

# 固有振動数と入力振動数に着目した飽和盛土造成斜面の1G場振動台実験

共振 固有振動数 斜面内破壊

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  
学生会員 堀田 繁

## 1. はじめに

筆者らはこれまでに、地震時の飽和盛土造成斜面の変形メカニズム解明の一環として、模型地盤の固有振動数と入力振動数の関係に着目した1G場振動台模型実験を実施している<sup>1)</sup>。その結果、①入力振動数が固有振動数とほぼ等しい場合は、加振初期段階から共振が生じて加速度が増幅すること、②塑性変形の蓄積とともに平均有効応力は減少して、やがて拘束圧の小さい盛土浅部において局所的に剛性や強度が低下すること、③加速度増加率は減少するものの、入力加速度の増加とともに慣性力は増大するため、浅部ですべりが発生すること、④入力加速度がさらに大きくなると、今度は深部においても同様のメカニズムですべりが発生することを示している。本報では、既報<sup>1)</sup>と同じ地盤条件のもとで入力振動数を変えた場合（入力振動数が固有振動数よりも大きい場合と小さい場合）の実験結果を示す。

## 2. 実験結果と考察

実験装置、および実験方法は既報<sup>1)</sup>に示す通りであり、今回は模型斜面の固有振動数（50Hz）に対して、入力振動数が小さい場合（20Hz）-CASE 1- と大きい場合（80Hz）-CASE 2- の実験を行った。

### 2.1 入力振動数が 20 Hz（< 模型斜面の初期固有振動数 50Hz）の場合 - CASE 1-

図1は計測加速度とその増幅率の変化を、図2は過剰間隙水圧比の変化を示す。計測は斜面近傍（加速度 ch.1~3, 間隙水圧 ch.9~11）と盛土天端（加速度 ch.4~6, 間隙水圧 ch.13~15）で実施したが、両者で似た傾向を示したので斜面側の計測結果のみを示す。写真1は加振前と12段階目（入力加速度  $5.7\text{m/s}^2$ ）の模型側面の状況を示す。写真1中のすべり面は、側面に設置したマーカーの変位と、後述する加速度増幅、および間隙水圧挙動から判定したものである。

#### 1段階目～8段階目「非共振過程」

図1より、増幅率は地表面に近いほど大きい傾向があるが、増幅率は既報<sup>1)</sup>の固有振動数と入力振動数が一致する場合に比べて小さく、浅部と深部の差もほとんどない。CASE1の場合、入力振動数が模型斜面の初期固有振動数よりも大きいため、模型斜面は共振せずにはほぼ一様に揺れているためである。

#### 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（入力加速度  $4.7\text{m/s}^2$ ）になると、深度方向の増幅率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増幅率が増加し始める。これは、加振によって盛土部の塑性変形が蓄積し、平均有効応力減少とともに剛性が低下して、系としての固有振動数が減少したためである。加振初期の固有振動数（50Hz）は、入力振動数（20 Hz）と離れていたため共振は生じずに揺れは小さかったが、上記の通り、固有振動数が次第に減少して入力振動数に近づき、共振が生じて増幅率は増加し始めた。共振によって浅部ほど加速度増幅率が大きくなるため、過剰間隙水圧比も次第に上昇し始める。図1, 2からわかるように、11段階目（入力加速度  $5.2\text{m/s}^2$ ）から表層部において過剰間隙水圧比が大きくなり、表層で水の湧き出しが観察される。

#### 12段階目「上部・中央部一体のすべり発生過程」

12段階目では、塑性変形の蓄積とともに盛土浅部・中央部の剛性がさらに低下して、浅部と中央部において加速度増幅率は減少に転じる。深度方向の増幅率の大小関係は、ch.3(upper) < ch.2(middle) < ch.1(lower) のように逆転する。この段階では、加速度増幅率は低下するものの、盛土浅部と中央部の過剰間隙水圧比が1.0を超えて剛性と強度が低下し、盛土中央部を貫くすべりが急に発生した。亀裂が地表面に発生し、側面からの目視観察においても、明瞭な変形が確認できた。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、盛土浅部から中央部が同時に剛性を失い、既報<sup>1)</sup>の固有振動数と入力振動数が同じ場合のように、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と考えられる。

