載荷試験における載荷点の拘束条件の影響

(Influence of Horizontal Restriction in Eccentric Loading Test)

北 誥 昌 樹ⁱ⁾ (Masaki Kitazume)
池 田 朋 広ⁱⁱ⁾ (Tomohiro Ikeda)

キーワード：浅い基礎／砂質土／支持力／すべり面
／偏心荷重／模型実験 (IGC : E3)

1. ま え が き

偏心荷重が作用する浅い基礎の支持力に関しては、Meyerhofの研究¹⁾を初めとして、実験、解析の両面より数多くの研究がなされてきている。実験研究において、鉛直支持力の場合には載荷ジャッキを用いてフーチングの中央を鉛直に載荷する。偏心支持力の場合にも同様の方式でフーチング中心をずらした位置を鉛直に載荷することが行なわれている。フーチングの中心を載荷した場合には、載荷条件が左右対称であるため、フーチングは鉛直には変位するが、基本的には水平変位も回転変位も生じない。一方、偏心支持力の場合には、荷重がフーチングに対して左右非対称であるため、フーチングは鉛直変位だけでなく、水平変位や回転変位も生じるはずである。しかし、偏心実験でこの水平変位を拘束しないように工夫して行なわれた実験はあまり行なわれておらず、筆者らの調べた限りではEastwood²⁾だけである。筆者らは以前、砂地盤上の帯基礎を対称として、有限要素法による解析を行い、水平拘束の影響を検討した^{3),4)}。その結果、フーチングの水平変位を拘束した場合には、載荷点で水平荷重が発生し、フーチングに真に作用している力は偏心傾斜荷重であり、地盤の支持力や変形挙動が真の偏心荷重実験と大きく異なることが分かった。そこで、本研究では、砂地盤上の帯基礎を対象にした偏心

実験を行ない、載荷点での水平変位の拘束条件の、支持力及び変形挙動に及ぼす影響を検討した。

また、偏心実験に加えて、地盤が左右非対称の場合として、斜面肩に設置されたフーチングに対する鉛直支持力実験を行い、フーチングの拘束の影響を検討した。

2. 実験装置及び模型地盤

本実験では、図-1に示すような幅50 cm、深さ30 cm、奥行き10 cmの剛性の高い容器を使用した。模型地盤は、気乾状態の豊浦標準砂を用い、多重ふるい法⁵⁾で層厚250 mmの均一で密な地盤 ($\gamma_d=1.587\sim1.633$ g/cm³, $D_r=81\sim95\%$) を作製した。載荷に用いたフーチングは幅(B) 5 cm、奥行き10 cm、厚さ0.2 cmの剛性の高いステンレス製の板を使用した。なお、フーチングの厚さが小さいのは、載荷中のフーチングの回転変位による偏心量の変化を出来るだけ小さくするためである。また、フーチング底面は標準砂を接着剤で付着させ粗な状態にしている。

図-1 試料容器

i) 運輸省港湾技術研究所土質部地盤改良研究室 室長 (横須賀市長瀬3-1-1)

ii) 同上 研究員
(1992. 10. 29 原稿受付・討議期間 1994. 4. 1, 要請があれば1か月の期限延長可能)

載荷実験は、載荷中のフーチングの水平変位を拘束したケース（以下、「拘束」と表わす。）と自由に変位可能なケース（以下、「自由」）について、それぞれ偏心率を0, 0.1B, 0.2Bに変化させて合計6ケース行なった。

3. 一様地盤上のフーチングの偏心載荷実験

3.1 水平方向の変位を拘束した場合（「拘束」）

（1）載荷装置及び実験方法

ここで用いた載荷装置は、図-2に示すように、鉛直に載荷するジャッキ部、載荷重を計測するロードセル、そしてフーチングを載荷するための鉄製の載荷板（長さ10 cm、奥行き5 cm、厚さ0.9 cm）の3つより構成されている。載荷板の先端は鋭角に加工され、さらにジャッキ部は試料容器上面にボルトで固定されているため、フーチングは回転変位は自由にできるものの、載荷板がたわまない限り水平方向には変位できない構造になっている。載荷板の曲げ剛性は、非常に大きく設定しており、本実験の荷重範囲（水平力4.25 kg）では載荷板先端での水平変位が約0.02 mmと無視できる程度であることを確認している。載荷板にはひずみゲージを貼りつけており、載荷点での水平荷重を計測できるようにしている。実験は、多重ふるい法で作製した砂地盤の上にフーチングを置き、載荷ジャッキで2.31 mm/minの速度で載荷した。実験中、フーチングの鉛直変位、鉛直荷重及び載荷点での水平荷重を計測した。

