

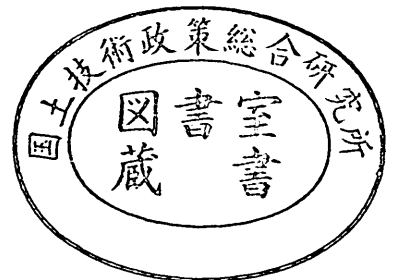
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 28 NO. 3 SEPT. 1989

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第28巻 第3号 (Vol. 28, No. 3), 1989年9月 (Sept. 1989)

目 次 (CONTENTS)

1. 共振集波効果を応用した直立消波ケーソンの原理と水理特性
..... 高橋重雄・木村克俊・田中 智..... 3
(Wave Concentration Principle and Its Application for a New
Wave Absorbing Caisson
..... Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi KIMURA and Satoru TANAKA)
2. 海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—
..... 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰.....29
(Wave-induced Liquefaction in Seabed—Field Observation and Analysis—
..... Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Yasushi SATO)
3. 遠心模型実験の計画と結果の信頼性—支持力に関する国際比較実験例—
..... 寺師昌明・遠藤敏雄・北誥昌樹.....59
(Planning of Model Tests and Reliability of Test Results
—Bearing Capacity of a Circular Foundation on Sand—
..... Masaaki TERASHI, Toshio ENDOH and Masaki KITAZUME)
4. 一軸圧縮試験と三軸試験を併用した新しい粘性土地盤の強度決定法
..... 土田 孝・水上純一・及川 研・森 好生.....81
(New Method for Determining Undrained Strength of Clayey Ground
by Means of Unconfined Compression Test and Triaxial Test
..... Takashi TSUCHIDA, Jun-ichi MIZUKAMI, Ken OIKAWA and Yoshio MORI)
5. 腐食鋼矢板の補修工の耐力特性..... 清宮 理・野口孝俊・横田 弘... 147
(Mechanical Properties of Repaired Steel Sheet Piles
..... Osamu KIYOMIYA, Takatoshi NOGUCHI and Hiroshi YOKOTA)

3. 遠心模型実験の計画と結果の信頼性 —支持力に関する国際比較実験例—

寺師 昌明*・遠藤 敏雄**・北詰 昌樹***

要 旨

遠心模型実験は有力な実験手法として認知されるようになってきたが、一部には本手法に対する過剰な期待もある。また、遠心装置に特定の規格はなく、実験技術もそれぞれの創意工夫によって異なる。要素試験とは異なり、模型実験手法にとってこれは当然であるが、同一の課題に対して、異なる機関が大きく相違する結果を得るようでは問題である。にもかかわらず、これまで、遠心実験結果を複数機関で横並びに比較した例はない。

遠心模型実験手法に関する技術委員会(国際土質基礎工学会)は、本手法で得られる結果の実施機関による変動を調査するために比較実験の実施を提案した。本報告では、これに協力して実施した実験の方法と結果を紹介しつつ、模型実験の計画ならびに実施に際して留意すべき事項を整理した。また、既発表の他機関のデータと対比することで遠心模型実験結果の変動と再現性を示し、変動に関わる要因の検討を試みた。

キーワード：砂，支持力，模型実験（遠心模型実験），試験方法

* 土質部 地盤改良研究室長
** 土質部 地盤改良研究室
*** 土質部 主任研究官(地盤安定解析担当)

3. Planning of Model Tests and Reliability of Test Results —Bearing Capacity of a Circular Foundation on Sand—

Masaaki TERASHI*

Toshio ENDOH**

Masaki KITAZUME***

Synopsis

The ISSMFE technical committee on geotechnical centrifuge modeling proposed an international cooperative test program in order to evaluate the variability in centrifuge test results. The selected topic was an axial loading of a shallow circular foundation on Fontainebleau sand.

In Europe, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Danmarks Ingeniør Akademi (DIA) and Cambridge University (CUED) have taken parts in this program and part of their results have been already reported. In Japan, Tokyo Institute of Technology (TIT) and Port & Harbour Research Institute (PHRI) have collaborated the program.

In the present paper the authors present i) the test procedure and major test results obtained at PHRI, ii) the comparison of the data with those obtained at the other research organization, and finally they emphasized the importance in the experimental research of the well determined program and fundamental examination of test conditions that may affect the test results.

Key Words; Sand, Bearing Capacity, Model Test (Centrifuge Model Test), Test Procedure

* Chief of the Soil Stabilization Laboratory, Geotechnical Engineering Division.

** Member, Soil Stabilization Laboratory, Geotechnical Engineering Division.

*** Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division.

目 次

要 旨	59
1. ま え が き	63
2. 比較実験内容	63
2.1 実験条件	63
2.2 実験材料の特性	63
3. 基礎実験—変位制御載荷実験	64
3.1 基礎実験の内容	64
3.2 基礎実験の方法	64
3.3 基礎実験結果と考察	66
4. 飽和砂地盤上の応力制御載荷実験	70
4.1 実験方法	70
4.2 実験結果と考察	71
4.3 比較実験結果の提案	72
5. 実験結果の変動と再現性	73
5.1 他機関の実験条件との対比	73
5.2 複数機関の実験結果の対比	75
5.3 同一機関，同一実験条件下の結果の変動	76
5.4 計算値との対比	78
6. 結 論	78
7. あ と が き	78
参 考 文 献	78
記 号 表	79

1. まえがき

遠心加速度場で実験を行うと、縮尺模型を用いたとしても実物規模の地盤との応力の相似性を満足させることができる。この遠心模型実験手法は土質基礎工学の分野で有力な手法として認知され、多くの研究機関で本手法による研究が進められ、さらに多くの機関で装置の導入が予定されている。このこと自体は喜ぶべきことであるが、近年では遠心場の縮尺模型実験に対する過剰な期待が懸念される状況にある¹⁾。

また、遠心装置は各研究機関がその必要性に応じて設計するもので特定の規格はなく、個々の模型実験を実施する際の実験技術もそれぞれの創意工夫によっている。要素試験とは異なり、ミニチュアの現場実験を行う模型実験手法にとってこれは当然のことであって規格化や統一化が可能なものでも好ましいものでもない。しかし、同一ないしは類似の課題に対して、異なる機関が大きく相違する結果を得るようであれば問題である。それにもかかわらず、これまで、遠心模型実験結果を複数の機関で横並びに比較した例はない。

このような状況を踏まえて、遠心模型実験手法に関する技術委員会（国際土質基礎工学会）の Corte は、本手法によって得られる結果の実施機関による変動を調査するために比較実験の実施を提案した。協力する機関に過大な負担や新たな投資を要求しない単純でかつ基礎的なものとして選定された課題は、飽和砂地盤表面の円形基礎の支持力実験であった。各機関は比較的緩やかな条件設定で、Fontainebleau（フォンテンブロー）砂を同一の密度に調整し、同一規模のプロトタイプを念頭に実験を行った。

日本では港湾技術研究所と東京工業大学が、ヨーロッパでは Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Danmarks Ingeniør Akademi (DIA), そして Cambridge University (CUED) がこの比較実験に参加しており、LCPC, DIA, CUED の結果は既に Corte et al.²⁾ によって報告されている。また、最終的な取りまとめも Corte によって行われる予定である。

本報告では、この比較実験に協力して港湾技術研究所で筆者らが実施した実験の方法と結果を紹介しつつ、遠心模型実験の実施に際して留意すべき事項を整理した。また、既発表の他機関のデータと対比することで実験結果の変動と再現性に関わる要因の検討を試みた。検討の結果からは、遠心模型実験以前の模型実験に共通する基本的な留意事項の重要性が再確認されたものと筆者らは考えている。

2. 比較実験内容

2.1 実験条件

選定された課題は前述のように、飽和砂地盤表面の円形基礎の支持力実験である。各機関は LCPC より提供された同一の砂（フォンテンブロー砂）を同一の密度に調整し、同一規模のプロトタイプを念頭に実験を行った。Corte の提示した実験条件は以下の通りである。

基礎：底面粗の剛な円形基礎（直径 160cm を想定）

地盤条件：間隙比 0.66 の飽和正規砂地盤

載荷条件：排水条件下での応力制御による載荷

砂の層厚：基礎直径の 3 倍以上

加速度：28.2g を標準

上述のように条件設定は緩やかであり、砂の充填方法、砂表面整形方法、試料容器の寸法、各段階載荷の載荷速度、各段階の放置時間など細部の条件は特定されず、各機関に委ねられているのが特徴である。

2.2 実験材料の特性

実験材料は LCPC より各機関に配布された同一の砂（フォンテンブロー砂）である。港研の試験で得られたこの砂の物理的・力学的特性は以下の通りである。

粒径は 0.074~0.84mm の範囲にあり、均等係数 (U_c) は 1.43 と均等な粒径分布を有している。粒径加積曲線を図-1に示した。また、同図には土粒子の比重と最大、最小間隙比も併せて示した。

砂試料の三軸圧縮試験 (CD 試験) は、乾燥密度、 $\rho_d = 1.37, 1.53, 1.67 \text{ g/cm}^3$ に対して実施し、それぞれ $\phi_d = 31.1^\circ, 35.0^\circ, 42.8^\circ$ の結果を得ている (図-2)。三軸圧縮試験を実施するに当たっては、先にした実験条件 (間隙比 $e = 0.66, \rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$) を含むように乾

