

# 表層地盤特性を考慮した断層運動による 地表面変状に関する研究

武澤永純<sup>1</sup>・宮島昌克<sup>2</sup>・北浦 勝<sup>3</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail:takezawa@pwri.go.jp

<sup>2</sup>金沢大学工学部教授 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail:miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>金沢大学工学部教授 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail:kitauro@t.kanazawa-u.ac.jp

1999年台湾集集地震において多大な被害を与えた地表断層変位の位置や変位量には、表層地盤特性が関与しているものと考え、小型土槽を用いた模型実験、並びに個別要素法を用いた数値解析によって検討を行った。その結果、地表断層変位の位置や変位量は基盤の断層傾斜角だけでなく、表層地盤特性として挙げられる地盤の硬軟、地盤の粒度、表層地盤の層厚によって変化することがわかった。特に表層地盤の硬軟は破壊の形態や進展に大きく影響することが明らかになった。

**Key Words** : fault displacement , surface ground property , fault angle , ground hardness , shear zone

## 1. はじめに

1999年台湾・集集地震では震源深さが約1 kmと非常に浅かったため、起震断層と言われている車籠埔断層が地表に出現し、地表面断層直上の土木構造物に多大な被害を与えた<sup>1)</sup>。この地表面断層変位は、場所によってその大きさや形状が異なることが報告されている<sup>2)、3)</sup>。本研究では断層変位が伝播する表層地盤の性質が、地表面断層の出現位置や地表面の形状に影響を与えているものと考え、小型土槽を用いた模型実験および個別要素法による解析を行った。なお、地表面断層に関する研究として、上田・谷<sup>4)</sup>、鬼塚ら<sup>5)</sup>の研究があるが、本研究で着目しているような表層地盤特性の違いに特に注目した検討は行われていない。

## 2. 小型土槽を用いた模型実験

図-1に実験装置を示す。実験に用いる土槽の寸法は、長さ500mm×高さ500mm×幅250mmであり、土槽の下にコンテナの土台があり、その中にベニア合板で組み合わせた移動基盤と油圧ジャッキを設置する。土槽の中に層厚200mmの模型地盤を作成する。ここで、移動基盤上の地盤を上盤、固定基盤上の地

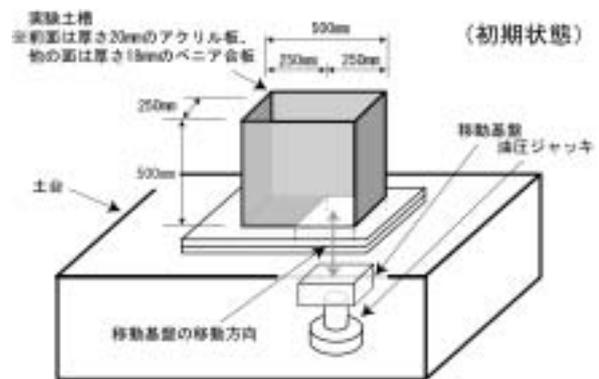


図-1 実験装置概要図

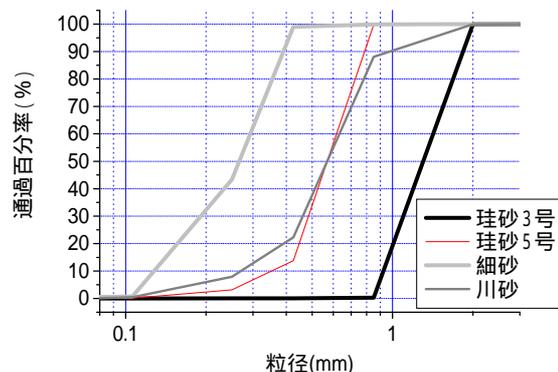


図-2 粒径加積曲線

表-1 実験ケース

実験ケース	地盤の硬さ	材料名	平均粒径	粒度分布	層厚(mm)
Case1-2L	軟らかい	珪砂5号	中	均等	200
Case1-2D	硬い				
Case2-2L	軟らかい	細砂	小	均等	
Case2-2D	硬い				
Case3-2L	軟らかい	川砂	中	やや均等	
Case3-2D	硬い				
Case4-2L	軟らかい	珪砂3号	大	均等	
Case4-2D	硬い				