（2）実験結果

a) 鉛直載荷重～沈下関係

実験より得られた鉛直載荷重～沈下曲線の代表例を図-3に示す。図中、縦軸には載荷応力 q をフーチング幅 B と地盤の単位体積重量 γ で除して無次元化した値（ $N_r = 2q/\gamma B$ ）で、横軸には沈下量 δ_v をフーチング幅で無次元化した値でそれぞれ示している。

フーチング中心を載荷した場合（ $e=0$ ）を見ると、載荷に従いほぼ一定の割合で載荷重は増加し、やがて明瞭なピークを示す全般せん断破壊を示していることが分か

図-2 載荷装置（「拘束」）

る。さらに、ピーク後の載荷重は急激に減少し、ほぼ一定の残留荷重を示している。一方、偏心載荷の場合には、載荷初期には中心載荷の場合とほぼ同じ割合で載荷重は増加しているが、ピーク荷重及び残留荷重の値が小さくなる傾向が見られる。また、ピーク時の沈下量も、偏心率が大きくなるにつれて小さくなることが分かる。

b) 水平荷重～沈下関係

鉛直載荷中に載荷点で発生している水平荷重～沈下曲

図-3 鉛直載荷重～沈下曲線（「拘束」）

図-4 水平荷重～沈下曲線（「拘束」）

線の代表例を図-4に示した。図-3と同様に、横軸は水平荷重を無次元化した値を、基礎中心方向に発生する力を正としている。さらに、鉛直荷重がピークになる時点を図中の矢印で示している。

偏心量が0の場合には、本来なら、フーチングの水平及び回転変位は生じず鉛直方向のみに変位するため、水平荷重は発生しないはずである。しかし、図を見ると、鉛直荷重がピークに達するまでは負の方向の力が、ピーク後は正の方向の力が発生していることが分かる。本条件については、フーチングの左右を逆にしたケースも含め合計6ケースの実験を行ったが、いずれの場合も同様の傾向であった。このことから、水平力の発生は載荷装置や砂地盤の微妙な不均一性のためと考えられるが、詳細な原因は不明である。

偏心載荷の場合にも、載荷初期には負の水平荷重が発生しているが、載荷が進むにつれて大きな正の水平力が発生している。水平荷重の大きさを中心載荷時の値と比較すると、沈下量(δ_v/B)が0.2程度までは、常に載荷点よりフーチング中心方向に向う水平力が発生している。そして、その大きさは、偏心量が大きいほど大きいことが分かる。すなわち、偏心載荷の場合には、鉛直方向に載荷しようとしているにもかかわらず、フーチングの水平変位を拘束した場合には、中心に向う水平力が発生し、偏心傾斜荷重が作用していることが分かった。

c) 水平荷重と偏心量

鉛直荷重のピーク時及びピーク後(ピーク荷重時の沈下量の2倍沈下した時)について、フーチング載荷点で発生している水平力を、偏心量ごとに図-5に示した。同図で、縦軸は水平力と鉛直力の比を、横軸は偏心量をそれぞれ示している。ピーク時の水平力(図中□印)について見ると、偏心量が大きくなると正の水平力が増加しており、偏心量が0.2Bの場合には、鉛直荷重の1%程度の水平荷重が発生していることが分かる。一方、ピーク後の水平力は、偏心量0から0.1Bにかけては減少しているが、0.2Bの場合には3%程度にまで増加している。

偏心量が0.25Bの鉛直荷重についての有限要素法解析では、ピーク時には鉛直荷重の約10%の水平荷重が発生する結果が得られている^{3),4)}。今回の実験値は計算値の1/10程度であった。この原因は、曲げ剛性の高い載荷板を使用したにもかかわらず僅かなたわみが生じたこと、載荷点でのフーチングと載荷板間でのわずかなずれ等によるものと考えられる。しかし、いずれにしても、フーチングの水平変位を拘束した場合には、載荷点にはフーチング中心方向への水平荷重が発生することが、解析、実験の面から確かめることができた。

図-5 水平荷重～偏心量(「拘束」)

3.2 水平方向の変位を自由にした場合(「自由」)