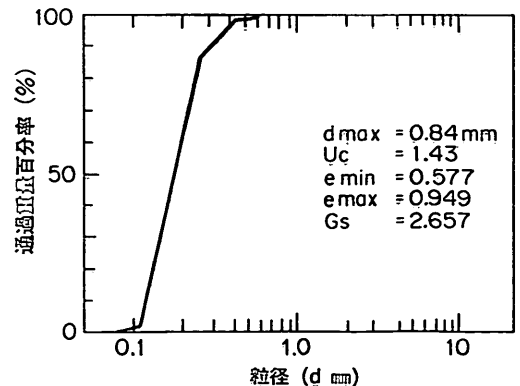


図-1 粒径加積曲線 (Fontainebleau sand)

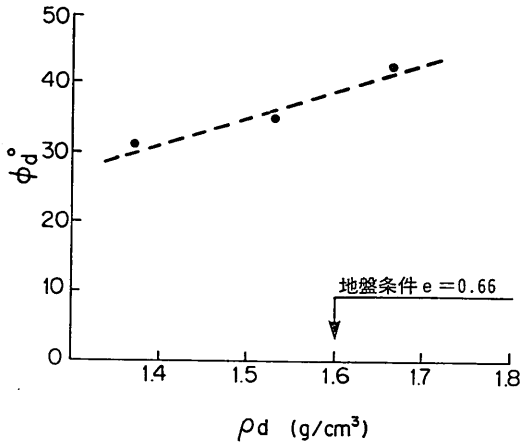


図-2 三軸圧縮試験 (CD) 結果

乾燥密度を変化させた。なお、後述の実用公式と支持力実験値の比較にあたっては、砂試料の乾燥密度と ϕ_d の関係を図-2に示す直線と仮定している。

3. 基礎実験—変位制御載荷実験

3.1 基礎実験の内容

2.1のような形で実験条件を与えられても、実験結果は多くの要因に影響される懸念がある。

筆者らは、設定された実験条件(2.1)に沿って飽和砂地盤上の応力制御による載荷実験を行う前に、後述するように実験の前提条件を明確にし、かつ、その前提下での実験結果の信頼性を高めるために基礎実験として、主として乾燥砂に対して変位制御による一連の載荷実験を実施した。基礎実験のほとんどを乾燥砂に対する変位制御載荷で行ったのは飽和砂の応力制御載荷実験に比べて遙かに簡便に実施でき、研究の省力化につながるためである。

基礎実験の着目点は、① 試料容器の大きさに対する適切な基礎直径の把握(境界条件の検討)、② モデル化の妥当性の確認(Modeling of models)、③ 基礎の寸法効果、④ 実験結果の変動の確認、そして、⑤ 地盤密度と支持力との関係の把握であり、さらに付加えると、⑥ 上述の乾燥砂に対する基礎実験の結果が飽和砂に対しても適用できることも確認しておく必要がある。

①の目的は自明であろう。実際の土材料を用いる模型実験であれ、土の特性を数値モデルで置き換えて用いる数値実験(数値解析)であれ、実験結果に及ぼす境界の影響は真っ先に検討すべきである。

②および③は大型の基礎の挙動を縮小した模型で予測しようとする場合に避けられない相似性の確認である。

なお、Modeling of models とは、実物の挙動を異なる縮尺で再現してみても(縮尺 $1/n_i$ の模型に $n_i g$ を加える実験を縮尺を変化させて複数回行い)、その結果が等しければ、外挿して実物($n_i=1$)の場合も等しい結果が得られると考えることで相似則を検証するために良く用いられる方法である。 n_i を大きく変化させることが望ましい。

④の実験結果の変動の確認は、⑤と関連して結果の妥当性(もっともらしさ)を判断する材料となる。

⑤の密度と支持力の関係は、特定の密度が条件として規定されている今回のような実験では一見不要に思える。しかし、実験テクニックとしての密度制御、密度の再現性の難しさを考えると、ある特定の密度に対する答として得られた結果の妥当性を判断する材料として密度と支持力の関係をトレンドとして把握しておくことは重要である。

どんな課題を対象とする実験であっても、現象に大きく影響すると考えられるパラメーターに対する実験結果のトレンドを先ず把握して、特定の条件での結果の妥当性を判断することは必要不可欠である。今回の実験の対象は比較的単純な現象であるためパラメトリックな検討が少なく済むが、複雑な現象のモデル化では筆者らは基礎実験に1~2年を費やすことも稀ではない。

飽和砂を用いた応力制御の実験は、以上の基礎的な検討を踏まえて実施した。なお、本来はもっと多くの要因に対しての事前の検討が必要となるが、今回は他機関の検討結果が一部既知であったため省略している。後述の他機関の検討内容(表-3)を参照されたい。

3.2 基礎実験の方法

(1) 実験装置

変位制御載荷実験に用いた試料容器は幅50cm、奥行20cm、深さ35cmの極めて剛性の高い鋼製容器である。今回の実験で広い範囲でModeling of modelsを行うためや、容器側壁の影響を避けるためには、もっと大きい試料容器を用いることが望ましい。今回の比較実験実施時期には、港研では他の研究で大型容器が占有されていたためやむなくこの容器を用いた。しかし、その影響は、当然、基礎実験で検討することとした。

載荷装置はモータージャッキ式でジャッキロッドに模型基礎とロードセルを剛結し、基礎の回転変位を拘束している。載荷装置は図-3に示すように、試料容器天端にボルトで固定している。

載荷は所定の遠心加速度に達した後、一定の載荷速度0.53mm/minの下で行い、鉛直荷重、鉛直変位をロードセルおよび変位計で計測する。

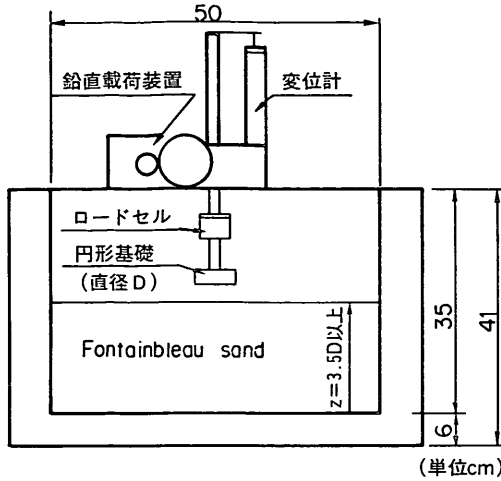


図-3 変位制御載荷実験装置

模型基礎は直径 20, 40, 56, 80 mm の 4 種類で、模型基礎底面には地盤材料と同じ砂試料（フォンテンブロー砂）を貼り、底面粗の条件を満足させた。

なお、一連の実験には港湾技術研究所の遠心模型実験装置を用いた。同装置のスイングプラットフォーム表面までの回転半径は 3.8m、最大搭載質量は 2.7 t、最大遠心加速度は 115g である。装置の詳細、ならびに周辺機器については別報³⁾を参照されたい。

(2) 砂地盤の作製

乾燥砂地盤は、図-4および写真-1に示す砂ホッパーと多重フルイ（網目 2 mm、合計枚数 9枚）からなる装置（多重フルイ）を用いて砂ふらし法で作製する。図示のように、砂試料は所定の高さに吊り上げられた砂ホッパーから落下し、9枚重ねのフルイを通過して試料容器の中に注がれる。この時砂ホッパーを手前側、奥行き側に一定のインターバルで微動させ、試料容器全体に渡って均一に砂が積るように操作する。

砂ホッパー（図-5）は幅 150cm、奥行き 30cm の鋼製である。砂ホッパーの中に鋼製のアングルをセットし、砂ホッパーとアングルのクリアランス（ t mm）を調整することで落下する砂の量をコントロールし、地盤の密度を制御することができる。フォンテンブロー砂に対しては、クリアランスを 1 mm, 3 mm, 5 mm とすることで乾燥密度 ρ_d (g/cm³) を 1.64, 1.58, 1.54 程度とすることができた。これは、それぞれ間隙比 0.62, 0.68, 0.74 程度に対応する。

地盤の密度調整を行なった後、規定の層厚（基礎直径の 3 倍以上）となるように地表面の整形が必要である。

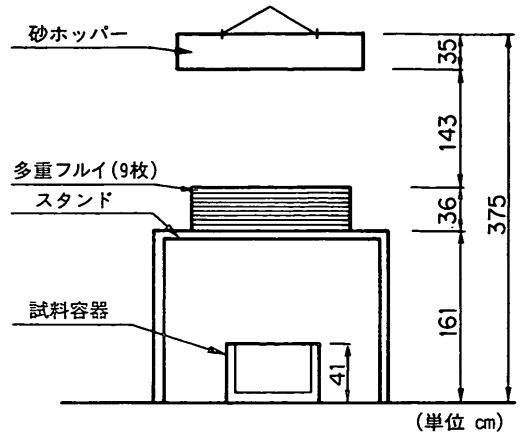


図-4 多重フルイ装置

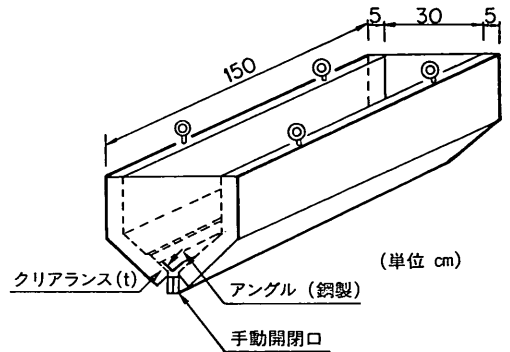


図-5 砂ホッパー

港研の実験では模型地盤の層厚は原則として基礎直径の 3.5 倍とし、一部の試験で 3.5 倍以上とした。地表面の整形は、密度コントロールした地盤に乱れを与えないようにパキューム方式の整形機で余分の砂を吸取することで平滑に仕上げた。個々の模型地盤の密度を確認するためには砂の体積および重量を計測したが、計測の精度の制約で、計算された間隙比には ± 0.01 程度の実験誤差が含まれている。これは、後に示す実験結果に若干の影響を与えている。