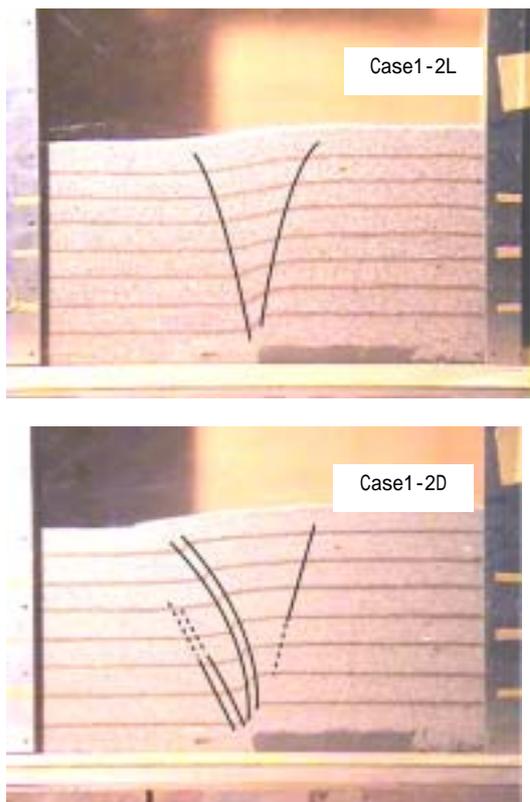


図-3 地盤側面の状態 (上昇 20mm)

盤を下盤と呼称する。模型実験に用いた地盤材料は物性値の異なる乾燥砂であり、図-2 に地盤材料の粒径加積曲線を示す。本研究で用いる地盤材料は 3 種類の均一な乾燥砂と 1 種類のやや均一な乾燥砂である。表-1 に実験ケースを示す。実験ケースは地盤の硬さ、地盤材料、地盤層厚で分けられており、軟らかい地盤は相対密度 20% を、硬い地盤は相対密度 80% を目標に作成している。

### 3. 実験結果

図-3 に基盤上昇 20mm における珪砂 5 号の地盤側面の状態を示す。軟らかい地盤では、基盤が上昇すると基盤中央から下盤地表面と上盤地表面に向かってせん断帯が発生する。前者は上盤が下盤を押すよ

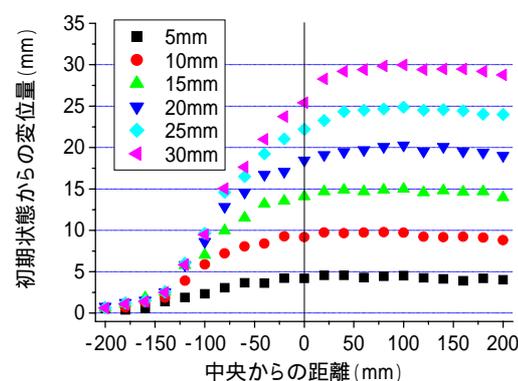
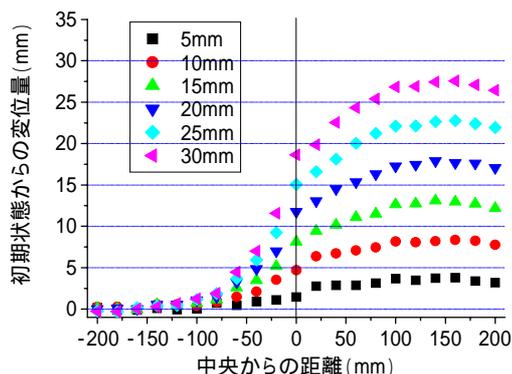


図-4 地表面の形状 (上: 軟らかい 下: 硬い)

うな形でせん断帯が発達することより受働崩壊を起こしており、後者のせん断帯より左側の地盤は下盤に向かって主動崩壊を起こしている。そして、軟らかい地盤では主動崩壊が主となって地盤中央部が破壊に至る。硬い地盤では、基盤が上昇すると、まず基盤中央から下盤地表面に向かってせん断帯が発達する。せん断帯が地表面に到達すると、その上盤側に新たなせん断帯が発生する。この繰り返しにより、地盤中央部が破壊に至る。硬い地盤では受働崩壊が主となって中央部の地盤が崩壊する。

