

小半径ドラム型遠心装置の試作と利用の経験

日下部 治*・萩原敏行**・大草正則***

遠心装置には、試料容器を回転アーム端に取り付けて回転させるビーム型遠心装置と、回転体自身を試料容器とするドラム型遠心装置と2種類がある。筆者らは、昭和60年以来小半径ドラム型遠心装置を2台試作し、その地盤工学における模型実験利用の可能性について継続的に検討してきた。本報告は、その試作と5年間の装置利用の経験を取りまとめ、将来の可能性について検討したものである。

Key Words : model test, centrifuge, consolidation, liquefaction, underground pipe

1. はじめに

地盤工学における遠心装置の利用が盛んとなってきている。遠心装置には、試料容器を回転アーム端に取り付けて回転させるビーム型遠心装置と、回転体自身を試料容器とするドラム型遠心装置の2種類がある。両装置共に、縮尺模型に遠心加速度を加えて、力学的相似則を満足させようとする遠心場利用の根本原理は何等変わる所ではないが、モデル化の可能性の範囲、実験手法の面で異なるため、遠心装置を利用する実験者の立場から区別される。また、新たに遠心装置の作成を考える時の選択肢にもなる。

歴史的に見て現在までに利用されている遠心装置の99%以上はビーム型であり、ドラム型装置の試作や、利用の体験は限られているのが現状であるが、将来の遠心模型実験の可能性を考えると、ドラム型遠心装置の持つ潜在的な利用方法についても検討される必要があろう。土の力学試験では、応力-ひずみ挙動、強度特性を調べるために多数の異なる試験装置が開発されて来たのに比べ、模型実験に関する装置の開発は比較的遅れている実験技術分野であると言えよう。

現在までドラム型遠心の利用は、Schofield¹⁾、FragaszyとCheney²⁾、Kusakabeら^{3),4)}による報告がある。最近では、ドラム装置内での地震波動発生装置⁵⁾や、波浪の発生装置⁶⁾の開発等、伝播現象の再現を目指した利用も検討されている。

筆者らは、昭和60年以来小半径ドラム型遠心装置を2台試作し、その地盤工学における模型実験利用の可能

性について継続的に検討してきた。本報告は装置の試作と5年間の装置利用の経験を取りまとめ、将来の可能性について検討したものである。

2. なぜドラム型装置か

ビーム型装置以外になぜドラム型装置の開発が必要であるかをまず議論しよう。その第一点は、ドラム型装置では長大な模型地盤作成が可能であることである。ビーム型遠心装置では、モデル化可能な地盤の寸法は、用いる容器の大きさと付加可能な遠心加速度によって制約される。たとえば1.0m立方体の容器で100Gであれば、100mの地盤のモデル化が可能である。これに比べ、ドラム型では、回転ドラムの寸法と遠心加速度によって決定され、たとえばドラム有効半径0.75mで、0.5m幅、0.5m深さの回転体を400Gで回転させれば、200m×200m×1880mの長大な地盤のモデル化が可能となる。それも端部の影響を受けない特徴をもつ。そのため、ドラム型装置は同一の方法で作成された試料が遠心加速度履歴をもつ長大な模型地盤を用い十数回の実験を実施するパラメトリックスタディに適しており、複雑な反射現象を回避しつつ、伝播現象、拡散現象の再現にも有利である。さらに、装置のバランス安定性が良いため高い加速度場での長期間実験が可能で長期拡散現象の予測にも利用される。

このようなドラム装置の潜在的な可能性に反して、ドラム型遠心装置は、 K_0 条件が満足されないとの批判を受けてきた。すなわちドラム容器内の地盤での、半径方向ひずみ ϵ_r 、円周方向ひずみ ϵ_θ は、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r &= -\frac{\partial u}{\partial r} \\ \epsilon_\theta &= -\frac{u}{r} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

と書ける。ここに r は半径、 u は半径方向の変位量であ

* 正会員 Ph.D 広島大学教授 工学部第四類 (建設系)
(〒724 東広島市鏡山1-4-1)

** 正会員 工修 群馬大学助手 工学部建設工学科

*** 正会員 工修 元宇都宮大学大学院生
(現在 (株)旭化成工業)

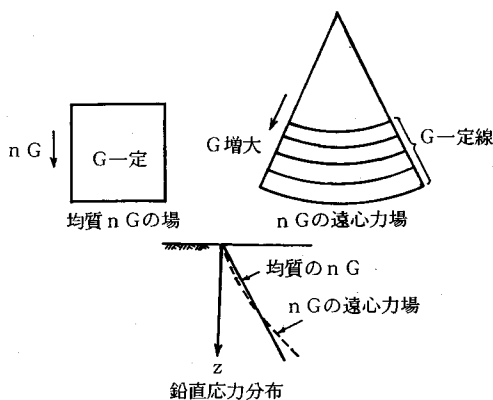


図-1 均質 nG の場と nG の遠心力場

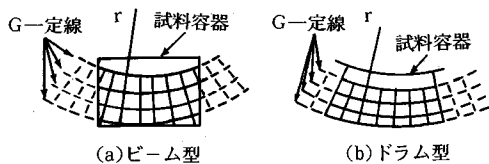


図-2 遠心力モデル中の応力場

る。即ち沈下に伴い周方向のひずみ ϵ_θ が発生することになる。Cheney と Oskoorouchi⁷⁾ は Cam-clay モデルを用いてこれを検討し、底部ではほぼ K_0 状態を満たすのに比べ、上部では主動状態に近づくことを指摘している。

この K_0 条件を満たさないとの批判は、遠心利用者にも根強く存在する懷疑である⁸⁾。これに関しては、遠心模型実験は、あくまでも本物の nG 場の近似であることの認識に立ち戻る必要がある。Tan と Scott⁹⁾ は、これを理論的に検討している。図-1 は、nG 場と回転遠心場との違いを示したものである。

図-2 は、ビーム型とドラム型の容器内の遠心加速度 (G) の分布を描いたものである。遠心場では半径方向に G が変化すると共に、等しい G の線は円弧上に来ることになる。図-2(b) に示すドラム型の半径方向の応力場は、

$$\sigma_r = \frac{r\omega^2}{G} \left(\frac{z^2}{2} + r_0 z \right) \dots\dots\dots (2)$$

