

材料非線形性に伴う共振現象の変化に着目した飽和盛土造成斜面の 1G 場振動台実験 1G shaking table tests of saturated fill slopes in terms of shift of resonance phenomena due to material-nonlinearity

村尾 英彦 (名大・工) 野田 利弘 (名大・工) 中井 健太郎 (名大・工)
 吉川 高広 (名大・工) 堀田 繁 (名大・工)
 Hidehiko MURAO, Nagoya University
 Toshihiro NODA, Nagoya University
 Kentaro NAKAI, Nagoya University
 Takahiro YOSHIKAWA, Nagoya University
 Shigeru HOTTA, Nagoya University
 FAX: 052-789-5203, E-mail: hidehiko.murao@muraochiken.co.jp

Earthquake motions include waves of various frequency bands ranging from low to high frequency. Notably, the difference in dominant frequencies affects the seismic stability of fill slopes. Hence, to analyze the deformation/failure mechanism during an earthquake, 1G shaking-table tests were conducted on saturated fill slopes considering the resonance phenomenon. Evaluating the seismic stability of the fill slopes depends on not only the magnitude of the acceleration but also the relationship between the natural frequency and the input frequency. Moreover, it is also important to grasp the change in the natural frequency associated with the progress of plastic deformation due to repeated loading.

1. はじめに

日本は国土の約 73%を山地が占めており、平坦地に限りがある。そのため、丘陵地を切土し、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、効率の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、盛土造成斜面の複雑な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. 実験概要

ステンレス製の土槽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。計測機器の配置を Fig. 1 に示す。基盤部は珪砂にセメント系固化剤を添加して作製した。盛土部は珪砂 (4, 5, 6, 7 号), DL クレー, および青色粘土を混合し、締固め度 $D_c=90\%$ となるように密度管理しながら突き固めた。模型地盤完成後、30 時間かけて段階的に浸潤面を上昇させ、10 時間放置した後に所定の形状となるように掘削・整形した。

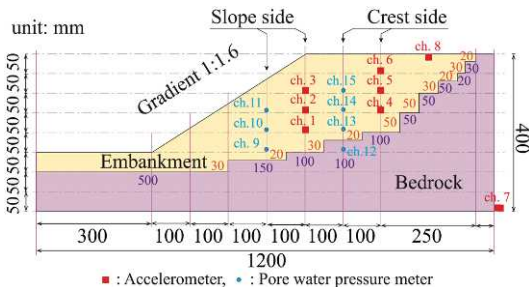


Fig. 1 Cross section of the model ground

入力波は振動数一定の正弦波とし、 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、インターバルは 240 秒である。別途実施した掃引試験の結果、模型斜面の固有振動数は 50Hz であった。共振現象に着目するため、入力振動数が固有振動数と一致する 50Hz および固有振動数とは離れている 20Hz, 80Hz の場合について検討した。

3. 実験結果

Case1 : 入力振動数が 50Hz の場合

Fig. 2 は計測加速度とその増幅率の変化, Fig. 3 は過剰間隙水圧比の変化を示す。Fig. 4 は 11 段階目 (5.2 m/s^2) における模型側面の状況を示す。

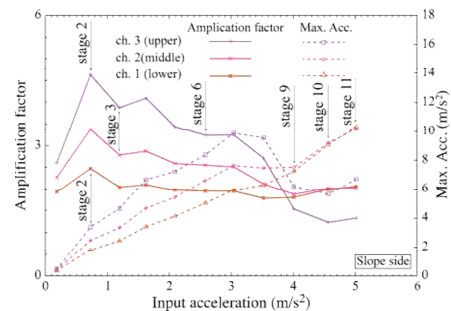


Fig. 2 Maximum acceleration and amplification factor

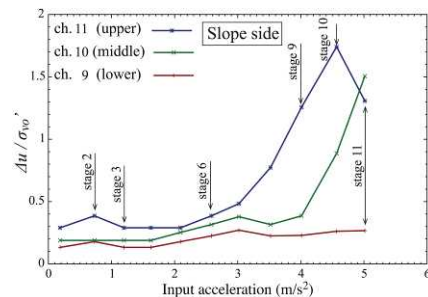


Fig. 3 Excess pore water pressure ratio

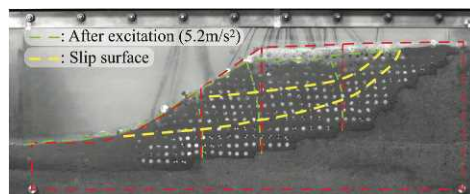


Fig. 4 Side view of the model at stage 11

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、初期段階では浅部ほど増

幅率が大きく、いずれの深度においても、増幅率は 2 段階目 (0.7 m/s^2)で最大となる。これは、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。

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、深度方向の大小関係を保ったまま、増幅率が減少に転じる。加振に伴って塑性変形が蓄積して剛性が低下し、系としての固有振動数が減少して共振しなくなったためだと考えられる。模型斜面に明確な変状は見られないが、3 段階目以降、地表面からの水の湧き出しが確認できるようになった。

9 段階目～10 段階目「浅部のすべり発生過程」

9 段階目 (4.2 m/s^2)になると、表層における開口亀裂が発生し、流動的な浅部のすべりが発生した。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が、浅部と中央部で逆転する。この段階で、浅部の過剰間隙水圧比が 1.0 を超えている。盛土浅部では、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、すべり発生に至った。

