

降雨と地震の作用を受ける斜面の安定性評価に関する基礎的実験

中澤 博志¹・石澤 友浩²・檀上 徹²・尾上 修浩³

¹ 正会員 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)
E-mail: nakazawa@bosai.go.jp

² 正会員 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)
E-mail: ishizawa@bosai.go.jp, t.danjo@bosai.go.jp

³ 非会員 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)
E-mail: onoue@bosai.go.jp

近年、地球温暖化に起因する気候変動や極端気象による各種災害が頻発している。一方、地震による大規模被害も多く生じており、これらが複合化した際には、被害の様相をより一層深刻化させている。本研究では、降雨と地震の複合化を念頭に、先行降雨による地盤の飽和度上昇後に地震が作用した場合と先行地震後の降雨浸透の場合を考え、降雨装置と振動台を併用し、単純な模型斜面对象とする実験を実施し、先行する事象・外力による損傷レベルによる最終的な被害様相の違いを確認した。その結果、先行して受けた外的要因によって、その後の耐震性やメカニズムが異なることを確認した。

Key Words: slope stability, earthquake, rainfall, shake table, complex disaster

1. はじめに

近年、地球温暖化に起因する気候変動や極端気象による各種災害が頻発している。この気候変動による災害の頻発化について、中央環境審議会が気候変動による影響の評価を行う等、行政や学術の場、あるいは国際的に議論されている^{1,2)}。しかし、地球温暖化や気候変動に関する研究は、地盤工学に焦点を絞った内容より地球温暖化に伴い生じ得る現象についての取り組みが多いのが現状である。一方、地球温暖化と関連しないと考えられる地震による大規模被害も多く生じており、被害の様相をより一層深刻化させている。また、地震を軸とする複数の事象の掛け合わせによる複合被害の事例は、降雨単独以外に、例えば 2004 年新潟県中越地震後に融雪を要因とする地滑りの発生が確認された³⁾。これは、先行地震による影響と言うことができる。斜面や土構造物に関しては、もともと降雨と地震単独のそれぞれで被害を受けやすく、特に集水地形に建設された盛土や排水性の悪い材料の場合に被害が集中する傾向にある⁴⁾。複合化の影響としては、例えば、降雨の浸透などにより盛土の地盤物性が変化し、その結果として盛土斜面の耐震性が低下する可能性が考えられ、その事例としては、古くは 1968

年十勝沖地震から、1984 年長野県西部地震、1999 年台湾集集地震、2003 年宮城県北部地震、2004 年新潟県中越地震等の被害について、地震前の先行降雨の影響による耐震性の低下が指摘されている^{5,6)}。

降雨と地震の複合作用に関する研究は、一井⁹⁾、松丸¹⁰⁾および川尻^{11,12)}による研究がある。例えば、一井らによる実験は、1.2m の盛土を対象とした実験を実施し、降雨浸透による盛土の耐震性低下のメカニズムについて、正弦波による振動実験を実施している。この実験における耐震性低下の原因として、降雨浸透によるサクシンの消失に起因するせん断強度の低下と単位体積重量の増加に伴う加振時の慣性力増加を挙げているが、どちらが支配的か判断が困難であるとしている。一方、川尻らは地震後の盛土耐力低減メカニズムを評価するため、模型実験や三軸試験等によりクラックへの降雨浸透の影響等を検討している。これらの一連の研究では、クラックが生じることにより盛土の透水性が高くなり、堤体内の水位上昇速度が増加すること、また、クラックの多さによっては、降雨時に早期の大規模崩壊を招く可能性が示唆されている。

今後、事象の複合化を念頭に、設計で想定される地震(中規模～L2 クラスまでの耐震性)と大雨警報～記録

的短時間大雨情報発動レベルの複合作用を考慮するためには、地震と豪雨の重ね合わせを定量的に評価するための評価手法が必要と考えられる。上述の通り、先行降雨による地盤の飽和度上昇後に地震が作用した場合と先行地震後の降雨浸透の場合があることから、これらの作用の順序が違っただけで、先行して生じた損傷状態やレベルによって最終的な被害様相が異なることが予想される。そこで、本研究では、単純な斜面模型対象に降雨と地震を再現し、降雨と振動実験の順序の入れ替えを行うことで、先行する事象・外力による損傷レベルによる最終的な被害様相の違いを確認することを目的とした。本実験では、降雨装置と振動台を併用し、土槽内に同一断面の斜面模型 2 ケースを作製し、「先行降雨+地震」および「先行地震+降雨」のケースで同時に実験を行い報告を行う。

2. 実験概要

本研究では、降雨および地震を再現するため、土槽内に斜面を再現したモデルを用い、降雨散水および振動台実験を実施した。写真-1に実験の前傾を示し、実験一連の概要を以降に説明する。



写真-1 実験の様子

(1) 試験体の概要

図-1に実験断面図を示す。中仕切り板を設置した土槽内に 2 ケース対面の同一斜面模型を作製した。長さ 4 m、幅 1 m および高さ 1.5 m の土槽内に、マサ土を用いた厚さ 30 cm の基礎地盤を構築し、その上部に背面高さ 0.9 m から 1:2 の勾配で斜面を造成した。また、降雨時には、地中浸透外の雨水が表面流が流れにより法先部に湛水しないよう排水層を設け、土槽底板のフィルタ層から排水する仕組みとした。なお、造成方法、センサ箇所および実験方法等については、次に順次説明する。

