

(83) 遠心力場における振動実験装置の開発

運輸省港湾技術研究所 正会員 稲富隆昌

〃 〃 風間基樹

〃 大塚幸治

1. まえがき

土質工学上あるいは構造工学上の試験技術の一つに遠心力载荷実験手法がある。この手法の特長は遠心力を用いることで、実物と同じ応力状態を模型中に再現できることである。その結果、今までの模型実験が小さな実物としての定性的な検討にとどまることが多かったのに対し、実物のある程度意識した定量的な模型実験が可能となる。この手法の適用は、半世紀以上前に逆のぼり、国内でもすでに土質工学上の静的問題に適用されてきた。地盤や構造物の動的物性もその応力状態に大きく左右されるので、本手法の動的問題への適用も古くから考えられていた。しかしながら、遠心力場における振動実験装置が開発され、動的問題への適用が本格化したのは、最近のことである。現在、外国においては、いくつかの動的問題に適用され、その成果が出つつある^{1,2)}。

運輸省港湾技術研究所においては、昭和54年度に世界最大級の遠心力载荷装置を導入し、静的問題に関する研究を精力的に行っている³⁾。今回、この遠心力载荷装置に搭載できる振動実験装置を開発したので、その概要と動的問題への適用上の留意点について報告する。

2. 振動実験装置の目標とする仕様

模型と実物を対応づけるものは、相似則である。したがって、遠心力場における振動実験装置の仕様も、その相似則に適合したものではなくてはならない。遠心力場における動的問題に関する相似則をまとめると表-1のようになる⁴⁾。表に示されるように遠心加速度が λ Gの遠心力場においては、模型の幾何スケールは実物の $1/\lambda$ となり、模型の振動数と加速度は、実物の λ 倍となる。現在、1 Gの場で行う振動実験の相似則^{4,5)}も提案されているが、非線形性の強い大ひずみ下での現象には適用しにくいものである。しかしながら、遠心力場における応力とひずみの関係は、実物のそれと同じになる。

項 目	相似比
長 さ	$1/\lambda$
振動数	λ
質量密度	1
変 位	$1/\lambda$
速 度	1
加 速 度	λ
応 力	1
ひずみ	1

今回、0.5~6Hzの卓越振動数、200 Galの最大加速度を有する実物の地震動を、50 Gの遠心加速度の場で再現できる振動実験装置の開発を行った。このような地震動を遠心加速度50 Gの場において再現するには、25~300Hzの振動数、10 Gの加速度を出力することができる実験装置が必要となる。また、その起震力は、振動する部分の重量が100kgとすると、それを10 Gで振動させる必要があるため、約1 tの力が必要となる。

製作にあたっては、遠心プラットフォーム(1.6×1.6m)に搭載可能であること、遠隔操作が容易であること、現行の遠心力载荷装置に大きな手を加えなくて済むことを合せて考慮し、種々の加振方式が検討された。その結果、システムの構成はやや複雑になるが、小さくて大きな起振力が出せる油圧を動力源とした機構が採用された。

なお、実際に製作を開始する前に、遠心力場でのアキュムレータの安全性、アクチュエータ、サーボバルブ、シャットオフバルブの正常動作を確認する実験を実施した。更に、振動現象を計測するためのシステムについても検討が行われ、遠心力場での実験データは、スリップリングを介して取得するよりも、遠心力载荷装置本体に動ひずみアンプとAD変換器を搭載して取得した方が、ノイズの少ない良好なデータを取得することが確認された。

3. 動的問題への適用上の留意点

物体の運動を考える時には基準となる座標を考えなければならない。物体の速度や加速度は基準座標のとり方によって異なるので、運動の法則も基準座標のとり方によって異なる表現となる。遠心力载荷装置中の供試体の座標は、慣性系に対し、回転する加速度系の座標すなわち回転座標となる。今、Z軸まわりで一定の角速度 ω で回転する加速度系に乗って現象を観測することを考える。ここで座標軸は図-1のようにとる。時刻 $t=0$ で、回転系の座標軸(x' , y' , z')と慣性系の座標軸(x , y , z)が一致していたとすると、2つの座標系での質点Pの座標の関係は、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' + r \\ y' \end{pmatrix} \quad \dots(1)$$

