

遠心模型実験における模型地盤内の加速度分布に関する実験的検討

Experimental investigation on the acceleration distribution in the centrifugal model ground

岩手大学
北海道大学大学院
北海道大学大学院
北海道大学大学院
北海道大学
(株)シーウェイ

正会員
フェロー
学生会員
正会員
学 生
正会員

大河原 正文 (Masafumi Okawara)
三田地 利之 (Toshiyuki Mitachi)
○梶原 大輔 (Daisuke Kajiwara)
工藤 豊 (Yutaka Kudoh)
中村 晃輔 (Kousuke Nakamura)
佐野 彰 (Akira Sano)

1.はじめに

遠心模型実験は、遠心力により縮小模型に実地盤と等しい自重応力を作用させ、実物と同じ挙動を縮小模型に再現させようとする実験であり、斜面崩壊や圧密など自重応力に大きく依存する地盤挙動の解明に威力を発揮するが、他の力学試験と同様に様々な問題を有している。なかでも遠心実験に特有の問題として、遠心加速度(A_c)が半径(r)と角速度(ω)の2乗に比例することから($A_c=r\omega^2$)、加速度の大きさが回転軸からの距離によって異なることや、遠心加速度のほかに模型地盤に常に重力加速度が作用していること、さらには加速あるいは減速時において回転軌道の接線方向に「接線加速度」が作用するなど、常に一定の重力加速度のみが作用している実地盤とは、厳密には加速度の分布が異なっている。Nicolas(1988)¹⁾によると、これら様々な加速度の影響は、遠心加速度の5%以下になれば無視できるとして、例えば重力加速度(g)については遠心加速度 A_c が20G ($(g/A_c) \times 100=5\%$) 以上、必要であるとしている。ところで、北海道大学では模型地盤に化学的風化を作用させ得る遠心力載荷試験装置を開発²⁾した。本装置は、小型ながら、回転半径(1.5m)の割に大きな土槽を搭載可能(表1参照^{3)~10)})であることが特徴の一つだが、回転半径が

小さいことによる懸念材料もある。すなわち、後述の模型土槽両端ほど大きくなる遠心加速度の分解加速度が遠心加速度の5%を超えるため、間隙水圧の分布が偏るなどの影響が懸念される。加えて、本装置では非排水条件を満足するために加速性能の良いモーターを使用しており、接線加速度の影響も検討しなければならない。そこで、これら模型地盤に作用する様々な加速度の影響について検討したので報告する。

2.模型地盤に作用する加速度

2.1 模型地盤の重心に作用する加速度

図1に模型地盤の重心に作用する加速度を示す。図に示すように、模型地盤には①半径方向外向きに作用する「遠心加速度」、②鉛直方向に常に作用している「重力加

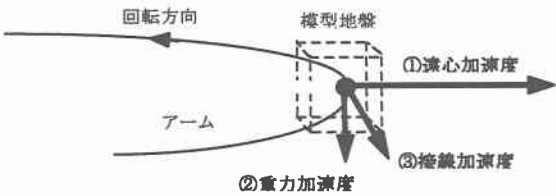


図1 模型地盤に作用する加速度(加速時)

表1 諸遠心装置のアーム半径とプラットフォーム幅との関係

	プラットフォーム幅 Width[m]	アーム半径 Radius[m]	W/R
北海道大学 (日本)	0.70	1.50	0.47
大阪市立大学 (日本)	0.40	2.56	0.15
(独)土木研究所 (日本)	1.30	6.60	0.20
日本工営 (日本)	1.00	2.60	0.38
大林組 (日本)	2.20	7.00	0.31
Hongkong Univ. (China)	1.50	3.82	0.18
Queen's Univ. (Canada)	0.09	0.20	0.45
Singapore Univ. (Singapore)	0.96	2.00	0.48
California Univ. (USA)	1.90	9.20	0.21
Cambridge Univ. (UK)	0.50	1.80	0.28

