

杭基礎で支持された建物のアンダーピニング時の挙動について

猪瀬二郎*・小西讓司**・中村兵次***

杭基礎で支持されている建物を、新設した杭で受け替える場合の挙動は、一般の杭基礎の挙動とは異なるものである。すなわち、プレロードにより既設杭は引き上げられるが、この引き上げ力が地盤を引き上げることとなり、この分、新設杭の沈下が少なくなる。この論文では、こうした挙動を理論式で表現するとともに、現場実測値との比較をして、この考え方の妥当性を確認した。

Keywords : underpinning, matrix analysis, group piles

1. ま え が き

東京のような数多くの地下構造物が既に存在する都市において、新しい地下構造物を構築する場合には、地下の既設構造物を避けるために、民地の地下に新しい構造物を構築せざるを得ない場合もある。

一方、都市内の地下構造物のうち、特に地下鉄道のように長く、しかも設置深さが深い構造物の場合には、その施工方法はシールド工法となることが多い。

民地の地下にシールドトンネルを施工する場合、あるいは道路下であっても既設の橋脚などが存在する場合には、既設の構造物が杭基礎で支えられていると、シールドトンネルの施工は複雑なものとなる。すなわちシールドトンネルの施工に先立って当該建物をアンダーピニング工法により仮受けし、その後、既設の杭を撤去する必要がある。杭の撤去が完了した後に、杭撤去により生じた鉛直の穴を土砂などにより埋戻し、そこで初めてシールドトンネルを掘進することが可能となる。

本稿で取り扱うテーマは、こうした工事の中の建物の仮受け工事に関する部分で、アンダーピニングする際の荷重と既設の建物および新設（仮受け）構造物の挙動に関するものである。アンダーピニング時のこれらの構造物の挙動の観測は、多くの場合、既設構造物と新設構造物の鉛直方向の変位によって行われている。そしてこれらの構造物の挙動の事前の予測は、既設の構造物は不動と考え、新設構造物にアンダーピニング荷重を作用させて、その沈下量を杭基礎の挙動に関する各種の計算手法によって推定する方法が採用されてきた¹⁾。

ところがこうした考え方は、プレロードを導入するこ

とにより、既設構造物基礎から地盤に伝えられていた力が減少することを無視しており、このようにして推定された予測値と、現場で測定される値とはほとんどの場合一致することはなかった。これは既設の杭と新しく設置した杭との相互作用（アンダーピニング荷重を作用させると、既設の杭からは上向きの、また新しく設置した杭からは下向きの力がそれぞれ地盤に作用し、これらの力が相互に干渉する）を無視したために生じる当然の結果と考えられる。

また、プレロードを導入すると新設杭は圧縮を受けて沈下するが、既設構造物を支えている既設杭は荷重が除去されて伸びることとなり、また杭周辺地盤の応力解放もあるので、結果として既設構造物は浮き上がることとなる。

こうした観点にたつて、アンダーピニング時の新旧構造物の挙動を精度良く推定するために、既設杭と新設杭の相互作用を考えに取り入れた新しい計算モデルを提案するものである。この計算モデルによって、新設構造物および既設構造物の挙動を事前に把握しておくことにより、プレロード時の荷重チェックが可能となり、また既設構造物の安全性の推定も可能となる。

なお、この計算モデルによって求められた予測値と、現場で測定された測定値とは良い一致をみた。

2. アンダーピニング時の力学的評価と計算式の誘導

(1) 対象とするテーマ

アンダーピニング時の力学的評価に先立ち、ここで対象とするテーマを明確にするために、杭基礎で支えられる建物のアンダーピニングの施工順序について記す。図1-1に、ここで考えているアンダーピニングの施工順序を示したが、⑤に示す「敷砂の撤去」はプレロード荷重が下受けスラブの下面から直接地盤に伝達されるのを防

* 正会員 帝都高速度交通営団建設本部長
(〒110 台東区東上野 3-19-6)

