

水～土連成極限つり合い計算を用いた補強材を有する地盤の安定解析

岐阜工業高等専門学校 国際会員 水野 和憲

岐阜工業高等専門学校 学生会員 石井 俊樹

1 はじめに

鉄筋やジオテキスタイルなどの補強材だけでなく、べた基礎や摩擦杭などの基礎構造物が設置された地盤も、地盤の側からみれば補強土になる¹⁾。本論文では、これらの基礎構造物も一種の補強材とみなし（例えば、摩擦杭は地盤の鉛直方向に挿入された補強材）、各種基礎構造物が設置された地盤の安定計算を行った。つまり、基礎構造物の形式の違いは、補強材の設置形態の違いと捉え、安定計算から得られる極限支持力の値、あるいは破壊時における地盤内の応力分布などによって、各基礎形式における補強効果の検証を行った。

また、本論文では、地盤を基礎構造物に外力を与えるものとして問題を解くのではなく、基礎が設置された地盤の挙動を解くことに着目して計算を行った。基礎構造物と地盤の両者を同時に解く場合に有効な手段として、本論文では以下の方法を用いる。すなわち、「基礎の役割を第一近似として、地盤の変形を拘束する役割を果たすことに着目し、土の変形場に「距離不変」、「角度不変」などの各種制約条件を導入して基礎の役割を表現」することである²⁾。このため、土骨格に関する力のつり合い式を解くと同時に基礎に発生する束縛力（部材力）を求めることができる。地盤の変形場における各種制約条件の設定によって、杭の本数や長さ、杭同士の設置間隔などの変更が可能となる。そこで本論文では、摩擦杭に発生する軸力分布やすべり破壊の位置にも着目し、最適な補強効果が得られるような基礎構造物の設置についても検討した。

2 補強材の設置形態における補強効果の検証

間隙が水で飽和した水平地盤上に、急速に局所載荷した場合を想定し、補強材の設置形態と補強効果の関係を明らかにするために、水～土連成極限つり合い計算^{3),4)}を用いて、1) 極限支持力の上昇、2) 破壊時地盤内平均応力分布図、3) 破壊時塑性流れ、4) 基礎に発生する部材力などから補強効果を判定する。

2.1 計算条件

(1) 地盤の初期条件

本論文では、水～土骨格連成問題としてカムクレイの降伏関数を用いた非排水載荷問題を取り上げる。計算に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を図-1に示す。左右対称性を考慮した半断面地盤を用意し、計算は二次元平面ひずみ条件で行う。

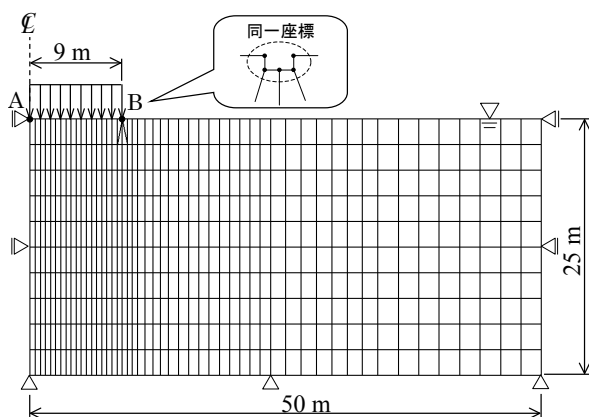


図-1 有限要素メッシュと境界条件

表-1 材料パラメータ

| | |
|---|-------|
| 圧縮指数 $\tilde{\lambda}$ | 0.108 |
| 膨潤指数 \tilde{r} | 0.025 |
| 限界状態定数 M | 1.55 |
| 側圧係数 K_0 | 1.0 |
| 地盤内初期平均有効応力 p'_0 [kN/m ²] | 75.0 |

地盤は単一の軟弱な飽和粘性土地盤を想定した。地盤内は均質ミーゼス材料とた。なお、簡単のため、地盤は等方材料であると仮定し地盤の側圧係数 K_0 を 1.0 とした。計算に使用した材料パラメータを表-1 に示す。