- ω : 角速度
- r_0 : 回転半径
- z : 深さ

のように表され、また変形場も解析的に記述できるのに対して、ビーム型では試料容器による制約のため複雑なひずみ性状を示す。このような複雑な加速度場、ひずみ場は解析的には容易には表示されない。そのため宇都宮大学に設置されているビーム型遠心装置 (有効半径 1.18 m) に取り付けられた遠心矩形容器 (長さ 498 mm, 幅 262 mm, 高さ 299 mm) での応力状態について、弾

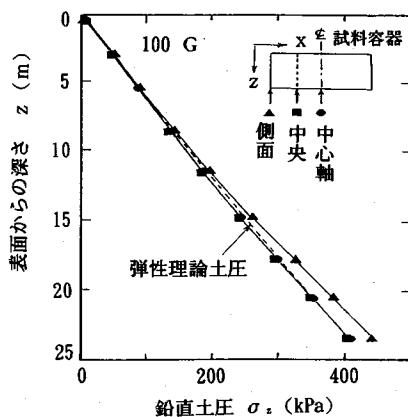


図-3 (a) 試料容器内の鉛直土圧分布

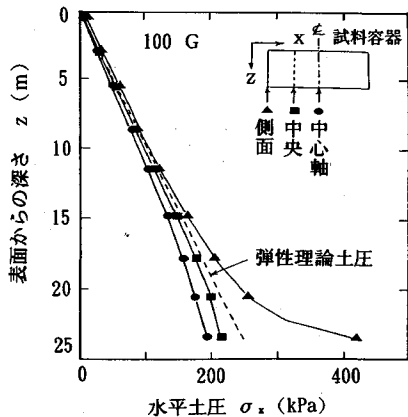
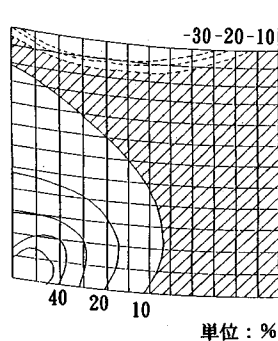


図-3 (b) 試料容器内の水平土圧分布



※中心軸上の応力に対する誤差

図-3 (c) 水平土圧の誤差分布

性応力解析を FEM で行ってみた結果が図-3 である。材料定数は、弾性係数 $E=19\,600\text{ kN/m}^2$, ポアソン比 $\nu=0.375$, 単位体積重量 $\gamma=15.52\text{ kN/m}^3$ とし、容器側面と試料との摩擦は考慮せず滑らかな条件とした。

図-3(a), (b) は、試料中央、試料容器側面およびその中点での鉛直・水平応力分布を弾性理論土圧と比較したものである。これによると、遠心場では理論土圧からの乖離が鉛直土圧より水平土圧の方が大きく、容器底

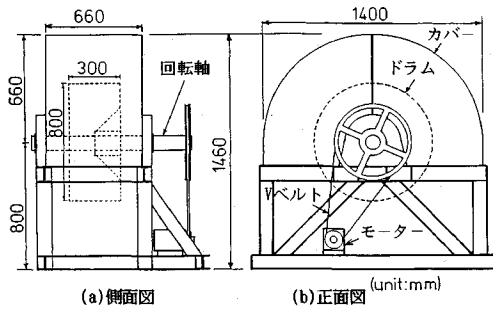


図-4 ドラム型遠心装置 (直径 0.8 m)

部に近づくにつれそれが著しくなる。図-3(c)は、容器左部分での水平土圧からの乖離を示したもので、地表面では低目に、また容器底端部方向に高目になることが明らかで、10% 以内の誤差に止まるのは図中の斜線部分である。この容器の回転面と ϵ_2 方向が垂直の場合の解析結果をみると、ドラム型のみにはひずみ状態の非合理性があるとの批判的を得ていないことが明らかである*。さらに、大規模ビーム型遠心が目指す広範囲の地盤ではプロトタイプである地盤が地球の曲率によって必ずしも平坦ではない点、および定常状態にある地下水面形状は試料形状、容器形状によらず、遠心場によってのみ決定される点も指摘しておこう。

3. 小型ドラム型遠心装置の試作

(1) 直径 0.8 m のドラム遠心装置^{3),4)}

本装置は、昭和 60 年に地盤工学用としてはわが国で初めて試作したもので、装置利用の直接的な目的は、堤防の決壊を頭に描いた水流と地盤との相対速度を有する模型化の可能性の検討である。装置の基本構成は、8 mm 板厚の鋼製回転ドラムと、直径 100 mm の鋼製円筒回転軸、5.5 kW モーター、V ベルト、および操作盤パネルからなる。本装置は図-4 に示す通りであり、回転体を 2 点で支持する構造形式で、回転面は垂直面とした。これは、通常の三軸試験機とほぼ同等のスペースで本装置を作成する目標と、粘土試料および水の容器内への投入が容易であるとの判断からであった。事実、作成された装置の占有スペースは、1.6 m × 2.0 m × 1.7 m である。

回転ドラム本体は、直径 0.8 m、幅 0.3 m、深さ 0.1 m であり、装置の最大遠心加速度は 150 G (回転数 619 r. p. m.) である。円周方向に模型地盤を作成すると、プロトタイプに換算して 330 m の長大構造物のモデル化が可能となる。なお、回転体外周に両開きのカバーを作成し、周辺の空気の流動を防止し、かつ装置回転中の安全を図った。

* なお、ビーム型では、容器の回転面と ϵ_2 方向が平行となる場合、誤差は小さくなる。

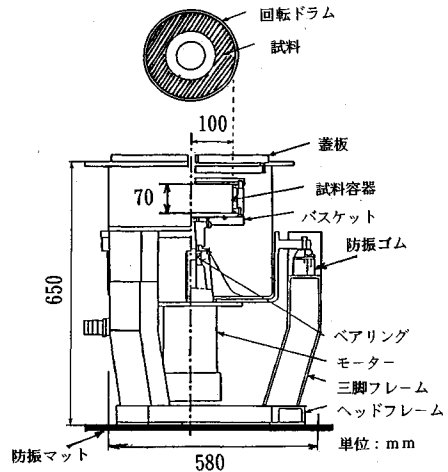


図-5 ドラム型遠心装置 (直径 0.2 m)

