

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、福井ら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

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。

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 ⁹⁾	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 ⁹⁾	RC	3F	布	RC三角節杭	埋込み	10
5		集合住宅 ⁹⁾	RC	3F	布	RC三角節杭	埋込み	16
6	大阪府	宿舎 ⁹⁾	RC	4F	布	RC三角節杭	打込み	14
7	大阪府	倉庫 ⁹⁾	S	1F	ベタ	RC三角節杭	打込み	29
8		倉庫 ⁹⁾	S	1F	ベタ	RC三角節杭	打込み	32
9	大阪府	学校 ⁹⁾	RC	3F(一部2F)	独立	RC三角節杭	埋込み	53

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 E_{50} 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	$E=2.8N(\text{MN}/\text{m}^2)$
	正規圧密	$E=1.4N(\text{MN}/\text{m}^2)$
粘性土	case1	$E=105q_u$, $q_u=N/8 \times 10^{-1}(\text{MN}/\text{m}^2)$ (ただし洪積粘性土は $E=240q_u$)
	case2	$E=105q_u$, $q_u=(4+N/2) \times 10^{-2}(\text{MN}/\text{m}^2)$ (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て、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 q_u 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。

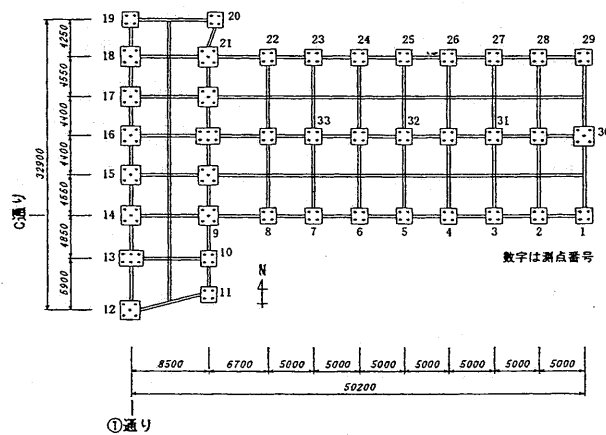


図-1 杭伏せ図

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、

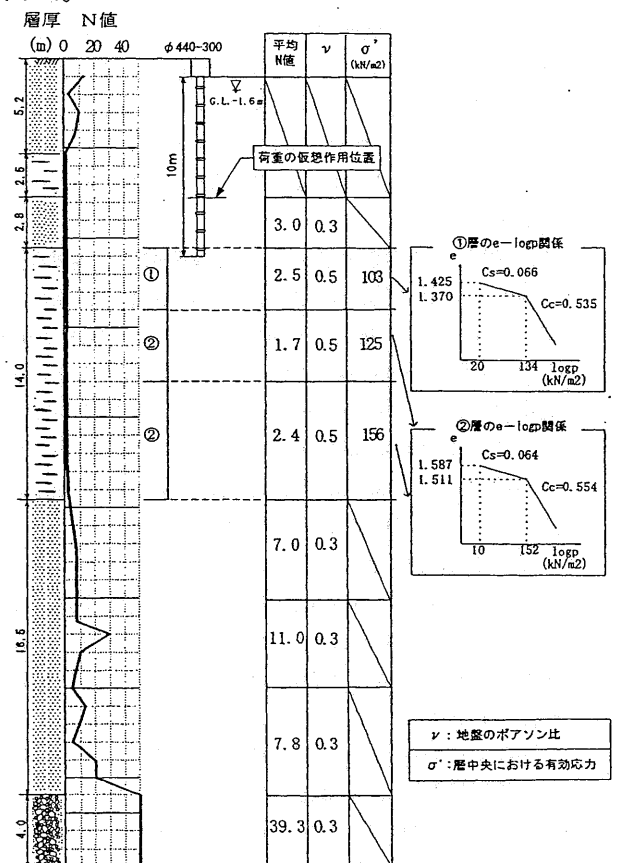


図-2 地盤状況

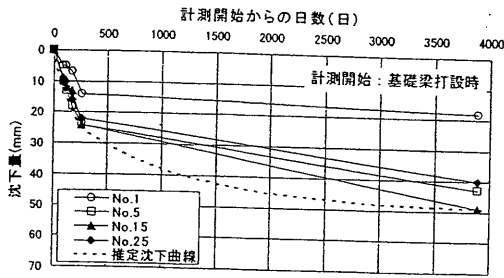


図-3 沈下量の経時変化

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、case1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。