(3) 飽和地盤の作製

飽和砂地盤は密度調整や地表面の整形を行なった後、砂層下端より砂の間隙中の空気を 2 時間かけて炭酸ガスと置き換え、次に約 12 時間に渡りゆっくりと砂層下端より水を浸透させて作製した。このため飽和砂地盤の作製にあたっては、試料容器の底に図-6に示すように、直径 3 mm の穴を格子状に設け、裏面に砂の流出を防止するためにフィルターを貼り付けた厚さ 6 mm の鋼板を固

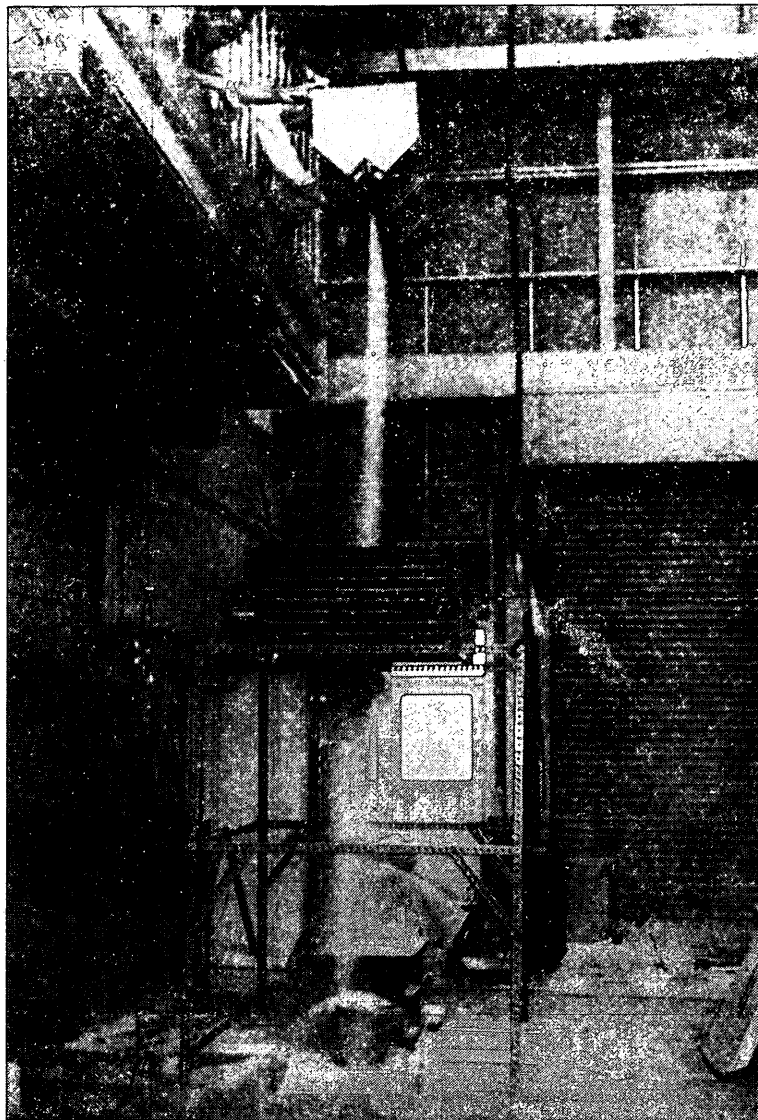


写真-1 多重フルイによる砂の充填

定した。これは、炭酸ガスや水が地盤全体に渡り均一に分布するように工夫したものである。

なお、飽和砂地盤の模型地盤では模型基礎直下の容器底面に間隙水圧計をセットし、载荷中に過剰間隙水圧が発生しないこと（排水条件の载荷であること）を確認できるようにした。

(4) 载荷実験

砂地盤の作製が終了すると試料容器に载荷装置を固定して図-3に示したセットアップが完成する。実験装置を遠心模型実験装置のスイングプラットフォームに搭載し、

他方のスイングプラットフォームには試料容器側のモーメントと釣り合うようにカウンターをセットし、全ての実験準備が終わる。

载荷実験は遠心模型実験装置を回転させ、所定の加速度に達した後、操作室からの遠隔操作で载荷装置を作動させて行なった。载荷中は鉛直荷重と鉛直変位を計測し、鉛直変位が基礎直径の約30~50%に達したところで载荷を終了した。

3.3 基礎実験結果と考察

変位制御载荷実験の全実験ケースおよび結果を表-1に

表-1 基礎実験（変位制御）の条件及び結果の一覧（乾燥砂）

(a) modeling of models, 間隙比による影響実験

実験シリーズ	基礎直径 (D cm)	加速度 (g)	砂層厚 (cm)	間隙比 (e)	乾燥密度 (ρ_d g/cm ³)	支持力 ($q_t/\rho_d nD$)	s_{f1}/D (%)	
A	1	2.0	79.29	6.95	0.653	1.607	47.33	10.38
	2	2.0	79.18	6.95	0.644	1.616	57.33	11.93
	3	4.0	40.14	14.04	0.640	1.620	52.00	7.63
	4	4.0	40.22	13.98	0.619	1.640	50.67	10.13
	5	5.6	28.19	19.99	0.650	1.610	44.00	7.63
	6	8.0	20.26	27.79	0.726	1.539	69.00	7.50
	7	8.0	20.25	23.07	0.625	1.635	73.33	7.41
B	1	4.0	40.30	14.10	0.767	1.503	18.33	5.13
	2	4.0	39.35	14.18	0.680	1.581	33.00	8.38
	3	4.0	40.25	14.18	0.642	1.618	57.86	7.15
	4	4.0	40.14	14.04	0.640	1.620	52.00	7.63
	5	4.0	40.26	14.14	0.639	1.621	55.33	8.13
	6	4.0	40.14	13.98	0.619	1.640	50.67	10.13
	7	4.0	40.54	18.84	0.616	1.644	53.73	7.63
	8	4.0	39.73	14.07	0.615	1.645	45.33	5.63
	9	4.0	40.62	18.80	0.609	1.651	58.21	7.25
	10	4.0	39.27	14.11	0.602	1.658	65.33	7.93

(b) 寸法効果の確認実験

実験シリーズ	基礎直径 (D cm)	加速度 (g)	砂層厚 (cm)	間隙比 (e)	乾燥密度 (ρ_d g/cm ³)	支持力 ($q_t/\rho_d nD$)	s_{f1}/D (%)	s_{f2}/D (%)	
C	1	4.0	1.0	21.84	0.631	1.629	70.00	4.63	8.50
	2	4.0	1.0	18.90	0.656	1.604	62.00	1.51	4.38
	3	4.0	15.06	18.70	0.627	1.639	50.67	6.93	10.30
	4	4.0	30.59	21.86	0.634	1.626	71.00	8.00	12.00
	5	4.0	40.26	14.14	0.639	1.621	55.33	8.13	13.75
	6	4.0	40.14	14.04	0.640	1.621	52.00	7.63	13.25
	7	4.0	80.56	18.51	0.633	1.627	38.00	9.50	14.00
	8	4.0	80.44	21.85	0.633	1.627	36.07	11.01	13.63

(c) 飽和砂との対比

実験シリーズ	基礎直径 (D cm)	加速度 (g)	砂層厚 (cm)	間隙比 (e)	水中密度 (ρ' g/cm ³)	飽和度 (S_r %)	支持力 ($q_t/\rho' nD$)	s_{f1}/D (%)	
D	1	4.0	40.11	20.85	0.756	0.944	95.09	18.66	7.75
	2	4.0	40.35	20.90	0.764	0.939	94.91	16.33	6.75

示した。

実験シリーズAは、先に示した。① 試料容器の大きさに対する適切な基礎直径の把握と、② Modeling of models の確認という二つの目的で乾燥砂に対して実施したものである。

実験シリーズBは、⑤ 地盤密度と支持力との関係に着目したもので乾燥砂に対して実施した。なお、これに先立って後述のシリーズDの実験が実施されている。

実験シリーズCは、③ 基礎の寸法効果に関して検討を加えたもので同様に乾燥砂に対して実施した。

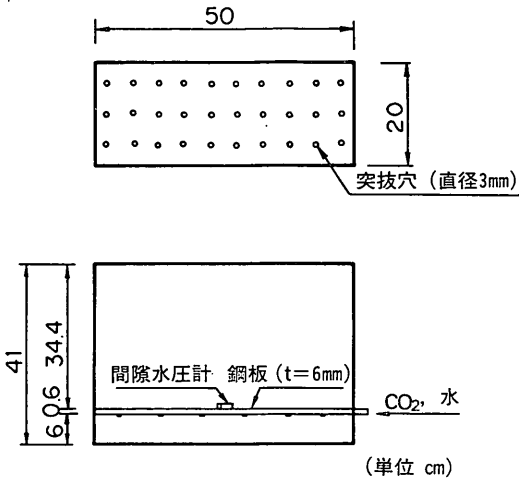


図-6 飽和砂地盤の作成

実験シリーズDは、⑥ 上述の乾燥砂に対する基礎実験の結果が飽和砂に対しても適用できることの確認のために実施した。

なお、基礎実験の目的の一つである、④ 実験結果の変動の確認、については章を改めて議論する。

(1) モデル化の妥当性の確認

同一のプロトタイプ ($nD=160\text{cm}$) を念頭に模型基礎直径 (D) と加速度 (n) g の組合せを変化させて実施した実験シリーズAで得られた鉛直応力と沈下量との関係を図-7に示した。同図の縦軸は鉛直応力 (q) を砂の乾燥密度 (ρ_d)、加速度 (n) および模型基礎直径 (D) の積で、横軸は沈下量 (S) を模型基礎直径 (D) で除して無次元化して表示している。

