

投稿論文 (和文報告)
TECHNICAL
REPORT

Mini-drum遠心装置の設計と利用

日下部 治¹・A. N. Schofield²・S. B. Gurung³・大野 司郎⁴

¹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丁目4-1)

²Ph. D ケンブリッジ大学教授 工学部 Trumpington, Cambridge, CB2 1PZ, UK

³正会員 工博 広島大学助手 工学部第四類(建設系)(〒724 東広島市鏡山1丁目4-1)

⁴正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

応力の相似性を確保しつつ地盤工学における境界値問題を実験的に解決するために遠心装置が利用される。教育用の実験装置を目指し直径0.8mのドラム型装置(Mini-drum遠心装置)を試作し適用性を検討した結果、Mini-drum遠心装置が3軸試験装置に比せられるほど簡便でかつ多様性のある模型実験装置であるとの認識をもつに至った。本報告では、基本的な設計コンセプトと2つの利用事例、1)砂中のベル型基礎の引き抜き抵抗問題、2)粘土地盤の下向き浸透流による土壌イオンの長期容脱過程の追跡問題、を紹介し本装置を用いた実験結果の信頼性、効率性と環境地盤工学の諸問題への潜在的利用範囲を示した。

Key Words : centrifuge model test, foundations, consolidation, leaching, environmental geotechnical engineering

1. はじめに

工学に携わる者にとって高度の数値解析と画像処理技術が身近なものとなり、物理現象理解に必須となっている現在においても、地盤工学における模型実験の重要性は失われてはいない¹⁾²⁾。筆者の一人(日下部)は、先に2台の小半径ドラム型遠心装置の試作と5年間の利用の経験を報告し、その地盤工学教育における潜在的な利用価値を指摘した³⁾。その利用経験に基づき広島大学では、地盤工学における境界値問題の教育用実験装置の必要性についての共通認識をもつケンブリッジ大学(Schofield)と、1991年からMini-drum遠心装置の設計開発を共同で進めてきている。本報告は試作第1号機をもちいて約1年間ケンブリッジ大学⁴⁾および広島大学での利用の経験から、Mini-drum遠心装置が3軸試験装置に比せられるほど簡便で多様性のある地盤工学における教育用模型実験装置として有用であるとの認識をもつに至ったので報告する。

本報告では、まず設計における筆者らの基本的なコンセプトといくつかの工夫を述べる。その後には

ドラム型装置としての利用事例として砂中のベル型基礎の引き抜き抵抗問題を取り上げ、実験結果の信頼性と模型実験の効率性について説明する。さらにドラム型装置としての利用事例として粘性土地盤の自重圧密過程と、その後実物換算で200年以上の長期にわたる土壌イオンの容脱過程の追跡の試みを紹介し、環境地盤工学の諸問題にも潜在的利用範囲があることを示す。

2. Mini-drumの設計

(1) 設計方針

実験装置の試作を考える場合、物理的条件、経済的条件、利用者環境条件の3点からの考察が必要である。物理的条件としては、装置および実験占有空間、周辺空間の利用状況、経済的条件としては、作成費用、運転費用、維持費用、利用者環境条件としては、模型作成、計測およびデータ処理の難易度、可能な対象実験の多様性、装置操作の難易度および安全性を考慮すべきであろう。本研究での筆者らの主目的は教育用実験装置の試作であるので、『限ら

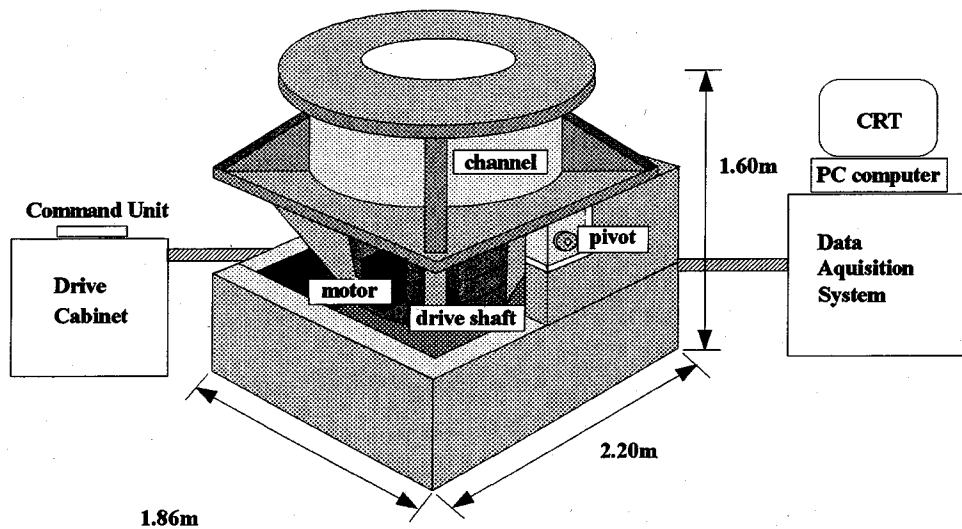


図-1 Mini-drum 遠心装置のシステム構成図

れた空間で、高価でなく、短期間の訓練で装置の運転および有効利用が可能である装置』の試作を目指した。ただし地盤工学の境界値問題理解のため、応力の相似性の確保、水理条件の制御を可能にすることは必須条件とした。具体的には装置の平面的大きさとして $2\text{m} \times 3\text{m}$ 程度、観測・計測空間を含め実験占有空間として $3\text{m} \times 4\text{m}$ 程度を想定し、通常の実験室単位に収容可能を条件とした。実験室基盤と遠心回転軸の固定部を連結させると周辺実験施設に微細な振動が影響を及ぼす恐れがあるため、装置は防震マット上に自立する方式とした³⁾。装置本体の費用はPC制御による中圧力三軸試験装置にほぼ匹敵する1千万円を目安とした。

