

平成 29 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 30 年 1 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28年度事業で用いた斜面模型のすべり破壊の発生位置とその発達過程を3つの解析手法により再現し、崩壊機構を明らかにする。解析コードとして、有限差分法による解析コード「FLAC」を用いた。構成則にはモールクーロンモデル、修正カムクレイモデル、マルチスプリングモデルを用いた。構成モデルのパラメータは室内試験を実施して設定した。解析ケースは、構成則の違い（3種類）、2つの水深、法肩部の切り欠きの有無に着目した12ケースを行った。

表1に再現解析結果のまとめに解析ケースと解析結果をまとめて示す。図1に破壊モードを示す。今回実施した解析はいずれも、破壊傾斜角が実験値よりも小さい値を示した。この差異が生じた原因は、過圧密状態にある粘土の強度を解析では過小に見積もっていることが考えられる。この課題については、遠心場において模型地盤のせん断強度を直接測定し、その強度定数を解析に用いることで解決できる可能性がある。また構成則によって発生するすべり面の位置が異なったが、実験結果に最も近い結果が得られたのは、モールクーロンモデルであった。それ以外のモデルは実験よりも深い位置にすべり面が発生した。水深の違いに着目すると、どの構成モデルにおいても結果に差が見られなかった。法肩クラックの有無に着目すると、マルチスプリングモデル（破壊モード⑥）を除けば、法肩付近のすべり面の位置に若干差が見られたが、全体の破壊傾向に影響を与えていないことがわかる。

表1 再現解析結果のまとめ

	水深 (m)	解析モデル	法肩クラック	破壊傾斜角 (度) 解析	破壊傾斜角 (度) 実験	破壊モード
Case1	45	モールクーロン	無し	4	11~12	①
Case2	70			4	13~14	
Case3	45	修正カムクレイ		4	11~12	②
Case4	70			4	13~14	
Case5	45	マルチスプリング		7	11~12	③
Case6	70			7	13~14	
Case7	45	モールクーロン	有り	4	10~11	④
Case8	70			4	13~14	
Case9	45	修正カムクレイ		4	10~11	⑤
Case10	70			4	13~14	
Case11	45	マルチスプリング		6	10~11	⑥
Case12	70			6	13~14	

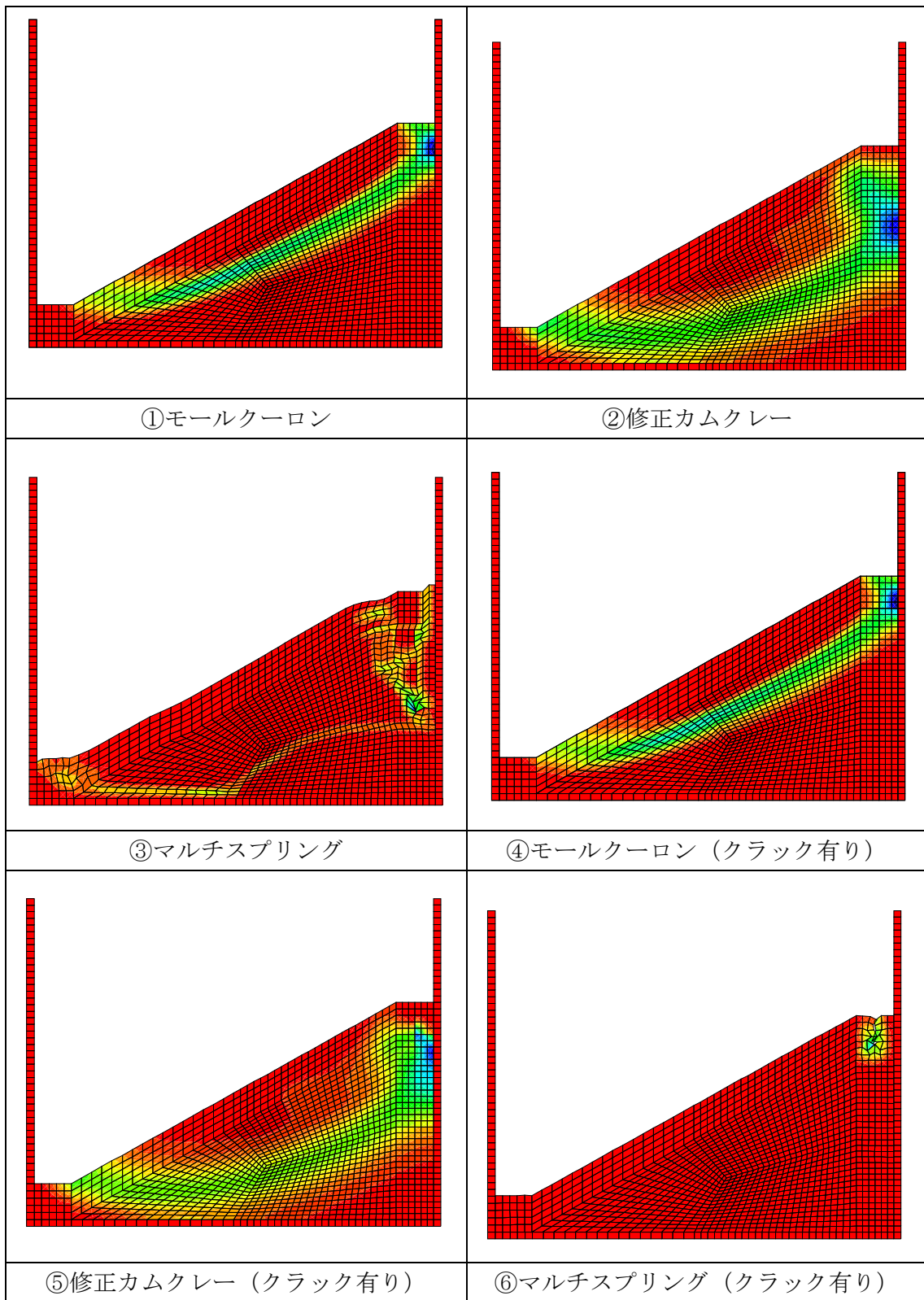


図1 再現解析の破壊モードの比較

次に、平成 28 年度事業において実施した静定外力の作用下での斜面模型の崩壊挙動への円弧すべり法（修正フェレニウス法）の適用性に関する前項までの検討を踏まえ、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、遠心振動実験用の模型地盤を設計した。設計に際して、有限差分法による解析コード「FLAC」を用いた。解析に用いる構成モデルのパラメータは前述と同じ値を設定した。加えて動的な繰返しせん断に関する室内試験を実施し、過剰間隙水圧上昇特性についても考慮した。斜面模型の設計では、まず、平成 28 年度事業で実施した規模の遠心载荷装置を用いた斜面形状などの影響を踏まえ小型斜面模型による設計を実施した。次いで、斜面形状によるスケール効果の影響を検証するため、国内最大規模の遠心载荷装置を用いた斜面模型の設計を実施した。

小型遠心模型実験モデル（傾斜角 30° ）を図 2 に示す。小型遠心模型実験モデル（傾斜角 10° ）を図 3 に示す。解析結果の傾斜角 30° の破壊モードを図 4 に示す。解析結果の傾斜角 10° の破壊モードを図 5 に示す。50G 場における解析結果では傾斜角 30° では 200~250 ガルですべりが発生し始める結果となった。傾斜角 10° では加振加速度 250gal 以後に、法肩から法尻まで、および表層一部にすべり線が形成され、加振加速度 500gal 以後に、すべり変位が大きくなった。破壊モードは側壁の境界条件の影響を受けてはいるものの、実験装置と土槽のサイズの制約条件を加味すると最適な設計になっていると考えられる。

大型遠心模型実験モデルを図 6 に示す。解析結果の破壊モードを図 7 に示す。50G 場における解析結果では 200~250 ガルですべりが発生し始める結果となった。破壊モードは側壁の境界条件の影響はほぼ受けていないことがわかる。一方で底面については境界条件の影響を受けている恐れもあるため、法尻部の層厚を変化させる等の検討も行う必要があると思われる。ただし、実験装置と土槽のサイズの制約条件を加味すると概ね最適な設計になっていると考えられる。

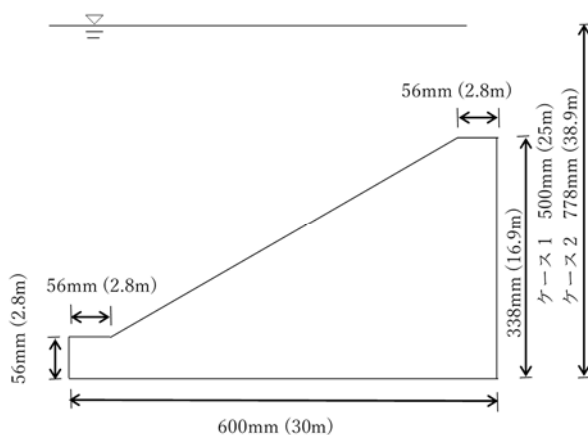


図 2 小型実験モデル（傾斜角 30° ）

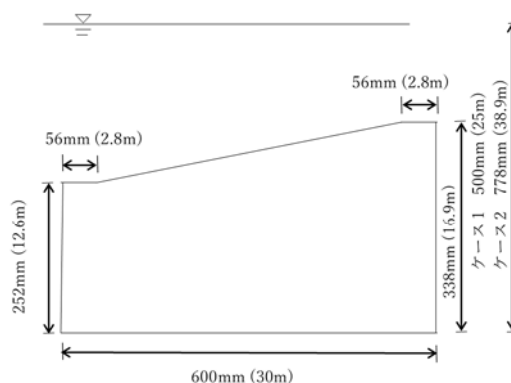
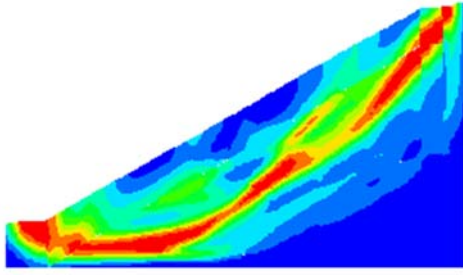
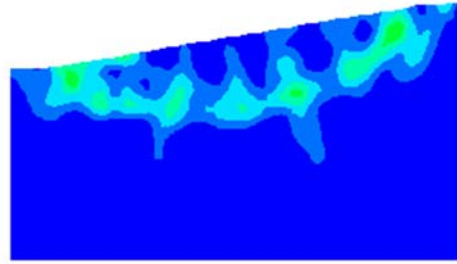


図 3 小型実験モデル（傾斜角 10° ）



(a) 450 gal

図4 破壊モード（傾斜角 30°）



(d) 600 gal

図5 破壊モード（傾斜角 10°）

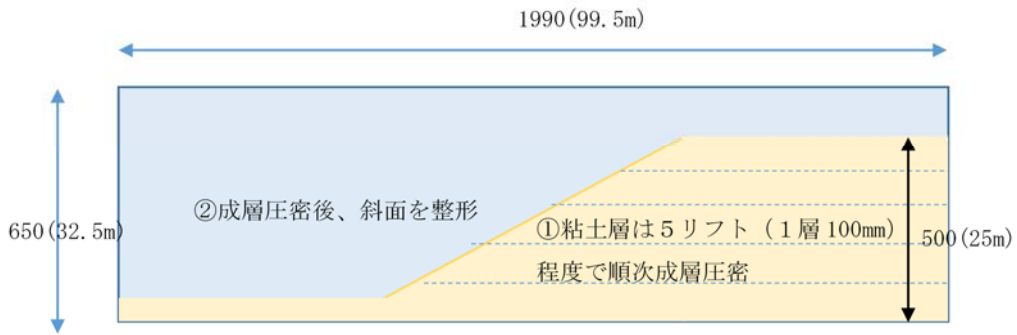
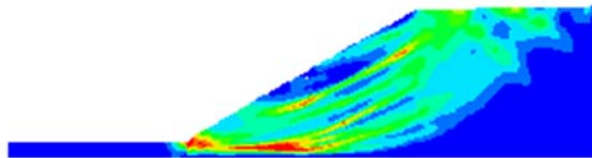


図6 大型実験モデル



(c) 300 gal

図7 破壊モード（せん断ひずみ分布）

目次

1	はじめに	1
2	海底環境下における斜面に与える水圧の影響検討	3
2.1	室内土質試験による静的解析のパラメータ設定	3
2.1.1	圧密非排水 (CU) 三軸圧縮試験の結果	3
2.1.2	圧密試験の結果	12
2.2	切り欠き無し斜面模型の再現解析	15
2.2.1	モール-クーロンモデルの概要	15
2.2.2	修正カムクレイモデルの概要	20
2.2.3	マルチスプリングモデルの概要	27
2.2.4	モール-クーロンモデルによる解析	29
2.2.5	修正カムクレイモデルによる解析	43
2.2.6	マルチスプリングモデルによる解析	54
2.3	切り欠き有り斜面模型の再現解析	63
2.3.1	法肩位置の切り欠きのモデル化	63
2.3.2	モール-クーロンモデルによる解析	63
2.3.3	修正カムクレイモデルによる解析	73
2.3.4	マルチスプリングモデルによる解析	83
2.4	海底環境下における斜面の地すべり挙動の分析	92
3	模型地盤の設計	95
3.1	室内土質試験による動的解析のパラメータ設定	95
3.1.1	土の動的変形試験	95
3.1.2	非排水繰返しせん断試験	100
3.2	小型遠心力模型実験モデル	104
3.2.1	模型地盤モデルの解析概要	104
3.2.2	解析パラメータの設定	108
3.2.3	入力波の設定	116
3.3	小型遠心力模型実験モデルの解析結果	117
3.3.1	モールクーロンモデルの結果	119
3.3.2	マルチスプリングモデルの結果	146
3.4	大型遠心力模型実験モデル	169
3.4.1	模型地盤モデルの解析概要	169
3.4.2	解析パラメータの設定	171

3.4.3	入力波の設定.....	172
3.5	大型遠心力模型実験モデルの解析結果.....	172
3.5.1	モールクーロンモデルの結果.....	172
3.5.2	マルチスプリングモデルの結果.....	184
3.6	設計検討結果のまとめ.....	199
4	海底環境下における斜面の安定性評価に関する情報収集.....	203
4.1	第 24 回原子炉施設における構造力学分野の国際学会(24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology)について.....	203
4.2	第 19 回国際地盤工学会(19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) について.....	206
5	まとめ.....	212
6	参考文献.....	213
7	付録.....	214

図目次

図 2-1	試験装置	6
図 2-2	試験後の供試体の状況	6
図 2-3	軸差応力と軸ひずみの関係（正規圧密）	7
図 2-4	軸差応力と軸ひずみの関係（過圧密状態（ $p_c=100\text{kN/m}^2$ ））	7
図 2-5	軸差応力と軸ひずみの関係（過圧密状態（ $p_c=200\text{kN/m}^2$ ））	8
図 2-6	有効応力経路	8
図 2-7	モール円（有効応力表示）正規圧密状態	9
図 2-8	モール円（全応力表示）正規圧密状態	9
図 2-9	モール円（有効応力表示）過圧密状態（ $p_c=100\text{kN/m}^2$ ）	10
図 2-10	モール円（全応力表示）過圧密状態（ $p_c=100\text{kN/m}^2$ ）	10
図 2-11	モール円（有効応力表示）過圧密状態（ $p_c=200\text{kN/m}^2$ ）	11
図 2-12	モール円（全応力表示）過圧密状態（ $p_c=200\text{kN/m}^2$ ）	11
図 2-13	ヤング率の拘束圧依存性	12
図 2-14	圧密試験装置	13
図 2-15	圧縮曲線（圧密試験）	14
図 2-16	圧縮曲線（三軸試験）	14
図 2-17	モールクーロンモデルの破壊基準の模式図	16
図 2-18	実験結果と解析結果の比較（ケース 1）	17
図 2-19	実験結果と解析結果の比較（ケース 2）	17
図 2-20	実験結果と解析結果の比較（ケース 3）	18
図 2-21	実験結果と解析結果の比較（ケース 4）	18
図 2-22	実験結果と解析結果の比較（ケース 5）	19
図 2-23	実験結果と解析結果の比較（ケース 6）	19
図 2-24	実験結果と解析結果の比較（ケース 7）	20
図 2-25	圧縮曲線	21
図 2-26	圧密応力の増加による塑性体積変化（ Δv^p ）	22
図 2-27	修正カムクレイモデルの降伏局面の模式図	22
図 2-28	解析結果と実験結果の比較（Case1）	23
図 2-29	解析結果と実験結果の比較（Case2）	24
図 2-30	解析結果と実験結果の比較（Case3）	24
図 2-31	解析結果と実験結果の比較（Case4）	25
図 2-32	解析結果と実験結果の比較（Case5）	25

図 2-33	解析結果と実験結果の比較 (Case6)	26
図 2-34	解析結果と実験結果の比較 (Case7)	26
図 2-35	マルチスプリングモデルの模式図	29
図 2-36	破壊後の残留状態の模式図	29
図 2-37	強度定数の比較 (三軸圧縮試験とベーンせん断試験)	32
図 2-38	強度定数の比較 (一面せん断試験とベーンせん断試験)	33
図 2-39	解析モデル	33
図 2-40	水圧の载荷状況 (水深 45m)	34
図 2-41	水圧の载荷状況 (水深 70m)	34
図 2-42	インターフェース要素の概要	35
図 2-43	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)	35
図 2-44	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)	36
図 2-45	変位ベクトル分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)	37
図 2-46	変位ベクトル分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 11.7~11.8 度)	37
図 2-47	変位ベクトル分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)	38
図 2-48	実験の変位ベクトル分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 14.1~14.3 度)	38
図 2-49	地盤の塑性状況 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)	39
図 2-50	地盤の塑性状況 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)	39
図 2-51	有効鉛直応力の分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)	40
図 2-52	有効鉛直応力の分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)	40
図 2-53	有効水平応力の分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)	41
図 2-54	有効水平応力の分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)	41
図 2-55	せん断応力の分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)	42
図 2-56	せん断応力の分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)	42
図 2-57	間隙水圧の分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)	43
図 2-58	間隙水圧の分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)	43
図 2-59	mpc 分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)	44
図 2-60	mpc 分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	45
図 2-61	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)	45
図 2-62	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	46
図 2-63	変位ベクトル分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)	47
図 2-64	変位ベクトル分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 11.7~11.8 度)	47
図 2-65	変位ベクトル分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	48
図 2-66	実験の変位ベクトル分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 14.1~14.3 度)	48
図 2-67	地盤の塑性状況 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)	49
図 2-68	地盤の塑性状況 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	49

図 2-69	有効鉛直応力の分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)	50
図 2-70	有効鉛直応力の分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	50
図 2-71	有効水平応力の分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)	51
図 2-72	有効水平応力の分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	51
図 2-73	せん断応力の分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)	52
図 2-74	せん断応力の分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	52
図 2-75	間隙水圧の分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)	53
図 2-76	間隙水圧の分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	53
図 2-77	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)	55
図 2-78	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)	55
図 2-79	変位ベクトル分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)	56
図 2-80	変位ベクトル分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 11.7~11.8 度)	56
図 2-81	変位ベクトル分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)	57
図 2-82	実験の変位ベクトル分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 14.1~14.3 度)	57
図 2-83	地盤の塑性状況 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)	58
図 2-84	地盤の塑性状況 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)	58
図 2-85	有効鉛直応力の分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)	59
図 2-86	有効鉛直応力の分布 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)	59
図 2-87	有効水平応力の分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)	60
図 2-88	有効水平応力の分布 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)	60
図 2-89	せん断応力の分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)	61
図 2-90	せん断応力の分布 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)	61
図 2-91	間隙水圧の分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)	62
図 2-92	間隙水圧の分布 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)	62
図 2-93	解析モデル (切り欠き有り)	63
図 2-94	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)	65
図 2-95	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)	65
図 2-96	変位ベクトル分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)	66
図 2-97	変位ベクトル分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 10.6~10.8 度)	66
図 2-98	変位ベクトル分布 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)	67
図 2-99	実験の変位ベクトル分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 13.4.1~13.6 度)	67
図 2-100	地盤の塑性状況 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)	68
図 2-101	地盤の塑性状況 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)	68
図 2-102	有効鉛直応力の分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)	69
図 2-103	有効鉛直応力の分布 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)	69

図 2-104	有効水平応力の分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)	70
図 2-105	有効水平応力の分布 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)	70
図 2-106	せん断応力の分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)	71
図 2-107	せん断応力の分布 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)	71
図 2-108	間隙水圧の分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)	72
図 2-109	間隙水圧の分布 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)	72
図 2-110	mpc 分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)	74
図 2-111	mpc 分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)	74
図 2-112	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)	75
図 2-113	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)	75
図 2-114	変位ベクトル分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)	76
図 2-115	変位ベクトル分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 10.6~10.8 度)	76
図 2-116	変位ベクトル分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)	77
図 2-117	実験の変位ベクトル分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 13.4.1~13.6 度)	77
図 2-118	地盤の塑性状況 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)	78
図 2-119	地盤の塑性状況 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)	78
図 2-120	有効鉛直応力の分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)	79
図 2-121	有効鉛直応力の分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)	79
図 2-122	有効水平応力の分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)	80
図 2-123	有効水平応力の分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)	80
図 2-124	せん断応力の分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)	81
図 2-125	せん断応力の分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)	81
図 2-126	間隙水圧の分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)	82
図 2-127	間隙水圧の分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)	82
図 2-128	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)	83
図 2-129	せん断ひずみ増分の分布 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)	84
図 2-130	変位ベクトル分布 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)	85
図 2-131	変位ベクトル分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 10.6~10.8 度)	85
図 2-132	変位ベクトル分布 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)	86
図 2-133	実験の変位ベクトル分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 13.4.1~13.6 度)	86
図 2-134	地盤の塑性状況 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)	87
図 2-135	地盤の塑性状況 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)	87
図 2-136	有効鉛直応力の分布 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)	88
図 2-137	有効鉛直応力の分布 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)	88

図 2-138	有効水平応力の分布 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)	89
図 2-139	有効水平応力の分布 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)	89
図 2-140	せん断応力の分布 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)	90
図 2-141	せん断応力の分布 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)	90
図 2-142	間隙水圧の分布 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)	91
図 2-143	間隙水圧の分布 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)	91
図 2-144	破壊モードの比較 (せん断ひずみ分布)	94
図 3-1	中空ねじり試験機	97
図 3-2	動的変形特性 (正規圧密)	98
図 3-3	応力ひずみ関係の例 (正規圧密 B-3)	98
図 3-4	動的変形特性 (過圧密 先行圧密応力 200kPa 圧密応力 100kPa)	99
図 3-5	応力ひずみ関係の例 (過圧密 K-1)	99
図 3-6	繰返し応力比と繰返し回数の関係 (正規圧密)	101
図 3-7	繰返し応力比と繰返し回数の関係 (過圧密)	101
図 3-8	繰返しせん断試験の例 (正規圧密)	102
図 3-9	繰返しせん断試験の例 (過圧密)	103
図 3-10	実験モデル概要 (斜面勾配 30°)	105
図 3-11	実験モデル概要 (斜面勾配 10°)	105
図 3-12	解析モデル (要素数 1,577、斜面勾配 30°)	106
図 3-13	解析モデル (要素数 1,901、斜面勾配 10°)	107
図 3-14	解析実施手順	108
図 3-15	三軸圧縮試験結果	109
図 3-16	剛性特性 (G- γ 関係)	112
図 3-17	減衰特性 (h- γ 関係)	113
図 3-18	最大減衰 hmax の推定	113
図 3-19	基準ひずみと破壊強度の関係	114
図 3-20	三軸圧縮試験結果	115
図 3-21	フィッティング結果	116
図 3-22	入力波	117
図 3-23	斜面表面中央の変位応答 (MC Case1)	119
図 3-24	斜面法尻の水圧応答 (MC Case1)	119
図 3-25	最大せん断ひずみ分布 (MC Case1)	122
図 3-26	変位分布 (MC Case1)	125
図 3-27	水圧分布 (MC Case1)	128
図 3-28	斜面表面中央の変位応答 (MC Case2)	128
図 3-29	斜面法尻の水圧応答 (MC Case2)	129

図 3-30	最大せん断ひずみ分布 (MC Case2)	131
図 3-31	変位分布 (MC Case2)	133
図 3-32	水圧分布 (MC Case2)	136
図 3-33	斜面法肩の変位応答 (MC Case3)	136
図 3-34	斜面法肩の水圧応答 (MC Case3)	137
図 3-35	最大せん断ひずみ分布 (MC Case3)	138
図 3-36	変位分布 (MC Case3)	139
図 3-37	水圧分布 (MC Case3)	141
図 3-38	斜面法肩の変位応答 (MC Case4)	141
図 3-39	斜面法肩の水圧応答 (MC Case4)	142
図 3-40	最大せん断ひずみ分布 (MC Case4)	143
図 3-41	変位分布 (MC Case4)	144
図 3-42	水圧分布 (MC Case4)	146
図 3-43	斜面表面中央の変位応答 (MS Case1m)	146
図 3-44	斜面法尻の水圧応答 (MS Case1m)	147
図 3-45	最大せん断ひずみ分布 (MS Case1m)	149
図 3-46	変位分布 (MS Case1m)	151
図 3-47	水圧分布 (MS Case1m)	153
図 3-48	斜面表面中央の変位応答 (MS Case2m)	153
図 3-49	斜面法尻の水圧応答 (MS Case2m)	154
図 3-50	最大せん断ひずみ分布 (MS Case2m)	156
図 3-51	変位分布 (MS Case2m)	158
図 3-52	水圧分布 (MS Case2m)	160
図 3-53	斜面法肩の変位応答 (MS Case3m)	161
図 3-54	斜面法肩の水圧応答 (MS Case3m)	161
図 3-55	最大せん断ひずみ分布 (MS Case3m)	162
図 3-56	変位分布 (MS Case3m)	163
図 3-57	水圧分布 (MS Case3m)	164
図 3-58	斜面法肩の変位応答 (MS Case4m)	165
図 3-59	斜面法肩の水圧応答 (MS Case4m)	165
図 3-60	最大せん断ひずみ分布 (MS Case4m)	166
図 3-61	変位分布 (MS Case4m)	167
図 3-62	水圧分布 (MS Case4m)	169
図 3-63	大型実験モデル概要	170
図 3-64	解析モデル (要素数 2,307)	171
図 3-65	最大せん断ひずみ分布 (MC Case5)	172

図 3-66	変位分布 (MC Case5)	173
図 3-67	斜面法尻の変位応答 (MC Case6)	174
図 3-68	斜面法尻の水圧応答 (MC Case6)	174
図 3-69	最大せん断ひずみ分布 (MC Case6)	175
図 3-70	変位分布 (MC Case6)	176
図 3-71	水圧分布 (MC Case6)	177
図 3-72	最大せん断ひずみ分布 (MC Case7)	178
図 3-73	変位分布 (MC Case7)	179
図 3-74	斜面法尻の変位応答 (MC Case8)	180
図 3-75	斜面法尻の水圧応答 (MC Case8)	180
図 3-76	最大せん断ひずみ分布 (MC Case8)	181
図 3-77	変位分布 (MC Case8)	182
図 3-78	水圧分布 (MC Case8)	184
図 3-79	最大せん断ひずみ分布 (MS Case5m)	185
図 3-80	変位分布 (MS Case5m)	186
図 3-81	斜面法尻の変位応答 (MS Case6m)	186
図 3-82	斜面法尻の水圧応答 (MS Case6m)	187
図 3-83	最大せん断ひずみ分布 (MS Case6m)	188
図 3-84	変位分布 (MS Case6m)	189
図 3-85	水圧分布 (MS Case6m)	190
図 3-86	最大せん断ひずみ分布 (MS Case7m)	191
図 3-87	変位分布 (MS Case7m)	192
図 3-88	斜面法尻の変位応答 (MS Case8m)	193
図 3-89	斜面法尻の水圧応答 (MS Case8m)	193
図 3-90	最大せん断ひずみ分布 (MS Case8m)	195
図 3-91	変位分布 (MS Case8m)	197
図 3-92	水圧分布 (MS Case8m)	199
図 3-93	小型遠心模型実験モデル (50G 傾斜角 30°)	200
図 3-94	小型遠心模型実験モデル (50G 傾斜角 10°)	201
図 3-95	破壊モード (せん断ひずみ分布, モールクーロン Case1)	201
図 3-96	破壊モード (せん断ひずみ分布, モールクーロン Case3)	201
図 3-97	大型遠心模型実験モデル	202
図 3-98	破壊モード (せん断ひずみ分布, モールクーロン Case5)	202
図 4-1	遠心振動実験で用いた岩盤斜面モデル	205
図 4-2	応答せん断ひずみの空間分布	205
図 4-3	法面の水平変位時刻歴の比較(d06)	205

図 4-4 地震前後の静的な確率論的非排水安定性解析の結果.....	210
------------------------------------	-----

表目次

表 2-1	実験ケース	5
表 2-2	強度定数	5
表 2-3	変形係数に関わる諸量	5
表 2-4	圧密パラメータ (λ と κ)	13
表 2-5	解析パラメータ (三軸試験の要素シミュレーション)	16
表 2-6	解析パラメータ	23
表 2-7	強度定数 (見直し前)	31
表 2-8	強度定数 (見直し後)	31
表 2-9	解析ケース	32
表 2-10	土槽境界部のインターフェース要素のパラメータ	35
表 2-11	解析パラメータ	44
表 2-12	解析ケース	44
表 2-13	解析パラメータ	54
表 2-14	解析ケース	54
表 2-15	インターフェース要素 (切り欠き部) のパラメータ	63
表 2-16	解析ケース	64
表 2-17	強度定数 (再掲)	64
表 2-18	土槽境界部のインターフェース要素のパラメータ (再掲)	65
表 2-19	解析パラメータ	73
表 2-20	解析ケース	73
表 2-21	解析パラメータ	83
表 2-22	解析ケース	83
表 2-23	再現解析結果のまとめ	93
表 3-1	動的変形試験による試験結果 (正規圧密)	96
表 3-2	動的変形試験による試験結果 (過圧密)	97
表 3-3	繰返しせん断試験による試験結果 (正規圧密)	100
表 3-4	繰返しせん断試験による試験結果 (過圧密)	100
表 3-5	解析ケース	105
表 3-6	マルチスプリングモデルで採用するパラメータ	110
表 3-7	動的変形試験結果	111
表 3-8	剛性低下率 G/G_0 と減衰 h の近似式	111
表 3-9	供試体ごとのパラメータ	112

表 3-10	マルチスプリングモデルに設定する動的変形特性.....	112
表 3-11	繰返し载荷の試験ケース.....	116
表 3-12	解析パラメータ.....	118
表 3-13	解析ケース.....	118
表 3-14	解析ケース.....	170

1 はじめに

平成28年度事業「海底における斜面の地震時安定評価に関する基礎検討」では、海底環境下を模擬した斜面を対象に円弧すべり法の適用性を把握するため遠心場での静的載荷実験を実施した。その際、課題となった事項、「得られた地すべり面が臨界円の形状とならないこと」、「水圧条件を大きくすると円弧状の地すべり面とはならない傾向があること」および「斜面天端に切り欠きを設定した場合における地すべり発生メカニズム」のうち、1番目の課題は力の釣り合いに基づく安定解析法による臨界円の評価手法に対する課題、2番目の課題は斜面模型地盤の不均質性に関する課題、3番目は破壊の進行に関する課題と考えることができる。ここで、1番目と3番目の課題は地震時におけるすべり面位置の評価、さらにそれに及ぼす水圧の影響を把握する上で重要な課題である。

まず、平成28年度事業で用いた斜面模型のすべり破壊の発生位置とその発達過程を実験における斜面内の応力状態および水圧の影響を考慮できる解析法により再現し、崩壊機構を明らかにする。また、その手法は、動的外力に対する斜面模型の遠心振動実験の設計に資する。ここで用いる解析は、せん断破壊の発達過程から斜面崩壊に至る大変形挙動の評価とともに、間隙水圧の上昇過程の評価も必要となる。さらに、斜面模型の構成材料の応力-ひずみ関係のモデル化も必要不可欠である。その様な条件を満たす解析コードとして、有限差分法による解析コード「FLAC」を用いることとする。その手法を用い、平成28年度事業で用いた斜面模型の挙動の再現解析を実施し、前述の課題と崩壊挙動に及ぼす水圧の影響を把握する。まず、構成モデルのパラメータの設定に必要な室内試験を実施する。次に、動的な斜面の応答に関する効果としての切り欠きの有無を分け、設定されたパラメータを用いて評価可能な切り欠き無しの斜面模型の再現解析を実施した後、切り欠き部分をモデル化した斜面模型の再現解析を実施し、すべり破壊の発達過程とそれに及ぼす水圧の影響を把握する。

次に、平成28年度事業において実施した静定外力の作用下での斜面模型の崩壊挙動への円弧すべり法（修正フェレニウス法）の適用性に関する前項までの検討を踏まえ、

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、遠心力模型実験用の模型地盤を設計する。設計に際して、前項で用いた有限差分法による解析コード「FLAC」を用いる。そのため、前項同様に、解析に用いる構成モデルのパラメータ設定に必要な室内試験を実施する。また、動的外力に対する斜面模型の設計では、まず、平成 28 年度事業で実施した規模の遠心载荷装置を用いた斜面形状などの影響を踏まえ小規模斜面模型による設計を実施する。次いで、斜面形状によるスケール効果の影響を検証するため、国内最大規模の遠心载荷装置を用いた斜面模型の設計を実施する。

最後に、海底地盤の崩壊挙動に関する研究事例は極めて少ない。また、遠心力模型実験を用いた海底環境下を模擬した斜面の安定性評価に関する研究及び報告は非常に少ないことから、類似の研究報告も極めて重要な知見となる。以下の示す韓国のプサンで開催される原子力関係の国際会議 24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology（以下、SMiRT24）では、斜面の特別セッションが設けられる。さらに、韓国のソウルで開催される地盤工学関係の国際会議 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering（以下、ICSMGE 2017）の 2 つの国際学会に出席し、関連情報の収集を行う。

2 海底環境下における斜面に与える水圧の影響検討

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を実施する。まず、解析に用いたパラメータの設定について、室内土質試験結果を示しながら説明する。つぎに斜面法肩にクラックが無い場合の解析を行った。さらに法肩にクラックがある場合の解析も実施した。いずれの場合も、2 種類の水深について解析し、水深の大きさが解析結果に及ぼす影響を調べた。

2.1 室内土質試験による静的解析のパラメータ設定

2.1.1 圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験の結果

数値解析に用いる粘土の種々のパラメータ（強度定数や変形係数等）を求めるために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。

実験に用いた三軸圧縮試験機を図 2-1 に示す。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た後、予備圧密容器に注ぎ入れて圧密圧力 100kN/m^2 で予備圧密した。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 の円柱状に成形して用いた。試験条件を表 2-1 に示す。有効拘束圧および過圧密比が異なる 7 ケースについて実施した。表中の値はそれぞれ σ_c' : 有効拘束圧 (kN/m^2)、 p_c : 先行圧密応力 (kN/m^2)、OCR : 過圧密比、 ρ_{d0} : 初期状態の乾燥密度 (g/cm^3)、 ρ_{dc} : 圧密後の乾燥密度 (g/cm^3)、 e_0 : 初期状態の間隙比、 e_c : 圧密後の間隙比である。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。図 2-2 には試験後の供試体の状況を示す。

正規圧密状態の試験における軸差応力と軸ひずみの関係を図 2-3 に示す。過圧密状態 ($p_c=100\text{kN/m}^2$) の試験における軸差応力と軸ひずみの関係を図 2-4 に示す。過圧密状態 ($p_c=200\text{kN/m}^2$) の試験における軸差応力と軸ひずみの関係を図 2-5 に示す。

正規圧密状態および過圧密状態の試験における有効応力経路を図 2-6 にまとめて示す。また有効応力経路の挙動を見ると、正規圧密状態にあるケースでは、負のダイレイタンシーにより有効応力が減少し、傾き M が 0.9 の限界状態線に至る。一方、過圧密状態にあるケースでは正のダイレイタンシーにより有効応力が若干増加しながら、同様の限界状態線に至る。

正規圧密状態の試験におけるモールの応力円（有効応力表示，全応力表示）を図 2-7 と図 2-8 に示す。過圧密状態（ $p_c=100\text{kN/m}^2$ ）の試験におけるモールの応力円（有効応力表示，全応力表示）を図 2-9 と図 2-10 に示す。過圧密状態（ $p_c=100\text{kN/m}^2$ ）の試験におけるモールの応力円（有効応力表示，全応力表示）を図 2-11 と図 2-12 に示す。図中の破壊包絡線の切片および傾きより強度定数（ c, ϕ ）を求めた。有効応力表示と全応力表示の強度定数を表 2-2 にまとめて示した。

モールクーロンモデルの解析に用いるヤング率 E は軸差応力と軸ひずみの関係から整理して求めて表 2-3 に示した。具体的には以下の式で示されるヤング率 E_{50} を求めた。

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{50}} \quad (1)$$

ここで σ_{50} は最大軸差応力の 50% の軸差応力， ε_{50} はそのときの軸ひずみである。実験値を整理した結果を表-3 に示す。図 2-13 には試験時の平均有効応力 p を基準平均有効応力 p_0 で正規化した平均有効応力比と E_{50} の関係を示す。なおここでは p_0 は 100kPa とした。 E_{50} は平均有効応力比が増加するほど増加し、拘束圧依存性が認められる。データにばらつきがあるため、正規圧密のデータを近似すると以下の関数が得られた。

$$E_{50} = 16100 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.66} \quad (2)$$

表 2-1 実験ケース

ケース	σ_c' (kN/m ²)	p_c (kN/m ²)	OCR	ρ_{d0} (g/cm ³)	ρ_c (g/cm ³)	e_0	e_c	B値
1	100	100	1.0	1.195	1.267	1.29	1.16	0.95
2	200	200	1.0	1.228	1.354	1.23	1.02	0.97
3	300	300	1.0	1.279	1.411	1.14	0.94	0.96
4	50	100	2.0	1.238	1.298	1.21	1.11	0.97
5	30	100	3.3	1.250	1.310	1.19	1.09	0.98
6	100	200	2.0	1.255	1.353	1.18	1.02	0.95
7	50	200	4.0	1.273	1.377	1.15	0.99	0.99

表 2-2 強度定数

圧密条件	p_c (kN/m ²)	有効応力表示		全応力表示		備考 (ケース)
		c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	c_{CU} (kN/m ²)	ϕ_{CU} (°)	
正規圧密	100	4	25	2	13	1,2,3
過圧密	100	0	28	32	0	4,5,1
過圧密	200	5	25	54	0	6,7,2

表 2-3 変形係数に関わる諸量

Case	p (kPa)	σ_{max} (kPa)	σ_{50} (kPa)	ε_{50} (%)	E_{50} (kPa)	OCR	p/p_0
1	100	60.6	30.3	0.203	14954	1	1
2	200	106.9	53.5	0.170	31443	1	2
3	300	173.2	86.6	0.295	29312	1	3
4	100	64.9	32.5	0.021	152781	2	1
5	100	65.1	32.5	0.270	12050	3.3	1
6	200	109.9	54.9	0.278	19734	2	2
7	200	91.6	45.8	0.540	8484	4	2

註) p_0 は100kPa

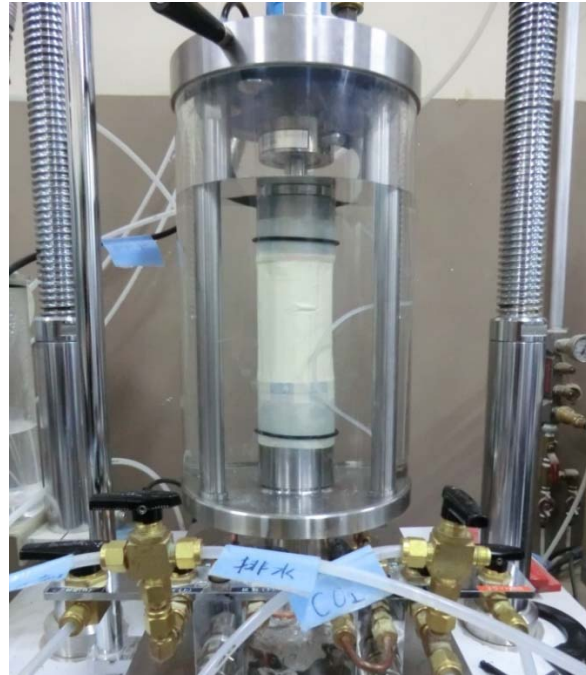


図 2-1 試験装置



図 2-2 試験後の供試体の状況

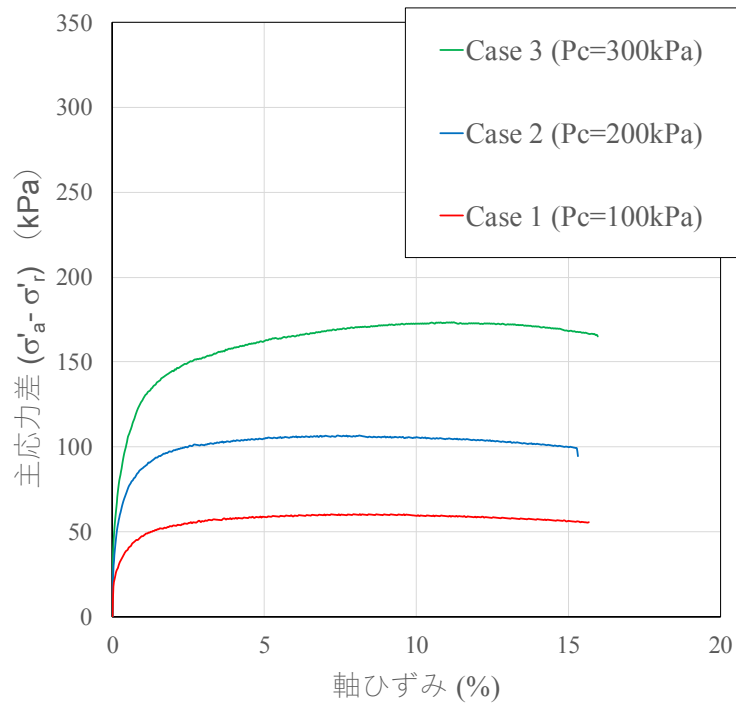


図 2-3 軸差応力と軸ひずみの関係（正規圧密）

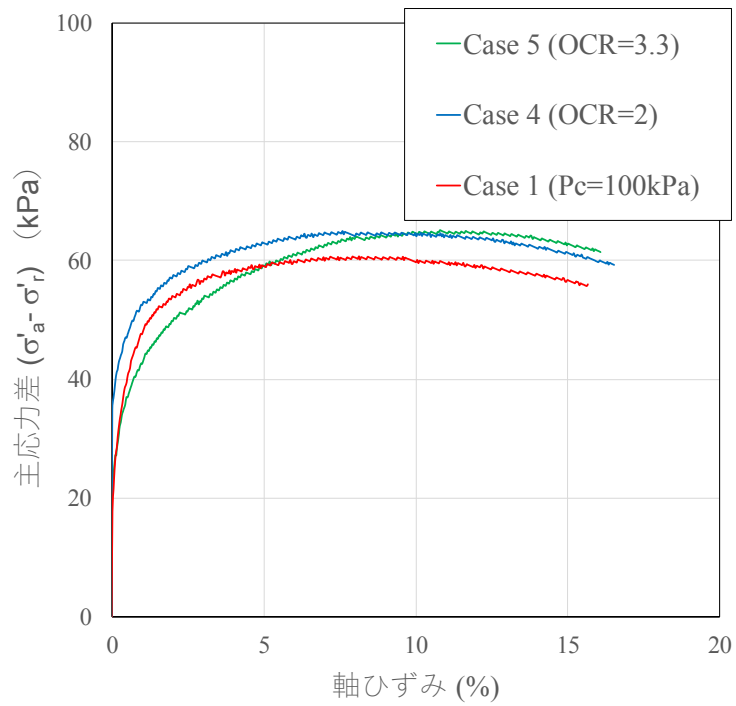


図 2-4 軸差応力と軸ひずみの関係（過圧密状態（ $p_c=100\text{kN/m}^2$ ））

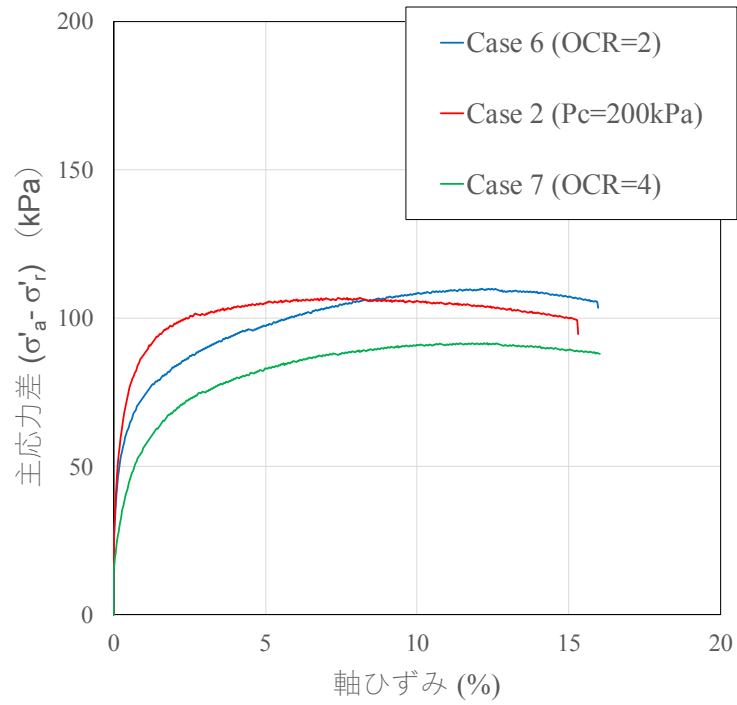


図 2-5 軸差応力と軸ひずみの関係（過圧密状態（ $p_c=200\text{kN/m}^2$ ））

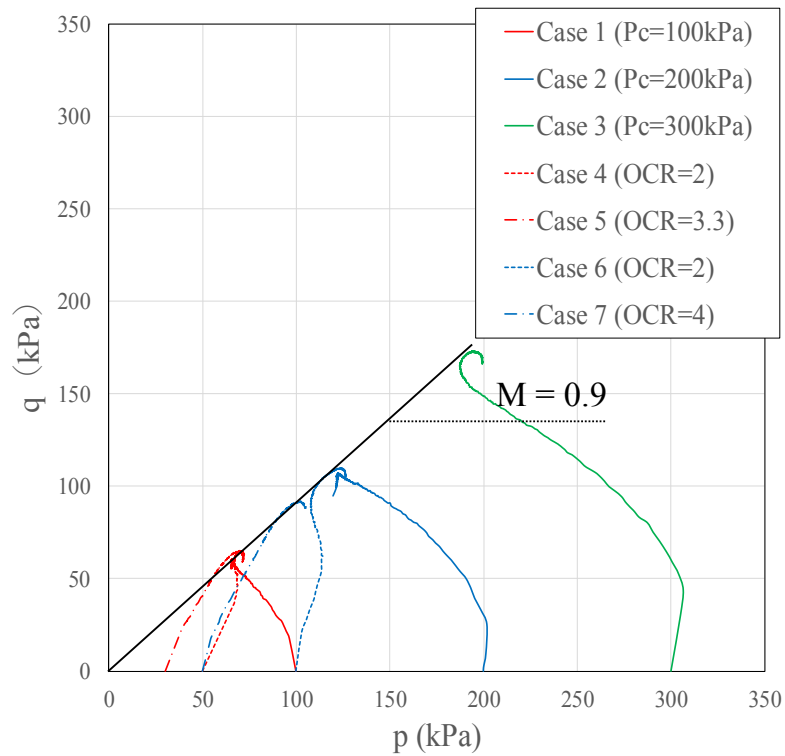


図 2-6 有効応力経路

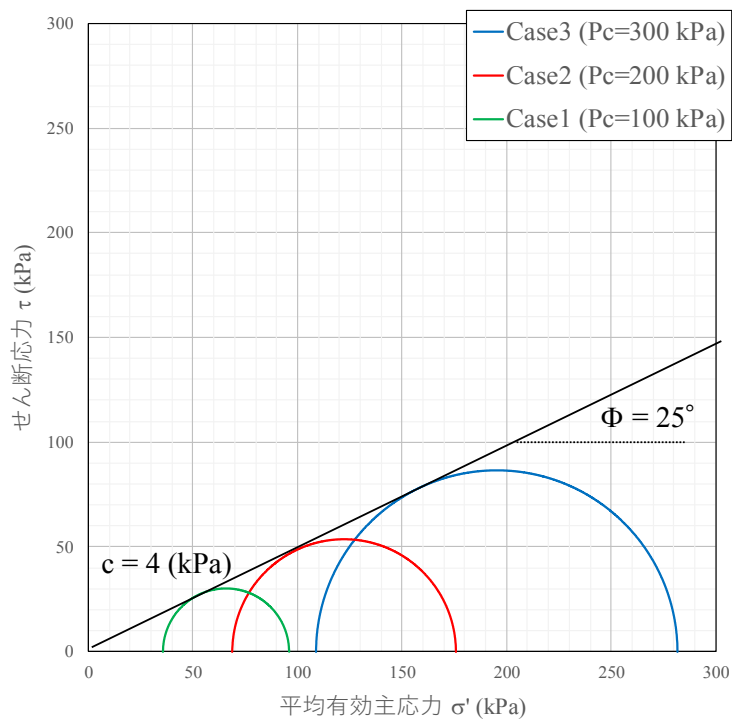


図 2-7 モール円（有効応力表示）正規圧密状態

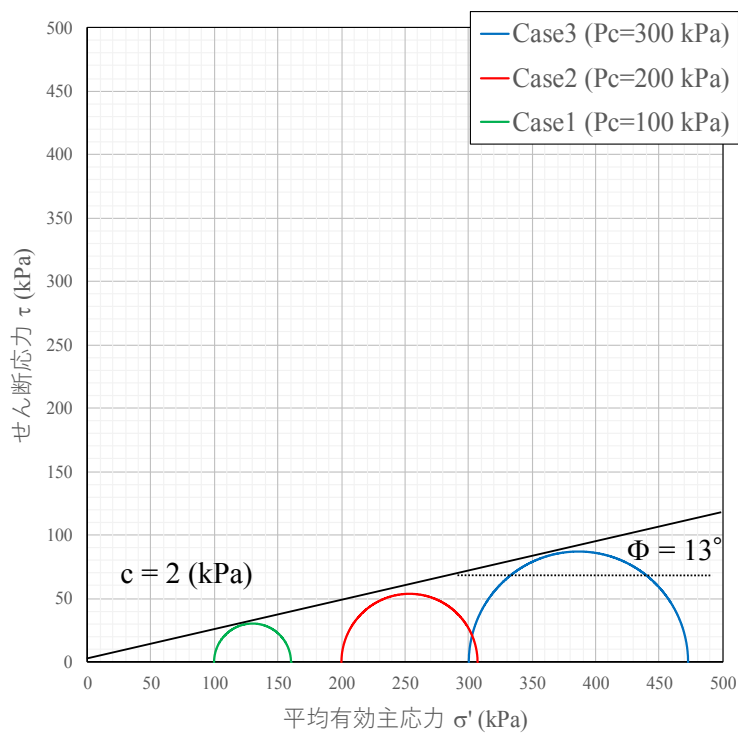


図 2-8 モール円（全応力表示）正規圧密状態

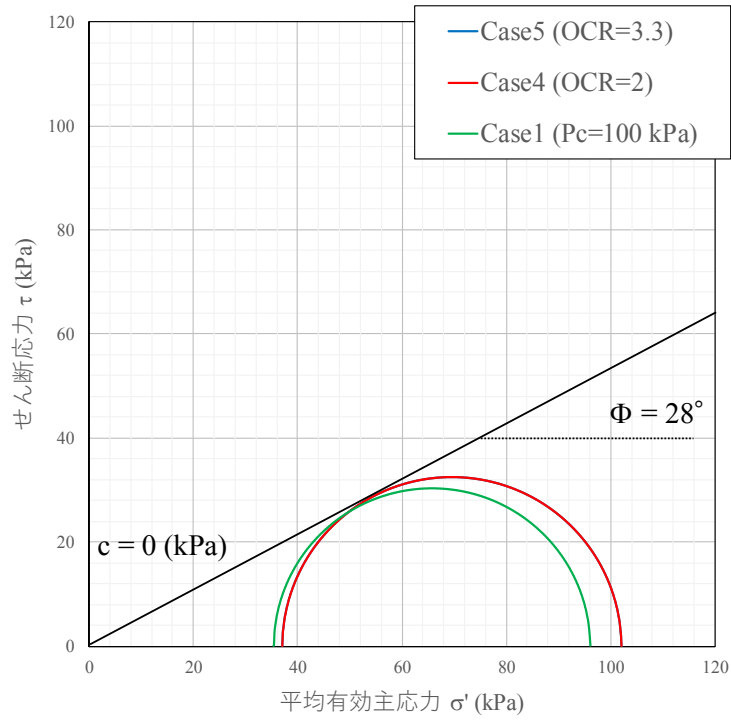


図 2-9 モール円（有効応力表示）過圧密状態（ $p_c=100\text{kN/m}^2$ ）

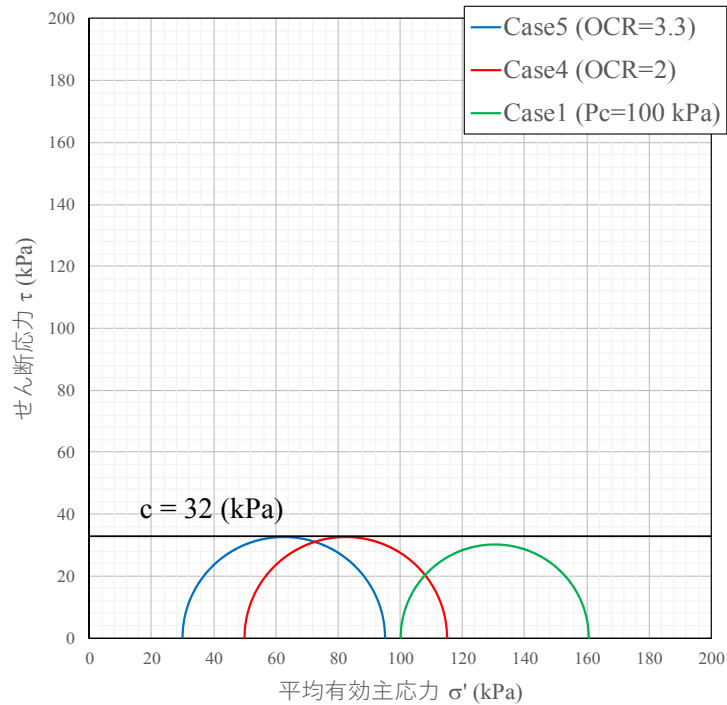


図 2-10 モール円（全応力表示）過圧密状態（ $p_c=100\text{kN/m}^2$ ）

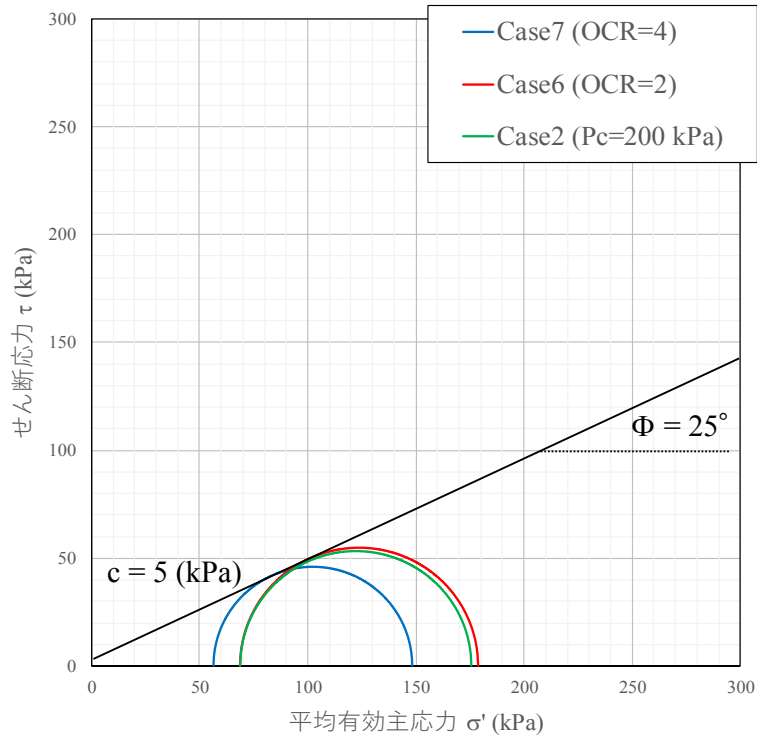


図 2-11 モール円（有効応力表示）過圧密状態（ $p_c=200\text{kN/m}^2$ ）

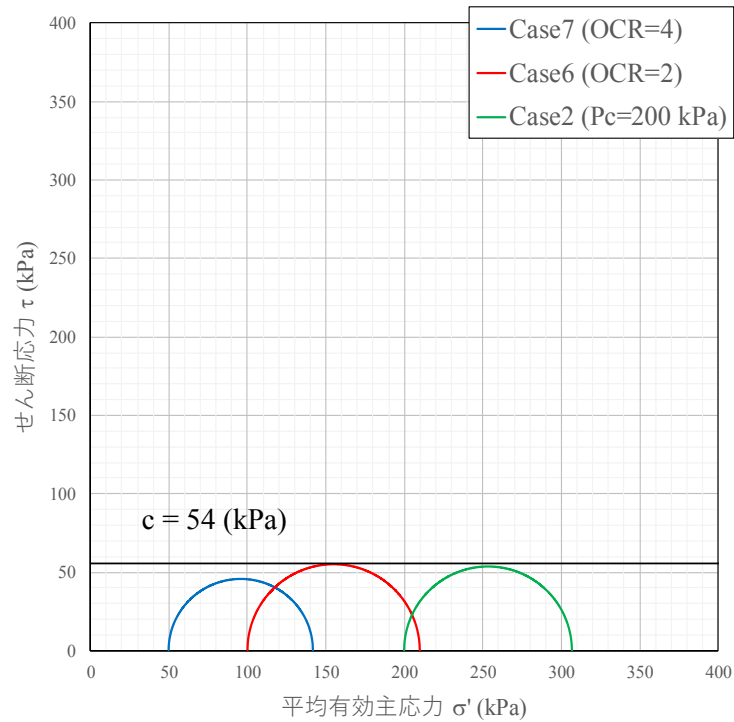


図 2-12 モール円（全応力表示）過圧密状態（ $p_c=200\text{kN/m}^2$ ）

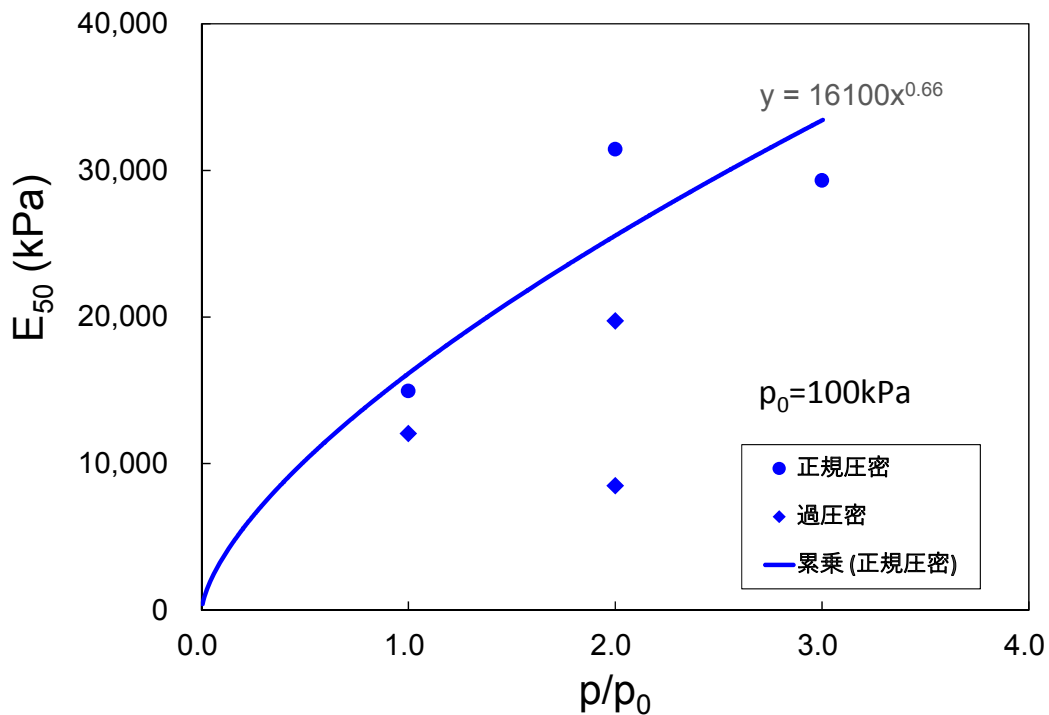


図 2-13 ヤング率の拘束圧依存性

2.1.2 圧密試験の結果

数値解析に用いる粘土の種々のパラメータ（圧縮指数，膨潤指数）を求めるために圧密試験を実施した。試験は「土の段階載荷による圧密試験方法（JIS A 1217:2009）」に準拠して実施した。

実験に用いた圧密試験機を図 2-14 に示す。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た後，予備圧密容器に注ぎ入れて圧密圧力 100kN/m^2 で予備圧密した。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。予備圧密終了後，容器から粘土を取り出してカッターリング法により直径 6cm，高さ 2cm の円柱状に成形して用いた。

圧縮曲線を図 2-15 に示す。参考として三軸圧縮試験における圧縮曲線も図 2-16 に示した。圧縮曲線より求めた圧縮指数 λ ，膨潤指数 κ を表 2-4 にまとめて示す。

表 2-4 圧密パラメータ (λ と κ)

	λ	κ
圧密試験	0.13	0.024
三軸試験	0.051~0.069	0.017~0.021



図 2-14 圧密試験装置

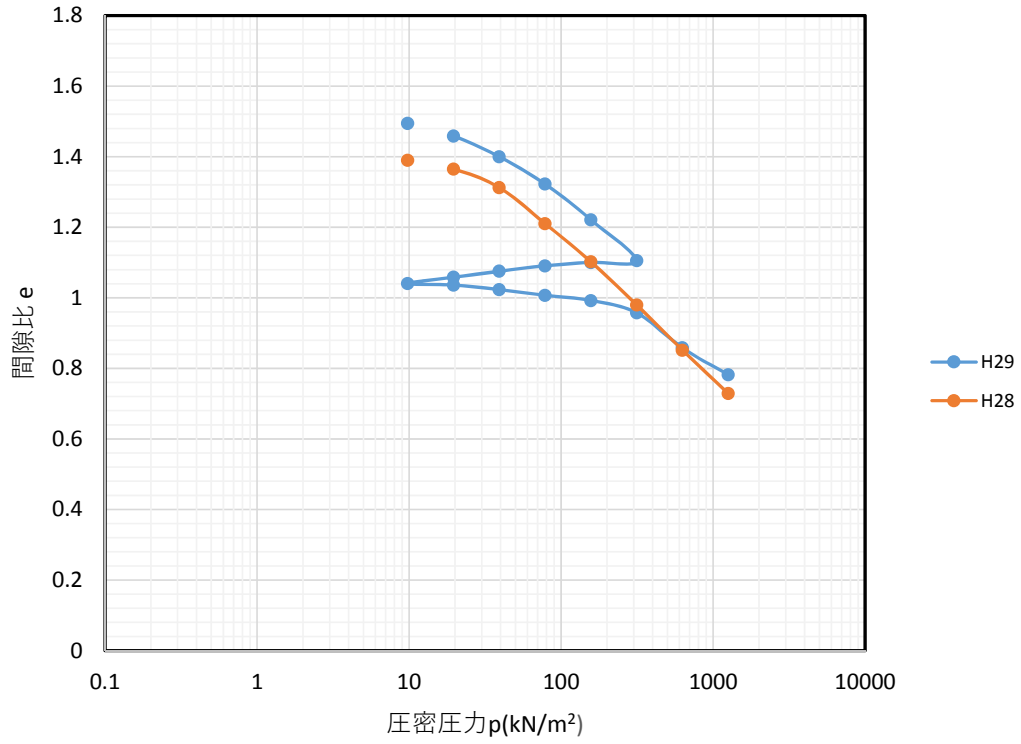


图 2-15 压缩曲线 (压密试验)

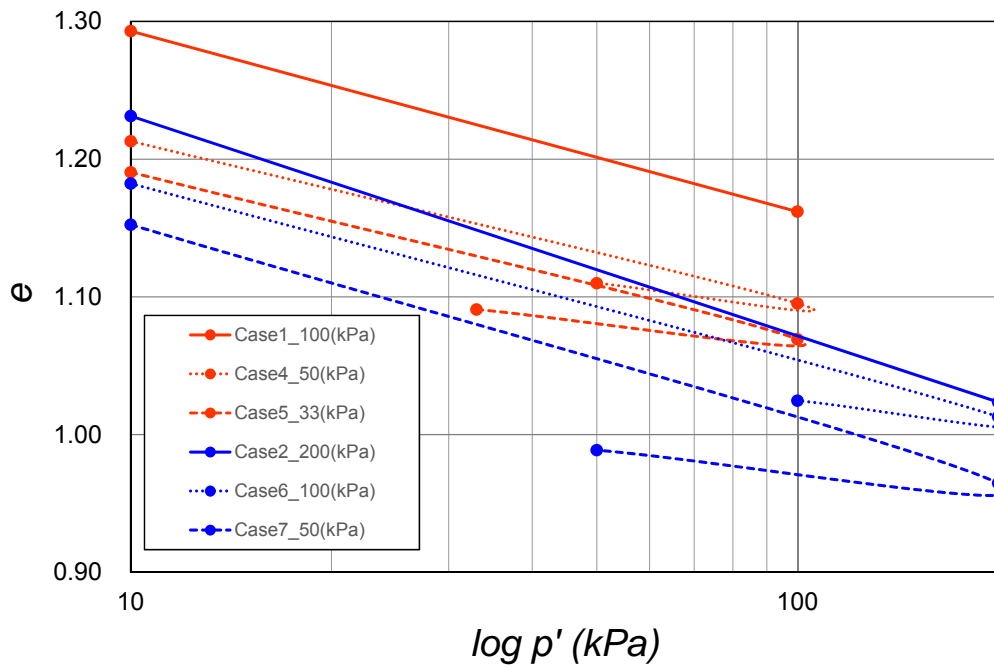


图 2-16 压缩曲线 (三轴试验)

2.2 切り欠き無し斜面模型の再現解析

解析は3種類の構成モデルを用いて実施した。具体的には、モール-クーロンモデル、修正カムクレイモデル、マルチスプリングモデルである。以下にその概要を説明した後、再現解析結果を示す

2.2.1 モール - クーロンモデルの概要

モール-クーロンモデルはモール - クーロンの破壊基準を降伏条件にした弾塑性モデルである。モール-クーロンモデルの破壊基準の模式図を図 2-17 に示す。降伏関数（図中 AB）は以下の式で定義される。

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (3)$$

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4)$$

ここで c 、 ϕ は粘着力、内部摩擦角、 σ_1 は最大主応力、 σ_3 は最小主応力である。

また引張に対する降伏関数（図中 BC）は以下の式で示される。

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad (5)$$

ここで σ^t は引張強度である。

モデルの主要なパラメータは体積弾性係数 K 、せん断弾性係数 G 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、引張限界（強度） σ^t である。

2.1.1 で示した実験（圧密非排水三軸圧縮試験）のシミュレーション結果を示す。表 2-5 には解析に用いたパラメータを示す。図 2-18～図 2-24 に軸差応力-軸ひずみ関係に関して実験結果と解析結果の比較を示す。

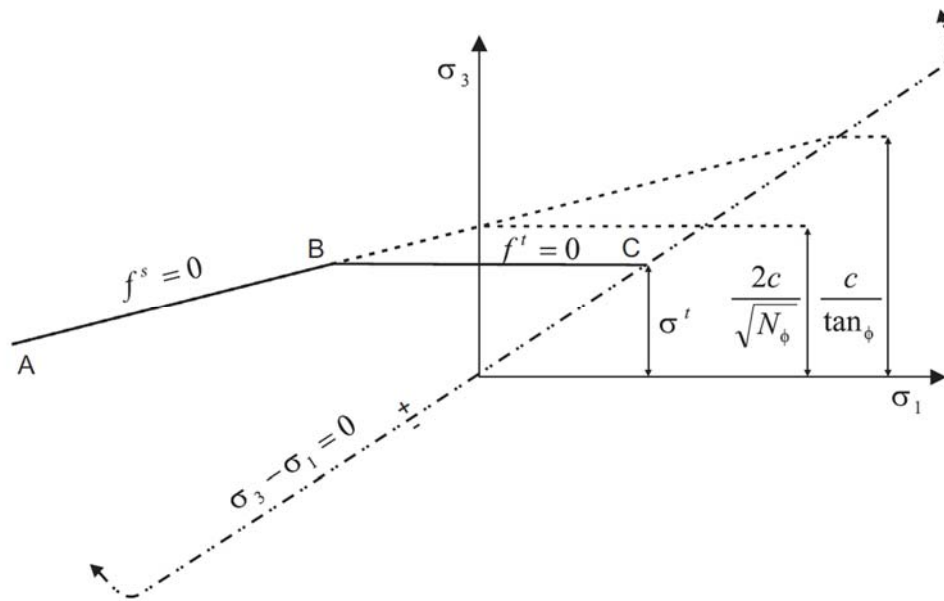


図 2-17 モールクーロンモデルの破壊基準の模式図

表 2-5 解析パラメータ（三軸試験の要素シミュレーション）

ケース	E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	c (kN/m ²)	φ (°)
1	16100	0.3	2	13
2	16100	0.3	2	13
3	16100	0.3	2	13
4	16100	0.3	32	0
5	16100	0.3	32	0
6	16100	0.3	54	0
7	16100	0.3	54	0

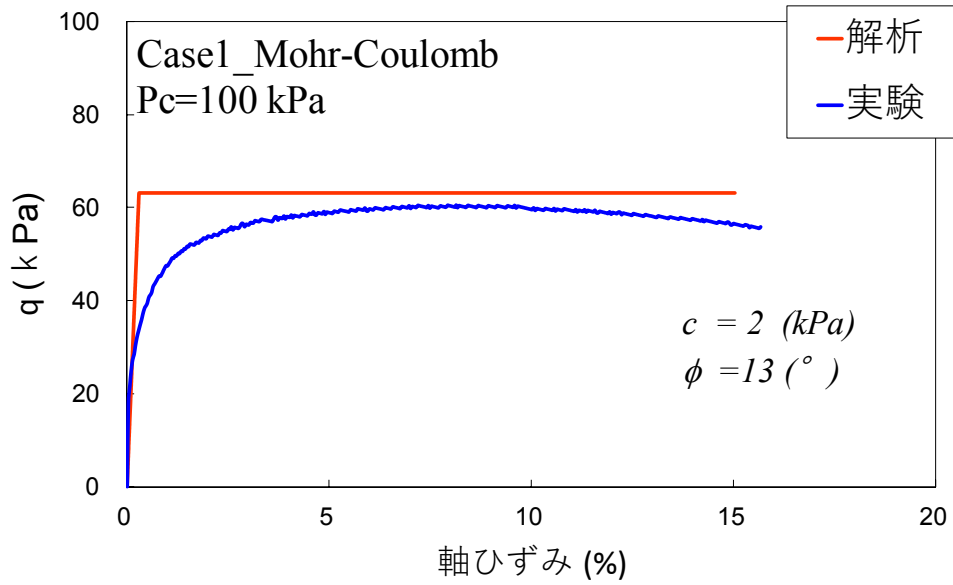


図 2-18 実験結果と解析結果の比較 (ケース 1)

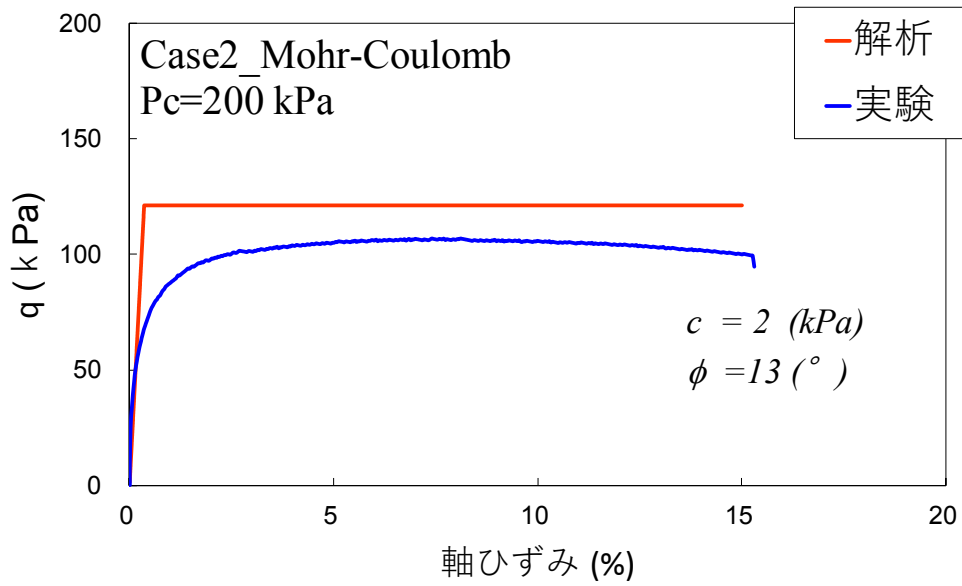


図 2-19 実験結果と解析結果の比較 (ケース 2)

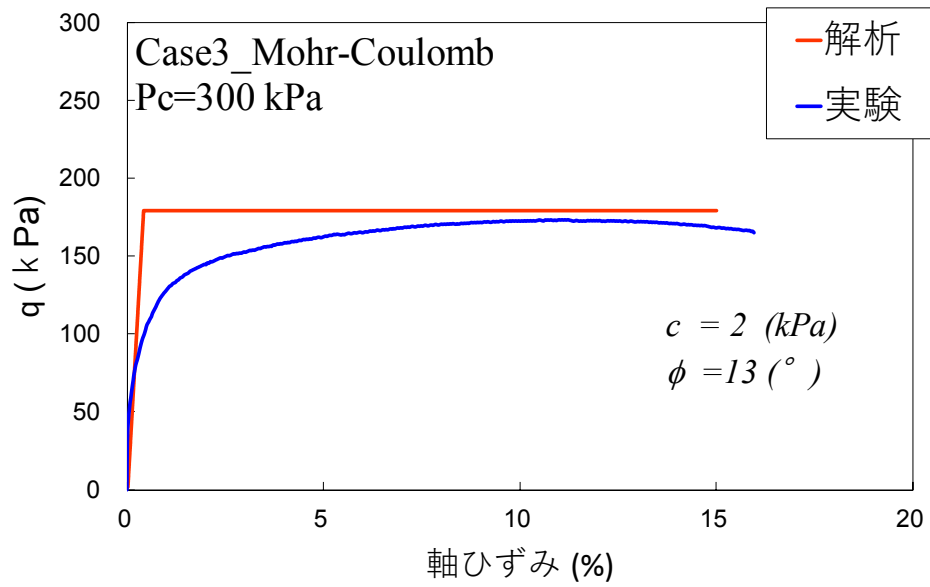


図 2-20 実験結果と解析結果の比較 (ケース 3)

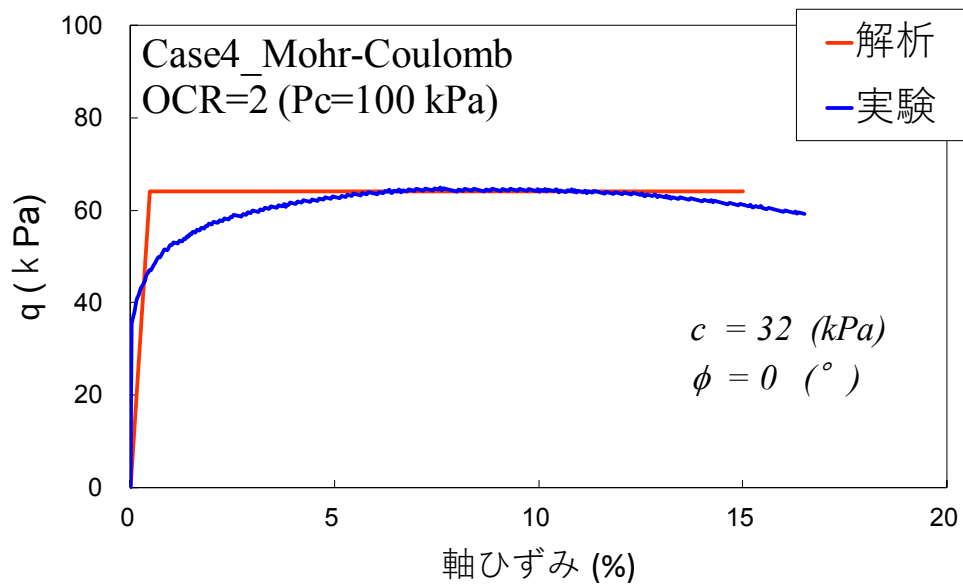


図 2-21 実験結果と解析結果の比較 (ケース 4)

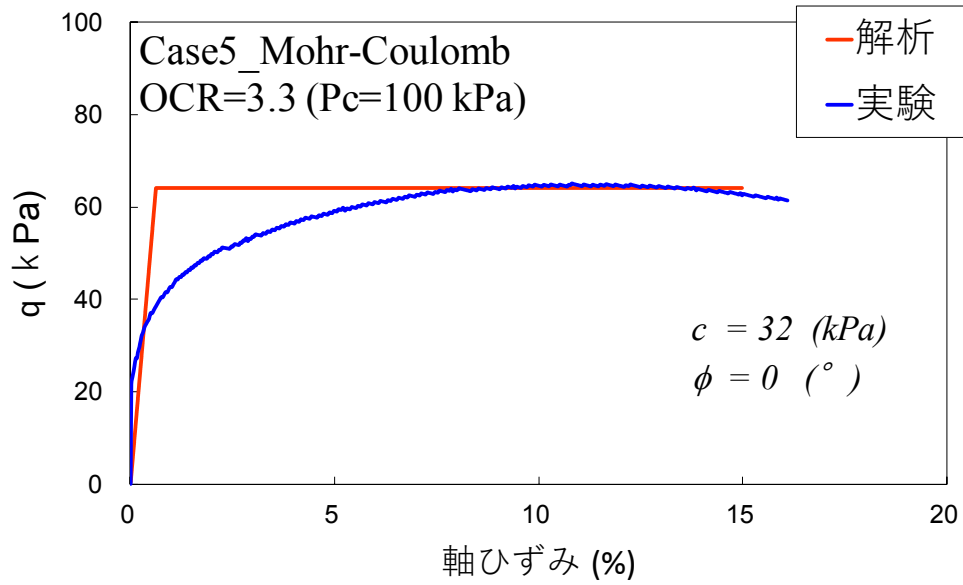


図 2-22 実験結果と解析結果の比較 (ケース 5)

