

杭基礎の鉛直荷重～変位特性の評価法入門

6. 杭基礎の施工に伴う杭体および周辺地盤の応力変化

大谷 順 (おおたに じゅん)
熊本大学大学院自然科学研究科

菊池 喜昭 (きくち よしあき)
運輸省港湾技術研究所基礎工研究室

6.1 はじめに

杭基礎は、杭体と地盤との相互作用によってその挙動が支配されることは言うまでもない。また一般にその設計は、杭施工後の杭頭荷重を対象として検討される。しかし、その支えとなる地盤について考えて見ると、杭基礎は種々の方法で種々の地盤内に施工されるため、上部荷重が載荷される前に地盤や杭体に応力や変形が生じる。これにより、地盤は施工前の物性から大きく変化する場合や、施工する地盤によっては地盤が杭体に過大な応力を発生させる場合がある。たとえば、杭の施工方法について考えてみると、鋼管杭やコンクリート既製杭のように、打込みにより地盤を乱しながら施工するものもあれば、場所打ち杭のように、杭体の施工に先立って地盤内に孔を掘って施工する方法もある。図—6.1¹⁾は、X線CT スキャナーを用いて、まさ土で作成した模型地盤内に、杭体を貫入させた時の杭先端地盤付近の密度変化を非破壊検査し、その結果を三次元画像として示したものである。図中の黒色は低密度、白色は高密度を示し、初期および貫入量の異なる2ステップでの結果を示している。これらより、貫入と共に杭先端地盤の密度が増加することが一目瞭然であり、またその領域が貫入量と共に拡大していることがわかる。

一方、未圧密地盤内に杭を施工すると、周辺の地盤特性が施工により変化することに加えて、周辺地盤の沈下に伴い杭体を下向きに引き込み、その結果として杭体内

に残留軸力が発生する場合がある。これがいわゆるネガティブフリクション問題である。

本章では、地盤の物性変化が杭基礎に与える影響を明らかにするという立場の基に、杭と周辺地盤の相互作用が杭基礎に与える影響について、特に

- (1) 杭基礎の施工に伴う地盤条件の変化、および
- (2) ネガティブフリクション

を対象として、その基本的な考え方と実測例について紹介する。またこれらを基に、杭基礎施工時における地盤物性変化の把握が、その設計や施工において大変重要であることについて言及するものである。

6.2 杭基礎の分類と地盤条件

杭基礎の分類方法は、その支持機構や杭種等によっていくつか存在するが、ここでは地盤の物性変化について議論を進めるために、その施工方法による分類を対象とする。これは、以下に示す二つに大別される。

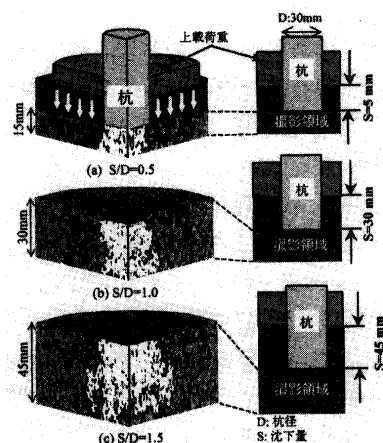
- (1) 排土杭 (Displacement pile) : 打込み杭がこれに当たり、静的または動的な杭の打込みが地盤に主として半径方向に圧縮応力を与えることにより地盤を強制的に変位させる杭。
- (2) 非排土杭 (Non-displacement pile) : 場所打ち杭や埋込み杭が対象となり、あらかじめ地盤内に孔を掘ることになり、地盤内応力を緩和し掘削問題と同様に杭周辺地盤を緩くする杭。

図—6.2²⁾は、排土杭と非排土杭の施工に伴う地盤内応力変化の比較を図示したものである。ここでは、打込み杭と場所打ち杭を対象として、それぞれ杭施工前と施工後の地盤内応力の変化について、特に有効土被り圧、土圧係数および間隙水圧の変化に着目して説明されている。これらより杭の施工による基本的な物性変化として以下のことが言える。

- 1) 施工前において、場所打ち杭では掘削のために土圧係数が静止土圧係数よりも小さくなっている。
- 2) 打込み杭は、地盤に杭を打込むために、間隙水圧が上昇する。

