地震～豪雨連動型の複合災害を模擬した遠心模型実験

丸　山　憲　治*1　　平　田　昌　史*1
大　塚　悠　大*1　　石　黒　　健*1

要　　旨

我が国は大規模地震が多く，近年，台風・豪雨等も激甚化及び多発化しているため，異なる自然災害が連続して発生する複合災害が懸念されている．例えば能登半島地震の被災地では，その後の記録的な豪雨によって土砂災害の多発や河川の氾濫など被害が拡大した．連動型の複合災害では，先発災害の影響によって，単発の災害よりも広範囲で甚大な被害が生じることになる．このような背景のもと，土構造物に対する予防保全等の対策が急務であると考えられ，複合災害による地盤被害を実験的，解析的に評価できる手法の確立が必要となる．そこで本研究では，土構造物の予防保全，防災・減災の対策検討を目的として，地震～豪雨を連動させた遠心模型実験を実施した．そして，著者らが過去に実施した単発豪雨発生時の被災状況との比較をし，連動型の複合災害が盛土斜面の破壊形態や被災規模に及ぼす影響を検討した．その結果，地震によって盛土が損傷した後に豪雨が連動して発生すると，豪雨のみの場合に比べ，盛土の沈下が早期に進行し，盛土の変状が広範囲に及んだ.

キーワード　遠心模型実験／地震／豪雨／斜面崩壊／連動型複合災害

目　　次

1．はじめに
2．遠心載荷実験の概要
3．遠心載荷実験結果
4．おわりに

CENTRIFUGE MODEL TESTS ON THE COMPLEX DISASTER OF AN EMBANKMENT SUBJECTED TO EARTHQUAKE FOLLOWED BY HEAVY RAINFALL

Yudai　OHTSUKA　　**Masafumi　HIRATA**
Kenji　MARUYAMA　　**Takeshi　ISHIGURO**

Synopsis:
In Japan, large-scale earthquakes, typhoons and torrential rains have become more severe and frequent, and concerns about complex disasters where these different natural disasters occur in succession are rising in recent years. For example, following the Noto Peninsula Earthquake, subsequent torrential rains caused widespread and severe damage. In linked complex disasters, the impact of the preceding disaster leads to more widespread and severe damage than in single disasters. To establish the methods for evaluating the damage caused by complex disasters, examining preventive maintenance and disaster prevention/mitigation measures for earth structures, a centrifuge model test linking earthquakes and rainfall was conducted. This paper presents the results of this experiment by comparing with data obtained from a previous test of single rain event. As a result, it was cleared that when it rains after the embankment was damaged by an earthquake, the embankment settles faster than it would with rainfall-only, and damage of the embankment spreads over wider area.

＊1 本店　ICI 総合センター　ICI テクノロジーセンター　地盤グループ

1．はじめに

我が国は大規模地震が多く，近年，台風・豪雨等も激甚化及び多発化しており，異なる自然災害が連続して発生する複合災害が懸念されている．国土交通白書[1)]では，複合災害に対してその発生頻度が高まっていくことを想定しており，その備えを強化する必要性など，複合災害への警鐘を鳴らしている．例えば令和6年元日に生じた能登半島地震の被災地では，同年9月に発生した記録的な豪雨によって広範囲で甚大な被害が生じた．連動型の複合災害では，先発災害の影響によって，単発の災害よりも広範囲で甚大な被害が生じる可能性がある．このような背景のもと，土構造物に対する予防保全等の対策が急務であると考えられ，連動型の複合災害による地盤被害を実験的，解析的に評価できる手法の確立が必要となる．

著者らはこれまで，土構造物（盛土/切土斜面）に対して豪雨を模擬した遠心模型実験[2)]及び再現解析[3)]，豪雨～高潮～地震の連動型の複合災害を模擬した遠心模型実験[4)]等を実施し，連動型の複合災害による相乗的な影響を示してきた．

