

1. はじめに

軟弱な地層が地表より厚く分布する地区において、基礎底面が比較的深い杭基礎形式の構造物を構築する場合、施工手順としては、施工性、経済性などの制約により、構造物を構築する前に基礎杭を打設し、その後基礎掘削を実施するというかたちがとられることが多い。このような場合、既に設置されている基礎杭が掘削によって大きく変形し、変形した杭に構造物を支持させることとなり、杭の支持能力の低下が問題となることがある。本報告は、このような条件にある事例である。

本工事に先立ち、まず、試験掘削を実施し、この時の基礎杭の水平変位を孔内傾斜計で実測して掘削深さと杭頭水平変位量の関係を把握した。次に、この実測結果より、各掘削段階の地盤の円弧迂りに対する安全率と杭頭変位量の関係を整理した。この関係より掘削断面に対する安全率を求め、それから、杭頭水平変位量を推定する。これより杭頭水平変位量が管理基準値以内に納まるよう施工断面を決定し、有限要素法によりこのことを検証した後に、本工事を実施した。1期工事においては、杭頭水平変位量について予測結果とよく一致した実測結果が得られ、問題なく工事は終了したが、2期工事における基礎杭の杭頭水平変位量は管理基準値をオーバーした。そこで、この差が生じた原因を究明することを目的として、再度、有限要素法による応力・変形解析を実施した。この結果、当初は掘削範囲まで影響しないと考えていた周辺地区の盛土により、大きな変形が生じたことが判明した。

本報告では、これら一連の予測と実測した結果について紹介する。

2. 地形・地質概要

本地区は、洪積台地上のおぼれ谷部に発達した沖積低地のほぼ中央に位置しており、地表付近よりN値0の軟弱な沖積粘性土層が層厚30mで厚く分布する（図-1）。この沖積粘性土層の下位には、洪積台地を構成する洪積砂質土層が粘性土層を挟みながら深部まで厚く分布している。この地区の構造物のほとんどはこの洪積砂質土層を支持層とする杭基礎形式となっている。

沖積粘性土層の土性を深度との関係図として整理し、全体的に見れば、自然含水比が $W_n = 80 \sim 160\%$ 、湿潤密度が $\rho_s = 1.2 \sim 1.5 \text{ t/m}^3$ 、一軸圧縮強さが $q_u = 0.1 \sim 1.2 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲の値を示している（図-2）。

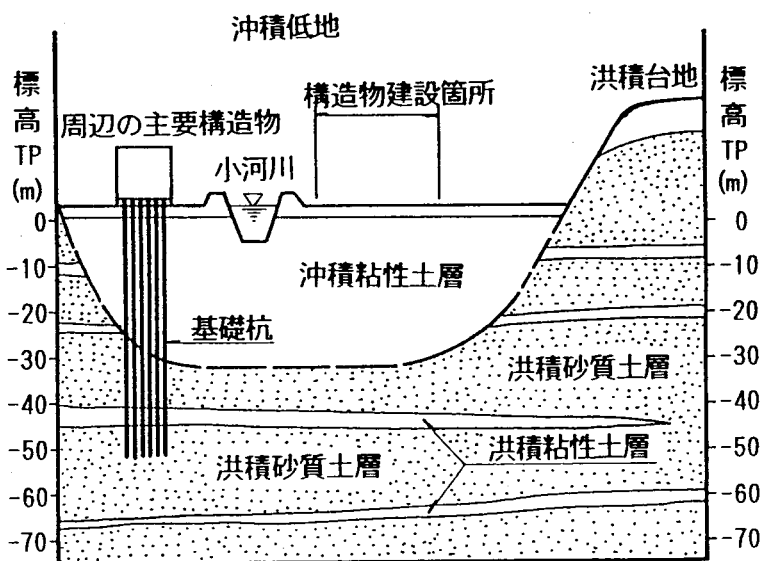


図-1 構造物建設箇所周辺の地質状況

3. 試験施工

3-1. 試験施工の経緯・概要と観測方法

当地区では、地表より厚く軟弱な沖積粘性土層が分布し、地下水位が深度GL-1m前後と高いこと、さらに、構築する構造物の基礎底面がGL-5mと比較的深いことなどから、基礎底面まで掘削した後に杭を打設するには、杭打機の走行性や経済性などの面で不利となる点が多い。このため、杭は掘削に先行して打設し、この後に基礎掘削を実施するという手順で施工されることとなった。この場合、先行打設された基礎杭が、掘削によってどの程度変形し、この変形が杭の支持能力にどの程度影響するのかなどの問題があり、これらを把握することを目的として試験的に掘削工事を実施した。

