

## 地盤工学における模型実験の相似則と遠心模型実験

著者	飛田 哲男
雑誌名	理工学と技術 : 関西大学理工学会誌 = Engineering & technology
巻	23
ページ	11-17
発行年	2016-11-30
その他のタイトル	Scaling law and centrifuge modelling in geotechnical engineering
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10112/10712">http://hdl.handle.net/10112/10712</a>

## 地盤工学における模型実験の相似則と遠心模型実験

飛 田 哲 男\*

### Scaling law and centrifuge modelling in geotechnical engineering

Tetsuo TOBITA

#### 1. はじめに

地盤工学に関する問題に対するアプローチの仕方としては理論的手法、実験的手法、数値実験的手法、さらに実験的手法と数値実験的手法を組み合わせたハイブリッド実験法などがある。相似則は、このうち実験的手法において多く実施されている模型実験に対して、得られた結果から実物の挙動が評価できるように、必要な条件を設定する方法である。すなわち、実物との幾何学的相似だけでなく、相似則により導かれる物理変数間の関係を利用して、力学的相似条件をも満足する模型を用いて実験を行い、実物の挙動を評価しようとするものである。

相似則を用いた模型実験として古くから行われていたのは、実現現象の物理的メカニズムの把握と予測であった。しかし、近年では物理現象を支配する方程式を数値的に解き、実現現象を仮想的ではあるが実スケールで解析する数値実験的手法に対して、その実用性を確認するために利用される事例が多くなっている。この点からも、模型実験は今後ますます重要性を増してゆくものと思われる。

相似則とは、現象を支配する二つ以上の物理法則を定式化したときに、無次元量として現れる式の比（以下、 $\pi$ 値と呼ぶ）が実物と模型とで等しくなるよう物理変数間に課される制約のことである。したがって、模型実験を行うに当たっては、どの物理法則が支配的であるかを十分に検討する必要がある。例えば、有名な $\pi$ 値として、水理実験でよく用いられるレイノルズ

数は、慣性力と粘性力の比として得られ、フルード数は、慣性力と重力の比の平方根として得られる。

#### 2. 物理法則の定式化による相似則の導出例

ここでは1次元圧密を例に物理法則の定式化による相似則の導出を試みる。例えば、次のような問題が与えられたとする。

（問）質量 $W_m=1$ (kg)の粘土を全応力 $\sigma$ (kPa)で圧密したところ、1次圧密終了までに要した時間は2時間であった。この時、質量 $W_p=2$ (kg)の粘土の1次圧密終了までに要する時間は何時間か？以下、圧密現象に関する時間の相似則を導出して、この問題に答える。ただし、添え字のmは模型、pは実物の物理量を表すものとする。

圧密の物理的メカニズムは、圧縮による①間隙水の流出と、②土骨格の収縮で説明できる。これらが現象を支配する物理法則である。まず①については、圧密開始時からの時間を $t$ (s)、流速変化を $\Delta v$ (m/s)とすれば、圧密に伴う間隙水の流出量 $\Delta Q$ ( $m^3$ )は、

$$\Delta Q = A\Delta vt = Ak\Delta it = Ak(\Delta h/z)t = Ak(\Delta u/\gamma_w/z)t \quad (1)$$

ここで、 $A$ ( $m^2$ )は表面積、 $k$ (m/s)は透水係数、 $\Delta h$ (m)は水頭変化量、 $\Delta u$ (kPa)は過剰間隙水圧変化量、 $\gamma_w$ ( $kN/m^3$ )は水の単位体積重量である。

一方、②については、圧密により有効応力 $\sigma'$ (kPa)が増加すると土の間隙率 $n$ が減少するので、このとき減少する体積を $\Delta V$ ( $m^3$ )とすれば、

$$\Delta V = V\Delta n = -Vm_v\Delta\sigma' = -Vm_v(\Delta\sigma - \Delta u) = Vm_v\Delta u \quad (2)$$

ここで、 $V$ ( $m^3$ )は体積、 $m_v$ ( $m^2/kN$ )は体積圧縮係数、 $\Delta\sigma$ (kPa)は全応力の変化量であるが、いま全応力は

一定であるため、 $\Delta\sigma=0$ である。式(1)と(2)の比を取ることにより、 $\pi$ 値は以下のように求まる。

$$\pi = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{Ak(\Delta u/\gamma_w/z)t}{Vm_s\Delta u} = \frac{k}{m_s\gamma_w} \frac{t}{l^2} = \frac{c_v t}{l^2} \quad (3)$$

