

◆ 特集：動的実験施設を活用した研究開発 ◆

土工構造物・地中構造物の動的遠心模型実験

佐々木哲也* 田村敬一** 岡村未対***

1. はじめに

遠心力载荷試験装置は、模型地盤に遠心加速度を作用させて自重に起因する拘束圧を増加させることにより、小さな模型内に実物大に相当する応力状態を再現することができる装置である。また、加振装置を有し、遠心力を作用させた状態で動的な加振が可能な動的遠心力载荷試験装置もある。小さな模型を用いて、実物相当の挙動を再現することが可能であることから、遠心模型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い^{1),2),3)}。本報告は、遠心模型実験の原理概要を述べるとともに、動的遠心力载荷試験装置を用いた実験例を紹介する。

2. 遠心模型実験の原理

土の強度や変形特性は、鋼材などの他の土木材料と異なり、土自身の自重に起因する拘束圧に強く依存する。図-1は同じ材料および密度の供試体を用いて異なる拘束圧のもとで実施された圧密排水三軸圧縮試験結果の例である。拘束圧の違いにより応力～ひずみ関係は大きく異なり、また、体積ひずみに着目すると、低拘束圧のもとでは膨張的な挙動を示すのに対し、高拘束圧のもとでは圧縮的な挙動を示すことがわかる。このように、同じ材料、密度の土でも拘束圧によりその力学挙動は大きく異なることから、重力場で縮尺だけを変えた模型を用いた実験では、現地盤と同じような応力状態を再現することができないため、実物と同等の結果を得ることは期待できない。しかし、遠心模型実験では、縮尺模型に遠心加速度を与え、土の自重に起因する拘束圧を実物大と同じにすることにより、小型模型を用いて実物に近い挙動を再現させることが可能となる。

図-2に示すように、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

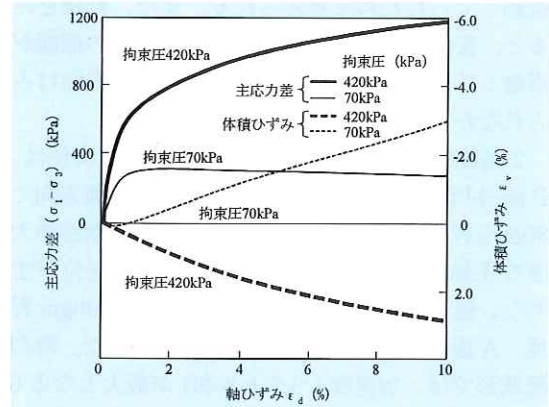


図-1 土の力学的挙動に及ぼす拘束圧の影響

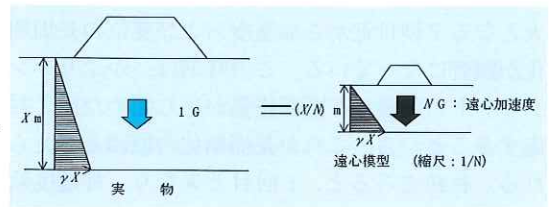


図-2 遠心模型実験の原理

表-1 遠心模型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	1	N
(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	1	$1/N$
(動的現象)	1	$1/N$
(浸透現象)	1	$1/N^2$

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、 $50G$ 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 20cm の模型地盤で再現することができる。なお、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実物大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。

遠心模型実験における相似則^{1),2),3)}をまとめて表-1に示す。実物と同じ材料で、同一の応力状態を再現しているため、その結果生じるひずみも同一となる。時間の縮尺は対象とする現象によって異なり、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る。例えば、圧密の終了までに10年かかるものは、縮尺1/50の遠心模型では、 $10/(50^2)$ 年=約1.5日で再現できる。また、実際の地震動の卓越振動数が1Hz、継続時間が30秒である場合には、縮尺1/50の遠心模型では加振波形の卓越振動数を50Hz、継続時間を0.6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、一般に、間隙流体として水よりも粘性の高い流体を用いて浸透時間を N 倍に増加させることにより、圧密・浸透現象の時間の縮尺をプロトタイプの $1/N$ 倍としている。