遠心装置としての性能は、装置占有空間から直径0.8m、遠心加速度400Gを最大Gとした。これは時間相似則 $1/n^2$ に従えば、実験時間1日は438年、1ヶ月は1.3万年、1年は16万年に対応し、放射性廃棄物の処理技術の予測にも原理的には可能であるとの判断からである。幾何学縮尺 $1/n$ 則に従う実物大の寸法は1 km長 ($0.8 \times \pi \times 400 \approx 1000\text{m}$) の空間を対象とすることになる。この長大な空間を有効に利用するために、地盤容器となる回転部分と、各種の操作をするシステムを搭載する部分を独立に回転させる構造とした (Twin Concentric Shaft)。さらに長大空間を分割して利用することでビーム型遠心装置の機能も付加することにした。金属腐食を発生させる化学成分を有する液体をも利用可能とするために金属製のロータリジョイントは用いずにテフロン製リングを用いて代用させることとした。

装置の安全性のため、応力計算上回転円筒容器の上部円盤と円筒部材とのボルト接合部を最弱部 (図-2点A) とし、容器の耐力を上回る大変形時には、初めにボルト接合部が塑性変形して伸び、模型地盤中からの排水を可能にし、回転質量を減少させて不安定性の増大を回避する工夫をした。

装置利用者としては高専あるいは大学学部の学生を想定し、使用者が利用しやすい工夫を取り入れた。主軸回転用モータとしてはプログラム可能なコンピュータ制御方式を採用し、所定加速度設定、運転時間設定、非常時停止機能を採用し、操作マニュアルに従えば簡単に操作可能とし、操作の簡素化と人為的ミスの回避につとめた。また筆者らのDrum型遠心装置の試料作成の経験³⁾から、縦回転方式が試料投入が容易である点を採用して、低いG (30G程度) までは縦回転での運転が可能であるようにし、縦回転から水平回転への運転の移行を可能とする条件で設計を進めた。さらに計測器接続部は装置本体に装備し、計測・データ解析システムまでを一体として作成することで利用者は最低限度の知識と経験で遠心実験を可能とすることを目標とした。

(2) 試作された装置

試作された第1号機の全体構成図を各部名称とともに図-1に示し、回転部分の詳細図を図-2に示した。図-3は縦回転時、水平回転時の写真である。容器接続回転円盤 (図-2 ①) を回転させる主軸回転動力モータは4.7kWのParker Hannifin Corporation製のコンプモータ (形式 Z/ZX 640)、操作装

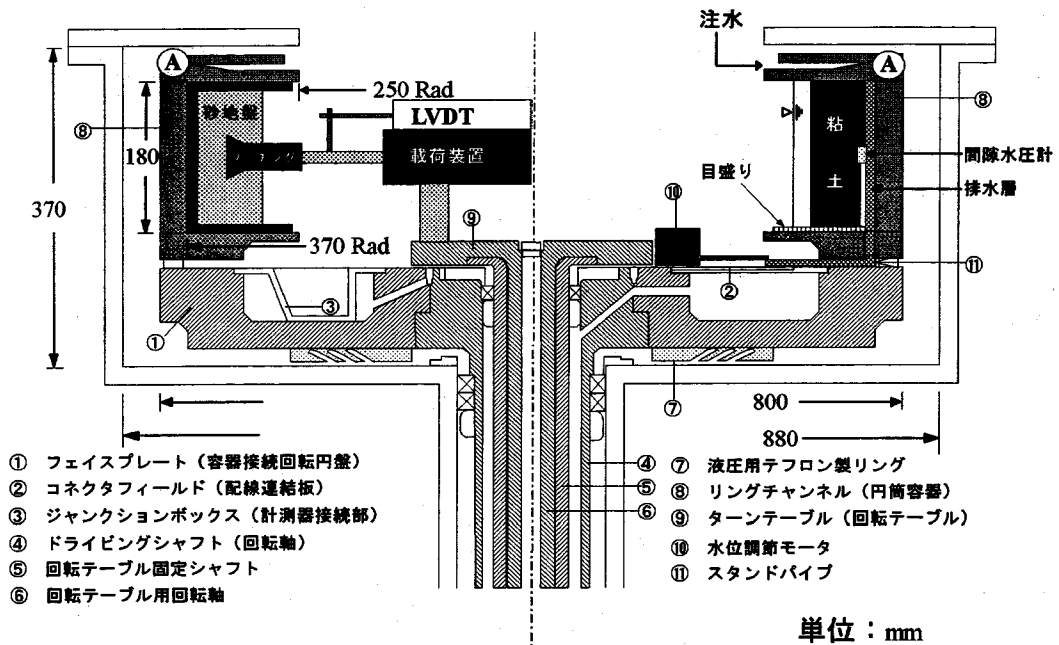
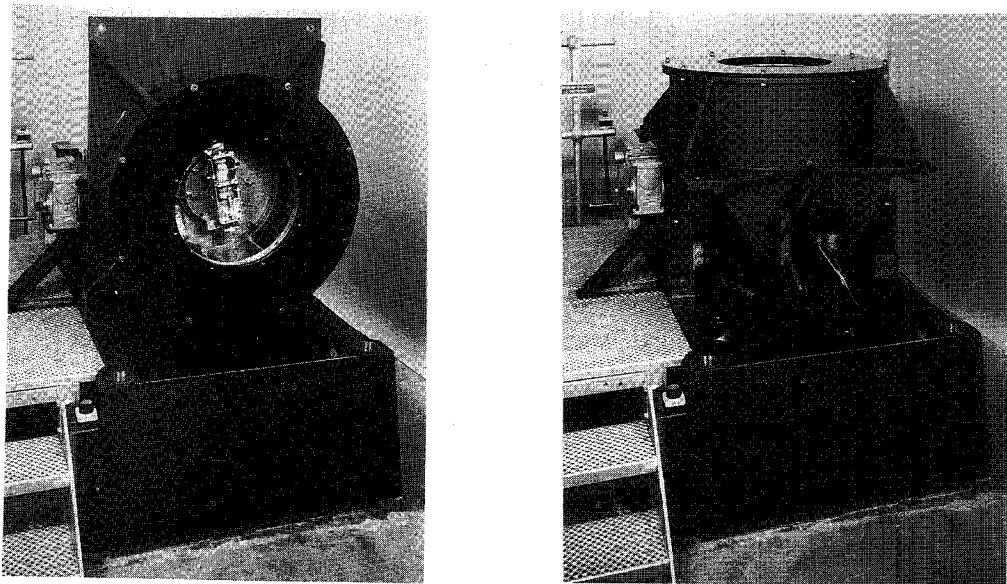


