

独立行政法人港湾空港技術研究所

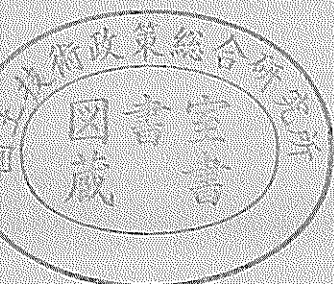
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.42 NO.2 June 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 卷 第 2 号 (Vol. 42, No. 2), 2003 年 6 月 (June 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. グリーンベルトを用いた南太平洋地域の津波対策
..... 平石 哲也・原田 賢治 3
(Greenbelt Tsunami Prevention in South-Pacific Region
..... Tetsuya HIRAISHI, Kenji HARADA)
2. 時間発展型擬似段波モデルに基づく砕波モデルの開発
..... 平山 克也・原 信彦 27
(A Simple Wave Breaking Model with Quasi-Bore Model in Time Domain
..... Katsuya HIRAYAMA, Nobuhiko HARA)
3. SCP 改良地盤における水平抵抗特性
..... 北詰 昌樹・高橋 英紀・竹村 慎治 47
(Experimental and Analytical Studies on Horizontal Resistance of Sand Compaction Pile Improved Ground
..... Masaki KITAZUME, Hidenori TAKAHASHI, Shinji TAKEMURA)
4. 粘土地盤中の根入れ基礎の鉛直支持力に関する遠心載荷模型実験と解析
..... 中村 健・北詰 昌樹 73
(CENTRIFUGE MODEL TESTS AND STRESS CHARACTERISTICS ANALYSES ON VERTICAL BEARING
CAPACITY OF EMBEDDED SHALLOW FOUNDATION
..... Takeshi NAKAMURA, Masaki KITAZUME)
5. 斜め組杭式棧橋の地震時挙動に関する数値解析と耐震性能照査法の提案
横田 弘・濱田 純次・大熊 弘行・杉澤 政敏・芥川 博昭・津國 正一・佐藤 博 87
(Numerical Analysis on Dynamic Behavior of an Open Type Wharf on Coupled Raking Steel Piles During Earthquakes
... Hiroshi YOKOTA, Junji HAMADA, Hiroyuki OHKUMA, Masatoshi SUGISAWA, Hiroaki AKUTAGAWA,
Shouichi TSUKUNI, Hiroshi SATO)
6. ASR が発生したコンクリートの特性および内部鉄筋ひずみとコンクリート表面ひずみの関係
..... タレク ウディン モハメッド・濱田 秀則・山路 徹 133
(Concrete Properties and Relationship Between Surface Strain and Strain Over the Steel Bars of ASR Affected
Concrete Members
..... Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA, Toru YAMAJI)

7. スラグセメントを用いたコンクリートの海洋環境下における長期耐久性
 …… タレク ウディン モハメッド・濱田 秀則・山路 徹 …… 155
 (Long-term Durability of Concrete Made with Slag Cements Under Marine Environment
 …… Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA, Toru YAMAJI)
8. 久里浜湾における越波被災の要因と特性
 - ナウファスを用いた臨海部の越波災害予知法の構築 -
 …… 安田 誠宏・服部 昌樹・平石 哲也・平山 克也・永井 紀彦・小川 英明 …… 193
 (Damage Cause and Characteristics of Wave Overtopping in Kurihama Bay
 -Establishment of the Estimation Method for Wave Overtopping Damage Applying NOWPHAS-
 …… Tomohiro YASUDA, Masaki HATTORI, Tetsuya HIRAIISHI, Tosihiko NAGAI, Hideaki OGAWA)
9. コンテナクレーンの耐震性向上に関する研究
 - 免震コンテナクレーンの開発 -
 …… 菅野 高弘・芝草 隆博・藤原 潔・徳永 耕一・榎本 洋二・藤木 友幸 …… 221
 (Study on the Seismic Performance of Container Crane
 -Development of the Container Crane with Isolation System-
 …… Takahiro SUGANO, Takahiro SHIBAKUSA, Kiyosi FUJIWARA, Koichi TOKUNAGA, Yoji MAKIMOTO,
 Tomoyuki FUJIKI)
10. 羽田空港の地震動特性に関する研究
 (第2報) スペクトルインバージョンによるサイト特性
 …… 野津 厚・佐藤 陽子・菅野 高弘 …… 251
 (Characteristics of Ground Motions Observed at Haneda Airport
 (Second Report) Site Amplification Factors
 …… Atsushi NOZU, Yoko SATO, Takahiro SUGANO)
11. 直立部に消波構造を用いた新しい高基混成堤の開発
 - 水理特性および耐波安定性に関する実験的研究 -
 …… 下迫 健一郎・高橋 重雄 …… 285
 (Development of a New Type High Mound Composite Breakwater
 -Experimental Study on Hydraulic Characteristics and Stability against Waves-
 …… Kenichiro SHIMOSAKO, Shigeo TAKAHASHI)

粘土地盤中の根入れ基礎の鉛直支持力に関する 遠心載荷模型実験と解析

中村 健*・北詰 昌樹**

要 旨

深層混合処理工法の現行の設計では、改良地盤を一種の構造物と見なして周囲に対して滑働、転倒と支持力の検討を行っているが、原地盤の土に比べて強度および変形係数が著しく大きい改良土は根入れのある浅い基礎と同等に考えることもでき、安定の検討も偏心傾斜荷重下の浅い基礎の支持力と捉えられると考えられる。

上記の観点から、沿岸域の軟弱粘土層で一般的な深度方向に強度が増加する地盤について、鉛直支持力を実験と特性曲線法による数値解析より検討した。

遠心模型実験は基礎幅、根入れ深さを種々に変化させた条件で行った。実験の結果、極限支持力は根入れ基礎幅比とともに直線的に増加すること、極限支持力発現後の鉛直荷重と基礎底面の深さとの関係は載荷前の根入れ深さと関係なく1本の線上にのることが確認された。

一方、数値解析で得た基礎底面での支持力係数は基礎幅 B 、地盤のせん断強度 C_{Df} とその深度方向増加率 k による指標 kB/C_{Df} が大きいほど大きく、根入れの影響は根入れ分の自重応力に相当することが分かった。

支持力の計算値と実験値は近い値を示し、基礎底面での反力分布も実験と計算がほぼ一致することが確認された。

キーワード：支持力，遠心模型実験，粘土，数値解析，鉛直荷重

*地盤・構造部 地盤改良研究室

**地盤・構造部 地盤改良研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5055 Fax：046-841-8307 e-mail：nakamurat@pari.go.jp

CENTRIFUGE MODEL TESTS AND STRESS CHARACTERISTICS ANALYSES ON VERTICAL BEARING CAPACITY OF EMBEDDED SHALLOW FOUNDATION

Takeshi NAKAMURA*

Masaki KITAZUME**

Synopsis

A series of centrifuge model tests and numerical analyses were carried out to investigate vertical bearing capacity of embedded shallow foundation in a clay ground whose undrained shear strength increases with depth. The embedded depth and the width of the foundation are changed in the model tests to study their effects on the bearing capacity. It is found that the bearing capacity increases almost linearly with increasing the ratio of embedded depth and width of the foundation. A series of stress characteristic analyses was also carried out to investigate the effects of ground strength profile with depth, and ratio of the embedded depth and width of the foundation on the bearing capacity. It was found that the measured vertical bearing capacities were well coincided with those of calculation.

