

繰り返し荷重を受けるマイクロパイル基礎の支持力特性

Bearing Capacity of Micropile Foundation Subjected to Cyclic Load

三浦 均也¹⁾ 坪川 将丈²⁾ 石戸 瑞穂³⁾
塚田 幸広⁴⁾ 大谷 義則⁵⁾ 西村 右敏⁶⁾

マイクロパイル(以下では MP と省略)工法とは、鋼材とモルタルあるいはセメントミルクからなる小口径杭を複数本地盤中に配置することによって、地盤や土構造物、基礎などを補強する工法である¹⁾。

MP 工法は、施工機械の小型化、低振動、低騒音などのメリットによって、斜面や掘削の安定化や構造物基礎の補強に採用される機会が増えていると同時に、最近では既設基礎の耐震補強にも有効な工法とされている。しかし、付着力が十分に期待できる反面、たわみ性の大きい MP の地盤中における力学挙動、MP とフーチングとの相互作用については未解明な部分が多く、合理的な設計手法を確立するためには、これらの解明を急ぐ必要がある。

本報告では、載荷模型実験により明らかになった MP 基礎の地震時挙動、地盤と基礎間の相互作用および支持機構におよぼす影響について報告する。

なお、本報告は第 34 回地盤工学研究発表会にて報告^{2), 3), 4)}した内容を抜粋したものである。

1. マイクロパイル工法の概要

マイクロパイルとは、イタリアでルートパイル、米国でピンパイルと呼ばれている小口径(ϕ 300mm 以下)の現場打ち杭・埋込み杭を総称したもので、ボーリングマシンによって地中に小口径の削孔を行い、異型鉄筋、鋼管などの補強材を挿入し、周囲にグラウトを注入して造成するものである。

我が国には、1979 年にイタリアから導入され、1980 年に展望台のアンダーピニングとしての適用例があり、今日までに切土法面補強、斜面崩壊防止、既設構造物のアンダーピニング等、数多くの施工実績がある⁵⁾。MP 工法は施工機械の小型化、低振動、低騒音などのメリットによって採用される機会が増えていると同時に、最近では既設基礎の耐震補強にも有効な工法とされている。図-1 に MP の適用例を示す⁶⁾。

2. 実験の経緯および内容

上述のように、MP の用途が急速に広まったにもかかわらず、大口径の場所打ち杭やグラウンドアンカーをベースとした経験や研究に基づいて、MP が設計されている状況にある。

著者らは支持力に着目し、模型載荷実験によって鉛直荷重を受けた MP 基礎の研究を進めてきた

きた^{7), 8)}。その結果 MP 基礎の支持力のメカニズムは、フーチングと MP の相互作用が重要であることが分かってきた。

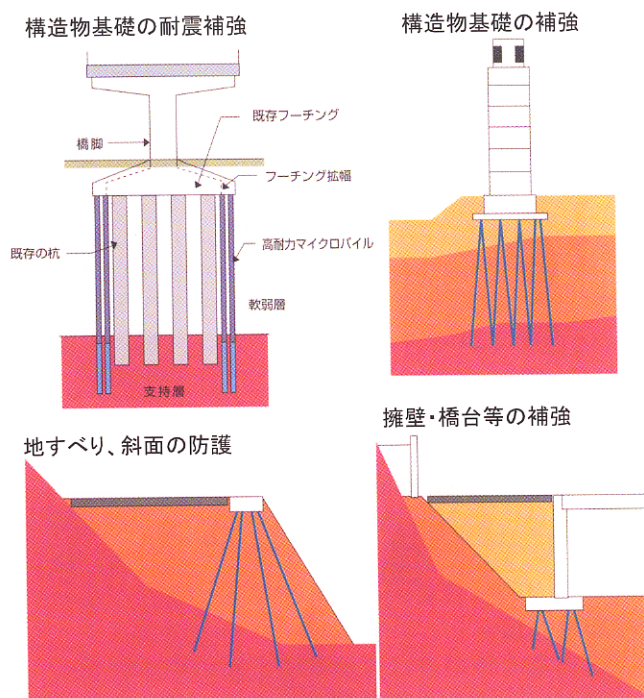


図-1 MP適用例

- 1) アジア工科大学院土木工学研究科 地盤・交通工学専攻 地盤力学解析グループ 助教授 MIURA Kinuya
- 2) 運輸省 港湾技術研究所 土質部 滑走路研究室 研究官 TUBOKAWA Yukitomo
- 3) 北海道大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 地盤解析学分野 修士2年 ISHITO Mizuho
- 4) 建設省 東北地方建設局 酒田工事事務所 所長 TUKADA Yukihiro
- 5) 株式会社 ヒロセ 補強土事業部 OHTANI Yoshinori
- 6) 株式会社 開発工営社 地質部 主任技師 NISHIMURA Migitoshi

本報告では、鉛直および水平荷重が作用した場合の MP 基礎の支持力特性について、以下の点について報告している。

- ① 直接基礎と MP を複合した MP 基礎の傾斜荷重に対する支持力特性に及ぼす影響を MP の設置角度、摩擦特性、曲げ剛性などの要因について検討している。
- ② MP を鉛直に配置し、MP の本数、地盤の密度、荷重の傾斜を変化させて、支持力を増強させる相互作用のメカニズムの検討を行った。
- ③ MP 基礎に対して、鉛直方向、水平方向に繰返し荷重を載荷することによって、地震時を想定した支持力メカニズムの検討を行った。

3. 実験概要

模型実験に用いた載荷試験装置のシステム全体図を図-2 に示す。装置は鉛直と水平方向に計 3 機のダイレクトドライブモータを有しており、偏心および傾斜荷重を制御して加えることが可能な構造となっている。