となる。一方、力の成分については、(X , Y , Z)を慣性系、(X' , Y' , Z')を回転系における力とすると

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} \quad \dots(2)$$

$$Z = Z'$$

となる。(1)、(2)式の関係を用いて慣性系の運動方程式

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = X, \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = Y, \quad m \frac{d^2 z}{dt^2} = Z \quad \dots(3)$$

に代入して整理すると、

$$m \frac{d^2 x'}{dt^2} = X' + 2m\omega \left(\frac{dy'}{dt} \right) + m\omega^2 (x' + r), \quad m \frac{d^2 y'}{dt^2} = Y' - 2m\omega \left(\frac{dx'}{dt} \right) + m\omega^2 y', \quad m \frac{d^2 z'}{dt^2} = Z' \quad \dots(4)$$

を得る。すなわち、遠心力载荷装置中の供試体に現れる慣性力は、遠心力 ($m\omega^2(x' + r)$, $m\omega^2 y$, 0) とコリオリの力 ($2m\omega \left(\frac{dy'}{dt} \right)$, $-2m\omega \left(\frac{dx'}{dt} \right)$, 0) である。

以上から、供試体中の各部分は、その座標によって異なる遠心力を受け、また、供試体中で運動する物体は、回転軸に対して垂直な面内で物体が動こうとする方向に対して垂直に作用するコリオリの力を受けることになる。このことは、遠心力場の模型について一般的に言えることで、実際の実験においても十分な配慮が必要である。このうち動的問題に特に係わってくるのは、後者のコリオリの力である。なお、二次元問題の内、水平成分の振動のみを対象とする場合には、振動方向をZ軸にとることによりコリオリの力を事実上無視することができる。しかし、三次元モデルあるいは対象とする実験によっては、模型の各部に現れる慣性力の差が実験結果に大きく影響を与える可能性がある。

次に、相似則のところで詳しく述べなかったが、浸透や圧密にかかわる時間の縮尺は $1/\lambda^2$ であり、動的問題にかかわる時間の縮尺の $1/\lambda$ と一致しない。浸透や圧密、熱の拡散、伝導(すなわち、熱伝導型の方程式で表されるような現象)等に関するものが大きく係わる動的問題では、相似則が乱される。例えば、液状化などの現象を対象とする場合には、特別な配慮が必要となる。また、実物と模型で同じ砂を用いるとき、その粒径の影響が生じる可能性がある。すなわち、砂の粒状体としての性質がどのように現象に影響するのかわかるといえる必要がある。

以上の様な遠心力場のモデル化に内在する問題点を検討するためには、同じ仮想の実物を異なる縮尺でモデル化してその結果を対比したり、あるいは同じ模型を異なる遠心加速度場で実験し、その結果を対比すればよい。このような作業はmodeling of modelsと呼ばれ、模型の妥当性を確認するためにその重要性が認識されている。

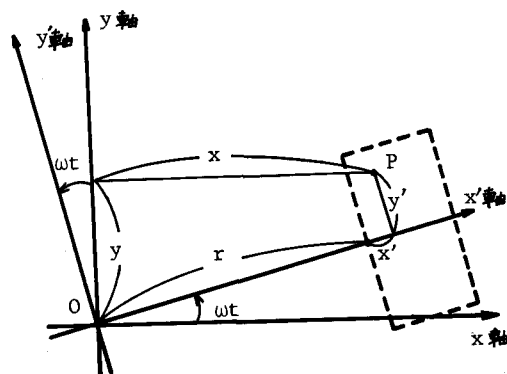


図-1 回転座標系の模式図

4. 装置の概要

本装置は、加振装置、油圧動力源、制御装置、排油タンクから構成されている。写真-1は、遠心力載荷装置の遠心ブラットフォームに搭載した本装置を示す。図-2は、各部の名称の説明図である。

加振装置は、アクチュエータと振動箱を含む本試験装置の中核部分である（写真-2参照）。アクチュエータの限界性能を表-2に示す。振動箱の内のり寸法は、400mm×180mm×270mmであり、前面はガラス張りとなっている。振動箱は、4組の門形ラーメンから釣り下がっているプランコにより支持されている。また、振動箱は、その重さなるべく軽量化するためにチタン合金で製作した。