(2) 計算に用いた基礎形式および基礎のモデル化⁵⁾

等分布の上載荷重は図-1 中の AB の部分 (幅 9m) に載荷するものとする。なお、荷重載荷端部 (図-1 中の B 点) には、特異点処理⁶⁾ を施した。計算に用いた補強材の設置形態 (基礎形式) を図-2 に示す。①は、補強材を設置せずに荷重のみで地盤を壊すもの (以後、「基礎なし」と呼ぶ)、②は、いわゆる「べた基礎」と呼ばれるもので、水平方向の補強材で地表面に設置されたもの (以後、「べた基礎」と呼ぶ)、③は、長さ 10m の補強材を鉛直方向に挿入させたもの、(以後、「摩擦杭」と呼ぶ)、④は、②と③の補強材がお互い剛結されたもので、これは近年、注目されている「パイルド・ラフト基礎」と呼ばれるものである。実際には、何本かの摩擦杭がラフト基礎に剛結されているが、ここでは、ラフト基礎に 1 本だけ剛結された杭としての補強効果を調べる。(以後、「パイルド・ラフト基礎」と呼ぶ)。

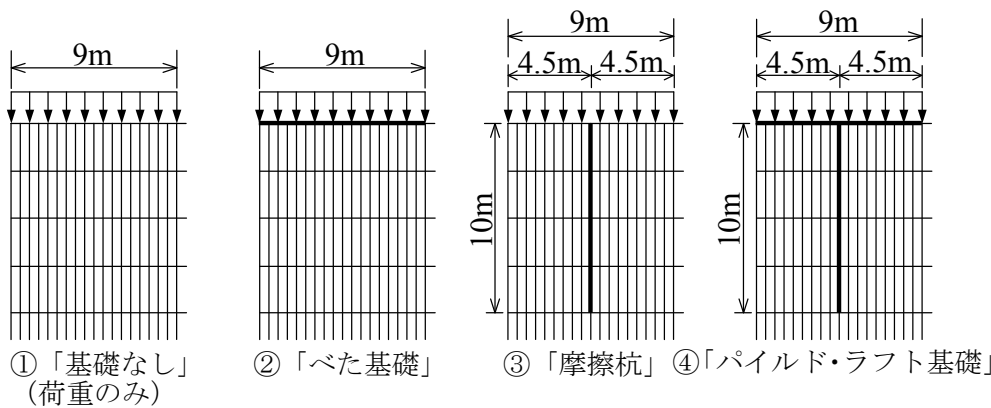


図-2 計算に用いた基礎形式 (半断面)

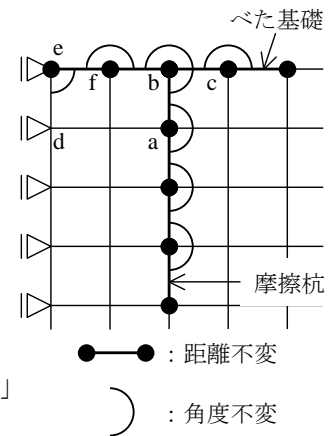


図-3 基礎のモデル化

また③「摩擦杭」は④「パイルド・ラフト基礎」との比較のため、杭間に制約を設けない単純な条件を仮定した。これは、本論文の主旨がパイルド・ラフト基礎の補強効果を明らかにする点にあるためで、摩擦杭のみの場合の杭頭条件は、必ずしも現実とは一致していない。べた基礎や摩擦杭などの基礎は地盤に比べて剛性が高く、ほとんど変形しないと考えられる。また、地盤と基礎の間には相対変位は生じないものとする。このため、基礎は地盤の変形を拘束して一体化して動くように働き、拘束する反力 (束縛力) として基礎には部材力が発生する。本論文では「基礎はそれに沿う土線素の距離および土線素間の角度を不変とする」という制約条件を土骨格の変形場に課すことによりモデル化する。すなわち、図-3 に示すようにべた基礎や摩擦杭は、その設置位置における有限要素節点 2 点間の距離が変わらない条件 (距離不変条件) と 3 点間の角度が変わらない条件 (角度不変条件) によって、土骨格の変形を拘束するものとして表す。図中黒丸間は、距離不変条件、半円は角度不変条件を示している。パイルド・ラフト基礎の杭とべた基礎の結合部分は図-3 中の $\angle abc$ の部分に示すように「角度不変条件」を用いて剛結合を表した。

条件によっては地盤と基礎の間ですべりが発生する場合もあるが、本論文では基礎に特殊な要素を入れることなく、土骨格の変形に制約条件を課すことで基礎の役割を簡単に表現することを優先して、このような基礎のモデル化を行った。このため、土骨格に関する力のつり合い式を解くと同時に基礎に発生する束縛力 (部材力) を求めることができる。「距離不変条件」および「角度不変条件」の Lagrange 未定乗数を用いて、束縛力としてそれぞれ軸力および曲げモーメントが計算される。