模型地盤は、図-3 に示す円筒形土槽 ($D = 300\text{mm}$, $H = 200\text{mm}$) に珪砂 ($D_{50} = 0.18\text{mm}$, $U_c = 1.82$, $e_{max} = 1.165$, $e_{min} = 0.688$) を絶乾状態で空中落下させ、さらに土槽を水平打撃することによって密結 ($D_r = 98\%$) の水平地盤を作製している。MP はボーリングにより削孔した後、鋼材を挿入し、充填材を圧入するのを原則としている。したがって、本実験では過度な地盤の乱れや応力集中を防ぐために、MP を貫入させるのではなく、図-3 に示すように MP を空中に支持した状態で水平砂地盤を作成した。

模型 MP 基礎(写真-1)は、MP の材質や寸法、基礎への配置(本数と設置角度)をパラメトリックに変化させている。基礎はステンレス製で、直径は $B = 40\text{mm}$ である。

基礎の載荷速度は、 1.0mm/min に統一した。

4. MP 基礎の支持力特性

ここでは、傾斜荷重を受ける MP 基礎の支持力特性に対する、MP の設置角度、摩擦特性、曲げ剛性などの影響要因について検討する。

4-1 実験方法

載荷荷重の作用点は直接基礎底面の中心とし、鉛直荷重に対する水平荷重の比 k を 0.0 から 0.9 まで傾斜角度を変化させて、4 パターンの載荷を行った。

模型 MP 基礎は、MP の設置角度 θ を鉛直方向

表-1 模型 MP の諸元

	材質	周面粗さ	直径D(mm)	表面積比	曲げ剛性EI(N・m ²)
R-Type	鋼製	Rough	2.0	1.11	1.18E-01
S-Type	鋼製	Smooth	1.8	1.00	1.18E-01
pR-Type	プラスチック製	Rough	2.2	1.22	2.45E-03

から計って 0° から 60° までの 5 タイプを用いた。

また、MP の周面摩擦特性と曲げ剛性の影響を調べるために、諸元(表-1)の異なる 3 種類の MP を用いた。曲げ剛性は曲げ試験 (2 点支持、中央載荷) により求めた。

R-Type と S-Type は鋼材、pR-Type はプラスチック製である。R-Type と pR-Type は MP と地盤間に十分な摩擦を確保するために、スプレーのりを塗布した後、地盤材料と同じ珪砂を貼り付けている(図-4)。

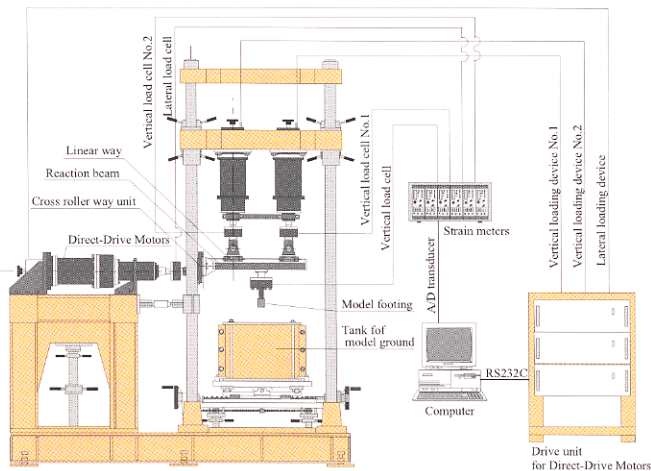


図-2 載荷試験装置システム図

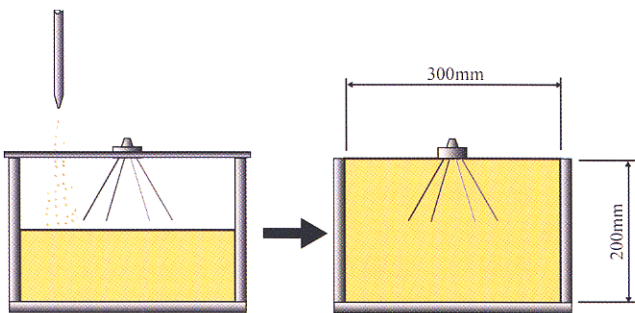


図-3 模型砂地盤の作製

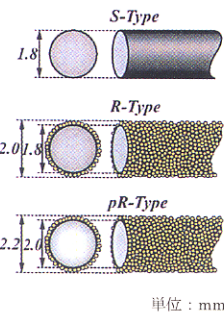


図-4 模型MPの形

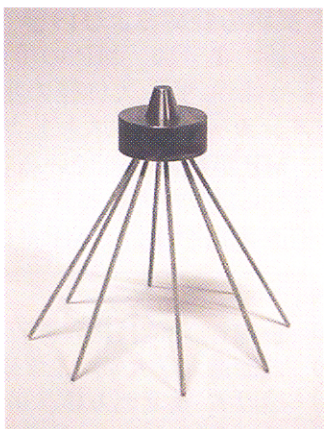


写真-1 MP模型基礎 ($\theta = 30^\circ$)

4-2 直接基礎と MP 単独での支持力特性

図-5 は、直接基礎(基礎単独)の支持力度—沈下量関係を示している。荷重の傾斜が大きくなるに従い支持力度は低下している傾向にある。また、荷重の傾斜が大きくなるとピーク値が見られなくなり、地盤表面にも明瞭なすべり線は観測されなかった。

図-5 は、杭の埋め込み長さ L_s を変化させた場合の、MP のみの支持力を示している。MP 単独の支持力も直接基礎と同様に、荷重の傾斜が大きくなるに従い低下している傾向にある。

ここには図示していないが、鉛直荷重を受ける場合の支持力は、ほぼ MP の本数 n に比例する傾向を示すので、この実験条件では群杭効果は大きくないと考えられる。また MP の先端支持力よりも周面摩擦力が支配的であることがわっている⁸⁾。