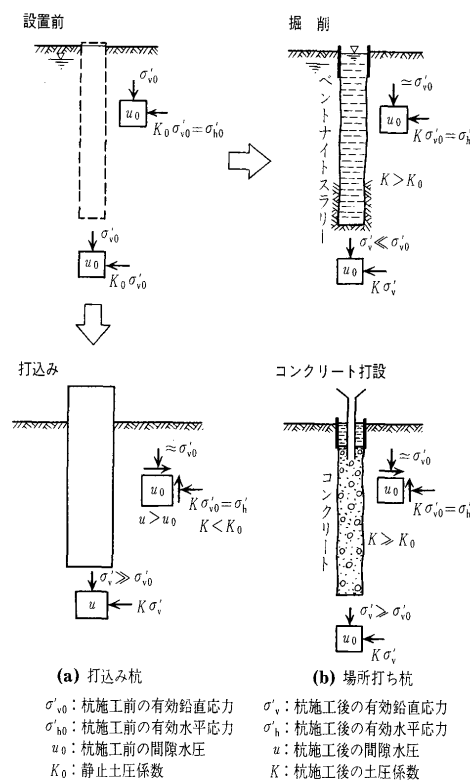
また土の種類によっては、これらの変化が設計における地盤定数の決定にも大きく影響すると考えられ、実務においても十分把握しておく必要がある。

一方、対象となる地盤条件を土質力学的に大別すれば以下ようになる。



図—6.1 杭の貫入による先端地盤の密度変化
(三次元 CT 画像)¹⁾

講座

図—6.2 杭の施工に伴う地盤内応力変化²⁾

(1) 粘性土

- 正規圧密粘土（軟弱粘土）
- 過圧密粘土（硬質粘土）

(2) 砂質土（シルトを含む）

- 緩い砂
- 密な砂

ここでは、上記杭基礎分類について、それぞれの地盤条件下において杭の施工条件が地盤に与える影響について単杭と群杭に分けて議論を進める。また、ネガティブフリクションについては、基本的に排土杭を対象としている。

6.3 単杭基礎地盤の初期条件

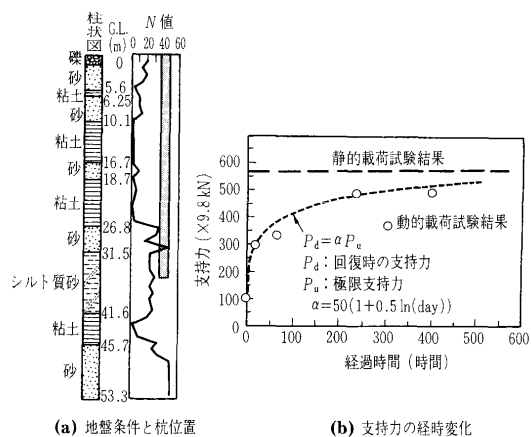
ここで対象とする初期条件とは、杭に荷重が載荷される前の地盤条件であり、杭の施工による地盤物性変化を加味した地盤条件を意味している。以下、これについて排土杭と非排土杭に分けて議論を進める。

6.3.1 排土杭

排土杭は、その施工中に地盤に対して主に半径方向に圧縮応力を与えるので、結果として杭周辺地盤は圧縮変形を起こす。よって粘性土では過剰間隙水圧を伴う圧密挙動が、また砂質土ではせん断に伴う体積変化であるダイレイタンスー挙動が、杭の施工による地盤物性変化の主要因となる。以下、それぞれについて説明する。

(1) 粘性土

正規圧密粘土地盤に杭を打設すると、その初期には攪拌により粘土構造を壊し、杭周辺地盤の剛性および非排水強度は減少する。しかし、時間が経過すると共に過剰間隙水圧が消散し、有効応力が増加することにより剛性や強度が回復する。この現象は一般に“セットアップ”

図—6.3 粘性土地盤を対象としたセッアップの計測例³⁾

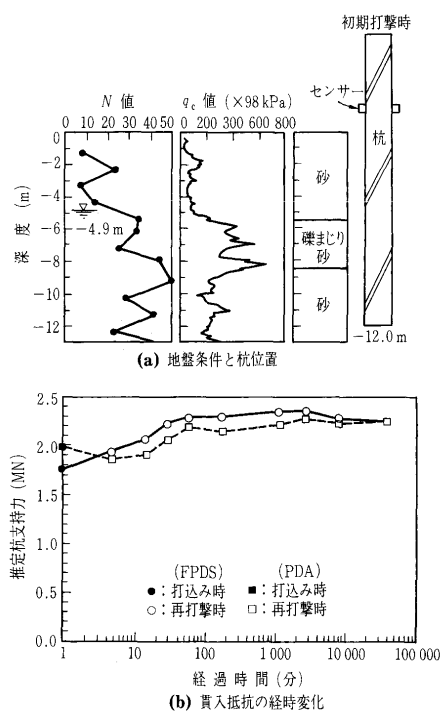
と呼ばれる。“セットアップ”は、動的載荷試験より得られる支持力の回復度としてしばしば議論されるが、これはその影響が顕著であるためである。一般に用いられる“セットアップ率”という用語は、この初期に対する変化の割合で定義されている。

