

遠心载荷模型実験に関する基礎実験

Fundamental Study on Centrifuge Model Tests

成田 国朝・奥村 哲夫・大根 義男
Kunitomo NARITA, Tetsuo OKUMURA and Yoshio OHNE

ABSTRACT: In this paper, several features and efficiencies of the geotechnical centrifuge apparatus set up at AIT in March, 1993 are first outlined. In order to confirm effective ways of utilizing the centrifuge and to acquire basic experimental techniques, some fundamental studies were carried out on the calibration of pick-ups and the measurement of earth and pore-water pressures in water and sand deposits. Discussions were then made on the effects of side friction in the container and stress concentration and arching of soils around pick-ups on the precise measurement of earth pressures. Test results reveal that in the calibration of earth pressure pick-up, appropriate correction is needed for inertia force and soil properties, and that the effects of side friction and arching on earth pressure measurements are strongly dependent on the particle size.

1. はじめに

地盤や各種土構造物の変形挙動や破壊性状の解明、あるいは理論解析や数値計算法の検証を行うために各種の模型実験が行われる。しかし、土質材料の力学特性は拘束応力に強く依存するため、自重応力の極く小さい小型の縮尺模型を用いた実験では、実物と模型との相似性が問題となり、その結果は定性的な議論にとどまざるを得ない場合が多い。

遠心载荷模型実験は、実物の $1/n$ の模型を重力加速度の n 倍の遠心加速度の場に置いて模型内に実物と同じ自重応力状態を再現しようとする手法であり、その有用性は既に各所で認められている。

本報告は、平成4年度私立大学研究設備整備費等補助金（私立大学研究設備等整備費）の補助により本学に設置された遠心载荷模型実験装置の概要と、本装置の有効な使用方法の確認や精密な実験技術の取得を主目的として、各種計測計器（土圧計・間隙

愛知工業大学 土木工学科（豊田市）

水圧計等）の検定や砂地盤内での土圧測定に関する基礎実験を行い、模型土槽内の側壁摩擦および計器周辺でのアーチ作用や応力集中が土圧測定に与える影響を調べた結果について述べるものである。

2. 遠心载荷模型実験装置

2.1 遠心力载荷装置

遠心力载荷装置の性能諸元、概観および概略図を表-1、写真-1および図-1に示す。本装置は以下に示す回転部や制御部などで構成されている。

(1) 回転部

図-1に示すように、回転部は、主軸、主軸に剛結された回転アーム、アーム先端にピン結合された試料容器やカウンターウェイトを搭載するためのスイングプラットホームから構成されている。

回転アームは電動モータ（3相200V, 11kw）を動力とし、Vベルトおよびプーリーを介し、主軸を中心

として水平回転する。そしてスイングプラットホームは、回転速度に応じてピン結合部を軸として振れ上がり試料容器内の模型に遠心加速度を与えることができる。

また主軸の上部には、模型内に設置した各種検出器の電気信号を外部に取り出すための弱電用スリッ

プリング(48極、Max:50vDC-100mA/極)や電磁弁等への電力を供給するための強電用スリプリング(10極、Max:100vAC-10A/極)、および空気圧、水圧、油圧を供給するためのロータリージョイント(空気

表-1 装置の性能諸元

項目	性能
有効半径	1360 mm
最大遠心加速度	200g (75g)
最大搭載重量	75kgf (200kgf)
容量	15 g・ton
最大回転数	360 rpm
駆動馬力	11.0kW インバータモータ
試料容器搭載形式	スイングプラットホーム
載荷スペース	W660xD500xH770

