

37 摩擦群杭で支持された建物の沈下解析法（群杭のモデル化の提案）

(株)ジオトップ 正会員 ○二見 智子
 同上 正会員 小椋 仁志
 同上 正会員 伴野 松次郎
 安井建築設計事務所 正会員 松尾 雅夫

1. はじめに

建築物に用いる杭の設計では、従来は支持力の検討が主であった。しかし、2000 年 6 月改正の建築基準法や 2001 年 10 月改定の日本建築学会建築基礎構造設計指針では、建築物の沈下や変形も重要視されるようになった。このため、今後はそれらの検討が必要不可欠になるものと考えられる。

群杭の沈下の検討方法としては、一般には建築基礎構造設計指針に記載された等価荷重面法や等価ピア法などの簡易法を用いる。しかし、簡易法では上部構造の剛性や地盤応力の相互作用を考慮してないため、建物の規模や用途によっては十分ではない場合もある。

そこで、筆者らの一人が提案した、上部構造は線材要素とし、地盤は弾性論に基づいて相互作用を考慮した実用的な沈下解析法¹⁾（概要は【付録】参照）をベースに、摩擦群杭を持つ建物の沈下解析手法を検討した。しかし、文献 1)の解析法では、杭基礎建物には一柱一杭方式を想定しているため、群杭を忠実に扱くと節点数が増え、計算機の容量や計算時間が膨大なものになるという問題が生じた。このため、群杭を簡略化するモデルが必要になり、その手法を検討した。

本論文では、一つのパイルキャップ下の群杭を杭径の大きな単杭に置き換えて簡略化する方法(仮想単杭法)を提案し、その適用性について検証した結果を報告する。また、摩擦群杭基礎を用いた 2 件の実構造物に対して、本手法により計算した沈下量と実測値とを比較した結果も示す。

2. 検討用解析モデル

沈下解析に用いる地盤のモデルは、図-1 に示す砂地盤 A、図-2,3 に示す粘性土地盤 B,C である。地盤 A は大分県の実地盤を、地盤 B,C は首都圏で節杭を用いた建物が建つ地盤をそれぞれモデル化したものである。

解析建物には、地盤 A,B,C とも図-4 に示す 2×2 スパンのモデルを用いる。これは、大分県で計画された 11 階建て RC 造共同住宅をモデル化したものである。地盤 A における杭は、建物荷重(約 24MN)や長期許容支持力(約 490kN/本)を考慮して、杭径が φ500-400mm(節部径一軸部径)、杭長が 14m の埋込み節杭 49 本を設定した。地盤 B,C は、実際に用いられている杭と同じとし、地盤 B では杭径 φ440-300mm、杭長 12m、地盤 C では φ500-400mm、杭長 8m の埋込み節杭とした。杭の設計支持力は、

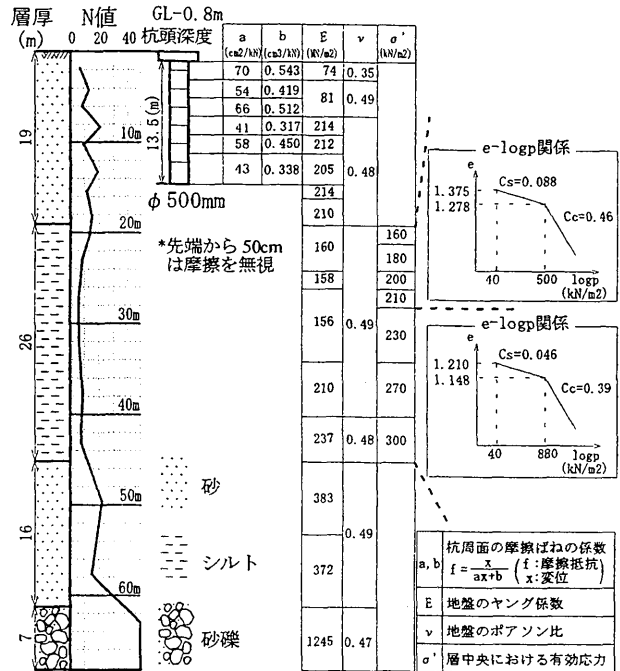


図-1 地盤条件 (砂地盤 A)

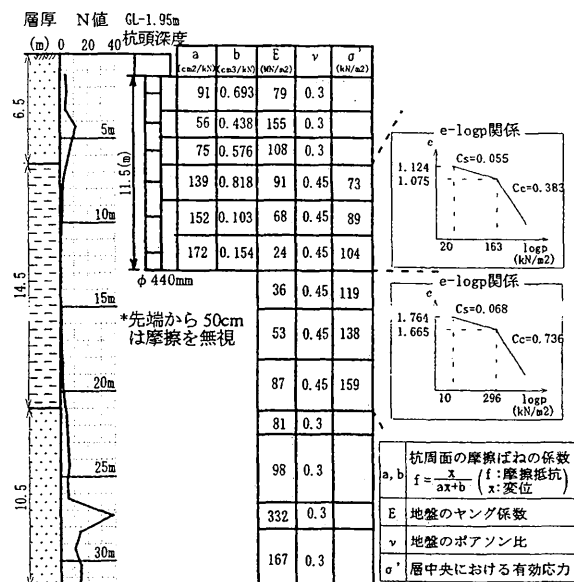


図-2 地盤条件 (粘性土地盤 B)

地盤 B では 98kN/本、地盤 C では 147kN/本である。地盤 B,C も地盤 A と同じ平面や杭配置の建物を想定したため、建物平面、設計支持力、杭本数からみると RC 造 2~3 階建ての建物を想定したことになる。

杭配置は、中柱には 9 本、側柱には 6 本、隅柱には 4 本

“Settlement Analysis Method of Buildings Supported by Friction Piles (Proposal for Pile Group Models)”

Tomoko FUTAMI (GEOTOP Corporation), Hitoshi OGURA (GEOTOP Corporation),
 Matsujiro TOMONO (GEOTOP Corporation) and Masao MATSUO (Yasui Architects & Engineers, Inc.)

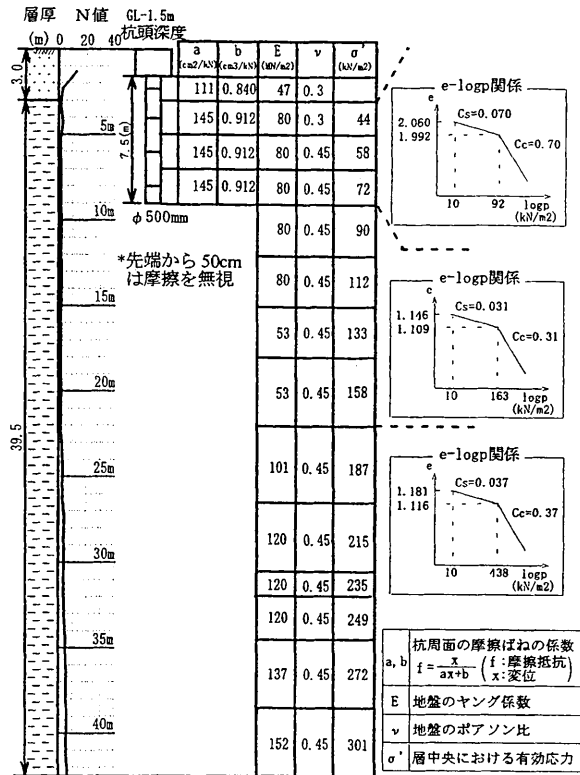


図-3 地盤条件 (粘土地盤 C)

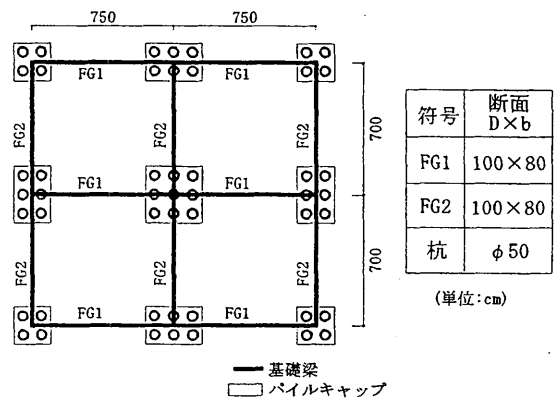


図-4 解析する構造物 (杭伏せ図)

とし、杭間隔は 1m、パイルキャップのへり空きは 0.5m とした。なお、解析に用いる杭長は、前述の杭長よりも 0.5m 短くしている。これは、前述の節杭では杭先端より上方約 0.5m (杭種によっては 0.4m) の部分の周面摩擦力を考慮しない設計を行っているためである。また、節杭の周面摩擦力の作用面は節部径を径とする円筒面とし、杭の圧縮剛性は軸部の値とした。上部構造物の架構剛性は、簡略化のため基礎梁の曲げ剛性で代表させている。

地盤 A は、N 値 10~15 の砂層に杭先端が位置し、その下方は過圧密粘性土層となっている。地盤 B, C は、両者とも N 値 1~2 程度の過圧密状態の粘性土層に杭先端が位置している。解析に用いる地盤定数や e-log p 関係は土質調査結果などから想定したものであり、図-1~3 中に合わせて示す。図中の a, b は、摩擦抵抗~変位量関係を双曲線にモデル化したときの係数であって、文献 2) で提案した式により N 値から求めた。ただし、勾配 1/b は杭周表面の摩擦抵抗~すべり変位量関係は剛塑性に近くなる³⁾ことから、N 値から求めた値の 100 倍とした。杭先端抵抗~

