

ジャックアップタイプのオイルリグの支持力

運輸省港湾技術研究所 正会員 田中洋行

1. まえがき

ジャックアップタイプのオイルリグ（以下、リグと呼ぶ）は海底の石油・天然ガスの掘削に広く使われており、その稼働中の数は1984年現在で450を越えるとされている（Young 他）¹⁾。リグは、図-1に示すように、船体（プラットフォーム）と上下する脚から成っている。リグの移動は、脚を引込めてプラットフォームを船体とし、リグ全体を浮かすことによって容易に行える。掘削地点に着くと、海底面まで脚を下げ、船体を海面から上げる事により、船体がプラットフォームとなる。脚の先端にはスパッドキャン（spud can）とよばれるフーチングが設けられており、この大きさ、形状はリグの大きさ、掘削する地点での土質条件、気象条件によって異なり、大型のものになると図-2に示すように、直径が20.1mに及ぶものがある。

掘削中のリグには、リグの自重、掘削装置の重量の他に、図-1に示すように波等による水平荷重が作用し、多くの場合この水平荷重がリグの基礎の諸元を決める。水平荷重に対する抵抗を大きくするために、スパッドキャンの底面の形状の多くは、図-2に示すように、先が尖っている円錐状である。荒天候時に作用する荷重条件に対してリグの安全性を確認するため、操業にはいる前に、プレロードによるブルーフェスト（proof test）が行なわれる。すなわち、図-1に示すように、リグが掘削地点に着くと、船体を海面から1～2m程度上げ、船体に搭載されるボーリングマシン等の重量の他に、予測される水平力を垂直荷重に変換した大きさのプレロードを、船体に海水を注入してリグの基礎に加える。ここで問題となるのは、想定される水平力をいかに等価な垂直荷重に置換えるか、そしてパンチング破壊（punching through）と呼ばれるプレローディング中の基礎の急激な沈下が発生する事である。

リグの基礎には鉛直荷重、 P_v の他に水平荷重、 P_h とモーメント、 M が作用している。このような場合の基礎の支持力、 q は、式1) に示すように、鉛直荷重を基本として上記の荷重成分を偏心、 e 、傾斜、 i に変換し、 e 、 i による低減係数を鉛直荷重だけが作用する場合の支持力、 q_v^* にかけて求められる。

$$q = S_e S_i q_v^* \quad 1)$$

ここに S_e 、 S_i は各々 e 、 i による低減係数である。リグのブルーフェストで用いられる水平荷重を等価な鉛直荷重におきかえる考え方は、この低減係数に相当する分だけ鉛直荷重を増加して载荷するものである。砂地盤の偏心・傾斜荷重の下での基礎の支持力は、数多くの研究者によって実験的、理論的に求められているが、実験の多くは基礎幅が小さいため、得られた値を