** 正会員 帝都高速度交通営団建設本部計画部長

*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) トンネル部長

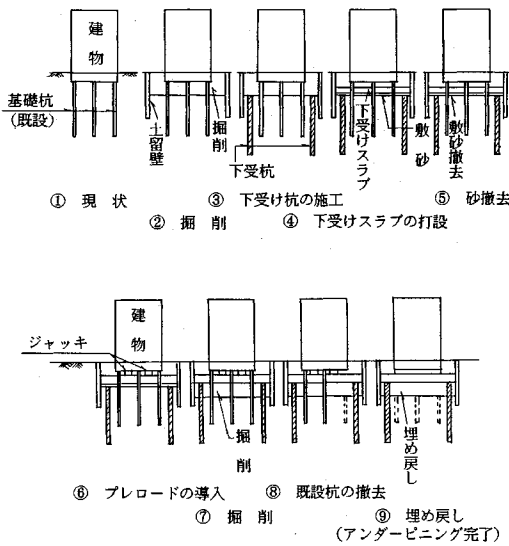


図-1 アンダーピニングの施工順序

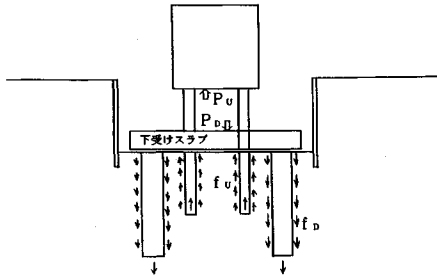


図-2 プレロードの伝達機構

ぎ、既設の杭に荷重が完全に導入されることをねらったものである。またこの図では埋戻し完了時点までを描いたが、この埋戻しの後にシールド工事が行われる。

そして本稿で対象とするテーマは、⑥に示す“プレロード導入”時の既設構造物と新設構造物の挙動についてである。

(2) アンダーピニング時の力学的評価

アンダーピニング時の挙動を考えるために、導入したプレロードの伝達機構を図-2に示した。プレロードを導入するという事は、図-2において既設構造物に P_U を、また新設構造物に P_D を作用させることである。プレロードはジャッキにより導入するので、これらの荷重は向きが逆で値は等しい。すなわち $P_U = P_D$ である。

このように既設構造物と新設構造物にプレロードが導入されると、この力はそれぞれ既設杭と新設杭を通じて地盤に伝達される。既設杭から地盤に伝達される力 (f_U) は地盤を引き上げる方向に作用し、新設杭から地盤に伝えられる力 (f_D) は地盤を押し下げる方向に作用する。ここに f_U の合計は P_U に等しく、 f_D の合計は P_D に等しい。前述のように $P_U = P_D$ であるから、 f_U の合計と f_D

の合計は等しく、向きが逆である。すなわち既設杭および新設杭から地盤に伝達されるこれらの力は釣り合っていることになる。したがってアンダーピニング荷重の載荷によって、新設杭の周辺には新たな下向きの力が作用するものの、既設杭の周辺には同様に上向きの力が新たに作用することとなり、地盤全体に作用する力(合力)としては、新たな力は作用しないこととなる。一般の杭基礎は、図-2において既設構造物がなく新設構造物のみが存在し、その新設構造物に鉛直下向きの荷重が作用する状態である。従来のアンダーピニング時の挙動の推定方法は、この方法であった。これに対して、ここで取り扱うアンダーピニングの問題では、既設の構造物が鉛直上向きの荷重を伝達するので、新設構造物の沈下量は、一般の杭基礎に比べて非常に小さなものとなることが想定される。

本稿では既設杭が地盤へ伝達する鉛直上向きの力を考慮に入れた新しい理論を提案する。

(3) 計算式の誘導

【基本的な仮定】

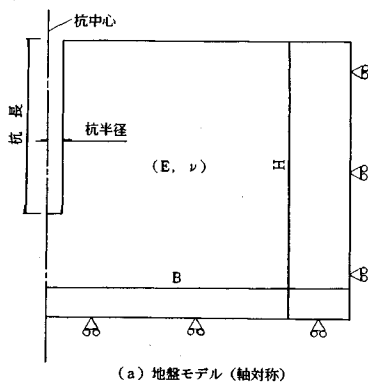
上記のプレロードの伝達機構を計算式で表現することを考える。計算式の誘導には、以下の仮定を設ける。