得られた実験結果は、無次元化した支持力 ($q_s/\rho_d n D$) が50程度のものと70程度のものに大きく分かれている。支持力が50程度のもの (A-1~A-5) は、間隙比の相違によるバラツキを有しているものの、その鉛直応力~変位曲線の挙動がほぼ一致しており、模型基礎の直径が2 cm から5.6 cm の範囲で $1/n_i$ の縮尺模型に対して $n_i g$ の加速度を付加することで同様な挙動が得られること (Modeling of models が成立すること) を示している。

なお、本報告中では、変位制御載荷実験結果に対する支持力の定義は、鉛直応力~沈下曲線にピークの認められる場合はピーク値としている。ピークが認められない場合には、後述の図-8(b)中に例示するように鉛直応力~沈下曲線の初期と後期の接線の交点の値とした。ただし、沈下量が大きくなって ($S/D \geq 20 \sim 25\%$)、根入れ

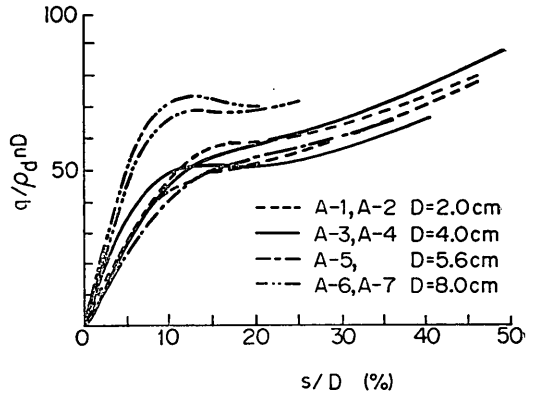


図-7 側壁の影響と Modeling of models

の効果で応力~沈下曲線の勾配が徐々に増大していく部分は後期の接線を得るための対象とはしないものとする (例えば、後述の図-10参照)。

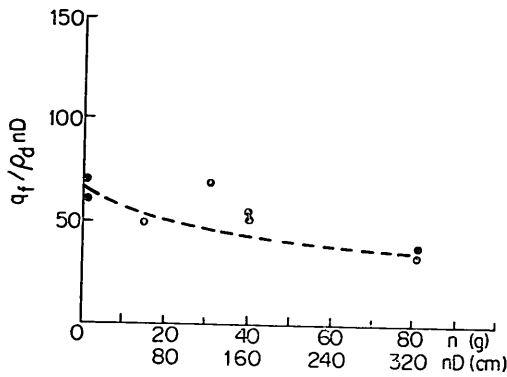
(2) 試料容器の大きさと基礎直径との関係

図-7において基礎直径 8 cm の実験値 (A-6, A-7) に着目すると、初期勾配および支持力が間隙比のバラツキでは説明できないほど他の実験値よりも大きく現れている。これは支持力破壊によって生じる地盤内の塑性域が試料容器側壁にかかり過大な支持力を与えたものと考えられる。したがって、本実験で使用した奥行き (最小幅) 20 cm の試料容器に対しては基礎直径を5.6 cm 以下にしなければ境界面の影響が生じることを示唆するものと考えられる。本研究では慎重を期して以下の実験では、基礎直径を4 cm に設定した。

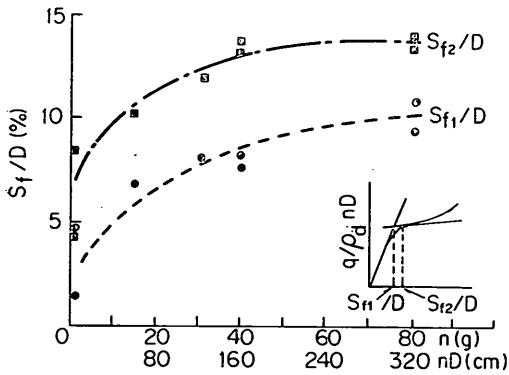
(3) 寸法効果の確認

砂地盤の支持力は基礎の大きさによって左右されることが多くの研究者によって指摘され寸法効果と呼ばれている。乾燥砂地盤 ($\rho_d=1.62\text{g/cm}^3$) に対して模型基礎の直径 D を4 cm、加速度 $n g$ を1, 15, 30, 40, 80 g と変化させた場合の無次元化した支持力 ($q_s/\rho_d n D$) と換算基礎直径 (nD) との関係を図-8(a)に示す。支持力は加速度30 g のものが他の実験値に比べ大きな値となっているが、全体的に換算基礎直径の増加と共に緩やかに減少している。円形基礎の場合、二次元の基礎に見られるような基礎寸法に対する急激な支持力の減少傾向がないのが特徴のようである。

図-8(b)には、地盤の降伏時の沈下量と基礎の寸法 (換算基礎直径) の関係を示した。降伏時の沈下量は同図中に示すように定義して求め基礎直径で無次元化している。変位は $nD < 120\text{cm}$ の範囲では急激に増加しているのに対して $nD > 120\text{cm}$ では緩やかな増加あるいは、



(a) 支持力と基礎寸法の関係



(b) 沈下量と基礎寸法の関係

図-8 寸法効果

ほぼ一定となる傾向を示している。

以上の傾向を考えると、今回、実験条件として設定されたプロトタイプ基礎の直径 160cm は、寸法効果の影響を受けにくい寸法であることが想像できる。

なお、この寸法効果に関する検討はフォンテンブロー砂に対して実物規模の載荷実験を行う計画が別途にあるため実施したもので、今回の実験条件に限定すれば必ずしも実施の必要はないものである。

(4) 実験シリーズDでは乾燥砂に対する載荷実験の結果と飽和砂の排水載荷実験の結果の対比を試みた。なお、飽和砂に対しても乾燥砂に対する実験と同様に一定の載荷速度 0.53mm/min の下で載荷を行っているが、載荷中の過剰間隙水圧の発生は認められなかった。

図-9に載荷時の鉛直応力と変位の関係を示す。同図の横軸はこれまでの整理と同様に沈下量を模型基礎直径で無次元化したものである。一方、鉛直応力は飽和砂と乾燥砂で一对一の対比ができるように、乾燥砂の鉛直応力

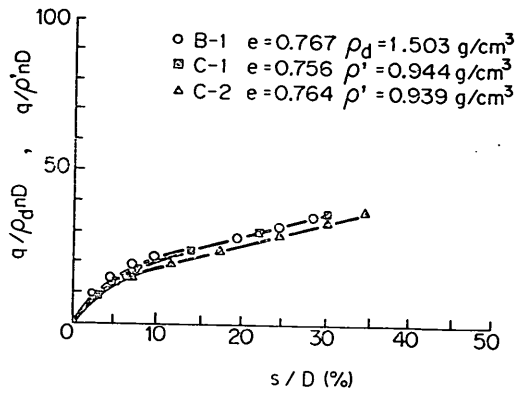


図-9 鉛直応力～沈下量関係(飽和砂と乾燥砂の対比)

は $q / \rho_d n D$ として無次元表示し、飽和砂の場合の鉛直応力は水中密度 (ρ') を用いて $q / \rho' n D$ と無次元表示した。

排水条件下の飽和砂と乾燥砂の実験結果をほぼ同一密度で比較すると極めてよく一致することが確認できる。

(5) 地盤密度と支持力との関係

実験シリーズBでは、地盤密度と支持力との関係に着目し模型基礎直径を 4 cm、加速度を 40g と一定に設定し、地盤の乾燥密度を 1.50~1.66 g/cm³ と大きく変化させて支持力試験を行なった。代表的な鉛直応力～沈下曲線を前述のように無次元化して図-10に示した。支持力ならびに応力～沈下曲線の形状は、密度(あるいは間隙比)の変化に対して極めて敏感であることがわかる。

実験シリーズA, B, Dから、試料容器側壁の影響が懸念される直径 8 cm の模型基礎に対する結果を除く全データを用いて間隙比と支持力との関係を求め図-11に示した。