(2) 直径 0.2 m のドラム遠心装置¹⁰⁾

本装置は平成元年に試作したもので、軟弱粘土の自重圧密係数の測定を主な利用目的として、試作されたものである。この動機は、軸対称弾性圧密計算の結果から、小型回転ドラムでも現象のモデル化が可能であるとの判断¹¹⁾と、埋め立て現場で即座に実験可能とする遠心装置の開発を考えたものである。従って、装置は移動可能な、自立式の三脚フレームで回転部を支えるタイプを考えた。容器は水平面回転とした。それは鉛直面回転の直径 0.8 m のドラム装置に於いて、加速度低下時に残留した表面水が運動し、地盤表面が損傷すること、また回転停止時に上部地盤が自重により崩壊するケースが存在することの経験の反省からである。同時に自重圧密試験では含水比の測定精度が結果に大きな影響を及ぼすので、回転数を低下させて余剰表面水分を吸水する機能を付与することを配慮したためである。

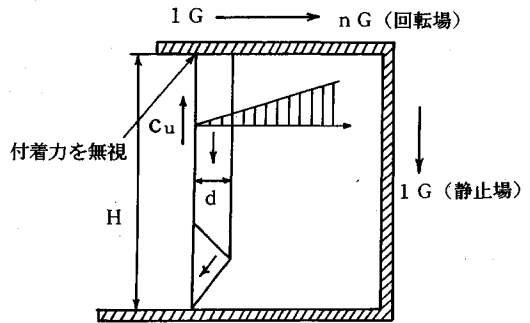
装置の基本構成は、0.8 m 装置と同じであるが、モーターの回転を直接バスケットに伝え、V ベルトを使用しない点、および回転部と容器部を分離し圧密容器そのものを着脱を可能とした点の 2 点が異なる。これは、装置の小型化と試験回数の向上に有利となる。

装置は図-5 に示す通りで、幅 580 mm、高さ 650 mm、総重量は 870 N である。試料容器は材質がステンレス製で、半径 100 mm、厚さ 70 mm、有効深さ 60 mm で、有効容積は $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ である。回転数は最大 3,000 r. p. m.、最大遠心加速度 700 G で、最大プロトタイプ層厚 40 m を可能とした。

回転体の上板は脱着可能なアクリル製とした。これは 0.8 m ドラムでの自重圧密実験の経験から、水面を通しての粘土表面沈下の測定は、誤差を生じ易いため、粘土表面を直接計測できる方法が望ましいこと、およびスケールを直接アクリル上板にはりつけることにより肉眼

表一 ドラム型遠心装置の性能比較

	最大遠心加速度 (G)	有効半径 (m)	ドラム寸法 (m)			最大回転長さ (m)
			半径	幅	深さ	
宇都宮大 (0.8 m)	150	0.35	0.40	0.30	0.10	330
宇都宮大 (0.2 m)	700	0.07	0.10	0.07	0.06	308
UMIST	1000	0.113	0.125	0.121	0.025	710
U. C. Davis	650	0.535	0.60	0.230	0.130	2184
ケンブリッジ大	600	0.85	1.00	1.00	0.30	3200



図一六 正規圧密地盤の破壊メカニズム

観察のみによる実験を可能とするためである。

本装置でも、回転中の安全のため 15 mm 厚のアクリル製蓋で保護した。また質量アンバランスによる回転容器の振動は、3脚上部に設置した防振ゴムで吸収することとした。さらに装置全体を防振マットの上に設置し、周辺機器への振動を更に低減した。

現在までに公表されているドラム型装置の性能の一覧を表一に整理した。

(3) 設計上の 2, 3 のポイント

装置を設計するには、装置の構造安全性および実験実施の両面からの考察が必要である。装置の構造を決定する主要な要因は、

- a) 回転面を水平面とするか、鉛直面とするか、
- b) 自立式とするか、固定式とするか、
- c) 回転部自身を試料容器とするか、回転部と容器を分離するかの 3 点である。実験実施上の問題点では、(a) の回転面の決定が第 1 番の問題である。

装置の構造上の問題について、水平回転面を選択する場合、図一五の 0.2 m ドラムの様に、構造モデルとしては、容器上部からの試料投入や観測計器の配置等を考えると、近接した 2ヶ所のベアリングによる片持梁形式の支持構造になりやすい。そのため模型の層厚・幅は、直接回転軸に作用するモーメントを増大させる。従って、大半径ドラムの作成にはこうした配慮が必要である。これに比べ、鉛直回転面を選択すると、図一四の 0.8 m ドラムの様に 2 点支持の構造モデルが安定している。

次は回転面決定に関する試料作成上の問題点である。模型実験に流体（水あるいは高含水比の粘土スラリー）を用いる場合、鉛直回転では、回転数が小さいときは、回転体と流体とのせん断伝達が十分ではないため、30 G 以下の回転では試料は安定した状態で回転しない。安定した回転に達すると水面形は、中心軸が G/ω^2 だけ上方に移動した円形となることが相対運動の立場から予測される。一方、水平面回転では水面形は回転放物線となり、上・下での水位差

$$\Delta r = \frac{HG}{r\omega^2} \dots \dots \dots (3)$$

程度が存在することになる。

次の点は試料作成時点での得失である。通常試料はある回転数のもとで粘土スラリーあるいは乾燥砂を投入する。スラリー状から正規圧密地盤を作成することは、鉛直面、水平面ともに困難ではない。事実 0.8 m、0.2 m ドラムで地盤作成を実施した経験では特に困難な問題はない。しかし、模型地盤の成形のため静止状態とする回転静止時の安定に問題が生じる。鉛直面回転の場合、静止状態下の模型地盤が安定であるためには、試料と回転ドラムとの付着に期待せざるを得ない。静止状態では時間とともに下方に向けて水分移動が生じ、付着力が劣化するため、圧密した粘土地盤、締め固めた粘性土を早期に成形することが必要となる。その他の場合、我々の経験では静止状態での模型作成は下方周壁 1/4 程度に限られる。

