

# 地震動が作用した盛土の降雨耐力低減メカニズム

布川 修\* 太田 直之\* 川尻 峻三\*\*

## Reduction Mechanism of Embankment Strength against Rainfall after Earthquake

Osamu NUNOKAWA Naoyuki OTA Shunzo KAWAJIRI

In this paper, the reduction mechanism of embankment strength against rainfall after earthquakes was examined by the sprinkling water test on an embankment model after the shaking table test on it. The results suggest that, the amount of rainfall necessary for caused an crack on the slope decreases with increase of the displacement of the top of the slope due to vibration, and that the local increase of pore water pressure was observed in case of the embankment model with the crack. Therefore, the mechanism of change of the infiltration characteristics of the embankment model could be related with the crack in the embankment model.

キーワード：盛土，降雨，模型実験，加振，散水，クラック

### 1. はじめに

大規模地震が発生した場合には、図1に示すとおり、盛土が大規模に崩壊する、あるいは盛土にき裂（クラック）などの小・中規模の変状が発生することがある。盛土が大規模に崩壊した場合には抜本的な応急・復旧対策を実施する必要がある、その結果として盛土の降雨耐力が被災前よりも向上することが多い。一方、盛土に小・中規模の変状が発生した場合には、繁茂した草木によりき裂などの変状の発見が困難であることが多いため、ある一定期間、降雨耐力の低下が懸念されたままの状態になる可能性がある。

このため、大規模地震が発生した後は、地震動によって盛土などの土構造物の降雨耐力が低下している可能性を考慮して、降雨時の運転規制（列車の徐行または運転の中止等）の雨量規制値を一時的に低く設定することがある。より適正な運転規制値を設定するためには、地震動が作用した土構造物の降雨耐力を解明することが必要となるが、こうした研究は少ない。

そこで、大規模地震により盛土にき裂などの小・中規模の変状が発生した場合を対象とし、この場合における降雨耐力の低減メカニズムを明らかにすることを目的として模型盛土を用いた加振・散水実験を実施した<sup>1) 2)</sup>。本稿では、この模型実験の概要と結果について述べる。

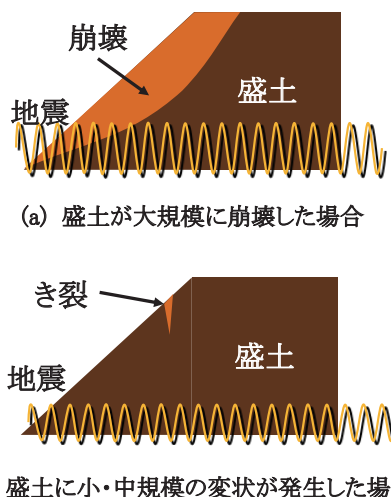


図1 大規模地震が発生した時の盛土の崩壊・変状<sup>2)</sup>

### 2. 実験の概要

#### 2.1 模型盛土

実験に用いた模型盛土を図2に、模型盛土の概略図を図3に示す。模型は2次元模型であり、高さ70mmの水平な支持地盤の上のり面勾配1:1.5、盛土高さ600mmの模型盛土を作成した。加振および散水中の計測のために、盛土内に加速度計、間隙水圧計、土壌水分計を、盛土のり肩部の鉛直方向に変位計を設置した。さらに、盛土底面の3箇所にもノメーターを設置して、盛土内の水位を観測した。

#### 2.2 実験に用いた試料

実験に用いた地盤材料である稲城砂の粒度分布を図4に示す。図中には稲城砂の主な物理的性質についても記

\* 防災技術研究部 地盤防災研究室

\*\* 防災技術研究部 地盤防災研究室（現 北見工業大学）

特集：防災技術

載している ( $F_c$ : 細粒分含有率,  $U_c$ : 均等係数,  $U'_c$ : 曲率係数,  $\rho_s$ : 土粒子の密度)。締固め試験により得られた締固め曲線を図5に示す。支持地盤については締固め度  $D_c$  (乾燥密度  $\rho_d$ /最大乾燥密度  $\rho_{dmax} \times 100$ ) = 95%, 含水比  $w = 19.5\%$  を, 盛土部については  $D_c = 75\%$ ,  $w = 13\%$  を目標として, 高さ 50mm ごとにバイブレーターによって締め固めて作成した。なお, これらの値の設定根拠は, 過去に実施した稲城砂を用いた実験<sup>3)</sup>により, 加振時に変状しやすく, かつ散水時に水位が上昇しやすいことが明らかになっていることによる。

