

横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析

小山 良浩¹・谷 和夫²¹正会員 株式会社白石 技術本部土木設計部（〒101-0033 東京都千代田区神田岩本町1-14）
oyama-y@shiraishi.com² Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）

1999年に相次いで発生したトルコのコジャエリ地震と台湾の集集地震では、地震動だけでなく地表地震断層によって土木構造物が被害を受ける問題が注目された。地表付近の地盤変形は、断層の変位や未固結被覆層の特性などに依存して複雑である。特に横ずれ断層の場合には、地表面に網目状のせん断帯が帶状に連なる変状域が形成されるが、その性状やメカニズムの詳細は未だ解明されていない。そこで、過去に実施された横ずれ断層に関する一連の模型実験の結果を分析し、基盤の横ずれの断層運動によって砂地盤の表面に形成されるせん断帯の特徴的な構造を検討した。

Key Words : fault, model test, strike-slip, sand, scale effect, shear band, surface rupture

1. はじめに

(1) 地表地震断層における表層地盤の変形構造

1999年に相次いで発生したトルコのコジャエリ地震と台湾の集集地震を契機として、地震動だけでなく地表地震断層、すなわち表層地盤のずれ変形によって、土木構造物が被害を受ける問題が注目されるようになった¹⁾。鉄道や道路、さらにパイプラインなど線状の土木構造物（インフラ）は、地震によって地表地震断層が現れる予想される場所にも活断層を横切って立地せざるを得ないケースが考えられる。このようなケースであっても、インフラが提供すべきサービスが地震直後に一時的にストップしたとしても、多数の人命に関わるような構造的な破壊は避けられるように対処すべきである。

地震の規模が大きいと、地下深部の硬い地殻で生じた震源断層のずれ（せん断変位）が上方に伝播し、最終的に地表地震断層として出現する。この地表付近の部分は、硬い（コンピテントな）基盤がそのまま地表に露出している場合を除くと、多くの場合、軟らかい（インコンピテントな）表層地盤に覆われていることが多い。この軟らかい表層地盤の変形は、図-1に示すような特徴を有している²⁾。

- a) 表層地盤に対する外的な作用は、剛体的に運動する硬い基盤の断層変位（準静的なせん断変位）である。
- b) 表層地盤に深部（基盤との境界）より入力された断層変位によって、表層地盤の内部にせん断帯が形成

される。このせん断帯は、上方に発達する間に方向・向きを変えたり、分岐や尖滅（尖った先端部分が消滅）したりする。

- c) せん断帯の両側には引きずり帶や撓曲のゾーンが形成される。そして、ひずみが集中したせん断帯における不連続的な変形は、ひずみが分散した連続的な変形（引きずり帶や撓曲）に転化する。
- d) 地表にせん断帯が到達した部分では段差や亀裂が発達し、その周辺には傾斜が緩やかに変化する撓曲地形が形成される。段差や亀裂の平面的な分布は、一般に網目状ないし雁行に配列して複雑である。

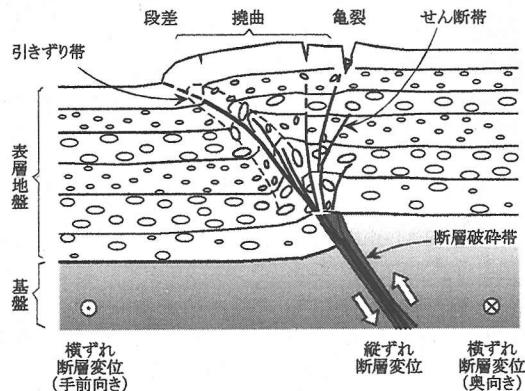


図-1 基盤の断層変位により軟らかい表層地盤に発達する変形構造

- e) 地表に変状が集中する部分は、活断層に沿う帶状の範囲に限られる。繰り返し活動する活断層の地表上の位置（断層地形）が、将来現れるであろう地表地震断層とほぼ一致する。
- f) 表層地盤の内部や地表の変状は、基盤の断層の走向・傾斜角、断層運動のセンス・変位、表層地盤の特性などに強く依存する。

せん断破壊が地下深部から地表に伝播すると共にその形態や性状が変化する傾向は、震源の深さから表層直下の基盤に到る範囲でも生じる。しかし、表層地盤の強度や剛性（変形に対する抵抗性能）は震源断層を含む深部地盤に比べて格段に低いので、表層地盤の影響がより大きい。特に表層地盤が未固結な土質地盤（未固結被覆層）となる場合には、基盤の一箇所（断層・せん断帯）に集中したシャープなせん断変位をなだらかな撓み（撓曲）に変化させる段差吸収作用（“座布団効果”と呼ぶことがある）は顕著となる¹⁾。

著者らは、地表地震断層における表層地盤の変形構造に関して、軟らかい表層地盤に発達するせん断帯に注目

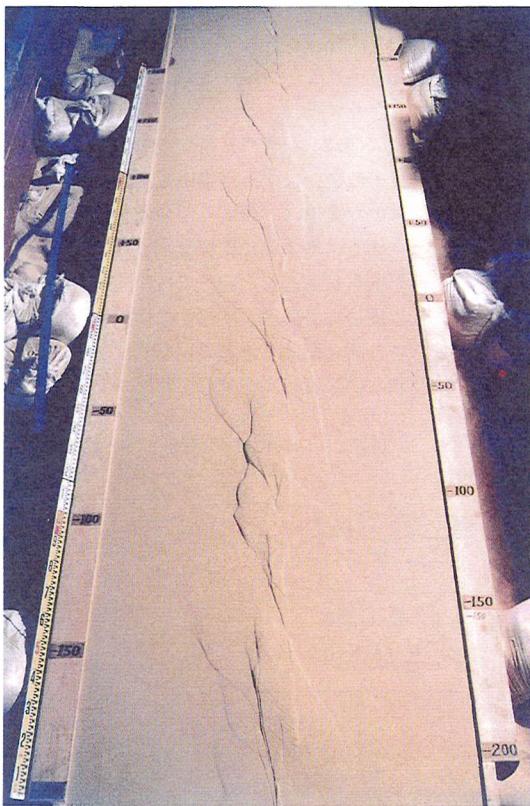


写真-1 横ずれ断層によって表層地盤の表面に形成されるせん断帯（模型地盤は密な豊浦砂、層厚 $H=200\text{mm}$ 、幅 $W=1300\text{mm}$ 、左横ずれの断層変位 $h=32\text{mm}$ ）