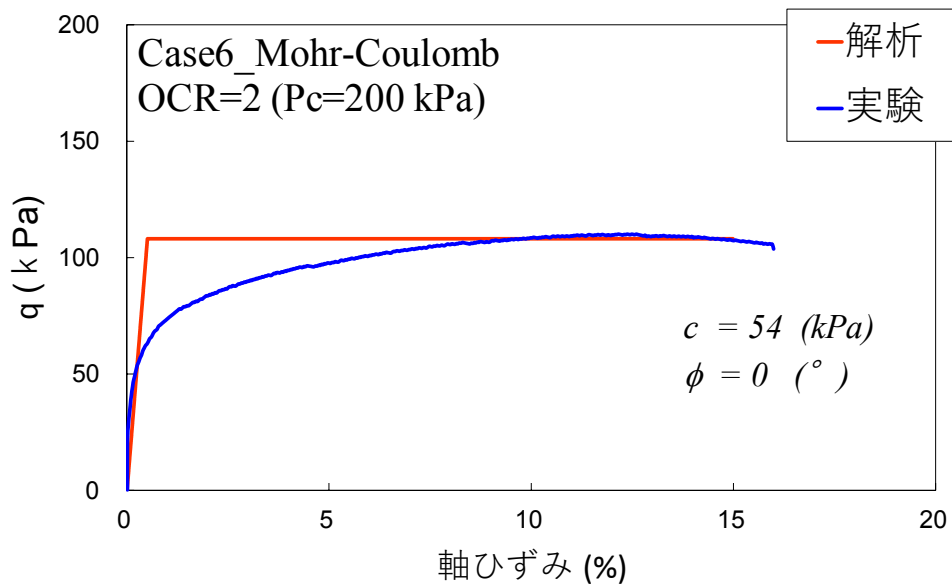


図 2-23 実験結果と解析結果の比較 (ケース 6)

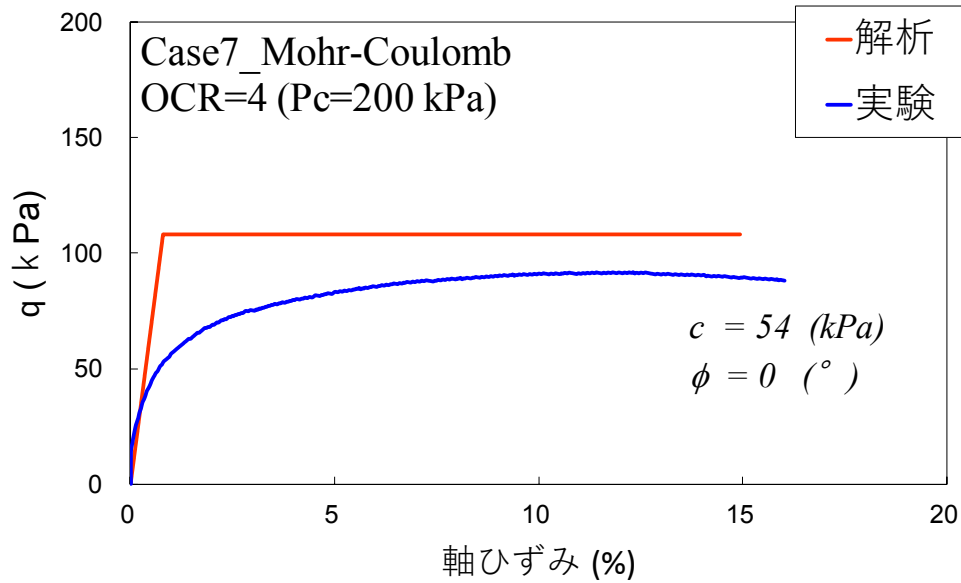


図 2-24 実験結果と解析結果の比較（ケース 7）

2.2.2 修正カムクレイモデルの概要

修正カムクレイモデルは非線形弾性関係と圧縮曲線から求められる塑性体積ひずみをもとに粘性土の硬化・軟化挙動を表現できる弾塑性構成モデルである。また破壊崩落線は平均有効応力軸を中心とする楕円形状である。塑性ひずみの算出は関連流れ則による。

圧縮曲線の模式図を図 2-25 に示す。比体積 v は $(1 + e)$ である。ここで e は間隙比である。 $v - \ln p$ 関係における正規圧密領域の傾きは λ ，過圧密領域の傾きは κ である。正規圧密領域および過圧密領域の圧密曲線は次式で定義される。

$$v = v_{\lambda} - \lambda \ln \frac{p}{p_1} \quad (6)$$

$$v = v_{\kappa} - \kappa \ln \frac{p}{p_1} \quad (7)$$

弾性関係は次式で表され、拘束圧 p と比体積により体積弾性係数が変化する。

$$K = \frac{vp}{k} \quad (8)$$

圧密応力の変化による塑性体積ひずみは、図 2-26 の概略図に示すように塑性比体積増分 Δv^p より以下の式で表される。ここでは p_c 圧密応力である。

$$\Delta e^p = \frac{\Delta v^p}{v} = -(\lambda - \kappa) \frac{\Delta p_c}{p_c} \quad (9)$$

降伏関数は図 2-27 の概念図に示す楕円形状であり次式で表される。

$$f = q^2 + M^2 p(p - p_c) \quad (10)$$

ここで M は限界状態線の傾きである。 p , q は次式で表される。

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (11)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (12)$$

モデルの主要なパラメータは λ , κ , M , p_c : 先行圧密応力, ν : ポアソン比である。

2.1.1 で示した実験（圧密非排水三軸圧縮試験）のシミュレーション結果を示す。表 2-6 には解析に用いたパラメータを示す。図 2-28～図 2-34 に軸差応力-軸ひずみ関係に関して実験結果と解析結果の比較を示す。

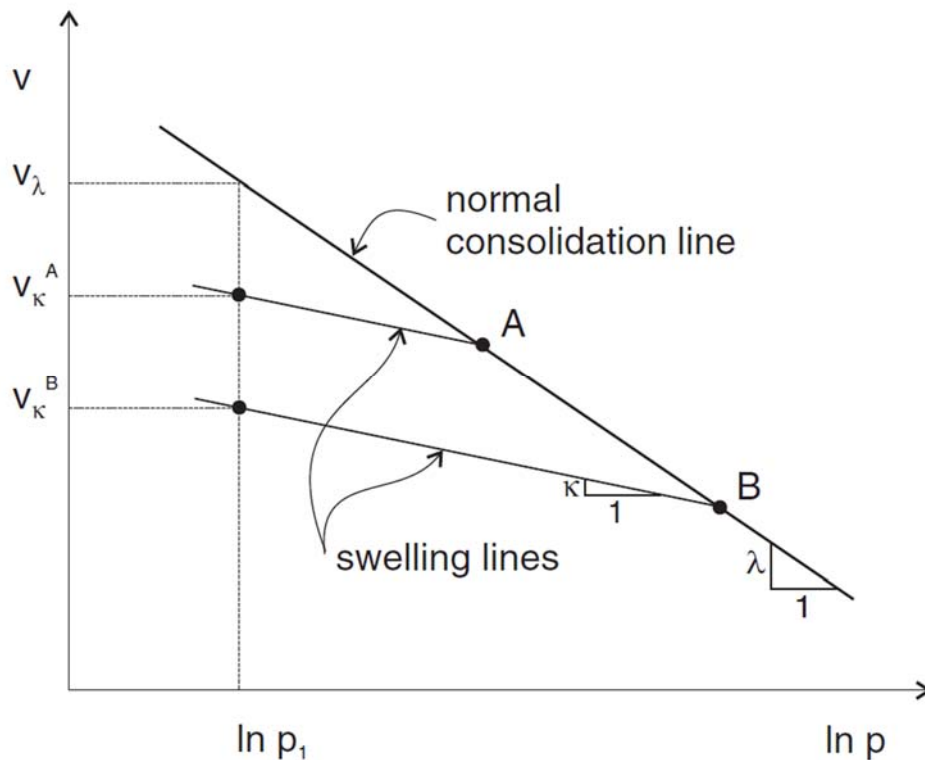


図 2-25 圧縮曲線

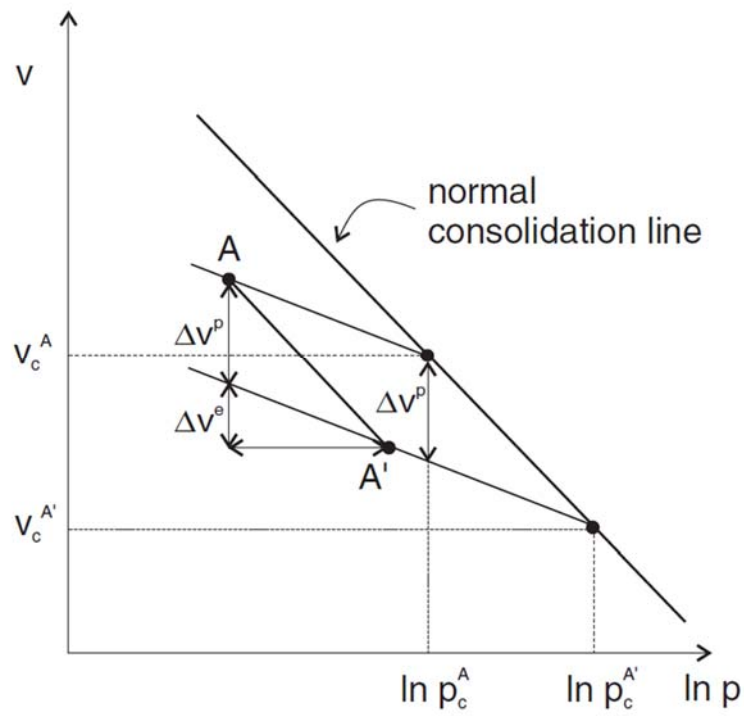


図 2-26 圧密応力の増加による塑性体積変化 (Δv^p)

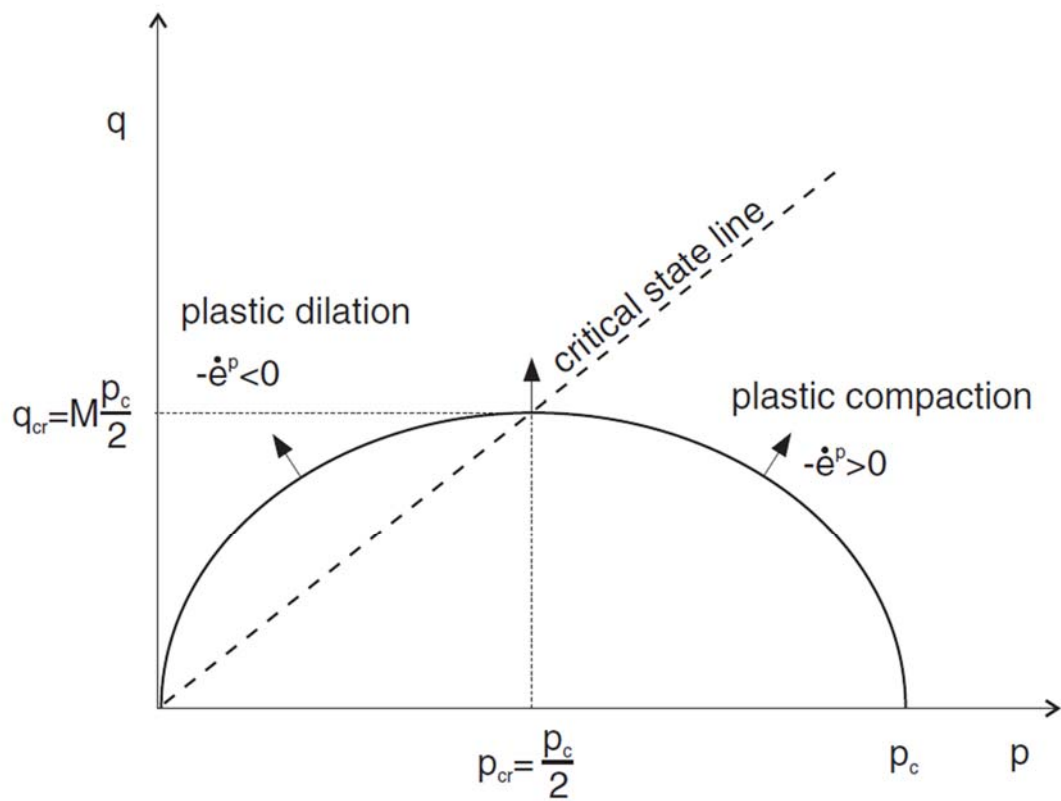


図 2-27 修正カムクレイモデルの降伏局面の模式図

表 2-6 解析パラメータ

	λ	κ	ν	M	p_1 (kPa)	p_c (kPa)	OCR	v_λ
Case1	0.13	0.019	0.30	0.9	1	100	1	2.8
Case2						200	1	
Case3						300	1	
Case4						100	2	
Case5						100	3.3	
Case6						200	2	
Case7						200	4	

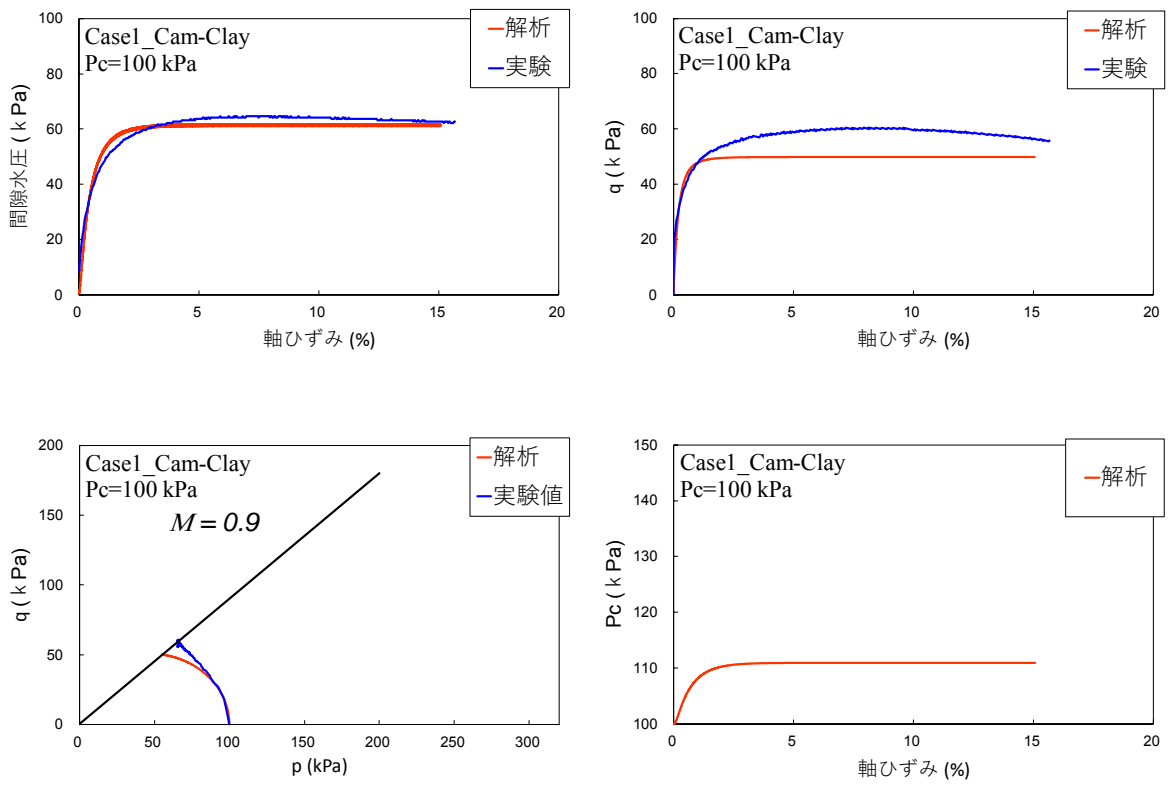


図 2-28 解析結果と実験結果の比較 (Case1)

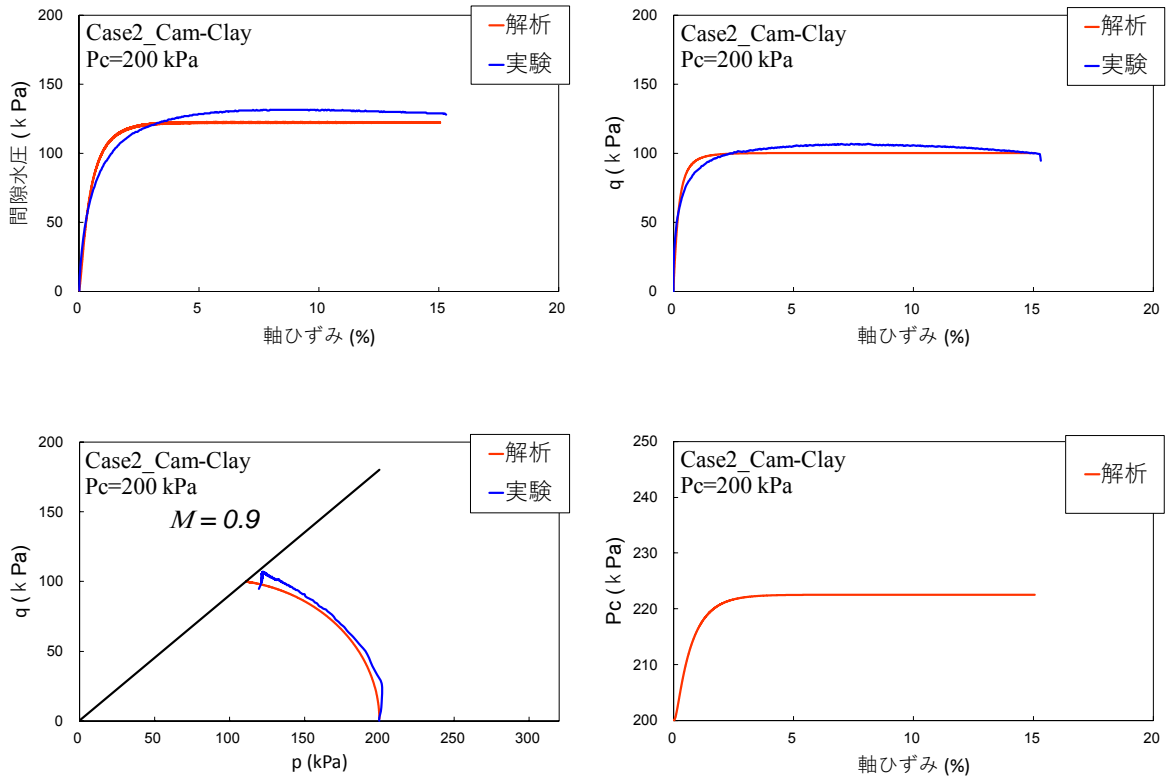


図 2-29 解析結果と実験結果の比較 (Case2)

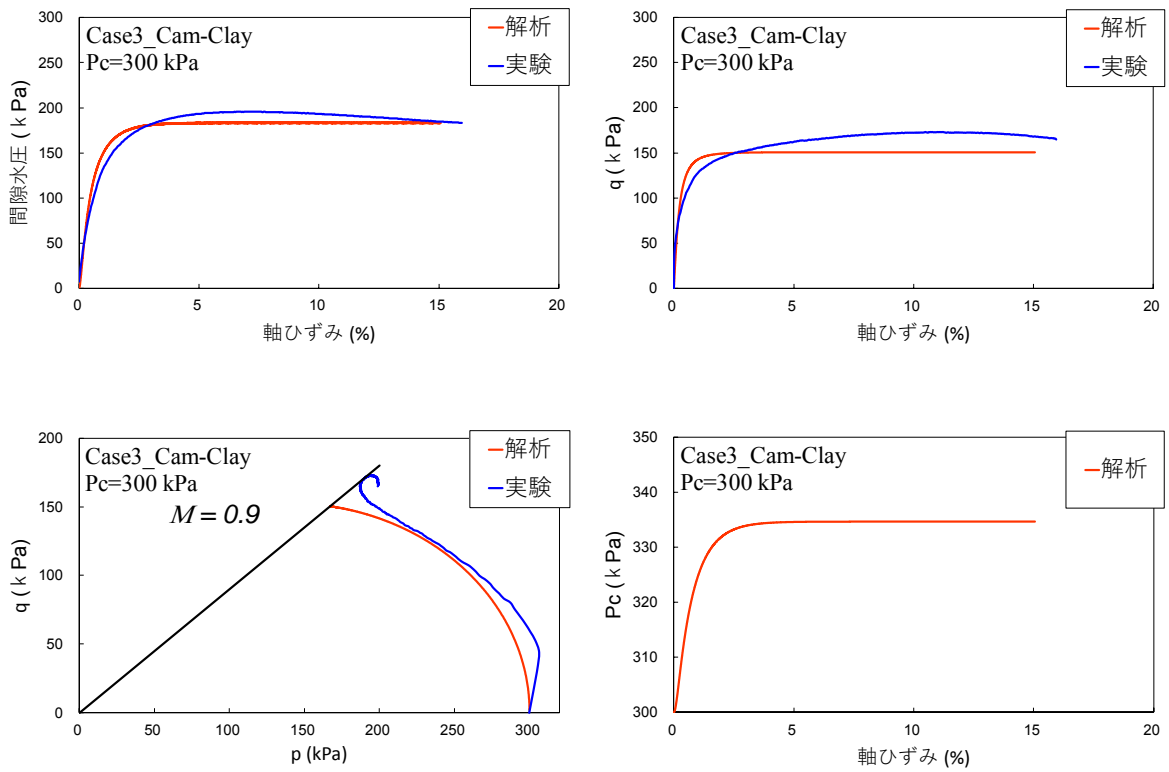


図 2-30 解析結果と実験結果の比較 (Case3)

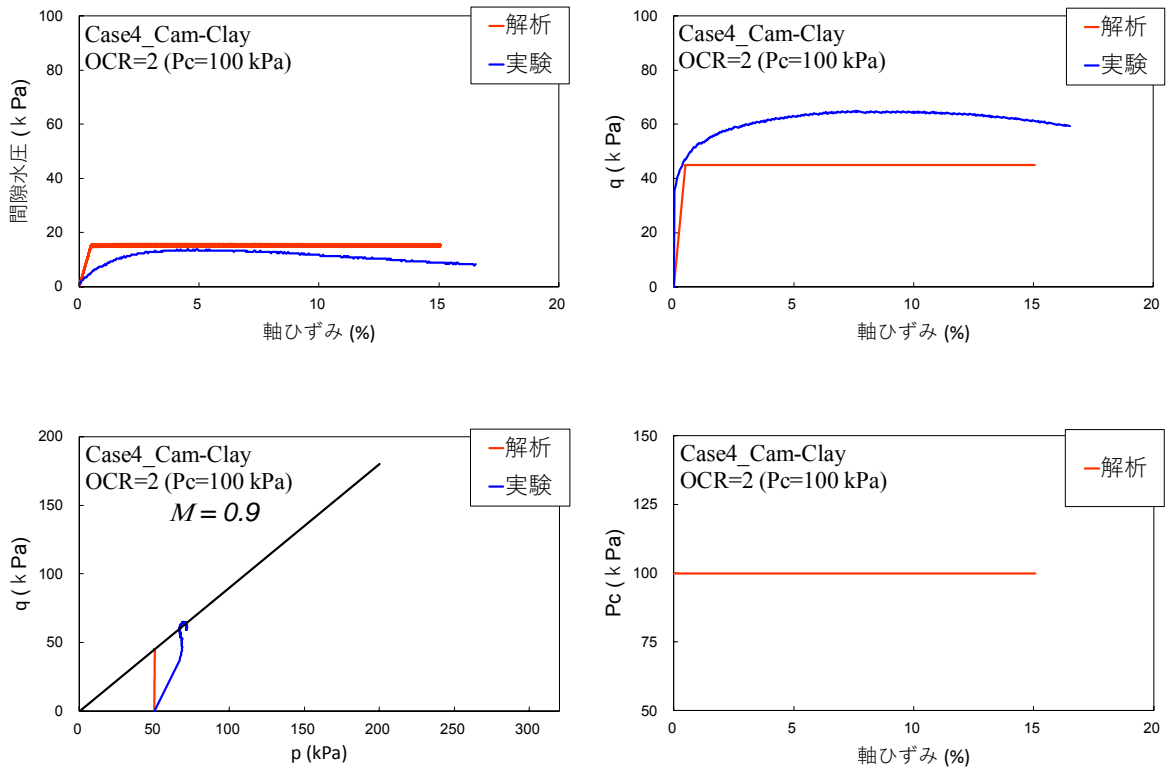


図 2-31 解析結果と実験結果の比較 (Case4)

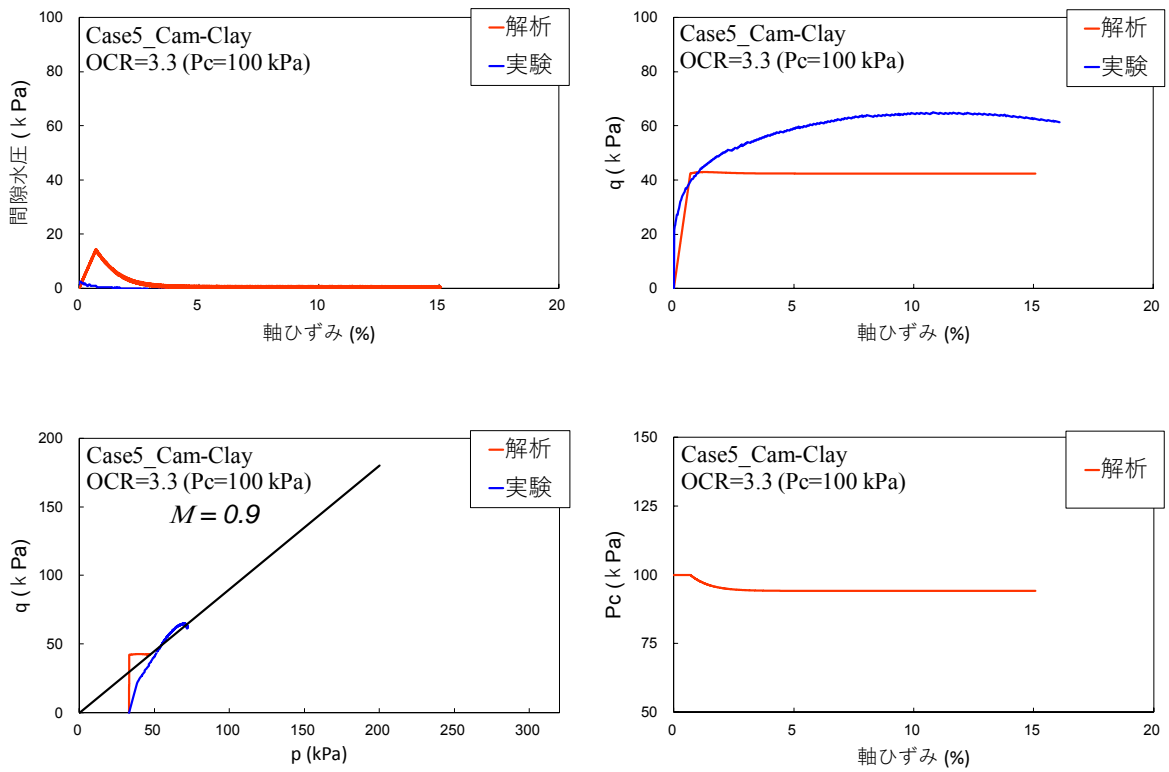


図 2-32 解析結果と実験結果の比較 (Case5)

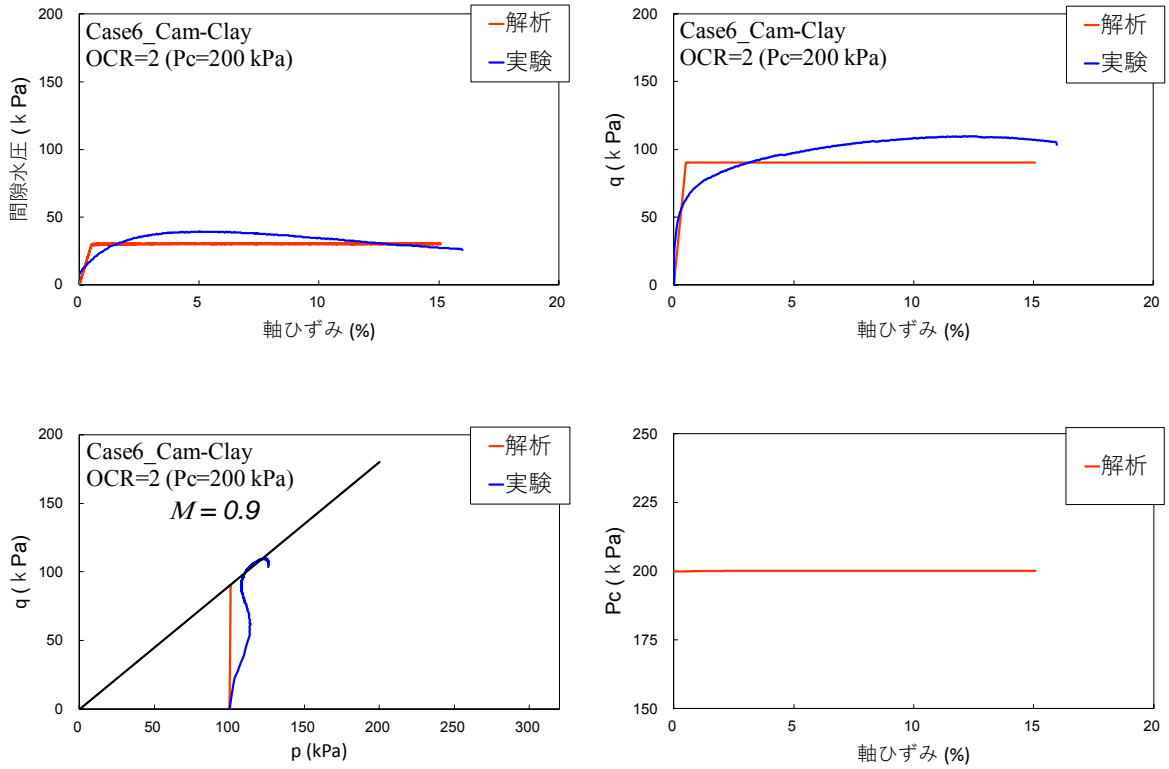


図 2-33 解析結果と実験結果の比較 (Case6)

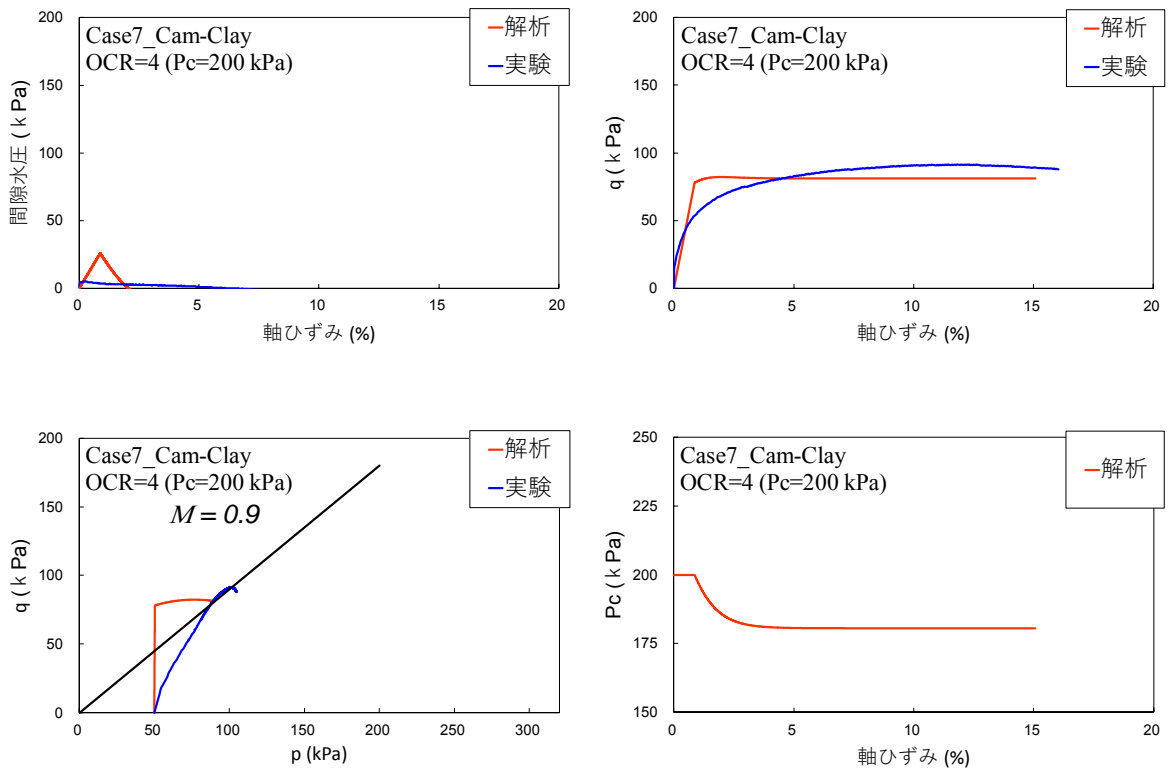


図 2-34 解析結果と実験結果の比較 (Case7)

2.2.3 マルチスプリングモデルの概要

FLAC の UDM オプションを利用し、ユーザー定義の構成則を C++ でプログラミングし、DLL モジュールを作成した。本モデルでは図 2-35 に示すように、せん断方向、軸差方向に 2 本のバネが設定されている。以下に述べる破壊前の状態については、それぞれのバネについて別々に応力ひずみ関係を計算する。ただし、引張破壊については石丸ら (2017) の方法に従い、バネの方向とは独立して最小主応力の値によって行う。弾性状態における応力ひずみ関係 (GHE モデル: General Hyperbolic Equation モデル) は以下の 13 式~15 式に従う。

$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{\frac{1}{C_1(\gamma)} + \frac{1}{C_2(\gamma)} \cdot \frac{|\gamma|}{\gamma_r}} \quad (13)$$

ここで γ_r : 規準ひずみ, G_0 : 初期せん断弾性係数, $\tau_{\alpha 0}$: 初期規準せん断強度

$$C_1(\gamma) = \frac{C_1(0) + C_1(CE)}{2} + \frac{C_1(0) - C_1(CE)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\alpha / (|\gamma| / \gamma_r) + 1} \right\} \quad (14)$$

$$C_2(\gamma) = \frac{C_2(0) + C_2(\infty)}{2} + \frac{C_2(0) - C_2(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\beta / (|\gamma| / \gamma_r) + 1} \right\} \quad (15)$$

$C_1(0)$, $C_2(0)$, $C_1(\infty)$, $C_2(\infty)$, α β はパラメータである。一方、減衰は下記のように定義される。ただし 16 式の減衰特性に従うように仮想の骨格曲線を設定し、履歴曲線を算出する。

$$h = h_{max} \cdot (1 - G_R / G_0)^{\beta_1} \quad (16)$$

G_R : 除荷点のひずみレベルにおけるせん断性係数, β_1 : パラメータである。

また、破壊前の状態では、FINN モデルによる間隙水圧変化、および有効応力依存による地盤パラメータの変化を考慮している。

$$G_{max} = G_{maxi} \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mi}} \right)^{0.5} \quad (17)$$

なお上式では 0.5 乗の形になっているが本プログラムではユーザーが入力・変更することが可能である。例えば、0 乗を設定すれば有効応力依存性を無効化することも可能である。

せん断破壊判定は次式に示すピーク強度 τ_f に多重せん断バネのせん断応力が達して

いるかによって判定する。

$$\tau_f = c_p \cdot \cos\phi_p + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \sin\phi_p \quad (18)$$

ここで ϕ :内部摩擦力, c :粘着力, σ_1 :最大主応力, σ_3 :最小主応力である。

なお, 引張破壊判定は次式に示す最小主応力のみによって判定する。引張破壊後の引張強度は 0, せん断破壊後の引張強度は σ_t とする。

$$\sigma_3 \leq \sigma_t \quad (19)$$

破壊後の骨格曲線は双曲線モデルとする。減衰特性については破壊前と同様に仮想の骨格曲線を設定して補正する。

$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{1 + \frac{G_0 |\gamma|}{\tau_a}} \quad (20)$$

ここで τ_a : 規準せん断層強度 (初期値 τ_{a0}) である。基準せん断強度 τ_a はひずみ軟化パラメータ A に従って滑らかにピーク強度 τ_f から残留強度 τ_r に遷移するようにする。

$$\tau_a = \tau_r + \frac{(\tau_{a0} - \tau_r)}{A \cdot \gamma^p + 1} \quad (21)$$

図 2-36 に破壊後の残留状態の模式図を示す。なお, 引張破壊については瞬時に応力を変化させる。なお残留せん断応力 τ_r は以下の式で定義している

$$\tau_r = c_r \cdot \cos\phi_r + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \sin\phi_r \quad (22)$$

以上のとおり, せん断破壊, 引張破壊ともに石丸ら(2017)では多重せん断バネモデルにおけるバネごとに破壊判定を行うのではなく, 要素全体の応力状態によって判定している。そこで, 1つのバネが破壊すれば全てのバネが同時に破壊する仕様とした。また, 石丸ら(2017)においても言及されていないが一度破壊した要素が再び弾性状態 (GHE モデル) に戻ることは無いものとした。

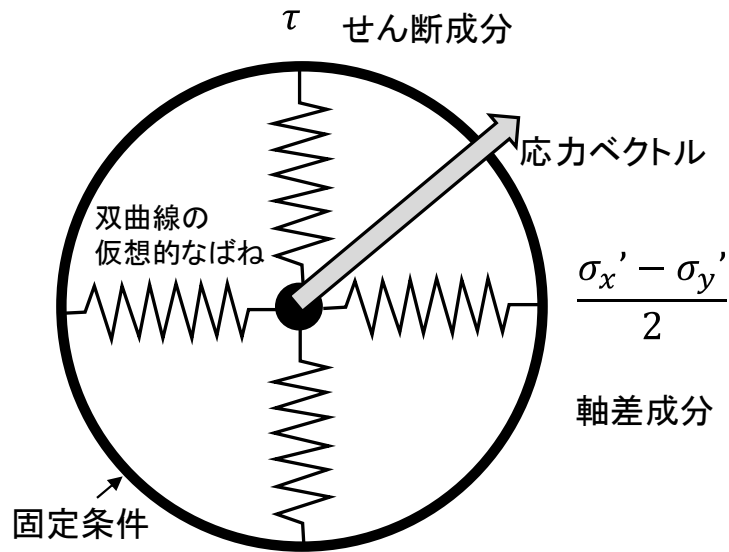


図 2-35 マルチスプリングモデルの模式図

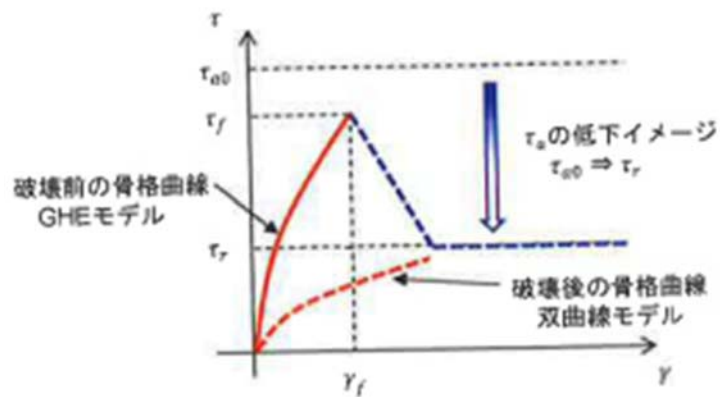


図 2-36 破壊後の残留状態の模式図

2.2.4 モール-クーロンモデルによる解析

解析に用いた地盤の物性について説明する．室内要素実験結果よりヤング率 (E_{50}) は平均有効応力比が増加するほど増加し，拘束圧依存性が認められた．そこで下記の式を用いて解析を行った．ここで p_0 は 100kPa とした．

$$E_{50} = 16100 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.66} \quad (23)$$

ポアソン比 (ν) は等方的な挙動を示すと仮定し 0.499 を設定した．

粘着力 c と内部摩擦角 ϕ は当初, 表 2-7 に示す正規圧密および過圧密状態の全応力表示の強度定数を用いていた. しかしながら, 斜面モデルにこのパラメータを適用すると, 実験結果とは異なり, 地盤を傾斜させる前に破壊が生じた. これは地盤の強度定数を過小に見積もった結果である. そこで, 強度定数の見直しを行った. 具体的には, 図 2-37 と図 2-38 に示す平成 28 年度に実施した要素試験結果(三軸圧縮試験, 一面せん断試験)と遠心載荷試験結果(ベーンせん断試験結果)を参考に粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を決定した. 表 2-8 に設定結果を示す. その設定根拠は下記の通りである.

- 1) 供試体作製時の余盛(実換算で約 6.5m)により地盤全体が過圧密であること
- 2) 過圧密粘土の非排水せん断時のストレスパスは過剰間隙水圧が発生しない, または過圧密比が大きいと負の過剰間隙水圧が発生することから, 排水状態の強度と同等かそれ以上の強度を発揮している可能性があること.
- 3) 粘土の有効応力表示の強度は排水強度と概ね等しいこと.
- 4) ベーンせん断試験結果より表層地盤の強度が比較的大きいこと.(ただし, ベーンせん断試験は重力場で実施されていたことから, 90G 場では強度がさらに大きかった可能性がある.)

これらを踏まえて, ベーンせん断試験, 三軸圧縮試験(または一面せん断試験)の有効応力表示(排水状態)の破壊基準をカバーする破線の破壊基準を設定した.

解析ケースを表 2-9 に示す. 水深は 45m と 70m の 2 ケースを行った. 解析モデルを図 2-39 に示す. 地盤の底面及び側面にはそれぞれインターフェース要素を用いた. インターフェース要素の概要を図 2-42 に示す. インターフェース要素のパラメータを表 2-10 に示す. なお, 引張強度 T を設定しなかったため, 初期値(ゼロ)であるため, 土槽側面では剥離を再現できるようになっている. 水深に相当する荷重は, 図 2-40 と図 2-41 に示すように, 水平および傾斜した地表面にそれぞれ垂直に作用する分布荷重として与えた. なお, 地盤の湿潤(飽和)密度は一律 $\rho_s = 1770 \text{kg/m}^3$ とした. 解析方法は以下の通りである. まず, 地盤の自重および水圧を作用させた条件で弾性解析により初期応力解析を行った. その後, 表 2-8 に示す強度定数を与えたモール-クーロンモデルで初期応力をもとに解析を行った. その後, 遠心載荷実験では地盤を傾斜させたが, 解析では

通常鉛直に作用する重力加速度 (9.81m/s^2) を傾斜させて与えることで実験の再現を試みた。上記の傾斜角度は1度刻みで大きくし、すべりが生じる角度を把握した。なおケース1、ケース2ともに水深の違いによらず4度ですべり破壊が生じた。以降で、各ケースの状況を比較しながら以下で説明する。

図 2-43 と図 2-44 にせん断ひずみ分布を示す。ケース1の変位ベクトル図を図 2-45 に示す。比較のために遠心実験で得られた結果を図 2-46 に示す。崩壊した時の傾斜角は解析が小さいものの、破壊モードは概ね整合していることがわかる。破壊した傾斜角が異なる原因としては、地盤が過圧密状態であり、設定したよりも大きい強度が発現されていた可能性があること、実験では傾斜角を連続して変化させる条件 ($0.3^\circ/\text{min}$) であるのに対して、解析は静的解析であることが考えられる。ケース2の変位ベクトル図を図 2-47 に示す。比較のために遠心実験で得られた結果を図 2-48 に示す。実験と解析では崩壊した時の傾斜角および破壊モードも異なっていることがわかる。図 2-49 と図 2-50 に地盤の塑性状況を示す。

図 2-51 と図 2-52 に有効鉛直応力分布を示す。図 2-53 と図 2-54 に有効水平応力分布を示す。図 2-55 と図 2-56 にせん断応力分布を示す。図 2-57 と図 2-58 に間隙水圧分布を示す。

表 2-7 強度定数（見直し前）

	c (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)	備考
斜面	32 (54)	0	過圧密
法肩	2	13	正規圧密

表 2-8 強度定数（見直し後）

	c (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)
斜面	10	25
法肩	10	25

表 2-9 解析ケース

	水深 (m)	解析モデル	法肩クラック
Case1	45	モールクーロン	無し
Case2	70	モールクーロン	無し

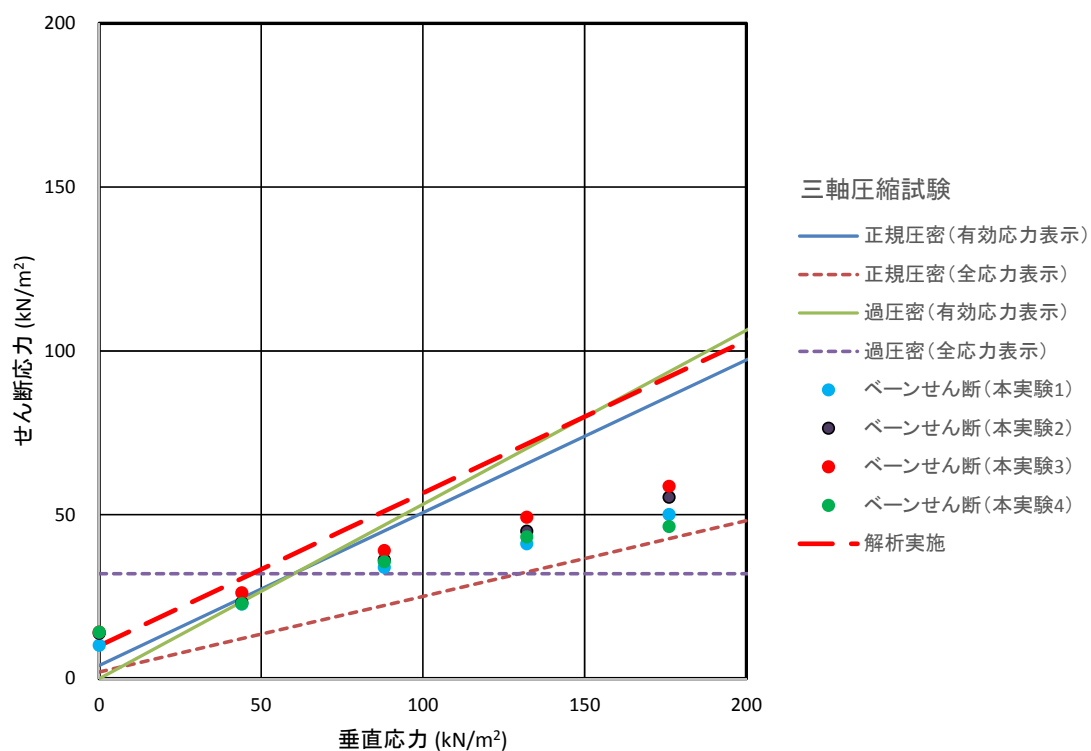


図 2-37 強度定数の比較 (三軸圧縮試験とベーンせん断試験)

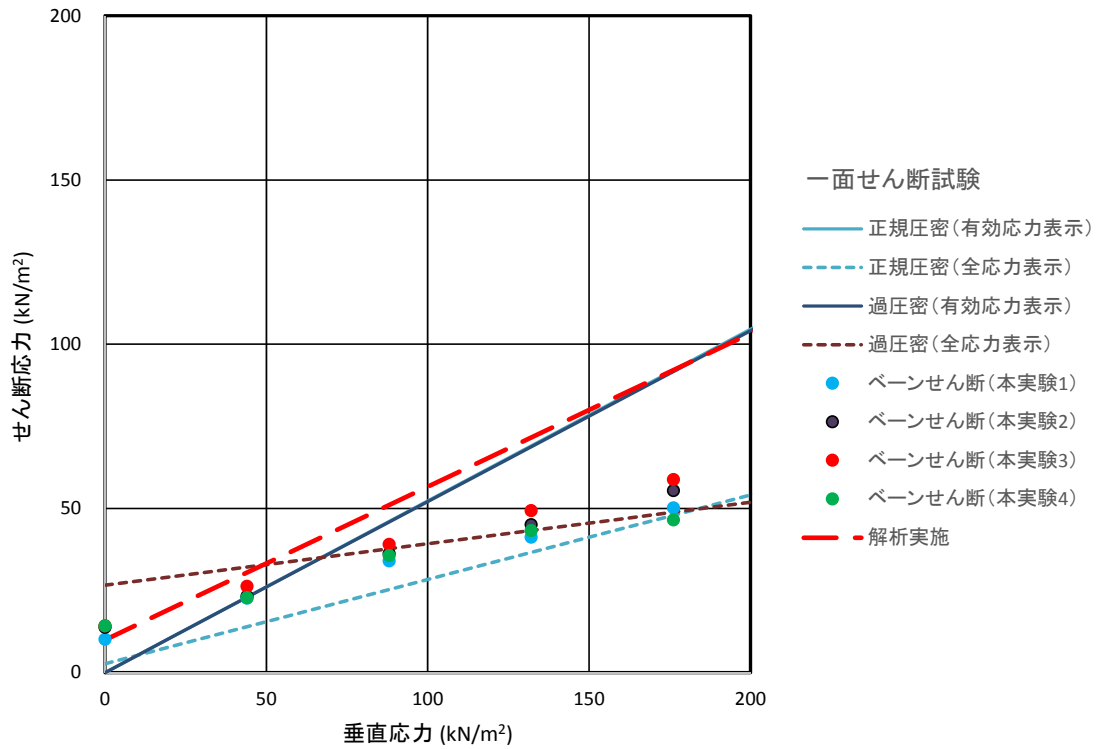


図 2-38 強度定数の比較（一面せん断試験とベーンせん断試験）

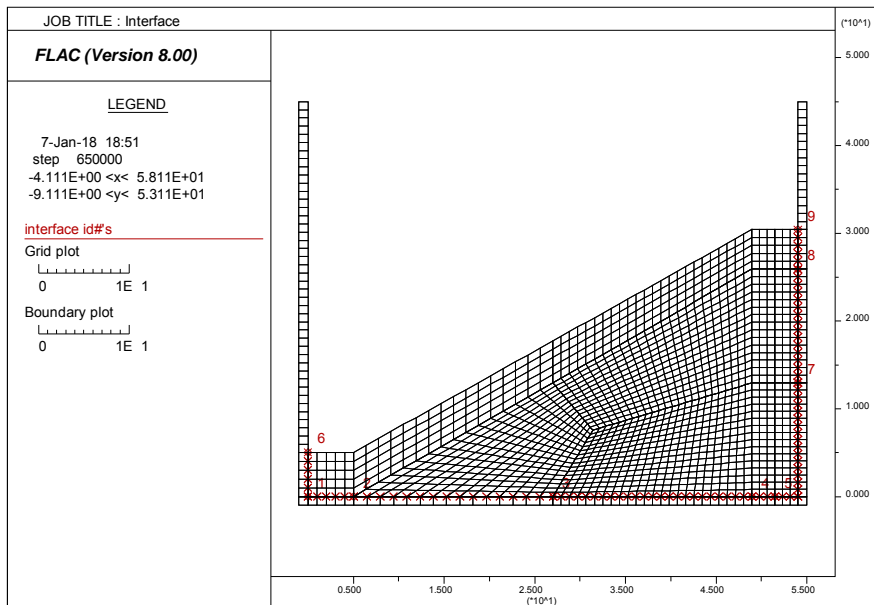


図 2-39 解析モデル

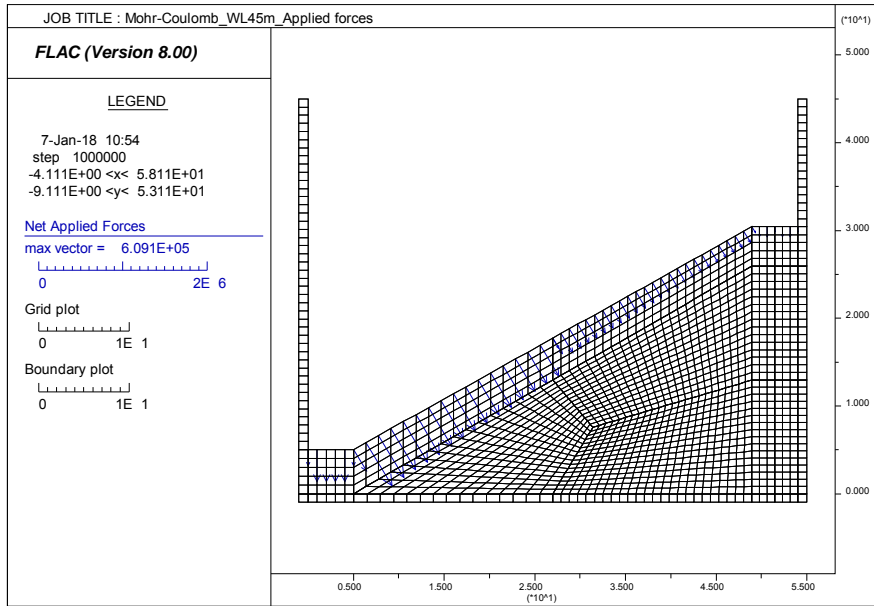


図 2-40 水圧の载荷状況（水深 45m）

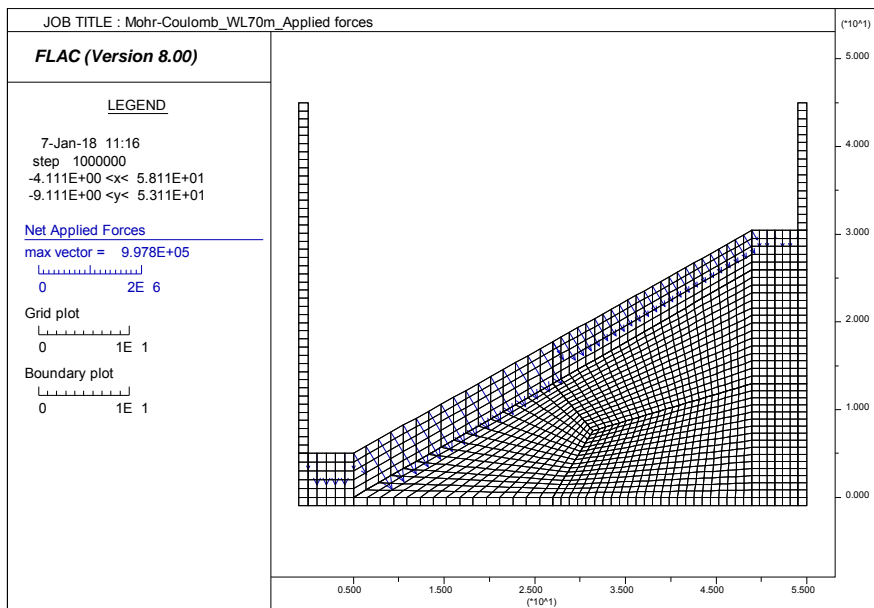


図 2-41 水圧の载荷状況（水深 70m）

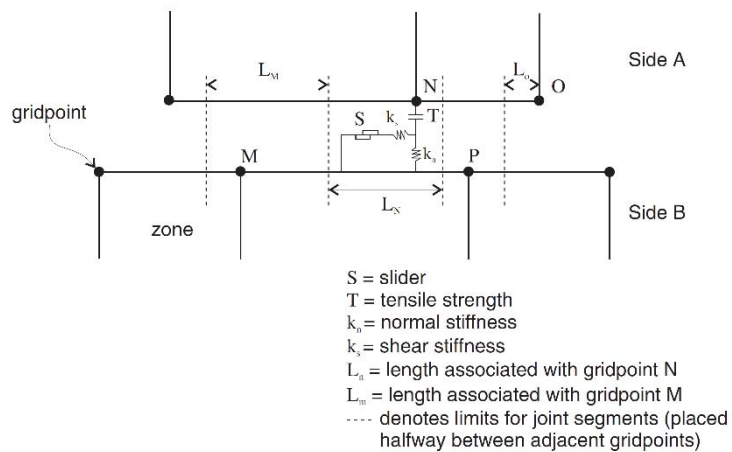


図 2-42 インターフェース要素の概要

表 2-10 土槽境界部のインターフェース要素のパラメータ

	k_s (N/m ²)	k_n (N/m ²)	せん断抵抗角 (degree)
底面	1.0E+20	1.0E+20	20
側面	6.2E+06	6.2E+06	20

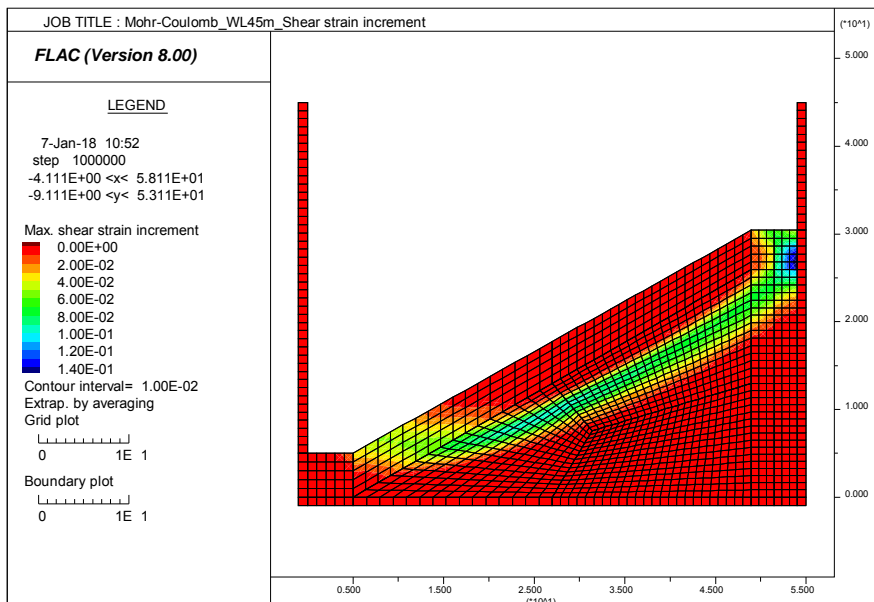


図 2-43 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)

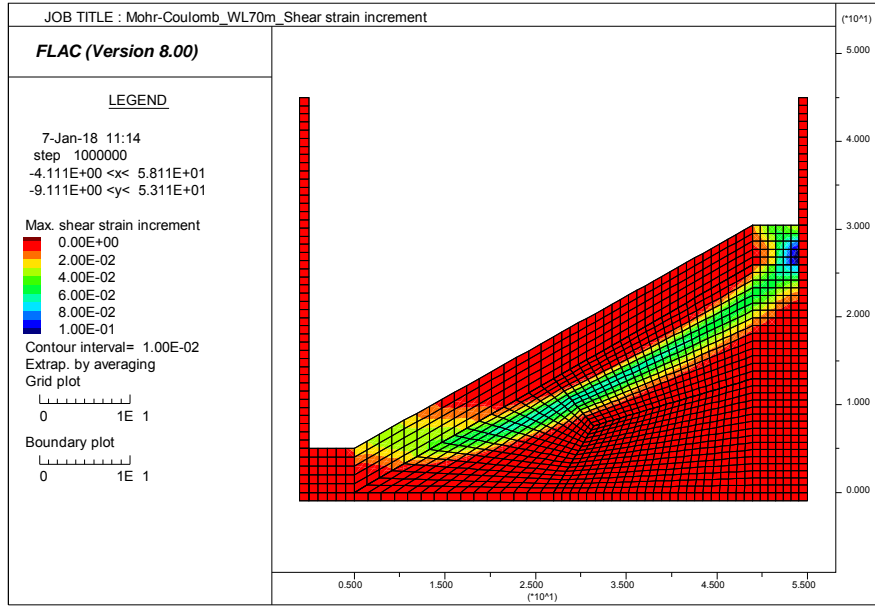


図 2-44 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)

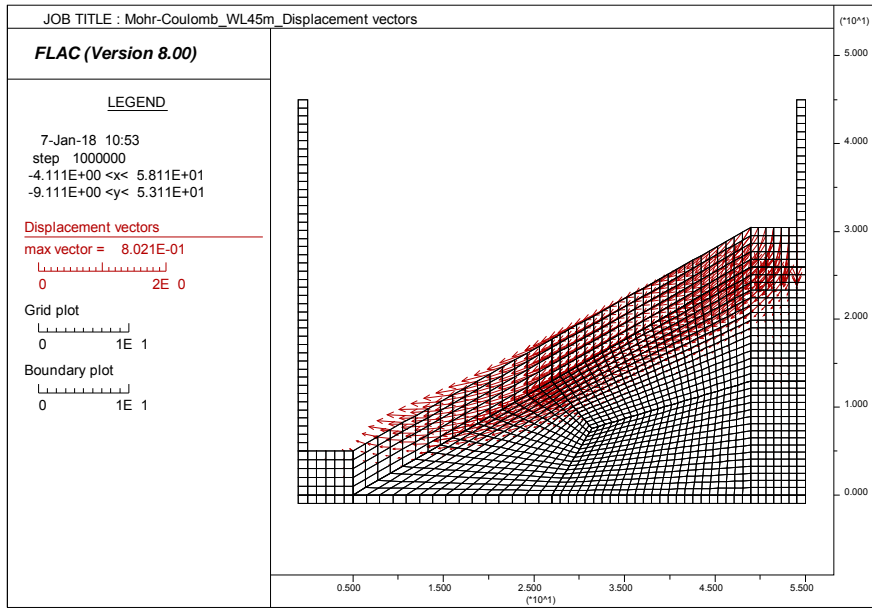


図 2-45 変位ベクトル分布（ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度）

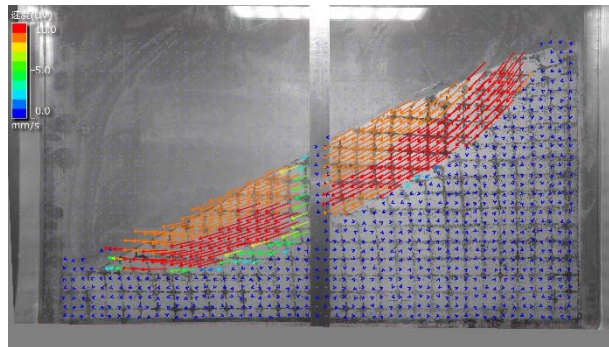


図 2-46 変位ベクトル分布（ケース 1 水深 45m 傾斜角 11.7~11.8 度）

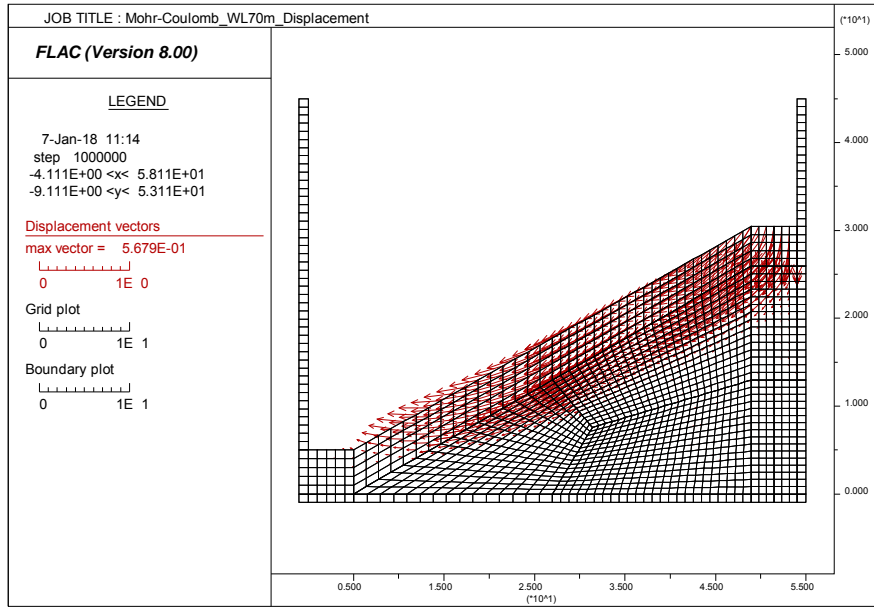


図 2-47 変位ベクトル分布（ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度）

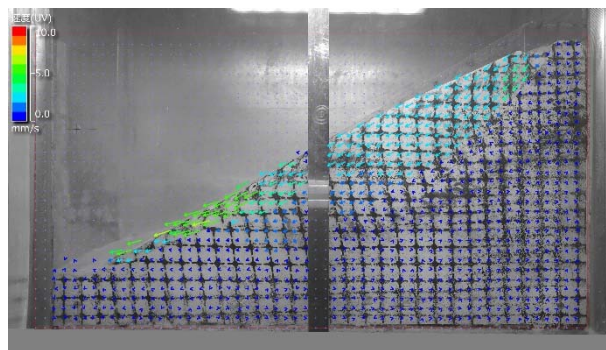


図 2-48 実験の変位ベクトル分布（ケース 2 水深 70m 傾斜角 14.1~14.3 度）

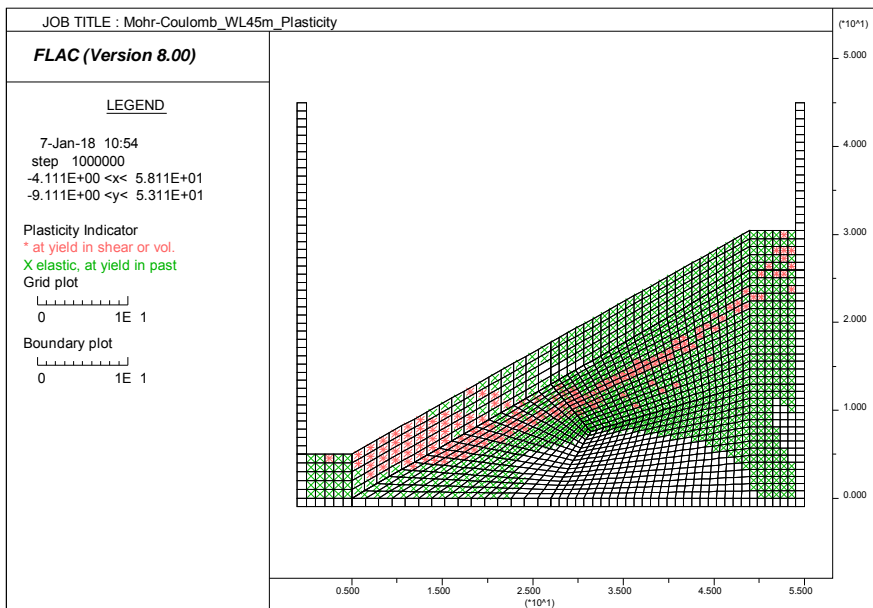


図 2-49 地盤の塑性状況（ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度）

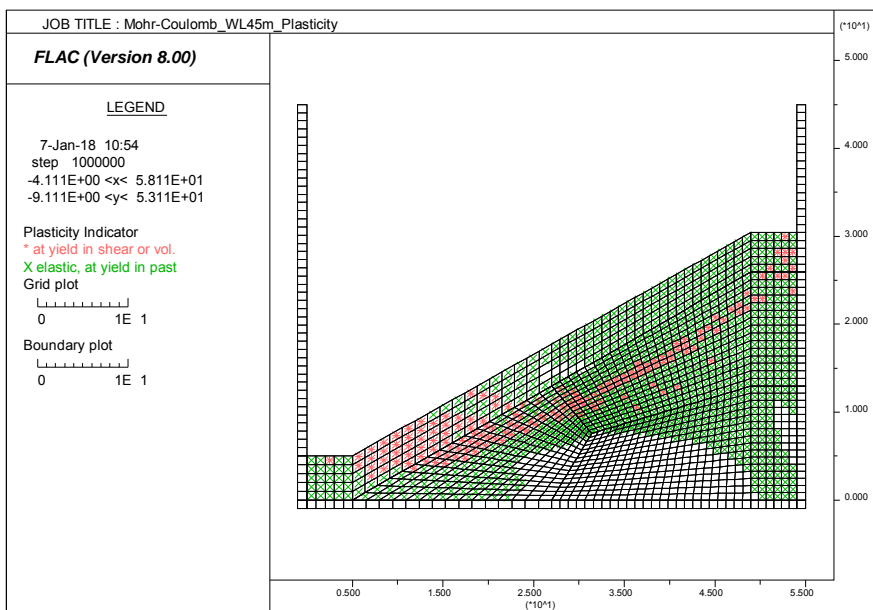


図 2-50 地盤の塑性状況（ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度）

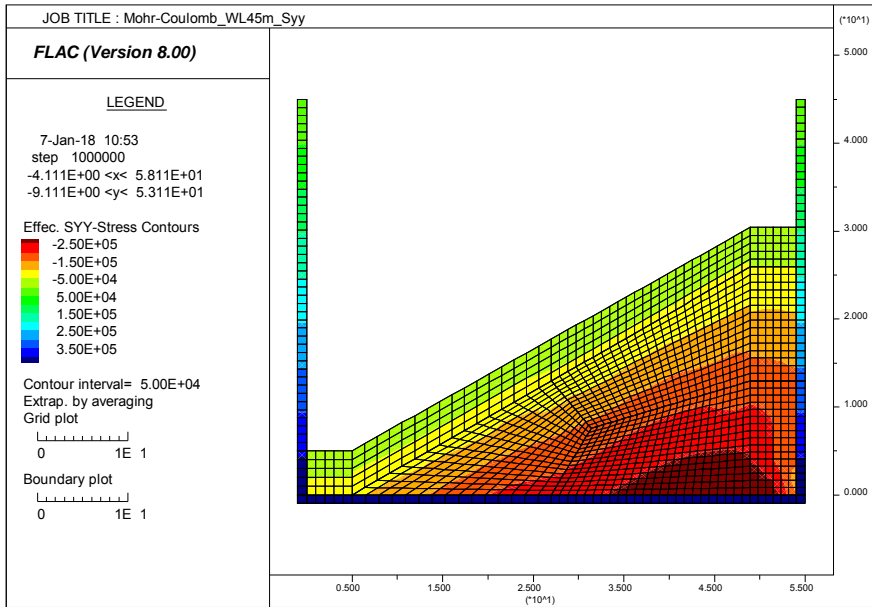


図 2-51 有効鉛直応力の分布（ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度）

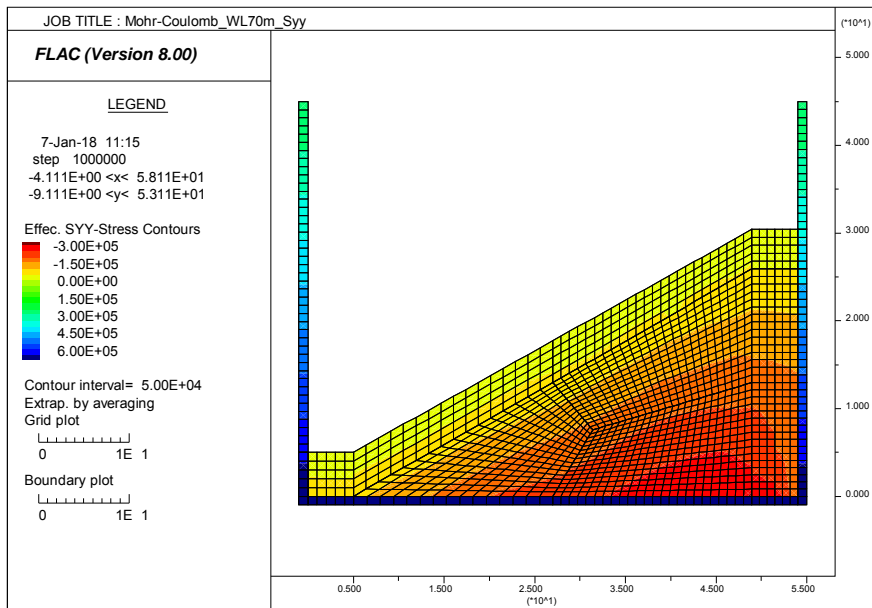


図 2-52 有効鉛直応力の分布（ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度）

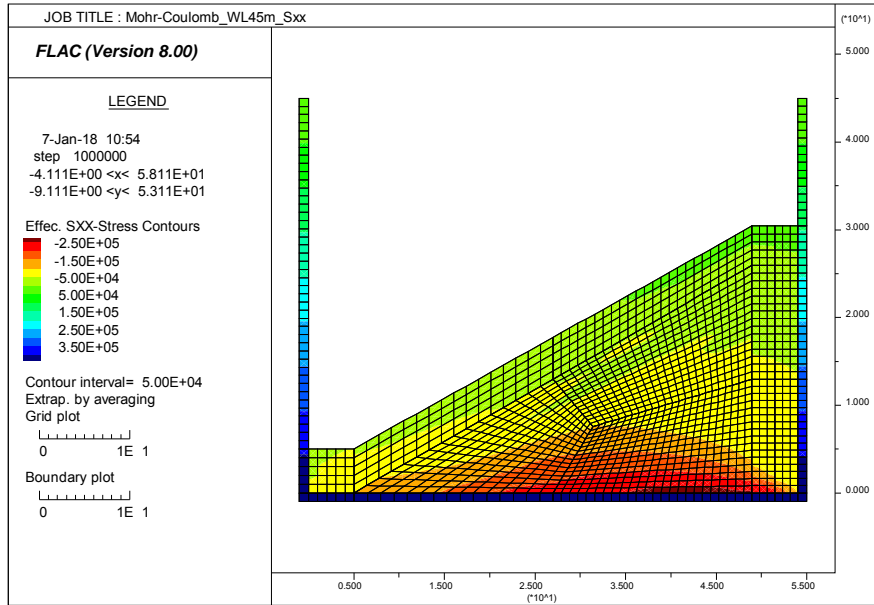


図 2-53 有効水平応力の分布 (ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度)

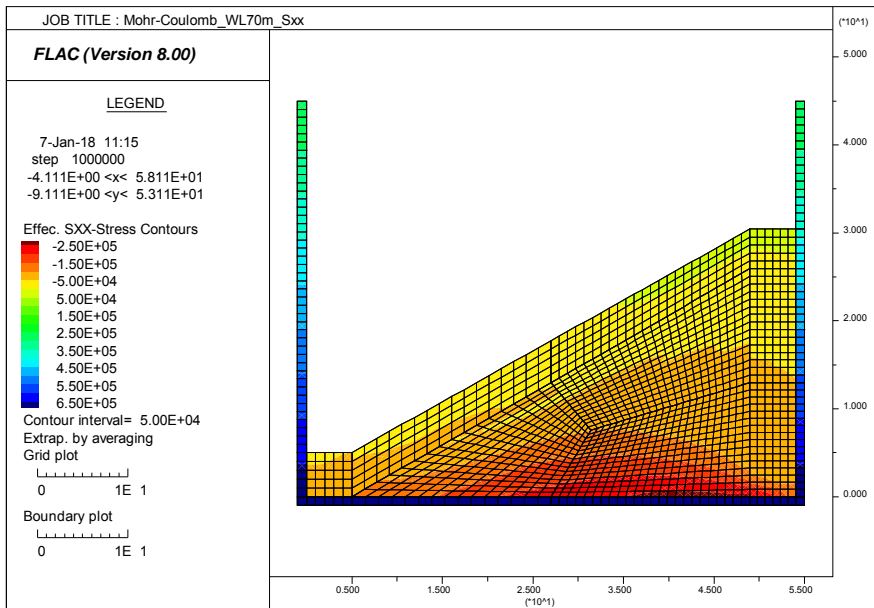


図 2-54 有効水平応力の分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度)