実験に使用した地盤材料の乾燥密度と飽和透水係数との関係を図6に示す。この図には, 模型盛土における盛土部と同じ含水比の試料を締め固めて作成した供試体に対して実施した透水試験結果と, 加振および散水実験終了後の模型盛土からサンプリングした供試体に対して実施した密度および透水試験結果をプロットしている。なお, 透水試験は直径 50mm × 高さ 51mm の円筒供試体に対しての定水位試験である。実験時における盛土部の目標乾燥密度 ( $\rho_d = 1.15\text{g/cm}^3$ ) における飽和透水係数  $k_s$  を全試験結果の回帰式から求めると,  $6.41 \times 10^{-5}\text{m/s}$  程度となる。



図2 模型盛土<sup>2)</sup>

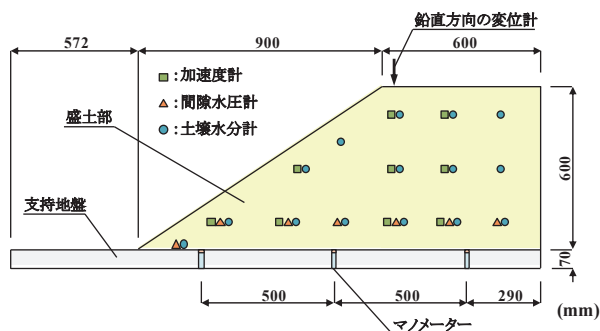


図3 模型盛土の概略図<sup>2)</sup>

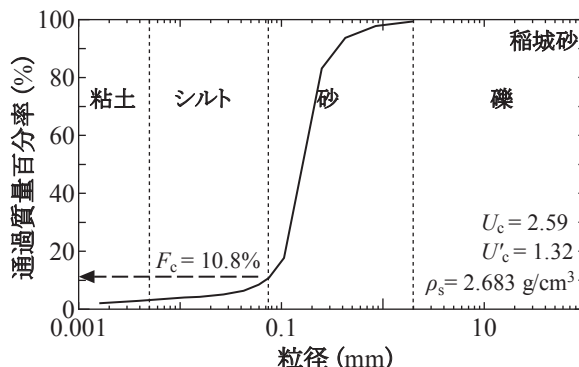


図4 実験に使用した地盤材料の粒度曲線<sup>1)</sup>

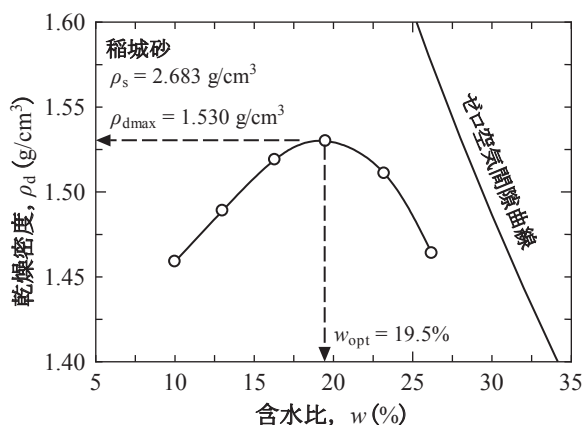


図5 実験に使用した地盤材料の締固め特性<sup>1)</sup>

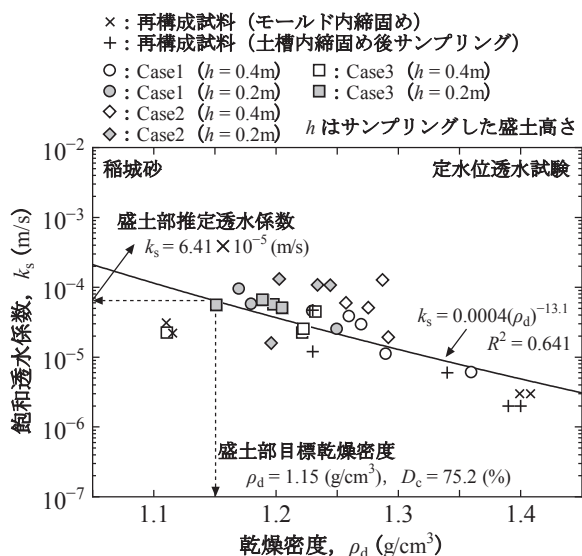


図6 実験に使用した地盤材料の飽和透水係数～乾燥密度関係<sup>1)</sup>

2.3 実験ケース

表1に実験のケースを示す。Case1は加振をせずに散水したケースであり、Case2, Case3は大規模地震発生後の盛土の状態を模擬するために加振を与え、その後散水したケースである。加振は盛土ののり肩の鉛直変位 $d_s$ を目安とし、5Hz, 20波のsin波を1~9m/s<sup>2</sup>(100~900Gal)までは1m/s<sup>2</sup>(100Gal)ずつのステップ加振とし、それ以降は任意の加速度振幅を適用して所定ののり肩の鉛直変位が発生するまで実施した。最終的な変位量は小規模の変状を模擬することを目標としたCase2では $d_s = 1.66\text{mm}$ 、中規模の変状を模擬したCase3では $d_s = 12.35\text{mm}$ であった。