Key Words: bearing capacity, centrifuge model test, clay, numerical analysis, vertical load

* Soil Stabilization Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Head, Soil Stabilization Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5055 Fax : +81-46-841-8307 e-mail:nakamurat@pari.go.jp

目 次

要 旨	73
1. はじめに	77
2. 鉛直支持力解析に関する既往の研究	77
3. 遠心模型実験	78
3.1 模型地盤の作製	78
3.2 実験結果及び考察	79
4. 特性曲線法による解析と実験結果との比較	81
4.1 計算と結果の標記	81
4.2 表面基礎に関する計算結果	82
4.3 根入れ基礎に関する計算結果	82
4.4 実験結果との比較	83
5. 結論	83
参考文献	83
付録	84

1. はじめに

港湾施設や海上空港などの建設予定地には、軟弱な粘土層が厚く堆積している場合が多く、その地盤強度分布は一般に深度方向にほぼ一定割合で大きくなっている。その際、支持力の確保や沈下の抑制のために地盤改良が行われる場合が多く、深層混合処理工法も多く用いられている。改良地盤にはケーソンなどの上部構造物の重量や埋立層からの土圧などが作用する。深層混合処理工法による改良土は、原地盤の土と比べて一般に強度および変形係数が著しく大きく、破壊時のひずみ量は著しく小さいことが確認されている。そのため、ブロック式の深層混合処理地盤の設計にあたっては、改良地盤を一種の構造物と見なして、重量や外力に対する改良地盤全体の安定（外部安定）と、改良地盤自体の耐力（内部安定）と改良地盤の変位を検討することとしている（運輸省港湾局，1999；北詰，1994）。外部安定の検討では、滑動破壊、転倒破壊と支持力破壊の3つの破壊モードを仮定し、個別に検討している。

一方、深層混合処理工法の改良地盤の深さと幅の比率は一般的には1以下であるため、根入れのある浅い基礎と考えることもできる。このように改良地盤を考えると、外部安定の検討は偏心傾斜荷重下での支持力の検討に集約できるのではないかと考えられる。

このような背景の下、筆者らは粘土地盤中の根入れのある浅い基礎の偏心傾斜荷重下の支持力に関する研究を進めている。本報告では、一連の研究の一環として行った、根入れのある基礎の鉛直支持力についての遠心模型実験の結果ならびに特性曲線法(Sokolovskii,1960)による解析結果について報告する。

なお、本論文は土木学会論文集への投稿分（北詰，中村：深度方向に強度が増加する地盤中の根入れ基礎の鉛直支持力の模型実験と解析）に、紙幅の都合で省略した事項と付録を加筆，修正したものである。

2. 鉛直支持力解析に関する既往の研究

支持力の解析に関して、最近、Kusakabe and Lee(2001)がTerzaghiに始まる古典的理論から最近の信頼性設計に至る研究の流れを概観している。その中でSolution tableとして、基礎の形状別に荷重の作用方向，地盤の条件，地盤の総数等のパラメータ毎に研究実績の有無を一覧表で示している。これにより本論文で取り上げる帯基礎の鉛直支持力については、深さ方向の強度増加，応力依存性，異方性，二層地盤といった条件下で解析がなされて

いると述べられている。

深さ方向に強度が増加する地盤の支持力について、解析や実験を行った既往の研究としては、まずDavis and Booker(1973)による解析があげられる。彼らは、粘土地盤上の表面基礎を対象に特性曲線法による支持力計算を行い、強度分布の鉛直支持力への影響を求めている。その中で、粘土地盤表面でのせん断強度 C_0 ，深度方向のせん断強度の増加率 k ，基礎幅 B を組み合わせた指標 kB/C_0 （または C_0/kB ）を導入し、鉛直支持力への影響係数(F_s)を求めている。

木村と竹村(1987)は、前述のDavis and Bookerの研究成果を踏まえ、深さ方向に強度が増加する粘土地盤上の表面基礎の鉛直支持力を上界値計算により算出している。さらに彼らは、遠心模型実験も実施して数値計算と比較し、両者はほぼ一致したと述べている。

一方、粘土地盤中の根入れ基礎の支持力に関して、Tani and Craig(1995)は、海底油田の油井の基礎を念頭に特性曲線法による支持力計算を行い、地盤表面の帯基礎の支持力係数，円形基礎の形状係数，根入れ係数を求め、深度方向に強度が増加する地盤中の根入れのある基礎の鉛直支持力の算定式を提案している。さらに、彼らは比較的根入れ深さの小さい条件についていくつかの遠心模型実験を行い、計算値が実験結果とほぼ一致したことを示している。最近では、Martin(2001)が根入れのある円形基礎を対象に支持力解析を行い、上界・下界値計算により得られた結果を図表化している。

実験を中心とした研究事例としては、西村ほか(1988)と飯島ほか(1987)が中間土の地盤に対して根入れ基礎の鉛直載荷試験を遠心場で行っている。彼らは、実験から求められた支持力係数は、根入れ基礎幅比の増加に伴い大きくなるが、上界値計算の結果とはあまり合わなかったと報告している。

このように根入れのある支持力に関してはいくつかの実験的・解析的研究がある。しかし、深層混合処理工法によるブロック式改良地盤に相当するような、深さ方向に強度が増加する地盤で、根入れ深さが基礎幅と同程度の帯基礎の支持力については未だ十分に検討されているとは言いがたい。そこで、本研究では深度方向に強度が増加する粘土地盤中の根入れ帯基礎の支持力について遠心模型実験と特性曲線法による数値解析で検討した。

表-1 カオリン粘土の物性

土粒子の密度(g/cm ³)	2.638	
液性限界 (%)	63.8	
塑性限界 (%)	26.8	
塑性指数	37.0	
分類名(分類記号)	粘土(CH)	
粒度分布 (%)	砂分	1
	シルト分	22
	粘土分	77
最大粒径 (mm)	0.425	