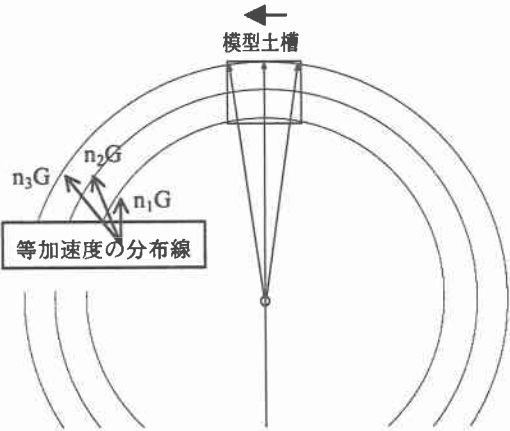


図2 遠心加速度の分布と模型地盤との関係

速度(1G)」、さらに加速・減速時において③回転軌道の接線方向に「接線加速度」が作用する。

2.2 模型地盤の両端に作用する遠心分解加速度

遠心加速度は、図 2 に示したとおり放射状に分布することから等加速度の場合は曲率をもっている。したがって、加速度の方向とその大きさが模型内で一様でなく、特にビーム型遠心装置ではプラットホームの底が直線状なので、模型地盤の両端にいくほど曲率をもつ等加速度場からはみ出る。そのため、模型土槽の下部を円弧状にする(Kimura et Al.(1991)¹¹⁾)など、とくに工夫しない限り遠心加速度の分解加速度が土槽底面に対して平行に作用することになる(図 3)。この分解加速度は、模型地盤の幅が大きくなるほど増加し、当該装置ではアーム長と土槽寸法との関係から計算すると、土槽底盤の中心に作用する遠心加速度(等加速度分布線上の遠心加速度)の約 15% に達する。

3.遠心模型実験装置

北海道大学の遠心装置(写真 1)の仕様を表 1 に示す。本装置は、回転部(アーム、プラットホーム)、駆動部(電動機、減速機)、保護風防、制御/計測部、安全管理機器から構成される。

回転部

回転部は、アームとプラットホームから構成される。アームは、モーターの回転を土槽に伝達すること、プラットホームを支えることを目的としている。前述のとおり本装置は、回転半径の割に大きな土槽を搭載可能としているが、これはアームを回転伝達を主目的とするメインアームとプラットホーム支持を主目的とするサブアームに分けて設計したことによるものである。また、本装置ではメインアームとサブアームを脱着できるようにしているため、将来、さらに加速性能の良いモーターを使用することによって「接線加速度」の影響が出た場合の対応(三次元的に動くプラットホーム)や、アーム半径の延長などに柔軟に対応できる構造となっている。

駆動部

駆動部には、回転数や制御が容易なインバーターモーターを用い、最大加速度 150G までの到達時間は最速で 300 秒である。

制御/計測部

運転、停止など本体を操作する制御部は、卓上型の操作盤に集約され本体とは別の場所に設置されている。

計測部は、荷重、変位、加速度計などの計測機器類と、データを伝送するワイヤレスデータロガー、さらにデータを記録、解析するパソコンから構成されている。計測システムを図 4 に示す。ワイヤレスデータロガーは、電波によりデータを送信するもので、スキャナーとコントローラから構成される。このデータロガーはスリッピングに比べて安価であり、今回、使用したものは最大 500ch まで増設可能など、今後の利用が期待される。また、実験中の地盤挙動は、超小型 CCD カメラにより撮影され、得られた画像信号は、スリッピングを通して DVD 装置に録画される。