ここで $c_v$ ( $m^2/s$ )は圧密係数である。また、長さの単位で表現できる物理量については代表値 $l$ を用いるものとし、 $z=l$ 、面積を $A=l^2$ 、体積を $V=l^3$ とした。実物と模型とで $\pi$ 値を合わせる事により、実物の圧密現象を模型スケールで再現することができるので、圧密現象に関する時間の相似則は、長さを尺度に以下のように表現される。

$$\pi = \frac{(c_v)_p}{(l)_p^2} (t)_p = \frac{(c_v)_m}{(l)_m^2} (t)_m \Rightarrow (t)_p = \left( \frac{(l)_p}{(l)_m} \right)^2 (t)_m \quad (4)$$

ここで、材料は実物と模型とで同じなので $(c_v)_p=(c_v)_m$ とした。式(4)より、模型の時間を実物の時間に換算するには、模型の時間に長さの比の2乗を乗ずればよいことがわかる。

ここで先の問題に戻ると、重量比の関係より、

$$(W)_m/(W)_p = \left( (l)_m/(l)_p \right)^3 = 1/2 \Rightarrow (l)_m/(l)_p = 2^{-1/3} \quad (5)$$

したがって、

$$(t)_p = \left( (l)_p/(l)_m \right)^2 (t)_m = 2^{2/3} \times 2 \approx 3 \quad (\text{時間})$$

重さ $W_p=2\text{kg}$ の粘土の1次圧密終了までに要する時間は約3時間であることがわかる。

### 3. 支配方程式による相似則の導出例

ここでは、地盤工学における模型実験で用いられる相似則を、支配方程式から導出する方法について述べる。この方法を用いる利点は、導出が容易であるということである。その反面、現象を支配する物理法則が方程式の中にすでに組み込まれているため、それが陽には現れていないことに注意する必要がある。

ここでは、以下の3式を用いて、主要な相似則を導く。

力の釣合い式：

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + X_i = \rho \ddot{u}_i \quad (6)$$

ひずみの定義式：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

構成則：

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (8)$$

ここで $\sigma_{ij}$ は応力テンソル、 $x_i$ は座標系、 $\rho$ は密度、 $\ddot{u}_i$ は加速度であり、ドット(・)は時間微分を表す。またベクトル $X_i=(0, \rho g, 0)$ 、 $g$ は重力加速度である。 $\varepsilon_{ij}$ はひずみテンソル、 $C_{ijkl}$ は弾性定数を表す4階のテンソルである。

ここで式(6)―(8)における物理変数に以下の相似関係を仮定する。

$$\begin{aligned} (x_i)_p &= \lambda (x_i)_m, & (\sigma_{ij})_p &= \lambda \sigma (\sigma_{ij})_m, & (u_i)_p &= \lambda u (u_i)_m, \\ (\rho)_p &= \lambda \rho (\rho)_m, & (g)_p &= \lambda g (g)_m, & (\varepsilon_{ij})_p &= \lambda \varepsilon (\varepsilon_{ij})_m, \\ (t)_p &= \lambda_t (t)_m, & (C_{ijkl})_p &= \lambda_c (C_{ijkl})_m \end{aligned}$$

まず式(6)について、

$$\frac{\partial (\sigma_{ij})_p}{\partial (x_j)_p} + (X_i)_p = (\rho)_p \frac{\partial^2 (u_{ij})_p}{\partial (t)_p^2} \quad (9)$$

この式に相似関係を代入すると、

$$\frac{\lambda \sigma}{\lambda} \frac{\partial (\sigma_{ij})_m}{\partial (x_j)_m} + \lambda \rho \lambda_g (X_i)_m = \lambda \rho \frac{\lambda_u}{\lambda_t^2} (\rho)_m \frac{\partial^2 (u_{ij})_m}{\partial (t)_m^2} \quad (10)$$

模型に関する変数も式(6)を満たすので、式(10)の係数は、

$$\lambda \sigma / \lambda = \lambda \rho \lambda_g = \lambda \rho \lambda_u / \lambda_t^2 \quad (11)$$