今回の比較実験のように砂に対して間隙比を特定された実験では、間隙比(密度)の制御とその再現性に最大

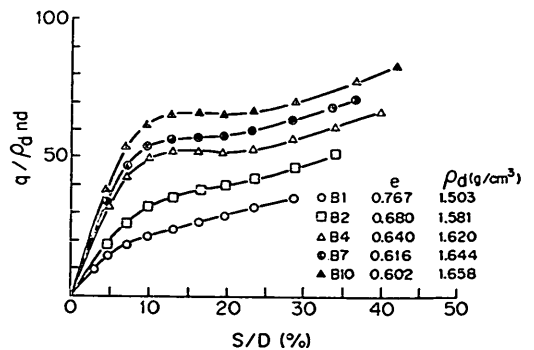


図-10 間隙比による鉛直応力～沈下関係の変化

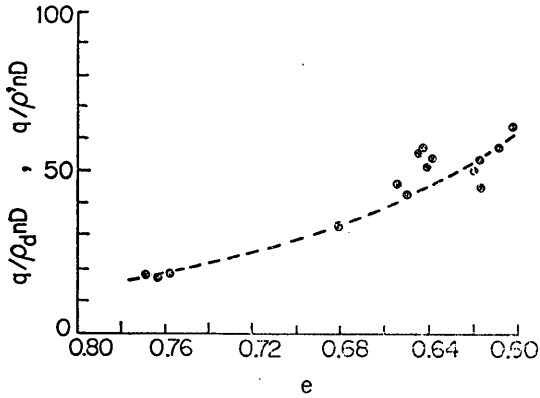


図-11 間隙比による支持力の変化

す実験装置を用いて行った。試料容器は変位制御のものと同じである。載荷装置はエアシリンダーとエアシリンダーに圧力を送る送圧装置からなっている。エアシリンダーのロッドにはロードセル(変位制御載荷実験と同一のもの)と模型基礎を剛結してあり、基礎の回転変位を拘束している。変位計も図示のようにロッドに剛結してあり、模型基礎の沈下量を計測できる。用いた模型基礎は基礎実験の結果を踏まえて直径 4 cm の底面粗の円形基礎とした。試料容器の底には間隙水圧計をセットし、載荷中の排水条件を確認した。水深は基礎が完全に水没する位置までとし、載荷中の浮力の変化による荷重の補正量を基礎とロードセルの間を結ぶ直径 1.5 mm のロッドの浮力の増分のみとしている。なお載荷中の浮力

の注意を払う必要が有ると同時に、特定の間隙比に対する結論は図-11のようなデータでその結果の妥当性を確認することが重要である。なお、この間隙比と支持力の関係は排水条件下の飽和砂に対しても適用可能であることは(4)で既に確認したところである。

4. 飽和砂地盤上の応力制御載荷実験

4.1 実験方法

(1) 実験装置

ここで述べる実験は、技術委員会の Corte の提示した条件に沿って、飽和砂を対象に応力制御で載荷を行うものである。

応力制御による載荷実験は、図-12および写真-2に示

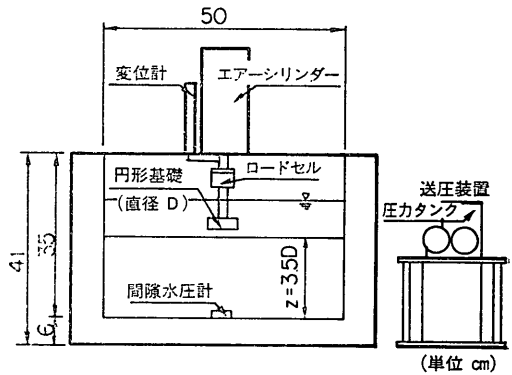


図-12 応力制御載荷実験装置

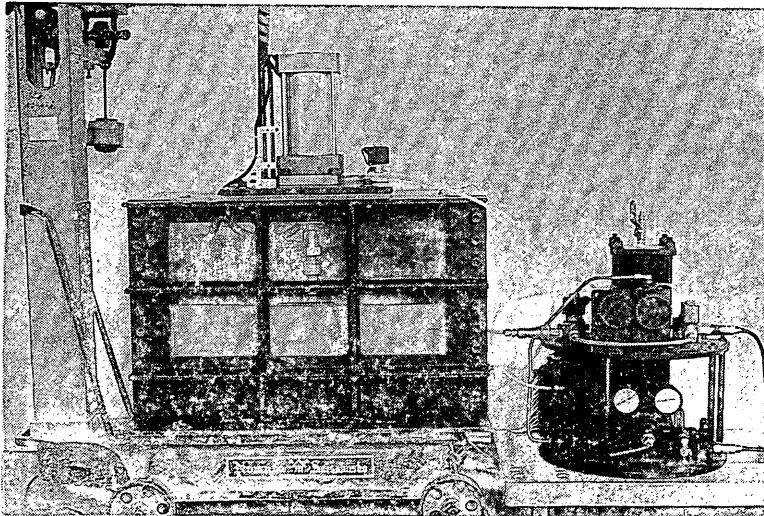


写真-2 応力制御載荷実験装置

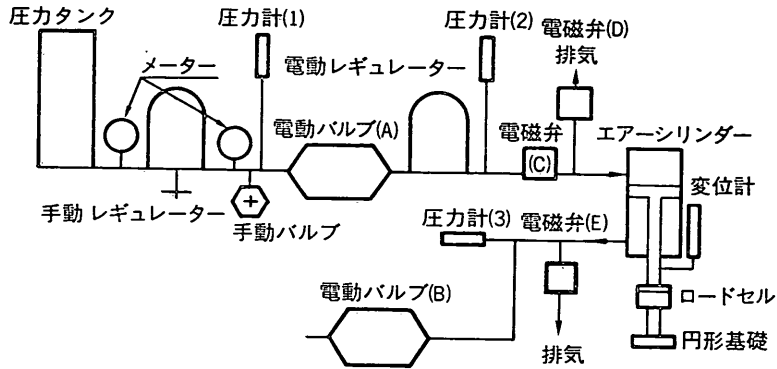


図-13 応力制御載荷実験装置配管系統図

の増分は載荷終了段階で鉛直荷重に対して約0.3%であった。

(2) 飽和砂地盤の作製

飽和砂地盤の作製方法は基礎実験の場合と全く同様である。

(3) 載荷実験

飽和砂地盤を作製した後、試料容器天端に載荷装置を固定して模型地盤のセットアップを完了し(図-12)、遠心模型実験装置のスイングプラットフォームに搭載する。遠心場でのロッドの自沈を防止するためにエアシリンダーの下部に4 kgf/cm²程度の空気圧を加える。次に圧力タンクに15 kgf/cm²程度の窒素ガスを入れ全ての実験準備が完了する。

載荷装置の配管系統図を図-13に示す。送圧装置には各種の電磁弁やレギュレーターなどを搭載し、操作室からの遠隔操作で圧力を調整できるようになっている。

実験では所定の加速度に達した後、載荷を開始した。応力制御による載荷時の各計測値の経時変化を図-14に示した。

荷重の小さい範囲の載荷は、まず電磁弁(E)を断続的に開閉してエアシリンダー下部の圧力を徐々に減圧し、シリンダー、ロッドと模型基礎の自重を利用して段階載荷を行なった。この時のエアシリンダー下部の圧力の変化を○印で示している(図-14)。当初、エアシリンダー下部は4.2 kgf/cm²の圧力で加圧されており、電磁弁(E)を小刻みに開閉することで徐々に圧力が減少している。エアシリンダー下部の圧力が約1.4 kgf/cm²となったところでロードセルが反応して模型基礎が地表面に接地したことが確認できる。基礎が接地してからは約2秒の間隔で電磁弁(E)を開閉させ、かつ30秒の放置時間をおき段階載荷を継続する。この減圧の過程での各

段階の減圧量は約0.1 kgf/cm²である。

エアシリンダー下部の圧力が完全になくなった後の載荷は、電動バルブ(B)を開放して下部シリンダーの圧力を0に保ち、シリンダー上部からの加圧によって行う。電動バルブ(A)を開放して電動レギュレーターで調圧し、電磁弁(C)を開閉することで段階載荷を行なった。各段階では、まず電動レギュレーターで増圧させてから電磁弁(C)を開放して載荷を行なう。放置時間は同様に30秒である。この時の増圧過程をエアシリンダー上部圧力として□印で図示している。増圧ステップは約15段階で、支持力近辺での各段階の増圧量は約0.05 kgf/cm²程度である。図-14に示した荷重の経時変化を、荷重と沈下の関係に置き換えると後述の図-15が得られる。

なお、この応力制御による載荷過程では、間隙水圧計の計測値で排水条件が満足されていることを確認した。

4.2 実験結果と考察

応力制御載荷実験の実験ケースおよび結果の一覧を表-2に示す。微妙な密度制御は難しいため、本実験で作製した地盤の間隙比は0.64前後と、提示された実験条件

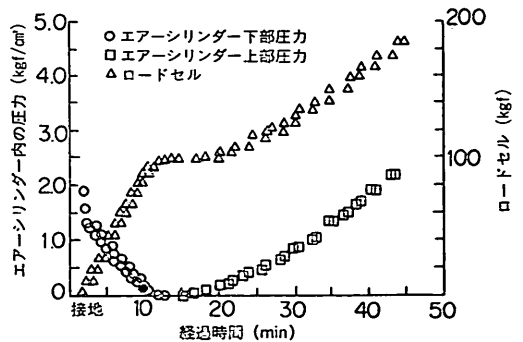


図-14 応力制御載荷実験中の計測値の経時変化

表-2 応力制御載荷実験条件及び結果一覧

	S-1	S-2	S-3
基礎直径 (D cm)	4.0	4.0	4.0
加速度 (g)	40.22	40.14	40.22
砂層厚 (z cm)	13.93	13.91	13.92
間隙比 (e)	0.638	0.641	0.627
水中密度 (ρ' g/cm ³)	1.011	1.010	1.018
飽和度 (Sr %)	94.2	96.4	87.8
初期荷重勾配 ($q/\rho' nD$)/(s/D=1%)	1470	1070	930
$q_t/\rho' nD$	64.9	63.2	55.9
s_t/D	7.2	7.5	6.6
$q/\rho' nD$ (s/D=5%)	52	51	45
$q/\rho' nD$ (s/D=10%)	65	64	56

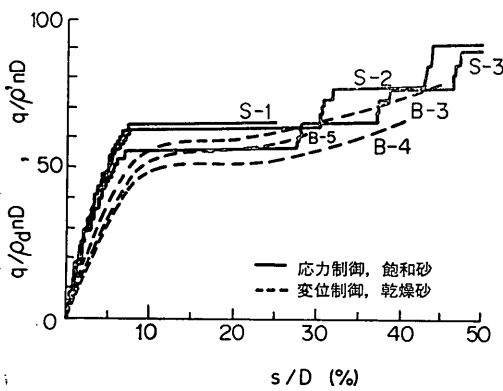


図-15 鉛直応力～沈下関係
(応力制御と変位制御の対比)