した研究を継続的に実施してきた²⁻⁴⁾。2次元問題である縦ずれ断層については、1990年より乾燥砂を表層地盤とした縦ずれ断層の模型実験を行い、剛完全塑性理論に基づくせん断帯の発達位置の推定法⁵⁾やFEMによる数值解析手法を提案した⁶⁾。さらに、複雑な3次元問題である横ずれ断層については、1993年より乾燥砂を利用した模型実験を行ってきた⁴⁾。

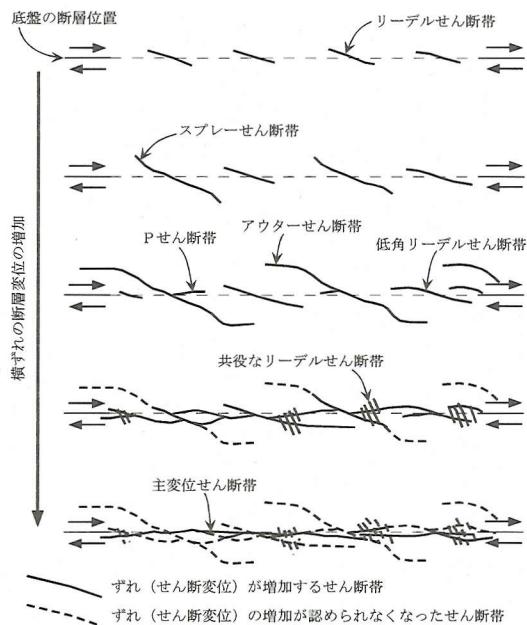


図-2 横ずれ断層によって表層地盤の表面に形成されるせん断帯

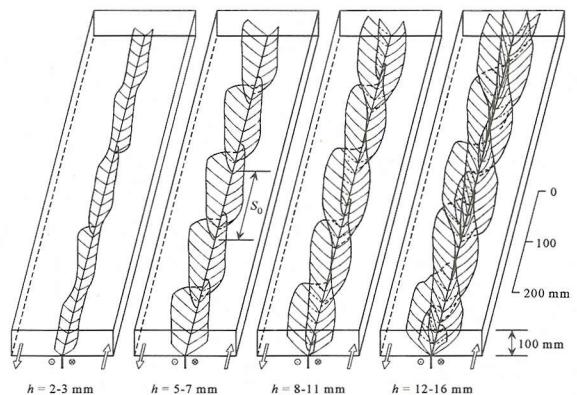


図-3 横ずれ断層によって表層地盤の内部に形成されるせん断帯

表-1 横ずれ断層の模型実験に用いた装置

装置 の 記号	ずれの センス	土槽の内法寸法 (mm)			模型地盤の 最大厚さ H_{\max} (mm)	横ずれの 最大断層変位量 h_{\max} (mm)	X線CT による 内部観察	ケース 数
		長さ L	幅 W	深さ D				
A	左ずれ	1,700	250	150	90	100	可能	3
B	右ずれ	1,700	380	200	120	34	可能	5
C	右ずれ	1,000	630	87	50	26	不可能	5
D	左ずれ	6,000	2,400	600	400	600	不可能	7
E	左ずれ	3,000	380	220	200	110	可能	1

(2) 横ずれの断層変位によって表層地盤に発達するせん断帶

横ずれの断層変位によって地表面に形成されるせん断帶の形態的な特徴については、主に地表地震断層の現地調査や実験的な研究によって既に概略は明らかにされている^{4,9-10}。図-2と写真-1に示すように、せん断帶が網目状に発達する帯状の変状域が基盤の断層に沿って形成される。その基本的なプロセスは、断層線上にほぼ等間隔に現れるリーデルせん断帶を1次的なモードとして、その間に次々と新たなモードのせん断帶（Pせん断帶、低角リーデルせん断帶など）が形成され、最終的に主変位せん断帶に変形が集中するものである。

また、表層地盤の内部に形成されるせん断帶については、主に実験的に調べられている。模型地盤の断面を切断して変形構造を目視で観察したり⁸、X線CTスキャナーを利用した断層撮影でせん断帶を記録したりすることによっている^{4,11}。そして図-3に示すように、最初に基盤の断層線上の両側にせん断帶の覆瓦構造が形成され、上方に発達して地表面にリーデルせん断帶が現れ、横断面ではせん断帶の花弁状構造が発達するプロセスが明らかにされた。この特徴的な内部構造は、1995年に起きた兵庫県南部地震で出現した野島断層におけるトレンチ調査でも確認されただけでなく¹²、理論的な解析によってもその基本的な構造が調べられている¹³。

(3) 研究の目的と検討項目、検討の方針と手順

横ずれ断層の場合、表層地盤に発達するせん断帶の構造は非常に複雑である。現段階では、その基本的な構造の概略が分かっただけで、形状、位置、発達状況などに関する詳細は充分に把握されていない。また、模型実験の精度、特に土槽の境界の影響、に対する配慮も不足していた。さらに、寸法効果に対する検討も不充分である。

そこで、著者らが実施してきた横ずれ断層に関する一連の模型実験の結果を整理して、地表面に形成されるせん断帶の詳細な構造を明らかにすることを研究の目的とした。分析に当たっては、実験の精度に対して充分に信頼がおける結果のみを利用した。

各種のせん断帶について、特に注目する検討項目は、以下の2点である。

- ① 形状や発達する位置
- ② 発達するプロセス（せん断帶の大きさと断層変位量の関係）

これらの項目の検討に当たっては、分級された（粒径幅が狭い）砂を模型地盤に用いた実験では、せん断帶の構造に及ぼす模型地盤の厚さの影響（寸法効果）が非常に大きいため、特に留意した¹⁴。寸法効果の要因としては、砂の力学特性が応力レベル（拘束圧）に依存することと、せん断帶の幅や間隔が砂の粒度に依存することが考えられる¹⁵。しかし、対象とする表層地盤（層厚：数～数十メートル）の中の応力レベルは小さいので（土被り圧<1MPa），前者（力学特性の拘束圧依存性）の影響は小さく、後者（せん断帶の粒度依存性）の影響が支配的である。そこで、模型地盤の厚さ（層厚/粒径の比）が異なるケースの実験を行い、寸法効果の影響を検討するために、せん断帶の大きさや断層の変位量は模型地盤の厚さで無次元化してデータを比較した。