この試験掘削工事は、掘削を、プレロード盛土を施工・撤去した後に、5段階に分けて実施し、各段階毎に、掘削完了直後の変位と変位が落ち着くまで放置した後の最終変位を孔内傾斜計によって観測した(図-3)。

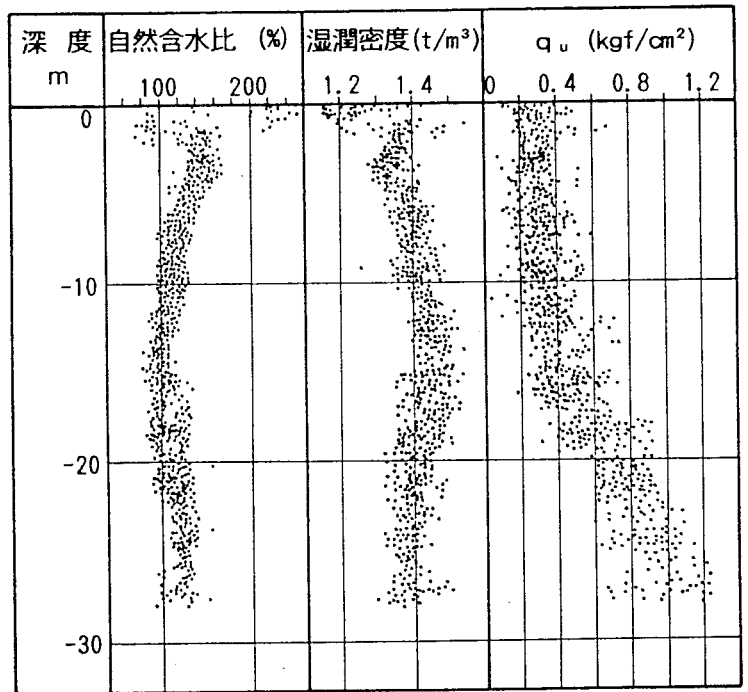


図-2 沖積粘性土層の土性

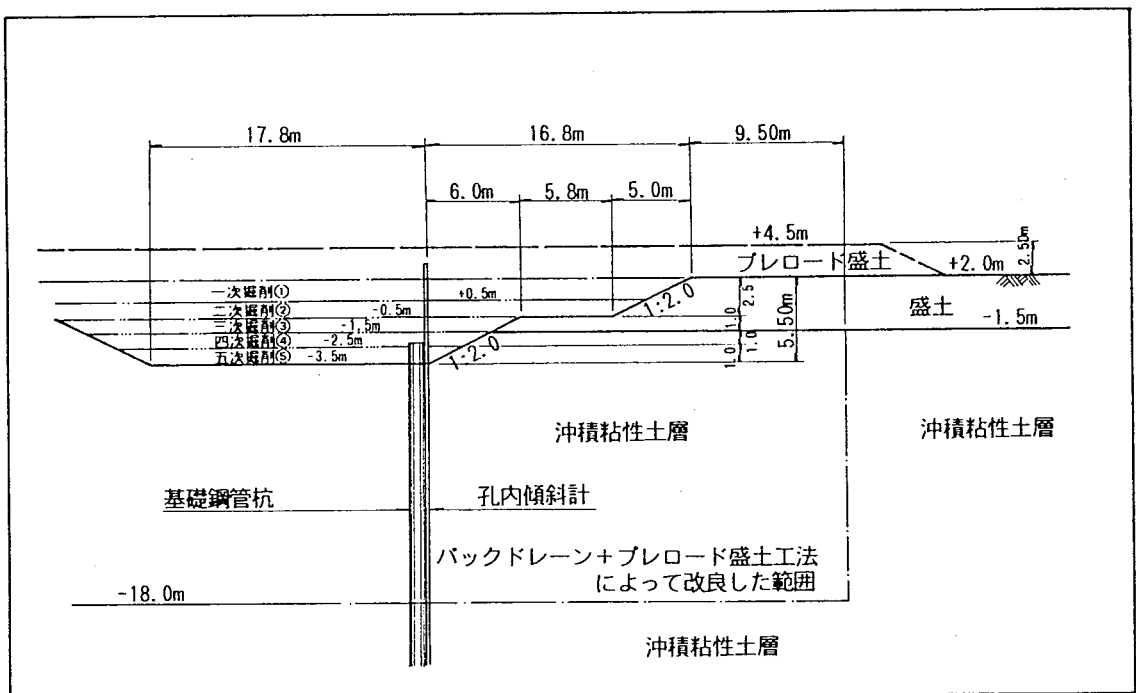


図-3 試験掘削工事実施状況概要図

3-2. 杭頭変位量と地盤の安全率

孔内傾斜計の観測結果を、図-4に示した。また、各掘削段階の地盤の円弧すべりに対する安全率計算結果を図-5に示した。これらの図より、杭頭変位量と地盤の安全率の関係を整理した結果、図-6に示すような反比例の関係にあることがわかった。

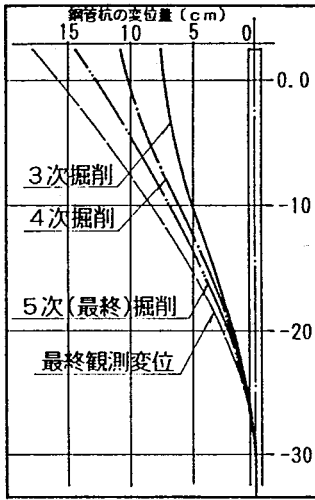


図-4 孔内傾斜計の観測結果

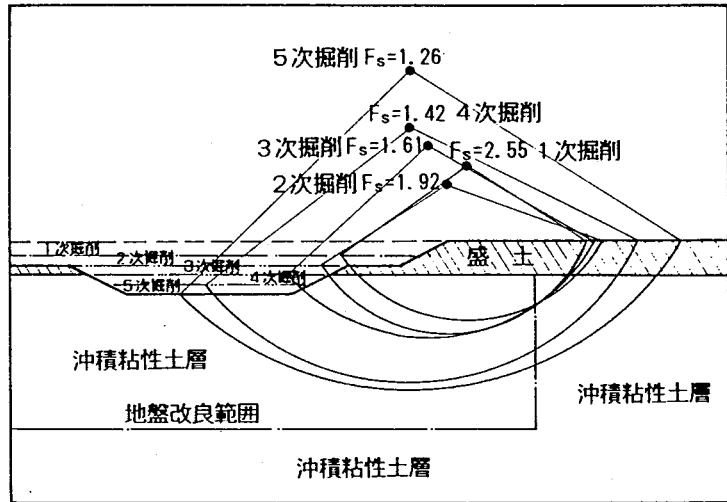


図-5 各掘削段階の円弧すべりに対する安全率

3-3. 本施工における掘削断面と施工方法の決定

孔内傾斜計によって観測された杭頭変位量を基に、構造物を構築した後に基礎杭に作用することが予想されるトータル応力を表-1の方法によって試算し、掘削による変形を何cmに抑えれば、応力的に問題がないかを判定した。計算結果は、図-7に変位量毎の応力分布図としてまとめたが、杭頭の水平変位量が15cm以内であれば、一般に鋼管杭の長期許容応力とされている $\sigma = 1400 \text{ kgf/cm}^2$ 以内の応力しか作用しないという計算結果となった。これより、本施工における杭頭の許容水平変位量をこの15cmの2/3の10cmと決定し、杭頭の水平変位を監視しながら本施工を行なうこととなった。なお、本施工における杭頭の許容水平変位量を10cmとすると、図-6より掘削時の地盤の安全率は $F_s = 1.6$ となる。これより、 $F_s = 1.6$ となるよう掘削断面を決定した。

