

令和元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

令和2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

令和元年度事業では、平成 30 年度までに実施した遠心実験で斜面模型の製作に用いた粘土を対象とし、正規圧密状態とした斜面模型を作製し、小型遠心力模型実験、大型遠心力模型実験を実施した。小型遠心力模型実験では、水圧等の影響を考慮した斜面模型の動的、静的載荷実験を実施し、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の把握を実施した。

まず、小型遠心力模型実験では、正規圧密状態とした小型の模型地盤を作製し、30G 場での静的載荷実験を 1 ケース、正弦波加振による動的載荷実験を 2 ケース実施した。まず、地盤の破壊状況について考察するために、斜面内で 5 断面周辺に位置する標点を抽出し、標点の PIV 解析で求めた各断面の深度方向に沿ったせん断ひずみの分布よりすべり面位置を求めた。次に、実験で得られたすべり面が形成されたと推定される震度〔以後、降伏震度（実験）〕と実験で得られた強度特性を用いて実施した修正フェレニウス法による安定解析より得られたすべり安全率が 1.0 となる降伏震度〔以後、降伏震度（安定解析）〕との比較を行った。さらに、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た。解析に用いる材料特性にはモールクーロンモデルを用い、解析パラメータは平成 30 年度と同様の考え方に基づいて設定した。これらより以下のことが分かった。

- ・静的載荷実験のケース 1 は傾斜角 9～11°、動的載荷実験のケース 2 は加振振幅 333Gal、ケース 3 は加振振幅 250Gal にてせん断ひずみが 20%を超え、すべり面が形成されたと考えられる。
- ・ケース 2 で形成されたと考えられるすべり面位置は条件に近いケース 1 に近い位置であった。ケース 3 で形成されたと考えられるすべり面の位置はケース 1 やケース 2 に比べて、やや深い位置に生じていた。
- ・降伏震度（安定解析）はケース 1 が 0.27、ケース 2 が 0.28、ケース 3 が 0.30 となり、ケース 2 の降伏震度（安定解析）は降伏震度（実験）0.339 より小さいものの、ケース 1(0.15～0.19)およびケース 3(0.255)の降伏震度（実験）より大きな値となっている。
- ・動的載荷実験の再現解析は、土槽位置で計測された加速度が解析結果とほぼ同程度、解析結果が地盤内で計測された加速度よりすこし大きな波形が得られているものの、いずれのケースも適切に応答が評価できていると考えられる。
- ・すべり面位置について見ると、ケース 1 は実験と同様に 9° にて再現解析による最大せん断ひずみ( $\sqrt{J2}$ )が 20%を超え、その分布も実験によりすべり面が形成された位置の下方に生じている。ケース 2、ケース 3 とも最大せん断ひずみ( $\sqrt{J2}$ )が 20%を超えた加速度は実験と同様、ケース 2 が 330Gal、ケース 3 が 250Gal であり、その分布もケ

ース 1 と同じ、実験によりすべり面が形成された位置の下方に生じている。

次に、実験スケールの違いが地すべり面形状や破壊の進行等に及ぼす影響を確認するための大型遠心力模型実験として、小型模型地盤との比較のために 30G 場で正弦波加振、50G 場で不規則波加振の動的載荷実験を 2 ケース実施した。さらに、実験で得られた強度特性を用いて、修正フェレニウス法による斜面安定解析を実施し、降伏震度（実験）との比較を行った。実験から明確なすべり面が確認できなかったことから、加振加速度に応じた標点の動き、さらに再現解析により得られた最大せん断ひずみ( $\sqrt{J2}$ )の分布に基づきすべり面、すべり面形成時の震度を設定した。これらより以下のことが分かった。

- ・ケース 1 は 300Gal 加振時に標点の移動に伴う変化が顕著となり、再現解析により得られた最大せん断ひずみ( $\sqrt{J2}$ )が 20%を超える領域が顕れた。その領域の上部に円弧状のすべり面を設定し、0.31(=300Gal/980Gal)を降伏震度(実験)とした。
- ・ケース 1 のすべり面の形状は、小型模型地盤におけるケース 2 のすべり面位置とも概ね対応しており、地盤条件が同一であればすべり面の発生位置に斜面の規模の影響はみられないことが分かる。
- ・ケース 2 は標点の動きからすべり面位置を推定することが困難なため、再現解析より最大せん断ひずみ( $\sqrt{J2}$ )が 20%を大きく超える領域が顕れた 500Gal を降伏震度(実験)とし、その領域の真ん中に円弧状のすべり面を設定した。
- ・設定したすべり面に対して修正フェレニウス法による安定解析より降伏震度（安定解析）を求めた結果、いずれのケース 1、ケース 2 とも 0.10 以下と実験よりかなり小さな値となった。大型模型地盤の強度特性は小型模型地盤と異なり、加圧密領域と正規圧密領域が交互に存在する不均質性を有しており、小型模型地盤と同様な考え方で強度特性を設定していることなども、実験と整合しない理由と考えられる。

最後に、平成 28 年度、平成 30 年度および令和元年度の遠心場での静的載荷実験および動的載荷実験の結果と修正フェレニウス法による評価結果を整理し、海底下における斜面の地震時安定性評価に修正フェレニウス法を適用する際の不確実さに関する主要な要因の抽出を行った。適用性は、実験ですべり面が形成した、また形成過程にあると推定した面周辺に円弧を設定し、降伏震度(安定解析)と降伏震度(実験)の比較に基づき検討し、以下のことが分かった。

- ・全体として、降伏震度(安定解析)は降伏震度(実験)と同定度（中央値で降伏震度(実験)は降伏震度(安定解析)の 0.98 倍）にあるが、ばらつきは対数標準偏差 $\xi$ で 0.45 程度と大きい。また、安定解析による降伏震度と実験値の相関係数は 0.54 と小さい。
- ・正規圧密粘土を用いた実験のケース数が少ないものの、過圧密粘土を用いたケースで

は実験値が安定解析より得られた値に比べて小さい傾向も認められる。

- 修正フェレニウス法による降伏震度を評価する上での主要な不確かさの要因として、模型地盤の強度特性としての圧密状態の差異、安定解析に用いる強度特性と斜面勾配が考えられる。
- これまでの実験結果より、水深などは影響が小さい。

以上より、海底下における斜面の地震時安定性評価について修正フェレニウス法の適用性を定量的に検討する上で、海底地盤の特性に近い正規圧密状態における実験データを追加することが重要と考えられる。

## 目次

1	はじめに .....	1
2	小型遠心力模型実験 .....	3
2.1	正規圧密状態にある地盤模型の製作 .....	3
2.1.1	実験装置 .....	3
2.1.2	実験条件 .....	5
2.1.3	実験方法 .....	7
2.1.4	模型地盤の作製方法 .....	8
2.1.5	地盤変位の測定方法 (PIV 画像解析) .....	11
2.2	静的載荷実験と動的載荷実験の結果と崩壊挙動の分析 .....	12
2.2.1	Case1 .....	12
2.2.2	Case2 .....	33
2.2.3	Case3 .....	50
2.3	模型地盤の斜面破壊の再現解析 .....	65
2.3.1	修正フェレニウス法による安定解析 .....	65
2.3.2	静的解析および動的解析による再現解析 .....	72
3	大型遠心力模型実験 .....	107
3.1	正規圧密状態にある地盤模型の製作 .....	107
3.1.1	実験装置 .....	107
3.1.2	実験ケース .....	110
3.1.3	模型地盤の概要 .....	111
3.1.4	模型材料 .....	113
3.1.5	模型地盤の作製方法 .....	113
3.1.6	実験の計測項目 .....	118
3.1.7	画像解析 .....	118
3.1.8	加振実験 .....	120
3.1.9	実験データ整理の概要 .....	121
3.2	動的載荷実験の結果と崩壊挙動の分析 .....	122
3.2.1	Case1 .....	122
3.2.2	Case2 .....	147
3.3	模型地盤の斜面破壊の再現解析 .....	168
3.3.1	修正フェレニウス法による安定解析 .....	168
3.3.2	動的解析による再現解析 .....	173

4	海底下の斜面不安定化の評価への修正フェレニウス法の適用性 .....	197
4.1	適用性評価に用いる実験とその考え方 .....	197
4.1.1	適用性評価に用いる実験 .....	197
4.1.2	適用性評価の考え方 .....	197
4.2	適用性の分析 .....	198
5	まとめ .....	203
6	参考文献 .....	206

## 図目次

図 2-1	遠心模型実験装置概要図.....	4
図 2-2	実験モデル (Case1) .....	6
図 2-3	実験モデル (Case2) .....	6
図 2-4	実験モデル (Case3) .....	7
図 2-5	実験手順のフロー.....	8
図 2-6	模型地盤概要図.....	9
図 2-7	圧密沈下量の時刻歴.....	12
図 2-8	ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験前) .....	13
図 2-9	せん断強度分布と含水比の深度分布.....	13
図 2-10	土槽傾斜角の経時変化.....	15
図 2-11	水圧の経時変化.....	15
図 2-12	遠心加速度の経時変化.....	15
図 2-13	ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験後) .....	16
図 2-14	せん断強度分布と含水比の深度分布.....	17
図 2-15	一軸圧縮強度試験用試料の採取位置.....	17
図 2-16	一軸圧縮強度試験結果.....	19
図 2-17	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 1) .....	20
図 2-18	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 2) .....	21
図 2-19	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 3) .....	22
図 2-20	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 4) .....	23
図 2-21	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 5) .....	24
図 2-22	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 6) .....	25
図 2-23	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 7) .....	26
図 2-24	水平変位分布 (Case1) (その 1) .....	27
図 2-25	水平変位分布 (Case1) (その 2) .....	28
図 2-26	水平変位分布 (Case1) (その 3) .....	29

図 2-27	せん断ひずみ分布 (Case1) (その 1)	30
図 2-28	せん断ひずみ分布 (Case1) (その 2)	31
図 2-29	せん断ひずみ分布 (Case1) (その 3)	32
図 2-30	圧密沈下量の時刻歴	33
図 2-31	ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験前)	34
図 2-32	せん断強度分布と含水比の深度分布 (Case2)	34
図 2-33	間隙水圧計と加速度計の設置状況 (Case2)	35
図 2-34	台、土槽および地盤の加速度の時刻歴 (その 1)	37
図 2-35	台、土槽および地盤の加速度の時刻歴 (その 2)	38
図 2-36	土槽下部および地盤の水圧の時刻歴 (その 1)	39
図 2-37	土槽下部および地盤の水圧の時刻歴 (その 2)	40
図 2-38	ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験後)	41
図 2-39	せん断強度分布と含水比の深度分布	41
図 2-40	一軸圧縮強度試験用試料の採取位置	42
図 2-41	一軸圧縮強度試験結果	44
図 2-42	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case2) (その 1)	45
図 2-43	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case2) (その 2)	46
図 2-44	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case2) (その 3)	47
図 2-45	水平変位分布 (Case2) (その 1)	48
図 2-46	水平変位分布 (Case2) (その 2)	49
図 2-47	せん断ひずみ分布 (Case2) (その 1)	49
図 2-48	せん断ひずみ分布 (Case2) (その 2)	50
図 2-49	圧密沈下量の時刻歴	51
図 2-50	ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験前)	52
図 2-51	せん断強度分布と含水比の深度分布 (Case3)	52
図 2-52	間隙水圧計と加速度計の設置状況 (Case3)	53
図 2-53	台、土槽および地盤の加速度の時刻歴	55
図 2-54	土槽下部および地盤の水圧の時刻歴	56
図 2-55	ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験後)	57
図 2-56	せん断強度分布と含水比の深度分布	57
図 2-57	一軸圧縮強度試験用試料の採取位置	58
図 2-58	一軸圧縮強度試験結果	60
図 2-59	地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case3) (その 1)	

.....	61
図 2-60 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case3) (その 2)	62
.....	62
図 2-61 水平変位分布 (Case3)	63
図 2-62 せん断ひずみ分布 (Case3)	64
図 2-63 修正フェレニウス法の概略図	66
図 2-64 強度定数の設定 (Case1)	67
図 2-65 実験で見られたすべり面と解析に用いたすべり面および臨界円 (Case1)	67
.....	67
図 2-66 土槽の傾斜角と安全率の関係 (Case1)	68
図 2-67 強度定数の設定 (Case2)	69
図 2-68 実験で見られたすべり面と解析に用いたすべり面および臨界円 (Case2)	69
.....	69
図 2-69 加振加速度と安全率の関係 (Case2)	70
図 2-70 強度定数の設定 (Case3)	71
図 2-71 実験で見られたすべり面と解析に用いたすべり面および臨界円 (Case3)	71
.....	71
図 2-72 加振加速度と安全率の関係 (Case3)	72
図 2-73 強度定数の設定	73
図 2-74 模型地盤の概要	74
図 2-75 解析モデル	74
図 2-76 土槽傾斜角に対応した入力加速度	74
図 2-77 せん断ひずみ増分とせん断ひずみ第 2 不変量 $\sqrt{J_2}$ の分布 (Case1) (その 1)	75
.....	75
図 2-78 せん断ひずみ増分とせん断ひずみ第 2 不変量 $\sqrt{J_2}$ の分布 (Case1) (その 2)	76
.....	76
図 2-79 せん断ひずみ増分とせん断ひずみ第 2 不変量 $\sqrt{J_2}$ の分布 (Case1) (その 3)	77
.....	77
図 2-80 強度定数の設定	79
図 2-81 模型地盤の概要	80
図 2-82 解析モデル	80
図 2-83 加速度と間隙水圧の時刻歴 (100gal 40 波)	81
図 2-84 解析結果 (100gal 40 波)	81
図 2-85 加速度と間隙水圧の時刻歴 (200gal 40 波)	82
図 2-86 解析結果 (200gal 40 波)	82
図 2-87 加速度と間隙水圧の時刻歴 (250gal 40 波)	83

図 2-88	解析結果 (250gal 40 波)	83
図 2-89	加速度と間隙水圧の時刻歴 (300gal 40 波)	84
図 2-90	解析結果 (300gal 40 波)	84
図 2-91	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 40 波)	85
図 2-92	解析結果 (330gal 40 波)	85
図 2-93	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_1)	86
図 2-94	解析結果 (330gal 80 波_1)	86
図 2-95	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_2)	87
図 2-96	解析結果 (330gal 80 波_2)	87
図 2-97	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_3)	88
図 2-98	解析結果 (330gal 80 波_3)	88
図 2-99	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_4)	89
図 2-100	解析結果 (330gal 80 波_4)	89
図 2-101	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_5)	90
図 2-102	解析結果 (330gal 80 波_5)	90
図 2-103	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_6)	91
図 2-104	解析結果 (330gal 80 波_6)	91
図 2-105	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_7)	92
図 2-106	解析結果 (330gal 80 波_7)	92
図 2-107	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_8)	93
図 2-108	解析結果 (330gal 80 波_8)	93
図 2-109	強度定数の設定	95
図 2-110	模型地盤の概要	96
図 2-111	解析モデル	96
図 2-112	加速度と間隙水圧の時刻歴 (100gal 40 波)	97
図 2-113	解析結果 (100gal 40 波)	97
図 2-114	加速度と間隙水圧の時刻歴 (200gal 40 波)	98
図 2-115	解析結果 (200gal 40 波)	98
図 2-116	加速度と間隙水圧の時刻歴 (250gal 40 波)	99
図 2-117	解析結果 (250gal 40 波)	99
図 2-118	加速度と間隙水圧の時刻歴 (300gal 40 波)	100
図 2-119	解析結果 (300gal 40 波)	100
図 2-120	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 40 波)	101
図 2-121	解析結果 (330gal 40 波)	101
図 2-122	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_1)	102
図 2-123	解析結果 (330gal 80 波_1)	102

図 2-124	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_2)	103
図 2-125	解析結果 (330gal 80 波_2)	103
図 2-126	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_3)	104
図 2-127	解析結果 (330gal 80 波_3)	104
図 2-128	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_4)	105
図 2-129	解析結果 (330gal 80 波_4)	105
図 2-130	加速度と間隙水圧の時刻歴 (330gal 80 波_5)	106
図 2-131	解析結果 (330gal 80 波_5)	106
図 3-1	遠心模型実験装置の構成	108
図 3-2	遠心振動台の構成	108
図 3-3	実験用土槽	110
図 3-4	模型地盤の概要	112
図 3-5	混合粘土の圧縮曲線	113
図 3-6	地盤模型作製手順	115
図 3-7	ケース 1 (30g) における各層の予備圧密荷重	116
図 3-8	ケース 2 (50g) における各層の予備圧密荷重	117
図 3-9	振動台上でのアクリル剛土槽とカメラの位置関係 (平面図)	119
図 3-10	入力波 (ケース 1、正弦波)	121
図 3-11	入力波 (ケース 2、不規則波)	121
図 3-12	ケース 1 の粘土層圧密履歴	123
図 3-13	ケース 1 における遠心重力載荷前の圧密領域の別	124
図 3-14	ケース 1 のせん断強度	126
図 3-15	遠心重力上昇時の応答	127
図 3-16	計測器設置位置と計測器番号	128
図 3-17	加速度の時刻歴 (正弦波 50gal)	129
図 3-18	間隙水圧、過剰間隙水圧、変位の時刻歴 (正弦波 50gal)	130
図 3-19	加速度の時刻歴 (正弦波 100gal)	131
図 3-20	間隙水圧、過剰間隙水圧、変位の時刻歴 (正弦波 100gal)	132
図 3-21	加速度の時刻歴 (正弦波 200gal)	133
図 3-22	間隙水圧、過剰間隙水圧、変位の時刻歴 (正弦波 200gal)	134
図 3-23	加速度の時刻歴 (正弦波 300gal)	135
図 3-24	間隙水圧、過剰間隙水圧、変位の時刻歴 (正弦波 300gal)	136
図 3-25	加速度の時刻歴 (正弦波 400gal)	137
図 3-26	間隙水圧、過剰間隙水圧、変位の時刻歴 (正弦波 400gal)	138
図 3-27	加速度の時刻歴 (正弦波 500gal)	139
図 3-28	間隙水圧、過剰間隙水圧、変位の時刻歴 (正弦波 500gal)	140

図 3-29	ケース 1 実験前後のターゲット位置 (側面図: アクリル壁側)	141
図 3-30	ケース 1 実験前後のターゲット位置 (側面図: 中心線)	141
図 3-31	ケース 1 実験前後のターゲット位置 (側面図: 剛壁側)	142
図 3-32	ケース 1 実験前後のターゲット位置 (平面図)	142
図 3-33	実験前後および加振前後のターゲット位置	144
図 3-34	ターゲットの壁面側と先端との移動距離の差	145
図 3-35	ブロックサンプリング位置	146
図 3-36	ケース 2 の粘土層圧密履歴	148
図 3-37	ケース 2 における遠心重力載荷前の圧密領域の別	149
図 3-38	ケース 2 のせん断強度	150
図 3-39	遠心重力上昇時の応答	151
図 3-40	計測器設置位置と計測器番号	153
図 3-41	加速度の時刻歴 (不規則波 500gal) (その 1)	154
図 3-42	加速度の時刻歴 (不規則波 500gal) (その 2)	155
図 3-43	間隙水圧の時刻歴 (不規則波 500gal)	155
図 3-44	過剰間隙水圧の時刻歴 (不規則波 500gal)	156
図 3-45	変位の時刻歴 (不規則波 500gal)	156
図 3-46	加速度の時刻歴 (不規則波 1000gal 1 回目) (その 1)	157
図 3-47	加速度の時刻歴 (不規則波 1000gal 1 回目) (その 2)	158
図 3-48	間隙水圧の時刻歴 (不規則波 1000gal 1 回目)	158
図 3-49	過剰間隙水圧の時刻歴 (不規則波 1000gal 1 回目)	159
図 3-50	変位の時刻歴 (不規則波 1000gal 1 回目)	159
図 3-51	加速度の時刻歴 (不規則波 1000gal 2 回目) その 1	160
図 3-52	加速度の時刻歴 (不規則波 1000gal 2 回目) その 2	161
図 3-53	間隙水圧の時刻歴 (不規則波 1000gal 2 回目)	161
図 3-54	過剰間隙水圧の時刻歴 (不規則波 1000gal 2 回目)	162
図 3-55	変位の時刻歴 (不規則波 1000gal 2 回目)	162
図 3-56	ケース 2 実験前後のターゲット位置 (側面図: アクリル壁側)	163
図 3-57	ケース 2 実験前後のターゲット位置 (側面図: 中心線)	163
図 3-58	ケース 2 実験前後のターゲット位置 (側面図: 剛壁側)	164
図 3-59	ケース 2 実験前後のターゲット位置 (平面図)	164
図 3-60	実験前後および加振前後のターゲット位置	165
図 3-61	ターゲットの壁面側と先端との移動距離の差	167
図 3-62	強度定数の設定(Case1)	169
図 3-63	実験で生じたすべり面の推定 (Case1)	170
図 3-64	実験より求めたすべり面と解析に用いたすべり面および臨界円 (Case1)	

.....	170
図 3-65 加振加速度と安全率の関係 (Case1) .....	171
図 3-66 強度定数の設定 (Case2) .....	172
図 3-67 実験で生じたすべり面の推定 (Case2) .....	172
図 3-68 実験より求めたすべり面と解析に用いたすべり面および臨界円 (Case2) .....	172
図 3-69 加振加速度と安全率の関係 (Case2) .....	173
図 3-70 強度定数の設定.....	175
図 3-71 模型地盤の概要.....	175
図 3-72 解析モデル.....	175
図 3-73 加速度の時刻歴 (50gal) .....	176
図 3-74 間隙水圧の時刻歴 (50gal) .....	177
図 3-75 解析結果 (50gal) .....	177
図 3-76 加速度の時刻歴 (100gal) .....	178
図 3-77 間隙水圧の時刻歴 (100gal) .....	179
図 3-78 解析結果 (100gal) .....	179
図 3-79 加速度の時刻歴 (200gal) .....	180
図 3-80 間隙水圧の時刻歴 (200gal) .....	181
図 3-81 解析結果 (200gal) .....	181
図 3-82 加速度の時刻歴 (300gal) .....	182
図 3-83 間隙水圧の時刻歴 (300gal) .....	183
図 3-84 解析結果 (300gal) .....	183
図 3-85 加速度の時刻歴 (400gal) .....	184
図 3-86 間隙水圧の時刻歴 (400gal) .....	185
図 3-87 解析結果 (400gal) .....	185
図 3-88 加速度の時刻歴 (500gal) .....	186
図 3-89 間隙水圧の時刻歴 (500gal) .....	187
図 3-90 解析結果 (500gal) .....	187
図 3-91 強度定数の設定.....	189
図 3-92 模型地盤の概要.....	190
図 3-93 解析モデル.....	190
図 3-94 加速度の時刻歴 (500gal) .....	191
図 3-95 間隙水圧の時刻歴 (500gal) .....	192
図 3-96 解析結果 (500gal) .....	192
図 3-97 加速度の時刻歴 (1000gal 1回目) .....	193
図 3-98 間隙水圧の時刻歴 (1000gal 1回目) .....	194

図 3-99	解析結果 (1000gal 1回目)	194
図 3-100	加速度の時刻歴 (1000gal 2回目)	195
図 3-101	間隙水圧の時刻歴 (1000gal 2回目)	196
図 3-102	解析結果 (1000gal 2回目)	196
図 4-1	実験で得られたすべり面と安定解析に用いるすべり面位置	198
図 4-2	実験で得られたすべり面と安定解析に用いるすべり面位置の比較	200
図 4-3	解析と実験による降伏震度の比較	202

## 表目次

表 2-1	遠心模型実験装置の諸元	3
表 2-2	実験ケース	6
表 2-3	解析ケースと条件	73
表 2-4	地盤の物性	73
表 2-5	解析ケースと条件	79
表 2-6	地盤の物性	79
表 2-7	解析ケースと条件	95
表 2-8	地盤の物性	95
表 3-1	相似則の比較 (縮尺 1/30、1/50)	109
表 3-2	実験ケース	110
表 3-3	予備実験一層目ベーンせん断試験結果	112
表 3-4	予備実験二層目ベーンせん断試験結果	112
表 3-5	計測機器名及び仕様	118
表 3-6	画像解析フロー	120
表 3-7	実験フロー	121
表 3-8	時刻歴データの整理項目と初期値	122
表 3-9	ケース1のベーンせん断試験の結果 (一層目)	124
表 3-10	ケース1のベーンせん断試験の結果 (二層目)	124
表 3-11	ケース1のベーンせん断試験の結果 (三層目)	125
表 3-12	ケース1の含水比 (一層目)	125
表 3-13	ケース1の含水比 (二層目)	125
表 3-14	ケース1の含水比 (三層目)	125
表 3-15	加振前後の地表面のベーンせん断試験結果	146
表 3-16	加振前後の含水比	146
表 3-17	一軸圧縮強度	147

表 3-18	ケース 2 のベーンせん断試験の結果（一層目） .....	149
表 3-19	ケース 2 のベーンせん断試験の結果（二層目） .....	149
表 3-20	ケース 2 のベーンせん断試験の結果（三層目） .....	149
表 3-21	ケース 2 の含水比（一層目） .....	150
表 3-22	ケース 2 の含水比（二層目） .....	150
表 3-23	ケース 2 の含水比（三層目） .....	150
表 3-24	加振前後の地表面のベーンせん断試験結果.....	168
表 3-25	加振前後の含水比.....	168
表 3-26	一軸圧縮強度.....	168
表 3-27	解析ケースと条件.....	174
表 3-28	地盤の物性.....	174
表 3-29	解析ケースと条件.....	189
表 3-30	地盤の物性.....	189
表 4-1	検討に用いる実験の条件.....	197
表 4-2	各ケースの強度定数.....	201
表 4-3	解析と実験による降伏震度の比較.....	201

## 写真目次

写真 2-1	遠心模型実験装置.....	3
写真 2-2	傾斜台 .....	4
写真 2-3	傾斜後 .....	4
写真 2-4	振動台（側面） .....	4
写真 2-5	振動台（上面） .....	4
写真 2-6	ベーンせん断試験機.....	5
写真 2-7	一軸圧縮試験機.....	5
写真 2-8	水圧計 .....	5
写真 2-9	加速度計.....	5
写真 2-10	間隙水圧計.....	5
写真 2-11	地盤の作製状況（その 1） .....	10
写真 2-12	地盤の作製状況（その 2） .....	11
写真 2-13	収録カメラ及び設置状況.....	11
写真 2-14	水圧計設置状況（Case1） .....	14
写真 2-15	実験前設置状況(Case1).....	14
写真 2-16	一軸圧縮試験の実施状況.....	18

写真 2-17	水圧計設置状況 (Case2)	35
写真 2-18	実験前設置状況(Case2)	36
写真 2-19	一軸圧縮試験の実施状況	43
写真 2-20	水圧計設置状況 (Case3)	53
写真 2-21	実験前設置状況(Case3)	54
写真 2-22	一軸圧縮試験の実施状況	59
写真 3-1	実験用剛土槽および傾斜用架台	109
写真 3-2	排水溝作製状況	116
写真 3-3	基盤層目荒らし状況	116
写真 3-4	圧密状況	117
写真 3-5	圧密時の沈下量計測状況	117
写真 3-6	振動台上でのアクリル剛土槽とカメラの設置状況	119
写真 3-7	画像解析用カメラの画角	119
写真 3-8	画像解析用の不動点の設定	120
写真 3-9	側方からの粘土層の様子	127
写真 3-10	地盤の状況 (加振前)	143
写真 3-11	地盤の状況 (正弦波 200gal 加振後)	143
写真 3-12	地盤の状況 (正弦波 300gal 加振後)	143
写真 3-13	地盤の状況 (正弦波 400gal 加振後)	143
写真 3-14	ターゲットの状態	144
写真 3-15	側方からの粘土層の様子	152
写真 3-16	色砂格子の変化	166

## 1 はじめに

平成 30 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、実施した 3 ケースの動的遠心載荷実験より、明確なすべり面の形成を伴う崩壊挙動を確認できなかった。その原因として、斜面模型の形状を精度よく作製するということから、過圧密状態で模型斜面を製作していることが考えられる。つまり、その製作過程で斜面模型を構成する粘土は過圧密状態となり、その応力-ひずみ関係の特性から、低い遠心場では明瞭なすべり面を形成しにくい状態にあると考えられる。そこで、地震時にける海底地盤の安定性評価への修正フェレニウス法の適用性を明らかにするためには、実海底地盤と同様な正規圧密状態にある斜面模型を対象とした実験の実施が必要と考えられる。そのため、正規圧密粘土斜面の作製方法について検討を行うこと、および本年事業で妥当性が確認できた数値解析の考え方が正規圧密粘土斜面へ適用性を有していることを確認することが課題として挙げられた。

令和元年度事業では、平成 30 年度までに実施した遠心実験で斜面模型の製作に用いた粘土を対象とし、正規圧密状態とした斜面模型を作製し、小型遠心力模型実験を実施する。実験では、まず 30G 場での静的載荷実験を 1 ケース実施する。ここで、水深は昨年度の実験を踏まえ 23m とする。次いで、水深が斜面の動的加振時の破壊挙動に及ぼす影響を把握するため、水深の 23m ケースに加え、昨年の実験を踏まえた水深 15m のケースについて正弦波加振による動的載荷実験を実施する。ここで、地盤模型の斜面勾配は、対象とする地盤材料の正規圧密状態で得られた既往の強度特性より  $15^\circ$  と設定する。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、平成 30 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。

さらに、実験で得られた強度特性を用いて、修正フェレニウス法による斜面安定解析を実施し、実験から得られたすべり面やそれが形成された時点の推定震度との比較を行

う。また、静的載荷実験と動的載荷実験について、再現解析を実施する。再現解析には、平成 30 年度と同様に有限差分法による解析コード「FLAC」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を用いる。解析に際して、せん断ひずみの発達領域と実験におけるすべり面の形成領域の対応、せん断ひずみの発達と作用震度の関係、およびすべり面上の土塊について PIV 解析により得られた変位の関係などに着目し、実験と解析の比較を実施する。

次に、実験スケールの違いが地すべり面形状や破壊の進行等に及ぼす影響を確認するため、より大きな模型地盤を対象として、30G 場および 50G 場の 2 ケースについて動的載荷実験を実施する。実験では、小型地盤模型の遠心実験と同様に、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も把握する。模型地盤の斜面長さは小型模型地盤の 2 倍程度とし、地盤模型の斜面勾配は小型地盤模型と同じ 15 度と設定する。30G 場の実験では正弦波加振、50G 場では不規則波加振による動的載荷実験を実施する。実験で得られた強度特性を用いて、修正フェレニウス法による斜面安定解析、構成モデルとしてモールクーロンモデルを用いた再現解析を実施し、小型地盤模型の遠心実験と同様に分析を行う。

最後に、平成 28 年度、平成 30 年度および令和元年度の遠心場での静的載荷実験および動的載荷実験の結果と修正フェレニウス法による評価結果をそれらの条件や結果について整理し、海底下における斜面の地震時安定性評価について修正フェレニウス法の適用性を検討する。

## 2 小型遠心力模型実験

### 2.1 正規圧密状態にある地盤模型の製作

#### 2.1.1 実験装置

実験は、五洋建設株式会社技術研究所が所有する、写真 2-1 の遠心模型実験装置を使用して行った。表 2-1 に遠心模型実験装置の諸元を、図 2-1 に遠心模型実験装置概要図を示す。写真 2-2~写真 2-3 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。写真 2-4~写真 2-5 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。地盤のせん断強度は、写真 2-6 のベーンせん断試験機および写真 2-7 の一軸圧縮強度試験機を用いて測定した。水深は写真 2-8 の水圧計、加振による地盤の応答は、写真 2-9 の加速度計、地盤の間隙水圧は写真 2-10 の間隙水圧計を用いて測定を行った。