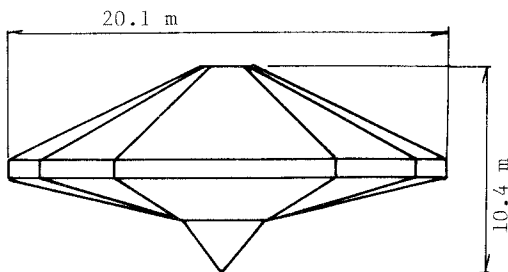


図-2

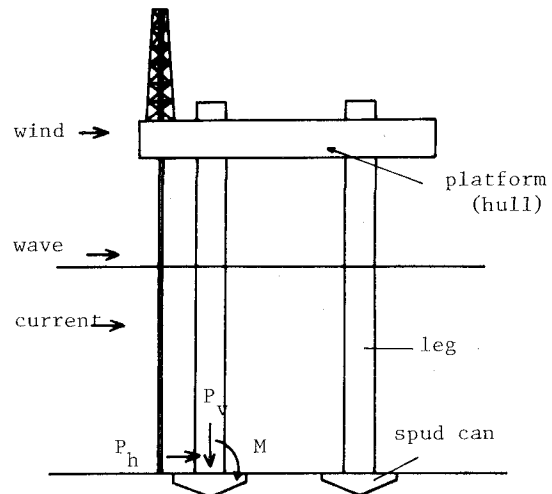
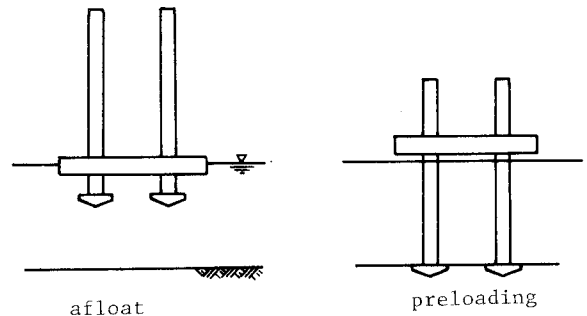


図-1

そのまま実際の大きな基礎に適用はできない。砂は拘束圧によって特性が大きく変化する材料であるため、基礎幅によって支持力、沈下特性が変化する、いわゆる寸法効果が砂地盤の支持力を議論する上で重要な因子となるからである。

プレロードは荷重-沈下曲線を管理しながら慎重に行なわれるが、基礎の支持力不足による事故がしばしば発生する。支持力不足による事故は、上部が密な砂あるいは過圧密された粘性土層で、その下部は軟弱な正規圧密粘土層からなる二層地盤である場合に多く発生している。この二層地盤の破壊を図-3に模式的に示す(図に示す例では、堅い層の上に更に柔らかい層が存在している)。通常の地盤では基礎の沈下が大きいのほど根入れの効果により支持力が増加するが、上に示した二層地盤の場合では、基礎が堅い層を突き抜けると急に支持力が減少するパンチング破壊とよばれる現象が発生する。このパンチング破壊が起こると、著しい沈下が生じ、リグが大きく傾いたり、脚の破壊の事故が発生する。通常の縮尺模型実験では、砂層と粘性土層の剪断抵抗比を実物と同じとすることは難しいため、この様な二層地盤、特に下層が正規圧密粘性土層の場合の支持力を実験的に求めた例は少ない。

以上述べた模型実験の制約は、模型に大きな重力加速度を加える事によって解消される。本報告では、遠心力载荷装置を用いて、リグの基礎を想定した、均一な密な砂地盤上で偏心・傾斜荷重が作用する基礎の支持力と、上層が密な砂、下層が正規圧密粘土層からなる二層地盤の鉛直支持力の実験結果に就いて述べる。

2. 実験方法

本実験で使用した遠心力载荷装置は、Cambridge 大学工学部のもので、その装置の詳細は文献2)を参照されたい。

実験は偏心、傾斜荷重が作用する支持力特性を求めるための砂地盤の実験と、二層地盤の支持力実験に分けられる。

1) 砂地盤

砂地盤は14/25 Leighton Buzzard砂(最大間隙比, 0.79, 最小間隙比, 0.49)をポアリング(pouring)して作成した。

砂地盤の間隙比は最小間隙比に近い値であり、かなり密である。模型フーチングはジュラルミン製で、直径75mmの円形である。実物に相当するリグのスパッドキャンの底面の形状は、図-2に示すように円錐であるが、今回の実験では平坦とした。用いた試料容器は、762×762mmの正方形の平面形状を有し、深さが200mmのものである。

実験に用いた载荷装置は図-4に示すように、鉛直力、水平力ともエアシリンダーで载荷するもので、その容量は鉛直力は10kN、水平力は2.5

kNである。水平载荷実験は、予め等しい張力をフーチングの両側にあるワイヤーに加えておき、载荷段階に入ると水平力を载荷する方向の反対側にあるエアシリンダーの圧力を下げる事によって行なった。鉛直力、ワイヤーの張力(水平力)はロードセルによって計測された。フーチングの鉛直変位、水平変位、回転を計測するために、3コの差動トランス(LVDT)を設置した。

