できる 0.075 (mm/sec) の断層変位速度 (鉛直方向) で上昇させ、 $V/H=10$ (%) で実験を終了した。

4. 基盤上の応力

粒状体の地盤は最大せん断応力 (τ) と最大垂直応力 (σ) の主応力比、 τ/σ の作用面で破壊すると言われている⁷⁾。特に本研究で用いたアルミ棒状材料は、上下方向に圧縮して地盤が破壊する可能性があるため、基盤上に作用する平均せん断応力と平均鉛直応力を τ/σ に着目して解析することにした。

逆断層 30° 型の基盤上の主応力比 (τ/σ) と基盤の断層変位量 (V/H) との関係を図-4(a) に示す。既往の研究²⁾ から、平均鉛直応力が基盤の断層変位量の増加に伴って変動するのは上盤・下盤のずれ先端付近であり、その地点からある距離を離れると応力変動しないことが分かっている²⁾。ここでは上盤・下盤ずれ先端付近の上盤側 1 地点 (No. 5) と下盤側 2 地点 (No. 6, No. 7) のデータをプロットする。

図-4(a) を見ると、 τ/σ は実験開始時の No. 5 と No. 7 の 0 付近で変動しないが、No. 6 は変動し約 10.5 になっている。その後、基盤の断層変位量の増加に伴って No. 6 は変動するものの、No. 5 と同様に τ/σ が 0 になり、No. 7 はそれよりも小さくなる。逆断層 45° 型では基盤の断層変位量の増加に伴って No. 7 の τ/σ が変動するものの、No. 5 と No. 6 はほとんど変動せず 0 となっている (図-4(b))。

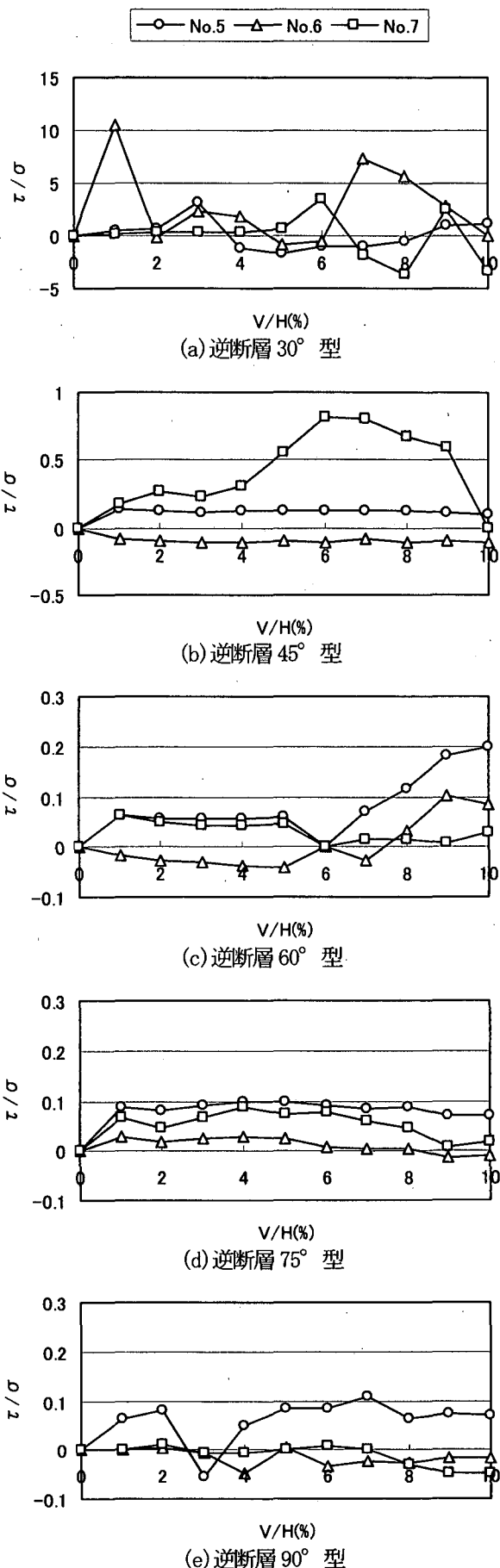


図-4 基盤上の主応力比と基盤の断層変位量

逆断層 60° 型では実験開始時に No. 5, No. 6, No. 7 の τ/σ は変動しないものの、基盤の断層変位量の増加に伴って τ/σ は 0.2 になる (図-4(c))。逆断層 75° 型, 90° 型では No. 5, No. 6, No. 7 の τ/σ は 0 付近でほとんど変動しない (図-4(d), (e))。