写真 2-1 遠心模型実験装置

表 2-1 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

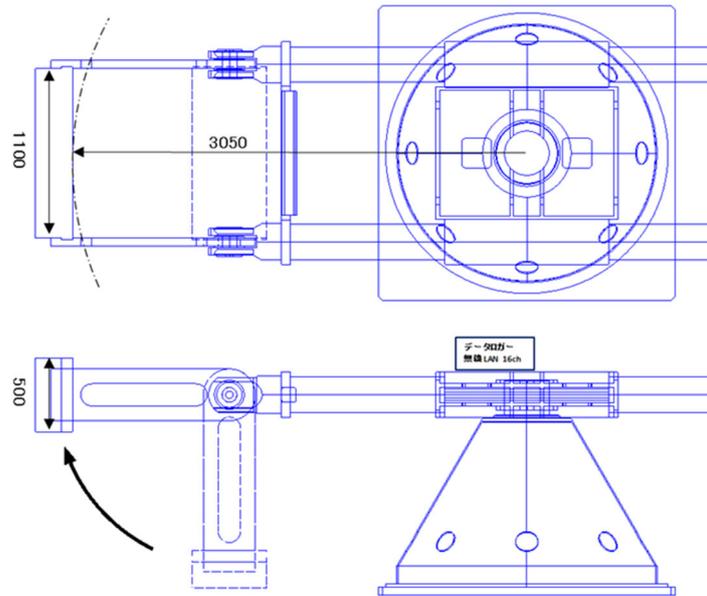


図 2-1 遠心模型実験装置概要図



写真 2-2 傾斜台



写真 2-3 傾斜後

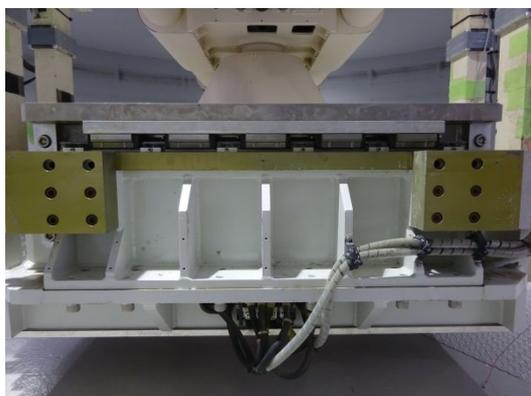


写真 2-4 振動台 (側面)

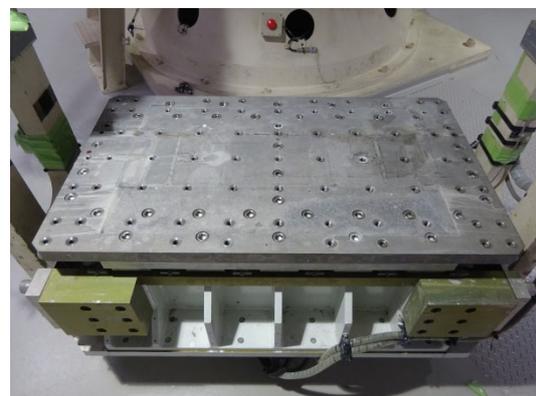


写真 2-5 振動台 (上面)

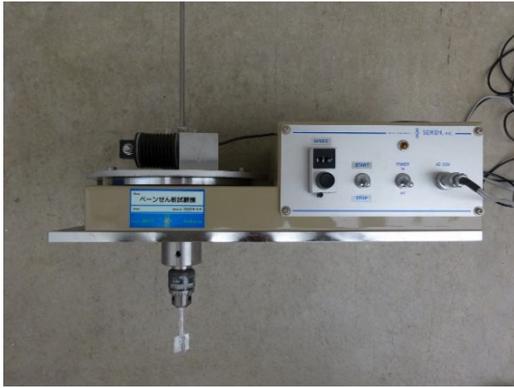


写真 2-6 ベーンせん断試験機

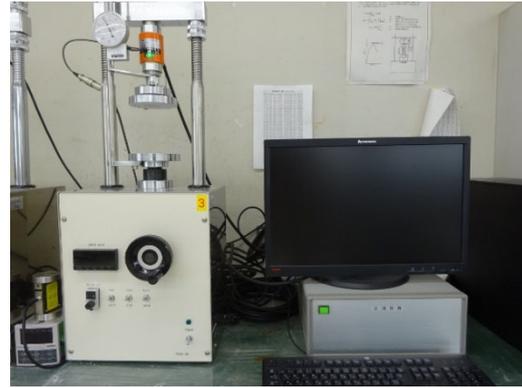


写真 2-7 一軸圧縮試験機



写真 2-8 水圧計

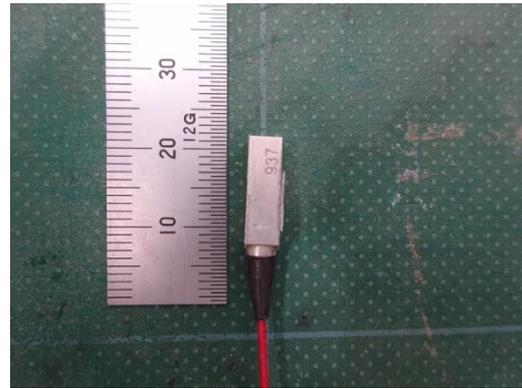


写真 2-9 加速度計



写真 2-10 間隙水圧計

### 2.1.2 実験条件

土槽自体を傾斜させ静的に模型地盤に震度を作用させる実験（静的実験）、地震動のような動的な外力を振動台によって模型地盤に与える実験（動的実験）を実施した。水深は 23m を基本とし、動的実験では水深 15m の条件でも実験を行った。なお、いずれも遠心加速度は 30G、模型斜面の勾配は  $15^\circ$  とした。これは予備実験において試作供試体 1 体を作製し、ベーンせん断強度および含水比を求めて決定した値である。予備実

験結果は後述するベーンせん断試験結果と含水比試験結果の図に併せて示した。

実験ケースは表 2-2 に示す 3 ケースである。Case1 は静的実験で水深 23m、Case2 は動的実験で水深 23m、Case3 は動的実験で水深 15m である。

実験モデルを図 2-2～図 2-4 に示す。

表 2-2 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	15°	23m	30G	静的
ケース2				動的
ケース3		15m		

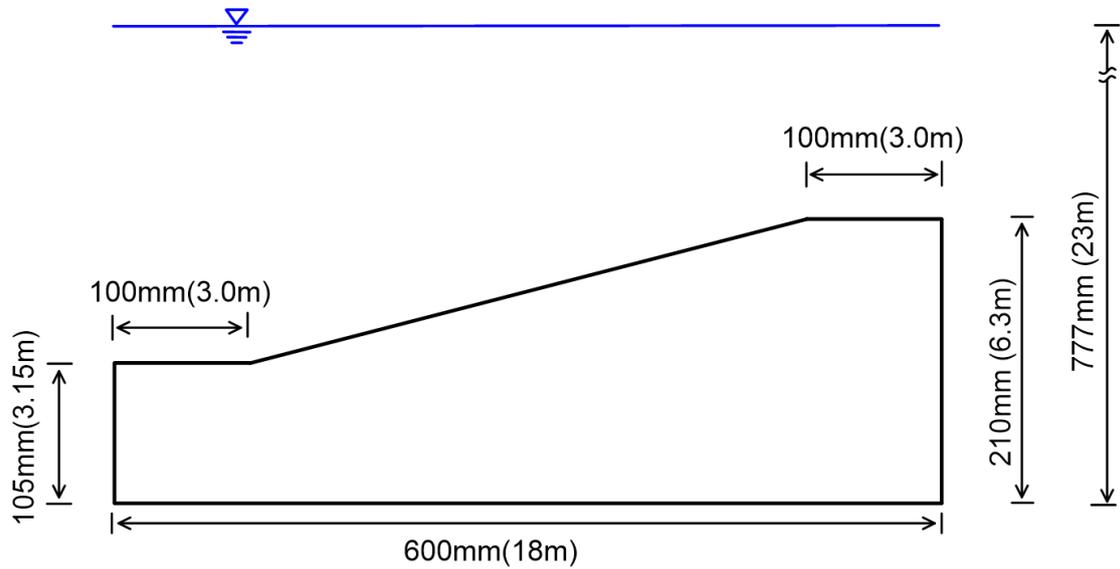


図 2-2 実験モデル (Case1)

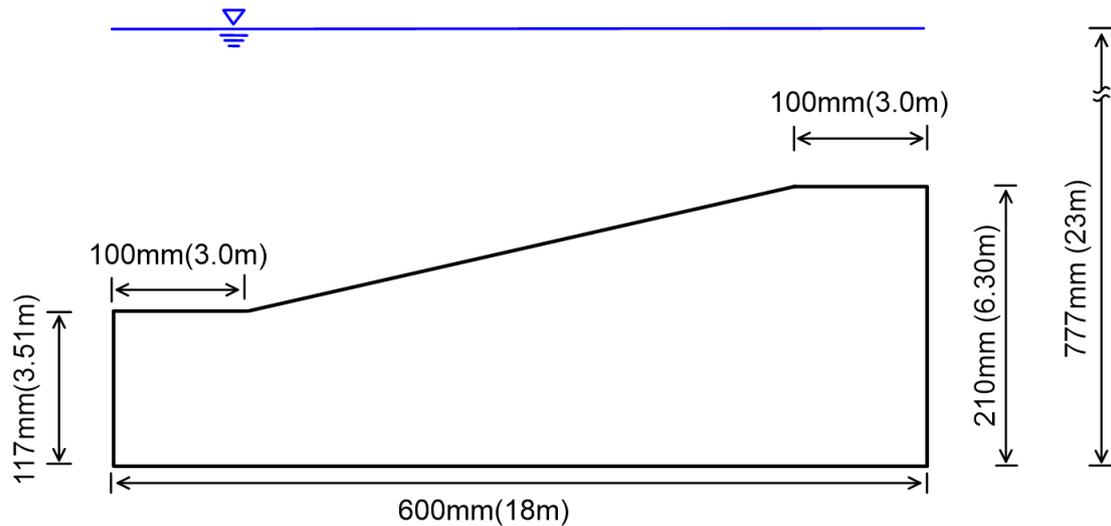


図 2-3 実験モデル (Case2)

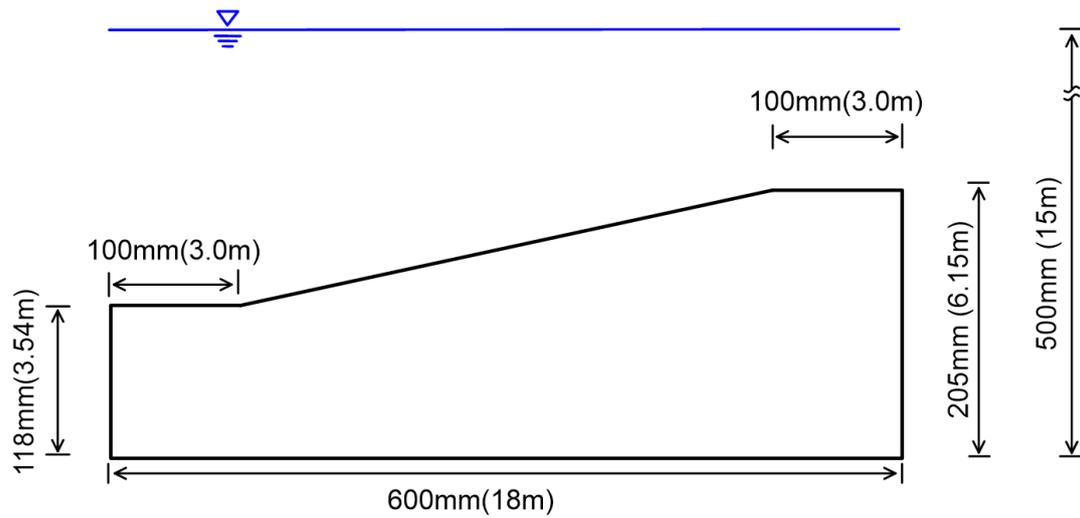


図 2-4 実験モデル (Case3)

### 2.1.3 実験方法

実験は図 2-5 に示す実験手順のフローに基づいて行った。粘性土調整をして、遠心場で圧密を行い、正規圧密状態であることを確認した後、斜面を整形し、地盤変位測定用の黒く着色した砂でマーキングをした。その後、湛水した状態で遠心圧密したのちに、動的实验または静的实验を実施する。実験前には地盤のせん断強度および含水比を測定し、試験後にも地盤のせん断強度を測定した。

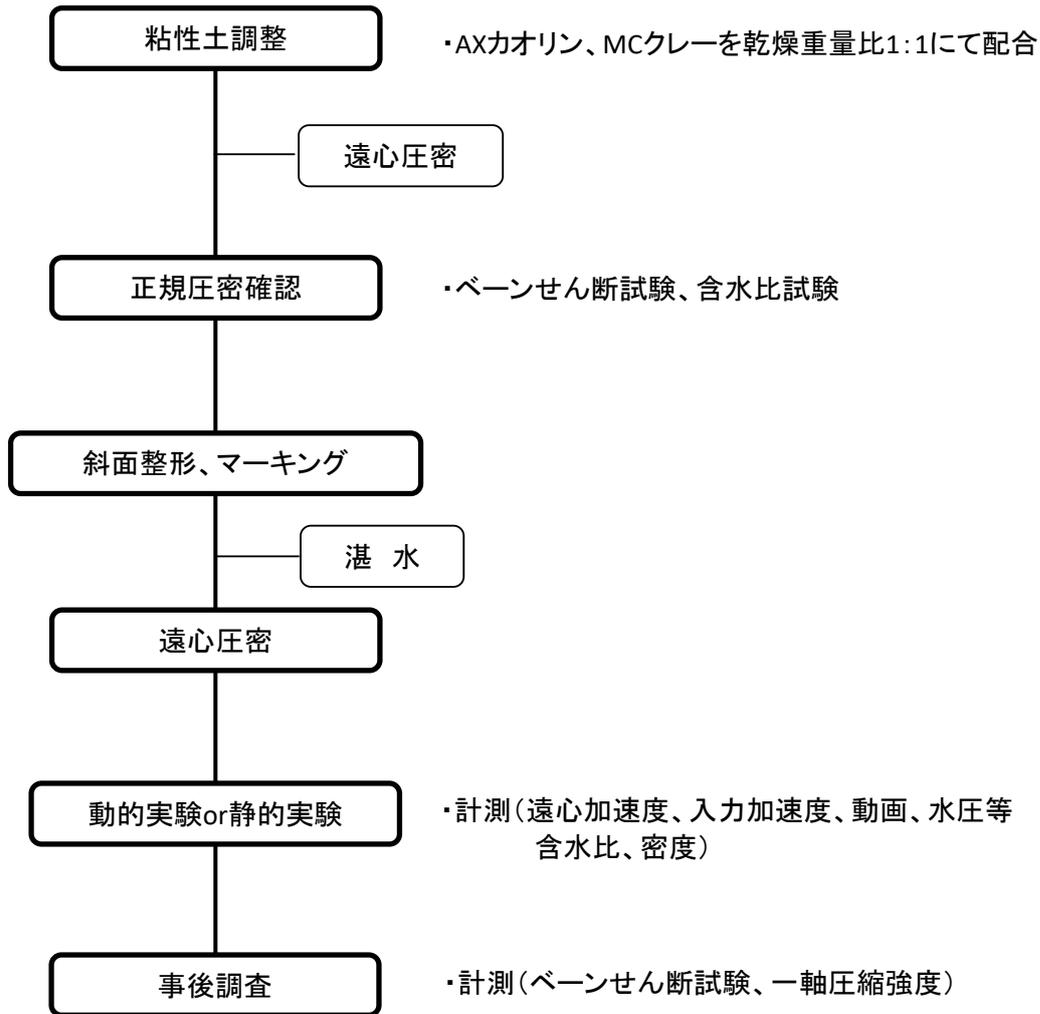


図 2-5 実験手順のフロー

#### 2.1.4 模型地盤の作製方法

正規圧密状態の地盤模型は以下の手順により作製した。各手順の実施状況を写真 2-11、写真 2-12 にまとめて示す。なお模型地盤概要図を図 2-6 に示す。

- ①粘性土作製:AX カオリンと MC クレーを乾燥重量比 1:1 で配合し、配合重量の 120% にあたる水道水を加水し、攪拌機にて混練を行った。
- ②粘性土投入:土槽内へ複数回かけて粘性土投入した。
- ③傾斜台設置:斜面勾配 15° と一致するように、傾斜台を用いて土層を 15° 傾けて設置した。
- ④遠心载荷による圧密(初期):両面排水を行いつつ 30G 場にて圧密を行った。

- ⑤遠心载荷による圧密(沈下計測)：模型地盤上面に上載荷重およびレーザー距離計を設置し、両面排水を行いつつ 30G 場にて圧密沈下計測を行った。
- ⑥ベーンせん断試験：ベーンせん断試験機を土槽上部に設置し、計測点のせん断強度試験を行った。
- ⑦含水比測定：サンプラーを用いて採取した模型地盤による深度方向の含水比測定を行った。なお、採取後にできた孔は事前に同条件で作製した粘土を用いて穴埋めした。
- ⑧模型地盤の整形：法肩幅 100mm を水平にカットし、カットした模型地盤を上下反転させて法尻幅 100mm に余盛した。斜面部は軽微な汚れなどの除去に留め極力乱さないこととした。また、模型地盤両側面の土槽境界面にシリコングリスを塗布し、観測面に変形確認用のメッシュを描画した。
- ⑨計測器設置：間隙水圧計、加速度計を模型地盤内に埋込設置した。
- ⑩湛水：傾斜地盤模型を乱さないよう注意して湛水した。

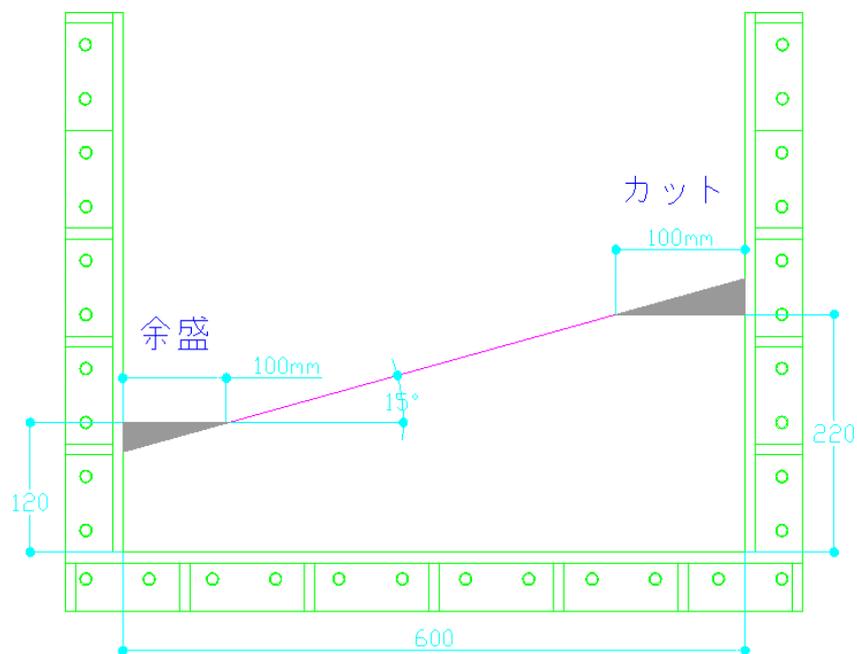
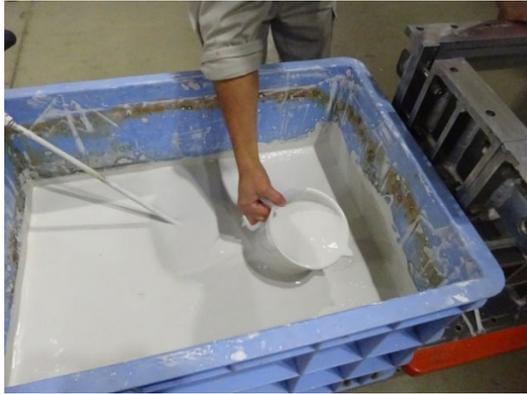


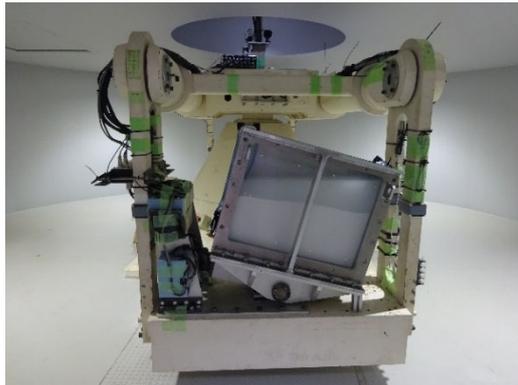
図 2-6 模型地盤概要図



①粘性土作製



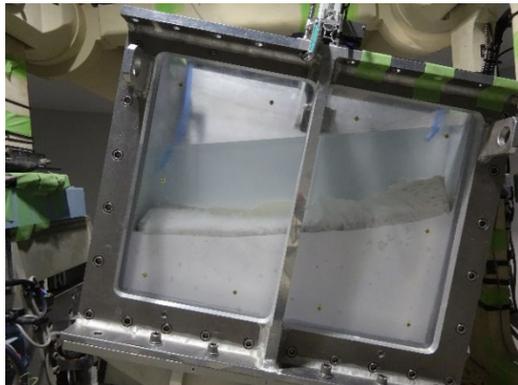
②粘性土投入



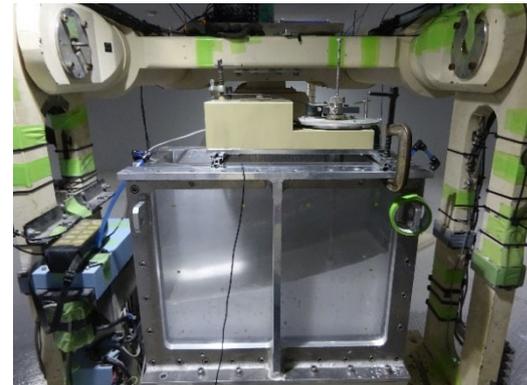
③土槽を傾斜



④遠心载荷による圧密(初期)



⑤遠心载荷による圧密(沈下計測)



⑥ベーンせん断試験



⑦含水比測定

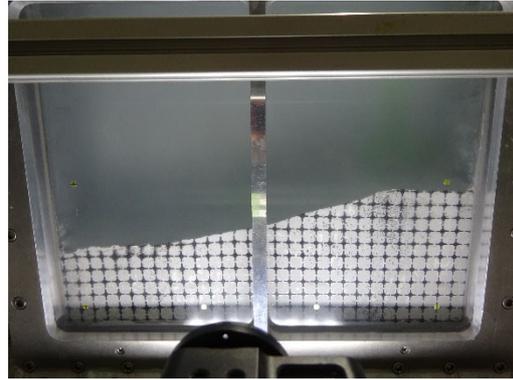


⑧斜面模型地盤の整形とマーキング

写真 2-11 地盤の作製状況 (その1)



⑨計測器設置



⑩湛水

写真 2-12 地盤の作製状況（その2）

### 2.1.5 地盤変位の測定方法（PIV 画像解析）

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 HERO5 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 2-13 に示す。

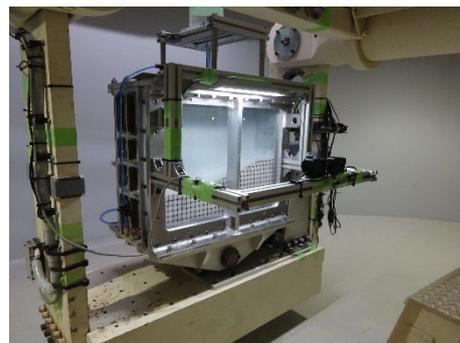


写真 2-13 収録カメラ及び設置状況

## 2.2 静的載荷実験と動的載荷実験の結果と崩壊挙動の分析

### 2.2.1 Case1

#### a) 地盤の圧密状況

30G場で遠心圧密において、 $\sqrt{t}$ 法にて圧密終了の判断を行った。沈下量の時刻歴を図 2-7 に示す。参考として 3t 法および双曲線法で表したものを示す。計測開始点は上載荷重および沈下計測用フロートが設置できるまで圧密させた所をゼロ点としている。上載荷重は模型地盤上面に 5.6 kg の珪砂を均一厚さに設置した。

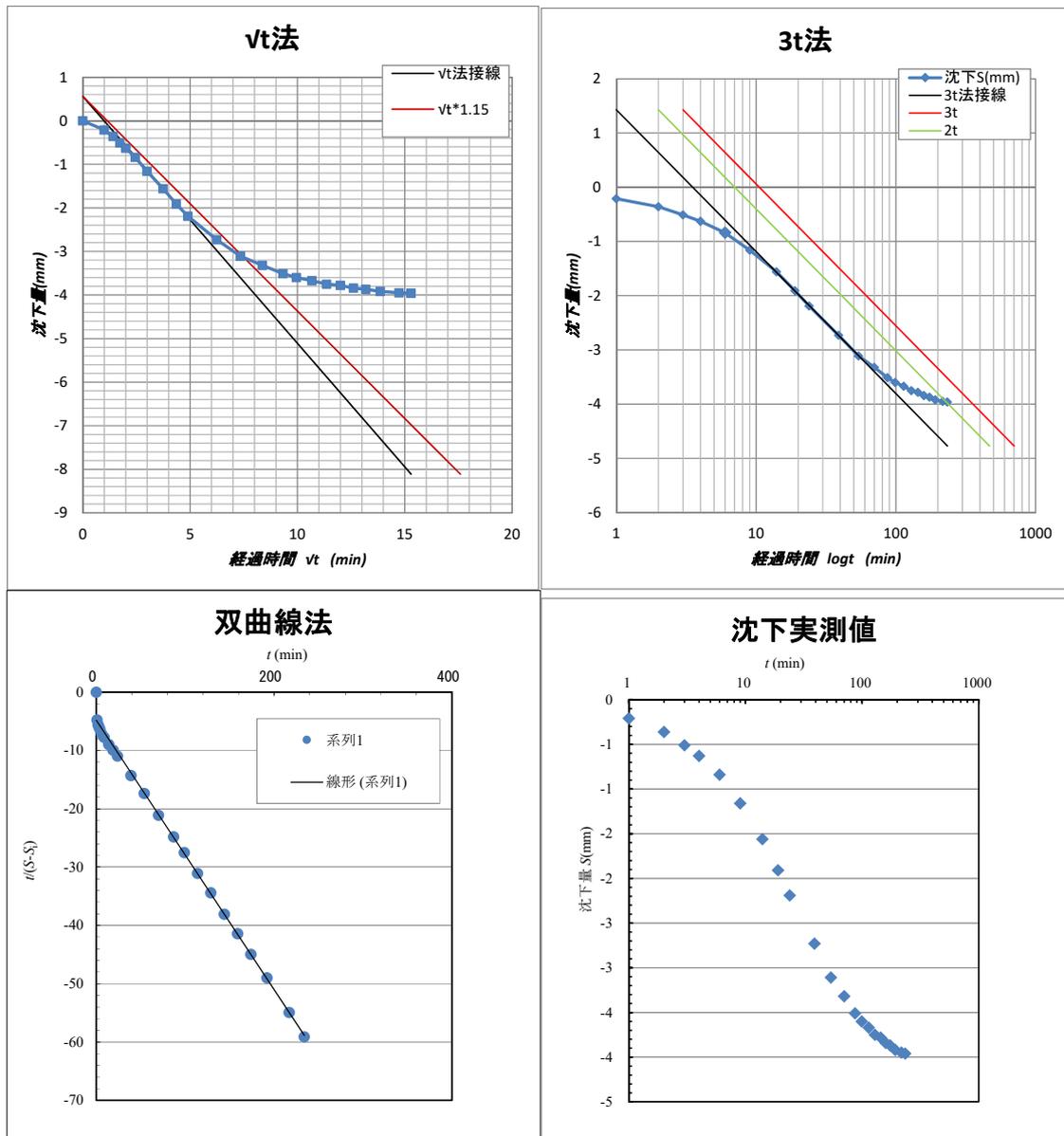


図 2-7 圧密沈下量の時刻歴

b) 模型地盤の実験前計測

実験前のベーンせん断試験による強度分布および含水比試験による含水比分布の計測位置を図 2-8 に示す。せん断強度分布および含水比分布を図 2-9 に示す。

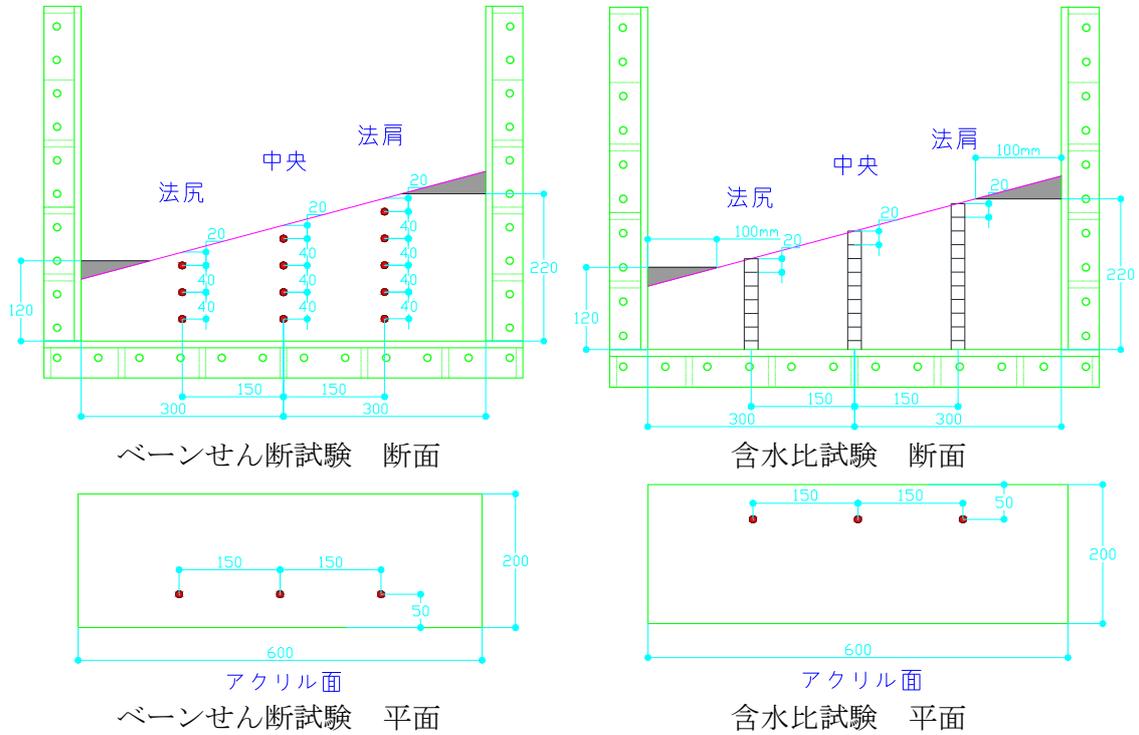


図 2-8 ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験前)