実験は合計8ケース行なったが、ここに紹介する水平载荷試験の応力経路は図-5に示す通りである。S-1の実験は偏心が0のケースで遠心加速度を40gの下で、フーチングに鉛直応力、 q_v を2.0kN/m²まで载荷し、その後 q_v を0.95kN/m²まで除荷し、 q_v 一定の状態で行なった。载荷実験を終了すると、遠心加速度を20gにまで減少させ、 q_v を40gの場合と同様に2.0kN/m²まで载荷、除荷し、図-5に示すように異なる q_v の下で4回水平载荷実験を行なった。S-2は偏心量が15mm(フーチングの直径Bの比にすると e/B は0.2となる)の場合で、実験の応力経路はS-1の場合とほぼ同じであ

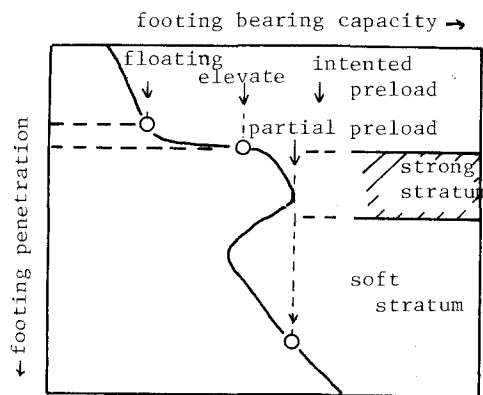


図-3

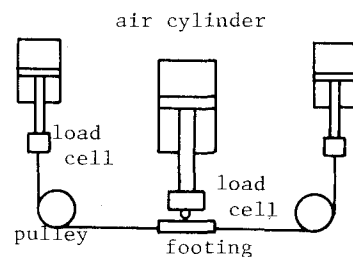


図-4

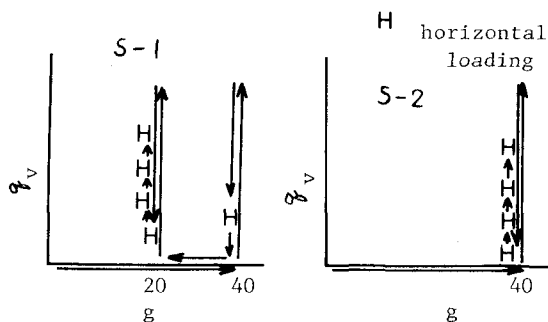


図-5

るが、遠心加速度は40gのみである。水平載荷試験を行なう前に鉛直荷重を加えた理由は、プレローディングの過程を再現するためである。別に行なった鉛直荷重による支持力実験の結果によれば、これらプレロードの鉛直荷重の大きさは破壊荷重、 q_v^* に対して、S-1で40gの場合で、30%，20gの場合で40%である。また、S-2の場合は偏心荷重であるのでS-1の場合よりも破壊荷重が小さく、プレロードの q_v / q_v^* は70%である（水平載荷時の q_v / q_v^* は図-9参照）。

2) 二層地盤

二層地盤で用いたフーチングは、図-6に示すように、底面が平坦（以下にflatと記す）と頂角が120°の円錐（conical）の2種類である。直径はいずれも50mmで、載荷実験は遠心加速度を100gの下で行なったので、実物に直すと5mの直径のフーチングに相当する。地盤条件は、上部の砂層の厚さ、 h_s とフーチングの直径、Bの比、 h_s / B が0（正規圧密された粘性土のみの場合）、0.5、1.0の3通りである。

実験手順は次の通りである。図-7に示す直径850mmの円形容器に液性限界の2倍程度の含水比に調整したカオリン粘土をいれる。粘性土の層厚は圧密終了後で20cmとなるように決め、また圧密を早めるために粘性土層の中央に厚さ3mm程度の中間砂層を設けた。模型地盤は遠心力載荷装置に搭載され100gの下で自重圧密させる。粘土層に設置された間隙水圧計と地表面の変位計から自重圧密が終了した事を確認したのち、載荷試験に入る。本実験で用いた載荷装置には、2つの載荷ジャッキを供えており、flatとconicalのフーチングの載荷実験を一回のフライトで行える。フーチングの載荷速度は10～60mm/minで、使用した粘土の透水係数に照らし合せると、非排水載荷と考えられる載荷速度である。載荷試験では、フーチングの載荷反力をロードセルで、貫入量をLVDTで計測した。