以上より、逆断層の傾斜が低角度になるほど τ/σ は大きくなり、高角度になるほど τ/σ は 0 になってほとんど変動しない。これは σ が圧縮あるいは膨張の値を示したが、 τ が 0 に近い場合、せん断方向にロードセルが動いていないことを示している。

5. 地盤の変形

本項は 3. で述べたように動画解析ソフトにより連続静止画像を作成した方法から解析する。逆断層変位 (30°, 45°, 60°, 75°, 90° の上昇方向) が増加すると、アルミ棒前面の粒子は移動し、すべり面に明瞭なせん断すべりが生じて上盤のずれ先端よりせん断層が形成される。1 本のせん断層が上盤先端から地表面へ連続的に発達するのではなく、最初に上盤のずれ先端から数本のせん断層が出現する。このうち地表面に向かって進展するせん断層から新たなせん断層が出現し、地表面に到達する。ただし、逆断層 90° 型では上盤側にもせん断層が出現する。このように、せん断層が分岐する現象は逆断層の傾斜に関係なく見られ、基盤を静的変位させた模型実験²⁾でも同様に見られたことから、せん断層の分岐現象は基盤の静的・動的の変位の違いによらず見られる。

上述のようなせん断層を境にして、上盤側、下盤側の粒子の動きを追跡するために、粒子の測定範囲を層厚上部から A, B, C, D, E に区分し、上盤側左端から順に番号を付けた粒子の軌跡を表示した (写真-1(a)~(e))。逆断層の傾斜に関係なく、上盤側の粒子は右斜め上方に動き、下盤側の粒子はほとんど動かない。上盤側の粒子の移動量は地表に近づく A の領域になるほど粒子の移動量が小さくなる。これは基盤の断層変位がそのまま地表に伝わるのではなく、アルミ棒地盤内で分散していることを示している。

さらに、粒子の動きを詳細に解析するために、逆断層 30° 型における測定範囲別の粒子の速度分布を図-5(a)~(e)に示す。縦軸は粒子の速度ベクトルのその方向成分 (粒子の移動速度) で、横軸は層厚に対する基盤の断層変位量 (V/H (%)) である。速度が 0 に近い場合には粒子が動いていないことを意味する。粒子の移動速度は基盤の断層変位量が増加するにしたがって大きくなり、その後一定の速度を保っている。各領域の粒子 1, 2 は粒子 3, 4, 5 に比して 0.1 (mm/sec) ほど大きい。逆断層 45° 型の粒子の移動速度は各領域の粒子 4, 5 に比して粒子 1, 2, 3 の方が 0.1 (mm/sec) ほど大きい (図-6(a)

~(e))。逆断層 60° 型, 75° 型の粒子の移動速度は、基盤の断層変位量が増加するにしたがって粒子 1, 2, 3 が一定になるのに対し、粒子 4, 5 は 0 に近づく (図-7(a)~(e), 図-8(a)~(e))。逆断層 90° 型では地表面に近い領域 A, B において、基盤の断層変位量が増加するにしたがって粒子の移動速度は変動するが、基盤に近い層厚の領域ほど粒子の移動速度は一定になっている (図-9(a)~(e))。粒子の移動速度は逆断層の傾斜および層厚の領域によらず、2 つの速度分布に区分できる傾向を示した。上盤側に近い 1 つの速度分布において、粒子の移動速度は逆断層型が低角度になるほど基盤の断層変位速度より大きくなる。