- ① プレロードは既設構造物と新設構造物に同時に作用し、その大きさと方向は等しく、向きが逆である。
- ② 荷重は鉛直方向のみに作用するものとし、水平力、回転モーメントは作用しないものとする。
- ③ 既設構造物も新設構造物も、それぞれほぼ対称な構造物とする。すなわち鉛直荷重の作用により、どちらの構造物も鉛直方向の変位のみを生じ、回転や水平方向の変位は生じないものとする。
- ④ 杭は鉛直方向に配置されているものとする。すなわち斜杭は考えない。
- ⑤ 杭は軸方向にのみ変形する弾性体とする。
- ⑥ 既設構造物および新設構造物の下受けスラブは剛とする。
- ⑦ 地盤は弾性体であって、その応力および変位の伝達機構は、軸対称の有限要素法により表現できるものとする。
- ⑧ 荷重はジャッキにより導入されるプレロードのみを考え、杭および地盤の自重は考えないものとする。
- ⑨ 杭と地盤の間には相対変位が生じないものとする。

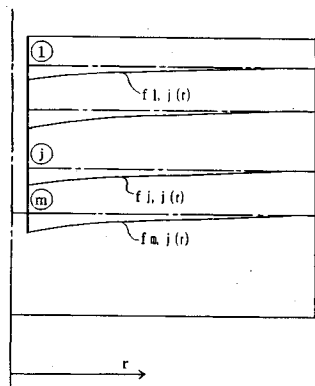
【地盤に対する方程式】

地盤は杭から伝達される周面摩擦力および杭の先端反力を受けて変形する。このとき地盤内の任意点の鉛直方向変位は、杭から地盤に伝達される力(周面摩擦力および先端反力)の関数として与えられるものであるから、次式により表現できる。

$$\delta = \sum (g \cdot F) \dots \dots \dots (1)$$



(a) 地盤モデル (軸対称)



(b) 地盤の変位

図-4 地盤のモデル化

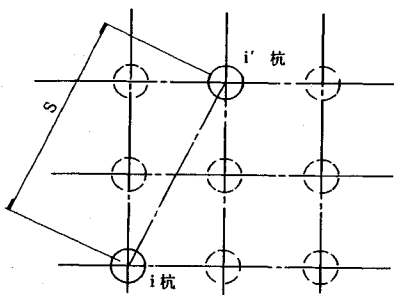


図-5 杭の距離

以上のようにして得られた地盤モデルの杭周囲の節点に、単位の荷重を作用させて地盤の変位を求める。いま節点 j に単位の鉛直荷重 $F_j=1$ を作用させたときの各節点 ($j=1 \dots j=M$) を通る水平面での沈下量を $f_{1,j}(r), f_{2,j}(r), \dots, f_{i,j}(r), \dots, f_{m,j}(r)$ とする。この変位式 $f(r)$ としては種々のものが考えられるが、ここでは次式により与えることとした。

$$f(r) = \frac{1}{C_1 r + C_2} \dots \dots \dots (4)$$

ここに r : 杭中心からの距離
 C_1, C_2 : 定数

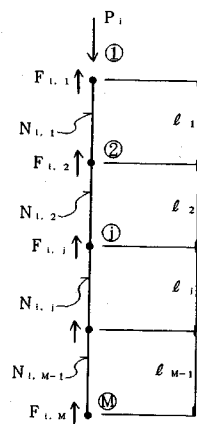


図-6 杭の力の釣り合い

定数 C_1, C_2 は、式 (4) の計算結果が軸対称有限要素法の計算結果に一致するように決定する。

次に f と g との関係について考える。いま i 杭 j 点から地盤に伝えられた単位の荷重による i' 杭 j' 点位置での地盤の沈下量を $g_{r,j}$ とし、また図-5 に示すように i 杭と i' 杭との平面距離を s とすると、 $g_{r,j}$ は次式のように書ける。