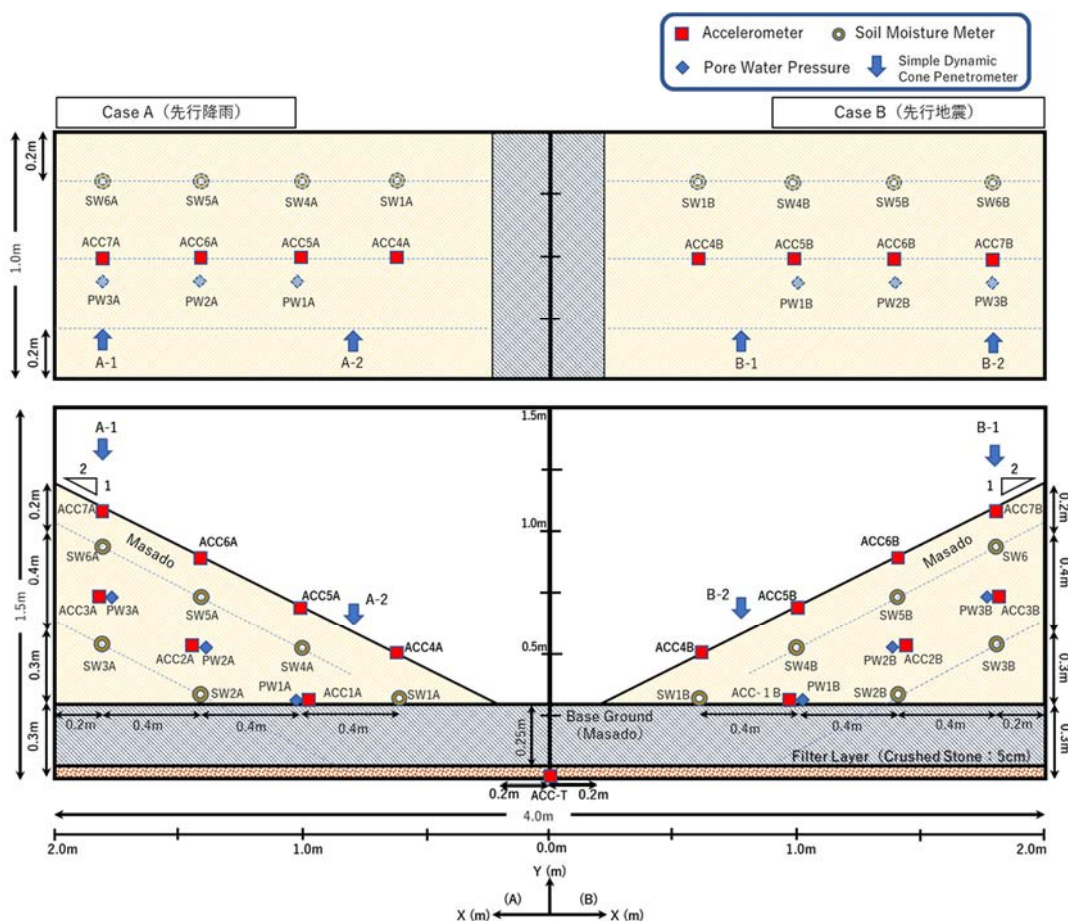


図-1 模型実験の断面・平面図



(a) 土槽



(b) 降雨散水装置



(c) 振動台

図-2 実験装置

表-1 実験ケースとスケジュール

No	時刻	概要	ケース A	ケース B	散水強度 [mm/h]
1	11時19分	散水スタート (ケースA側)	○	-	50.8
2	12時19分	散水停止			
3	13時26分	正弦波 63 Gal, 5Hz, 8s	○	○	-
4	13時29分	正弦波 138 Gal, 5Hz, 8s	○	○	-
5	13時31分	正弦波 350 Gal, 5Hz, 8s	○	○	-
6	13時34分	正弦波 490 Gal, 5Hz, 8s	○	○	-
7	14時03分	散水スタート (ケースB側)	-	○	50.8
8	15時03分	散水停止			
9	16時08分	正弦波 343 Gal, 5Hz, 8s	○	○	-
10	16時10分	正弦波 486 Gal, 5Hz, 8s	○	○	-
11	16時12分	正弦波 644 Gal, 5Hz, 8s	○	○	-

(2) 実験装置

降雨および地震を再現するための主要な装置として、土槽、降雨散水装置および振動台の概要を以下に示す。

(a) 土槽

写真-2(a)に実験に用いた土槽の外観を示す。土槽の内寸は、上述の通り長さ4m、幅1mおよび高さ1.5mで中仕切り版1枚が設置されている。底板には排水溝が設置され、模型地盤への給排水が可能な構造となっている。土槽側面中央部は一部アクリル板となっており、限定的ではあるが内部の様子が確認可能である。振動台上では、土槽を固定治具およびねじを用い、振動台のねじ穴へ締結・固定し使用した。

b) 降雨散水装置

写真-2(b)に降雨散水装置の外観を示す。本装置は、実験で使用した土槽の外寸である幅1.3m、長さ4.3mおよび高さ1.7mを跨ぐ構造であり、散水範囲内(1m×1.8m)に均一な降雨が実現可能な構造である。散水機構は逆U字ノズル式で降雨針を用いており、降雨針500本をモーターで同時に振動させることにより、均一な降雨を土槽上2.0mの高さから発生させることが出来る。また、雨滴径を $\phi 1.7 \sim 3.0$ mmの範囲で可変とし、かつ降雨強度は10~80 mm/hまでの制御が可能となっている。

c) 振動台

写真-2(c)に実験時の振動台の状況写真を示す。振動台は、14.5m×15.0m(搭載可能エリアは12.5m×12.5m)

表-2 表地盤材料の物理・力学特性

土 質			まさ土
土粒子の密度 ρ_d		g/cm ³	2.634
粒度組成	礫分	%	40.2
	砂分	%	53.8
	シルト分	%	3.8
	粘土分	mm	2.2
最大粒径 D_{max}		mm	19.0
均等係数 U_c			14.726
50%粒径 D_{50}		mm	1.299
最大乾燥密度 ρ_{dmax}		g/cm ³	1.884
最適含水比 w_{opt}		%	11.60
塑性指数 I_p			NP~4.5
最大密度 ρ_{max}		g/cm ³	1.884
最小密度 ρ_{min}		g/cm ³	1.309
三軸CD試験	c	kN/m ²	20.5
	ϕ	°	38.0

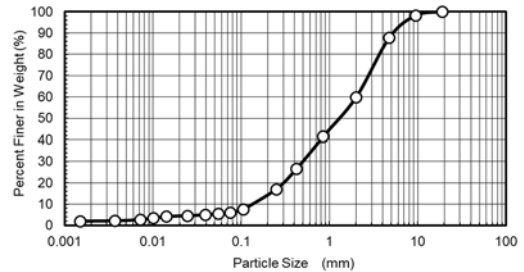


図-2 粒径加積曲線

のテーブルサイズを有している。搭載重量は最大で4900 kNであり、加振能力として4900 kN搭載時に約0.5 G(490 Gal)、2450 kN搭載時に0.8 G(784 Gal)の加速度、またストロークは ± 22 cmの仕様であり、今回の実験条件を十分に満たす能力を有している¹³⁾。なお、写真中に加振方向を示しているが、加振実験時には降雨散水装置は撤去した状態で実験が行われてた。

(3) 試験体の造成

表-1にスケジュールを含めた実験ケースを示す。模型地盤に用いたまさ土の物理的性質および粒径加積曲線を表-2および図-2にそれぞれ示す。その特徴は、構成土質

の殆どが礫分と砂分である材料であり、模型地盤造成時の施工管理に用いる最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.884 g/cm^3 であった。

模型斜面の造成は、2 ケース別々に水平 5 層に分け、1 層あたり 20 cm 程度撒きだし、締固め度 D_c が 90% になるよう転圧を行いながら密度調整し、結果的に模型地盤施工直後の D_c がケース A で 90.6%, B で 90.3% であった。なお、その際の初期含水比 w_0 の全体平均値は、 $w_0 = 4.91(\%)$ であった。

(4) 実験方法

実験ケースおよび降雨と加振実験の順序について表-1 に示し、実験の手順や測定項目について述べる。

a) 実験手順

降雨散水および加振実験について説明する。実験ケースについては、ケース A は先行降雨後の加振、一方、ケース B は先行加振後の降雨散水実験とした。降雨散水については、先行、後行に拘わらず、事前に設定した降雨強度 50 mm/h を条件として、散水時間を一時間とした。加振実験における入力波は、 5Hz の正弦波とし、2 実験断面が土槽中央を境に対象であることから、漸増部(2 s)、定常部(4 s)および漸減部(2 s)で構成される計 8 s の波を用いた。各加振段階は、振動台への入力目標として、加速度振幅を 50 Gal, 100 Gal, 250 Gal および 350 Gal に調整して加振を実施した。実際の振動台上の応答加速度は、それぞれ、63.1 Gal, 138.0 Gal, 349.7 Gal および 489.5 Gal であった。なお、ケース A と B において、降雨と加振の両外的要因を作用させた後、最終的に振動台上の応答値で 342.9 Gal, 486.4 Gal および 644.2 Gal の加振を行い、最後に残留変形を把握し終了した。

b) 計測項目

図-1 に図示しているが、降雨散水時の計測項目は降雨浸透による斜面内の水分特性を把握するための土壌水分計 (SW), また、加振時には、加速度計 (ACC) と変位計 (DT) により動的応答特性を把握した。参考として、間隙水圧計 (PW) によるデータも計測し、降雨浸透による影響と間隙水圧の動態の把握を試みた。なお、降雨時の土壌水分計は 10s 間隔、加振時の動的計測には 100Hz でデータのサンプリングを行い、一連の実験終了後には、斜面の残留変形を確認した。