2.2 解析結果

(1) 各基礎形式における極限支持力の比較

各基礎形式について、極限つり合い計算を解いて得られた極限支持力 q_f の値を表-2 に示す。なお、表-2中の c_u は非排水せん断強度を表しており、本論文では、地盤内で均質である。一般に、地盤は深さ方向に、土被り圧に応じた強度の不均質性を有する。しかし、本論文では、基礎形式の違いによる改良効果の検証を優先して、地盤内の強度は均質に分布しているとして計算した。

本論文で与えた計算条件の下では、地盤内の土を全く拘束しない①「基礎なし(荷重のみ)」の極限支持力に対して、②「べた基礎」で3%、③「摩擦杭」で4%、④「パイルド・ラフト基礎」では11%増加しており、基礎設置による補強効果が見られている。地盤内の強度は均質なので、「基礎なし」に対する他の基礎形式における極限支持力の増加は、基礎が土を拘束している量、すなわち、制約条件の数に比例している。

表-2 各基礎形式の極限支持力の比較

| 基礎形式 | 極限支持力 q_f ($\times c_u$) [kN/m ²] |
|---------------|---|
| ①「基礎なし(荷重のみ)」 | 5.165 |
| ②「べた基礎」 | 5.307 |
| ③「摩擦杭」 | 5.361 |
| ④「パイルド・ラフト基礎」 | 5.738 |

次に、破壊時地盤内平均応力分布および破壊時塑性流れ(速度場)を、各基礎形式について、それぞれ図-4、図-5 に示す。

図-4 では、色が濃いほど、外力に対応する平均(全)応力が大きく発生している部分である。つまり、土を拘束する補強効果が大きく現れていることを示す。

②「べた基礎」のような剛で基礎底面が粗い補強材を地表面に設置しても、地盤浅部の土を拘束するだけで、顕著な補強効果は見られない。また、鉛直方向の土に沿う補強材として、③「摩擦杭」を設置した場合には、杭に沿う土を拘束しているものの、地表面付近の杭間地盤や杭先端付近の地盤深部において大きな平均応力の発生が見られる。これは、上載荷重を地表面付近の杭間地盤だけでなく、杭先端付近の地盤深部にも伝達していることを示している。

一方、④「パイルド・ラフト基礎」では、他の基礎形式よりも杭間の土において大きな平均応力の発生が見られる。水平・鉛直の各方向の補強材が剛結して始めて大きな補強効果を現し、基礎と基礎近傍の地盤が一体となることで、極限支持力の上昇に大きく寄与していると考えられる。

図-5 の①「基礎なし」と③「摩擦杭」を比較すると、鉛直方向の補強材が地盤内に存在することで、崩壊機構が円弧すべり破壊から荷重載荷端部での局所破壊へと変化する。一方、④「パイルド・ラフト基礎」では②「べた基礎」の補強効果、つまり水平方向の土の拘束があるため、「摩擦杭」のような局所破壊は見られない。また、地盤深部まで土を拘束するため、より大きな円弧すべり破壊となり、極限支持力を上昇させる補強効果が見られる。

(2) 基礎に発生する部材力

基礎に発生する部材力について、図-6 に③「摩擦杭」と④「パイルド・ラフト基礎」の杭に発生する軸力分布(圧縮力:正)および曲げモーメント分布を示す。どちらの部材力についても「パイルド・ラフト基礎」の杭の方が、杭頭へ近づくほど大きく発生している。荷重の載荷によって載荷部分の端部では、地盤が側方へ流れようとする。④「パイルド・ラフト基礎」のラフト基礎と摩擦杭は剛結されているので、ラフト基礎と摩擦杭が一体となって地盤の変形を束縛し、その反力として摩擦杭とラフト基礎に大きな力が作用していると考えられる。しかし、③「摩擦杭」では、水平方向への補強材が存在しないこと、また、上述したように、土の塑性流れは荷重載荷