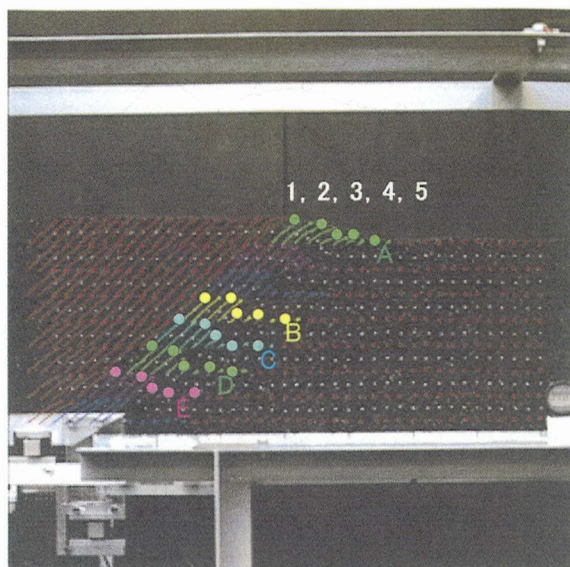
6. 結論

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。基盤に動的変位を与えた時の逆断層運動に伴う地盤の変動を明らかにするために、アルミ棒状材料を用いた模型実験を行った。その結果、基盤上の応力と高解像度デジタルカメラを導入した画像計測システムによる地盤の変形について、定量的に解析することができた。主要な結果をまとめると、以下のようになる。

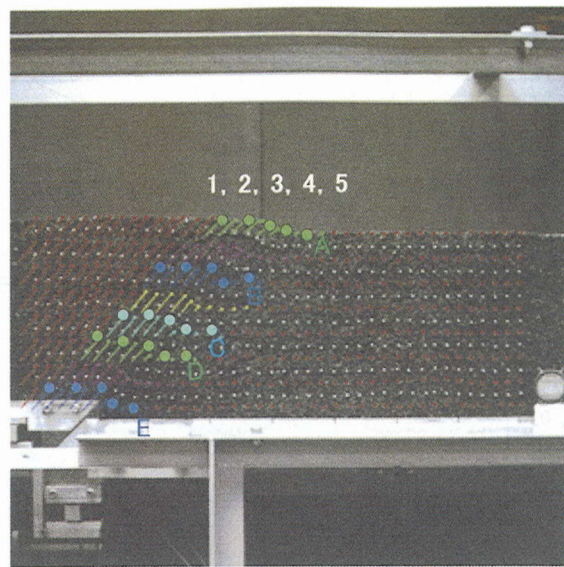
- 1) 基盤上の主応力比 (τ/σ) と基盤の断層変位量 (V/H) は、逆断層の傾斜が低角度になるほど τ/σ は大きくなり、高角度になるほど τ/σ は 0 になってほとんど変動しない。
- 2) 逆断層 30°, 45°, 60°, 75° 型のせん断層は上盤のずれ先端付近から下盤側方向に向かって発達する。せん断層は基盤の上昇角度に対してそのまま真っ直ぐ地表に現れるのではなく、上方に向かって途中で曲がり分岐し、このうち地表面に向かって進展するせん断層が地表に到達する。逆断層 90° 型では上盤側にもせん断層が出現する。
- 3) せん断層の分岐現象は基盤の静的・動的の変位の違いによらず見られる。
- 4) せん断層が出現した周辺領域における粒子の動きは逆断層の傾斜に関係なく、上盤側の粒子は右斜め上方に動き、下盤側の粒子はほとんど動かない。上盤側の粒子の移動量は地表に近づく領域になるほど粒子の移動量が小さくなる。
- 5) 粒子の移動速度は逆断層の傾斜およびせん断層が出現した周辺領域によらず、2 つの速度分布に区分できる。上盤側に近い 1 つの速度分布において、粒子の移動速度は逆断層の傾斜が低角度になるほど基盤の断層変位速度より大きくなる。

謝辞

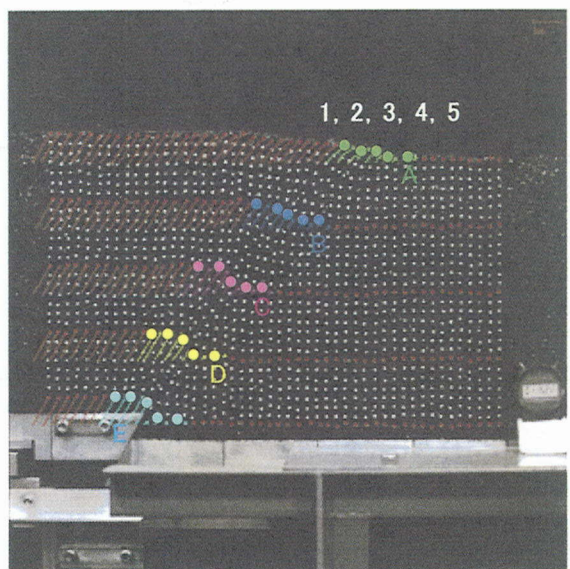
本研究を遂行するにあたって、平成 14 年度の本校卒業生の木戸正太氏、中花洋介氏、石川貴朗氏の一部データの作成を手伝っていただいた。関係各位に深謝致します。



