

模型実験における逆断層運動に伴う地中構造物の影響について

Influence to Underground Structures due to Reverse Fault Movements on Model Experiments

鬼塚 信弘*・堀 宗朗**・小国 健二***・金井 太一****・海保 大樹*****・西村 能和*****

Nobuhiro ONIZUKA, Muneo HORI, Kenji OGUNI, Taichi KANAI, Daiki KAIHO and Yoshikazu NISHIMURA

*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 Ph. D., 東京大学助手, 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 木更津工業高等専門学校技術専門職員, 環境都市工学科(〒292-0041 千葉県木更津市清見台東2-11-1)

*****木更津工業高等専門学校学生, 環境都市工学科(〒292-0041 千葉県木更津市清見台東2-11-1)

(現 東海旅客鉄道株式会社(〒450-6101 名古屋市中村区名駅1-1-4))

*****木更津工業高等専門学校学生, 環境都市工学科(〒292-0041 千葉県木更津市清見台東2-11-1)

(現 千葉大学工学部都市環境システム学科学生(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33))

The design guideline of linear underground structures for earthquake surface fault is important in order to reduce earthquake damages. The objective of this paper is to evaluate the influence to underground structures due to reverse fault movements, in order to clarify the faulting mechanism. 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 model structures and 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. These results are for model experiments, they will serve as basic findings for influence of underground structures.

Key Words: reverse faulting, model experiment, underground structure, ground deformation

1. はじめに

近年, 断層運動が活発になっており, 台湾集集地震, トルコ・コジャエリ地震をはじめ世界的に地震が多発している. ここ日本も例外ではなく各地で地震が発生し, 断層運動が線状地中構造物を横切る場合の耐震性向上対策について検討されている¹⁾. 既往の線状地中構造物に対する縦断方向の耐震計算では, 比較的剛性の小さい構造物の地震時挙動に対して適用できる応答変位法が用いられることが多い²⁾. しかしながら, 線状地中構造物に対して縦断方向に地盤剛性が急変する箇所では, 地盤変位の推定が困難であるため, 必ずしも応答変位法が適用できるかどうかかわからない. 特に断層運動が線状地中構造物を横切る場合, 縦断方向に地盤剛性が急変する箇所が現れる可能性があり, 耐震計算を行う際にこの現象を明らかにすることが重要である.

本研究は, アルミ棒状材料を用いた模擬地盤に共同溝をモデル化した線状地中構造物(以下, 模型構造物とする)を縦断方向に挿入し, 基盤の逆断層運動模型実験を行い, 数値解析モデルと検証するための基礎的データを取得することを目的としている. 本論文では, 実物から模型への

展開, 模擬地盤に構造物を挿入した影響と構造物の挿入位置の違いによる影響をみるために, 構造物および地盤の変形と構造物および基盤上の応力状態について解析した結果を報告する.

2. 実物と模型

2-1 実験材料の特性

本研究の地盤材料は $\phi 1.6\text{ mm}$ と $\phi 3.0\text{ mm}$ の2種類のアルミ棒を用い, 重量比3:2の割合で混合した. 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³⁾で, 支持力や落とし戸実験⁴⁾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⁵⁾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. アルミ棒を積み重ねるとアルミ棒が自立するため, 奥行き方向の動きがなく前背面の壁が不要で摩擦の影響がない. せん断による粒子破碎が起こらないため, マクロにみたせん断層の発達構造の再現性が非常に高い. 実験装置の前背面を覆っていないため, アルミ棒に直接マーキングができるなどの様々な利点があるために用いた.

本研究で対象とする模型構造物は複数のボックスカルバートで連結した様な線状構造物とした。模型構造物は実構造物 2m×2m×60m の大きさを想定して、実験装置の奥行きがアルミ棒長さと同様の 50 mm であるため、それに合わせて構造物を 50 mm×50 mm×1500 mm とした。

2-2 実物と模型の相似則

模型構造物の材料は、コンクリート製のボックスカルバートを模型サイズまで縮小するため、以下の理論式に基づいて決定した。

$$\text{弾性力: } F_e = \sigma l = E \epsilon l \quad (1)$$

$$\text{浮力: } F_b = \Delta \rho l^2 g \quad (3 \text{ 次元で考えると } l^3) \quad (2)$$

$$\text{摩擦力: } F_f = \mu \sigma l \quad (3)$$

σ は物体の応力、 l は物体の長さ、 E は物体のヤング率、 ϵ は物体のひずみ、 $\Delta \rho$ は物体の密度、 g は重力加速度、 μ は静止摩擦係数を示す。

(1)式と(3)式は物体を2次元で考えると、同一平面上の力のつりあいなので一方が無視できる。このため、本研究では(3)式を無視して、以下の相似則の式を考えた。

$$\frac{F_e}{F_b} = \frac{\sigma l}{\Delta \rho l^2 g} \quad (4)$$

実物と模型は(4)式の比が等しくなればよい。形状の比率と加速度を同一条件下で考えると、実物と模型の相似則の式は以下になる。

$$\frac{E}{\Delta \rho l} = \frac{E'}{\Delta \rho' l'} \quad (5)$$

(5)式に基づいて材料を選定することができる。

2-3 模型構造物の材料選定

2-1の模型構造物の大きさに基づいて、2-2の相似則の式から求めた模型構造物のヤング係数は約 1470N/mm² になった。あらかじめ様々な材料から、このヤング係数に近い材料を抽出したところ、ポリエチレンが該当した。本研究で用いるポリエチレン材料について、ヤング係数測定試験を JISK 7113 に基づいて行い、理論値と実測値を検証した。