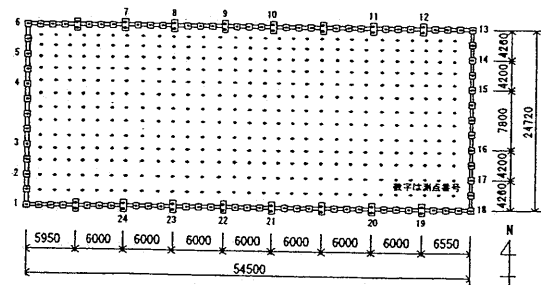


図-6 杭伏せ図

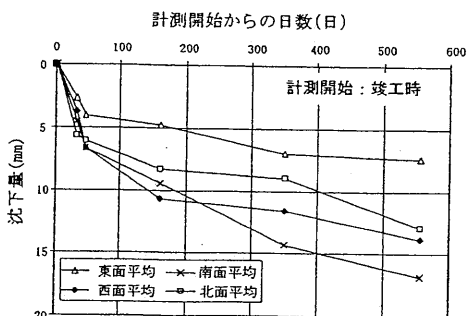


図-8 沈下量の経時変化

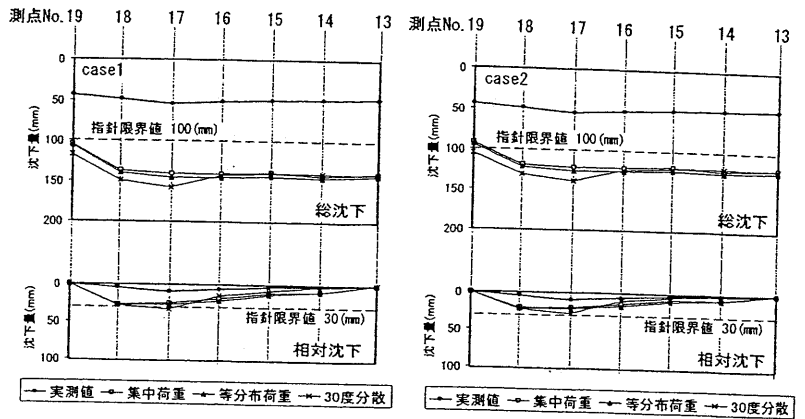


図-4 沈下量分布図 (1通り)

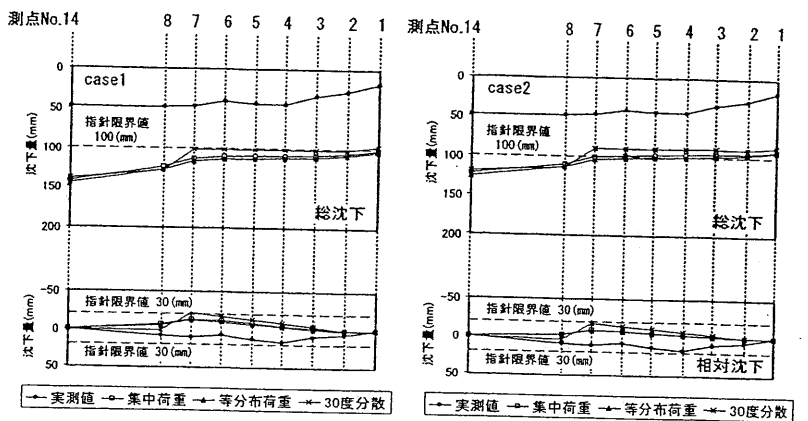


図-5 沈下量分布図 (C通り)