検討の手順は、まず各種のせん断帶を判定する規準を明確に設定し、模型実験で観察されたせん断帶を分類した¹⁶。そして、各種のせん断帶毎に計測項目を設定し、せん断帶の形状や大きさ、発達する位置を系統的に計測して分析した。

2. 横ずれ断層の模型実験

(1) 実験装置と模型地盤

表-1に示す5種類の実験装置を使い分けた⁴。模型地盤の境界の影響を調べる場合は、内法幅 W_{\max} が大きい装置CやD、内法長さ L_{\max} が大きい装置DやEを用いて検討した。また寸法効果を考慮して模型地盤の厚さ H の影響を調べる場合は、模型地盤の最大厚さ H_{\max} が大きい装置Dを利用した。さらに、模型地盤の内部に発達するせん断帶をX線CTスキャナーで観察する場合は、幅が小さい装置A、B、Eを用いた。

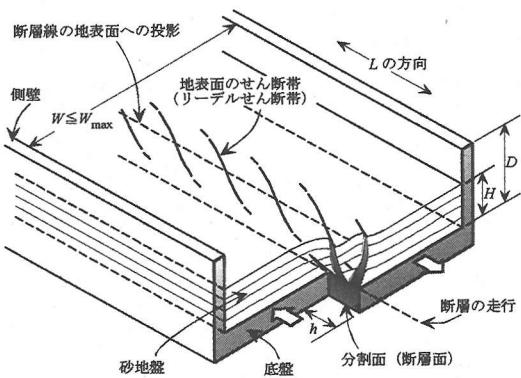


図-4 横ずれ断層の模型実験

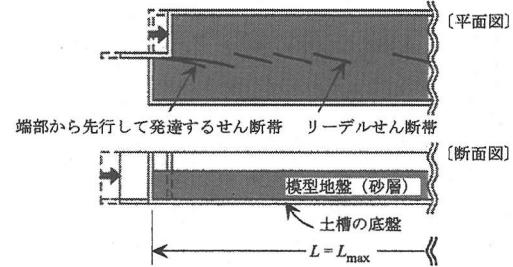
図-4に示すように、いずれの実験装置も基盤に相当する土槽の底盤が長手方向に2つのブロックに分割されている。片方のブロックを分割面(断層面)に沿って相対的に水平方向に移動させることによって、横ずれ(右ずれ/左ずれ)を生じさせる。また、模型地盤に用いた密な砂が正のダイレンタンシー特性を示すことによって土槽が幅方向に広がることを防止するため、土槽の両側壁の外側に剛な補強枠を設けて土槽の幅を一定に保った。さらに底盤と側壁の内側にはサンドペーパーを貼って、模型地盤が滑らない粗な状態とした。

模型地盤の材料には、細粒で力学特性に関する情報が豊富な豊浦砂(土粒子の密度 $\rho_s = 2.62 \sim 2.63 \text{ g/cm}^3$ 、平均粒径 $D_{50} = 0.17 \text{ mm}$)を用いた。気乾燥状態(含水比 $w = 0.11 \sim 0.15\%$)の試料を厚さ10mmごとに敷き均してバイブルーターで締め固め作業を繰り返す方法、またはホッパーを用いた空中落下法により、均質で密な砂地盤(間隙比 $e = 0.65 \sim 0.66$ 、乾燥密度 $\rho_d = 1.59 \text{ g/cm}^3$)を作製した。

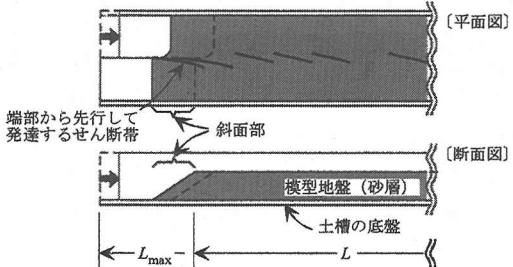
模型地盤の表面は、層厚が所定の値をわずかに越えてから、整形板で均して平坦にした。一方、土槽の長手(断層の走行)方向の両端は、図-5に示す3つの条件を検討した。箱型あるいは斜面状に成型する条件(図-5aあるいは図-5b)では、せん断帶が両端部に強制的に形成されてしまう。その結果、リーデルせん断帶が発達する位置関係(配置)が拘束され、その間隔に影響を与える問題がある。この境界の影響を抑えるため、一边が1~3cm程度の発泡スチロールの小片(EPS片)をビニール袋に詰めた枕状の緩衝部材を配置し、その上に砂が斜面状に被るように工夫した(図-5c)。

表-1に示すように、土槽の内法幅 W_{max} が大きい装置CやDでは、土槽の内側に側壁を固定して模型地盤の幅 W を変えることができる。模型地盤の幅の影響を検討したところ、断層線上に表れる帶状の変状域の最大幅 $2 \cdot D_R$ (D_R は断層線からリーデルせん断帶の最外縁までの距離)

(a)両端部を箱型にする条件



(b)両端部を斜面状に成型する条件



(c)両端部にEPS片を詰めた枕を設置する条件

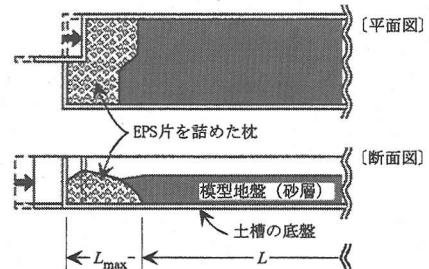


図-5 実験装置の両端部の条件

離で、図-12に示すように模型地盤の厚さに依存する)より大きくする必要があることが分かった¹⁷。また模型地盤の長さ L ($< L_{max}$: 土槽の内法長さ)は、リーデルせん断帶が4本程度は十分に形成される長さ $L > 4 \cdot S_R$ (S_R はリーデルせん断帶に関して断層の走行に沿う間隔で、図-10に示すように模型地盤の厚さに依存する)とした。