3. 遠心模型実験

3.1 模型地盤の作製

(1) 地盤の仕様

遠心模型実験で用いた粘土はカオリン粘土で、その物性は表-1に示すとおりである。深層混合処理工法が用いられる軟弱地盤は正規圧密状態が多いと考えられるが、表面付近の粘土が軟弱であると模型基礎が設置できないこと等の理由により全層過圧密の地盤とした。ただし、後述するように地盤の強度分布は深さ方向に強度の増加する地盤となっている。

図-1はセットアップされた模型地盤の概要を示している。試料容器は内寸で幅50cm、高さ35cm、奥行20cmの小型のものを用いた。また粘土層の厚さは根入れ深さ5~7cmのケースでは18cm以上、根入れ深さ10cmのケースでは25cm以上とした。容器および粘土層厚の設定にあたっては事前にFEM解析を行い、容器の幅と粘土層厚が基礎に鉛直載荷および水平載荷を行った際の荷重~変位関係に影響を与えない幅・厚さであることを確認している。

(2) 実験ケース

実験は表-2に示すように、4種類の根入れ深さ D_f 、3種類の基礎幅を組み合わせた合計6ケースについて行った。 kB/C_{Df} (根入れ深さ D_f である基礎底面でのせん断強度という意味で C_{Df} と表記する)で分類すると5種類である。ケース名がB7D7の場合のみ-10,-12とサフィックスがついているのは、同じ基礎幅、根入れ深さでの実験を偏心傾斜荷重の実験も含めて多数行ったため、そのうち鉛直載荷試験を行ったケースのみ表-2に掲げた。

(3) 地盤の作製

模型地盤の作製は、まず試料容器内に排水層である基礎砂層を作製した後、含水比を120%に調整したカオリン粘土スラリーを投入した。その後、粘土表面に空気圧で作動するペロフラムシリンダーにより載荷して地盤を圧密した。最終圧密圧力は83kN/m²に設定した。これは今回

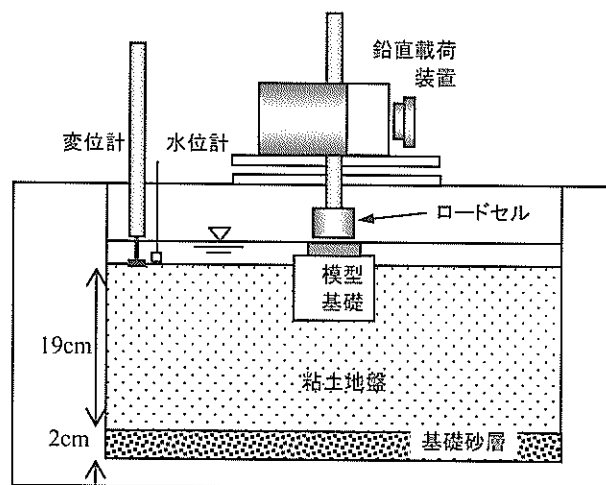


図-1 模型地盤セットアップ図(B7D7-10)

表-2 実験一覧

ケース名	根入れ深さ D_f (cm)	基礎幅 B (cm)	$\frac{D_f}{B}$	$\frac{kB}{C_{Df}}$	支持力値	
					圧力 (kN/m ²)	N_c
B5D0	0	5	0	0.53	29.7	5.13
B5D5	5	5	1	0.35	63.0	6.83
B5D10	10	5	2	0.26	105.2	7.62
B7D7-10	7	7	1	0.43	110.8	8.83
B7D7-12	7	7	1	0.43	112.6	9.00
B10D0	0	10	0	1.07	34.5	5.97

の地盤条件で遠心実験を行った際に、粘土層が全層過圧密状態になるために必要な圧密圧力である。なお根入れのある基礎の実験の場合は、最終圧密圧力の3/4程度の圧力で圧密し、その後一旦圧力を開放して基礎の根入れ分の粘土を除去してベークライト製の模型基礎を設置した。その後、最終圧密圧力である83kN/m²で再度圧密させた。

深層混合処理工法による改良地盤は原地盤に固化材を混合攪拌して作製されるため、改良地盤と原地盤の境界は粗な条件と考えられる。そのため、遠心模型実験や解析などでも、基礎の周面を粗とした条件で行う必要性が高い。しかし、模型実験で周面が完全に粗な条件の基礎を用いた模型地盤は、地盤の作製プロセス上困難であり、解析を行う際にも不確定要因が増えると考えられたため、基礎の周面が滑な条件とした。そのため、模型基礎表面にシリコン潤滑剤を塗布して可能な限り付着を除去するように努めた。

実験室内で作製された模型地盤を遠心模型実験装置に搭載し、50gの遠心加速度の下で自重圧密させた。自重圧密中には粘土地表面の沈下を計測して、90%以上の圧密

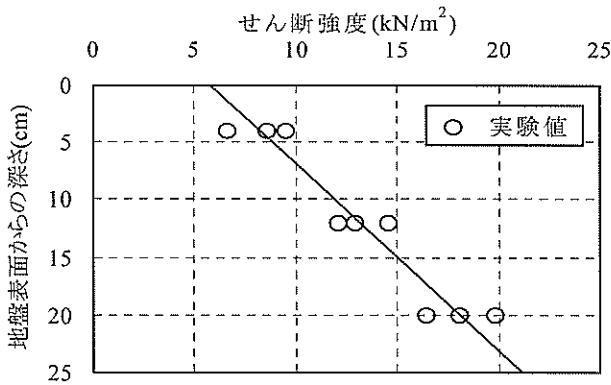


図-2 地盤強度分布

に達したことを確認した。自重圧密終了後、試料容器に取り付けた鉛直載荷装置により模型基礎を一定速度で沈下させ、変位制御で鉛直載荷を行った。非排水条件を満足させるために、載荷速度は23mm/分と速く設定した。

(4) 地盤の強度

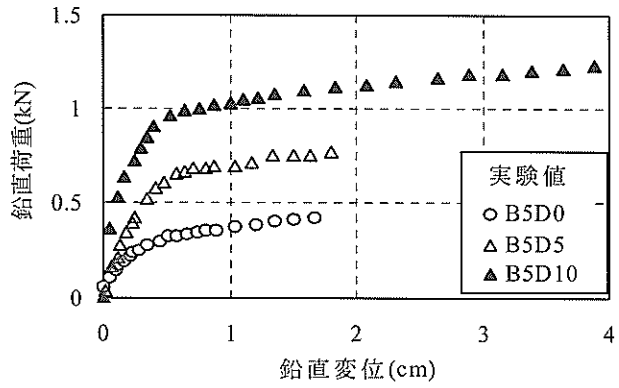
粘土地盤の非排水せん断強度分布は、載荷実験と同じ材料、手順で別途作製した粘土地盤について、50gの遠心場でペーン試験を行って求めた。カオリン粘土地盤の非排水せん断強度が、遠心場でのペーン試験で精度良く求められることは、当所で以前行った研究により確認されている(北詰ら, 1988)。なお、地盤強度の測定のための実験は3ケース行った。図-2は得られた地盤の非排水せん断強度の深度方向の分布である。図より、地表面での強度を有し深度方向に直線的に増加する地盤が形成されていることが分かる。