本実験で盛土ののり肩の鉛直変位を目安とした理由は次のとおりである。現地盛土が受けた最大の加速度や計測震度等を地震後に早期に得ることは困難である。一方、のり肩の変位量は地震後に比較的容易に測定できることが想定される。このため、のり肩の変位量を用いることは実盛土の降雨耐力低減を定量的に評価する場合に有用なパラメータとなり得ると考える。

後述するとおり、加振を与えたCase2, Case3では盛土上面や内部にクラック(き裂, 本実験ではクラックに統一)が発生し、のり肩の鉛直変位が大きいCase3の方が明らかにクラックの数が多かった。なお、Case3では加振によりのり肩部からのり面中央部付近にかけてのり面表面部分にすべりが発生した。

散水は模型盛土から約8mの高さに設置されている散水装置を用いた。降雨強度については、時間雨量30mm/hを基本としているが、Case1およびCase2では30mm/hの散水中に盛土内水位および間隙水圧の経時変化が緩慢となったため、40mm/hに変更した。

3. 散水実験の結果

図7は、Case2を例として散水によるのり面変状発生から模型盛土の崩壊に至るまでのプロセスを示している。このプロセスはどの実験ケースでも同様であった。本実験では、①のり面変状として盛土奥行き200mm程度の箇所にはらみ出しとそれによるクラックの発生、②クラック発生箇所から地下水が浸出、③ある程度の時間経過後にこの浸出点よりも上方ののり面表面にクラックが発生、④このクラックを境界とした崩壊ブロックがのり面表面部分にすべりが発生した。

表1 実験ケースのまとめ<sup>1)</sup>

Case No.	加振波形	のり肩部の鉛直変位 $d_s$ (mm)	降雨強度 (mm/h)
1	加振無	0.00	30 → 40
2	sin波,	1.66	30 → 40
3	5Hz, 20波	12.35	30