4-3 MP 基礎の支持力特性

図-6 に、MP(R-Type)を用いた MP 基礎の鉛直支持力度を、MP の設置角度 θ をパラメータとして示す。荷重の傾斜角に関わらず、載荷初期においては $\theta=30^\circ$ がもっとも大きな支持力を発揮するが、載荷後半においては $\theta=15^\circ$ が最も大きな支持力を発揮する傾向が認められる。また荷重の傾斜が大きくなるにつれて、支持力度が MP の設置角度によらず低下していることがわかる。

図-7 は、正規化沈下量(沈下量 S / 基礎直径 B) の値が 5% の時点で計算した、載荷初期における MP 基礎の水平剛性を MP の設置角度 θ をパラメータとして示したものである。鉛直支持力度においては θ が 0° から 30° 程度の範囲で大きな値を、水平剛性においては θ を 45° と斜杭に配置した場合に大きな剛性が得られている。この傾向は、荷重の傾斜に関わらずに観察された。

図-8 には、3 種類の MP を用いて作成した MP 基礎の鉛直支持力を MP の設置角度 θ をパラメータとして示している。鉛直荷重を載荷した場合 ($k=0.0$) には、MP の周面摩擦の影響は θ が小さいほど大きいようであり、MP の曲げ剛性の影響は θ が 30° の付近で顕著に見られる。しかし、傾斜荷重を載荷した場合 ($k=0.3$) には、MP の周面摩擦による支持力差はほとんど見られなくなっており、MP の曲げ剛性の影響は θ が小さいほど大きいようである。

図-9 は、 $k=0.3$ とした場合の MP 基礎の水平剛性を比較したものである。図から明らかなように、傾斜荷重を載荷した場合では水平剛性における MP の摩擦特性の影響はほとんど見られていない。また曲げ剛性が小さい MP では、 θ が小さくなるに連れて水平剛性は低下し、MP を鉛直に配置した場合では、水平方向にはほとんど剛性を期待で

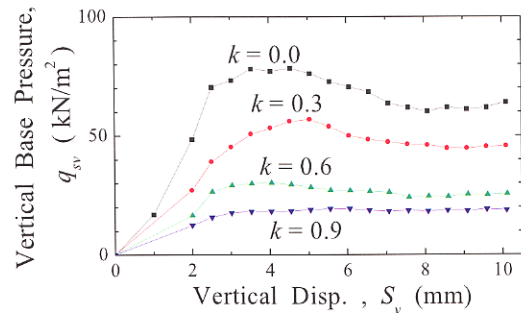


図-5 直接基礎の支持力度—沈下量関係

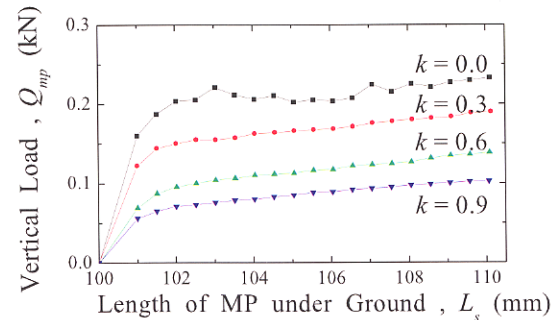


図-6 MP の荷重—埋め込み長さ関係

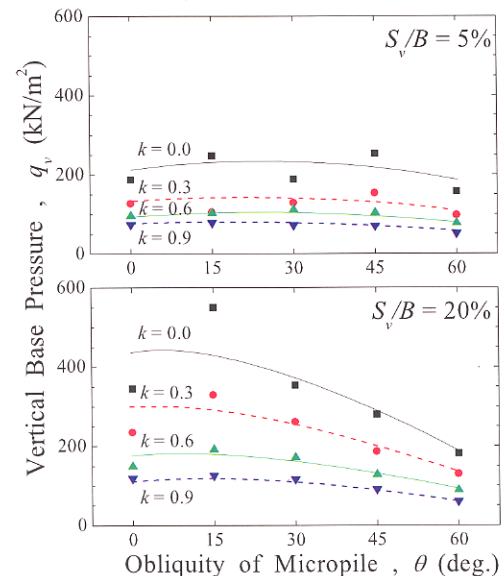


図-7 MP 基礎支持力の MP 設置角度依存性 (傾斜荷重)

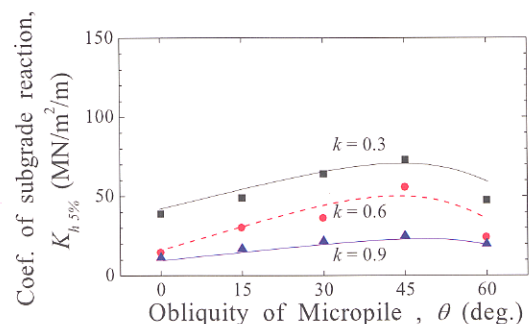


図-8 MP 基礎水平剛性の MP 設置角度依存性 (傾斜荷重)

