

研究解説

地盤工学における遠心力载荷実験

Centrifuge Test in Geotechnical Engineering

古関潤一*・龍岡文夫*

Junichi KOSEKI and Fumio TATSUOKA

小さな模型地盤内で実物大に相当する応力状態を再現するために、模型に遠心加速度を作用させることにより自重を増加させた状態で実験を行う遠心力载荷実験が、地盤工学の分野で近年盛んに利用されるようになってきた。この実験手法の原理と装置の構造、及びこれを用いた研究の動向について解説するとともに、砂地盤上の浅い基礎の支持力特性における粒径効果と、砂地盤の液化化問題における相似則の適用性に関する研究成果の一部を紹介する。

1. はじめに ー遠心力载荷実験の必要性ー

土の力学的特性は、土自身の自重に起因する拘束圧の影響を大きく受ける。縮尺模型を用いた通常の重力場における実験では、原地盤と同じような応力状態を再現することは難しい。一方、実物大の模型を用いれば、実際と同じ応力状態が当然得られるが、きわめて大規模な実験となるため、パラメトリックに数多くの実験を実施することが困難である。また、軟弱地盤の圧密沈下問題のように、実際の現象が数年～数十年のオーダーできわめてゆっくりと進行する場合には、時間的な制約も大きくなる。さらに、地震時の問題では、模型を振動台に載せて加振することが行われるが、実物大の模型を加振することは、実物がよほど小さくない限り不可能である。

これらに対して、模型地盤に遠心加速度を作用させて自重を増加させた状態で実験を行う遠心力载荷実験では、小さな模型内で実物大に相当する応力状態を再現することができる。また、圧密・浸透現象や、動的な現象が進行する時間が実際よりも短縮される。さらに、10年ほど前からは、遠心加速度を作用させた状態で加振実験を行うことも可能となった。これらの理由により、遠心力载荷実験が地盤工学の分野で近年盛んに利用されるようになってきた¹⁾。重力場における実物大の模型実験との実験条件の比較を表1にまとめて示す。

ここでは、遠心力载荷実験の原理と実験装置の構造、及び研究の動向について解説するとともに、筆者らが実施した研究成果の一部を紹介する。

2. 遠心力载荷実験の原理

実際と同じ材料を用いて作成した縮尺1/Nの模型において、材料の自重に起因する応力状態をプロトタイプ（重力場における実物大の模型）と同一にするためには、模型に“N”G（Gは重力加速度）の遠心加速度を作用させる必要がある。例えば図1に示すように、10Gの遠心加速度を作用させた場合には、厚さ10mのプロトタイプ地盤と同じ応力状態を厚さ1mの模型で再現することができる。なお、図中に示したように、動的な加振を行う場合にも、各部の慣性力に起因する応力状態をプロトタイプと同一にするために、加振加速度を重力下のN倍とする必要がある。

遠心力载荷実験における相似則^{1)~3)}を表2に示す。実際と同じ材料で、同一の応力状態であるから、生じるひずみも同一となる。なお、時間の縮尺は対象とする現象に

表1 重力場における実物大の模型実験との比較

比較項目	重力場	遠心力場
模型規模	実物大	縮尺1/10-1/100程度
実験の所要時間	数週間以上	数日程度 (圧密・浸透現象の所要時間は縮尺の2乗、動的現象は縮尺に比例して短縮)
地震時の挙動	再現はほとんど不可能	再現可能

*東京大学生産技術研究所 第5部

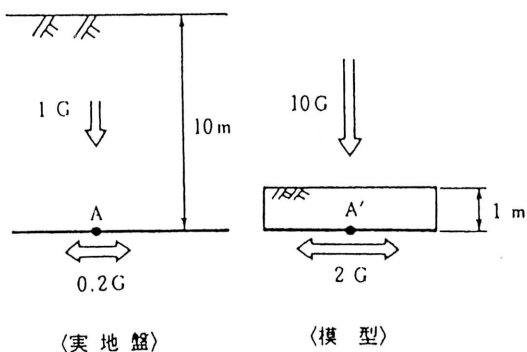


図1 遠心力载荷実験の原理

表2 遠心力载荷実験における相似則

項目	実物	模型
密度	1	1
長さ	1	1/N
加速度 (遠心加速度)	1	N
(加振加速度)	1	N
質量	1	1/N ³
力	1	1/N ²
応力	1	1
ひずみ	1	1
時間 (動的現象)	1	1/N
(浸透現象)	1	1/N ²

よって異なり、圧密・浸透現象はプロトタイプの N^2 倍の速さで、動的な現象は N 倍の速さで進行する。前者は浸透方程式より導かれ、後者は運動方程式より導かれたものである。例えば、圧密の終了までに1年かかるものは、縮尺 $1/10$ の遠心模型では、 $10/(10^2)$ 年=約4日で再現できる。また、実際の地震動の卓越振動数が 2 Hz 、継続時間が 30 秒である場合には、縮尺 $1/10$ の遠心模型では加振波形の卓越振動数を 20 Hz 、継続時間を 3 秒に短縮する必要がある。さらに、砂地盤の液状化問題のように、圧密・浸透現象と動的な現象が連成する場合には、何らかの方法で両者の時間の縮尺を一致させる必要があるが、一般には、間隙流体として水よりも粘性の高いシリコンオイルなどを用いて地盤の見かけの透水係数を $1/N$ に低下させることにより、圧密・浸透現象の時間の縮尺をプロトタイプの N 倍とすることが行われている。

