## 液状化による緩斜面の流動現象に関する遠心模型実験

愛媛大学 学生会員 ○新藤衣佐希, 正会員 岡村未対,小野耕平

## 1. <u>はじめに</u>

2018 年 9 月 28 日に起きたインドネシア・スラウェシ島地震では, 地盤の液状化により 2,3%の緩勾配の斜面が広範囲にわたり流動し, その流動動距離は数 100m から 1km 以上という世界でも前例の無い長 距離であった.田中ら<sup>1)</sup>は現地の液状化層から採取した試料の CUB 試 験を行い,非排水強度が斜面のせん断応力よりも常に大きく,地盤の せん断強度特性のみでは流動現象を説明できないことを明らかにした. 長距離流動の考え得るメカニズムとしては水膜現象(國生ら<sup>2)</sup>)など 地盤の層構造に起因するものがある.そこで,流動現象の解明に向け た研究の一歩として,遠心模型実験により均一な斜面の加振実験を行 い,流動現象と非排水せん断強度との関係を調べた.

2. 実験概要

本研究では表1に示す勾配の異なる2種類の模型に対する実験を行った. Casel は斜面勾配が3%, Case2 は斜面勾配 25% (林<sup>3)</sup>) の模型実験である.

図1に模型の概略を示す.地盤は硅砂6号を液状化しない 密な状態に締固めた下部砂層と,その上の液状化層からなる. 液状化層は,8号硅砂とファインサンドを乾燥重量比2:1で混 合した混合砂を層厚2cm毎に締固め度Dc=90%となるよう締固 めて作成した.その後,地盤表面を勾配3%あるいは25%となる よう整形し,約-95kPaの負圧下にてメトローズ水溶液(50cst)で 飽和した.地盤中に設置した水圧計及び加速度計の位置は図1

に示すとおりである. 模型を遠心模型実験装置に搭載し, Casel では 50g 場にて地下水位も 3%の勾配となるよう下流側の水位を調整し,合計 4 回の加振を行った. これらの加振は何れも最大加速度振幅が約 240gal で,波数を加振 Step 毎に波数を増加した. 4 回の加振では大きな流動変形が生じなかったため,遠心加速度を 40g としさらに約 300gal の加振を 2 回行った。Case2 では 40g 場にて最大加速度振幅が約 230gal の加振実験行った. 表 1 に示した加振条件における波数は,過剰間隙水圧の上昇に寄与した 180gal 以上の波形の数である.

3. 実験結果

本論文では以後すべての結果を原型スケールに変換して示 す. Casel (3%斜面)の Step2 加振で測定された過剰間隙水 圧 ( $\Delta u$ )の時刻歴を図2に示す. 図中には水圧計設置深度に おける初期鉛直有効応力 ( $\sigma_{v0}$ ')も破線で示してある. いず れの深度でも加振開始後 $\Delta u$  が $\sigma_{v0}$ 'にほぼ達していることから, 地下水面以下の混合砂層全体が液状化したことがわかる. Step3 以降の各 Step でも過剰間隙水圧が有効応力に達し,混 合砂層は地下水面以下の全層が液状化した. また,加振後も 特に地盤浅部では液状化状態が 300 秒以上継続した.

図 3(a)は Case1 で各 Step の加振終了時の地盤の変形状況(鉛直に設置した 5 本の色砂の位置)である。地表面については実験前と Step6 の加振終了後のものである.地盤は下流に向かってせん断変形しており、上流部



図1 動的遠心実験の模型概略図

表1 動的遠心実験各 Case の加振条件

		i i			
		加振	遠心	最大入力加速度	波
		時間(s)	加速度	(原型スケール)	数
Casel	Step1	0.2	50g	218gal	1
	Step2	0.3	50g	226gal	3
	Step3	0.3	0g	222gal	5
	Step4	0.4	50g	248gal	8
	Step5	0.4	40g	303gal	8
	Step6	1.0	40g	298gal	31
Case2		0.5	40g	227gal	14



では Step6 までのせん断ひずみは約 26%, 下流部は約 74%と下流部ほど大きい.変位はほとんどが加振中に生 じており、加振後には液状化状態が継続している間でも変形は進行しなかった.また各加振 Step ごとの変位量 増分は概ね同程度であり、大きな流動変形が起きた加振 Step は無かった.