3.2 実験結果及び考察

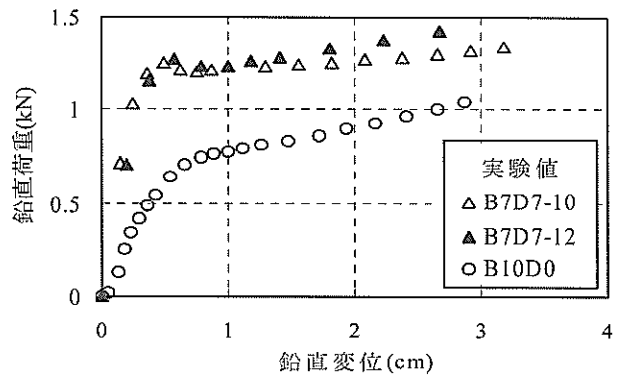
(1) 鉛直荷重と鉛直変位の関係

実験で得られた鉛直荷重と基礎の鉛直変位の関係を図-3に示した。図-3(a)は基礎幅が5cmで根入れ深さの異なる場合を、図-3(b)は基礎幅が7cmと10cmで根入れ深さの異なる場合をそれぞれまとめて示している。図-3(a)および(b)における鉛直荷重は、載荷装置により模型基礎上面に与えた荷重であり、基礎の自重は含まれていない。

まず基礎幅が5cmの場合について見ると(図-3(a))、いずれのケースも基礎の鉛直変位に伴い鉛直荷重が急速に増加し、その後荷重は基礎の変位に伴い徐々に増加する傾向が見られる。同様の傾向は、基礎幅が7cm、10cmの場合にも見られる(図-3(b)参照)。基礎幅が5cmの場合について、載荷初期の荷重増加割合を見ると、根入れ深さの大きい方が荷重増加割合が大きい傾向が見られる。これは、粘土地盤が深度方向に強度が増加するものであるため、根入れが深いほど基礎底面位置での地盤強度が大きくなるためと考えられる。



(a) 基礎幅 5cm



(b) 基礎幅 7cm,10cm

図-3 荷重～基礎鉛直変位関係

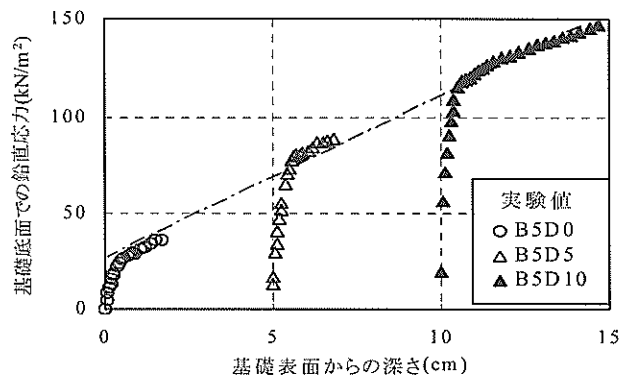


図-4 鉛直応力～基礎深さ

図-3(a)で示した基礎幅5cmの実験ケースの荷重～鉛直変位関係について、載荷中の地盤表面から基礎底面までの深さを横軸に、基礎底面での鉛直応力を縦軸として示したのが図-4である。なお、図中の鉛直応力は、載荷装置による鉛直荷重と基礎の自重の合計を基礎の底面積で除して求めた圧力である。この図より、同じ幅の基礎の場合、載荷後半部で漸増する部分の鉛直応力と基礎深さの関係は、図に一点鎖線で示した1本の線上に乗っていることが分かる。同様の傾向は砂地盤を対象とした研究(石鍋ら, 1997)でも見られている。

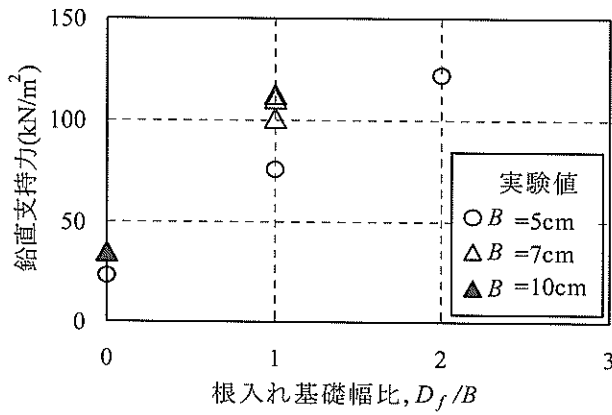


図-5 鉛直支持力～ D_f/B

b) 極限支持力と根入れ基礎幅比の関係

本研究においては、地盤の極限支持力を次のように定義した。図-3(b)に示したB7D7-10及びB7D7-12の両ケースについては、荷重～鉛直変位曲線にピークが見られるため、計測されたピーク荷重と基礎の自重の和を基礎の底面積で除した圧力を極限支持力と定義した。また図-3(a)(b)で荷重のピークが見られないケースでは、荷重～鉛直変位曲線の荷重初期に荷重が急増している部分と、荷重後半部に荷重が漸増する部分をそれぞれ延長し、両者が交わる点での荷重に基礎の自重を加え、基礎の底面積で除した値を極限支持力と定義した。このようにして求められた極限支持力と基礎の根入れ基礎幅比 (D_f/B) との関係を図-5に示した。