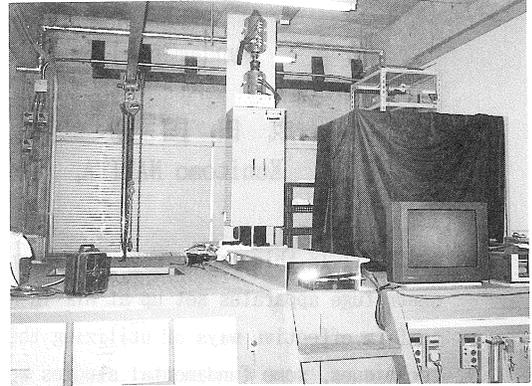


写真-1 装置の全景

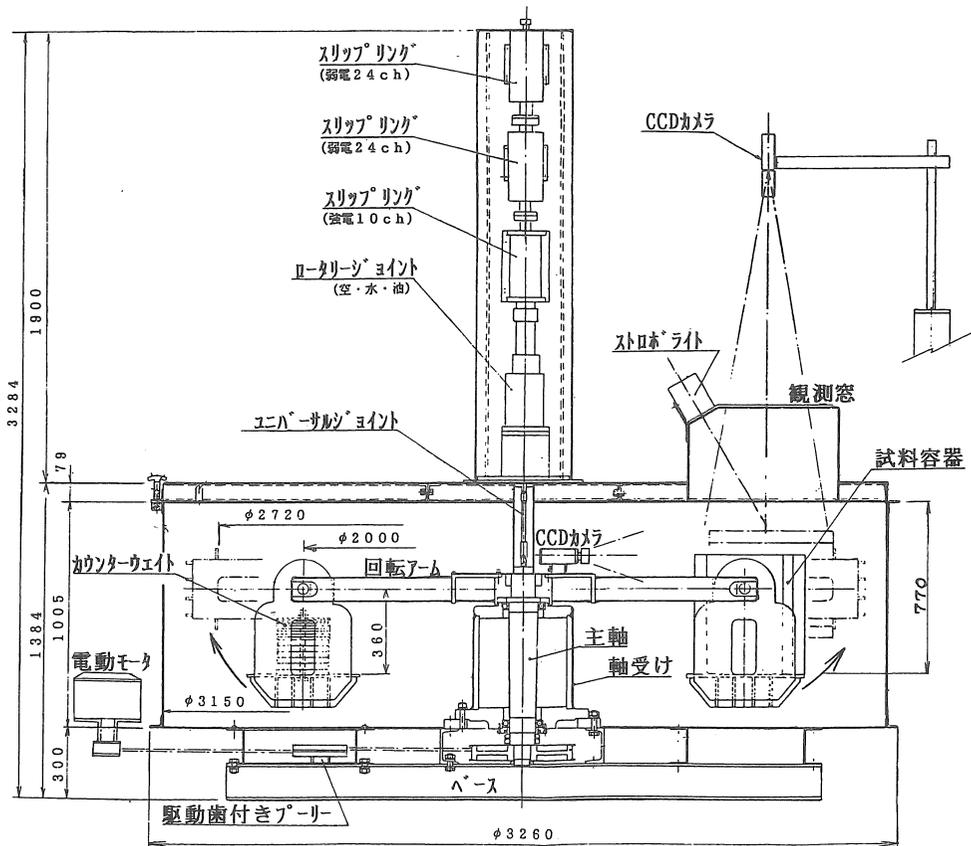


図-1 遠心力载荷装置の概略

圧：1極， $P_{max}=10.0\text{kgf/cm}^2$ ，水圧：2極， $P_{max}=10.0\text{kgf/cm}^2$ ，油圧：2極， $P_{max}=100.0\text{kgf/cm}^2$ ）がユニバーサルジョイントを介して組み込まれている（写真-2参照）。

(2) 試料容器

試料容器の内寸法は $W460 \times D200 \times H460\text{mm}$ である（写真-3参照）。材質にはアルミ合金を使用して軽量化を図っているが、容器の一側面は模型の変形を光学的に観察するために透明のアクリル樹脂（ $t=40\text{mm}$ ）を使用している。なお、本容器は奥行 $D=200\text{mm}$ の二次元模型実験用であり、三次元下の実験には新たな容器が必要となる。

(3) 制御器

制御器は、アームの回転速度（遠心加速度）を制御するためのインバータ（VCD-110，三木プーリ製）、回転速度の検出やカメラ撮影用のストロボ発光のためのストロボピッチャースコープ（SVS-3B，菅原研究所製）、遠心加速度を監視するための加速度表示器、および模型表面観察表示用のモニターテレビなどから構成されている。

図-2は、インバータの設定周波数および回転計の出力電圧とアーム回転数との関係を調べたもので、この結果は本装置の制御や遠心加速度の算出のための資料となる。

(4) 安全装置

スイングプラットフォーム上に $100 \sim 150\text{kgf}$ の重量を搭載し、他端のプラットフォームにはバランスを保つためのカウンターウェイトが搭載される。回転アームのバランスは回転軸を中心とした両者のモーメントの差が許容範囲（本装置では最大2%で設計）に納まるようにカウンターウェイトの搭載重量を調整して行われる。このバランスチェックは、実験者が手計算とパソコンで2重に行う。さらに装置の運転者（教員）は駆動電源投入前に上記の計算チェックおよび計算の入力値と実搭載重量との対比を行って再度安全確認を行う。表-2はパソコンによって求めたバランス計算結果の出力例である。

上述のバランスチェックが完全なものであったとしても、回転アーム上に設置した各種機器の脱落など何等かの原因でバランスが失われ、回転軸にローリングが発生するなどして主軸のベアリングが破損