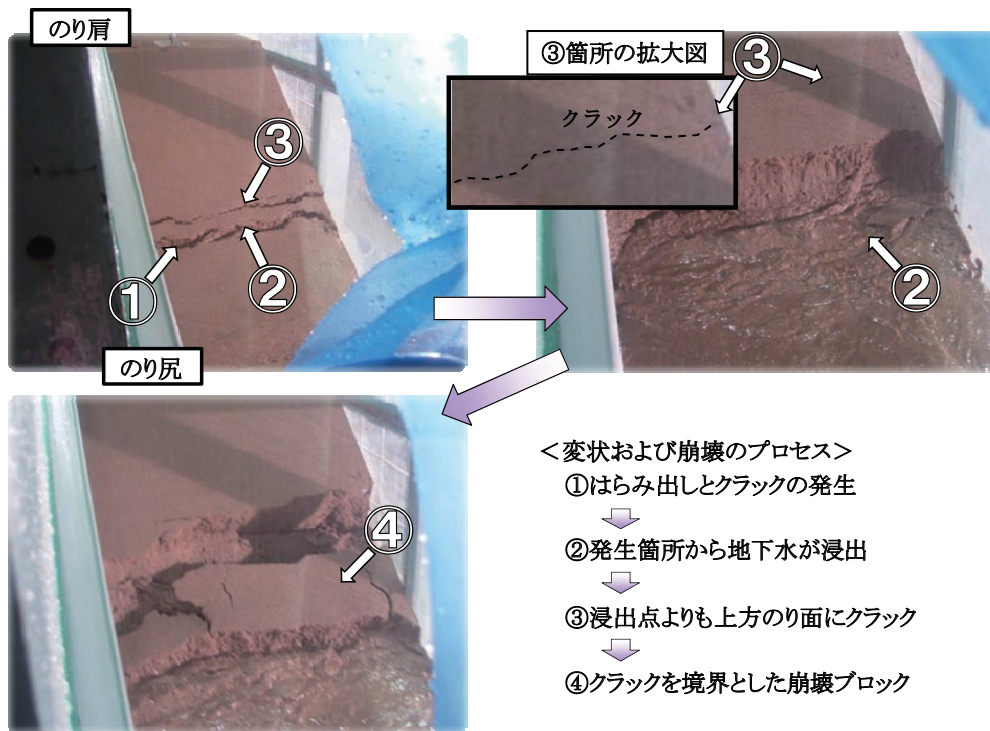


図7 模型盛土の変状および崩壊過程の状況<sup>1)</sup>

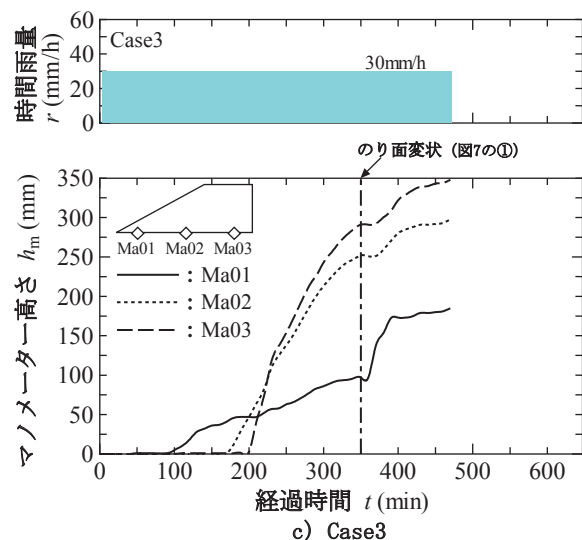
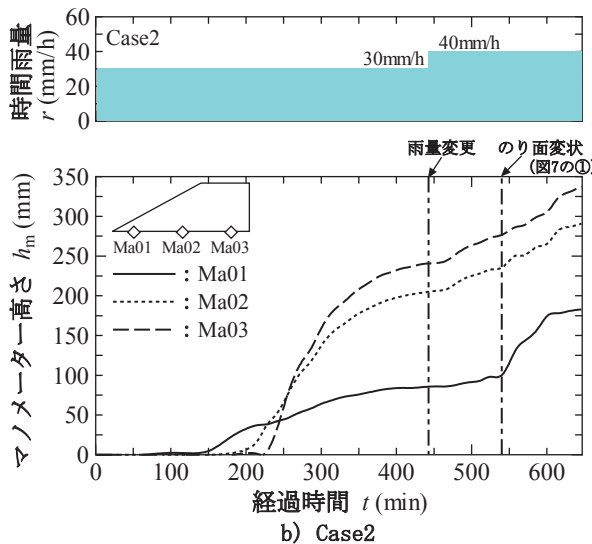
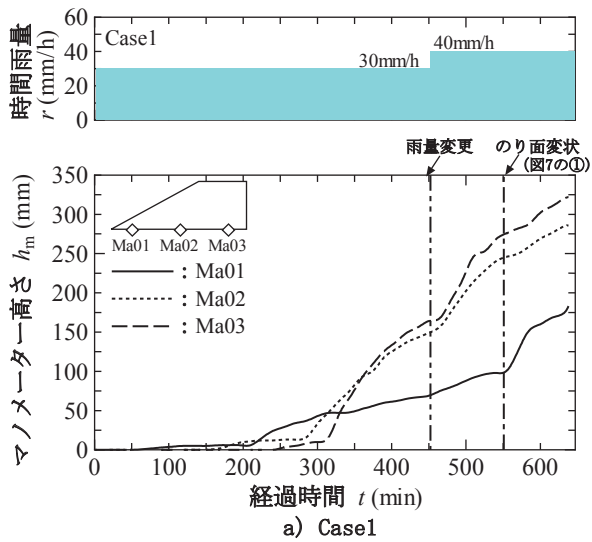