また、別途、デプスカメラによる形状計測も試行しており、残留変形の把握を試みた。デプスカメラの計測原理は図-3 に示す通り、平行に並んだ 2 台のカメラで対象物を撮影することで、ステレオ写真測量の原理を用いてカメラからの水平方向距離を計測し、変位を面的に把握分かる仕組みとなっている¹⁴⁾。

c) 簡易軽量動的コーン貫入試験

本実験で使用した簡易軽量動的コーン貫入試験¹⁵⁾は、

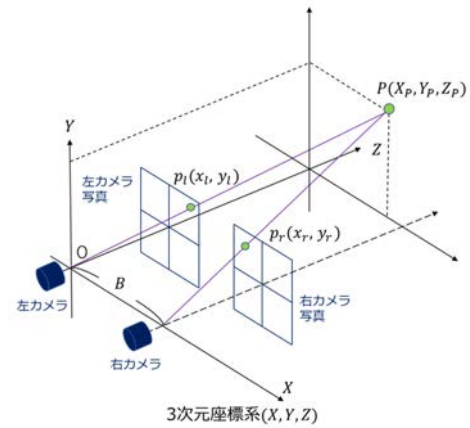


図-3 対象物とデプスカメラの幾何学関係

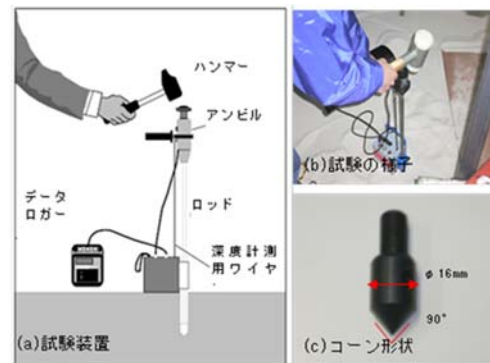


図-4 簡易軽量動的コーン貫入試験

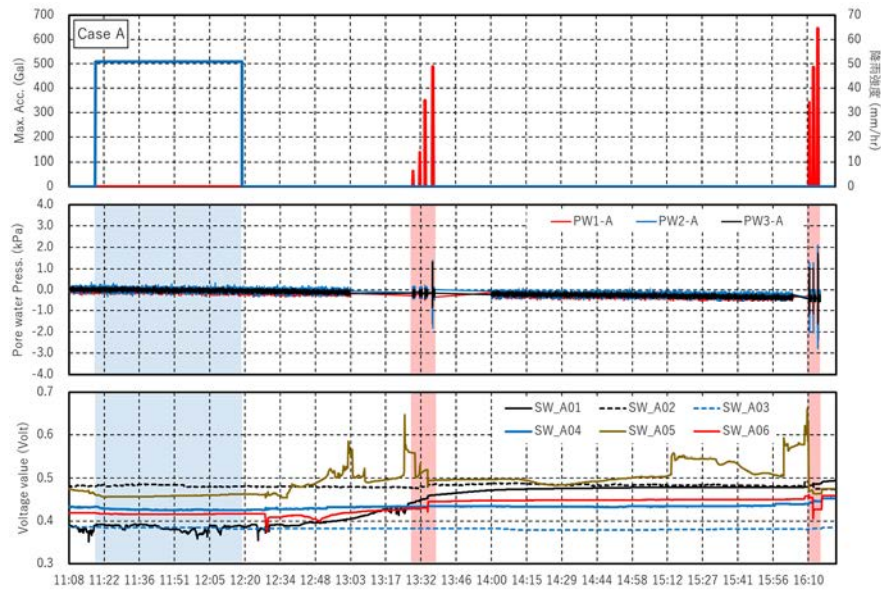
図-4 に示す通り、狭隘地において一人で試験が可能、任意の打撃力で評価が出来る、試験に時間をそれほど要さない、試験後直ちにデータのチェックが可能、および空間分解能が高い等の利点を有するサウンディング手法である。試験は、模型斜面造成後、ケース A の先行降雨としての散水後、ケース A の散水後の加振あるいはケース B の先行加振後、ケース B の後行降雨散水後、および最終的に実施した加振後の 4 回のタイミングで実施された。後述の図-8 における試験結果を見ると、造成後には、両ケース共に表層の 10 cm はコーン貫入抵抗 q_d がやや小さく、転圧面に相当する深度分布でピークが出現しているのがわかる。

3. 実験結果

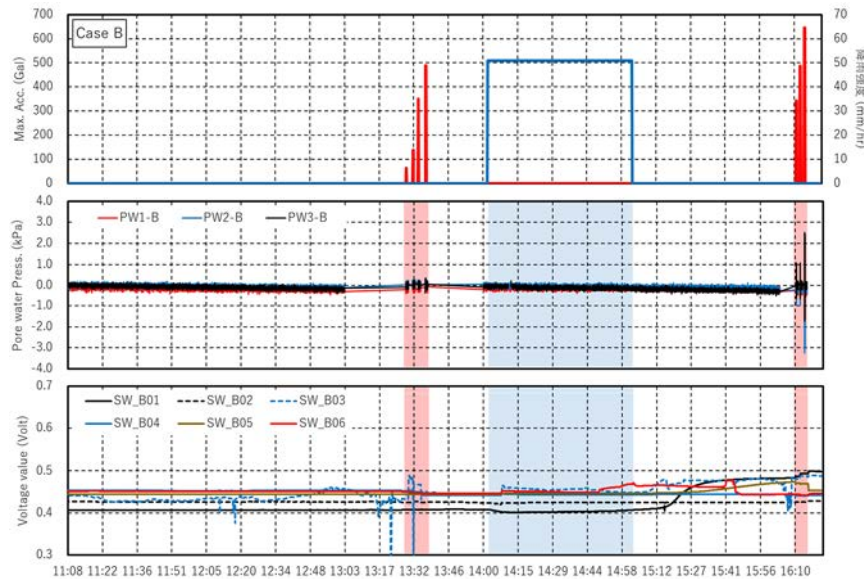
(1) 全体概要

表-1 に示したスケジュール全体に沿って、図-5 に加振時の振動台加速度応答値、間隙水圧計および土壌水分計の電圧値の変化をそれぞれ示す。

ケース A を見ると、先行降雨時に間隙水圧と土壌水分計の電圧値に変化はないが、降雨後の浸透によって、加振実験に至るタイミングまで徐々に電圧値が上昇してい



(a) ケース A



(b) ケース B

図-5 各種イベントにおける計測値の時刻歴

の様子がわかる。加振時には間隙水圧に変化が見られるが残留することは無く、電圧値も最後までほぼ一定値を示している様子が認められる。一方、ケース B では、先行で加振を実施しているが、後行で実施した降雨散水中の電圧値に殆ど変化が認められず、その後、電圧値が増加して飽和度が上昇している様子が見て取れる。両ケースの間隙水の動態の傾向が同様ではあるものの、SW01に着目すると、先行する加振の有無により、電圧値の上昇傾向が異なっており、加振によって浸透特性が変化した様子がわかる。

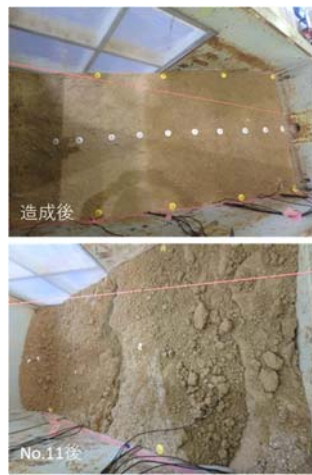
写真-3 に実験前と表-1 中の No.11 の最終加振終了後の斜面の様子を示す。降雨と加振の順序の違いによって、ケース A と B で斜面の崩壊性状が異なっている様子が確認できる。前述の通り、実験全体では、降雨散水と加振

