

横ずれ断層の模型実験で観察された 砂地盤の内部に発達するせん断帯の構造分析

谷 和夫¹・小山 良浩²

¹ 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)
tani@cvg.ynu.ac.jp

² 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)

大規模な内陸性の地震が発生すると、地震動だけでなく、地表地震断層によっても土木構造物が被害を受ける場合がある。この地表地震断層による地盤変形は、断層の変位や未固結被覆層の特性などに依存しており複雑である。横ずれ断層については、地表面に形成される網目状のせん断帯の性状やメカニズムが検討されているが、未固結被覆層の内部に発達するせん断帯に関する詳細は未だ解明されていない。そこで、横ずれ断層に関する模型実験において、X線CT技術を利用して模型地盤の内部に発達するせん断帯を観測した。そして、花弁状構造を特徴とするせん断帯の発達過程および形状や寸法に関する知見を得た。

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

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

大規模な内陸性の地震が発生すると、地震動だけでなく、地表地震断層によっても土木構造物が被害を受ける場合がある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と予想される場所でも、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。そこで、壊滅的な破壊を防ぐ対策を立てるために、まず地表地震断層による表層地盤の変形を明らかにする必要がある。

地表地震断層による表層地盤の変形は、硬い(コンピテントな)基盤中の断層のずれ(せん断変位)が原因となつて、これを覆う軟らかい(インコンピテントな)表層地盤に形成されるせん断帯によって特徴付けられる。このせん断帯は、上方に向かって発達する過程で方向・向きを変えたり、分岐や尖滅したり、さらに連続的な変形(引きずり・撓曲)に転化する。地表面にせん断帯が到達した部分では、段差や亀裂が発達し、その周辺には緩やかに傾斜した撓曲地形が見られる。表層地盤の内部や地表面で見られるこのような変状は、基盤の断層の走向・傾斜角、断層運動のセンス・断層変位の大きさ、表層地盤の特性などに強く依存して非常に複雑である。

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、未固結な表層地盤に発達するせん断帯に注目

した研究を継続的に実施してきた²⁾。1990年より取り組んだ縦ずれ断層(正・逆断層)に続いて³⁾、1993年からは、横ずれ断層に関する検討も行っている⁴⁾。

(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帯

横ずれの断層変位によって地表面に形成されるせん断帯の形態的な特徴については、主に実験的な研究⁵⁻⁷⁾や地表地震断層の現地調査^{8,9)}によって概略は明らかにされている。図-1に示すように、その特徴は、基盤の断層に沿ってせん断帯が網目状に発達し、帯状の変状域が形成されることである。その基本的なプロセスは、断層の直上にはほぼ等間隔に現れるリーデルせん断(Riedel shear)帯を1次的なモードとして、その間に次々と新たなモードの低角リーデルせん断(low-angle Riedel shear)帯やPせん断(P-shear)帯などが形成され、最終的に主変位せん断(principle displacement shear)帯に変形が集中していくというものである。

一方、表層地盤の内部に形成されるせん断帯については、主に実験的に調べられている。平面ひずみ状態の縦ずれ断層の場合には、断層面の走行に直交する鉛直断面内で二次元的な変形構造を把握することが可能である。よって、縦ずれ断層の模型実験においては、土槽の側面を通してせん断帯を観察するのが一般的である。しかし、横ずれ断層の場合には、模型地盤に三次元的な変形構造

が形成されるので、せん断帯の観察は容易ではない。模型地盤を切断して任意の断面を露出させて直接に目視観察する方法もあるが⁸⁾、観察後に横ずれの断層変位を継続して与えることができず、実験が中断する問題がある。そこで、X線CT (X-ray computed tomography) 技術を利用した断層撮影によって、密な砂地盤の内部に発達するせん断帯を間接的に観察する方法が1990年頃に開発された^{9, 10, 11)}。密な砂地盤に発達するせん断帯は、正のダイレイタンス特性によって体積が膨張し、密度が周囲より低くなる。すなわち、X線の吸収率が低下した領域となる。そして、外周からX線の透過強度のデータを収集して被検体内部のX線吸収率ないし密度の空間分布を解析的に求めるX線CT技術によって、このせん断帯の空間的な広がりを識別することができる。

図-2は、著者等がX線CTスキャナー (株) 日立メディコ製、CT-W450) を横ずれ断層の模型実験に初めて利用した際に得られた結果である¹⁰⁾。模型地盤は密な気乾状態の豊浦砂で、層厚 $h=100\text{mm}$ である。断層変位量 $h=3\text{mm}$ の段階では、基盤の断層より両側に傾斜が約 40° のせん断帯が連続的に発達する。 $h=6\text{mm}$ の段階では、両側のせん断帯はやや急傾斜になりながら上方に発達し、相対的な断層変位の進行方向に乗り上げるセンス (鱗状に面が重なる方向) の覆瓦構造 (imbrication structure) が形成される。さらに断層変位量が大きくなると ($h=12\text{mm}$)、両側のせん断帯の一部が断層直上で互いに結合する。そして、地表面には、一体化したせん断帯の中央上端が到達して、左ずれ特有の「ミ」型に雁行配列するリーデルせん断帯が現れる。このように、X線CT技術を利用した初歩的な模型実験によって、せん断帯が発達するプロセスの概略は明らかになってきた。

2. 研究の方針

(1) 研究の目的と検討項目

横ずれ断層の場合、表層地盤に形成されるせん断帯は三次元的な構造で非常に複雑である。著者らは、これまで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帯を各種モードに分類して詳細な性状やメカニズムを検討した⁷⁾。しかし、表層地盤の内部に形成されるせん断帯については、现阶段では、その基本的な構造の概略が分かっただけで、形状 (寸法や傾斜)、位置関係 (配置)、発達するプロセスなどに関する詳細は、充分に把握されていない。

