

# 杭基礎の圧密沈下解析

## Consolidation Settlement Analysis of Pile Foundations

平山英喜 (ひらやま ひでき)

(株)ジオトップ 基礎研究室

### 1. まえがき

いわゆる摩擦杭を用いた杭基礎は、直接基礎の場合にその直下で生じる大きな応力集中を杭周面から広い範囲に分散させて、沈下を減少させるものである。したがって、沈下の予測が非常に重要な課題となる。

2章で、杭基礎の沈下の機構を、直接基礎との比較を含めてまとめる。続いて、実務における計算法は、70年あまり前に提案された概略検討法からほとんど変わっていない現状を説明する。そして、杭基礎の場合も弾性論に基づいた方法を適用しうることを述べる。この観点から、3章で、Mindlin (ミンドリン) の応力解とその積分による応力分布の計算例を図示して、摩擦杭による荷重の分散効果を考察する。また、応力分布の簡便概算法を概説する。

### 2. 杭基礎沈下の機構と計算法の現状

#### 2.1 杭基礎の沈下機構

地盤の変形を、体積変形とせん断変形の和として考える。杭基礎の周辺地盤の変形状況の模式図を図-1に示すが、次のような特徴がある<sup>1)</sup>。杭軸の周辺地盤では単純せん断タイプのせん断変形が、沈下の要因となる。杭間地盤の杭周面に平行な面では、逆向きのせん断応力が重ね合わさるため、せん断変形は緩和される。杭先端レベルより深い所では、体積変形も大きくなり、せん断変形成分は単純せん断タイプに近くなって、沈下の機構は次節で説明する地表面載荷の場合と類似したものになる。

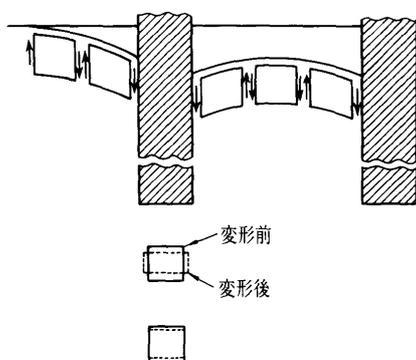


図-1 杭基礎における周辺地盤の変形

上記の変形機構は、以下のような解析結果で定量的に示される。①ミンドリン解を利用した簡易化BEM解析の結果<sup>2)</sup>によると、地表面載荷に比べて、杭基礎の沈下にはせん断変形によるものの割合が大きい。単杭の場合

にこの傾向は顕著になる。②弾性体を仮定した連成FEM解析結果<sup>3)</sup>によると、群杭基礎の載荷によって発生する過剰間隙水圧は、杭に囲まれた領域ではきわめて小さく、杭先端部下方では大きい。

#### 2.2 直接基礎の圧密沈下の慣用計算法

地表面載荷型の圧密沈下計算では、多次元的に検討する場合でも、弾性論によって求まる応力の内の鉛直応力成分だけを用いて一次元圧密計算法を適用する方法が広く慣用されている。ブーシネスク解の鉛直応力には弾性定数が一切含まれず、実測結果からもその適用性は評価されている。また、弾性論によると、慣用計算法と三次元解析による沈下量の差は、ポアソン比 $\nu$ が0.3程度以下ならば、さほど大きくないことが示される<sup>4)</sup>。したがって、最終沈下量の計算に対して、慣用法は実用的なものであるとされている。

#### 2.3 杭基礎の圧密沈下計算の現状とその背景

日本の設計基準類では、図-2に示す仮想載荷面を地表面と仮定して圧密沈下を計算する方法が広く採用されている。摩擦杭の場合、仮想載荷面は杭長の2/3の深さとする。この考え方は、Terzaghi & Peck<sup>5)</sup> (テルツァーギ・ペック) に説明されている。外国では Terzaghi-Peck method (以降 T-P 法と略記), equivalent raft method (等価直接基礎法) などと呼ばれている。

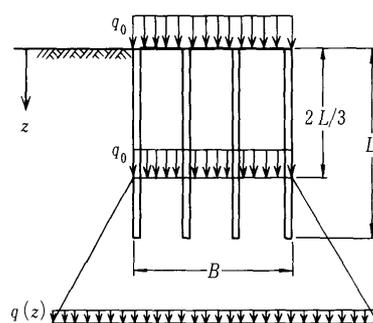


図-2 Terzaghi-Peck 法 (T-P 法)