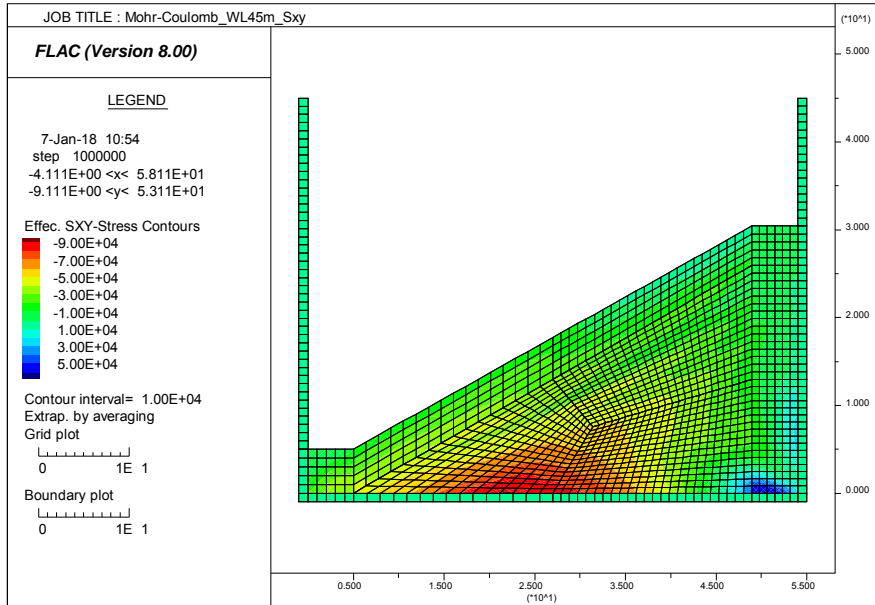


図 2-55 せん断応力の分布（ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度）

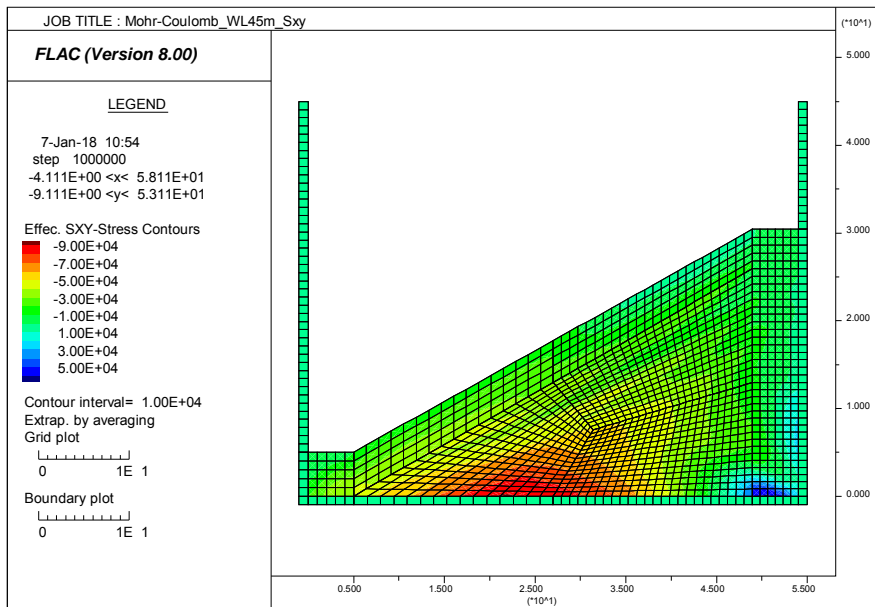


図 2-56 せん断応力の分布（ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度）

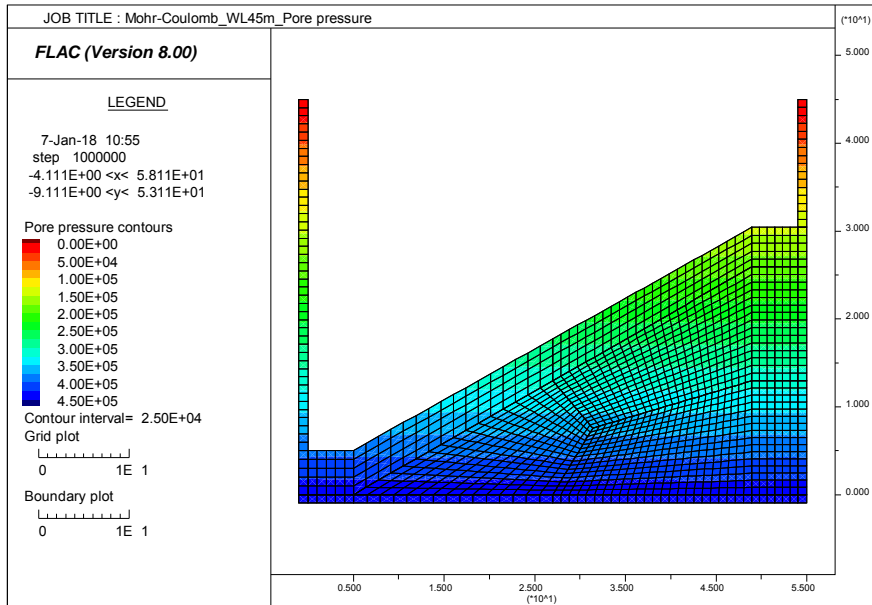


図 2-57 間隙水圧の分布（ケース 1 水深 45m 傾斜角 4 度）

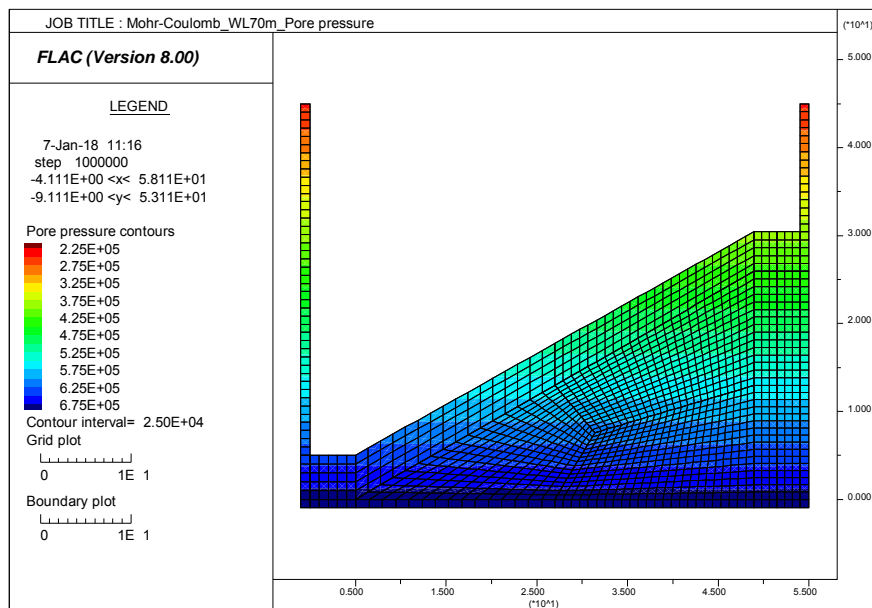


図 2-58 間隙水圧の分布（ケース 2 水深 70m 傾斜角 4 度）

2.2.5 修正カムクレイモデルによる解析

解析で用いたパラメータを表 2-11 に示す。これ以外にも先行圧密による降伏状態を規定するパラメータ mpc がある。これは、模型地盤作製過程に配慮して、斜面整形前

の水平地盤の初期有効応力を別途計算して各要素に入力した。mpc の分布は後に示す結果において示す。その他の条件（水圧载荷，ジョイント要素の与えた）は 2.2.4 と同じである。解析ケースを表 2-12 に示す。

以下に解析結果を示す。傾斜角 4 度において斜面が滑った。ここでは 4 度の結果を示す。

表 2-11 解析パラメータ

λ	κ	ν	M	p_1 (kPa)	ν_λ
0.13	0.019	0.30	0.9	1	2.8

表 2-12 解析ケース

	水深 (m)	解析モデル	法肩クラック
Case3	45	修正カムクレイ	無し
Case4	70	修正カムクレイ	無し

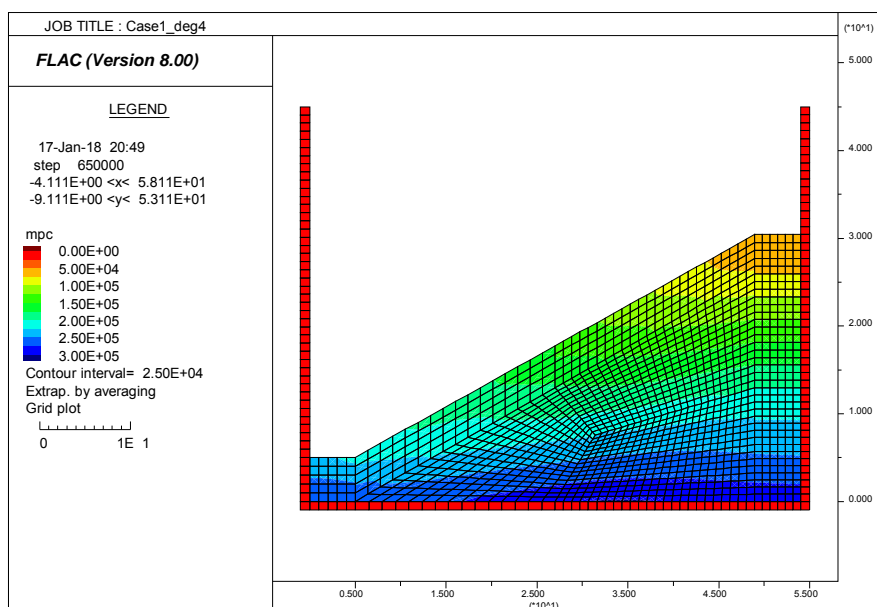


図 2-59 mpc 分布（ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度）

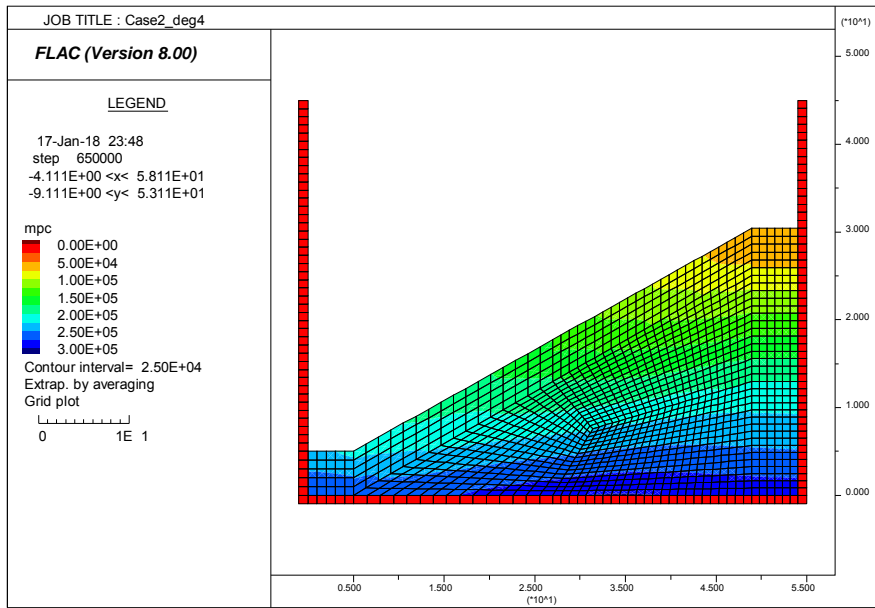


図 2-60 mpc 分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)

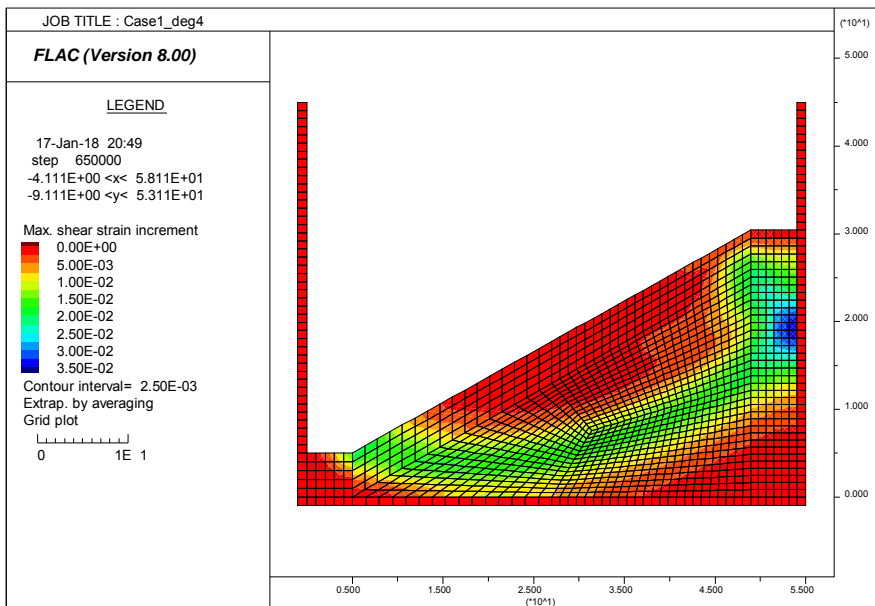


図 2-61 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)

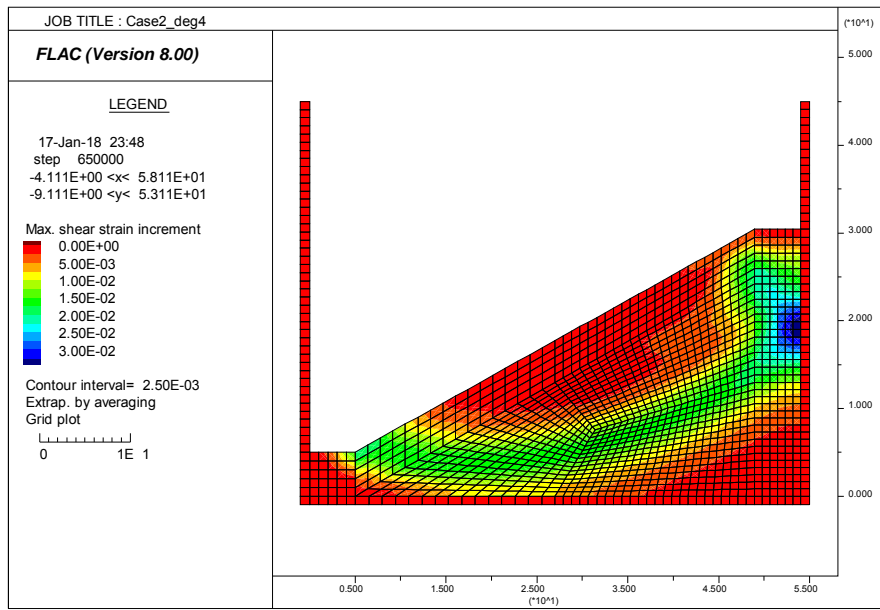


図 2-62 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)

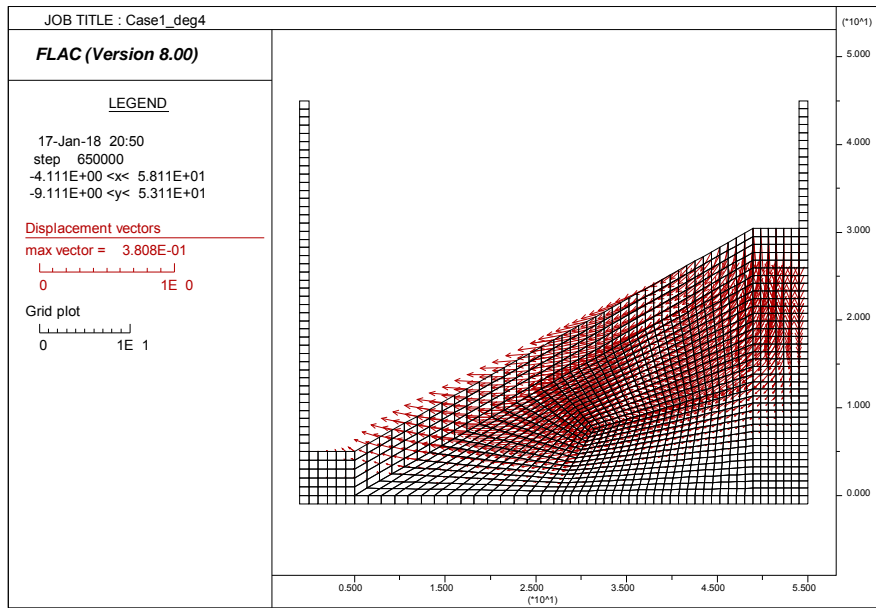


図 2-63 変位ベクトル分布（ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度）

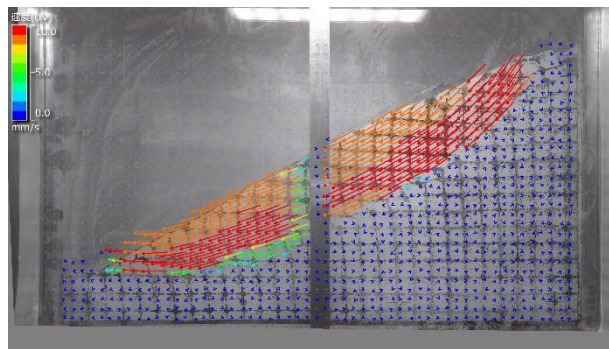


図 2-64 変位ベクトル分布（ケース 1 水深 45m 傾斜角 11.7~11.8 度）

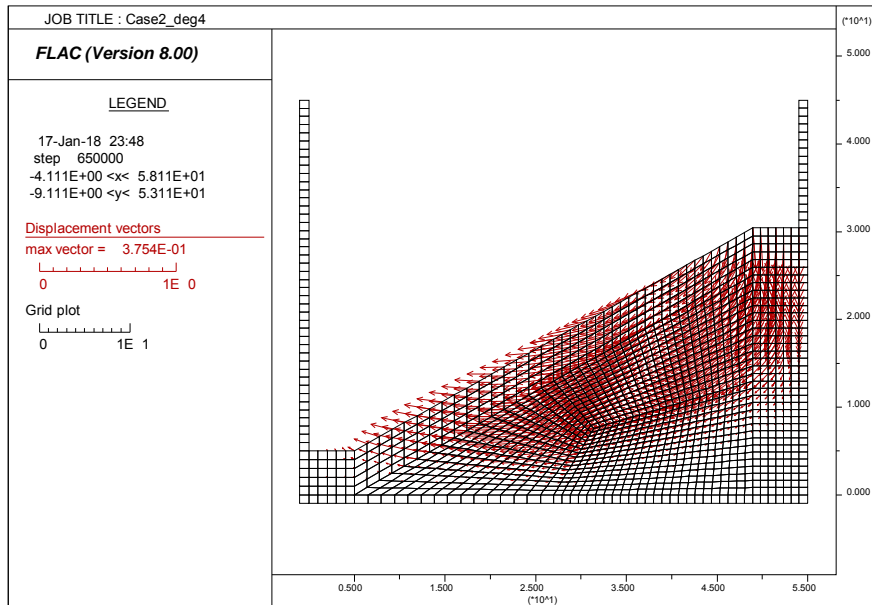


図 2-65 変位ベクトル分布（ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度）

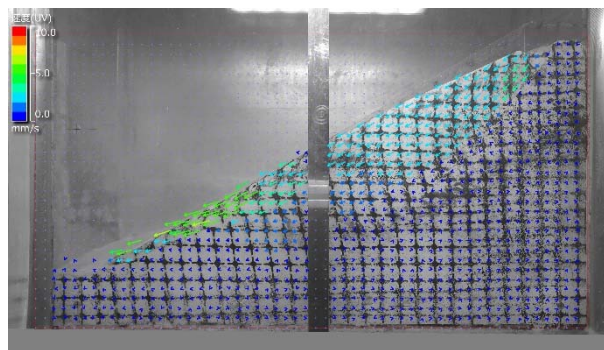


図 2-66 実験の変位ベクトル分布（ケース 2 水深 70m 傾斜角 14.1~14.3 度）

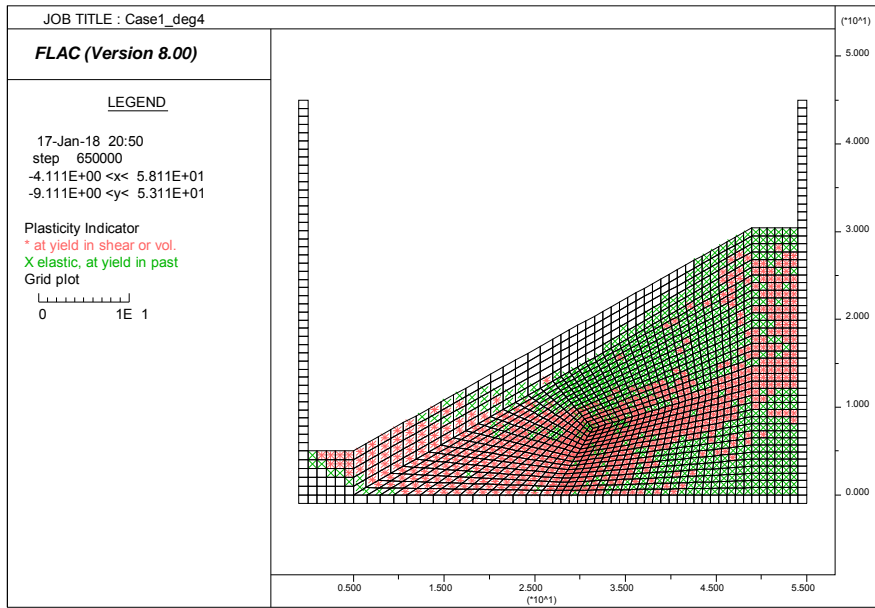


図 2-67 地盤の塑性状況（ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度）

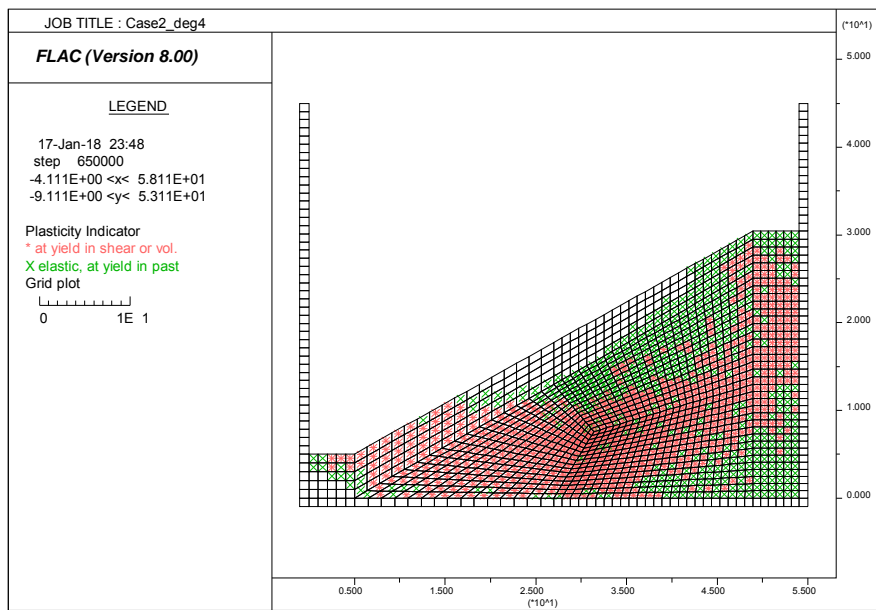


図 2-68 地盤の塑性状況（ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度）

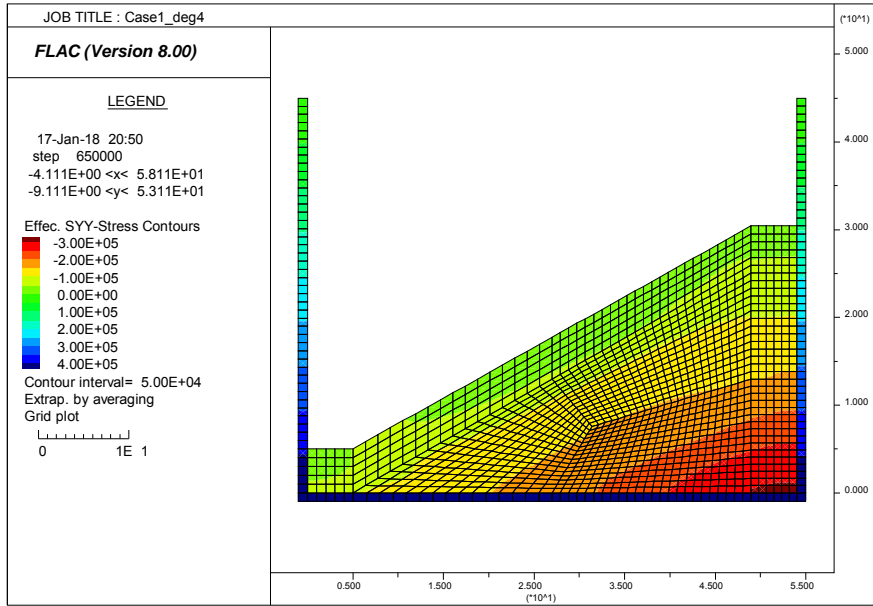


図 2-69 有効鉛直応力の分布（ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度）

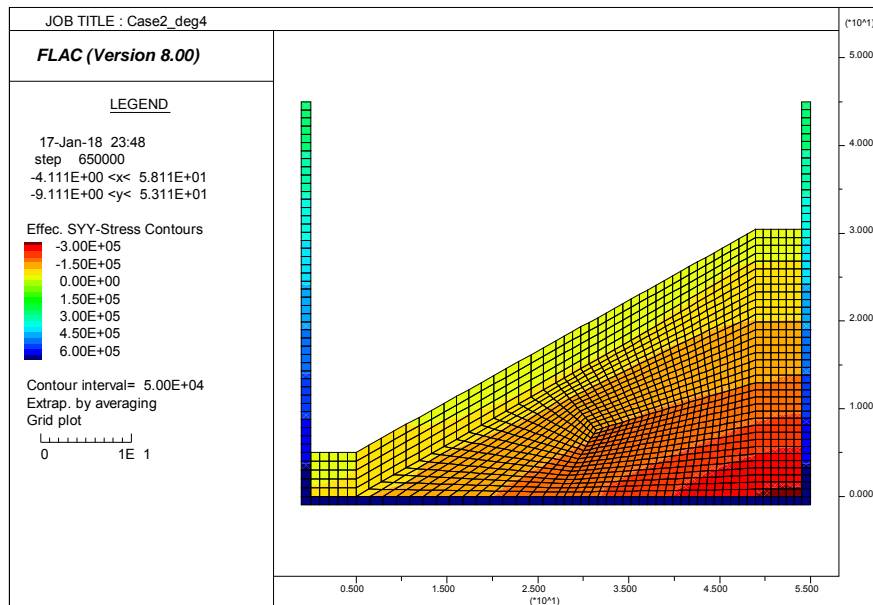


図 2-70 有効鉛直応力の分布（ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度）

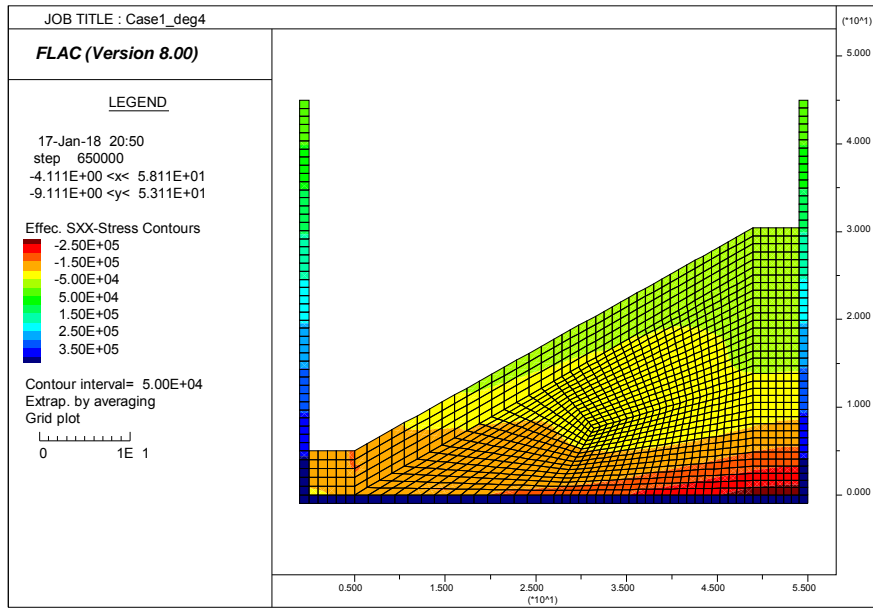


図 2-71 有効水平応力の分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度)

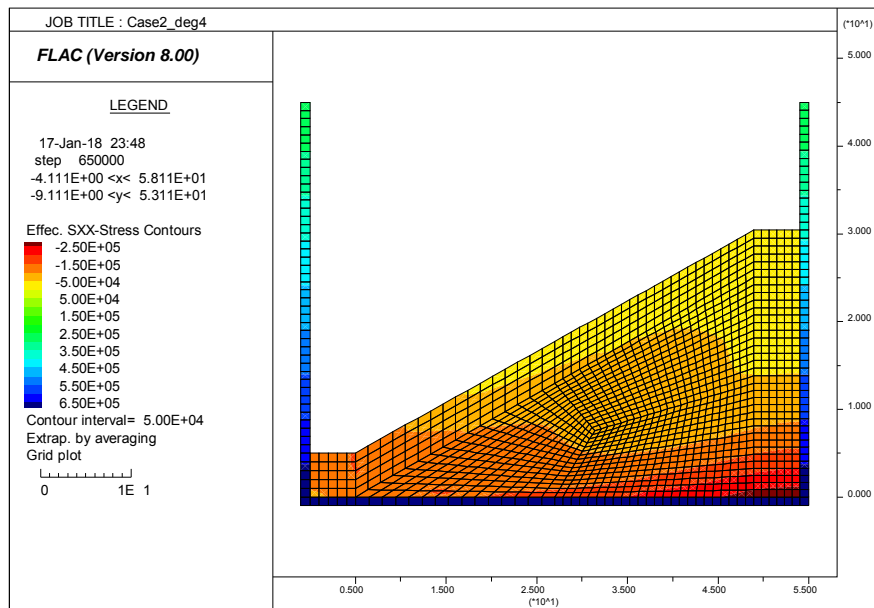


図 2-72 有効水平応力の分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)

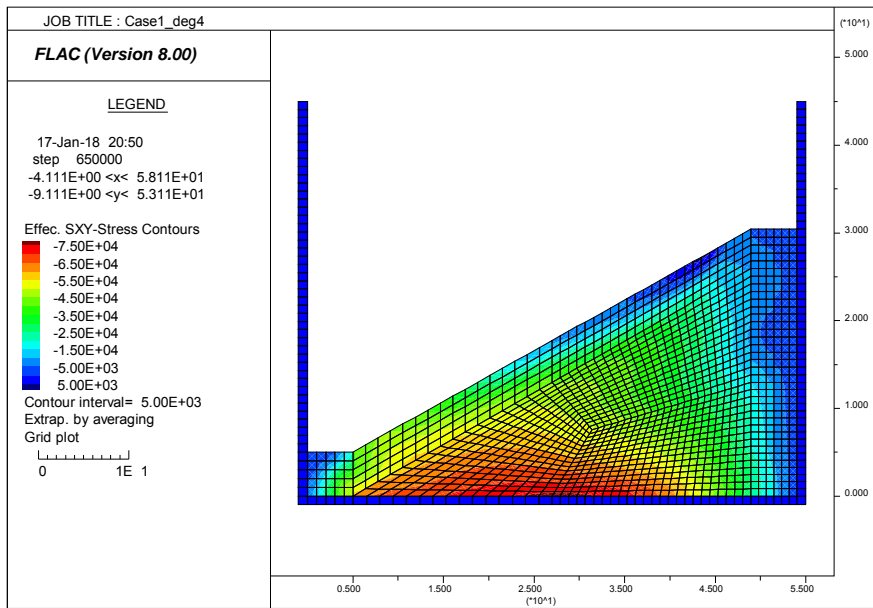


図 2-73 せん断応力の分布（ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度）

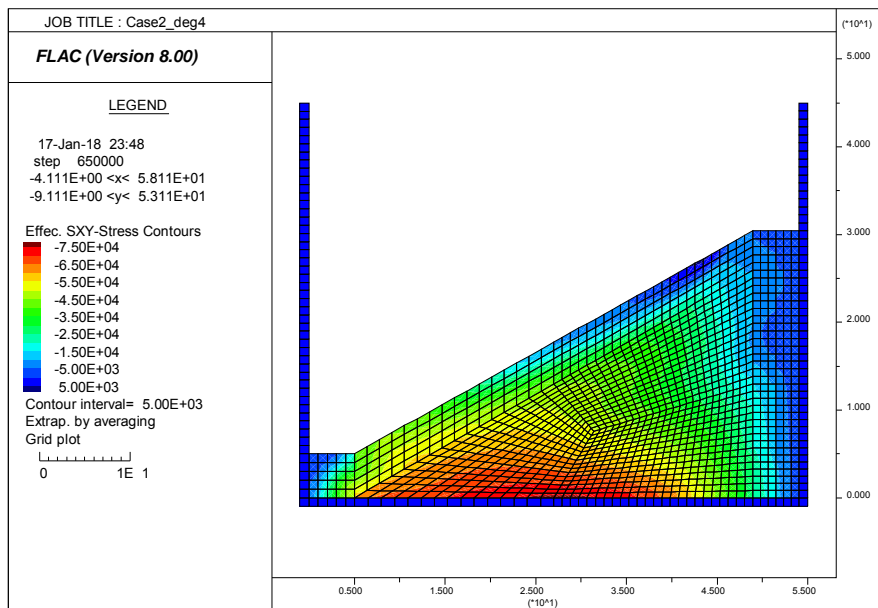


図 2-74 せん断応力の分布（ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度）

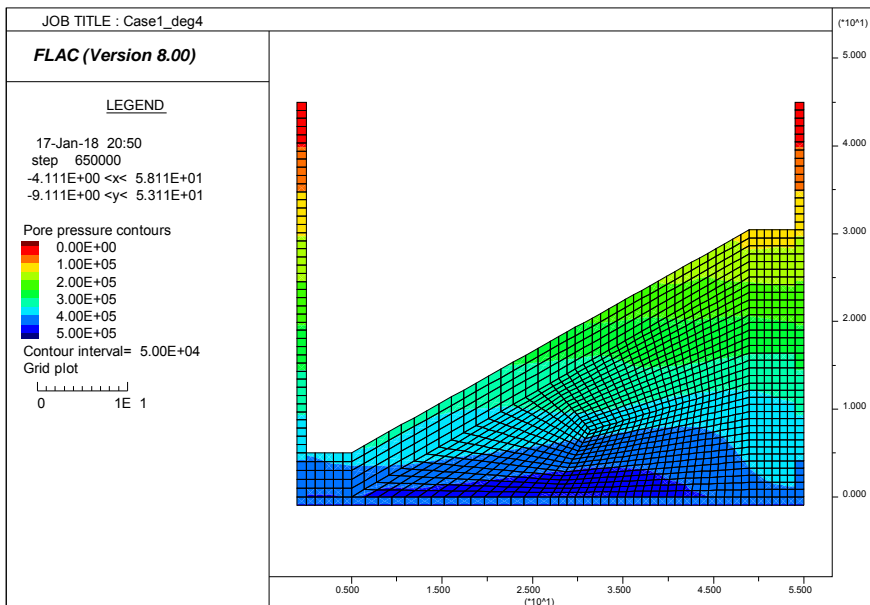


図 2-75 間隙水圧の分布（ケース 3 水深 45m 傾斜角 4 度）

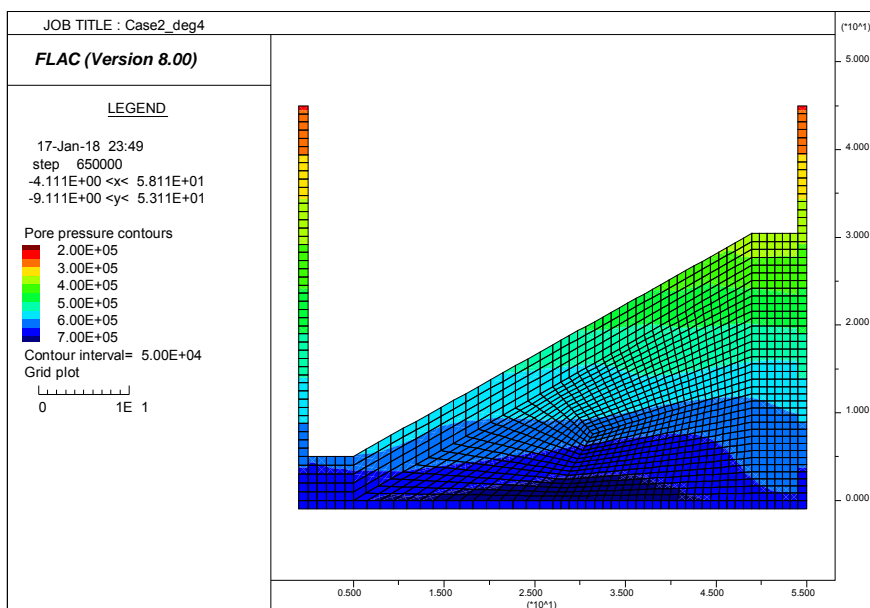


図 2-76 間隙水圧の分布（ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度）

2.2.6 マルチスプリングモデルによる解析

解析で用いたパラメータを表 2-13 示す。せん断剛性性の拘束圧依存性を考慮し、基準拘束圧に対して 0.7 乗で変化するようにした。なお、表層 1 層分の要素についてはモールクーロンモデルを用いた。その時のパラメータは 2.2.4 で設定したものをそのまま用いた。その他の条件（水圧载荷，ジョイント要素の与えた）は 2.2.4 と同じである。解析ケースを表 2-14 に示す。

以下に解析結果を示す。傾斜角 4 度において斜面が滑った。ここでは 7 度の結果を示す。

表 2-13 解析パラメータ

G_{\max} (MPa)	γ_r	ν	n	σ_{ref} (kPa)
39.69	0.0014	0.499	0.7	100

表 2-14 解析ケース

	水深 (m)	解析モデル	法肩クラック
Case5	45	マルチスプリング	無し
Case6	70	マルチスプリング	無し

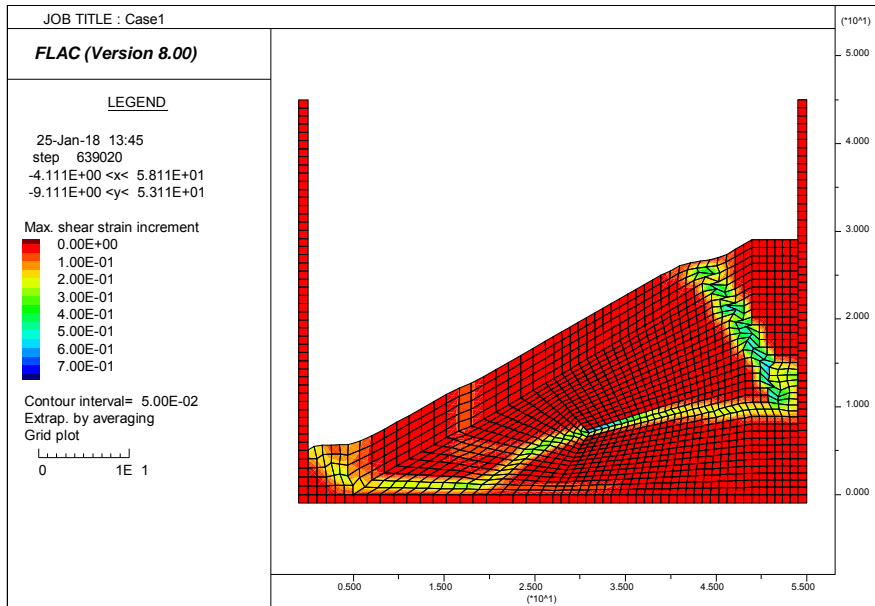


図 2-77 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)

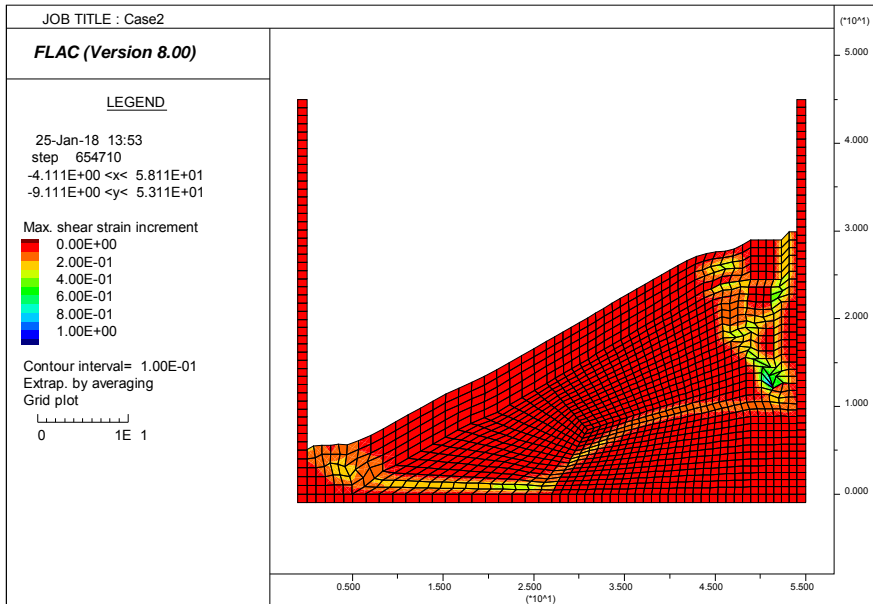


図 2-78 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)

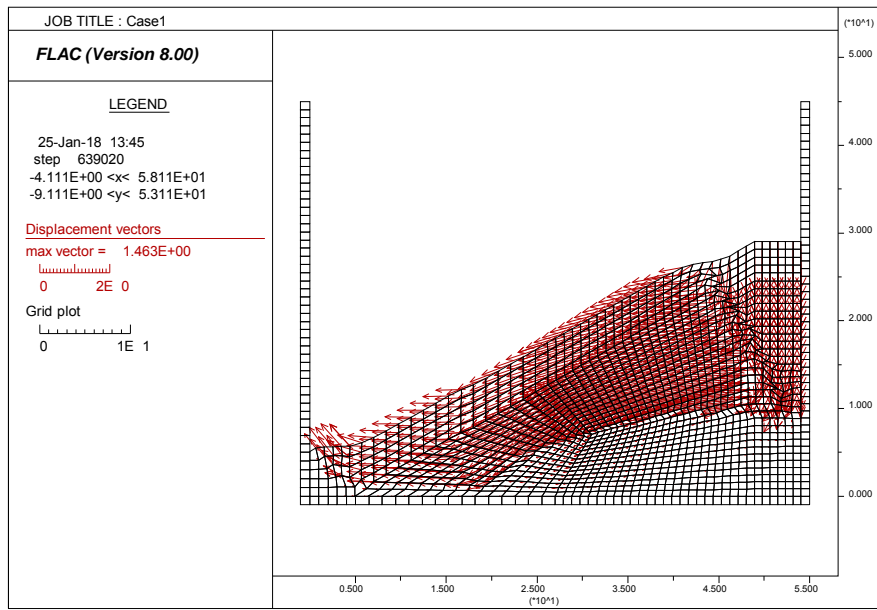


図 2-79 変位ベクトル分布（ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度）

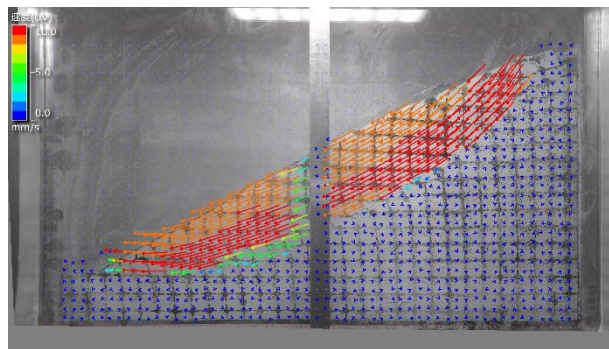


図 2-80 変位ベクトル分布（ケース 1 水深 45m 傾斜角 11.7~11.8 度）

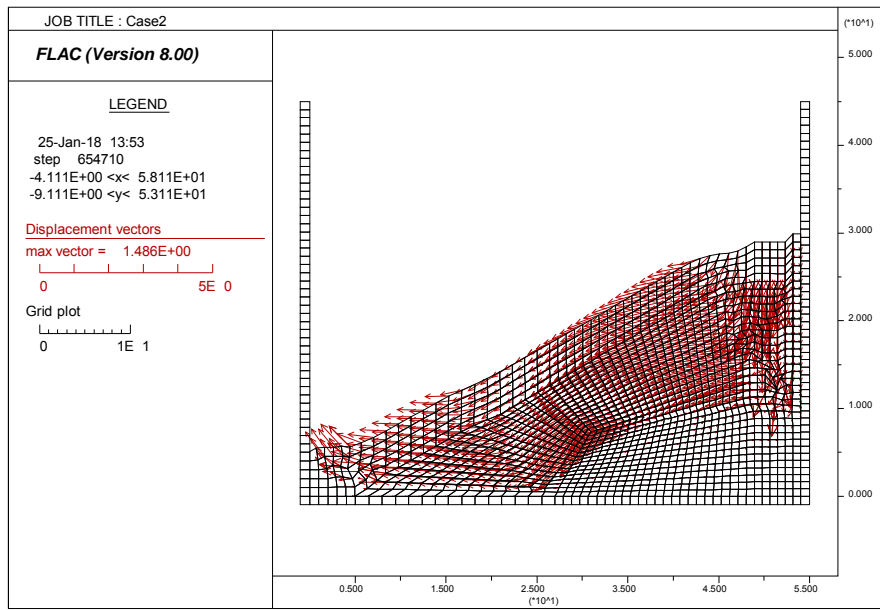


図 2-81 変位ベクトル分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 4 度)

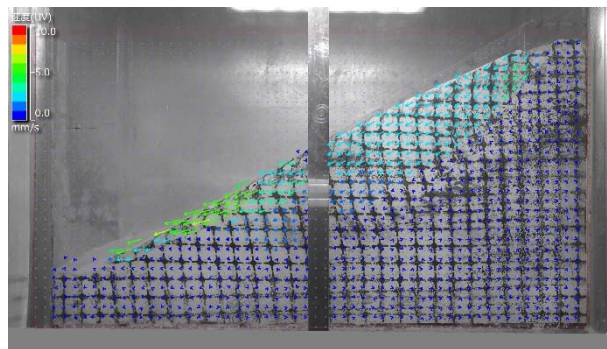


図 2-82 実験の変位ベクトル分布 (ケース 2 水深 70m 傾斜角 14.1~14.3 度)

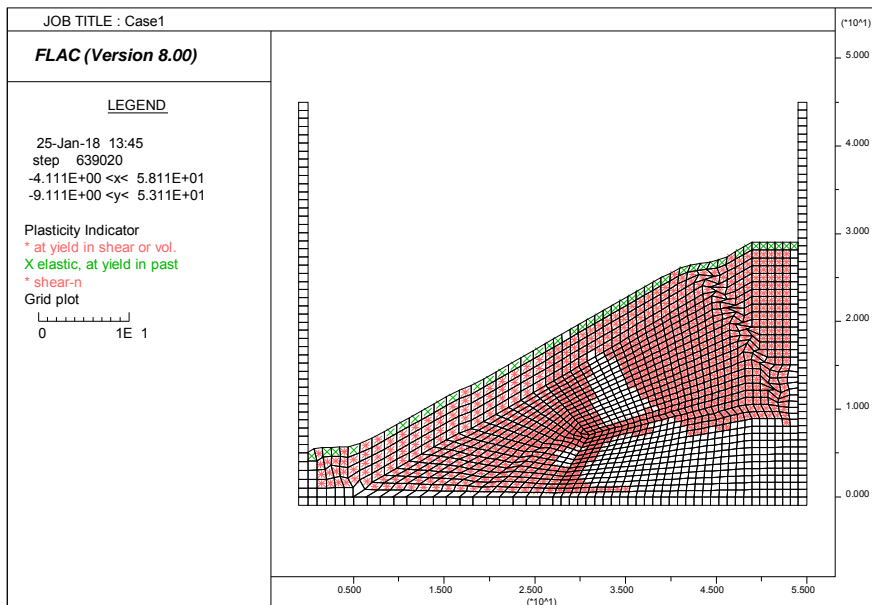


図 2-83 地盤の塑性状況（ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度）

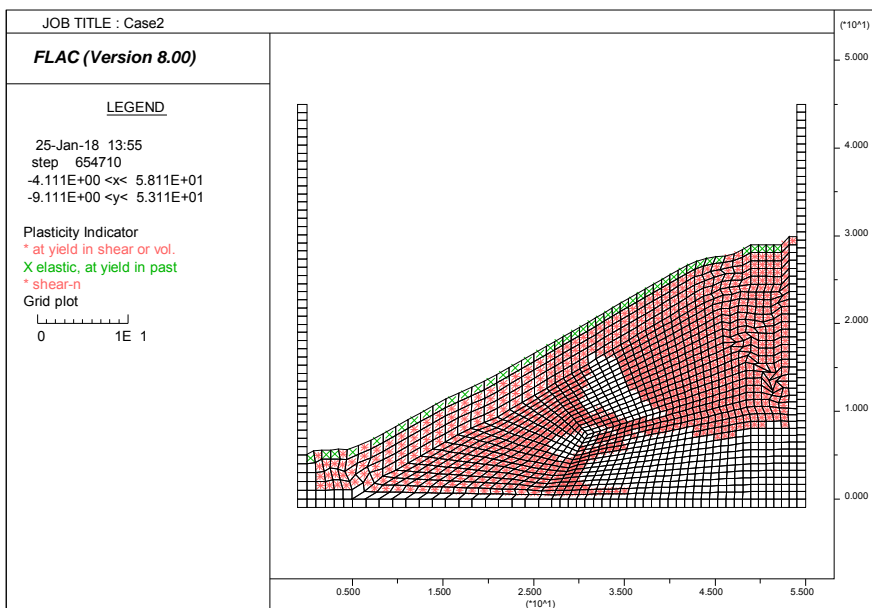


図 2-84 地盤の塑性状況（ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度）

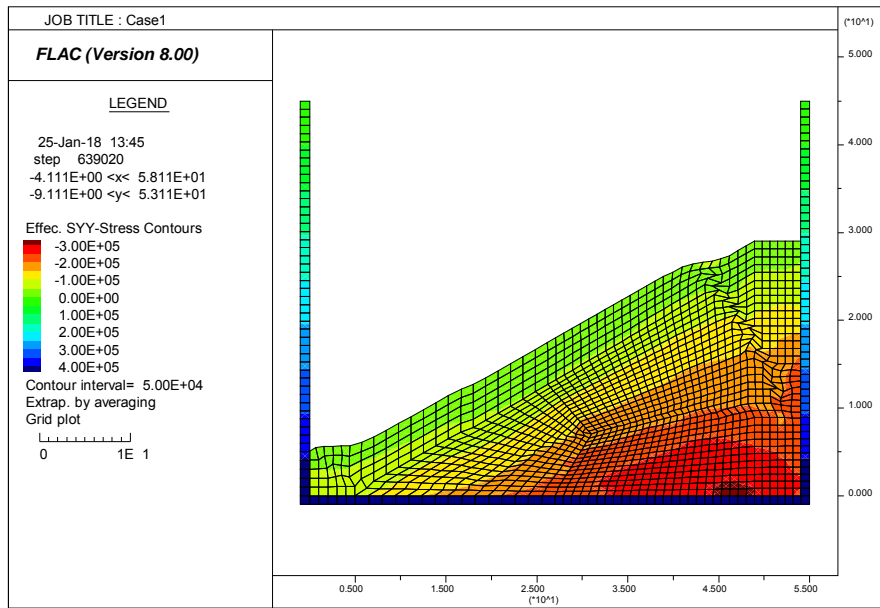


図 2-85 有効鉛直応力の分布（ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度）

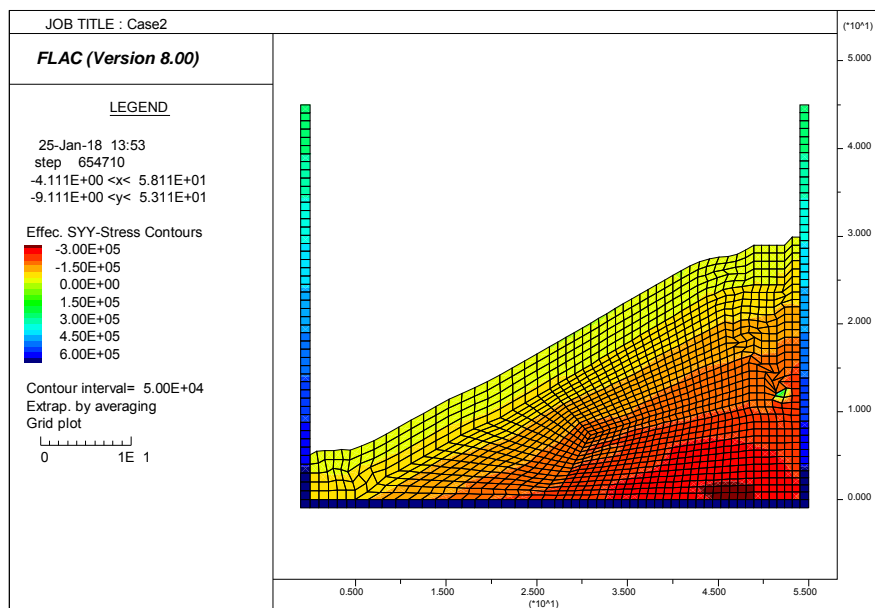


図 2-86 有効鉛直応力の分布（ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度）

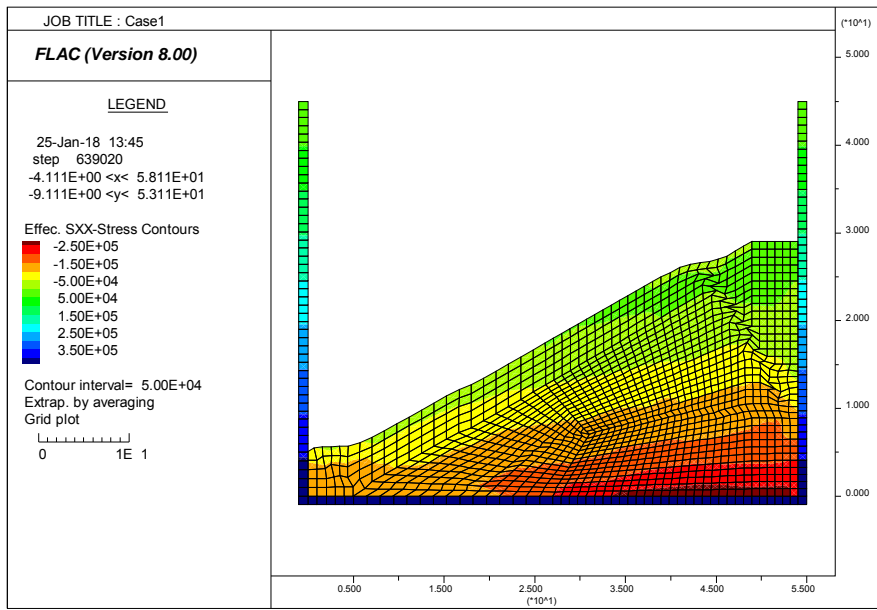


図 2-87 有効水平応力の分布（ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度）

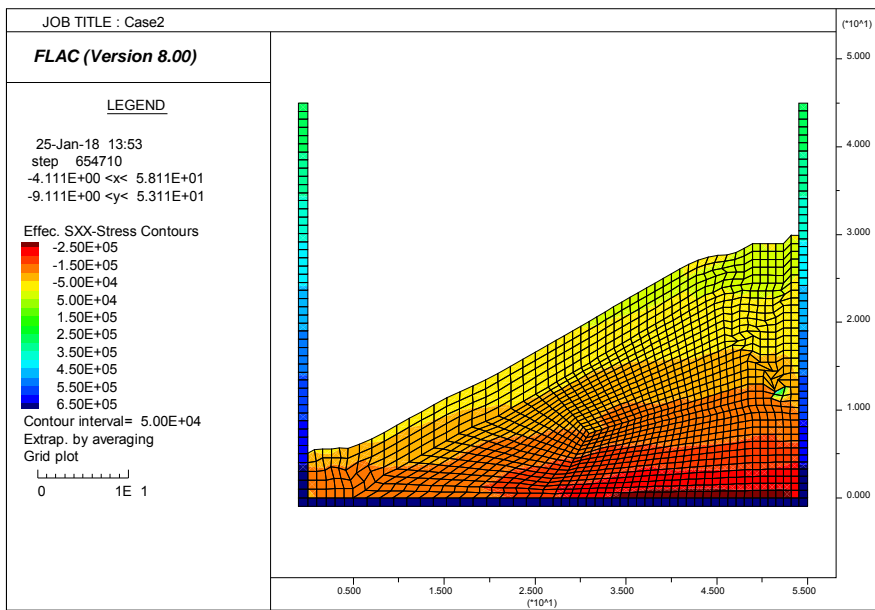


図 2-88 有効水平応力の分布（ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度）

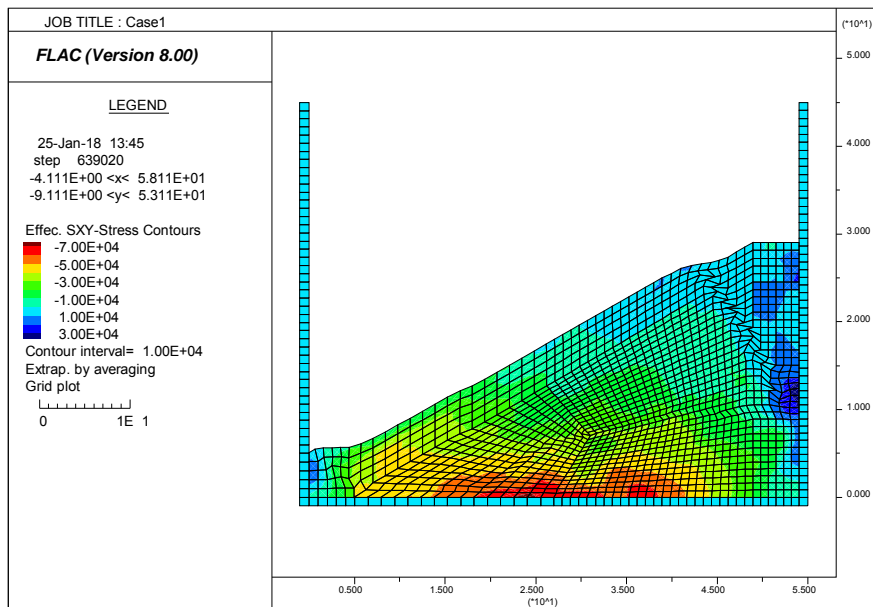


図 2-89 せん断応力の分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)

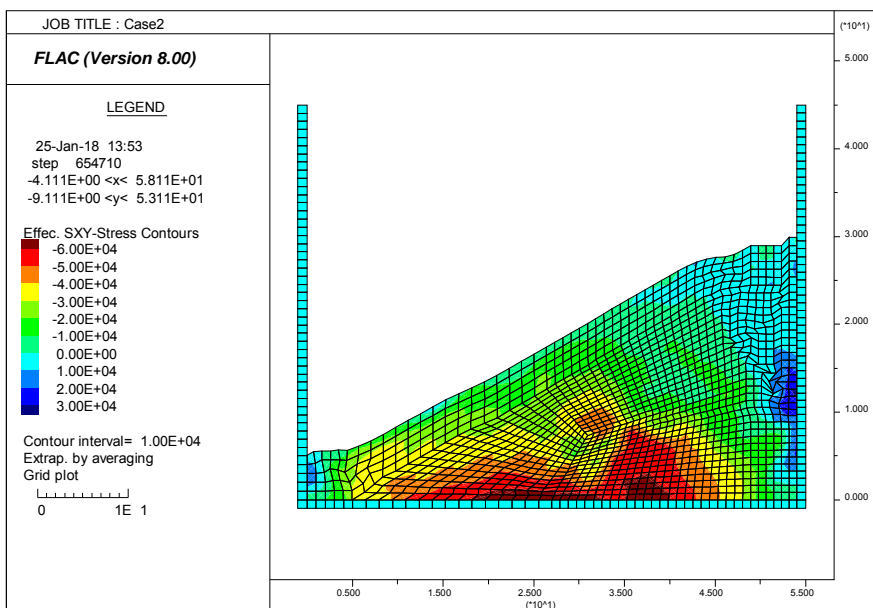


図 2-90 せん断応力の分布 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)

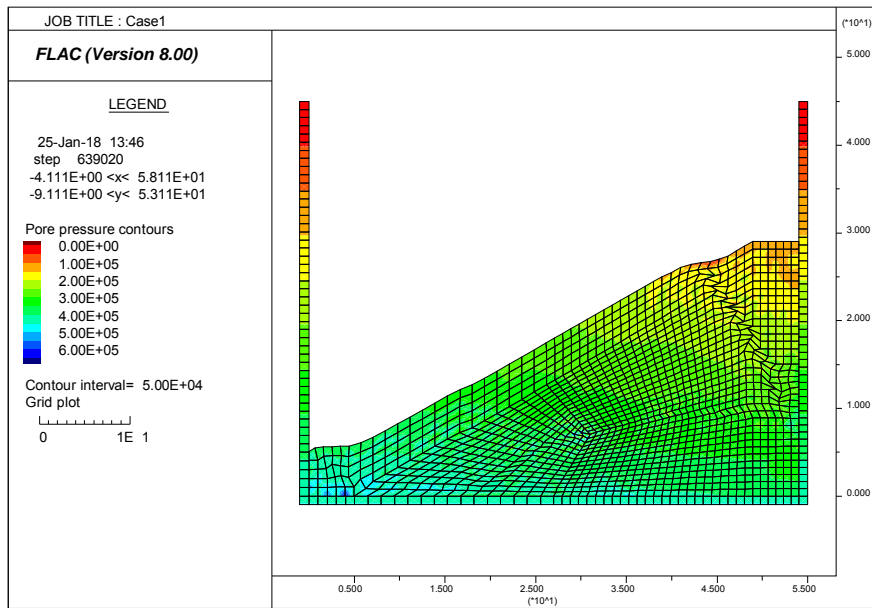


図 2-91 間隙水圧の分布 (ケース 5 水深 45m 傾斜角 7 度)

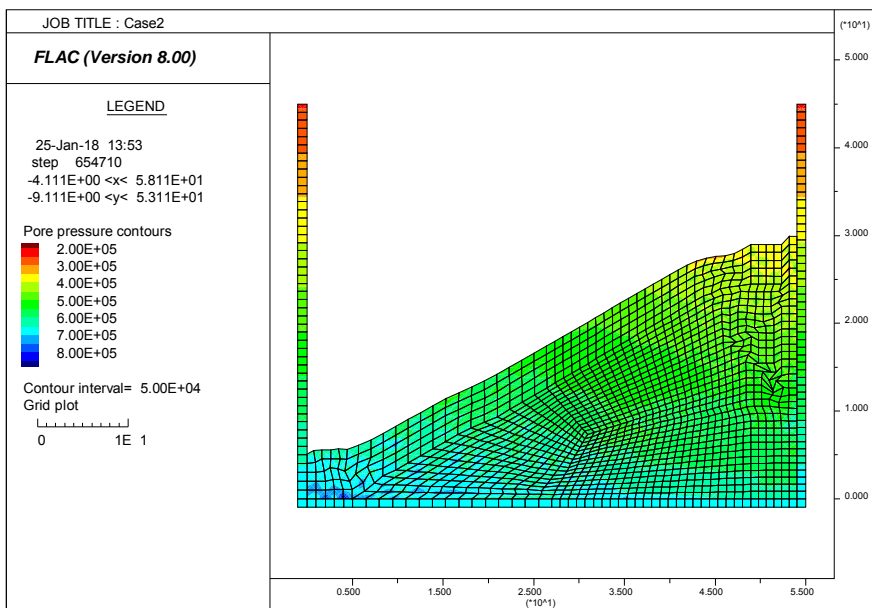


図 2-92 間隙水圧の分布 (ケース 6 水深 70m 傾斜角 7 度)

2.3 切り欠き有り斜面模型の再現解析

2.3.1 法肩位置の切り欠きのモデル化

法肩中央部に設けた切り欠き部は図 2-93 に示すように長さ 4.5m のインターフェース要素でモデル化した。インターフェース要素に用いたパラメータを表 2-15 に示す。自由に滑りおよび剥離が生じるようにモデル化した。

表 2-15 インターフェース要素（切り欠き部）のパラメータ

k_s (N/m^2)	k_n (N/m^2)	せん断抵抗角 (degree)
1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10

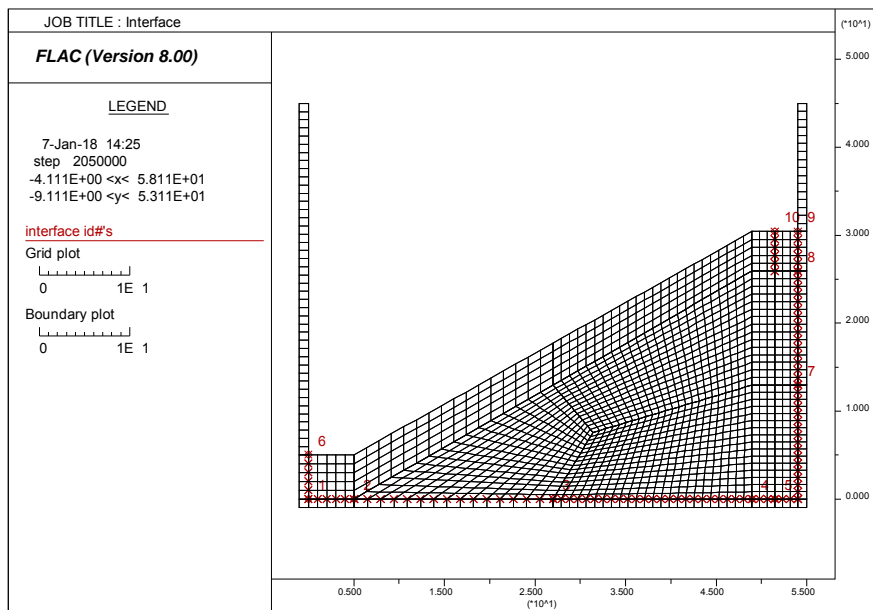


図 2-93 解析モデル（切り欠き有り）

2.3.2 モール-クーロンモデルによる解析

解析ケースを表 2-16 に示す。水深は 45m と 70m の 2 ケースを行った。地盤の底面及び側面にはそれぞれインターフェース要素を用いた。インターフェース要素のパラメータを表 2-18 に示す。なお、引張強度 T を設定しなかったため、初期値（ゼロ）である

ため、土槽側面では剥離を再現できるようになっている。なお、地盤の湿潤（飽和）密度は一律 $\rho_t=1770\text{kg/m}^3$ とした。解析方法は以下の通りである。まず、地盤の自重および水圧を作用させた条件で弾性解析により初期応力解析を行った。その後、表 2-17 に示す強度定数を与えた解析を行った。傾斜のかけ方は前述の方法と同じである。なおケース 7、ケース 8 とともに水深の違いによらず 4 度ですべり破壊が生じた。以降で、各ケースの状況を比較しながら以下で説明する。

図 2-94 と図 2-95 にせん断ひずみ分布を示す。ケース 1 の変位ベクトル図を図 2-96 に示す。比較のために遠心実験で得られた結果を図 2-97 に示す。崩壊した時の傾斜角は解析が小さいものの、破壊モードは概ね整合していることがわかる。破壊した傾斜角が異なる原因としては、地盤が過圧密状態であり、設定したよりも大きい強度が発現されていた可能性があること、実験では傾斜角を連続して変化させる条件 ($0.3^\circ/\text{min}$) であるのに対して、解析は静的解析であることが考えられる。ケース 2 の変位ベクトル図を図 2-98 に示す。比較のために遠心実験で得られた結果を図 2-99 に示す。実験と解析では崩壊した時の傾斜角および破壊モードも異なっていることがわかる。図 2-100 と図 2-101 に地盤の塑性状況を示す。

図 2-102 と図 2-103 に有効鉛直応力分布を示す。図 2-104 と図 2-105 に有効水平応力分布を示す。図 2-106 と図 2-107 にせん断応力分布を示す。図 2-108 と図 2-109 に間隙水圧分布を示す。

表 2-16 解析ケース

	水深 (m)	解析モデル	法肩クラック
Case7	45	モール-クーロン	有り
Case8	70	モール-クーロン	有り

表 2-17 強度定数（再掲）

	c (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)
斜面	10	25
法肩	10	25

表 2-18 土槽境界部のインターフェース要素のパラメータ (再掲)

	k_s (N/m^2)	k_n (N/m^2)	せん断抵抗角 (degree)
底面	1.0E+20	1.0E+20	20
側面	6.2E+06	6.2E+06	20

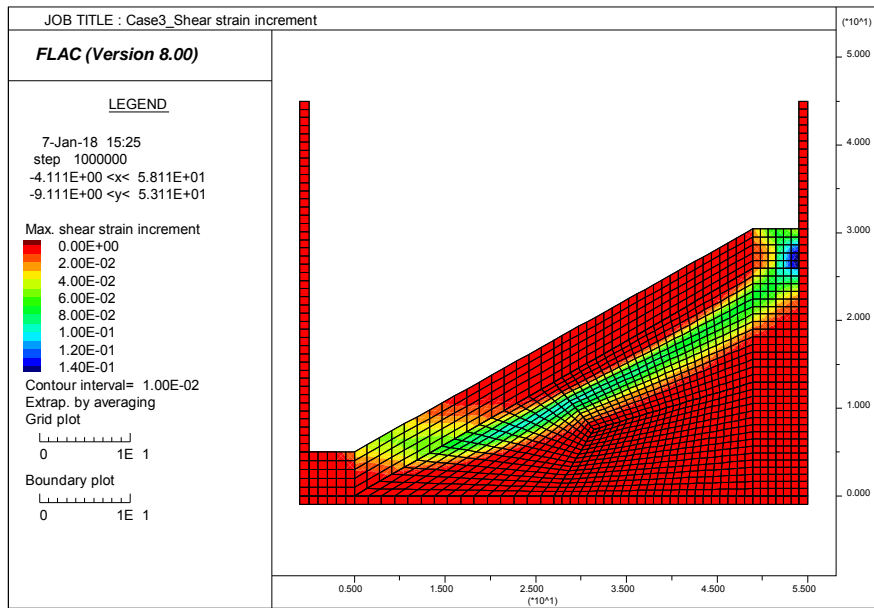


図 2-94 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)

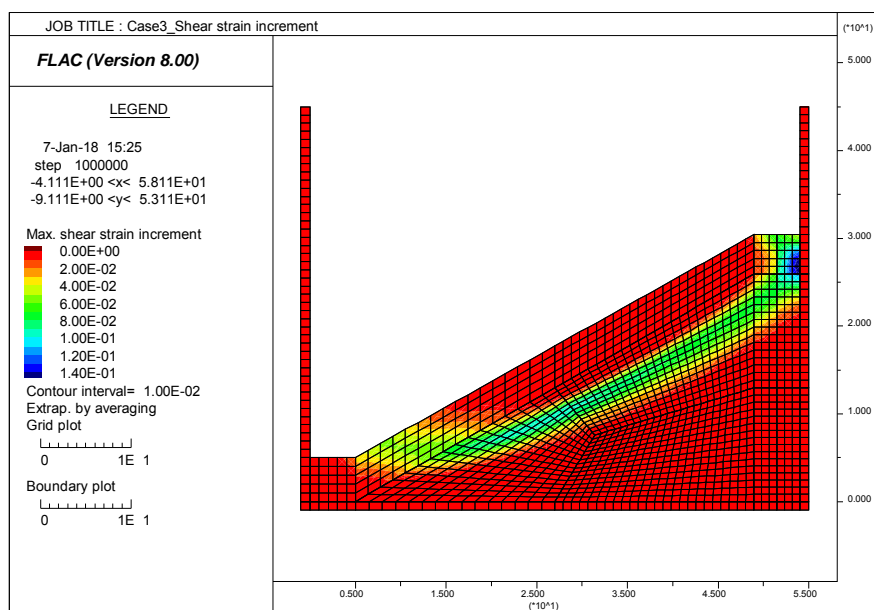


図 2-95 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)

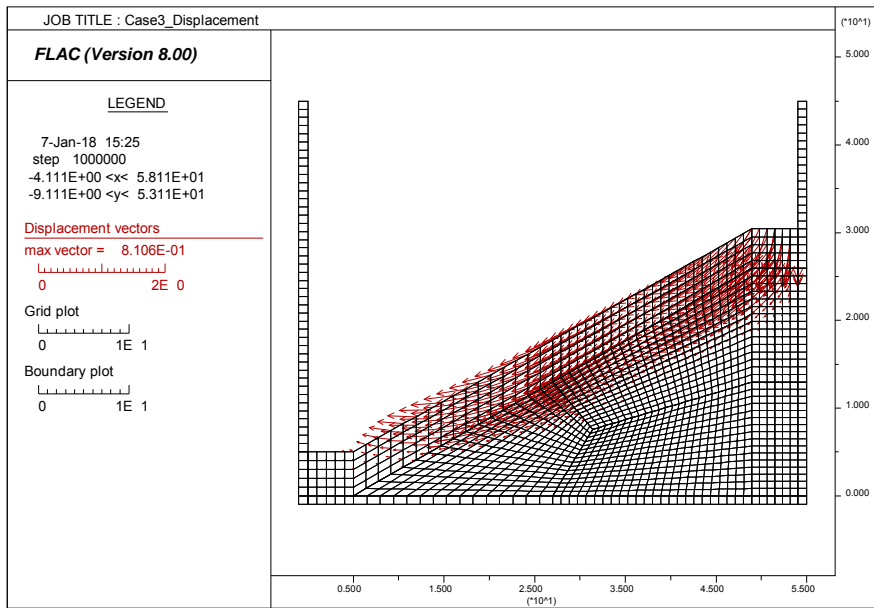


図 2-96 変位ベクトル分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)

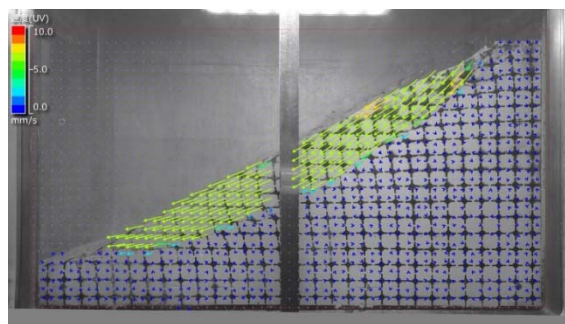


図 2-97 変位ベクトル分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 10.6~10.8 度)

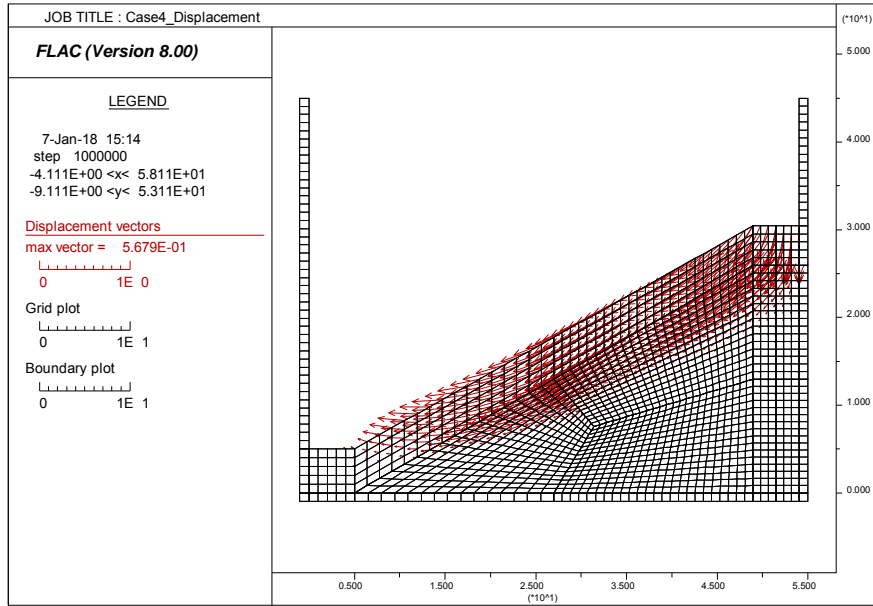


図 2-98 変位ベクトル分布（ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度）

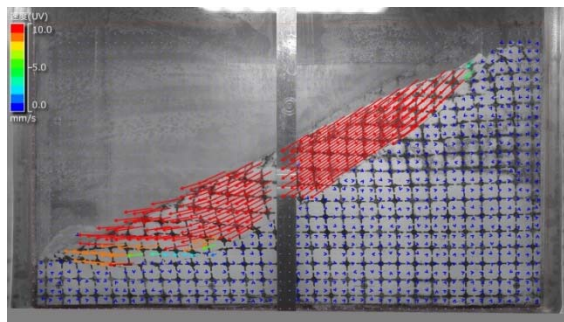


図 2-99 実験の変位ベクトル分布（ケース 4 水深 70m 傾斜角 13.4.1~13.6 度）

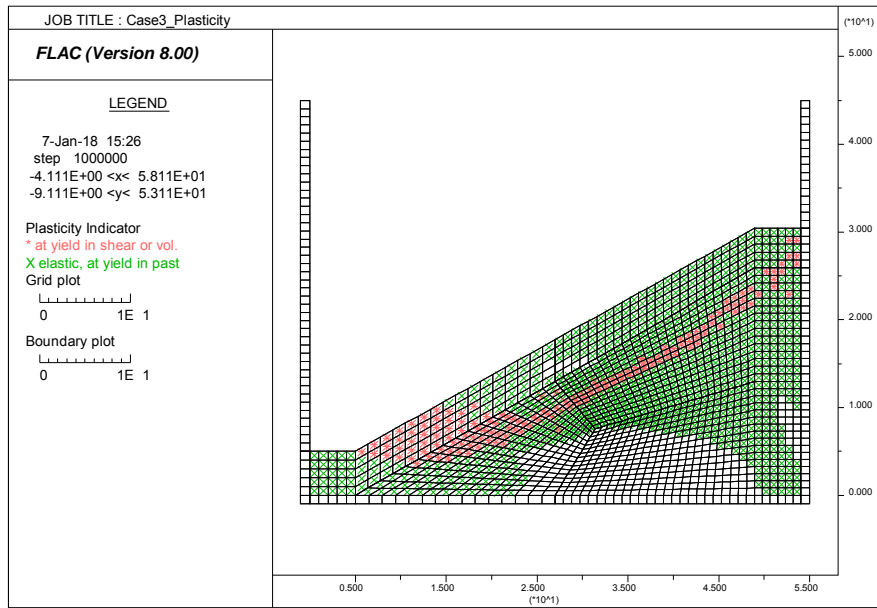


図 2-100 地盤の塑性状況（ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度）

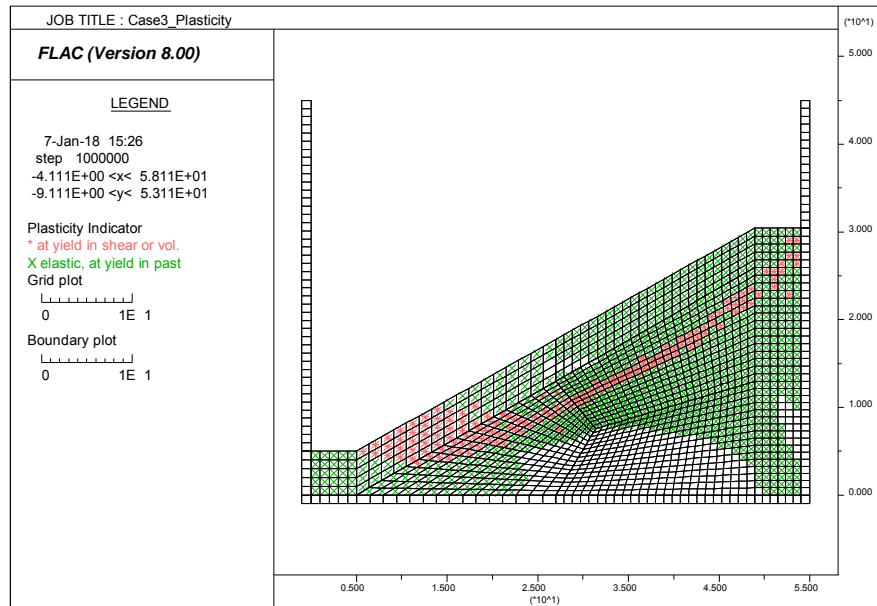


図 2-101 地盤の塑性状況（ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度）

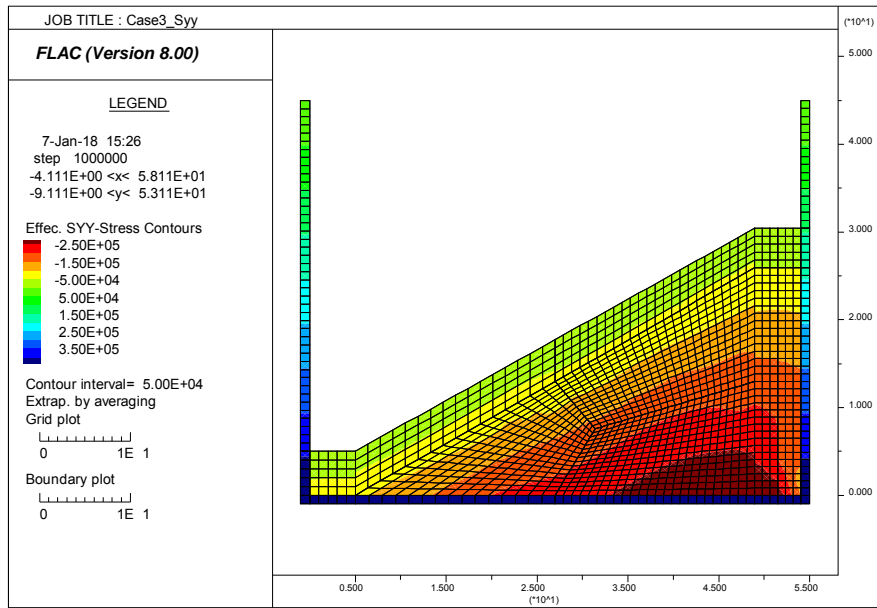


図 2-102 有効鉛直応力の分布 (ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度)