本報告では土構造物の予防保全，防災・減災の対策検討のために実施した，地震～豪雨を連動させた遠心模型実験の結果を紹介するとともに，著者らが過去に実施した豪雨のみ（単発）の場合[2)]の盛土変形状況と比較することで，先行地震による盛土の損傷の有無が破壊形態や被災規模（範囲）に及ぼす影響について示す．

2．遠心載荷実験の概要

図-1 に地震後に豪雨を加えた CaseA の模型地盤の概略図を示す（図中寸法は模型スケール表示）．模型地盤は剛性土槽内に幅 500 mm の基礎地盤を，硅砂 7 号と木節粘土を重量比 8:2 で混合した中間土（初期含水比 5%で調整）で，乾燥密度が 1.60 Mg/m^3 になるように締固めて作製した．基礎地盤上には，盛土部を基礎地盤と同一材料の中間土で乾燥密度 1.46 Mg/m^3 で作製し，斜面勾配は 1:1（45 度）としている．実験は遠心加速度 40 G 場で行うため，実験で使用する流体には粘性を 40 倍に調整した粘性流体を使用した．降雨再現装置には 50 mm 間隔で 8 個，奥行方向 2 列の計 16 個の散水用ノズルを取り付けており，豪雨被害を想定し降雨強度は 127.8 mm/h（降雨強度の相似比は実物/模型=1）となっている．実験は遠心加速度 40G 場で，初期水位（基礎地盤天端から 30 mm 下）で安定させた後，まず神戸波 0.5 倍の地震動（L1 相当）を 3 回加えた．そして盛土の損傷を確認した後，降雨を模型スケールで約 34 分間（実スケールで 22.7 時間）加えた．模型地盤の左端には排水層を設けており，降雨に伴う排水によって水位変動がないようにしている．盛土及び基礎地盤内には**図-1** に示すように，間隙水圧計，土圧計，加速度計を設置している．また盛土天端には変位計（D1，D2）を設置した．降雨終了後には，神戸波 0.5 倍で再度地震動を加えた．

ここで過去に実施した豪雨前に地震動を加えていない場合[2)]（豪雨のみ）を CaseB と称す．CaseB は，CaseA と同一の模型形状で，盛土材料，地盤密度，降雨強度，地下水位等すべて同条件である．ただし計測器位置は異なる（注目する地盤挙動の違い）ため，CaseB の詳細については文献 2)を参照されたい．

3．遠心載荷実験の結果

実験結果はすべて実スケールで示す．**図-2** に神戸波 0.5 倍の入力加速度（CaseA）を示す．降雨前の神戸波 0.5 倍による 3 回の地震動によって，**表-1** に示すように盛土天端に実スケールで概ね 10 cm の累積沈下が生じていた．