また水平面回転では軸対称鉛直斜面の安定が保持される場合のみ可能である。具体的に地表面強度ゼロの正規圧密粘土地盤、砂地盤作成について検討してみよう。

正規圧密地盤について図一六に示すメカニズムを仮定する。 d が十分薄ければ問題は 2 次元問題として近似できよう。ここで、上部の試料とドラムの接触面での付着力および、下部の三角形部分の抵抗を無視して、近似的に鉛直面での力の釣合式をとれば、鉛直斜面が安定であるのは、

$$kdH > dH\gamma \dots \dots \dots (4)$$

となる。

ここで k は、深さ方向の非排水強度 c_u の増加率であって $k = (c_u/\sigma'_v)n\gamma'$ と記述される。ここで、 H : 斜面の直立高さ、 σ'_v : 鉛直有効応力、 γ' : 土の水中単位体積重量である。

従って

$$n > (\gamma/\gamma') / (c_u/\sigma'_v) \dots \dots \dots (5)$$

なる加速度下で圧密し、地盤強度分布を確保すればよい。いま $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ 、 $c_u/\sigma'_v = 0.25$ とすれば $n = 12 G$ 以上

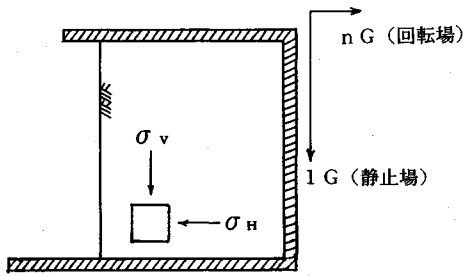


図-7 斜面底部の応力状態

で圧密すればよいことになり、これは実行可能である。

乾燥砂、飽和砂では鉛直斜面は成立しない。そのため、試料を不飽和状態としてサクシオンを利用することになる。この方法は、Cambridgeで採用されている試料作成方法¹²⁾である。従って問題は不飽和砂の直立斜面の安定問題となる。図-7に示す様な斜面底部での応力状態を考える。ここでもドラム上盤と試料との付着は無視する。

モール・クーロン式

$$\sigma'_v - \sigma'_H = (\sigma'_v + \sigma'_H) \sin \phi' \dots\dots\dots (6)$$

を全応力と間隙水圧 u で書き直せば

$$\sigma_v - \sigma_H = (\sigma_v + \sigma_H - 2u) \sin \phi' \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで底部での斜面表面では $\sigma_v = \gamma H$, $\sigma_H = 0$ とおけるので

$$\gamma H (1 - \sin \phi') / \sin \phi' = -2u \dots\dots\dots (8)$$

と変形される。負の間隙水圧は山口¹³⁾によれば

$$u = -\frac{0.38 \gamma_w}{D \sqrt{e}} \dots\dots\dots (9)$$

と書ける。ここで e は土の間隙比、 γ_w は水の単位体積重量、 D は砂の平均粒径で cm 単位で表示したものである。

以上より

$$HD = \frac{2 \times 0.38 \gamma_w \sin \phi'}{(1 - \sin \phi') \sqrt{e} \gamma} \dots\dots\dots (10)$$

で表される。従って、粒径と直立高さは双曲線関係となる。 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\phi' = 30^\circ$, $e = 0.68$ とすれば、

$$HD = 0.5 \dots\dots\dots (11)$$

となり、500 mm (50 cm) の直立斜面が必要ならば、平均土粒子直径が 0.1 mm (0.01 cm) 以下の粒子を選ぶ必要がある。

このように試料作成の面からは、上に示した条件を満たせば水平面回転の方が有利である。ただし、砂試料の場合、回転ドラム内に初期に投入するには、多少の工夫が必要で、Cambridgeではジェットリングによって乾燥砂をドラム壁面に吹き付ける方法を採用している¹²⁾。

最後に模型内加速度の変動について触れておく。鉛直面回転では地球の重力加速度の影響で試料に回転に伴い

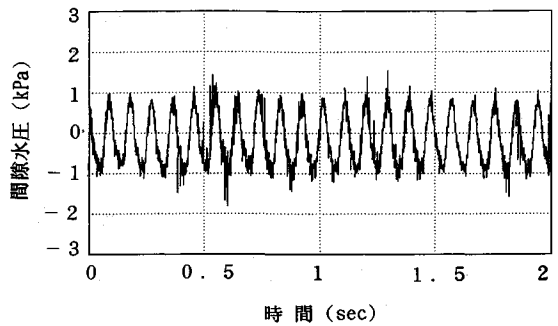


図-8 縦型ドラム装置における ±1G による過剰間隙水圧の変動

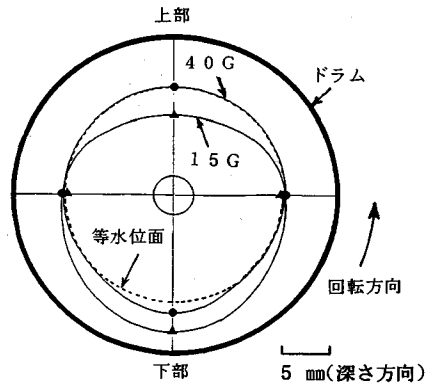


図-9 ドラム中央部での水面形

±1Gの繰り返し加速度履歴が作用する。図-8は0.8 mドラムで、直方体容器に水を満たし、40 Gのもとで過剰間隙水圧挙動を測定した例である。明らかに回転数と同期した周期の変動が観測され±1Gの影響は、低いGでは無視し得ない影響を及ぼすことになる。これに対し、当然ながら水平面回転では加速度場の回転に伴う周期性はない。

4. 装置の利用例と問題点

(1) 水流の発生

0.8 mドラム装置試作の直接の動機は、内部流体の運動の地盤工学への利用であった。空気と水面との抵抗や回転容器側面と流体との不完全なせん断力伝達によって、縦型ドラム容器内の流体は、容器に対して相対的に運動することになる。これを実験的に調べるために、定常状態での水面形状および流速の測定を縦型0.8 mドラムで行った。ドラム中央部に半径方向に垂直に最小目盛り1.0 mmのスケールを設置し、15 Gまで遠心装置を加速した後に平均水深約55 mmまで水を投入する。そのまま定常状態に達した時点、および40 Gで定常状態に達した時点で、水面位置でのスケールの目盛りをトランシットにより読み取る方法によって水面形状の測定を行った。測定位置は、上下左右の4箇所、それぞれ

の位置にスケールが通過する時点でストロボスコープの発光の同期を変化させて水深を計測した。ドラム中央部での測定結果を図-9に示す。なお、図中の等水位面からのずれは強調して描いている。15 Gでは左右の水深は同一であるが、頂部で最大水深を取り、最下部で最小水深を示しており、相対運動からの予測とは異なった結果が観察された。この傾向は40 Gではほぼ消滅し、各測点で均等な水深になっている。

