

参考

杭の極限支持力についての歴史的流れを考える

(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

表-1 には、筆者なりに杭の極限支持力についての歴史的流れを考察するために建築学会の規
準・指針とともに関連する主要な論文を挙げてみた。以下に、これらの概要を考察してみたい。

表-1 建築学会の規準、指針と極限支持力に関する主要な論文の歴史的流れ

1960年版基礎規準	Meyerhofの支持力式が示される。
BCP 委員会の実験	BCP 委員会：砂層に支持されたいの支持力に関する実験的研究、1969.7、論文としては BCP Committee: Field Tests on Piles in Sand, Soils and Foundations, Vol.11, No.2, pp.29~50, 1971.6
1974年版基礎規準	Meyerhofの支持力式が修正され、場所打ちコンクリート杭などの式も示される。
岸田、高野の論文	岸田英明、高野昭信：砂地盤中の埋込み杭先端部の接地圧分布（その1. 加圧砂地盤タンクの製作及び接地圧分布形の実験結果）、建築学会論文報告集、第260号、pp.21-33、1977.10、岸田英明、高野昭信：砂地盤中の埋込み杭先端部の接地圧分布（その2. 接地圧分布と埋込み杭の先端支持力の関係）、建築学会論文報告集、第261号、pp.25-38、1977.11、高野昭信（博士論文）：砂地盤に設置された NONDISPLACEMENT PILE の先端支持力、1981.3
友人の経験談 1987	建築センター基礎評定委員会へ評定審査申請した話
1988年版基礎指針	0.1D沈下時の荷重を基準支持力と定義し、施工法ごとに支持力式を示している。
山肩らの論文	山肩邦男、伊藤享志、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
筆者らの実験 1996	杉村義広：大口径場所打ち杭の鉛直支持力と問題点、建築技術、No.557、pp.168-171、1996.6、杉村義広、板橋薫、田村昌仁、鳥居信吾、萩原康嘉、藤岡豊一：低コストを目的とした大口径場所打ち杭の鉛直載荷試験-同一敷地における杭径2.5m、1.5mの2本の載荷試験、基礎工、Vo.25、No.12、pp.129-135、1997.1、杉村義広、田村昌仁、寺川鏡、持田悟、長岡弘明、山崎雅弘、藤岡豊一：大口径場所打ちコンクリート杭の先端載荷試験とシミュレーション解析、日本建築学会構造系論文集、第560号、pp.115-123、2002.10
持田らの論文	持田悟、萩原康嘉、森脇登美夫、長尾昌：場所打ちコンクリート杭の支持力性能（その1）先端荷重-先端沈下特性、建築学会大会、pp.725~726、2000.9
2001年版基礎指針	0.1D沈下時の荷重を含めて極限支持力として扱うことに変更した。

i) 1960年版基礎規準では、砂質地盤を対象としたMeyerhofの支持力式[Meyerhof: Penetration Tests on and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, Prpc. ASCE, Vol.82, pp.1-19, 1956] である(29.7)式の極限支持力 $R_u=43NA_p+\tilde{N}6$ が示された。ここでは杭先端の抵抗力が関心事であるので右辺第1項に注目したい。杭先端でのN値と杭面積 A_p に対する係数43は原論文では $4NA_p$ とされて単位が t/ft^2 で求められていたので、 t/m^2 に換算するために 0.303^2 で除して丸めたものである〔同様に右辺第2項の杭周面摩擦抵抗力に対して考察すれば、以下の書き換えがなされたものと推定される。砂層中の平均N値 \tilde{N} と杭表面積 A_s に対する係数が、静的コーン貫入試験の場合には $\tilde{N}50$ 、ペネトロメーターの場合には $\tilde{N}100$ の平均値が得られるとしたMeyerhofの結論を、規準の原案作成者がさらにそれらの平均値を取って $\tilde{N}75$ とし、それに換算値で除して丸めたものと思われる〕。