図8 マノメーター高さの経時変化の比較<sup>1)</sup>

り尻側に押し出されるような崩壊が発生した。上記②～④が繰り返し発生することで、最終的には盛土上面まで崩壊面が達した。

図8に散水中のマノメーター高さの値の経時変化を示す。前述したとおり、Case1, Case2ではマノメーター高さの上昇が緩慢となったため、散水開始後450分程度から降雨強度を30mm/hから40mm/hに変更している。各実験ケースの結果を比較すると、加振によるのり肩部の鉛直変位が最も大きいCase3において、Case1, Case2よりも模型盛土内の水位が早く上昇している。のり面に初期変状が発生(崩壊プロセスで示した①の状態)するまでの経過時間はCase1で散水開始後551分、Case2で540分、Case3で350分であった。

図9は、図8のデータから各実験ケースにおけるのり面に初期変状が発生したときの盛土内水位を盛土断面形状に表したものである。この結果より、のり面に初期変状が発生するまでに与えた雨量は異なるが、盛土内水位は加振の有無に関わらずほぼ同じであることがわかる。このことから、本実験の条件範囲では、加振の有無は盛土内水位の上昇速度には大きく影響を及ぼすが、のり面に初期変状が発生する際の盛土内水位には影響が少ない

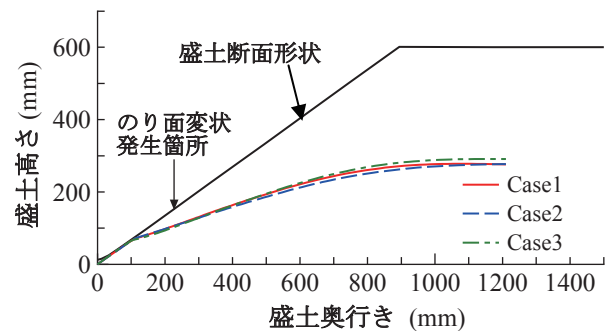


図9 散水によりのり面に初期変状が発生した時の盛土内水位<sup>2)</sup>

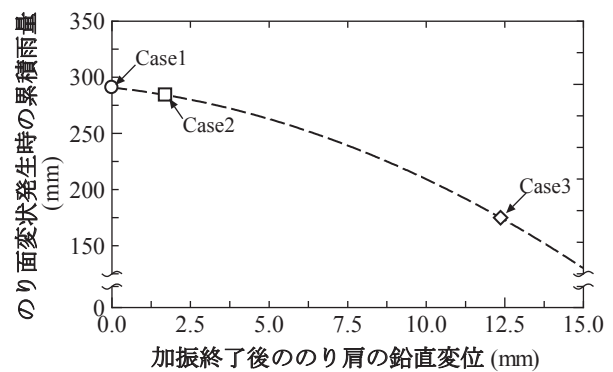


図10 加振によるのり肩部における鉛直変位と散水によりのり面に初期変状が発生するまでの累積雨量との関係<sup>1)</sup>

と判断できる。

加振によるのり肩部の鉛直変位と散水によりのり面に初期変状が発生するまでの累積雨量との関係を図10に示した。図中の曲線は2次曲線による近似結果である。この関係から、加振によるのり肩部の鉛直変位が大きいほどのり面変状が発生する累積雨量が少なくなることがわかる。すなわち、加振により降雨耐力が低下することを表している。

図11にはのり面に初期変状が発生したときにおける間隙水圧増分およびマンメーター高さの値から算出した間隙水圧（静水圧）と、加振によって発生したのり面表面のクラック状況を各実験ケースについて示した。加振を与えていないCase1では、模型盛土内の水位に対応する静水圧と同程度の間隙水圧増分が計測されていることがわかる。一方、加振を与えたCase2、Case3では、Case1と比較して大きな間隙水圧増分が局所的に発生

