3章 断層変位に関する室内模擬実験

地震時に発生する地表地震断層は地震動の伝搬、表層の不均質構造など様々な影響を受けて複雑な分布を示し、時には主要な断層から離れた箇所にいわゆる副断層と考えられる 変位が生じることもある。複雑な地表地震断層分布から、主断層・副断層の関係を整理、さらには形成メカニズム等、詳細に検討するには考慮すべき要因が多いため、非常に困難である。

一方、室内模擬(アナログ)実験は断層形成過程を逐次観察・繰り返し検討することがで きるので、複雑な主断層・副断層の関係の整理・検討に有効だと思われる。しかしながら、 実験内容と対象としたい現象とを比較・考察するためには、実験に用いる模擬地盤材料やそ の物性から得られる相似則は、実験結果の検討に非常に重要である。

そのような目的で、過年度より実験に用いる模擬地盤材料の物性試験を行い、得られた物 性情報から相似則を整理した上で縦ずれ断層、横ずれ断層のアナログ実験を実施してきた。 横ずれ断層の実験で得られた副断層分布は主断層のごく近傍に限られていたため、今年度 は引き続き横ずれ断層を実施、取りまとめを行った。

3.1. 模擬地盤の物性

粒径が細かな模擬地盤材料を用いると微細な断層構造が観察できるとされ、過年度の実 験(パスコ,2022,2023)では小麦粉を用いている。また、破壊に関する相似則を考えると、 粘着力が小さいと長さに関する相似が小さくなり広域の検討ができる一方、変位量が1回 の地震での変位量を大きく超えてしまうため、ある程度大きな粘着力が必要と考えられた。 そこで様々な粉体の力学強度に関する既往文献の中で、比較的粘着力が高い傾向にあった 小麦粉を模擬地盤材料として採用してきた(例えばNeto et al.,2017)。一方で小麦粉のよう な粉体は、湿度や締め固め具合によって強度が異なる可能性が指摘されている(Guan,2010 など)。また、同じ材料でも実験時の拘束圧によっても材料の強度がかわり、形成される断 層形状が異なる可能性ある(例えばSchöpfer et al.,2007)。模擬地盤の作成については、圧 密を行わず単純に作成する方法や、押し固めながら作成する方法などが考えられる。

3.1.1. 温度湿度状態

小麦粉のような粉体は含水率によって強度が異なる可能性があるため、実験期間中は実 験室の温度・湿度のモニタリングを行なった(図 3.1.1)。実験期間中の温度・湿度を図 3.1.2 に示す。夏場は湿度が高く、冬場は湿度が低い。実験実施の際にはエアコンを使用している ため大きな温度・湿度変化がみられる。ここで示す湿度は相対湿度であるため、温度により 大きく変化する。容積絶対湿度を求めると夏場はおよそ 10 から 25g/m³程度、冬場で 5 から 10g/m³となる。エアコンによる温度変化でも 5 から 15g/m³程度の変動がみられる。季節変 化と夏場の湿度変化はやや夏場の方が大きいことがわかった。



(a) センサー

(b) 記録計

図 3.1.1 実験室における温度・湿度の記録



図 3.1.2 実験室の温度・湿度グラフ。赤実線が温度、青実線が湿度、黒実線が絶対湿度 を示す。

3.1.2. 模擬地盤の物性試験

今回の実験では、物性の異なる模擬地盤を作成するために、コテによる押し固め(みつ詰 とよぶ)を採用した。模擬地盤のかさ密度を計測するために、実際に模擬地盤を作成する実 験装置内にかさ密度計測用の容器(縦 8cm×横 8cm×高さ 3cm)を設置し、それぞれの方法 で模擬地盤を作成した上で容器を取り出し、重量を計測した。図 3.1.3 にはみつ詰の模擬地 盤作成の様子を示す。計測したゆる詰のかさ密度を表 3.1.1 に示す。



(a) 小麦粉を模擬地盤エリアに入れる



(b) コテで押し固める



(c) 再度、小麦粉を模擬地盤エリアに入れ る



(d) 再びコテで押し固める



(e) 一連の作業を4から6回程度繰り返す



(f) 表面を整形

図 3.1.3 みつ詰模擬地盤作成の様子

(a) 開封後 1	年後の試料	(b) 開封直	重後の試料
重量 (g)	密度 (g/cm ³)	重量 (g)	密度(g/cm ³)
138.90	0.83	136.87	0.81
136.42	0.81	138.69	0.82
132.57	0.79	132.32	0.79
133.63	0.79	133.92	0.79
134.64	0.80	134.18	0.80
平均	0.80	平均	0.80