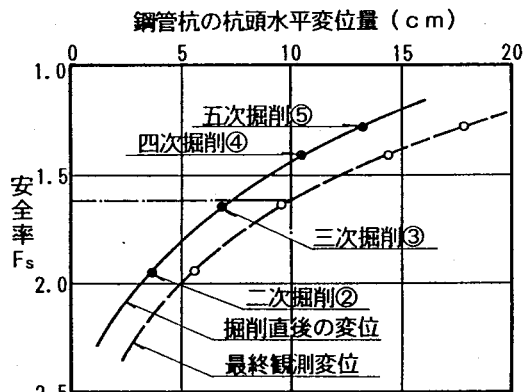


図-6 杭頭水平変位～円弧すべり安全率関係図

表-1 構造物構築後に基礎杭に作用するトータル応力の推定方法

【構造物完成後に杭に作用する各応力の算定式】		dx : 任意の区間長 (50cm)	Z : 杭の断面係数 (cm^3)
①構造物荷重 (鉛直荷重) によって杭に作用する応力 $\sigma_1 = P/A$ ----- (kgf/cm^2) ここに、 P : 杭1本当りに作用する鉛直荷重 (kgf/本) A : 杭の断面積 (cm^2)	E : 杭材の弾性係数 ($2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$) I : 杭の断面二次モーメント (cm^4) Z : 杭の断面係数 (cm^3)		②地震時の水平荷重によって発生する応力 地震時の水平荷重によって杭に発生する応力は、Changの式の『地中に埋め込まれた頭部固定の杭』として算定する。
②掘削時の変形によりすでに杭に作用している残留応力 傾斜計で観測された水平変位より各変位区間(50cm)におけるたわみ角の変化角($d\theta$)を算定し、以下の式によって区間毎に残留応力を算定する。 $M_2 = (d\theta/dx) \cdot E \cdot I$ ----- ($\text{t}\cdot\text{m}$) $\sigma_2 = M_2/Z$ ----- (kgf/cm^2) ここに、 M_2 : 掘削によって発生したモーメント $d\theta$: ある区間におけるたわみ角の変化角	③偏心(変形)している杭に載荷したとき発生する応力 偏心している杭に鉛直荷重が作用したときに発生するモーメントは、オイラーの公式より以下のように算定する。 $M_3 = -(a-y) \cdot P$ ----- ($\text{t}\cdot\text{m}$) $\sigma_3 = M_3/Z$ ----- (kgf/cm^2) ここに、 M_3 : 鉛直荷重を載荷したときのモーメント a : 杭頭部の水平変位量 y : 任意の位置における水平変位量 P : 杭1本当りに作用する鉛直荷重 (kgf/本)		

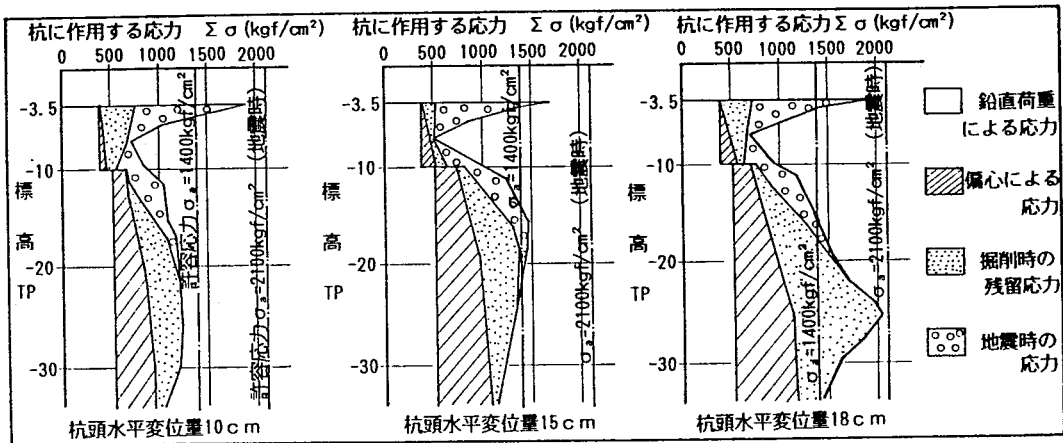


図-7 杭頭水平変位量別の構造物構築後の基礎杭に作用する応力推定結果図

以上のようにして決定した掘削断面において、どの程度の変位が発生しまたどの程度の応力が杭に作用するのかを検証するために、有限要素法による応力・変形計算を行った。計算結果は、図-8に示すように、変形は約9.4cmであり、また応力的にも問題ないという結果が得られた。これより、本施工は、図