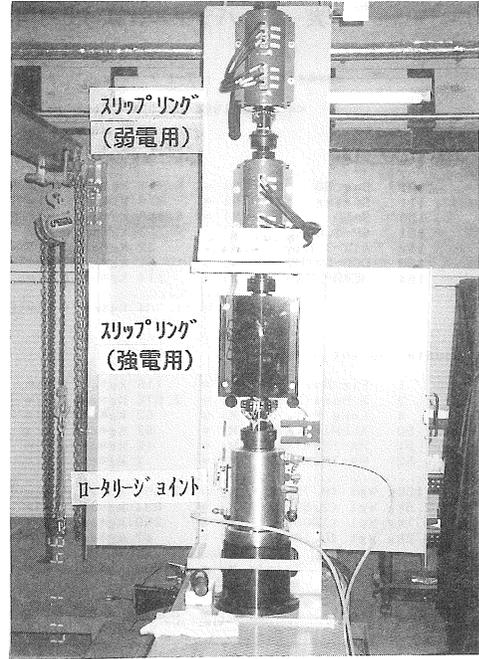


写真-2 スリッピングリングとロータリージョイント

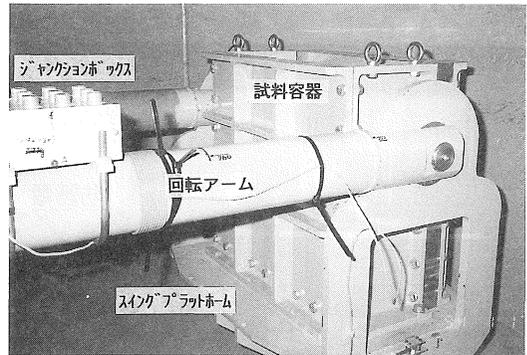


写真-3 試料容器

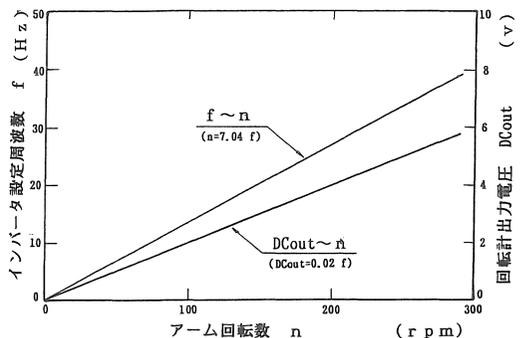


図-2 インバータ設定周波数及び回転計出力とアーム回転数の関係

表一 2 バランス計算の出力例

```

***** Test No. : T-1 / Person Name : 4_HAN *****
<< Date 1994-02-05   Time 14:13:00 >>

Container Side:
101 Box. 50      Mi = 5,717 kg*cm ( Wi= 50.46kg / Hi= 22.70cm )
111 Spacer      Mi = 919 kg*cm ( Wi= 6.82kg / Hi= 1.20cm )
150 SAND        Mi = 4,488 kg*cm ( Wi= 38.82kg / Hi= 20.40cm )
151 6P-J. BOX   Mi = 53 kg*cm ( Wi= 1.42kg / Hi= 98.50cm )
152 AIR-J. BAR  Mi = 32 kg*cm ( Wi= 0.87kg / Hi= 99.50cm )
153 CCD-CAMERA  Mi = 61 kg*cm ( Wi= 3.20kg / Hi=117.00cm )
154 HEAD-LIGHT  Mi = 114 kg*cm ( Wi= 5.72kg / Hi=116.00cm )
-----
Total: Mt = 11,384 Kg*cm ( Wc=107.31kg )

Counter Weight Side:
1 Fix. Bar      MJ = 116 kg*cm ( Wj= 0.91kg / Hj= 9.00cm )
3 S. Base (20K) MJ = 2,676 kg*cm ( Wj= 19.86kg / Hj= 1.25cm )
4 Long. Nut     MJ = 52 kg*cm ( Wj= 0.44kg / Hj= 17.30cm )
50 ALUMI-PLATE MJ = 52 kg*cm ( Wj= 2.53kg / Hj=115.50cm )
51 HA-TERMINA1 MJ = 12 kg*cm ( Wj= 0.40kg / Hj=105.50cm )
52 HA-TERMINA2 MJ = 2 kg*cm ( Wj= 0.10kg / Hj=113.50cm )
-----
10kg. Wgt (9.70kg) MJ = 7,551 kg*cm ( Wj= 58.20kg < 2p.> / 7.50cm)
2.5kg. Wgt (2.52kg) MJ = 634 kg*cm ( Wj= 5.04kg < 2p.> / 0.60cm)
1kg. Wgt (1.00kg) MJ = 250 kg*cm ( Wj= 2.00kg < 2p.> / 0.60cm)
0.2kg. Wgt (0.19kg) MJ = 47 kg*cm ( Wj= 0.38kg < 2p.> / 0.60cm)
-----
Total: Mu = 11,393 Kg*cm ( Wu= 89.86kg )

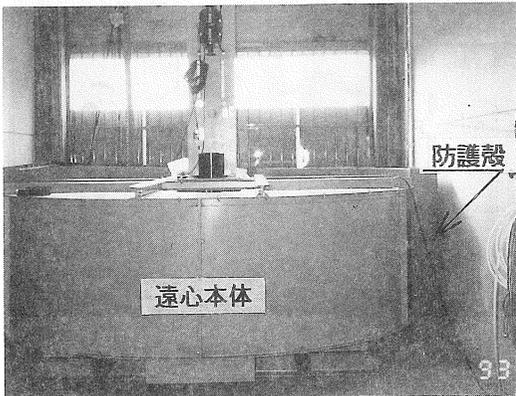
Balance Error:      Error = 0.07 % ( dM = 8 kg*cm )
    
```

Maximum G-level:

User's Name:

Checker's Name:

Operator's Name:



写真一 4 コンクリート製防護殻



写真一 5 画像計測装置

したり重大な事故に結び付くことが危惧される。本装置では回転軸上部のスリップリングを固定している塔および本体基礎部の合計4カ所の変位を運転時に常時計測し、装置全体の動きを監視している。また、回転アーム上にはCCDカメラを設置し、試料容器やアーム上の各種機器の作動状況の監視を行っている。さらに、スイングプラットフォームの脱落など大きな事故に備えて写真一4に示すようなコンクリート製の防護殻(φ3200, H1400,t250~1000)で装置の側壁全体を覆い安全性を高めている。

2.2 計測装置

(1) 画像計測

斜面や地盤など各種の土構造物の破壊機構を解明するためには、模型の変形挙動を連続的に観察し、後に収録した画像の処理を行って模型の挙動を詳細に解明する必要がある。写真一5は、アームの回転と同期して発光するストロボ光のもとで撮影されたCCDカメラからの画像を収録するためのビデオ装置(①)、収録画像を解析処理するための画像処理装置(②,PIASⅢ)、および解析のためのパーソナルコンピュータ(③,32ビット,PC9801FAU)などの全景である。図一3は画像計測システムの概略を示している。

(2) 電氣的計測

一般に、増幅器など各種計測機器は、遠心本体(回転体)の外に設置される。この場合、測定点の数は弱電用スリップリングの極数の制約を受ける。本装置のスリップリングは48極であるから、通常の使用方法(入力2極、出力2極の計4極/1点)では12点の測定となる。この制約を幾分でも解消する方法として、回転アーム上に検出器用の入力電源を設置し、種々の検出器への入力電源の極数を減らす方法がある。図一4は、回転アーム上に設置した直流電源(6VDC)を用いて行ったポテンシオメータの

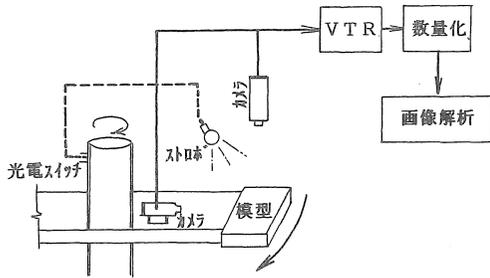


図-3 画像計測システムの概略

変位量と出力電圧の検定結果の一例である。

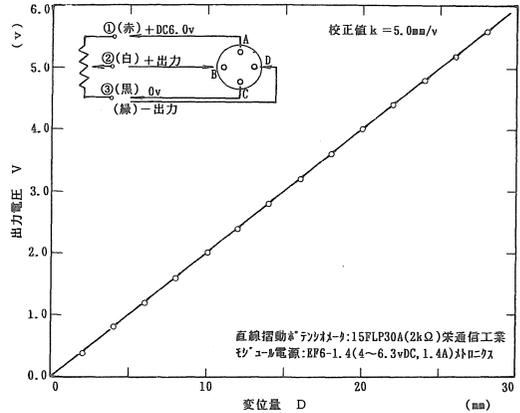


図-4 遠心本体移動監視用変位計の校正結果

3. 検出器の検定と土圧測定

1 g の重力場の計測において実用的に問題のない検出器であっても、遠心力場では使用できない場合がある。例えば、カンチレバー形式の検出器は板バネのたわみ量を直接測定する構造となっており、遠心力場では板バネ自体に慣性力が作用するため、この種の機構の検出器は使用できない。

遠心模型実験で検出器が具備すべき条件として、検出器自体が大きな加速度に耐え得ること、模型の挙動に影響を与えないために軽量・小型であること、および大容量（実物と同一容量）であること、などが挙げられる¹⁾。

遠心加速度場における土圧計、間隙水圧計の適用性を調べるための基礎的実験を行った。各々の実験の方法および結果を以下に示す。

3.1 検出器の検定

(1) 空中検定

表-3 に示すような諸性能の土圧計および間隙水圧計を試料容器の底面上（遠心半径 $r=131.5\text{cm}$ ）に受圧面を上向きにして固定した状態で遠心加速度を与え、各々の検出器の遠心力場における特性を調べた。図-5 は結果の一例であり、検出器の出力ひずみと遠心加速度の関係を示している。まず間隙水圧計の結果を見ると（同図 a）、遠心加速度 $\alpha \approx 100\text{g}$ までの範囲に

表-3 検出器の諸元

項目	間隙水圧計	土圧計
定格容量	10kgf/cm ²	10kgf/cm ²
非直線性	0.5%FS	0.5%FS
ブリッジ電圧	6.0vDC	6.0vDC
直径	7.5 mm	25.0 mm
厚さ	6.0 mm	6.0 mm
重量	1.2 gf	14.0 gf
リード線直径	1.6 mm	4.0 mm
型式	P306A-10	P325S-10

(三計エンジニアリング)