より若干密度の高い地盤となった。飽和前後の試料重量より推定される各ケースの飽和度は87～96%程度である。

また、乾燥砂に対する実験でも、飽和砂に対する実験でも、所定の加速度に到達してから40 min～2 hr 放置して砂の圧密をまって載荷するケース (B-5, C-2) と、所定の加速度到達後計器の測定値が安定すると直ちに載荷するその他のケースとを比較した。砂地盤の地表面の経時的な沈下量の計測、飽和砂の場合は間隙水圧の変化、そして載荷時の鉛直応力～沈下曲線の比較を行ったが、有意な差異は認められなかった (例えば、図-9参照)。

前述の方法で実施した応力制御載荷実験の結果を、各実験で得られた鉛直応力と沈下量の関係として図-15に示す。段階載荷での一段階あたりの荷重増分 ($\Delta q/\rho' nD$) は変位が小さい範囲では5程度とし、支持力値の前後で

は2程度で与えて、支持力値までに約20ステップの段階載荷を行った。支持力確認後は $S/D=0.5$ までさらに数段階の載荷を行った。この段階載荷の支持力に至る間の平均的な変位速度は、約0.1 mm/min となっている。なお、応力制御載荷実験での支持力値は沈下が急激に大きくなる始点での値として定義した。

同図には基礎実験 (乾燥砂に対する変位制御載荷実験) で同程度の間隙比の地盤に対して得られた鉛直応力～沈下曲線 (B-3, B-4, B-5) も併せて示している。方法の異なる2種類の実験値は、間隙比を全く同一には制御できないためそのバラツキによる変動があるもののほぼ同様な挙動を示している。基礎実験で飽和砂と乾燥砂に対して変位制御載荷実験を行い対比した結果と考え併せると、乾燥砂、飽和砂の相違、載荷方法の相違は、図示のように無次元化して整理すると結果にほとんど影響を及ぼさないことが分る。また、各実験曲線は $S/D=25\%$ 付近から変位制御、応力制御共に支持力が再び増加する傾向を示している。これは基礎の根入れの効果が現れてきたものと思われる。

4.3 比較実験結果の提案

飽和砂 (間隙比 $e=0.64$, 相対密度 $D_r=80\%$ 前後) の応力制御載荷実験結果は、図-15に示したように同様な間隙比の乾燥砂の変位制御載荷実験結果と良く対応した。また、もっと緩い砂 ($e=0.76$, $D_r=50\%$ 程度) での乾燥砂と飽和砂の変位制御載荷実験結果も極めて良く一致していたことを既に述べた (図-9)。

このため、比較実験での規定の条件 (2) に対する支持力は、図-11の支持力～間隙比の関係で間隙比0.66に対応する支持力 (無次元表示) とした。図-11は乾燥砂に対する変位制御載荷実験結果を中心に求められたもので

あった。しかし、前述のように基礎実験を含む一連の実験で、この結果は比較実験の条件を十分に満足する答をだすことが確認されており、かつ、今回の規定の条件の中では間隙比の誤差が実験結果にもっとも大きく影響を与えるため、あるトレンドのなかでとらえるのが最適と考えられるからである。

5. 実験結果の変動と再現性

5.1 他機関の実験条件との対比

2. に述べたような形で実験条件を規定されても、実験結果は多くの要因に影響される。試料容器側壁の影響、砂の充填方法（砂の異方性、密度の一様性、密度の再現性）、表面の整形方法（乱れ）、飽和させるテクニック（飽和度、乱れ）、載荷方法（速度など）、載荷装置の精度、計測の方法と精度、また、より基本的には相似則の成否などである。このため、港研でも本来の規定条件を満足する実験に先立って多くの時間を基礎実験に費やしたことは既に説明した。本比較実験に参加した欧米の各機関もこのような意識を持って比較実験に参加していたことが、他機関の既発表データから伺い知れる。

Corte 他²⁾より、LCPC、DIA、そして CUED の実験条件を整理して、港研（PHRI）の設定した実験条件と対比して表-3に示す。

(1) 砂地盤の作製方法

2. に記載のように単に密度の目標値のみが設定された場合に、いずれの機関も砂地盤の作製法として、作製後に容器中の密度の一様性が高く、かつ再現性にも優れる方法として、落下高さを一定にした砂ふらし法（sand raining）を採用する傾向がある。しかし、砂ふらし法にもバリエーションはあり、港研と LCPC は試料容器の全幅に一齐に砂を落下させるために矩形のホッパーを工夫しているのに対して、CUED は円形ホッパーを用いている（DIA のホッパー形状は不明）。また、さらに落下中の砂の動きを一様にするために DIA と港研ではホッパーの下部に多重ふるいを設けている。

密度の制御方法は詳しくは触れられていないが、どの機関も砂の流量を変化させて対応しているようである。

表面の整形はいずれの機関も密度調整した地盤の表面を乱さないように努力しており、真空で余分の砂粒子を吸引する方法をとっている。

なお、LCPC は砂の密度制御法として、hand tamping（規定量の砂を手で押えながら規定の高さに充填する方法）も採用し砂ふらし法との比較を試みている。

(2) 密度の測定

密度の決定は、いずれの機関も重量と体積を測定して

計算で求めている。CUED は、これに加えてコーン試験を実施して計算密度に補正を加えているが、これは試料準備後の操作で初期に設定した密度に大きな変化が生じたという特殊事情によるようである。

(3) 砂の飽和方法

砂地盤の飽和方法も、ある程度、常識化した炭酸ガス置換後に水置換する方法で統一がとれている。

(4) 模型基礎と試料容器の寸法

模型基礎の寸法は、標準値として 28.2 g で 1.6 m の基礎をモデル化することが提案されているため、利用可能な試料容器に制約のあった港研以外は、Modeling of models の目的を除くと直径 56.6 mm の模型基礎を用いている。

港研では前述のように側壁の影響と Modeling of models の検討結果を踏まえて、40 mm の模型基礎に対して 40 g を付加する実験を標準としている。

各機関で使用した試料容器の寸法はそれぞれに異なる。港研での試料容器の寸法は、上述のように側壁の影響に関する検討結果を踏まえているため表示の寸法で問題はない。港研のこの検討結果を基に他機関の容器寸法を考えると、DIA の試料容器直径は十分に大きい。LCPC と CUED は同一容器内で複数の実験を行っているため、その基礎間隔が問題となるが、LCPC の基礎間隔は十分である。CUED については基礎間隔の記述がないが、試料容器が十分に大きいため恐らく問題はないものと想像される。

(5) 載荷方法

模型基礎と載荷治具の取合いでは、LCPC と CUED が模型基礎の回転変位を拘束しないように球座もしくはローラーを介して載荷しているのに対して DIA と港研は模型基礎と治具を剛結している。基礎に対して偏心傾斜荷重を加える条件下では、この基礎と載荷治具の取合いは結果に大きな影響を及ぼすことが知られているが、今回のように一様な水平地盤に鉛直荷重のみを作用させる場合には、この相違は影響を及ぼさないことが分っている⁴⁾。

載荷方法は応力制御という規定があるため、DIA を除くいずれの機関も応力制御の載荷を行っている。DIA は変位制御のみの実験を行っているが、港研での基礎実験結果から判断するとこれは実験結果に有意な差を産まないと考えられる。

(6) 加速度の算定深度

DIA と港研を除く機関では加速度の算定深度が明示されていない。DIA では加速度の算定半径を地表面から基礎半径分下にとっている。これは現象に対して支配

表-3 比較 実

研究機関名	L C P C	D I A
(1) 砂地盤の作製方法	<ul style="list-style-type: none"> ・タンピング：計量した乾燥砂を規定厚さごとに手で押える ・砂ふらし法 矩形断面ホッパー（線状スロット） スロット幅 3.3mm, 落下高 675mm 一定速度でホッパー 横移動 ・密度調整 詳細不明（ホッパー条件） ・表面整形 真空吸引 	<ul style="list-style-type: none"> ・砂ふらし法 多重ふるいを併用 炉乾砂（24 hrs）を使用 ホッパー 詳細不明 ・密度調整 不明 ・表面整形 真空吸引
(2) 密度の測定方法	<ul style="list-style-type: none"> ・砂ふらし法の場合, 密度とホッパー条件の検定結果利用 	<ul style="list-style-type: none"> ・試料容器ごと計量
(3) 砂の飽和方法	<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸ガス置換（底面より） 上面より軽い負圧で補助 ・水置換（底面より） 水量：間隙体積の5～15倍 	<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸ガス置換（底面より） 事前に容器を繰返し真空脱気 ・水置換（脱気水使用）
(4) 模型基礎と試料容器の寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・直径D：56.6mm ・矩形容器 1200×800mm ・基礎間隔 280mm ・基礎間隔/D=280/56.6=4.95 	<ul style="list-style-type: none"> ・直径D：56.6mm ・円形容器 ϕ 534mm ・$\phi/D=534/56.6=9.43$
(5) 载荷方法	<ul style="list-style-type: none"> ・球座 ・応力制御（飽和砂） 荷重 インタバル 10min 	<ul style="list-style-type: none"> ・固定：鉛直貫入 ・ひずみ制御（飽和砂） 0.6, 0.4, 0.2mm/min
(6) 加速度の算定深度	—	<ul style="list-style-type: none"> ・加速度 AT GL-0.5D
(7) 実験内容	<ul style="list-style-type: none"> ・飽和砂に対する実験のみ ・载荷速度の差（TAMPED SAND） ・modeling of models, D (56.6, 40) ・同一容器内の結果の変動 ・比較実験データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・飽和砂に対する実験 （一部、乾燥砂） ・载荷速度 ・modeling of models 56.6\geqD\geq28.3 ・乾燥砂と飽和砂の変動比較 （飽和 process の影響） ・比較実験データ取得

