

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 392 Sept. 1981

歩行式作業船の脚の底面に作用するせん断力と
地盤反力の模型実験

岩 崎 峯 夫
秋 園 純 一
轟 達 夫

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 実験内容	4
2.1 実験概要	4
2.2 実験装置	4
2.3 測定方法	4
2.4 実験条件	7
3. 実験結果	9
3.1 実験結果の一例	9
3.2 実験結果の解析	10
4. 結 論	29
5. あとがき	29
参考文献	29
記号一覧表	29

Forces Acting upon Legs of a Jack-up Type Workvessel

Mineo IWASAKI*
Jun-ichi AKIZONO**
Tatsuo TODOROKI**

Synopsis

A jack-up type workvessel, of which hull is elevated above the sea level by its legs, has large stability during operation.

However, buckling of its long legs is an important problem, especially in the case of walking type, because the hole which was made on the sea bed previously by the leg produces bending moments.

A landing experiment of a model leg was carried out on a sand bed with a hole to investigate the vertical force, the shearing force which acts on the bottom of leg, and the eccentricity of acting point of the equivalent vertical force, etc.

The experimental parameters are the diameter of leg, the distance between the axes of hole and leg, the depth of hole, and the degree of sand compaction.

The summary of the results is as follows:

- (1) The vertical force per unit area is almost independent on the diameter of leg. It varies with the distance between the axes before the leg reaches the bottom of hole. But after the leg goes down under the bottom, it tends to approach a constant value except the case that the depth of hole is more than the diameter of leg.
- (2) The shearing force per unit area takes a maximum value when the distance between the axes is $6/4-8/4$ of the diameter of leg. It increases with the depth of hole.
- (3) The shearing force is less than 13% of the maximum vertical load which was needed to make the hole.
- (4) The eccentric displacement of acting point is less than 30% of the diameter of leg.
- (5) The bending moment caused by the eccentricity is less than 10% of the product of the diameter of leg and the maximum vertical load to make the hole.
- (6) The bending moment caused by the eccentricity and that caused by the shearing force act on the leg in opposite directions.

These results can be used for the design of a real workvessel if the scale factor is considered.

* Chief of Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

** Member of Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

歩行式作業船の脚の底面に作用するせん断力と 地盤反力の模型実験

岩 崎 峯 夫 *
秋 園 純 一 **
轟 達 夫 **

要 旨

これからの港湾工事には、大深度荒天用作業船が必要となることが予想される。ジャッキアップ型作業船は作業時に数本の脚で海面上に船体を支えるため安定性が高く、大深度荒天用として有る。しかし、この型式は長い脚を必要とし、特に歩行式の場合には移動前の足跡がつきに着底する脚に影響を与えるため、バックリングが問題となる。

そこで、実機の設計のための基礎資料を得るため、模型脚の着底実験を行い、歩行時に模型脚に作用する地盤反力、模型脚底面に生じるせん断力、地盤反力の着点の偏心等を調べた。実験パラメータとして、模型脚直径は 50, 75, 100 mm, 足跡とつきに着底する模型脚の距離は模型脚直径の $1/4 \sim 16/4$, 足跡の深さは模型脚直径の $1/2 \sim 2/1$ とし、締固め状態の異なる 2 種類の砂地盤に対して種々の組合せで実験を行った。地盤反力は模型脚を押込む力とつりあうので、これらを垂直力と呼ぶこととして実験結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) 垂直応力は模型脚直径による差は少く、模型脚を砂地盤に押込む途中では足跡からの距離により差がある。しかし、足跡より深く押込まれると、足跡の深さが模型脚直径以下の場合、一定の値に近づく傾向がある。

(2) せん断応力は、模型脚直径による差は少く、足跡からの距離が模型脚直径の $6/4 \sim 8/4$ のとき最大となり、足跡が深いほど大きくなる傾向がある。

(3) 最大せん断力は、足跡を作ったときの最大垂直力の 0.13 倍程度である。

(4) 垂直力の着点の偏心量の最大値は、模型脚直径の 0.3 倍程度である。

(5) 垂直力の着点の偏心による曲げモーメントの最大値は、足跡を作ったときの最大垂直力と模型脚直径の積の 0.1 倍程度である。

以上の結果は、実験条件の範囲に注意すれば、実機の設計に利用できると考えられる。その際、脚底面のせん断力による曲げモーメントと、垂直力の偏心による曲げモーメントは、互いに脚を逆方向に曲げる向きに作用するので、危険断面に対して影響の大きい方を基準にして設計を行うとよい。

1. ま え が き

港湾の建設は、従来、静穏で比較的水深の浅い内湾や内海で行われてきたが、今後新しく計画される港湾工事は、海象・気象条件の厳しい外海に面し、水深が深い場所で行われることが多くなると予想される。

しかし、現状では、荒天と大水深という条件のもとで稼働できる作業船は実現していない。

ジャッキアップ型作業船は、このような大深度荒天用

作業船に対して応用可能な形式のひとつである。

ジャッキアップ型作業船は、数本の脚を装備しており作業時には、船体から脚を下げて海底面に着底させ、さらに船体を海上に支えることができる機構を有している。このため、波の影響が少く、作業時の安定性が非常に高いという特徴をもっている。また、最近では、固定脚と移動脚を装備して順番に着底させることにより歩行するタイプが作業の能率向上のため関心を集めている。

ところが、ジャッキアップ型作業船の脚は細長いため

* 機材部 作業船研究室長

** 機材部 作業船研究室

にもともと偏心荷重によってバックリングしやすい性質を持っている。そのうえで、歩行式の場合には、歩行の前でできた足跡の近くに歩行によって次の脚が着底する。

そのため、脚に作用する地盤反力の着力点は脚の中心からずれた位置になる。また、地盤に脚が押込まれるにつれて脚の下部の土が足跡の方へくずれながら移動するため、脚のフーティング底面には摩擦によりせん断力が発生する。このため、脚には曲げモーメントが作用し、バックリングしやすくなる。さらに、大深度用となると従来よりも長い脚が必要となるため、歩行式ジャッキアップ型作業船の設計にあたっては、バックリングに対する脚の強度設計が重要な項目となる。

しかし、脚の着底時に脚に作用する力が足跡によってどのように変化するかは明らかにされていないのが現状である。

そこで、脚の設計のための基礎資料を得るために、脚の模型を製作し押込み装置で模擬地盤に押込む実験を行った。この模型実験によって、先にできた足跡とつぎに押込む脚の位置と、脚の底面に作用する地盤反力、地盤反力の着力点、脚の底面に生じるせん断力との関係を明らかにすることができたので、実機の設計の際の基礎資料として役立つと考えられる。

2. 実験内容

2.1 実験概要

着底実験はつぎのように行った。まず、円筒形の模型脚を砂地盤に対して垂直方向に押込んでから抜きとり、足跡を作っておく。この足跡を先穴と呼ぶことにする。

つぎに、先穴に対して模型脚を中心軸をずらせた位置に押込み、このときに模型脚に加わる垂直力、水平力を測定し、その結果から模型脚底面に作用する地盤反力の大きさと着力点の位置、模型脚底面に生じるせん断力の大きさ等を算出した。

なお、本研究では地盤反力は模型脚底面に垂直に作用し、模型脚を砂地盤に押込む力と大きさが等しいので、これらを総称して垂直力と呼ぶことにする。また、模型脚底面に生じるせん断力を単にせん断力と呼ぶことにする。

図-1に実験状態の模式図を示す。各種の量の定義と記号を同時に示してある。ここで、無次元先穴深さDEP、無次元オフセット量EXC、着力点の偏心率 Sl_0 は、それぞれ、先穴深さ d 、オフセット量 l 、着力点の偏心量 l_0 を模型脚直径DIAで割って無次元化した量であり、模型脚直径DIAに関係なく比較を行うことができる。

無次元押込み深さ SL は、押込み深さ L を先穴深さ d で割って無次元化した量で、先穴に対して模型脚が押込まれた深さの割合を示している。そのため、無次元先穴深さDEPが同じであれば、模型脚直径DIAに関係なく模型脚の押込みによる変化を比較することができる。

また、垂直応力 SF_v 、せん断応力 ST は、それぞれ、垂直力 F_v 、せん断力 T を模型脚底面積 A で割ったみかけの値を用いた。その理由は、実際に模型脚底面と地盤が接している面積は、模型脚の押込みにつれて地盤がくずれるので測定が困難で実応力が求めにくいことと、実機の設計時に必要なのは、脚に作用する垂直力と脚の底面に生じるせん断力であり、それらは脚の底面積とみかけの応力の積として求まるからである。

図-1からわかるように模型脚底面の砂は先穴の方へくずれるので、せん断力 T の方向は先穴の方へ向く。また、垂直力 F_v の着力点は先穴と反対側へ偏心する。このため、せん断力によって模型脚に生じる曲げモーメントと、着力点の偏心によって生じる曲げモーメントは、互いに脚を逆方向に曲げる向きに作用する。

2.2 実験装置

実験装置の外観図を図-2に示す。実験装置は、押込み装置、砂槽、模型脚から成っている。

押込み装置は砂槽の両縁に取付けられたレール上を移動できるようになっている。模型脚は押込み装置の荷重棒の下端に取付けられている。荷重棒はボールジョイントによって2本のガイド棒と接続され、常に砂地盤に垂直な方向に向くようになっており、昇降装置により上下動を行う。荷重棒には垂直力用に1個、水平力用に2個の荷重変換器が取付けられている。砂槽には砂が0.5mの深さまで入れてあり、下部に水抜き用のバルブがついている。

図-3に模型脚の断面図を示す。模型脚は円筒形で、直径は50, 75, 100mmの3種類で鋼製である。底面は平面とし、荷重測定部に砂が入りこまないようにカバーをつけてある。荷重測定棒は両端を球面座で支えることにより圧縮力だけを受けるようになっている。荷重測定棒の断面は長方形で両側にひずみゲージを張ってあり荷重を測定できるようになっている。

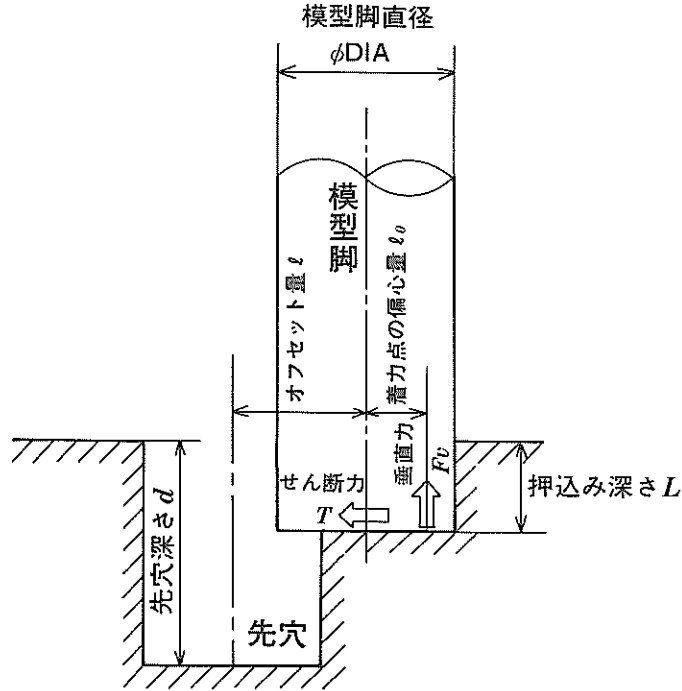
表-1に実験装置の諸元を示す。

荷重変換器および荷重測定棒のひずみゲージからの出力は動歪計で増幅され、ペンレコーダで記録される。

2.3 測定方法

図-4に荷重測定の模式図を示す。(a)は荷重棒、荷重変換器、および、模型脚、(b)は模型脚底部である。

図-4で実際に測定されるのは、荷重棒に加わる垂直



無次元オフセット量 $EXC = \frac{\ell}{DIA}$	模型脚断面積 $A = \frac{1}{4}\pi(DIA)^2$
無次元先穴深さ $DEP = \frac{d}{DIA}$	垂直応力 $SFv = \frac{Fv}{A}$
着力点の偏心率 $S\ell_0 = \frac{\ell_0}{DIA}$	せん断応力 $ST = \frac{T}{A}$
無次元押し込み深さ $SL = \frac{L}{d}$	曲げモーメント $M = Fv \cdot \ell_0$

図-1 実験模式図と記号の定義

力 F_v 、水平力 F_u および F_d 、模型脚の荷重測定棒に加わる力 F_k の値である。知りたいのは、模型脚底面に生じるせん断力 T 、模型脚底面に加わる垂直力 F_v 、着力点の偏心率 ℓ_0 、着力点の偏心による曲げモーメント M である。

