

杭基礎設計における施工過程の影響

Effect of Construction Process on Pile Foundation Design

大谷 順 (おおたに じゅん)

熊本大学教授 工学部

1. はじめに

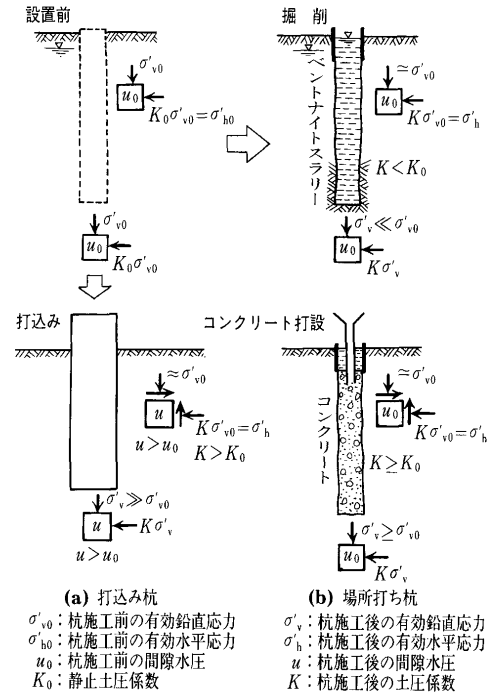
杭基礎は、杭体と地盤との相互作用によってその挙動が支配されることは言うまでもない。また一般にその設計は、杭施工後の杭頭荷重を対象として実施される。しかし、施工する地盤について考えて見ると、杭基礎は種々の方法で種々の地盤内に施工（打設）されるため、上部荷重が载荷される前に地盤や杭体に応力や変形が生じる。よって、地盤が施工前の物性から大きく変化する場合や、施工する地盤によっては杭体に過大な応力を発生させる場合がある。例えばその施工方法について考えてみると、鋼管杭やコンクリート既成杭のように、打込みにより地盤を乱しながら施工するものもあれば、場所打ち杭のように、杭体の施工に先立って地盤内に孔を掘って施工する方法もある。本論文では、杭基礎の施工過程時の挙動が設計にどのような影響を及ぼすかという点に立脚し、地盤の物性変化が杭基礎設計に与える影響を明らかにするために、杭基礎の施工に伴う地盤条件の変化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、その現象の把握を目的として実施したX線CTスキャナー装置を用いた可視化実験結果を紹介することにより、载荷時を含む施工過程の現象解明について言及する。

2. 施工法による杭基礎の分類

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、本小特集号では特にその施工過程を対象としているため、施工方法による分類を対象とする。これは、以下に示す2つに大別される。

- 1) 排土杭 (Displacement pile) : 静・動的打込み杭がこれに当たり、杭打設が地盤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基礎。
- 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、一般の掘削問題と同様に地盤を緩くする杭基礎。

図-1¹⁾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コンクリート杭を対象として比較している。杭の施工法の違いにより、設計に用いる条件としての土圧係数や間隙水圧の変化は一目瞭然である。また、これらの変化は設計におけるパラメーターの決定に大きく影

図-1 杭の施工に伴う地盤内条件の変化¹⁾

響するため、それらの決定に際しては十分注意を要する。

一方、対象となる地盤条件は、一般に粘性土と砂質土に分類され、それぞれ正規圧密粘土と過圧密粘土、また緩い砂と密な砂等に分類される。

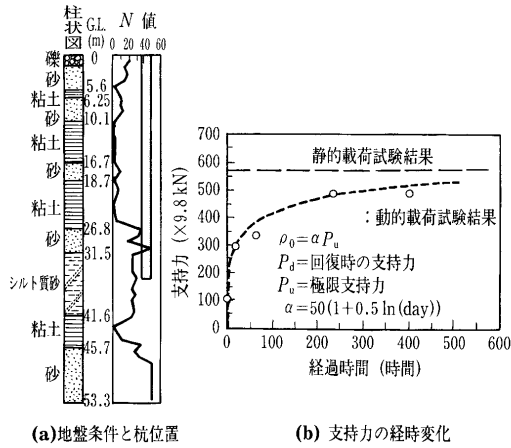
以下では、上記杭基礎分類について、杭の施工条件が地盤に与える影響について議論する。

2.1 排土杭

排土杭は、その施工中において地盤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、それぞれ杭基礎施工時における地盤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一般に減少する。しかし、時間が立つと共に過剰間隙水圧が消散し、結果として剛性や強度が回復する。この現象は一般に“セットアップ”と呼ばれる。“セットアップ”は、動的载荷の場合を対象に動的支持力の回復度としてしばしば議論されるが、これはその変化量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