図-2 ドラム部詳細図



(a) 縦回転時

(b) 水平回転時

図-3 Mini-drum 遠心装置の運転状況

置搭載用テーブル (図-2 ⑨) の回転は7気圧の空圧モータ (Atlas Copco 製, 形式 LZB44A008-11/B) で, それぞれVベルトで個別に回転軸 (図-2 ④, ⑤) に伝達されている。両者の接続・分離は磁気クラッチを介して可能にしている。主軸運転はパネル上で対話型による加速度設定等の操作が可能である。図-2の左側にはビーム型装置としての利用図が描

かれており, 矩形容器の中に模型地盤が作成され, 回転テーブルには载荷装置が示してある。同じく図-2の右側には円筒容器の利用例が示されており, これを我々はリングチャンネル (図-2 ⑧) と呼んでいる。

リングチャンネルは容器接続回転円盤から脱着可能であり様々な機能を付属するリングチャンネルの搭

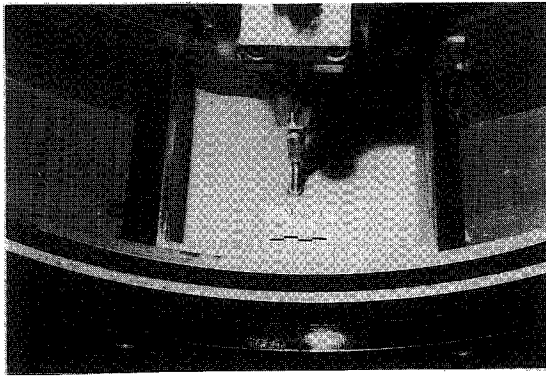


図-4 矩形容器と基礎の引抜き模型実験

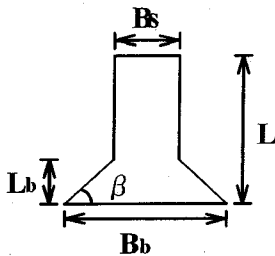


図-5 模型基礎

表-1 模型基礎の寸法

Model	Bs (mm)	Bb (mm)	Lb (mm)	L (mm)	β (Deg)	G Value
SBG-1	18.75	31.50	12.75	37.50	63.5	140
SBG-2	25.00	42.00	17.00	50.00	63.5	105
SBG-3	37.50	63.00	25.50	75.00	63.5	70

載が可能である。現在のリングチャンネルは鋼製で、その内寸法は縦120cm×横180cm×内径25cmである。

給水は、回転中に外部から外周のリングを通じて模型地盤底部から供給される。底部の水理条件は、遠隔作動する容器接続回転円盤上の小型モータ（図-2 ⑩）でスタンドパイプ（図-2 ⑪）を上下することで変化させる。

計測信号は容器接続回転円盤に埋め込まれた18チャンネル用の計測器接続部（図-2 ③）から20チャンネル有する直径230mmのスリップリングを介して、PCに取り込まれる。PCにはLabtech notebookのボードが内蔵され簡便にリアルタイムのデータ出力と、データの後処理が可能である。な

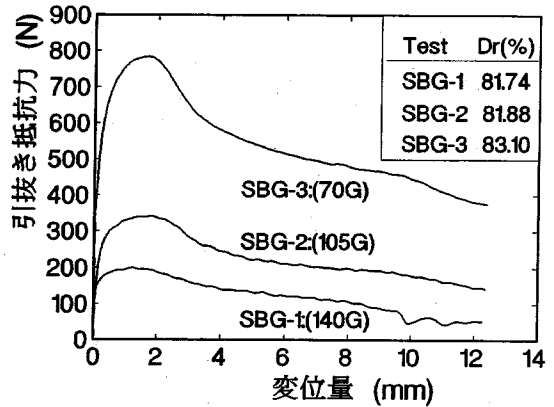


図-6 引抜き抵抗～変位関係（モデル値）

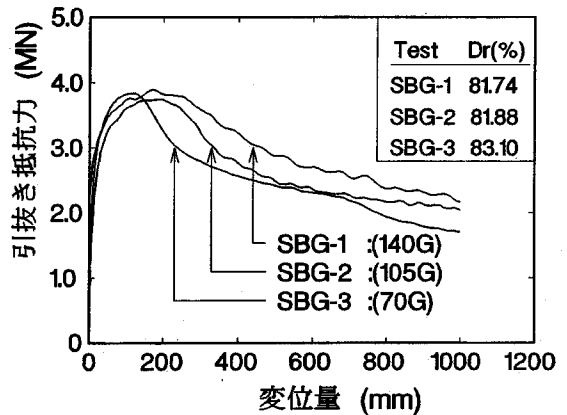


図-7 引抜き抵抗～変位関係（実物換算）

お本装置の一部はケンブリッジ大学で特許申請が行われていることを付記しておく（British Patent Application No.9417256.6）。

3. 2つの利用事例

(1) ビーム型装置としての利用事例

a) 実験条件

使用した模型容器は、リングチャンネルに脱着可能な（鋼製）長さ165mm、幅165mm、高さ115mmの矩形容器である。使用可能な最大軸対称基礎の寸法は、容器境界の影響を避けるため容器幅の約1/2.5(63mm)程度である。図-4は引抜き模型実験のためにリングチャンネルの中に据え付けた模型容器である。模型地盤下端の排水条件は、非排水条件の場合、厚さ2.87mmのゴムシートを、排水条件の場合厚さ4.66mmの多孔質マットを用いた。したが

