

杭の先端支持力算定式に関する一考察 (先端平均N値の平均範囲を中心として)

(株) ジオトップ 正会員 小椋仁志

1. はじめに

杭の先端支持力については、Vesic の支持力理論が定説化され、球空洞押し広げ理論による支持力式が提案されている。しかし、この支持力式は実用化されておらず、設計基準類においては、杭先端付近の地盤の平均N値 N_p に支持力係数 α と杭の先端面積 A_p を乗じる形の実用式が主流となっている。本報では、主に建築分野の基準類で用いられている実用支持力算定式の妥当性について考察を加える。特に、 N_p を算定する際の平均範囲について、支持力機構と載荷試験データをもとに検討する。

2. 先端支持力理論と実用支持力算定式

杭の先端支持力理論は、Terzaghi が直接基礎の支持力理論を杭に応用して、図-1 のように、杭先端に生じたくさびによって側方向から上方に移動しようとする地盤を、上載圧で押さえるとした理論を 1943 年に発表した¹⁾。次いで、1951 年に Meyerhof が、図-2 のように杭先端に生じるくさびに対数らせん状のすべり領域が杭側面まで連続する破壊形を考えた理論を発表した²⁾。しかし、これらの支持力理論は、地盤を剛塑性体と仮定しているため体積変化を考慮しておらず、想定されたすべり線も実験では確かめられないことから実際の地盤とは合わないこととされ³⁾、現在では否定された支持力理論となっている。なお、Meyerhof は、支持力理論だけでなく、実用式として先端支持力をコーン貫入試験値 q_c や標準貫入試験の N 値から求める算定式も提案している⁴⁾。

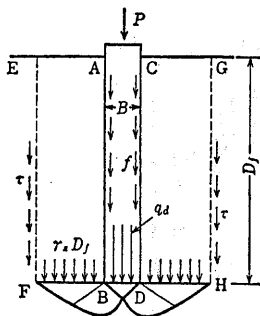


図-1 Terzaghi の理論¹⁾³⁾

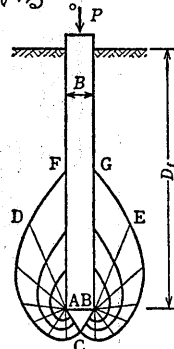


図-2 Meyerhof の理論²⁾³⁾

これらの理論に対して、Vesic は 1977 年に、図-3 のように、杭先端のくさびがはっきりしたすべり線を生じることなく、周囲の地盤を圧縮しながら貫入するとした支持力理論を発表した⁵⁾。この支持力理論は、BCP 委員会による埋込み杭の現場実験⁶⁾、高野・岸田の Non-Displacement 杭に対する模型実験⁷⁾、佐藤・小泉の 2 層系地盤による模型実験⁸⁾ などによって、その妥当性が確

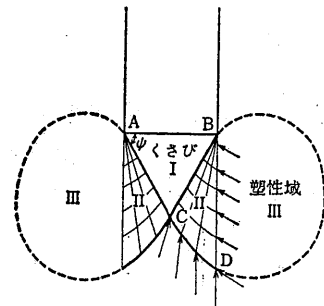


図-3 Vesic の理論^{5) 3)}

認された。これにより、杭先端の支持力機構がこの支持力理論で説明できることは、現在では定説化されている。

この理論による支持力値を、Vesic や山口は、球空洞押し広げ理論を用いて説明している^{9), 10)}。また、高野は、球空洞押し広げ理論によって降伏支持力の、円柱空洞押し広げ理論¹⁰⁾によって極限支持力の算定式を示している¹¹⁾。これらの理論で支持力を算定するときに必要となる土質定数は、有効粘着力、有効内部摩擦角 ϕ 、有効上載圧 p_v 、有効平均拘束圧、弾性係数 E 、ポアソン比 ν などであって、一般には測定されないものが多い。山口は実用式として、 ϕ 、 ν および E を N 値からの推定式に置き換えて、 p_v と N 値から先端支持力を求める式を提案している¹²⁾ が、ほとんど使われていないのが現状である。

現在、実用に供されている先端支持力 R_p の算定式は、上記の理論とは無関係に、砂地盤では Meyerhof の提案⁴⁾ を応用した N 値のみによる次の形の式である。

$$R_p = \alpha N_p A_p \quad (1) \text{式}$$

ここに、 α : 先端支持力係数

N_p : 先端平均 N 値

A_p : 杭先端面積

この式は、次の 3 つの仮定が満足されて初めて成り立つ。

- ① 地盤の支持力は N 値のみで評価できる
- ② R_p と N_p とは比例する
- ③ R_p は A_p にも比例する

これらのうち、③は「寸法効果は生じない」とする仮定である。模型実験の結果では生じる例¹³⁾と生じない例¹⁴⁾が報告されているが、実際の地盤で確かめられた例はほとんどない。基準類の中には直径 1.5m 以上の大口径杭では R_p を低減した算定式¹⁵⁾もあるが、これも「寸法効果を考慮した」というよりも「大口径杭のデータが少なく、支持力の信頼性が不明だから」との理由による¹⁶⁾。