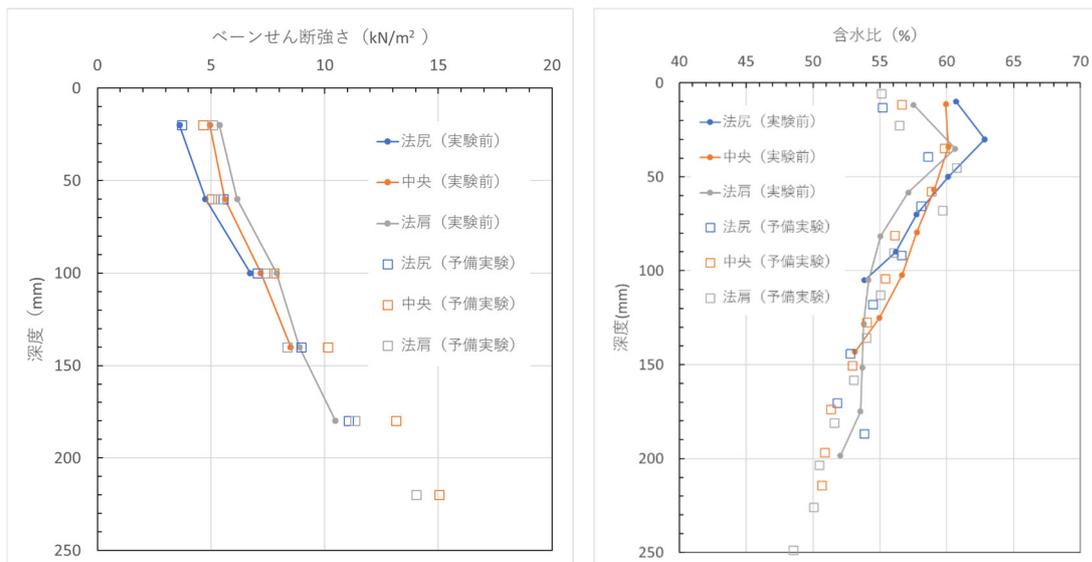


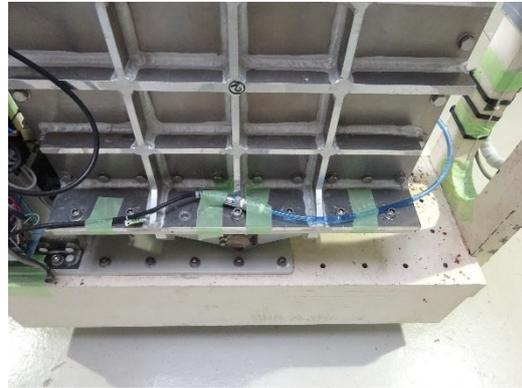
図 2-9 せん断強度分布と含水比の深度分布

c) 計測器設置と初期状態

水圧を計測するために、土槽蓋上部および土槽下部に水圧計を設置した。設置状況を写真 2-14 に示す。実験前の準備完了した地盤モデルの初期状態を写真 2-15 に示す。

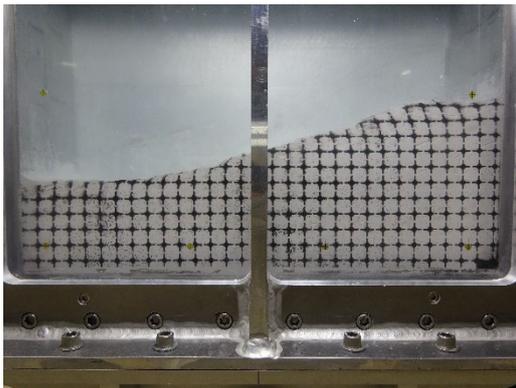


水圧計設置状況(土槽上部)



水圧計設置状況(土槽下部)

写真 2-14 水圧計設置状況 (Case1)



模型地盤



実験土槽

写真 2-15 実験前設置状況 (Case1)

d) 傾斜過程の応答

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。傾斜実験は、遠心加速度が 30G に到達してから約 10 分経過してから開始した。

斜面崩壊後、遠心装置を停止し、目視確認を実施した。傾斜角の経時変化を図 2-10 に示す。水圧の経時変化を図 2-11 に示す。30G 到達時から遠心装置回転停止までの遠心加速度の経時変化を図 2-12 に示す。

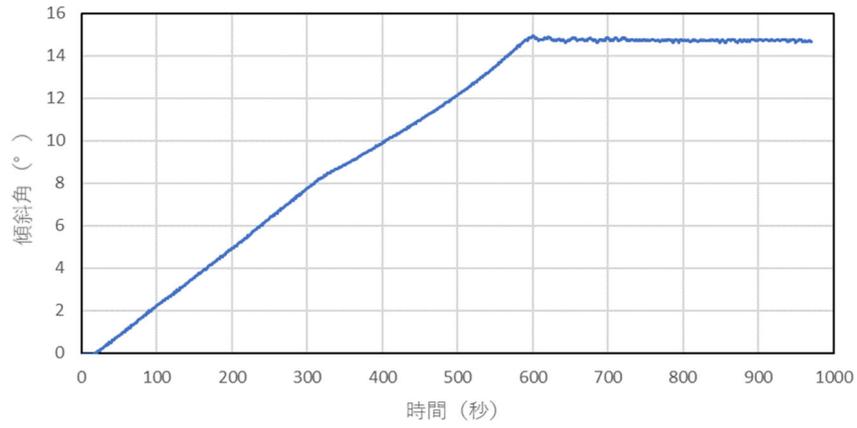


図 2-10 土槽傾斜角の経時変化

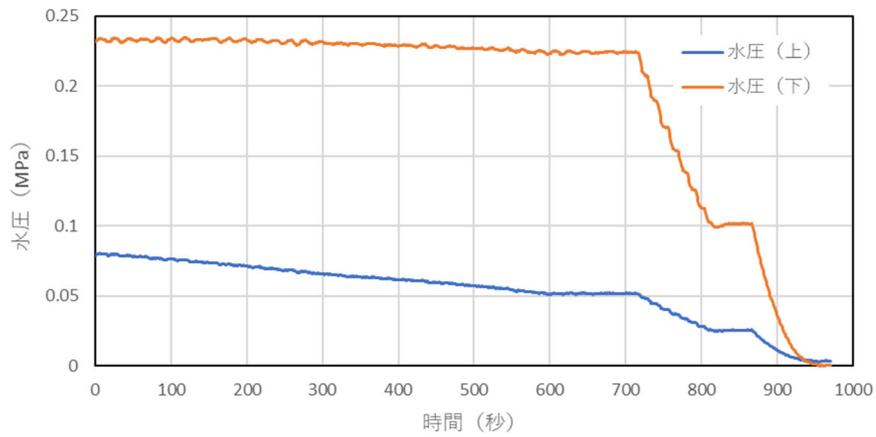


図 2-11 水圧の経時変化

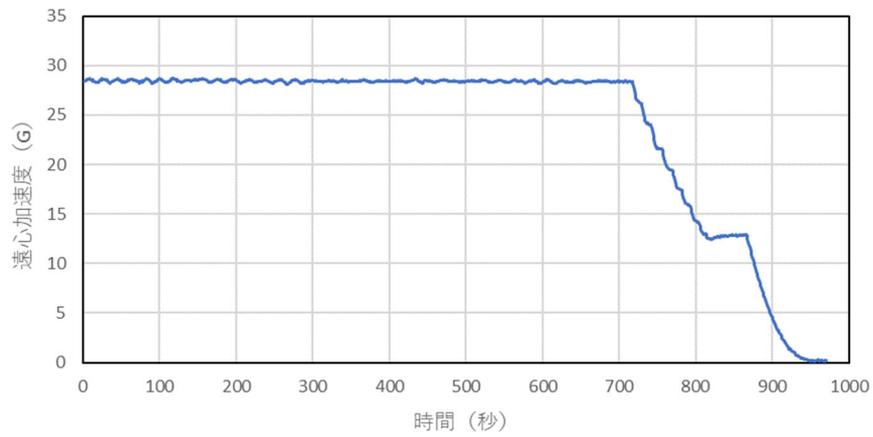


図 2-12 遠心加速度の経時変化

d) 模型地盤の実験後計測

実験後のベーンせん断試験による強度分布および含水比分布の計測位置を図 2-13 に示す。せん断強度分布および含水比分布を図 2-14 に示す。

模型地盤から試料を採取し、一軸圧縮強度試験を行った。試料は図 2-15 に示す 3 箇所から採取した。採取した試料による一軸圧縮強度試験状況を写真 2-16 に示す。法尻、中央、法肩ともに強度が低く、整形の途中、自重により変形し、供試体作製が困難であった。一軸圧縮試験結果を図 2-16 に示す。

中央(センター)、法尻は試験体作製時に供試体変形が大きく、法肩においては整形ができなかったため試験結果を得ることができなかった。

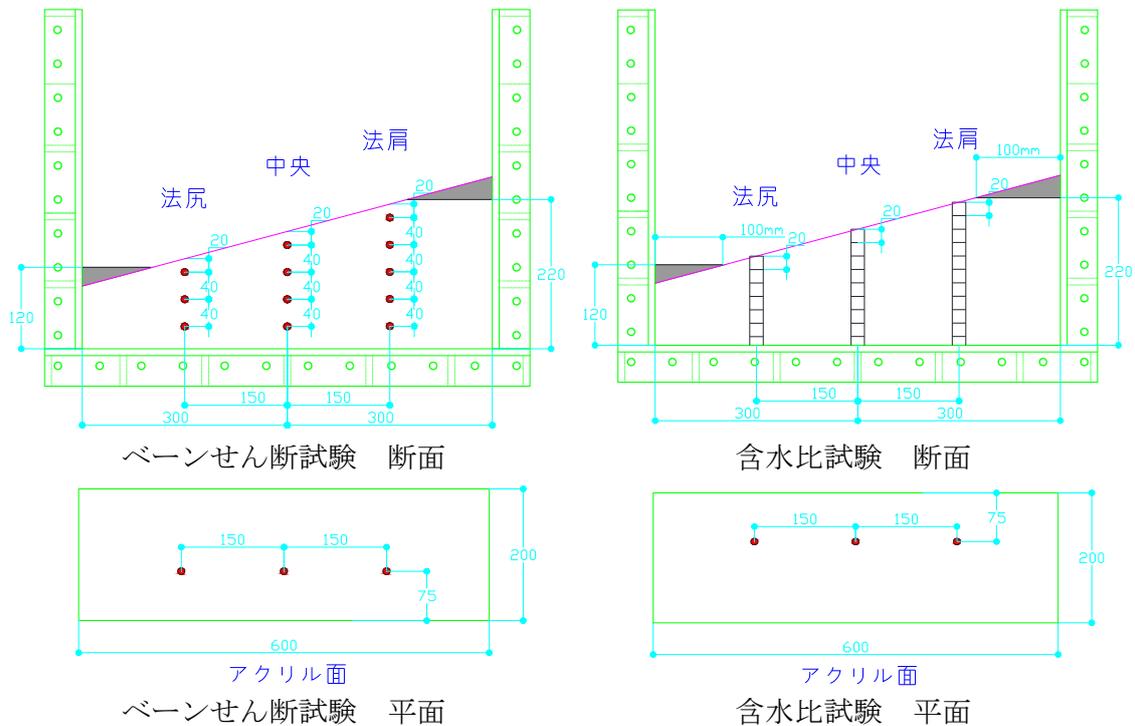


図 2-13 ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験後)

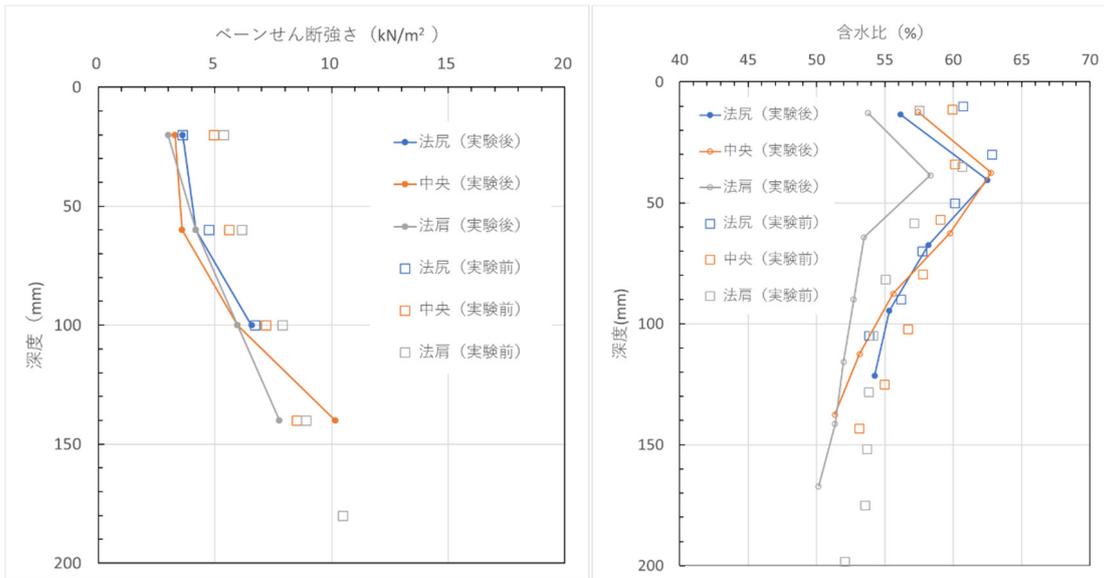


図 2-14 せん断強度分布と含水比の深度分布

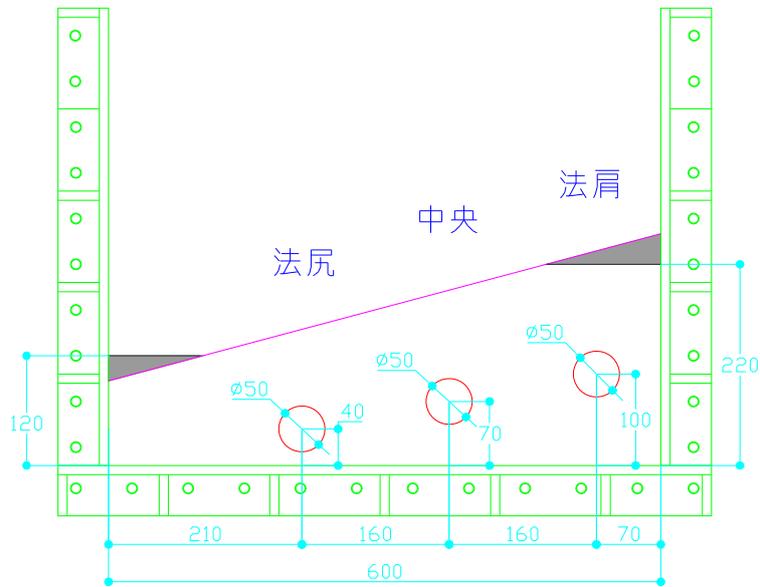


図 2-15 一軸圧縮強度試験用試料の採取位置



試料採取状況



整形状況



試験状況(法尻)



試験状況(中央)



供試体(法肩)

写真 2-16 一軸圧縮試験の実施状況

測点	一軸圧縮強さ	含水比	湿潤密度
	(kN/m <sup>2</sup> )	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )
法肩	—	55.0	—
中央	3.2	55.9	1.622
法尻	5.0	54.8	1.644

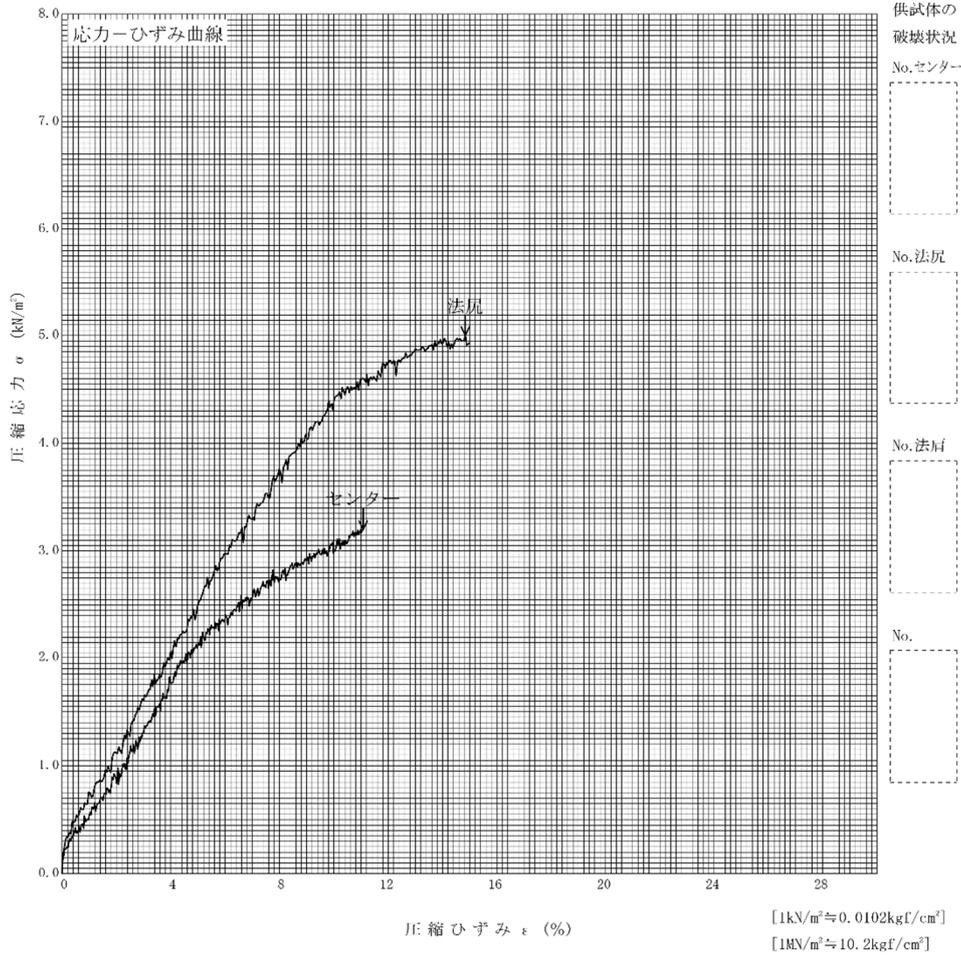


図 2-16 一軸圧縮強度試験結果

e) 画像解析により地盤変位

傾斜開始時を基準とした地盤変位のベクトル表示およびコンター表示を図 2-17～図 2-23 に示す。さらに 5 測線を抽出し、測線における深度方向の水平変位分布を図 2-24～図 2-26 に、せん断ひずみ分布を図 2-27～図 2-29 に示す。

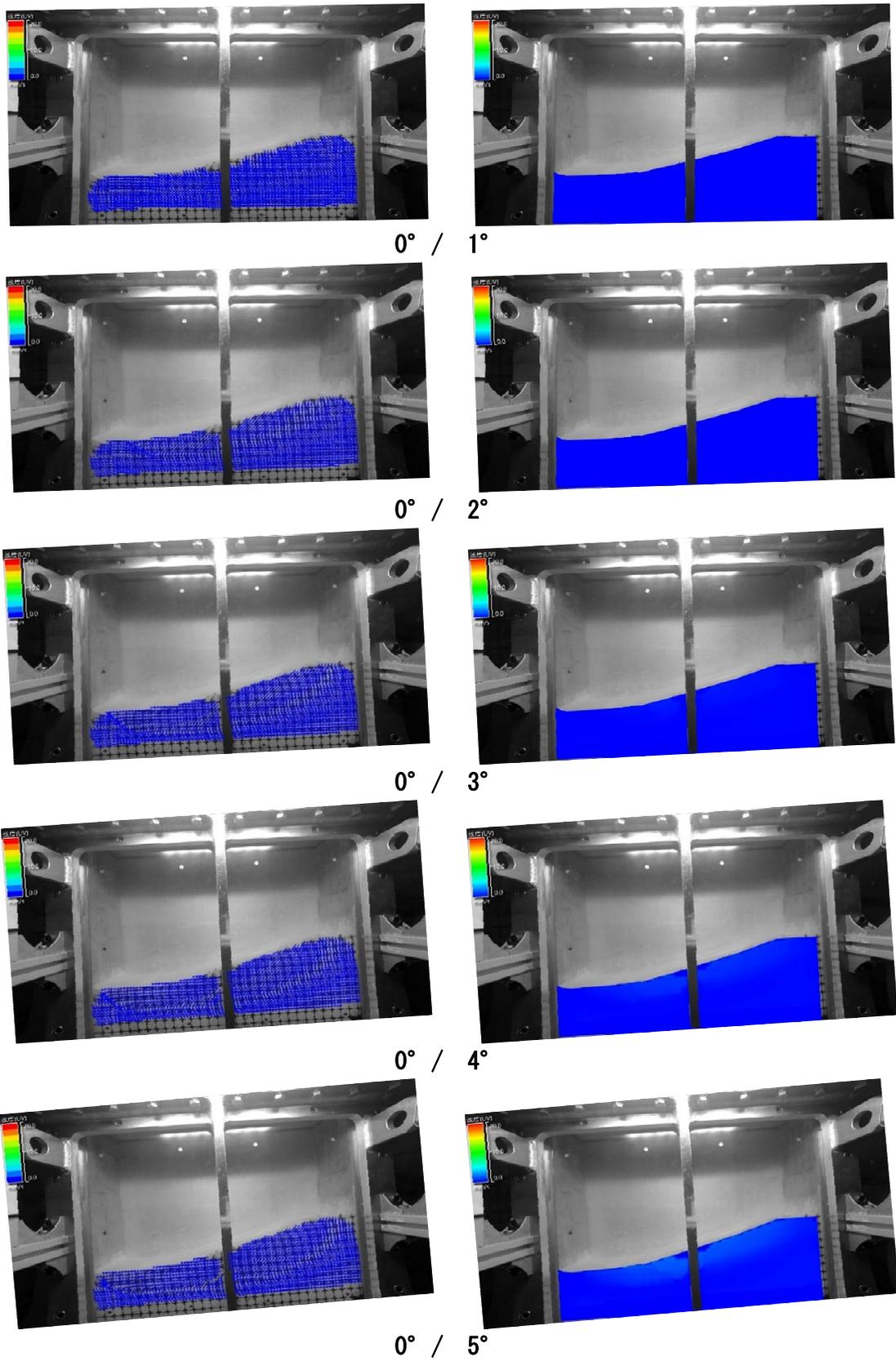


図 2-17 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 1)

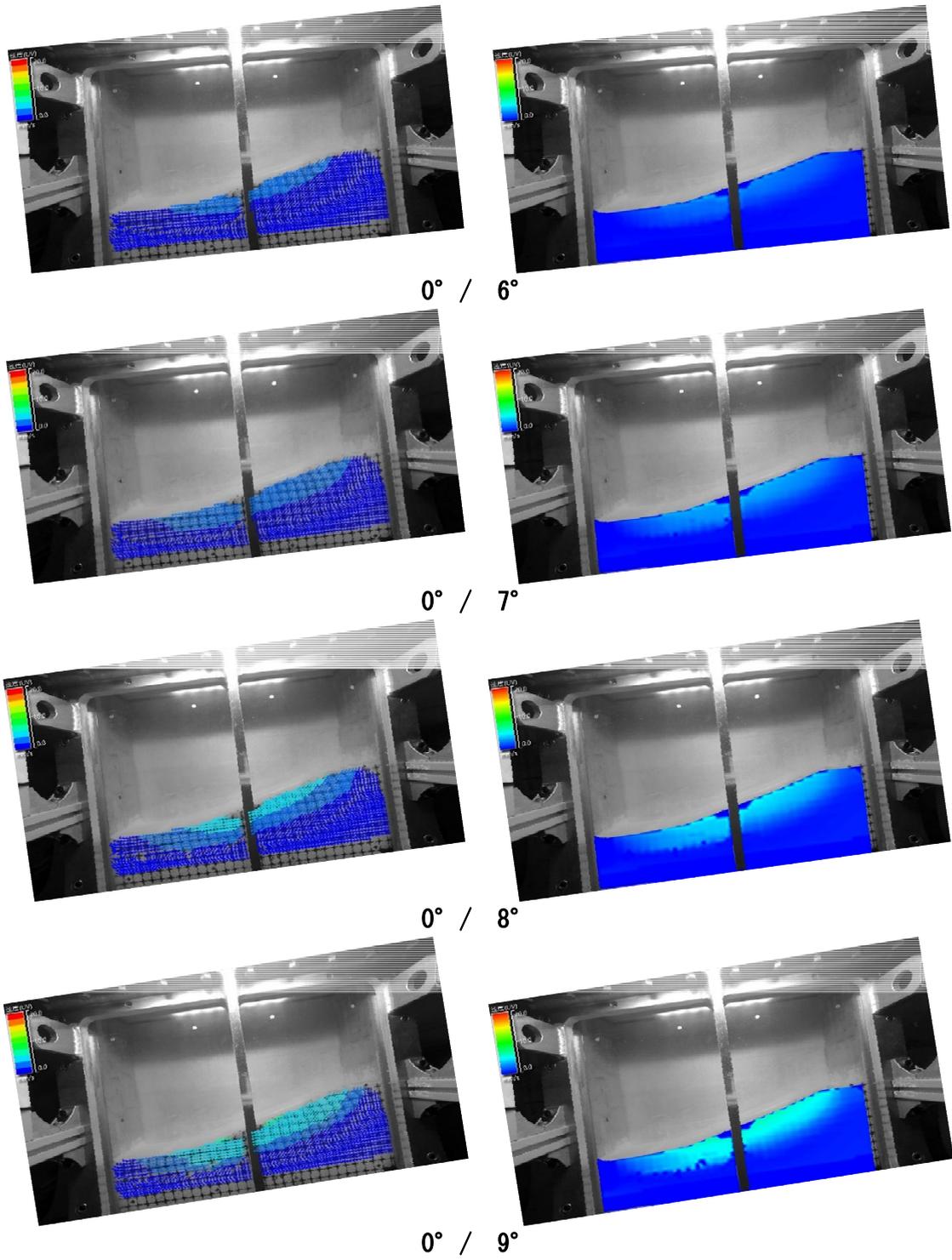


図 2-18 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 2)

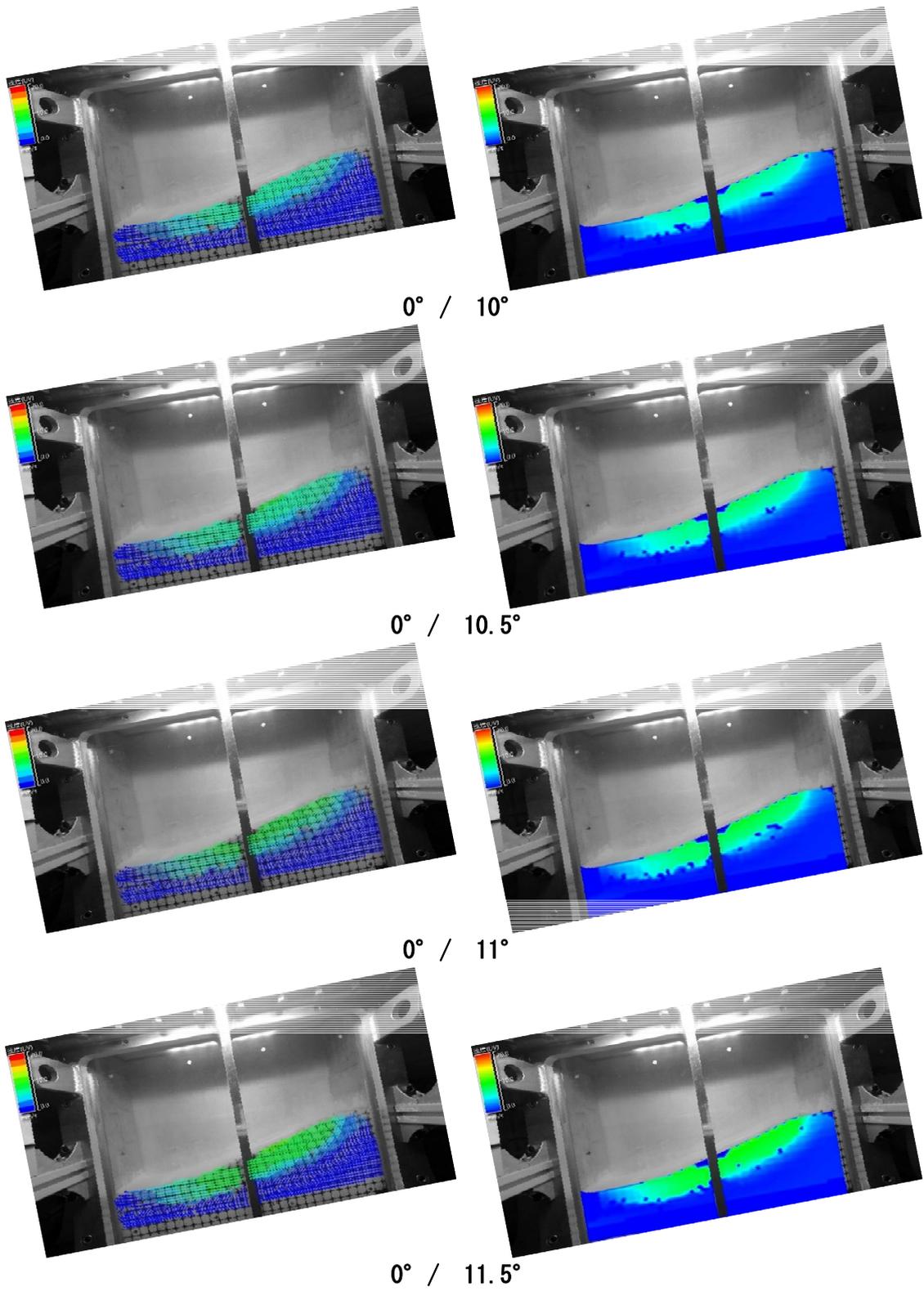
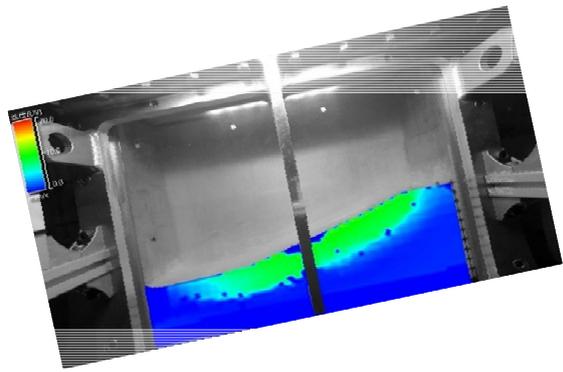
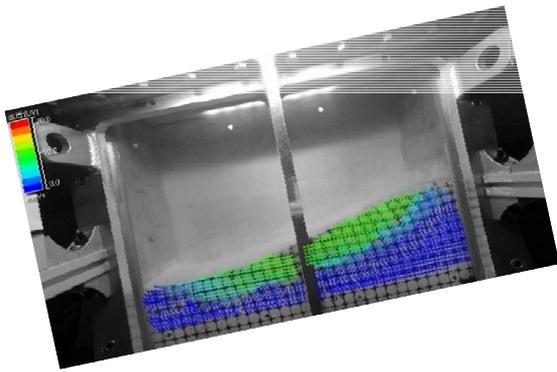
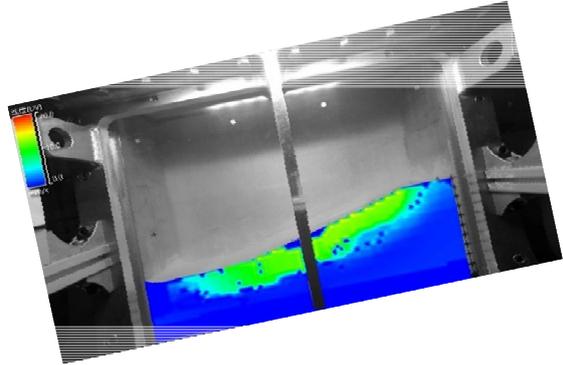
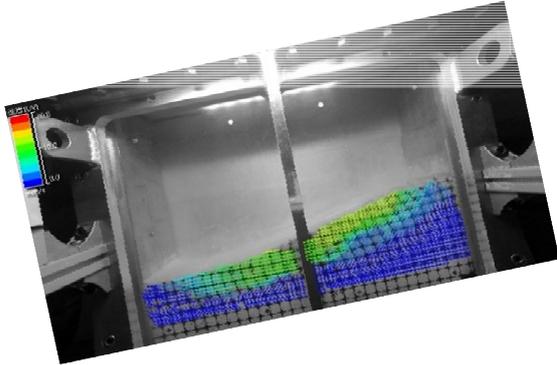


