

共振現象に着目した飽和盛土造成斜面の 1G 場振動台模型実験

名古屋大学 学生会員 ○堀田 繁

名古屋大学 正会員 中井健太郎, 野田利弘, 吉川高広, 村尾英彦

1. はじめに

日本国は、国土の約 73%を山地が占めており、平坦地に限りがある。そのため、丘陵地の丘部分を切土し、その際に発生した土砂を盛土材に転用して、周辺の谷部や窪地を盛土する造成手法が、効率的かつ経済的な手法として多用されてきた。しかしながら、耐震性の高い盛土造成斜面の設計および対策工は経験に頼るところが大きく、複雑な盛土造成斜面の変状メカニズムには未だ不明なことが多い。本報では、地震時における盛土造成斜面の変状メカニズム解明の一環として実施した 1G 場振動台模型実験結果を報告する。

2. 模型地盤の概要と加振条件

図-1 に土槽概要を示す。ステンレス製の土槽内に、基盤部と盛土部からなる盛土造成斜面を模した模型地盤を作成した。模型地盤の基盤部は、三河珪砂 (4, 5, 5.6, 6, 7 号) にセメント系固化剤を 150kg/m^3 の割合で添加した後で、含水比 15%で突き固め、28 日養生を経た後に階段状に整形した。盛土部は、三河珪砂 (4, 5, 6, 7 号), DL クレーおよび青色粘土を配合した。含水比を最適含水比 ($w_{opt}=10.6\%$) より若干高めの 12%に調整し、乾燥密度 $\rho_d=1.72\text{ g/cm}^3$ (締固め度 $D_c=90\%$) となるよう密度管理を行い、水平成層となるように 15 層 (1 層 2cm) に分けて突き固めた。30 時間かけて浸潤面を上昇させ、模型地盤が水浸状態となつてから 10 時間放置した後で、所定の形状の斜面となるように盛土部を掘削・整形した。

入力加速度は振動数一定の正弦波とし、 0.2m/s^2 から、段階的に 0.5 m/s^2 刻みで加速度を大きくした。各段階の加振時間は 60 秒である。各段階間で、次の加振準備のために 240 秒のインターバルを設けたが、インターバル中に間隙水圧の変動はほぼ見られず連続的な加振とみなした。入力振動数は、別途実施したスウィープ試験から得られた、加振前の模型地盤の固有周波数である 50Hz とした¹⁾。

3. 実験結果と考察

写真 1-は加振前と 11 段階目 (入力加速度 5.2 m/s^2) の模型側面の状況を示す。2 つのすべり面は、側面に設置したマーカーの変位と、後述する増幅率変化および間隙水圧挙動から判定したものである。図-2 は計測加速度とその増幅率の変化を、図-3 は過剰間隙水圧比の変化を示す。図-1 に示すように、計測は法面側と天端側で行っているが、傾向は似ていたため、法面側のみを示している。

1 段階目～2 段階目「共振過程」

深度方向の増幅率を比較すると、初期段階では盛土内で地表面に近い箇所ほど増幅率が大きく「lower < middle < upper」の関係となる。いずれの深度においても、増幅率は 2 段階目 (入力加速度 0.7 m/s^2) で最大となる。入力振動数が模型斜面の固有振動数に近いので共振が生じているためであり、深部に比べて浅部ほど揺れが大きい。共振が生じているので、入力加速度が小さくても盛土部では大きく揺れている。

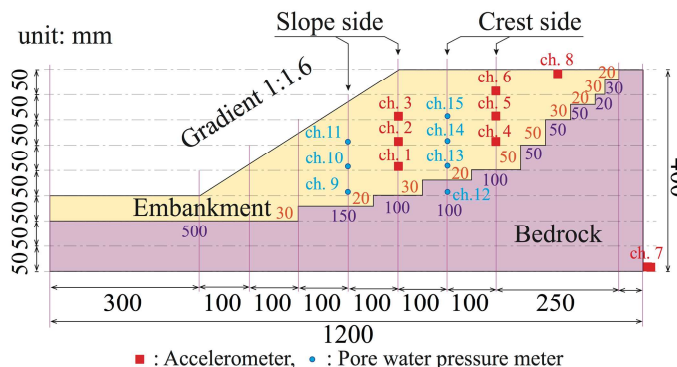
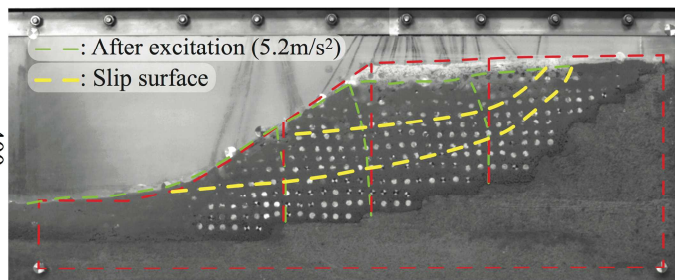