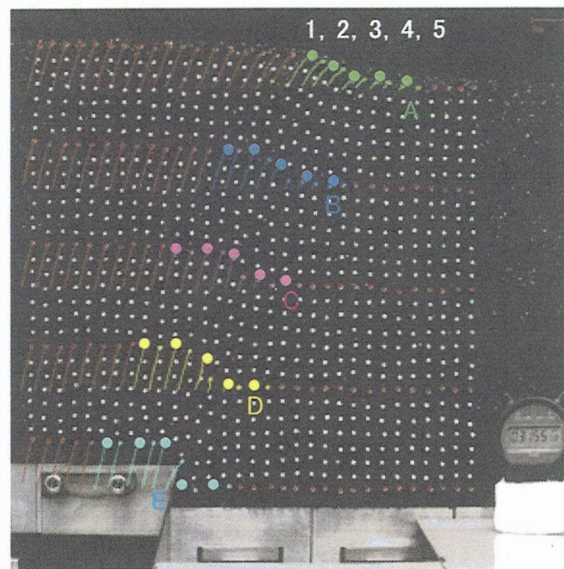
(a) 逆断層 30° 型



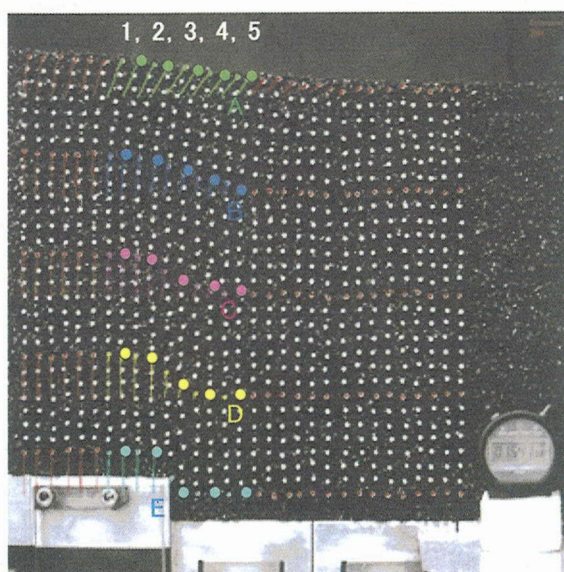
(b) 逆断層 45° 型



(c) 逆断層 60° 型



(d) 逆断層 75° 型



(e) 逆断層 90° 型

写真-1 アルミ棒前面の粒子の軌跡と測定範囲区分

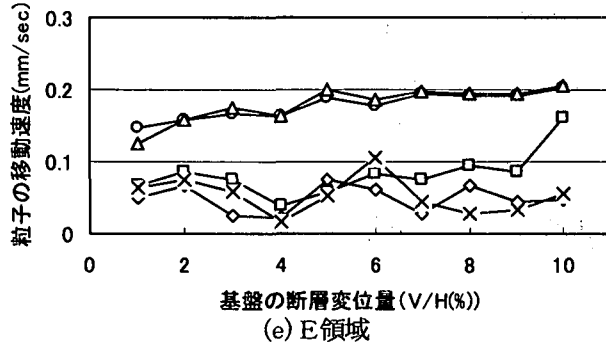
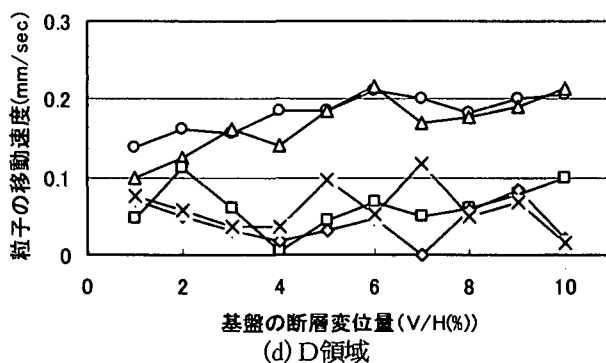
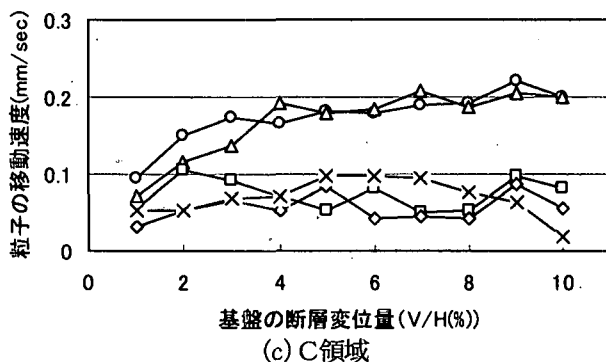
