

1. まえがき

杭の荷重試験で軸力を測定する場合、通常荷重試験開始時の杭体のひずみ・応力を全てゼロと仮定し、試験中の増分をそのまま測定値として用いている。しかし、ひずみの原点は任意に設定しうるものであるが、応力についてはそうでないことに留意する必要がある¹⁾。したがって、特に打込み杭では、杭体(または反力として周辺地盤)には試験開始時に、一般にすでに無視しえない応力が発生している。この初期残留応力は、測定結果の解釈・適用に際して重要な役割を果たすものである²⁾。しかし、今まであまり測定されておらず、また正確な測定は容易でない。本稿は、残留応力発生メカニズムを考察して解析法を検討し、非線形簡易化BEMによる実際の測定例の解析結果を報告する。

2. 初期残留応力発生メカニズム

杭の初期残留応力は、

- ① 打込み中の動的荷重とリバウンド、
- ② 打込み時に発生した間隙水圧の放置期間中の消散による周辺地盤の沈下、

に起因して発生する。

通常の荷重開始時の応力(軸力)を全てゼロとする荷重試験法でも、杭頭荷重をゼロまで除荷した時に杭体に軸力が残留するのが見られる。①のメカニズムはこの現象と同じもので、動的または静的な荷重によって生じた杭体の圧縮が元に戻ろうとする際に、周面摩擦抵抗によって完全に戻れないために発生する。したがって、鋭敏粘土中に打込まれた杭の場合には、打込み直後の周面摩擦抵抗がほとんど無いため、①のタイプの残留応力は発生しない³⁾。

②のタイプのものは、ネガティブ・フリクション(NF)と同じメカニズムである³⁾。

3. 静的荷重・除荷による解析法

①のタイプのものは、波動理論に基づく解析法で算定しうる²⁾。また、そのメカニズムの類似性から、静的に極限荷重まで荷重した後に、杭頭荷重をゼロまで除荷した時の残留応力で近似的に算定できる⁴⁾。解析の際に重要なことは、地盤に関するインプットとして、打込み中の動的特性に対応するものを適切に与えることである。しかし、

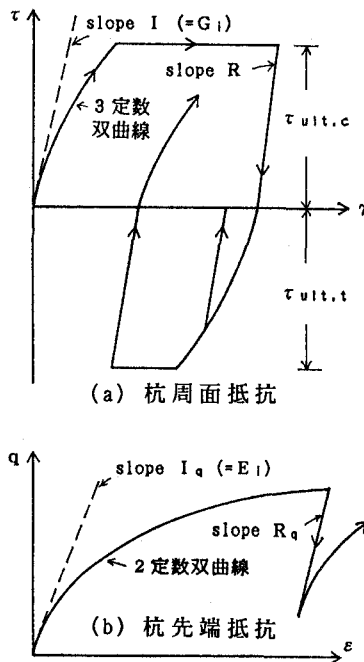


図-1 簡易化BEMで仮定した構成式⁷⁾

砂質土でも、乱れによる剛性・強度の低下が生じる⁵⁾ので動的特性を静的特性から推定する際に、両者の差に留意する必要がある。

②のNFタイプのものを現象に忠実に解析するためには、周辺地盤の経時沈下量と、シキソトロピーと圧密を考慮した剛性・強度の経時変化が必要である。しかし、地盤と杭との相対沈下量によって杭体の軸方向応力(および地盤内のせん断応力)が発生する点では、①のタイプと同じである。したがって、放置期間中の平均的な剛性・強度の地盤条件のもとで、静的に極限荷重まで荷重した後に除荷した際の残留応力で、近似的に推定しうると考えられる。

以上の考察から、①・②を含めた杭の荷重試験開始時の初期残留応力を、比較的計算の容易な静的沈下解析法を用いて、極限荷重までの静的荷重の後の除荷時の残留応力によって推定しうると考えられる。その際、荷重試験開始時の応力をゼロと仮定する通常の方法で、極限荷重付近まで載

表-1 基本および修正インプット定数⁹⁾

	基本インプット	修正(1)	修正(2)
初期弾性係数	$E_i=1500c_u^*$	同左、 (先端は2倍)	修正(1) の5/3倍
極限摩擦抵抗	$\tau_{ult}=0.5c_u$	0~3mは1/5倍	同左
極限先端抵抗	$q_{ult}=9c_u$	2倍	同左
ポアソン比	$\nu=0.5$	同左	同左
単杭周辺の 仮想影響半径	$R=mr_o=7(d/2)$ ($Rr_o=0.25$)	同左	同左
基盤層	GL-18m, $E=1,100$ [MPa] $=11,000$ [kgf/cm ²]	同左	同左
杭の弾性係数	中空部を 考慮して $E_p=2.78 \times$ 10^4 [MPa] $=2.84 \times 10^5$ [kgf/cm ²]	同左	同左