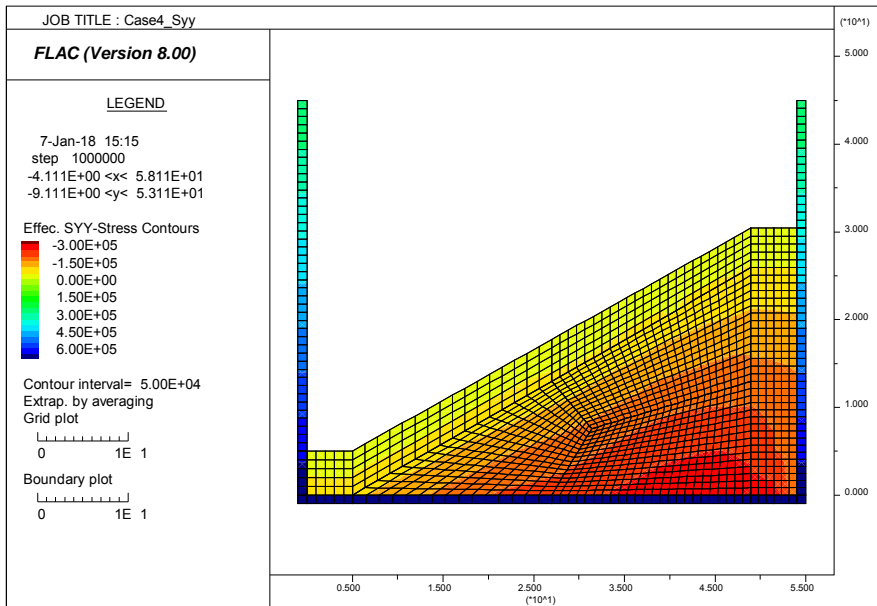


図 2-103 有効鉛直応力の分布 (ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度)

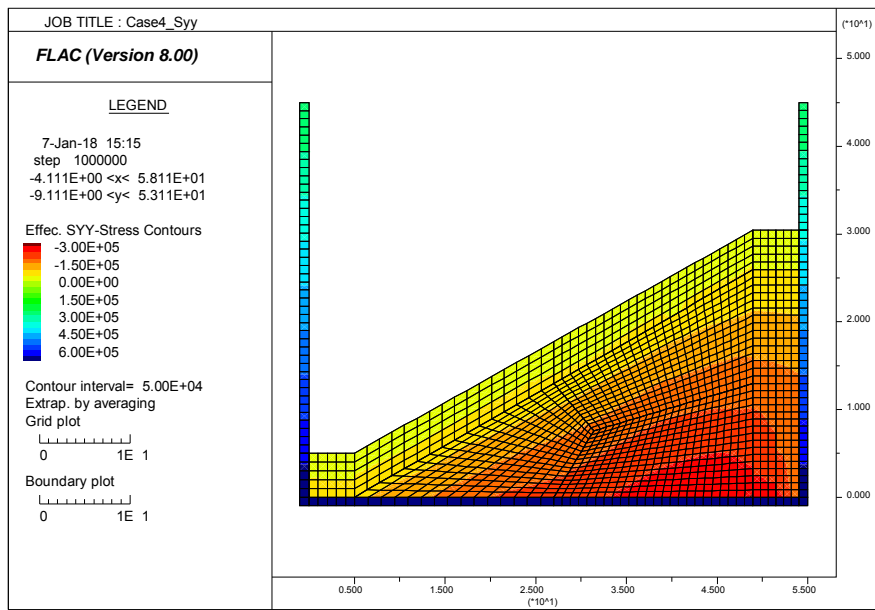


図 2-104 有効水平応力の分布（ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度）

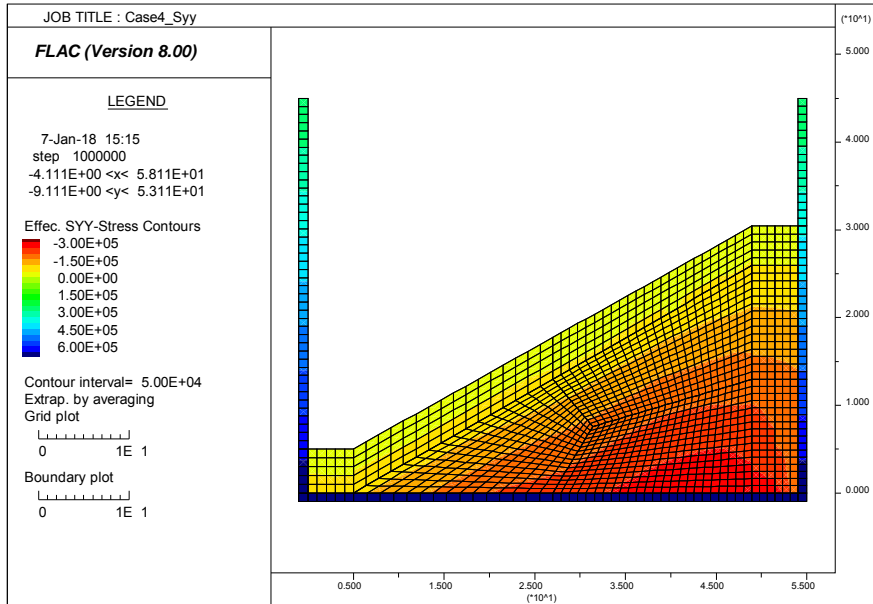


図 2-105 有効水平応力の分布（ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度）

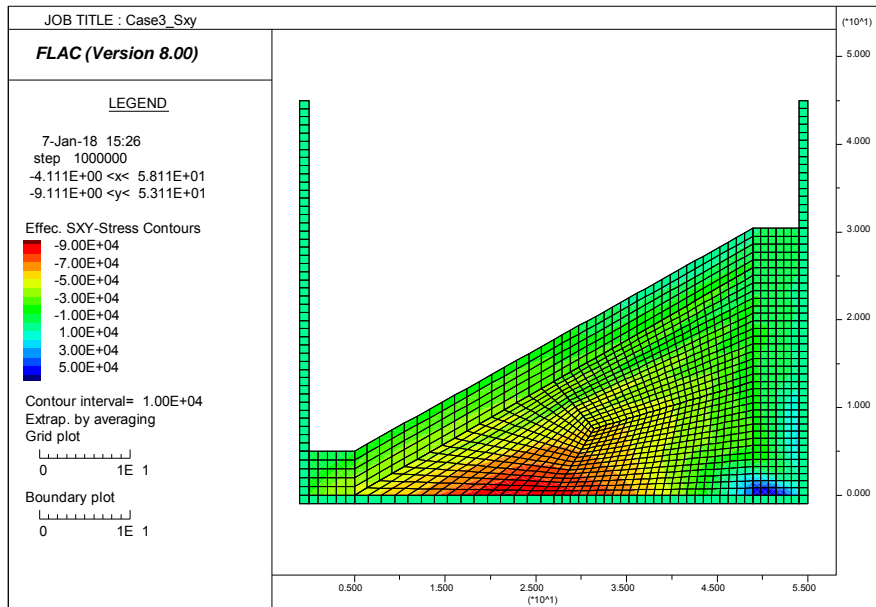


図 2-106 せん断応力の分布（ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度）

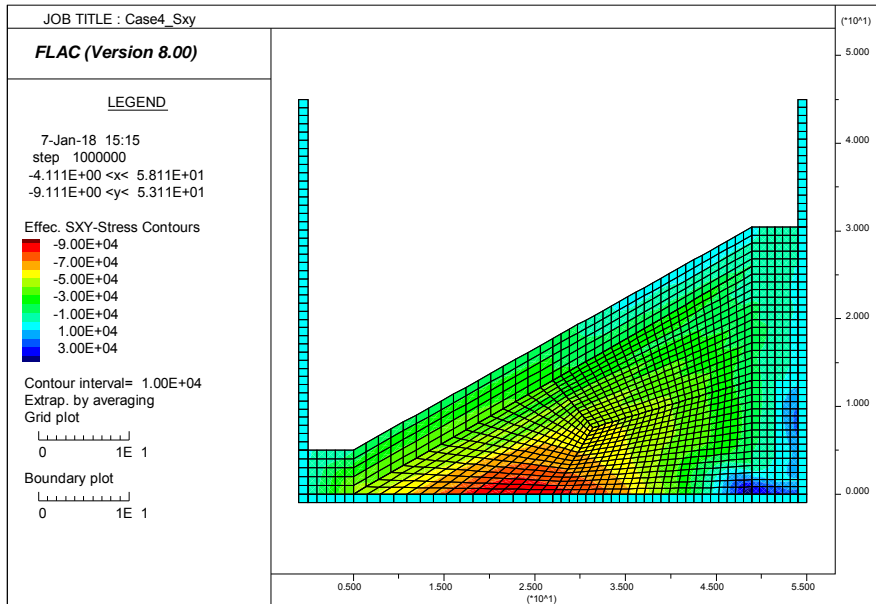


図 2-107 せん断応力の分布（ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度）

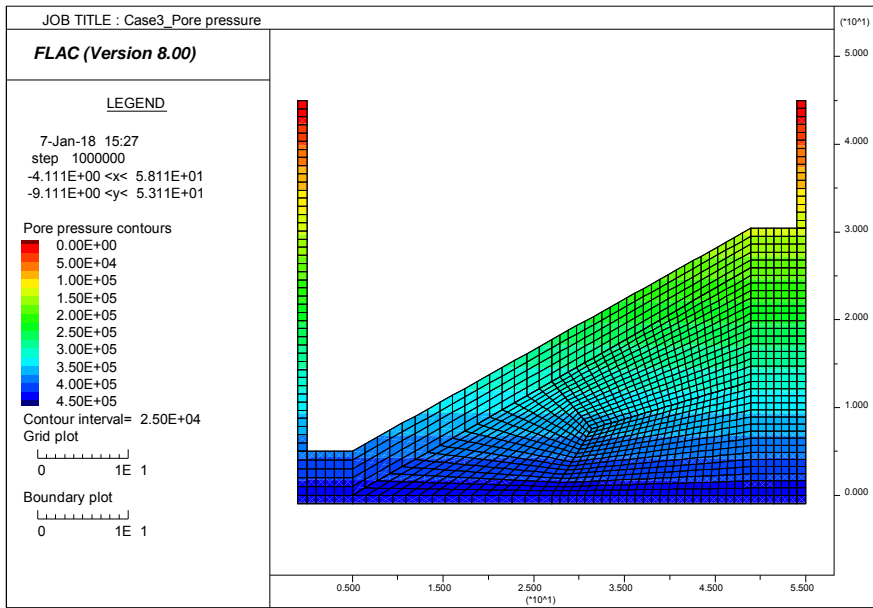


図 2-108 間隙水圧の分布（ケース 7 水深 45m 傾斜角 4 度）

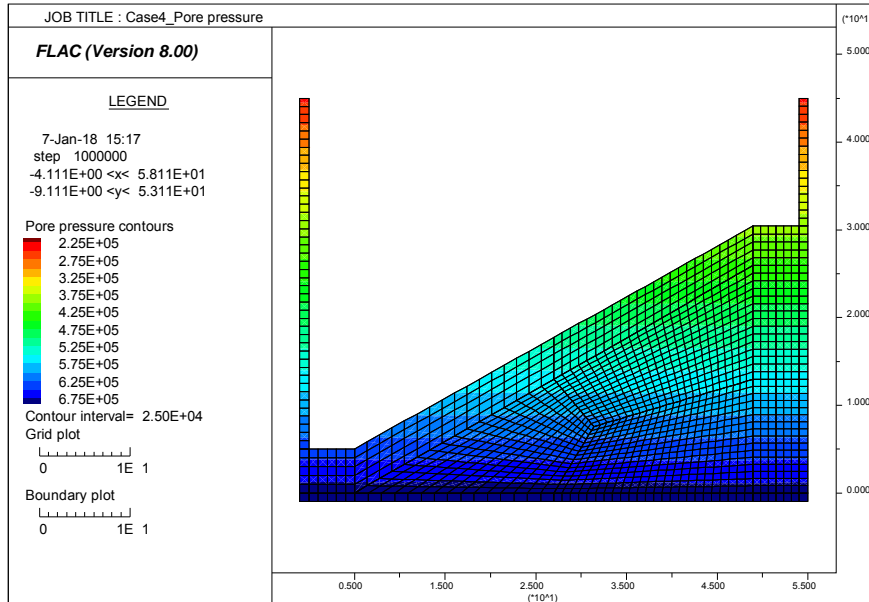


図 2-109 間隙水圧の分布（ケース 8 水深 70m 傾斜角 4 度）

2.3.3 修正カムクレイモデルによる解析

解析で用いたパラメータを表 2-19 に示す。これ以外にも先行圧密による降伏状態を規定するパラメータ $m_p c$ がある。これは、模型地盤作製過程に配慮して、斜面整形前の水平地盤の初期有効応力を別途計算して各要素に入力した。 $m_p c$ の分布は後に示す結果において示す。その他の条件（水压载荷、ジョイント要素の、クラックの与え方）は 2.3.2 と同じである。解析ケースを表 2-20 に示す。

以下に解析結果を示す。傾斜角 4 度において斜面が滑った。ここでは 4 度の結果を示す。

表 2-19 解析パラメータ

λ	κ	ν	M	p_1 (kPa)	ν_λ
0.13	0.019	0.30	0.9	1	2.8

表 2-20 解析ケース

	水深 (m)	解析モデル	法肩クラック
Case9	45	修正カムクレイ	有り
Case10	70	修正カムクレイ	有り

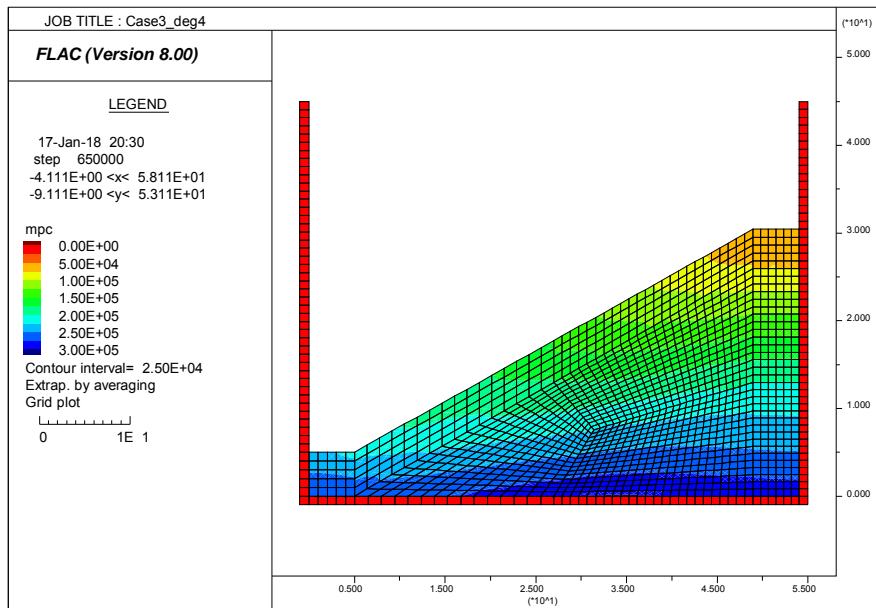


図 2-110 mpc 分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)

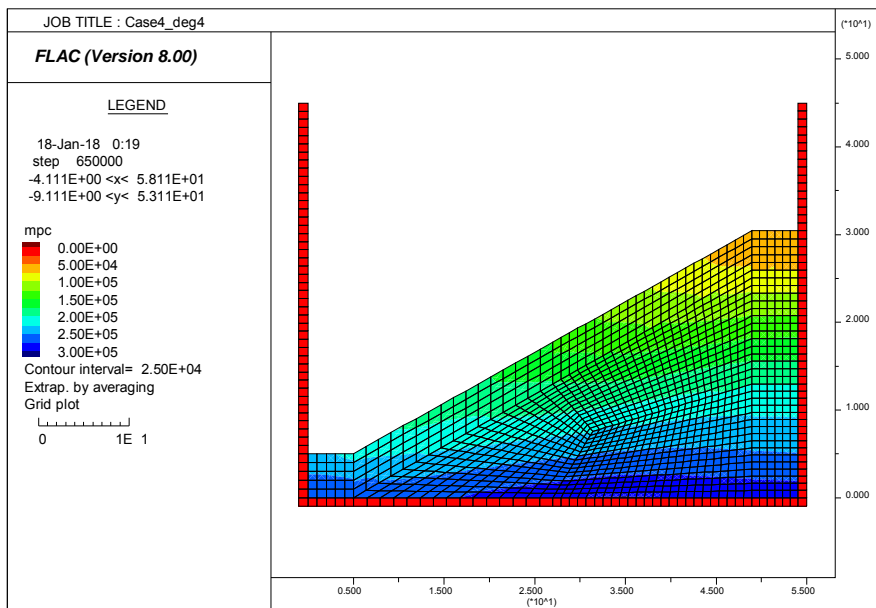


図 2-111 mpc 分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)

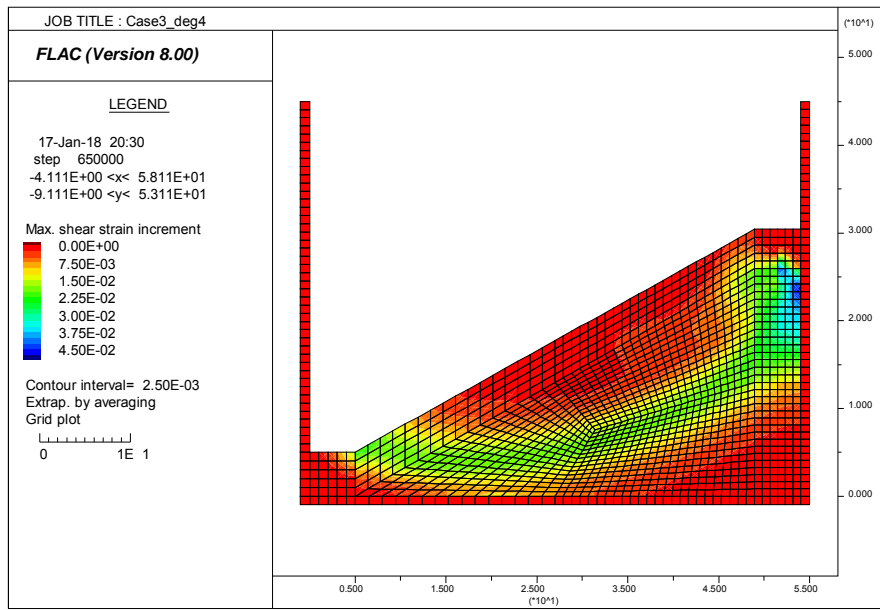


図 2-112 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)

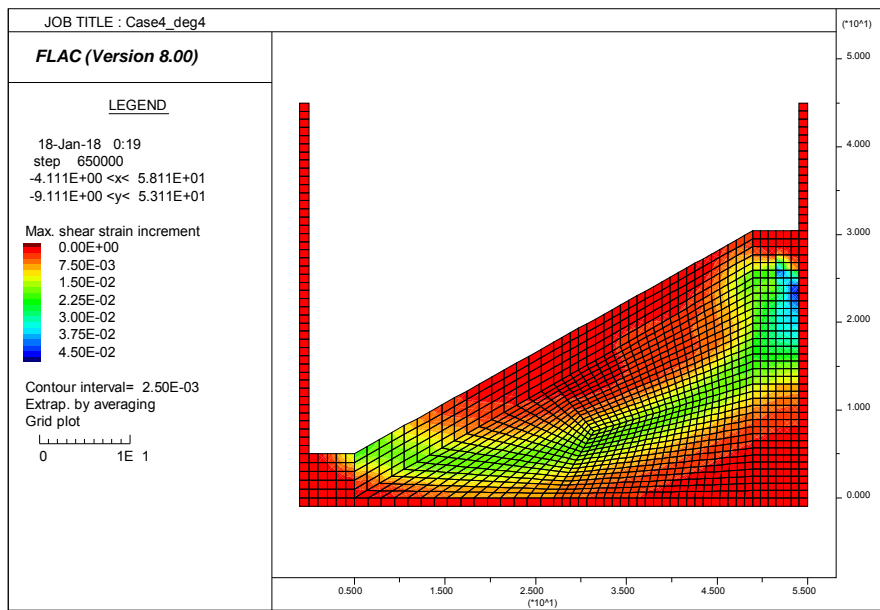


図 2-113 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)

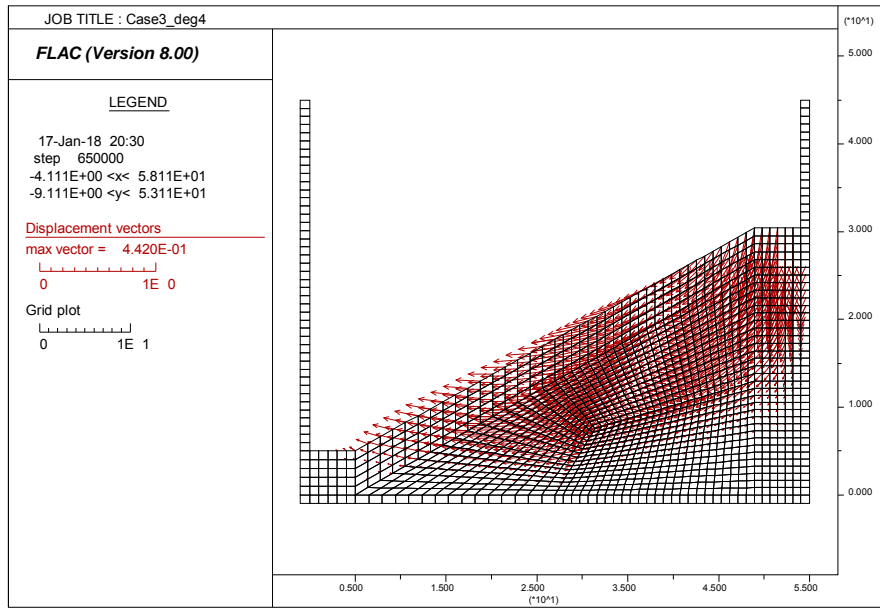


図 2-114 変位ベクトル分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)

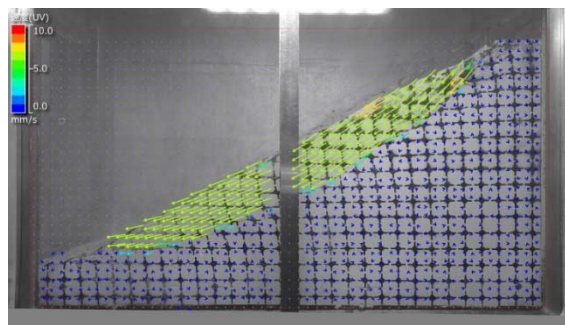


図 2-115 変位ベクトル分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 10.6~10.8 度)

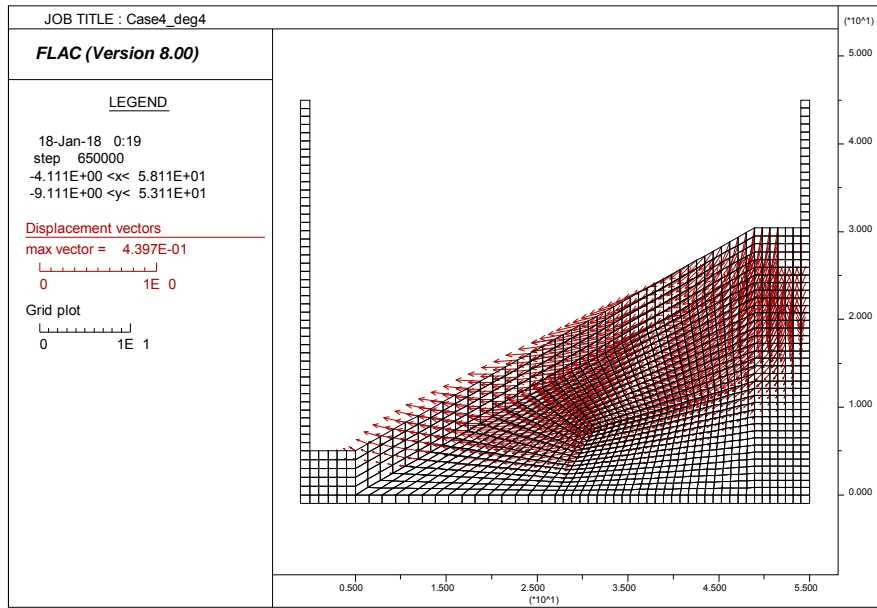


図 2-116 変位ベクトル分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)

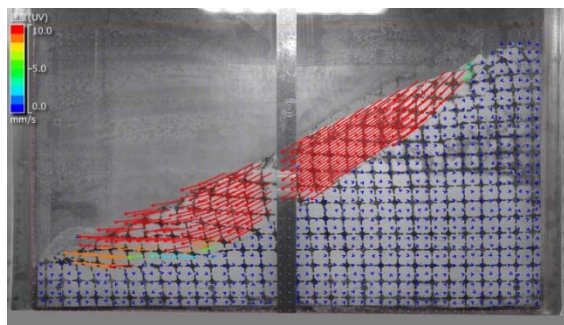


図 2-117 実験の変位ベクトル分布 (ケース 4 水深 70m 傾斜角 13.4.1~13.6 度)

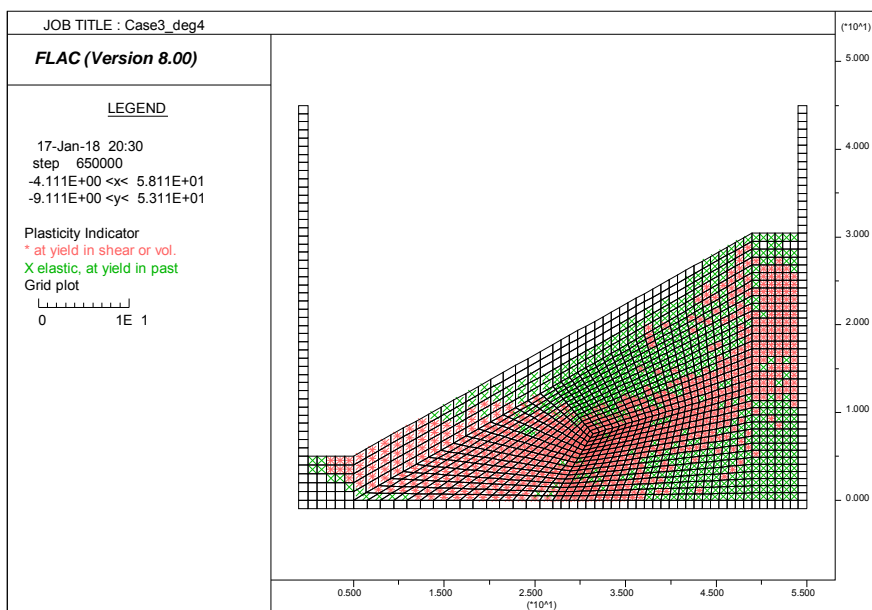


図 2-118 地盤の塑性状況（ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度）

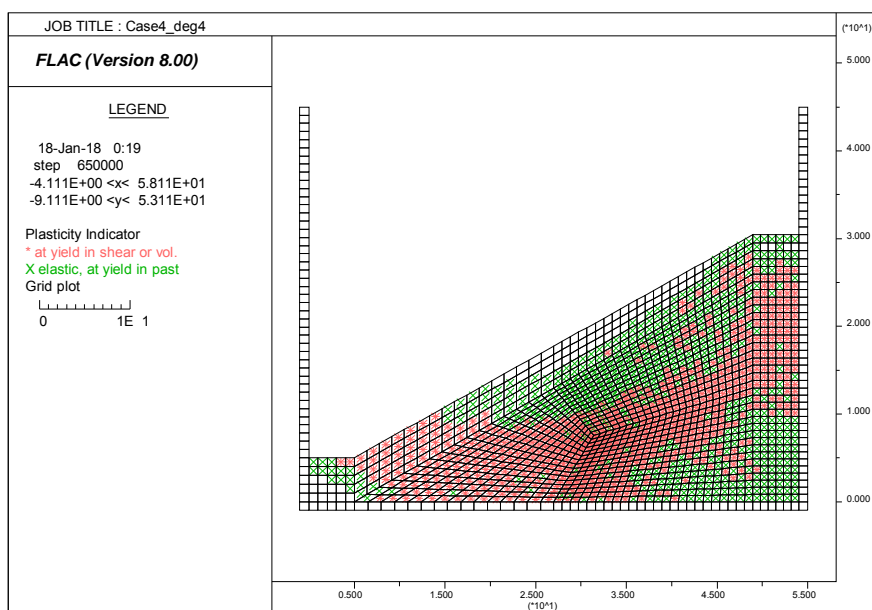


図 2-119 地盤の塑性状況（ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度）

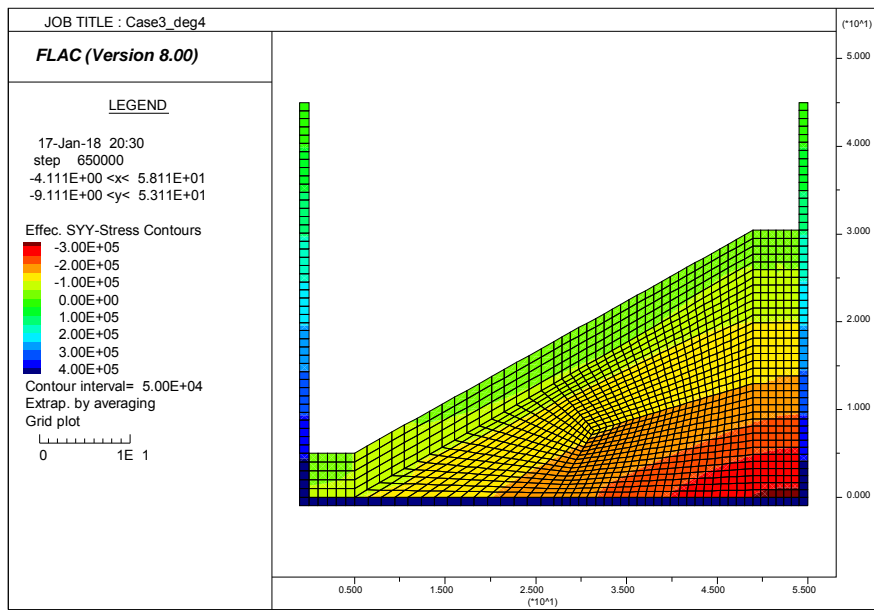


図 2-120 有効鉛直応力の分布（ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度）

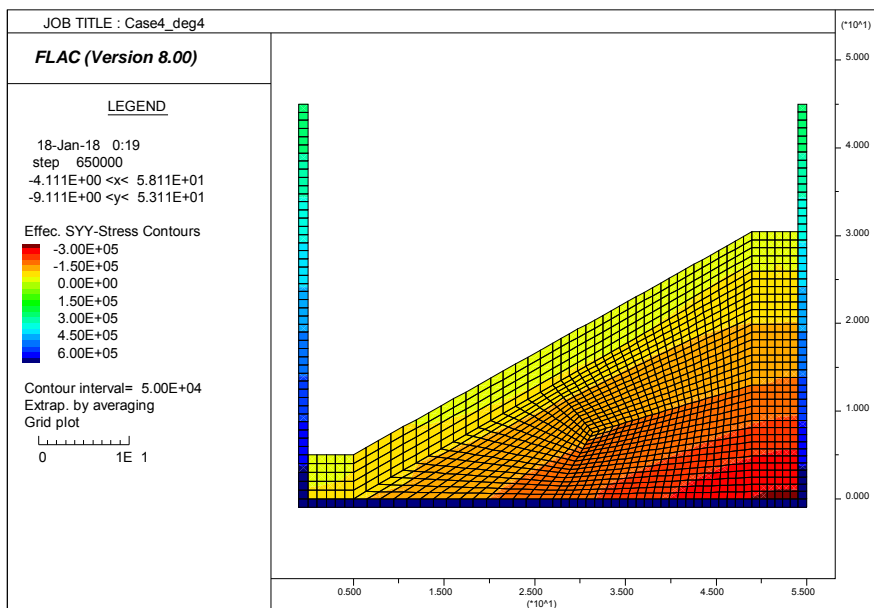


図 2-121 有効鉛直応力の分布（ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度）

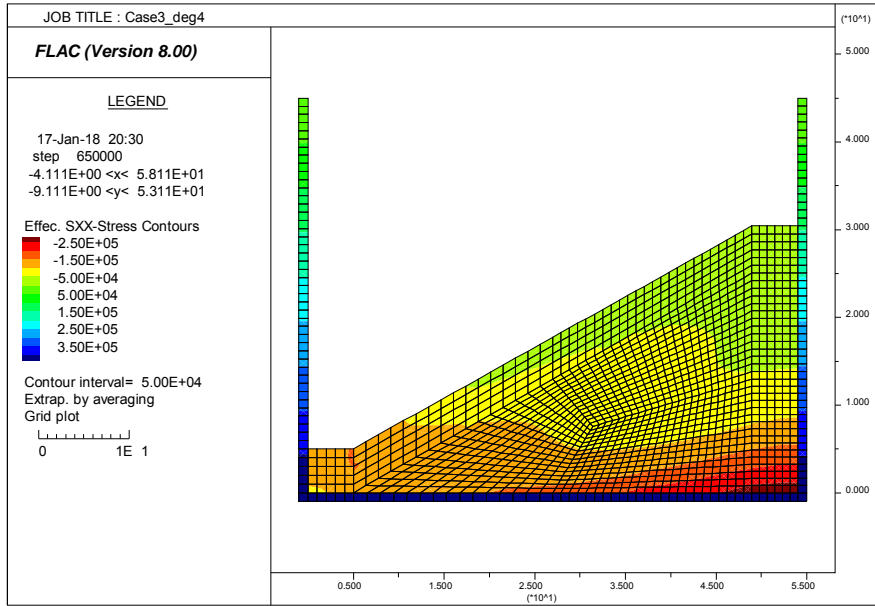


図 2-122 有効水平応力の分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)

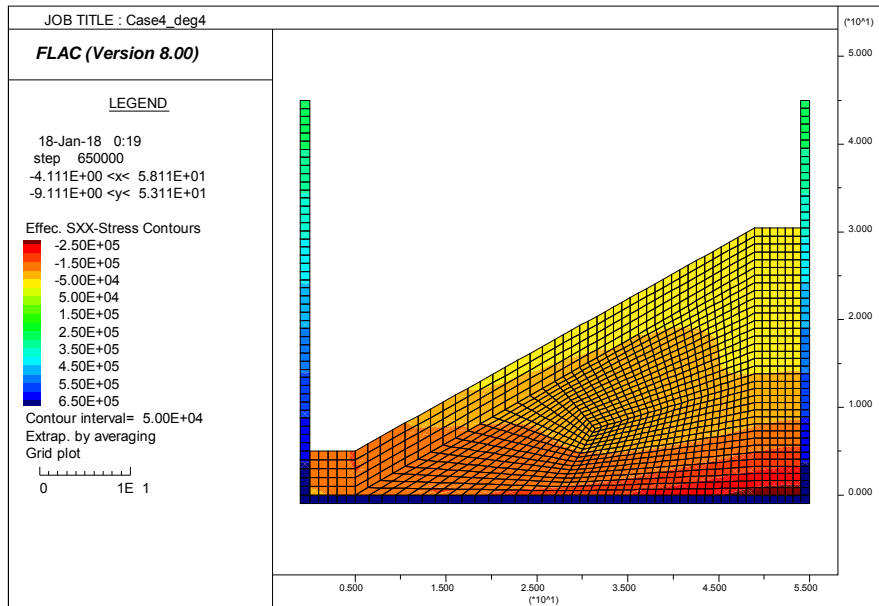


図 2-123 有効水平応力の分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)

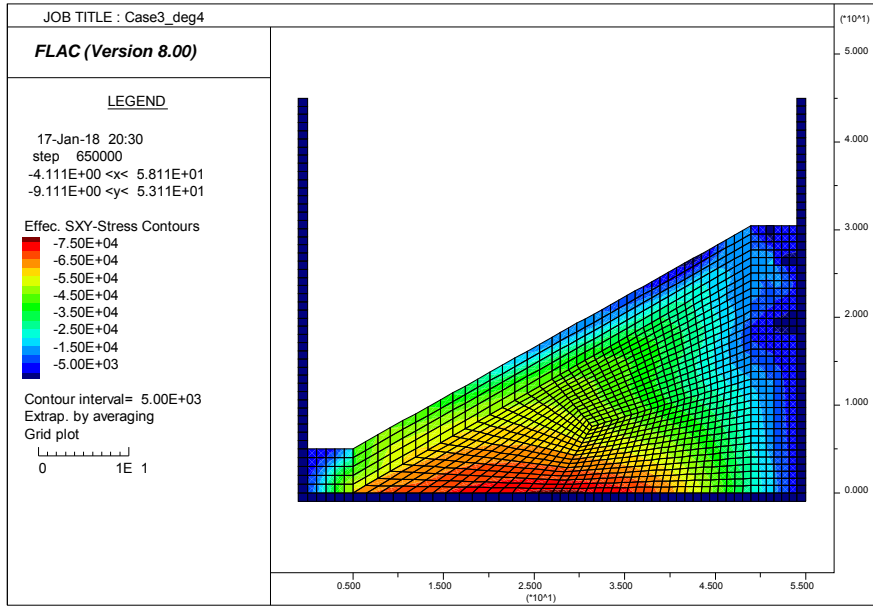


図 2-124 せん断応力の分布（ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度）

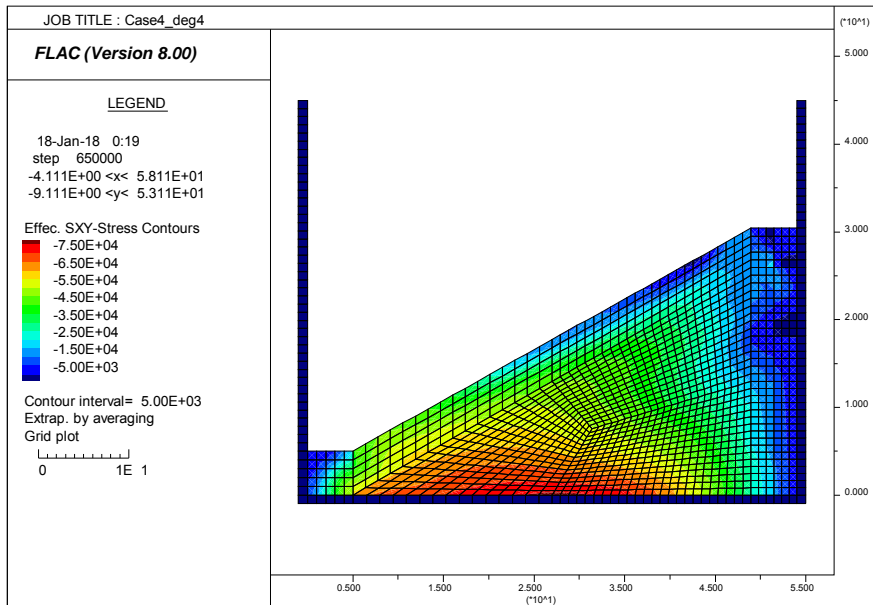


図 2-125 せん断応力の分布（ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度）

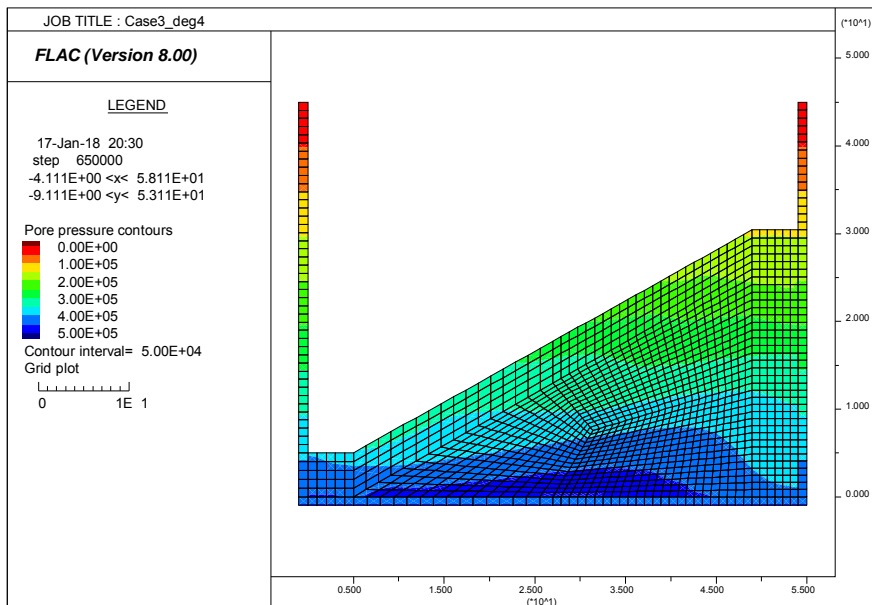


図 2-126 間隙水圧の分布 (ケース 9 水深 45m 傾斜角 4 度)

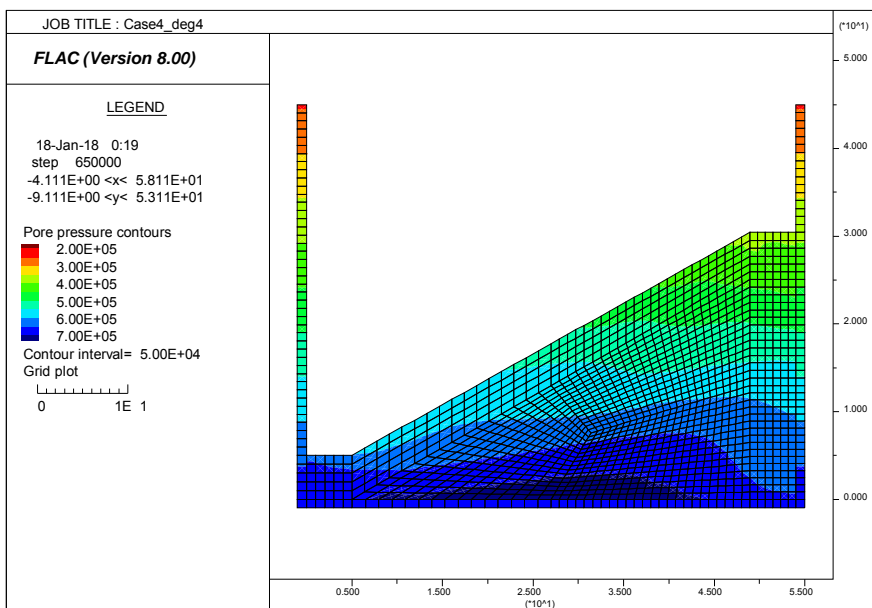


図 2-127 間隙水圧の分布 (ケース 10 水深 70m 傾斜角 4 度)

2.3.4 マルチスプリングモデルによる解析

解析で用いたパラメータを表 2-21 に示す。その他の条件（水圧载荷，ジョイント要素の，クラックの与え方）は 2.3.2 と同じである。解析ケースを表 2-22 に示す。

以下に解析結果を示す。いずれのケースにおいても傾斜角 6 度において法肩付近に変位が集中し計算が終了した。ここでは 6 度の結果を示す。

表 2-21 解析パラメータ

G_{\max} (MPa)	γ_r	ν	n	σ_{ref} (kPa)
39.69	0.0014	0.499	0.7	100

表 2-22 解析ケース

	水深 (m)	解析モデル	法肩クラック
Case11	45	マルチスプリング	有り
Case12	70	マルチスプリング	有り

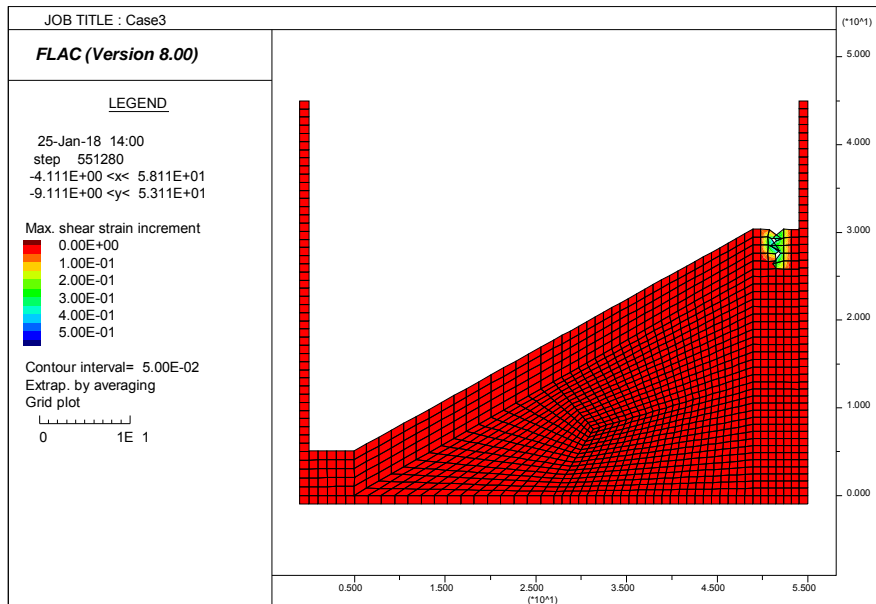


図 2-128 せん断ひずみ増分の分布（ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度）

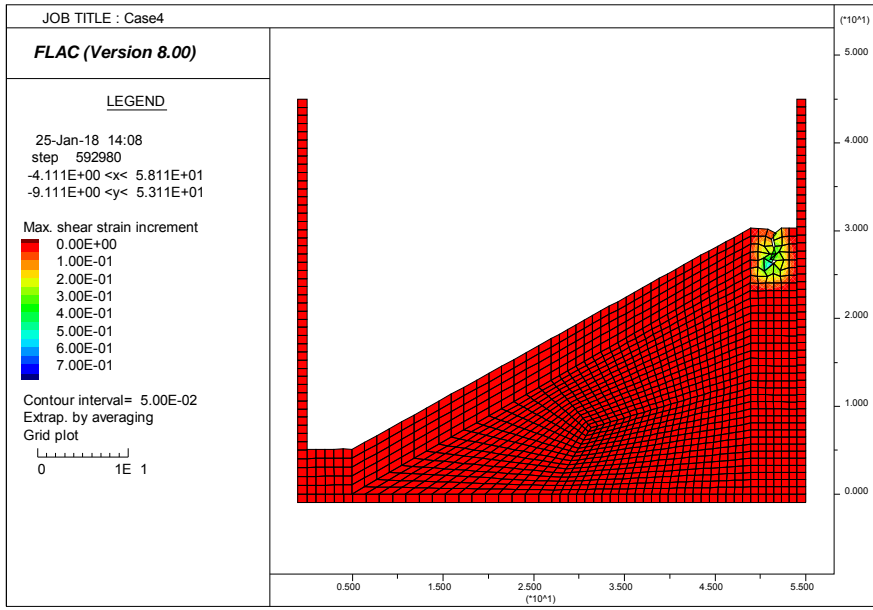


図 2-129 せん断ひずみ増分の分布 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)

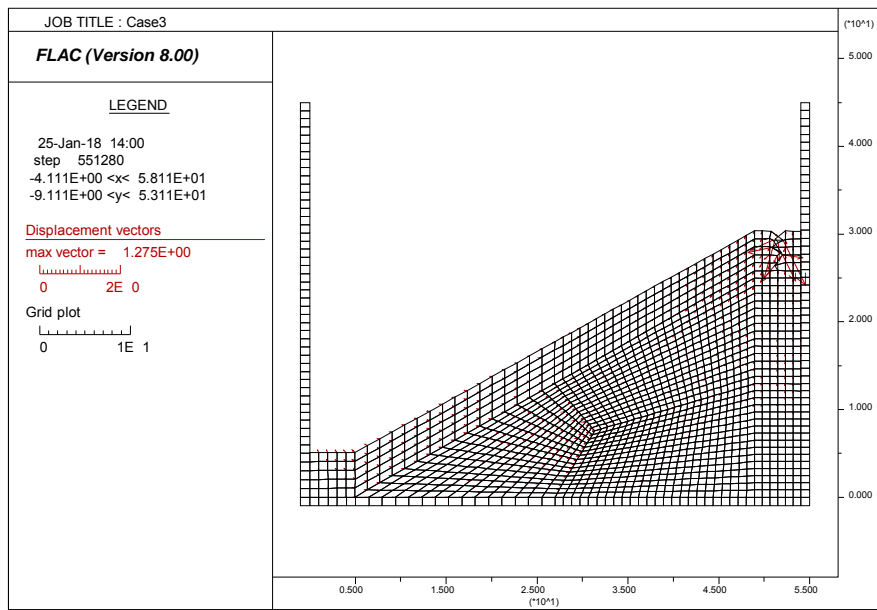


図 2-130 変位ベクトル分布 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)

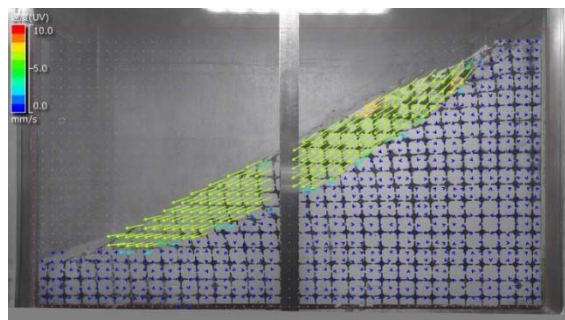


図 2-131 変位ベクトル分布 (ケース 3 水深 45m 傾斜角 10.6~10.8 度)

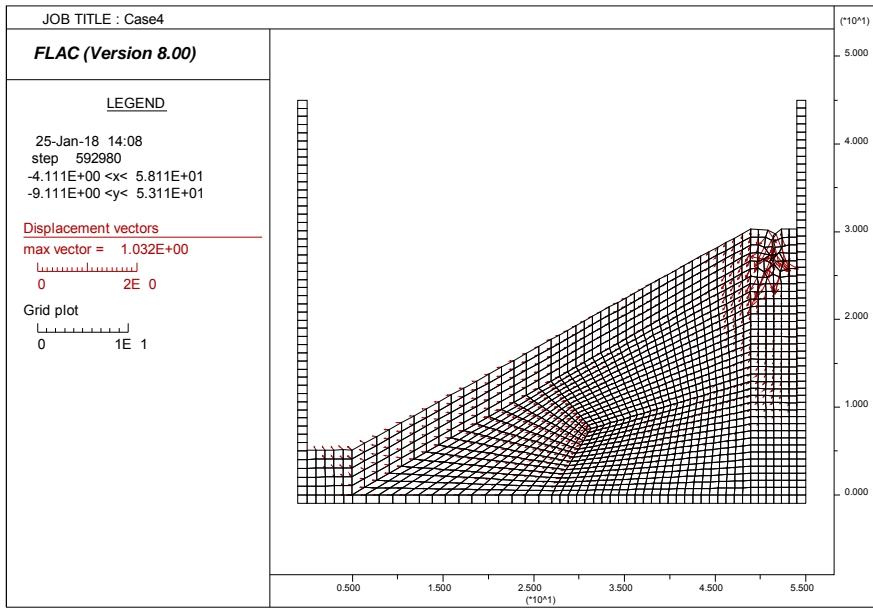


図 2-132 変位ベクトル分布（ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度）

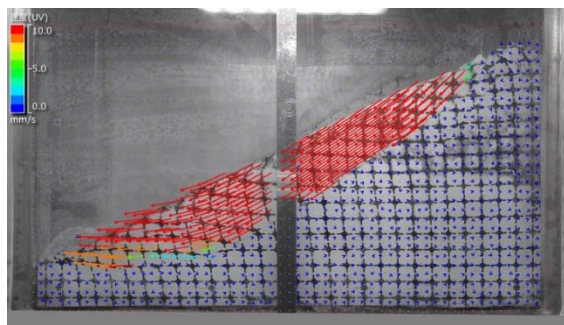


図 2-133 実験の変位ベクトル分布（ケース 4 水深 70m 傾斜角 13.4.1~13.6 度）

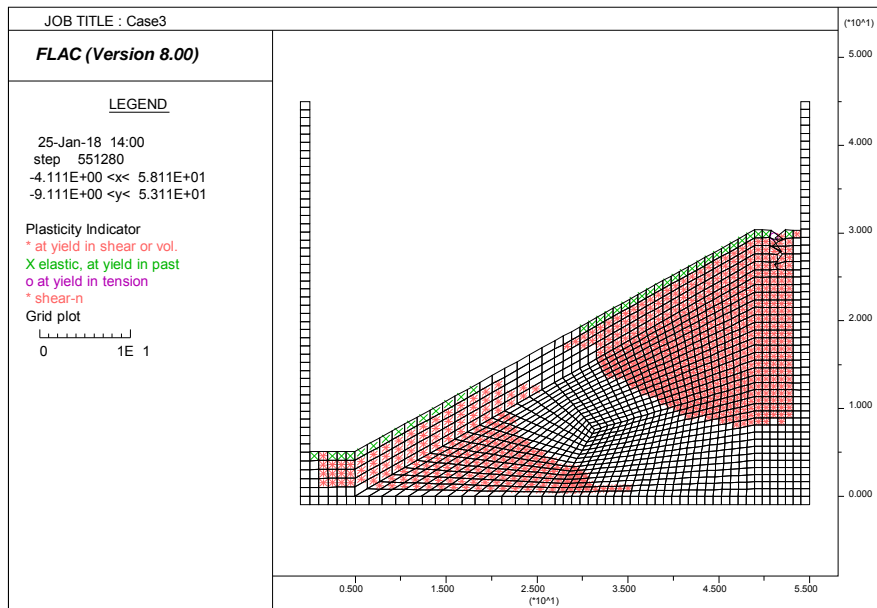


図 2-134 地盤の塑性状況（ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度）

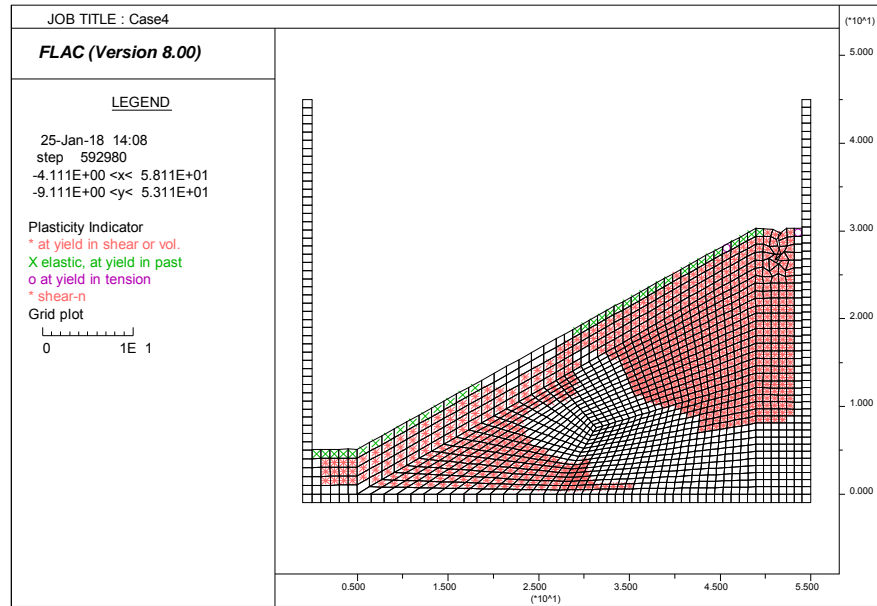


図 2-135 地盤の塑性状況（ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度）

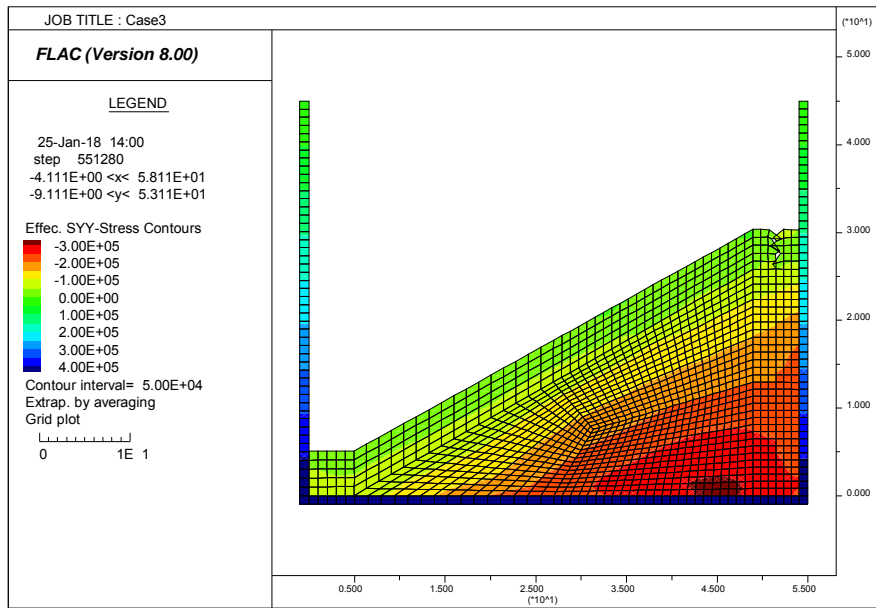


図 2-136 有効鉛直応力の分布（ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度）

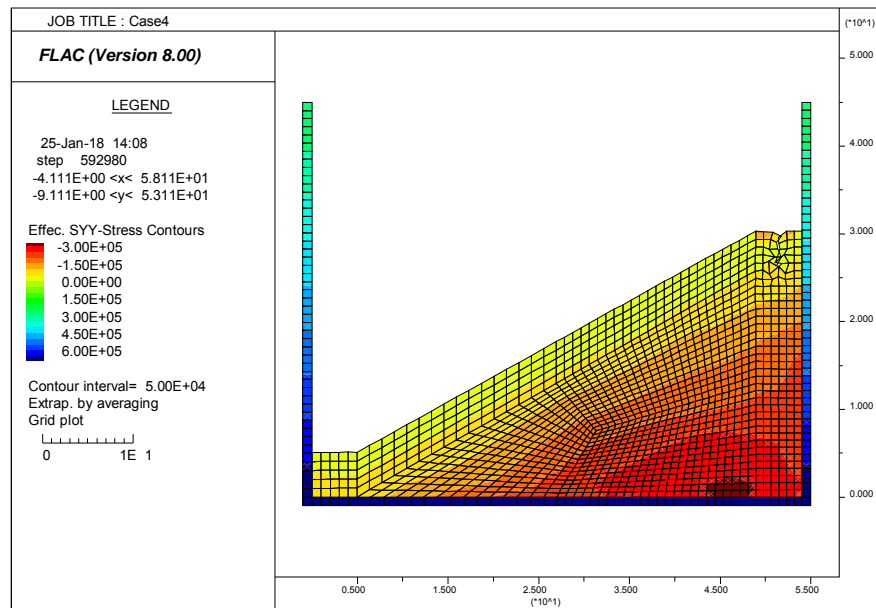


図 2-137 有効鉛直応力の分布（ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度）

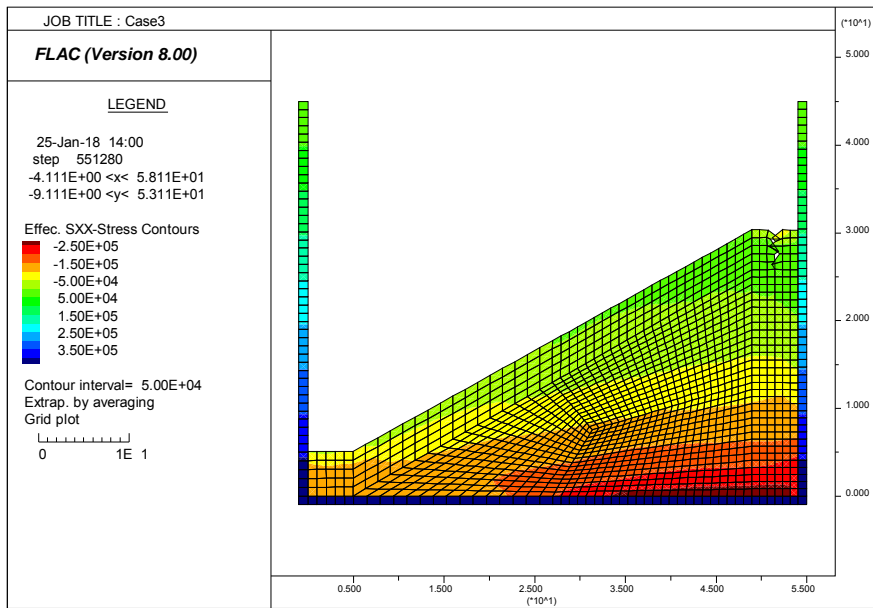


図 2-138 有効水平応力の分布（ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度）

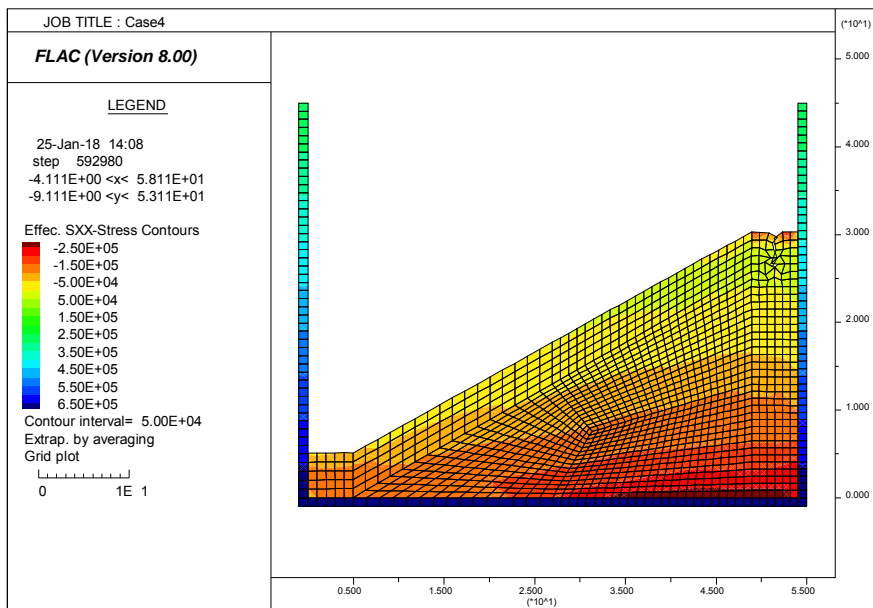


図 2-139 有効水平応力の分布（ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度）

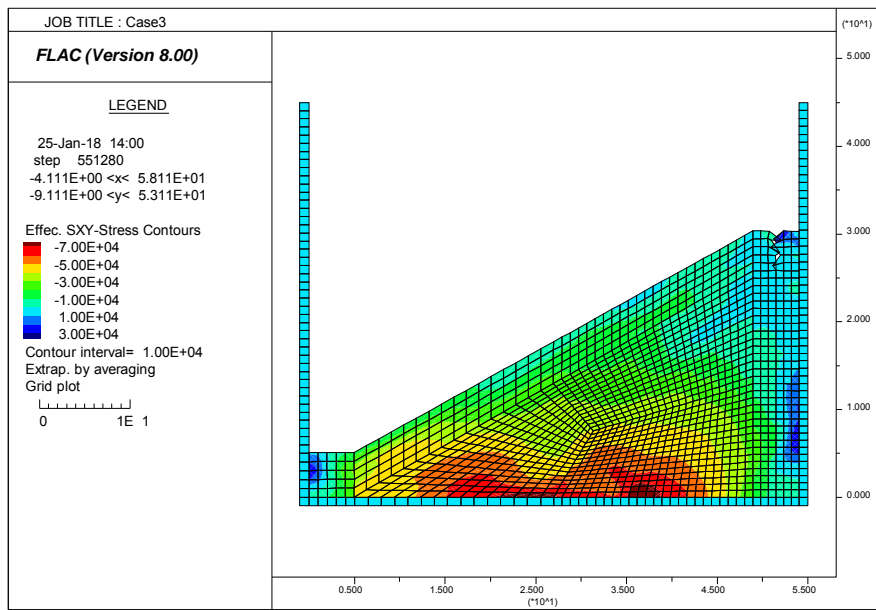


図 2-140 せん断応力の分布 (ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度)

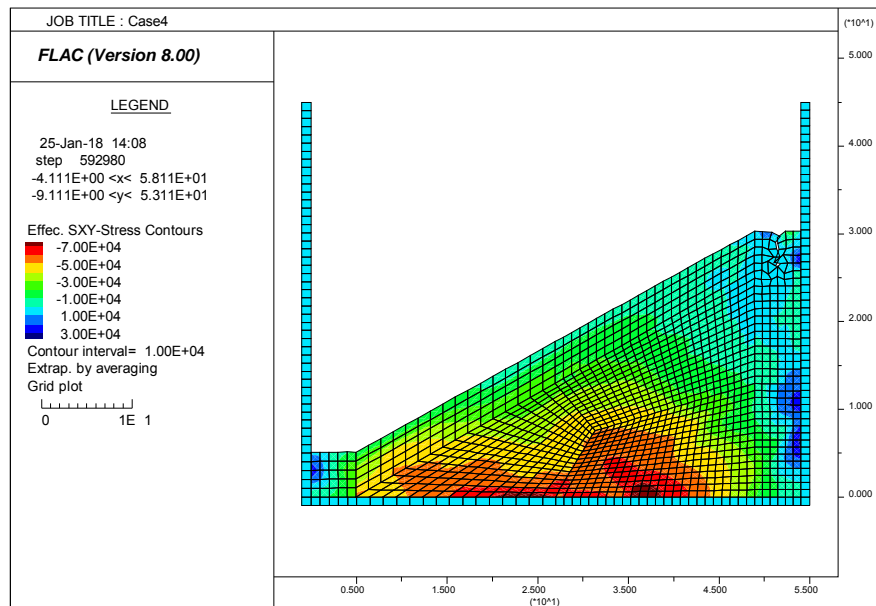


図 2-141 せん断応力の分布 (ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度)

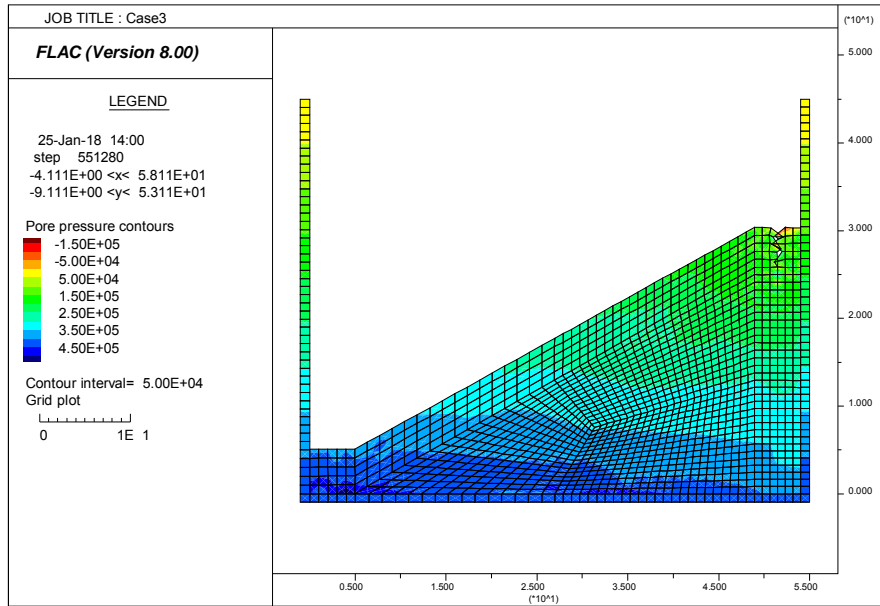


図 2-142 間隙水圧の分布（ケース 11 水深 45m 傾斜角 6 度）

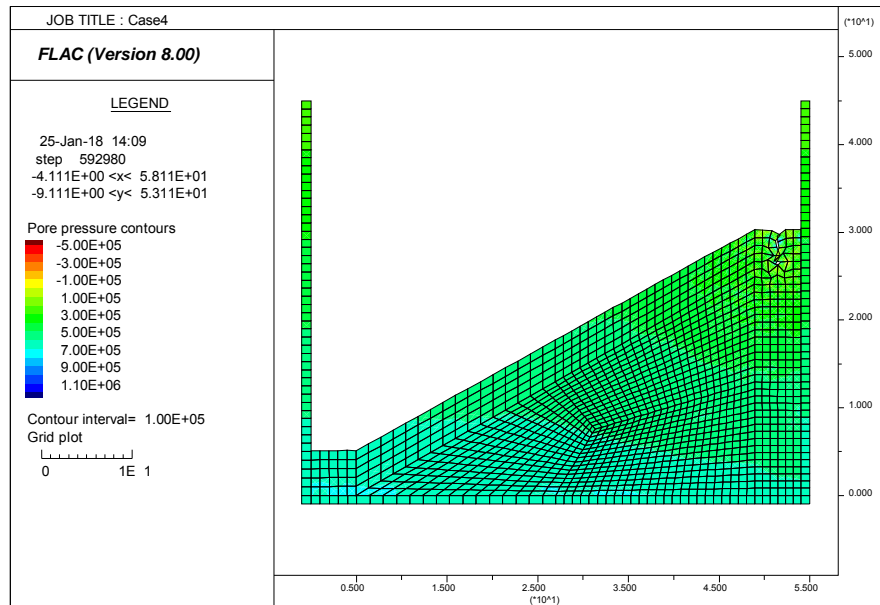


図 2-143 間隙水圧の分布（ケース 12 水深 70m 傾斜角 6 度）

2.4 海底環境下における斜面の地すべり挙動の分析

表 2-23 再現解析結果のまとめに解析ケースと解析結果をまとめて示す。図 2-144 に破壊モードを示す。今回実施した解析はいずれも、破壊傾斜角が実験値よりも小さい値を示した。この差異が生じた原因は、過圧密状態にある粘土の強度を解析では過小に見積もっていることが考えられる。この課題については、遠心場において模型地盤のせん断強度を直接測定し、その強度定数を解析に用いることで解決できる可能性がある。さらに、今回は弾塑性解析として修正カムクレイモデルを用いたが、過圧密挙動をより精度良く評価できる構成則を用いることも考えられる。また構成則によって発生するすべり面の位置が異なったが、実験結果に最も近い結果が得られたのは、モールクーロンモデルであった。それ以外のモデルは実験よりも深い位置にすべり面が発生した。マルチスプリングモデルのすべり面形状は不連続かつ他のモデルと傾向を異なっていた。そのため、FLAC で有限差分法に適用する際には、類似の双曲線モデルとの解析結果の傾向を比較する等の検証をさらに行う必要があると思われる。水深の違いに着目すると、どの構成モデルにおいても結果に差が見られなかった。法肩クラックの有無に着目すると、マルチスプリングモデル（破壊モード⑥）を除けば、法肩付近のすべり面の位置に若干差が見られたが、全体の破壊傾向に影響を与えていないことがわかる。

表 2-23 再現解析結果のまとめ

	水深 (m)	解析モデル	法肩クラック	破壊傾斜角 (度) 解析	破壊傾斜角 (度) 実験	破壊モード
Case1	45	モーラーケーロン	無し	4	11~12	①
Case2	70			4	13~14	
Case3	45	修正カムクレイ		4	11~12	②
Case4	70			4	13~14	
Case5	45	マルチスプリング		7	11~12	③
Case6	70			7	13~14	
Case7	45	モーラーケーロン	有り	4	10~11	④
Case8	70			4	13~14	
Case9	45	修正カムクレイ		4	10~11	⑤
Case10	70			4	13~14	
Case11	45	マルチスプリング		6	10~11	⑥
Case12	70			6	13~14	

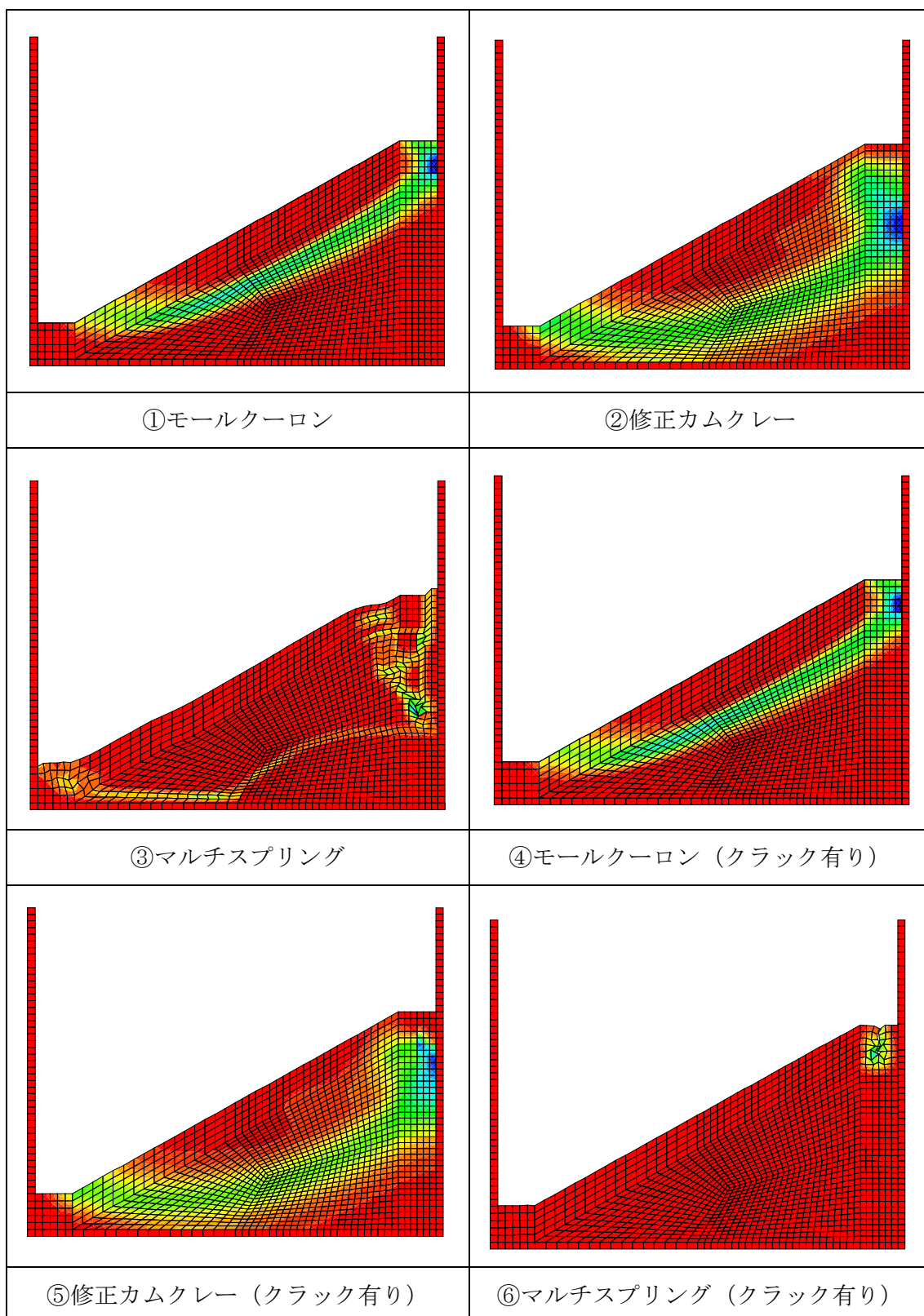


図 2-144 破壊モードの比較 (せん断ひずみ分布)

3 模型地盤の設計

平成 28 年度事業において実施した静定外力の作用下での斜面模型の崩壊挙動への円弧すべり法（修正フェレニウス法）の適用性に関する検討を踏まえ、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、遠心力模型実験用の模型地盤を設計する。設計に際して、有限差分法による解析コード「FLAC」を用いる。そのため、まず解析に用いる構成モデルのパラメータ設定に必要な室内試験の結果を説明する。また、動的外力に対する斜面模型の設計では、まず、平成 28 年度事業で実施した規模の遠心載荷装置を用いた斜面形状などの影響を踏まえ小規模斜面模型による設計を実施する。次いで、斜面形状によるスケール効果の影響を検証するため、国内最大規模の遠心載荷装置を用いた斜面模型の設計を実施する。

3.1 室内土質試験による動的解析のパラメータ設定

動的パラメータの設定に際し、動的変形試験と非排水繰返しせん断試験を実施した。以下にその概要と結果を示す。

3.1.1 土の動的変形試験

動的解析に用いる粘土の動的変形特性を求めるために「土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法（JGS 0543:2009）」に準拠して試験を実施した。

実験に用いた中空ねじりせん断試験装置を図 3-1 に示す。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た後、予備圧密容器に注ぎ入れて圧密圧力 100kPa で予備圧密した。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。予備圧密終了後、容器から粘土を取り出してトリミング法により外直径 7cm、内直径 3cm 高さ 10cm の中空円筒状に成形して用いた。実験は有効拘束圧 100kPa で圧密した後、応力制御で繰返しせん断を実施した。実験は正規圧密状態では表 3-1

に示すように再現性を確認するために3ケース（B-1~B-3）実施した。過圧密状態では表 3-2 に示す1ケース（K-3）実施した。

正規圧密状態の動的変形特性（等価せん断剛性率 G_{eq} 、履歴減衰率 h とせん断ひずみ γ の関係）を図 3-2 に示す。履歴曲線の例を図 3-3 に示す。