実験を行っているため、写真-3 に示す最後の No.11 に至るまでの実験結果について、以下にそれぞれ説明する。

(2) 降雨浸透の影響

図-5 における土壌水分計の電圧値から推定した飽和度 S_r のコンター図を図-6 に示す。なお、本実験の土壌水分計測は、誘電率から土壌水分を測定する誘電率土壌水分センサを地中に設置し計測しているが、土壌水分センサ SW の計測電圧値 V_{SW} を用いて推定飽和度 S_r を求めた。まず、土壌水分センサの計測電圧値 V_{SW} から体積含水率 θ_{SW} を次式より換算した。

$$\theta_{SW} = a(V_{SW})^2 + b(V_{SW}) + c \quad (1)$$

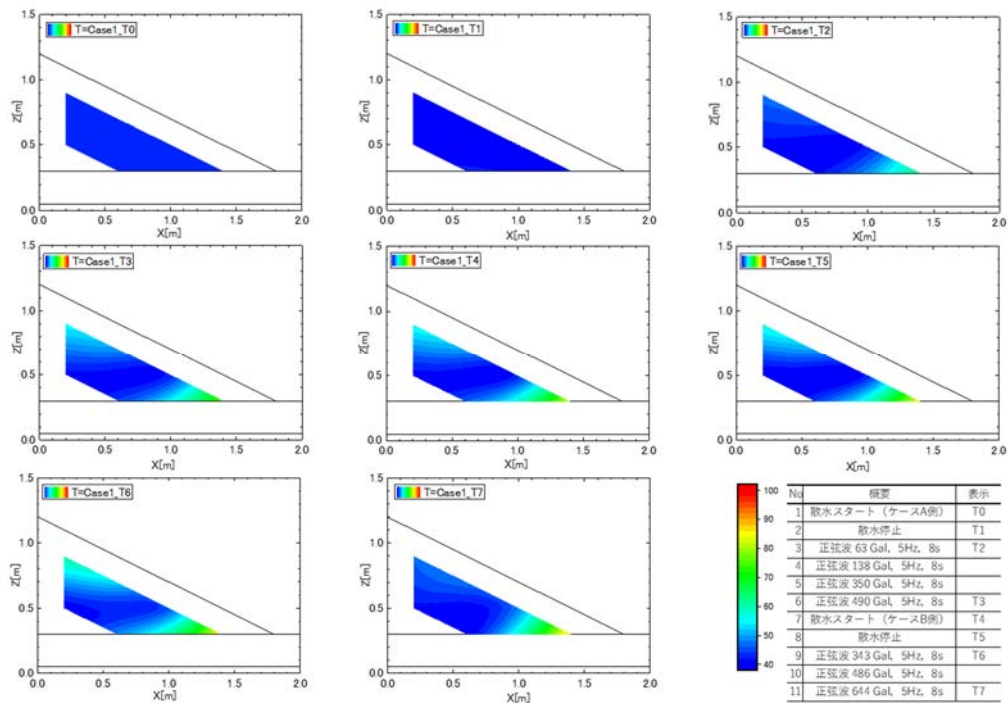


(a) ケース A

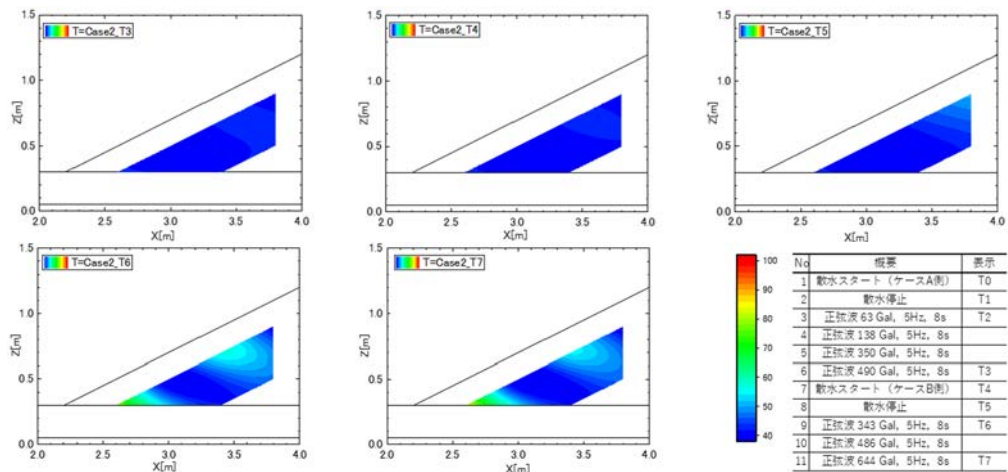


(b) ケース B

写真-3 一連の実験前後における斜面の様子



(a) ケース A



(b) ケース B

図-6 飽和度分布図



(a) 浸透領域



(b) 浸透領域に生じたすべり線



(c) No.11加振終了後の様子

写真4 ケース Aにおける降雨浸透状況と残留変形の様子

なお、係数 a 、 b および c は、マサ土の乾燥密度が $\rho_d = 1.600 \text{ g/cm}^3$ で実施したキャリブレーション値（印加電圧 2.5 V 、 $a = 6.621 \times 10^{-5}$ 、 $b = 1.089 \times 10^{-1}$ 、 $c = 4.490 \times 10^{-1}$ ）を用いた。次に、各地点の土壌水分センサの感度が僅かに異なることから補正する必要がある。ここでは、式(2)に示すように、実験前（斜面造成直後）の体積含水率 θ_{sw} と、盛土作製時の含水比 w_0 と乾燥密度 ρ_d から求めた体積含水率 θ_{sw0} が一致すると仮定し、初期含水比 w_0 と実験前の体積含水率から求めた含水比 w_{sw} から補正含水比 w_1 を求め、補正体積含水率 θ_{sw1} を算出した。

$$w_{sw} = \theta_{sw} / \rho_d \quad (2a)$$

$$w_1 = w_0 - w_{sw} \quad (2b)$$

$$\theta_{sw1} = w_1 \times \rho_d \quad (2c)$$

最後に、上記の補正体積含水率 θ_{sw1} と土粒子密度 ρ_s から推定飽和度 S_r を次式で求めた。



(a) 浸透領域

(b) No.11加振終了後の様子

写真5 ケース Bにおける先行加振と残留変形の様子

$$S_r = \theta_{sw1} \left(1 + \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1} \right) \quad (3)$$

図-6(a)に示すケース Aに着目すると、先行降雨の前後にあたる T0 と T1 の間に S_r が 40%程度のみで、変化が明瞭に見られていないが、T2 の加振実験直線に至るまでに、斜面上部と法先で高飽和度領域の広がりが見られる。特に法先での S_r の上昇傾向が大きく、70%程度を示している。土槽の亚克力板からでしか確認できないが、写真-4(a)を見ると、法先に向かい浸透領域が広がっている様子が分かる。その後、後行での加振実験後である T3 以降、飽和度分布の傾向は変わらず、表-1 における No.6 の 490 Gal 加振時には、写真-4(b)に示すように、浸透領域におけるクラックと滑り線が確認できる。最終的な加振を行った後の T7 において、斜面上部の S_r が増加しているが、写真-4(c)に示す通り、崩壊後、著しい沈下が生じており、密になって影響がでえと考えられる。

図-6(b)に示す先行加振後の降雨散水であるケース Bに着目すると、降雨散水後の T5 において、斜面上部で S_r の上昇領域が認められるが、ケース Aほど明確な傾向は見られない。また、表-1 における No.9 の加振前である T6 を見ると、 $X=3.5\text{m}$ における地表面において、高飽和度領域が拡大している様子がわかる。写真-5(a)はNo.8の後行で実施した降雨散水後の様子であるが、先行加振によるクラックや滑り線等の明確な変状が無かったこともあり、目視では降雨散水後も変状が認められない。しかし、(b)に示す No.11 の 644 Gal 加振後の様子を確認すると、崩壊領域の源頭部と高飽和度領域とが概ね一致することから、先行加振によって、潜在的な損傷等が生じ、降雨散水前には浸透しやすい状況になっていた可能性がある。