なお、実際と同じ材料を用いて縮尺 $1/N$ の模型を作成することは、土粒子の大きさに着目した場合、実際の N 倍の大きさの土粒子を用いて模型を作成していることを意

味する(以下ではこの影響を「粒径効果」と称する)。例えば、平均粒径 1 mm の砂を用いて作成した模型地盤に $10G$ の遠心加速度を作用させて実験を行った場合、プロトタイプの地盤の平均粒径は 10 mm となり、もはや「砂地盤」とは呼べなくなる。本来は、実際の $1/N$ の粒径で応力~ひずみ関係が同一の材料を使用すべきであるが、上記の例において平均粒径が 0.1 mm で粒度分布が全く相似な砂があったとしても、粒子形状や破碎性などの微妙な相違により応力~ひずみ関係が同一とはならないため、現実問題としてはこのような実験は不可能である。

一般に、地盤が連続体としての挙動を示している限りは粒径効果を考慮する必要はないが、後述する砂地盤上基礎の支持力試験のように地盤内のある領域にひずみが集中して生じる(以下ではこのような領域を「せん断層」と称する)場合には、粒径効果のために遠心力载荷実験の結果が実際(重力場で同じ材料を用いて実物大の実験を行った結果)とは一致しないことに留意する必要がある。

なお、ロックフィル材のような大粒径の材料に対しては、遠心力载荷実験ではその $1/N$ の粒径の材料を用いることが可能になるが、この場合でも、先に述べた粒子形状や破碎性などの条件が実物とは異なっていることに留意する必要がある。

3. 実験装置の構造

実験装置の例を図2に示す⁴⁾。回転腕の先端に試料容器を吊り下げて、これらを一定速度で回転させることにより試料容器内の実験模型に遠心加速度を作用させる。

実験装置の構造としては、図2のように回転腕を用いるビーム型のほかに、図3¹⁾のようなドラム型のものもあるが、静止時に模型に作用する重力加速度の方向と回転時に模型に作用する遠心加速度の方向が異なる短所があるため、最近の大型の実験装置では全てビーム型が用いられている。

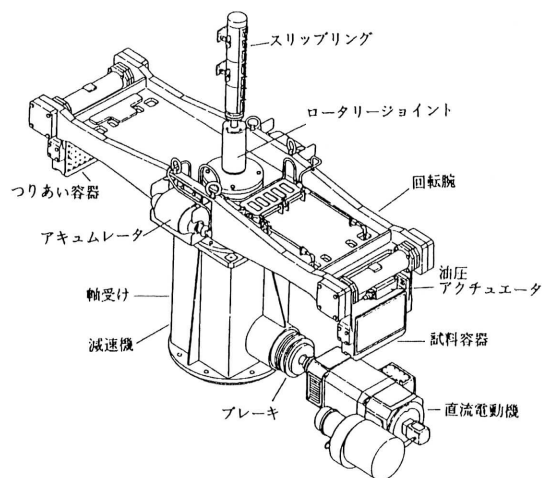
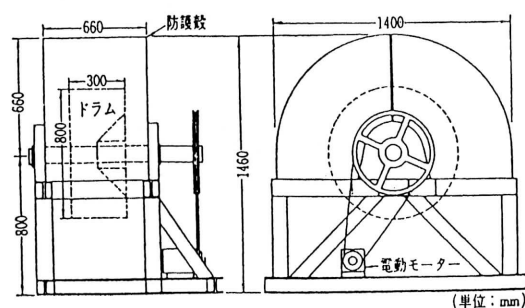
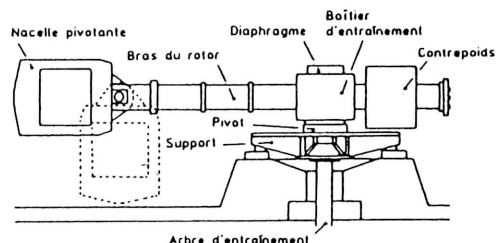


図2 遠心力载荷実験装置の例⁴⁾

図3 ドラム型の実験装置の例¹⁾図4 プラットホームのある実験装置の例¹⁰⁾

また、試料容器の支持方法としては、図2に示したように直接吊り下げる方式よりも図4¹⁰⁾のようにプラットホーム上に試料容器を搭載する方式のほうが試料容器の交換等が柔軟に行えるため、ほとんどの大型装置ではプラットホーム方式が採用されている。さらに、図2では試料容器の長手方向が回転方向と一致しているが、この場合には実際の水平地盤に相当する模型地盤としてその位置での回転半径に応じた曲面状の地盤を作成する必要があるため、プラットホームの広い大型装置では試料容器の長手方向を回転方向に対して垂直にして、回転半径の影響を小さくすることが行われている。なお、回転半径が有限であることは、このような模型形状の問題に加えて、遠心加速度の分布が半径方向に不均一となる原因にもなるが、これらの影響を低減させるためには装置の回転半径をできる限り大きくする必要がある。