一方、過圧密粘土地盤を対象とした場合は、この現象が常に地盤の剛性や強度を高めるとは限らず、負の圧密現象（膨潤現象）により剛性が低下する可能性もあり、対象となる地盤物性の把握が不可欠となる。

図—6.3³⁾は、粘性土地盤に対して実施された鉛直の動的載荷試験結果と静的載荷試験結果の例である。実施された地盤条件を図—6.3(a)に示す。杭は鋼管杭で杭径609.5 mm、長さが35 mである。動的載荷試験では、“セットアップ”の影響を調べるために、打止め時の計測とその後計4回の再打撃計測を行っている。図—6.3(b)は、結果としての経過時間と支持力増加の関係を示している。図中の○は再打撃計測時の値を示しているが、時間の経過と共に支持力が増加していることがわかる。支持力は約240時間（10日間）でピークに達しており、このときのセットアップ率は約5であり、一般に粘性土で言われている4~5と同程度となっている。

(2) 砂質土

一般に緩い砂に杭基礎を打込むと、地盤に変位が生じ圧縮されることにより密度が上昇し、その剛性および強度が大きくなる場合が多い。しかし、相対密度がかなり大きい密な砂の場合は打設による攪乱の効果が大きく逆の結果となる場合もある。図—6.4⁴⁾は、砂質地盤について、杭の動的載荷試験および再打撃試験を実施した事例である。図—6.4(a)は地盤条件と杭位置を示し、図—6.4(b)は杭貫入抵抗力の経時変化をプロットしたものである。ここでは、計測システムとして、オランダのオランダ応用科学技術研究所建築施工部門（TNO）で開発されたFPDS（Foundation Pile Diagnostic System）と、Goble（ゴープル）らによって開発されたPDA（Pile Driving Analyzer）が用いられている。図中には、この2種類の計測システムを用いた結果がそれぞれプロットされている。これを見ると、砂質地盤にお



図—6.4 砂質地盤を対象としたセットアップの計測例⁴⁾

いても粘性土のような強度回復は起こるが、その回復はおよそ60分程度ではほぼ終了している。またいわゆるセットアップ率は1.1~1.3程度でかなり小さいことがわかる。

このほか、特に南九州や沖縄地方に堆積しているしらすやさんご礫混じり砂、またオーストラリアに広く堆積する Calcareous (カルカリアス) 砂のようないわゆる破碎性地盤では、杭を打設することにより粒子破碎を生じ、その剛性や支持力が一般の砂と大きく異なることが少なくない。この支持力特性の把握については多くの実験結果が公表されているが⁵⁾、これらの地盤におけるセットアップの定量的評価については現在も研究が継続中である。今後、このデータの蓄積が大きく期待される。

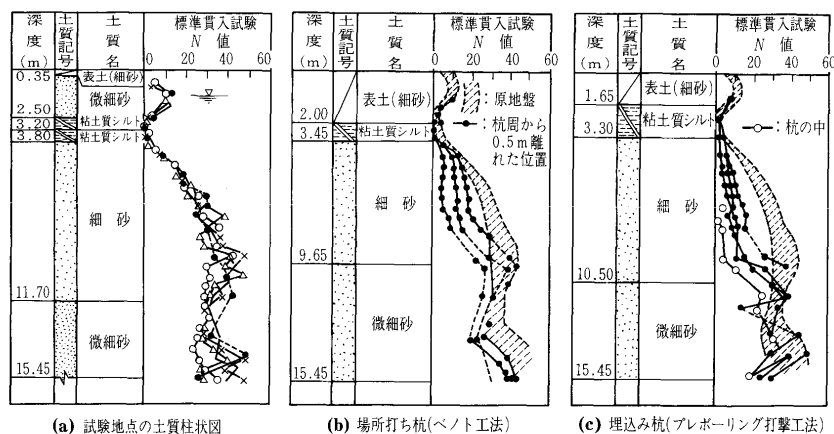
6.3.2 非排土杭

一般に、非排土杭は、地盤内に孔を掘って、そこに杭を埋め込んだり、または、その孔の中で、コンクリートを打設する杭(場所打ち杭)などが対象となる。この場合は、掘削されることにより地盤内応力が緩和されるため、杭周面と地盤との密着性が重要となり、施工管理がその荷重~沈下特性に大きく影響すると言える。

