

平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書

海底における斜面の地震時安定評価
に関する検討

日本大学工学部 工学研究所

平成 31 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

要旨

まず、平成 29 年度の再現解析における課題として挙げられた斜面模型の過圧密における模型地盤のせん断強度の推定を実施した。そのため、三軸圧縮試験を先行圧密応力、圧密応力、背圧が異なる 18 ケースについて実施した。過圧密比 (OCR) は 1~6.75 であり平成 28 年度の実施した 90G 場、および本年度に実施した 30G 場における遠心載荷実験での斜面地盤の位置の違いを考慮して設定した。過圧密状態の応じた応力-ひずみ関係に着目すると、ひずみの増加とともに軸差応力は増加し、ピーク強度を示した後に残留状態になるような挙動は示していない。強度増加率は背圧によらず 0.085~0.153 の範囲でばらついており、その平均は 0.117、勾配 ϕ に換算すると 6.7°となる。斜面安定解析に用いる強度特性には、すべり面形成と同様な挙動を対象とした強度試験より得られ、強度増加率と同程度であることから、図-1 に示した平成 28 年に実施した一面せん断試験より得られた内部摩擦角(ϕ)7.2°を用いた。粘着力については法面下のすべり面深度は一定でないことから幅を持たせて評価することにした。数値解析の材料特性に用いる強度特性には、図-2 に示す低拘束圧については実験後に実施した一軸圧縮強さ、高拘束圧については三軸圧縮試験による強度特性を包括する破壊線の接線の切片を粘着力、傾きを内部摩擦角とした。

次に、海底環境下で、地震動のような動的な外力に対する斜面模型のすべり面の伸展や崩壊モードなどの崩壊挙動を把握するため、30G 場での遠心載荷実験を実施した。実験は、斜面模型の勾配 (30°、35°、15°) と水圧(水深 15m、23m)を変えた 3 ケースを実施した。加えて、斜面模型を徐々に傾け静的な外力を与える静的遠心載荷実験(ケース 4)を 30G 場で 1 ケース実施した。ケース 4 では傾斜角 19° 程度ですべり面が形成

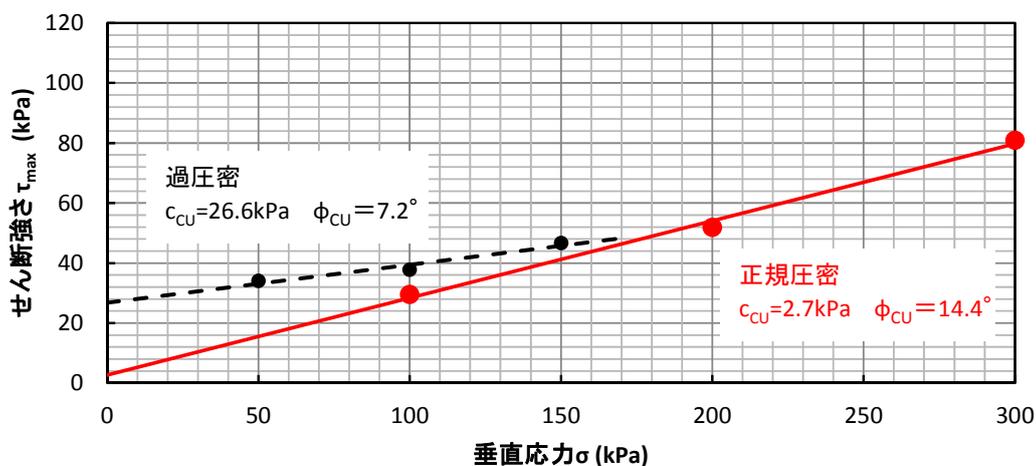


図-1 一面せん断試験によるせん断強さと垂直応力の関係 (平成 28 年度実験)

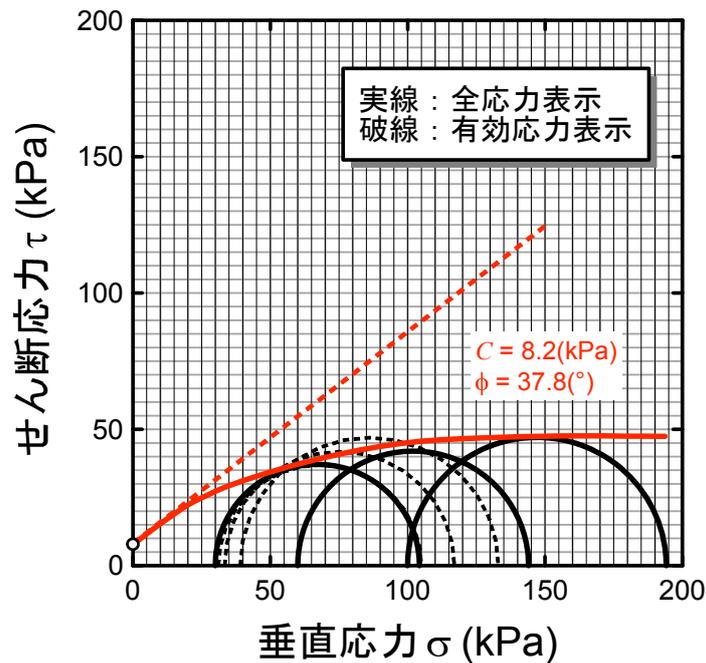


図-2 強度定数の設定（方法1）（90G場実験）

され、崩壊に至ったが、斜面勾配 30° （水深 15m）のケース 1、斜面勾配 35° （水深 23m）のケース 2 および斜面勾配 15° （水深 23m）のケース 3 とともに明確なすべり面を形成するような崩壊には至らなかった。

地盤の破壊状況について考察するために、PIV 解析で変位を求めた標点のうち、斜面内で 5 断面周辺に位置する標点を抽出し、各断面の深度方向に沿った標点の水平変位分布とせん断ひずみの分布を求めた。せん断ひずみ分布に基づく変形に着目すると、ケース 1 は図-3 に示す様に法面から 5~10cm まで、ケース 3 は法面から 2~4cm までが全体としてせん断変形しているのに対して、ケース 4 は図-4 に示す様に法面から 5~6cm の位置に変形の局所化が生じていた。斜面勾配 35° のケース 2 は、ケース 1 とケース 4 の中間的な変形挙動を示していた。ケース 1~3 について、せん断ひずみが 10~20% 程度の大きさとなっているせん断変形領域の地盤はせん断破壊状態にあることから、その下限位置を斜面安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる位置とみなすことができる。その位置は、ケース 4 においてすべり面が形成された位置に比べて、ケース 1 と 2 は深く、ケース 3 は浅い。また、ケース 4 ですべり面が生じる直前の傾斜角 19° は震度換算で 0.34 であり、ケース 1、ケース 2 とともに斜面安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる加速度振幅は 250~300Gal であり、概ね対応している。ケース 3 についてはせん断変形領域のせん断ひずみが 5% 程度と小さいことから、斜面安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる状態の加振加速度は 250~300Gal 以上と推測される。実験では、水圧が崩壊挙動に及ぼす有意な影響を認めることができなかつた。今後、正規圧密状態にある模型にて斜面勾配同一で水深のみを変更した場合の実験による比較の実施などの検討が必要と考えられる。

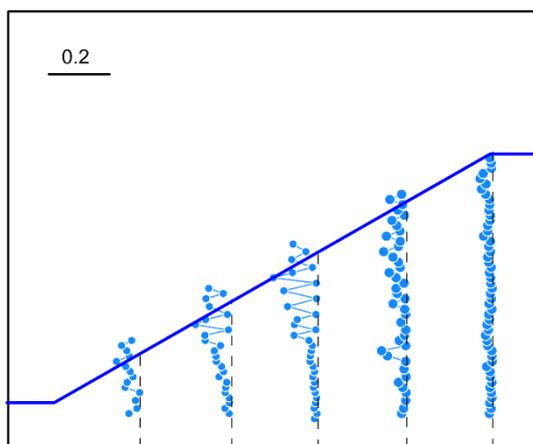


図-3 せん断ひずみ分布
(ケース 1、300Gal 1 回目)

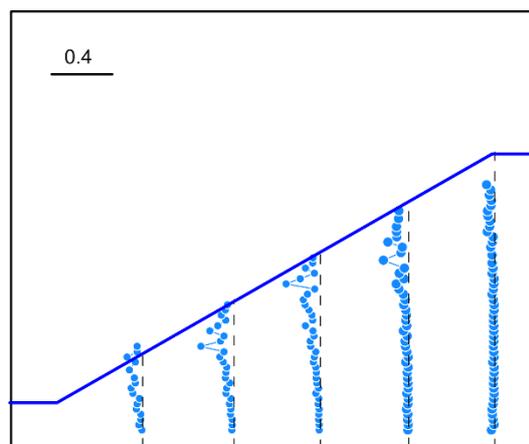


図-4 せん断ひずみ分布
(ケース 4、傾斜角 19 度)

次に、円弧すべり法（修正フェレニウス法）による斜面安定解析を実施し、30G 場の動的遠心载荷実験により得られた変形挙動との比較を実施した。強度特性は前述の推定結果を用い、すべり面の位置は前述の PIV 解析より得られたせん断変形領域の下限位置とした。さらに、ケース 1～3 においてすべり面の形成が生じる震度を 0.25 と仮定した。後述する静的遠心载荷実験のケース 4 の粘着力 11.7kPa に対して、斜面勾配 30° のケース 1 は粘着力 10.3kPa と同程度、斜面勾配 35° のケース 2 は粘着力 14kPa と少し大きめの値となっている。斜面勾配 15° のケース 3 は、仮定したすべり面がケース 4 より浅いこともあり、5.9kPa とケース 1 より小さな値となっている。各ケースの粘着力の大きさは、過圧密地盤において想定される強度特性として妥当な結果となっている。このことは、ケース 1 以外、すべり面を形成していないものの、変形の程度を勘案すると斜面安定解析においてすべり安全率が 1.0 の状態に至っているとの仮定も妥当であると考えられる。しかし、静的遠心载荷実験のケース 4 のすべり面と動的遠心载荷実験のケース 1 の実験で得られたせん断ひずみが大きい領域の下限位置は異なっており、その差異の原因説明については今後の検討が必要である。

次に、有限差分法による解析コード「FLAC」を用いた再現解析を実施し、動的遠心载荷実験により得られた変形挙動との比較を実施した。解析に用いた材料特性はモールクーロンモデル（MC モデル）、HD モデルの 2 つである。応答変位の大きさは両材料モデルとも実験より大きな値であるが、その変形分布は図-5 に示す様に材料モデルにより異なっている。モールクーロンモデルは斜面上部の水平、鉛直変位とも大きく評価しているに対して、HD モデルでは水平変位は斜面下部、鉛直変位は斜面上部が大きく評価している。PIV 解析により得られた実験による変形は、HD モデルの方が定性的傾向をよく示している。また、 J_2 (最大せん断ひずみの自乗)の分布について実験でせん断ひず

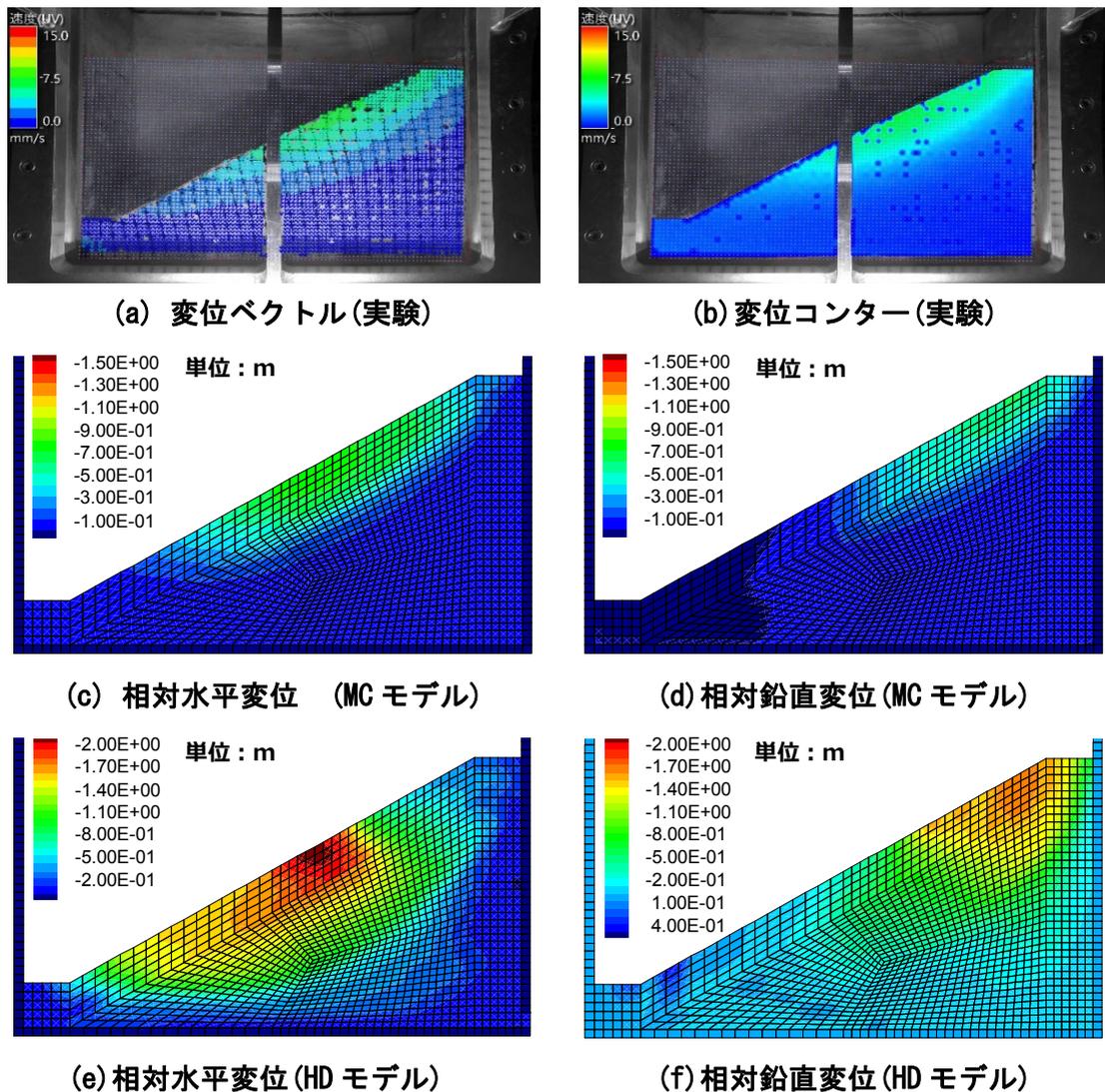


図-5 実験結果と再現解析の比較（ケース1 250Gal）

みが増加している下限位置と比べると、モールクーロンモデルは若干浅く、HDモデルは深い位置に生じている。斜面勾配が 15° のケース3については、両材料モデルとも J_2 の大きな位置の分布は実験と同じ位置となっている。

最後に、平成28年度事業にて実施した90G場、平成30年度事業にて実施した30G場での傾斜台を用いた静的遠心载荷実験で得られた崩壊状況と、円弧すべり法（修正フェレニウス法）による斜面安定解析、解析コード「FLAC」を用いた再現解析との比較を行った。再現解析の材料特性にはモールクーロンモデルとマルチスプリングモデルを用いた。斜面安定解析についてみると、90G場の遠心载荷実験ですべり面が形成された傾斜角 13° に対して、見直した強度特性を用いて得られた粘着力は25.3kPa、30G場の遠心载荷実験ですべり面が形成された傾斜角 19° のケース4に対して、粘着力は

11.7kPa となった。いずれも、粘着力の大きさは、過圧密地盤において想定される強度特性として妥当な結果となっている。再現解析についてみると、強度特性の見直しにより、モールクーロンモデルを用いた解析では図-6 に示すように 90G 場に対するケースが 9° で崩壊し、実験で崩壊が生じた 13° に対して強度見直し前の 4° に比べて大きく改善した。30G 場の実験に対しても、実験では 19° で崩壊したケースが 15° で崩壊という結果が得られた。マルチスプリングモデルは、平成 28 年度事業と同様に地盤の変形状態が実験と大きく異なった結果となった。モールクーロンモデルを用いた解析で崩壊が生じた傾斜角は実験で得られた傾斜角の 70%と小さいものの、ほぼ評価できていると考えることができる。また、水圧が崩壊に及ぼす影響については、解析結果から有意な影響を認めることができなかった。

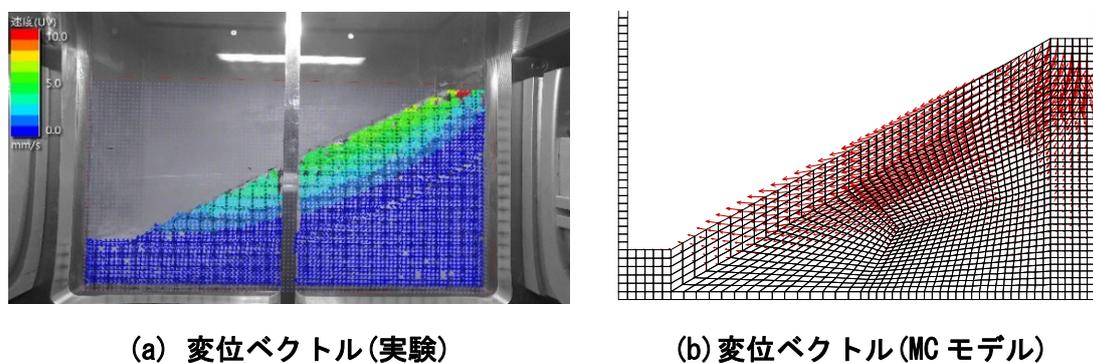


図-6 実験結果と再現解析の比較 (ケース 4 傾斜角 15 度)

目次

1	はじめに	1
2	遠心場での模型地盤のせん断強度推定のための三軸圧縮試験	3
2.1	室内土質試験による遠心場に応じた模型地盤のせん断強度増加率の評価	3
2.1.1	室内土質試験の概要	3
2.1.2	強度増加率の評価	7
2.2	遠心場での模型地盤のせん断強度推定	9
2.2.1	斜面安定解析への適用	9
2.2.2	FEM 解析への適用	10
3	海底環境下の斜面を模擬した遠心力模型実験	14
3.1	遠心場での斜面模型の静的載荷実験	20
3.1.1	模型地盤の製作、計測器設置	20
3.1.2	実験結果	24
3.2	遠心場での斜面模型の動的載荷実験	35
3.2.1	CASE1	35
3.2.2	CASE2	45
3.2.3	CASE3	57
3.3	実験結果に基づく斜面の崩壊挙動の分析	68
4	模型地盤の斜面崩壊の再現解析	94
4.1	動的な遠心力模型実験に対する再現解析	94
4.1.1	修正フェレニウス法による斜面安定解析	94
4.1.2	動的解析による再現解析	100
4.2	静的な遠心力模型実験に対する再現解析	187
4.2.1	修正フェレニウス法による斜面安定解析	187
4.2.2	静的解析による再現解析	191
5	まとめ	197
6	参考文献	201

図目次

図 2-1	応力ひずみ関係（先行圧密応力 100kPa）	6
図 2-2	有効応力経路（先行圧密応力 100kPa）	6
図 2-3	応力ひずみ関係（先行圧密応力 200kPa）	6
図 2-4	有効応力経路（先行圧密応力 200kPa）	6
図 2-5	応力ひずみ関係（先行圧密応力 270kPa）	7
図 2-6	有効応力経路（先行圧密応力 270kPa）	7
図 2-7	非排水せん断強さと圧密応力の関係（背圧 350kPa）	8
図 2-8	非排水せん断強さと圧密応力の関係（背圧 600kPa）	9
図 2-9	一面せん断試験によるせん断強さと垂直応力の関係（平成 28 年度実験）	10
図 2-10	斜面地盤の一軸圧縮強さ（90G 場実験）	11
図 2-11	強度定数の設定（方法 1）（90G 場実験）	12
図 2-12	強度定数の設定（方法 2）（90G 場実験）	12
図 2-13	斜面地盤の強度分布（30G 場実験）	13
図 2-14	強度定数の設定（方法 1）（30G 場実験）	13
図 3-1	試験装置	15
図 3-2	遠心模型実験装置概要図	16
図 3-3	実験フローチャート	20
図 3-4	成層地盤の計測地点（Case4）	22
図 3-5	成層地盤の計測結果（Case4）	22
図 3-6	模型地盤の計測地点（Case4）	23
図 3-7	模型地盤の計測結果（Case4）	23
図 3-8	計測器の設置地点（Case4）	23
図 3-9	傾斜角の計測結果	25
図 3-10	間隙水圧計の計測結果	25
図 3-11	斜面の変位ベクトルと変位コンター（Case4）	33
図 3-12	サンプリング地点	34
図 3-13	計測地点	34
図 3-14	成層地盤内の計測地点（Case1）	36
図 3-15	成層地盤の計測結果（Case1）	37
図 3-16	模型地盤内の計測地点（Case1）	37
図 3-17	模型地盤のせん断強度結果（Case1）	38

図 3-18	計測器の設置地点 (Case1)	38
図 3-19	水圧及び間隙水圧の計測結果 (Case1)	39
図 3-20	加速度計の計測結果 (Case1)	40
図 3-21	斜面の変位ベクトルと変位コンター (Case1)	44
図 3-22	試験後のサンプリング地点 (Case1)	44
図 3-23	試験後の計測地点 (Case1)	45
図 3-24	成層地盤の計測地点 (Case2)	47
図 3-25	成層地盤の計測結果 (Case2)	47
図 3-26	模型地盤の計測地点 (Case2)	48
図 3-27	模型地盤の計測結果 (Case2)	48
図 3-28	計測器の設置地点 (Case2)	49
図 3-29	水圧及び間隙水圧の計測結果 (Case2)	50
図 3-30	加速度計の計測結果 (Case2)	51
図 3-31	斜面の変位ベクトルと変位コンター (Case2)	55
図 3-32	試験後のサンプリング地点 (Case2)	56
図 3-33	試験後の計測地点 (Case2)	56
図 3-34	成層地盤の計測地点 (Case3)	58
図 3-35	成層地盤の計測結果 (Case3)	59
図 3-36	模型地盤の計測地点 (Case3)	59
図 3-37	模型地盤の計測結果 (Case3)	60
図 3-38	計測器の設置地点 (Case3)	60
図 3-39	水圧及び間隙水圧の計測結果 (Case3)	61
図 3-40	加速度計の計測結果 (Case3)	62
図 3-41	斜面の変位ベクトルと変位コンター (Case3)	66
図 3-42	試験後のサンプリング地点 (Case3)	67
図 3-43	試験後の計測地点 (Case3)	67
図 3-44	水平変位およびせん断ひずみ分布 (Case1)	74
図 3-45	水平変位およびせん断ひずみ分布 (Case2)	78
図 3-46	水平変位およびせん断ひずみ分布 (Case3)	82
図 3-47	水平変位およびせん断ひずみ分布 (Case4)	93
図 4-1	修正フェレニウス法の概要図	96
図 4-2	解析対象断面 (Case1)	97
図 4-3	設定したすべり面と実験結果の比較	97
図 4-4	安全率と水平震度の関係 (Case1)	97
図 4-5	解析対象断面 (Case2)	98
図 4-6	設定したすべり面と実験結果の比較	98

図 4-7	安全率と水平震度の関係 (Case2)	98
図 4-8	解析対象断面 (Case3)	99
図 4-9	設定したすべり面と実験結果の比較	99
図 4-10	安全率と水平震度の関係 (Case3)	99
図 4-11	解析で設定したすべり面	100
図 4-12	解析モデル図 (Case1)	103
図 4-13	基盤入力加速度 (Case1)	103
図 4-14	法肩の応答加速度の解析結果 (Case1)	104
図 4-15	変位分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)	105
図 4-16	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)	105
図 4-17	ひずみ分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)	105
図 4-18	変位分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)	106
図 4-19	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)	106
図 4-20	ひずみ分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)	106
図 4-21	変位分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)	107
図 4-22	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)	107
図 4-23	ひずみ分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)	107
図 4-24	変位分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)	108
図 4-25	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)	108
図 4-26	ひずみ分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)	108
図 4-27	変位分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)	109
図 4-28	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)	109
図 4-29	ひずみ分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)	109
図 4-30	変位分布 (Case1 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)	110
図 4-31	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (1 回目)加振終了時)	110
図 4-32	ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (1 回目)加振終了時)	110
図 4-33	変位分布 (Case1 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)	111
図 4-34	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (2 回目)加振終了時)	111
図 4-35	ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (2 回目)加振終了時)	111
図 4-36	変位分布 (Case1 : 300Gal (3 回目) 加振終了時)	112
図 4-37	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (3 回目)加振終了時)	112
図 4-38	ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (3 回目)加振終了時)	112
図 4-39	変位分布 (Case1 : 300Gal (4 回目) 加振終了時)	113
図 4-40	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (4 回目)加振終了時)	113
図 4-41	ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (4 回目)加振終了時)	113
図 4-42	変位分布 (Case1 : 300Gal (5 回目) 加振終了時)	114

図 4-43	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (5 回目)加振終了時)	114
図 4-44	ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (5 回目)加振終了時)	114
図 4-45	変位分布 (Case1 : 300Gal (6 回目) 加振終了時)	115
図 4-46	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (6 回目)加振終了時)	115
図 4-47	ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (6 回目)加振終了時)	115
図 4-48	変位分布 (Case1 : 300Gal (7 回目) 加振終了時)	116
図 4-49	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 300Gal (7 回目)加振終了時)	116
図 4-50	ひずみ分布 (Case1 : 300Gal (7 回目)加振終了時)	116
図 4-51	変位分布 (Case1 : 325Gal 加振終了時)	117
図 4-52	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 325Gal 加振終了時)	117
図 4-53	ひずみ分布 (Case1 : 325Gal 加振終了時)	117
図 4-54	解析モデル図 (Case2)	120
図 4-55	基盤入力加速度 (Case2)	120
図 4-56	法肩の応答加速度の解析結果 (Case2)	121
図 4-57	変位分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)	122
図 4-58	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)	122
図 4-59	ひずみ分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)	122
図 4-60	変位分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)	123
図 4-61	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)	123
図 4-62	ひずみ分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)	123
図 4-63	変位分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)	124
図 4-64	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)	124
図 4-65	ひずみ分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)	124
図 4-66	変位分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)	125
図 4-67	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)	125
図 4-68	ひずみ分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)	125
図 4-69	変位分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)	126
図 4-70	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)	126
図 4-71	ひずみ分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)	126
図 4-72	変位分布 (Case2 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)	127
図 4-73	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (1 回目)加振終了時)	127
図 4-74	ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (1 回目)加振終了時)	127
図 4-75	変位分布 (Case2 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)	128
図 4-76	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (2 回目)加振終了時)	128
図 4-77	ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (2 回目)加振終了時)	128
図 4-78	変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 1 回目) 加振終了時)	129

図 4-79	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 1 回目) 加振終了時)	129
図 4-80	ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 1 回目) 加振終了時)	129
図 4-81	変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 2 回目) 加振終了時)	130
図 4-82	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 2 回目) 加振終了時)	130
図 4-83	ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 2 回目) 加振終了時)	130
図 4-84	変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 3 回目) 加振終了時)	131
図 4-85	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 3 回目) 加振終了時)	131
図 4-86	ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 3 回目) 加振終了時)	131
図 4-87	変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 4 回目) 加振終了時)	132
図 4-88	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 4 回目) 加振終了時)	132
図 4-89	ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 4 回目) 加振終了時)	132
図 4-90	変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 5 回目) 加振終了時)	133
図 4-91	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 300Gal (50 波 5 回目) 加振終了時)	133
図 4-92	ひずみ分布 (Case2 : 300Gal (50 波 5 回目) 加振終了時)	133
図 4-93	変位分布 (Case2 : 325Gal 加振終了時)	134
図 4-94	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 325Gal 加振終了時)	134
図 4-95	ひずみ分布 (Case2 : 325Gal 加振終了時)	134
図 4-96	解析モデル図 (Case3)	137
図 4-97	基盤入力加速度 (Case3)	137
図 4-98	法肩の応答加速度の解析結果 (Case3)	138
図 4-99	変位分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)	139
図 4-100	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)	139
図 4-101	ひずみ分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)	139
図 4-102	変位分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)	140
図 4-103	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)	140
図 4-104	ひずみ分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)	140
図 4-105	変位分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)	141
図 4-106	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)	141
図 4-107	ひずみ分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)	141
図 4-108	変位分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)	142
図 4-109	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)	142

図 4-110	ひずみ分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)	142
図 4-111	変位分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)	143
図 4-112	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)	143
図 4-113	ひずみ分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)	143
図 4-114	変位分布 (Case3 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)	144
図 4-115	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (1 回目)加振終了時)	144
図 4-116	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (1 回目)加振終了時)	144
図 4-117	変位分布 (Case3 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)	145
図 4-118	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (2 回目)加振終了時)	145
図 4-119	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (2 回目)加振終了時)	145
図 4-120	変位分布 (Case3 : 300Gal (3 回目) 加振終了時)	146
図 4-121	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (3 回目)加振終了時)	146
図 4-122	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (3 回目)加振終了時)	146
図 4-123	変位分布 (Case3 : 300Gal (4 回目) 加振終了時)	147
図 4-124	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (4 回目)加振終了時)	147
図 4-125	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (4 回目)加振終了時)	147
図 4-126	変位分布 (Case3 : 300Gal (5 回目) 加振終了時)	148
図 4-127	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (5 回目)加振終了時)	148
図 4-128	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (5 回目)加振終了時)	148
図 4-129	変位分布 (Case3 : 300Gal (6 回目) 加振終了時)	149
図 4-130	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (6 回目)加振終了時)	149
図 4-131	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (6 回目)加振終了時)	149
図 4-132	変位分布 (Case3 : 300Gal (7 回目) 加振終了時)	150
図 4-133	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (7 回目)加振終了時)	150
図 4-134	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (7 回目)加振終了時)	150
図 4-135	変位分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)	151
図 4-136	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)	151
図 4-137	ひずみ分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)	151
図 4-138	せん断強度と拘束圧の関係	153
図 4-139	せん断弾性係数と拘束圧の関係	153
図 4-140	基準ひずみと拘束圧の関係	154
図 4-141	解析モデル図 (Case1)	155
図 4-142	基盤入力加速度 (Case1)	155
図 4-143	法肩の応答加速度の解析結果 (Case1)	156
図 4-144	変位分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)	157
図 4-145	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)	157

図 4-146	ひずみ分布 (Case1 : 50Gal 加振終了時)	157
図 4-147	変位分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)	158
図 4-148	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)	158
図 4-149	ひずみ分布 (Case1 : 100Gal 加振終了時)	158
図 4-150	変位分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)	159
図 4-151	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)	159
図 4-152	ひずみ分布 (Case1 : 150Gal 加振終了時)	159
図 4-153	変位分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)	160
図 4-154	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)	160
図 4-155	ひずみ分布 (Case1 : 200Gal 加振終了時)	160
図 4-156	変位分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)	161
図 4-157	PIV 解析による変位分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)	161
図 4-158	ひずみ分布 (Case1 : 250Gal 加振終了時)	161
図 4-159	解析モデル図 (Case2)	163
図 4-160	基盤入力加速度 (Case2)	163
図 4-161	法肩の応答加速度の解析結果 (Case2)	164
図 4-162	変位分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)	165
図 4-163	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)	165
図 4-164	ひずみ分布 (Case2 : 50Gal 加振終了時)	165
図 4-165	変位分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)	166
図 4-166	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)	166
図 4-167	ひずみ分布 (Case2 : 100Gal 加振終了時)	166
図 4-168	変位分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)	167
図 4-169	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)	167
図 4-170	ひずみ分布 (Case2 : 150Gal 加振終了時)	167
図 4-171	変位分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)	168
図 4-172	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)	168
図 4-173	ひずみ分布 (Case2 : 200Gal 加振終了時)	168
図 4-174	変位分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)	169
図 4-175	PIV 解析による変位分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)	169
図 4-176	ひずみ分布 (Case2 : 250Gal 加振終了時)	169
図 4-177	解析モデル図 (Case3)	172
図 4-178	基盤入力加速度 (Case3)	172
図 4-179	法肩の応答加速度の解析結果 (Case3)	173
図 4-180	変位分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)	174
図 4-181	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)	174

図 4-182	ひずみ分布 (Case3 : 50Gal 加振終了時)	174
図 4-183	変位分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)	175
図 4-184	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)	175
図 4-185	ひずみ分布 (Case3 : 100Gal 加振終了時)	175
図 4-186	変位分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)	176
図 4-187	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)	176
図 4-188	ひずみ分布 (Case3 : 150Gal 加振終了時)	176
図 4-189	変位分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)	177
図 4-190	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)	177
図 4-191	ひずみ分布 (Case3 : 200Gal 加振終了時)	177
図 4-192	変位分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)	178
図 4-193	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)	178
図 4-194	ひずみ分布 (Case3 : 250Gal 加振終了時)	178
図 4-195	変位分布 (Case3 : 300Gal (1 回目) 加振終了時)	179
図 4-196	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (1 回目)加振終了時)	179
図 4-197	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (1 回目)加振終了時)	179
図 4-198	変位分布 (Case3 : 300Gal (2 回目) 加振終了時)	180
図 4-199	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (2 回目)加振終了時)	180
図 4-200	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (2 回目)加振終了時)	180
図 4-201	変位分布 (Case3 : 300Gal (3 回目) 加振終了時)	181
図 4-202	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (3 回目)加振終了時)	181
図 4-203	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (3 回目)加振終了時)	181
図 4-204	変位分布 (Case3 : 300Gal (4 回目) 加振終了時)	182
図 4-205	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (4 回目)加振終了時)	182
図 4-206	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (4 回目)加振終了時)	182
図 4-207	変位分布 (Case3 : 300Gal (5 回目) 加振終了時)	183
図 4-208	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (5 回目)加振終了時)	183
図 4-209	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (5 回目)加振終了時)	183
図 4-210	変位分布 (Case3 : 300Gal (6 回目) 加振終了時)	184
図 4-211	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (6 回目)加振終了時)	184
図 4-212	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (6 回目)加振終了時)	184
図 4-213	変位分布 (Case3 : 300Gal (7 回目) 加振終了時)	185
図 4-214	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 300Gal (7 回目)加振終了時)	185
図 4-215	ひずみ分布 (Case3 : 300Gal (7 回目)加振終了時)	185
図 4-216	変位分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)	186
図 4-217	PIV 解析による変位分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)	186

図 4-218	ひずみ分布 (Case3 : 325Gal 加振終了時)	186
図 4-219	解析対象断面 (90G 場)	188
図 4-220	設定したすべり面と実験結果の比較	188
図 4-221	安全率と傾斜角度の関係 (90G)	189
図 4-222	解析対象断面 (30G)	189
図 4-223	設定したすべり面と実験結果の比較	189
図 4-224	安全率と傾斜角度の関係 (30G)	190
図 4-225	解析に用いたすべり面 (Case4)	190
図 4-226	解析モデル図	192
図 4-227	ひずみ分布 (傾斜角 9 度、モールクーロンモデル)	193
図 4-228	変位ベクトル (傾斜角 9 度、モールクーロンモデル)	193
図 4-229	PIV 解析による変位分布 (左 : 水深 45m、右 : 水深 70m)	193
図 4-230	ひずみ分布 (傾斜角 4 度、マルチスプリングモデル)	194
図 4-231	変位ベクトル (傾斜角 4 度、マルチスプリングモデル)	194
図 4-232	解析モデル図	195
図 4-233	ひずみ分布と変位ベクトル (傾斜角 15 度 : モールクーロンモデル)	196
図 4-234	PIV 解析による変位分布 (傾斜角 15 度) (左 : 水深 45m、右 : 水深 70m)	196
図 4-235	ひずみ分布と変位ベクトル (傾斜角 20 度 : マルチスプリングモデル)	196

表目次

表 2-1	実験ケース	4
表 2-2	強度定数と非排水せん断強さ	7
表 3-1	実験ケース	15
表 3-2	遠心模型実験装置の諸元	16
表 3-3	サンプリング試料の試験結果	33
表 3-4	ベーンせん断試験結果	34
表 3-5	試験後の一軸圧縮試験結果 (Case1)	44
表 3-6	試験後のベーンせん断試験結果 (Case1)	45
表 3-7	試験後の一軸圧縮試験結果 (Case2)	55
表 3-8	試験後のベーンせん断試験結果 (Case2)	56
表 3-9	試験後の一軸圧縮試験結果 (Case3)	66
表 3-10	試験後のベーンせん断試験結果 (Case3)	67
表 4-1	強度定数	96
表 4-2	解析条件とすべり安全率が1となる強度定数	100
表 4-3	地盤の解析パラメータ (モールクーロンモデル)	102
表 4-4	地盤の解析パラメータ (HD モデル)	153
表 4-5	強度定数	188
表 4-6	解析条件とすべり安全率が1となる強度定数	190
表 4-7	解析パラメータ (モールクーロンモデル、マルチスプリングモデル)	192
表 4-8	解析パラメータ (モールクーロンモデル、マルチスプリングモデル)	195

写真目次

写真 2-1	スラリー作製	5
写真 2-2	スラリー脱気	5
写真 2-3	スラリーの投入	5
写真 2-4	予備圧密	5
写真 2-5	供試体の成形	5
写真 2-6	三軸試験の実施	5

写真 3-1	遠心載荷実験装置.....	16
写真 3-2	振動台	17
写真 3-3	加振機	17
写真 3-4	傾斜台	17
写真 3-5	傾斜後	17
写真 3-6	粘性土作製.....	17
写真 3-7	粘性土投入.....	17
写真 3-8	浸透圧による圧密.....	18
写真 3-9	遠心載荷による圧密.....	18
写真 3-10	ベーンせん断試験.....	18
写真 3-11	含水比測定.....	18
写真 3-12	地盤切出し.....	18
写真 3-13	斜面模型地盤の成型.....	18
写真 3-14	マーキング.....	19
写真 3-15	湛水	19
写真 3-16	地盤強度確認.....	19
写真 3-17	湛水	19
写真 3-18	計測器の設置状況 (Case4)	24
写真 3-19	収録カメラ及び設置状況 (Case4)	24
写真 3-20	計測器の設置状況 (Case1)	38
写真 3-21	計測器の設置状況 (Case2)	49
写真 3-22	収録カメラ及び設置状況 (Case2)	52
写真 3-23	計測器の設置状況 (Case3)	60
写真 3-24	収録カメラ及び設置状況 (Case3)	63

1 はじめに

平成 29 年度事業「海底における斜面の地震時安定評価に関する検討」では、平成 28 年度事業で実施した斜面模型の静的遠心載荷実験で得られた崩壊状況の再現解析を解析コード「FLAC」を用いて実施し、崩壊挙動に及ぼす水圧や切り欠けの影響について検討を実施した。さらに、動的外力に対する円弧すべり法（修正フェレニウス法）の海底環境下における適用性を把握するための遠心載荷実験に用いる模型地盤の設計を実施した。「FLAC」を用いた再現解析では、すべり面の形成を伴う崩壊が実験より小さな傾斜角で生じた。その原因は斜面内の過圧密領域における強度設定に際して、過圧密の程度に応じた強度増加の影響を適切に考慮していないことが挙げられる。

平成 30 年度事業では、水圧等の影響を考慮した斜面模型の動的、静的遠心載荷実験を実施し、円弧すべり法（修正フェレニウス法）の海底環境下における適用性を把握する。まず、平成 29 年度の再現解析における課題として挙げられた斜面模型の過圧密における模型地盤のせん断強度の推定を実施する。そのため、三軸圧縮試験を実施し、求められた強度増加率を用いて、平成 28 年度に実施した 90G 場での遠心載荷実験、及び本年度実施する 30G 場で遠心載荷実験でのせん断強度を推定する。

次に、海底環境下で、地震動のような動的な外力に対する斜面模型のすべり面の伸展や崩壊モードなどの崩壊挙動を遠心場での加振実験により把握する。実験は 30G 場で実施し、斜面模型の勾配（ 30° 、 35° 、 15° ）と水圧の大小を変えた 3 ケースを実施する。加えて、動的遠心載荷実験との対比のため、傾斜台を用いて、模型地盤を徐々に傾け静的な外力を与える実験を動的遠心載荷実験と同じ 30G 場で実施する。これらの実験では、実験前後の含水比、強度分布、加振時における模型斜面や振動台の加速度波形などの実験データを収集し、斜面崩壊の様子は画像変位計測にて、崩壊形状や移動量等を把握する。なお、供試体は、平成 28 年度に実施した遠心力模型実験で使用した海成粘土を模擬した粘性土（AX カオリンと MC クレーを乾燥重量比 1:1 で配合した粘性土）とする。

次に、円弧すべり法（修正フェレニウス法）による斜面安定解析を実施し、動的遠心

載荷実験により得られた崩壊状況（すべり面や崩壊時の震度）との比較を行い、円弧すべり法の動的な崩壊挙動への適用性を検討する。さらに、数値解析により、動的遠心載荷実験により得られた崩壊挙動の再現解析、および斜面崩壊に及ぼす水圧の影響を検討する。数値解析には、平成 29 年度と同様に有限差分法による解析コード「FLAC」を用いる。解析に用いる斜面模型の過圧密領域における強度特性には前述の方法で推定された過圧密状態に応じた強度特性を用いる。また、解析に用いる材料特性にはモールクーロンモデルと HD モデルを用いる。

最後に、平成 28 年度事業にて実施した 90G 場、平成 30 年度事業にて実施した 30G 場での傾斜台を用いた静的遠心載荷実験で得られた崩壊状況について、円弧すべり法（修正フェレニウス法）による斜面安定解析より得られるすべり面や崩壊震度との比較を行い、斜面安定解析の適用性を検討する。さらに、前述の動的遠心実験と同様に、静的遠心実験についても再現解析を実施し、斜面崩壊に及ぼす水圧の影響を検討する。解析に用いる斜面模型の過圧密領域における強度特性には前述の方法で推定された過圧密状態に応じた強度特性を用いる。また、解析に用いる材料特性にはモールクーロンモデルとマルチスプリングモデルを用いる。

2 遠心場での模型地盤のせん断強度推定のための三軸圧縮試験

本章では、平成 28 年度に実施した遠心載荷実験の再現解析の解析パラメータを決定するために実施した模擬粘土の三軸圧縮試験の概要を説明する。それらの結果を利用して遠心場に応じた模型地盤のせん断強度増加率の推定方法について説明する。

2.1 室内土質試験による遠心場に応じた模型地盤のせん断強度増加率の評価

2.1.1 室内土質試験の概要

実験は圧密非排水三軸試験 (\overline{CU}) 試験を実施した。試験は「土の圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験方法 (JGS 0523-2009)」に準拠して実施した。

供試体は AX カオリンと MC クレーの乾燥重量比 1:1 配合粘土を含水比約 100% になるように脱気水と粘土粉末を混ぜ合わせてスラリー状にし (写真 2-1)、スラリーを脱気した (写真 2-2)。スラリーを予備圧密容器に注ぎ入れた (写真 2-3)。なお、スラリー粘土を容器に入れする際、打撃を与え、空気が混入しないようにした。予備圧密容器を組み立て、100kPa で予備圧密した (写真 2-4)。圧密終了後、容器から粘土を取り出して直径 5cm、高さ 10cm の円柱状に成形した (写真 2-5)。その後、供試体を試験機に設置し (写真 2-6)、有効拘束圧 10kPa で CO₂ と脱気水を流した。背圧は 350 あるいは 600kPa とし、90G 場遠心実験と 30G 場遠心実験における斜面模型の水深の違いを考慮した。試験条件を表 2-1 に示す。先行圧密応力、圧密応力、背圧が異なる 18 ケースについて実施した。先行圧密応力は 90G 場遠心実験と 30G 場遠心実験における斜面模型の土被り圧を考慮した。過圧密比 (OCR) は 1~6.75 であり遠心載荷実験での斜面地盤の位置の違いをできるだけカバーするように配慮した。実験は軸ひずみ 15% を破壊ひずみとして、破壊ひずみに達したら試験を終了した。

実験における応力ひずみ関係と有効応力経路を図 2-1~図 2-6 に示す。応力ひずみ関係を比較すると圧密条件が等しい場合、背圧の違いによる差は若干あるものの、背圧が大きいと必ず応力ひずみ関係が上にくる (せん断抵抗力を大きく発揮する) といった規則性は認められなかった。この傾向は応力経路についても同様である。過圧密の程度に

よる違いに着目すると過圧密比が大きくなると、せん断に伴い有効応力が増加（過剰間隙水圧が減少）する傾向を示す。その結果、ひずみの増加とともに軸差応力は増加する。したがってピーク強度を示した後に残留状態になるような挙動は示さない。正規圧密粘土（Case1、10、4、13、7、16）は、せん断開始から有効応力が減少（過剰間隙水圧が上昇）し、その後、有効応力が回復する傾向を示す。

模擬粘土の強度定数および非排水せん断強さ（ s_u ）を表 2-2 にまとめて示す。非排水せん断強さは圧縮強さを 2 分の 1 することで求めた。強度定数を求めたモール円を記載したデータシートは巻末資料に示す。