でなければならない。式(11)の左の等式より、応力の相似則は、

$$\lambda \sigma = \lambda \lambda \rho \lambda_g \quad (12)$$

同様に、式(7)、(8)、(11)より、時間、変位、剛性に関する相似則は以下のように与えられる。

$$\lambda_t = (\lambda \lambda_g / \lambda_g)^{0.5}, \quad \lambda_u = \lambda \lambda_g, \quad \lambda_c = \lambda \lambda \rho \lambda_g / \lambda_g \quad (13)$$

1G場の模型実験において縮尺 $1/\eta$ の幾何学的に相似な模型を用いる場合には、長さの相似則は $\lambda=\mu$ (=実物/模型)であり、重力加速度については $\lambda_g=1$ である。また実物と同じ材料を用いるとすれば、密度 $\lambda_\rho=1$ となる。ここで、ひずみに関する相似則は $\lambda_\varepsilon=\mu^{0.5}$ とおいた場合、実現象の再現性が良いことが知られているので<sup>1, 2, 3)</sup>、 $\lambda_t=\mu^{0.75}$ 、 $\lambda_u=\mu^{1.5}$ 、 $\lambda_c=\mu^{0.5}$ 、 $\lambda_\sigma=\mu$ となる。ただし、1G場におけるひずみの相似則については、せん断波速度 $V_s$ を用いて

$$\lambda_\varepsilon = \mu / [(V_s)_p / (V_s)_m]^2 \quad (14)$$

のように表されるので<sup>1)</sup>、厳密には対象とするひずみ

レベルに応じて相似則を変更する必要がある。

次に遠心場の相似則を求める。例えば深さ1mの土層に100Gの遠心力を作用させたとき、土層底部には1G場の100倍の圧力が作用する。すなわち土層底部は100mの深さに等しい応力状態となっている。したがって、遠心加速度を $\eta$ とすれば、加速度の相似則は $\lambda_g=1/\eta$ となり、長さについては $\lambda_l=\eta$ となる。実物と同じ材料を用いるのであれば、密度の相似則は $\lambda_p=1$ となるので、式(12)より応力の相似則は $\lambda_\sigma=1$ である。したがって、ひずみの相似則も $\lambda_\epsilon=1$ となる。よって式(13)より $\lambda_f=\eta$ 、 $\lambda_u=\eta$ 、 $\lambda_c=1$ となる。表1に1G場と遠心場における模型実験に現れる主な物理量の相似則を示す。

表1 模型振動台実験で用いられる相似則

	1G場 $\mu=\text{実物}/\text{模型}$	遠心場 $\eta=\text{実物}/\text{模型}$
長さ	$\mu$	$\eta$
密度	1	1
時間	$\mu^{0.75}$	$\eta$
応力	$\mu$	1
間隙水圧	$\mu$	1
変位	$\mu^{1.5}$	$\eta$
速度	$\mu^{0.75}$	1
加速度	1	$1/\eta$
ひずみ	$\mu^{0.5}$	1
曲げモーメント	$\mu^{4.0}$	$\eta^{3.0}$
曲げ剛性	$\mu^{4.5}$	$\eta^{4.0}$

相似則の導出方法としては、Buckinghamの $\pi$ 定理による方法もあるが、これについては他書<sup>4)</sup>を参考にさせていただきたい。また模型実験と相似則に関する良書として江守ほか<sup>5)</sup>を、土質模型実験における相似則の優れた文献<sup>6)</sup>を挙げておくので適宜参照されたい。

#### 4. なぜ遠心力载荷装置が必要か

ここでは、そもそもなぜ地盤工学の模型実験には、遠心力载荷装置が必要なのかを述べ、その利点と限界について解説する。図1に、遠心力载荷装置の概要を示す。アームと呼ばれる部分が、電気モーターなどの動力により中心軸の周りに水平回転する。アームを高速で回転させると、その先端部の揺動デッキが遠心力で持ち上がる。この時、デッキに載せた模型は横向きになるが、遠心力が外向きに作用するので、模型は落ちることはない。ちょうど水の入ったバケツを手で持って、体ごとぐるぐる回ると同じことである。回