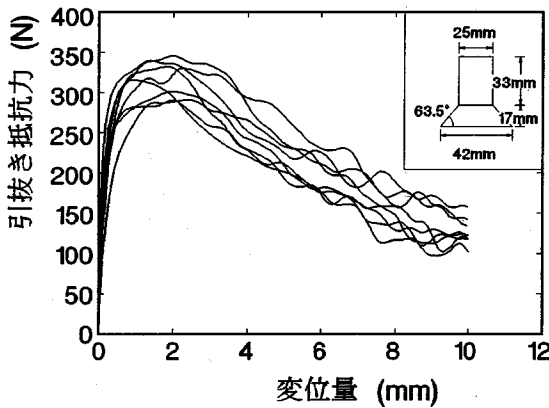


図-8 同一条件での引抜き試験結果（豊浦砂）

って、有効半径は容器下部のマットの厚さを除くと363mmとなる。

この容器で円柱基礎より大きな引抜き抵抗が期待される拡底基礎の引抜き試験を実施した。過去に同種類の実験がビーム型装置で行われている⁵⁾。模型地盤にはその模型の目的に応じて豊浦砂 ($D_{50} = 0.17\text{mm}$, $e_{\max} = 0.961$, $e_{\min} = 0.602$, $G_s = 2.63$) と Leighton buzzard sand 100/170 (BS4500, $D_{50} = 0.114\text{mm}$, $e_{\max} = 1.051$, $e_{\min} = 0.657$, $G_s = 2.689$) の2種類を使用した。全ての模型地盤は、基礎の中心が地盤に対して垂直になるように振り下げを軸に直角固定定規を用い、所定の含水比（豊浦砂は4%、Leighton buzzard sandは3%）状態で基礎頂までハンマーで10層にわけて段階的に締め固めて作成した。不飽和土を用いたのは、Mini-drumが水平方向から鉛直方向に回転方向を変えた場合に、地表面が自重で乱されるのをサクシオンで防ぐためである。全ての試験で各土層の湿潤単位体積重量は、 16 kN/m^3 を目標に地盤を作成した。模型基礎の寸法は粒子径が試験に大きく影響しないとされる基礎幅/粒子径の比が100以上⁶⁾の基礎の直径を選んだ。全ての基礎の引抜き試験は、遠心装置が所定の加速度に到達し安定した後、12Wのリモートコントロール式リニアモータにより5.5 mm/minの変位速度で引き抜いた。ひずみゲージ式ロードセルで抵抗荷重を、LVDTで変位量を計測した。計測信号中の電氣的なノイズはBESSELフィルターで取り除いた。

b) モデリング オブ モデルズ

1つの実物を表現するのに幾何学的な縮尺(1/n)と遠心加速度(nG)の組み合わせで実物と等価な応力レベルで模型試験を行い、模型内での整合性を検討することを「モデリング オブ モデルズ」と呼

表-2 同一条件下の引抜き試験による統計量

Model	Dr (%)	Pmax (N)	d' (mm)	k (N/mm)	r (mm)
SBG-9	71.73	315.00	0.93	918.64	
SBG-12	71.76	331.63	1.80	828.12	
SBG-14	70.37	290.64	2.41	679.68	35.98
SBG-15	71.29	329.83	2.26	860.48	40.25
SBG-22	71.14	289.95	1.95	921.72	34.97
SBG-23	73.64	300.98	1.98	950.88	36.25
SBG-24	68.90	345.41	1.98	1022.40	34.00
SBG-25	69.41	339.42	1.37	1264.13	38.00
Avg.	71.03	317.86	1.84	930.76	36.57
Std.	1.40	20.52	0.45	157.59	1.90
COV	0.02	0.06	0.25	0.17	0.05

d'=displacement at peak uplift resistance

ぶ¹⁾。「モデリング オブ モデルズ」の確認のため1/70, 1/105, 1/140の縮尺模型の異なる3種の拡底基礎を用い、それぞれ70G, 105G, 140Gの遠心加速度を付与して実験を行った。全ての模型基礎は模型容器の底より13.0mmの位置とし、それぞれ88.0mm, 63.0mm, 50.5mmの根入れ深さを有している。模型基礎の寸法記号を図-5、数値を表-1に示した。

図-6は、試験より得られた引抜き抵抗力と変位の関係である。図-7は変位を加速度倍(n倍)し引抜き抵抗力を n^2 倍して実物換算で整理している。これを見れば、3実験の抵抗ピーク値及びピーク時変位量はほぼ一致しており、「モデリング オブ モデルズ」の成立が確認される。ピーク値以降は地盤作成上の再現性や粒子径の影響を含む分岐破壊の問題となり、一致する必然性はない。

c) 実験の再現性

模型を用いて物理試験を実施する際、実験結果が再現可能であることは工学上重要である。試験の再現性の確認のため、豊浦砂を用いた模型地盤で同一の条件下で8回実験を行った。用いた基礎は図-8の中に示した寸法で厚さ63mmの地盤に50mm埋め込み、基礎底面で105Gの加速度を与えた。図-8は、8回の試験で得られた変位量10mmまでの引抜き抵抗力~変位関係である。表-2には実験データの統計量を整理した。ただし、kは基礎直径の1%変位の初期勾配（地盤反力係数に相当）、rは地表面に現れた破壊円の平均半径である。

模型地盤は、相対密度の平均値が71.03%、変動係数0.02と小さいものであった。また、引抜き試験での最大引抜き抵抗力は平均値317.86N、変動係数0.06、変位量は、平均値1.84mm、変動係数0.25