粘性土のみの実験が終わると、1gの場で14/25leighton Buzzard 砂を厚さ25mm敷き、 $h_s / B = 0.5$ の地盤を作成する。先に行なった載荷試験による土の乱れの影響を小さくするため、図-7の○に示すように、載荷場所を約60°かえ、再び100gで自重圧密を行なう。粘土地盤は $h_s / B = 0.5$ に相当する砂の土被り圧を新たに受けるため、この応力状態の下で正規圧密された地盤となる。これと同様な実験手順で $h_s / B = 1.0$ の実験も行なった。つまり、1つの地盤で3つの異なる地盤と2種類のフーチングによる合計6ケースの載荷実験を行なった事になる。

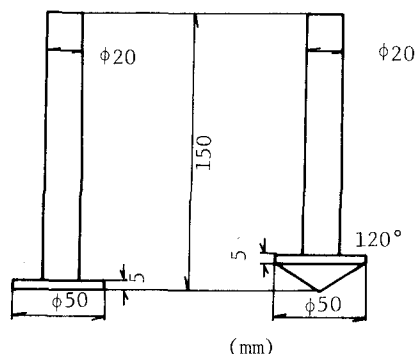


図-6

3. 砂地盤の支持力実験の結果

1) 水平載荷時のフーチングの挙動

水平力の作用に伴うフーチングの変位、回転角度の方向を図-8に示すように決める。すなわち、水平力が鉛直応力の偏心方向に作用している場合を正の偏心（positive eccentricity）、逆の方向に偏心している場合を負の偏心（negative eccentricity）とし、水平方向の変位、荷重は正の偏心方向を正とし、回転も同様に正の偏心方向に傾く方向を正とする。鉛直の変位は下向き（沈下）を正、上向きを負とする。

図-9に偏心していない場合（S-1）と e/B が0.2の場合（S-2）で得られたフーチングの挙動の1例を示す。S-1、S-2の場合も q_v が小さいと、フーチングの動きは水平方向のみで、鉛直方向の変位、あるいは回転はほとんどみられない。僅かであるが水平力によって砂地盤にダイヤタンシーが生じ、フーチングが負の鉛直変位（上向き）を示している。 q_v が大きくなると、水平応力 q_h と q_v との比 q_h / q_v と水平変位、 d_h との勾配は緩かになり、極限水平応力を示す q_h / q_v の値も小さくなる。また、鉛直変位（沈下）、回転（水平力が作用している方向に沈下）も大きくなる。今回行なった実験では、水平載荷の繰返し回数は0.5または1サイクルと少ないが、水平力の除荷過程でもフーチングはかなりの沈下を生じており、水平力の繰返し載荷