ただ、ここでの関心事からすればそれ以上に大事なことがある。Meyerhof は杭の支持力を目的としている筈なのに論文題名は単に「砂質土の貫入試験と支持力」とされていることである。それは、Meyerhof が Terzaghi の浅い基礎、したがって地盤の塑性論に基づいた支持力理論から出発して杭の支持力に発展させたことによるのであり、上記 ASCE の論文の前に

Geotechnique に発表した元論文 [Meyerhof: The Ultimate Bearing Capacity of Foundations, Geotechnique, Vol.2, No.4, pp.301-332, 1951] があるからである。その詳細はここでの本題ではないので省略するが、Meyerhof が単に杭と言っていることにも注目しておきたい。その当時杭と言えば事実上打込み杭を指していたので、この設計式は事実上打込み杭を対象としていたものであるという点、したがって 1960 年版基礎規準もそれに準じていたということを忘れてはならない [場所打ちコンクリート杭という言葉はあったが、むしろペDESTAL杭という言い方が普通で、今日から見れば一時代前の形式のものであり、現場打ちという意味ではピヤと呼ばれる形式の基礎もあって、場所打ちコンクリート杭よりは少し大型であることで区別されていたようである]。

ii) 1974 年版基礎規準では、杭の施工法ごとに支持力式が杭先端支持力と杭周面摩擦力に別けて明記されるようになった。以下、先端支持力の項についてのみ記述する。

打込み杭については Meyerhof の式が継続されているが、 $R_u \doteq 30\tilde{N}A_p$ (24.3) 式に変更されている。係数 43 が 30 へ低減されたのは、コーン貫入試験では先端面積が 10cm^2 と小さく、実際の杭との間に寸法効果があることによる。また、平均 N 値 \tilde{N} は文献 [C. Van der Veen and L. Boesma: The Bearing Capacity of a Pile Predetermined by a Cone Penetration Test, Proc. 4th ICSMFE, Vol. 2, pp.72-75, 1957] を参考にして、杭先端から下に $1D$ 、上に $4D$ の範囲を取ることに変更されている。

場所打ちコンクリート杭と埋込み杭については、載荷試験を行う場合には全般破壊型の荷重-沈下曲線を示す打込み杭と違って進行性破壊の性状を持つとされ、降伏荷重の $1/2$ 、あるいは極限荷重の $1/3$ を長期許容支持力とすることが明記された。載荷試験を行わない場合の場所打ちコンクリートの長期許容支持力算定式については、(24.18) 式として $15\tilde{N}A_p$ の $1/3$ が示されているので $5\tilde{N}A_p$ [単位は t/m^2] が先端での極限支持力として評価されていることになる。平均 N 値 \tilde{N} については、打込み杭に準じて先端から下に $1D$ 、上に $4D$ の範囲を取ることにされている。

埋込み杭については杭メーカーごとに新しい工法が開発され、建築センターの評定に基づいている現状であったから、この規準ではとくに記述されていない。

iii) 以上の 1960 年版と 1974 年版の基礎規準に挟まれた時期に BCP 委員会の実験が行われていることが象徴的である。東京赤坂見附の東急ホテル建設予定地で、実験用として製作された杭径 20cm、肉厚 3cm、長さ 1.25m の鋼管杭 [先端と側面には土圧計が配備されている] を継杭として必要なだけ継ぎ足すことで、埋込み、押込み、打込み工法で最大 12m 程度の長さまで設置した後、載荷試験を行ったものである [支持層は東京下部層の N 値 50 以上の密な砂礫層と、それより少し浅い中密な砂層が選ばれている]。

本題に関係する主要な結論として一つを挙げると、極限支持力は中密な砂層では押込み杭 [打込み杭も同様とされている] で $2.8D$ 、埋込み杭で $6D$ となり、密な砂礫層では押込み杭で $1.5D$ 、埋込み杭で $4.5D$ となったとされている。極限支持力に達する沈下量は、埋込み杭が押込み杭の 2~3 倍を要しているが、極限支持力の大きさ自体は施工法で違いがなく、地盤すなわち支持層の性質として現れていることが認められる。ただ、少し気になるのは、密な砂礫層の押込み杭の場合でさえ $1.5D$ となっていることであり、上記して来た打込み杭では $0.1D$ 沈下時に極限