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に相当する。厳密には、実際の $1/N$ の粒径で応力～ひずみ関係が同一の材料が存在すれば、それを利用したほうが望ましいが、平均粒径が等しく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、このような粒径の違いの影響は小さく、無視することができるが、例えば砂地盤の支持力試験におけるすべり面のように不連続な部分が生じる場合には、遠心模型実験の結果が実際(重力場で同じ材料を用いて実物大の実験を行った結果)とは異なることが知られている^{1),2),3)}。

土木研究所の大型動的遠心力載荷試験装置の概要を図-3に、主な仕様を表-2に示す⁴⁾。回転腕に取り付けられたプラットホームに試料容器を取り付けて、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一定の遠心加速度を作用させる。

大型動的遠心力載荷試験装置には、油圧式の加振装置がプラットホーム上に設置されており、

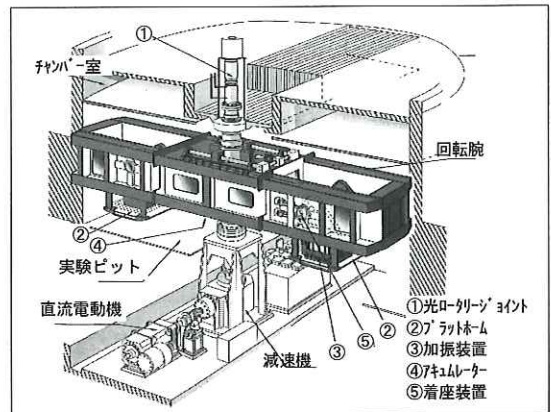


図-3 大型動的遠心力載荷試験装置の概要

表-2 大型動的遠心力載荷試験装置の仕様

(1) 遠心力載荷装置

有効回転半径	6.6m
最大遠心加速度	静的試験：150G 動的試験：100G
最大積載容量	400ton・G

(2) 加振装置

振動台の大きさ	幅:1,700mm 奥行:1,000mm
最大加振容量	40ton・G
最大加振加速度	40G

水平方向の地震動を再現することができる。土木研究所の加振装置の最大加振加速度は40Gであり、この値は、50Gの遠心場において1995年兵庫県南部地震で観測された最大の地表面加速度と概ね一致する。

実験模型には変位計、水圧計、土圧計、ひずみゲージなどのセンサーが設置され、電気的な計測・制御信号は回転腕内で光デジタル信号に変換された後、光ロータリージョイントを介して伝達される。さらに、回転腕に設置したCCDカメラや高速度カメラ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可能である。特に、高速度カメラおよび画像解析技術により、動的実験において残留値のみならず、加振中の動的な変位成分まで高精度に測定することが可能となっており⁵⁾、加振時の地盤内のひずみ分布の計測等へ活用されている。

4. および5.では、大型動的遠心力載荷試験装置の土工・地中構造物への適用事例を紹介する。

4. 盛土の液状化対策工の効果に関する動的遠心模型実験

動的遠心模型実験の動的問題への適用例として、基礎地盤の液状化による河川堤防の沈下に対するの

り先固化改良の効果を検討した事例⁶⁾を紹介する。

図-4 に実験模型の概要を示す。実験では、実物の 1/50 を想定し、50G の遠心加速度場にて水平加振を行った。模型は内寸で幅 1.5m、奥行 0.3m 深さ 0.5m の剛性土槽の中に作成した。模型地盤は、層厚 10mm の碎石層、層厚 90mm の珪砂（相対密度 90%）またはカオリン粘土の支持層、層厚 160mm の緩い江戸崎砂層である。地下水位面を GL-3.5cm に設定した後、模型地盤上に高さ 100mm、のり面勾配 1:2 の盛土を作成した。この模型は、層厚 8m の緩い砂層上の高さ 5m の盛土に対応するものである。盛土のり先下には固化体を模擬した表面が粗なアクリルブロックを設置している。以下では長さ及び時間を 50 倍し実物スケールに換算して示すことにする。入力波形は最大加速度約 250gal あるいは 420gal、振動数 1Hz の正弦波 8 波からなる“主要動”とそれに続く約 100gal の“後続波”からなっている。