図-1 土槽寸法と計測器配置位置

写真-1 11 段階目(入力加速度 5.2 m/s^2)の模型側面の状況

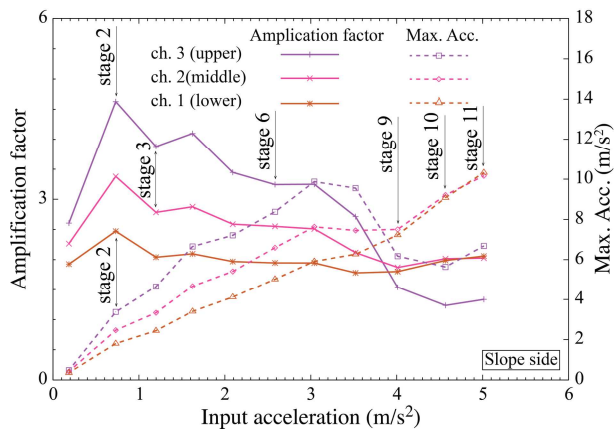


図-2 法面側における計測加速度と増幅率変化

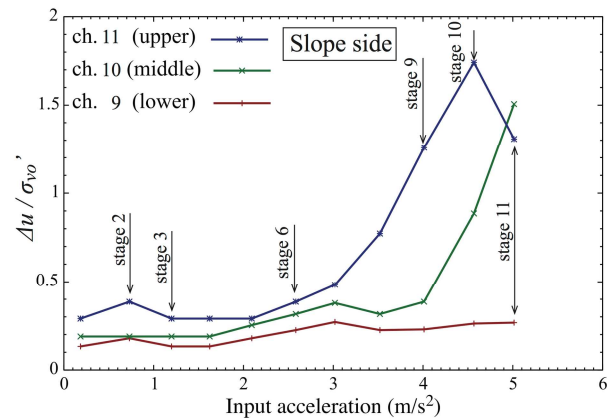


図-3 法面側における過剰間隙水圧比

3段階目～8段階目「系としての固有振動数低下過程」

さらに入力加速度を大きくすると（3～8段階目）、加速度は増加しつつも、深度方向の増幅率の大小関係を保ったまま盛土浅部～中央部の増幅率が減少に転じる。この3段階目（入力加速度 1.2m/s^2 ）以降における増幅率の減少は、加振に伴う微小な塑性変形が蓄積して共振しなくなったためだと考えられる。つまり、弾塑性学的な観点から、以下のように考えることができる。

1. 入力加振はまだ小さいが、増幅率は3倍以上を保ち、模型斜面の塑性変形が徐々に蓄積する。繰返し時の応力比は限界状態（破壊）に至るほどは大きくないため、塑性変形は塑性圧縮として働く。
2. 実験中は非排水条件と見做せるため、塑性圧縮の結果、弾性膨張が生じる。したがって、平均有効応力が減少して、間隙水圧は上昇する。
3. 平均有効応力減少に伴って剛性が低下するので、模型斜面の系としての固有振動数が減少する。

9段階目～10段階目「浅部のすべり発生過程」

9段階目（入力加速度 4.2 m/s^2 ）になると、表層部における開口亀裂が発生し、流動的な浅部のすべりが明瞭となる。この段階では法面浅部の増幅率が著しく低下し、深度方向の増幅率の大小関係は「upper < lower < middle」のように反転する。すべりの発生および増幅率の反転は、以下のように考えることができる。

1. 入力加速度の増加によって塑性変形がさらに進展し、平均有効応力が減少する。
2. 拘束圧の小さい浅部ほど平均有効応力減少の程度が大きく、過剰間隙水圧比が1.0を超える。
3. 剛性は局所的にさらに低下し、繰返し载荷によって盛土が乱されて強度も低下する。
4. すべり発生箇所周辺の加速度が内部消散によって減衰し、増幅率が反転する。

盛土上部では、慣性力の増大とともに、共振を含む繰返し負荷過程で大きな揺れを経験する。塑性変形の蓄積に伴う剛性と強度の低下によって、この段階ですべり発生に至ったと考えられる。

11段階目～「深部のすべり発生過程」

11段階目（入力加速度 5.2m/s^2 ）になると、盛土天端から法尻へと向かう深いすべりが発生した。この段階では、法面中央部の増幅率が著しく低下し、深度方向の増幅率の大小関係は「upper < middle < lower」のようにさらに反転する。先に示した加振9段階目の浅部と同様、法面中央部の過剰間隙水圧比が1.0を超えると同時に、中央部の加速度は 7.5m/s^2 でピークを迎えた後、徐々に減衰している。浅部のすべりと同様のメカニズムで、すなわち、（発生するすべり面より上の土塊の）慣性力の増大とともに、共振を含む繰返し負荷過程での、塑性変形の蓄積に伴う剛性と強度の低下に起因すると考えられる。

4. おわりに

盛土造成斜面の地震時安定性評価は、単に入力加速度の大きさだけで決まるものではなく、盛土造成斜面の共振現象、つまり、盛土造成斜面の初期固有振動数および繰返し負荷等による塑性変形の進展に伴う系としての固有振動数変化の把握も重要であることがわかった。

- 1) 村尾ら(2016): 1G 場振動台実験における模型盛土造成斜面の固有振動数の探索, 第71回年次学術講演会概要集