①と②は、支持力式を簡単にするための仮定であって、前述の支持力機構を考えると成立するとは思えない。

Some Considerations on Pile Toe Bearing Capacity Formula
(Centering on the Range for Average SPT N-value)

OGURA Hitoshi (GEOTOP Corporation)

②に関しては、載荷試験データを整理して R_p/A_p と N_p との関係を求めても、後述するように比例関係が成り立たない場合が多い。①の仮定は、合理的な根拠に基づいたものではなく、単に「N値しか測定データがない」との理由による。杭の先端支持力という静的な抵抗をコーン貫入抵抗などの静的なものから求めるなら理解できるが、N値は動的な貫入抵抗であって、杭の先端支持力とは抵抗機構が全く異なっている。杭の先端支持力をN値のみから評価するのは、基本的に無理があるといえよう。

たとえば、同じN値であっても地盤種類や含水比などによって、支持力が全く異なる場合がある。段丘砂礫層の支持力は一般の砂礫層よりも小さい¹⁷⁾、しらす地盤では支持力が大きくなる¹⁸⁾。また、筆者の経験では風化頁岩は、N値が100以上であっても水がある状態で攪拌されると支持力はほとんど期待できなくなる。

もともとN値には、モンケン¹⁹⁾の落下効率や礫地盤でのばらつきなど動的抵抗を評価する上でも問題点が多く、静的支持力を推定するのに適した地盤定数とは思えない。

しかし、「N値しか地盤定数がない」という現状では、(1)式を用いるのはやむを得ないだろう。したがって、先端支持力を算定する際には、N値を用いることの問題点を常に考え、算定式は現状で可能な範囲で少しでも合理的なものにしておく必要がある。本報では、 N_p を求める時の平均範囲に焦点を当て、合理的な範囲を検討する。

3. 支持力機構による平均範囲の検討

建築分野の主な基準類で規定されている平均範囲をまとめると、表-1のように、大半は杭先端面から上方に4d (d:杭径)、下方に1d (以下、「上4d下1d」と略す) となっている。これは、前述のMeyerhofの支持力理論と、杭の先端支持力は上方3.75d、下方1d間のコーン貫入抵抗の平均値によって示されるとしたVan der Veenの打込み杭の実験¹⁹⁾に基づいたものである。しかし、少なくとも、埋込み杭や場所打ち杭においては、前節で述べたとおり、この支持力理論は否定されている。

表-1 主な基準類の先端N値の平均範囲

機関 (基準類名)	対象工法	平均範囲 上方 下方
建設省 (建築基準法 昭和46年建設省告示111号他)	打・埋・場	上4d下1d
日本建築センター (評定基本方針1996:埋込み杭工法)	埋	上4d下1d
東京都建築構造行政連絡会 (建築構造設計指針1991)	打・埋・場	上4d下1d
日本建築学会 (建築基礎構造設計指針1988)	打	上4d下1d
	場	上1d下1d

杭先端の支持力機構として定説化しているVesicの支持力理論では、上方の地盤はほとんど影響せず、先端支持力に寄与するのは先端面より下方の地盤のみである。高野らが模型実験で確かめた杭先端の沈下量と直下地盤の移動量との比を、文献²⁰⁾から引用して図-4に示す。杭の先端地盤が圧縮変形される範囲は、先端面～先端面下方2d間の範囲が大半であることが分かる。

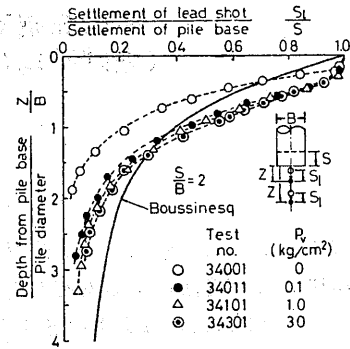


図-4 先端地盤の圧縮変形範囲²⁰⁾

また、佐伯らは、杭の先端抵抗に影響する地盤の範囲をFEM解析によって検討している²¹⁾。その結果、杭先端から上方の地盤はほとんど関係せず、杭先端面～先端面下1d間が33%、同1d～同2d間が35%、同2d～同3d間が20%、同3d～同4d間が12%の割合で影響するとの結論を得ている。これらの模型実験や解析の結果から、先端支持力の大半は杭先端面～先端面下(2～3)d間の地盤によって決まるものと判断される。

以上より、先端支持力に寄与する割合を模式的に表すと、概ね図-5に示す範囲の地盤となる。杭先端面より上方1dの地盤も少し寄与しているのは、載荷試験では杭先端から1d程度上方に取り付けたひずみ計で計測した値を「先端支持力」としており、この間の周面摩擦力もそれに含まれるためである。この図には、「上4d下1d」、「上1d下1d」および「上1d下3d」の範囲も併記した。両者を比べると、平均範囲を「上4d下1d」としたのでは、先端支持力に寄与する地盤をほとんど評価していないことになり、支持力機構から考えると不合理であることが分かる。