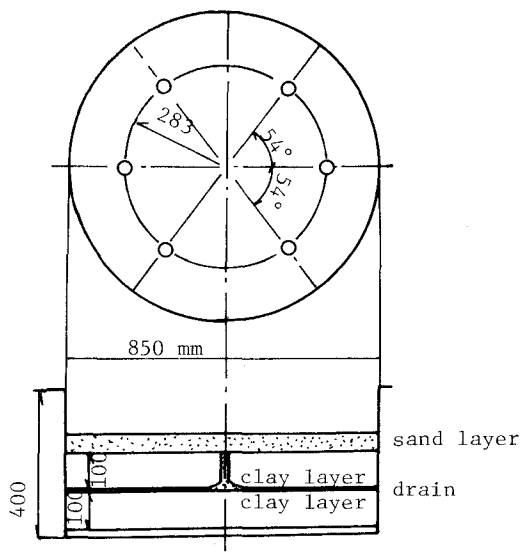


図-7

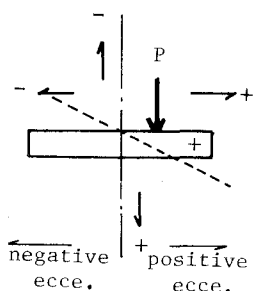


図-8

による沈下の蓄積が予想される。水平力によるフーチングの回転はS-1の場合小さいが、偏心している場合のS-2では q_v が大きくなると増加する。正の偏心方向に水平力が作用すると、偏心した方向へフーチングが傾くのは容易に理解できるが、負の偏心方向に水平力が働いても、偏心した方向へフーチングが傾く。このことより、偏心荷重が作用している条件下で繰返し水平力が作用すると、沈下ばかりでなく、フーチングの傾きも累積的に増加する事が予想される。

2) 極限水平荷重

図-9に示す d_h と q_h/q_v の関係が折れ曲がる地点の q_h に相当する水平力を極限水平力 P_h として、 P_h が鉛直力 P_v によってどのように変化するかをみる。

図-10にS-1で得られた P_v と P_v^* の関係を示す。 P_h 、 P_v とも水平荷重が作用していない時の破壊時の鉛直荷重 P_v^* で正規化している。鉛直成分のエアーシリンダーの容量の不足のため、図-10に示すように P_v/P_v^* の大きさは0.5以下と小さい。この範囲での P_v/P_v^* と P_h/P_v^* との関係は直線で表わされ、その勾配は $1:1$ であり、この角度はジュラルミンと砂との摩擦角度に等しい。すなわち、小さな P_v の下では滑動によってフーチングの極限水平力が決る。極限水平力が作用した時の変位増分の方角を、図-10の矢印で示すが(変位増分は垂直、水平成分とも $1:1$ で記入している)、 P_v が小さな場合には矢印の方角が水平であり、この破壊パターンからも滑動によって極限水平力が決る事が明らかである。しかし、図に示すように P_v/P_v^* が0.5となるあたりから、徐々に鉛直変位成分が大きくなり、 P_v の大きい場合には支持力不足によって極限水平力が決る事が予想される。図中にTicof³⁾が1gの場で行なった帯基礎の載荷実験から求められた実験値を点線で示す。彼の実験ではフーチングにサンドペーパーを貼って粗くしているため、本実験で得られた P_h/P_v^* と比べると、Ticofによるものが大きい。

図-11にS-2で得られた P_v/P_v^* 、 P_h/P_v^* の関係を示す。S-1の場合と異なり、S-2では偏心荷重を与えているため、 P_h/P_v^* の値に正負がある。S-1の場合と同様に、小さな P_v の下では、水平力の作用する方向に関係なく、 P_h は砂とフーチング底面の摩擦係数で決るようである。しかし、比較的大きな P_v/P_v^* で正と負の P_h を比較すると、負の偏心の方向に水平力が作用した方が、多少 P_h は大きくなり、破壊時の変形の方角も水平方向だけであったのが、徐々に鉛直成分が大きくなると同時に、図-9に示すように、フーチングの傾斜角度も大きくなる。Brinch Hansen⁴⁾は砂地盤で根入れのない場合の傾斜による低減係数を滑り線による解析をもとにして、2)式のように提案した。