支持力になるとの国際的コンセンサスにもなっていることとの開きが大きすぎるのではないかという点である。その点については荷重-沈下曲線を丹念に調べたところ、この $1.5D$ の判断は完全に沈下軸に平行になるまで厳しく見て確認した結果であること、それ以前に急激に形状が変化する点があって、通常の載荷試験での極限支持力の判定 $0.1D$ と比べてそれほど違わない結果であることが判明した。この点については、後述の 1988 年版基礎指針のところで再度記述したい。

iv) 岸田、高野の論文は、室内の加圧砂地盤タンクを用いて地表面から杭を押し込む荷重-沈下曲線を打込み杭に見立てて、それが極限支持力を連続で載荷していることに該当すると考える実験を行っている。それに対して、ある程度の深さに施工された埋込み杭の載荷試験が行われたと仮定した荷重-沈下曲線も想定し、沈下量が大きくなるまで押し込めば、いつか打込み杭の荷重-沈下曲線に到達し、それが埋込み杭の極限支持力となるとの考え方を示している。

得られた結論としては上記 BCP 委員会の実験に通じるものがあり、重要な論文であると筆者は評価しているが、ここではそのことよりも“第 1 極限支持力”、“第 2 極限支持力”という奇妙な命名法による概念が示されていることに違和感を持ったことの方を問題としたい。詳細は高野の学位論文に見ることが出来るが、極限支持力は、いわば最果ての現象であるから一つしかない筈であり [第 2 極限支持力と定義されたものがそれに該当する]、“第 1 極限支持力”と呼ばれているものは“極限支持力”ではなく、両対数グラフなどで勾配が変わって折れ線となる先端地盤が塑性化したことを示す特異点である。したがって、極限支持力とは別の用語を当てるべきものであることを指摘しておきたい。

v) 上記した友人の経験談は、1968 年の騒音規制法で市街地での打撃工法が禁止されて以後、既製杭は埋込み工法によるしかなくなったためにパイルメーカーが競って新工法の開発をしていた頃の話であり、時期は次に述べる 1988 年版基礎指針の発行の 1 年前にあたっている。これほど早い時代から埋込み杭の問題は始まっていたのかと歴史的流れを今更ながら思い起こす心境になっている。

vi) 1988 年版基礎指針は、長く続いて来た打込み杭の知識と経験に基づきながらも騒音規制法 (1968) で市街地での打撃工法が禁止されて以来、掘削を伴う埋込み杭と場所打ちコンクリート杭が主体的になり始める状況の中でまとめられたものと言える。杭の支持力に関しては、前出の BCP 委員会の実験結果が図-6.2.1 として引用され、打込み杭と埋込み杭の荷重-沈下曲線が考察されている。縦軸は沈下量そのもので示されていることも重要であり、両者とも 30cm ($1.5D$) を超えたあたりから沈下軸に平行となり始めており、値もほぼ同様な大きさとなる傾向が確認出来る [すなわち、極限支持力領域では施工法の違いはなくなり、地盤 (支持層) の性質が現れることを意味している]。ただ、この判定はかなり厳しめになされたものであるとも言える。なぜなら、 $0.1D$ (2cm) の沈下あたりには急激な

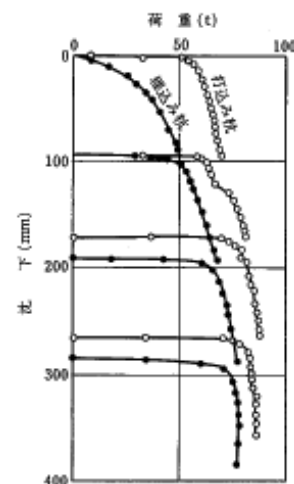


図 6.2.1 打込み杭と埋込み杭の先端荷重-沈下関係の相違^{6.1.1)}

変化をしており、通常の載荷試験では極限支持力と判定されるだろうと思われる点が存在しているからである。したがって、現実的には $0.1D$ 沈下時を極限支持力と判断してもおかしくはないことが確認出来る。