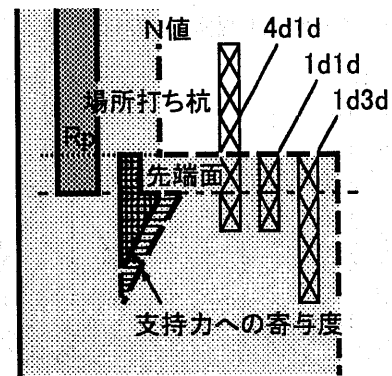


図-5 支持力への寄与度 (場所打ち杭)

建築基礎構造設計指針²²⁾では、場所打ち杭の平均範囲を「上1d下1d」としている(表-1)。上方の範囲を4dでなく1dとしたのは、先端面より上方の地盤は支持力にあまり寄与しないことと、支持層に1d以上根入れさせることを配慮したためであろう。しかし、支持力機構を考えるならば、下方地盤は圧縮変形される範囲の(2～3)dまで含めるべきである。

さらに埋込み杭の場合を考えると、埋込み杭工法は杭先端下方に(1～2)dの深さまで根固め部が設けられるものが多い。この部分の強度や剛性は周囲の地盤よりも

はるかに大きいため、設計どおり施工されていれば根固め部は杭の一部として作用すると考えるのが自然である。したがって、杭本体の先端面からみた支持力に寄与する範囲は、図-6のように杭先端面から下方に1d~(3~4)d間の範囲となる。このため、「上4d下1d」はもちろん、「上1d下1d」でも実際に支持力に寄与する地盤をほとんど評価していないことになる。

また、N値は通常1mおきに測定されるため、杭径が1m以下の場合「上1d下1d」では、平均範囲内にN値が1つしか存在しないことになり、N値の変動の影響を非常に受けやすくなる。さらに、杭径が50cm以下の小口径杭では、平均範囲内にN値が存在しないこともありうる。以上より、埋込み杭の場合は、支持力機構からみても、実用上からみても、「上4d下1d」はもちろん、「上1d下1d」も不合理な平均範囲ということになる。

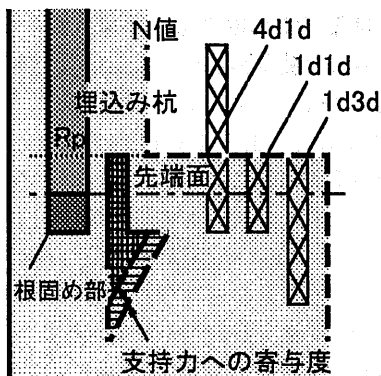


図-6 支持力への寄与度 (埋込み杭：支持杭)

ただし、「上4d下1d」には、支持層より上方にあるN値の小さい地盤も平均に含めて N_p を小さくする、あるいは支持層に十分根入れさせるなどの、「安全側の配慮」としての意味はある。しかし、これが安全側になるのは明確な支持層に根入れされる支持杭の場合に限られる。図-7のように、支持層の下方に軟弱層が存在する場合や中間支持杭の場合では、先端支持力に寄与するのは軟弱層、 N_p は良好地盤のN値の平均、となつて、「上4d下1d」では非常に危険側の設計となる。支持杭として開発され、大臣認定で $\alpha = 250$ が認められた工法による埋込み杭でも、根入れさせる地盤のN値の下限値が設定されていないこともあって、このような中間支持杭としての使い方は多く見られる。

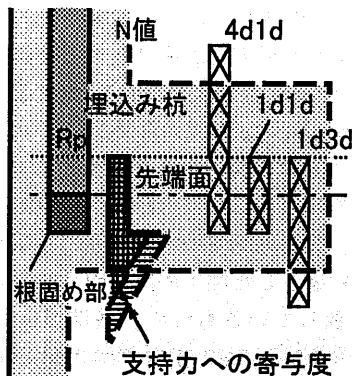


図-7 支持力への寄与度 (埋込み杭：中間支持杭等)

以上のように、杭先端の支持力機構からみると平均範囲を「上4d下1d」や「上1d下1d」とするのは不合理であつて、場所打ち杭では「上1d下(2~3)d」、埋込み杭では「上1d下(3~4)d」とするのが合理的であると考えられる。

4. 載荷試験データによる平均範囲の検討

次に、載荷試験による実測結果から、適切な平均範囲を考える。ここでは埋込み杭を対象とし、支持杭と摩擦杭・中間支持杭とに分けて検討する。前者には中掘り工法による鋼管杭の、後者にはプレ-ソグ工法によるPHC節杭の大臣認定を取得するために行われた載荷試験データを用いる。