$$g_{r,j} = f_{r,j}(s) \dots \dots \dots (5)$$

以上のようにして、式 (3) の $[g]$ マトリクスは式 (4)、式 (5) により決定されることとなる。

【杭に対する方程式】

図-6 は i 杭に作用する力を示したものであるが、杭頭に作用した力 P_i により、杭には軸力 $N_{i,1}, N_{i,2} \dots N_{i,j} \dots N_{i,M-1}$ が、また杭と地盤の間には結合力 $F_{i,1}, F_{i,2} \dots F_{i,j} \dots F_{i,M}$ が発生して安定を保つ。すなわち外力の釣り合い条件より、次式が成り立つ。

$$P_i = \sum_{j=1}^M F_{ij} \dots \dots \dots (6)$$

また i 杭各部の軸力 $N_{i,1}, N_{i,2} \dots N_{i,j} \dots N_{i,M-1}$ は次式により書き表せる。

既設杭 ($i=1 \sim N_K$)

$$N_{i,1} = P_i - F_{i,1} = \sum_{j=1}^{M_K} F_{ij} - F_{i,1} = \sum_{j=2}^{M_K} F_{ij}$$

$$N_{i,2} = N_{i,1} - F_{i,2} = \sum_{j=2}^{M_K} F_{ij} - F_{i,2} = \sum_{j=3}^{M_K} F_{ij}$$

$$\dots \dots \dots$$

$$N_{i,j} = \sum_{j=1}^{M_K} F_{ij} - F_{ij} = \sum_{j=j+1}^{M_K} F_{ij}$$

$$\dots \dots \dots$$

$$N_{i,M_K-1} = \sum_{j=M_K-1}^{M_K} F_{ij} - F_{i,M_K-1} = \sum_{j=M_K}^{M_K} F_{ij}$$

新設杭 ($i=1 \sim N_S$)

$$N_{i,1} = P_i - F_{i,1} = \sum_{j=1}^{M_S} F_{ij} - F_{i,1} = \sum_{j=2}^{M_S} F_{ij}$$

$$N_{i,2} = N_{i,1} - F_{i,2} = \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij} - F_{i,2} = \sum_{j=3}^{M_s} F_{ij}$$

$$N_{i,j} = \sum_{j=j}^{M_s} F_{ij} - F_{ij} = \sum_{j=j+1}^{M_s} F_{ij}$$

$$N_{i,M_s-1} = \sum_{j=M_s-1}^{M_s} F_{ij} - F_{i,M_s-1} = \sum_{j=M_s}^{M_s} F_{ij} \quad (7)$$

次に既設杭について、その天端における沈下量を δ_K として各杭各点の沈下量 $\delta_{i,j}$ (i 杭 j 点の沈下量) と結合力 F_i との関係を考えて、次式を得る。

$$\delta_{i,1} = \delta_K$$

$$\delta_{i,2} = \delta_K - \frac{l_1}{A_K E_K} N_{i,1} = \delta_K - \frac{l_1}{A_K E_K} \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij}$$

$$\delta_{i,3} = \delta_{i,2} - \frac{l_2}{A_K E_K} N_{i,2} = \delta_K - \frac{l_1}{A_K E_K} \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij} - \frac{l_2}{A_K E_K} \sum_{j=3}^{M_s} F_{ij}$$

$$\delta_{i,j} = \delta_K - \frac{l_1}{A_K E_K} \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij} - \frac{l_2}{A_K E_K} \sum_{j=3}^{M_s} F_{ij}$$

$$\dots - \frac{l_{j-1}}{A_K E_K} \sum_{j=j}^{M_s} F_{ij}$$

$$\delta_{i,M_K} = \delta_K - \frac{l_1}{A_K E_K} \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij} \dots - \frac{l_{M_K-1}}{A_K E_K} \sum_{j=M_K}^{M_s} F_{ij} \quad (8)$$