図-3 には降雨前の神戸波 0.5 倍による 3 回の地震動に

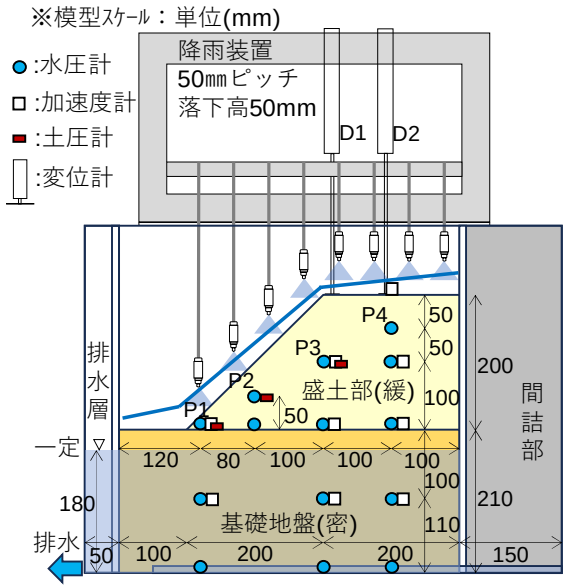


図-1　実験概略図：CaseA

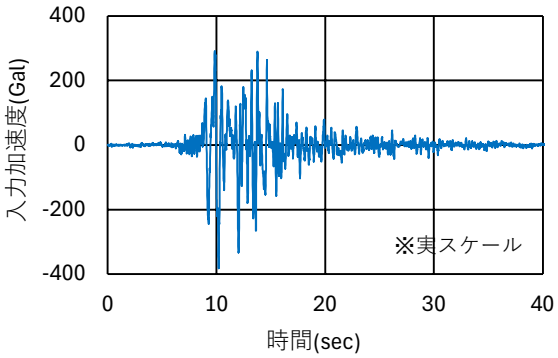
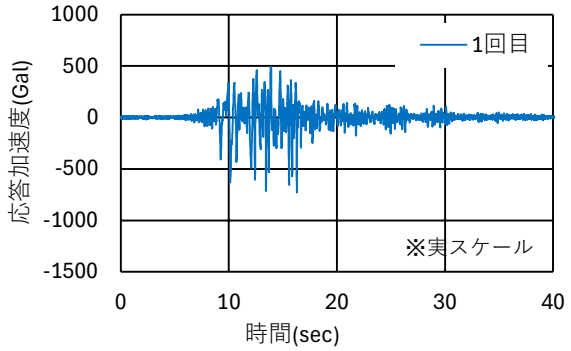