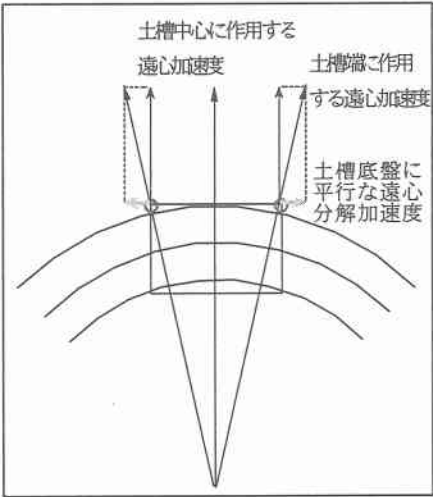


図 3 模型地盤の両端に作用する遠心分解加速度

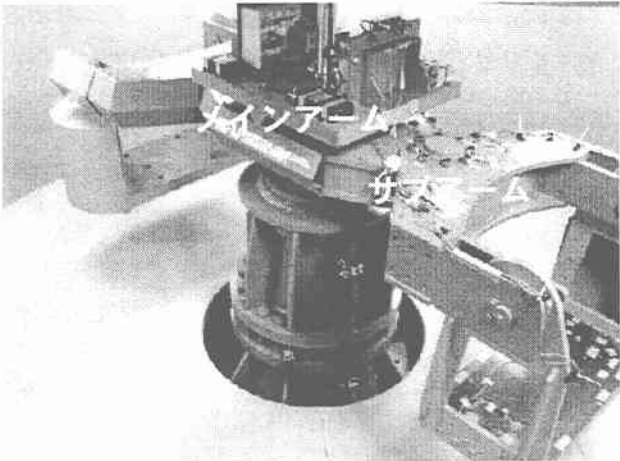


写真 1 遠心力载荷装置

表 2 遠心装置の主な仕様

型式	ビーム型
有効半径	1.5m
最大加速度	150G(回転半径1.5mにて)
最大積載重量	150kg
主電動機容量	23kW
最大回転数	300rpm
加速到達時間	300秒
減速停止到達時間	600秒
プラットホーム寸法	700W×400D×500Hmm
土槽寸法	450W×200D×400Hmm

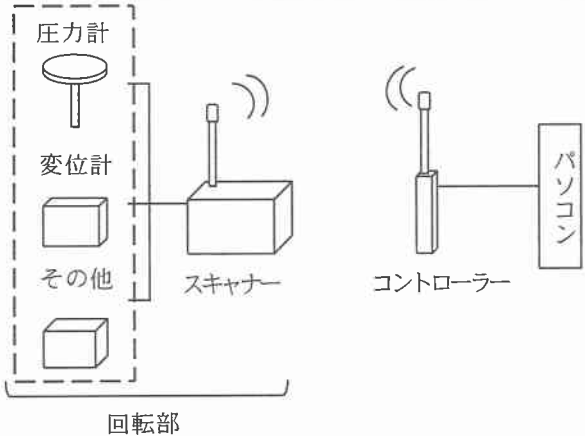


図 4 計測システム

保護風防

保護風防は、稼働中に試料の飛び出し等の異常が発生した場合の安全対策と、回転部の空気抵抗を小さくするためのもので、本装置では複数枚の鋼板を用いて回転部の周囲を取り囲んでいる。

安全管理機器

高速回転による主軸の軸受の異常振動や温度上昇を常時計測し、設定値を超えると警報と回転灯が点灯するシステムとなっている。

4.実験内容・手順

4.1 各種加速度の測定実験

模型地盤の両端では、土槽底盤に平行な向きにどの程度の遠心加速度の分解加速度が作用しているか調べた。今回は分解加速度を測定するために模型地盤の両端にあたる部分のプラットホーム上に中心から外向きを正の方向として1箇所ずつ加速度計を取り付けた。また、その時々に対応した遠心加速度を確認するためにプラットホームの中心にも加速度計を設置した。

また、プラットホームの中心で接線加速度の影響がどの程度生じているかを目視で確認するため土槽に振り子を取り付け、CCDカメラを用いて加速時の振り子の動きを撮影した。

4.2 粘性土の圧密実験

粘性土の遠心圧密実験を行った。この実験は、模型地盤に自重圧密を再現させて、このとき生じる沈下量と過剰間隙水圧を模型両端で測定することにより接線加速度、遠心分解加速度の影響を評価しようとするものである。もし、これら加速度の影響があれば測定値に偏りが見られるはずである。実験に使用した試料は市販のNSF-clay($\rho_s=2.77\text{g/cm}^3$, $LL=56\%$, $I_p=28$)である。供試体作製の方法として、今回は遠心実験時にそのまま使用するアルミ製の土槽を使って通常の予圧密を行った。手順として、NSF-clayに蒸留水を加え、含水比120%のスラリー状とした後ミキサーで約1時間攪拌し、あらかじめ側面に摩擦軽減のためにグリースを塗布しておいた土槽に静かに流し込み、その後ペロフラムシリンダーを用いて圧密応力50kPaで10日間予圧密を行った。なお、予圧密時に土槽底面には20mm間隔で穴のあいた有孔板を置き、粘土上部、すなわち載荷部にも同様の形状の載荷板を用い両面排水とした。

予圧密終了後、供試体上部を成形した。供試体寸法は450W×200D×180Hmmである。また、土槽をプラットホームにのせる前に、遠心力載荷時の排水を処理するための排水受け水槽をプラットホームにあらかじめ取り付け、その上部に土槽をセットした。その後、遠心加速度をかけた時の沈下量と間隙水圧を測定するために、変位計を2箇所、間隙水圧計を2箇所、そして遠心加速度方向に向けて加速度計を取り付けた。本実験では、沈下量の測定にレーザー変位計を用いた。これはレーザー光を対象物に反射させて受信し、そこから電圧変換した値を変位に直すというものである。間隙水圧計は土槽側面にあけた穴に取り付けた。なお、間隙水圧計の受圧部分には脱気、水で飽和させたポーラスメタルを取り付けてあ