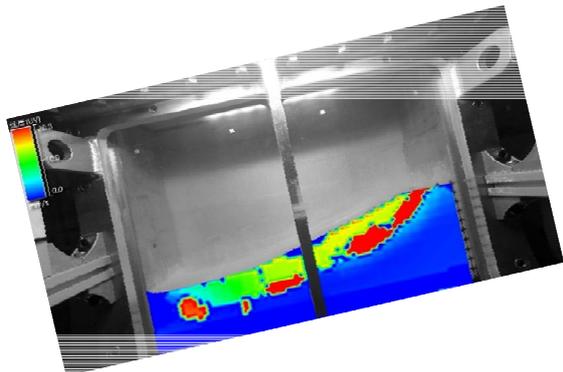
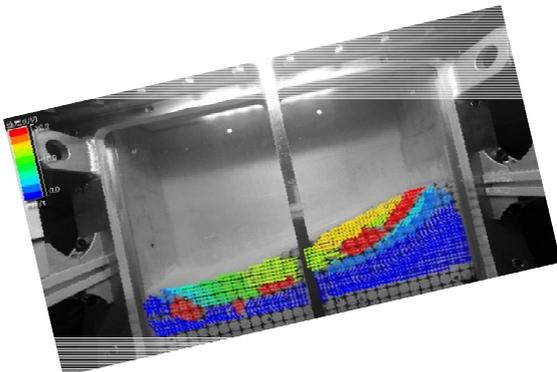
図 2-19 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 3)



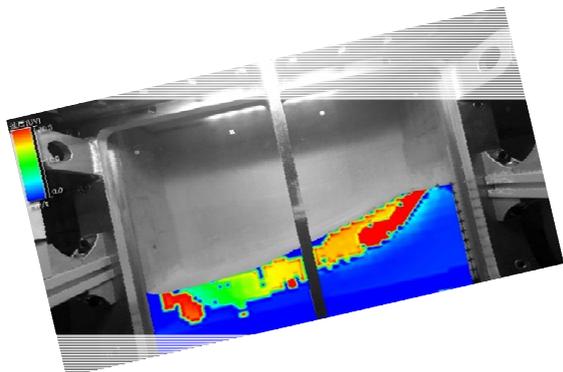
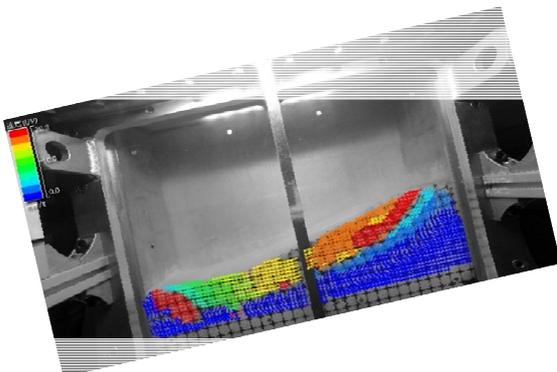
0° / 12°



0° / 12.5°

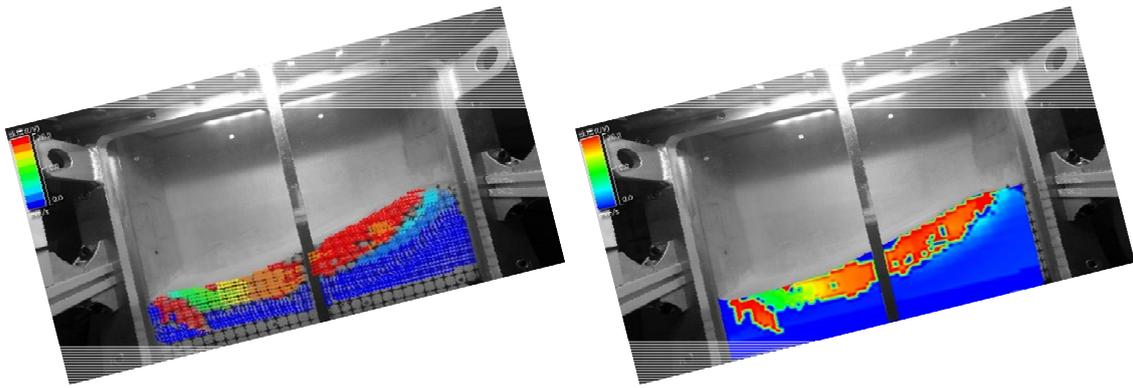


0° / 13°

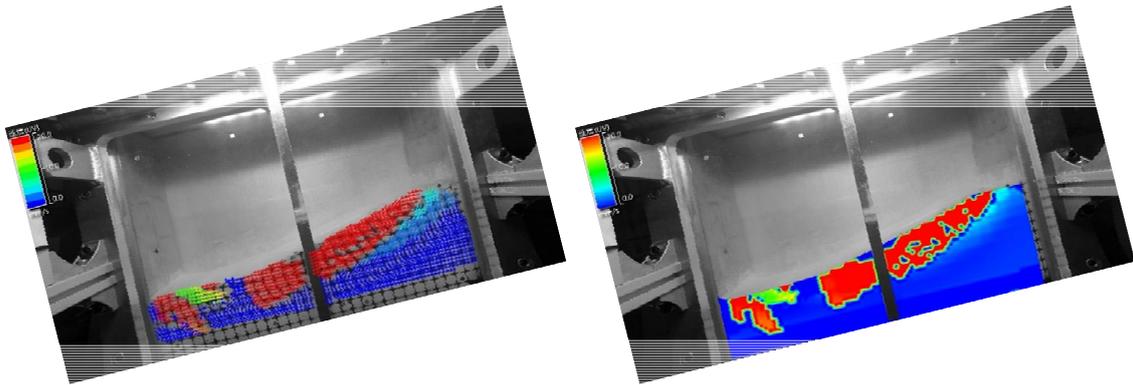


0° / 13.5°

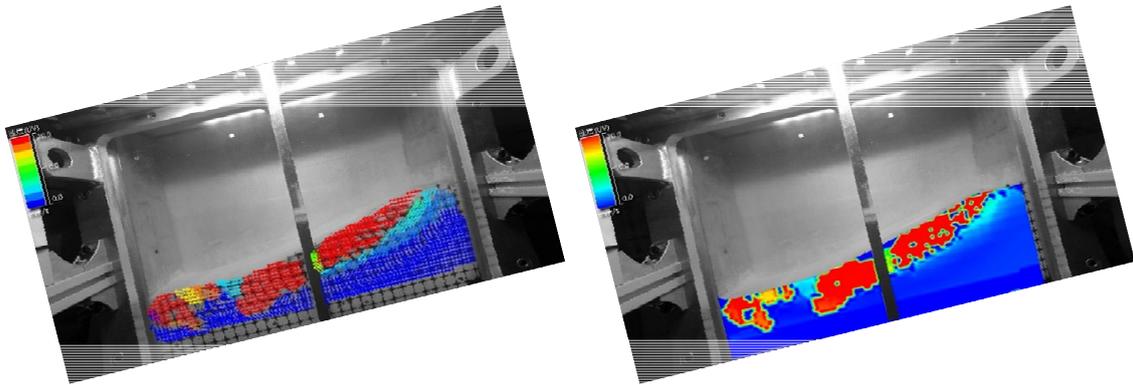
図 2-20 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 4)



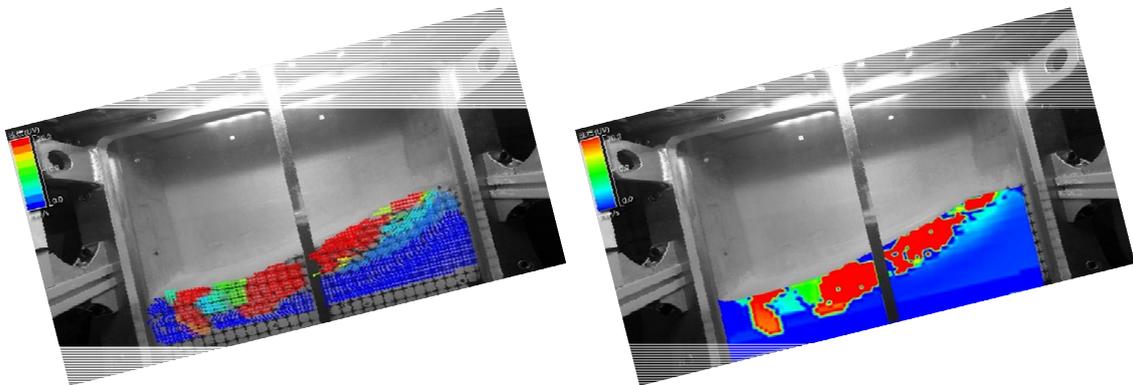
0° / 14°



0° / 14.5° -1

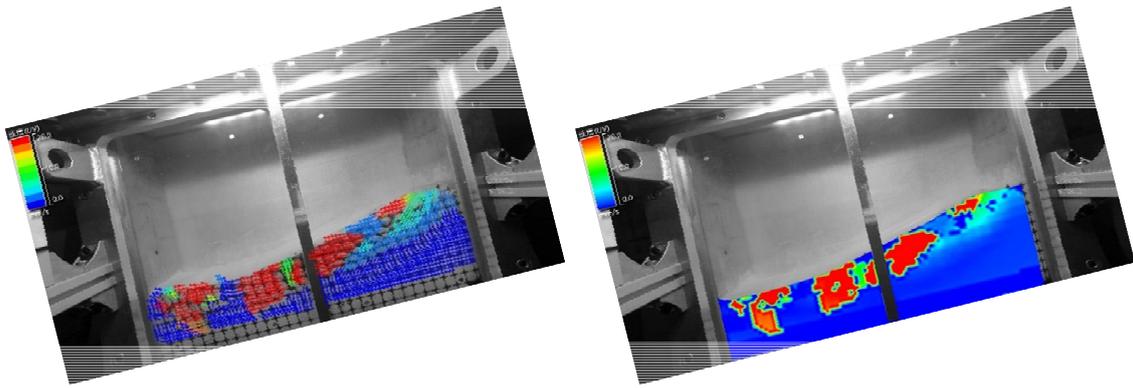


0° / 14.5° -2

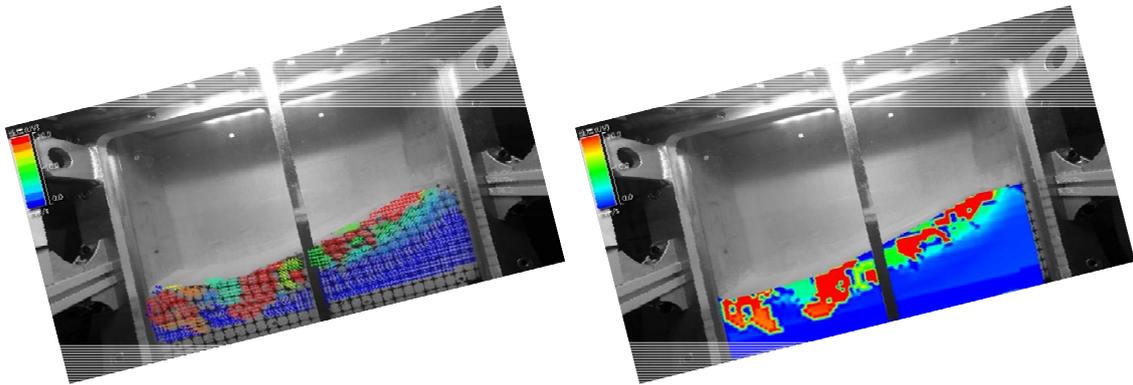


0° / 14.5° -3

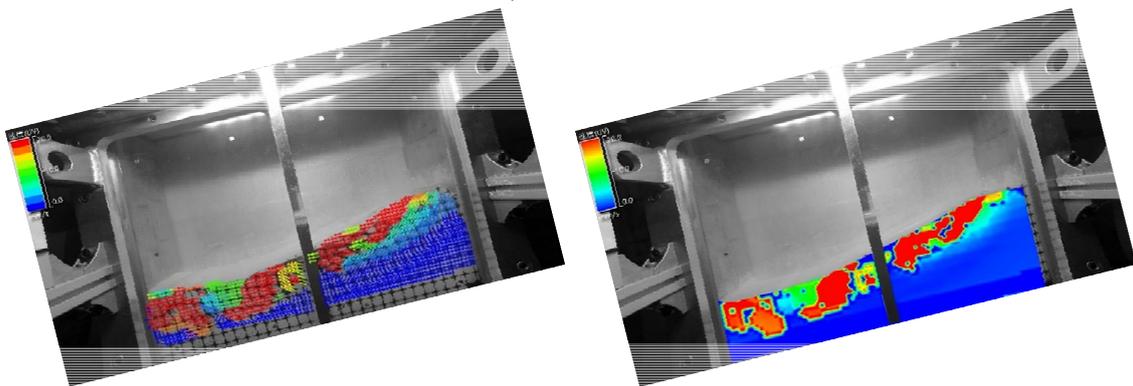
図 2-21 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 5)



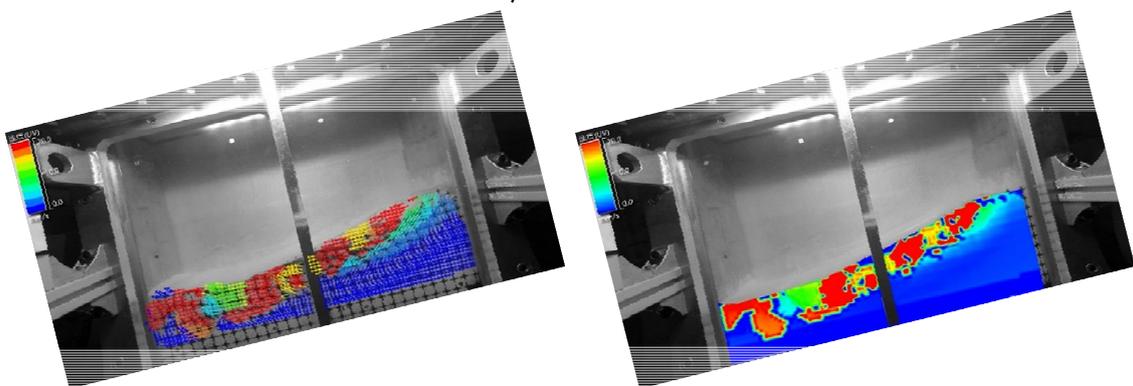
0° / 14.5° -4



0° / 14.5° -5

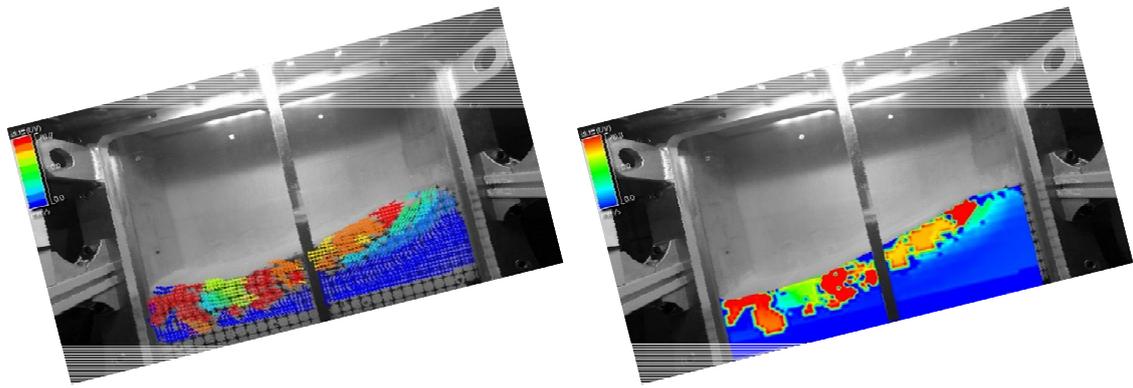


0° / 14.5° -6

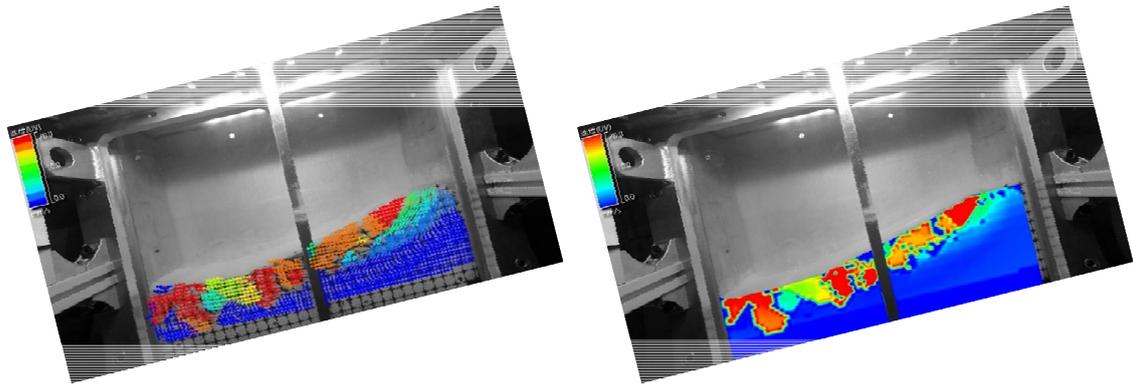


0° / 14.5° -7

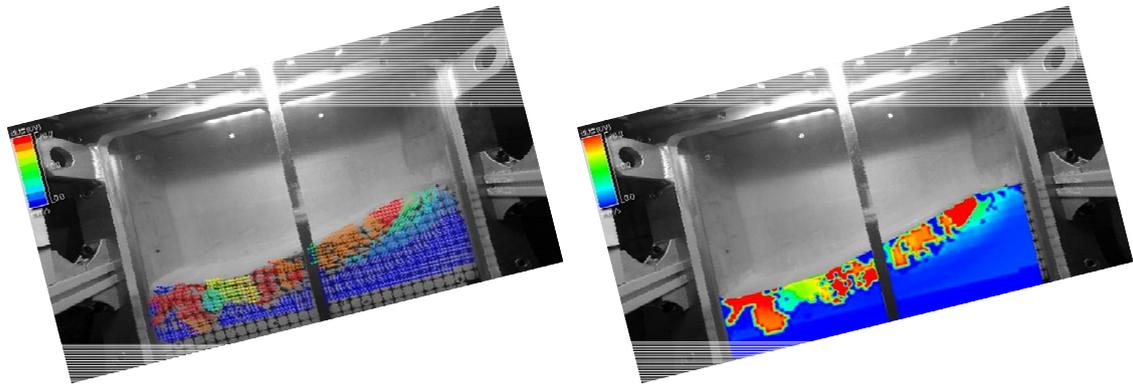
図 2-22 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その 6)



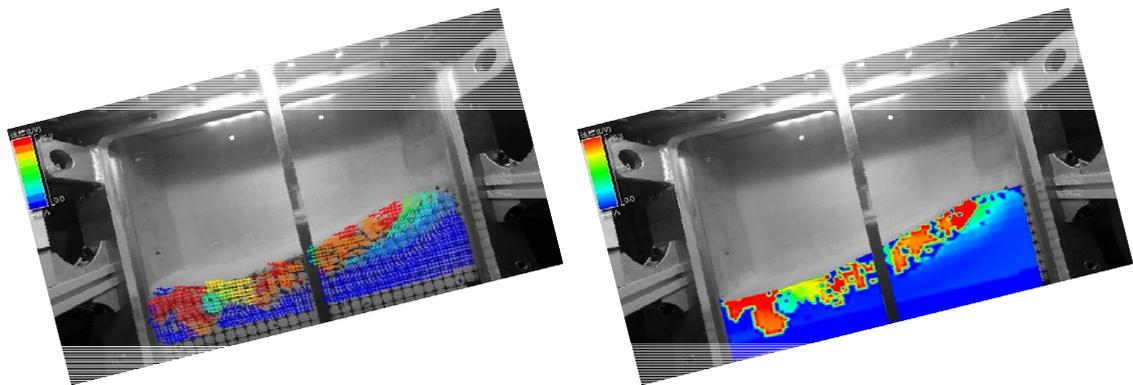
0° / 14.5° -8



0° / 14.5° -9



0° / 14.5° -10



0° / 14.5° -11

図 2-23 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case1) (その7)

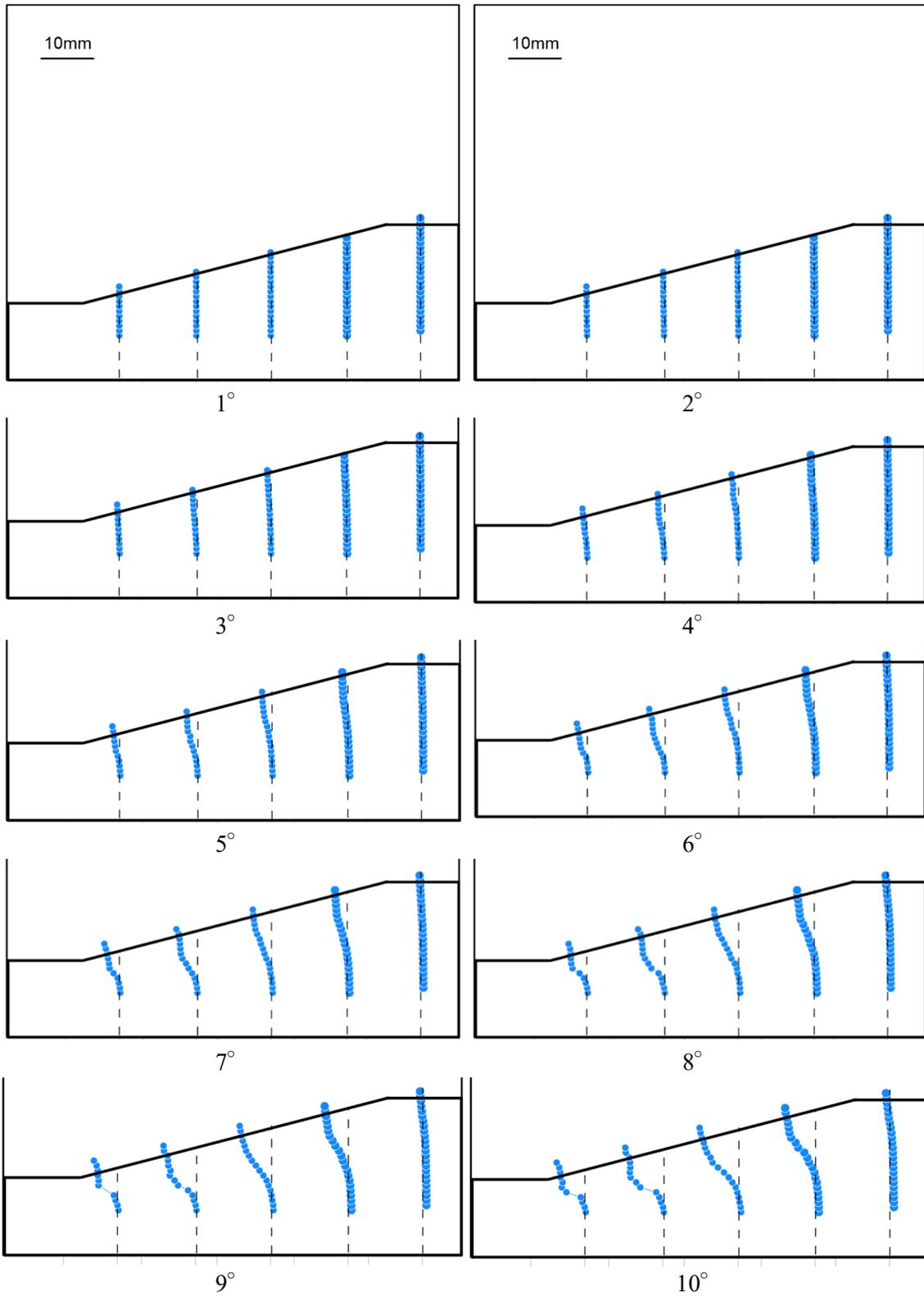


図 2-24 水平変位分布 (Case1) (その 1)

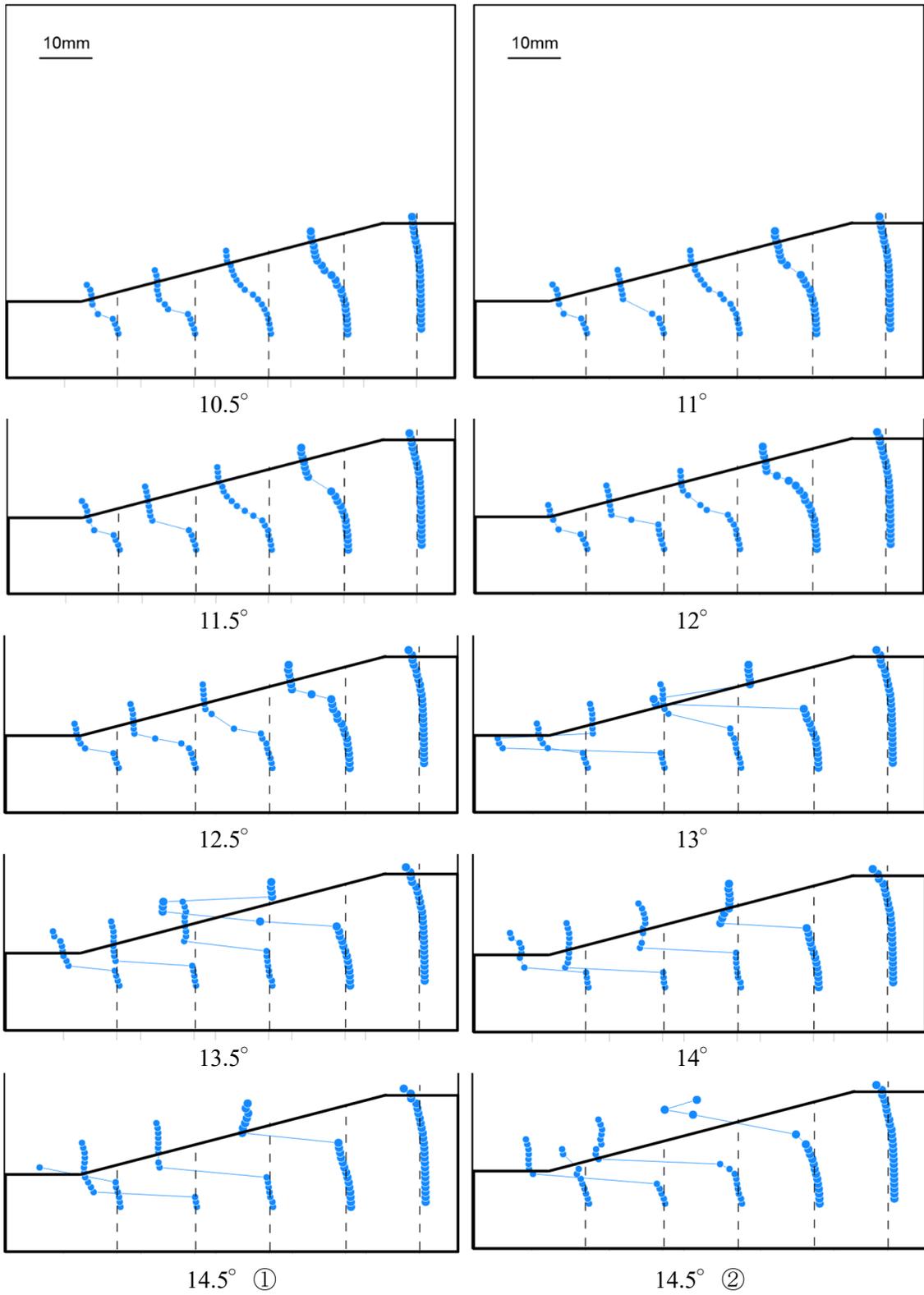


図 2-25 水平変位分布 (Case1) (その 2)

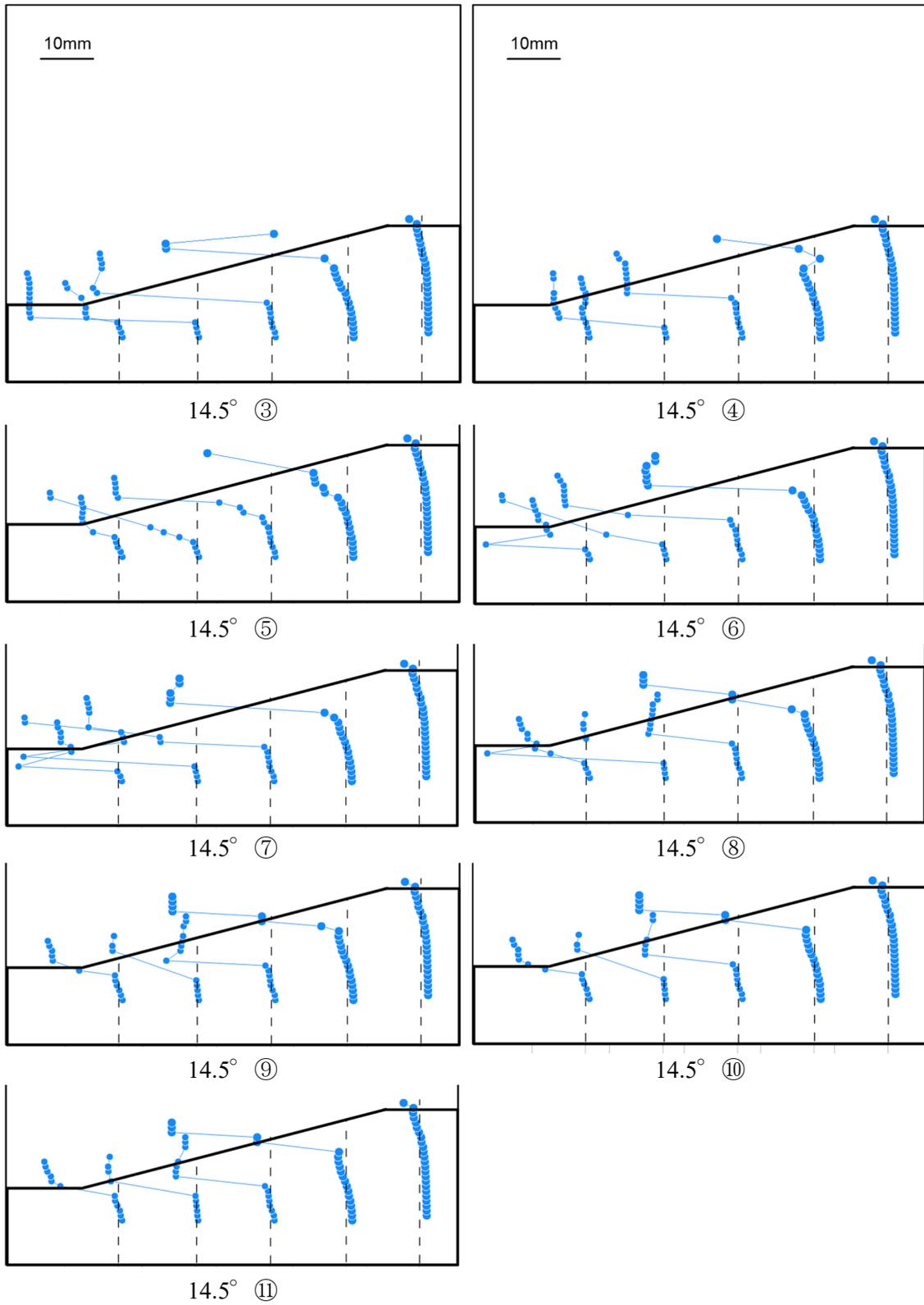


図 2-26 水平変位分布 (Case1) (その 3)