そこで、X線CTスキャナーを利用して計測した結果を分析して、表層地盤の内部に形成されるせん断帯の詳

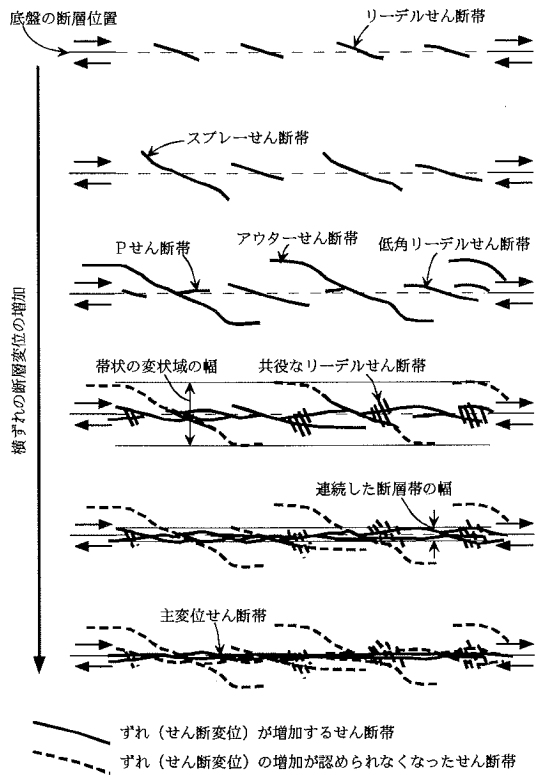


図-1 横ずれの断層変位によって表層地盤の表面に形成されるせん断帯

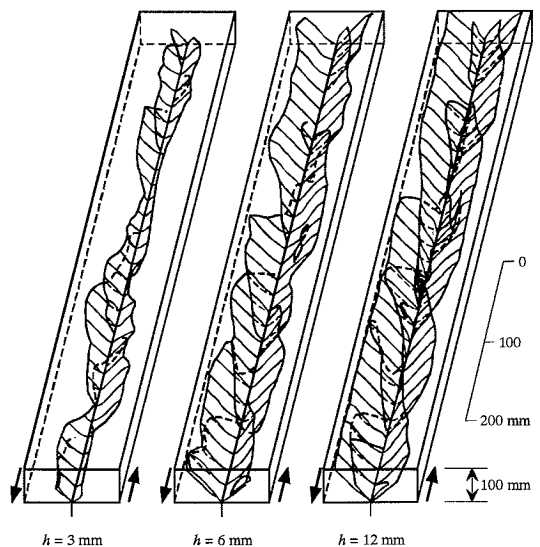


図-2 横ずれ断層によって表層地盤 (層厚 100mm, 密な気乾状態の豊浦砂) の内部に形成されるせん断帯¹⁰⁾

表-1 横ずれ断層の模型実験に用いた装置の仕様

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)	模型地盤の 最大対角長さ (mm)	横ずれの 最大断層変位量 h_{max} (mm)	ケース数
		長さ L	幅 W	深さ D				
A	左ずれ	1,700	250	150	90	266	100	3
B	右ずれ	1,700	380	200	120	398	34	4
E	左ずれ	3,000	380	220	200	429	110	1

細な構造を明らかにすることを研究の目的とした。各種モードのせん断帯について、特に注目する検討項目は以下の3つである。

- ① 形状 (寸法や傾斜) や位置関係 (配置)
- ② 発達するプロセス (せん断帯の大きさと断層変位量の関係)
- ③ 地表面で観察されたせん断帯との関連

(2) 検討の方針と手順

上記の3項目の検討に当たって、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、せん断帯の構造に及ぼす模型地盤の層厚の影響 (寸法効果) に留意する必要がある¹⁰⁾。模型地盤の層厚 H を 30~400mm の範囲で変化させて地表面で観察されるせん断帯を検討した結果でも、せん断帯の方向・向きには寸法効果が認められなかったが、せん断帯が発達するプロセス (せん断帯が発達するのに必要な断層変位量)、大きさ (寸法)、位置関係 (配置) などは層厚に著しく依存していた⁹⁾。このような寸法効果の要因としては、砂の力学特性が応力レベルに依存する拘束圧効果も考えられるが、せん断帯の幅や間隔が砂の粒度に依存する粒径効果が重要と思われる¹⁰⁾。そこで、模型地盤の層厚 H を変化させて平均粒径 D_{50} との比 H/D_{50} が異なるケースの実験を行い、計測したせん断帯の大きさや断層変位量を模型地盤の層厚で無次元化して比較・検討した。

検討の手順は、まず各種モードのせん断帯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帯に名称を付して分類した。そして、モード毎に計測項目を設定し、せん断帯の形状 (寸法や傾斜)、位置関係 (配置) を系統的に計測して分析した。

3. 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3種類の実験装置を使用した⁹⁾。土槽の内法幅 W と模型地盤の最大層厚 H_{max} は、X線CTスキャナーの観測範囲 (直径430mmの円形断面) 内に模型地盤の最大対角長さが収まるように定めた。また、土槽の内法長さ L は、両端の影響に配慮して、リーデルせん断帯が

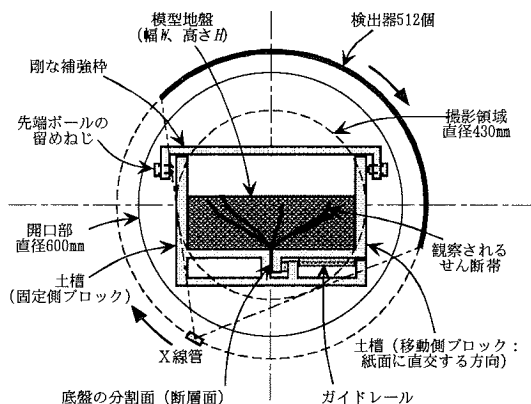


図-3 模型地盤の内部に形成されるせん断帯のX線CT技術による観察方法 (断面図)

最低でも4本以上は形成されるように長くした。

図-3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 (断面面) 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。

土槽の材料には、観測精度を上げるために、スキャナーの観測範囲にはX線の透過性が高いアクリル樹脂を用いた。一方、土槽の剛性が低いと、模型地盤に用いた密な砂が示す正のダイレンタンシー特性によって土槽が幅方向に広がろうとする。そこで、上面を覆うように剛な補強棒を設けて、土槽の幅を一定に保った。さらに、底盤と側壁の内側にサンドペーパーを貼って、模型地盤と土槽が滑らない (粗な) 条件とした。なお、底盤上の断層の位置を、以後、断層線と称す。

模型地盤の材料には、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。気乾状態 (含水比 $w = 0.11 \sim 0.15\%$) の試料を、厚さ約10mmごとに敷き均してパイプレーターで締め固める作業を繰り返す方法、または、ホッパーを利用した空中落下法 (落下高さ約1m) によって、均質で密な砂地盤 (空隙比 $e = 0.66 \sim 0.65$, 乾燥密度 $\gamma_s = 1.59 \text{ g/cm}^3$) を作製した。模型地盤の表面は、層厚が

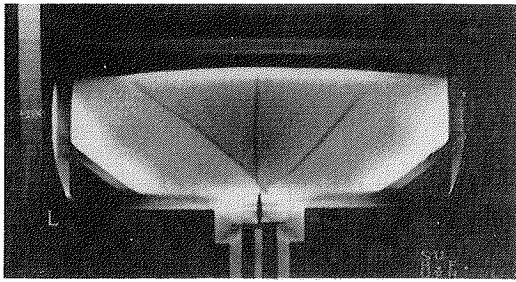


写真-1 X線CT技術による断層撮影されたせん断帯
(3本の黒く帯状に見える部分)

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、土槽の長手方向の両端には、境界の影響を抑えるため、一辺が1~3cm程度の発砲スチロールの薄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⁷⁾。