表 2-1 実験ケース

試験case	試験条件				供試体諸元		
	先行圧密応力 kPa	圧密応力 kPa	過圧密比 OCR	背圧 kPa	湿潤密度 g/cm ³	乾燥密度 g/cm ³	含水比 %
1	100	100	1.00	350	1.757	1.192	47.4
2	100	60	1.67	350	1.757	1.192	47.4
3	100	30	3.33	350	1.764	1.197	47.4
4	200	200	1.00	350	1.775	1.206	47.2
5	200	120	1.67	350	1.773	1.205	47.2
6	200	60	3.33	350	1.775	1.206	47.2
7	270	270	1.00	350	1.790	1.216	47.2
8	270	135	2.00	350	1.790	1.215	47.3
9	270	40	6.75	350	1.792	1.215	47.5
10	100	100	1.00	600	1.789	1.212	47.6
11	100	60	1.67	600	1.790	1.213	47.6
12	100	30	3.33	600	1.790	1.213	47.6
13	200	200	1.00	600	1.768	1.201	47.2
14	200	120	1.67	600	1.770	1.201	47.4
15	200	60	3.33	600	1.780	1.207	47.5
16	270	270	1.00	600	1.785	1.204	48.3
17	270	135	2.00	600	1.784	1.209	47.5
18	270	40	6.75	600	1.787	1.213	47.3



写真 2-1 スラリー作製

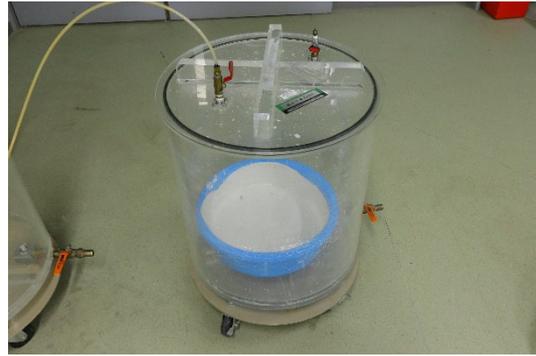


写真 2-2 スラリー脱気



写真 2-3 スラリーの投入



写真 2-4 予備圧密

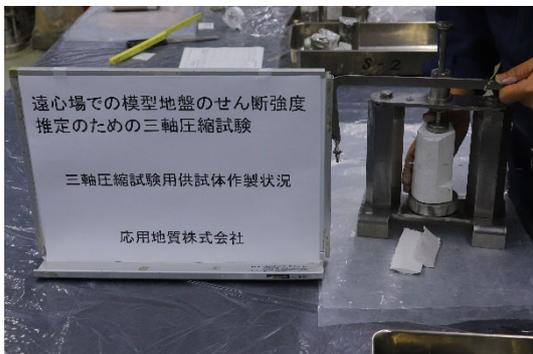


写真 2-5 供試体の成形



写真 2-6 三軸試験の実施

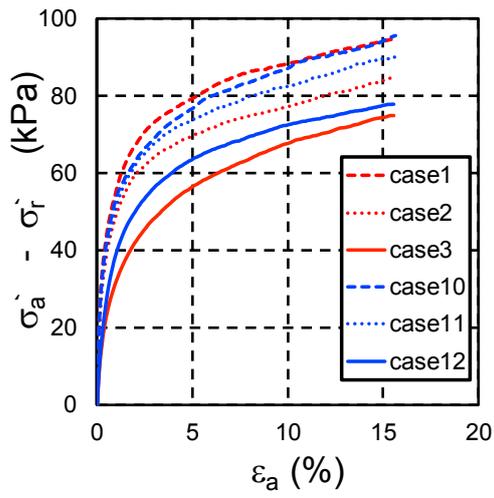


図 2-1 応力ひずみ関係 (先行圧密応力
100kPa)

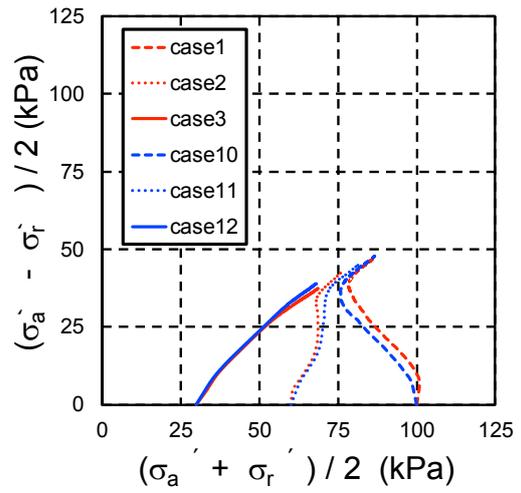


図 2-2 有効応力経路 (先行圧密応力
100kPa)

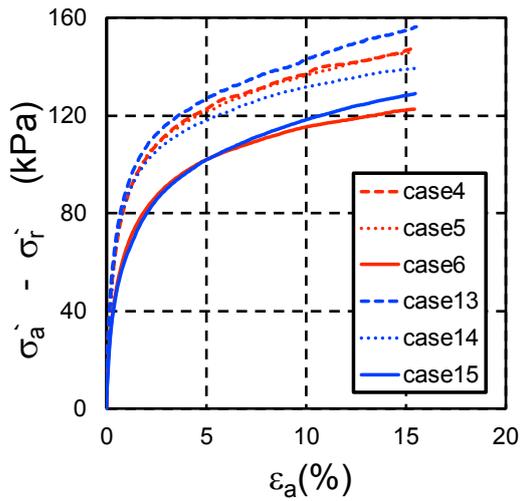


図 2-3 応力ひずみ関係 (先行圧密応力
200kPa)

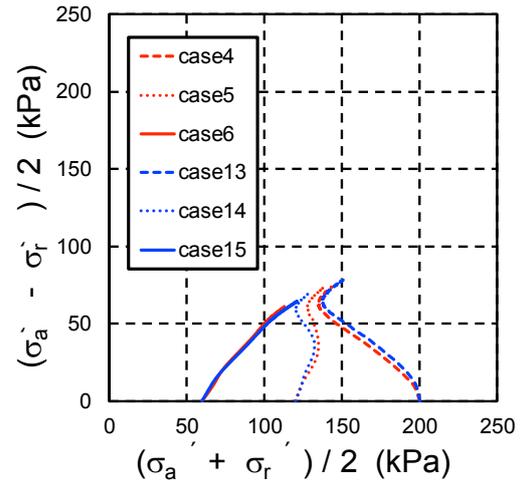


図 2-4 有効応力経路 (先行圧密応力
200kPa)

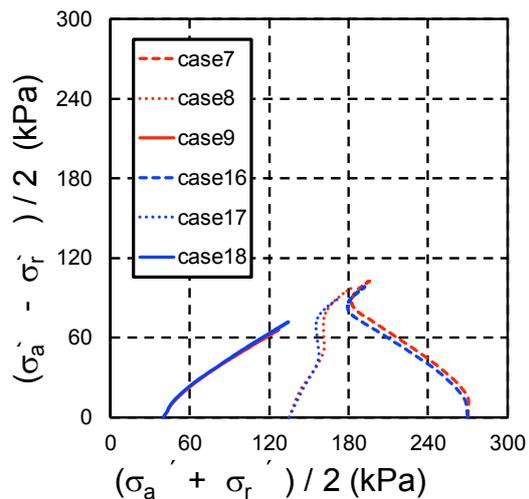
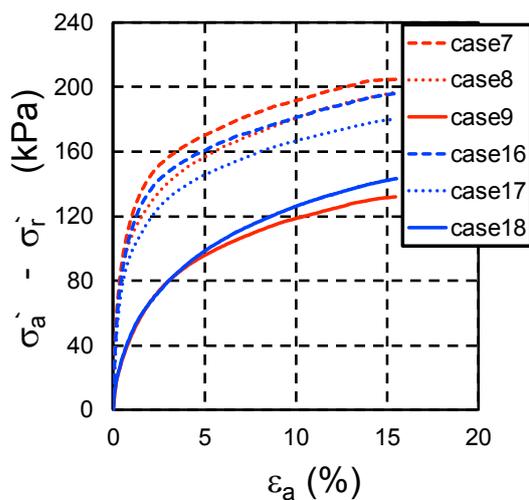


図 2-5 応力ひずみ関係 (先行圧密応力 270kPa)

図 2-6 有効応力経路 (先行圧密応力 270kPa)

表 2-2 強度定数と非排水せん断強さ

試験case	試験条件				せん断過程					
	先行圧密応力 kPa	圧密応力 kPa	過圧密比 OCR	背圧 kPa	c kPa	φ 度	c' kPa	φ' 度	圧縮強さ kPa	s _u kPa
1	100	100	1.00	350					94.1	47.1
2	100	60	1.67	350	29.3	7.1	0.2	33.1	84.0	42.0
3	100	30	3.33	350					74.3	37.2
4	200	200	1.00	350					147	73.5
5	200	120	1.67	350	53.8	4.5	13.1	26.0	146	73.0
6	200	60	3.33	350					122	61.0
7	270	270	1.00	350					205	102.5
8	270	135	2.00	350	57.0	0.1	0.0	31.7	195	97.5
9	270	40	6.75	350					131	65.5
10	100	100	1.00	600					94.3	47.2
11	100	60	1.67	600	32.6	6.0	8.7	27.2	89.7	44.9
12	100	30	3.33	600					77.6	38.8
13	200	200	1.00	600					155	77.5
14	200	120	1.67	600	53.2	5.1	13.1	26.2	139	69.5
15	200	60	3.33	600					128	64.0
16	270	270	1.00	600					195	97.5
17	270	135	2.00	600	62.7	5.8	10.4	27.7	180	90.0
18	270	40	6.75	600					142	71.0

2.1.2 強度増加率の評価

過圧密粘土の強度増加率を表 2-2 の非排水せん断強さと圧密応力の関係から推定する。圧密応力と非排水せん断強さの関係を背圧 350kPa について図 2-7 に、背圧 600kPa

について図 2-8 プロットする。具体的には、背圧 350kPa は Case1～9 において、正規圧密領域として Case1、4、7、過圧密領域として 2、3、と 5、6 および 8、9 の値をそれぞれプロットした。背圧 600kPa の Case10～18 において、正規圧密領域としてケース 10、13、16、過圧密領域として 11、12 と 14、15 と 17、18 の値をそれぞれプロットする。

図 2-7 より、過圧密領域の強度増加率は 0.085～0.153 となり平均値は 0.128 となる。これは ϕ に換算すると 7.3 度相当に相当する。参考として正規圧密領域の強度増加率(直線の傾き)は 0.32 となり、 ϕ に換算すると 17.7 度に相当する。図 2-8 より、過圧密領域の強度増加率は 0.097～0.116 となり平均は 0.108 であり、 ϕ に換算すると 6.2 度に相当する。参考として正規圧密領域の強度増加率は 0.30 となり、これは ϕ に換算すると 16.7 度に相当する。

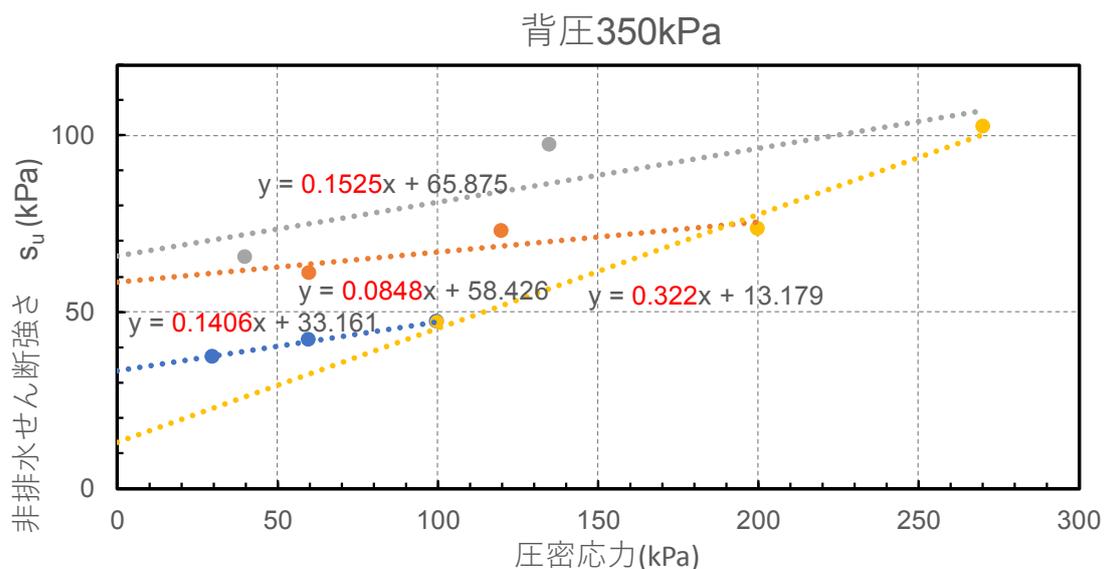


図 2-7 非排水せん断強さと圧密応力の関係 (背圧 350kPa)

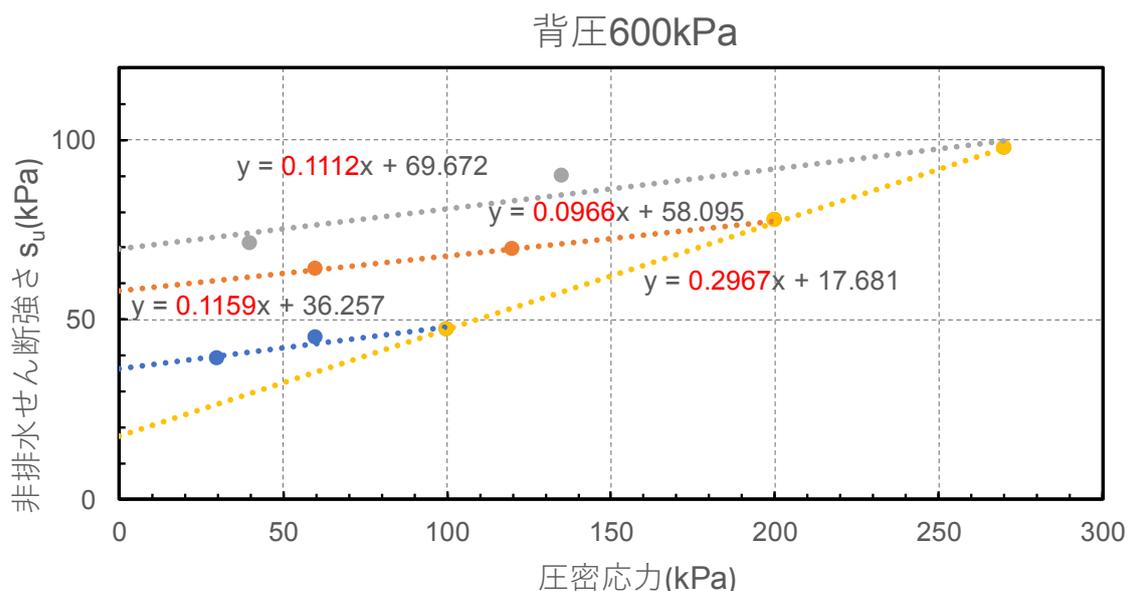


図 2-8 非排水せん断強さと圧密応力の関係（背圧 600kPa）

2.2 遠心場での模型地盤のせん断強度推定

2.2.1 斜面安定解析への適用

前項で得られた強度増加率を斜面安定解析に適用する場合の方法を示す。平成 28 年度模型実験における斜面の崩壊モードは、すべり面を境界とした不連続なせん断面が形成された。斜面安定解析（修正フェレニウス法）においてもすべり面を設定するため、せん断条件が最も近い力学試験は一面せん断試験である。そこで平成 28 年度に実施した一面せん断試験から求めた強度定数と今年度実施した三軸圧縮試験結果の比較を行う。図 2-9 に一面せん断試験で得られたせん断応力と垂直応力の関係を示す。全応力表示の過圧密状態の ϕ は 7.2 度であった。一方、前述の方法により求めた強度定数に基づく過圧密状態で ϕ は 6.2 度と 7.3 度であり、一面せん断試験で求めた ϕ と近い値を示している。ただし ϕ に 1 度程度の違いはあるものの、事前検討において過圧密領域の ϕ が 1 度違っていても、安全率にはほとんど差がみられなかったことから、修正フェレニウス法による検討では、一面せん断試験の過圧密状態 ϕ の 7.2 度とそのまま使うものとする。なお、正規圧密状態の ϕ は一面せん断試験の値 14.4° を用いることとした。

粘着力に関しては、斜面の水平成層地盤を作製した後、土塊を取り除く方法であるた

め法面部は過圧密状態である。そのため想定するすべり面では、位置によって先行圧密応力および過圧密比が異なっている。加えて遠心加速度の大きさによっても粘着力が変化する。したがって、粘着力の評価は、すべり面全長にわたる粘着力の平均値を用いざるを得ないが、平均値を理論的に算出は難しい。そこで粘着力は、模型地盤で測定したせん断強度、具体的には成層地盤のベーンせん断試験結果を粘着力とみなして求めることとした。ただし、測定結果は幅をもっているため、粘着力も幅をもたせて評価することとした。

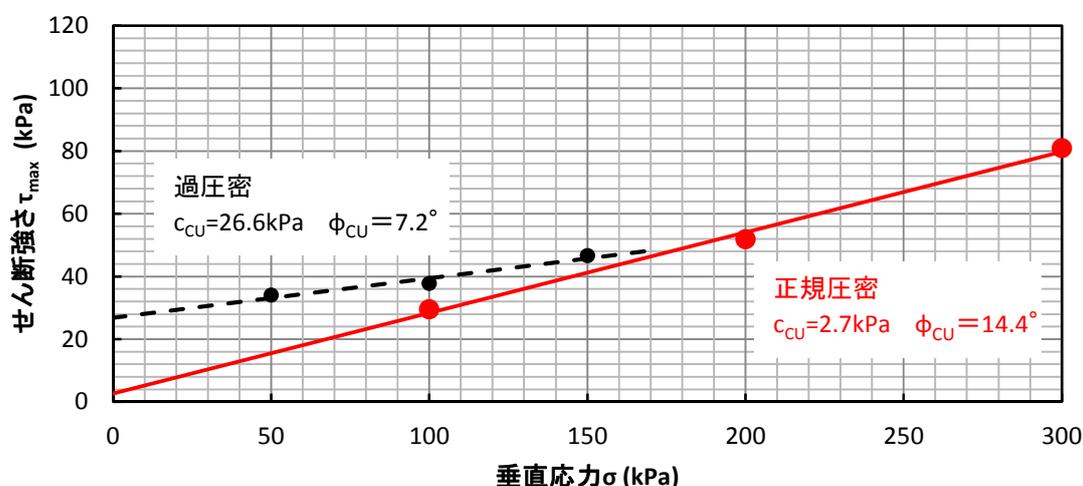


図 2-9 一面せん断試験によるせん断強さと垂直応力の関係（平成 28 年度実験）

2.2.2 FEM 解析への適用

地盤を連続体とみなす FEM 解析（モールクーロンモデル）では、三軸圧縮試験の強度定数を参考に設定することとした。ただし、三軸圧縮試験で得られた粘着力（拘束圧が 0 のときのせん断強さ）は、模型実験で得られた非排水せん断強さと比べてかなり大きい値を示し、乖離が見られた。そこで低拘束圧領域では模型地盤の一軸圧縮試験結果を、高い拘束圧領域では三軸圧縮試験結果（モール・クーロンの破壊基準）を適用し、両者の組み合わせにより強度定数を評価した。まず平成 28 年度の遠心載荷実験について検討する。図 2-10 に斜面地盤の一軸圧縮強さを示す。検討には図中の②、③、④の一軸圧縮強さの平均値を用いて、低拘束圧領域では、非排水せん断強さ（一軸圧縮強さ

(q_u) ÷ 2) を粘着力とみなす方法 1 (図 2-11) と一軸圧縮試験のモールの応力円を設定する方法 2 (図 2-12) を試行した。ここでモール円 (全応力表示) は三軸圧縮試験の Case4、5、6 の結果を用いた。実線で示される非線形な破壊包絡線が得られたが、解析パラメータは非線形な強度定数を設定できないため、低拘束圧領域の包絡線の接線 (点線) の切片より粘着力 c を、傾きより内部摩擦角 ϕ を求めた。事前検討において方法 1 および 2 から求めた強度定数を用いて、H28 年度の静的遠心載荷実験の再現解析を実施した。その結果、平成 29 年度実施の崩壊角は 4 度であったが、方法 1、2 ともに崩壊角は 9 度となり、実験結果 (約 13 度) に近づく結果となった。なお、方法 1 がすべり面位置をより良く再現できたことから、再現解析では、方法 1 で求めた強度定数を採用することとした。したがって、90G 場における再現解析では c は 12.7kPa、 ϕ は 33.7 度を用いることとした。

今年度実施した 30G 場の実験では、同様の方法により強度定数を決定した。図 2-13 に実験結果の概要と地盤の強度を示す。図中の一軸圧縮強さの平均値から粘着力を求めた。図 2-14 に方法 1 で求めた強度定数を示す。図中のモール円 (全応力表示) は先行圧密応力が低い三軸圧縮試験 (Case1、2、3) の結果を用いた。これにより 30G 場における再現解析では c は 8.2kPa、 ϕ は 37.8 度を用いることとした。

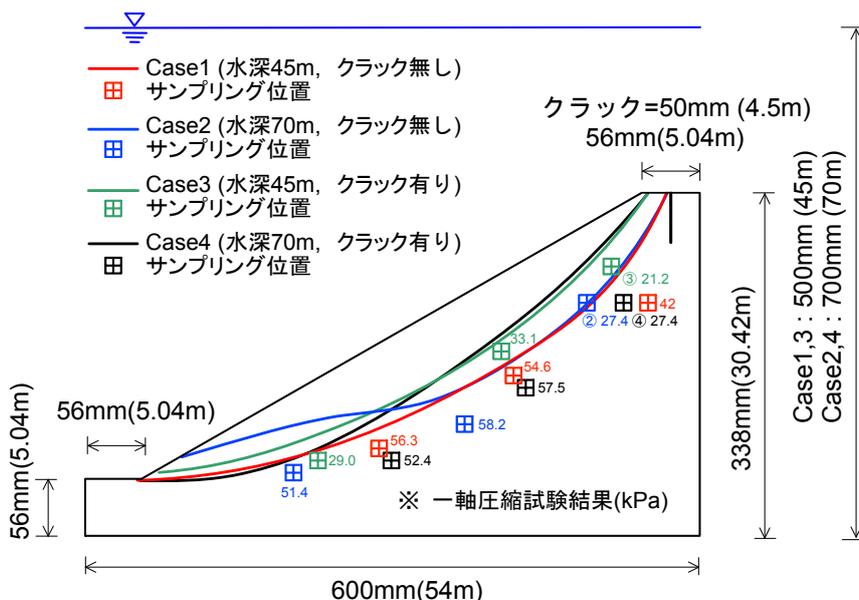


図 2-10 斜面地盤の一軸圧縮強さ (90G 場実験)

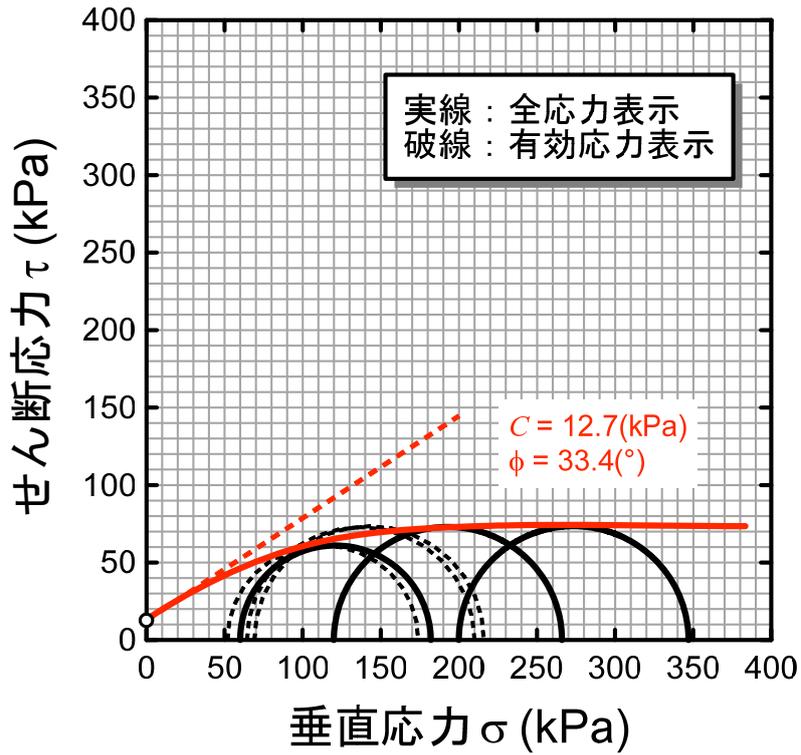


図 2-11 強度定数の設定（方法 1）（90G 場実験）

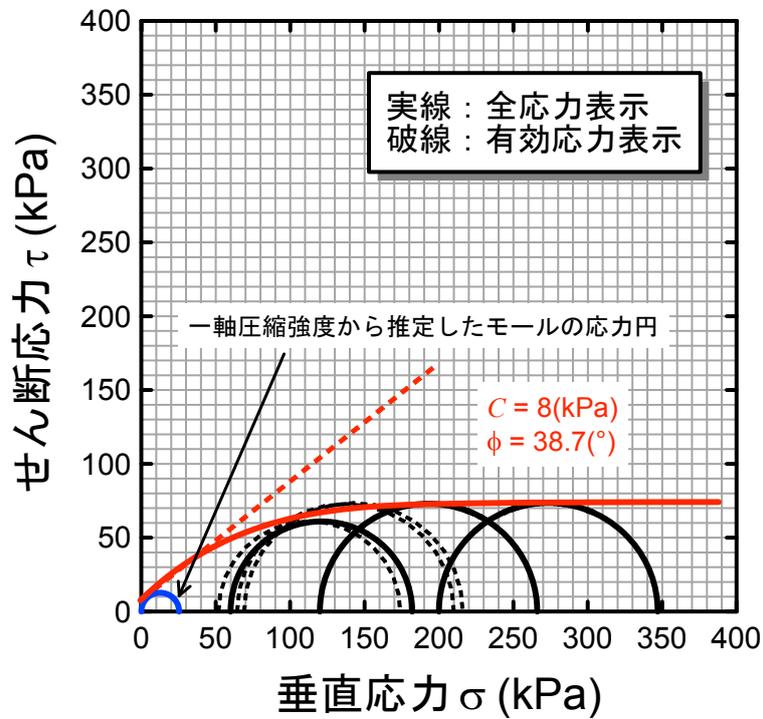


図 2-12 強度定数の設定（方法 2）（90G 場実験）

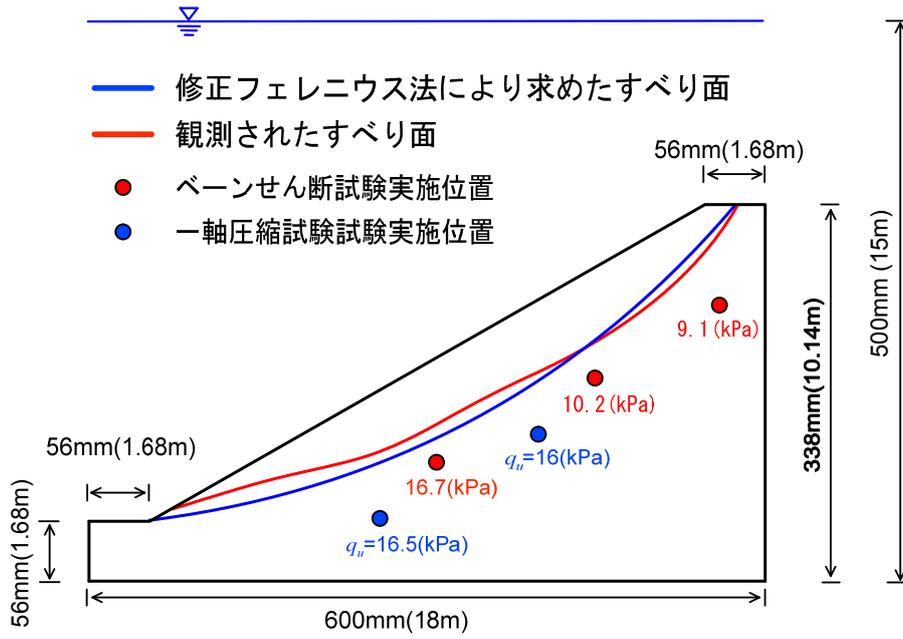


図 2-13 斜面地盤の強度分布 (30G 場実験)

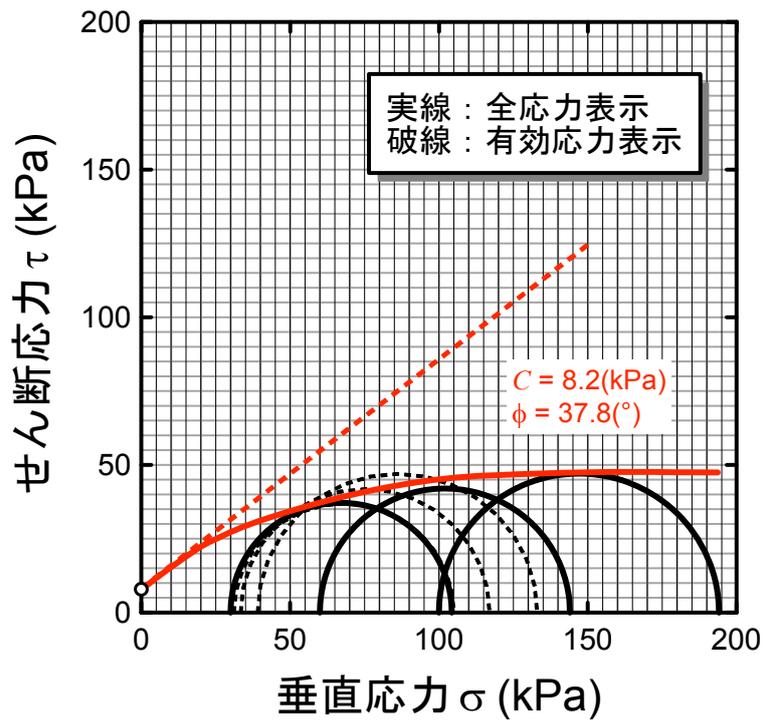


図 2-14 強度定数の設定 (方法 1) (30G 場実験)

3 海底環境下の斜面を模擬した遠心力模型実験

本事業では、地震動のような動的な外力を振動台によって与える実験を実施し、海底環境下でのすべり面の伸展や崩壊モードを把握する。

実験ケースとして、斜面の勾配によって崩壊モードが異なる可能性があるため、模型地盤の斜面勾配（30°、35°、15°）と水圧の大小を変えた表 3-1 の 3 ケース（実験ケース 1～3）を実施する。遠心場は 30G とした。加えて、動的な実験との対比のため、振動台のかわりに傾斜台を用いて 30G 場で、模型地盤を徐々に傾け静的な外力を与えるケース（実験ケース 4）を実施した。実験のイメージを図 3-1 に示す。これらの実験では、以下に示す実験データを収集し、斜面崩壊の様子は画像変位計測にて、崩壊形状や移動量等を把握する。なお、実験装置の制約条件等により、規制庁担当職員との協議の上、模型地盤の形状を当初の計画より一部変更した。

実験は、五洋建設株式会社技術研究所が所有する、写真 3-1 の遠心模型実験装置を使用して行った。表 3-2 に遠心模型実験装置の諸元を、図 3-2 に遠心模型実験装置概要図を示す。

ケース 1～3 の実験には、写真 3-2、写真 3-3 に示す振動台を使用し、正弦波を与える事により加振して載荷した。ケース 4 の実験には写真 3-4、写真 3-5 に示す傾斜台を使用し、土槽を傾けていくことで静的な水平震度を斜面模型に載荷した。

遠心載荷実験は図 3-3 に示すフローチャートに基づいて行った。

模型地盤は以下のように作製した。具体的には、平成 28 年度事業にて実施した遠心力模型実験で用いた手順〔① 30G 場で成層地盤の圧密、② 1G 場で斜面整形後に湛水し 30G 場で再圧縮〕より、AX カオリンと MC クレーを乾燥重量比 1:1 で配合した粘性土を用いて斜面模型を作製した。

全てのケースにおいて作成方法は同じ手順で実施した。ケース 1～3 においては、模型地盤作成後の含水比計測の際のサンプリング坑が本実験に与える影響を懸念し、サンプリングによる含水比計測は実施せず、ベーンせん断強度により確認することとした。

地盤作製状況を写真 3-6～写真 3-17 示す。

表 3-1 実験ケース

実験ケース	斜面勾配	水深	遠心場	外力
ケース1	30°	15m	30G	動的
ケース2	35°	23m		
ケース3	15°			静的
ケース4	30°			

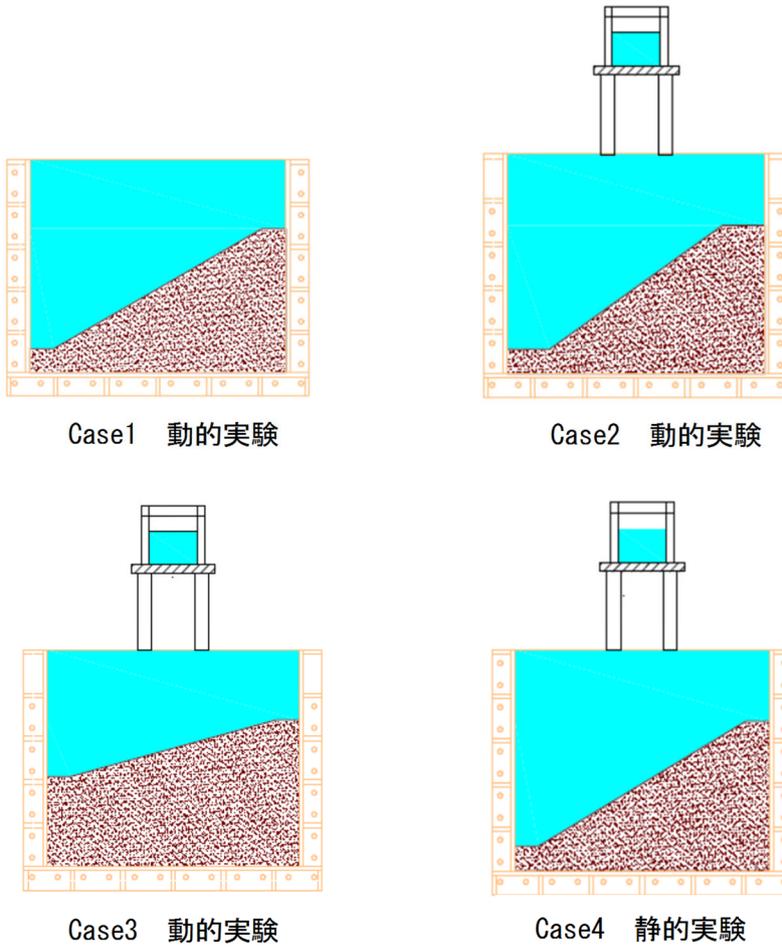


図 3-1 試験装置



写真 3-1 遠心載荷実験装置

表 3-2 遠心模型実験装置の諸元

項 目	仕 様
遠心加速度	20~90G
有効回転半径	3,050 mm
中心軸回転数	70~168rpm
プラットフォームの大きさ	500×1100 mm
最大積載重量×加速度	1000G・kN

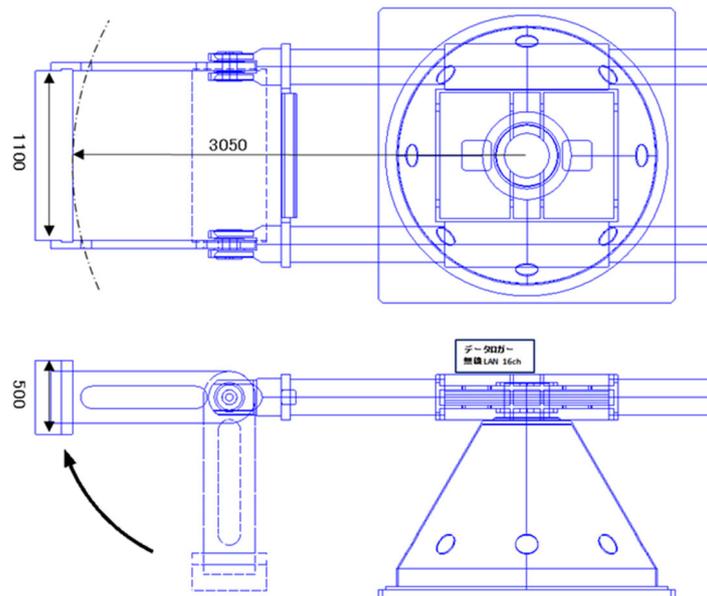


図 3-2 遠心模型実験装置概要図

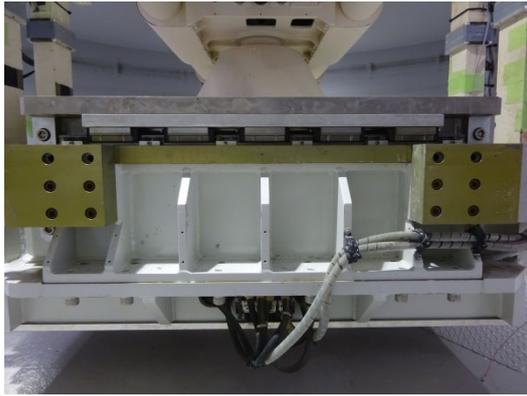


写真 3-2 振動台

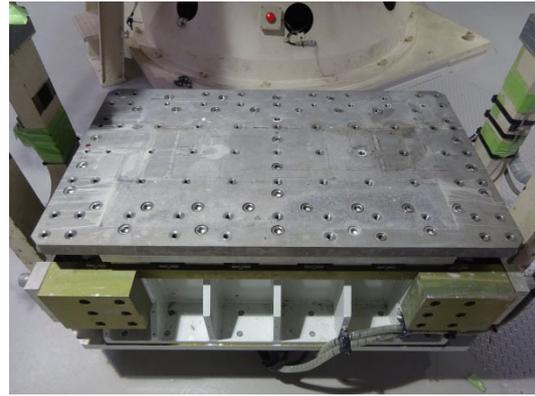


写真 3-3 加振機



写真 3-4 傾斜台



写真 3-5 傾斜後



写真 3-6 粘性土作製



写真 3-7 粘性土投入



写真 3-8 浸透圧による圧密

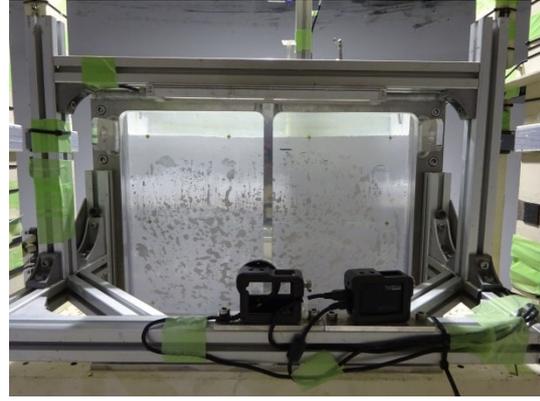


写真 3-9 遠心载荷による圧密



写真 3-10 ベーンせん断試験



写真 3-11 含水比測定



写真 3-12 地盤切出し



写真 3-13 斜面模型地盤の成型

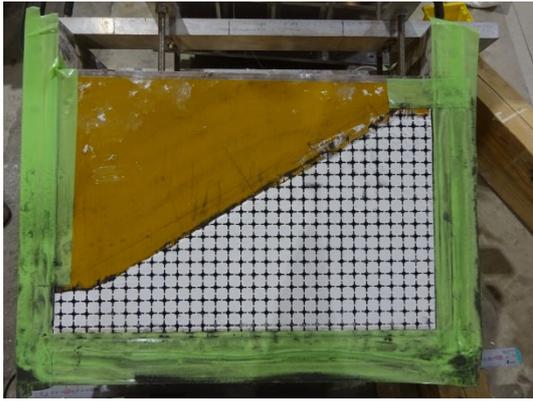


写真 3-14 マーキング

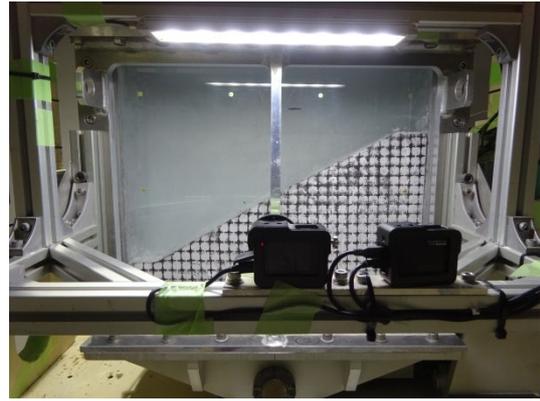


写真 3-15 湛水

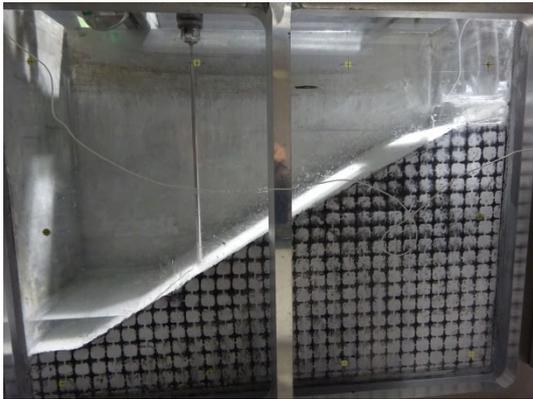


写真 3-16 地盤強度確認

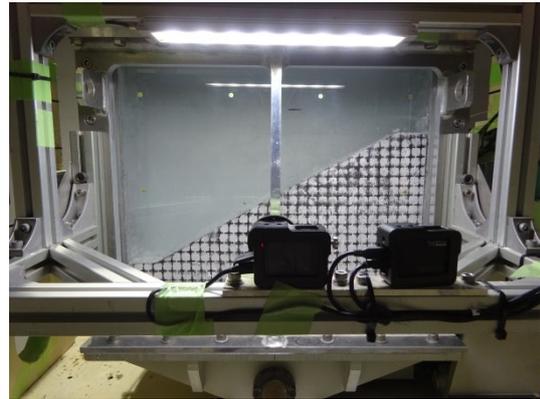


写真 3-17 湛水

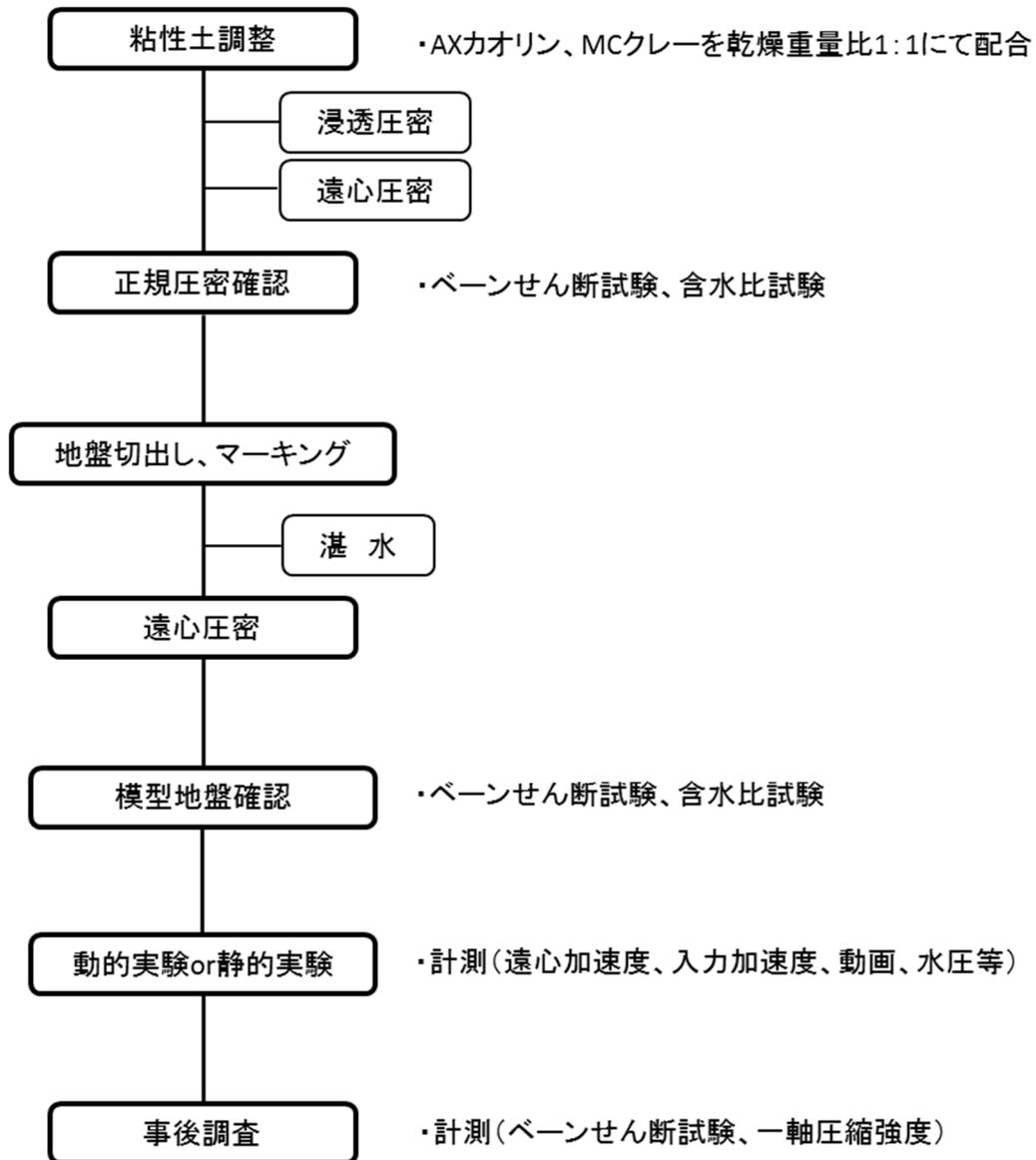


図 3-3 実験フローチャート

3.1 遠心場での斜面模型の静的载荷実験

3.1.1 模型地盤の製作、計測器設置

遠心圧密を行い、 \sqrt{t} 法にて圧密沈下が収束した判断を行い、地盤のせん断強度及び含水比計測で確認した。せん断強度は、模型地盤の法肩を基準として、67mm 間隔で5地点計測した。含水比試験は、チューブサンプリングを行い、法面表層から20mm 間隔で計測を実施したが、最深部のサンプルは採取できなかった。