(2) 実験方法と観察方法

横ずれの断層変位量 h をダイヤルゲージで確認しながら、土槽を分割面(断層面)に沿って静的に横ずれを生じさせた。その変位速度は、制御の精度を確保するために十分に遅い速度(1mm/min以下)に設定し、現象に対する慣性力の影響は無視した。そして、任意の変位段階($\Delta h/H = 0.008 \sim 0.033$)で制御を停止して、模型地盤の地表面や内部の変形構造を記録した。

地表面の変形構造は、せん断帶の形状、位置関係、す

れのセンスなどに着目してスケッチを描き、また写真も撮影した。スケッチの記載は、実験後に写真と比較して確認を行った。

また装置A, B, Eを用いた場合には、医療用X線CTスキャナーを用いて模型地盤の内部に発達するせん断帯を記録した^{4,10}。

(3) 実験ケース

表-2に示す合計21ケースの実験を行った。寸法効果の影響を考慮して、模型地盤の厚さHを30, 50, 70, 90, 120, 150, 200, 400mmとした。層厚Hを平均粒径D₅₀で割った比(H/D₅₀)を176~2353と非常に幅広く変化させて、寸法効果(特に、せん断帯の粒度依存性)の影響を検討したことが特徴である。寸法効果を実務レベルで完全に検討するためには、さらに大規模な実験が必要だが、経済性を考慮してH=400mmを上限とした。

なお、本論文に示す以外にも多くの実験を行ったが、境界の影響(幅や長さ、両端部の条件)や制御の精度に問題があるケースは全て検討の対象外とした。

3. 模型地盤の地表面に発達するせん断帯の構造分析

(1) せん断帯の発達過程と特徴

図-2に示すように、基盤の横ずれの断層変位が増加すると、模型地盤の表面には複数のモードのせん断帯が順を追って発達し、網目状にせん断帯が発達する帶状の変状域が形成される⁴。1次モードはリーデルせん断(Riedel shear)帯と呼ばれ、断層の走向に低角度(18°~33°)で斜交する直線状のせん断帯が、断層の直上にほぼ等間隔に分布(雁行配列)する。なお、地表面のせん断帯が基盤の断層の走行となす角度(斜交角度)は、断層のずれによる回転と同じ方向を正として示す(断層が右ずれならば、断層の走行より時計回りに正の角度をとる)。さらに断層変位量が大きくなると、このリーデルせん断帯の両端部がS字を描きながら成長し、スプレーせん断(Spray shear)帯、アウターせん断(Outer shear)帯を伴うようになる。

リーデルせん断帯の成長と共に、隣接するリーデルせん断帯の間で断層の直上に、断層の走向とさらに低角度(5°~15°と-10°~-0°)で斜交する2種類のせん断帯が形成される。これら2次モードのせん断帯は、それぞれ低角リーデルせん断(Low-angle Riedel shear)帯やPせん断(P-shear)帯と呼ばれる。

さらに断層変位が増大すると、リーデルせん断帯と低角リーデルせん断帯ないしPせん断帯が交差する挾角部

表-2 模型実験のケース

実験 ケース	実験 装置	層厚 H (mm)	幅 W (mm)	長さ L (mm)	
1	A	30	250	1,400	
2					
3					
4	C	50	630	700	
5					
6					
7					
8					
9					
10	B	70	380	1,300	
11					
12					
13					
14	D	120	650	5,600	
15	E		380	2,600	
16	D		150	1,300	
17			200		
18			200		
19			400		
20			400		
21			2,400		

に、断層の走向に対して高角度(65°~80°)で斜交する短いせん断帯が密集して発達する部分が現れる。この3次モードのせん断帯は共役なりーデルせん断(Antithetic Riedel shear)帯と呼ばれ、これに沿うすれば基盤の断層とは逆のセンスである。

最終的には、リーデルせん断帯の中央部分、低角リーデルせん断帯、Pせん断帯を連ねて連続した主変位せん断(Principal displacement shear)帯が断層の直上に形成される。そして、ほぼすべてのずれが、この4次モードのせん断帯に沿って生じるようになる。

(2) せん断帯の分類と計測項目

a) 分類の方針

1次モードから3次モードのせん断帯を対象として、模型地盤の表面で観察されたすべてのせん断帯を、図-6に示すフローに従って分類した。判断規準として考慮したせん断帯の特性は、ずれのセンス、出現する順序と位