以上をまとめると、次のように考えられる。入力振動数が盛土斜面の初期の固有振動数より小さい場合、加振初期段階は共振が生じないため安定を保つ。しかし、入力加速度が大きくなるにつれて塑性変形が蓄積すると、模型斜面の固有振動数が徐々に減少し、やがて入力振動数に近づくと共振が生じ、盛土部の揺れが非常に大きくなる。盛土斜面の慣性力の増加とともに、盛土浅部と中央部において平均有効応力が減少して剛性・強度が低下し、盛土中央部を貫くすべりが発生する。共振が発生した時点で入力加速度が大きいため、盛土中央部から一気にすべりが発生した。

### 2.2 入力振動数が 80 Hz（> 模型斜面の初期固有振動数 50Hz）の場合 (CASE 2)

図3は、過剰間隙水圧比の変化を示す。写真2は、加振前と15段階目（入力加速度  $7.7\text{m/s}^2$ ）の模型側面の状況を示す。CASE 2では、既報<sup>1)</sup>やCASE 1と異なり、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。しかし、間隙水圧挙動としては、図3に示すように、15段階目までの加振において、過剰間隙水圧比の増加は見られない。既報<sup>1)</sup>やCASE 1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と考えられる。なお、11段階目（入力加速度  $5.2\text{m/s}^2$ ）以降の加振では、法肩と天端周辺のみから徐々に水の湧き出しが確認され、15段階目の加振では、写真3に示すように明瞭となるが、すべりの発生にまでは至っていない。既報<sup>1)</sup>やCASE 1においてすべりを発生

させたモードと異なる高次の固有モードが存在し、入力加速度がさらに大きくなった際に、その高次モードでの共振が生じてすべりが発生する可能性もあるが、これについては、今後、数値解析的に検証していく必要である。

以上をまとめると、入力振動数が盛土斜面の初期の固有振動数より大きい場合、塑性変形の蓄積によって模型斜面の固有振動数が変化（減少）しても、入力振動数から遠ざかるため、共振せずに安定を保つことができたと考えられる。

### 3. おわりに

本報では、入力振動数が固有振動数よりも大きい場合と小さい場合の飽和盛土造成斜面の 1G 場振動台模型実験を実施した。既報<sup>1)</sup>の成果と合わせて、盛土造成斜面の地震時安定性（崩壊に至る加速度の大きさや崩壊モード）は、入力加速度の大きさで決まるものではなく、盛土造成斜面の固有振動数と入力振動数の関係に強く依存することを示した。

参考文献 1) Murao, H. and Nakai, K. : 1G shaking table tests on saturated fill slope focusing on resonance phenomena, 19<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017