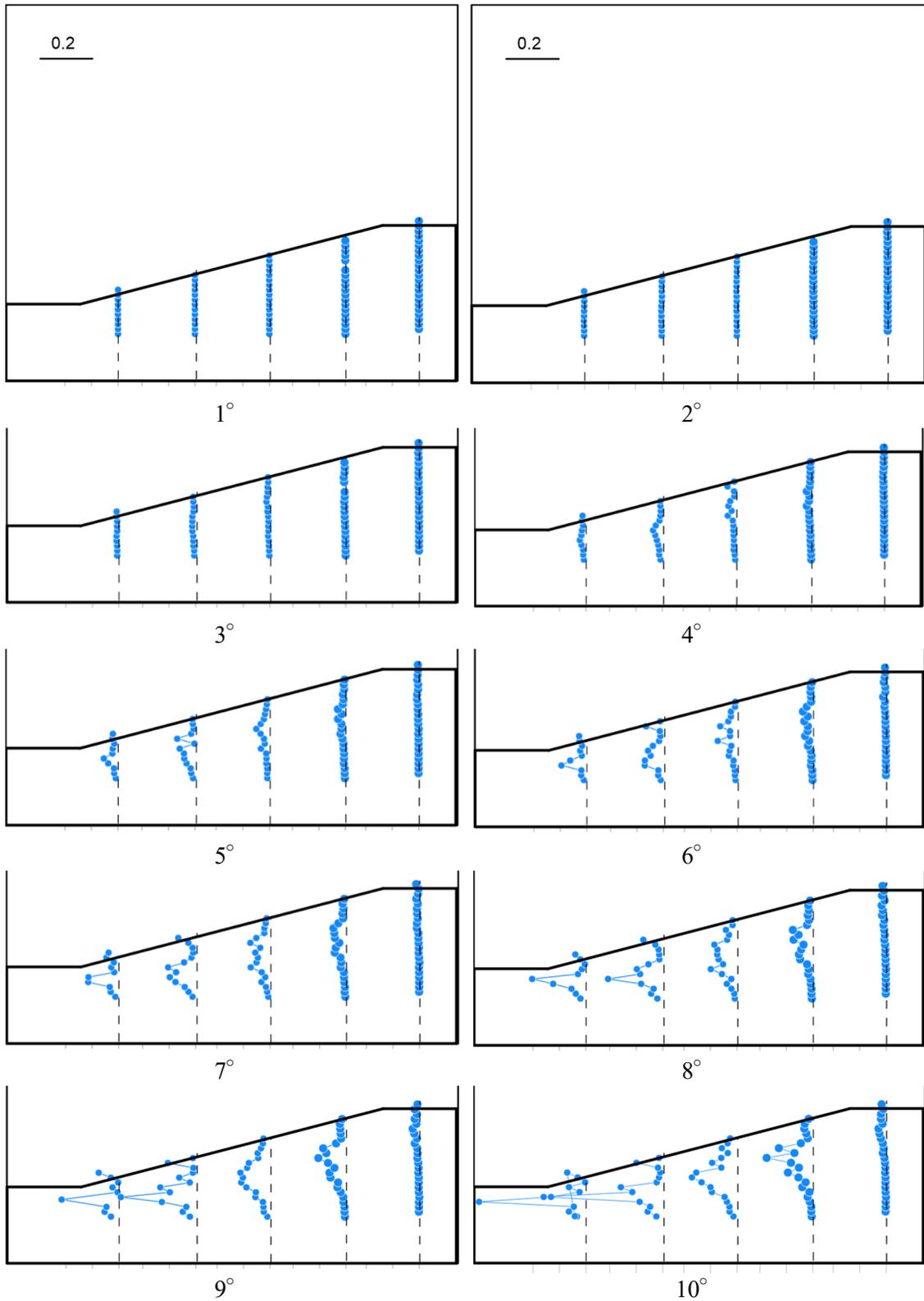


図 2-27 せん断ひずみ分布 (Case1) (その 1)

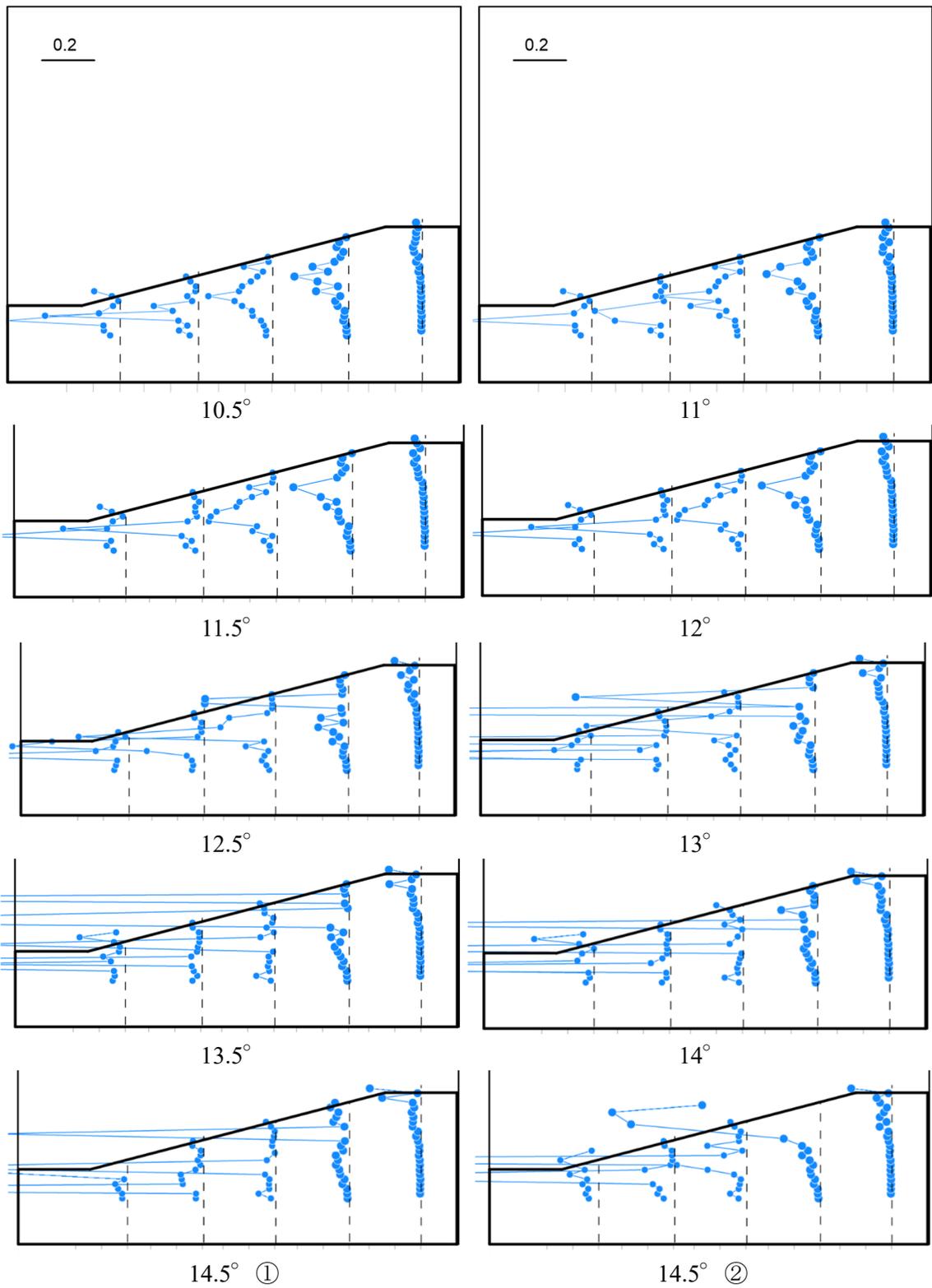


図 2-28 せん断ひずみ分布 (Case1) (その 2)

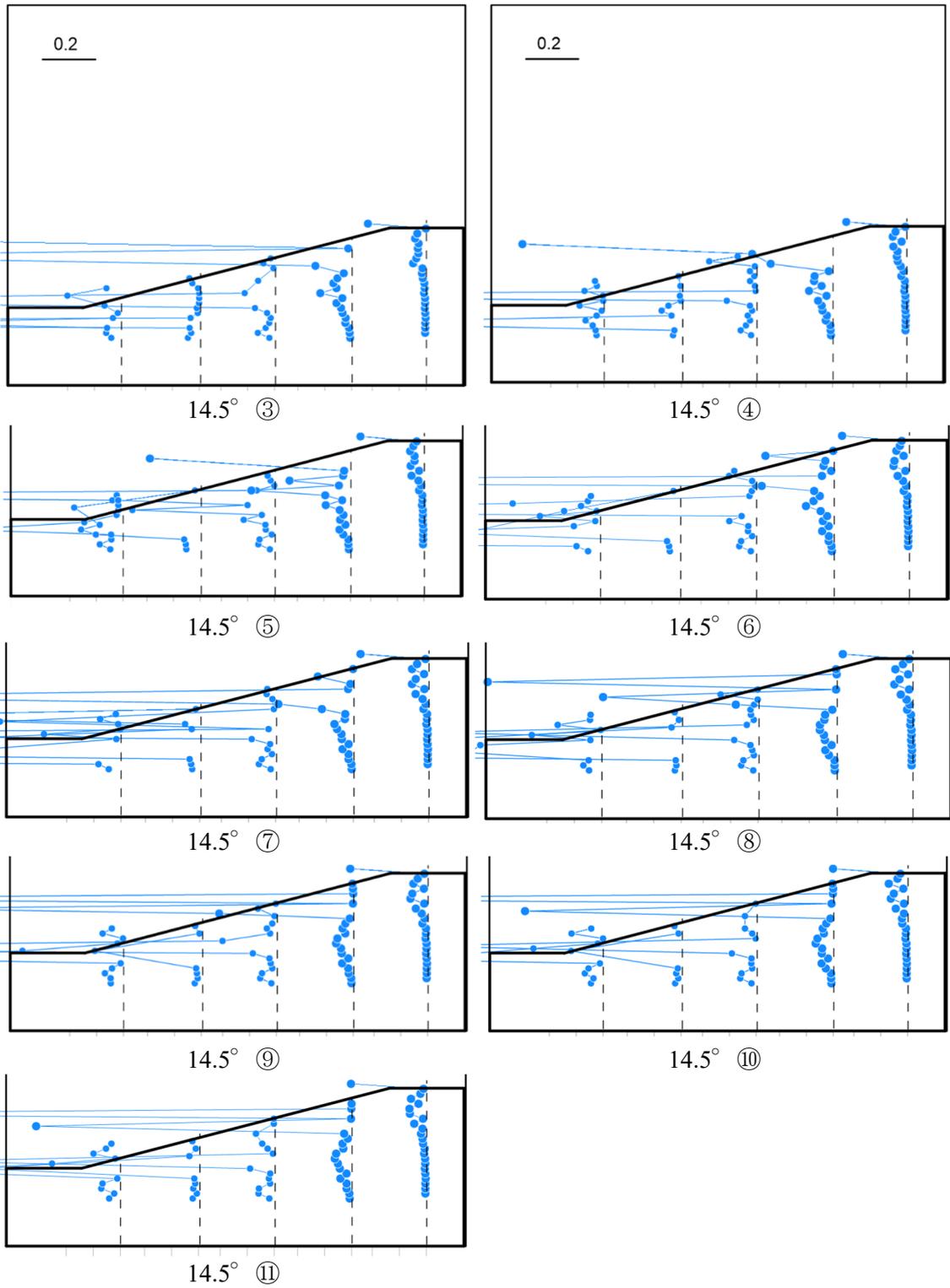


図 2-29 せん断ひずみ分布 (Case1) (その 3)

## 2.2.2 Case2

### a) 地盤の圧密状況

30G場で遠心圧密において、 $\sqrt{t}$ 法にて圧密終了の判断を行った。沈下量の時刻歴を図 2-30 に示す。参考として 3t 法および双曲線法で表したものを示す。計測開始点は上載荷重および沈下計測用フロートが設置できるまで圧密させた所をゼロ点としている。上載荷重は模型地盤上面に 5.6 kg の珪砂を均一厚さに設置した。

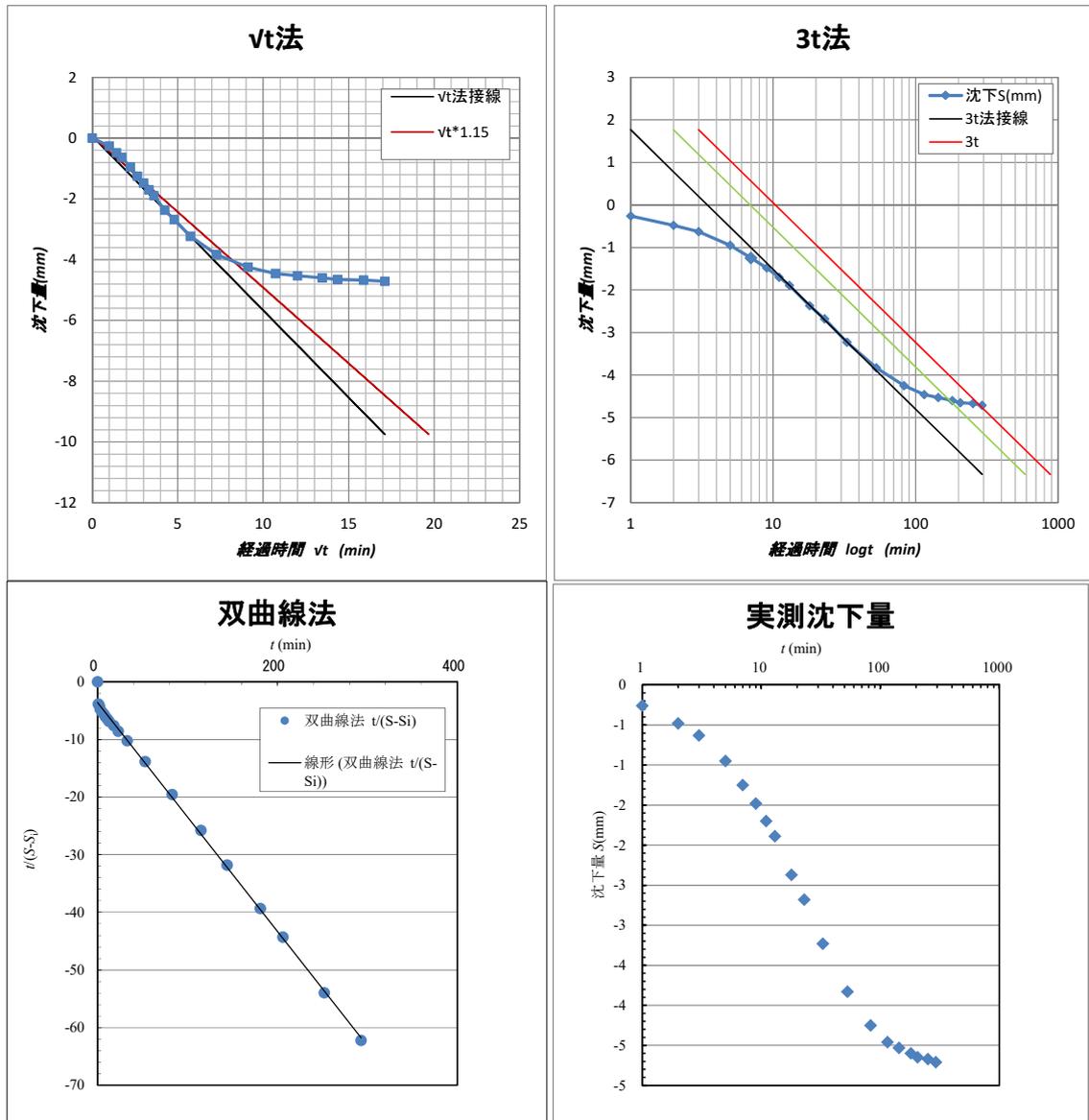


図 2-30 圧密沈下量の時刻歴

b) 模型地盤の実験前計測

実験前のベーンせん断試験による強度分布および含水比試験による含水比分布の計測位置を図 2-31 に示す。せん断強度分布および含水比分布を図 2-32 に示す。

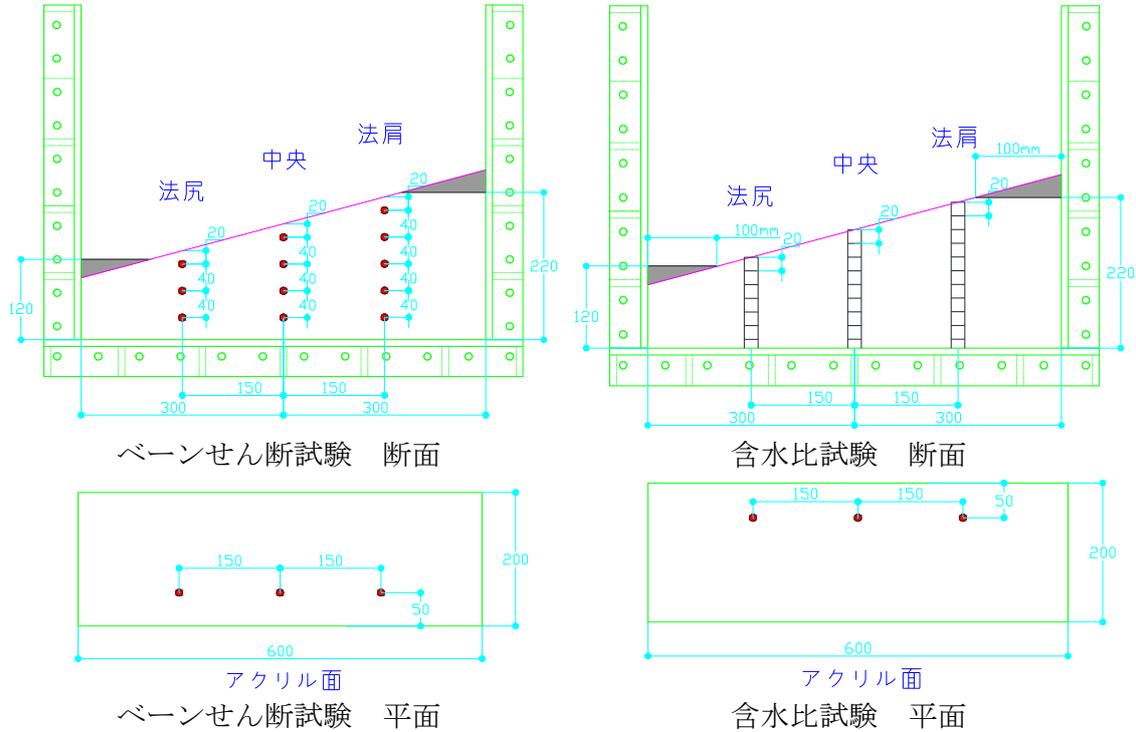


図 2-31 ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験前)

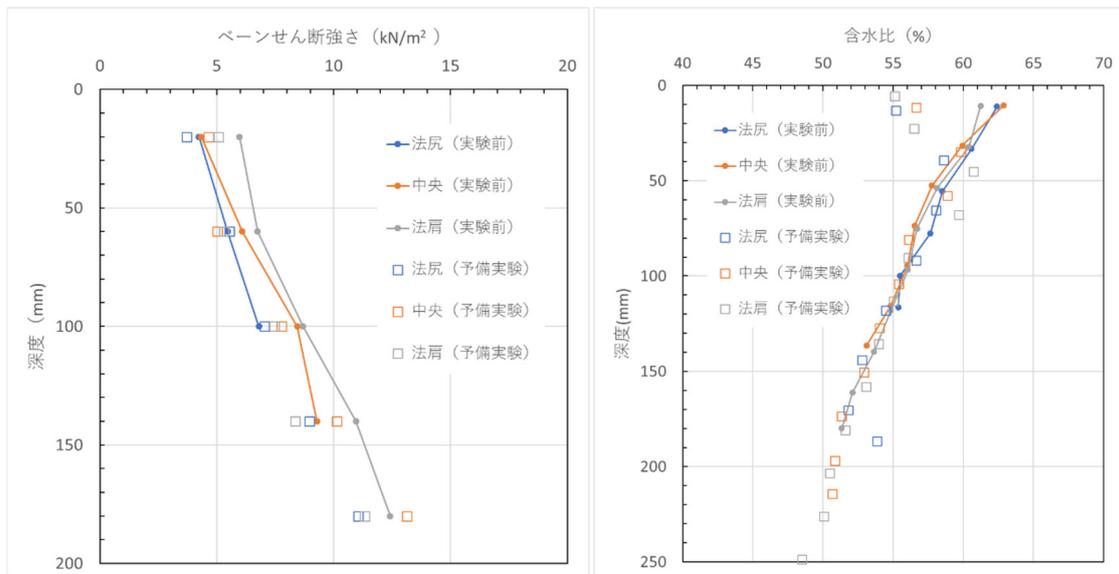
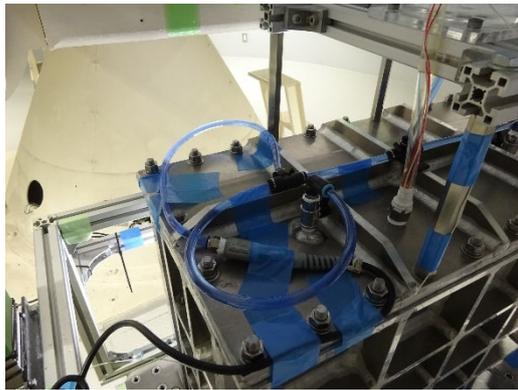


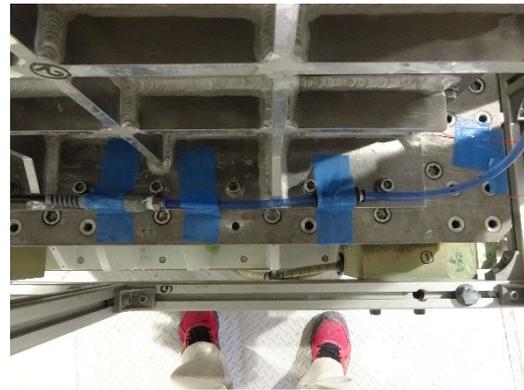
図 2-32 せん断強度分布と含水比の深度分布 (Case2)

c) 計測器設置と初期状態

水圧を計測するために、土槽蓋上部および土槽下部に水圧計を設置した。設置状況を写真 2-17 に示す。模型地盤の間隙水圧計、加速度計の設置状況を図 2-33 に示す。実験前の準備完了した地盤モデルの初期状態を写真 2-18 に示す。

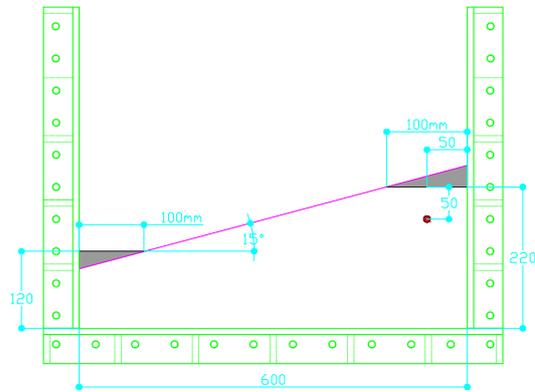


水圧計設置状況(土槽上部)

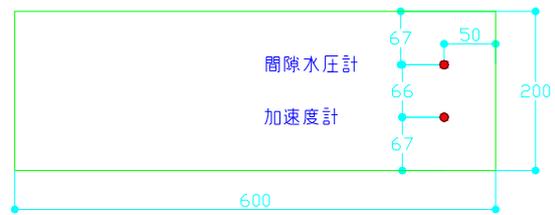


水圧計設置状況(土槽下部)

写真 2-17 水圧計設置状況 (Case2)



断面

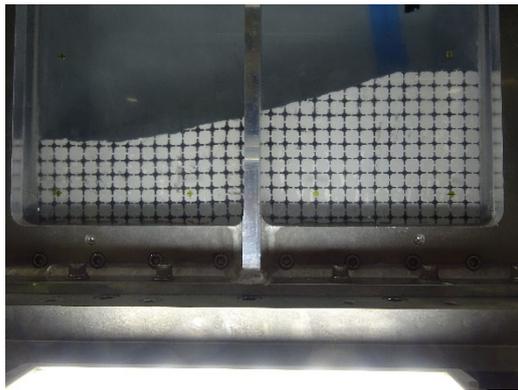


平面



間隙水圧計、加速度計設置

図 2-33 間隙水圧計と加速度計の設置状況 (Case2)



模型地盤



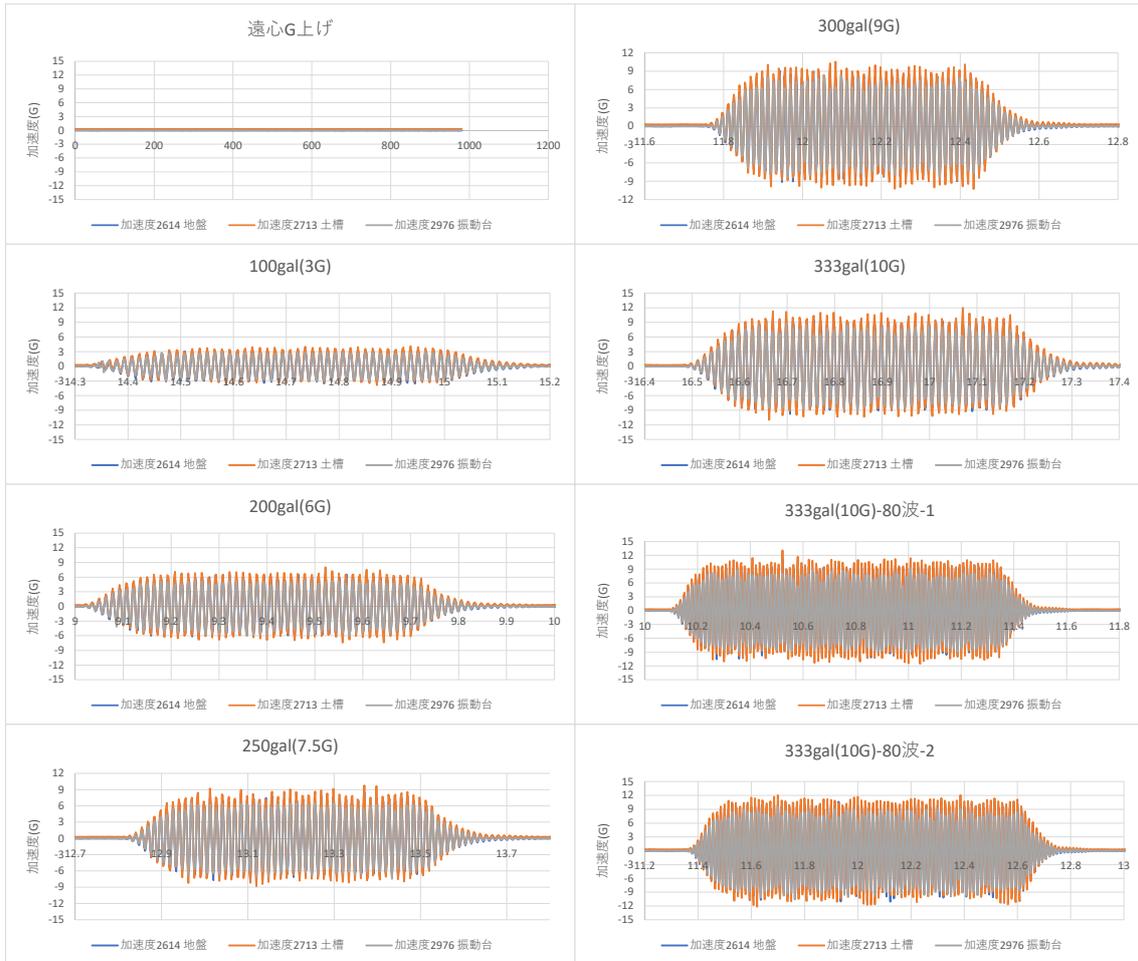
実験土槽

写真 2-18 実験前設置状況 (Case2)

#### d) 加振実験

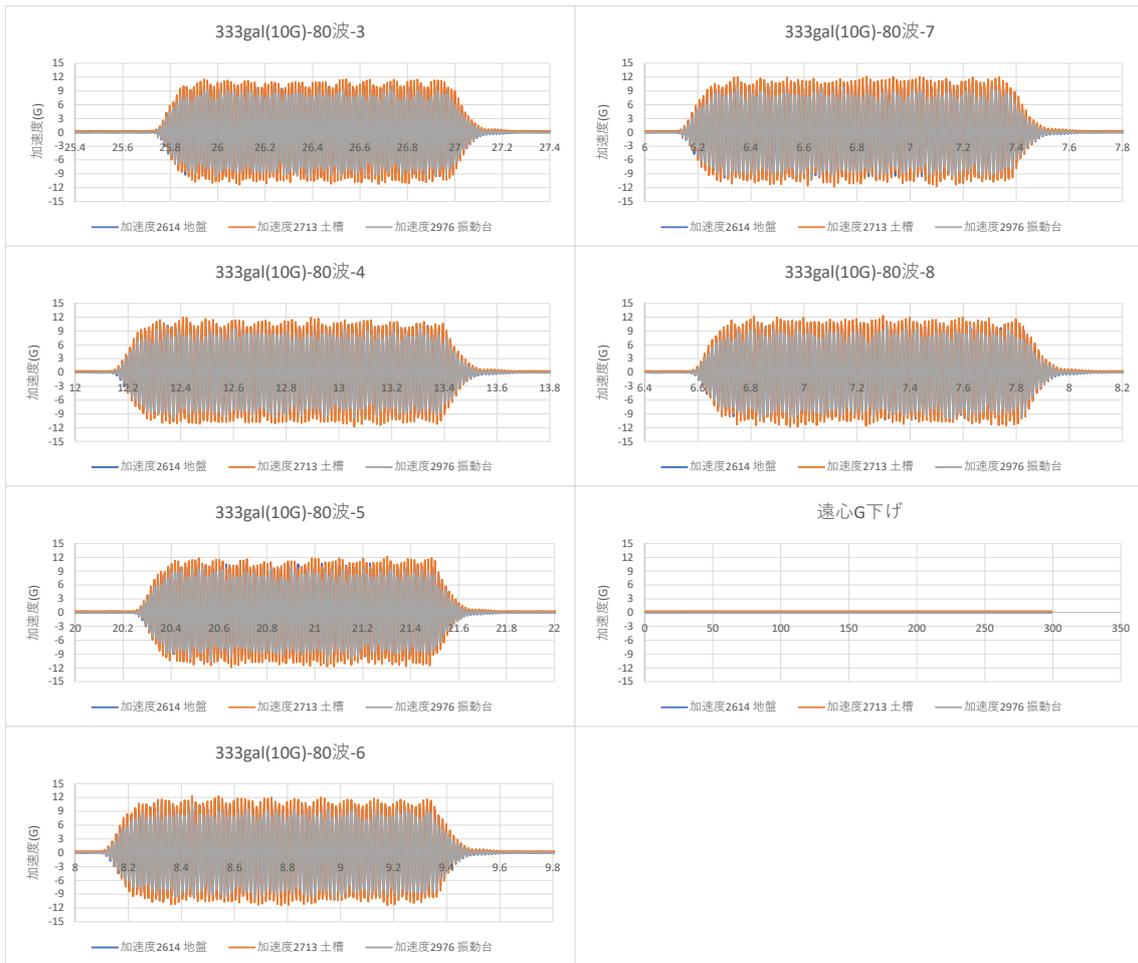
30G の遠心加速度の下で水深 23.3m の模型地盤について加振実験を行った。遠心装置運転後、遠心加速度が 30G に到達してから約 10 分経過したのち加振を開始した。加振波は周波数 2.33Hz の正弦波とし、加振加速度は 100、200、250、300、333gal と段階的に大きくし、333gal 加振のみ 8 回実施した。振動台、土槽および地盤の加速度の時刻歴の結果を図 2-34～図 2-35 に示す。