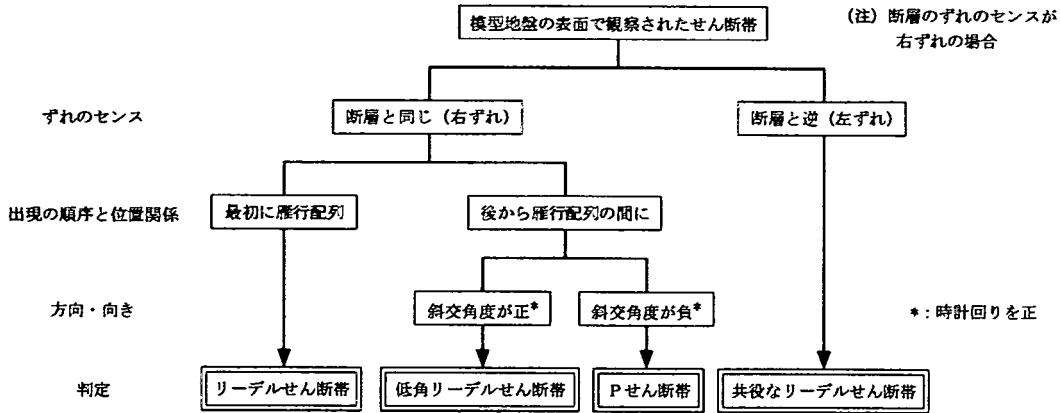


図-6 地表面のせん断帯の分類フロー

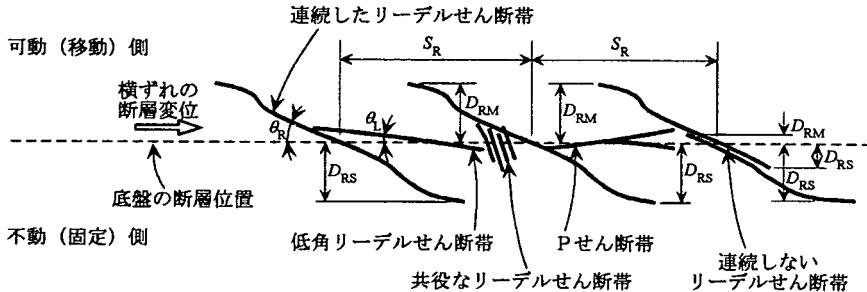


図-7 地表面のせん断帯の計測項目

置関係（配置），方向・向きである。

それのセンスは途中で反転せず、確実に判定することができる。そこで、まず、基盤の断層のずれと逆のセンスのせん断帯を3次モードの共役なリーデルせん断帯とした。

一方、基盤の断層のずれと同じセンスのせん断帯は、最初に出現する雁行配列のせん断帯を1次モードのリーデルせん断帯（スプレーせん断帯とアウターせん断帯を含む）とした。そして、この雁行配列のせん断帯の間に後から発達する2次モードの直線的なせん断帯を、その方向・向き（斜交角度の符号）によって低角リーデルせん断帯とPせん断帯に分類した。

b) 計測項目

図-6に示すフローに従って分類した各せん断帯について、その構造的な特性を調べた。図-7に示すように、位置関係（配置）、大きさや方向・向きに関する計測項目を定義して、スケッチと写真の結果を元に系統的に計測した。実際に計測した項目は多岐にわたるが、本論文では、以下に示す代表的な項目のみを論じる。

せん断帯が現れる位置関係（配置）としては、雁行配

列するリーデルせん断帯に関して、断層の走向に沿う間隔 S_R を検討した。また、せん断帯の大きさ（寸法）としては、リーデルせん断帯とスプレーゼン断帶およびアウターせん断帯が連結したせん断帯に関して、断層線から最外縁までの距離 D_R を検討した。この距離は、帯状の変状域の大きさ（幅の半分）に対応している。そして、せん断帯が発達する方向・向き（斜交角度）としては、リーデルせん断帯と低角リーデルせん断帯に関して、断層の走向と斜交する角度 θ_R と θ_L を検討した。

(3) 計測結果と考察

a) 各種のせん断帯が発達するのに必要な横ずれの断層変位量と模型地盤の厚さの関係

図-8 に各種のせん断帯が最初に地表面で観察されたときの横ずれの断層変位量 h_1 と模型地盤の厚さ H の関係を示す。また図-9 は、寸法効果の影響を検討するために、図-8 の縦軸 h_1 を模型地盤の厚さ H で割って無次元化して示した。図-8 と図-9 に示す曲線は、各種のせん断帯に対して、 h_1 と H の関係を式(1)に示す双曲線関数で近似したものである。

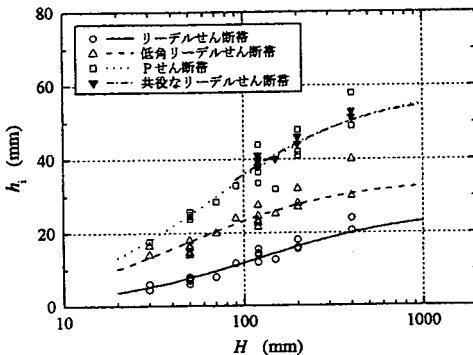


図-8 h_i と H の関係

$$h_i = \frac{H \cdot h_i^*}{H - a} \quad (1)$$

ただし、 h_i^* と a は各せん断帯に対する定数を示す。

1次モードのリーデルせん断帯に続いて、その1.5～2.3倍の断層変位量を要して、2次モードの低角リーデルせん断帯が現れる。その次に、同じ2次モードのPせん断帯と3次モードの共役なリーデルせん断帯が、リーデルせん断帯の2.2～3.0倍の断層変位量を要して発達する。ただし、共役なリーデルせん断帯は、模型地盤の厚さが90mm以下の実験ケースでは観察されなかった。

層厚 H が小さいと共役なリーデルせん断帯が発達しない理由は、次のように考えられる。共役なリーデルせん断帯の特徴は、数本の短いせん断帯が近接して局所的に発達することである。その間隔は砂の粒度に依存すると考えられ、豊浦砂の場合に25～40mmと推測される¹⁰。よって、3～5本のせん断帯が近接して存在するためには、リーデルせん断帯と低角リーデルせん断帶ないしPせん断帯が交差する挾角部に100～200mm四方程度のスペースが必要である。しかし、層が薄い模型地盤では帯状の変状域自体が狭くなり、共役なリーデルせん断帯が発達できるための領域が充分に確保されなかつたと推測される。

図-9に示すように、いずれの種類のせん断帯についても、模型地盤の厚さ H が増大するに従って相対的に少ない断層変位量 h_i/H で地表に出現する傾向の顕著な寸法効果が認められる。ただし、層厚 H が大きくなると、対数表示の H に対する h_i/H の変化はやや減少する（寸法効果が小さくなる）ようである。このように、模型地盤の厚さが小さい範囲でより顕著な寸法効果があることは、縦ずれ断層の模型実験の結果でも見られている¹⁰。また、層厚 H が大きくなると、リーデルせん断帯以外のせん断帯が出現する断層変位量とリーデルせん断帯が出現する断層変位量の比が小さくなる（同程度の断層変

