

# 1G 場振動台実験による盛土造成斜面の変状に及ぼす浸潤面の影響の考察

斜面安定 水位条件 破壊モード

名古屋大学 国際会員 ○村尾英彦, 野田利弘, 中井健太郎, 吉川高広

## 1. はじめに

筆者らはこれまでに、地震時の盛土造成斜面の破壊メカニズム解明を目的として正弦波加振による 1G 場振動台実験を行い、飽和土地盤に対して次のことを明らかにしてきた<sup>1)</sup>。①入力振動数が模型斜面の初期の基本固有振動数と等しい場合は、载荷初期から共振が生じて加速度が増幅した後、減衰を伴いつつ斜面の安定性が著しく低下する。②入力振動数が基本固有振動数と異なると共振が生じず载荷初期の揺れは小さく模型斜面は安定に見えるが、模型斜面の基本固有振動数が入力振動数よりも小さい場合は、継続加振によって次第に盛土材の塑性変形が進展して模型斜面の基本固有振動数が徐々に減少するため、やがて共振が生じて盛土が急激に崩壊する。③逆に模型斜面の基本固有振動数が入力振動数よりも大きい場合は、盛土材の塑性変形が進展しても基本固有振動数は入力振動数から離れる一方であるため、共振せずに安定を保つ。一連の結果は、斜面安定が単に加速度の大ききで決まるものではなく、地盤の固有振動数と地震動の卓越振動数の関係性が重要であることを意味する。

盛土造成斜面の地震時安定性に及ぼす影響因子は、振動数特性以外にも多々考えられる。例えば、盛土造成斜面内では背後斜面からの地下水供給や降雨によって浸潤面位置が常時変動するが、浸潤面位置によって地震時挙動が異なる。そこで本報では、不飽和状態にある盛土に対して新たに実施した実験と、飽和状態にある盛土に対して実施した既往の実験との観察結果の比較から、浸潤面位置の違いが地震時の盛土造成斜面の安定性、変形モードや破壊メカニズムに及ぼす影響について述べる。

## 2. 模型実験の概要

模型斜面、材料、計測機器などは既報<sup>1)</sup>と同様である。加振条件についても同様で、振動数一定の正弦波を段階的に  $0.5\text{m/s}^2$  刻みで大きくする加振を行った。各段階の加振時間は 60 秒で、振動数は模型斜面の固有振動数と等しい 50Hz である。

## 3. 実験結果および考察

不飽和状態の加振実験 (Case A) を行い、既往の飽和状態の加振実験 (Case B)<sup>1)</sup>との比較を行った。

### (1) 変形モードの違い

図 1 に Case A の加振前と入力加速度  $8.2\text{m/s}^2$  の加振後の模型側面の状況を、図 2 に Case B の加振前と入力加速度  $5.2\text{m/s}^2$  の加振後の模型側面の状況を示す。図中に描いたすべり面は、実験中の観察および加速度増幅率や過剰間隙水圧に関する考察から判断したものである。

飽和状態にある Case B の場合、入力加速度が  $1.2\text{m/s}^2$  になると法肩および天端から水の浸み出しが生じはじめる。やがて、入力加速度が  $4.2\text{m/s}^2$  になると法面中央部をすべり面の先端とする表層部の流動的なすべりが明確となる。さらに加振レベルが増加すると、法面での水の湧き出しと開口亀裂が顕著となり、入力加速度が  $5.7\text{m/s}^2$  に達すると、盛土部分の大半が変動土塊となる全体すべりへと発展し、天端でも大きな沈下が発生している。このように飽和盛土造成斜面の場合、表層の流動的なすべりから次第に深部へとすべりが伝播し、やがて全体崩壊へと至る。

図 3 に Case A の場合の天端および法面部分の写真を示す。入力加速度はそれぞれ、 $3.2\text{ m/s}^2$ ,  $5.7\text{ m/s}^2$ ,  $8.2\text{m/s}^2$  である。入力加速度  $3.2\text{ m/s}^2$  (図 3(a)) になると法面で水が浸み出しはじめる。Case B の飽和地盤との違いは浸み出しの章じる加速度レベルが大きいこと、天端では浸み出しが見られないことが挙げられる。加振レベルが増加すると、法面中央部における浸み出しと同時に、法面が全体的に孕み出す傾向が観察された。加振レベルの増加とともに、浸み出し部周辺に微細な亀裂が生じはじめ、入力加速度が  $5.7\text{ m/s}^2$  に達すると、それ以降は徐々に亀裂が明瞭になり開口していく。依然、天端では浸み出しは観察されないが、入力加速度  $8.2\text{ m/s}^2$  の段階では、図 6(c)に示すように、天端を貫く大きな開口亀裂が発生した (図 1 中の Slip surface3)。法面は浸潤面位置を起点に斜面側方に