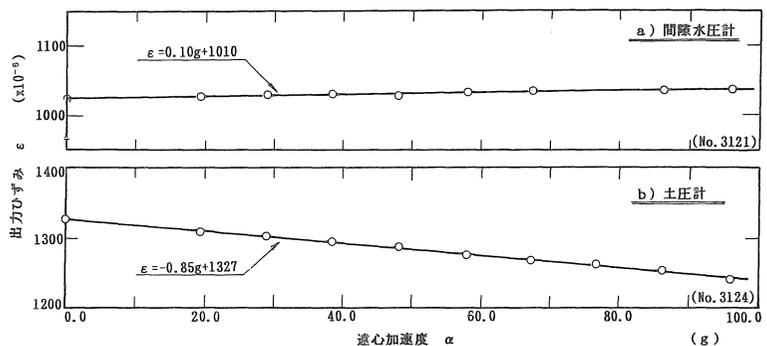


図-5 土圧計及び間隙水圧計の空中検定結果

において、出力ひずみ ϵ は若干ではあるが遠心加速度 α の増大にほぼ比例して増加する傾向を示していることが分かる。しかしこの変動の大きさは、 $\alpha = 100\text{g}$ （本装置の通常の使用範囲）に対して約 0.04kgf/cm^2 (0.4%FS) であり、検出器の非直線性 (0.5%

FS) 以内にある。

一方、同図 b) に示した土圧計の結果は、遠心加速度の増大と共に出力ひずみが減少する傾向を示し、 $\alpha=100\text{ g}$ に対する変動量は検出器の非直線性0.5%FS に対して1.6%FS (0.16 kgf/cm^2) とかなり大きな値であることが知られる。これは土圧計のダイヤフラムに生じた慣性力の影響によるものであると考えられる。

以上のことから、本実験で用いた土圧計のように、ダイヤフラムの質量が大きい場合はダイヤフラムに生じる慣性力の補正を行う必要がある。また、この補正は検出器の設置方向すなわち検出器の感度方向と遠心加速度の作用方向の相違によっても異なるので、実験毎に検定しなくてはならない。

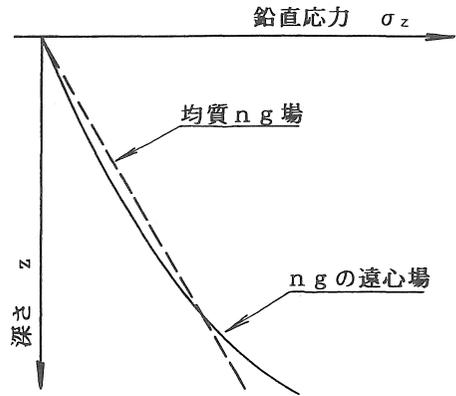


図-6 均質 n g 場と n g の遠心力場の鉛直有効応力分布⁽⁵⁾

(2) 水圧検定

n g の遠心力場の加速度分布は、遠心加速度 α が $\alpha = r \omega^2$ (r :回転半径、 ω :角速度) で与えられることから、径方向に沿って加速度が変化(増大)する形となる。従って、模型内の鉛直応力 σ_z の分布は、図-6の実線で示すように直線にはならず、次式の形で与えられる。なお、当然ではあるが、水面も水平ではなく曲率をもつことになる¹⁾。

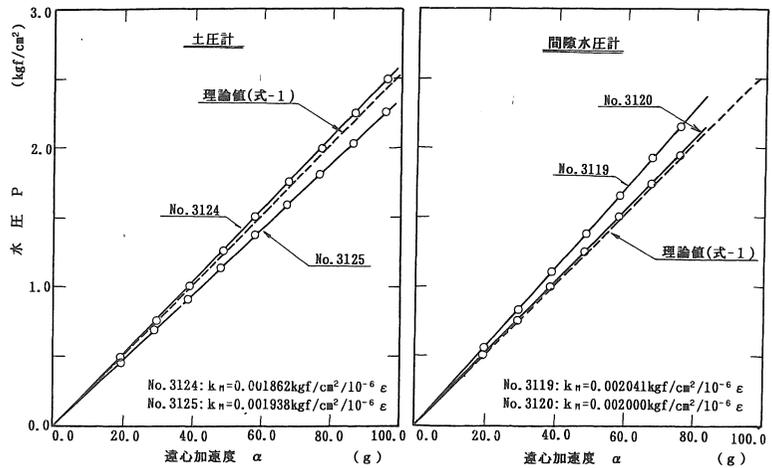


図-7 土圧計及び間隙水圧計の水中検定結果

深さ z_1 における鉛直応力 σ_z :

$$\sigma_z = (\gamma \omega^2 / g) \int_0^z (R_1 + z) dz \quad \text{---- (1)}$$

ここに、 R_1 は試料表面における遠心半径、 g は重力加速度、 γ は 1 g 場の模型の単位体積重量である。

図-7 は、土圧計および間隙水圧計を試料容器内の底面中心に埋設し(受圧面は上向き)、水深を 30 cm として行った水圧検定の一例である。実線は測定値の平均線(算定はメーカー提示の較正值 k_M を使用)、破線は水面形状を考慮して式(1)より求めた理論水圧の値である。図より、いずれの検出器においても、検出器の直線性は良く、満足し得る結果となっていることが分かる。しかし、理論値との対応は十分とは言えず、水圧 2.0 kgf/cm^2 において最大約 10% の差が認められる。この原因としては、本実験