成層地盤における計測地点と計測結果を図 3-4 及び図 3-5 に示す。

せん断強度及び含水比の計測結果が、概ね良好であることから、正規圧密地盤は作製できたものとし、斜面模型地盤を整形し、湛水したのち本試験に近い状態で地盤がなじむように遠心圧密を行ったのち、再度、ベーンせん断強度及び含水比試験で確認した。せん断強度は、土槽アクリル側に3地点・3測線（法面より50mm間隔）とし、含水比は壁側3地点とし、深度分布は正規圧密確認と同様に20mm間隔で実施した。斜面模型地盤の計測地点を図3-6、計測結果を図3-7に示す。

模型地盤の確認後、計測器を設置した。加速度計は法肩より18mm離れた天端に設置した。間隙水圧計は天端幅の中央28mm、深度100mmに設置した。計測器の設置地点・設置状況を図3-8および写真3-18に示す。

崩壊形状の計測は、斜面模型の側面を撮影した動画から静止画を抽出し、PIV (Particle Image Velocimetry) 画像解析ソフトを用いて行った。PIV 画像解析ソフトは、目印となる粒子の配置パターンを画像処理によって識別し、そのパターンの移動位置から変位量を算出する。

動画撮影用のカメラは、遠心載荷実験で使用実績のあるGoPro HERO4 Blackを使用した。4K画質で撮影した動画から800万画素の静止画に書き出し、ひずみ補正を行ってから解析を実施した。使用したカメラ及び設置状況を写真3-19に示す。

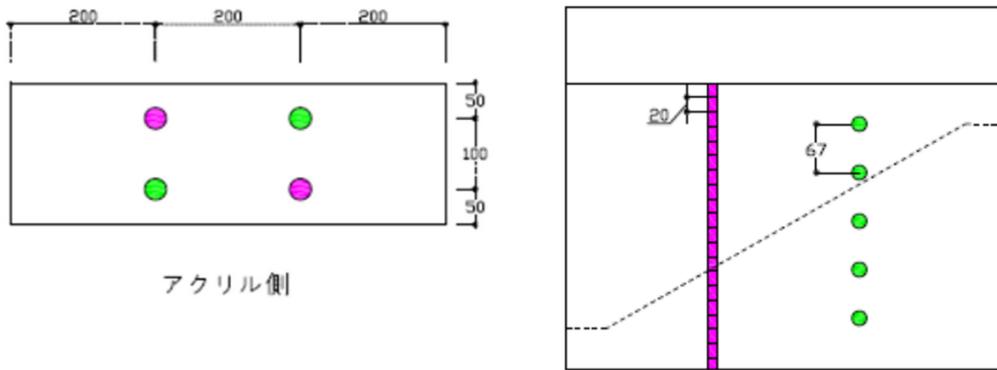


図 3-4 成層地盤の計測地点 (Case4)

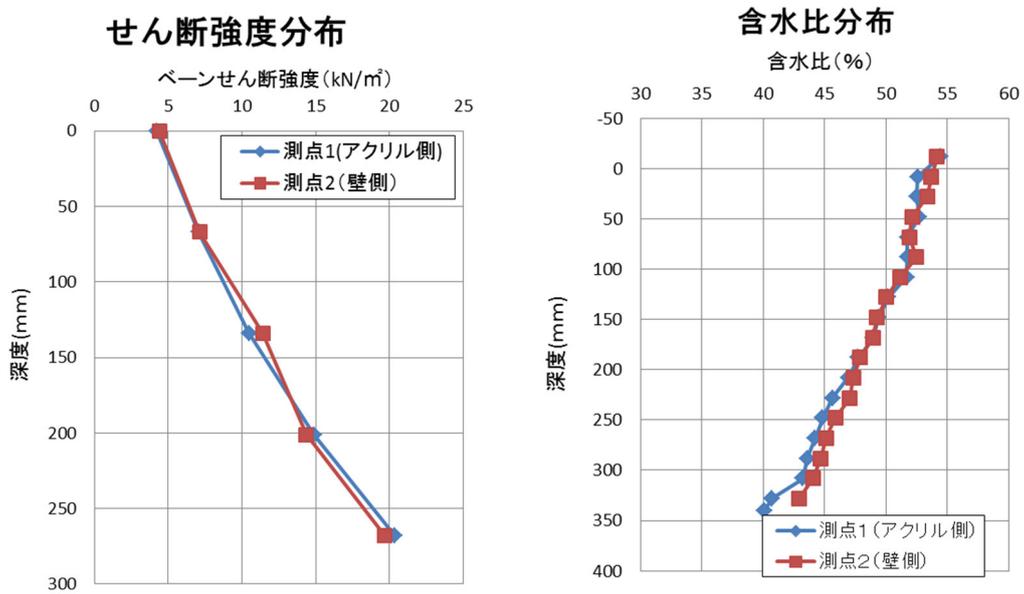


図 3-5 成層地盤の計測結果 (Case4)

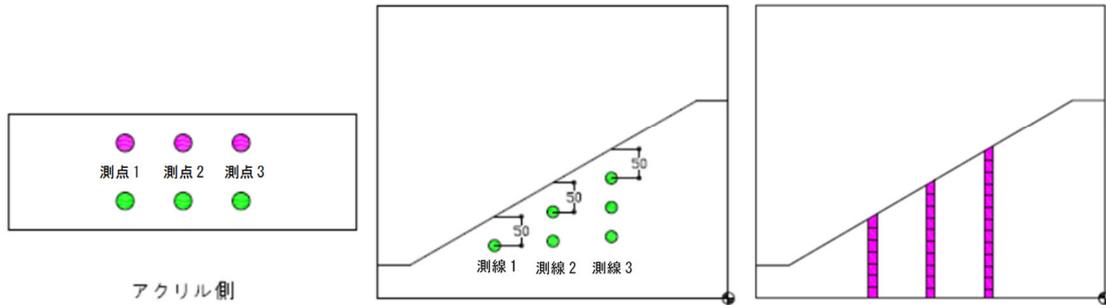


図 3-6 模型地盤の計測地点 (Case4)

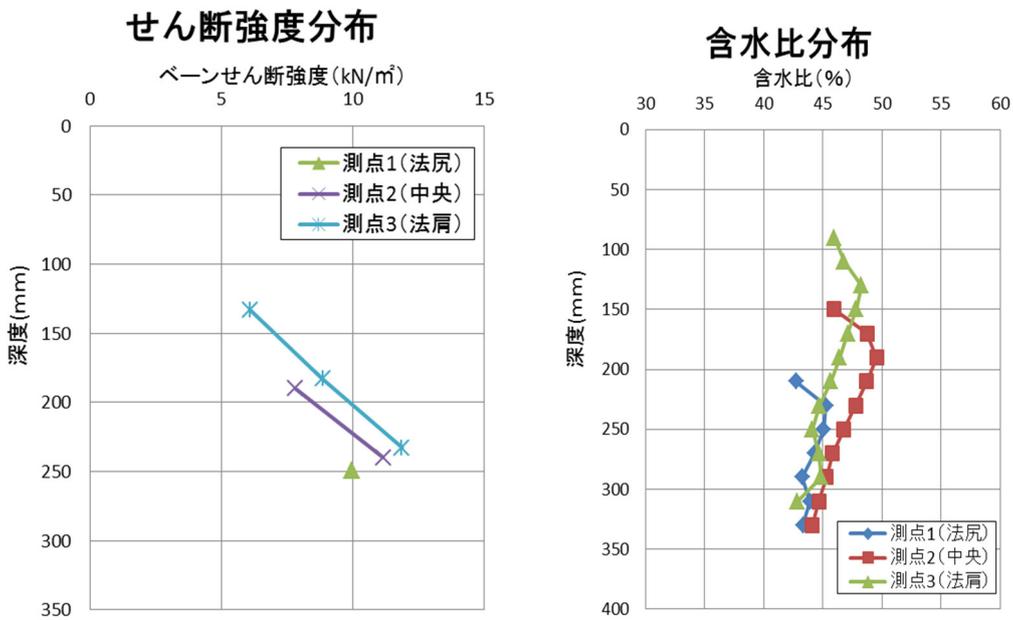


図 3-7 模型地盤の計測結果 (Case4)

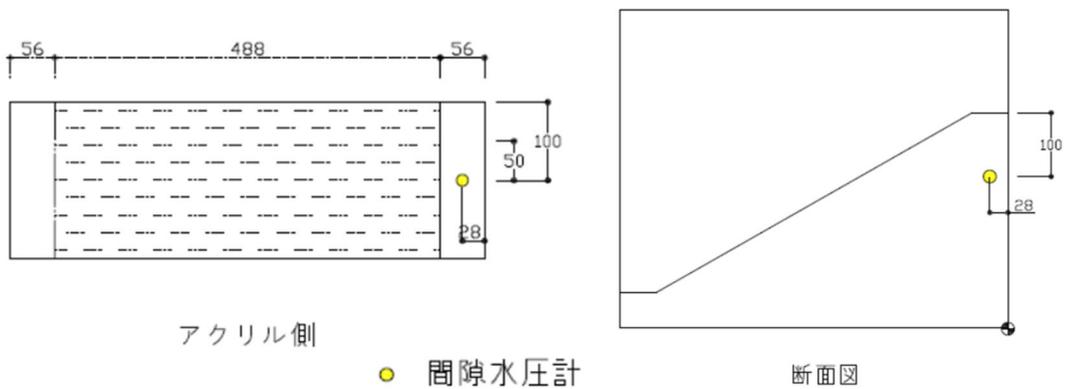


図 3-8 計測器の設置地点 (Case4)

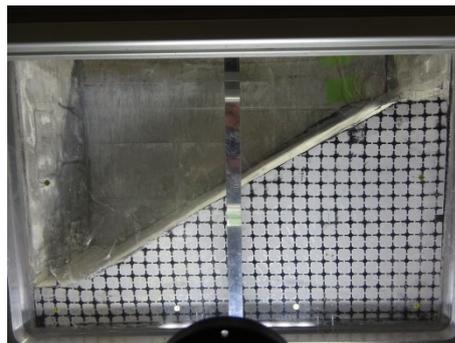
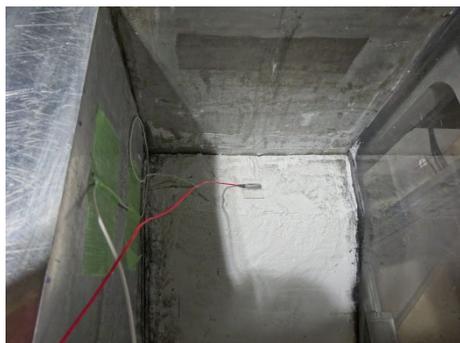


写真 3-18 計測器の設置状況 (Case4)



写真 3-19 収録カメラ及び設置状況 (Case4)

3.1.2 実験結果

30G の遠心加速度の下で水深 23.3m の模型地盤について、傾斜実験を行った。遠心装置運転後、遠心加速度が 30G に到達してから 10 分経過したのち傾斜を開始した。傾斜台の傾斜速度は、装置の下限速度の $0.6^{\circ} / \text{min}$ とした。傾斜角 12° を超えると傾斜台の制御が効かなくなり傾斜速度が約 $1.8^{\circ} / \text{min}$ となり、傾斜角 19.3° にて遠心装置のアームに接触して停止した。傾斜角の結果を図 3-9 に示す。

間隙水圧の計測を図 3-10 に示す。傾斜が上昇するによって、設置した間隙水圧計の設置位置が上昇するため、間隙水圧が上昇し傾斜台が停止すると間隙水圧が安定した値になった。

PIV 解析による斜面滑動状況をに図 3-11 示す。

遠心載荷実験終了後の地盤について、側面からサンプリングを行い、一軸圧縮強度試験及びベーンせん断強度試験を実施した。サンプリング位置は、すべり面付近の 3 箇所

とし、乱れていない位置からブロックサンプリングを行い、一軸圧縮試験を実施した。試験結果を表 3-3 に示す。測点 3 のサンプリング地点は、トリミング後の供試体が自立困難の為、一軸圧縮試験を実施できなかった。サンプリング地点を図 3-12 に示す。

ベーンせん断強度は一軸圧縮試験の計測地点から原点よりに 50mm 移動させた地点を計測地点とした。試験は計測器の設置が困難なためハンドベーンにて計測した。試験結果を表 3-4、計測地点図を図 3-13 に示す。

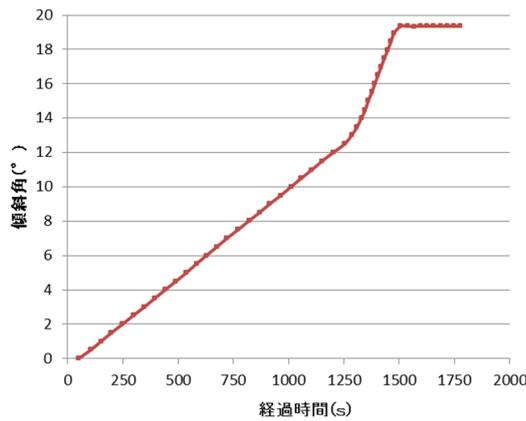


図 3-9 傾斜角の計測結果

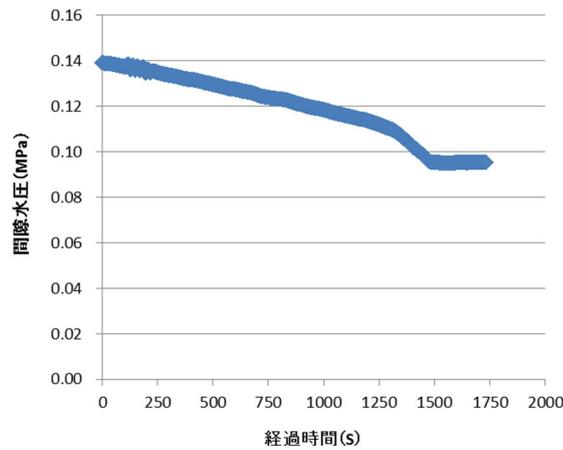
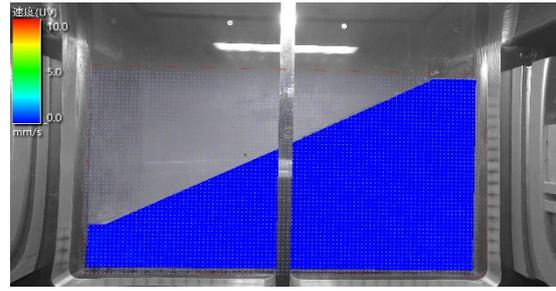
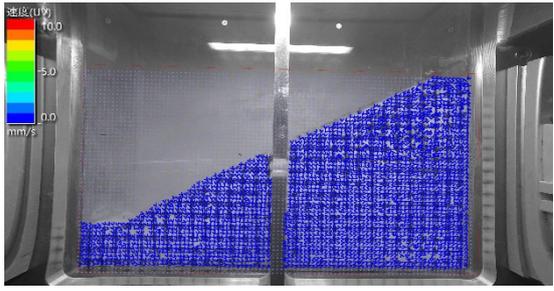
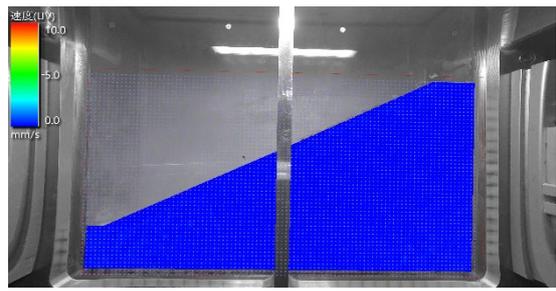
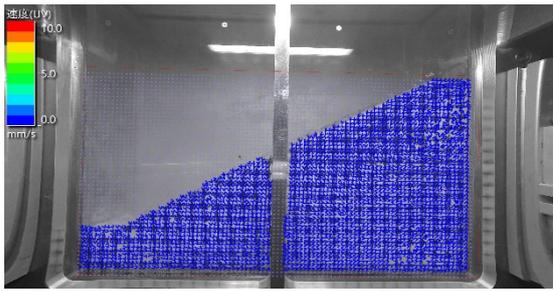


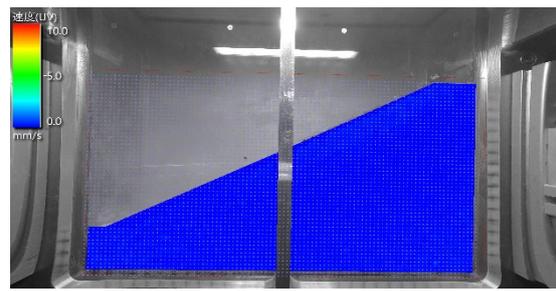
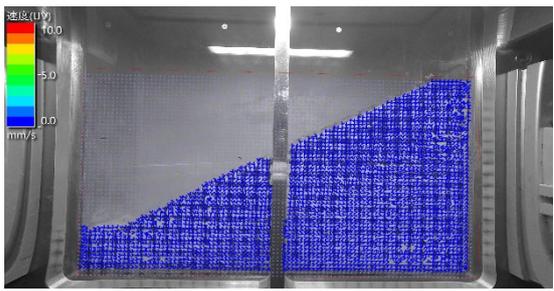
図 3-10 間隙水圧計の計測結果



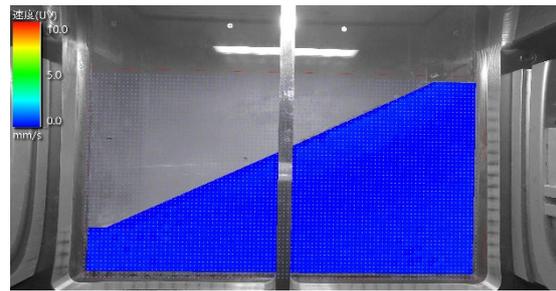
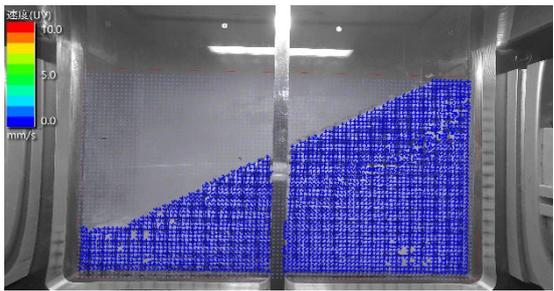
0° / 1°



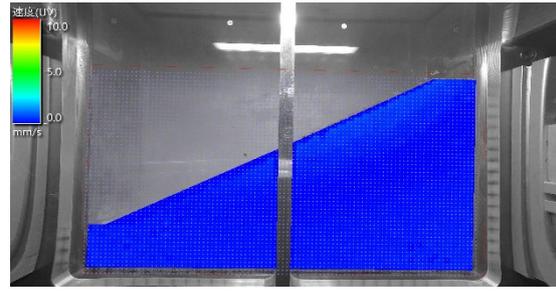
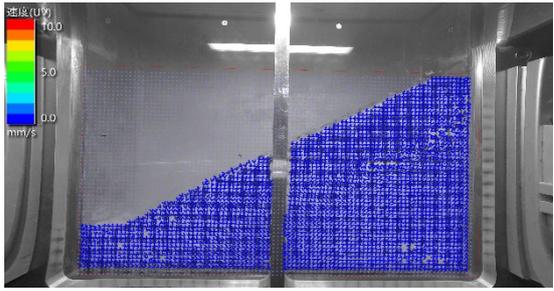
0° / 2°



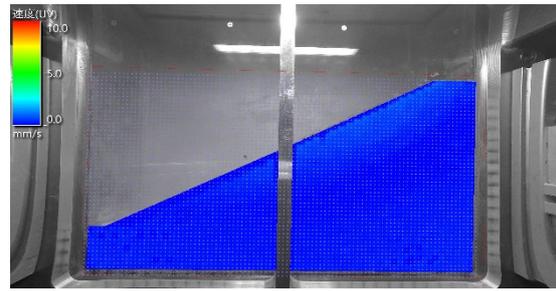
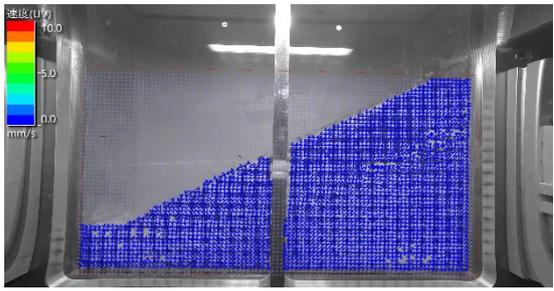
0° / 3°



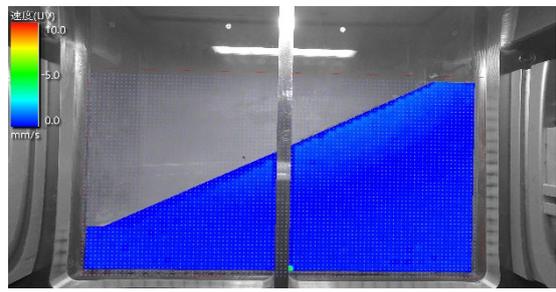
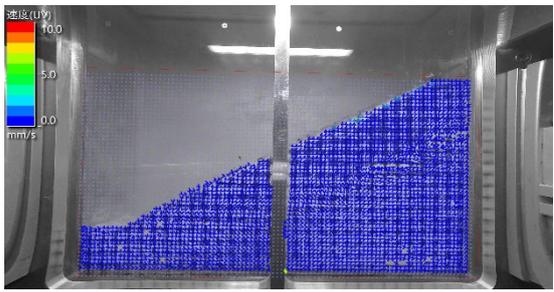
0° / 4°



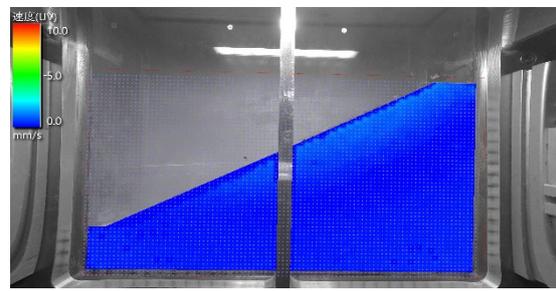
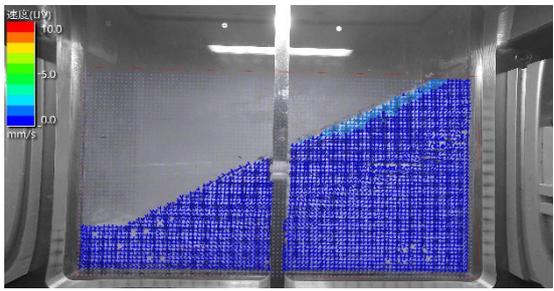
0° / 5°



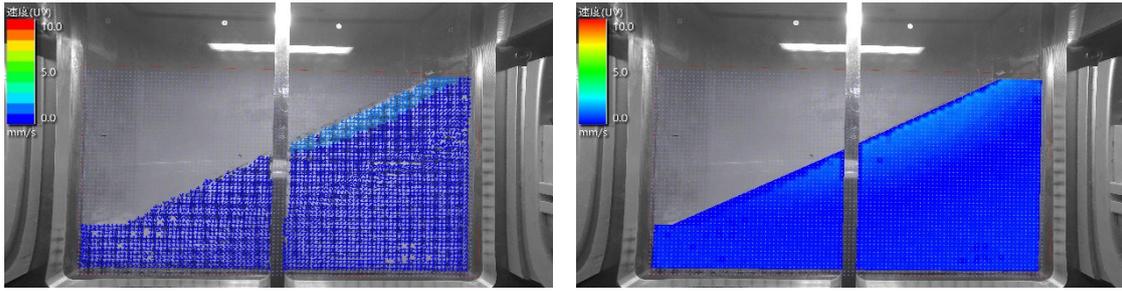
0° / 6°



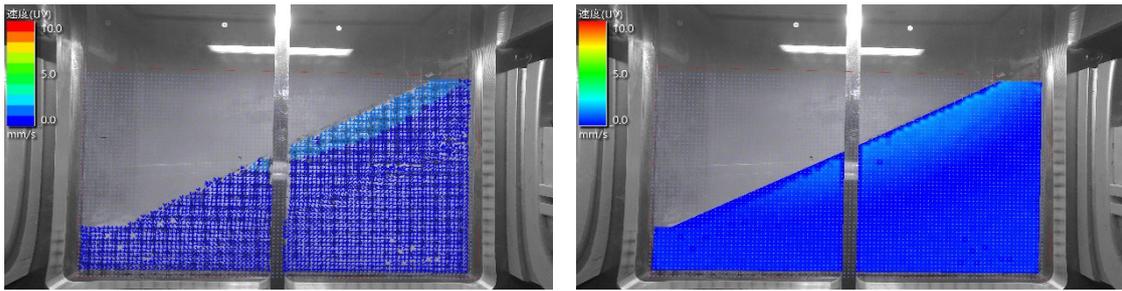
0° / 7°



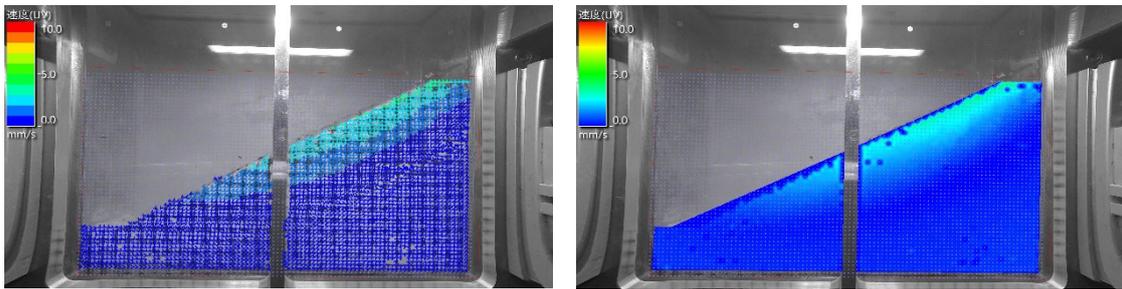
0° / 8°



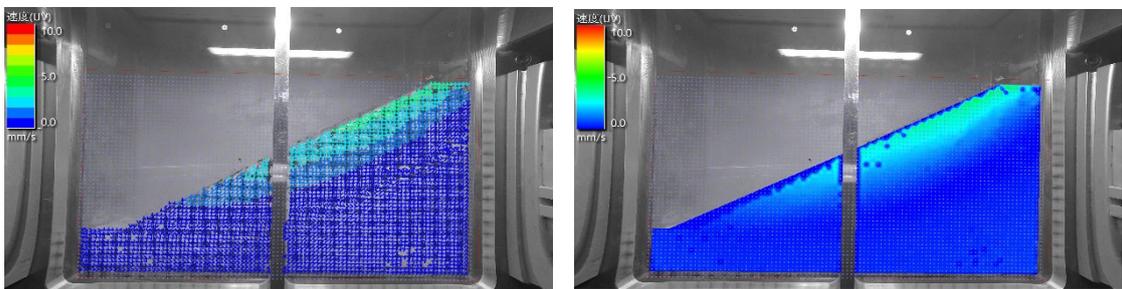
0° / 9°



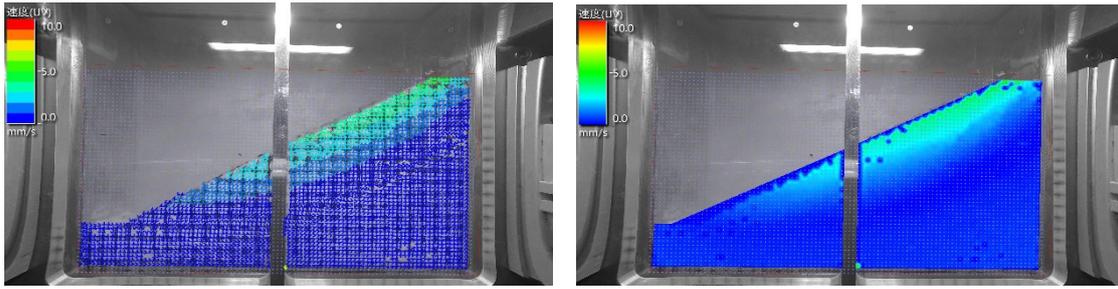
0° / 10°



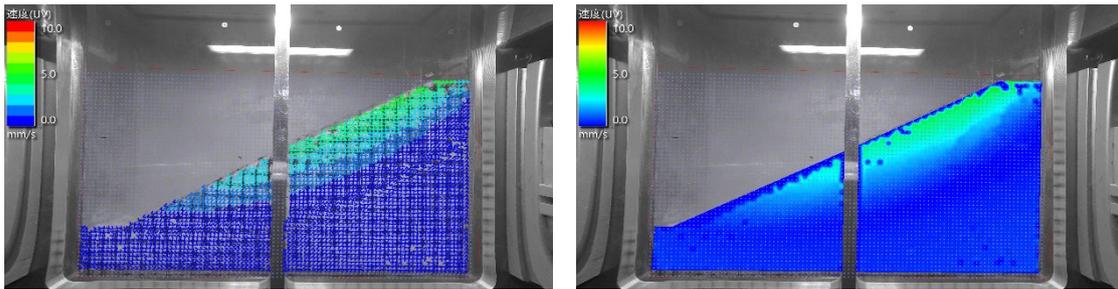
0° / 10.5°



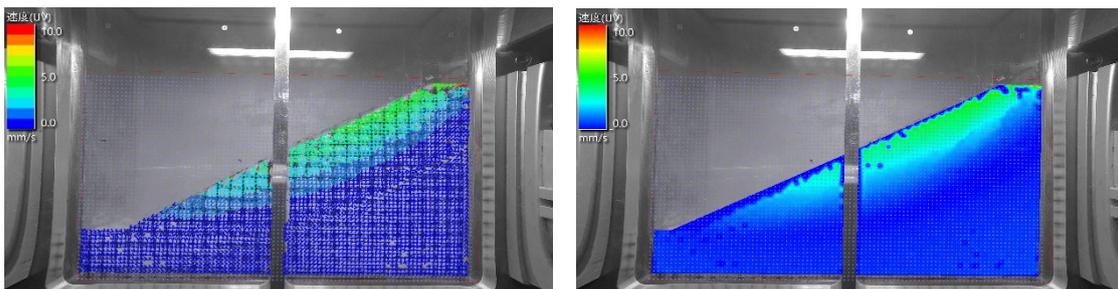
0° / 11°



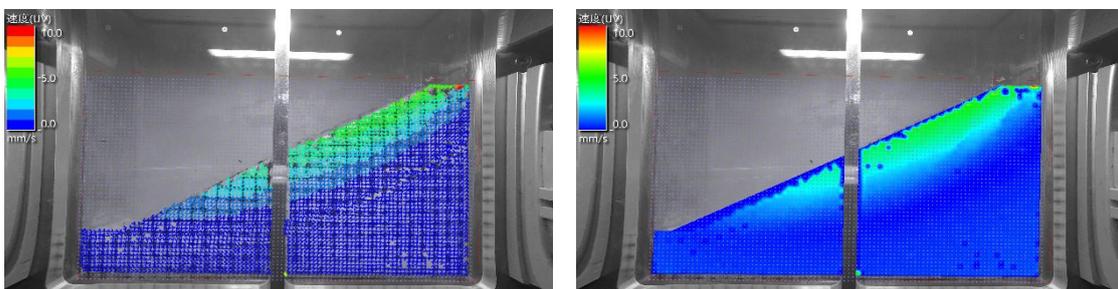
0° / 11.5°



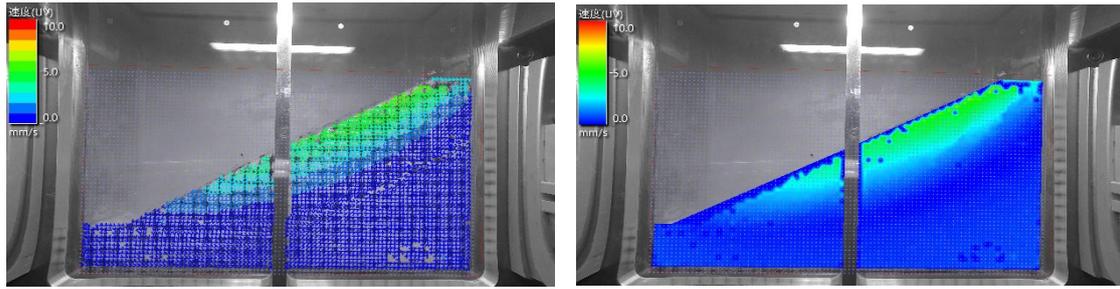
0° / 12°



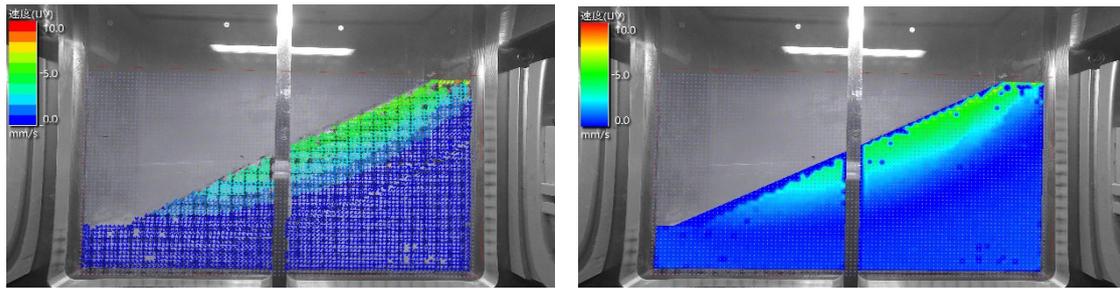
0° / 12.5°



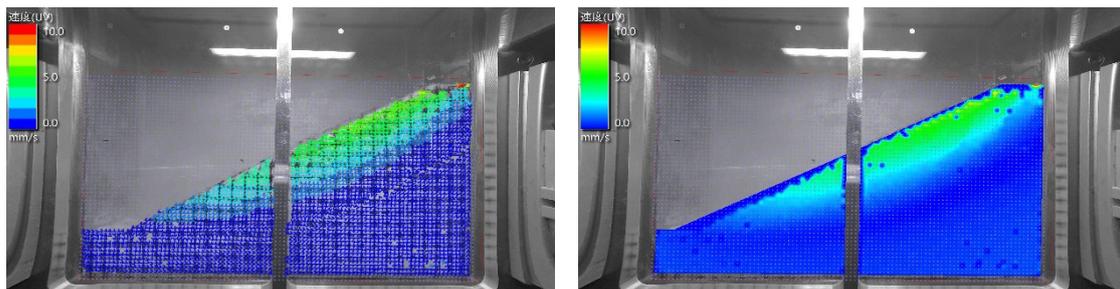
0° / 13°



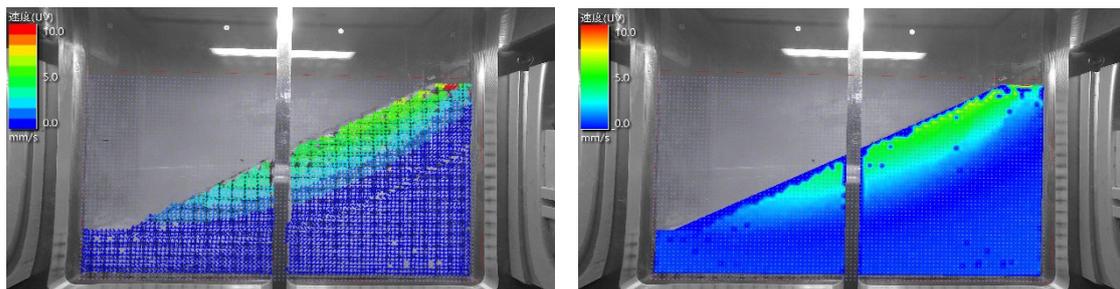
0° / 13.5°



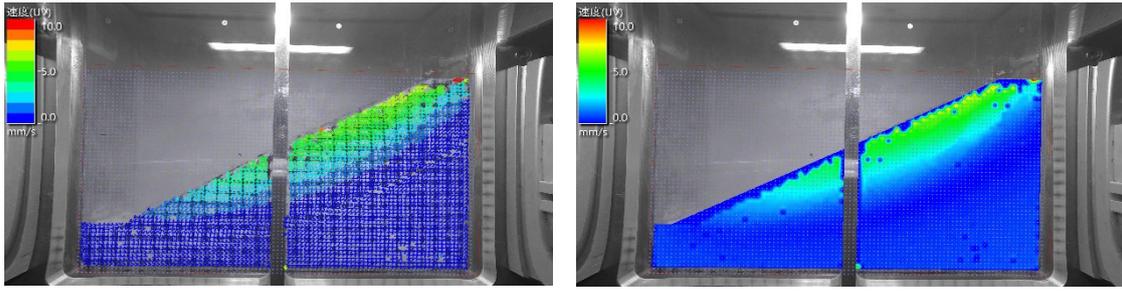
0° / 14°



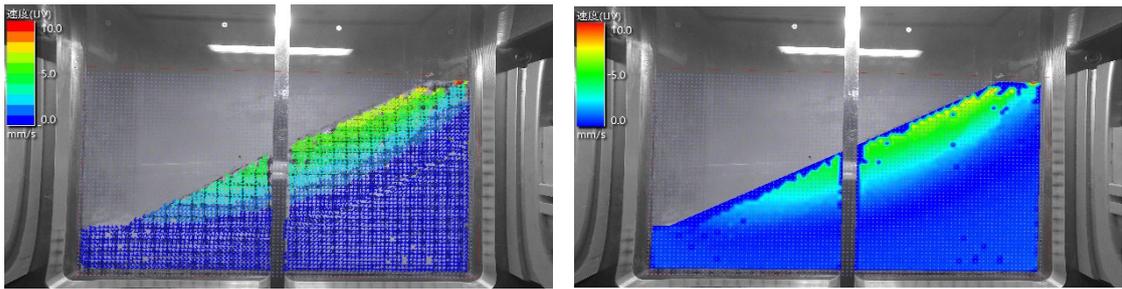
0° / 14.5°



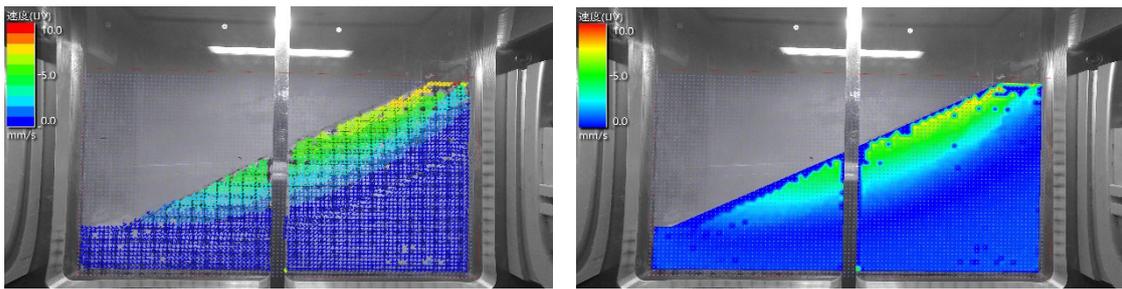
0° / 15°



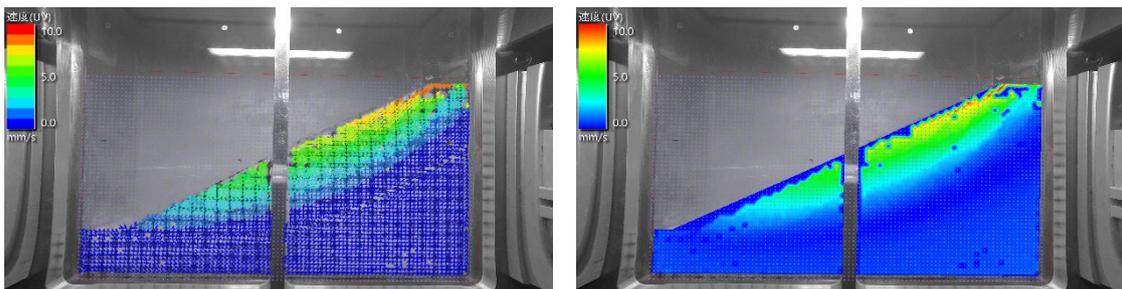
0° / 15.5°



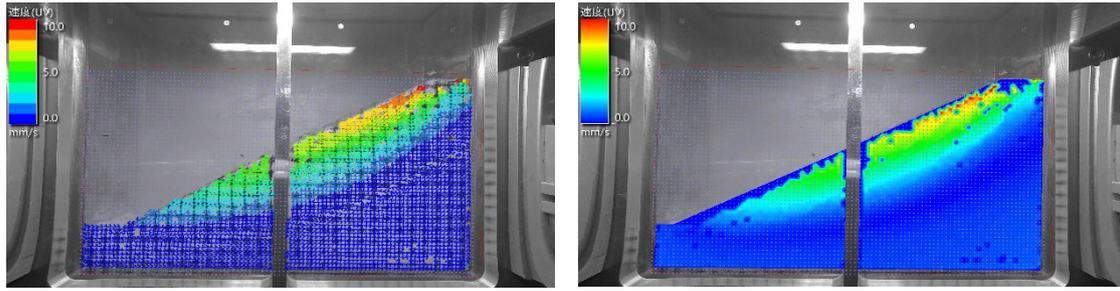
0° / 16°



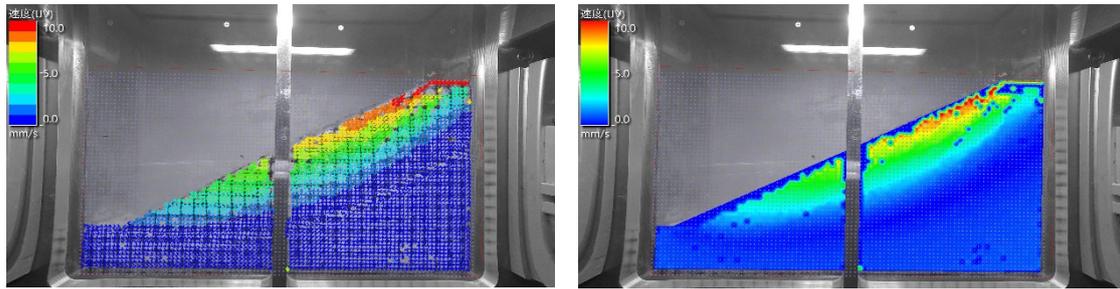
0° / 16.5°



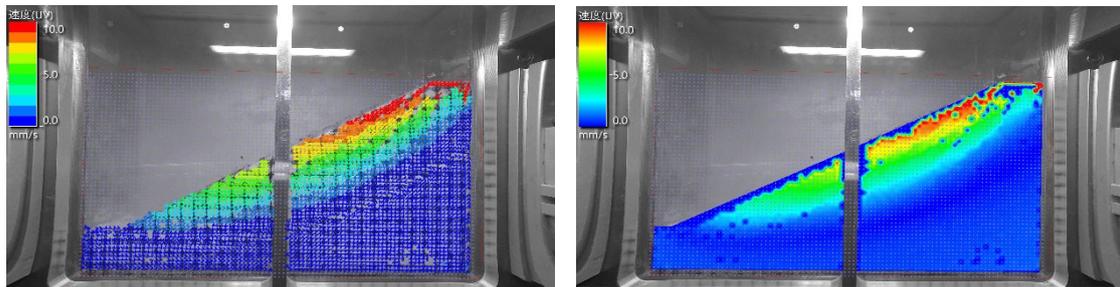
0° / 17°



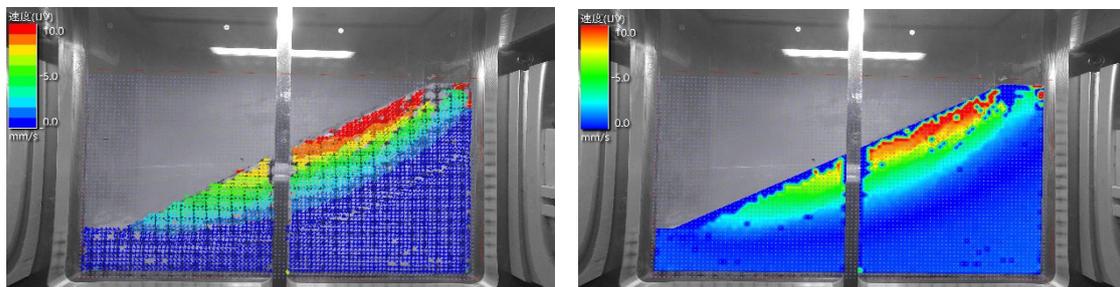
0° / 17.5°



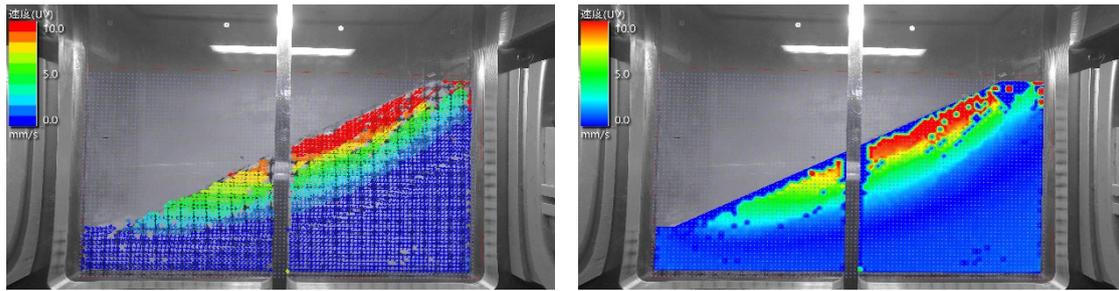
0° / 18°



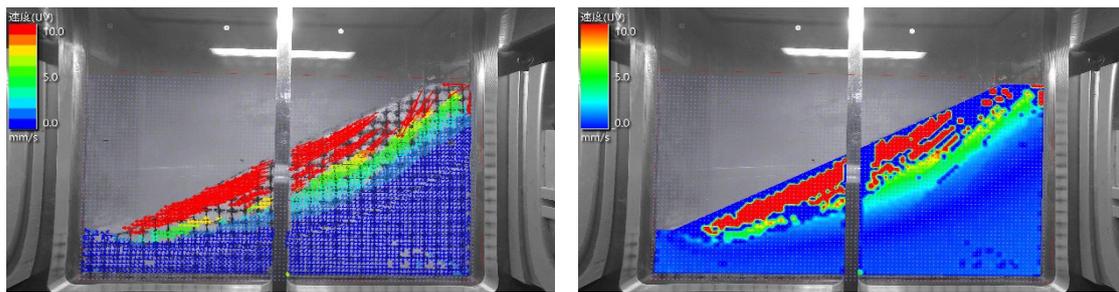
0° / 18.5°



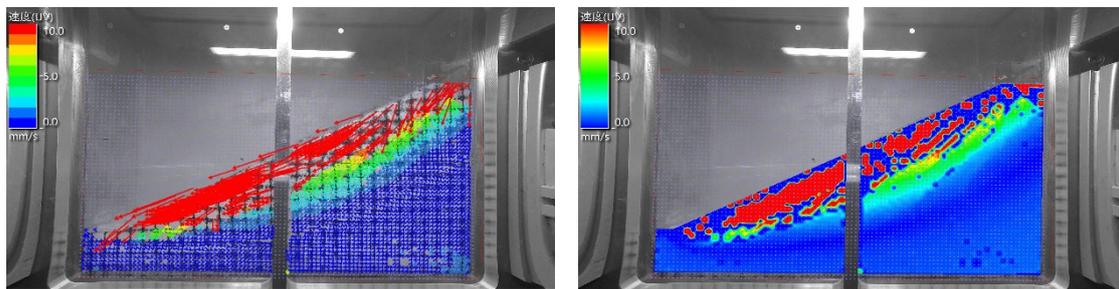
0° / 19°



0° / 19.5-1°



0° / 19.5-2°



0° / 19.5-3°

図 3-11 斜面の変位ベクトルと変位コンター (Case4)