T-P法の考え方は、1925年に Terzaghiによって最初に発表された<sup>6)</sup>。当時、ほとんどの技術者が、地盤条件によらず実際の群杭基礎の沈下は単杭の鉛直載荷試験の設計荷重での沈下と同じである、と思っていた。Terzaghiの意図は、杭先端レベルよりずっと深いところに軟弱層がある場合に、その圧密沈下に起因して群杭基礎で大きな沈下が発生する可能性があることを説明することであった。杭の周面摩擦応力分布は、杭先端レベルまでは深さ方向に線形増加することを仮定して、その重心位置から仮想載荷面を杭長の2/3の深さとしている。ま

事例報告

た、地盤内応力を計算するのに弾性論を用いるような理論的な試みは、杭基礎の場合には全く不適当であるとしている<sup>5)</sup>。鉛直応力増分は、直接基礎の場合には多用される弾性論に基づいたものでなく、概算のための簡便法である荷重分散法が通常用いられる。すなわち、T-P法は、摩擦杭基礎で著しい圧密沈下が生じるかどうかを検討するためのものであり、沈下量を定量的に予測するためのものではない。

2.4 T-P法の問題点と他の計算法との関連

国際的なアンケート<sup>7)</sup>によると、群杭の沈下予測法に関する回答ははっきりしないものが多かったが、具体的に挙げられた方法は次の三つであった。

- ① ミンドリン解を利用する BEM 解析法 (18%)
- ② 地中に仮想荷界面を仮定して、杭先端以深の軟弱層の圧密沈下だけを計算する方法 (13%)
- ③ 仮想荷界面を地表面と仮定して、仮定の直接基礎に置き換えて沈下を計算する方法 (9%)

①は、三次元弾性論に基づいているので、即時沈下も計算できる。ただし、ミンドリン解の利用は、地盤を半無限均質弾性体と仮定したものであるため、杭先端以深に先端部の層より軟弱な層が存在する場合の沈下は、別途考慮する必要がある<sup>2)</sup>。

③は、T-P法あるいはその修正法である。しかし、圧密沈下の検討に関しては、2.1~2.3節で述べたことから、②の方が適切である。杭長の深さまでのせん断変形を主とした沈下は、別途考慮すべきものである。このタイプの沈下は、支持力の安全率が3程度以上あれば時間依存性は小さく<sup>2)</sup>、単杭の沈下に群杭効果を考慮して算定することができる。単杭の沈下は、荷重試験結果を用いるか、荷重伝達法や①の方法で解析的に算定することができる。群杭効果は、荷重試験が困難なので、①の方法で杭-土-杭間の相互作用を評価するのが実用的である。この場合、杭間の土のひずみレベルを考慮した地盤定数を用いることに留意する必要がある<sup>8)</sup>。

①の方法により、杭基礎の設計においても、弾性論を用いた解析が実用的なものであることが認識されてきた。実際の計算は、計算図表<sup>2)</sup>を利用するか数値解析による。この方法は変位解を用いて定式化されているため、地盤内応力分布は、表に現れない。一方、②と③の方法は、直接基礎に置き換えて、しかも荷重分散法を用いる。したがって、杭基礎に対しては、2.2節で説明した弾性論による鉛直応力を用いる慣用法に相当する方法が無い。

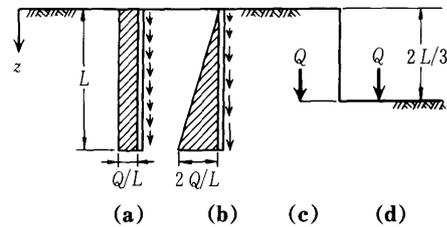
そこで、次章で、ミンドリン解を積分して求められた線荷重に対する Geddes<sup>9)</sup> (ゲデス) の解を用いて、杭周面力による地盤内鉛直応力  $\Delta\sigma_v$  の分布を考察する。

3. 弾性論による応力分布の考察

3.1 単杭の場合の応力分布

ミンドリン解およびその積分解は、プーシネスク解に比べてかなり複雑であり、解の持

つ特性が把握しにくい。そこで、まず周面荷重による荷重分散効果と根入れ効果 (すなわち集中荷重に対する分散荷重の影響と地表載荷に対する地中載荷の影響) を基本的な条件のもとで解釈するために、単杭に対して図-3に示す条件・使用解のもとで  $\Delta\sigma_v$  を比較してみる。ポアソン比  $\nu$  は、0.3または0.5とした。ただし、図-3(d)のプーシネスク解の場合は、ポアソン比に関係しない。