(1) 載荷装置及び実験方法

ここで用いた載荷装置を図-6に示す。同装置も「拘束」の載荷装置同様、ジャッキ部とロードセル、そして載荷板の3つの部分より構成されている。「拘束」の装置と大きく違う点は、第一にジャッキ部がローラーを介して試料容器に固定されているため水平方向に自由に変位できること、第二に載荷重に対して座屈せず、かつフーチングの水平偏位を拘束しないような剛性の小さいアクリル板(長さ10 cm, 奥行き5 cm, 厚さ0.5 cm)を載荷板として用いた点である。

実験方法では、「拘束」と同様であるが、フーチングの水平変位を自由にするため、載荷中は、アクリル板に貼りつけたひずみを監視し、常に水平力を0となるように手動で載荷ジャッキを水平変位させた。そのため、

図-6 載荷装置(「自由」)

フーチングは自由に回転、水平変位しながら鉛直方向に載荷されることになる。

なお、載荷中のフーチングの水平変位量は、容器に取付けたダイヤルゲージによる載荷装置の水平変位量で代表させた。

(2) 実験結果

a) 鉛直載荷重～沈下関係

鉛直載荷重～沈下曲線の代表例を図-7に示す。縦軸、横軸共に図-3と同様に無次元化した値で示している。

フーチング中心を載荷した場合、載荷初期には載荷重は一定の割合で増加し、その後明瞭なピークを示す全般せん断破壊であることが分かる。さらに、ピークを過ぎると鉛直荷重は急激に減少し、その後ある一定の残留荷重を示している。偏心量が大きくなると、中心載荷と比べ荷重～沈下曲線の初期の傾きが減少するとともに支持力値も小さくなる傾向が見られる。図-3における「拘束」と比較すると、ピークを過ぎた直後の鉛直荷重は「拘束」よりも「自由」の方がより大きく減少している。さらに残留強度は、「拘束」(図-3)では偏心量によって大きく異なっているのに対して、「自由」(図-7)の場合には、偏心量によらずほぼ同じ大きさを示している。

b) 水平変位～沈下関係

載荷中のフーチングの水平変位を図-8に示した。図中、横軸はフーチングの中心より偏心側への変位を正とした水平変位量(δ_h)を、縦軸には沈下量(δ_v)をそれぞれフーチング幅(B)で除して無次元化している。又、図にはピーク荷重時を矢印で示している。中心を載荷した時は左右対称条件であるため、本来なら、フーチ

図-7 鉛直載荷重～沈下曲線(「自由」)

図-8 水平変位～沈下曲線(「自由」)

ングは水平に変位せず鉛直方向のみに変位していくはずである。しかし、実験では、鉛直荷重のピークまでは比較的小さな水平変位が、ピーク後は大きな水平変位が生じる結果が得られた。実験では、フーチングの左右を逆にしたケースも含め合計5ケースを行ったが、いずれも同様の水平変位挙動が生じた。一方、偏心荷重の場合には、載荷初期より偏心側に水平変位していく傾向が見られる。この傾向は、偏心量が大きくなる程顕著に表われている。一般に行われている偏心載荷実験では、この水平変位を拘束してしまうため、図-4に示したようなフーチング中心方向を向かう水平力が発生し、結果的に偏心傾斜実験となっている可能性が高い。

c) 水平変位と偏心量

図-9には、鉛直荷重のピーク時とピーク後(ピーク荷重時の沈下量の2倍の沈下時)での水平変位を偏心量別にプロットした。偏心量の増加につれて、ピーク時及びピーク後の水平変位は、いずれも偏心側に増加しており、偏心量が $0.2B$ の場合にはフーチング幅の5%程度の水平変位を示していることが分かる。

3.3 考察

(1) 極限支持力

フーチングの水平方向の変位を拘束したケースと自由にしたケースについて、極限支持力値(載荷重の最大値)を図-10に比較した。図中、縦軸は極限支持力値、横軸は偏心量をそれぞれ表わしている。中心載荷($e=0$)について見ると、「拘束」の実験値(○印)には「自由」(◇

図-9 水平変位～偏心量 (「自由」)

図-11 支持力減少割合～偏心量

図-10 極限支持力～偏心量

印) に比べて大きなばらつきが見られている。また、支持力値も「拘束」と「自由」で多少異なっていることが分かる。本来、中心載荷の場合には、実験方法によらず同様の結果を示すはずであるが、これまで見てきたように、中心載荷した場合でもフーチングは水平に変位したり水平荷重が発生しており、これらの影響によって支持力値が多少異なったものと思われる。偏心量が大きくなると、支持力はほぼ直線的に減少する傾向がいずれのケースでも見られている。