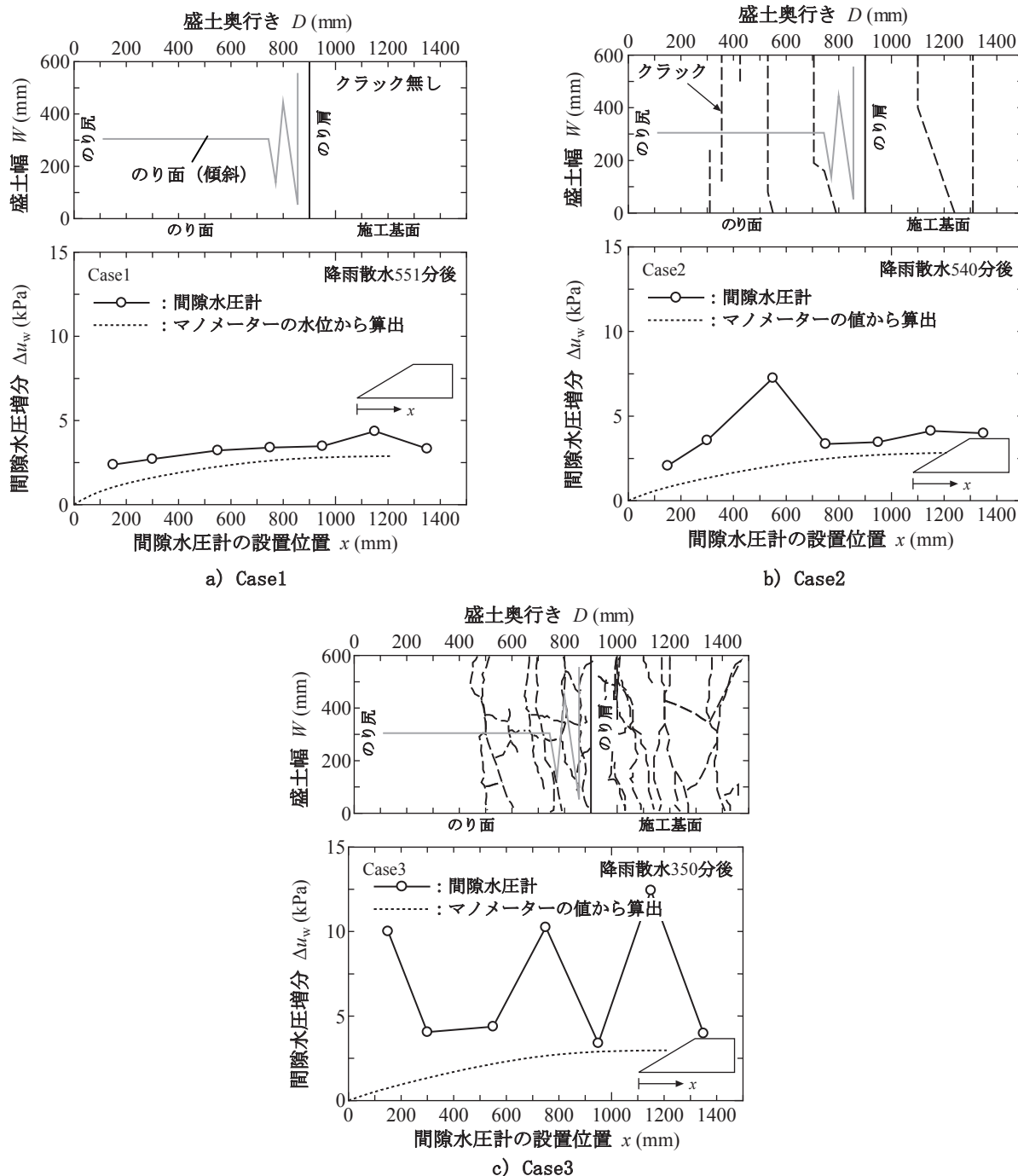
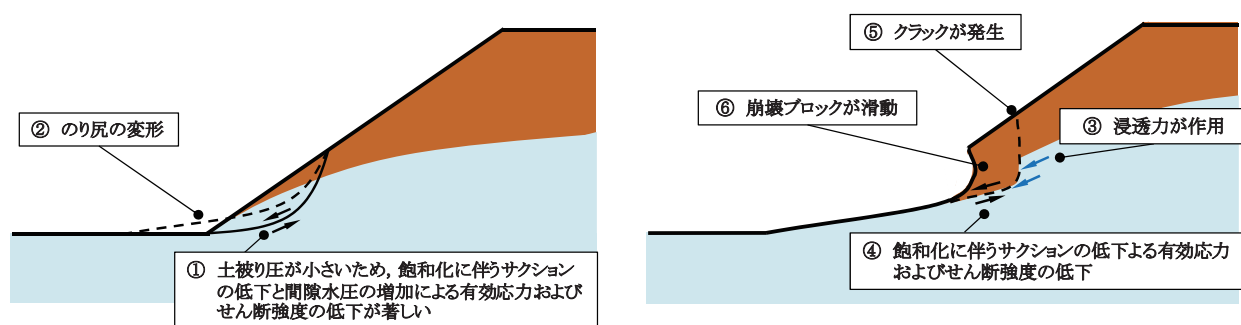