図-4に珪砂5号の地表面の形状を示す。横軸の正の値は上盤側、負の値は下盤側を示す。軟らかい地盤では基盤の上昇に伴い地表面中央部で緩やかに褶曲していく様子が見られる。これに対して硬い地盤では、基盤の上昇によって下盤側で断層崖が形成される。本論文では、図-5に示すように、断層変位によって地盤の地表面が傾斜している箇所を影響範囲と称し、この点に注目して考察を進める。各ケースの影響範囲を比較したものを図-6に示す。影響範囲の発生位置は地盤の硬さによって異なっている。すなわち、地盤が軟らかい場合には影響範囲は地表面中央部に発生し、基盤の上昇に伴い下盤側と上盤側に拡大する。これに対し地盤が硬い場合には、影響範囲は初めに下盤側で発生する。基盤の上昇に伴い、上盤側に向かって拡大する。この挙動は、地盤側面

のせん断帯の発達過程と一致している。Case4-2Dは地盤が硬い他のケースよりも影響範囲が下盤側で発生し、上盤側へ大きく広がっている。鬼塚ら<sup>6)</sup>は断層実験において、模型地盤を構成する粒子が層厚に比べて相対的に大きくなること、地盤の破壊やせん断帯の発達に影響を及ぼすと述べており、珪砂3号はその影響を顕著に受けたものと推測される。

#### 4. 個別要素法を用いた数値解析

図-7 に実物スケールのモデルと断層傾斜角の位置を示す。モデル地盤の寸法は高さ 20m、長さ 120m である。断層変位の入力位置は、断層傾斜角度が低角度の場合、地表面到達位置が左側の境界に近づくことにより、境界の影響を受ける可能性があるため、境界左側から 70m 離れた位置に設定した。表-2 に解析ケースと解析に用いたパラメータの値を示す。この解析では、地盤の硬軟をばね定数 ( $K_n, K_s$ ) で表現している。伯野の手法<sup>7)</sup>を参考にすると、解析ケースにおける軟らかい地盤のN値は 2、硬い地盤のN値は 50 を想定していることに対応する。モデル地盤ならびに解析パラメータのいくつかは本田らの研究<sup>8)</sup>を参考にした。要素の粒径  $r$  は 0.1m ~ 0.3m までの一様分布とし、落下法によりランダム配置を行った。ここでは、模型実験では検討できなかった断層傾斜角が影響範囲に与える影響を検討することとし、粒度分布については各ケースで一定とした。なお、解析における時間刻みは  $1 \times 10^{-4}$  sec/step、断層変位は毎秒 0.5m で最大基盤上昇変位 2m まで地盤に変位を与えている。

#### 5. 解析結果

図-8 に基盤上昇 0.5m から 1m における地盤の変位量を示す。図の左上の数字は断層傾斜角を示す。同図より地盤の硬軟にかかわらず、せん断帯が基盤境界部分から下盤側地表面に向かって発達しているのが分かる。しかし、硬い地盤は軟らかい地盤と比べて、下盤において変位量の濃淡が薄いことから、硬い地盤のせん断帯は基盤境界部から鉛直に発達する傾向が見られる。

図-9 に基盤上昇 2m における土層上での影響範囲の発生位置、図-10 に断層傾斜角と影響範囲の関係を示す。解析での粒子の最小粒径が 0.1m であることから、影響範囲の両端は、上盤側、下盤側共に土槽両端部分の地表面が水平を保っているところから鉛直方向に 0.1m の変位が認められる箇所と定義した。すなわち、図-5 に示す模型実験における 1mm のところを 0.1m と考えて定義している。本研究では生成的な検討にとどまっているので、両者に定量的な関係は特にはない。図-9 より、断層傾斜角 90° において、軟らかい地盤は硬い地盤よりも影響