変位量関係は、杭先端地盤のヤング係数や e-log p 関係から自ずと決まるため、特にモデル化は行っていない。

3. 群杭のモデル化の方法

図-4 の構造物を解析するにあたり、群杭を簡略化するためのモデルを考える。まず、Randolph が提案した等価ピア法⁴⁾を検討した。これは、群杭を包絡する範囲に含まれる杭体と地盤とを、圧縮剛性が等価な単杭に置き換える方法である。しかし、この方法では、杭の剛性だけでなく地盤の剛性も評価する必要があるため、やや煩雑になる。

そこで、もっと単純化して、図-5 のように、n本の単杭から成る群杭を、杭周長φ、断面積A、断面2次モーメントIをすべてn倍した単杭に置き換えた。φがn倍の単杭は、実際にはAはn²倍、Iはn⁴倍になるが、これを単杭の集合体と考えて全てn倍とした。実際にはあり得ない寸法の杭を想定することになるため、「仮想単杭法」と呼ぶ。このように単純な方法で、一つのパイルキャップ下の杭本数を1本にすると、計算に要する時間が非常に短縮され、計算機の容量も少なくて済む。

図-4 の構造物に仮想単杭法を使ってモデル化すると、図-6 のようになる。この方法の妥当性を検証するため、群杭を1本1本忠実にモデル化したものと比較する。これを「詳細法」と呼び、図-4 のパイルキャップの部分を曲げ剛性が等価な仮想梁に置き換えた図-7 のモデルを用いる。

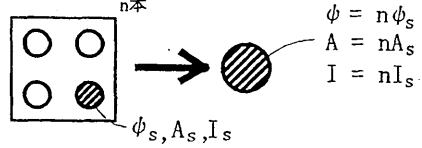


図-5 群杭のモデル化 (仮想単杭法)

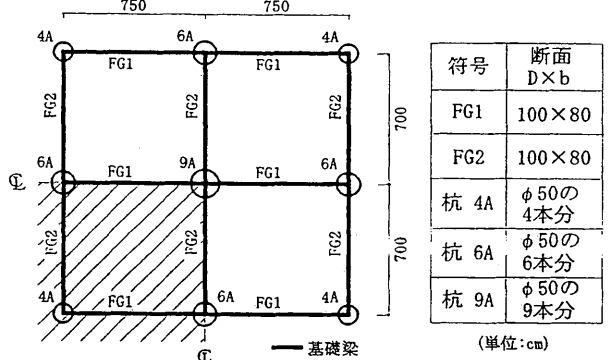


図-6 仮想単杭法による解析モデル

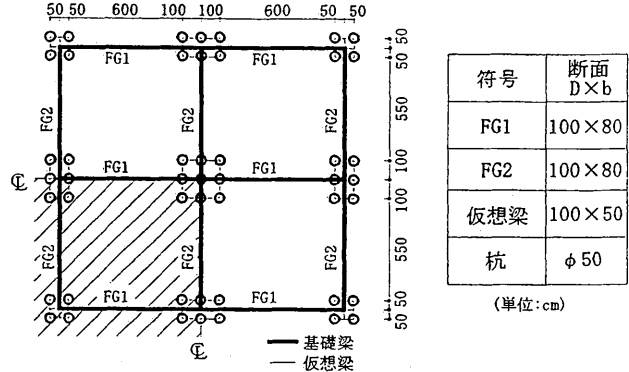


図-7 詳細法による解析モデル

4. 解析結果と仮想単杭法の適用性

仮想単杭法と詳細法を3種類の地盤モデルに適用して解析し、これらの結果を比較した。ただし、建物荷重は両者とも柱位置に与え、解析モデルは平面的には対称形であることから、全体の1/4(図-6,7の斜線部)のみを対象とした。

表-1, 2には、地盤 A,B,C について解析した柱位置の杭頭沈下量と反力の値を示す。詳細法の値は、平均沈下量と合計反力の値である。この表には、詳細法の値を基準とした割合(%)も併記した。一例として、地盤 B について解析で得られた杭頭部の沈下量と反力を図-8に示す。ここで、表-2の反力は、図-8の値を側柱は2倍、中柱は4倍し、柱全体の値として表示したものである。

これらの表や図から、仮想単杭法と詳細法とによる解析値の差は、次のようになる。

表-1 杭頭沈下量の比較

	沈下量 (mm)					
	砂地盤 A		粘性土地盤 B		粘性土地盤 C	
	詳細法	仮想単杭	詳細法	仮想単杭	詳細法	仮想単杭
隅柱	20.1 100%	20.0 99%	7.8 100%	9.0 115%	6.5 100%	7.4 109%
側柱	23.9 100%	23.8 99%	9.3 100%	10.9 117%	7.5 100%	8.4 112%
側柱	23.6 100%	23.5 99%	9.2 100%	10.8 117%	7.4 100%	8.3 112%
中柱	28.4 100%	28.3 100%	11.1 100%	13.2 119%	8.7 100%	9.9 114%
平均	100%	99%	100%	117%	100%	111%

表-2 杭頭反力の比較

	反力 (kN)					
	砂地盤 A		粘性土地盤 B		粘性土地盤 C	
	詳細法	仮想単杭	詳細法	仮想単杭	詳細法	仮想単杭
隅柱	2173 100%	2171 100%	638 100%	665 104%	448 100%	470 105%
側柱	2885 100%	2907 101%	869 100%	868 100%	574 100%	570 99%
側柱	2844 100%	2868 101%	859 100%	852 99%	564 100%	557 99%
中柱	3885 100%	3799 98%	1205 100%	1109 92%	738 100%	670 91%
平均	100%	100%	100%	101%	100%	101%

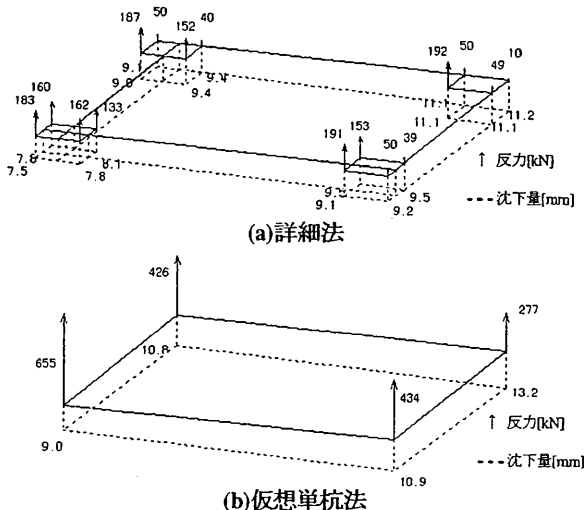


図-8 杭頭沈下量と反力分布(粘性土地盤 B)

- ①杭先端が砂地盤の場合の沈下量は、ほとんど同じ値を示している。
- ②杭先端が粘性土地盤の場合の沈下量は、仮想単杭法の方が9~19%大きくなっている。
- ③杭頭反力は、杭先端地盤種別によらず差は10%以下となっている。

これから、杭頭反力や杭先端が砂質土地盤の場合の沈下量については、仮想単杭法は詳細法に近い値を与えることが分かる。しかし、杭先端が粘性土地盤の場合には仮想単杭法は大きめの沈下量を与えている。この理由として、群杭の破壊機構の差が考えられる。仮想単杭の周面積や断面積はもとの単杭を本数倍したものであるため、結果的にそれぞれの杭が地盤中に貫入する貫入破壊の状態を想定していることになる。これに対して、詳細法では杭間隔が節部径の2倍と小さいため群杭と内部の地盤が一体となって沈下するブロック破壊の状態になっているものと推察される。この破壊は、同じ杭間隔でも粘性土の方が生じやすいと思われるため、粘性土地盤においてのみ沈下量に差が現れものと推測される。しかし、本解析法では、地盤の破壊を考慮していないこともあり、現状ではこれらの差を定量的に説明することは難しい。今後の検討課題としたい。

ただし、両者による沈下量の差は平均すると14%程度であることを考えると、群杭を仮想単杭法によってモデル化しても実用上は問題がないものと判断される。

5. 仮想単杭法を用いた計算値と実測値との比較

実際の沈下量が計測されている粘性土地盤上に建つ2件の節杭基礎建物について、この実測結果と仮想単杭法を適用して解析した結果とを比較する。

解析では、砂層は即時沈下、粘性土層は圧密沈下するものとし、得られる圧密沈下量は圧密完了時の値である。解析に用いる地盤定数や $e\text{-log } p$ 関係は地盤図中に示したが、これは土質調査結果などから想定したものである。建物荷重は、集中荷重として与え、この荷重はすべて杭が負担するものと仮定して解析している。

5.1 RC 造店舗付き集合住宅

5.1.1 構造物および地盤の概要

川崎市内に建つ建築面積約190m²、5階建て(一部2階建て)のRC造店舗付き集合住宅⁵⁾を対象に解析を行う。この建物の全重量は約15.6MN(5階建て部は94kN/m²)であって、1階平面図は図-9のようにになっている。杭は、杭径φ440-300mm、杭長12mの埋込み工法による節杭であり、この設計支持力は131kN/本となっている。杭配置は、図-10のように、1.1m間隔で119本の節杭がべた基礎状に打設されている。

地盤は、前節の検討で用いた地盤B(図-2)であり、N値2程度の沖積粘性土層がGL.-6.5~21.0mの間に厚く堆積しており、杭先端もその中に位置する。その層は、以前、低下していた地下水位が現在は回復したことにより過圧密比は1.6~2.5の過圧密状態となっている。

5.1.2 沈下量の計測

建物の沈下量の計測が1階床打設後に開始され、その後約2年間にわたり行われている⁹⁾。計測点は、図-11に示すように建物外周の5点である。同図に計測開始から3ヶ月後と2年後の実測沈下量分布図を示した。同図より、5~6mmの沈下が生じていることがわかる。なお、完成後10年以上建った今でも、建物には異常は見られず健全に使用されている。