(2) 実験方法と観察方法

はずれの断層変位量 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させた（変位速度 1mm/min 以下）。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。

地表面の変形構造については、せん断帯の形状、位置関係、ず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。スケッチは、実験後に写真との比較を行い、記載の確認を行った。

また、模型地盤の内部に発達するせん断帯については、医療用X線CTスキャナー（東芝メディカル（株）製、TCT-700S）を用いて記録した^{8),10)}。土槽の長手方向に10mm 間隔で断層撮影（スライス厚 2mm）し、写真-1に示すように、断層線に直交する断面の画像を得た。そして、各画像からせん断帯を抽出し、画像間を補間して計測区間（300~900mm）内のせん断帯の三次元的な構造を特定した。

(3) 実験ケース

表-2 に示す合計 8 ケースの実験を行った。模型地盤の層厚 H を 30, 50, 70, 90, 120mm（層厚と平均粒径の比 $H/D_{50}=176\sim 706$ ）と幅広く変化させて、寸法効果（特に、せん断帯の粒度依存性）を検討したことが特徴である。

なお、表-1に示す装置 E（模型地盤の幅 $W=380$ mm, 最大厚さ $H_{max}=200$ mm）でも、X線CTスキャナーの撮影領域（直径430mm）と側壁の影響を受けない条件（ $H=120$ mmで $W/H\geq 3.1$ ）⁹⁾を考慮すると模型地盤の層厚を123mm以上にはできない。よって、模型地盤

表-2 模型実験のケース

実験 ケース	実験 装置	層厚 H (mm)	幅/層厚 W/H	長さ/層厚 L/H
1	A	30	8.3	56.6
2	A	30	8.3	56.6
3	A	50	5.0	34.0
4	B	70	5.4	24.3
5	B	90	4.2	18.9
6	B	120	3.2	14.2
7	B	120	3.2	14.2
8	E	120	3.2	25.0

の最大層厚は120mmに制限された。実際には本論文に示す以外にも多くの実験を行ったが、境界の影響や制御の精度に問題があるケースは全て検討の対象より外した⁷⁾。

4. 模型地盤の内部に発達するせん断帯の発達過程と分類

(1) せん断帯の発達過程

地表面に、1次モードのリーデルせん断帯と2次モードの低角リーデルせん断帯やPせん断帯が発達するまでの段階を検討する。模型地盤の内部で観察されたせん断帯の発達過程を図-4に示す。断層変位量 h の増加に伴い、4つの特徴的な段階を定義することができる。

a) 第1段階

$30^\circ\sim 40^\circ$ の傾斜を持つ連続したせん断帯が、断層線に沿って向かい合って発達する。断層線に直交する断面で観測されるせん断帯は、基盤の断層を基部として上方へ向かって広がる特徴的な形態をしており、花卉状構造（flower structure）と呼ばれる。

この花卉状構造のせん断帯が断層線に沿って連なり、連続した平面のように見えるが、図-5に模式的に示すように、本質的には周期性が存在するはずである。断層によって2分された基盤の相対的なずれ変位によって、基盤直上の砂層には断層上に立つ任意の鉛直軸回り（いずれの場合も鉛直上方から見て反時計回り）の偶力が作用する。隣り合う同じ方向に回転する砂層ブロックどうしの間では、ずれ変位を許容するせん断帯を考慮しないと運動学的に相容れない。したがって、適切な間隔で砂層ブロックの回転軸が断層面上に選ばれて、その中間にせん断帯が発達するはずである。しかし、土槽の両端を除いて断層線に沿って同じ境界条件の下にあるため、せん断帯変形が小さい初期段階では回転軸の位置や間隔が特定されず、明瞭な周期性は認められない。

b) 第2段階

断層直上の向かい合う2枚のせん断帯は、上方ほど傾斜がやや急になる下に凸の形状、すなわち正の花弁状構

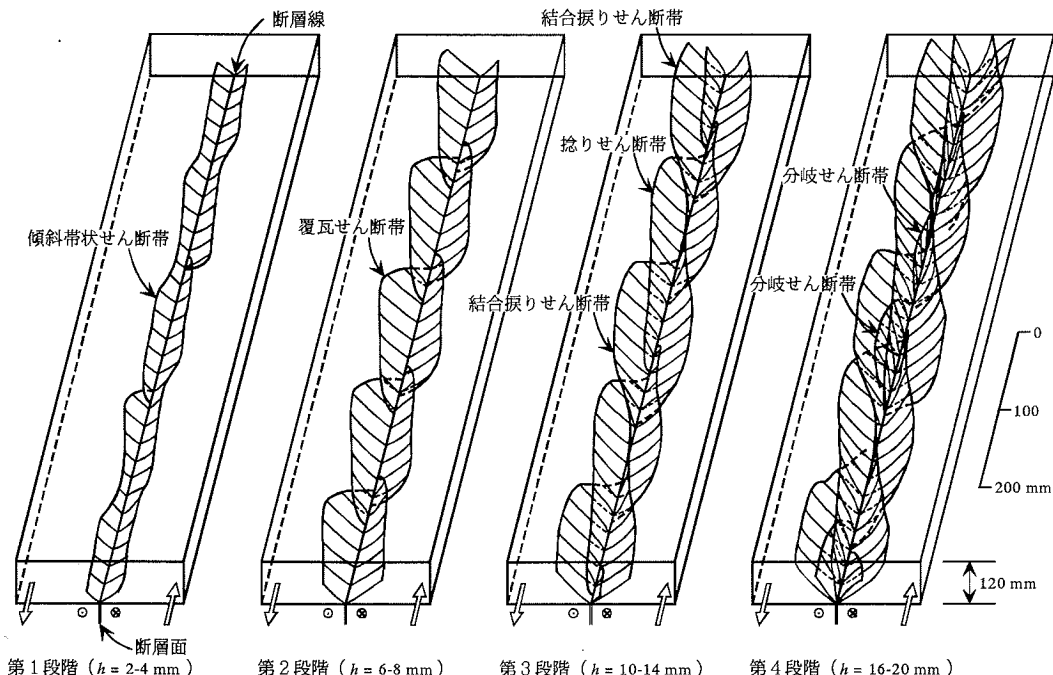


図-4 模型地盤の内部に形成されるせん断帯の発達過程 (層厚 120mm の場合)