表 3-3 サンプル試料の試験結果

測点	座標	一軸圧縮強度 (kN/m ²)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)
1	(-350, 65)	16.5	1.750	45.9
2	(-210, 140)	16	1.674	44.5
3	(-100, 205)	-	-	-

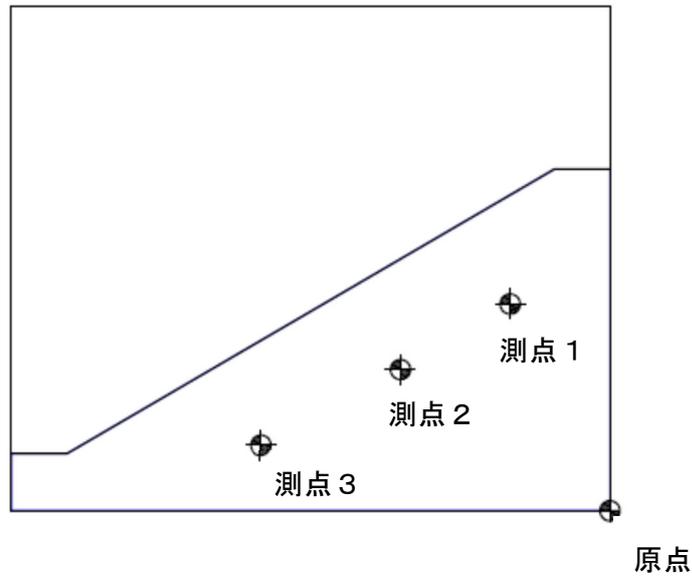


図 3-12 サンプルング地点

表 3-4 ベーンせん断試験結果

測点	座標	ベーンせん断強度 (kN/m^2)
1	(-300, 115)	16.7
2	(-160, 190)	10.2
3	(-50, 255)	9.1

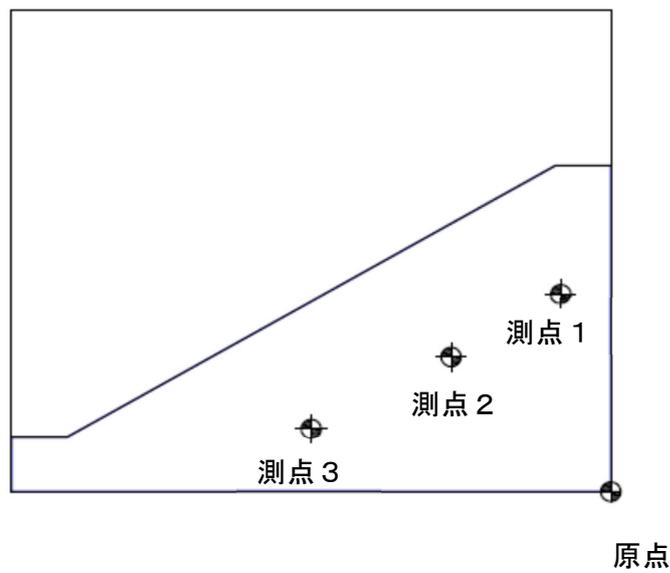


図 3-13 計測地点

3.2 遠心場での斜面模型の動的載荷実験

3.2.1 CASE1

遠心圧密を行い、 \sqrt{t} 法にて圧密沈下が収束した判断を行い、地盤のせん断強度及び含水比計測で確認した。せん断強度は、模型地盤の法肩を基準として、67 mm間隔で5地点計測した。含水比試験は、チューブサンプリングを行い、法面表層から20 mm間隔で計測を実施したが、最深部のサンプルは採取できなかった。

計測地点と計測結果を図 3-14 及び図 3-15 に示す。

せん断強度及び含水比の計測結果が、概ね良好であることから、成層地盤は作製できたものとし、斜面模型地盤を整形し、湛水したのち本試験に近い状態で地盤がなじむように遠心圧密を行ったのち、再度、ベーンせん断強度で確認した。せん断強度の計測地点及び結果を図 3-16 及び図 3-17 に示す。

模型地盤の確認後、計測器を設置した。加速度計は法肩より18mm離れた天端に設置した。間隙水圧計は天端幅の中央28mm、深度100mmに設置した。計測器の設置地点・設置状況を、図 3-18 及び写真 3-20 に示す。

湛水し水深15mの模型地盤について、30Gの遠心加速度の下で加振実験を行った。加振波は10波の正弦波とし、入力加速度を段階的に50Gal増加させて加振した。250Gal以降は、間隙水圧及び地盤が落ち着くまで約5分待つて加振を行った。

加振前の水圧は0.155MPa程度、間隙水圧は0.08~0.09MPaであり、概ね設置条件を満足している。また、加振時は水圧、間隙水圧ともにわずかに増減する。間隙水圧は加振後の圧力がわずかに上昇する傾向がみられた。水圧計及び間隙水圧の計測結果を図 3-19 に示す。

振動台及び実験土槽の加速度はほぼ同じであるのに対し、地盤の応答加速度は応答が極端に小さいが、過剰間隙水圧の発生もわずかであることから、地盤非線形化による応答の減衰ではなく、加速度計になんらかの不具合が発生している可能性が高い。計測結果を図 3-20 に示す。試験後に加速度計の動作を調べたところ水中において同様の加速度の以上が認められた。ただし、図 3-30 に示した計測結果より Case2 では、地盤は土槽とほぼ同じ加速度応答が得られており、本ケースでも同様の応答を示していたものと

考えられる。

崩壊形状の計測は、斜面模型の側面を撮影した動画から静止画を抽出し、PIV (Particle Image Velocimetry) 画像解析ソフトを用いて行った。PIV 画像解析ソフトは、目印となる粒子の配置パターンを画像処理によって識別し、そのパターンの移動位置から変位量を算出する。

動画撮影用のカメラは、遠心载荷実験で使用実績のある GoPro HERO4 Black を使用した。4K 画質で撮影した動画から 800 万画素の静止画に書き出し、ひずみ補正を行ってから解析を実施した。使用したカメラ及び設置状況を写真 3-19 に示す。

PIV 解析による各加振終了後の変位ベクトルおよび変位コンター結果を図 3-21 に示す。なおこれらの変位は、50Gal 加振後の標点変位からの増分である。

遠心载荷実験終了後の地盤について、側面からサンプリングを行い、一軸圧縮強度試験及びベーンせん断強度試験を実施した。サンプリング位置は、すべり面付近の 3 箇所とし、乱れていない位置からブロックサンプリングして一軸圧縮試験を実施した。試験結果を表 3-5 に示す。測点 3 のサンプリング地点は、トリミング後の供試体が自立困難の為、一軸圧縮試験を実施できなかった。サンプリング地点を図 3-22 に示す。ベーンせん断強度は、一軸圧縮試験の計測地点から原点より 50mm 移動させた地点を計測地点とした。試験は計測器の設置が困難なためハンドベーンにて計測した。試験結果を表 3-6、計測地点図を図 3-23 に示す。

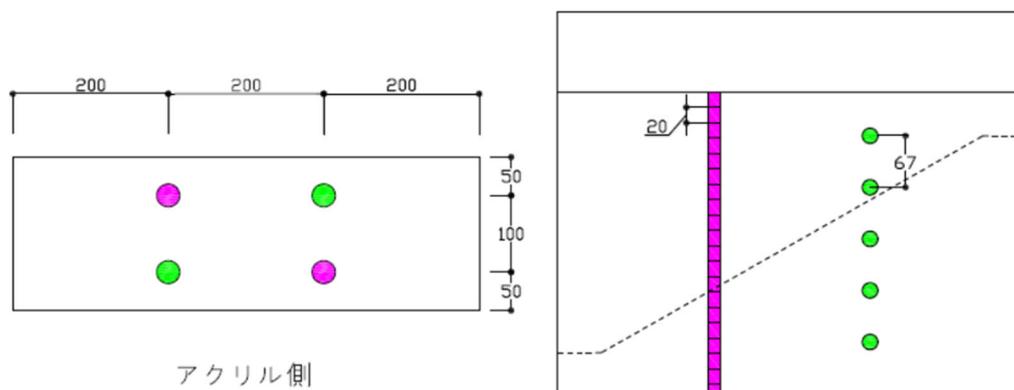


図 3-14 成層地盤内の計測地点 (Case1)

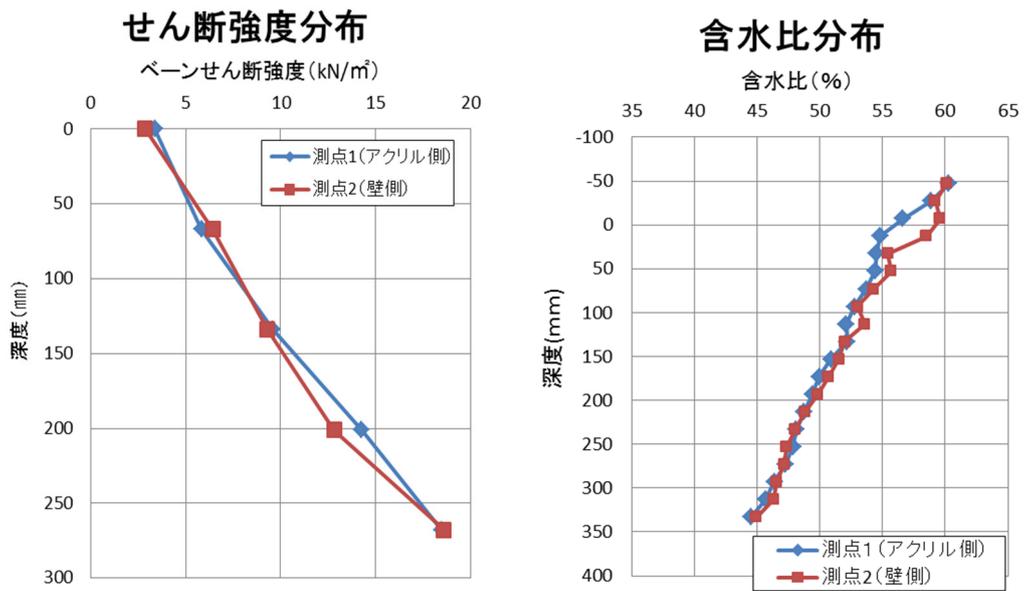


図 3-15 成層地盤の計測結果 (Case1)

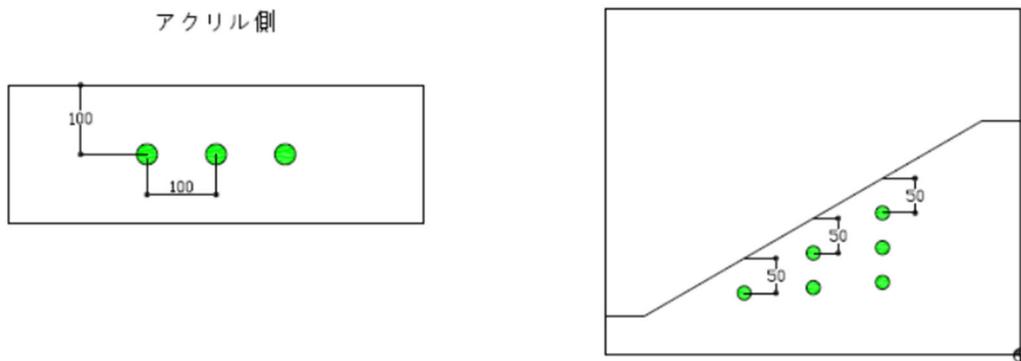


図 3-16 模型地盤内の計測地点 (Case1)

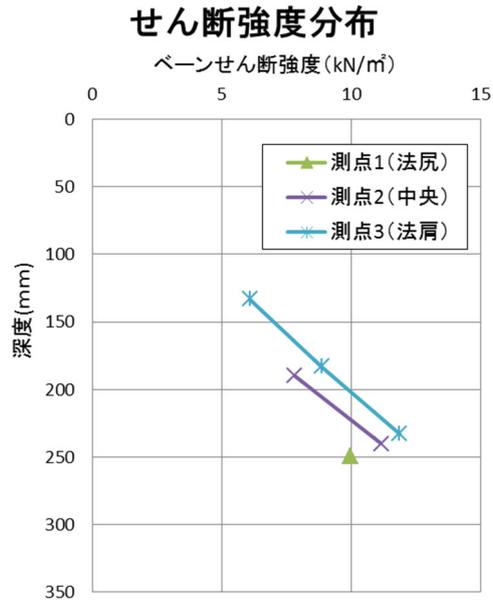


図 3-17 模型地盤のせん断強度結果 (Case1)

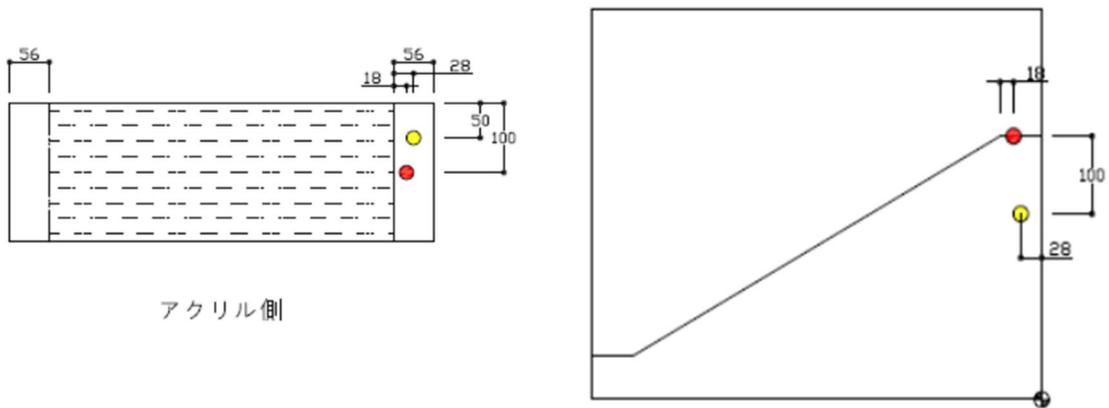


図 3-18 計測器の設置地点 (Case1)



写真 3-20 計測器の設置状況 (Case1)

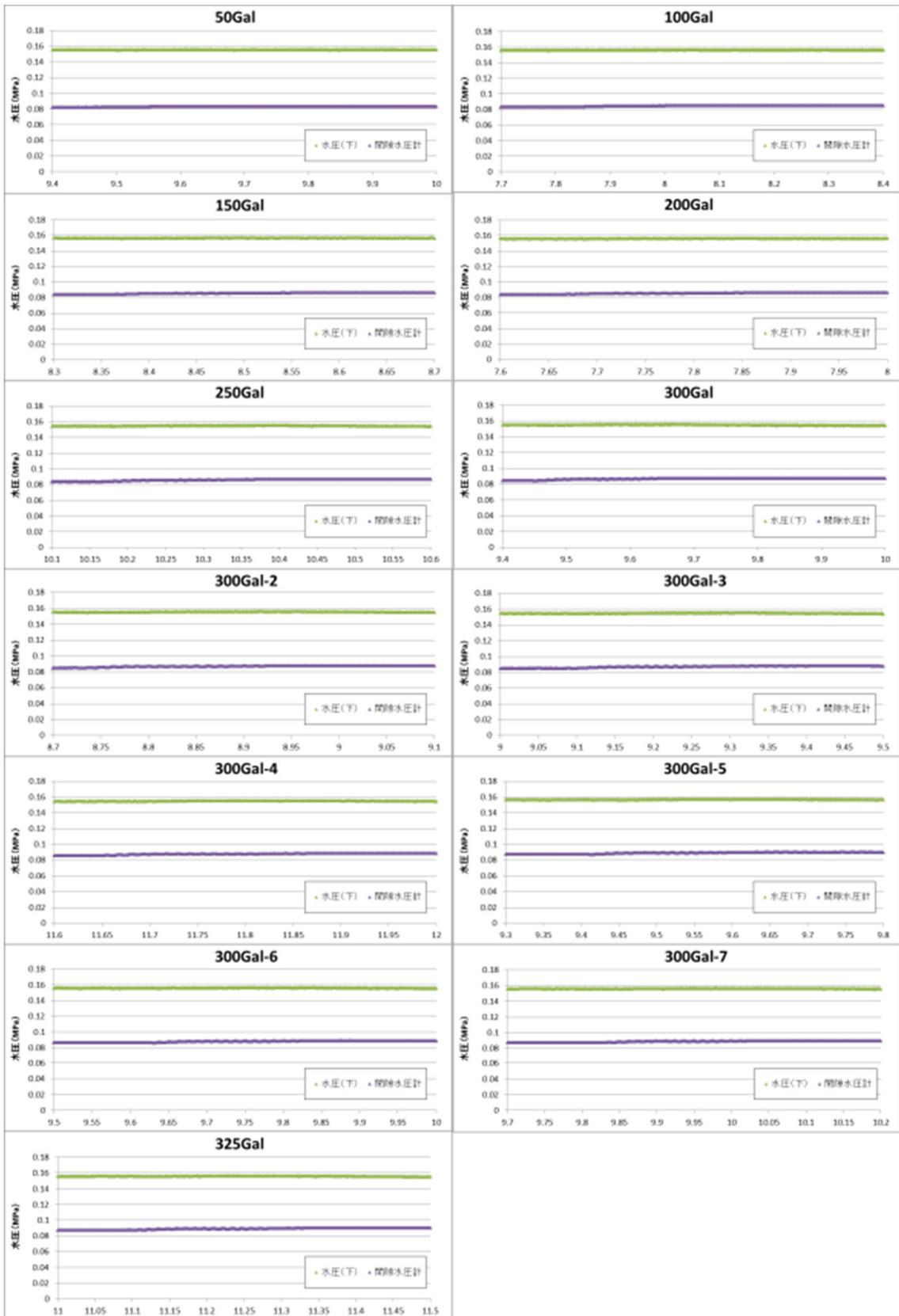


図 3-19 水圧及び間隙水圧の計測結果 (Case1)

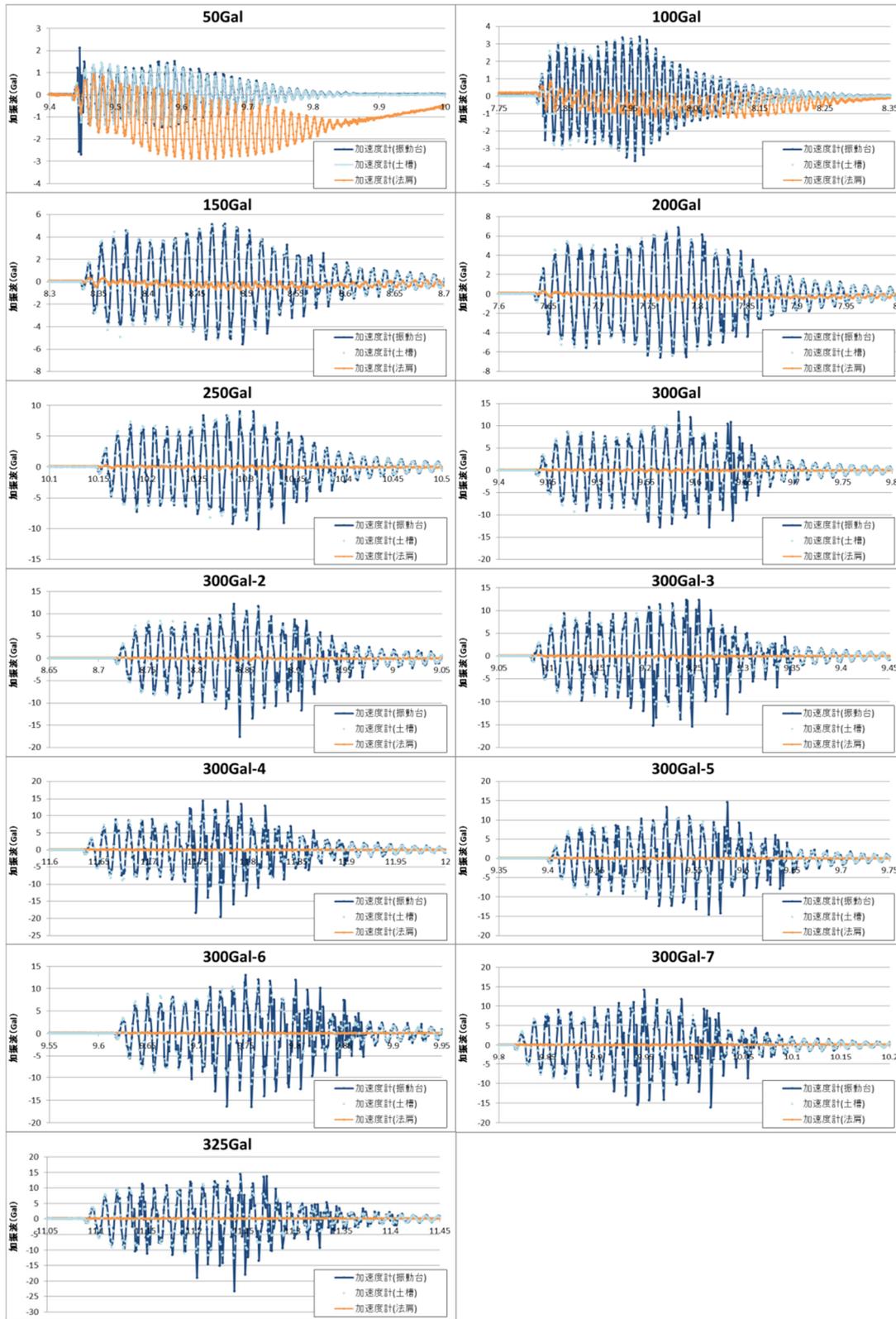
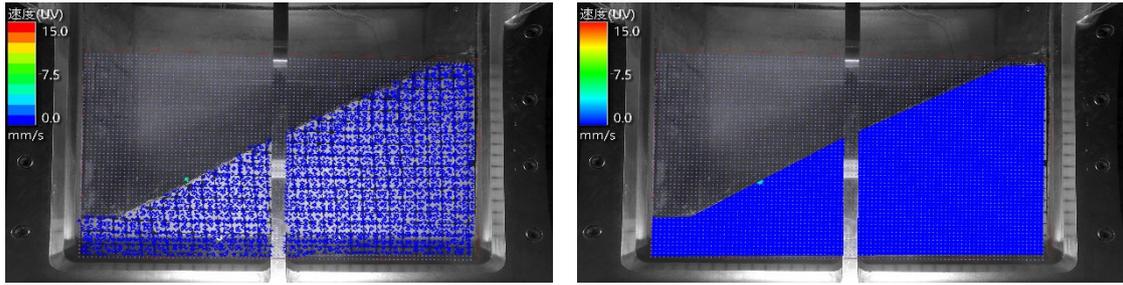
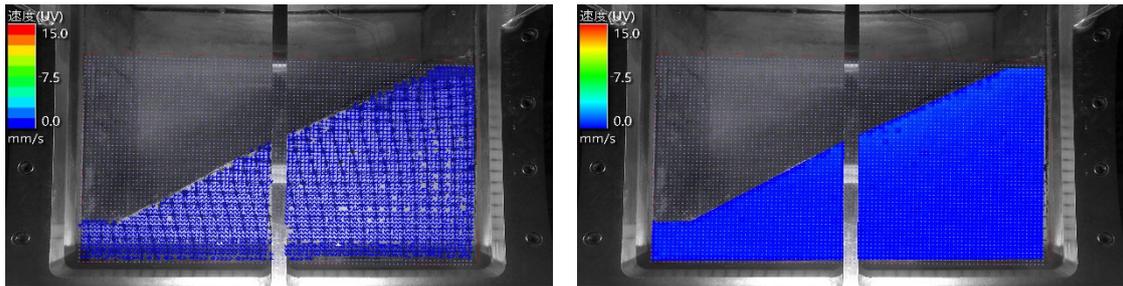


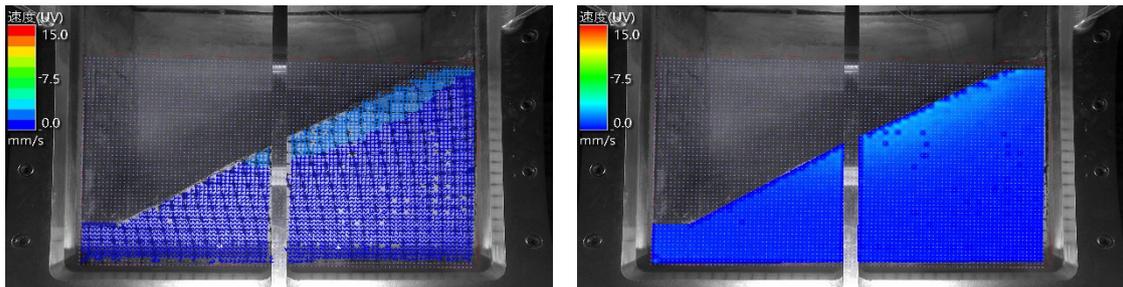
図 3-20 加速度計の計測結果 (Case1)



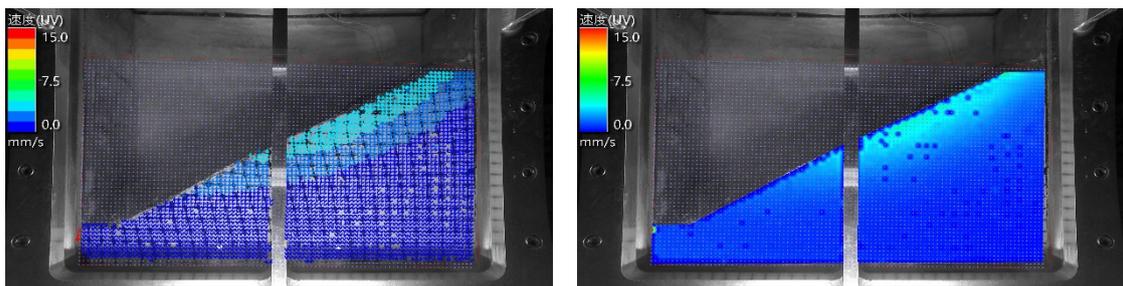
50gal 後



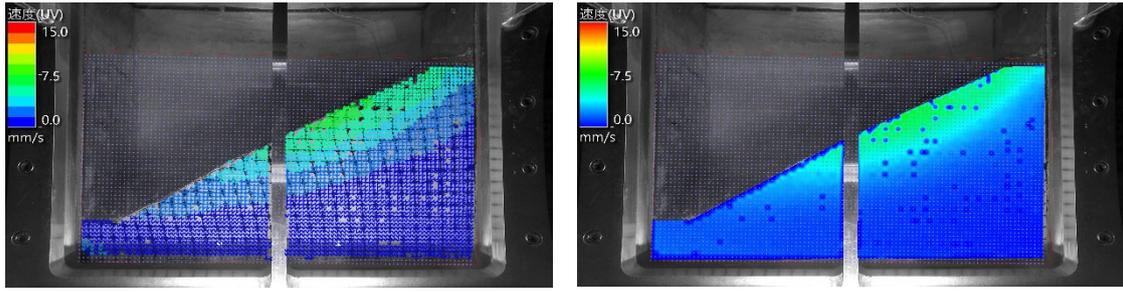
100gal 後



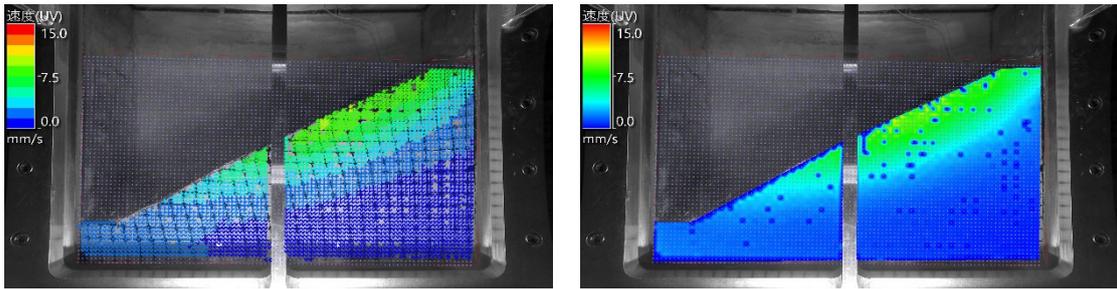
150gal 後



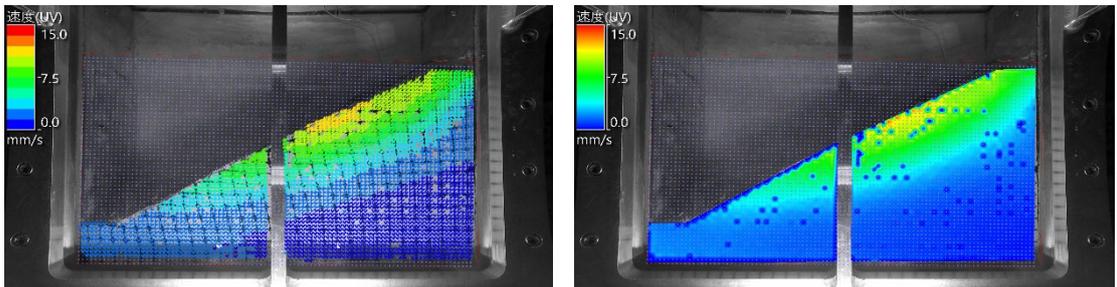
200gal 後



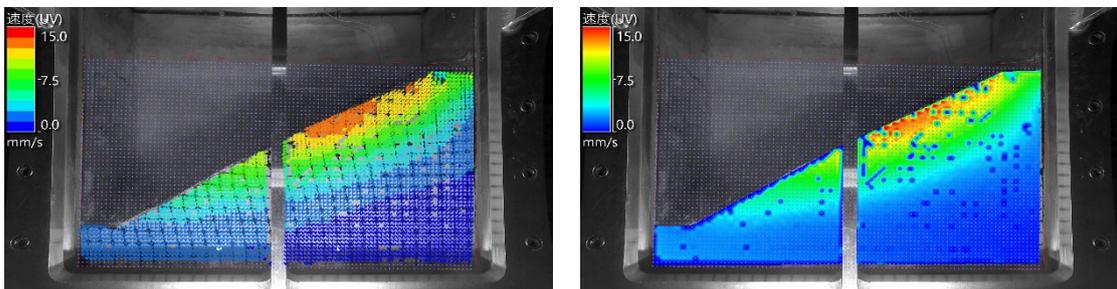
250gal 後



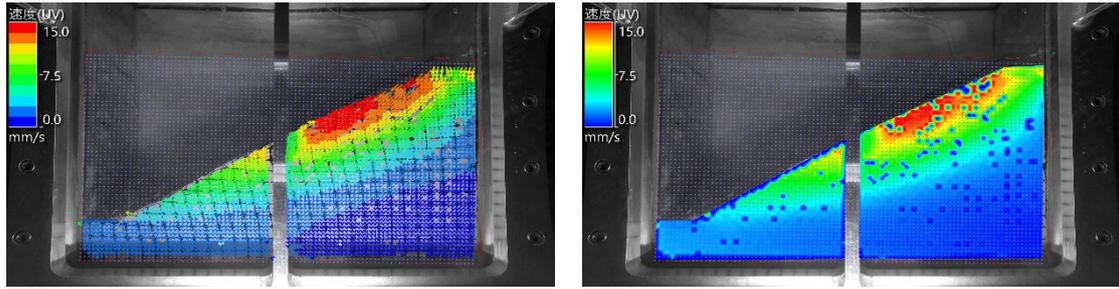
300gal (1 回目) 後



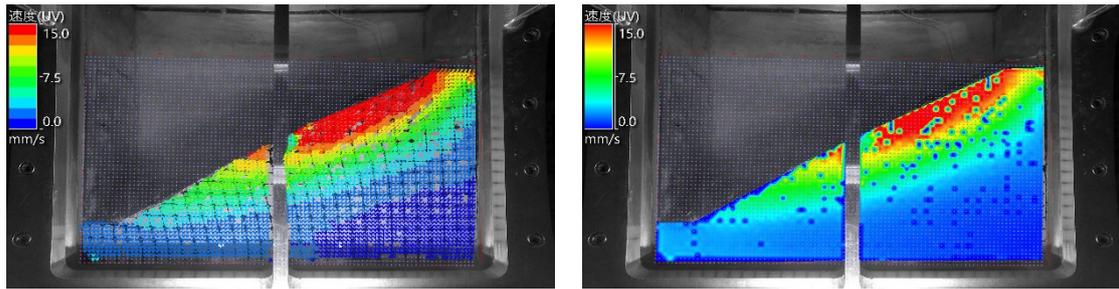
300gal (2 回目) 後



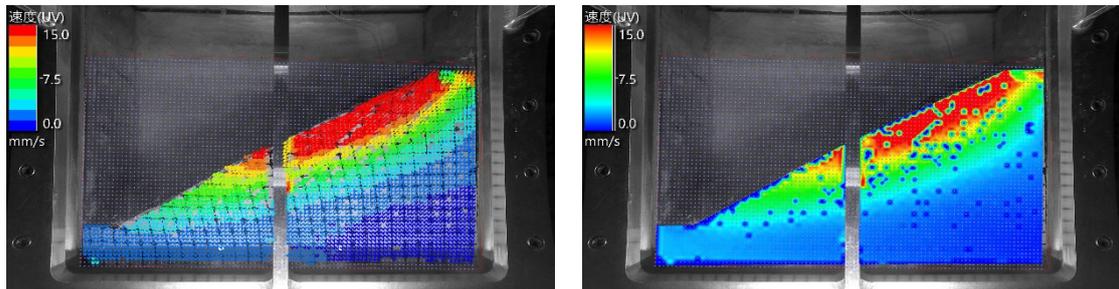
300gal (3 回目) 後



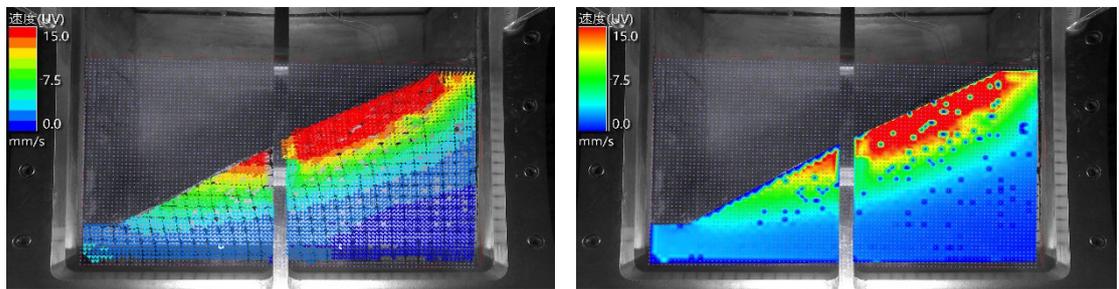
300gal (4 回目) 後



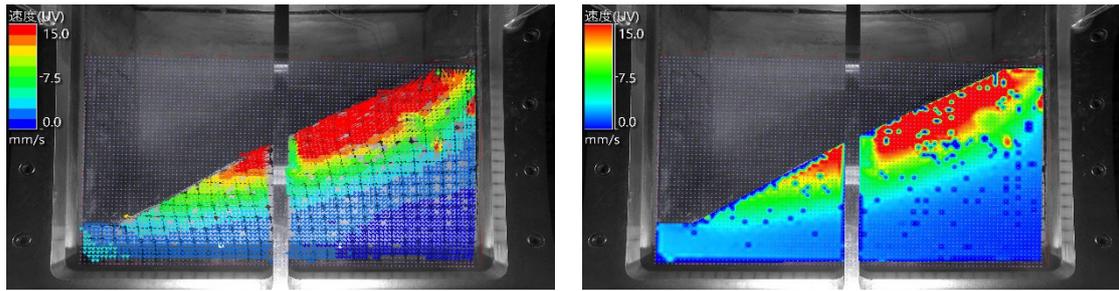
300gal (5 回目) 後



300gal (6 回目) 後



300gal (7 回目) 後



325gal 後

図 3-21 斜面の変位ベクトルと変位コンター (Case1)

表 3-5 試験後の一軸圧縮試験結果 (Case1)

測点	座標	一軸圧縮強度 (kN/m ²)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)
1	(-350, 65)	16.6	1.717	46.9
2	(-210, 140)	9.4	1.723	47.0
3	(-100, 205)	-	-	51.8

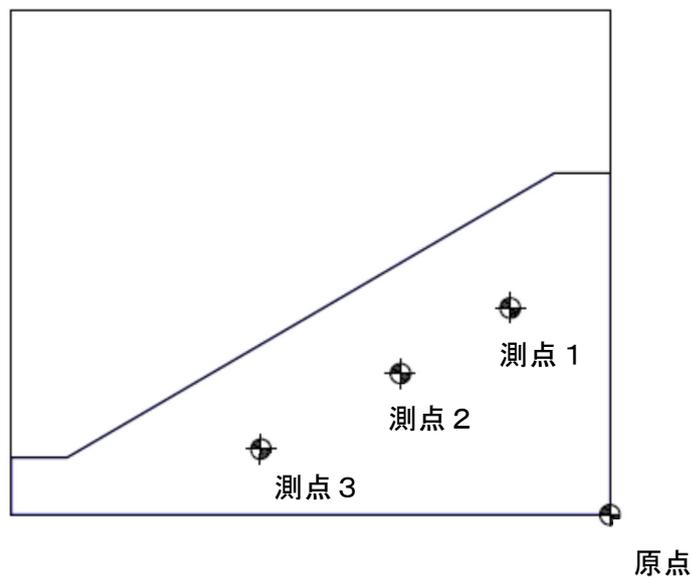


図 3-22 試験後のサンプリング地点 (Case1)

表 3-6 試験後のベーンせん断試験結果 (Case1)

測点	座標	ベーンせん断強度 (kN/m ²)
1	(-300, 65)	13.7
2	(-160, 140)	9.3
3	(-50, 205)	6.3

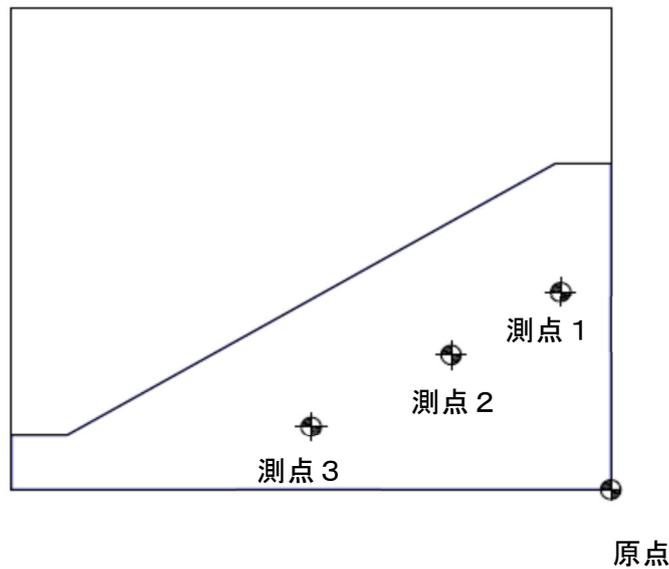


図 3-23 試験後の計測地点 (Case1)

3.2.2 CASE2

模型地盤の製作は遠心圧密で行い、 \sqrt{t} 法にて圧密沈下の収束を確認したのち、地盤のせん断強度及び含水比計測の結果から圧密終了の判断を行った。せん断強度は、模型地盤の法肩を基準として、67mm 間隔で5地点計測した。含水比試験は、チューブサンプリングを行い、法面表層から20mm 間隔で計測を実施したが、最深部のサンプルは採取できなかった。

計測地点と計測結果を図 3-24 及び図 3-25 に示す。

せん断強度及び含水比の計測結果が、概ね良好であることから、正規圧密地盤は作製できたものとし、斜面模型地盤を整形し、湛水したのち本試験に近い状態で地盤がなじむように遠心圧密を行ったのち、再度、ベーンせん断強度で確認した。せん断強度の計

測地点及び結果を図 3-26 及び図 3-27 に示す。

模型地盤の確認後、計測器を設置した。加速度計は天端幅中央の壁から 100mm・深度 30mm、天端幅中央の壁から 25mm・深度 150mm、法尻 30mm の壁から 100mm の 3 箇所に設置した。間隙水圧計は天端幅の中央の壁から 50mm、深度 100mm に設置した。計測器の設置地点・設置状況を、図 3-28 及び写真 3-1 に示す。

湛水し水深 15m の模型地盤について、30G の遠心加速度の下で加振実験を行った。加振波は 10 波の正弦波とし、入力加速度を段階的に 50Gal 増加させて加振した。250Gal 以降は、間隙水圧及び地盤が落ち着くまで約 5 分待って加振を行った。300Gal の 3～7 回目は 1 回の加振を 50 波の正弦波で実施した。

