

3章 断層変位に関する室内模擬実験・物性調査

3.1. 地盤物性調査

3.1.1. はじめに

副断層形成過程の数値解析を行う場合、対象となるモデルの物性を与える必要がある。副断層のような副次的な構造を検討する場合には、あらかじめ弱面をモデルに組み込んで検討している例もある（例えば澤田, 2014 など）。過年度までの表層付近を対象とした数値解析の検討（図 3.1.1, 表 3.1.1）においても、地盤や弱面などの物性を与えて検討を行っていた。

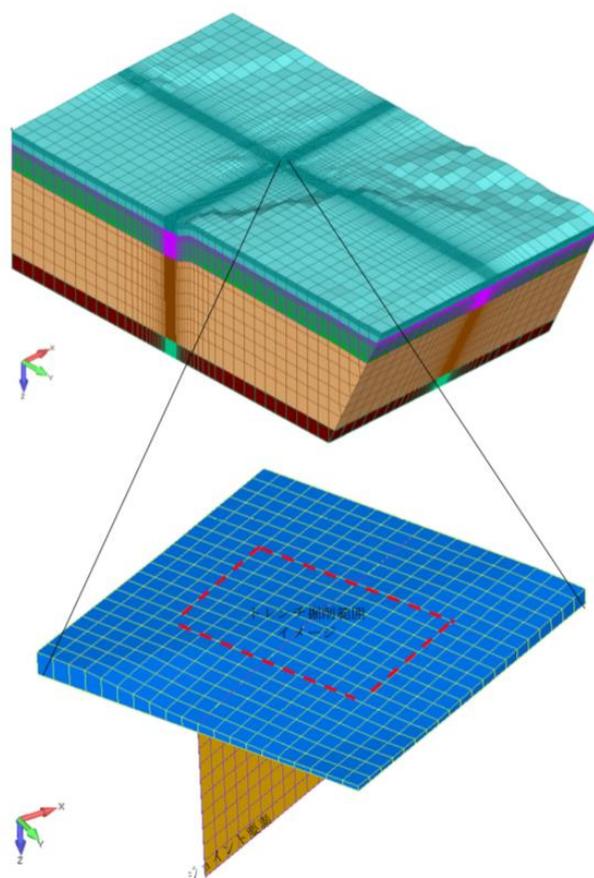


図 3.1.1 弱面を考慮した数値解析モデル（令和元年度原子力規制庁委託業務「断層変位評価に係る知見の蓄積」より）

表 3.1.1 表層解析の際の物性設定例（平成 29 年度原子力規制庁委託業務「断層変位評価に係る知見の整備」より）

地盤物性値一覧

深度 (m)	密度 (Kg/m ³)	ポアソン比	せん断剛性 G0 (×10 ¹⁰ N/m ²)
0~200	2,400	0.310	1.058
200~600	2,500	0.294	1.823
600~2000	2,650	0.244	2.714
2000~3000	2,700	0.248	2.940

物性値・地盤非線形特性

粘着力 (×10 ⁵ N/m ²)	摩擦角 (deg)
1.0	35

断層の物性値(ジョイント要素)

弾性係数 (×10 ⁹ N/m ²)	ポアソン比	粘着力 (×10 ⁶ N/m ²)	摩擦角 (deg)
7.0	0.33	1.0	15

そこで過年度での検討を参考に、表層数値解析の際にモデル化を行う基盤部分、表層の未固結層ならびに弱面の一つとして考えられる断層破碎帯について、破壊判定の指標となるせん断強度について、文献情報の整理ならびに原位置サンプリングによる物性試験を実施して取りまとめた。

3.1.2. 分析試料

表層部として下町トレンチサイトから試験試料を採取した（下町トレンチの位置は 2 章を参照）。断層破碎帯は、既往研究で詳細に調査が実施された郷村山田断層の虫生地点において断層破碎帯（相山・他, 2017）から試料採取を行った（図 3.1.2 から図 3.1.4）。

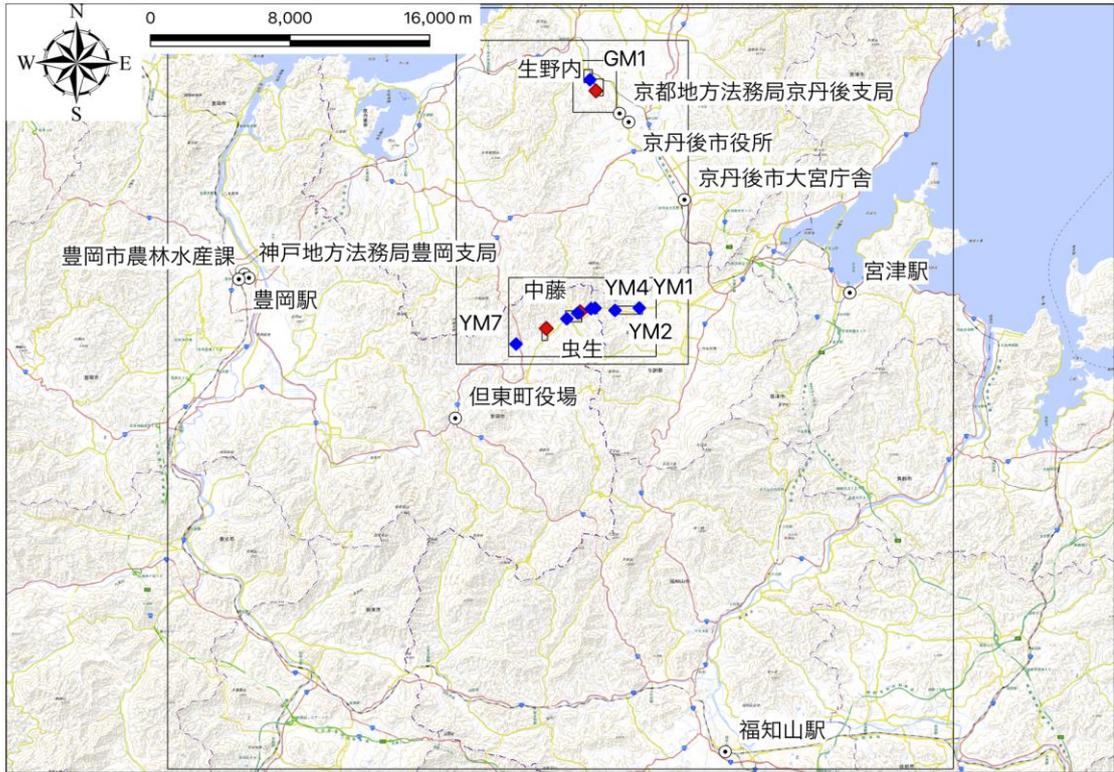


图 3.1.2 物性調査試料採取地点（全体図）. 基図は国土地理院「都市圏活断層図」.

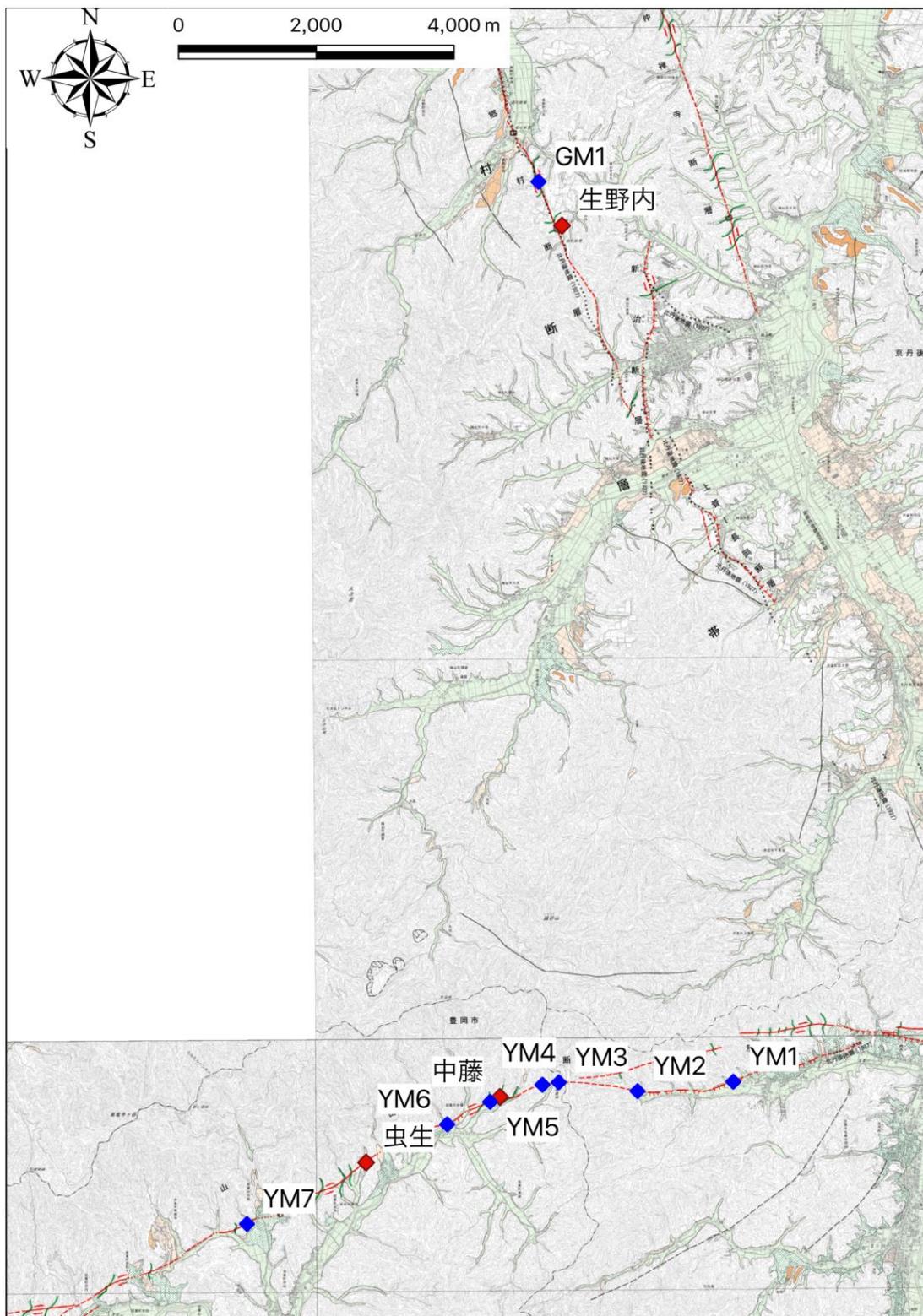


图 3.1.3 物性調査試料採取地点（拡大図）。基図は国土地理院「都市圏活断層図」。

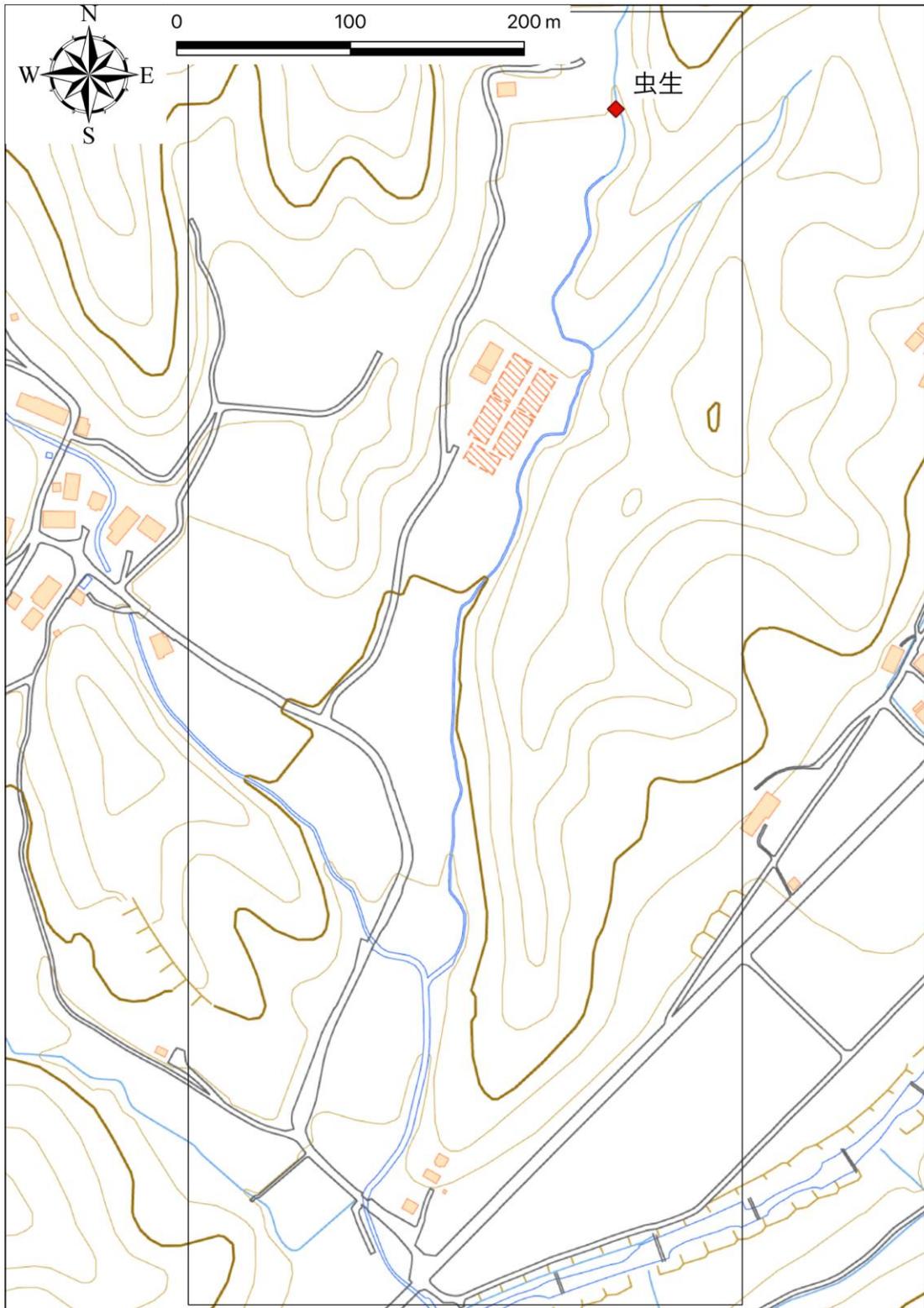


図 3.1.4 物性調査試料採取地点（詳細図）．基図は国土地理院「標準地図」．

郷村山田断層の試料採取は 2020 年 12 月 16 日から 18 日にかけて実施した．郷村山田断層での試料採取状況を図 3.1.5 に示す．

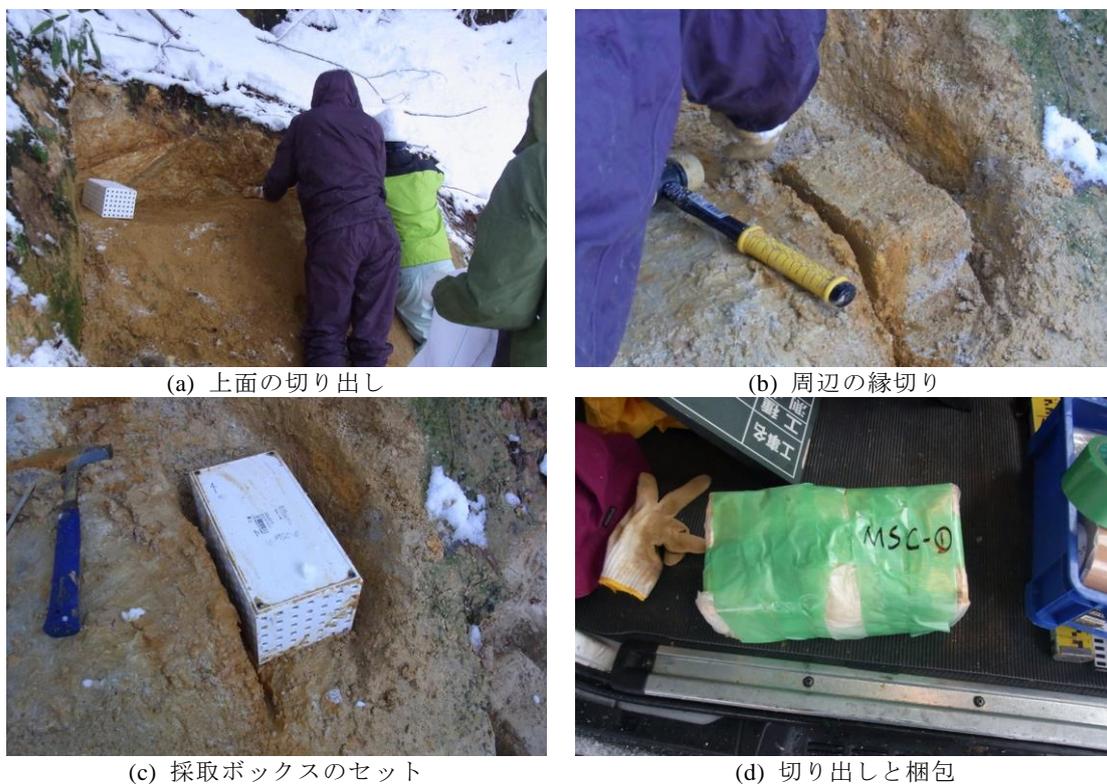


図 3.1.5 ブロックサンプリングの流れ

物性試験試料は破碎帯の状況に応じて3箇所に分けて行った(図 3.1.6)。断層ガウジ帯(MSC)を中心にカタクレーサイト化している両サイド(MSL, MSR)の計3地点からそれぞれ8個の試料を採取した。含水比を計測するための試料は単管にて採取した(図 3.1.7)。

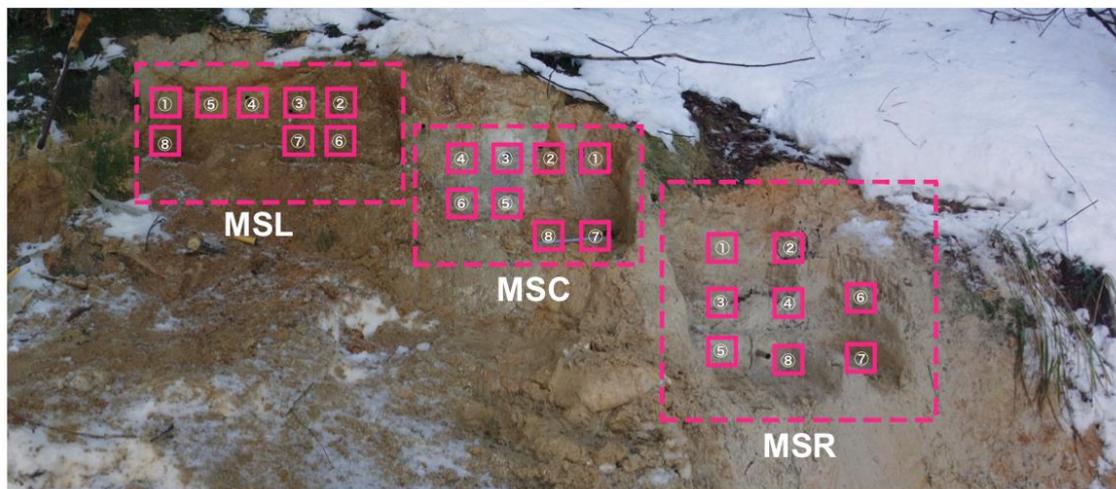


図 3.1.6 ブロックサンプル採取地点

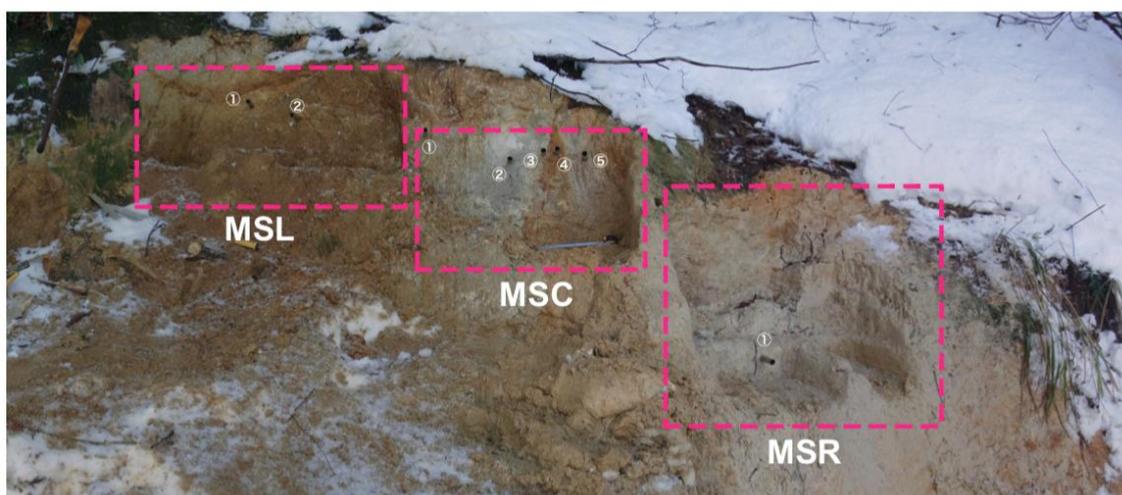


図 3.1.7 単管試料採取地点

下町トレンチは2021年1月11日から12日にかけて試料採取を行った。図 3.1.8・図 3.1.9 に下町トレンチにおける試料採取状況を示す。ここでも 8 個の物性試験試料および含水比測定のための単管試料 1 本を採取した。



図 3.1.8 下町トレンチ試料採取風景



(a) 試料の切り出し



(b) 採取完了した試料

図 3.1.9 下町トレンチにおける試料採取状況

3.1.3. 分析方法

力学特性に関しては，地盤工学会による各種基準（地盤工学会, 2020）の中から，静的な強度，動的な強度試験を実施した．実施した試験を表 3.1.2 に示す．図 3.1.10 には力学試験作成状況を示す．このほか，基本的な物理試験（表 3.1.3）や鉱物同定のための XRD も実施した．各試験結果のデータシートは付属資料とした．

表 3.1.2 力学試験項目

項目	試験内容
静的強度	土の圧密非排水（ $\bar{C}U$ ）三軸圧縮試験（JGS0523-2020）
動的強度	岩石の多段階繰り返し非排水三軸圧縮試験（JGS2561-2020）
変形特性	土の変形特性を求めるための繰り返し三軸試験（JGS0542-2020）

表 3.1.3 物理試験項目

項目	試験内容
土粒子	土粒子の密度試験（JIS A 1202:2020）
含水比	土の含水比試験（JIS A 1203:2020）
粒度	土の粒度試験（JIS A 1204:2020）
液性・塑性限界	土の液性限界・塑性限界試験（JIS A 1205:2020）



(a) 試料の取り出し



(b) 試料の切り出し



(c) 試料の成形



(d) 成形が完了した試料

図 3.1.10 ブロックサンプリング成形の流れ

各試験状況例を図 3.1.11 から図 3.1.17 に示す.



図 3.1.11 土の圧密非排水三軸圧縮試験 (JGS0523-2020)



図 3.1.12 土の変形特性をを求めるための繰返し三軸試験 (JGS0542-2020)



図 3.1.15 土の粒度試験 (沈降分析, JIS A 1204:2020)



図 3.1.16 土粒子の密度試験 (JIS A 1202:2020)



図 3.1.17 土の液性限界・塑性限界試験 (JIS A 1205:2020)

試験結果例を図 3.1.18 から図 3.1.21 に示す。



(a) 試験前 (b) 試験後
図 3.1.18 土の圧密非排水三軸圧縮試験 (MSL2)



(a) 試験前

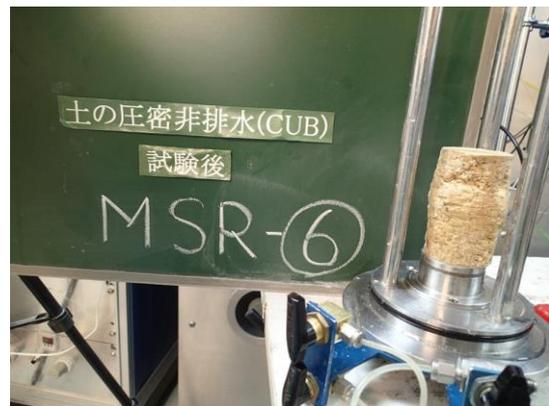


(b) 試験後

図 3.1.19 土の圧密非排水三軸圧縮試験 (MSC1)



(a) 試験前



(b) 試験後

図 3.1.20 土の圧密非排水三軸圧縮試験 (MSR6)



(a) 試験前



(b) 試験後

図 3.1.21 土の圧密非排水三軸圧縮試験 (SMR6)

各物性試験試料に含まれる鉱物を同定するための X 線回折法 (X-ray Diffraction, 以降, XRD 分析とする) による XRD 分析も行った. 分析試料を表 3.1.4 に示す. 各サンプルを水篩し乾燥後 106 - 75 μ m のフルイでこして XRD 試料とした. したがって試料は上澄みおよび沈殿速度の低い微粒子に限られる. スメクタイトの特定のためエチレングリコール(EG)処理をした XRD も行った. ただし⑨, ⑩はごく少量のため EG 処理を行えなかった. スメクタイトは今回すべてモンモリロナイトに属する.

表 3.1.4 鉱物分析リスト

XRD分析番号	試料採取地点
①	MSR5
②	MSC2-1
③	MSC2-2
④	MSC3-1
⑤	MSC3-2
⑥	MSC4
⑦	MSC5
⑧	MSL6
⑨	MSL7
⑩	SMR5

3.1.4. 分析結果

物理試験結果を表 3.1.5・表 3.1.6 に示す。

表 3.1.5 物理試験結果

鉱物	断層破砕帯試料							火山灰シルト
	破砕帯		断層ガウジ				破砕帯	
	MSL7	MSL6	MSC4	MSC3	MSC5	MCS2	MSR5	
土粒子密度	2.669	2.646	2.636	2.633	2.648	2.66	2.627	2.725
液性限界	50.35	47.38	53.56	49.79	55.76	71.34	64.47	104.21
塑性限界	22.74	16.47	11.74	12.26	12.58	17.38	21.33	39.96
塑性指数	27.61	30.91	41.82	37.53	43.18	53.96	43.14	64.25
地盤材料分類	粘性土質砂	砂質粘土 (低液性限界)	砂質粘土 (高液性限界)	礫まじり砂質粘 土L	砂質粘土 (高液性限界)	礫まじり砂質粘 土H	礫まじり砂質粘 土H	砂まじり粘土 (高液性限界)

表 3.1.6 物理試験（含水比）結果

物性	断層破砕帯試料							火山灰シルト		
	破砕帯		断層ガウジ				破砕帯	SMR1	SMR2	
	MSL1	MSL2	MSC4	MSC3	MSC5	MCS2	MCS1	MSR1		
含水比	26.1	17.7	23.16	26.92	27.33	16.83	20.17	27.67	113.5	99.5

断層破砕帯試料では、地盤材料分類では低液性限界，高液性限界が混在しているが，今回の試料はちょうど区分である液性限界 50%境界付近に位置しているためである．基本的にカタクレーサイト化して粘土化している。

鉱物分析結果を表 3.1.7 に示す。

表 3.1.7 XRD による鉱物分析結果．◎：相対的に多量．○：相対的にやや多量．△：相対的に少量．+：量の判断が困難，空欄は検出できなかったことを示す。

鉱物	断層破砕帯試料								火山灰シルト	
	破砕帯		断層ガウジ				破砕帯	SMR		
	MSL6	MSL7	MCS2-1	MCS2-2	MCS3-1	MCS3-2	MCS4	MCS5		MSR5
モンモリロナイト	○	○	◎		○	◎	○	◎		
カオリナイト	○	◎	○	○	○	○	○	○	△	
イライト	○	○		△	△	△	△		◎	
ハロイサイト			○	○						◎
緑泥石				△					△	
ギブス石				○					○	
斜長石	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
カリ長石	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
石英	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

石英・長石は結晶度が高く少量であってもピークが明瞭であるが，粘土鉱物では不明瞭であり結晶度が低い場合はさらに不明瞭となり目安分量にとどまる．ハロイサイトはカオリナイトと同一成分であるがわずかに H₂O を含む点で後者と異なる。

MSL6 に関しては岩石薄片観察も行った．砂質土を樹脂に包埋し岩石薄片を作成した．破砕作用を被った花崗岩起源の砂質土で，石英，カリ長石，斜長石，黒雲母の砂質～シルト質

粒子および粘土鉱物からなる。各鉱物は破砕作用を受けているがカリ長石は径 2~1.5 mm の粒子が残存するなど最も軽微で量も多い。次いで石英が多量であるが径 1.1~0.5 mm (多くは径 0.1 mm 以下に細粒化している)。黒雲母は径 1.8 mm 以下で加水黒雲母化し、わずかに破断・屈曲する。通常の花崗岩組織よりも含有率が高い。斜長石は元の含有率が不明であるが、破断・細粒化が最も進行して残存率がきわめて低い。粘土鉱物ではイライトの明瞭な板状結晶、モンモリロナイト、カオリナイトは各々微粒子の集合体をなす。極度に破断した状態の花崗岩組織、鉱物片が移動せずに存在することから破砕した花崗岩体に近い箇所での堆積物といえる。

強度試験ならびに変形試験結果を表 3.1.8, 表 3.1.9 に示す。

表 3.1.8 強度試験結果 (全応力)

試料	静的強度		動的強度	
	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
MSL	47.3	26.8	67.4	21.3
MSC	18.1	21.0	78.1	15.5
MSR	48.3	17.5	58.3	19.5
SMR	25.5	15.5	39.7	15.6

表 3.1.9 変形試験結果

試料	初期せん断剛性率 (MN/m ²)
MSL	47.4
MSC	35.4
MSR	36.8
SMR	14.5

断層ガウジ部分の結果 (MSC) を除き、静的強度に比べて動的強度は同程度か、高い傾向にある。静的解析 (荷重と構造の応答が時間に対して変化がないか、クリープ解析のように時間に対して応答が非常にゆっくりとした変化) で用いられる静的強度は、一般的に動的弾強度よりも小さく、固結度の低い若い堆積岩では古く固結の進んだ岩石よりも動的強度と静的強度との差が大きいとされる (林田, 1973)。固結度の低い泥岩では、両者の違いが 10 倍に達するものもある。検層による P 波速度と S 波速度、室内試験による密度値を用いて計算した動的ヤング率と間隙率の関係および室内三軸試験で得られた静的ヤング率と間隙率の関係では、静的ヤング率は動的ヤング率に比べ、砂岩の場合 1/2 から 1/5、砂質泥岩と泥岩の場合、1/3 程度となる (高橋, 2015)。静的強度に関しては断層ガウジの方が破砕部よりも粘着力が小さい報告がある (例えば、桑原・平間, 1991)。断層ガウジ部分の静的強度・動的強度については、今回の試験結果のみでは十分な検討ができるだけのデータがないため、既存研究も含めた情報の蓄積による考察が必要である。

破碎を受けていない母岩の強度として、例えば野島断層の花崗岩系（山田・他, 2012）では 320 から 780 kfg/cm³, すなわち 31 から 76 MPa となる。砂岩・泥岩互層（山田・他, 2010）で 150 から 270 kfg/cm³, すなわち 15 から 26 MPa となる。

以上、断層破碎帯を含む基盤とその上位を覆う未固結層の物性を検討した結果、既存研究で指摘されていたように静的強度に比べて動的強度は同程度か、高い傾向にある結果が得られた。破碎帯近傍では母岩に比べて 1 オーダー小さな強度を呈する。基本的に断層破碎部よりも未固結堆積層（SMR）の強度が低い結果となった。基盤の中でも大きな強度差が存在することとなり、このように強度の異なる物性領域がある場合の静的・動的な外部入力（変位や振動）に対する応答は副断層の形成を考える上でも、数値解析等での検討が必要と思われる。

3.1.5. 物性調査まとめ

断層破碎帯を含む基盤と未固結層の物性試験を取りまとめた結果を図 3.1.22 に示す。破碎帯近傍では母岩の花崗岩（野島断層の深部花崗岩物性は粘着力 31 から 76 MPa, 内部摩擦角 34 から 55°）に比べて 1 オーダー小さな強度を呈する。基本的に断層破碎部よりも未固結堆積層の強度が低い結果となった。静的強度に比べて動的強度は同程度か、高い傾向にある。このように強度の異なる物性領域がある場合の静的・動的な外部入力（変位や振動）に対する応答は副断層の形成を考える上でも重要で、数値解析等での検討が必要と思われる。

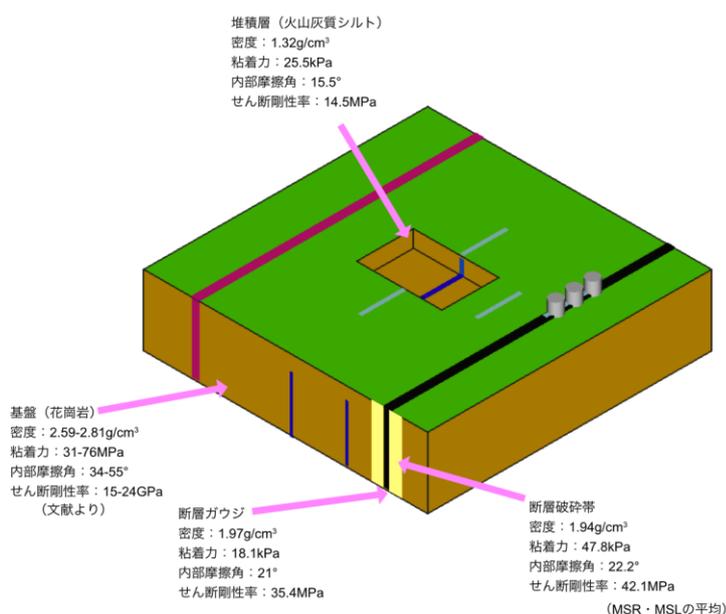


図 3.1.22 物性調査のまとめ。粘着力、内部摩擦角は静的力学試験結果で全応力。破碎帯の粘着力・内部摩擦角は複数の計測値の平均。基盤部分の値は文献より。

3.2. 室内模擬実験の計画立案のための技術的知見の整理

3.2.1. 既往アナログ実験の整理

複雑な地表地震断層形成プロセスを理解するために、これまでに数多くのアナログ実験や数値シミュレーションが行われてきている。ここでは、断層変位に関連した既往のアナログ実験の文献調査を行い、相似則や副断層の再現性の有無などを整理した。収集・整理した文献を表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 収集・整理した文献. 水色, オレンジ色, 茶色のハッチは横ずれ断層, 逆断層, 正・逆断層のアナログ実験であることを示す. 黄色, 緑色, 紫色のハッチは地震発生メカニズム, 地殻構造スケールの構造発達, レビューを取り扱った内容であることを示す.

No	Author	Year	Title	Journal	Volume	Number	Pages
1	KING HUBBERT, M	1951	MECHANICAL BASIS FOR CERTAIN FAMILIAR GEOLOGIC STRUCTURES	Geological Society of America Bulletin	62	4	355-372
2	Davis, Dan and Suppe, John and Dahlen, F. A.	1983	Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	88	B2	1153-1172
3	David A. Cole, Jr. and Poul V. Lade	1984	Influence Zones in Alluvium Over Dip - Slip Faults	Journal of Geotechnical Engineering	110	5	599-615
4	Poul V. Lade and David A. Cole and David Cummings	1984	Multiple Failure Surfaces Over Dip-Slip Faults	Journal of Geotechnical Engineering	110	5	616-627
5	Bray, Jonathan D and Seed, Raymond Bolton and Seed, Harry Bolton	1989	The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments				
6	Jonathan D. Bray and Raymond B. Seed and H. Bolton Seed	1994	Analysis of Earthquake Fault Rupture Propagation through Cohesive Soil	Journal of Geotechnical Engineering	120	3	562-580
7	Schreurs, Guido	1994	Experiments on strike-slip faulting and block rotation	Geology	22	6	567-570
8	Keller, J. V. A. and McClay, K. R.	1995	3D sandbox models of positive inversion	Geological Society, London, Special Publications	88	1	137-146
9	McClay, K. R.	1996	Recent advances in analogue modelling: uses in section interpretation and validation	Geological Society, London, Special Publications	99	1	201-225
10	Davletli, O. and Mart, Y.	1998	Analogue modeling of faulting pattern, ductile deformation, and vertical motion in strike-slip fault zones	Tectonics	17	2	303-310
11	谷山,尚 and 渡辺,啓行	1998	逆断層運動に伴う砂質表層地盤の変形に関する研究	土木学会論文集	1998	591	313-325
12	栗塚,信弘 and 伯野,充寿 and 若下,和義 and 鈴木,崇伸	1999	基盤の逆断層変位に伴う地盤の変形と応力について	応用力学論文集	2		533-542
13	上田,圭一 and 谷,和夫	1999	基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地盤の变形状況の検討(その3)-横ずれ, 逆断層型実験	電力中央研究所報告	U98049		
14	上田,圭一 and 谷,和夫	1999	基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地盤の变形状況の検討(その2)-正断層, 逆断層型実験	電力中央研究所報告	U98048		
15	Lagmay, F. A. M. and van Wyk de Vries, B. and Kerls, N. and Pyle, M. D.	2000	Volcano instability induced by strike-slip faulting	Bulletin of Volcanology	62	4	331-346
16	Ken McClay and M Bonora	2001	Analog models of restraining stopovers in strike-slip fault systems	AAPG Bulletin	85	2	233-260
17	Rolf V. Ackermann and Roy W. Schlicke and Martha O. Withjack	2001	The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws	Journal of Structural Geology	23	11	1803 - 1819
18	Le Calvez, JOËL H and Vendeville, Bruno C	2002	Experimental designs to model along-strike fault interaction	Journal of the Virtual Explorer	7		1-17
19	Bonini, Marco	2003	Detachment folding, fold amplification, and diapirism in thrust wedge experiments	Tectonics	22	6	
20	Giacomo Corti and Marco Bonini and Sandro Coticelli and Fabrizio Innocenti and Piero Manetti and Dimitrios Sokoutis	2003	Analogue modelling of continental extension: a review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma	Earth-Science Reviews	63	3	169 - 247
21	Maria Luján and Fabrizio Storti and Juan-Carlos Balanyá and Ana Crespo-Blanc and Federico Rossetti	2003	Role of décollement material with different rheological properties in the structure of the Aljibe thrust imbricate (Flysch Trough, Gibraltar Arc): an analogue modelling approach	Journal of Structural Geology	25	6	867 - 881
22	Schellart, W. P. and Nieuwland, D. A.	2003	3D evolution of a pop-up structure above a double basement strike-slip fault: some insights from analogue modelling	Geological Society, London, Special Publications	212	1	169-179
23	Schreurs, G.	2003	Fault development and interaction in distributed strike-slip shear zones: an experimental approach	Geological Society, London, Special Publications	210	1	35-52
24	Yasuhiro Yamada and Ken McClay	2003	Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. Paper 2: insights for possible along strike migration of material during 3D hanging wall deformation	Journal of Structural Geology	25	8	1331-1336
25	Yasuhiro Yamada and Ken McClay	2003	Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. Paper 1: 2D hanging wall deformation and section restoration	Journal of Structural Geology	25	9	1551-1560
26	上田,圭一	2003	横ずれ断層系の発達過程ならびに変位地形の形成過程-断層型実験による検討	電力中央研究所報告, 研究報告, U	3021		44218
27	上田,圭一 and 井上,大樹 and 宮越,紳義	2003	長大な活断層系における活動性調査法の高精度化-現地調査・模型実験による断層系の発達過程・断層変位地形の形成過程に関する検討	電力中央研究所報告, 研究報告	U03022		44216
28	Corti, Giacomo and Bonini, Marco and Sokoutis, Dimitrios and Innocenti, Fabrizio and Manetti, Piero and Cloetingh, Sierd and Mulageta, Genene	2004	Continental rift architecture and patterns of magma migration: A dynamic analysis based on centrifuge models	Tectonics	23	2	
29	S. Ellis and G. Schreurs and Marion Panien	2004	Comparisons between analogue and numerical models of thrust wedge development	Journal of Structural Geology	26	9	1659 - 1675
30	Yasuhiro Yamada and Ken McClay	2004	3D Analog Modeling of Inversion Thrust Structures	AAPG Memoir	82		276-301
31	Gloria Eisenstadt and Darrell Sims	2005	Evaluating sand and clay models: do rheological differences matter?	Journal of Structural Geology	27	8	1399 - 1412
32	Jea Woo LEE and Masanori HAMADA	2005	AN EXPERIMENTAL STUDY ON EARTHQUAKE FAULT RUPTURE PROPAGATION THROUGH A SANDY SOIL DEPOSIT	STRUCTURAL ENGINEERING / EARTHQUAKE ENGINEERING	22	1	1s-13s
33	R. Hus and V. Accocella and R. Funiello and M. De Batist	2005	Sandbox models of relay ramp structure and evolution	Journal of Structural Geology	27	3	459-473
34	上田,圭一 and 井上,大樹 and 鳥越,祐司	2005	2004年新潟県中越地震震源域における上部新主界の变形機構模型実験による基礎的検討	地震学2編	58	3	309-327

表 3.2.1 続き

No	Author	Year	Title	Journal	Volume	Number	Pages
35	Atmaoui, Nassima	2006	Development of Pull Apart Basins and Associated Structures by the Riedel Shear Mechanism: Insight from Scaled Clay Analogue Models				
36	Erwan (Le Guerroué) and Peter Robert Cobbold	2006	Influence of erosion and sedimentation on strike-slip fault systems: Insights from analogue models	Journal of Structural Geology	28	3	421 - 430
37	Ha, D and Abdoun, Tarek and O'Rourke, M and Van Laak, P and O'Rourke, T and Stewart, H	2006	Split-containers for centrifuge modeling of permanent ground deformation effects on buried pipeline systems				44292
38	Marc Holland and Janos L. Ural and Stephen Martel	2006	The internal structure of fault zones in basaltic sequences	Earth and Planetary Science Letters	248	1	301 - 315
39	Ming-Lang Lin and Chun-Fu Chung and Fu-Shu Jeng	2006	Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip	Engineering Geology	88	1-2	70 - 89
40	Panien, M. and Bulter, S. J. H. and Schreurs, G. and Pfiffner, O. A.	2006	Inversion of a symmetric basin: insights from a comparison between analogue and numerical experiments	Geological Society, London, Special Publications	253	1	253-270
41	S. Supak and D.R. Bohnenstiehl and W.R. Buck	2006	Flexing is not stretching: An analogue study of flexure-induced fault populations	Earth and Planetary Science Letters	246	1-2	125 - 137
42	Tibaldi, Alessandro and Bistacchi, Andrea and Pasquaré, Federico Aligi and Vezzoli, Luigina	2006	Extensional tectonics and volcano lateral collapses: insights from Ollague volcano (Chile-Bolivia) and analogue modelling	Terra Nova	18	4	282-289
43	Bernard, Sylvain and Avouac, Jean-Philippe and Dominguez, Stéphane and Simoes, Martine	2007	Kinematics of fault-related folding derived from a sandbox experiment	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	112	B3	
44	Corti, Giacomo and van Wijk, Jolande and Cloetingh, Sierd and Morley, Chris K.	2007	Tectonic inheritance and continental rift architecture: Numerical and analogue models of the East African Rift system	Tectonics	26	6	
45	I. Anastasopoulos and G. Gazetas and M. F. Bransby and M. C. R. Davies and A. El Nahas	2007	Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering	133	8	943-958
46	Mattioni, Luca and Sassi, William and Callot, Jean-Paul	2007	Analogue models of basin inversion by transpression: role of structural heterogeneity	Geological Society, London, Special Publications	272	1	397-417
47	佐藤,あすみ and 谷,和夫 and 薄田,昌孝	2007	横ずれ断層変位に伴う岩盤表面の破壊形態に関する模型実験と2005年パキスタン地震で出現した地表地震断層との比較	地盤工学研究発表会			473-474
48	白石,和也 and 山田,泰広 and 松岡,俊文	2007	アナログモデル実験で再現された付加体構造に対する反射法地震探査記録の合成	石油技術協会誌	72	3	279-289
49	B Barrientos and M Cerca and J Garcia-Márquez and C Hernández-Bernal	2008	Three-dimensional displacement fields measured in a deforming granular-media surface by combined fringe projection and speckle photography	Journal of Optics A: Pure and Applied Optics	10	10	104027
50	Bransby, M. F. and Davies, M. C. R. and El Nahas, A. and Nagoka, S.	2008	Centrifuge modelling of reverse fault-foundation interaction	Bulletin of Earthquake Engineering	6	4	607-628
51	Bransby, M. F. and Davies, M. C. R. and Nahas, A. E.	2008	Centrifuge modelling of normal fault-foundation interaction	Bulletin of Earthquake Engineering	6	4	585-605
52	F.O. Marques and C.R. Nogueira	2008	Normal fault inversion by orthogonal compression: Sandbox experiments with weak faults	Journal of Structural Geology	30	6	761 - 766
53	Fabien Graveleau and Stéphane Dominguez	2008	Analogue modelling of the interaction between tectonics, erosion and sedimentation in foreland thrust belts	Comptes Rendus Geoscience	340	5	324 - 333
54	Ghosh, N. and Chattopadhyay, A.	2008	The initiation and linkage of surface fractures above a buried strike-slip fault: An experimental approach	Journal of Earth System Science	117	1	23-32
55	Ha, Da and Abdoun, Tarek H. and O'Rourke, Michael J. and Symans, Michael D. and O'Rourke, Thomas D. and Palmer, Michael C. and Stewart, Harry E.	2008	Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting --- a centrifuge investigation	Canadian Geotechnical Journal	45	12	1733-1742
56	KOYI, HEMIN A. and GHASEMI, ABBAS and HESSAMI, KHALED and DIETL, CARLO	2008	The mechanical relationship between strike-slip faults and salt diapirs in the Zagros fold-thrust belt	Journal of the Geological Society	165	6	1031-1044
57	I. Anastasopoulos and G. Gazetas and M. F. Bransby and M. C. Davies and A. El Nahas	2009	Normal Fault Rupture Interaction with Strip Foundations	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering	135	3	359-370
58	Rosenau, Matthias and Lohmann, Jo and Oncken, Onno	2009	Shocks in a box: An analogue model of subduction earthquake cycles with application to seismotectonic forearc evolution	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	114	B1	
59	Toscani, Giovanni and Di Bucci, Daniela and Ravaglia, Antonio and Seno, Silvio and Fracassi, Umberto and Valensise, Gianluca	2009	Propagation of an inherited strike-slip fault through a foreland-chain system: quantitative aspects from analogue modelling and applications	Italian Journal of Geosciences	128	1	107-122
60	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		
61	Ping Hu and Yan-Hui Ding and Qipeng Cai and Guangyong Luo and Charles Wang Wai Ng and Yu-Jing Hou	2010	Centrifuge Modelling of the Influence of Pre-Existing Fractures in Multilayered Soils on Ground Deformations	International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics		Paper 13	
62	TRIYANI NUR HIDAYAH	2010	Experimental modeling of focused shortening				
63	Bonini, Lorenzo and Bucci, Daniela Di and Toscani, Giovanni and Seno, Silvio and Valensise, Gianluca	2011	Reconciling deep seismogenic and shallow active faults through analogue modelling: the case of the Messina Straits (southern Italy)	Journal of the Geological Society	168	1	191-199
64	Gang Rao and Aiming Lin and Bing Yan and Dong Jia and Xiaojun Wu and Zhikun Ren	2011	Co-seismic Riedel shear structures produced by the 2010 Mw 6.9 Yushu earthquake, central Tibetan Plateau, China	Tectonophysics	507	1	86-94
65	Leever, Karen A. and Gabrielsen, Roy H. and Sokoutis, Dimitrios and Willingshofer, Ernst	2011	The effect of convergence angle on the kinematic evolution of strain partitioning in transpressional brittle wedges: Insight from analog modeling and high-resolution digital image analysis	Tectonics	30	2	

表 3.2.1 続き

No	Author	Year	Title	Journal	Volume	Number	Pages
66	Marc Holland and Heijn van Gent and Loic Bazalgette and Najwa Yassir and Eilard H. Hoogerduijn Strating and Janos L. Ural	2011	Evolution of dilatant fracture networks in a normal fault --- Evidence from 4D model experiments	Earth and Planetary Science Letters	304	3	399 - 406
67	Reiter, Karsten and Kukowski, Nina and Ratschbacher, Lothar	2011	The interaction of two indenters in analogue experiments and implications for curved fold-and-thrust belts	Earth and Planetary Science Letters	302	1	132-146
68	上田, 圭一	2011	模型実験による逆断層・活褶曲帯の発達過程の検討	電力中央研究所報告	N10049		
69	Giacomo Corti	2012	Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System	Tectonophysics	522-523		1 - 33
70	Marco Bonini and Federico Sani and Benedetta Antonielli	2012	Basin inversion and contractional reactivation of inherited normal faults: A review based on previous and new experimental models	Tectonophysics	522-523		55-88
71	Ng, C. W. W. and Cai, Q. P. and Hu, P.	2012	Centrifuge and Numerical Modeling of Normal Fault-Rupture Propagation in Clay with and without a Preexisting Fracture	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering	138	12	1492-1502
72	R. Solhmirzaei and A. Soroush and M. Mortazavi Zanjani	2012	Fault Rupture Propagation through Level Ground and Sloping Sand Layers	15wcee / 15th World Conference on Earthquake Engineering		4148	
73	Rojhni, M. and Moradi, M. and Ebrahimi, M. and Galandzadeh, A. and Takada, S.	2012	Recent Developments in Faulting Simulators for Geotechnical Centrifuges	Geotechnical Testing Journal	35	6	924-934
74	Stanislav Burliga and Hemin A. Koyi and Piotr Krzywiac	2012	Modelling cover deformation and decoupling during inversion, using the Mid-Polish Trough as a case study	Journal of Structural Geology	42		62 - 73
75	Taras Gerya	2012	Origin and models of oceanic transform faults	Tectonophysics	522-523		34 - 54
76	Tim P. Dooley and Guido Schreurs	2012	Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results	Tectonophysics	574-575		1 - 71
77	Yakymchuk, Chris and Harris, Lylal B. and Godin, Laurent	2012	Centrifuge modelling of deformation of a multi-layered sequence over a ductile substrate: 1. Style and 4D geometry of active cover folds during layer-parallel shortening	International Journal of Earth Sciences	101	2	463-482
78	Chang, YY and Lee, CI and Huang, WC and Huang, WJ and Lin, ML and Hung, WY and Lin, YH	2013	Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip	International Journal of Civil Engineering	11	2	79-89
79	Michele L. Cooke and Mariel T. Schotterfeld and Steve W. Buchanan	2013	Evolution of fault efficiency at restraining bends within wet kaolin analog experiments	Journal of Structural Geology	51		180 - 192
80	PERI JORDAN SASNETT	2013	ANALOGUE MODELLING OF STRIKE-SLIP SURFACE RUPTURES: IMPLICATIONS FOR GREENDALE FAULT MECHANICS AND PALEOSEISMOLOGY				
81	ALEXANDRA ELISE HATEM	2014	EVOLUTION OF OFF-FAULT DEFORMATION ALONG ANALOG STRIKE-SLIP FAULTS				
82	Justin W. Herbert	2014	INVESTIGATING FAULT SYSTEM DEFORMATION WITH NUMERICAL MODELS AND ANALOG EXPERIMENTS				
83	Mohammad Hassan Baziar and Ali Nabizadeh and Chung Jung Lee and Wen Yi Hung	2014	Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel	Soil Dynamics and Earthquake Engineering	65		151 - 164
84	Sugan, M. and Wu, Jonny and McClay, Ken	2014	3D analogue modelling of transtensional pull-apart basins: Comparison with the Cinarcik basin, Sea of Marmara, Turkey	Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata	55		699-716
86	高尾, 誠 and 上田, 圭一 and 安中, 正 and 栗田, 悠史 and 中瀬, 仁 and 京谷, 孝史 and 加藤, 洋治	2014	確率論的新層変位ハザード解析の信頼性向上	日本地震工学会論文集	14	2	2_16-2_36
86	渡辺, 健治	2014	動的な変形・破壊挙動を捉える模型実験技術(特集 模型実験の動向)	地震工学会誌: 土と基礎	62	9	20-23
87	Alexandra E. Hatem and Michele L. Cooke and Elizabeth H. Madden	2015	Evolving efficiency of restraining bends within wet kaolin analog experiments	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	120	3	1975-1992
88	Caniven, Y. and Dominguez, S. and Soliva, R. and Cattin, R. and Peyret, M. and Marchandon, M. and Romano, C. and Strak, V.	2015	A new multilayered visco-elasto-plastic experimental model to study strike-slip fault seismic cycle	Tectonics	34	2	232-264
89	Lindsay Waffle	2015	ROLE OF REACTIVATED BASEMENT FAULTS IN LOCALIZING DEFORMATION IN THE UPPER CRUST: INSIGHTS FROM CENTRIFUGE ANALOGUE MODELLING				
90	M. Rokonuzzaman and A. El Nahas and T. Sakai	2015	Experimental validation of a numerical model for the interaction of dip-slip normal fault ruptures, sand deposits, and raft foundations	International Journal of Geotechnical Engineering	9	3	239-250
91	KOYI, HEMIN and NILFOUROUSHAN, FARAMARZ and HESSAMI, KHALED	2016	Modelling role of basement block rotation and strike-slip faulting on structural pattern in cover units of fold-and-thrust belts	Geological Magazine	153	44322	827-844
92	Bienest, Anouk	2017	From continental rifting to conjugate margins: insights from analogue and numerical modelling			2017PA066289	
93	Brune, Sascha and Corti, Giacomo and Ranalli, Giorgio	2017	Controls of inherited lithospheric heterogeneity on rift linkage: Numerical and analog models of interaction between the Kenyan and Ethiopian rifts across the Turkana depression	Tectonics	36	9	1767-1786
94	Emanuele Bonanno and Lorenzo Bonini and Roberto Basilli and Giovanni Toscani and Silvio Seno	2017	How do horizontal, frictional discontinuities affect reverse fault-propagation folding?	Journal of Structural Geology	102		147 - 167
95	Montanari, Domenico and Agostini, Andrea and Bonini, Marco and Corti, Giacomo and Ventisette, Chiara Del	2017	The Use of Empirical Methods for Testing Granular Materials in Analogue Modelling	Materials	10	6	
96	P. Grenado and O. Ferrer and J.A. Muñoz and W. Thöni and P. Strauss	2017	Basin inversion in tectonic wedges: Insights from analogue modelling and the Alpine-Carpathian fold-and-thrust belt	Tectonophysics	703-704		50-68

表 3.2.1 続き

No	Author	Year	Title	Journal	Volume	Number	Pages
97	Rosenau, M. and Corbi, F. and Dominguez, S.	2017	Analogue earthquakes and seismic cycles: experimental modelling across timescales	Solid Earth	8	3	597-635
98	Sibbel, M.	2017	Surface dynamics of inversion tectonics systems through analogue modelling	BSc thesis			
99	Yang XIAO and Guanghui WU and Yongliang LEI and Tingting CHEN	2017	Analogue modeling of through-going process and development pattern of strike-slip fault zone	Petroleum Exploration and Development	44	3	368 - 376
100	Yannick Caniven and Stéphane Dominguez and Roger Soliva and Michel Peyret and Rodolphe Cattin and Frantz Maerten	2017	Relationships between along-fault heterogeneous normal stress and fault slip patterns during the seismic cycle: Insights from a strike-slip fault laboratory model	Earth and Planetary Science Letters	480		147 - 157
101	Zonghu Liao and Hui Liu and Zheng Jiang and Kurt J. Marfurt and Ze'ev Reches	2017	Fault damage zone at subsurface: A case study using 3D seismic attributes and a clay model analog for the Anadarko Basin, Oklahoma	Interpretation	5	2	T143-T150
102	Kuge, Hiroaki and Yamada, Yasuhiro and Ohde, Akihiro and Bauville, Arthur and Yamaguchi, Asuka and Ashi, Juichiro	2018	Dynamic formation process of thick deformation zone on the shallow plate boundary fault of the Japan Trench: insight from analog experiments of half-graben subduction	Progress in Earth and Planetary Science	5	1	69
103	Sascha Brune	2018	Modelling continental rift dynamics				192
104	Takemura, Jiro and Yao, Chaofan and Kusakabe, Osamu	2018	Development of a fault simulator for soils under large vertical stress in a centrifuge	International Journal of Physical Modelling in Geotechnics			44210
105	Zhuo, Yan-Qun and Guo, Yanshuang and Chen, Shunyun and Ji, Yuntao and Ma, Jin	2018	Laboratory Observations of Linkage of Preslip Zones Prior to Stick-Slip Instability	Entropy	20	9	629
106	Zwaan, Frank and Schreurs, Guido and Adam, Jürgen	2018	Effects of sedimentation on rift segment evolution and rift interaction in orthogonal and oblique extensional settings	Global and Planetary Change	171		110-133
107	Chaofan Yao and Jiro Takemura	2019	Using laser displacement transducer scanning technique in centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction	Soil Dynamics and Earthquake Engineering	121		219 - 232
108	Zwaan, F. and Schreurs, G. and Butler, S. J. H.	2019	A systematic comparison of experimental set-ups for modelling extensional tectonics	Solid Earth	10	4	1063-1097
109	Yao, Chaofan and Takemura, Jiro and Guo, Wenqi and Yan, Qixiang	2020	Hyperbolic spiral model for predicting reverse fault ruptures in sand based on centrifuge tests	Géotechnique	19	63	44208

表 3.2.1 で色分けしたように断層変位を与えるアナログ実験には、その目的に応じて様々なスケールの装置が存在する。大別すると、装置実寸大から 10^{-2} オーダー、 10^{-4} から 10^{-5} オーダー、 10^{-7} 以下のオーダー、さらには地震発生プロセスそのものを対象とした装置である (図 3.2.1)。

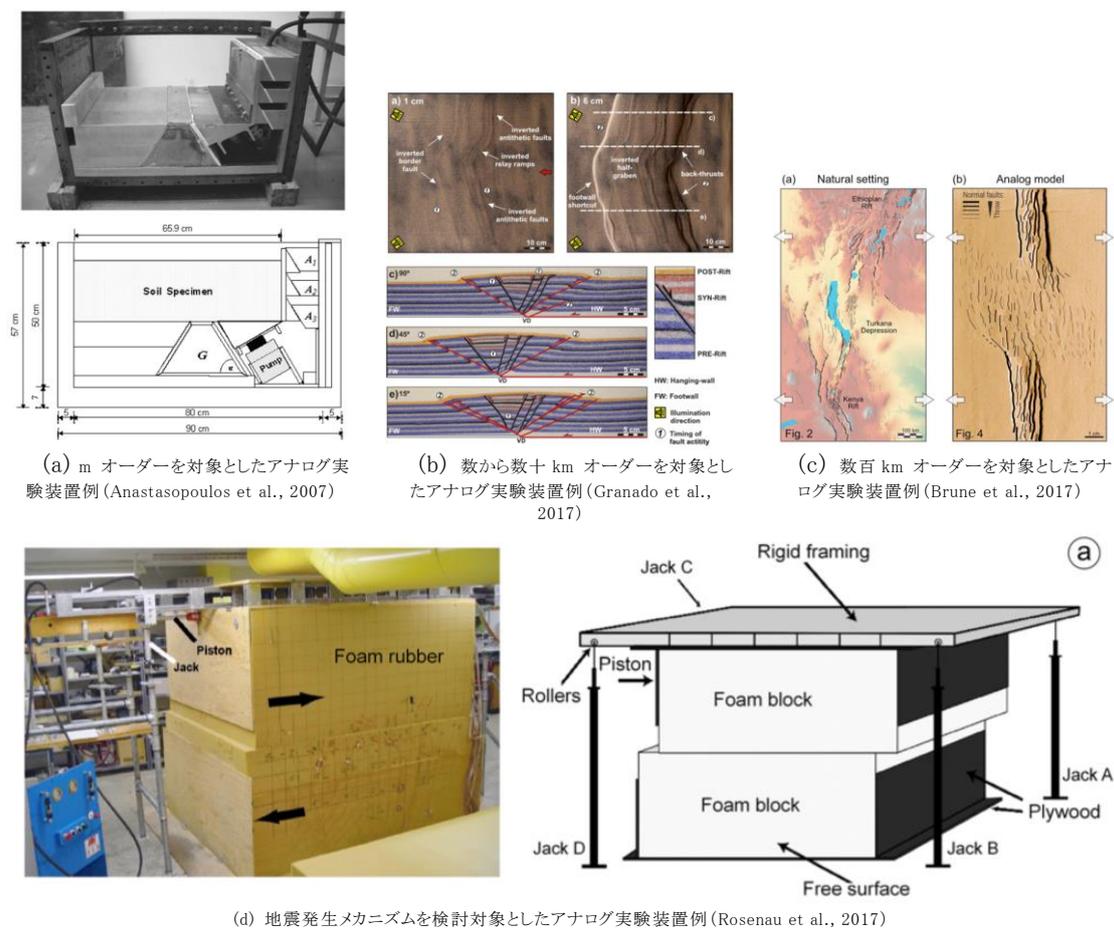


図 3.2.1 様々なスケール・目的のアナログ実験装置

遠心模型実験や 1g 場での相似則を整理している風間・稲富(1993) によれば, 模型実験の相似比は表 3.2.2 のようになる. 遠心場 (ng 場) における遠心模型モデルは長さに関する相似比が 1/n となるためモデルの長さを L_m , 実地盤の長さを L_n とした時, 100g としても $L_m/L_n=1 \times 10^{-2}$ となり, 基盤を対象とした 1km 程度の模擬地盤空間を作成するには巨大な装置 (20m 程度) が必要となる.

表 3.2.2 相似則 (風間・稲富, 1993)

項 目	記 号	A 1) 一般的な相似則 (動的問題)	A 2) 一般的な相似則 (静的問題)	B) 1G 場の 相似則 (動的問題)	C1) 遠心場の 相似則 (動的問題)	C2) 遠心場の 相似則 (静的問題)
長さ	N_l	N_l	N_l	N_l	1/N	1/N
土の質量密度	N_ρ	N_ρ	N_ρ	1	1	1
ひずみ	N_ε	N_ε	N_ε	N_ε	1	1
加速度	N_g	N_g	N_g	1	N	N
間隙率	N_n	N_n	N_n	1	1	1
透水係数/(間隙流体の 単位体積重量)	N_k	$(N_l N_\varepsilon / N_g)^{1/2} / N_\rho$	N_k	$(N_l N_\varepsilon)^{1/2}$	1/N	1
透水係数	N_{k0}	$(N_\rho N_\varepsilon N_g)^{1/2}$	$N_k N_\rho N_g$	$(N_\rho N_l)^{1/2}$	1	N
時間	N_t	$(N_\varepsilon N_l / N_g)^{1/2}$	$N_l N_\varepsilon / (N_g N_\rho N_k)$	$(N_\varepsilon N_l)^{1/2}$	1/N	1/N ²
振動数	-	$(N_\varepsilon N_l / N_g)^{-1/2}$	-	$(N_\varepsilon N_l)^{-1/2}$	N	-
土粒子骨格の絶対変位	N_u	$N_l N_\varepsilon$	$N_l N_\varepsilon$	$N_l N_\varepsilon$	1/N	1/N
間隙流体の土粒子骨格 に対する平均相対変位	N_w	$N_l N_\varepsilon N_n$	$N_l N_\varepsilon N_n$	$N_l N_\varepsilon$	1/N	1/N
間隙流体の絶対変位	N_U	$N_l N_\varepsilon$	$N_l N_\varepsilon$	$N_l N_\varepsilon$	1/N	1/N
応力	N_σ	$N_\rho N_g N_l$	$N_\rho N_g N_l$	N_l	1	1
有効応力	N_σ'	$N_\rho N_g N_l$	$N_\rho N_g N_l$	N_l	1	1
間隙流体の圧力	N_π	$N_\rho N_g N_l$	$N_\rho N_g N_l$	N_l	1	1
剛性	N_D	$N_\rho N_g N_l / N_\varepsilon$	$N_\rho N_g N_l / N_\varepsilon$	N_l / N_ε	1	1
土粒子の体積剛性	N_{Ks}	$N_\rho N_g N_l / N_\varepsilon$	$N_\rho N_g N_l / N_\varepsilon$	N_l / N_ε	1	1
間隙流体の体積剛性	N_{Kf}	$N_\rho N_g N_l / (N_\varepsilon N_n)$	$N_\rho N_g N_l / (N_\varepsilon N_n)$	N_l / N_ε	1	1
体積剛性に関する係数	N_Q	$N_\rho N_g N_l / (N_\varepsilon N_n)$	$N_\rho N_g N_l / (N_\varepsilon N_n)$	N_l / N_ε	1	1
間隙流体の密度	$N_{\rho f}$	N_ρ	N_ρ	1	1	1
杭や矢板の曲げ剛性	N_{EI}	$N_\rho N_g N_l^5 / N_\varepsilon$	$N_\rho N_g N_l^5 / N_\varepsilon$	N_l^5 / N_ε	1/N ⁴	1/N ⁴
杭の密度	$N_{\rho b}$	N_ρ	N_ρ	1	1	1

1g 場での実験の問題点としては, 応力やひずみの相似比が 1 でないことから, 1/n にスケールダウンされた模型実験における小さなひずみ領域での実験結果と大ひずみ領域での実地盤における現象では, そもそも現象の相似が成り立たない点が指摘されている (風間・稲富, 1993). 一方で, 実地盤と同じ模擬地盤を用いた実験では, 粒子サイズ効果により逆断層に伴う剪断帯が再現される保証がないとされる (上田・谷, 1999a).

さらに断層変位のような破壊現象では, 内部摩擦角は等しく応力の相似比に応じた粘着力である必要がある (例えば Weijermars et al., 1993). 前述の粒子サイズ効果を除けば, 実地盤と同じ地盤材料を用いる遠心模型実験は, スケール (1/n) が検討したい対象に適していれば, 問題ないと思われる.

しかしながら, 模擬地盤とは異なる物性の実地盤を対象とする場合は, 相似比に留意する必要がある. そこで, 既存文献による相似比を整理した. 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 3.2.1).

$$\frac{c_m}{c_n} = \frac{\rho_m g_m L_m}{\rho_n g_n L_n} \dots\dots\dots (式 3.2.1)$$

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 3.2.1)より,

$$\frac{L_m}{L_n} = \frac{c_m}{c_n} \div \left(\frac{\rho_m g_m}{\rho_n g_n} \right) \dots\dots\dots (式 3.2.2)$$

1g 場での実験を考えた場合, $g_m/g_n=1$ より, 対象とする実地盤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. 長さの相似比は実験装置サイズ, 検討する変位量や構造の空間的な広がりやを規定する. 地殻構造スケールの横ずれ断層に伴う岩塩のダイヤピル (貫入構造) を, 1g 場および遠心模型実験で検討した KOYI et al. (2008) による相似比を表 3.2.3 および表 3.2.4 にそれぞれ示す. 1g 場 (表 3.2.3) での実験では上部地殻 ($\rho_n = 2.55 \text{ g/cm}^3$, $c_n = 5 \text{ MPa}$) として, 緩い砂 ($\rho_m = 1.44 \text{ g/cm}^3$, $c_m = 140 \text{ Pa}$) を用いている. このとき $\rho \text{ gL/c}$ は実地盤, 模擬地盤それぞれで 0.5 と 0.1 となり, 同じオーダーに収まっている. 遠心模型実験 (表 3.2.4) では, 上部地殻に粘土 ($\rho_n = 1.44 \text{ g/cm}^3$, $c_n = 20 \text{ kPa}$) を用いており, $\rho \text{ gL/c}$ は 0.49 と, 先程の実地盤の値 (0.5) とほぼ等しくなる. したがって, 遠心模型実験でも模擬地盤材料に粘土を用いると基盤から地殻構造スケールの実験に適用できる可能性がある.

表 3.2.3 1g アナログ実験相似比 (Koyi et al., 2008, $L_m/L_n = 1 \times 10^{-5}$)

Variable	Nature	Model	Scaling ratio
Acceleration due to gravity	9.81	9.81	$a_m/a_n = 1$
Density of overburden (kg m^{-3})	2550	1500	$\rho_m/\rho_n = 0.59$
Density of substratum (kg m^{-3})	2200	987	$\rho_m/\rho_n = 0.45$
Density contrast ($\rho_o - \rho_s$)	350	513	1.46
Stress ratio ($\sigma_r = \mu_r g_r l_r$)			$\sigma_r = (4.5-5.9) \times 10^{-6}$
Friction coefficient of overburden	0.85	0.73	0.86
Viscosity of source layer	1.7×10^{-18} to 10^{-19}	5×10^4	$\mu_r = 2.9 \times 10^{-14}$ to 10^{-15}
($\rho/g/\tau_0$) ratio	7.5×10^{-1}	1.6×10^{-1}	0.21

Subscripts m, n, o and s denote model, nature, overburden and substrate, respectively.

表 3.2.4 遠心模型実験相似比 (Koyi et al., 2008)

Variable	Model	Nature	Scaling ratios (model/nature)
Thickness of overburden	25 mm	2400 m	$I_r = 10^{-5}$
Thickness of buoyant layer	6 mm	600 m	$I_r = 10^{-5}$
Density of overburden	1.705 g cm ⁻³	2.6 g cm ⁻³	$\rho_r = 0.65$
Density of buoyant layer	0.964 g cm ⁻³	2.2 g cm ⁻³	$\rho_r = 0.7$
Viscosity of overburden	10 ⁷ -10 ⁸ Pa s	10 ²² Pa s	$\mu_r = 10^{-14}$ -10 ⁻¹⁵
Viscosity of buoyant layer	4 × 10 ⁴ Pa s	4 × 10 ¹⁸ -4 × 10 ¹⁹ Pa s	$\mu_r = 10^{-14}$ -10 ⁻¹⁵
Acceleration	c. 700 m s ⁻²	9.81 m s ⁻²	$g_r = 700$
RN, overburden units	7.2 × 10 ⁻¹² to 10 ⁻¹³	1.49 × 10 ⁻¹²	0.48-4.8
RN, buoyant layer units	4 × 10 ⁻⁹	2 × 10 ⁻¹⁰	20

そこで、表 3.2.1 で整理した文献から横ずれ断層や逆断層を中心に実験対象とした断層タイプ、装置サイズ、模擬地盤や長さの相似比等を取りまとめた。整理したアナログ実験の装置と実験結果のセットの一部を図 3.2.2 から図 3.2.21 に示す。

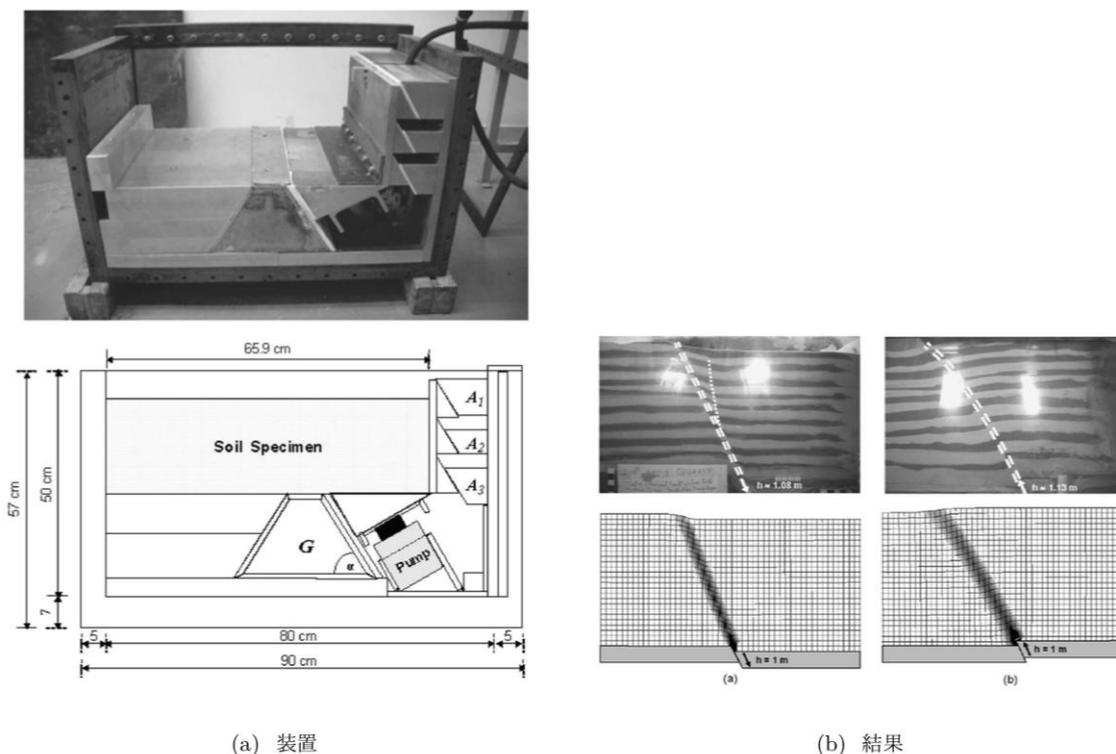
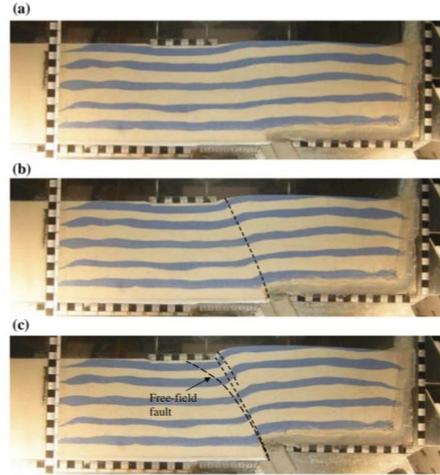
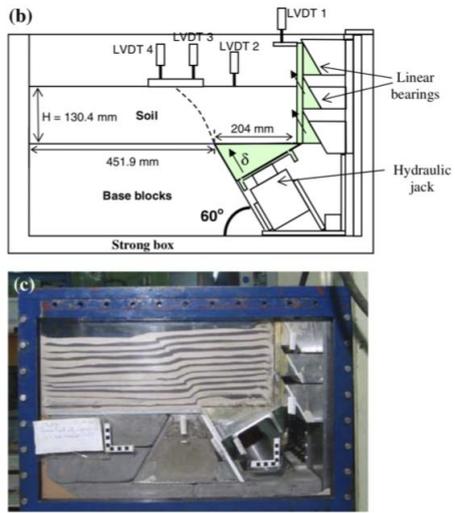


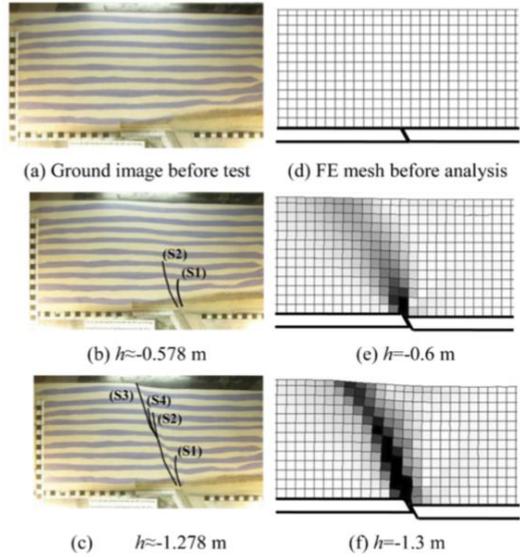
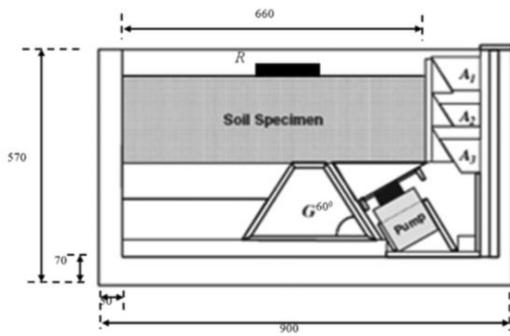
図 3.2.2 Anastasopoulos et al. (2007)



(a) 装置

(b) 結果

図 3.2.3 Bransby et al. (2008)



(a) 装置

(b) 結果

図 3.2.4 Rokonuzzaman et al. (2015)

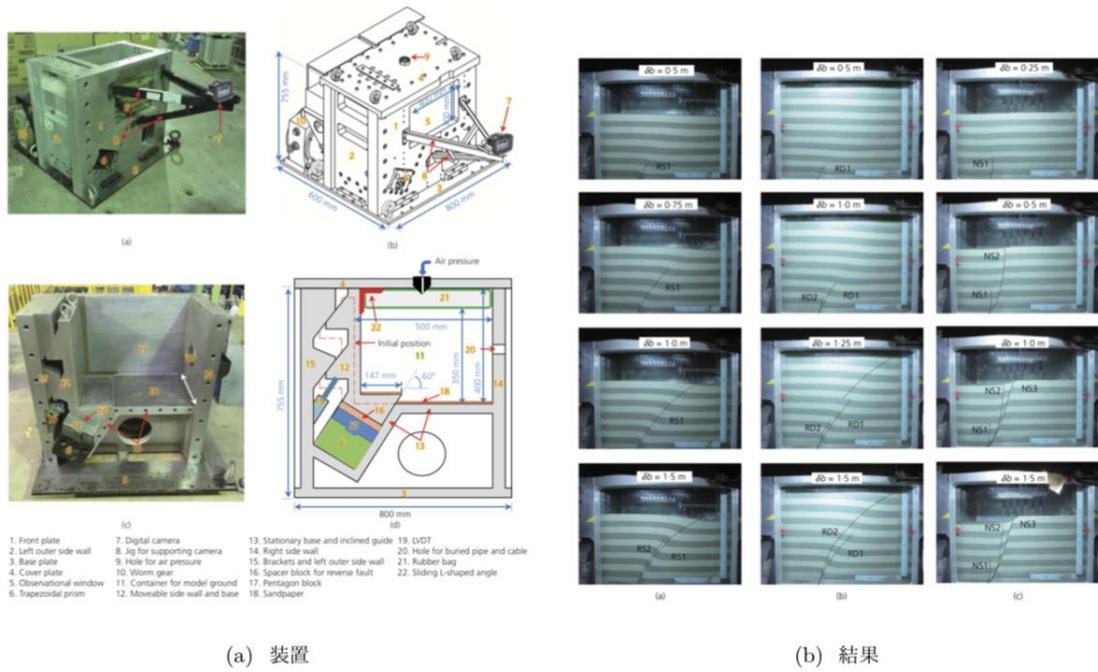


図 3.2.5 Takemura et al. (2018)

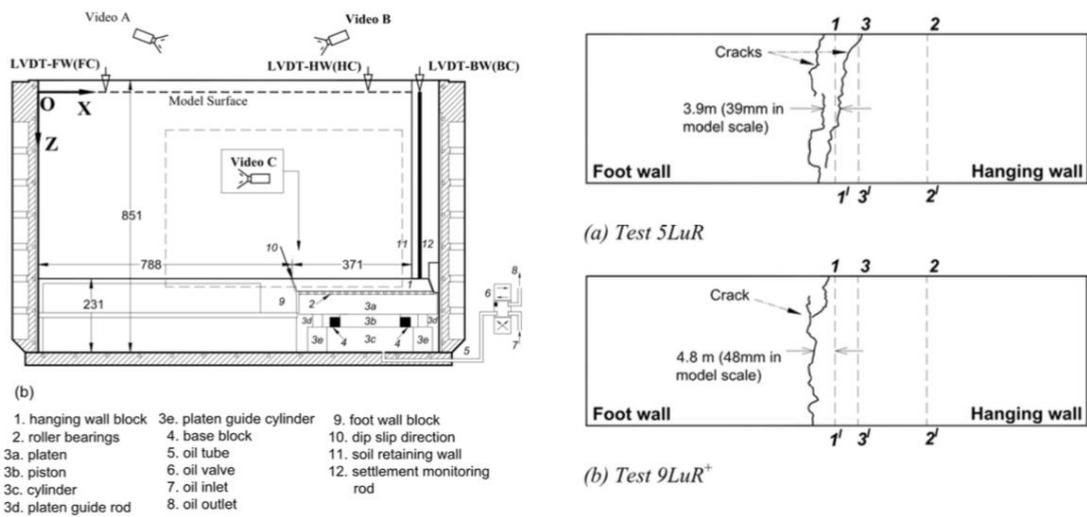
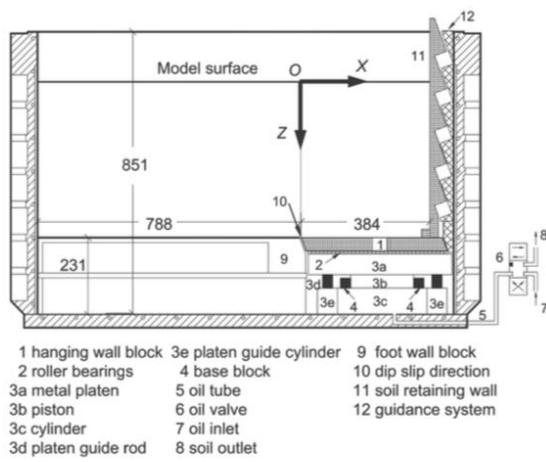
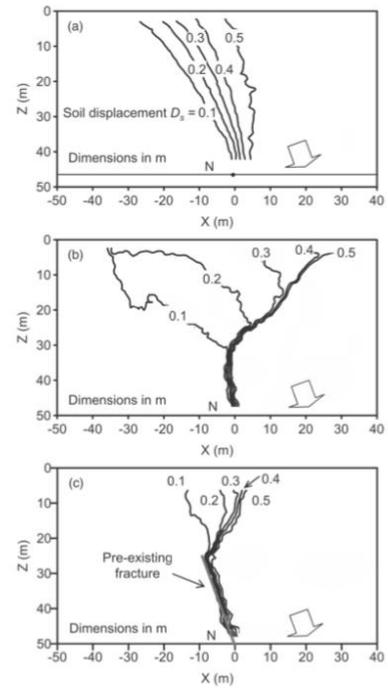


図 3.2.6 Hu et al. (2010)

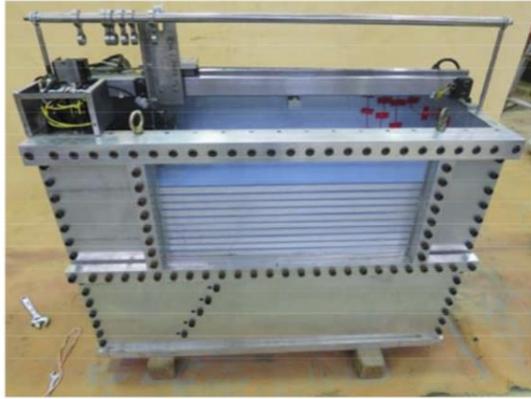


(a) 装置



(b) 結果

☒ 3.2.7 Ng et al. (2012)