	(a)(b) ゲデス解	(c) ミンドリン解	(d) プーシネスク解
荷重分散効果	Yes	No	No
根入れ効果	Yes	Yes	No

図-3 解析における条件・使用解

図-4に、 $\Delta\sigma_v = C(Q/L^2)$  (ここに、 $Q$ =載荷重、 $L$ =杭長) と表した時の無次元応力係数  $C$  の分布を示す。この図から、単杭の場合の荷重の分散および根入れ効果の特性に関して、次のようなことが分かる。

- ① ミンドリン解による(c)や、その積分解のゲデス解による(a)(b)の  $\Delta\sigma_v$  においても、ポアソン比の影響はさほど大きくない。
- ② (a)(b)の分布荷重の場合であっても、 $\Delta\sigma_v$  が最も大きいのは杭先端周辺である。杭先端レベル以深の同一点では、(b)の線形増加分布の方が大きな値になるが、両者の差は小さい。
- ③  $2L/3$ の深さに集中荷重として作用すると仮定した場合の(c)の  $\Delta\sigma_v$  は、 $z > 4L/3$ では(a)(b)の分布荷重の場合とほぼ一致する<sup>2)</sup>。しかし、当然のことながら、荷重点に近づくほど過大評価する。
- ④ (d)のプーシネスク解は(c)のミンドリン解よりも荷重軸の下方周辺でかなり大きな  $\Delta\sigma_v$  を与える。その倍率は、杭軸延長線上の  $z = L \sim 2L$  の同一点において約2倍となる<sup>9)</sup>。

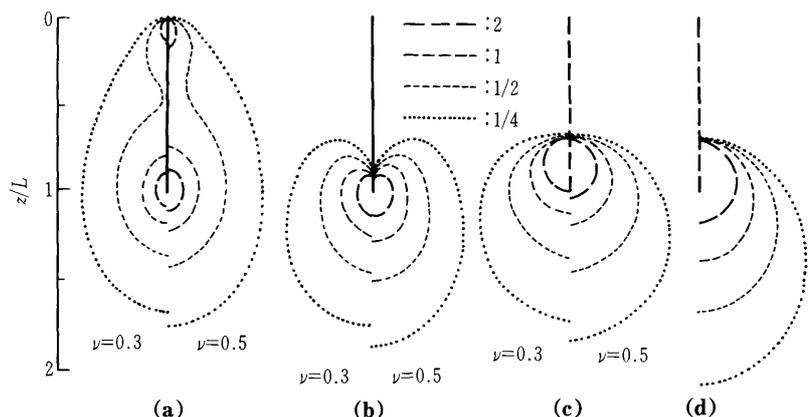


図-4 単杭における  $C = \Delta\sigma_v(L^2/Q)$  の分布の比較

### 3.2 群杭の場合の応力分布とその簡便法

解析条件として、図-3の荷重条件の基に、杭中心間隔・杭本数・基礎幅/杭長(=B/L)・ポアソン比 $\nu$ をパラメーターとして、群杭の場合の応力分布を計算した<sup>6)</sup>。すなわち、図-4の結果を、種々の条件で重ね合わせた。図-5に線形分布荷重(図-3(b)の条件)、 $L=10\text{m}$ 、杭中心間隔1.5m、 $\nu=0.5$ の条件での、 $B/L=0.3$ と3.0の場合の計算結果を示す。このような弾性論に基づく計算結果から、以下のような特徴がまとめられる。

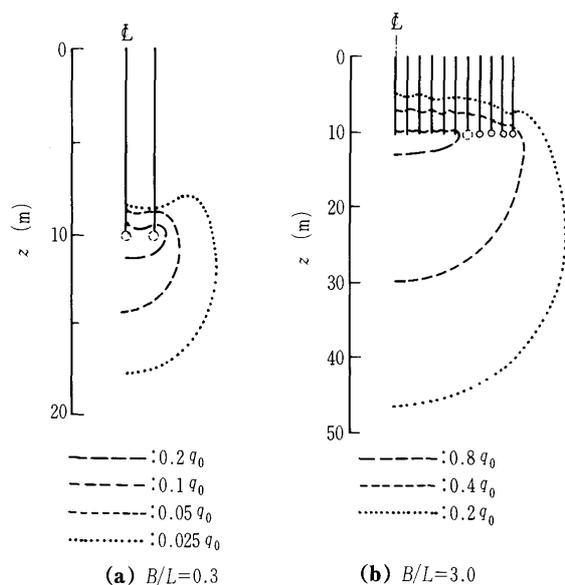


図-5 群杭の場合の $\Delta\sigma_v$ の分布計算例

- ①  $B/L$ が小さいほど、摩擦杭の応力分散効果が高い。杭本数を増やして支持力に対する安全率を大きくしても、沈下低減効果はあまり期待できない。
- ② 摩擦杭の場合でも、杭先端レベルでの応力が最も大きくなる。