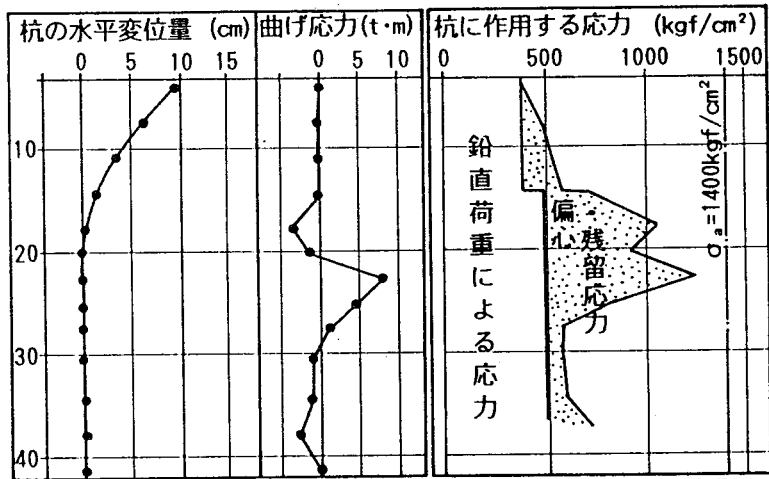


図-8 有限要素法による基礎杭の変形・応力の予測計算結果

-9に示す断面で実施することに決定した。なお、現状の地盤のままでは、掘削法面の円弧すべりに対する安全率を $F_s=1.6$ 以上とすることが困難であったため、図-9の図中に示した範囲をプレロード盛土+圧密促進工法（バックドレーン工法）によって改良し、地盤の強度が所定の強度まで増加していることを確認した後に、掘削工事を実施するものとした。

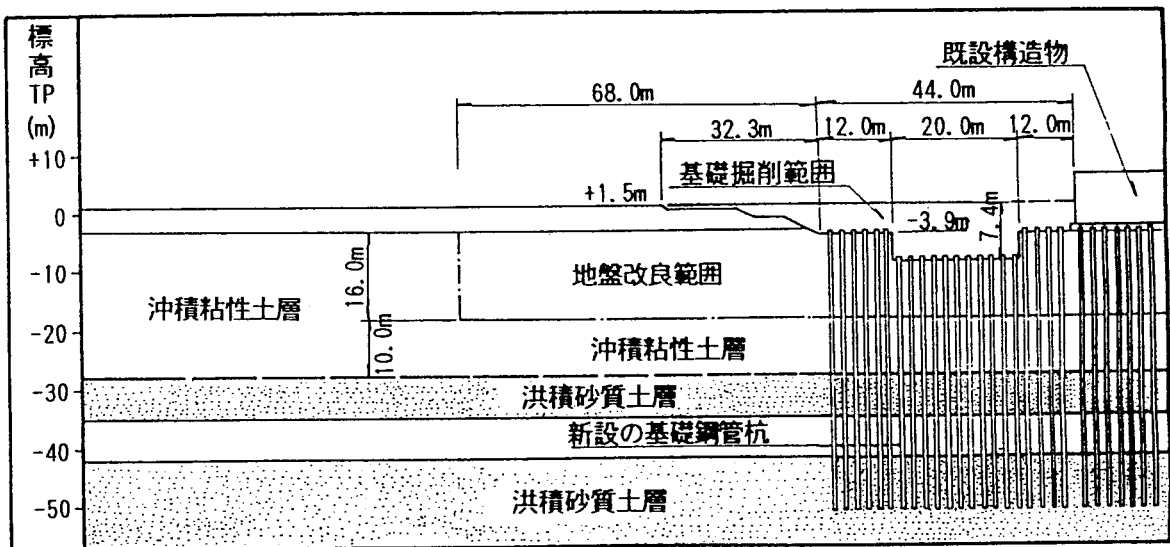


図-9 本施工（1期工事）実施状況模式断面図

4. 本施工

4-1. 1期工事

まず、1期工事の観測結果は、図-10に示したとおりであり、深度方向の変形の発生状況に多少の違いが見られるものの、最も変形の大きかった掘削面法尻部においても9cm程度の杭頭水平変位量であり、当初の予測結果とほぼ一致した観測結果となり、問題なく施工を実施することができた。

4-2. 2期工事

1期工事に引き続き、2期工事が実施されることになったが、当地区においては、以後も3期、4期と継続して同一の一連の構造物を構築される計画となっており、これらの工事の工期短縮を目的として、2期工事施工箇所基礎掘削と同時に、3期工事施工箇所の地盤改良工事（プレロード盛土+バックドレーン工法）を実施するという施工工程で実施することとなった。この時の施工断面は、図-11に示すとおりであり、掘削範囲から約5.6m離れた位置に3期工事のためのプレロード盛土が実施された。なお、この時の2期工事の掘削断面の円弧すべりに対する安全率は $F_s=1.6$ 以上となっている。