同様にして新設杭の天端の沈下量を δ_S とすると、次式を得る。

$$\delta_{i,1} = \delta_S$$

$$\delta_{i,2} = \delta_S - \frac{l_1}{A_S E_S} N_{i,1} = \delta_S - \frac{l_1}{A_S E_S} \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij}$$

$$\delta_{i,3} = \delta_{i,2} - \frac{l_2}{A_S E_S} N_{i,2} = \delta_S - \frac{l_1}{A_S E_S} \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij} - \frac{l_2}{A_S E_S} \sum_{j=3}^{M_s} F_{ij}$$

$$\delta_{i,j} = \delta_S - \frac{l_1}{A_S E_S} \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij} - \frac{l_2}{A_S E_S} \sum_{j=3}^{M_s} F_{ij}$$

$$\dots - \frac{l_{j-1}}{A_S E_S} \sum_{j=j}^{M_s} F_{ij}$$

$$\delta_{i,M_s} = \delta_S - \frac{l_1}{A_S E_S} \sum_{j=2}^{M_s} F_{ij} \dots - \frac{l_{M_s-1}}{A_S E_S} \sum_{j=M_s}^{M_s} F_{ij} \quad (9)$$

式 (8)、式 (9) において、 $\alpha_k = l_j / (A_K \cdot E_K)$ 、 $\alpha_s = l_j / (A_S \cdot E_S)$ とおくと、次式のように書き換えられる。

$$\begin{Bmatrix} \{\delta_1\} \\ \{\delta_2\} \\ \vdots \\ \{\delta_j\} \\ \vdots \\ \{\delta_{N_K}\} \end{Bmatrix} = \delta_K^\circ - \begin{Bmatrix} \{\alpha_1\} & & & & \\ & \{\alpha_2\} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \{\alpha_i\} & \\ & 0 & & & \ddots \\ & & & & & \{\alpha_{N_K}\} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \\ \vdots \\ \{F_j\} \\ \vdots \\ \{F_{N_K}\} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \{\delta_{N_K+1}\} \\ \{\delta_{N_K+2}\} \\ \vdots \\ \{\delta_{N_K+i}\} \\ \vdots \\ \{\delta_{N_K+N_S}\} \end{Bmatrix} = \delta_S^\circ - \begin{Bmatrix} \{\alpha_{N_K+1}\} & & & & \\ & \{\alpha_{N_K+2}\} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \{\alpha_{N_K+i}\} & \\ & 0 & & & \ddots \\ & & & & & \{\alpha_{N_K+N_S}\} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \{F_{N_K+1}\} \\ \{F_{N_K+2}\} \\ \vdots \\ \{F_{N_K+i}\} \\ \vdots \\ \{F_{N_K+N_S}\} \end{Bmatrix}$$

.....(10)

式 (10) を簡単に次式で表す。

$$\{\delta_K\} = \delta_K^\circ - [\alpha_K] \{F_K\} \quad (11)$$

$$\{\delta_S\} = \delta_S^\circ - [\alpha_S] \{F_S\}$$

【荷重の釣り合い式】

既設の建物と新設の構造物との間に作用させるプレロード W は、既設の建物には上向きに、新設の構造物には下向きに作用することになる。そしてこれらの荷重は、各構造物の杭の天端の軸力に等しいことから、荷重の釣り合いにより次式を得る。

$$-W = \sum_{i=1}^{N_K} P_i = \sum_{i=1}^{N_K} \sum_{j=1}^{M_s} F_{ij}$$

$$W = \sum_{i=1}^{N_S} P_i = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{M_s} F_{ij}$$

.....(12)

【式の合成】

地盤に対する結合力 $\{F\}$ と沈下量 $\{\delta\}$ との関係式 (3) と、杭に対する関係式 (11) とにおいて、杭と地盤の相対変位がないものとする、両式においてベクトル $\{F\}$ および $\{\delta\}$ は同じものと考えることができるので、両式から $\{\delta\}$ を消去することができる。

$$[g_K] \{F\} = \delta_K^\circ - [\alpha_K] \{F_K\}$$

$$[g_S] \{F\} = \delta_S^\circ - [\alpha_S] \{F_S\}$$

.....(13)