遠心载荷開始から停止までの水圧（土槽下部および地盤）の時刻歴を図 2-36～図 2-37 に示す。



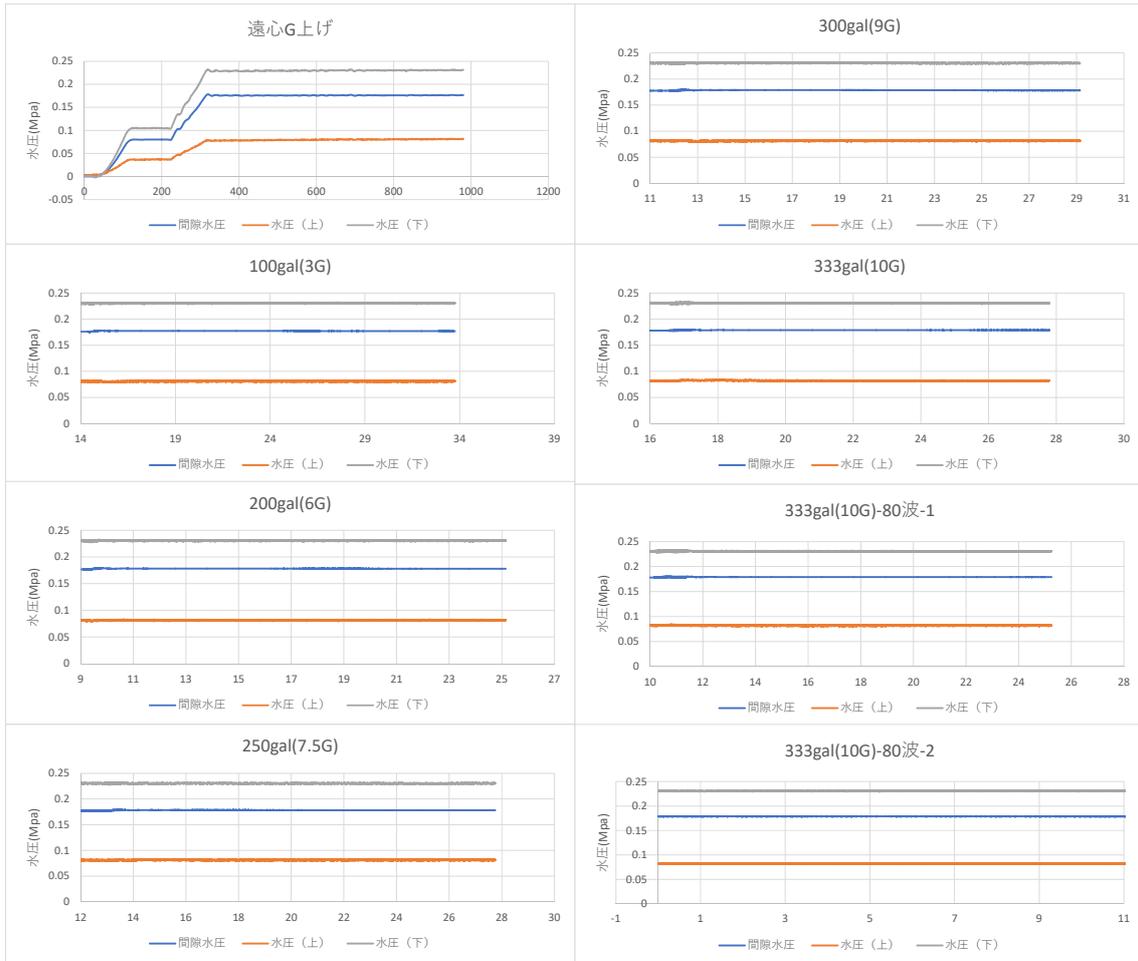
横軸の時間の単位は秒である

図 2-34 台、土槽および地盤の加速度の時刻歴（その 1）



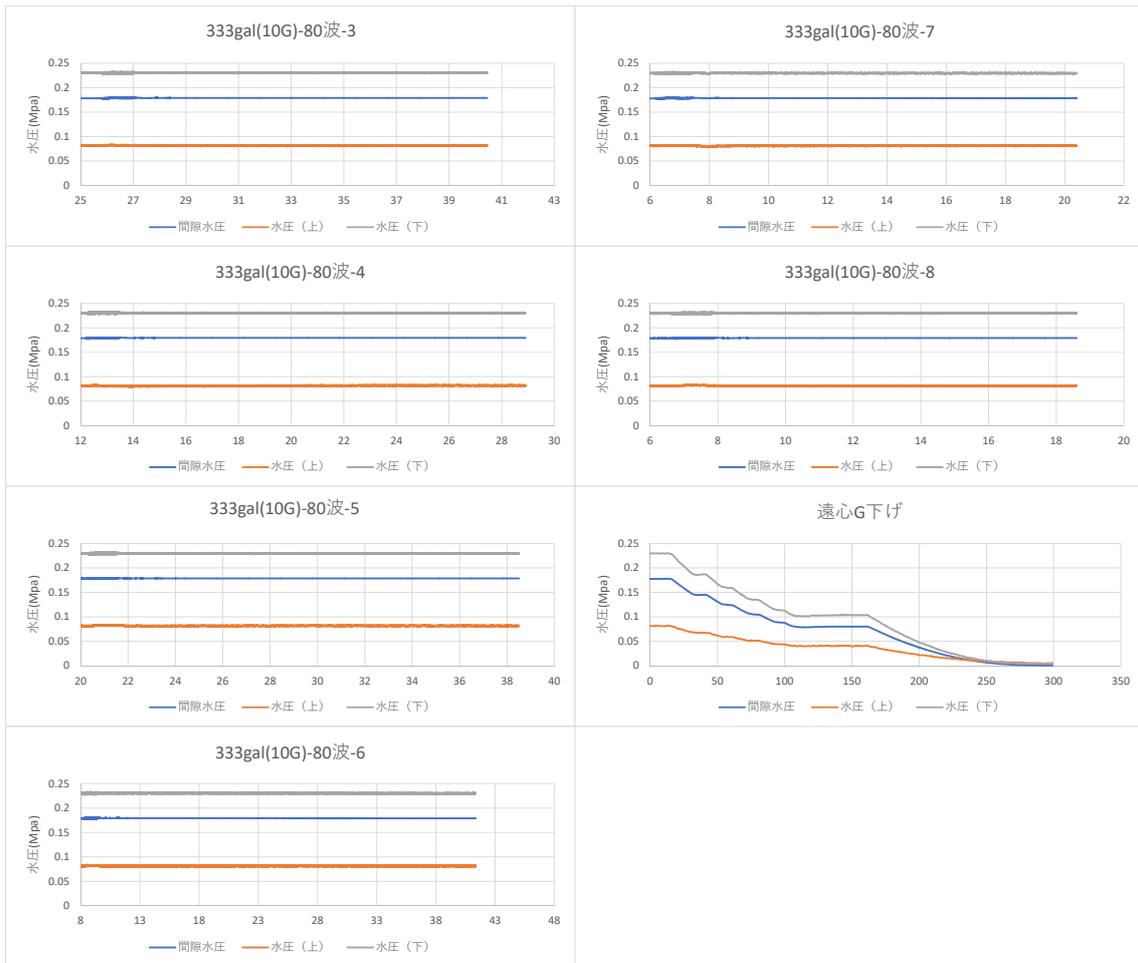
横軸の時間の単位は秒である

図 2-35 台、土槽および地盤の加速度の時刻歴（その2）



横軸の時間の単位は秒である

図 2-36 土槽下部および地盤の水圧の時刻歴 (その 1)



横軸の時間の単位は秒である

図 2-37 土槽下部および地盤の水圧の時刻歴（その 2）

e) 模型地盤の実験後計測

実験後のベーンせん断試験による強度分布および含水比分布の計測位置を図 2-38 に示す。せん断強度分布および含水比分布を図 2-39 に示す。

模型地盤から試料を採取し、一軸圧縮強度試験を行った。試料は図 2-40 に示す 3 箇所採取した。Case1 における供試体整形の困難さを踏まえ、ワイヤーソーによる整形の代わりに、薄肉パイプを用いたサンプラーによる採取とした。採取した試料による一軸圧縮強度試験状況を写真 2-19 に示す。法尻、中央、法肩ともに試験前に自重による変形がみられた。一軸圧縮試験結果を図 2-41 に示す。

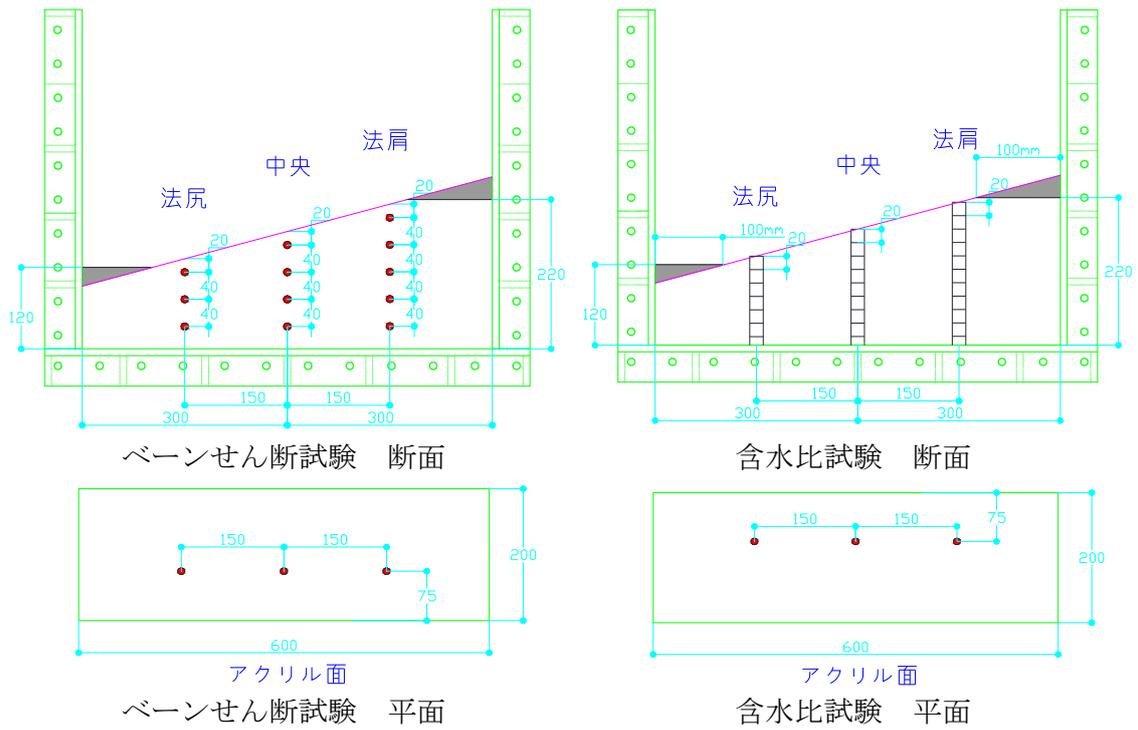


図 2-38 ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置 (試験後)

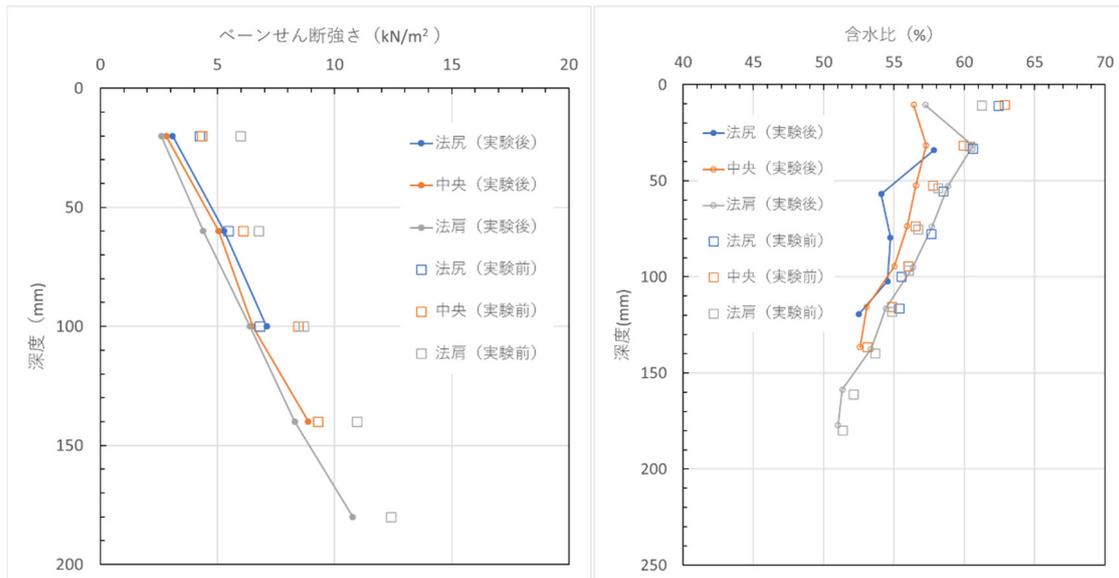


図 2-39 せん断強度分布と含水比の深度分布

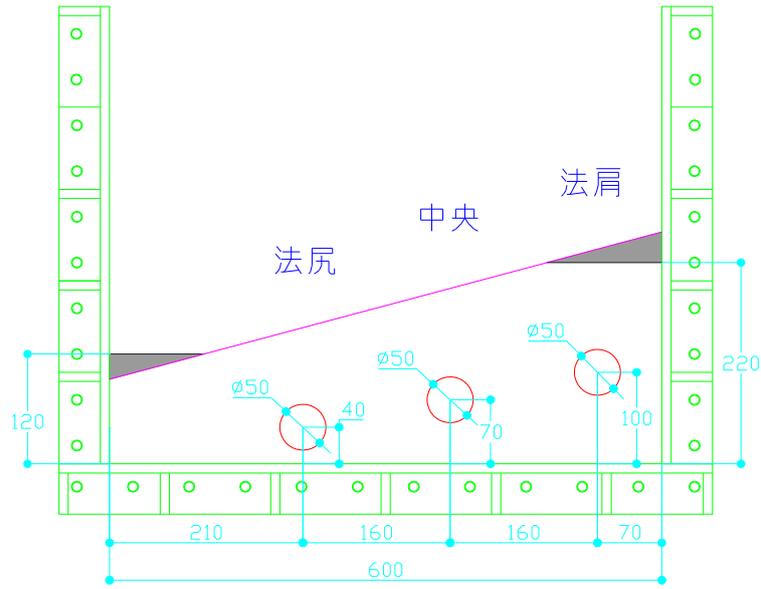
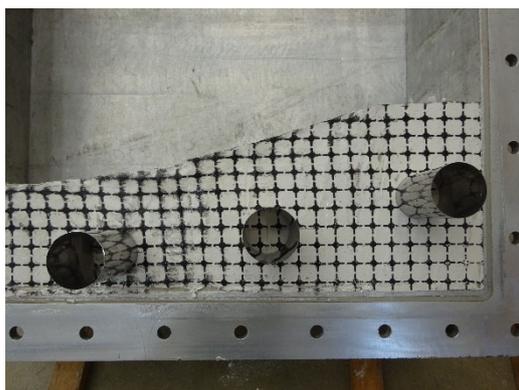
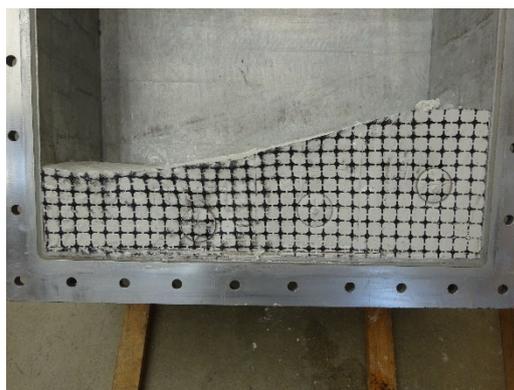


図 2-40 一軸圧縮強度試験用試料の採取位置



試料サンプラー挿入前



試料サンプラー挿入後



試験状況(法尻)



試験状況(中央)



供試体(法肩)

写真 2-19 一軸圧縮試験の実施状況

測点	一軸圧縮強さ	含水比	湿潤密度
	(kN/m <sup>2</sup> )	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )
法肩	8.1	55.2	1.689
中央	8.8	54.3	1.694
法尻	10.1	53.6	1.653

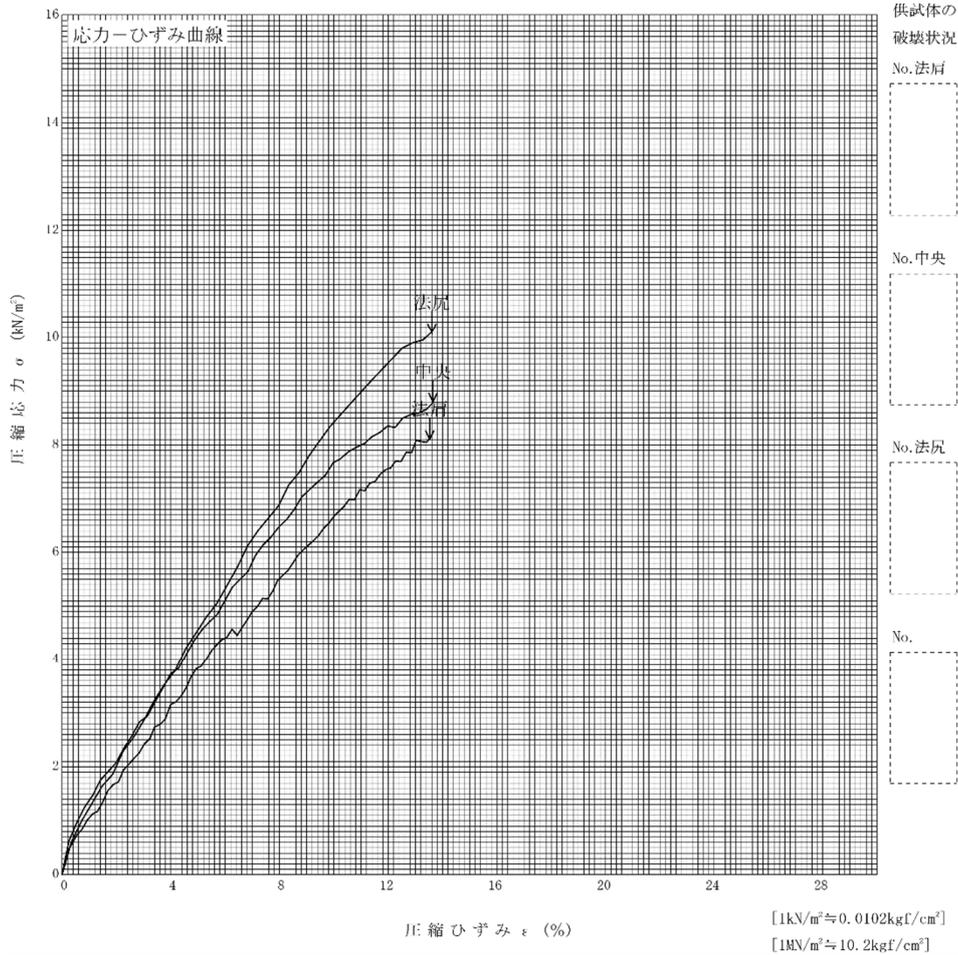


図 2-41 一軸圧縮強度試験結果

f) 画像解析による地盤変位

100gal 加振前の状態を基準とした地盤変位のベクトル表示およびコンター表示を図 2-42～図 2-44 に示す。さらに 5 測線を抽出し、測線における深度方向の水平変位分布を図 2-45～図 2-46 に、せん断ひずみ分布を図 2-47～図 2-48 に示す。

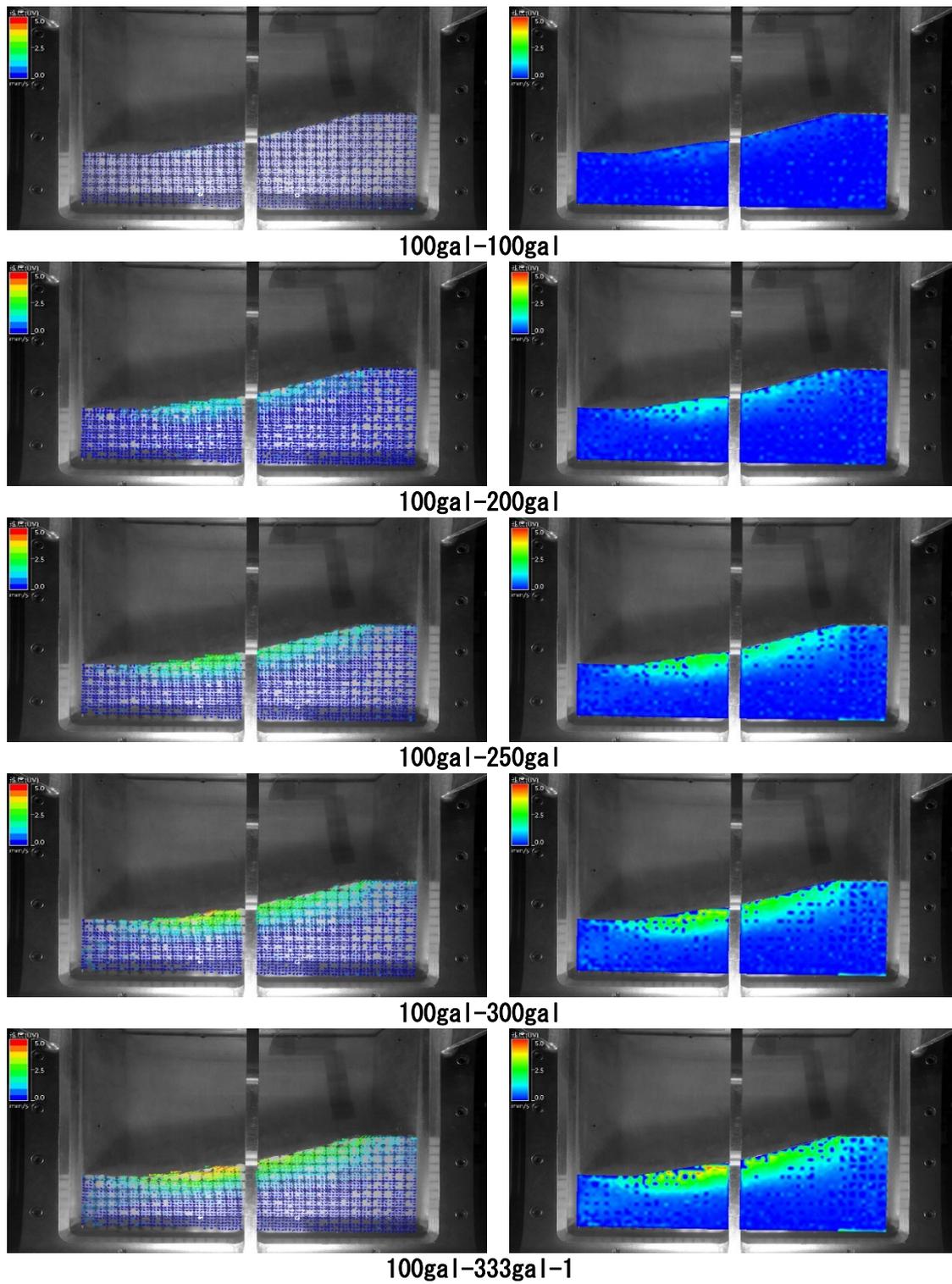


図 2-42 地盤変位のベクトル表示（左）とコンター表示（右）（Case2）（その1）

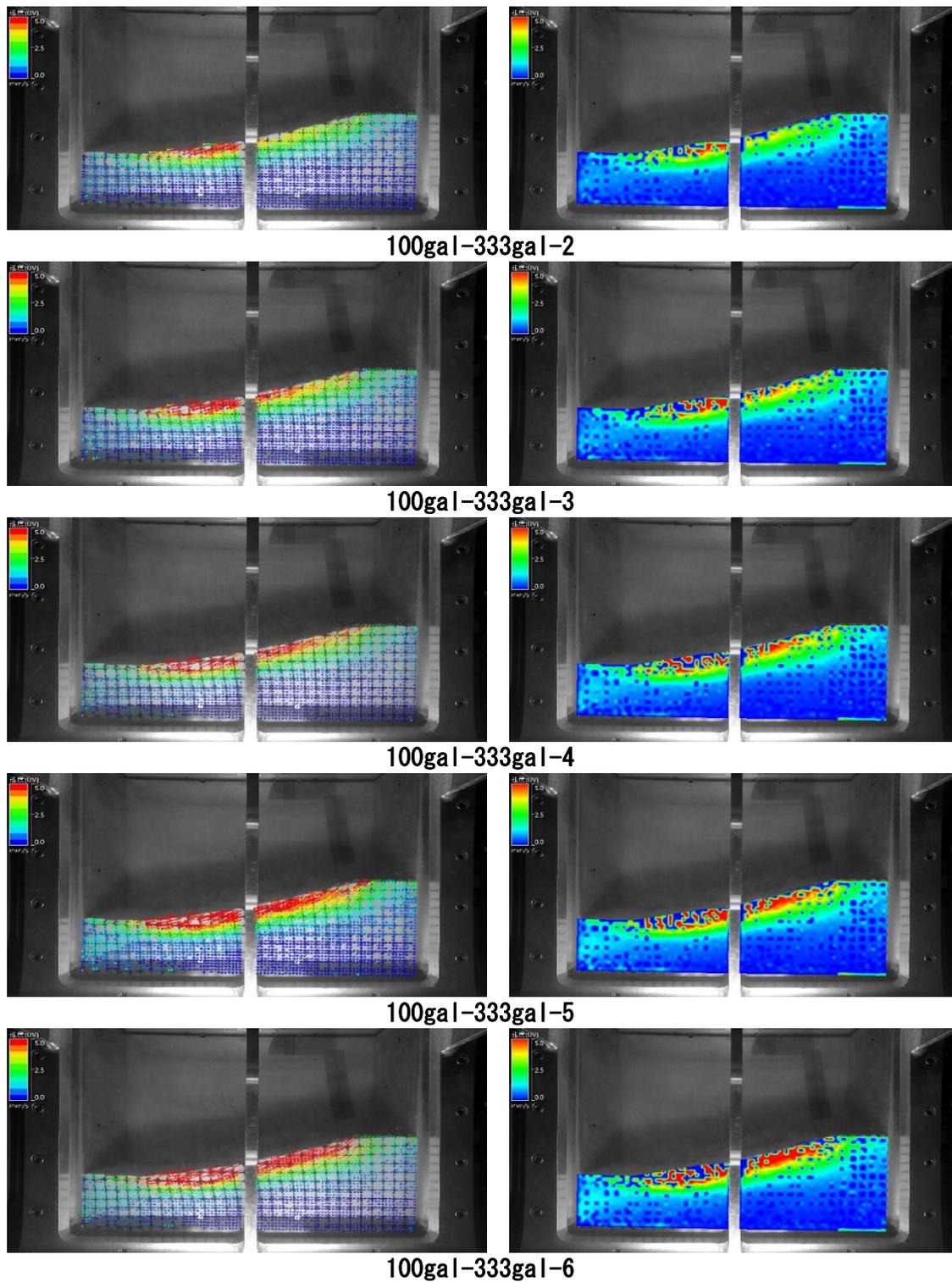
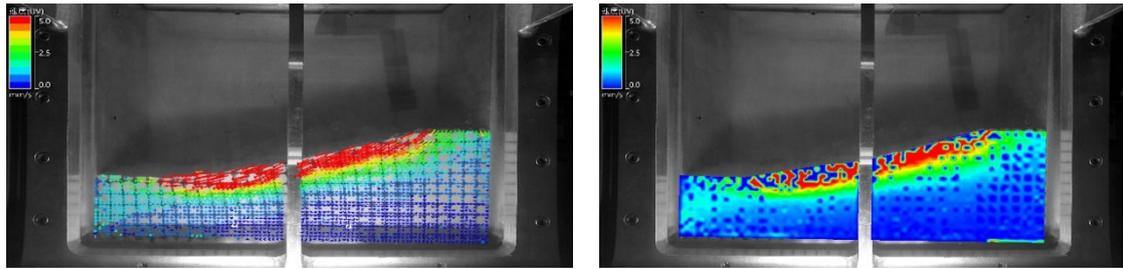
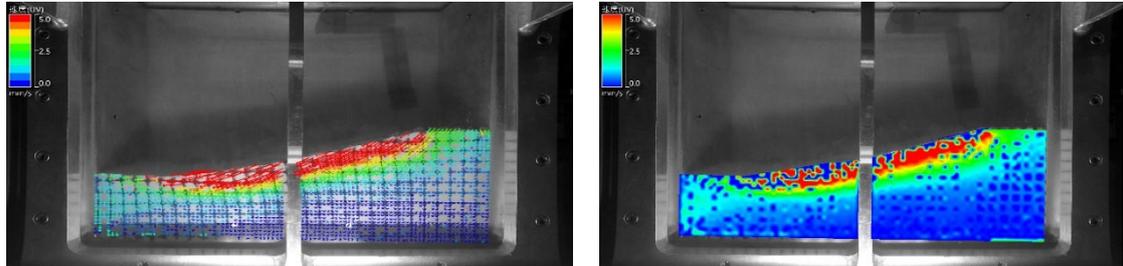


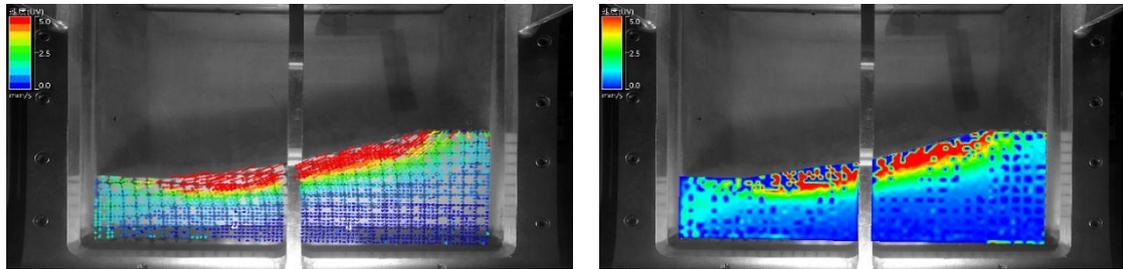
図 2-43 地盤変位のベクトル表示（左）とコンター表示（右）（Case2）（その2）