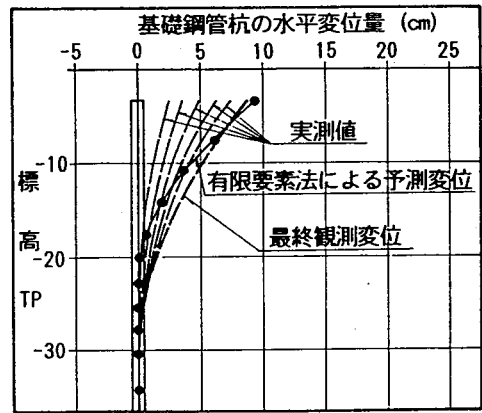


図-10 1期工事施工中に観測した基礎杭の変位

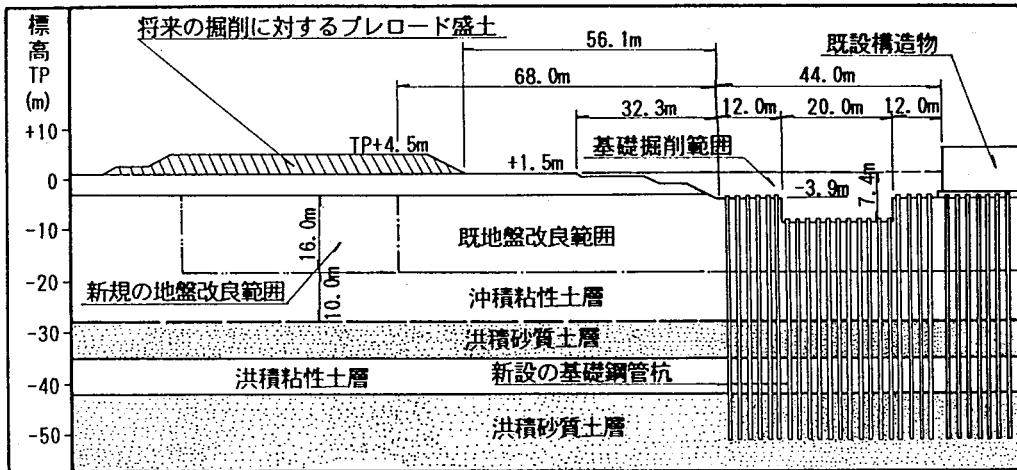


図-11 2期工事実施状況模式断面図（プレロード盛土を同時施工）

この2期工事施工時の基礎鋼管杭の杭頭変位量の観測結果は、図-12に示すとおりであり、当初予測した変位の2倍近い約17cmの杭頭水平変位量が観測された。このため、再度、有限要素法による応力・変形解析を実施し、この大きな変位量が発生した原因の究明と、それ以降の施工法の検討などを行なうこととなった。

4-3. 有限要素法による再解析

有限要素法による解析は、当初と同一の地盤条件で実施するものとし、実際の施工箇所と同一の位置にプレロード盛土を施工したという条件を加味して実施した。

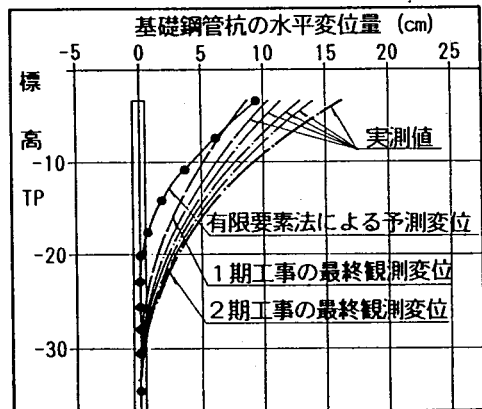


図-12 2期工事施工中に観測した基礎杭の変位

計算結果は、図-13に示すとおりで、プレロード盛土を同時に施工したことにより約4cm変位量が増加し、また杭に作用する曲げモーメントも約4t・m増加するという結果が得られた。