荷重制御によって行ったポリエチレンのヤング係数測定試験の結果を図-1 に示す。応力 - ひずみ曲線はポリエチレンが破壊するまで、荷重をかけた。1~10 kg までは 1 kg ずつ、10~20 kg までは 2kg ずつ、20 kg 以降は 10 kg ずつ増荷させて行った。図-1 の凡例 A と B は、ひずみゲージを試験体の両側に貼り付けているそれぞれのひずみゲージの値である。実測データのヤング係数決定法は、JIS K 7113 に定められた回帰曲線の直線部分になっているところ(図-1)を採用し、ヤング係数は 1520N/mm² となった。よって理論値と実測値がほぼ妥当な結果が得られたため、模型構造物はこのポリエチレン材料を用いた。

2-4 模型構造物の設計

2-2~3 に基づいて設計した模型構造物を図-2~4 に示す。模型構造物は 50 mm×50 mm×1500 mm の大きさで、厚さ 5 mm のものを作成した。模型構造物の部材に働く応力を測定

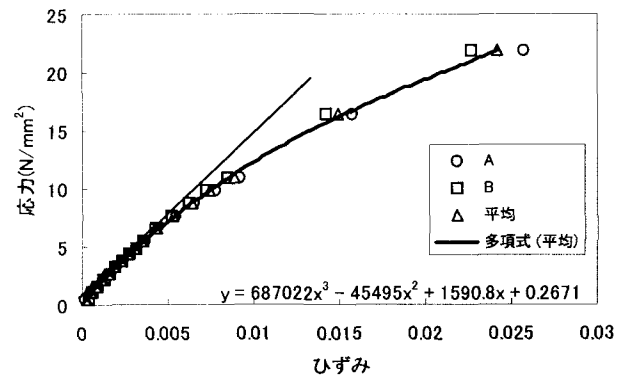


図-1 ポリエチレン材料の応力 - ひずみ曲線

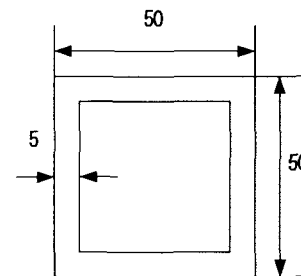


図-2 模型構造物の断面 (mm)

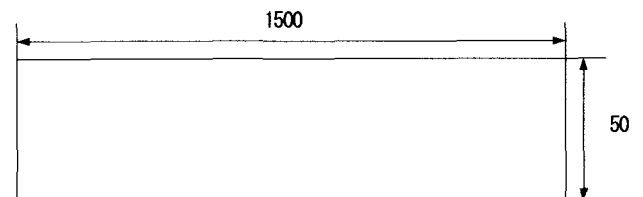


図-3 模型構造物の側面 (mm)

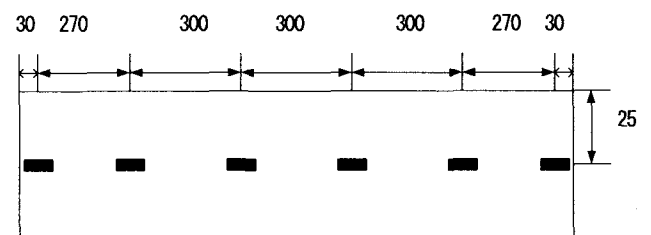


図-4 模型構造物のひずみゲージ取り付け位置 (mm)

するために、上面と下面にそれぞれ6枚のひずみゲージを貼った。

作成したそのままの模型構造物とアルミ棒では、アルミ棒が滑りやすく、実構造物のコンクリートと土との摩擦に相当しない。このため、模型構造物以外の各材料同士の静止摩擦係数をもとに、模型構造物にシートを貼付する工夫をして摩擦を同一することにした。

同一物体間の静止摩擦係数は以下の式で求まる。

$$\mu' = \tan \theta \quad (6)$$

θ は物体のすべり角を示す。模型構造物に貼付するシートの静止摩擦係数は各材料同士の静止摩擦係数の比に基づいて求めた。

$$\frac{\mu_{sa}}{\mu_{co}} = \frac{\mu_{al}}{\mu_{se}} \quad (7)$$

μ_{sa} は砂同士の静止摩擦係数、 μ_{co} はコンクリート同士の静止摩擦係数、 μ_{al} はアルミニウム棒同士の静止摩擦係数、 μ_{se} は模型構造物に貼付するシートの静止摩擦係数を示す。砂同士の静止摩擦係数を 0.70⁶⁾、コンクリート同士の静止摩擦係数を 0.65⁷⁾、アルミニウム棒同士の静止摩擦係数を 0.53⁸⁾ とすると、模型構造物に貼付するシートの静止摩擦係数は 0.49、摩擦角は 26° になればよい。

摩擦角測定装置を図-5 に示す。模型構造物に貼付する最適なシートを選び出すため、120 mm×100 mm×75 mm の大きさで 1390 g の質量の 2 つのコンクリートブロック間に、紙ヤスリや紙のシートを貼付した摩擦角測定試験を行った。その結果、普通紙の裏面（ザラザラ面）の摩擦角が 24° となり、(7) 式で算出した値にほぼ該当したので、これをアルミ棒と接する模型構造物の側面に貼付した。