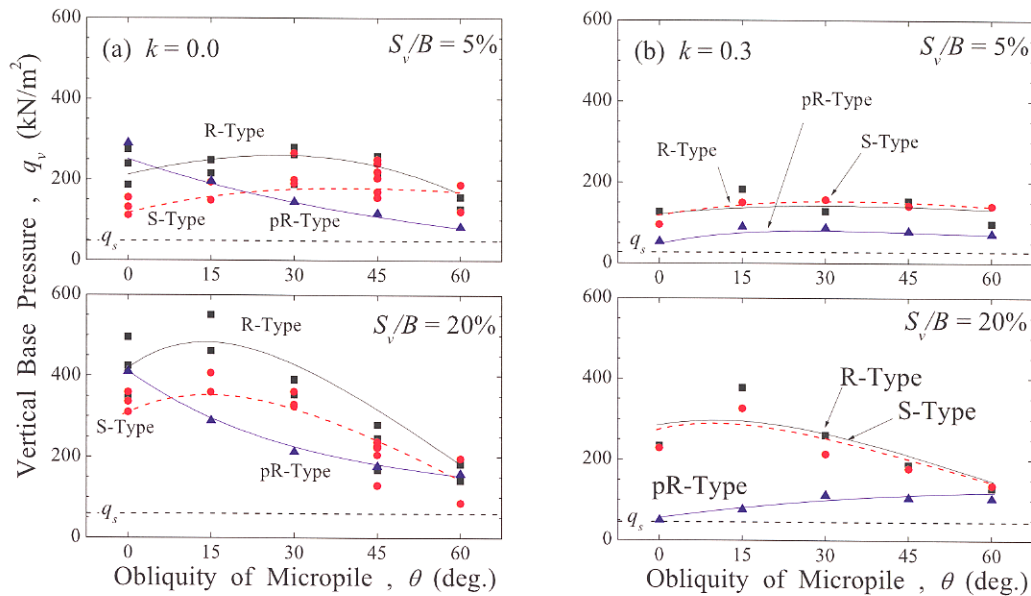


図-9 MP基礎支持力のMP設置角度依存性(材質の異なるMP)

きないことがわかる。

5. MP とフーチングの相互作用

MP を鉛直に配置し、MP の本数、地盤の密度、荷重の傾斜を変化させて、支持力を増強させる相互作用のメカニズムの検討を行った。

5-1 実験方法

模型砂地盤の密度は3種類 ($D_r=98, 65, 50\%$) を用意した。MP 基礎は、MP の設置角度を $\theta=0^\circ$ とし、本数 n を0から8本までの5種類を用いた。

荷重条件は、鉛直荷重に対する水平荷重の比 k を0.0から0.9まで傾斜角度を変化させて、4パターンの載荷を行った。

5-2 鉛直荷重に対する相互作用⁹⁾

図-10 は、3種類の相対密度を有する模型砂地盤に、MP を有していない模型フーチングを配置して鉛直荷重を載荷した場合の支持力度—沈下量曲線である。支持力特性は地盤密度に大きく依存しており、密詰地盤の場合のみ全般せん断型の破壊形態を示した。

図-11 には、模型砂地盤の密度と MP の埋め込み長さ L_s を変化させて、フーチングの影響を排除した MP (設置角度 $\theta=0^\circ$) のみに載荷を行った場合の実験結果を示す。本実験において MP の支持力 Q_{mp} は L_s の二乗に比例し、先端支持力よりも周面摩擦力が支配的であることを示している。また図は省略するが、複数の MP 間には極端な群杭効果は見受けられず、支持力は MP の本数に比例して増加していることが確認されている。

図-12 は、密詰地盤における MP 基礎 (設置角度 $\theta=0^\circ$) の支持力度 q を MP の本数 n に対してプロットしたものである。また比較のために、フ

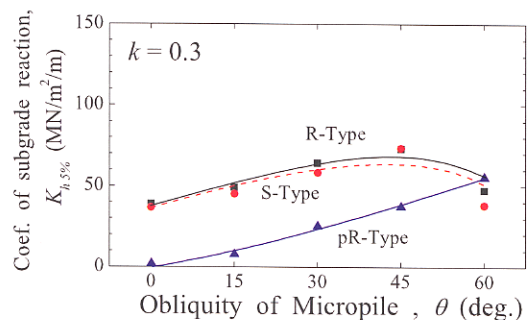


図-10 MP基礎水平剛性のMP設置角度依存性(材質の異なるMP)

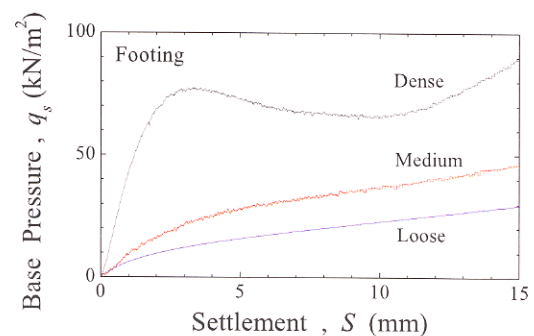


図-11 直接基礎の支持力度—沈下量関係

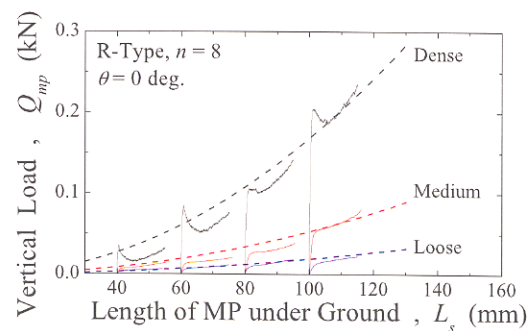


図-12 MPの荷重—埋め込み長さ関係

ーチングのみ ($n=0$) の支持力度 q_s を水平な破線で示し、その値 q_s と MP のみの支持力 Q_{mp} を基礎底面の面積 ($A_s = \pi B^2/4$) で正規化した値とを加算した値 ($q_s + Q_{mp}/A_s$) を q の推定値とした。载荷初期 (正規化沈下量 $S/B=5\%$) においては支持力度の測定値 q と推定値 ($q_s + Q_{mp}/A_s$) との間には顕著な差は認められないが、载荷が進行し ($S/B=20\%$) MP の本数が十分に配置されていると測定値が推定値を大幅に上回っており、測定値は最大で推定値の 2 倍の支持力を発揮している。