100gal-333gal-7



100gal-333gal-8



100gal-333gal-9

図 2-44 地盤変位のベクトル表示（左）とコンター表示（右）（Case2）（その3）

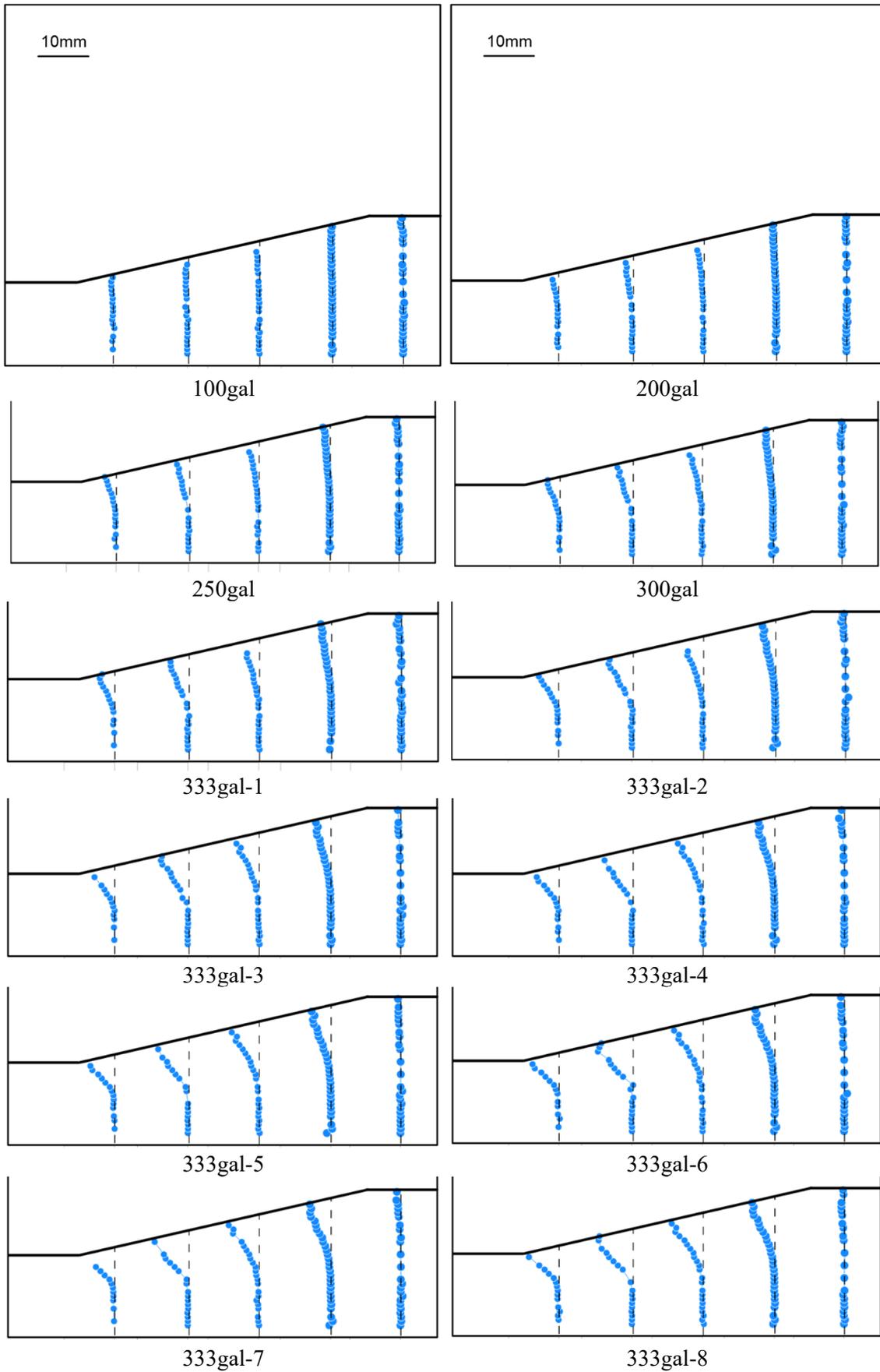
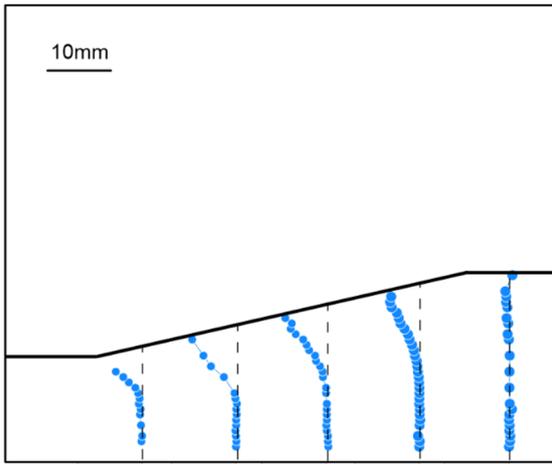


図 2-45 水平変位分布 (Case2) (その 1)



333gal-9

図 2-46 水平変位分布 (Case2) (その 2)

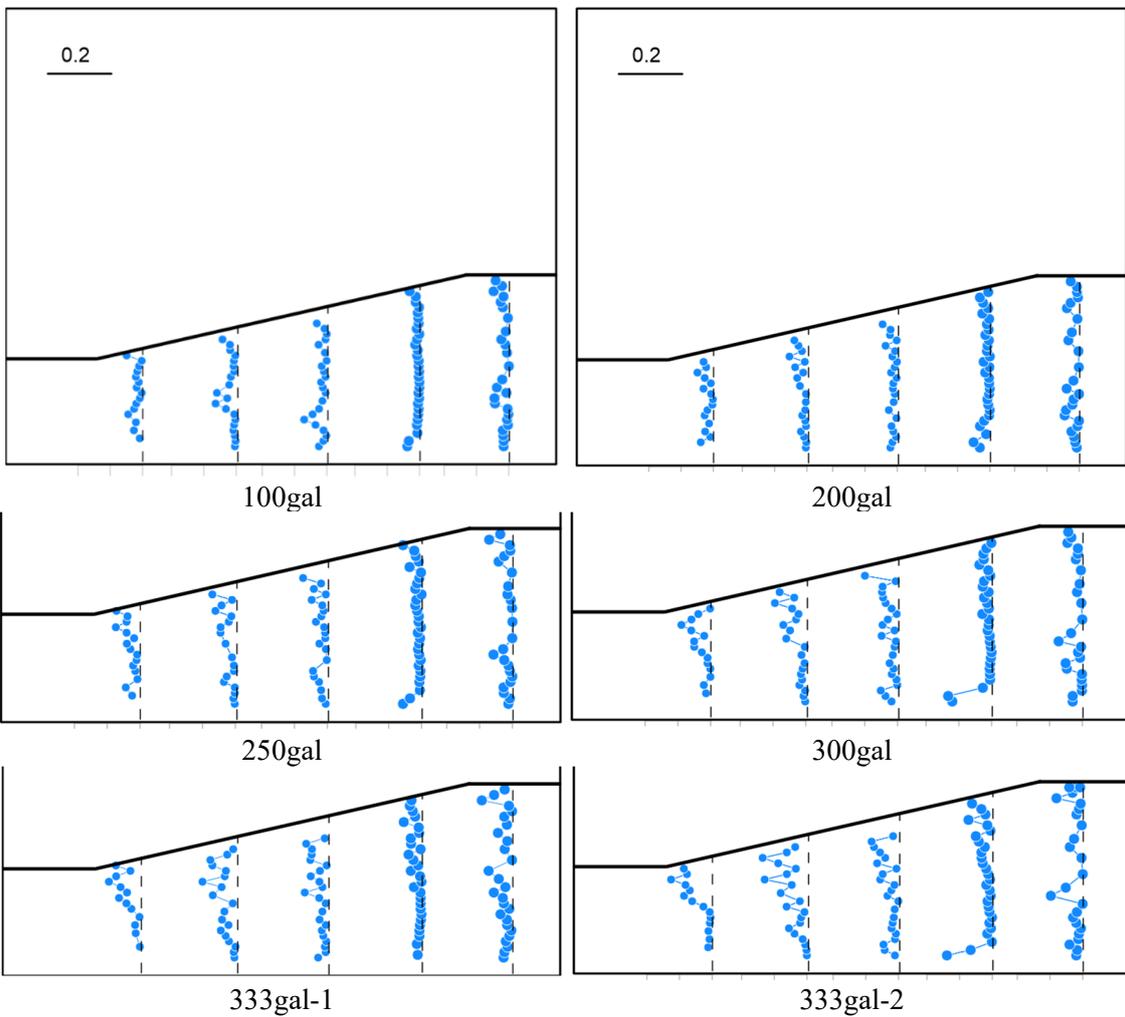


図 2-47 せん断ひずみ分布 (Case2) (その 1)

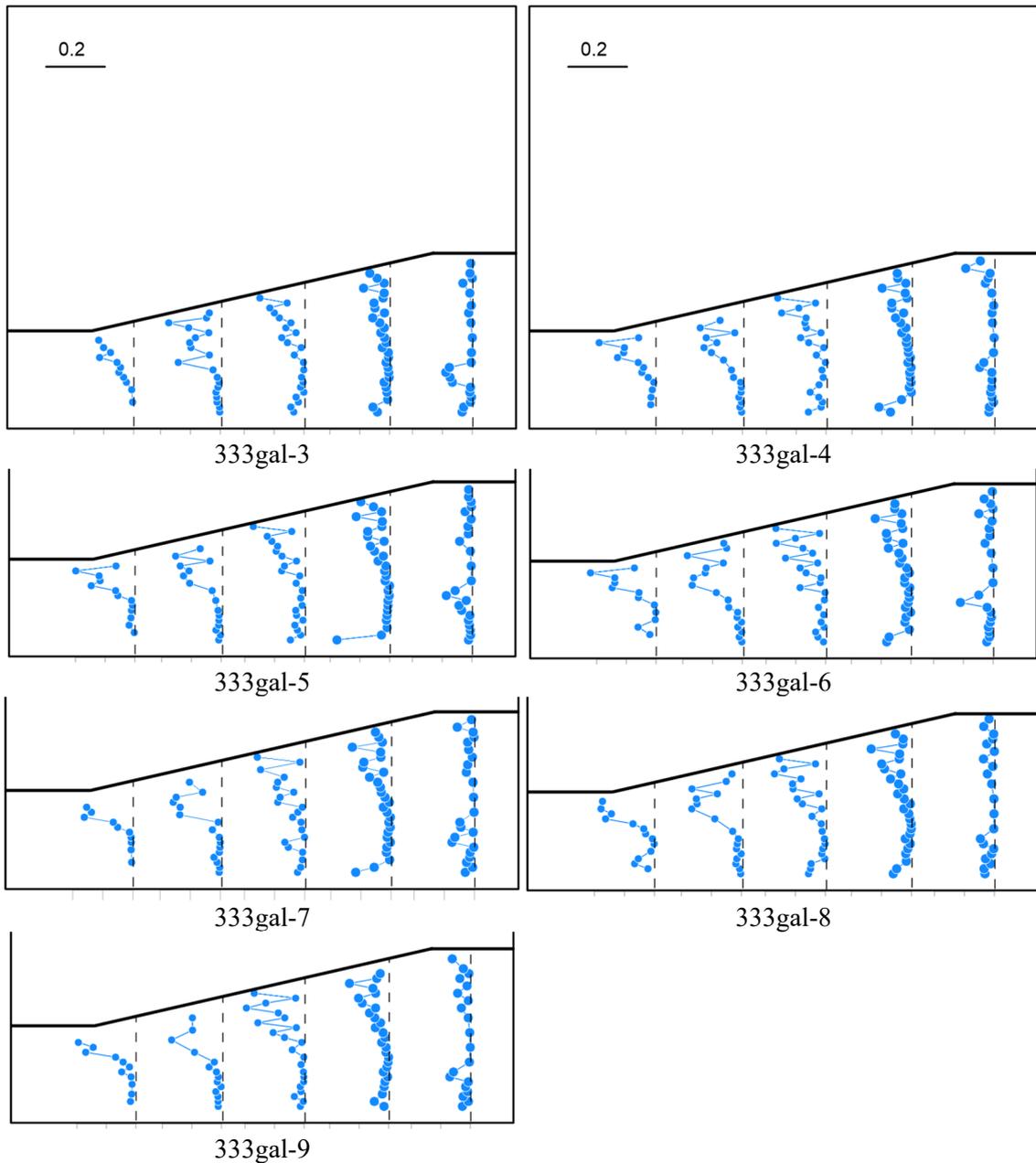


図 2-48 せん断ひずみ分布 (Case2) (その 2)

### 2.2.3 Case3

#### a) 地盤の圧密状況

30G場で遠心圧密において、 $\sqrt{t}$ 法にて圧密終了の判断を行った。沈下量の時刻歴を図 2-49 に示す。参考として  $3t$  法および双曲線法で表したものを示す。計測開始点は上載荷重および沈下計測用フロートが設置できるまで圧密させた所をゼロ点としている。上載荷重は模型地盤上面に 5.6 kg の珪砂を均一厚さに設置した。

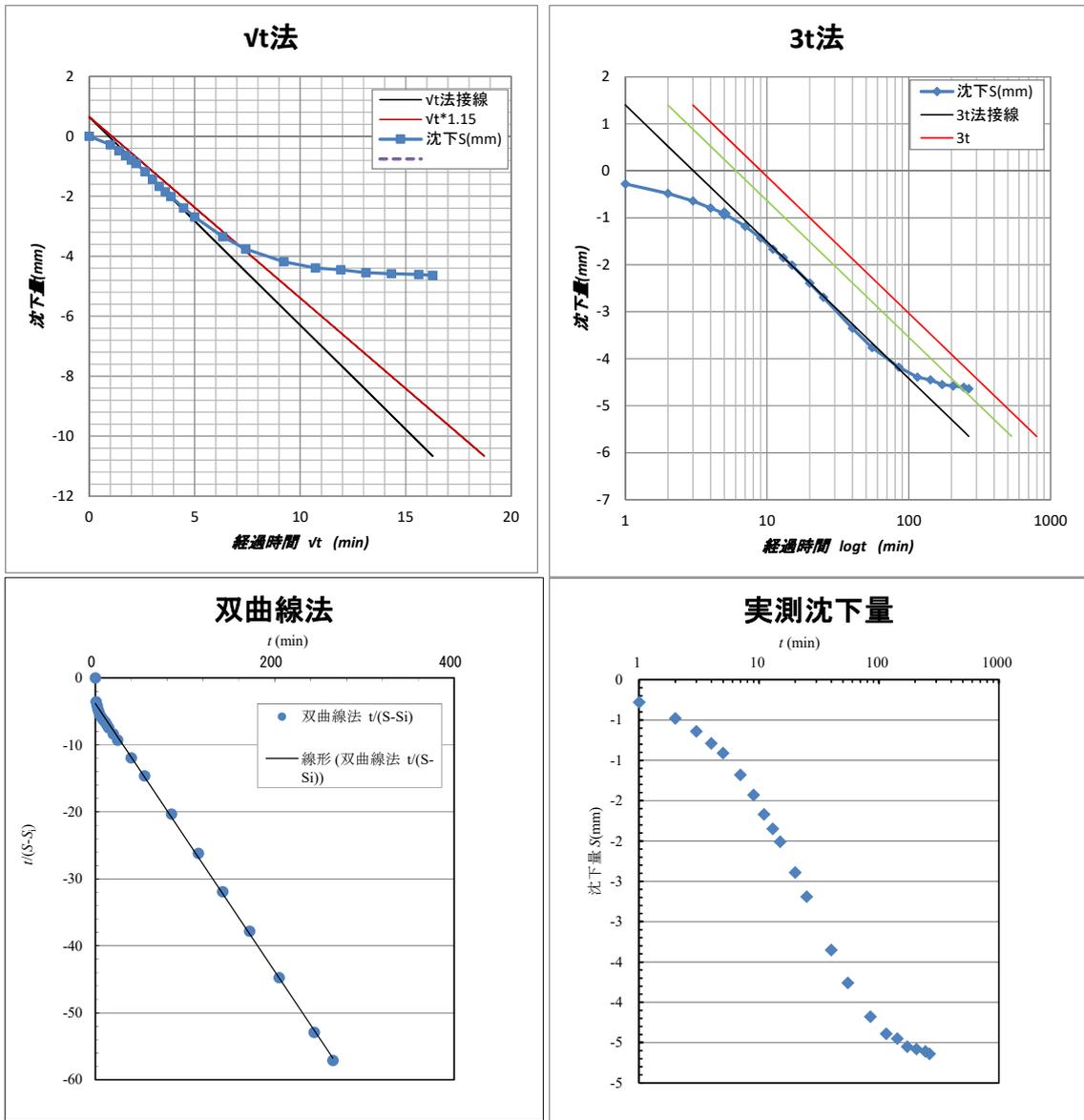


図 2-49 圧密沈下量の時刻歴

b) 模型地盤の実験前計測

実験前のベーンせん断試験による強度分布および含水比試験による含水比分布の計測位置を図 2-50 に示す。せん断強度分布および含水比分布を図 2-51 に示す。

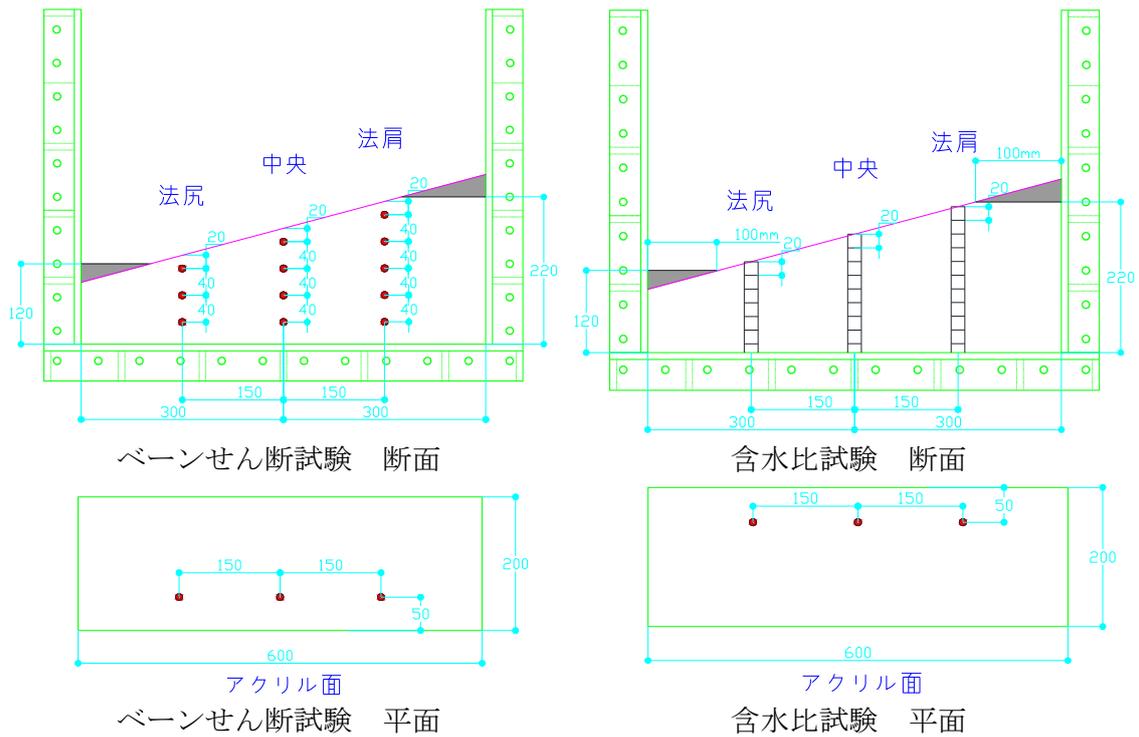


図 2-50 ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置（試験前）

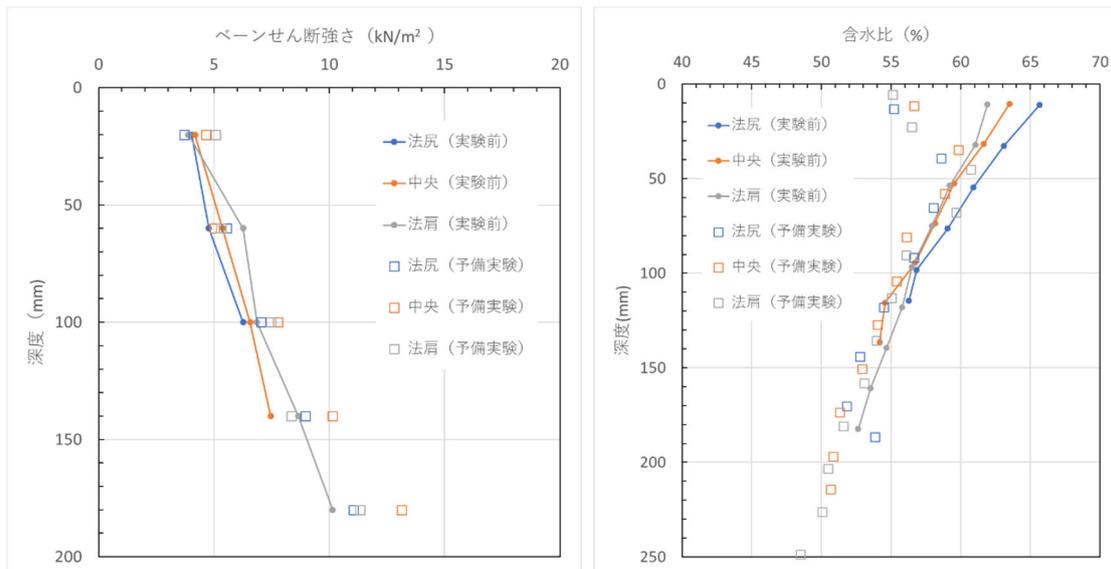
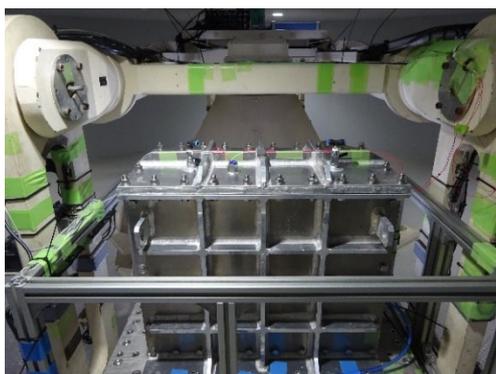


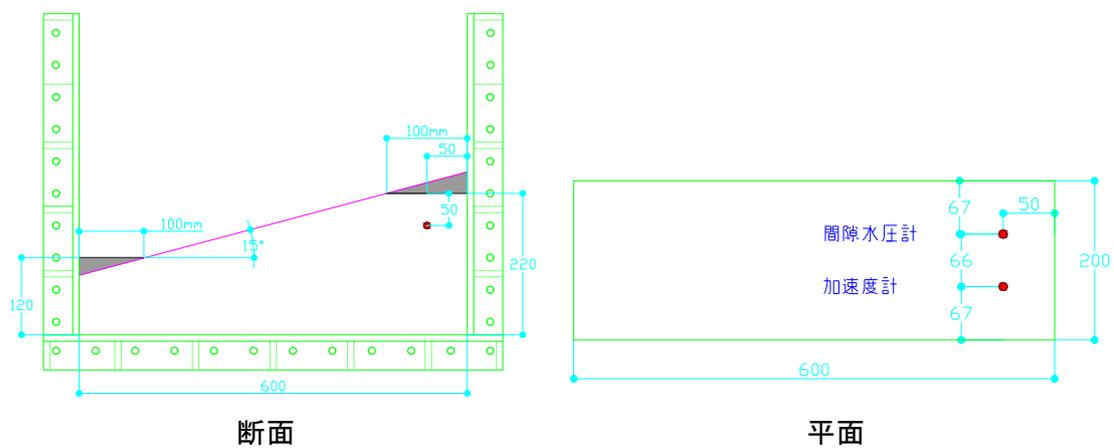
図 2-51 せん断強度分布と含水比の深度分布（Case3）

c) 計測器設置と初期状態

水圧を計測するために、土槽下部に水圧計を設置した。設置状況を写真 2-20 に示す。模型地盤の間隙水圧計、加速度計の設置状況を図 2-52 に示す。実験前の準備完了した地盤モデルの初期状態を写真 2-21 に示す。

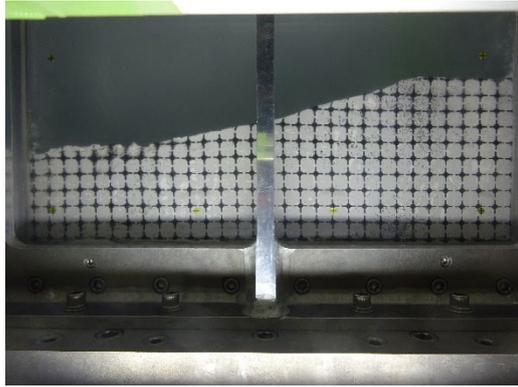


水圧計設置状況(土槽下部)  
写真 2-20 水圧計設置状況 (Case3)

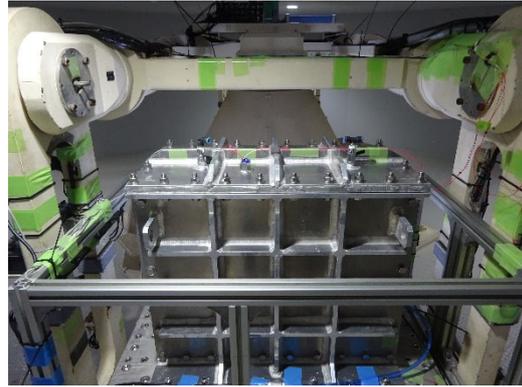


間隙水圧計、加速度計設置

図 2-52 間隙水圧計と加速度計の設置状況 (Case3)



模型地盤



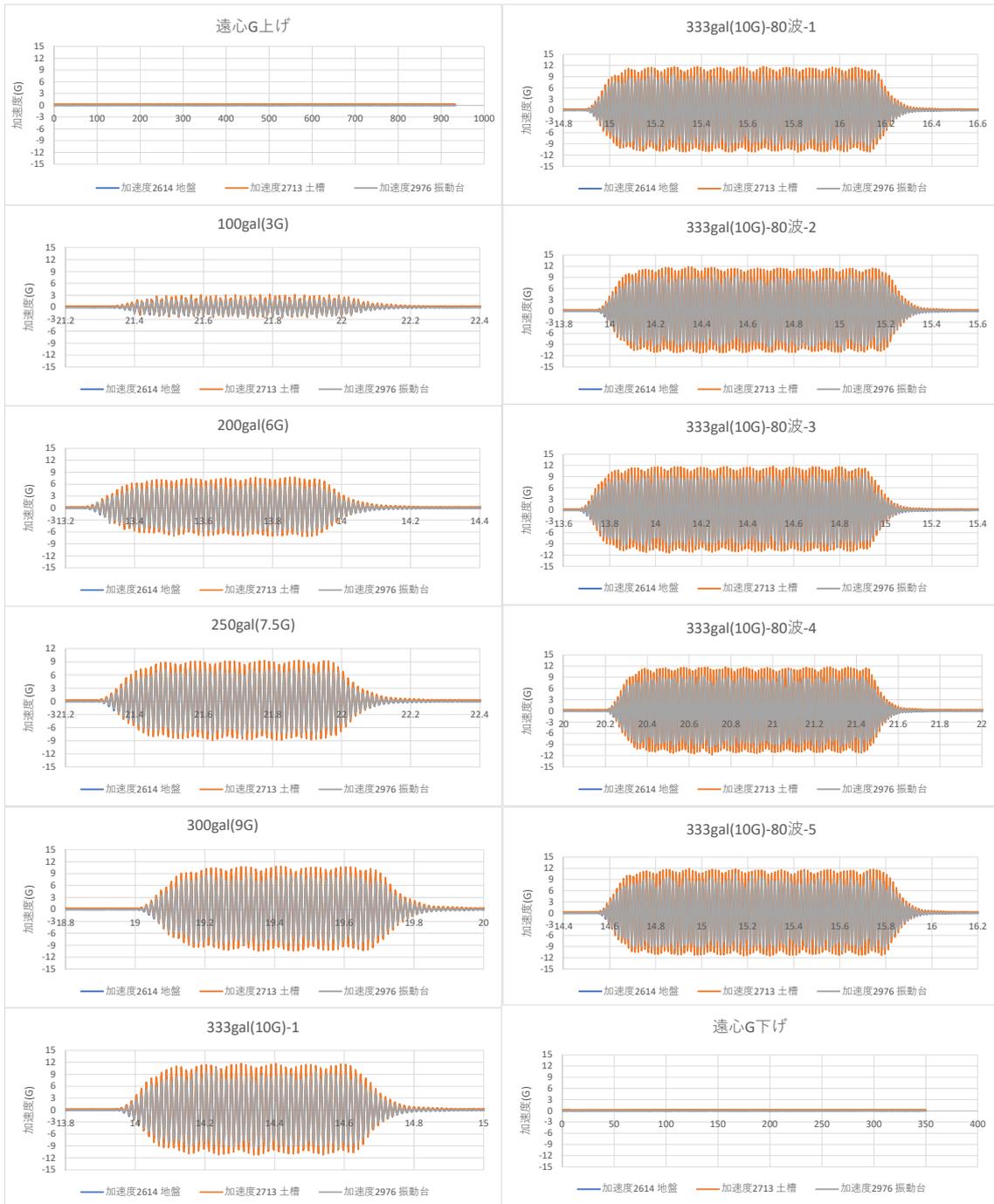
実験土槽

写真 2-21 実験前設置状況 (Case3)

#### d) 加振実験

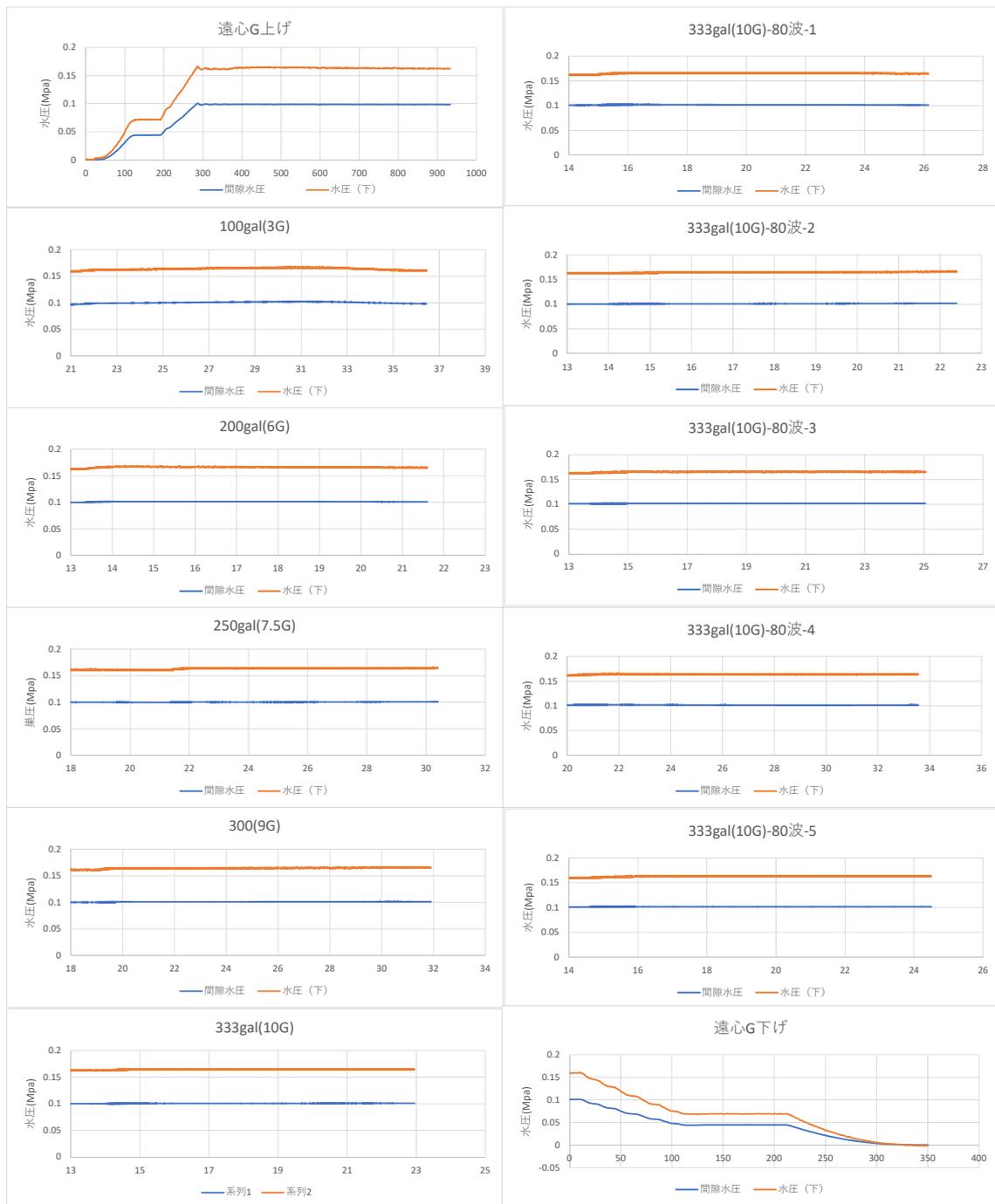
30G の遠心加速度の下で水深 23.3m の模型地盤について加振実験を行った。遠心装置運転後、遠心加速度が 30G に到達してから約 10 分経過したのち加振を開始した。加振波は周波数 2.33Hz の正弦波とし、加振加速度は 100、200、250、300、333gal と段階的に大きくし、333gal 加振のみ 8 回実施した。振動台、土槽および地盤の加速度の時刻歴の結果を図 2-53 に示す。