3. 実験方法

実験装置および記号の概略を図-6 に、基盤の構成部品を写真-1 に、基盤上に作用する応力方向の定義を図-7 に、模型構造物の挿入状態と位置を写真-2、図-8 に示す。1.6 mm と 3.0 mm のアルミ棒を重量比 3:2 で混合した地盤を支えるため、装置両端は L 型フレームで覆っているが、前背面はアルミ棒と模型構造物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。ロードセルは平均鉛直方向応力（主応力）が測定できる 1 方向型ロードセルと平均鉛直方向応力（主応力）と平均せん断方向応力（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。ロードセルの数は上盤側に 6 個、下盤側に 15 個を配置し、ロードセル番号を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。2 方向型ロードセルは鬼塚らの模型実験⁹⁾ で明らかになったせん断層が出現する位置を考慮して、ロードセル番号 No. 1～12 まで上盤側に 5 個、下盤側に 7 個を配置した。

実験装置両端付近の基盤上の応力は基盤の上昇に伴って発達するせん断層の影響を受けず、アルミ棒を積み上げた時の初期土かぶり圧となっている⁸⁾。このため、模型構造物の境界条件はせん断層発生による影響をみるために自由端とした。模型構造物はあらかじめせん断層の発達位置を予測して、図-8 のように上盤側にずらした位置に挿入し、実験装置全体の左右対称となる位置にはしなかった。

画像計測・解析過程の詳細は、参考文献⁹⁾ を参照していただきたい。ここでは、基盤のずれ先端の角度を 45° にした層厚 H=400 mm の逆断層の実験の画像計測条件について述べる。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、動画解析ソフトでの追跡を円滑にするために、測定点のアルミ棒および模型構造物の前面には白いシールを貼り、その他の前面には黒く塗って解析の精度を上げる工夫をした。高解像度デジタルカメラの位置は高さ

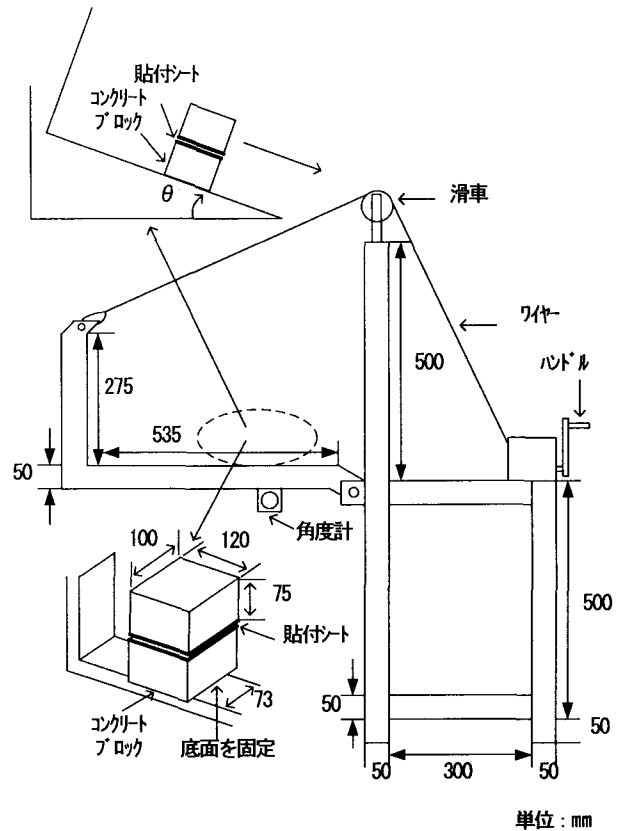


図-5 摩擦角測定装置

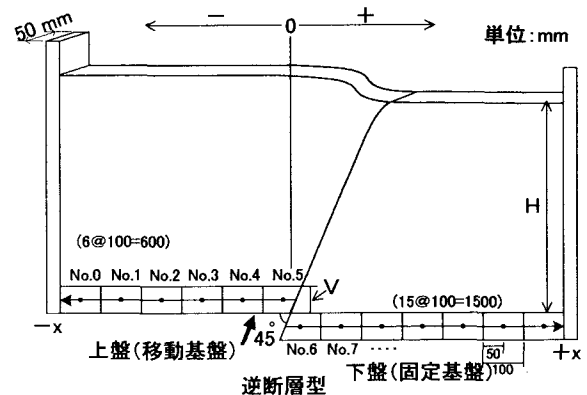


図-6 実験装置および記号の概略

1000 mm、距離 2540 mm で撮影した。地震時の基盤の断層変位速度は 1.0 m/sec 以上¹⁰⁾ といわれているが、模型実験ではこの断層変位速度を再現することが不可能である。基盤の断層変位速度は動的なロードセルデータを取得できる 0.067 mm/sec とし、基盤の断層変位量（鉛直変位量）V を層厚 H の 10% に相当する V=40 mm で実験を終了した。

4. 実験結果

本章では、模擬地盤に模型構造物を挿入した影響と模型構造物の挿入位置の違いによる影響をみるために、構造物および地盤の動きを画像計測システム⁹⁾ により明らかにする。さらに、ひずみゲージ、ロードセルから得られた模型構造物と基盤上の応力状態について解析する。