図一 2 粘性土を対象としたセッアップの計算例²⁾

“セッアップ率”は、時間変化に伴う支持力の回復度として定義されている。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、除荷による膨張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は不可欠となる。図一 2²⁾は、粘性土地盤に対して実施された鉛直の動的載荷試験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一 2 (a)に示す。杭は杭径609.5 mmで、長さが35 mである。動的試験では“セッアップ”の影響を調べるために、打止め時の計測とその後計 4 回の再打撃を行い支持力の計測を行っている。図一 2 (b)は、その時の経過時間に伴う支持力変化の関係を示している。図中の○は再打撃計測の位置を示しているが、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

砂質土に杭基礎を打設すると、地盤が圧縮されることにより密度が上昇する場合が多い。よって緩い砂の場合はその剛性および強度が増加する可能性がある。しかし密な砂の場合は、打設により乱す効果が大きく、逆の結果となる場合もある。図一 3³⁾は、砂質地盤について、群杭を動的載荷方法により施工した現場において、施工前と施工後にコーン貫入試験を実施し、その地盤特性変化について紹介された例である。図一 3 (a)は地盤条件を示すが、対象地盤は緩い砂質地盤である。図一 3 (b)は、コーン貫入試験結果について、杭貫入前後でのコーン指数と周面摩擦応力の変化を示している。この図より、コーン指数は施工後に1.2~2.2倍を示し、摩擦応力は1.5~5倍の値となっており、施工による地盤条件は大きく変化していることが容易に確認できる。

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礁混じり砂、またオーストラリアに広く堆積するカルカリアス (Calcareous) 砂のようないわゆる破砕性地盤と呼ばれる土では、杭を打設することにより粒子破砕を生じ、その剛性や支持力特性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⁴⁾、これらの

地盤におけるセッ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り、今後のデータ蓄積が大きく期待される。

2.2 非排土杭

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、その穴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、掘削することにより地盤内応力が緩和され、杭基礎と土との間に緩み域が発生することが予想される。

以下、粘性土と砂質土の場合に分けて議論する。

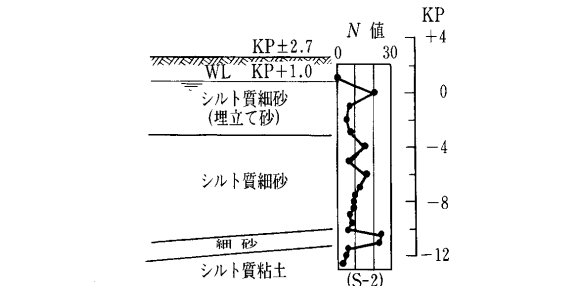
(1) 粘性土

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により、杭基礎-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。

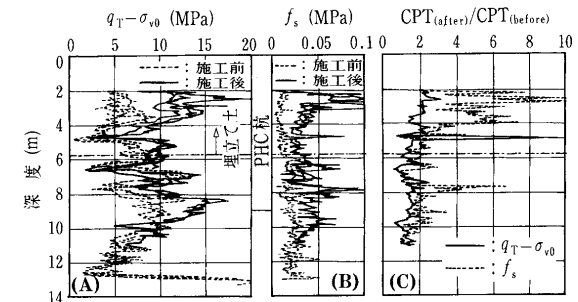
- 1) スラリー状のコンクリートから水が周辺の粘土地盤に浸透、
- 2) ボアホール周辺の緩み領域におけるマイグレーション、
- 3) 地盤を掘削する際に用いる水が周辺地盤内に浸透。

これらについては、施工時の注意によって十分改善可能なものもあり、その施工管理方法の重要性が指摘される。

(2) 砂質土

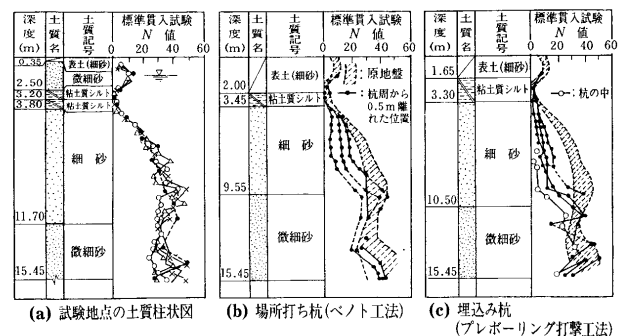


(a) 地盤条件



(b) コーン指数および摩擦応力の変化

図一 3 杭打設による地盤内応力変化と地盤条件³⁾



図一 4 埋込み杭および場所打ち杭の施工による地盤の乱れ⁴⁾

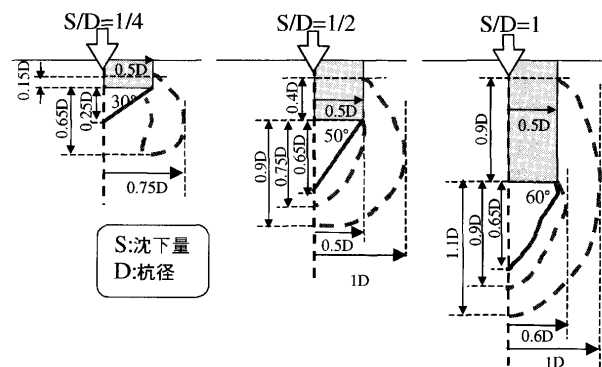
論文

図一4⁵⁾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50 cm離れた場所において N 値の深度分布変化を計測した例である。これら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-地盤間の相互作用を十分把握しておくことが不可欠であると言える。