油圧動力源は、サーボバルブに油圧を供給するもので、最高使用圧力300kg/cm²のアクيومレータとサーボバルブからの油の漏れを極力少なくするためのシャットオフバルブから構成されている。このアクيومレータの容量は、一度の充填で数回の実験が可能な能力を持っている。

制御装置は、装置全体を総合的に制御するもので、実験時には操作室からのボタン一つで全ての装置が作動するようにシーケンス回路が組み込まれている。また、入力できる波形は、正弦波、三角波、矩形波、任意波である。任意波は、8000データ容量のROMに書き込んであり、4つのROMが用意されている。なお、時間間隔、波数、振幅レベルは、任意に設定できるようになっている。

排油タンクは、実験に使用した油を回収して溜めておくためのものである。

本装置の実際問題への適用に先立ち、装置自身の耐G試験と遠心力場での動作試験が実施された。

図-3は、遠心加速度が約50Gの時の振動箱と振動箱中の砂層表面の加速度波形で、入力波形がそれぞれ正弦波100Hz、300Hz、および不規則波の加速度波形を示す。振動箱中には、豊浦標準砂が約30kg投入され

ていたが、振動箱の最大加速度は約28Gであり、アクチュエータの限界性能から判断すると、も

っと大きな供試 表-2 アクチュエータの限界性能

最大出力	±1200kg
最大振幅	±3mm
最大速度	±30cm/sec
最大圧力	210kg/cm ²
負荷	92kg
最高振動数	300Hz

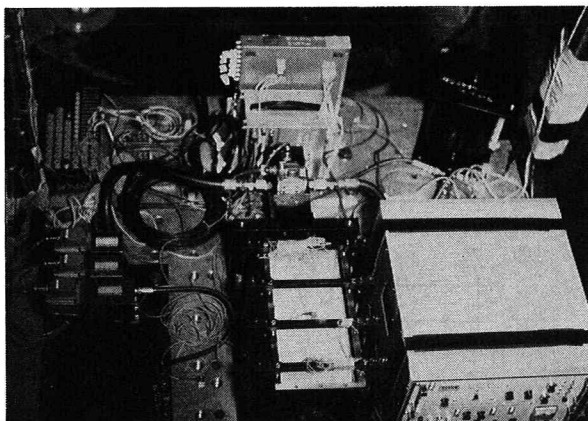


写真-1 振動実験装置全景

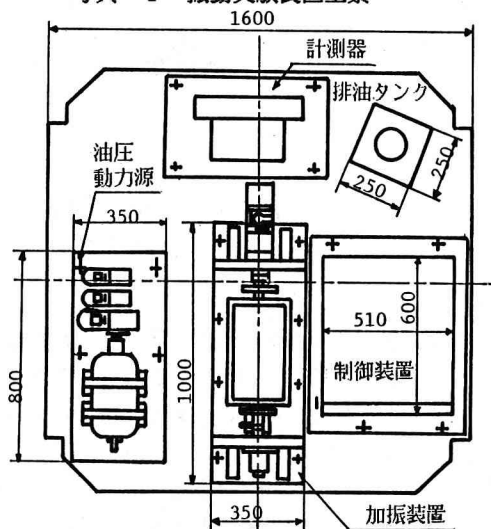


図-2 振動実験装置配置平面図

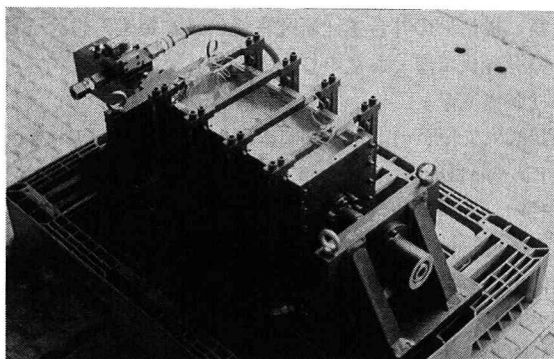


写真-2 加振装置（振動箱を含む）

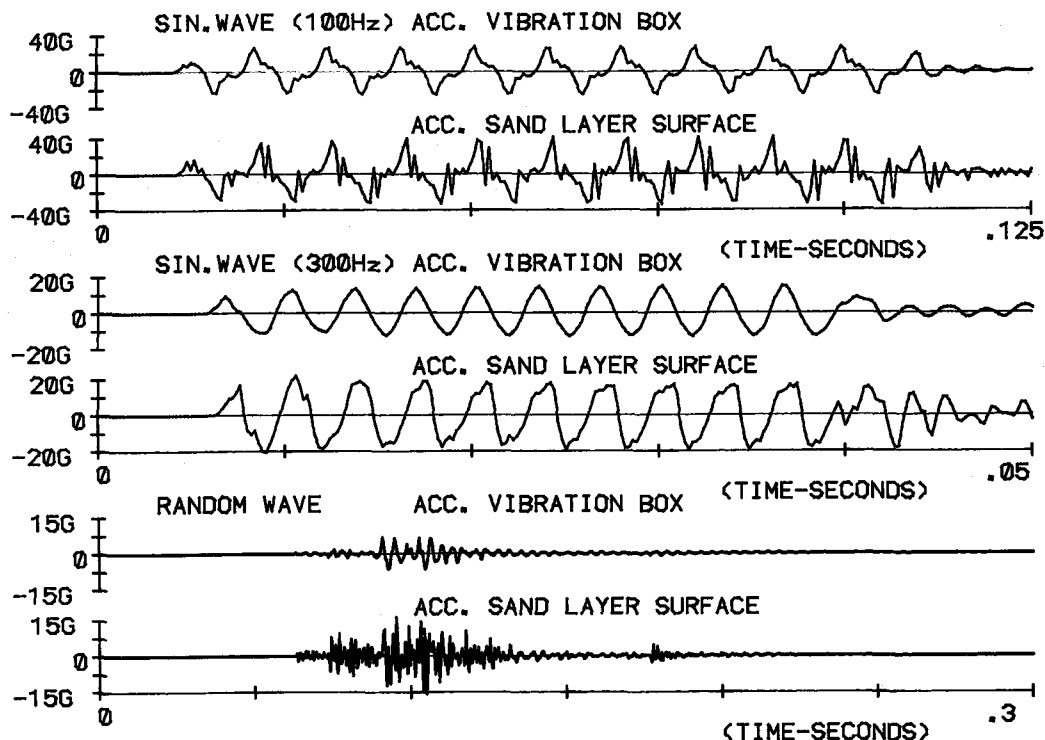


図-3 遠心力場（約50G）における加速度波形

体を実験に使用出来ることを示している。なお、このデータは、プラットフォーム上に搭載した動ひずみアンプとAD変換器によって取得されたものである。

5. あとがき