4.1 支持杭

載荷試験杭は、中掘り工法(TAIP工法他)によって施工された外径 $\phi 600 \sim 1,000 \text{mm}$ 、杭長 $20 \sim 71 \text{m}$ の鋼管杭である。いずれもN値が50以上の砂質地盤や砂礫地盤に1d以上根入れされている支持杭であつて、杭径+100~200mmの径を持つ根固め部(コンクリート)が、杭先端位置から(1~2)d程度下方まで造成されている。

先端支持力 R_p は、杭先端から約1d上方に貼付されたひずみ計の測定値 ϵ_p から、次式によって求めている。

$$R_p = \epsilon_p (E_s A_s + \lambda E_c A_c) \quad (2) \text{式}$$

E_s 、 A_s は鋼管のヤング率と断面積であつて、公称値を用いた。根固めコンクリートのヤング率 E_c には、原則として載荷試験後に採取したコアの圧縮試験時の測定値を用いた。根固めコンクリートの面積 A_c には、鋼管内部の面積を採用した。 λ は先端支持力に対する根固めコンクリートの有効係数であつて、 $0 \leq \lambda \leq 1$ の値である。鋼管杭は肉厚が薄いため、 A_c が A_s よりも非常に大きくなり根固めコンクリート部分が負担する荷重を無視する、すなわち $\lambda = 0$ とすることはできない²³⁾。反対に、 $\lambda = 1$ 、すなわち完全な平面保持状態とすると、 R_p が上方の軸力より大きくなるなど、明らかに過大な値になる。 λ の値をいくりにするかによって R_p は大きく変化するが、 λ の真実の値を知ることは不可能である。そこで、文献24)等を参考に、 $\lambda = 0.5$ として R_p を求めた。

所定時間保持された処女荷重階の先端沈下量 S_p の最大値が杭径の10%を超えた15件の載荷試験(現場数は9ヶ所)を検討対象として、先端支持力 q_p と種々の平均範囲による N_p との相関係数や変動係数を求めた。 q_p は、 $S_p = 0.1d$ 時の R_p を、杭径を直径とする閉塞面積 A_p で除したものである。

N_p を求める平均範囲は「上1d下3d」などの8通りを考え、各々の範囲に含まれるN値を単純平均した値を N_p とした。図-8は、平均範囲を「上4d下1d」、「上1d下1d」、「上1d下3d」としたときの $q_p \sim N_p$ 関係図である。これらの図には、最小自乗法による回帰直線(平均 μ)と $\mu \pm \sigma$ (σ :分散を定数としたときの標準偏差)、および N_p の平均値を示している。なお、50を超えるN値は、換算N値により100まで評価した。

図-8から、回帰式のqp切片は原点に近いとはいえない、すなわち(1)式が成立する条件の「qpとNpが比例する」は成り立たないことが分かる。参考に、原点を通る回帰直線も併記したが、変動係数は前者のほぼ2倍の値になっている(表-2)。なお、原点を通る回帰直線の勾配(平均値 μ)の求め方は種々提案されている方法²⁵⁾うちの、最も一般的なqp/Npの単純平均値を採用した。これは、他の方法に比べて大きめの値を与えることが多い。

表-2は、平均範囲ごとの相関係数、標準偏差、Npが平均値のときの変動係数などの値である。この表で相

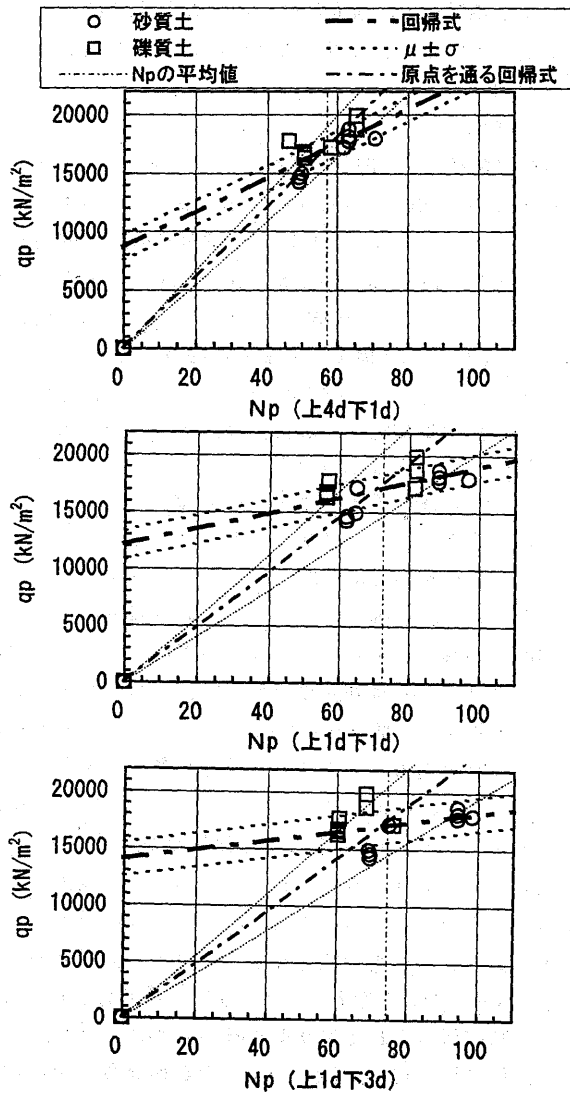


図-8 支持杭のqp~Np関係図

表-2 平均範囲別の相関係数と変動係数(支持杭)