(a) 装置



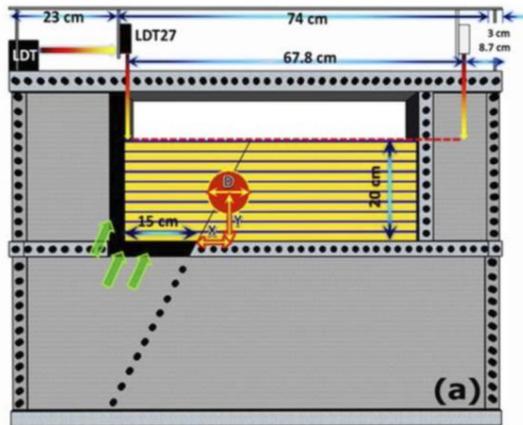
(b) tested at 40 g



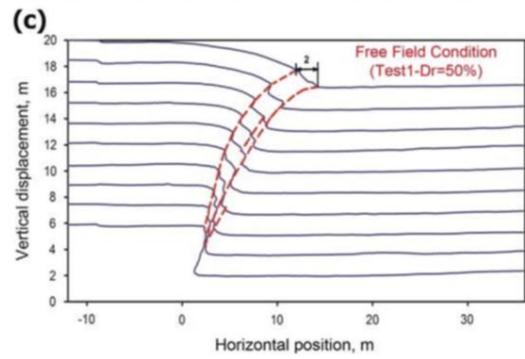
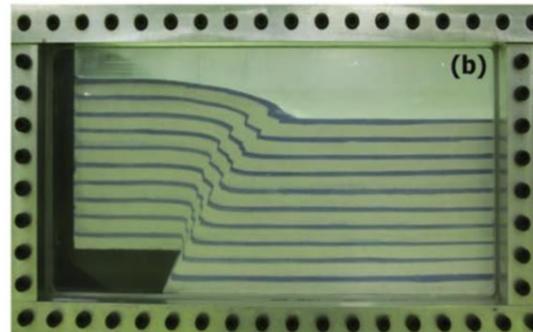
(c) tested at 1 g

(b) 結果

图 3.2.8 Chang et al. (2013)



(a) 装置



(b) 結果

图 3.2.9 Baziar et al. (2014)

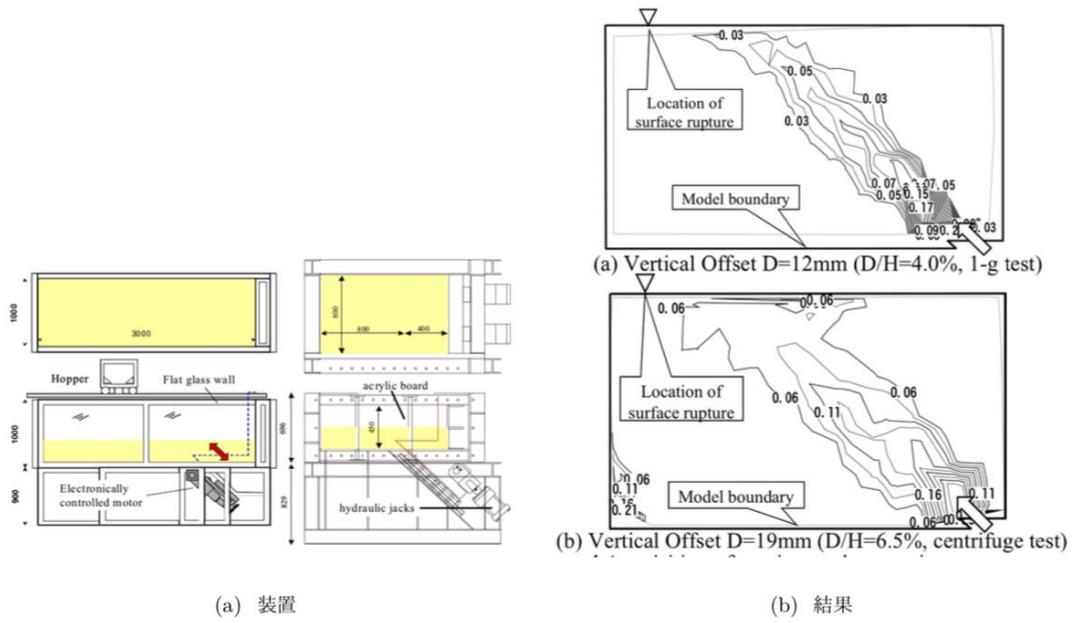


図 3.2.10 Lee et al. (2003)

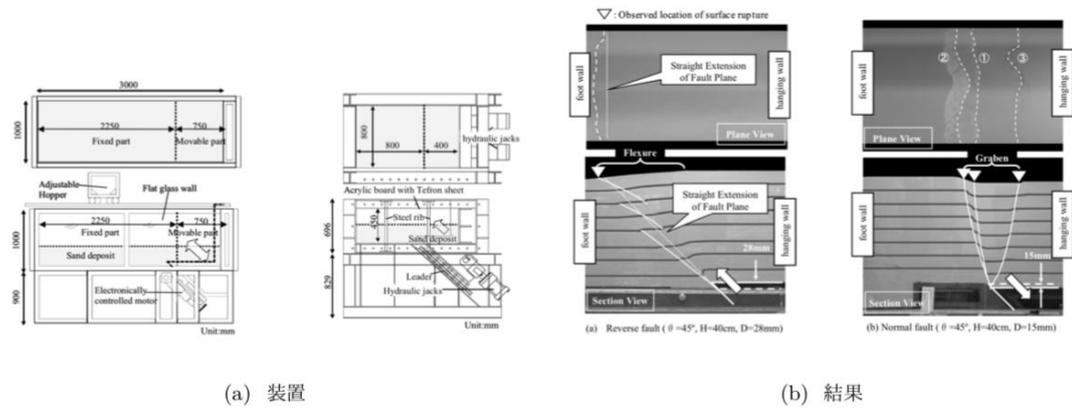


図 3.2.11 LEE and HAMADA (2005)

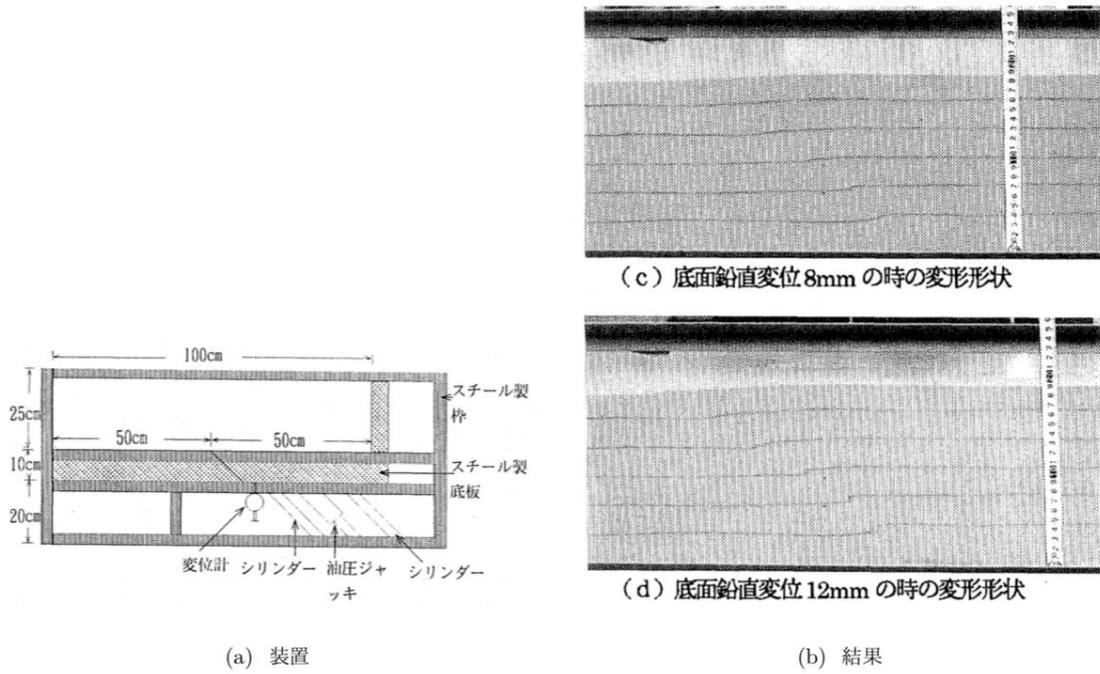


図 3.2.12 谷山・渡辺(1998)

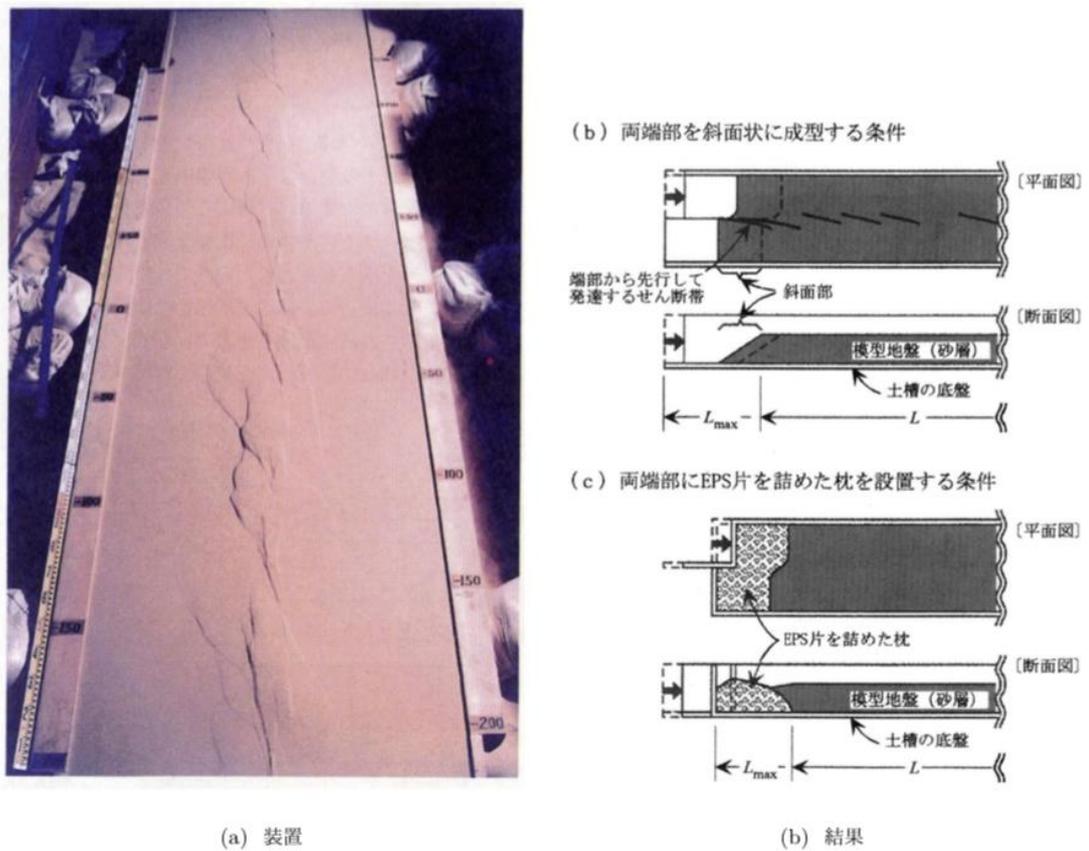


図 3.2.13 小山・谷(2003)

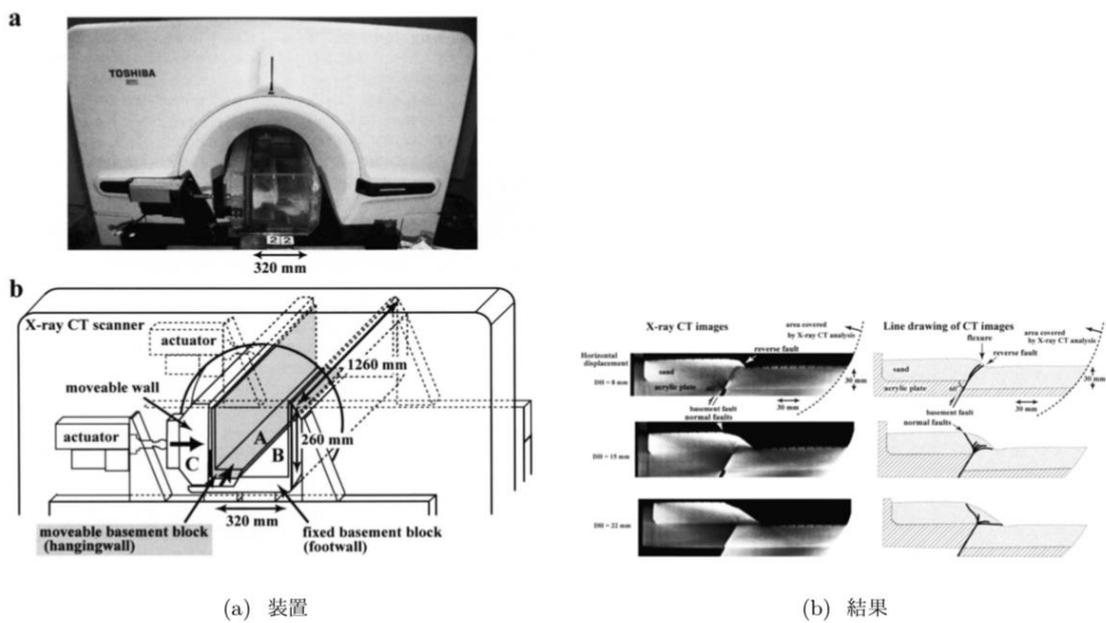


図 3.2.14 上田・他(2005)

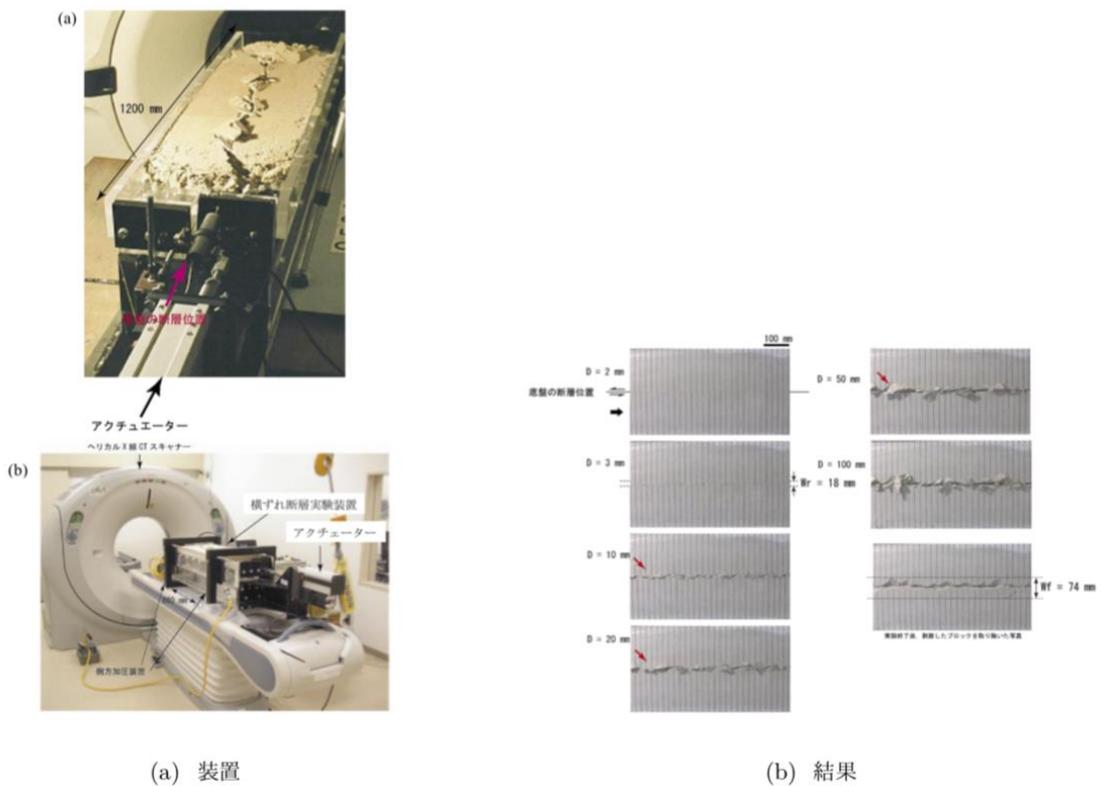
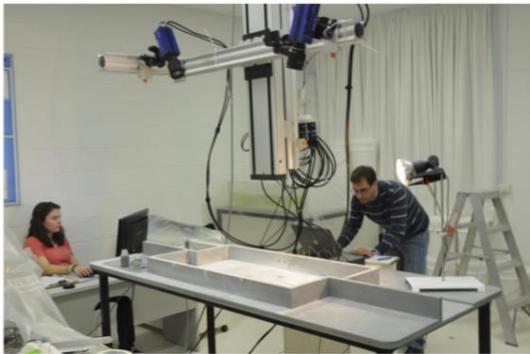
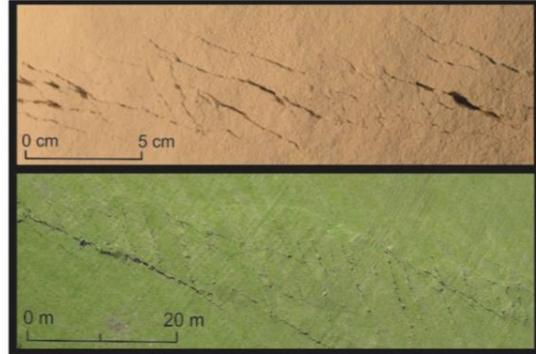


図 3.2.15 上田(2009)

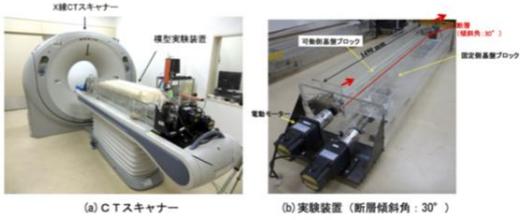


(a) 装置



(b) 結果

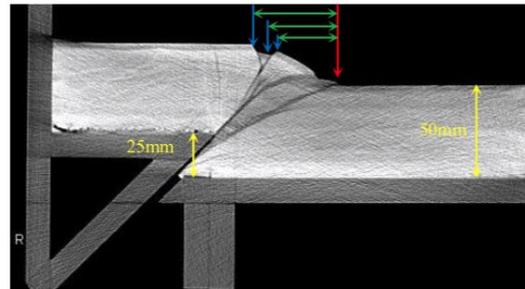
図 3.2.16 Sasnett (2013)



(a) CTスキャナー

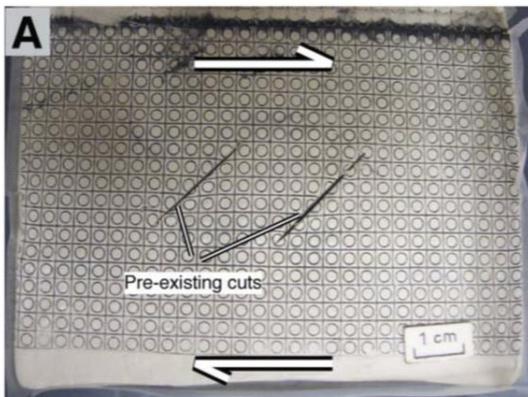
(b) 実験装置 (断層傾斜角: 30°)

(a) 装置

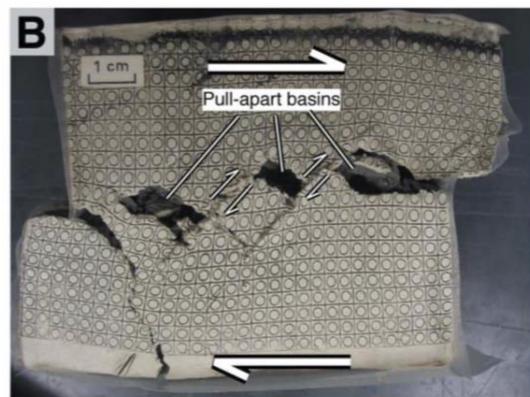


(b) 結果

図 3.2.17 高尾・他(2014)

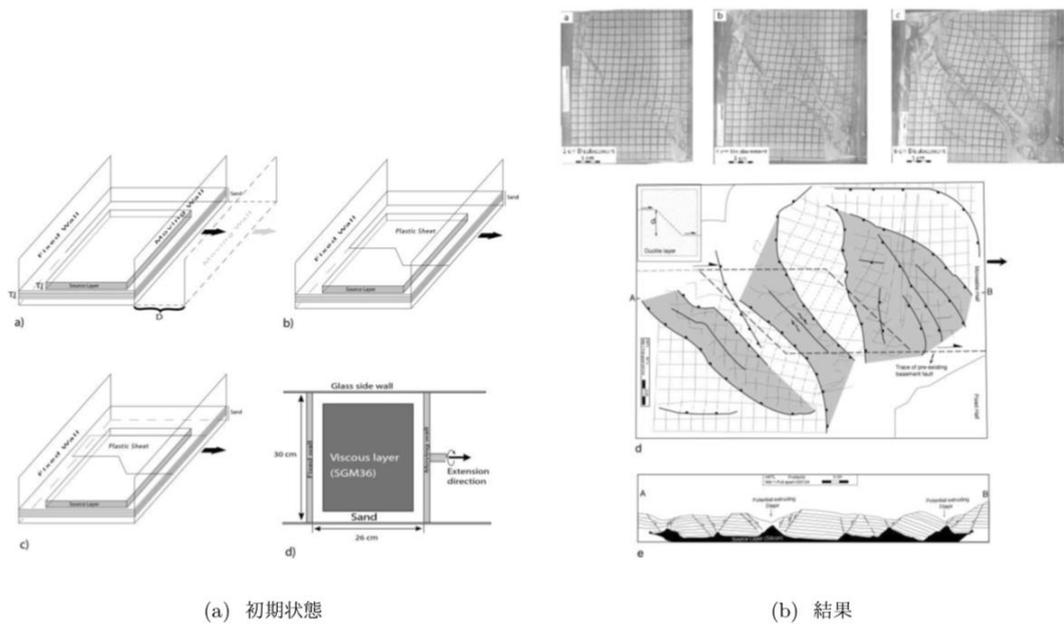


(a) 初期状態



(b) 結果

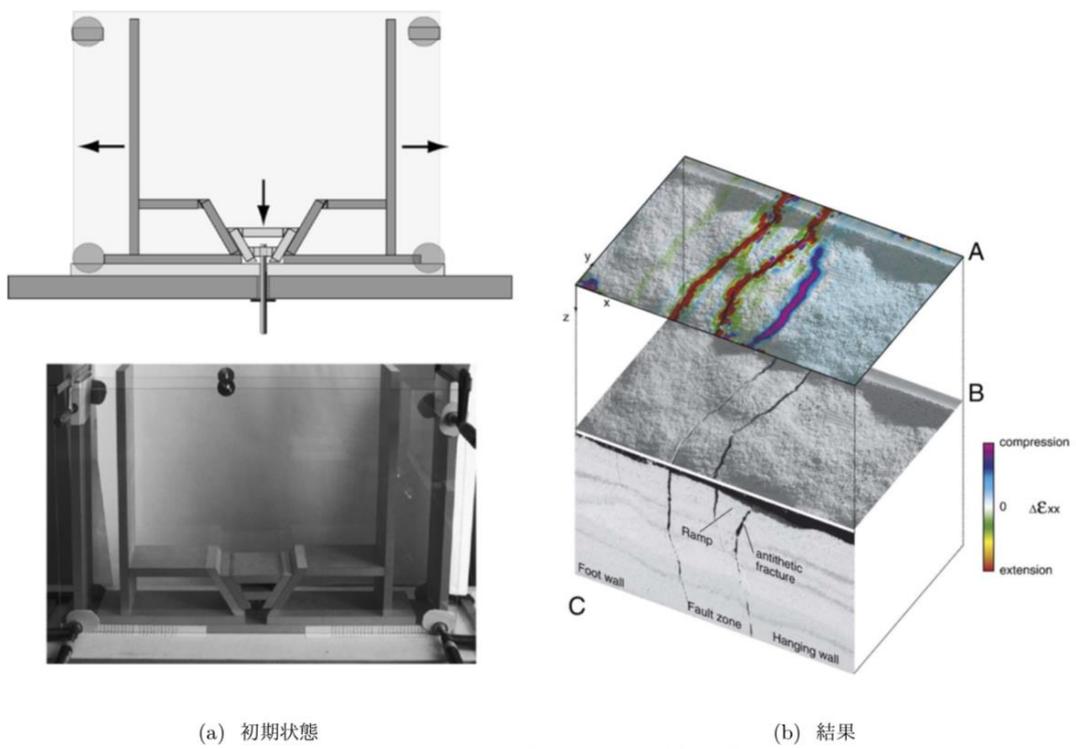
図 3.2.18 Koyi et al. (2008)



(a) 初期状態

(b) 結果

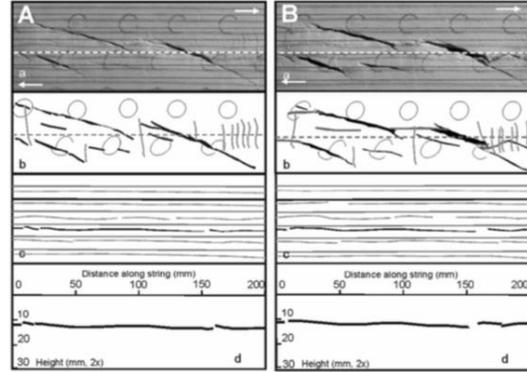
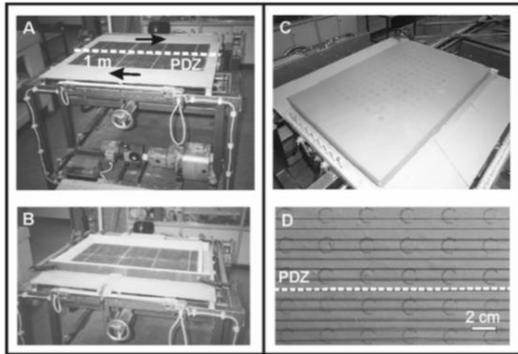
図 3.2.19 Koyi et al. (2008)



(a) 初期状態

(b) 結果

図 3.2.20 Holland et al. (2006)



(a) 実験装置

(b) 結果

図 3.2.21 Atmaoui (2006)

表 3.2.5 アナログ実験結果文献整理一覧. 番号は表 3.2.1 に対応している.

No.	断層 (角度, °)	重力場	装置 (幅・奥行き・高さ)	変位量	模擬地盤材料 (試料サイズ)	$\rho g/c$ (m:モデル)	$\rho g/c$ (n:実地盤)	空間分解能 (長さの相似比)	結果の整理
15	逆 (45)	1g	---	1.2cm	砂 (100×20×25cm)	---	---	---	最終的には地震動と組み合わせての解析
16	逆 (45, 60, 75, 90)	1g	---	層厚の1%	アルミ棒 (110-210×5?×50cm)	---	---	---	物性情報の詳細が不明
23	地溝帯	1g	50×10×?cm	---	乾燥粉末 (50×10×15cm)	0.01	0.05	1cm=50-500m (2×10^{-4} - 10^{-5})	写真およびPIV (6 pixel mm ⁻¹)
38	逆 (45)	20, 30, 50g	---	to ca. 3cm	密詰の砂 (120×80×45cm)	---	---	0.02 - 0.05	写真
38'	正・逆 (30, 45, 60)	1g	---	to ca. 3cm	密詰・緩詰の砂 (300×50×100cm)	---	---	---	写真
40	逆 (60)	1g	32×120×55cm	H, 2.2cm	標準砂+シリコン (32×86×30cm)	0.13	0.12	3cm=3km (1×10^{-5})	X-CT
44	沈み込み帯	1g	100×70×10cm	to ca. 5.4cm	地殻部分は砂糖とゴムの合成	2.43×10^{-3}	2.49×10^{-3}	0.027mm=8m (3.3×10^{-6})	PIV
47	地溝帯	1g	12.5×136×60cm	4.75cm (曲げ)	石膏 (0.5×25×40cm)	---	---	---	写真およびDIC
51	正・逆 (60)	115g	80×50×50cm	2.5cm	乾燥砂 (68×20?×25cm)	---	---	0.1cm=0.115m (9×10^{-3})	写真およびPIV
54	沈み込み帯	1g	150×20×50cm	78cm	乾燥砂+ガラスビーズ	---	---	---	写真および断面
60	地溝帯	1g	---	6cm	緩詰の砂 (30×26×5-20cm)	0.1	0.51	1cm=1km (1×10^{-5})	実験後に上からの写真, 断面による内部構造の観察は, 緩い砂をかぶせ, 湿らせて実施
60'	地溝帯	700g	---	2cm	粘土 (10×8×10cm)	1.26	1.25	2.5cm=2.4km (1×10^{-5})	実験後に上からの写真, 断面による内部構造の観察は, そのまますくは凍結させてカット
64	横 (90)	1g	32×120×55cm	10cm	標準砂+石膏 (31×86×30cm)	0.1	0.12	1.5m=3km (5×10^{-4})	X-CT
66	沈み込み帯	1g	---	0.5-3.5cm	砂とガラスビーズ (80cm×60cm×3cm)	---	---	1cm=1km (1×10^{-5})	写真および湿らせてカット
69	地溝帯	1g	15×28×30cm	2.5cm	半水石膏	0.043	0.044	1cm=50-500m (2×10^{-4} ~ 10^{-5})	X-CT, DIC
74	正 (70)	100g	124×35×85cm	0.5cm	非セメンテーション・セメンテーション粘土 (117×35×50cm), 既存断層も考慮	---	---	1×10^{-2}	写真・動画・変位センサー
81	逆 (60)	40, 80g	100×53×67cm	5cm	珪砂 (74×30×20cm)	---	---	0.0123 - 0.025	surface profile scanner
81'	逆 (60)	1g	100×53×67cm	5cm	珪砂 (74×30×20cm)	---	---	---	surface profile scanner
83	横 (90)	1g	---	3cm	滑石 (ca.100×40×2cm)	0.12	1.47	1cm=100m (1×10^{-4})	PIV
87	逆 (30, 45, 60)	1g	---	3.5cm	標準砂 (35×149×5cm)	0.22	0.2	5cm=5km (1×10^{-5})	X-CT
92	正 (60)	115g	80×50×50cm	2.7cm	乾燥砂 (66×21×22cm)	---	---	10cm=11.5m (9×10^{-3})	PIV, 変位センサー
96	逆 (30, 45)	1g	---	4cm	湿潤カオリナイト (5×50cm×?)	---	---	1cm=0.1-1km (1×10^{-4} ~ 10^{-5})	サイズは図からよみとり
106	正・逆 (60)	50g	80×60×76cm	3cm	乾燥砂 (50×30×35cm)	---	---	1.5cm=75cm (2×10^{-2})	写真・PIV

表 3.2.5 に実験装置サイズや用いた模擬地盤材料，相似則等まとめた結果を示す．基本的に与えている強制変位は cm オーダーである．リソスフェア（プレート）の運動に伴う地溝帯等の形成メカニズム（図 3.2.22）の検討が目的とした実験では，地殻の下位にある凹凸を有する延性層によるものであり，断層運動を模した強制変位を与えず遠心载荷による荷重だけで実験しているものもある（図 3.2.23）．

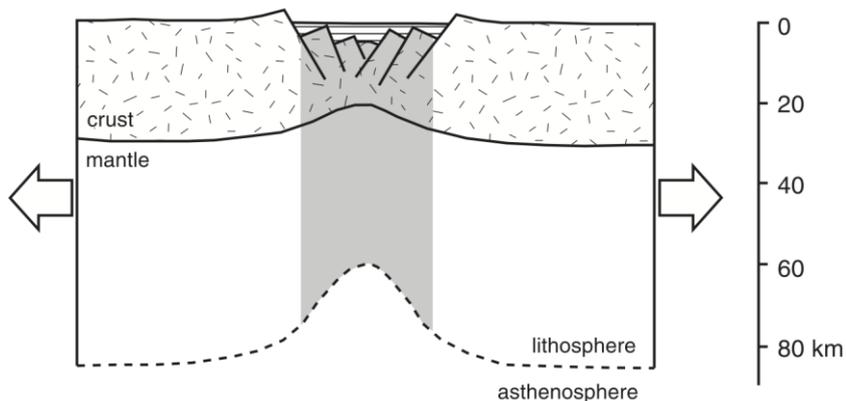


図 3.2.22 地溝帯形成メカニズム (Corti et al., 2003)

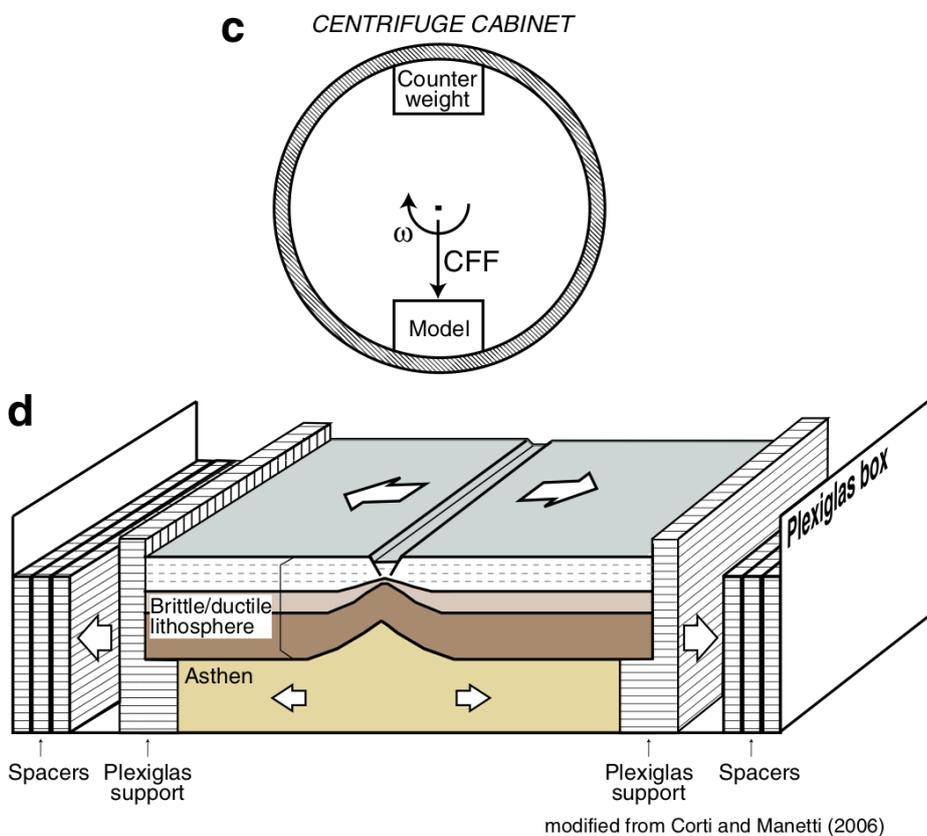


図 3.2.23 地溝帯形成メカニズムの遠心裁荷実験 (Corti et al., 2003)

装置サイズとしては 1m を超える装置は少ない。模擬地盤材料は粘着性の低い砂と粘着性の高い粉体・粘土に大別される。砂と粉体・粘土での長さに関する相似比はおよそ、 1×10^{-5} から 1×10^{-7} 、 1×10^{-4} から 1×10^{-6} とされ（例えば、Hidayah, 2010），粉体・粘土の方がより大きなモデル変位で小さな実地盤の変位を表現することができる。横ずれ断層、逆断層共に、模擬地盤の種別に関わらず変形帯（せん断帯）を形成する。逆断層では深度が浅いほど断層面が緩やかになる傾向が示されている。与える変位が大きくなると、主せん断帯より離れて断層が出現する傾向にある（図 3.2.24）。S17 以降では、逆断層の上盤側に地溝状の落ち込んだ構造が発生しているのがグラフにも認められ、同様の構造は図 3.2.17(b)にもみられる。

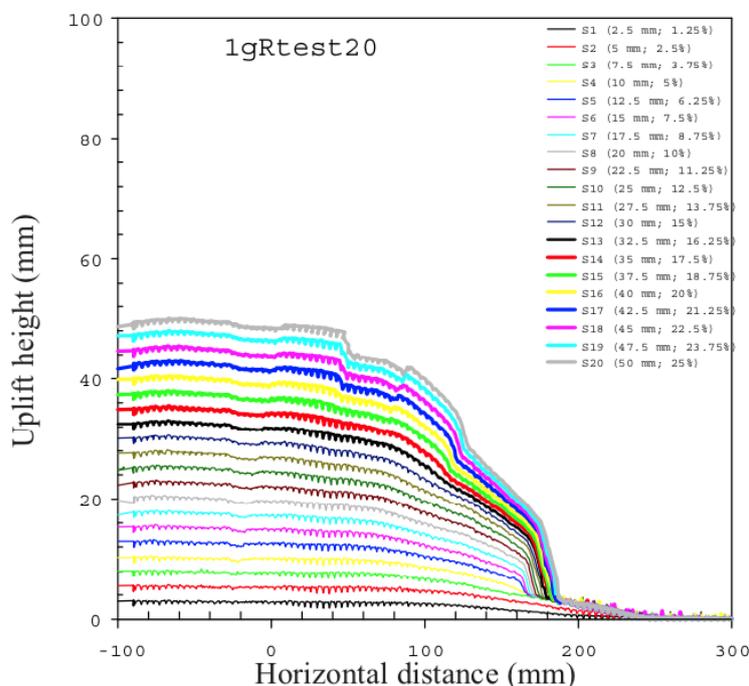


図 3.2.24 逆断層アナログ実験変位断面（Chang et al., 2013）

また、粘着力が大きな地盤材料でも同様の結果が得られている（図 3.2.25）。左側の列は非圧縮粘土による実験結果、中央は圧縮した粘土、右側は圧縮した粘土にあらかじめ切れ込み（既存構造）を与えたモデルによる結果である。いずれも横軸正側が落ち込む正断層の実験であるが、圧縮した粘土では非圧縮粘土にはみられない下盤側（横軸負の領域）表層付近に構造が発生している。

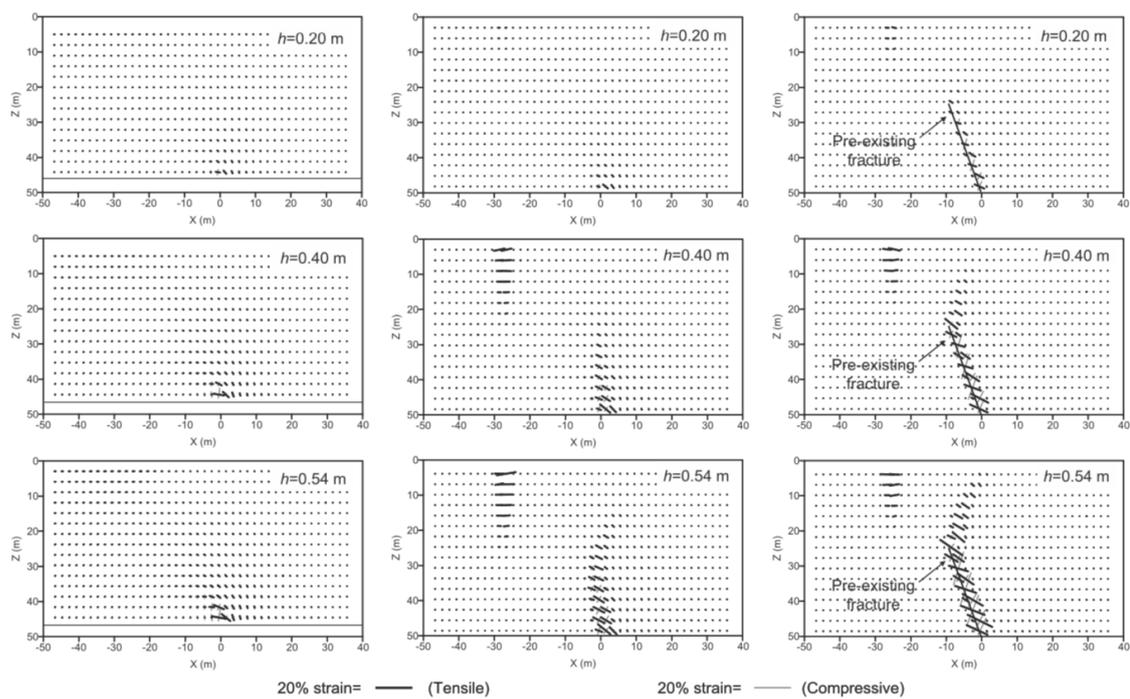


図 3.2.25 正断層アナログ実験変位断面 (Ng et al., 2012)

粘土を模擬地盤とした実験の方がより微細な構造や、主せん断帯とは離れたところに変形・変位が生じる傾向にある (図 3.2.26) .

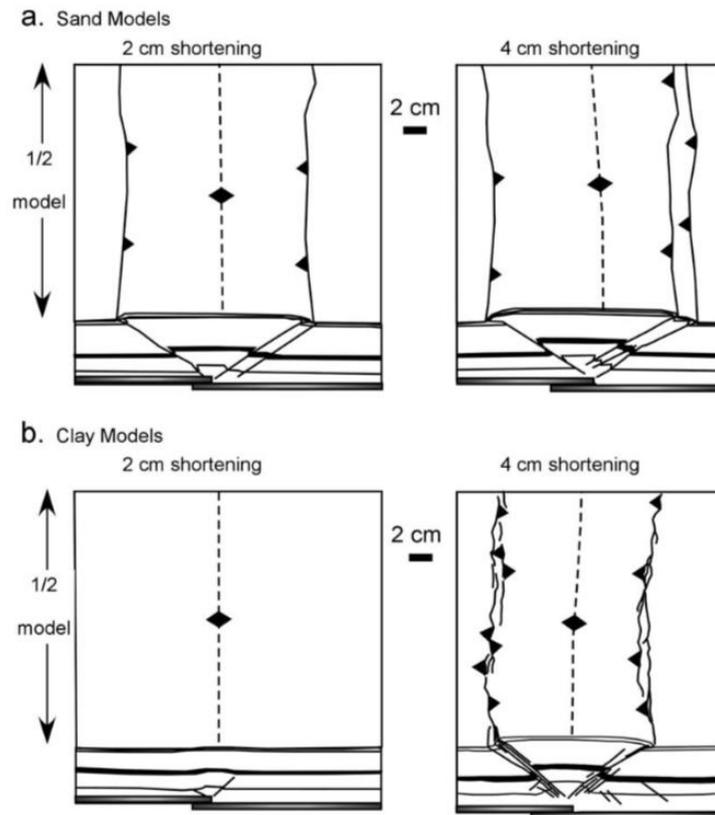


図 3.2.26 砂と粘土の違いによる断層変位分布 (Eisenstadt and Sims, 2005)

表 3.2.1 で整理した既往室内実験の文献でも副断層そのものを対象とした実験はほとんどなく、断層によるせん断帯の性状や構造物との相互作用、大規模かつ複雑な地殻構造の発展などが中心で、相似則から考えても通常の地震が何十回も繰り返して発生した結果をみているイメージである。砂などの粒状であれば微細な断層は目視できない可能性が高い。さらに既往文献でも実験結果の写真しか示されていないケースでは判断できないケースもあると思われる。図 3.2.27 は滑石パウダーを用いた横ずれ断層の実験結果を示しているが、写真と解釈スケッチを比較した場合、スケッチにみられる小さな断層は写真だけでは識別困難であることがわかる。

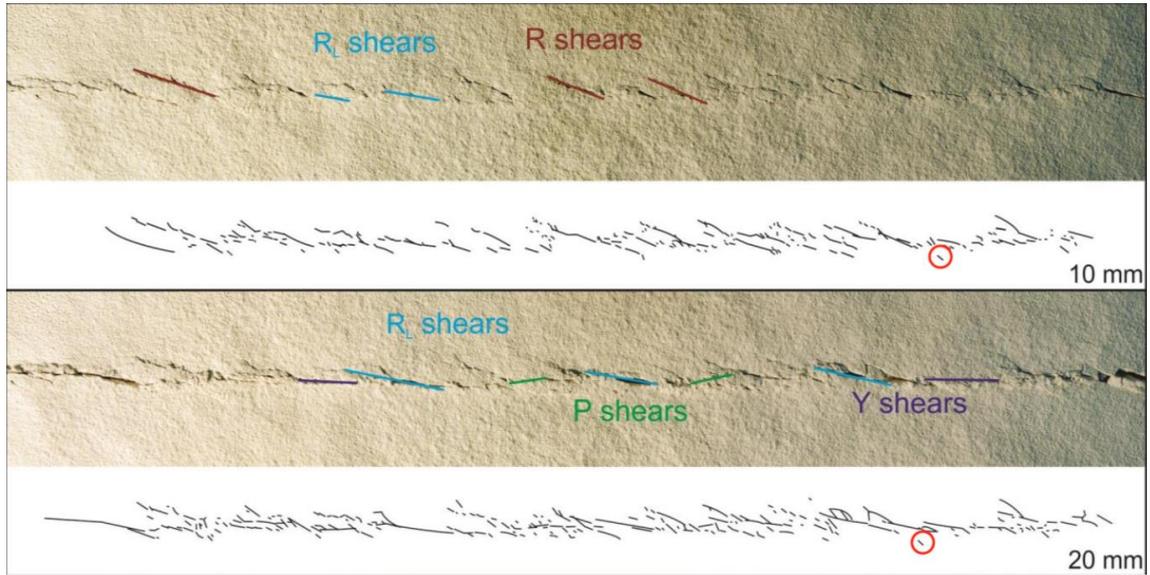


図 3.2.27 滑石パウダーを用いた横ずれ断層実験 (Sasnett, 2013)

ただし、粘土を模擬地盤とした場合、成形時の模擬地盤生成の方向により実験で生じる断層形状が規制されると報告されている例もあり、留意する必要がある (図 3.2.28)。

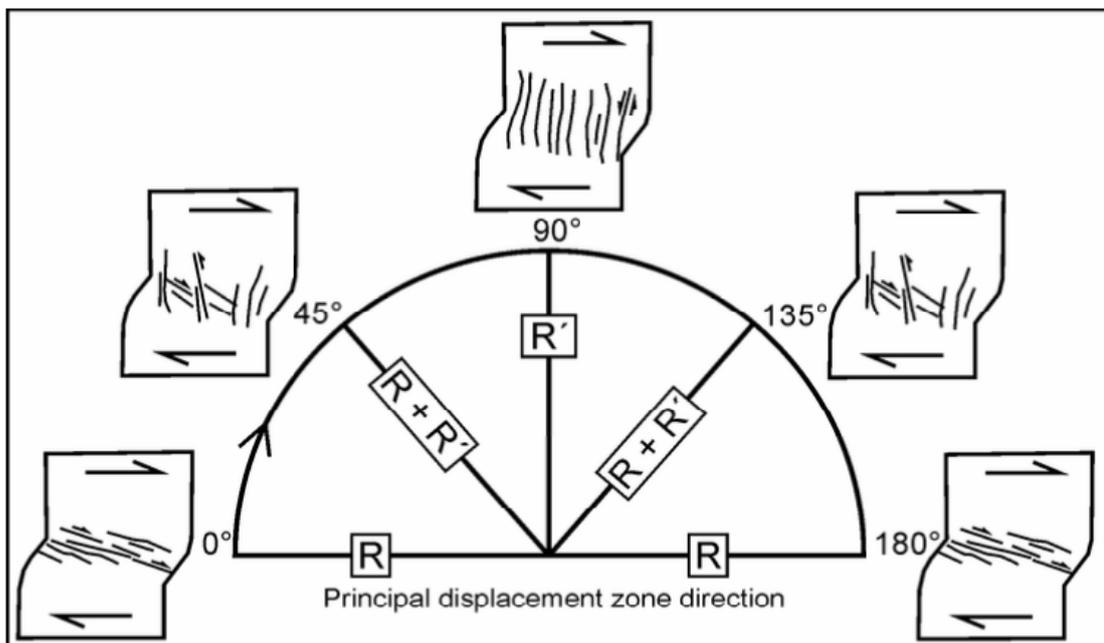


図 3.2.28 粘土の成形方向と形成される断層 (Atmaoui, 2006)

3.2.2. 副断層の検討に適したアナログ実験について

最初に対象とする実地盤の物性について整理する．既往文献における模擬地盤の物性値を実地盤に変換すると，10 から 20 MPa や 100 MPa が得られている．これを，国内の岩石物性と比較すると，例えば，野島断層の花崗岩系（山田・他, 2012）では 320 から 780 kgf/cm³，すなわち 31 から 76 MPa となる．砂岩・泥岩互層（山田・他, 2010）で 150 から 270 kgf/cm³，すなわち 15 から 26 MPa となる．

東コルディレラ山脈の褶曲衝上帯の地質構造（図 3.2.29）を数値解析から検討している Islam and Hayashi (2009)では図 3.2.30 のような地殻モデルを用いている．その数値解析モデルの物性を表 3.2.6 に示す．

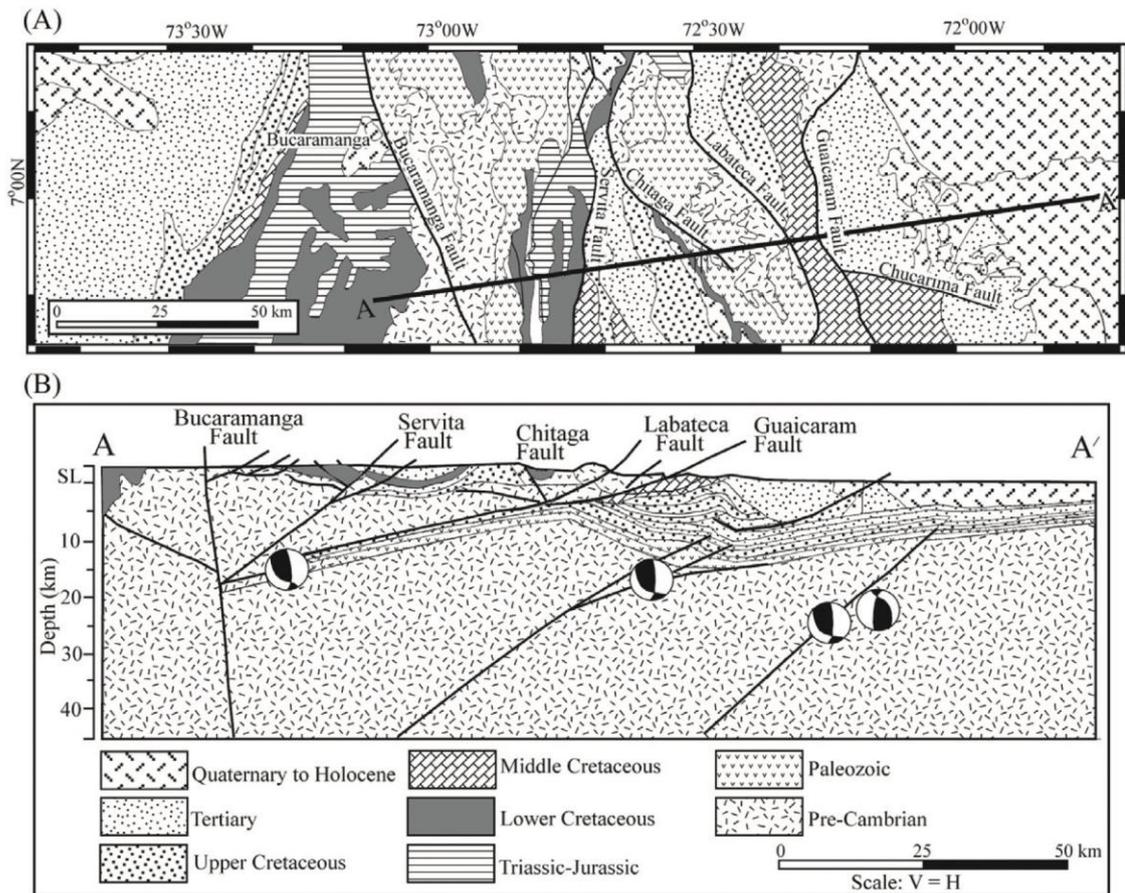


図 3.2.29 数値解析の対象とした地質構造（Islam and Hayashi, 2009）

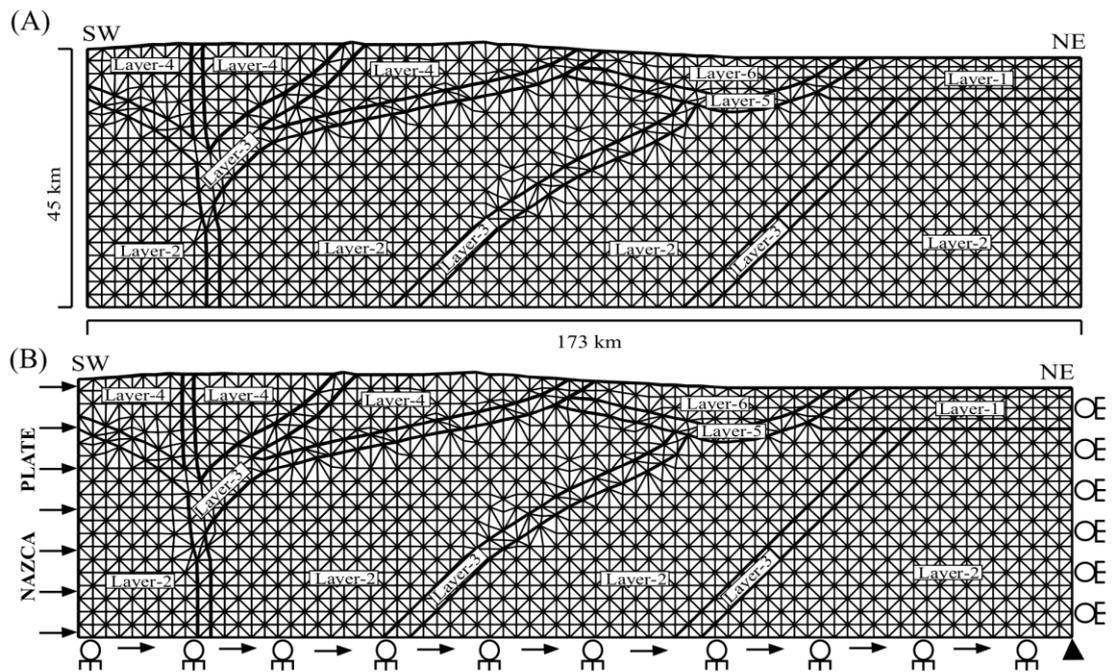


図 3.2.30 数値解析モデル (Islam and Hayashi, 2009)

表 3.2.6 モデル物性 (Islam and Hayashi, 2009)

Layers	ρ (kg/m ³)	V_p (km/s)	ν	E (GPa)	c (MPa)	ϕ (deg.)
L-1	2680	5	0.25	54	25	20
L-2	2800	6.3	0.25	93	50	35
L-3	---	---	0.25	15	25	15
L-4	2700	5.5	0.25	68	40	35
L-5	2680	5.3	0.25	63	30	20
L-6	2680	5.2	0.25	60	30	20

表 3.2.6 によれば地殻に相当する Layer-2 (表 3.2.6 の L-2), $\rho_m = 2.8 \text{ g/cm}^3$, $c_m = 50 \text{ MPa}$, $\phi = 35^\circ$ となっている. 上田・他(2005)でも模型実験の対象として堆積岩を仮定しており, $c_m = 50 \text{ MPa}$ (Byerlee, 1978) としている. 一方, トレンチ等でみられる未固結堆積物の物性として, 表 3.2.7 を参照する.

表 3.2.7 未固結砂層の物性一覧 (蔵田・宮本, 1987)

試 験 項 目	最 小 値	最 大 値	平 均
土粒子比重 G_s	2.61	2.86	2.67
含水比 W_n (%)	9.6	28.1	16.5
10% 粒径 D_{10} (mm)	0.01	0.13	0.09
60% 粒径 D_{60} (mm)	0.14	0.23	0.19
均等係数 U_c	1.2	20.0	2.82
シルト・粘土分含有率 (%)	2.0	23.0	8.1
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.16	1.54	1.34
間隙比 e	0.81	1.27	1.00
相対密度 D_r (%)	52.0	113.7	86.0
コーン貫入抵抗 q_c (kgf/cm ²)	30.6	100 以上	60
一軸圧縮強さ q_u (kgf/cm ²)	0.175	0.54	0.30
粘着力 c (kgf/cm ²)	0.1	0.19	0.13
内部摩擦角 ϕ (°)	29.7	35.9	34.0

これらの物性値を、実地盤系の物性値を考える際の資料として検討をすすめる。実験の相似則を考えるために、模擬地盤材料候補の物性について整理を行った。青木 (1961)では Zenz and Othmer (1960)による多数の物質の安息角を整理している (表 3.2.8)。

表 3.2.8 様々な物質の見掛け密度と安息角 (青木, 1961)

材 料	見掛け密度 ρ_a [g/cm ³]	ϕ_r [°]	材 料	見掛け密度 ρ_a [g/cm ³]	ϕ_r [°]
アルミナ (粒状または塊状)	1.04	22	鉛散弾 ($d_p=1.3$ mm)	6.73	23
アルミナ (球, $d_p=15$ mm)	2.2	43	鉛散弾 ($d_p=6.35$ mm)	6.57	33
アルミナ (球, $d_p=13$ mm)	2.03	38	鉛散弾 ($d_p=3.81$ mm)	6.58	30
アルミナ (球, $d_p=7$ mm)	2.07	34	珪酸鉛 (粒状)	3.68	30
水酸化アルミニウム (粉砕物)	0.216	34	硫酸鉛 (粉砕物)	2.95	45
碓安 (粒状)	0.64	45	石灰 (塊状)	0.96	26
灰 (黒色, 粉砕物)	1.68	27	石灰 (煨焼, 粉砕物)	0.43	43
フライアッシュ (粉状)	0.72	42	石灰 (煨焼, 粒状ペブル)	0.85	30
灰 (乾燥, 粗充填状態)	0.61	40	石灰 (微粉)	0.72	40
ポーキサイト (乾燥, 粉砕物)	1.09	35	水酸化カルシウム	—	42
生石灰 (粉状)	0.43	43	石灰石 (粗)	1.57	25
カーボン (粉砕物)	0.80	21	石灰石 (粉砕物)	1.36	47
流動クラッキング触媒 ($d_p=0.061$ mm)	0.51	32	酸化マンガン	7.37	39
TCC 触媒 ($d_p=4.3$ mm)	0.73	35	雲母 (粉砕物)	0.216	36
セメントクリンカー	1.41	33	磷酸カルシウム (粒状)	0.96	30
ポートランドセメント	1.57	39	磷酸ナトリウム (粒状)	0.96	26
チョーク (粉末状)	0.29	45	磷酸ナトリウム (粉砕物)	0.80	40
木炭 (粒状)	0.425	35	二十日大根種子 ($d_p=2.5$ mm)	0.73	33
シンダー (石灰, 灰およびクリンカ)	0.67	35	イオン交換樹脂 ($d_p=0.033$ mm)	—	29
シンダー (溶鉱炉)	0.91	35	米	0.80	20
クレイ (タイル用, 湿分 11%)	0.72	45	粉砕スクラップゴム	0.37	35
クレイ (乾燥, 粗充填)	—	35	破碎岩塩	1.20	25
クレイ (灰色, 粒状)	—	35	粒状塩	1.30	31
クレイ (粉砕物)	—	35	川砂	1.57	35
クローバー粒子	0.77	28	砂 (粗粒)	1.57	30
無煙炭 (破砕物)	0.865	22	砂 (きわめて微粒)	1.57	32
無煙炭 (クルミ大)	0.74	22	砂 (空隙を水で充たしたもの)	—	45
歴青炭 (-1/4 インチ, 乾燥)	0.67	29	砂 ($d_p=0.50$ mm)	1.46	37
歴青炭 (-1/4 インチ, 湿り状態)	0.80	40	砂 ($d_p=0.25$ mm)	1.37	36
歴青炭 (-1/4 インチ, 含水率大)	0.88	33	砂 ($d_p=0.18$ mm)	1.36	36
コーヒー (生豆)	0.67	25	砂 ($d_p=0.13$ mm)	1.36	35
コークス (破砕物)	0.48	28	鋸屑	0.32	45
コークス (粉砕物)	0.40	34	頁岩	1.36	39
硫酸銅 (粉砕物)	1.20	31	炉のスラグ (粒状に粉砕)	1.95	25
綿の種子	0.40	29	スレート (微粉砕)	1.31	35
ドロマイト	0.74	41	スレート (フレック状)	1.39	28
土 (ローム, 乾燥)	1.23	35	石鱗 (チップ)	0.16	30
蛍石 (破砕物)	1.60	32	ソーダ灰 (塊状)	0.80	22
ガラス球 ($d_p=0.287$ mm)	1.47	26	ソーダ灰 (密)	1.06	32
ガラス球 ($d_p=5.18$ mm)	1.36	32	ソーダ灰 (軽)	0.48	37
砂利 (球状)	—	30	硝酸ソーダ (粒状)	1.09	24
砂利 (鋭角)	—	40	硫酸ソーダ (微粉および塊)	1.41	31
石膏	2.27	45	大豆	0.64	27
酸化鉄 (顔料)	0.40	40	鋼球 ($d_p=8.74$ mm)	5.0	33
鉄鉱石 (limonite)	3.8	40	鋼球 ($d_p=12.7$ mm)	4.82	37
鉄粉 ($d_p=0.36$ mm)	2.37	42	硫酸 (粗)	1.22	32
鉄粉 ($d_p=0.25$ mm)	2.43	41	硫黄 (粉砕物)	0.80	45
鉄粉 ($d_p=0.18$ mm)	2.24	40	小麦	0.77	23
鉄粉 ($d_p=0.13$ mm)	2.21	40	亜鉛鉱 (粒状, 焙焼)	1.76	38
カオリン (破砕物)	1.03	35	酸化亜鉛	0.318	45
カオリン (粉砕物)	0.35	45			

さらにいくつかの粉体の粘着力など物性を検討している既存文献について整理する。

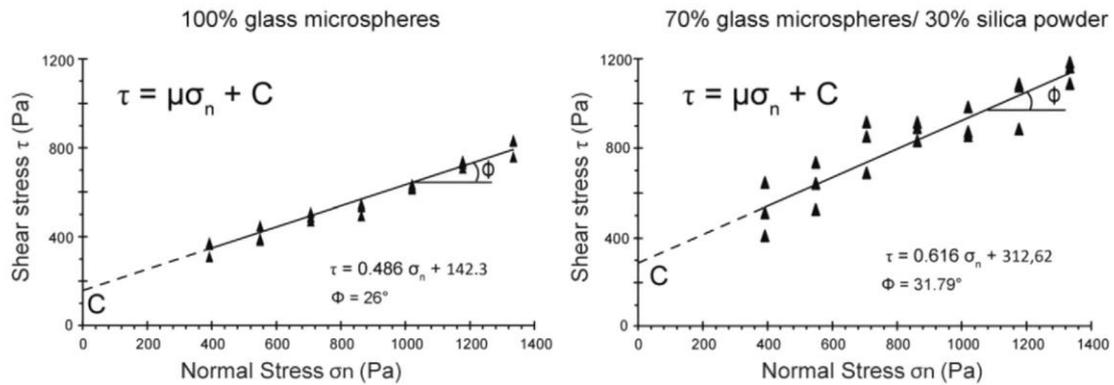


図 3.2.31 (a) 100% ガラス微小球, (b): 70% ガラス微小球+30% シリカパウダー (Abdelmalak et al., 2016)

図 3.2.31 より, 100% ガラス微小球で $\rho_m = 1.5 \text{ g/cm}^3$, $c_m = 0.143 \text{ kPa}$, $\phi = 26^\circ$ 程度である. 100% シリカパウダーでは, $\rho_m = 1.1 \text{ g/cm}^3$, $c_m = 0.560 \text{ kPa}$, $\phi = 46^\circ$ 程度である.

表 3.2.9 物性一覧 (Bose et al., 2015)

Parameter and model properties	Sand (analog model)	Natural prototypes	Ratio: model/nature
Length, L (m)	0.01	360	$\lambda = 2.7 \times 10^{-5}$
Density (kg m^{-3})	1600	2700	$\delta = 0.59$
Internal friction angle, ϕ ($^\circ$)	~ 30	30–40	1–0.75
Cohesion (Pa)	20	2×10^6	1×10^{-5}
Gravity, g (m s^{-2})	9.8	9.8	$\gamma_g = 1$
Deviatoric stress ^a ($\sigma = \delta g L$)	157 Pa	$9.5 \times 10^6 \text{ Pa}$	16.5×10^{-6}
Velocity	5 mm/min	85 mm/yr	3.09×10^4

^a Based on Schellart (2000).

付加体形成過程のアナログ実験 (表 3.2.9) では低粘着力の砂を用いており, $\rho_m = 1.6 \text{ g/cm}^3$, $c_m = 0.020 \text{ kPa}$, $\phi = 30^\circ$ である.

表 3.2.10 物性一覧 (Macho et al., 2020) . AIF が ϕ に相当.

Sample	CE (μm)	Φ (-)	AOR ($^\circ$) \pm st. dev	AIF ($^\circ$) \pm st. dev	c (kPa) \pm st. dev	BD (kg.m^{-3}) \pm st. dev
Strong flour	206.2	0.791	40.18 ± 1.70	18.40 ± 3.11	1.325 ± 0.148	0.722 ± 0.002
Semolina	519.3	0.828	28.07 ± 0.18	22.43 ± 6.49	0.796 ± 0.174	0.725 ± 0.001
Soft flour	97.7	0.849	48.58 ± 2.10	18.37 ± 2.26	1.597 ± 0.232	0.632 ± 0.002
Sand 0.8-1.2	1044	0.960	26.05 ± 1.50	36.75 ± 2.90	0.395 ± 0.400	1.630 ± 0.028
Sand 1.0-1.6	1459	0.881	29.05 ± 2.00	32.00 ± 0.00	1.010 ± 0.000	1.540 ± 0.000
GB1	152.5	0.998	25.02 ± 0.10	20.47 ± 1.18	0.164 ± 0.089	1.483 ± 0.005
GB2	91.71	0.997	27.57 ± 0.09	20.97 ± 0.28	0.239 ± 0.034	1.447 ± 0.011
GB3	489.6	0.991	21.80 ± 0.20	26.13 ± 1.02	0.139 ± 0.090	1.513 ± 0.006
GB4	338.0	0.996	25.02 ± 0.15	23.45 ± 0.35	0.182 ± 0.019	1.505 ± 0.007
GB5	271.0	0.997	23.43 ± 0.12	21.67 ± 0.92	0.165 ± 0.067	1.500 ± 0.000

表 3.2.10 より，強力粉（strong flour），セモリナ粉，薄力粉（soft flour）でそれぞれ， $\rho_m = 0.72 \text{ g/cm}^3$ ， $c_m = 1.33 \text{ kPa}$ ， $\phi = 18^\circ$ ， $\rho_m = 0.73 \text{ g/cm}^3$ ， $c_m = 0.80 \text{ kPa}$ ， $\phi = 22^\circ$ ， $\rho_m = 0.63 \text{ g/cm}^3$ ， $c_m = 0.16 \text{ kPa}$ ， $\phi = 18^\circ$ である。

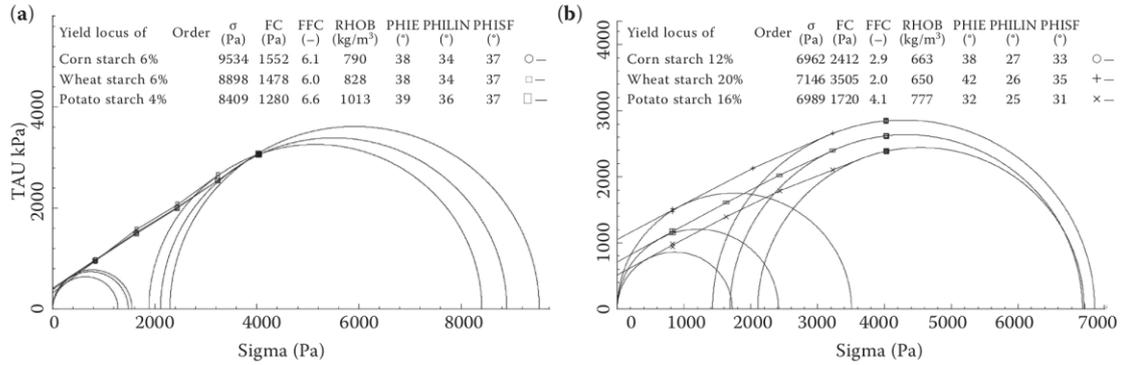


図 3.2.32 (a):乾燥, (b):湿潤 (Stasiak et al., 2013)

図 3.2.32 によればせん断試験で得られたコーンスターチ，小麦粉，片栗粉の粘着力が示されているが，乾燥状態では粉体の違いはあまりないが，湿潤状態になると粘着力が大きく異なる．およそ， $\rho_m = 0.9 \text{ g/cm}^3$ ， $c_m = 1.3 \text{ kPa}$ ， $\phi = 30^\circ$ 程度である。

表 3.2.11 密詰め粘性土（K：カオリン，M：モンモリロナイト）の粘着力（Charkley et al., 2019）

Samples	Cohesion (c), kPa	Frictional angle (ϕ), degree	Water content (%)
K30Q70	67.68	30.43	17.4
K50Q50	94.75	21.81	21.3
K70Q30	97.66	18.88	26.1
K100	94.70	18.63	32.6
M30Q70	80.71	17.87	22.1
M50Q50	118.40	16.25	24.1
M70Q30	121.57	24.58	28.8
M100	120.18	22.19	38.3
M30K70	88.93	13.38	34.5
M50K50	86.40	14.58	35.8
M70K30	74.89	18.39	40.3

密詰めの粘性土（表 3.2.11）では，もう少し大きな粘着力が得られている．粘土の場合は，含水比によっても粘着力が異なる（表 3.2.12）．

表 3.2.12 含水比の異なる粘土の物性 (Atmaoui, 2006)

Water content w (%)	ρ_b (g/cm ³)	S_u (kPa)	e	Sr (%)
38	1.79	2	1.1	95
42	1.75	1.5	1.2	96
48	1.70	0.5	1.3	99

これらの物性値をもとに長さの相似比を検討した (表 3.2.13 から表 3.2.15) .

表 3.2.13 各模擬地盤の物性と長さに関する相似比 (遠心模型実験, 50g 場)

模擬地盤材料	g_m (g)	ρ_m (g/cm ³)	c_m (kPa)	実地盤	ρ_n (g/cm ³)	c_n (kPa)	相似比
ガラス微小球	50	1.5	0.14	基盤	2.8	50000	1.05E-07
シリカパウダー	50	1.1	0.56	基盤	2.8	50000	5.70E-07
砂 (低粘着力)	50	1.6	0.02	基盤	2.8	50000	1.40E-08
強力粉	50	0.72	1.33	基盤	2.8	50000	2.07E-06
セモリナ粉	50	0.73	0.8	基盤	2.8	50000	1.23E-06
薄力粉	50	0.63	1.6	基盤	2.8	50000	2.84E-06
標準砂	50	1.4	0.4	基盤	2.8	50000	3.20E-07
米粉	50	0.6	0.1	基盤	2.8	50000	1.87E-07
カオリン	50	0.8	95	基盤	2.8	50000	1.33E-04
ガラス微小球	50	1.5	0.14	粘土層	1.3	13	1.87E-04
シリカパウダー	50	1.1	0.56	粘土層	1.3	13	1.02E-03
砂 (低粘着力)	50	1.6	0.02	粘土層	1.3	13	2.50E-05
強力粉	50	0.72	1.33	粘土層	1.3	13	3.69E-03
セモリナ粉	50	0.73	0.8	粘土層	1.3	13	2.19E-03
薄力粉	50	0.63	1.6	粘土層	1.3	13	5.08E-03
標準砂	50	1.4	0.4	粘土層	1.3	13	5.71E-04
米粉	50	0.6	0.1	粘土層	1.3	13	3.33E-04
カオリン	50	0.8	95	粘土層	1.8	13	3.29E-01

表 3.2.14 各模擬地盤の物性と長さに関する相似比（遠心模型実験，5g 場）

模擬地盤材料	g_m (g)	ρ_m (g/cm ³)	c_m (kPa)	実地盤	ρ_n (g/cm ³)	c_n (kPa)	相似比
ガラス微小球	5	1.5	0.14	基盤	2.8	50000	1.05E-06
シリカパウダー	5	1.1	0.56	基盤	2.8	50000	5.70E-06
砂（低粘着力）	5	1.6	0.02	基盤	2.8	50000	1.40E-07
強力粉	5	0.72	1.33	基盤	2.8	50000	2.07E-05
セモリナ粉	5	0.73	0.8	基盤	2.8	50000	1.23E-05
薄力粉	5	0.63	1.6	基盤	2.8	50000	2.84E-05
標準砂	5	1.4	0.4	基盤	2.8	50000	3.20E-06
米粉	5	0.6	0.1	基盤	2.8	50000	1.87E-06
カオリン	5	0.8	95	基盤	2.8	50000	1.33E-03
ガラス微小球	5	1.5	0.14	粘土層	1.3	13	1.87E-03
シリカパウダー	5	1.1	0.56	粘土層	1.3	13	1.02E-02
砂（低粘着力）	5	1.6	0.02	粘土層	1.3	13	2.50E-04
強力粉	5	0.72	1.33	粘土層	1.3	13	3.69E-02
セモリナ粉	5	0.73	0.8	粘土層	1.3	13	2.19E-02
薄力粉	5	0.63	1.6	粘土層	1.3	13	5.08E-02
標準砂	5	1.4	0.4	粘土層	1.3	13	5.71E-03
米粉	5	0.6	0.1	粘土層	1.3	13	3.33E-03
カオリン	5	0.8	95	粘土層	1.8	13	3.29E+00

表 3.2.15 各模擬地盤の物性と長さに関する相似比（1g 場）

模擬地盤材料	ρ_m (g/cm ³)	c_m (kPa)	実地盤	ρ_n (g/cm ³)	c_n (kPa)	相似比
ガラス微小球	1.5	0.14	基盤	2.8	50000	5.23E-06
シリカパウダー	1.1	0.56	基盤	2.8	50000	2.85E-05
砂（低粘着力）	1.6	0.02	基盤	2.8	50000	7.00E-07
強力粉	0.72	1.33	基盤	2.8	50000	1.03E-04
セモリナ粉	0.73	0.8	基盤	2.8	50000	6.14E-05
薄力粉	0.63	1.6	基盤	2.8	50000	1.42E-04
標準砂	1.4	0.4	基盤	2.8	50000	1.60E-05
米粉	0.6	0.1	基盤	2.8	50000	9.33E-06
カオリン	0.8	95	基盤	2.8	50000	6.65E-03
ガラス微小球	1.5	0.14	粘土層	1.3	13	9.33E-03
シリカパウダー	1.1	0.56	粘土層	1.3	13	5.09E-02
砂（低粘着力）	1.6	0.02	粘土層	1.3	13	1.25E-03
強力粉	0.72	1.33	粘土層	1.3	13	1.85E-01
セモリナ粉	0.73	0.8	粘土層	1.3	13	1.10E-01
薄力粉	0.63	1.6	粘土層	1.3	13	2.54E-01
標準砂	1.4	0.4	粘土層	1.3	13	2.86E-02
米粉	0.6	0.1	粘土層	1.3	13	1.67E-02
カオリン	0.8	95	粘土層	1.8	13	1.64E+01

実地盤を基盤と考えた場合、低粘着力の砂やガラス微小球、カオリンを除き、長さのスケールが 10^{-4} から 10^{-5} オーダーとなる。強力粉、セモリナ粉、標準砂、米粉、低粘着力砂の長さに関する相似比をそれぞれ 1×10^{-4} 、 6×10^{-5} 、 2×10^{-5} 、 1×10^{-5} 、 1.3×10^{-3} として、模擬地盤層厚 10cm、模擬地盤変位 1mm の実地盤での値を整理した（表 3.2.16、表 3.2.17）。

表 3.2.16 各模擬地盤における長さの対応（1g 場，対象：基盤岩）

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)
カオリン	6.00E-03	10	0.1	16.7	0.2
強力粉	1.00E-04	10	0.1	1000.0	10.0
セモリナ粉	6.00E-05	10	0.1	1666.7	16.7
標準砂	2.00E-05	10	0.1	5000.0	50.0
米粉	1.00E-05	10	0.1	10000.0	100.0
ガラス微小球	5.00E-06	10	0.1	20000.0	200.0
低粘着力砂	7.00E-07	10	0.1	142857.1	1428.6

表 3.2.16 より、実地盤を基盤とした場合、最低限強力粉やセモリナ粉程度の粘着力の模擬地盤材料が現在考えている 1g 場実験装置のサイズ（図 3.2.33、図 3.2.34）には適していると考えられる。一方、トレンチ内部でみられた構造を検討する場合、モデル実験が 1 mm 程度の最小分解能であるときは 1g よりも遠心模型実験（図 3.2.35）の方が適している（表 3.2.17）。岩盤を対象とする場合は、低粘着力の模擬地盤材料を用いることで、実験できる可能性がある。

表 3.2.17 各模擬地盤における長さの対応（50g 場，対象：粘土層）

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)
カオリン	2.00E+01	10	0.1	0.01	0.00
強力粉	4.00E-03	10	0.1	25.00	0.25
セモリナ粉	2.00E-03	10	0.1	50.00	0.50
標準砂	6.00E-04	10	0.1	166.67	1.67
米粉	3.00E-04	10	0.1	333.33	3.33
ガラス微小球	2.00E-04	10	0.1	500.00	5.00
低粘着力砂	2.50E-05	10	0.1	4000.00	40.00

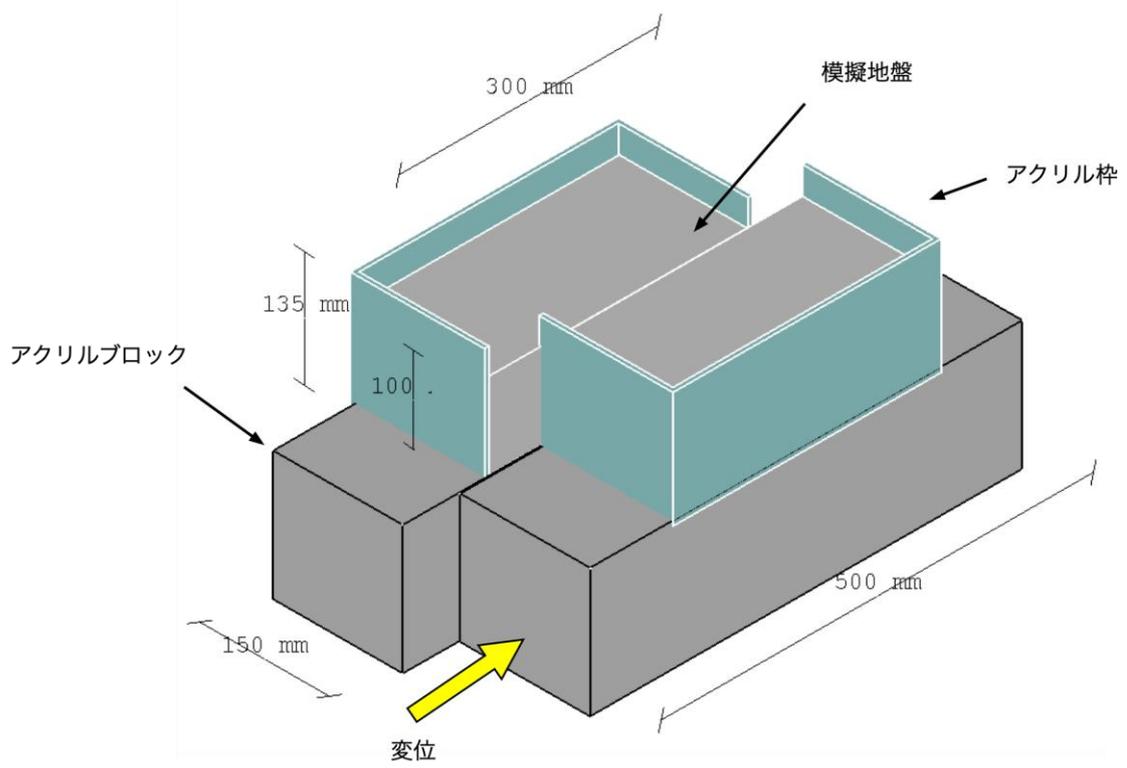


図 3.2.33 横ずれ断層アナログ実験装置案

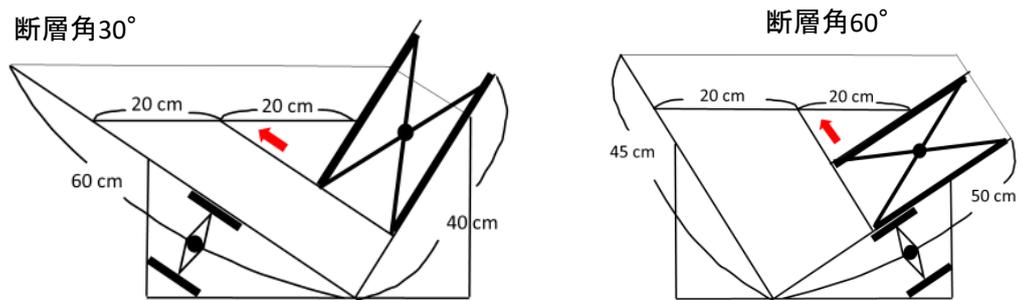


図 3.2.34 逆断層アナログ実験装置案

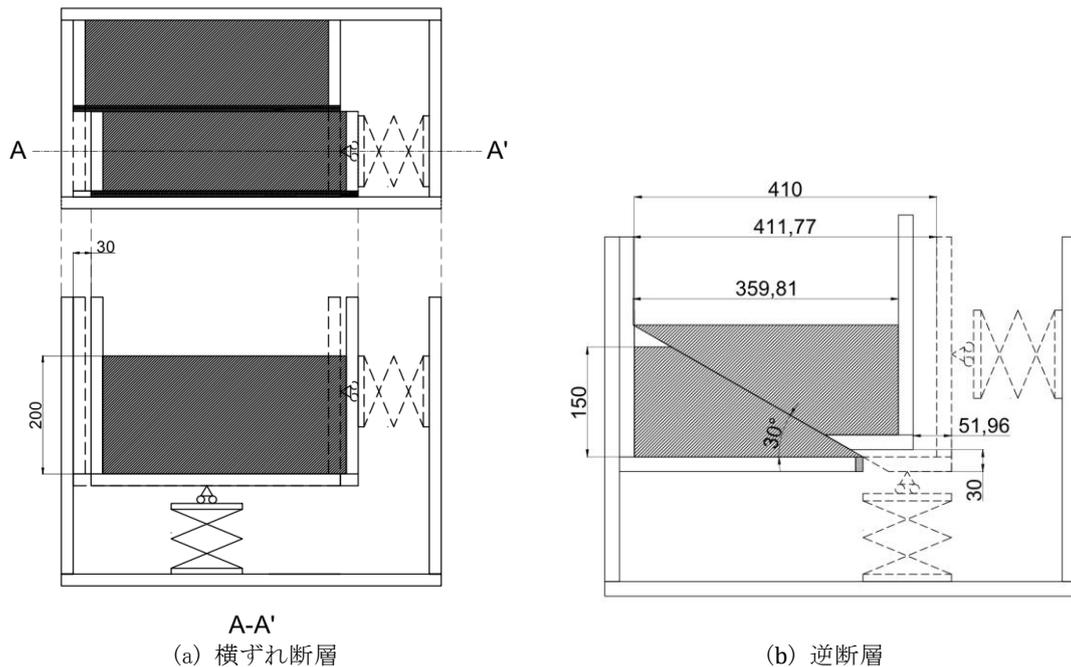


図 3.2.35 遠心模型実験装置案

3.2.3. 室内模擬実験まとめ

既往アナログ実験の文献整理を行った。逆断層・横ずれ断層共に模擬地盤の材料に関わらずせん断帯（変形ゾーン）が形成される。逆断層では、浅くなるに従い、断層傾斜角度が低角化する傾向にある。主せん断帯よりも離れて断層が発生するのは大きな変位量、複雑な変位の与え方、不均質構造、粘着力が高い模擬地盤の実験に発生する傾向にある。また、細粒で粘着力が高い模擬地盤では微小な断層が発生しやすい。

したがって、副断層を対象としたアナログ実験では、実地盤を基盤と仮定した場合、粘土や強力粉・セモリナ粉等の細粒で粘着力の高い材料を用いた 1g 場の室内模擬実験であれば、 10^{-4} オーダーで副断層のような小規模な構造も検討できる可能性があると考えられる。トレンチで観察されるようなスケールの構造を対象とした場合、遠心模型実験の方が適している。ただし、粉体や粘土は敷き詰め方や含水比で物性値が大きく異なることが予想されるため、模擬地盤材料の物性試験も必要と考えられる。

3.3. 文献

- 1) Abdelmalak, M., C. Bulois, R. Mourgues, O. Galland, J.-B. Legland, and C. Gruber (2016), Description of new dry granular materials of variable cohesion and friction coefficient: Implications for laboratory modeling of the brittle crust, *Tectonophysics*, Vol. 684, 39 - 51. Special Issue on GeoMod 2014 – Modelling in Geoscience.