一方、埋込みの場合は全く状況が異なり、 $1D$ (20cm) 近くまで荷重-沈下関係は進行中であることが見られるので、それよりずっと小さい $0.1D$ 沈下時はとても極限支持力とは言えないことも理解出来るであろう。

場所打ちコンクリート杭に対しては図 6.2.14 が示され、初めて沈下についての言及が現れている。同図の説明として、領域 A は地盤の非常にしまった状態で、掘削による応力解放によっても安定性が保たれ、スライム処理も入念に行われた場合であり、 $0.1D$ 沈下時の下限が $15\bar{N}$ で表されるとしている。それ以外が領域 B とされているが、場所打ちコンクリート杭はばらつきが大きくなるのが現状であるとも記述されており、載荷試験で確認されていない場合は α の下限の $7.5\bar{N}$ を使うとされている。

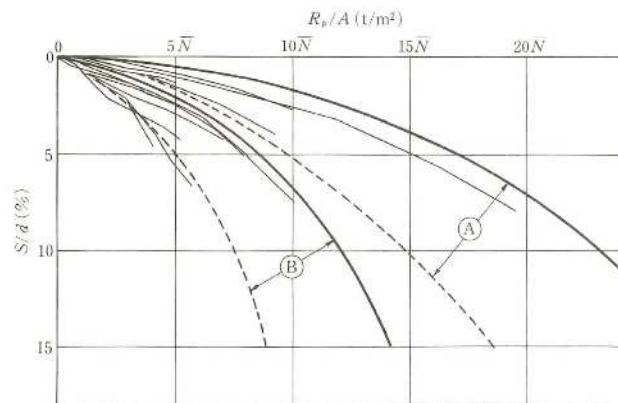


図 6.2.14 場所打ちコンクリート杭の載荷試験結果例
(太実線は実測値の上限、破線は推定下限値を示す)

図 6.2.14 では $0.1D$ の沈下まで載荷されている例はないのが気に掛かるが、場所打ちコンクリート杭で直径が 1m を超えるような杭が多くなっている現状を反映して、そこまで載荷出来なかった試験ではなかったかと推察される。それに対して、この指針では数は少ないが大きな沈下量まで載荷された例もあり、荷重-沈下曲線が初めて $0.1D$ 沈下時で基準化されたグラフが図 1.4.14 として示されている。