遠心载荷開始から停止までの水圧(土槽下部および地盤)の時刻歴を図 2-54 に示す。



横軸の時間の単位は秒である

図 2-53 台、土槽および地盤の加速度の時刻歴



横軸の時間の単位は秒である

図 2-54 土槽下部および地盤の水圧の時刻歴

e) 模型地盤の実験後計測

実験後のベーンせん断試験による強度分布および含水比分布の計測位置を図 2-55 に示す。せん断強度分布および含水比分布を図 2-56 に示す。

模型地盤から試料を採取し、一軸圧縮強度試験を行った。試料は図 2-57 に示す 3 箇

所で採取した。Case1 における供試体整形の困難さを踏まえ、ワイヤーソーによる整形の代わりに、薄肉パイプを用いたサンプラーによる採取とした。採取した試料による一軸圧縮強度試験状況を写真 2-22 に示す。法尻、中央、法肩ともに試験前に自重による変形がみられた。一軸圧縮試験結果を図 2-58 に示す。

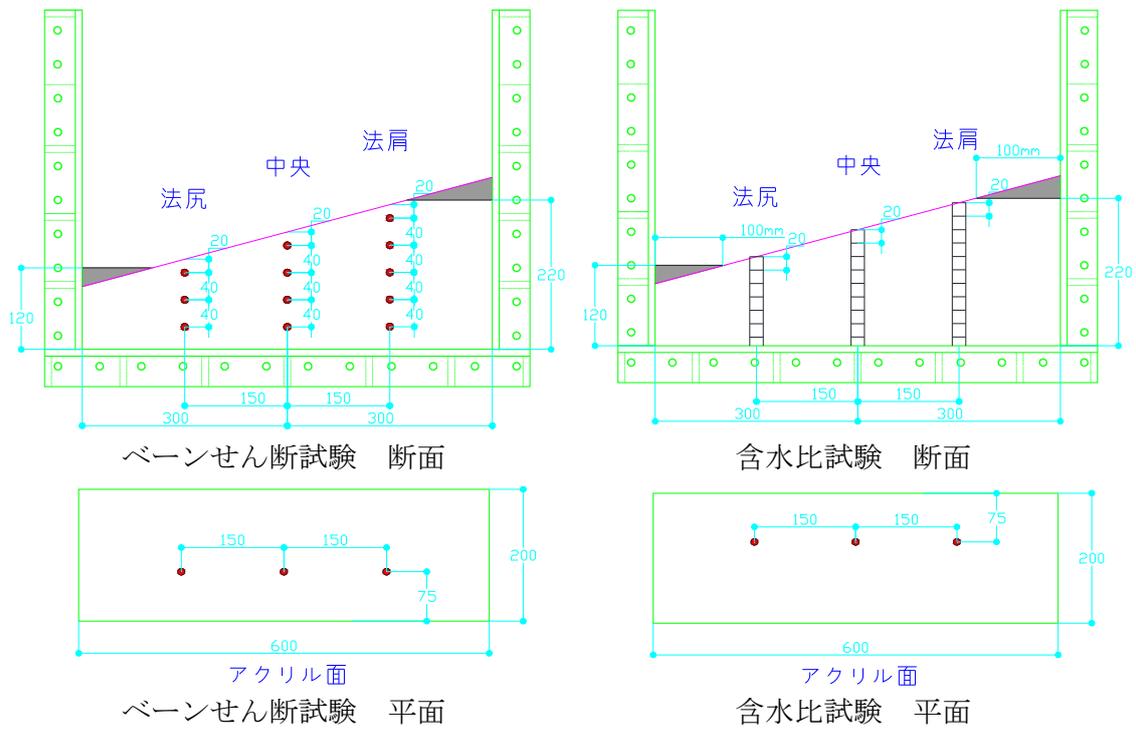


図 2-55 ベーンせん断試験と含水比試験の計測位置（試験後）

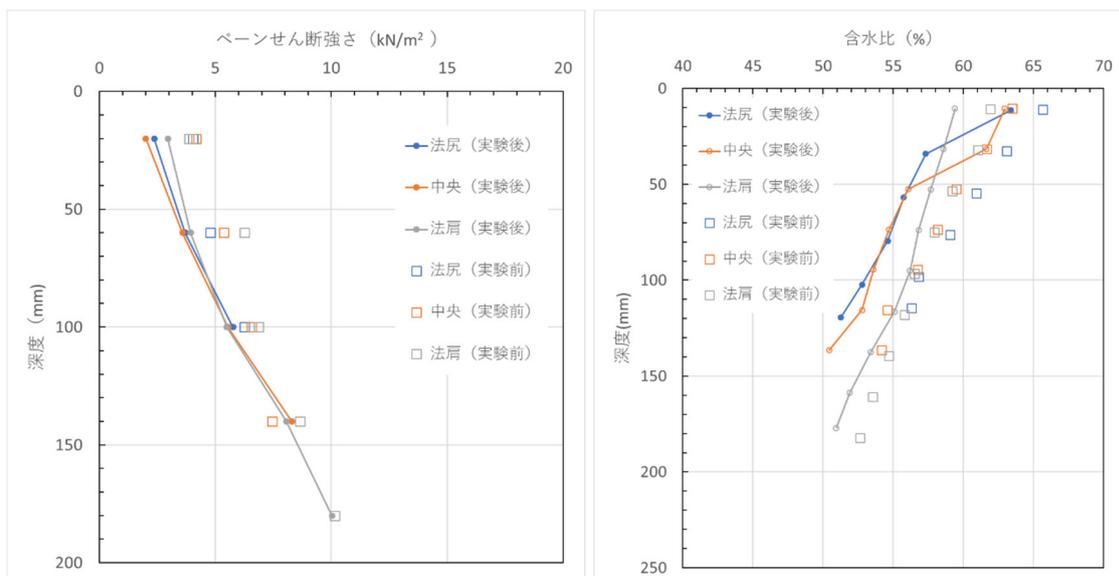


図 2-56 せん断強度分布と含水比の深度分布

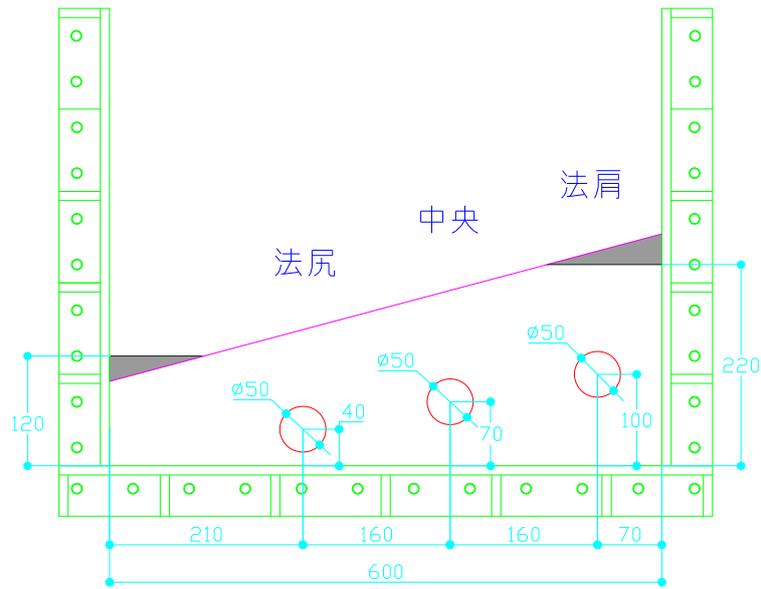
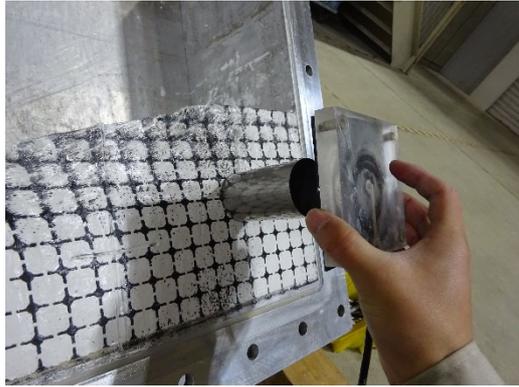
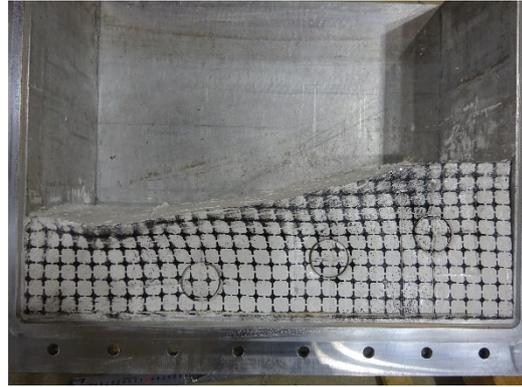


図 2-57 一軸圧縮強度試験用試料の採取位置



試料サンプラー挿入前



試料サンプラー挿入後



試験状況(法尻)



試験状況(中央)



供試体(法肩)

写真 2-22 一軸圧縮試験の実施状況

測点	一軸圧縮強さ	含水比	湿潤密度
	(kN/m <sup>2</sup> )	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )
法肩	7.8	55.3	1.687
中央	8.0	54.8	1.695
法尻	9.2	54.7	1.668

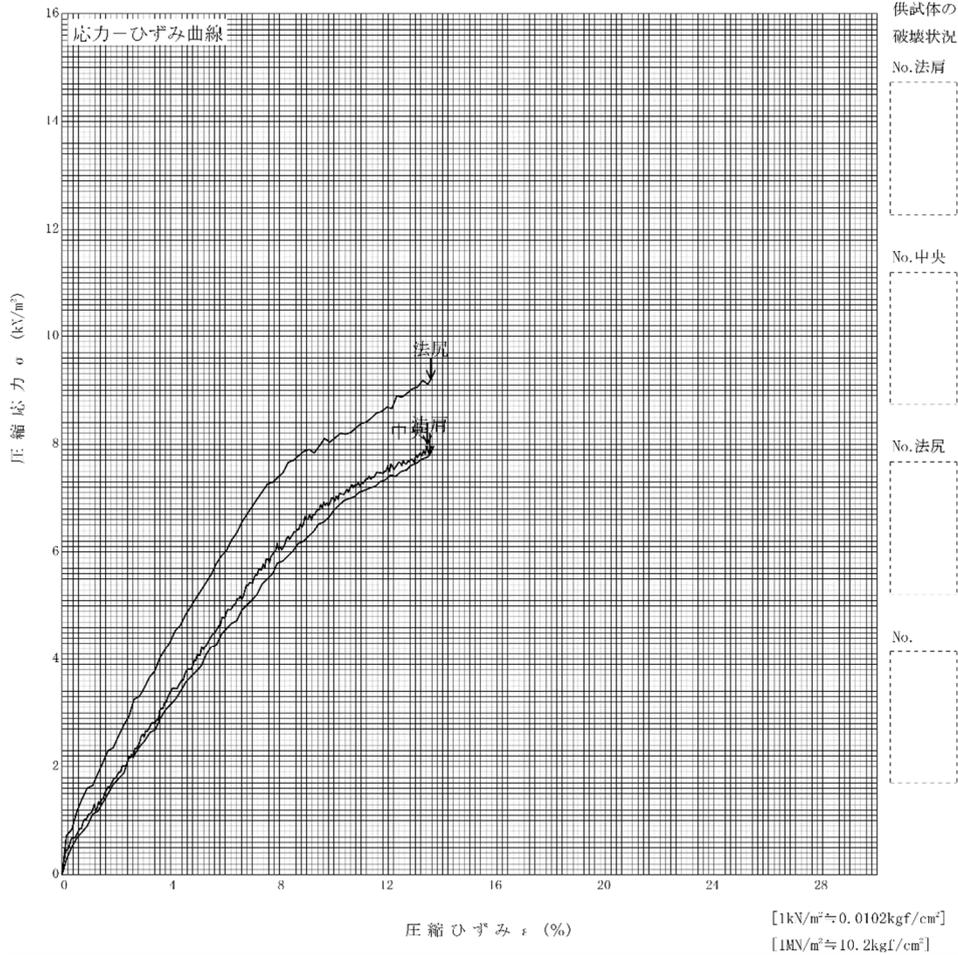
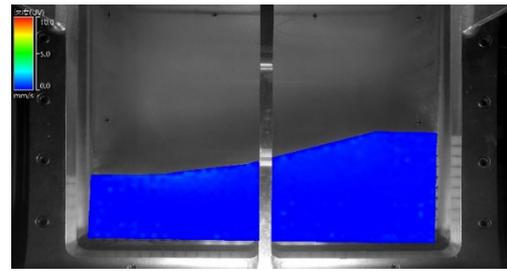
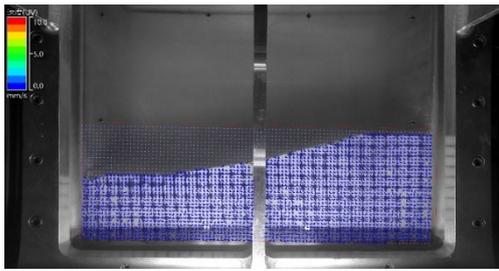


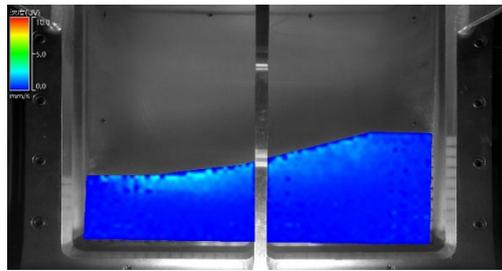
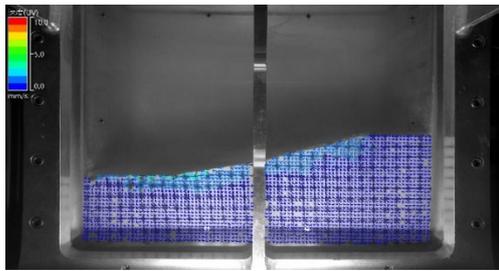
図 2-58 一軸圧縮強度試験結果

f) 画像解析による地盤変位

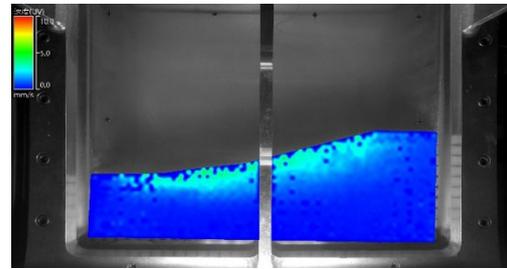
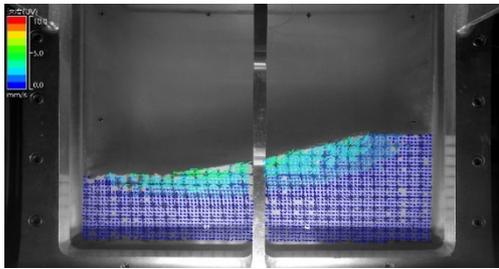
100gal 加振前の状態を基準とした地盤変位のベクトル表示およびコンター表示を図 2-59～図 2-60 に示す。さらに 5 測線を抽出し、測線における深度方向の水平変位分布を図 2-61 に、せん断ひずみ分布を図 2-62 に示す。



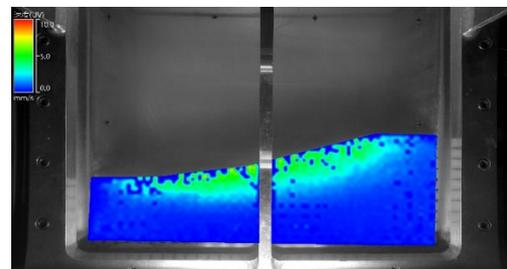
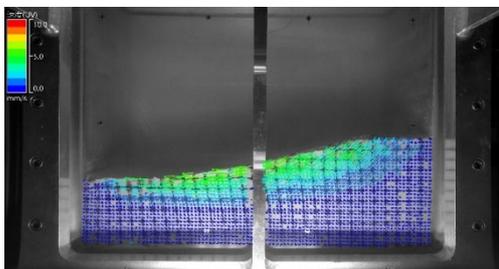
100gal-100gal



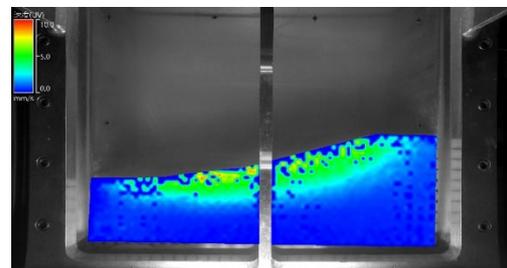
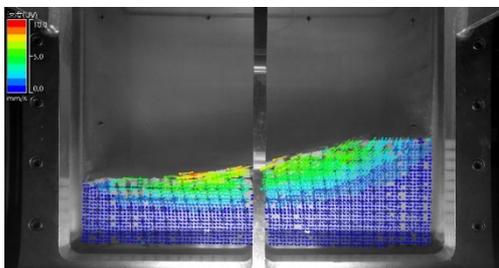
100gal-200gal



100gal-250gal

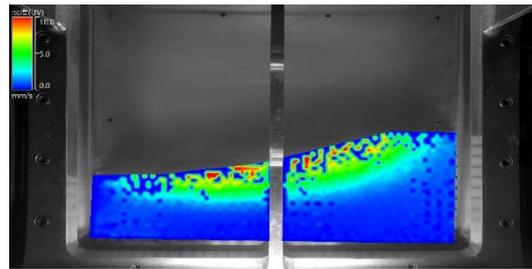
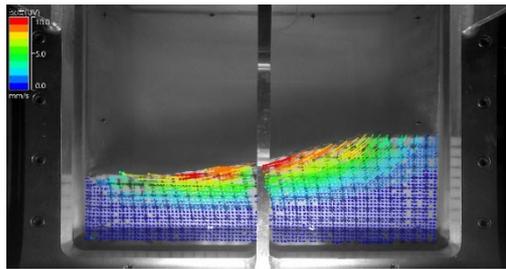


100gal-300gal

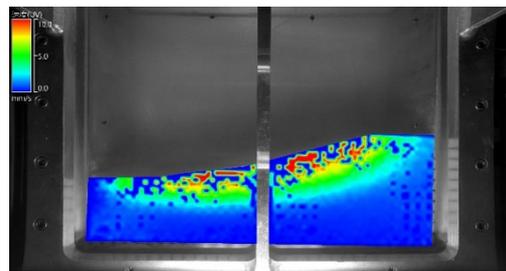
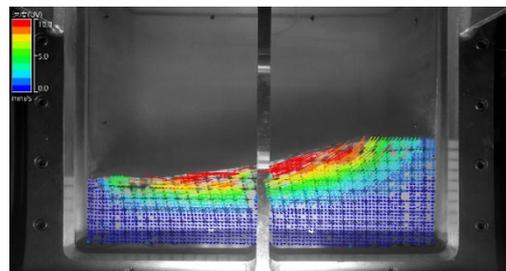


100gal-333gal-1

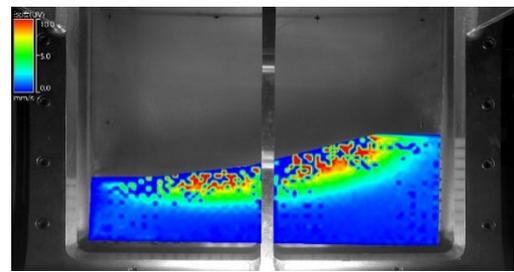
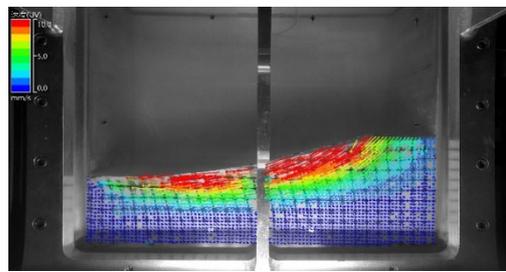
図 2-59 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case3) (その1)



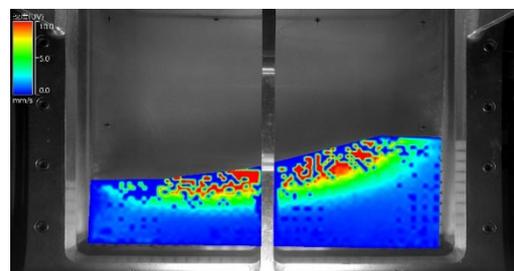
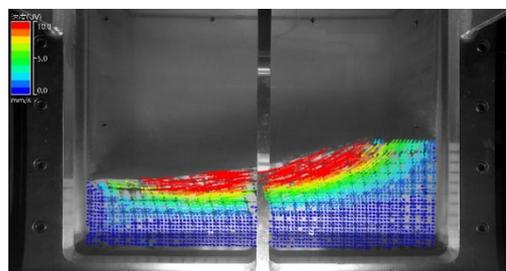
100gal-333gal-2



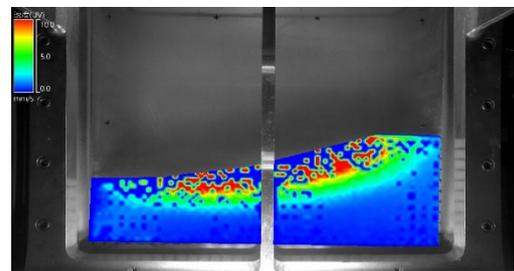
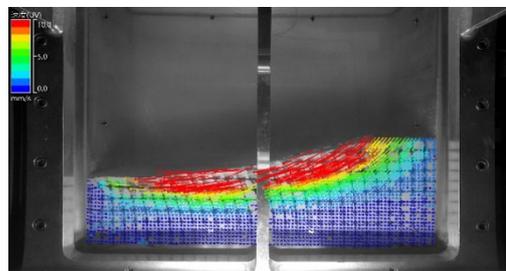
100gal-333gal-3



100gal-333gal-4



100gal-333gal-5



100gal-333gal-6

図 2-60 地盤変位のベクトル表示 (左) とコンター表示 (右) (Case3) (その 2)

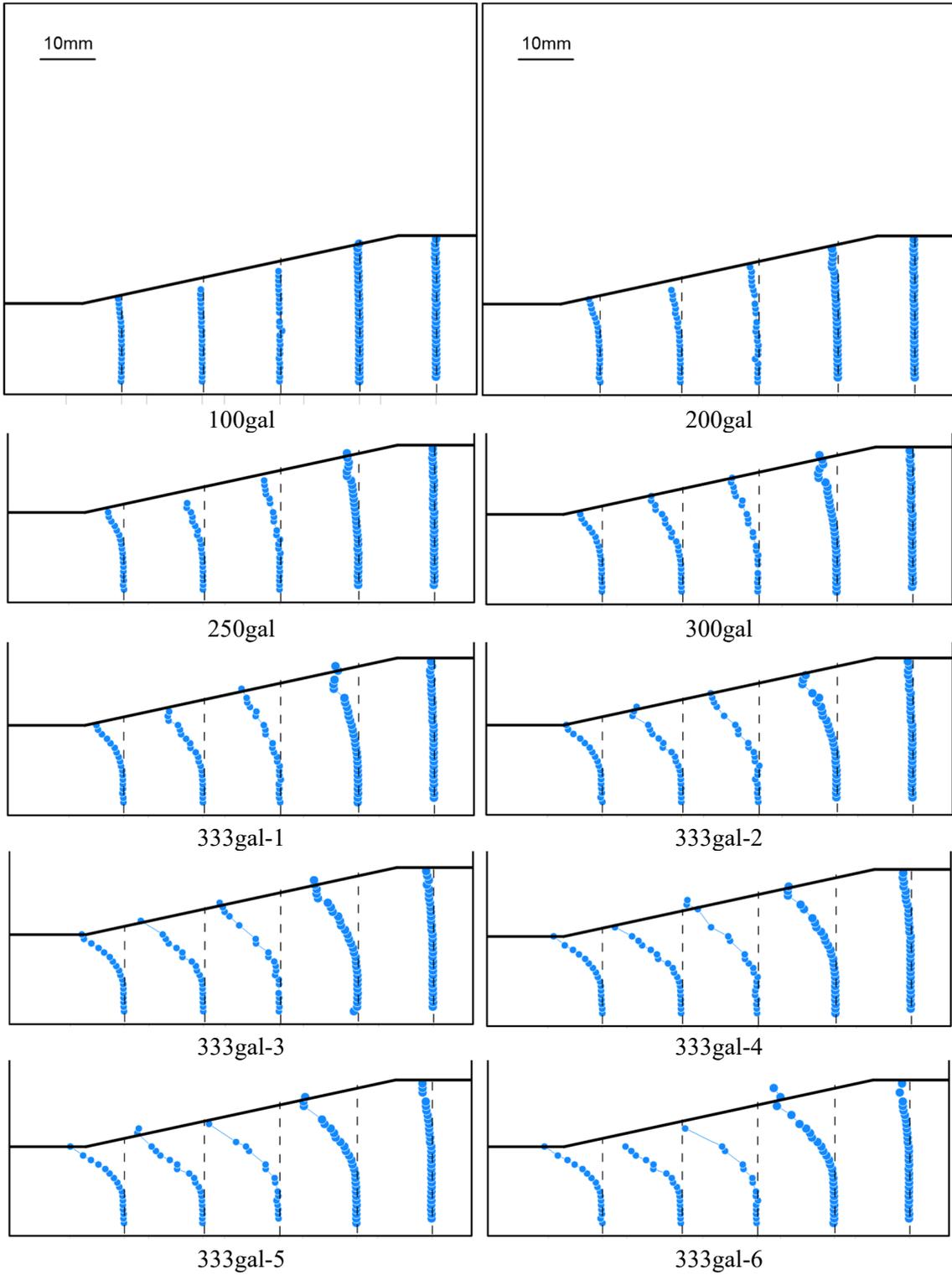


图 2-61 水平变位分布 (Case3)

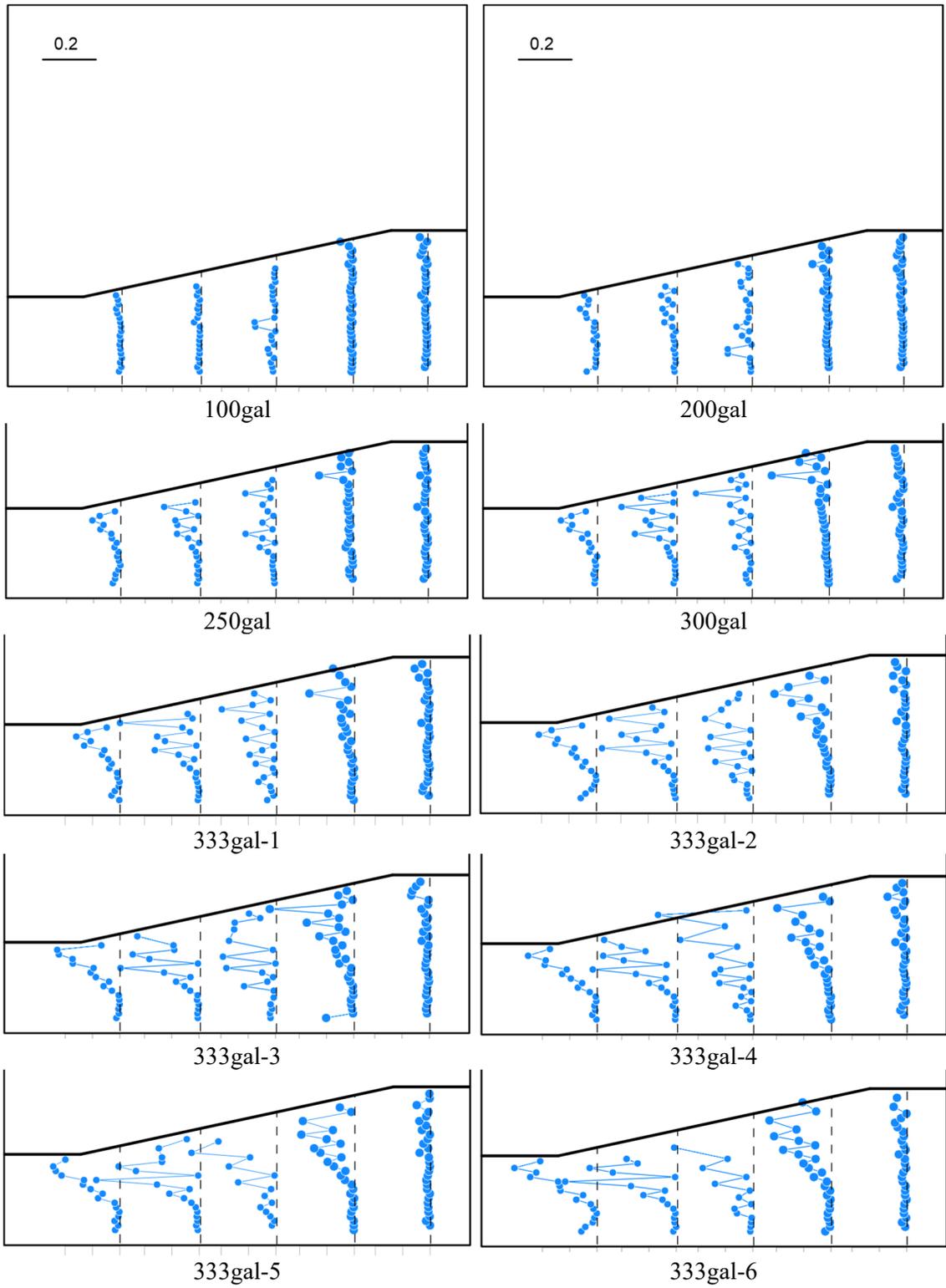


図 2-62 せん断ひずみ分布 (Case3)