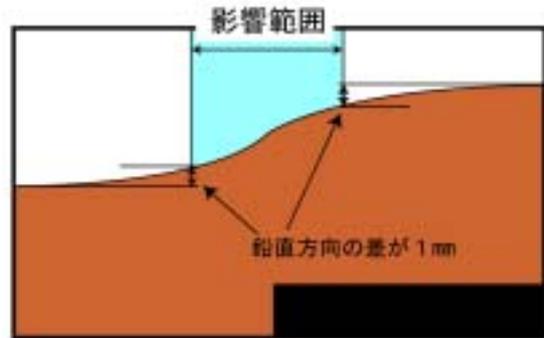


図-5 影響範囲の定義

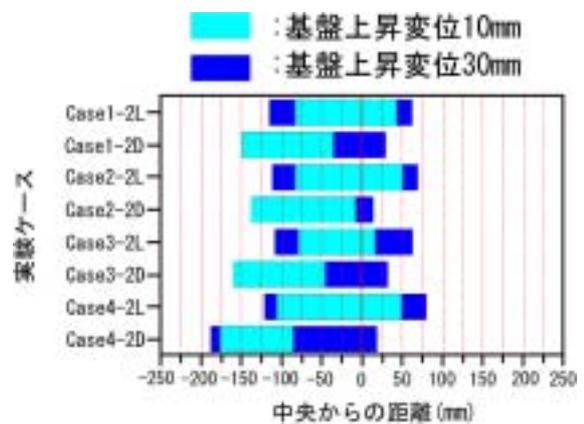


図-6 各ケースの影響範囲

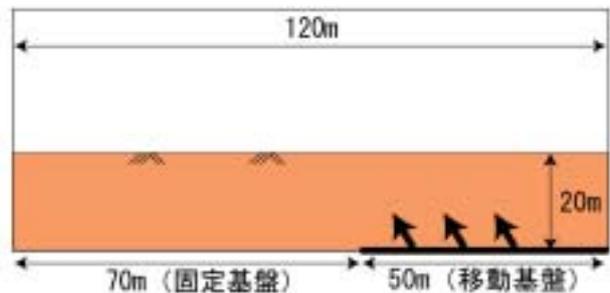


図-7 モデル地盤

表-2 解析モデル

	fault angle (°)	$K_n$ (N/m)	$K_s$ (N/m)	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$r$ (m)	friction -
CASE30-L	30	$2.3 \times 10^8$	$3.9 \times 10^7$	2650	0.1 ~ 0.3	0.577
CASE45-L	45					
CASE60-L	60					
CASE75-L	75					
CASE90-L	90					
CASE30-D	30	$1.1 \times 10^9$	$1.8 \times 10^8$	2650	0.1 ~ 0.3	0.577
CASE45-D	45					
CASE60-D	60					
CASE75-D	75					
CASE90-D	90					