(1) 粘性土

一般に粘性土地盤に場所打ち杭や埋込み杭を施工すると、周辺地盤の応力緩和が起こることにより杭と地盤間の粘着力は減少する。この原因としては以下のことが考えられる。

- 1) スラリー状のコンクリートからの水が粘土地盤に浸透
- 2) 粘土中の間隙水がボアホール周辺の緩み領域に浸透
- 3) 地盤を掘削する際に用いる水が地盤内に浸透



図—6.5 埋込み杭および場所打ち杭の施工による地盤の乱れ⁶⁾

これらは施工管理方法によっては改善可能なものもあり、施工時には十分注意を必要とする。

(2) 砂質土

図—6.5⁶⁾は、場所打ち杭および埋込み杭を対象として、杭の施工前後で、杭の外周から0.5m離れたところで測定したN値の深度分布の変化を示す。これらの図より施工中の掘削の影響により地盤を緩め、N値がかなり低下していることがわかる。またその程度は場所打ち杭と埋込み杭で異なっている。この原因としては、一般に埋込み杭は既製杭を孔に挿入していくので杭と地盤との一体化が難しく、特に杭周面領域の地盤の剛性や強度が低下すると考えられるが、場所打ち杭の場合は、コンクリート表面の凹凸と地盤との密着度が高いと考えられ、埋込み杭ほどの低下はしないことが考えられる。

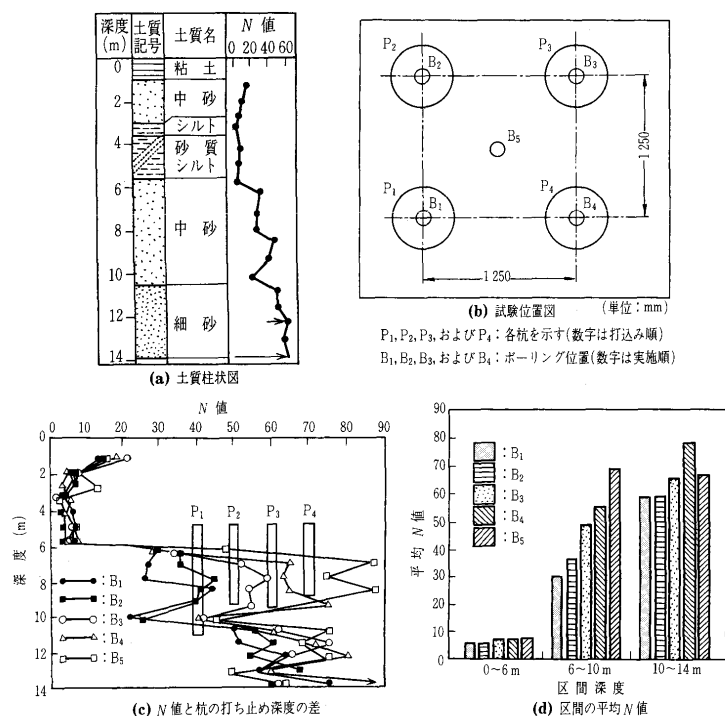
以上より、杭基礎の設計・施工および解析においては、施工条件による地盤特性変化とその結果としての杭-地盤間相互作用を十分把握しておくことが不可欠である。

6.4 群杭基礎地盤の初期条件

打込み杭などの排土杭を施工しようとする、杭施工に伴いその杭の周辺地盤が側方に押し出される状況が発生する。図—6.6⁷⁾は図—6.6(a)に示すような地盤に図—6.6(b)で示す4本群杭を打込んだ時の打設前のN値に対して打設後のN値分布を深さ方向について測定した結果である。杭は、杭径500mmの先端閉塞杭を杭間隔1.25mで正方形配置し、根入れ深度10mで施工されている。ここでは、杭を打つ毎に測定した周辺地盤のN値は施工が進むにつれて増加し、正方形配置の中心点でのN値が当初の2倍程度まで増加することが報告されている。同様の測定がPhilcox (フィルコックス)⁸⁾によっても実施されており、その増加割合は周辺よりも先端のほうが大きいことが結論されている。以上のようなことは、群杭の施工順序やその管理方法において大変重要である。