実験終了後の模型の変形状況を図-5に示す。対策工を施していないケースでは液状化層内に大きな水平変位が生じているが、のり先改良を施したケースでは盛土直下の液状化層内の水平変位量が抑制されている。加振終了時 ($t=60$ 秒) の盛土天端沈下量と固化体幅の関係を図-6に示す。無対策のケースに比べて対策を行ったケースでは天端沈下量が最大で約 50% 減少し、対策効果が認められていることがわかる。また、固化体の幅 B よりも固化体高さ H を増すことが天端沈下量の低減に有効であることがわかる。

5. 地中構造物の液状化による浮上がりに関する動的遠心模型実験

地震時の地盤の液化化による被害として、地中構造物の浮上りがある。ここでは、動的遠心模型実験を用いて、地中構造物の浮上りに及ぼす各種要因を検討した結果⁷⁾について紹介する。

図-7に模型断面図を示す。実験に用いた模型は、主に豊浦砂で作製した飽和地盤の中にアクリル製の共同溝模型を埋設したものである。実験は、実物の1/50を想定して行い、浸透の相似則を満足させるため、間隙流体として、水の50倍の粘性を持つシリコンオイルを用いた。実験では、ケースにより地中構造物模型の形状、幅、地盤材料、地盤の相対密度、地下水位、液状化層厚、土被り厚、および加振加速度等を変化させた。加振波形

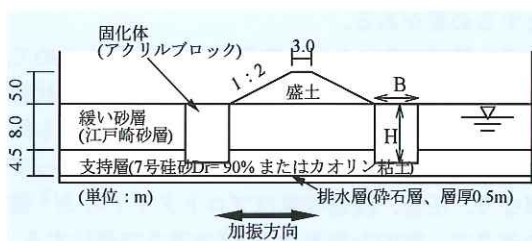
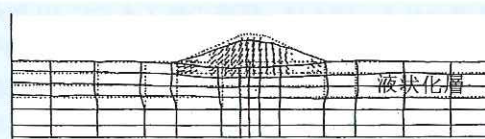


図-4 盛土模型の概要 (実物スケール)



(1) 無対策



(2) 固化对策

図-5 模型の変形状況

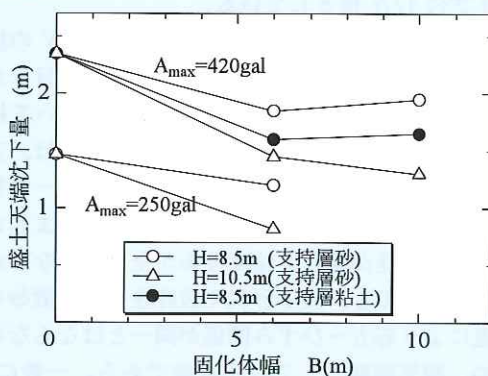


図-6 固化体幅と盛土天端沈下量の関係

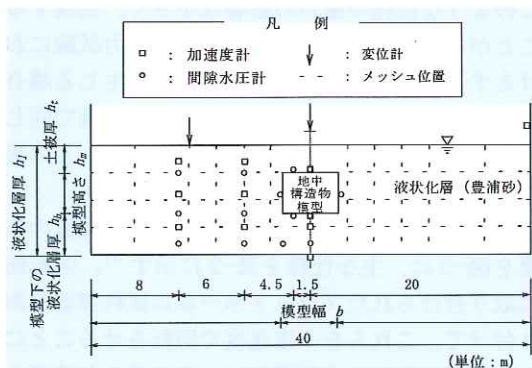
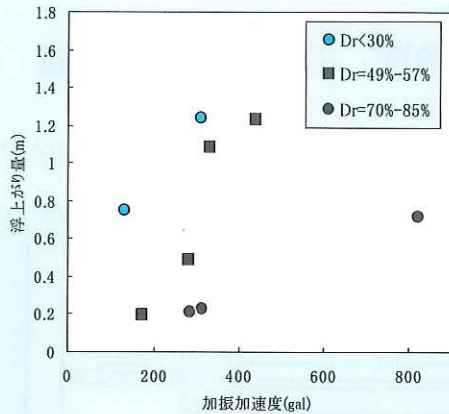