表 3.1.1 かさ密度測定結果

4章の数値解析や実験結果を実地盤スケールに換算する際、模擬地盤の物理特性や力学特 性が必要となる。パスコ(2021)では断層破砕帯を、パスコ(2022、2023)では小麦粉を対象と して力学試験や物理試験を実施している。パスコ(2021、2022、2023)での試験内容を参考に、 地盤工学会による各種基準(地盤工学会,2020)の中から、基本的な物理試験と粉体を対象 とした一面せん断試験を実施した。実施した試験を表 3.1.2 に示す。

項目	試験内容
土粒子	土粒子の密度試験(JISA1202:2020)
含水比	土の含水比試験 (JISA1203:2020)
粒度	土の粒度試験 (JISA1204:2020)
静的強度	粉体一面せん断試験

表 3.1.2 試験項目

含水率によって小麦粉の強度が異なる可能性を考慮して、各試験は開封直後の小麦粉と 開封後1年経過した小麦粉を対象として実施し、時間経過による試料の物性の変化を検討 した。粒度試験結果を図3.1.4に示す。時間経過による粒度分布の変化は認められない。



(b) 開封後1年の試料

図 3.1.4 粒度試験結果。分析試料を No.1 から No.3 の 3 つの試料に分けて分析を行った。

粉体層の一面せん断試験装置の概要を図 3.1.5 に示す。最初に鉛直方向に目標荷重をかけ ることで試料のかさ密度を調整している。目標荷重に達して一定時間経過後、10 µ m/s の速 度でせん断変位を与える。ロードセルとレーザー変位計で水平方向・鉛直方向の荷重と変位 を 10Hz にて計測する。開封直後の試料および開封後半年の試料の試験結果を表 3.1.3 に示 す。Sample-②-T が開封直後、Sample-①-T が開封後 1 年の試料を示す。表 3.1.1 で示すかさ 密度を参考に、みつ詰は押し目標荷重 60N の結果を採用した。図 3.1.6 から図 3.1.7 に一面 せん断試験で計測されたデータを示す。図 3.1.8 から図 3.1.11 に横軸にせん断距離、縦軸に 応力比・体積歪のグラフを示す。

表 3.1.4 に試験結果一覧を示す。必ずしも時間経過による強度増加がみられないことか ら、今回は開封直後と開封後1年後の結果を平均した値を用いることとした(表 3.1.5)。



図 3.1.5 粉体層の一面せん断試験装置(Shimada et al., 2018)

サンプル名	目標 荷重 (N)	a (PYL)	b (PYL)	粉体層 厚み (mm)	かさ密度 (g/cm3)	内部 摩擦角 (°)	せん断 付着応力 (kPa)	単軸 崩壊応力 (kPa)	限界状態 垂直荷重 (N)	限界状態 せん断力 (N)	限界状態 垂直応力 (kPa)	限界状態 せん断応力 _{(k} Pa)	最大 主応力 (kPa)	流動性 指数 FI(m)
	10	0.67	1.70	14. 18	0. 73	33.7	1.7	6.3	6.3	5.4	4.3	3.7	7.9	0.89
CIOL I PE Somplo(1) T	20	0.58	1.82	13.85	0.75	30.1	1.8	6.3	9.6	8.7	6.6	6.0	13.7	0.87
0004-1-K5-SalipTe()-1	40	0.62	2.44	13. 42	0.77	31.8	2.4	8.8	25.4	19.6	17.5	13.5	37.2	1.16
	60	0.66	2.83	13. 27	0. 78	33.5	2.8	10.6	37.4	27.5	25.7	18.9	51.5	1.38
	10	0.57	1.68	14. 32	0. 72	29.8	1.7	5.8	7.7	6.3	5.3	4.3	10. 2	0.82
CIOA L DE Comple@ T	20	0.60	2.13	14. 02	0.74	31.0	2.1	7.5	18.8	14.2	12.9	9.8	27.5	1.04
6504-1-K5-SampTe(2)-1	40	0.57	3.31	13.50	0.76	29.6	3.3	11.4	41.6	30.5	28.6	21.0	52.0	1.52
	60	0.72	2.83	13.35	0.77	35.6	2.8	11.0	50.3	39.3	34.6	27.1	77.7	1.45

表 3.1.3 粉体層の一面せん断試験結果 (Sample①:開封後1年、Sample②:開封直後)



図 3.1.6 開封後1年後の試料の一面せん断試験計測データ



図 3.1.7 開封直後の試料の一面せん断試験計測データ



図 3.1.8 開封後1年後の試料の一面せん断試験結果(せん断距離一応力比)



図 3.1.9 開封直後の試料の一面せん断試験結果(せん断距離一応力比)



図 3.1.10 開封後1年後の試料の一面せん断試験結果(せん断距離一体積歪)



図 3.1.11 開封直後の試料の一面せん断試験結果(せん断距離一体積歪)

試料	含水比	土粒子密度	せん断試験での	内部摩擦角	粘着力
		(g/cm^3)	かさ密度 (g/cm ³)	(°)	(kPa)
開封直後	13.4	1.58	0.80	33.5	2.8
1年後	11.4	1.58	0.80	35.6	2.8