3. 鉛直荷重下における支持力メカニズムの可視化 (口絵写真参照⁶⁾)

口絵写真一4⁶⁾は、模型実験における杭先端付近の地盤密度変化について、X線CT撮影することにより得られた3次元差画像である。差画像とは、異なる貫入時における画像を同じ位置での初期時と重ね合わせることで作り出される画像であり、その場所における密度の変化のみが示される画像である。よってこれらは初期と三つの貫入時(5 mm, 10 mm および 20 mm)におけるそれぞれの密度変化状況を示している。なお、この実験の詳細については参考文献⁶⁾を参照されたい。これらを見ると、杭先端にはくさび型の高密度領域が形成され、これを包み込むように低密度領域が形成されている。この低密度領域は、杭貫入に伴う高密度領域の形成により乱された領域と考えられる。また杭の貫入に伴う変化領域の進展は、水平方向にはさほど影響はしないものの、鉛直方向に拡大している。図一5⁶⁾は、差画像の各断面における変化領域の杭中心からの距離を測定し、深さ方向にプロットしたものであり、貫入量： S 、杭径： D (本実験では20 mm)を用いてそれぞれの影響範囲で正規化している。ここでは、低密度領域を口絵写真一4に示す2色の黄色領域により2領域で示している。これらを見ると、杭貫入に伴う変化領域は、 $S/D=0.5$ までに低密度領域が杭中心より $1D$ の範囲内に落ちつき、高密度領域は深さ方向に $0.65D$ に落ち着く。 $S/D=1$ においては杭先端地盤に形成されるくさび型高密度領域は、深さ方向には進展しないものの水平方向に広がりを見せ、その杭底面に対する発生角度は約 60° となっている。また杭周面における低密度領域の巻込みは、杭の貫入量につれて大きくなっていく。以上より、本実験から考察される支持力メカニズムは、低密度領域まで含むものと考えれば、過去に提案されているMeyerhof(マイヤーホッフ)のそれに類似したものといえる。しかし厳密には杭周面への広がり、マイヤーホッフの提案ほど上方向まで進展していない。また荷重過程における杭先端の高密度領域の進行過程では、鉛直方向にある限界量まで達



図一5 支持メカニズムの定量的考察

するとその後水平方向への広がりを見せることから、Vesic(ベシッチ)の提案するパンチング破壊に類似したものとなっている。

4. おわりに

本章は、深い基礎の設計理論と実際について、特に杭基礎の施工時における地盤特性変化や、それに伴う設計定数決定についての留意点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再度まとめる以下のとおりである。

- 1) 杭基礎を施工する地盤特性の把握
- 2) 杭基礎の施工過程における地盤特性変化の把握
- 3) 施工時の地盤挙動を反映した設計定数の決定

これらを実現するためには、より多くのデータベースを構築することはもちろんであるが、このような現象を解明する理論分野の発展も期待したい。

最後に、本論文は、著者も所属した「施工過程を考慮した地盤の変形・破壊予測」委員会(委員長:中井照夫名古屋工業大学教授)における深い基礎ワーキングメンバー(菊池喜昭氏(港湾空港技術研究所),高橋秀明氏(東電設計),張鋒先生(岐阜大学),堀内孝英先生(名城大学))との議論を基に執筆したものである。これら諸氏に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 大谷 順・菊池喜昭: 杭基礎の施工に伴う杭体および周辺地盤の応力変化, 講座「杭基礎の鉛直荷重~変位特性の評価法入門」, 土と基礎, Vol. 48, No. 6, pp. 41~46, 2000.
- 2) 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」, 3月, pp. 21~22, 1994.
- 3) Suzuki, K., Asanuma, T., Taguchi, H. and Hanzawa, H.: Change in mechanical property of sandy deposit investigated by cone penetration test conducted before and after pile driving, Proceeding of Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance, IW Kamakura, Japan, pp. 245~250, 2002.
- 4) 例えば, 限界状態設計法における調査・設計・施工, 地盤工学会九州支部, pp. 137~165, 1996.
- 5) 土質工学会編: N 値及び $c \cdot \phi$ 考え方と利用法一, p. 80, 1992.
- 6) 弘中淳市・大谷 順・平井貴雄: X線CT法を用いた杭貫入に伴う鉛直支持力メカニズムの解明, 施工過程を考慮した地盤変形・破壊予測に関するシンポジウム論文集, 東京, 9月, 2002. (投稿中)

(原稿受理 2002.5.10)

土と基礎, 50-8 (535)