* c_u [kPa] = $53 + 7.2z$ (深度 z は[m]単位)

残留軸力 [kN]

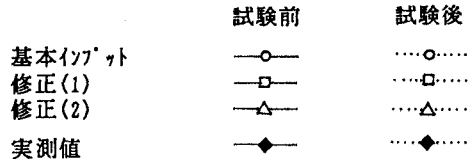
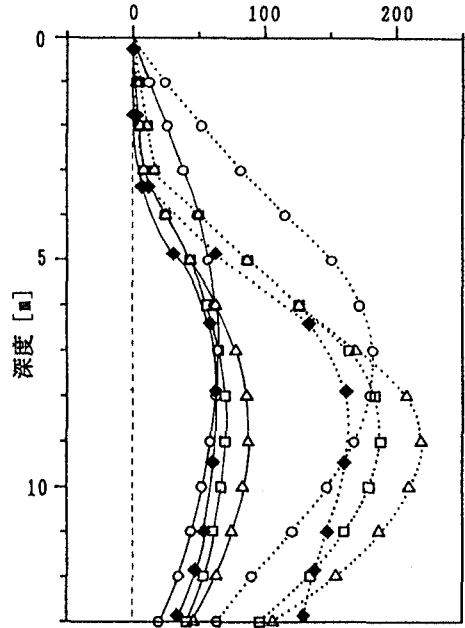


図-2 計算・実測結果の比較

荷した試験終了時に残留応力があまりなければ、放置期間中の平均的な地盤定数は載荷試験中のものとはほぼ同じと推定できる。そうでなければ、地盤の剛性・強度は、載荷試験解析のものとは異なるものを用いる必要がある。打込み後の経時的な土の強度増加(set-up)は、きわめて複雑な現象であり、一般的な推定式は現在のところまだない。その中で、載荷試験時と打込み直後の土の強度の比(set-up factor)として提案されている次の値⁹⁾が一応の参考となろう：3(軟弱粘土)、2(硬質粘土)、1(その他の土)。土の剛性の経時変化についても、まずは強度と同じと仮定する。これらの比の妥当性は、測定が比較的容易かつ正確な載荷試験によって発生する残留応力の実測値を解析結果と比較することで、ある程度チェックが可能である。

静的載荷・除荷解析法として、パソコンで容易に非線形解析が可能でインプット定数の簡潔な図-1に示した双曲線型の周面摩擦抵抗-せん断ひずみ、先端抵抗-鉛直ひずみ関係を仮定した非線形簡易化BEM⁷⁾を用いる。砂質土の場合、先端での拘束圧の影響で、 R_q は I_q よりも大きくするほうが良いと考えられる。

4. 解析例

飽和過圧密粘土地盤における打込み鋼管杭の初期および試験終了後の残留応力⁸⁾を解析してみる。この試験の沈下解析については、すでに報告している⁹⁾。初期残留応力算定のためのインプット定数としては、過圧密粘土地盤なので、表-1⁹⁾に

示した沈下解析すなわち載荷試験の解析に用いた土の剛性・強度(初期弾性係数 E_i ・極限摩擦抵抗 τ_{ult} ・極限先端抵抗 q_{ult})を1/2倍したものを用いる。また、図-1において $I = R$ 、 $I_q = R_q$ 、 $\tau_{ult,c} = \tau_{ult,t}$ を仮定する。

2本の単杭の実測値の平均値をベースにした、初期残留軸力(打込み15日後)と極限荷重まで載荷した後の除荷時の残留軸力の測定結果とともに、計算結果を図-2に示す。載荷試験での τ_{ult} の実測分布結果を参考にした修正データによる計算結果は、実測結果とほぼ対応している。したがって、土の剛性・強度に関する前述の仮定は、本事例ではほぼ妥当であったと判断できる。

参考文献 1)Wroth & Houlsby(1985):Proc. 11th ICSMFE, Vol. 1, p. 5 2)Holloway et al.(1978): Proc. 10th OTC, Paper No. 3306 3)Fellenius & Broms(1969):Proc. 7th ICSMFE, Vol. 2, pp. 93-98 4)Poulos(1987):Proc. ASCE, Vol. 113, No. GT3, pp. 216-229 5)Mitchell & Solymar(1983):Proc. ASCE, Vol. 110, No. GT11, pp. 1559-1576 6)Poulos & Davis(1980):Pile Foundation Analysis and Design, p. 66 7)平山(1990):土と基礎, Vol. 38, No. 7, pp. 51-56 8)O'Neill et al.(1982):Proc. ASCE, Vol. 108, No. GT12, pp. 1605-1623 9)平山(1991):第26回土質工学研究発表会(投稿中)