

(92) 動的遠心模型実験装置を用いた砂地盤の側方流動現象のメカニズムに関する基礎実験

東京電力 正会員 佐藤 博 正会員 土居 賢彦

鹿島建設 正会員 大保 直人 正会員 本田 満彦 正会員 吉迫 和生

1. まえがき

液状化に伴い地盤が流動する側方流動現象について、これまで1g場における土槽振動実験により、液状化地盤が流動する過程においては流体的な挙動を示すこと、さらに流動が進展して数十%程度の大きなせん断歪時には地盤の特性が流体的性質から剛性が回復して固体的性質に移行することが示されている^{1), 2)}。ここでは、砂の非排水時のせん断変形特性が拘束圧に依存することを考慮し、動的遠心模型実験装置を用いて、上記の液状化地盤が大きなせん断歪時に流体的性質から固体的性質に移行する現象の再現性に焦点を当て基礎実験を行った。以下にその概要を報告する。

2. 1g場における土槽振動実験の概要

浜田等²⁾は図-1に示すような強制的に傾斜可能な土槽を用いて、完全液状化状態になった砂層を傾斜して側方流動を発生させ、流動による砂層の変形状態を検討した。この結果による流動後の地表面形状と流動変位の深度分布を図-2に示す。これによると砂層の地表面形状は中流部に初期の傾斜が残留し、その両側で平坦になること、さらに流動変位の深度分布は上記の残留傾斜部で直線に近く、平坦部では下に凸のとなることが示された。この中流部に見られる残留傾斜部では流動量が大きいため砂層が大きなせん断変形を受け深度方向に一樣に限界せん断歪に達して砂の骨格構造の回復、即ち剛性が回復して流動が停止し、そのため変位の深度分布が直線的になること、またその両側の上、下流部では流動量が小さいため限界せん断歪に至らず変位の深度分布が下に凸になると想定された。またこの考えの基に砂層の体積移動量の釣り合いから導かれる①式を用いて図-2の地表面形状を合理的に説明できることが示された。さらにこの限界せん断歪は相対密度に依存し、相対密度が大きくなるほど残留傾斜部長さも大きくなることが示された。

$$X = L - 2H\sqrt{\gamma^*/\theta} \quad \text{----- ①}$$

ここに X : 残留傾斜部長さ、L : 砂層長さ、H : 砂層厚さ、 γ^* : 液状化砂の限界せん断歪

θ : 地表傾斜角

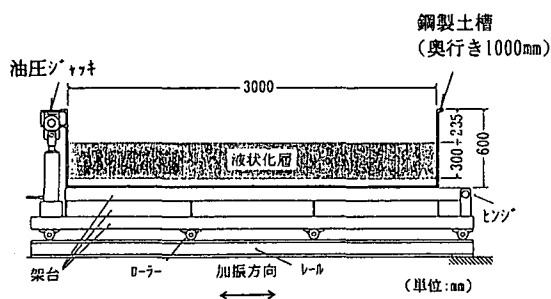


図-1 1g場の実験装置の概要²⁾

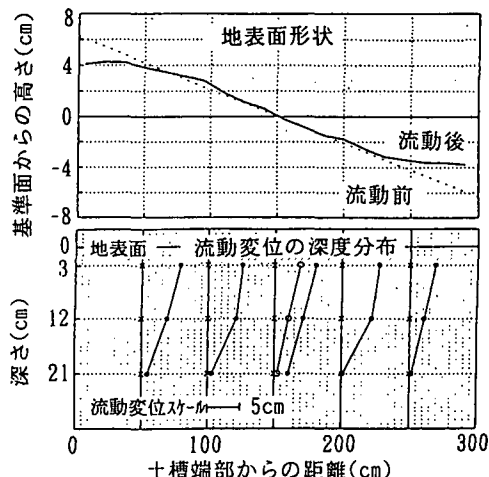


図-2 1g場における土槽振動実験結果²⁾
(相対密度41%、傾斜角4.2%)