これより、掘削範囲に近接して盛土を実施した場合、掘削範囲から50m離してもプレロード盛土による影響が掘削範囲に及ぶことが確認された。

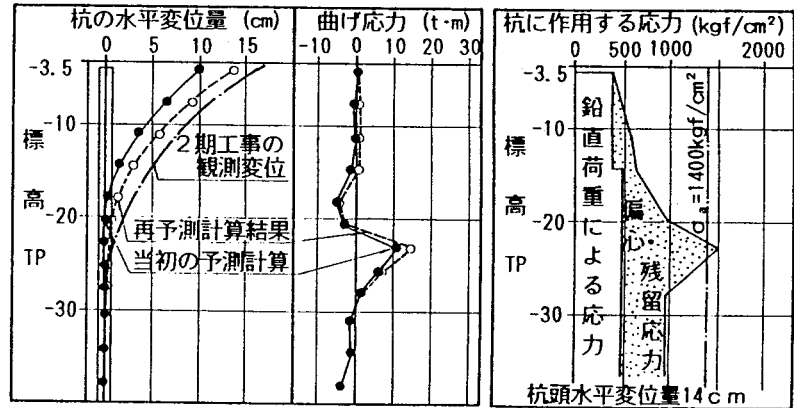


図-13 有限要素法による再計算結果

4-4. 2期工事以降の施工方法

2期工事以降の施工方法として、掘削範囲からどの程度プレロード盛土を離せば、盛土による影響を少なくできるかを把握するために、再度計算を実施した。結果は、図-14に、プレロード盛土を掘削範囲から76m離れた場合、96m離れた場合について、それぞれ、杭頭水平変位量および曲げモーメントの関係図として示した。図-14に見られるように、76m離れた場合と96m離れた場合とでは杭頭水平変位量で約1cmの差が見られるが、杭に作用する曲げモーメントはほとんど差がないという計算結果となった。この計算結果と、2期工事施工時の変位の観測結果とから総合的に判断し、以後の施工においては、プレロード盛土を掘削範囲から約76m離して施工することに決定し、現在施工が実施されている。

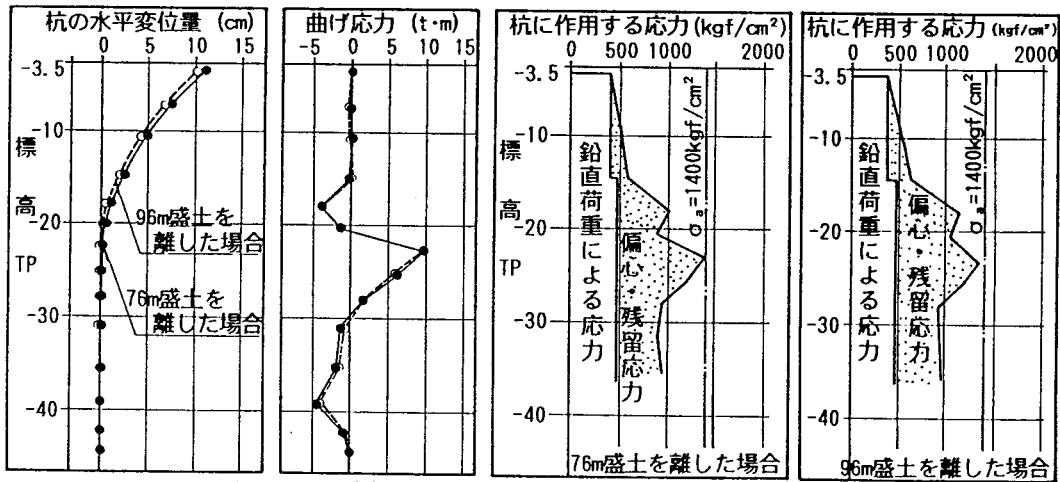


図-14 今後の施工法を検討するための有限要素法による計算結果

5. おわりに

一般には、今回紹介した事例のような基礎杭に生じる変形や水平応力は設計に考慮されない場合が多い。しかしながら、基礎杭を打設した後に基礎掘削を行ない構造物を構築する施工順序において、地盤が軟弱な場合、先行して打設された基礎杭に比較的大きな水平応力が作用する。

今回は傾斜計を使って変形を観測し、円弧すべりの安全率と水平変位量を関係づけることによって、掘削形状を決める方法を提案し、検証することができた。

今後も現地の観測を重視し、その結果を設計、施工に生かすことに努力していきたいと考えている。