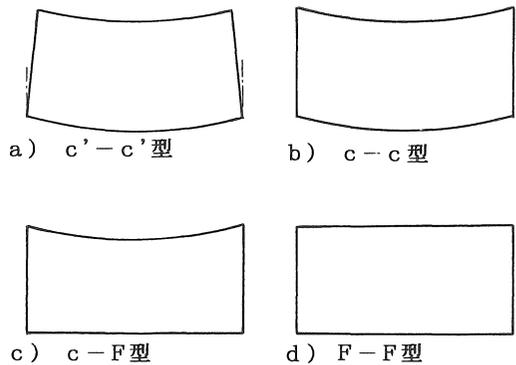


図-8 模型の形状

やメーカーの検定試験の測定精度が考えられよう。以後の整理においては、理論値に合うように修正した較正值 k_{AIT} を用いることとする。

表-4 試料の物理的性質

試料	砂分	最大粒径	50%粒径	均等係数
試料A(7号硅砂)	92%	0.42mm	0.02mm	2.9
試料B(4号硅砂)	100	2.0	1.2	2.2

3.2 砂地盤の土圧測定

(1) 模型形状

3.1で述べたように、遠心力場の等加速度線は円弧を描き、また遠心力の作用方向は、回転軸を中心として半径に沿った形となる。従って遠心力場の実験模型は図-8(a)に示す形状でなくてはならない。しかし、この形状の模型を作成することは簡単ではなく、また試料容器も複雑な形状のものが必要となる。ここでは、同図(b), (c)および(d)の3形状(C-C型, C-F型およびF-F型)を作成し、模型形状の相違が測定土圧に与える影響を調べた。使用した試料は表-4に示すような物理特性を持つ硅砂(空乾状態)であり、これを容器内へポアリングすることによって地盤を作成した。地盤の乾燥重量 γ_d は $1.36 \sim 1.40 \text{gf/cm}^3$ である。

図-9(a)は実験結果を測定土圧 σ_z と遠心加速度 α の関係で整理したものである。地盤厚は約30cm、土圧計埋設位置は試料容器底面中心である。図をみると、土圧は遠心加速度 α の増大に伴って比例的に増大していることが分かる。また土圧の絶対値に差がみられるが、これは土圧計埋設深さの違いによるものである。そこで、各々の模型の地盤表面から土圧計受圧面までの距離 z と地盤の乾燥重量 γ_d を用いて式(1)より得られる土圧(理論土圧 σ_z^*) と実測土圧 σ_z との比 k_σ 、 $k_\sigma = \sigma_z / \sigma_z^*$ (以後土圧応答比と呼ぶ) を求め、遠心加速度 α との関係で整理すると同図(b)が得られる。図より、C-C型模型の土圧応答比 k_σ 値は約1.1、C-F型およびF-F型模型では0.9であり、理論値との差は±10%程度であることが分かる。また、この値は遠心加速度 α が50~90gの範囲でほぼ一定となっている。これらのことから、模型作成が最も簡単なF-F型の模型形状を用いても実地盤の再現性に大きな支障は生じないと考えられる。

(2) 土圧計埋設位置

1gの重力場の土圧検定において、土圧計の据え付け位置によって測定値が異なったり、検定線がループを描く原因は以下の要因によるものであること

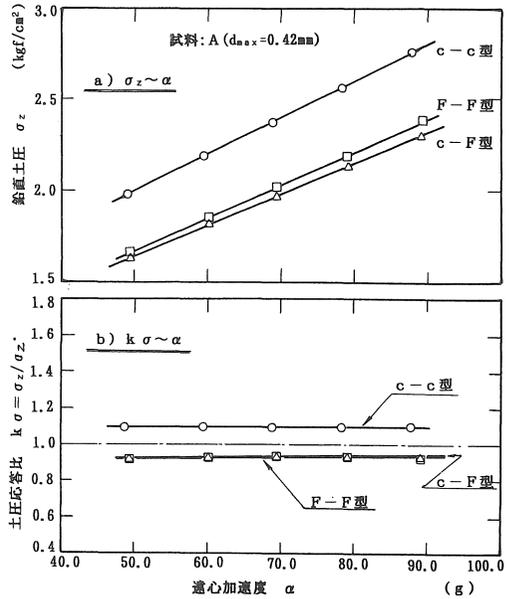


図-9 模型形状の違いと鉛直土圧

が知られている⁹⁾。

- (a) 受圧板の可とう性に問題がある場合、これによって土圧計受圧面上にアーチングが発生する。
- (b) 土圧計とその周辺の土の応力~変形特性が異なるために、受圧面上で応力集中が発生し土圧検定値より大きな値を示す。
- (c) 試料と検定土槽側壁との接触部で摩擦(側面摩擦)が発生し、加えた応力が土圧計受圧面に十分伝達されない。

地盤厚約30cmの模型内に埋設位置を数カ所を選んで土圧計を設置して上記の影響を調べた。図-10は土圧計埋設位置が試料容器中心で埋設深さ $z=15$ および 30cm における測定結果を土圧応答比 k_σ と遠心加速度 α との関係で整理したものである。 $z=30\text{cm}$ では2種類の砂について示している。まず、同一埋設位置の $z=30\text{cm}$ の結果をみると、粒径の小さな試料A(土圧計直径 ϕ と平均粒径 D_{50} の比、 $\phi/D_{50}=119$)