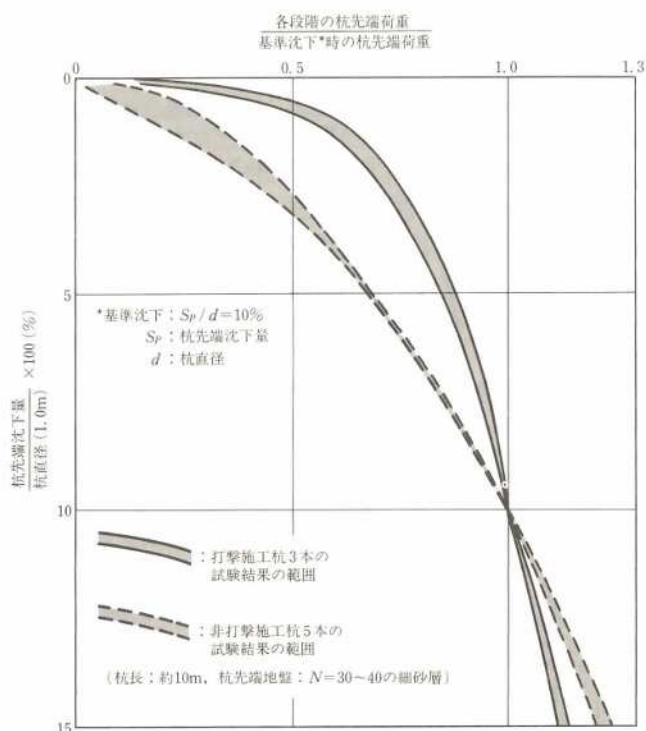


図 1.4.14 施工法による荷重-沈下量曲線の相違^{1.4.12)}

この図によれば、 $0.1D$ を過ぎると打撃杭より非打撃杭[参考文献として「大径 PC

くいの施工法と支持力に関する研究報告書、1970」が挙げられているので埋込み杭と思われる]の方がさらに荷重-沈下関係が伸びていることが確認出来る。このことから、打込み杭の場合は $0.1D$ で極限支持力となるとしてもそれほど違和感がないが、埋込み杭の場合は[場所打ちコンクリート杭も同様であるが] $0.1D$ 沈下時は極限支持力とはとても言えない。したがって、それに代わって「基準支持力」と呼ぶことにし、用語にも定義されている[すなわち、「極限(鉛直)支持力に達するときの沈下量が大き過ぎる場合に、極限(鉛直)支持力に代わ

って基準となる支持力。杭の場合には、杭径の10%の沈下量を生じるときの支持力」と定義されている。これがこの指針の特筆すべき点ともなっている。

vii) 山肩らの論文、持田らの論文と2001年版基礎指針

山肩らの論文は33例の場所打ちコンクリート杭〔杭径1~1.9m〕の載荷試験結果を統計的に考察したもので、 $0.1D$ 沈下時で基準化したグラフを作成し、結論として次式の一般式、 $(S_p/D_p)/0.1 = \alpha \left\{ (R_p/A_p)/(R_p/A_p)_u + (1 - \alpha) \left\{ (R_p/A_p)/(R_p/A_p)_u \right\}^n \right\}$ で α を0.27、 n を2.27とした式を提案している〔岸田英明、高野昭信：砂層を支持地盤とするNon-displacement pile（埋込み杭・場所打ちコンクリート杭）の先端支持力、第23回土質工学シンポジウム、pp.25-32, 978.11が参考文献として挙げられている。この一般式の中で $(R_p/A_p)_u$ が極限支持力とされていることなどは2001年版基礎指針と深く関係しているので、後に再術する〕。

持田らの論文も支持層が砂礫層の場合5件、砂層の場合7件合計12件〔いずれもN値50以上、杭先端深度12.8~48m〕、の場所打ちコンクリート杭〔杭径は1~2.5mで、筆者らが行った1.5mと2.5mの2本も含まれている〕の載荷試験について山肩らの論文と同様な整理をしている。

これら二つの論文が影響を与えたとも思われるが、2001年版基礎指針は「砂質土に支持させた場所打ちコンクリート杭の先端における荷重程度~沈下比の関係は(6.3.29)式で表される」とした上で、上記の一般式で係数が $\alpha=0.3$ 、 $n=2$ とされた式が示されている。各文献の係数 α と n を改めて比較して表-2に示す。

表-2 各文献の係数 α と n の比較

曲線の種類	α	$1-\alpha$	n
BCS 砂礫	0.12	0.88	3.31
BCS 砂	0.23	0.77	2.70
山肩ほか	0.27	0.73	2.27
2001 基礎指針	0.3	0.7	2

指針(6.3.29)式が図化された図6.4.4も示すと右のようになる。係数 α は原点(0,0)から出発する曲線の初期勾配を示し、係数 n は曲線の曲率を示すことになるので、 α が大きく、 n が小さくなるほど、原点(0,0)から45°右下がりの線〔荷重-沈下曲線が弾性の直線となることを示す〕に近づく。逆に α が小さく、 n が大きくなるほど、右45°上方へ凸状の曲線になること、したがって曲率が大きくなることを意味している〔最も極端な例として、原点(0,0)から沈下比 $S_p/d_p=0$ の線を水平に進み、 $(R_p/A_p)/(R_p/A_p)_u=1$ で垂直に下降して $S_p/d_p=1$ に到達する二つの直線の経路は完全剛塑性体ともいうべき性質を示す〕。