造 (positive flower structure または tulip structure) を呈して地表面に向かって発達する。さらに、第1段階では断層線に沿って連続していたせん断帯が、ほぼ等間隔に分割される。そして、相対的な断層変位の方向に乗り上げるセンスで配向する覆瓦構造を形成する。その結果、 $40^\circ \sim 50^\circ$ に傾斜して互いに逆向きセンスで鱗状に重なる2列のせん断帯が、断層直上で向かい合って整列する状態となる。

c) 第3段階

断層を挟んで2列に形成されたせん断帯が、それぞれ内側および上方に向かってさらに発達する。そして、一部は対向側のせん断帯と結合して断層線を横切る大きなせん断帯を形成する。まず、覆瓦構造の乗り上げた部分の先端が、相対的な断層変位の方向に成長しながら内側に曲がり、全体として先端を捻った形状に発達する。そして、隣接するせん断帯に比べてより大きく発達するものがほぼ等間隔に表れて、前方から対向して発達する逆側のせん断帯と断層の直上で結合する。

断層線を横切って一体化したせん断帯は、断層線に沿って立てた平面の中央上端を、断層のずれ変位による回転方向 (左横ずれの場合は上方から見て反時計回り) に振った形状である。上端はS字の輪郭を描き、直線的な中央部分 (変曲区間) が上方に伸びて地表面に到達する。その結果、図-1 に示すように、断層に沿って雁行配列 (断層線に対して $18^\circ \sim 33^\circ$ 斜交して等間隔に分布、

左ずれの場合は「ミ」型) する1次モードのリーデルせん断帯が地表面に形成される。このリーデルせん断帯は、図-5 に示す回転する砂層ブロックの中間に潜在するせん断帯と、その走行が $57 \sim 72^\circ$ 異なることと、ずれのセンス (ずれる方向: 右ずれ/左ずれ) が逆であることから、互いに共役な関係にあることが分かる⁹⁾。

d) 第4段階

一体化したせん断帯がさらに発達する。そして、地表

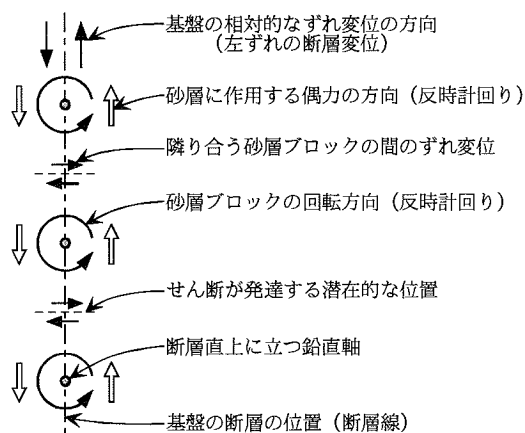


図-5 基盤の左ずれの断層変位によって表層地盤の変形に生起する周期性 (平面図)

面のリーデルせん断帯は、両端部にスプレーせん断 (spray shear) 帯とアウトアーせん断 (outer shear) 帯を伴って、全体としてS字を描くようになる。

リーデルせん断帯が成長すると共に、覆瓦構造のせん断帯の根元 (基盤の断層) あるいは途中から新たなせん断帯が内側に分岐して発達する。これらの新たなせん断帯は鉛直ないし高傾斜で、ほぼ平面状であることが特徴である。断層変位量がさらに増加すると、他のせん断帯を横断する (切る) 場合もある。

断層の近傍からほぼ鉛直に発達するこれらの新たなせん断帯が上方に成長し、最終的に地表面に到達したものが2次モードの低角リーデルせん断帯やPせん断帯に対応する。図-1 に示すように、地表面における走行は断層線の方向に近く、それぞれ $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $-10^{\circ} \sim 0^{\circ}$ に斜交する⁷⁾。

(2) せん断帯の分類と計測項目

a) 分類の方針

図-4 に示す第1~4段階のせん断帯の発達過程に従って、模型地盤の内部で観察されたすべてのせん断帯を6種類に分類した。

第1段階において、断層線に沿って向かい合って発達するせん断帯を「傾斜帯状せん断 (inclined strip shear) 帯」とした。ずれのセンスは断層と同じで (最終的に地表に到達した時点で確認ができる)、傾斜が $27^{\circ} \sim 44^{\circ}$ で帯状に (ほぼ同じ幅の平面として) 連なる。所々分断されているが、断層線に沿う明瞭な周期性は認められない。

第2段階において、傾斜帯状せん断帯がほぼ等間隔に分断されて、明瞭な周期性が観察されるようになったものを「覆瓦せん断 (imbrication shear) 帯」とした。断層を挟んで向かい合う2列の覆瓦せん断帯は、それぞれ相対的な断層変位の方向に乗り上げるセンスで鱗状に重なる対向関係 (重なり方向が互いに逆向き) にある。基部の傾斜は緩く $27^{\circ} \sim 44^{\circ}$ 、上端がやや高傾斜 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ になるので、全体として下に凸の形状を呈する。その平均傾斜角は、10mm 間隔で断層撮影したすべての観測断面において 50° 以下である。

第3段階において、覆瓦せん断帯がさらに発達して、乗り上げた部分の先端が内側に捻られた形状になったものを「捻りせん断 (twisted shear) 帯」とした。覆瓦せん断帯との区別は、平均傾斜角が最も急な乗り上げた先端部で 50° を超えるか否かで判断した。

これらの捻りせん断帯の中で、特に大きく発達して対向側のせん断帯と一体化したものを「結合振りせん断 (combined wrench shear) 帯」とした。ペアとなる捻りせん断帯は、断層を挟んで目の前に存在するものではなく、相対的な断層変位の方向に離れて存在するものである。

また、すべての捻りせん断帯が結合振りせん断帯にまで成長するわけではなく、ほぼ等間隔に選択される。その特徴的な形状は、断層上に立てた平面の中央上端を摘んで、断層のずれ変位による回転方向に浅い角度 ($20^{\circ} \sim 30^{\circ}$) に振った構造である。地表面に表れるリーデルせん断帯、さらにはスプレーせん断帯やアウトアーせん断帯に対応する。

第4段階において、覆瓦せん断帯の根元 (基盤の断層) あるいは途中から内側に分岐して発達するものを「分岐せん断 (diverted shear) 帯」とした。形状はほぼ平面で、その走行は断層線にほぼ平行で、鉛直ないし高傾斜 ($65^{\circ} \sim 90^{\circ}$) である。ずれのセンスは断層と同じで、地表面に表れる低角リーデルせん断帯やPせん断帯に対応する。

さらに断層変位が大きくなると、図-4 には示していないが、図-1 に示す地表面で観察される共役なリーデルせん断 (conjugate Riedel shear) 帯に対応するものが地盤の内部でも観察されることがある。地表面の近傍で、数枚の互いに平行で鉛直な平面がほぼ等間隔に密集して分布するので、「平行表層せん断 (parallel shallow shear) 帯」とした。他のせん断帯と比較して撮影された像が明瞭ではないので推測の域を出ないが、これらのせん断帯は浅部のみで発達し、深部から成長する覆瓦せん断帯や分岐せん断帯とは連続していないようである。ずれのセンスは断層と逆である (共役な関係にある)。

b) 計測項目

分類した6種類のせん断帯の内、断層線から地表面に向かって継続的に発達する主要なせん断帯 (傾斜帯状せん断帯、覆瓦せん断帯、捻りせん断帯、結合振りせん断帯) について、その構造的な特性を調べた。図-6 に示すように、形状 (寸法や傾斜)、位置関係 (配置) に関する計測項目を定義して、X線CTによる断層撮影の結果を元に計測した。各計測項目を表す変数 (高さ H 、幅 W 、長さ L 、傾斜角 δ) に付したサフィックス (下付き文字: is, im, tw, cw) は、各せん断帯の名称を表示する。