図-4 に示すように各点間の距離に記号をつけるとせん断力 T 、着力点の偏心率 ℓ_0 、曲げモーメント M は以下のようにして求められる。

なお、模型脚底面に加わる垂直力と荷重棒上端に加わる垂直力は等しいので同じ記号 F_v で表してある。また、 F_k は荷重棒上端に水平方向に働く摩擦力である。

図-4 (a) の水平方向の力のつりあいから

$$F_d + F_u = F_k + T \quad (1)$$

がなりたつ。図-4 (a) の上端におけるモーメントのつりあいから、

$$T(l_1 + l_2 + l_3) = F_v l_0 + F_u l_3 + F_d(l_1 + l_3) \quad (2)$$

がなりたつ。図-4 (b) の滑節におけるモーメントのつりあいから、

$$T l_4 + F_v l_5 = F_v l_6 = F_v(R + l_0) \quad (3)$$

がなりたつ。(3)式を変形すると、

$$F_v l_0 = T l_4 + F_v l_5 - F_v R \quad (4)$$

となるので、これを(2)式に代入して T について解くと

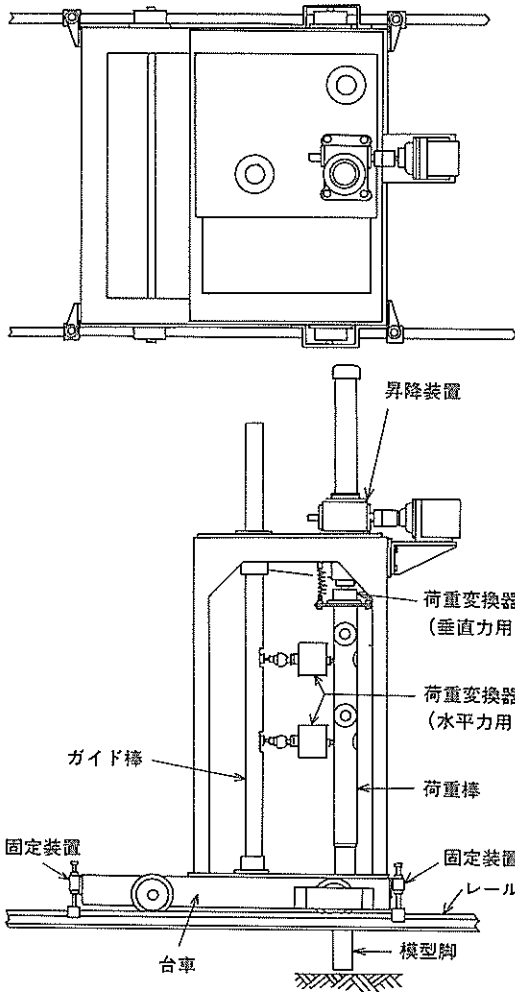


図-2 実験装置

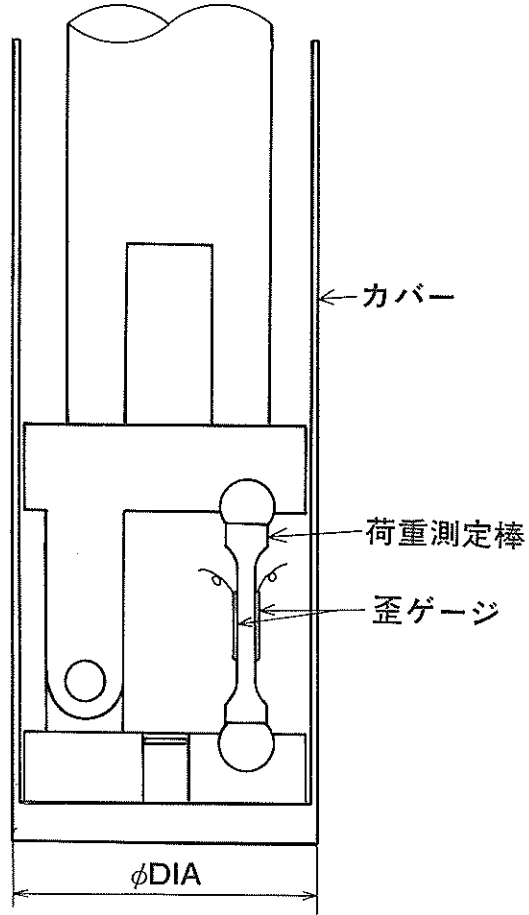


図-3 模型脚断面図

表-1 実験装置諸元

押込み装置	原動機 昇降速度	交流モータ 60W 0.81 mm/s
砂 槽	長さ 3.6m	幅 0.9m 深さ 0.6m
模型脚	円筒形 底面平型	鋼製 直径 50, 75, 100mm

$$T = \frac{F_0 l_5 - F_v R + F_w l_3 + F_d(l_1 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3 - l_4} \quad (5)$$

となり、 T が求まるので、これを(4)式に代入して l_0 について解くと、

$$l_0 = \frac{T l_4 + F_0 l_5}{F_v} - R \quad (6)$$

となり、 l_0 が求まる。 l_0 が求まれば M は

$$M = F_v l_0 \quad (7)$$

で求められる。

各測定値は実験中ペンレコーダで連続記録し、そのグラフを押込み深さ3.24 mmまたは4.05 mmごとに、カーブリーダにより読みとった。それらの値を電子計算機で処理して各種の値を計算し、結果の作図を行った。

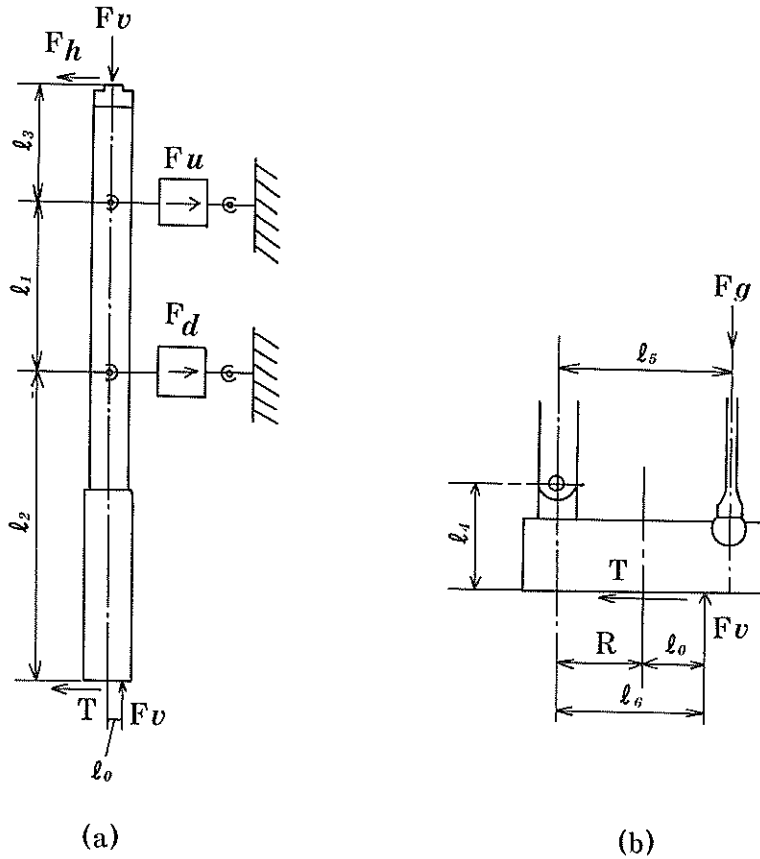


図-4 荷重測定模式図

2.4 実験条件

実験は空気中で行い、砂地盤の表面は水平にならした状態とした。

実験パラメータとして、模型脚の直径、無次元オフセット量、無次元先穴深さ、砂地盤の締固め状態を、それぞれ変化させ、種々の組合わせで実験を行った。

模型脚直径DIAは50, 75, 100 mmの3種類である。無次元オフセット量EXCは1/4, 2/4, 3/4, 4/4, 6/4, 8/4とし、他の実験条件によってはそのうえに5/4, 10/4, 12/4, 16/4も行った。無次元先穴深さDEPは、1/2, 1/1, 2/1の3種類としたが、直径100 mmの模型脚の場合は実験装置の都合上、2/1は行わなかった。図-5に無次元オフセット量EXCと無次元先穴深さDEPの例を示す。

実験に用いた砂は川砂である。図-6に粒径加積曲線を示す。砂の締固め状態は、砂槽に水を満たした状態で

砂と水を十分にかくはんしたのち水槽の下部から水を放出して、1~2日後のものと約50日放置したものの2種類とした。それぞれの砂地盤にオレンジ式コーン貫入試験¹⁾を行い、静的貫入抵抗 q_c (kgf/cm²)を測定した。図-7に測定結果を示す。コーンの先端角は60°、底面積は10 cm²、貫入速度は0.41 cm/sである。貫入速度が標準より小さいので補正を行った²⁾。測定は連続して行い、1~2日後のものは3回の測定の平均値、約50日後のものは1回の測定値である。静的貫入抵抗 q_c (kgf/cm²)と N 値の間には砂地盤の場合、 $q_c = 4N$ の関係があるとされている²⁾ので図-7にはこの式から求めた N 値も示してある。図-7によると水抜き後の日数による静的貫入抵抗の差はあまり大きくないが、着底実験で先穴を作る際の観察によると、周囲の盛上がり方には差が見られた。

実験は水抜き後1~2日のものを主にして行った。以

無次元オフセット量

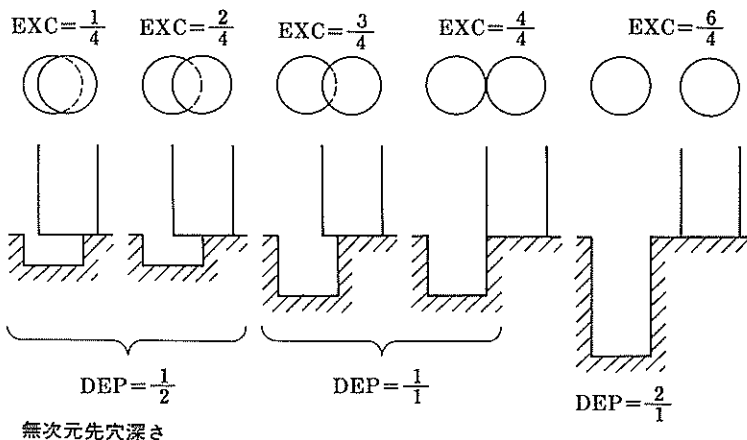


図-5 無次元オフセット量と無次元先穴深さ

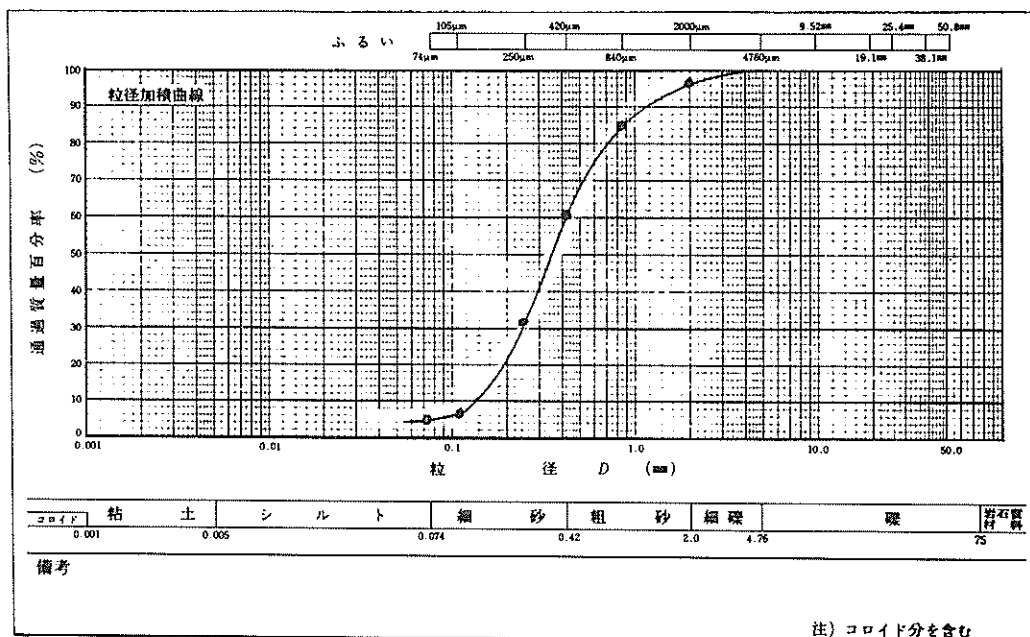


図-6 粒径加積曲線

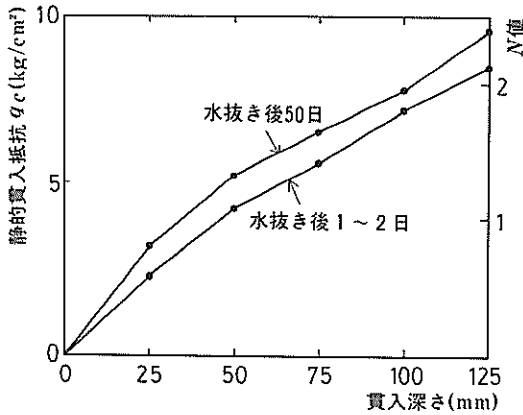


図-7 供試砂地盤の静的貫入抵抗

後、特に断らない場合は、水抜き後1~2日のものの実験について述べているものとする。

表-2に実験条件の組合わせを示す。各ケースごとに1回ずつ実験を行った。

3. 実験結果

3.1 実験結果の一例

写真-1に実験状況、写真-2に実験後の砂地盤の状態を示す。また、図-8に実験状態の模式図を示す。

このようにして行われた着底実験の測定結果の一例を図-9に示す。これは、直径75mmの模型脚を水抜き後1~2日の砂地盤に、無次元先穴深さ1/1の先穴に対して無次元オフセット量4/4で押込んだときの生データである。図-10は図-9の結果から2.3で述べた方法で必要な値を計算したもので、押込み深さ L に対して、垂直力 F_v 、せん断力 T 、着力点の偏心量 l_0 、着力点の偏心により模型脚中心に対して生じる曲げモーメント $M (= F_v \cdot l_0)$ を示してある。

図-10によると垂直力 F_v は押込み深さに対して単調増加している。その増加率は最初はかなり大きいですが、押込み深さ10mm付近で急に小さくなり、そのあとは少し大きくなっている。他の実験条件の場合には途中で増加率が負になる場合もあった。また、このような途中で増加率が小さくなる傾向は、先穴をあける場合にも見られた。これは、押込みの初期には砂は垂直力の方向に圧縮されるが、垂直力がある限度を越えると砂は水平方向へもすべりはじめるためであると考えられる。

つぎに、せん断力 T は、押込み深さ25mm付近で最大となり、その後は減少する。せん断力が発生する理由

表-2 実験ケース

締固め状態	無次元 オフセット量 無次元先穴深さ 直径 (mm)	無次元先穴深さ															
		1/4	2/4	3/4	4/4	5/4	6/4	7/4	8/4	9/4	10/4	11/4	12/4	13/4	14/4	15/4	16/4
水抜き後1~2日	50	1/2	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
		1/1	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
		2/1	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○				○
水抜き後1~2日	75	1/2	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
		1/1	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
		2/1	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○				○
水抜き後1~2日	100	1/2	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
		1/1	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○				○
水抜き後50日	50	1/1	○	○		○											
	75	1/1	○	○		○											
	100	1/1	○	○		○											

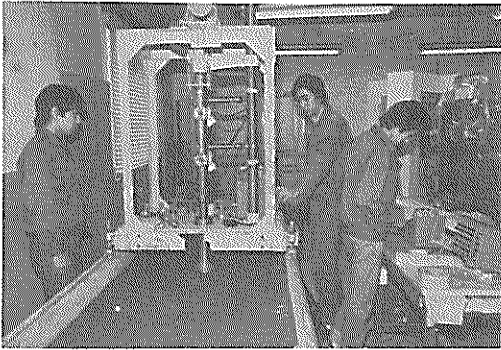


写真-1 実験状況

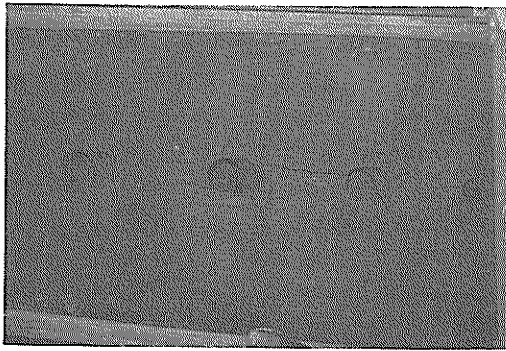


写真-2 実験後の砂地盤の状態

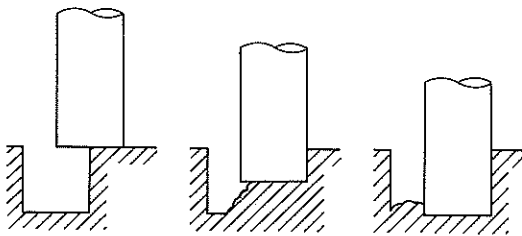


図-8 実験状態模式図

を考えると図-8を見ると、模型脚が押込まれるにつれて模型脚下部の砂は先穴の方へ移動することがわかる。

このとき、模型脚底面には垂直力が作用しているため、模型脚底面と砂の間の摩擦により水平方向にせん断力が発生すると考えられる。そして、先穴の底にはくずれた砂がたまっていくため、模型脚底面が先穴の底付近まで押込まれると砂は移動しなくなり、せん断力はなくなる。