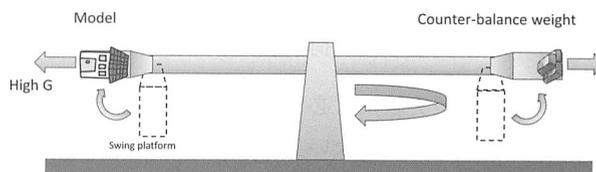


図1 ビーム型遠心力载荷装置の例

転速度が上がってくると、バケツは横向きになるが水はこぼれない。

遠心力载荷装置を使った実験では、遠心力の大きさを表すために重力加速度Gが単位として使われる。通常の遠心模型実験では20Gから100Gの遠心力場、つまり重力の20倍から100倍の遠心力を模型に作用させて実験することが多い。このように高い遠心力を模型に与える必要があるのは、土を使って実験するというところに深く関係している。地盤工学が対象とするのは、土でできた構造物や土と密接にかかわる構造物である。地盤と一言で言っても、そこには建物の基礎やトンネル、堤防、水道管や下水管など、人間の暮らしに欠かせないたくさんの構造物が関わっている。地盤工学では、このような構造物全体を研究対象にしている。では、なぜ土を使った実験では、高い遠心力を模型に与える必要があるのだろうか？土を細かく見ると、粒々(=粒状体)でできていることがわかる。乾燥した砂のような粒状体を手にとると、さらさらしていて、粒々どうしは簡単にくっついたり離れたりできる。しかし、その砂をギュッと握ると固くなることは経験的に知っている。このように、周りから押されると砂の塊は固くなる。この「周りから押される」ということを専門用語で「拘束圧を受ける」と言う。つまり、土は高い拘束圧を受けるほど強くなるのである。ここで自然の地盤を考えてみると、土は地中深くなるほど自分の重みで押されている、つまり、土は深いところほど強いのである。土を使った実験をするとき、このことは決定的に重要である。

地盤に関する模型実験を1G場で行う、つまり低い拘束圧下で行うということは、自動車の衝突実験をミニカーでやるようなものであって、いくらミニカーの壊れ方を調べても、本物の自動車の壊れ方はわからないのと同じことである。高い遠心力を地盤模型に与える必要がある理由は、土の拘束圧を高めなければ、実物の土の強さや応力とひずみの関係を再現できないためである。ただし、先に述べた1G場の相似則をうまく使って1G場での実験結果を実物換算し、合理的に解釈することは可能であり、そのような実験的研究も多くなされている。

## 5. 遠心力载荷模型実験の限界

いかなる模型実験にも必ず限界があり、実現象を忠実に再現できる訳ではない。遠心模型実験には、以下に示すような限界、つまり誤差の要因が知られている。(1)半径方向に変化する遠心加速度の影響、(2)土粒子の寸法効果、(3)コリオリ力、(4)ひずみ速度の影響である。(1)については次節で詳しく検討する。(2)は、土粒子の寸法が構造物の応答に及ぼす影響のことである。通常の遠心模型実験では、構造物模型は縮小するが、土は縮小することなく実物をそのまま用いるため、構造物模型の寸法と土粒子径の比が小さくなり、そのことで構造物と地盤の変形挙動が実物と異なる可能性がある。杭の実験では、杭の直径が土粒子の直径の数倍程度以上であればこの影響は小さいという報告もある。ただし、(3)と(4)については、ページ数の制約から割愛する。興味のある読者は参考文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

## 6. 半径方向に変化する遠心力の影響

ここでは、遠心模型実験における誤差の要因の一つである半径方向の遠心力場の影響について実験結果に基づき考察する。通常の重力場では、重力は深さ方向に一樣に作用すると考えてよい。つまり、地盤の鉛直応力は深さ方向に直線的に増加する。一方、遠心場では遠心力は  $r\omega^2$  で与えられる。ここで、 $r$  は半径、 $\omega (=v/r)$ 、 $v$  は速度) は回転角速度である。このため、模型地盤に作用する遠心力は、地点ごとにわずかではあるが異なり、鉛直応力の深さ方向分布は曲線を描く。この誤差を最小化するため、地表面から層厚の3分の1下がった地点で既定の縮尺に応じた遠心力を与えることが多い<sup>7)</sup>。また、地表面形状を回転半径に応じた円弧とすることもある<sup>7)</sup>。以下では、飽和傾斜地盤に対する遠心場模型振動台実験を行い、斜面の断面形状を半径方向の遠心場を考慮して「曲面」にした場合と、単純に「平面」とした場合の応答の違いを比較し、モデル化の妥当性について検討した結果<sup>9)</sup>を紹介する。

