

アンダーピニングに用いられた場所打ち杭の沈下特性の研究

防災設計工学研究室 五十嵐 健

指導教官 海野 隆哉

1. はじめに

杭の支持力の研究方法は大きく分けて、理論的研究と実験的研究がある。理論的研究には、支持力理論、杭打ち式、荷重-沈下関係の推定法があり、それぞれ独自に発展を遂げている。この中でも、荷重の初期から極限荷重に至るまでの杭頭の荷重-沈下量関係を推定する方法の研究が最近多くなっている。この研究の終局目標は、載荷試験を行うことなく杭頭の荷重-沈下関係を正しく推定することにある。

京都市地下鉄烏丸線が建設される際にアンダーピニング工法として、安全性の高い添えばり工法が採用された。その際、高架橋の沈下対策のため仮受け杭（場所打ち杭）にプレロードを与えた。プレロード時に測定された荷重、仮受け杭と仮受け梁の相対変位および高架橋の変位をもとに杭の沈下量が求められた。この沈下量の特性を研究することが本研究の目的である。

2. プレロードの施工

図1に示す場所打ち杭56本に対して、高架橋線路方向柱列の荷重は同一とし、線路直角方向のくい列に対し7系列に分け、100t、200t、300tの油圧ジャッキをプレロード荷重によって組合せ配置した。

プレロード導入は支点（仮受け杭）が沈下しないとした時における反力をプレロード荷重として56本の仮受けくいに対して、A～G通りに合わせ7台の電動ポンプユニットでいっせに行った。また、荷重は各

杭1本当りの計画最大荷重の20%、40%、60%、70%、80%、90%、100%と7段階に分けて加圧した。加圧速度は1段階5分以内を目標に行った。

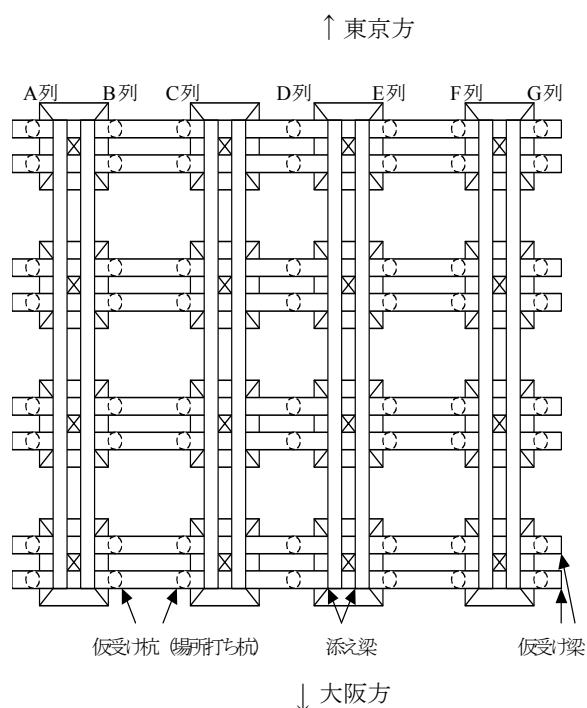


図1 仮受け杭（場所打ち杭）

3. 沈下特性の解析

全部の仮受け杭について、仮受けばりとは杭頭との相対変位量を測定し、その値から仮受けばりのたわみ量および高架橋の変位量を差し引いたものを杭の沈下量とした。式で表すと下式のようなになる。

$$\delta = \delta_0 - (\delta_1 + \delta_2)$$

ここに、 δ : 仮受け杭の沈下量

δ_0 : 仮受け梁と杭との相対差

δ_1 : 高架橋の浮き上がり

δ_2 : 仮受け梁のたわみ

3.1 荷重沈下関係図

プレロードにより得られた荷重－沈下量関係をグラフに表した（パソコン画面上）。このグラフを見ると測定されたデータの中で、不連続データ、不規則データ、そして異常値データがあった。また、仮受けばり杭との相対変位を表わす δ_0 をもとに荷重－相対変位量関係をグラフに表した（パソコン画面上）。

以上のグラフに見られる不連続データ、不規則データや異常値データの原因として考えられるのは機械的誤差や、人為的誤差があげられる。また、同じプレロード荷重がかかっているにもかかわらず、沈下量に差があるのは場所打ち杭の特性によるものと考えられる。

3.2 荷重沈下近似曲線

上記のグラフにおいて沈下量に関して不連続データ、不規則データ、そして異常値データをもつ杭を除き、残った杭の荷重－沈下量関係を半対数グラフにした。それに回帰曲線を加えて表した。ここでは例として A 列について示した（図 2）。同様に荷重－相対変位量関係についても半対数グラフに表わした。採用した杭は 2～4、9～16、19、24～30、33～38、43、44、47～50 である。