平均範囲(上下)	相関係数	Npの平均値	回帰直線(最小自乗法)		原点を通る回帰直線(qp/Npによる)		
			σ (kN/m)	V*	回帰式	σ	V
4d 1d	0.737	57.2	1079	0.063	302Np	30Np	0.099
1d 1d	0.631	72.6	1238	0.072	242Np	40Np	0.163
1d 2d	0.343	75.3	1499	0.085	232Np	39Np	0.167
1d 3d	0.360	74.5	1488	0.087	235Np	40Np	0.172
1d 4d	0.353	74.6	1493	0.087	235Np	40Np	0.172
0d 2d	0.148	77.6	1578	0.092	228Np	46Np	0.204
0d 3d	0.246	75.8	1546	0.090	233Np	48Np	0.204
0d 4d	0.274	76.0	1534	0.090	232Np	45Np	0.193

*) Npが平均値の時の値 (qpの平均 $\mu=1717kN/m^2$)

関係数が最も良いのは、Npの平均範囲が「上4d下1d」の場合である。次いで「上1d下1d」、「上1d下3d」の順となり、「上0d下2d」が最も悪くなっている。「上4d下1d」や「上1d下1d」が、「上1d下3d」より相関性が良い、という前節の支持力機構による検討とは異なる結果となった。これは、qpは(2)式の λ の設定値によって大きく変動する信頼性が低いものであること、統計処理するにはデータ数が少ないため数個のデータのばらつき(特に砂礫地盤のデータ)が大きく影響したこと、杭先端から2dよりも下方のN値(換算N値)は100を超えるものが多くNpを適切に評価できなかったこと等のためであろう。また、前節で述べた模型実験や解析はN値が50以下に相当する地盤を対象としているが、N値が50を超えるような堅い層では先端地盤の影響範囲が小さくなるとも考えられ、前節の支持力機構をそのまま適用するのは無理があるのかも分からない。

山肩・伊藤らは、30件以上の場所打ち杭と100件以上の埋込み杭の荷重試験データから、先端支持力~先端沈下量関係について検討を加えている^{26), 27)}。この中で、「上4d下1d」、「上1d下1d」および「上0d下1d」の3種類の平均範囲によるNpとqpとの相関性を比べているが、いずれの杭種も相関係数は「上1d下1d」が最も良く「上4d下1d」が最も悪くなっている。杭先端から1dよりも下方の地盤が検討されていないのは残念であるが、データ数が統計処理に耐えられるほど多くなると、前節での検討のとおり、「上4d下1d」の相関性が悪くなることを示唆している。今後、統計処理するのに十分なデータが蓄積されるのを待ちたい。

4.2 摩擦杭・中間支持杭

摩擦杭や中間支持杭の適切な平均範囲を、節杭の荷重試験データを用いて検討する。荷重試験杭は杭径 $\phi 440-300$ 、 $\phi 500-400$ 、 $\phi 600-450$ および $\phi 650-500$ (節部径・軸部径、単位mm)、杭長4~43mのPHC節杭であって、改良セメント工法、低排土セメント工法、ソイルセメント工法などグレイソグ方式の埋込み工法によって施工されている。先端地盤は大半がN値0~30の砂質土、粘性土、腐植土であって、試験杭は摩擦杭や中間支持杭ということになる。

100件以上の荷重試験結果のうち、所定時間保持された処女荷重階のSpの最大値が節部径doの7%未満のものを除いた78件について、qpと種々の平均範囲によるNpとの相関係数や変動係数を求めた。qpは、Sp=0.1do時のRpを節部径を直径とする面積で除したものである。なお、Spの最大値が0.1doに達していない場合は、 $\log Rp \sim \log Sp$ 関係から外挿して求めた。Rpは、節杭の支持力機構を調べた模型実験²⁸⁾の結果から、図-9のB位置の軸力とし上下の軸力から内挿した。

B位置は、Np計算時の平均範囲の基準面にもなる。このため、対象とした施工法は根固め部先端位置は杭先端位置と一致しているものの、基準面が杭先端から約0.36m(doの0.55~0.82倍)または0.46m(doの0.92~1.05倍)上方であることによって、支持力に寄与する範