一方、平均的な相対流速は、発砲スチロールおよびコルクの碎片を投入して、それらが静止状態に観察される時点のストロボスコープの発光周期と、ドラム回転数との差より算出した。浮遊物体の空気抵抗の差異などの原因により、発砲スチロールでは約0.2 m/sec、コルクでは約0.45 m/secの相対流速がドラム回転方向とは反対方向に発生しているのが確認された。なお実験条件は、水面形状の計測時と同一である。さらに、直径3 mmの超小型プロベラ流速計(篠塚製作所, SV-3型)をドラム内に設置し、水深50 mmの水流に対して水面下10 mmの位置での流速を測定した。その結果、ドラムが鉛直方向に回転するのに呼応して、水流はドラム回転方向に対して正、反の方向の流れを繰り返していることを示すデータが得られ、この傾向は20 G以下の加速度場で顕著である。40 Gの定常状態では表面近傍の測定データより小さい0.12 m/secの流速が計測された。以上、縦型ドラムでは、回転に伴い流速は回転位置によって常に変化し、また深度方向にも流速分布が生じていることが観察された。この観察事実は、遠心回転のみによる水流の発生および定常的な流体運動を発生させるには縦型ドラム装置は適していないと判断させるものとなっている。

(2) 正規圧密地盤の作成

直径0.8 mのドラム型遠心装置内で、自重圧密により正規圧密粘性土地盤の作成を行った経験を述べる¹¹⁾。

粘土は、川崎粘土 ($w_L=99.4\%$, $w_p=39.0\%$)を用い、これを繰り返して初期含水比130%に調整した。まず約15 G (200 r.p.m.)で回転中のドラム内部に、粘土スラリーを投入する。これには安全に対する十分な注意が必要で、塩化ビニール管を通して投入する方式を用いた。塩化ビニール管の位置の設定は別途作成したマニピュレーターにより行った。投入終了後、回転数を所定の圧密遠心加速度まで加速し、自重圧密を開始する。圧密中は、時間経過に伴う地表面の沈下量をドラム壁面に取り付けた目盛りを、トランシットを通して読みとる。圧密の打ち切り時間の目安は、粘土層の沈下がほぼ停止した時点とし、初期層厚80 mmの川崎粘土 ($I_p=60.4$)を80 Gの遠心加速度で自重圧密した場合の圧密時間は約48時間であった。

圧密終了後は、遠心加速度を徐々に減速すると、10

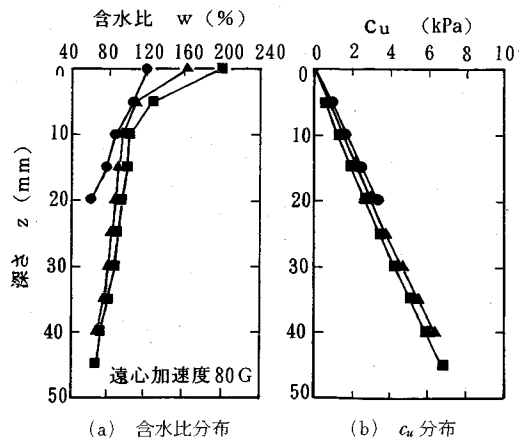


図-10 深さ方向の含水比測定結果

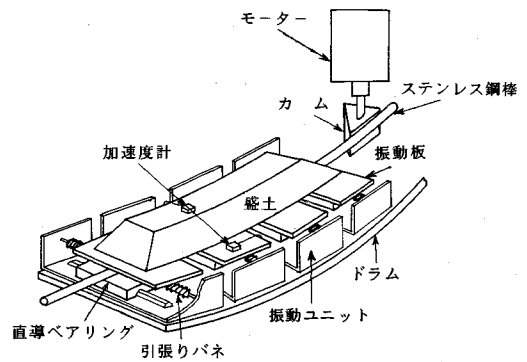


図-11 地震発生装置

G以下の加速度に回転数が低下すると、地盤表面の水がドラム外に排出されるが、停止時には地盤底面とドラム壁面との付着力により、ドラム上部の粘性土が下方に落ちることはない。地盤内3カ所にアルミニウム円筒を挿入し、模型地盤の深さ方向の含水比分布を測定した結果を、図-10に示す。同図には深さ方向の含水比分布から計算される非排水せん断強度 c_u の分布の関係も示してある。深さとともに c_u は増加しており、正規圧密状態に近い模型地盤が作成されたものと考えられる。なお0.8 mドラムの外周面には、排水層機能を与える工夫はしておらず、排水条件は、粘土層上端のみの片面排水である。

(3) 地震発生装置の開発

a) 地震発生装置⁵⁾

直径0.8 mのドラム型遠心装置に用いるべく振動システムの開発を試みた。このシステムの構造は、図-11に示すように直動ベアリングを用いた振動ユニット(振動板、直動ベアリング)をドラム内に7個並べ、それらを直径5 mmのステンレス鋼棒で連結し、ステンレス鋼棒の片端を可変電動モーター(90 W)で打撃することにより、強制変位を与える方式である。モーター軸の先

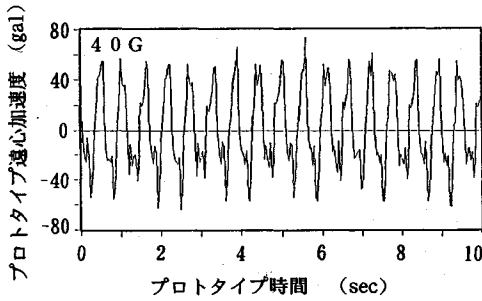


図-12 盛土基盤の加速度波形の一例

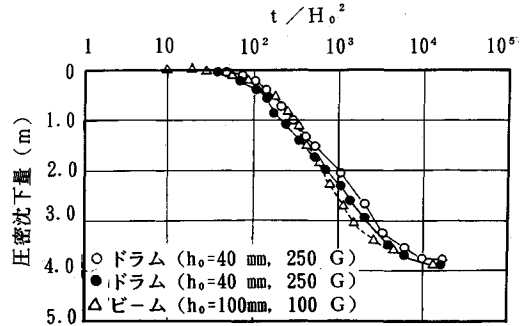


図-13 圧密-時間曲線の比較 (ドラム型, ビーム型)