計測装置として、変位計、水圧計、土圧計、ひずみゲージなどの計測器が実験模型に設置され、電気的な計測・制御信号はスリップリングを介して伝達される。また、実験模型に水を補給したり、あるいは動力源として空気圧、流体圧を供給するために、ロータリージョイントが用いられる。さらに、回転に同調させたストロボとカメラを用いて試料容器側面の状態を撮影したり、高速度カメラまたはVTRを用いて加振時の模型の状況を連続的に撮影することが行われている。

4. 遠心力載荷実験を用いた研究の動向

各国の遠心力載荷実験装置の導入状況が、文献5), 6)にまとめられている。日本には20台前後の装置があり、同程

度の台数を保有する米国と並んで世界的にも突出した存在となっている。特に、日本では民間の研究機関の保有台数が多いことが特徴的である。

研究成果の発表の場として、地盤工学における遠心力載荷実験の利用に関する国際会議が、1984年に東京⁷⁾、英国のマンチェスター⁸⁾、米国のデビス⁹⁾でたて続けに開かれた。その後、国際土質基礎工学会の賛助のもとで設立された技術委員会の主催となり、1988年にCENTRIFUGE88¹⁰⁾がフランスのパリで、第2回が1991年に米国のボールダーでCENTRIFUGE91¹¹⁾として、第3回が1994年にシンガポールでCENTRIFUGE94¹²⁾として開催された。論文数は会議毎に増えつつあり、1984年の東京の会議では18編だったものが、最近のCENTRIFUGE94では128編まで増加した。

このほかに、1993年に米国のデビスで開催された液状化解析手法の適用性を比較検討するシンポジウム¹³⁾では、遠心力場で加振を行った数多くの実験結果がブライントテストとして報告された。

1984 (東京及びマンチェスター)、1988、1991、1994年の各国際会議における論文数のテーマ別動向が、文献6)にまとめられている。これによれば、論文数が多く、かつ増加傾向にあるテーマとして、地盤と構造物の地震時挙動を主とした動的問題、地盤内の物質 (例えば汚染物質) の拡散・移動現象に関する地盤環境問題、深い基礎と地盤の相互作用問題、及び盛土とダム の安定問題が挙げられている。また、論文数は少ないが、増加傾向にある新規テーマとして、トンネル・山留めなどの掘削問題と自然斜面・切土の斜面安定問題が挙げられている。また、開発が進められている新しい実験手法として、以下の技術が挙げられている。

- ・遠心場での盛土、掘削、地盤改良工事、原位置試験 (コーン貫入試験、ベーンせん断試験など) の再現
- ・実際の地盤条件に近い互層地盤、過圧密地盤などの作成
- ・計測器の小型化、高精度化

5. 砂地盤上の浅い基礎における粒径効果の研究

5.1 研究目的

粒径効果が地盤の支持力特性に及ぼす影響を明らかにするために、3種類の砂を用いて浅い基礎の支持力実験を重力場及び遠心力場で行った。

5.2 実験方法

1991年以前に行った豊浦砂を用いた実験の結果は別途報告した¹⁴⁾。その後、1994年に平均粒径0.62 mmのS.L.B.砂と平均粒径1.73 mmの姫礫を地盤材料として用いて、それぞれについて表3に示す各9ケースの実験を行った¹⁵⁾。

重力場では $40^W \times 183^L \times 60^H$ (cm)と $25^W \times 60^L \times 30^H$ (cm)

表3 支持力実験の実験ケース

ケース	基礎幅 B ₀ (cm)	加速度レベル n(G)	備考
1	0.5	1.0	重力場
2	1.0		
3	2.5		
4	5.0		
5	10.0		
6	2.0	5.0	遠心力場
7		11.5	
8		25.0	
9		50.0	

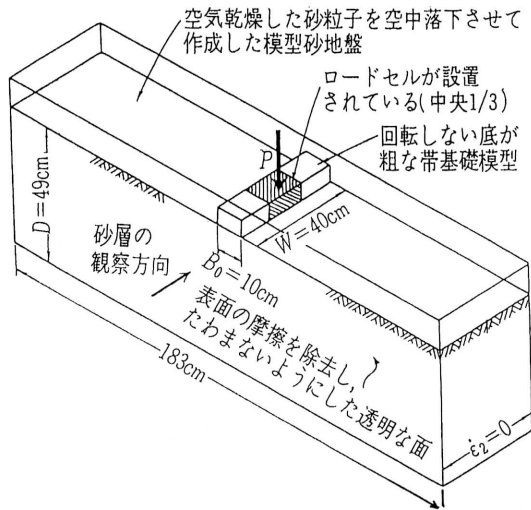


図5 支持力実験の概要

の2種類の土槽を用いて、基礎幅 B₀ を変化させた実験を行った。基礎幅が10 cm の場合の実験の概要を図5に示す。遠心力場では10^W×50^L×30^H(cm)の土槽を用いて、一定の基礎幅で遠心加速度 n (G) を変化させた実験を行った。