遠心力場における振動実験装置の概要とその動的問題への適用上の留意点について報告した。開発の過程では未知の部分も多く、何回かの改良を加えた。また実際問題への適用に当たっては、計測システム、小さなセンサーの開発、模型の作製方法などの技術的課題もある。現在、本装置を用いたいくつかの実験が計画されている段階で、研究は始まったばかりであるが、今後、遠心力場における振動実験は、実物の挙動の予測、設計法や数値計算手法の検証あるいは対象とする現象のメカニズムの解明等、地震工学の技術の発展に大きく寄与するものと考えられる。

最後に本装置の開発に当り貴重な御助言をいただいた土質部地盤改良研究室の寺師室長、北詰主任研究官、構造部の井合主任研究官並びに本装置の設計・製作を担当したサム電子機械（株）の青木保夫氏、漆原弘光氏に厚くお礼申し上げます。

〔参考文献〕

- 1) A.N. Schofield, "Dynamic and Earthquake Geotechnical Centrifuge Modelling", Proc. of International Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake and Soil Dynamics, St. Louis, 1981, pp.1081~1100.
- 2) R. Scott, "Centrifuge Model Testing at Caltech", Proc. of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, Vol.2, No.4, pp.188~198.
- 3) Terashi, M., "Development of PHRI Geotechnical Centrifuge and its Application. Report of the PHRI, 1985, Vol.24, No.3, pp.73~122.
- 4) 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, 1978, PP.69~77.
- 5) 国生剛治, 岩楯敏広, "軟弱地盤の非線形震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, 1979, PP.57~67.