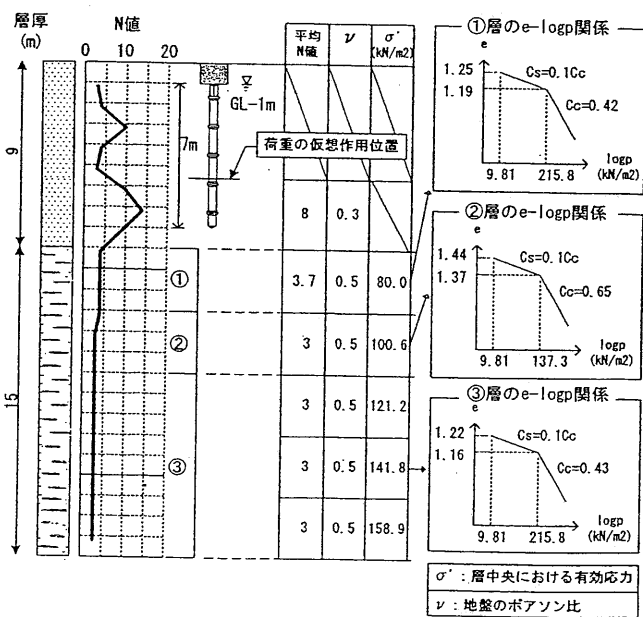


図-7 地盤状況

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

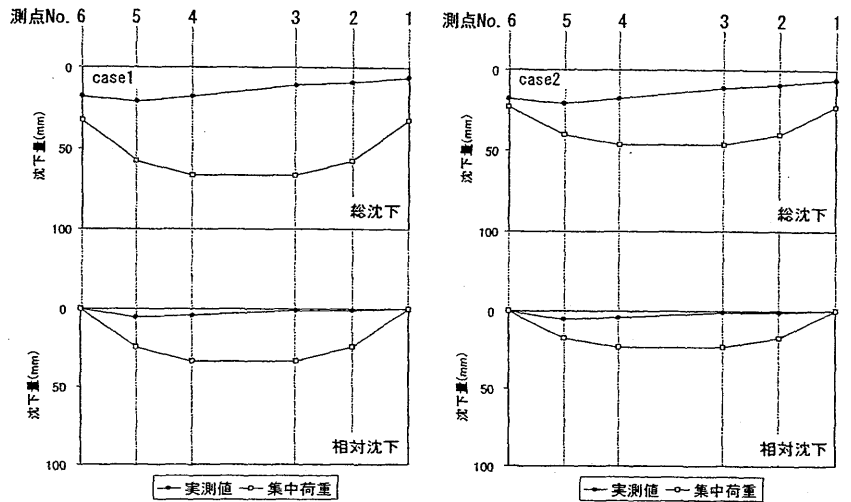


図-9 沈下量分布図(西面)

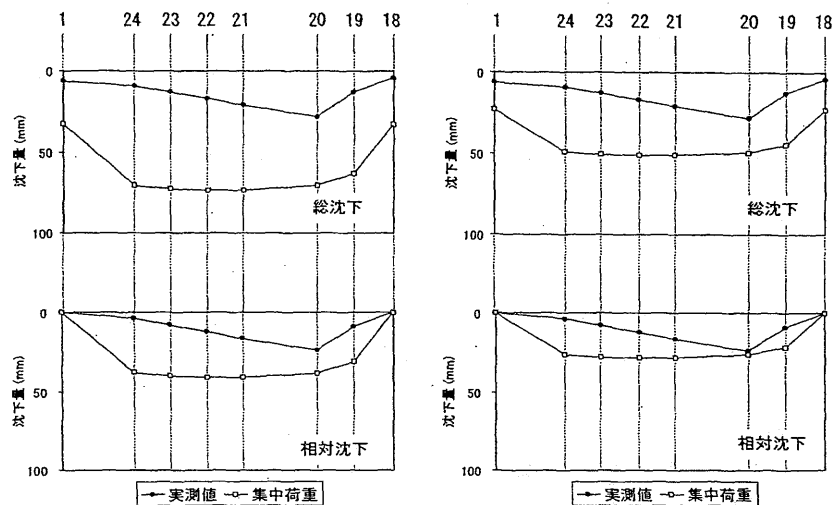


図-10 沈下量分布図(東面)

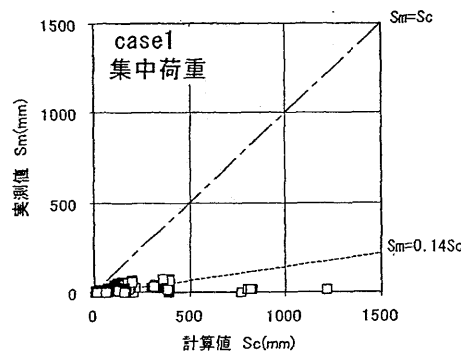


図-11 総沈下量の相関図(case1)