着力点の偏心量 l_0 は、押込みはじめは大きく、変動も大きいのが押込むにつれて減少し、押込み深さ 80 mm でほぼ 0 になる。これは、押込みによって砂がくずれのことを考えると説明できる。つまり、押込みはじめは図-8 でわかるように、模型脚底面に接した砂がくずれるため着力点の偏心量 l_0 は大きいのが、押込み深さが大きくなるにつれて砂が先穴の底にたまるので l_0 はしだいに減少し 0 に近づく。

着力点の偏心による曲げモーメント M は垂直荷重 F_v と着力点の偏心量 l_0 の積であるため、 F_v と l_0 の傾向からわかるようにピーク値を持ち、押込み深さ 40 mm 付近で最大となっている。

他の実験条件の場合にも、ばらつきはあるが、一般的にみて以上の傾向が見られた。

3.2 実験結果の解析

(1) 解析の方法

各種の実験ケースの実験結果を整理し傾向を明らかにするために、図-1 で定義した垂直応力 SF_v 、せん断応力 ST 、着力点の偏心率 Sl_0 を用いることとし、無次元押込み深さ SL に対して表わすことにした。また、3.2(5)で述べるように無次元曲げモーメント SM というものも考えた。

これらの値は一種の無次元化量であり、模型脚直径や先穴深さによる差を統一的に表わすことができる。

実験条件による差を明らかにするため、解析結果は、無次元オフセット量 EXC 、模型脚直径 DIA 、無次元先穴深さ DEP をそれぞれパラメータとしてまとめて図示してある。

水抜き後約 50 日の砂地盤による実験は図の右上に「水抜き後 50 日」と表示してある。表示のないものは水抜き後 1~2 日の砂地盤による実験であることを示す。

(2) 垂直応力

図-11 に無次元オフセット量 EXC の違いによる垂直応力の変化を示した。全体的な傾向として、無次元押込み深さがある程度に達するまでは、無次元オフセット量 EXC が小さいほど垂直応力は小さい。

無次元オフセット量 EXC が 1/4, 2/4 の場合は、押込みはじめは砂がくずれやすいため垂直応力はほとんど 0 に近く、押込みが進んで先穴の底にくずれた砂がたまっていくと急に大きくなる。また、この垂直応力が急に大きくなる無次元押込み深さは、くずれる砂の多い無次元オフセット量 EXC が 2/4 の方が 1/4 よりも小さい。

無次元オフセット量 EXC が 4/4 以上では、模型脚底面全体が砂と接しているため、押込みの初期から垂直応力は大きくなっている。

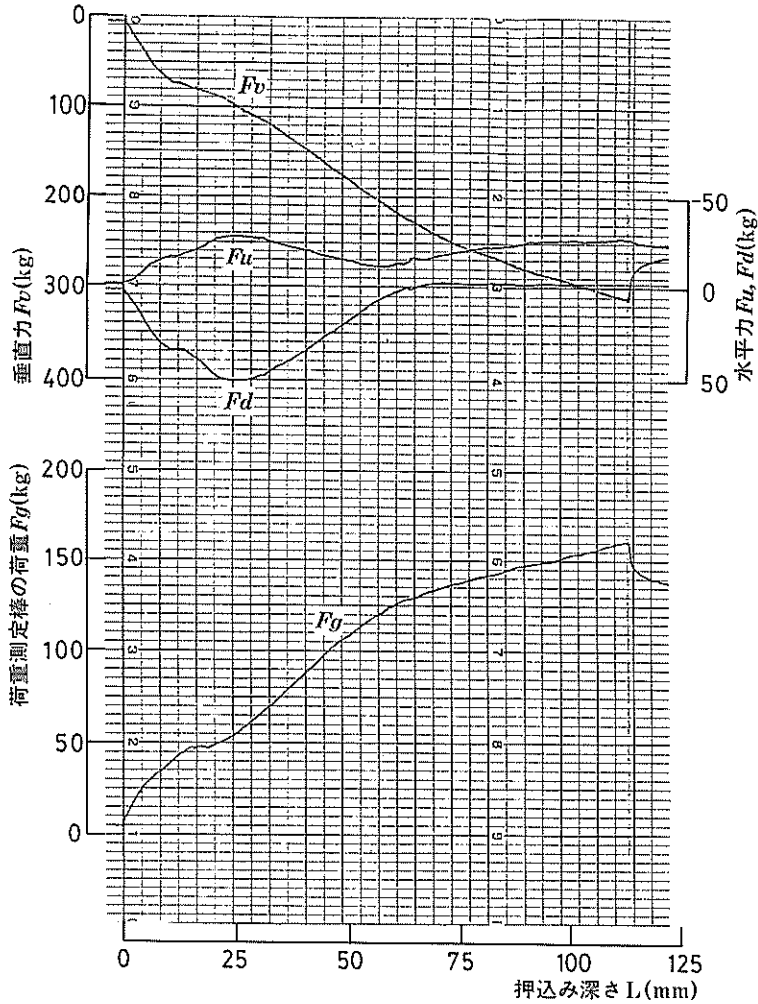


図-9 測定結果の例 (DIA = 75, DEP = 1/1, EXC = 4/4)

無次元先穴深さDEPの影響を調べるために図-11(a) (b)(c)を比較すると、DEPが1/2の図-11(a)では無次元オフセット量EXCが4/4以上はほとんど差がないのに対して、DEPが1/1の図-11(b)ではEXCが8/4以上で差がなくなり、DEPが2/1の図-11(c)ではEXCが10/4でも差はなくなる。これは、無次元先穴深さが大きいほど無次元オフセット量が増加しても先穴の影響が大きいことを示しており、当然であると考えられる。

模型脚直径DIAの影響を調べるために図-11(b)(d) (e)を比較するとほぼ同じ傾向を示しており、模型脚直径によって傾向は変わらないことがわかる。

砂地盤の締固め状態の影響を調べるために図-11(b) (f)を比較するとほぼ同じ傾向を示しており、水抜き後約50日の方が垂直応力の値が全体的に少し大きくなっている。

そして、図-11全体を見ると、(c)の無次元先穴深さDEPが2/1の場合を除いて、無次元押し込み深さが1.0を越えると垂直応力は無次元オフセット量EXCにかかわらず一定の値に近づいてゆく。

つぎに、図-12~15に模型脚直径DIAの違いによる垂直応力の変化を示した。いずれもかなり一致しており、図-13(a)と図-15(a)の無次元オフセット量EXCが1/4の場合のみ無次元押し込み深さが大きい部分でばらつ

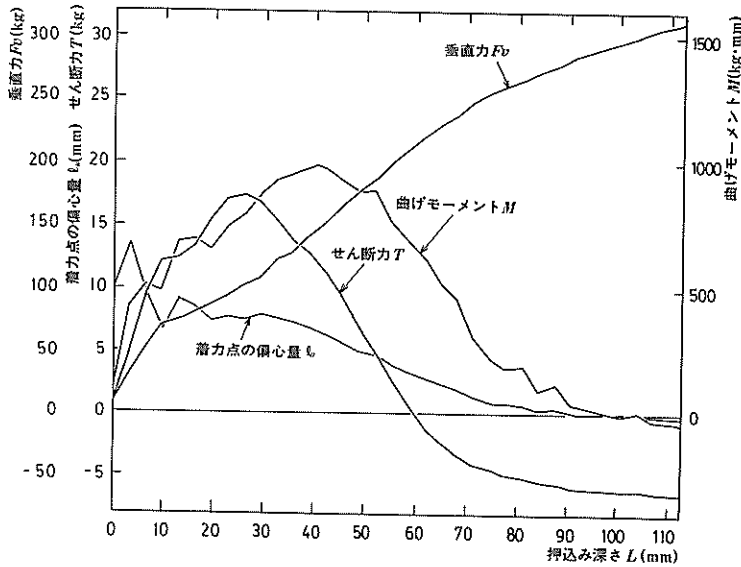


図-10 測定結果の解析例 (DIA = 75, DEP = 1/1, EXC = 4/4)

きが大きくなる。図-12と図-13を比較すると、無次元先穴深さ DEP が 1/2 よりも 1/1 の方がばらつきが大きく、図-13と図-15を比較すると水抜き後約 50 日の方がばらつきが小さい。

これは、無次元オフセット量が小さく、無次元先穴深さが大きく、砂地盤の締め固めがゆるいほど、砂のくずれ方が不安定になるためであると考えられる。全体として、模型脚直径を変えても砂のくずれ方が不安定な場合を除いて測定結果は非常によく一致しており、垂直応力は模型脚直径にはほとんど影響されることがわかった。

図-16に無次元先穴深さ DEP の違いによる垂直応力の変化を、模型脚直径 75 mm、無次元オフセット量 4/4 の場合について示した。これによると、砂がすべりはじめる前の垂直応力の増加率は無次元先穴深さ DEP には関係なく一定である。しかし、DEP が 1/2 の場合には無次元押し込み深さが 0.35 まで砂はすべらないがその後の増加率は小さいのに対して、DEP が 2/1 の場合は無次元押し込み深さ 0.1 位ですべりはじめ、いったん除荷してしまうが、その後の増加率は DEP が 1/2 の場合より大きい。DEP が 1/1 の場合は 1/2 と 2/1 の場合の中間的な挙動を示す。

そこで、図-16で横軸を無次元押し込み深さから押し込み深さに変更したとすると、砂がすべりはじめたあとの傾きは無次元先穴深さ DEP にかかわらず同程度となるであろう。ゆえに、砂がすべりはじめる前の垂直応力は模

型脚底面から先穴底面までの砂の圧縮によって支えられ、すべりはじめたあとは無次元先穴深さにかかわらず押し込み深さだけに依存すると考えられる。

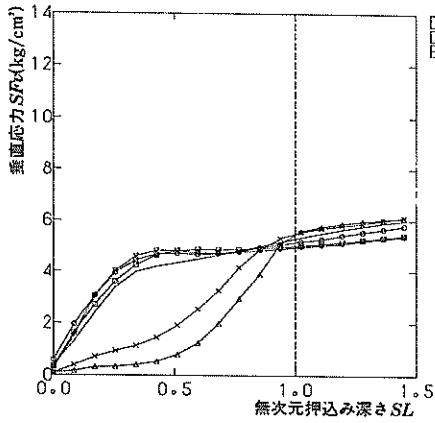
(3) せん断応力

図-17に無次元オフセット量 EXC の違いによるせん断応力の変化を示した。

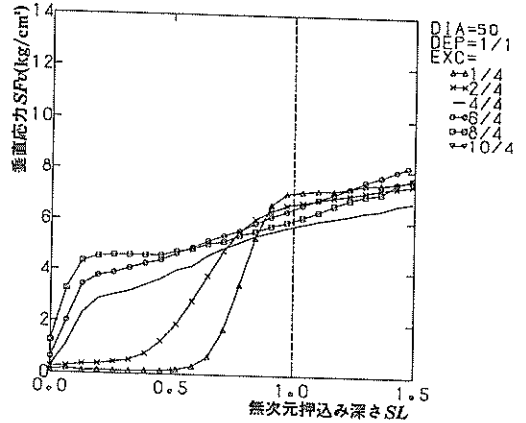
全体的な傾向として、無次元オフセット量 EXC が 1/4 では砂がくずれやすいため垂直応力があまり大きくならないのでせん断応力はあまり大きくはならない。

無次元オフセット量 EXC が 1/4 から 4/4 までは、図-17(a)に示す無次元先穴深さ DEP が 1/2 の場合にははっきりしないが、それ以外ではせん断応力ははっきりしたピークを持っている。そして、無次元オフセット量 EXC が大きくなるにつれてピーク値自体が増加するとともにピーク値の生じる無次元押し込み深さが小さくなる傾向がある。また、ピークをすぎるとせん断応力は減少するが、そのあとまた増加する場合もある。しかし、無次元押し込み深さが 1.0 を越え、せん断応力はばらつきはあるもののしだいに 0 に近づいて行くように思われる。

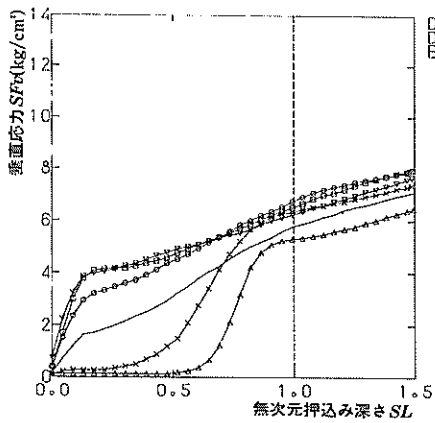
無次元オフセット量 EXC が 6/4 と 8/4 では、他の無次元オフセット量の場合よりもせん断応力のピーク値は大きくなるが急なピークは持たず、ピークを過ぎるとなだらかに減少する。



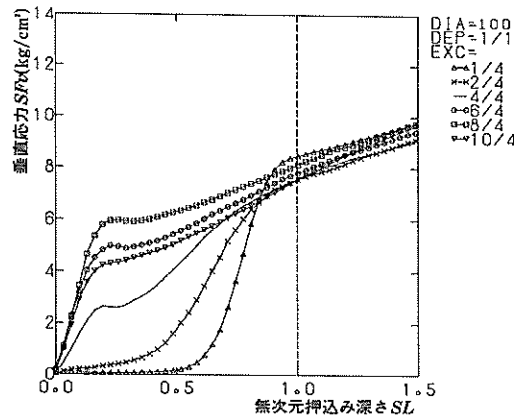
(a)