4-1 模型構造物と地盤の変形

V/H=10%時の地盤に模型構造物を挿入した3ケースを写真-3～5に、模型構造物を挿入していない1ケースを写真-6に示す。写真-3～5より、基盤の断層変位が増加すると、基盤のずれ先端から上盤と下盤に区分できるせん断層が形成され、同時に模型構造物全体に曲げが生じ始める。せん断層が模型構造物の下部材付近まで進展すると、せん断層が模型構造物に吸収され、模型構造物の上部材から上方には新たなせん断層が出現しない。この結果、模型構造物と地盤の間には隙間が発生し(写真-7)、層厚の浅い位置に模型構造物を挿入するほどこの隙間は大きい。上層部に模型構造物を挿入した場合では、地表面が隆起する現象もみられる(写真-8)。これは上層部の模型構造物にかかる土かぶり圧が他の位置に挿入した模型構造物に比べて小さく、模型構造物自体の回転と移動が容易になったためである。

写真-3～5と写真-6をもとに地盤の動きを解析すると、せん断層の上盤の動きが異なっている。模型構造物を挿入していない写真-6では、上盤のアルミ棒はほぼ直線に近い動きとなっている。これに対し、模型構造物を挿入した写真-3～5では、上盤にある全てのアルミ棒が同じような曲線を描いているのではなく、はっきり曲線となっている部分と、ほぼ直線になっている部分に分けられる。特に模型構造物の下の部分で、曲線になっているのが顕著である。また、写真-3～5より、基盤の逆断層変位に伴って模型構造物が基盤の逆断層変位方向と同じ右方向に移動し、模型構造物上にある下盤のアルミ棒も全体的に右方向に移動している。模型構造物を挿入していないケースでは、下盤のアルミ棒が大きく移動していないので、これは模型構造物を挿入した影響が大きく現れたと考えられる。

4-2 基盤上の応力

V/H=10%時の基盤上の σ/σ_0 (主応力/初期主応力)と x/H (0線からの距離/層厚)の関係を図-9に、基盤上の τ/σ (せん断応力/主応力)と x/H の関係を図-10に示す。

模型構造物の挿入位置の違いによらず、 x/H が0付近において σ/σ_0 が大きくなっている。4-1で観察されたせん断層が発生している付近でもあり、この付近の地盤が大きく圧縮され、せん断層を境に上盤側と下盤側の両方の σ/σ_0 が大きくなっている。

τ/σ が大きく変化しているのは、上層部では x/H が-0.75、中層部では x/H が1.15、下層部では x/H が-0.75、0.4、1.15である。各実験の x/H における τ/σ の変化点は、模型構造物と地盤との間にある隙間と隙間でないところの境となっている。

4-3 模型構造物の応力

断層変位量ごとにみた模型構造物の上下部材内側に生じる応力と構造物の左端からの距離の関係を図-11(a)、(b)～13(a)、(b)に、部材ごとにみた模型構造物の内側に生じる応力と構造物の左端からの距離の関係を図-14(a)、

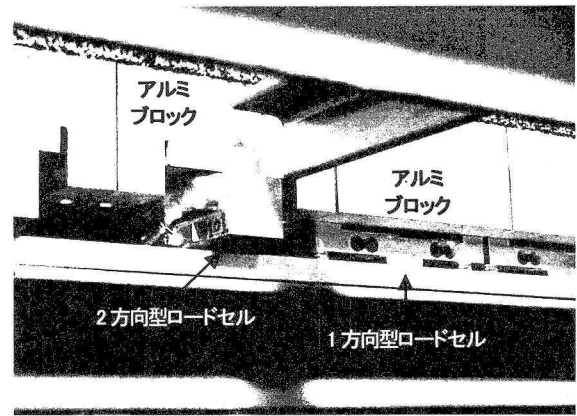


写真-1 基盤の構成部品

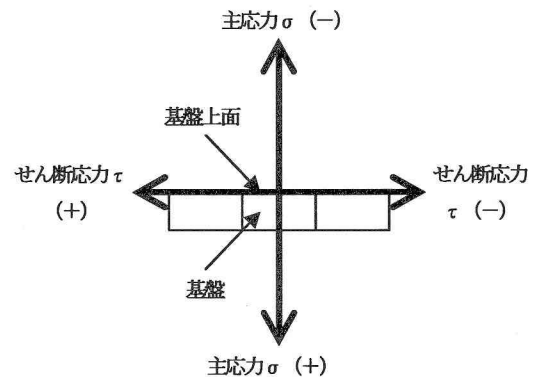


図-7 基盤上の応力方向の定義

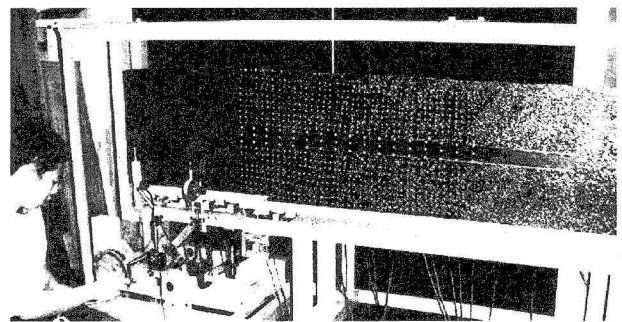


写真-2 模型構造物の挿入状態

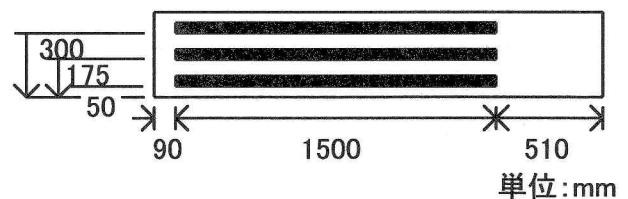


図-8 模型構造物の挿入位置(側面)