5.3 実験結果及び考察

S.L.B.砂を用いた場合の帯基礎模型の荷重沈下曲線を、重力場と遠心力場のそれぞれについて図6及び図7に示す。鉛直荷重は基礎底面の平均直応力 q を次式により正規化した基礎応力度 N として表示しており、N の最大値が支持力係数 N_γ に相当する。また、沈下量は基礎幅 B₀ で正規化して示した。それぞれの図より、荷重沈下特性は基礎幅と加速度レベルの影響を大きく受けることがわかる。

$$N = \frac{2q}{\gamma \cdot B_0 \cdot n}$$

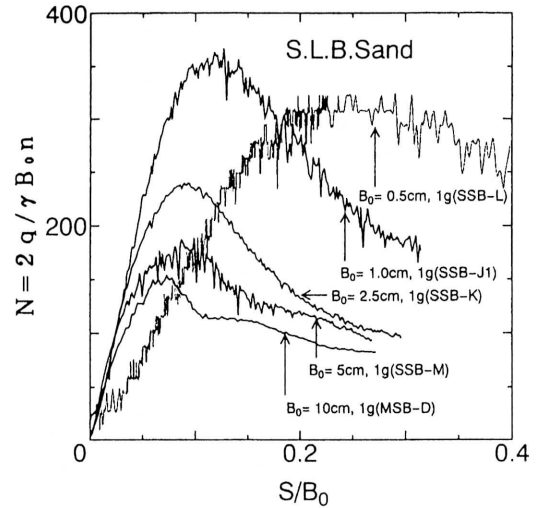


図6 重力場における帯基礎模型の荷重沈下曲線 (S.L.B.砂)

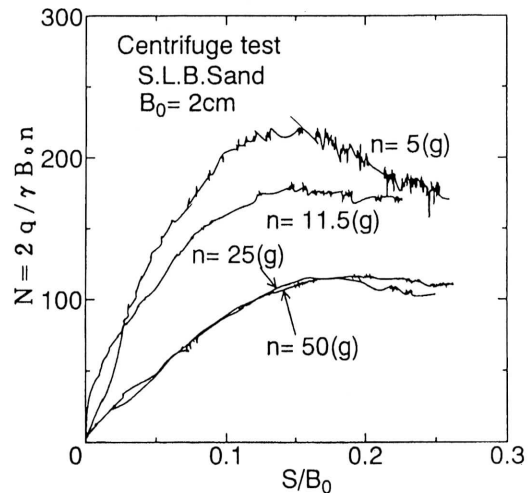


図7 遠心力場における帯基礎模型の荷重沈下曲線 (S.L.B.砂)

ここに、γ：重力場における地盤の単位体積重量である。

S.L.B.砂を用いた場合の支持力係数 N_γ と換算基礎幅 B (=B₀・n) の関係を図8に示す。図7の場合のように同一の B₀ で n が増加するために N~S/B₀ 関係が変化するのを圧力効果と呼ぶ。図8での曲線 A の N_γ~B 関係は、N_γ に関する圧力レベル効果を表す。一方、図6の場合のように、同一の n (この場合は n=1) で、B₀ の増加により N~S/B₀ 関係が変化するのを伝統的に寸法効果 (scale effect) と呼んでいる。図8での曲線 B の N_γ~B 関係が N_γ に関する寸法効果を表す。

いずれにせよ、B が大きくなると N_γ が低下するが、B = 10 cm では遠心力場での実験のほうが重力場 (n = 1) の実験よりも N_γ が大きかった。この差は、同一の B での

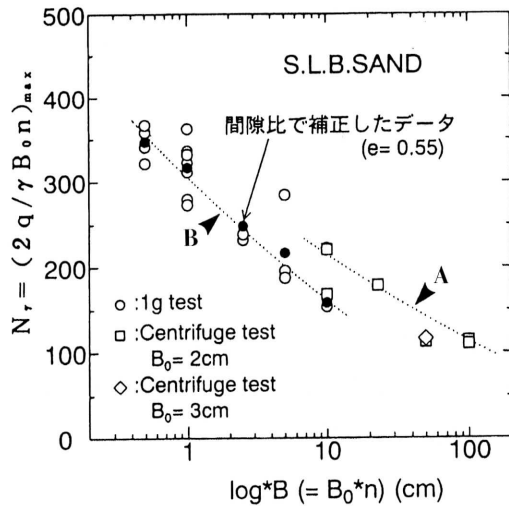


図8 支持力係数と換算基礎幅の関係 (S.L.B. 砂)