$$S_i = (1 - \alpha m)^\beta \quad 2)$$

S-1 $e/B = 0$

S-2 $e/B = 0.2$

— $q_v = 0.76 \text{ MN/m}^2$

— $q_v = 0.45 \text{ MN/m}^2$

----- 1.67

----- 1.76

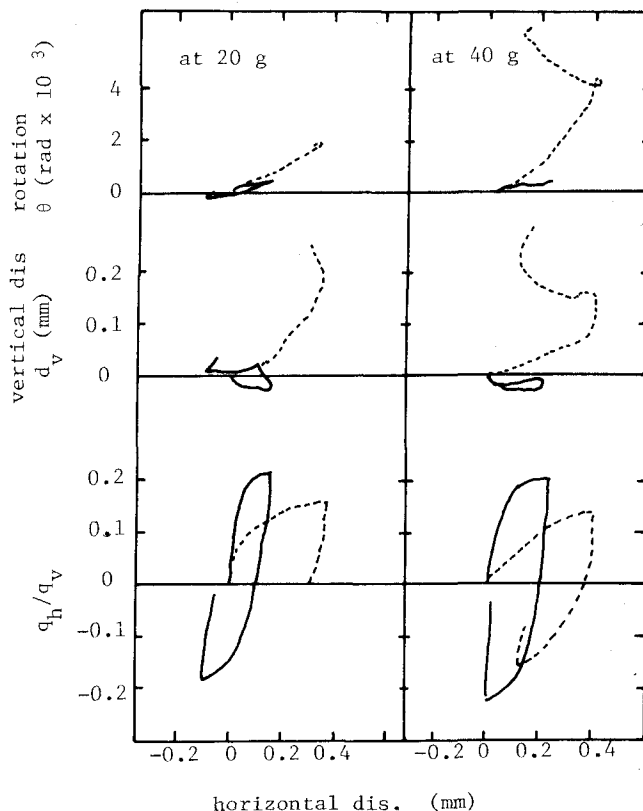


図-9

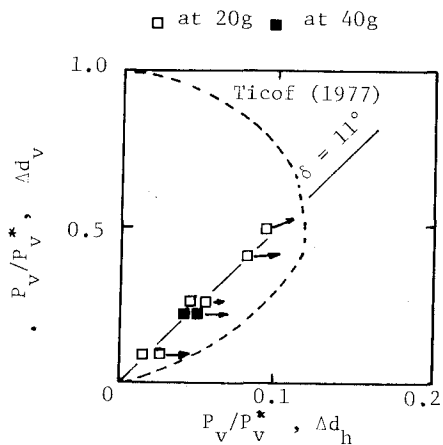


図-10

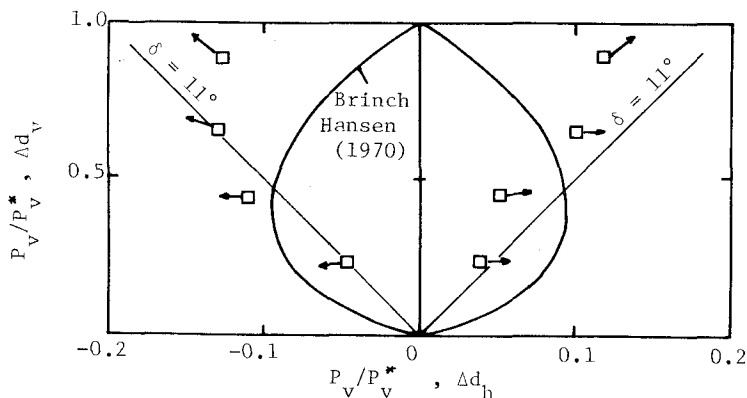


図-11

ここに m は P_h/P_v 、 α 、 β は実験定数で、Brinch Hansenによれば、各々 0.7、5を提案している。これらの α 、 β の値を用いて2)式で計算された P_h/P_v^* 、 P_v/P_v^* の関係を図-11に示す。実験で得られた値は小さな P_v/P_v^* の下では提案式より小さく、大きな P_v/P_v^* の下では実験値のほうが大きい結果となった。この結果は、基準となる P_v^* によって大きく異なるため、実験の個数が少ない現段階ではBrinch Hansenの提案式が安全側の値を出すか否かは断言できない。

4. 二層地盤の支持力

1) 反力と貫入量の関係

図-12に二層地盤のフーチングの貫入量と反力を示す。図中の矢印は3分間載荷を中断した事を示す。粘性土だけの地盤の載荷実験では、flatの載荷が旨くいかなかったため、conicalで得られた値だけを記す。図中の斜線は上部砂層と中間砂層の位置と厚さを示す。