図-2　入力加速度（神戸波 0.5 倍）

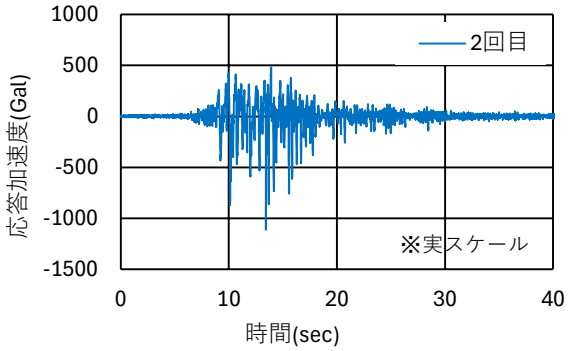
表-1　降雨前の地震動による盛土天端累積沈下

降雨前	盛土天端の累積沈下	
加振回数	法肩D1	中央D2
1回目	4.7cm	4.8cm
2回目	7.8cm	7.4cm
3回目	10.7cm	9.6cm

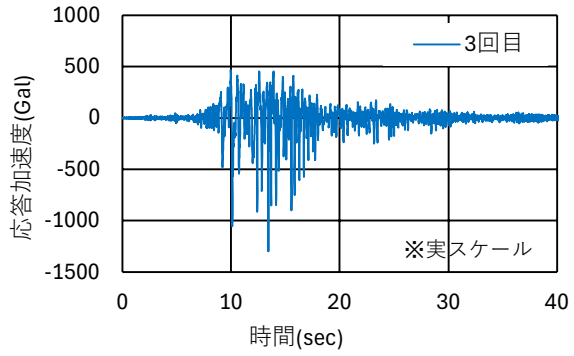
※実スケール



(a)　神戸波 0.5 倍_1 回目



(b)　神戸波 0.5 倍_2 回目



(c)　神戸波 0.5 倍_3 回目

図-3　地震動による盛土天端中央での応答加速度（降雨前）

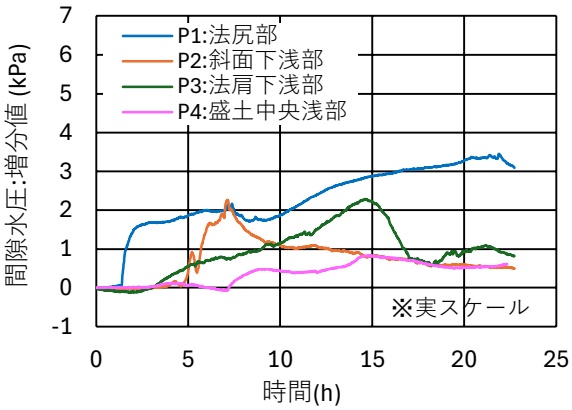
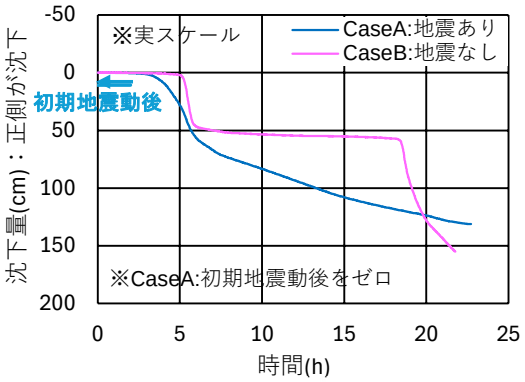
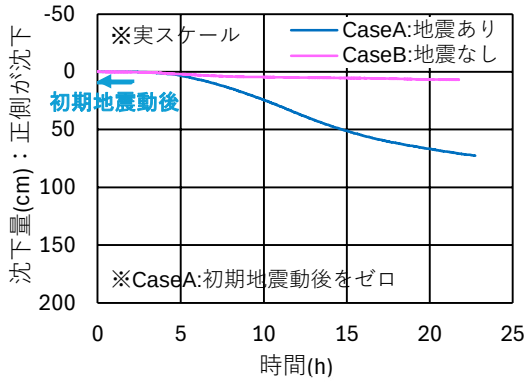


図-4　盛土浅部の間隙水圧（降雨過程）



(a)　盛土法肩部：D1



(b)　盛土天端中央：D2

図-5　盛土天端の沈下増分（降雨過程）

よって盛土天端中央で生じた応答加速度の時刻歴を示す．(a)の 1 回目の地震動による盛土天端中央の応答加速度を見ると，**図-2** で示した入力加速度に対し，加速度が増幅していることがわかる．図示はしないが，振動台の入力加速度から盛土地表面での地盤内応答加速度への変化は，地表面に近づくほど増幅する傾向が見られた．そして(b)の 2 回目，(c)の 3 回目の地震動による盛土天端中央の応答加速度は，1 回目の加振よりかなり加速度振幅が増大していることがわかる．このことから，2 回目及び 3 回目の地震動によって，盛土の動的物性や応答特性が変化した可能性がある．このように，盛土天端の沈下及び加速度の計測結果により盛土の損傷を確認した後，盛土に豪雨被害を想定した降雨を加えた．

図-4 に CaseA の降雨過程における盛土の比較的浅い部分の間隙水圧の時刻歴を示す．間隙水圧はいずれの位置においても降雨開始に伴い増加傾向を示し，地盤深度 4.0 m（模型スケールで 100 mm）に位置する P3 法肩下では，14.5 h 後に最大 2.3 kPa の水圧が生じている．これらの傾向は盛土表面からの降雨浸透を示唆している．

図-5 に降雨開始からの盛土天端の沈下増分量を示す．各図の CaseA では初期地震動による沈下後をゼロとして表記している．また**表-1** に示した CaseA の降雨前の初期地震動時の沈下量も地震のみによる沈下に相当するものとして青矢印で併記した．これは地震動単体による盛土沈下に相当する．同図には過去に実施した地震動を加えていない豪雨のみの CaseB の結果も示している．(a)の盛土法肩の沈下を見ると，地震後に豪雨を加えた CaseA では，降雨開始約 3.0 h 後から徐々に沈下が急増し，6.0 h 後