的な領域の中央で加速度を算定するのが原則であり、正しい考え方である。港研でも通常、大型の実験を行う場合には同様になっているが、今回の実験では加速度算定の半径を地表面に取った。これは港研の大型装置で今回のような小型実験を行う場合に、上記の差が極めて小さいためである（加速度の値の差は0.5%にしかない）。LCPC, CUED 共に港研と同規模の装置半径を有しているため、加速度半径は明示されていないが、この差は無

視できるものと考ええる。

(7) 実験内容

いづれの機関も提示された条件にそって比較実験データを取得する実験に加えて、程度の差はあれ、基礎的検討を加えている。共通しているのは、Modeling of models の検討と、飽和砂に対する载荷速度の影響の吟味、または、過剰間隙水圧の発生の有無の確認である。

港研の基礎的実験の結果については既に紹介した。他

験 一 覧

C U E D	P H R I
<ul style="list-style-type: none"> ・砂ふらし法 円形断面のホッパー（円形スロット 1） 落下高さ 1 m ・密度調整：流量変化による 1~7 kg/min ・表面整形 真空吸引 	<ul style="list-style-type: none"> ・砂ふらし法 多重ふるいを併用 矩形断面ホッパー（線状スロット） 落下高さ一定 一定時間間隔でホッパーを横移動 ・密度調整：スロット幅調整（流量調整） ・表面整形 真空吸引
<ul style="list-style-type: none"> ・試料容器ごと計量 ・低精度のためコーン試験結果で補正 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥砂：実験後に砂のみ計量 ・飽和砂：水浸前に容器ごと計量
<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸ガス置換（底面より） 事前に容器を真空脱気 ・水置換（脱気水使用） 置換後、再度、真空吸引脱気 	<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸ガス置換（底面より） 2 hrs ・水置換（底面より） 12 hrs
<ul style="list-style-type: none"> ・直径D：40, 56.6, 80mm ・円形容器 ϕ 850mm 基礎間隔不明 	<ul style="list-style-type: none"> ・直径D：20, 40, 56.6, 80mm ・矩形容器 500×200mm 標準模型基礎 40mm ・容器最小幅/D = 200/40 = 5
<ul style="list-style-type: none"> ・ローラー ・応力制御（飽和砂） 増分 14 kPa/30sec 荷重 インタバル 10min 	<ul style="list-style-type: none"> ・固定：鉛直貫入 ・変位制御（乾燥・飽和砂） 0.53mm/min ・応力制御（飽和砂） 増分 初期 0.8kgf/cm² 支持力近傍 0.3kgf/cm² 荷重 インタバル 30sec
—	<ul style="list-style-type: none"> ・地表面
<ul style="list-style-type: none"> ・飽和砂に対する実験のみ ・載荷速度/放置時間 ・modeling of models $80 \geq D \geq 40$ ・支持力と間隙比の関係 ・コーン試験による密度補正 ・比較実験データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥砂（基礎実験）および飽和砂 ・境界条件 ・modeling of models $80 \geq D \geq 20$ ・支持力と間隙比の関係 ・基礎の寸法効果 ・乾燥砂と飽和砂の対比（排水条件） ・比較実験データ取得

の機関の基礎実験の結果については、Corte 他²⁾を参照されたい。

5.2 複数機関の実験結果の対比

(1) 間隙比と支持力の関係

港研で実施した実験で得られた間隙比と支持力との関係（図-11に4章のデータも追加）に、他の研究機関の全ての結果²⁾を併せて図-16に示した。図中に○印で示した LCPC のデータの内 $e \geq 0.68$ の4点は、砂地盤の

作製を hand tamping によったものである。Corte 自身も hand tamping で作製する地盤は全体としては規定の密度を再現することができて内部での密度変化が大きくなる可能性が高いと述べており、その影響がでて他のデータの傾向から外れる結果を得たものと考えられる。△印で示した CUED のデータは、円形ホッパーからの砂ふらしで作製された地盤で、他の機関とは砂地盤の作製法が若干異なり、また、文献²⁾の記述によると地

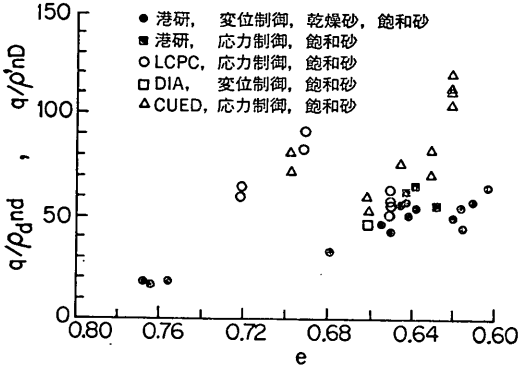


図-16 各機関の支持力実験値 (全データ)

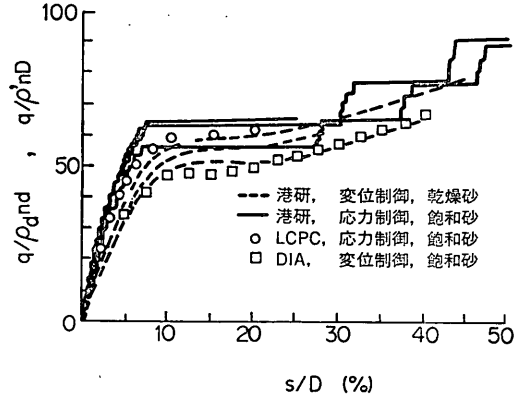


図-18 鉛直応力～沈下関係の各機関による変動

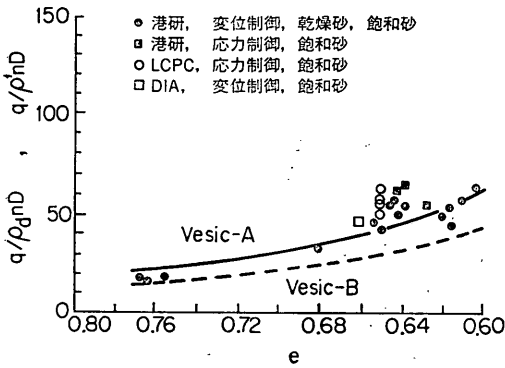


図-17 各機関の支持力実験値と間隙比の関係

盤作製後の容器運搬過程や飽和過程で相当の密度変化があったため、コーン試験結果を利用して間隙比に大きな補正を加えた(±0.03程度)とされている。

このため、同列での比較ができないこれらの結果を省くと間隙比と支持力の関係として図-17が得られる。なお、同図中の曲線 Vesic-A, B は支持力の計算値で、これについては後述する。

図-17において比較実験で対象とした間隙比に近い $e=0.64\sim0.67$ の間の支持力に着目すると ±15% 程度の変動が認められる。

(2) 鉛直応力～沈下曲線

さて、港研は比較実験の条件に対応する支持力は前述のように図-11 (または、図-17) のトレンドの中で規定の間隙比に対応する値であるという立場を取るものであった。一方、他の機関は間隙比の異なる複数の鉛直応力～沈下曲線から、規定の間隙比に対応する鉛直応力～沈下曲線を内挿などにより求めて、間隙比 0.66 に対応す

るものとして提案している。この他機関の鉛直応力～沈下曲線と港研の間隙比 0.64 程度の補正を加えていない実験曲線を併せて図-18に示す。先に述べたように港研で計算された間隙比には ±0.01 程度の実験誤差を含んでいる。また、他の研究機関でも同様に少なくとも ±0.01～0.02 程度の間隙比の計算誤差がある。このように、ベースとなる間隙比データにバラツキを包含した実験結果からの提案であるが、全体的にはほぼ同様な挙動を示している。

支持力値にすると、ここでも平均値 ±15% 程度の変動が認められる。間隙比～支持力関係の変動、また、この鉛直応力～沈下曲線の変動が大きいとみるか小さいとみるかは人それぞれであろう。筆者らは、比較実験に際して地盤の作製法などを緩やかに設定したにも関わらずこの程度の範囲に結果が収斂したのは、むしろ変動が小さいと考える。表-3に示したように各機関の採用した実験手法にそれほど大きな差がなかったためであろう。

5.3 同一機関、同一実験条件下の結果の変動

港研の実験結果をほぼ同一の条件で実施された4つのデータグループ(ST-1～ST-4)にかけて、図-19に示すように、設定間隙比の変動と支持力の変動を整理してみた。結果は表-4に示す通りである。同表ならびに図-19では、各グループ内の無次元化した支持力を N_{Tq} と表示しその平均値 $\overline{N_{Tq}}$ からの変動範囲の半幅を ΔN_{Tq} と表示している。また、同様に間隙比もグループ内の平均値 e 、変動範囲の半幅を Δe と表示する。間隙比にしておよそ ±0.01 程度、支持力にして平均値から ±10% 程度の変動が認められる。

他機関(DIA, LCPC)の実験結果では、個々の実験の間隙比として前述のように ±0.01～0.02 の変動があったとされており、支持力値としては平均値から港研と