- 2) Ackermann, R. V., R. W. Schlische, and M. O. Withjack (2001), The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws, *Journal of Structural Geology*, Vol. 23, No. 11, 1803 - 1819.
- 3) Anastasopoulos, I., G. Gazetas, M. F. Bransby, M. C. Davies, and A. E. Nahas (2009), Normal Fault Rupture Interaction with Strip Foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 3, 359-370.
- 4) Anastasopoulos, I., G. Gazetas, M. F. Bransby, M. C. R. Davies, and A. E. Nahas (2007), Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 8, 943-958.
- 5) Atmaoui, N. (2006), Development of Pull Apart Basins and Associated Structures by the Riedel Shear Mechanism: Insight from Scaled Clay Analogue Models, Ph.D. dissertation, Verlag nicht ermittelbar.
- 6) Barrientos, B., M. Cerca, J. García-Márquez, and C. Hernández-Bernal (2008), Three-dimensional displacement fields measured in a deforming granular-media surface by combined fringe projection and speckle photography, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol. 10, No. 10, 104027.
- 7) Baziar, M. H., A. Nabizadeh, C. J. Lee, and W. Y. Hung (2014), Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 65, 151 - 164.
- 8) Beniest, A. (2017), From continental rifting to conjugate margins : insights from analogue and numerical modelling, Theses, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- 9) Bernard, S., J.-P. Avouac, S. Dominguez, and M. Simoes (2007), Kinematics of fault-related folding derived from a sandbox experiment, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 112, No. B3.
- 10) Bonanno, E., L. Bonini, R. Basili, G. Toscani, and S. Seno (2017), How do horizontal, frictional discontinuities affect reverse fault-propagation folding? *Journal of Structural Geology*, Vol. 102, 147 - 167.
- 11) Bonini, L., D. D. Bucci, G. Toscani, S. Seno, and G. Valensise (2011), Reconciling deep seismogenic and shallow active faults through analogue modelling: the case of the Messina Straits (southern Italy), *Journal of the Geological Society*, Vol. 168, No. 1, 191-199, 01.
- 12) Bonini, M. (2003), Detachment folding, fold amplification, and diapirism in thrust wedge experiments, *Tectonics*, Vol. 22, No. 6.
- 13) Bonini, M., F. Sani, and B. Antonielli (2012), Basin inversion and contractional reactivation of inherited normal faults: A review based on previous and new experimental models, *Tectonophysics*, Vol. 522-523, 55-88.
- 14) Bose, S., P. Saha, J. J. Mori, C. Rowe, K. Ujiie, F. M. Chester, M. Conin, C. Regalla, J. Kameda, V. Toy, J. Kirkpatrick, F. Remitti, J. C. Moore, M. Wolfson-Schwehr, Y. Nakamura, and A. Gupta (2015), Deformation structures in the frontal prism near the Japan Trench: Insights from sandbox models, *Journal of Geodynamics*, Vol. 89, 29 - 38.

- 15) Bransby, M. F., M. C. R. Davies, A. El Nahas, and S. Nagaoka (2008), Centrifuge modelling of reverse fault–foundation interaction, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 4, 607–628.
- 16) Bray, J. D., R. B. Seed, and H. B. Seed (1994), Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 3, 562–580.
- 17) Bray, J. D. (1989), *The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments: Earthquake Engineering Research Center, University of California.*
- 18) Brune, S. (2018), *Modelling continental rift dynamics.*
- 19) Brune, S., G. Corti, and G. Ranalli (2017), Controls of inherited lithospheric heterogeneity on rift linkage: Numerical and analog models of interaction between the Kenyan and Ethiopian rifts across the Turkana depression, *Tectonics*, Vol. 36, No. 9, 1767-1786.
- 20) Burliga, S., H. A. Koyi, and P. Krzywiec (2012), Modelling cover deformation and decoupling during inversion, using the Mid-Polish Trough as a case study, *Journal of Structural Geology*, Vol. 42, 62 - 73.
- 21) Byerlee, J. (1978), Friction of rocks, *pure and applied geophysics*, Vol. 116, No. 4, 615–626.
- 22) Caniven, Y., S. Dominguez, R. Soliva, R. Cattin, M. Peyret, M. Marchandon, C. Romano, and V. Strak (2015), A new multilayered visco-elasto-plastic experimental model to study strike-slip fault seismic cycle, *Tectonics*, Vol. 34, No. 2, 232-264.
- 23) Caniven, Y., S. Dominguez, R. Soliva, M. Peyret, R. Cattin, and F. Maerten (2017), Relationships between along-fault heterogeneous normal stress and fault slip patterns during the seismic cycle: Insights from a strike-slip fault laboratory model, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 480, 147 - 157.
- 24) Chang, Y., C. Lee, W. Huang, W. Huang, M. Lin, W. Hung, and Y. Lin (2013) Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip, *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 2, 79–89.
- 25) Charkley, F. N., K. Zhang, and G. Mei (2019), Shear Strength of Compacted Clays as Affected by Mineral Content and Wet-Dry Cycles, *Advances in Civil Engineering*.
- 26) Cooke, M. L., M. T. Schottenfeld, and S. W. Buchanan (2013), Evolution of fault efficiency at restraining bends within wet kaolin analog experiments, *Journal of Structural Geology*, Vol. 51, 180 - 192.
- 27) Corti, G. (2012), Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System, *Tectonophysics*, Vol. 522-523, 1 - 33.
- 28) Corti, G., M. Bonini, S. Conticelli, F. Innocenti, P. Manetti, and D. Sokoutis (2003), Analogue modelling of continental extension: a review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma, *Earth-Science Reviews*, Vol. 63, No. 3, 169 - 247.
- 29) Corti, G., M. Bonini, D. Sokoutis, F. Innocenti, P. Manetti, S. Cloetingh, and G. Mulugeta (2004), Continental rift architecture and patterns of magma migration: A dynamic analysis based on centrifuge models, *Tectonics*, Vol. 23, No. 2.

- 30) Corti, G., J. van Wijk, S. Cloetingh, and C. K. Morley (2007), Tectonic inheritance and continental rift architecture: Numerical and analogue models of the East African Rift system, *Tectonics*, Vol. 26, No. 6.
- 31) Dauteuil, O., and Y. Mart (1998), Analogue modeling of faulting pattern, ductile deformation, and vertical motion in strike-slip fault zones, *Tectonics*, Vol. 17, No. 2, 303–310.
- 32) David A. Cole, J., and P. V. Lade (1984), Influence Zones in Alluvium Over Dip - Slip Faults, *Journal of Geotechnical Engineering*, 110, 5, 599-615.
- 33) Davis, D., J. Suppe, and F. A. Dahlen (1983), Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 88, No. B2, 1153–1172.
- 34) Dooley, T. P., and G. Schreurs (2012), Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results, *Tectonophysics*, Vol. 574–575, 1 - 71.
- 35) Eisenstadt, G., and D. Sims (2005), Evaluating sand and clay models: do rheological differences matter? *Journal of Structural Geology*, Vol. 27, No. 8, 1399 - 1412.
- 36) Ellis, S., G. Schreurs, and M. Panien (2004), Comparisons between analogue and numerical models of thrust wedge development, *Journal of Structural Geology*, Vol. 26, No. 9, 1659 - 1675.
- 37) Gerya, T. (2012), Origin and models of oceanic transform faults, *Tectonophysics*, Vol. 522-523, 34 - 54.
- 38) Ghosh, N., and A. Chattopadhyay (2008), The initiation and linkage of surface fractures above a buried strikeslip fault: An experimental approach, *Journal of Earth System Science*, Vol. 117, No. 1, 23–32.
- 39) Granado, P., O. Ferrer, J. Muñoz, W. Thöny, and P. Strauss (2017), Basin inversion in tectonic wedges: Insights from analogue modelling and the Alpine-Carpathian fold-and-thrust belt, *Tectonophysics*, Vol. 703-704, 50-68.
- 40) Graveleau, F., and S. Dominguez (2008), Analogue modelling of the interaction between tectonics, erosion and sedimentation in foreland thrust belts, *Comptes Rendus Geoscience*, Vol. 340, No. 5, 324 - 333.
- 41) Ha, D., T. Abdoun, M. O'Rourke, P. Van Laak, T. O'Rourke, and H. Stewart (2006), Split-containers for centrifuge modeling of permanent ground deformation effects on buried pipeline systems, in *Proceedings of the Sixth International Conference on Physical Modeling in Geotechnics*, 4–6.
- 42) Ha, D., T. H. Abdoun, M. J. O'Rourke, M. D. Symans, T. D. O'Rourke, M. C. Palmer, and H. E. Stewart (2008), Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting — a centrifuge investigation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 12, 1733-1742.
- 43) Hatem, A. E., M. L. Cooke, and E. H. Madden (2015), Evolving efficiency of restraining bends within wet kaolin analog experiments, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 120, No. 3, 1975-1992.

- 44) Hatem, A. E. (2014), Evolution of off-fault deformation along analog strike-slip faults, Master's thesis, University of Massachusetts.
- 45) Herbert, J. W. (2014), Investigating fault system deformation with numerical models and analog experiments, Ph.D. dissertation, University of Massachusetts Amherst.
- 46) Hidayah, T. N. (2010), Experimental modeling of focused shortening.
- 47) Holland, M., H. van Gent, L. Bazalgette, N. Yassir, E. H. H. Strating, and J. L. Urai (2011), Evolution of dilatant fracture networks in a normal fault — Evidence from 4D model experiments, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 304, No. 3, 399 - 406.
- 48) Holland, M., J. L. Urai, and S. Martel (2006), The internal structure of fault zones in basaltic sequences, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 248, No. 1, 301 - 315.
- 49) Hu, P., Q. P. Cai, G. Y. Luo, Y. H. Ding, M. Dong, L. W. Hu, Y. J. Hou, and C. W. W. Ng (2009), Centrifuge modeling of failure patterns in mixed soil layers induced by normal faults., , 594-597, Amsterdam, Netherlands: IOS Press.
- 50) Hu, P., Y.-H. Ding, Q. Cai, G. yong Luo, C. W. W. Ng, and Y.-J. Hou (2010), Centrifuge Modeling of the Influence of Pre-Existing Fractures in Multilayered Soils on Ground Deformations, *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol. Paper 13.
- 51) Hus, R., V. Acocella, R. Funiciello, and M. D. Batist (2005), Sandbox models of relay ramp structure and evolution, *Journal of Structural Geology*, Vol. 27, No. 3, 459–473.
- 52) Islam, R., and D. Hayashi (2009), Extensional stresses in the Colombian Eastern Cordillera fold-and-thrust belt (northern Andes): insights from 2D finite element modeling, *Geologica acta*, Vol. 7, No. 3, 333–350, Settembre.
- 53) Keller, J. V. A., and K. R. McClay (1995), 3D sandbox models of positive inversion, *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 88, No. 1, 137–146.
- 54) King Hubbert, M. (1951), Mechanical basis for certain familiar geologic structures, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 62, No. 4, 355-372.
- 55) Koge, H., Y. Yamada, A. Ohde, A. Bauville, A. Yamaguchi, and J. Ashi (2018), Dynamic formation processes of thick deformation zone on the shallow plate boundary fault of the Japan Trench: insight from analog experiments of half-graben subduction, *Progress in Earth and Planetary Science*, Vol. 5, No. 1, 69.
- 56) Koyi, H. A., A. Ghasemi, K. Hessami, and C. Dietl (2008), The mechanical relationship between strikeslip faults and salt diapirs in the Zagros fold–thrust belt, *Journal of the Geological Society*, Vol. 165, No. 6, 1031–1044.
- 57) Koyi, H., F. Nilfouroushan, and K. Hessami (2016), Modelling role of basement block rotation and strike-slip faulting on structural pattern in cover units of fold-and-thrust belts, *Geological Magazine*, Vol. 153, No. 5-6, 827–844.
- 58) Lade, P. V., D. A. Cole, and D. Cummings (1984), Multiple Failure Surfaces Over Dip Slip Faults, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 5, 616-627.
- 59) Lagmay, F. A. M., B. van Wyk de Vries, N. Kerle, and M. D. Pyle (2000), Volcano instability induced by strike-slip faulting, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 62, No. 4, 331–346.

- 60) Le Calvez, J. H., and B. C. Vendeville (2002), Experimental designs to model along-strike fault interaction, *Journal of the Virtual Explorer*, Vol. 7, 1–17.
- 61) Le Guerroué, E., and P. R. Cobbold (2006), Influence of erosion and sedimentation on strike-slip fault systems: insights from analogue models, *Journal of Structural Geology*, Vol. 28, No. 3, 421 - 430.
- 62) Lee, J. W., and M. Hamada (2005), An experimental study on earthquake fault rupture propagation through a sandy soil deposit, *structural engineering /earthquake engineering*, Vol. 22, No. 1, 1s-13s.
- 63) Lee, J. W., G. Tabuchi, and M. Hamada (2003), Experimental approach for understanding of fault rupture propagation through an alluvial soil, *地震工学研究発表会梗概集*, 27, 215-215.
- 64) Leever, K. A., R. H. Gabrielsen, D. Sokoutis, and E. Willingshofer (2011), The effect of convergence angle on the kinematic evolution of strain partitioning in transpressional brittle wedges: Insight from analog modeling and high-resolution digital image analysis, *Tectonics*, Vol. 30, No. 2.
- 65) Liao, Z., H. Liu, Z. Jiang, K. J. Marfurt, and Z. Reches (2017), Fault damage zone at subsurface: A case study using 3D seismic attributes and a clay model analog for the Anadarko Basin, Oklahoma, *Interpretation*, Vol. 5, No. 2, T143-T150.
- 66) Lin, M.-L., C.-F. Chung, and F.-S. Jeng (2006), Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip, *Engineering Geology*, Vol. 88, No. 1–2, 70 - 89.
- 67) Luján, M., F. Storti, J.-C. Balanyá, A. Crespo-Blanc, and F. Rossetti (2003), Role of décollement material with different rheological properties in the structure of the Aljibe thrust imbricate (Flysch Trough, Gibraltar Arc): an analogue modelling approach, *Journal of Structural Geology*, Vol. 25, No. 6, 867 - 881.
- 68) Macho, O., K. Demková, L. Gabrišová, M. Čierny, J. Mužíková, P. Galbavá, Ž. Nižnanská, J. Blaško, P. Peciar, R. Fekete et al. (2020), Analysis of static angle of repose with respect to powder material properties, *Acta Polytechnica*, Vol. 60, No. 1, 73–80.
- 69) Marques, F., and C. Nogueira (2008), Normal fault inversion by orthogonal compression: Sandbox experiments with weak faults, *Journal of Structural Geology*, Vol. 30, No. 6, 761 - 766.
- 70) Mattioni, L., W. Sassi, and J.-P. Callot (2007), Analogue models of basin inversion by transpression: role of structural heterogeneity, *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 272, No. 1, 397–417.
- 71) McClay, K. R. (1996), Recent advances in analogue modelling: uses in section interpretation and validation, *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 99, No. 1, 201–225.
- 72) McClay, K., and M. Bonora (2001), Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems, *AAPG Bulletin*, Vol. 85, No. 2, 233–260, 2.
- 73) Montanari, D., A. Agostini, M. Bonini, G. Corti, and C. D. Ventisette (2017), The Use of Empirical Methods for Testing Granular Materials in Analogue Modelling, *Materials*, Vol. 10, No. 6.

- 74) Ng, C. W. W., Q. P. Cai, and P. Hu (2012), Centrifuge and Numerical Modeling of Normal Fault-Rupture Propagation in Clay with and without a Preexisting Fracture, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, No. 12, 1492–1502, 2020/04/27.
- 75) Panien, M., S. J. H. Buitter, G. Schreurs, and O. A. Pfiffner (2006), Inversion of a symmetric basin: insights from a comparison between analogue and numerical experiments, *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 253, No. 1, 253–270.
- 76) Rao, G., A. Lin, B. Yan, D. Jia, X. Wu, and Z. Ren (2011), Co-seismic Riedel shear structures produced by the 2010 Mw 6.9 Yushu earthquake, central Tibetan Plateau, China, *Tectonophysics*, Vol. 507, No. 1, 86-94.
- 77) Reiter, K., N. Kukowski, and L. Ratschbacher (2011), The interaction of two indenters in analogue experiments and implications for curved fold-and-thrust belts, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 302, No. 1, 132–146.
- 78) Rojhani, M., M. Moradi, M. Ebrahimi, A. Galandarezadeh, and S. Takada (2012), Recent Developments in Faulting Simulators for Geotechnical Centrifuges, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 35, No. 6, 924–934, 10.
- 79) Rokonuzzaman, M., A. E. Nahas, and T. Sakai (2015), Experimental validation of a numerical model for the interaction of dip-slip normal fault ruptures, sand deposits, and raft foundations, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 9, No. 3, 239-250.
- 80) Rosenau, M., F. Corbi, and S. Dominguez (2017), Analogue earthquakes and seismic cycles: experimental modelling across timescales, *Solid Earth*, Vol. 8, No. 3, 597–635.
- 81) Rosenau, M., J. Lohrmann, and O. Oncken (2009), Shocks in a box: An analogue model of subduction earthquake cycles with application to seismotectonic forearc evolution, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 114, No. B1.
- 82) Sasnett, P. J. (2013), Analogue modelling of strike-slip surface ruptures: implications for greendale fault mechanics and paleoseismology, Master's thesis, University of Canterbury.
- 83) Schellart, W. P., and D. A. Nieuwland (2003), 3D evolution of a pop-up structure above a double basement strike-slip fault: some insights from analogue modelling, *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 212, No. 1, 169–179.
- 84) Schreurs, G. (2003), Fault development and interaction in distributed strike-slip shear zones: an experimental approach, *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 210, No. 1, 35-52.
- 85) Schreurs, G. (1994), Experiments on strike-slip faulting and block rotation, *Geology*, Vol. 22, No. 6, 567-570.
- 86) Sibbel, M. (2017), Surface dynamics of inversion tectonics systems through analogue modelling, B.S. thesis.
- 87) Solhmirzaei, R., A. Soroush, and M. M. Zanjani (2012), Fault Rupture Propagation through Level Ground and Sloping Sand Layers, 15wcee / 15th World Conference on Earthquake Engineering, No. 4148.

- 88) Stasiak, M., M. Molenda, I. Opaliński, and W. Błaszczak (2013), Mechanical properties of native maize, wheat, and potato starches, *Czech Journal of Food Sciences*, Vol. 31, No. 4, 347–354.
- 89) Sukan, M., J. Wu, and K. McClay (2014), 3D analogue modelling of transtensional pull-apart basins: Comparison with the Cinarcik basin, Sea of Marmara, Turkey, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 55, 699-716, 12.
- 90) Supak, S., D. Bohnenstiehl, and W. Buck (2006), Flexing is not stretching: An analogue study of flexure-induced fault populations, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 246, No. 1–2, 125 - 137.
- 91) Takemura, J., C. Yao, and O. Kusakabe (2018), Development of a fault simulator for soils under large vertical stress in a centrifuge, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 1-14.
- 92) Tibaldi, A., A. Bistacchi, F. A. Pasquare, and L. Vezzoli (2006), Extensional tectonics and volcano lateral collapses: insights from Ollagüe volcano (Chile-Bolivia) and analogue modelling, *Terra Nova*, Vol. 18, No. 4, 282-289.
- 93) Toscani, G., D. Di Bucci, A. Ravaglia, S. Seno, U. Fracassi, and G. Valensise (2009), Propagation of an inherited strike-slip fault through a foreland-chain system: quantitative aspects from analogue modeling and applications, *Italian Journal of Geosciences*, Vol. 128, No. 1, 107-122, 02.
- 94) Waffle, L. (2015), Role of reactivated basement faults in localizing deformation in the upper crust: insights from centrifuge analogue modelling, Master's thesis, Queen's University.
- 95) Weijermars, R., M. Jackson, and B. Vendeville (1993), Rheological and tectonic modeling of salt provinces, *Tectonophysics*, Vol. 217, No. 1, 143 - 174.
- 96) Xiao, Y., G. Wu, Y. Lei, and T. Chen (2017), Analogue modeling of through-going process and development pattern of strike-slip fault zone, *Petroleum Exploration and Development*, Vol. 44, No. 3, 368 - 376.
- 97) Yakymchuk, C., L. B. Harris, and L. Godin (2012), Centrifuge modelling of deformation of a multi-layered sequence over a ductile substrate: 1. Style and 4D geometry of active cover folds during layer-parallel shortening, *International Journal of Earth Sciences*, Vol. 101, No. 2, 463–482.
- 98) Yamada, Y., and K. McClay (2003a), Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. Paper 1: 2D hanging wall deformation and section restoration, *Journal of Structural Geology*, Vol. 25, No. 9, 1551—1560.
- 99) Yamada, Y., and K. McClay (2003b), Application of geometric models to inverted listric fault systems in sandbox experiments. Paper 2: insights for possible along strike migration of material during 3D hanging wall deformation, *Journal of Structural Geology*, Vol. 25, No. 8, 1331–1336.
- 100) Yamada, Y., and K. McClay (2004), 3D Analog Modeling of Inversion Thrust Structures, *AAPG Memoir*, Vol. 82, 276–301.

- 101) Yao, C., and J. Takemura (2019), Using laser displacement transducer scanning technique in centrifuge modeling of reverse fault–foundation interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 121, 219 - 232.
- 102) Yao, C., J. Takemura, W. Guo, and Q. Yan (2020), Hyperbolic spiral model for predicting reverse fault ruptures in sand based on centrifuge tests, *Géotechnique*, Vol. 19, No. 63, 1-12.
- 103) Zenz, F. A., and D. F. Othmer (1960), *Fluidization and fluid-particle systems*, New York: Reinhold, 513 p.
- 104) Zhuo, Y.-Q., Y. Guo, S. Chen, Y. Ji, and J. Ma (2018), Laboratory Observations of Linkage of Preslip Zones Prior to Stick-Slip Instability, *Entropy*, Vol. 20, No. 9, 629, Aug.
- 105) Zwaan, F., G. Schreurs, and S. J. H. Buiters (2019), A systematic comparison of experimental set-ups for modelling extensional tectonics, *Solid Earth*, Vol. 10, No. 4, 1063–1097.
- 106) Zwaan, F., G. Schreurs, and J. Adam (2018), Effects of sedimentation on rift segment evolution and rift interaction in orthogonal and oblique extensional settings, *Global and Planetary Change*, Vol. 171, 110–133.
- 107) 佐藤あすみ・谷 和夫・澤田昌孝(2007), 横ずれ断層変位に伴う岩盤表面の破壊形態に関する模型実験と 2005 年パキスタン地震で出現した地表地震断層との比較, 地盤工学研究発表会, 473-474.
- 108) 風間基樹・稲富隆昌(1993), 遠心力載荷模型実験手法の振動実験への適用について, 土木学会論文集, 1993, 477, 83-92.
- 109) 上田圭一(2003), 横ずれ断層系の発達過程ならびに変位地形の形成過程-断層模型実験による検討, 電力中央研究所報告, 研究報告, U, 03021, 1-22.
- 110) 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.
- 111) 上田圭一(2011), 模型実験による逆断層・活褶曲帯の発達過程の検討, 電力中央研究所報告, N10049.
- 112) 上田圭一・井上大栄・宮腰勝義(2003), 長大な活断層系における活動性調査法の高精度化-現地調査・模型実験による断層系の発達過程・断層変位地形の形成過程に関する検討, 電力中央研究所報告, 研究報告, U03022, 1-20.
- 113) 上田圭一・井上大栄・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.
- 114) 上田圭一・谷 和夫(1999a), 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, U98048.
- 115) 上田圭一・谷 和夫(1999b), 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)- 横ずれ, 斜めずれ断層模型実験-, 電力中央研究所報告, U98049.
- 116) 渡辺健治(2014), 動的な変形・破壊挙動を捉える模型実験技術(特集模型実験の動向), 地盤工学会誌: 土と基礎, 62, 9, 20-23, sep 月.
- 117) 相山光太郎・田中姿郎・佐々木俊法(2017), 断層破碎帯の詳細構造解析に基づく断層の活動性の検討, 応用地質, 58, 1, 2-18.
- 118) 谷山 尚・渡辺啓行(1998), 逆断層運動に伴う砂質表層地盤の変形に関する研究, 土木学会論文集, 1998, 591, 313-325.

- 119) 澤田昌孝(2014), 動力学的破壊進展解析による地表断層変位予測手法の提案, 電力中央研究所報告, 研究報告, N14007.
- 120) 鬼塚信弘・伯野元彦・岩下和義・鈴木崇伸(1999), 基盤の逆断層変位に伴なう地盤の変形と応力について, 応用力学論文集, 2, 533-542.
- 121) 桑原 徹・平間邦興 (1991) 断層破砕帯の工学的物性評価に関する研究, 大林組技術研究所報, 43, 99-106.
- 122) 高尾 誠・上田圭一・安中 正・栗田哲史・中瀬 仁・京谷孝史・加藤準治(2014), 確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上, 日本地震工学会論文集, 14, 2, 2_16-2_36.
- 123) 高橋 亨. (2015) 地盤工学における浅層物理探査データの物理モデルに基づく解釈技術の高度化に関する研究, 京都大学博士論文 .
- 124) 地盤工学会(2020), 地盤材料試験の方法と解説 [第一回改訂版] .
- 125) 蔵田忠廣・宮本武司(1987), 未固結砂層におけるトンネル切羽自立性の判定基準の提案, 土木学会論文集, 1987, 382, 245-254.
- 126) 青木隆一(1961), 粉体の力学的諸性質, 化学工学, 25, 3, 199-206.
- 127) 山田隆二・小林健太郎・池田隆司(2012), 野島断層における深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果 (平林・岩屋・甲山), 防災科学技術研究所研究資料, 371, 1-16.
- 128) 山田隆二・松田達生・小林健太郎・池田隆司(2010), 防災科学技術研究所による深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果(足尾・新宮・牛伏寺), 防災科学技術研究所研究資料, 349, 1-12.
- 129) 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.
- 130) 白石和也・山田泰広・松岡俊文(2007), アナログモデル実験で再現された付加体構造に対する反射法地震探査記録の合成, 石油技術協会誌, 72, 3, 279-289.
- 131) 林田精郎 (1973) 岩石の動弾性係数と静弾性係数について, 応用地質, 14, 3, 103-111.

4章 断層変位に関する数値解析

本章では、3章の調査により整理を行った室内模擬実験の文献を参照し、2つの断層変位実験を選択して実施した再現解析について述べる。対象実験は何れも湿潤粘土を対象としたものであり、乾燥した粉体とは異なる変形挙動を示すものであるが、間隙水を考慮しない条件の個別要素法(DEM)による全応力解析で、どの程度現象を再現できるかについて検討を行った。

再現解析は、横ずれタイプと逆断層タイプを模擬した室内実験を対象に、それぞれ1つずつを選択して実施した。なお、横ずれタイプのみでなく、縦ずれタイプの再現解析を実施した理由は2次元解析による検討が可能であり、より高い分解能の解析評価を行うためである。以下に、それぞれの検討内容と得られた結果について示す。

4.1. 室内模擬実験の再現解析 1・横ずれタイプ

4.1.1. 室内模擬実験概要

横ずれタイプを対象とした室内模擬実験の中から、Atmaoui(2006)の実験を再現解析の対象として選定した理由は以下の着目点からである。

- 1)粘性土が対象であるためか、明瞭な亀裂が発生している。
- 2)対象の地盤物性や強度に関する情報提示が比較的多い。
- 3)横ずれ断層実験であるため3次元性があり、3次元モデルによる検討に有用である。

4.1.1.1. 実験装置

図 4.1.1 に、検討対象とした室内模擬実験の実験装置を示す。

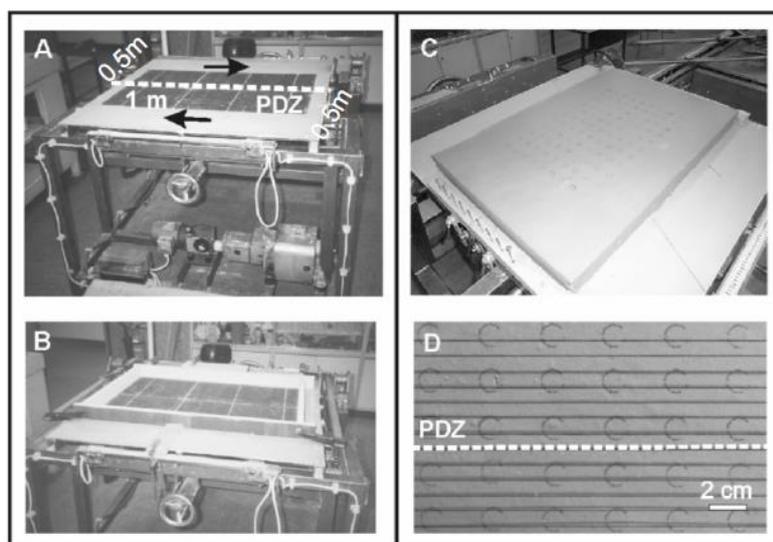


図 4.1.1 実験装置(Atmaoui(2006))Fig.13 から)

実験装置は、長さ 1.0m、幅 0.5m のテーブルを配置し、土槽幅の中間地点に主断層を模擬した食い違いがあり、あらかじめ反対方向に移動する不連続面 (pre-defined principal displacement zone(PDZ))を設定している。

4.1.1.2. モデル物性値

Atmaoui(2006)では含水比を調整した飽和に近い条件の湿潤粘性土を供試体として使用し、断層変位実験を行っている。表 4.1.1 に実験供試体で想定されているモデル物性値を示す。

表 4.1.1 モデル物性値

項目	物性値
湿潤密度	1.75 (g/cm ³)
内部摩擦角	32 (deg.)
せん断強度	1500 (Pa)

(Atmaoui(2006)Tabel5 から)

※なお、内部摩擦角は CUbar 試験等により有効応力で評価されたものと考えられ、飽和に近い条件の非排水せん断強度の内部摩擦角は小さいと考えられる。個別要素法による再現解析では、間隙水を考慮しない全応力解析を行うため、内部摩擦角は小さいものとして取り扱う。

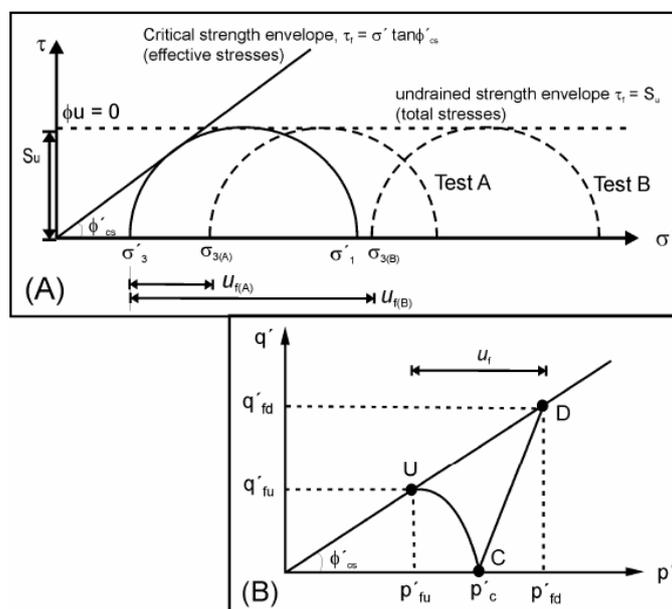


Fig. 7. A) Undrained (total) and critical (effective) strength envelopes for normally consolidated clays. B) Graph showing the location of the drained (D) and undrained (U) failure points on the CSL. q'_{fd} and p'_{fd} are the drained effective deviatoric and mean normal stresses at failure. q'_{fu} and p'_{fu} are the undrained effective deviatoric and mean normal stresses at failure (modified from Whitlow, 2001).

図 4.1.2 非排水時の応力歪関係(A)と xxx(B)の考え方(Atmaoui(2006)Fig.7 から)

4.1.1.3. 実験ケース

実験は、層厚 4cm の供試体を基本ケースとして設定し、他に 2cm および 8cm の実験模型を作成している。なお、層厚 4cm の模型については強度特性による影響を確認するため、含水比 42% を基本として 38% と 48% の条件の検討を行っており、合計 5 ケースの実験が実施されている。なお、含水比の調整のために行われた圧密方法などに関する情報はなく不明である。表 4.1.2 に全ての実験ケースを示し、再現解析では含水比 42% の供試体を用いた 3 ケースを対象とした。

表 4.1.2 実験ケース (Atmaoui(2006)Table6 から抜粋)

	NA4	NA7	NA8	NA9	NA10
Dimension (cm)	36 X 90	35 X 90	35 X 90	20 X 90	35 X 90
Thickness Z (cm)	4	4	8	2	4
Water content w (%)	42	48	42	42	38
Width of shear zone W (cm)	5.2	4.1	11.5	2.2	5.7
Vertical displacement U_{max} at the ridges (mm)	6.8	3	3.4	5.6	12
U_{max} in percent of thickness Z	17%	7.5%	4.3%	28%	30%

実験結果は、①せん断帯の幅、②光源から紐に落とされた影より算出された鉛直変位、③亀裂の規模や数量、④表層変状図などが整理されている。図 4.1.3 に鉛直変位の計測イメージを示す。なお、再現解析ではせん断帯の幅や鉛直変位に着目した検討を行う。

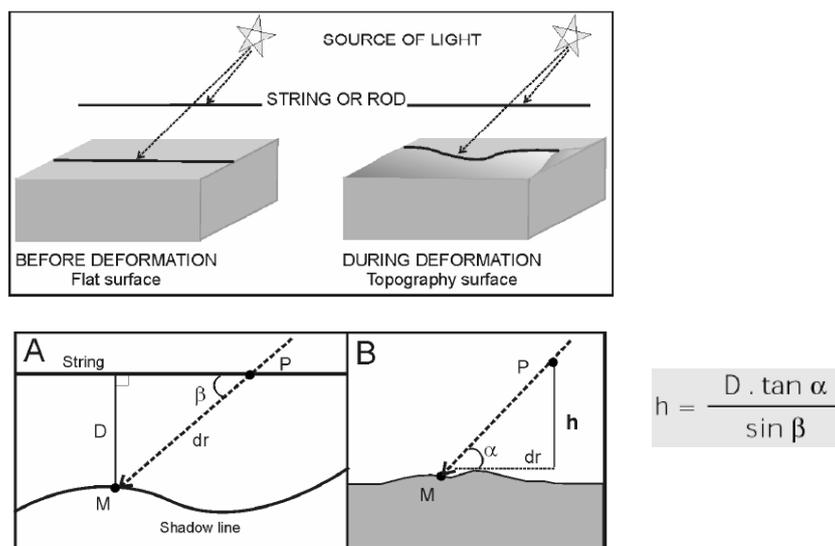
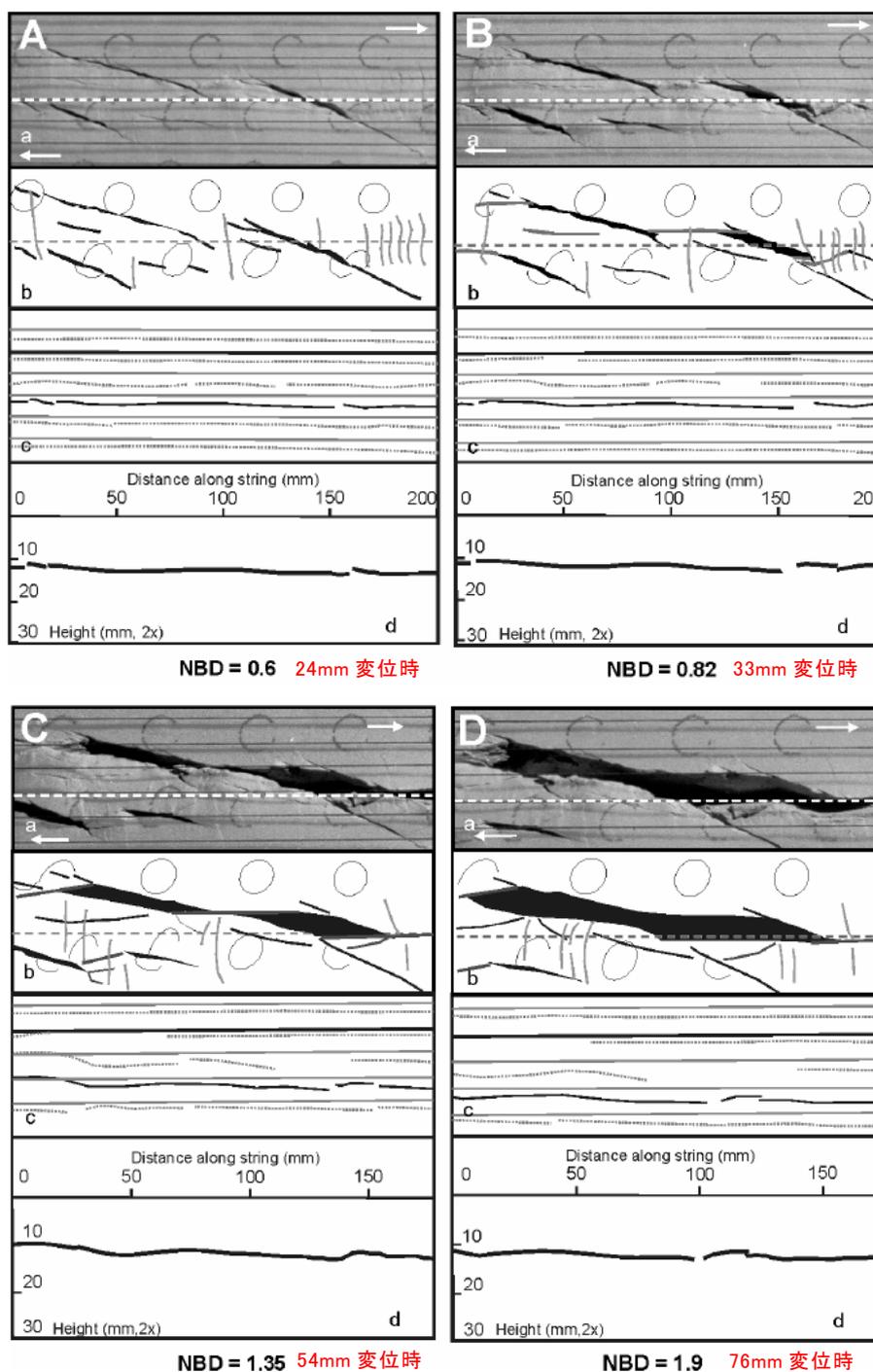


図 4.1.3 鉛直変位計測方法のイメージ図 (Atmaoui(2006)Fig.15,16 から)

4.1.1.4. 実験結果

図 4.1.4 に基本ケース(NA4(表 4.1.2 参照))の表層変状の進展過程を示す。また、図 4.1.5 に基本ケース(NA4)の底盤の移動完了時(80mm 変位時)の表層変状図を示す。



(NBD: normalized basal displacement)

(赤字は本報告書で追記)

図 4.1.4 基本ケース(NA4)の表層の進展過程(Atmaoui(2006)Fig.18 から)

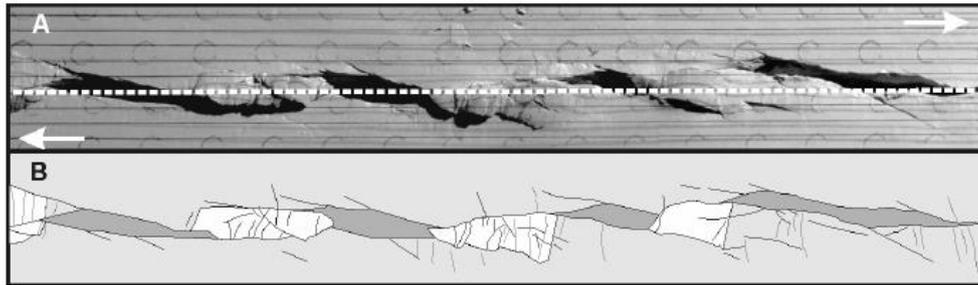


図 4.1.5 基本ケース(NA4)の表層変状図 (Atmaoui(2006)Fig.19 から抜粋)

図 4.1.4 底盤の移動に伴い、表層の亀裂が進展する様子が見える。また、図 4.1.5 から、表層の亀裂と表層が盛り上がる箇所が交互に発生している様子が見える。なお、この最大盛り上がり量が表 4.1.2 に記載されている U_{max} である。

図 4.1.6 からせん断帯の幅が層厚に比例する関係が見られる。また含水比を変えたケース間で隆起量を比較した図 4.1.7 より、強度の高いケースほど鉛直変位が大きくなっていることが確認できる。

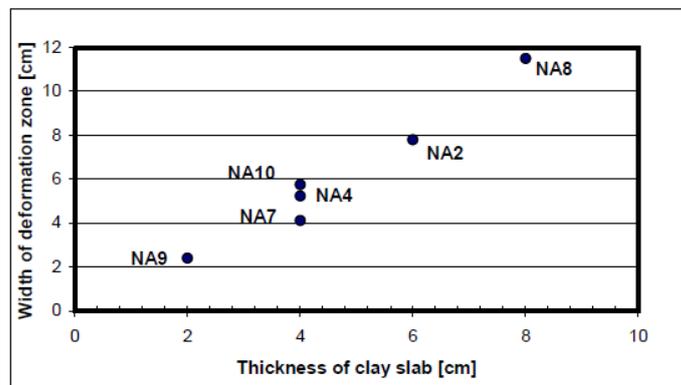


図 4.1.6 層厚とせん断帯幅の関係 (Atmaoui(2006)Fig.21 から)

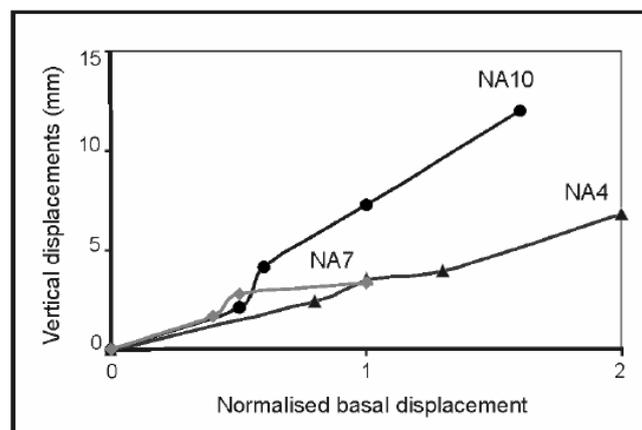


図 4.1.7 正規化した入力変位と隆起部の鉛直変位の関係 (Atmaoui(2006)Fig.22 から)

図 4.1.8 に各ケースの層厚に対する 82%変位入力時点における表層変状の様子を示す。何れのケースも明瞭な亀裂の発生が見られ、生じた亀裂の深さは層厚の過半に到達するほど非常に深いことが報告されている。亀裂の規模やせん断帯の幅は層厚が深くなるほど大きくなっており、亀裂の発生個数としては層厚が大きくなるほど少なくなっている。これらの表層変状の様子は数値解析の結果と比較を行う。

なお、表 4.1.2 に示される層厚に対するせん断帯の幅は、層厚の 1 倍強程度となっているが、これは乾燥砂や石膏を用いた模擬実験に比べて狭い。澤田・上田(2009)では既往実験結果を参照し、乾燥砂の方が石膏の模擬岩盤よりせん断帯の広がりがある理由として、内部摩擦角が大きいことで走行に対して成す角が大きくなり、せん断帯の幅に影響している可能性を指摘している。このことから、模擬実験の再現解析においては C 材と ϕ 材の違いについて着目することも有用であると考えられる。

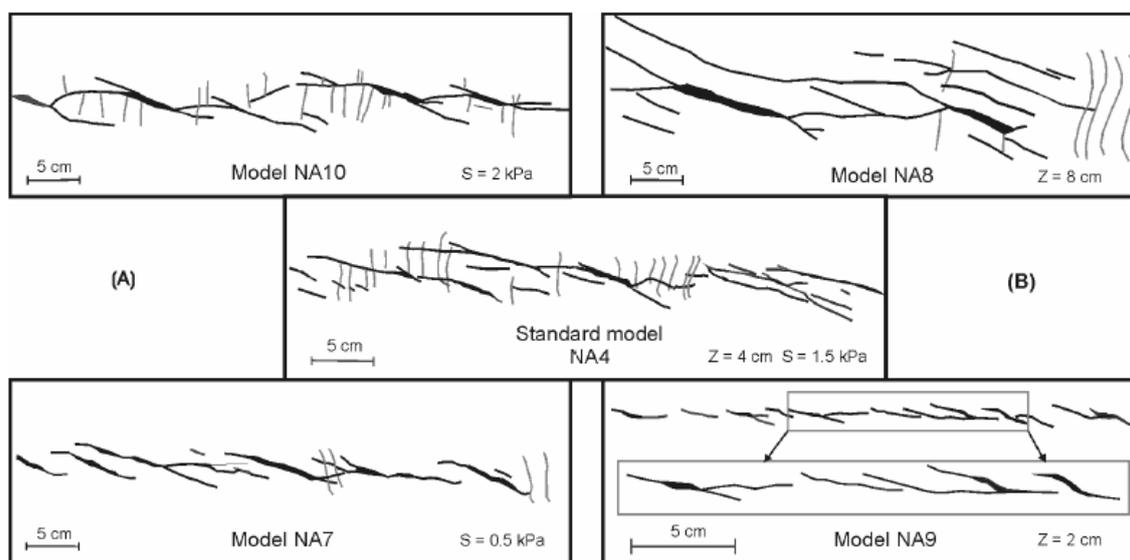


図 4.1.8 各ケースの層厚に対する 82%変位時の表層変状図(Atmaoui(2006)Fig.20 から抜粋)

4.1.2. 再現解析

個別要素法による再現解析では、表 4.1.2 に示される実験ケースの内、含水比 42% の供試体を用いた 3 ケースを対象として解析を実施した。解析では特にせん断帯の幅や鉛直変位に着目し、層厚 2cm(NA9)、4cm(NA4)、8cm(NA8) の各モデルを作成して実施し、得られた解析結果を整理した。

4.1.2.1. モデル化範囲

数値解析において計算分解能は重要であり、特に粉体内部のせん断帯の発達過程の計算精度は厚さ方向の分割によるところが大きいと考えられる。そのため、最も薄い 2cm のケース NA9 についても、厚さ方向に 10 分割程度の計算分解能を確保するようにモデル化を行った。なお、解析のモデル化領域は本来、模型実験の土槽寸法の通りとするべきであるが、平均的な粒子径が小さくなることから計算規模が大きくなり、検討を行う上での問題となった。そこで、影響の小さい範囲でモデル化範囲の再検討を行い、解析モデルの縮小による計算規模の抑制を図った。

解析モデルの幅はせん断帯の幅が最大となる NA8 の 11.5cm に対し 2 倍とし、走行方向は 2/3 倍とし、各ケースで共通の領域を想定した。図 4.1.9 にモデル化を行った土槽の範囲を示す。モデル化範囲と計算規模の検討の結果、作成した解析モデルの粒径分布を表 4.1.3 に示す。また図 4.1.10、図 4.1.11 に作成した個別要素法解析の再現解析モデルを示す。なお、実験結果のせん断帯の間隔は層厚の 2~3 倍であり、入力する食い違い変位は各ケースで最大 8.3cm である。

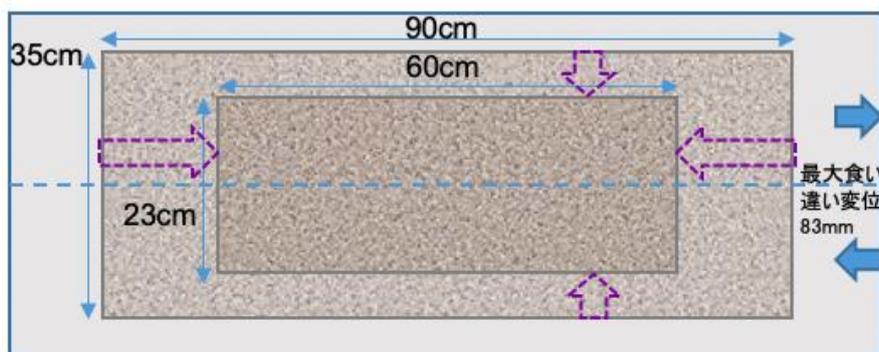


図 4.1.9 モデル化範囲

表 4.1.3 解析モデルの粒径分布

粒径[mm]	質量割合[%]
2.0	15.0
2.1	17.5
2.2	20.0
2.3	22.5
2.4	25.0

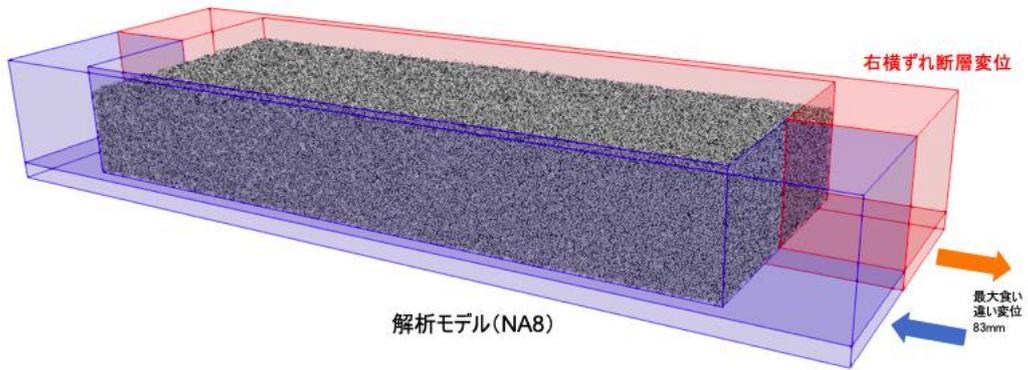


図 4.1.10 再現解析モデル(NA8 の場合)

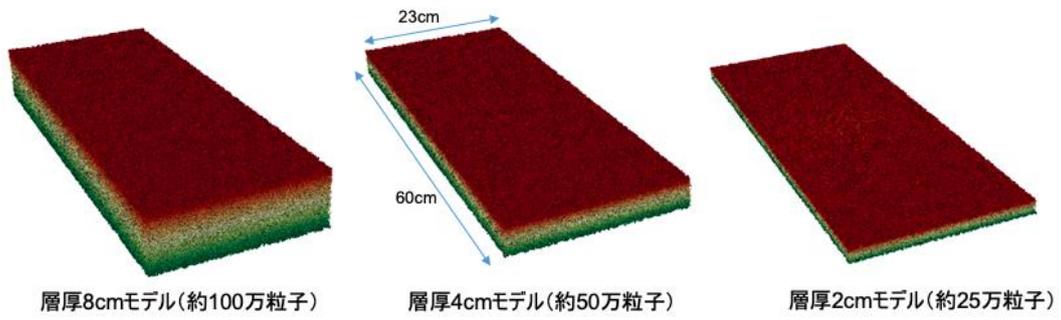


図 4.1.11 再現解析モデル(初期粒子配置)

4.1.2.2. 物性値同定のための要素シミュレーション

対象が粘土材料であり、間隙比が大きいことから高い強度を設定し、可能な限り疎なパッキング計算を行うことで、要素シミュレーションモデルおよび対応する模型実験モデルを作成した。

初期粒子配置となる疎なパッキングモデル生成の手順を以下に示す。

- ①大きな強度を設定して疎な DEM パッキングの計算（個別要素法解）を行う
- ②非球形状の効果を得るため、比較的大きな転がり摩擦を考慮（転がり摩擦角 38.7° ）



図 4.1.12 解析モデルの作成過程

なお、実験における含水比 42% ケースの間隙比が 1.2 であり、間隙比 1.2 となるパッキングモデル作成を試みたが、全応力解析では達成が困難であったため、現実的に設定可能なモデルとして間隙比 1.0 の条件を採用した。

DEM 解析に用いる強度パラメータは、一面せん断試験の要素シミュレーションを実施することでパラメータスタディによる同定を行う。図 4.1.13 に一面せん断試験のモデル図を示す。図 4.1.14 に一面せん断試験の概要図を示す。

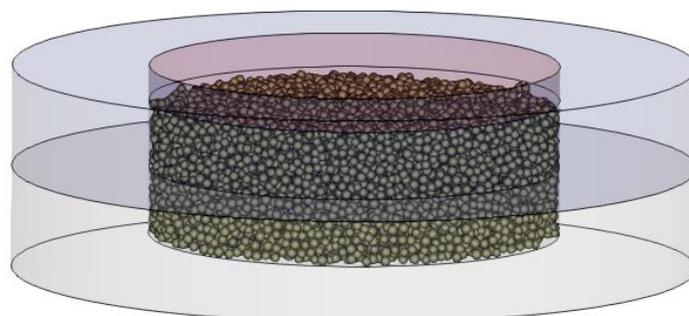


図 4.1.13 一面せん断試験の解析モデル(外形)

個別粒子法(DEM)による解析は全応力解析として実施する。なお、一面せん断試験の解析では、モデル粒径が粗いことを考慮して一般的な供試体の1.5倍の寸法とした。強制変位は10mmまでを入力し、上載圧は模型実験で想定される応力レベルよりは大きい、大き過ぎない範囲として10, 20, 30kPaを採用した。

表 4.1.4 に Atmaoui(2006)で整理された対象とする粘性土の物性値を示す。対象とする含水比42%の条件では間隙比が1.2となるが、前述の通り達成が困難であるため、間隙比を1.0とし、全体質量が整合する条件として土粒子密度 3.5g/cm^3 を設定した。

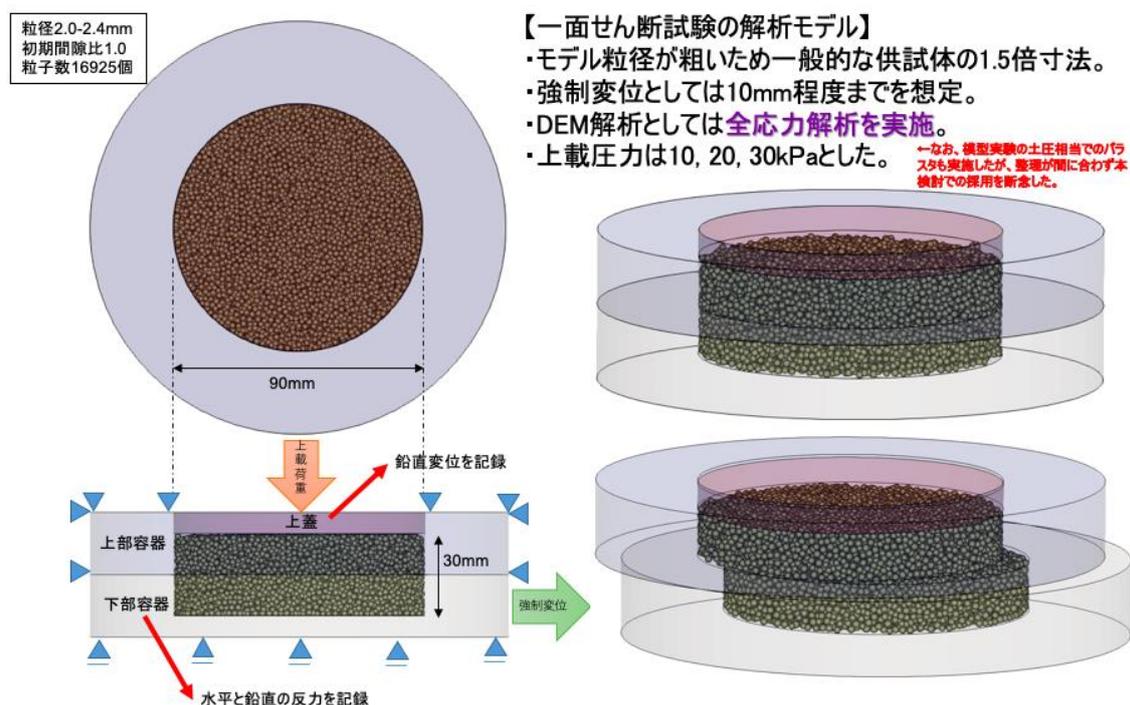


図 4.1.14 一面せん断試験モデル(概要)

表 4.1.4 対象とする粘性土の物性値(Atmaoui(2006)Table4 から抜粋)

Water content w (%)	ρ_b (g/cm^3)	S_u (kPa)	e	Sr (%)
38	1.79	2	1.1	95
42	1.75	1.5	1.2	96
48	1.70	0.5	1.3	99

一面せん断試験のシミュレーション結果を整理して DEM 解析パラメータを設定した。模型実験条件の拘束圧は非常に小さく、また個別要素法解析としては全応力条件であるため、必ずしも要素試験の結果再現が重要であるとは限らないが、摩擦角を出来るだけ小さくした上で所定のせん断強度を目指すモデル化を行っている。内部摩擦角が最小となる条件は粒子間の摩擦係数を 0 とした場合であり、解析条件によるが内部摩擦角の最小値は 6 度程度となる。

図 4.1.15 に要素シミュレーション結果より得られたせん断強度を示す。表 4.1.5 に要素シミュレーション結果より最終的に採用した DEM 解析パラメータを示す。なお、本検討では実験における粘性土を念頭に同定を行った解析条件(表 4.1.5)を C 材ケースとした。

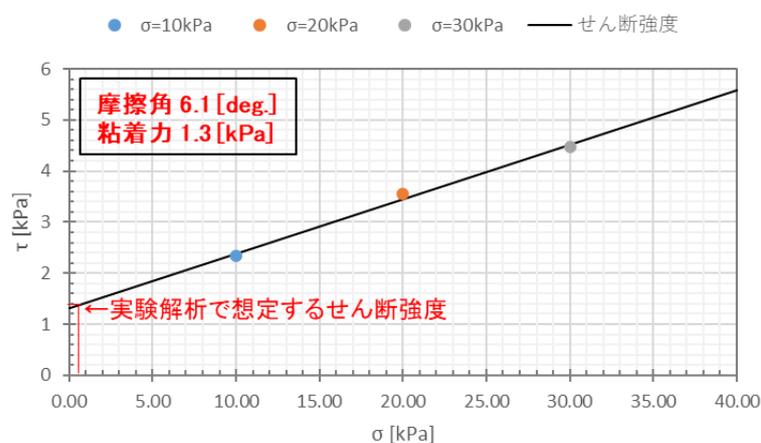


図 4.1.15 要素シミュレーション結果より得られたせん断強度(C 材ケース)

表 4.1.5 DEM 解析パラメータ(C 材ケース)

パラメータ	設定値
基準法線剛性	1.0×10^7 [N/m]
基準接線剛性	2.5×10^6 [N/m]
減衰定数	0.15
粒子間摩擦角	0.0 [deg.]
転がり摩擦角	38.7 [deg.]
粒子間粘着力	1.0×10^4 [N/m ²]
粒子間固着力	1.0×10^5 [N/m ²]
土粒子密度	3.5 [g/cm ³]

また、C材ケースによる解析結果との比較として、摩擦角が大きい条件を想定したケースを追加で実施した。想定するせん断強度としては同程度として、摩擦角を大きく設定することでφ材の強度特性を想定した要素シミュレーションを実施した。なお、本来は想定とする材料が密砂などである場合、解析モデルの間隙比自体を変更すべきであるが、本検討では解析モデルは共通として強度特性のみ変更し、摩擦係数以外は同じ条件の追加ケースを設定している。なお、澤田・上田(2009)に示されるとおり、砂や石膏を用いた横ずれ断層実験では、せん断帯の幅は内部摩擦角が大きいほど大きくなっており、内部摩擦角による影響からφ材のせん断帯の発達にはC材に比べて広がりを持つと考えられる。

図 4.1.16 に要素シミュレーション結果より整理したφ材ケースのせん断強度を示す。表 4.1.6 に要素シミュレーション結果より最終的に設定したφ材ケースのDEM解析パラメータを示す。

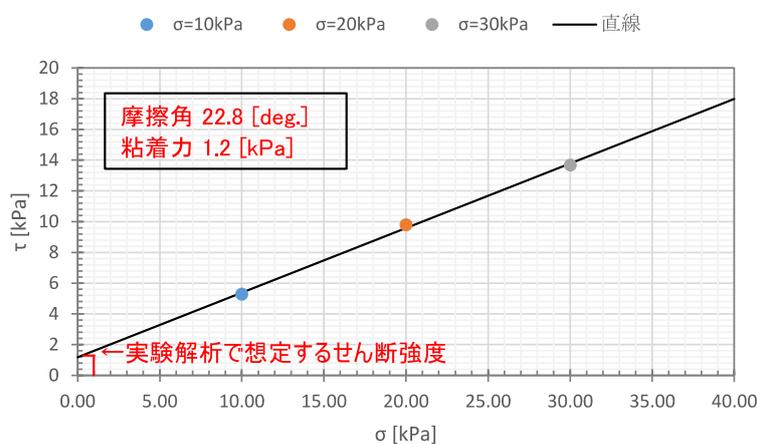


図 4.1.16 要素シミュレーション結果より得られたせん断強度(φ材ケース)

表 4.1.6 DEM 解析パラメータ(φ材ケース)

パラメータ	設定値
基準法線剛性	1.0×10^7 [N/m]
基準接線剛性	2.5×10^6 [N/m]
減衰定数	0.15
粒子間摩擦角	38.7 [deg.]
転がり摩擦角	38.7 [deg.]
粒子間粘着力	1.0×10^4 [N/m ²]
粒子間固着力	1.0×10^5 [N/m ²]
土粒子密度	3.5 [g/cm ³]

表 4.1.7 に横ずれタイプの室内模擬実験を対象とした再現解析ケースの一覧を示す。

表 4.1.7 再現解析ケース一覧

ケース名	層厚	物性
case1-1	2cm(NA9)	C 材ケース
case1-2	4cm(NA4)	
case1-3	8cm(NA8)	
case2-1	2cm(NA9)	φ 材ケース
case2-2	4cm(NA4)	
case2-3	8cm(NA8)	

4.1.2.1. 再現解析結果

3次元個別要素法による再現解析結果を各ケース整理して以下の結果を得た。

図 4.1.17 に C 材ケースの 3 モデルの最終変位 (83mm) 時の地表水平変位分布図を示す。また、図 4.1.18 に φ 材ケースの 3 モデルの最終変位(83mm)時の地表水平変位分布図を示す。それぞれ、寸法の目安として 1cm 間隔の正方格子を合わせて図示している。

図 4.1.19～図 4.1.24 に、各ケースの地表鉛直変位分布図を示し、実験で観測された最大鉛直変位量との比較を行っている。また、図 4.1.25～図 4.1.30 に、各ケースの表層変状図を示す。表層変状の様子を把握するために、それぞれ初期の粒子配置に対して 1.5cm 間隔の正方格子の位置の粒子色を変えて示しており、実験で観測されたせん断帯の幅を示す横実線を重ねて図示している。また、参考に Atmaoui(2006)より層厚に対して 82%の変位を入力した際の変状図のスケールを合わせて示した。

図 4.1.31～図 4.1.42 に、各ケースの最大せん断ひずみ分布図を示す。せん断ひずみは各変位入力ステップで 2.5mm 立法格子内に含まれる粒子の平均変位 (初期位置からの移動量) から計算し、隣接する前後の 3次元格子の差分計算より体積平均量として算出している。同様の計算方法は竿本ら(2005)や谷山(2008)でも個別要素法解析の整理手法として採用されている。底部から表層への発達を確認するため、底部と表層部の最大せん断ひずみをそれぞれ 1cm 平方格子と共にコンター図で示した。また、3次元的な図示方法としてポストプロセッサ (オープンソースプログラムの Prview) のボリュームレンダリング機能による半透明描画図を合わせて示している。この際、粒子変状図との関係を確認できるように 3次元描画した粒子変状図を半透明で重ねて図化している。

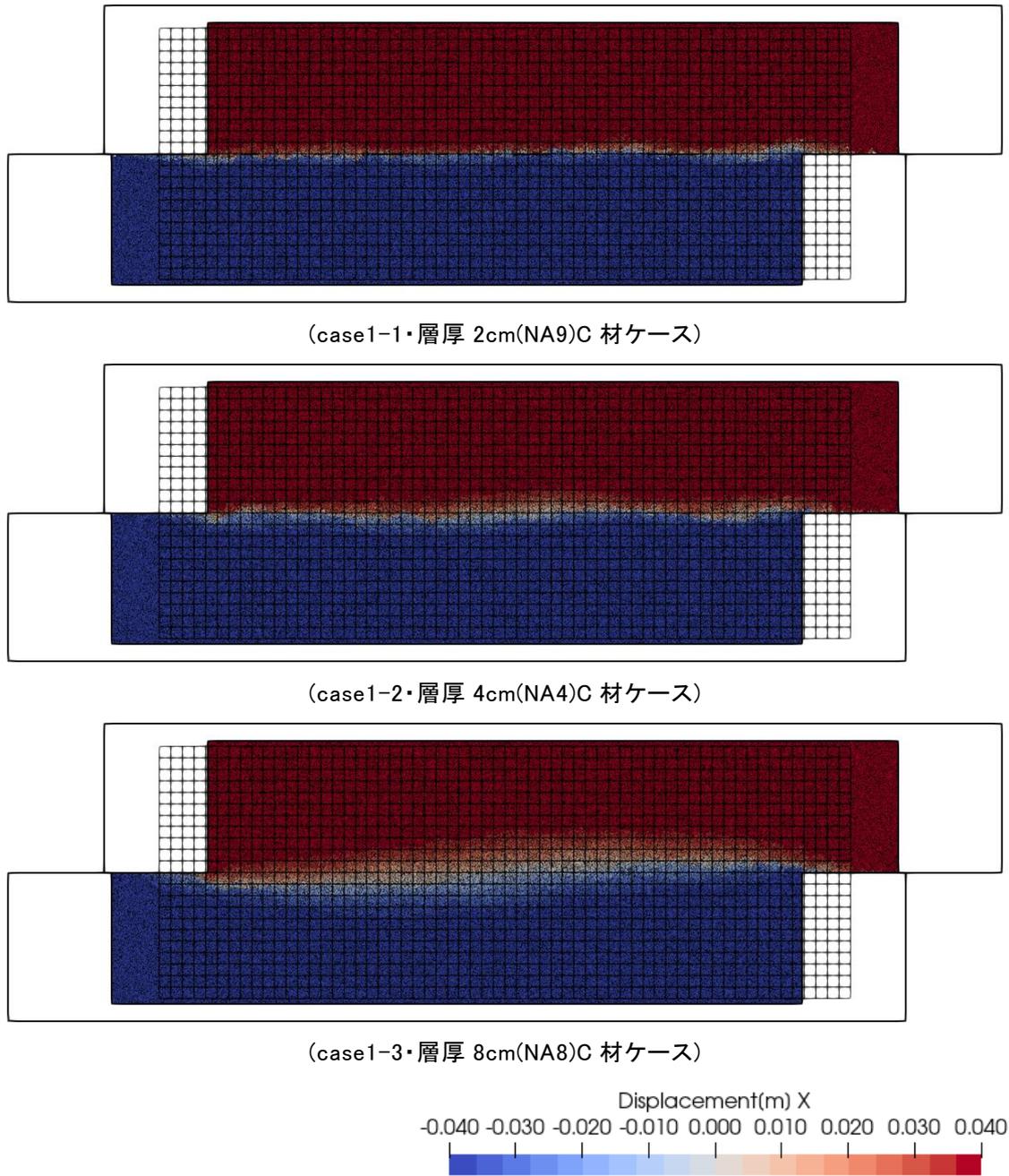


図 4.1.17 C 材ケースの最終変位（83mm）時の地表水平変位分布図

中央部以外は入力した食い違い変位がそのまま水平変位となっており、中央部の変位分布から層厚が増すほどせん断帯の幅も広がっていく傾向が確認できる。なお、各せん断帯の間隔の広い8cm ケースではモデル端部では境界の影響を強く受けていることが確認された。

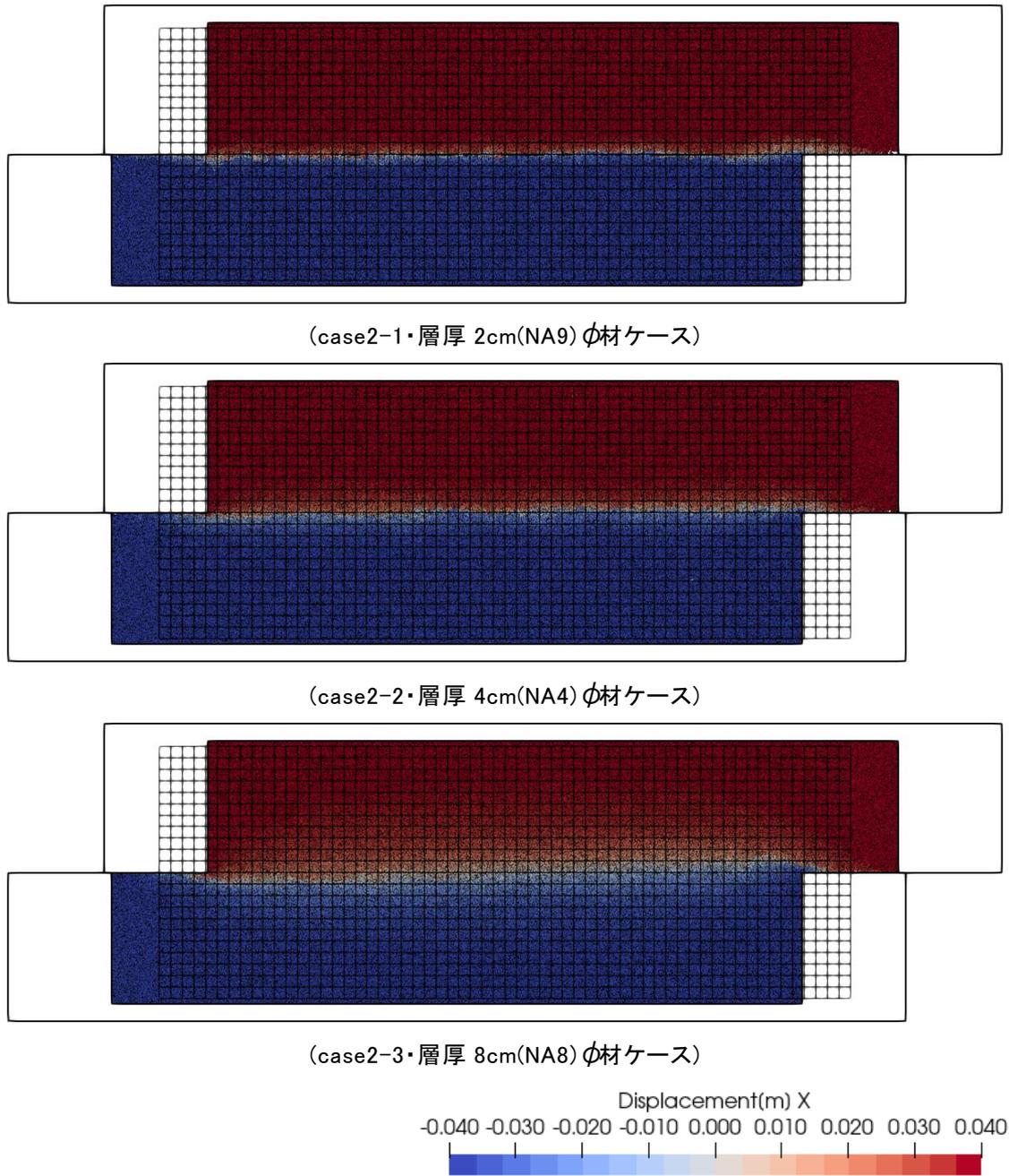


図 4.1.18 φ材ケースの最終変位（83mm）時の地表水平変位分布図

C 材ケースと同様に中央部以外は入力した食い違い変位がそのまま水平変位となっており、中央部の変位分布から層厚が増すほどせん断帯の幅も広がっていく傾向が確認できる。なお、予想に反してせん断帯の幅は C 材ケースより狭く、間隔も狭いためか層厚 8cm ケースでも境界の影響は小さくなっている。この点、φ材ケースのモデルにも C 材ケースと同じものを使用しているため、間隙比が大きくφ材としての特性が現れなかった可能性がある。

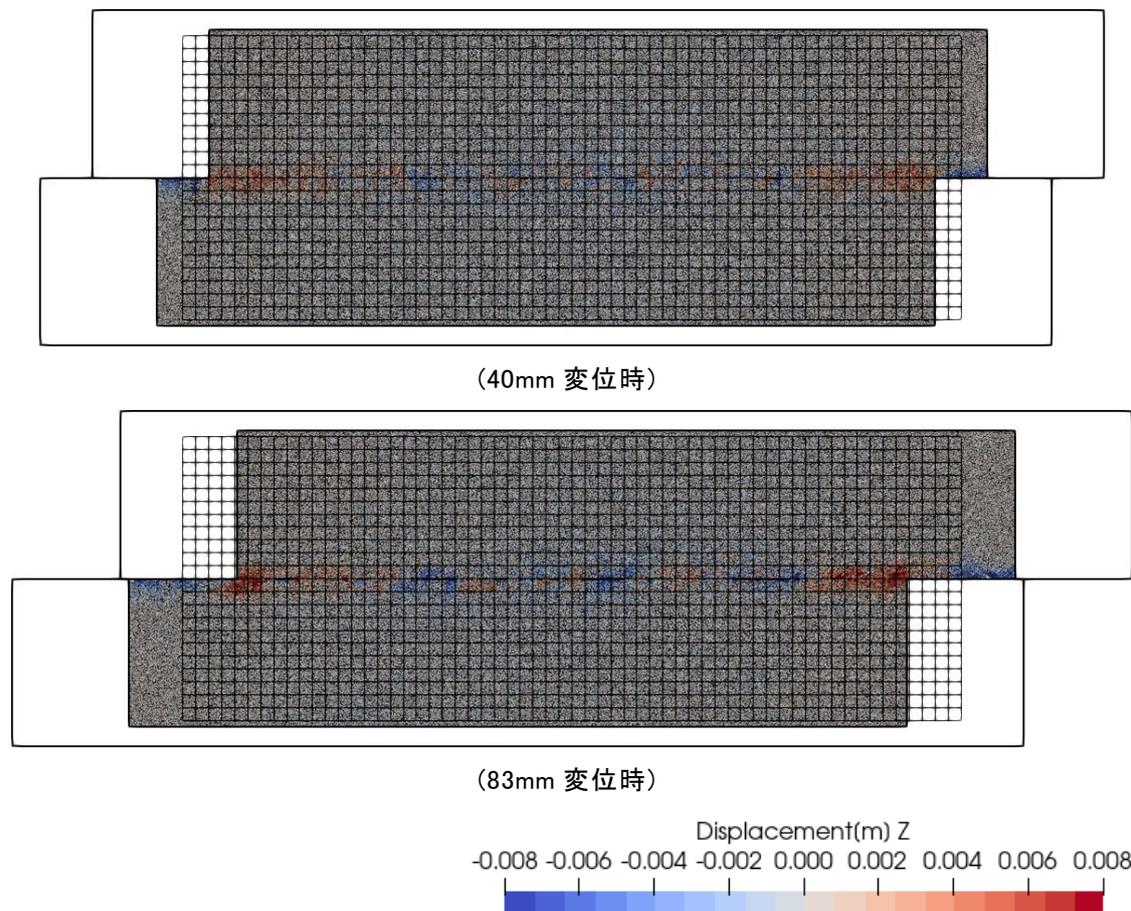


図 4.1.19 case1-1・層厚 2cm(NA2)C 材ケースの地表鉛直変位分布図

最終変位時の最大鉛直変位量(隆起側)は、土槽端部の境界部を除いて 6mm 程度となった。実験では 5.6mm の変位が計測されており、同程度の変位量となっている。隆起は表層部で圧縮が生じた箇所で生じ、一方で沈降が引張域で生じていると考えられ、せん断帯の形成が確認される。

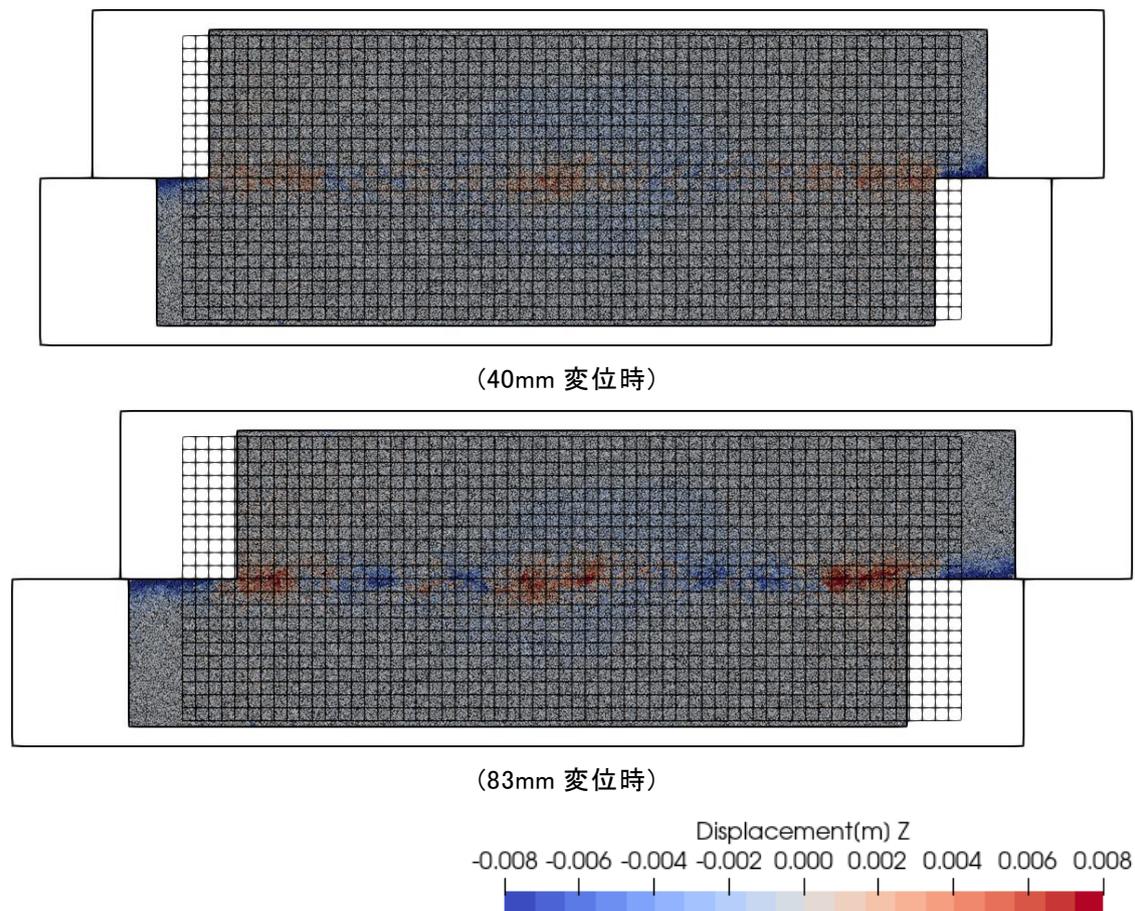


図 4.1.20 case1-2・層厚 4cm(NA4)C 材ケースの地表鉛直変位分布図

最終変位時の最大鉛直変位量(隆起側)は、土槽端部の境界部を除いて 9mm 程度となった。実験では 6.8mm の変位が計測されており、やや大きい変位量となっている。なお、40mm 変位入力時には中央の食い違い境界部から離れた場所では広く沈降が生じており、これは強度不足によるものと考えられる。2cm ケースと同様に、隆起は表層部で圧縮が生じた箇所で生じ、一方で沈降が引張域で生じている。

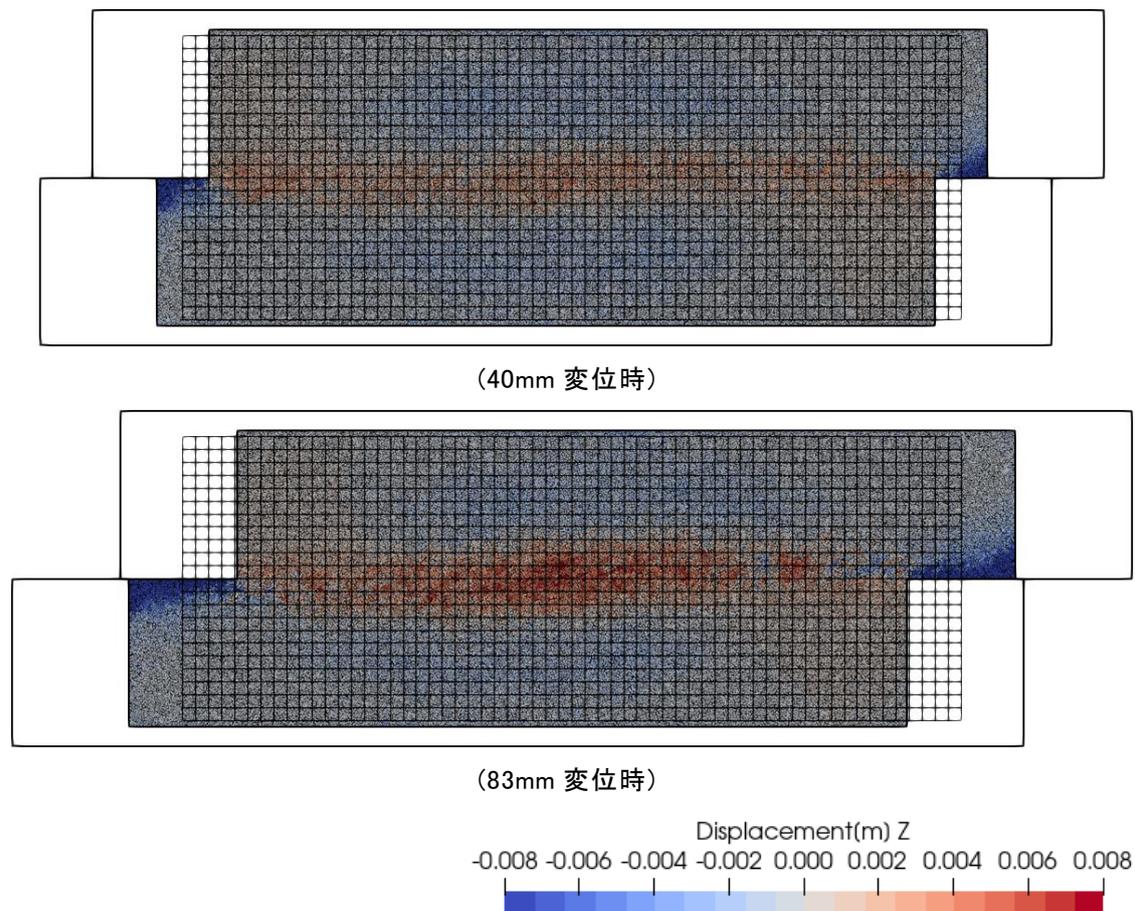


図 4.1.21 case1-3・層厚 8cm(NA8)C 材ケースの地表鉛直変位分布図

最終変位時の最大鉛直変位量(隆起側)は、土槽端部の境界部を除いて 9mm 程度となった。実験では 3.4mm の変位が計測されており、解析結果は隆起量が非常に大きくなっている。また、4cm ケースと同様に中央部から離れた領域で全体的な沈降が認められ、強度の不足から骨格を維持できずに空隙が潰れたものと考えられる。そのため、間隙比が小さくなった影響か正のダイレイタンス挙動が強く、全体的に中央部が膨張しており、他ケースと同じレンジの鉛直変位の分布からはせん断帯で形成される、圧縮域と引張域で生じる隆起沈降の関係が分かり難い。