式 (13) は、式の数 $(N_K \cdot M_K + N_S \cdot M_S)$ であり、未知数の和は $\{F\}$ が $(N_K \cdot M_K + N_S \cdot M_S)$ で、変位が δ_K と δ_S の2つである。したがって、式 (13) に式 (12)

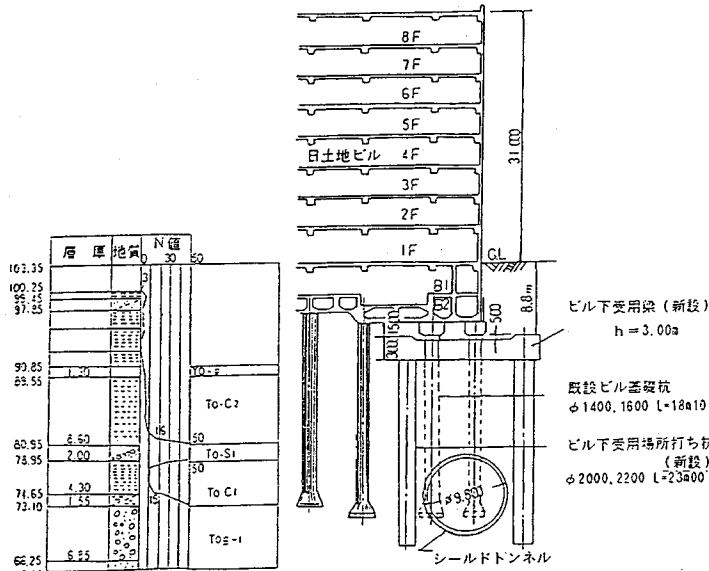


図-7 日土地ビル概要図 (基礎杭の撤去を伴う場合)

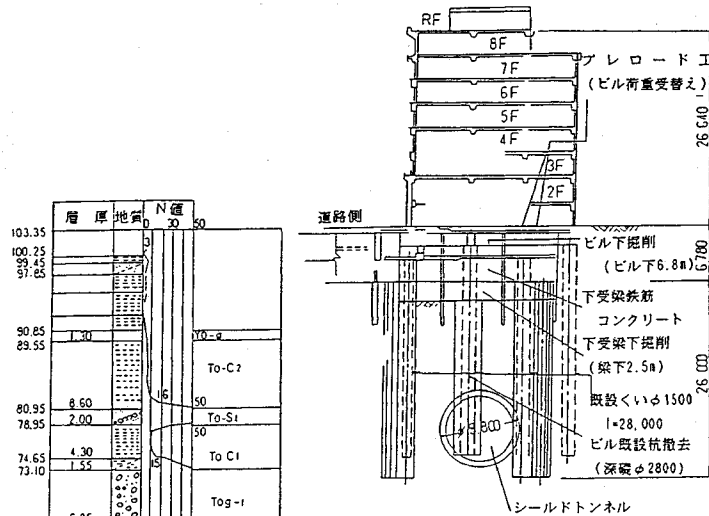


図-8 ナンヤビル概要

を加えると、方程式の数と未知数の数が一致するので解くことができる。

3. 現場実測値と理論値の比較

(1) 測定現場の概要

営団地下鉄11号線(半蔵門線)三越前～蠣殻町間のアンダーピニング工事において、アンダーピニング時の挙動を調べた。工事は日土地ビルとナンヤビルの2ヶ所で行われた。両者とも、建物全部をアンダーピニングするのではなく、建物の一部をアンダーピニングするものである(図-7, 8参照)。

またこれらの現場は比較的近くにあつて、地盤条件はほぼ同じと考えて良い。地質は地表より15mまで軟弱シルト層であり、その下にN値3~6の粘性土が9m近く続き、2m厚のN値50の玉石混じりの砂質土があり、さらにN値10~11の約4m厚の粘性土、N値50の砂礫層となっている。