このようなフーチングと MP との相互作用による支持力の増大は、図-13 のように説明することができる。MP 基礎が鉛直荷重を受ける場合、フーチングと MP とで荷重を分担して支持することになる。その際フーチングの沈下に伴って、フーチング直下の地盤はダイレイタンスに起因する体積膨張を伴いながら、側方に変位して地盤が破壊しようとする。しかし MP がある程度の密度で配置されていると、地盤の側方への移動が妨げられ、フーチング直下の地盤の拘束圧が増大する。

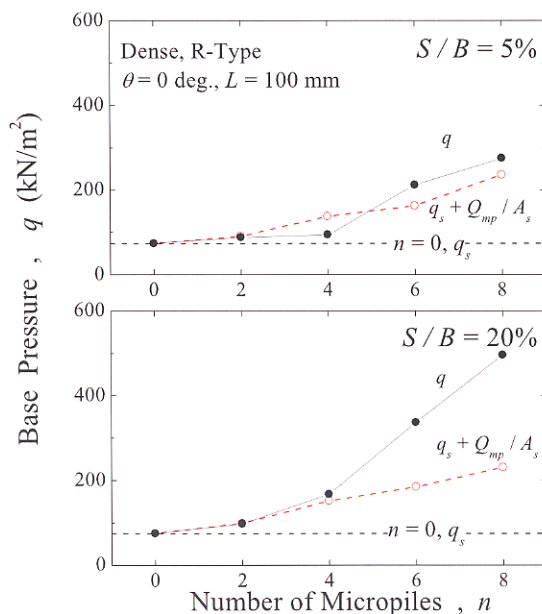


図-13 MP本数に対する相互作用の依存性

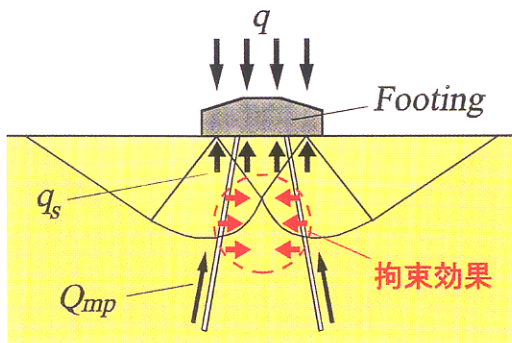


図-14 フーチングとMPの相互作用

拘束圧の増大は、フーチング底面の地盤反力を増大させると同時に、MP の周面摩擦力も増大させる結果となる。従って、全体として支持力は改善されることになる。

図-14 は、地盤密度を 3 種類に変化させて、フーチングと MP の支持力実験からの推定値 ($q_s + Q_{mp}/A_s$) と MP 基礎による支持力実験による測定値 q との比率を R ($= q / (q_s + Q_{mp}/A_s)$) として、 $\theta=0^\circ$ の場合について示している。この比が 1 より大きいことは相互作用がプラスに作用し、基礎が良好に補強されたことを意味している。図示のように、地盤が密詰の場合には補強効果が認められ、特に基礎の沈下が進行すると支持力は 2 倍以上にも改善されている。その反面、中密詰あるいは緩詰の場合には比率 R は 1 を下回り、相互作用は発揮されないという結果になっている。これは、地盤が正のダイレイタンス特性を示さないために、フーチング直下の圧力が上昇しないためと考えられ、実際問題においては注意を要する点である。

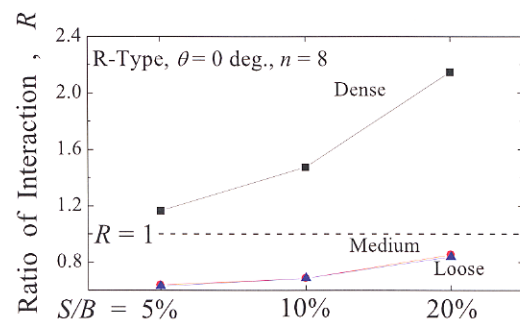


図-15 相互作用の地盤密度依存性

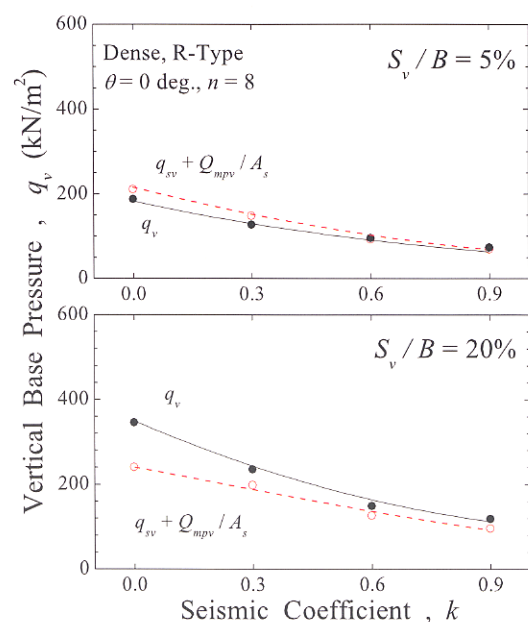


図-16 傾斜荷重に対する相互作用の依存性

5-3 傾斜荷重に対する相互作用

密詰地盤において基礎、MP、MP 基礎のそれぞれに傾斜荷重を載荷して、相互作用効果を検討した。図-15 では、推定値 $q_{sv} + Q_{mpv}/A_s$ と測定値 q_v との比較を行っている。鉛直荷重のみを載荷した場合と同様に、載荷が進行すると測定値と推定値との間に差が認められるが、その程度は荷重の傾斜が大きくなるに連れて減少している。