る。

沈下量測定に関しては変位計の値だけでなく、目視によっても沈下の様子を観察できるように、CCDカメラを用いて土槽前面の亚克力部を通して撮影を行った。目視で確認しやすいようにあらかじめ予圧終了後に土槽前面についている亚克力板を取り外し、模型地盤にラインを引き格子線を入れ、形状の変化の目安とした。

5.実験結果

5.1 各種加速度測定実験

土槽中心に作用する遠心加速度と、土槽両端に作用する、底盤に平行な遠心分解加速度の関係を図5に示す。図で、大きく現れている加速度が遠心加速度である。今回、遠心加速度を30Gまで上昇させた時、遠心分解加速度はおよそ6Gほどまで上昇した。分解加速度は遠心加速度が増加するのに伴い増加しており、常に遠心加速度の2割程度であった。

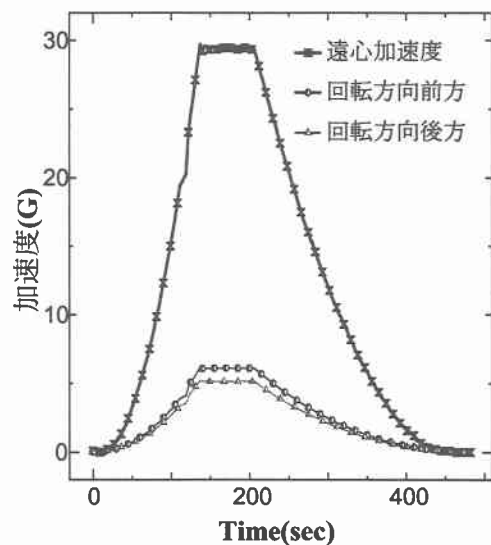


図5 加速度－時間関係

接線加速度の影響を調べるために、土槽に振り子を取り付けその挙動を確認したが、振り子は全くと言っていいほど前後左右どの方向にも動かなかった。この様子はDVD装置に録画してある。

5.2 粘性土の圧密実験

実験装置稼働後、およそ240秒で所定の回転数まで上昇した。その後、定速で540秒間回し続けた。なお、図6、7に示す遠心加速度は土槽底面(回転軸から1.35m)の位置に働く加速度であり、模型地盤の重心(回転軸から1.20m)では定速時におよそ78Gがかかっている計算になる。

図6に間隙水圧と遠心加速度の時間による推移を示す。

加速時に遠心加速度が増加していくのに伴って、過剰間隙水圧が発生し増加していく様子が見られる。その後、定速になると間隙水圧の消散が起こっている。このことから、実際の地盤の挙動を表していると言える。

回転方向前方と後方に設置した間隙水圧の値を比較してみると両者の差は最大で8kPaであり、土槽両端で間隙

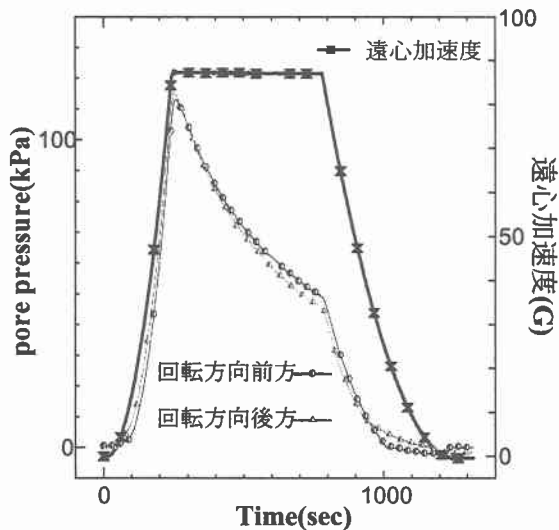


図6 間隙水圧－時間関係

水圧の大きな差は存在しないとみてよい。すなわち、回転の軌道上に発生する接線加速度の影響は見られないといえる。ただ、粘土の透水性が低いために回転方向の前方と後方では偏りがほとんどなかったとも考えられるので、今後、土槽に砂を詰め色を付けた液体を流すなどして土中水がどのように移動するか確認する。

また、図7に変位と遠心加速度の時間による推移を示す。グラフで、変位は正の方向が沈下を示している。やはり実際の圧密と同様に遠心加速度がかかった状態、すなわち荷重がかかった状態になると沈下が始まり、遠心加速度の減速、すなわち除荷が始まると膨張が始まるという結果になった。