(b)に示す。ここで述べる応力は測定時応力と初期応力の差を意味する。

図-11(a)、(b)～13(a)、(b)をみると、模型構造物の挿入位置の違いによらず断層変位量が増加するにしたがって、引張側の点がより引張に、圧縮側の点がより圧縮なる

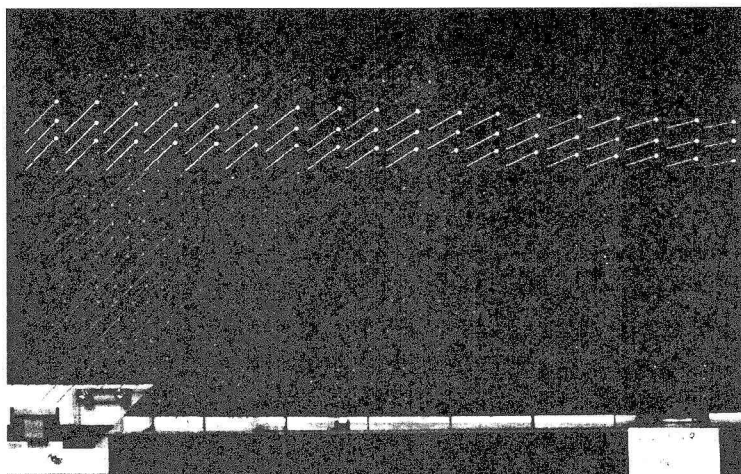


写真-3 模型構造物上層部挿入時のアル
ミ棒および構造物標点の軌跡
(逆断層型, H=400mm)

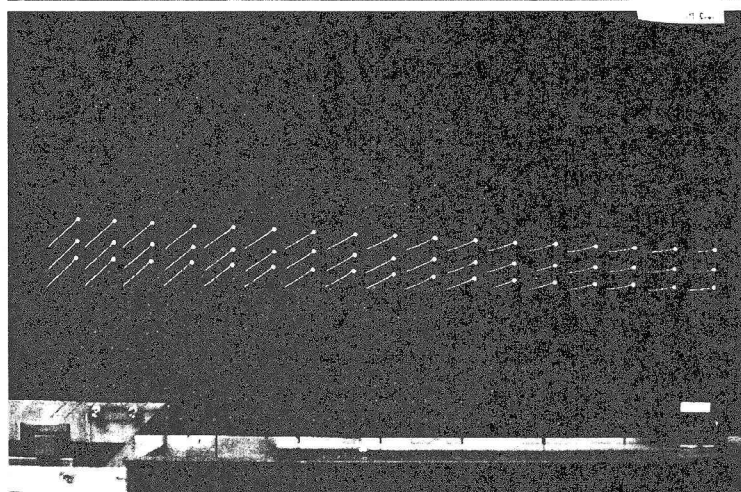


写真-4 模型構造物中層部挿入時のアル
ミ棒および構造物標点の軌跡
(逆断層型, H=400mm)

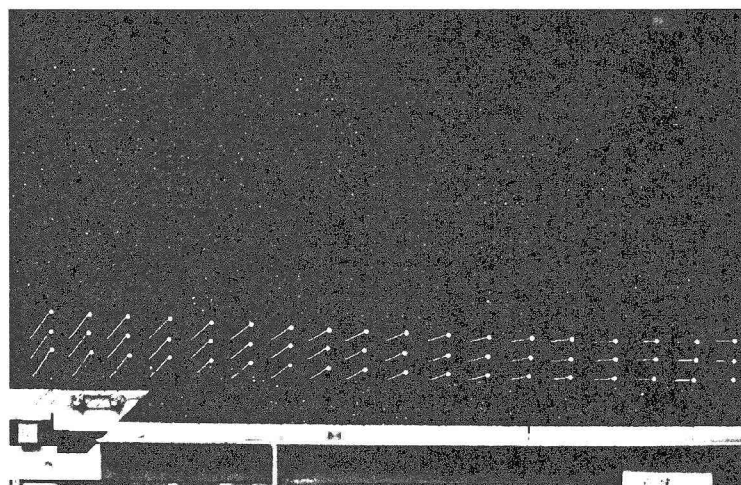


写真-5 模型構造物下層部挿入時のアル
ミ棒および構造物標点の軌跡
(逆断層型, H=400mm)

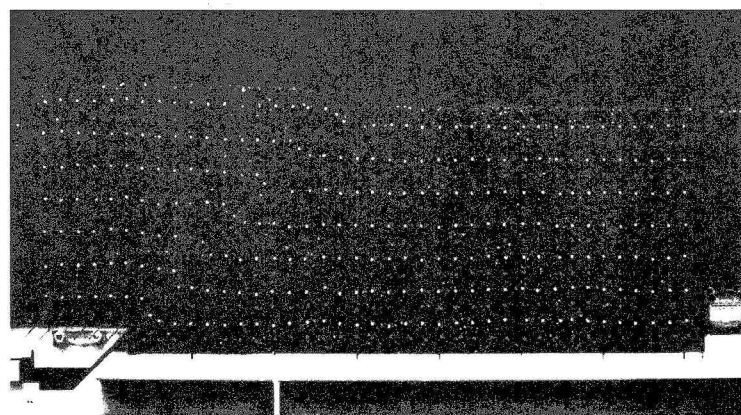


写真-6 模型構造物未挿入時の
アルミ棒標点の軌跡
(逆断層型, H=300mm)