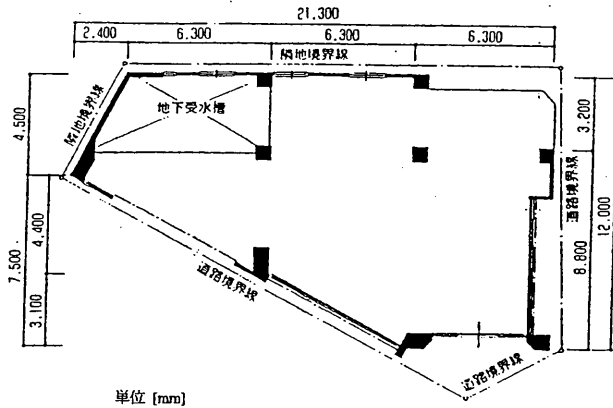


図-9 建物の一階平面図

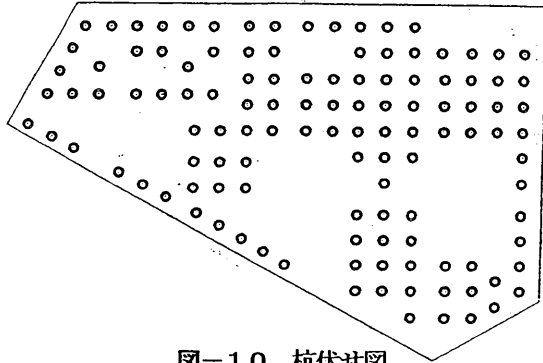


図-10 杭伏せ図

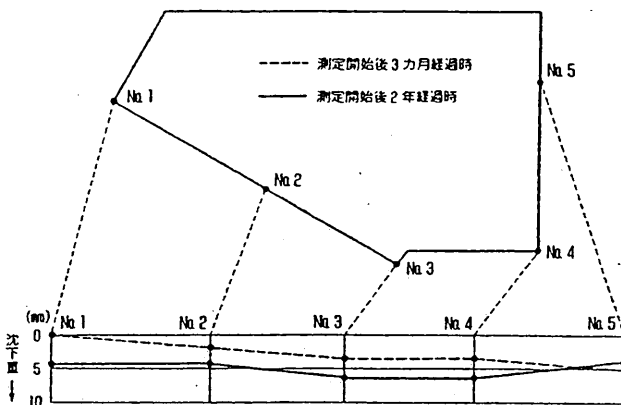


図-11 沈下量の計測点位置と計測結果

5.1.3 沈下解析と結果

図-10の杭を図-12に示すように仮想単杭に置き換えた。119本の杭を3~7本ずつ27組にまとめ、それらを柱下にある27本の仮想単杭とみなした。図-12中には、1本の仮想単杭に置き換えたときの杭本数と、解析時に設けた節点の位置を併記している。また、図中のグリッドはモデル化した基礎梁であるが、その曲げ剛性は実際に用い

られているものの5倍とした。これは、上部構造物全体の架構剛性を、基礎梁に代表させたためである。図-13に、解析で得られた沈下量分布図を示す。この図から、解析値は実測値の約3~5倍の値となっていることが分かる。

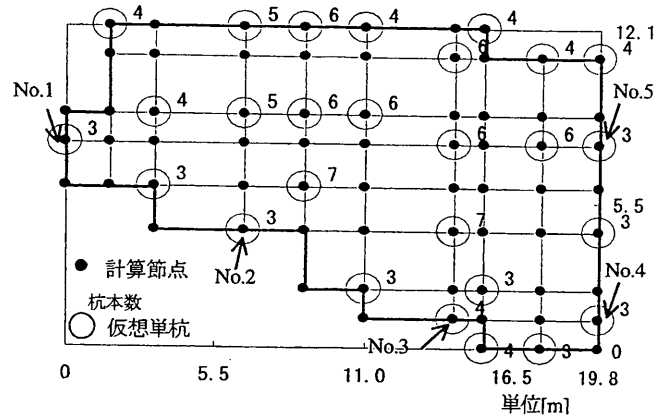


図-12 仮想単杭法による解析モデル

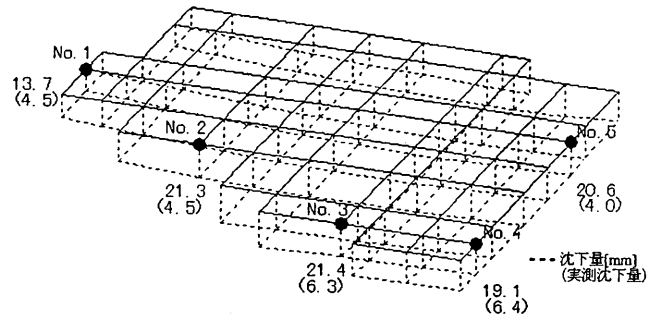


図-13 解析沈下量分布図

5.1.4 考察

解析値が実測値より約3~5倍大きくなった原因として、次のことが考えられる。

- ①沈下の計測は1階床打設時から始められているため、実測値にはそれ以前に生じた沈下量が含まれていない。
- ②解析での圧密沈下量は圧密完了時のものであるが、実測ではそこまでは至っていない。
- ③前述の建物荷重は設計用の積載荷重を含んだ値であるが、実際の積載荷重はこれより小さいと考えられる。また、建物荷重には排土重量が考慮されていない。
- ④地盤のヤング係数など地盤定数の多くはN値から推定しているが、これらの推定式は一般に安全側（沈下量が大きめに計算される）の定数値が与えられるものが多い。
- ⑤荷重はすべて杭が負担するとして解析したが、摩擦杭であることから、実際には基礎スラブの底版も建物荷重を負担するパイルド・ラフト基礎として機能している可能性が高い。

以上の原因によって解析値がどの程度実測値に近くなるか、計測点 No.1 の沈下量について検討を行った。まず、①と③を考慮するため、1階床荷重と積載荷重を実状に近くなるよう低減したところ、解析値は図-13の値よりも約45%小さくなった。次に、②を考慮するため2年経過時の圧密度を求めたところ80%となり、解析値は前述の

値のより約20%小さくなる。また、⑤の影響については、文献6)などの事例から考えると、パイル・ラフト基礎として解析すると沈下量は小さくなるものと推測される。これらの点を適切に考慮すると、仮想単杭法による解析でも実測値に近い沈下量を得ることができるものと考えられる。

5.2 某倉庫

5.2.1 構造物および地盤の概要

解析の対象とした建物は、1階床面積約1020m²、平屋（一部2階建て）のS造倉庫で、全重量は約17.75MN（17.4kN/m²）である。杭は、杭径φ440-300mm、杭長10mの埋込み工法による節杭であって、設計支持力は、118kN/本である。杭配置は図-14に示すように、1つのパイルキャップに4~6本の節杭が計174本打設されている。

地盤は、図-15に示すように、N値1~2程度の沖積

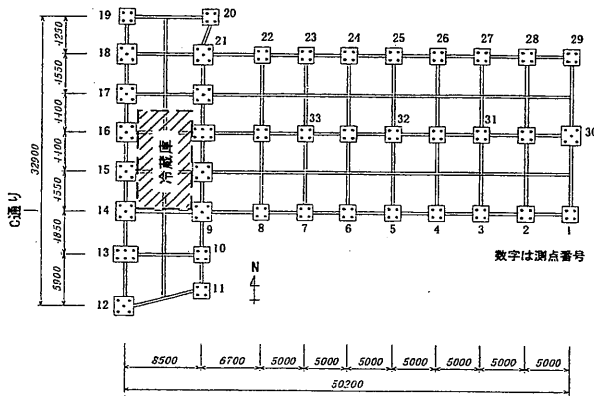


図-14 杭伏せ図

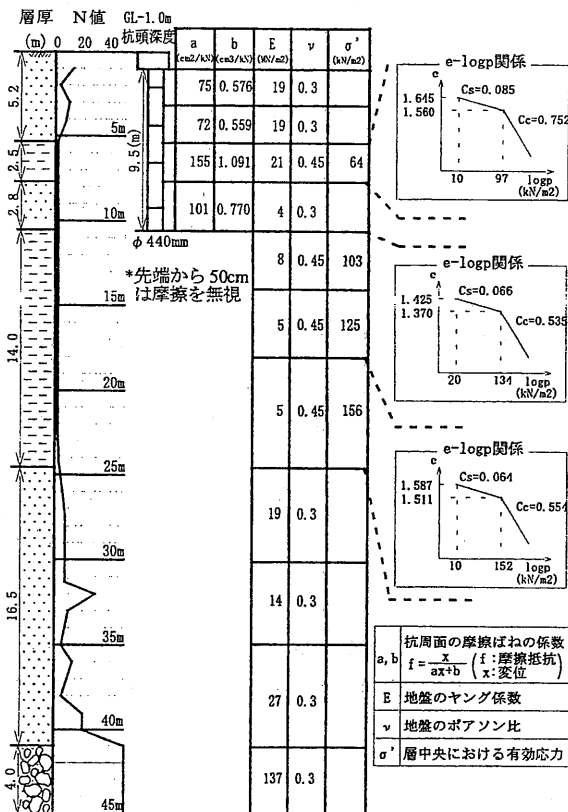


図-15 地盤条件

粘性土層がGL.-5.2~24.5mの間に厚く堆積しており、この付近一帯は現在も地盤沈下が継続している。杭先端は、その沖積粘性土の中に位置している。

5.2.2 沈下量の計測

建物の沈下量の計測が、基礎梁打設後に開始され、約11年間にわたって行われている。計測点は図-14に示すような建物外周の30点および建物内部の4点である。図-16(a)~(d)は、平成13年5月に計測した建物荷重による実測沈下量の分布図であって、建物の沈下量から計測期間中の地盤沈下量73mmを差し引いた値を示している。