3. 動的遠心模型実験

(1) 実験概要

前述の1g場の実験結果を再現するために実施した動的遠心模型実験に用いた地盤モデルと計器の配置を図-3に示す。豊浦標準砂を用いて地表面に傾斜を有する飽和砂層を作製し、短辺方向に加振して液化化させ、流動を発生させた。なお水位は傾斜上流端部の高さに一致させ、砂層全体が飽和状態になるようにした。今回の実験の特徴は、大きなせん断歪を発生させるため、砂層の長さに対して厚さできるだけ小さくしたことである。また間隙流体は振動現象と透水現象の相似則を考慮し、水の50倍の粘性を有するシリコンオイルとした。実験ケースは表-1のとおり、相対密度と初期の地表面勾配を変えた3ケースとし、それぞれについて加振時間の異なる2種類の正弦波加振を引き続いて行った。また計測項目は地盤の応答加速度、間隙水圧ならびに流動変位である。流動変位の計測については、砂層に埋設した着色砂による最終流動変位の計測と、土槽に固定した小型CCDカメラ（撮影時間間隔1/30秒）を用いた着色砂の流動変位の時刻歴計測である。

表-1 実験ケース一覧表

	初期 相対密度	初期 地表面勾配	遠心 加速度	加振正弦波	1回目加振	2回目加振
					加振後相対密度	加振後相対密度
ケース1	25%	10%	50g	200Hz, 20g	34%	42%
ケース2	56%	10%	50g	(4Hz, 400Gal)	56%	63%
ケース3	29%	5%	50g		37%	48%

注) 加振時間 1回目: 0.05秒(2.5秒) 2回目加振: 2.0秒(100秒)、()内は1g換算値

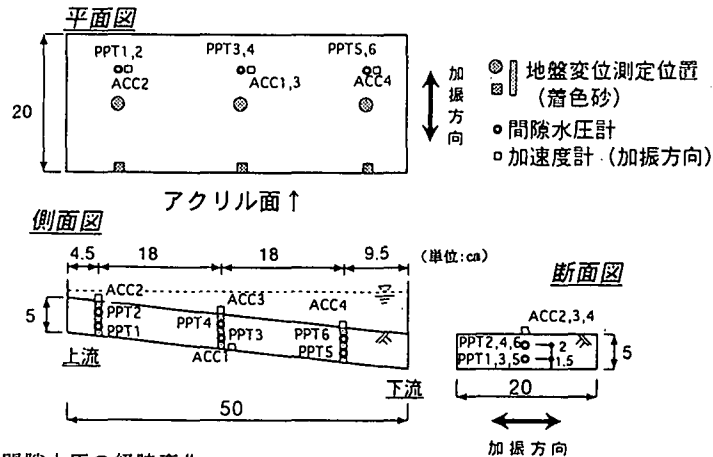


図-3 地盤モデルと計器配置

(2) 実験結果

a. 地表流動変位、過剰間隙水圧の経時変化

地表流動変位、過剰間隙水圧の計測例として相対密度が同程度で初期の地表面勾配が異なるケース1と3の中流部における計測値を入力加速度とあわせて図-4に示す。ケース2はケース1とほぼ同じ結果であることから割愛した。ここで流動変位に経時的な細かい変動が見られるのはCCDカメラによる録画の読みとり誤差である。これによると流動変位はどちらのケースも加振に伴い増加し、加振停止に伴って流動も停止すること、変位量は初期地表面勾配の大きいケース1の方が大きいことが認められる。過剰間隙水圧は加振後急激に増加して水圧比がほぼ1に達し、砂層が完全液化化状態になったことを示している。加振初期に水圧が上昇した後、急激に低下する場合がみられるが、これは流動により計器周辺に負圧が発生したためと推測される。