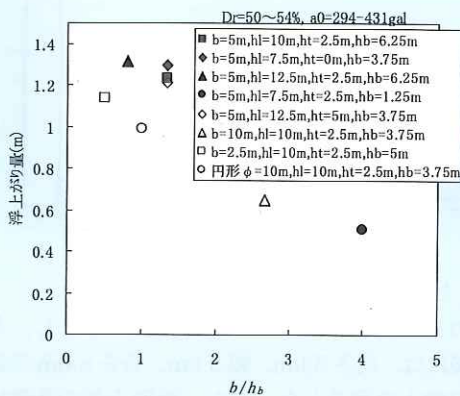
図-7 地中構造物模型の概要 (実物スケール)

として、振動数 1.2Hz の正弦波 20 波を用いた。

図-8(a)に、地盤の相対密度 D_r と加振加速度



(a) 浮上り量と加振加速度の関係



(b) 構造物幅と構造物下の液状化層厚の比 (b/h_b) と浮上り量の関係

図-8 各種要因と浮上り量の関係

を変化させたケースの加振加速度と最終浮上り量の関係を示す。加振加速度が大きくなるほど浮上り量は大きくなり、同じ加振加速度では地盤の相対密度 Dr が高いほど浮上り量は小さくなる。地盤の相対密度 Dr および加振加速度が等しいケースについて、構造物幅 b と構造物下の液状化層厚 h_b の比 (b/h_b) と浮上り量の関係を図-8(b) に示す。これより、 b/h_b が大きいほど浮上り量が小さくなっている。これは、 b/h_b が大

きいほど、すなわち構造物幅 b が大きく構造物下の液状化層厚 h_b が小さいほど、浮上りに伴う構造物直下への砂の回り込みが発生しにくいことによると考えられる。

6. おわりに

本報では、地盤工学の分野で盛んに利用されるようになっている遠心模型実験の概要を紹介するとともに、動的遠心模型実験を用いた実験の例として、盛土の液状化対策、および地中構造物の浮上りに関する実験を紹介した。

以上のほかに、土木研究所における遠心模型実験の動的問題への適用として、地盤の液状化・流動化、土構造物の地震時挙動、地中構造物の地震時挙動、擁壁の安定性、杭と地盤の相互作用、液状化対策工法の効果等の実験の検討があげられる。動的遠心力载荷試験装置により、小型模型を用いて大規模な土工構造物の地震時の実物に近い挙動を再現させることができることから、比較的短期間に数多くの実験を行うことが可能であり、今後も活用が期待される。

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) Taylor R. N. (ed.): Geotechnical Centrifuge Technology, Blackie Academic and Professional, 1995。
- 3) 建設省土木研究所：遠心力载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。
- 4) 松尾修、堤達也：大型動的遠心力载荷試験装置、土木技術資料、Vol.39，No.6，p.11，1997。
- 5) Okamura, M., Matsuo, O. and Tamoto, S.: A high frame rate image acquisition system for dynamic centrifuge tests, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 1, No.1, pp.71-76, 2001。
- 6) 岡村未対、松尾修：固化改良により液状化対策を行った盛土の地震時沈下量評価法，第 36 回地震工学研究発表会，2001。
- 7) 佐々木哲也、田村敬一：地中構造物の浮上り予測手法に関する検討，第 11 回日本地震工学シンポジウム，2002。

佐々木哲也*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム研究員
Tetsuya SASAKI

田村敬一**



同 振動チーム上席研究員，工博
Dr.Keiichi TAMURA

岡村未対***



同 振動チーム主任研究員，工博
Dr.Mitsu OKAMURA