載荷点での拘束条件による極限支持力の減少傾向をより詳細に検討するため、個々の実験値をそれぞれのケースでの中心載荷時の極限支持力値の平均で除して図-11に示した。図より、フーチングの水平変位を自由にしたケースの方が「拘束」に比べ偏心に対する極限支持力の減少傾向が大きいことが分かる。その差を、偏心量が $0.2B$ の場合について見ると、約10%程度になっていることがわかる。図中には、偏心支持力に関する Meyerhof の低減係数 ($E_r = (1 - 2e/B)^2$)¹⁾ も破線で示している。実験値は、Meyerhof の低減係数を挟む様にプロットされており、実験値と計算値との差は約5%程度と小さい。そのため、実用上は載荷点での拘束条件によらず Meyerhof の低減係数を用いることで大きな問題ないと考えられる。

(2) すべり線

載荷終了後に砂表面に現れたすべり線の位置を図-12に偏心量ごとにプロットした。図中、横軸は、載荷直前の載荷点から砂表面のすべり線までの長さを示している。

まず、「拘束」について見ると、荷重偏心側の地表面に現れたすべり線の位置は、偏心量の増加にともない急速に減少しているが、偏心反対側のすべり線の位置はほとんど変化していない傾向が見られる。一方、「自由」を見ると、偏心量の増加につれて偏心側のすべり線の位置はほとんど変化しないが、偏心反対側のすべり線が小さくなり「拘束」とは逆の傾向を示していることが分かる。これは、「拘束」の場合には、荷重の偏心量が大きくなるほど、フーチングの中心方向の水平力が大きくな

るため偏心側のすべり線の発達が抑制されるとともに、フーチングの回転変位に伴う偏心反対側のすべり線が卓越するためと考えられる。一方、「自由」の場合には偏心量が大きくなるほど偏心側の地盤の破壊が卓越して生じるためと考えられる。

(3) 破壊形態

いくつかの実験ケースについては、载荷終了後に X 線撮影を行ない、地盤内のすべり線の発生状況を観察した。写真-1 には、偏心量が $0.2B$ について、「拘束」と「自由」のすべり線の発生状況を示した。「拘束」の場合(写真-1(a))、载荷によってフーチングは多少回転変位し、偏心側の地盤に多少盛り上がりが見られている。さらに、フーチングの偏心側端部よりすべり線が発生しているが、その大きさは比較的小さいことが見られている。一方、偏心反対側方向には、非常に大きなすべり線がフーチングの偏心反対側端部より発生していることが分かる。

次に、フーチングの水平変位が「自由」の場合(写真-1(b))、偏心側の地盤の盛り上がりやすべり線の大きさは「拘束」に比べて大きいことが分かる。逆に、偏心反対側方向へのすべり線の発生は、偏心側よりさほど大

(a)

(b)

写真-1 地盤内のすべり線
(a)「拘束」、(b)「自由」

きくはなく、「拘束」とは大きく異なることが分かる。このように、フーチングの水平変位の拘束条件によって、地盤中のすべり線の発生状況が大きく変化することが実験的に確かめることができた。

4. 斜面地盤の場合

これまでは、一様な地盤上のフーチングの鉛直載荷試験で荷重条件が左右非対称の場合について、載荷点の拘束条件の影響を検討してきた。ここでは、非対称な地盤条件下として、斜面地盤上の基礎に対して中央に載荷した場合を例にし、載荷点の拘束条件の影響について検討を行なう。

4.1 実験方法

実験では、一様な地盤の場合と同様の方法で作製した砂地盤の一方を、整形機を用いて傾斜角 30° の斜面に整形して斜面地盤を作製した(図-13)。その後、斜面法肩より25 mm (0.5 B) 離れた距離にフーチングを設置し、その中心を鉛直に載荷した。用いた載荷装置は、偏心載荷と同じもので、実験では載荷点での水平変位を拘束した3ケースと自由にした4ケースの合計7ケース行なった。

4.2 実験結果及び考察

(1) 極限支持力

両ケースで得られた、鉛直荷重～沈下曲線の代表例を図-14に示す。「拘束」の場合、載荷初期に急激に荷重が増加する傾向が見られる。載荷が進むにつれて荷重の増加傾向は小さくなり、荷重がほぼ一定値に収束し始めた直後に、急速に荷重が減少していることが分かる。一方、「自由」の場合には、「拘束」に比べ小さい増加割合で荷重が増加する傾向が見られる。ピーク時の載荷重