表 3.1.4 試験結果一覧

表 3.1.5 物性値一覧(開封直後と1年後の計測値の平均を使用)

試料	かさ密度 (g/cm ³)	内部摩擦角(°)	粘着力(kPa)
みつ詰	0.80	34.6	2.8

3.1.3. 相似則について

今回の実験では模擬地盤、実地盤の諸物理量の比は、断層の形成メカニズムを支配するモ ール・クーロンの破壊規準である(式 3.1.3.1)を満たす必要がある。ここで τ と σ_n はせん断 応力と垂直応力である。1g 場での断層変位アナログ実験を行った上田・他 (2005)、Sasnett (2013)では、ともに内部摩擦角(ϕ)は等しく、粘着力(c)と密度(ρ)・重力加速度(g)・ 長さ(L)の積の相似比が等しいと考えている(式 3.1.3.2)。

 $\tau = c + \sigma_n \tan \phi \cdots (\vec{\mathfrak{x}} \ 3.1.3.1)$

 $\frac{c_m}{c_n} = \frac{\rho_m g_m L_m}{\rho_n g_n L_n} \dots (\vec{\mathfrak{X}} 3.1.3.2)$

添字のm、nはそれぞれモデルと実地盤系であることを示す。(式 3.1.3.2)より、

 $\frac{L_m}{L_n} = \frac{c_m}{c_n} \div \left(\frac{\rho_m g_m}{\rho_n g_n}\right) \cdots (\vec{\mathfrak{X}} \ 3.1.3.3)$

1g 場での実験を考えているので、gm/gn=1 より、対象とする実地盤(堆積岩を想定、密度 2.8g/cm³、粘着力 50MPa とする)および模擬地盤の粘着力と密度より長さに関する相似比を 導くことができる(表 3.1.6・表 3.1.7)。

本章の実験においては 1mm/30s を目安に基底断層に変位を与えている。類似の横ずれ断層の室内模擬実験を参照すると、0.01mm/s(上田・谷 1999b, a)、1mm/s(Sasnett, 2013)であり、およそ同程度である。上田・他 (2005)では、モール・クーロンの破壊基準を考えるような現象では、与える変位の速度は実験結果に影響を与えないとされる。無次元化した波動方程式から導かれる $\rho L^2 = \sigma T^2$ からは、時間(T)の相似に関して L^{0.5} となる。また、力の釣り合い及び変位-歪みの関係式から歪みの相似則を L^{0.5} とした場合、時間の相似則は L^{0.75}

となる(例えば Iai, 1989 など)。長さと時間の相似則から実際のスケールに換算するとおよ そ 5m あたり 2100s から 18000s となる。1m/s よりも 3 から 4 オーダー小さな速度となり、 準静的な領域に相当すると思われる。この領域での変形では変位を与える速度が変化して も形成される断層形状に大きな違いはないとされる(例えば Jiao et al., 2021; Hentz et al., 2004)。実際に 1mm/15s や 1mm/60s と与える速度を大きく変化させた実験も行ったが、形 成される断層構造は不均質等の影響が大きいためか、Jiao et al. (2021)のような再現はでき なかった。

表 3.1.6 各模擬地盤の物性と長さに関する相似比(1g場)。添字のm、n はそれぞれモ デルと実地盤系であることを示す。

模擬地盤材料	$\rho_m (g/cm^3)$	c _m (kPa)	実地盤	ρ_n (g/cm ³)	c_n (kPa)	相似比
小麦粉(みつ詰)	0.80	2.8	堆積岩 (Byerlee, 1978)	2.80	50000	1.96×10 ⁻⁴

表 3.1.7 各模擬地盤における長さの対応(1g場、対象:堆積岩)

模擬地盤材料	長さの相似比	モデル層厚 (cm)	モデル変位 (cm)	実地盤層厚 (m)	実地盤変位(m)
小麦粉(みつ詰)	1.96×10^{-4}	3.0	0.1	153.06	5.10
小麦粉(みつ詰)	1.96×10^{-4}	2.0	0.1	102.04	5.10

3.1.4. 模擬地盤の物性のまとめ

数値解析や実験結果を実地盤スケールに換算する際、模擬地盤の物理特性や力学特性が 必要となる。小麦粉のような粉体は含水率によって強度が異なる可能性を考慮して、各試験 は開封直後の小麦粉と開封後1年経過した小麦粉を対象として試験を実施し、時間経過に よる試料の物性の変化を検討した。時間経過による強度増加も考えられるが、異なる目標荷 重による他のかさ密度では必ずしも増加しているものばかりではない。したがって過年度 事業(パスコ,2022,2023)と同様に両者を平均した値を用いることとした。整理して得られ た強度から今回の実験の相似則をまとめた。