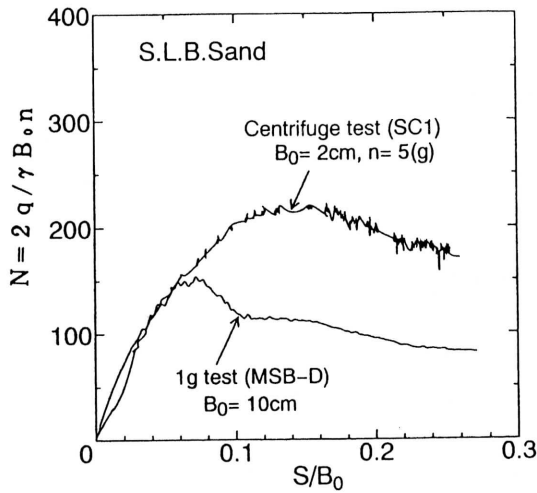


図9 換算基礎幅が同じ場合の荷重沈下曲線 (S.L.B. 砂)

粒子径の相違によるものであるから、粒径効果と呼ぶことができる。図8の曲線AとBでの N_r の差が粒径効果によるものである。B=10cmでの荷重沈下曲線の比較を図9に示す。粒径効果は、ピーク荷重の大きさとその後の挙動の違いとして現れた。このような粒径効果は、B/粒径の比が大きい程大きく現れる傾向にあるようである。すなわち、図10(前掲文献14)の図9)は、豊浦砂(平均粒径0.162mm)でのB=23cmとB=50cmにおける重力場の実験と遠心力場の実験の比較であるが、この場合のほうが両者の差が大きいことがわかる。このような粒径効果は、ピーク荷重付近から進行的に生成される地盤内のせん断層の厚さが土粒子の大きさに比例し、従ってせん断層の発達仕方、すなわち地盤の破壊の進行の仕方が土粒子の大きさによって変化することに起因すると考えている。すなわち、 B_0 に比して土粒子が小さいほど、潜在的破壊面(すべり面)の発達がより進行的になり、その面に沿ってピーク

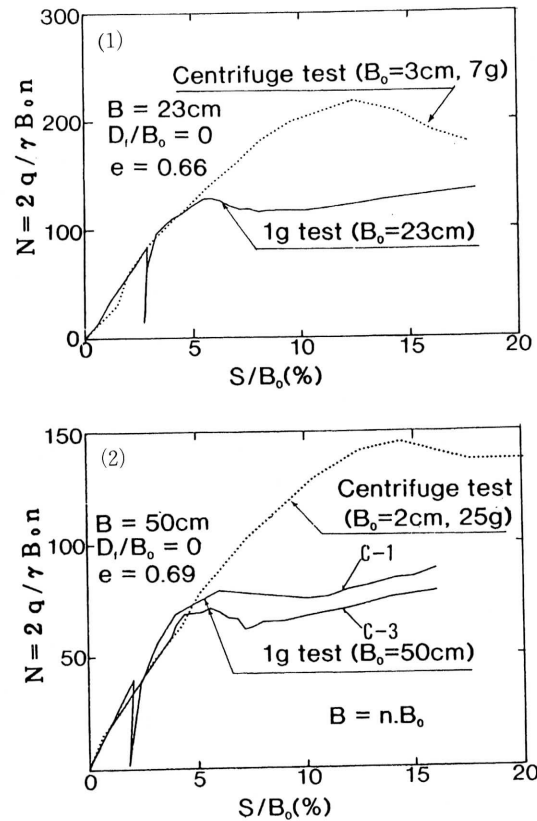


図10 換算基礎幅が同じ場合の荷重沈下曲線¹⁴⁾(豊浦砂)

- (1) 換算基礎幅23cm
- (2) 換算基礎幅50cm

ク強度が同時に発揮されない程度が高くなるためであると考えている。一方、図7に示した圧力レベル効果は、拘束圧の増加に応じて地盤の圧縮性と変形性が増加し、さらにそれによって地盤の破壊の進行性の程度が増加し、加えてせん断抵抗角(内部摩擦角) ϕ が低下することに起因すると考えている。図6に示した寸法効果は、このような粒径効果と圧力レベル効果の和として説明することができる。

3種類の砂の正規化した支持力係数と平均粒径の関係を図11に示す。実験で求めた支持力係数 N_r は、地盤を等方完全塑性体として仮定して破壊の進行性を考慮せずに算定した古典解 $(N_r)_{theory}$ で正規化し、平均粒径 D_{50} は基礎幅 B_0 で正規化した。この古典解 $(N_r)_{theory}$ は、最小主応力 σ_3 が(qの最大値/10)の大きさのときの、粒子の堆積面方向と最大主応力 σ_1 の方向が直交している通常の平面ひずみ圧縮試験で求めた内部摩擦角 ϕ を用いて求めている。基礎幅の同じデータを直線で結んで表示した。データのばらつきがあるが、正規化した平均粒径が大きくなると正規化した支持力も大きくなる傾向があることがわかる。 D_{50}/B_0 が 50×10^{-3} 程度以下のとき、支持力の実験値が古典解よりも小さくなるのは、古典解では地盤の強度の異方性と破壊の進行性を考慮していないことにより説明できる。一