過圧密状態の動的変形特性（等価せん断剛性率 G_{eq} 、履歴減衰率 h とせん断ひずみ γ の関係）を図 3-4 に示す。履歴曲線の例を図 3-5 に示す。

表 3-1 動的変形試験による試験結果（正規圧密）

供試体No.	有効主応力 (kN/m ²)	等価せん断剛性率 (MN/m ²)	履歴減衰率 (-)	片振幅せん断ひずみ (-)
B-1	98.3	30	0.0632	0.00002
B-1	98.1	28	0.0435	0.00004
B-1	97.6	24	0.0389	0.00012
B-1	97.3	22	0.0432	0.00015
B-1	97.0	21	0.0493	0.00018
B-1	94.9	19	0.0765	0.00029
B-1	88.4	13	0.1444	0.00063
B-1	80.6	11	0.1610	0.00102
B-2	96.0	70	0.0493	0.00001
B-2	96.0	65	0.1098	0.00002
B-2	95.8	51	0.0752	0.00005
B-2	91.8	24	0.0970	0.00019
B-2	90.0	18	0.1084	0.00038
B-2	87.4	17	0.1223	0.00048
B-2	85.8	16	0.1375	0.00059
B-2	83.2	14	0.1519	0.00073
B-2	81.1	13	0.1661	0.00090
B-3	97.6	86	0.0401	0.00001
B-3	95.4	34	0.0688	0.00005
B-3	96.1	32	0.0941	0.00008
B-3	94.1	21	0.1020	0.00018
B-3	94.7	18	0.1129	0.00026
B-3	93.4	16	0.1205	0.00037
B-3	90.8	14	0.1305	0.00049
B-3	88.8	13	0.1444	0.00063
B-3	86.3	11	0.1577	0.00081
B-3	82.9	9	0.1798	0.00117

表 3-2 動的変形試験による試験結果（過圧密）

供試体No.	有効主応力 (kN/m ²)	等価せん断剛性率 (MN/m ²)	履歴減衰率 (-)	片振幅せん断ひずみ (-)	初期乾燥密度 (g/cm ³)
K-3	99.2	27.28	0.0387	0.000020	1.173
K-3	100.0	26.72	0.0350	0.000042	1.173
K-3	100.0	23.10	0.0315	0.000095	1.173
K-3	100.0	19.12	0.0532	0.000227	1.173
K-3	101.0	13.52	0.1148	0.000641	1.173
K-3	98.0	6.00	0.2034	0.002859	1.173

※過圧密については、一旦 200kPa で圧密後に所定の初期有効拘束圧に除荷した後、載荷を行っている。

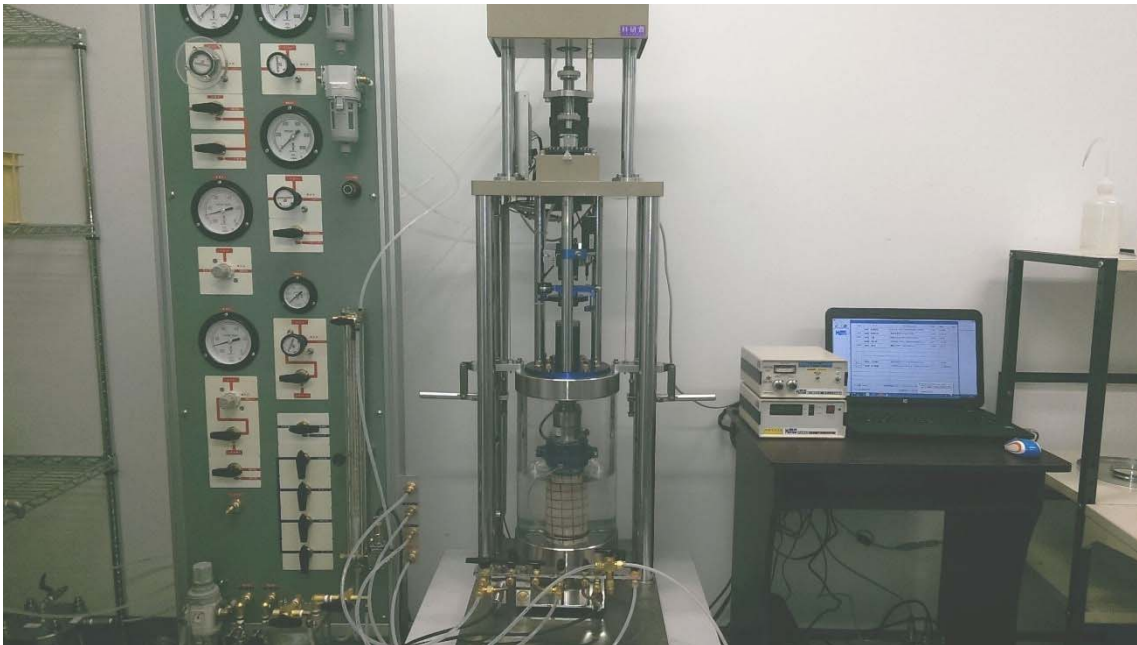


図 3-1 中空ねじり試験機

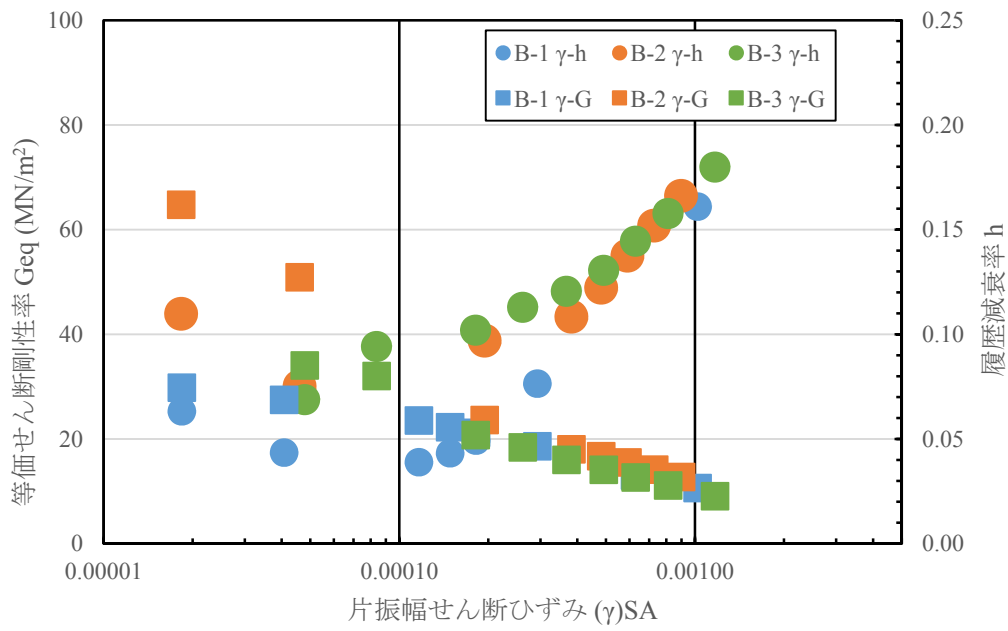
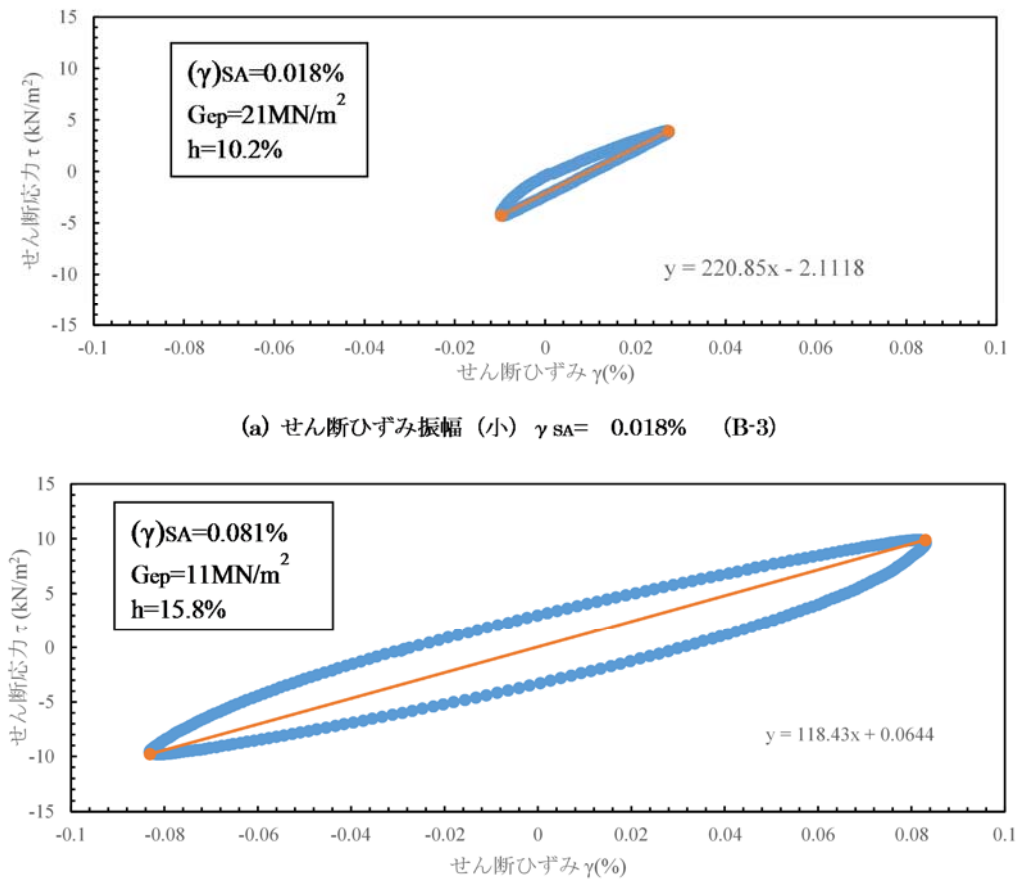


図 3-2 動的変形特性（正規圧密）



(a) せん断ひずみ振幅（小） $\gamma_{SA} = 0.018\%$ （B-3）

(b) せん断ひずみ振幅（大） $\gamma_{SA} = 0.08\%$ （B-3）

図 3-3 応力ひずみ関係の例（正規圧密 B-3）

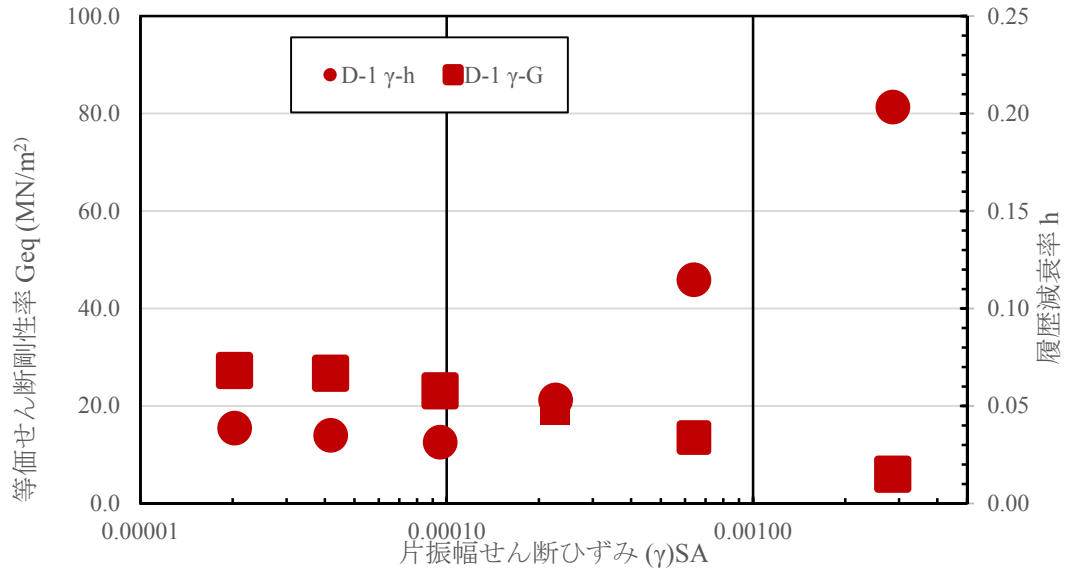
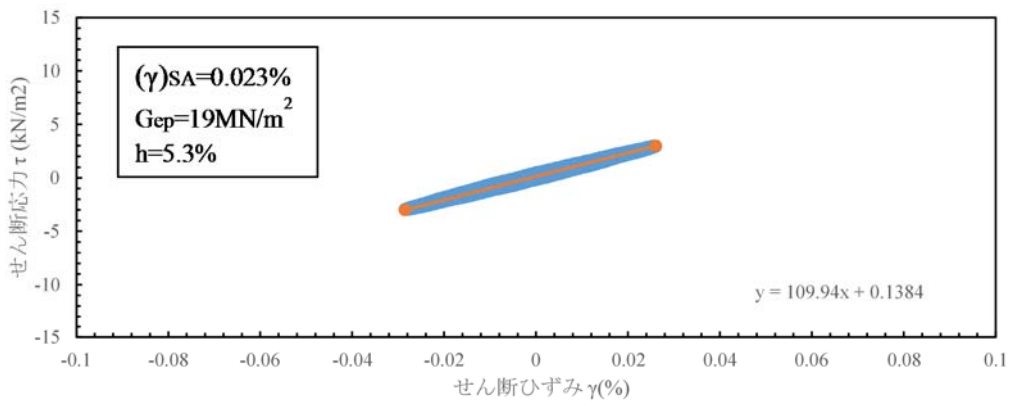
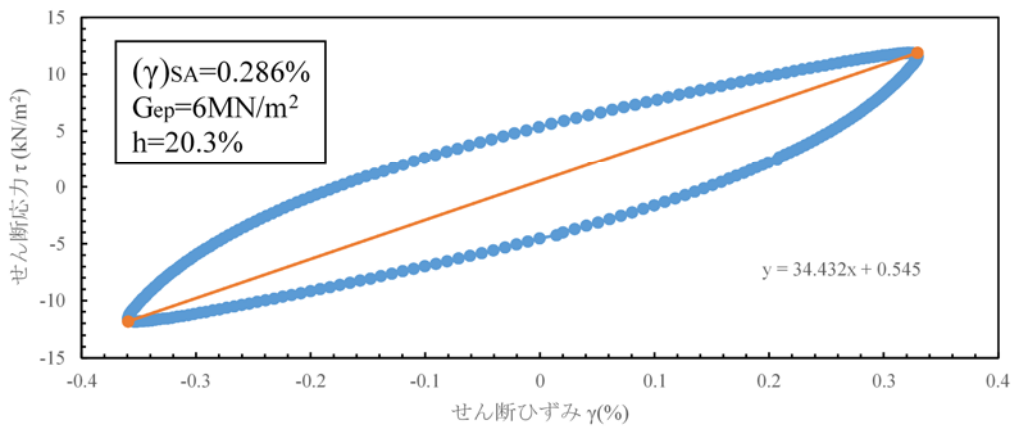


図 3-4 動的変形特性 (過圧密 先行圧密応力 200kPa 圧密応力 100kPa)



(a) せん断ひずみ振幅 (小) $\gamma_{SA} = 0.0023\%$ (K-1)



(b) せん断ひずみ振幅 (大) $\gamma_{SA} = 0.29\%$ (K-1)

図 3-5 応力ひずみ関係の例 (過圧密 K-1)

3.1.2 非排水繰返しせん断試験

動的解析に用いる粘土の非排水繰返しせん断特性を求めるために前述の中空ねじりせん断試験装置を用いて非排水繰返しせん断試験を実施した。試験条件は背圧 100kPa を載荷して飽和させた後、正規圧密条件では圧密応力を 100kPa、過圧密条件では先行圧密応力 200kPa、圧密応力 100kPa とした（過圧密比 OCR=2）。正規圧密における繰返しせん断試験結果を表 3-3 に示す。過圧密における繰返しせん断試験結果を表 3-4 に示す。正規圧密状態の繰返し応力比と繰返し回数の関係を図 3-6 に示す。過圧密状態の繰返し応力比と繰返し回数の関係を図 3-7 に示す。正規圧密状態の繰返しせん断試験結果の例を図 3-8 に、過圧密状態の繰返しせん断試験結果の例を図 3-9 に示す。

表 3-3 繰返しせん断試験による試験結果（正規圧密）

供試体No.	有効拘束圧(kPa)	τ_u/σ'_c	繰返し载荷回数(10%)	繰返し载荷回数(7.5%)	初期乾燥密度(g/cm ³)
A-1	98.0	0.10			0.918
A-2	98.0	0.21		29	1.168
A-3	92.0	0.32	3	2	1.269
A-4	97.0	0.15	32	27	1.173
A-5	98.0	0.25	3	2	1.138
A-6	96.0	0.20	8	5	1.133
A-7	95.0	0.10		30	1.100

表 3-4 繰返しせん断試験による試験結果（過圧密）

供試体No.	有効拘束圧(kPa)	τ_u/σ'_c	繰返し载荷回数(10%)	繰返し载荷回数(7.5%)	初期乾燥密度(g/cm ³)
A-12	95.4	0.18	200	200	1.103
A-11	97.5	0.25	12	10	1.095

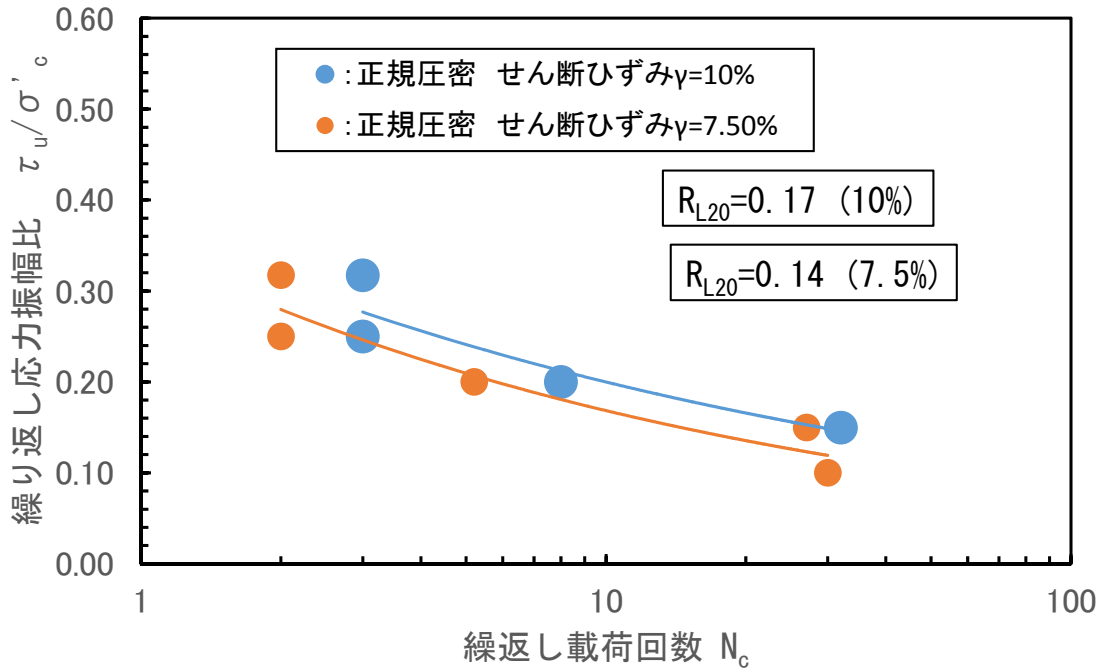


図 3-6 繰返し応力比と繰返し回数関係（正規圧密）

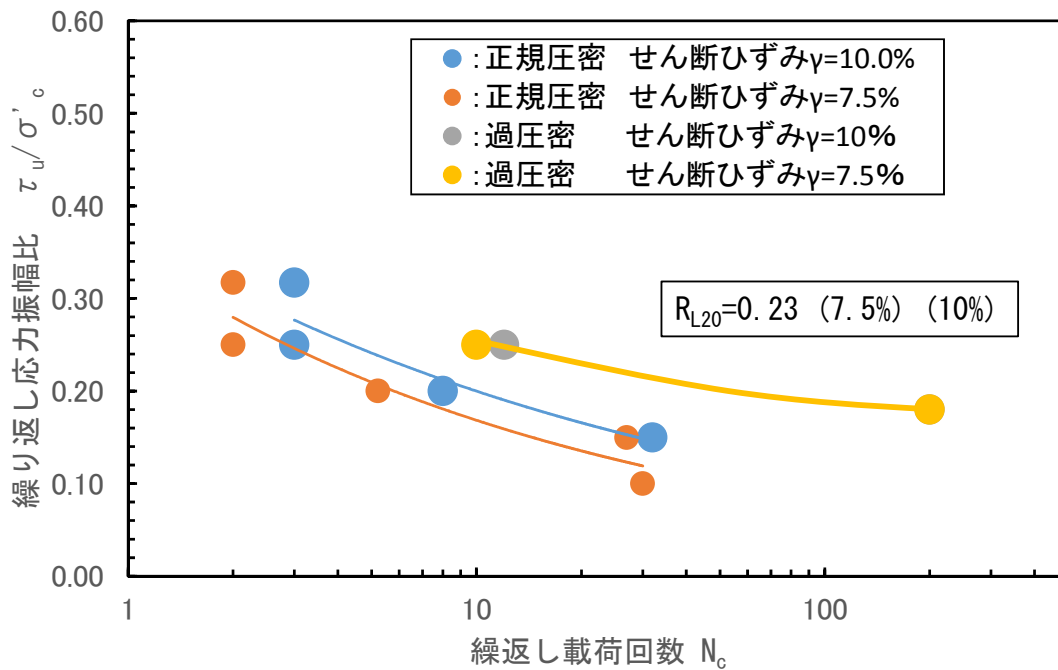
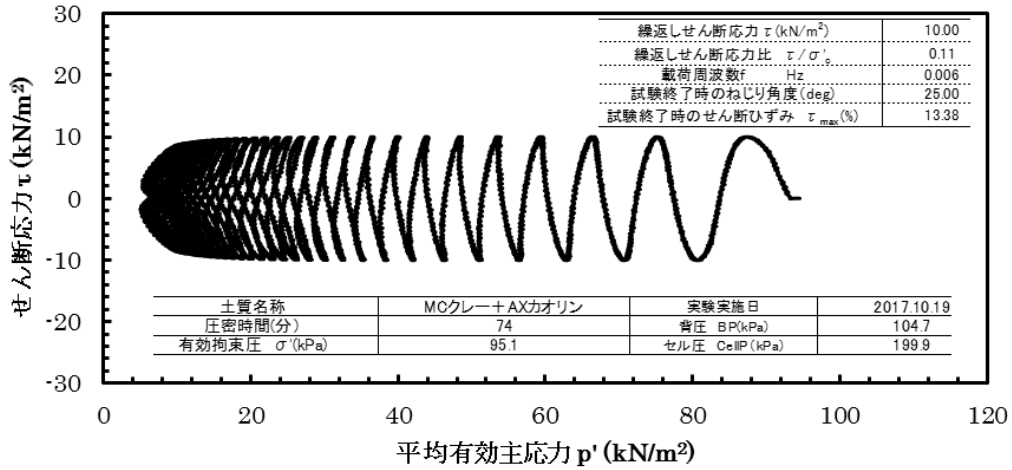
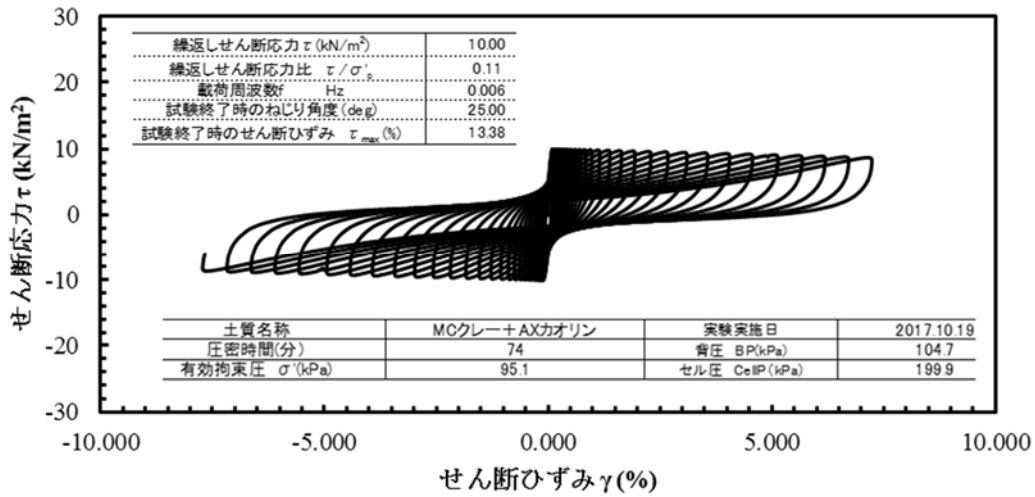


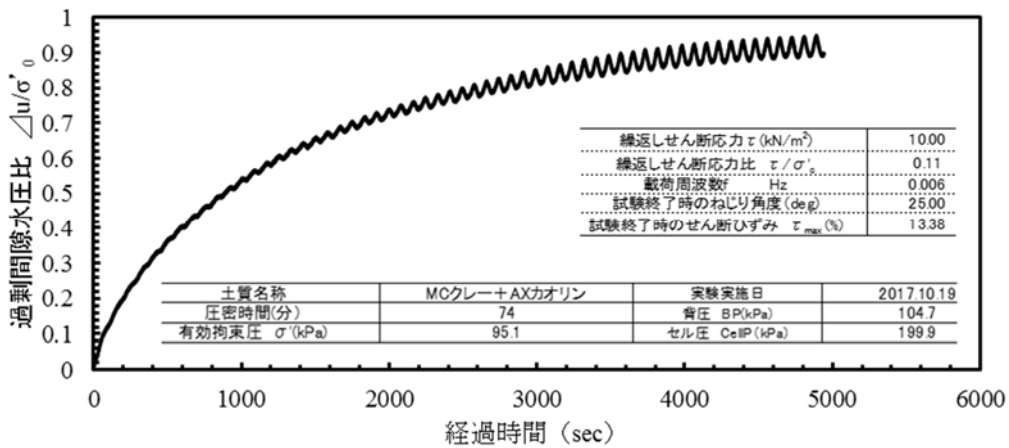
図 3-7 繰返し応力比と繰返し回数関係（過圧密）



(a) 有効応力経路

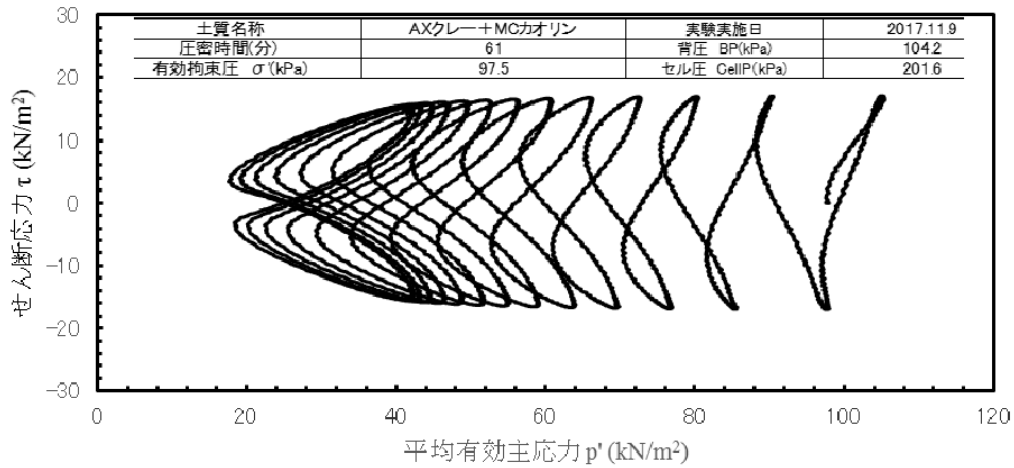


(b) 応力~ひずみ関係

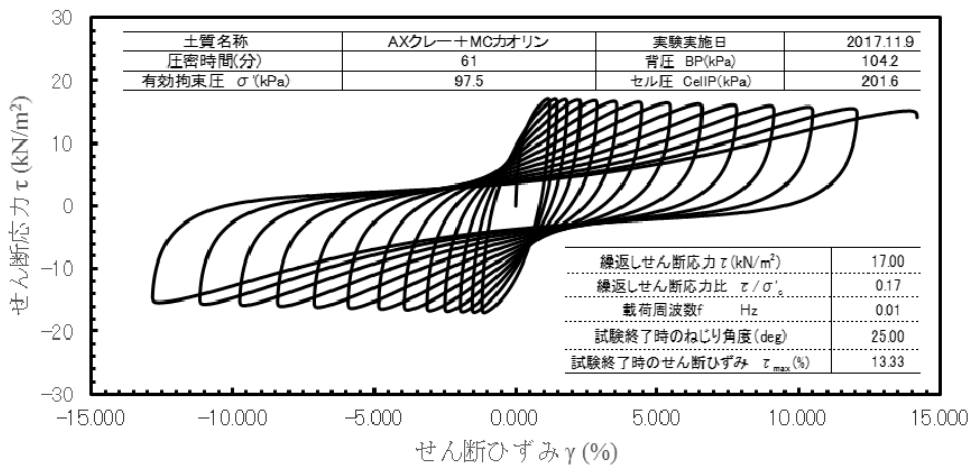


(c) 過剰間隙水圧比の時刻歴

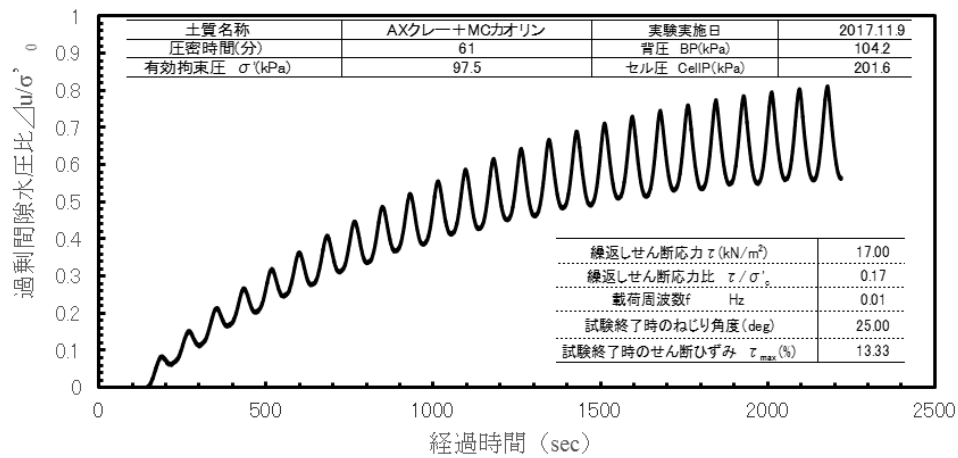
図 3-8 繰返しせん断試験の例 (正規圧密)



(a) 有効応力経路



(b) 応力~ひずみ関係



(c) 過剰間隙水圧比の時刻歴

図 3-9 繰返しせん断試験の例 (過圧密)

3.2 小型遠心力模型実験モデル

模型地盤の設計として、動的外力を与える遠心力模型実験モデルの解析を行う。検討条件として、模型地盤の構成材料は平成 28 年度の静的な遠心載荷実験で用いた材料と同様に、AXカオリン、MCクレーを重量比 1 : 1 に配合した粘土モデルを用いる。模型地盤の斜面形状は、急勾配 30° と緩勾配 10° の 2 種類とする。ただし、実験施設の管理者とのヒアリングから、平成 28 年度に行った実験で載荷した重力加速度 (90G) では、振動台の加振能力が不足するため、土槽および模型地盤の仕様は同じ条件で、加振機の性能を考慮して 50G 場での実験をシミュレーションすることとした。

また、加振条件は動的外力の作用下での円弧すべり法の適用性を明らかにするという観点で正弦波加振とし、振幅を増加させながらすべり面の形成位置および崩壊の生じる加振レベルを求める。

3.2.1 模型地盤モデルの解析概要

図 3-10 には傾斜角 30°の実験モデル、図 3-11 には傾斜角 10°の実験モデル、表 3-5 には解析条件を示す。また、図 3-12 には傾斜角 30° 斜面の FLAC 解析のメッシュ分割図を示す。図 3-13 には傾斜角 10° 斜面の FLAC 解析のメッシュ分割図を示す。境界条件は土槽と地盤間の不連続性が考慮できるようにジョイント要素を設定し、土槽自体の変位は拘束する条件とする。つまり、固定された土槽内の地盤が重力に応じて自由に移動することが可能なモデルである。ただし、土槽と地盤の剥離および再接触が生じる際の衝撃による境界要素への破壊の影響を防ぐために地盤境界は弾性要素とする。

解析の大まかな流れは図 3-14 のフローに示すとおり、水深を考慮した初期応力の計算後、土槽に正弦波加振し、振幅を増加させながら、崩壊の生じる加振レベルおよびすべり形状を求める。

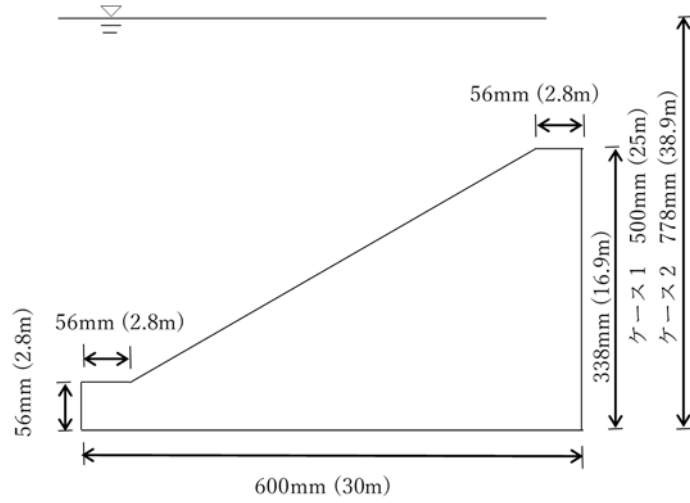


図 3-10 実験モデル概要 (斜面勾配 30°)

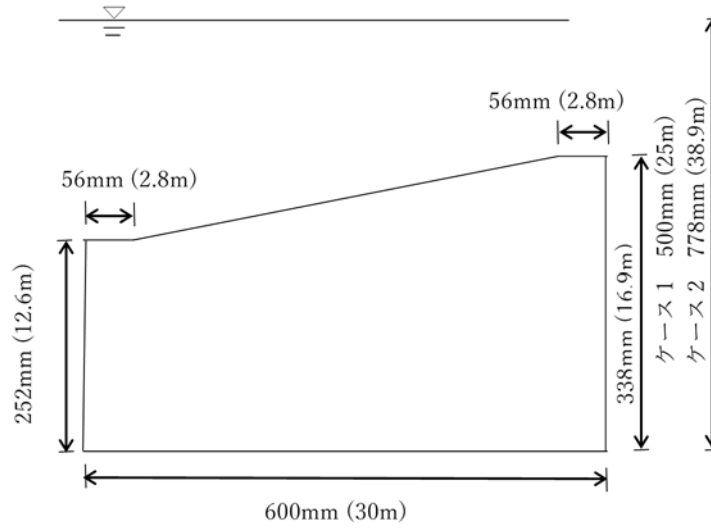
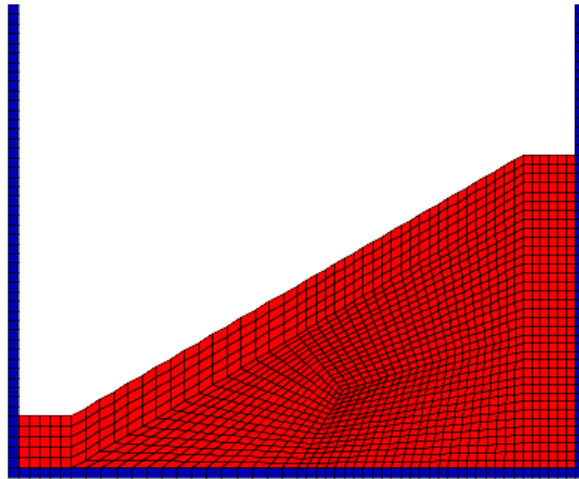


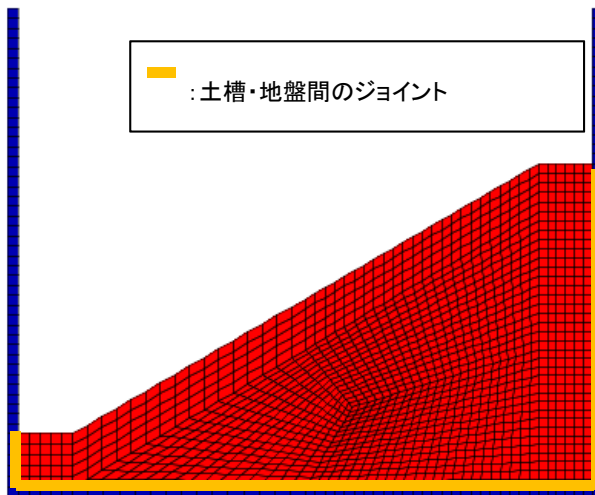
図 3-11 実験モデル概要 (斜面勾配 10°)

表 3-5 解析ケース

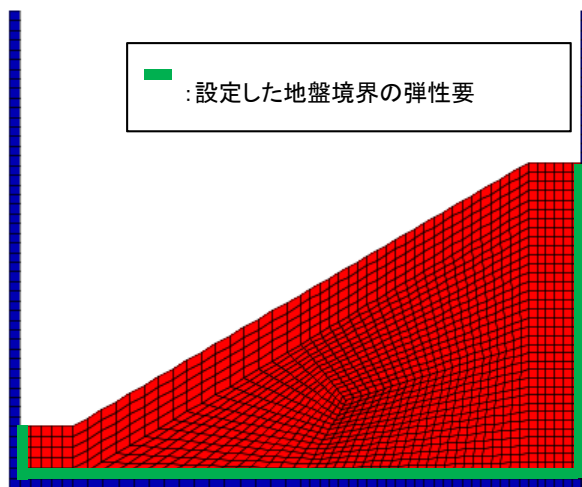
解析ケース	斜面勾配	水深	慣性力
1	30°	25m	50G
2	30°	38.9m	50G
3	10°	25m	50G
4	10°	38.9m	50G



(a)モデル

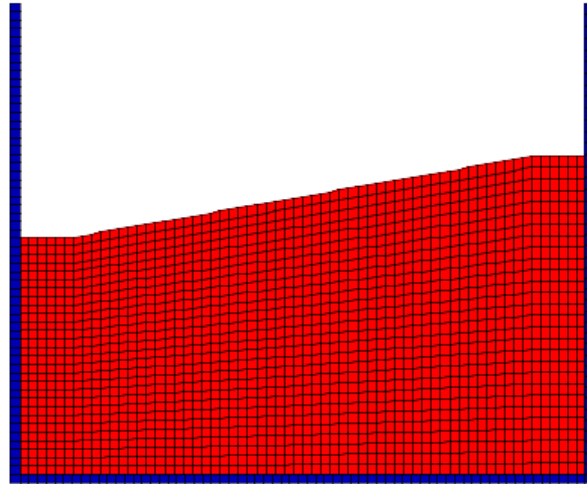


(b) ジョイント要素の設定

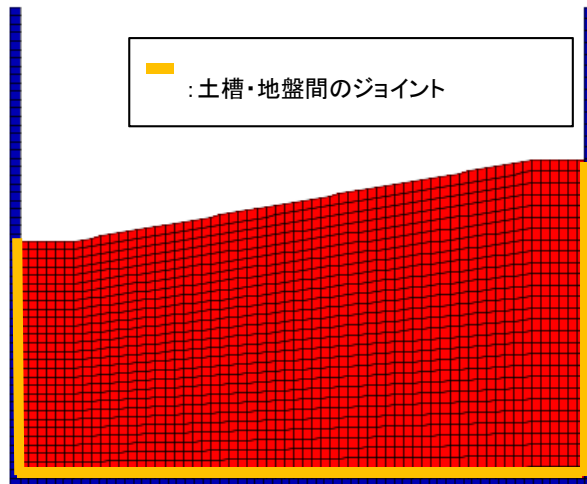


(c) 破壊を考慮しない弾性要素の設定

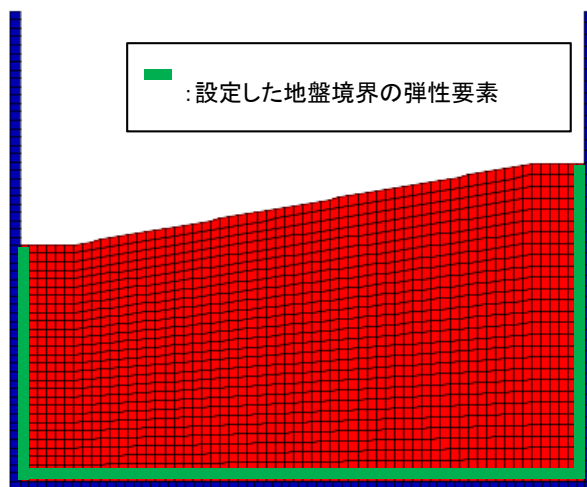
図 3-12 解析モデル（要素数 1,577、斜面勾配 30°）



(a)モデル



(b) ジョイント要素の設定



(c) 破壊を考慮しない弾性要素の設定

図 3-13 解析モデル (要素数 1,901、斜面勾配 10°)

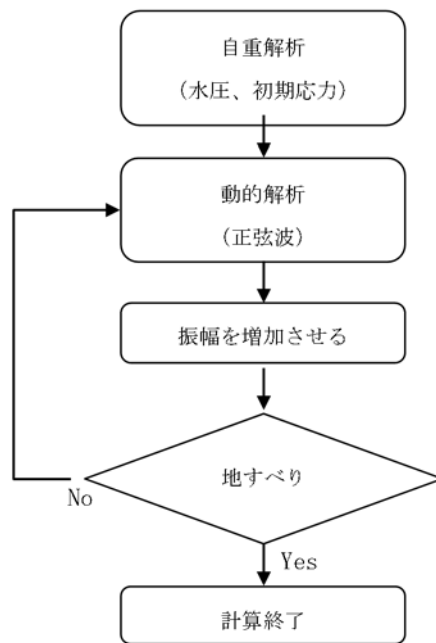


図 3-14 解析実施手順

3.2.2 解析パラメータの設定

試験結果をもとに、以下のようにパラメータを設定する。

(1) 剛性（モールクーロンモデル）

対象材料の塑性指数は 19 程度であるので砂に近い低塑性の粘土と考えられ、以下の式に示す拘束圧の依存性を考慮する。解析方法としてはまず初期剛性 $E_0=16100$ kPa（拘束圧 $\sigma_0=100$ kPa）と仮定し、初期水圧を考慮した自重解析を実施する。次に各要素における拘束圧を計算し、以下の式から各要素の剛性を計算し、初期状態を求める。なお、参照した三軸圧縮試験結果（2.1.1 で説明）は図 3-15 に示す。

$$E = 16100 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{0.66} \quad (24)$$

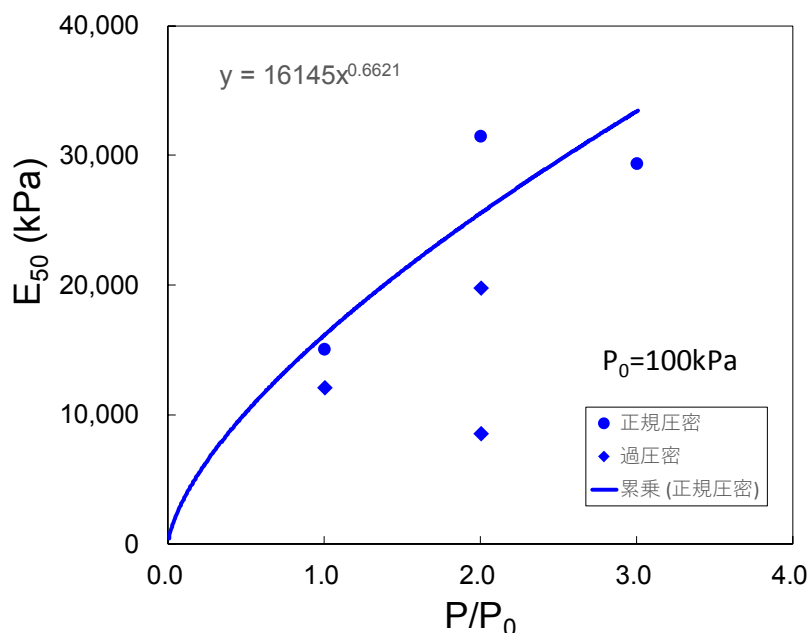


図 3-15 三軸圧縮試験結果

(2) 動的変形特性 (マルチスプリングモデル)

マルチスプリングモデルではせん断方向、軸差方向の2本のバネを設定し、そのバネの構成則は石丸ら(2017)に従って骨格曲線には式(25)に示す GHE モデルを採用し、履歴曲線は減衰特性 (h- γ 関係) を満足するように修正した Masing 則を採用する。

$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{\frac{1}{C_1(\gamma)} + \frac{1}{C_2(\gamma)} \cdot \frac{|\gamma|}{\gamma_r}}$$

$$C_1(\gamma) = \frac{C_1(0) + C_1(\infty)}{2} + \frac{C_1(0) - C_1(\infty)}{2} \cdot \cos\left\{\frac{\pi}{\alpha/(|\gamma|/\gamma_r) + 1}\right\} \quad (25)$$

$$C_2(\gamma) = \frac{C_2(0) + C_2(\infty)}{2} + \frac{C_2(0) - C_2(\infty)}{2} \cdot \cos\left\{\frac{\pi}{\beta/(|\gamma|/\gamma_r) + 1}\right\}$$

ここで γ_r : 規準ひずみ, G_0 : 初期せん断弾性係数, $C_1(0)$, $C_2(0)$, $C_1(\infty)$, $C_2(\infty)$, α , β : パラメータである. Masing 則は次式の減衰特性に従うように修正する。

$$h = h_{max} \cdot (1 - G_R/G_0)^{\beta_1} \quad (26)$$

G_R : 除荷点のひずみレベルにおけるせん断性係数, β_1 : パラメータである. GHE モデルのパラメータは石丸ら(2017)に従い表 3-6 の値を採用する. これによって双曲線モデルと等価な骨格曲線を採用することになる。

マルチスプリングモデルを用いるに当たり設定が必要なパラメータは以下の 3 つとなる。

- ・ 基準ひずみ γ_r
- ・ 初期せん断剛性 G_0
- ・ 最大減衰 h_{max}

パラメータを設定するに当たり

表 3-7 に示す動的変形試験の結果を用いる。本試験は 4 つの供試体に対して繰り返しせん断変形を与え、応答を出力したものである。

供試体ごとに初期せん断剛性 G_0 を算出し、せん断ひずみ、剛性低下率、履歴減衰の関係から基準ひずみ γ_r を求める。初期せん断剛性 G_0 は同実験結果のひずみレベルが最も小さい値 ($10^{-6} \sim 10^{-5}$ のオーダー) の値を用いる。この G_0 を基準としたせん断剛性低下率を算出し、実験結果にフィットする G - γ 関係 (図 3-16)、 h - γ 関係 (図 3-17) を算出し、基準ひずみ γ_r を求めた。

最大減衰 h_{max} は図 3-18、表 3-8 に示すように剛性低下率 G/G_0 と減衰 h の関係から近似曲線を算出し、その近似式の切片の値を採用した。供試体ごとに算出したパラメータを表 3-9 に示す。これらの値の平均値 (表 3-10) をマルチスプリングモデルに設定する。ただし、動的変形特性を重視した場合には基準ひずみ 0.00033 は図 3-19 に示すように破壊強度を過小に見積もることとなる。そこで過圧密状態の試験結果 (同図中の「実験 OC」の点線) の破壊強度 τ_f より決定した基準ひずみ 0.0014 を解析では用いることとする。ここで基準ひずみ γ_r は破壊強度 τ_f と初期せん断剛性 G_0 より以下の式で決定することができる。

$$\gamma_r = \frac{\tau_f}{G_0} \tag{27}$$

表 3-6 マルチスプリングモデルで採用するパラメータ

$C_1(0)$	$C_2(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(\infty)$	α	β	β_1
1	1	1	1	0	0	1

表 3-7 動的変形試験結果

供試体 No.	有効主応力 (kN/m ²)	等価せん断剛性率 (MN/m ²)	履歴減衰率 (-)	片振幅せん断ひずみ (-)	初期乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	B 値	圧密
B-1	98.250	29.821	0.063	0.00002	1.159	67.46	1.020	正規圧密
	98.120	27.507	0.044	0.00004	1.159	67.46	1.020	正規圧密
	97.590	23.571	0.039	0.00012	1.159	67.46	1.020	正規圧密
	97.324	22.291	0.043	0.00015	1.159	67.46	1.020	正規圧密
	97.035	21.213	0.049	0.00018	1.159	67.46	1.020	正規圧密
	94.948	18.625	0.077	0.00029	1.159	67.46	1.020	正規圧密
	88.359	13.051	0.144	0.00063	1.159	67.46	1.020	正規圧密
80.554	10.671	0.161	0.00102	1.159	67.46	1.020	正規圧密	
B-2	96.027	69.582	0.049	0.00001	1.196	66.44	1.006	正規圧密
	95.975	64.773	0.110	0.00002	1.196	66.44	1.006	正規圧密
	95.798	50.935	0.075	0.00005	1.196	66.44	1.006	正規圧密
	91.822	23.662	0.097	0.00019	1.196	66.44	1.006	正規圧密
	90.017	18.063	0.108	0.00038	1.196	66.44	1.006	正規圧密
	87.437	16.736	0.122	0.00048	1.196	66.44	1.006	正規圧密
	85.767	15.567	0.138	0.00059	1.196	66.44	1.006	正規圧密
	83.179	14.176	0.152	0.00073	1.196	66.44	1.006	正規圧密
81.102	12.776	0.166	0.00090	1.196	66.44	1.006	正規圧密	
B-3	97.649	85.637	0.040	0.00001	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	95.397	34.075	0.069	0.00005	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	96.099	32.061	0.094	0.00008	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	94.068	20.777	0.102	0.00018	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	94.659	18.426	0.113	0.00026	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	93.436	16.038	0.120	0.00037	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	90.839	14.147	0.131	0.00049	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	88.808	12.678	0.144	0.00063	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	86.272	11.150	0.158	0.00081	1.098	65.26	0.930	正規圧密
	82.892	9.104	0.180	0.00117	1.098	65.26	0.930	正規圧密
D-3	99.218	27.280	0.039	0.00002	1.173	66.53	0.916	過圧密
	100.000	26.723	0.035	0.00004	1.173	66.53	0.916	過圧密
	100.000	23.104	0.031	0.00010	1.173	66.53	0.916	過圧密
	100.000	19.120	0.053	0.00023	1.173	66.53	0.916	過圧密
	101.000	13.523	0.115	0.00064	1.173	66.53	0.916	過圧密
	98.000	6.002	0.203	0.00286	1.173	66.53	0.916	過圧密

表 3-8 剛性低下率 G/G0 と減衰 h の近似式

供試体 B1	$y = -0.19x + 0.21$
供試体 B2	$y = -0.09x + 0.15$
供試体 B3	$y = -0.13x + 0.15$
供試体 D3	$y = -0.21x + 0.23$

表 3-9 供試体ごとのパラメータ

供試体 No	圧密	最大減衰	基準ひずみ	初期せん断剛性
		hmax	γ_r	G0(MPa)
B-1	正規圧密	0.21	0.000486	29.82
B-2	正規圧密	0.15	0.000108	69.58
B-3	正規圧密	0.15	0.000034	32.06
D-3	過圧密	0.23	0.000708	27.28

表 3-10 マルチスプリングモデルに設定する動的変形特性

	最大減衰	基準ひずみ	初期せん断剛性
	hmax	γ_r	G0(MPa)
平均	0.19	0.00033	39.69
解析	0.19	0.0014	39.69

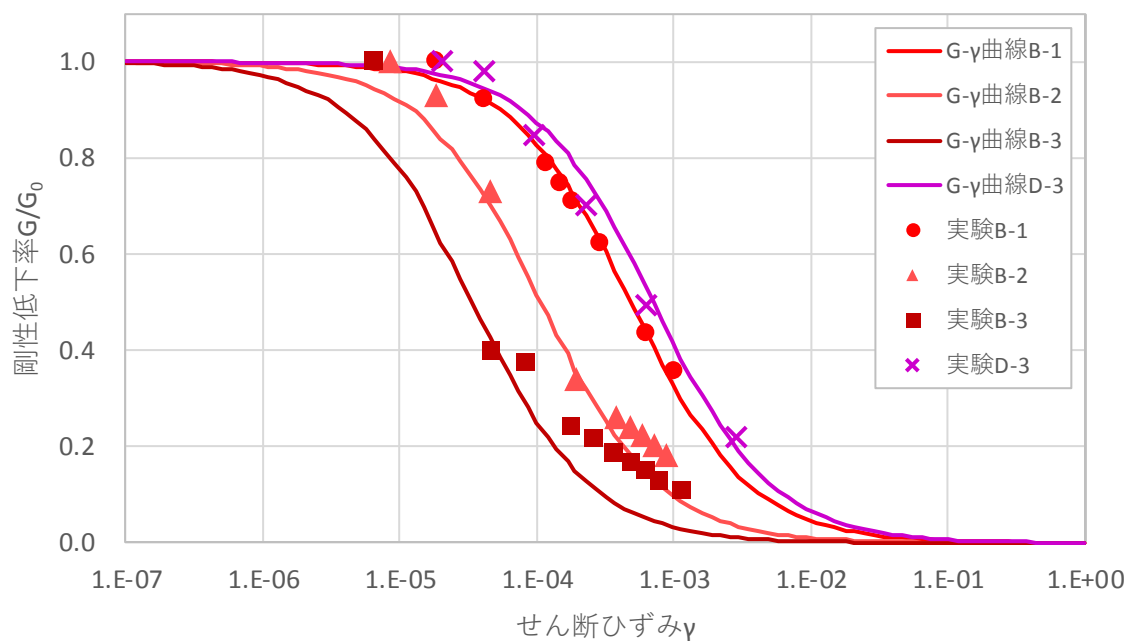


図 3-16 剛性特性 (G- γ 関係)

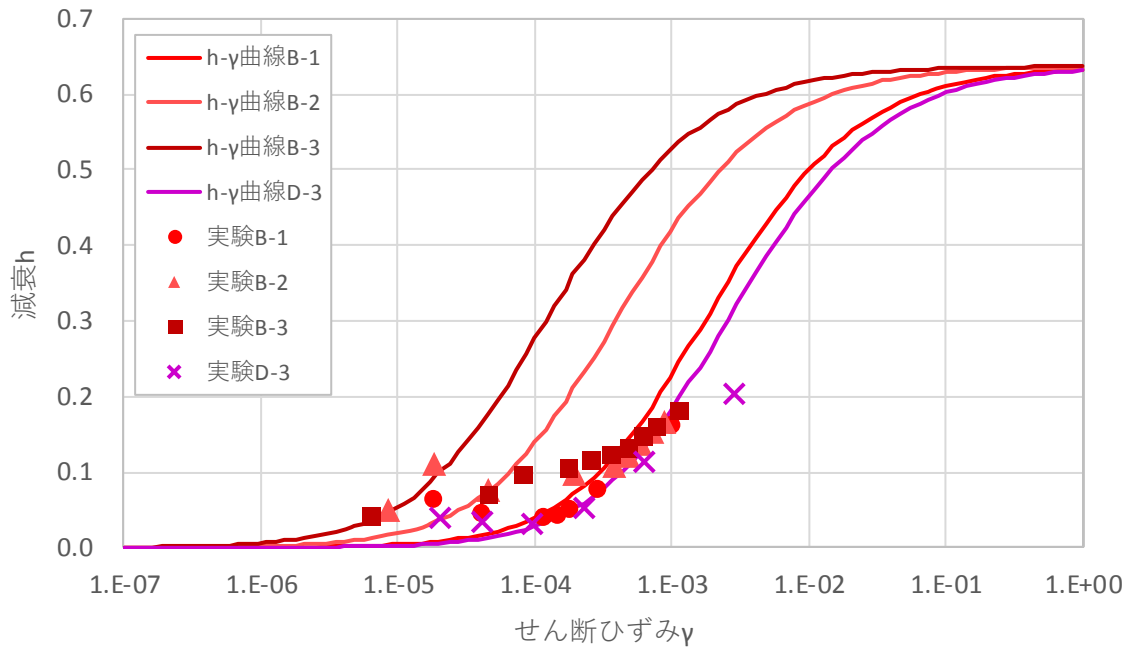


図 3-17 減衰特性 (h - γ 関係)

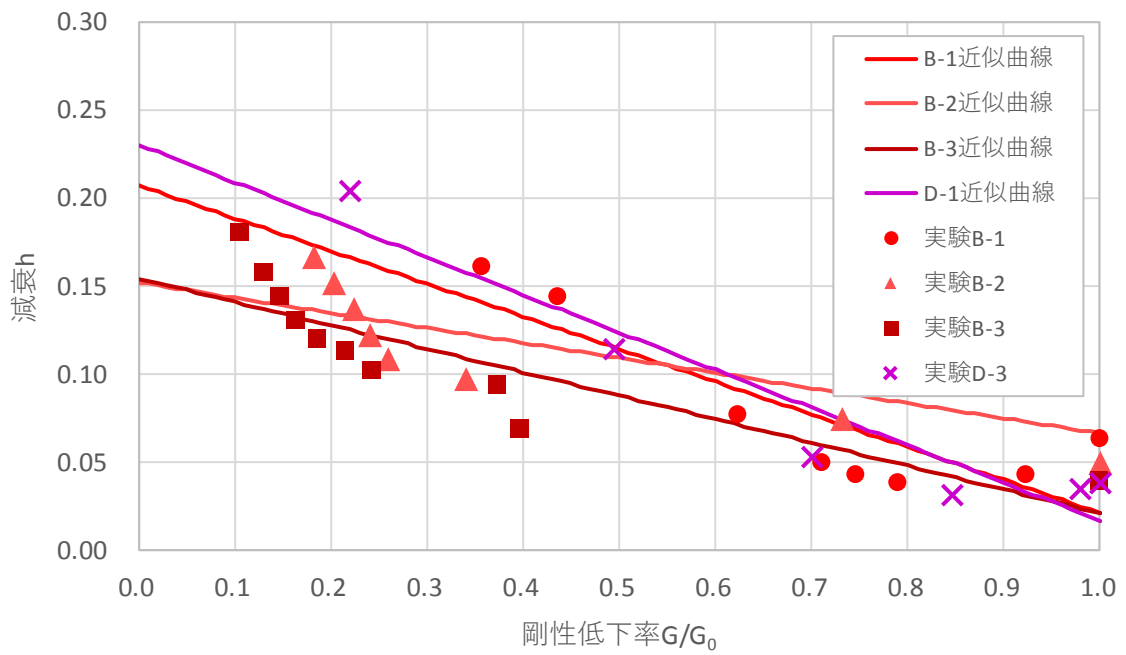


図 3-18 最大減衰 h_{max} の推定

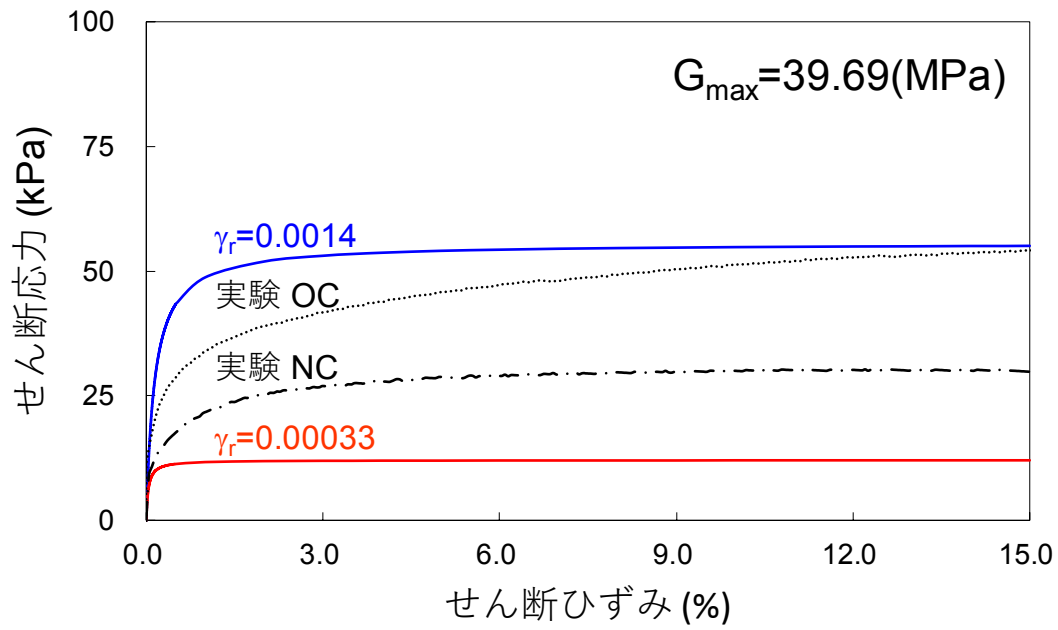


図 3-19 基準ひずみと破壊強度の関係

(3) 強度特性

正規圧密領域，過圧密領域における強度特性は，図 3-20 に示す試験結果を参照し，有効応力場での強度特性を圧密排水強度(CD 条件)とみなして設定する．本解析では，強度特性は一律に $c=10kPa$ ， $\Phi=25^\circ$ を設定する．

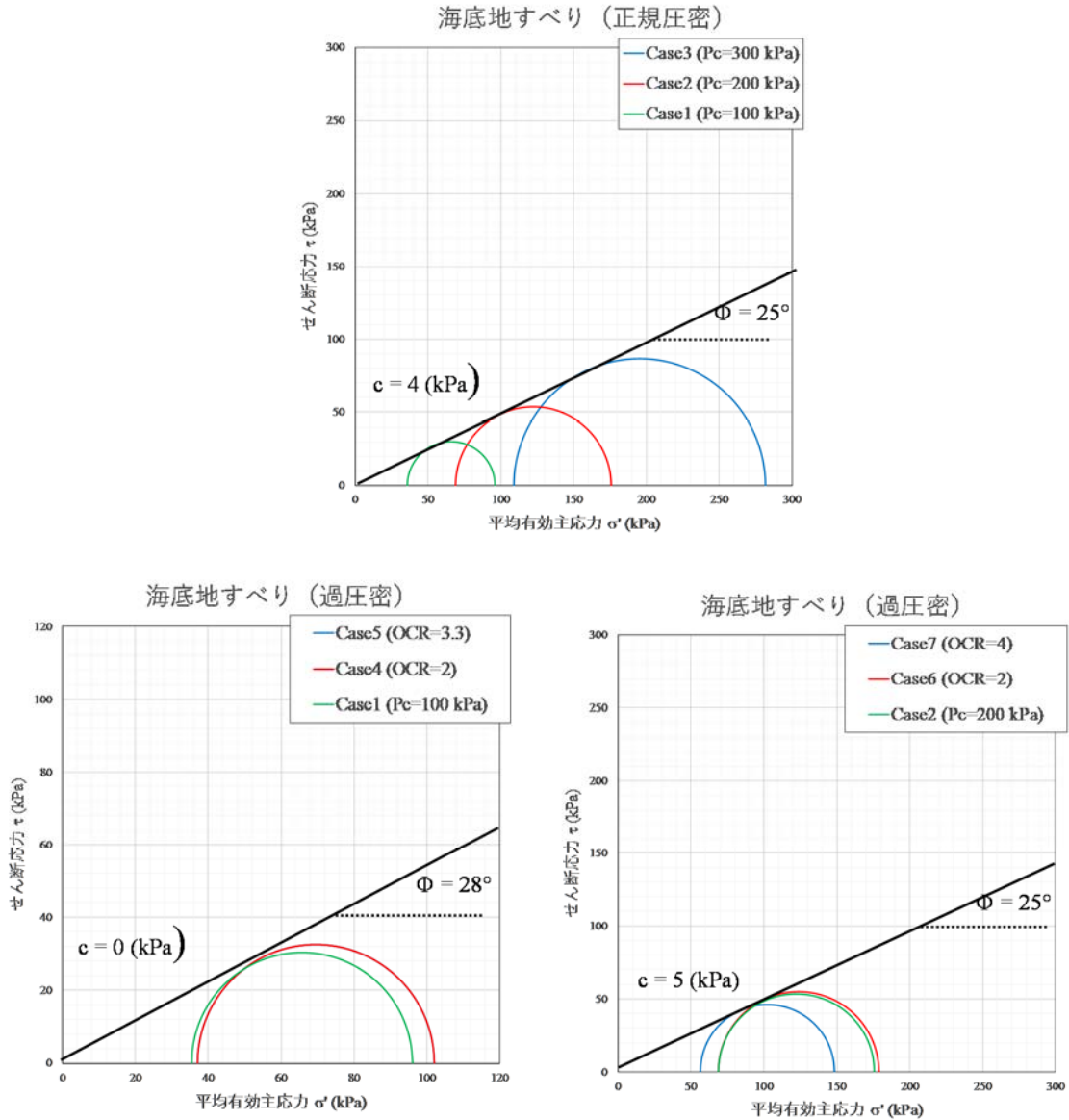


図 3-20 三軸圧縮試験結果

(4) 過剰間隙水圧のモデル化

間隙水圧の計算は、以下に示す FINN モデルを用いる。

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (28)$$

ここで、 γ : せん断ひずみ、 ε_{vd} : 体積ひずみである。 $C_1 \sim C_4$ はパラメータであり、繰り返しせん断载荷の実験結果からフィッティングする。ただし、 $\gamma=0$ の時、 $\Delta \varepsilon_{vd}=0$ となるので、以下の関係が成立する。

$$C_3 = C_1 C_2 C_4 \quad (29)$$

図 3-21 にはフィッティングした結果を示す。FINN モデルのパラメータは以下に示す通りである。

○正規圧密部 $C1=0.15, C2=0.70, C3=0.0042, C4=0.04$

○過圧密部 $C1=0.04, C2=0.95, C3=0.00152, C4=0.04$

なお、計算結果の詳細は付録に示す。

表 3-11 繰返し载荷の試験ケース

	供試体No.	拘束圧	τ_u/σ'_c	繰返し载荷回数(10%)	繰返し载荷回数(7.5%)	初期乾燥密度	含水比	B値
case-1	A-1	98.0	0.10	200	200	0.918	67.42	0.871
case-2	A-2	98.0	0.21	30	29	1.168	67.42	0.809
case-3	A-3	92.0	0.32	3	2	1.269	67.96	1.004
case-4	A-4	97.0	0.15	32	27	1.173	67.46	1.000
case-5	A-5	98.0	0.25	3	2	1.138	66.84	1.000
case-6	A-6	96.0	0.20	8	5	1.133	66.53	0.950
case-7	A-7	95.0	0.10	31	30	1.100	68.54	0.976
case-8	K-1(過圧密)	95.4	0.18	200	200	1.103	66.61	0.930
case-9	K-2(過圧密)	97.5	0.25	12	10	1.095	66.50	0.922

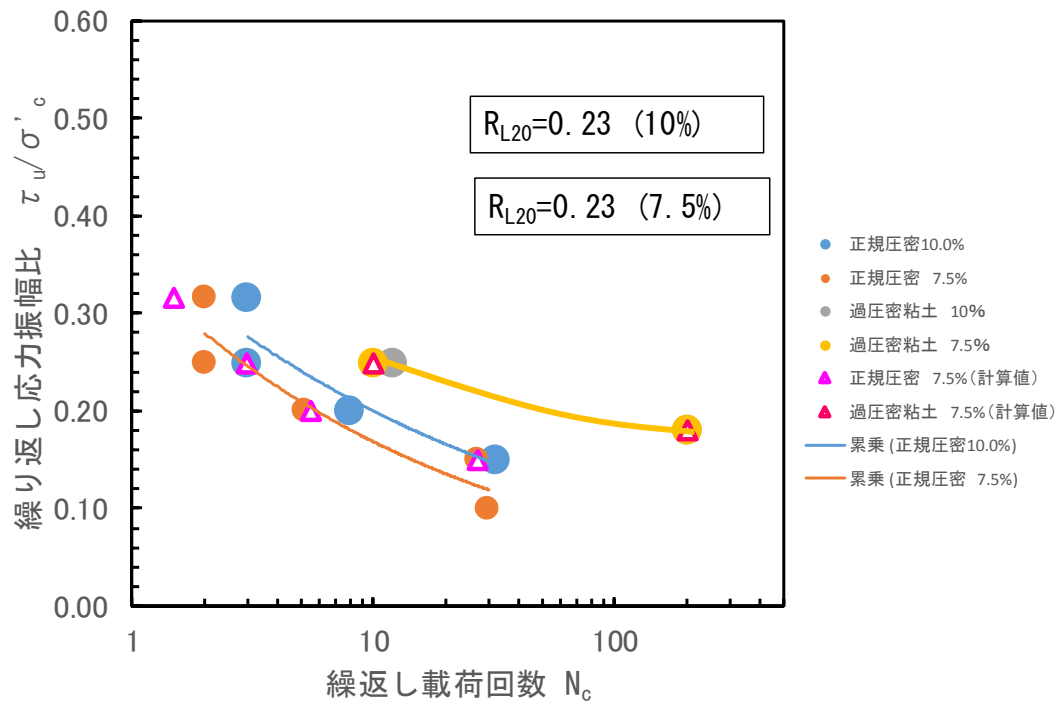


図 3-21 フィッティング結果

3.2.3 入力波の設定

入力波の詳細は以下に示す。

- ・波形：正弦波 10 波，ただし前後に 0.1T(継続時間)区間の余弦テーパー付き

- ・ 周期： $T=0.2$ 秒(5Hz)
- ・ 振幅：50Gal ずつ増加させながら崩壊が生じるまで実施する。ただし、各波形の間に 2 秒の停止時間を設ける。

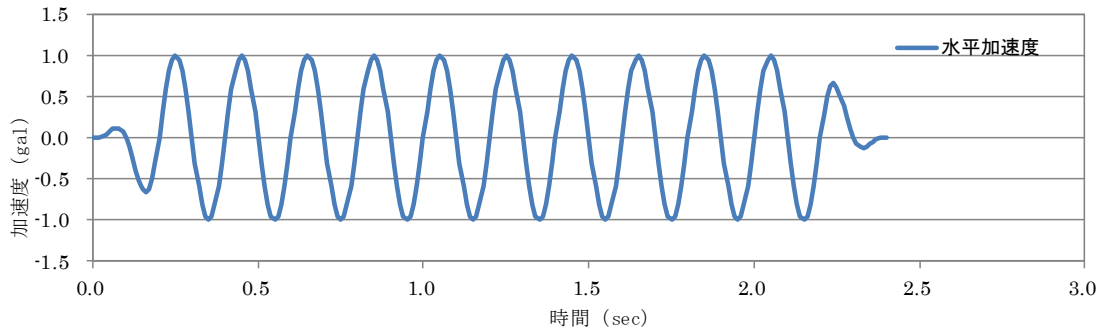


図 3-22 入力波

3.3 小型遠心力模型実験モデルの解析結果

前節で設定したパラメータを表 3-12 にまとめる。これらのパラメータを用い、模型地盤モデルの解析を実施する。解析ケースを表 3-13 に示す。以下は解析の結果を示す。

表 3-12 解析パラメータ

地盤	物性値
密度 ρ (kg/m ³)	1744
弾性係数 E (kN/m ²)	$E = 16100 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{0.66}$
ポアソン比(-)	0.3
内部摩擦角 ϕ (°) (正規圧密部①)	25
内部摩擦角 ϕ (°) (過圧密部②)	25
粘着力 C (kN/m ²) (正規圧密部①)	10
粘着力 C (kN/m ²) (過圧密部②)	10
FINN モデル常数(-) (正規圧密部①)	$C_1=0.15, C_2=0.70,$ $C_3=0.0042, C_4=0.04$
FINN モデル常数(-) (過圧密部②)	$C_1=0.04, C_2=0.95,$ $C_3=0.00152, C_4=0.04$

表 3-13 解析ケース

解析ケース	斜面勾配	水深	慣性力
1	30°	25m	50G
2	30°	38.9m	50G
3	10°	25m	50G
4	10°	38.9m	50G

3.3.1 モールクーロンモデルの結果

(1) ケース 1

加振加速度 200gal~250gal 辺りで、法肩から法尻までのすべり線が形成される。その後、斜面モデルは大きく崩れる。

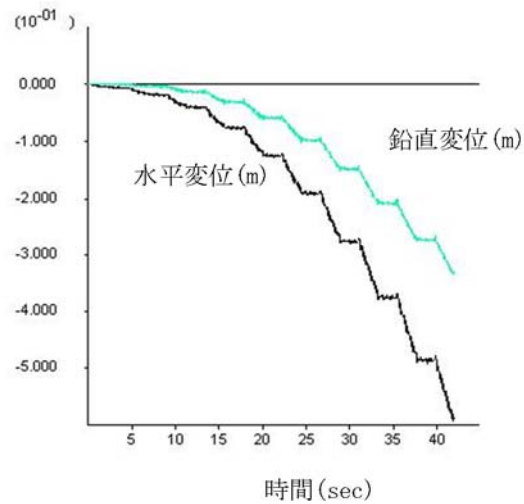


図 3-23 斜面表面中央の変位応答 (MC Case1)

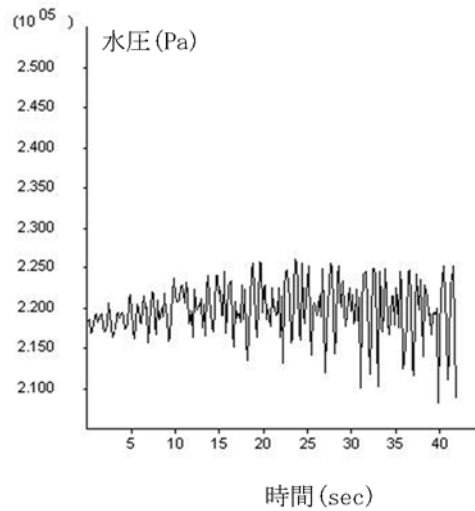
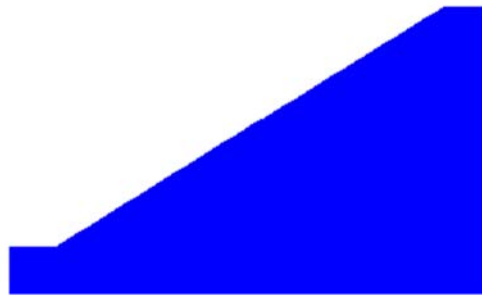
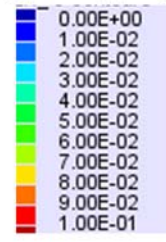
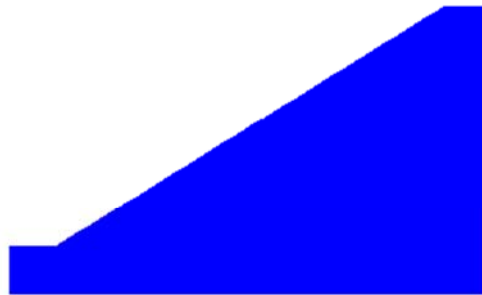


図 3-24 斜面法尻の水圧応答 (MC Case1)

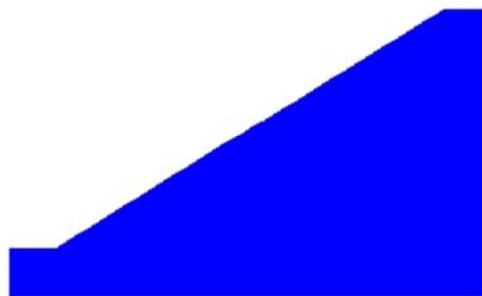
最大せん断ひずみ



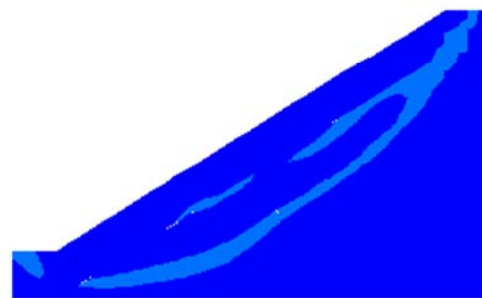
(a) 50 gal



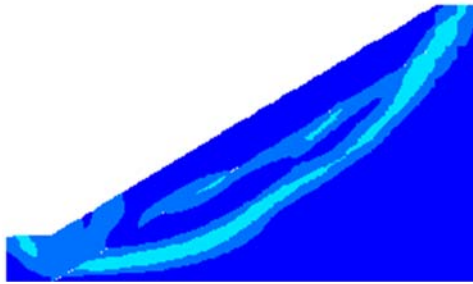
(b) 100 gal



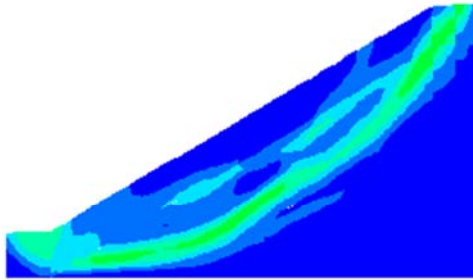
(c) 150 gal



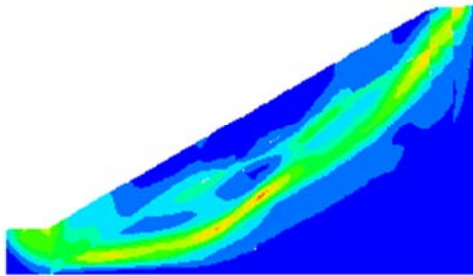
(d) 200 gal



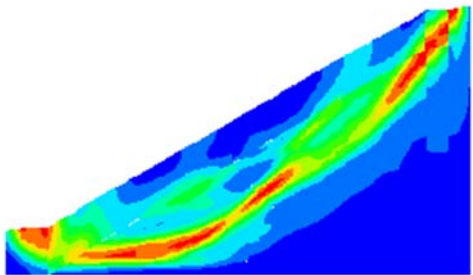
(a) 250 gal



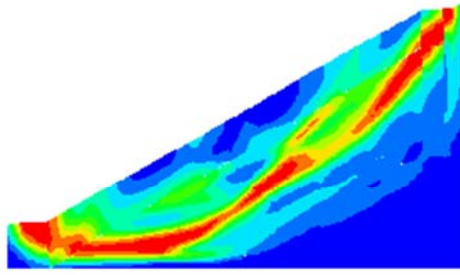
(b) 300 gal



(c) 350 gal

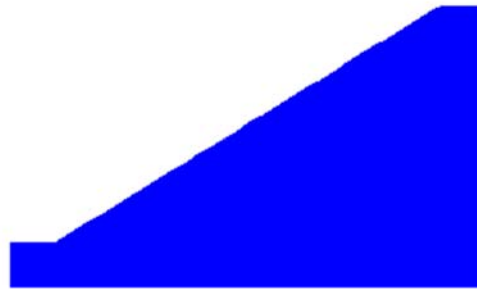


(d) 400 gal

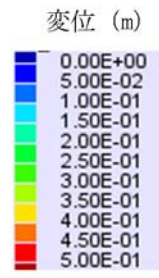


(a) 450 gal

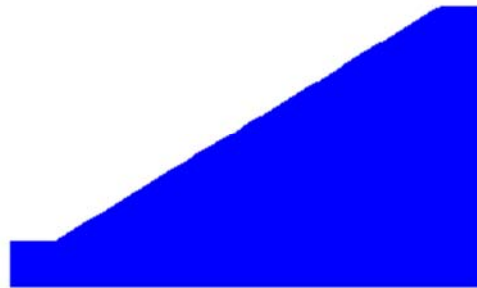
図 3-25 最大せん断ひずみ分布 (MC Case1)