3.2. 横ずれ断層型の室内模擬実験

3.2.1. 実験装置および実験方法

横ずれ断層の実験装置はパスコ(2023) で使用された装置を参考に作成した(図 3.2.1)。 変位計測に用いたセンサーは、鉛直精度は 5μ m、水平精度は0.1mm、撮影範囲は 17×28 cm (表 3.1.6 の相似則により実地盤に換算すると 0.9×1.4 km)となっている。変位センサーで 計測される領域外も記録するため、斜め方向から写真撮影も行った。

実験は模擬地盤の密度計測で説明した地盤作成方法(3.1.2)で作成したのち、ラボジャッ キで変位を与え、模擬地盤表面に形成された亀裂を変位センサーおよびカメラで記録した。 走向方向端部に模擬地盤流出防止のためのアクリル板を取り付けたアクリルブロックを実 験装置内底面に2枚設置した。これらのアクリルブロック境界が基底断層に相当する。片側 のアクリル板にのみラボジャッキで変位を与えた。基底断層に与える変位(右ずれ)は、1mm 刻みで10mmまで与えた。1mm/30sを目安に基底断層に変位を与えている。また、カメラに よる写真はセンサーでは捉えられない模擬地盤表面全体を記録するために撮影しており、 斜め方向から撮影した写真を単純な幾何補正で擬似的に上から撮影した写真に変換して用 いている。真上に設置した変位センサーで検討している領域に比べて、明瞭な亀裂が生じる まで表面の変化を捉えられないため、抽出される構造やその精度については中央部と異な ることに留意する必要がある。



図 3.2.1 横ずれ断層型室内模擬実験装置

3.2.2. 実験結果

異なる模擬地盤層厚での実験条件を表 3.2.1 に示す。各ケースは2回試行を行った。3.2.2.1 から 3.2.2.4 に実験結果を示す。模擬地盤層厚や模擬地盤の締め固め具合により表面に発生 する亀裂の分布形状は異なる。基底断層に与える変位が小さい初期段階では、右ずれ断層に 特徴的な杉型の雁行亀裂が生じる。基底断層変位が大きくなるにつれて、初期に発生したせ ん断亀裂をつなげるように亀裂が発達し、さらに複雑な亀裂が形成されていく。また、形成 されたせん断帯には隆起する領域と、開口亀裂により凹地が発達する領域がみられた。模擬 地盤の層厚が厚い方が、より幅の広いせん断帯が模擬地盤表面に形成される傾向にあった。

表 3.2.1 実施した室内模型実験ケース(基本ケースは2回試行)

対象ケース	模擬地盤の状態・層厚
基本ケース(厚い模擬地盤)	みつ詰 3cm
基本ケース(薄い模擬地盤)	みつ詰 2cm
応用ケース(鉛直不均質構造)	みつ詰 2cm+未圧縮 1cm
応用ケース (既存構造)	みつ詰 2cm、1cm 変位の後、未圧縮 1cm

3.2.2.1. 基本ケース(層厚 3cm・みつ詰)

(1)1回目試行



図 3.2.2 基底断層累積変位 0 mm の結果。数字の単位は mm。







(a) 強度画像図 3.2.4 基底断層累積変位 2 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.5 基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。



(a) ^{強度}画像 図 3.2.6 基底断層累積変位 4 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.8 基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.10 基底断層累積変位 8 mm の結果。数字の単位は mm。













図 3.2.13 基底断層累積変位 0 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.14 基底断層累積変位 1 mm の結果。数字の単位は mm。



(a) 強度画像図 3.2.15 基底断層累積変位 2 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.16 基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.17 基底断層累積変位 4 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.19 基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.21 基底断層累積変位 8 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.23 基底断層累積変位 10 mm の結果。数字の単位は mm。

3.2.2.2. 基本ケース(層厚 2cm・みつ詰)

(1)1回目試行







(a) 強度画像図 3.2.25 基底断層累積変位 1 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.27 基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.29 基底断層累積変位 5 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.31 基底断層累積変位 7 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.33 基底断層累積変位 9 mm の結果。数字の単位は mm。









図 3.2.35 基底断層累積変位 0 mm の結果。数字の単位は mm。







(a) 強度画像図 3.2.37 基底断層累積変位 2 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.38 基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.39 基底断層累積変位 4 mm の結果。数字の単位は mm。






図 3.2.41 基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.43 基底断層累積変位 8 mm の結果。数字の単位は mm。







- 図 3.2.45 基底断層累積変位 10 mm の結果。数字の単位は mm。
- 3.2.2.3. 応用ケース(鉛直不均質構造)



図 3.2.46 基底断層累積変位 0 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.47 基底断層累積変位 1 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.49 基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.51 基底断層累積変位 5 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.53 基底断層累積変位 7 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.55 基底断層累積変位 9 mm の結果。数字の単位は mm。





3.2.2.4. 応用ケース(既存構造)