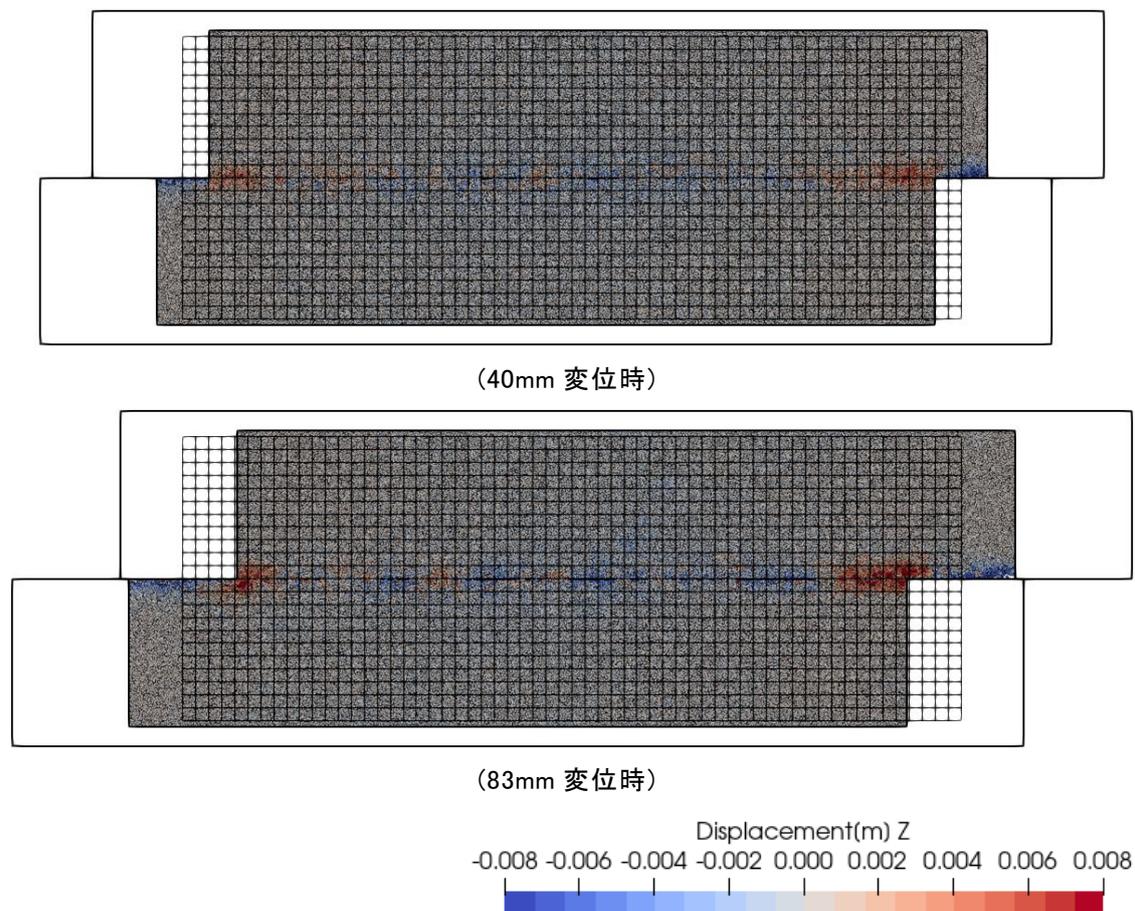


図 4.1.22 case2-1・層厚 2cm(NA2)φ材ケースの地表鉛直変位分布図

最終変位時の最大鉛直変位量(隆起側)は、土槽端部の境界部を除いて 6mm 程度となり、C 材ケースとの差異は殆ど生じなかった。実験では 5.6mm の変位が計測されており、同程度の変位量となっている。C 材ケースと同様に、隆起は表層部で圧縮が生じた箇所で生じ、一方で沈降が引張域で生じているが、φ材では隆起した部分がやや少なくなっている。強度が高いためか境界部の盛り上がりが大きいが、全体的な傾向に C 材ケースと φ材ケースの際は見られなかった。

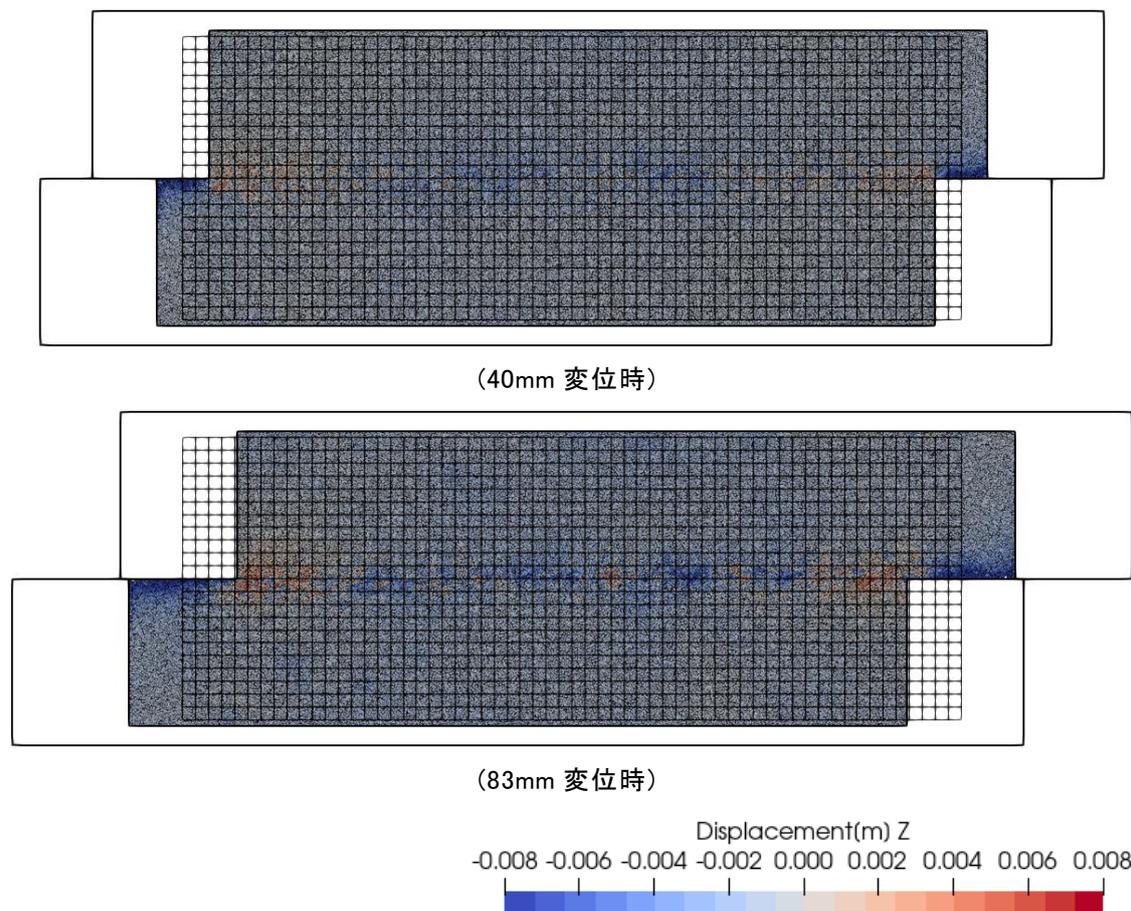


図 4.1.23 case2-2・層厚 4cm(NA4)φ 材ケースの地表鉛直変位分布図

最終変位時の最大鉛直変位量(隆起側)は、土槽端部の境界部を除いて 4~5mm 程度となった。実験では 6.8mm の変位が計測されており、やや小さい変位量となっている。なお、C 材ケースで見られた 40mm 変位入力時の中央部から離れた場所で広く生じていた沈降は緩和され、強度がやや高いためと考えられるが、せん断変位による鉛直変位の傾向としては C 材ケースに比べて沈下する方向にある。そのため、隆起と沈降によるせん断帯は確認し難くなっているが、C 材ケースと同様に圧縮が生じた箇所での隆起が生じていることが確認できる。

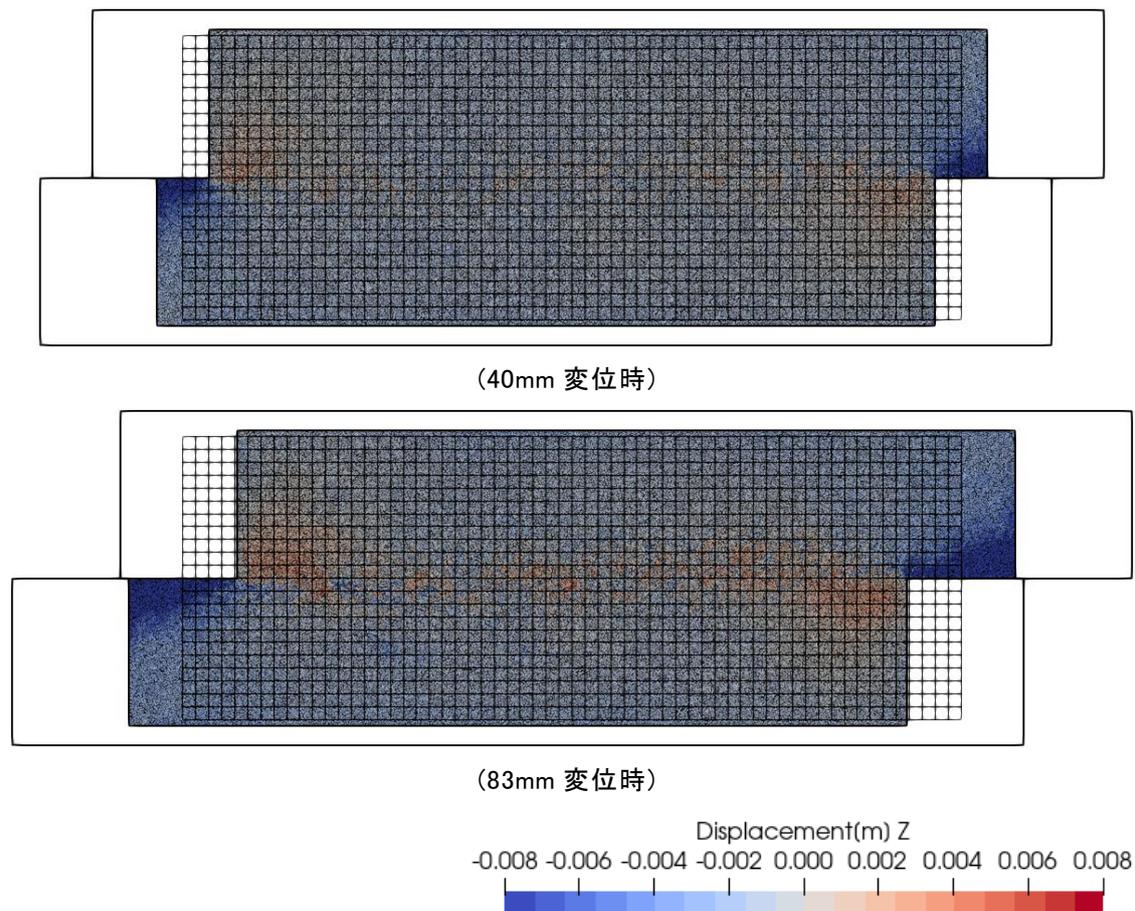
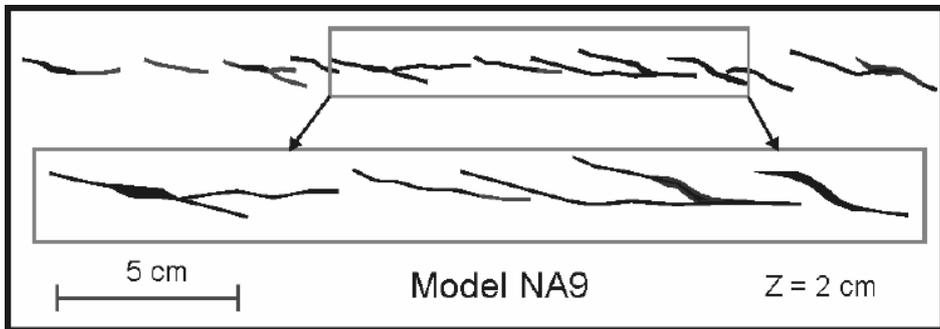
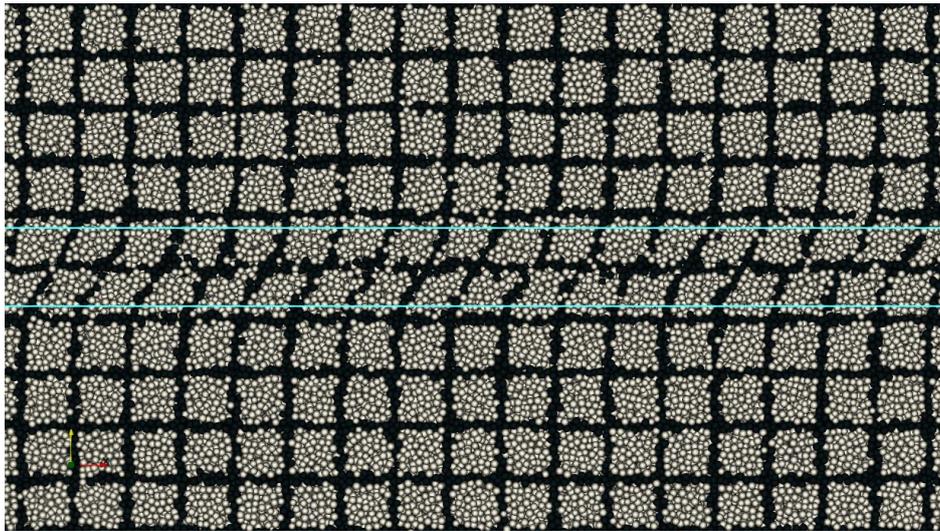
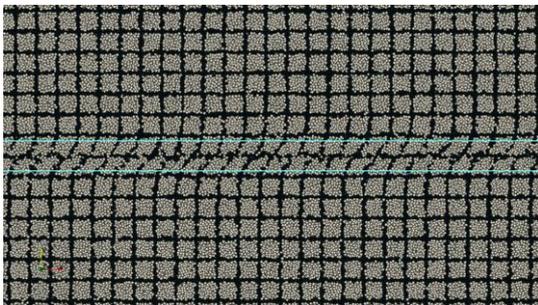


図 4.1.24 case2-3・層厚 8cm(NA8)φ材ケースの地表鉛直変位分布図

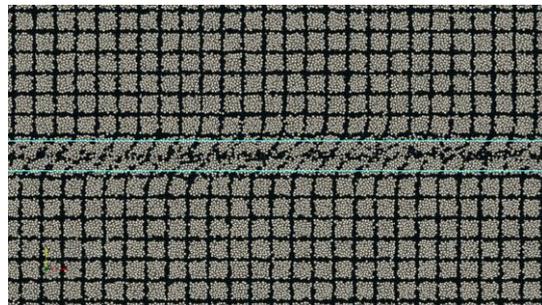
最終変位時の最大鉛直変位量(隆起側)は、土槽端部の境界部を除いて 6mm 程度となった。実験では 3.4mm の変位が計測されており、解析結果は隆起量が非常に大きくなっているが、C 材ケースと比べると実験結果に近づいている。また、C 材ケースの層厚の大きいケースで見られる全体的な沈下は認められず、強度が高いために骨格が維持されているものと考えられる。その結果として、φ材ケースで見られた極端に強い正のダイレイタンスーは見られず、本来のせん断帯の発達過程による隆起と沈降が生じているものと考えられる。なお、層厚の大きいケースはせん断の間隔が広いため、境界の影響を受けない範囲は狭く、明確な圧縮域と引張域を確認することが難しくなっている。



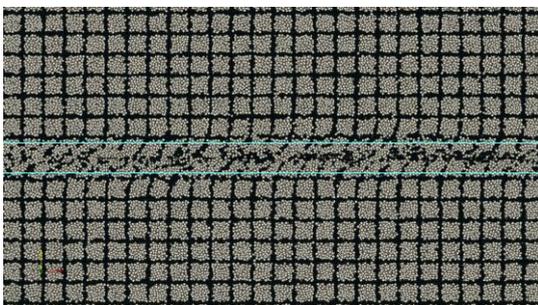
(16mm 変位時(下段: Atmaoui(2006)より))



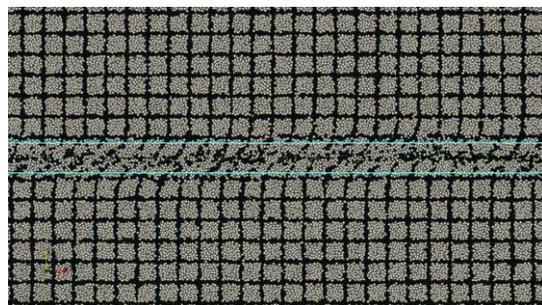
(20mm 変位時)



(40mm 変位時)



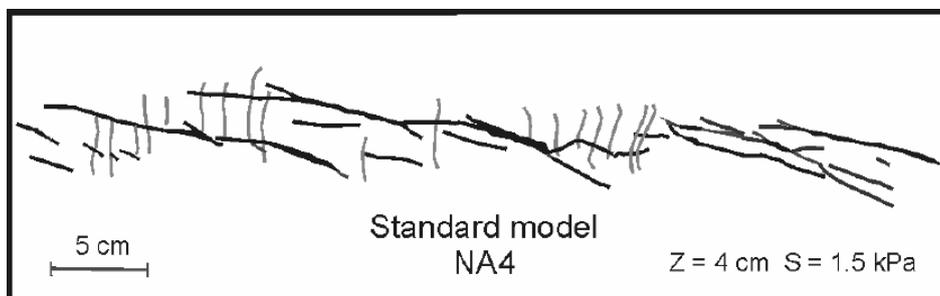
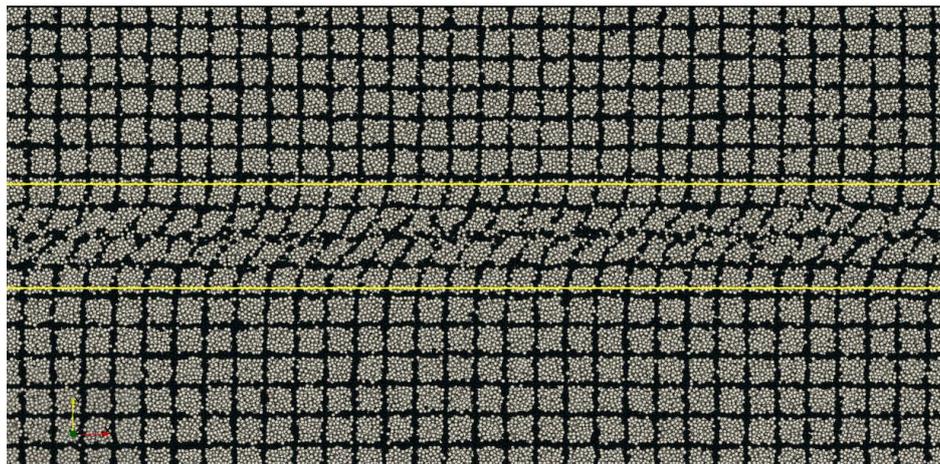
(60mm 変位時)



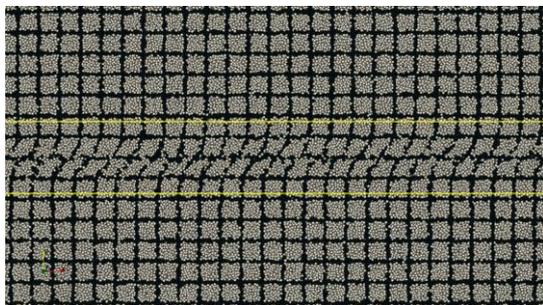
(83mm 変位時)

図 4.1.25 case1-1・層厚 2cm(NA9)C 材ケースの表層変状図

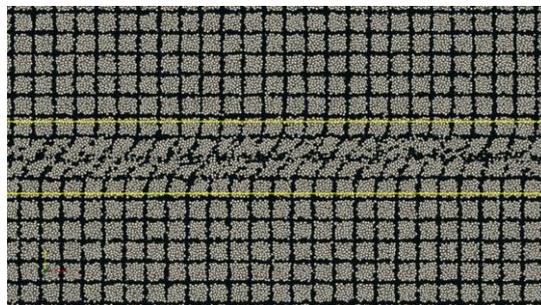
分解能のため亀裂の発生は確認できないが、せん断帯の幅は実験結果と整合的である。



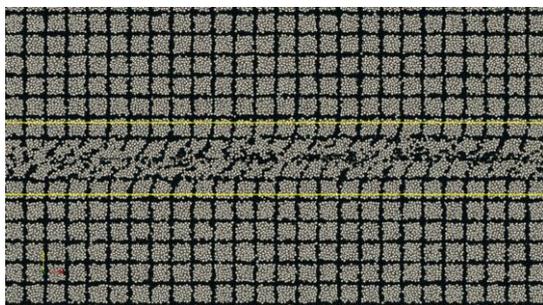
(33mm 変位時(下段: Atmaoui(2006)より))



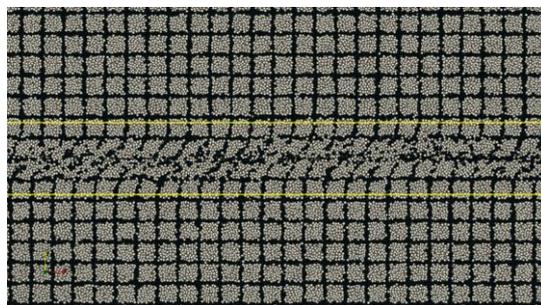
(20mm 変位時)



(40mm 変位時)



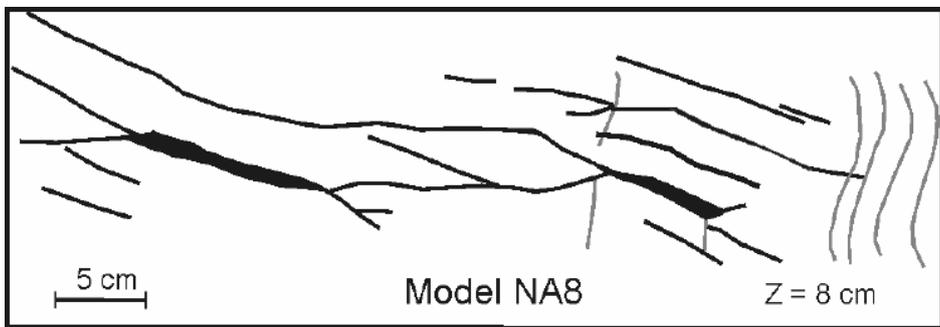
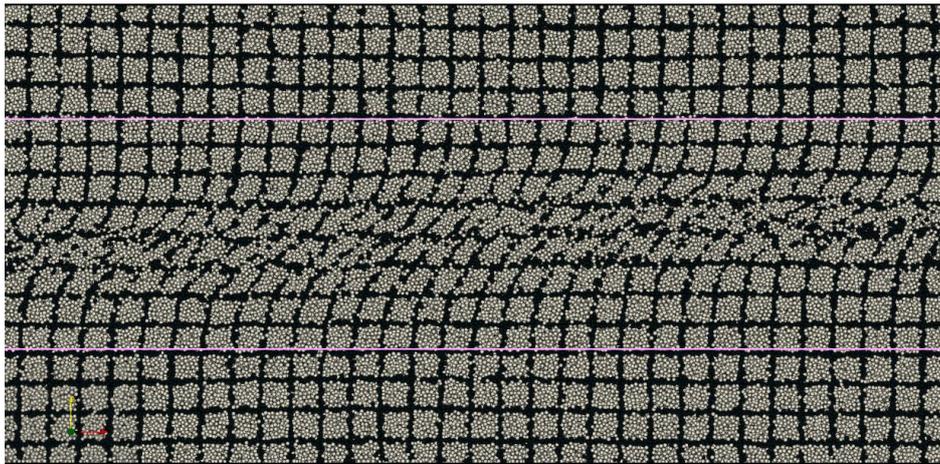
(60mm 変位時)



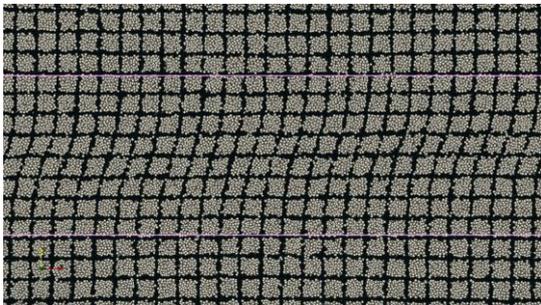
(83mm 変位時)

図 4.1.26 case1-2・層厚 4cm(NA4)C 材ケースの表層変状図

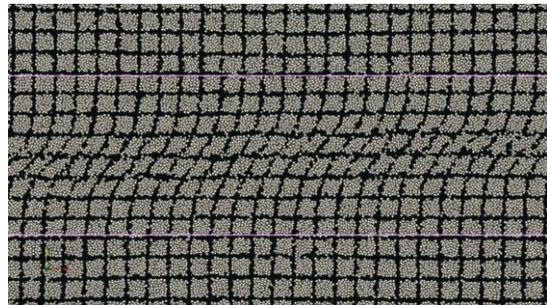
分解能のため亀裂の発生は確認できない。せん断帯の幅は実験結果と同程度かやや狭いことが確認できる。



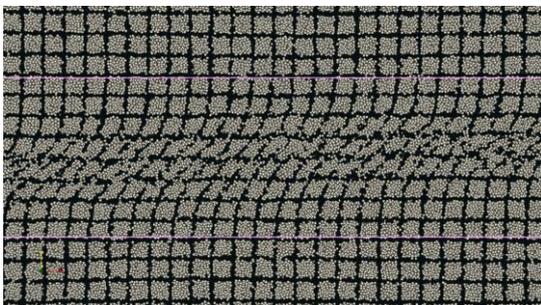
(66mm 変位時(下段: Atmaoui(2006)より))



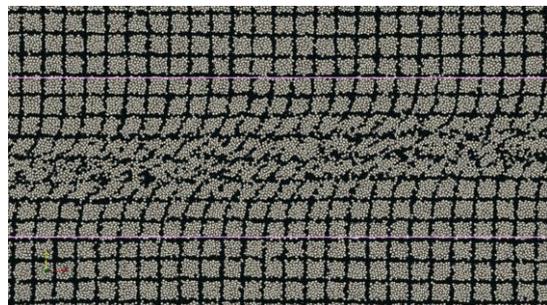
(20mm 変位時)



(40mm 変位時)



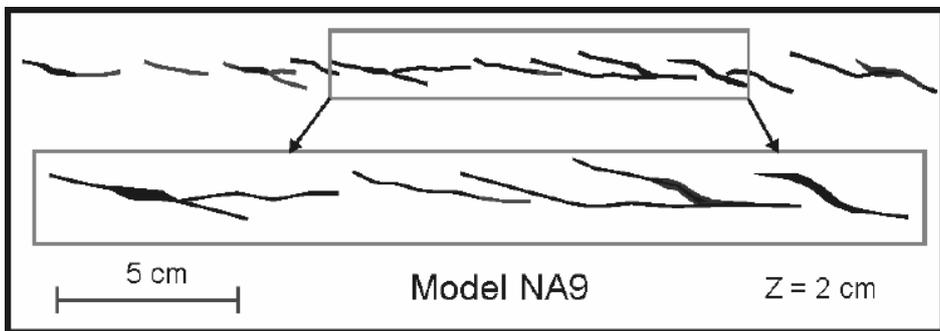
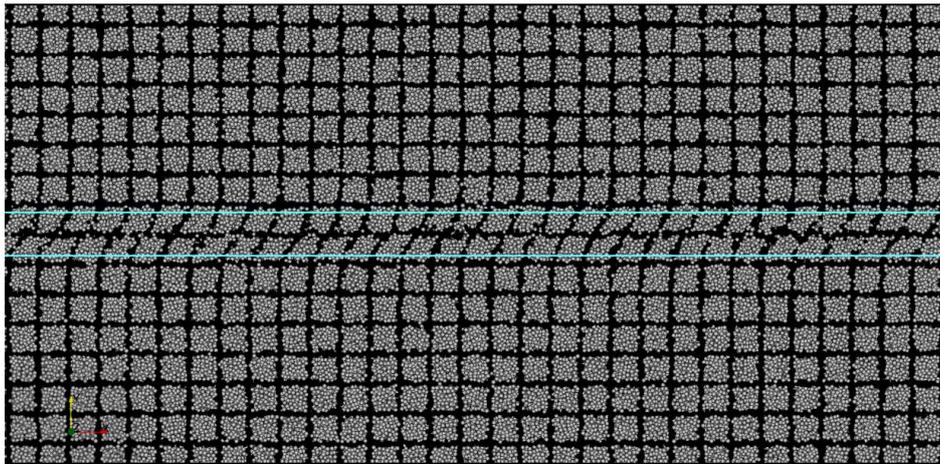
(60mm 変位時)



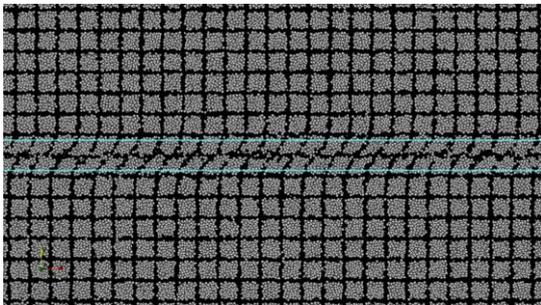
(83mm 変位時)

図 4.1.27 case1-3・層厚 8cm(NA8)C 材ケースの表層変状図

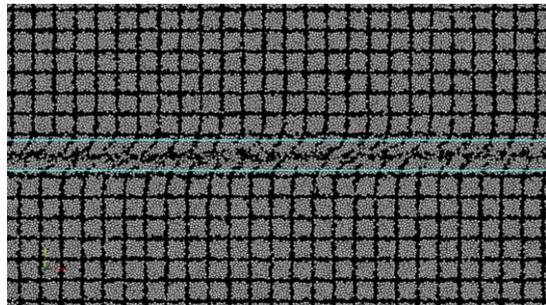
亀裂は見られない。せん断帯の幅は実験結果と同程度かやや狭いことが確認できる。



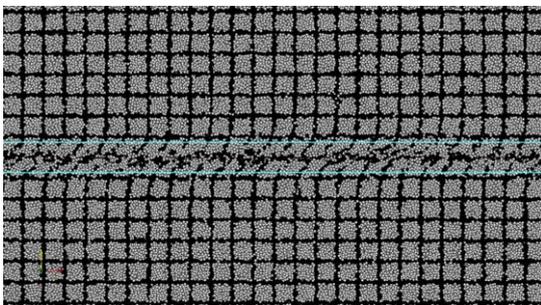
(16mm 変位時(下段: Atmaoui(2006)より))



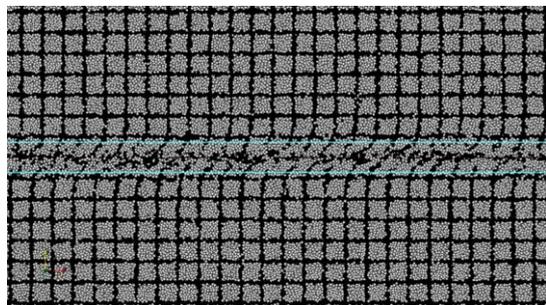
(20mm 変位時)



(40mm 変位時)



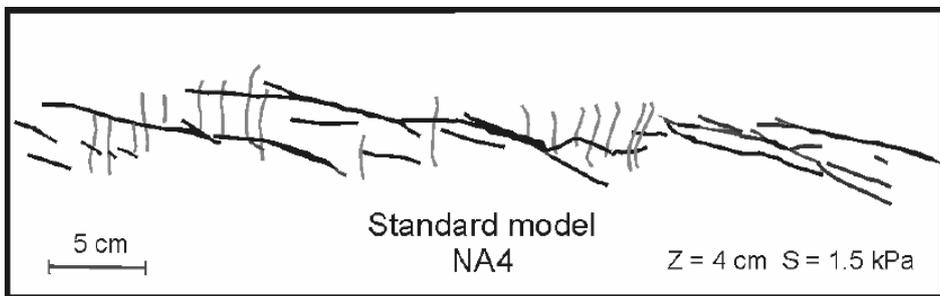
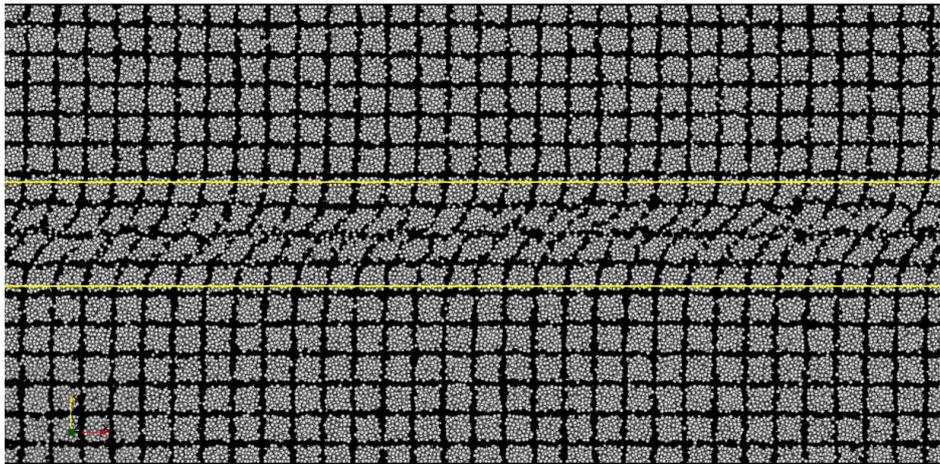
(60mm 変位時)



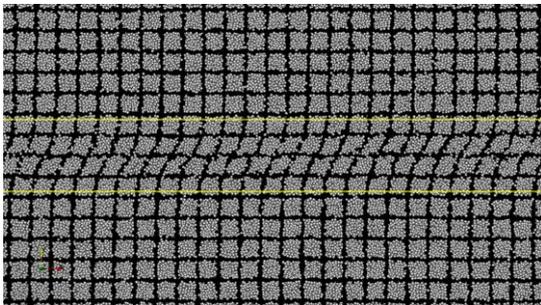
(83mm 変位時)

図 4.1.28 case2-1・層厚 2cm(NA9) φ 材ケースの表層変状図

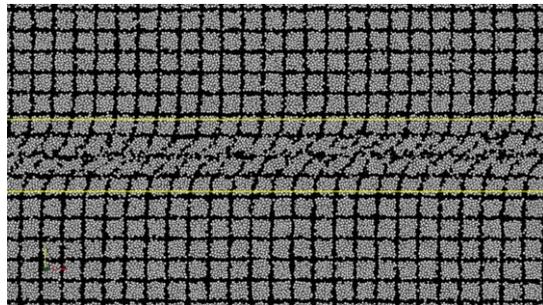
C 材ケースとの有意な違いはないが、中央部で生じている食い違いがやや明瞭である。



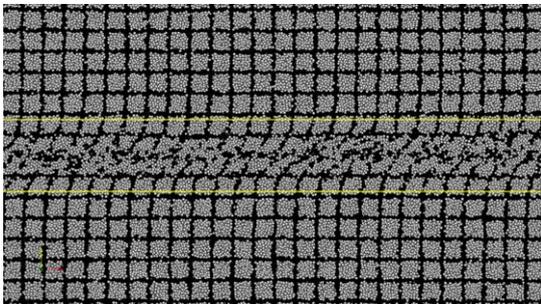
(33mm 変位時(下段: Atmaoui(2006)より))



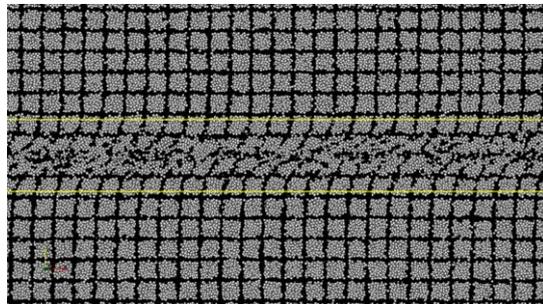
(20mm 変位時)



(40mm 変位時)



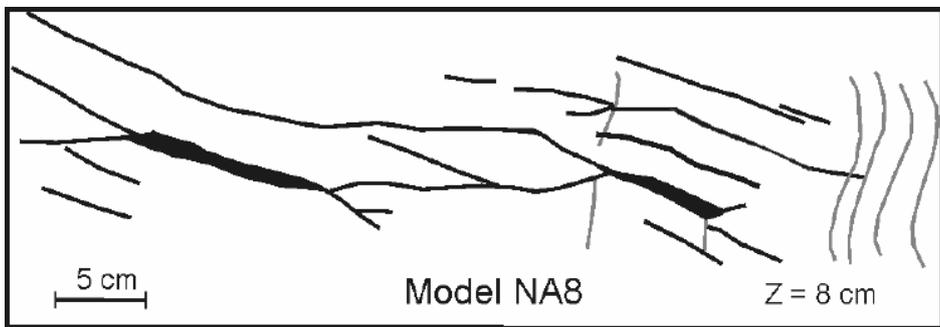
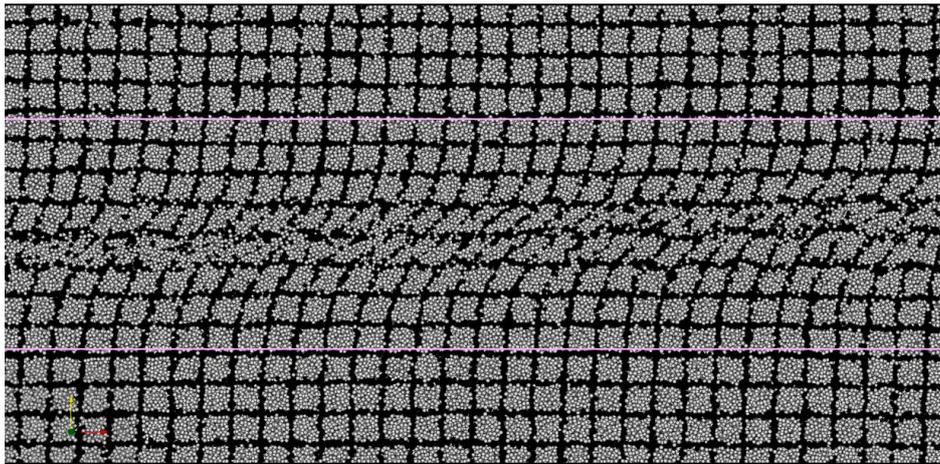
(60mm 変位時)



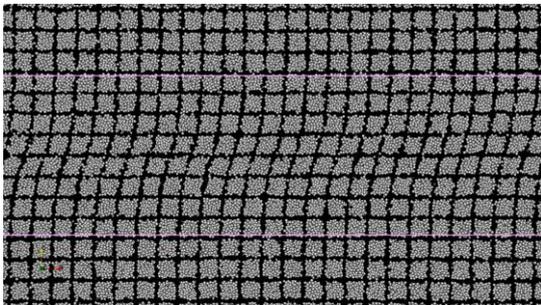
(83mm 変位時)

図 4.1.29 case2-2・層厚 4cm(NA4)φ材ケースの表層変状図

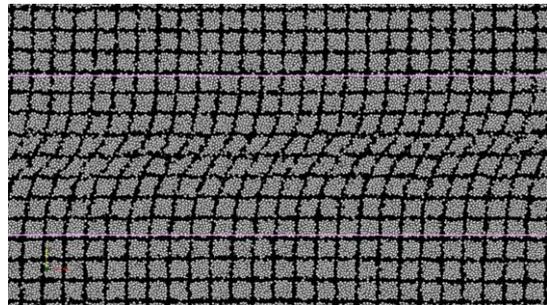
C材ケースと同様の傾向であり、実験とせん断帯の幅は整合的である。C材ケースと比べると食い違いがやや明瞭で格子変状の傾斜が鋭角である。



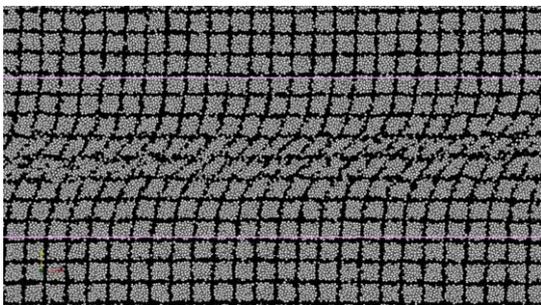
(66mm 変位時(下段: Atmaoui(2006)より))



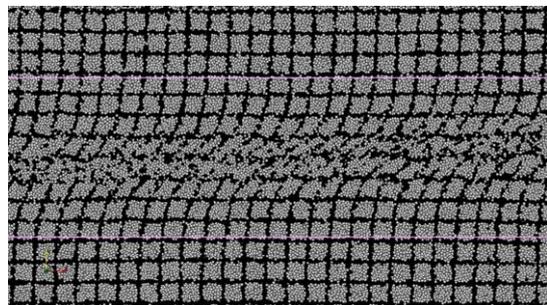
(20mm 変位時)



(40mm 変位時)



(60mm 変位時)



(83mm 変位時)

図 4.1.30 case2-3・層厚 8cm(NA8) φ 材ケースの表層変状図

C 材ケースと同様の傾向であるが、せん断帯の幅がやや狭い。食い違いが明瞭である。

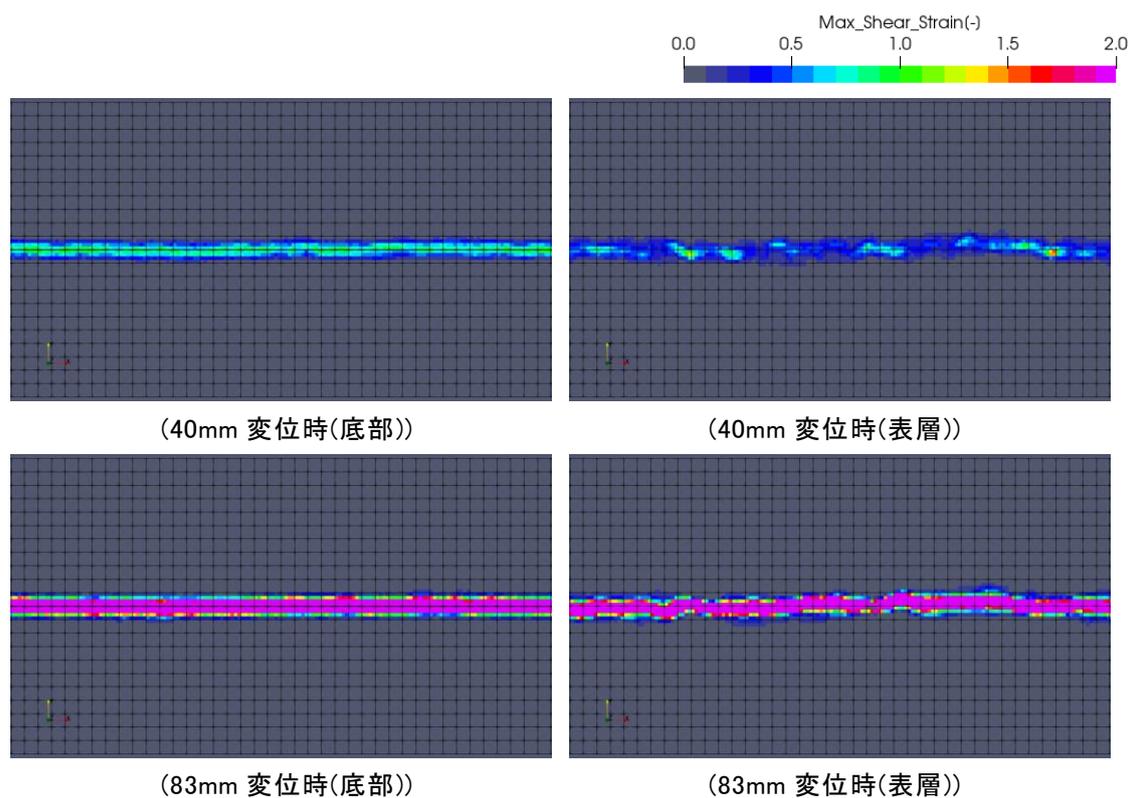


図 4.1.31 case1-1・層厚 2cm(NA9)C 材ケースの最大せん断ひずみ分布図

せん断ひずみ計算における格子分解能からせん断帯の発達を確認することは難しいが、底部に入力された食い違い変位による影響は、層厚が小さいこともあってほぼ直上しており広がり狭い。粘性土の場合は広がりにくい傾向があり、解析結果も同様の傾向であると考えられる。

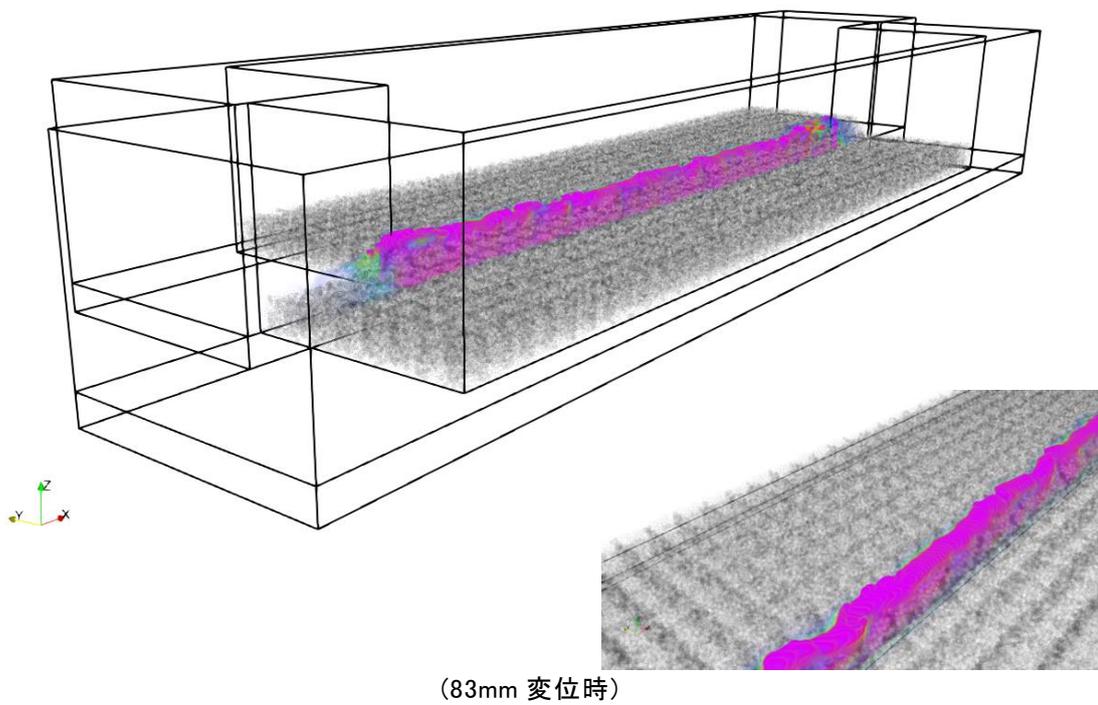
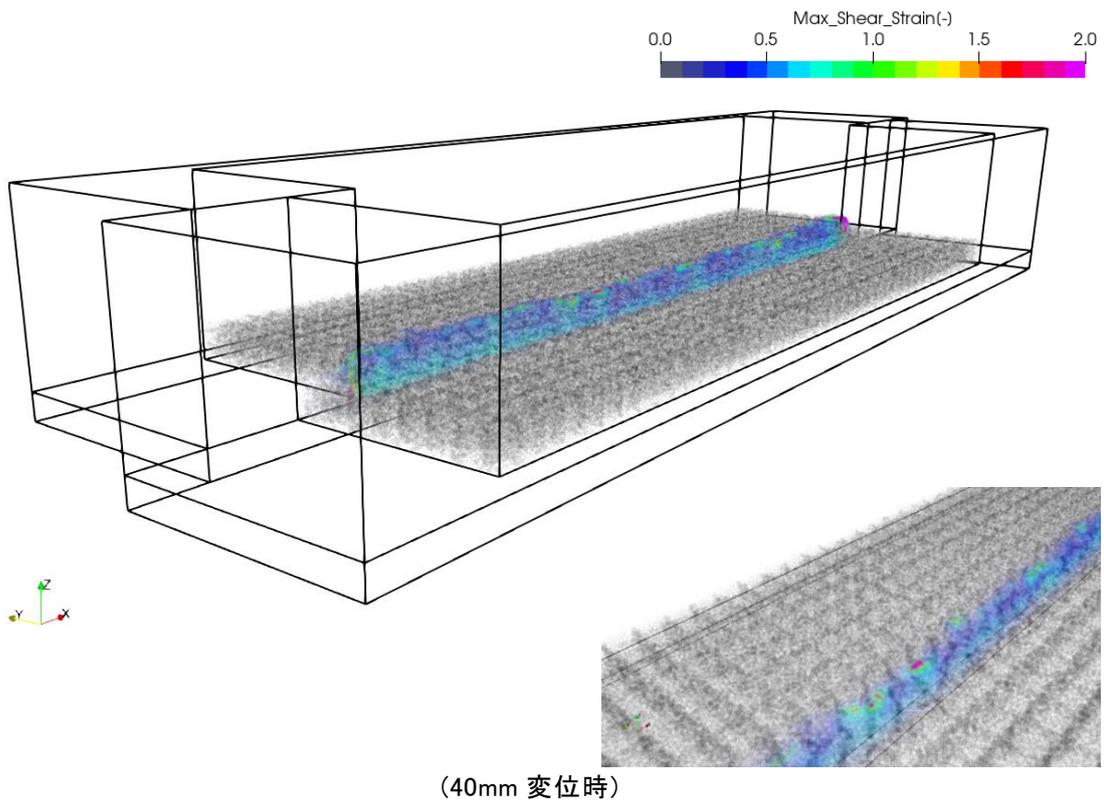


図 4.1.32 case1-1・層厚 2cm(NA9)C 材ケースの最大せん断ひずみ分布図
(ボリュームレンダリング)

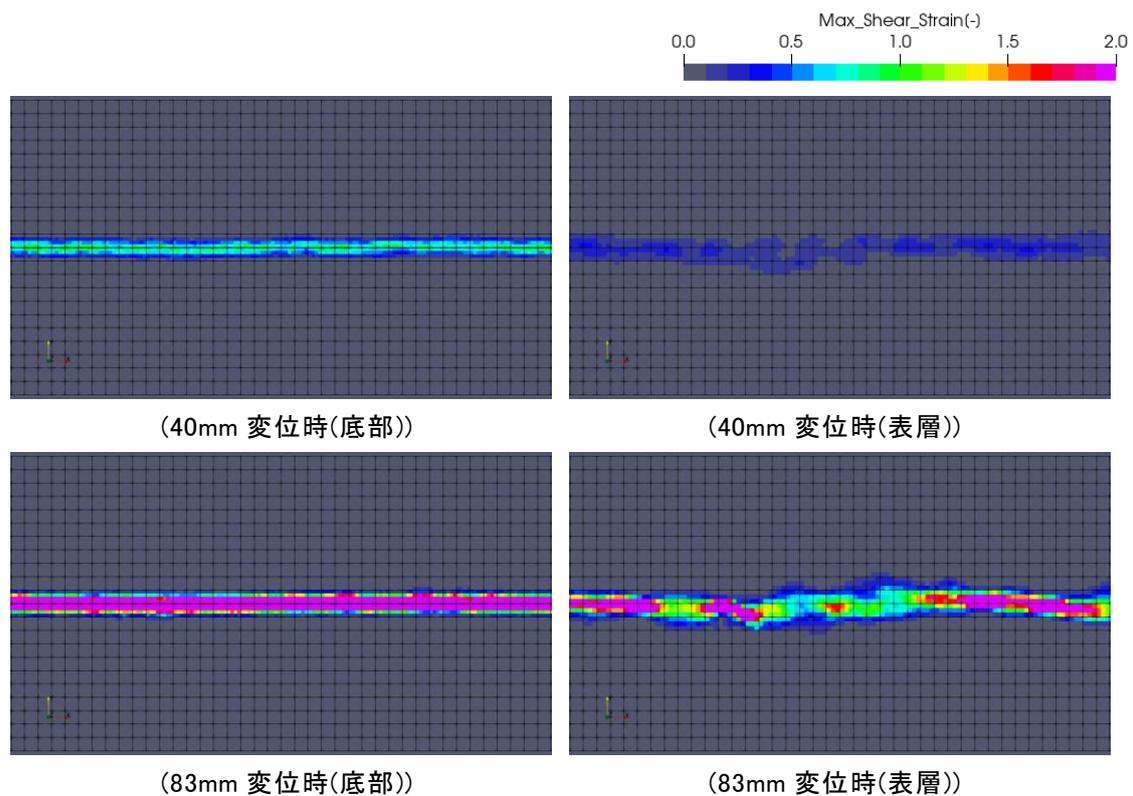


図 4.1.33 case1-2・層厚 4cm(NA4)C 材ケースの最大せん断ひずみ分布図

せん断ひずみ計算における格子分解能からせん断帯の発達を確認することは難しいが、底部に入力された食い違い変位による影響は、上昇する過程でやや広がり持ち、ひずみの絶対値としては小さくなっている。粘性土の場合は乾燥砂などに比べて広がりが狭いが、解析と実験結果は整合的であると考えられる。

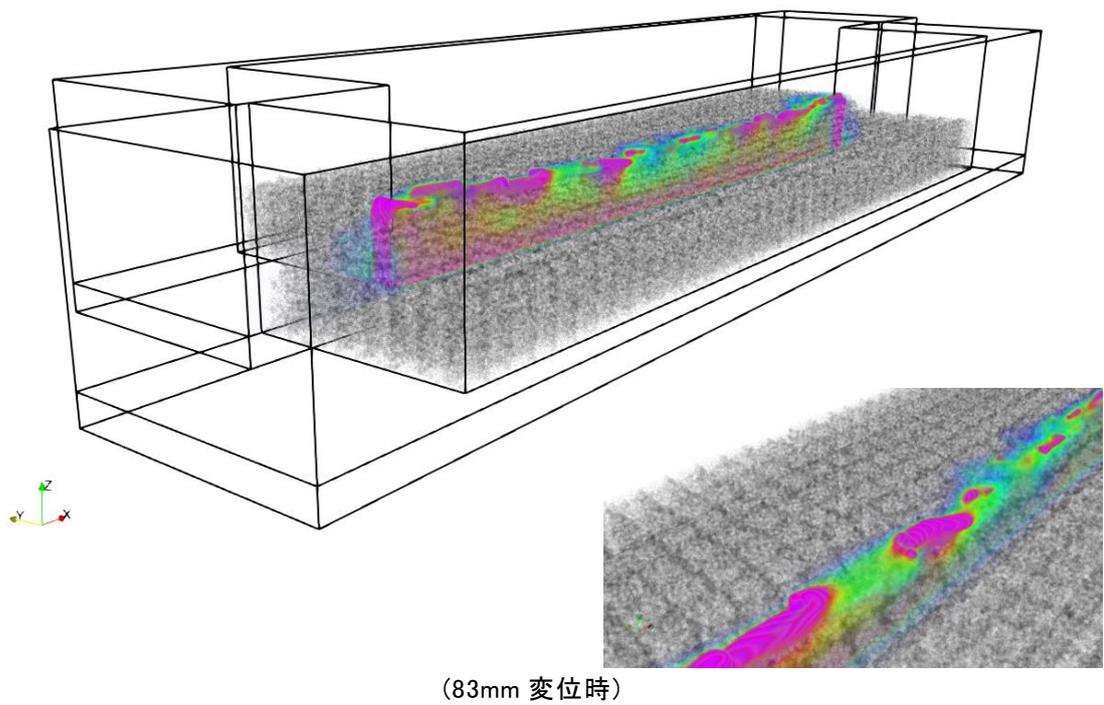
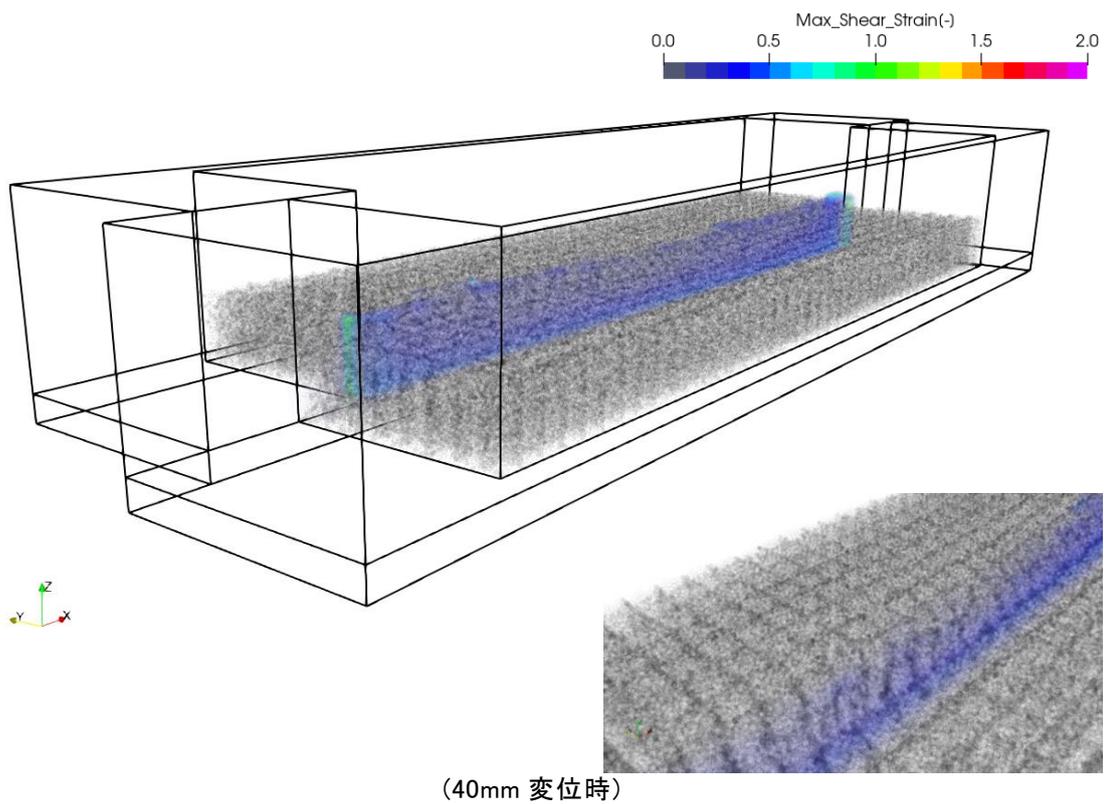


図 4.1.34 case1-2・層厚 4cm(NA4)C 材ケースの最大せん断ひずみ分布図
(ボリュームレンダリング)

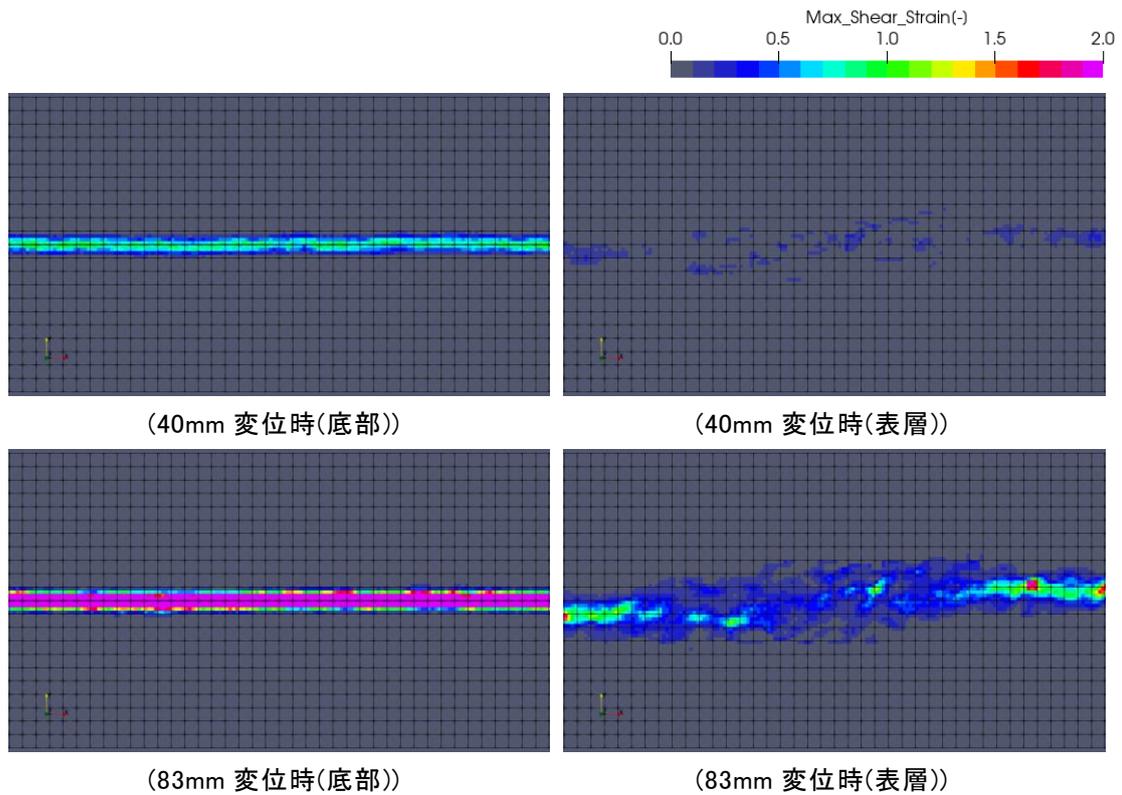


図 4.1.35 case1-3・層厚 8cm(NA8)C 材ケースの最大せん断ひずみ分布図

せん断ひずみ計算における格子分解能からせん断帯の発達を確認することは難しい。底部に入力された食い違い変位による影響は、層厚が大きくなると上昇する過程でせん断ひずみ量が小さくなるため確認し難くなるが、表層に近づくほど広く分布していることが確認できる。解析結果は実験結果と比べるとせん断帯の広がりやや狭い。

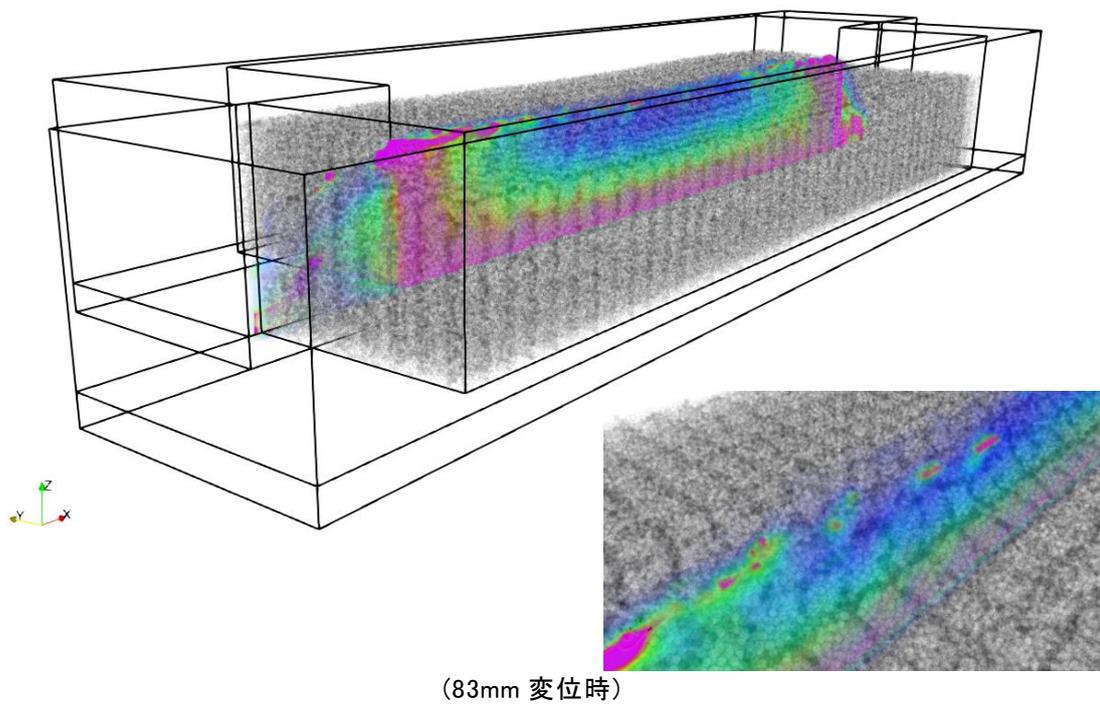
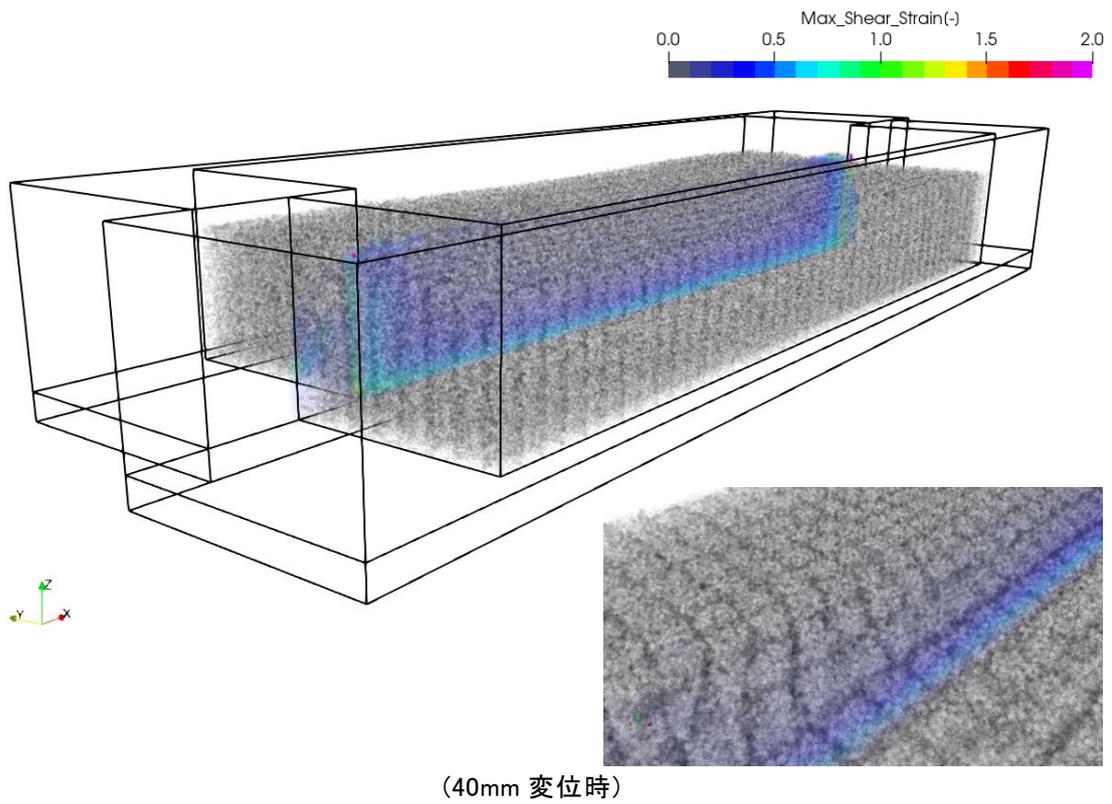


図 4.1.36 case1-3・層厚 8cm(NA8)C 材ケースの最大せん断ひずみ分布図
(ボリュームレンダリング)

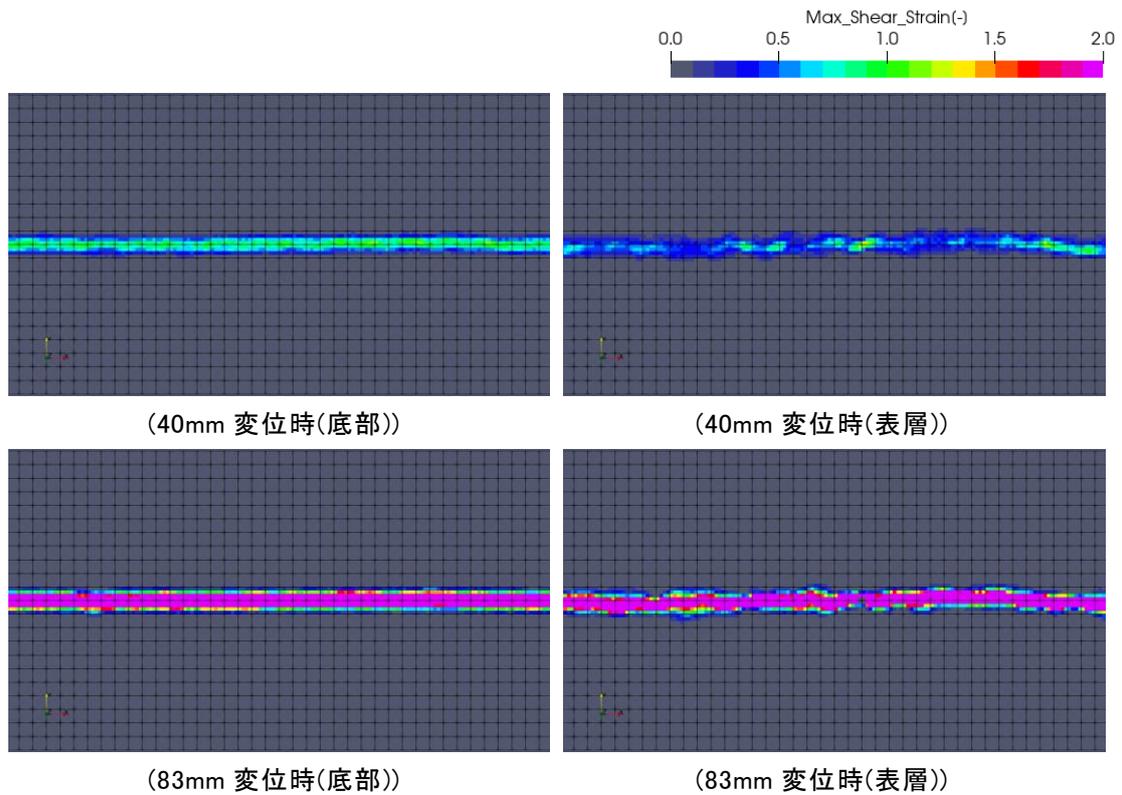


図 4.1.37 case2-1・層厚 2cm(NA9)φ材ケースの最大せん断ひずみ分布図

せん断ひずみ計算における格子分解能からせん断帯の発達を確認することは難しいが、層厚が小さいケースではC材とφ材の違いは殆ど見られない。せん断帯の幅は実験結果と整合的である。

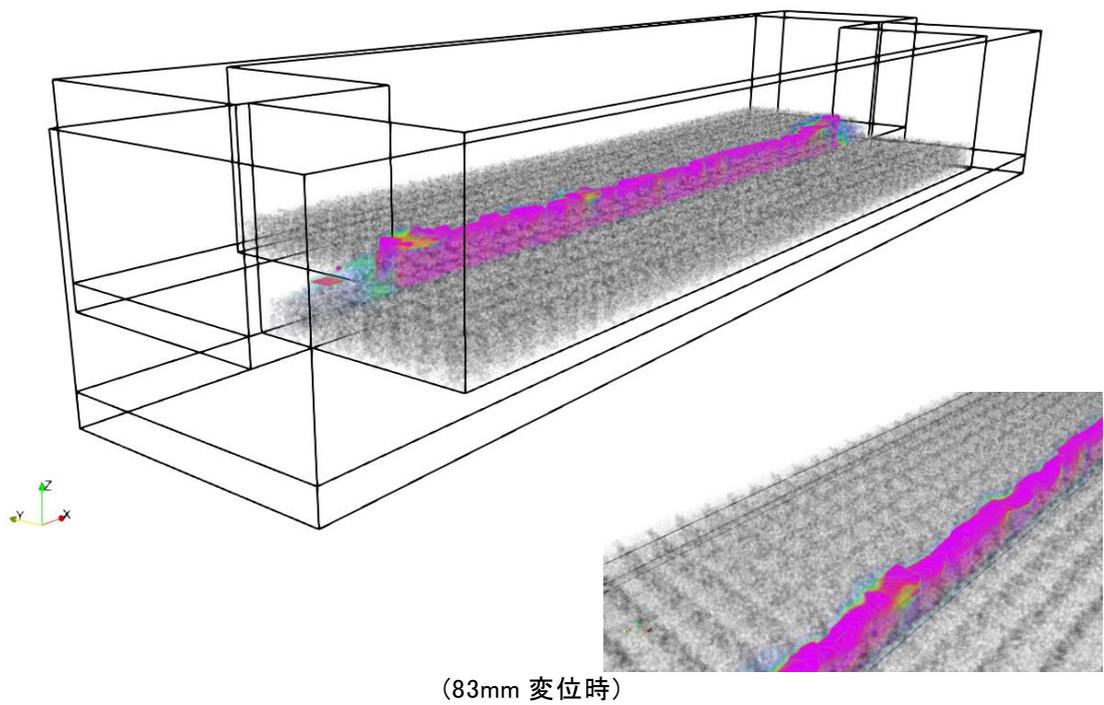
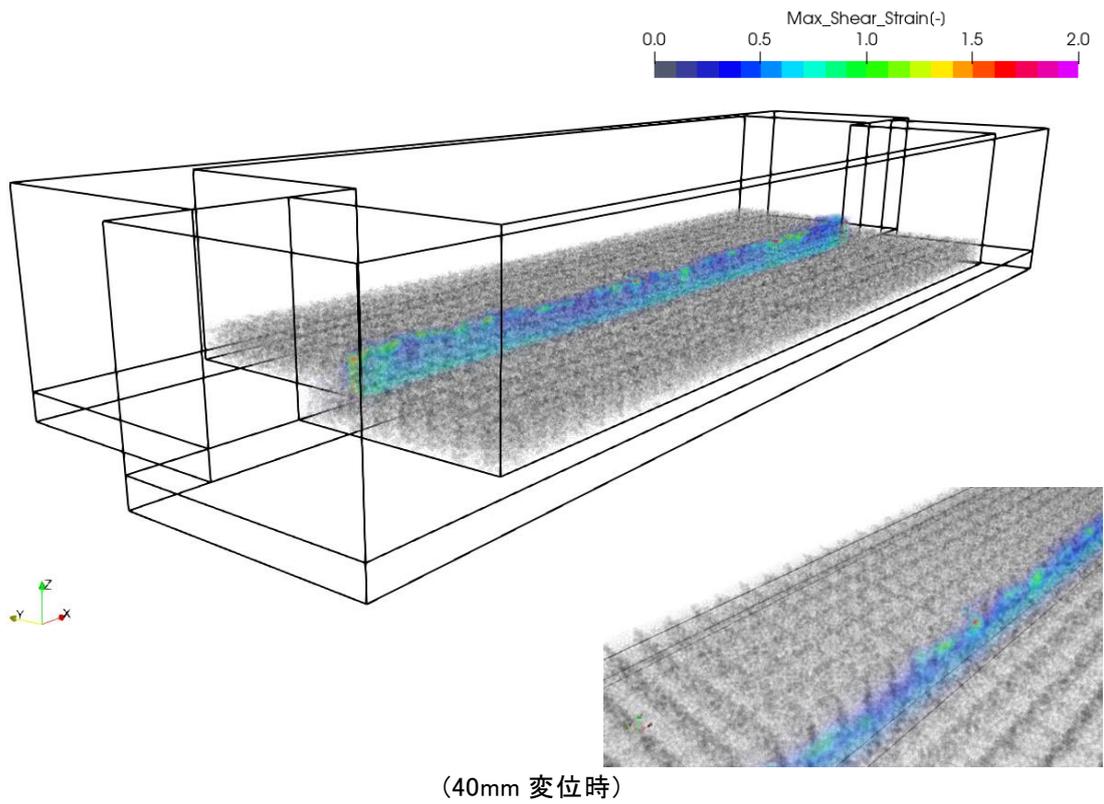


図 4.1.38 case2-1・層厚 2cm(NA9)φ材ケースの最大せん断ひずみ分布図
(ボリュームレンダリング)

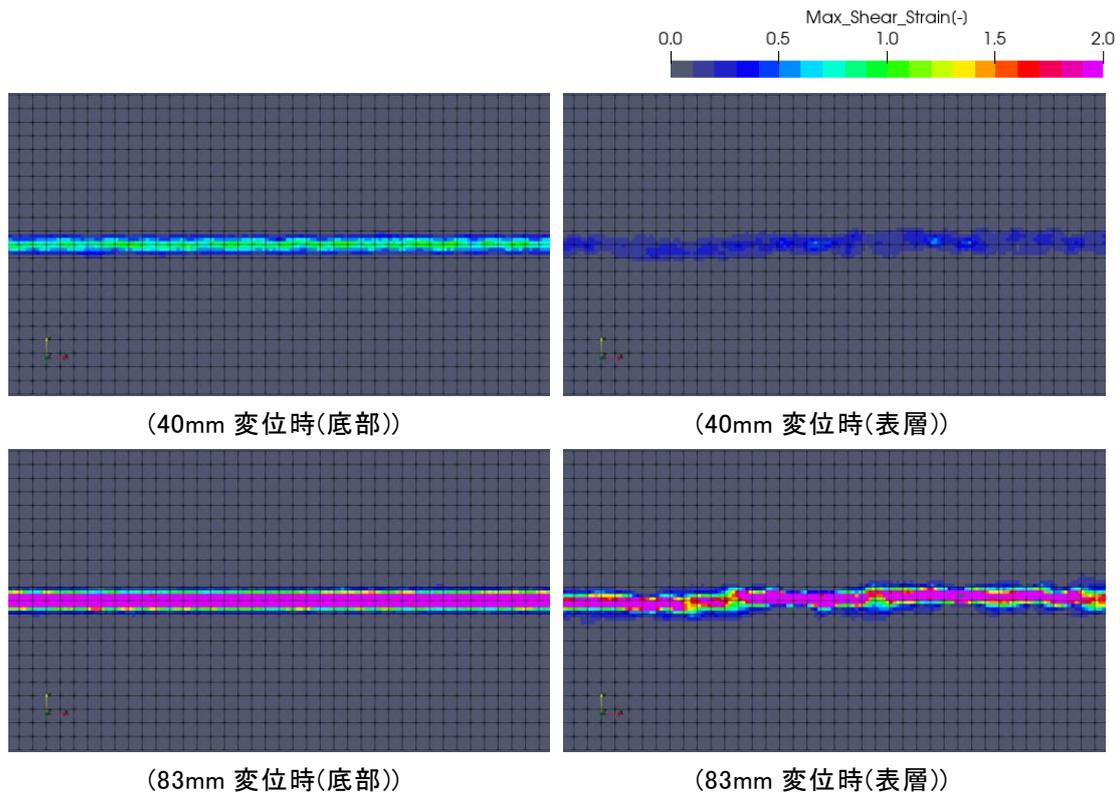
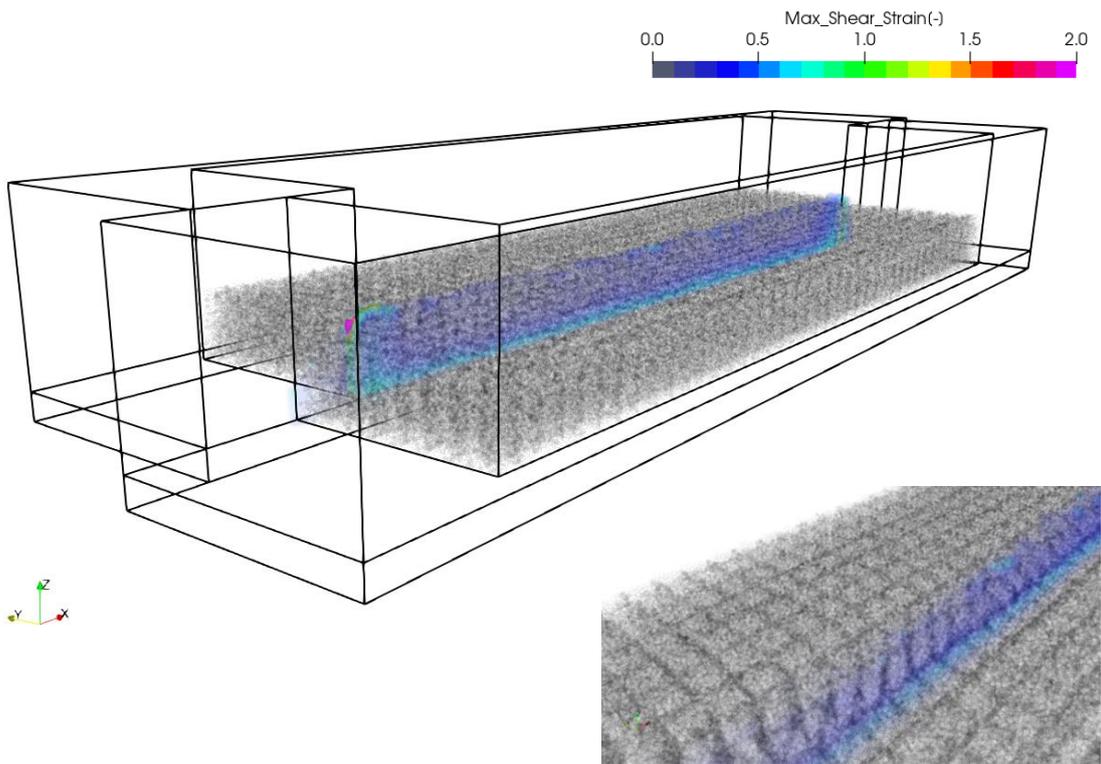
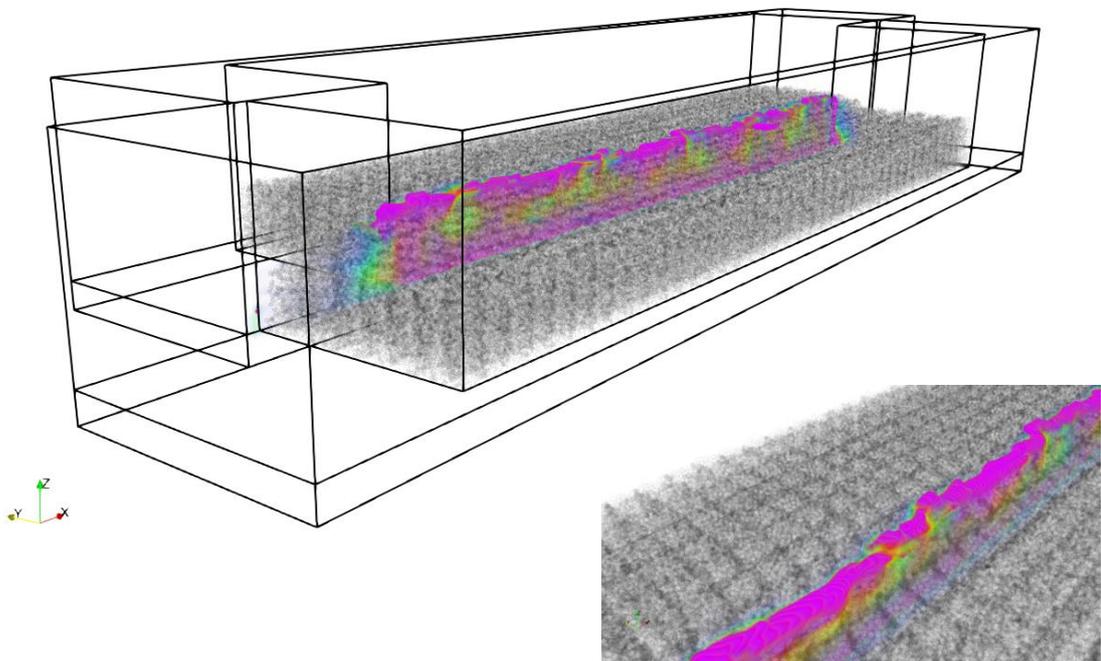