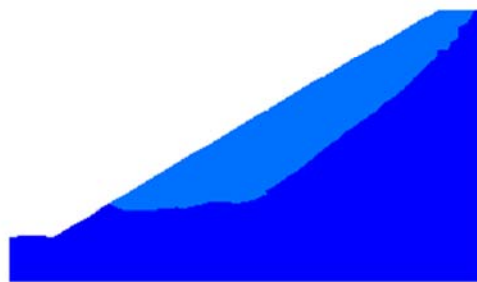
(a) 50gal



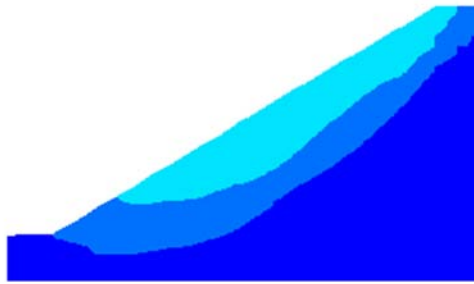
(b) 100 gal



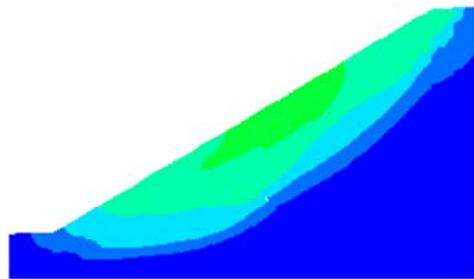
(c) 150 gal



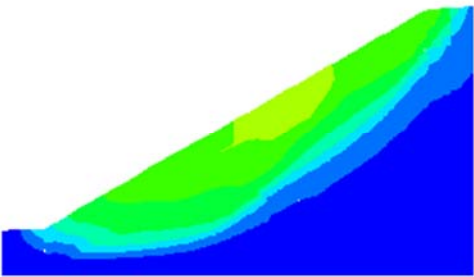
(d) 200 gal



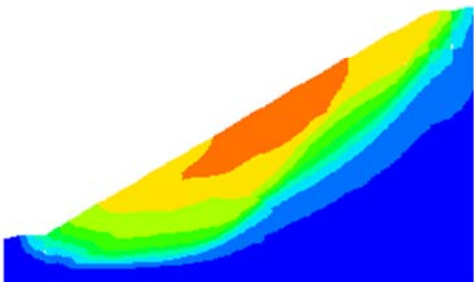
(a) 250 gal



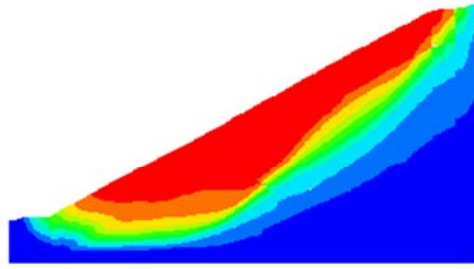
(b) 300 gal



(c) 350 gal



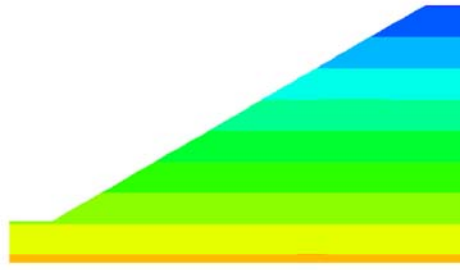
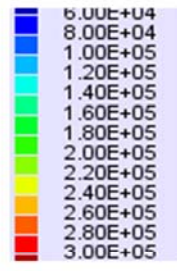
(d) 400 gal



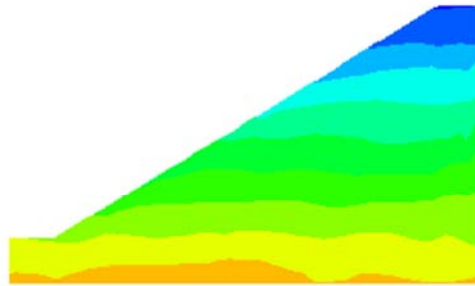
(a) 450 gal

図 3-26 変位分布 (MC Case1)

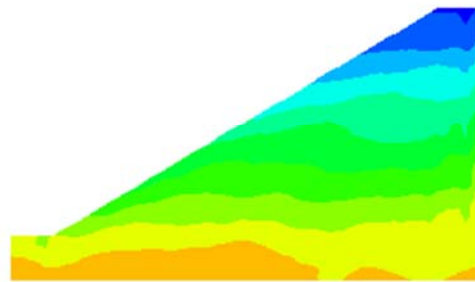
水圧 (Pa)



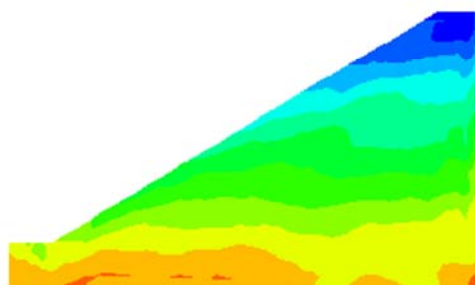
(a) 初期状態



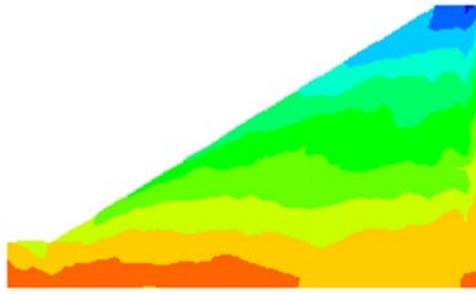
(b) 50gal



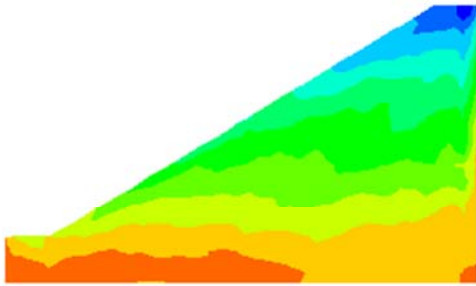
(c) 100 gal



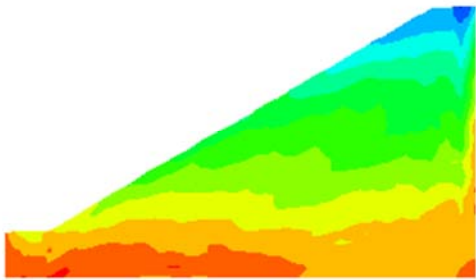
(d) 150 gal



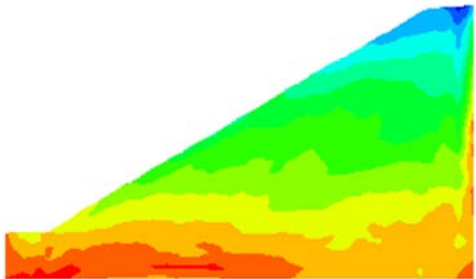
(a) 200 gal



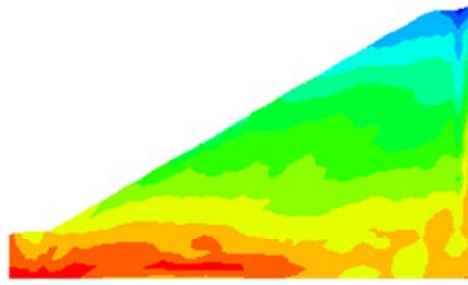
(b) 250 gal



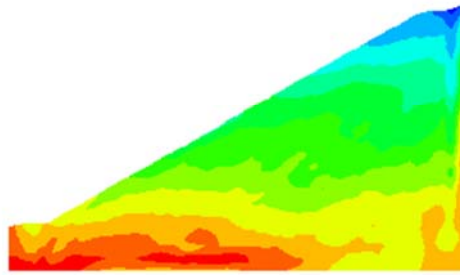
(c) 300 gal



(d) 350 gal



(a) 400 gal



(b) 450 gal

図 3-27 水圧分布 (MC Case1)

(2) ケース 2

加振加速度 200gal~250gal 辺りで、法肩から法尻までのすべり線が形成される。その後、斜面モデルは大きく崩れる。

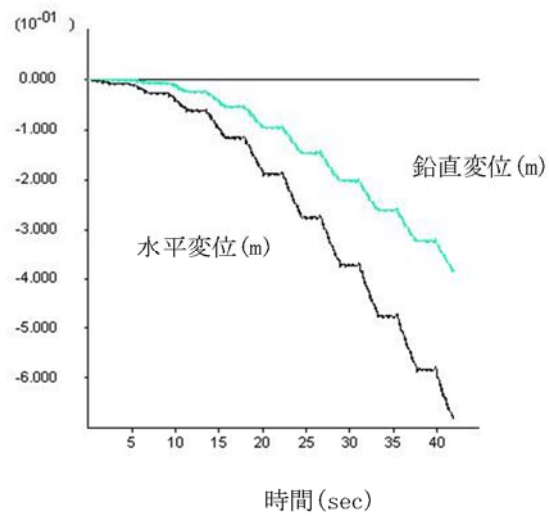


図 3-28 斜面表面中央の変位応答 (MC Case2)

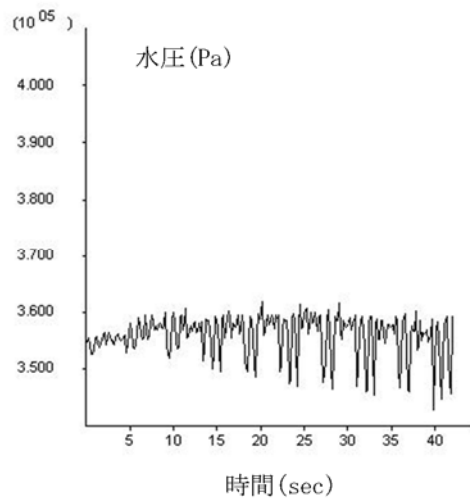
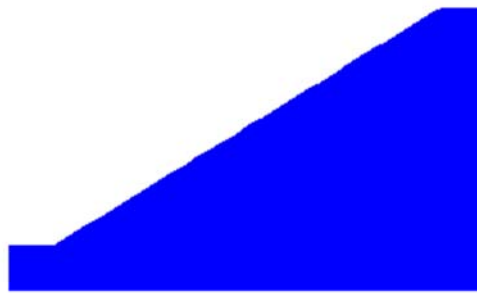
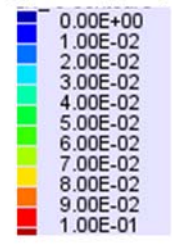
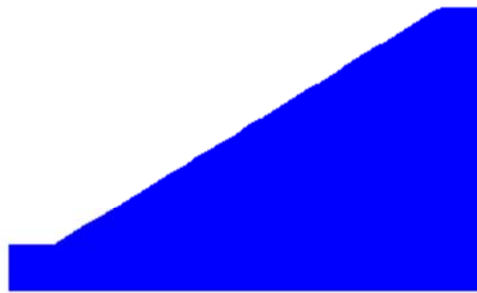


図 3-29 斜面法尻の水圧応答 (MC Case2)

最大せん断ひずみ



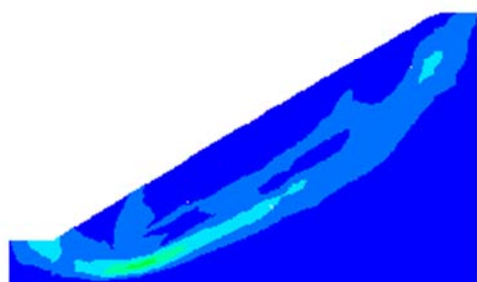
(a) 50gal



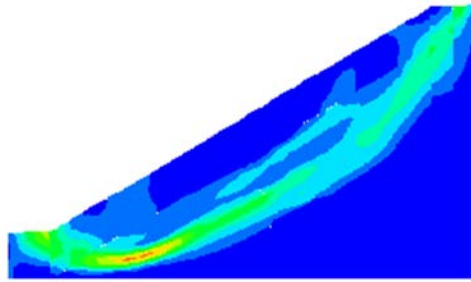
(b) 100 gal



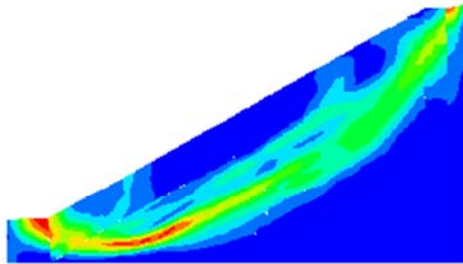
(c) 150 gal



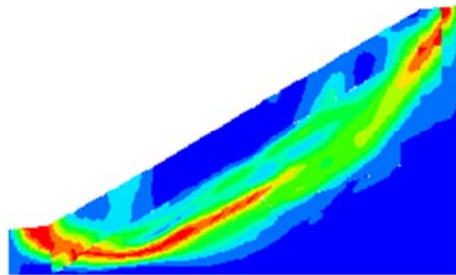
(d) 200 gal



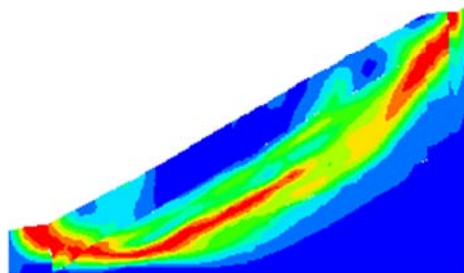
(a) 250 gal



(b) 300 gal

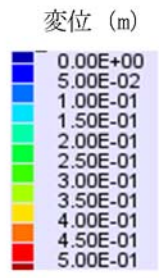
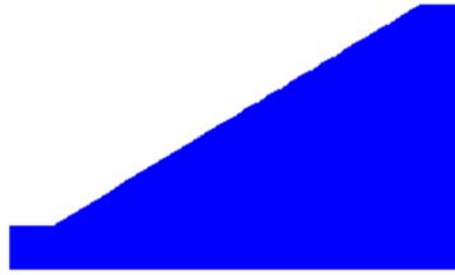


(c) 350 gal

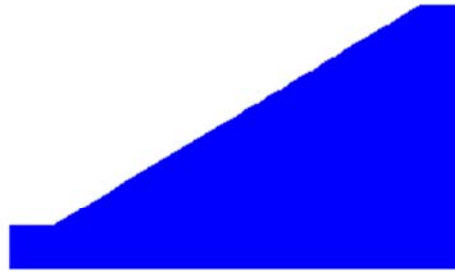


(d) 400 gal

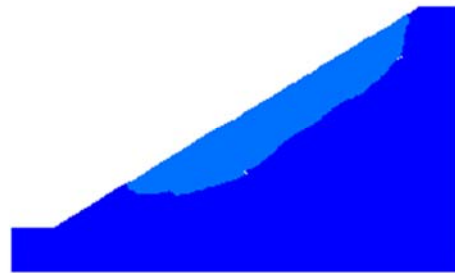
図 3-30 最大せん断ひずみ分布 (MC Case2)



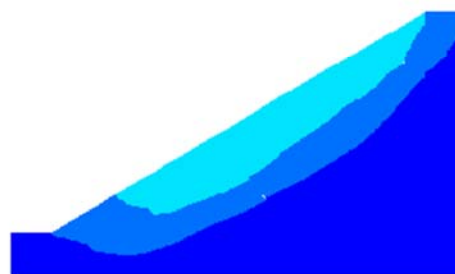
(a) 50gal



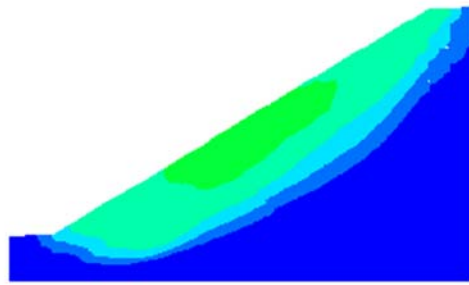
(b) 100 gal



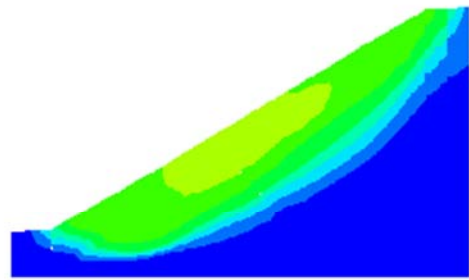
(c) 150 gal



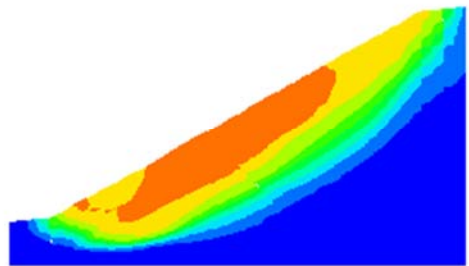
(d) 200 gal



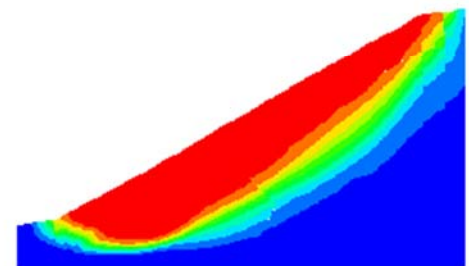
(a) 250 gal



(b) 300 gal

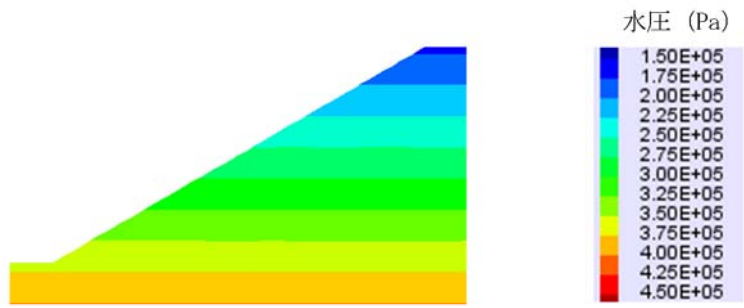


(c) 350 gal

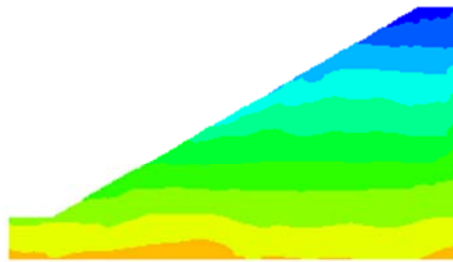


(d) 400 gal

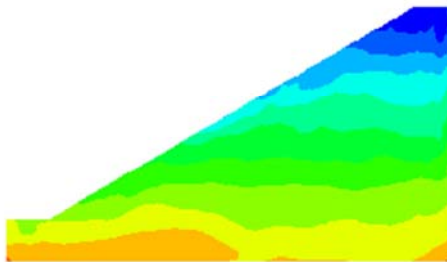
图 3-31 变位分布 (MC Case2)



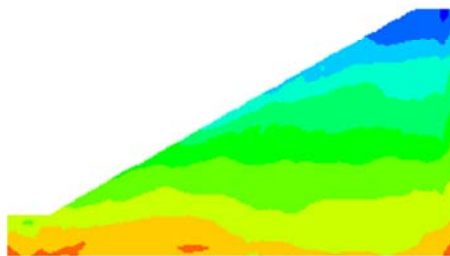
(a) 初期状態



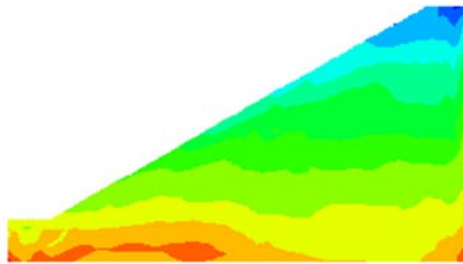
(b) 50gal



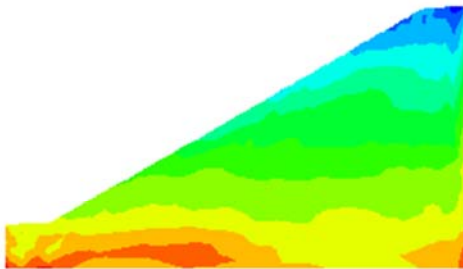
(c) 100 gal



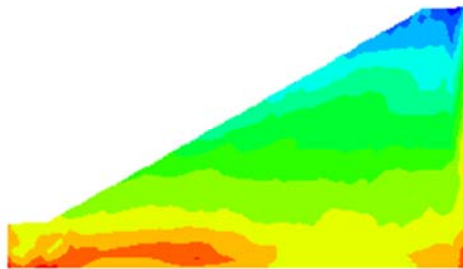
(d) 150 gal



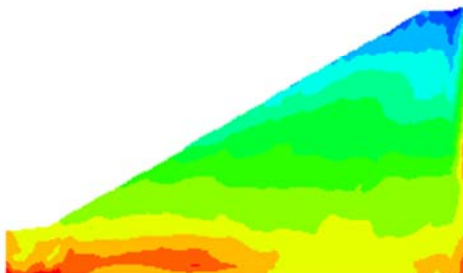
(a) 200 gal



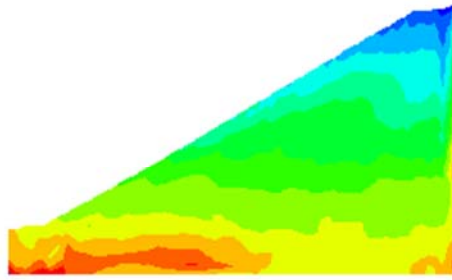
(b) 250 gal



(c) 300 gal



(d) 350 gal



(a) 400 gal

図 3-32 水圧分布 (MC Case2)

(3) ケース 3

加振加速度 250gal 以後に、法肩から法尻まで、および表層一部にすべり線が形成される。加振加速度 500gal 以後に、すべり変位が大きくなる。

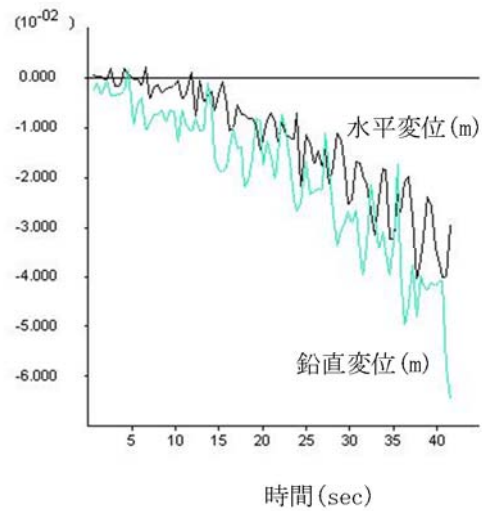


図 3-33 斜面法肩の変位応答 (MC Case3)

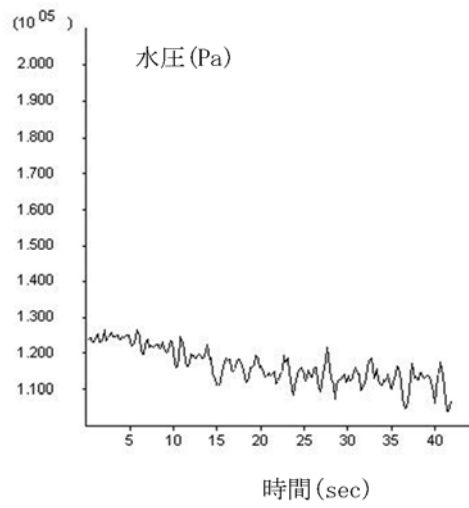


図 3-34 斜面法肩の水圧応答 (MC Case3)

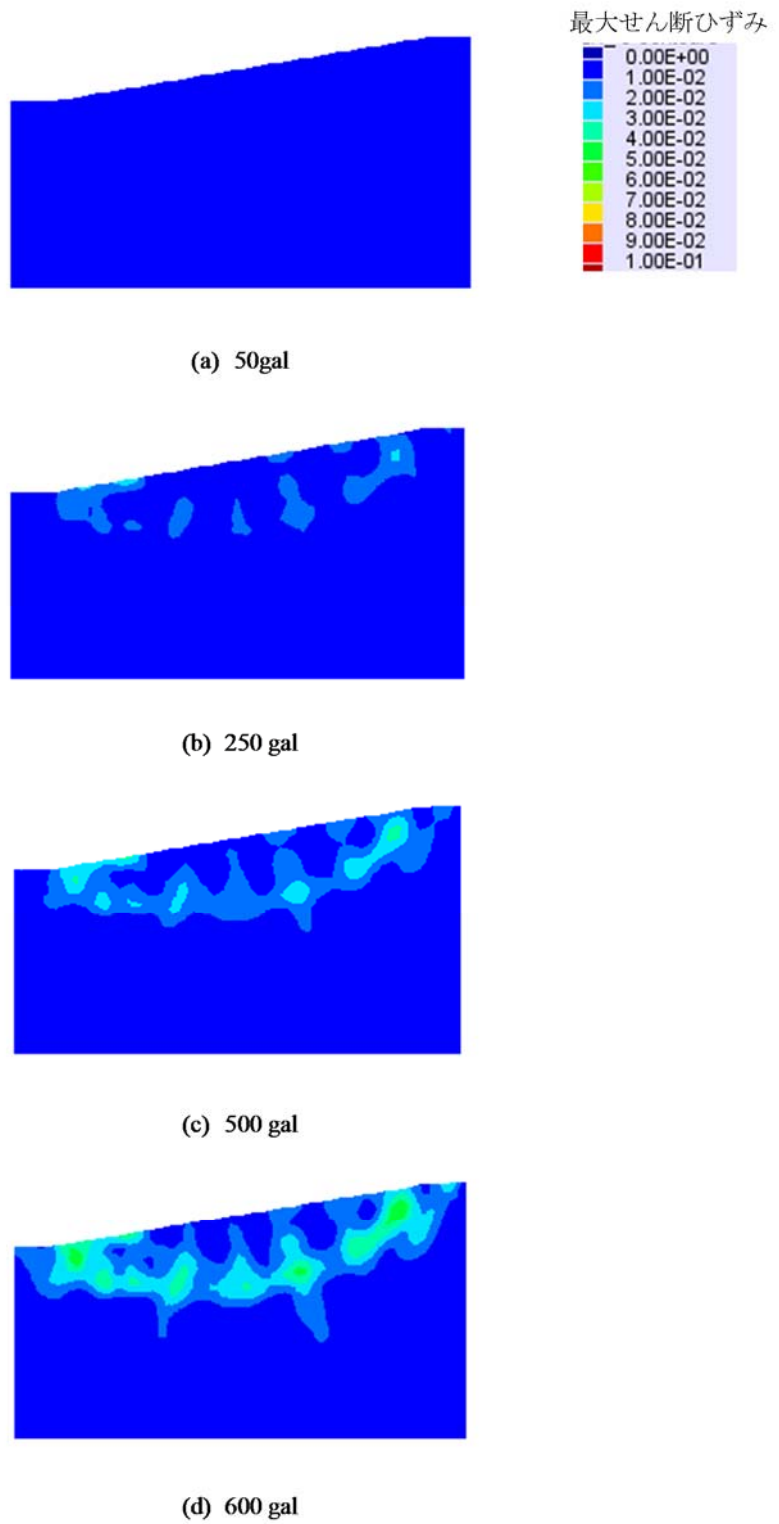


図 3-35 最大せん断ひずみ分布 (MC Case3)

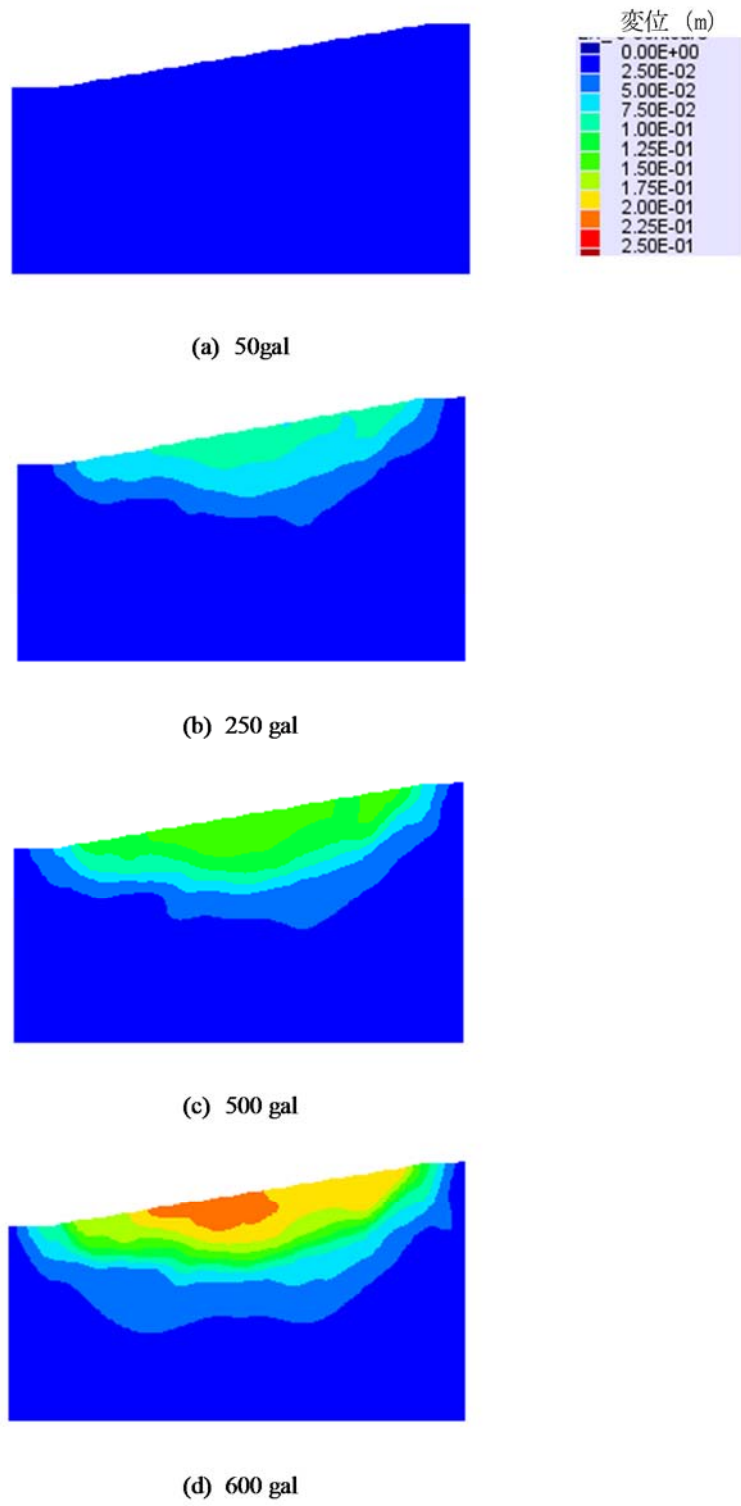
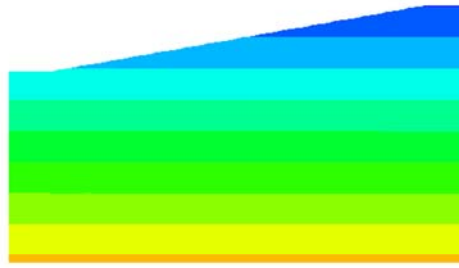
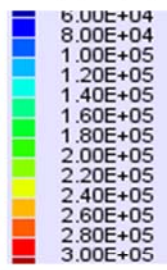
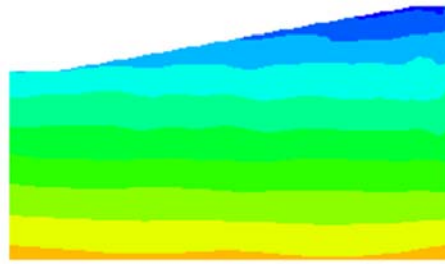


图 3-36 変位分布 (MC Case3)

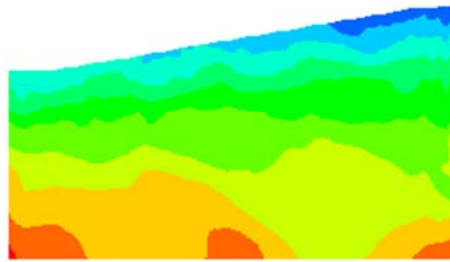
水圧 (Pa)



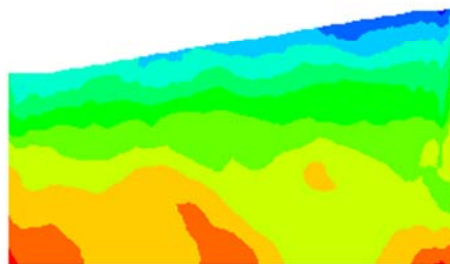
(a) 初期状態



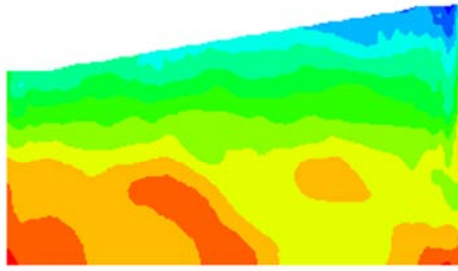
(b) 50gal



(c) 250 gal



(d) 500 gal



(a) 600 gal

図 3-37 水圧分布 (MC Case3)

(4) ケース 4

加振加速度 500gal 辺りで、法肩から法尻までにすべり線が形成される。その後、すべり変位が大きくなる。

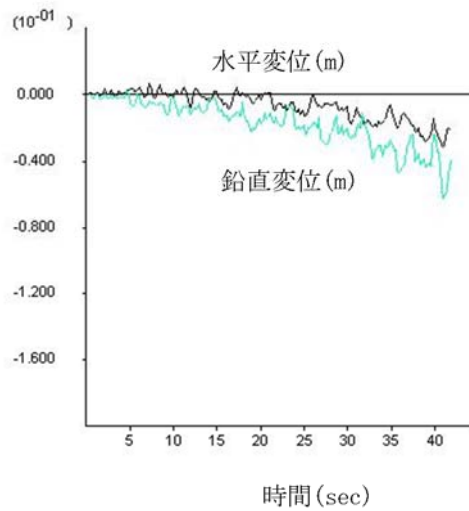


図 3-38 斜面法肩の変位応答 (MC Case4)

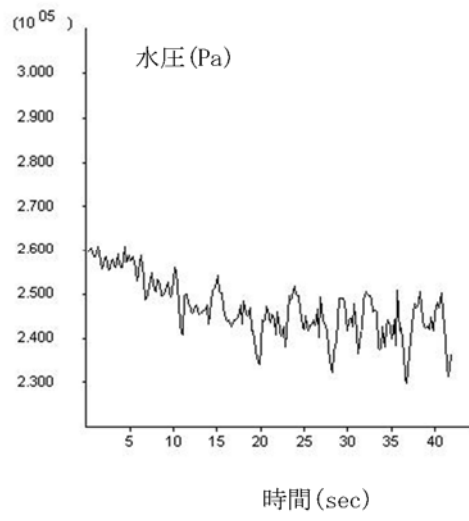


図 3-39 斜面法肩の水圧応答 (MC Case4)

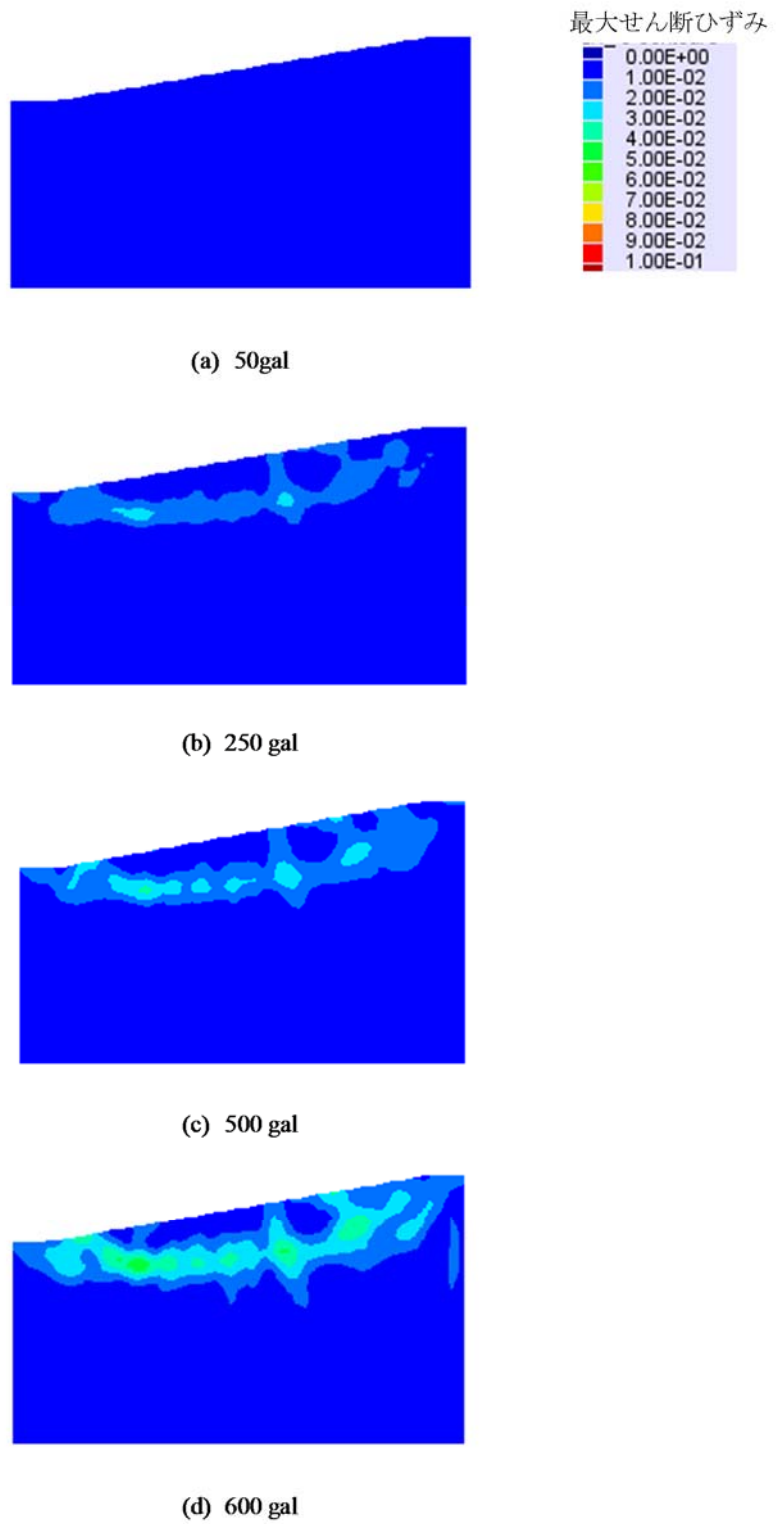


図 3-40 最大せん断ひずみ分布 (MC Case4)

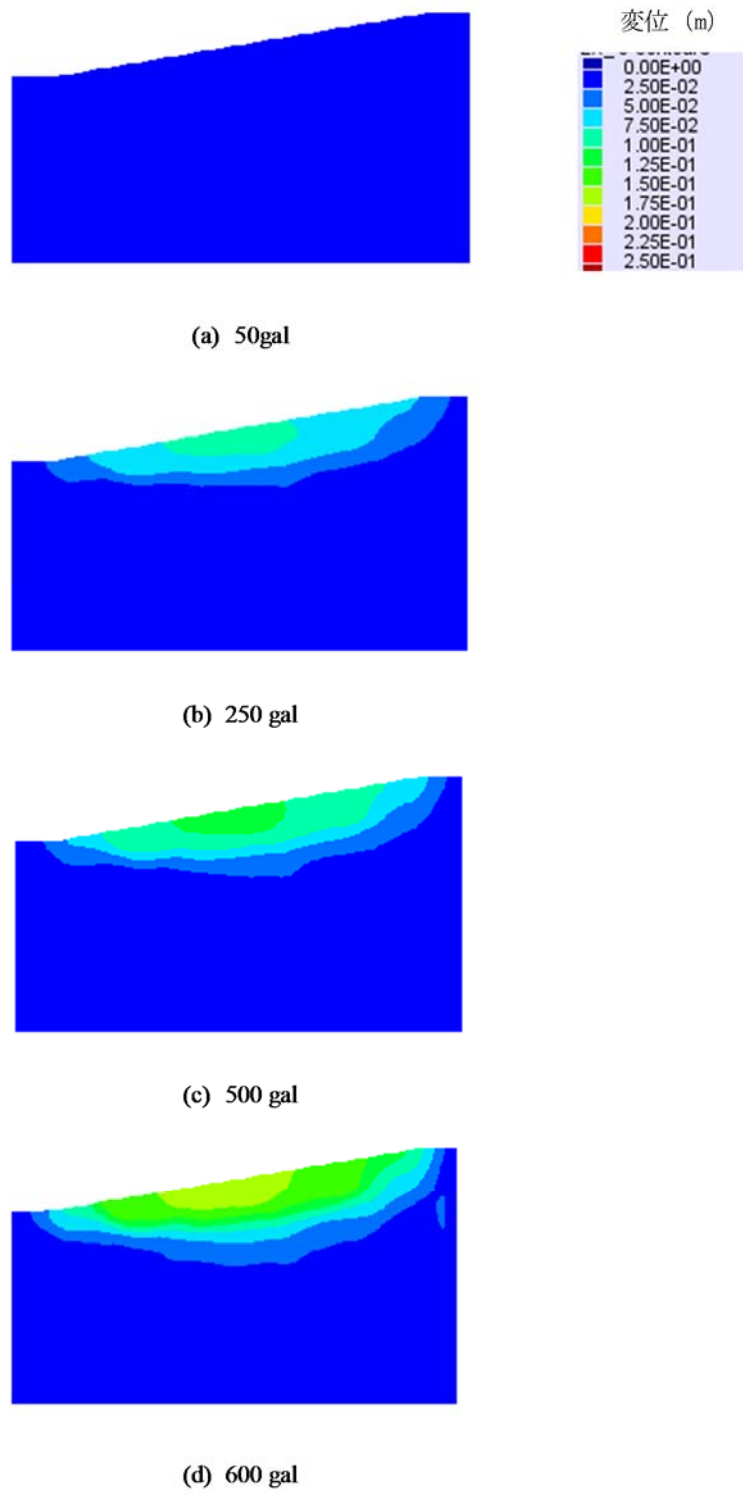
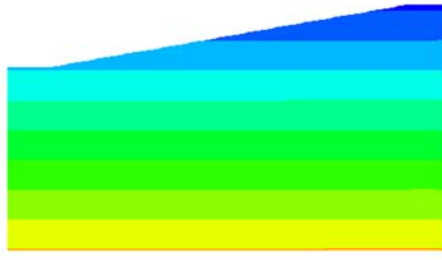
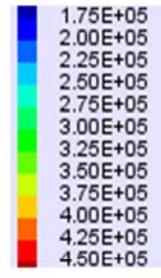
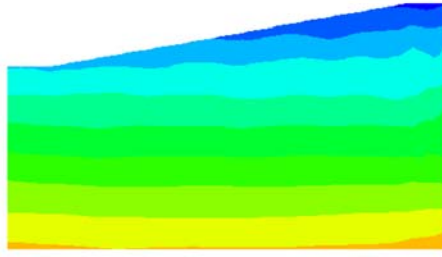


図 3-41 変位分布 (MC Case4)

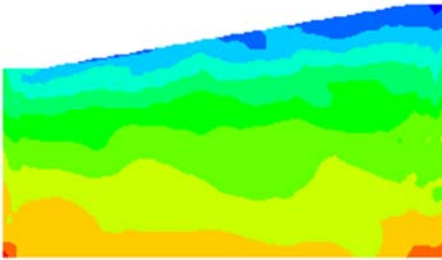
水圧 (Pa)



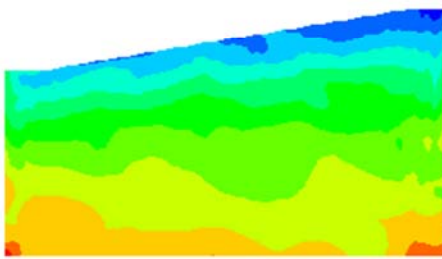
(a) 初期状態



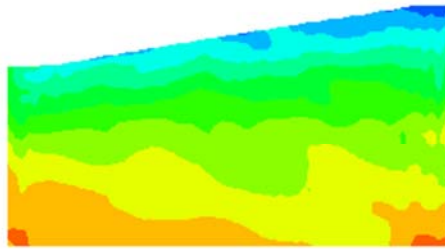
(b) 50gal



(c) 250 gal



(d) 500 gal



(a) 600 gal

図 3-42 水圧分布 (MC Case4)

3.3.2 マルチスプリングモデルの結果

(1) Case1m

加振加速度 200gal 辺りで、法肩から法尻までにはすべり線が形成される。ただし、250gal 加振計算の途中で斜面肩部分の変形が大きくなり、要素が潰れたため計算が中止された。

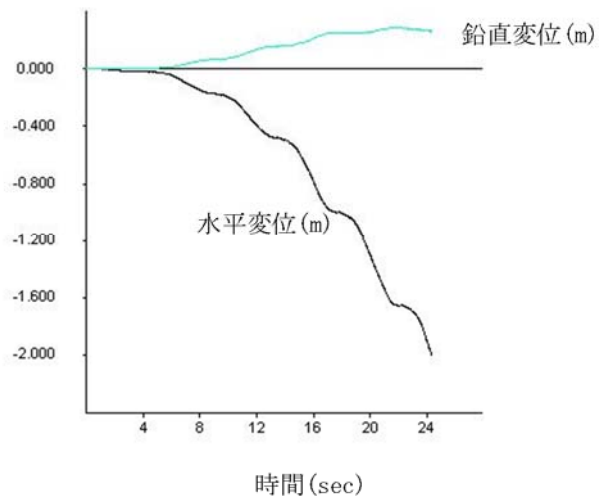


図 3-43 斜面表面中央の変位応答 (MS Case1m)

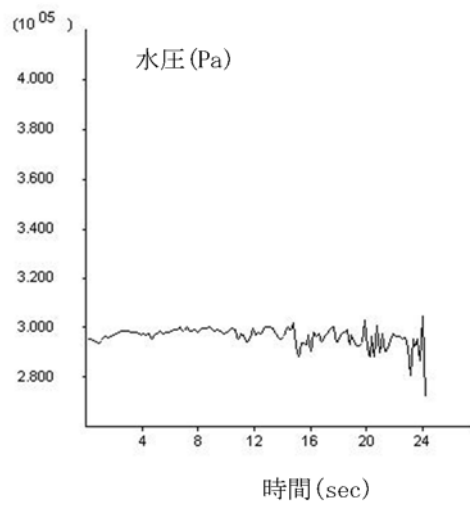
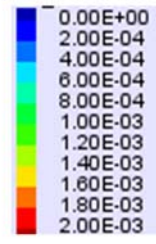
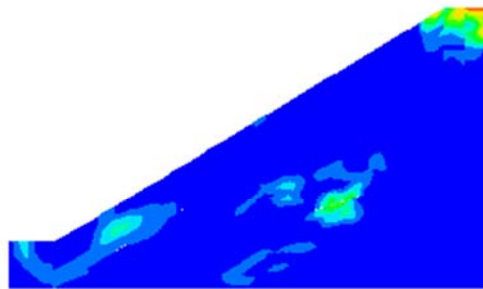


図 3-44 斜面法尻の水圧応答 (MS Case1m)

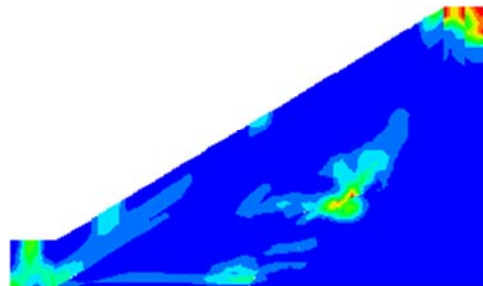
最大せん断ひずみ



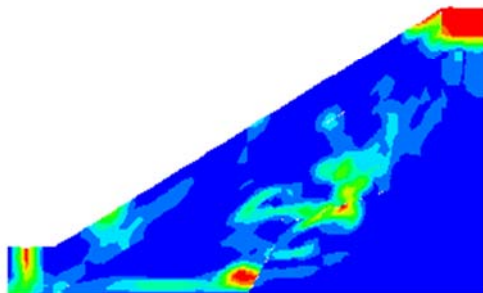
(a) 50gal



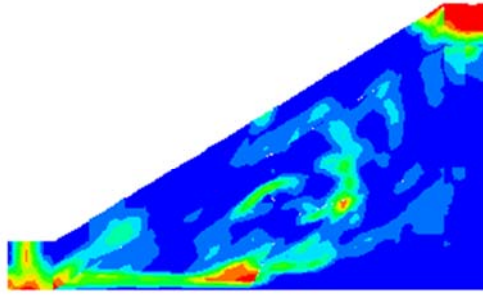
(b) 100 gal



(c) 150 gal

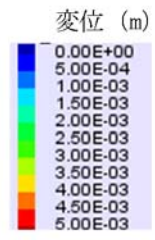
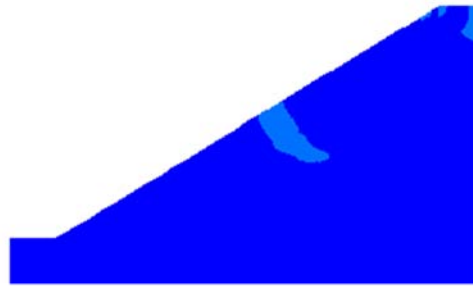


(d) 200 gal



(a) 200 gal(最大値のとき)

図 3-45 最大せん断ひずみ分布 (MS Case1m)



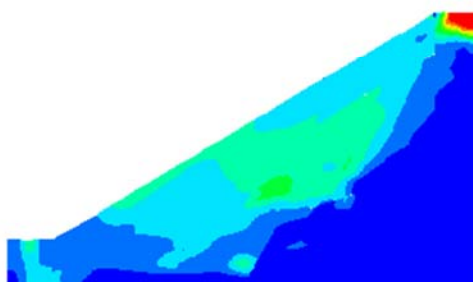
(a) 50gal



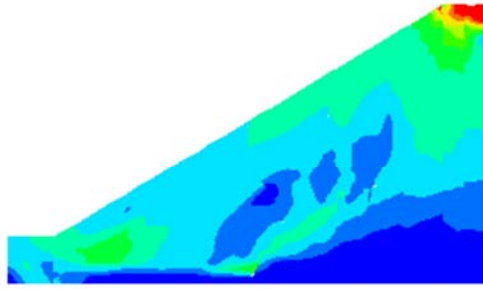
(b) 100 gal



(c) 150 gal



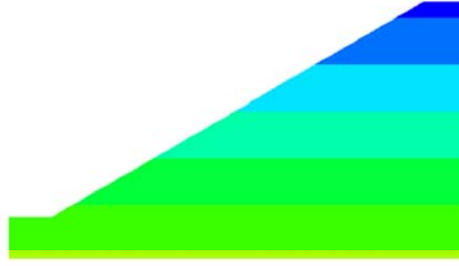
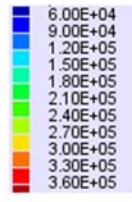
(d) 200 gal



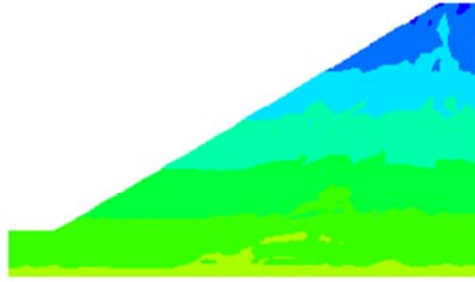
(a) 200 gal(最大値のとき)

図 3-46 変位分布 (MS Case1m)

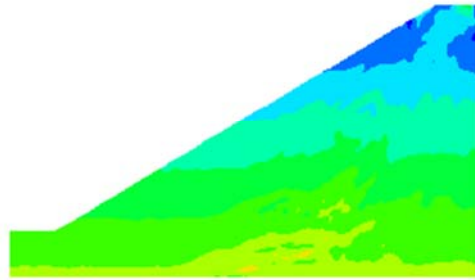
水压 (Pa)



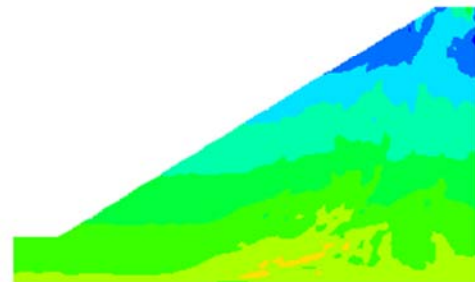
(a) 初期状態



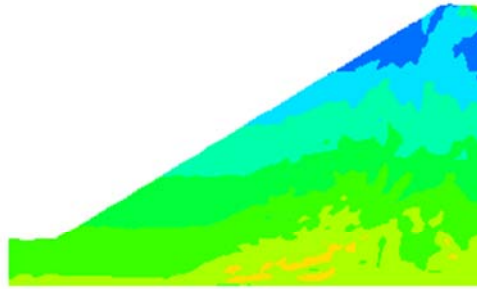
(b) 50gal



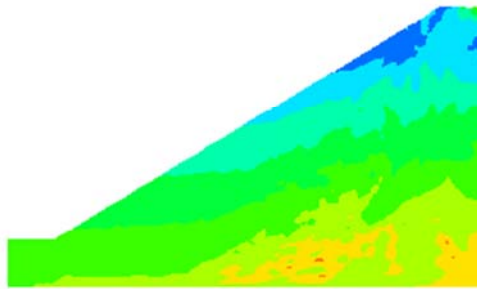
(c) 100 gal



(d) 150 gal



(a) 200 gal



(b) 200 gal(最大値のとき)

図 3-47 水圧分布 (MS Case1m)

(2) Case2m

加振加速度 250gal 辺りで、斜面上部から法尻までにすべり線が形成される。ただし、350gal 加振計算の途中で斜面肩部分の変形が大きくなり、要素が潰れたため計算が中止された。

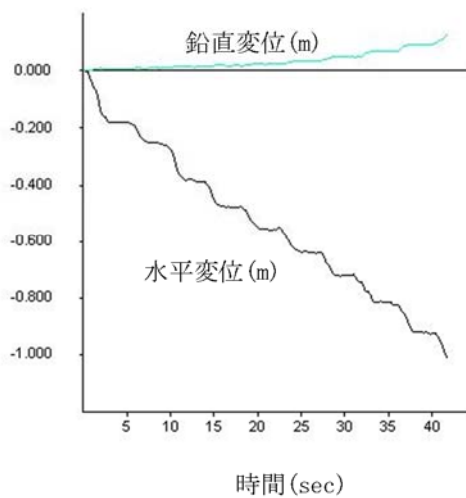


図 3-48 斜面表面中央の変位応答 (MS Case2m)

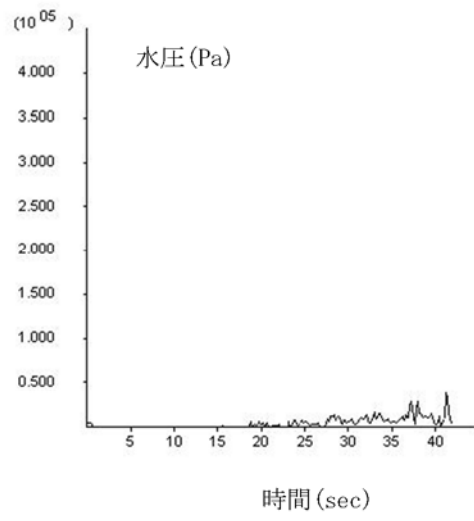
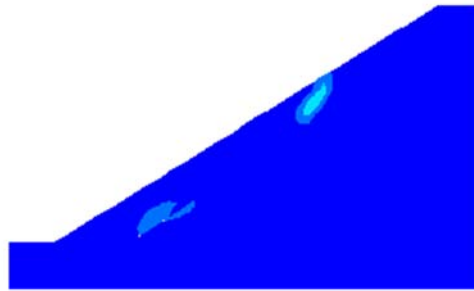
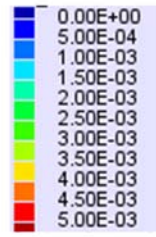
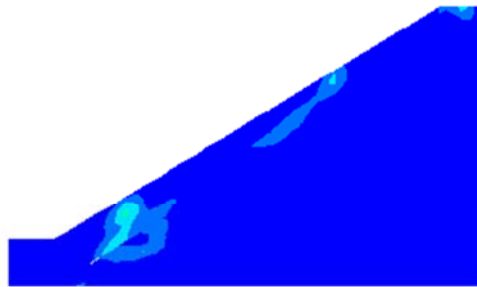


図 3-49 斜面法尻の水圧応答 (MS Case2m)

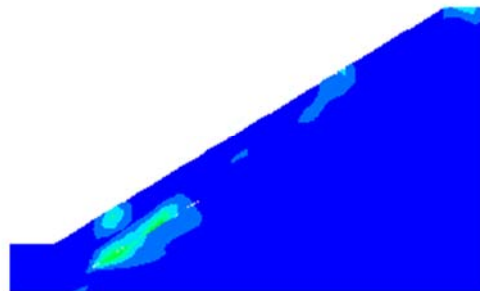
最大せん断ひずみ



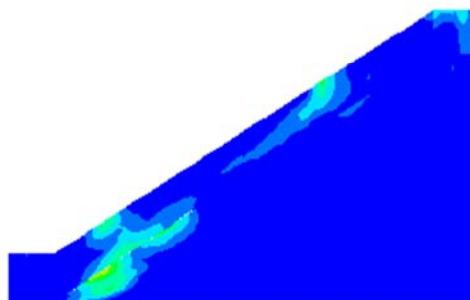
(a) 50 gal



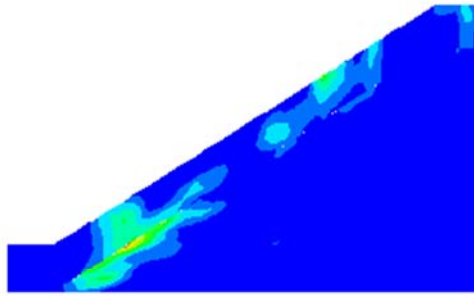
(b) 100 gal



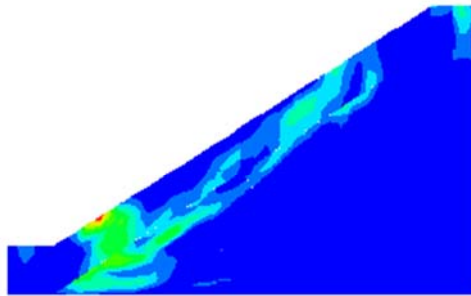
(c) 150 gal



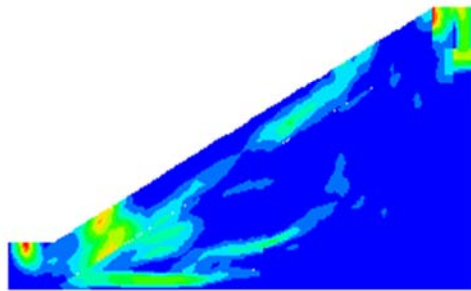
(d) 200 gal



(a) 250 gal

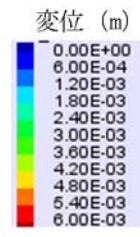
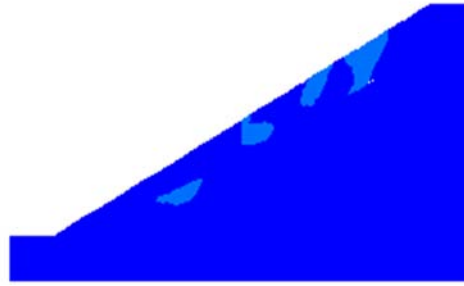


(b) 300 gal

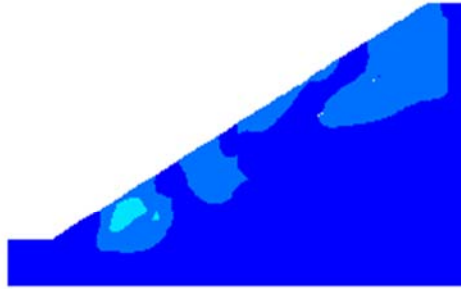


(c) 300 gal(最大値のとき)

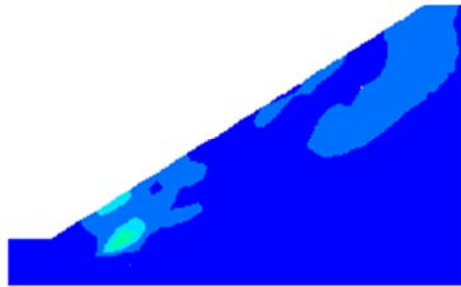
図 3-50 最大せん断ひずみ分布 (MS Case2m)



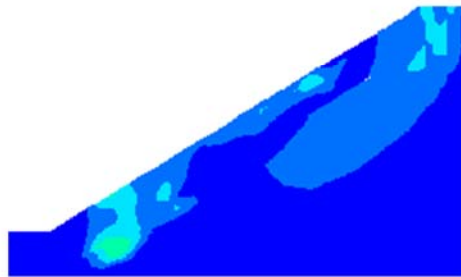
(a) 50 gal



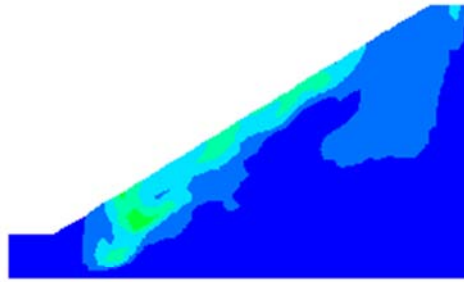
(b) 100 gal



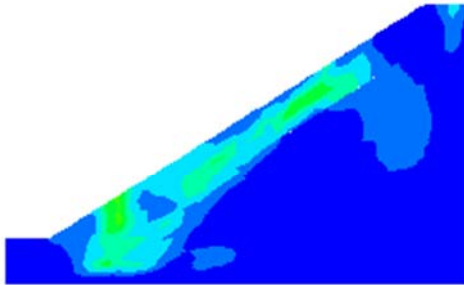
(c) 150 gal



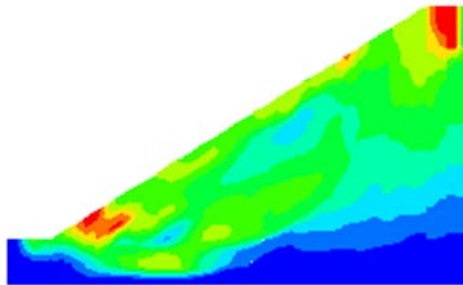
(d) 200 gal



(a) 250 gal



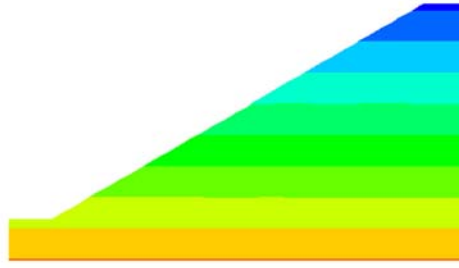
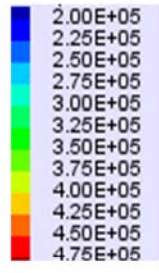
(b) 300 gal



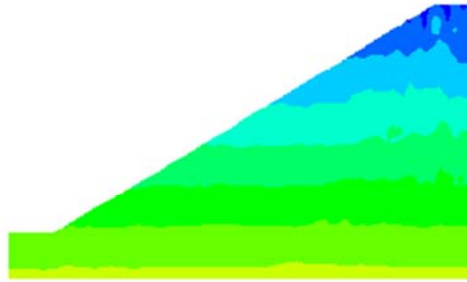
(c) 300 gal(最大値のとき)

図 3-51 変位分布 (MS Case2m)

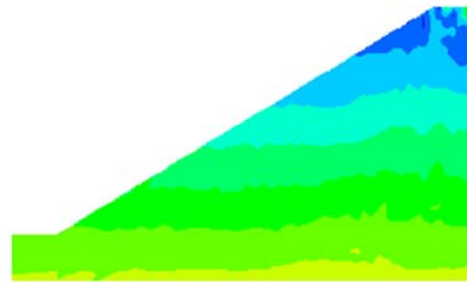
水圧 (Pa)



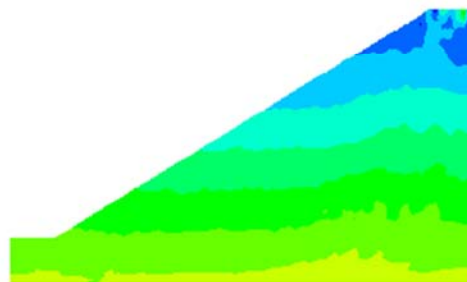
(a) 初期状態



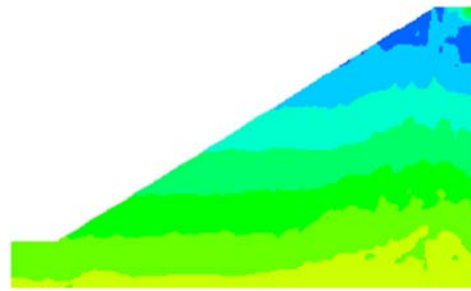
(b) 50 gal



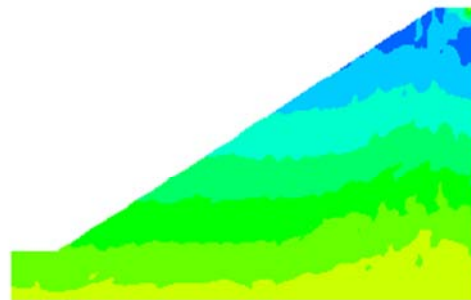
(c) 100 gal



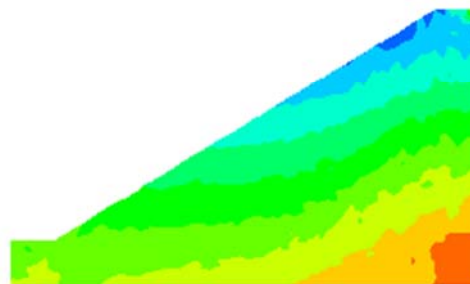
(d) 150 gal



(a) 250 gal



(b) 300 gal



(c) 300 gal(最大値のとき)

図 3-52 水圧分布 (MS Case2m)

(3) Case3m

加振加速度 100gal 辺りで、肩部から斜面内部へ（法尻方向）の一部すべり線が形成される。ただし、150gal 加振計算の途中で斜面肩部分の変形が大きくなり、要素が潰れたため計算が中止された。

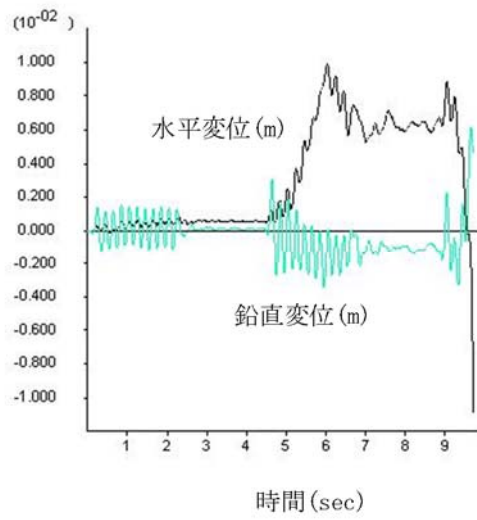


図 3-53 斜面法肩の変位応答 (MS Case3m)

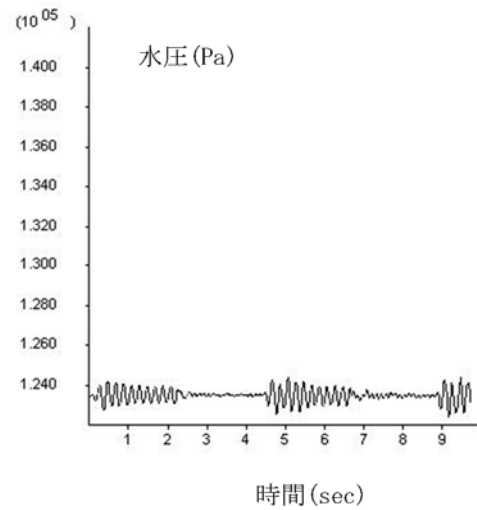
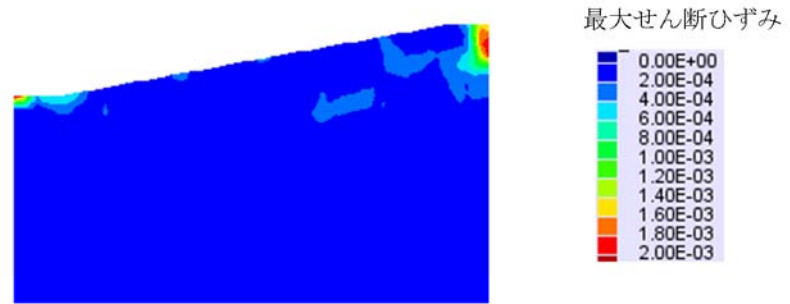
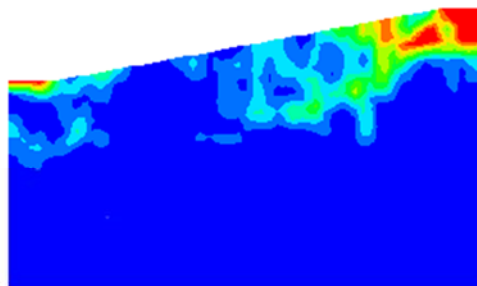


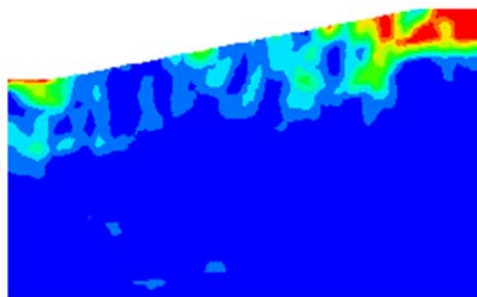
図 3-54 斜面法肩の水圧応答 (MS Case3m)



(a) 50 gal



(b) 100 gal



(c) 150 gal(最大値のとき)

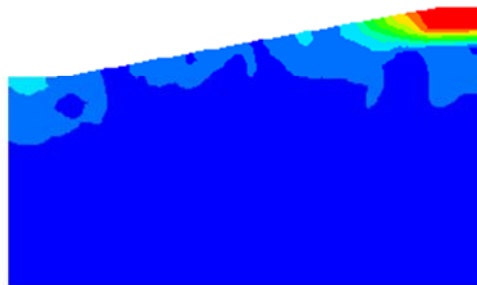
図 3-55 最大せん断ひずみ分布 (MS Case3m)



(a) 50gal



(b) 100 gal



(c) 100 gal(最大値のとき)

図 3-56 変位分布 (MS Case3m)

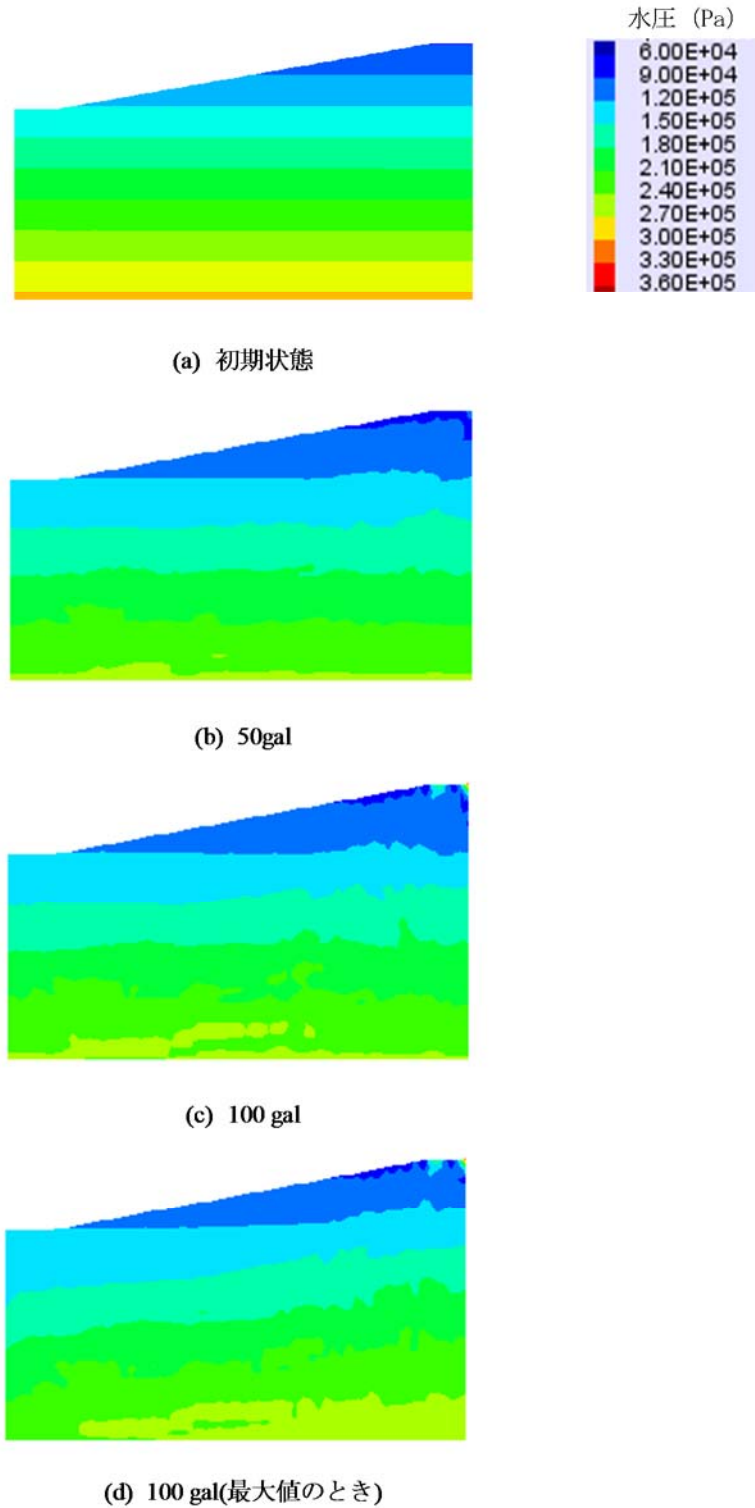


図 3-57 水圧分布 (MS Case3m)

(4) Case4m

加振加速度 150gal 辺りで、表層部分にすべり線が形成される。ただし、200gal 加振計算の途中で斜面肩部分の変形が大きくなり、要素が潰れたため計算が中止された。

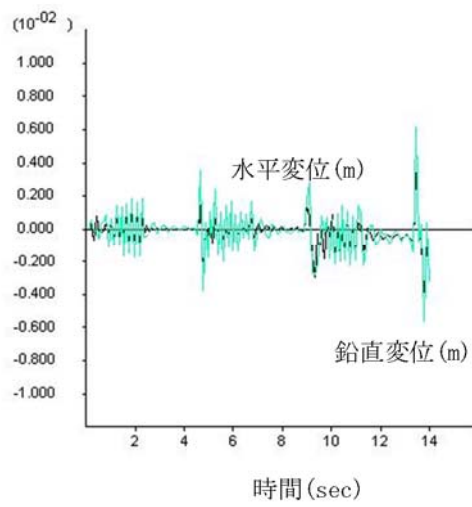


図 3-58 斜面法肩の変位応答 (MS Case4m)

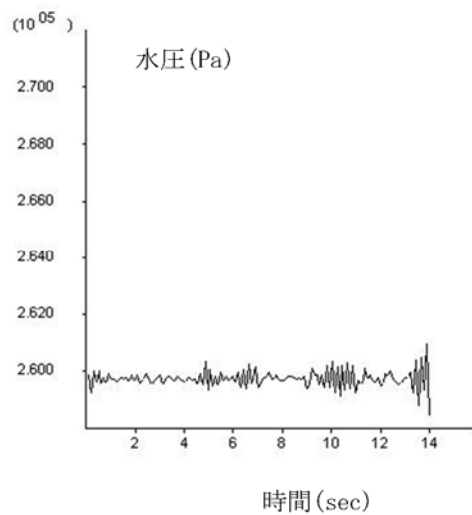


図 3-59 斜面法肩の水圧応答 (MS Case4m)