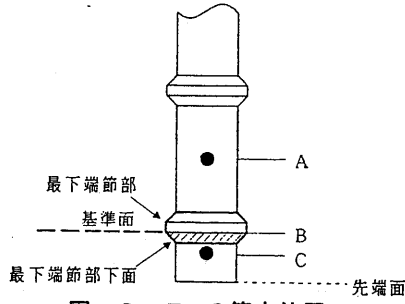


図-9 Rpの算定位置

囲は図-6や図-7とほぼ同じ状態となる。

平均範囲として「上1do下3do」などの7通りを考え、これらの範囲に含まれるN値を単純平均した値をNpとした。図-10は、平均範囲を「上4do下1do」、「上1do下1do」および「上1do下3do」としたときのqp~Np関係図である。これらの図には、最小自乗法による回帰直線(平均μ)とμ±σ(σ:分散を定数としたときの標

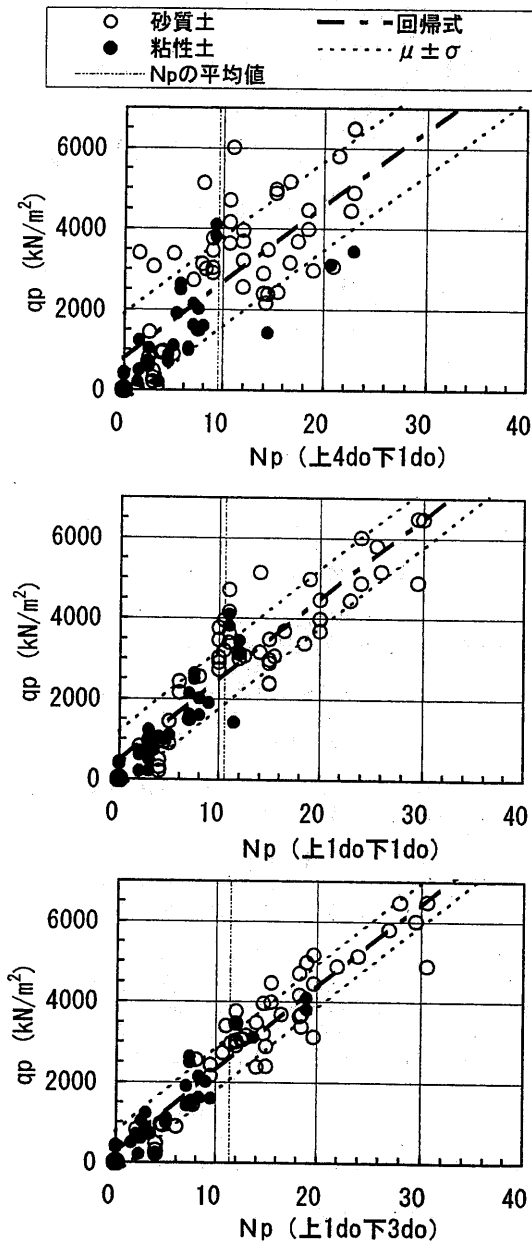


図-10 摩擦杭・中間支持杭のqp~Np関係図

準偏差) およびNpの平均値を示している。これらの図を見ると、回帰式のqp切片は原点に近い値となっている。したがって、このデータでは(1)式的前提条件である「qpとNpは比例する」ことが成り立つといえる。

表-3は、平均範囲ごとの相関係数、標準偏差σ、Npが平均値のときの変動係数Vなどの値である。相関係数が最も良いのは、Npの平均範囲が「上1do下3do」の場合、次いで「上1do下2do」、「上0do下3do」の順であり、「上4do下1do」が最も悪くなっている。支持杭の場合と異なり、「上1do下3do」など支持力機構からみて合理的な平均範囲が、載荷試験データでも良い相関性を示している。これは、データ数が多いこと、N値が10~30程度の地盤では前節で述べた支持力機構が成り立ちやすいことなどによるものと推測される。

したがって、摩擦杭や中間支持杭の場合は、支持力機構からみてもデータの相関性からみても合理的な平均範囲である「上1do下3do」とするのが適切と考えられる。

表-3 平均範囲別の相関係数と変動係数(摩擦杭等)

平均範囲(上下)	相関係数	Npの平均値	回帰直線(最小自乗法)		原点を通る回帰直線(qp/Npによる、Np=0を除いた)		
			σ (kN/m²)	V*	回帰式	σ	V
4do 1do	0.756	9.5	1103	0.430	310Np	280Np	0.903
1do 1do	0.912	10.5	728	0.284	245Np	93Np	0.380
1do 2do	0.940	10.8	625	0.244	234Np	85Np	0.362
1do 3do	0.987	11.4	538	0.210	225Np	80Np	0.353
0do 2do	0.883	11.6	805	0.314	232Np	98Np	0.423
0do 3do	0.928	12.3	725	0.283	220Np	91Np	0.411
0do 4do	0.870	13.0	919	0.358	204Np	93Np	0.456

*) Npが平均値の時の値 (qpの平均μ=2566kN/m²)