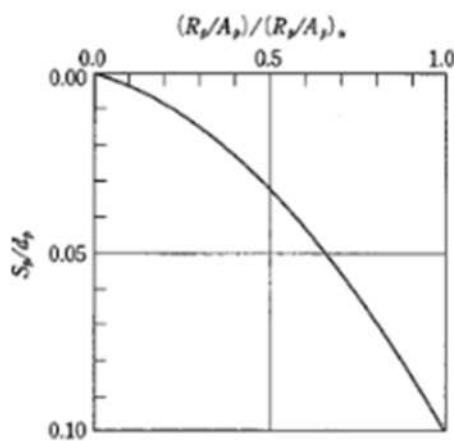


図6.4.4 杭の先端抵抗~先端変位関係のモデル化

これらの文献の曲線群が一つにまとめて示された文献があったので〔鈴木直子、西山高土、渡辺和博、佐原守：中間支持杭の鉛直支持性能に関する解析的検討、建築学会大会、pp.593~594、2017.8〕、その図5

を以下に引用してみる。これは中間支持砂層の N 値を種々に変えた解析を行った研究で、 N 値が 30 以上、層厚が $2D$ 以上あれば完全支持杭と同等とみなせるとの結論を得ており、2001 年版基礎指針、BCS 砂、BCS 砂礫、次に述べる筆者らの実験と比較したものである〔山肩ほかの研究は残念ながら含まれていないが、ここではそれを含めて言及してみる〕。これを見れば、2001 年版基礎指針〔図中基礎指針と示されている赤線〕が最も扁平で、山肩ほか、BCS 砂、BCS 砂礫の順に曲線が凸状になっており、鈴木らが解析した結果がさらに凸状の急となり、筆者らの実験結果に近いという筆者には心強い結果が報告されている。

なお、2001 年版基礎指針の (6.3.29) 式は、後になって表-1 に示した高野の学位論文で示された (7.13) 式が同じものであると知ったことをここで記述しておきたい。それとは別に、 $(R_p/A_p)_u$ が極限先端支持力度 [kN/m²] と定義されていることをここでは問題にしたい。1988 年版基礎指針で“基準支持力”と定義されていたものが、断りなしに“極限支持力”と言い換えられているからである〔学術書では、変更する場合は理由を明記するのが常識であるが、それがなされていない〕。この指針は、限界状態設計法で統一しようとする意図があるあまり、“長期許容支持力は極限支持力の 1/3”という歴史的な慣習と無理に結びつけた結果ではないかと思われるほど、無断で定義を変えたのは学術書としてあるまじき行為であるというのが筆者の感想である〔建築学会などの委員会の席で“第1極限支持力”とか“見かけ上の極限支持力”とかといった言葉を聞いたことがあったとも思い出すが、その“第1”とか“見かけ上の”の部分がいづの間にか抜け落ちて指針に現れたとも言える〕。

なお、改定基礎指針 2019 は 2001 年版基礎指針を踏襲していることを付け加えておきたい。

viii) 筆者らの実験

場所打ちコンクリート杭の支持力に関しては、筆者らが行った載荷試験についても言及しておく必要がある。最近の傾向として場所打ちコンクリート杭の大口径化はますます進んでおり、2m や 3m を超える杭の場合、 $0.1D$ の沈下は 20cm、30cm ということになり、現実の設計で対象としている沈下であろうか、杭径に対する比率で表示することが 1m 以下の杭の時代と同じような意味があるのだろうかとの問題が出て来る。また、先端地盤はどのような状況になっているかは誰もが知りたいことである。これらの点を調べてみようとの意図があって、杭径 1.5m と 2.5m の 2 本について $0.1D$ 以上の沈下量まで載荷したものである。詳しい内容は別の所で書いたことがあるので、ごく簡単に二つの結論についてだけ述べたい。