図 4.1.39 case2-2・層厚 4cm(NA4)φ材ケースの最大せん断ひずみ分布図

せん断ひずみ計算における格子分解能からせん断帯の発達を確認することは難しいが、40mm 変位入力段階では C 材との有意な違いは見られない。一方で、最終変位時のせん断帯の幅は明らかに狭く、実験結果と比較しても狭いことが確認できる。層厚が増すと強度が高いためか、ある程度大きな変位域まで狭い範囲で耐えた後は、せん断帯を広げることなく中央部のせん断ひずみのみ大きくなる結果となった。



(40mm 変位時)



(83mm 変位時)

図 4.1.40 case2-2・層厚 4cm(NA4)φ材ケースの最大せん断ひずみ分布図
(ボリュームレンダリング)

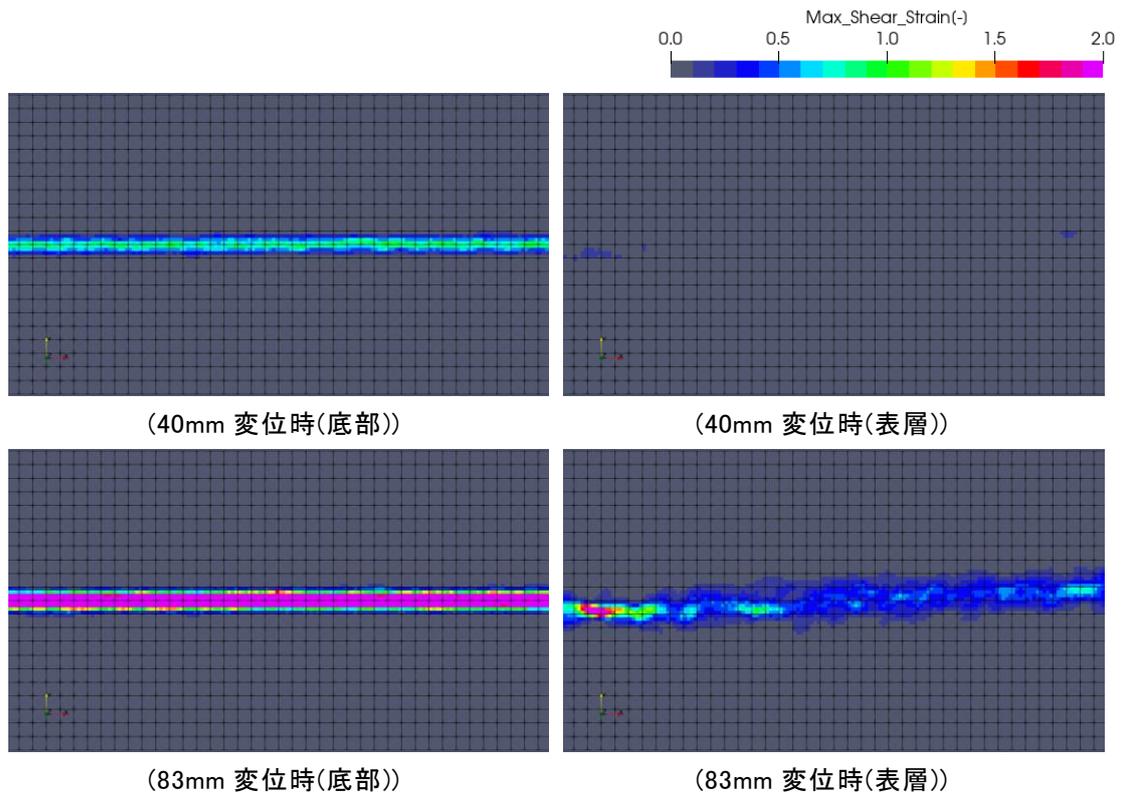


図 4.1.41 case2-3・層厚 8cm(NA8)φ材ケースの最大せん断ひずみ分布図

せん断ひずみ計算における格子分解能からせん断帯の発達を確認することは難しい。40mm 変位入力段階では C 材との有意な違いは見られないが、表層のせん断ひずみ量はやや小さくなっている。また、最終変位時のせん断帯の幅は明らかに狭く、実験結果と比較しても狭いことが確認できる。4cm ケースと同様に、層厚が増すと強度が高いためか、ある程度大きな変位域まで狭い範囲で耐えた後は、せん断帯を広げることなく中央部のせん断ひずみのみ大きくなる結果となった。

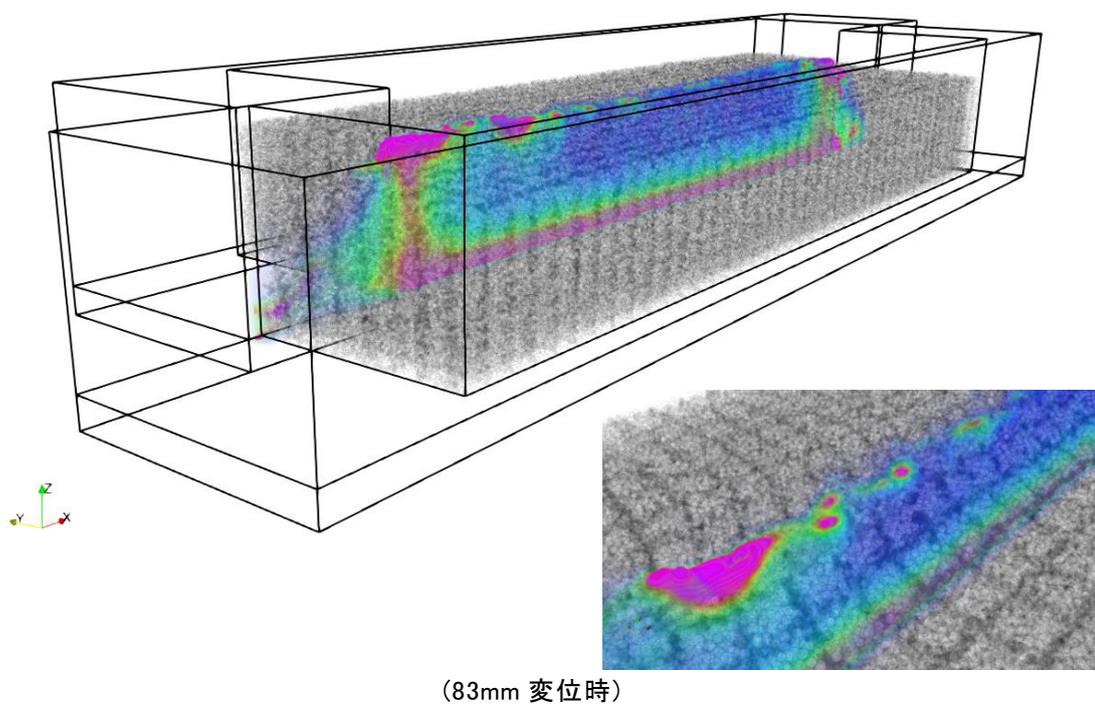
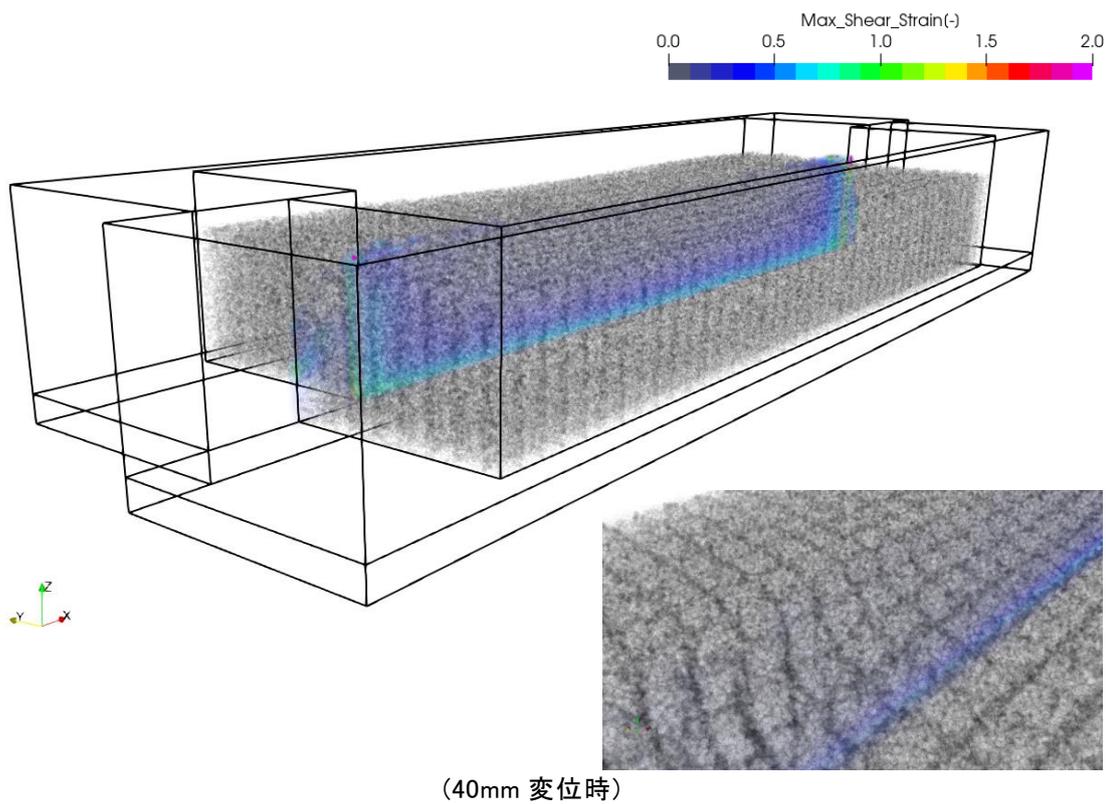


図 4.1.42 case2-3・層厚 8cm(NA8)φ材ケースの最大せん断ひずみ分布図
(ボリュームレンダリング)

4.2. 室内模型実験の再現解析 2・逆断層タイプ

逆断層タイプを対象とした室内模擬実験について、Bonanno (2017)の実験を以下の着目点から対象候補として選定した。

- 1) 縦ずれ断層の想定であり 2次元解析による高分解能の検討が可能。
- 2) デジタル画像相関法(DIC)を用いた結果処理をしており解析と高い親和性を持つ。

4.2.1. 室内模型実験概要

4.2.1.1. 実験装置

図 4.2.1 に、対象とした室内模擬実験の実験装置と赤枠内に解析対象ケースを示す。

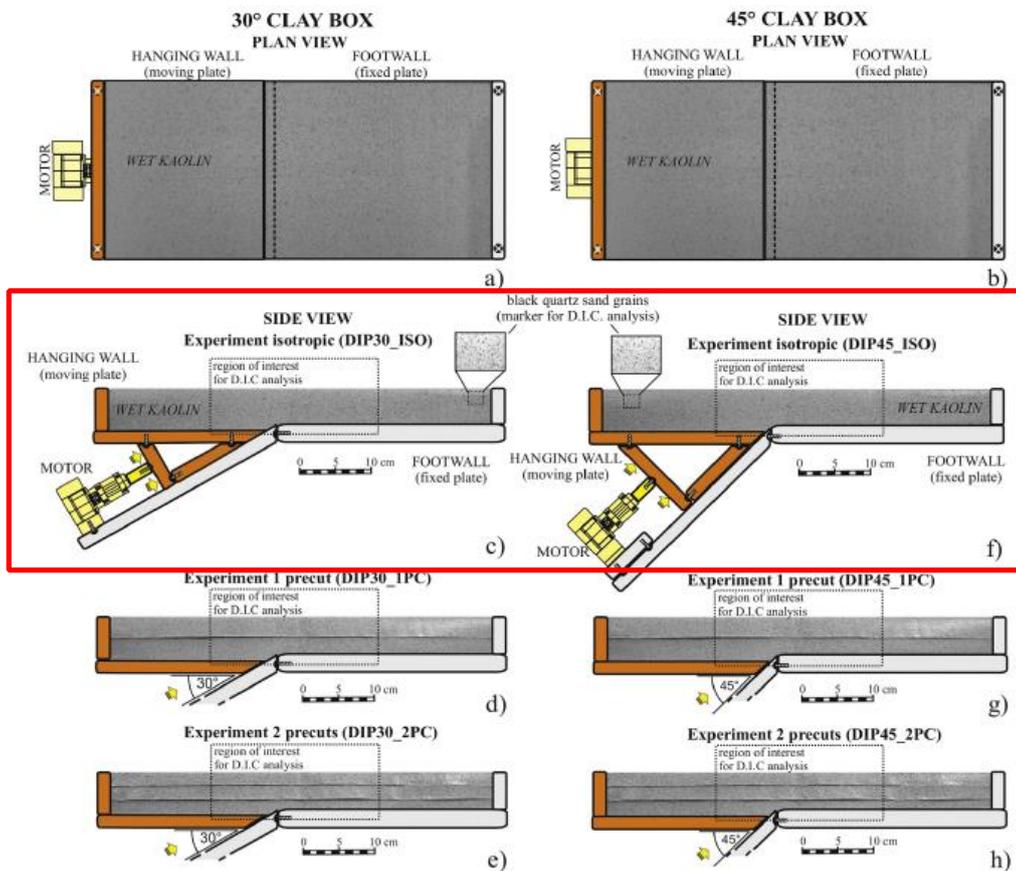


Fig. 1. Schematic representation of the experimental apparatus with two different setups: 30° clay box (left column), and 45° clay box (right column). a) and b) are the plan view of both boxes. c), d), e) f), g), h) show the side view for all the configurations, both isotropic and with precuts. Orange colour marks the mobile parts.(For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

図 4.2.1 実験装置(Bonanno (2017)Fig.1 に赤枠を加筆)

対象実験は、傾斜角を 30° と 45° とした 2つのモデルに対し、試料が単層/2層/3層の 3つのパターンについて実施し、また供試体の層厚は各モデルに共通で 50mm としている。本検討における再現解析では、上記の単層の 2ケースのみを対象に実施した。

4.2.1.2. モデル物性値

表 4.2.1 に Bonanno (2017)において整理された供試体材料の湿潤カオリン粘土のモデル物性値を示す。

表 4.2.1 モデル物性値

項目	物性値
含水比	60%
湿潤密度	1.65(g/cm ³)
粘着力	50~120(Pa)
間隙比(間隙率)	1.618(0.618)

(間隙比は含水比と湿潤密度から計算した。)

4.2.1.3. 実験結果

図 4.2.2～図 4.2.4 に解析対象の実験結果の例を示す。図 4.2.2 は全 6 ケースの 0.5cm 毎の入力変位時の表面高さの分布を整理したものであり、横軸の 0 が主断層の先端位置を示す。低角度のケースで水平反力による地盤変状が強く生じる結果となっている。

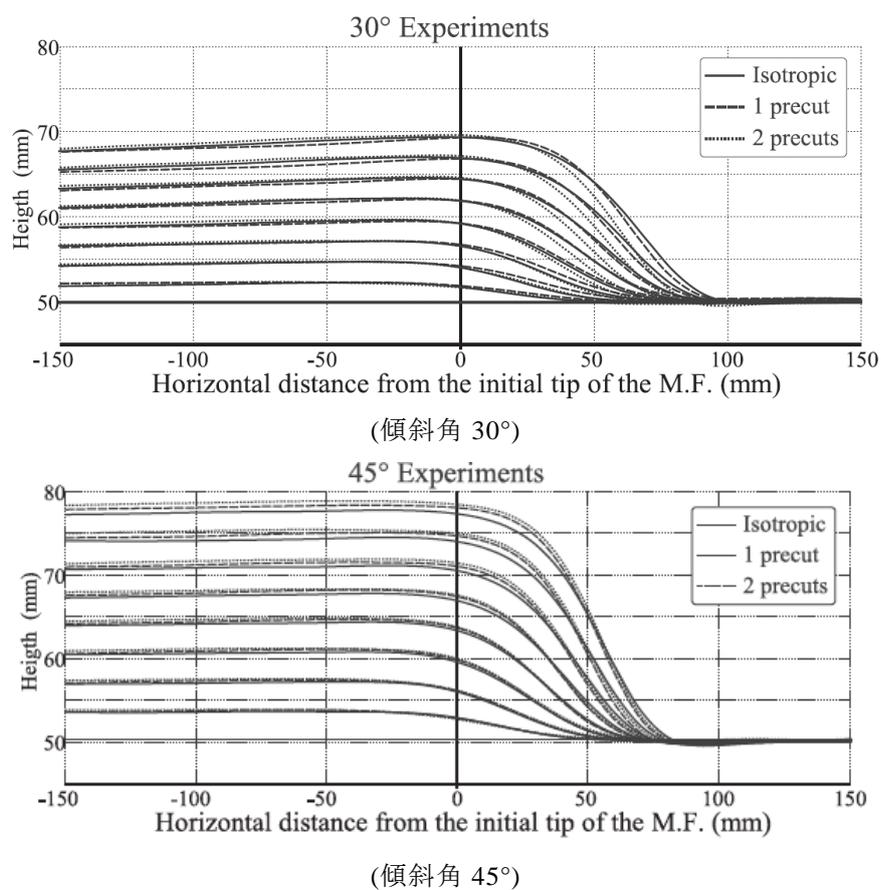


図 4.2.2 上盤側の断層位置を基準点とする表面鉛直変位の分布(断層変位 0.5cm 刻み毎)
(Bonanno (2017)Fig.11 から)

図 4.2.3 と図 4.2.4 に DIC 処理からコンター表現を行った各ケースの土層内の変位分布の履歴を示す。黒線は亀裂の進展を図示したものである。なお、0.5cm 入力時に主断層の先端が下盤側の土層下端より下にあり、これは実験装置で断層角度を変更する機構による仕様と考えられる。なお、後述の数値解析では上盤側の層厚が下盤側に対して厚いことについては考慮せずにモデル化を行っている。

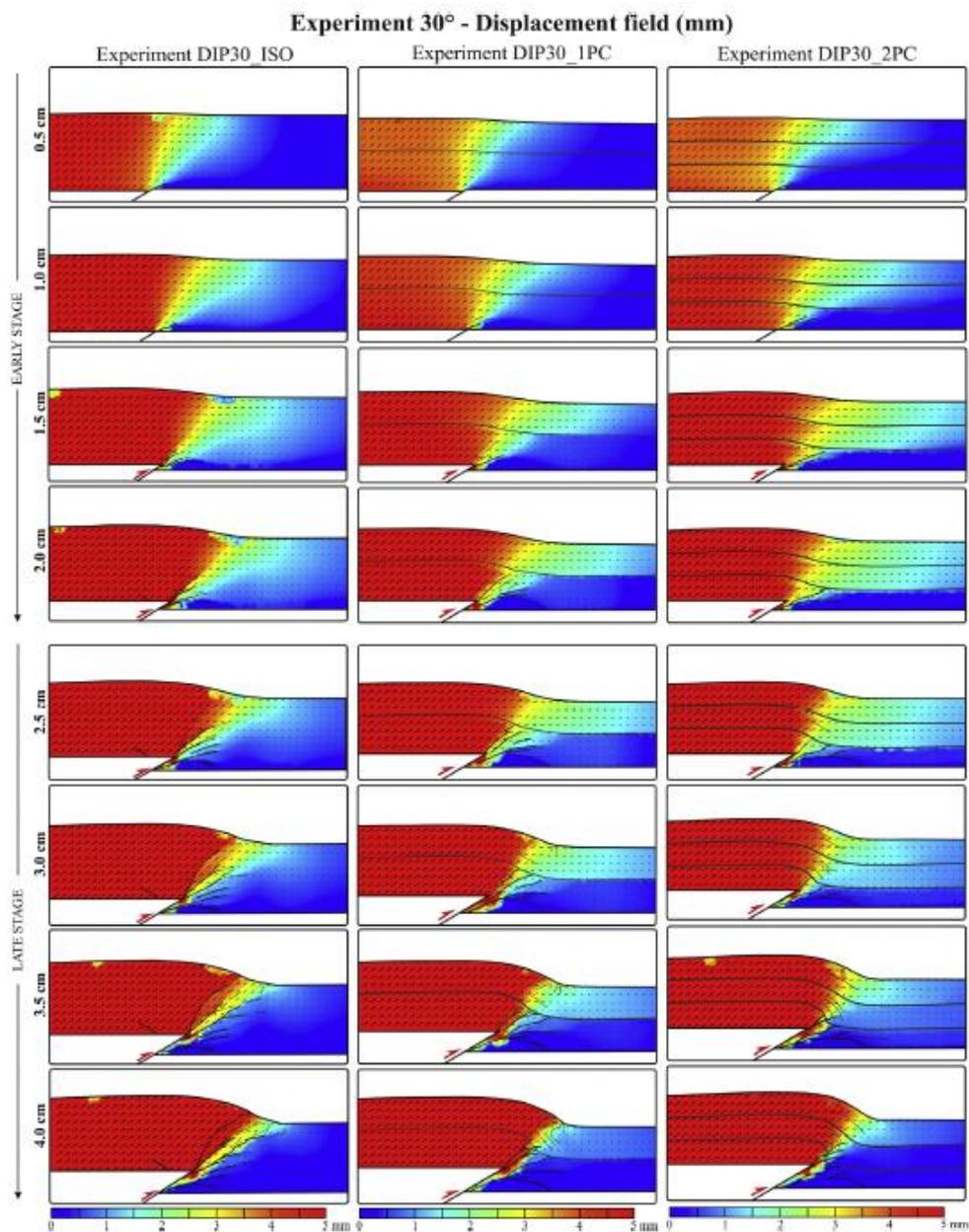


図 4.2.3 DIC 処理による変位分布図(傾斜角 30°)

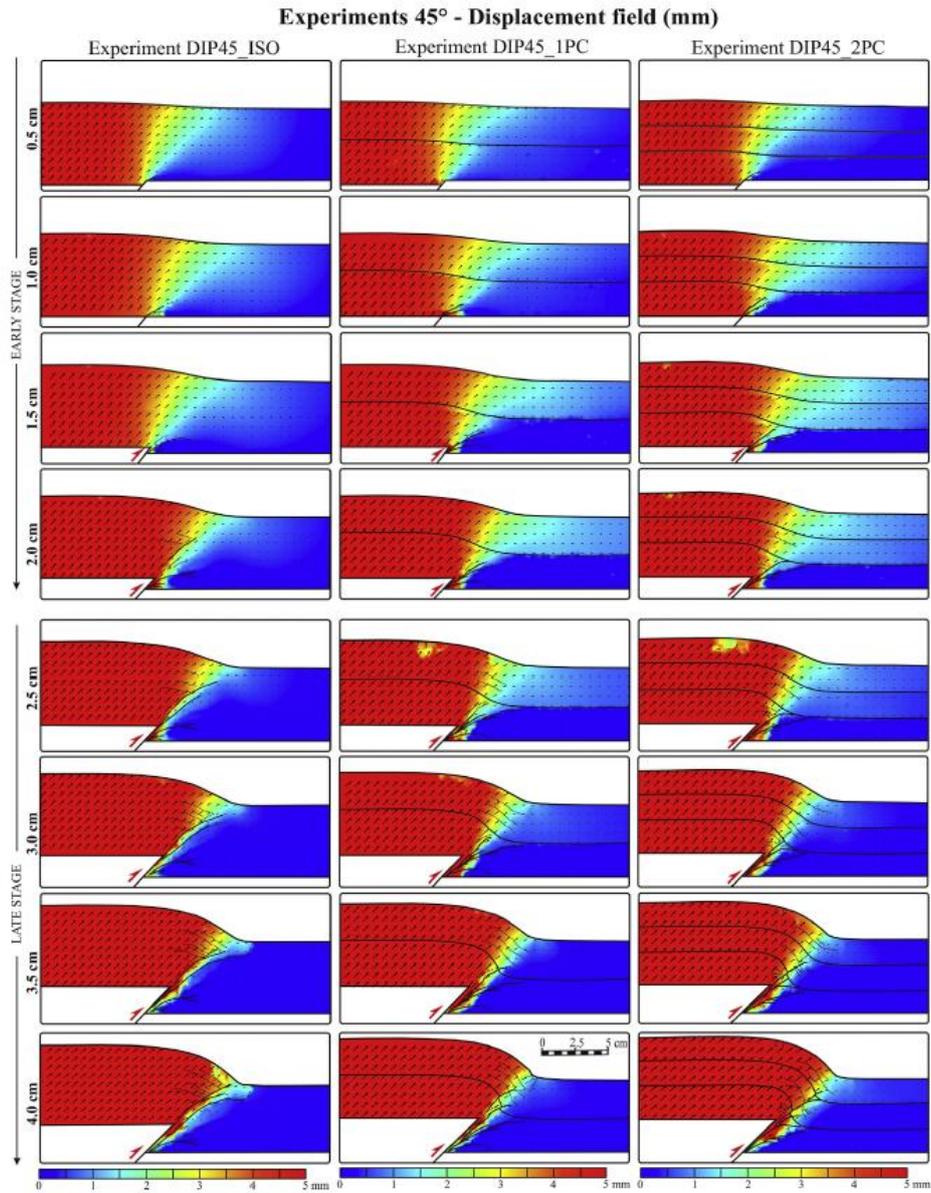


Fig. 7. Displacement field analysis in experiments with master fault dipping 45° for three different configurations: isotropic (_ISO), one precut (_1PC), and two precuts (_2PC). Each row shows the displacement field after every 5 mm of displacement on the master fault. Black arrows represent the displacement vectors. The traces of faults, fractures, and precuts are also shown.

図 4.2.4 DIC 処理による変位分布図(傾斜角 45°)

4.2.2. 再現解析

4.2.2.1. 解析モデル

図 4.2.5 に作成した傾斜角 30° および 45° の再現解析モデルを示す。なお、表 4.2.2 の粒径分布に基づき、モデル全体の間隙率が 0.2 になるように作成を行っており、間隙率の設定にあたっては既往検討で得られている知見を反映している。縦ずれ模型実験を対象とした 2 次元解析としては、平成 30 年度（平成 30 年度報告書を参照されたい）において米粉のアナログ実験の再現解析を行っており、固着力を考慮した比較的間隙率の小さい条件の個別要素法解析を実施している。その際の解析結果の傾向として以下の事項があった。

- ・作成した 2 次元解析モデルは間隙率が小さく、非常に正のダイレイタンスが強い。
- ・特に水平方向成分の影響の大きい 30 度ケースで地盤変状結果の乖離が大きい。
- ・一方で、60 度ケースでは崩壊箇所の落ち込みが大きいと同様の崩壊形状が見られた。

これらの知見を反映して、本再現解析の解析モデルでは間隙率があまり密とならないように調整を行い、強度特性との兼ね合いで最終的に間隙率を 0.2 に設定した。

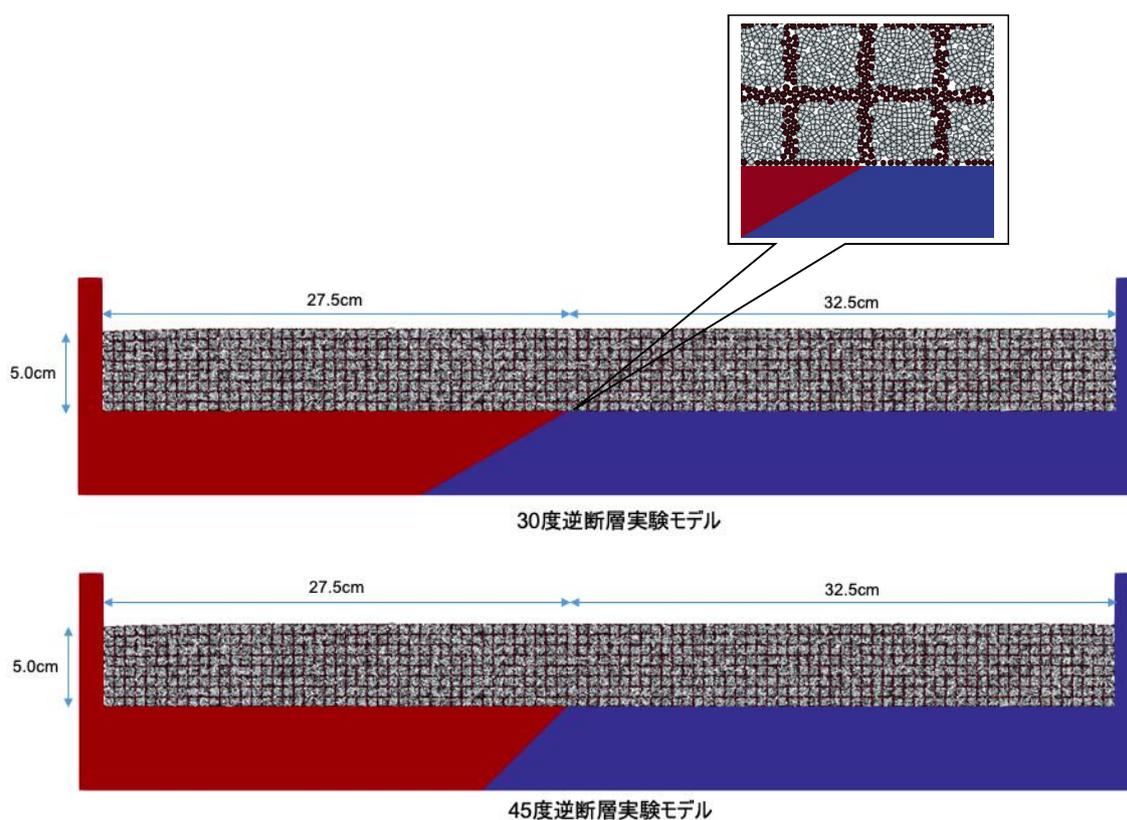


図 4.2.5 再現解析モデル

表 4.2.2 解析モデルの粒径分布

粒径[mm]	質量割合[%]
0.500	20.0
0.525	20.0
0.550	20.0
0.575	20.0
0.600	20.0

縦横にグリッド状につけた濃い粒子色は内部の変状が分かりやすいように 7.5mm 間隔で入れている。なお、土槽幅について Bonanno (2017)では明確には示されていないが十分に広いものと想定し再現解析では 60cm とした。また、実験供試体は実験装置の仕様からか、上盤側の層厚が下盤側より厚いようであるが、詳細が不明であるため個別要素法解析モデルではこれを考慮していない。

4.2.2.2. 解析パラメータ

表 4.2.3 に再現解析で使用した DEM 解析パラメータの一覧を示す。なお、これらのパラメータについては要素シミュレーションを行って決定したわけではなく、必ずしも対象粘土の強度特性を模擬したものではないが、横ずれタイプの検討結果などを参考に設定したものである。

本検討では、間隙率が比較的大きい粒状体モデルを使用することで、正のダイレイタンスを抑制した解析を意図した。なお、横ずれタイプの検討時と異なり、固着力については考慮していない。減衰定数を非常に小さな値としているのは準静的な解析であり、影響が小さいと考えられるためである。

表 4.2.3 DEM 解析パラメータ

パラメータ	設定値
基準法線剛性	1.0×10^6 [N/m]
基準接線剛性	2.5×10^5 [N/m]
減衰定数	0.001
粒子間摩擦角	5.7 [deg.]
転がり摩擦角	21.8 [deg.]
粒子間粘着力	1.0×10^4 [N/m ²]
粒子間固着力	0.0×10^5 [N/m ²]
土粒子密度	2.05 [g/cm ³]

4.2.2.3. 再現解析結果

図 4.2.6、図 4.2.7 に傾斜角 30° 時の地盤変状過程と最大せん断ひずみ分布図を示す。

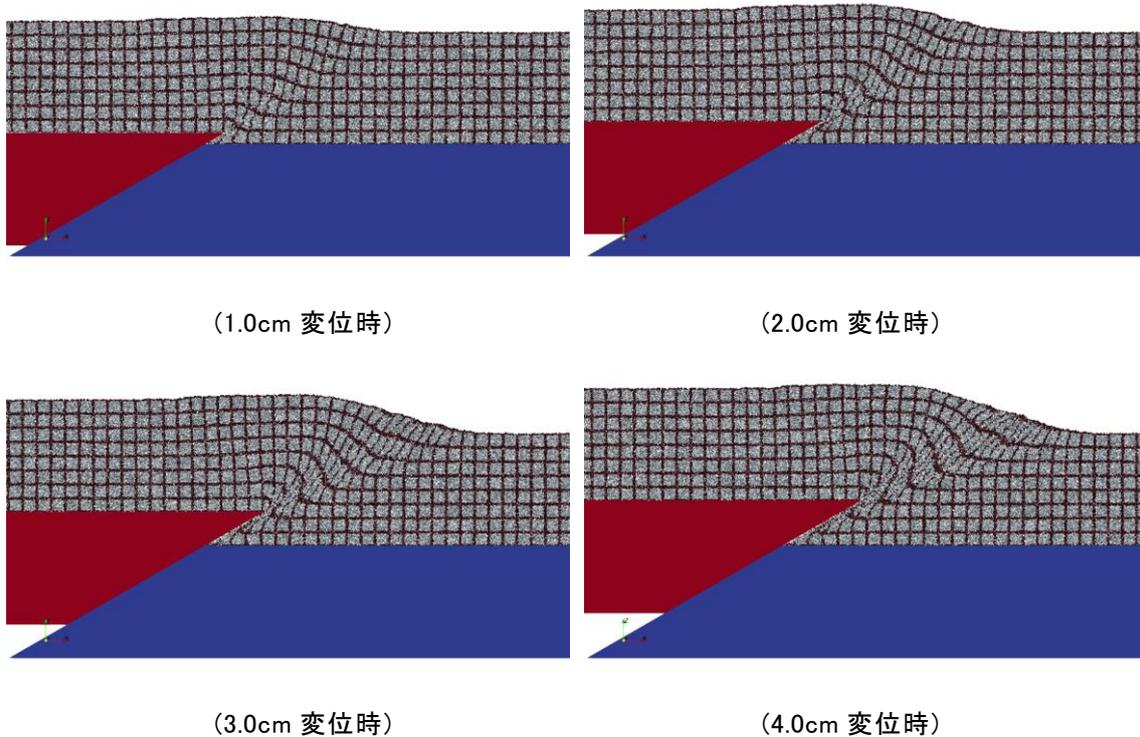


図 4.2.6 30° ケースの地盤変状過程

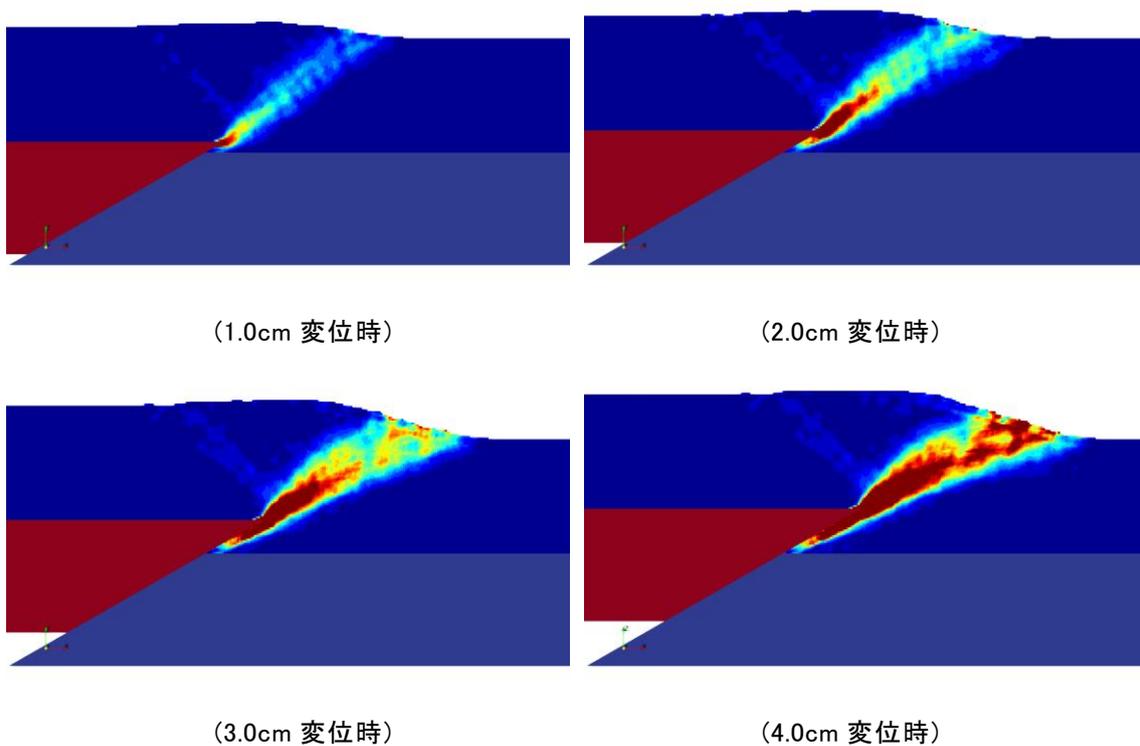


図 4.2.7 30° ケースの地盤変状過程(最大せん断ひずみ分布)

図 4.2.8 に最終変位である 4cm 変位時の地盤変状拡大図(実験との比較)を示す。

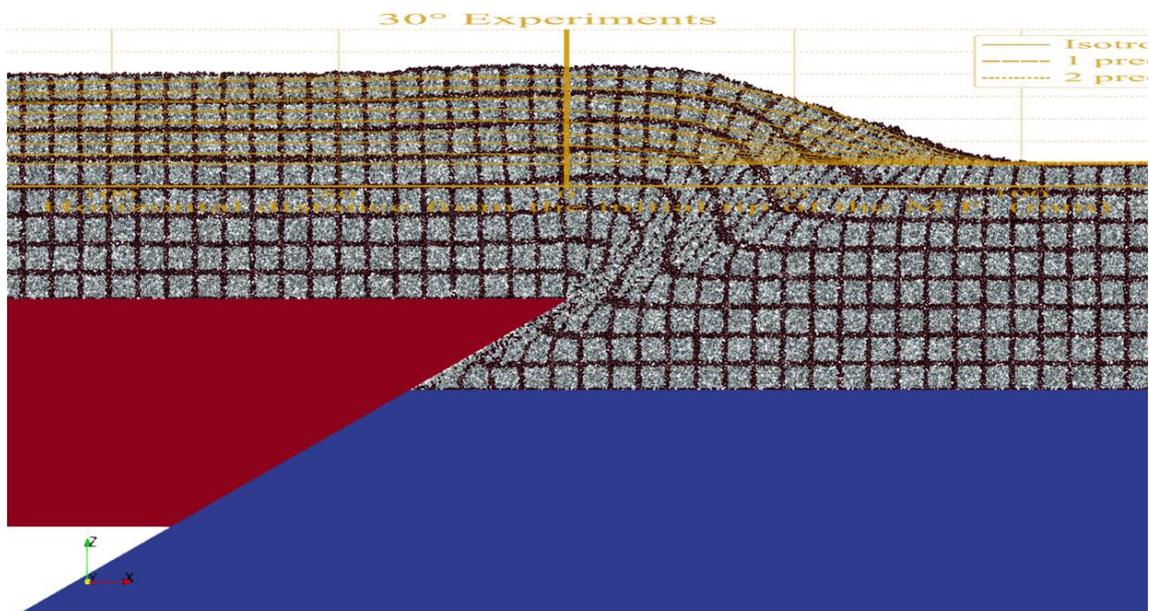


図 4.2.8 30° ケースの 4cm 変位時の地盤変状拡大図(実験との比較)

湿潤粘土を対象とした実験結果からはダイレイタンスの影響がほぼ見られないのに対し、再現解析ではややダイレイタンスが大きい結果となっているが、表面の高さ分布については概ね再現できていることが分かる。なお、低角度ケースであるので水平力が強く、主断層直上の僅かな盛り上がりからダイレイタンスの影響が確認できる。また、実験結果のスケッチより分かる粘性土の亀裂の進展などは高い分解能の解析モデルを用いても判別が難しい。

図 4.2.9、図 4.2.10 に傾斜角 45° 時の地盤変状過程と最大せん断ひずみ分布図を示す。

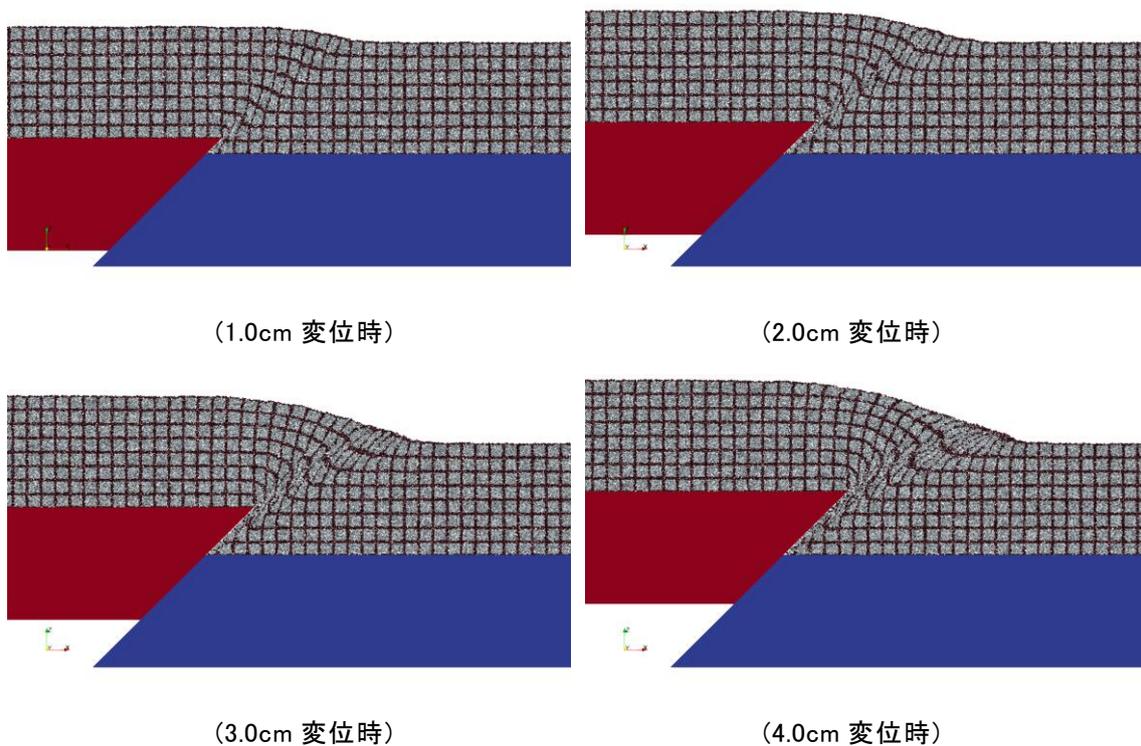


図 4.2.9 45° ケースの地盤変状過程

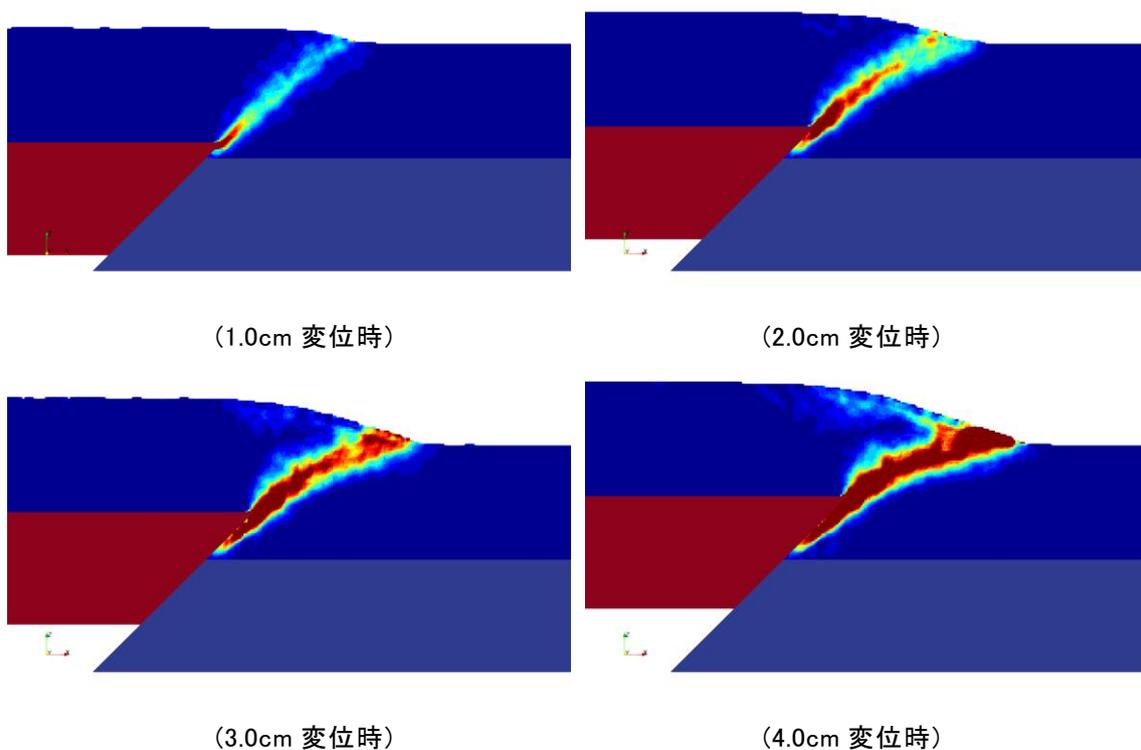


図 4.2.10 45° ケースの地盤変状過程(最大せん断ひずみ分布)

図 4.2.11 に最終変位である 4cm 変位時の地盤変状拡大図(実験との比較)を示す。

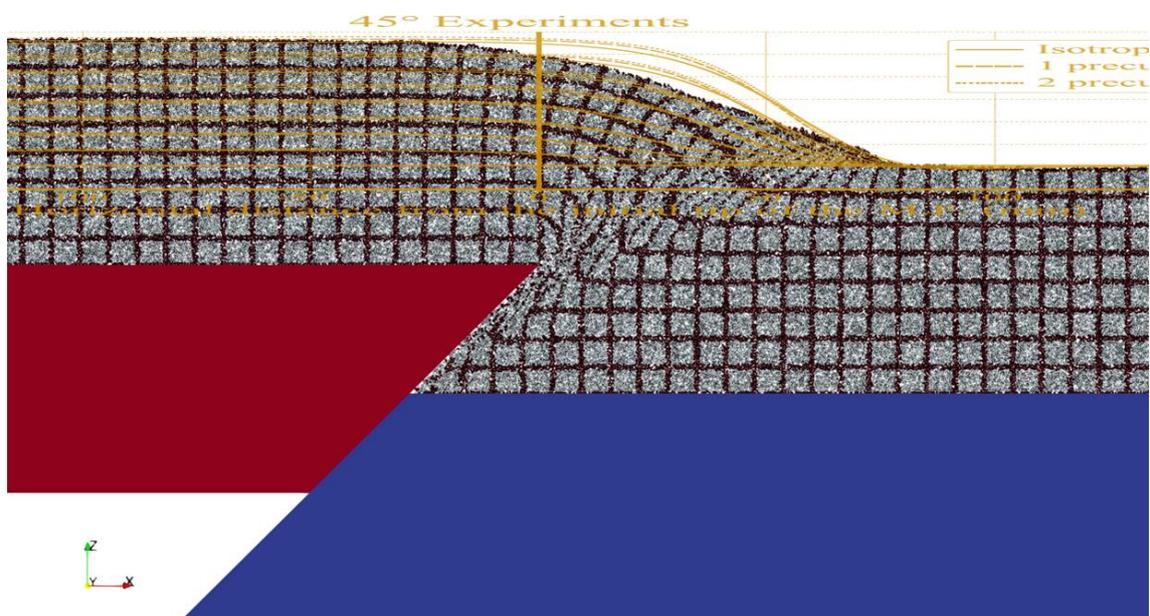


図 4.2.11 45° ケースの 4cm 変位時の地盤変状拡大図(実験との比較)

30 度のケースと同様に、湿潤粘土を対象とした実験ではダイレイタンスの影響が小さく、特に水平力の小さい 45 度ケースでは体積変化は小さいと考えられる。一方で、解析結果は主断層直上から下盤側の土層表面の嵩が大きく下がっており、実験と再現解析結果の斜面形状の違いが大きい。これは比較的疎な解析モデルを使用しているため、負のダイレイタンスの影響と地盤強度不足が原因として考えられる。

4.3. まとめ

本章では、既往の断層模擬実験を対象とした再現解析を実施し、対象実験として 2 つのタイプの土槽実験を選択した。

横ずれタイプ断層変位を模擬した Atmaoui(2006)の実験を対象に 3 次元個別要素法による再現解析を行った。3 パターンの層厚と C 材および ϕ 材を想定した強度特性の違いを設定し、合計 6 ケースの解析を実施し、再現解析結果から得られた成果を以下に示す。

- ◆ 疎な粒状体モデルを用いて、3 次元個別要素法による全応力解析を実施した。摩擦角の小さい C 材の強度特性と、摩擦角の大きい ϕ 材の強度特性を要素シミュレーションにより設定したが、強度特性の違いによらず、せん断帯の幅は実験とほぼ同等かやや狭い範囲となった。また、浅部へ向けての発達はあまり見られない。実験の再現は層厚の小さいケースの方が高く、層厚が大きいケースでは境界による影響などが現れた可能性がある。
- ◆ ϕ 材ケースは特に層厚の大きいケースで C 材ケースに比べて強度が高く、断層直上でははっきりとした食い違いを生じるが、疎な構造であるためか乾燥砂などの既往実験で見られるような広いせん断帯の発達は見られず、食い違い部で生じたせん断ひずみが局所化する傾向があった。 ϕ 材ケースでは特に間隙比や粒径分布のモデル化が重要であると考えられる。
- ◆ 粘性土の間隙比 1.2 に対し、間隙水を考慮しない条件で間隙比 1.0 の解析モデルを使用しており、緩い粒状体集合であるため、せん断初期は負のダイレイタンスーが大きい。一方で、C 材ケースでは強度不足な点も見られ、層厚の大きいケースでは常時計算の段階で圧密して正のダイレイタンスーが強くなる傾向が見られた。このような傾向は拘束圧依存の強度が大きい ϕ 材ケースでは見られなくなっている。
- ◆ 粘性土の断層変位実験では、砂に比べてせん断帯の発達は小さく、表層で亀裂の発生が目立っているが、本解析の分解能では亀裂の再現は難しい。また、本解析モデルは空隙が大きいため、亀裂のような隙間の評価は難しい。なお、個別要素法解析で設定される要素間のばねの破壊形態としてはせん断破壊するものが殆どであった。
- ◆ 破壊が生じるとその際の応力は解放されるため、応力で亀裂の発生を評価することは難しく、変形やひずみ評価を高分解能高精度で行うことが重要と考えられる。

上記の 3 次元解析に加えて、逆断層タイプを模擬した Bonanno(2017)の実験を対象に 2 次元個別要素法による再現解析を行った。なお、2 次元モデルでは妥当な空隙の評価が難しいが、本検討ではダイレイタンスーがあまり大きくならないことを目標に、空隙率で 0.2 程度のモデルを採用した。以下に、再現解析結果から得られた成果をまとめて示す。

- ◆ 対象実験は粘性土模型を使用しており、表面は滑らかな変形を生じている。低角度の 30 度ケースについては比較的変位が合っているが、一方で高角度の 45 度ケースでは

負のダイレイタンシーや強度特性の違いの影響が見られ、地表面高さの比較結果に乖離が見られた。

- ◆ ダイレイタンシーの影響については、間隙比を調整することである程度制御可能であるが、密なモデルでは低角度ケースで正のダイレイタンシーが問題となる。現象の再現には湿潤粘土の強度および変形特性の再現が重要である他、ダイレイタンシーの影響の生じにくいモデル化の方法を検討していく必要がある。
- ◆ 粘性土模型実験の再現については、疎なパッキングとその構造を維持する粒子間力のモデル化が重要と考えられ、粒子間接触力を基本とする全応力解析の適用には課題が多いといえる。
- ◆ 2次元解析では高分解能モデルでの検討が可能となるが、内部に生じる亀裂等の評価はやはり難しい。なお、本検討モデルより粒径が2倍程度大きな解析モデルを用いても、地表面の大まかな変位分布は変わらないことを確認している。局所的な亀裂の進展などを評価する上では結果の評価方法に課題があり、特に数値解析の適用範囲を実規模スケールへ拡大する過程で重要となる。

4.4. 参考文献

- 1) Atmaoui, N. (2006), Development of Pull Apart Basins and Associated Structures by the Riedel Shear Mechanism: Insight from Scaled Clay Analogue Models, Ph.D. dissertation, Verlag nicht ermittelbar.
- 2) 澤田 昌孝, 上田 圭一 (2009), 横ずれ断層の進展に伴う地盤の破壊領域評価のための数値シミュレーション, 電力中央研究所報告 N08028.
- 3) 竿本 英貴, 吉見 雅行, 国松 直 (2005), 横ずれ断層運動に伴うせん断帯発達過程に関する DEM シミュレーション, 土木学会地震工学論文集, 28 巻, pp.179-185.
- 4) 谷山 尚 (2008), 横ずれ断層によって表層地盤に形成されるせん断帯-DEM による解析-, 土木学会論文集 C, Vol.64 No.3, pp.485-494.
- 5) Bonanno, E., L. Bonini, R. Basili, G. Toscani, and S. Seno (2017), How do horizontal, frictional discontinuities affect reverse fault-propagation folding? *Journal of Structural Geology*, Vol. 102, 147 - 167.
- 6) 原子力規制庁, 平成 30 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)事業報告書,平成 31 年 3 月.

5章 まとめ

5.1. 断層変位データの収集・分析

5.1.1. 断層変位（2019年以降）最新データの収集・分析

国内外地震に関する断層変位のデータとして、2019年7月にアメリカで発生したリッジクレスト地震及び熊本地震に関する最新の文献を収集した。リッジクレスト地震の現地での変位計測データを用いて断層変位と空間分布の検討を行った。検討はメインレースと断層変位計測地点との離間距離と変位量の分布から、高尾ほか(2014)による主断層からの距離と断層変位量のグラフと重ねた。その結果、主断層からの距離に対する変位量が全体的に小さい値を示していることが判明した。

ALOS-2のデータを使用してリッジクレスト地震の位相不連続ラインを抽出し、現地調査及びSentinel-1による地表変状の分布と比較検討した。大きな変位を伴う地表地震断層はピクセルオフセット解析により、小さな変位を伴う地表変状はLC-InSAR図により抽出が可能であることが判明した。地震発生箇所の植生の状況やSAR衛星の観測頻度によっては、ALOS-2以外の衛星を使用して海外の地表地震断層及び副断層の分布状況を捉えることができるので、海外の事例も含めて副断層に関する知見を増やすことが可能であることが分かった。

5.1.2. 測地学的情報を用いた変動地形学的解析

地震時の微小な地表地震断層を捉える方法として、これまで干渉SAR解析のうちLC-InSAR図を用いて微小な変位の抽出を行ってきた。LC-InSAR図で捉えた副断層についてトレンチ調査を行うと、ほぼ全ての地点で先行する断層活動イベントが認定されてきた。一方でLC-InSAR図では主断層周辺の変位量が大きな箇所では干渉性が悪くなりコヒーレンス値が低く、断層位置を捉えることが出来ない。また、断層沿いの変位量及び変位分布が捉えられないという欠点がある。そこで、本事業では光学衛星による画像マッチングを実施した。その結果、画像マッチングは断層変位が大きな主断層沿いの変位分布の確認は有効であり、LC-InSAR図の欠点を補完することが出来ることが分かった。干渉SAR解析に光学衛星の画像マッチングの組み合わせることで、微小な副断層変位から大きな主断層変位まで確認することができ、断層分布抽出の精度向上が期待できる。しかしながら現段階では画像マッチングによって副断層の微小変位量までは検出できていない。今後も画像マッチングの範囲を限定してマッチングさせる等、手法の検討が必要である。また、SAR衛星による2.5次元解析を本事業で実施した。様々な解析手法を試みたところ、条件により有効な解析手法が異なることが示唆された。対象とする断層の変動量に応じて解析手法を使い分けることが重要であることが判明した。

熊本地震では布田川断層や日奈久断層、出ノ口断層等の主断層で余効変動が生じていることが分かってきた。副断層箇所において余効変動が生じていないか検証するために、干渉SAR時系列解析(SBAS解析)を実施した。主断層以外にも余効変動が確認されたが、今年及びこれまでトレンチ調査を実施してきた副断層位置では変位量が微小すぎるのか、余効変動は検出できなかった。

5.1.3. 副断層に関する現地調査

測地学的情報を用いた変動地形学的解析により副断層を抽出した。抽出した副断層地点 2 箇所でトレンチ調査を実施し、いずれのトレンチでも熊本地震に先行する断層イベントが確認できた。

上陳東トレンチは熊本地震を含めて 3 回の断層活動イベントが確認された。熊本地震に先行するイベントⅡおよびⅢは約 90,000 年前以降約 11,000 年前以前の活動であり、イベントⅡの 11,000 年前以降、断層活動が無いとすると、布田川断層本体の活動時期に同時に活動していないこととなる。下町トレンチでは、熊本地震を含めて 5 回の断層活動イベントが確認された。熊本地震に先行するイベントⅡおよびイベントⅢは約 2000 年前以降に生じている。イベントⅣは約 10,000 年前以降約 2,000 年前以前の活動であり、イベントⅤは 10,000 年前より以前の活動である。これらの活動年代は布田川断層本体の活動年代とも整合的であり、同時に活動している可能性がある。

これまでの副断層位置でのトレンチの結果、どの副断層も布田川断層本体の断層活動と同時に活動していると解釈可能であった。上陳東トレンチのように布田川断層本体と同時に活動しない副断層はどのようなところに位置しているのか今後検討していく必要がある。

5.2. 断層変位に関する室内模擬実験・物性調査

過年度までの数値解析モデルを参考に、弱面を含む基盤とその上位を覆う未固結堆積層からなるモデルを想定して、基盤、弱面、堆積層の物性調査を行なった。弱面としては郷村山田断層の破碎帯から試験試料採取を行なった。堆積層としては今回の下町トレンチから試料採取を行なった。風化等の影響を受けていない基盤の物性情報としては、野島断層で実施されたボーリング試料から得られた深部の花崗岩の物性試験結果を整理した。静的・動的強度試験、変形試験を行なった結果、トレンチ調査地点から得られた物性値が破碎帯に比べても強度が小さい傾向を示した。静的強度に比べて動的強度は同程度か、高い傾向にある結果となった。破碎帯近傍では母岩の花崗岩（野島断層の深部花崗岩物性値）に比べて 1 オーダー小さな強度を呈する。このように強度の異なる物性領域がある場合の静的・動的な外部入力（変位や振動）に対する応答は、副断層の形成過程を考える上でも重要で、数値解析等での検討が必要と思われる。

副断層形成プロセスやデータ拡充を目的とした室内模擬実験の計画立案を目的として、既往アナログ実験の文献整理を行った。逆断層・横ずれ断層共に模擬地盤の材料に関わらずせん断帯（変形ゾーン）が形成される。逆断層では浅くなるに従い、断層傾斜角度が低角化する傾向にある。主せん断帯よりも離れて断層が発生するのは大きな変位量、複雑な変位の与え方、不均質構造、粘着力が高い模擬地盤の実験に発生する傾向にある。また、細粒で粘着力が高い模擬地盤では微小な断層が発生しやすく、また視覚的にも認識しやすい。したがって、副断層を対象としたアナログ実験では、実地盤を基盤と仮定した場合、粘土や強力粉・セモリナ粉等の細粒で粘着力の高い材料を用いれば 10^{-4} から 10^{-5} オーダーでの副断層を対象とした実験が可能と考えられる。トレンチで観察されるようなスケールの構造を対象と

した場合、遠心模型実験の方が適している。ただし、粉体や粘土は敷き詰め方や含水比で物性値が大きく異なることが予想されるため、模擬地盤材料の物性試験も必要である。

5.3. 断層変位に関する数値解析

調査を行った室内模擬実験の内、横ずれタイプと縦ずれタイプそれぞれ 1 つを対象実験に選定して再現解析を行った。どちらの実験も実験土槽の供試体材料として湿潤粘性土を用いており、模型縮尺から準静的な载荷が行われるため非排水条件でせん断帯が形成されるものと考えられる。解析手法としては横ずれタイプでは 3 次元、縦ずれタイプでは 2 次元個別要素法を採用し、それぞれ間隙水のモデル化は行わない全応力条件での再現解析を実施し、整理した結果を実験結果と比較することで知見を整理した。

横ずれタイプでは特に層厚の小さいケースについてせん断帯の形成時に生じる圧縮域の隆起と引張域で生じる沈降が見られ、せん断帯の幅は概ね実験結果と整合的となった。なお、層厚の大きいケースでは強度が不足したためか全体的な沈下が見られ、正のダイレイタンスーが強い傾向が見られたが、比較ケースとして実施を行った ϕ 材の強度特性を模擬するケースでは本来のせん断帯形成過程に見られる隆起と沈降を確認した。実験結果の再現は層厚の小さいケースで高く、層厚の大きいケースではせん断帯の幅がやや小さくなっており、境界の影響を受けた可能性がある。また、対象実験の供試体の強度特性を想定した C 材ケースと比較ケースの ϕ 材ケースの比較では、 ϕ 材ケースでせん断帯の広がり狭くなる傾向があった。このことは既往の土槽実験などで得られている傾向とは逆であり、両方のケースで同じ粒状体モデルを使用したため、 ϕ 材ケースでは間隙比や粒度が実際と大きく異なることによる影響があったと考えられ、粒状体強度に与える間隙比や粒度の重要性が再確認された。

縦ずれタイプの検討は、2 次元解析モデルを使用することによる高分解能の恩恵を目的として実施しており、横ずれタイプに比べて小径の粒径分布モデルを使用した。実験結果との比較においては低角度のケースで概ね表層変量が整合したが、やや正のダイレイタンスーの影響が強い傾向が見られ、また高角度のケースでは強度不足や負のダイレイタンスーの影響から表層変位量に大きな乖離が生じた。2 次元解析では間隙比が小さくなるため、ダイレイタンスーの影響が強く、本検討では比較的疎な解析モデルを作成しているが、湿潤粘度の強度特性を全応力解析で再現できないために結果の差異が生じていると考えられる。今後の課題として、ダイレイタンスーの影響の生じにくいモデル化について検討する必要がある。また、本検討で用いた解析モデルより分解能の粗い解析モデルを用いた結果から、全体的な変位自体には差異がないことが分かっており、発生亀裂等を評価する上では単純に計算分解能を上げるだけでは不十分であることが確認された。今後、模型実験スケールから実規模スケールへ適用範囲を変更して行く上でも亀裂の進展などの局所的な変位の評価技術の開発が重要であると考えられる。

【付 属 資 料】

2 章 付属資料

- ・ 施工写真集
- ・ 放射性炭素年代測定結果

施工写真集（上陳東トレンチ）

トレンチ調査 現場写真 (上陳東)

現場写真	施工状況
	施工前
	掘削状況 (表土掘削)
	掘削状況 I

施工状況	現場写真
掘削状況Ⅱ	
掘削完了 水系設置後	
現地検討委員会	

トレンチ調査 現場写真（上陳東）

現場写真	施工状況
	埋戻し状況
	表土埋戻し状況
	施工後

施工写真集（下町トレンチ）

トレンチ調査 現場写真（下町）

現場写真	施工状況
	施工前
	掘削状況 (表土掘削)
	掘削状況 I

施工状況	現場写真
掘削状況Ⅱ	
掘削完了 水系設置後	
現地検討委員会	

トレンチ調査 現場写真 (下町)

現場写真	施工状況
	現地検討委員会 (トレンチ内)
	埋戻し状況
	施工後

放射性炭素年代測定結果

放射性炭素年代測定結果報告書

(AMS 測定)

(株) 加速器分析研究所

1 化学処理工程

(1) 炭の化学処理

- 1) メス・ピンセットを使い、付着物を取り除く。
- 2) 酸-アルカリ-酸 (AAA : Acid Alkali Acid) 処理により不純物を化学的に取り除く。その後、超純水で中性になるまで希釈し、乾燥させる。AAA 処理における酸処理では、通常 1mol/l (1M) の塩酸 (HCl) を用いる。アルカリ処理では水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液を用い、0.001M から 1M まで徐々に濃度を上げながら処理を行う。アルカリ濃度が 1M に達した時には「AAA」、1M 未満の場合は「AaA」と表 1 に記載する。
- 3) 試料を燃焼させ、二酸化炭素 (CO₂) を発生させる。
- 4) 真空ラインで二酸化炭素を精製する。
- 5) 精製した二酸化炭素を、鉄を触媒として水素で還元し、グラファイト (C) を生成させる。
- 6) グラファイトを内径 1mm のカソードにハンドプレス機で詰め、それをホイールにはめ込み、測定装置に装着する。

(2) 土壌、黒褐色土壌の化学処理

- 1) 試料を超純水の中に入れ、超音波で分散させた後、ふるいにかけて根等の混入物を除去する。ふるいを通過した土を乾燥させ、この後の処理に用いる。
- 2) 酸処理により不純物を化学的に取り除く。その後、超純水で中性になるまで希釈し、乾燥させる。処理には 1mol/l (1M) の塩酸 (HCl) を用い、表 1 に「HCl」と記載する。

以下、(1)3) 以降と同じ。

2 測定方法

加速器をベースとした ¹⁴C-AMS 専用装置 (NEC 社製) を使用し、¹⁴C の計数、¹³C 濃度 (¹³C/¹²C)、¹⁴C 濃度 (¹⁴C/¹²C) の測定を行う。測定では、米国国立標準局 (NIST) から提供されたシュウ酸 (HOxII) を標準試料とする。この標準試料とバックグラウンド試料の測定も同時に実施する。

3 算出方法

- 1) $\delta^{13}\text{C}$ は、試料炭素の ¹³C 濃度 (¹³C/¹²C) を測定し、基準試料からのずれを千分偏差 (‰) で表した値である (表 1)。AMS 装置による測定値を用い、表中に「AMS」と注記する。
- 2) ¹⁴C 年代 (Libby Age : yrBP) は、過去の大気中 ¹⁴C 濃度が一定であったと仮定して測定され、1950 年を基準年 (0yrBP) として遡る年代である。年代値の算出には、Libby の半減期 (5568 年) を使用する (Stuiver and Polach 1977)。¹⁴C 年代は $\delta^{13}\text{C}$ によって同位体効果を補正する必要がある。補正した値を表 1 に、補正していない値を参考値として表 2 に示した。¹⁴C 年代と誤差は、下 1 桁を丸めて 10 年単位で表示される。また、¹⁴C 年代の誤差 ($\pm 1\sigma$) は、試料の ¹⁴C 年代がその誤差範囲に入る確率が 68.2% であることを意味する。

- 3) pMC (percent Modern Carbon)は、標準現代炭素に対する試料炭素の ^{14}C 濃度の割合である。pMC が小さい (^{14}C が少ない) ほど古い年代を示し、pMC が 100 以上 (^{14}C の量が標準現代炭素と同等以上) の場合 Modern とする。この値も $\delta^{13}\text{C}$ によって補正する必要があるため、補正した値を表 1 に、補正していない値を参考値として表 2 に示した。
- 4) 暦年較正年代とは、年代が既知の試料の ^{14}C 濃度をもとに描かれた較正曲線と照らし合わせ、過去の ^{14}C 濃度変化などを補正し、実年代に近づけた値である。暦年較正年代は、 ^{14}C 年代に対応する較正曲線上の暦年代範囲であり、1 標準偏差 ($1\sigma=68.3\%$) あるいは 2 標準偏差 ($2\sigma=95.4\%$) で表示される。グラフの縦軸が ^{14}C 年代、横軸が暦年較正年代を表す。暦年較正プログラムに入力される値は、 $\delta^{13}\text{C}$ 補正を行い、下 1 桁を丸めない ^{14}C 年代値である。なお、較正曲線および較正プログラムは、データの蓄積によって更新される。また、プログラムの種類によっても結果が異なるため、年代の活用にあたってはその種類とバージョンを確認する必要がある。ここでは、暦年較正年代の計算に、IntCal20 較正曲線 (Reimer et al. 2020) を用い、OxCalv4.4 較正プログラム (Bronk Ramsey 2009) を使用した。暦年較正年代については、特定の較正曲線、プログラムに依存する点を考慮し、プログラムに入力する値とともに参考値として表 2 に示した。暦年較正年代は、 ^{14}C 年代に基づいて較正 (calibrate) された年代値であることを明示するために「cal BC/AD」または「cal BP」という単位で表される。

4 測定結果

表 1 放射性炭素年代測定結果 ($\delta^{13}\text{C}$ 補正值)

測定番号	試料名	採取場所	試料形態	処理方法	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) (AMS)	$\delta^{13}\text{C}$ 補正あり	
						Libby Age (yrBP)	pMC (%)
IAAA-201720	KJE(1.1,0.5)	熊本県上益城郡益城町上陳 上陳 東トレンチ東側法面 深度:0.5m	土壌	HCl	-17.98 ± 0.19	2,120 ± 20	76.80 ± 0.23
IAAA-201721	KJE(4.6,2.5)	熊本県上益城郡益城町上陳 上陳 東トレンチ東側法面 深度:2.5m	炭	AAA	-24.62 ± 0.20	2,850 ± 30	70.11 ± 0.22
IAAA-201722	KJE(4.5,3.4)	熊本県上益城郡益城町上陳 上陳 東トレンチ東側法面 深度:3.4m	土壌	HCl	-21.66 ± 0.24	11,090 ± 40	25.15 ± 0.12
IAAA-201723	SMW(8.8,3.2)	熊本県菊池郡大津町 下町トレンチ 西側法面 深度:3.2m	土壌	HCl	-17.42 ± 0.21	2,530 ± 20	72.96 ± 0.22
IAAA-201724	SMW(8.9,3.8)	熊本県菊池郡大津町 下町トレンチ 西側法面 深度:3.8m	土壌	HCl	-17.30 ± 0.22	2,430 ± 20	73.87 ± 0.22
IAAA-201725	SMW(5.05,3.7)	熊本県菊池郡大津町 下町トレンチ 西側法面 深度:3.7m	土壌	HCl	-14.33 ± 0.29	2,750 ± 20	71.01 ± 0.22
IAAA-201726	SMW(5.8,3.7)	熊本県菊池郡大津町 下町トレンチ 西側法面 深度:3.7m	土壌	HCl	-16.27 ± 0.23	2,140 ± 20	76.61 ± 0.22
IAAA-201727	SMW(9.9,4.8)	熊本県菊池郡大津町 下町トレンチ 西側法面 深度:4.8m	黒褐色土壌	HCl	-16.91 ± 0.24	2,760 ± 20	70.90 ± 0.21
IAAA-201728	SME(12.9,2.8)	熊本県菊池郡大津町 下町トレンチ 東側法面 深度:2.8m	土壌	HCl	-21.77 ± 0.25	11,750 ± 40	23.15 ± 0.12

IAAA-201729	SME(4.9,4.2)	熊本県菊池郡大津町 下町トレンチ 東側法面 深度:4.2m	炭	AaA	-24.27 ± 0.25	8,280 ± 30	35.65 ± 0.15
-------------	--------------	----------------------------------	---	-----	---------------	------------	--------------

[IAA 登録番号 : #A510]

表 2 放射性炭素年代測定結果 ($\delta^{13}\text{C}$ 未補正值、暦年較正用 ^{14}C 年代、較正年代)

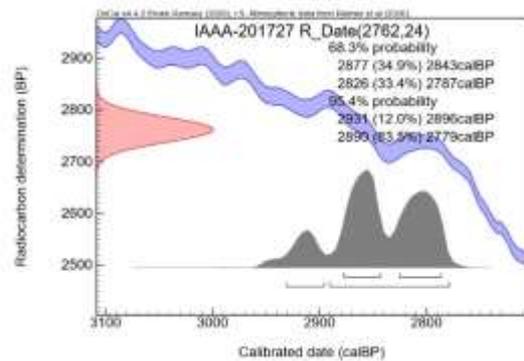
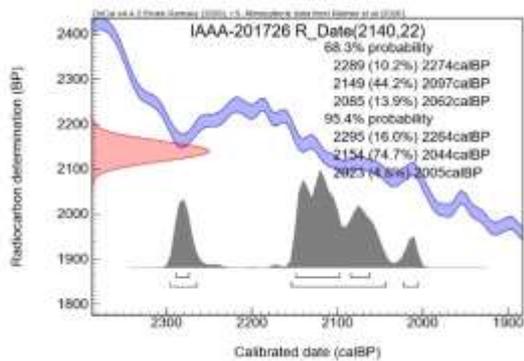
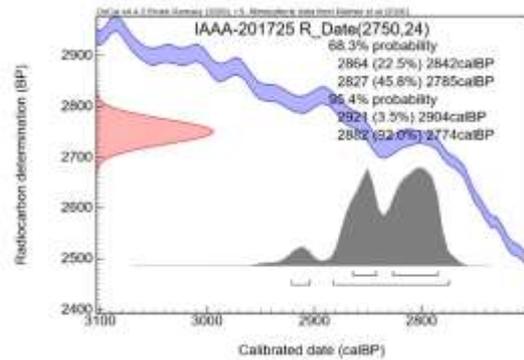
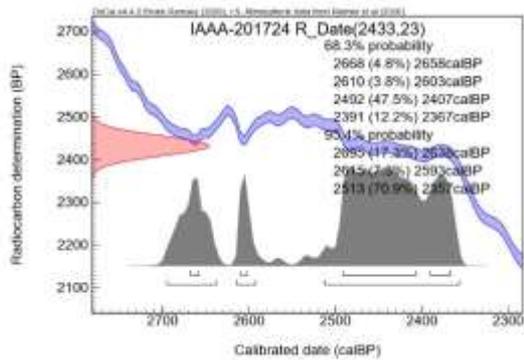
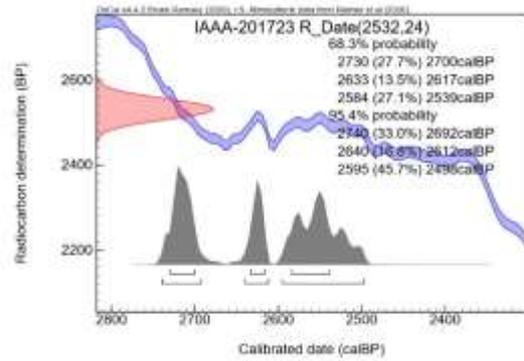
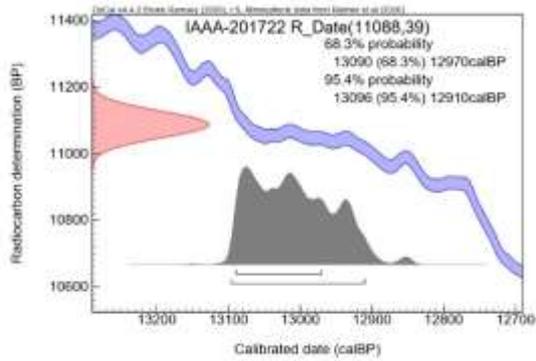
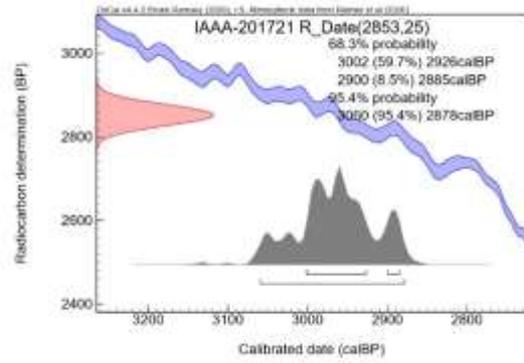
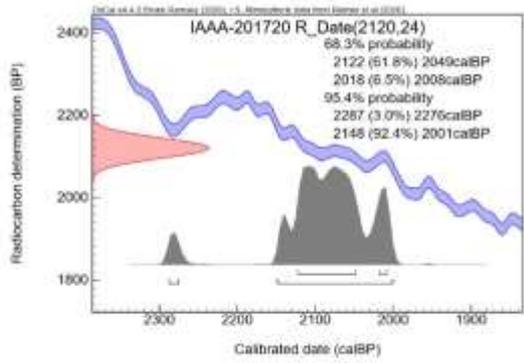
測定番号	$\delta^{13}\text{C}$ 補正なし		暦年較正用(yrBP)	1 σ 暦年代範囲	2 σ 暦年代範囲
	Age (yrBP)	pMC (%)			
IAAA-201720	2,010 ± 20	77.91 ± 0.24	2,120 ± 24	2122calBP - 2049calBP (61.8%) 2018calBP - 2008calBP (6.5%)	2287calBP - 2276calBP (3.0%) 2148calBP - 2001calBP (92.4%)
IAAA-201721	2,850 ± 30	70.16 ± 0.22	2,853 ± 25	3002calBP - 2926calBP (59.7%) 2900calBP - 2885calBP (8.5%)	3060calBP - 2878calBP (95.4%)
IAAA-201722	11,030 ± 40	25.32 ± 0.12	11,088 ± 39	13090calBP - 12970calBP (68.3%)	13096calBP - 12910calBP (95.4%)
IAAA-201723	2,410 ± 20	74.09 ± 0.22	2,532 ± 24	2730calBP - 2700calBP (27.7%) 2633calBP - 2617calBP (13.5%) 2584calBP - 2539calBP (27.1%)	2740calBP - 2692calBP (33.0%) 2640calBP - 2612calBP (16.8%) 2595calBP - 2498calBP (45.7%)
IAAA-201724	2,310 ± 20	75.04 ± 0.22	2,433 ± 23	2668calBP - 2658calBP (4.8%) 2610calBP - 2603calBP (3.8%) 2492calBP - 2407calBP (47.5%) 2391calBP - 2367calBP (12.2%)	2695calBP - 2638calBP (17.3%) 2615calBP - 2593calBP (7.3%) 2513calBP - 2357calBP (70.9%)
IAAA-201725	2,580 ± 20	72.57 ± 0.22	2,750 ± 24	2864calBP - 2842calBP (22.5%) 2827calBP - 2785calBP (45.8%)	2921calBP - 2904calBP (3.5%) 2882calBP - 2774calBP (92.0%)
IAAA-201726	2,000 ± 20	77.98 ± 0.22	2,140 ± 22	2289calBP - 2274calBP (10.2%) 2149calBP - 2097calBP (44.2%) 2085calBP - 2062calBP (13.9%)	2295calBP - 2264calBP (16.0%) 2154calBP - 2044calBP (74.7%) 2023calBP - 2005calBP (4.8%)
IAAA-201727	2,630 ± 20	72.08 ± 0.21	2,762 ± 24	2877calBP - 2843calBP (34.9%) 2826calBP - 2787calBP (33.4%)	2931calBP - 2896calBP (12.0%) 2890calBP - 2779calBP (83.5%)
IAAA-201728	11,700 ± 40	23.30 ± 0.12	11,752 ± 41	13736calBP - 13713calBP (10.9%) 13650calBP - 13635calBP (6.6%) 13609calBP - 13578calBP (20.8%) 13553calBP - 13510calBP (29.9%)	13751calBP - 13677calBP (21.7%) 13669calBP - 13500calBP (73.8%)
IAAA-201729	8,270 ± 30	35.71 ± 0.15	8,284 ± 34	9407calBP - 9352calBP (25.2%) 9323calBP - 9262calBP (27.7%) 9217calBP - 9210calBP (2.0%) 9175calBP - 9143calBP (13.3%)	9421calBP - 9194calBP (78.5%) 9184calBP - 9135calBP (16.9%)

[参考値]

文献

Bronk Ramsey, C. 2009 Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon* 51(1), 337-360

Reimer, P.J. et al. 2020 The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP),



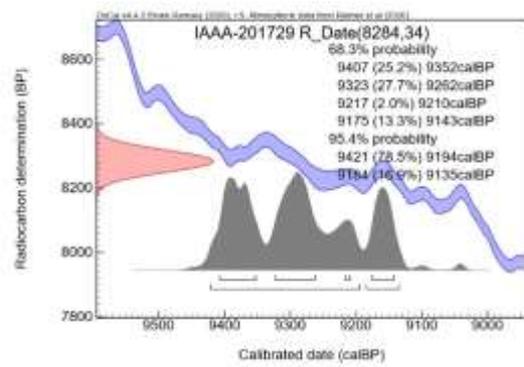
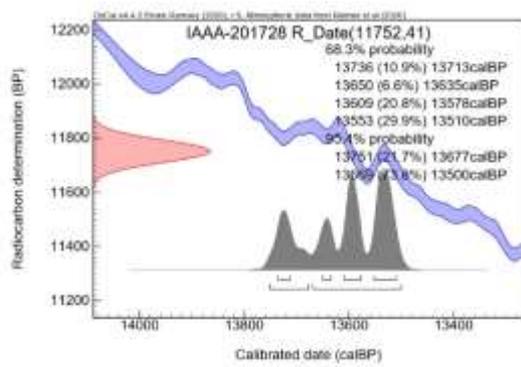


図1 暦年較正年代グラフ (参考)

3 章 付属資料

- ・分析・試験結果データシート

物理試驗結果

土質試験結果一覧表 (基礎地盤)

調査件名 整理年月日 令和3年3月4日

整理担当者 本郷 隆夫

試料番号 (深さ)	MSL-6	MSL-7	MSC-2	MSC-3	MSC-4	MSC-5	
一般	湿润密度 ρ_t g/cm ³						
	乾燥密度 ρ_d g/cm ³						
	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.646	2.669	2.660	2.633	2.648	
	自然含水比 W_n %						
	間隙比 e						
	飽和度 S_r %						
粒度	石分 (75mm以上) %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	礫分 ¹⁾ (2~75mm) %	0.6	2.0	8.4	8.3	1.0	
	砂分 ¹⁾ (0.075~2mm) %	36.8	48.1	31.7	37.1	25.6	
	シルト分 ¹⁾ (0.005~0.075mm) %	34.4	33.3	22.8	23.7	22.5	
	粘土分 ¹⁾ (0.005mm未満) %	28.2	16.6	37.1	30.9	50.9	
	最大粒径 mm	4.75	9.5	9.5	9.5	4.75	
	均等係数 U_e	--	65	--	--	--	
液性指数特性	液性限界 W_L %	47.38	50.35	71.34	49.79	53.56	
	塑性限界 W_p %	16.47	22.74	17.38	12.26	11.74	
	塑性指数 I_p	30.91	27.61	53.96	37.53	41.82	
分類	地盤材料の分類名	砂質粘土 (低液性限界)	粘性土質砂	礫まじり 砂質粘土H	礫まじり 砂質粘土L	砂質粘土 (高液性限界)	砂質粘土 (高液性限界)
	分類記号	(CLS)	(SCs)	(CHS-G)	(CLS-G)	(CHS)	(CHS)
圧密	試験方法						
	圧縮指数 C_c 圧密降伏応力 p_c kN/m ²						
一軸圧縮	一軸圧縮強さ q_u kN/m ²						
	試験条件						
せん断	全応力	c kN/m ² ϕ °					
	有効応力	c' kN/m ² ϕ' °					

特記事項

1) 石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

土質試験結果一覧表 (基礎地盤)