また、杭を密に打設する群杭を用いた場合には、先行して打設された杭によって周辺地盤が締め固まったり、盛り上がったたりして、先行して打設した杭が側方に移動したりするといったトラブルがしばしば起こる。これら

講座

図—6.6 群杭における打込み施工による N 値の変化⁷⁾

については以下のような例が報告されている⁹⁾。

- (1) 杭打設による地盤の変形
- (2) 杭打設による既設杭の浮上がり
- (3) 杭打設による近接構造物の変状

一方、このような現象を有効に利用した例として、群杭打設による埋立て地盤の液化化対策効果について検討されている例¹⁰⁾もあり、興味深い。

6.5 杭周辺地盤の沈下が杭に及ぼす影響

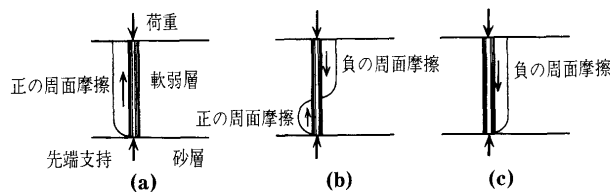
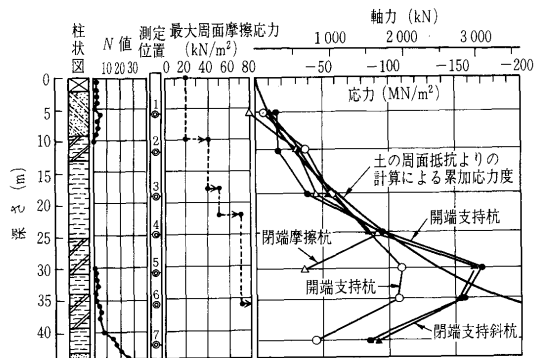
一般的には、杭の鉛直方向の支持力は、杭周面での摩擦力と先端での支持力によって発揮されるが、周辺地盤の変形などによって必ずしも教科書的に支持力が発揮されるとは限らないケースがある。その一つが、周辺地盤の沈下によるネガティブフリクションである。

ネガティブフリクションは、地盤が杭に対して相対的に沈下する場合などに、周辺摩擦力が杭を押し込むようにして働くときに起こる。周辺地盤の相対的な沈下の主な原因は、未圧密地盤での圧密の進行、上載荷重の載荷による圧密、地下水の汲み上げによる沈下などである。

通常の杭周面摩擦応力と同様に、ネガティブフリクションは杭と地盤の間の周面摩擦応力によるものであり、その最大値は杭の支持力を考える時の周面摩擦応力の最大値とほぼ同じになると考えて良い。杭に働く周面摩擦応力の最大値は、杭周面での摩擦応力か周辺地盤内の地盤のせん断強さによって決まる。杭周面で発揮される摩擦応力 τ_s は、次式で示すように杭周面に作用する杭面に対する垂直応力の関数になっていると考えることができる。

$$\tau_s = \sigma_v' K \tan \delta \quad (1)$$

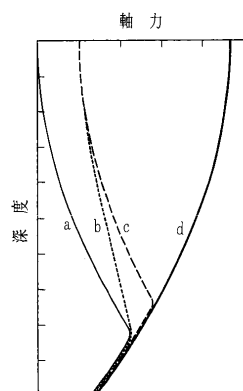
ここに、 σ_v' は有効土被り圧、 K は土圧係数、 δ は杭周面の摩擦係数である。日本の沖積粘土では、このよう