端には三角カムを取り付け、ステンレス鋼棒を打撃し、強制振動させている。その振動が各振動板に伝わり、直動ベアリングにより振動板はドラム回転方向と直角な方向に振動する。そのためコリオリ力は影響しない。その際、一定間隔の振動板両端部は、ステンレス鋼棒によって受けた強制変位を元の位置に戻すために、バネによって拘束されている。このようにして、地震時の長大構造物の蛇行現象をドラム内で再現することができる。この装置はドラム全周の1/4にあたり、遠心加速度80 Gの下では、長さ40 mの構造物のモデル化が可能である。

b) 地震発生装置の特性と限界

地震発生装置は、40 Gにおいてプロトタイプの周期で0.3~1.3秒の振動が得られる。振動周期の変更は、モーターの回転速度を変化させることにより簡単に操作可能である。実験で再現できる周期は、実際の地震動の周期をほぼカバーしていると考えられるが、表面波のような長周期の波形についてはさらに改良が必要である。

加速度は、モーターのパワー、バネの拘束条件やバネ定数、供試体負荷による影響がある。モーターの周波数が高くなるにつれて最大加速度は増加しており¹⁴⁾、モーターの制御により様々な加速度をモデル化することができる可能性がある。図-12は、盛土基盤で測定した加速度波形の一例であるが、ほぼ一定振幅の振動波形が得られている。

(4) 2, 3の利用例

a) 粘性土の自重圧密実験

直径0.2 mのドラム型遠心装置と有効半径2.2 mの東洋建設総合技術研究所のビーム型遠心装置¹⁵⁾を使用して、同一のプロトタイプサイズの粘土層について、自重圧密実験を実施し両者の比較を行った例を紹介する¹⁶⁾。用いた試料は液性限界の1.5倍のスラリーに調整した神戸粘土 ($G_s=2.67$, 塑性指数 $I_p=56.6$, 圧縮指数 $C_c=0.55$) である。ビーム型装置は、初期層厚 $h_0=100$ mm, 100 Gの実験条件である。また、0.2 mドラム型では遠心加速度を167, 200, 250 Gとし、このときの層厚をそれぞれ60, 50, 40 mmとして modeling of models の

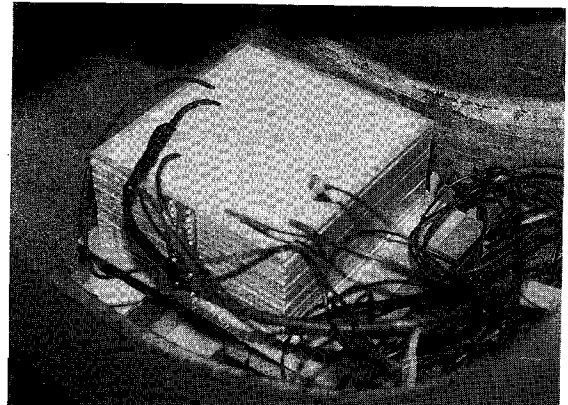


写真-1 セン断土層

確認実験も実施した。モデルとしたプロトタイプは10 m地盤の自重圧密である。図-13は、ドラム装置で行った2ケース ($h_0=40$ mm, 250 G) とビーム装置の結果 ($h_0=100$ mm, 100 G) の圧密-時間曲線を比較したものであるが、両者の一致は良好である。これは遠心半径/試料厚比が0.4以下であれば、小型ドラム型遠心装置でも一次元圧密状態が近似でき、ビーム型遠心装置とほぼ等価な自重実験が簡便に行えるものと判断される。

b) 砂地盤の液状化実験

直径0.8 mのドラム型遠心装置で開発した地震動発生装置を用いて、砂地盤の液状化実験を試みた¹⁷⁾。用いた試料容器は、側壁全体がモデル地盤と一体にせん断変形できるように5 mm角のアルミニウム製で積層構造としたせん断土槽 (縦150 mm, 横150 mm, 高さ70 mm) である。容器高さに対するドラム半径の比は0.175である。容器内壁には、水密性の確保と摩擦を軽減するため、厚さ0.4 mmのメンブレンを貼りつけた。模型地盤の試料には豊浦標準砂を使用し、間隙流体は、遠心模型実験での時間的相似則¹⁸⁾を満たすように水の30倍の粘性係数を持つシリコンオイルを使用した。液状化現象は、過剰間隙水圧の発生、消散の程度から確認することにした。写真-1は、せん断箱中に作成した模型地盤であり、4

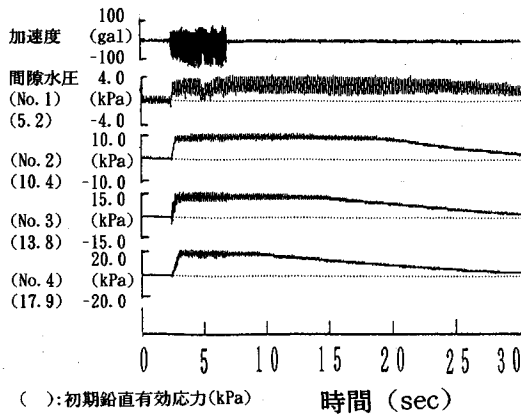


図-14 (a) 液状化実験結果

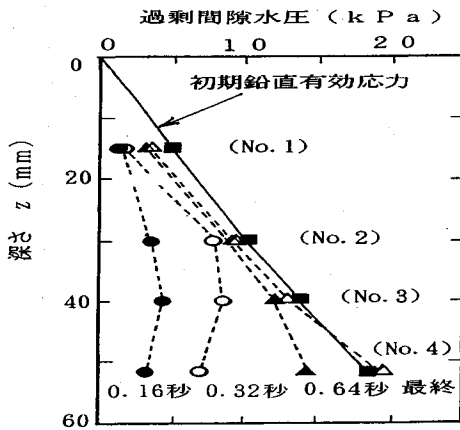


図-14 (b) 振動中の過剰間隙水圧分布の変化

個の間隙水圧計が埋設された様子を示している。

図-14(a)は、時間経過に伴う水平基盤加速度、設置高さの異なる4点の過剰間隙水圧の計測結果を示している。実験の振動最大加速度は5.93 Gとなり、プロトタイプに換算すると約145 galで震度Vに相当する大きさである。たとえば、No.2の間隙水圧に注目すると、地震動開始直後から水圧上昇が生じ、0.3秒でピークをむかえ、その直後漸次減少している。