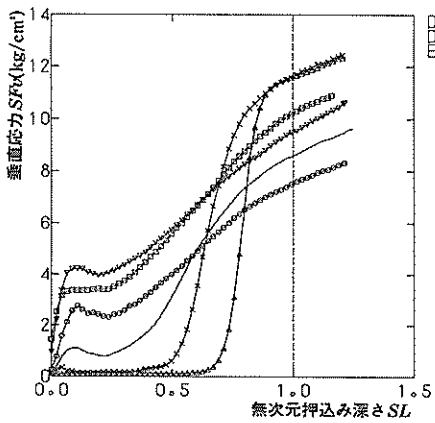
(d)



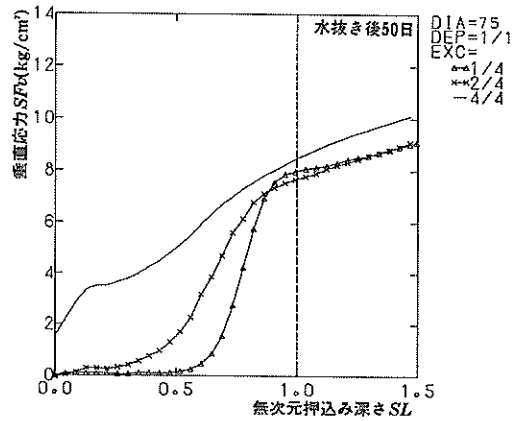
(b)



(e)

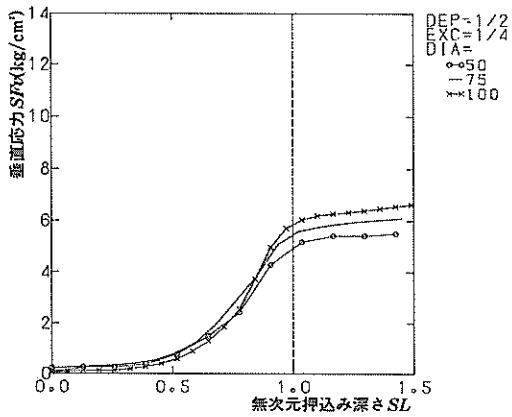


(c)

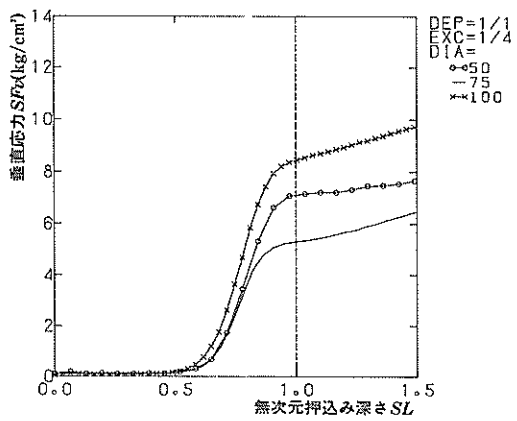


(f)

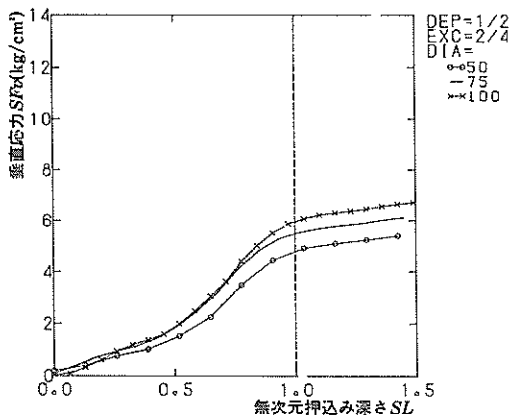
図-11 無次元オフセット量による垂直応力の変化



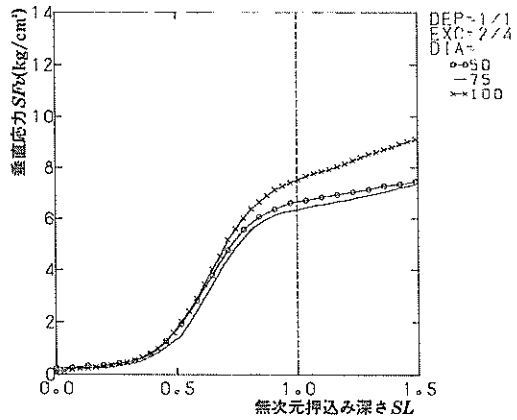
(a)



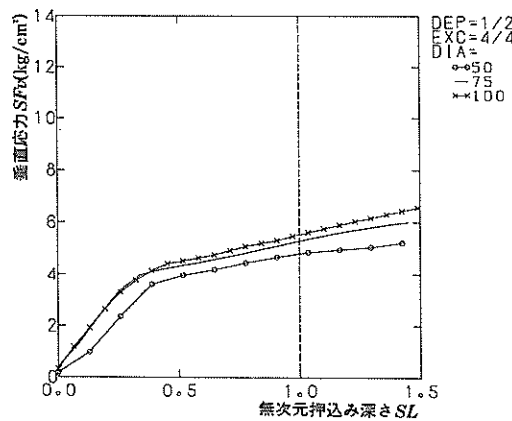
(a)



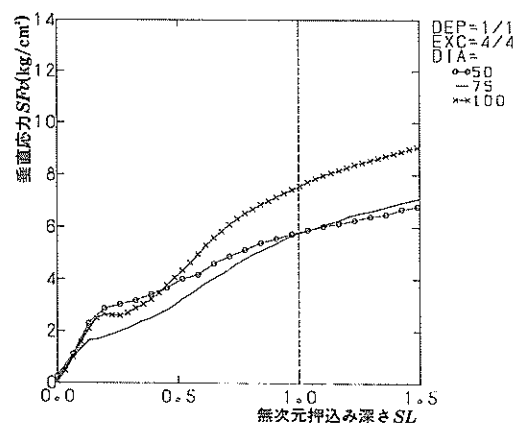
(b)



(b)



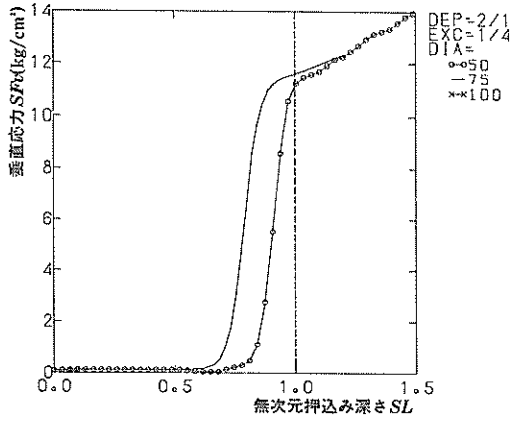
(c)



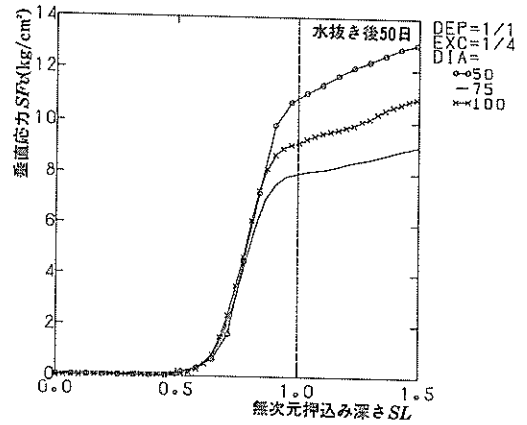
(c)

図-12 模型脚直径による垂直応力の変化 (DEP=1/2)

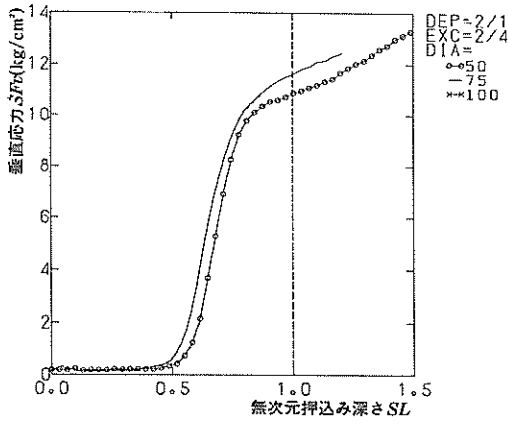
図-13 模型脚直径による垂直応力の変化 (DEP=1/1)



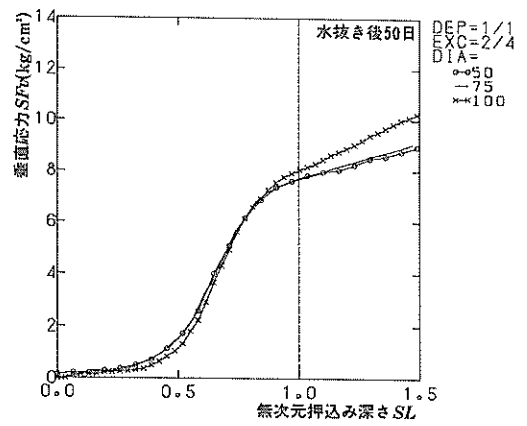
(a)



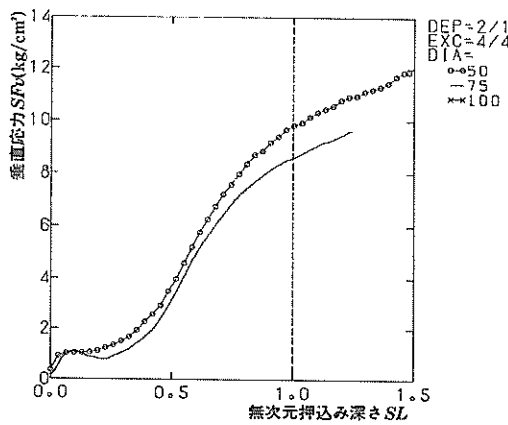
(a)



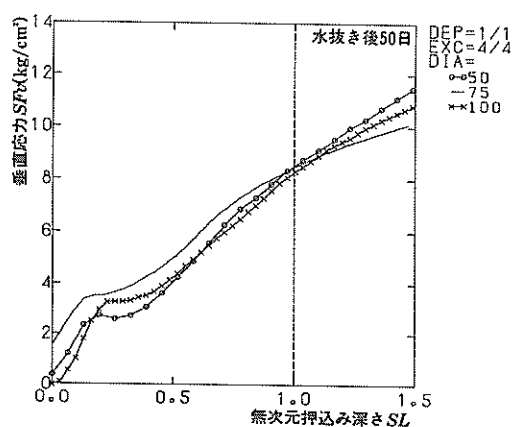
(b)



(b)



(c)



(c)

図-14 模型脚直径による垂直応力の変化 (DEP=2/1)

図-15 模型脚直径による垂直応力の変化
(DEP=1/1, 水抜き後約50日)

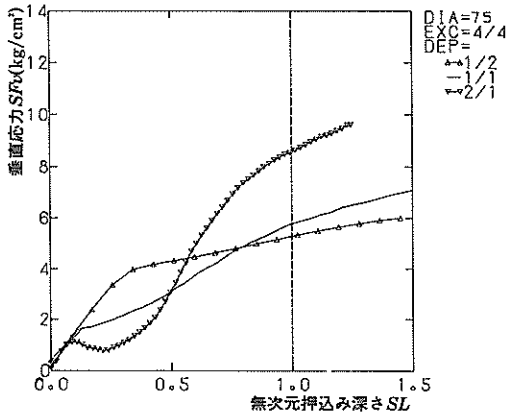


図-16 無次元先穴深さによる垂直応力の変化

無次元オフセット量EXCが10/4では、先穴の影響が小さくなるためせん断応力はかなり小さくなってしまふ。

無次元先穴深さDEPの影響を調べるために図-17(a)(b)(c)を比較すると、DEPが1/2の図-17(a)ではピークがあまりはっきりしないのに対して、DEPの大きい図-17(b)(c)になるにつれてピークがはっきりしてくるとともに、同じ無次元オフセット量EXCではピークを生じる無次元押し込み深さが大きくなり、かつ、ピーク値自体も大きくなっている。これは、3.2(2)で述べたように、無次元先穴深さが大きいほど垂直応力が大きくなり始める無次元押し込み深さが大きく、かつ、垂直応力の値自体も大きいことから説明できる。つまり、せん断応力は砂の移動により模型脚底面に生じる摩擦力であるので、同じ速度で砂が移動していれば垂直応力が大きいほどせん断応力も大きくなるからである。

模型脚直径DIAの影響を調べるために図-17(b)(d)(e)を比較するとほぼ同じ傾向を示しており、模型脚直径によって傾向は変わらないことがわかる。

砂地盤の締固め状態の影響を調べるために図-17(b)(f)を比較するとほぼ同じ傾向を示しており、水抜き後約50日の方がせん断応力の値がやや大きくなっている。

つぎに、図-18~21に模型脚直径DIAの違いによるせん断応力の変化を示した。かなりよい一致が見られ、とくに、ピークを生じる無次元押し込み深さが一部を除いてよく一致していることが注目される。つまり、せん断応力、および、せん断応力が最大となる無次元押し込み深さは模型脚直径の影響を受けないことがわかる。

図-22に無次元先穴深さDEPの違いによるせん断応力の変化を、模型脚直径75mm、無次元オフセット量

4/4の場合について示した。これによると、せん断応力のピーク値は無次元先穴深さDEPが大きくなるにつれて比例的に増大し、ピークを生じる無次元押し込み深さは無次元先穴深さが大きいほど大きくなっている。つまり、せん断応力は無次元先穴深さの影響を受けることがわかる。

以上の実験結果から実機のせん断力を推定するために、垂直力 F_v とせん断力 T の間に、模型脚底面と砂との間の摩擦係数を μ_0 として、

$$T = K\mu_0 \cdot F_v \quad (8)$$

の関係があるものと仮定した。ただし、 K は係数である。

このように、真の摩擦係数 μ_0 に係数 K をかけたみかけの摩擦係数 $K\mu_0$ を考えて、各測定結果について計算し、各実験ケースごとの最大値を示したものが図-23である。

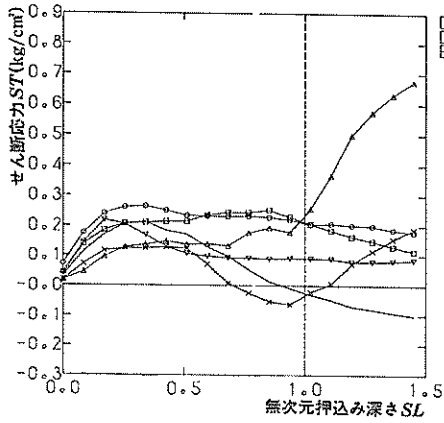
図-23によると、みかけの摩擦係数 $K\mu_0$ は無次元オフセット量が5/4~6/4で極大値を持つが、無次元オフセット量が1/4~2/4でも大きくなる場合がある。しかし、無次元オフセット量が小さい場合は垂直力も小さいので、みかけの摩擦係数が大きくてもせん断力の値自体はあまり大きくはならない。そこで、無次元オフセット量が小さい場合を無視することにすれば、みかけの摩擦係数は0.33を越えることはないといえる。