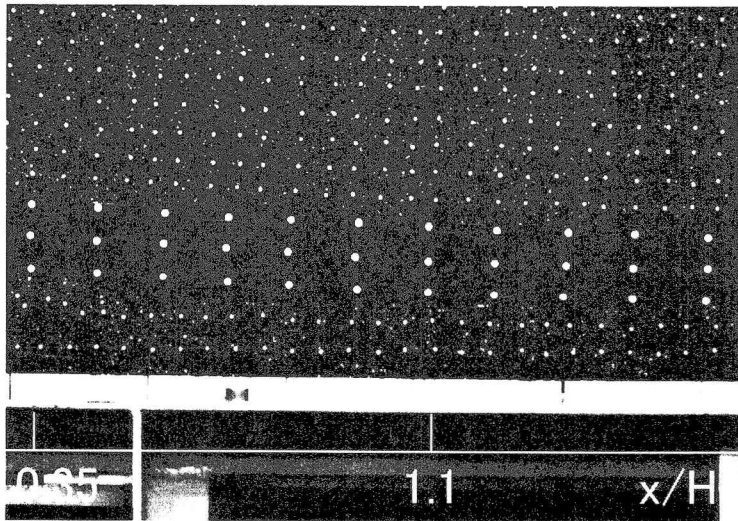


写真-7 下層部模型構造物と地盤の隙間 ($V/H=10\%$)

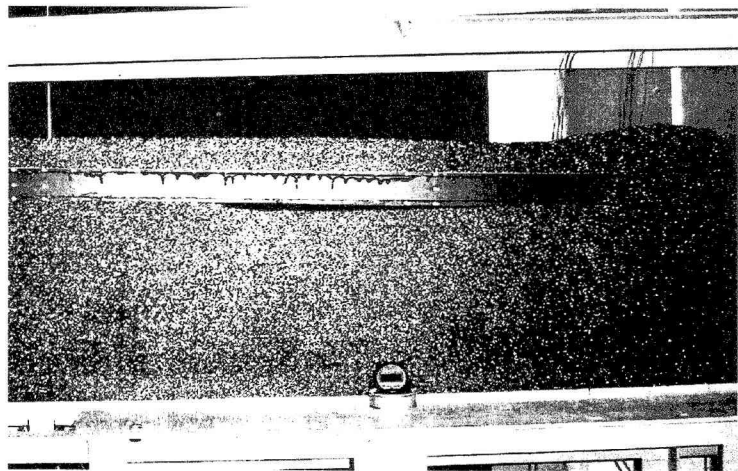


写真-8 上層部模型構造物の地表面の変形 ($V/H=10\%$)

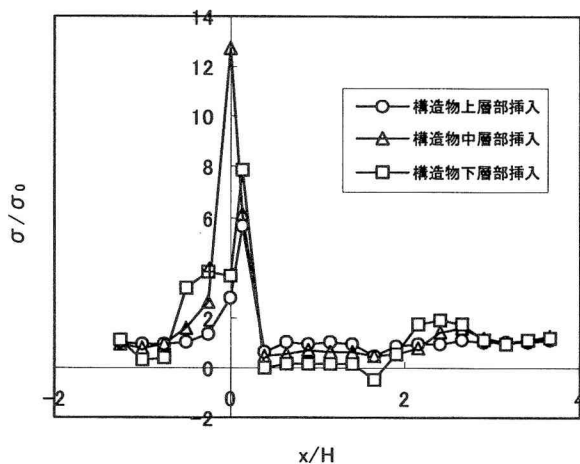


図-9 寸法効果を考慮した距離と主応力比 ($V/H=10\%$)

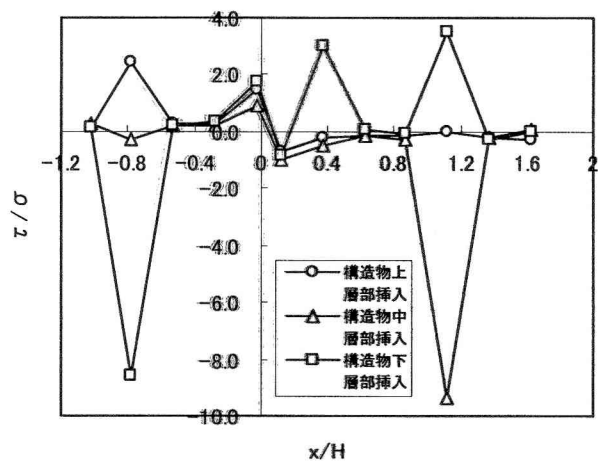


図-10 寸法効果を考慮した距離と応力比 ($V/H=10\%$)