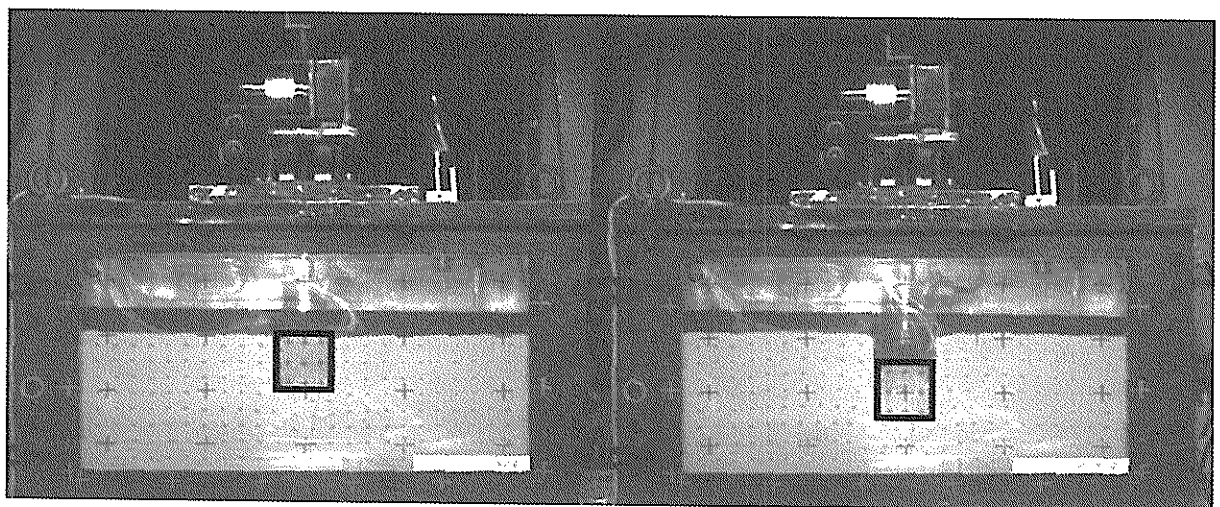
まず、基礎幅が5cmの実験ケース (図中の○印) に着目すると、極限支持力は根入れ基礎幅比の増加にともないほぼ直線的に増していることが分かる。また、基礎幅が7cmの場合を見ると、本研究では D_f/B が1の場合しか行っていないが、基礎幅が5cmの場合の支持力に比べて約1.4倍大きな支持力を示していることが分かる。

c) 地盤の変形挙動

鉛直荷重による地盤の変形挙動を観察するために、いくつかの実験ケースでは粘土地盤前面にターゲットを約2cm間隔で設置した。実験ケースB7D7-10での鉛直荷重前後の地盤の写真を図-6(a)と(b)にそれぞれ示す。写真中央に正方形の黒枠で表した部分が模型基礎、その周囲の白い部分が粘土地盤である。2枚の写真を見比べると、基礎は大きく下方に変位しているのに対して基礎側面の粘土はほとんど変位していない。地盤作製の条件で基礎周面を滑とするために、基礎周面にシリコン潤滑剤を塗布した効果が現れていることがわかる。

この実験ケースについて、荷重による地盤各部の変位の方向と大きさを定量的に求めるため、鉛直荷重中に撮影した写真を用いて得られた地盤の変形挙動を図-7に示す。図中、模型基礎を矩形で囲って示している。また、図には鉛直荷重の開始から極限支持力に達した時点までの各ターゲットの変位ベクトルを、変位の大きさを実際の変位量の5倍に拡大して示している。

図より、基礎直下の地盤が基礎の鉛直変位に伴いほぼ鉛直下方向に大きく変位していることが分かる。このケースでは、鉛直荷重の開始から荷重が極限荷重に達するまでに基礎が約0.5cm鉛直変位しているため、基礎直下の地盤も同様に変位していることが分かる。一方、基礎直下以外の部分での地盤の変位は全般的に小さいことが分かる。変位ベクトルの向きについて見ると、基礎の下端部付近では水平方向の変位が卓越しているが、その他の部分では水平方向あるいは斜め上方向に大きく変位している傾向が見られる。また、基礎側面付近では前述のとおり基礎に引きずり込まれることなく、ほとんど変位していないことが分かる。



(a)鉛直荷重前

(b)鉛直荷重後

図-6 模型地盤写真 (ケース B7D7-10)

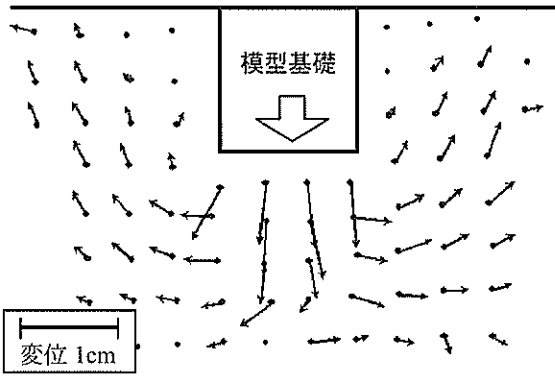


図-7 地盤の変形挙動 (B7D7-10)

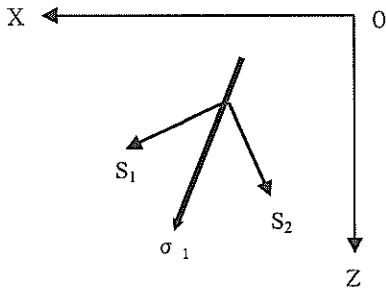


図-8 特性曲線

4. 特性曲線法による解析と実験結果との比較

4.1 計算と結果の表記

特性曲線法による解析は、2. に述べた研究例以外にも多く行われており、式展開(Sokolovskii,1960)も詳しく述べられている。そこで、紙数の制約もあるため、ここでは簡潔に説明するに留める。

まず、二次元基礎に関する地盤中の力のつり合い方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma'$$

ここに、 σ_x , σ_z , τ_{xz} はそれぞれ水平方向と鉛直方向の直応力ならびにせん断応力であり、 γ' は地盤の有効単位体積重量である。次に、破壊規準として次式に示すモール・クーロンの規準を適用した。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c' \cos \phi' + 2\sigma_m' \sin \phi' \tag{2}$$

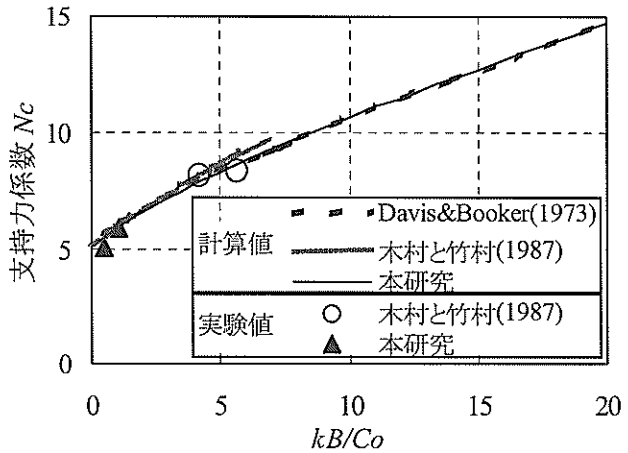


図-9 支持力係数~kB/Co (表面基礎)