図—6.7 軸力分布の変化¹⁵⁾図—6.8 各杭の最終軸力分布図¹⁵⁾

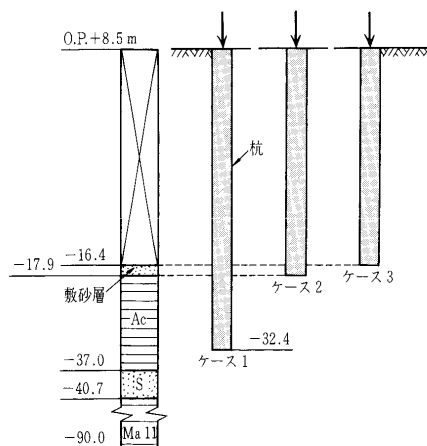
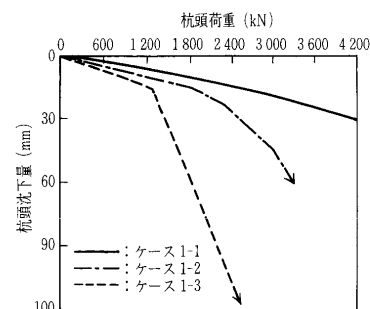
にして決まる τ_s と非排水せん断強さ s_u がほぼ同じ程度の値となるため、一般にせん断強さ s_u 程度の摩擦応力が発揮されると考えて良い¹¹⁾。海外の調査事例を見ても、圧縮性の高い地盤であれば、 $K \tan \delta$ の範囲は比較的狭く、およそ 0.15~0.35 の範囲にある¹²⁾。また、砂質土に杭を打ち込んだ場合でも、 $K \tan \delta$ としては、0.33 程度を考えれば十分である¹²⁾。

図—6.7 に周辺地盤の沈下の進行に伴う杭軸力分布の変化のイメージを示す。この場合、杭先端がしっかりとした支持層に打ち込まれていると周辺地盤が沈下するのに対し杭が沈下しないため、杭に支えられた構造物が相対的に浮き上がるなどの問題を引き起こすことがある。すなわち、時間の経過とともに、図—6.7 の (a) から (c) へと周面摩擦力の効き方が変化する。一方、上載荷重を主に周面摩擦力で支えるような摩擦杭では、ネガティブフリクションが作用するような状況では杭先端が沈下するため、杭と地盤の相対沈下が少なくなり、その結果大きなネガティブフリクションが働きにくくなる。しかし、この場合には、杭は地盤とともに沈下することに注意が必要である。したがって、この種の杭では状況によっては大きな沈下を示す場合がある。ただし、摩擦杭の沈下挙動については不明点が多く、いくつかのアプローチが試みられているものの現段階でも十分な沈下予測ができないのが実状である¹⁴⁾。

ネガティブフリクションと正の摩擦力は地盤と杭との相対変位によって生じるものであるので、上層地盤が圧密されるような支持杭では、上部では地盤が杭に対して下方に変位するためネガティブフリクションが生じるが、杭の下方では杭の方が相対的に下方に変位するようなことも起きるようになり、ネガティブフリクションの作用しない部分や正の摩擦力が作用する部分が出てくるため、杭に作用する軸力の極大値が杭の途中で現われるようになる。このような点を中立点と呼ぶ。



図—6.9 軸力の深度分布

図—6.10 杭長を変化させた検討ケース¹⁹⁾図—6.11 荷重と杭頭沈下量¹⁹⁾

図—6.8は杭を支持層まで根入れさせた場合と中間層までしか根入れをしていない摩擦杭とについてネガティブフリクションの発生の違いによる軸力発生の程度の違いを示したものである¹⁵⁾。軸力が最大になっている深さが中立点の深さであり、これより浅い部分でネガティブフリクションが作用していることを意味している。根入れの深い支持杭の場合には、 -30 m 付近までネガティブフリクションが作用しているが、摩擦杭ではそれより浅い -25 m 付近までしかネガティブフリクションが作用しておらず、それ以深では正の摩擦力が作用していることがわかる。

ところで、どの程度の相対沈下で杭にネガティブフリクションが作用するのかが問題となるが、十分大きなネガティブフリクションが作用するために必要な地盤と杭との相対変位は非常に小さなものであり、また、一次圧密が終了するまでにはそのような相対変位は十分に起きている場合が多いようである^{13),16)}。このように、杭頭に荷重を載荷しない場合でも杭には軸力分布が生じていることがあるので注意が必要である。

ネガティブフリクションが作用している杭に荷重を作用させた場合の軸力の変化に注目してみよう。ただし、ここでは、杭施工時の残留軸力の影響はないものとして考えることにする。深度方向に地盤の強度が線形に増加している均質な地盤に支持杭を打設してある場合を考える。この杭にネガティブフリクションが作用し杭の途中に中立点が存在すると考えると、図—6.9のa線に示すような杭の軸力分布が考えられる。ここで、ネガティブフリクションによって杭先端地盤の支持力が極限に達しているとする、極限まで荷重を載荷した場合にはd線で示すような軸力分布となる。極限荷重の値はネガティブフリクションの有無とは関係がない。