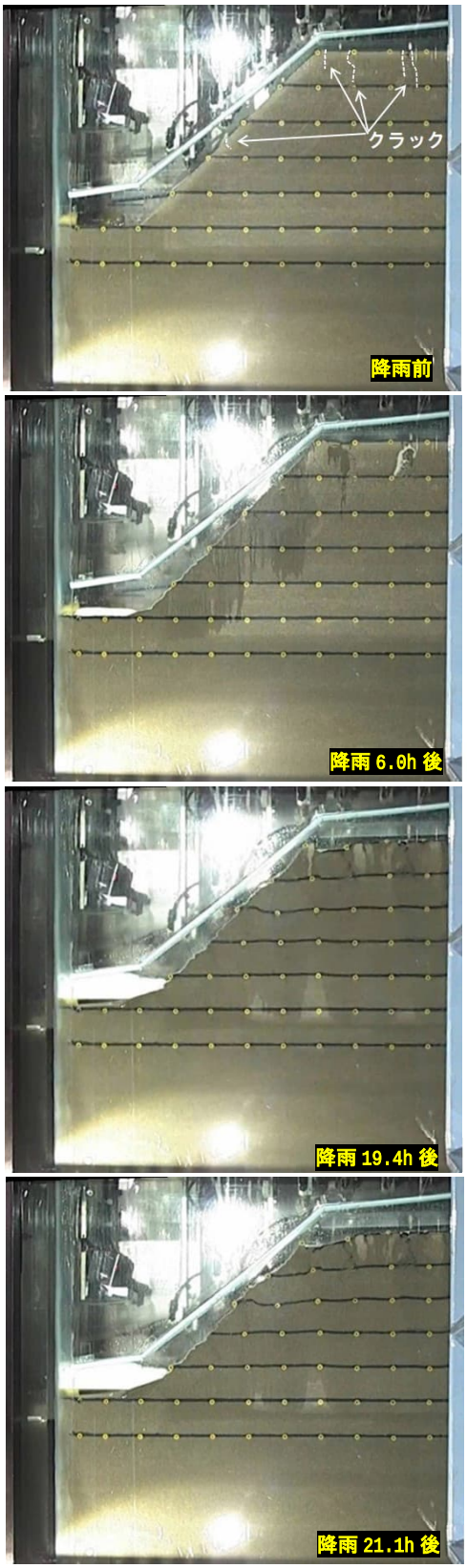


図-6　地震後に豪雨を加えた CaseA の地盤状況（降雨過程）

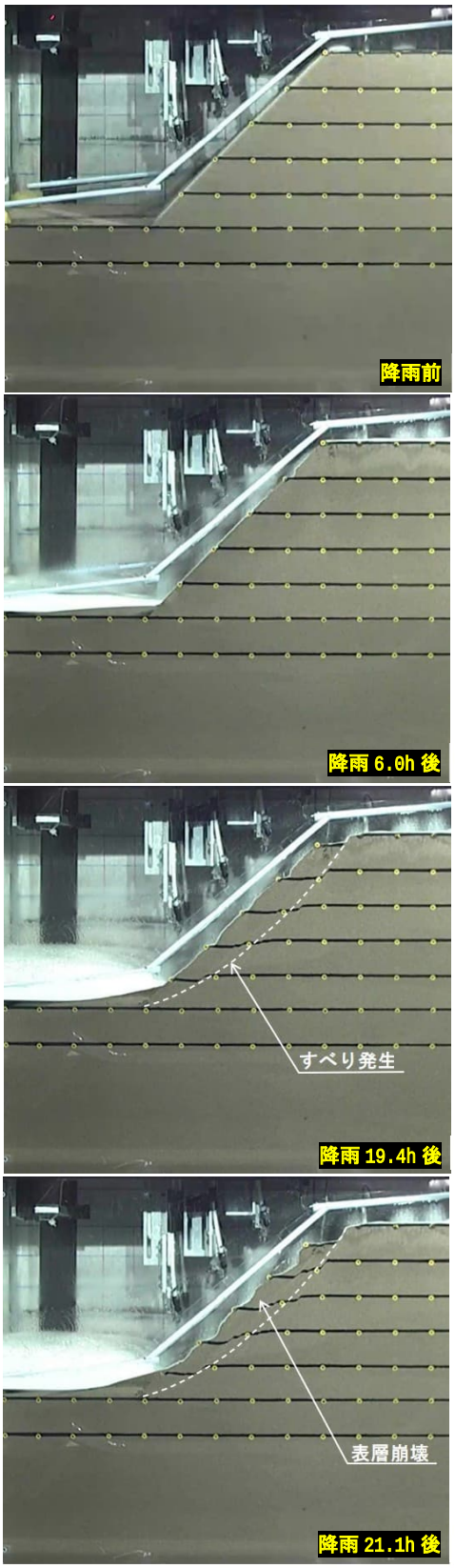
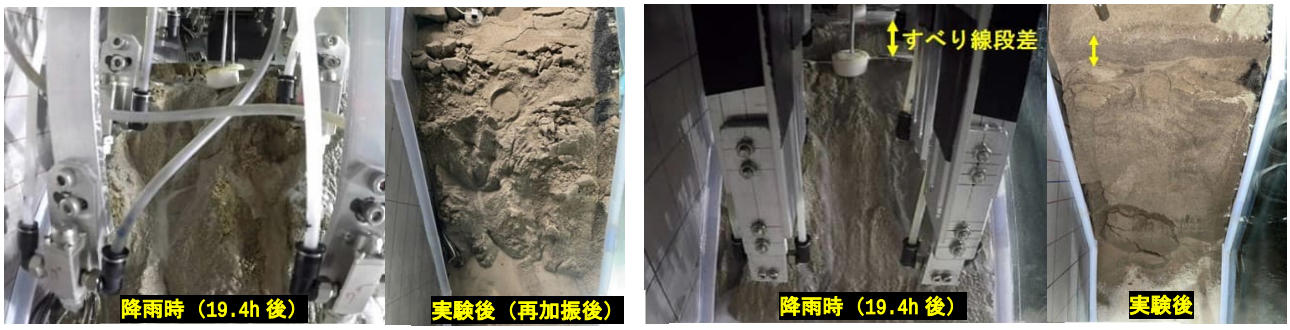


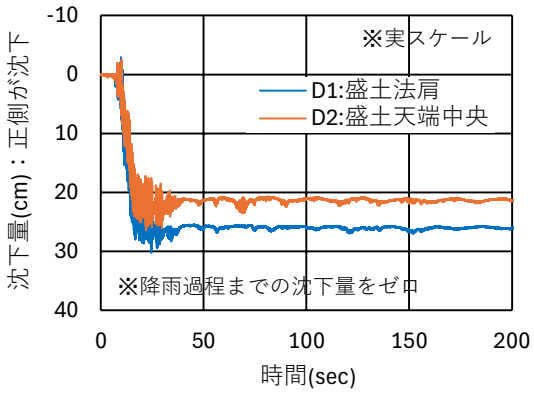
図-7　豪雨のみの CaseB の地盤状況（降雨過程）

には 57 cm 程度の沈下が生じ，その後も降雨に伴って沈下が増加し続けている．一方，豪雨のみの CaseB は，降雨開始約 6.0 h 後に沈下が 50 cm 程度まで急増するが，その後沈下傾向は緩慢になり，18.0 h 以降沈下が再び急増している．(b)の盛土天端中央の沈下を見ると，CaseA では降雨開始約 4.0 h 以降になると徐々に沈下が増加し始め，降雨期間中は沈下が増加し続けている．一方 CaseB は終始沈下が小さく，両者で被災形態や規模（範囲）が大きく異なっている．これらの比較結果は，地震～豪雨連動型の複合災害による盛土変状は，地震動単体や豪雨単体の