ように応力分布が変動する。

図-14(a), (b)より、上部材および下部材の模型構造物の左端から30mmと300mmでは模型構造物の挿入位置の違いによる応力の差はなく、1470mmでは応力の差が小さい。すなわち基盤の逆断層運動では、せん断層が模型構造物に吸収されても模型構造物の両端は影響を受けないといえる。一方、模型構造物を深い位置に挿入するほど、圧縮側

および引張側の点の応力の差が大きくなる。模型構造物は $V/H=0\%$ 時の上層部に挿入したときの土かぶり圧を1とした場合、中層部で3.5倍、下層部で6倍ほどの土かぶり圧を受けているので、このような違いがみられたものと考えられる。

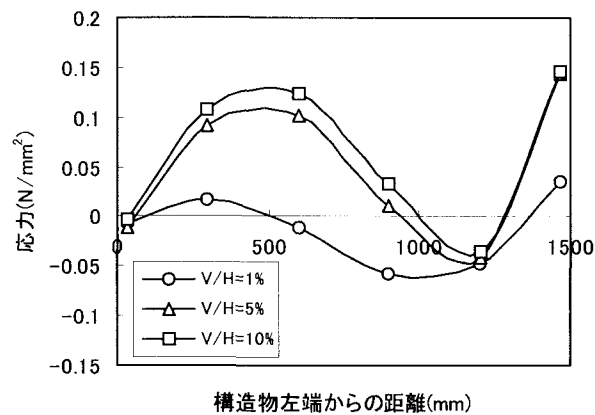


図-11(a) 模型構造物上層部挿入時の上部材応力

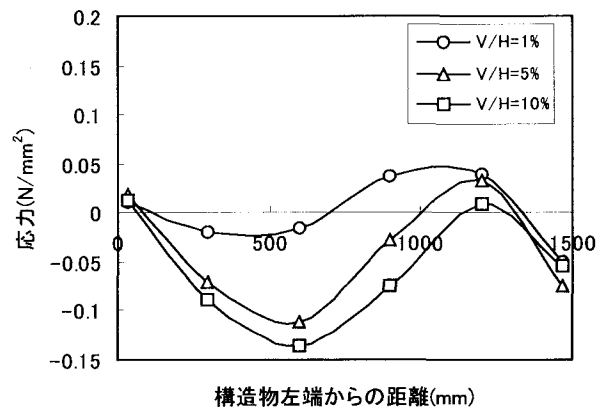


図-11(b) 模型構造物上層部挿入時の下部材応力

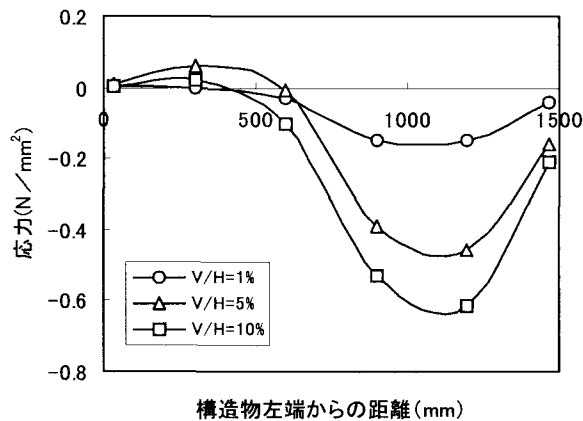


図-12(a) 模型構造物中層部挿入時の上部材応力

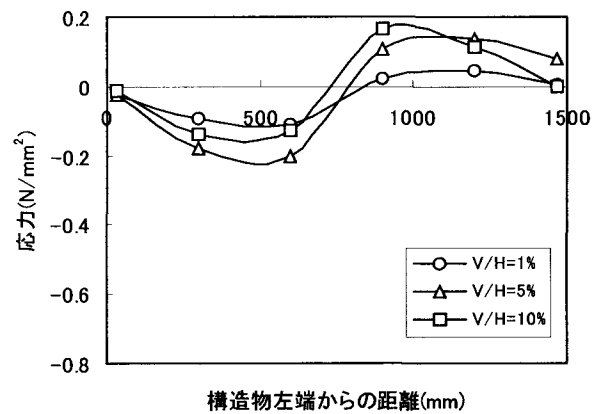


図-12(b) 模型構造物中層部挿入時の下部材応力

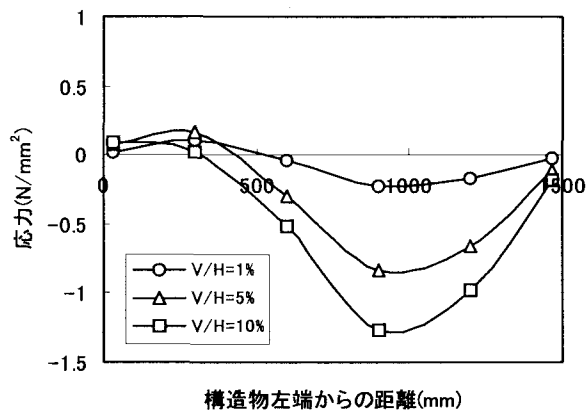


図-13(a) 模型構造物下層部挿入時の上部材応力

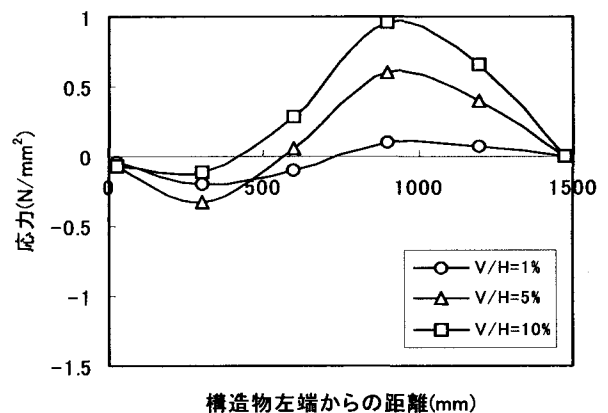


図-13(b) 模型構造物下層部挿入時の下部材応力

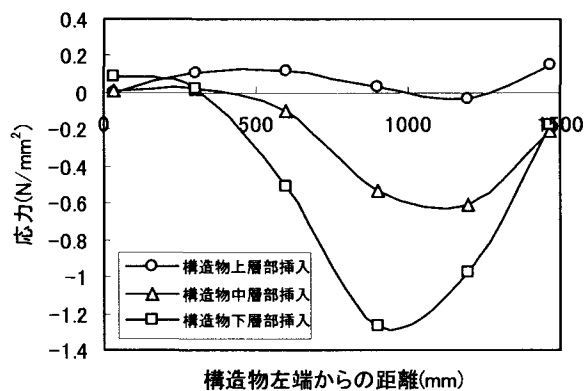


図-14(a) 模型構造物上部材の応力 ($V/H=10\%$)

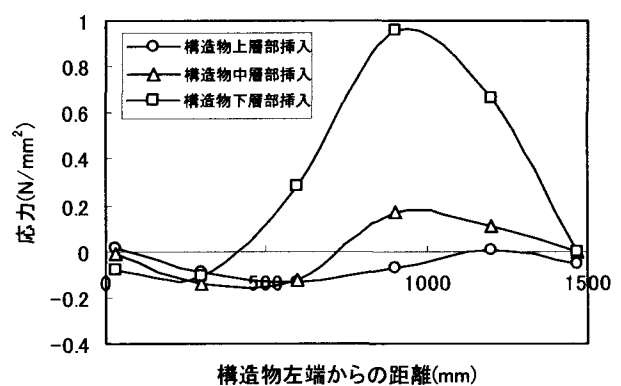


図-14(b) 模型構造物下部材の応力 ($V/H=10\%$)

5. 結論

本研究は、基盤の逆断層運動に伴う地中構造物の影響について、アルミ棒地盤に線状模型構造物を挿入した模型実験を行い、数値解析モデルと対比するための基礎的データを取得した。模型構造物はコンクリート製のボックスカルバートを想定し、実物と模型の相似則に基づいて材料を選定したところ、ポリエチレンが該当した。

模型実験は、地盤に構造物を挿入した影響と構造物の挿入位置の違いによる影響をみるために、構造物および地盤の変形と構造物および基盤上の応力状態について解析した。これによると、基盤の断層変位の増加に伴って出現したせん断層は模型構造物に吸収されて曲線の動きをし、模型構造物の上方には新たなせん断層が出現しないことがわかった。また、模型構造物は層厚の深い位置に挿入するほど模型構造物の応力の変化が著しいが、模型構造物の両端は基盤の逆断層変位が上昇しても挿入位置に依存せず、応力の変化が少ないこともわかった。