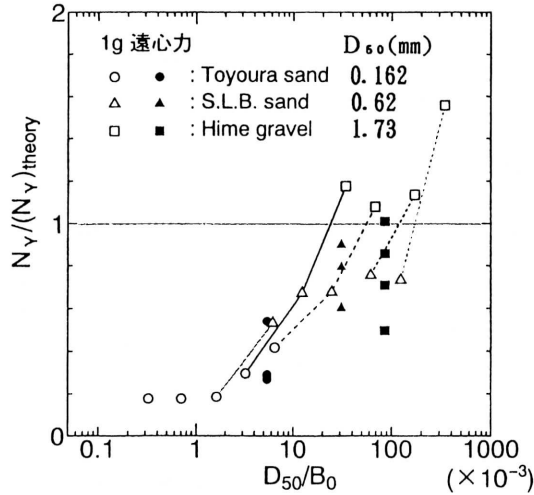


図11 正規化した支持力係数と平均粒径の関係

方、 D_{50}/B_0 が 50×10^{-3} 程度以上になると実験値のほうが古典解よりも大きくなるのは、実験において古典解で想定しているような明確なせん断層（すべり面）を伴った破壊メカニズムが形成されなかったことに原因があると考えている。すなわち、この場合は、強度の異方性と破壊の進行性の影響を考えないことにより支持力係数 $(N_\gamma)_{theory}$ を過大評価する影響よりも、せん断層による破壊メカニズムが形成されないことにより実際の N_γ が増加する影響が大きくなったのであろう。

6. 砂地盤の液状化に関する相似則の適用性の研究

6.1 研究目的

遠心力载荷実験において砂地盤の液状化問題を取り扱う場合の相似則の適用性を明らかにするために、地中構造物模型を埋設した飽和砂地盤の水平加振実験を、重力場と遠心力場においてほぼ同一の条件のもとで実施した¹⁶⁾。

6.2 実験方法

重力場の実験は、 $100^W \times 400^L \times 200^H$ (cm)の土槽を用いて行った。実験模型の断面を計測器の配置とあわせて図12に示す。遠心力場の実験は、これを縮尺1/20（遠心加速度20G）でモデル化して計3ケース行った。

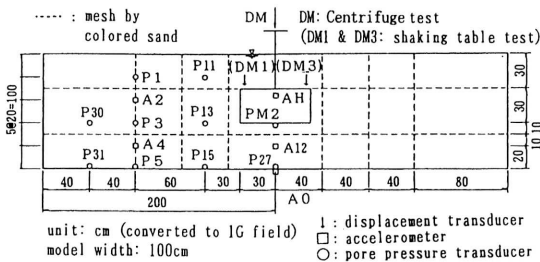


図12 液状化実験に用いた模型の断面と計測器の配置

表4 液状化実験の実験ケース

ケース	間隙流体の粘性	加速度レベル n(G)	備考
0	1 cs(水)	1.0	重力場
1	30cs*	20.0	遠心力場
2	30cs		
3	50cs		

* 模型地盤の底面が、金網を介して厚さ15cm（重力場の3mに相当）の締め固め層に接しており、過剰間隙圧が消散しやすかった。

砂地盤は豊浦砂を用いて作成し、見かけの比重が約0.8となるように重量調整したアクリル製の地中構造物模型を埋設した。重力場の実験では水を用いて、遠心力場での実験では水の30倍または50倍の粘性を有するシリコンオイルを用いて砂地盤を飽和させた。加振は、対応する周波数（重力場では5 Hz、遠心力場では100 Hz）の正弦波20波を用いて、加速度振幅を大きくしながら数回実施した。これらの実験条件をまとめて表4に示す。

6.3 実験結果及び考察

以下では、遠心力場の実験における測定値を重力場に換算して比較を行う。

地中構造物模型の周辺地盤の変形状況の例を図13に示す。重力場と遠心力場のいずれにおいても、液状化した周辺地盤のまわり込みを伴う形で構造物の浮上がりが生じた。構造物の浮上がり量と地盤中の過剰間隙圧の経時変化の例を図14に示す。構造物の浮上がりは加振中に進行し、加振終了後は過剰間隙圧の消散とともに若干沈下する傾向がいずれの実験においても見られた。これらの図では、遠心力場の実験の代表例としてケース3の結果を示したが、他のケースの結果も定性的には同様であった。

なお、図14では、過剰間隙圧の消散速度は遠心力場の実験ケース3のほうが重力場の実験よりも大きかった。図示

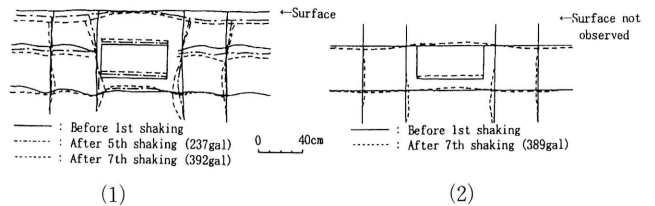


図13 地中構造物模型の周辺地盤の変形状況の例
(1) 遠心力場（ケース3）
(2) 重力場

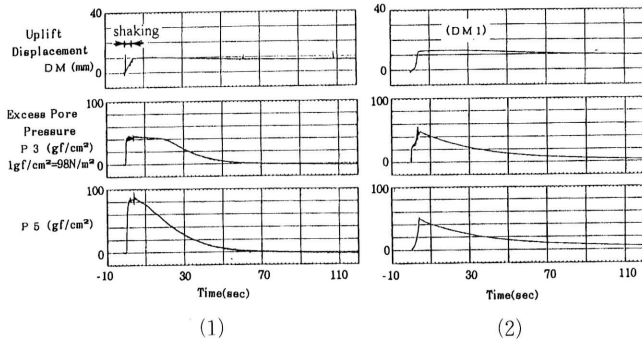


図14 構造物の浮上がり量と地盤中の過剰間隙圧の経時変化の例
 (1) 遠心力場 (ケース 3, 237 gal 加振時)
 (2) 重力場 (218 gal 加振時)