調査件名 整理年月日 令和3年3月4日

整理担当者 本郷 隆夫

試料番号 (深さ)	MSR-5	SMR-5			
一般	湿润密度 ρ_t g/cm ³				
	乾燥密度 ρ_d g/cm ³				
	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.627	2.725		
	自然含水比 W_n %				
	間隙比 e				
	飽和度 S_r %				
粒度	石分 (75mm以上) %	0.0	0.0		
	礫分 ¹⁾ (2~75mm) %	9.7	0.4		
	砂分 ¹⁾ (0.075~2mm) %	37.7	7.9		
	シルト分 ¹⁾ (0.005~0.075mm) %	15.5	11.6		
	粘土分 ¹⁾ (0.005mm未満) %	37.1	80.1		
	最大粒径 mm	9.5	4.75		
	均等係数 U_c	--	--		
コンシステンス特性	液性限界 W_L %	64.47	104.21		
	塑性限界 W_P %	21.33	39.96		
	塑性指数 I_P	43.14	64.25		
分類	地盤材料の分類名	礫まじり砂質粘土H	砂まじり粘土 (高液性限界)		
	分類記号	(CHS-G)	(CH-S)		
圧密	試験方法				
	圧縮指数 C_c				
	圧密降伏応力 p_c kN/m ²				
一軸圧縮	一軸圧縮強さ q_u kN/m ²				
	試験条件				
せん断	全応力	c kN/m ²			
		ϕ °			
	有効応力	c' kN/m ²			
		ϕ' °			

特記事項

1) 石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

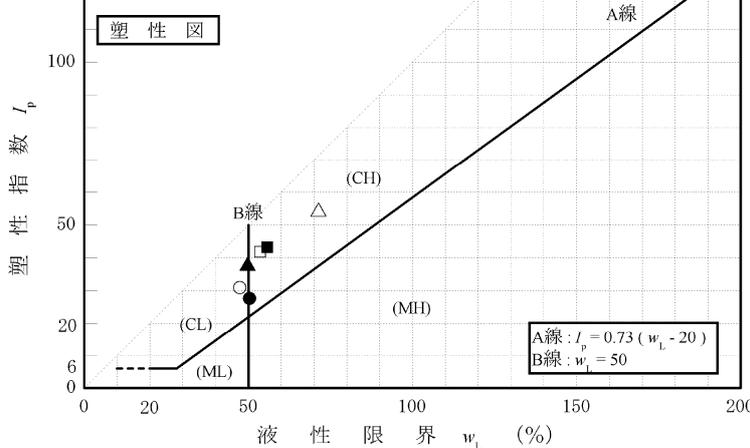
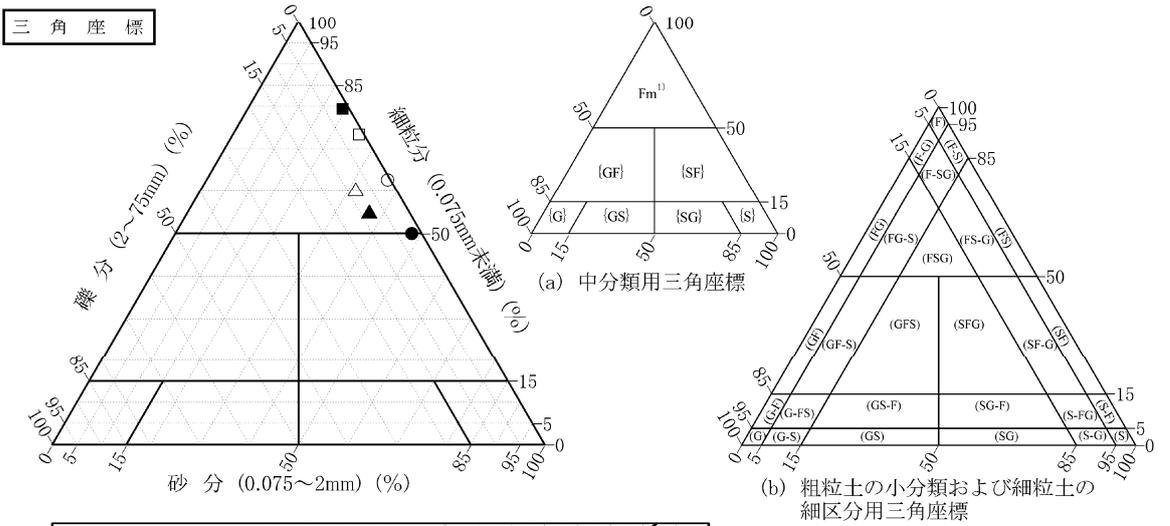
[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 0051	地盤材料の工学的分類	
----------	------------	--

調査件名 _____ 試験年月日 令和3年2月4日

試験者 清水裕之

試料番号 (深さ)	MSL-6	MSL-7	MSC-2	MSC-3	MSC-4	MSC-5
石分(75mm以上) %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
礫分(2~75mm) %	0.6	2.0	8.4	8.3	1.0	1.3
砂分(0.075~2mm) %	36.8	48.1	31.7	37.1	25.6	19.3
細粒分(0.075mm未満) %	62.6	49.9	59.9	54.6	73.4	79.4
シルト分(0.005~0.075mm) %	34.4	33.3	22.8	23.7	22.5	20.1
粘土分(0.005mm未満) %	28.2	16.6	37.1	30.9	50.9	59.3
最大粒径 mm	4.75	9.5	9.5	9.5	4.75	9.5
均等係数 U_s	—	65	—	—	—	—
液性限界 w_L %	47.38	50.35	71.34	49.79	53.56	55.76
塑性限界 w_p %	16.47	22.74	17.38	12.26	11.74	12.58
塑性指数 I_p	30.91	27.61	53.96	37.53	41.82	43.18
地盤材料の分類名	砂質粘土 (低液性限界)	粘性土質砂	礫まじり 砂質粘土H	礫まじり 砂質粘土L	砂質粘土 (高液性限界)	砂質粘土 (高液性限界)
分類記号	(CLS)	(SCs)	(CHS-G)	(CLS-G)	(CHS)	(CHS)
凡例記号	○	●	△	▲	□	■



特記事項 1) 主に観察と塑性図で判別分類

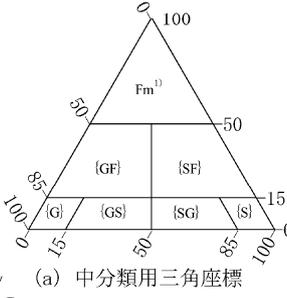
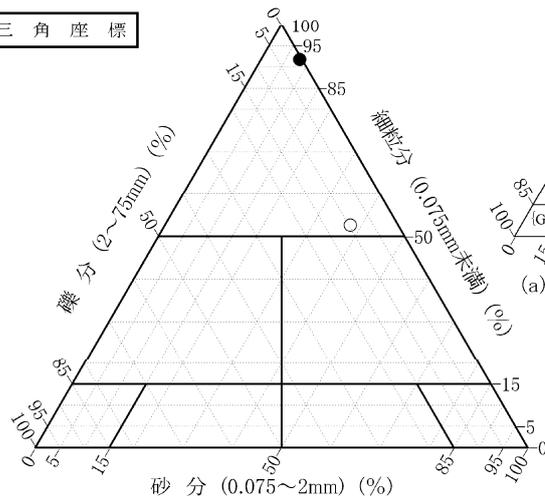
JGS 0051	地盤材料の工学的分類	
----------	------------	--

調査件名 _____ 試験年月日 令和3年2月4日

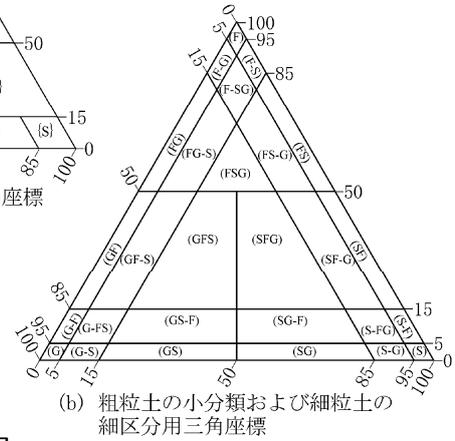
試験者 清水 裕之

試料番号 (深 さ)	MSR-5	SMR-5			
石 分(75mm以上) %	0.0	0.0			
礫 分(2~75mm) %	9.7	0.4			
砂 分(0.075~2mm) %	37.7	7.9			
細 粒 分(0.075mm未満) %	52.6	91.7			
シルト分(0.005~0.075mm) %	15.5	11.6			
粘 土 分(0.005mm未満) %	37.1	80.1			
最 大 粒 径 mm	9.5	4.75			
均 等 係 数 U_s	—	—			
液 性 限 界 w_L %	64.47	104.21			
塑 性 限 界 w_p %	21.33	39.96			
塑 性 指 数 I_p	43.14	64.25			
地盤材料の分類名	礫まじり 砂質粘土H	砂まじり粘土 (高液性限界)			
分 類 記 号	(CHS-G)	(CH-S)			
凡 例 記 号	○	●			

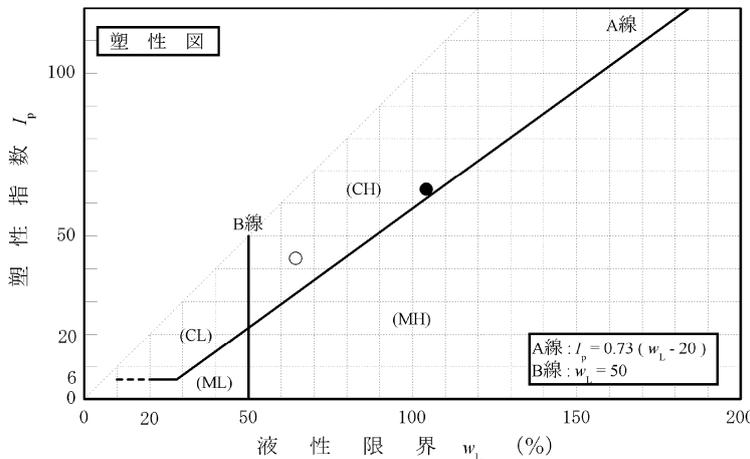
三角座標



(a) 中分類用三角座標



(b) 粗粒土の小分類および細粒土の細区分用三角座標



特記事項 1) 主に観察と塑性図で判別分類

含水比試験

JIS A 1203 JGS 0121	土 の 含 水 比 試 験
------------------------	---------------

調査件名 _____ 試験年月日 令和 2 年 12 月 18 日

採取日:R2.12.18

採取地:兵庫県豊岡市虫生

試験者 北田奈緒子

試料番号 (深さ)	MSL-1			MSL-2		
容器 No.	965	137	783	13	683	555
m_a g	39.28	37.79	41.12	38.29	40.84	40.04
m_b g	37.15	35.97	38.58	36.87	39.12	38.32
m_c g	28.93	28.90	29.02	28.91	28.96	28.93
w %	25.91	25.74	26.57	17.84	16.93	18.32
平均値 w %	26.1			17.7		
特記事項						

試料番号 (深さ)	MSC-1			MSC-2		
容器 No.	859	566	523	235	275	594
m_a g	40.37	39.53	38.56	38.25	38.83	40.37
m_b g	38.50	37.74	36.92	36.89	37.42	38.73
m_c g	28.95	28.95	28.95	28.88	29.00	28.94
w %	19.58	20.36	20.58	16.98	16.75	16.75
平均値 w %	20.17			16.83		
特記事項						

試料番号 (深さ)	MSC-3			MSC-4		
容器 No.	351	264	88	239	650	203
m_a g	41.21	40.99	39.51	39.00	40.60	40.66
m_b g	38.60	38.32	37.38	37.12	38.41	38.43
m_c g	28.93	28.96	28.94	28.92	28.98	28.87
w %	26.99	28.53	25.24	22.93	23.22	23.33
平均値 w %	26.92			23.16		
特記事項						

試料番号 (深さ)	MSC-5			MSR-1		
容器 No.	913	833	984	458	930	851
m_a g	43.03	42.35	41.90	45.21	41.11	41.98
m_b g	39.95	39.52	39.06	41.68	38.49	39.14
m_c g	28.68	28.91	28.91	28.97	28.91	28.96
w %	27.33	26.67	27.98	27.77	27.35	27.90
平均値 w %	27.33			27.67		
特記事項						

試料番号 (深さ)						
容器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平均値 w %						
特記事項						

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100$$

m_a : (試料+容器) 質量
 m_b : (炉乾燥試料+容器) 質量
 m_c : 容器質量

JIS A 1203 JGS 0121	土 の 含 水 比 試 験
------------------------	---------------

調査件名 活断層評価R2 試験年月日 令和 3 年 1 月 13 日

試験者 清水 裕之

試料番号 (深さ)	SM-A			SM-B		
容器 No.	217	387	600	378	562	255
m_a g	39.4	40.4	40.2	43.7	43.1	41.1
m_b g	33.9	34.3	34.2	36.3	36.1	35.1
m_c g	29.0	29.0	28.9	29.0	29.0	29.0
w %	112.2	115.1	113.2	101.4	98.6	98.4
平均値 w %	113.5			99.5		
特記事項						

試料番号 (深さ)						
容器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平均値 w %						
特記事項						

試料番号 (深さ)						
容器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平均値 w %						
特記事項						

試料番号 (深さ)						
容器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平均値 w %						
特記事項						

試料番号 (深さ)						
容器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平均値 w %						
特記事項						

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100$$

m_a : (試料+容器) 質量
 m_b : (炉乾燥試料+容器) 質量
 m_c : 容器質量

静的強度試験

MSR

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月1日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称 JGS 0523 土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 $\rho_s^{(3)}$ g/cm ³	2.627
供試体の作製 ²⁾	トリミング		
土質名称			

供試体 No.		1	2	3	
初期状態	直径 cm	5.016 5.037	5.019 5.051	5.088 5.032	
		4.904 4.927	4.964 5.061	4.996 4.965	
		4.865 4.858	4.929 5.000	5.015 4.972	
	平均直径 D_i cm	4.935	5.004	5.011	
	高さ cm	10.299	10.247	10.133	
		10.348	10.108	10.093	
	平均高さ H_i cm	10.324	10.178	10.113	
	体積 V_i cm ³	197.5	200.2	199.4	
	含水比 w_i %	27.3	31.5	24.8	
	質量 m_i g	360.9	371.2	386.3	
	湿潤密度 $\rho_{ti}^{(3)}$ g/cm ³	1.827	1.854	1.937	
	乾燥密度 $\rho_{di}^{(3)}$ g/cm ³	1.435	1.410	1.552	
	間隙比 $e_i^{(3)}$	0.830	0.863	0.692	
	飽和度 $S_{ti}^{(3)}$ %	86.4	95.9	94.1	
相対密度 $D_{ri}^{(3)}$ %					
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定			
	設置時の軸変位量 cm				
	飽和過程の軸変位量 cm				
	軸変位量 $\Delta H_i^{(5)}$ cm	0.041	0.025	0.045	
	体積変化量の測定方法	計算による			
	設置時の体積変化量 cm ³				
	飽和過程の体積変化量 cm ³				
体積変化量 $\Delta V_i^{(3)}$ cm ³	2.4	1.5	2.7		
圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	10.283	10.153	10.068	
	直径 D_0 cm	4.915	4.992	4.988	
	体積 V_0 cm ³	195.1	198.7	196.7	
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{(3)}$ g/cm ³	1.453	1.421	1.573	
	間隙比 $e_0^{(3)}$	0.808	0.849	0.670	
	相対密度 $D_{r0}^{(3)}$				
炉乾燥後	容器 No.				
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g				
	容器質量 g				
	炉乾燥質量 m_s g	283.5	282.3	309.5	

特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態(塊状, 凍結, ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法等を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

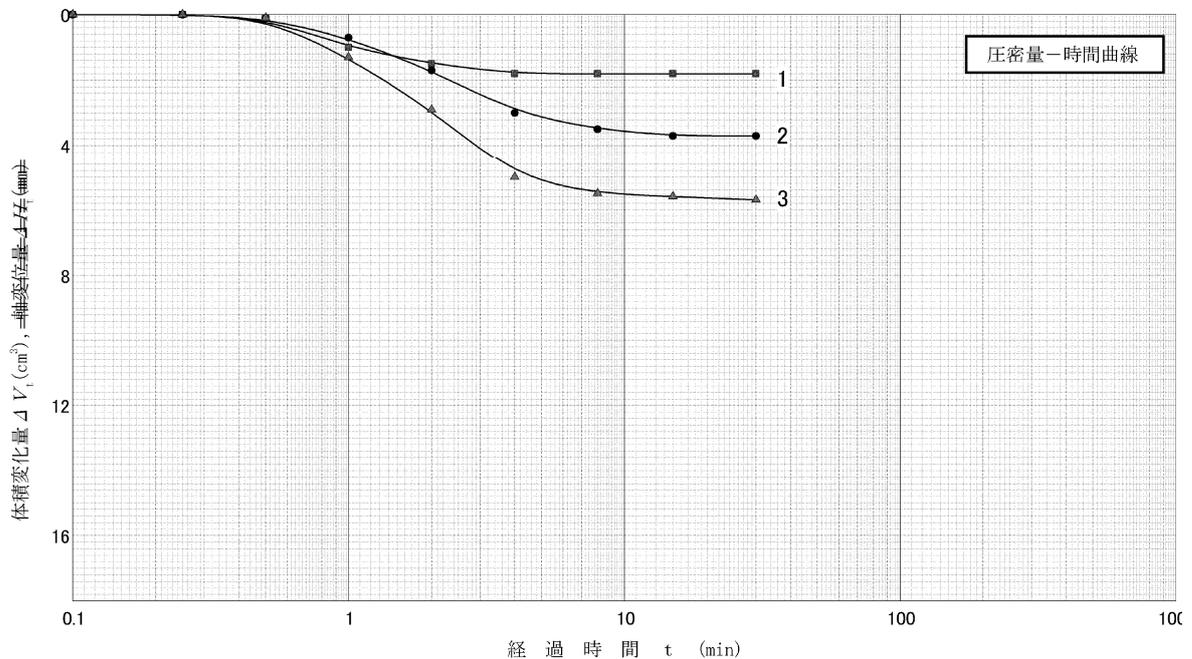
[1kN/m²≒0.1012kgf/cm²]

JGS 0523	土の三軸圧縮試験 [CU, CU , CD] (圧密前, 圧密後) (圧密量-時間曲線)
----------	--

調査件名 試験年月日 令和3年2月1日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾		乱さない		⁴⁾		
供試体の作製方法 ²⁾		トリミング		⁴⁾		
土質名称				圧密中の排水方法		
土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³		2.627		両面排水		
供試体 No.		1		2		
試験条件	セル圧 σ_c kN/m ²	250		300		
	背圧 u_b kN/m ²	200		200		
	圧密応力 σ'_c kN/m ²	50		100		
圧密前	高さ H_0 cm	10.283		10.153		
	直径 D_0 cm	4.915		4.992		
	間隙比 e_0 ³⁾	0.808		0.849		
圧密後	圧密時間 t_c min	30		30		
	体積変化量 ΔV_c cm ³	1.8		3.7		
	軸変位量 ΔH_c cm	0.029		0.053		
	体積 V_c cm ³	193.3		195.0		
	高さ H_c cm	10.254		10.100		
	炉乾燥質量 m_s g	283.5		282.3		
	乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	1.467		1.448		
	間隙比 e_c ³⁾	0.791		0.815		
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta \sigma$ kN/m ²	20.0		20.0		
	間隙水圧増加量 Δu kN/m ²	18.9		19.3		
	測定に要した時間 min	15		15		
B 値	0.95		0.97		0.95	



特記事項

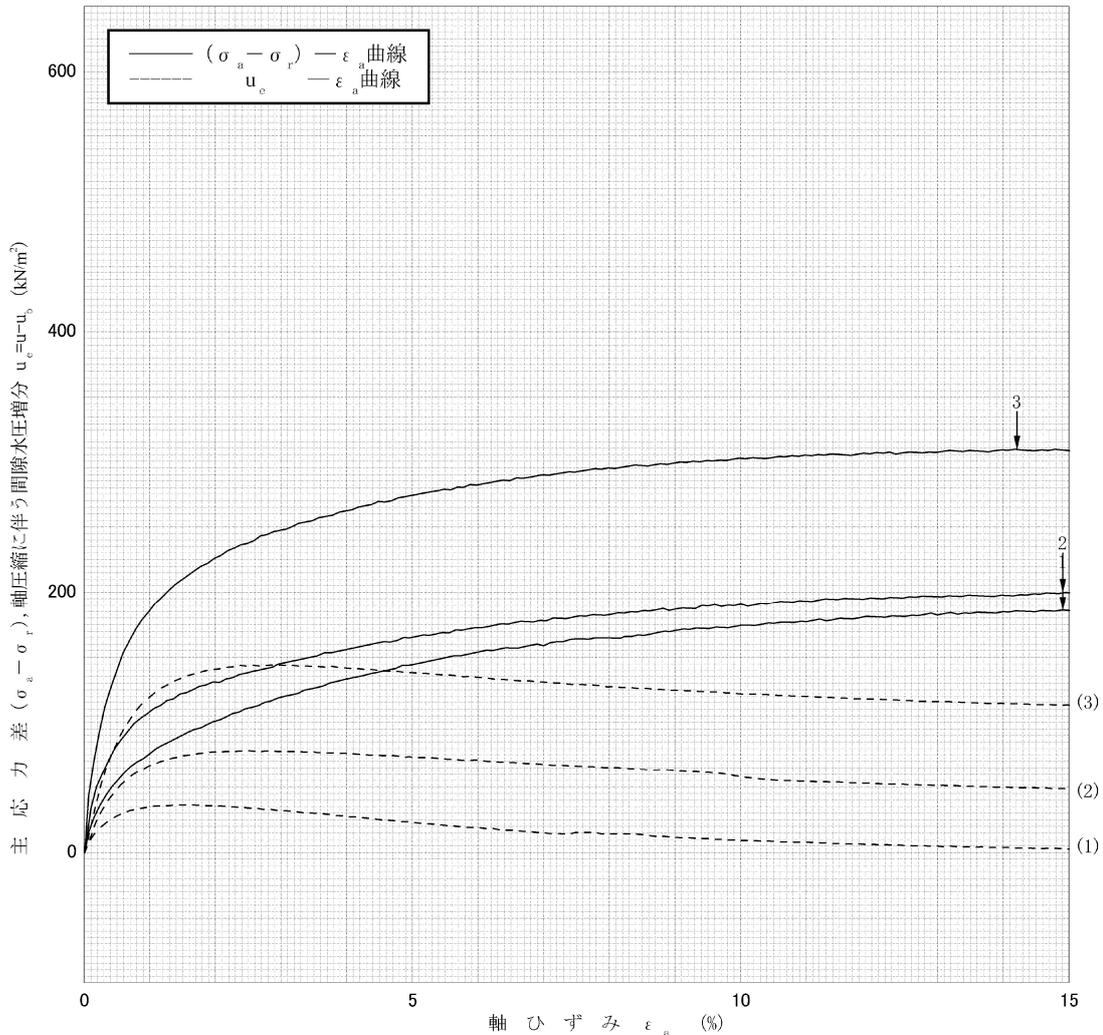
- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解冻方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土野の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

調査件名 _____ 試験年月日 令和3年2月1日

試料番号(深さ) MSR _____ 試験者 清水 裕之

土質名称	供試体 No.	1	2	3			
	セル圧・圧密応力	kN/m ²	50	100	200		
	背圧	kN/m ²	200	200	200		
ひずみ速度 %/min	0.1						
特記事項 1)必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。	主応力差最大時	圧縮強さ ($\sigma_a - \sigma_r$) _{max}	kN/m ²	186	200	309	
		軸ひずみ ϵ_{af}	%	14.9	14.9	14.2	
		CU	間隙水圧 u_f	kN/m ²	3	49	114
			有効軸方向応力 σ'_{az}	kN/m ²	233	251	395
		CD	有効側方向応力 σ'_{ar}	kN/m ²	47	51	86
体積ひずみ ϵ_{vf}	%						
	間隙比 e_f						
供試体の破壊状況			□	□	□	□	



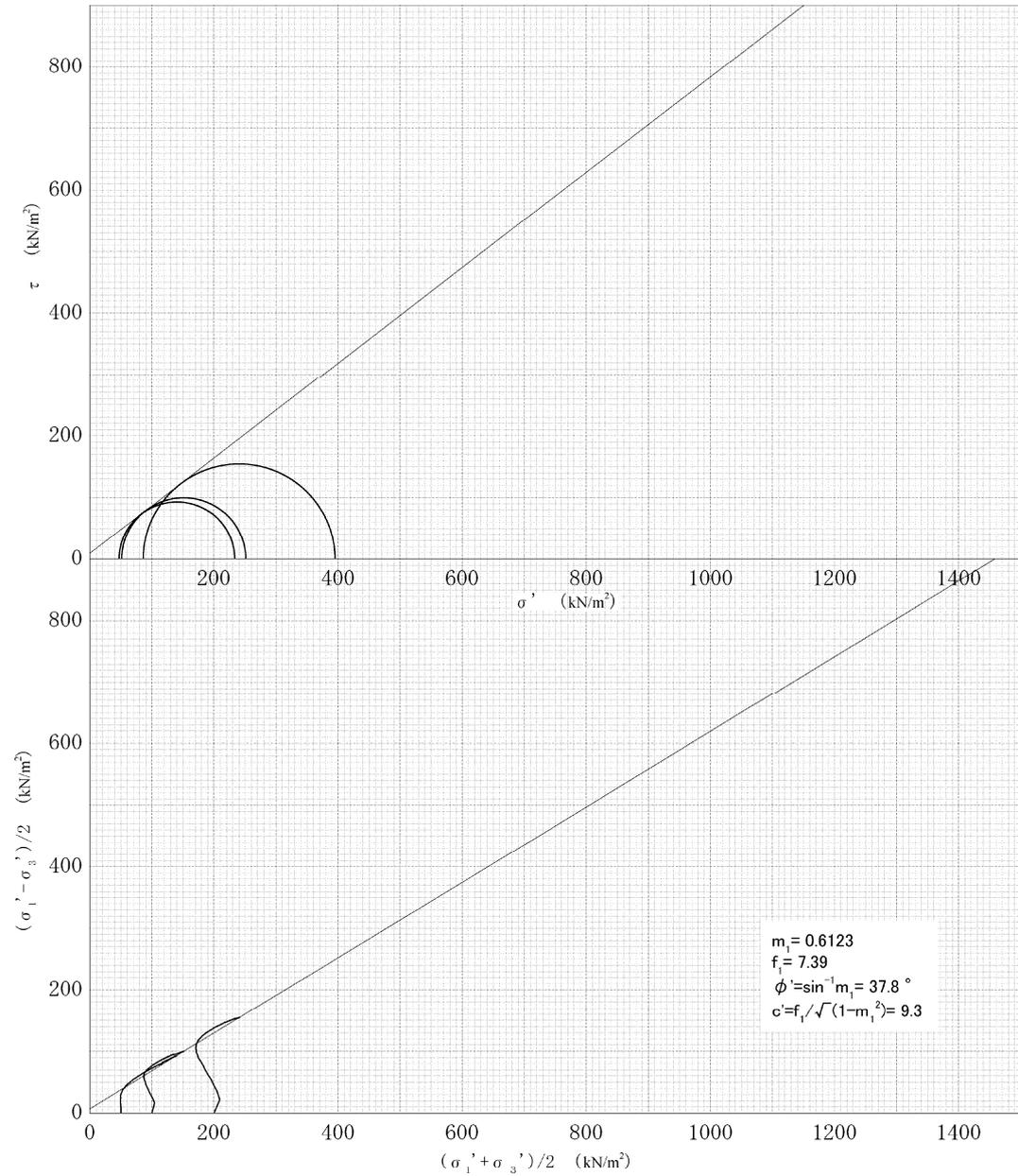
[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 0523	土の強度特性	土の三軸圧縮試験 [CU]
----------	--------	---------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 2 月 1 日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$
正 規 圧 密 領 域				9.3	37.8
過 圧 密 領 域					



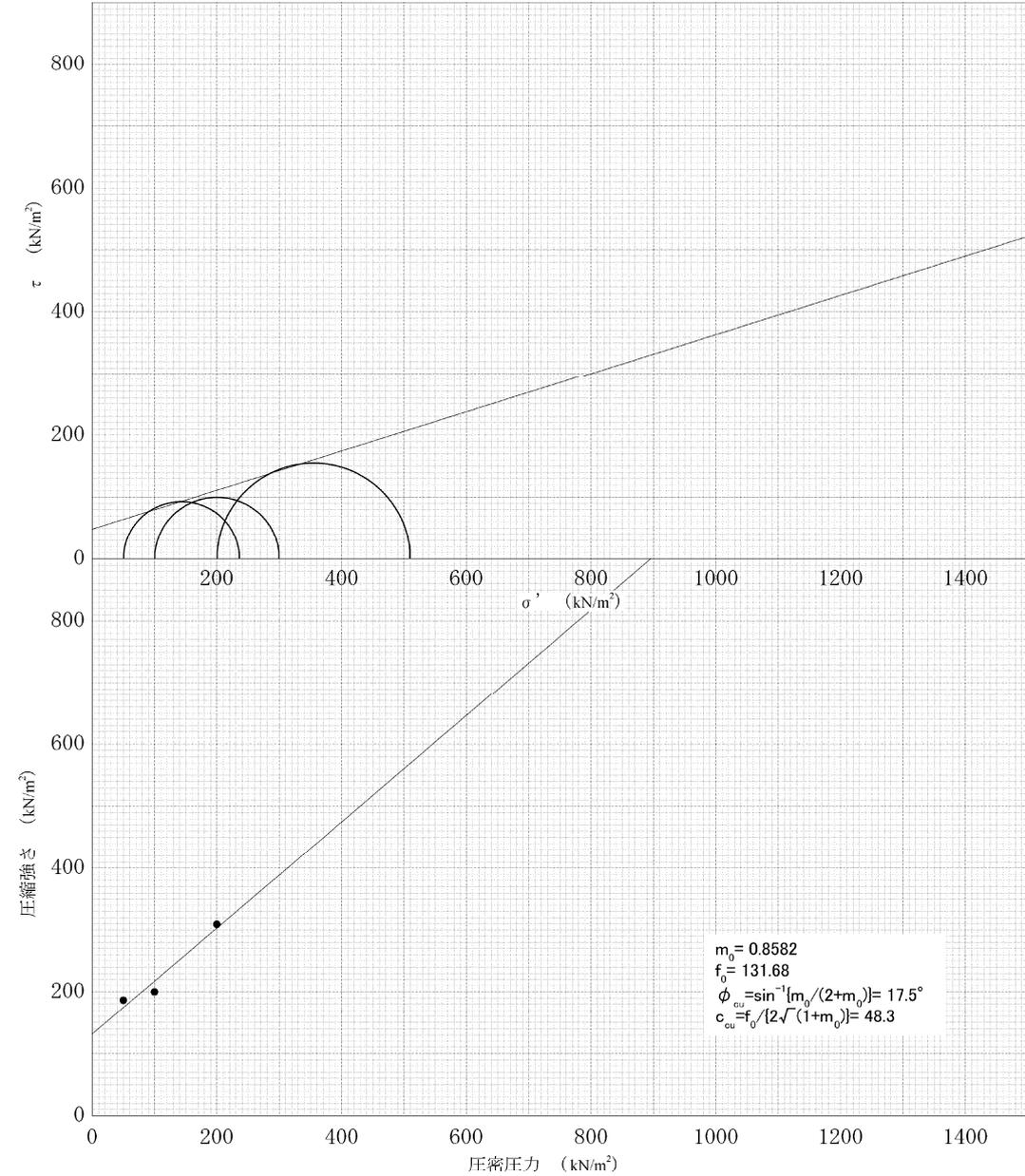
特 記 事 項

JGS 0523	土の強度特性	土の三軸圧縮試験 [CU]
----------	--------	---------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 2 月 1 日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

応力範囲	強度定数	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$	
正 規 圧 密 領 域	48.3	17.5	0.3153			
過 圧 密 領 域						



特 記 事 項

静的強度試験

MSC

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月15日

試料番号(深さ) MSC 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称 JGS 0523 土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³	2.65
供試体の作製 ²⁾	トリミング		
土質名称			

供試体 No.		1	2	3	
初期状態	直径 cm	4.958 4.995	5.084 5.074	4.886 4.954	
		4.938 4.821	5.033 5.006	4.917 4.921	
		4.868 4.916	4.988 5.014	4.906 4.925	
	平均直径 D_i cm	4.916	5.033	4.918	
	高さ cm	10.090	10.080	10.238	
		10.098	10.046	10.195	
	平均高さ H_i cm	10.094	10.063	10.217	
	体積 V_i cm ³	191.6	200.2	194.1	
	含水比 w_i %	23.6	26.2	19.0	
	質量 m_i g	359.3	381.8	394.3	
	湿潤密度 $\rho_{ti}^{3)}$ g/cm ³	1.875	1.907	2.031	
	乾燥密度 $\rho_{di}^{3)}$ g/cm ³	1.517	1.511	1.707	
	間隙比 $e_i^{3)}$	0.746	0.754	0.553	
	飽和度 $S_{ti}^{3)}$ %	83.8	92.1	91.0	
	相対密度 $D_{ri}^{3)}$ %				
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定			
	設置時の軸変位量 cm				
	飽和過程の軸変位量 cm				
	軸変位量 $\Delta H_i^{5)}$ cm	0.067	0.019	0.041	
	体積変化量の測定方法	計算による			
	設置時の体積変化量 cm ³				
	飽和過程の体積変化量 cm ³				
体積変化量 $\Delta V_i^{3)}$ cm ³	3.8	1.1	2.3		
圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	10.027	10.044	10.176	
	直径 D_0 cm	4.883	5.024	4.899	
	体積 V_0 cm ³	187.8	199.1	191.8	
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{3)}$ g/cm ³	1.548	1.519	1.727	
	間隙比 $e_0^{3)}$	0.711	0.744	0.534	
	相対密度 $D_{r0}^{3)}$				
炉乾燥後	容器 No.				
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g				
	容器質量 g				
	炉乾燥質量 m_s g	290.8	302.5	331.3	

特記事項

- 1) 試料の採取方法、試料の状態(塊状、凍結、ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法、負圧法の種別、凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

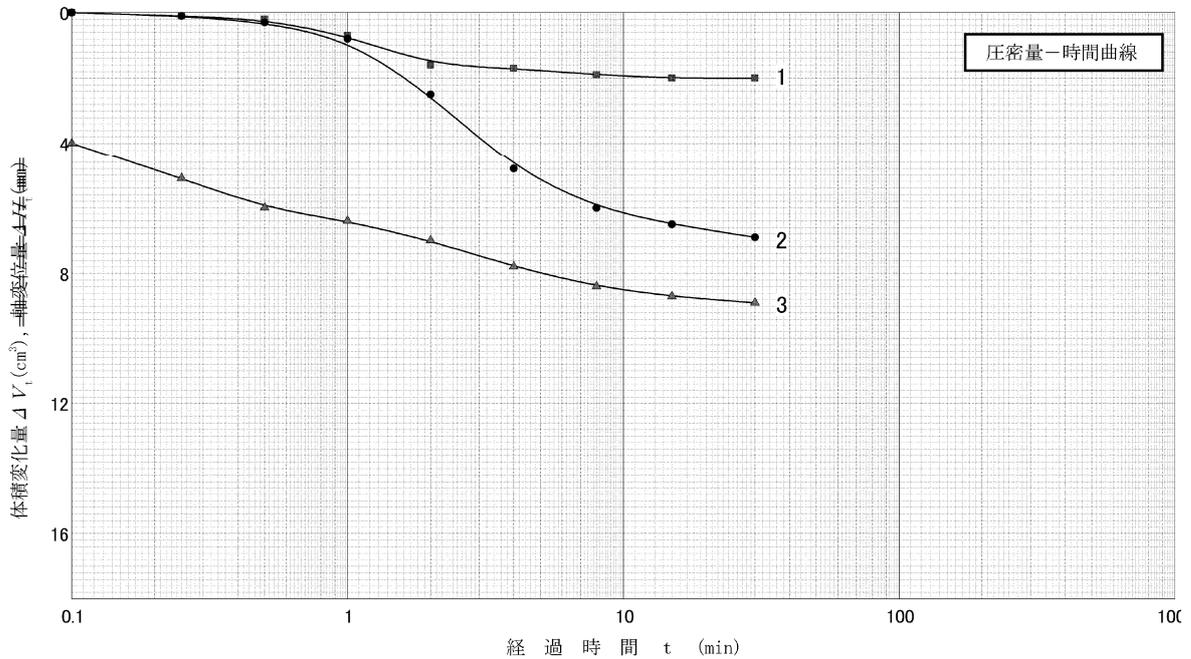
[1kN/m²≒0.1012kgf/cm²]

JGS 0523	土の三軸圧縮試験 [CU, CU , CD] (圧密前, 圧密後) (圧密量-時間曲線)
----------	--

調査件名 試験年月日 令和3年1月15日

試料番号(深さ) MSC 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾	乱さない		
供試体の作製方法 ²⁾	トリミング		
土質名称		圧密中の排水方法	両面排水
土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³	2.65		
供試体 No.	1	2	3
試験条件			
セル圧 σ_c kN/m ²	250	300	400
背圧 u_b kN/m ²	200	200	200
圧密応力 σ'_c kN/m ²	50	100	200
圧密前			
高さ H_0 cm	10.027	10.044	10.176
直径 D_0 cm	4.883	5.024	4.899
間隙比 e_0 ³⁾	0.711	0.744	0.534
圧密後			
圧密時間 t_c min	30	30	30
体積変化量 ΔV_c cm ³	2.0	6.9	8.9
軸変位量 ΔH_c cm	0.020	0.059	0.099
体積 V_c cm ³	185.8	192.2	182.9
高さ H_c cm	10.007	9.985	10.077
炉乾燥質量 m_s g	290.8	302.5	331.3
乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	1.565	1.574	1.811
間隙比 e_c ³⁾	0.693	0.684	0.463
間隙圧係数 B			
等方応力増加量 $\Delta \sigma$ kN/m ²	20.0	20.0	20.0
間隙水圧増加量 Δu kN/m ²	19.2	19.0	19.3
測定に要した時間 min	15	15	15
B 値	0.96	0.95	0.97



特記事項

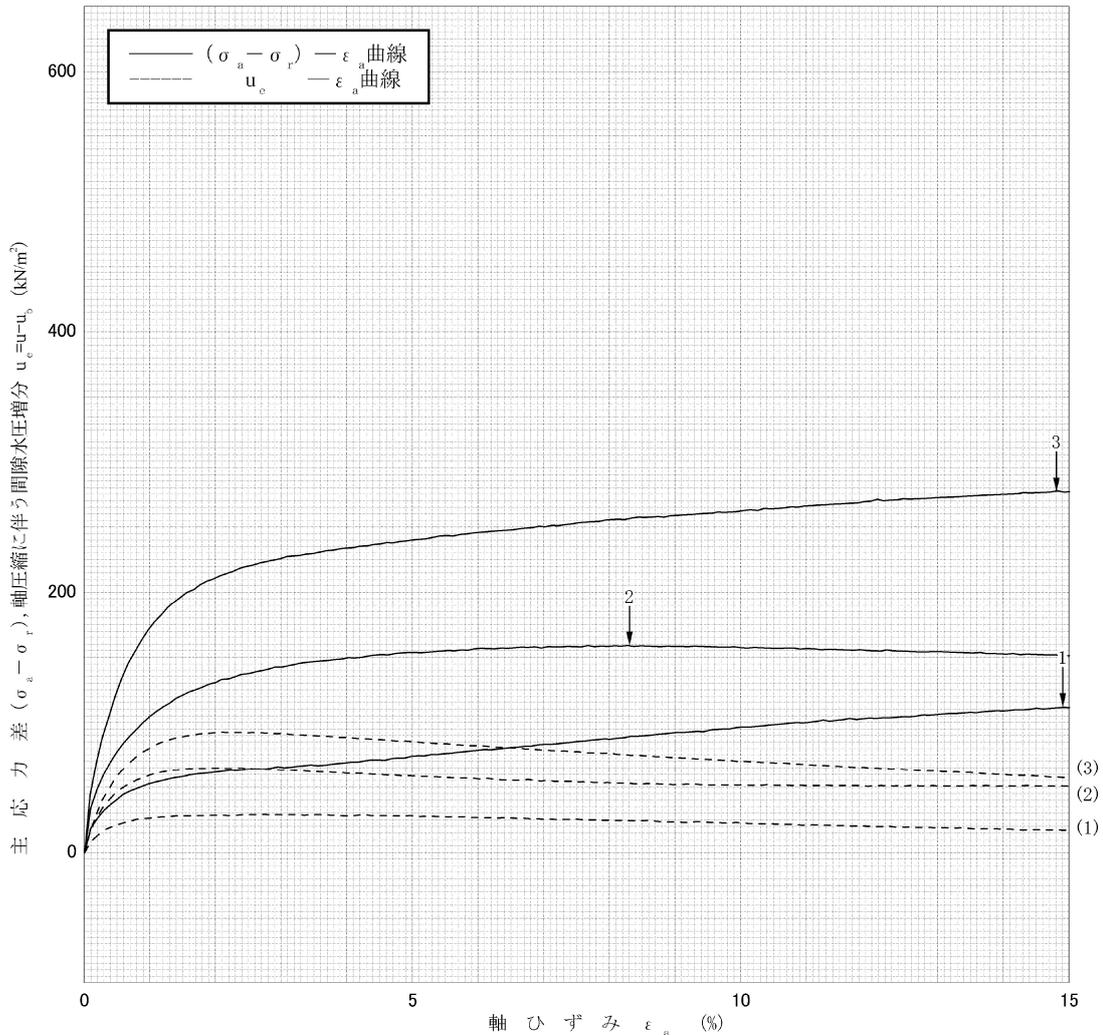
- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土野の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

調査件名 _____ 試験年月日 令和3年1月15日

試料番号(深さ) MSC _____ 試験者 清水 裕之

土質名称	供試体 No.	1	2	3			
	セル圧・圧密応力	kN/m ²	50	100	200		
	背圧	kN/m ²	200	200	200		
ひずみ速度 %/min	0.1						
特記事項 1)必要に応じて粘性土の場合は液性限界,塑性限界,砂質土の場合は最小乾燥密度,最大乾燥密度等を記載する。	主応力差最大時	圧縮強さ ($\sigma_a - \sigma_r$) _{max}	kN/m ²	112	159	277	
		軸ひずみ ϵ_{af}	%	14.9	8.3	14.8	
		CU	間隙水圧 u_f	kN/m ²	17	53	58
			有効軸方向応力 σ'_{az}	kN/m ²	145	206	420
		CD	有効側方向応力 σ'_{ra}	kN/m ²	33	47	142
体積ひずみ ϵ_{vf}	%						
	間隙比 e_f						
供試体の破壊状況			□	□	□	□	



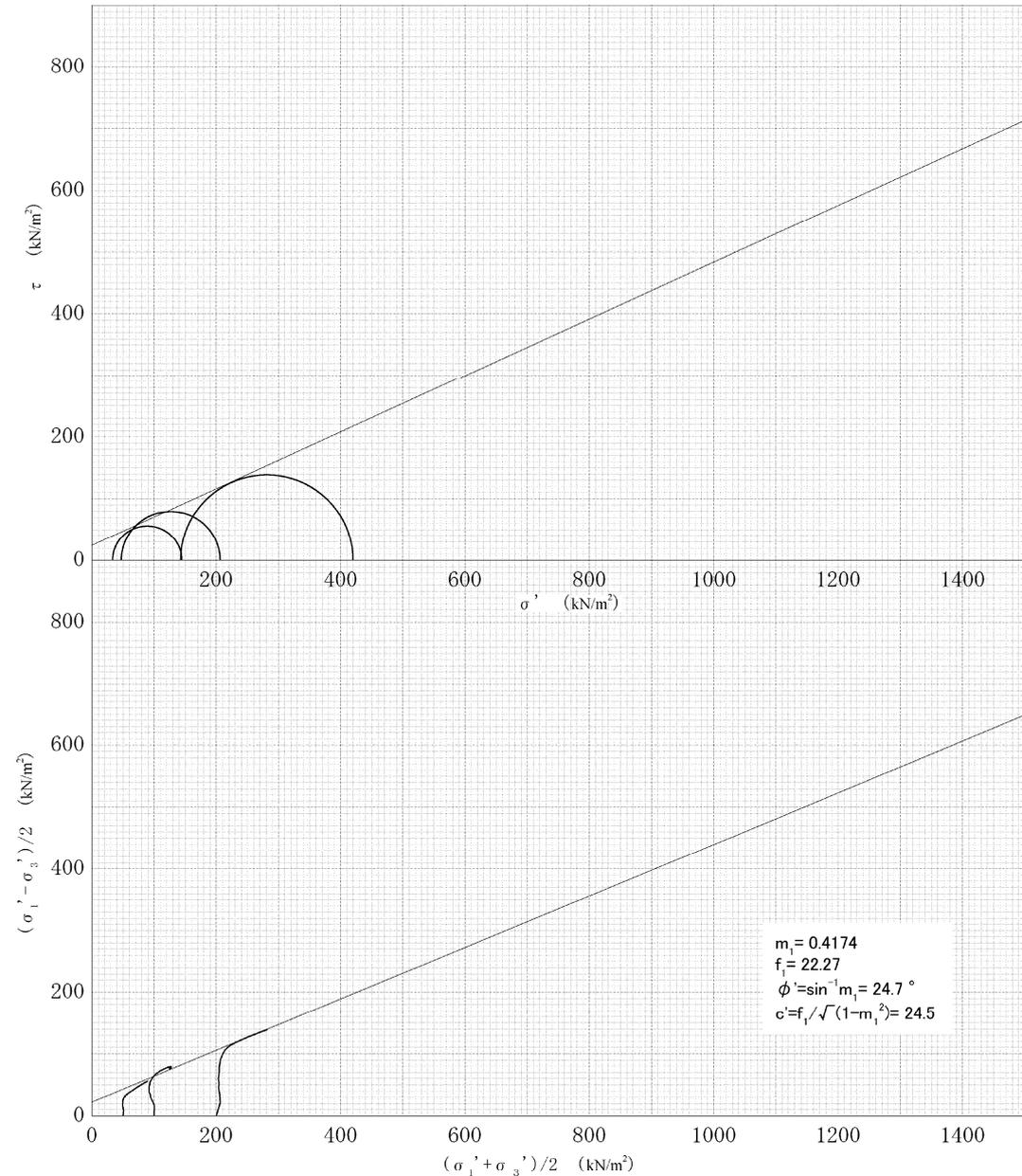
[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 0523	土の強度特性	土の三軸圧縮試験 [CU]
----------	--------	---------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 1 月 15 日

試料番号(深さ) MSC 試験者 清水 裕之

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^\circ$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^\circ$
正 規 圧 密 領 域				24.5	24.7
過 圧 密 領 域					



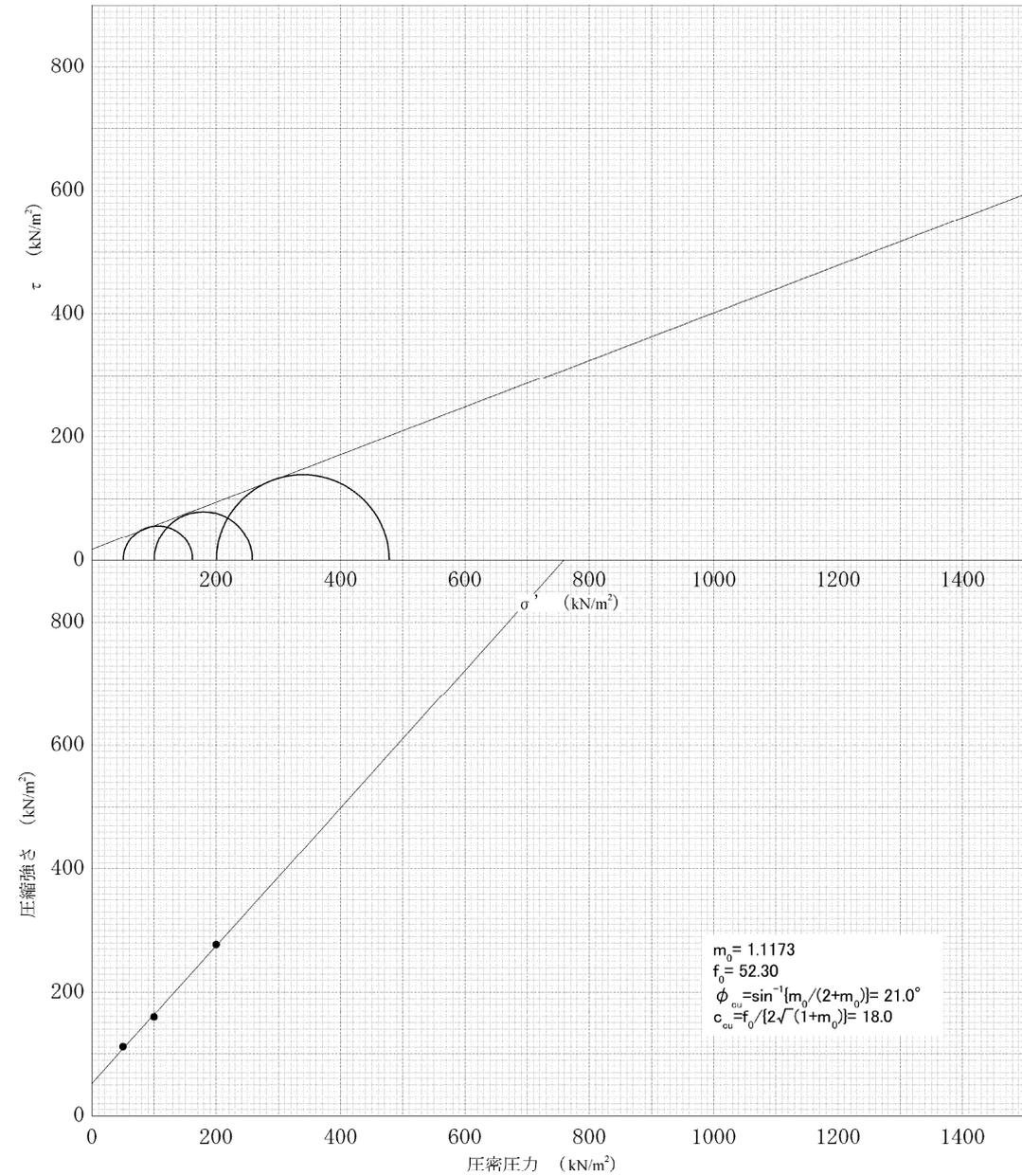
特 記 事 項

JGS 0523	土の強度特性	土の三軸圧縮試験 [CU]
----------	--------	---------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 1 月 15 日

試料番号(深さ) MSC 試験者 清水 裕之

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$
正 規 圧 密 領 域	18.0	21.0	0.3839		
過 圧 密 領 域					



特 記 事 項

静的強度試験

MSL

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月7日

試料番号(深さ) MSL 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称 JGS 0523 土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 $\rho_s^{(3)}$ g/cm ³	2.658
供試体の作製 ²⁾	トリミング		
土質名称			

供試体 No.		1	2	3
初期状態	直径 cm	4.950 4.978	4.890 4.860	5.055 5.049
		4.967 5.086	4.858 4.857	5.049 5.048
	平均直径 D_i cm	5.024 5.194	4.850 4.834	5.037 5.039
	高さ cm	10.061	9.939	10.254
		10.090	9.945	10.256
	平均高さ H_i cm	10.076	9.942	10.255
	体積 V_i cm ³	200.5	184.3	205.1
	含水比 w_i %	19.2	22.4	20.1
	質量 m_i g	392.2	369.9	421.4
	湿潤密度 $\rho_{i1}^{(3)}$ g/cm ³	1.956	2.007	2.055
	乾燥密度 $\rho_{di}^{(3)}$ g/cm ³	1.641	1.640	1.711
	間隙比 $e_i^{(3)}$	0.620	0.621	0.554
	飽和度 $S_{i1}^{(3)}$ %	82.3	95.9	96.4
	相対密度 $D_{ri}^{(3)}$ %			
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定		
	設置時の軸変位量 cm			
	飽和過程の軸変位量 cm			
	軸変位量 $\Delta H_i^{(5)}$ cm	0.064	0.076	0.041
	体積変化量の測定方法	計算による		
	設置時の体積変化量 cm ³			
	飽和過程の体積変化量 cm ³			
体積変化量 $\Delta V_i^{(3)}$ cm ³	3.8	4.2	2.5	
圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	10.012	9.866	10.214
	直径 D_0 cm	5.001	4.821	5.025
	体積 V_0 cm ³	196.7	180.1	202.6
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{(3)}$ g/cm ³	1.672	1.678	1.731
	間隙比 $e_0^{(3)}$	0.590	0.584	0.535
	相対密度 $D_{r0}^{(3)}$			
炉乾燥後	容器 No.			
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g			
	容器質量 g			
	炉乾燥質量 m_s g	328.9	302.2	350.8

特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態(塊状, 凍結, ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

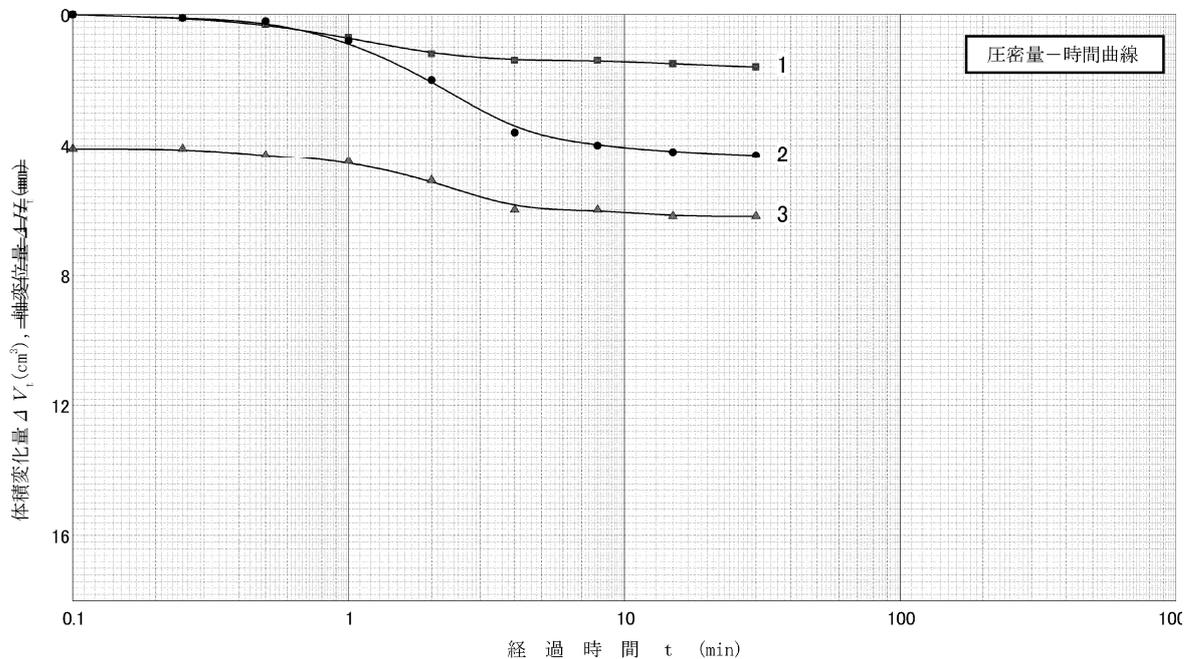
[1kN/m² ≒ 0.1012kgf/cm²]

JGS 0523	土の三軸圧縮試験 [CU, CU , CD] (圧密前, 圧密後) (圧密量-時間曲線)
----------	--

調査件名 試験年月日 令和3年1月7日

試料番号(深さ) MSL 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾		乱さない		
供試体の作製方法 ²⁾		トリミング		
土質名称			圧密中の排水方法	両面排水
土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³		2.658		
供試体 No.		1	2	3
試験条件	セル圧 σ_c kN/m ²	250	300	400
	背圧 u_b kN/m ²	200	200	200
	圧密応力 σ'_c kN/m ²	50	100	200
圧密前	高さ H_0 cm	10.012	9.866	10.214
	直径 D_0 cm	5.001	4.821	5.025
	間隙比 e_0 ³⁾	0.590	0.584	0.535
圧密後	圧密時間 t_c min	30	30	30
	体積変化量 ΔV_c cm ³	1.6	4.3	6.2
	軸変位量 ΔH_c cm	0.020	0.038	0.086
	体積 V_c cm ³	195.1	175.8	196.4
	高さ H_c cm	9.992	9.828	10.128
	炉乾燥質量 m_s g	328.9	302.2	350.8
	乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	1.686	1.719	1.786
	間隙比 e_c ³⁾	0.577	0.546	0.488
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta \sigma$ kN/m ²	20.0	20.0	20.0
	間隙水圧増加量 Δu kN/m ²	19.0	19.3	19.1
	測定に要した時間 min	15	15	15
B 値		0.95	0.97	0.96



特記事項

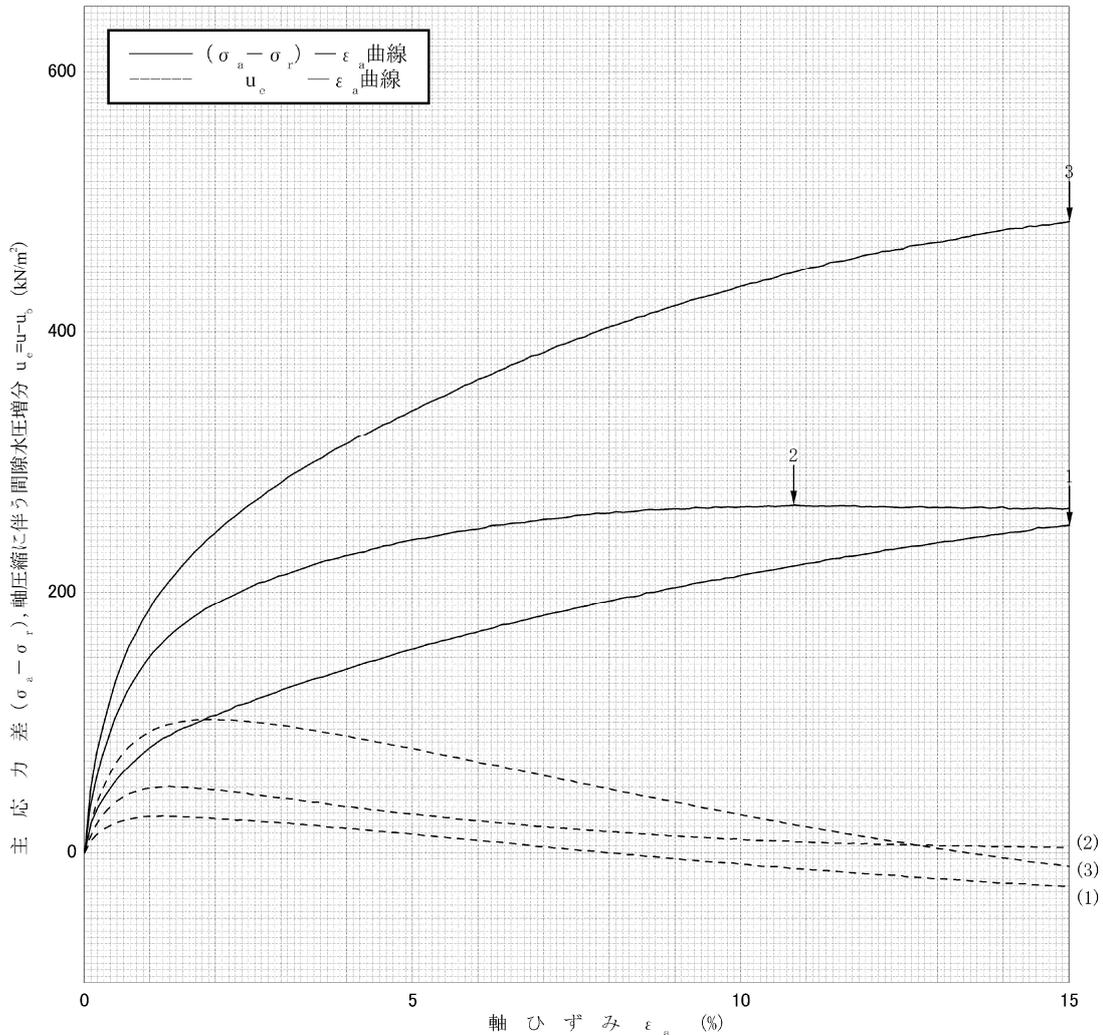
- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土野の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

調査件名 _____ 試験年月日 令和3年1月7日

試料番号(深さ) MSL 試験者 清水 裕之

土質名称	供試体 No.	1	2	3			
	セル圧・圧密応力	kN/m ²	50	100	200		
	背圧	kN/m ²	200	200	200		
ひずみ速度 %/min	0.1						
特記事項 1)必要に応じて粘性土の場合は液性限界,塑性限界,砂質土の場合は最小乾燥密度,最大乾燥密度等を記載する。	主応力差最大時	圧縮強さ ($\sigma_a - \sigma_r$) _{max}	kN/m ²	251	267	485	
		軸ひずみ ϵ_{af}	%	15.0	10.8	15.0	
		CU	間隙水圧 u_f	kN/m ²	-26	8	-10
			有効軸方向応力 σ'_{az}	kN/m ²	327	358	695
		CD	有効側方向応力 σ'_{ra}	kN/m ²	76	92	210
体積ひずみ ϵ_{vf}	%						
	間隙比 e_f						
供試体の破壊状況			□	□	□	□	



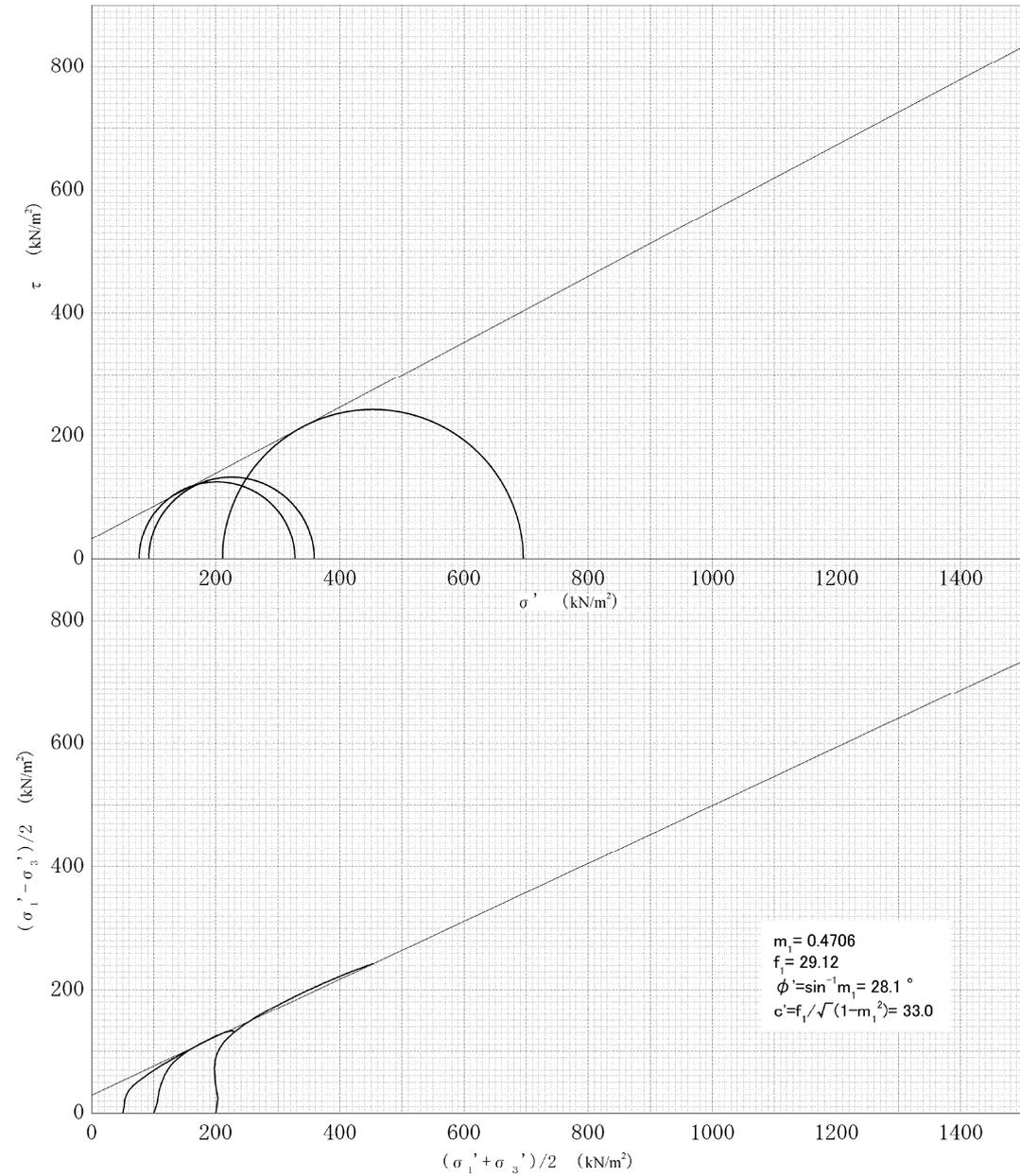
[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 0523	土の強度特性	土の三軸圧縮試験 [CU]
----------	--------	---------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 1 月 7 日

試料番号(深さ) MSL 試験者 清水 裕之

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^\circ$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^\circ$
正 規 圧 密 領 域				33.0	28.1
過 圧 密 領 域					



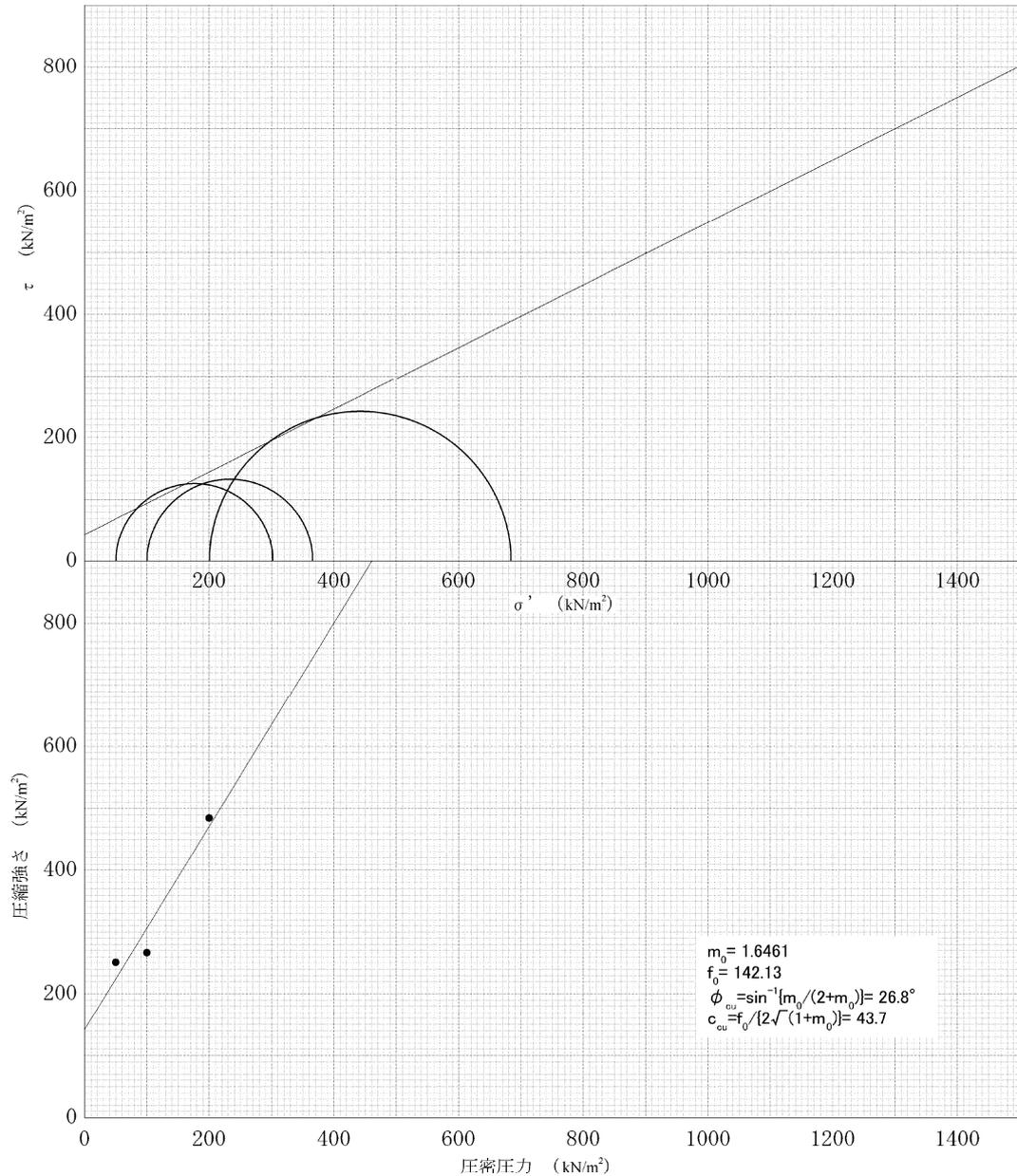
特 記 事 項

JGS 0523	土の強度特性	土の三軸圧縮試験 [CU]
----------	--------	---------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 1 月 7 日

試料番号(深さ) MSL 試験者 清水 裕之

応力範囲	強度定数	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$	
正 規 圧 密 領 域	43.7	26.8	0.5051			
過 圧 密 領 域						



特 記 事 項

静的強度試験

SMR

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月1日

試料番号(深さ) SMR 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称 JGS 0523 土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³	2.725
供試体の作製 ²⁾	トリミング		
土質名称			

供試体 No.		1	2	3	
初期状態	直径 cm	5.053 5.033	5.055 5.015	5.070 5.044	
	平均直径 D_i cm	4.941 5.059	4.997 5.024	5.018 5.012	
	高さ cm	4.965 4.921	4.968 4.979	4.955 4.990	
	平均高さ H_i cm	10.128	10.195	10.226	
	体積 V_i cm ³	10.086	10.173	10.182	
	含水比 w_i %	10.107	10.184	10.204	
	質量 m_i g	198.1	200.4	201.6	
	湿潤密度 $\rho_{i1}^{3)}$ g/cm ³	107.9	101.4	94.4	
	乾燥密度 $\rho_{di}^{3)}$ g/cm ³	253.6	270.9	273.2	
	間隙比 $e_i^{3)}$	1.280	1.352	1.355	
	飽和度 $S_{r1}^{3)}$ %	0.616	0.671	0.697	
	相対密度 $D_{ri}^{3)}$ %	3.425	3.060	2.910	
		85.8	90.3	88.4	

設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定			
	設置時の軸変位量 cm				
	飽和過程の軸変位量 cm				
	軸変位量 $\Delta H_i^{5)}$ cm	0.034	0.027	0.009	
	体積変化量の測定方法	計算による			
	設置時の体積変化量 cm ³				
	飽和過程の体積変化量 cm ³				

圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	10.073	10.157	10.195	
	直径 D_0 cm	4.979	4.992	5.011	
	体積 V_0 cm ³	196.1	198.8	201.1	
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{3)}$ g/cm ³	0.622	0.677	0.699	
	間隙比 $e_0^{3)}$	3.380	3.028	2.900	

炉乾燥後	容器 No.				
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g				
	容器質量 g				
	炉乾燥質量 m_s g	122.0	134.5	140.5	

特記事項

- 1) 試料の採取方法、試料の状態(塊状、凍結、ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法、負圧法の種別、凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

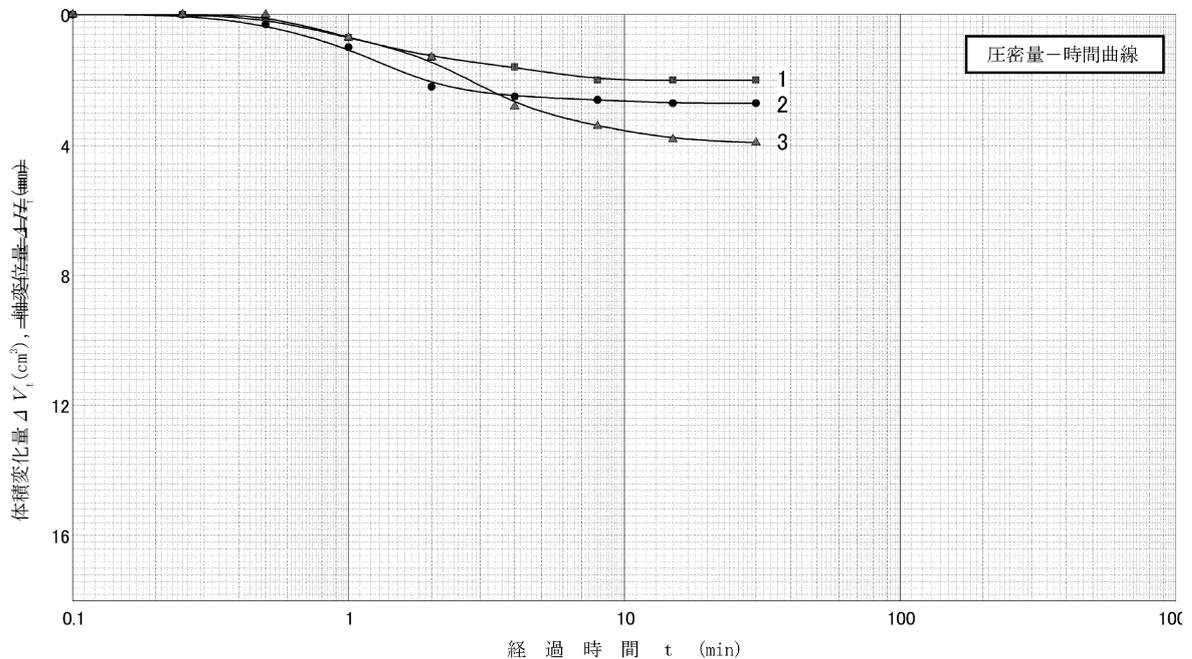
[1kN/m²≒0.1012kgf/cm²]

JGS 0523	土の三軸圧縮試験 [CU, CU , CD] (圧密前, 圧密後) (圧密量-時間曲線)
----------	--

調査件名 試験年月日 令和3年2月1日

試料番号(深さ) SMR 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾	乱さない		
供試体の作製方法 ²⁾	トリミング		
土質名称		圧密中の排水方法	両面排水
土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³	2.725		
供試体 No.	1	2	3
試験条件			
セル圧 σ_c kN/m ²	250	300	400
背圧 u_b kN/m ²	200	200	200
圧密応力 σ'_c kN/m ²	50	100	200
圧密前			
高さ H_0 cm	10.073	10.157	10.195
直径 D_0 cm	4.979	4.992	5.011
間隙比 e_0 ³⁾	3.380	3.028	2.900
圧密後			
圧密時間 t_c min	30	30	30
体積変化量 ΔV_c cm ³	2.0	2.7	3.9
軸変位量 ΔH_c cm	0.029	0.058	0.085
体積 V_c cm ³	194.1	196.1	197.2
高さ H_c cm	10.044	10.099	10.110
炉乾燥質量 m_s g	122.0	134.5	140.5
乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	0.629	0.686	0.712
間隙比 e_c ³⁾	3.335	2.973	2.825
間隙圧係数 B			
等方応力増加量 $\Delta \sigma$ kN/m ²	20.0	20.0	20.0
間隙水圧増加量 Δu kN/m ²	19.3	19.4	18.9
測定に要した時間 min	15	15	15
B 値	0.97	0.97	0.95



特記事項

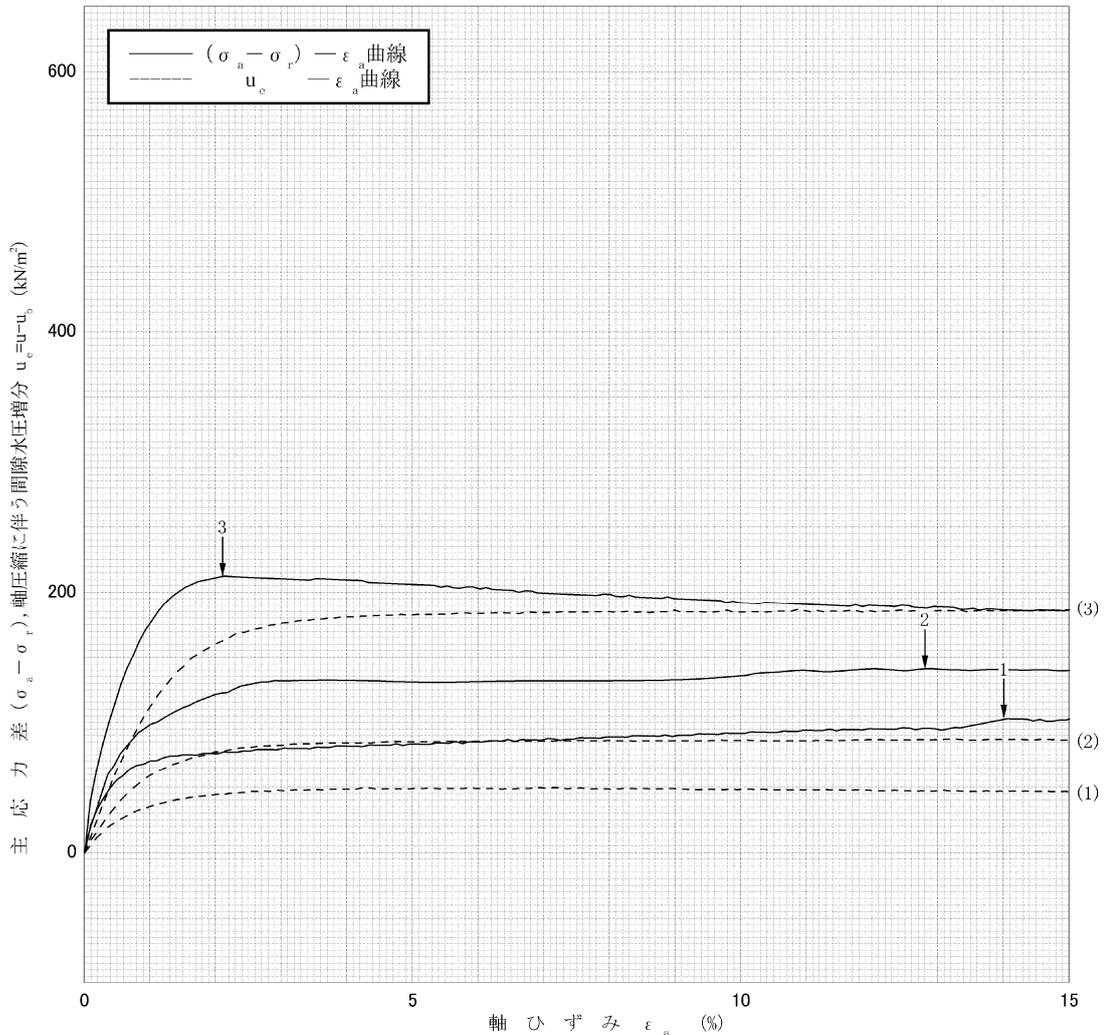
- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土野の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

調査件名 _____ 試験年月日 令和 3 年 2 月 1 日

試料番号(深さ) SMR _____ 試験者 清水 裕之

土質名称	供試体 No.	1	2	3			
	セル圧・圧密応力	kN/m ²	50	100	200		
	背圧	kN/m ²	200	200	200		
ひずみ速度 %/min	0.1						
特記事項 1)必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。	主応力差最大時	圧縮強さ ($\sigma_a - \sigma_r$) _{max}	kN/m ²	103	141	212	
		軸ひずみ ϵ_{af}	%	14.0	12.8	2.1	
		CU	間隙水圧 u_f	kN/m ²	47	87	163
			有効軸方向応力 σ'_{ax}	kN/m ²	106	154	249
		CD	有効側方向応力 σ'_{ra}	kN/m ²	3	13	37
体積ひずみ ϵ_{vf}	%						
	間隙比 e_f						
供試体の破壊状況			□	□	□	□	

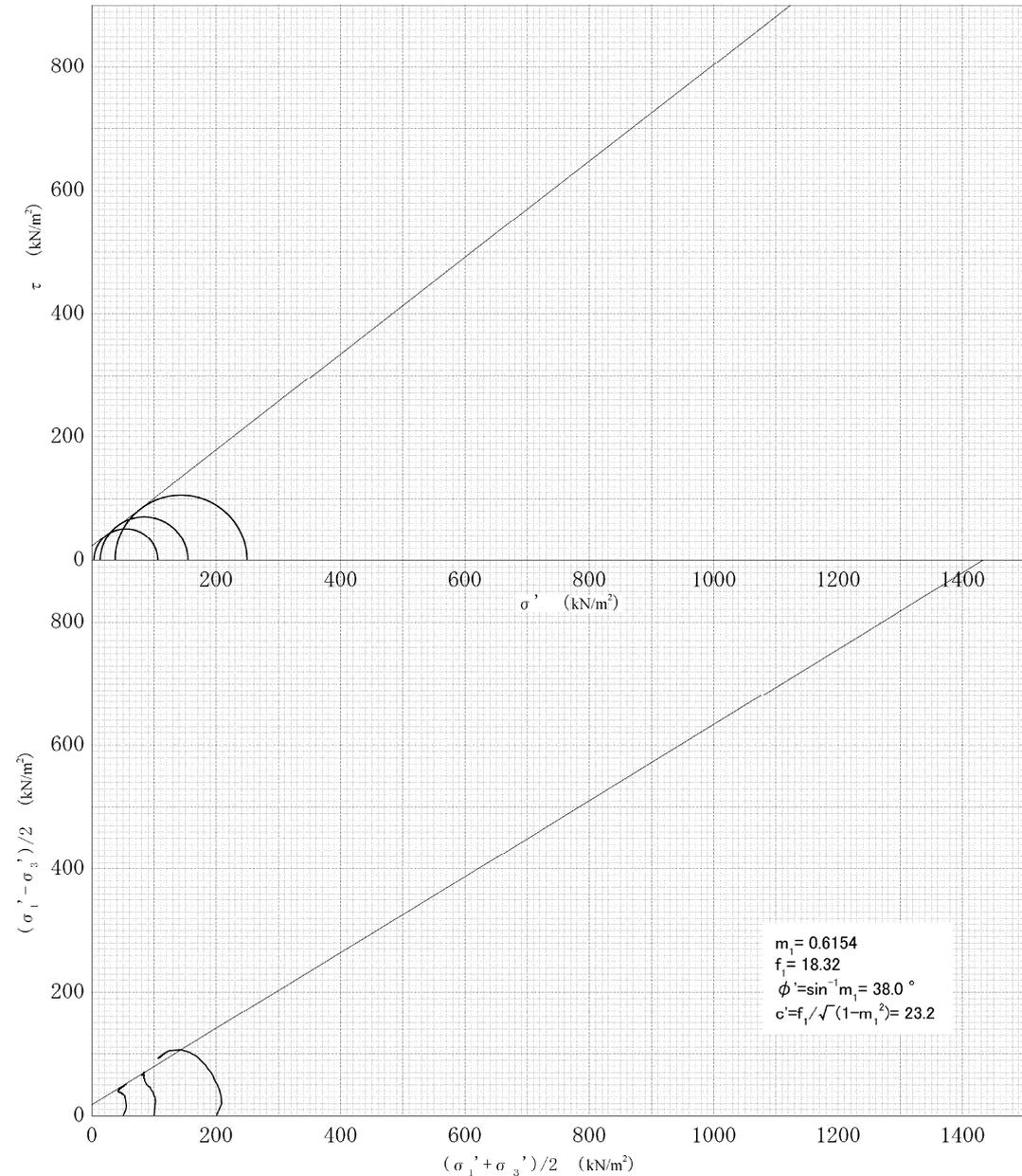


JGS 0523	土の強度特性	土の三軸圧縮試験 [CU]
----------	--------	---------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 2 月 1 日

試料番号(深さ) SMR 試験者 清水 裕之

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^\circ$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^\circ$
正 規 圧 密 領 域				23.2	38.0
過 圧 密 領 域					