### 6.1 遠心模型実験

遠心模型実験は、京都大学防災研究所のビーム型遠心力载荷装置(半径2.5m)を用い44.4G場で行った。通常、遠心力により土層内の水面形状は円弧となるが、特に本装置では、アームの回転方向と土層の長辺が平行であるため、その影響が大きい。この影響を考察するため、地表面の断面形状が曲面の場合(図2(a))と平面の場合(図2(b))について、加振実験を行う。図2(b)に示すように模型地盤の地表面は5度傾斜し

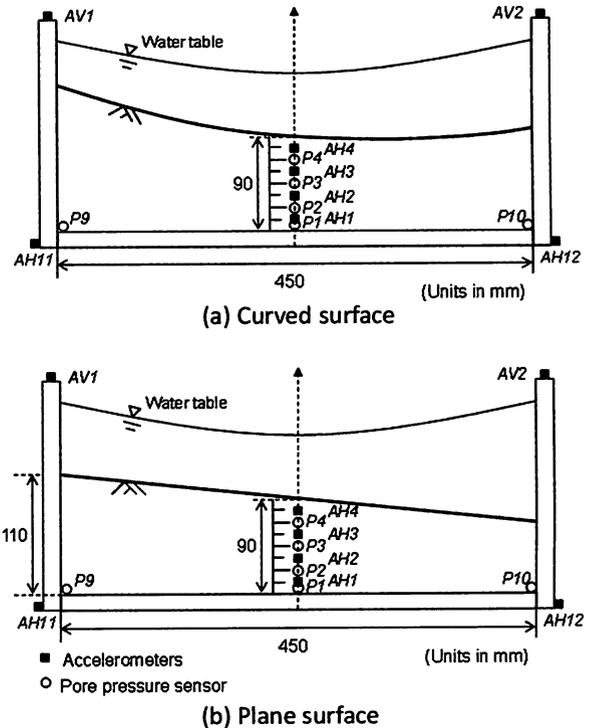


図2 実験模型断面<sup>2)</sup>: (a) 曲面モデル、(b) 平面モデル

ている。地盤材料は Ottawa F-65 sand ( $G_s=2.665$ ,  $D_{50}=0.203$ ) であり、相対密度65%に相当する密度  $1.652\text{kg/m}^3$  で模型地盤を作成した。使用したセンサーは、加速度計8個、水圧計6個である(図2)。模型地盤は、まず空中落下法で層厚110mmの水平成層地盤を作成し、次に所定の断面形状となるよう掃除機で砂を吸引した。曲面モデル(図2(a))の作成は次のように行った。まず半径2.5mの円弧を有する金型を、その凹部最下部が土層長軸方向の midpoint と一致するように土層上部に置いた。次にこの金型をその最下部(土層長軸の midpoint)を固定して5度回転させ固定する。その後、掃除機のパイプを金型の円弧に添わせ砂を吸引した。このように乾燥砂地盤を作成した後、土層を真空槽に入れ、空気を  $\text{CO}_2$  で置換したのち、脱気した粘性流体(目標粘性: 44.4cSt, 計測値: 曲面モデル 52.6cSt, 平面モデル 47.2cSt) を約12時間かけて地表面から滴下し飽和模型地盤を作成した。真空槽中で計測した飽和度<sup>9)</sup>は99.9%であった。入力加速度は、1Hzで前後にテーパーをかけた16波の正弦波である(図3(c)(f))。以下、計測値は原型換算値とする。

### 6.2 実験結果

加振実験は、表2に示す順序で Shake #1から #5まで行った<sup>8)</sup>。この中で Shake #2と #4の2ケースが、入力加速度振幅の最大値がそれぞれ0.15gと0.25gで比