してはいるが、間隙流体の粘性が小さいケース 1 及び 2 では、ケース 3 よりもさらに過剰間隙圧の消散がはやく進行した。重力場の透水試験¹⁷⁾ではシリコンオイルの粘性を水の30倍とすると透水係数が約1/20になったことから、これを用いることによって20Gの遠心力場での液状化試験の相似則が満足されることを事前には予想していたが、実際には粘性を水の50倍まで高めても圧密・浸透現象の一つである過剰間隙水圧の消散速度が対応しないことがわかった。この点について今後も検討を続ける必要がある。

水平地盤部と地中構造物模型の底面における過剰間隙圧の最大値と加振加速度の関係を図15及び図16に示す。加振加速度レベルが小さい場合には、遠心力場の実験のほうが重力場よりも過剰間隙圧が大きかった。この理由として、

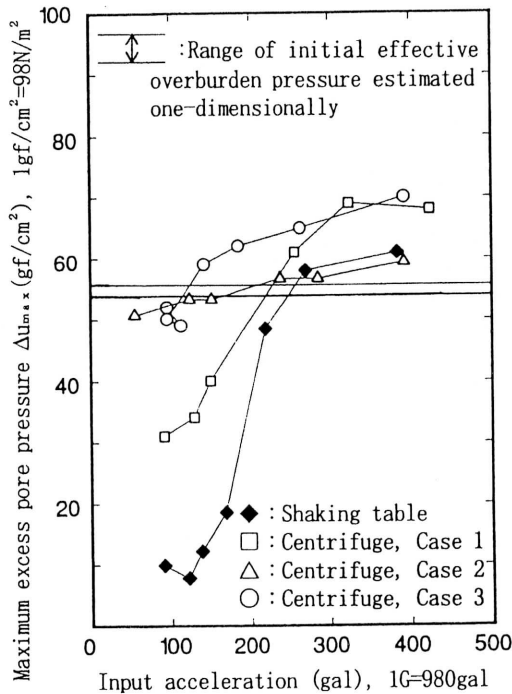


図15 水平地盤部の過剰間隙圧と加振加速度の関係

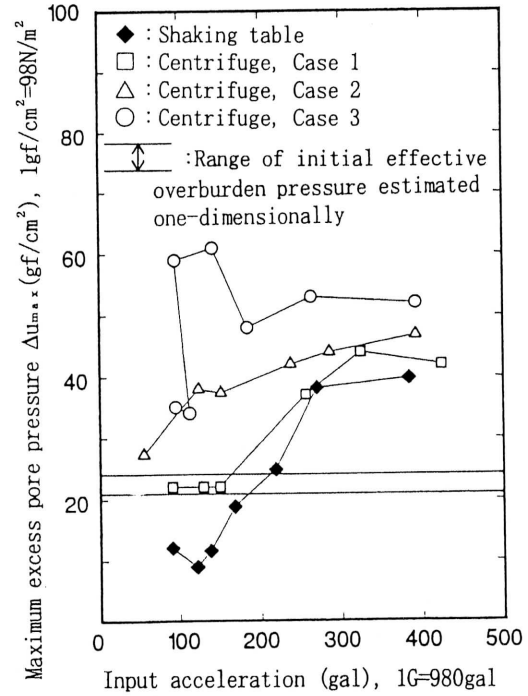


図16 地中構造物模型の底面の過剰間隙圧と加振加速度の関係

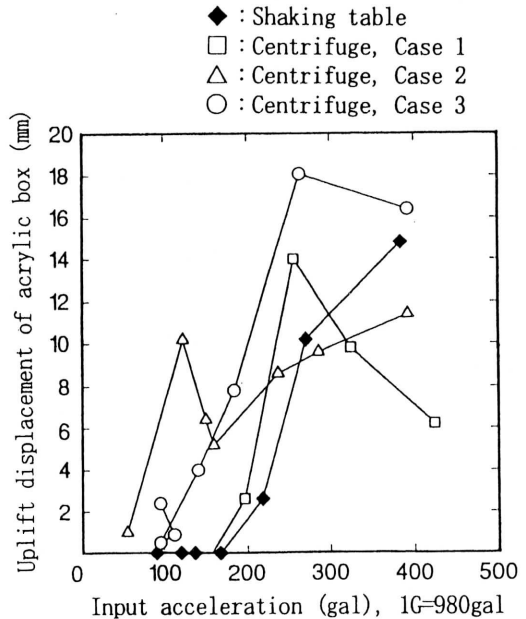


図17 地中構造物模型の浮上がり量と加振加速度の関係

遠心力場の実験では模型全体に負圧を作用させた状態で地盤を飽和させたために、重力場の実験よりも飽和度が高かったことが考えられる。また、極めて高い周波数で加振を行う遠心力場の実験では、間隙流体の種類と粘性が地盤の液状化強度に直接的な影響を及ぼしている可能性も考えられる。