図-16 ではフーチング、MP、MP 基礎の鉛直・水平方向剛性を示している。剛性は正規化沈下量 S/B の値が 5%の時点の荷重-沈下量比をとっている。鉛直剛性に着目すると、MP の剛性はフーチングの剛性の 3 倍程度を示しており、両者を複合した MP 基礎の鉛直剛性は、それらの和で発揮されていることが分かる。

水平剛性に関しては鉛直の場合とは逆に、フーチングの剛性が MP の剛性を大きく上回っている。また MP 基礎の水平剛性は、それらの和より小さい値であり、MP による補強効果が見られない。

この理由は図-17 のように説明することができる。フーチングの水平剛性は、主に底面の摩擦力に依存していると考えられる。底面摩擦力は鉛直荷重に依存しているために、フーチング底面と地盤がしっかりと密着し、底面反力がある程度得られていないと発揮されない。一方、MP の水平剛性は、主に MP の曲げによるものであると考えられ、鉛直荷重には依存していない。

このことから、MP 基礎の水平剛性のメカニズムは図-18 のように説明できる。すなわち、図-18(a)のように MP 基礎が受ける鉛直荷重の分担が MP の方に大きく偏っていると、フーチングの底面反力は減少するために水平剛性が減少するのである。MP 基礎全体の水平剛性を高めるために、図-18(b)のように初期状態におけるフーチングの底面反力を大きくし、フーチング底面の摩擦力を増大させることが、設計上有利である。

6. 繰返し荷重を受ける MP 基礎の支持力特性

MP 基礎に対して、鉛直方向、水平方向に繰返し荷重を載荷することによって、地震時を想定した支持力メカニズムの検討を行った。

6-1 実験方法

MP の設置角度 θ を 0° から 60° まで 5 段階に変化させて実験を行った。模型砂地盤の密度は密詰 ($D_r=98\%$) としている。

鉛直繰返し荷重の載荷は図-19 に示すように、沈下量 S を基礎の直径 B ($=40\text{mm}$) で正規化した正規化沈下量 S/B の値が 2.5%, 5%, 10% ($S=1, 2, 4\text{mm}$) に達した時点で除荷を行い、荷重がゼロの時点から再載荷を行ったものである。水平繰返し荷重の載荷は図-20 に示すように、 S/B の値

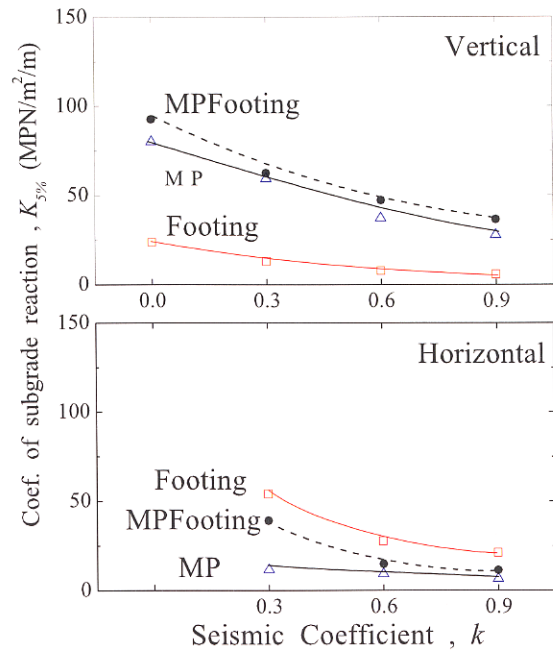


図-17 フーチング,MP,MP基礎の鉛直および水平剛性

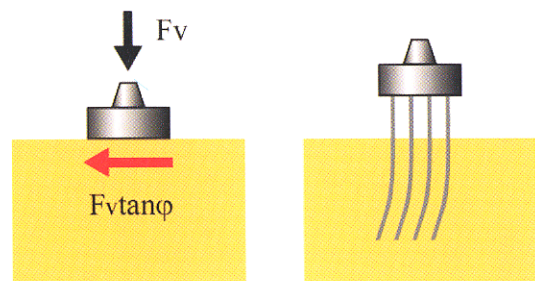


図-18 フーチング,MPの水平剛性メカニズム

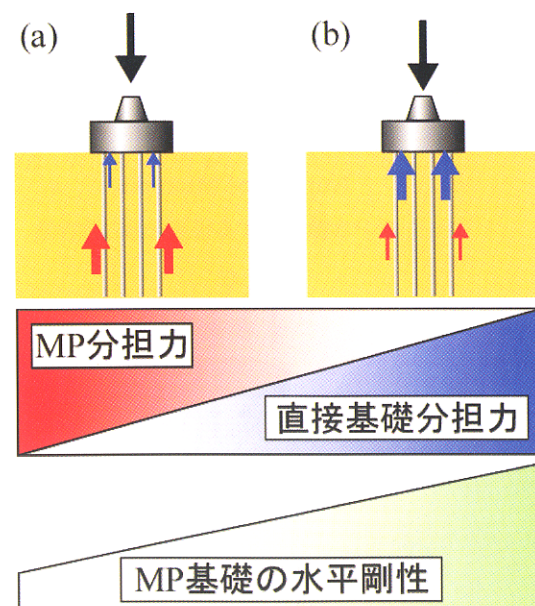


図-19 MP基礎の水平剛性のメカニズム

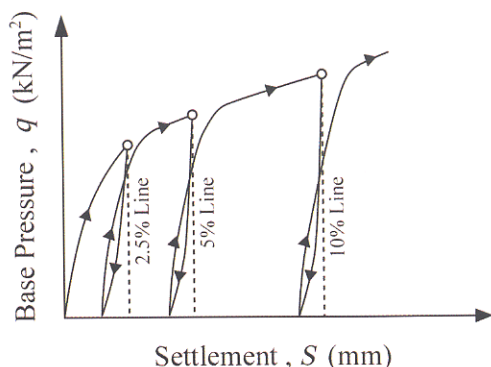


図-20 繰り返し鉛直荷重載荷方法

が 2.5% ($S=1\text{mm}$) に達した時点で、その時の鉛直荷重を一定に保つように沈下量を調整しながら、繰返し水平荷重を載荷した。その際に、鉛直荷重と水平荷重の比である水平震度 k の値が 0.2 から 0.2 の間を往復するように載荷している。