せん断帯の大きさを表す寸法として、断層線に直交する断面内で定義した高さ⁸⁾と幅、さらに長手方向の延長 (長さ) について分析した。覆瓦せん断帯の範囲毎に、断層線の位置から最高縁部までの鉛直距離 (高さ) H_s 、 H_m 、 H_w 、 H_{cw} と、最外縁部までの水平距離 (幅) W_s 、 W_m 、 W_w 、 W_{cw} を計測した。その他、覆瓦せん断帯と結合振りせん断帯に関しては、断層線に接している長さ L_m 、 L_{cw} も検討した。せん断帯の一部 (1/2未満) がX線CTによる観測範囲の端部より外れている場合には、覆瓦せん断帯に関しては、平面図上で形状が楕円の1/2であると仮定して L_m の値を求めた。一方、結合振りせん

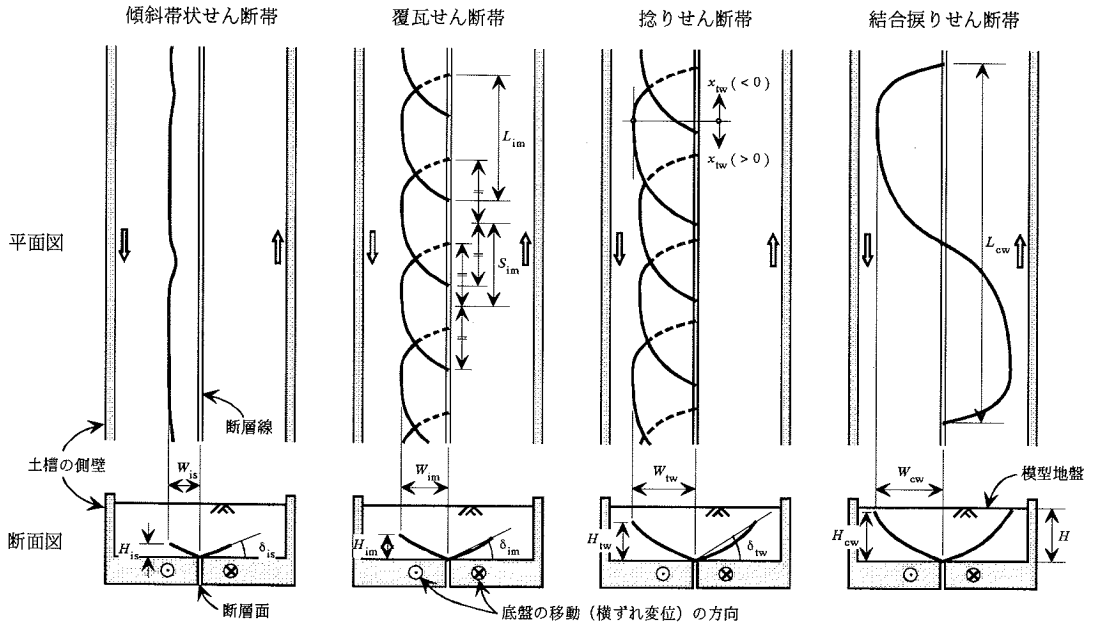


図-6 地盤内部のせん断帯の計測項目 (平面図には片側ないし一部のみを表示)

断帯に関しては、同じく平面図上で中心の結合部に関して点対称であると仮定して L_{cw} の値を求めた。

また、せん断帯の傾斜として、傾斜帯状せん断帯の基盤面高さにおける傾斜角 δ_s と、覆瓦せん断帯と捻りせん断帯の平均傾斜角 δ_m および δ_w を断層線に直交する断面内で計測した。捻りせん断帯については、その曲面性状(捻りの状態)を調べるため、最外縁部(H_w の計測位置)からの断層線に沿う距離 x_w と平均傾斜角 δ_w の関係を求めた。

そして、せん断帯が現れる位置関係(配置)として、断層線に沿って分割されている覆瓦せん断帯の間隔 S_m を計測した。断層線に接している長さ L_m の中間点同士の間隔を間隔 S_m と定義して求めた。

5. 模型地盤の内部に発達するせん断帯の計測結果と考察

(1) 各種のせん断帯の鉛直方向への発達と横ずれの断層変位量の関係

すべての実験ケースについて、傾斜帯状せん断帯、覆瓦せん断帯、捻りせん断帯、結合捻りせん断帯の断層線の位置から最高縁部までの鉛直距離(高さ) H_s 、 H_m 、 H_w 、 H_{cw} の平均値と横ずれの断層変位量 h の関係を図-7に示す。

傾斜帯状せん断帯(○印)の高さ H_s は、模型地盤の層厚 H には余り依存せず、横ずれの断層変位量 h に比

例して $H_s=30\sim 50\text{mm}$ まで発達することが分かる。その後、層厚が大きい場合($H=90\text{mm}$ & 120mm)には、覆瓦せん断帯(□印)、捻りせん断帯(◇印)、結合捻りせん断帯(△印)と順次高さを増大させて地表面に到達する。一方、層厚が小さい場合($H=30\text{mm}$ & 50mm)には、傾斜帯状せん断帯として地表面近くまで成長するため、これに続く性状の変化の間に高さの変化は小さい。

図-7に示す関係の勾配は、単位横ずれ断層変位あたりのせん断帯の高さの増加量を示している。断層変位が小さい初期の関係はほぼ線形で、傾斜帯状せん断帯の成長傾向が模型地盤の層厚 H には余り依存せず、勾配は9~12である。基盤近くでは、地表面の影響を受けていないためと推測される。一方、断層変位が大きくなりせん断帯が成長すると、地表面の影響を受けてせん断帯のモードが変換し、この勾配は減少する。特に、模型地盤の層厚が小さいほどその非線形な傾向が強くなる。

また図-7に示す上向き矢印の位置は、目視により地表面でリーデルせん断帯が最初に観察されたときの断層変位量 h_0 である。X線CT技術により地盤内部で観察された結合捻りせん断帯が地表面に到達($H_{cw}=H$)する断層変位量とほぼ一致しており、計測の信頼度が高いことが確認できる⁷⁾。