図 3.2.57 基底断層累積変位 0 mm の結果。数字の単位は mm。







(a) 強度画像図 3.2.59 基底断層累積変位 2 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.60 基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.61 基底断層累積変位 4 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.63 基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.65 基底断層累積変位 8 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.67 基底断層累積変位 10 mm の結果。数字の単位は mm。

3.2.3. 画像相関法(DIC)解析結果

3.2.3.1. DIC 解析精度検証

実験結果の強度画像を用いて、画像相関法 (DIC) による解析を行い、水平変位を求める。 解析には DICe (Turner, 2015)を用いた。DIC により得られる変位の精度としては一般的に は 1/10 pixel 程度とされる(Caporossi et al., 2018)。層厚 2cm みつ詰の模擬地盤作成後、基 底断層直上の小麦粉を取り除き、その部分に未圧縮の小麦粉を充填し、異なる変位を与えた (図 3.2.68)。一つ前の結果との差分として変位量を求めた。

表 3.2.2 より DIC で得られる変位は 0.01 から 0.02mm 程度の精度と考えられる。3.2.3.2 から 3.2.3.4 に DIC による結果を示す。各図には水平変位から求められた変位ベクトルもあ わせて示した。



図 3.2.68 精度検証のための計測の様子

衣 3.2.2 胜价相及快证和未		
与えた変位 (mm)	計測変位 (mm)	差(mm)
0.200	0.190	0.010
0.100	0.084	0.016
0.040	0.028	0.012
0.020	0.017	0.003
0.010	0.017	-0.007
0.020	0.014	0.006
0.040	0.034	0.006
0.010	0.005	0.005

表 3.2.2 解析精度検証結果

3.2.3.2. 基本ケース(層厚 3cm・みつ詰)

(1)1回目試行







(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.71基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。







(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.74基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.75 基底断層累積変位 7 mm の結果。数字の単位は mm。





(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.77基底断層累積変位 9 mm の結果。数字の単位は mm。



(2)2回目試行









(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.81基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。







(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.84基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。







(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.87基底断層累積変位 9 mm の結果。数字の単位は mm。



3.2.3.3. 基本ケース(層厚 2cm・みつ詰)

(1)1回目試行







(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.91基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。







(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.94基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.95 基底断層累積変位 7 mm の結果。数字の単位は mm。





(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.97基底断層累積変位 9 mm の結果。数字の単位は mm。



(2)2回目試行









(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.101基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。







(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.104基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。



100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
100
<td



(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.107基底断層累積変位9mmの結果。数字の単位はmm。





3.2.3.4. 応用ケース(鉛直不均質構造)



図 3.2.110 基底断層累積変位 2 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.113 基底断層累積変位 5 mm の結果。数字の単位は mm。







図 3.2.116 基底断層累積変位 8 mm の結果。数字の単位は mm。





3.2.3.5. 応用ケース(既存構造)





(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.120基底断層累積変位 2 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.121 基底断層累積変位 3 mm の結果。数字の単位は mm。



3.2.122 本広町信条領支位 4 11111 の紀末。 数十の単位は


(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.123基底断層累積変位 5 mm の結果。数字の単位は mm。



a) X 方向変位(石向さ止) (a) Y 方向変位(下向さ止) (c) 金。 図 3.2.124 基底断層累積変位 6 mm の結果。数字の単位は mm。





(a) X 方向変位(右向き正)(a) Y 方向変位(下向き正)(c) 歪み図 3.2.126基底断層累積変位 8 mm の結果。数字の単位は mm。



図 3.2.127 基底断層累積変位 9 mm の結果。数字の単位は mm。



3.2.4. 実験結果による副断層形成過程

3.2.2 および 3.2.3 で示した実験結果に対して、横ずれ断層の形成機構を踏まえながら形成 された亀裂分布を整理する。砂層を用いた横ずれ断層の室内模擬実験の結果を整理した小 山・谷 (2003)によると、図 3.2.129 のように基底断層の変位量が増加するにつれて、リーデ ルせん断、2次、3次と逐次せん断断層が発達・形成される。基底断層の変位量がより大き くなると、これらのせん断断層がつながり、基底断層直上付近に主断層帯が形成される。前 節で示した実験結果でも同様の傾向が確認された。前節の実験結果は物性が柔らかい材質 と硬い材質を含むが、材質により形成されるせん断帯の幅は異なるものの、大局的な形状は 類似している(図 3.2.130)。有限要素法 FEM による数値解析でも基底断層変形開始後は幅 広いせん断帯が形成され、リーデルせん断(1次亀裂)が形成、順次、せん断が局所化して 断層群が形成される過程が示されている(図 3.2.131)。



図 3.2.129 砂層を用いた横ずれ断層の室内模擬実験の結果 (小山・谷, 2003)



図 3.2.130 乾燥砂地盤および模擬岩盤に形成されるせん断断層構造 (上田, 2009)