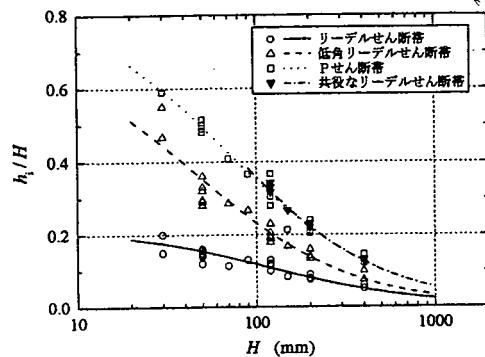


図-9 h_i/H と H の関係

位量で出現する）傾向が認められるが、出現する順序が入れ替わることはない。

h_i と H の関係に対する双曲線近似が層厚 H が数メートル以上の範囲にまで成り立つと仮定すると、各種のせん断帯が地表面に出現するのに必要な横ずれの断層変位量の上限（式（1）に示す h_i^* の値）が推測できる。 h_i^* の値は、リーデルせん断帯は26mm、低角リーデルせん断帯は35mm、Pせん断帯と共にリーデルせん断帯は60mm程度である。せん断帯の出現の判定が模型実験と比べて困難な実際の地盤であっても、倍程度のずれ変位があれば充分にせん断帯が発達すると仮定すると、未固結被覆層の厚さが数メートル以上の場合にも、0.5メートル程度の横ずれでリーデルせん断帯が、さらに1メートル程度の横ずれでせん断帯が網目状に発達する変状域が地表面に形成される可能性がある。ただし、この推測に関しては、地盤の種類や特性、さらに斜めずれの場合に縦ずれ成分の断層変位の影響も考慮して、実地盤でさらに検討する必要があろう。

b) せん断帯が現れる位置関係（配置）と模型地盤の厚さの関係

図-10にリーデルせん断帯に関して断層の走向に沿う間隔 S_R と模型地盤の厚さ H の関係を示す。また図-11は、寸法効果の影響を検討するために、図-10の縦軸 S_R を模型地盤の厚さ H で割って無次元化して示した。

各層厚 H に対して、 S_R ないし S_R/H の値が離散的にはらついている（グループ毎に）分布していることが特徴である。また、層厚 H が大きくなると、 S_R の値は全体的に増加するが、 S_R/H の値は逆に減少する傾向を示すので寸法効果が認められる。

このことは、1次モードのリーデルせん断帯が雁行配列して形成されるメカニズムに対して、表層地盤の内部に形成される変形構造が深く関与しているためと推測される。図-3に示すように、地表面で観察されるリーデ

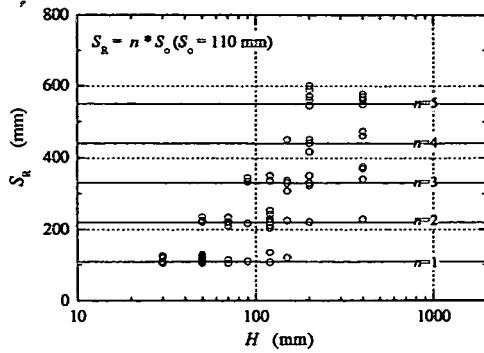


図-10 S_R と H の関係

ルせん断帯は、模型地盤の内部に形成される覆瓦構造のせん断帯が、捩りせん断帯を経て連結したS字せん断帯に選択的に成長し、最終的に地表面に到達した結果であることが分かっている^{10,11}。そこで、リーデルせん断帯の間隔 S_R が覆瓦構造のせん断帯の間隔 S_o （図-3 参照、文献 18 より 90~120mm）の整数倍であると仮定した関係 ($S_R = n \cdot S_o$: n は整数, $S_o = 110\text{mm}$) を図-10 と図-11 に実線で示した。

模型地盤の厚さ H が 150mm 以下では、 $n = 1$ の関係 ($S_R = S_o$) に沿って実験による S_R/H の下限値が分布し、覆瓦構造のせん断帯がすべてリーデルせん断帯として地表面にまで成長する可能性があることを示している。しかし、層厚 H が大きくなるに従って $n=2\sim 5$ の関係に沿って実験データが分布するようになり、覆瓦構造のせん断帯が飛び飛びに成長する選択的な傾向が強くなる。結果的に、 $H < 150\text{mm}$ の範囲では寸法効果の影響（層厚 H に伴って S_R/H の値が減少する傾向）が著しいが、 $H > 150\text{mm}$ の範囲では寸法効果の影響は次第に小さくなっている。

図-11 で層厚 H が数メートルの場合を外挿すると、 S_R/H の値は 0.2~1.0 と推測される。実際の地表地震断層で計測された結果¹⁰と比較してみると、斜めずれの場合ではあるが、未固結被服層の厚さ H が数メートルに対してリーデルせん断帯の間隔 S_R が 1~数メートルと概ね調和的である。なお、斜めずれ断層の模型実験より、 S_R/H の値は斜めずれ断層の縦ずれ成分の影響をあまり受けないことが知られている¹⁰。

c) リーデルせん断帯の大きさ（寸法）と模型地盤の厚さの関係

各種のせん断帯の中で断層線から最も遠方（変状の外縁）まで発達するのは、リーデルせん断帯の末端に形成されるスプレーせん断帯およびアウターせん断帯である。そこで、主変位せん断帯が発達する最終的な変位段階

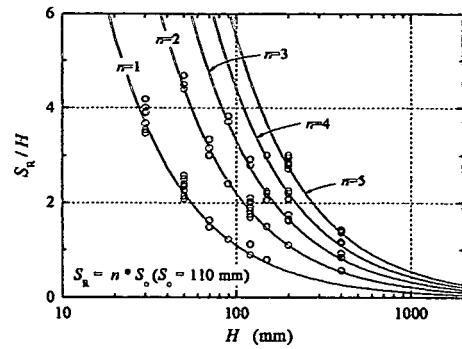


図-11 S_R/H と H の関係

(4次モード)において、断層線からリーデルせん断帯（スプレーせん断帯とアウターせん断帯も含める）の最外縁までの距離 D_R を計測した。土槽の可動（移動）側で計測したものを D_{RM} （正值）、不動（固定）側で計測したものを D_{RS} （負値）として、模型地盤の厚さ H に対してプロットして図-12 に示す。また図-13 は、寸法効果の影響を検討するために、図-12 の縦軸 D_{RS} と D_{RM} を模型地盤の厚さ H で割って無次元化して示した。

図-7 の右側のリーデルせん断帯に示すように、両翼が断層線の直上で連結していない（二分されたままの）場合もあるために、 D_R ないし D_R/H の絶対値が小さいデータも存在してばらつきが大きい。しかし、絶対値の最大を包絡する図中の破線の関係が、帯状の変状域の大きさ（幅の半分）の限界値に対応すると解される。

図-12 と図-13 を見ると、土槽の可動（移動）側と不動（固定）側のデータが、ほぼ同様に分布している。よって、土槽の片方のみを静的に横ずれさせる制御方法でも、現象の対称性が維持できることが確認できる。