図-14(b)は、過剰間隙水圧の発生の高さ方向分布を各時刻で見たものである。振動時間の経過とともに、過剰間隙水圧が次第に蓄積され、計算上の初期有効応力分布に接近し、液状化に至る過程が伺える。

c) 盛土中埋設管の地震時挙動

地中構造物の地震時挙動を明らかにすることを目的として、振動システム上で、盛土中に模型地中埋設管を置き埋設管内のひずみを計測した実験の例である^{14),19)}。用いた試料は、川崎粘土 ($I_p=30.0$) を33.0%の含水比に調整したもので、模型盛土は、重さ14.7 Nの円筒型のおもりを用いて一定な圧縮強度となるように手により締固めて作成した。層厚30 mmに達したら模型埋設管

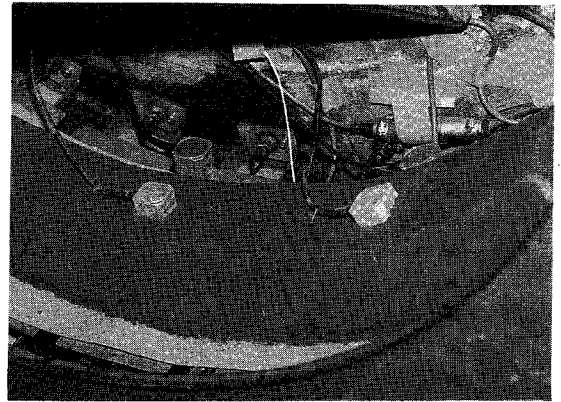


写真-2 盛土中埋設管の実験システム

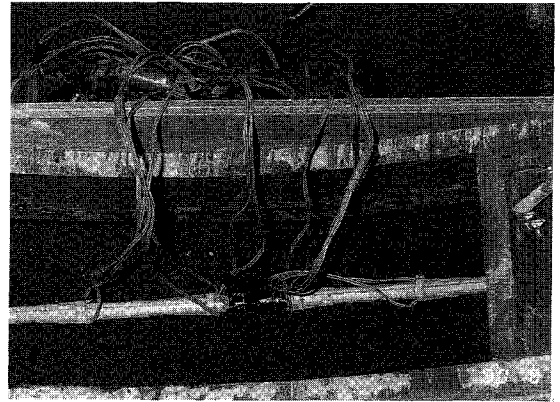


写真-3 模型埋設管

を埋め込み、再び高さ50 mmとなるまで盛土を作成する。模型埋設管は剛性の異なる4種類を用い、予めドラム内の埋設管設置位置と同じ曲率を持つように加工してある。遠心加速度は、すべてのケースで40 Gである。写真-2は、実験システム全体の状況、写真-3はひずみゲージを取り付けた模型埋設管を示したものである。

振動の発生と停止は、ドラム内部に取り付けたモーターのオン・オフを、ドラム外部の切替えスイッチにより手動操作で行える。計測項目は、基盤と盛土内部および天端の加速度、振動板の基盤水平変位、模型管表面のひずみである。

ドラム内の各変換器からの信号は、スリップリング(米国ミシガン社製, SR-20 M)を介して、外部のデジタル動ひずみ測定器((株)東京測器製, DRA-10 A)へ送り込まれる。これらのデータは、すべてパーソナルコンピュータ(NEC, PC-9801 VM)によりフロッピーディスクに保存される。実験データのサンプリング時間は3 secで、サンプリング間隔は0.5 msecである。データ収録の操作、各校正係数の入力、波形グラフの出力、サンプリング間隔などは、専用のプログラムによりすべてパソコン制御により行うことができる。

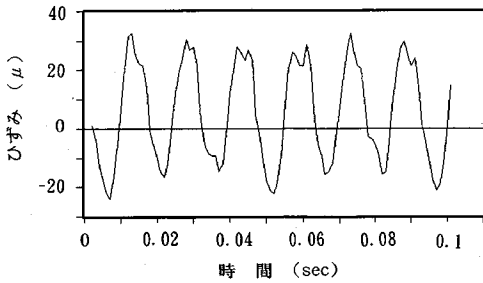


図-15 (a) 曲げひずみ波形 (アルミニウム中空)

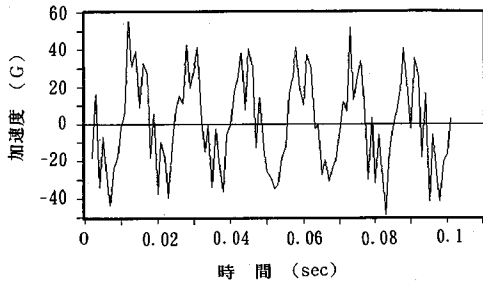


図-15 (b) 入力加速度波形

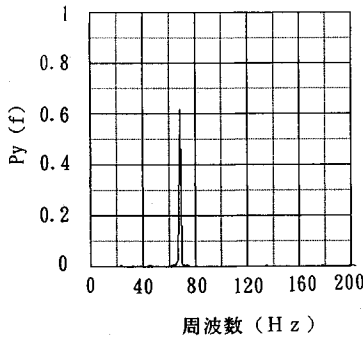


図-16 曲げひずみ波形のフーリエスペクトル (アルミニウム中空)

図-15は、アルミニウム (中空) の曲げひずみと入力加速度波形を示し、また図-16にはそのフーリエスペクトルの波形を示している。70 Hz 付近に卓越周期が認められ、入力振動の周波数特性にほぼ一致している。曲げ剛性 (EI) の異なるステンレス (中実) の実験結果もほぼ同様な形となり、EI の増加による極端なひずみ減少傾向は見られず、各管同程度のひずみ値が発生している結果が得られた¹⁴⁾。すなわち、埋設管の曲げ剛性に関係なく、管は地盤と同じ挙動を示しており、地中埋設管の変位は地盤の変位に追従し、管の挙動は周辺地盤挙動が支配的であることがわかる。このことは、過去の地震被害の調査報告と同一な結論を示すものである³⁰⁾。