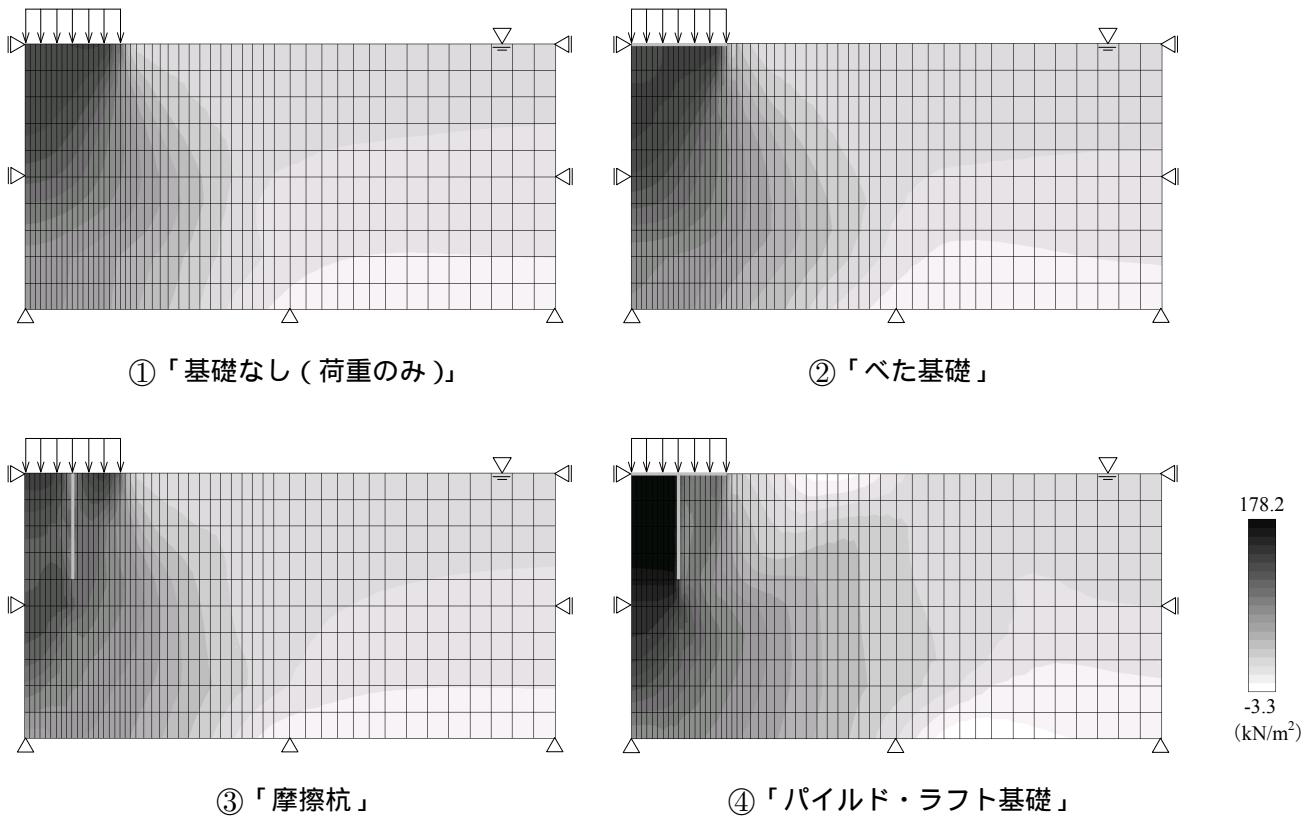


図-4 破壊時平均応力分布図

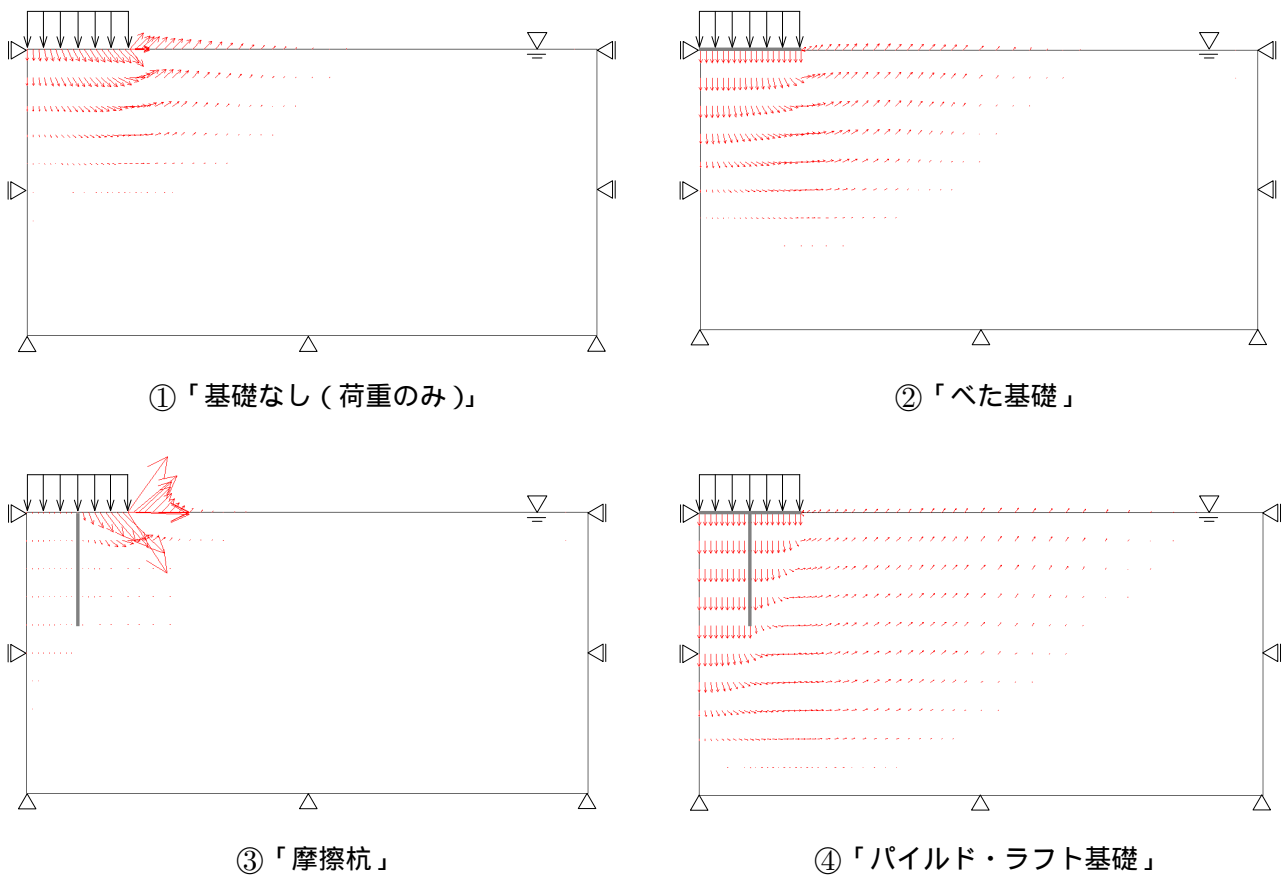


図-5 破壊時塑性流れ (速度場)

端部でのみ発生することから(図-5中の③「摩擦杭」), 上載荷重を地盤深部へ伝達するため軸力は発生するものの, 曲げモーメントはほとんど発生しない.

これらのことから, 地盤の塑性流れを束縛するように補強材に配置することによって, 大きな補強効果が期待できることが明らかとなった.