図 3.2.131 FEM による横ずれ断層のせん断帯発達過程(Chemenda et al., 2016)。色はせん断ひずみの大きさを示す。



図 3.2.132 室内模擬実験の解釈(小山・谷, 2003 に加筆)

図 3.2.132 に示すように、基底断層の変位量が大きくなるにつれて、せん断亀裂(1 次亀 裂)、それらをつなぐ亀裂(2 次亀裂)、複雑な亀裂場の中で共役系等の亀裂(3 次亀裂) が形成されると考える。基底断層の累積変位量が 2mm(みつ詰状態で実スケールに換算す るとおよそ 13m の変位)から 3mm(みつ詰状態で実スケールに換算するとおよそ 20m の変 位)で3 次亀裂の形成がみられる実験結果が多かった。そこで、基底断層の累積変位量が 3mm 変位までの結果について詳細に整理を行った。整理に際しては、前後の基底断層変位 量の結果も参考にしながら行った。また、図 3.2.132 にみられるように、せん断帯の発達に 伴い、変位する領域が基底断層付近になると、初期段階でより離れたところに形成されてい たせん断亀裂での変位量が少なくなる、もしくはみられなくなる。一連の実験結果において そのような現象がみられた亀裂について変位量が減少した亀裂として整理を行った。各実 験の整理結果を 3.2.4.1 から 3.2.4.4 に示す。

3.2.4.1. 層厚 3cm・みつ詰の整理結果

(1)1回目試行





(2)2回目試行







3.2.4.2. 層厚 2cm・みつ詰の整理結果

(1)1回目試行



図 3.2.140 基底断層累積変位 2 mm の整理結果。数字の単位は mm。



(2)2回目試行









3.2.4.3. 応用ケース(鉛直不均質構造)の整理結果







3.2.4.4. 応用ケース(既存構造)の整理結果





3.2.4.5. 模擬実験結果による副断層形成過程

断層形成過程を解釈した図と各変位段階の変位量グラフを図 3.2.152から図 3.2.155に示 す。最初の 1mm の変位を与えたグラフの Y 方向の変位(黒実線)をみると、広い幅で変化 しているのがわかる。与える変位が大きくなるにつれて、場所によっては狭い範囲で不連続 となり急激な変化を呈している。これは亀裂が発生したため、画像相関がとれなくなったた めである。複数箇所で亀裂が発生している場合は、1 箇所あたりの変位は小さく、全体でお よそ 1mm の Y 方向の変位をしている。これらのことから、横ずれ断層の場合、亀裂発生直 前は広い範囲でせん断変形が発生して、亀裂が生じるとその亀裂で基底断層の変位を解消 するようになる。亀裂が 1 箇所の場合はそこで全ての基底断層の変位を解消し、比較的単純 な亀裂分布となる傾向にある。これに対して、複数亀裂が発生している場合は、各亀裂で変 位を解消しているため、1 箇所あたりの変位量は基底断層で与えている変位量に比べて小さ くなり、いわゆる分岐断層のような挙動を示す。

このような主断層変位に対して、副断層は毎回変位していなかったり、Y 方向の変位に対して、X 方向の変位の方が顕著である場合が多い。



(a) 解釈結果(強度画像)



(b) 変位断面(Y=50)図 3.2.152 基底断層累積変位 3 mm の整理結果。数字の単位は mm



(a) 解釈結果(強度画像)



(b) 変位断面(Y=0)図 3.2.153 基底断層累積変位 3 mm の整理結果。数字の単位は mm。



(a) 解釈結果(強度画像)



(b) 変位断面 (Y=30)

図 3.2.154 基底断層累積変位 3 mm の整理結果。数字の単位は mm。



(a) 解釈結果(強度画像)



(b) 変位断面(Y=-90)図 3.2.155 基底断層累積変位 4 mm の整理結果。数字の単位は mm。

過年度事業までの目視による断層構造認定・整理に加えて、画像相関法を用いることで、 横ずれ断層における断層帯(せん断帯)形成過程および変位分布が明らかとなった。

3.2.5. 実験で得られた副断層と既往距離減衰データとの比較

本節では実験結果について記述・整理を行うが、本プロジェクトのメインの目的が副断層 に関連した知見の整理である。そこで、室内模擬実験でみられる断層構造の解釈について示 す。図 3.2.156 に示すように基本的に1 章での定義に従うが、表 3.2.3 のように呼び方を変 更して用いる。図 3.2.157 から図 3.2.158 に副断層として解釈された亀裂に対して、変位量 が読み取れた点を示す。



図 3.2.156 室内模擬実験解釈においてベースとする主断層・副断層の概念図(Nurminen et al., 2022)

表 3.2.3	室内模擬実験解釈	駅における亀裂の分類	

rank (Nurminen et al., 2022)	実験結果の分類	区分	コメント
1	1次亀裂	主断層	明瞭に発達する断層構造、長い断層
1.5	2次亀裂		基底断層変位量増加に伴い断層帯を 形成
2	3次亀裂	副断層	再現頻度が低い・短い断層