しかし、荷重を極限までかける過程での軸力分布はどうなるであろうか。もし、ネガティブフリクションであれ、正の摩擦力であれ、周面摩擦がフルに働いているとすれば、この杭に荷重を作用させると図—6.9のc線で示すような軸力分布が生じるようになる。一方、荷重レベルが小さくて、載荷重が杭下端にまで伝わらないような条件では、途中のネガティブフリクションが低減され

るため、図—6.9のb線のような軸力分布になることが考えられる。このように、既にネガティブフリクションが作用している杭では、杭の軸力分布の変化がネガティブフリクションの影響を受け、ひいては、杭の荷重～沈下曲線の形状にも影響が出ることがある。なお、土屋らは、荷重とネガティブフリクションの作用順序や荷重のレベルによって杭に発生する軸力が異なることを議論している¹⁷⁾。

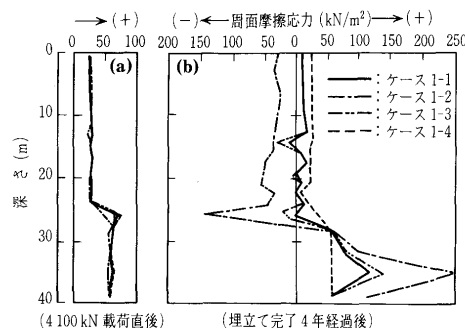
未圧密地盤など弱齢地盤では、杭の拔上がりやネガティブフリクションなどの問題があるため摩擦杭を適用することがある。この場合、杭が地盤に追従してある程度の沈下を起こすことが期待されるが、杭長の変化や杭施工時期の違いによって杭の沈下量がどの程度異なるかは明らかになっていない。ここでは、関西国際空港人工島で実施された実大摩擦杭支持力試験¹⁸⁾の結果を参考にモデル化した条件で解析した事例¹⁹⁾を紹介する。

実験現場は、海底地盤表層の 10 m に位置する沖積粘土層をサンドドレーンで地盤改良した上に、礫を含む岩砕土砂によって 30 m 埋め立てた地盤であり、沖積粘土層以下の地盤の圧密はほとんど終了しているが、まだ沈下が続くことが予想されている。この地盤に杭を打撃工法により沖積粘土層下端まで打設した後、載荷試験を行っている¹⁸⁾。解析¹⁹⁾では、作成したモデルが載荷試験結果や地盤の沈下特性を十分再現できることを確認した上で、杭の根入れ長の影響と杭の打設時期の違いの影響を検討している。なお、この解析では杭の打設による杭体残留応力については考慮しているが、杭の打設が地盤に与える影響については考慮されていない。根入れ長の違いを検討するために解析で用いたケースを図—6.10に示す。ケース1は載荷実験とはほぼ同等のケースを意味しており、ケース2と3は中間の敷砂層の影響を見ようとするものである。荷重～沈下曲線は、図—6.11に示す結果となった。この図よりわかるように、中間の敷砂層による周面摩擦力が大きい、敷砂層に貫入させるかどうかで荷重～沈下曲線には大きな違いが出ている。

次に、沖積粘土層の圧密の影響を調べるために、杭打設時期を表—6.1に示す四つのケースとし、荷重を 4100 kN 載荷した状態で4年間放置した場合の沈下量と摩擦

表—6.1 打設時期を変化させた検討ケース¹⁹⁾

ケース	杭打設と載荷時期	沖積粘土層の平均圧密度
1-1	埋立て完了後 8 箇月	93.5%
1-2	埋立て完了直後	48.4%
1-3	埋立て完了後 4 箇月	81.8%
1-4	埋立て完了後 24 箇月	99.4%

図—6.12 各検討ケースにおける周面摩擦力の違い¹⁹⁾

力分布を検討している。この場合の杭の根入れ長は、図—6.10に示すケース1のものである。図—6.12に杭に発生している周面摩擦応力分布を示す。打設直後に4100 kN 載荷した時には、いずれの時期に杭を打設しても周面摩擦力分布はほぼ同じで、正の摩擦が発揮されているが、4年後の摩擦力分布を見ると、特にケース1-2では圧密層より上の部分で大きなネガティブフリクションが発生していることがわかる。また、敷砂層は周面摩擦力の大きなところであるが、その部分が最もネガティブフリクションが大きくなっていることがわかる。また、杭頭沈下量の経時変化をみると、杭頭の沈下量は杭の打設時期が早いほど大きくなっている。別途杭先端付近の要素の有効応力経路の解析結果からも明らかにされているが、杭の打設時期が早い場合には、杭先端付近の土要素が破壊条件に近づくために、杭の沈下が促進される傾向があるようである。