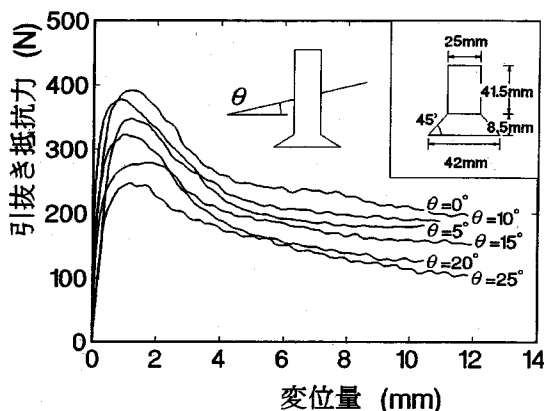


図-9 傾斜地盤における引抜き試験結果

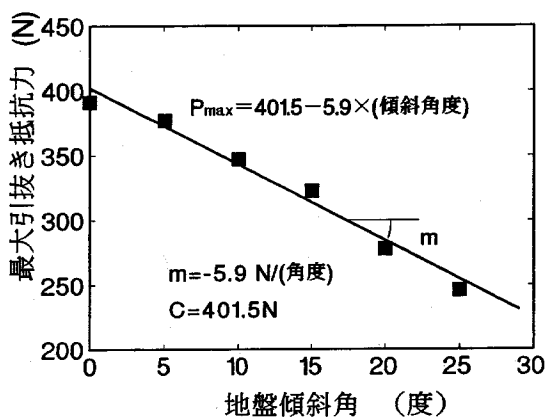


図-10 最大引抜き抵抗～傾斜角関係

表-3 傾斜地盤における最大引抜き抵抗力

Model	Dr (%)	Slope angle (Deg)	Pmax (N)
SB0G	82.65	0	390.98
SB5G	82.65	5	376.62
SB10G	82.46	10	346.80
SB15G	82.22	15	322.22
SB20G	82.16	20	277.66
SB25G	81.99	25	245.89

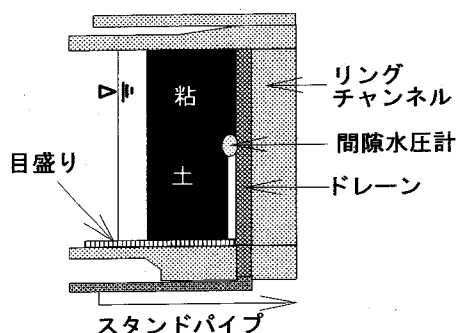


図-11 ドラム容器と実験システム概念図

初期勾配は平均値 930.76N/mm, 変動係数 0.17, 破壊円の半径は平均値 36.57mm, 変動係数 0.05 と極めてばらつきの小さいもので, 本実験装置と実験手法は十分信頼できる再現性の高いデータを提供することが明らかである。

d) 実験の効率性

実設計においては, 未知の境界値問題に対して短期間で設計の意志を決定する必要がしばしばある, これを模型実験を用いて行うことを想定し, 斜面中に構築された拡底基礎の引き抜き試験を傾斜角を変化させて行い, 短期間に実験公式を求めようを試みた。地盤底面から13mmに基礎を設置した後, 基礎上面が斜面の中央にくるように模型を作成して $\theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ の傾斜模型地盤を Leighton buzzard sand で作成し, 引き抜き試験を実施した。図-9には, その模型基礎の寸法と各傾斜地盤より得られた荷重～変位曲線を, 表-3には各傾斜地盤における最大引抜き抵抗力を示した。図-10は最大引抜き抵抗力と地盤傾斜角との関係である。模型地盤の傾斜が増加することによって, 拡底基礎の有する引抜き抵抗力は減少する傾向があることがわかり, 引抜き抵抗力の減少率は傾斜地盤で

の破壊領域の減少として説明できる。抵抗力が斜面勾配の増大にほぼ直線的に減少するこの傾向は, 斜面上直接基礎の鉛直支持力⁷⁾や斜面近傍に設置された杭の水平支持力の低減傾向⁸⁾にも類似している。図-10の最大引抜き抵抗力 P_{max} と地盤傾斜角 θ との関係をも最小2乗法により回帰直線を求めると

$$P_{max} = -5.9 \times \theta + 4015(N)$$

となる。この関係は, 同種の基礎の実際の設計に対して有用な知見となろう。また, 1Gの傾斜した粘土斜面に対して実施した松尾の実験⁹⁾も同様傾向を与えている。

今回のMini-drum装置によれば, この6回の実験は2日間で実施可能で, 同じ時間を費やして得られる3次元FEM等の数値解析の情報と比べて遜色ない。むしろ, 破壊性状の目視観察が可能であること, 廉価な費用, 少ない技術的経験で実施可能である等, ドラム型遠心実験の利用の方が実務面で有利であると判断される。