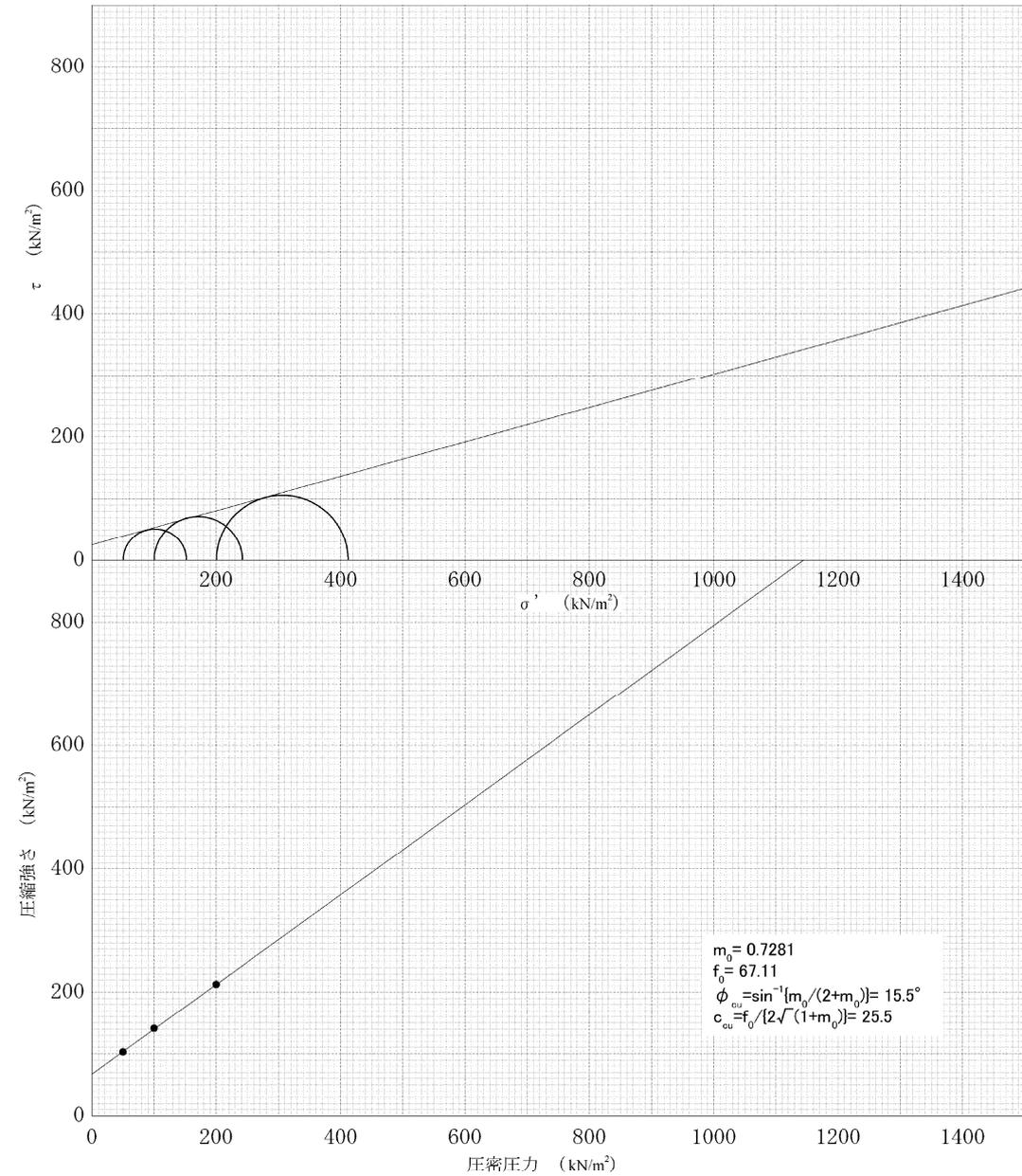
特 記 事 項

JGS 0523	土の強度特性	土の三軸圧縮試験 [CU]
----------	--------	---------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 2 月 1 日

試料番号(深さ) SMR 試験者 清水 裕之

応力範囲	強度定数	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$	
正 規 圧 密 領 域	25.5	15.5	0.2773			
過 圧 密 領 域						



特 記 事 項

動的強度試験

MSR

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月25日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称 JGS 2561 岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 $\rho_s^{(3)}$ g/cm ³	2.627
供試体の作製 ²⁾	トリミング		
土質名称			

供試体 No.		1	2	3	4
初期状態	直径 cm	4.890 4.939	5.122 5.106	5.139 5.018	5.112 4.964
	平均直径 D_i cm	4.949 4.888	5.126 5.108	4.957 5.044	5.030 5.023
	高さ cm	4.899 4.911	5.121 5.182	5.012 4.995	5.088 5.009
	平均高さ H_i cm	4.913	5.128	5.028	5.038
	体積 V_i cm ³	9.993	10.136	10.206	10.039
	含水比 w_i %	9.983	10.099	10.278	9.980
	質量 m_i g	9.988	10.118	10.242	10.010
	湿潤密度 $\rho_{i1}^{(3)}$ g/cm ³	189.3	209.0	203.4	199.5
	乾燥密度 $\rho_{di}^{(3)}$ g/cm ³	24.9	28.1	24.1	23.9
	間隙比 $e_i^{(3)}$	345.9	393.0	385.8	393.7
	飽和度 $S_{i1}^{(3)}$ %	1.827	1.880	1.897	1.973
	相対密度 $D_{ri}^{(3)}$ %	1.463	1.468	1.528	1.593
		0.795	0.790	0.718	0.650
		82.3	93.4	88.2	96.6
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定			
	設置時の軸変位量 cm				
	飽和過程の軸変位量 cm				
	軸変位量 $\Delta H_i^{(5)}$ cm	0.016	0.009	0.038	0.035
	体積変化量の測定方法	計算による			
	設置時の体積変化量 cm ³				
	飽和過程の体積変化量 cm ³				
体積変化量 $\Delta V_i^{(3)}$ cm ³	0.9	0.6	2.3	2.1	
圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	9.972	10.109	10.204	9.975
	直径 D_0 cm	4.905	5.123	5.009	5.020
	体積 V_0 cm ³	188.4	208.4	201.1	197.4
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{(3)}$ g/cm ³	1.470	1.472	1.546	1.609
	間隙比 $e_0^{(3)}$	0.787	0.785	0.699	0.632
	相対密度 $D_{r0}^{(3)}$				
炉乾燥後	容器 No.				
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g				
	容器質量 g				
	炉乾燥質量 m_s g	277.0	306.7	311.0	317.7

特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態(塊状, 凍結, ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

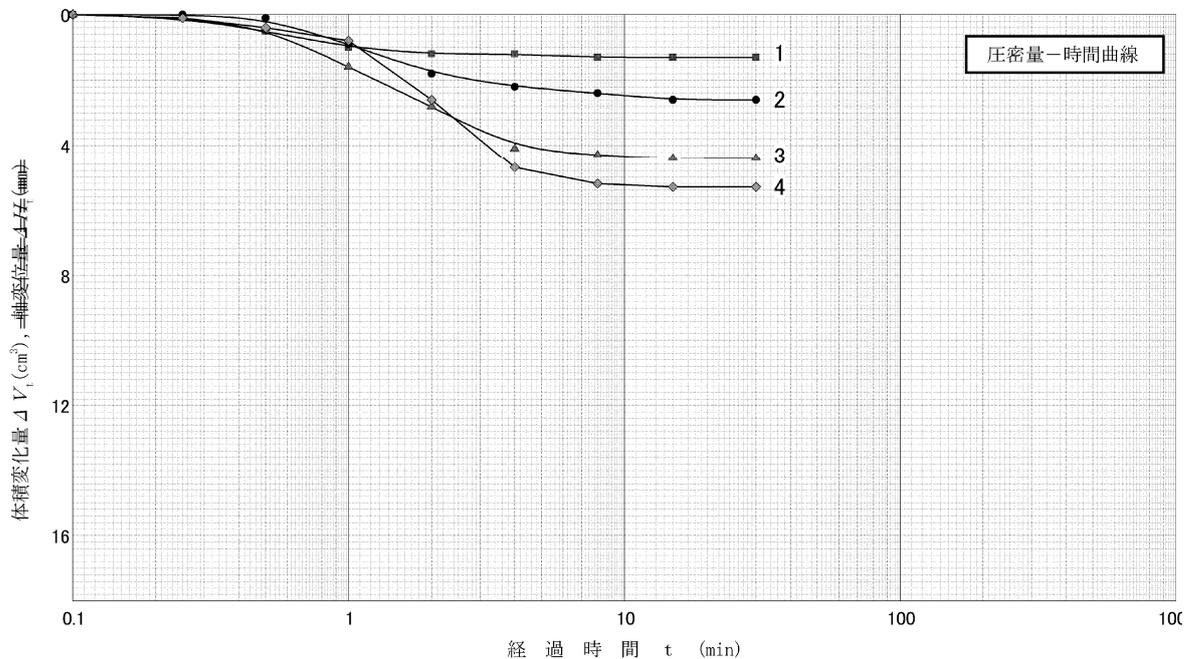
[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (圧密前, 圧密後) (圧密量-時間曲線)
----------	---

調査件名 試験年月日 令和3年1月25日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾		乱さない	⁴⁾		
供試体の作製方法 ²⁾		トリミング	⁴⁾		
土質名称			圧密中の排水方法	両面排水	
土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³		2.627			
供試体 No.		1	2	3	4
試験条件	セル圧 σ_c kN/m ²	250	300	350	400
	背圧 u_b kN/m ²	200	200	200	200
	圧密応力 σ'_c kN/m ²	50	100	150	200
圧密前	高さ H_0 cm	9.972	10.109	10.204	9.975
	直径 D_0 cm	4.905	5.123	5.009	5.020
	間隙比 e_0 ³⁾	0.787	0.785	0.699	0.632
圧密後	圧密時間 t_c min	30	30	30	30
	体積変化量 ΔV_c cm ³	1.3	2.6	4.4	5.3
	軸変位量 ΔH_c cm	0.016	0.041	0.082	0.440
	体積 V_c cm ³	187.1	205.8	196.7	192.1
	高さ H_c cm	9.956	10.068	10.122	9.535
	炉乾燥質量 m_s g	277.0	306.7	311.0	317.7
	乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	1.480	1.490	1.581	1.654
	間隙比 e_c ³⁾	0.774	0.763	0.662	0.588
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta \sigma$ kN/m ²	20.0	20.0	20.0	20.0
	間隙水圧増加量 Δu kN/m ²	19.4	18.9	19.3	18.9
	測定に要した時間 min	15	15	15	15
B 値		0.97	0.95	0.97	0.95



特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法等を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土野の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

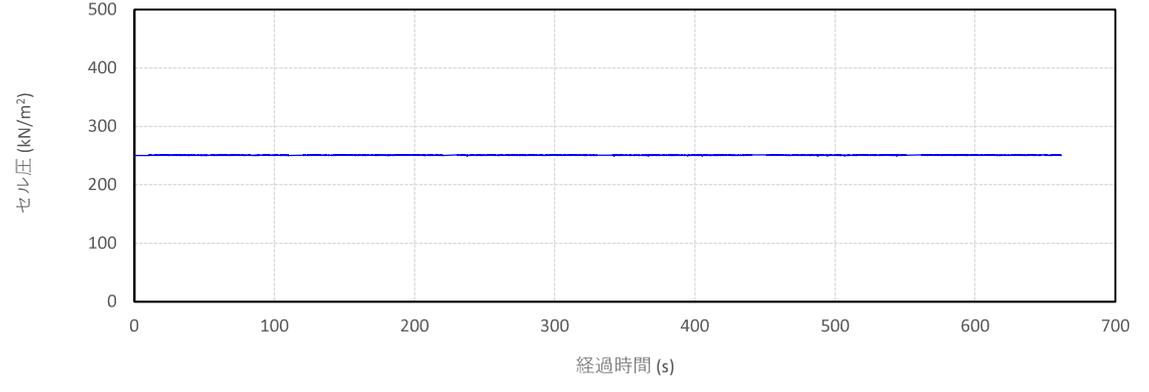
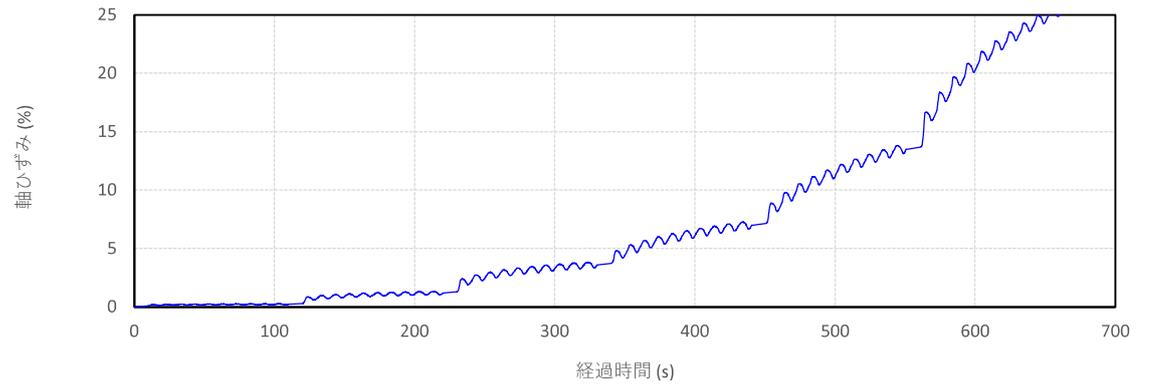
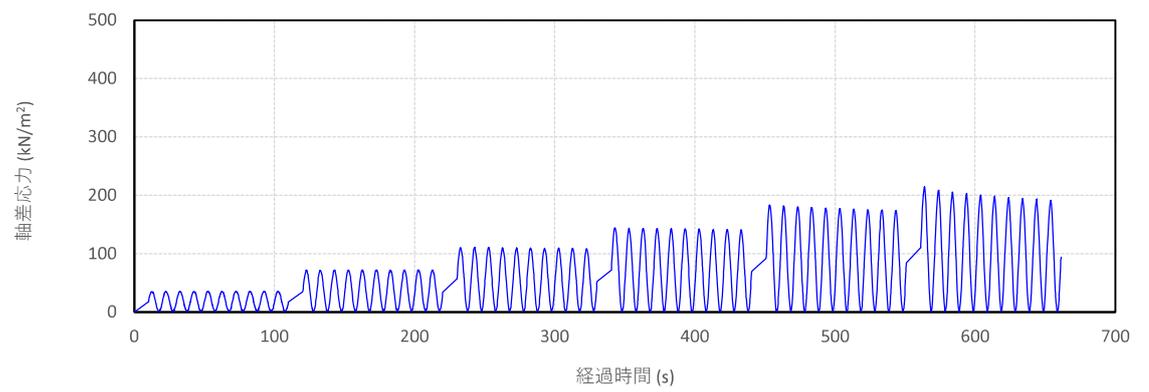
[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月5日

試料番号 (深さ) MSR 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	1
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	50
1段階当たりの軸差応力の増分	37.2kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



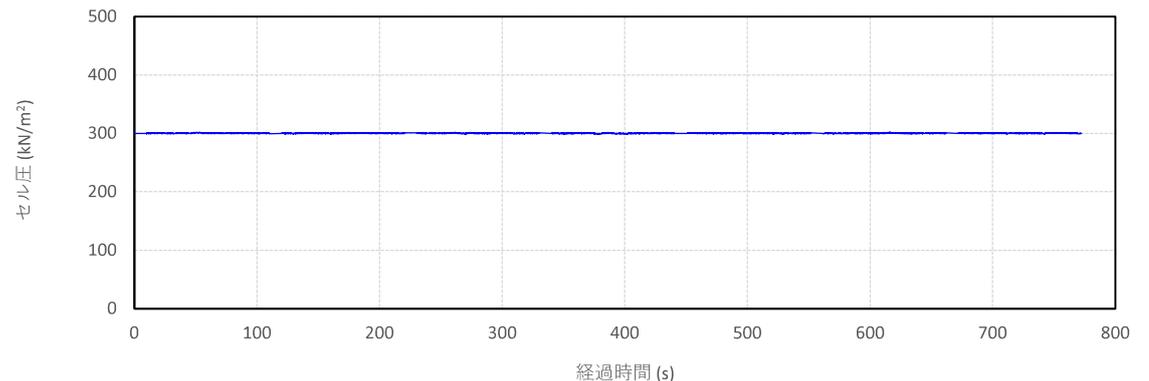
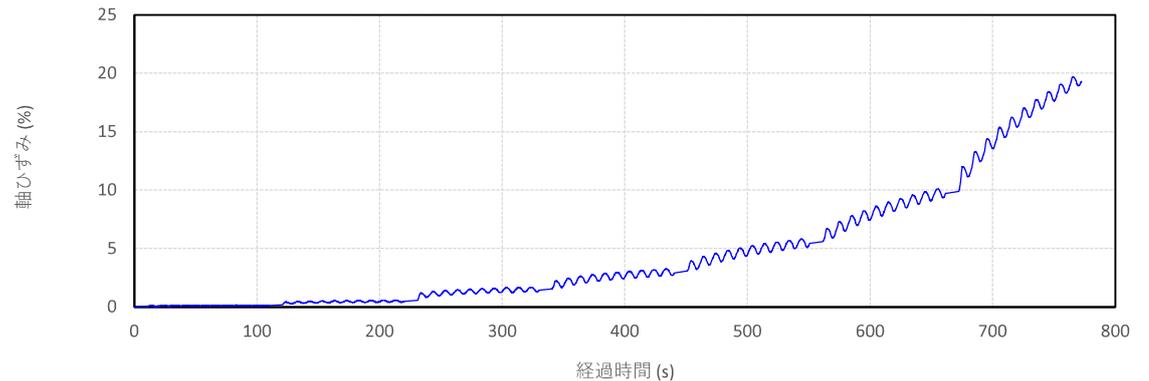
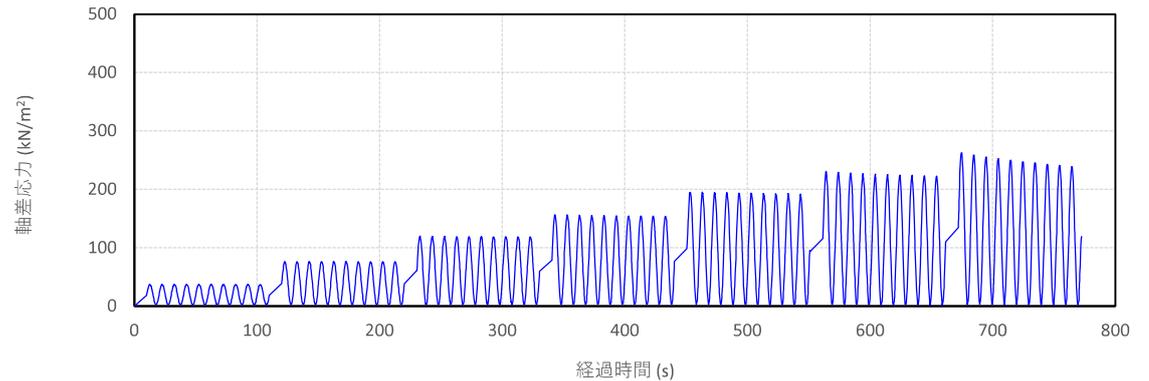
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月5日

試料番号 (深さ) MSR 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	2
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	100
1段階当たりの軸差応力の増分	40.0kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



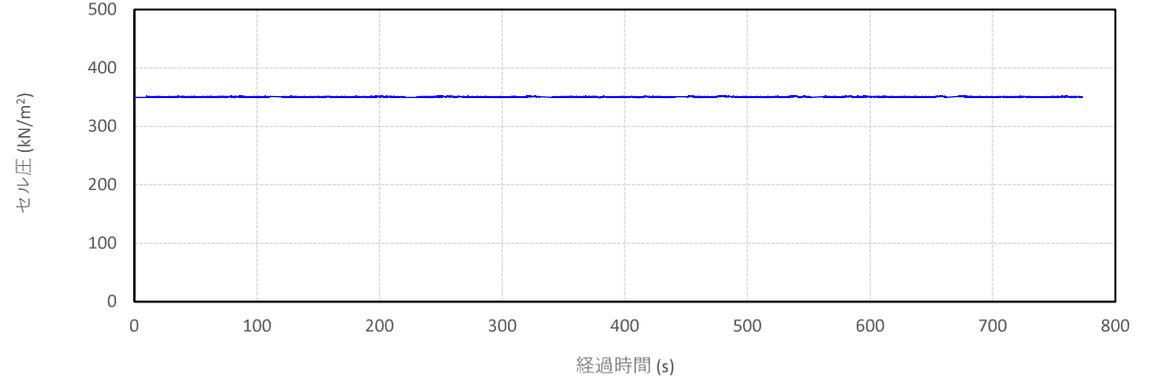
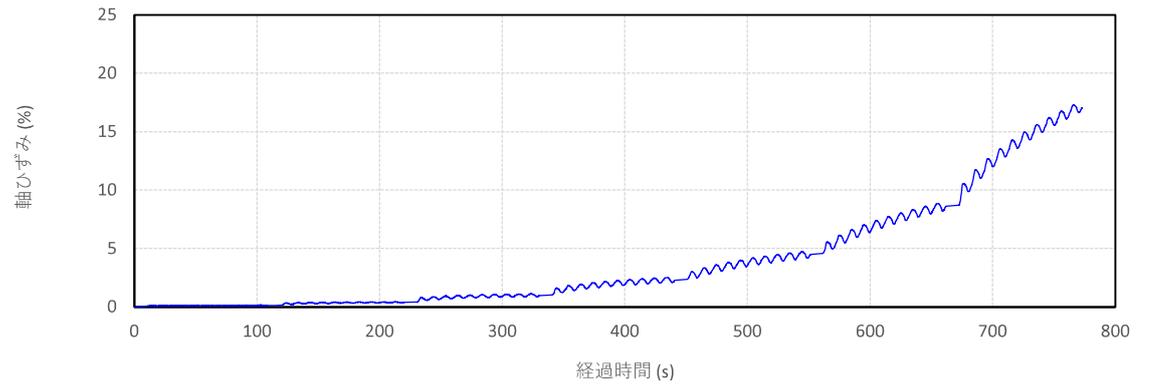
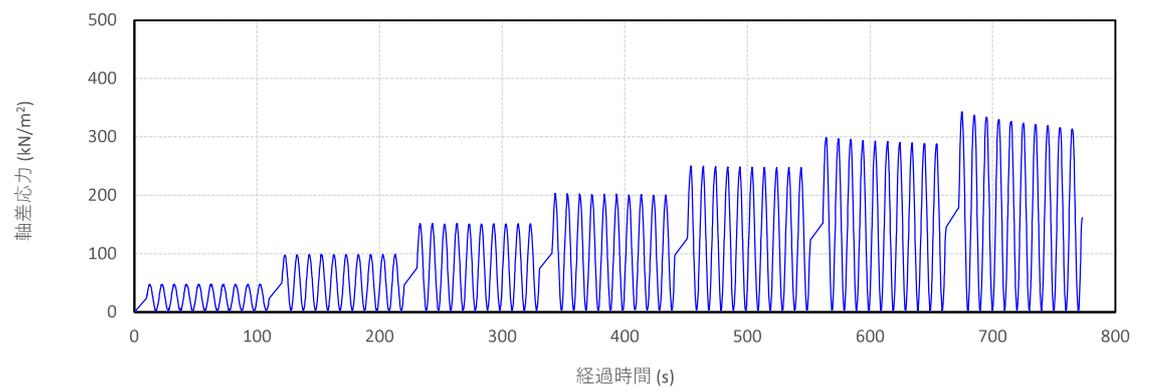
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月8日

試料番号 (深さ) MSR 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	3
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	150
1段階当たりの軸差応力の増分	50.9kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



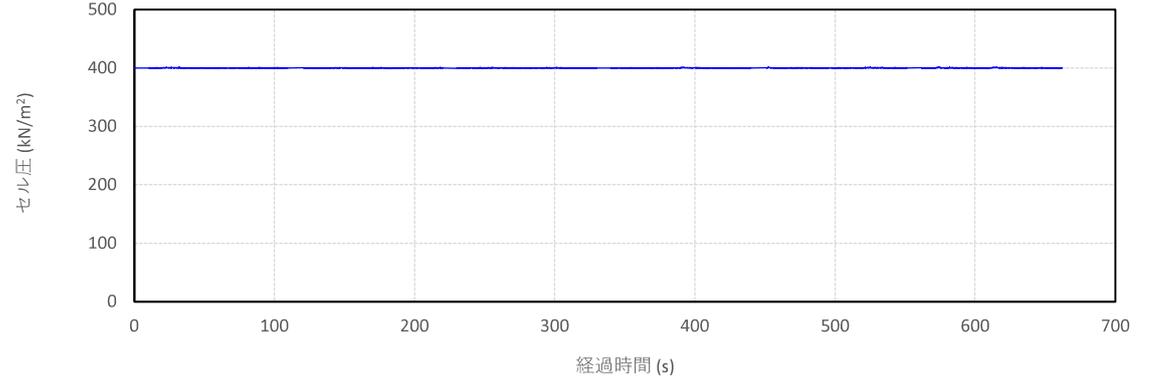
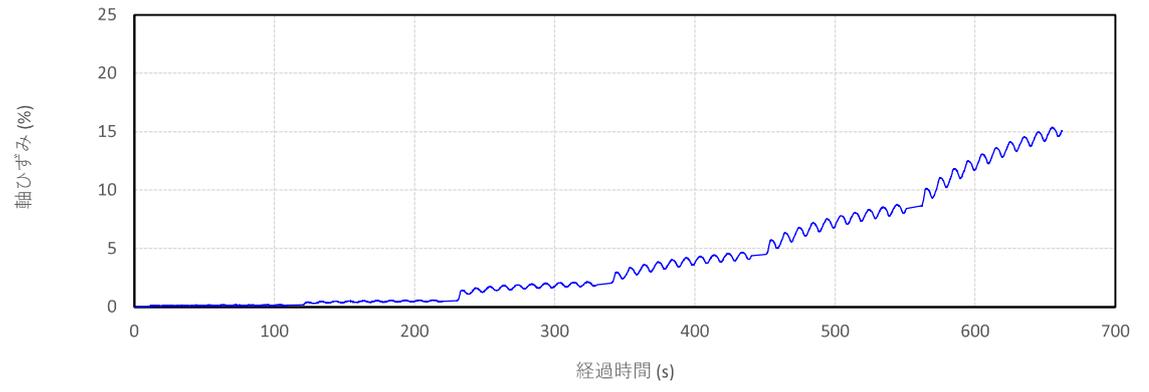
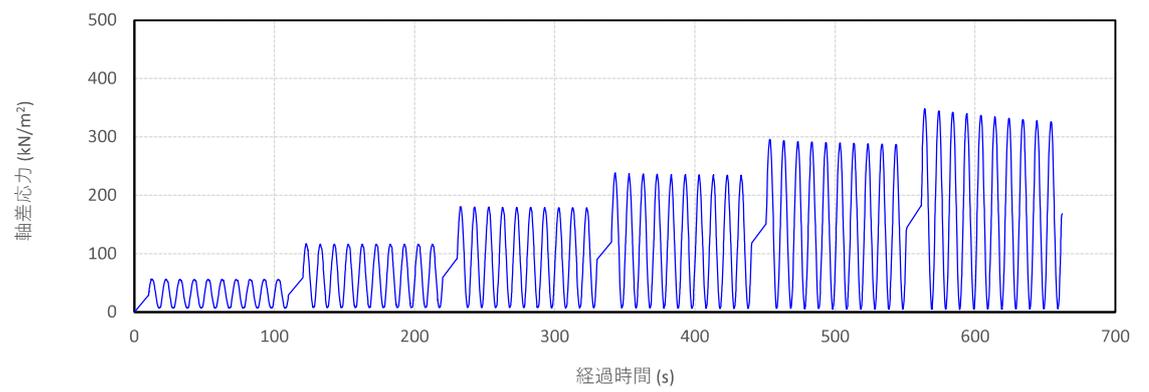
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月8日

試料番号 (深さ) MSR 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	4
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	200
1段階当たりの軸差応力の増分	61.8kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200

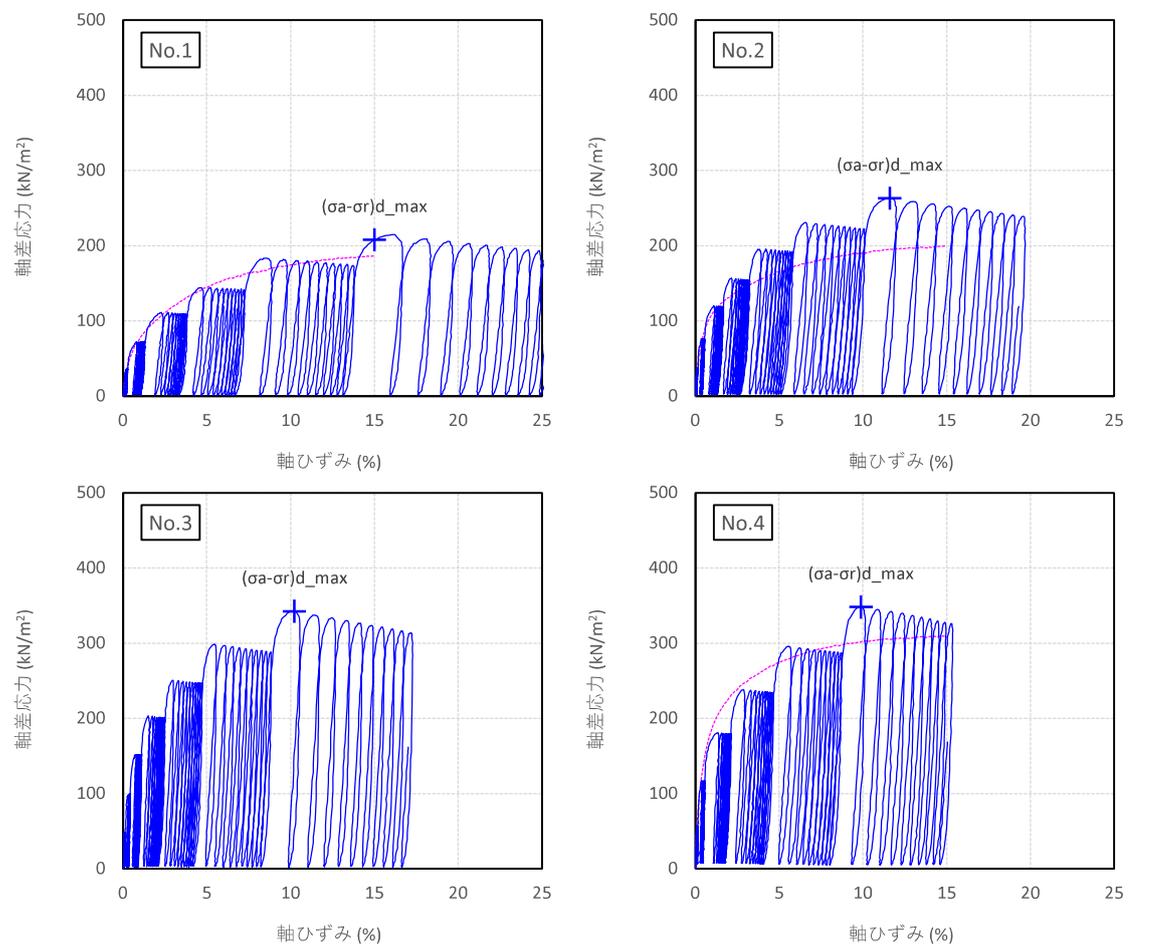


特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (応力-ひずみ曲線)
----------	-------------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月5日
 試料番号 (深さ) MSR 試験者 清水 裕之

供試体No.	1	2	3	4
セル圧・圧密応力 kN/m^2	50	100	150	200
圧縮強さ $(\sigma_a - \sigma_r)_{d_{max}}$ kN/m^2	208	263	343	348
供試体の破壊状況				



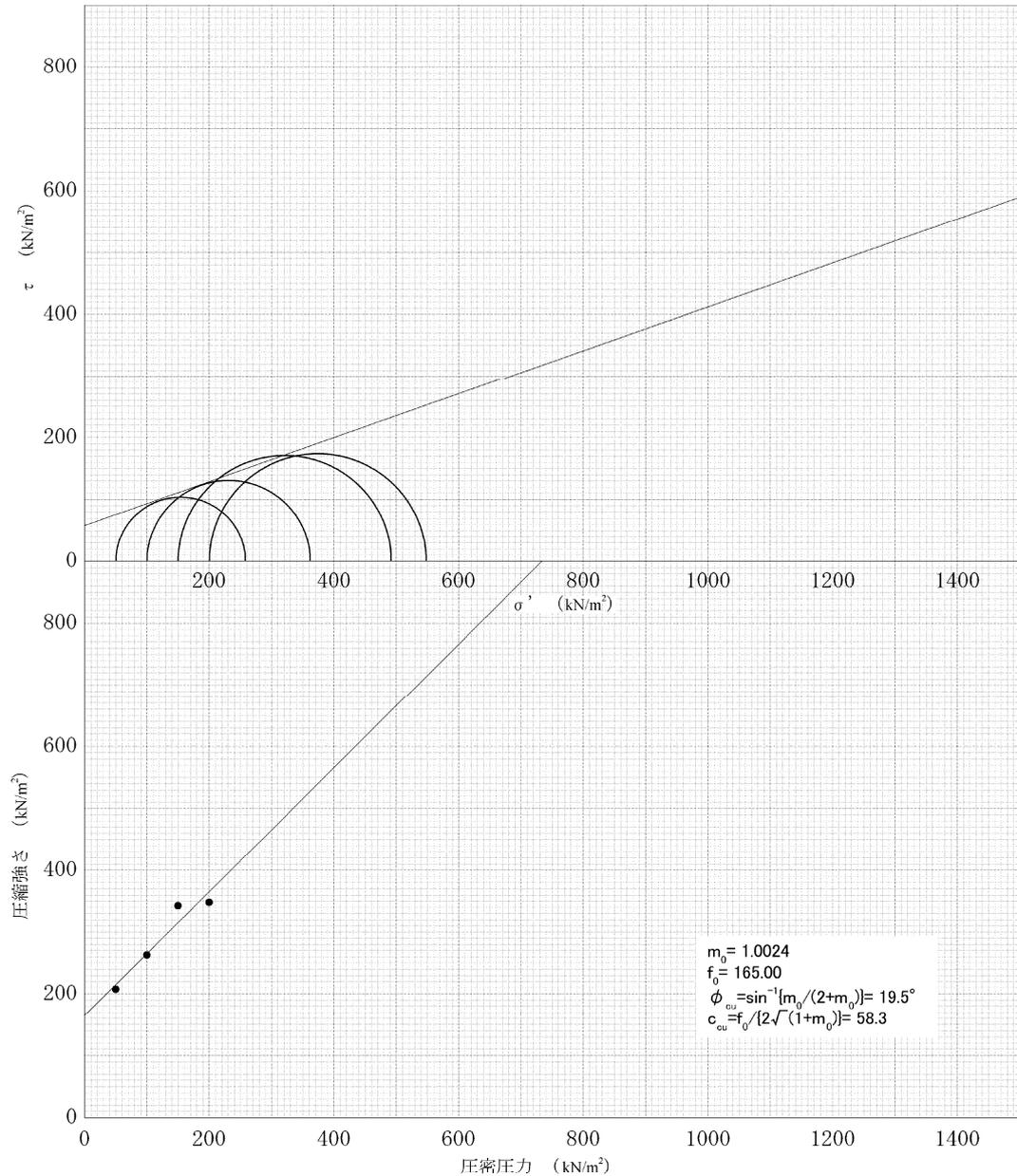
特記事項 [$1\text{kN/m}^2 \approx 0.0102\text{kgf/cm}^2$]
 グラフ上(No.3を除く)土の三軸圧縮試験(CUB)結果を破線で示す。
 繰返し载荷中に軸ひずみが $\epsilon > 15\%$ となる場合、圧縮強さは $\epsilon = 15\%$ 時の値を示す。

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 [強度特性]
----------	---------------------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 1 月 25 日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$
正 規 圧 密 領 域	58.3	19.5	0.3541		
過 圧 密 領 域					



特 記 事 項

動的強度試験

MSC

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月28日

試料番号(深さ) MSC 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称 JGS 2561 岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 $\rho_s^{(3)}$ g/cm ³	2.644
供試体の作製 ²⁾	トリミング		
土質名称			

供試体 No.		1	2	3	4
初期状態	直径 cm	5.087 4.993	4.997 5.003	4.962 4.967	4.982 4.994
		4.930 4.989	4.961 4.989	4.933 4.921	5.005 4.974
		4.942 4.954	4.957 4.895	4.884 4.934	5.025 4.984
	平均直径 D_i cm	4.983	4.967	4.934	4.994
	高さ cm	10.176	10.105	10.130	10.287
		10.048	10.122	10.287	10.113
	平均高さ H_i cm	10.112	10.114	10.209	10.200
	体積 V_i cm ³	197.2	196.0	195.2	199.8
	含水比 w_i %	26.0	23.6	18.2	16.3
	質量 m_i g	370.5	372.2	401.3	411.7
湿潤密度 $\rho_{tj}^{(3)}$ g/cm ³	1.879	1.899	2.056	2.061	
乾燥密度 $\rho_{dij}^{(3)}$ g/cm ³	1.491	1.536	1.739	1.772	
間隙比 $e_i^{(3)}$	0.773	0.721	0.520	0.492	
飽和度 $S_{tj}^{(3)}$ %	88.9	86.5	92.5	87.6	
相対密度 $D_{ri}^{(3)}$ %					

設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定			
	設置時の軸変位量 cm				
	飽和過程の軸変位量 cm				
	軸変位量 $\Delta H_i^{(5)}$ cm	0.036	0.023	0.032	0.014
	体積変化量の測定方法	計算による			
	設置時の体積変化量 cm ³				
	飽和過程の体積変化量 cm ³				
	体積変化量 $\Delta V_i^{(3)}$ cm ³	2.1	1.3	1.8	0.8

圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	10.076	10.091	10.177	10.186
	直径 D_0 cm	4.965	4.956	4.919	4.987
	体積 V_0 cm ³	195.1	194.7	193.4	199.0
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{(3)}$ g/cm ³	1.507	1.547	1.755	1.779
	間隙比 $e_0^{(3)}$	0.755	0.709	0.506	0.486
相対密度 $D_{r0}^{(3)}$					

炉乾燥後	容器 No.				
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g				
	容器質量 g				
炉乾燥質量 m_s g	294.0	301.2	339.5	354.0	

- 特記事項
- 1) 試料の採取方法, 試料の状態(塊状, 凍結, ときほぐされた)等を記載する。
 - 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
 - 3) 必要に応じて記載する。
 - 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。
 - 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

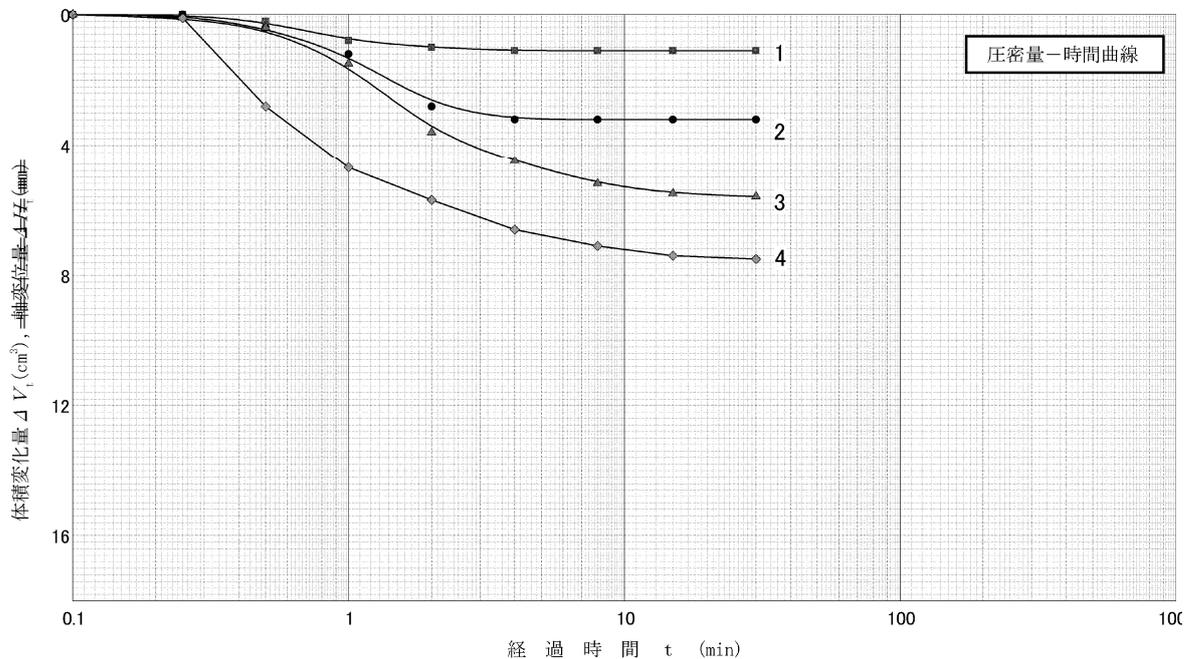
[1kN/m² ≒ 0.1012kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (圧密前, 圧密後) (圧密量-時間曲線)
----------	---

調査件名 試験年月日 令和3年1月28日

試料番号(深さ) MSC 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾		乱さない ⁴⁾			
供試体の作製方法 ²⁾		トリミング ⁴⁾			
土質名称		圧密中の排水方法			
土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³		両面排水			
土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³		2.644			
供試体 No.		1	2	3	4
試験条件	セル圧 σ_c kN/m ²	250	300	350	400
	背圧 u_b kN/m ²	200	200	200	200
	圧密応力 σ'_c kN/m ²	50	100	150	200
圧密前	高さ H_0 cm	10.076	10.091	10.177	10.186
	直径 D_0 cm	4.965	4.956	4.919	4.987
	間隙比 $e_0^{3)}$	0.755	0.709	0.506	0.486
圧密後	圧密時間 t_c min	30	30	30	30
	体積変化量 ΔV_c cm ³	1.1	3.2	5.6	7.5
	軸変位量 ΔH_c cm	0.015	0.034	0.085	0.560
	体積 V_c cm ³	194.0	191.5	187.8	191.5
	高さ H_c cm	10.061	10.057	10.092	9.626
	炉乾燥質量 m_s g	294.0	301.2	339.5	354.0
	乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	1.515	1.573	1.808	1.849
	間隙比 $e_c^{3)}$	0.745	0.681	0.463	0.430
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta \sigma$ kN/m ²	20.0	20.0	20.0	20.0
	間隙水圧増加量 Δu kN/m ²	19.0	19.3	19.0	19.0
	測定に要した時間 min	15	15	15	15
B 値		0.95	0.97	0.95	0.95



特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解冻方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土野の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

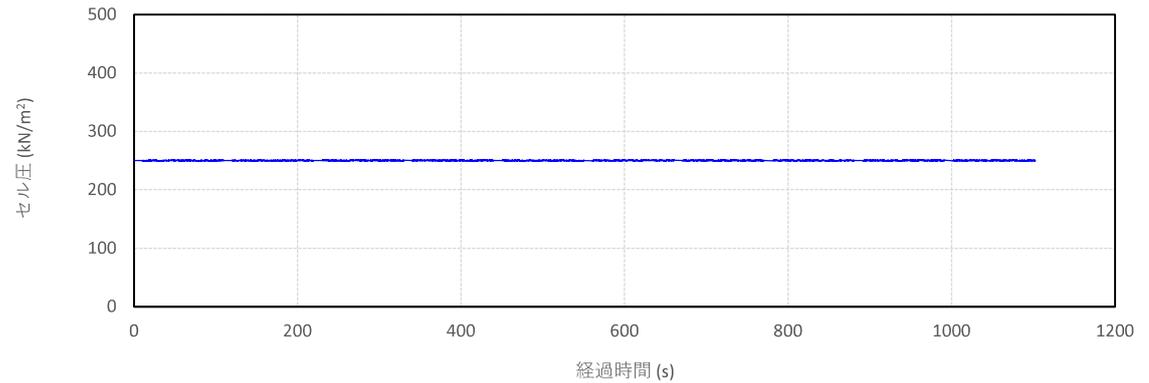
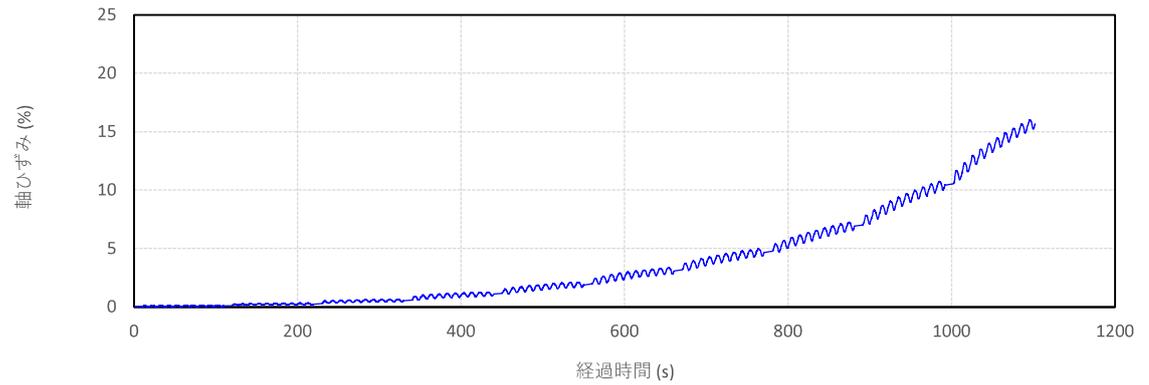
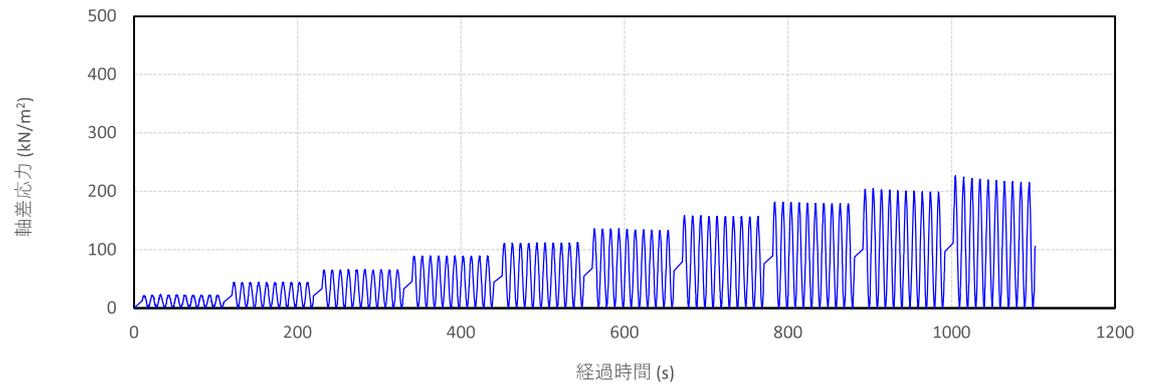
[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月28日

試料番号 (深さ) MSC 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	1
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	50
1段階当たりの軸差応力の増分	22.4kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



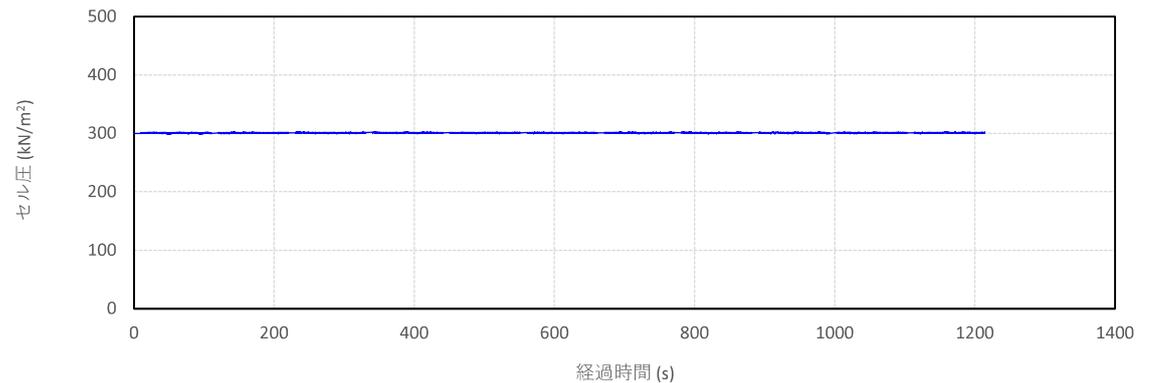
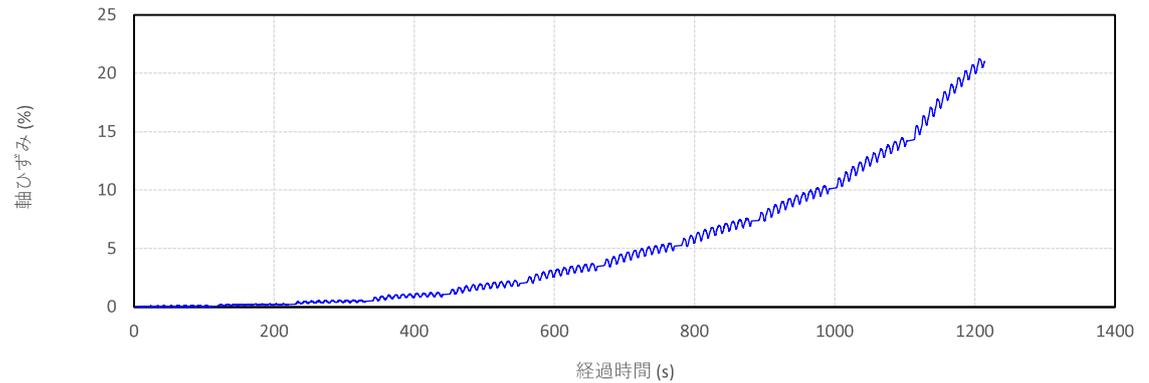
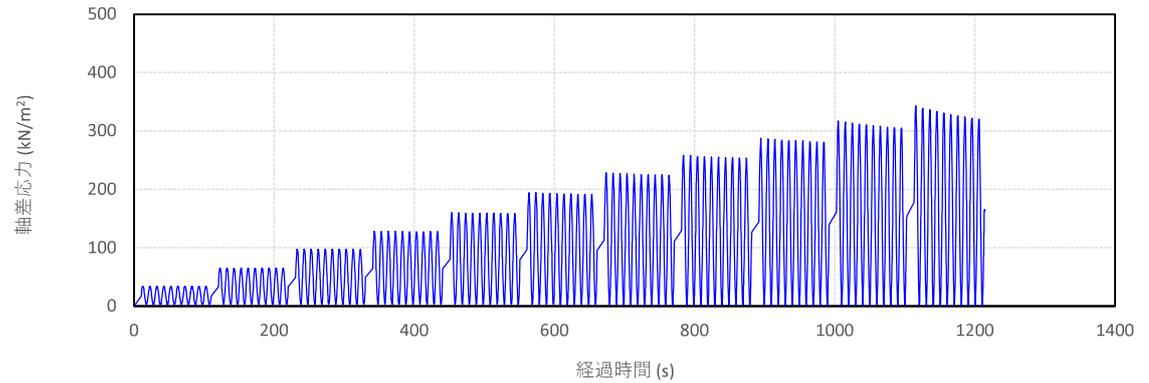
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月28日

試料番号 (深さ) MSC 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	2
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	100
1段階当たりの軸差応力の増分	31.8kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



特記事項

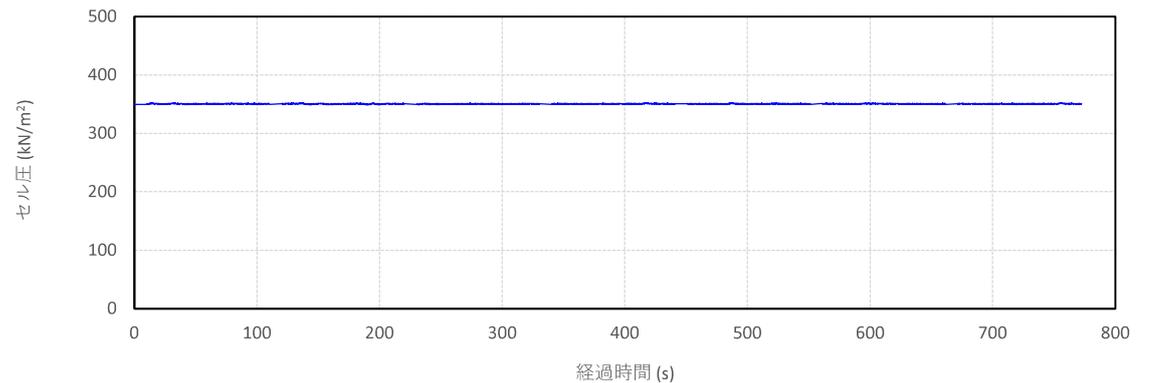
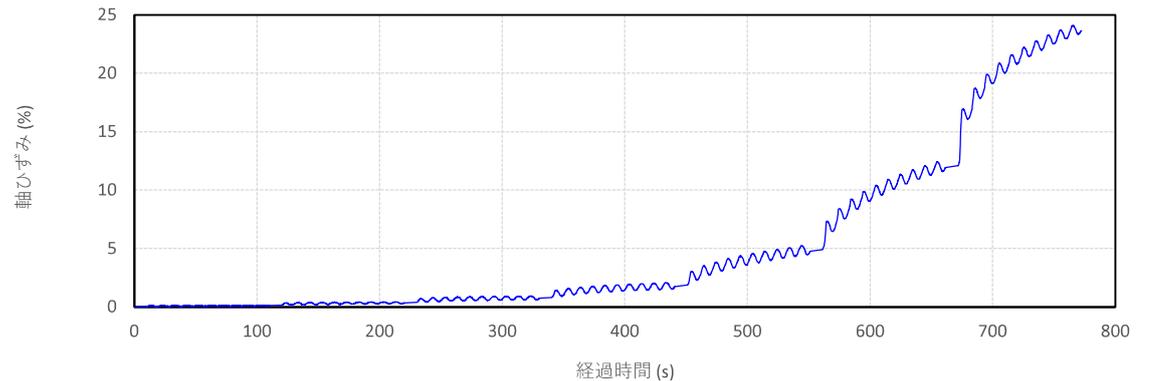
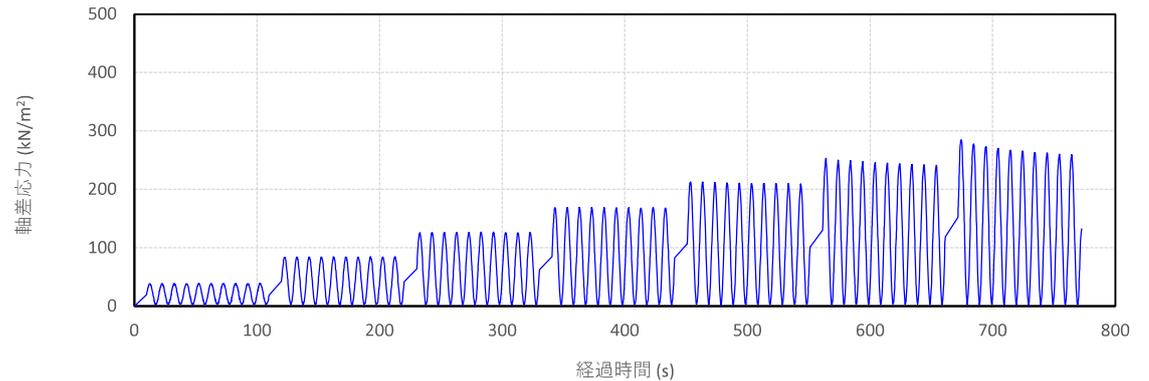
[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月29日

試料番号 (深さ) MSC 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	3
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	150
1段階当たりの軸差応力の増分	43.6kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



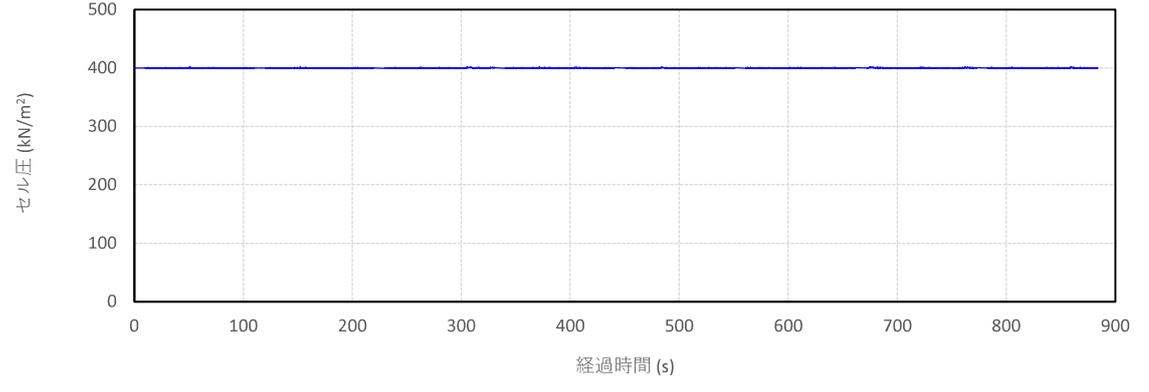
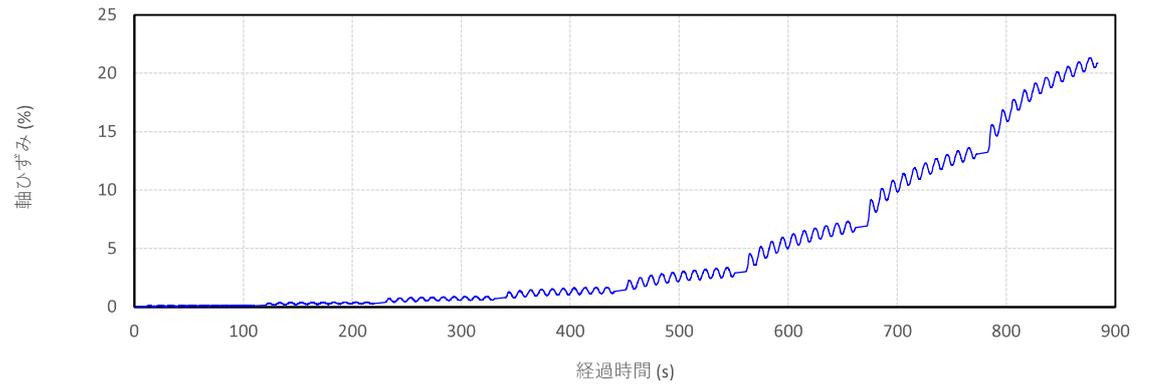
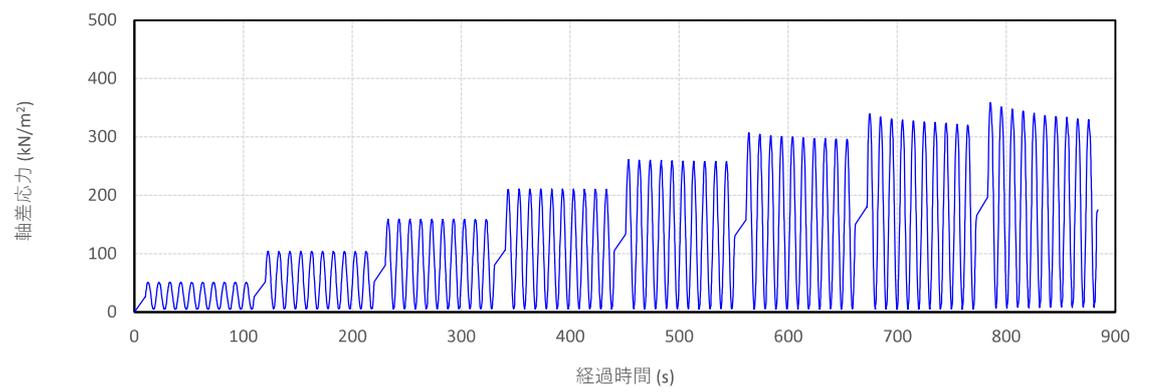
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月29日

試料番号 (深さ) MSC 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	4
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	200
1段階当たりの軸差応力の増分	55.4kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



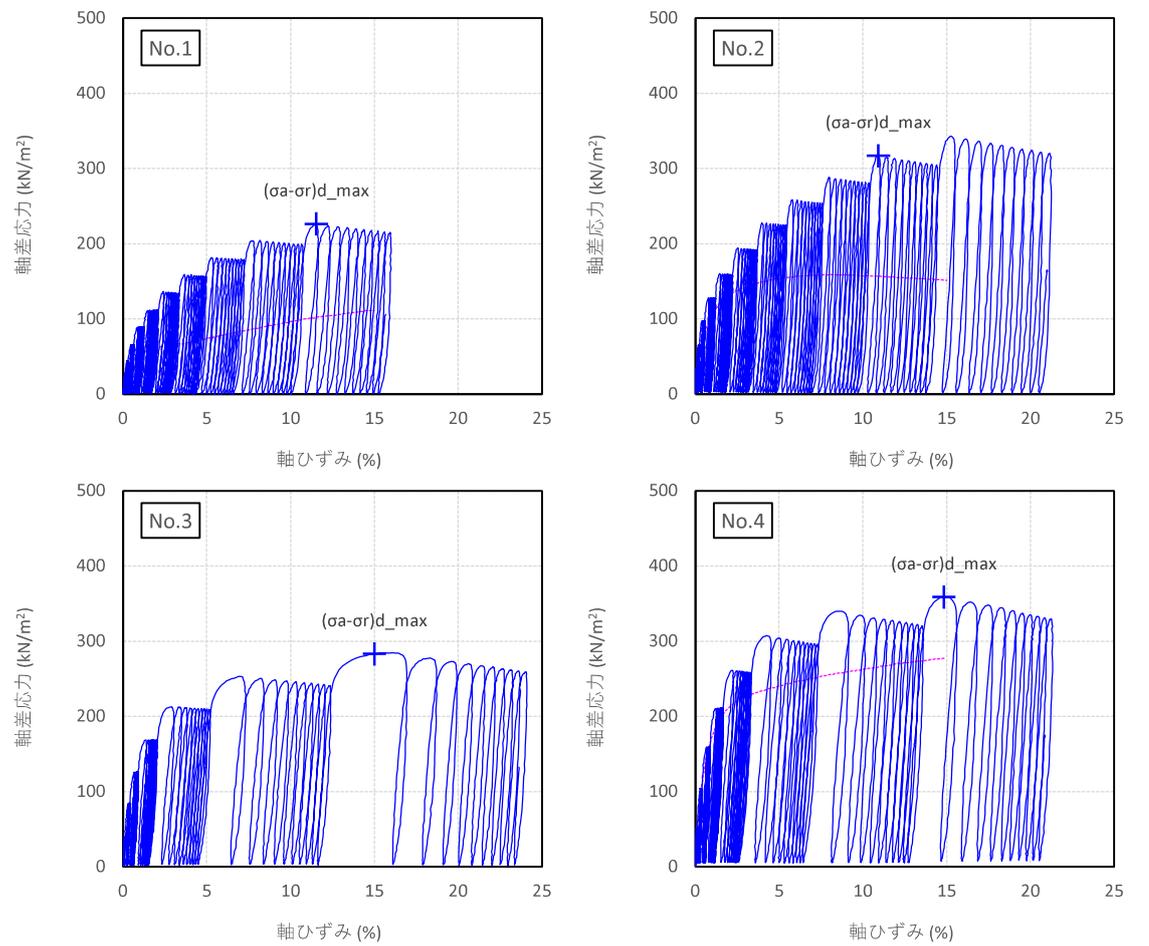
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (応力-ひずみ曲線)
----------	-------------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月28日

試料番号 (深さ) MSC 試験者 清水 裕之

供試体No.	1	2	3	4	
セル圧・圧密応力 kN/m^2	50	100	150	200	
圧縮強さ $(\sigma_d - \sigma_r)_{d_{max}}$ kN/m^2	226	317	283	359	
供試体の破壊状況					



特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

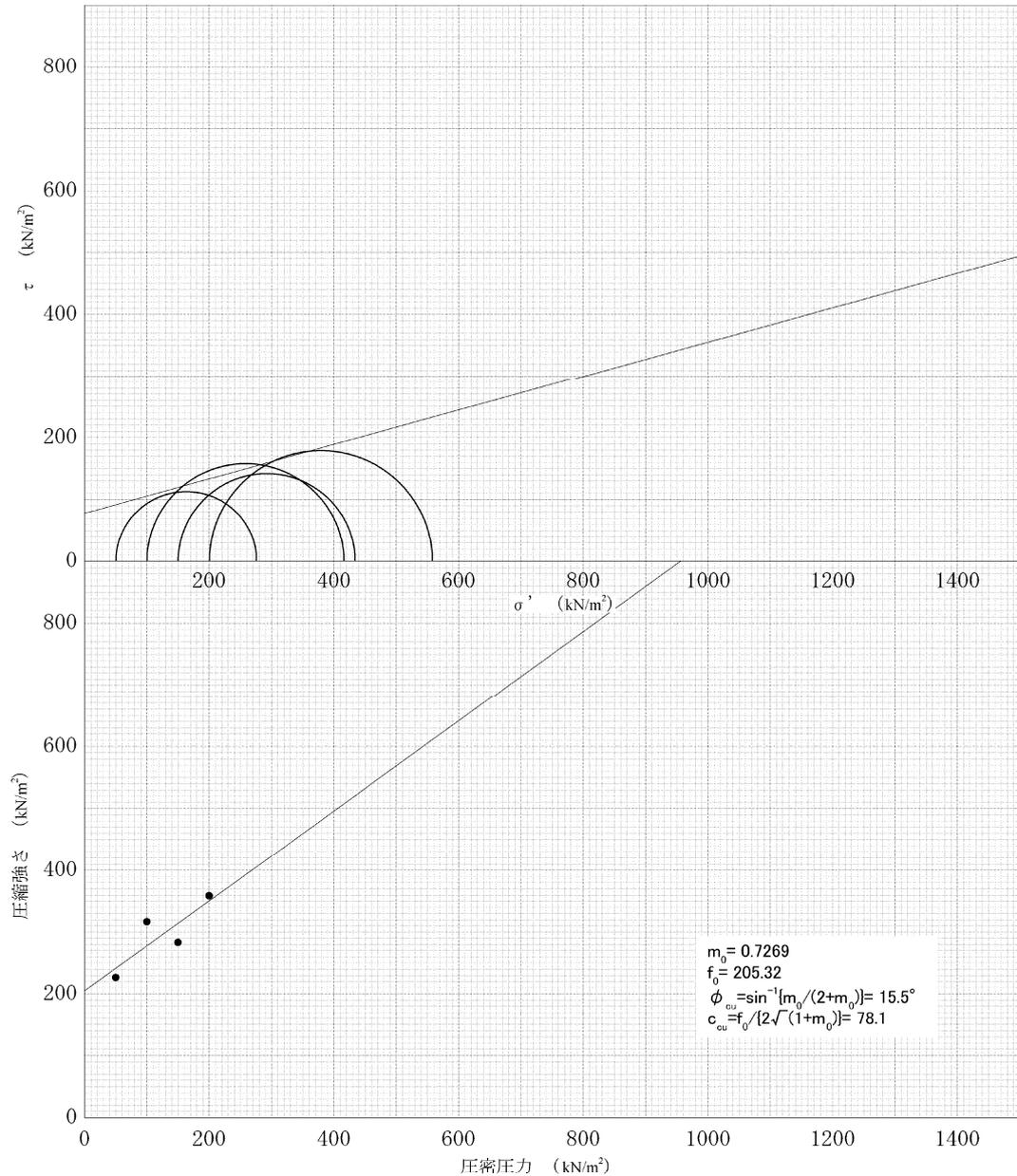
グラフ上(No.3を除く)土の三軸圧縮試験(CUB)結果を破線で示す。
繰返し载荷中に軸ひずみが $\epsilon > 15\%$ となる場合、圧縮強さは $\epsilon = 15\%$ 時の値を示す。

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 [強度特性]
----------	---------------------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 1 月 28 日

試料番号(深さ) MSC 試験者 清水 裕之

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$
正 規 圧 密 領 域	78.1	15.5	0.2773		
過 圧 密 領 域					



特 記 事 項

動的強度試験

MSL

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月25日

試料番号(深さ) MSL 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称 JGS 2561 岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³	2.658
供試体の作製 ²⁾	トリミング		
土質名称			

供試体 No.		1	2	3	4
初期状態	直径 cm	5.003 4.996	4.918 4.965	5.062 5.016	4.924 4.923
	平均直径 D_i cm	4.953 4.994	4.876 4.852	4.987 4.930	4.998 4.985
	高さ cm	4.953 4.973	4.977 4.916	5.032 4.905	5.004 4.996
	平均高さ H_i cm	4.979	4.917	4.989	4.972
	体積 V_i cm ³	10.078	10.198	10.096	10.156
	含水比 w_i %	10.013	10.211	10.135	10.199
	質量 m_i g	10.046	10.205	10.116	10.178
	湿潤密度 $\rho_{i1}^{3)}$ g/cm ³	195.6	193.8	197.8	197.6
	乾燥密度 $\rho_{di}^{3)}$ g/cm ³	21.7	17.7	20.1	18.7
	間隙比 $e_i^{3)}$	385.4	385.4	401.8	401.8
	飽和度 $S_{i1}^{3)}$ %	1.970	1.989	2.031	2.033
	相対密度 $D_{ri}^{3)}$ %	1.619	1.690	1.691	1.713
		0.642	0.573	0.572	0.552
		89.8	82.1	93.4	90.0
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定			
	設置時の軸変位量 cm				
	飽和過程の軸変位量 cm				
	軸変位量 $\Delta H_i^{5)}$ cm	0.037	0.035	0.031	0.099
	体積変化量の測定方法	計算による			
	設置時の体積変化量 cm ³				
	飽和過程の体積変化量 cm ³				
体積変化量 $\Delta V_i^{3)}$ cm ³	2.2	2.0	1.8	5.8	
圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	10.009	10.170	10.085	10.079
	直径 D_0 cm	4.960	4.900	4.974	4.922
	体積 V_0 cm ³	193.4	191.8	196.0	191.8
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{3)}$ g/cm ³	1.638	1.708	1.707	1.765
	間隙比 $e_0^{3)}$	0.623	0.557	0.557	0.506
	相対密度 $D_{r0}^{3)}$				
炉乾燥後	容器 No.				
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g				
	容器質量 g				
	炉乾燥質量 m_s g	316.7	327.5	334.5	338.5

特記事項

- 1) 試料の採取方法、試料の状態(塊状、凍結、ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法、負圧法の種別、凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

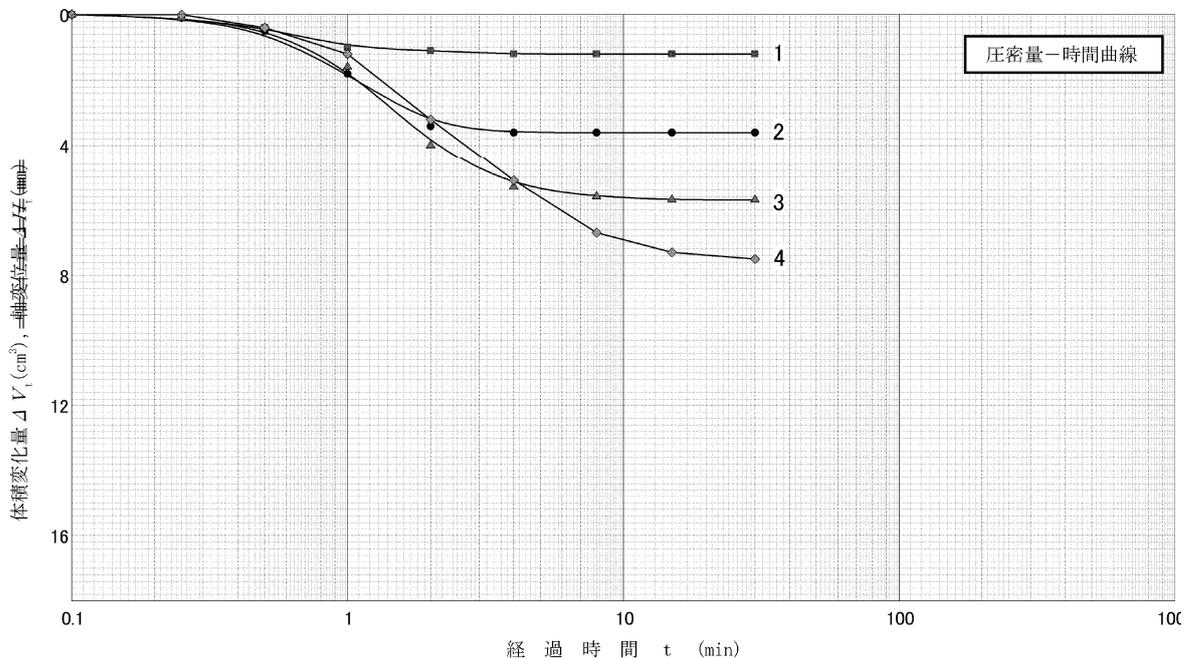
[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (圧密前, 圧密後) (圧密量-時間曲線)
----------	---

調査件名 試験年月日 令和3年1月25日

試料番号(深さ) MSL 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾		乱さない ⁴⁾			
供試体の作製方法 ²⁾		トリミング ⁴⁾			
土質名称		圧密中の排水方法			
土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³		両面排水			
土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³		2.658			
供試体 No.		1	2	3	4
試験条件	セル圧 σ_c kN/m ²	250	300	350	400
	背圧 u_b kN/m ²	200	200	200	200
	圧密応力 σ'_c kN/m ²	50	100	150	200
圧密前	高さ H_0 cm	10.009	10.170	10.085	10.079
	直径 D_0 cm	4.960	4.900	4.974	4.922
	間隙比 $e_0^{3)}$	0.623	0.557	0.557	0.506
圧密後	圧密時間 t_c min	30	30	30	30
	体積変化量 ΔV_c cm ³	1.2	3.6	5.7	7.5
	軸変位量 ΔH_c cm	0.017	0.042	0.089	0.570
	体積 V_c cm ³	192.2	188.2	190.3	184.3
	高さ H_c cm	9.992	10.128	9.996	9.509
	炉乾燥質量 m_s g	316.7	327.5	334.5	338.5
	乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	1.648	1.740	1.758	1.837
	間隙比 $e_c^{3)}$	0.613	0.527	0.512	0.447
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta \sigma$ kN/m ²	20.0	20.0	20.0	20.0
	間隙水圧増加量 Δu kN/m ²	19.0	19.5	19.3	19.1
	測定に要した時間 min	15	15	15	15
B 値		0.95	0.98	0.97	0.96



特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土野の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

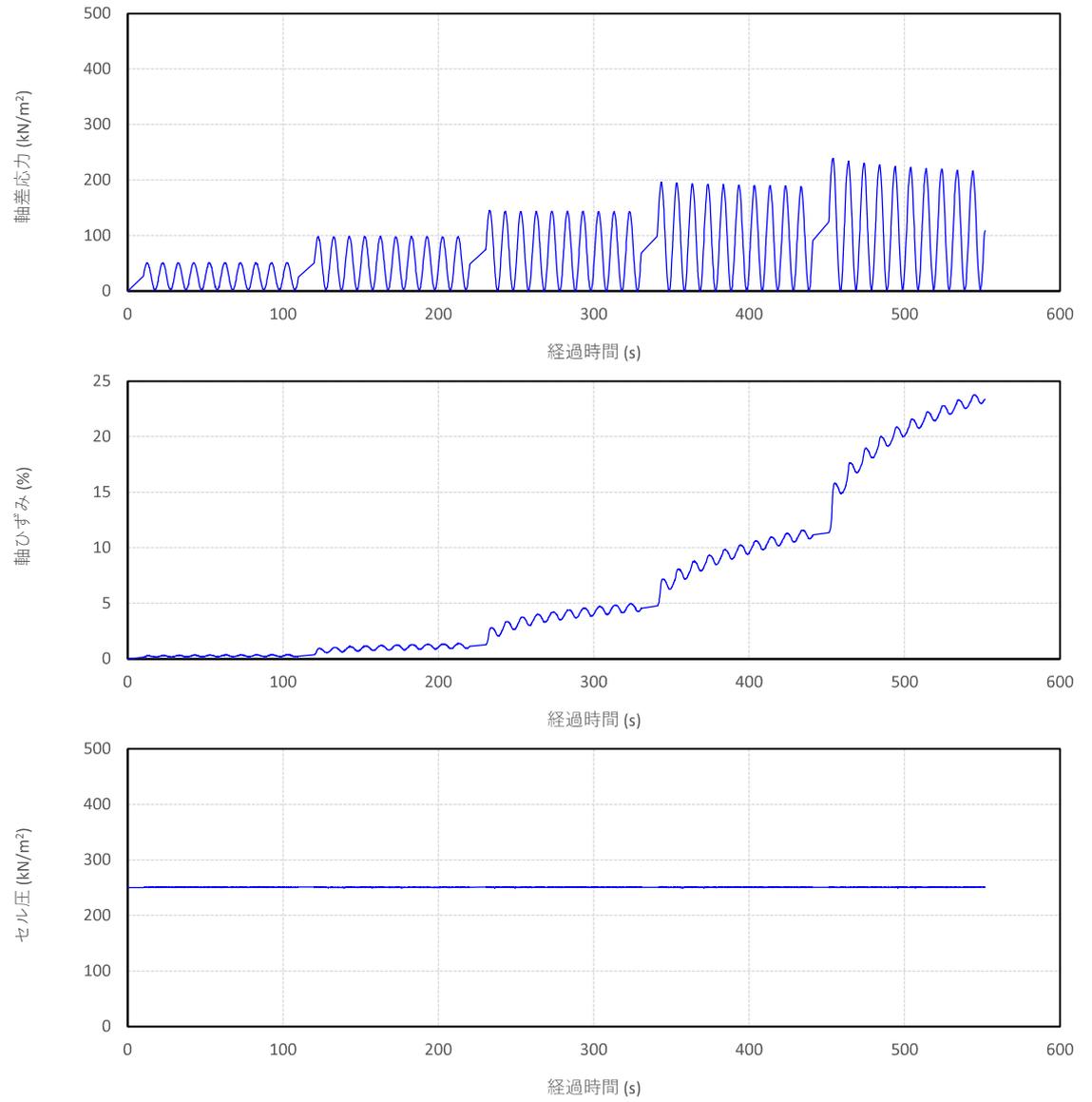
[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月25日

試料番号 (深さ) MSL 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	1
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	50
1段階当たりの軸差応力の増分	50.2kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



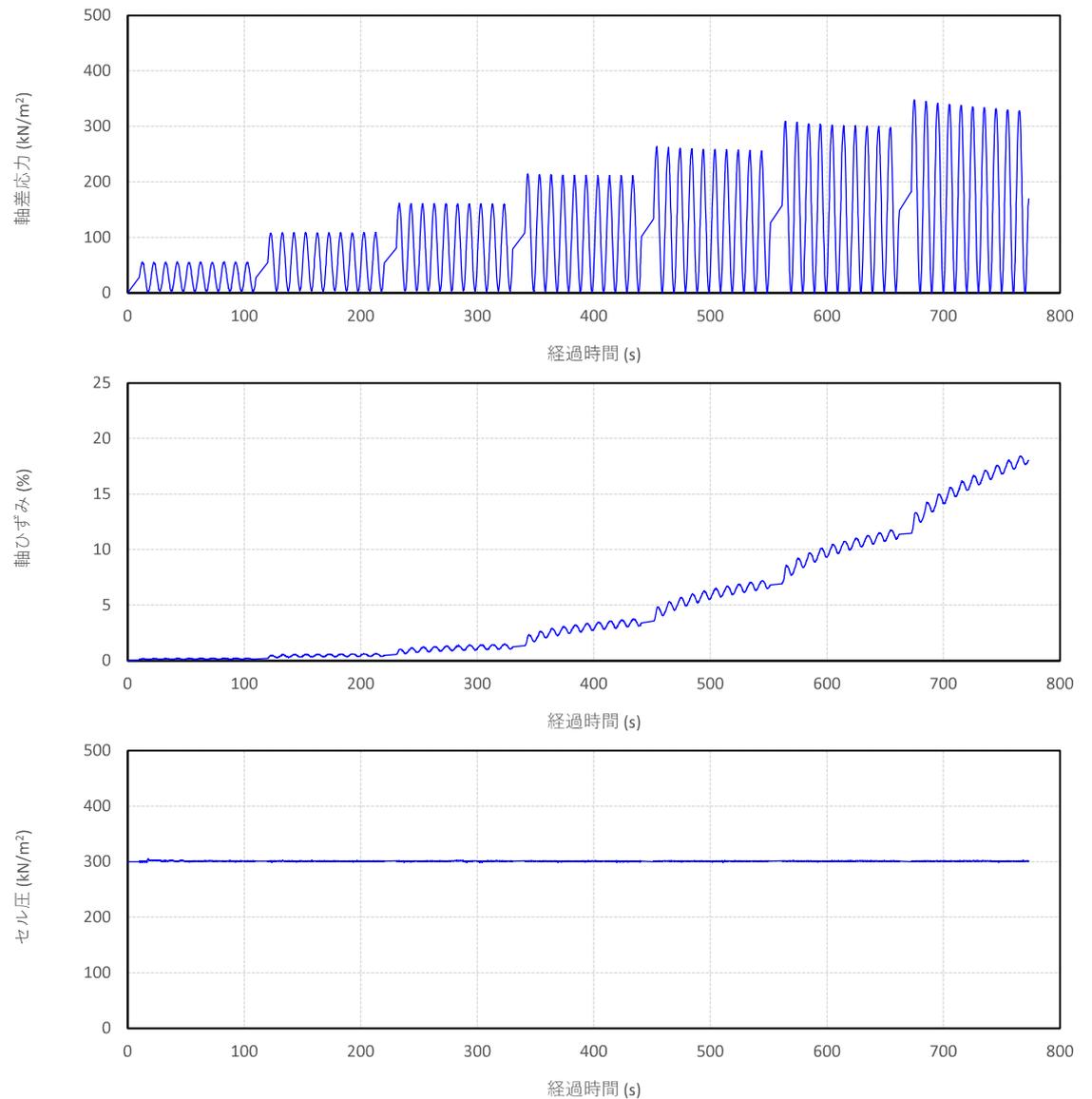
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月26日

試料番号 (深さ) MSL 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	2
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	100
1段階当たりの軸差応力の増分	53.4kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