加振終了後の過剰間隙水圧の消散速度については、どちらのケースも1回目加振に比べて2回目加振の方が大きいこと、また1回目加振、2回目加振のどちらの場合も初期の地表面勾配の大きいケース1の方が大きいことが認められる。

b. 地表面形状

各ケースの地表面形状を加振開始前、加振終了後とをあわせて図-5に示す。これによると、初期の地表

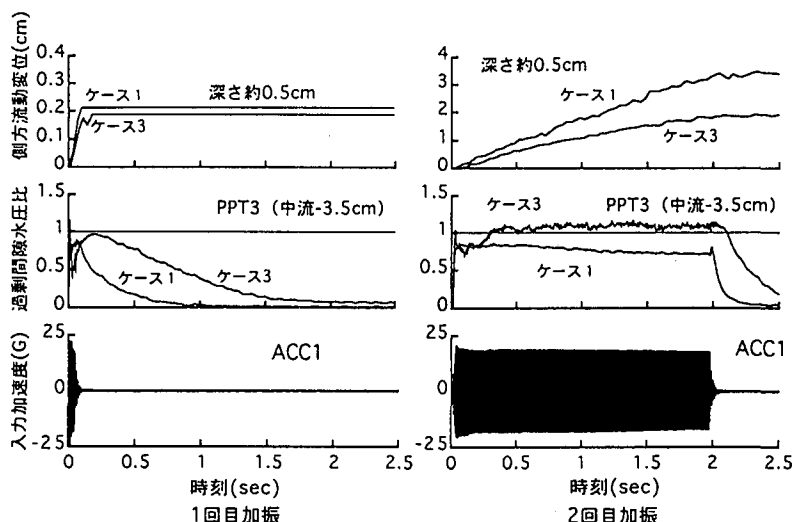


図-4 地表流動変位、過剰間隙水圧、入力加速度の経時変化

面勾配の大きいケース1、2と勾配の小さいケース3では傾向が異なることが認められる。即ちケース1、2では加振後の地表面形状は上、下流部が平坦で、中流部に初期傾斜が残留しており、前述の1g場の結果と傾向が一致している。但し、1回目加振後と2回目加振後とを比べると、加振時間が長くなるにつれて中流部の残留傾斜部が短くなり次第に平坦に近づく結果になっている。これに対して初期の地表面勾配の小さいケース3では加振に伴い地表面全体が一様勾配で次第に緩やかになる傾向である。

c. 流動変位の深度分布

2回目加振後、着色砂を発掘することにより求めた各ケースの流動変位の深度分布を上流、中流、下流に分けて図-6に示す。ここで土槽側壁に設置した着色砂は側壁の影響がみられるため土槽中央部の着色砂の計測値を示してある。またこの上流、中流、下流は図-5に示したケース1、2の地表面形状において、それぞれ上流の平坦部、中流の残留傾斜部、下流の平坦部に位置が対応している。これによると初期の地表面勾配の大きいケース1、2については、残留傾斜部の流動変位の深度分布が直線的であるのに対して、上、下流の平坦部では下に凸の分布形状を示し、このことも1g場の実験結果と傾向が一致している。これに対して初期の地表面勾配の小さいケース3では、いずれの位置でも流動変位の深度分布は直線状を呈さず、下に凸の分布形状を示し他のケースとは異なっている。

(3) 考察

前述の1g場の実験結果によると、液状化層は流動により大変形し、流動量の大きい中流部で深度方向に一様に限界せん断歪に達して剛性が回復し、流動が停止する。またその両側の上、下流部では流動量が小さいため限界せん断歪に達していない。そのため流動変位の深度分布もこの残留傾斜部で直線的になり、上、下流の平坦部では曲線的になるとされている。また砂層の体積移動量の釣り合いから④式によりこの残留傾斜部長さが算定される。

上記の1g場の結果を踏まえ、まず地表面形状、流動変位の深度分布について考察する。図-6のケース1、2の2回目加振後における中流部の変位分布が直線的であることから、砂層が限界せん断歪に達していると考え、これを限界せん断歪と仮定し、①式から求められる地表面形状を図-5に併記して示すと実験結果とほぼ一致することが認められる。ケース3では変位分布が下に凸であることから、砂層が限界せん断歪に達しておらず、このため残留傾斜部ができないと判断される。ちなみに深部の変位分布から求められる歪を限界せん断歪と仮定して①式に当てはめると残留傾斜部長さが負となり、実験結果と符合している。さらにケース1、2を比較すると相対密度が大きい方ケース2の方が残留傾斜部長さが大きく、このことも1g