この図より、建物荷重による沈下が最大で40~50mm生じていることが分かる。西側から東側にかけて少し傾斜沈下が見られるが、完成後10年以上建った今でも、建物には障害が無く健全に使用されている。なお、この建物の実測沈下量に関しては、文献7)に詳しく示している。

5.2.3 沈下解析と結果

図-14に示した杭をパイルキャップごとに40本の仮想単杭に置き換えて解析した。建物荷重は、柱位置に集中荷重として与えた。

解析で得られた杭頭沈下量の分布図を図-16(a)~(d)中に合わせて示す。これらの図から、解析値と実測値は、ほぼ同じ値となっていることが分かる。

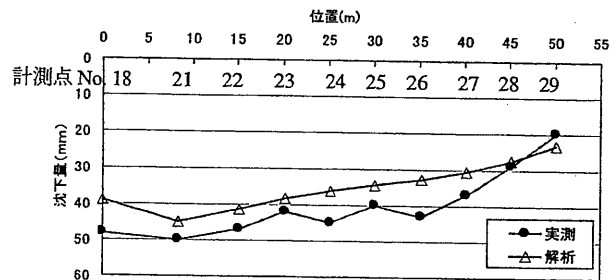


図-16(a) 解析沈下量と実測沈下量の比較（北側）

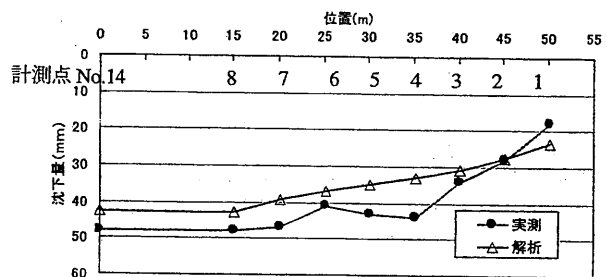


図-16(b) 解析沈下量と実測沈下量の比較（南側）

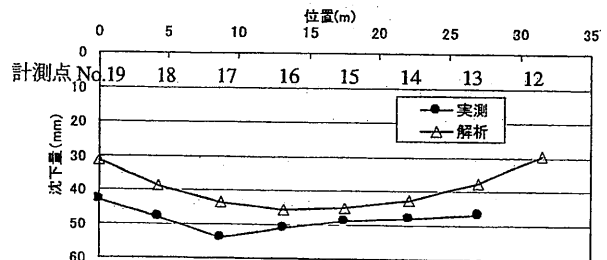
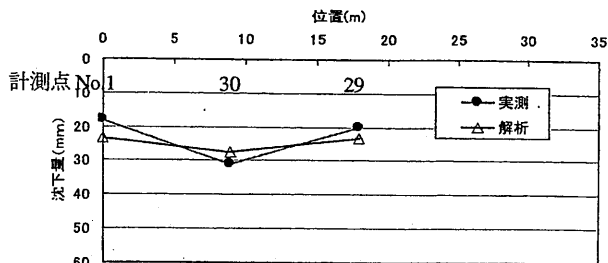


図-16(c) 解析沈下量と実測沈下量の比較（西側）



図一 16(d) 解析沈下量と実測沈下量の比較 (東側)

5.2.4 考察

この建物の場合、5.1.4で挙げた要因のうち①に関しては計測開始時期が基礎梁設置時と早い、②に関してはこの一帯の地盤沈下は進んでいるが建物荷重による圧密沈下はほぼ完了している⁷⁾と推測されるので該当しない。③に関しては、設計段階では考慮されていなかった荷重が西側に作用したことが分かっており、その部分の実測沈下量が解析値よりも大きくなったと推測される。

5.1での比較も含めて総合的に判断すると、仮想単杭法を用いた解析でも、実測値を良く説明すると言える。

6. おわりに

本論文では、上部構造と基礎とを一体とした実用的な沈下解析法を群杭基礎に適用するため、パイルキャップ単位の群杭を杭径の大きな単杭に置き換える仮想単杭法を提案し、その妥当性を検討した。また、本解析手法により解析した沈下量と実測沈下量との比較を行った。

その結果から、仮想単杭法は、群杭基礎における実用沈下計算法として妥当なものであると判断される。今後も実測値との比較例を蓄積し、本手法による沈下解析法の適用性を検討する予定である。

参考文献

- 1) 松尾・山肩：地盤の変形を考慮した杭基礎の鉛直荷重時実用解析法、日本建築学会構造系論文集、第477号、pp.67-76、1995.11
- 2) 二見・小椋：埋込み節杭のデータから摩擦杭の荷重～沈下量関係推定法の提案、第44回地盤工学シンポジウム、III-7、pp.127-132、1999.11
- 3) 加藤・小椋・山肩・伊藤：中型単純せん断試験を用いた砂～鋼板間の摩擦試験、第25回土質工学研究発表会、1990.2
- 4) Randolph, M. F.: Design methods for pile group and piled rafts, Proc.13th Int. Conf. on SMFE, New Delhi, Vol.5, pp.61-82, 1994
- 5) 河津・小椋：軟弱地盤に建設されたRC造店舗付き集合住宅、建築知識 Vol.412、pp.116-119、1992.6
- 6) 堀越・山下：杭基礎の鉛直荷重～変位特性入門、土と基礎 Vol.48 No.2、pp.47-52、2000.2
- 7) 板東・小椋・二見：摩擦群杭を用いた建物の沈下量の計算値と実測値の比較、第46回地盤工学シンポジウム、2001.11

【付録】計算に用いた沈下解析法⁷⁾の概要

この解析法は、上部構造の応力解析に多用されている3次元骨組解析プログラムに、地盤の変形を連携させることによって構成されている。解析できる基礎形式は、独立基礎、べた基礎、杭基礎、パイルドラフト基礎、浮基礎である。このうち杭基礎構造物を計算する場合の基本的な仮定や考慮すべき事項は、以下の通りである。

- 1) 地盤の変形は、即時沈下と終局圧密沈下に限る。
- 2) 即時沈下は、砂質土層・粘性土層（不飽和状態の沈下に適用）ともに、Mindlinの第一解（変位解）を基本とした積分式により求める。互層地盤に対しては、山肩・八尾の群杭理論⁷⁾を多層系地盤に拡張した手法を適用する。地盤の弾性係数は、ひずみ依存性を考慮して設定する。
- 3) 粘性土の圧密沈下は、1次元圧密として扱い、地中応力の伝達については、地盤の互層状態にかかわらず、Mindlinの第一解（応力解）を基本とした積分式を用いる。変形係数は体積圧縮係数 m_v を採用するが、 m_v は圧密試験結果から得られる $e-\log p$ 関係曲線上の有効応力に応じた値を設定する。
- 4) 上部構造は、立体架構とする。また、部材の塑性化に伴う剛性低下やクリープ変形を考慮する。
- 5) 杭は、上部構造の柱と同様に立体ラーメン材として扱い、かつ適当な間隔で杭節点を想定する。その杭節点と同一位置に、別に設定する地盤節点との間に摩擦ばねを考慮する。摩擦ばね係数は、杭-地盤間の摩擦力と相対変位の関係式を双曲線関数によりモデル化して設定する。

杭基礎を解析する場合は、互層地盤上に杭を有する立体架構を考える。杭は、摩擦力特性を評価するため、地盤の層厚を考慮して適当な長さに水平方向に区分する。各区分位置および杭先端部に杭節点を、杭節点と同位置に地盤の節点を設ける。以下にプログラムの解析手順を示す。ここに、 $\{R\}$ ：節点外力、 $[K]$ ：剛性マトリックス、 $\{D\}$ ：節点変位である。添字の p は杭を、 f は摩擦を表す。また、 F は基礎を、 S は沈下量を示す。

- 1) 上部立体架構の関係式を立てる。各節点は6自由度の変位 $(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$ を持っている。
$$\{R\} = [K]\{D\} \quad \dots \text{(付式 1)}$$
- 2) 杭の関係式を立てる。
$$\{R_p\} = [K_p]\{D_p\} \quad \dots \text{(付式 2)}$$
- 3) 杭と地盤の摩擦力の関係式を立てる。
$$\{R_{pf}\} = [K_f]\{D_{ps}\} \quad \dots \text{(付式 3)}$$
- 4) 杭基礎の全節点の沈下関係式を考える。
$$\{D_{ps}\} = [F_p]\{R_{pf}\} \quad \dots \text{(付式 4)}$$
(付式4)を $\{R_{pf}\} = [F_p]^{-1}\{D_{ps}\}$ と変形して、(付式1~3)と同形式とする。
- 5) $[K]$ に $[K_p]$ 、 $[K_f]$ 、 $[F_p]^{-1}$ を加えて建物全体の剛性マトリックスを作る。これにより、地盤変位を考慮した杭を有する建物全体の関係式を求める。
- 6) 節点変位や反力を求める。

なお、 $[F_p]$ は、基礎節点間の相互作用を考慮した即時沈下量と圧密沈下量を求めるための柔性マトリックスで構成されている。

参考文献

- 付1) 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講演集、pp.481-484、1974.6

38 摩擦群杭を用いた建物の沈下量の計算値と実測値の比較

(株)ジオトップ 正会員 ○ 板東 真平
 同 上 正会員 小椋 仁志
 同 上 正会員 二見 智子

1. はじめに

建築基準法の改正など性能設計の時代を迎えて、建築物の設計においても沈下や変形の検討はますます重要になっている。沈下量の計算には、これまで日本建築学会「建築基礎構造設計指針(1988)」¹⁾(以下「旧指針」と呼ぶ)に記載された方法によるのが一般的であった。筆者らは、この計算方法の検証を試みるため、旧指針による沈下量の計算値と実測値とを比較した。その結果、総沈下量で考えると計算値は実測値の約3倍の沈下量を与えることが分かった²⁾。