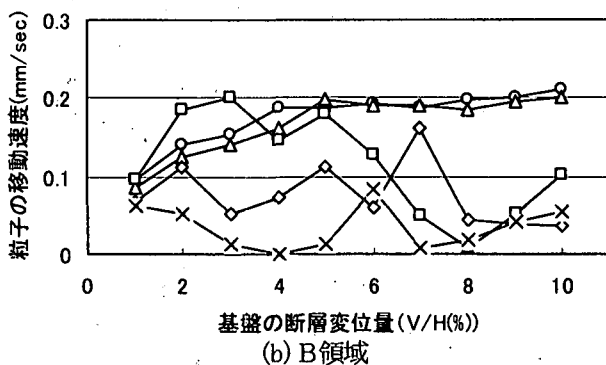
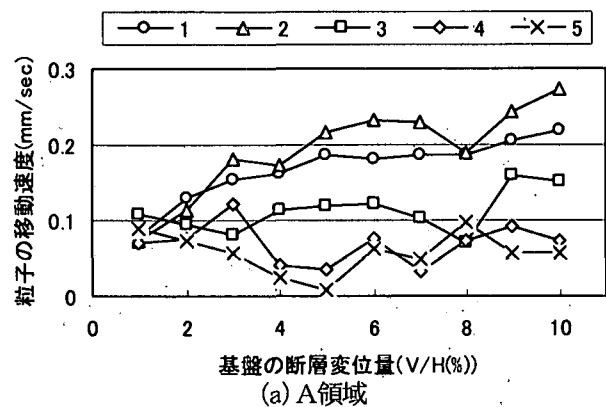


図-5 逆断層 30° 型の粒子の移動速度分布

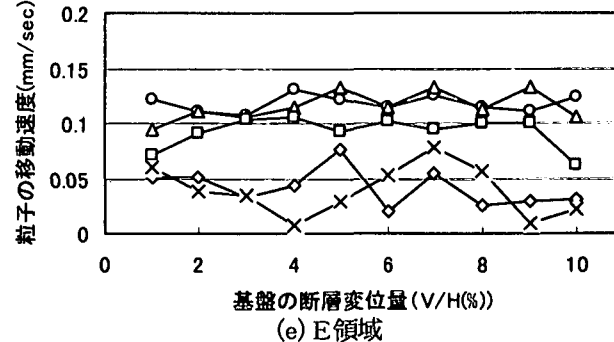
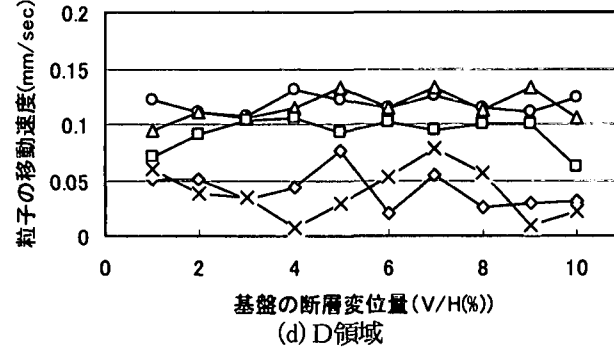
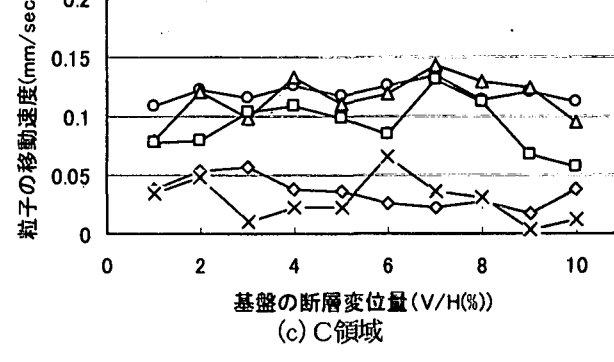
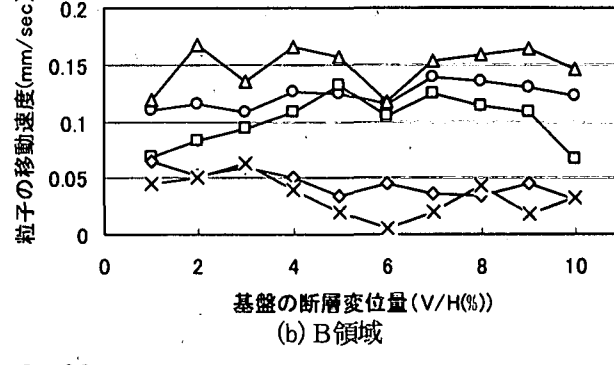
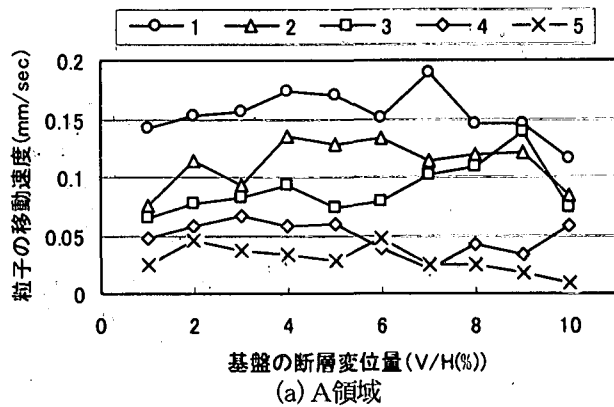