10分間の実験で最大8.3mmほどの沈下が生じている。これは模型地盤の初期高さのほぼ5%である。また、前方、後方での変位の差の最大値は0.5mmほどで2つの変位計の挙動に関してほとんど違いが見られないことから接線加速度の影響はないとしてよいと考えられる。

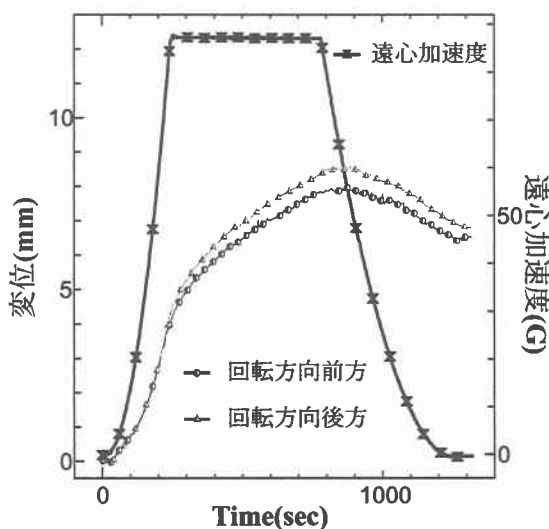


図7 変位－時間関係

なお CCD カメラを取り付け、目視によって変化を確認しようとしたが、今回は沈下量が小さかったことや、

壁面およびアクリル面で摩擦が生じたため、観察窓であるアクリル部で沈下が生じなかったことから、視認できるほどの変化は現れなかった。

6.考察およびまとめ

振り子の実験と粘性土の圧密実験より接線加速度の影響を評価した。振り子実験に関して振り子はほとんど揺れず、圧密実験では間隙水圧、変位ともにほとんど偏りは見られなかったことから、実験の結果として接線加速度の影響は非常に小さく無視できるものであると判断した。

当該の遠心力载荷試験装置では、土槽端の位置に作用する遠心加速度の分解加速度は、土槽中心に作用する遠心加速度の2割ほどであった。このことから、土槽端部では鉛直下向きの力以外に土槽底盤に平行な方向にも影響を無視することの出来ない力を受けてしまう。

7.今後の課題など

当該の実験装置は回転半径に対する土槽のサイズが大きいため土槽両端では、土槽底盤に平行な加速度が大きく働いていたので、それを軽減、除去できるような仕組みを考えていく必要がある。

土槽両端において間隙水圧の偏りが無いことは確認できたが、遠心分解加速度の影響を受けて、土槽の端部と中央部では状態が違う可能性がある。土槽中心に間隙水圧計を取り付けるなどして状態を評価する予定である。

参考文献

- 1) 大河原正文, 三田地利之, 佐野彰; アーム可動型遠心力実験装置の開発土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, III-2, pp.284-285, 2002.
- 2) J.Nicolas; Design of geotechnical centrifuges, Centrifuge 88, A.A.Balkema, pp.9-15, 1988.
- 3) M.Mikasa, N.Takada, M.Ikeda, I.Takeuchi; Design of geotechnical centrifuge, Centrifuge 88, A.A.Balkema, pp.185-192, 1988
- 4) O.Matsuo et al.; Design of geotechnical centrifuges, Centrifuge 98, A.A.Balkema, pp.25-30, 1998
- 5) Y.Sekine et al.; Design of geotechnical centrifuges, Centrifuge 98, A.A.Balkema, pp.779-785, 1998
- 6) C.K.Shen et al.; Design of geotechnical centrifuges, Centrifuge 98, A.A.Balkema, pp.13-18, 1998
- 7) R.J.Mitchell; Design of geotechnical centrifuges, Centrifuge 98, A.A.Balkema, pp.41-44, 1998
- 8) F.H.Lee et al.; Design of geotechnical centrifuges, Centrifuge 91, A.A.Balkema, pp.11-17, 1991
- 9) J.A.Cheney et al.; Design of geotechnical centrifuges, Centrifuge 88, A.A.Balkema, pp.61-66, 1988
- 10) A.N.Scofield et al.; Design of geotechnical centrifuges, Centrifuge 88, A.A.Balkema, pp.29-32, 1988
- 11) T.Kimura, J.Takemura, N.Suemasa and A.Hirooka; Failure of fills due to fall, Centrifuge 91, A.A.Balkema, pp.509-516, 1991.