5. おわりに

本報告では筆者らの5年間にわたるドラム型遠心装置の開発と利用の経験を取りまとめた。この報告ではなる

べく広範囲の利用経験を列記することに努め、ドラム型遠心装置の潜在的な利用方法にもふれた。しかし筆者らは、試作された装置が地盤工学の詳細な実験的研究には十分ではないことは自覚している。それは筆者らの初期からの目的でもない。現段階での筆者らの主な目標は、研究用装置としてよりもむしろ教育用装置としての利用である。地盤工学で遭遇する典型的な境界値問題を、模型実験を通じて体験的に学べる廉価で簡便な土質実験装置としての小型ドラム遠心装置の利用が筆者らの希望である。

近年、要素挙動研究のための試験装置の著しい開発に較べ、境界値問題解決のための試験装置の開発の遅れが顕著である。本報告がこのような状況変革への小さな寄与になればうれいと思う。

なお直径0.8 mのドラム装置の開発に関しては、昭和60年度から平成2年度まで継続的に科学研究費補助金 (一般研究 C: 代表者 日下部 治) を、直径0.2 mのドラム装置の開発には、平成元年から2年度までの科学研究費補助金 (試験研究 (B): 代表者 日下部 治、および一般研究 (B): 代表者 山口 柏樹) の援助を受けた。

まとめるに当たっては、科学研究費補助金 (一般研究 (c) 地盤工学模型実験へのロボティックスの応用に関する基礎的研究 (代表者: 日下部 治)) の援助を受けた。

本装置の利用については、建設省技官 (元宇都宮大学工学部) 黒岩 久一氏の協力が不可欠であった。また、卒業研究として実験に取り組んだ宇都宮大学工学部土木工学科卒論生 川島 明 (日産化学)、斉藤晃一 (栃木県庁)、田中重巳 (大都工業)、浪岡和浩 (住友建設)、橋本則之 (不動建設) の諸君に心から感謝したい。

また、FEM 解析には、西松建設 石橋 貢氏のご協力を頂いた。

参考文献

- 1) Schofield, A.N.: Use of centrifugal model testing to assess slope stability, Technical Report, Engineering Department, University of Cambridge, CUED/C, Soils TR 30, 1976.
- 2) Fragaszy, R. and Cheney, J.A.: Drum centrifuge studies of overconsolidated slopes, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.107, No.GT 7, pp.843~857, 1981.
- 3) Kusakabe, O., Hagiwara, T. and Kuroiwa, H.: Design and operation of a drum centrifuge, Centrifuge '88, pp.77~82, 1988.
- 4) Kusakabe, O., Kawashima, A. and Hagiwara, T.: Levee failures modeled in a drum centrifuge, Centrifuge '88, pp.147~152, 1988.
- 5) 斉藤晃一・日下部 治・萩原 敏行・横山幸満: ドラム

- 型遠心装置内での地震動発生システムの開発, 第24回土質工学研究発表会, pp.103~104, 1989.
- 6) Sekiguchi, H. and Phillips, R. : Generation of water waves in a drum centrifuge, *Centrifuge '91*, pp.343~350, 1991.
 - 7) Cheney, J.A. and Oskoorouchi, A.M. : Physical modeling of clay slopes in the drum centrifuge, *Transportation Research Record*, pp.1~7, 1982.
 - 8) Craig, W.H. : *Centrifuges, Equipment, Instrumentation, General Report of Centrifuge '88*, 1988.
 - 9) Tan, T.S. and Scott, R.S. : Centrifuge scaling considerations for fluid-particle systems, *Geotechnique*, Vol.35, No.4, pp.461~470, 1985.
 - 10) 日下部 治・横山幸満・萩原 敏行・三宅達夫 : ドラム型自重圧密試験装置の試作, 第25回土質工学研究発表会, pp.329~330, 1991.
 - 11) 田中重巳・日下部治・萩原敏行・横山幸満 : ドラム型遠心装置を用いた粘土の自重圧密試験と解析, 特殊圧密試験に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.161~168, 1988.
 - 12) Murff, J.D., Hamilton, J.M., Deen, E.T.R., James, R.G., Kusakabe, O. and Schofield, A.N. : Centrifuge testing of behavior using full jackup rig models, *Proc. Offshore Technology Conference*, pp.165~178, 1991.
 - 13) 山口 柏樹著 : 全改訂土質力学, 技報堂出版, p.35, 1984.
 - 14) 大草正則・日下部 治・横山幸満・黒岩久一 : ドラム型遠心載荷装置を用いた地中埋設管の振動実験, 構造物の基礎と地盤の動的相互作用に関するシンポジウム発表論文集, pp.117~122, 1990.
 - 15) Miyake, M., Akamoto, H. and Aboshi, H. : Filling and quiescent consolidation including sedimentation of dredged marine clay, *Centrifuge '88*, pp.163~170, 1988.
 - 16) 橋本則之・日下部 治・横山幸満・萩原敏行・三宅達夫 : 小半径のドラム型遠心模型実験装置を用いた自重圧密実験, 第26回土質工学研究発表会, pp.277~278, 1991.
 - 17) 浪岡和浩・大草正則・日下部 治・黒岩久一 : ドラム型遠心装置を用いた砂地盤の液状化実験, 土木学会第46回年次学術講演会, pp.226~227, 1991.
 - 18) 高田直俊・日下部 治 : 遠心模型実験, 第3章, 原理, 土と基礎, Vol.35, No.12, pp.89~93, 1987.
 - 19) 大草正則 : ドラム型遠心模型実験装置を用いた地中構造物の地震時挙動に関する研究, 宇都宮大学修士論文, 1992.
 - 20) 浜田政則 : ロマブリエタ地震によるライフライン施設の被害と復旧, 土と基礎, Vol.38, No.11, pp.43~48, 1990. (1993.4.30 受付)

EXPERIENCES OF DESIGN AND USE OF SMALL DRUM CENTRIFUGES

Osamu KUSAKABE, Toshiyuki HAGIWARA and Masanori OHKUSA

Two types of centrifuges exist in geotechnical model tests : beam centrifuge and drum centrifuge. The authors have designed, constructed and utilized two small diameter drum centrifuges since 1985. They have examined the applicability of the drum centrifuges to geotechnical model testing, including problems of self-weight consolidation, liquefaction, behaviour of buried piles during earthquakes. This report summarizes their five years experiences and discusses the potential use of the drum centrifuge.