なお、図中には、 $y=ax^b$ の形で記載されているが、 y は沈下量 δ または相対変位量 δ_0 を表わし、 x は荷重 P を表わす。

3.3 近似曲線の係数、指数の比較

図 2 等で求めた回帰曲線 ($y=ax^b$) の係数 a と指数 b の関係をグラフに表すと図 3 のようになる。図を見ると杭頭荷重 P から

杭の沈下量 δ を推定する近似式は、一般に、 $\delta = aP^b$ と a 、 b 二つの係数を持つ形で表わされるが、 a と b は互いに独立ではなく相関性がある。近似曲線は A、B、C、E、F、G 列と D 列の二つに分けて加えた。これはプレロード最大荷重を考慮してそのように考えたからである。

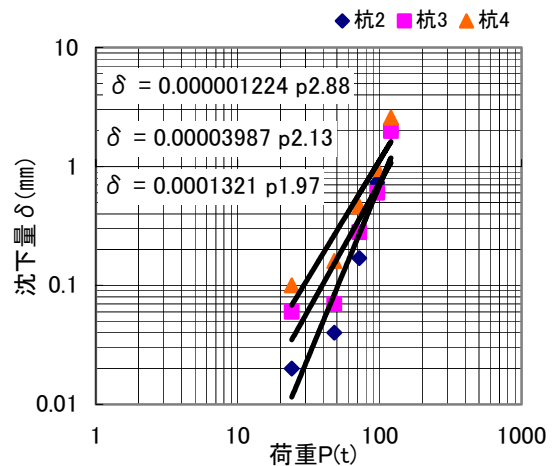


図 2 荷重－沈下量関係（A 列）

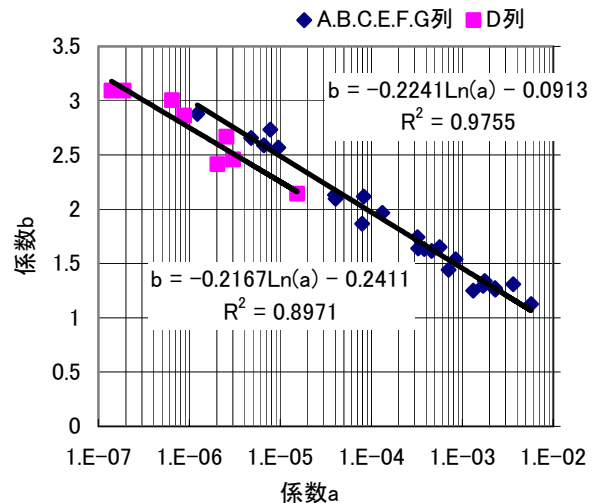


図 3 ABCDEF 列と G 列の近似式

また、図 3 から a は広い範囲にわたってばらついているのに対し、 b は狭い範囲に分布していることがわかる。そこで分布範

囲の狭い b の関数として a を表わせば荷重から沈下量を推定する式が簡素化されるので、以下のような検討を行った。

3.4 提案式

図3の対数近似式の係数 a と切片 b をもとに、荷重－沈下量が累乗近似曲線の指数 b により求まる提案式を示したものが下式である。

$$\delta = e^{\frac{\beta}{\alpha}} \left(\frac{P}{e^{\frac{1}{\alpha}}} \right)^b \quad \dots \dots \text{提案式}$$

上式の求め方：図2より沈下量 δ と荷重 P の関係は

$$\delta = aP^b \quad \dots \dots \text{①}$$

図3の対数回帰式 ($y = -\alpha \ln x + \beta$) は

$$b = -\alpha \ln a + \beta$$

$$\ln a = \frac{\beta - b}{\alpha}$$

$$a = e^{\frac{\beta - b}{\alpha}} \quad \dots \dots \text{②}$$

①式の a に②を代入すると

$$\delta = e^{\frac{\beta}{\alpha}} \left(\frac{P}{e^{\frac{1}{\alpha}}} \right)^b \quad \text{となる。}$$

図の回帰曲線より提案式の係数は以下のようなになる。

1. 荷重－沈下量関係式

(1) A-G 列： $\delta = 0.665(P/86.7)^b$

(2) D 列： $\delta = 0.329(P/101.0)^b$

2. 荷重－相対変位量関係式

(3) A-G 列： $\delta_0 = 2.883(P/133.9)^b$

(4) D 列： $\delta_0 = 0.256(P/67.8)^b$

上記の式を見てわかることは b が変化し

ても P が分母と同じ値なら沈下量や相対変位量の値は変わらない。これらの式より、荷重 P が 100t 前後の時の沈下量は比較的安定した値、すなわち b の値の影響を受けにくい値となる。

b の値を (1) 式では 2.5、(2) ～ (4)