この検証で使った実測値は、摩擦群杭を用いた建物に対して行われた長期間の沈下計測結果である。これまで行われた20件以上の節杭による建物の実測データを再整理したもので、前述の検証にはこのうちの5件を用いている。

最近、旧指針を改定した「建築基礎構造設計指針(2001)」³⁾(以下「指針」と呼ぶ)が発表された。この指針では粘性土地盤でも即時沈下量を考慮するなど、沈下量の計算方法が旧指針と少し変更されている。そこで、筆者らは、この新しい指針についても、その計算方法を検証することとした。また、比較する実測値も、文献2)よりもデータ数を増やして9件とした。本報告は、その結果に関するものである。

2. 節杭を用いた建物の沈下量の長期計測

芳賀らは、1976年から79年にかけて、RC三角節杭を用いた近畿地方の9件の建物を対象に、その沈下量を長期間計測した⁴⁾。また、筆者らは1981年以降に北陸地方や関東地方などで、PHC節杭(遠心力成形)を用いた約10件の建物について、沈下量の長期計測を行っている⁵⁾。さらに、福井県も神戸市の埋立地に建つ数件の建物について、沈下量の計測結果を報告している⁶⁾。これらの20件以上のデータを再整理し、地盤や建物に関する情報が比較的そろっていて、建物荷重による沈下量が明確な9件を検討対象とした。そのリストを、表-1に示す。

9件の建物は、S造の低層倉庫、RC造3~5階建ての集合住宅や学校である。杭は、節部径が450~500mm(三角節杭は断面積が等しくなる直径)、杭長は6~12m

表-1 検討建物の一覧表

No.	場所	用途	上部	階数	基礎型式	杭種	施工法	測点数
1	石川県	倉庫	S	1F(一部2F)	独立	PHC節杭	埋込み	29
2	神奈川県	店舗・集合住宅 ⁷⁾	RC	5F(一部2F)	ベタ	PHC節杭	埋込み	5
3	東京都	店舗・集合住宅	S	5F(一部6F)	ベタ	PHC節杭	埋込み	8
4	大阪府	集合住宅 ⁸⁾	RC	3F	布	RC三角節杭	埋込み	10
5		集合住宅 ⁴⁾	RC	3F	布	RC三角節杭	埋込み	16
6	大阪府	宿舍 ⁴⁾	RC	4F	布	RC三角節杭	打込み	14
7	大阪府	倉庫 ⁴⁾	S	1F	ベタ	RC三角節杭	打込み	29
8		倉庫 ⁴⁾	S	1F	ベタ	RC三角節杭	打込み	32
9	大阪府	学校 ⁴⁾	RC	3F(一部2F)	独立	RC三角節杭	埋込み	53

であり、いずれも摩擦群杭として用いられている。計測は、1階床の打設時や竣工時などに始められ、1~13年間続けられている。なお、表-1中の基礎形式で、「独立」は柱の下部に設けられたパイルキャップの下に杭が配置されているものであり、「布」は基礎梁の下に、「ベタ」は柱や基礎梁に関係なく床の下にほぼ等間隔に配置されているものを指している。

3. 指針に示された方法による建物の沈下量の計算

新しい指針に準拠して、表-1の9件の建物の沈下量を計算した。旧指針では粘性土層の沈下は圧密沈下のみを考えていたが、新しい指針では粘性土層でも正規圧密状態の場合は即時沈下と圧密沈下の両方を合計することになっている。また、過圧密状態の粘性土では圧密沈下は即時沈下に含まれるとして、即時沈下のみを考えている。なお、砂質土層は、旧指針と同様、考慮するのは即時沈下のみである。

即時沈下量の計算方法は、指針には地盤を半無限弾性体としたHookeの法則によるひずみを積分する方法と、有限厚さの地盤の沈下量を求めるSteinbrennerの近似解が掲載されている。本報では、多層系地盤にも適用できることから、後者の方法を用いて即時沈下量を計算した。

この計算で必要になる地盤のヤング係数Eは、平板載荷試験などの地盤調査によって求める方法も示されているが、ここでは最も多く用いられるN値から推定する方法を用いた。表-2に採用した換算式を示す。この表の中で砂の式は指針に示されているものである。粘性土の方は、指針には一軸圧縮試験から求めると記述されている。これは一軸圧縮試験による変形係数E₅₀をEとすることを意図していると思われる。しかし、現実には応力-ひずみ関係のデータが無いものが多い。このため、表に示したEと一軸圧縮強さq_uの関係式^{7),8)}、およびq_uとN値の関係式⁹⁾から、N値をもとに粘性土のEを求めた。これらの式は、最も一般的と思われる式であるが、後者はcase1とcase2の二通り考えている。

表-2 土質条件とEの換算式

土質条件		換算式
砂	過圧密	E=2.8N(MN/m ²)
	正規圧密	E=1.4N(MN/m ²)
粘性土	case1	E=105q _u , q _u =N/8 × 10 ⁻¹ (MN/m ²) (ただし洪積粘性土はE=240q _u)
	case2	E=105q _u , q _u =(4+N/2) × 10 ⁻² (MN/m ²) (ただし洪積粘性土はE=240q _u)

地盤のポアソン比 ν は、指針に記載された値 $\nu=0.3$ (砂)、 $\nu=0.5$ (粘性土)を用いた。

圧密沈下量の計算方法は、指針にはCc法とmv法が示されているが、本報の計算では前者を用いた。二次圧密や建物剛性の影響は考えていない。

建物荷重は、指針のとおり等価荷重面法によって考慮する。これは、摩擦群杭基礎の場合、杭先端から杭長の1/3の深さに建物荷重の仮想作用面を設定し、これを地表面とする方法である。圧密沈下の計算に用いる地盤の増加応力 $\Delta\sigma_z$ は、指針に示されている次の3つの算定方法を考え、それぞれの方法による沈下量を比較する。

- ① 各杭に働く荷重が仮想作用面の深さで集中荷重として作用するものと考えて、Boussinesqの解により $\Delta\sigma_z$ を求める。以下、この方法を「集中荷重」と呼ぶ。
- ② 群杭に働く荷重が仮想作用面の深さで杭を包絡する面に等分布荷重として作用するものと考え、Boussinesqの解を積分した式により $\Delta\sigma_z$ を求める。以下、この方法を、「等分布荷重」と呼ぶ。
- ③ 群杭に働く荷重が、仮想作用面の深さで群杭を包絡する面から鉛直面に対して30度の角度で広がる面に等分布荷重として作用すると考えて $\Delta\sigma_z$ を求める。以下、この方法を「30度分散」と呼ぶ。

以上の条件で、表-1に示した9件の建物について沈下量を計算した。計算は、それぞれについて6パターン行った。すなわち、①~③の $\Delta\sigma_z$ を求める3種類の方法について、各々、N値とquの換算式を表-2に示すcase1とcase2の二通り考えたわけである。

なお、建物荷重のうち、固定荷重が不明のものがRC造の建物であったので、1階あたり 17kN/m^2 とした。また、積載荷重が不明のものが学校や住宅の建物であったので、建築基準法の大梁・柱・基礎用の値を用いた。

4. 沈下量の実測値と計算値の比較例

表-1に示す9件はすべて沈下量の実測されている。ここでは、建物荷重による沈下量のみを考えるため、地盤沈下を生じている地域の建物では、実測値から地盤沈下量を差し引いた。

以下に、杭配置を「独立」と「ベタ」とした建物について、沈下量の計算値と実測値の比較例を1件ずつ示す。

4.1 杭配置「独立」の例 (No. 1の倉庫)

建物は、S造平屋(一部2階)建ての倉庫である。杭長10m、杭径 $\phi 440$ (節部径)- 300 (軸部径)のPHC節杭が、埋込み工法で図-1の位置に175本施工されている。この地域は、図-2のように軟弱な粘性土が厚く堆積する地盤沈下地帯である。建物の沈下量の計測は1990年9月の基礎梁打設時(床打設前)に開始され、約1年間にわたって5回続けられた。諸般の事情で約10年間中断したのち、2001年6月に計測を再開した。

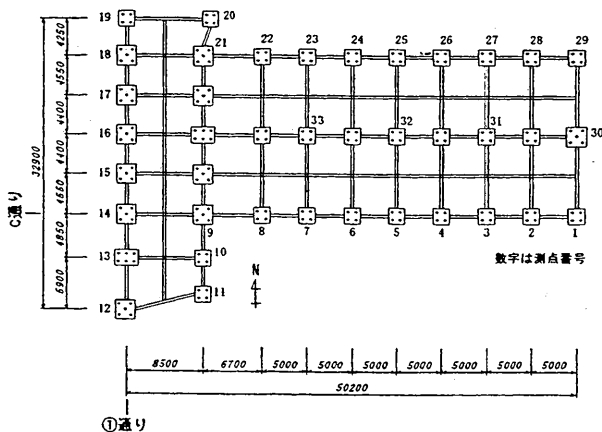


図-1 杭伏せ図

図-3に沈下量の経時変化を示す。図中の点線は、圧密試験の結果から求めた測点No.15の沈下量の推定曲線である。この図から、建物荷重によって10年余の間に最大で50mm沈下していることが分かる。また推定曲線から、この沈下はほぼ収束していると判断される。なお、前述したように、この地域は地盤沈下が続いており、計測期間中の沈下量は約73mmである。