(a) 地震後に豪雨を加えた CaseA　　(b) 豪雨のみの CaseB

図-8 降雨時および実験後の盛土斜面状況



(a) 盛土天端の沈下



(b) 盛土変形状況

図-9 再地震動時の盛土変形状況（CaseA）

場合に比べ大きくかつ広範囲に拡大することを示唆する．

図-6 及び**図-7** に降雨時の地盤状況を示す．**図-6** の地震後に豪雨を加えた CaseA を見ると，降雨前の時点で地震動によって盛土表層に目視で確認できるクラックが複数生じている（図中の白点による補助線）．降雨開始 6.0 h 後になると，地震により生じたクラックからの盛土内への雨水浸透によって縦方向の湿潤域の拡大が認められる．19.4 h 後になると浸透範囲はより拡大し，盛土天端（背面部含む）及び斜面表面に大きな凹凸が見られた．特に斜面側の比較的浅い部分での標線（黒線）が大きく蛇行し，盛土が崩壊している．21.1 h 後ではさらに盛土の変形が大きくなった．一方，**図-7** の豪雨のみの CaseB を見ると，降雨開始から 6.0 h 後では，斜面上部が一部崩壊し，**図-5(a)** の CaseB の沈下が生じているが，正面から見た写真ではこの崩壊は確認できない．その後，盛土に大きな変化は見られなかったが，18.3 h 後に盛土斜面に段差が生じ始め，19.4 h には斜面表層付近に明確なすべり線が発生し，21.1 h 後には斜面表層で完全に崩壊していた．また**図-5** の結果も踏まえると，CaseA では CaseB より早期に変状が発生し，盛土天端背面を含む広範囲にまで盛土全体の変形が及んでいる．

図-8 には各ケースにおける降雨開始から 19.4 h 後および実験後の盛土の斜面表面の状況を示している．(a)に CaseA，(b)に CaseB の場合をそれぞれ示している．各ケースの降雨時の斜面状況（各ケースの左図）を見ると，どちらのケースも降雨強度（豪雨を想定し 127.8 mm/h）

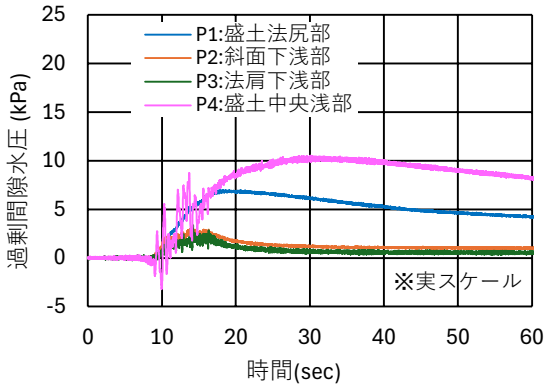


図-10 再地震動時における盛土浅部の過剰間隙水圧の増分値（CaseA）

が大きいため，盛土内部に降雨がすべて浸透しきれず，降雨が斜面上で流出している．ここで別途実施した解析の結果[3]より，盛土の不飽和透水係数を用いて境界面からの限界浸透量（盛土表面から浸透できる限界量）を簡易的に逆算したところ，その限界浸透量は約 16.1 mm/h であった（詳細については紙面の関係上，文献 3)を参照されたい）．そのためどちらもガリ浸食が生じているが，地震後に豪雨を加えた CaseA の方が，より深いガリ浸食が生じている．また各ケースにおける実験後の盛土表面（各ケースの右図）を観察すると，どちらもガリ浸食の形跡が見られ，豪雨のみの CaseB では斜面天端付近にすべり破壊の段差が明確に確認できるのに対し，地震後に豪雨を加えた CaseA では斜面表面の凹凸が激しく，盛土

全体が大きく崩壊していた．

これらのことから地震によって盛土が損傷した後に豪雨が加わると，盛土表面の損傷部（クラック）から降雨が盛土内に浸透し，ガリ浸食をさらに促進させるとともに，降雨浸透に伴う盛土内部の飽和度増加と強度低下に伴い盛土全体が大きく変形し崩壊に至ることが示唆できる．一方，先行的な地震履歴による盛土損傷がなければ，斜面表層での限定的なすべりに収まるものと思われる．