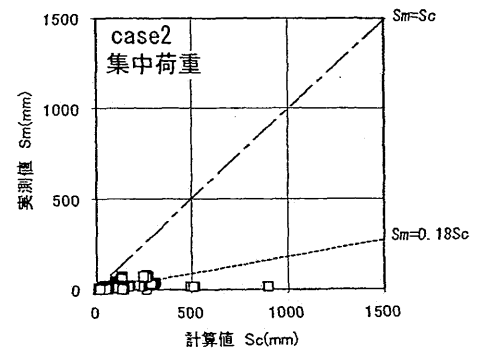


図-12 総沈下量の相関図

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。

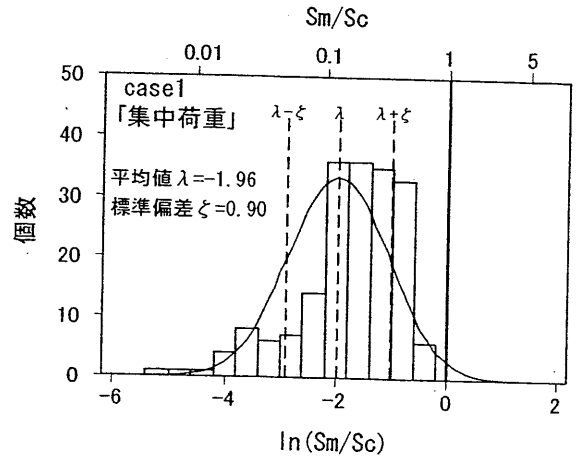


図-13 $\ln(Sm/Sc)$ のヒストグラム

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：計算では何もな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/m^2) 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

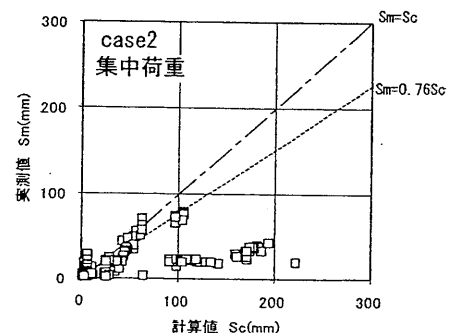


図-14 総沈下量の相関図
(E を大きくした場合)

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。

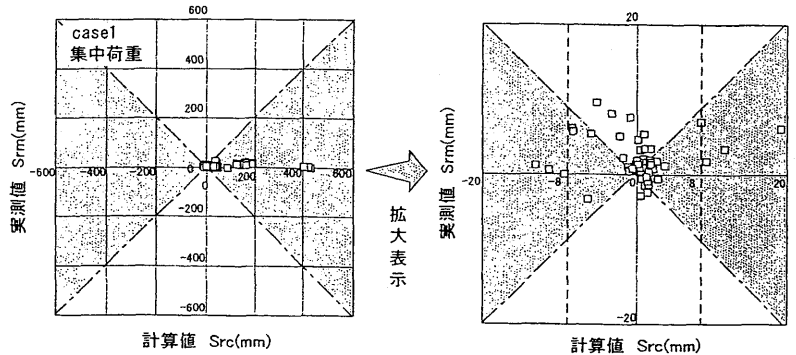


図-15 相対沈下量の相関図

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 μ は $\mu = e^{-0.99} = 0.37$ 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のである。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。

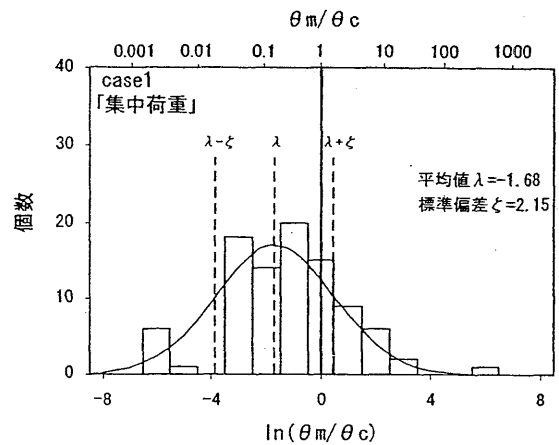


図-16 $\ln(\theta_m/\theta_c)$ のヒストグラム

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