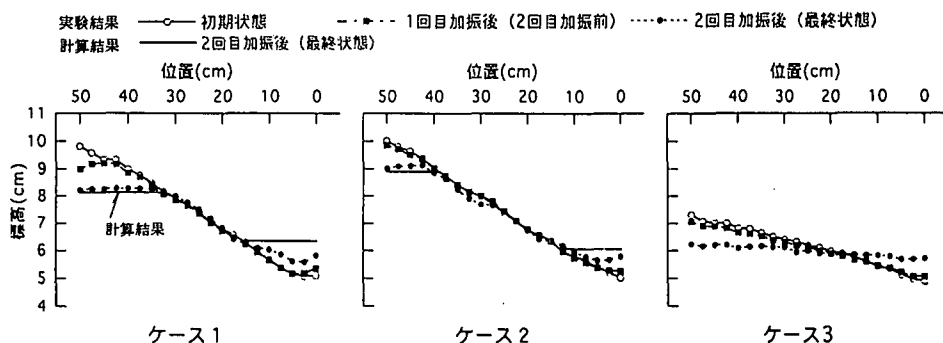


図-5 地表面形状

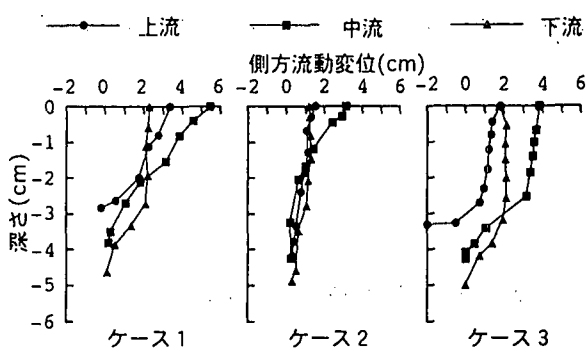


図-6 流動変位の深度分布

場の実験結果と符合している。このように1 g 場の実験結果と同様に砂層の体積移動量の釣り合いにより地表面形状を合理的に説明することができる。但し図-4に示したように、今回の実験では加振停止と同時に流動が停止するため、図-5に示したように、ケース1、2ともに加振時間が長くなると残留傾斜部長さが減少し加振継続時間に依存する結果となっている。限界せん断歪に関する1 g 場の実験結果との定量的な比較検討は今後の課題である。

次に加振停止後の過剰間隙水圧の消散速度については、図-4に示したように、どちらのケースも1回目加振に比べ2回目加振の方が大きいこと、またどちらの加振もケース3に比べてケース1の方が大きい結果になっている。これに関しては現在のところ明確な結論は得られていないが、1回目加振に比べて2回目加振の方が流動変位が大きく、液状化層のせん断歪が大きいこと、また同様にケース3に比べてケース1の方が流動変位が大きく、液状化層のせん断歪が大きいことを考慮すると、液状化層のせん断歪と過剰間隙水圧の消散速度との間には有意な関係があるものと考えられる。

4. あとがき

1 g 場の実験に見られた砂層が大きなせん断歪時に剛性が回復する現象について、動的遠心模型実験装置を用いて検討した結果、流動後の地表面形状、流動変位の深度分布等についてはよく似た結果になることを確認することができたが、現象が加振継続時間に依存するため、限界せん断歪の定量的な比較はできなかった。この点については引き続いて検討を進める予定である。

【参考文献】

- 1)土居、佐藤、浜田：液状化による側方流動地盤の挙動と物性に関する実験的研究、土木学会、第22回地震工学研究発表会、1993
- 2)HAMADA, M. et al.: A Consideration on Mechanism of Liquefaction-related Large Ground Displacement, 5th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, 1994