は、「自由」の方が「拘束」より約15%程度小さく、また残留強度も、約50%程度小さい傾向が見られる。このように斜面地盤の場合には、載荷点での拘束条件によって極限支持力の値も大きく異なることが分かった。

(2) すべり線

載荷終了後に砂表面に現れたすべり線の位置を図-15にプロットした。図中、横軸は、載荷直前の載荷点から砂表面のすべり線までの長さを示している。

「拘束」について見ると、斜面側及び反対側の両方にすべり線が生じている事が分かる。また、斜面反対側の

図-14 鉛直載荷重～沈下曲線(斜面地盤)

図-13 斜面地盤

図-15 すべり線位置(斜面地盤)

(a)

(b)

写真-2 地盤内のすべり線
((a)「拘束」、(b)「自由」)

すべり線の大きさは斜面側のすべり線に対して半分程度であった。一方、「自由」の場合には、斜面側には「拘束」の場合とほぼ同じ大きさのすべり線が生じているが、斜面反対側には見られなかった。このように、載荷点での拘束条件によってすべり線の発生状況が大きく異なることが分かった。

(3) 破壊形態

写真-2は、載荷終了時の地盤の破壊内のすべり線の発生状況を示したものである。「拘束」の場合(写真-2(a))は、フーチング両端から下方に三角形形状のすべり線が生じている。フーチング下部での三角形の剛性域は多少斜面方向に向っているが、その程度は小さい。一方、「自由」の場合(写真-2(b))には、フーチングの斜面側端部より数本のすべり線が発生している状況が見られる。又、フーチング下部に形成されている剛性域は斜面側に大きく流れており、写真撮影した範囲内では、フーチングの両端部より発生したすべり線が一点に収束する傾向は見られなかった。

これまで見てきたように、斜面地盤の場合には、載荷点での水平変位の拘束条件が極限支持力と地盤の破壊形

態の両方に大きな影響を及ぼすことが分かった。

5. 結 論

載荷実験における載荷点の水平変位の拘束条件の影響について、一様な砂地盤上のフーチングの偏心支持力実験及び斜面上の基礎の鉛直載荷実験を行い、その支持力と破壊形態を検討した。一連の検討より、下記の結論が得られた。

(1) 荷重条件が非対称の場合

1) 載荷点の水平変位を自由にした場合には、載荷によってフーチングは鉛直方向に沈下するだけでなく、偏心側の方向にも水平変位する。しかし、拘束した場合には、この水平変位を拘束するためにフーチングの中心方向の水平力が発生する。

2) 偏心量と極限支持力値の低減割合は、フーチングの水平変位を自由にした方が拘束した場合よりも約10%程度小さくなる。しかし、その低減割合は、Meyerhofの低減率と良い一致を示しており、実務上問題になる程の差ではなかった。

3) 地盤中のすべり線の発生状況は、載荷点での拘束

の有無によって大きく変化する。

(2) 地盤条件が非対称の場合

1) 載荷点での水平変位を自由にした場合には、拘束した場合に比べて極限支持力は約15%程度も小さく、また、地盤内のすべり線の発生状況も大きく異なる。

あ と が き

本研究で対象とした実験は比較的簡単なものであるが、載荷点でのわずかな条件の違いが極限支持力や地盤の変形挙動に大きな影響を及ぼすことが分かった。現場での基礎や地盤の破壊挙動を模型実験やFEM解析で予測することが多い。その際、模型と地盤でのわずかな地盤条件、荷重条件、拘束条件の違いによって、両者で大きく異なる結果を引き起こす危険性が高いことを本研究は示している。模型実験、解析でのこれらの条件の設定、単純化、理想化を行なうには十分な注意が必要である。

参 考 文 献

- 1) Meyerhof, G. G. (1953): "The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads." Proc. 3rd ICSMFE, pp. 440-445.
- 2) Eastwood, W. (1955): "The bearing capacity of eccentrically loaded foundations on sandy soils." Structural Engineer, Vol. 29, pp. 181-187.
- 3) Kitazume, M. (1984): "Influence of loading condition on bearing capacity and deformation." Proc. Int. Symp. on Geotechnical Centrifuge Model Testing, pp. 149-151
- 4) 寺師昌明・北詰昌樹・大橋照美・小竹 望 (1984): 偏心傾斜荷重を受ける帯基礎の破壊パターン, 「第19回土質工学研究発表会」, pp. 953~956
- 5) Terashi, M. and Kitazume, M. (1987): "Bearing capacity of a foundation on top of high mound subjected to eccentric and inclined load." 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, pp. 3-24