ナンヤビルでは、既設杭は $\phi 1500-8$ 本、 $\phi 1000-2$ 本、その長さはいずれも $L=28$ mであり、これらの杭のうち $\phi 1500-4$ 本、 $\phi 1000-2$ 本を撤去する。新設杭は、リバース杭 $\phi 2100-6$ 本、 $L=26$ mである。そしてビルの総重量3100tfの約73%の2250tfをアンダーピ

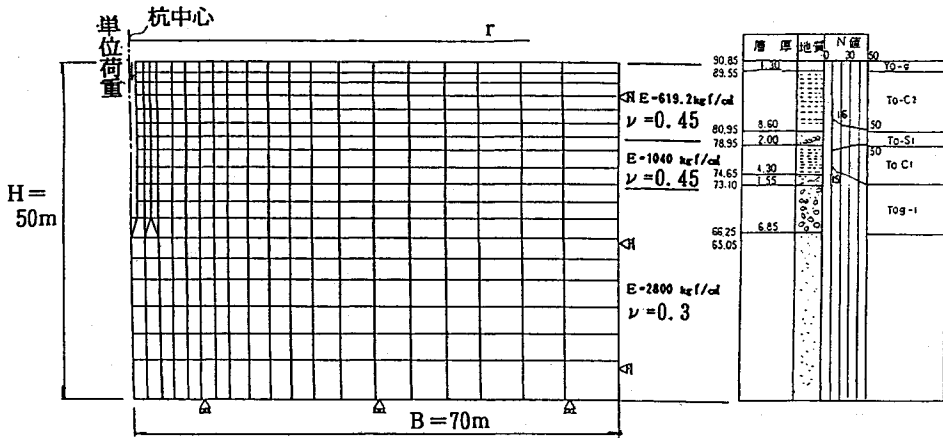


図-9 軸対称有限要素モデル

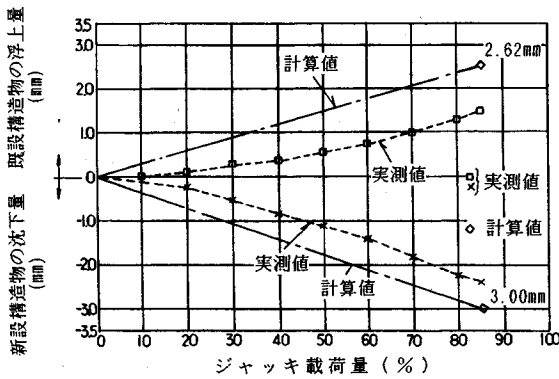


図-10 ナンヤビル初期プレロード変位図

ニングする。

日土地ビルでは、既設杭はφ1400, 1600 (いずれも L=18.1 m) で、新設杭はφ2000, 2200 (いずれも L=23 m) の2種類である。アンダーピニングによって受け替える荷重は2805 tfである。

(2) 計算条件

図-9に、ここで提案した計算法で用いる有限要素法モデルを示した。地盤の変形係数については、「道路橋示方書・下部工編」(日本道路協会)を参考にして、アンダーピニング時の荷重は短期荷重とみなし、次のように決めた。1層目と2層目の変形係数については、一軸圧縮試験より得られた値の8倍、3層目の変形係数については、N値より変形係数を求めた (E=2×28 N)。

ポアソン比については、第1層、第2層の粘性土の場合、非排水状態ではν=0.5とすべきであるが計算不能となるので、有限要素法の解析に際しては、ν=0.45を用いた。第3層の砂質土のポアソン比は、工学的判断によりν=0.30を用いた。

結果として解析に用いた変形係数 (E) とポアソン比 (ν) は次のような値にした。

表-1 実測値と計算値の比較

		実測値	計算値 (提案式)	計算値 (従来式)
日土地ビル	浮上量	0.56	2.28	0.0
	沈下量	3.16	3.09	9.6
ナンヤビル	浮上量	1.46	2.62	0.0
	沈下量	2.37	3.00	6.6