の土圧応答比は $k\sigma \approx 0.9$ となっているが、これよりも粒径の大きな試料 B ($\phi/D_{50} = 22$) では $k\sigma \approx 0.2$ とかなり低い値であることが分かる。これは、粒径の大きな (ϕ/D_{50} 値が小さい) 砂ではアーチングの影響が顕著に現れることによるものと考えられる。

次に、同一試料 (試料 A) で埋設深さの相違による影響をみると、 $z = 15\text{cm}$ では $k\sigma \approx 1.02 \sim 1.05$ で理論値にほぼ一致し、 $z = 30\text{cm}$ の結果に対しては 10~15% ほど大きな値を示している。この差はそれほど大きなものではないが、 $z = 15\text{cm}$ では応力集中によって土圧が大きくなり、 $z = 30\text{cm}$ ではアーチ作用の影響によって低下したと考えることができる。

図-11は側壁摩擦の影響を調べた結果である (試料 A 使用)。埋設深さ $z = 30\text{cm}$ の $k\sigma$ 値を見ると、両端に設置した土圧計の $k\sigma$ 値 (○および●印) は 0.25~0.45 と最も低く、中心部に向かうほど $k\sigma$ 値が大きくなり、側壁摩擦の影響が明瞭に現れていることが分かる。一方、 $z = 15\text{cm}$ の $k\sigma$ 値はいずれの検出器の結果も $k\sigma \approx 1.0 \sim 1.08$ と理論値にほぼ一致した値を示し、側壁摩擦の影響はほとんど認められない。

4. まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 水圧検定の結果、遠心力場においても検出器の直線性に問題は生じなかった。したがって、一般に市販されている検出器の使用が可能である。
- 2) しかし、検出器によってはダイヤフラムの自重によるたわみを見逃すことができないものがある。この場合、

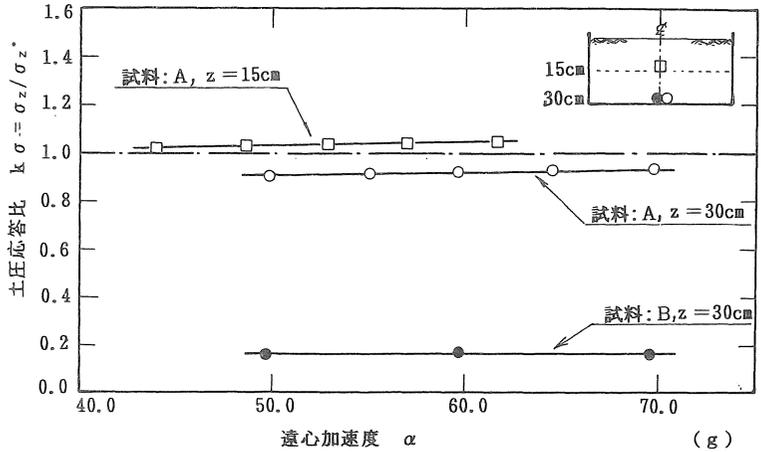


図-10 粒度及び埋設深さの違いと土圧応答比

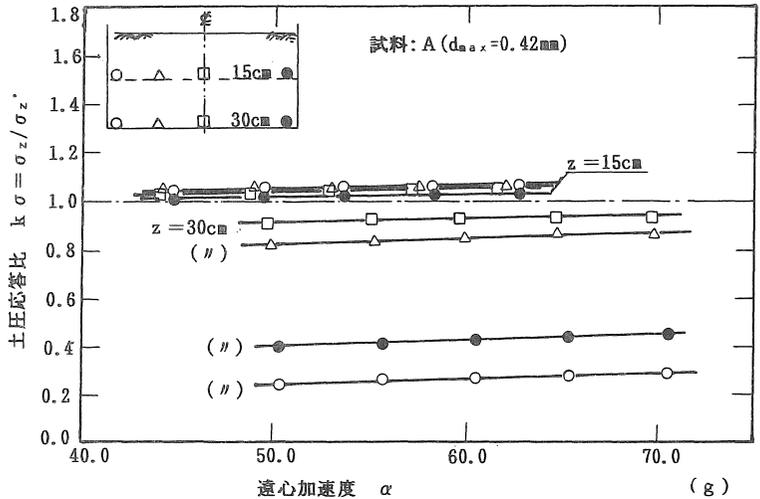


図-11 埋設位置の違いと土圧応答比

実験毎に遠心力場において較正值を決定する必要がある。

- 3) 水平砂地盤の土圧測定の結果、比 $\phi/D_{50} \geq 22$ では土圧計受圧面上にアーチングが生じ、測定値は理論値の約 2 割とかなり低い値となる。また、地盤中高位置では応力集中が生じ、これによって測定値は理論値と比較して若干大きく現れる。さらに側壁周辺部では側壁摩擦の影響が現れ、土圧は低い値を示す。

遠心載荷模型実験装置の概要について述べ、また検出器の検定試験および水平砂地盤の土圧測定を行

った結果、遠心模型実験によって実地盤の現象を再現することが可能であることを確認した。しかし、本研究の結果は基礎的な問題点を扱ったものであり、実際問題への適用に当っては今後多くの詳細な研究を重ねていく必要があると考えている。