(2) 円筒試料を用いた利用事例

a) 実験条件

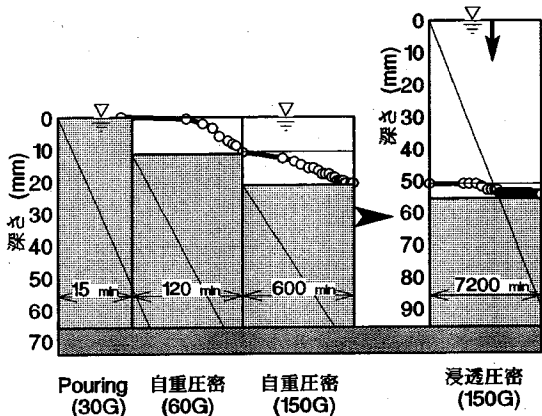


図-12 実験手順と圧密過程

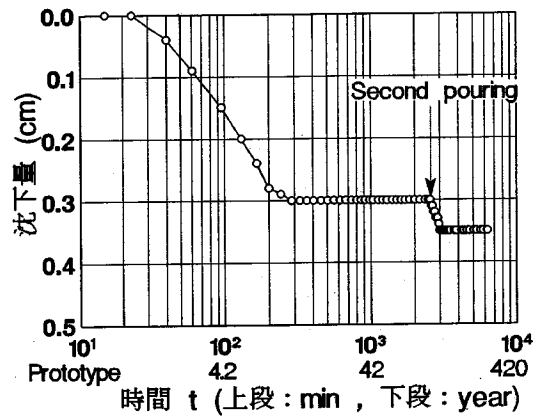


図-14 150Gでの浸透圧密沈下

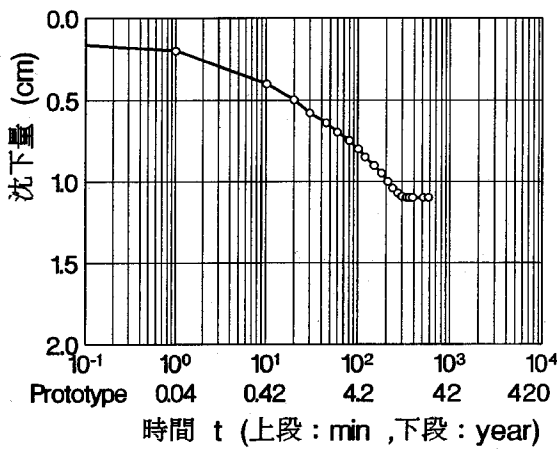


図-13 150Gでの自重圧密沈下

Mini-drum遠心装置の長所の一つは、長大な地盤の模型実験が可能であることにある。これは、同一加速度履歴を有する均質地盤で試験筒所を変えて数回のパラメトリックスタディを実施するのに適している。さらに、装置のバランスが良いため高い加速場での長時間の実験が可能で、例えば、汚染物質の土壌への拡散や、クイックレイ等に見られる土壌イオンの容脱過程など長期現象を取り扱うことができる。特に、ダルシーの法則が成り立つ範囲では、時間は $1/n^2$ に短縮するので、大きな層厚の粘土の圧密現象等の観察に有効であり、圧密データは1965年以降ビーム型、ドラム型遠心を用いて蓄積されつつある^{3) 4) 10)}。

ドラム装置の地盤環境問題への潜在的な可能性を検討するため、粘土地盤の淡水の一次元浸透によるイオンの容脱過程を追跡する実験を行った。

海成の広島粘土 (L.L.=82%, P.L.=32%, IP=50, $G_s=2.635$) を用い、片面上面排水条件下で

自重圧密過程を行い、一次圧密沈下がほぼ終了したところで、上澄み(海水)を取り除き、蒸留水を加え、下面を排水面とするように境界の水利条件を変化させて下向き一次元浸透流を発生させて、蒸留水を浸透させる。そのとき排水量、イオン濃度、水位、沈下量、間隙水圧を測定した。この間、遠心装置は一定加速度を保持したままである。イオン濃度が一定になった時点で装置の回転を停止し、地盤内含水比の深度分布を測定する。その後、再度所定のGに戻し、地盤強度の計測のため杭の貫入試験及び引き抜き試験を行った。なお、沈下量及び水位は側面の最小目盛り1mmの物差しを目視による測定、間隙水圧は圧力変換器からスリップリングを介して自動計測を行った。また、化学分析は用いた粘土が自然試料でありイオン種類が多様であるため測定精度及び簡便性を考慮し最も含有率の高い塩素イオン (Cl^-) を排水量300ml毎の平均イオン濃度として硝酸銀法¹¹⁾で測定した。

b) 遠心圧密

実験システムの概念図を図-11に示した。全ての計測装置は、回転の中心軸に対して点対称に据え付けた。2カ所のドレーン中央部に間隙水圧計を据え付け、4カ所の側壁の目盛りによって沈下挙動を観測し地盤の均一な沈下を確認した。後に実施する浸透試験の時に水道が出来ないように側壁や側壁に沿う計測器の周囲を十分にシリコングリースで塗布した。図-12は試験手順の模式図を粘土層厚の経時的変化として示したもので、圧密沈下曲線を付してある。片面上面排水を条件に、円筒容器を縦回転させながら(30G)、初期含水比130%(L.L.の1.5倍)の試料投入後、粗粒成分の分級を防ぐため60Gで自重沈下が安定した後(2時間)、150Gに加速度を上げ圧密沈下を計測した。150Gでの3