次に、図-4、5に、最終計測時の総沈下量と相対沈下量について、実測値と計算値の分布図を示す。実測値をみると東西方向に傾斜沈下が生じているが、これは設計時に考慮されていなかった荷重が西側に作用したためであろう。

ただし、この建物は竣工から10年以上経った今でも、

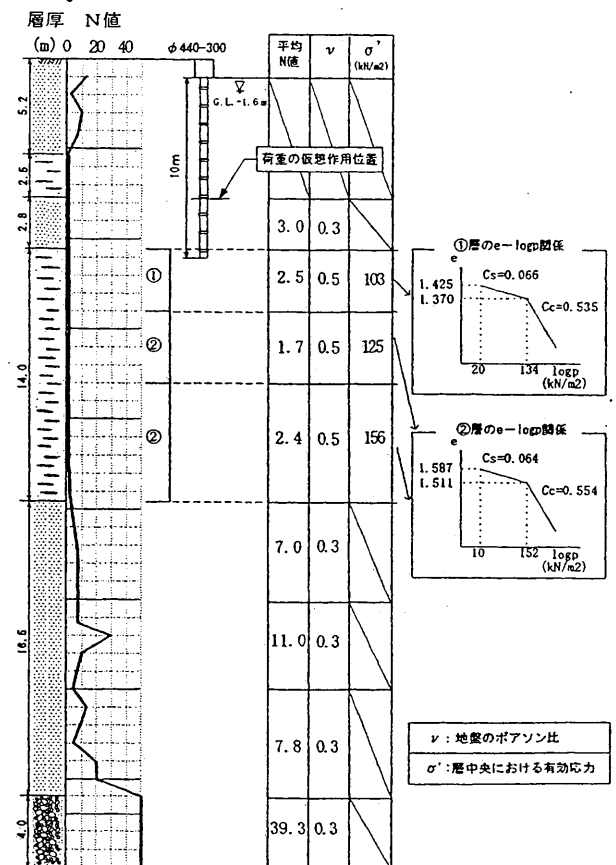


図-2 地盤状況

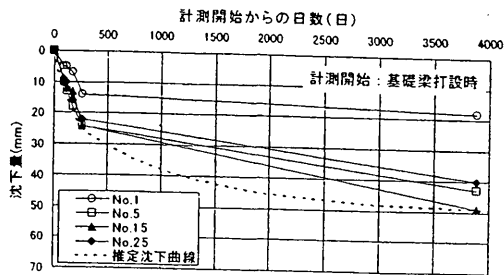


図-3 沈下量の経時変化

全く支障なく使用されており、床面や壁面にも亀裂等は発生しておらず、この傾斜沈下による影響は生じていない。

総沈下量の計算値と実測値とを比べると、case1、case2ともに計算値は実測値よりも大きくなっている。また、計算値を指針に示された総沈下量の限界値と比べると、C通りでは同程度の値、1通りでは1.3~1.5倍の値となっている。しかし、前述したようにこの建物に障害は生じていない。

相対沈下量の計算値は、1通りでは実測値より大きい値、C通りではほぼ同じ値になっている。また、いずれも限界値内に収まっている。

沈下量の分布形状は、総沈下量、相対沈下量ともに計算値と実測値とは、比較的良く似た形状を示している。なお、case 1 と case2 の計算値を比べると、前者の方が沈下量は大きくなっている。

4.2 杭配置「ベタ」の例 (No. 7の倉庫)

建物は、大阪市大正区に建つS造平屋建ての倉庫であって、杭長7mのRC三角節杭が、図-6のように床の下に等間隔に489本、打ち込まれている。地盤は、図-7のように、厚さ9mの砂質土層の下は過圧密状態の粘性土層となっている。沈下量の計測は1978年3月の竣工時に開始され、以後約1年7ヶ月間行われている。図-8は、沈下量の経時変化を示したものである。最大で約17mm沈下しているが、まだ収束していないようである。なお、この倉庫は竣工後20年以上経った現在も問題なく使用されており、沈下による障害は生じていない。

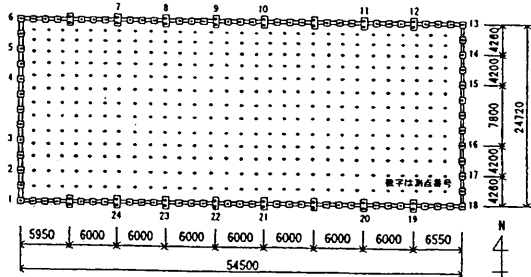


図-6 杭伏せ図

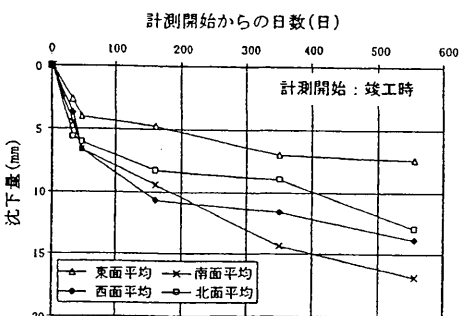


図-8 沈下量の経時変化

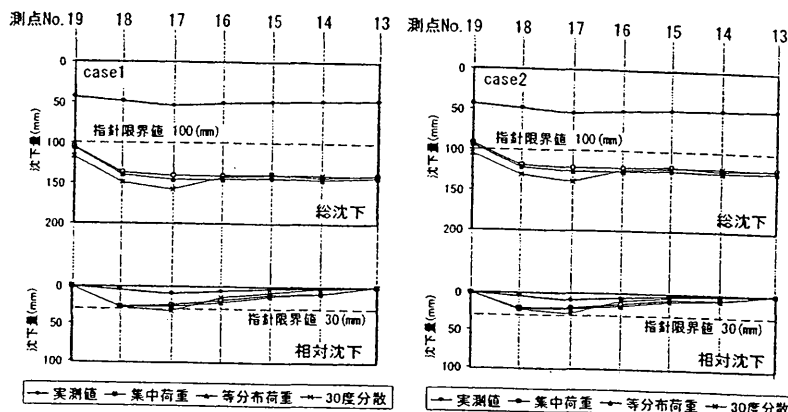


図-4 沈下量分布図 (1通り)

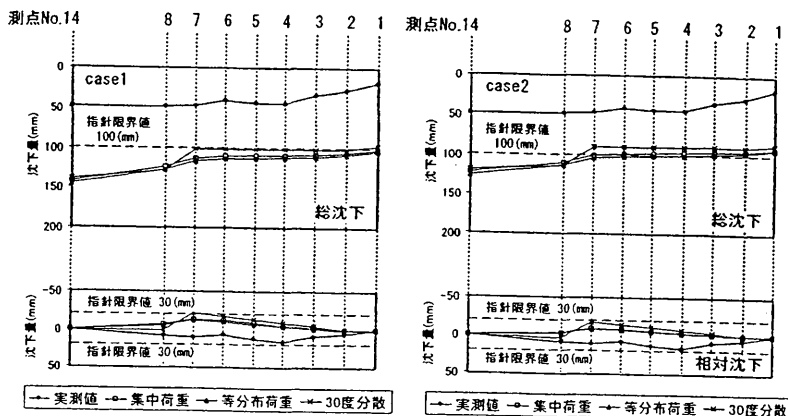


図-5 沈下量分布図 (C通り)

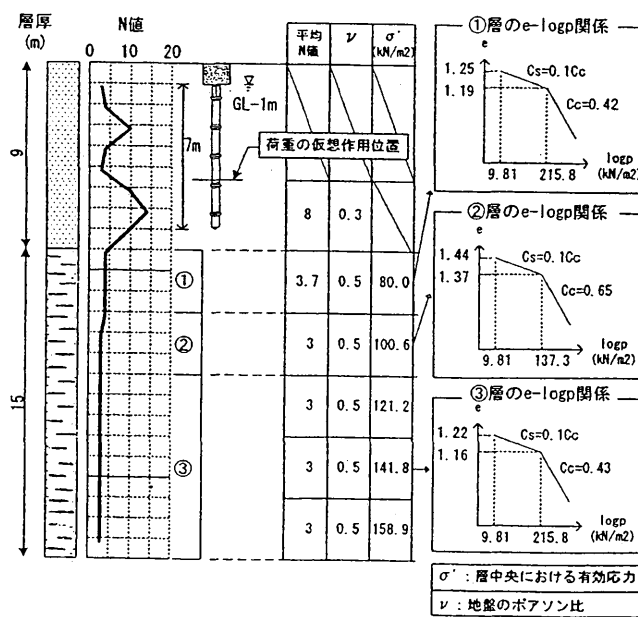


図-7 地盤状況

図-9に西面の、図-10に東面の総沈下量と相対沈下量の分布を示す。東面で測点 20,21 の沈下量が大きいのは、この間がフォークリフトの出入り口になっているためである⁴⁾。

計算値は「集中荷重」の場合しか示していないが、これは、地盤が砂層や過圧密状態の粘性土層から成る場合、圧密沈下は計算されず即時沈下量のみを計算することになるため、 $\Delta\sigma_z$ の算定方法による違いは生じないことによる。

総沈下量の計算値と実測値を比べると、計算値は実測値よりもかなり大きい値を示していることが分かる。また、相対沈下量も、計算値が実測値を大きく上回っている。したがって、この例では、指針による計算値は実測値に比べ過大な値を与えることが分かる。

また、case1とcase2による計算値を比較すると総沈下量、相対沈下量ともに、4.1の例と同様、case1の方が大きな値になっている。すなわち、case2による計算の方が実測値に近い値になることが分かる。