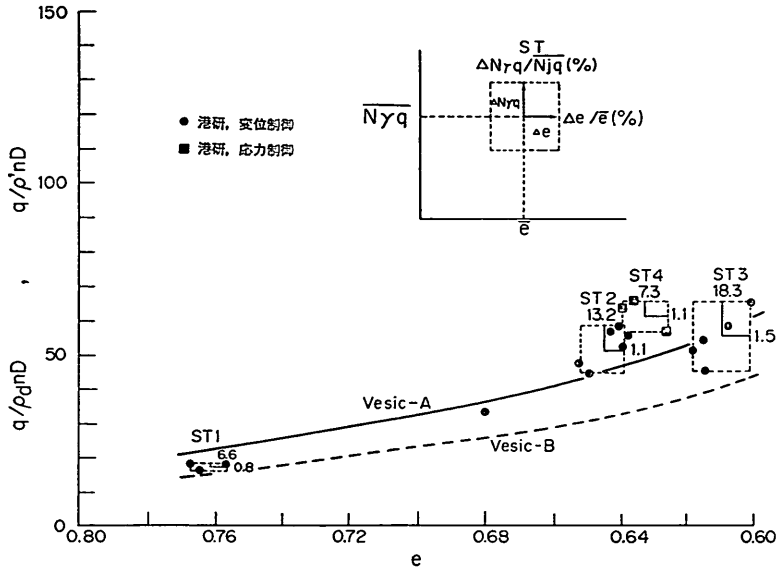


図-19 同一実験条件下の結果の変動

表-4 同一実験条件下の結果の変動

	ST1			ST2			ST3			ST4		
	No	e	Nr _q	No	e	Nr _q	No	e	Nr _q	No	e	Nr _q
実験値	C-1	0.756	18.66	B-3	0.642	57.86	B-10	0.602	65.33	S-1	0.638	64.9
	B-1	0.767	18.33	A-2	0.644	57.33	B-9	0.609	58.21	S-2	0.641	63.2
	C-2	0.764	16.33	B-5	0.639	55.33	B-7	0.616	53.73	S-3	0.627	55.9
				A-3	0.640	52.00	B-6	0.619	50.67			
				A-1	0.653	47.33	B-8	0.615	45.33			
				A-5	0.650	44.00						
\bar{e}		0.762			0.645			0.612			0.635	
Δe		0.006			0.007			0.009			0.007	
$\Delta e/\bar{e}$ (%)		0.8			1.1			1.5			1.1	
\overline{Nr}_q		17.77			52.31			54.65			61.33	
ΔNr_q		1.17			6.93			10.00			4.50	
$\Delta Nr_q/\overline{Nr}_q$ (%)		6.6			13.2			18.3			7.3	

同様に ±10% 程度の変動が認められる。

いづれの機関も模型実験には相当習熟していることを考えると、砂の実験はかなり丁寧に行ってもこの程度の結果の変動は常にあると考えてよさそうである。現象に影響する要因が多い場合には、数少ない実験結果から結論を導くのではなく、要因毎に条件を大きく変化させて全体の定性的・定量的傾向を把握してから実験値を吟味する必要の高いことが理解されよう。

なお、ここで述べた変動は同一の遠心装置で同一の実

験テクニックで実験を行った場合の変動である。この変動を前述の複数機関の間の変動と対比すると、それほど相違のないことが分る。すなわち、遠心装置、実験テクニックなどの相違は今回の比較実験の結果には余り大きく影響しないものと判断される。むしろ、今回の一連の実験ならびに他機関との比較で生じた支持力の変動は間隙比を正確に調整することの難しさを示すもので、遠心模型実験に限らないあらゆる模型実験につきものの非常に基本的な人為的実験誤差と考えられる。

5.4 計算値との対比

砂の三軸圧縮試験 (CD) 結果 (2.2) を基に実験で得られた間隙比と支持力の関係を既往の支持力式と対比してみる。支持力公式としては Vesic が円形基礎に対して提案した支持力公式⁹⁾を用いた。粘着力に関する項を省略すると Vesic の提案式は以下の通りである。

$$q_f = S_q \gamma D_f N_q + S_r \gamma R N_r$$

ここに、

$$N_q = \exp(\pi \tan \phi) \tan^2(45^\circ + \phi/2) - 1$$

$$N_r = 2(N_q + 1) \tan \phi$$

γ : 砂の単位体積重量

D_f : 根入れ深さ

R : 基礎半径

S_q : 円形基礎に対する形状係数 ($1 + \tan \phi$)

S_r : 円形基礎に対する形状係数 (0.6)

計算結果は既に図-17 に併示した。図中、Vesic-A はサーチャージ (N_q) 項と自重 (N_r) 項を加算したもので、Vesic-B は自重項だけを考慮したものである。表-1、表-2 に示したように、実験では支持力を発揮する時の沈下量 (S_{f1}/D) の平均的な値が約 0.075 であった。このため、上式によってサーチャージ項を算定する時に必要となる基礎の根入れ深さは支持力を発揮する時の沈下量の平均的な値として $D_f = 0.075 \times 2R$ を用いた。計算された支持力の間隙比減少に伴う増加傾向は、Vesic-A も Vesic-B も港研の実験結果の傾向とほぼ一致しており、砂地盤上の浅い円形基礎の間隙比と支持力との関係に対して Vesic の支持力公式が有効であることが分る。また、支持力計算にあたりサーチャージ項を考慮することで更に計算値を実験値に近づけられることが分る。

6. 結論

円形基礎の模型実験を題材に、以下の結論を得た。

- (1) 遠心加速度場で、模型縮尺と加速度の積を一定にして、加速度および基礎直径を変化させる一連の実験 (Modeling of models) で遠心模型実験の妥当性を確認した。
- (2) 円形基礎の実験に際して容器側壁の影響を避けるためには、直径に対して試料容器の最小幅は 5 倍程度が必要である。
- (3) 実物基礎直径が 120cm 程度を超えると寸法効果の影響が小さい。
- (4) 排水条件下の飽和砂の支持力実験と乾燥砂の支持力実験で得られる鉛直応力～沈下曲線は、応力を有効密度、加速度と模型基礎直径の積で、沈下を基礎直径で無次元化することによって一致する。

- (5) 応力制御載荷実験と変位制御載荷実験で得られる結果に有意な差はない。
- (6) 実験にあたっては上述のような基礎的検討を本実験に先行して実施することが誤りの無い結果を得るために重要である。
- (7) 同一研究機関で同一の遠心装置、同一の実験技術で実験を行っても、砂の間隙比に関して $\pm 0.01 \sim 0.02$ 、支持力にして $\pm 10\%$ 程度の結果の変動は避けがたい。
- (8) 異なる研究機関の支持力の変動の幅は $\pm 15\%$ 程度であるが、これは遠心装置や実験技術の相違の問題というより、むしろ、砂の模型実験に共通の密度制御の問題と言える。
- (9) 模型実験の実施にあたっては、現象に影響する要因を大きく変化させて定性的・定量的傾向を把握しておくことが重要である。
- (10) 砂地盤上の浅い円形基礎の間隙比と支持力係数との関係に対して Vesic の支持力式が有効である。

7. あとがき

土質基礎工学国際学会・遠心模型実験手法に関する技術委員会の Corte の呼びかけに応じて実施した円形基礎の支持力に関する国際比較実験の港研実施分を題材にして、模型実験の計画の立て方、模型実験における留意事項を取りまとめた。

まとめ終えてみると、内容は全て言わば常識的なことばかりである。筆者らとしては、最近、遠心模型実験に対する過大な期待 (一度の実験で全てが理解できるといった盲信) に対して、実験研究は慎重に十分な検討を踏まえて実施すべきであることを主張したつもりである。

同様な配慮は、数値解析や現場実験の計画に際しても必要である。本文が港湾社会での技術開発の参考になれば幸いである。

(1989年6月30日受付)

参考文献

- 1) 土質工学会：講座『遠心模型実験』10. 座談会，土と基礎，Vol. 36-9, 1988, pp. 89-97.
- 2) Corte, J.-F. et al: Centrifugal modelling of the behaviour of a shallow foundation-A cooperative test programme, Centrifuge '88, *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling*, Paris, 1988, pp. 325-336.
- 3) 寺師昌明：遠心力載荷実験手法とその適用例，昭和60年度港湾技術研究所講演会，1985, pp. 119-184.
- 4) Kitazume, M.: Influence of loading condition on bearing capacity and deformation, *Proceedings*

of *International Symposium on Geotechnical Centrifuge Modeling*, Tokyo, 1984, pp. 149-151.
 5) 土質工学会編：実用数式・図表の解説（第1回改定版），1985，pp. 90~96.

記 号 表

D	: 模型基礎直径 (cm)	N_q	: 支持力係数
d	: 粒径 (mm)	N_{Tq}	: $\rho_a n D$ または $\rho' n D$ で無次元表示した支持力
d_{max}	: 最大粒径 (mm)	n	: 加速度 (g)
D_f	: 基礎の根入れ深さ	q_f	: 支持力 (kgf/cm^2)
e	: 間隙比	R	: 基礎半径
e_{max}	: 最大間隙比	S	: 沈下量 (mm)
e_{min}	: 最小間隙比	S_r	: 飽和度 (%)
G_s	: 土粒子の比重	t	: クリアランス (mm)
N_T	: 支持力係数	U_c	: 均等係数
		z	: 砂層厚 (cm)
		ρ_a	: 乾燥密度 (g/cm^3)
		ρ'	: 水中密度 (g/cm^3)
		ϕ_a	: 内部摩擦角 (度)