図11 のり面に初期変状が発生したときにおける間隙水圧増分およびマンメーター高さの値から算出した間隙水圧（静水圧）と加振によって発生したのり面表面のクラック状況<sup>1)</sup>

図12 模型盛土の変状および崩壊メカニズムの概略図<sup>1)</sup>

し、Case3の方がより顕著であることがわかる。この要因は、加振によって発生したクラックが水みちとなり盛土底部への水の移動量が増加したためと推察される。

#### 4. 降雨耐力低減メカニズム

ここでは、まず、図7で示した本実験での散水による模型盛土の変状および崩壊プロセスのメカニズムについて考察する。図12は模型盛土の変状及び崩壊メカニズムの概略図である。

のり尻部では土被り厚が小さく有効応力が元来小さいため、飽和化に伴う僅かな間隙水圧増加によってすべりに対するせん断抵抗力が低下すると考えられる（図中の①）。これによりのり尻の変形（図中の②）が進行し、のり面の初期変状としてのはらみ出しおよびクラックが発生する。さらに盛土内水位が上昇すると浸透力が作用するとともに（図中の③）せん断強度も低下（図中の④）する。すなわち、さらなる外力の増加と耐力の低下によって、下部の変形・崩壊箇所よりものり面の上方にクラックが発生し（図中の⑤）、このクラックを境界とした崩壊ブロックがのり尻側へと滑動する（図中の⑥）、と推察される。

つぎに本稿のまとめとして、本実験の結果をもとに、地震動が作用した盛土の降雨耐力低減メカニズムを考察する。

本実験では、図10より、加振により降雨耐力が低下することを明らかにした。また、図9より加振の有無は盛土内水位の上昇速度に大きな影響を及ぼし、この原因として図11より加振によって発生したクラックが水みちとなり盛土底部への水の移動量を増加させていることを示唆した。

以上の結果から、本実験の結果から推察される地震動が作用した盛土の降雨耐力低減メカニズムは次のとおり

と考えられる。

- 1) 加振によって盛土表層や内部にクラックが発生する。
- 2) 散水時にはクラックが水みちの役割を果たし、盛土底部に水が早く到達する。
- 3) 地下水位が早く上昇することにより少ない雨量で初期変状が発生、すなわち盛土の降雨耐力が低減する。

#### 5. おわりに

本稿では、比較の変状が発生しやすい条件の模型盛土を対象とした加振・散水実験の結果を示し、大規模地震により盛土にクラックなどの小・中規模の変状が発生した場合における降雨耐力の低減メカニズムについて考察した。限られた条件の結果ではあるが、今後、この結果をもとに地震動が作用した盛土の降雨耐力の低減程度を定量化する方法や、地震動が作用して発生したクラックへの対策の効果などについて検討を進めていく予定である。

#### 文献

- 1) 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
- 2) 布川修: 地震動が作用した盛土の降雨耐力低減メカニズム, 日本鉄道施設協会誌, Vol.52, No.9, pp.46-48, 2014
- 3) 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.70, No.1, pp.135-149, 2014