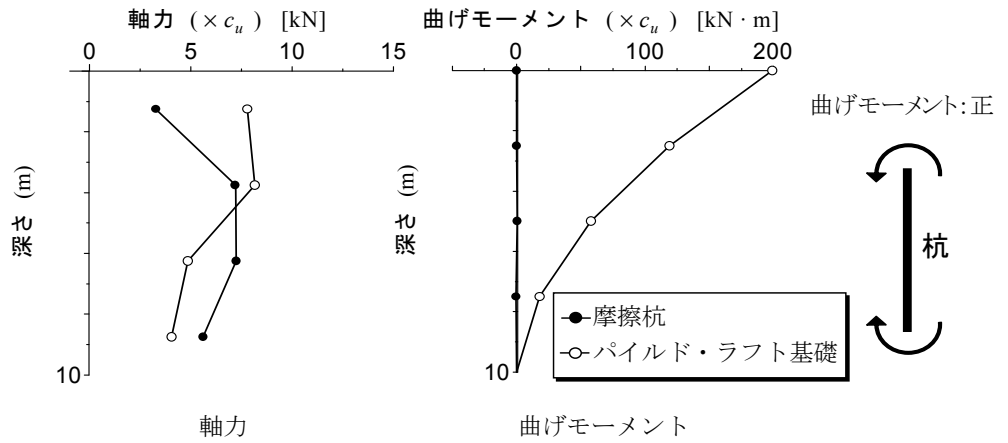


図-6 杭に発生する部材力の分布図

3 ラフト基礎に剛結された摩擦杭の設置位置の違いが補強効果に及ぼす影響

前章において, パイルド・ラフト基礎のようなラフト基礎に摩擦杭が剛結された基礎構造物では, ラフト基礎のみあるいは摩擦杭のみの基礎構造物よりも補強効果の大きいことが明らかとなった. 本章では, このような基礎構造物において, 摩擦杭が剛結されている位置によって, 極限支持力や杭に発生する部材力にどのような影響を及ぼすのかを調べる.

3.1 計算条件

計算に用いる地盤の有限要素メッシュ, 境界条件および地盤の初期状態については, 前章と同じものを用いる. ここでは, 摩擦杭の設置位置を以下の図-7に示す4つのパターンを設定した. なお, パターン2は再掲とした.

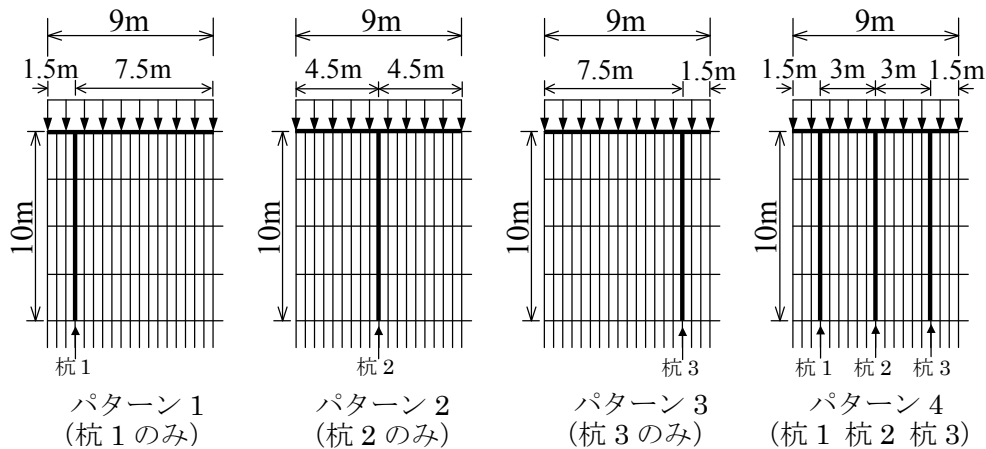


図-7 摩擦杭の設置位置の異なる基礎形式(半断面)

3.2 解析結果

各基礎形式について, 極限支持力 q_f の値を表-3に示す. 摩擦杭の剛結される位置が荷重載荷端部へ近づくほど, 極限支持力は増加している. また, パターン3とパターン4の極限支持力の値が全く同じになった.

表-3 各基礎形式の極限支持力の比較

| 基礎形式 | 極限支持力 q_f ($\times c_u$) [kN/m^2] |
|-------|--|
| パターン1 | 5.449 |
| パターン2 | 5.738 |
| パターン3 | 6.937 |
| パターン4 | 6.937 |

次に、パターン1～パターン3における部材力を図-8に示し、パターン4における部材力を図-9に示す。

図-8中のパターン3の杭（荷重載荷端部に近い杭3）の部材力と図-9中の杭3の部材力がほとんど等しい結果が得られた。しかも、図-9中の杭1と杭2については、ほとんど部材力が発生しておらず、補強効果にほとんど寄与していない。

以上のことから、本論文で与えた計算条件の下では、粘性土地盤においてラフト基礎に摩擦杭が剛結された基礎構造物を設置する場合には、荷重載荷端部に摩擦杭を設置することが、最も補強効果が得られ、しかも、破壊時（極限状態時）には、大きな部材力が発生していることが明らかとなった。

4 おわりに

一般に、粘性土地盤上での基礎構造物による接地圧分布は荷重載荷端部ほど大きくなる。不同沈下などにも注意しつつ、そこには重点的に摩擦杭などを設置することで、合理的かつ経済的な設計が可能になると思われる。