地中構造物模型の加振毎の最終浮上がり量と加振加速度の関係を図17に示す。加振加速度レベルが小さい場合には、遠心力場の実験のほうが重力場よりも浮上がり量が大きかった。これは、前述した地盤中の過剰間隙圧の発生量の違いに起因しているものと考えられる。遠心力場の実験ではケース1の浮上がり量が最も小さいが、これは、図15と図16でケース1の過剰間隙圧が最も小さいこと、及びケース1は過剰間隙圧が最も消散しやすい模型条件であったこと(表4参照)と対応する。

7. ま と め

遠心力載荷実験の利点をまとめると以下のようになる。

- 1) 小さな模型地盤内で実物大に相当する応力状態を再現することができる。
- 2) 圧密・浸透現象を取り扱う場合には、実験時間が実物大よりもはるかに短縮される。
- 3) 実物大に相当する加振実験が可能となる。

このため、以下のテーマでの研究事例が増えつつある。

- 1) 地盤と構造物の動的問題
- 2) 地盤内物質の拡散・移動現象に関する地盤環境問題
- 3) 土構造物と斜面の安定問題
- 4) 深い基礎と地盤の相互作用問題
- 5) 地盤の掘削問題

ただし、この実験手法を利用するにあたっては、以下の点に留意する必要がある。

- 1) 地盤内にせん断層が発生すると粒径効果の影響が現れ、例えば砂地盤の極限支持力は遠心力載荷実験では過大評価される。
- 2) 動的現象と圧密・浸透現象が連成する場合には、時間の縮尺を一致させるために間隙流体の粘性を高めるなどの工夫が必要である。このとき、液状化強度などの地盤特性がその影響を直接的に受けている可能性が考えられ、今後の検討課題として残されている。

(1995年6月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 木村孟ほか：講座 遠心模型実験，土と基礎，Vol. 35, No.11, 1987. ~Vol. 36, No. 9, 1988.
- 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，pp. 69-77, 1978.
- 3) Scott, R. F.: Summary of Specialty Session 7-Modeling, Proc. of Geotechnical Engineering Division Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 1417-1424, 1978.
- 4) 古賀泰之，谷口栄一，古関潤一，森下義：新しく導入した動的遠心模型実験装置，土木技術資料，Vol. 30, No. 5, pp. 50-54, 1988.
- 5) Craig, W. H., James, R. G. and Schofield, A. N. (eds.): Centrifuges in Soil Mechanics, Balkema, 1988.
- 6) 川島一彦ほか：遠心力載荷装置を用いた実験の現状と将来，土木研究所資料第3339号，1995.
- 7) Kimura, T. (ed.): Geotechnical Centrifuge Model Testing, Proc. of Int. Sym. on Geotechnical Centrifuge Model Testing, Tokyo, 1984.
- 8) Craig, W. H. (ed.): Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design, Proc. of Sym. on the Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design, Manchester, 1984.
- 9) University of California: Recent Advances in Geotechnical Centrifuge Modeling, Proc. of Sym. on Recent Advances in Geotechnical Centrifuge Modeling, Davis, California, 1984.
- 10) Corte, J. F. (ed.): Centrifuge 88, Proc. of Int. Conf. on Geotechnical Centrifuge Modelling, Paris, 1988.
- 11) Ko, H. Y. and McLean, F. G. (eds.): Centrifuge 91, Proc. of Int. Conf. Centrifuge 1991, Boulder, Colorado, 1991.
- 12) Leung, C. F., Lee, F. H. and Tan, T. S. (eds.): Centrifuge 94, Proc. of Int. Conf. Centrifuge 94, Singapore, 1994.
- 13) Arulanandan, K. and Scott, R. F. (eds.): Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Proc. of Int. Conf. on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis, California, 1993.
- 14) 龍岡文夫，田中忠次，岡原美知夫，Siddiquee, M.S.A.: 模型実験・材料実験・数値解析による砂地盤上の帯基礎の支持力の研究，土と基礎，Vol. 40, No. 5, pp. 11-16, 1992.
- 15) 後藤正司：砂地盤上の基礎の支持力における粒子径効果について，東京大学修士論文，1995.
- 16) Koseki, J., Takahashi, A., Hayashi, Y. and Matsuo, O.: Comparison of Centrifuge and Shaking Table Tests on Liquefaction Induced Damage, Proc. of 1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, 1995 (to be printed).
- 17) 稲富隆昌，風間基樹，野田節男，土田肇：港湾技術研究所における遠心力載荷模型振動実験，天然資源の開発利用に関する日米会議，耐風・耐震構造専門部会第21回合同部会，1989.