(2) 加振時挙動

降雨の履歴の有無による比較として、表-1に示すNo.6の加振実験結果を抽出し図-7に示す。図に示す左段は先行降雨を受けたケースA、一方、右段はケースBを示している。間隙水圧の時刻歴を確認すると、降雨浸透の影響のあるケースAで間隙水圧計が応答している様子が分かる。加速度に関しては、ACC4およびACC7を除き、全体的に応答加速度特性はほぼ変わらないが、ケースAにおけるACC4およびACC7においては、乱れと加振後に残留値が生じていることから、著しい変状が生じたものと推察される。これらのセンサ箇所は、図-6(a)に示

す先行降雨によって生じた高飽和度領域にあることから、加振による慣性力の影響であったものと推察される。

次に、同様な降雨と加振の履歴を受けた状態による比較として、表-1に示すNo.11の加振実験結果を抽出し図-8に示す。両ケースともに、間隙水圧計の応答値はほぼ同様な傾向を示している。一方、応答加速度については、全体的に加速度応答にスパイク状の成分と乱れが確認されるが、先行降雨と後行の加振で損傷が確認されたケースAがケースBに比べ、より著しい傾向を示していることが分かる。

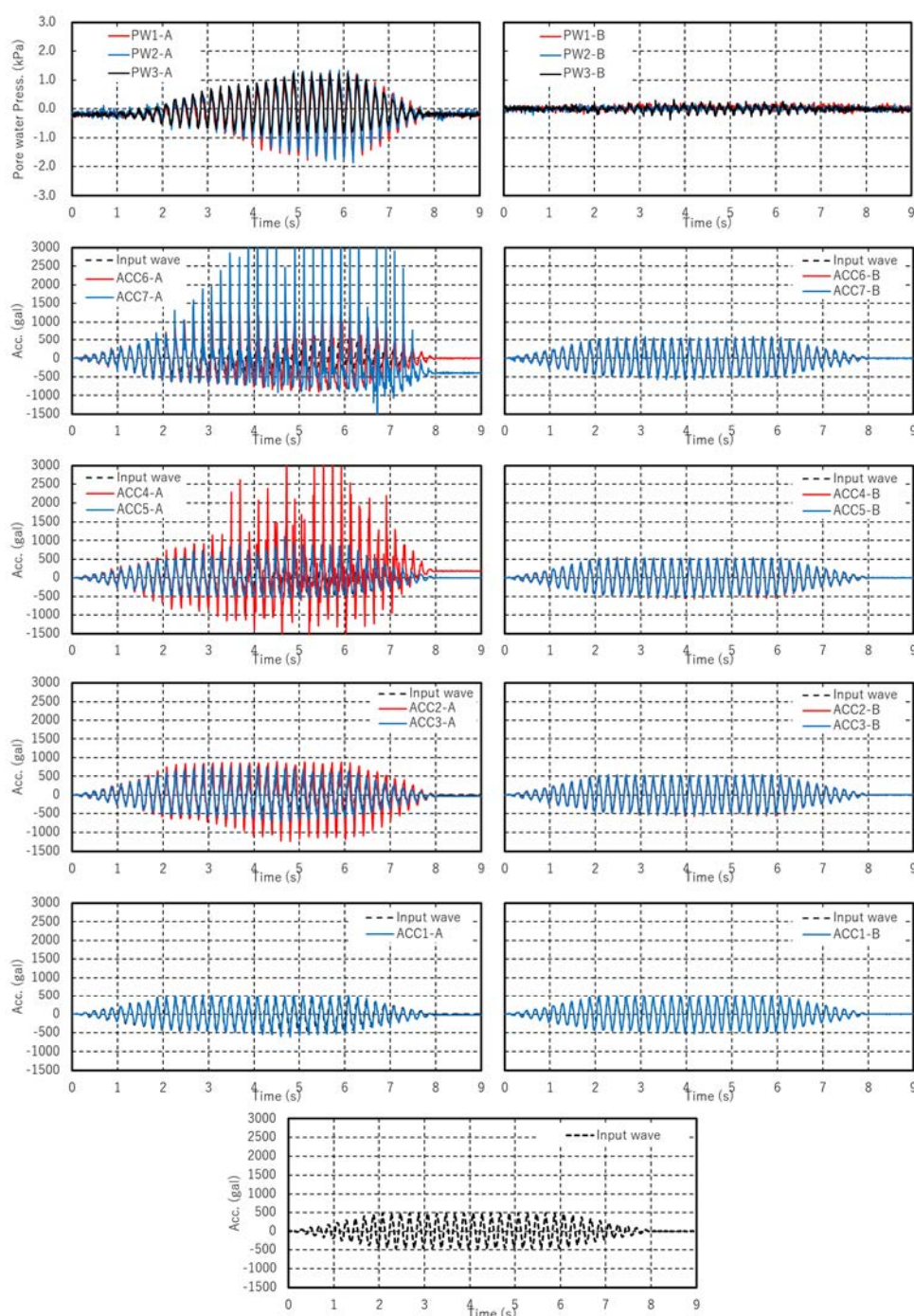


図-7 No.6における加振時時刻歴データ（左列はケースA、右列はケースB）

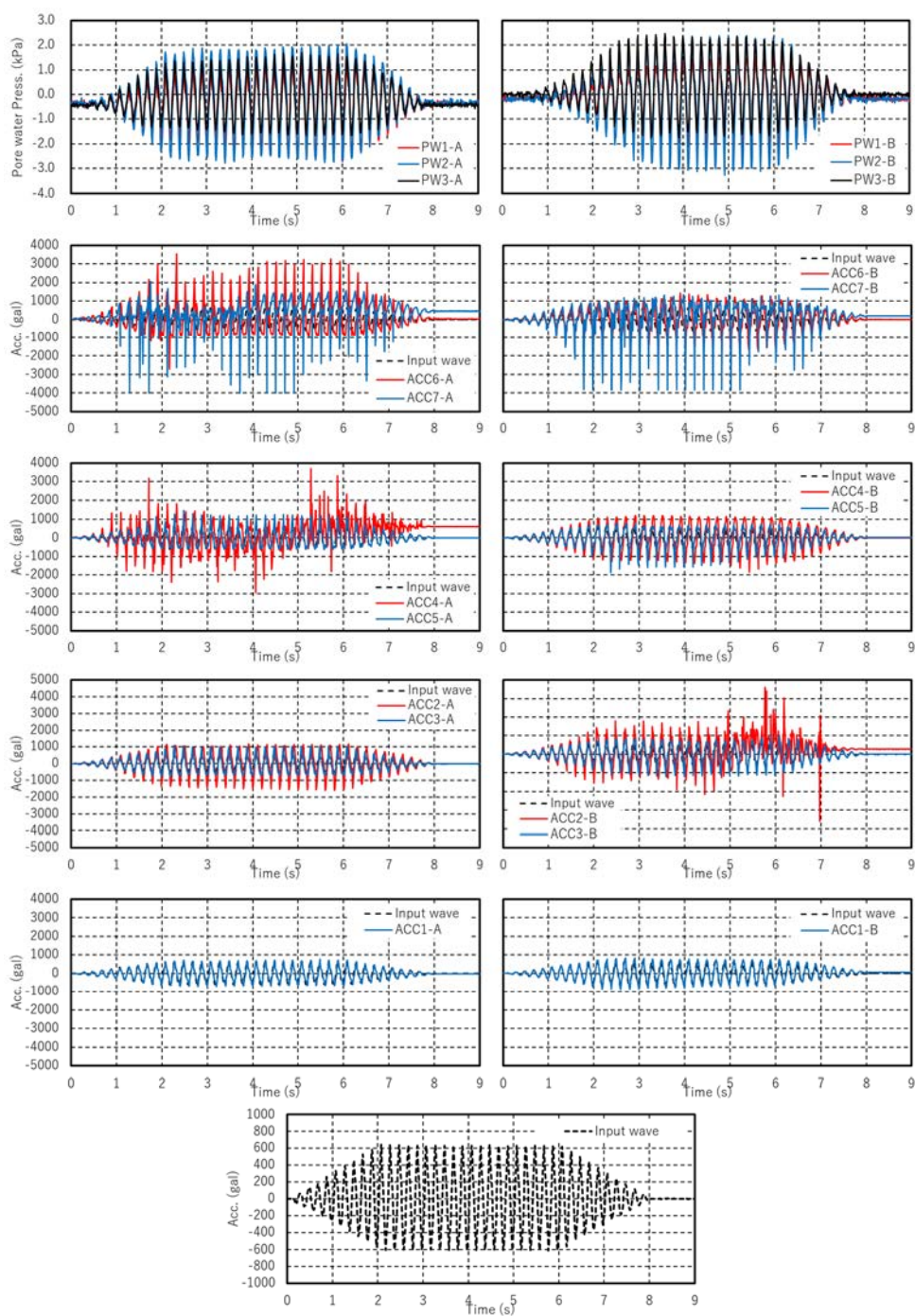


図-8 No.11における加振時時刻歴データ（左列はケース A、右列はケース B）

4. 残留変形による降雨と地震による作用の評価

降雨と地震の順序によって、最終的な被害様相の相違を把握するため、簡易軽量動的コーン貫入試験による地盤内の状態の評価および変形計測による残留変形の評価を行った。以下にそれぞれの結果について述べる。

(1) 簡易軽量動的コーン貫入試験

図-1に示す簡易軽量動的コーン貫入試験実施個所における調査結果を図-9にそれぞれ示す。先行降雨を受けたA-1では、斜面造成後から降雨散水後にかけて、土被り

の浅いGL-0.3mの範囲で動的コーン指数 q_d の低下が認められ、その後の加振により、更なる低下が認められる。土被りの深い斜面深部については、先行降雨による降雨浸透の影響が少ないため、先行降雨そのものや後行で実施した加振による大きな変化は確認されず、影響は少ないものと判断される。B-1については、先行で加振を実施しているが、浅部における影響が大きい点で、A-1と同様である。しかし、先行加振において、滑り破壊等の変状や損傷が無かったことから、造成後と先行加振における q_d に大きな変化が見られていない。その後の後行降雨により、 q_d の低下が見られているが、降雨浸透による