式では 2 とすれば $P=100t$ の時の沈下量は

A～G 列： $\delta = 0.950\text{mm}$

D 列： $\delta = 0.323\text{mm}$

同じく、 $P=100t$ の時の相対変位量は

A～G 列： $\delta_0 = 1.608\text{mm}$

D 列： $\delta_0 = 0.557\text{mm}$ となる。

3.5 提案式の検証

提案式に実際の数値を代入し、求めた値をまとめた。この提案式より求めた値（推定値）を実測値で割った値を誤差率と定義する。誤差率が 1 というのは推定値が実測値に一致、すなわち、真値を表わしている。誤差率が 1 から離れる程、誤差が大きいことを表わす。そして誤差率をまとめた。

誤差率を見ると一定な誤差になることを示していないことがわかった。例えば、杭 2 においてはプレロード荷重が小さくなるにつれて、誤差率が大きくなっていくが、杭 25 では逆の傾向を示していた。

3.5.1 逆数比較

誤差率の中で 1 よりも小さい値をもつものは逆数を取った。そしてそれをまとめた。プレロード最大荷重の大、中、小のグループに分けて考えることにした。

δ の D 列においては杭 25、27 の値が偏った値をとっていた。 δ_0 の D 列についてはほとんど一定の値になっていることから杭 25、27 は高架橋の浮上り量について適切

なデータが得られていなかったものと思われる。この杭 25、27 を除いて考えれば D 列は 1 に近い値をとっていた。このことから、荷重が大きくなるほど安定した沈下量およびその予測値が得られるのもと思われる。

3.5.2 対数化比較

誤差率を対数化したものをまとめた。この対数表示した誤差率の Pmax、80%、60%、40%、20%毎の平均値には最大 9%の誤差が含まれる（相対変位量 Pmax の平均値： $10^{-0.0382}=0.916$ ）が、これら 5 個の平均値の平均、すなわち、全ての対数表示された誤差率の平均値は、沈下量 δ に関しては 0.00246、相対変位量 δ_0 に関しては -0.00042 である。これをもとの引数に直すと、沈下量 δ に関する誤差率の総平均値

$$D_{AVE}=1.006 \quad (=10^{0.00246})$$

相対変位量 δ_0 に関する誤差率の総平均値

$$D_{AVE}=0.999 \quad (=10^{-0.00042})$$

と、ほとんど偏りが無い。すなわち、提案式による個々の推定値には誤差がかなり含まれるものの誤差率の平均値はほぼ 1（=すなわち、真値）になる。

沈下量 δ に関する対数表示された誤差率の標準偏差 σ はデータが正規分布すると仮定して 0.197 である。これより、提案式から計算される仮受け杭の沈下量 δ (mm) の推定値は、68%の確率で

$$D_{AVE} \cdot 10^{-\sigma} = 1.006 \cdot 10^{-0.197} = 0.64 \text{ から}$$

$D_{AVE} \cdot 10^{\sigma} = 1.006 \cdot 10^{0.197} = 1.58$ の間の誤差率に入る。

同様に、仮受け杭と仮受け梁との間の相対変位量 δ_0 に関する対数表示された誤差率の標準偏差 σ は 0.155 である。提案式か

ら計算される相対変位量 δ_0 (mm)の推定値は、68%の確率で

$$D_{AVE} \cdot 10^{-\sigma} = 0.999 \cdot 10^{-0.155} = 0.70 \text{ から}$$

$D_{AVE} \cdot 10^{\sigma} = 0.999 \cdot 10^{0.155} = 1.43$ の間の誤差率に入る。

4. 結論

今回の解析は困難なものであった。そのため、沈下の性状をうまくまとめられなかった。A~G 列に対してそれぞれ異なったプレロード荷重が設定されているため、各杭列毎に荷重レベルに差があり、全体を一樣に比較することができなかった。また、場所打ち杭におけるバラツキの特性が現れていると考えられる。

杭頭荷重 P から仮受け杭の沈下量 δ 、仮受け杭と仮受け梁の間の相対変位量 δ_0 を推定する近似式を提案した。この提案式は、場所打ち杭のばらつき特性のため、係数 b は杭毎に推定する必要があり、しかも計算結果はかなりの誤差を含む結果となった。しかし、推定値の総平均値は偏りがなく、第 1 近似値の推定には使えるものと考えられる。

今後に残された問題点としては、高架橋の変位の測定結果に信頼性に欠けると思われる部分があることである。これについては正しいと思われる値を何らかの方法で推定する必要がある。

参考文献

- ・京都駅新幹線高架橋アンダーピニングに伴う応力および変位測定報告書、鉄建建設株式会社、中央復建コンサルタンツ株式会社
- ・地盤工学 海野隆哉、垂水尚志 編著