図 3.2.157 および図 3.2.158 に副断層として解釈された亀裂に対して、変位量を整理した 点を青丸で示す。変位量については、DIC により得られた水平変位・鉛直変位を合成して変 位量を求めた。パスコ (2022) による鉛直断層型室内模擬実験結果では、鉛直変位のみを使 用していた。地表地震断層においても、副断層に関しては現地で計測される変位量は必ずし もネットスリップを求められるだけの情報が得られない場合もあるため、鉛直変位や水平 変位のみなど、簡易的に求められた副断層変位と 3 成分を合成して得られた変位との間に どの程度の違いがあるのかを検討することは重要である。



室内模擬実験で得られた副断層変位データと実地震による既往の横ずれ断層副断層変位 データとを比較した結果を図 3.2.159 に示す。横軸は主断層からの距離、縦軸は副断層変位 を主断層の最大変位量で正規化している。室内模擬実験のデータに関しては、基底断層に与 えた累積変位ではなく、直前に基底断層に与えた変位(1mm)を最大変位としている。これは、 今回整理を行った副断層の変位が基底断層変位開始時から継続的に変位しておらず、直前 の基底断層変位によって変位が生じていることによる。参考までの過年度業務で得られた 同様のグラフを図 3.2.160 に示す。今回の実験では主断層近傍にのみデータが得られている 過年度の結果とは異なり、2 章の測地学的に得られた副断層変位量と比較的整合的な結果と なった。室内模擬実験においては、DIC による解析結果により、主断層近傍の複雑な断層分 布や変位量分布を明らかすることができた。主断層近傍の不均質構造を考慮した実験も実 施したが、実際の地震で主断層から数キロメートル離れた副断層の再現までは至らなかっ た。室内模擬実験では、断層帯の成熟過程を考えると初期段階を検討していることになる。 既往の横ずれ断層発達過程では初期段階では主断層近傍に変形帯が発生し、変位を繰り返 し成熟すると変形帯が収斂すると考えられている。本検討で用いた実験装置の最大変位 (50mm)を与えると、変形帯は形成されたが、その変形帯が収斂する様子は確認できていな い(図 3.2.161)。数値解析による多様な基底断層変位入力条件などの結果を整理して検討 すべき課題といえる。



図 3.2.159 横軸は主断層からの距離、縦軸は最大変位量で正規化された副断層の変位 量。SS-Analog:アナログ実験(みつ詰)の結果、熊本地震のデータは2章の測地学的に得られ た副断層を含む。それ以外は構造計画研究所 (2018) で整理した横ずれ断層副断層のデー

タ。



図 3.2.160 横軸は主断層からの距離、縦軸は最大変位量で正規化された副断層の変位 量。SS-Analog:アナログ実験(みつ詰)の結果、それ以外は構造計画研究所 (2018) で整理し た横ずれ断層副断層のデータ。



図 3.2.161 実験装置最大の変位(50mm)を与えたみつ詰の結果。数字の単位は mm。

3.3. 断層変位に関する室内模擬実験のまとめ

3.3.1. 模擬地盤の物性

数値解析や実験結果を実地盤スケールに換算する際、模擬地盤の物理特性や力学特性が 必要となる。小麦粉のような粉体は含水率によって強度が異なる可能性を考慮して、各試験 は開封直後の小麦粉と開封後1年経過した小麦粉を対象として実施し、時間経過による試 料の物性の変化を検討した。過年度業務を含め、最長1年ほどの時間経過の影響を検討した が、必ずしも時間経過による系統的な物性変化はみられなかった。したがって過年度事業と 同様に両者を平均した値を用いることとした。整理して得られた強度から今回の実験の相 似則をまとめた。

3.3.2. 横ずれ断層型の室内模擬実験

室内模擬実験の詳細な検討範囲を過年度業務よりも拡大し、画像相関法による得られた 水平変位分布もあわせて検討した結果、初期段階では広い幅で変形しているが、基底断層の 変位量が増大し断層帯の発達に伴い、大きな変位量を呈する主断層帯が狭くなる傾向にあ る。主断層帯の周辺では、主断層の変形に伴い、変位量が小さい・変位センスが異なるよう な亀裂が認められることがある。また、変形幅が狭いところでは、変位量のコントラストが シャープで明瞭な亀裂が形成される一方、複数条形成される場合、変位量が分散し、変位量 のコントラストも緩やかになる傾向にある。既往構造や異なる物性構造の組み合わせなど の不均質構造により、より複雑な断層分布が形成されやすい傾向にあることがわかった。室 内模擬実験で得られた副断層の変位量は、主断層ごく近傍でしか得られなかった過年度よ りも、より遠方におけるデータが得られた。また、5章で整理している副断層変位距離減衰 を検討するデータと比較すると、実際の地震で得られたデータのばらつき範囲内に収まる。