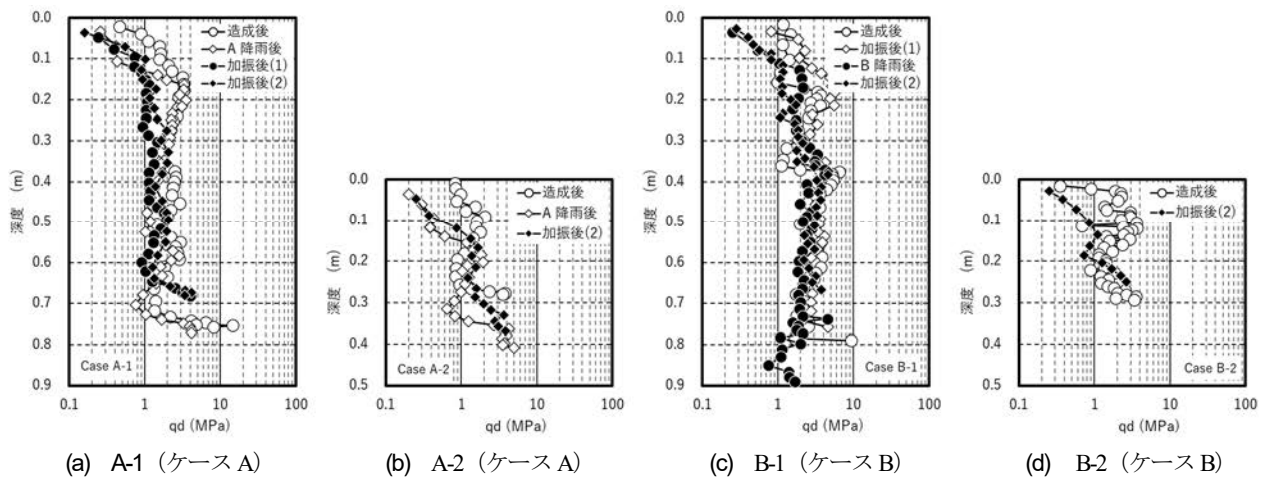


図-9 簡易軽量動的コーン貫入試験結果

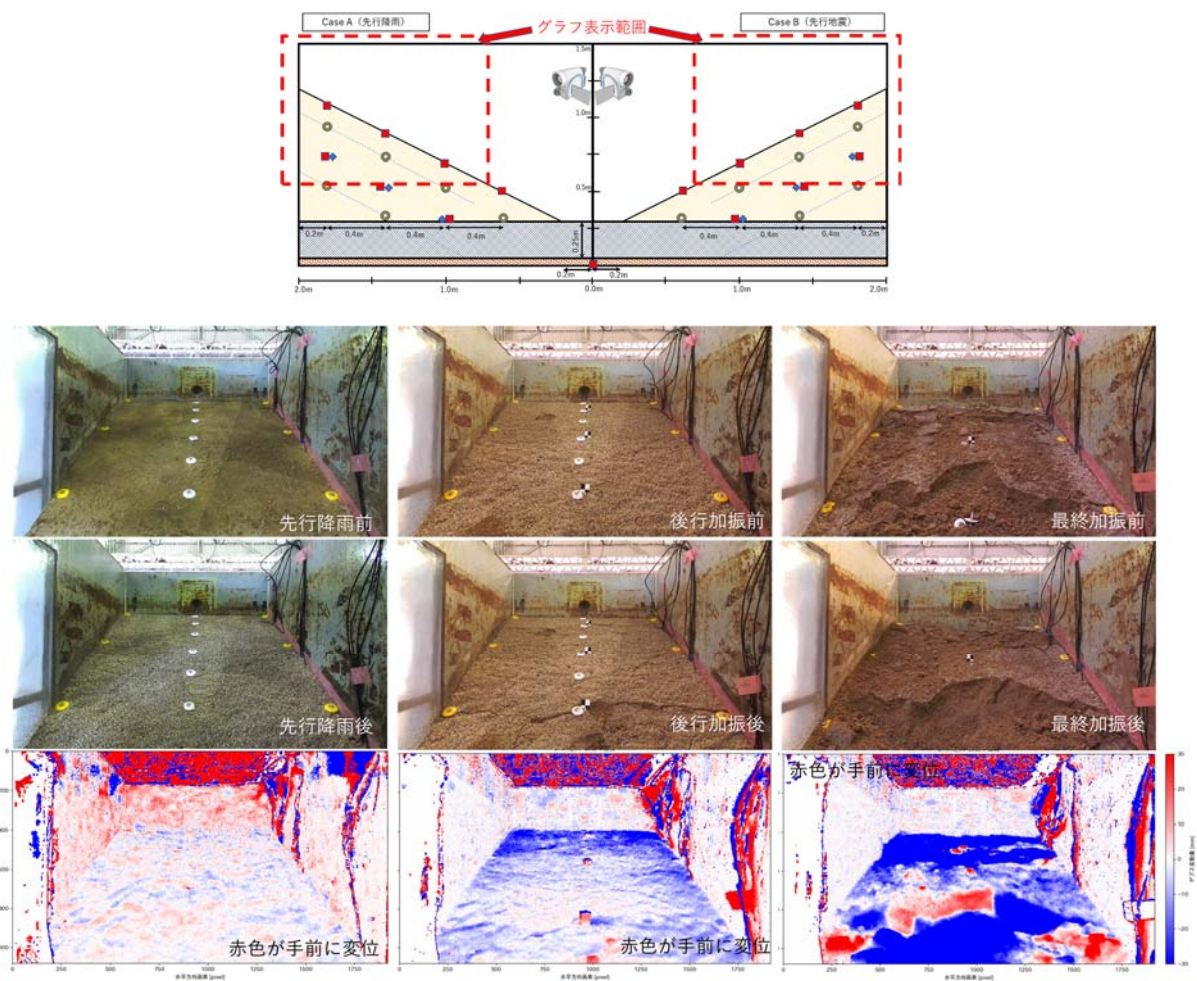


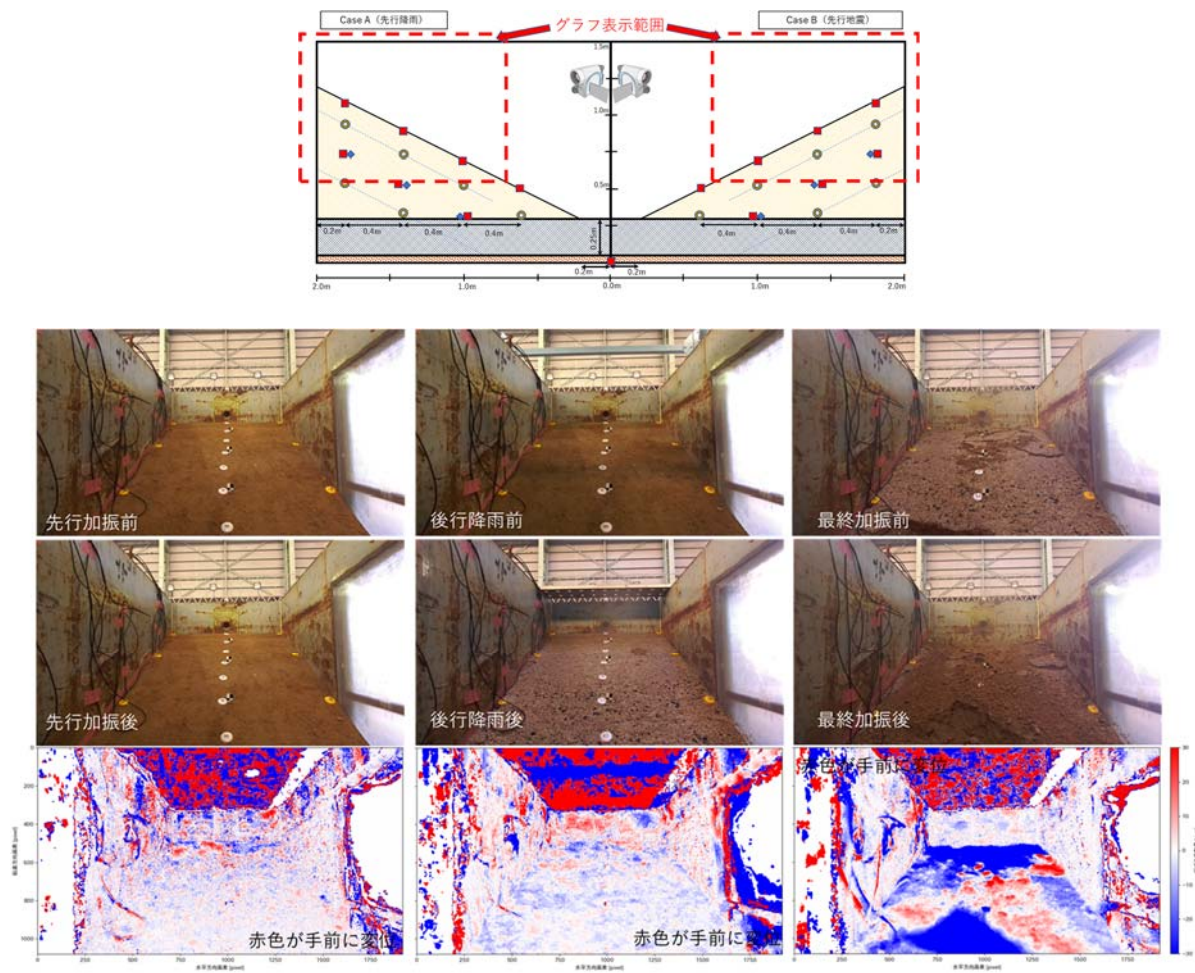
図-10 デプスカメラによる画像処理 (ケース A)

S_r 上昇に伴うせん断抵抗の低下と考えられ、図-6(b)における T6 で図示されている高飽和度領域とも一致する。

(2) 変位計測結果

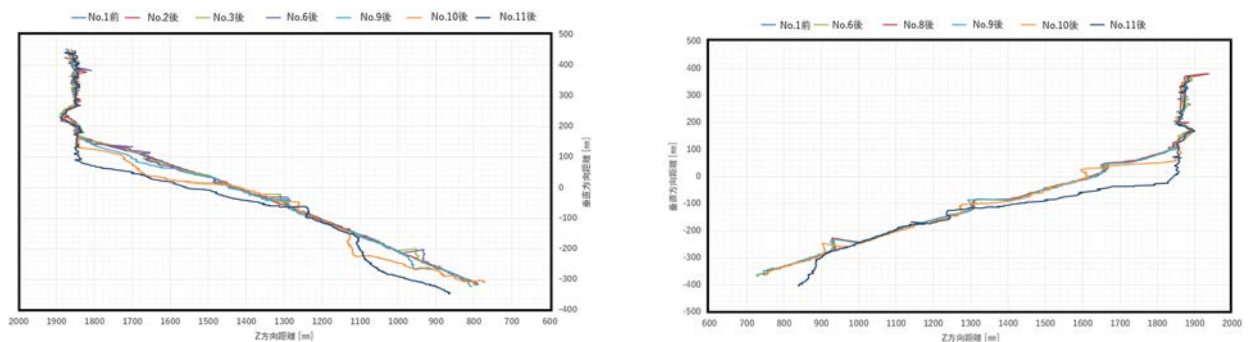
面的に評価を行うため、デプスカメラによる計測結果に基づき地表面の変状について述べる。ケース A におけ

る代表的な取得情報として、No.1 と No.2, No.6 の前後、および No.11 の前後における画像の比較と変位量の差分、ケース B では、No.6, No.7 と No.8, および No.11 におけるデータを図-10 および 11 にそれぞれ示す。両ケース共に、最終的な加振である No.11 において、斜面上部の沈下と手前の崩壊面の様子が明瞭に確認できる。



(a) 先行加振前後 (No.6 の前後) (b) 後行降雨前後 (No.7 および 8) (c) 残留変形 (No.11 の前後)

図-11 デプスカメラによる画像処理 (ケース B)