加振前の水圧は 0.23MPa 程度、間隙水圧は 0.15MPa であり、概ね設置条件を満足している。また、加振時は水圧、間隙水圧ともにわずかに増減する。間隙水圧は加振後の圧力がわずかに上昇する傾向がみられた。水圧計及び間隙水圧の計測結果を図 3-29 に示す。

振動台、実験土槽および地盤の加速度は入力波と同程度であることから、極端な増幅や地盤の非線形化による加速度の減衰は発生していない。なお、法肩の深度 15cm に設置した加速度計は、他の結果と比べて応答が極端に小さいが、過剰間隙水圧の発生もわずかであることから、地盤非線形化による応答の減衰ではなく、加速度計になんらかの不具合が発生している可能性が高い。計測結果を図 3-30 に示す。

崩壊形状の計測は、斜面模型の側面を撮影した動画から静止画を抽出し、PIV (Particle Image Velocimetry) 画像解析ソフトを用いて行った。PIV 画像解析ソフトは、目印となる粒子の配置パターンを画像処理によって識別し、そのパターンの移動位置から変位量を算出する。

動画撮影用のカメラは、遠心載荷実験で使用実績のある GoPro HERO4 Black を使用した。4K 画質で撮影した動画から 800 万画素の静止画に書き出し、ひずみ補正を行ってから解析を実施した。使用したカメラ及び設置状況を写真 3-22 に示す。PIV 解析による各加振終了後の変位ベクトルおよび変位コンター結果を図 3-31 に示す。なおこれらの変位は、50Gal 加振後の標点変位からの増分である。

遠心載荷実験終了後の地盤について、側面からサンプリングを行い、一軸圧縮強度試

験及びベーンせん断強度試験を実施した。サンプリング位置は、すべり面付近の3箇所とし、乱れていない位置からブロックサンプリングして一軸圧縮試験を実施した。試験結果を表 3-7 に示す。測点3のサンプリング地点は、トリミング後の供試体が自立困難の為、一軸圧縮試験を実施できなかった。サンプリング地点を図 3-32 に示す。ベーンせん断強度は一軸圧縮試験の計測地点から原点より50mm移動させた地点を計測地点とした。試験は計測器の設置が困難なためハンドベーンにて計測した。試験結果を表 3-8、計測地点図を図 3-33 に示す。

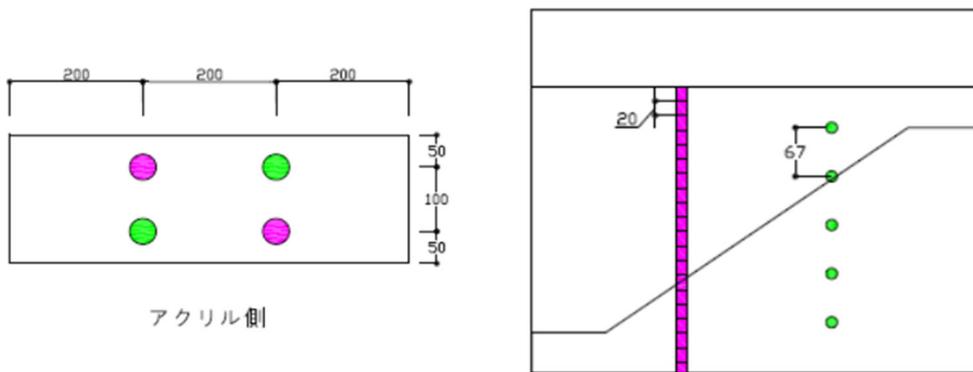


図 3-24 成層地盤の計測地点 (Case2)

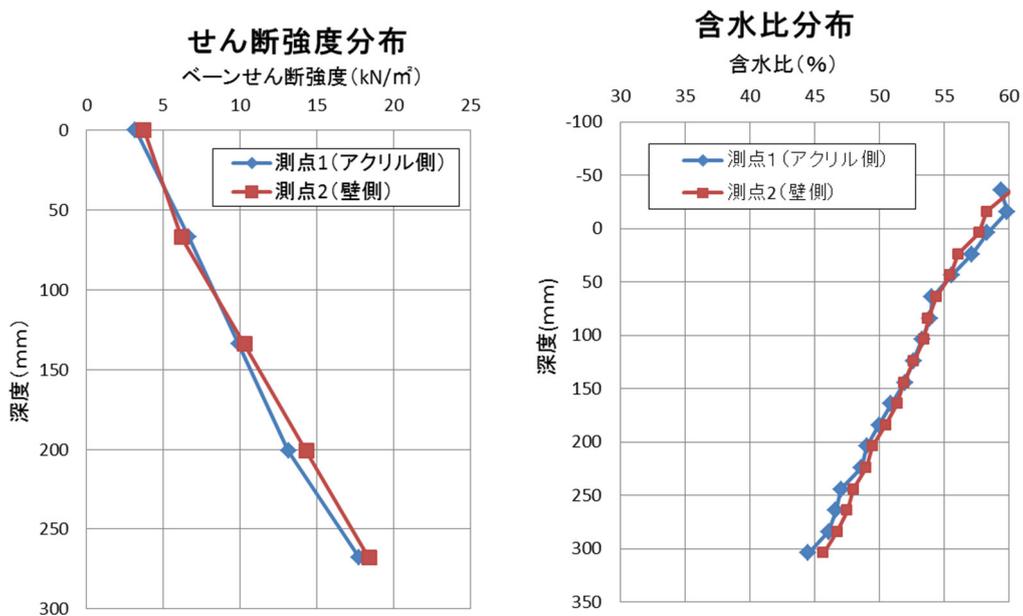


図 3-25 成層地盤の計測結果 (Case2)

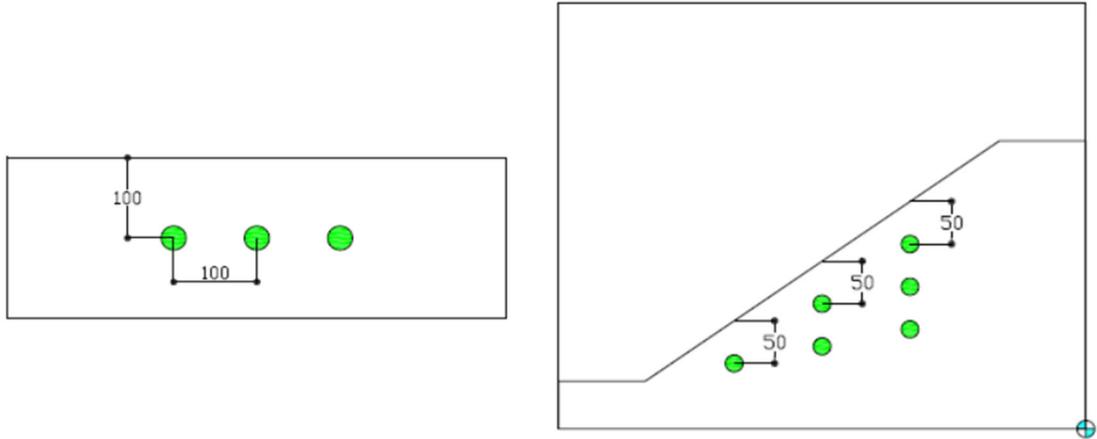


図 3-26 模型地盤の計測地点 (Case2)

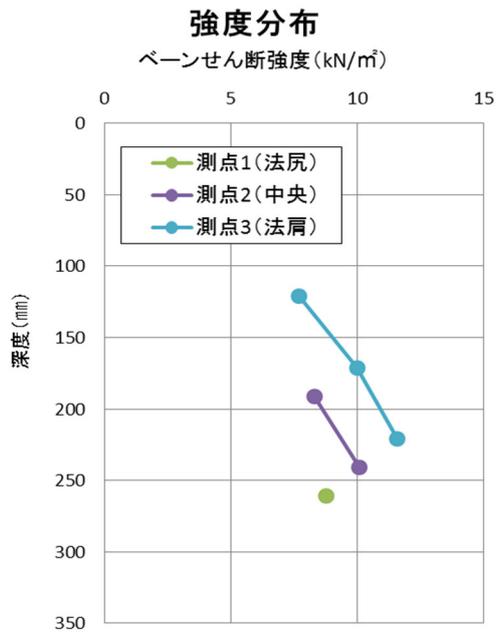


図 3-27 模型地盤の計測結果 (Case2)

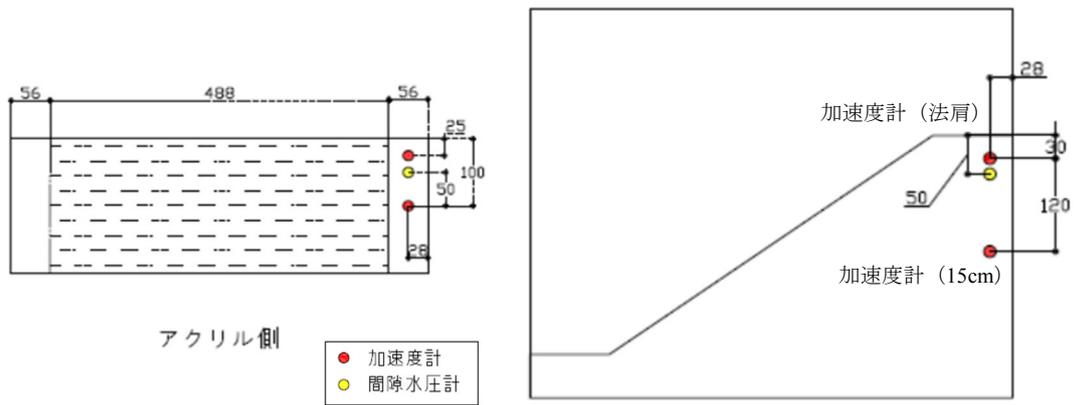


図 3-28 計測器の設置地点 (Case2)



写真 3-21 計測器の設置状況 (Case2)

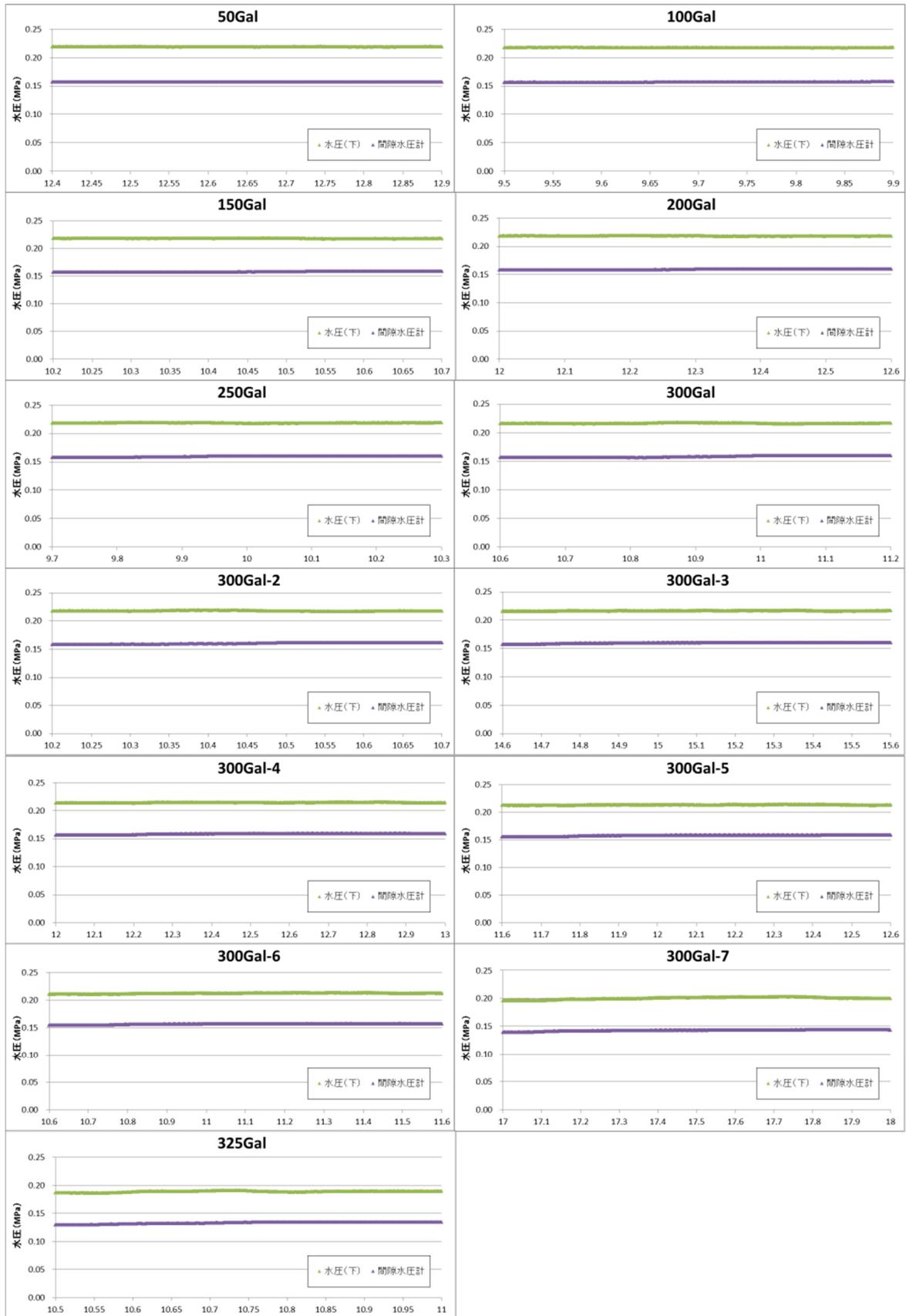


図 3-29 水圧及び間隙水圧の計測結果 (Case2)

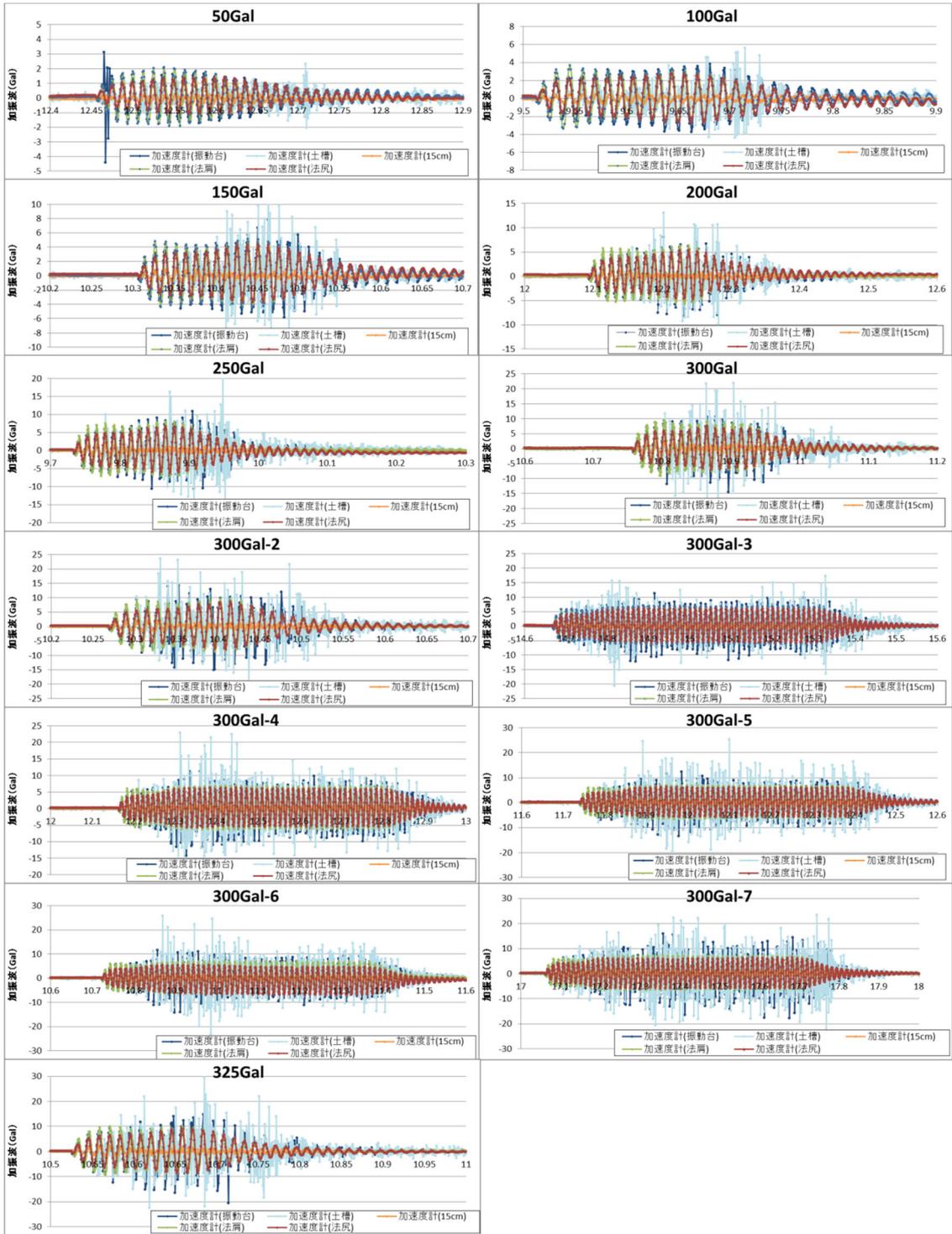


図 3-30 加速度計の計測結果 (Case2)

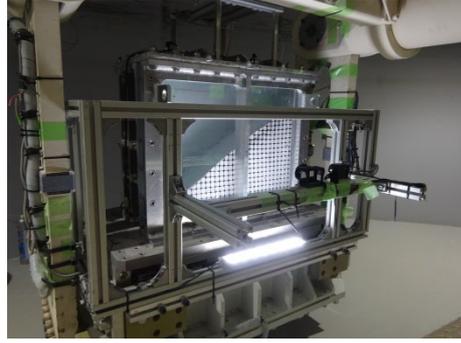
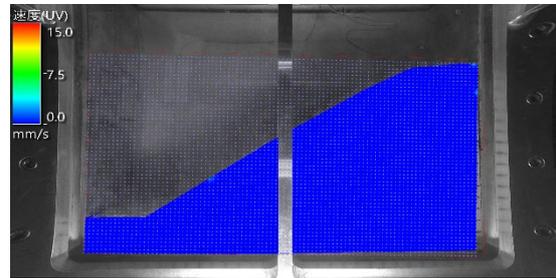
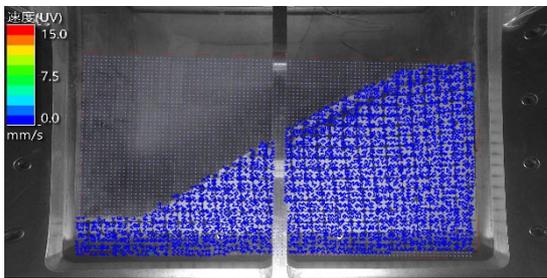
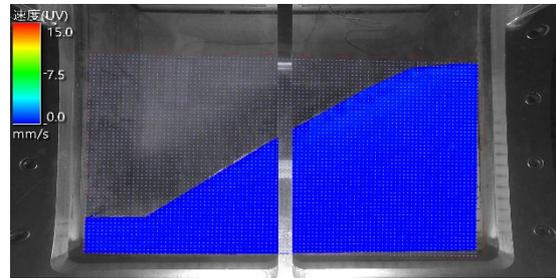
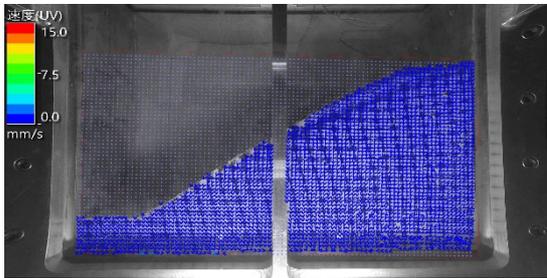


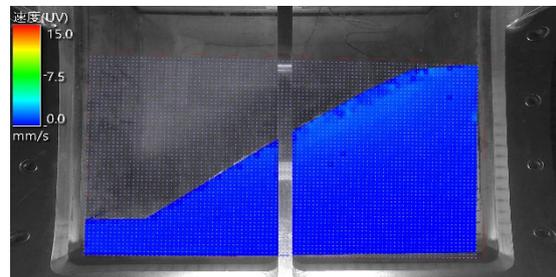
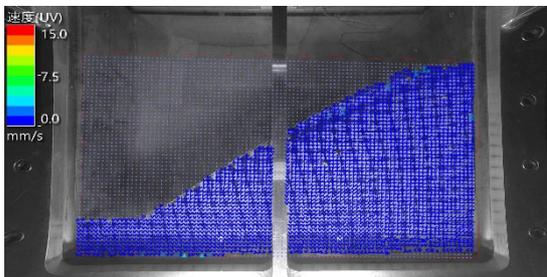
写真 3-22 収録カメラ及び設置状況 (Case2)



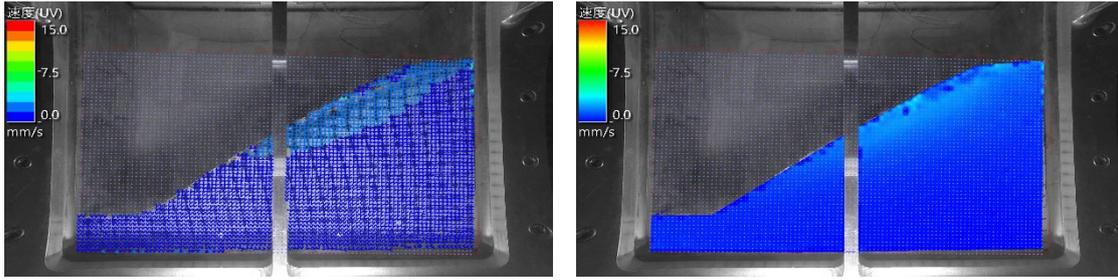
50gal 後



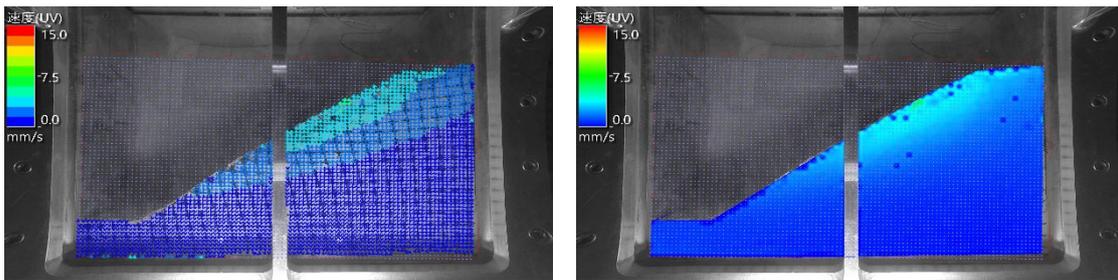
100gal 後



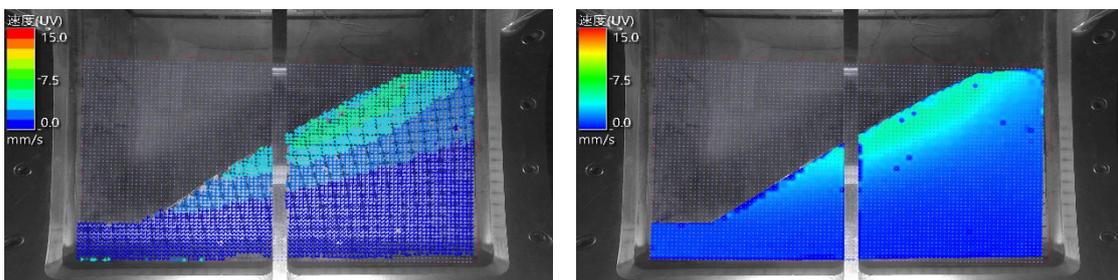
150gal 後



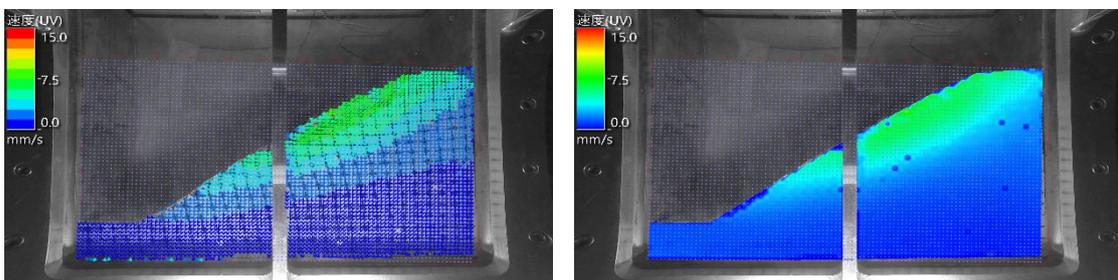
200gal 後



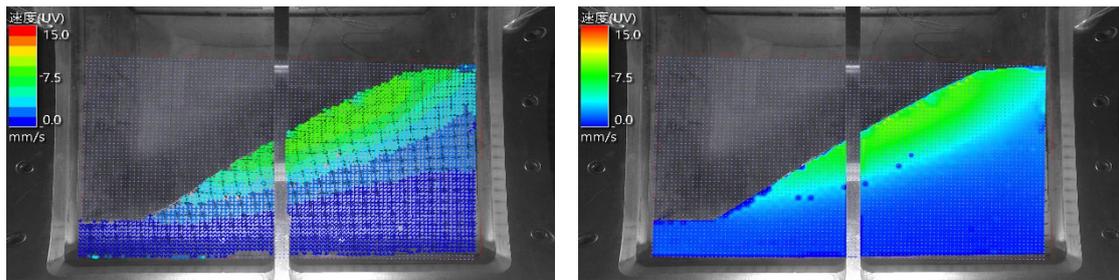
250gal 後



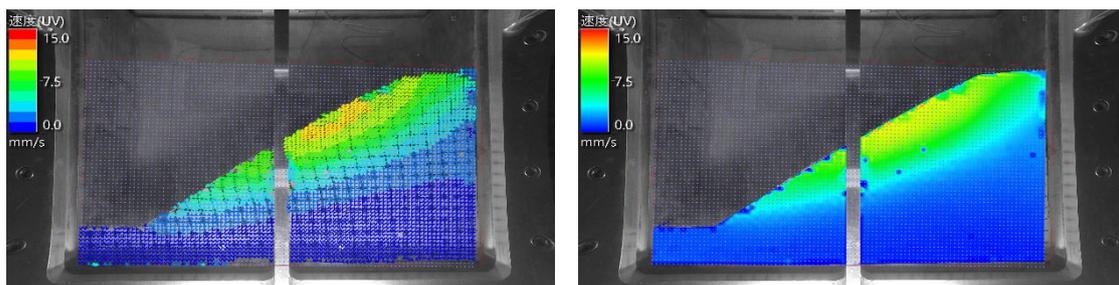
300gal (1 回目) 後



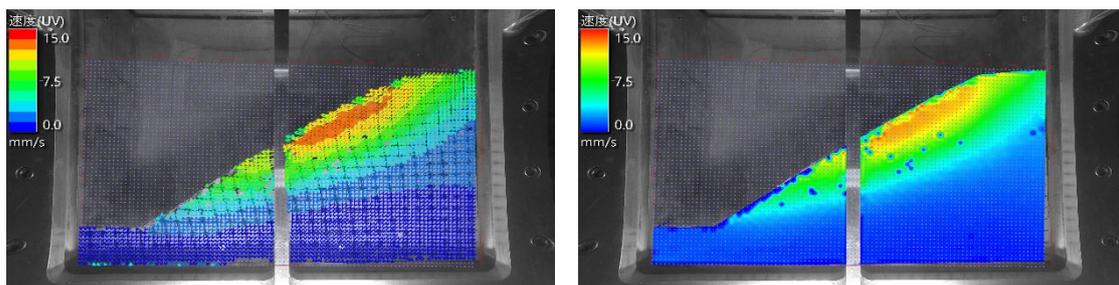
300gal (2 回目) 後



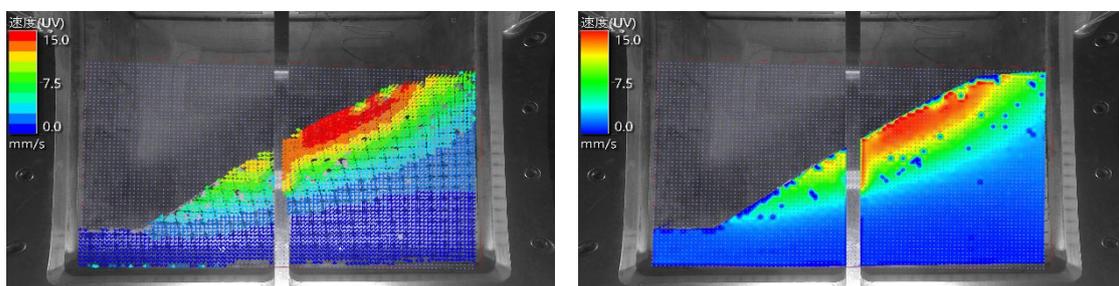
300gal (50 波 1 回目) 後



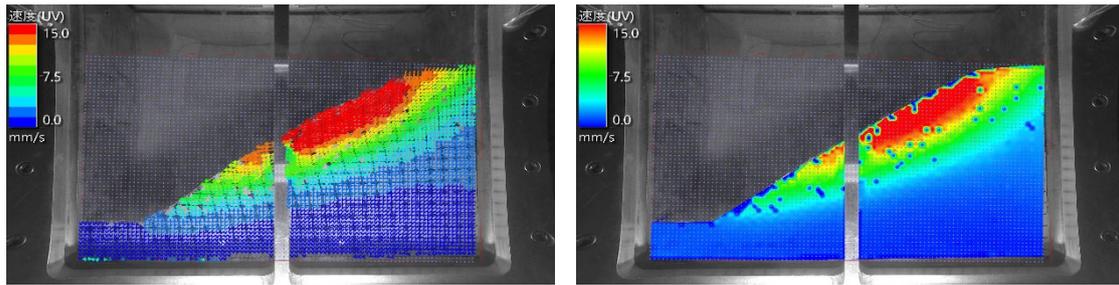
300gal (50 波 2 回目) 後



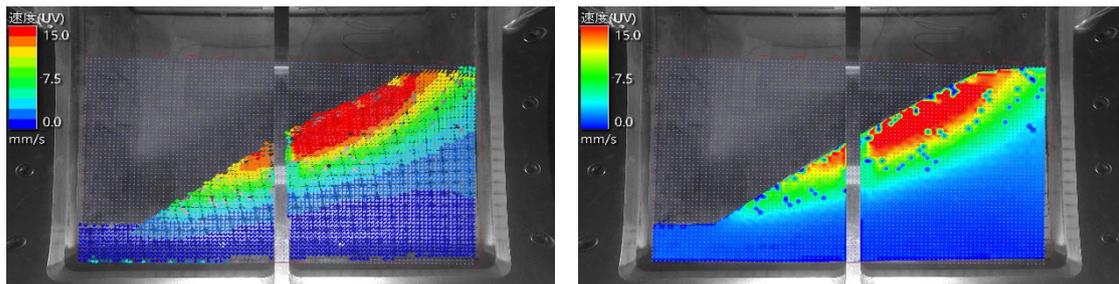
300gal (50 波 3 回目) 後



300gal (50 波 4 回目) 後



300gal (50 波 5 回目) 後



325gal 後

図 3-31 斜面の変位ベクトルと変位コンター (Case2)

表 3-7 試験後の一軸圧縮試験結果 (Case2)

測点	座標	一軸圧縮強度 (kN/m^2)	湿潤密度 (g/cm^3)	含水比 (%)
1	(-350, 100)	16.8	1.688	46.1
2	(-230, 170)	11.3	1.654	49.4
3	(-100, 250)	-	-	53.3

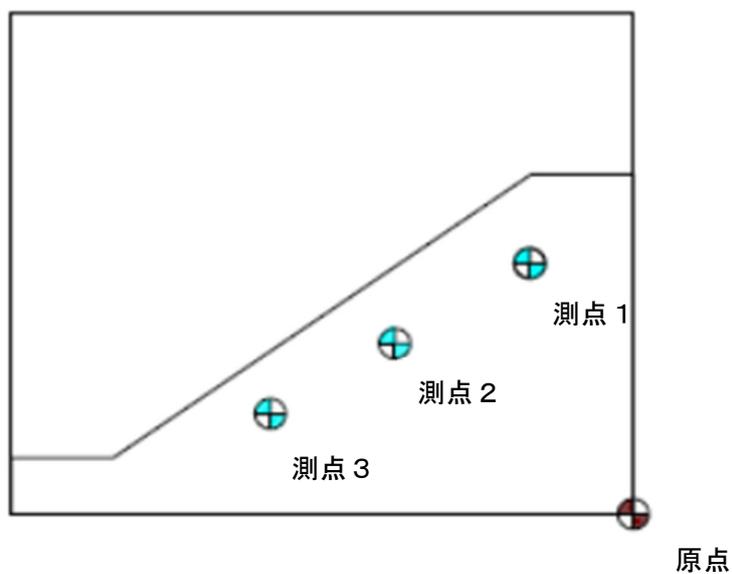


図 3-32 試験後のサンプリング地点 (Case2)

表 3-8 試験後のベーンせん断試験結果 (Case2)

測点	座標	ベーンせん断強度 (kN/m^2)
1	(-500, 300)	10.7
2	(-300, 100)	11.0
3	(-180, 170)	7.8

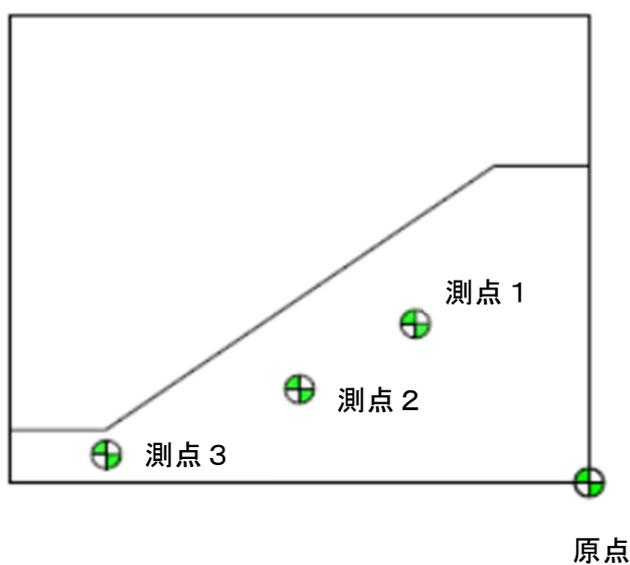


図 3-33 試験後の計測地点 (Case2)

3.2.3 CASE3

模型地盤の製作は遠心圧密で行い、 \sqrt{t} 法にて圧密沈下の収束を確認したのち、地盤のせん断強度及び含水比計測の結果から圧密終了の判断を行った。せん断強度は、模型地盤の法肩を基準として、67mm 間隔で5 地点計測した。含水比試験は、チューブサンプリングを行い、法面表層から 20mm 間隔で計測を実施したが、最深部のサンプルは採取できなかった。計測地点と計測結果を図 3-34 及び図 3-35 に示す。

せん断強度及び含水比の計測結果が、概ね良好であることから、成層地盤は作製できたものとし、斜面模型地盤を整形し、湛水したのち本試験に近い状態で地盤がなじむように遠心圧密を行ったのち、再度、ベーンせん断強度で確認した。せん断強度の計測地点及び結果を図 3-36 及び図 3-37 に示す。

模型地盤の確認後、計測器を設置した。加速度計は天端幅中央の壁から 100mm・深度 30mm と、天端幅中央の壁から 25mm・深度 150mm の2 箇所を設置した。間隙水圧計は天端幅の中央の壁から 50mm、深度 100mm に設置した。計測器の設置地点・設置状況を、図 3-38 及び写真 3-23 に示す。

湛水し水深 23mの模型地盤について、30G の遠心加速度の下で加振実験を行った。加振波は 10 波の正弦波とし、入力加速度を段階的に 50Gal 増加させて加振した。250Gal 以降は、間隙水圧及び地盤が落ち着くまで約 5 分待って加振を行った。

加振前の水圧は 0.23MPa 程度、間隙水圧は 0.14MPa 程度であり、概ね設置条件を満足している。また、加振時は水圧、間隙水圧ともにわずかに増減する。間隙水圧は加振後の圧力がわずかに上昇する傾向がみられた。水圧計及び間隙水圧の計測結果を図 3-39 に示す。

振動台、実験土槽および地盤（法肩位深 15cm）の加速度は入力波と同程度であることから、極端な増幅や地盤の非線形化による加速度の減衰は発生していない。なお、法肩に設置した加速度計は、他の結果と比べて応答が極端に小さいが、過剰間隙水圧の発生もわずかであることから、地盤非線形化による応答の減衰ではなく、加速度計の不具合（水中での防水機能不良）によるものである。計測結果を図 3-40 に示す。

崩壊形状の計測は、斜面模型の側面を撮影した動画から静止画を抽出し、PIV (Particle Image Velocimetry) 画像解析ソフトを用いて行った。PIV 画像解析ソフトは、目印とな

る粒子の配置パターンを画像処理によって識別し、そのパターンの移動位置から変位量を算出する。

動画撮影用のカメラは、遠心载荷実験で使用実績のある GoPro HERO4 Black を使用した。4K 画質で撮影した動画から 800 万画素の静止画に書き出し、ひずみ補正を行ってから解析を実施した。カメラの設置状況を写真 3-24 に示す。PIV 解析による各加振終了後の変位ベクトルおよび変位コンター結果を図 3-41 に示す。なおこれらの変位は、50Gal 加振後の標点変位からの増分である。

遠心载荷実験終了後の地盤について、側面からサンプリングを行い、一軸圧縮強度試験及びベーンせん断強度試験を実施した。サンプリング位置は、すべり面付近の 3 箇所とし、乱れていない位置からブロックサンプリングして一軸圧縮試験を実施した。試験結果を表 3-9 に示す。測点 3 のサンプリング地点は、トリミング後の供試体が自立困難の為、一軸圧縮試験を実施できなかった。サンプリング地点を図 3-42 に示す。

ベーンせん断強度は一軸圧縮試験の計測地点から原点よりに 50mm 移動させた地点を計測地点とした。試験は計測器の設置が困難なためハンドベーンにて計測した。試験結果を表 3-10、計測地点図を図 3-43 に示す。

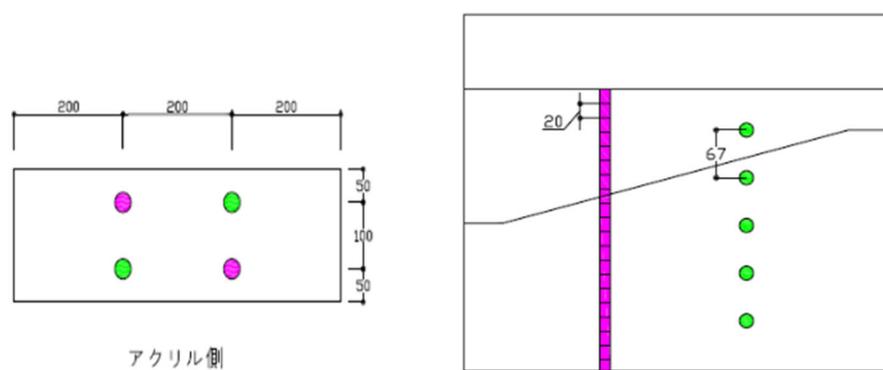


図 3-34 成層地盤の計測地点 (Case3)

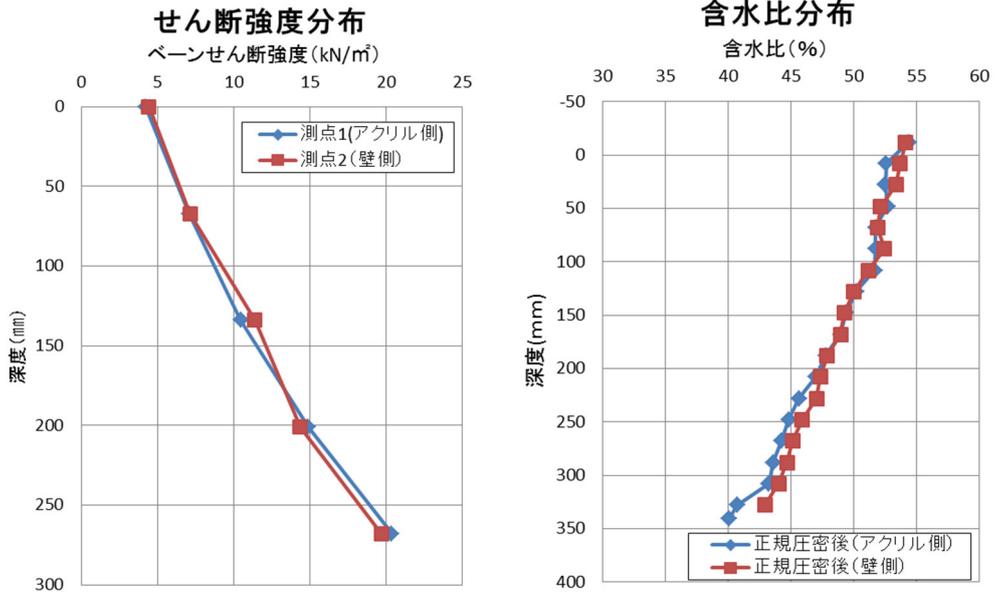


図 3-35 成層地盤の計測結果 (Case3)

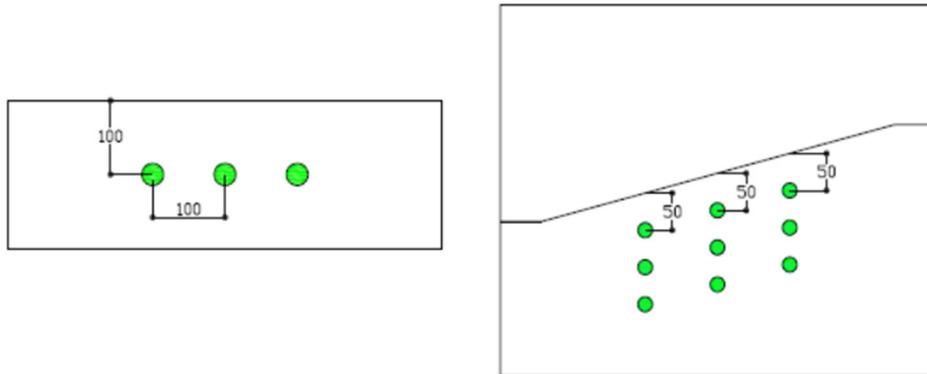


図 3-36 模型地盤の計測地点 (Case3)

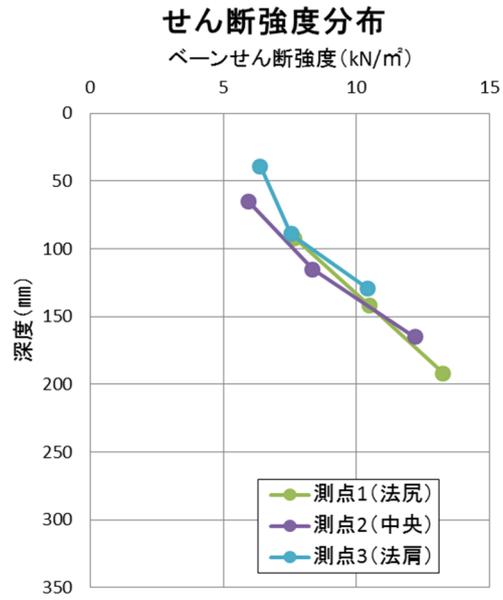


図 3-37 模型地盤の計測結果 (Case3)

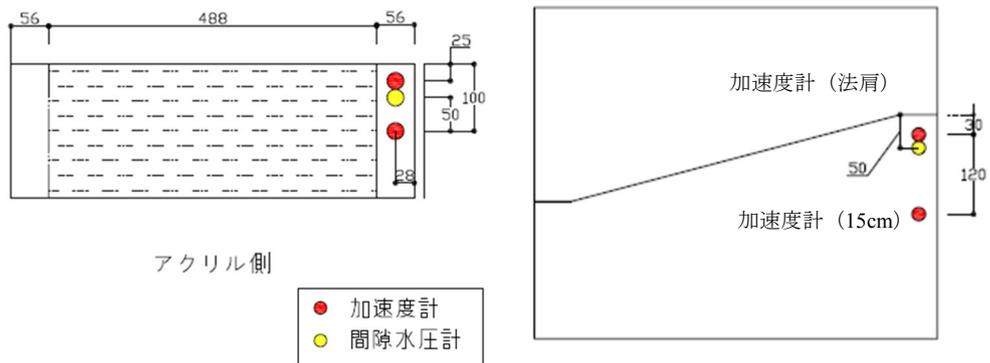


図 3-38 計測器の設置地点 (Case3)



写真 3-23 計測器の設置状況 (Case3)