5. $\Delta\sigma_z$ の算定方法に関する考察

4.1で示した例のように、未圧密や正規圧密状態の粘性土層が存在する地盤の場合、 $\Delta\sigma_z$ を求める3種類の方法によって得られる沈下量の値に差が生じる。表-

1の9件の建物での計算では、沈下量にかなりの差が生じる場合もあった。ただし、「集中荷重」と「等分布荷重」による沈下量は、総沈下、相対沈下ともにほぼ同じ値となっていた。「等分布荷重」は計算がやや煩雑であることを考えると、 $\Delta\sigma_z$ を求める方法としては比較的計算の簡便な「集中荷重」を用いれば十分であるといえよう。「30度分散」は、他の2者と得られる沈下量の値が異なる場合が多いことに加えて、杭配置が「独立」以外では建物全体を一つの基礎と考えるため同じ深さでは同じ $\Delta\sigma_z$ となり圧密沈下による相対沈下量が得られないという問題がある。したがって、この方法は「沈下量のあたりをつける」程度の簡便法であって、設計時に沈下量を求める方法としては適していないと思われる。

6. 総沈下量の計算値の検証

表-1に示した9件の建物に設置された全ての計測点(196点)について、総沈下量の最終実測値と計算値との相関図を図-11と図-12に示す。前者がcase1の場合、後者がcase2の場合である。 $\Delta\sigma_z$ の算定方法は、いずれも「集中荷重」としている。これらの図から、沈下量が非常に小さい場合を除いて、計算値は実測値よりも非常に大きな値となっていることが分かる。すなわち、総沈下量に関しては、指針による計算方法では、実際に建物に生じるものよりも極めて大きな沈下量を与えるということが指摘できる。

これを定量的に検討するために、沈下量の実測値 S_m と計算値 S_c の比で考える。ただし、両者の単純な比 S_m/S_c では、 $S_m > S_c$ の場合は S_m/S_c が $1 \sim \infty$ になるのに対し、 $S_m < S_c$ の場合は $0 \sim 1$ と狭い範囲の値となるため、 S_m/S_c を単純平均すると後者のデータを軽く扱うこと

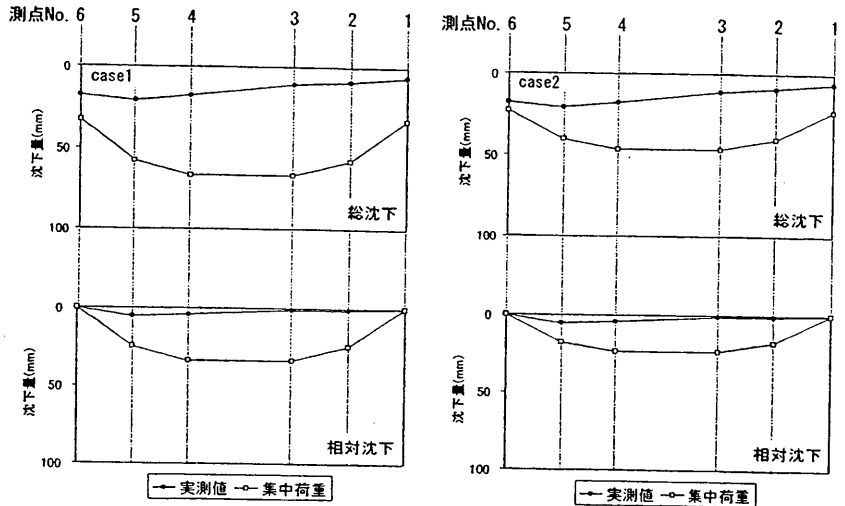


図-9 沈下量分布図(西面)

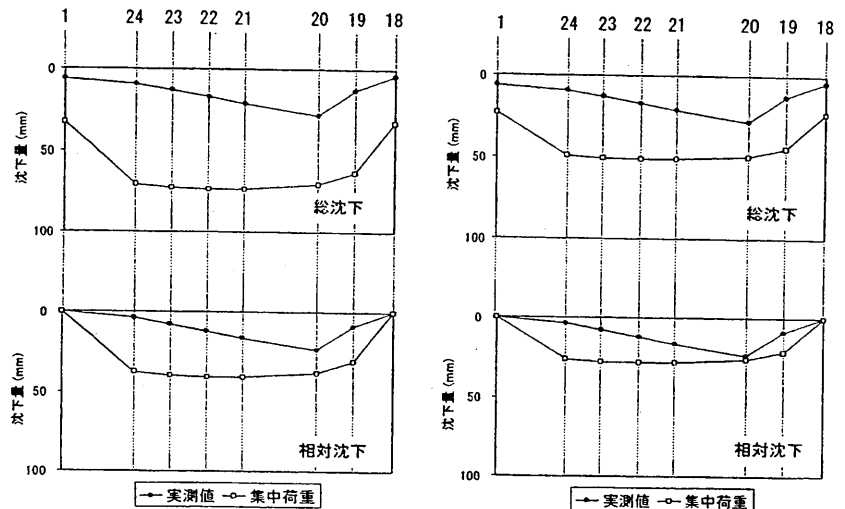


図-10 沈下量分布図(東面)

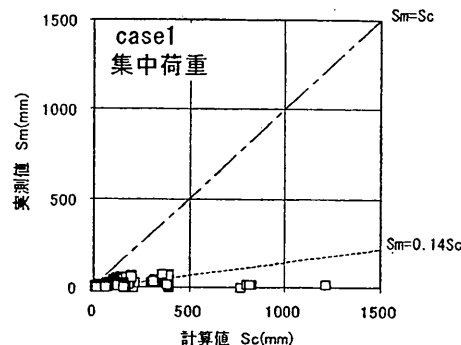


図-11 総沈下量の相関図(case1)

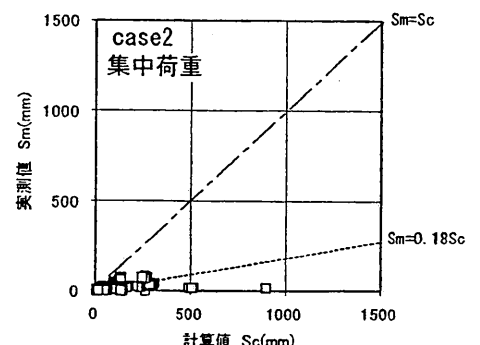


図-12 総沈下量の相関図

になって不合理な結果を与える。そこで、 Sm/Sc の対数をとって、 $\ln(Sm/Sc)$ の値で考える。こうすると、前述の問題点は解消できる。

図-13に、case1 の式で「集中荷重」の場合について描いた $\ln(Sm/Sc)$ のヒストグラムを示す。データに偏りがあり正規分布（対数正規分布）と見なすにはやや無理があるが、 $\ln(Sm/Sc)$ の平均値 λ と標準偏差 ζ を考えると、 $\lambda = -1.96$ 、 $\zeta = 0.90$ となる。これを普通目盛に戻すと、平均値 μ は $\mu = e^{-1.96} = 0.14$ となる。また、図は省略するが「等分布荷重」、「30度分散」の場合の平均値もともに $\mu = 0.14$ となった。これらの結果から、実測値は計算値の 0.14 倍、すなわち約 1/7 の値になっていることが分かる。したがって、指針による総沈下量の計算値は、実際に生じる沈下量の約 7 倍の値を与えることになる。さらに、実測値に比較的近い計算値を与える case2 の式の場合でも、平均は $Sm/Sc = 0.18$ と実測値の 5 倍以上の値になることが分かる。

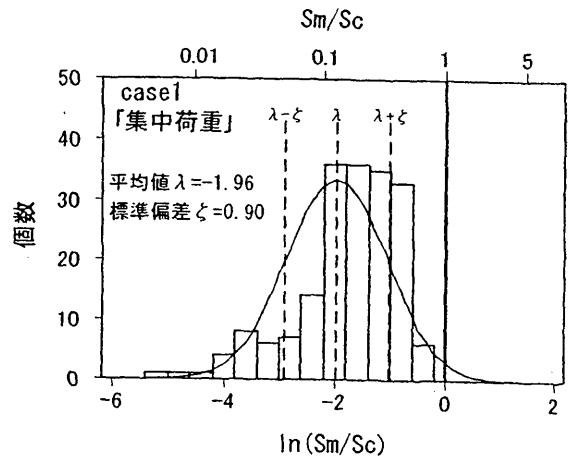


図-13 $\ln(Sm/Sc)$ のヒストグラム

指針の方法による計算では総沈下量が実際の値よりも非常に大きな値となる理由として、以下のことが考えられる。

- 建物重量の設計値が大きい：固定荷重は安全側の配慮から、一般に大きめに設定されることが多い。積載荷重も、設計ではフルに荷重が載った状態を想定しているが、実状はそのようなことはほとんどない。したがって、実際に地盤に作用している荷重は、計算で用いる値よりもかなり小さい。
 - 地盤のヤング係数が小さめの値：圧密沈下は圧密試験の結果を用いるが、新しい指針で大きな比重を占める即時沈下では主に N 値から換算した地盤のヤング係数 E を用いることになる。特に、粘性土の場合には N 値と qu との換算式も使うことになる。これらの換算式は、「安全側」ということで小さめの E や qu の値を与えるものが多い。この結果、計算では沈下量が大きくなることが多い。これについては、次節で考察する。
 - 理論との整合：計算では何も無い地盤に建物荷重が一度に全て作用した状態を仮定しているが、実際には施工過程に応じた荷重状態となる。また、指針の計算方法は、圧密沈下は圧密理論に、即時沈下は弾性論に基づいたものであるが、実際の地盤はこれらの理論に必ずしも従わない。これらの要因によって計算値が実測値よりも大きくなるとは限らないが、両者が合わない理由の一つではある。
 - 基礎スラブの抵抗が入ってない：摩擦杭基礎の場合、基礎スラブの底面は地盤面に接している。計算では建物荷重は全て杭に伝達されると仮定しているが、実際には基礎スラブも一部を負担しており、パイルド・ラフト基礎の状態になっている。この条件を考慮すると、沈下量は小さく計算されるものと考えられる。
- また、計測の点にも実測値が小さくなる要因がある。
- 初期沈下量が入っていない：計測には建物側面に標点を設ける必要があることから、その開始は早くても基礎梁打設時、施工の都合などで遅くなれば竣工時となる。したがって、実測値には、それまでに生じた沈下量が含まれないことになる。
 - 圧密が完了していない：計算で得られる圧密沈下量は圧密完了時のものであるが、本報で比較した実測値には建物荷重による圧密沈下がまだ収束していないものも含まれている。圧密が完了するまで計測した場合は、実測値はもう少し大きくなる。