実験した範囲 ($H=30\sim 400\text{mm}$) にわたって、帯状の変状域の大きさ (D_R の絶対値) は模型地盤の厚さ H と共に増大するが、その相対的な大きさ (D_R/H の絶対値) は減少する。よって、大きさ（寸法）についても頗るな寸法効果が認められる。地盤内部に形成されるせん断帯の花弁状の構造が、層厚 H が大きくなると、その開き具合が小さくなると考えられる。

図-13 で層厚 H が数メートル～数十メートルの場合を外挿すると、 D_R/H の絶対値は最大でも約 0.5 と推測される。よって、帯状の変状域の幅は未固結被服層の厚さと同程度以下に限定されることが分かる。なお、斜めずれ断層の場合には、さらに狭くなることが分かっている¹⁰。

d) せん断帯が発達する方向・向きと模型地盤の厚さの関係

リーデルせん断帯と低角リーデルせん断帯が断層の走

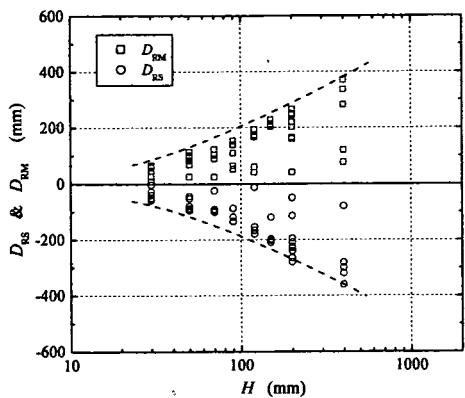


図-12 D_R と H の関係

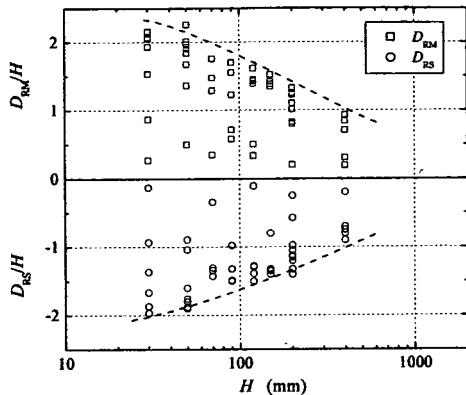


図-13 D_R/H と H の関係

向と斜交する角度 θ_R と θ_L と模型地盤の厚さ H の関係を図-14 に示す。 θ_R も θ_L の値もばらついているが、それぞれ $18^\circ \sim 33^\circ$ と $5^\circ \sim 15^\circ$ の範囲に分布し、層厚 H に依存する明瞭な傾向は認められない。したがって、実験した層厚の範囲 ($H=30\sim400\text{mm}$) では、せん断帯が発達する方向・向きに関する寸法効果ではなく、基盤の影響は余り大きくないと推察される。このことは、模型地盤の地表面に発達するせん断帯の方向・向きは、基盤の断層直上のせん断変形場（せん断帯の位置が定められている一面せん断的なメカニズム）よりも、地表面近傍の平面応力場（せん断帯の位置が定められていない単純せん断的なメカニズム）に強く支配されていることを示唆している。

θ_R と θ_L の理論値は、地表面近傍の応力場が単純せん断モードと仮定して、以下のように推定される¹⁰⁾。

$$\theta_R = \phi - (\pi/4 - \phi/2) \quad (2)$$

$$\theta_L = \theta_R - \xi \quad (3)$$

ただし、 ϕ はリーデルせん断帯が形成させる1次モードの応力場における最大主応力の方向が断層の走行となす斜交角度、 ϕ は砂の内部摩擦角、 ξ は1次モードの応力場から低角リーデルせん断帯が形成される2次モードの応力場に変化する際に最大主応力の方向が回転する角度である。豊浦砂の力学特性に関する研究より^{10, 19)}、応力レベルが低いこと ($\ll 10\text{kPa}$) と間隙比が小さいこと ($e=0.65$) を考慮すると、 ϕ と ϕ の値がそれぞれ $\phi = 40^\circ \sim 50^\circ$ 、 $\phi = 51^\circ$ と見積もることができる。よって、式(2)よりリーデルせん断帯の斜交角度の理論値は $\theta_R = 20.5^\circ \sim 30.5^\circ$ と計算され、模型実験での計測値 $\theta_R = 18^\circ \sim 33^\circ$ にほぼ一致する。

また、2次モードのリーデルせん断帯が斜交する角度

の実験結果 $\theta_L = 5^\circ \sim 15^\circ$ より、主方向の回転は $\xi = \theta_R - \theta_L = 13^\circ \sim 18^\circ$ であると推測される。したがって、低角リーデルせん断帯を形成する2次モードのせん断場に関する最大主応力の方向が断層の走行となす角度は $\phi - \xi = 27^\circ \sim 32^\circ$ と推定される。この角度はリーデルせん断帯の方向・向き ($\theta_R = 18^\circ \sim 33^\circ$) と近く、この領域（隣り合うリーデルせん断帯に挟まれた断層直上の領域）がリーデルせん断帯にほぼ平行な方向（水平方向）に圧縮される応力場にあることを示唆している。このことは、当該領域がプレッシャー・リッジになる（地表面が水平方向に圧縮されて尾根状に盛り上がる）ことと調和することは興味深い¹⁰⁾。

さらに、次の変位段階で形成される同じ2次モードのPせん断帯を調べてみると、低角リーデルせん断帯と異なる方向・向き ($\theta_P = 10^\circ \sim 0^\circ$) に発達することが報告されている¹⁰⁾。低角リーデルせん断帯とPせん断帯の方向・向きの差 $\theta_L - \theta_P = 15^\circ$ は、リーデルせん断帯と低角リーデルせん断帯の方向・向きの差 $\xi = 13^\circ \sim 18^\circ$ に