弾性論による応力の重ね合わせ計算は手計算には煩雑すぎるので、前記の計算結果を基に、図-6に示す概算のための鉛直応力分布の簡便法を提案した<sup>6)</sup>。この方法では、以下のように仮定している。

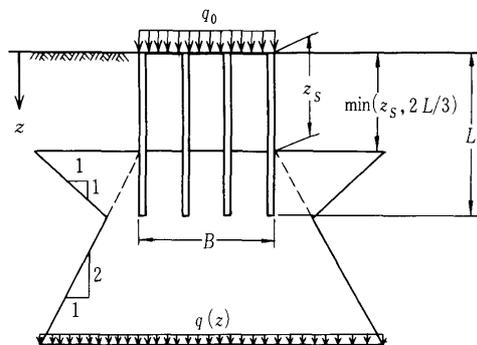


図-6 群杭の周面荷重による鉛直応力増分分布の簡便概算法

- ① 杭先端以深の応力算定のための仮想載荷面の深度 $z_s$ は $B/L$ の関数とし、 $z_s = (L/6)(3+B/L) \leq L$ とする。
- ② 杭先端以浅の応力に関しては、 $z_s$ と $2L/3$ の小さ

い方の値の深度までを考慮し、荷重分散角は $-45^\circ$ とする。

上記①の仮定により、 $B/L$ が1.0より大きくなると、簡便法はT-P法より杭先端以深の応力を大きく評価する。逆に、②の仮定により、簡便法はT-P法に比べて $2L/3 \sim L$ の応力を非常に小さく評価する。軟弱粘土<sup>10)</sup>・硬質粘土<sup>11)</sup>での実測例でも指摘されているように、T-P法はこの範囲の沈下を過大評価する。

文献11)に対する解析では、実測最終沈下量に対してT-P法は1.9倍、簡便法は1.2倍の値が計算された<sup>12),13)</sup>。

### 4. あとがき

摩擦杭は長尺になるほど沈下低減に対して効果的であるが、T-P法によると $2L/3 \sim L$ の層厚も杭長に比例して大きくなるので、その効果を十分考慮できない場合がある。種々の経験的な修正法が提案されてきたが、弾性論に基づいて提案した修正法について説明した。

### 参考文献

- 1) 平山英喜：杭基礎の沈下・変形の機構と解析法、「杭基礎に関する最近の動向」講習会テキスト、地盤工学会関西支部、pp. 1~24, 1996.
- 2) Poulos, H. G. and Davis, E. H.: Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley & Sons, 1980.
- 3) 土屋 勉・大築和夫・木幡 守：軟弱地盤における建築構造物の即時沈下および圧密沈下の三次元有限要素法解析、日本建築学会構造系論文報告集、No. 361, pp. 123~131, 1986.
- 4) 山口柏樹：土質力学、技報堂、p. 346, 1984.
- 5) Terzaghi, K. and Peck, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Ed., John Wiley & Sons, pp. 525~555, 1967.
- 6) 平山英喜：群杭基礎のミンドリン解に基づく地盤内応力分布とその簡便法、第29回土質工学研究発表会講演集、pp. 1445~1448, 1994.
- 7) Focht, J. A. and O'Neill, M. W.: Piles and other deep foundations, Proc. 11th ICSMFE, Vol. 1, pp. 187~209, 1985.
- 8) 平山英喜：杭の沈下解析法と構成式、土と基礎、Vol. 38, No. 7, pp. 51~56, 1990.
- 9) Geddes, J. D.: Stresses in foundation soils due to vertical subsurface loading, Geotechnique, Vol. 16, No. 3, pp. 231~255, 1966.
- 10) Blanchet, R., Tavenas, F. and Garneau, R.: Behaviour of friction piles in soft sensitive clays, Can. Geotech. J., Vol. 17, pp. 203~224, 1980.
- 11) Hooper, J. A. and Wood, L. A.: Comparative behaviour of raft and piled foundations, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 1, pp. 545~548, 1977.
- 12) 平山英喜：ミンドリン解に基づいた簡便法による群杭の沈下解析例、土木学会第49回年講III, pp. 916~917, 1994.
- 13) Hirayama, H.: A simplified method for evaluating stresses in soils due to pile-group loading, Compression and Consolidation of Clayey Soils, Balkema, pp. 777~782, 1995.

(原稿受理 1996.7.29)