寸法効果の影響を検討するために、図-7の両軸を模型地盤の層厚 H で無次元化した関係を図-8に示す。縦軸の H_s/H 、 H_m/H 、 H_w/H 、 H_{cw}/H は、各せん断帯の地表面までの到達度を、横軸の h/H は相対的な断層変位量を表している。

相対的な断層変位量が小さく ($h/H < 0.07$) , 傾斜帯状せん断帯が発達する段階では, 層厚の影響は小さい。しかし, $h/H > 0.07$ になると, 層厚が大きいほど地表面までの到達度は高くなる。よって, 模型地盤の層厚 H が大きいほど, 相対的に少ない断層変位量 h でせん断帯が地表面に到達する傾向の寸法効果が存在する。同様の寸法効果は, 地表面に各種のせん断帯が最初に出現する相対的な断層変位量 h/H についても認められている¹⁾。

(2) 各種のせん断帯の水平方向への発達と横ずれの断層変位量の関係

3回実施した層厚 $H=120\text{mm}$ の実験ケースについて, 傾斜帯状せん断帯, 覆瓦せん断帯, 捻りせん断帯, 結合振りせん断帯の断層線の位置から最外縁部までの水平距離(幅) W_s, W_m, W_w, W_{cw} と横ずれの断層変位量 h の関係を図-9に示す。

傾斜帯状せん断帯 (○印) から覆瓦せん断帯 (□印) までは, 傾斜がほぼ一定 ($27^\circ \sim 44^\circ$) であるので, 図-7に示す鉛直方向の成長に対応して, すべてのせん断帯が断層変位量に比例して水平方向にも成長する。しかし, 捻りせん断帯 (◇印) に転じる段階 ($h=8\sim 12\text{mm}$) になると, 結合振りせん断帯 (△印) にまで大きく成長するもの (実線) と捻りせん断帯に留まるもの (破線) に分類される。さらに, 断層変位量に対して鉛直方向に (高さ) はほぼ線形に成長したのに比べて, 水平方向へ (幅) の進展は徐々に低下する非線形な傾向を示す。このことは, 捻りせん断帯の外縁部 (上部) の傾斜が急になり, 形状が下に凸であることを反映している。また, 下向き矢印で示した最初に地表面に到達した時点 ($h=14\sim 15\text{mm}$) の後も, 水平方向への進展が継続し, 向かい側のものと一体化して結合振りせん断帯にまで成長すると, 幅 W_{cw} は 150mm を超える。この値は, 地表面で計測された断層線からリーデルせん断帯 (スプレーせん断帯とアウトターせん断帯も含める) の最外縁までの距離 $W_R=165\sim 180\text{mm}$ に対応している¹⁾。

寸法効果の影響を検討するために, 模型地盤の層厚毎に得られた W_s, W_m, W_w, W_{cw} と h の関係 (例えば, $H=120\text{mm}$ については図-9) において, 結合振りせん断帯にまで成長したものの (実線) の平均的な関係の両軸を模型地盤の層厚 H で無次元化して図-10に示した。縦軸の $W_s/H, W_m/H, W_w/H, W_{cw}/H$ は, 各せん断帯の水平方向への進展度を表している。

すべての層厚において非線形な関係であり, 図-8に示す鉛直方向の関係とは異なる寸法効果の傾向が見られる。すなわち, 相対的な断層変位量が小さく ($h/H < 0.07$) , 傾斜帯状せん断帯が発達する段階では, 層厚の影響は小さい点で共通している。しかし, $h/H > 0.07$ になると, 層

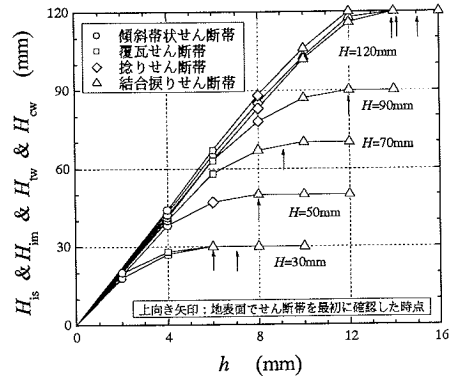


図-7 H_s, H_m, H_w, H_{cw} と h の関係

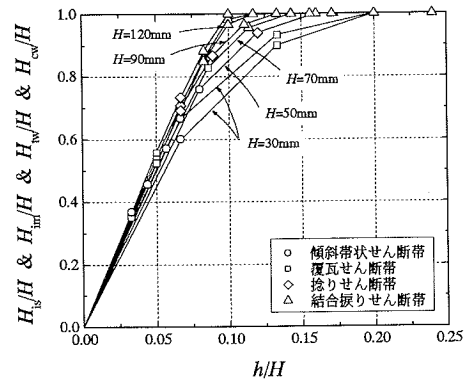


図-8 $H_s/H, H_m/H, H_w/H, H_{cw}/H$ と h/H の関係

厚が大きいほど水平方向への成長は小さくなり, 鉛直方向とは逆の傾向となる。模型地盤の層厚が大きいほど水平方向の進展度が小さいことは, 地表面で観察される帯状の変状域 (またはリーデルせん断帯) の相対的な幅が模型地盤の層厚が大きいほど狭くなる傾向と調和的である¹⁾。

(3) せん断帯の形状と模型地盤の層厚の関係

せん断帯の発達に関する寸法効果の傾向が, 鉛直方向と水平方向で異なることは, せん断帯の形状にも寸法効果が存在することを意味する。層厚が小さい場合には, 緩い傾斜 ($27^\circ \sim 44^\circ$) の傾斜帯状せん断帯が地表面の近傍にまで発達するので, 覆瓦せん断帯や捻りせん断帯に移行しても上端部の傾斜はあまり急にならず, その形状は平面に近い。一方, 層厚が大きい場合には, 地盤の中～浅部にまで発達した段階で捻りせん断帯が十分に発達して, 外縁部が急な傾斜 ($35^\circ \sim 55^\circ$) になる下に凸の曲面形状になってから地表面に到達する。

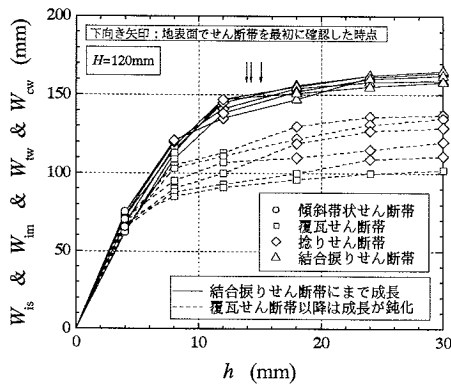


図-9 W_b , W_m , W_w , W_{cw} と h の関係 ($H=120\text{mm}$)