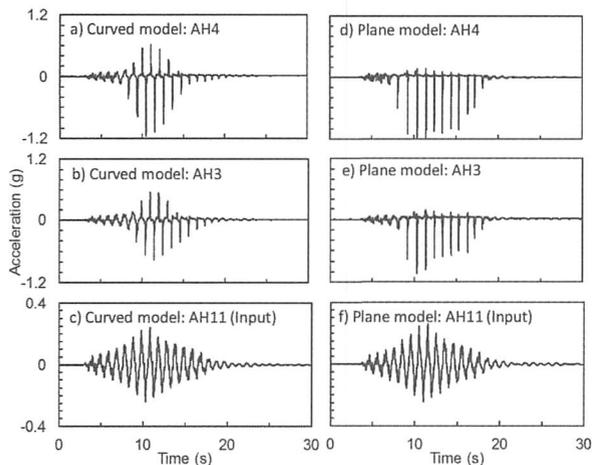


図3 加速度時刻歴：(a) 曲面モデル：AH4、(b) 同 AH3、(c) 同 AH11、(d) 平面モデル：AH4、(e) 同 AH3、(f) 同 AH11

表2 加振ケース<sup>2)</sup>

(a) 曲面モデル

Event Number	Date	Description	Achieved Base Acc. (g_prototype scale)
DPRI_01_1	2015/01/07	Measure surface markers	-
DPRI_01_2		Spin up centrifuge	-
DPRI_01_3		CPT	NA
DPRI_01_4		Shake #1 ramped sine 1H, 0.015g	0.010
DPRI_01_5		Shake #2 ramped sine 1H, 0.15g	0.148
DPRI_01_6		Spin down	-
DPRI_01_7		Measure surface markers	-
DPRI_01_8		Shake #3 ramped sine 1H, 0.015g	0.011
DPRI_01_9		Shake #4 ramped sine 1H, 0.25g	0.258
DPRI_01_10		Shake #5 ramped sine 1H, 0.015g	0.015
DPRI_01_11		Spin down	-
DPRI_01_12		Measure surface markers	-

(b) 平面モデル

Event Number	Date	Description	Achieved Base Acc. (g_prototype scale)
DPRI_02_1	2015/01/09	Measure surface markers	-
DPRI_02_2		Spin up centrifuge	-
DPRI_02_3		CPT	NA
DPRI_02_4		Shake #1 ramped sine 1H, 0.015g	0.010
DPRI_02_5		Shake #2 ramped sine 1H, 0.15g	0.149
DPRI_02_6		Spin down	-
DPRI_02_7		Measure surface markers	-
DPRI_02_8		Shake #3 ramped sine 1H, 0.015g	0.012
DPRI_02_9		Shake #4 ramped sine 1H, 0.25g	0.260
DPRI_02_10		Shake #5 ramped sine 1H, 0.015g	0.015
DPRI_02_11		Spin down	-
DPRI_02_12		Measure surface markers	-

較的大きなものである。以下では、紙面の都合上 Shake #4の結果についてのみ示す。なお、Shake #2の傾向は Shake #4と同様であった。

加速度時刻歴(図3(a-b),(d-e))より、サイクリックモビリティによるスパイクの出方に、断面形状の違いと推測される明らかな差が見られる。すなわち、加速度は斜面下向きを正としたので、いずれのモデルにおいても、斜面上向き(負)のスパイクが卓越している。これは、傾斜方向への側方流動により生じたせん断ひずみに起因する正のダイレイタンスーによるも

のである。しかし、曲面モデルでは、やや大きな斜面下向き(正)のスパイクも見られるのに対し、平面モデルでは斜面上方へのスパイク(負)が卓越している。このことは、後で述べるように原型換算したときの平面モデルの傾斜が、曲面モデルと比較して急であることを示唆している。

次に過剰間隙水圧時刻歴(図4)より、曲面モデル(同図(a))では、P2からP4で過剰間隙水圧の最大値が、同じ色の水平線で示す初期有効拘束圧より大きくなっていることが分かる。一方、平面モデル(同図(b))では、最大値はほぼ初期有効拘束圧に等しいか(P3, P4)、それ以下(P1, P2)となっている。水圧計は土層側面に張り付けたので、実験前後で位置は変化していない。また、加振による地盤の変形量は総じて小さく、いずれのモデルにおいても水圧計周辺の有効上載圧の変化量は小さいものと推測されることから、水圧計の初期位置に問題があったものと推察される。そこで過剰間隙水圧の最大値から水圧計の設置深度を逆算したところ、所定の深さの最大約2倍のところに設置されていることが推測された。