CaseA では降雨後に再度地震動を加えている．**図-9** に降雨後に再地震動を加えた際の盛土の変形状況について示す．ここで再地震動は降雨終了から実スケールで 2.0 h 後に実施した．(a)の盛土天端の沈下を見ると（降雨過程までの沈下量をゼロとして表示），法肩から実スケールで 4.0 m 離れた盛土中央でも比較的大きな沈下がみられ，(b)に示すように盛土全体（天端背面部を含む広範囲）がさらに崩壊した．

図-10 には再地震動による盛土浅部の過剰間隙水圧の発生状況（**図-1** の P1～P4）を示す．盛土天端から 2.0 m（模型スケールで 50 mm）下の盛土中央浅部（P4）を見ると，過剰間隙水圧が最大で 10.1 kPa と，他の計測位置により比較的大きく生じ，盛土法尻部（P1）でも最大 6.8 kPa の過剰間隙水圧が生じていた．その他の計測位置（P2，P3）における過剰間隙水圧は小さかった．ここで，過剰間隙水圧比の算出については，降雨の浸透に伴う地盤の湿潤密度分布が不明で有効土被り圧の評価が困難なため行っていない（今後の課題と考える）．

これらのことから，地下水位より上であるにもかかわらず，降雨後 2.0 h 程度でも，降雨の浸透に伴い，盛土上部及び法尻部において飽和度の上昇が示唆され，比較的大きな過剰間隙水圧が生じ，盛土の崩壊を助長していたことが考えられる．今回は豪雨を 1 回のみ与えたが，これが複数回繰り返されると降雨浸透や盛土内の飽和度上昇がより顕著となり，盛土の強度低下，被災規模（範囲）のさらなる拡大が生じるのではないかと推察され，今後検討すべき課題である．

４．おわりに

本研究では，連動型の複合災害を想定して地震～豪雨を連動させた遠心模型実験を行い，過去に実施した豪雨時単体での被災状況との比較を試みた．また，豪雨後に再地震動を加えた結果についても紹介した．それらの結果から得られた主な知見を以下に示す．

1) 降雨前の地震動によって盛土天端には 10cm 程度の沈下が生じ，盛土天端及び斜面には目視で確認できるクラックが複数発生し，盛土が損傷した．
2) 地震によって盛土が損傷した後に豪雨が降ると，豪雨のみの場合より，盛土の変状が早期に発生し，盛土天端背面部を含む広範囲に変形が及んだ．
3) 豪雨後の再地震動によって，盛土全体（天端背面部を含む広範囲）がさらに崩壊し，盛土天端の浅部及び法尻には他の位置に比べ，比較的大きな過剰間隙水圧が発生した．

今回の実験より，遠心力場で連動型の複合災害を想定した地震～豪雨～地震（既往研究では高潮を含む連続載荷も実施している [4]）を連続的に作用させる再現実験が可能となり，それら連動型の複合災害による相乗的な被害状況などを検討することができた．今後は，数値解析手法とも連携しつつ，複合災害のメカニズム再現や被災の拡大を抑制するための効果的な対策方法の検討を進めていく予定である．

謝辞：本研究の実験を実施するにあたり，株式会社ジオデザインのアルマン泉澤哲学氏に多大な尽力を得た．ここに記し感謝の意を示す．

参考文献

1) 国土交通省：令和 8 年度版 国土交通白書，p.214，2026.
2) 丸山憲治，大塚悠大，石黒健，平田昌史，大木拓哉，赤木寛一，小西真治：降雨装置を用いた盛土斜面安定性に関する遠心模型実験，第 59 回地盤工学研究発表会発表講演集，No.23-13-4-03, 2024.
3) 平田昌史，丸山憲治，石黒健，大塚悠大，高橋めぐみ：遠心模型実験と不飽和 FEM 解析を用いた豪雨時における斜面安定性評価手法の検討，前田建設技術報告集，VOL.60，2025.
4) 丸山憲治，石黒健，平田昌史，大塚悠大：降雨～高潮～地震動連動発生時における堤防の挙動に関する遠心載荷実験，第 80 回土木学会年次学術講演会講演集，III-243，2025.