つぎに、(8)式と同様の考え方で、先穴押し込み時の最大垂直力を F'_v とおき、偏心させて押し込むときのせん断力 T との間に

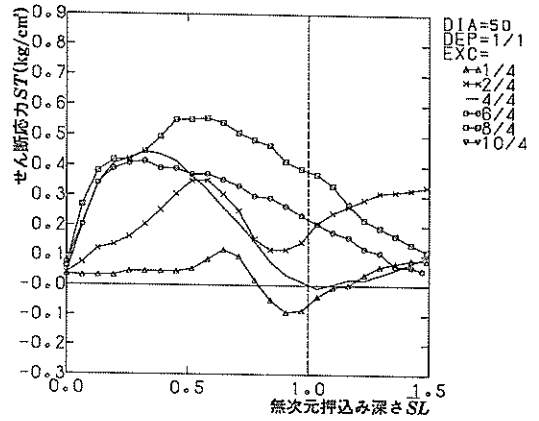
$$T = K'\mu_0 \cdot F'_v \quad (9)$$

の関係があるものと仮定してみた。ただし、 K' は係数である。これは、(8)式のように押し込み過程のある瞬間の垂直力とせん断力の関係からではなく、先穴押し込み時の最大垂直力だけからせん断力を推定しようとするものである。というのは、実機の設計時には脚に作用する最大垂直力すなわち先穴押し込み時の最大垂直力を最初の段階で決定するからである。

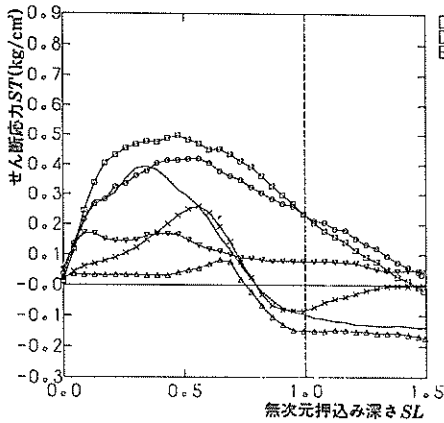
各測定結果について $K'\mu_0$ を計算し、各実験ケースごとの最大値を示したものが図-24である。図-24によると $K'\mu_0$ は無次元オフセット量5/4~8/4で最大となる傾向があり、その傾向は無次元先穴深さが大きいほど強いが、模型脚直径、砂地盤の締固め状態による違いは特に一定の傾向は示していない。そして、全体として $K'\mu_0$ の値は0.13を越えない。ゆえに、先穴深さが脚の直径の2倍程度までの場合には、脚に作用する最大垂直力の0.13倍程度のせん断力が脚底面に生じる可能性がある



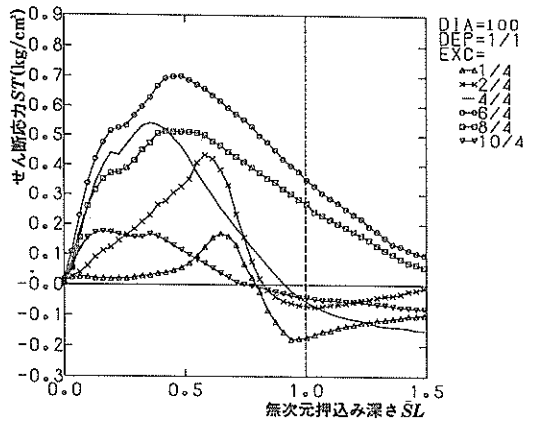
(a)



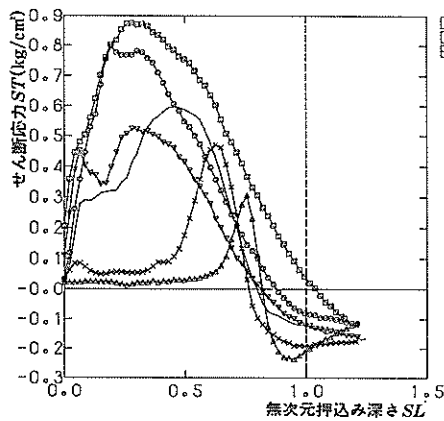
(d)



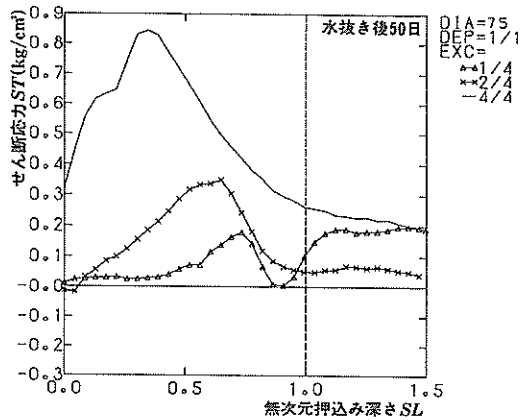
(b)



(e)

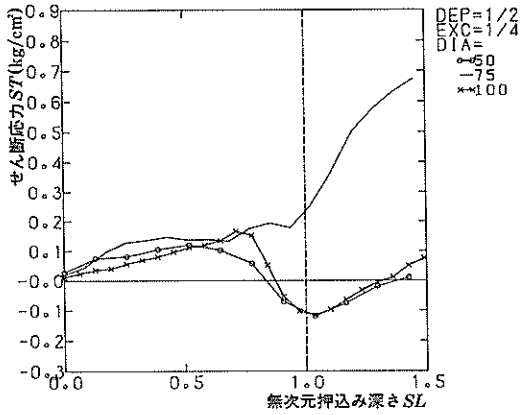


(c)

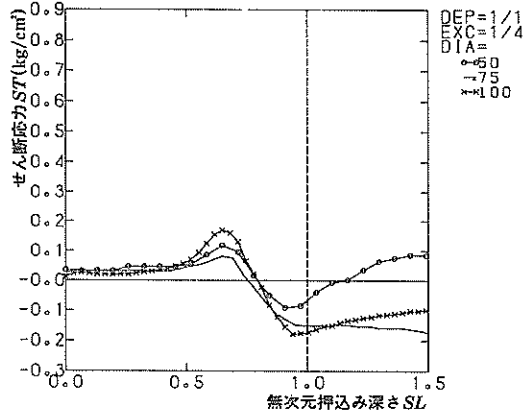


(f)

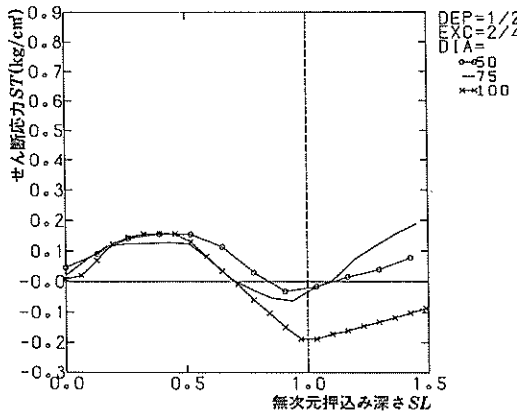
図-17 無次元オフセット量によるせん断応力の変化



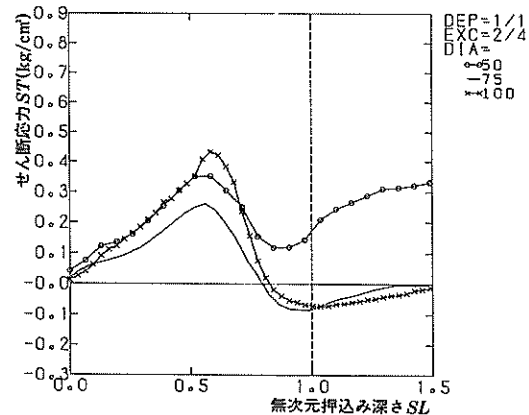
(a)



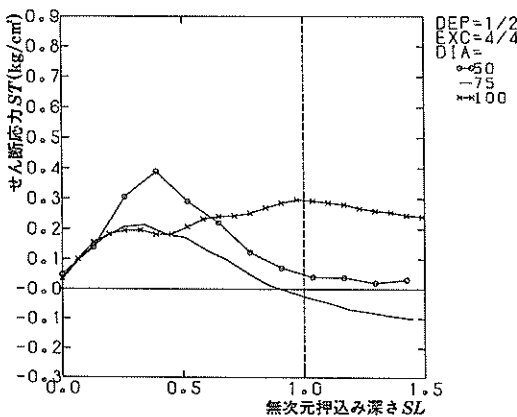
(a)



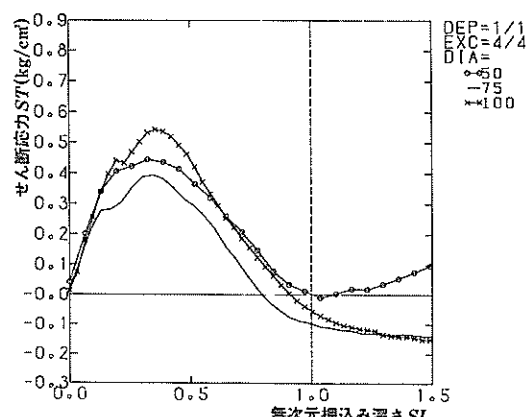
(b)



(b)



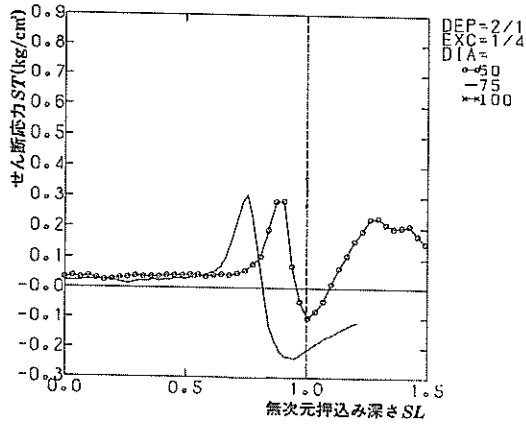
(c)



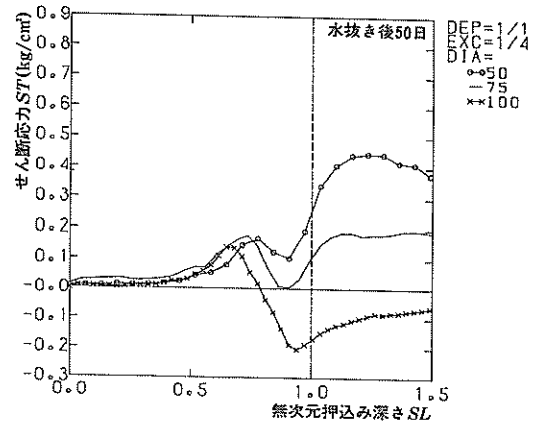
(c)

図-18 模型脚直径によるせん断応力の変化(DEP=1/2)

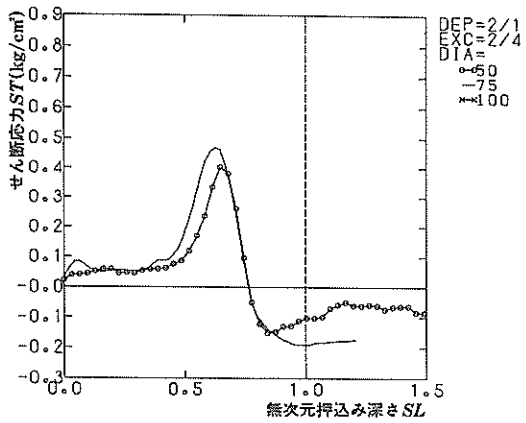
図-19 模型脚直径によるせん断応力の変化(DEP=1/1)



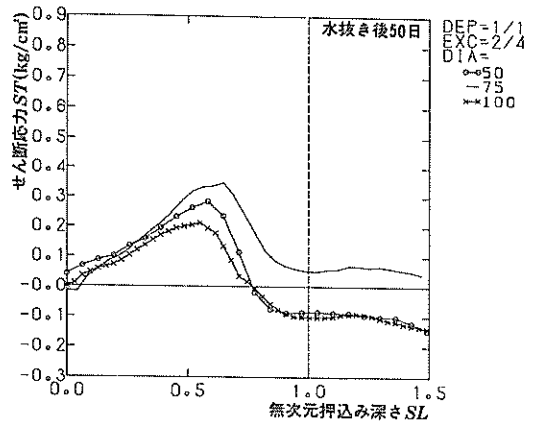
(a)



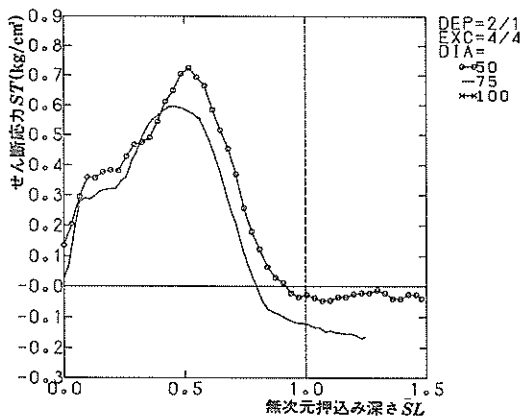
(a)



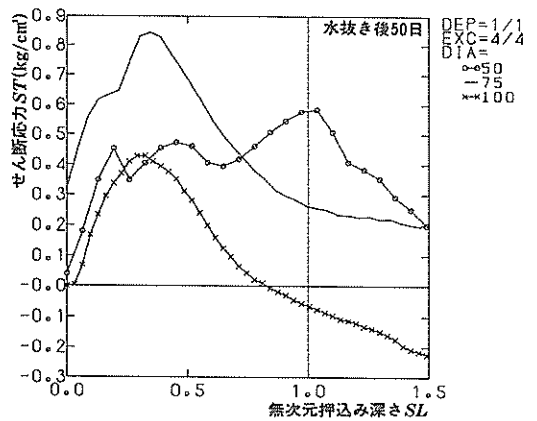
(b)



(b)



(c)



(c)

図-20 模型脚直径によるせん断応力の変化(DEP=2/1)

図-21 模型脚直径によるせん断応力の変化
(DEP=1/1, 水抜き後約50日)