5. おわりに

本報では、建築分野の基準類で用いられている先端支持力の算定式について検討を加えるとともに、先端平均N値を求める際の平均範囲について、支持力機構の面と多数の載荷試験による実測データの面から検討した。その結果、以下のことを指摘した。

- ① 建築分野の基準類で主流となっている「上4d下1d」間や「上1d下1d」間は、支持力機構からみて不合理な平均範囲である。また、摩擦杭や中間支持杭では、危険側になることもある。
- ② 支持力機構からみると、場所打ち杭では「上1d下(2~3)d」、埋込み杭では「上1d下(3~4)d」とするのが合理的である。ここで、「上1d」を評価するのは、先端面~先端支持力測定位置間の摩擦力も「先端支持力」に含まれるためである。
- ③ 15件の埋込み支持杭の実測値では、「上4d下1d」の相関性が高いが、データ数が多くなると「上1d下1d」の方の相関性が良くなる。また、先端地盤のN値が50を超える堅い地盤では、下方の影響範囲は②の範囲よりも小さくなると推測される。
- ④ 78件の埋込み摩擦杭・中間支持杭の実測値では「上1do下3do」の相関性が高く、②と合わせて考えても、この平均範囲が合理的であり適切といえる。

以上の指摘より本報では、平均範囲を場所打ち杭では $\sqrt[2]{d}$ 、埋込み杭では $\sqrt[3]{d}$ に改めることを提案する。そして、支持力係数 α も、この平均範囲に応じたものに修正されることを期待したい。

なお、土木分野の基準類は、以前からBCP委員会の実験結果⁶⁾などをもとに、先端面より下方の地盤のみを評価するものが大半であった。たとえば、鉄道構造物等設計標準²⁹⁾では埋込み杭(中掘り先端根固め杭)の平均範囲は、「杭先端から下方へ3d間」としている。また、道路橋示方書³⁰⁾も N_p は「杭先端地盤のN値」としており、先端面より上方の地盤は考慮していない。土木分野の場合、設計基準は各機関の内部基準的な性格が強く、改訂時の手続きも比較的簡単であって、新たな知見や研究の成果を基準の上に反映しやすいものと思われる。

これに対して、建築分野では基準類は建築確認など一般人を対象とした行政指導に使われるため、影響の大きさを懸念するあまり、改訂時にも新たな知見は取り入れられず、ほとんど前例を踏襲したものになる傾向がある。その結果、技術や研究の進歩に合わないものや、技術的にみて疑問に思われる事項が多く残ることになる。たとえば建築基準法施行令第93条には、「地盤の許容応力度」の値を土質別に定めた表が示されている。これは地盤調査が普及していなかった時代に便法として定められたものであるが、平成12年6月の大改正でもそのまま残された。多くの研究者や技術者から、表の削除や「地盤の許容支持力度」への用語の修正を提案する意見が出された。しかし、内閣法制局の厚い壁のためか、これらの意見は受け入れられず³¹⁾、SI単位への変更のみにとどまった。

また、摩擦力を含めた場所打ち杭の長期許容支持力 R_a を、 $R_a=250A_p$ (tf/m^2)として設計することが多い。これは、もともと先端抵抗と摩擦抵抗とを分離せずに場所打ち杭の R_a を杭底部の単位面積あたり $250tf/m^2$ を上限値とした(財)日本建築センター(建設大臣認定式の審査機関)の評定や、アースドリル工法などの場所打ち杭の R_a を先端の単位面積あたりほぼ $250tf/m^2$ を上限値とした東京都の建築構造設計指針¹⁵⁾など、上限値を設定したものであった。しかし、実際には、この規定を根拠に先端N値が50以上であれば先端面積だけで R_a を決める設計や行政指導が多い。その結果、 R_a に摩擦力を反映しない不合理な設計となる。特に、細砂地盤ではN値が50以上であっても第2限界先端支持力度は $750tf/m^2$ を満足しない場合が多い³²⁾ため、杭長が短い場合は危険側の設計になってしまうことになる。

本報で検討した平均範囲についても、これらの例のように、新たな知見や研究の成果が取り入れられない結果残された不合理な規定の一つである。関連する発表論文は土木分野よりも建築分野の方が多く、たくさんの研究成果が得られているにもかかわらず、建築分野の基準類が技術的にみて遅れたままになっているのが現状である。本報が、建築分野の基準類においても平均範囲を合理的なものに改めるきっかけになれば幸いである。