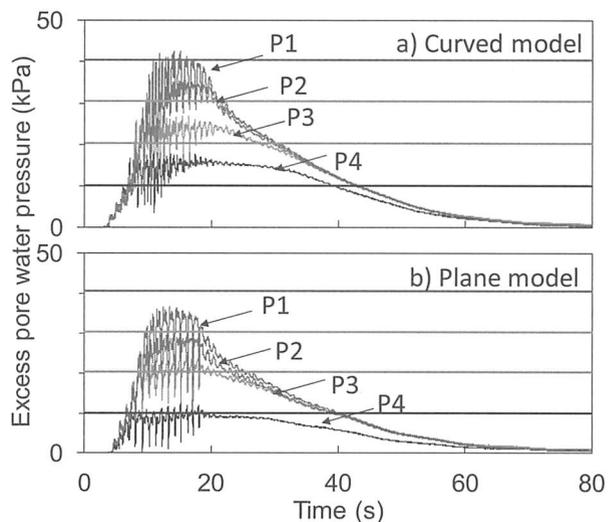


図4 過剰間隙水圧時刻歴、(a) 曲面モデル、(b) 平面モデル

図5に示すように、地表面に置いた1m間隔のマーカーの変位量は、曲面モデルと平面モデルとで、それぞれ最大約10cm、約30cm程度であった。ただし、いずれのモデルも側方流動方向は、最大傾斜方向ではなく、その方向と一定の角度をなす斜め下流方向であった。この原因は未解明であるが、何らかの原因で揺動デッキが正常に上昇していない可能性がある。

図6には、今回用いた装置の寸法に合わせ、遠心力の等ポテンシャル線を点線で、また水平位置0m(土層長辺の midpoint)で引いた等ポテンシャル線の接線が実

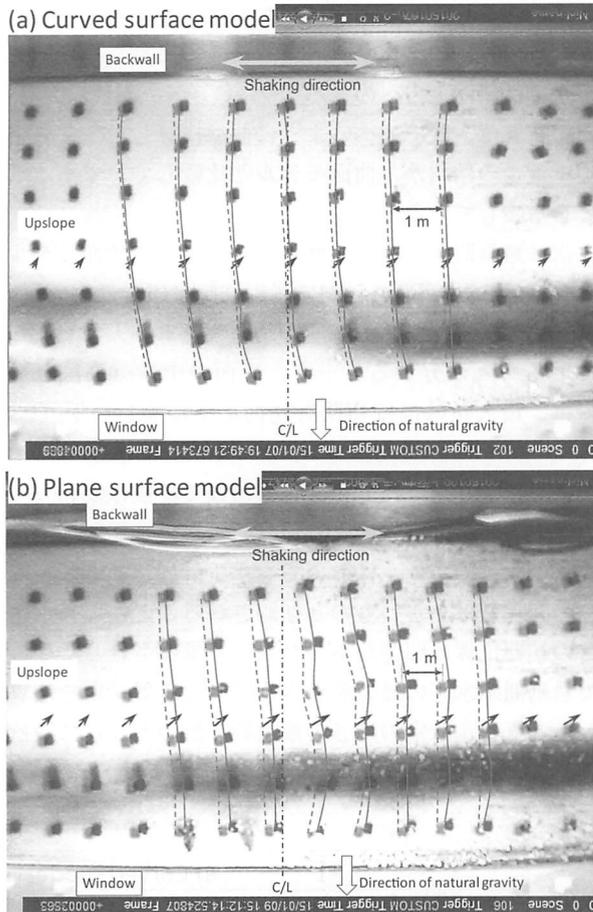


図5 Motion #4前後の地表面変位：(a) 曲面、(b) 平面

線で描いてある。同図には、白抜き丸印で実験時の地表面の断面形状（(a)曲面、(b)平面）を、黒丸で上記接線上に射影した断面形状が描いてある。ただし、図の縦横の目盛間隔は異なる。図6に黒丸で示す射影後の地表面の断面形状は、(a)曲面モデルの場合直線、(b)平面モデルの場合曲線を描いていることが分かる。また、等ポテンシャル線上で地表面に作用する半径方向の遠心力の大きさを比較すると、平面モデルでは下流に向かうほどその増加割合が大きいことが分かる。このことは、平面モデルで実験した場合、斜面の傾斜が下端に近づくほど急になっているのと同じ状態（図6(b)の黒丸）になっていることを意味している。

### 6.3 半径方向に変化する遠心力の影響に対するまとめ

飽和傾斜地盤に対する遠心場加振実験を行い、地表面の断面形状が加速度応答、過剰間隙水圧、側方流動に与える影響を考察した。断面形状が曲面の場合、斜面上下向きスパイクが出ること、平面モデルと比較して、側方流動量が小さいことが確認された。実験時の地表面形状を、等ポテンシャル線上に射影すると、平面モデルでは、斜面の傾斜が下端に近づくにつれ急