ので、これに耐えられるように脚の設計を行う必要があるといえる。

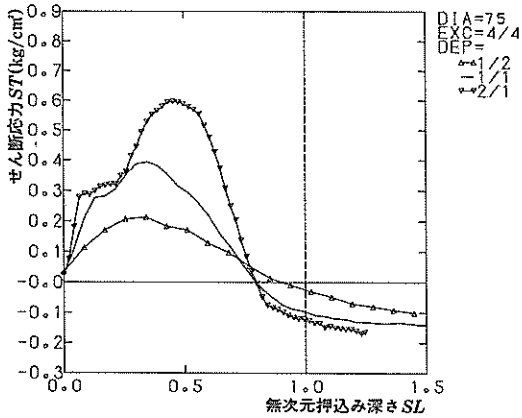


図-22 無次元先穴深さによるせん断応力の変化

(4) 着力点の偏心率

図-25に無次元オフセット量EXCの違いによる着力点の偏心率の変化を示した。

ばらつきが大きいですが、全体的にみて無次元オフセット量EXCが1/4～2/4の場合は着力点の偏心率はピーク値を持つ。そして、無次元オフセット量EXCが大きくなるにつれて、ピーク値を生じる無次元押し込み深さは小さくなり、ピーク値自体も減少してゆく。

無次元オフセット量EXCが6/4以上になると、着力点の偏心率ははっきりしたピークは持たず、値もかなり小さくなる。これは着力点の偏率は先穴の影響によって生じるのであるから当然である。

図-25 (a) (b) (c)を比較すると、無次元先穴深さDEPが大きいほど以上の傾向は著しく、着力点の偏心率の値自体は無次元先穴深さDEPが小さいほど大きくなっている。

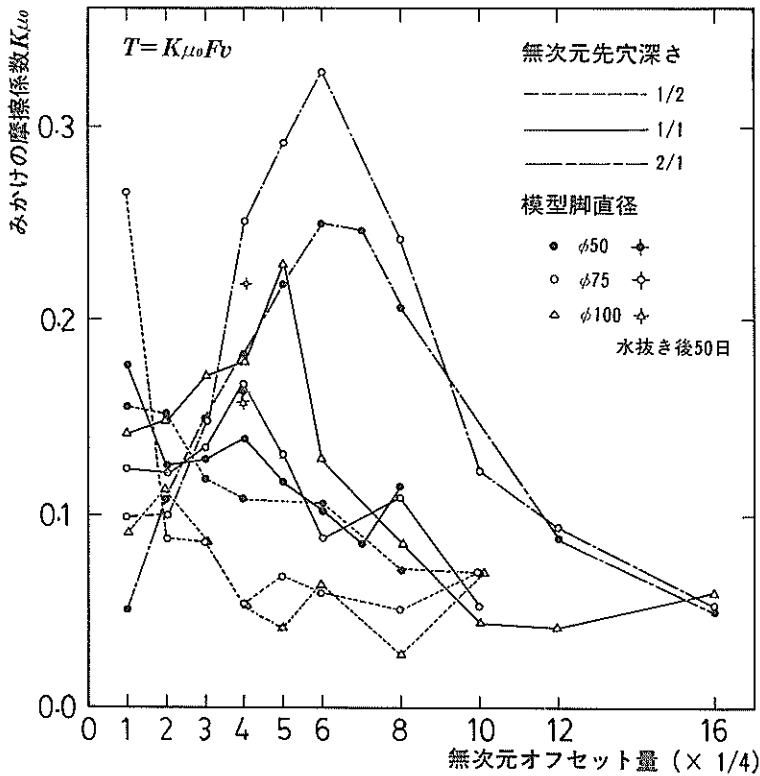


図-23 みかけの摩擦係数

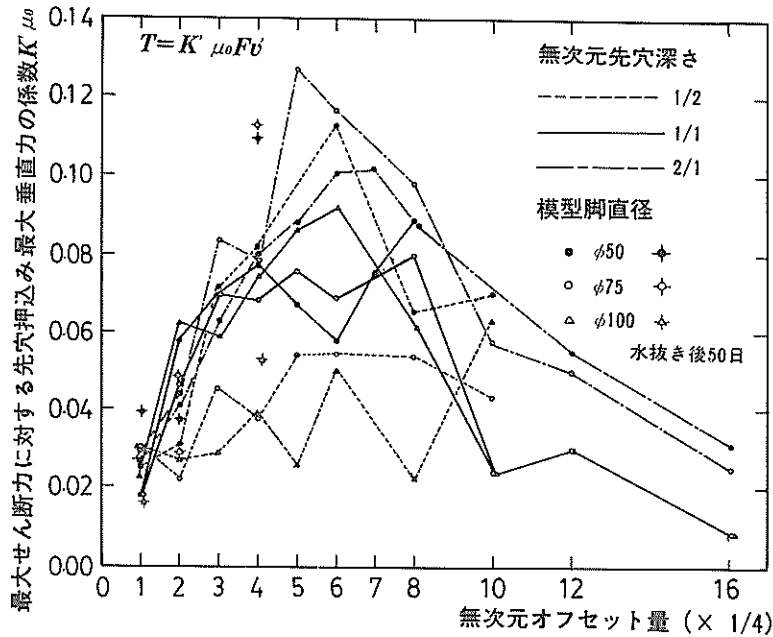


図-24 最大せん断力に対する先穴押込み時の最大垂直力の係数

また、図-25のいずれの場合も、ピークを生じる無次元押込み深さは0.8以下であることがわかる。

なお、無次元押込み深さが小さい場合や無次元オフセット量 EXC が小さい場合に、着力点の偏心率のばらつきが大きくなったり負の値になることがあるのは、それらの場合には垂直力 F_v の値が小さいため F_v の測定誤差が、2.3の(6)式において着力点の偏心量 l_0 に大きく影響するためであると考えられる。

つぎに、図-26~29に模型脚直径 DIA の違いによる着力点の偏心率の変化を示した。無次元オフセット量 EXC が小さい場合や水抜き後約50日の場合のばらつきが大きく全体的な傾向ははっきりしないが、押込みの途中でピークを持つように見える。そして、ばらつきの大きい場合を除けば着力点の偏心率の最大値は約0.3である。ばらつきが大きく着力点の偏心率が0.3を越えているのは垂直力が小さいため測定誤差の影響が大きい場合であると考えられるので、着力点の偏心による曲げモーメントの値自体は小さい。そこで、実際の設計に应用する場合には、それらの場合を無視して、着力点の偏心は脚の直径の0.3倍までであると考えてよい。しかし、実際の設計の際には、着力点の偏心が最大となるときに垂直力も最大となるわけではないということを考慮しないと過大設計になることに注意が必要である。

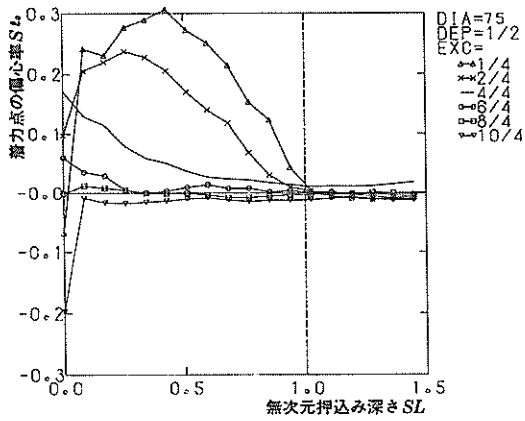
また、図-30に無次元先穴深さ DEP の違いによる着力点の偏心率の変化を、模型脚直径 75 mm、無次元オフセット量 4/4 の場合について示した。ばらつきはあるが着力点の偏心率のピークは比較的よく現われており、無次元先穴深さ DEP が大きいほど、ピーク値は小さく、ピーク値を生じる無次元押込み深さは大きくなっているようである。

(5) 無次元曲げモーメント

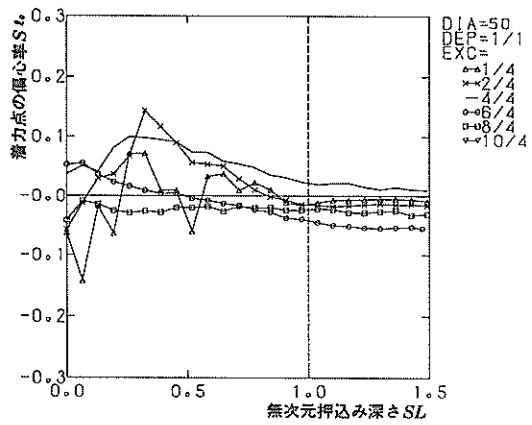
(4)で述べたように着力点の偏心量だけで、そのときの垂直力を考えないと過大設計になる可能性があるため、無次元曲げモーメント SM としてつぎのような量考えた。

$$SM = \frac{l_0}{DIA} \cdot \frac{F'_v}{F'_v} \quad (10)$$

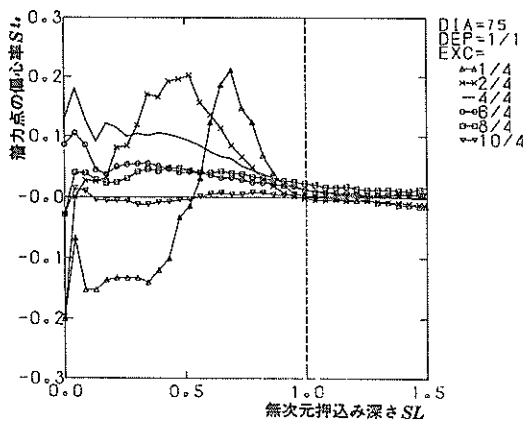
ここで、(9)式と同じく F'_v は先穴押込み時の最大垂直力とする。この無次元曲げモーメント SM を用いれば、実際の曲げモーメント $M = F_v \cdot l_0$ は SM に模型脚直径 DIA と先穴押込み時の最大垂直力 F'_v を乗じることによって得られる。



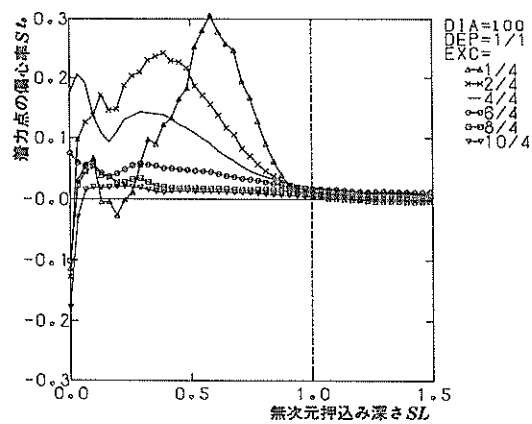
(a)



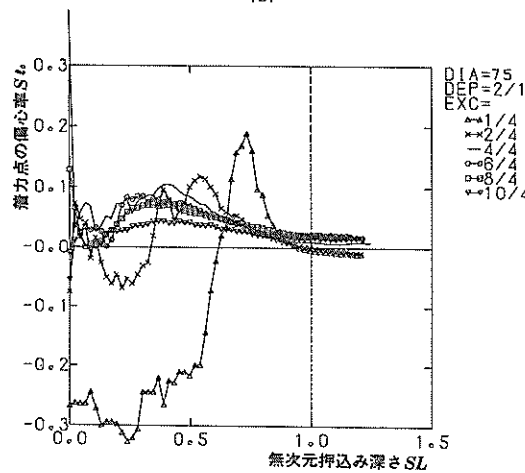
(d)



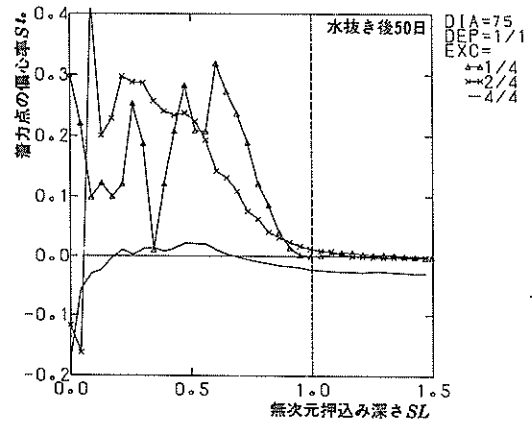
(b)



(e)

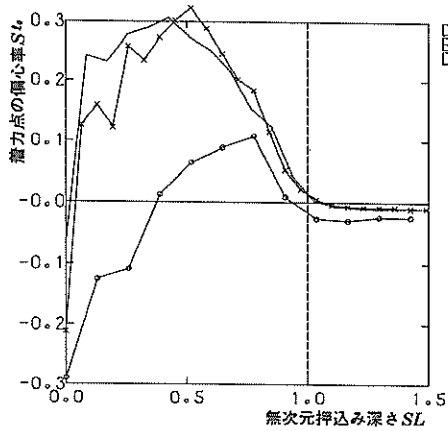


(c)

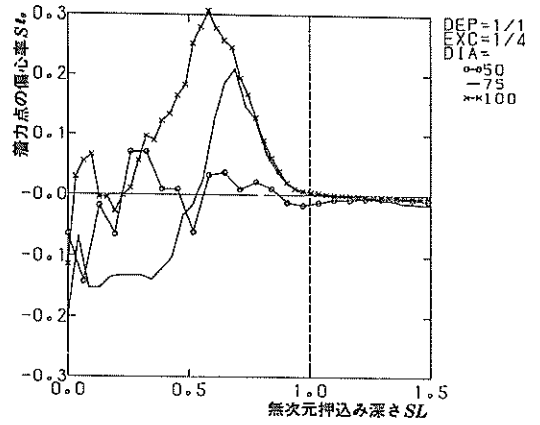


(f)

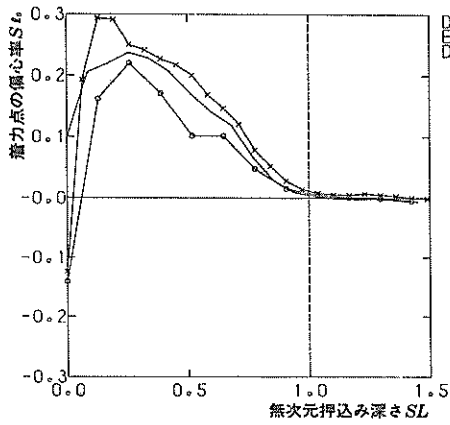
図-25 無次元オフセット量による着力点の偏心率の変化



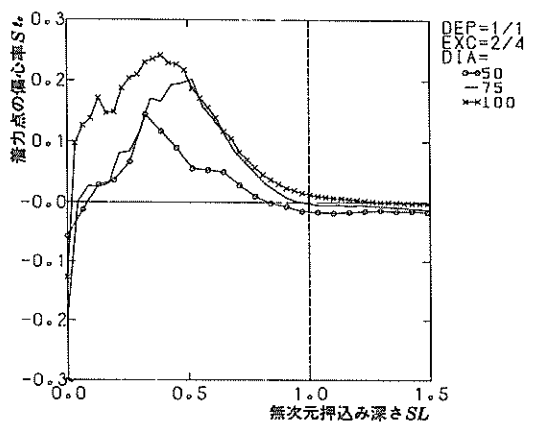
(a)