図-6 逆断層 45° 型の粒子の移動速度分布

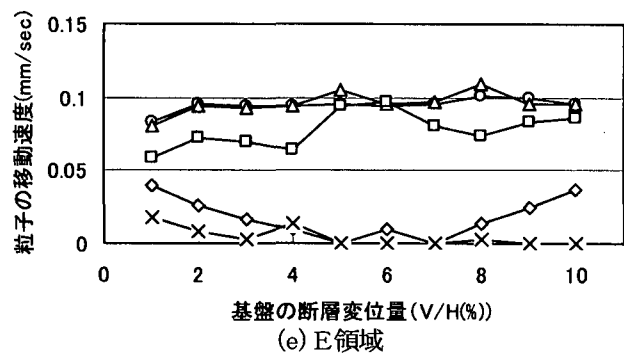
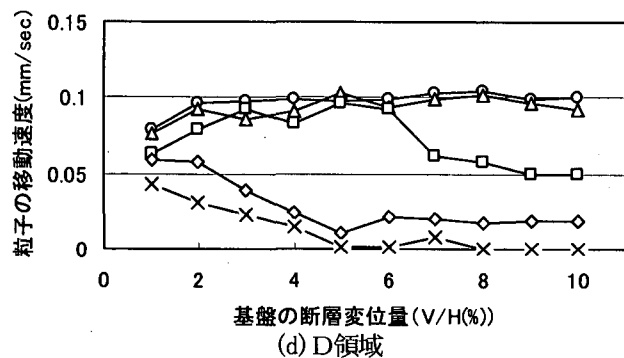
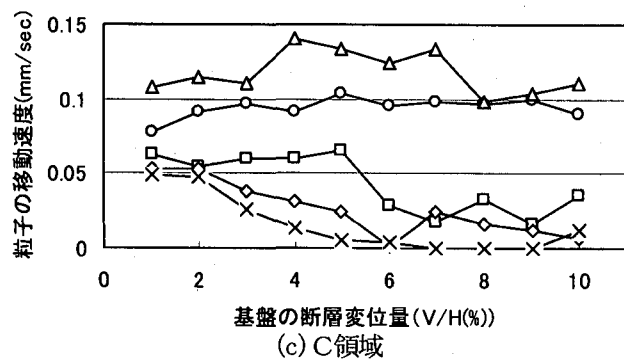
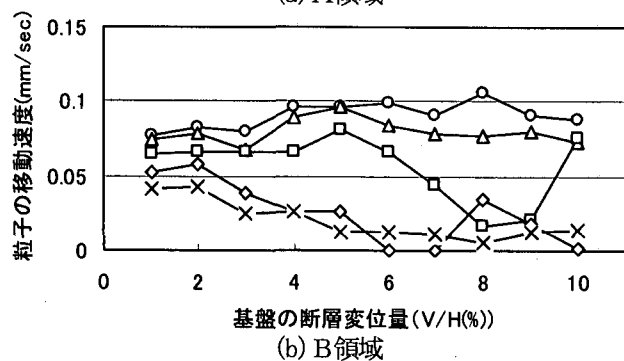
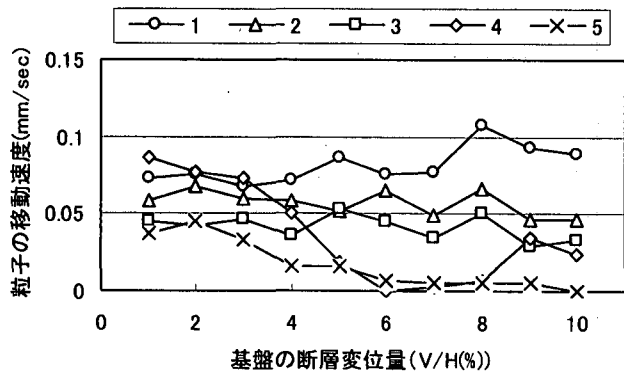