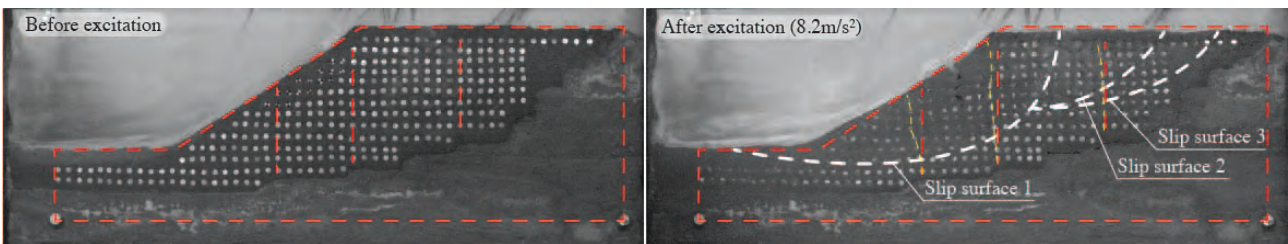


図 1 不飽和状態の実験前後の側面状況

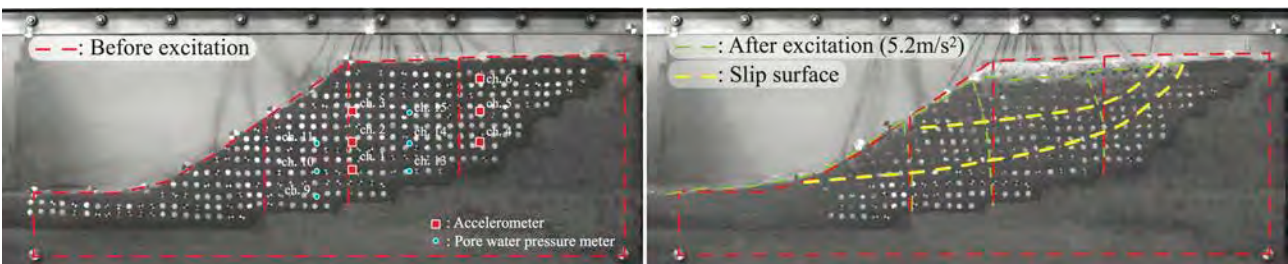


図 2 飽和状態の実験前後の側面状況

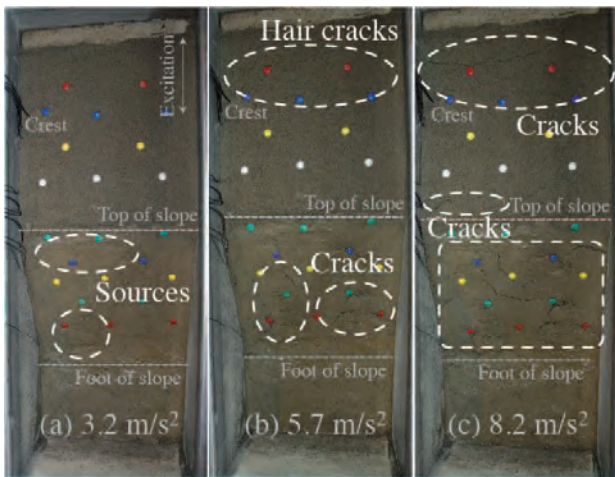


図3 加振による模型斜面上部の状態の変化

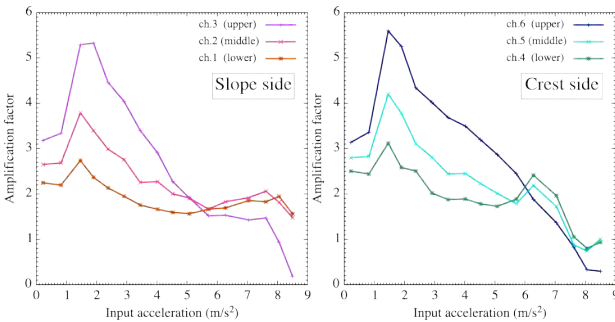


図4 不飽和状態の加速度増幅率変化

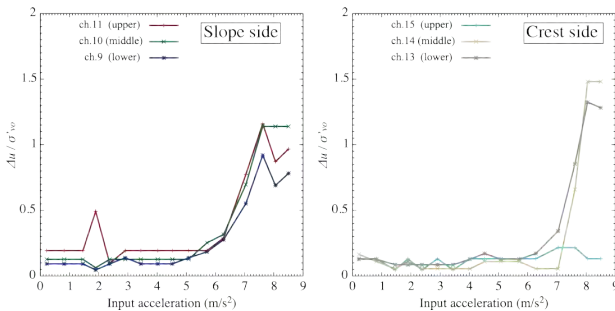


図5 不飽和状態の過剰間隙水圧比変化

向かって押し出され、変動土塊の頭部は倒れるように変形する。法肩付近で大きな亀裂や側方変位を生じるといふ結果は、大地震時の被害報告における盛土造成斜面の法肩部分が崩落したという事例と一致する。

以上、不飽和地盤 (Case A) と飽和地盤 (Case B) を比較すると、変形モードは異なること、不飽和地盤の方が変動土塊の変形は小さいことがわかる。このことは地下水条件以外が同一である盛土造成斜面において、地下水位が低い方が、地震時安定性が高いことを意味しており、地下水排除工の有効性を示唆する結果である。