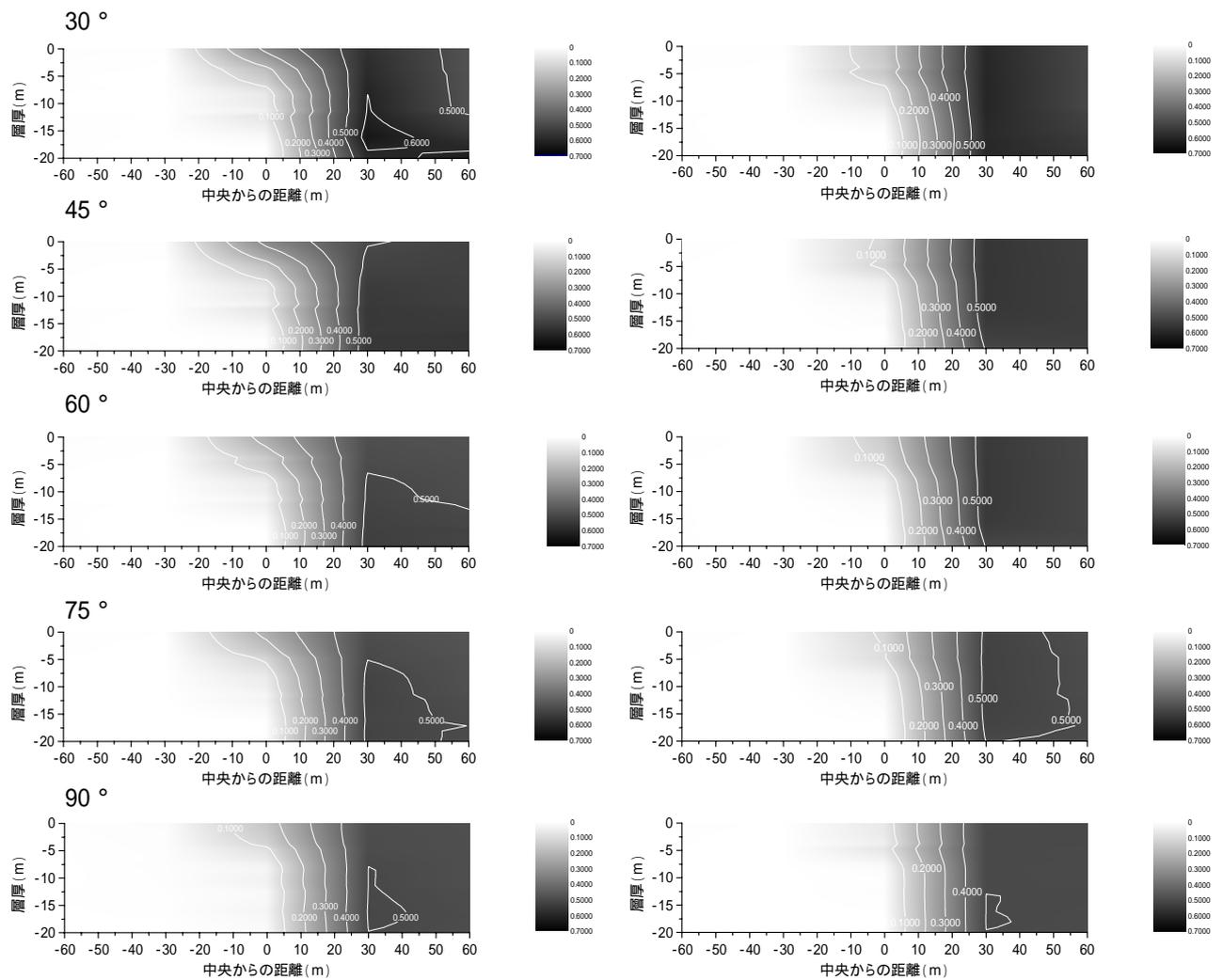


図-8 基盤上昇量 0.5 m から 1 m における地盤の変位量 (左: 軟らかい地盤、右: 硬い地盤)

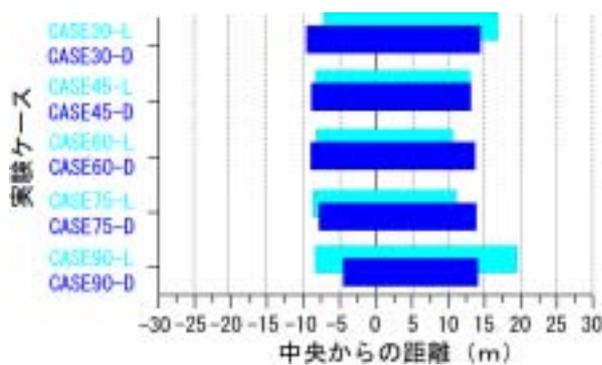


図-9 地表面の影響範囲

範囲が非常に大きくなっていることがわかる。90° 以外は硬い地盤と軟らかい地盤において影響範囲の大きさはそれほど変わらない。また、図-10 より、軟らかい地盤において、影響範囲は断層傾斜角 60° のケースが最も小さい。そして傾斜角 60° を境界に、低角度もしくは高角度になると影響範囲は大きくなる。硬い地盤は断層傾斜角が大きくなると