断層運動が線状地中構造物を横切する場合の耐震性向上対策を検討することが重要ではあるが、実際の検証はなかなか難しい。しかしながら、一つの方法として、本研究の模型実験のように力学的影響の考察を積み上げて数値解析モデルと比較検討することにより、何らかの耐震性向上対策が図れるものと考えている。今後は地表地震断層の地中構造物への影響をさらに検討するために、模型実験の定量的解析を行いたい。

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鬼塚研究室 平成14年度卒研生の木戸正太氏（現 長岡技術科学大学学生）、中花洋介氏（現 長岡技術科学大学学生）、石川貴朗氏（現 巴商会）に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。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会：土木構造物の耐震設計入門，土木学会，pp.161-231，2000.
- 2) 川島一彦：地下構造物の耐震設計，鹿島出版会，pp.45-60，1997.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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) 河上房義：土質力学（第5版），森北出版，pp.137-138，1983.
- 7) 塩見弘平：ベルトコンベヤ設計ハンドブック，工業調査会，pp.435-469，1970.
- 8) 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.
- 9) 鬼塚信弘，堀宗朗，佐藤恒明，金井太一：逆断層運動模型実験における地盤変動の定量的解析，土木学会応用力学論文集，Vol.6，pp.685-692，2003.
- 10) 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.
- 11) 鹿島建設土木設計本部：耐震設計法／限界状態設計法，鹿島出版会，pp.89-131，2000.
- 12) 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.
- 13) 松岡元：土質力学（基礎土木工学シリーズ15），森北出版，pp.143-149，1999.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 中田高：カリフォルニア州の活断層「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.
- 17) 海保大樹，鬼塚信弘，小国健二，金井太一，堀宗朗，西村能和：模型実験における断層変位が地盤に与える影響について，土木学会第31回関東支部技術研究発表会，2004.
- 18) 鬼塚信弘，金井太一，西村能和，海保大樹，堀宗朗，小国健二：基盤の逆断層運動に伴う地中構造物の影響について，地盤工学会第39回地盤工学研究発表会，投稿中，2004.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.

（2004年4月16日 受付）