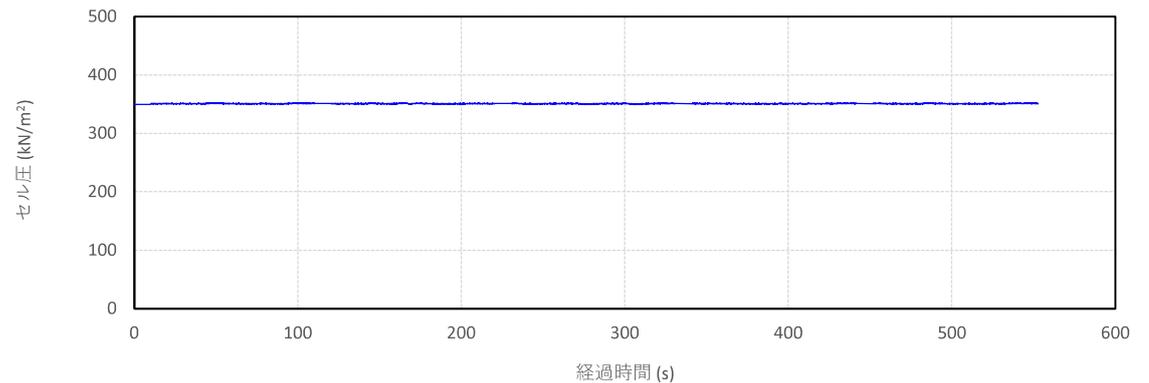
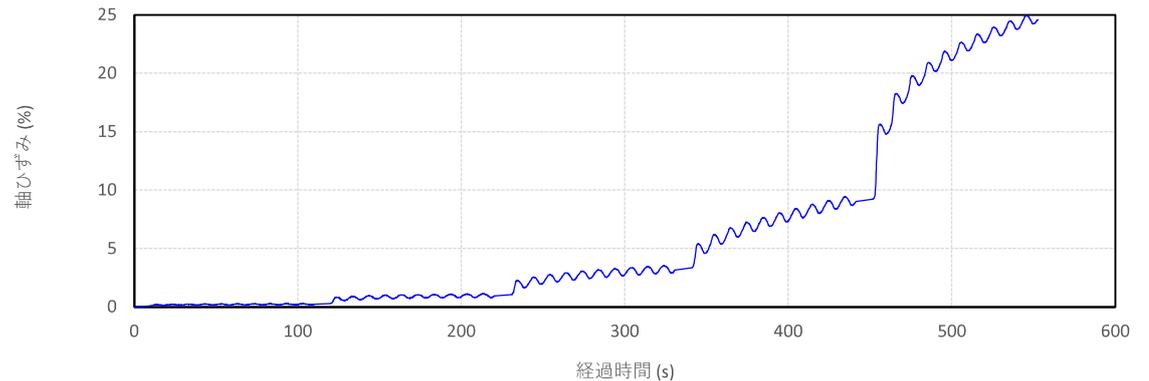
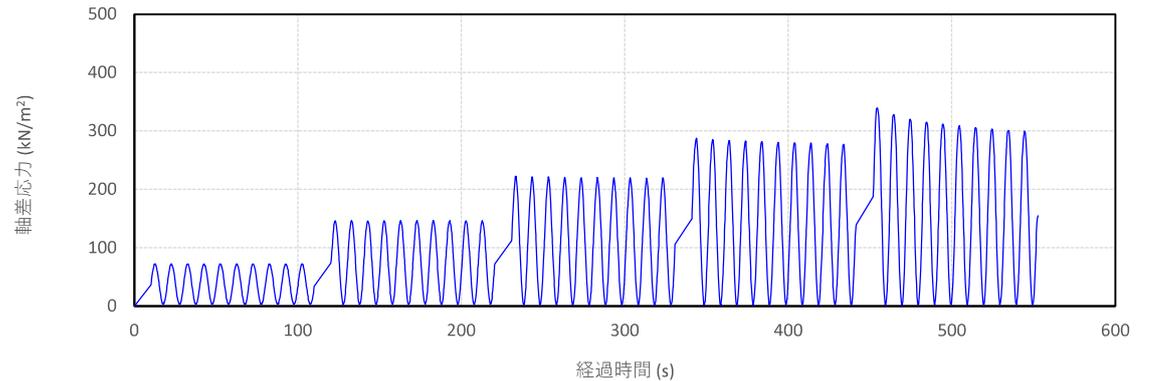
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月27日

試料番号 (深さ) MSL 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	3
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	150
1段階当たりの軸差応力の増分	75.2kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



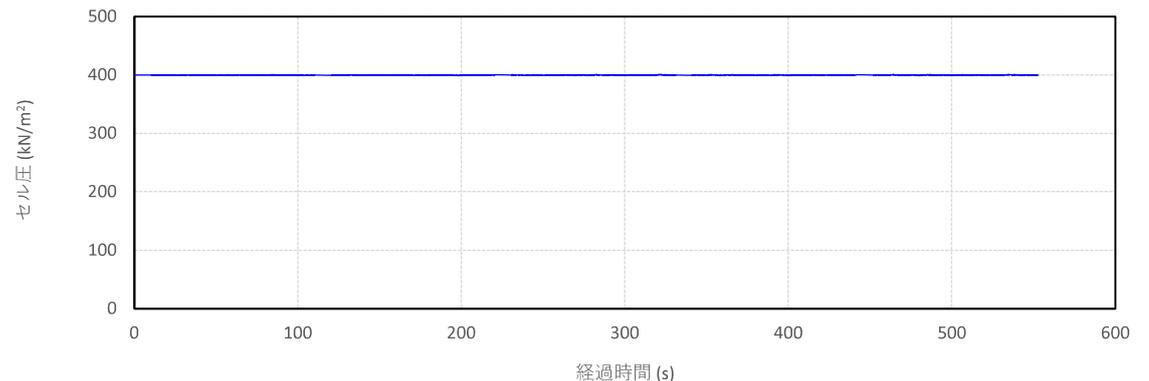
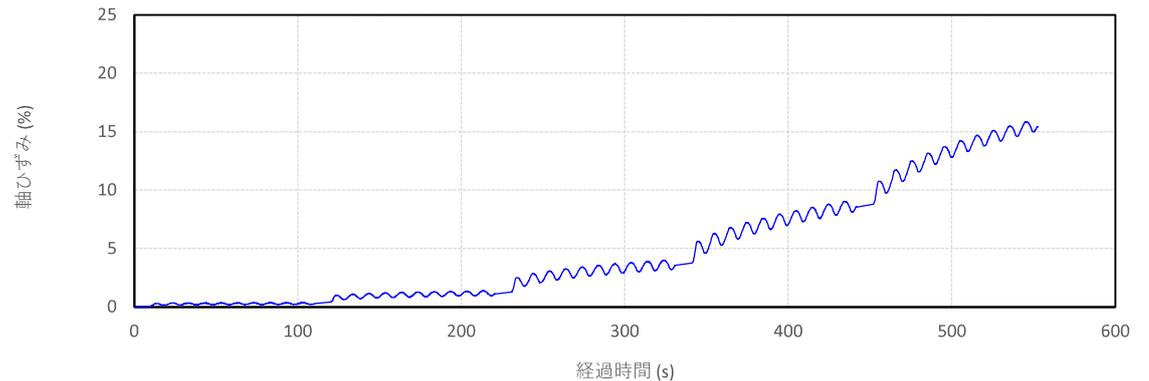
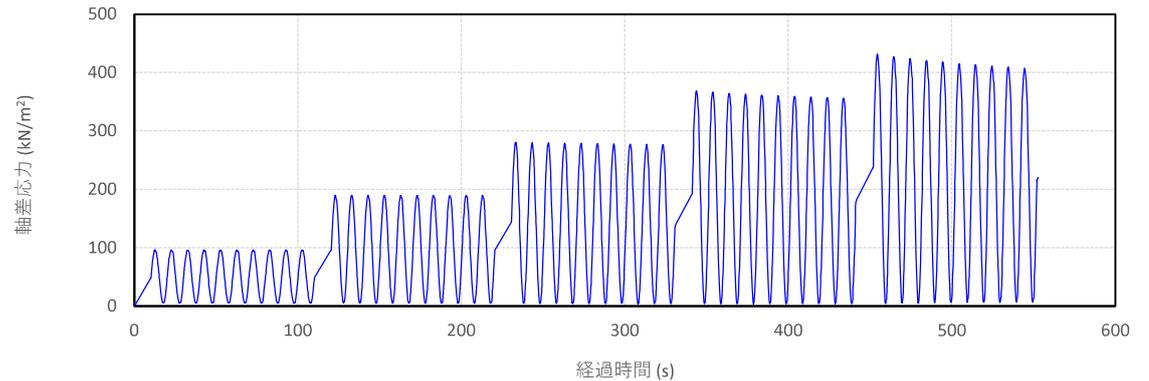
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月27日

試料番号 (深さ) MSL 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	4
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	200
1段階当たりの軸差応力の増分	97.0kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



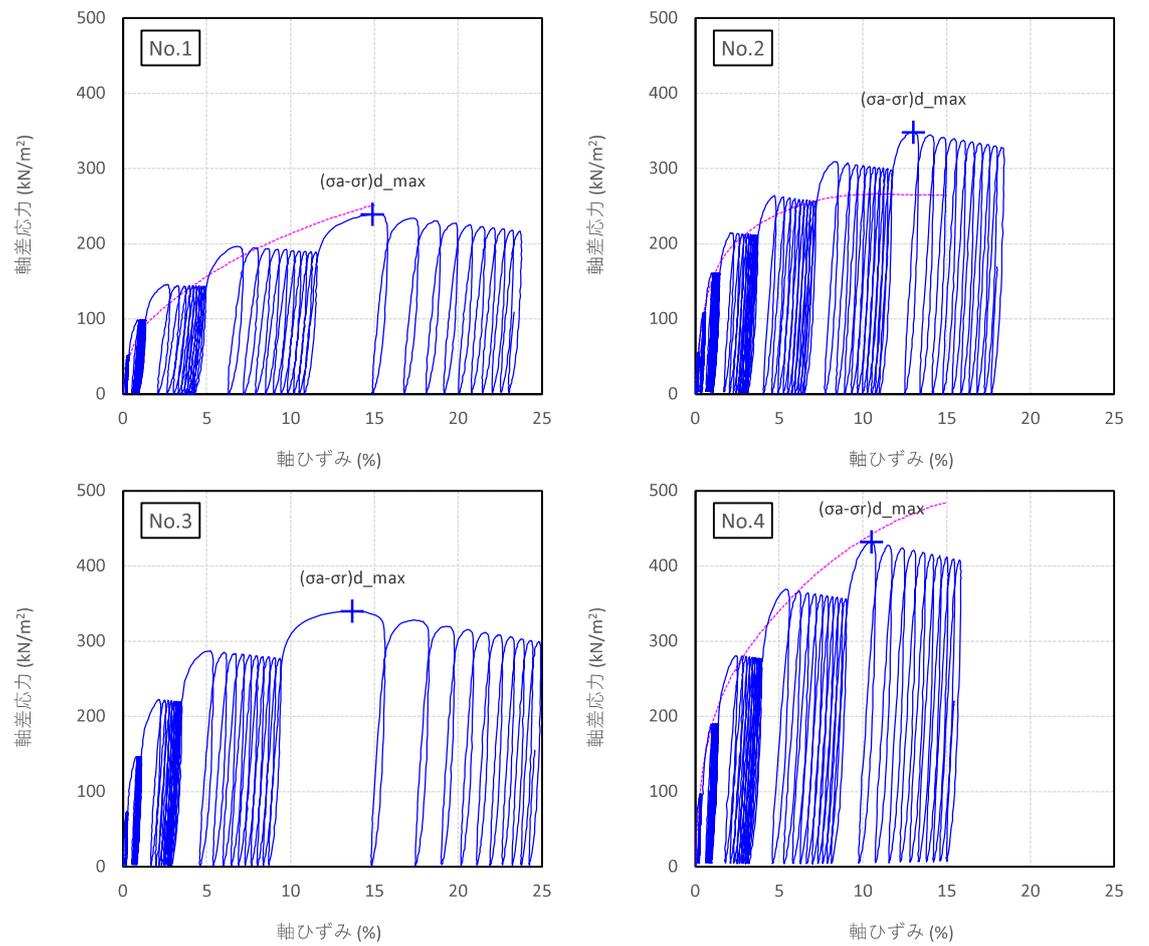
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (応力-ひずみ曲線)
----------	-------------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月25日

試料番号 (深さ) MSL 試験者 清水 裕之

供試体No.	1	2	3	4	
セル圧・圧密応力 kN/m^2	50	100	150	200	
圧縮強さ $(\sigma_a - \sigma_r)_{d_{max}}$ kN/m^2	239	348	340	432	
供試体の破壊状況					



特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

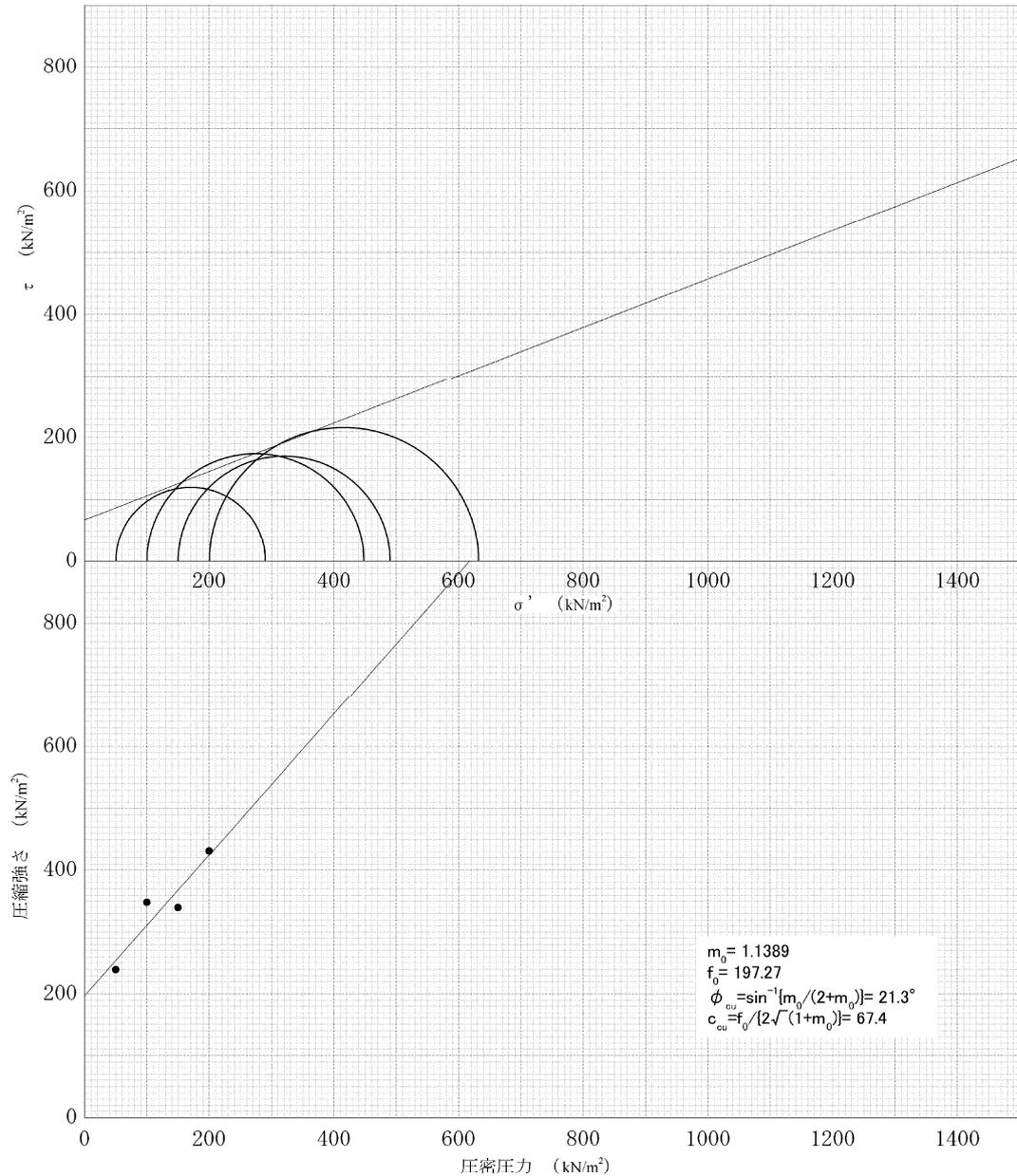
グラフ上(No.3を除く)土の三軸圧縮試験(CUB)結果を破線で示す。
繰返し载荷中に軸ひずみが $\epsilon > 15\%$ となる場合、圧縮強さは $\epsilon = 15\%$ 時の値を示す。

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 [強度特性]
----------	---------------------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 1 月 25 日

試料番号(深さ) MSL 試験者 清水 裕之

応力範囲	強度定数	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$	
正 規 圧 密 領 域	67.4	21.3	0.3899			
過 圧 密 領 域						



特 記 事 項

動的強度試験

SMR

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月9日

試料番号(深さ) SMR 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称 JGS 2561 岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³	2.725
供試体の作製 ²⁾	トリミング		
土質名称			

供試体 No.		1	2	3	4
初期状態	直径 cm	4.977 4.944	5.034 5.064	5.122 5.058	4.987 5.024
	平均直径 D_i cm	4.906 4.954	5.019 5.035	5.023 4.925	4.866 4.924
	高さ cm	5.000 5.078	4.963 4.970	4.997 4.990	4.841 4.896
	平均高さ H_i cm	4.977	5.014	5.019	4.923
	体積 V_i cm ³	9.919	10.276	10.358	10.149
	含水比 w_i %	9.903	10.217	10.294	10.174
	質量 m_i g	9.911	10.247	10.326	10.162
	湿潤密度 $\rho_{i1}^{3)}$ g/cm ³	192.8	202.3	204.3	193.4
	乾燥密度 $\rho_{di}^{3)}$ g/cm ³	96.5	102.9	101.1	102.8
	間隙比 $e_i^{3)}$	250.9	270.9	265.2	262.6
	飽和度 $S_{i1}^{3)}$ %	1.301	1.339	1.298	1.358
	相対密度 $D_{ri}^{3)}$ %	0.662	0.660	0.645	0.670
		3.114	3.129	3.221	3.070
		84.4	89.6	85.5	91.2

設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定			
	設置時の軸変位量 cm				
	飽和過程の軸変位量 cm				
	軸変位量 $\Delta H_i^{5)}$ cm	0.037	0.011	0.022	0.010
	体積変化量の測定方法	計算による			
	設置時の体積変化量 cm ³				
	飽和過程の体積変化量 cm ³				
	体積変化量 $\Delta V_i^{3)}$ cm ³	2.2	0.6	1.3	0.6

圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	9.874	10.236	10.304	10.152
	直径 D_0 cm	4.958	5.009	5.008	4.917
	体積 V_0 cm ³	190.6	201.7	203.0	192.8
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{3)}$ g/cm ³	0.670	0.662	0.650	0.672
	間隙比 $e_0^{3)}$	3.067	3.117	3.194	3.057
相対密度 $D_{r0}^{3)}$					

炉乾燥後	容器 No.				
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g				
	容器質量 g				
	炉乾燥質量 m_s g	127.7	133.5	131.9	129.5

特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態(塊状, 凍結, ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

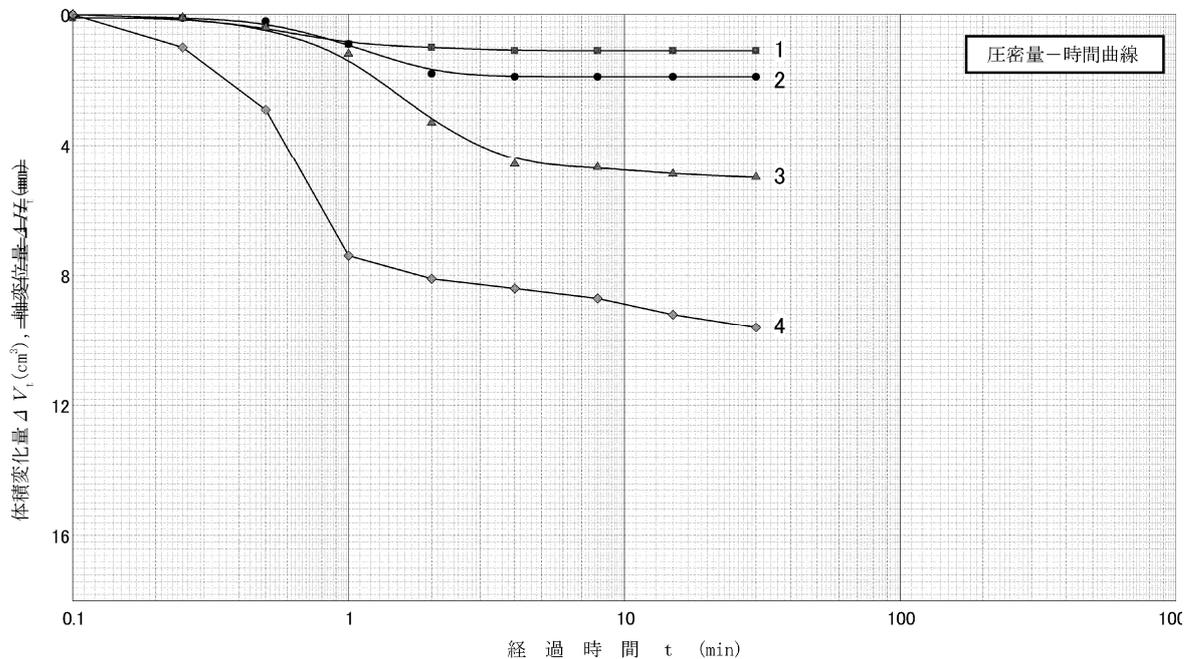
[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (圧密前, 圧密後) (圧密量-時間曲線)
----------	---

調査件名 試験年月日 令和3年2月9日

試料番号(深さ) SMR 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾		乱さない	⁴⁾		
供試体の作製方法 ²⁾		トリミング	⁴⁾		
土質名称			圧密中の排水方法	両面排水	
土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³		2.725			
供試体 No.		1	2	3	4
試験条件	セル圧 σ_c kN/m ²	250	300	350	400
	背圧 u_b kN/m ²	200	200	200	200
	圧密応力 σ'_c kN/m ²	50	100	150	200
圧密前	高さ H_0 cm	9.874	10.236	10.304	10.152
	直径 D_0 cm	4.958	5.009	5.008	4.917
	間隙比 $e_0^{3)}$	3.067	3.117	3.194	3.057
圧密後	圧密時間 t_c min	30	30	30	30
	体積変化量 ΔV_c cm ³	1.1	1.9	5.0	9.6
	軸変位量 ΔH_c cm	0.026	0.039	0.106	0.500
	体積 V_c cm ³	189.5	199.8	198.0	183.2
	高さ H_c cm	9.848	10.197	10.198	9.652
	炉乾燥質量 m_s g	127.7	133.5	131.9	129.5
	乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	0.674	0.668	0.666	0.707
	間隙比 $e_c^{3)}$	3.044	3.078	3.091	2.855
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta \sigma$ kN/m ²	20.0	20.0	20.0	20.0
	間隙水圧増加量 Δu kN/m ²	19.0	18.9	19.2	18.9
	測定に要した時間 min	15	15	15	15
B 値		0.95	0.95	0.96	0.95



特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解冻方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土野の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

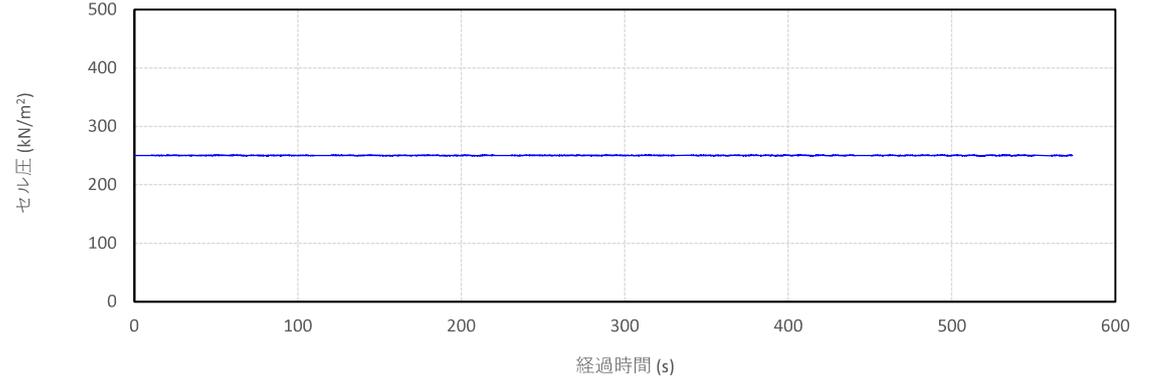
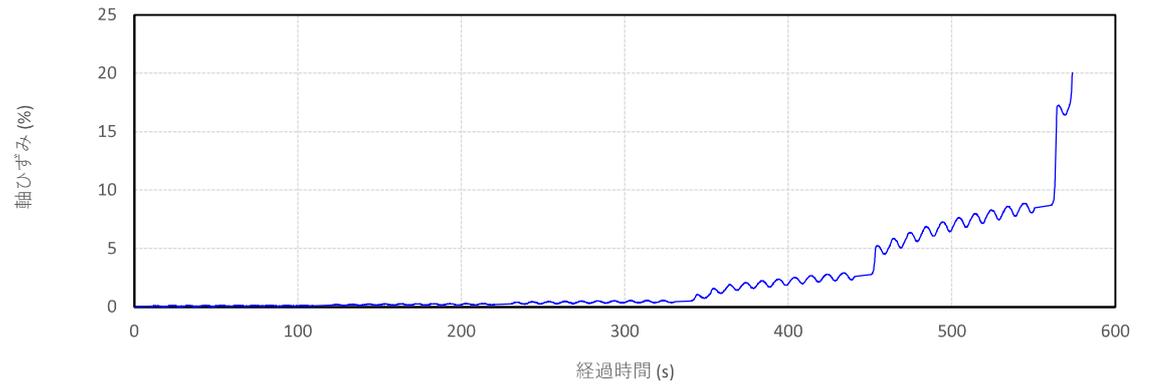
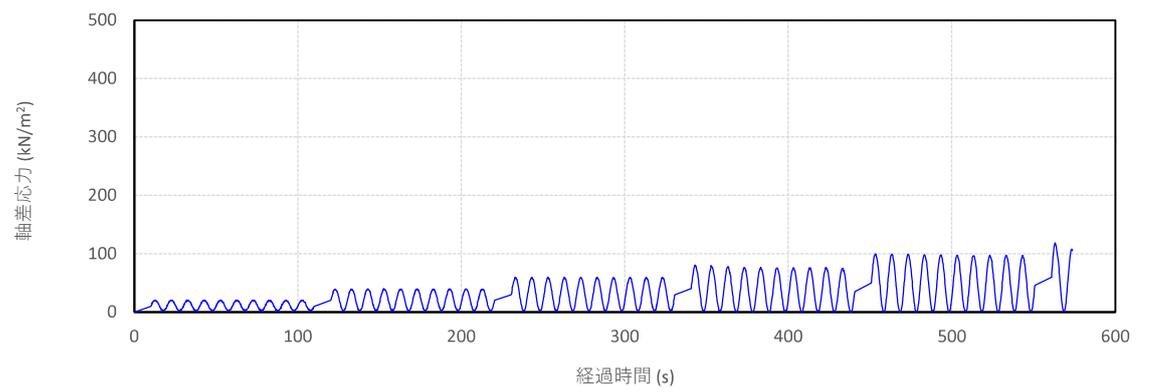
[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月9日

試料番号 (深さ) SMR 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	1
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	50
1段階当たりの軸差応力の増分	20.6kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



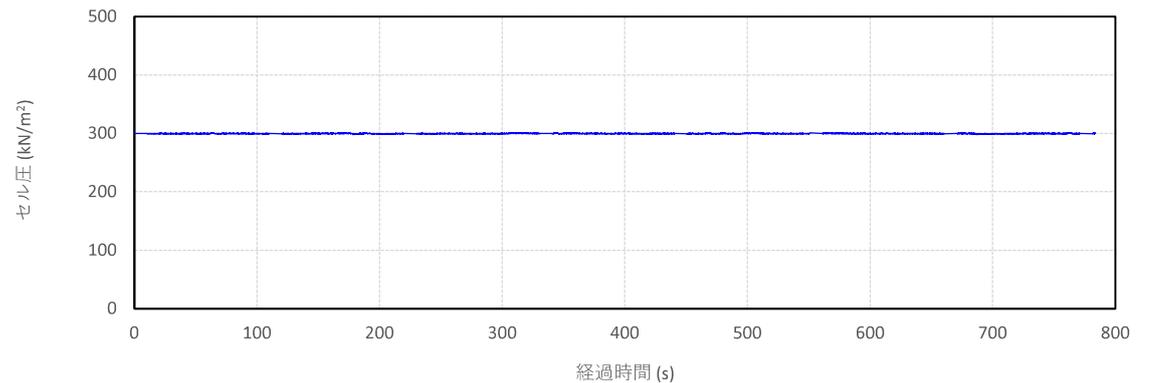
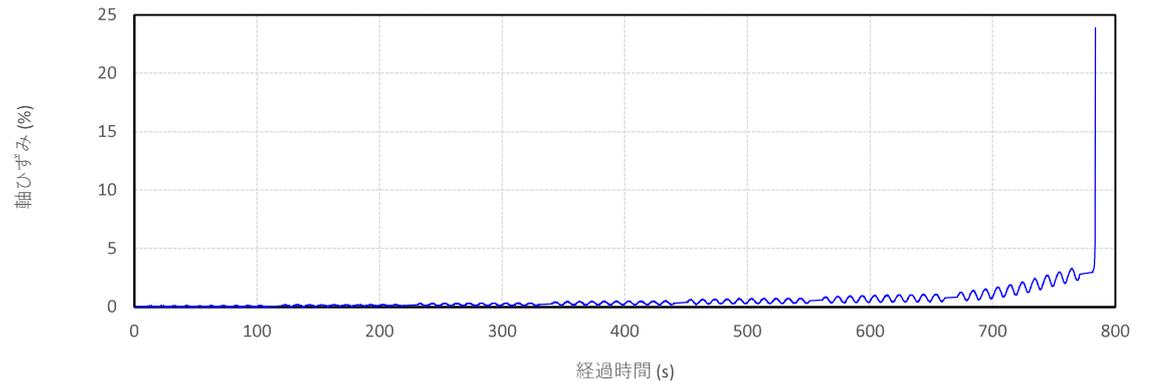
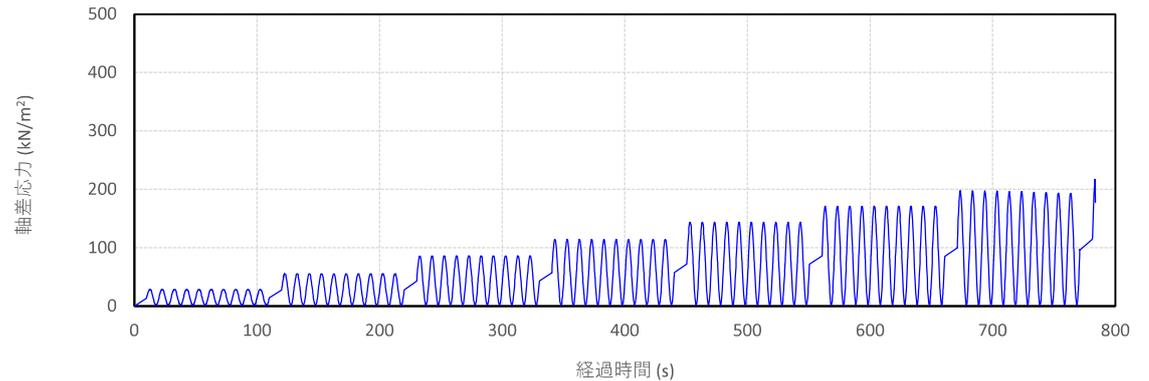
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月9日

試料番号 (深さ) SMR 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	2
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	100
1段階当たりの軸差応力の増分	28.0kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



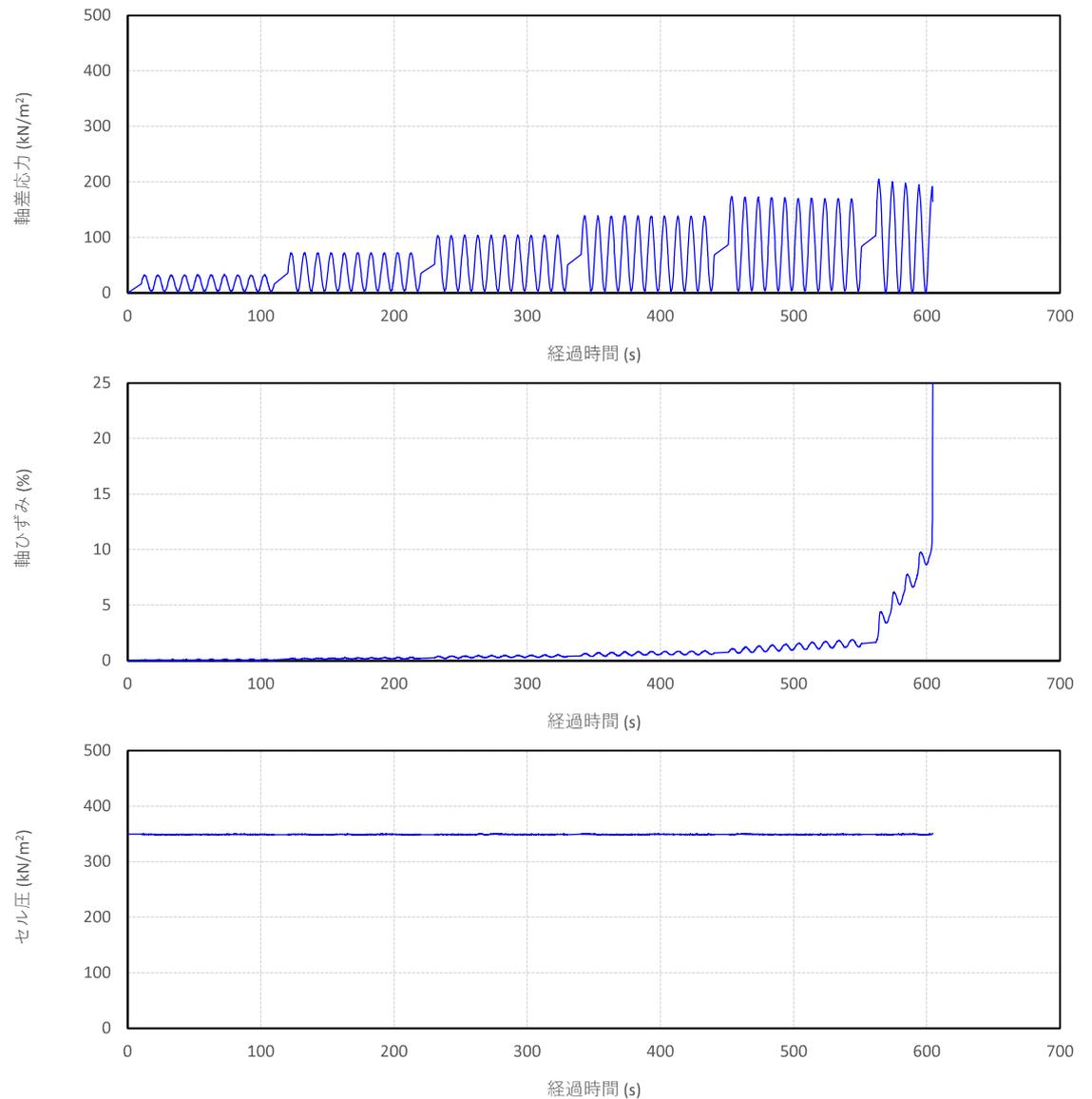
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月10日

試料番号 (深さ) SMR 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	3
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	150
1段階当たりの軸差応力の増分	35.2kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200

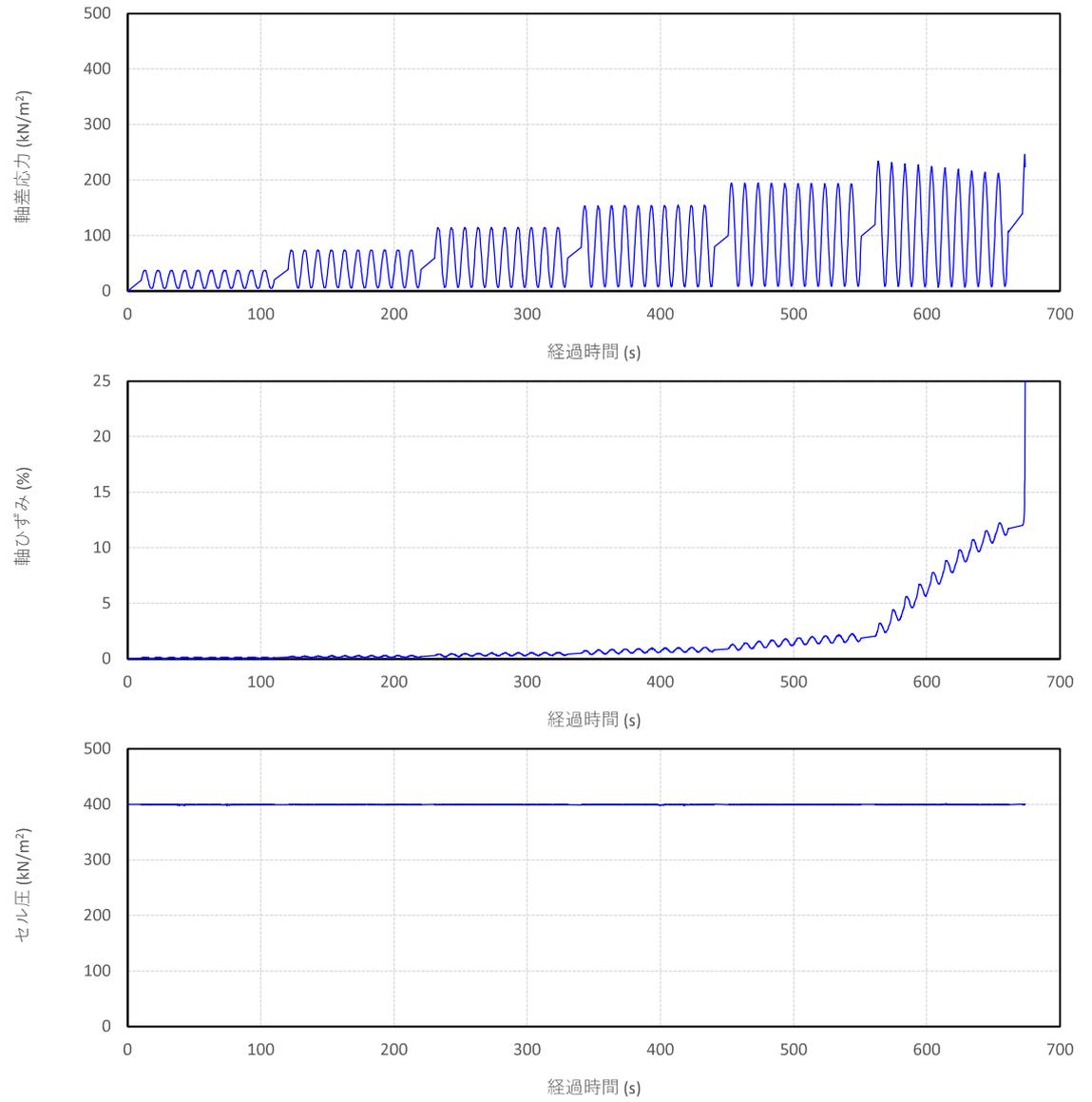


特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (時刻歴)
----------	--------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月10日
 試料番号 (深さ) SMR 試験者 清水 裕之

載荷波形	正弦波	供試体No.	4
載荷周波数	0.1Hz	セル圧・圧密応力 kN/m ²	200
1段階当たりの軸差応力の増分	42.4kN/m ²	背 圧 kN/m ²	200



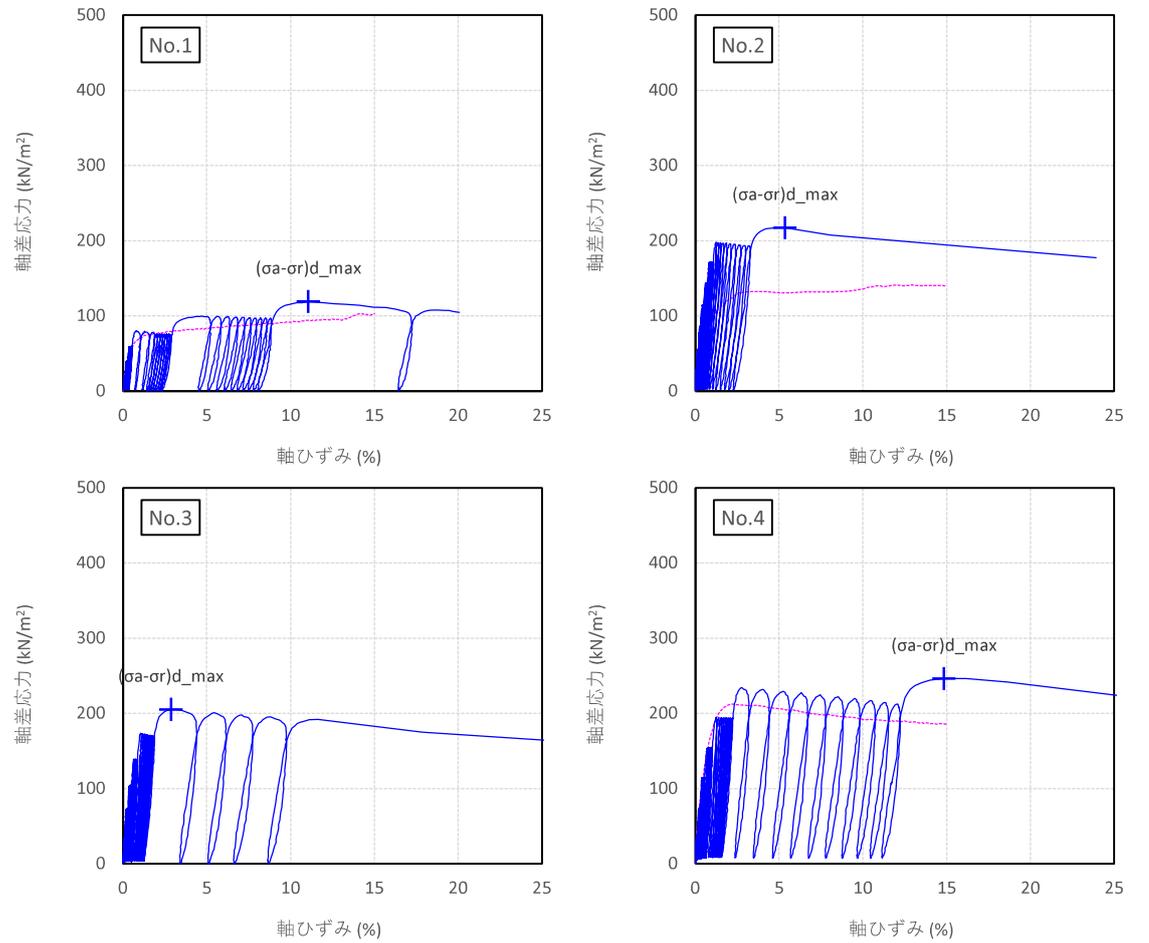
特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 (応力-ひずみ曲線)
----------	-------------------------------

調査件名 試験年月日 令和3年2月9日

試料番号 (深さ) SMR 試験者 清水 裕之

供試体No.	1	2	3	4	
セル圧・圧密応力 kN/m^2	50	100	150	200	
圧縮強さ $(\sigma_d - \sigma_r)_{d,max}$ kN/m^2	119	217	205	246	
供試体の破壊状況					



特記事項 [1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

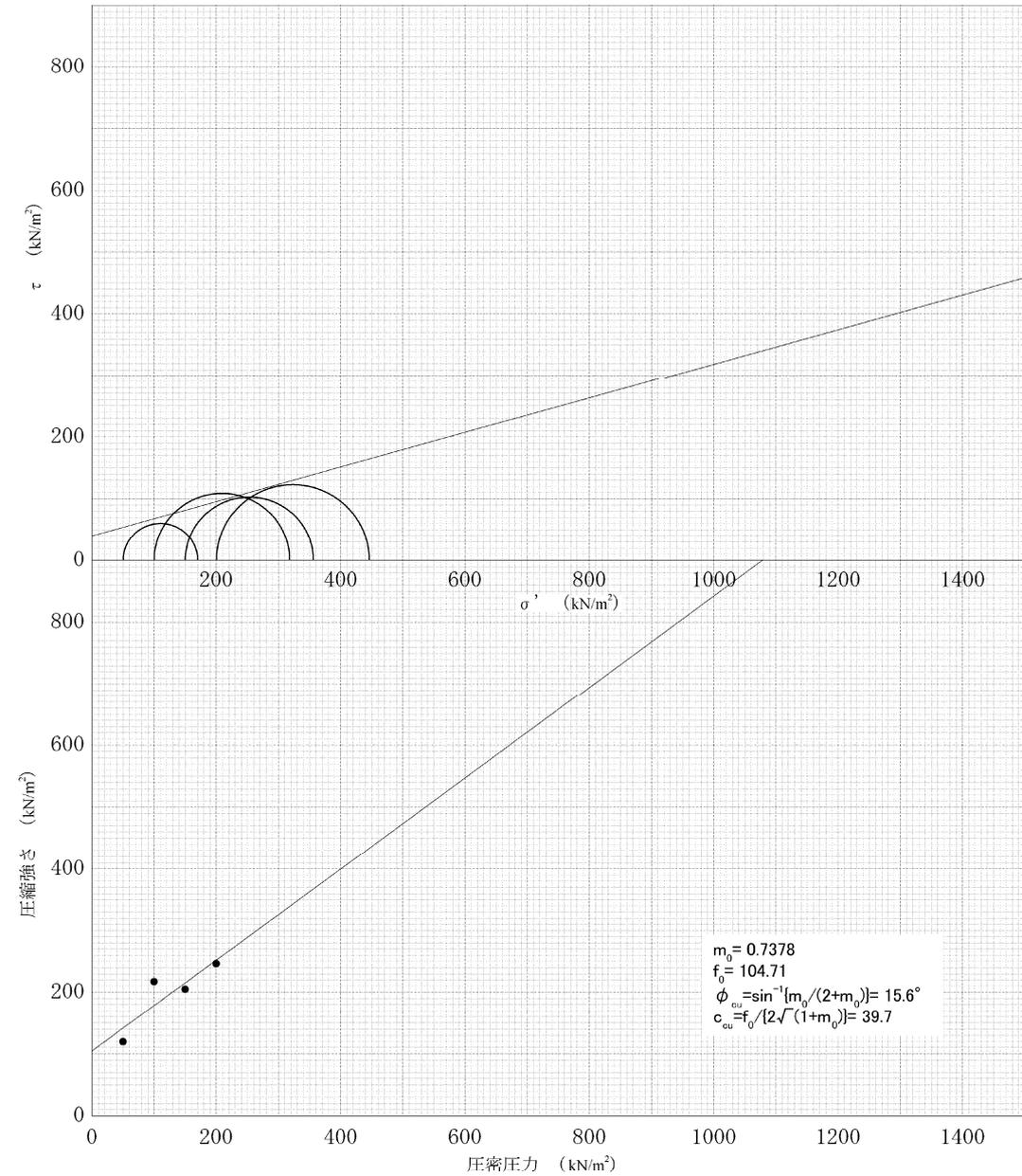
グラフ上(No.3を除く)土の三軸圧縮試験(CUB)結果を破線で示す。
繰返し载荷中に軸ひずみが $\epsilon > 15\%$ となる場合、圧縮強さは $\epsilon = 15\%$ 時の値を示す。

JGS 2561	岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験 [強度特性]
----------	---------------------------

調査件名 試験年月日 令和 3 年 2 月 9 日

試料番号(深さ) SMR 試験者 清水 裕之

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cu} kN/m^2	ϕ_{cu} $^{\circ}$	$\tan \phi_{cu}$	c' kN/m^2	ϕ' $^{\circ}$
正 規 圧 密 領 域	39.7	15.6	0.2792		
過 圧 密 領 域					



特 記 事 項

動的変形試験

MSR

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置
----------	-----------------

調査件名 試験年月日 令和3年1月26日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

供試体を用いる試験の基準番号と名称		JGS 0542 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験			
試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度	$\rho_g^{(3)}$ g/cm ³	2.627	
供試体の作製 ²⁾	トリミング	最小乾燥密度	$\rho_{min}^{(4)}$ g/cm ³		
土質名称		最大乾燥密度	$\rho_{max}^{(4)}$ g/cm ³		
供試体 No.		1	2	3	4
初期状態	直径	cm	5.084, 5.004		
		cm	5.014, 5.005		
		cm	4.997, 5.038		
	平均直径 D_i	cm	5.024		
	高さ	cm	10.330		
		cm	10.263		
	平均高さ H_i	cm	10.297		
	体積	V cm ³	204.1		
	含水比	w_i %	28.4		
	質量	m_i g	383.8		
	湿潤密度	$\rho_{wi}^{(3)}$ g/cm ³	1.881		
	乾燥密度	$\rho_{di}^{(3)}$ g/cm ³	1.465		
	間隙比	$e^{(3)}$	0.793		
	飽和度	$S_{ri}^{(3)}$ %	94.1		
相対密度	$D_{ri}^{(3)}$ %				
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法		外部変位計によって測定		
	設置時の軸変位量	cm			
	飽和過程の軸変位量	cm			
	軸変位量 $\Delta H_i^{(5)}$	cm	0.000		
	体積変化量の測定方法		軸変位量から計算によって算出		
	設置時の体積変化量	cm ³			
飽和過程の体積変化量	cm ³				
体積変化量 $\Delta V_i^{(5)}$	cm ³	0.0			
圧密前(試験前)	高さ	H_0 cm	10.297		
	直径	D_0 cm	5.024		
	体積	V_0 cm ³	204.1		
	乾燥密度	$\rho_{d0}^{(3)}$ g/cm ³	1.465		
	間隙比	$e_0^{(3)}$	0.793		
炉乾燥後	容器 No.				
	(炉乾燥供試体+容器)質量	g			
	容器質量	g			
炉乾燥質量 m_s	g	299.0			

特記事項

- 1) 試料の採取方法、試料の状態(塊状、凍結、ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法、負圧法の種別、凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は、最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

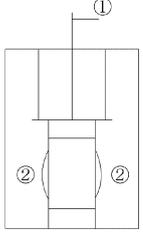
JGS	0542 0543	地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験 (試験条件) 三軸試験による地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験 (圧密状態)
-----	-------------------------	--

調査件名

試験年月日 令和3年1月26日

試料番号(深さ) MSR

試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾		乱さない		土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³		2.627						
供試体の作製方法 ²⁾		トリミング		最小乾燥密度 ρ_{min} ⁴⁾ g/cm ³								
土質名称				最大乾燥密度 ρ_{max} ⁴⁾ g/cm ³								
供試体 No.		1		飽和方法		二重負圧法						
試験条件	軸方向応力 σ_{ac} kN/m ²		300		載荷条件	載荷波形		正弦波, 三角波				
	側方向応力(=外圧,内圧) σ_{rc} kN/m ²		300			載荷周波数 f Hz		0.1				
	背圧 u_v kN/m ²		200			排水条件		排水 , 非排水				
	軸方向圧密応力 σ'_{vc} kN/m ²		100			1サイクルデータポイント数		100				
	側方向圧密応力 σ'_{rv} kN/m ²		100			載荷段階数		10				
	異方圧密応力比 $\sigma'_{rv}/\sigma'_{vc}$ (=K) ⁵⁾		1									
試験装置	荷重計の容量		kN		1							
	トルク計の容量		N・m		1							
	軸変位計	大変位	位置	①		圧密後	軸変位計の読み		圧密前 cm		0.000	
			種類	高感度変位計			変位計の位置		圧密後 cm		0.017	
			数	1					排水量の読み		圧密前 cm ³	
	中変位	位置	②		圧密後 cm ³				3.416			
		種類	LDT		軸変位量 ΔH_v cm				0.017			
		数	2		体積変化量 ΔV_c cm ³		3.416					
	小変位	位置			高さ H_0 cm		10.279					
		種類			外径 (D_0, ϕ_{00}) cm		4.986					
		数			内径 D_{i0} ⁶⁾ cm		200.68					
	回転角計	小変位	位置				体積 V_c cm ³		19.52			
種類					断面積 A_c cm ²		299.0					
数					乾燥質量 m_s g		1.490					
金属製リップ	数量			乾燥密度 $\rho_{df} = m_s/V_c$ g/cm ³		0.763						
	高さ	cm		間隙比 e_c ³⁾		2						
	厚さ	cm		相対密度 D_{rc} ³⁾ %		0.96						
間隙水圧経路体積変化		cm ³ /kN/m ²		1.0E-06								
コーラスリーブ	材質		ラテックス		間隙水圧係数 B	圧密前		等方応力増加量 $\Delta\sigma$ N/mm ²		20.0		
	厚さ		mm			1.0		間隙水圧増加量 Δu N/mm ²		19.1		
圧密前	高さ		H_0 cm		10.297		測定に要した時間		min		2	
	外径 (D_0, ϕ_{00})		cm		5.024		B 値				0.96	
	内径 D_{i0} ⁶⁾		cm				圧密後		等方応力増加量 $\Delta\sigma$ N/mm ²			
								間隙水圧増加量 Δu_v N/mm ²				
								Δu_1 N/mm ²				
								測定に要した時間		min		
								B 値				

特記事項

供試体の状況



- 1) 試料の採取方法、試料の状態(塊状、凍結、ときほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法、負圧法の種別、凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は、最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 異方応力状態で試験するときのみ記入する。
- 6) 中空円筒供試体による場合に記入する。

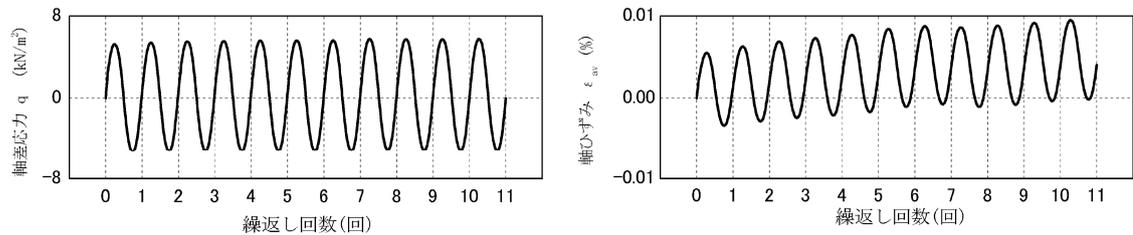
[1kN/m²≒0.102kgf/cm²]

調査件名 _____ 試験年月日 令和 3 年 1 月 26 日

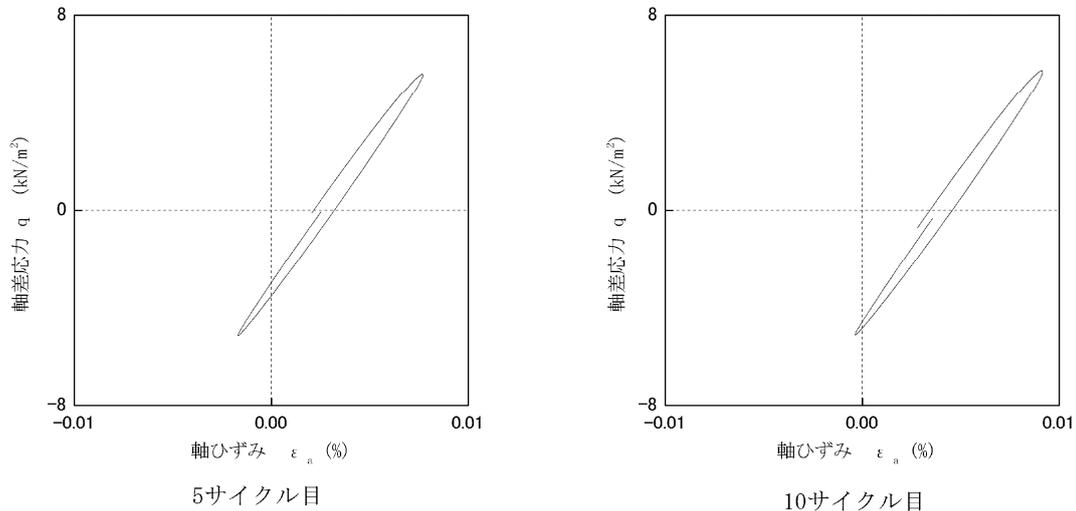
試料番号(深さ) MSR _____ 試験者 清水 裕之

土 質 名 称				供 試 体 No.	1	載 荷 段 階	3					
繰返し 載荷 試験 前	軸変位量 ΔH_3 cm	0.002	サイクル	片振幅軸応力 σ_d kN/m ²	片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ %	等価ヤング率 E_{eq} MN/m ²	履歴減衰率 h %					
	体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.027										
	高 　　さ H_3 cm	10.277	2					5.3	4.57E-03	115.9	5.3	
	外 径 (D_{10}, D_{30}) cm	4.986	3					5.3	4.65E-03	114.5	5.2	
	内 　　径 D_{10} cm		4					5.4	4.70E-03	113.8	4.8	
	体 　　積 V_a cm ³	200.657	5					5.4	4.70E-03	114.3	4.5	
	断 面 積 A_0 cm ²	19.524	6					5.4	4.75E-03	113.4	5.4	
	間 隙 比 e_0	0.763	7					5.4	4.76E-03	113.3	4.9	
	載 荷 後	軸変位量 ΔH_3 cm	0.003					8	5.4	4.84E-03	111.8	2.9
		体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.027					9	5.4	4.82E-03	112.5	4.7
			10	5.4	4.77E-03	114.0	4.9					

波形の連続記録¹⁾



履歴曲線²⁾



特記事項

- 1) 繰返し載荷中の軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の連続記録を図示するか,または別途添付してもよい。
- 2) 軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の履歴曲線を図示するか,または別途添付してもよい。必要に応じて5, 10回目以外の繰返し載荷における履歴曲線も添える。
- 3) 中空円筒供試体による試験のときのみ記入する。

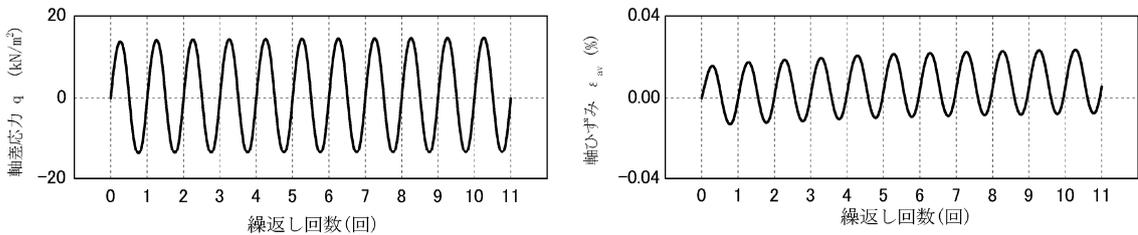
[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]
[1MN/m² ≒ 10.2kgf/cm²]

調査件名 _____ 試験年月日 令和 3 年 1 月 26 日

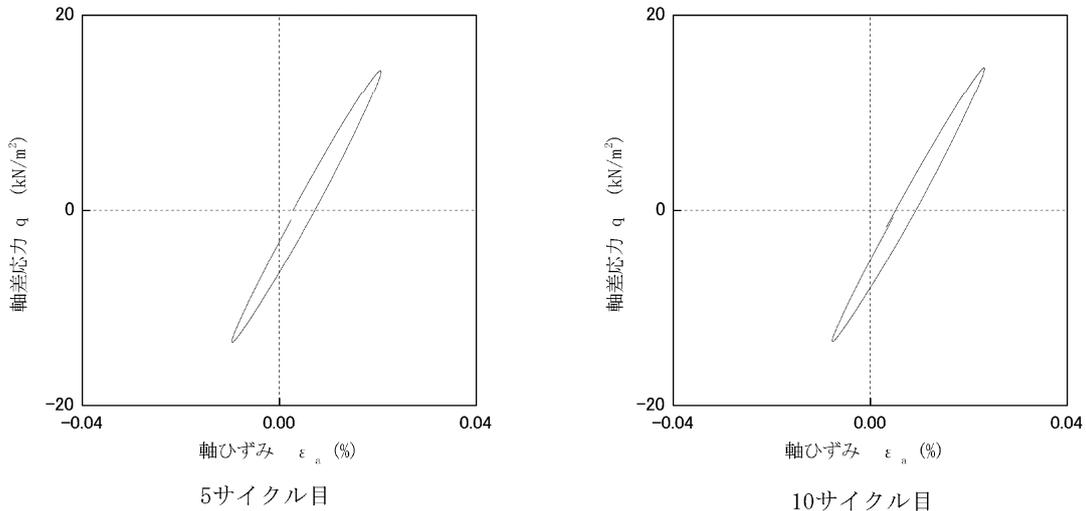
試料番号(深さ) MSR _____ 試験者 清水 裕之

土 質 名 称				供 試 体 No.	1	載 荷 段 階	5					
繰返し 載荷 試験 前	軸変位量 ΔH_3 cm	0.004	サイクル	片振幅軸応力 σ_d kN/m ²	片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ %	等価ヤング率 E_{eq} MN/m ²	履歴減衰率 h %					
	体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.054										
	高 　　さ H_3 cm	10.275	2					13.9	1.47E-02	94.6	7.0	
	外径 ($D_o, D_{o,3}$) cm	4.986	3					13.9	1.49E-02	93.4	6.8	
	内 　　径 $D_{i,3}$ cm		4					13.9	1.49E-02	93.7	7.1	
	体 　　積 V_a cm ³	200.630	5					14.0	1.52E-02	92.0	6.6	
	断 面 積 A_a cm ²	19.525	6					14.0	1.53E-02	91.7	6.6	
	間 隙 比 e_a	0.763	7					14.0	1.53E-02	91.5	6.6	
	載 荷 後	軸変位量 ΔH_3 cm	0.005					8	14.0	1.53E-02	91.4	6.4
		体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.054					9	14.0	1.54E-02	91.0	6.3
			10	14.1	1.55E-02	90.8	6.2					

波形の連続記録¹⁾



履歴曲線²⁾



特記事項

- 1) 繰返し載荷中の軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の連続記録を図示するか,または別途添付してもよい。
- 2) 軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の履歴曲線を図示するか,または別途添付してもよい。必要に応じて5, 10回目以外の繰返し載荷における履歴曲線も添える。
- 3) 中空円筒供試体による試験のときのみ記入する。

[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]
[1MN/m² ≒ 10.2kgf/cm²]

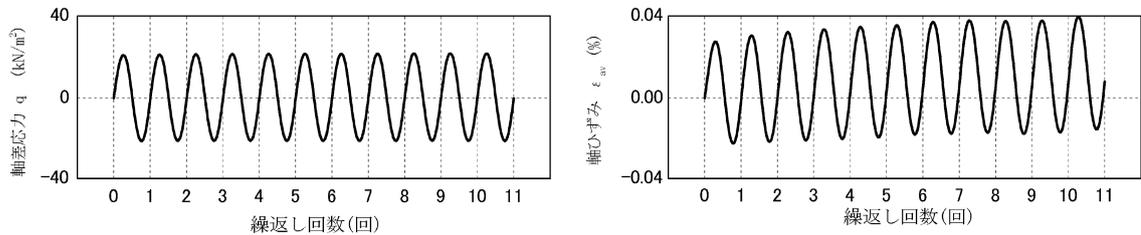
JGS	0542 0543	地盤材料の変形特性を求めめるための繰返し三軸試験 主の変形特性を求めめる中空円筒供試体による繰返し三軸試験	(載荷過程) 波形記録
-----	-------------------------	--	------------------

調査件名 _____ 試験年月日 令和 3 年 1 月 26 日

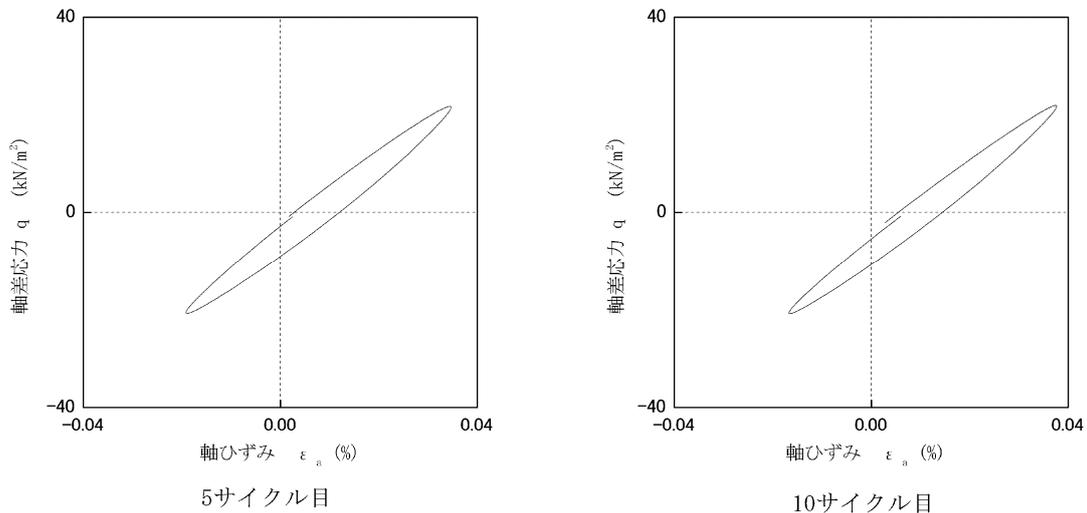
試料番号(深さ) MSR _____ 試験者 清水 裕之

土 質 名 称				供 試 体 No.	1	載 荷 段 階	6					
繰 返 し 載 荷 試 験 前	軸変位量 ΔH_3 cm	0.005	サイクル	片振幅軸応力 σ_d kN/m ²	片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ %	等価ヤング率 E_{eq} MN/m ²	履歴減衰率 h %					
	体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.054										
	高 々 H_3 cm	10.274	2					21.0	2.59E-02	81.0	8.1	
	外径 (D_{10}, D_{30}) cm	4.986	3					21.0	2.64E-02	79.8	8.0	
	内 径 D_{10} cm		4					21.1	2.67E-02	79.0	8.0	
	体 積 V_a cm ³	200.630	5					21.1	2.69E-02	78.6	7.9	
	断 面 積 A_0 cm ²	19.527	6					21.2	2.66E-02	79.6	7.7	
	間 隙 比 e_s	0.763	7					21.2	2.72E-02	77.9	7.8	
	載 荷 後	軸変位量 ΔH_3 cm	0.007					8	21.2	2.73E-02	77.7	8.1
		体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.081					9	21.2	2.75E-02	77.3	7.6
			10	21.3	2.72E-02	78.2	7.3					

波形の連続記録¹⁾



履歴曲線²⁾



特記事項

- 繰返し載荷中の軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の連続記録を図示するか,または別途添付してもよい。
- 軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の履歴曲線を図示するか,または別途添付してもよい。必要に応じて5, 10回目以外の繰返し載荷における履歴曲線も添える。
- 中空円筒供試体による試験のときのみ記入する。

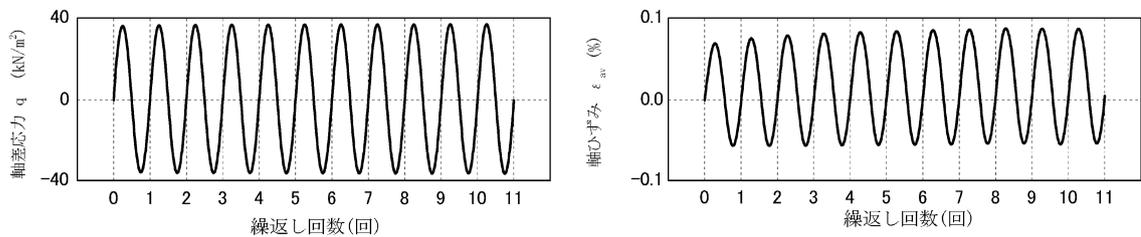
[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]
[1MN/m² ≒ 10.2kgf/cm²]

調査件名 _____ 試験年月日 令和 3 年 1 月 26 日

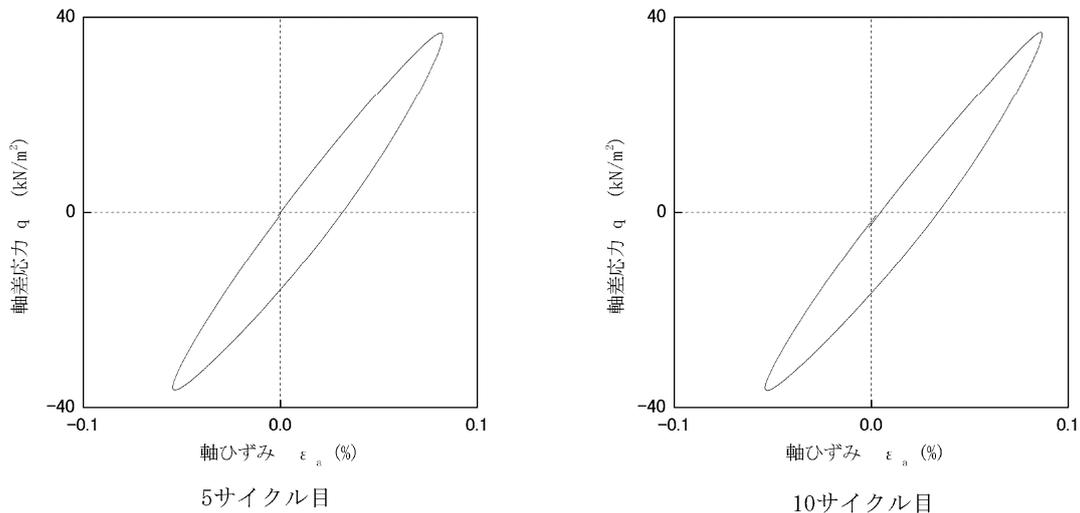
試料番号(深さ) MSR _____ 試験者 清水 裕之

土 質 名 称				供 試 体 No.	1	載 荷 段 階	8					
繰返し 載荷 試験 前	軸変位量 ΔH_3 cm	0.009	サイクル	片振幅軸応力 σ_d kN/m ²	片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ %	等価ヤング率 E_{eq} MN/m ²	履歴減衰率 h %					
	体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.108										
	高 々 H_3 cm	10.271	2					36.4	6.55E-02	55.6	11.5	
	外径 (D_{10}, D_{30}) cm	4.986	3					36.5	6.71E-02	54.4	11.2	
	内 径 D_{10} cm		4					36.5	6.80E-02	53.8	11.0	
	体 積 V_a cm ³	200.576	5					36.6	6.86E-02	53.4	10.9	
	断 面 積 A cm ²	19.529	6					36.6	6.91E-02	53.0	10.7	
	間 隙 比 e_s	0.762	7					36.7	6.96E-02	52.8	10.6	
	載 荷 後	軸変位量 ΔH_3 cm	0.012					8	36.7	6.94E-02	52.9	10.4
		体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.215					9	36.7	7.00E-02	52.5	10.4
			10	36.7	7.04E-02	52.2	10.0					

波形の連続記録¹⁾



履歴曲線²⁾



特記事項

- 1) 繰返し載荷中の軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の連続記録を図示するか,または別途添付してもよい。
- 2) 軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の履歴曲線を図示するか,または別途添付してもよい。必要に応じて5, 10回目以外の繰返し載荷における履歴曲線も添える。
- 3) 中空円筒供試体による試験のときのみ記入する。

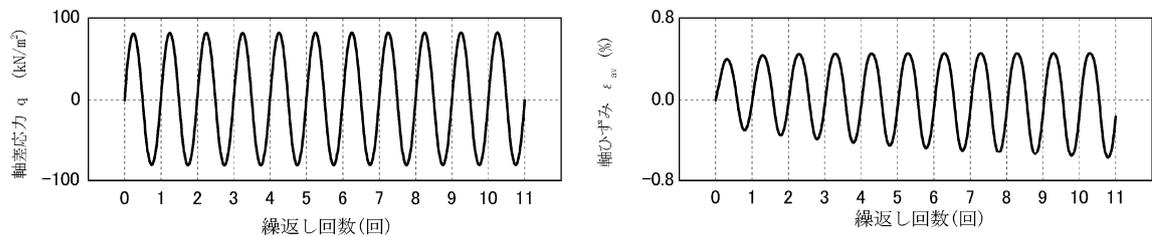
[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]
[1MN/m² ≒ 10.2kgf/cm²]

調査件名 _____ 試験年月日 令和 3 年 1 月 26 日

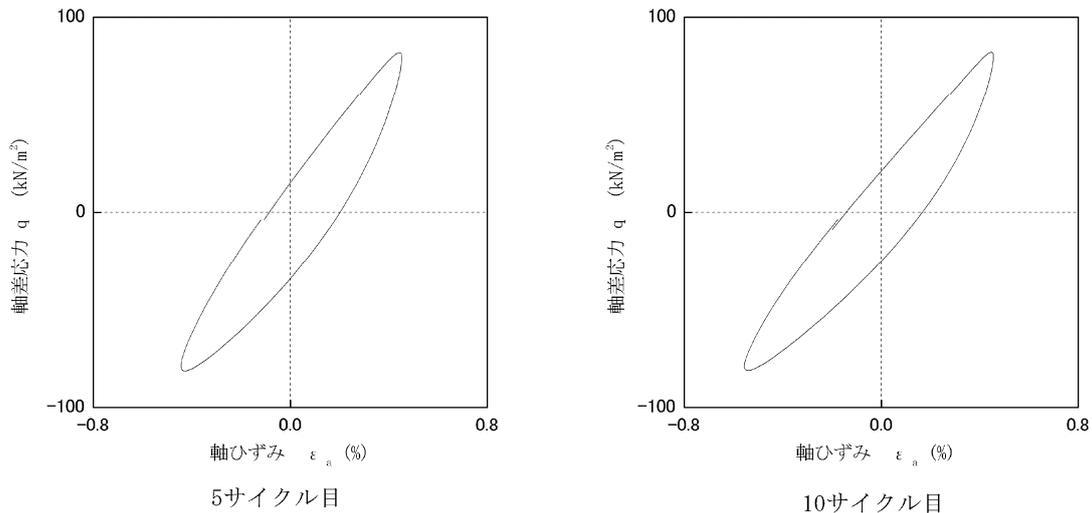
試料番号(深さ) MSR _____ 試験者 清水 裕之

土 質 名 称				供 試 体 No.	1	載 荷 段 階	10					
繰返し 載荷 試験 前	軸変位量 ΔH_3 cm	0.018	サイクル	片振幅軸応力 σ_d kN/m ²	片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ %	等価ヤング率 E_{eq} MN/m ²	履歴減衰率 h %					
	体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.350										
	高 々 H_3 cm	10.261	2					81.5	3.90E-01	20.9	18.0	
	外径 (D_{10}, D_{30}) cm	4.986	3					81.6	4.14E-01	19.7	16.8	
	内 径 D_{10} cm		4					81.7	4.33E-01	18.9	16.1	
	体 積 V_a cm ³	200.334	5					81.7	4.49E-01	18.2	15.6	
	断 面 積 A_0 cm ²	19.523	6					81.7	4.63E-01	17.7	15.2	
	間 隙 比 e_0	0.760	7					81.7	4.75E-01	17.2	14.9	
	載 荷 後	軸変位量 ΔH_3 cm	0.035					8	81.7	4.86E-01	16.8	14.8
		体積変化量 ΔV_0 cm ³	0.942					9	81.6	4.95E-01	16.5	14.6
			10	81.6	5.06E-01	16.1	14.5					

波形の連続記録¹⁾



履歴曲線²⁾



特記事項

- 1) 繰返し載荷中の軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の連続記録を
図示するか,または別途添付してもよい。
- 2) 軸荷重と軸変位,あるいはねじり力と回転角の履歴曲線を図示するか,ま
たは別途添付してもよい。必要に応じて5, 10回目以外の繰返し載荷にお
ける履歴曲線も添える。
- 3) 中空円筒供試体による試験のときのみ記入する。

[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]
[1MN/m² ≒ 10.2kgf/cm²]

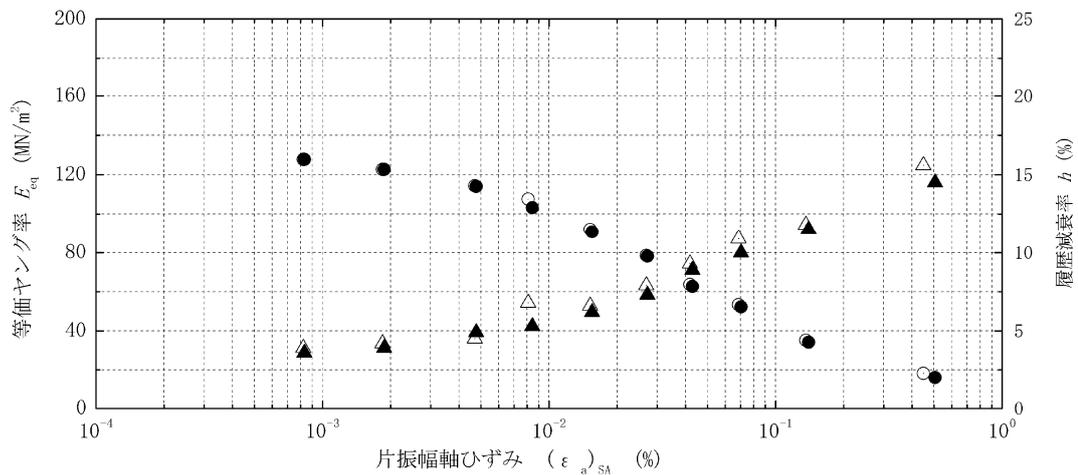
JGS	0542 0543	地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験($E_{eq}, h \sim (\epsilon)_{SA}$ 関係) 主の変形特性を有する中空円筒供試体による繰返し三軸試験($E_{eq}, h \sim (\epsilon)_{SA}$ 関係)
-----	-------------------------	--

調査件名 試験年月日 令和3年1月26日

試料番号(深さ) MSR 試験者 清水 裕之

試料の状態 ¹⁾	乱さない	土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³	2.627
供試体の作製方法 ²⁾	トリミング	最小乾燥密度 ρ_{min} ⁴⁾ g/cm ³	
土質名称		最大乾燥密度 ρ_{max} ⁴⁾ g/cm ³	
供試体 No.	1	飽和方法	二重負圧法
試験条件	軸方向応力 σ_{ac} kN/m ²	300	載荷条件
	側方向応力(=外圧,内圧) σ_{rc} kN/m ²	300	
	背圧 u_b kN/m ²	200	
	軸方向圧密応力 σ'_{ac} kN/m ²	100	
	側方向圧密応力 σ'_{rc} kN/m ²	100	
	異方圧密応力比 $\sigma'_{rc}/\sigma'_{ac}$ (=K) ⁵⁾	1	
		圧密条件	等方, 異方
		載荷波形	正弦波, 三角波
		載荷周波数 f Hz	0.1
		排水条件	排水 , 非排水
		1サイクルデータポイント数	100
		載荷段階数	10

載荷段階	5サイクル目 ○ △			10サイクル目 ● ▲		
	片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ %	等価ヤング率 E_{eq} MN/m ²	履歴減衰率 h %	片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ %	等価ヤング率 E_{eq} MN/m ²	履歴減衰率 h %
1	8.22E-04	127.7	3.9	8.33E-04	127.8	3.6
2	1.84E-03	122.6	4.2	1.87E-03	122.7	3.9
3	4.70E-03	114.3	4.5	4.77E-03	114.0	4.9
4	8.10E-03	107.5	6.8	8.45E-03	103.2	5.3
5	1.52E-02	92.0	6.6	1.55E-02	90.8	6.2
6	2.69E-02	78.6	7.9	2.72E-02	78.2	7.3
7	4.19E-02	63.7	9.3	4.30E-02	62.6	8.9
8	6.86E-02	53.4	10.9	7.04E-02	52.2	10.0
9	1.36E-01	35.2	11.8	1.40E-01	34.2	11.5
10	4.49E-01	18.2	15.6	5.06E-01	16.1	14.5
11						
12						
13						
14						



特記事項

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態(塊状, 凍結, とさほぐされた)等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は, 最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 異方応力状態で試験するときのみ記入する。

[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]
[1MN/m² ≒ 10.2kgf/cm²]

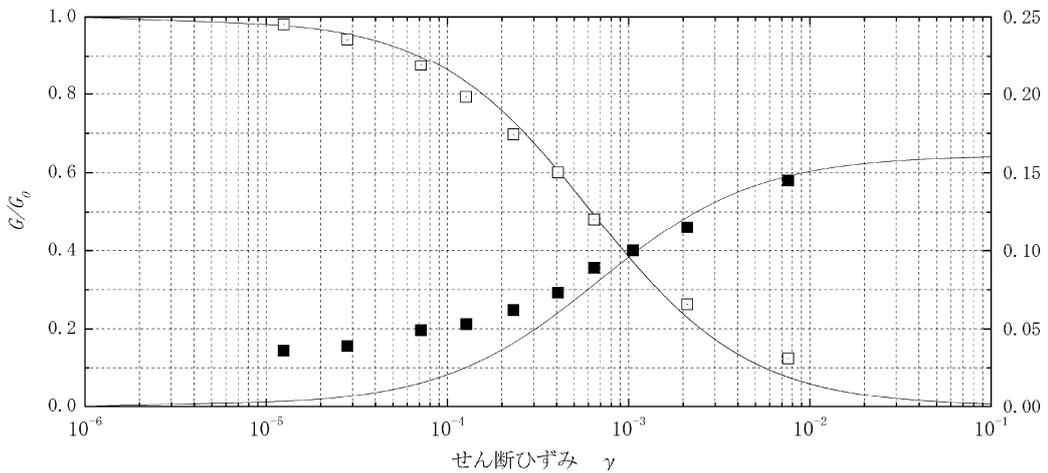
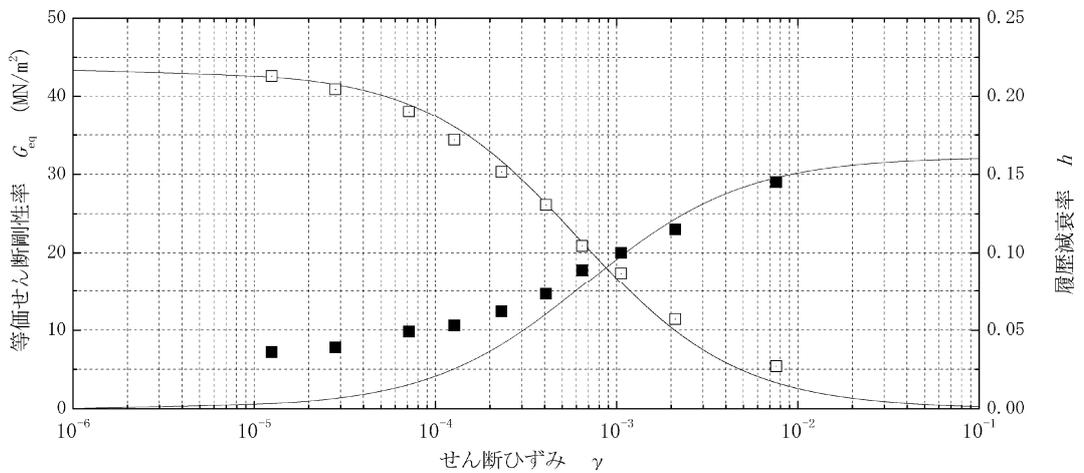
調査件名 _____ 試験年月日 令和 3 年 1 月 26 日

試料番号(深さ) MSR _____ 試験者 清水 裕之

$$\begin{aligned}
 1/G_0 &= 0.023 \text{ (MN/m}^2\text{)}^{-1} \\
 G_0 &= 43.4 \text{ (MN/m}^2\text{)} \\
 1/\tau_f &= 36.845 \\
 \tau_f &= 0.0271 \\
 \gamma_{rg} &= 6.25E-4 \\
 1/h_0 &= 6.22 \\
 \gamma_{rh} &= 6.81E-4
 \end{aligned}$$

ポアソン比 $\nu=0.5$ として計算
 $G = E/(2(1+\nu))$
 $\gamma = (1+\nu) \varepsilon_a$

G_0 : 初期せん断剛性率
 τ_f : 動的せん断強度 ($=G_0 \cdot \gamma_{rg}$)
 γ_{rg} : G から求めた基準ひずみ
 γ_{rh} : h から求めた基準ひずみ



特記事項

$[1\text{kN/m}^2 \doteq 0.0102\text{kgf/cm}^2]$
 $[1\text{MN/m}^2 \doteq 10.2\text{kgf/cm}^2]$