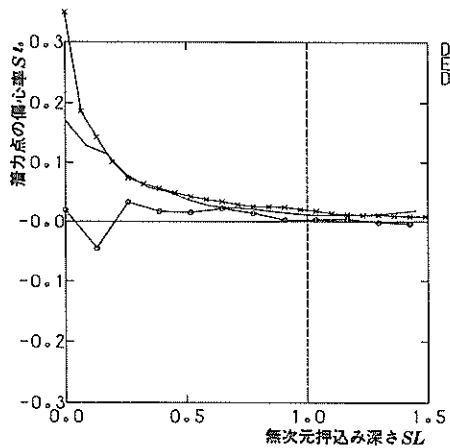
(a)



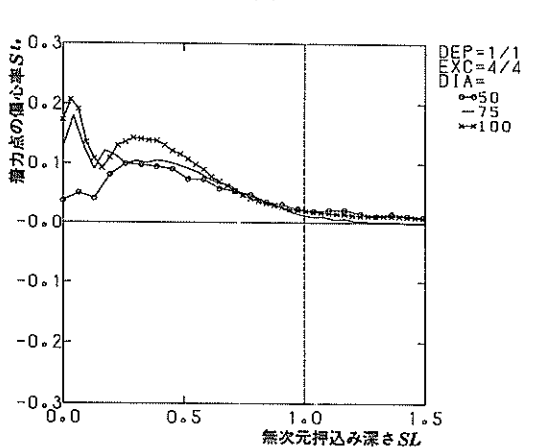
(b)



(b)



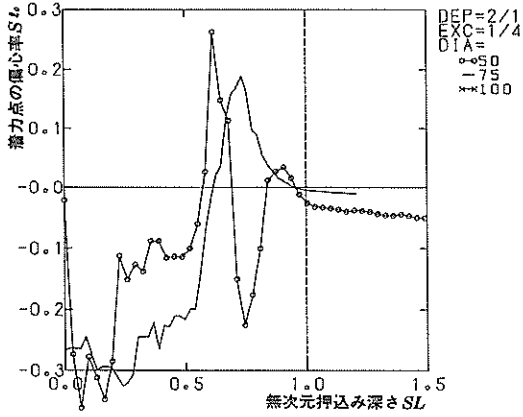
(c)



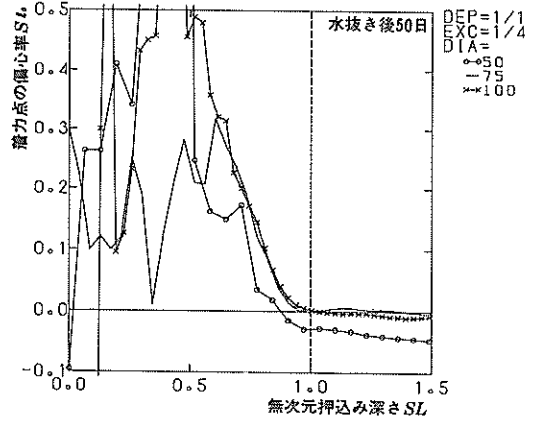
(c)

図-26 模型脚直径による着力点の偏心率の変化
(DEP = 1/2)

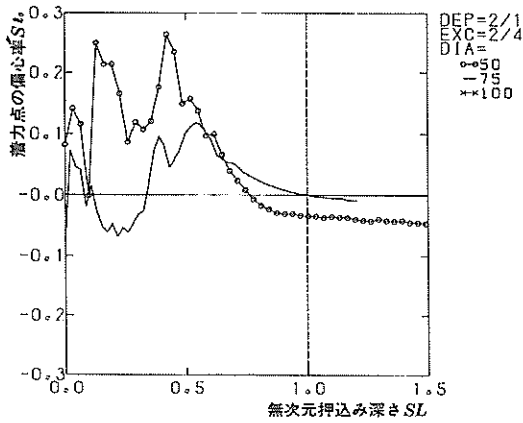
図-27 模型脚直径による着力点の偏心率の変化
(DEP = 1/1)



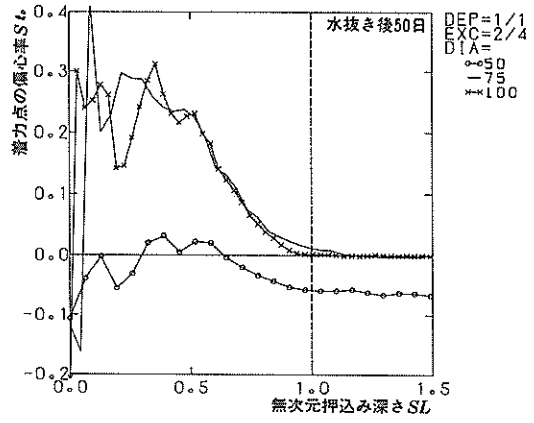
(a)



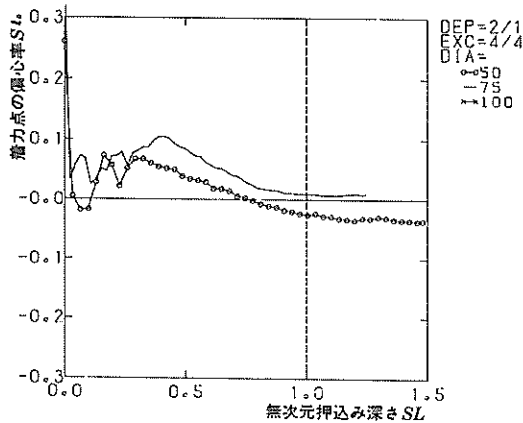
(a)



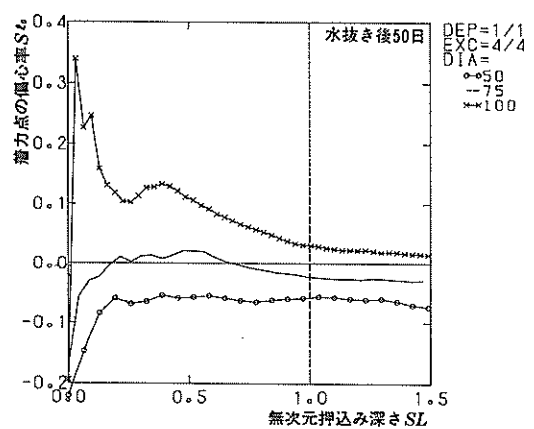
(b)



(b)



(c)



(c)

図-28 模型脚直径による着力点の偏心率の変化 (DEP = 2/1)

図-29 模型脚直径による着力点の偏心率の変化 (DEP = 1/1, 水抜き後約50日)

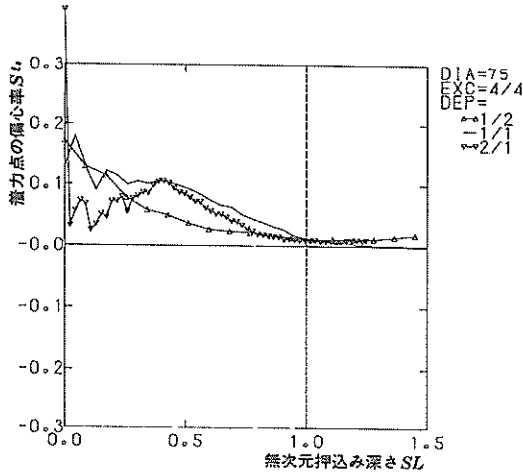


図-30 無次元先穴深さによる着力点の偏心率の変化

図-31 に無次元オフセット量 EXC の違いによる無次元曲げモーメントの変化を示した。3.1 で述べたように曲げモーメントはピークを持つので無次元曲げモーメントもピークを持つ。図-31 (a) の無次元先穴深さ DEP が 1/2 の場合と図-31 (d) の模型脚直径 DIA が 50 mm の場合を除いてその傾向ははっきりしている。

無次元オフセット量 EXC が大きくなるにつれて、無次元曲げモーメントのピーク値を生じる無次元押し込み深さは小さくなり、図-31 (d) の模型脚直径 DIA が 50 mm の場合を除いてピーク値自体も減少する。同時に、無次元オフセット量 EXC が大きくなるにつれてピークもはっきりしなくなる。これは着力点の偏心率と同じ傾向であり、無次元曲げモーメントが着力点の偏心によって生じるからである。

つぎに、図-32~35 に模型脚直径 DIA の違いによる無次元曲げモーメントの変化を示した。ばらつきはあるが比較的同じ傾向を示しており、模型脚直径 DIA が 50 mm の場合のみピーク値がほかより小さくなっているがピークを生じる無次元押し込み深さが一部を除いてよく一致していることが注目される。つまり、無次元曲げモーメントのピークを生じる無次元押し込み深さは模型脚直径の影響を受けないことがわかる。ばらつきは無次元オフセット量 EXC が大きいほど大きい、その場合は無次元曲げモーメントのピーク値も小さく、全体として無次元曲げモーメントは最大 0.1 であるといえる。

図-36 に無次元先穴深さ DEP の違いによる無次元曲げモーメントの変化を、模型脚直径 75 mm、無次元オ

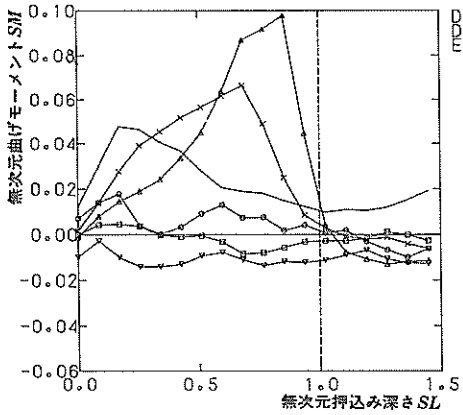
フセット量 4/4 の場合について示した。これによると、無次元先穴深さ DEP が大きくなるにつれて、無次元曲げモーメントのピーク値が生じる無次元押し込み深さは大きくなる。また、ピーク値自体は無次元先穴深さ DEP が小さくなると大きくなるが DEP が 1/2 と 1/1 では同じ程度である。

以上の結果から、無次元曲げモーメントの最大値は、無次元オフセット量と無次元先穴深さが小さいときに生じ、その値は今回の実験条件の範囲内では約 0.1 である。

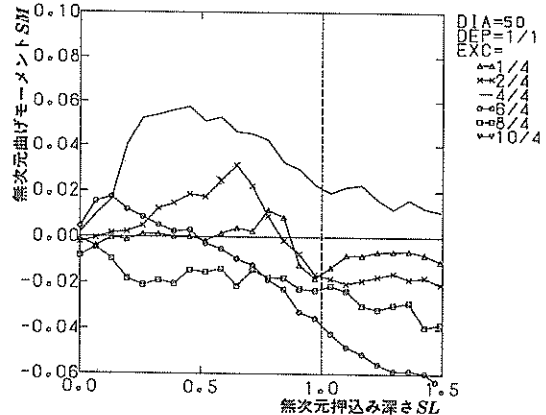
よって、実際の設計に応用する場合には、足跡と脚のずれが脚の直径の 1/4 以上で足跡の深さが脚の直径の 1/2 以上の場合には、着力点の偏心による曲げモーメントは脚に作用する最大垂直力と脚の直径の積に 0.1 を乗じた値より大きくはならないと考えてよいと思われる。

ただし、2.1 で述べたように、図-1 で垂直力 F_v と着力点の偏心量 l_0 によって生じる曲げモーメント M と、せん断力 T によって生じる曲げモーメントは向きが逆になり打消しあうことがある。ところが、せん断力による曲げモーメントは模型脚底面からの距離によって変化するのに対して、着力点の偏心による曲げモーメントは模型脚の長さ方向に一定である。また、今まで述べたように、それらの大きさも押し込み深さによって異なるので、打消しあう量は一定ではない。

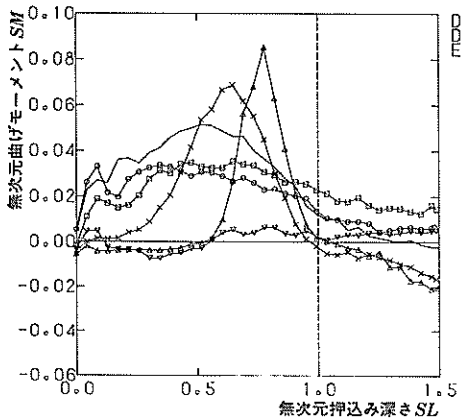
よって、実機の設計の際には、3.2 (3) で求められた最大せん断力と、ここで求められた最大曲げモーメントのうち脚への影響が大きい方に耐えられるように脚の設計を行えば安全である。



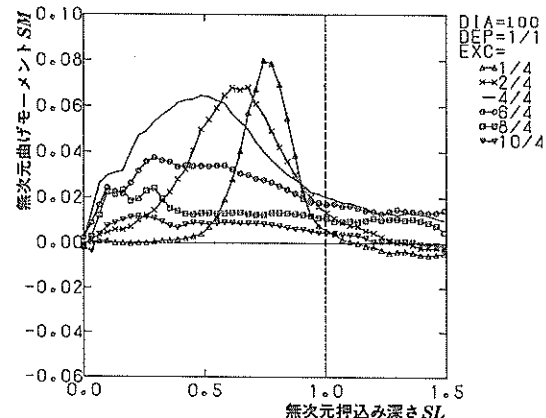
(a)



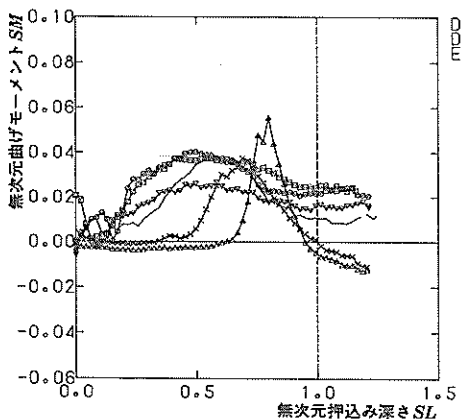
(d)



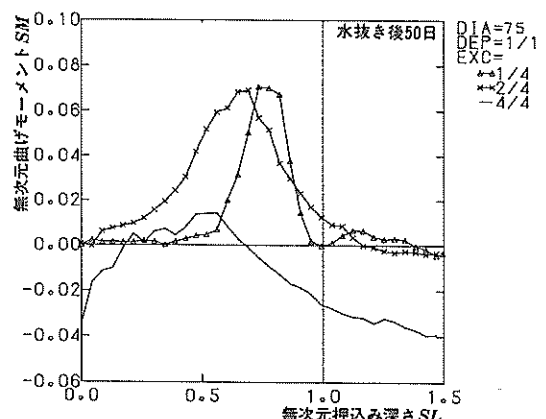
(b)