図-7 逆断層 60° 型の粒子の移動速度分布

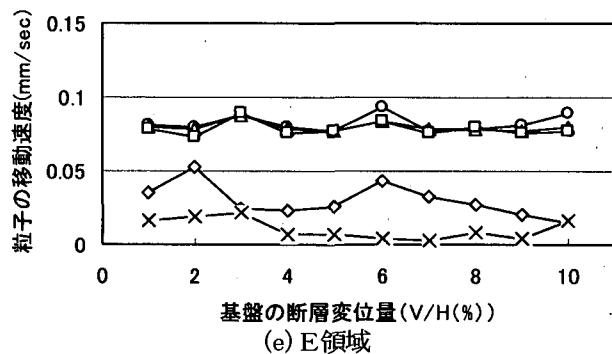
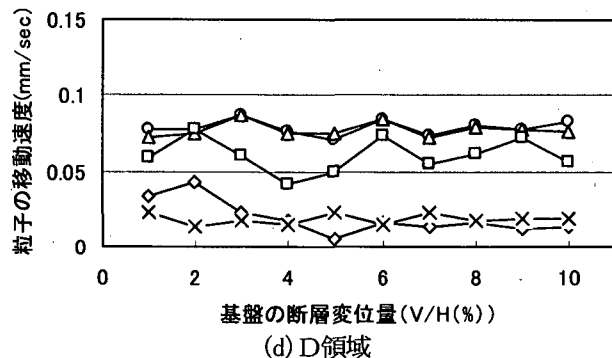
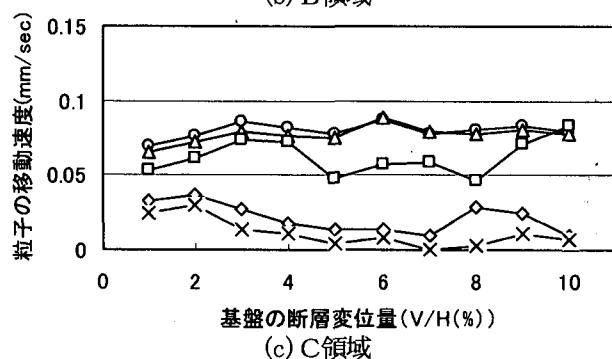
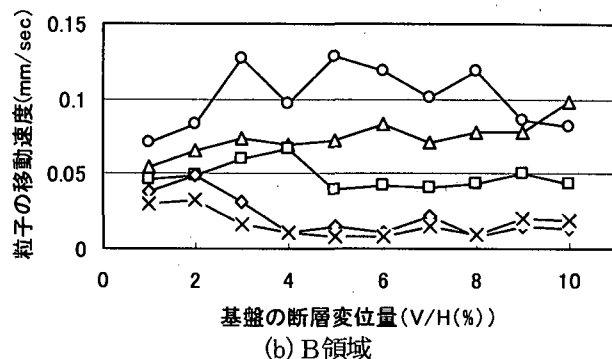
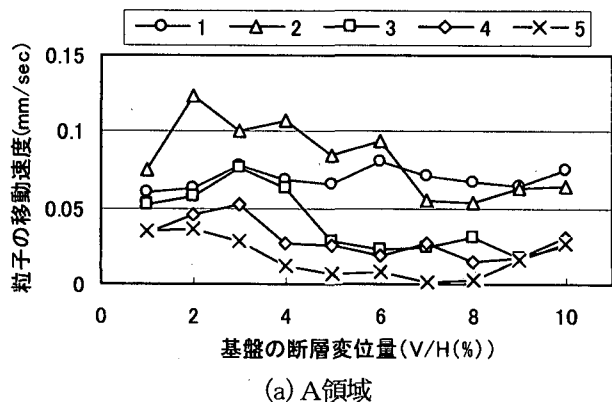