6.6 おわりに

本章では、杭に上載荷重が作用する前の段階として、杭基礎が地盤内に施工される時の地盤内応力やその時の変形が杭基礎に与える影響についてまとめると共に、その挙動の重要性について述べた。

本章で強調したい点をまとめると以下の2点である。

- (1) 杭基礎を施工する地盤の特性を十分に把握することの重要性
- (2) 杭基礎の設計に用いる地盤条件の定量的評価の重要性

最後に蛇足ではあるが、今日このような載荷前の地盤変化を考慮しなくても設計や数値解析がうまくいったという例は少なくない。しかし、大事な事は、どうして実際の地盤の応力変化を考慮しないのに計測結果等とうまく合ったのかということを解明することが杭基礎の長期

的展望には不可欠ではなかろうか。実務と理論の接点を追求する意味においても、今後は現象のデータベース化に加えて、それらを解明する理論分野の発展も期待したい。

参考文献

- 1) 棕木俊文・大谷 順・尾原祐三：X線CT法による杭基礎先端地盤内の粒子移動評価、破砕性地盤における工学的諸問題に関するシンポジウム論文集、地盤工学会、pp. 89~94, 1999.
- 2) 地盤工学会編：地盤工学ハンドブック、第4編 3.4杭基礎、p. 790, 1999.
- 3) 鋼管杭協会支持力推定法委員会：動的載荷試験による鋼管杭の支持力推定法、pp. 21~22, 1994.
- 4) 前掲3)、pp. 23~24, 1994.
- 5) たとえば、地盤工学会九州支部：限界状態設計法における調査・設計・施工、pp. 137~165, 1996.
- 6) 土質工学会編：N値および $c \cdot \phi$ —考え方と利用法—、p. 80, 1992.
- 7) 前掲6)、pp. 78~79, 1992.
- 8) Poulos, H. G. and Davis, E. H.: Pile Foundation and Design, John Wiley & Sons, p. 15, 1980.
- 9) 土質工学会編：杭基礎のトラブルとその対策、トラブルと対策シリーズ1, 171p., 1992.
- 10) 社本康弘・田地陽一・後藤 茂・桂 豊・鈴木康夫・勝沢勝栄・中村龍一：杭打設に伴う埋立て地盤の液状化対策効果に関する研究（その2）、第31回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 1243~1244, 1996.
- 11) 平山英喜：長尺摩擦杭の支持機構から見た設計上の留意点、土と基礎、Vol. 40, No. 2, pp. 35~40, 1992.
- 12) Burland, J. B. and Strake, W.: Review of Measured Negative Pile Friction in terms of Effective Stress, Proc. of 13th ICSMFE, pp. 493~496, 1994.
- 13) 高橋邦夫・沢口正俊・善 功企・篠原邦彦・橋本寿光：ネガティブフリクションに関する実験と考察（第1報）、港湾技術研究所報告、第13巻第1号、pp. 65~86, 1974.
- 14) 平山英喜：群杭基礎のミンドリン解に基づく地盤内応力分布とその簡便法、第29回土質工学研究発表会発表講演集、pp. 1145~1148, 1994.
- 15) 遠藤正明：第5章 ネガティブフリクション、鋼グイ—鋼グイ研究委員会報告—、土質基礎工学ライブラリー6, pp. 257~315, 1969.
- 16) Bjerrum, L., Johannessen, I. J. Eide, O.: Reduction of negative skin, friction on steel piles to rock, Proc. 7th ICSMFE., Vol. 2, pp. 27~34, 1969.
- 17) 土屋 勉・浜田 治：杭頭荷重とNF荷重が作用する単杭の軸力算定法、第33回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 1447~1448, 1998.
- 18) 布施洋一・大川征治・桜井雅夫・安藤誠二・高見邦幸：若齢埋立地盤における摩擦杭の支持力特性について、第26回土質工学研究発表会発表講演集、pp. 1403~1404, 1991.
- 19) 柴田 徹・八嶋 厚・大林 淳・尾関 浩：若齢埋立地盤における摩擦杭の挙動解析、土と基礎、Vol. 40, No. 2, pp. 11~16, 1992.

本講座では、上記各文献かせ図表を引用する際、英語表記の和訳、SI単位への換算、記号その他の説明の追加や修正を行っております。