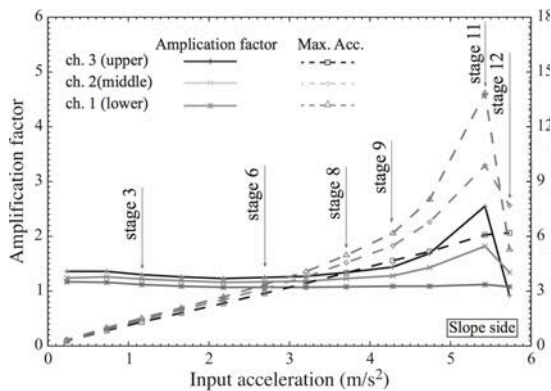


図 1 CASE1における計測加速度と増幅率の変化

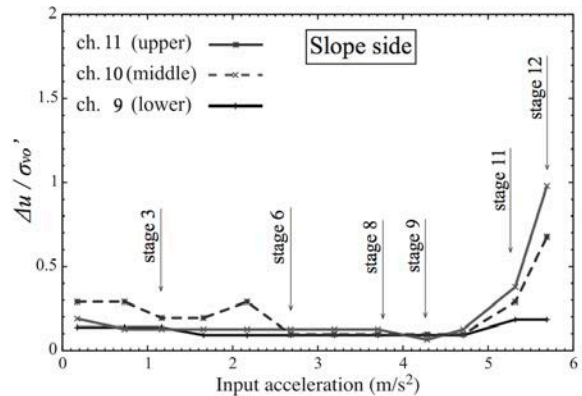


図 2 CASE1における過剰間隙水圧比の変化

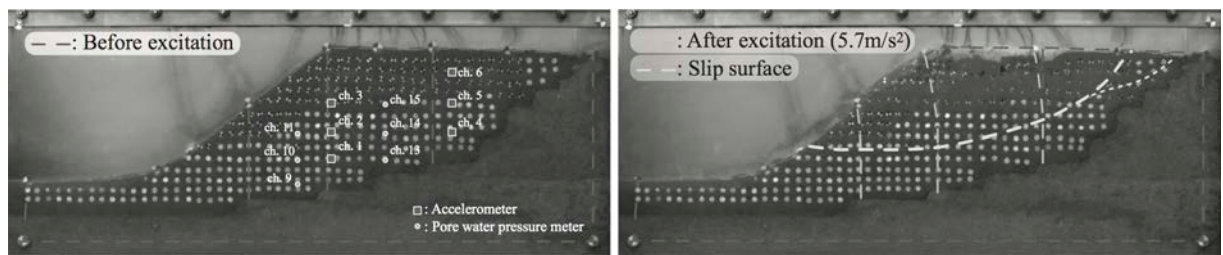


写真 1 入力振動数 20Hz (CASE 1)における模型斜面側面の変化 (左: 加振前, 右: 12 段階 入力加速度 5.7m/s<sup>2</sup>)

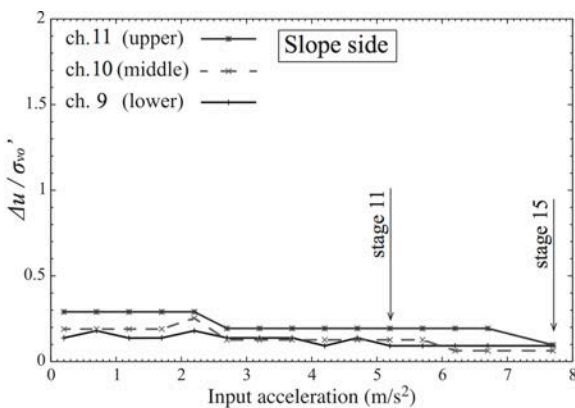


図 3 CASE2における過剰間隙水圧比の変化

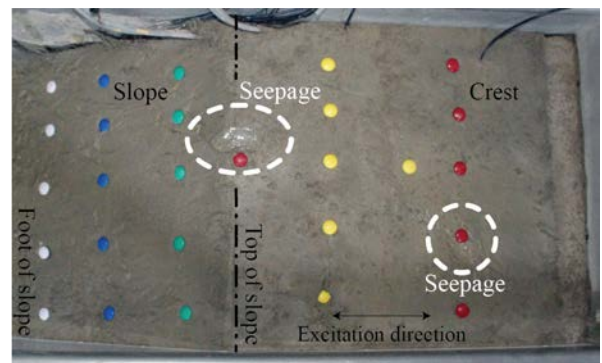


写真 3 地表面における水の湧き出し (Case2, 15 段階)

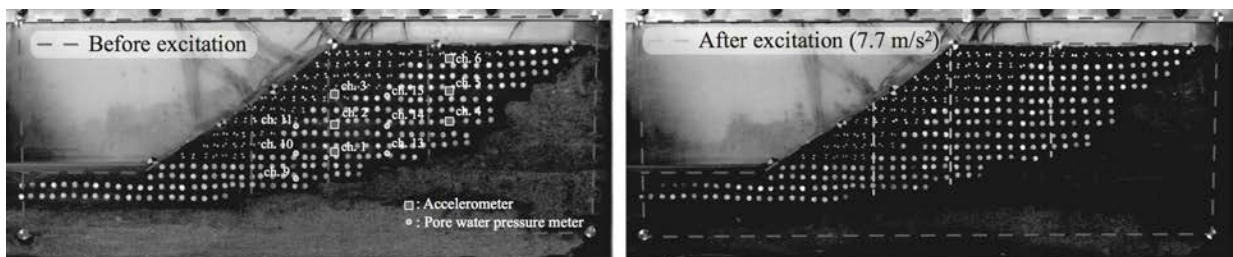


写真 2 入力振動数 80Hz (CASE 2)における模型斜面側面の変化 (左: 加振前, 右: 15 段階 入力加速度 7.7m/s<sup>2</sup>)