正規圧密された粘土だけの地盤では、貫入量の増加とともに、地盤の剪断強度と根入れの増加によって、反力は増加する。一方、上部が砂層で覆われると、反力は一旦ピークを示した後、減少する、パンチング破壊が生じる。例えば、 $h_s/B = 1.0$ でflatの場合をみてみると、最小時の反力はピーク時と比べて

半分に減少する。フーチングの底面の形状の違いによる影響は、conicalの方が最大と最小反力の差は小さく、反力の値自体はflatと比べて多少大きめである。前者の原因としては、conicalのフーチングでは、フーチングが砂層と粘性土の境界付近に貫入した場合、頂端の一部はすでに粘性土層に到達しているが、他の部分は未だ砂層にあるため、flatにみられるような急激な反力の減少は生じない事が上げられる。

2) ピーク時の反力

Yamaguchi⁵⁾による方法で本実験から得られたピーク時の支持力を検討してみる。Yamaguchiの方法は荷重分散法とも呼ばれているもので、図-13に示すように砂層に作用する荷重が、下部粘性土層表面に砂層中を分散して伝ばした分布応力が急速破壊時の極限支持力に等しいとして求めたものである。フーチングの

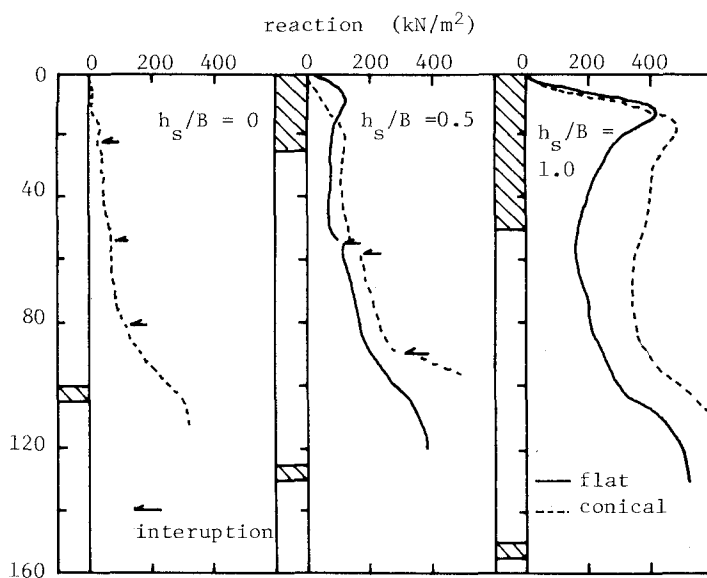


図-12

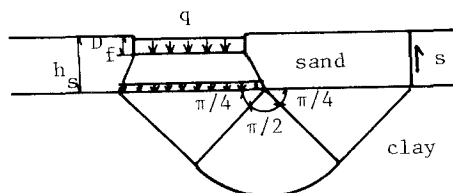


図-13

基礎の形状が長方形の場合には許容支持力は3)式によって表わす事ができる。

$$q = (1 + \frac{h_s - D_f}{B}) (1 + \frac{h_s - D_f}{L}) (\frac{5.3 S_u S_c}{F_s} + \gamma D_f) \quad (3)$$

ここに、 D_f は根入れ深さ、 B 、 L はフーチングの幅及び長さ、 F_s は安全率、 S_u は下部の粘性土の非排水剪断強度、 γ は砂の単位体積重量、 S_c は形状係数である。

ここで、3)式によって求められた値が、均一の砂地盤の支持力より大きくなる場合には、もちろん、この均一砂地盤の支持力を二層地盤の許容支持力とする。

今回の実験結果と比較するために3)式を円形フーチングに適用できるように、3)式の L を B と等しいとし、 S_c を1.13とすると、4)式が得られる。

$$q = (1 + h_s / B)^2 6.0 S_u \quad (4)$$

下部が正規圧密された粘性土であると、地盤の S_u は深さとともに増加する。このため、4)式に用いる S_u は下部粘性土層の上面からフーチングの基礎幅 B の1/2の深さの S_u とする。自重圧密終了後の粘性土の S_u の測定は行なっていないので、要素試験の結果から S_u / p を0.2として、砂と粘性土の γ から S_u を推定した。