注) 浮上量: 既設構造物の浮上量 沈下量: 新設構造物の沈下量

第1層: E= 619.2 kgf/cm², ν=0.45

第2層: E=1040 kgf/cm², ν=0.45

第3層: E=2800 kgf/cm², ν=0.30

(3) 実測値と計算値の比較

ナンヤビルと日土地ビルのアンダーピニングについて実測値と計算値の両方の結果の比較を行った。

ナンヤビルについては、図-10に示すように、既設構造物の浮上量については実測値で1.5 mmを示しているが、計算では2.62 mmを示した。一方、新設構造物の沈下量は実測値では約2.4 mmを示しているが、計算値では3.00 mmを示した。

日土地ビルについては、表-1に示すように、既設構造物の浮上量については実測値では0.56 mmを示しているが、計算では2.28 mmを示した。新設構造物の沈下量では、実測値では3.16 mmを示したが、計算では3.09 mmを示した。両ケースとも、既設構造物の浮上量の計算値が実測値より少し大きくなったものの、新設構造物の沈下量に対する計算値は、実測値と良い一致を見た。

また従来採用してきた方法により得られる新設構造物の沈下量は、ナンヤビルで6.6 mm、日土地ビルで9.6 mmであり、実測値および本稿で提案した計算法により得られる値の2~3倍となっていて、従来の方法が予測手法として不適當であることがわかる。

4. あとがき

杭基礎で支えられている建物をアンダーピニングする際に、新設杭の沈下量を推定することは、プレロードを安全に導入するために欠くことの出来ないことである。この沈下量の推定には、従来は既設杭の存在を考えない一般の杭基礎と同じ方法が用いられてきた。しかし、プレロードを行うと、既設構造物に上向きの力が作用するために、実際に測定される沈下量は、このようにして計算される沈下量より相当小さいものとなることが一般的であった。

本稿では、こうした理論的な欠点をなくし、既設杭の存在を考慮した計算モデルを提案した。また提案した計算モデルの妥当性を見るために、2現場で得られた実測値と計算値の比較も行った。この結果ここで提案した方法の妥当性が確認できた。

なお、ここで提案した計算方法は、地盤を弾性体と仮定しているので、新設杭の許容支持力に対してプレロード荷重が大きき場合には適用できないと考えるが、一般の設計では $F_s=2\sim3$ 程度の安全率を考えているので適用できる。

また、ここで提案した考え方は、アンダーピニング時の挙動ばかりでなく、反力杭を使用する杭の鉛直載荷試験における荷重と沈下の関係（載荷杭の沈下量は反力杭の影響を受けて小さく測定されるが、実際の構造物では反力杭がないので、沈下量は試験結果から推定するものより大きくなる）の解析にも、設計荷重程度までのような低荷重レベルであれば使用できる。すなわち、載荷試験の結果と本稿で提案した方法による計算結果とが一致するように地盤条件を修正し、その地盤条件に対して文献³⁾の方法で荷重と沈下の関係を推定することにより、精度の良い荷重と沈下の関係を推定することができる。

参 考 文 献

- 1) 西林・矢萩：高層ビル群のアンダーピニング，トンネルと地下，Vol. 21, No. 3, 1990.
- 2) 山肩・八尾：マサツ群ぐい基礎の沈下に関する理論解について，第9回土質工学研究発表会，1974.
- 3) 中村・村田・水谷：軸対称有限要素法を使用した群杭の鉛直荷重に対する計算方法と適用例，土木学会第40回年次学術講演概要集，第3部，1985年9月.

(1990. 11. 9 受付)

SOME CONSIDERATIONS ON UNDERPINNING BEHAVIOR OF BUILDINGS SUPPORTED ON PILE FOUNDATION

Jiro INOSE, Joji KONISHI and Hyoji NAKAMURA

The theoretical and numerical method on the underpinning problem, one of the temporary supporting systems, is studied in this paper.

The theoretical explanation by using the matrix analysis method is introduced and applied to the supporting problem temporarily loaded on the pile foundation consisting of group piles.

This method is characterized by using the calculated results of F.E.M. as the displacement property of foundation.

In addition, some examples of underpinning by using this numeric method are analyzed and studied compared with the measured results of above examples.