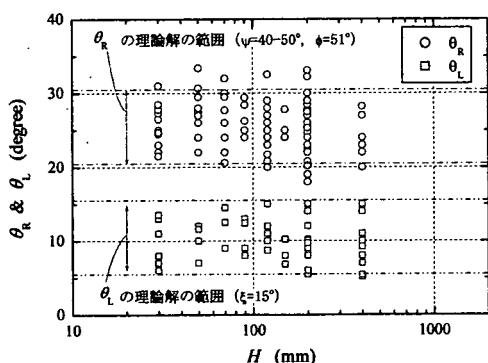


図-14 θ_R & θ_L と H の関係

近く、主応力方向が回転する同様のメカニズムが繰り返されている可能性もある。

4.まとめ

気乾燥状態の豊浦砂を密に締め固めて作製した模型地盤で、その層厚を30~400mmの範囲で変化させて一連の横ずれ断層の模型実験を行った。そして、地表面で観察されるせん断帶の構造を分析し、以下に示す結論を得た。

- (1) 土槽の境界の影響には、十分に配慮する必要がある。
特に断層の走行方向の両端部は、断層線上に雁行配列するリーデルせん断帶の間隔に影響を与えないように緩衝機能を有するものとしなければならない。
- (2) 地表面に形成されるせん断帶を、その特性に応じて分類した。さらに各せん断帶について、位置関係(配置)、大きさ(寸法)や方向・向き(斜交角度)に関する計測項目を定義して分析した。
- (3) 各せん断帶が形成されるのに必要な横ずれの断層変位量は、模型地盤の厚さと共に増加し、その寸法効果は著しい。
- (4) せん断帶が網目状に形成される変状域の大きさは、模型地盤の厚さと共に増加し、その寸法効果は著しい。
- (5) せん断帶が発達する方向・向きは、模型地盤の厚さに依存せず、寸法効果は認められない。そして、地表面近傍の応力場を単純せん断モードと仮定した理論と調和的である。

上記の(3)、(4)に示すように、本研究で実施した実験の範囲内で、対象とした現象は著しく寸法に依存する傾向を示した。今後、同様な模型実験を行う際や、本研究で得られた結果を元に実際の未固結被覆層の変形を予測する際には、この寸法効果に十分に留意する必要がある。なお、X線CTスキャナーで計測した地盤内部に発達するせん断帶の構造については別報で報告する予定である。

謝辞： 模型実験は、(財)電力中央研究所と横浜国立大学で実施した。実験を行った小林和夫氏(太平組)、西真幸氏(鉄道建設公団)、大澤清隆氏(八重洲土木技術センター)、渡辺亮氏(中央開発)、香川敬祐氏(フジタ)、河合貴行氏(横浜国立大学大学院)、研究計画などの議論に参加して頂いた上田圭一氏(電力中央研究所)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 谷 和夫：断層変位—どのくらい動くのか、その対処法
- 2) 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—地震断層・活断層の現地調査、電力中央研究所報告、U93007, 1993.
- 3) 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)、電力中央研究所報告、U98048, 1999.
- 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3)、電力中央研究所報告、U98049, 1999.
- 5) 渡辺 亮、谷 和夫：縦ずれ断層変位に伴って砂層に発達するせん断層の地表面到達位置に関する理論モデル、土と基礎、第50巻、第9号、pp.31-33, 2002.
- 6) Tani, K. and Ohnami, M.: FE model for surface rupturing of horizontal sand layer by reverse faulting. Proc. 9th Int. Conf. of Int. Assoc. for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol.3, pp.2065-2070, 1997.
- 7) Naylor, M.A., Mandl, G. and Sjöpstein, C.H.K.: Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress state, J. of Structural Geology, Vol.7, No.8, pp.737-752, 1986.
- 8) Mandl, G.: Mechanics of Tectonic Faulting Models and Basic Concepts, Elsevier, 1988.
- 9) Tchalenko, J.S. and Ambroseye, N.N.: Structural analysis of the Dasht-e Bayaz (Iran) earthquake fractures, Geol. Soc. American Bull., Vol.81, pp.41-61, 1970.
- 10) 谷 和夫、上田圭一、阿部信太郎、仲田洋文、林 康幸：野島地震断層で観察された未固結な表層地盤の変形構造、土木学会論文集、No.568/III-39, pp.21-39, 1997.
- 11) Tani, K.: X-ray computed tomography technique to observe shear banding in dense sand, Proc. Int. Sym. on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, pp.315-320, 1997.
- 12) 谷 和夫、阿部信太郎、鈴木浩一、西 真幸、林 泰幸、遠藤 理：野島断層上に発達した変形帯の調査結果—第四紀地盤地域で見られた地盤内部の断裂構造—、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会、土木学会、pp.41-48, 1997.
- 13) 堀 宗朗、ナブラ・バイクンタン：地震断層としてのリーデル線の形成のシミュレーション、計算工学講演会、Vol.1, pp.225-228, 1996.
- 14) 谷 和夫、上田圭一、鬼塚信弘、田中芳則：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.
- 15) 谷 和夫：密な砂に発達するせん断帶の間隔を調べるための基礎的な実験、第37回地盤工学研究発表会、pp.333-334, 2002.
- 16) 小山良浩、谷 和夫：横ずれ断層実験で観察された砂地盤

- 上に発達するせん断層の変形構造, 第 28 回土木学会関東支部技術研究発表会, pp. 496-497, 2001.
- 17) 西 真幸, 谷 和夫 : 横ずれ断層実験で観察されるリーデルせん断の発達するメカニズムに関する一考察, 第 31 回地盤工学研究発表会, pp. 1539-1540, 1996.
- 18) Pradhan, T., Tatsuoka, F. and Hori, N.: Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.2, pp.95-112,
- 19) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fukushima, S.: Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.65-84, 1986.

(2003. 2. 5 受付)

ANALYSIS OF SHEAR BAND STRUCTURE DEVELOPED ON SURFACE OF SAND LAYER OBSERVED IN STRIKE-SLIP FAULT MODEL TESTS

Yoshihiro OYAMA and Kazuo TANI

Since the outbreaks of huge earthquakes in Taiwan and Turkey in 1999, attention has been paid to surface fault rupturing causing damages to various civil engineering structures. The mechanism of surface fault rupturing is significantly affected by characteristics of fault movement and unconsolidated surface layer, and very little has been elucidated for the cases of strike-slip faults and oblique faults. This study examines a series of model tests of strike-slip faulting using sand. Characteristic features of shear band structures observed on the surface of model sand layer are investigated.