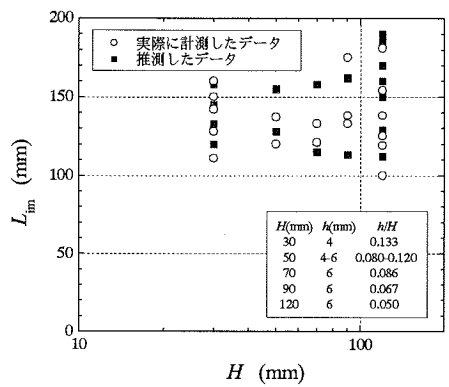


図-11 L_m と H の関係

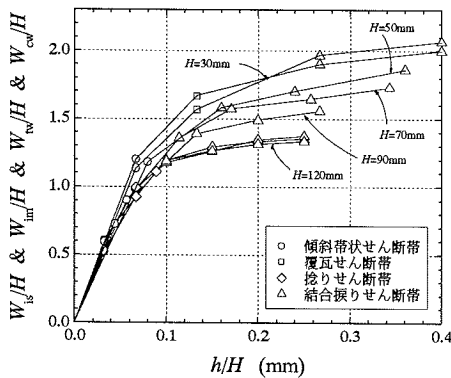


図-10 W_b/H , W_m/H , W_w/H , W_{cw}/H と h/H の関係

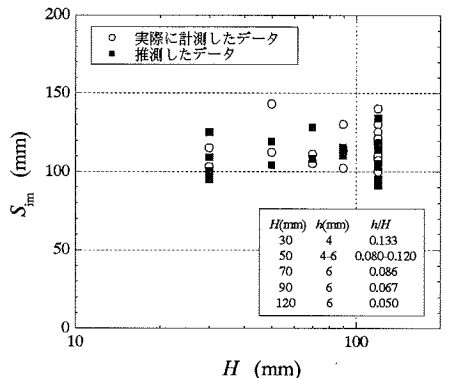


図-12 S_m と H の関係

このようにせん断帯の形状に寸法効果が見られる理由として、縦ずれ断層の場合も含めて一連の模型実験の観察に基づき、粒径の影響が大きいと推測している。粒状体に発達するせん断帯は、粒径が大きいほどその幅(平均粒径の10~20倍)が広く(厚く)なり、取り得る曲率が小さく(断面内ではより線形に、空間内ではより平面的)になる¹⁹。また、分岐が少なくなる傾向も観察されている¹⁹。初期に断層線の直上に発達する傾斜帯状せん断帯や覆瓦せん断帯は、その形状がほぼ平面である(曲率がゼロに近い)ので、大きさの制限は受けずに成長できる。しかし、それ以降に発達する捻りせん断帯などの形状は曲面であるため、粒径と許容される曲率に応じて、ある最低の寸法が存在すると考えられる。ところが、模型地盤の層厚が小さいと、捻りせん断帯などの曲面のせん断帯が充分に発達するスペースがなく、形状が平面から曲面に遷移する前に地表面に到達してしまう。その結果、層厚が大きい場合と比較して、せん断帯の形状は相対的により平面的な形状になり、また水平方向の

進展度も大きくなると推測される。

これまでせん断帯の幅に対する粒径の影響は検討されてきたが、せん断帯の曲率や分岐に対する粒径の影響に関する知見やデータは非常に限られている¹⁹。粒径効果は模型実験の相似則にも関連するため、今後、定量的な検討が必要であろう。

(4) せん断帯の大きさ(寸法)や位置関係(配置)と模型地盤の層厚の関係

覆瓦せん断帯に関して、断層線に接している長さ L_m および間隔 S_m と模型地盤の層厚 H の関係を図-11および図-12に示す。○印は覆瓦せん断帯の全体がX線CTの観測範囲内にあり実際に計測できたデータを、■印は覆瓦せん断帯の一部(1/2未満)が端部より外れているのでその形状を楕円と仮定して推測したデータを示す。なお、各層厚の模型実験において計測をする断層変位量 h は、覆瓦せん断帯が同程度に発達した段階で比較できるように寸法効果を考慮して選択したので、両図に示す

ように相対的な断層変位量 h/H は層厚が大きくなるほど小さい。

傾斜帯状せん断帯と同様に、覆瓦せん断帯の長さ L_m も間隔 S_m も、模型地盤の層厚 ($H=30\sim 120\text{mm}$) に依存しないようである。計測した変位段階が緻密には同一ではないためにデータがややばらついているが、長さは $L_m=120\sim 160\text{mm}$ である。一方、間隔は計測した変位段階に依存しないためデータのばらつきは小さく、 $S_m=100\sim 120\text{mm}$ である。層厚に依存しない理由は、基盤の断層直上の深部に発達する変形構造は、地表面の影響を受け難いからであると考えられる。覆瓦せん断帯の L_m や S_m の値が模型地盤の層厚 H に依存しないということは、これらの値を層厚で無次元化した L_m/H や S_m/H の値が、層厚 H が大きくなるほど小さくなることを意味している⁷⁾。つまり、模型地盤内の覆瓦せん断帯の相対的な大きさや間隔に関して、顕著な寸法効果が存在することになる。

結合振りせん断帯に関して、断層線に接している長さ L_{cw} と模型地盤の層厚 H の関係を図-13 に示す。結合振りせん断帯の延長が長くて観測範囲の端部に掛かるものが多いので推定した値 (■印) が多く、またデータのばらつきも大きい。しかし、図-11 に示す L_m とは異なり、模型地盤の層厚が大きくなると、結合振りせん断帯の延長も長くなる明瞭な傾向が確認できる。 $H=30\sim 50\text{mm}$ では覆瓦せん断帯の間隔 ($S_m=100\sim 120\text{mm}$) の4倍程度、 $H=90\sim 120\text{mm}$ では5倍程度である。すなわち、覆瓦せん断帯が成長して断層線を挟んで結合する相手は、数枚離れた位置のものであり、層厚と共にその離間距離が大きくなる。

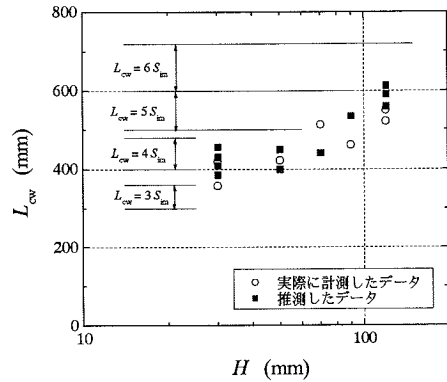


図-13 L_{cw} と H の関係

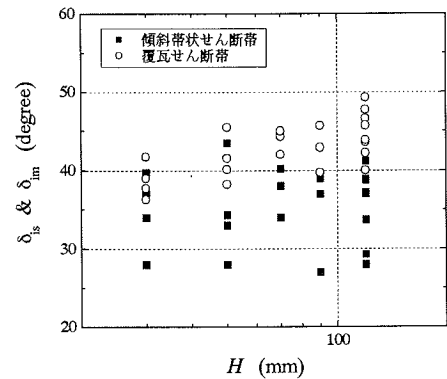


図-14 δ_s , δ_m と H の関係

(5) 覆瓦せん断帯の傾斜と模型地盤の層厚の関係

傾斜帯状せん断帯の基盤面高さにおける傾斜角 δ_s および覆瓦せん断帯の平均傾斜角 δ_m と模型地盤の層厚 H の関係を図-14 に示す。

δ_s の値は $27\sim 44^\circ$ の範囲でばらついているが、模型地盤の層厚に依存せず、寸法効果は認められない。傾斜帯状せん断帯が、地表面の影響を受けずに形成される構造であることを反映している。