11 段階目～「深部のすべり発生過程」

11 段階目 (5.2 m/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、深度方向の増幅率はさらに反転する。

Case2 : 入力振動数が 20Hz の場合

Fig. 5 は計測加速度とその増幅率の変化を、Fig. 6 は過剰間隙水圧比の変化を示す。Fig. 7 は 12 段階目 (5.7 m/s^2)における模型側面の状況を示す。

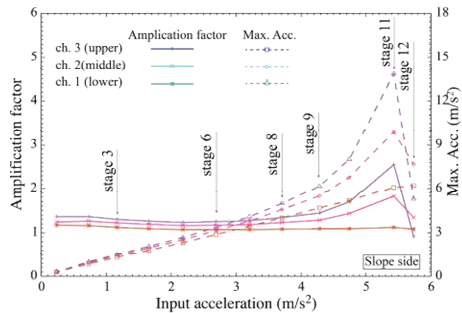


Fig. 5 Maximum acceleration and amplification factor

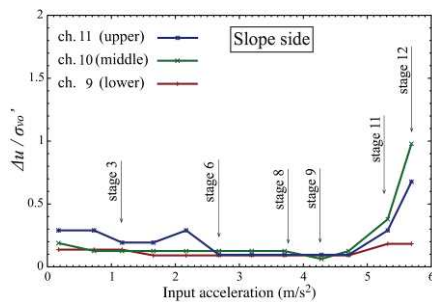


Fig. 6 Excess pore water pressure ratio

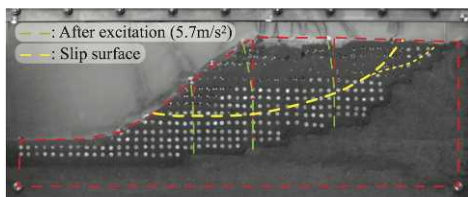


Fig. 7 Side view of the model at stage 12

1 段階目～8 段階目「非共振過程」

増幅率は地表面に近いほど大きい傾向において Case1 と同様である。しかし、その値は小さく、模型斜面は共振せずに、ほぼ一様に揺れている。

9 段階目～11 段階目「系としての固有振動数増加過程」

9 段階目 (4.7 m/s^2)になると、深度方向の大小関係を保ちながら、盛土浅部～中央部において加速度と増幅率が徐々に増加する。過剰間隙水圧比も上昇し、表層で水の湧き出しが見え始める。Case1 と同様、加振によって塑性変形が蓄積したためである。剛性が徐々に低下し、系としての固有振動数は減少する。加振初期の固有振動数は、入力振動数 (20 Hz) と離れていたため共振は生じず揺れは小さかったが、模型斜面の固有振動数が次第に減少して入力振動数に近づくため、共振が生じて増幅率は増加する。

12 段階目「上部・中央部一体のすべり発生過程」

12 段階目で、盛土浅部と中央部の増幅率が減少して、深度方向の増幅率が反転する。この段階では、浅部と中央部の計測加速度が増大して慣性力も増大するとともに、浅部と中央部の過剰間隙水圧比が 1.0 を超え、盛土中央部を貫くすべりが急に発生した。共振が発生した時点で入力加速度が大きいことが原因で浅部から中央部が同時に剛性を失ったため、Case1 のように表層から深部へとすべりが段階的に進展するのではなく、盛土中央部から一気にすべりが発生した。

Case3 : 入力振動数が 80Hz の場合

Fig. 8 は過剰間隙水圧比の変化を示す。

Case 3 では、Case 1 や Case 2 とは異なり、15 段階目までの加振を行っても、目視で観測可能な変形が生じなかった。入力振動数が加速度計の許容応答振動数を超えるため、増幅率に関する議論はできないが、間隙水圧挙動としては、15 段階目までの加振においても増加は見られない。Case1 や Case 2 と同様に、入力加速度の増加とともに塑性変形が蓄積し、系としての固有振動数は減少していると考えられるが、入力振動数から遠ざかる一方であるため、共振による加速度増幅は発生せず、安定を保った。

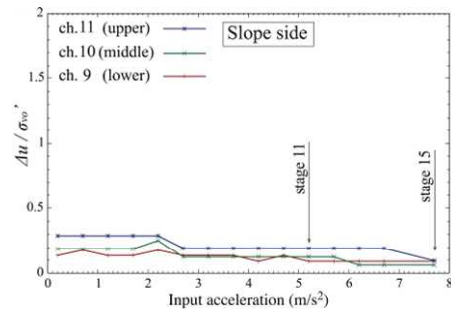


Fig. 8 Excess pore water pressure ratio

4. おわりに

実験結果から、①盛土造成斜面の地震時安定性評価は、単に入力地震波の加速度の大きさで決まるのではなく、盛土造成斜面の固有振動数と入力振動数の関係にも強く依存すること、②盛土造成斜面の変形／崩壊は 1 つのすべり面で規定できるものではなく、条件によっては、進行的に複数のすべり面が形成されること、がわかった。これらは、従来、設計で用いられる震度法や Newmark 法では考慮することのできない現象である。

本研究は南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト (文部科学省) および JSPS 科研費 (基盤研究 A : 25249064) の助成を受けた。ここに謝意を表す。