今後は、地盤内の不均質性や異方性を考慮し、砂のような拘束圧に依存してせん断強度が大きくなるような材料での安定計算も行いたい。

参考文献

- 1) 浅岡顕, 高稲敏浩, 野津光夫: 各種構造物の実例にみる地盤改良工法の選定と設計, 5. 地盤改良と土質力学(その2), (社)地盤工学会, Vol.47, No.2, Feb. No.493, pp.49-54, 1999.
- 2) 浅岡顕, 高稲敏浩: 各種構造物の実例にみる地盤改良工法の選定と設計, 5. 地盤改良と土質力学(その1), (社)地盤工学会, Vol.47, No.1, Jan. No.492, pp.45-50, 1999.
- 3) 浅岡顕: 支持力と有効応力, 土と基礎, Vol.36, No.6, pp.43-49, 1988.
- 4) Asaoka, A., Ohtsuka, S. and Matsuo, M.: Coupling analysis of limiting equilibrium state for normally consolidated and lightly overconsolidated soils, Soils and Foundations, Vol.30, No.3, pp.10-123, 1990.
- 5) 山田英司, 高稲敏浩, 水野和憲, 大野雅幸, 野田利弘: パイルド・ラフト基礎が設置された地盤の水～土連成弾塑性変形解析, 土木学会論文集, No.659, III-52, pp.113-128, 2000.
- 6) 沖見芳秀・右近八郎・吉清孝: 剛塑性有限要素法による支持力解析におけるモデル化について, 第44回土木学会年次学術講演会講演概要集, III, pp.96-967, 1989.

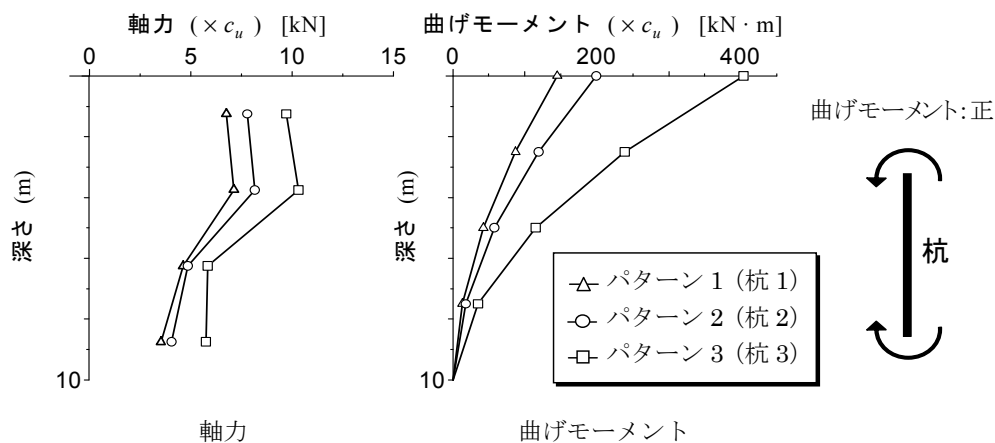


図-8 杭に発生する部材力の分布図（パターン1～パターン3）

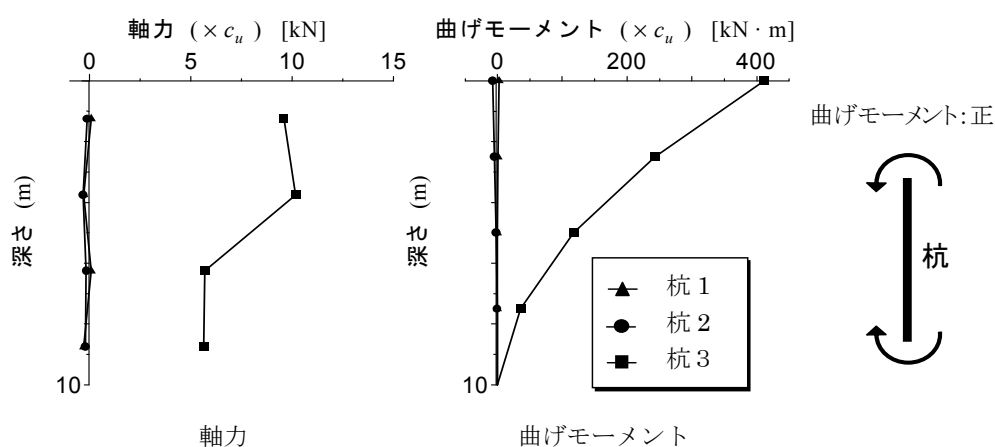


図-9 杭に発生する部材力の分布図（パターン4のみ）