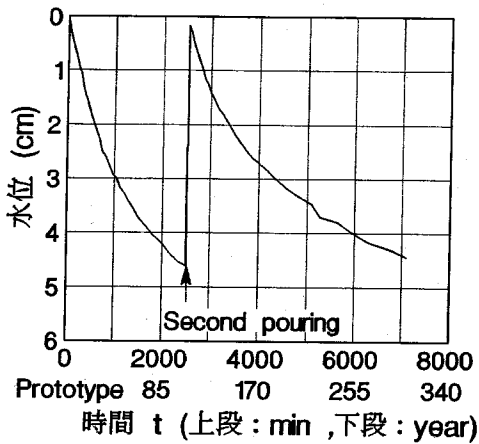


図-15 水位差の経時変化

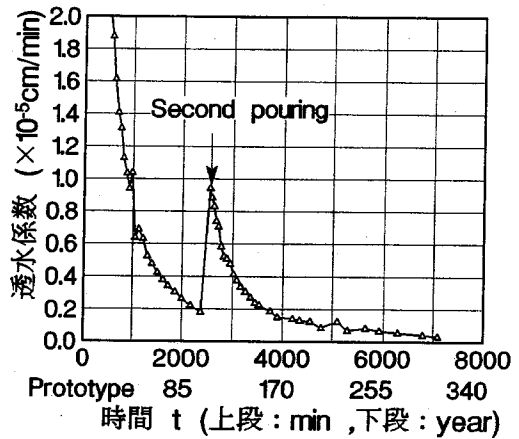


図-17 透水係数の経時変化

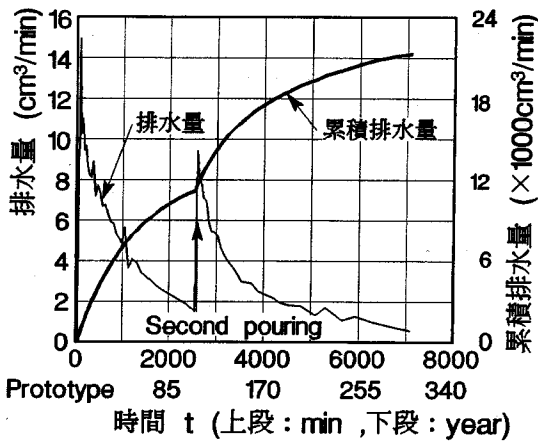


図-16 単位時間当たりの排水量

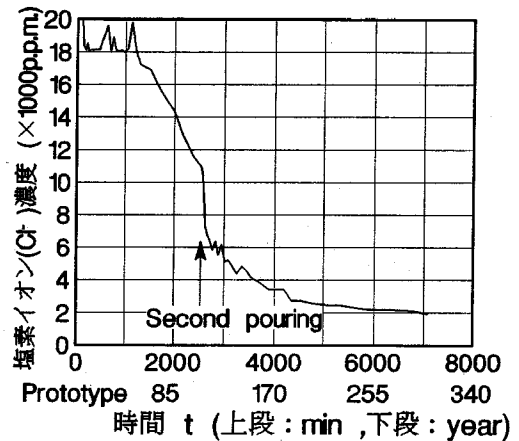


図-18 イオン濃度の経時変化

T法による圧密終了¹²⁾まで、所要時間は600分、プロトタイプで19年間の圧密を観測したことになる(図-13)。

c) 1次元浸透

海成粘土の間隙水は、塩素イオン濃度 20,000ppm 以上で、片面排水条件による自重圧密完了後の上部の上澄みは間隙水とほぼ同じものが計測された。サンプル水の確保と低イオン濃度の淡水の注水のために、地盤表層を傷つけない程度の水位まで、遠心回転中に真空ポンプを用いて上澄みをくみ出し(表層より 5mm 程度)、表面より 50mm の水位まで蒸留水を投入した。このとき、投入した水がせん断力によって高速回転中の粘土試料の堆積構造を壊さないように配慮した。その後小型モータで作動するスタンドパイプを下げ、遠心力の作用方向への一次元浸透を行った。水位差の低下により時間の経過とともに排水量がきわめて微量となるため2度の蒸留水の投入を行った。

浸透力の付与は、地盤内の有効応力の増大、ひいては浸透圧密を引き起こすことは図-14にみるとおりで 0.35mm の沈下が観測された。有効応力は水位の低下とともに減少するが、浸透力による圧密は継続し単位時間当たりの排水量は減少する。図-15、図-16は、それぞれ水位差、単位時間当たりの排水量の経時変化を示している。水位差の経時変化は、徐々に緩やかになっている。この関係から変水位透水試験法に準じて求めた平均的な透水係数の経時変化を示したのが図-17である。得られた透水係数 (10^{-5} cm/min) は標準圧密試験より求められる値にほぼ等しいオーダーであった。

また、図-18は、塩素イオンの容脱過程の経時変化を示している。排水から得た経時的な塩素イオン濃度の変化は、間隙水中のイオン分の減少であり、その地盤強度への影響度は工学的に興味深い。

2回目の蒸留水投入時には、跳水の影響でドレン以外からの排水経路への蒸留水の進入があり、イ

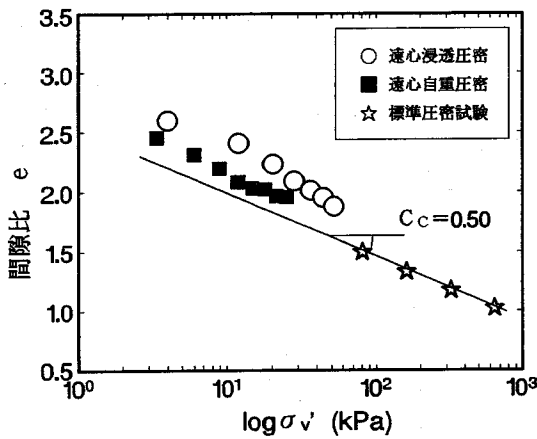


図-19 平均含水比から得られる $e \sim \log \sigma'_v$

オン濃度が顕著に変化している部分がある。しかし、その経時曲線はカオリン試料で行ったケンブリッジ大学での試験結果⁴⁾と容脱過程が定性的に一致する。

この7000分にあたる浸透試験はプロトタイプで300年のデータに対応する。また、5日間の長期にあたる稼動でも装置は安定性に優れ、データ計測時のみが実験上の拘束時間であった。

d) 地盤強度

3. (1)の利用事例で用いた载荷システムを用い、円柱基礎(基礎直径 $D=25\text{mm}$)を用いてその貫入抵抗力と引抜き抵抗力を測定した。一度遠心装置の回転を停止させ、深さ方向の地盤内含水比分布を測定するとともに载荷装置を搭載し(所要時間30分)所定の加速度に復帰した直後に深さ方向の貫入・引抜き抵抗力を測定した。

模型地盤を10層に切り分けて各層ごとの平均含水比を測定し、回転半径と遠心加速度から深さ方向の鉛直有効応力 σ'_v を計算すると $e \sim \log \sigma'_v$ 関係が算定できる。ただし、標準圧密試験結果の $e \sim \log k$ 関係によれば、粘土の上層部と下層部の k の比は2程度であるので、全層の平均動水勾配1を用いて浸透時の有効応力を算定した。その結果を示したのが図-19で、図中には同一条件下で遠心自重圧密(150G, 900min)を行った結果も合わせて示してある。両者の勾配は標準圧密試験から得られる $C_c = 0.50$ に近い。

また、図-20は、深さ方向の貫入及び引抜き抵抗力の分布である。実験は容器の点対称な2点で実施し、両者に有意な差は見られなかった。また、貫入抵抗力 Q_1 、引抜き抵抗力 Q_2 は、ある深度 Z での非排水強度を $C_u(Z)$ 、先端支持力係数を $N_c(Z)$ 、基礎直径を D とすると、近似的に