ここに、 σ_1 , σ_3 , σ_m はそれぞれ最大・最小主応力、平均主応力である。また、 c' と ϕ' は地盤の粘着力と内部摩擦角をそれぞれ表している。

式(1)ならびに式(2)を展開して求められるすべり線は、図-8に示すように最大主応力 (σ_1) の向きに対して $\pm(\pi/4 - \phi'/2)$ の角度に2方向発生する。今回の計算では、地盤表面から計算を進め、基礎側面ならびに底面での境界条件を満たすまで繰り返し計算を行った。また、基礎の支持力は底面での応力条件から鉛直成分を計算し、それを合計して求めた。

本研究では、計算結果を正規化して表記するため、下記に示すTerzaghiの支持力公式を援用した支持力係数を用いることとした。

$$q = cN_c + \gamma_1 D_f N_q + \gamma_2 \frac{B}{2} N_\gamma \tag{3}$$

ここに、 N_c, N_q, N_γ は支持力係数、 γ_1 と γ_2 はそれぞれ根入れ部分と基礎底面下の土の単位体積重量、 D_f は根入れ深さ、 B は基礎幅をそれぞれ示している。今回の研究は $\phi' = 0$ 材を対象としているので、 $N_q = 1, N_\gamma = 0$ であり、式(3)は下式のように表される。

$$q = cN_c + \gamma_1 D_f \tag{4}$$

地盤強度の深度分布が支持力(q)に及ぼす影響について、各支持力係数に影響係数を付加して表記する方法と支持力係数自体に含めて表記する方法がある。Davis and Booker(1973)は前者の表記法を、Tani and Craig(1995)は後者の表記法を用いている。ここでは後者の方法で表記することとする。なお、本研究で作成したプログラムの精度については、付録に検討した結果を示す。

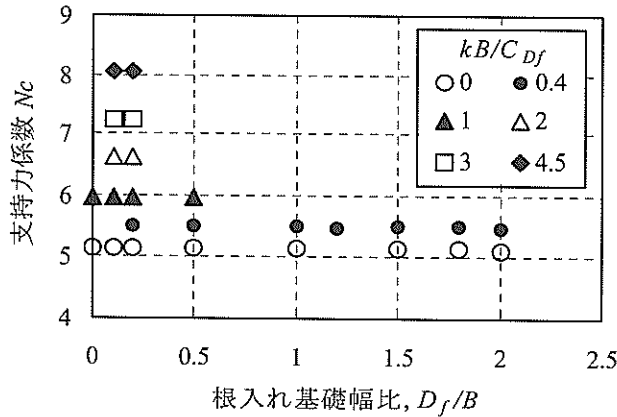


図-10 支持力係数 $\sim D_f/B$ (根入れ基礎)

4.2 表面基礎に関する計算結果

まず表面基礎の支持力について、地盤の強度条件を変えながら計算を行った。なお、基礎底面の粗さは、実験条件にあわせて完全に滑な条件とした。得られた計算結果を図-9に示す。図中の縦軸は計算で得られた支持力値(Q)から式(4)により求められた支持力係数 N_c を、横軸は kB/C_0 をそれぞれ示している。なお、 C_0 は基礎底面でのせん断強度、 k は深さ方向の強度増加率、 B は基礎幅をそれぞれ示す。図より、支持力係数 N_c は kB/C_0 の増加に伴いほぼ一様に増加する傾向が見られる。図には、Davis and Booker(1973)、木村と竹村(1987)による計算結果もあわせてプロットした。Davis and Bookerの計算は今回の計算と同じ特性曲線法によるものであり、今回の計算結果とほぼ完全に一致していることが分かる。また、木村と竹村による上界定理による計算結果と比較すると、本研究の計算結果は若干小さめであるが、比較的良い一致を示していることが分かる。また、図には木村と竹村による実験値(図中の○印)と本実験結果(B5D0とB10D0)(図中の▲印)もあわせてプロットした。木村と竹村による実験値は、本研究とは異なる粘土を用いて行った遠心場での支持力実験結果である。計算結果はいずれの実験結果ともほぼ一致していることが分かる。

4.3 根入れ基礎に関する計算結果

(1) 地盤の自重がない場合

次に、地盤強度が深度方向に増加する地盤で根入れがある基礎について計算を行った。基礎の底面、側面はいずれも滑の条件である。計算上のパラメータとして、 kB/C_{Df} (根入れ深さ D_f である基礎底面でのせん断強度という意味で C_{Df} と表記する)に加え、根入れ基礎幅比 D_f/B がある。

計算は地盤の強度分布と基礎の根入れ深さを種々に変

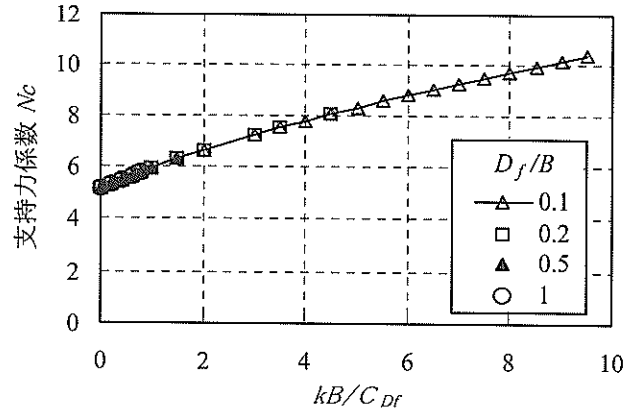


図-11 支持力係数 $\sim kB/C_{Df}$ (自重なし)

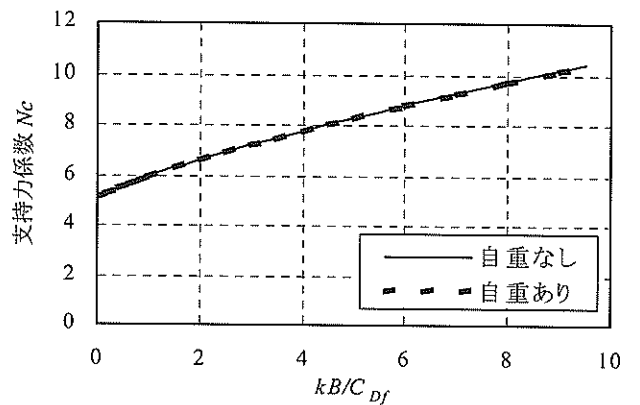


図-12 支持力係数 $\sim kB/C_{Df}$ (自重あり)