(参考文献)

- 1) 土質工学会：講座・遠心模型実験，土と基礎，Vol. 35-36, 1987-1988.
- 2) 木村孟：諸外国における遠心載荷模型実験，土と基礎，Vol. 28, pp. 61-64, 1980.
- 3) 三笠正人・高田直俊・望月秋利：遠心力を利用した土構造物の模型実験，土と基礎，Vol. 28, pp. 15-23, 1980.
- 4) 東田淳：学生教育としての遠心力模型実験，土と基礎，Vol. 33, pp. 49-55, 1985.
- 5) 寺師昌明・遠藤敏雄・北詰昌樹：遠心模型実験の計画と結果の信頼性，港湾技術研究所報告，第28巻第3号，1989.
- 6) 山口柏樹：遠心モデル実験における相似則について，1989.
- 7) 藤井斉昭：遠心模型実験，土と基礎，Vol. 40, pp. 54-56, 1992.
- 8) 竹村次朗：遠心力場内での掘削過程のシュミレーション-遠心模型実験手法に関する国際セミナー-，運輸省港湾技術研究所，1993.
- 9) 奥村哲夫・成田国朝・大根義男：土圧計の検定に関する基礎的研究，愛知工業大学研究報告，No. 16 pp. 151-157, 1981.
- 10) 木村孟・藤井斉昭・斉藤邦夫・日下部治：砂中の浅基礎の支持力に関する研究，土木学会論文報告集，No. 319, pp. 795-798, 1977.
- 11) 木村孟・斉藤邦夫・日下部治・司代明：砂地盤の支持力ならびに変形性状に対する異方性の影響について，土木学会論文報告集，No. 319, pp. 105-113 1982.
- 12) 岡村末対・竹村次朗・木村孟：砂地盤における円形及び帯基礎の支持力に関する研究，土木学会論文集，NO. 463/III-22, pp. 85-94, 1993.
- 13) 日下部治・荻原敏行・前田良刃・大内正敏：不攪乱試料を用いた支持力遠心実験と現場載荷試験との比較，土木学会論文集，NO. 457/III-21, pp. 107-116, 1992.
- 14) 藤井利侖・荻原敏行・石橋貢・田口敦：乾燥砂中の深い円形立杭に作用する土圧の遠心模型実験と有限要素解析，土木学会論文集，NO. 475/III-24, pp. 109-117, 1993.
- 15) 高田直俊・大島昭彦・渡辺篤・池田通陽：重錘落下締固め工法の現場実験と遠心模型実験-地盤変形、土圧、強度増加-：土木学会論文集，NO. 469/III-23, pp. 127-134, 1993.
- 16) 高田直俊・大島昭彦・池田通陽・竹内功：重錘落下締固め工法の遠心模型実験-重錘貫入量と地盤変形-：土木学会論文集，NO. 475/III-24, pp. 89-97, 1993.
- 17) 藤井斉昭・六角浩司：段切り基礎の支持力実験，中央大学理工学部紀要，第29巻，pp. 219-231, 1986.
- 18) 風間基樹・稲富隆昌：遠心力載荷模型実験手法の振動実験への適用について，土木学会論文集，NO. 477/III-25, pp. 83-92, 1993.
- 19) 古賀泰之・古潤潤一・高橋晃浩：飽和砂地盤と盛土の地震時挙動に関する動的遠心模型実験：土と基礎Vol. 40, pp. 17-22, 1992.
- 20) 三宅達夫・赤本弘文・佐藤毅：浚渫・埋立計画における遠心模型実験の利用，土と基礎，Vol. 40, pp. 23-27, 1992.
- 21) A.N. Schofield: Earthquake Induced Pressures in the Foundation of a Sea Dyke, Geotechnical Centrifuge Model Testing, Proceedings of International Symposium on Geotechnical Centrifuge Model Testing (Tokyo), pp. 14-21, 1984.
- 22) N.K. Ovesen: Centrifuge Tests of Embankments Reinforced with Geotextiles on Sift Clay, Geotechnical Centrifuge Model Testing, Proceedings of International Symposium on Geotechnical Centrifuge Model Testing (Tokyo), pp. 14-21, 1984.
- 23) ASCE: Soil Properties Evaluation from Centrifugal Models and Field Performance, ASCE Geotechnical Special Publication, No. 17, 1988.
- 24) F.H. Lee, T.S. Tan, C.F. Leung, K.Y. Yong, G.P. Karunaratne and S.L. Lee: Development of Geotechnical Centrifuge Facility at The National University of Singapore, Centrifuge 91, pp. 11-17, 1991.

- 25) F. H. Lee and A. N. Schofield: Centrifuge Modelling of Sand Embankments and Islands in Earthquakes, *Geotechnique*, Vol. 38, No. 1, pp. 45-58, 1988.
- 26) C. F. Lunf and H-Y Ko: Centrifuge Model Study of Piles Socketed in Sift Rock, Soils and Foundations, Vol. 33, No. 3, pp. 80-91, 1993.

(受理 平成 6年 3月20日)