参考文献

- 1) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley, pp. 134~135, 1943.
- 2) Meyerhof, G. G.: The Ultimate Bearing Capacity of Foundations, Geotechnique, 2, pp. 301~332, 1951.
- 3) たとえば、山肩邦男: 建築基礎工学, pp. 183~200, 朝倉書店, 1990. 4.
- 4) Meyerhof, G. G.: PENETRATION TESTS AND BEARING CAPACITY OF COHESIONLESS SOILS, Proc. of ASCE, Vol. 82, No. SM1, pp. 1~19, 1956. 1.
- 5) Vesic, A. S.: Design of Pile Foundations, Synthesis of Highway Practice, 42, Transportation Research Board, 1977.
- 6) BCP Committee: Field Tests on Piles in Sand, Soils and Foundation, Vol. 11, No. 2, pp. 29~50, 1971.
- 7) 高野昭信・岸田英明: 砂地盤中のNon-displacement pile 先端部地盤の破壊機構, 日本建築学会論文報告集, No. 285, pp. 51~62, 1979. 11.
- 8) 佐藤英二・小泉安則: 二層系地盤における杭の鉛直支持力, 第17回土質工学研究発表会, pp. 2097~2100, 1982. 6.
- 9) Vesic, A. S.: Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, Proc. of ASCE, Vol. 98, No. SM3, pp. 265~290, 1972. 3.
- 10) 山口柏樹: 無限土中における空洞押掛けの弾塑性解析と応用, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 15, pp. 1~11, 1973. 12.
- 11) 高野昭信: 砂地盤に設置されたNONDISPLACEMENT PILEの先端支持力, 東京工業大学学位論文, pp. 158~180, 1981. 3.
- 12) 山口柏樹: 弾塑性解析によるクイの先端支持力式とその適用性, 土と基礎, Vol. 23, No. 7, pp. 7~11, 1975. 7.
- 13) 金谷祐二・秋野矩之: 杭先端の沈下性状と寸法効果, 第14回土質工学研究発表会, pp. 941~944, 1979. 6.
- 14) 岸田英明・高野昭信・吉沢孝夫: 砂地盤中のNon-displacement pile (埋込み杭・場所打ちコンクリート杭) 先端部の荷重-沈下量関係に杭径が与える影響, 日本建築学会論文報告集, No. 284, pp. 17~27, 1979. 10.
- 15) 東京都建築構造行政連絡会監修: 建築構造設計指針, pp. 382~388, 1991.
- 16) 島崎邦明: 大口径場所打ち杭の取扱いの現状と背景, 建築技術, No. 555, pp. 172~175, 1996. 6.
- 17) 阪口 理: N値に関する2~3の問題点について-実用面からの考察-, 第9回土質工学研究発表会, pp. 5~8, 1974. 6.
- 18) 藤尾保幸・高田 誠・北村良介: 二次しらす地盤における場所打ちコンクリート杭の鉛直支持力に関する研究, 第35回地盤工学研究発表会(岐阜), pp. 1817~1818, 2000. 6.
- 19) Van der Veen: The Bearing Capacity of a Pile Predetermined by a Cone Penetration Test, Proc. 4th ICSMFE, 2, pp. 72~75, 1957.
- 20) 文献7)のFig. 11.
- 21) 佐伯英一郎・岩松浩一・木下雅敬: Non-Displacement Pileの先端支持力推定のための地盤の「平均N値」に関する解析的一考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 535, pp. 87~94, 2000. 9.
- 22) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp. 232~233, 1988.
- 23) 山肩邦男・藤田圭一・田中柳之助・平尾幸太郎・大杉富美一・小椋仁志: 大口径鋼管杭の打込み・埋込み工法による支持力比較実験, 第15回土質工学研究発表会, pp. 953~956, 1980. 6.
- 24) 和田茂哉・森河 久・高野晴夫・松井謙二: 施工法の違いによる中掘り工法大口径P C杭の支持力, 土と基礎, Vol. 28, No. 11, pp. 27~34, 1980. 11.
- 25) 小椋仁志・日野真紀子・カルキーマダン: 信頼性理論を考慮した杭の支持力算定式の作成例, 第44回地盤工学シンポジウム, pp. 121~126, 1999. 11.
- 26) 山肩邦男・伊藤淳志・山田 毅・田中 健: 場所打ちコンクリート杭の極限先端荷重および先端荷重~先端沈下量特性に関する統計的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 423, pp. 137~146, 1991. 5.
- 27) 山肩邦男・伊藤淳志・田中 健・倉本良之: 埋込み杭の極限先端荷重および先端荷重~先端沈下量特性に関する統計的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 436, pp. 81~89, 1992. 6.
- 28) 小椋仁志・山肩邦男・岸田英明: 模型実験による節付き円筒杭の支持力特性の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 374, pp. 87~97, 1987. 4.
- 29) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, pp. 227~232, 1997. 3.
- 30) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, pp. 334~336, 1996. 12.
- 31) たとえば、杉村義広: 技術と利益, COPITA, No. 29, pp. 3, 2000. 2.
- 32) 小椋仁志・渋谷孝男・カキマダノ・斎藤基治: 関東郵政局等庁舎新築工事における大口径場所打ち杭の先端載荷試験(その2: 試験結果の検討), 第32回地盤工学研究発表会(熊本), pp. 1433~1434, 1997. 7.