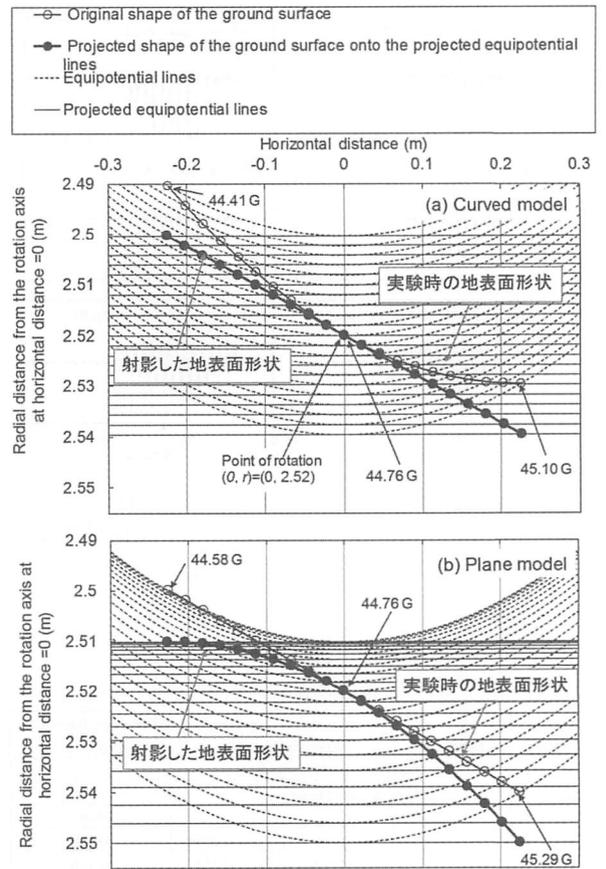


図6 遠心模型実験時の地表面形状（白抜き○）と射影した地表面形状（黒丸）の比較。(a) 曲面モデル、(b) 平面モデル。射影は、等ポテンシャル線（等遠心力線）の土層中点における接線に対し行った。

になっているのと同じ状態になっていることが分かった。以上より実験時の断面形状を曲面とする方がより合理的であることが示された。

## 7. まとめ

本稿では、まず地盤工学における模型実験の意義と例題を通じた相似則の適用例を示した。次に地盤工学における模型実験で用いられることの多い物理量について、1G場と遠心場の模型実験に対する相似則を導いた。さらに、遠心模型実験の意義とそれが必要な理由を述べ、その限界について半径方向の加速度の影響について検討した事例を紹介した。

### 〈謝辞〉

本研究は、科学研究費助成事業基盤研究(B)(26282103, 2014-2016)、並びに基盤研究(C)(25420502, 2013-2015)の助成を受けた。また、半径方向に変化する遠心力の影響に関する実験は、遠心力載荷模型実験と数値解析に関する国際プロジェクト(LEAP)<sup>8)</sup>

の一環として行ったものである。

#### 参考文献

- 1) Iai, S., Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, *Soils and Foundations*, Vol.29, No. 1, pp.105-118, 1989.
- 2) 香川崇章, 土構造物の模型振動実験における相似則, *土木学会論文報告集*, 第275号, 69-76, 1978.
- 3) 国生剛治, 岩楯敏広, 軟弱地盤の非線形振動特性についての模型振動実験と解析, *土木学会論文報告集*, 第285号, 57-67, 1979.
- 4) 例えば, Bridgman, P. W., 「次元解析論 (堀 武男訳)」, コロナ社, 1943.
- 5) 江守一郎・斉藤孝三・関本孝三:「模型実験の理論と応用」, 第3版, 技報堂出版, 2000.
- 6) 柴田徹, 太田秀樹, 土質模型実験における相似則, *土と基礎*, 土質工学会, 28(5), 9-14, 1980.
- 7) Madabhushi, G., *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*. CRC Press. Taylor & Francis Group ISBN: 978-0-415-66824-8, pp.292, 2014.
- 8) Kutter, B.L., Carey, T.J., Hashimoto, T., Zeghal, M., Abdoun, T., Kokkali, P., Madabhushi, G., Haigh, S., Hung, W.-Y., Lee, C.-J., Iai, S., Tobita, T., Zhou, Y.G. and Chen, Y., LEAP-GWU-2015 Experiment Specifications, Results, and Comparisons. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, In press.
- 9) Okamura, M. and Inoue, T., Preparation of fully saturated model ground, *Physical Modelling in Geotechnics - Springman, Laue & Seward (eds)*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-59288-8 1, pp. 147-152, 2010.