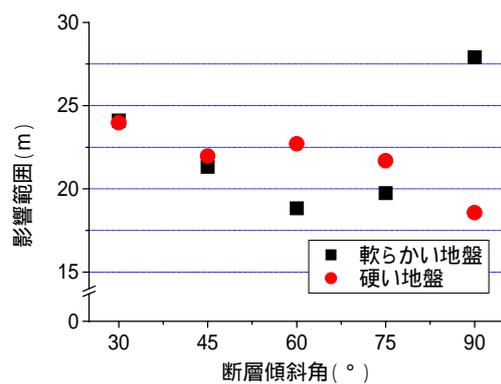


図-10 断層傾斜角と影響範囲の関係

影響範囲が小さくなる傾向にある。ここで、図-9 より、影響範囲の両端に着目すると、軟らかい地盤では断層傾斜角によって上盤側の端部は変化するが、下盤側の端部は変化が見られない。硬い地盤はその逆であり、上盤側の端部は変化するが、下盤側の端部は変化が見られない。

模型実験の考察において、表層地盤に断層変位が

作用した場合、軟らかい地盤では主に主動崩壊によって上盤が破壊に至り、硬い地盤では受働崩壊によって下盤が破壊に至ると述べた。すなわち、影響範囲はせん断帯の発達位置と一致していることから、影響範囲の下盤側端部の位置は受働崩壊、上盤側端部の位置は主動崩壊によって左右され、軟らかい地盤では、上盤側で発生する主動状態のすべり崩壊、硬い地盤では下盤側で発生する受働状態のせん断帯の発達、これらが主となって地盤が破壊されたと考えることが出来る。解析では最大基盤上昇変位は層厚の10%なので、模型実験における基盤上昇量20mm(層厚200mmの10%)のケースと同様に、硬い地盤では主動崩壊までには至らず、影響範囲の上盤側の端部は各ケースにおいて変化が見られなかったものと考えられる。

## 6. 結論

本研究は、地表断層変位の変位量分布や発生位置、すなわち影響範囲が基盤上の表層地盤特性に左右されているものと考え、模型実験及び数値解析を通じて、表層地盤特性が地表面変状に及ぼす影響について検討を行ったものである。これらの結果より、台湾集集地震のような地表地震断層による被害を避けるためには、基盤上の断層の位置及びパラメータを把握するだけでなく、表層地盤の性質を考慮することが重要であると言える。しかしながら、地震予知のできない現在、起震断層を特定し、予め対策を行うておくことは容易なことではない。本研究で検討したような、地表地盤特性と地表面断層の関係を明らかにしておくことによって、地震後の地中埋設管などの早期被害把握に応用することができると期待される。

謝辞:本研究は、科学研究費基盤研究(C)(研究代表者:宮島昌克、No.13680542)の補助により行われた。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 川島一彦、家村浩和、庄司学、岩田秀治:1999年集集地震(台湾)における交通施設の被害と被災メカニズムに関する検討、東京工業大学土木工学科耐震工学研究グループ、1999.
- 2) 大槻憲四郎:9.21台湾地震調査資料(内陸におけるプレート境界大地震の脅威—台湾921集集地震調査速報集)、文部省突発自然災害調査班、p.17、1999.
- 3) 宮島昌克、橋本隆雄、北浦勝:断層崖近傍の建物被害に関する基礎的研究 1999年台湾・集集地震を例として、地域安全学会論文集 No.3、2001.
- 4) 上田圭一、谷和夫: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(その2) 正断層、逆断層模型実験、電力中央研究所報告、1999.
- 5) 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 / -58, pp.29-38,2002.
- 6) 鬼塚信弘他:鉛直断層の室内模型実験で見られた寸法効果について、第29回土質工学研究発表会、pp.1359-1362、1994.
- 7) 伯野元彦:破壊のシュミレーション 拡張個別要素法で破壊を追う、森北出版株式会社、pp.39-43、1997.
- 8) 本田剛、東畑郁生:個別要素法による断層周辺地盤の地盤変状に関する数値実験、土木学会第57回年次学術講演会論文集、-482、pp.963-964、2002.

(2003.6.29 受付)

## STUDY OF GROUND DEFORMATION INDUCED BY FAULT MOVEMENT IN CONSIDERING CHARACTERISTICS OF SUBSURFACE SOIL

Nagasumi TAKEZAWA, Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITAURA

The present paper deals with large ground deformation induced by fault movements. According to the field investigation of the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan, ground deformation induced by faults movements seems to depend on the characteristics of subsurface ground, such as softness, grain distribution, thickness of ground and so on. Small scale tests and DEM analysis are conducted in this study. The relation of the ground characteristics and ground deformation is studied.