Case2 の地盤変形状況を図 3(b)に示す.この実験では、加振開始後に地盤が液状化し天端が沈下して法面がや や盛り上がったところで加振が終了し地盤の変形もそ こで一旦ほぼ停止した. その数秒後に再び地盤の流動 が始まり、地盤表面がほぼ水平になるまで流動が継続 した(図 3(b)の赤線).図 3(b)の青線は加振前,黒線は 流動変形が再開した後の色砂のスケッチであり、流動 が停止した時には流動域内の色砂は大変形によってほ とんど見えなくなっていた.



4. 考察

上述したように、Casel では加振中以外の時間帯に

変形はほとんど生じず,一方 Case2 では加振終了後も地震動による慣性力の作用無しに地盤の流動変形が継続 して生じた. そこで混合砂の非排水せん断強度特性と斜面によるせん断応力を比較する.

まず, 模型地盤(混合砂)と同じ密度で作成した供試体の圧密比排水せん断試験(CUB 試験)を 100kPa の 初期有効拘束圧 $\sigma_{c0}$ 、の下で行った. 応力-ひずみ曲線を図4に示す. ただし図4の縦軸はせん断応力 $au_r$ を $\sigma_{c0}$ 、で無 次元化してある. τ,/σ,0'はピーク後に低下するが, 最小値 0.10 を示した後に再び上昇している.

次に,斜面による地盤のせん断応力を以下のように求めた. Case1, Case2 でせん断変形の起きている代表的な地点を図 2 の赤点に示 す.地表面傾斜が3%および25%の無限斜面を仮定し、これら地点 でのせん断応力τ<sub>d</sub>を式(1)(2)で求めた.これを初期平均有効応力 p'(=2σ<sub>v0</sub>'/3)で除して無次元化し,図4に示した.

 $\tau_d = \{(\gamma_{sat} z_{sat} + \gamma_t z_t) \sin\theta\}/p'$  (1)  $\sigma_{vo}' = \gamma' z_{sat} + \gamma_t z_t$  (2) ここで, γ<sub>sat</sub>:地下水位以深の混合砂の飽和単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>) γ<sub>t</sub>:地下水位面以浅の混合砂の湿潤単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>) zsat:地下水位面からすべり線までの長さ(m)



z<sub>t</sub>:初期状態の地盤表面から地下水位面までの飽和混合砂の長さ(m)

Casel では常に抵抗力が斜面による駆動力を上回っており(r<sub>t</sub>/g<sub>e0</sub>'>r<sub>d</sub>),加振中以外では変形が生じなかった ことがわかる.また、Case2 ではひずみが約 30% 生じるまでは τ<sub>r</sub>/σ<sub>c0</sub> '<τ<sub>d</sub> となっており、慣性力無しで流動変形 が生じたことが説明できる.ただし、ひずみが 30%を超えると $\tau_r/\sigma_{c0}$ 'と  $\tau_d$ が逆転しているにも関わらず、模型 地盤は流動が継続している点では三軸試験と実験が整合していない.

5. まとめ

本研究では均一な斜面の液状化による流動現象を動的遠心模型実験により調べた。得られた結論は以下に示 すとおりである.①今回用いた均一な混合砂では,液状化しても 3%の斜面では流動せず,25%の斜面では大き な流動変形が生じた. 大きな流動変形は加振終了後にも継続したことから, 加振による慣性力が流動の主因で はないことがわかった. ②この混合砂の非排水せん断強度特性を斜面によるせん断力と比較し, T<sub>d</sub>と T<sub>r</sub>の大小 関係で流動現象の発生をある程度説明できた.

## 参考文献

- 1) 田中ら(2020): 2018 年スラウェシ島地震での大規模地盤流動域から採取した砂の単調及び繰返しせん断特性,第 55 回地盤工 学研究発表会(投稿中).
- 國生ら(2004):液状化地盤の水膜現象による流動の模型実験とエネルギー的検討,土木学会論文集 No.771/III-68. 2)
- 3) 林秀太朗(2011):盛土の液状化判定法に関する実験的研究,平成23年度愛媛大学学位論文