(e)

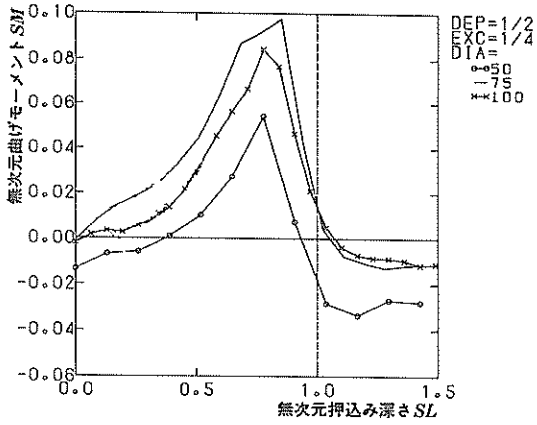


(c)

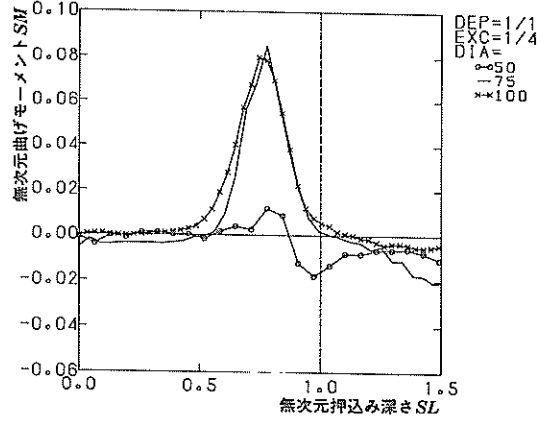


(f)

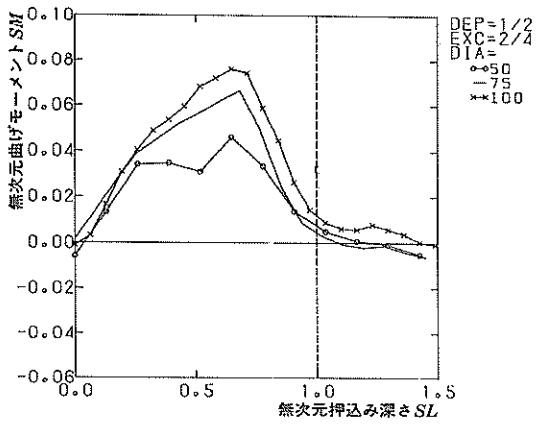
図-31 無次元オフセット量による無次元曲げモーメントの変化



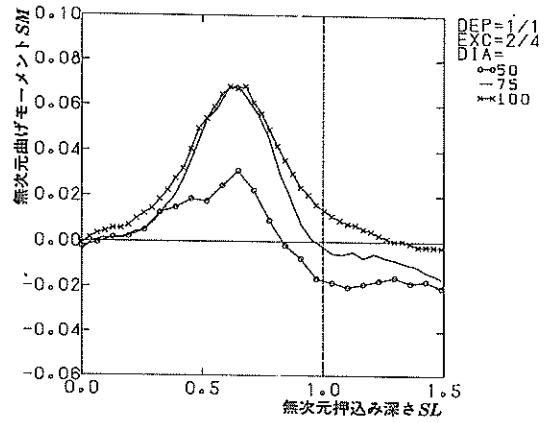
(a)



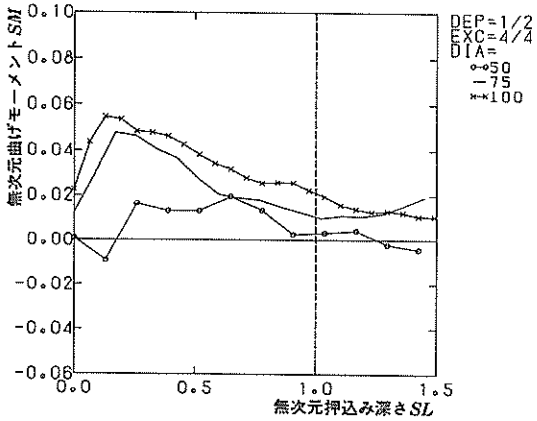
(a)



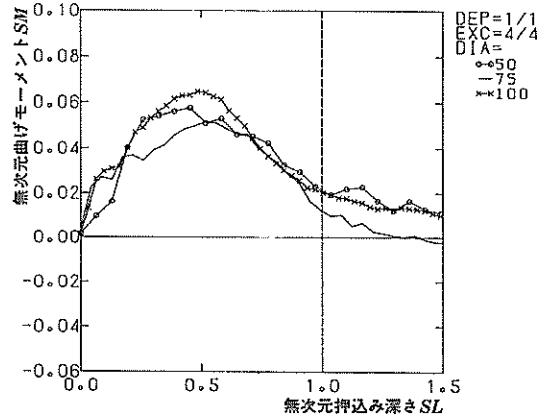
(b)



(b)



(c)



(c)

図-32 模型脚直径による無次元曲げモーメントの変化 (DEP = 1/2)

図-33 模型脚直径による無次元曲げモーメントの変化 (DEP = 1/1)

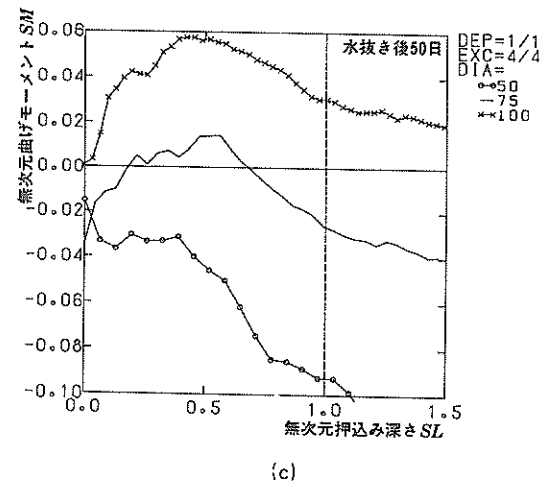
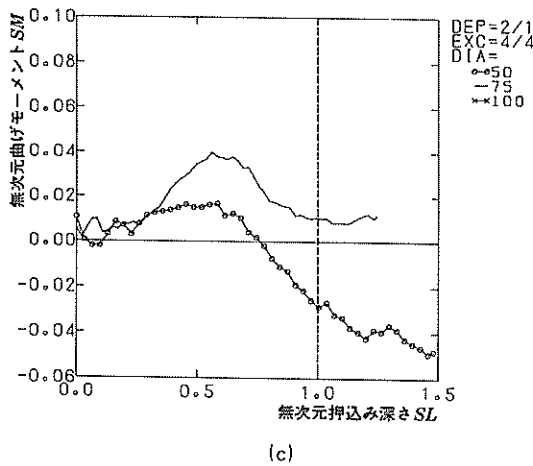
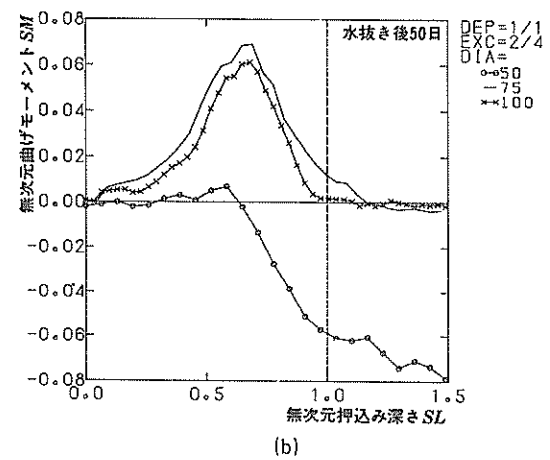
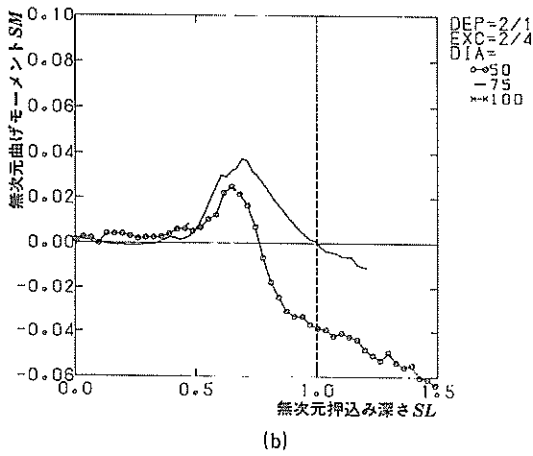
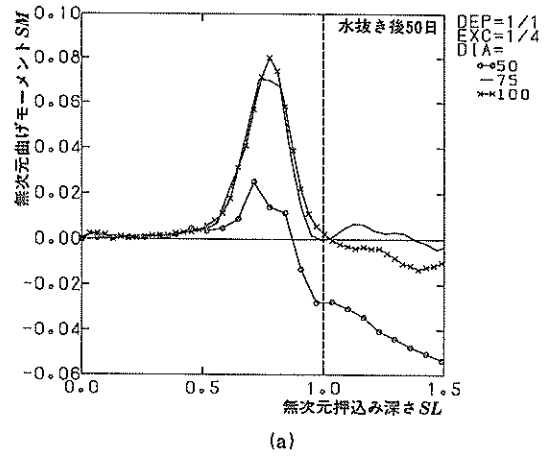
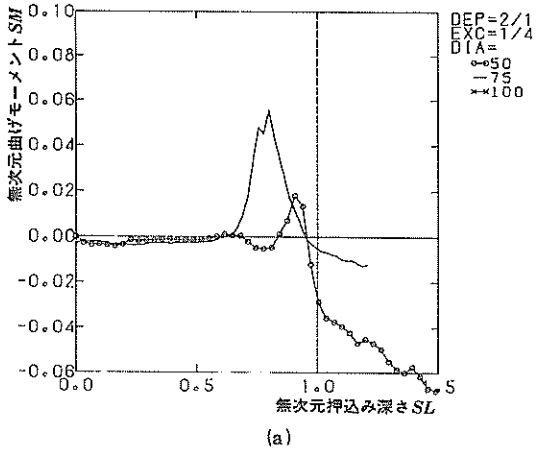


図-34 模型脚直径による無次元曲げモーメントの変化 (DEP = 2/1)

図-35 模型脚直径による無次元曲げモーメントの変化 (DEP = 1/1, 水抜き後約50日)

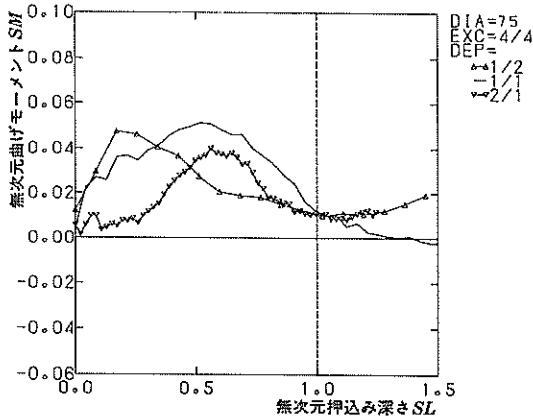


図-36 無次元先穴深さによる無次元曲げモーメントの変化

4. 結 論

着底実験の解析結果をまとめると、実験条件の範囲内ではつぎのことがいえる。

(1) 垂直応力は砂のくずれ方が不安定な場合を除いて模型脚直径による差は少ない。

(2) 垂直応力は、無次元押込み深さが 1.0 以下では無次元オフセット量が小さいほど小さい。しかし、無次元押込み深さが 1.0 を越えると一定の値に近づく傾向がある。

ただし、無次元先穴深さが 2/1 の場合には、ややばらつきがある。

(3) せん断応力は模型脚直径による差は少ない。

(4) せん断応力は無次元オフセット量が 6/4 ~ 8/4 のとき最大となり、その値は無次元先穴深さが大きいほど大きくなる。また、最大となる無次元押込み深さは模型脚直径には関係しない。

(5) 最大せん断力は、無次元先穴深さが 2/1 以下の場合、先穴押込み時の最大垂直力の 0.13 倍程度である。

(6) 垂直力の着力点の偏心量の最大値は模型脚直径の 0.3 倍程度である。

(7) 着力点の偏心による曲げモーメントの最大値は、先穴押込み時の最大垂直力と模型脚直径の積の 0.1 倍程度である。また、そのときの無次元押込み深さは模型脚直径には関係しない。

(8) 脚の着底時のせん断力による曲げモーメントと着

力点の偏心による曲げモーメントは、それぞれ、脚を逆方向に曲げる向きに作用するので、どちらか影響の大きい方を基準に脚の設計を行う必要がある。

5. あとがき

本研究結果は模型実験によるものであり、実験条件の範囲では脚の直径に対してほぼ相似がなりたっているが実機の設計に適用するためにはさらに相似則を検討する必要がある。しかし、脚に作用する最大垂直力と、脚底面に生じるせん断力、垂直力の着力点の偏心により脚に作用する曲げモーメントの関係を明らかにできたことは、実機の設計指針として重要な意味を持つと考えられる。

なお、本研究は日本作業船協会からの委託により行われたものである。(1981年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) JIS A 1220 オランダ式二重管コーン貫入試験法, 日本規格協会, 1976, 5p.
- 2) 土質調査法改訂編集委員会: 土質調査法, 土質工学会, 1973, pp. 171~256

記 号 一 覧 表

A	: 模型脚断面積
d	: 先穴深さ
DEP	: 無次元先穴深さ
DIA	: 模型脚直径
EXC	: 無次元オフセット量
F_d	: 水平力
F_g	: 荷重測定棒に加わる力
F_h	: 荷重棒上端に水平方向に働く摩擦力
F_u	: 水平力
F_v	: 垂直力
F'_v	: 先穴押込み時の最大垂直力
$K\mu_0$: みかけの摩擦係数
$K'\mu_0$: 最大せん断力に対する先穴押込み時の最大垂直力の係数
L	: 押込み深さ
l	: オフセット量
l_0	: 着力点の偏心量
$l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$: 長さを表わす量
M	: 曲げモーメント
q_c	: 静的貫入抵抗 (kgf/cm^2)
R	: 長さを表わす量
SF_v	: 垂直応力
SL	: 無次元押込み深さ
Sl_0	: 着力点の偏心率
SM	: 無次元曲げモーメント
ST	: せん断応力
T	: せん断力
μ_0	: 模型脚底面と砂との間の摩擦係数

港 湾 技 研 資 料 No.392

1981・9

編 集 兼 發 行 人 運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所

發 行 所 運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所
 橫 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号

印 刷 所 日 青 工 業 株 式 會 社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.