3.3.3.課題

過年度事業における室内模擬実験を含めて、主断層近傍および基底断層からの分岐によ り発生する副断層に関する知見を蓄積することができた。しかしながら、より離れた箇所に 大きな変位を発生させる副断層の形成メカニズムを解明するまでには至らなかった。室内 模擬実験では、断層帯の成熟過程を考えると初期段階を検討していることになる。既往の横 ずれ断層発達過程では初期段階では主断層近傍に変形帯が発生し、変位を繰り返し成熟す ると変形帯が収斂すると考えられている。本検討で用いた実験装置の最大変位を与えると、 変形帯は形成されたが、その変形帯が収斂する様子は確認できていない。長期的な断層帯発 達過程や実地盤に近い不均質構造、特に誘発もしくはお付き合い断層を考慮した実験結果 (数値解析を含む)と実際の断層変位分布とを比較することによる副断層生成に繋がる要因 の分析が必要である。これらは今後の課題である。

3.4. 参考文献

- 1) Byerlee, J. (1978), Friction of rocks, pure and applied geophysics, Vol. 116, No. 4, 615–626.
- Caporossi, P., Mazzanti, P., and Bozzano, F. (2018), Digital Image Correlation (DIC) Analysis of the 3 December 2013 Montescaglioso Landslide (Basilicata, Southern Italy): Results from a Multi-Dataset Investigation, ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol. 7, No. 9.
- Chemenda, A. I., Cavalié, O., Vergnolle, M., Bouissou, S., and Delouis, B. (2016), Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system, Comptes Rendus Geoscience, Vol. 348, No. 1, 61 - 69. From past to current tectonics.
- 4) Guan, W. (2010), Effect of compaction on strength and arching of cohesive material in storage bins.
- Hentz, S., Donzé, F. V., and Daudeville, L. (2004), Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates, Computers & Structures, Vol. 82, No. 29, 2509-2524.
- 6) Iai, S. (1989), similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, soils and foundations, vol. 29, no. 1, 105-118.
- Jiao, L., Klinger, Y., and Scholtès, L. (2021), Fault Segmentation Pattern Controlled by Thickness of Brittle Crust, Geophysical Research Letters, Vol. 48, No. 19, e2021GL093390.
- 8) 地盤工学会(2020),地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]
- 9) Neto, J. P. L., Meira, A. S., and do Nascimento, J. W. B. (2017), FLOW PROPERTIES AND PATTERN FLOW PREDICTION OF FOOD INDUSTRIAL POWDERS, Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, Vol. 37, No. 4.
- Nurminen, F., Baize, S., Boncio, P., Blumetti, A. M., Cinti, F. R., Civico, R., and Guerrieri, L. (2022), SURE 2.0 -New release of the worldwide database of surface ruptures for fault displacement hazard analyses, Scientific Data, Vol. 9, No. 729.
- Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., Cao, T., Wills, C. J., Schwartz, D. P., and Frankel, A. D. (2011), Fault displacement hazard for strike-slip faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 2, 805-825.
- 12) SASNETT, P. J. (2013), ANALOGUE MODELLING OF STRIKE-SLIP SURFACE RUPTURES: IMPLICATIONS FOR GREENDALE FAULT MECHANICS AND PALEOSEISMOLOGY, Master's thesis, University of Canterbury.
- 13) Schöpfer, M. P. J., Childs, C., and Walsh, J. J. (2007), Two-dimensional distinct element modeling of the structure and growth of normal faults in multilayer sequences: 2. Impact of confining pressure and strength contrast on fault zone geometry and growth, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 112, No. B10.
- 14) Shimada, Y., Kawata, T., and Matsusaka, S. (2018), Analysis of constant-volume shear tests based on precise measurement of stresses in powder beds, Advanced Powder Technology, Vol. 29, No. 6, 1372-1378.
- Turner, D. (2015), Digital image correlation engine (DICe) reference manual, Sandia Report, SAND2015-106060.

- 16) パスコ(2021),令和2年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る調査) 業務報告書.
- 17) パスコ(2022),令和3年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る調査) 業務報告書.
- 18) パスコ(2023),令和4年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る調査) 業務報告書.
- 19) 上田圭一 (2009),横ずれ断層の変位に伴う岩盤の 3 次元変形過程-ヘリカル X 線 CT を用いた断層変位実験による検討-, 電力中央研究所報告, N08039.
- 20) 上田圭一・井上大榮・鳥越祐司(2005), 2004 年新潟県中越地震震源域における上部新 生界の変形機構模型実験による基礎的検討,地震第2 輯, 58, 3, 309-327.
- (2018),平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に 係る知見の整備)業務報告書.
- 22) 構造計画研究所(2020),令和元年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る知見の蓄積)業務報告書.地盤工学会(2020),地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版].
- 23) 小山良浩・谷和夫(2003),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,2003,750,171-181.