6-2 鉛直繰返し荷重における支持力特性

図-21 に鉛直繰返し荷重を受けた MP 基礎の支持力度—沈下量関係を示す。MP 設置角度 θ が小さい場合では、除荷直後に荷重がゼロとなり、再載荷を行うと急激な支持力度の増加が認められる。一方、 θ が大きな場合では、除荷を行っても直後には荷重がゼロにならず、載荷ロッドをかなり引き上げるまで荷重が残存している。また再載荷を行うと、ある程度沈下が進むまでは比較的低い剛性で支持力度が上昇し、沈下量が除荷を行った時点で回復する手前で、それまでよりも一段高い剛性で支持力度が上昇していくのがわかる。(図-21 の破線を参照)

MP の摩擦特性や曲げ剛性を変化させた場合の実験結果⁹⁾から、 θ が小さい MP 基礎では、MP の周面摩擦力が支持力の主な成分であると考えられるために、除荷を行うと摩擦力が瞬時に解放され、再載荷すると摩擦力がすぐに発揮されるために急激な支持力度の増加が見られるものと考えられる。

一方、 θ が大きい MP 基礎では、MP の曲げによる支持力が大きな成分になっていると考えられるために、除荷を行っても MP の曲げ量が解消されるまでは荷重が抜け切らない現象が現れる。再載荷を行うと、ある程度の沈下量までは MP が再び曲げられることによって剛性が発揮される。さらに沈下が進むと MP 周辺の地盤に局所破壊が生じ、MP の曲げ量がそれ以上大きくならずに、MP が地盤に押し付けられるようにして沈下が進む。載荷の進行に伴い、直接基礎と地盤との密着が高まることによって、それまでよりも一段高い剛性が発揮されるものと思われる。

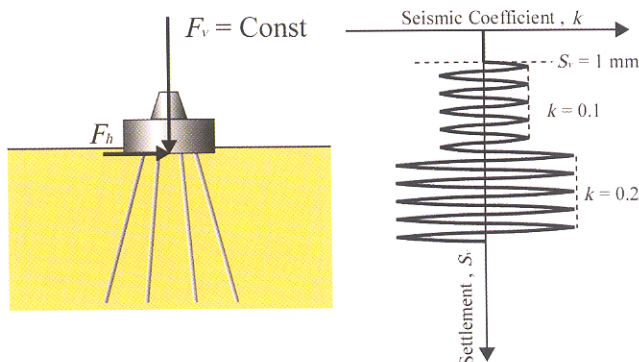


図-21 繰返し水平荷重載荷方法

6-3 水平繰返し荷重における支持力特性

図-22 に水平繰返し荷重を受けた MP 基礎の鉛直変位—水平変位関係を示す。 θ の小さい MP 基礎では、鉛直変位、水平変位ともに大きな変位が生じているが、 θ が大きくなるに連れて基礎の変位が小さくなっている。前述の 4 および 5 節でも示されているように、 θ の小さい MP 基礎では、鉛直荷重に対しては大きな支持力を発揮することができるが、水平荷重に対しては剛性が非常に小さく、 θ の大きい MP 基礎の方が、強い水平剛性が期待できるという結果とも合致している。

7. まとめ

種々の条件下で MP 基礎の載荷模型実験を行った。その結果、MP 基礎の支持力特性をまとめると以下のようである。

1. 荷重の傾斜角度に関わらず、傾斜荷重が作用する MP 基礎の鉛直支持力度は、設置角度 θ を小さく ($0 \sim 30^\circ$) するのが有利であった。しかし、水平剛性に関しては、 θ を 45° に配置した場合に最も大きな剛性が得られる。
2. MP がある程度の密な間隔で配置されると、地盤の側方への移動が妨げられ、フーチング直下の地盤の拘束圧が増大する。これに伴い、フーチング底面の地盤反力が増大し、同時に MP の周面摩擦力も増大することになり、MP 基礎全体としての支持力は改善される。
3. 鉛直および鉛直繰返し荷重を受ける MP 基礎は、設置角度 θ が小さい範囲では周面摩擦力が主な成分である。 θ が大きくなると、杭体の曲げによる支持力が大きな成分となる。このため、斜めに MP を配置した場合の基礎の挙動は、MP の曲げ剛性に依存する。
4. 水平および水平繰返し荷重を受ける MP 基礎は、 θ が大きくなるに従い、基礎の変位が鉛直、水平ともに小さくなる。高い水平剛性を期待するには、 θ を大きく設置する方が良い。