図-8 逆断層 75° 型の粒子の移動速度分布

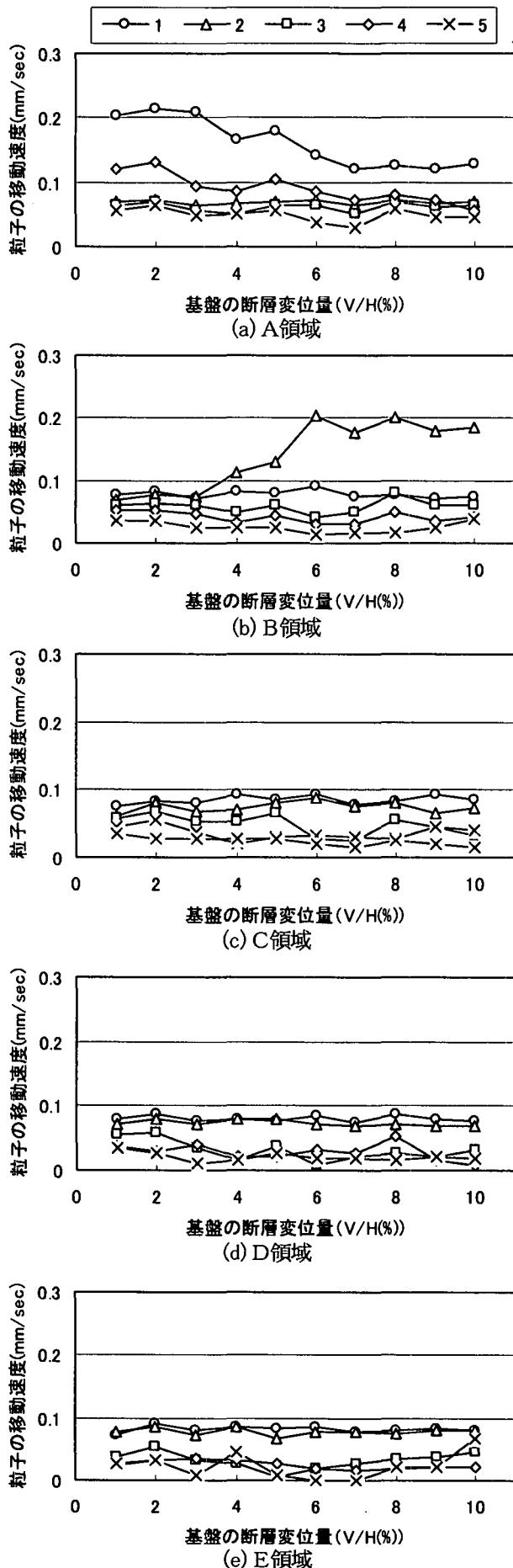


図-9 逆断層 90° 型の粒子の移動速度分布

参考文献

- 1) 活断層研究会：新編 日本の活断層（分布図と資料），東京大学出版会，pp.164-183，1991.
- 2) 鬼塚信弘，伯野元彦，鈴木崇伸，岩下和義，堀宗朗：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，土木学会論文集，No.701/III-58，pp.29-38，2002.
- 3) 鬼塚信弘，堀宗朗，岩下和義，鈴木崇伸：基盤の逆断層運動の数値実験における地盤変形の解析，土木学会応用力学論文集，Vol.4，pp.459-466，2001.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 松岡元：土質力学（基礎土工学シリーズ15），森北出版，pp.143-149，1999.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.

(2003年4月18日受付)