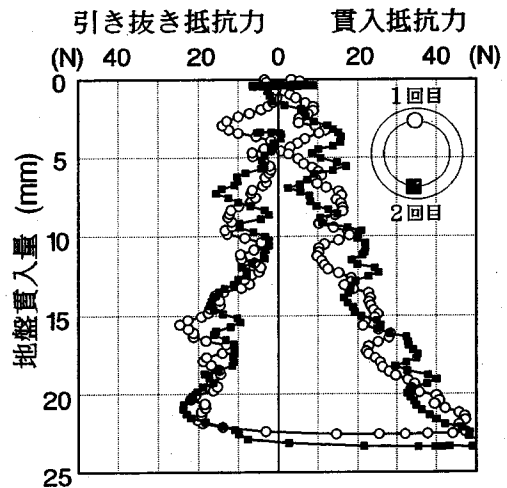


図-20 円柱基礎の貫入・引抜き試験

$$Q_1 = \pi D \alpha \int C_u(Z) dZ + \frac{\pi D^2}{4} N_c(Z) C_u(Z)$$

$$Q_2 = \pi D \alpha \int C_u(Z) dZ$$

と表示される。両式より、底面の非排水強度は、

$$Q_1 - Q_2 = \frac{\pi D^2}{4} N_c(Z) C_u(Z)$$

から推定される。いま、 $\alpha = 1$ 、 $N_c(Z) = 6$ とし、沈下量20mmの非排水強度 $C_u(Z) = 8 \text{ kPa}$ を得る。模型地盤は K_0 条件のため、等方圧密条件下の三軸圧縮試験結果の C_u/p 値(0.41)を用いて、 $(C_u/p)_{K_0} / (C_u/p)_1 = 0.8^{13)}$

なる関係と $e \sim \log \sigma'_v$ 関係から推定される非排水強度 $C_u(Z)$ は10kPaとなり、貫入試験から得られる値にほぼ一致する。

イオンの容脱が地盤強度に及ぼす影響の定量的評価は今後の研究課題であるが、今回の円筒容器による広島粘土を用いた一連の実験から、長時間を要する地盤工学問題へのアプローチが比較的容易に行えることを確認した。

4. まとめ

本報告では約1年間の利用の経験から、Mini-drum遠心装置が3軸試験装置に比せられるほど簡便で多様性のある地盤工学における教育用模型実験装置として有用であることを事例をもって示した。このMini-drum遠心装置は大学、高等専門学校における教育用のみならず、既設の大型遠心装置を有

している機関でも、高額で長期にわたる大型模型実験実施の計画準備段階や大型実験結果を補完する役割としても利用されうるのであろう。ただし、それには縮尺模型としての限界や境界条件についての正しい認識と結果の解釈が必要なのは言うまでもない。

なお本報告作成の一部には科学研究費（一般研究 B：課題番号 05452241、自然堆積地盤への遠心支持力実験の適用限界に関する実験的研究、代表、日下部 治）の援助を受けたことを付記する。

謝辞：本研究をすすめるに当たって多くの方のご理解とご支援を頂いた。特に九州大学工学部落合英俊教授、竹中工務店技術研究所、建設技術研究所、基礎地盤コンサルタント、西松建設技術研究所の方々に厚くお礼を申し上げたい。装置の設計・作成・運転には Wilkinson, Collison, Baker（ケンブリッジ大学）、山本博（広島大学）の各技術者の協力が不可欠であった。記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 土質工学会編：地盤工学における模型実験入門，p.165, 1994.
- 2) Taylor,R.N. 編：Geotechnical Centrifuge Technology, p.320, Blackie Academic & Professional, UK, 1994.
- 3) 日下部治，萩原敏行，大草正則：小半径ドラム型遠心装置の試作と利用の経験，土木学会論文集，No.487/III-26, pp.255-264, 1994.
- 4) Evans,D.C, Savvidou,C, & Schofield,A.N：Contaminant migration through clay in a mini-drum centrifuge, *Centrifuge '94*, pp.381-368, 1994.
- 5) Dickin, E.A., and Leung, C.F.：Performance of piles with enlarged bases subjected to uplift forces., *Can. Geotech. J.* 27, pp.546-556, 1990.
- 6) 日下部治：基礎工に関する遠心実験の利用と適用性，地盤と建設（土質工学会中国支部論文集），Vol.11, No.1, pp.1-10, 1993.
- 7) 毛戸秀幸，前田良刀，上原精治，日下部治：しらす斜面上の段切り基礎の大型模型載荷実験，土木学会論文集，No.397/Ⅳ，pp.75-84, 1988.
- 8) M.Terashi, M.Kitazume, A.Maruyama, and Y.Yamamoto：Lateral resistance of a long pile in or near the slope, *Centrifuge '91*, pp.245-252, 1991.
- 9) Matsuo, M.：Study on the Uplift Resistance of Footing (I), *Soils and Foundations*, Vol. 7 No. 4, pp. 1-37, 1967.
- 10) 高田直俊，藤井齊昭：遠心模型実験，第5章，適用事例，土と基礎，Vol.35, No.12, pp.89-93, 1987.
- 11) 日本下水道協会編：下水道試験方法，第31節，塩素，pp.137-140, 1974.
- 12) 土質工学会編：土質試験の方法と解説，pp.106-115, 1990.
- 13) Nakase, A., and Kamei, T.：Influence of anisotropy of deformation modulus on effective stress path, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.106-110, 1984.

(1994.12.6受付)

DESIGN OF A MINI-DRUM CENTRIFUGE AND A FEW APPLICATIONS

Osamu KUSAKABE, Andrew N SCHOFIELD, Sukh B GURUNG
and Shiro OHNO

A 0.8 m diameter mini-drum centrifuge facility was designed and constructed mainly for the purpose of geotechnical engineering education. It was revealed that the mini-drum centrifuge is less costly, easy to use and is a versatile facility comparable to triaxial apparatus. This report describes the basic design concepts and two applications; pull out test of bell-shaped foundation, long-term modeling of leaching of clay layer, demonstrating the validity and high repeatability, the cost effectiveness of the use of mini-drum centrifuge, and a potential use for long-term geotechnical environmental predictions.