(a) ケース A

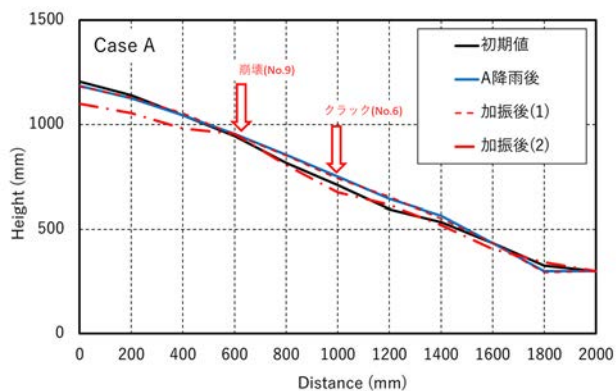
(b) ケース B

図-12 デプスカメラにより評価された地表面形状

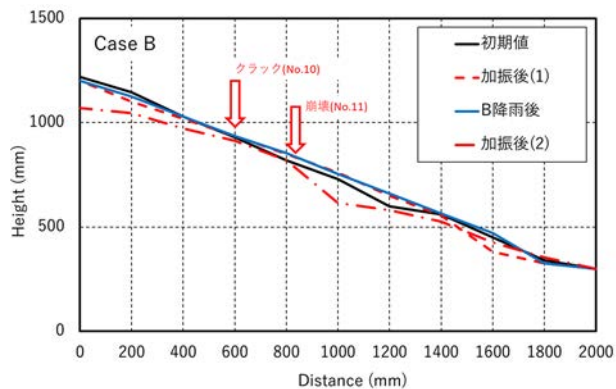
これらの計測結果に基づき、図-12 に模型斜面のセンターラインにおける地表面変形図を示す。ただし、デプスカメラで捉えた範囲のみの表示であり、図-10 および 11 に図示および撮影された範囲を対象としている。ケース A を見ると、先行降雨に始まり No.6 後の後行加振までは、変状が余り生じていない様子がわかる。No.9 以降の加振により、加振ごとに、斜面上部の沈下と下部の滑りの様子が確認できる。ケース B についても、先行加

振から後行降雨である No.8 後までの変状は殆どなく、No.9 以降の加振において、変状が進行し、全体的に傾斜がフラットになるように、斜面上部の沈下が著しいこと、また、段差が生じ、加振毎にその位置が下がっており、土塊の滑りが進行している様子がわかる。

斜面全体の変状が分かるよう、図-13 に水平方向 20cm ピッチで測量したセンターラインの地表面形状分布を示す。なお、両ケースで比較しやすいように、ケース B の



(a) ケース A



(b) ケース B

図-13 地表面形状

グラフの左右を反転し、ケース A の表示と併せた。ケース A の加振後(1) (No.6 後の計測) とケース B の B 降雨後 (No.8 後) を見ると、降雨と加振の順序が入れ替わっただけでは変状に差異が見られないが、加振後(2) (No.11 終了後) における残留変形図を比較すると、ケース B における局所的な変状が顕著であることがわかる。これは先行で加振したことにより、後行の降雨散水時に地表面近傍の浅い層で局所的に浸透しやすい条件になったこと、それにより高飽和度領域が生じ、No.9 以降の加振で大きな変状が生じたものと考えられる。

5. まとめ

先行降雨による地盤の飽和度上昇後に地震が作用した場合と先行地震後の降雨浸透の場合を考え、本研究では、降雨装置と振動台を併用し、単純な模型斜面を対象に降雨と地震を再現し、先行する事象・外力による損傷レベルによる最終的な被害様相の違いを確認した。一連の実験から、以下の項目を確認できた。

- 1) 先行、後行に拘わらず、今回、降雨強度 50mm/hr による一時間の降雨散水では、土壌水分計の電圧値には殆ど変化が無く、その後、表層近くにおいて電圧

値が増加し飽和度が上昇する。しかし、先行する加振の有無により、電圧値の上昇傾向が異なっており、加振による損傷によっては浸透特性が変化する可能性があると考えられる。

- 2) 密度や締固め度等の条件にもよるが、先行降雨を受けた場合、後行の加振時により表層の浸透領域においてクラックと滑り線が確認された。一方、先行加振を受けたケースでは、加振時にはクラック等の変状が確認されなかったが、その後の降雨散水では、先行降雨を受けたケースと浸透特性が異なり、局所的には浸透しやすい傾向が確認された。加振の際に生じた潜在的な緩みや損傷の影響と推察され、その部位において、加振時に変状が生じやすくなると考えられる。
- 3) 今回、降雨と加振の入れ替えを行い比較実験を実施したが、表-1 に示す No.8 までの実験条件においては、斜面の変形に大きな差異があるとは言及できなかった。しかし、その後の加振を続けた場合には、変形・損傷・崩壊の傾向がやや異なることが確認された。先行降雨による飽和度が上昇した浸透領域は地震によって損傷するケースと、先行地震後の局所的な変状・損傷によって、降雨浸透特性が異なりせん断抵抗の低下を招くケースがあり、その後の耐震性やメカニズムについては、先行して受けた損傷に負うところが大きいと考えられる。

謝辞：本実験を実施するにあたり、株式会社ネクサスの中村様のご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：「日本国内における気候変動予測の不確実性を考慮した結果について（お知らせ）」，気象庁報道発表資料，2014。
- 2) IPCC 第 5 次評価報告書第 1 作業部会報告書，2013。
- 3) 千木良雅弘：斜面崩壊，地質と調査，2011 年第 2 号（通巻 128 号），pp.9-14，2011。
- 4) （社）地盤工学会：新潟県中越地震災害調査委員会報告書，新潟県中越地震災害調査委員会，518p，2007。
- 5) 佐々木康一，飯島尚：道路の被害，土木研究所報告，第 141 号，1968 年十勝坤地震災害調査報告，pp.67-78，1971。
- 6) 大日方尚巳，伊藤良弘，長谷川金二：道路の被害，土木研究所報告，第 182 号，昭和 59 年（1983 年）長野県四部地震災害調査報告，pp.223-246，1993。
- 7) 鳥居宣之，仲村孝一，吉田信之：921 集集（台湾）地震により発生した斜面崩壊地における定点観測，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第 6 号，pp.51-71，2002。
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路の被害状況，国土技術政策総合研究所資料，No.133，平成 15

- 年7月26日宮城県北部地震被害に係わる現地調査報告書, pp.35-44, 2003.
- 9) 一井康二：降雨による盛土の耐震性低下に関する実験的研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, No.188, 2005.
 - 10) 松丸貴樹, 小島謙一, 館山勝：浸透水の影響を受けた盛土の地震時挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.71, No.1, pp.135-149, 2014.
 - 11) 川尻峻三, 布川修, 伊藤賀章, 西田幹嗣, 松丸貴樹, 川口貴之, 太田直之, 杉山友康：実験的検討による地震後の降雨による盛土崩壊メカニズムについて, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.153-168, 2014.
 - 12) 川尻峻三, 布川修, 太田直之：亀裂が散水時の模型盛土内の水分挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.71, No.3, pp.204-217, 2015.
 - 13) 防災科学技術研究所：大型耐震実験施設, <https://www.bosai.go.jp/shisetsu/taishin/top.html>, 2020.9.5 閲覧.
 - 14) 尾上修浩, 石澤友浩, 檀上徹：デプスカメラを用いた斜面変形挙動の把握と崩壊検知への有効性に関する検証, 第16回地盤工学会関東支部発表会, pp.57-59, 2019.
 - 15) Langton, D.D. : The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction, Ground Engineering September, pp.33-34, 1999.

BASIC EXPERIMENTS ON EVALUATION OF SLOPE STABILITY UNDER THE CONDITION OF RAINFALL AND EARTHQUAKE

Hiroshi NAKAZAWA, Tomohiro ISHIZAWA, Toru DANJO and Yasuhiro ONOUE

In recent years, various disasters due to climate change and extreme weather caused by global warming have frequently occurred. On the other hand, there has been recognized many large-scale damages caused by earthquakes. When these are combined, the aspect of the damages becomes even more serious. In this study, both shake table and rainfall sprinkling tests using a simple slope model were carried out in consideration of the combination of rainfall and earthquake. As a result, it was confirmed that the earthquake resistance and the mechanism on slope stability after that differed depending on the previous external factors. In particular, changes in the permeability characteristics and differences in saturation degree due to preceding external factors are considered to be the major factors on occurrence of slope damage.