#### (2) 加速度増幅率・過剰間隙水圧と変形モードの関係

図4に不飽和地盤の加速度増幅率変化を示す。深度方向の増幅率を比較すると、模型地盤の変状が顕著となる大きな加振レベルまでは、盛土部分の層厚が大きい(土被り圧が大きい)ほど、増幅率も大きくなる (ch.1 < ch.2 < ch.3, ch.4 < ch.5 < ch.6)。また、入力振動数は加振前の模型地盤の固有振動数と等しいため、加振レベルが小さい間は、共振によって増幅率は次第に大きくなり、入力加速度 1.2 m/s<sup>2</sup> の段階で最大となる。しかしながら、加振レベルを大きくすると (1.7~5.2m/s<sup>2</sup> の段階)、深度方向の増幅率の大小関係 (ch.1 < ch.2 < ch.3, ch.4 < ch.5 < ch.6)

は保ちながらも、いずれの深度においても増幅率が減少に転じる。この 1.7m/s<sup>2</sup> 以降の増幅率の減少は、盛土部分の塑性変形進展に伴う剛性低下によって、模型斜面の固有振動数が変化した結果である。さらに加振レベルが大きくなると、盛土上部 (ch.3, 5, 6) の増幅率が大きく減少し、法面側では入力加速度 5.7 m/s<sup>2</sup>、天端側では入力加速度 6.2 m/s<sup>2</sup> となった段階で増幅率の大小関係が反転する (ch.3 < ch.1 < ch.2, ch.6 < ch.4 < ch.5)。この増幅率の大小関係の反転は、当該箇所の下位部分で破壊が生じ、深部からの振動が十分に伝播しなくなったことを意味する。加速度増幅率の反転という視点から変形モードを考えると、入力加速度 5.7 m/s<sup>2</sup> の段階から破壊が生じはじめ、最初に法面側のすべり面 (図1中の Slip surface 1) が形成される。その後、後退的に天端側のすべり面

(図1中の Slip surface 2) が形成され、入力加速度が 8.2m/s<sup>2</sup> の段階では、法面・天端両側で異なる加速度の反転が生じて、天端の開口亀裂が明瞭となる。盛土部の大半が変動土塊となって変形し、側面からもすべり面の判定が可能な大きな滑りへと発展した。このことは、側面の観察結果と一致する。後退的に生じたすべり面の末端部は、いずれも浸潤面付近の地盤中央部であることから、破壊メカニズムとしては、地盤中央部周辺における剛性低下だと考えられる。そこで、図5に各加振段階における過剰間隙水圧比の変化を示す。過剰間隙水圧比は、上記の増幅率の反転が生じ始める直前の 5.2 m/s<sup>2</sup> から上昇しはじめ、その後、上昇傾向を示す。法面側では下部 (ch.9)、中央部 (ch.10)、上部 (ch.11)、天端側では下部 (ch.13) と中央部 (ch.14) の値が上昇し、やがて 1.0 を超えて、周辺地盤が剛性を失った様子が伺える。天端側の上部 (ch.16) の値は加振段階が大きくなってもほとんど変化しないが、これは浸潤面付近に設置されていて不飽和状態にあったためだと考えられる。

紙面の都合から図は省略するが、Case B の飽和地盤の場合は、Case A よりも入力加速度が小さい 5.2m/s<sup>2</sup> の段階で加速度の反転が生じ、天端の明瞭な開口亀裂や、側面からもすべり面と判定できる変形が確認できている。変状モードは異なるものの、過剰間隙水圧比が上昇して剛性が低下した盛土が起点となって崩壊が生じはじめること、すべり面を境に加速度増幅率の反転が生じることなど、崩壊に至るメカニズムそれ自体は共通であった。

#### 4. おわりに

不飽和模型斜面の特徴は、法面に沿うすべり面が形成され、その後浸潤面付近を先端とするすべり面が後退的に形成される。不飽和状態と飽和状態の実験結果を比較すると、すべり面が形成される破壊メカニズムは、剛性低下が原因であることは共通であるものの、破壊に至る入力加速度、破壊モード、およびすべり面形状が異なることが示唆された。破壊が生じてすべり面が形成される入力加速度は不飽和地盤の方が大きく、変形も小さい。このことは、地下水位以外の条件が同じである盛土造成斜面においては、不飽和地盤の方が飽和地盤に対して耐震性能が高いことを意味する。今後は、固有値解析を含め空気-水-土連成解析を実施し、より詳細な造成盛土の変形・破壊メカニズムを検証するとともに、有効な耐震対策工について検討する予定である。

謝辞 科学研究費補助金 (基盤研究(A): 課題番号 17H01289) の補助を受けた。

参考文献 1) Murao, H., Nakai, K., Noda, T. and Yoshikawa, T. (2018) Deformation/failure mechanism of saturated fill slopes due to resonance phenomena based on 1G shaking-table tests, Canadian Geotechnical Journal, accepted.