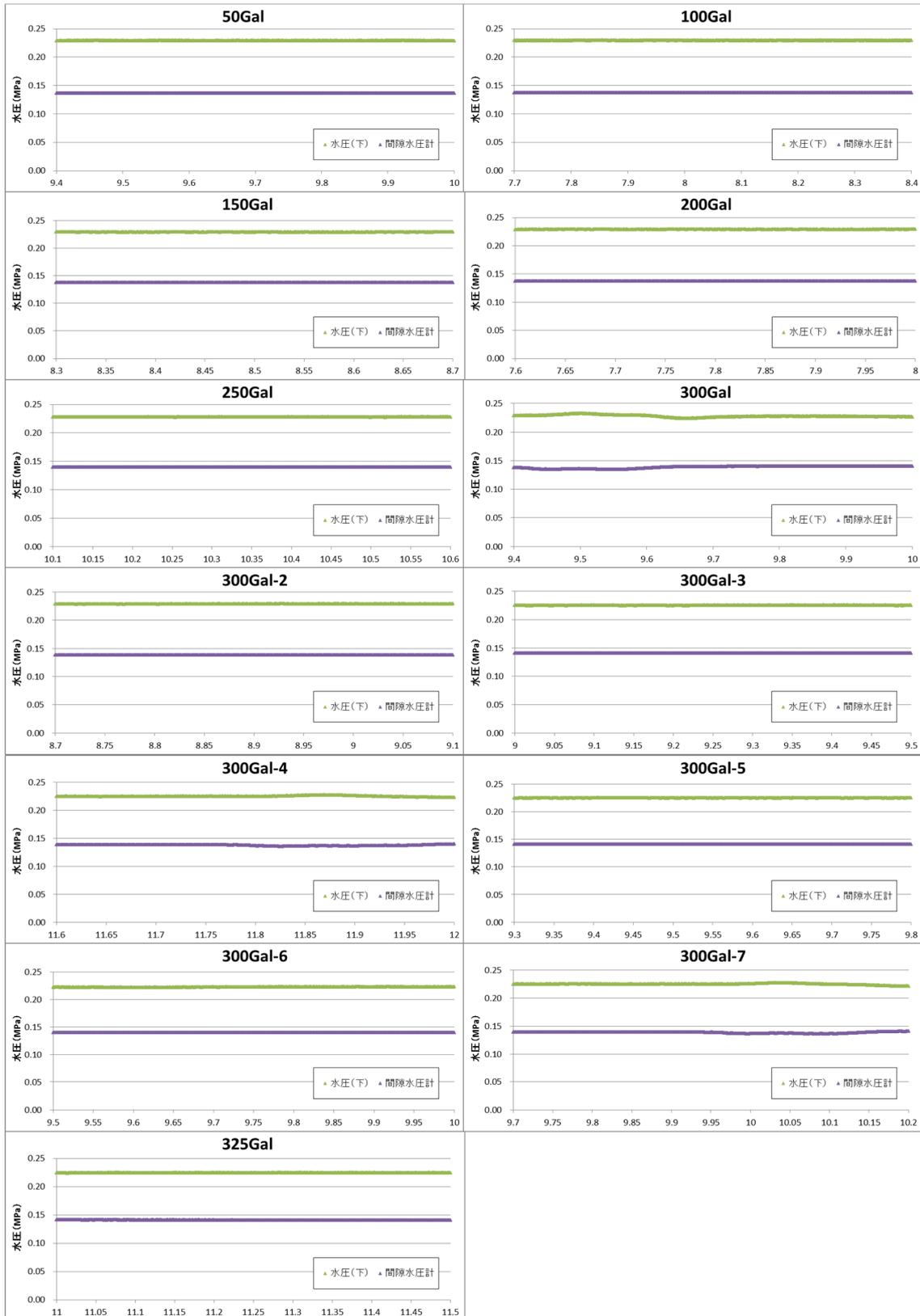


図 3-39 水圧及び間隙水圧の計測結果 (Case3)

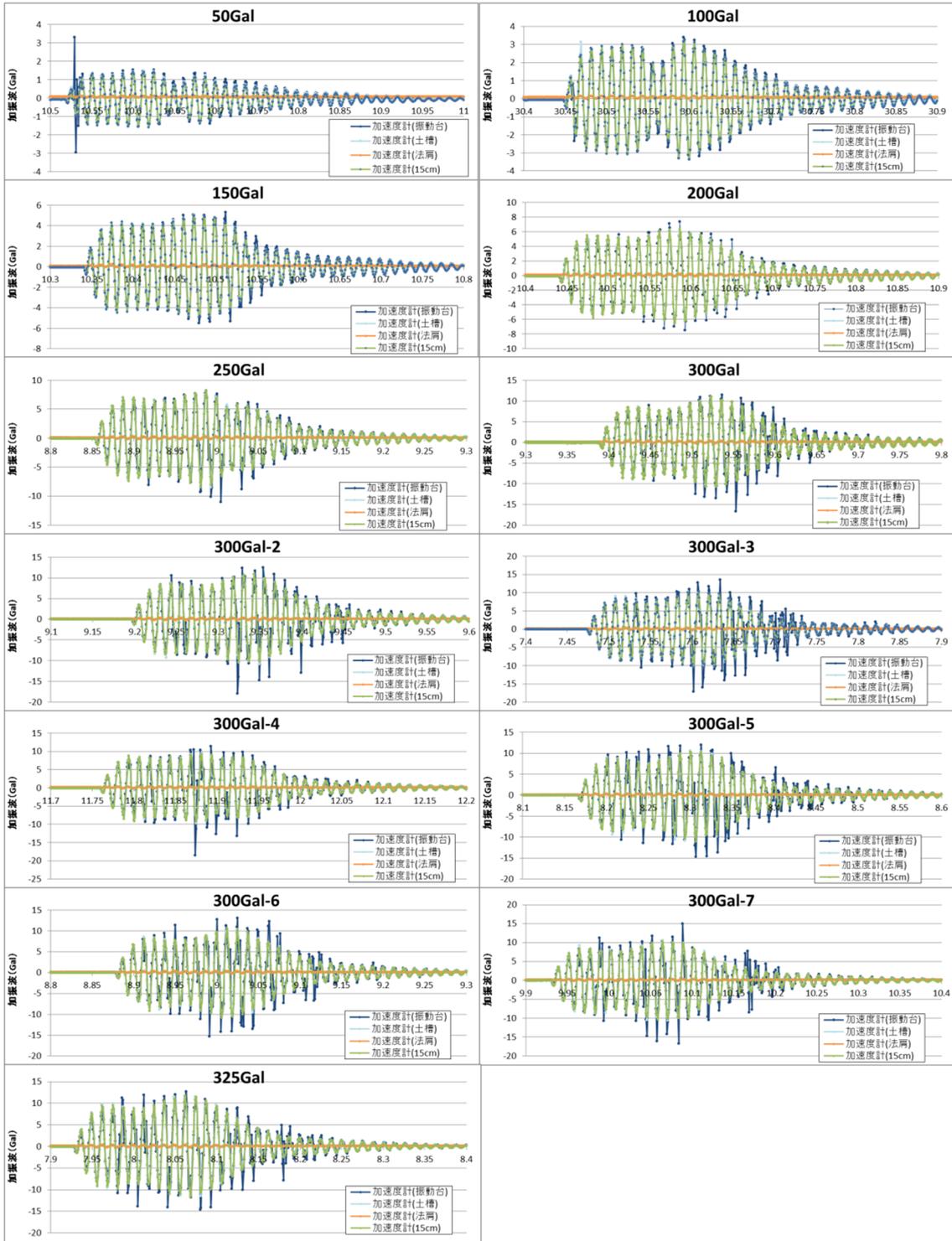


図 3-40 加速度計の計測結果 (Case3)

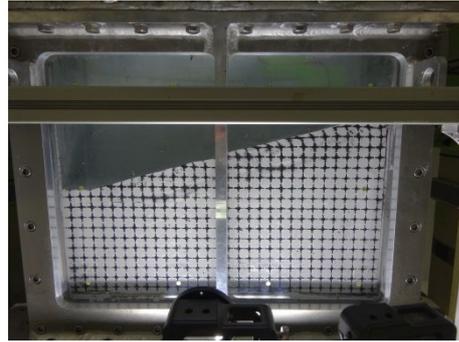
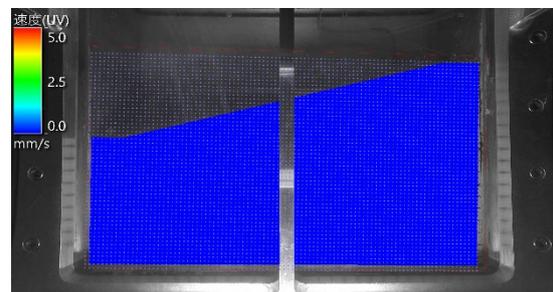
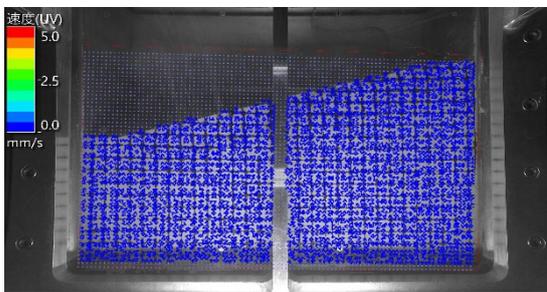
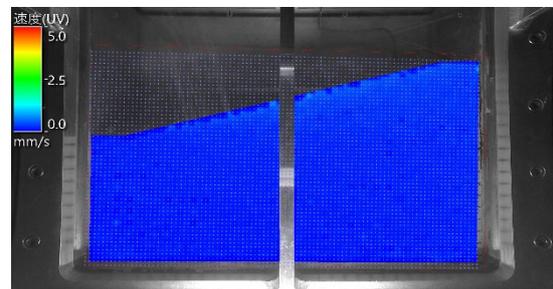
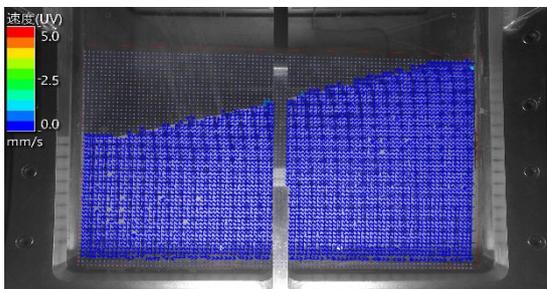


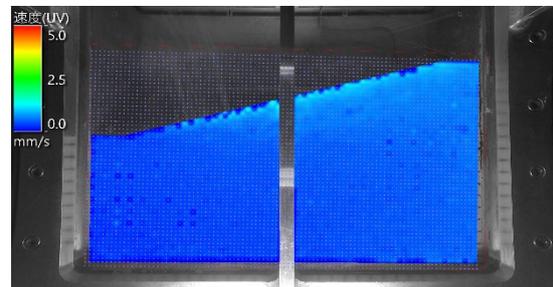
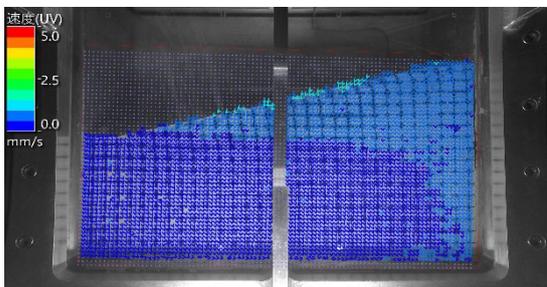
写真 3-24 収録カメラ及び設置状況 (Case3)



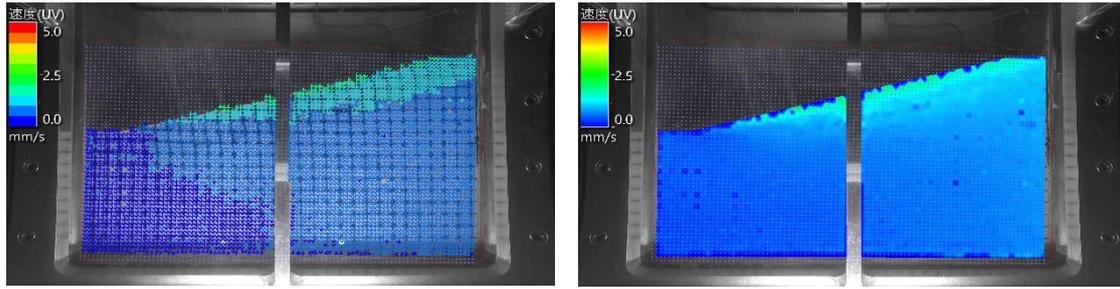
50gal 後



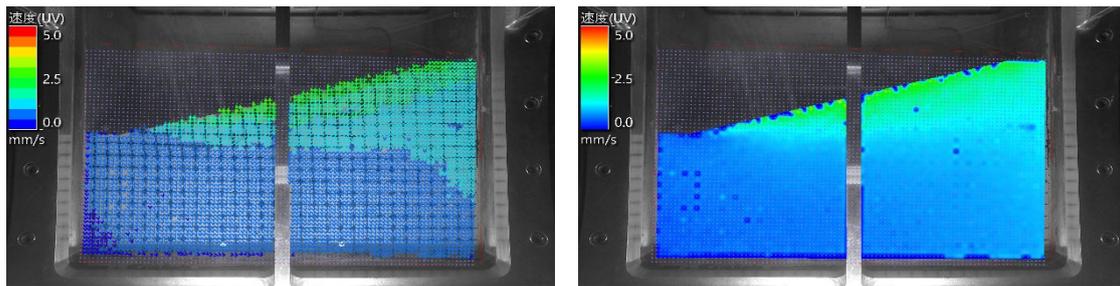
100gal 後



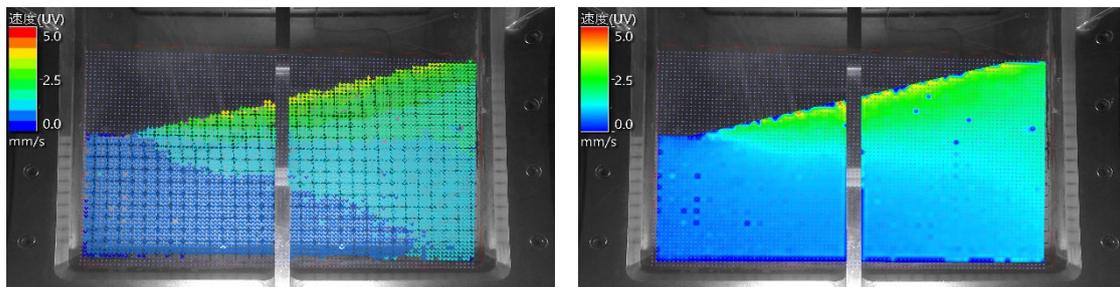
150gal 後



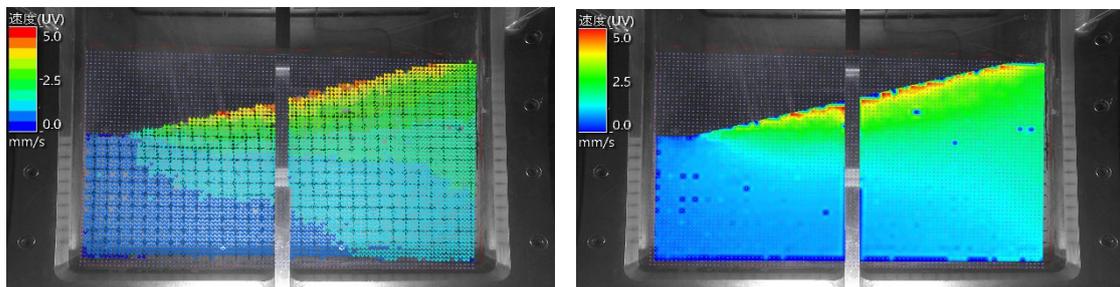
200gal 後



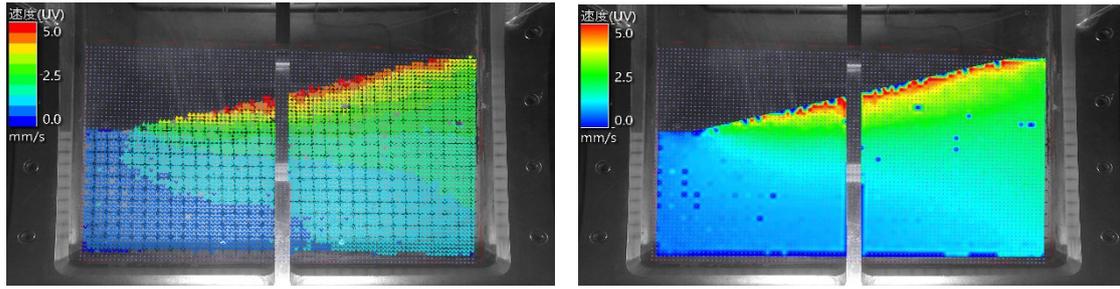
250gal 後



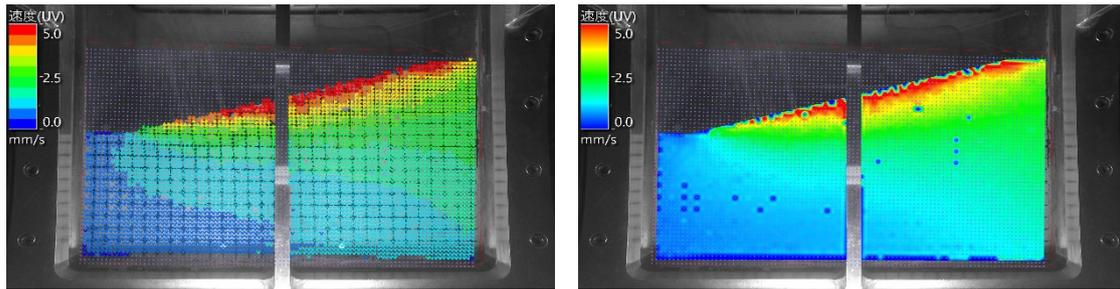
300gal (1 回目) 後



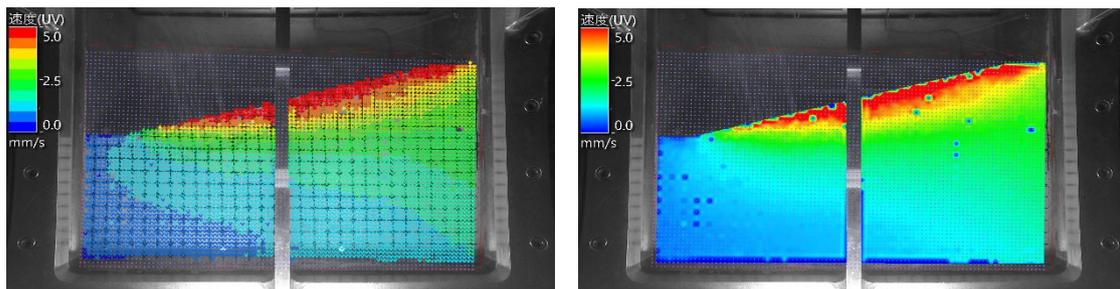
300gal (2 回目) 後



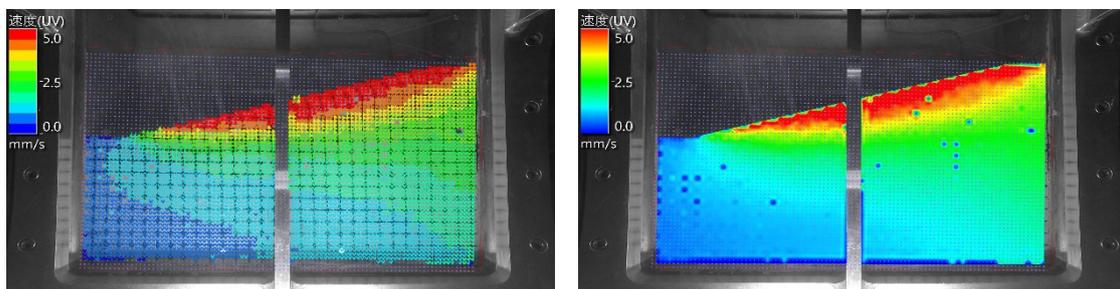
300gal (3 回目) 後



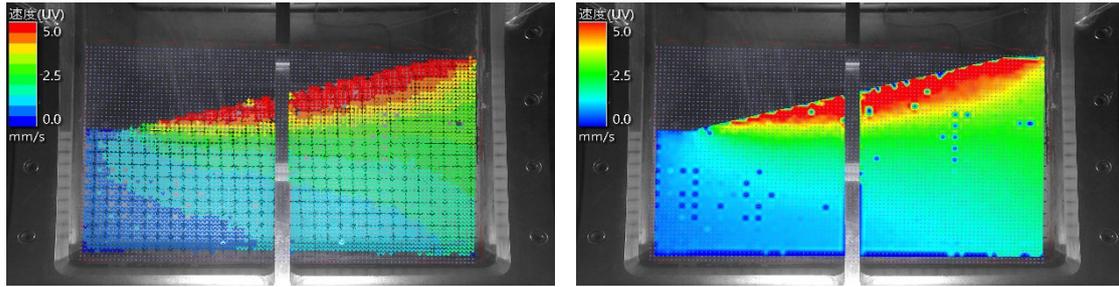
300gal (4 回目) 後



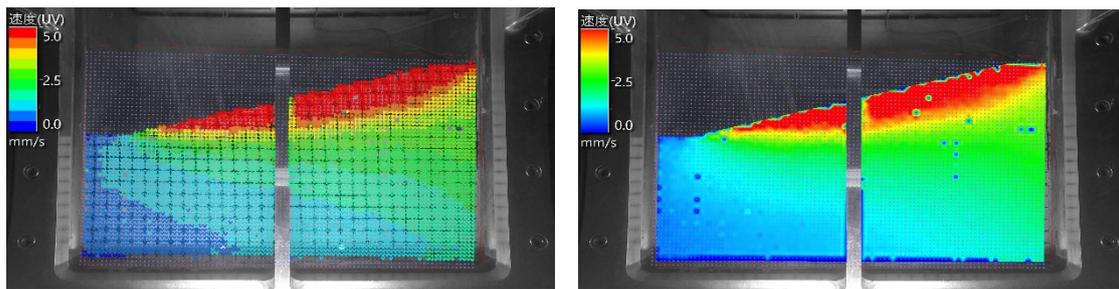
300gal (5 回目) 後



300gal (6 回目) 後



300gal (7 回目) 後



325gal 後

図 3-41 斜面の変位ベクトルと変位コンター (Case3)

表 3-9 試験後の一軸圧縮試験結果 (Case3)

測点	座標	一軸圧縮強度 (kN/m^2)	湿潤密度 (g/cm^3)	含水比 (%)
1	(-450, 170)	12.8	1.730	47.1
2	(-250, 200)	9.6	1.649	49.2
3	(-100, 250)	-	-	-

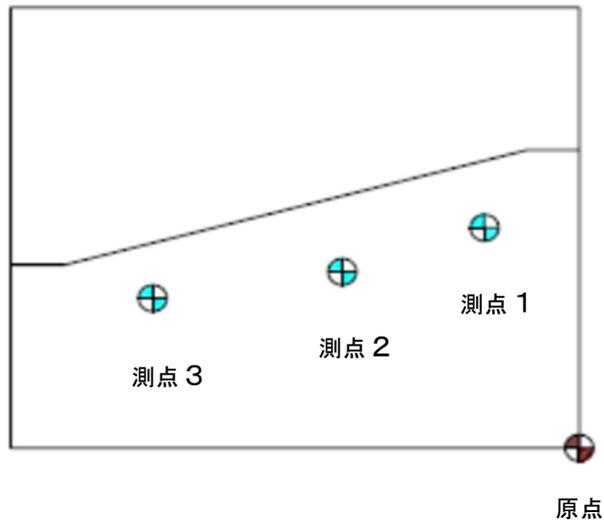


図 3-42 試験後のサンプリング地点 (Case3)

表 3-10 試験後のベーンせん断試験結果 (Case3)

測点	座標	ベーンせん断強度 (kN/m^2)
1	(-400, 170)	13.7
2	(-200, 200)	9.3
3	(-50, 250)	6.3

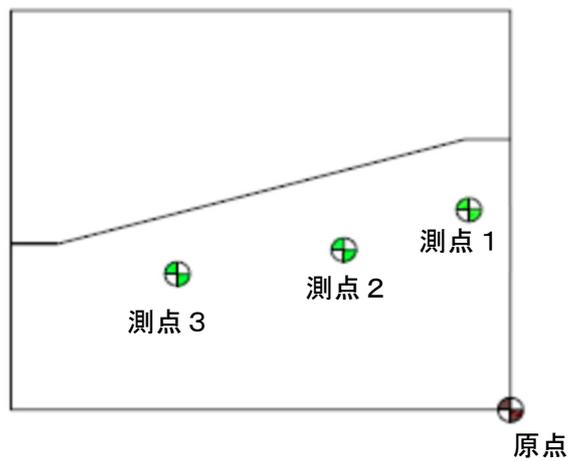


図 3-43 試験後の計測地点 (Case3)

3.3 実験結果に基づく斜面の崩壊挙動の分析

各実験の崩壊挙動として、ケース 4 の静的遠心実験では明瞭なすべり面を形成しているが、他の実験では明瞭なすべり面を形成していない。斜面安定解析の適用性の検討(4 章で検討)では、実験によるすべり面位置やそれが発生した震度などの崩壊状況との比較が重要となる。ここでは、ケース 4 のすべり面形成に至る斜面模型の変形挙動を基準として、他ケースの崩壊状況を分析する。

各実験ケースの崩壊状況の分析に先立ち、PIV 解析で変位を求めた標点のうち、斜面内で 5 断面周辺に位置する標点を抽出し、各断面の深度方向に沿った標点の水平変位分布と隣接する 2 つの標点における水平変位の差を標点間距離(約 6mm)で除すことにより求めたせん断ひずみの分布を求めた。対象とする 5 断面は土槽端部(法尻側)から 150、250、350、450、550mm の位置である。なお、動的遠心実験(ケース 1~ケース 3)については、50Gal 加振後からの増分値で示す。静的遠心実験(ケース 4)については、傾斜開始時(0°)からの増分値で示す。ケース 1~3 の加振加速度、ケース 4 の傾斜角に応じた水平変位とせん断ひずみ分布を、図 3-44~図 3-47 に示す。図中の左は変位分布、右はせん断ひずみ分布を示している。

まず、基準とするケース 4 の崩壊状況として、図 3-47 に示した傾斜角 12°、17°、19°の水平変位とせん断ひずみの分布に着目する。傾斜角 12°についてみると、法肩断面の断面最上部とその左断面の法面から 6cm ぐらいの位置で不連続な水平変位とせん断ひずみの増加が認められる。傾斜角 17°についてみると、法肩断面から 2 番目、3 番目の位置においても法面から 4~6cm の位置にて水平変位が不連続となり、その位置にてせん断ひずみの増加が認められる。傾斜角 19°についてみると、せん断ひずみが大きな深度にてその値が増大し、0.1 から 0.2 (10%~20%) 程度の大きさとなっている。傾斜角が 19.5°に増加した後、各断面にてせん断ひずみが大きな位置にて、その値が急増、つまりすべり面が形成されている。

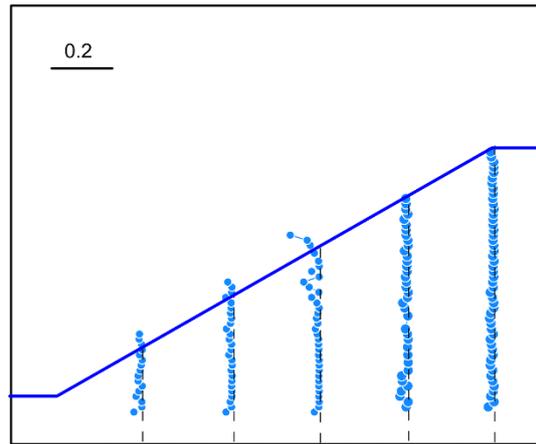
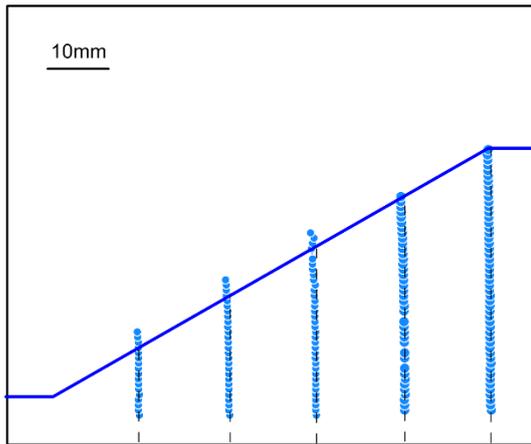
次に、ケース 1 の崩壊状況として、図 3-44 に示した 200Gal、300Gal(1 回目)、300Gal(2 回目)加振後の水平変位とせん断ひずみの分布に着目する。200Gal 加振後についてみると、斜面中央断面にて深さ 6cm 程度から法面まで水平変位が直線的に増加し、せん断

ひずみも 0.05～1.0 (5%～10%) 程度の値となっている。その左断面においても、深さ 5cm 程度から法面まで水平変位が直線的に増加し、せん断ひずみも 0.05 (5%) 程度の値となっている。静的遠心実験と異なり、斜面中央から下部にかけての変形が増大している。300Gal 加振(1 回目)後についてみると、斜面中央とその左右断面にて、深さ 5～10cm から法面にかけてせん断ひずみが全体的に増加し、0.1(1%) 程度となっている。さらに、斜面中央の右側の断面においても法面から 6cm 位置におけるせん断ひずみが増加している。300Gal 加振(2 回目)後についてみると、全断面の深さ 5～10cm から法面までのせん断ひずみが 0.2(20%)程度に急増した。せん断ひずみ増加傾向として、ケース 4 は法面から 5～6cm の位置にて局所的に増加しているのに対して、ケース 1 は深さ 5～10cm から法面までの領域全体がせん断変形している。このケース 1 にてせん断ひずみが 20%程度を示しているせん断変形領域の地盤はせん断破壊状態にあることから、その下限位置を斜面安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる位置とみなすことができる。その位置は、ケース 4 においてすべり面が形成された位置に比べて深い。

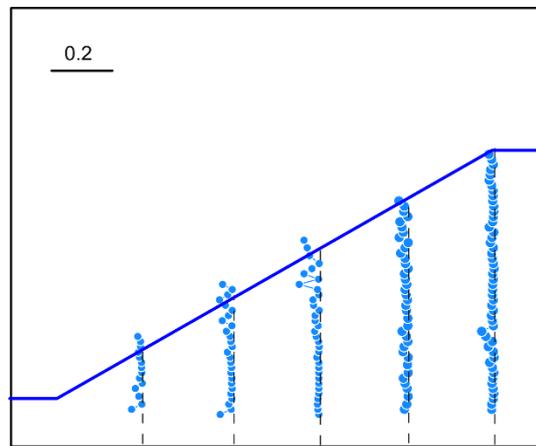
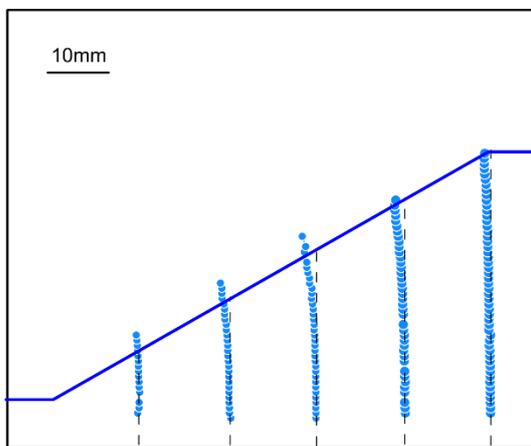
次に、法面勾配が 35° のケース 2 の崩壊状況として、図 3-45 に示した 250Gal、300Gal(1 回目)、300Gal(2 回目)加振後における各断面の水平変位とせん断ひずみの分布に着目する。250Gal 加振後についてみると、斜面中央の断面にて法面から 10cm ぐらいの位置にてせん断ひずみが 0.05(5%)程度の値を示している。その左断面においては、深度 6cm 程度から法面の間でせん断ひずみが 0.05(5%)程度の値となっている。このケースもケース 1 と同様に、水平変位は法面中央から下部にかけて増大している。300Gal 加振(1 回目)後についてみると、斜面中央とその左右断面にて、深度 5～10cm から法面にかけてせん断ひずみが全体的に増加し、0.1(10%)程度となっている。300Gal 加振(2 回目)後についてみると、斜面中央部の法面から 10cm 位置におけるせん断ひずみが 0.2(20%)に増加した。この時、その左側の断面では深度 8cm ぐらいから法面までの間でせん断ひずみが増大し、右側の断面では法面から 5～10cm 位置にてケース 4 のように局所的にてせん断ひずみが増大している。せん断増加傾向は、ケース 4 の様な傾向も 1 部みられるが、深度 5～10cm から法面までが全体として一様にせん断変形しているという点ではケース 1 と同じである。ケース 1 と同様に、せん断ひずみが 20%程度を示しているせん断変形領域の地盤はせん断破壊状態にあることから、その下限位置を斜面

安定解析におけるすべり安全率が 1.0 となる位置とみなすことができる。その位置は、ケース 4 においてすべり面が形成された位置に比べて深い。

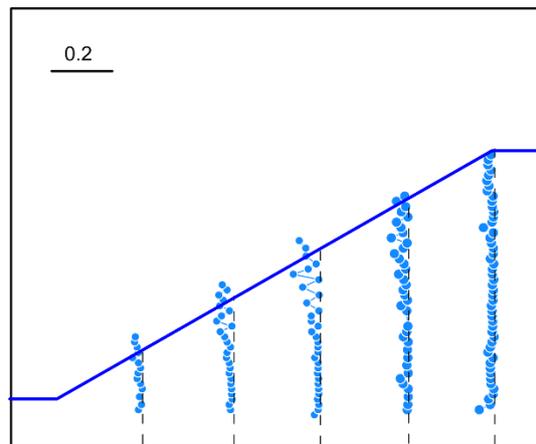
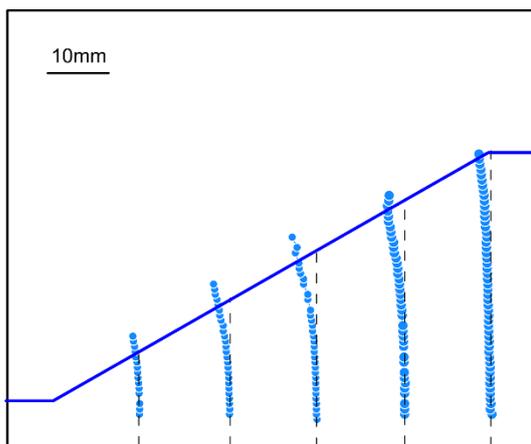
最後に、斜面勾配 15° のケース 3 の崩壊状況として、図 3-46 に示した 250Gal、300Gal(1 回目)、300Gal(2 回目)加振後における各断面の水平変位とせん断ひずみの分布に着目する。250Gal 加振後についてみると、斜面中央の断面にて法面から 4cm 位置にてせん断ひずみが 0.05(5%)程度の大きさとなっている。その右断面にて法面から 2cm 位置、左断面にて法面から 3cm 位置においても、せん断ひずみが 0.05(5%)弱の大きさとなっている。このケースは法面全体として法面から 2~4cm と比較的浅い位置にてせん断ひずみが増加している。300Gal 加振(1 回目)後についてみると、それら 3 断面に加え、法尻の地表近傍においてもせん断ひずみが増大している。300Gal 加振(2 回目)後もその状態に大きな変化はみられない。これは、法尻部分が斜面表層部の崩壊をおさえているためと推測され、300Gal 加振(1 回目)でケース 1、2 と同様に地盤はせん断破壊状態にあると考えられ、せん断ひずみの大きな位置を連ねた領域にて斜面安定解析によるすべり安全率が 1.0 の状態に至っていると考えられる。



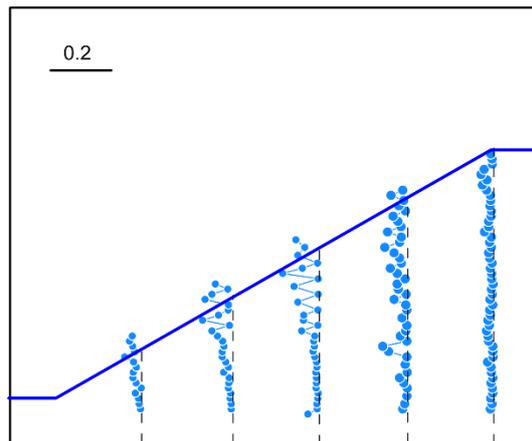
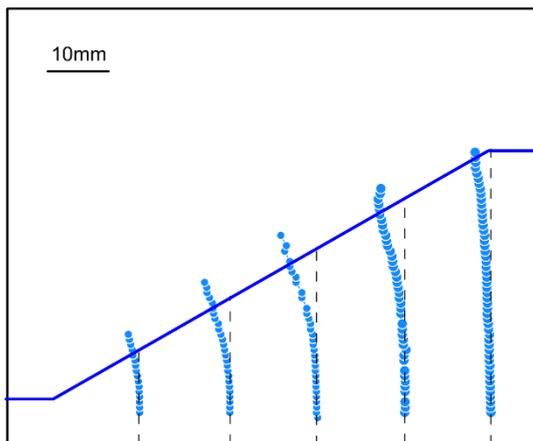
Case1 100gal 後



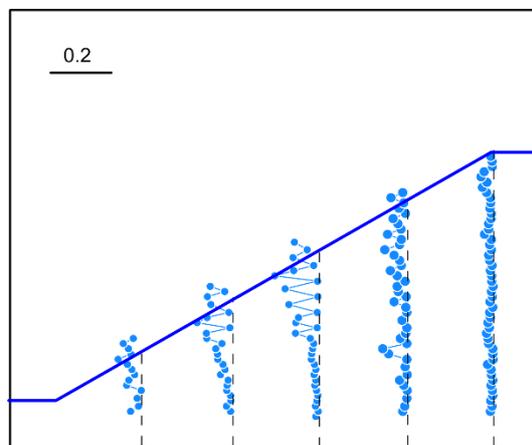
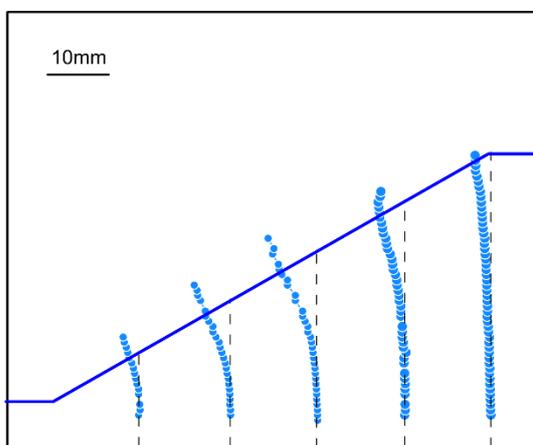
Case1 150gal 後



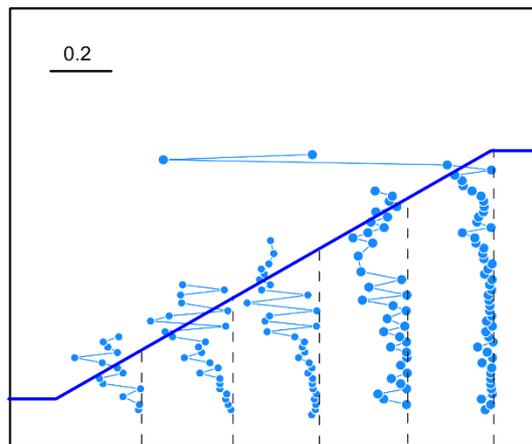
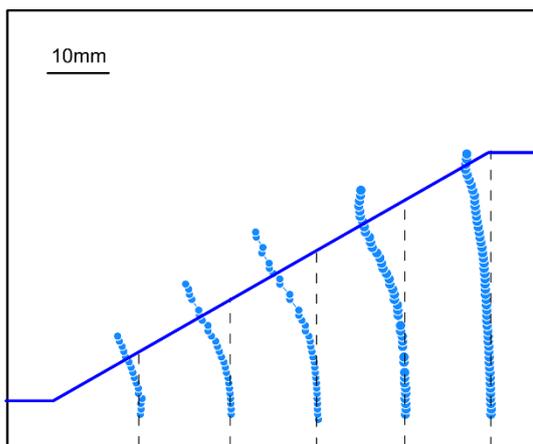
Case1 200gal 後



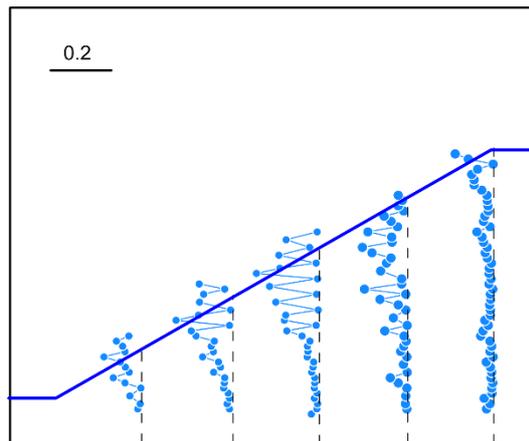
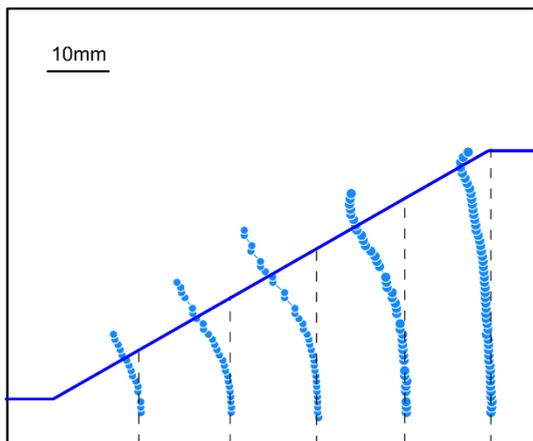
Case1 250gal 後



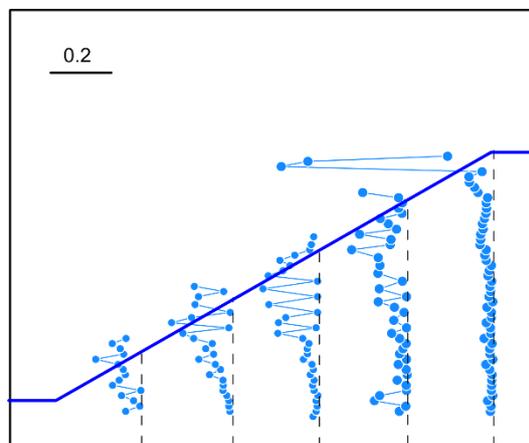
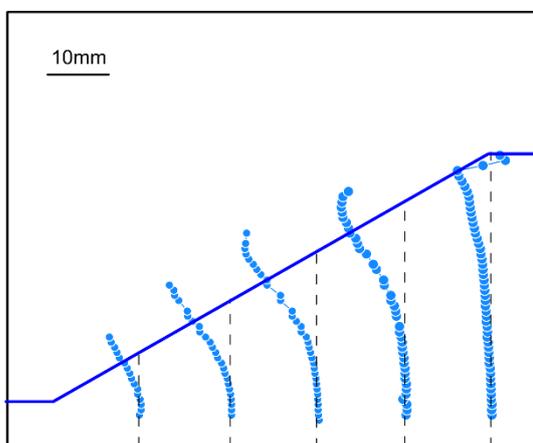
Case1 300gal 後 (1回目)



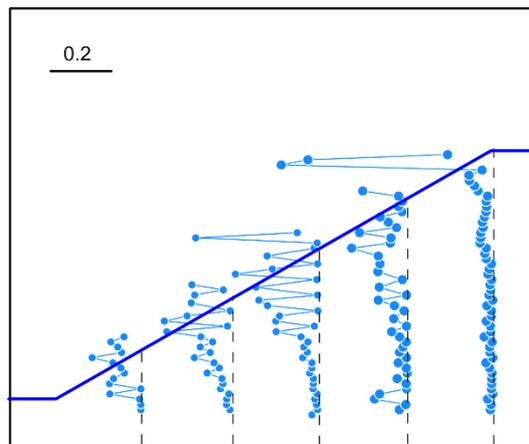
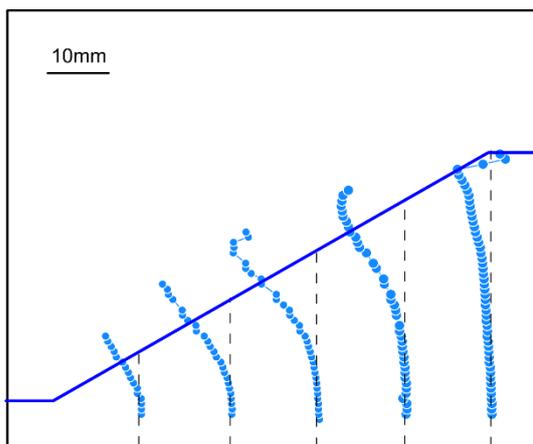
Case1 300gal 後 (2回目)