4)式による計算値と実測値を図-14に示す。上部の砂の層厚が増加すると粘性土の S_u も増加するため、粘性土だけの支持力、 q_c も増加する。これを示したのが図-14に示す斜線の部分である。4)式による計算値は実線で示す。すなわち、 q_c とこの実線との距離によって表わせる応力が上部砂層による支持力の増加を示すことになる。4)式による計算値は実験値を比較的良い精度で予測している。しかし、図-12に示すように h_s / B が大きくなると、ピーク後の反力が著しく低下するため、二層地盤の許容支持力を求めるための安全率は、通常用いられる値より大きな値を採用する必要がある。

5. 結論

1) 水平力が作用する砂地盤の支持力

鉛直荷重が小さい場合には、極限水平荷重は砂とフーチングの摩擦係数で決まる。鉛直荷重が大きくなるとフーチングの破壊モードは滑動から、沈下及び傾きによる支持力不足の破壊へと変化する。

2) 上層が密な砂、下層が正規圧密地盤から成る二層地盤の支持力

荷重分散法による方法は二層地盤の支持力を比較的良く推定する。しかし、ピーク後の反力は著しく減少するため、二層地盤の許容支持力を設定する場合には、かなり高めの安全率を採用する必要がある。

本報告は、著者が科学技術庁長期在外研究員として、連合王国Cambridge 大学にM.Philの学生として在籍した時に行なった実験、及び提出した論文⁶⁾をもとにして書いたものである。著者の指導教官であった、R G James 博士、及びA N Schofield 教授、M Randolph博士から実験の遂行、結果の考察にあたって貴重なご意見を戴いた。末尾を借りて謝意を呈する。

参考文献 1) Young A G et al. (1984) Foundation Performance of Offshore Jack-Up Drilling Rigs ASCE, vol 110, No. 7, pp 841-859 2) Schofield A N (1980) Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations, Geotechnique, Vol. 30, No. 3, pp 227-268. 3) Ticof J (1977) Surface Footings on Sand under General Planer Loads, Ph.D thesis, Southampton University 4) Hansen Brinch (1970) A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity, Bulletin, No. 28, The Danish Geotechnical Institute, pp 5-11. 5) Yamaguchi H (1963) Practical formula of Bearing Capacity Value for Two layered Ground, Proc. 2nd Asian Conf. on SMFE PP 176-180 6) Tanaka H (1984) Bearing Capacity of Footings for "Jack-Up" Platforms, M. Phil Thesis Cambridge University.

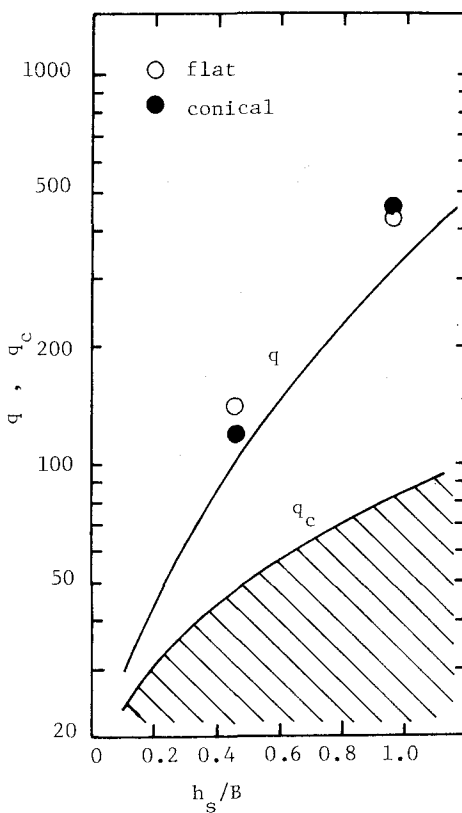


図-14