一方、 δ_m の値も $36\sim 50^\circ$ の範囲でばらついているが、層厚と共にやや高角度になる傾向が見られる。5(3)節に記した形状に関する寸法効果に対応している。この覆瓦せん断帯については、傾斜帯状せん断帯と同じく、基盤の深さで定義される長さ L_m (図-11) や間隔 S_m (図-12) には明瞭な寸法効果が見られなかった。しかし、層厚が小さい場合には、せん断帯が成長する外縁部が地表面近くまで到達するので、先端部 (地盤の中～浅部) では地表面の影響を受けていると推測される。

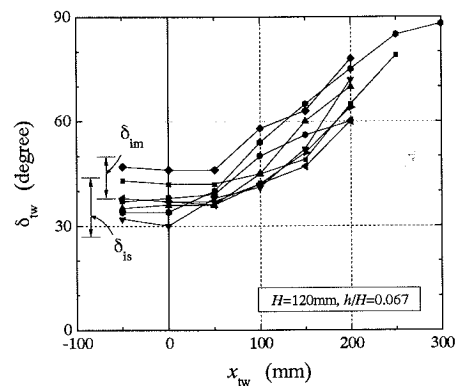


図-15 δ_{cw} と L_{cw} の関係

(6) 捻りせん断帯の形状

3 回実施した層厚 $H=120\text{mm}$ の実験ケースについて、

捻りせん断帯の形状を調べた結果を図-15 に示す。縦軸は平均傾斜角 δ_m で、横軸は最外縁部を原点とした計測断面の位置 x_m である(図-6 参照)。

$x_m = -50 \sim +50 \text{mm}$ (最もせん断帯の端部が断層線から水平方向に離れている部分の周辺)では、傾斜帯状せん断帯や覆瓦せん断帯の傾斜角 δ_s および δ_m の範囲に含まれるが、断層変位の進行方向(x_m が正の方向)へ離れるに従って δ_m の値は増大する。このことより、捻りせん断帯の形状は、覆瓦せん断帯の断層変位の進行方向の端部が内側(断層線側)に捻られて進展しており、逆方向の端部の傾斜角は一定で成長していないことが分かる。

6. まとめ

横ずれ断層の模型実験を実施して、気乾燥状態の豊浦砂からなる密な地盤(層厚 30~120mm)の内部に発達するせん断帯を、X線CT技術を利用して観察した。そして、地表面で観察される1次モードのリーデルせん断帯に対応する地盤内部のせん断帯の特徴的な発達過程(傾斜帯状せん断帯→覆瓦せん断帯→捻りせん断帯→結合捩れせん断帯)を明らかにした。また、2次モードの低角リーデルせん断帯やPせん断帯に対応するものは、上記のせん断帯から枝分かれする高傾斜な分岐せん断帯であることや、3次モードの共役なりーデルせん断帯は、地表面近傍にのみ発達し、基盤の断層から発達するせん断帯とは連続していないことも分かった。

さらに、地盤内部で観察されたこれらのせん断帯を、その発達過程と形態的な特徴に従って6種類に分類した。そして、傾斜帯状せん断帯、覆瓦せん断帯、捻りせん断帯、結合捩れせん断帯について、その形状(寸法や傾斜)、位置関係(配置)に関する計測項目を定義して形態的な特徴を調べた。その結果、せん断帯の正の花弁状構造に関する具体的な形状や寸法、さらに寸法効果の影響などに関する知見が得られた。

今後は、横ずれと縦ずれが複合する斜めずれ断層に関しても同様の分析が必要である。そして、実際の地表地震断層との関連性を検討し、地表地震断層による表層地盤の変状予測や、被害の低減策などに、これらの知見を反映させることが重要であろう。

謝辞：利用した実験データは、1993年から1997年にかけて(財)電力中央研究所で実施されたものである。実験を実施した西真幸氏(鉄道建設公団)、大澤清隆氏(八重洲土木技術センター)、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、その対処法は — (日本地震あれからこれから(「1995年兵庫県南部地震」5周年特別企画))、土木学会、pp.31-34, 2000.
- 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) Naylor, M.A., Mandl, G. and Sijpestein, 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.
- 6) Mandl, G.: *Mechanics of Tectonic Faulting-Models and Basic Concepts*, Elsevier, 1988.
- 7) 小山良浩、谷和夫：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、土木学会論文集、No.750/III-65, pp.171-181, 2003.
- 8) Tchalenko, J.S. and Ambrasey, N.N.: Structural analysis of the Dasht-e-Bayaz (Iran) earthquake fractures, *Geol. Soc. American Bull.*, Vol.81, pp.41-61, 1970.
- 9) 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.
- 10) 谷和夫、上田圭一：X線CTを用いた横ずれ断層模型実験、第48回年次学術講演会、土木学会、III-677, pp.1408-1409, 1993.
- 11) Desrués, J., Mokni, M. and Mazerolle, F.: Tomodensimetry and localization in sands, *Proc. 11th ECSMFE*, Vol.1, pp.61-64, 1991.
- 12) 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.
- 13) 谷和夫：密な砂に発達するせん断帯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.
- 14) 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.
- 15) 谷和夫、上田圭一、鬼塚信弘：基盤断層を被覆する砂層内に発達するせん断層群の形状解析 — 模型実験に基づく数値解析的検討 —、日本地質学会第101年学術大会、pp.203, 1994.
- 16) Tani, K., Ueta, K. and Onizuka, N.: Discussion on "Earthquake fault

rupture propagation through soil” by J.D. Bray, R.B. Seed, L.S. Cluff
and H.B. Seed, *J. of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.122, No.1,
pp.80-82, 1996.

(2003.6.18 受付)

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

Kazuo TANI and Yoshihiro OYAMA

Huge inland earthquakes often cause fault rupture hazards. The mechanism of surface fault rupturing is significantly affected by the features of fault movements at the basement and the characteristics of unconsolidated surface layers, and very little has been elucidated for the cases of strike-slip faults. In this study, a series of model tests of strike-slip faulting are conducted using X-ray CT technique to observe shear bands in the model ground. Typical development processes, shapes and sizes of shear bands forming typical flower structures are investigated.