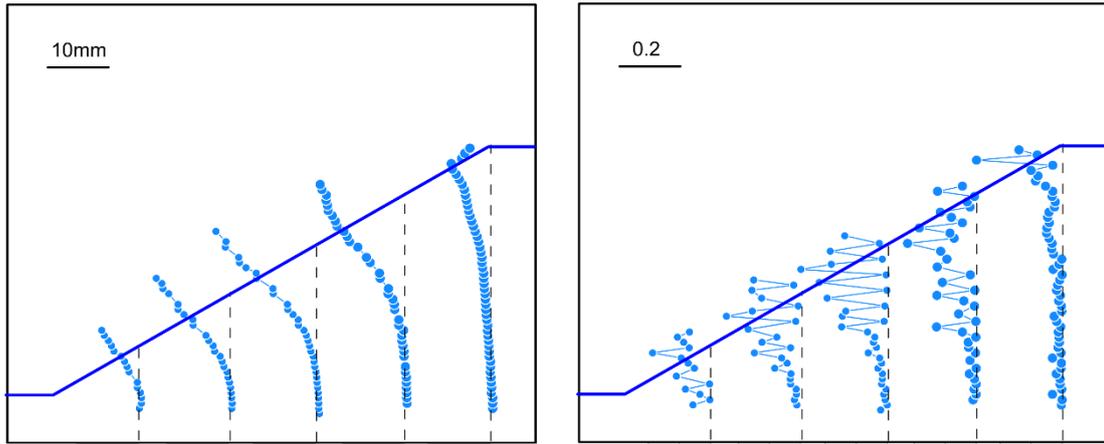
Case1 300gal 後 (3回目)



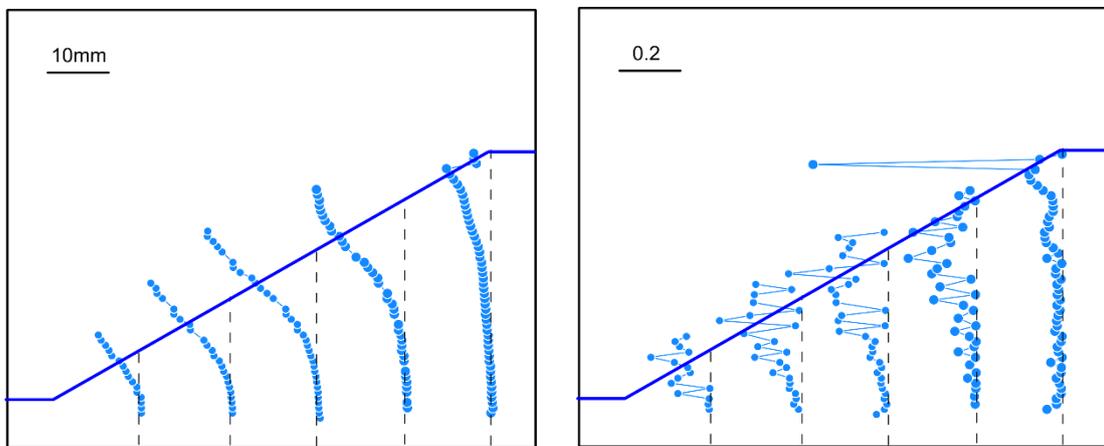
Case1 300gal 後 (4回目)



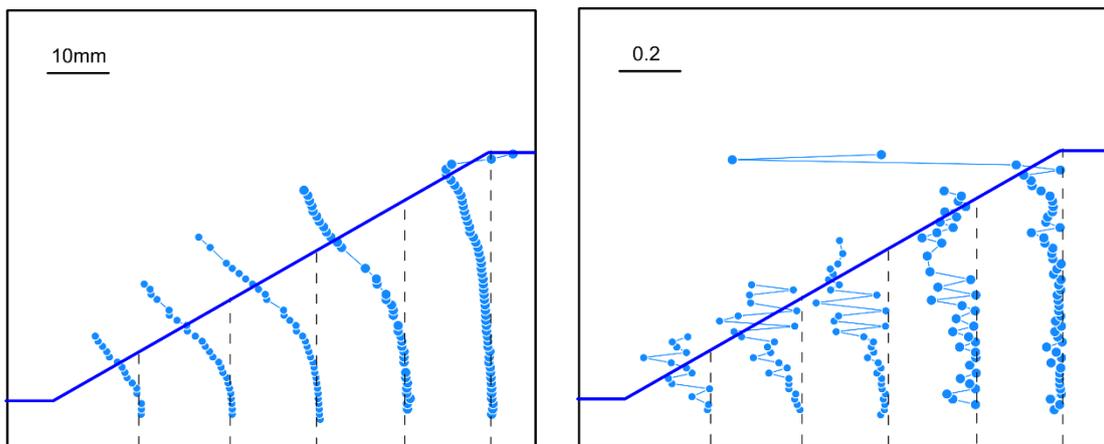
Case1 300gal 後 (5回目)



Case1 300gal 後 (6 回目)

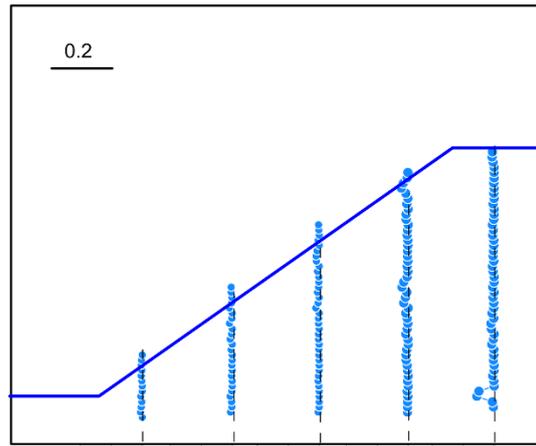
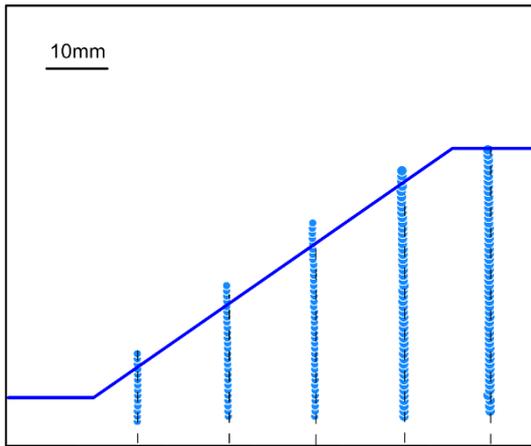


Case1 300gal 後 (7 回目)

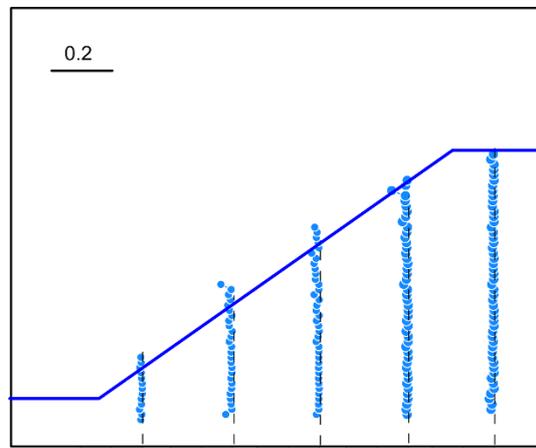
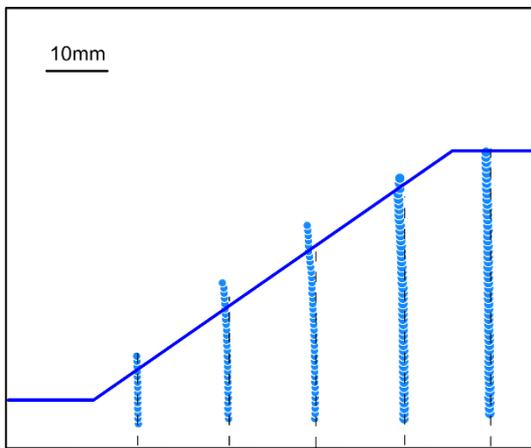


Case1 325gal 後

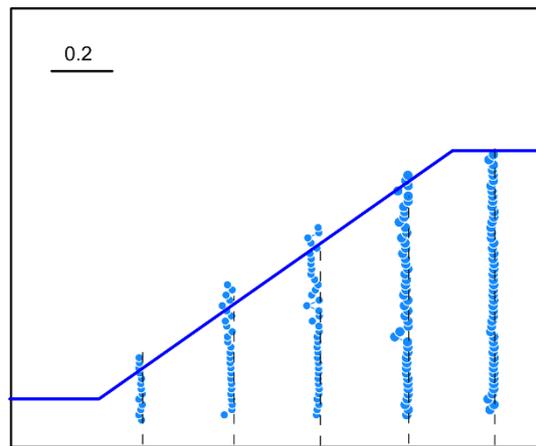
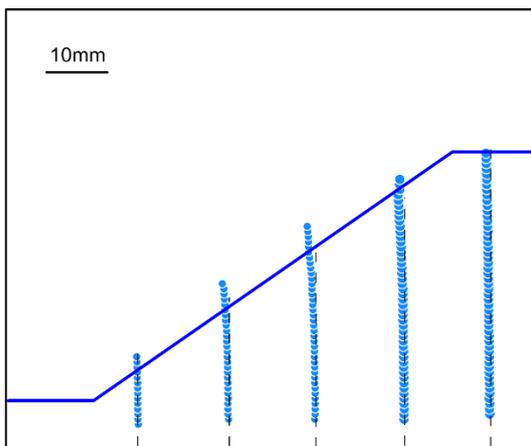
図 3-44 水平変位およびせん断ひずみ分布 (Case1)



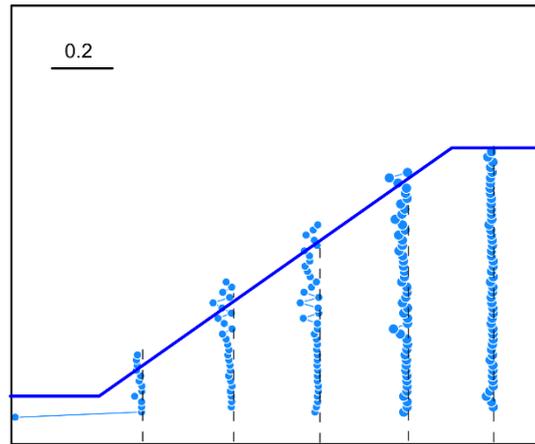
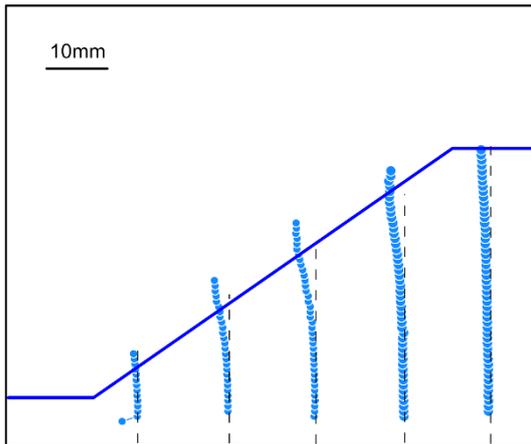
Case2 100gal 後



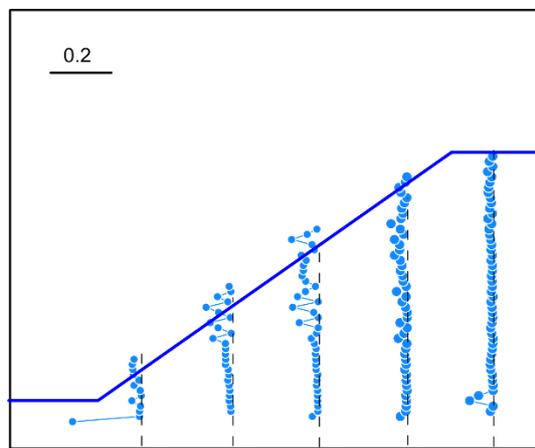
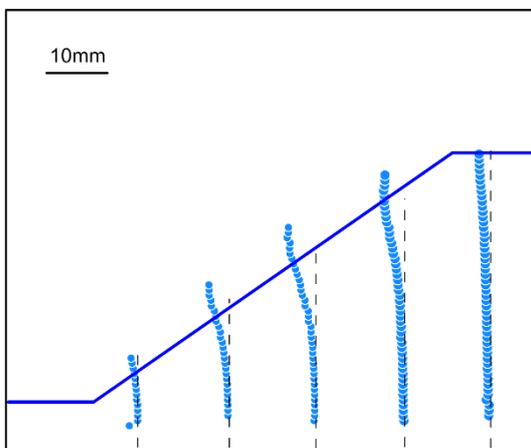
Case2 150gal 後



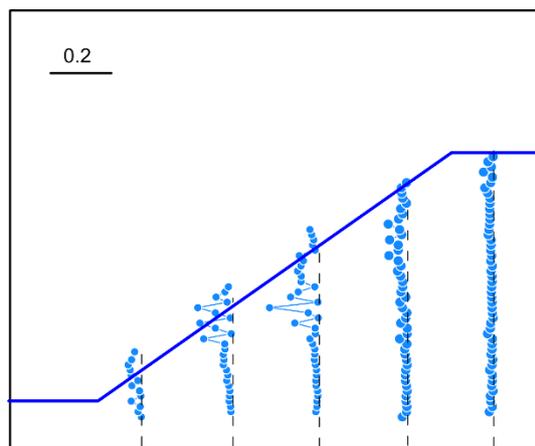
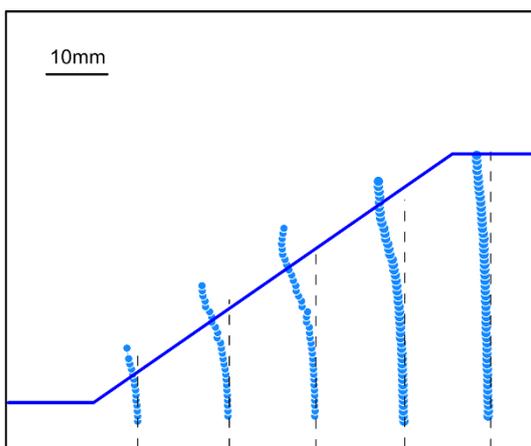
Case2 200gal 後



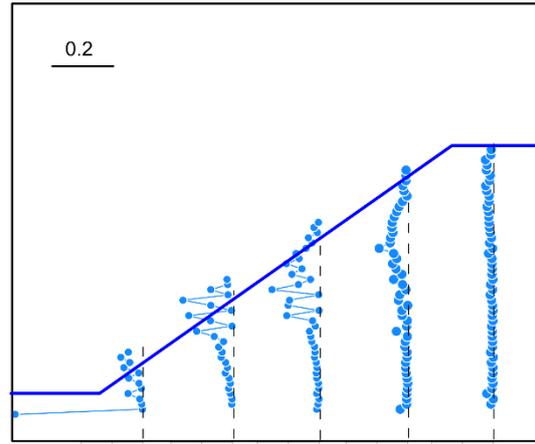
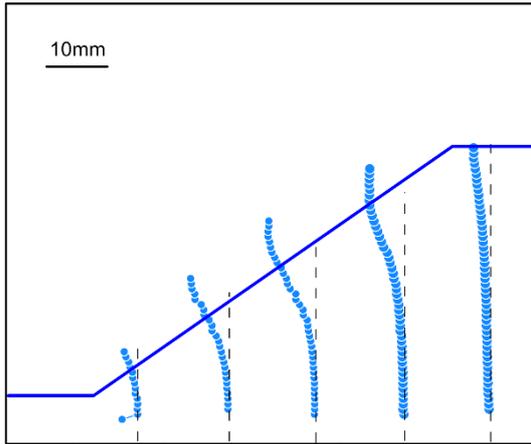
Case2 250gal 後



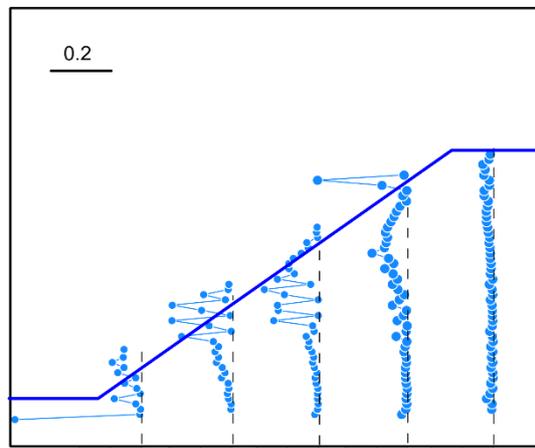
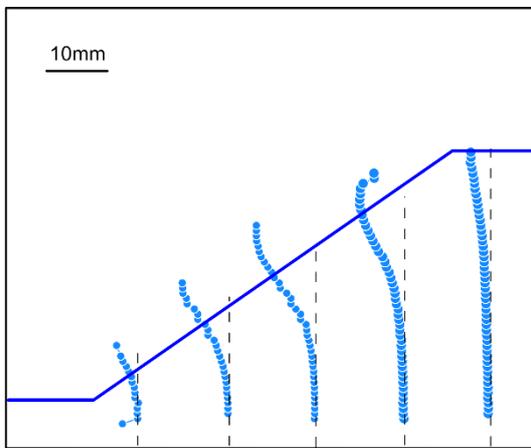
Case2 300gal 後 (1回目)



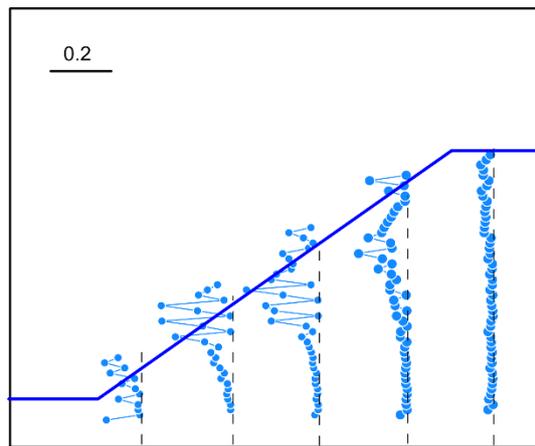
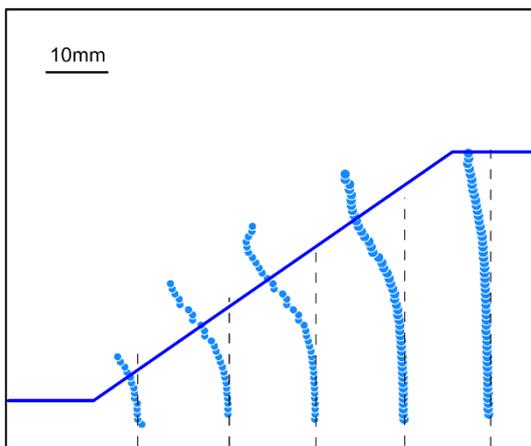
Case2 300gal 後 (2回目)



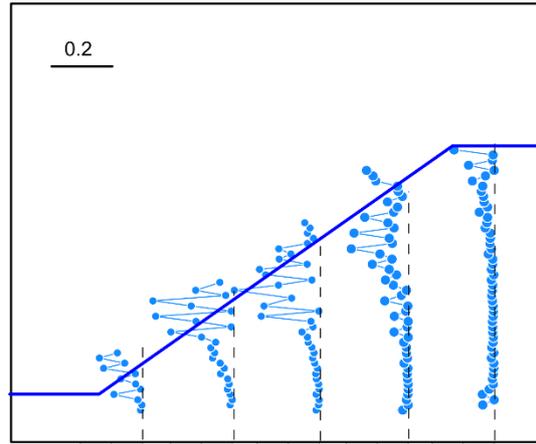
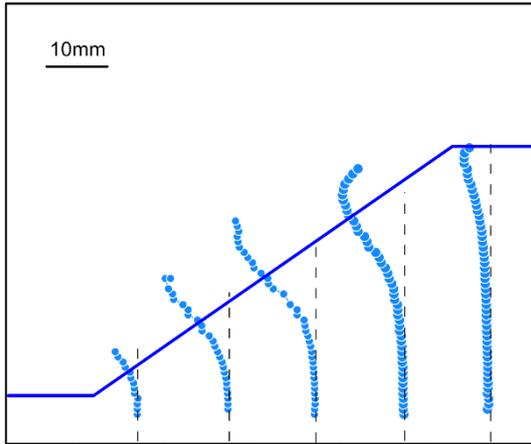
Case2 300gal-50 波後 (1回目)



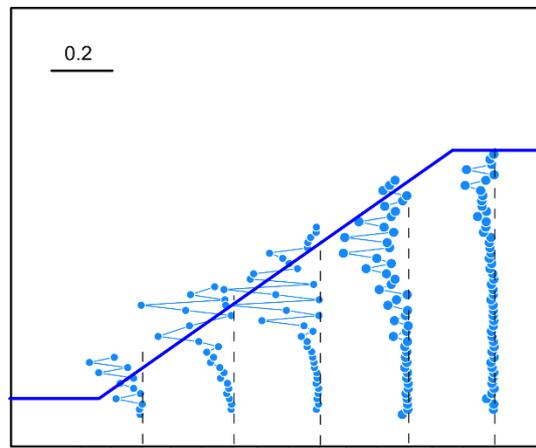
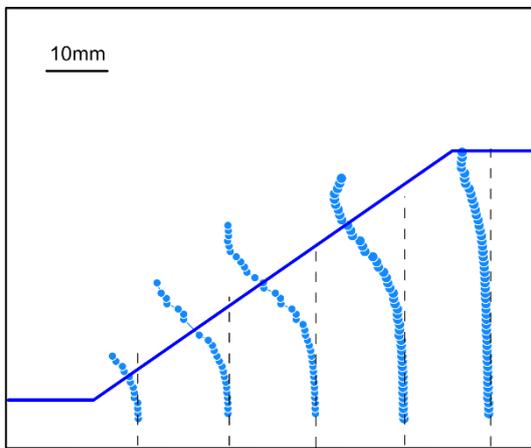
Case2 300gal-50 波後 (2回目)



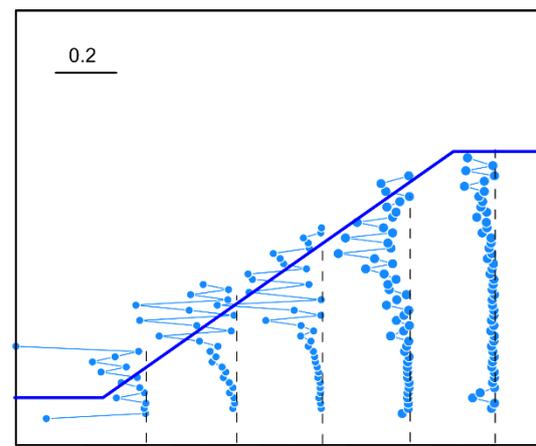
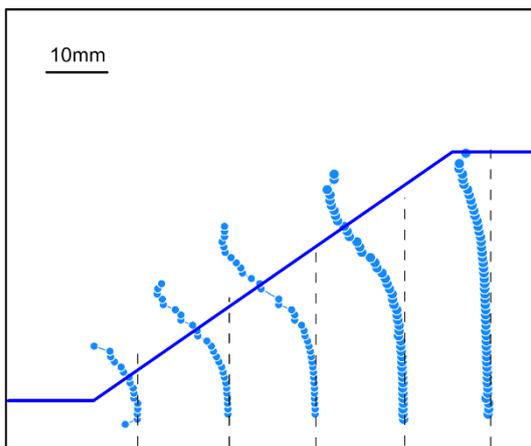
Case2 300gal-50 波後 (3回目)



Case2 300gal-50 波後 (4 回目)

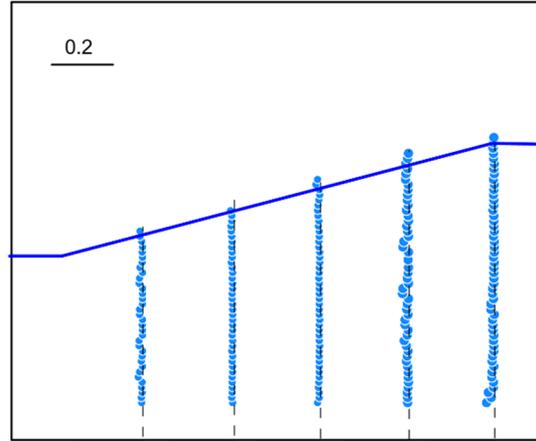
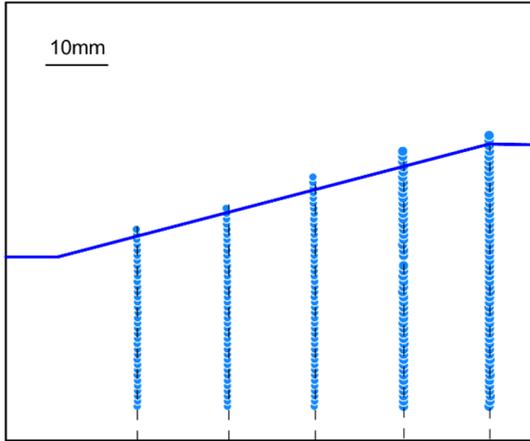


Case2 300gal-50 波後 (5 回目)

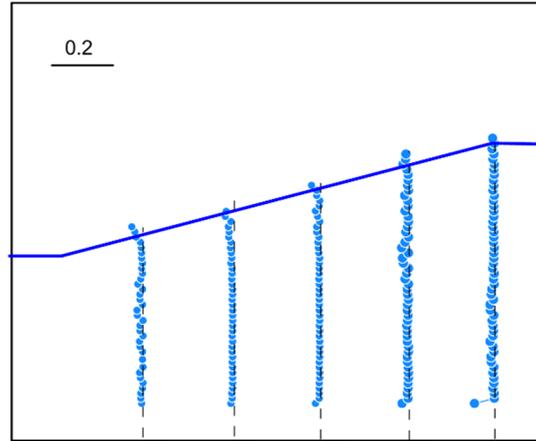
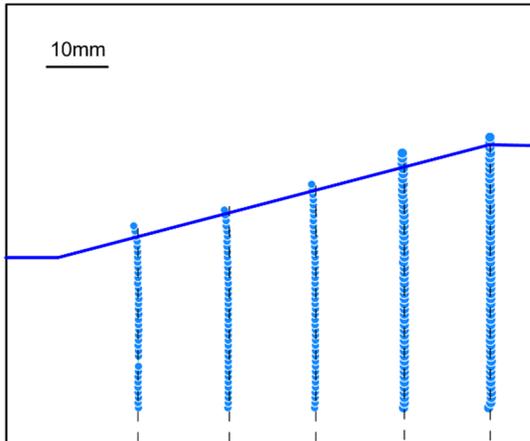


Case2 325gal 後

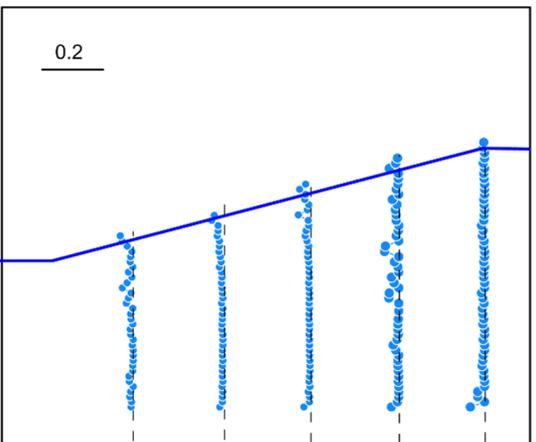
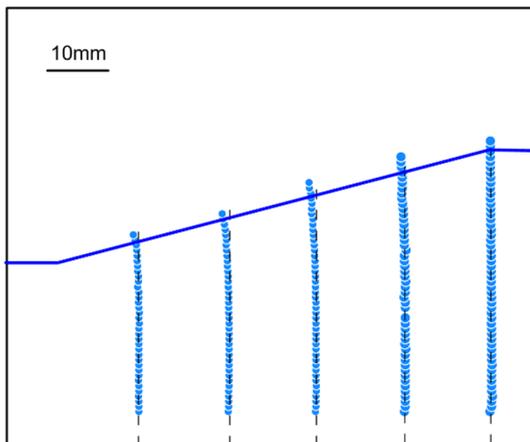
図 3-45 水平変位およびせん断ひずみ分布 (Case2)



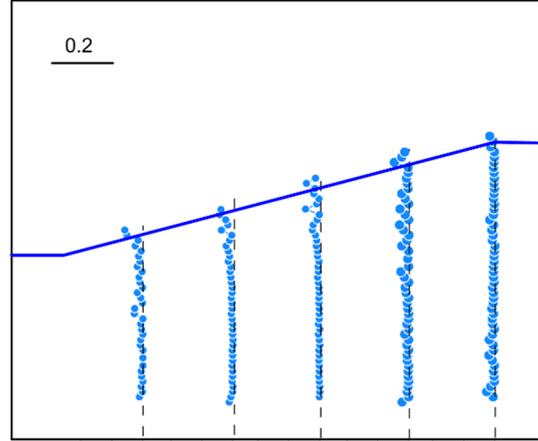
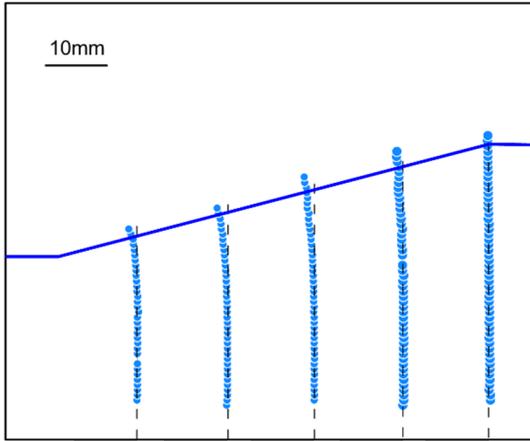
Case3 100gal 後



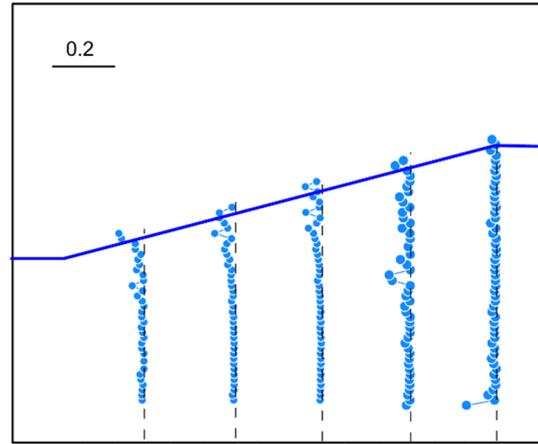
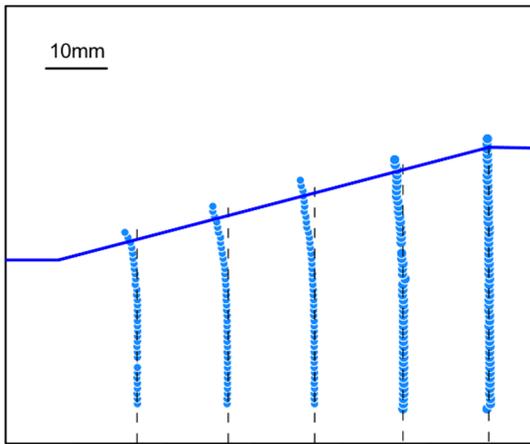
Case3 150gal 後



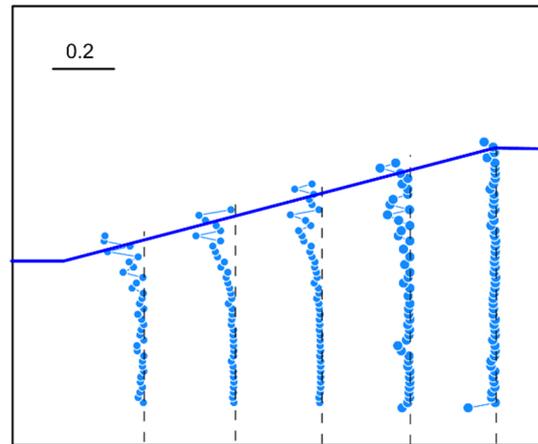
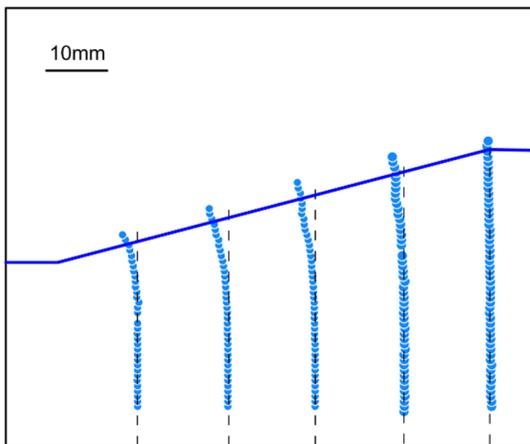
Case3 200gal 後



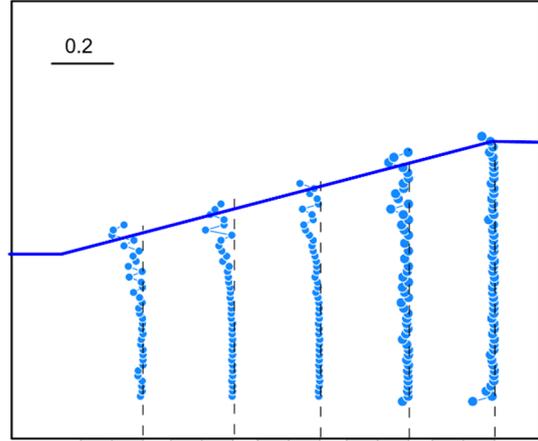
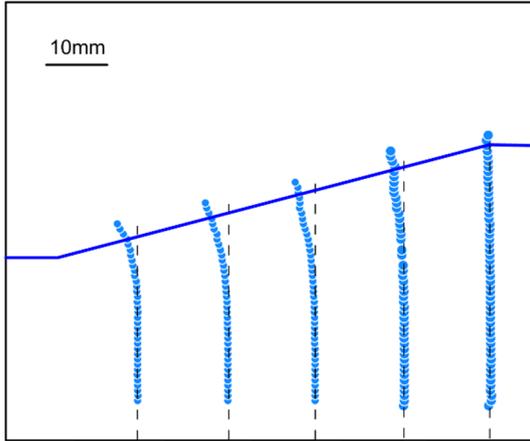
Case3 250gal 後



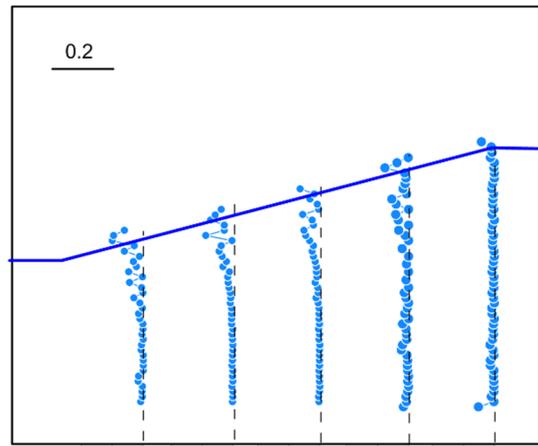
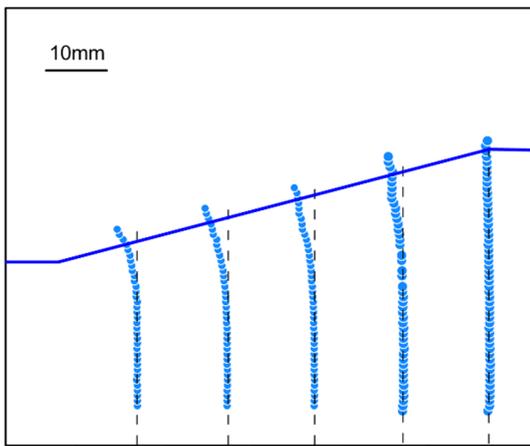
Case3 300gal 後 (1回目)



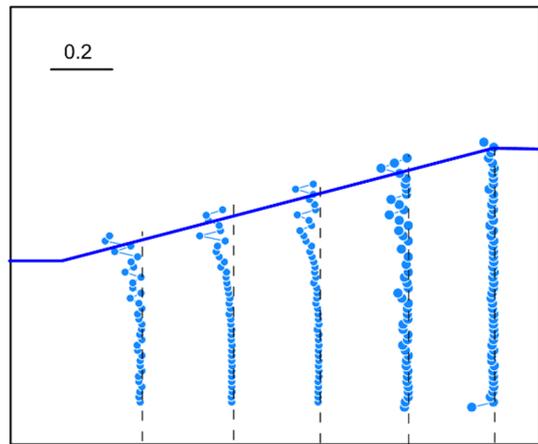
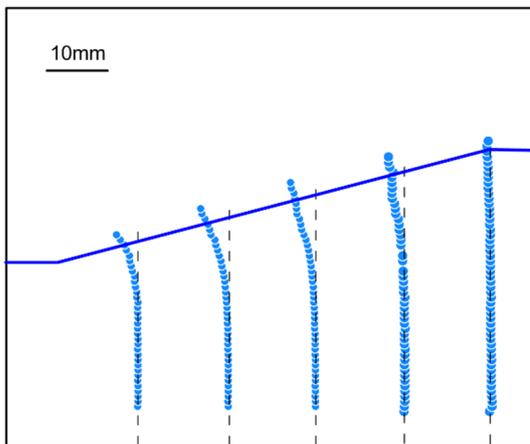
Case3 300gal 後 (2回目)



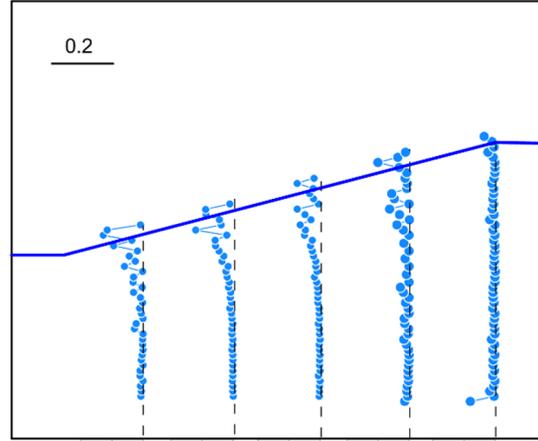
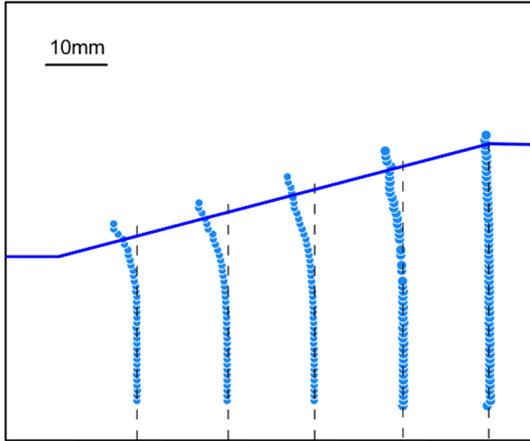
Case3 300gal 後 (3回目)



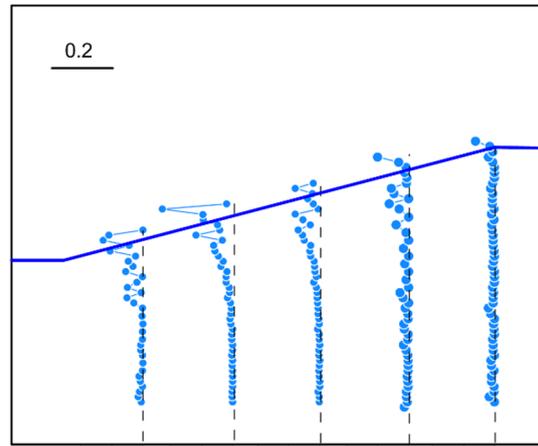
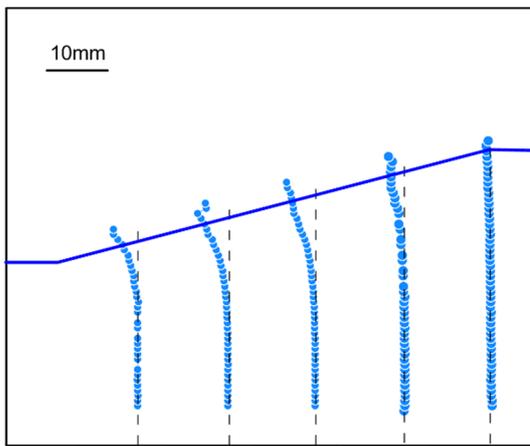
Case3 300gal 後 (4回目)



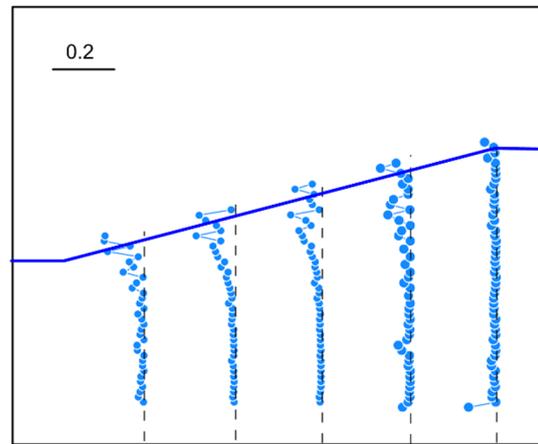
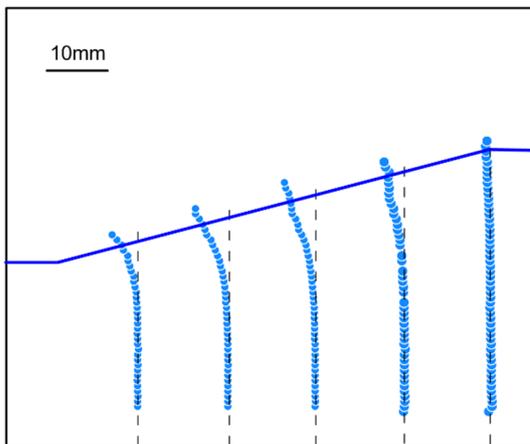
Case3 300gal 後 (5回目)



Case3 300gal 後 (6 回目)

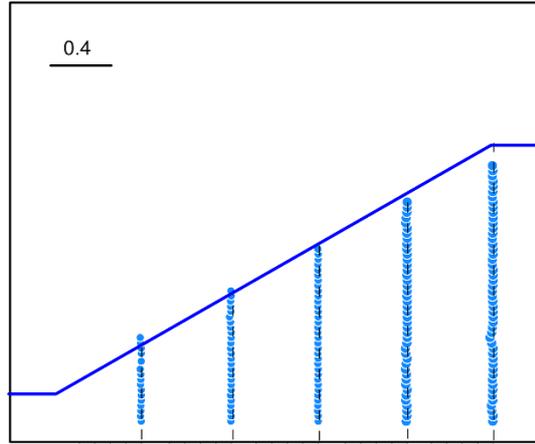
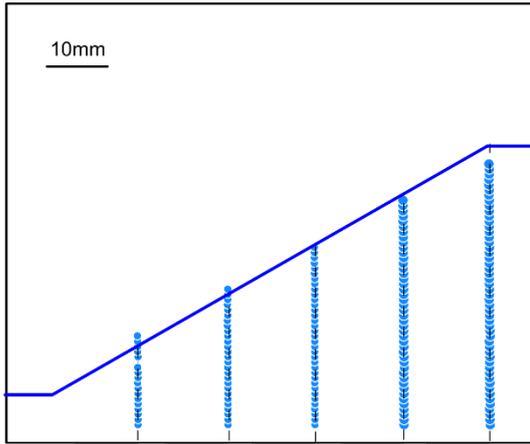


Case3 300gal 後 (7 回目)

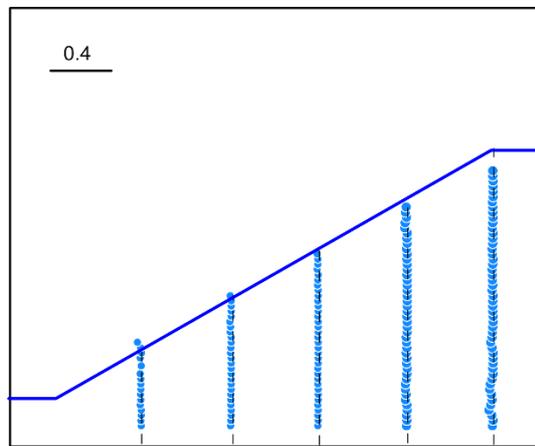
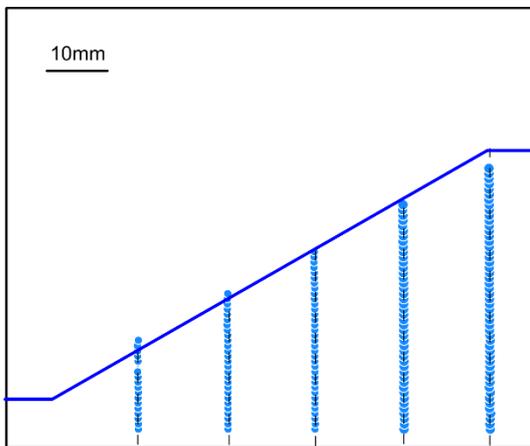