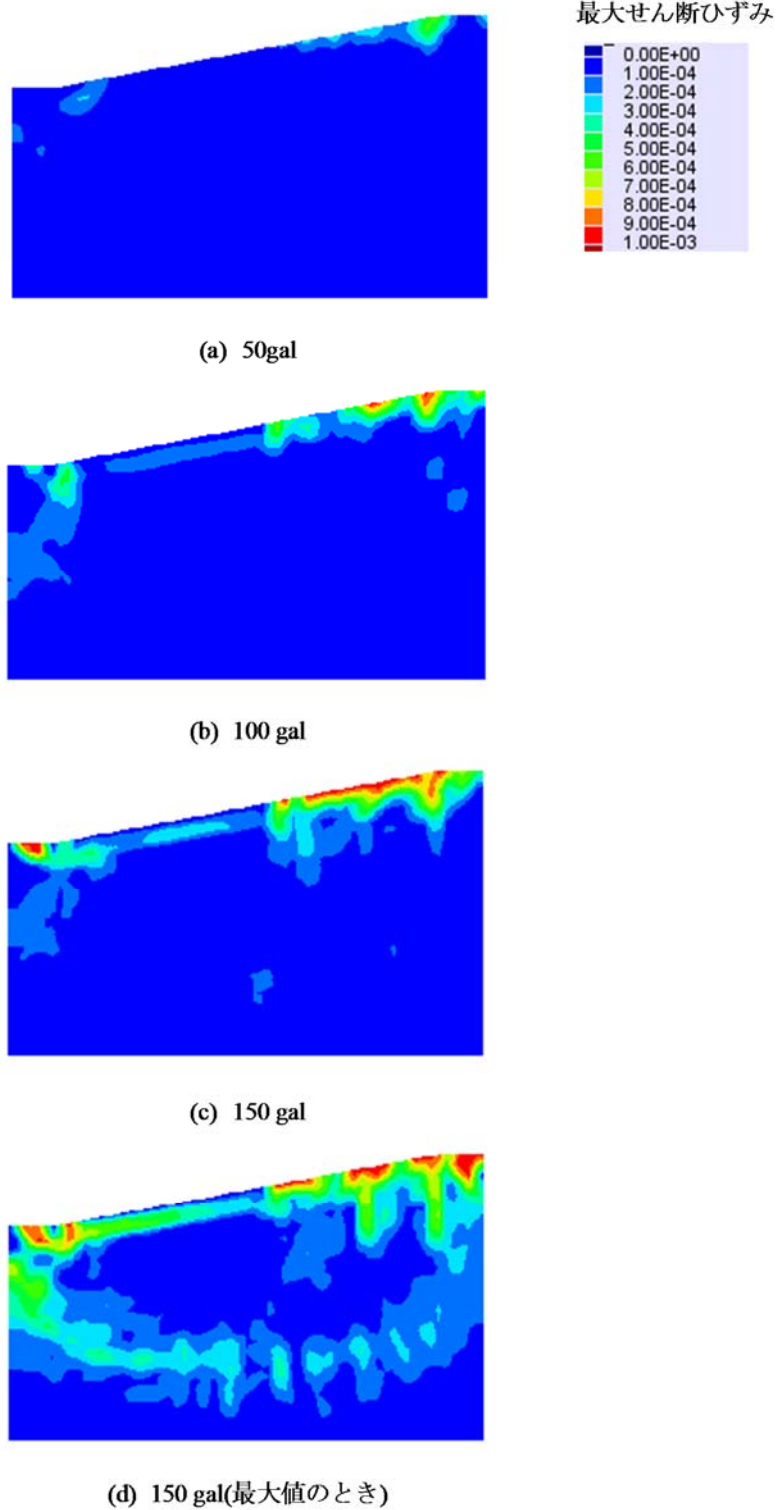


図 3-60 最大せん断ひずみ分布 (MS Case4m)



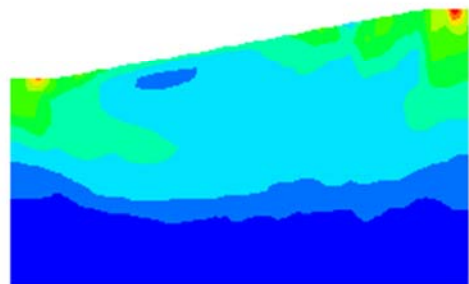
(a) 50gal



(b) 100 gal



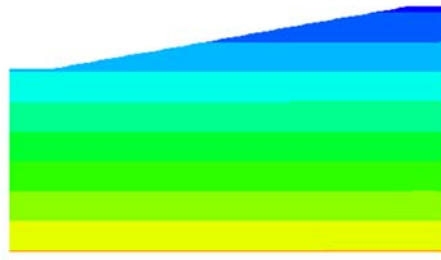
(c) 150 gal



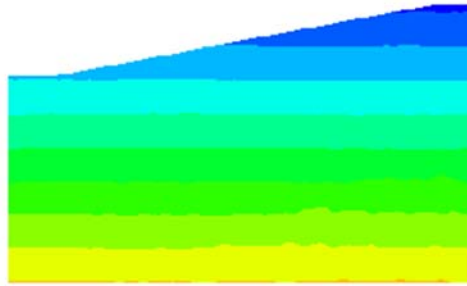
(d) 150gal(最大値のとき)

図 3-61 変位分布 (MS Case4m)

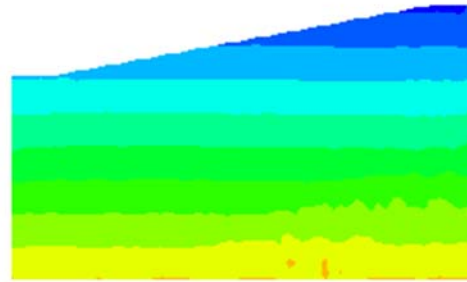
水压 (Pa)



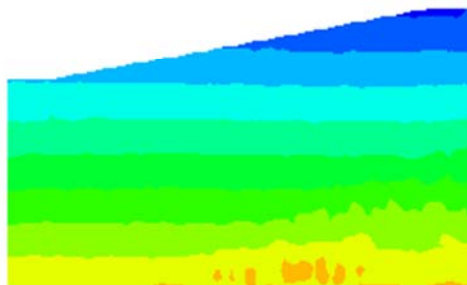
(a) 初期状態



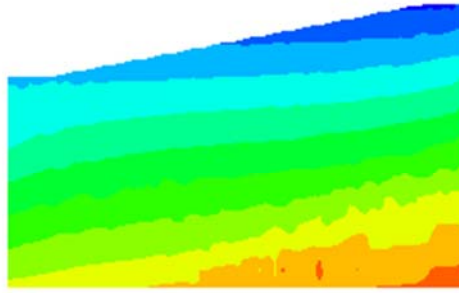
(b) 50gal



(c) 100 gal



(d) 150 gal



(a) 150gal(最大値のとき)

図 3-62 水圧分布 (MS Case4m)

3.4 大型遠心力模型実験モデル

大型遠心力模型実験モデルについて、静的および動的的外力を与える有効応力解析を行う。検討条件として、3.2の小型模型地盤モデル解析と同様に、構成材料はAXカオリン、MCクレーを重量比1:1に配合した粘土モデルを用いる。模型地盤の斜面形状は、急勾配 30° とする。ただし、実験施設の管理者へのヒアリングにより、使用できる大型土槽の特性を生かし、加振機の性能も勘案しながら、斜面の高さ及び長さを大きくするとともに、土槽の側面の境界の条件を取り除くために、斜面の両側に水平地盤をできるだけ広く設定できるように配慮した。

また、加振条件は静的荷重を考慮するとともに、正弦波加振とし、振幅を増加させながらすべり面の形成位置および崩壊の生じる加振レベルを求める動的解析を考慮する。

3.4.1 模型地盤モデルの解析概要

図 3-63 には実験モデル、表 3-14 には解析条件を示す。また、図 3-64 にはFLAC解析のメッシュ分割図を示す。

境界条件は土槽と地盤間の不連続性が考慮できるようにジョイント要素を設定し、土槽自体の変位は拘束する条件とする。つまり、固定された土槽内の地盤が重力に応じて自由に移動することが可能なモデルである。ただし、土槽と地盤の剥離および再接触が生じる際の衝撃による境界要素への破壊の影響を防ぐために地盤境界は弾性要素とする。

動的解析の流れは 3.2.1 と同じである。水深を考慮した初期応力の計算後、土槽に正弦波加振し、振幅を増加させながら、崩壊の生じる加振レベルおよびすべり形状を求める。

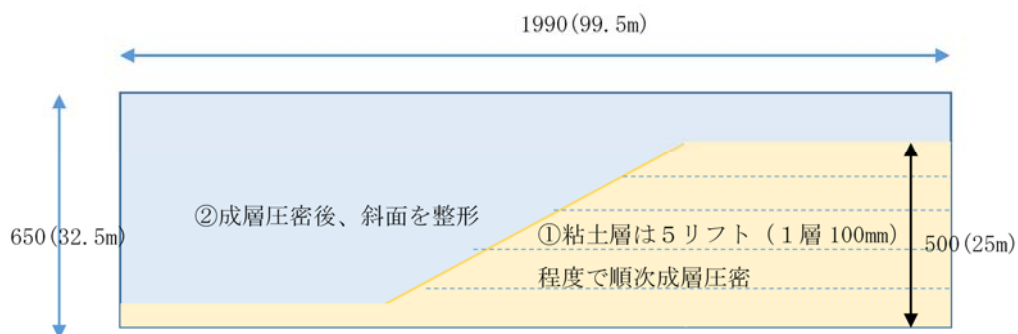
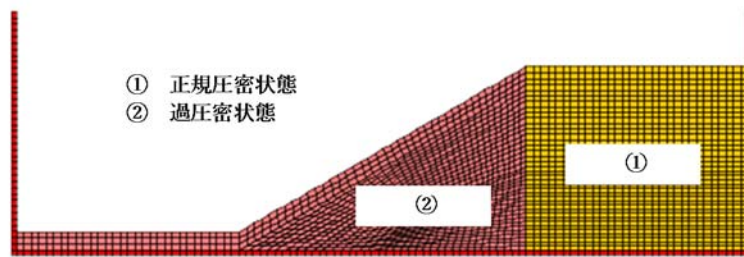


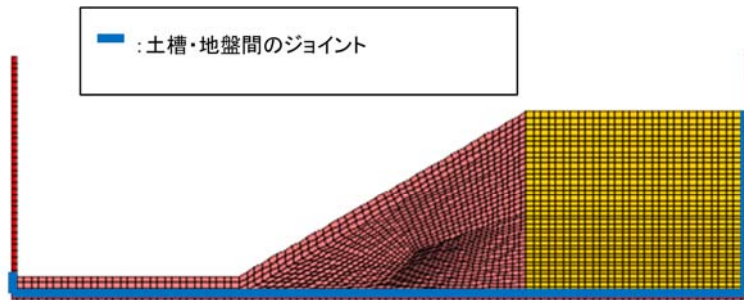
図 3-63 大型実験モデル概要

表 3-14 解析ケース

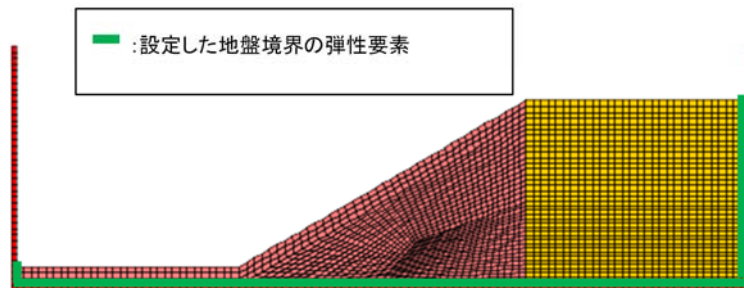
解析ケース	斜面勾配	水深	慣性力	荷重条件
5	30°	0.650×50m	50G	静的
6	30°	0.650×50m	50G	動的
7	30°	斜面内部のみ	50G	静的
8	30°	斜面内部のみ	50G	動的



(a) 物性の設定



(b) ジョイント要素の設定



(c) 破壊を考慮しない弾性要素の設定

図 3-64 解析モデル (要素数 2,307)

3.4.2 解析パラメータの設定

以下の項目については 3.2.2 解析パラメータの設定と同じである。

- (1) 剛性 (モールクーロンモデル)
- (2) 動的変形特性 (マルチスプリングモデル)
- (3) 強度特性
- (4) 過剰間隙水圧のモデル化

3.4.3 入力波の設定

3.2.3 入力波の設定と同じである。

3.5 大型遠心力模型実験モデルの解析結果

3.5.1 モールクーロンモデルの結果

(1) Case5

斜面の傾く角度は 1° ずつ増加し、静的解析を行った。角度 4° の時、斜面が大きくすべる。

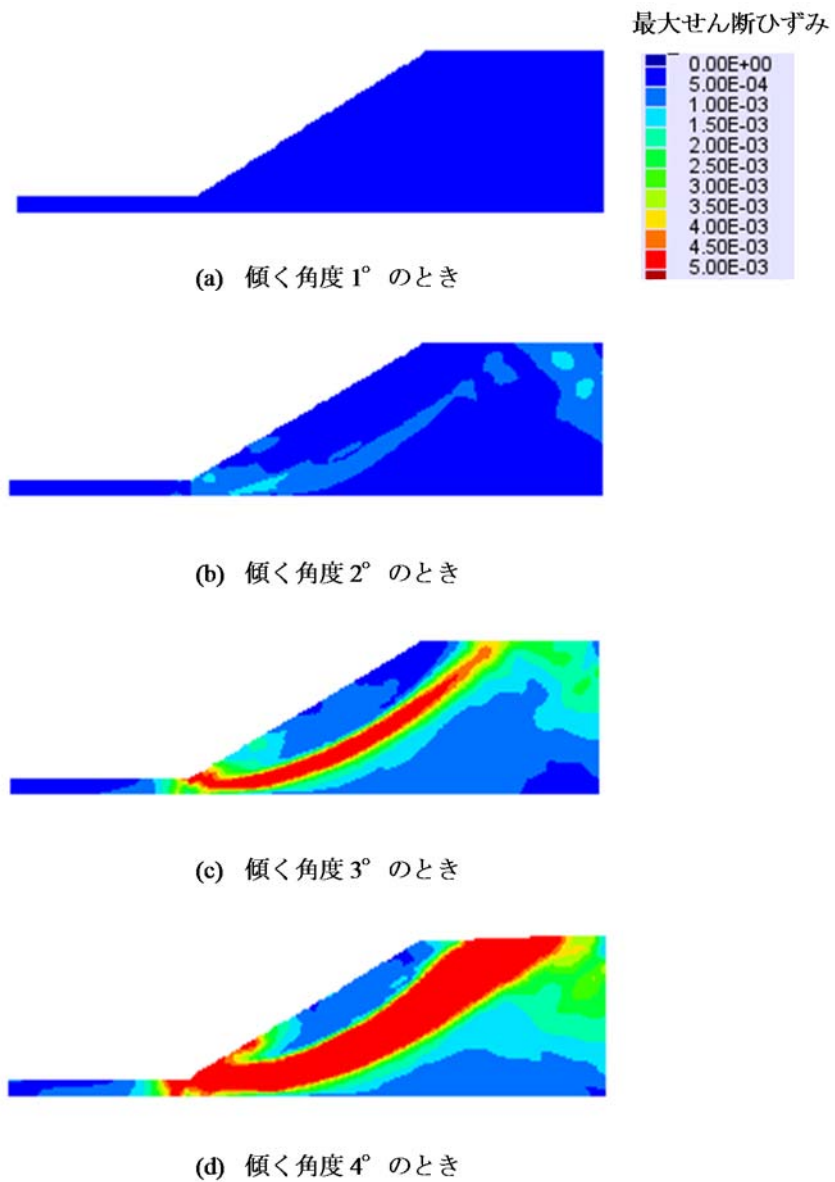


図 3-65 最大せん断ひずみ分布 (MC Case5)

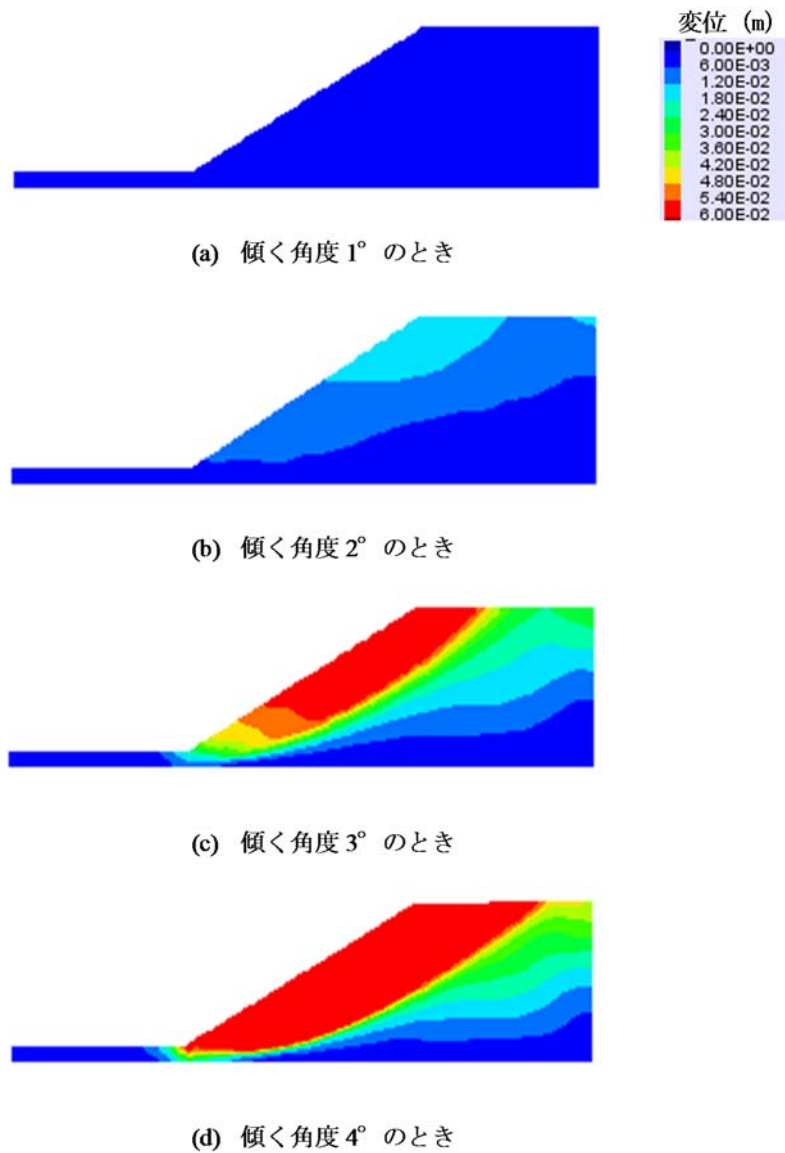


図 3-66 変位分布 (MC Case5)

(2) Case6

加振加速度 200gal~250gal 辺りで、法肩から法尻までのすべり線が形成される。その後、斜面モデルは大きく崩れる。

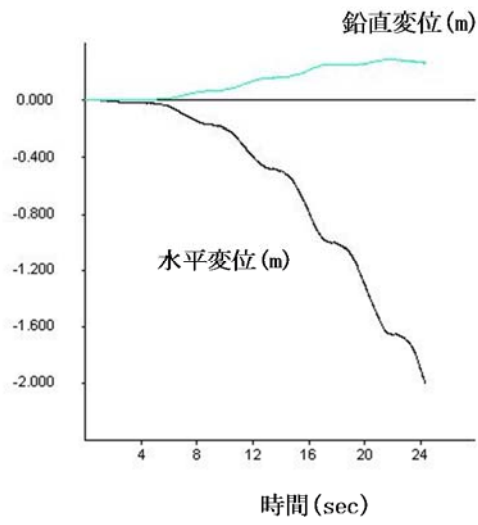


図 3-67 斜面法尻の変位応答 (MC Case6)

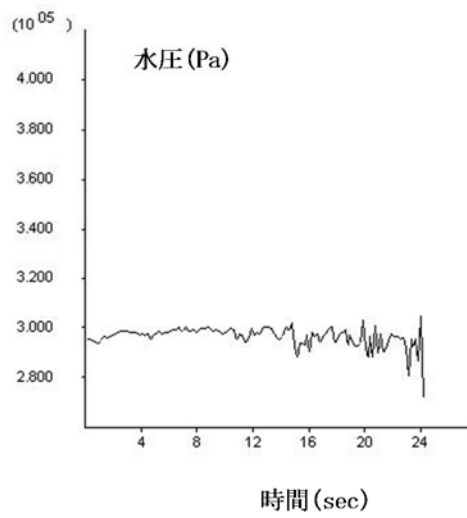


図 3-68 斜面法尻の水圧応答 (MC Case6)

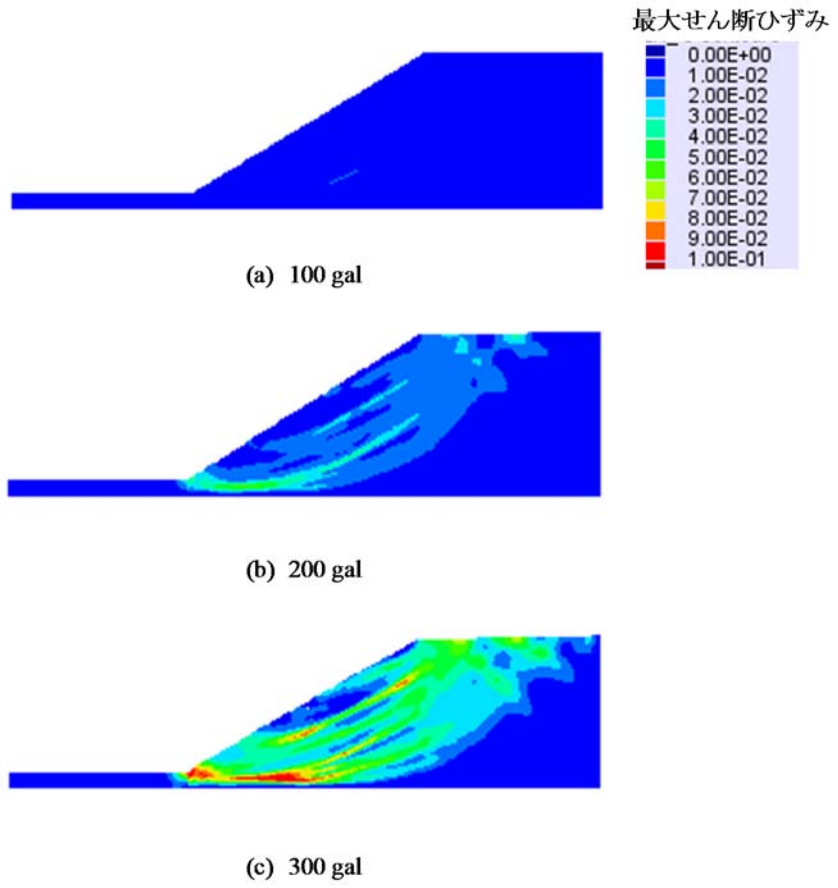


図 3-69 最大せん断ひずみ分布 (MC Case6)

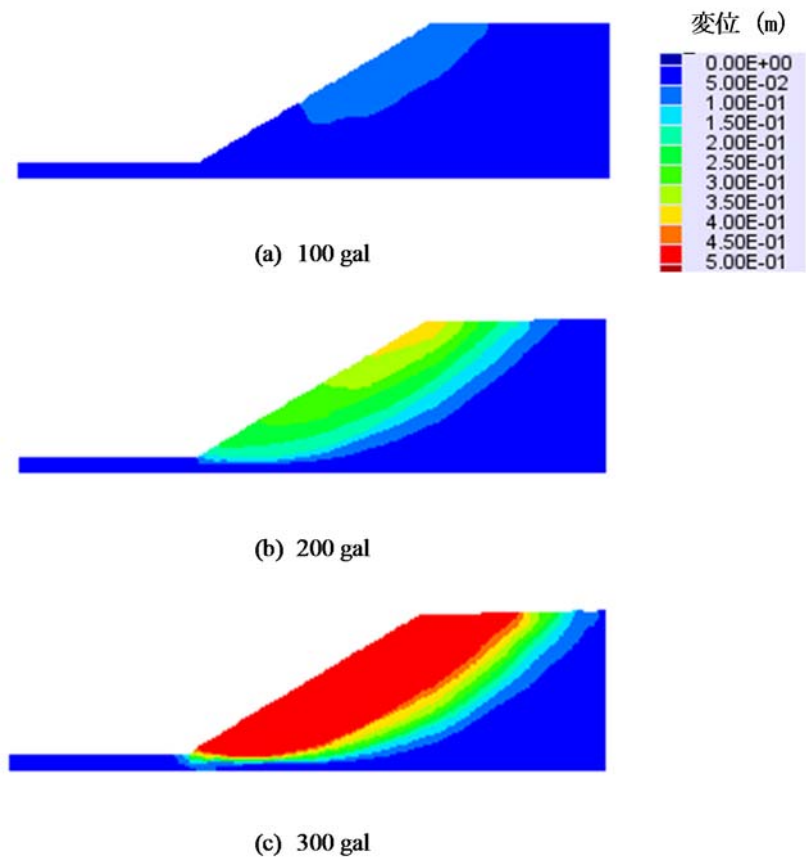


图 3-70 变位分布 (MC Case6)

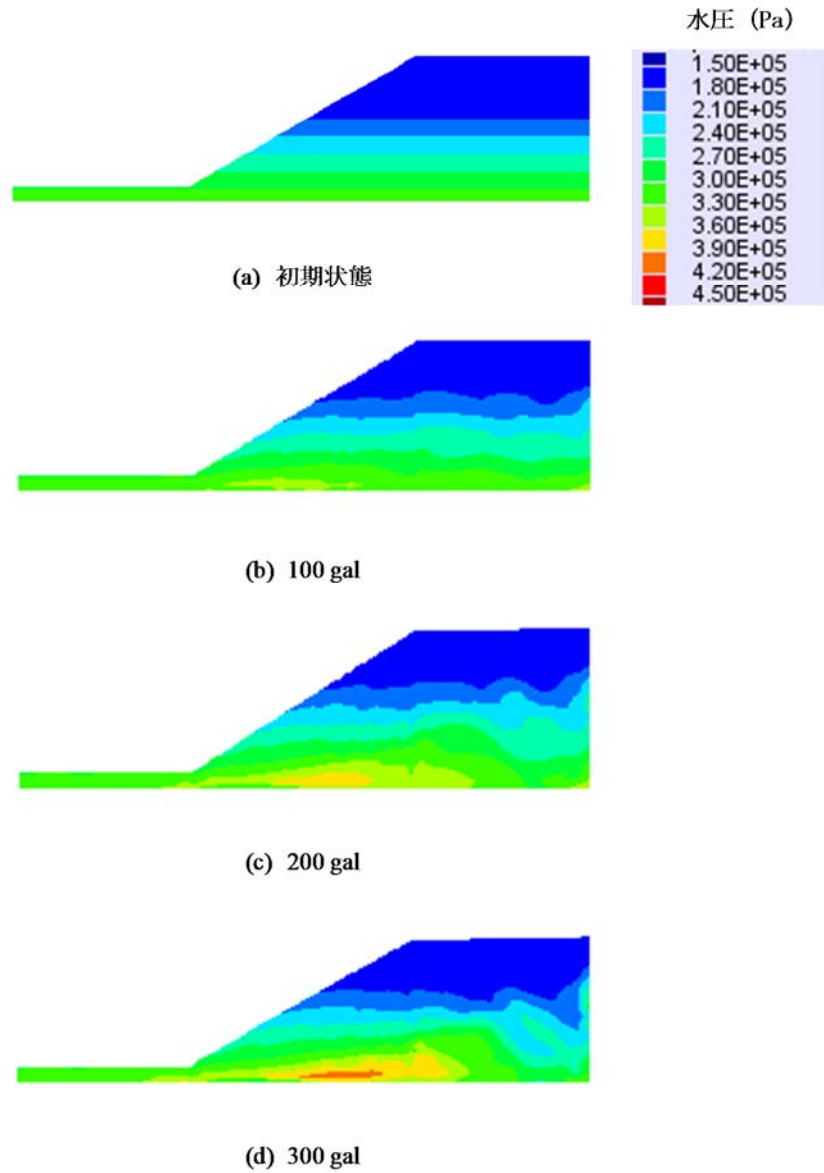


図 3-71 水圧分布 (MC Case6)

(3) Case7

斜面の傾く角度は 1° ずつ増加し、静的解析を行った。角度 $>5^\circ$ の時、斜面が大きくすべる。

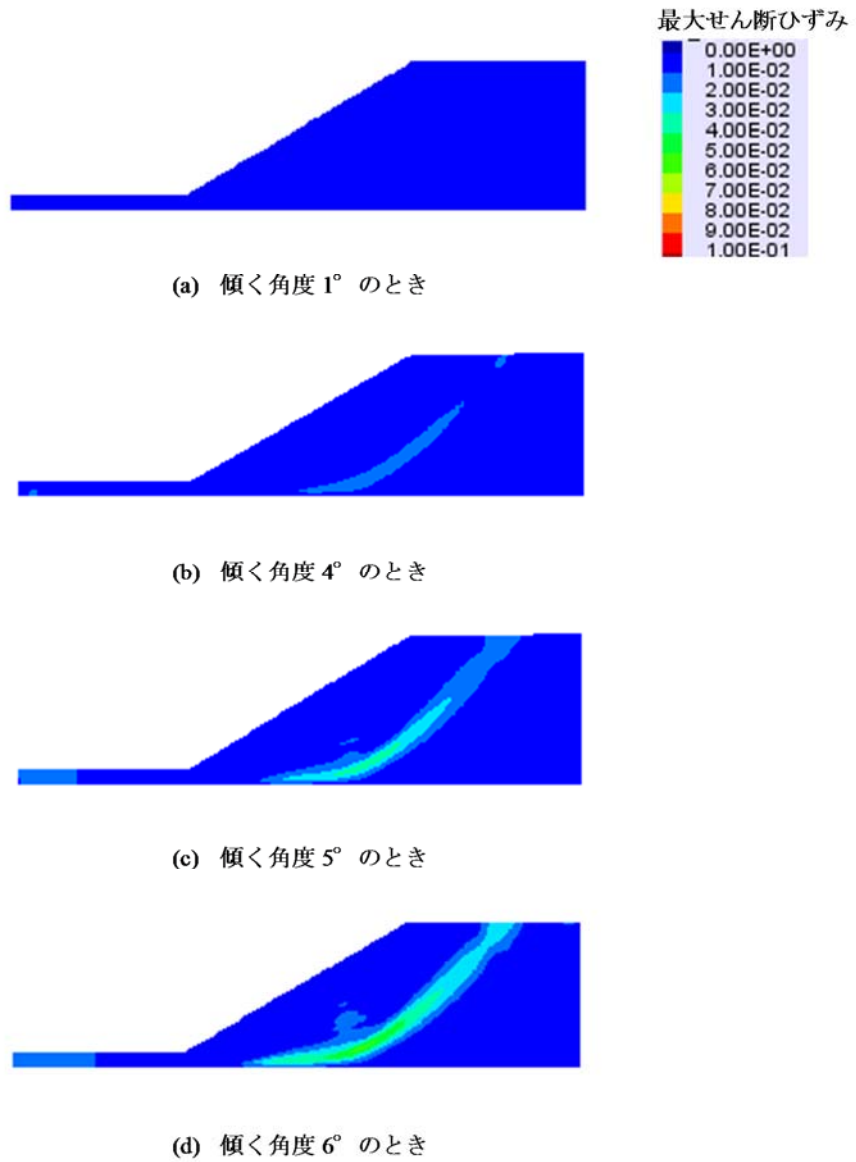


図 3-72 最大せん断ひずみ分布 (MC Case7)

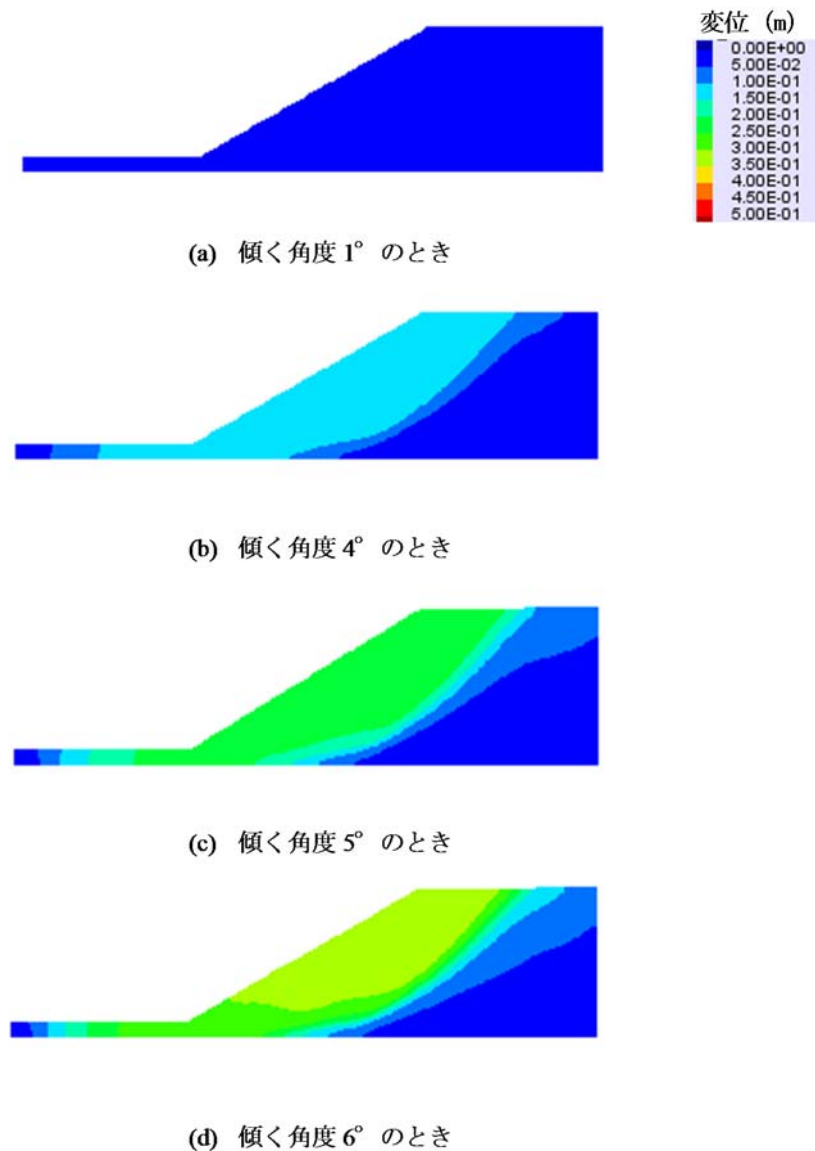


図 3-73 変位分布 (MC Case7)

(4) Case8

加振加速度 200gal~250gal 辺りで、法肩から法尻までのすべり線が形成される。その後、斜面モデルは大きく崩れる。

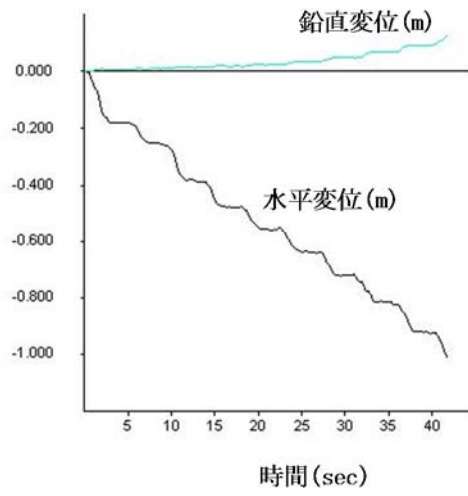


図 3-74 斜面法尻の変位応答 (MC Case8)

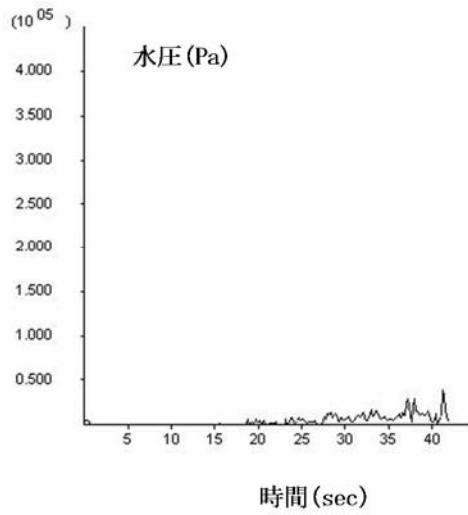


図 3-75 斜面法尻の水圧応答 (MC Case8)

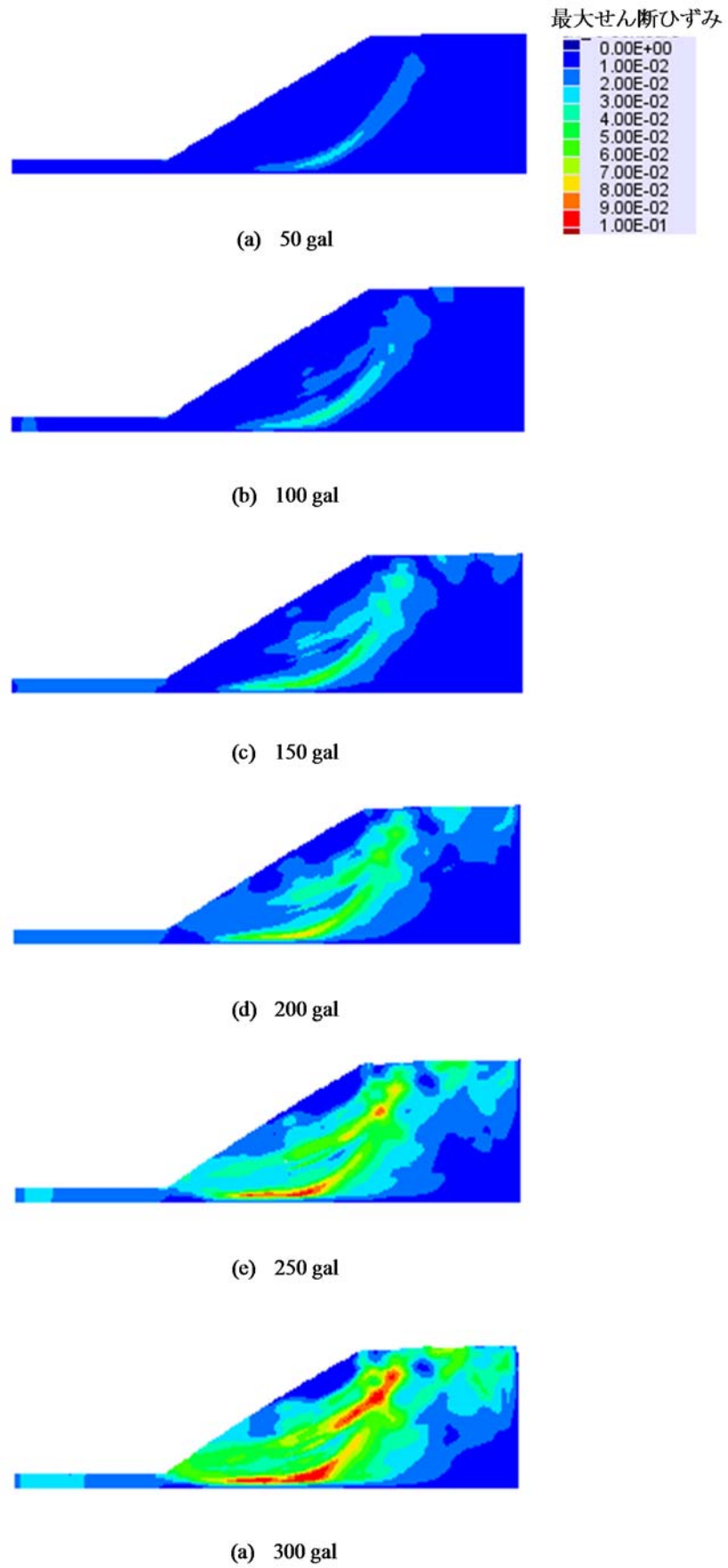


図 3-76 最大せん断ひずみ分布 (MC Case8)

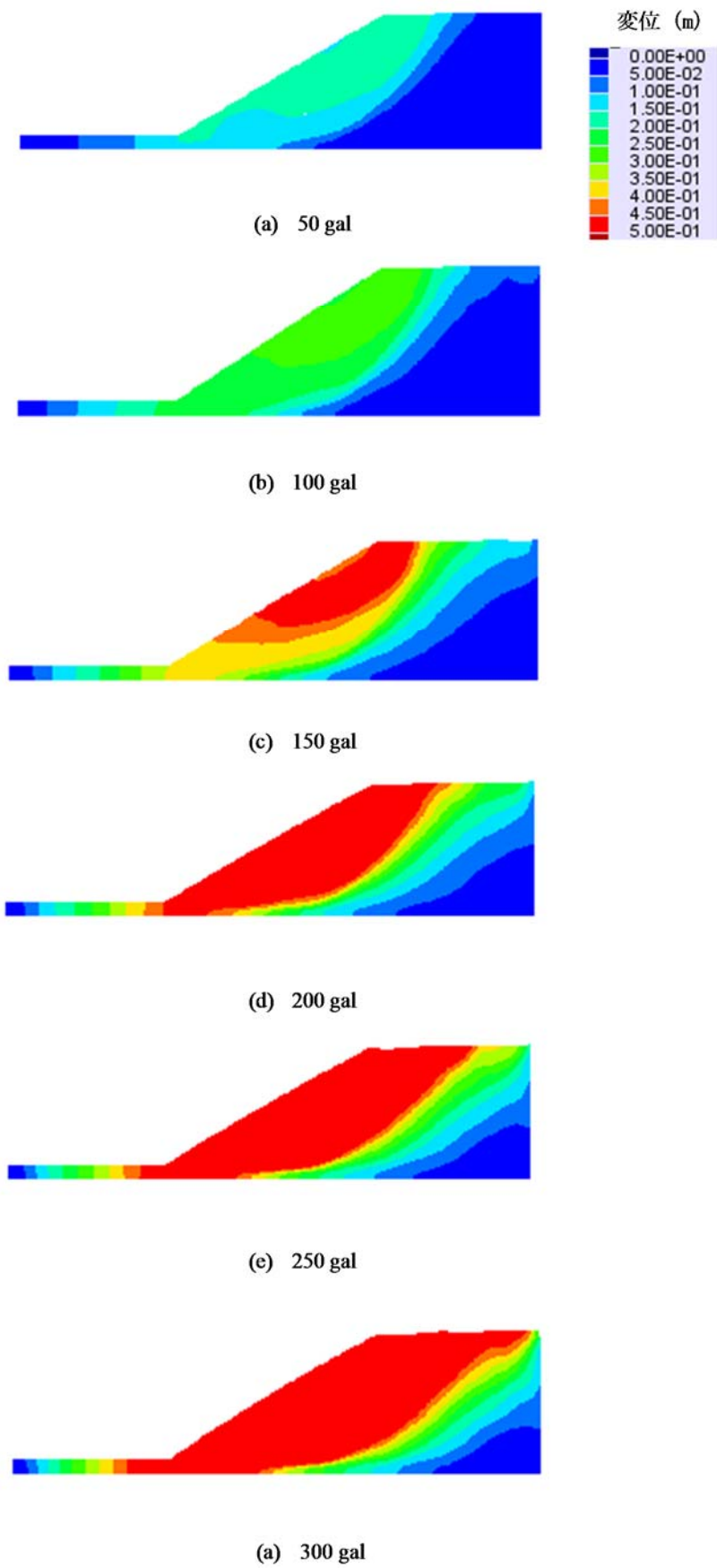
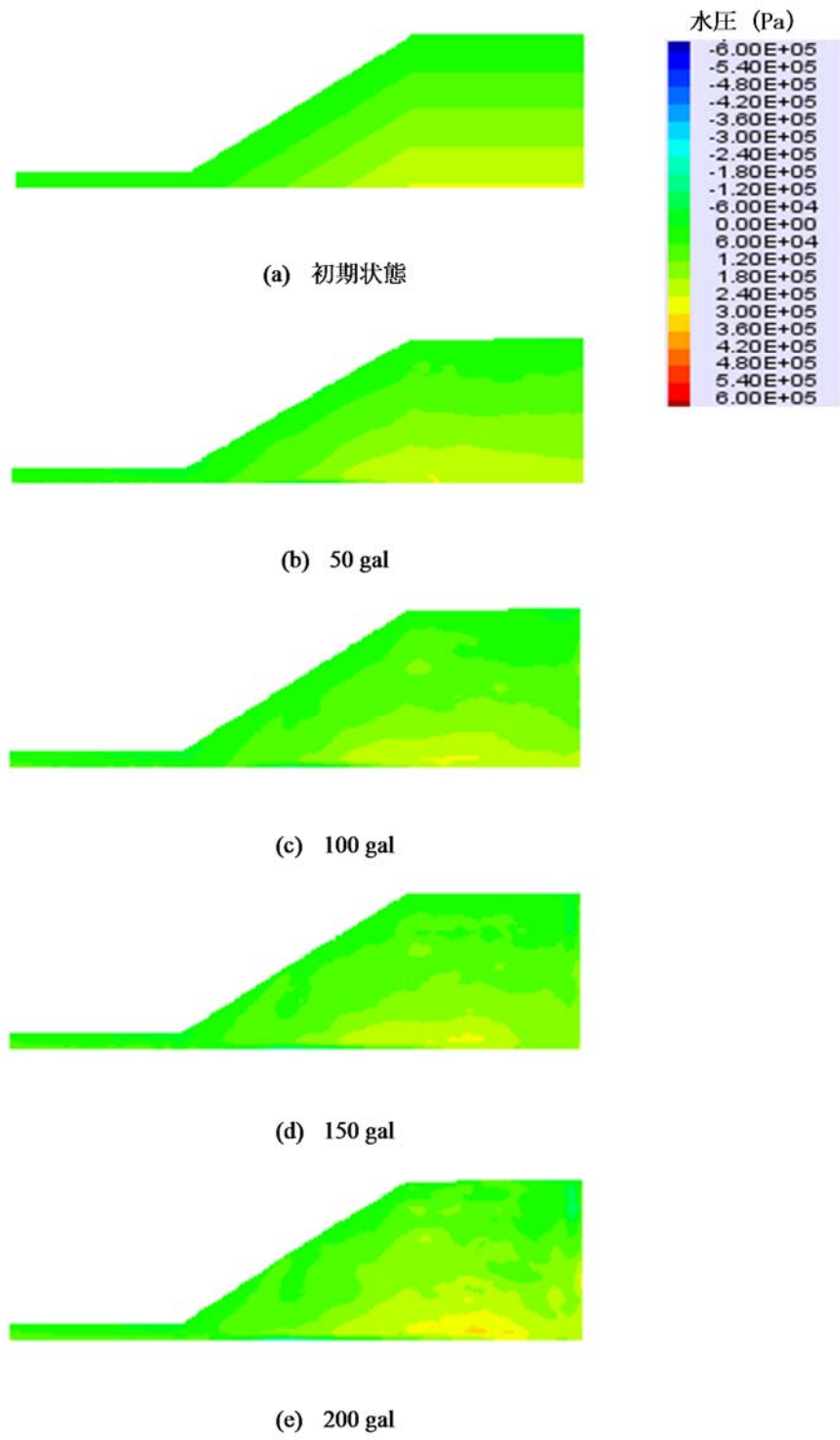
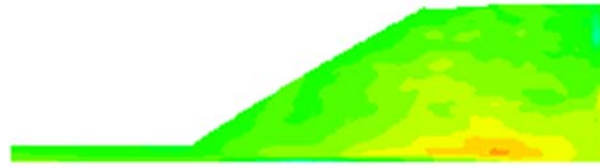
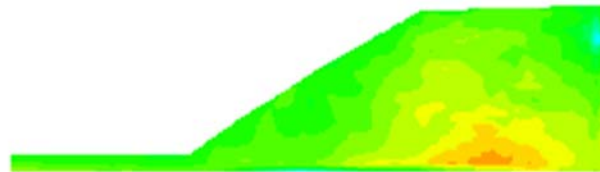


図 3-77 変位分布 (MC Case8)





(a) 250 gal



(b) 300 gal

図 3-78 水圧分布 (MC Case8)

3.5.2 マルチスプリングモデルの結果

(1) Case5m

斜面の傾く角度は 1° ずつ増加し、静的解析を行った。角度 3° の時、斜面が大きくすべる。ただし、すべり線は、斜面肩部の右境界まで延びる。

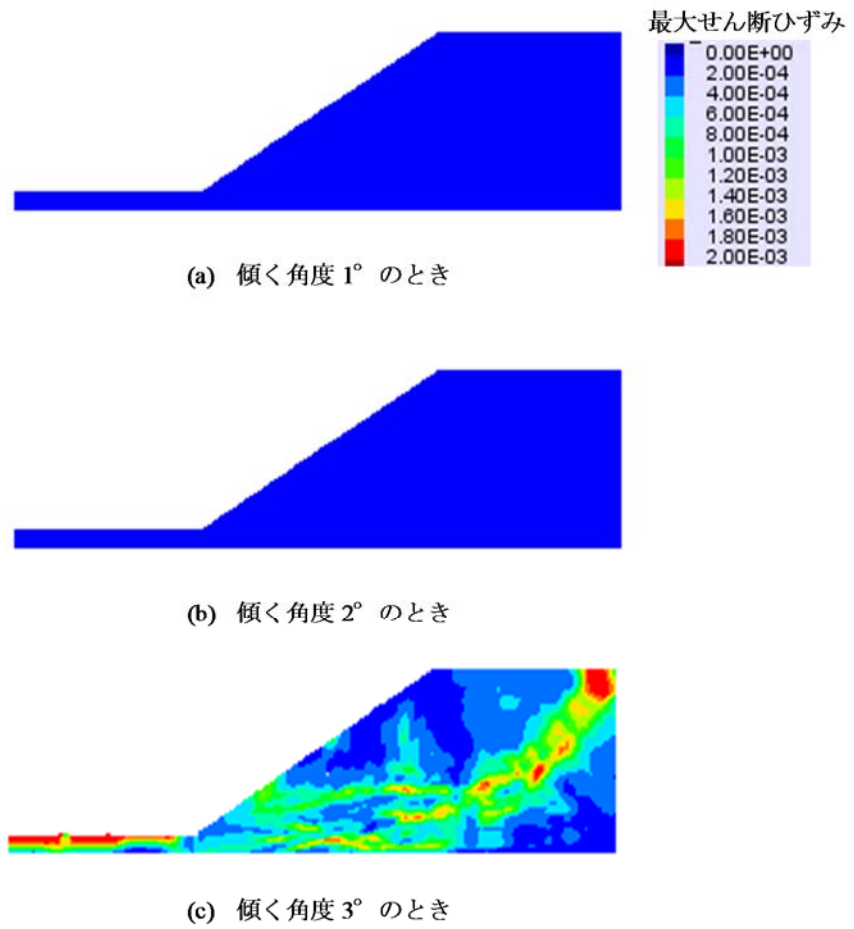


図 3-79 最大せん断ひずみ分布 (MS Case5m)

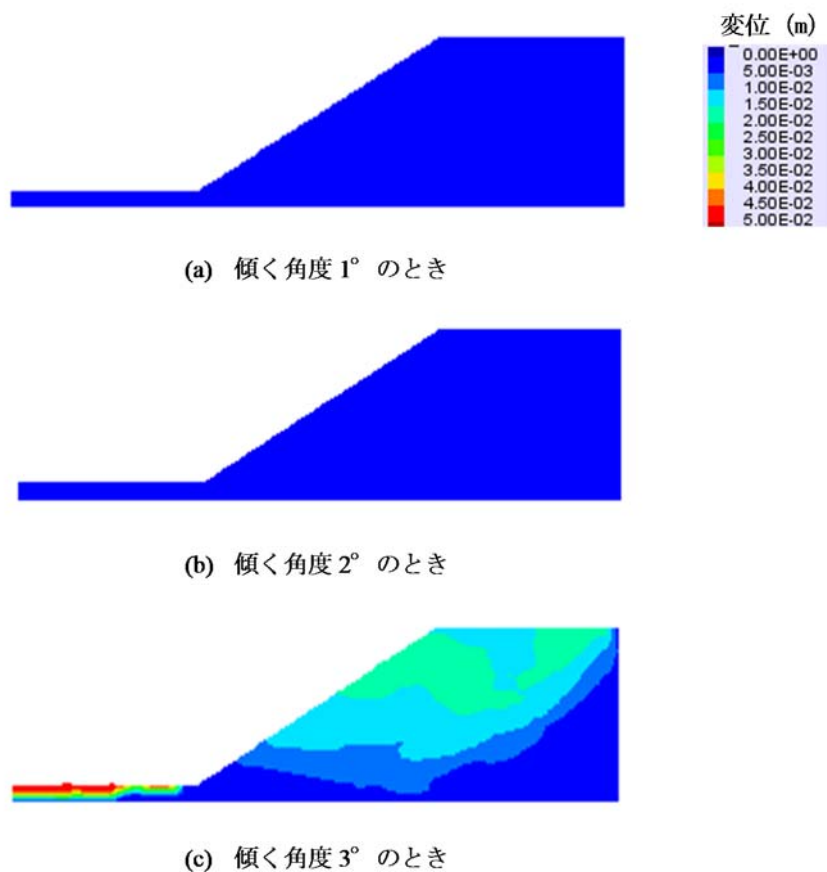


図 3-80 変位分布 (MS Case5m)

(1) Case6m

加振加速度 150gal~200gal 辺りで、表層にすべり線が現れる。その後、法尻先の部分に要素の変形が大きくなり、計算不可となる。

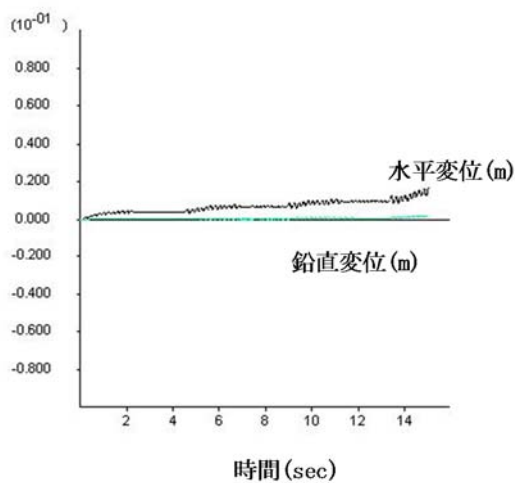


図 3-81 斜面法尻の変位応答 (MS Case6m)

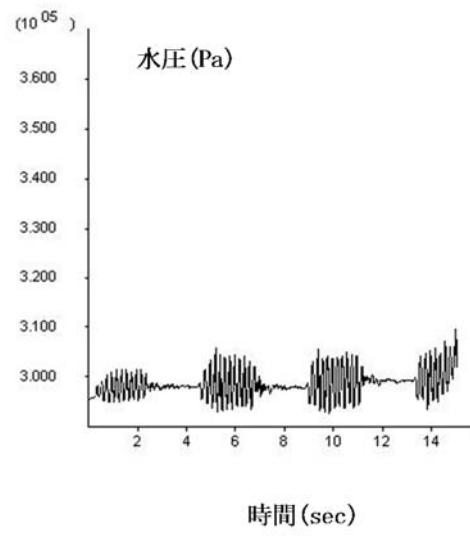


図 3-82 斜面法尻の水圧応答 (MS Case6m)

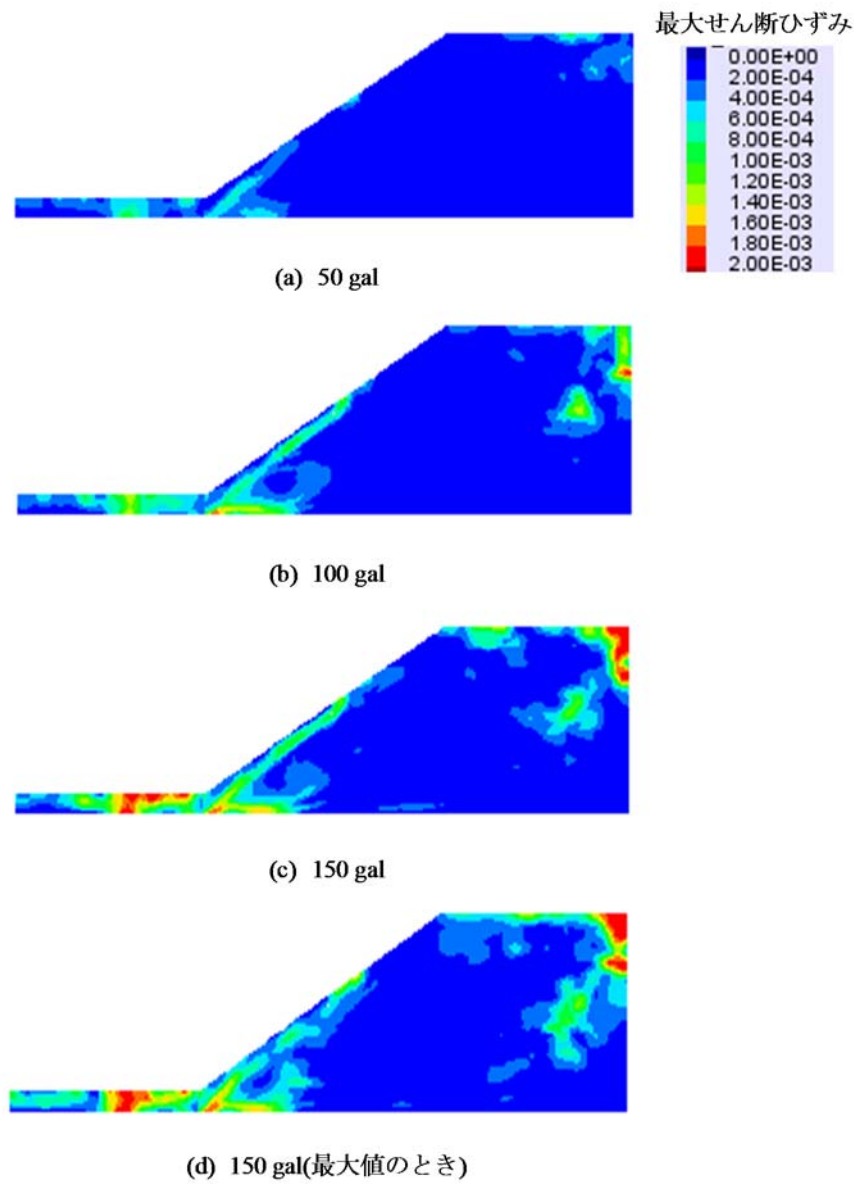


図 3-83 最大せん断ひずみ分布 (MS Case6m)

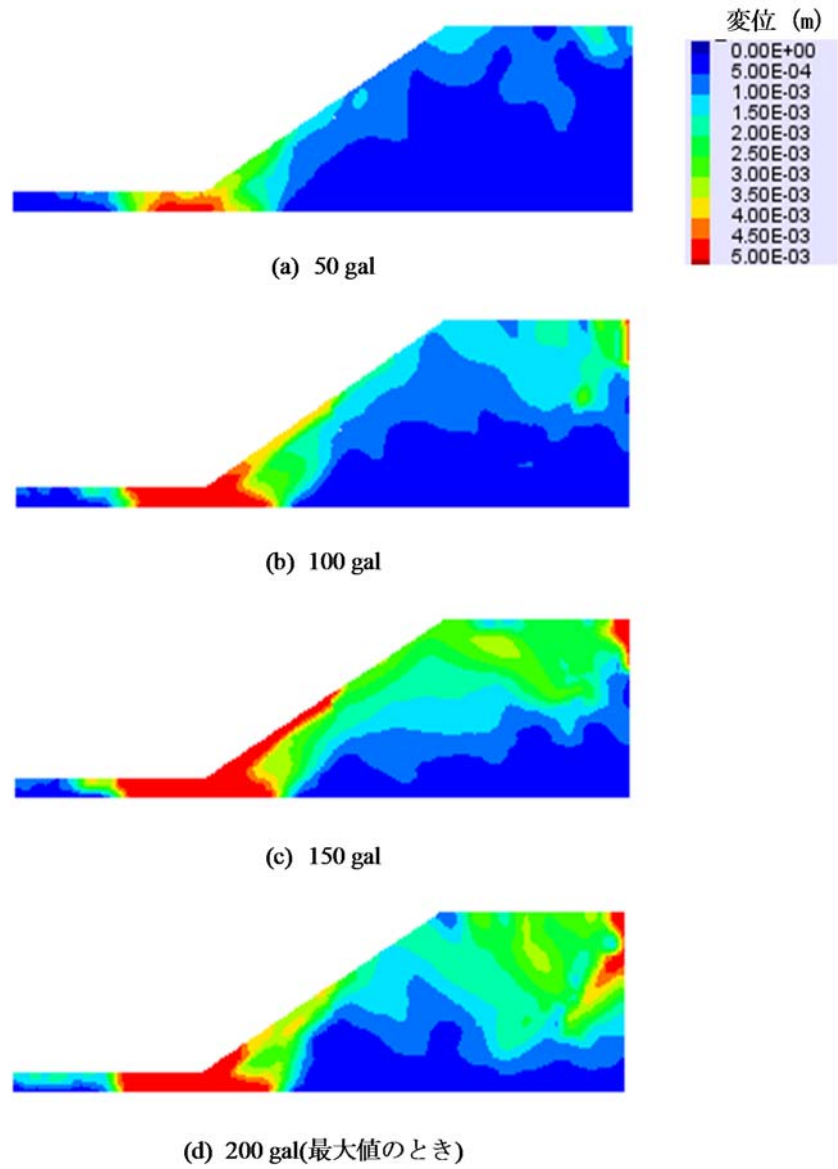


図 3-84 変位分布 (MS Case6m)

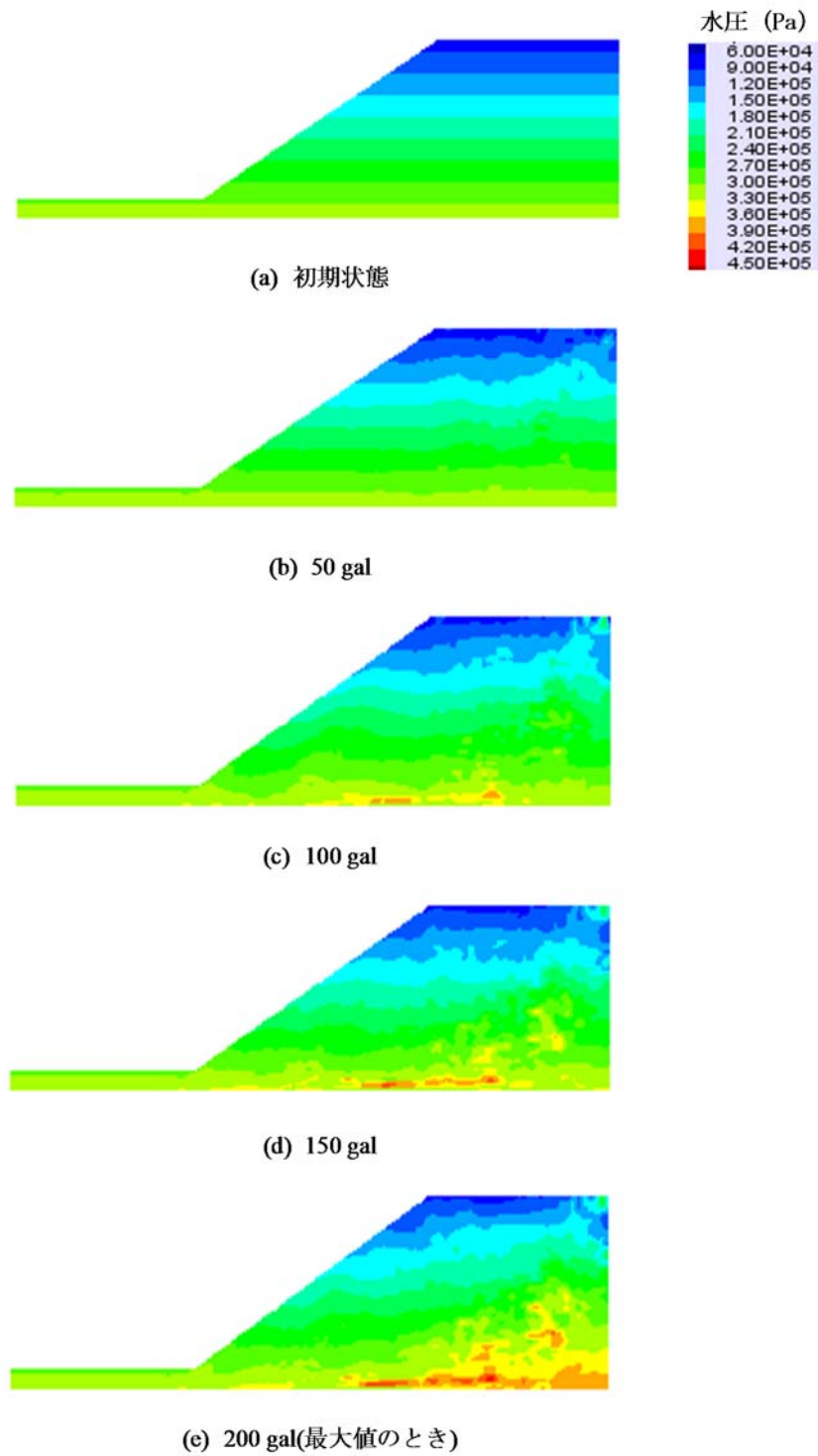


図 3-85 水圧分布 (MS Case6m)

(3) Case7m

斜面の傾く角度は 1° ずつ増加し、静的解析を行った。角度 4° の時、法肩から法尻まで、および斜面上部水平面におけるすべり線が形成される。

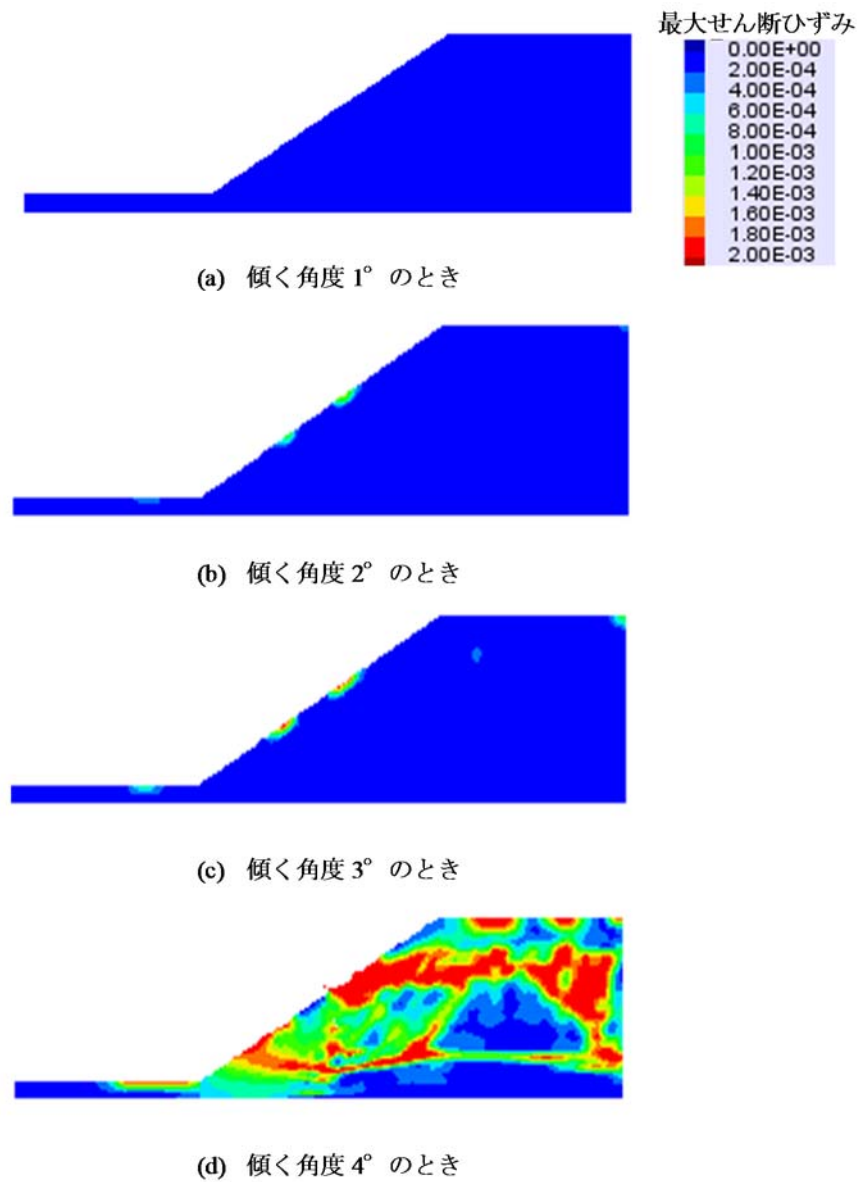


図 3-86 最大せん断ひずみ分布 (MS Case7m)

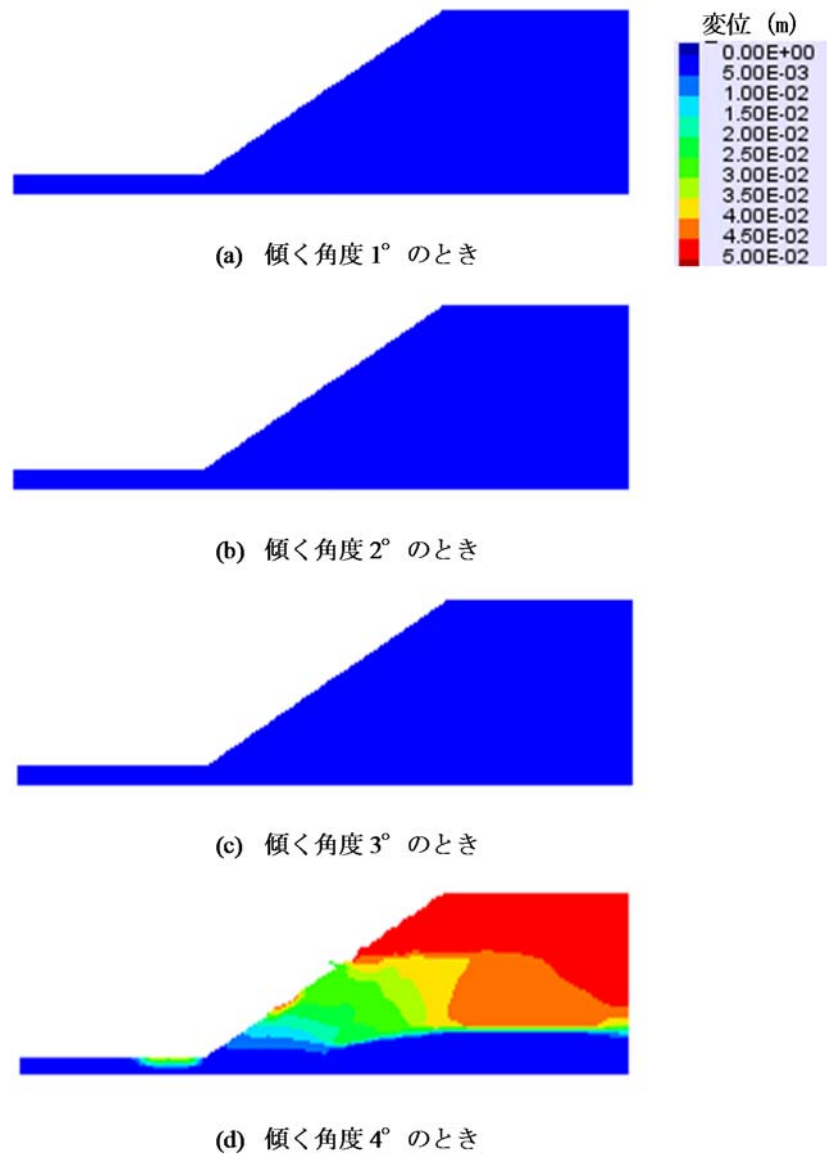


図 3-87 変位分布 (MS Case7m)

(4) Case8m

加振加速度 150gal~200gal 辺りで、表層にすべり線が現れる。さらに加振すると、斜面内部の変形が大きくなる。

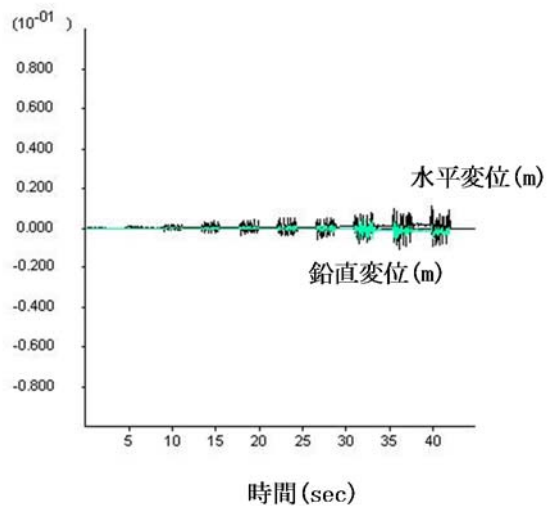


図 3-88 斜面法尻の変位応答 (MS Case8m)

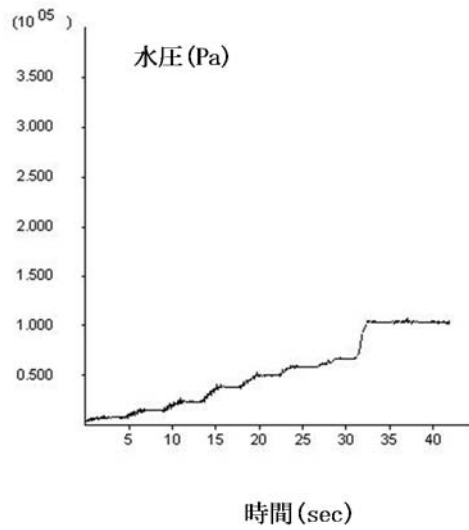
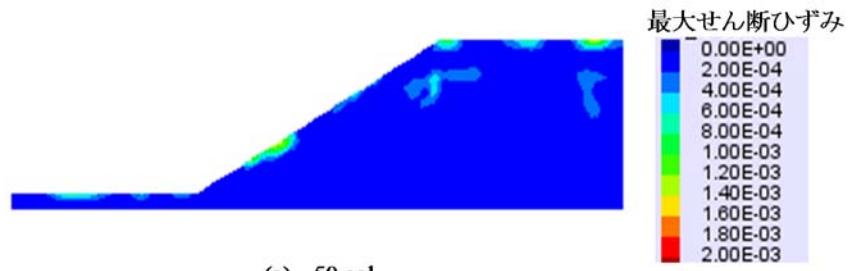
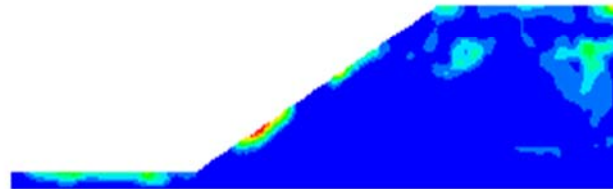


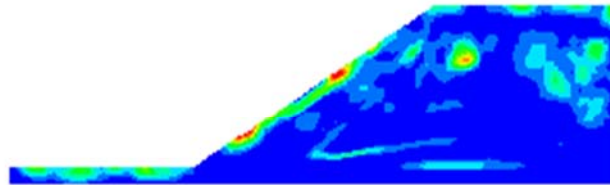
図 3-89 斜面法尻の水圧応答 (MS Case8m)



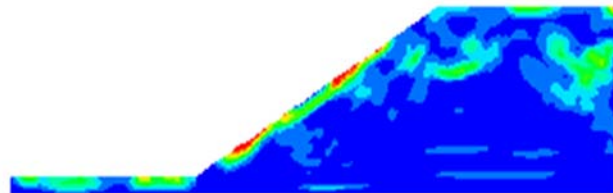
(a) 50 gal



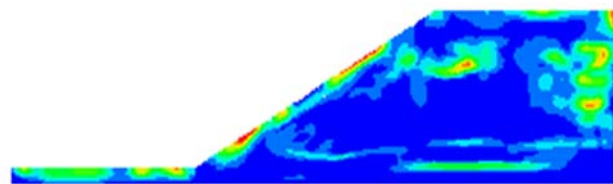
(b) 100 gal



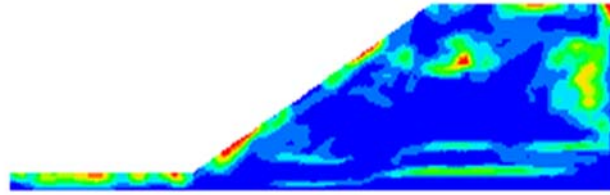
(c) 150 gal



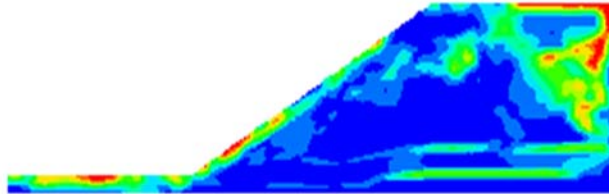
(d) 200 gal



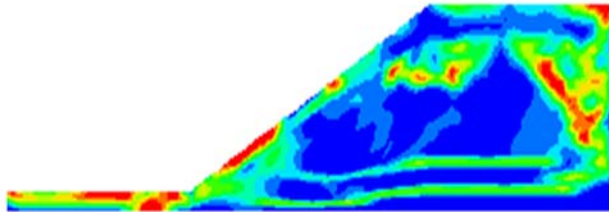
(e) 250 gal



(a) 300 gal



(b) 350 gal

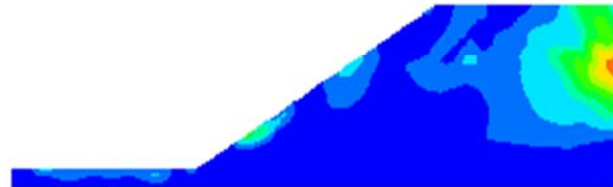


(c) 350 gal(最大値のとき)

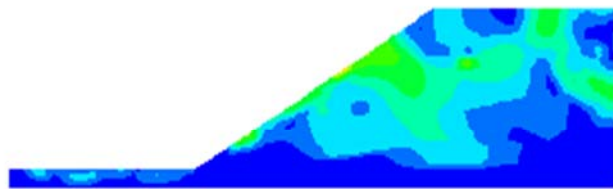
図 3-90 最大せん断ひずみ分布 (MS Case8m)