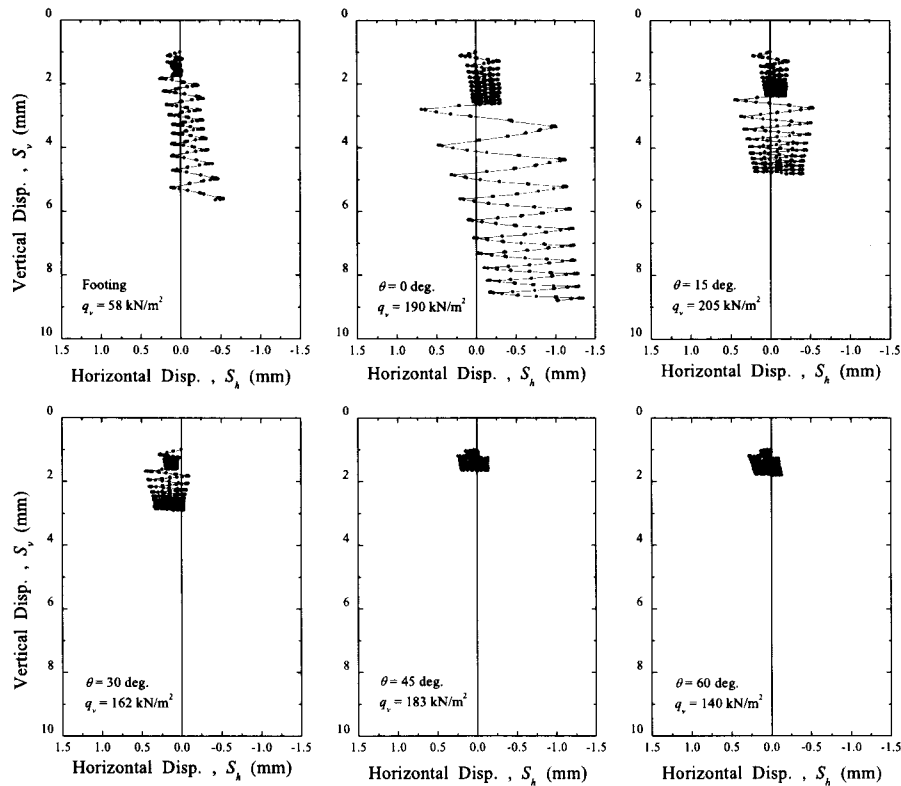


図-22 鉛直繰返し荷重を受けるMP基礎の支持力度一沈下量関係

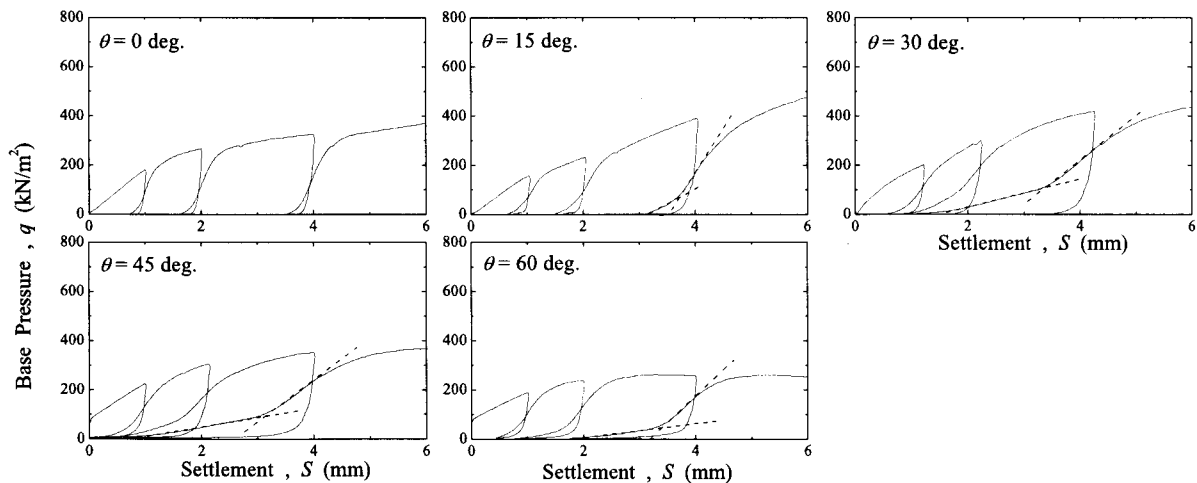


図-23 水平繰返し荷重を受けるMP基礎の鉛直変位一水平変位関係

参考文献

- 1) Donald A. Bruce and Ilan Juran : Drilled and Grouted Micropiles , State-of-Practice Review , Volume 1 , 1997.
- 2) 坪川将丈, 塚田幸広, 三浦均也, 石戸瑞穂, 西村右敏, 大谷義則 : 砂地盤上で傾斜荷重を受けるマイクロパイル基礎の模型実験, 第34回地盤工学研究発表会, pp.1493-1494, 1999.
- 3) 三浦均也, 塚田幸広, 坪川将丈, 石戸瑞穂, 西村右敏, 大谷義則 : マイクロパイル基礎におけるフーチングとマイクロパイルの相互作用, 第34回地盤工学研究発表会, pp.1495-1496, 1999.
- 4) 塚田幸広, 坪川将丈, 三浦均也, 石戸瑞穂, 西村右敏, 大谷義則 : 砂地盤上で傾斜荷重を受けるマイクロパイル基礎の模型実験, 第34回地盤工学研究発表会, 1999.
- 5) 大谷 義則, 妻鹿 誠, 浜塚 政治 : マイクロパイルの施工事例, 基礎工 Vol.26, No.11, pp.56-61, 1998.
- 6) 高耐力マイクロパイル研究会 : 高耐力マイクロパイル工法.
- 7) 塚田幸広, 三浦均也, 坪川将丈 : 砂地盤上のマイクロパイル基礎の鉛直荷重支持力の模型載荷実験, 第33回地盤工学研究発表会, pp.1601-1602, 1998.
- 8) 塚田幸広, 三浦均也, 坪川将丈, 西村右敏 : 砂地盤上のマイクロパイル基礎の模型実験, 「土と基礎」 Vol.47, No.1, pp.35-38, 1999.
- 9) 坪川将丈 : マイクロパイルで補強された直接基礎の支持力特性に関する実験的研究, 北海道大学大学院工学研究科修士論文, 1999.