化させることで、 kB/C_{Df} を変化させて行った。図-10には地盤の自重がない場合の計算結果を、縦軸に支持力係数 N_c を、横軸に根入れ基礎幅比(D_f/B)をとって表した。ここで支持力係数 N_c は、計算で得られた支持力値(Q)を基礎の底面位置での地盤のせん断強度(C_{Df})で除して求めたものである。図-10では、各 kB/C_{Df} ごとにマークを変えて示している。計算結果は、 kB/C_{Df} の値によって異なる支持力係数(N_c)を示しているが、同じ kB/C_{Df} の場合には支持力係数(N_c)は根入れ基礎幅比に関係なく一定であることが分かる。なお、 kB/C_{Df} が比較的大きい場合には、 D_f/B の比較的小さい場合のみしか図にプロットされていない。これは、根入れ基礎幅比と地盤の強度増加率が大きく地盤表面でのせん断強度 C_0 が負の値になる場合には計算を行わなかったためである。

図-11は、図-10に示した計算結果について kB/C_{Df} を横軸にプロットし直したものである。図より、地盤の kB/C_{Df} が増加するにつれ支持力係数がほぼ一様に増加する傾向が見られる。また、基礎の根入れ基礎幅比が異なっても、支持力係数 N_c は一本の線上にプロットされており、基礎の根入れには影響されないことが確認できた。

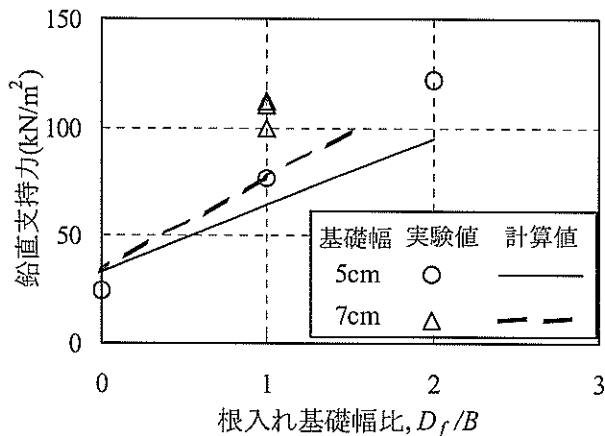


図-13 実験値と計算値の比較 (支持力 $\sim D_f/B$)

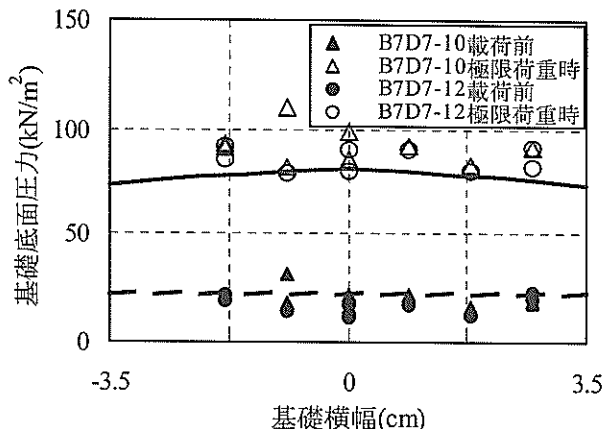


図-14 実験値と計算値の比較 (基礎底面圧力分布)

(2) 地盤の自重がある場合

次に、地盤の自重がある場合について計算を行った。計算では、地盤に 10kN/m^3 の自重を与え、 D_f/B の大きさを $0.1\sim 1$ まで変化させて計算を行い、図-12に支持力係数 N_c と kB/C_{Df} との関係を示した。 N_c の値は式(4)に基づき、計算で求められた q から根入れ分の自重 γD_f を減じ、それを C_{Df} で除して求めた。なお、図には自重なし場合の計算結果(図-11)もあわせて示した。図より、地盤の自重がある場合の N_c と kB/C_{Df} の関係は、当然ながら自重のない場合と一致する計算結果を得ることを確認した。

4.4 実験結果との関係

(1) 支持力 \sim 根入れ深さ関係

次に実験の地盤条件をあわせた計算を行い、鉛直支持力と根入れ基礎幅比との関係を図-13に示した。図には図-5に示した実験値もあわせて示している。図より、基礎の根入れのない場合には、計算値と実験値はほぼ一致している。一方、根入れ基礎幅比が大きくなると実験値は計算値より20%程度大きいことが分かる。この傾向は基礎幅の大きさによらず見られた。この理由として、実験では基礎側面の根入れ部分及び底面に潤滑剤を塗布して粘着力の除去に努めたものの、完全ではなかったこと等が考えられるが、その詳細は分かっていない。これに關しては今後の検討課題としたい。

(2) 基礎底面での反力分布

実験ケースのうち基礎幅が7cm、根入れ深さが7cmの2ケース(B7D7-10とB7D7-12)では模型基礎底面に小型の圧力計を設置しており、底面での圧力分布を計測した。図-14には、実験ケースB7D7-10及びB7D7-12について極限荷重時の基礎底面での圧力分布と、解析による圧力分布を示した。計算値は基礎中央部で多少大きな圧力を、基礎端部で多少小さい圧力を示している。実験値には実験ケースごとに多少ばらつきが見られているが、平

均すれば計算値に対し10%程度大きい値を示している。一方、図-14にあわせて示した鉛直載荷前の圧力分布は実験値の方が計算値より若干小さい値を示しており、鉛直載荷による圧力の増分は、実験値が計算値に比べて約20%程度大きな値を示した。

5. 結論

本研究では、深度方向に強度の増加する地盤中の根入れのある基礎の鉛直支持力を遠心模型実験と特性曲線法による数値計算で検討した。一連の研究より得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 遠心模型実験より、極限支持力は根入れ深さとともに直線的に増加すること、載荷後半部での鉛直応力 \sim 変位関係は根入れ深さに関係なくほぼ1本の線に乗ることが分かった。
- 2) 特性曲線法による計算では、支持力係数 N_c は kB/C_{Df} が大きいほど大きく、両者の関係は地盤の単位体積重量や根入れ基礎幅比に関係なく一定であることが確認できた。
- 3) 鉛直支持力の実験値と計算値とでは実験値の方が約20%大きい、両者とも根入れ基礎幅比の増加に対して直線的に支持力が増加する傾向が見られた。

参考文献

飯島興二, 末政直晃, 竹村次朗, 木村 孟: 粘性土地盤における根入れのある基礎の支持力特性, 第22回土質工学研究発表会, pp.1079-1080, 1987.
石鍋仁史, 森本弘光, 小林利雄, 片上典久, 斎藤邦夫: 中間的な根入れを有する基礎の支持力特性, 第32回地盤工学研究発表会, pp.1405-1406, 1997.

運輸省港湾局: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上), 日本港湾協会, pp.525-536, 1999.