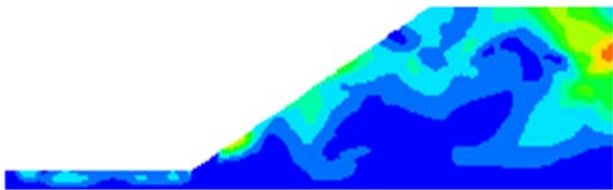
(a) 50 gal



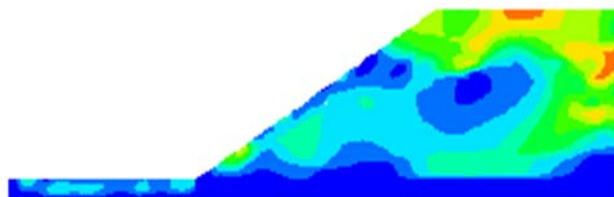
(b) 100 gal



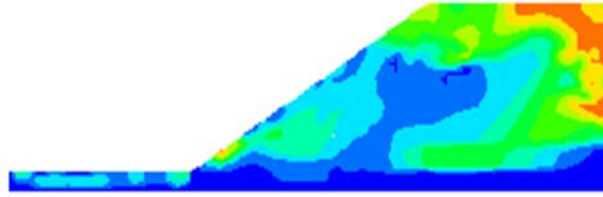
(c) 150 gal



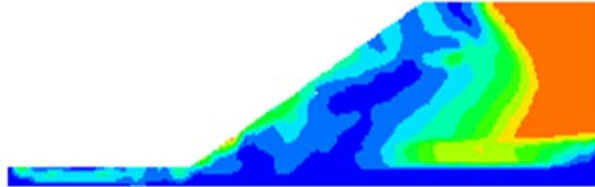
(d) 200 gal



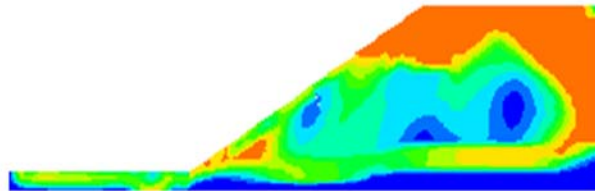
(e) 250 gal



(a) 300 gal

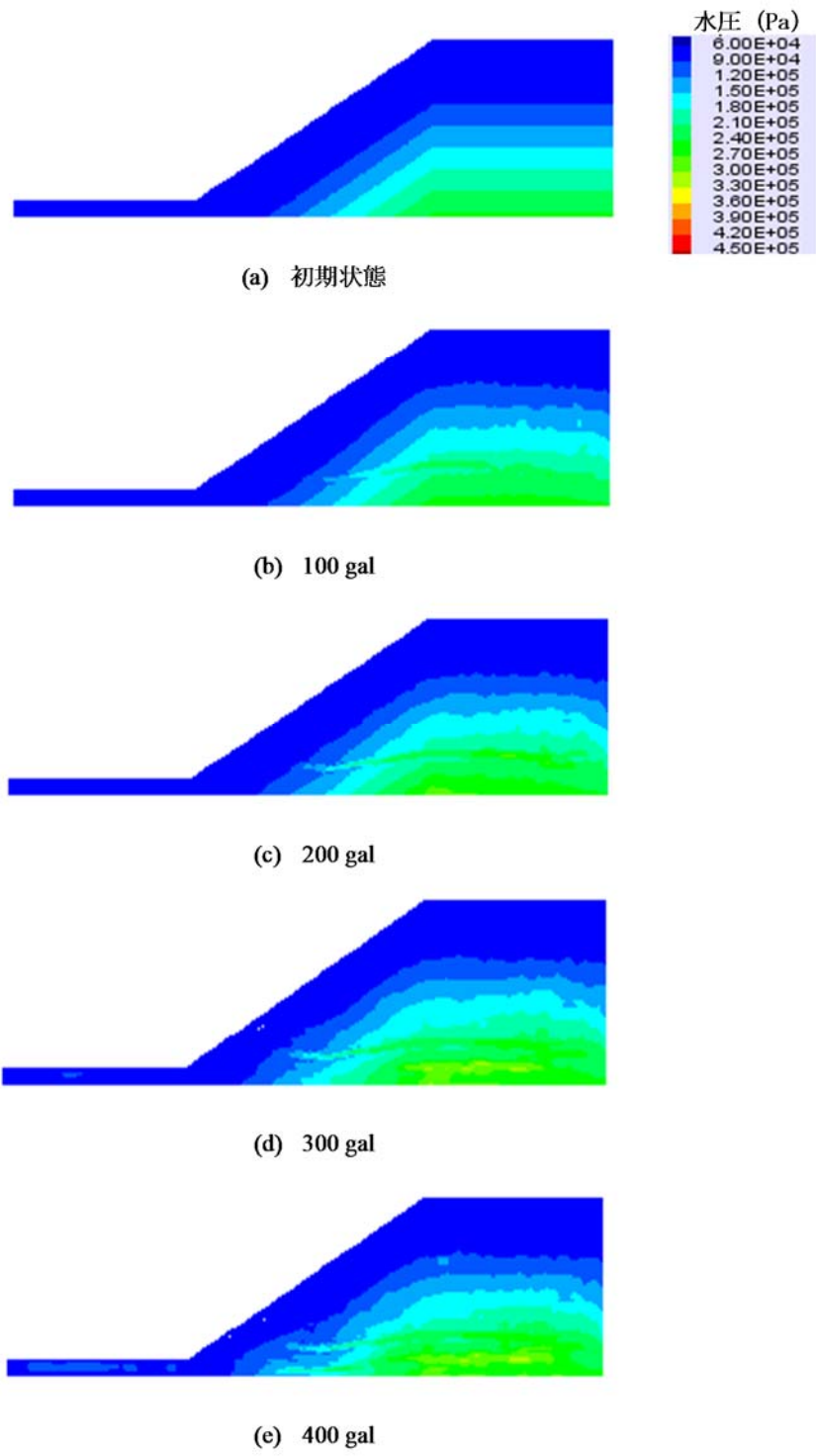


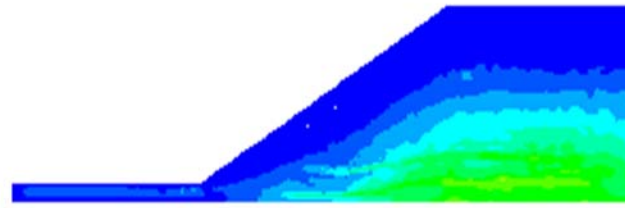
(b) 350 gal



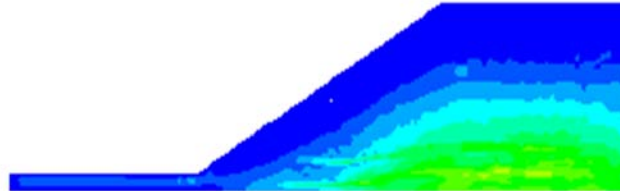
(c) 350 gal(最大値のとき)

図 3-91 変位分布 (MS Case8m)

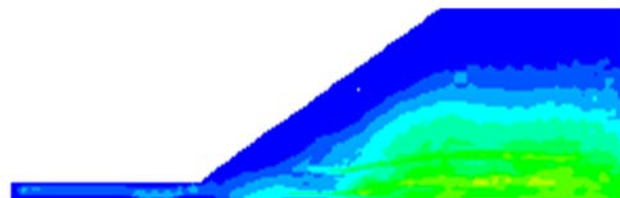




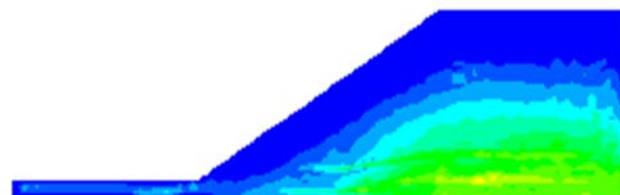
(a) 500 gal



(b) 600 gal



(c) 700 gal



(d) 700 gal(最大値のとき)

図 3-92 水圧分布 (MS Case8m)

3.6 設計検討結果のまとめ

小型遠心模型実験モデル（傾斜角 30° ）を図 3-93 に示す。小型遠心模型実験モデル（傾斜角 10° ）を図 3-94 に示す。解析結果の傾斜角 30° の破壊モードを図 3-95 に示す。解析結果の傾斜角 10° の破壊モードを図 3-96 に示す。50G 場における解析結果では傾斜角 30° では 200~250 ガルですべりが発生し始める結果となった。傾斜角 10° では加振加速度 250gal 以後に、法肩から法尻まで、および表層一部にすべり線が形成され、加振加速度 500gal 以後に、すべり変位が大きくなった。破壊モードは側壁の境界

条件の影響を受けてはいるものの、実験装置と土槽のサイズの制約条件を加味すると最適な設計になっていると考えられる。

大型遠心模型実験モデルを図 3-97 に示す。解析結果の破壊モードを図 3-98 に示す。50G 場における解析結果では 200~250 ガルですべりが発生し始める結果となった。破壊モードは側壁の境界条件の影響はほぼ受けていないことがわかる。一方で底面については境界条件の影響を受けている恐れもあるため、法尻部の層厚を変化させる等の検討も行う必要があると思われる。ただし、実験装置と土槽のサイズの制約条件を加味すると概ね最適な設計になっていると考えられる。

本検討では、2.4 で指摘したように平成 28 年度の模型実験結果に対し、解析では滑動が生じる傾斜角を過小評価しており、小さめの強度定数を用いていることが示唆された。本章の設計においても同じ強度定数を用いたため、ここで示した滑動が生じる加速度レベルは、実験においてさらに大きくなる可能性があることに留意する必要がある。

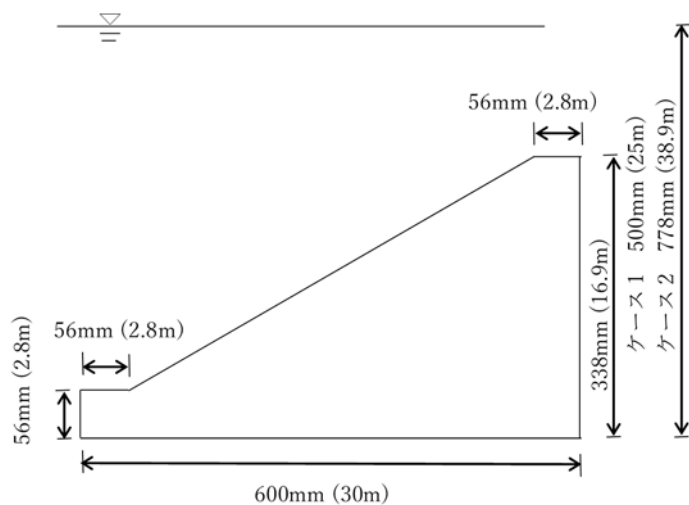


図 3-93 小型遠心模型実験モデル (50G 傾斜角 30°)

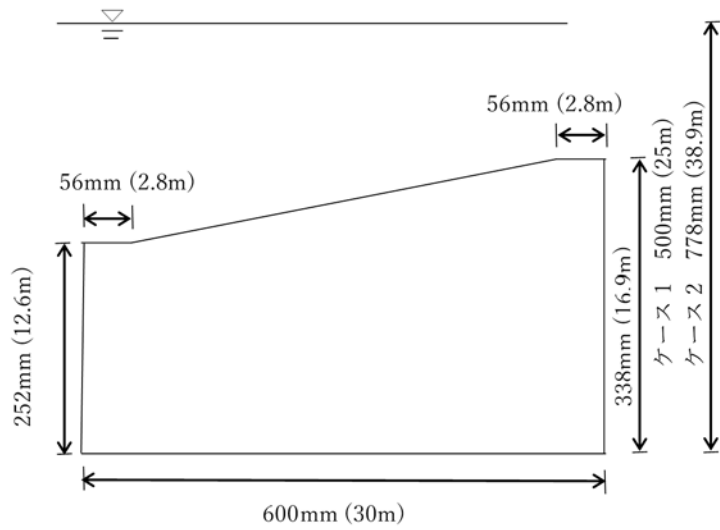
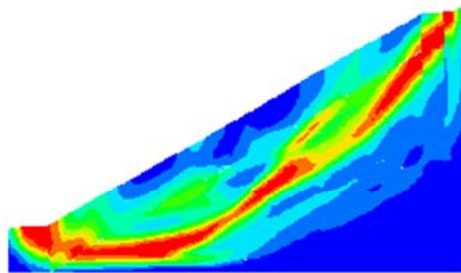
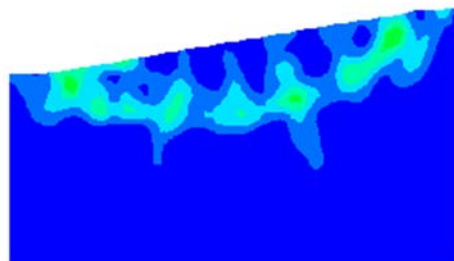


図 3-94 小型遠心模型実験モデル (50G 傾斜角 10°)



(a) 450 gal

図 3-95 破壊モード (せん断ひずみ分布, モールクーロン Case1)



(d) 600 gal

図 3-96 破壊モード (せん断ひずみ分布, モールクーロン Case3)

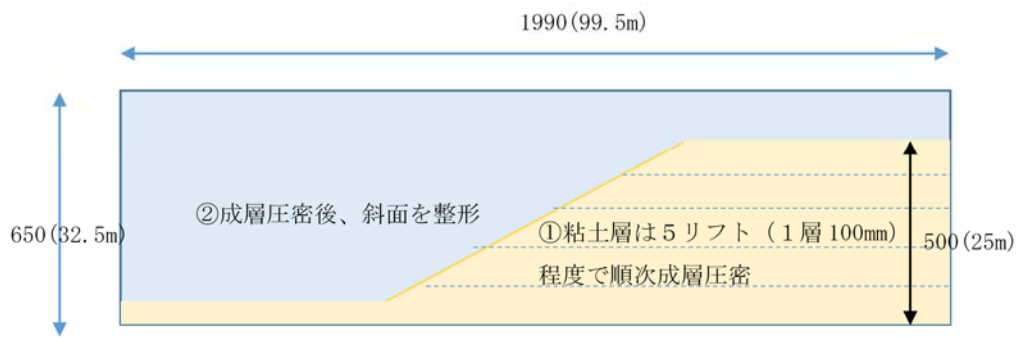
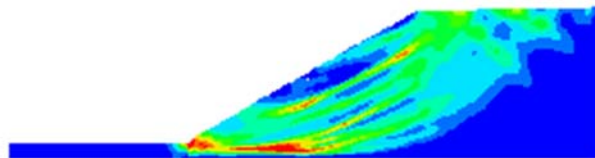


図 3-97 大型遠心模型実験モデル



(c) 300 gal

図 3-98 破壊モード（せん断ひずみ分布，モールクーロン Case5）

4 海底環境下における斜面の安定性評価に関する情報収集

最後に、海底地盤の崩壊挙動に関する研究事例は極めて少ない。また、遠心力模型実験を用いた海底環境下を模擬した斜面の安定性評価に関する研究及び報告は非常に少ないことから、類似の研究報告も極めて重要な知見となる。以下の示す韓国のプサンで開催される原子力関係の国際会議 24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT24)では、斜面の特別セッションが設けられる。さらに、韓国のソウルで開催される地盤工学関係の国際会議 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE 2017)の2つの国際学会に出席し、関連情報の収集を行う。

4.1 第24回原子炉施設における構造力学分野の国際学会(24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology)について

平成29年8月20日～25日、韓国のプサンで開催された原子力分野における構造力学分野の国際会議 SMiRT24 に参加し、原子力安全に係わる斜面崩壊に関する研究事例の調査を実施した。斜面崩壊に関する研究事例は特別セッション(SS5)である Risk analysis of NPP against seismic induced non-vibration hazardの2番目のセッションにて以下の5編の発表が行われた。いずれも、日本から投稿された論文である。

- 1) Proposal for using ground displacement to evaluate the seismic stability of critical facilities surrounding slopes and foundation ground T. Oshima, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., Japan, K. Hashi, Chubu Electric Power Company, Inc., Japan, M. Ishimaru, Nuclear Risk Research Center, Japan, T. Kawai, Tohoku University, Japan
- 2) Evaluating the seismic stability of rock slopes near critical facilities using a nonlinear analysis method that considers progressive failure M. Ishimaru, Nuclear Risk Research Center, Japan, K. Hashi, Chubu Electric Power Company, Inc., Japan, T. Oshima, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., Japan, T. Kawai, Tohoku University, Japan

- 3) An integrated study on the rock slopes against planar sliding subjected to dynamic loading under dry and immersed conditions Ö. Aydan, N. Tokashiki, University of the Ryukyus, Japan, K. Adachi, N. Iwata, R. Kiyota, Y. Takahashi, Chuden Engineering Consultants Co. , Ltd. , Japan
- 4) Development of method to evaluate seismic risk on facilities of nuclear power plant caused by slope collapse S. Nakamura, Engineering College of Nihon University, Japan, I. Yoshida, Engineering College of Tokyo City University, Japan, M. Bepu, School of System Engineering of National Defense University, Japan
- 5) A numerical study on effects of grain characteristics in simulations of slope disasters S. Moriguchi, S. Takase, K. Terada, T. Kyoya, Tohoku University, Japan, Y. Ohta, JGC corporation, Japan

この中で斜面崩壊メカニズムとその解析法に研究事例である 1), 2)のうち 2)について概要を示す。

地盤材料の構成モデルとしてマルチスプリングモデルを用いて地盤の進行破壊を考慮した非線形地震応答解析法による遠心場での振動実験を対象とした再現解析，と実斜面モデルへの適用性の検討を実施している。ここで用いている解析法は2次元有限要素法を用いている。振動実験に用いた斜面モデルは図 4-1 に示した岩盤斜面（高さ 600mm，斜面勾配 1:1.05）であり，正弦波を入力波とする 50G の遠心場で振動実験を実施している。解析により得られたせん断ひずみの分布を図 4-2 に示す。ピーク強度から残留強度への強度低下率を実験に用いた材料の特性に合わせて設定することにより，実験にて変形が生じ始めた加振レベルにて図 4-1 内の赤線で示している補強材の右端部に沿ってせん断ひずみが発達している。しかし，図 4-3 に示したせん断ひずみが発達する加振ステップにおける法面下部における水平変位時刻歴の実験と解析との比較より，解析では実験より先に変位が生じており，変位量の大きさについては概ね定量的な評価が可能であるが，図 4-2 におけるせん断ひずみの発達過程を発生時刻も含めた定量評価には至っていない。

いずれにしても，斜面の不安定化に伴う影響評価に対する必要性が増しており，非線

形地震応答解析の活用とさらなる発展が期待される。

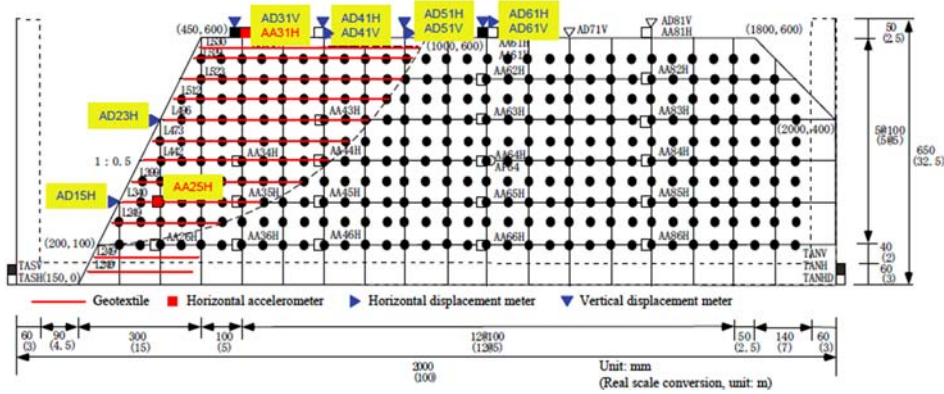


図 4-1 遠心振動実験で用いた岩盤斜面モデル

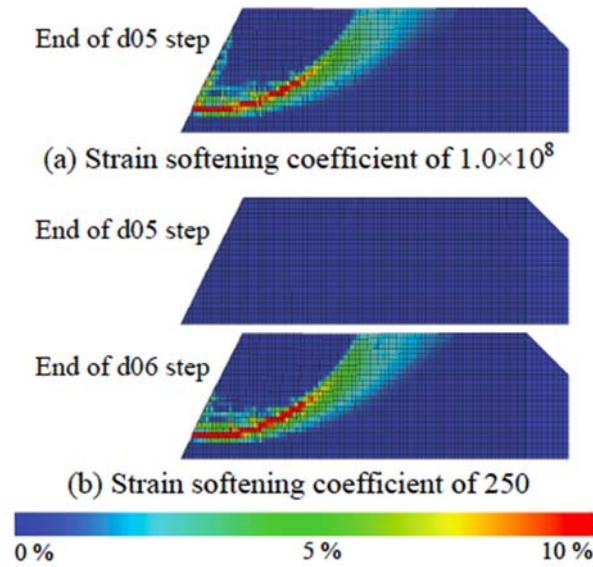


図 4-2 応答せん断ひずみの空間分布

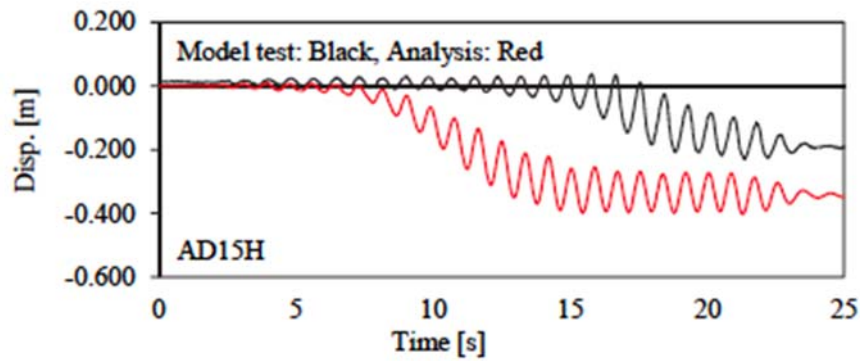


図 4-3 法面の水平変位時刻歴の比較(d06)

4.2 第 19 回国際地盤工学会(19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) について

平成 29 年 9 月 17 日～22 日, 韓国のソウルで開催された国際地盤工学会に参加し, 地盤工学分野における確率論的安全性評価, および海底地すべりの事例などを報告する. 確率論的安全性評価としては, 受賞講演のうち, 地盤工学分野において, 斜面の安定などに地盤物性の不確実性を考慮した確率論的な安定性評価に関する研究に先駆的に取り組んでこられた NGI の Lacasse 博士を記念して設けられた Lacasse 賞を受賞された NGI の Nadim 博士の受賞講演論文である. また, 海底地すべりの事例として東アフリカにおける周期的に発生する地すべりの事例である.

1) Reliability-based approach for robust geotechnical design

Farrokh Nadim, Technical Director, Norwegian Geotechnical Institute, Norway,
farrokh.nadim@ngi.no

2) Recurrent submarine landslides at Cape Lopez, Gabon, West Africa.

Erik Green Spécialiste géotechnicien, Total SA, Paris La Défense, France,
erik.green@total.com

Bruno Simon, Cécile Babin, Khoa Van Nguyen Terrasol, Paris, France

Reliability-based approach for robust geotechnical design について

地盤構造物の信頼性理論に基づく設計や評価の事例として, Nadim 博士が係わった事例として以下の 8 つが示されている.

- ・ 軟弱粘土上の盛土の沈下予測および海洋構造物の沈下予測(Settlement prediction of embankment on soft clay and settlement prediction for offshore structures)
- ・ 供用中のダムの破壊(Breach of a dam under operation)
- ・ 建設中のダムの破壊(Breach of a dam before construction)
- ・ ダム湖周辺斜面に崩壊に対する減災対策の優先付け(Prioritising mitigation measures)

for a landslide dam)

- ・ 水面下の斜面の地震時安定性(Seismic stability of underwater slope)
- ・ 地震起因の地すべりへの対策(Earthquake-triggered landslide management)
- ・ 海洋構造物基礎の部分安全係数設計(Partial safety factor for offshore foundation design)
- ・ クイッククレーの斜面崩壊による崩落 Run-out of quick clay landslide

この中で、水面下の斜面の地震時安定性の事例概要を示す。この中で、Biscontin らにより提案されている以下の3つの地震起因の斜面不安定化シナリオに基づいて評価を行っている。

1. 繰り返しせん断による過剰間隙水圧の上昇によりせん断強度が低下し、斜面の安定性を損なう。
2. 地震後、深部地盤から増加した間隙水圧の消散に起因した危険位置の破壊(斜面内のせん断応力作用場への間隙水圧の流入による有効応力低下に伴う破壊)
3. 地震後、クリープ起因した破壊

水面下の斜面の地震時安定性の評価は以下の手順にしたがって実施する。

1. すべり面の同定と確率論的な様式に基づき地形や地盤材料の力学特性を設定する。
(Identify the critical slopes and establish the geometry and mechanical soil properties for the critical slopes in a probabilistic format.)
2. 斜面の静的安全率の CDF を求めるため、MCS, FORM また他の手法を用いる。(Use Monte Carlo simulation, FORM or other technique to compute the cumulative distribution function (CDF) of the static safety factor for the slope, FFS.)
3. 斜面の現時点での状態を踏まえ、静的安全率の CDF をアップデートする。これは、現在の安全率がわからないものの 1.0 より大きいことを踏まえたものである。年当たりの崩壊確率は現在の安全率が1年の参照期間の間 1.0 を下回ってはいない程度の問題となる。その確率分布は計算することができるが、斜面が現時点でも安定であることを表すには不完全である。これは、基本的に安全率が 1.0 以上との事前情報に対

するベース更新手順である。更新された安全率の事後分布は次式であらわされる。地震作用の効果で安全率が 1.0 を下回ると、地震時の斜面崩壊が生じる。(Update the CDF for static safety factor using the fact that the slope is standing today. This implies that the current factor of safety, although unknown, is greater than unity. The annual probability of failure becomes the question of the likelihood that the current factor of safety will fall below unity during a reference time of one year. Its probability distribution can be computed (from FORM analysis or Monte Carlo simulation), but is truncated to reflect that the slope is stable today. This is basically a Bayesian updating procedure where the apriori information is that $FS > 1$. The updated (or posterior) distribution of the factor of safety is

$$P[FS < z | FS \geq 1] = [FFS(z) - FFS(1)]/[1 - FFS(1)] \quad (1)$$

Seismic slope failure occurs if the safety factor falls below unity as a result of the earthquake loading effects.)

4. 確率論的な地震ハザード解析を実施し、対象とする再現期間に関連する代表的な加速度時刻歴を設定する。(Do a probabilistic seismic hazard assessment and identify representative acceleration time histories for return periods of interest.)
5. 室内試験また既往の文献より、地震に誘発された最大せん断ひずみの関数として、地震後の非排水せん断強度の低減率を求める。(Establish the reduction in the post-earthquake undrained shear strength as a function of the maximum earthquake-induced shear strain from laboratory tests or literature survey (e.g. Fig. 12).)
6. MCS の技法を用いて代表的な地震動と様々な動的な材料パラメータの組み合わせに対して動的解析を実施する。解析はステップ 9 で示したように少なくとも 2 つの再現期間について実施することが必要である。(Perform dynamic response analyses for various combinations of dynamic soil properties and representative earthquake ground motions using the Monte Carlo simulation technique. The analyses should be done for at least two return periods, as discussed in Step 9.)
7. ステップ 5 と 6 を用い、地震作用の効果に影響を及ぼす非排水せん断強度低減係数

- を求める。(Using Steps 5 and 6, establish the distribution function for the undrained shear strength reduction factor, reflecting the effects of earthquake loading.)
8. ステップ 3 と 7 より, 地震後の静的安全係数の CDF を求める. 崩壊の条件付き確率は $F_s=1$ の時の CDF の値である. (From Steps 3 and 7, establish the CDF for postearthquake static safety factor. The conditional probability of failure (given that the earthquake with the specified return period occurred) is the value of this CDF at FS equal to 1.)
 9. 年崩壊確率は所用の再現期間に対する全ての条件付き崩壊確率を合わせることで得られる. その解析は, 少なくとも 2 つの再現期間, 理想的には年崩壊確率に関連する再現期間より上また下の再現期間について求めることが必要である. その再現期間は前もって分からないので繰り返し計算が必要である. (The annual failure probability is the sum (integral) of all conditional failure probabilities for a given return period, divided by that return period. The analyses should be done for at least two return periods, ideally above and below the return period that contributes most to the annual failure probability. Iteration might be necessary as this is not known beforehand.)
 10. ステップ 9 の結果より, 対象となる再現期間に対する計算上の崩壊確率にマッチする作用と抵抗を求める. 最も通常的作用パラメータは典型的な指数またパレート分布により表される年当たりの入力 PGA である. もし PGA が代表的な作用パラメータとすると, 斜面の抵抗も加速度パラメータとして規定する必要がある. 抵抗として対数正規分布が一般に用いられる. (With the result of Step 9, establish a model with load and resistance that matches the computed failure probabilities at the return periods of interest. The most usual load parameter is the input annual peak ground acceleration (PGA), with typically exponential or Pareto distribution. If PGA is used as the representative load parameter, the slope resistance needs to be specified as an acceleration parameter. A log-normal distribution for resistance is commonly assumed.)
 11. 斜面の抵抗が地震起因の斜面崩壊の年発生確率に対応する作用力(e.g.年あたりの PGA)より小さいことを評価する. (Estimate the probability that the resistance of the slope is less than the applied load (e.g. the annual PGA), which is the annual probability of

earthquake-induced slope failure).

この手順にそって実施した北海，カスピ海，黒海，インドネシア海岸，メキシコ湾での事例の一例として図 4-4 の安全率の CDF を示す。

最後に，Nadim 博士はまとめとしてリスク解析について以下のようなことを述べている。海底地盤のように地上に比べ著しく情報の不足した対象におけるリスク評価に際して重要な見識と考える。

「地盤工学分野の解析で，潜在意識で，成し遂げたい答えに達するために，イベントツリー解析などに基づき複雑な多くの分析を行うことで，我々は「危険を冒します」。データが不足しているとき，経験豊かなプロでさえ，適切な評価を行うことは困難である。

評価のために必要とされるモデルの複雑さを減らすことなく，ハザードとリスクの評価モデルがより透明で理解がより簡単にすることと，それを使用することが重要です。今日では，ハザードとリスク情報に基づいた意思決定に対する関心が増加している。それ故，決定論的方法と確率論的方法を補間的に統合することが，80 年代後半から推薦されてきた。そのような統合は，エンドユーザー（科学的な背景の有無にかかわらず）により複雑な根底にある情報よりもむしろ分析結果に集中することを可能としている。

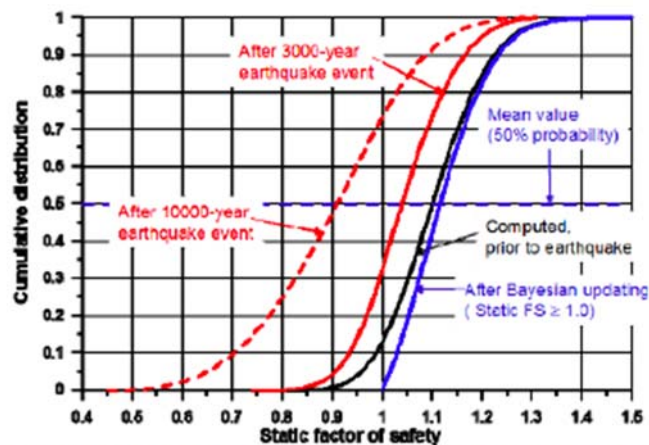


Figure 15. Results of probabilistic analyses of static undrained stability, prior to and after the 3000-year and 10000-year earthquake events (Nadim et al. 2014).

図 4-4 地震前後の静的な確率論的非排水安定性解析の結果

Recurrent submarine landslides at Cape Lopez, Gabon, West Africa について

海底地形などについて若干の情報はあるものの、崩壊状況などの検討報告が分かり難い論文であるが、概要に関する情報を海底地すべりの事例として以下に報告する。

西アフリカのロペス岬の海岸では 1 億立米以上の大規模な海底地すべりが 20 年ごとに発生し、沈下堆積物が増加している。小規模な地滑りは、さらに頻繁に発生している。1971 年に生じた大規模な海底地滑りの後、コーン貫入試験、間隙水圧の測定、コア採取用のボーリング調査、原位置密度試験や室内試験などの多くの調査と探査が、行われた。地盤の調査は、多数の地形、水深測量によって補われます。その土は主に 22MPa の平均的コーン抵抗を有する砂であることが明らかとなった。これらの砂は中程度の荒さを有して、非常に均一である。内部摩擦角度は 35° ですが、海岸線から離れた位置での斜面勾配は、水平から約 5° で均衡を保っている。これらの調査より再発する地滑り現象は、せん断力の作用下での砂の収縮挙動とそれに関連してせん断強度の低下をもたらす間隙水圧の増加により生じていることと考えられる。

5 まとめ

平成 28 年度に実施した遠心載荷実験の再現解析を 3 つの構成則を用いて実施した。その結果、いずれの構成則においても、破壊傾斜角が実験値よりも小さくなった。また構成則によって発生するすべり面の位置が異なったが、実験結果に最も近い結果が得られたのは、モールクーロンモデルであった。それ以外のモデルは実験よりも深い位置にすべり面が発生した。水深の違いに着目すると、どの構成則においても結果に差が見られなかった。法肩クラックの有無に着目すると、法肩付近のすべり面の位置に若干差が見られたが、全体の破壊傾向に影響を与えていないことがわかった。

今後実施する小型、大型斜面モデルの加振実験のための模型地盤設計を実施した。設定した小型遠心模型実験モデル（50G 場）は 200~250 ガルですべりが発生し始める結果となった。破壊モードは側壁の境界条件の影響を受けてはいるものの、実験装置と土槽のサイズの制約条件を加味すると最適な設計になっていると考えられる。

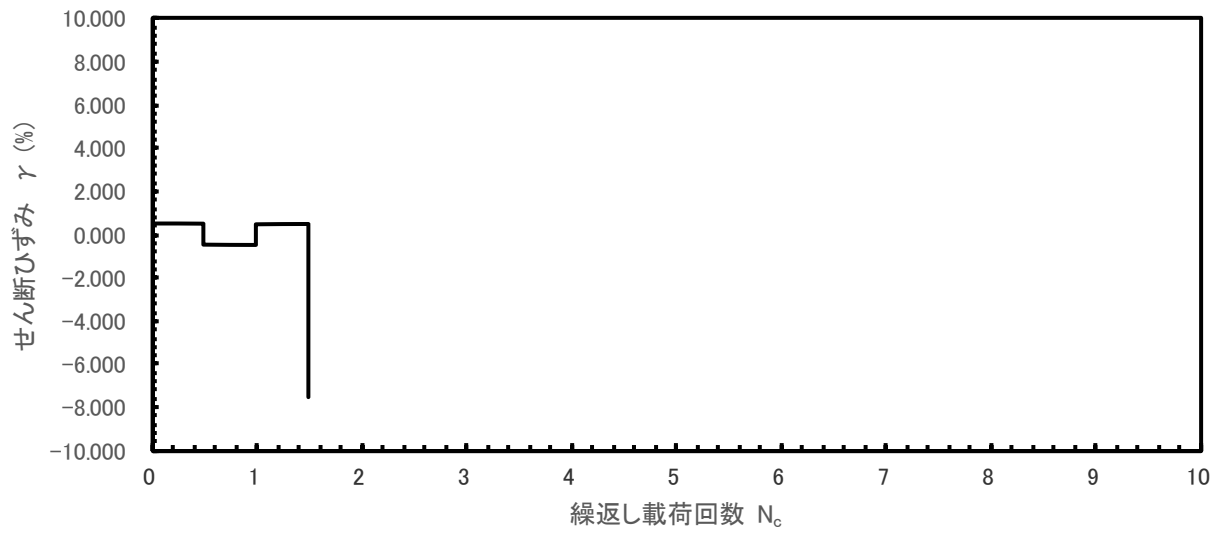
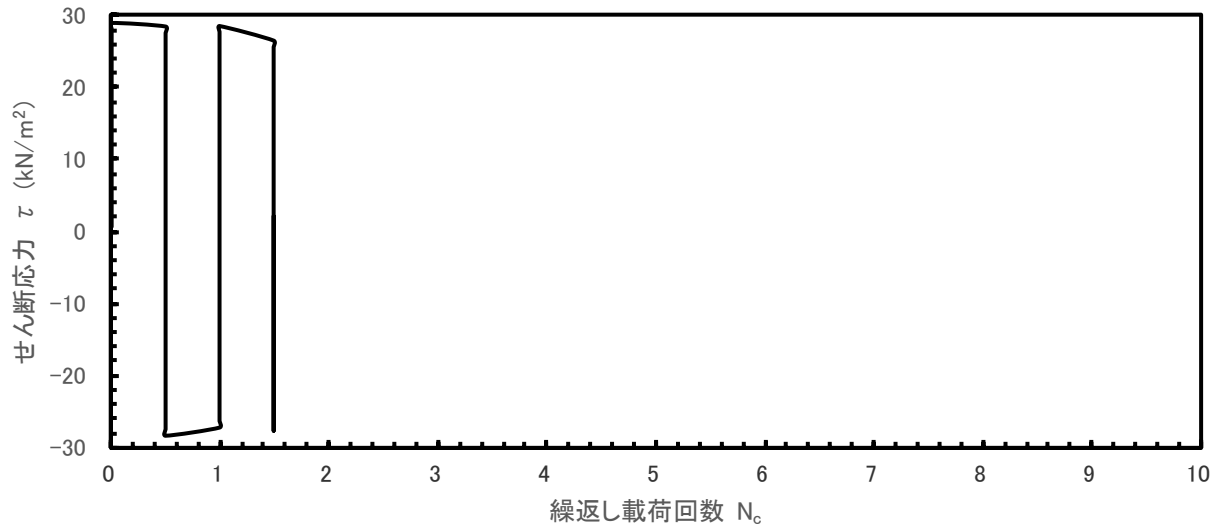
大型遠心模型実験モデル（50G 場）も 200~250 ガルですべりが発生し始める結果となった。破壊モードより側壁の境界条件の影響は受けていないものの、底面については境界条件の影響を受けている恐れもあるため、法尻部の層厚を変化させる等の検討も行う必要があると思われる。ただし、実験装置と土槽のサイズの制約条件を加味すると概ね最適な設計になっていると考えられる。

6 参考文献

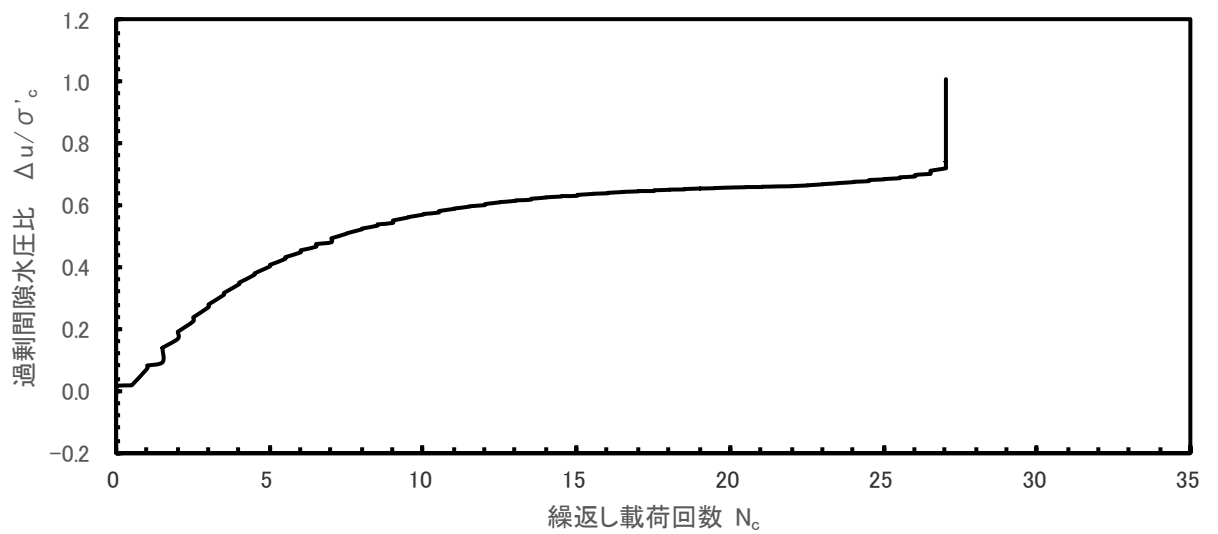
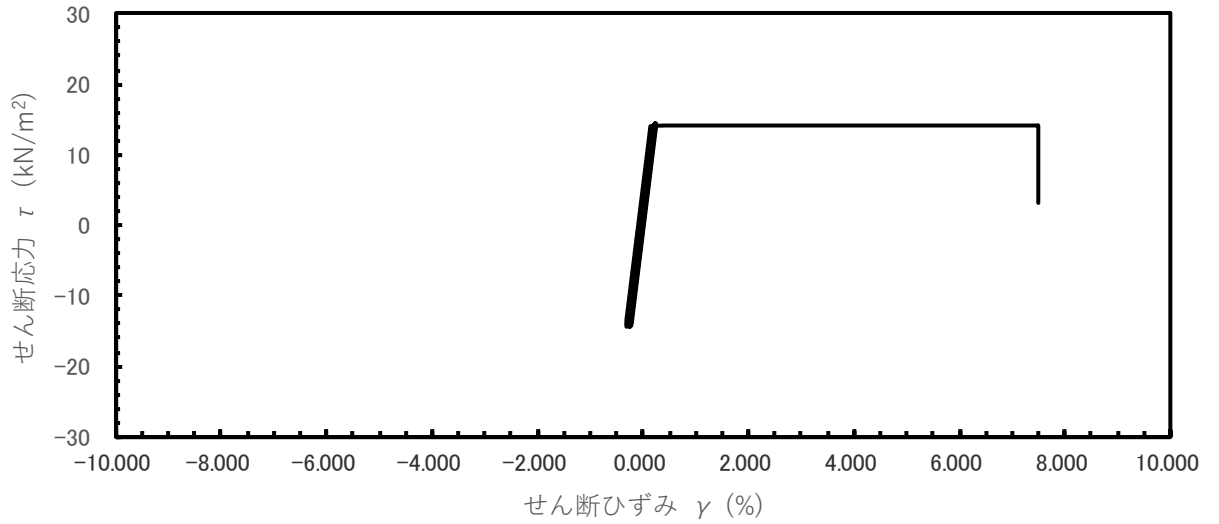
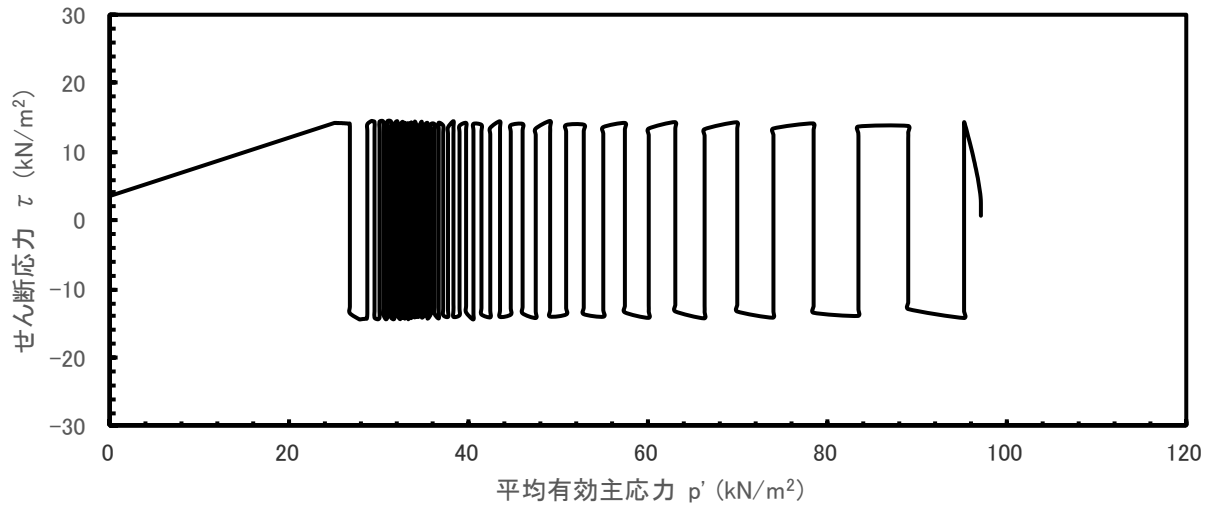
David Muir Wood, Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics, Cambridge University Press, 1990.

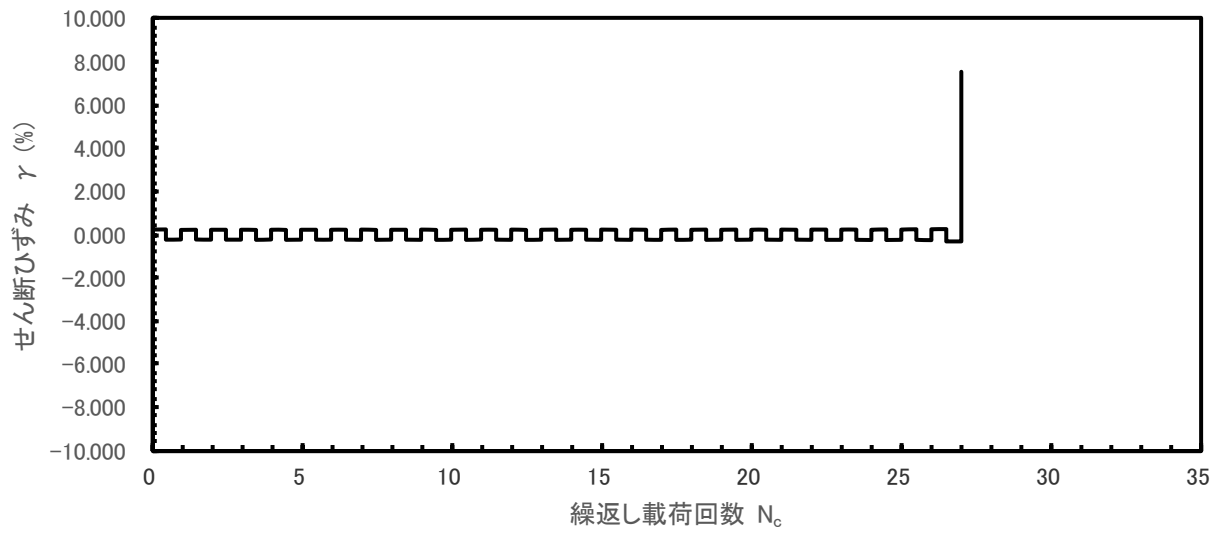
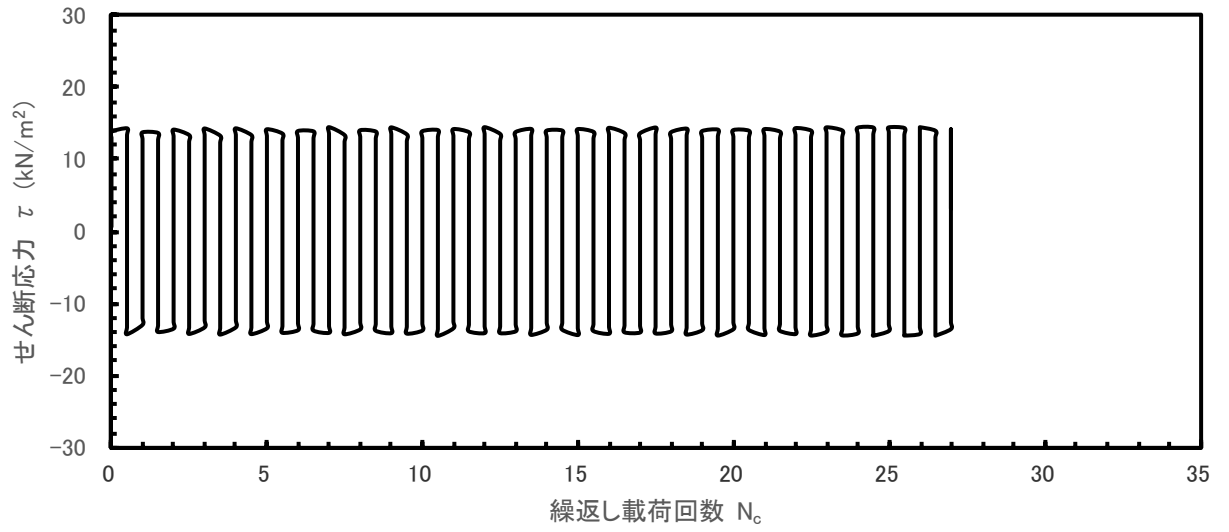
石丸 真, 岡田 哲実, 中村 大史, 河井 正, 風間 基樹: 軟岩のせん断破壊後の強度変形特性のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用, Vol.73, No.1, 土木学会論文集 C (地圏工学), p.23-38, 2017.

G. R. Martin, W. D. Finn and H. B. Seed, Fundamentals of liquefaction under cyclic loading, Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT5, ASCE, pp.423-438, 1975.

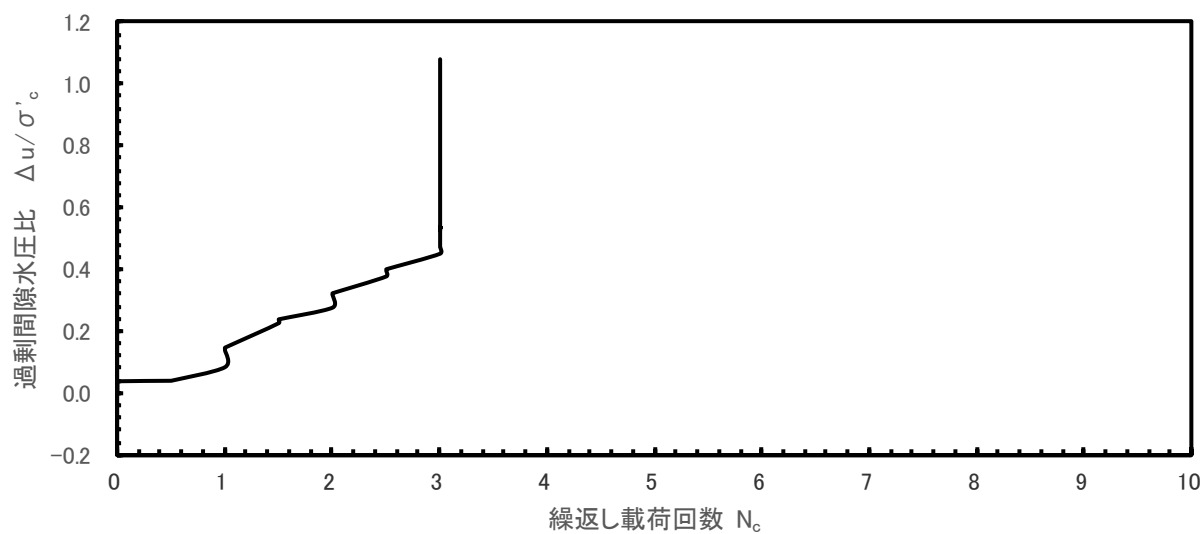
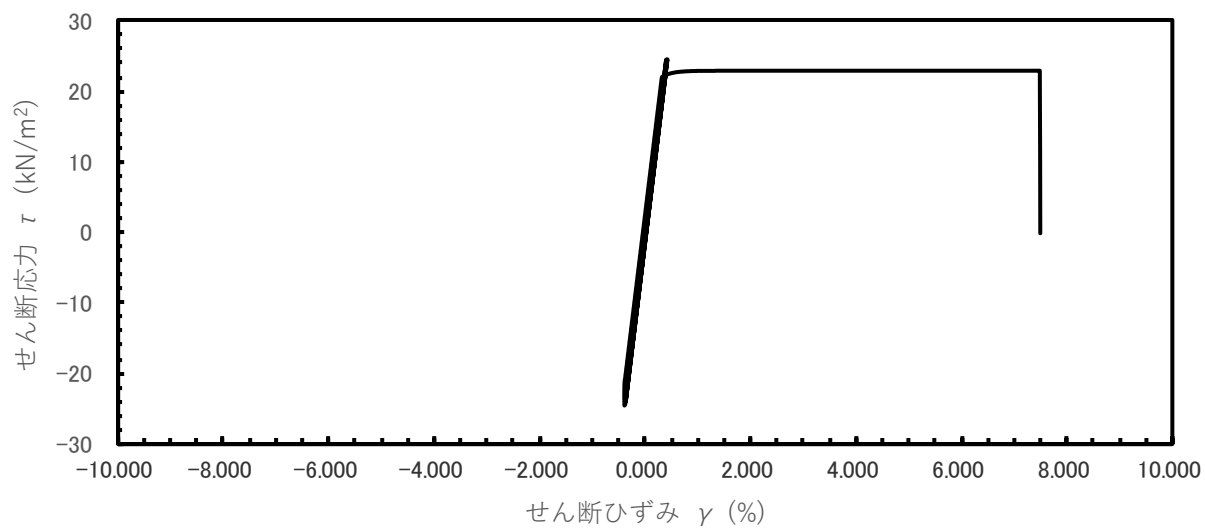
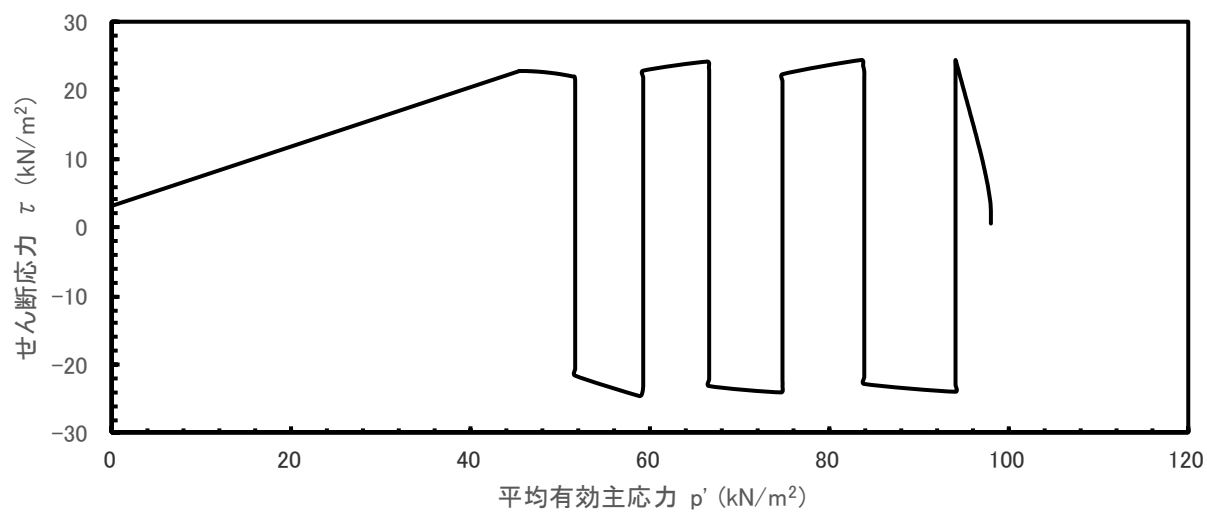


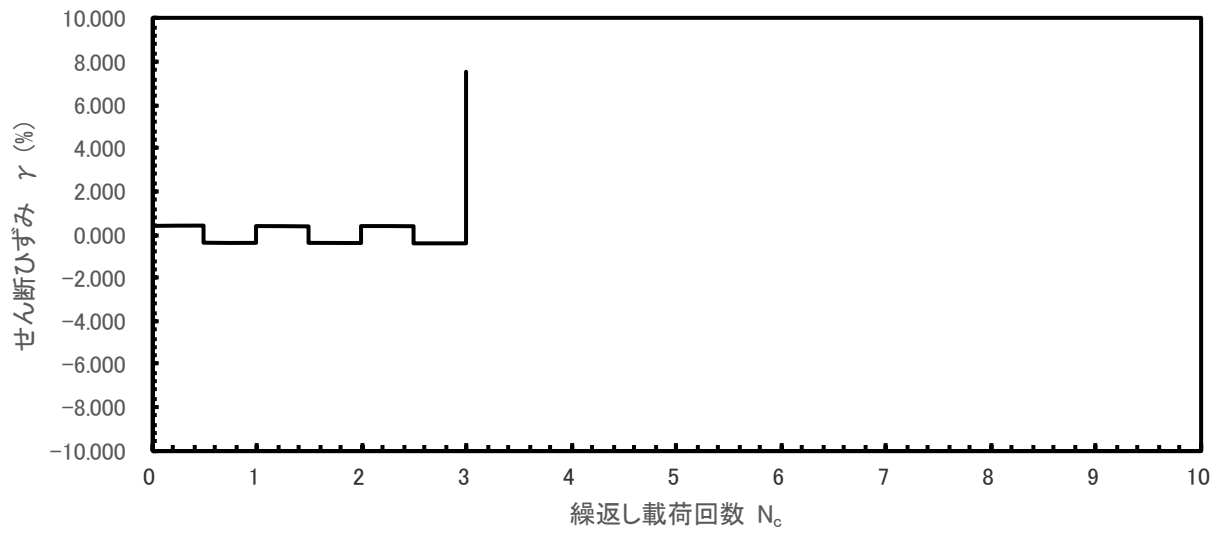
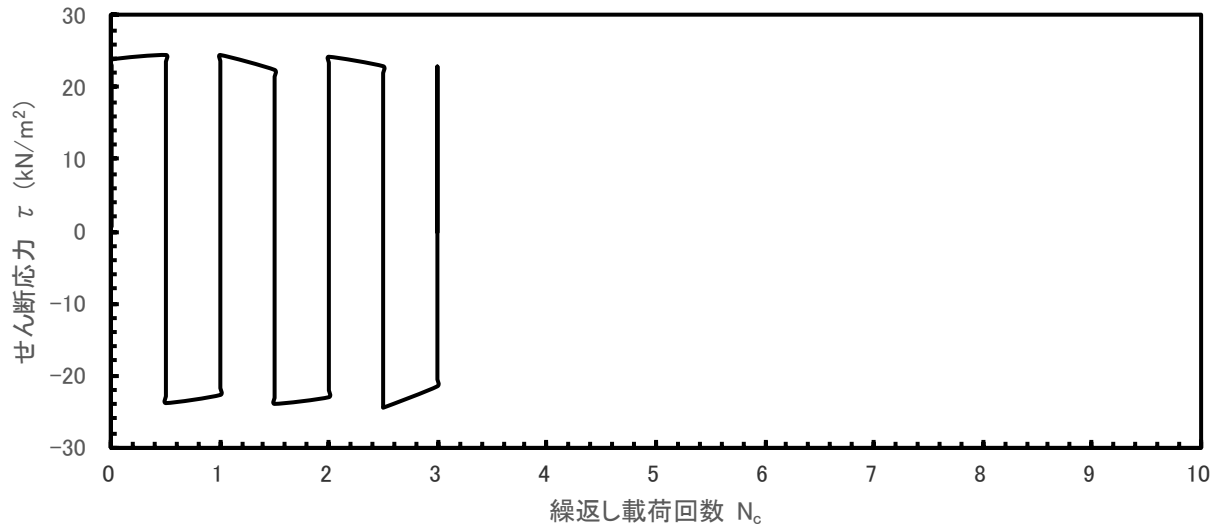
(2) Case4



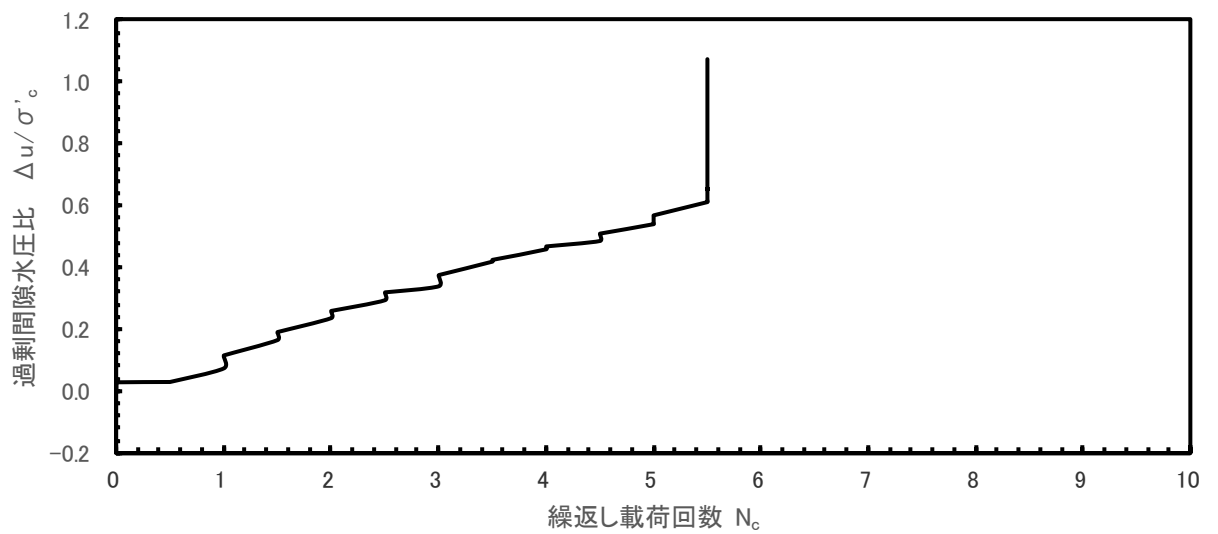
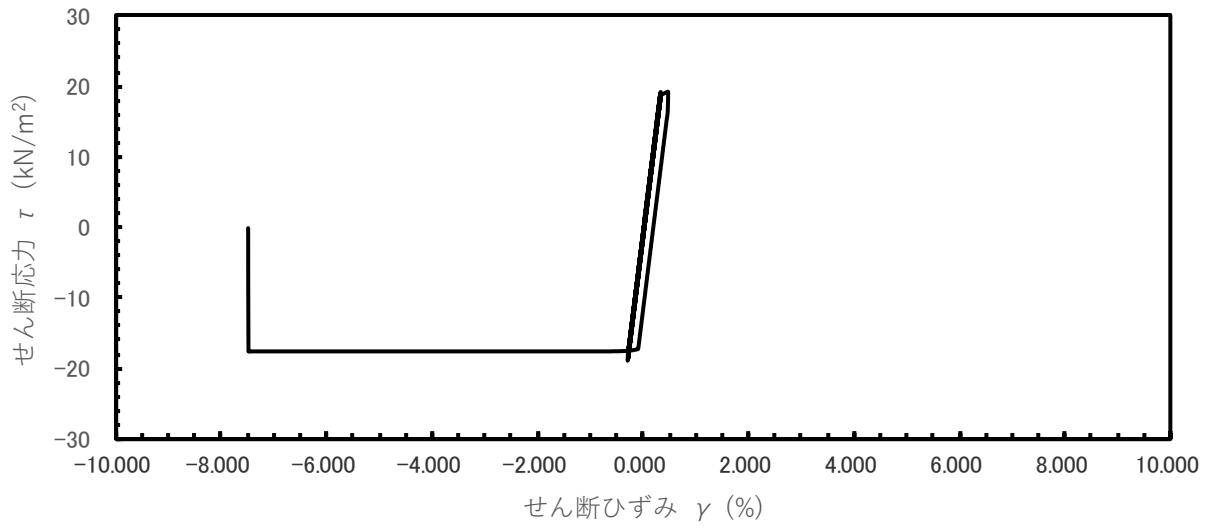
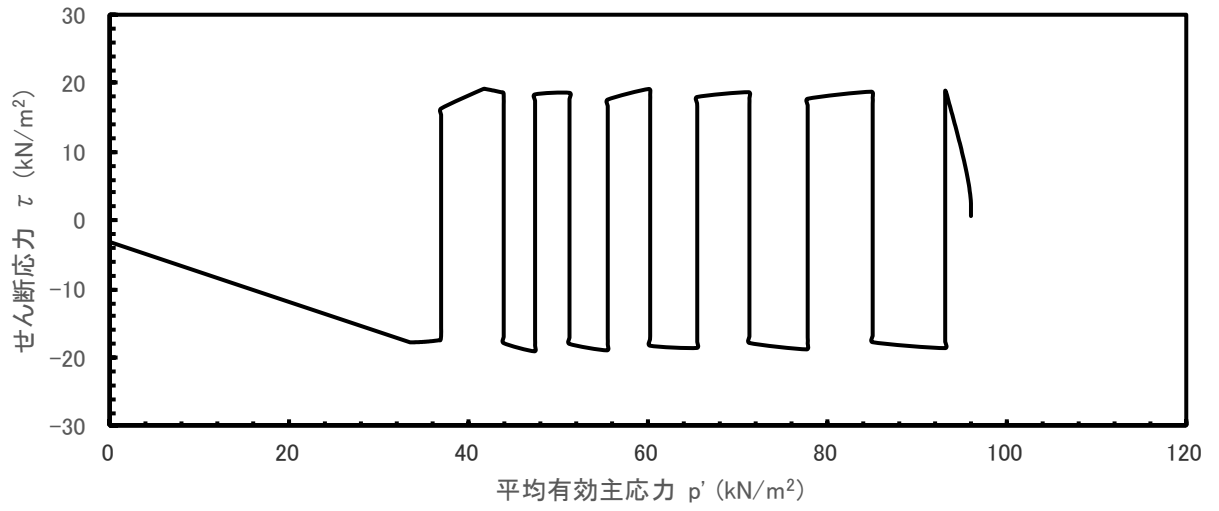


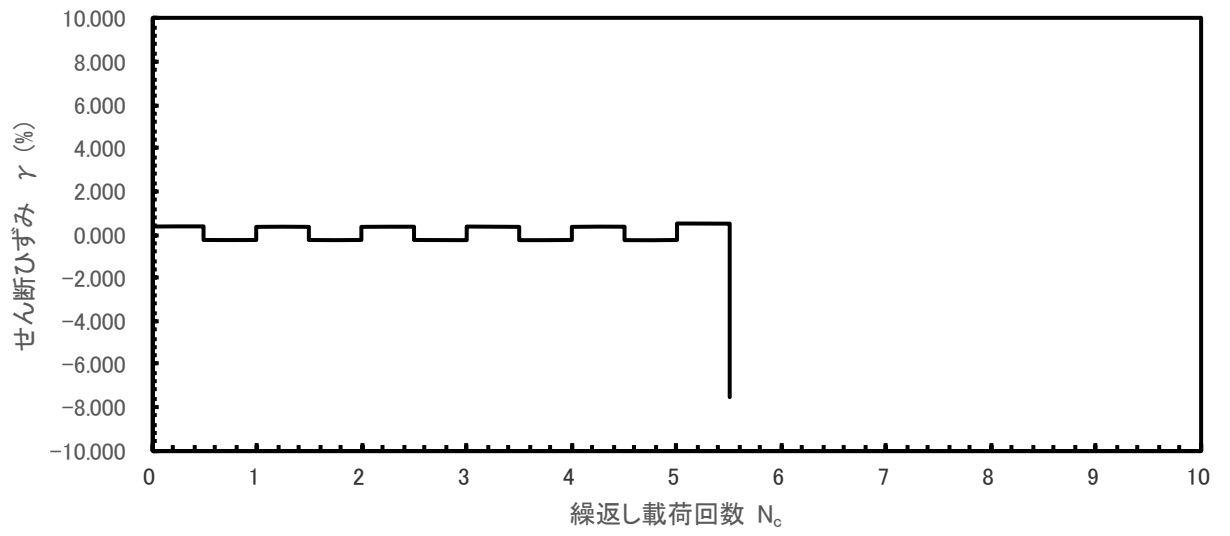
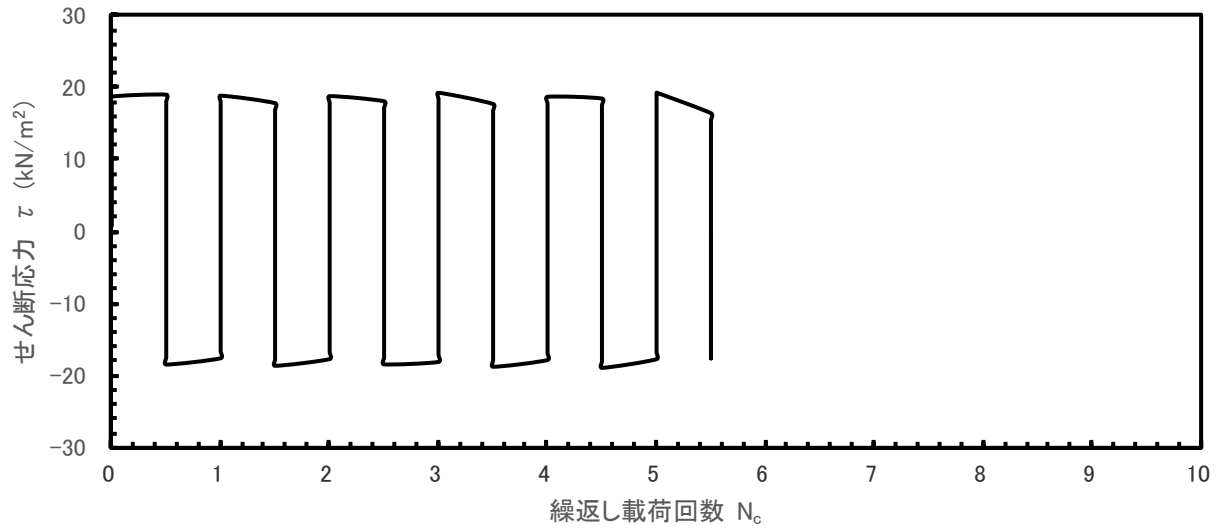
(3) Case5



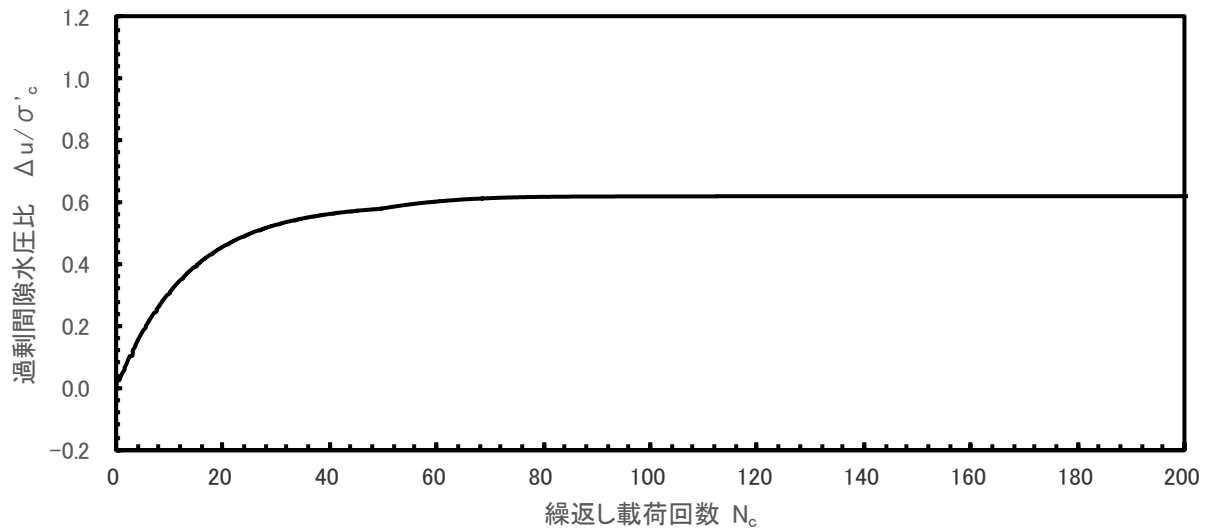
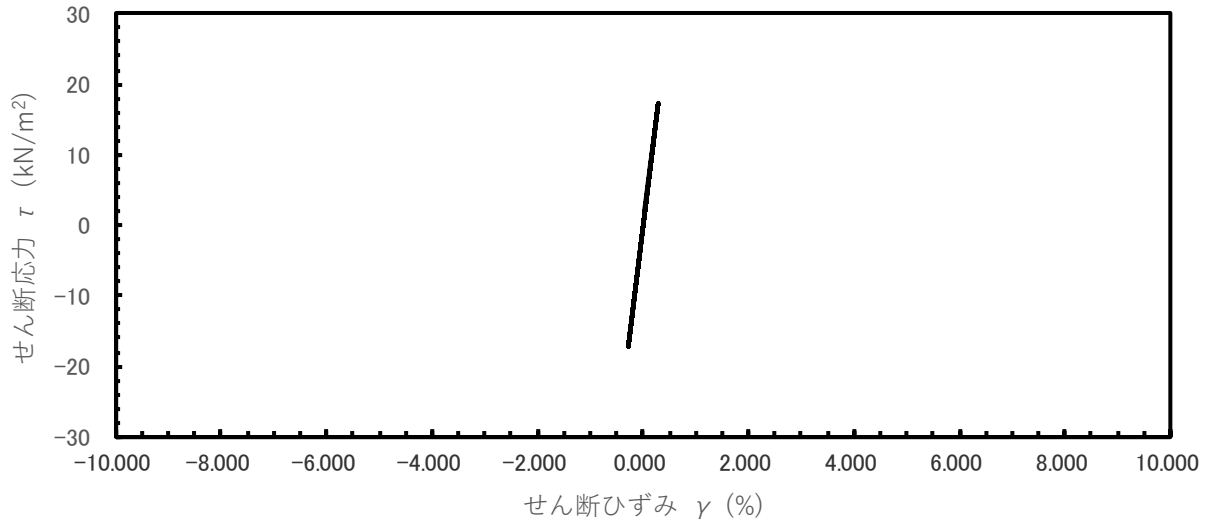
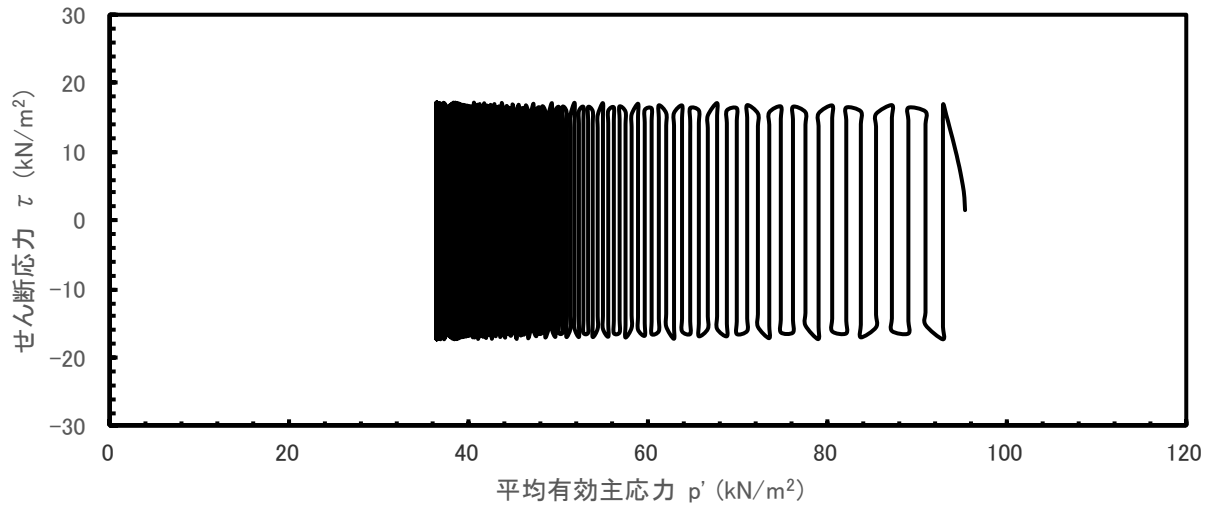


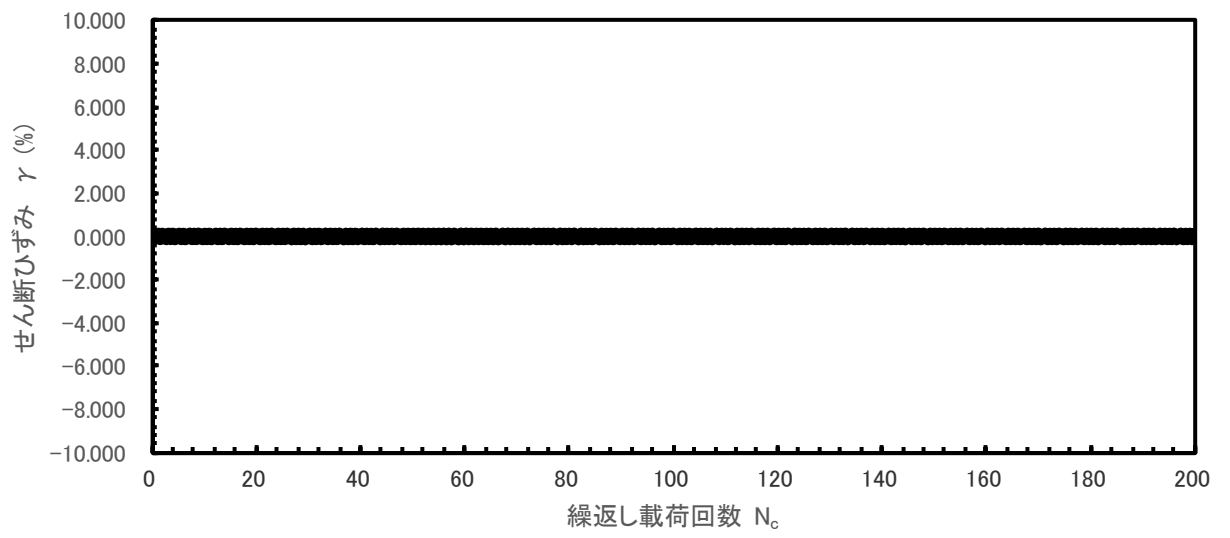
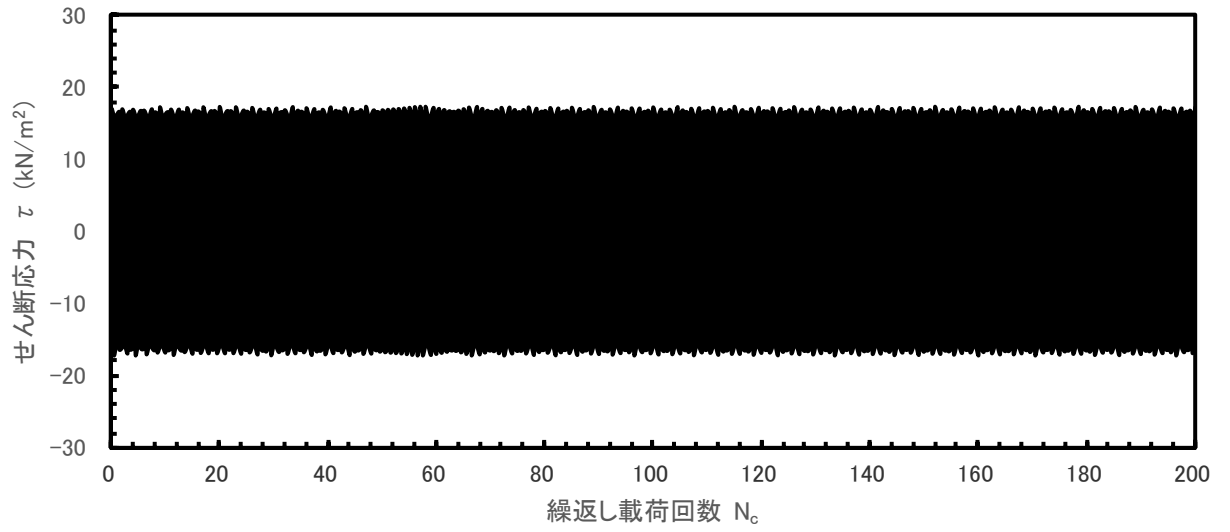
(4) Case6





(5) Case8





(6) Case9