以上の理由などによって、指針による計算値が実測値の 5～7 倍の沈下量となったものと考えられる。ただ、旧指針による結果²⁾では 3 倍程度であったことを考えると、新指針では粘性土地盤でも即時沈下を考慮することは、沈下量の計算値を過大に評価する大きな要因となる。

7. ヤング係数 E の検討

即時沈下量の計算に用いる地盤のヤング係数 E は、N 値から推定することが多い。本報では表-2 に示す換算式から E を求めたが、その結果、計算値は実測値に比べて過大な沈下量になった。これは前述のように、E の値を過小評価しているのも一因である。特に、case1 の式では、N 値が 0 に近いと qu が 0 に近くなって、その結果、E も 0 に近い値となり計算上非常に大きな即時沈下の値を与えることになる。このため、 qu を N 値から求める換算式としては、case2 の $qu = (4+N/2) \times 10^{-2}$ (MN/m²) の方が適切と考えられる。

いま、粘性土の E を case2 の換算式によって得られた値の 10 倍にしてみる。砂質土の E は、指針にも示されている N 値と E の関係図¹⁰⁾を参考に、表-1 の式で得られた値の 3 倍にしてみる。それらの E の値を使って得られた計算値 Sc と、実測値 Sm との相関図が図-14 である。前節と同じ手法で

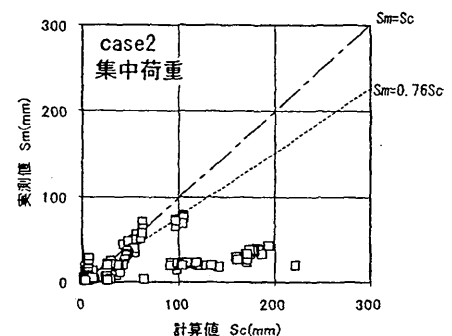


図-14 総沈下量の相関図
(E を大きくした場合)

S_m/S_c の平均値を求めると0.76となる。これから、Eを砂質土で3倍、粘性土で10倍しても指針の方法による計算では、実測値の約4/3倍の沈下量を与えることが分かる。

しかし、実測値にも前節で述べた問題点があることや安全側の配慮なども考えると、実測値の約4/3倍というのは妥当な計算値であるともいえる。したがって、指針の方法によって沈下量を計算するときには、地盤のヤング係数は表-1の式(粘性土はcase2)で得られた値を砂では3倍、粘性土では10倍した値を用いることを、本報では提案する。

8. 指針に準拠し計算した相対沈下量の検討

表-1に示した9件の建物について、相対沈下量の計算値 S_{rc} と実測値 S_{rm} の相関図と、その拡大図を図-15に示す。相対沈下量は正負の値になるため絶対値で考えると、計算値は大半が実測値よりもかなり大きな値となっていることが分かる。中には実測値よりも小さいものもあるが、拡大図でみるとほとんど指針で示された限界値の8mm(地盤が砂層のRC造の値)以下であり、建物に障害が生じない範囲のものである。

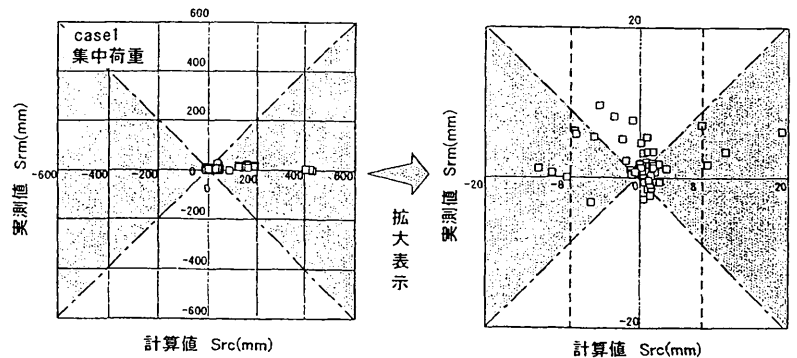


図-15 相対沈下量の相関図

これを定量的に検討するために、相対沈下量分布から変形角を求め、この計算値 θ_c と実測値 θ_m について考える。6節と同様、 $\ln(\theta_m/\theta_c)$ の平均値 λ と標準偏差 ζ を求めると、 $\lambda = -0.99$ 、 $\zeta = 2.16$ となった。普通目盛に戻すと平均値 $\mu = \lambda = e^{-0.99} = 0.37$ となり、計算値は実測値の約3倍の値になることが分かる。

さらに、 $|S_{rc}| < 8$ mmのデータを除外して考える。これは $|S_{rc}| < |S_{rm}|$ のデータは $|S_{rc}|$ が限界値より小さく建物には問題を生じない場合に集中しているにもかかわらず、 $\ln(\theta_m/\theta_c)$ の値は大きくなってしまい、統計値への影響が大きいためである。この場合、 $\ln(\theta_m/\theta_c)$ のヒストグラムは図-16のようになる。 $\lambda = -1.68$ 、 $\zeta = 2.15$ となり、 $\mu = e^{-1.68} = 0.19$ が得られる。これから、 $|S_{rc}| > 8$ mmのデータでは、変形角の計算値は実測値に対して約5倍の値を与えることが分かる。したがって、指針の計算方法では過大な相対沈下量や変形角を与えることが指摘できる。

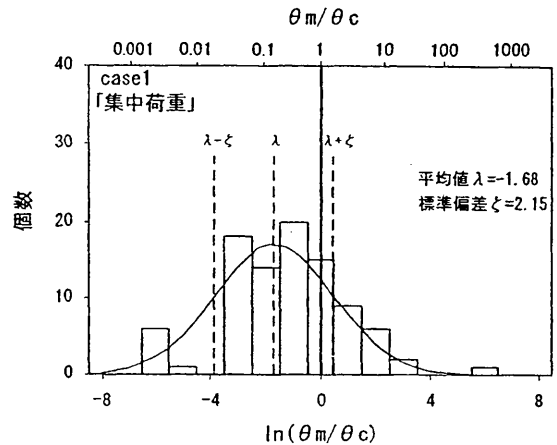


図-16 $\ln(\theta_m/\theta_c)$ のヒストグラム

この原因の一つは、計算値には基礎梁や上部構造の剛性が考慮されていないことである。しかし、旧指針で示されていた建物剛性を考慮する簡略な方法は削除され、格子梁モデル、格子梁+連成ばねモデル、立体架構+地盤ばねモデル、FEMなどの方法が紹介されるに留まっている。今後、格子梁モデルのような実用的な方法が普及するのが期待される。

なお、以上の検討は粘性土の換算式にcase1を用い、 $\Delta\sigma_z$ の計算に「集中荷重」を用いた場合であるが、case2や「等分布荷重」、「30度分散」を用いても同じ傾向を示している。

9. おわりに

本報では、新しい指針の方法による沈下量の計算方法を、9件の摩擦群杭を用いた建物の長期沈下計測による実測値と比較することによって検証した。その結果以下のことが分かった。

- ① 指針の方法による計算値は、実測値に比べ総沈下量では約7倍、変形角では約5倍の値となる。これは、粘性土層でも即時沈下を考慮することが大きく影響している。
- ② 即時沈下に用いる地盤のヤング係数をN値から求める場合は、既往の換算式から得られる値を砂地盤では3倍、粘性土地盤では約10倍すると、ほぼ妥当と思われる総沈下量の計算値が得られる。
- ③ 地盤の増加応力 $\Delta\sigma_z$ の計算は、各杭に働く荷重が仮想作用面の深さで集中荷重として作用するものと考えて、Boussinesqの解により求める方法で十分である。

参考文献 1)日本建築学会：建築基礎構造設計指針、1988.1. 2)板東真平・小椋仁志：摩擦杭基礎の沈下量の計算値と実測値との比較、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)B-1、pp.507~508、2001.9. 3)日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001.10. 4)節杭協会：節杭による建物の沈下測定、1983.4. 5)例えば、河津 亘・小椋仁志：軟弱地盤に建設されたRC造店舗付き集合住宅(摩擦杭)、建築知識、pp.116~119、1992.5. 6)例えば、福井 実・本田周二：圧密未了地盤に建設した摩擦杭および直接基礎建物の沈下観測、第31回地盤工学研究発表会、pp.471~472、1996.7. 7)竹中準之介：粘土のサンプリングとその信頼度、土質材料の力学と試験法における最近の問題点、日本材料試験協会関西支部、pp.1~22、1962. 8)西垣好彦：粘土のヤング率の歪レベルによる変化、第26回土木学会年次学術講演梗概集、pp.93~96、1971. 9)大崎順彦：建築基礎構造、pp.399~400、技報堂出版、1991.10. 10)玉置克之・桂 豊・岸田 了：施工時の鉛直変位測定に基づく支持地盤のヤング係数、清水建設研究報告、Vol.55、pp.11~20、1992