北詰昌樹, 遠藤敏雄, 寺師昌明: 正規圧密地盤上の浅い基礎の支持力, 港湾技術研究所報告, Vol.27, No.3, pp185-203, 1988.

北詰昌樹: 深層混合処理工法による改良地盤の安定性に関する研究, 港湾技術研究所資料, No.774, 1994.

木村 孟, 竹村次朗: 帯基礎による正規圧密粘性土地盤の変形・支持力に関する研究, 土木学会論文集, No. 382/III-7, pp.157-166, 1987.

西村 学, 末政直晃, 斉藤邦夫, 中瀬明男: 過圧密地盤における根入れを有する基礎の支持力特性に関する研究, 第 23 回土質工学研究発表会, pp.1305-1308, 1988.

Davis, E. H. and Booker, J. R.: The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays, *Geotechnique*, Vol.23, No.4, pp.551-563, 1973.

Kusakabe, O. and Lee, M. W. : Development of bearing capacity studies and changing foundation design, *Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.2, pp.729-751, 2001.

Martin, C. M. : Vertical bearing capacity of skirted circular foundations on tresca soil, *Proceedings of the 15th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Vol.1, pp.743-746, 2001.

Sokolovskii, V. V. : *Statics of soil media*, 1960

Tani, K. and Craig, W. H. : Bearing capacity of circular foundations on soft clay of strength increasing with depth, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No.4, pp.21-35, 1995.

付録 特性曲線法計算の精度の検証

1. 特性曲線の節点数の影響

今回作成したプログラムでは, 特性曲線網の節点数を任意に設定することができる. 分割数を多くすることにより高精度の計算結果が期待できるが, その反面データ数が増加して処理に時間を要するので, 実用上問題のない範囲で少ない節点数を用いるのがよいと思われる. そこで, 一連の計算を始める前に節点数が支持力値に及ぼす影響を表面基礎を対象に検討した.

特性曲線網の節点数による影響を図-付1に示した. 図では, 支持力 (q_u) を基礎底面位置での粘土地盤のせん断強度 C_0 で除して求めた支持力係数 N_c を縦軸に示している. 計算では kB/C_0 を 0 (深さ方向強度一定) から 40 まで変化させて計算した. まず kB/C_0 が 20 までの場合について見ると, 節点数が 67 から 337 と変化させても算出された支持力係数にほとんど違いが見られないことが分かる. 一方, kB/C_0 が 40 の場合には節点数が増加するにつれて支持力が多少減少し, 節点数が 100 程度以上ではほぼ一定となる傾向が分かる. このように, 地盤の条件によっては節点数の影響が多少見られているが, 全般には節点数の影響は小さいことが確認された. 以上の検討から, 以下の計算では特性曲線網の節点数を 67 として計算した.

2. 自重の影響

先に示したように, $\phi = 0$ の地盤では支持力は自重の影響を受けない. 言い換えれば地盤の自重の値をどのように変えても, 支持力の計算結果は同じになるはずである. この点を確認するため, 単位体積重量の異なる 5 種類

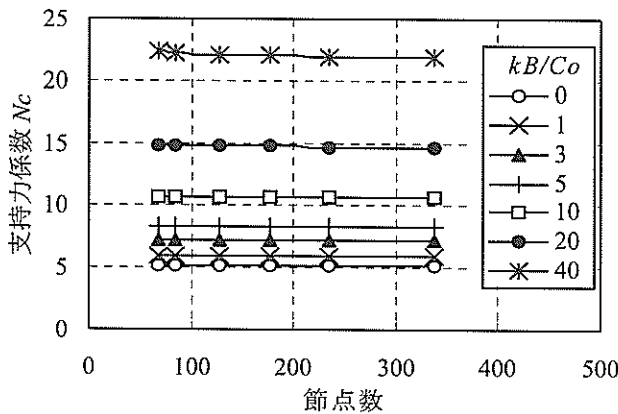


図-付1 節点数の影響

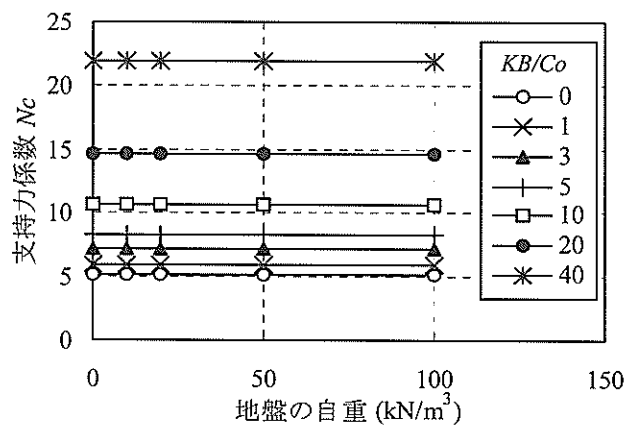


図-付2 地盤の自重の影響

(自重なしも含む)の地盤を想定して、前項と同様、7種類の kB/C_0 の条件で支持力を計算した。計算結果を図-付2に、支持力係数 N_c と地盤の自重との関係で示す。図より kB/C_0 が同じならば、地盤の自重の大きさにかかわらず一定の支持力係数が算定されることがわかる。

3. 上載荷重の影響

地盤に6通りの上載荷重(0も含む)を与えて、7種類の kB/C_0 の条件にて支持力を計算した結果を図-付3に示す。図の縦軸は支持力 q から上載荷重分 $\gamma_1 D_f$ を差し引き、基礎底面でのせん断強度 C_0 で除して求めた支持力係数 N_c である。図よりいずれの kB/C_0 の場合でもほぼ同じ支持力係数が得られ、上載荷重の影響は見られなかった。

以上の検討より、今回作成したプログラムが精度の高い計算結果を出すことが確認できた。

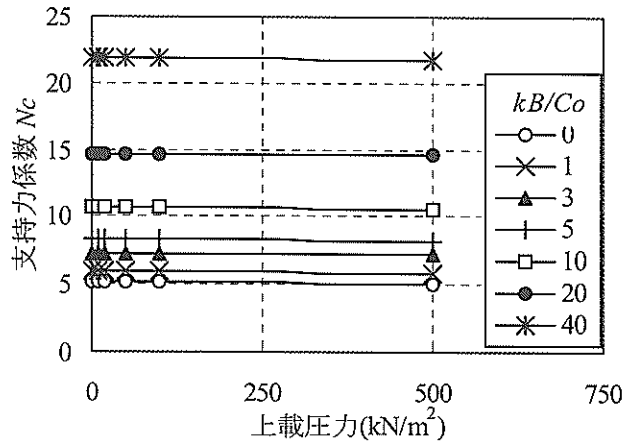


図-付3 上載圧力の影響