Case3 325gal 後

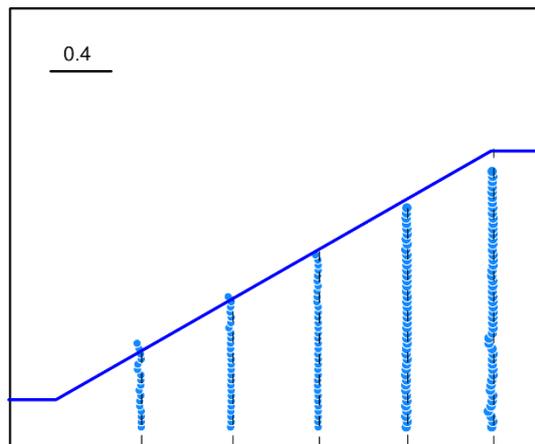
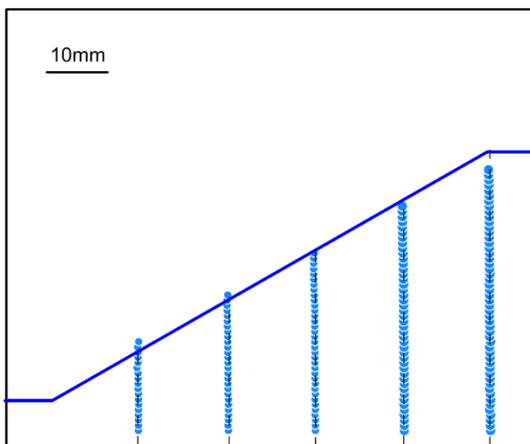
図 3-46 水平変位およびせん断ひずみ分布 (Case3)



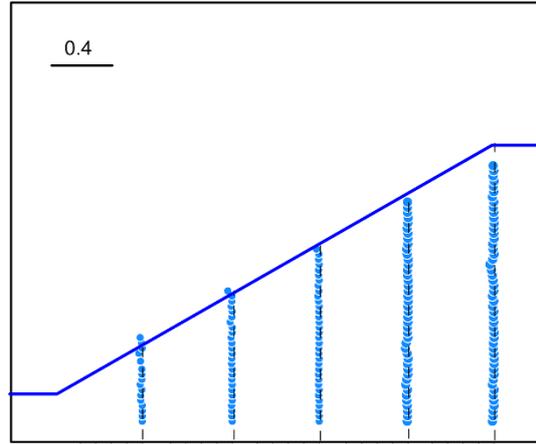
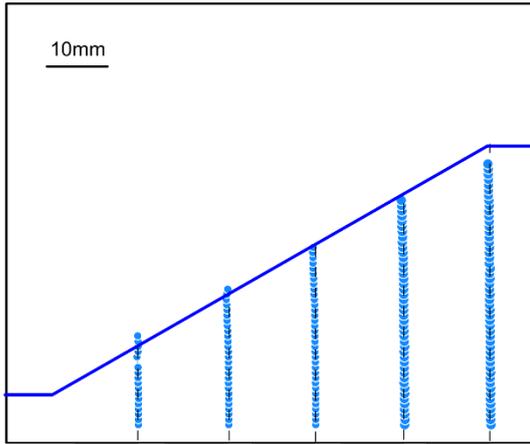
Case4 1度



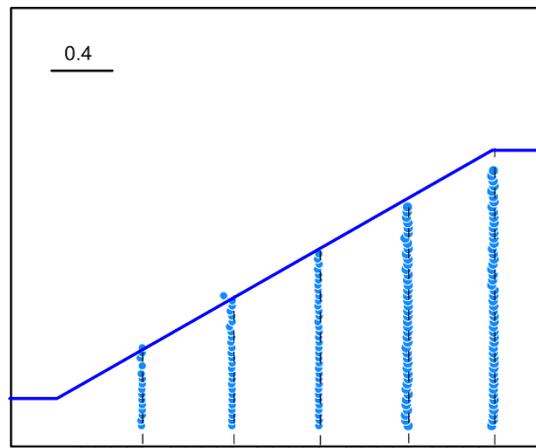
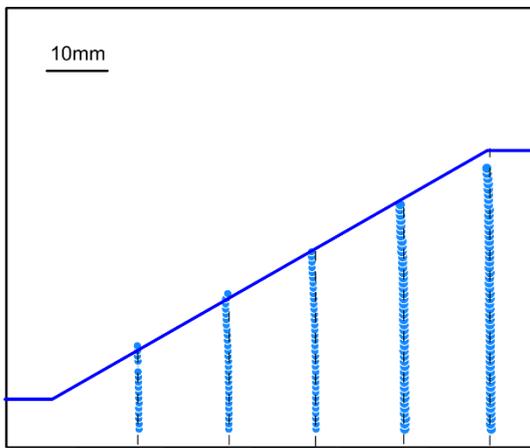
Case4 2度



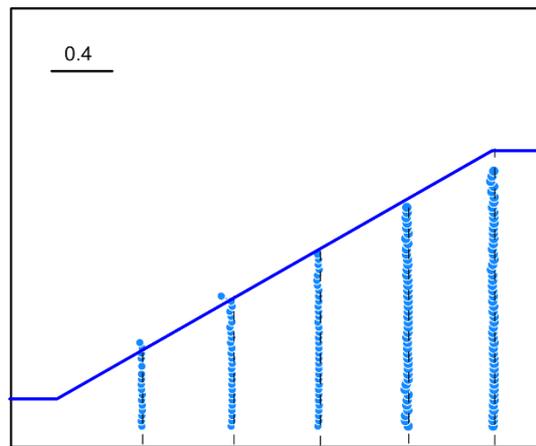
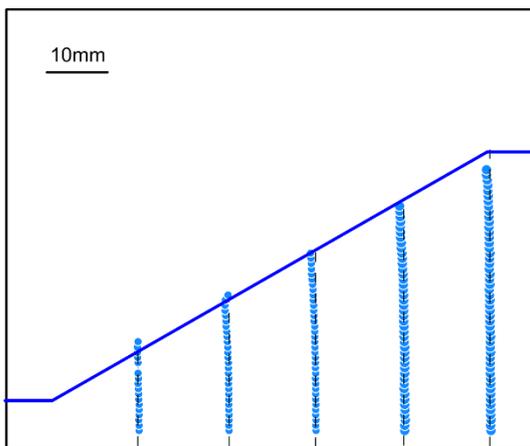
Case4 3度



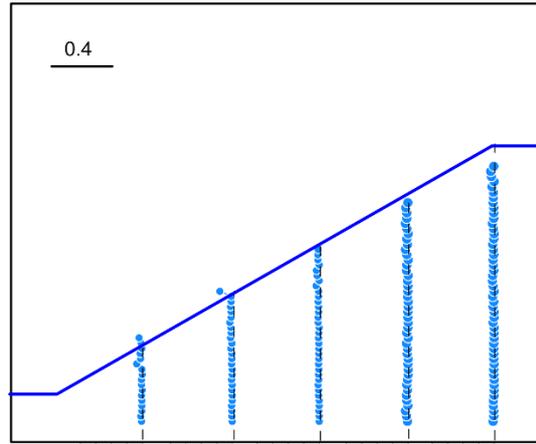
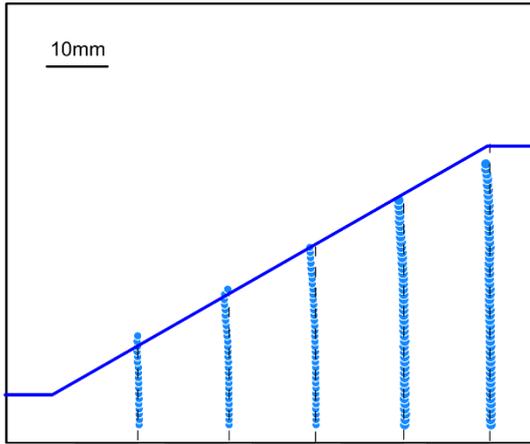
Case4 4度



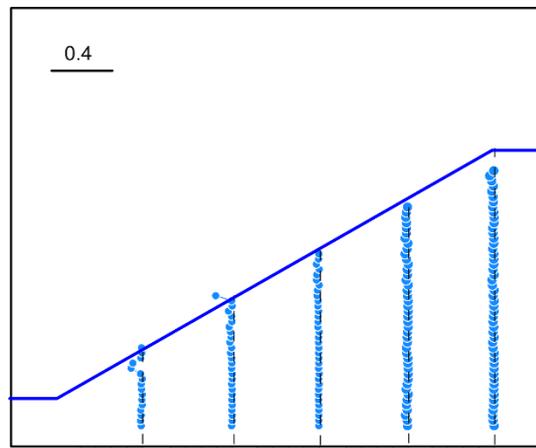
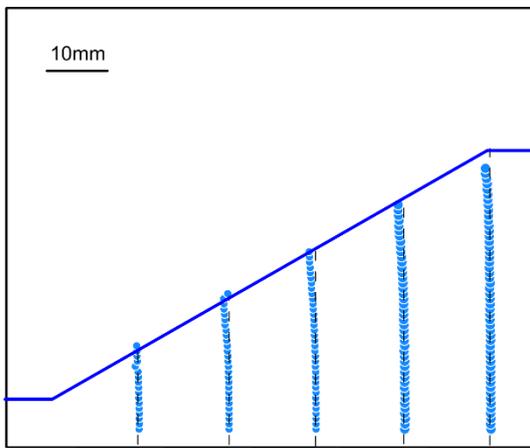
Case4 5度



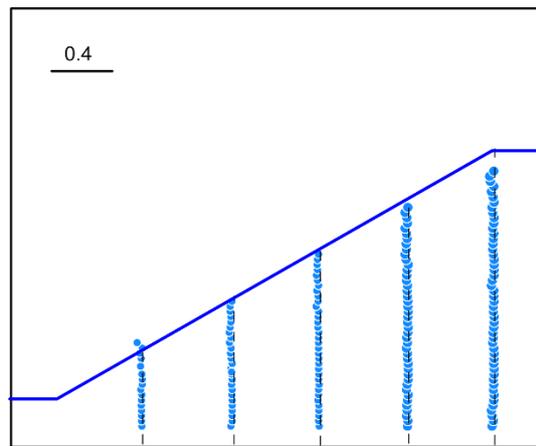
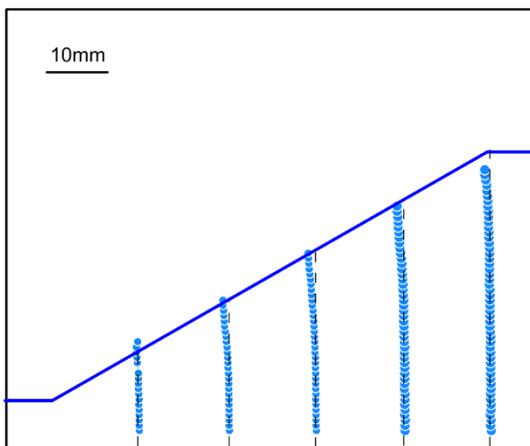
Case4 6度



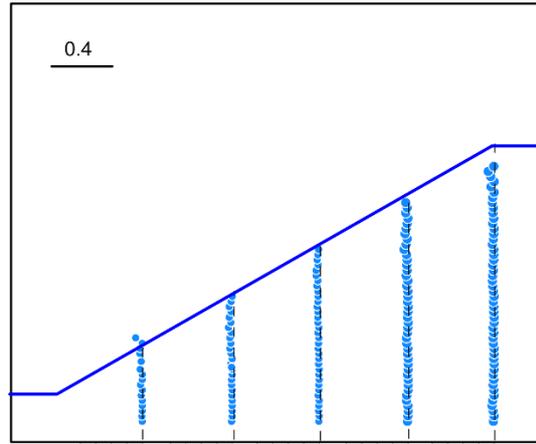
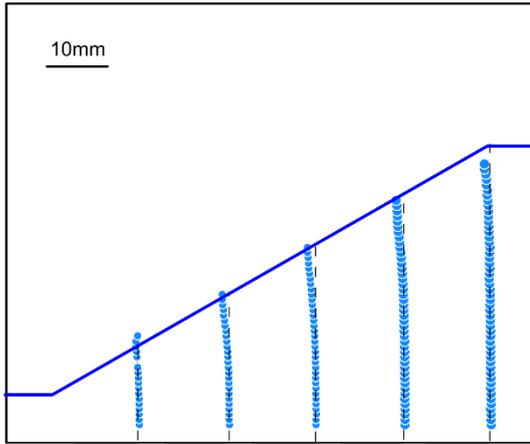
Case4 7度



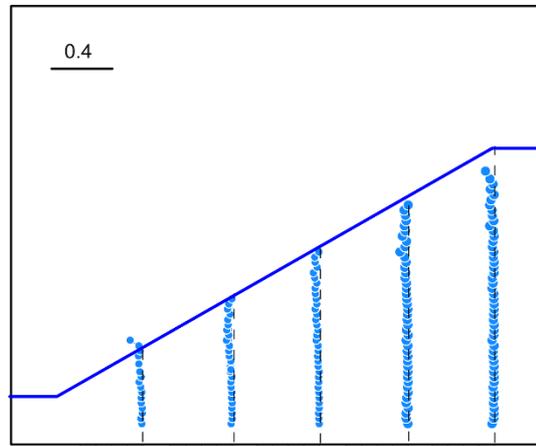
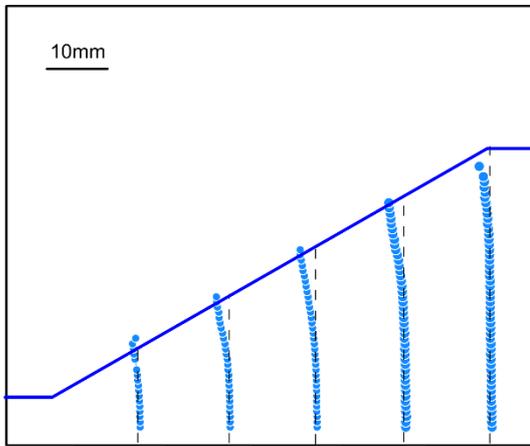
Case4 8度



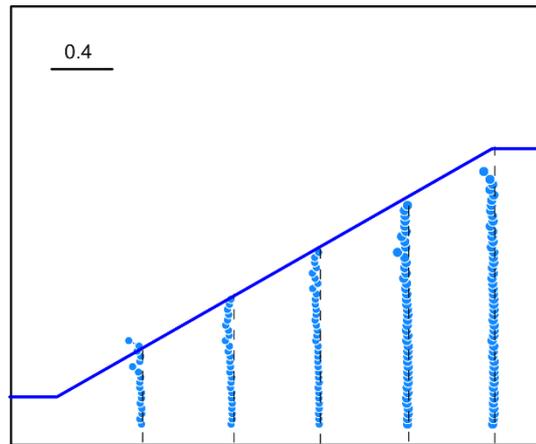
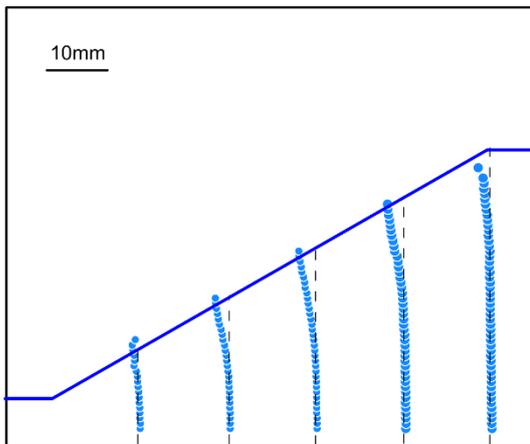
Case4 9度



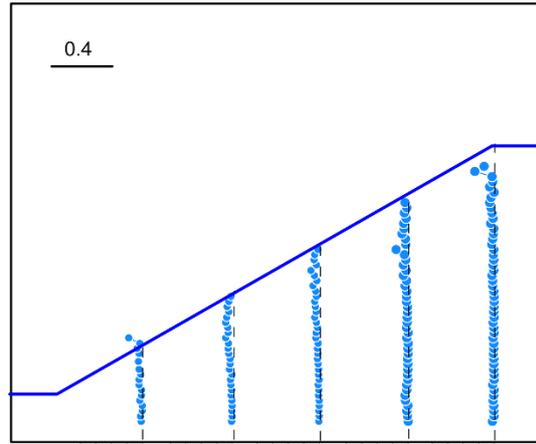
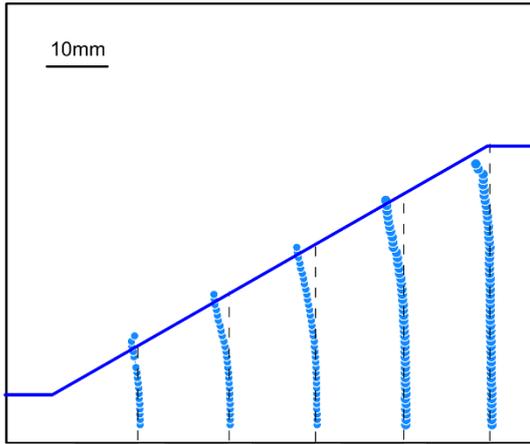
Case4 10度



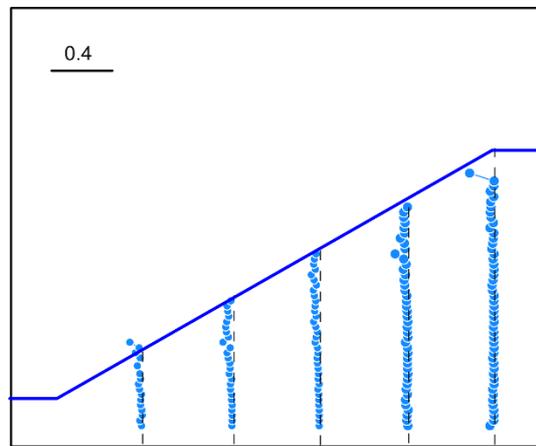
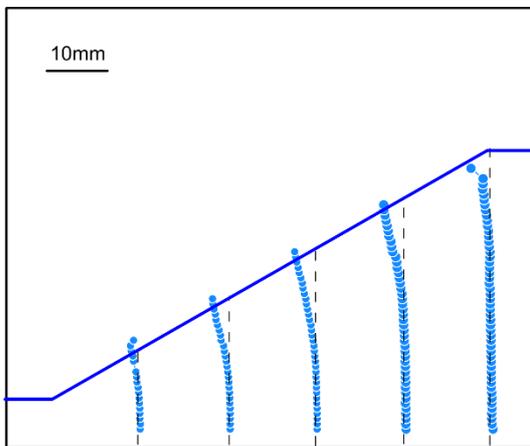
Case4 10.5度



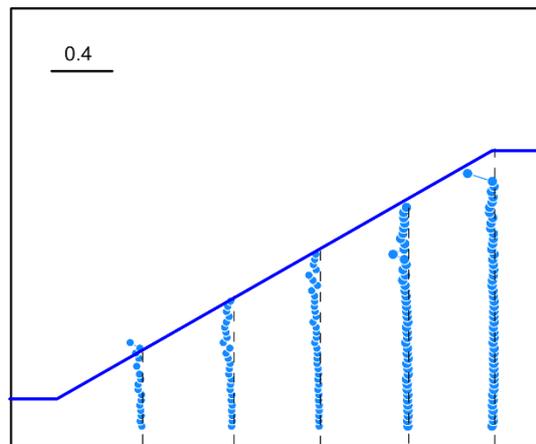
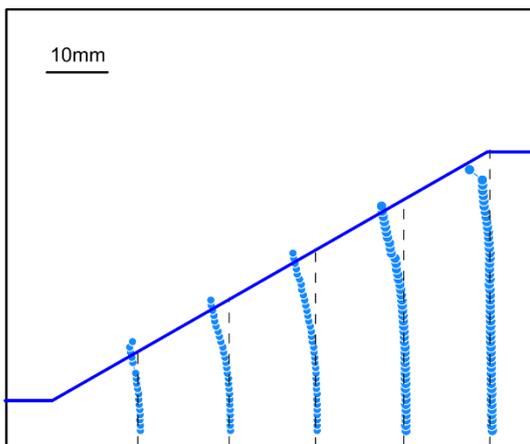
Case4 11度



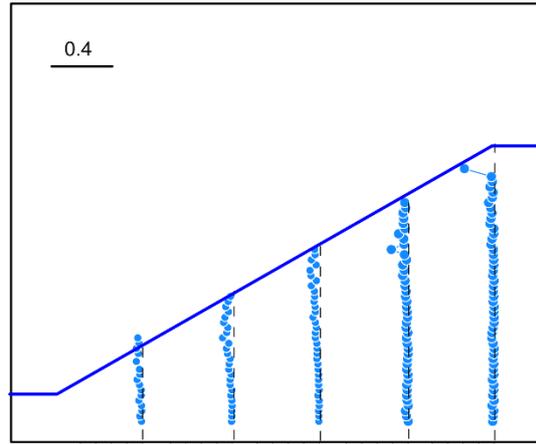
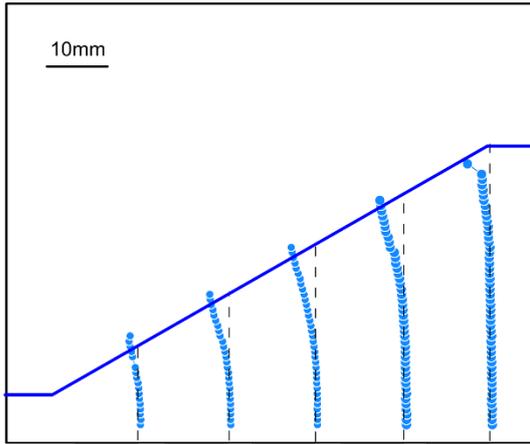
Case4 11. 5 度



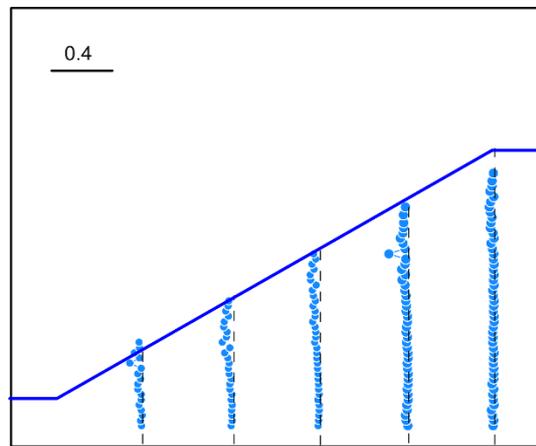
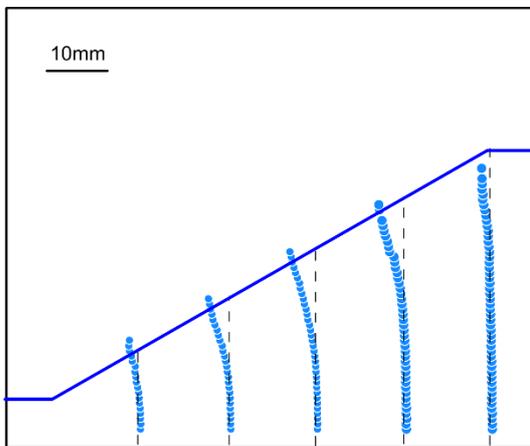
Case4 12. 0 度



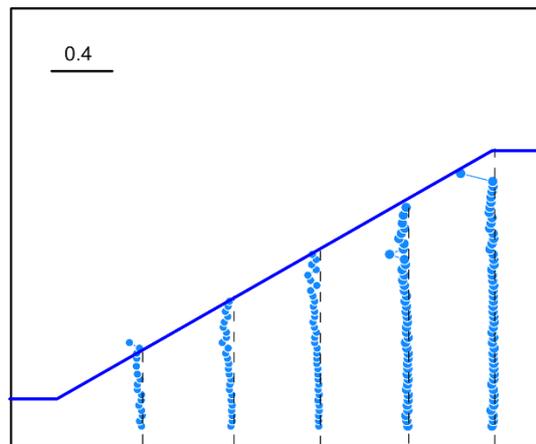
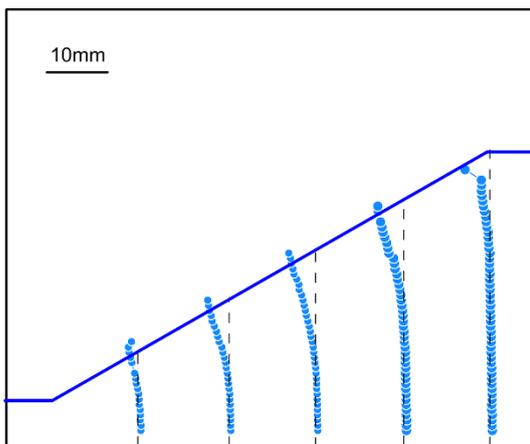
Case4 12. 5 度



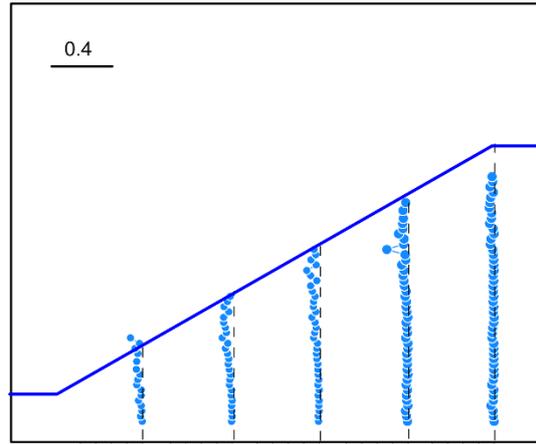
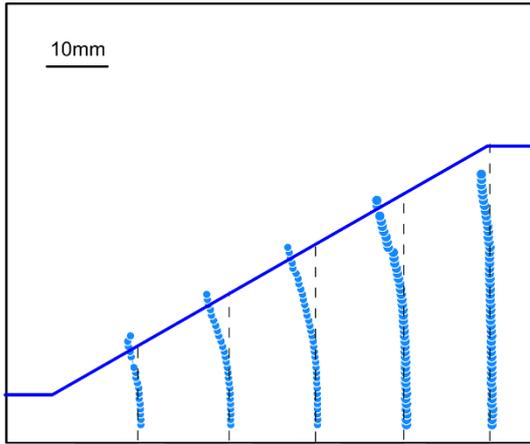
Case4 13.0 度



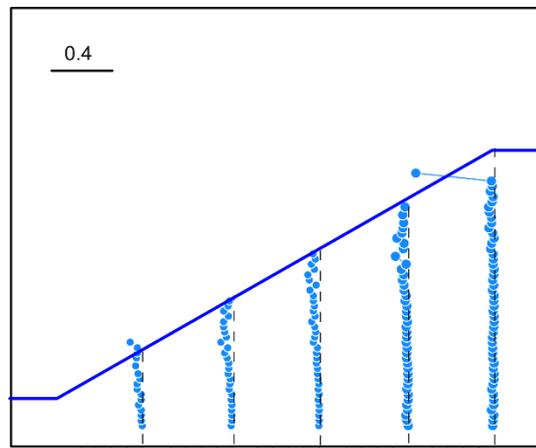
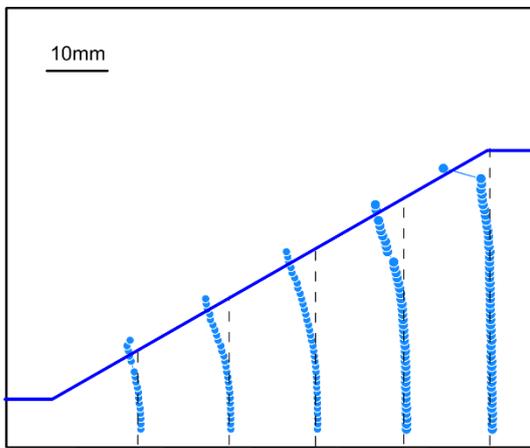
Case4 13.5 度



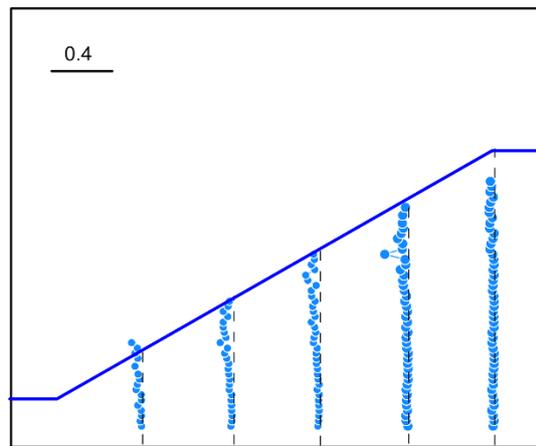
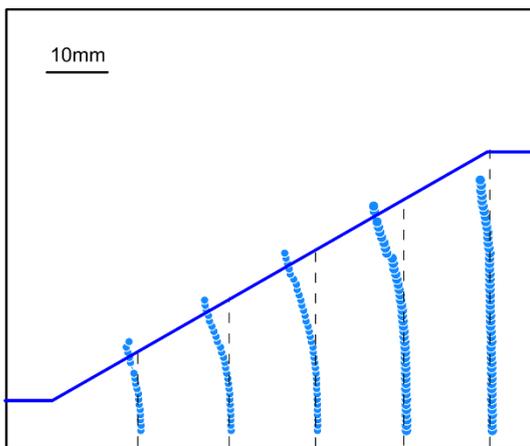
Case4 14.0 度



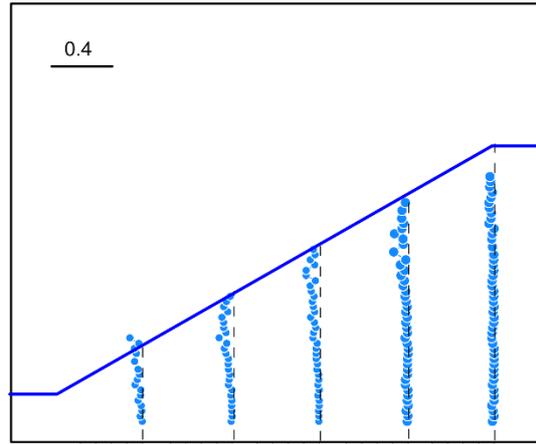
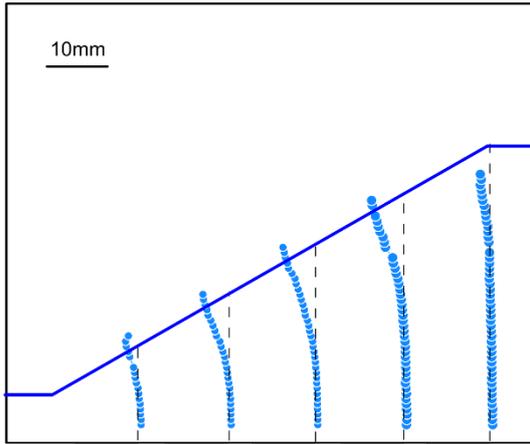
Case4 14. 5 度



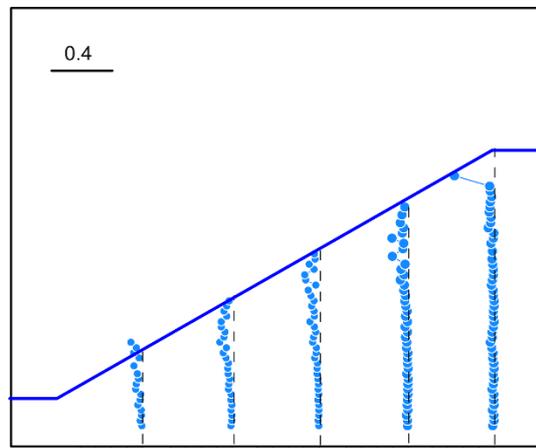
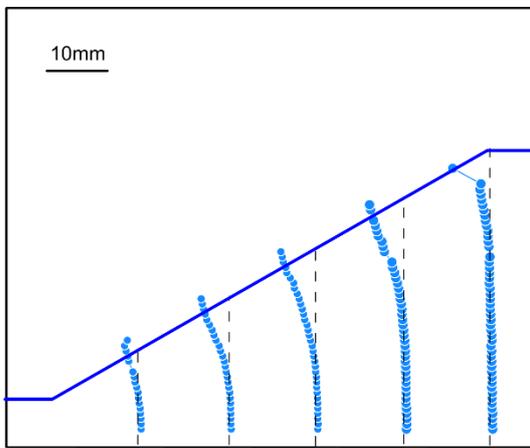
Case4 15. 0 度



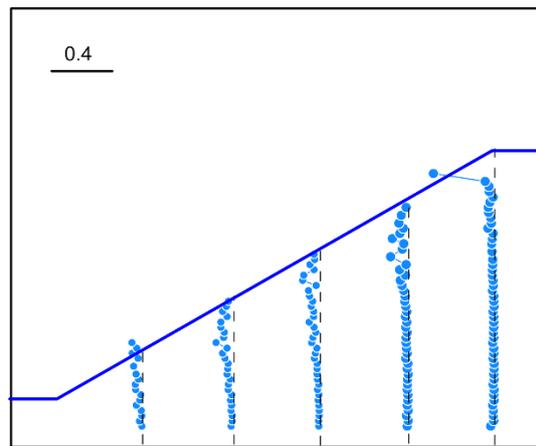
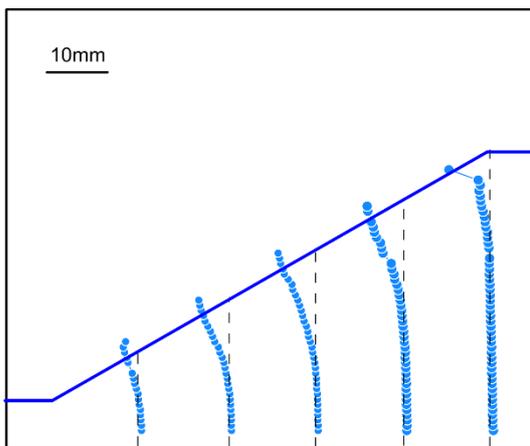
Case4 15. 5 度



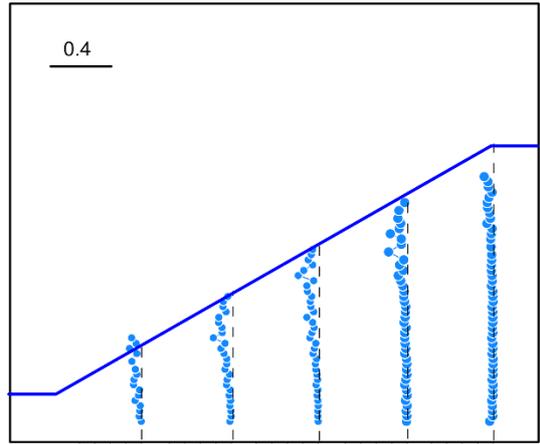
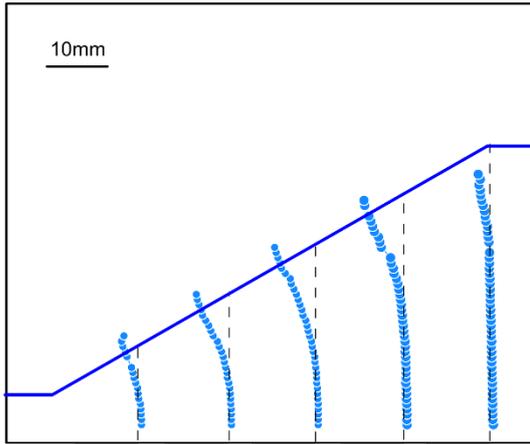
Case4 16.0 度



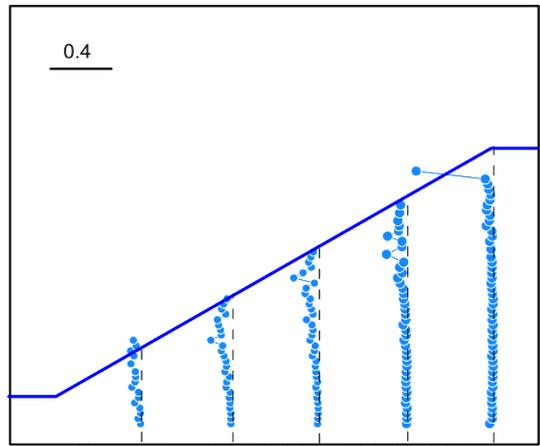
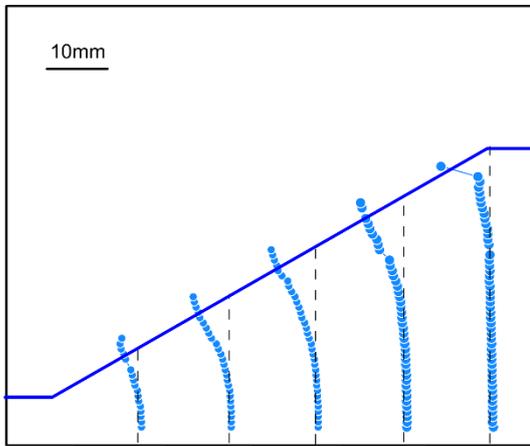
Case4 16.5 度



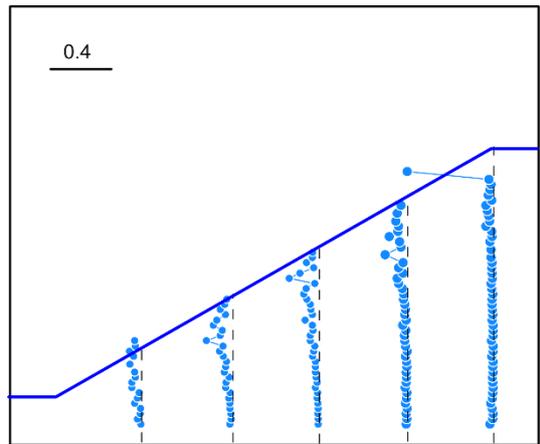
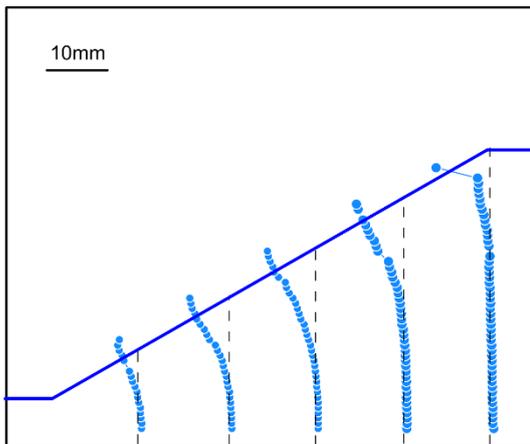
Case4 17.0 度



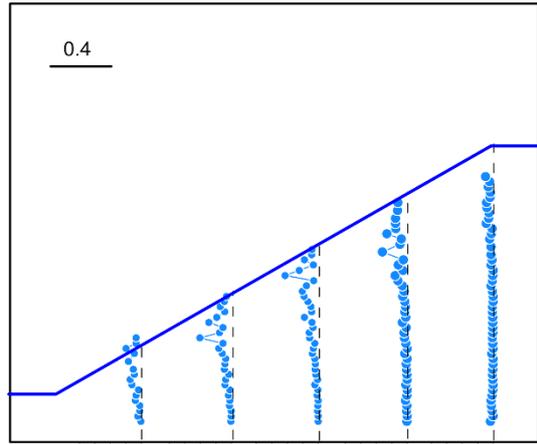
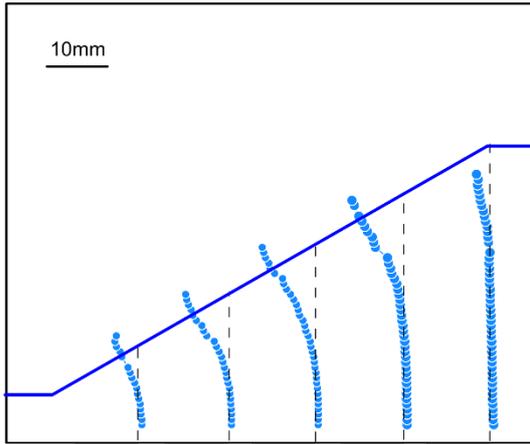
Case4 17. 5 度



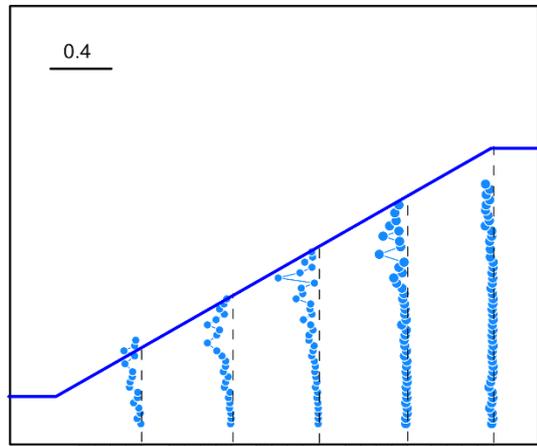
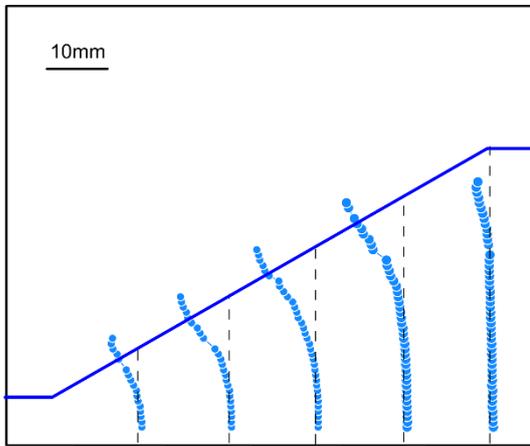
Case4 18. 0 度



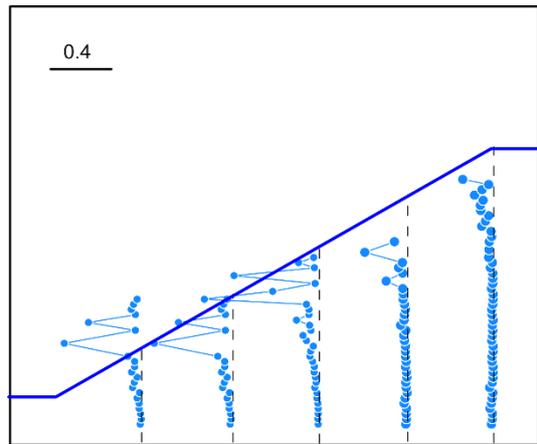
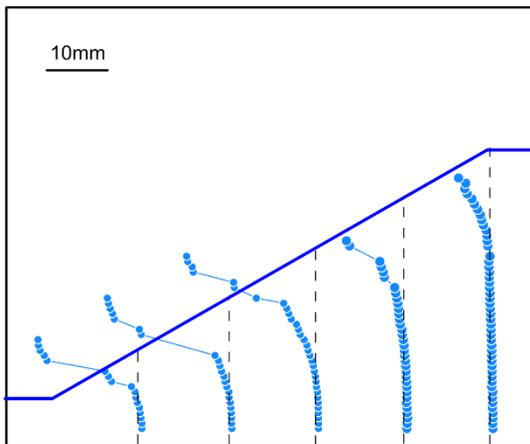
Case4 18. 5 度



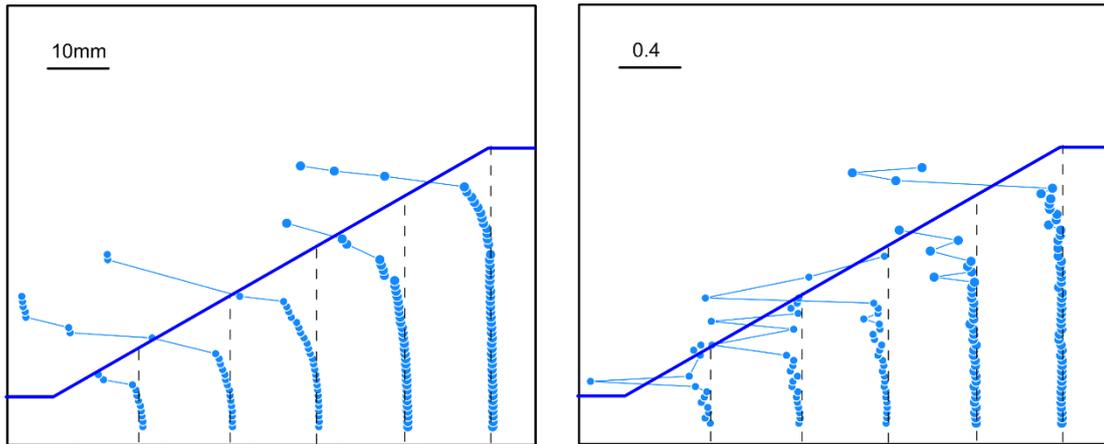
Case4 19.0 度



Case4 19.5 度-1



Case4 19.5 度-2



Case4 19.5度-3

図 3-47 水平変位およびせん断ひずみ分布 (Case4)