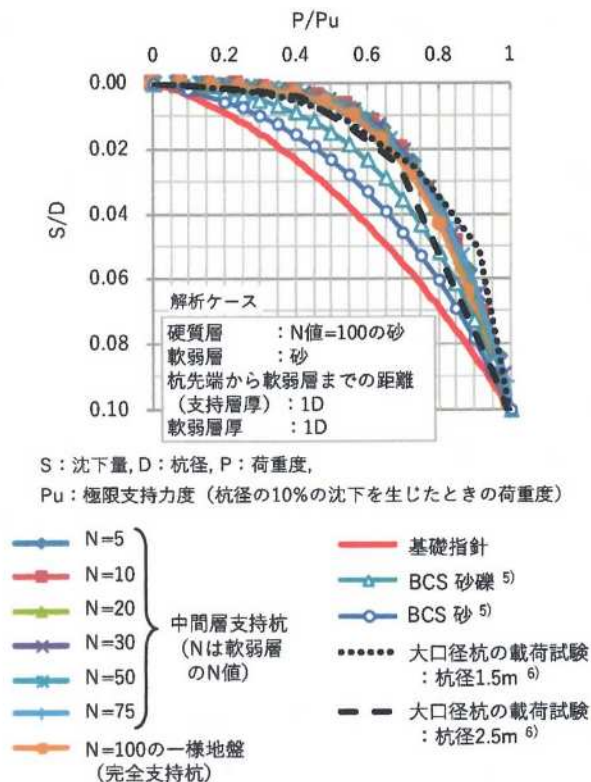


図5 杭先端の正規化した荷重～沈下曲線

一つは、杭先端地盤の動きを測定した図-17についてである。論文を書いたときには抵抗力として働いている範囲、いわゆる圧力球根がどのような形状になっているのかを描き出したという観点から得たのがリング状で示される点線であった。しかし、改めてこの図を見たときに、それ以上に杭体があたかもパンチングシヤ状態で貫入しているとみるの方が重要ではないかという点に気づいたの

である。これは、杭先端にコアが出来て抵抗するという極限支持力状態のようなメカニズムではなく、杭先端はばねの状態、杭体が地盤中に貫入していると見た方がよいのではないかと、底面での抵抗力はゼロではないがその値は小さく、むしろ杭側面の摩擦力が抵抗力として主体的に働いている、いわば沈下のメカニズムというべきものになっていたのではないかとということである。

二つ目は、2本の杭の先端基準支持力度 [1988年基礎指針にならって0.1D沈下時の荷重を“基準支持力”と呼んでいたのである]をほかの文献による結果も含めて比較した結果、図-19に示すように杭径に対して右45°下がりの直線、すなわち反比例の関係が得られたことである。これを杭の支持力 [すなわち基準支持力] に直すと、基準支持力は面積比例ではなく、杭径比例の関係状況になっているということである。

以上二つの結論は、杭先端部の抵抗力は杭先端底面での反力 [すなわち支持力メカニズムによる抵抗力]ではなく、杭周面の摩擦力 [すなわち沈下メカニズムによる抵抗力]であることを強く示唆している。このことから筆者は、従来の支持力メカニズムに基づくものではなく、沈下量を基底とした考え方への方向転換を提案したいと思っている。

“掘削を伴う杭の場合は、直径1m以下の杭に対しては0.1D沈下時、1m以上の杭に対しては10cmを基準値とし、その時の荷重を基準支持力として設計の対象とする” というものである。このことによって筆者は、0.1D沈下時の荷重を極限支持力とするのは学問的には間違いであることを指摘し、それを正すために沈下量で制御する方向への転換を提案したいと考えている。

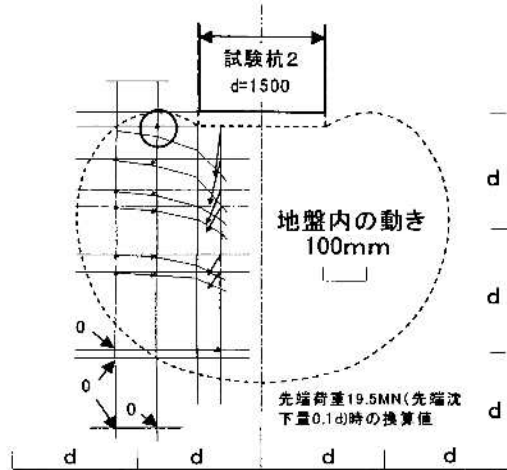


図-17 試験杭2の杭先端付近での地盤の動き

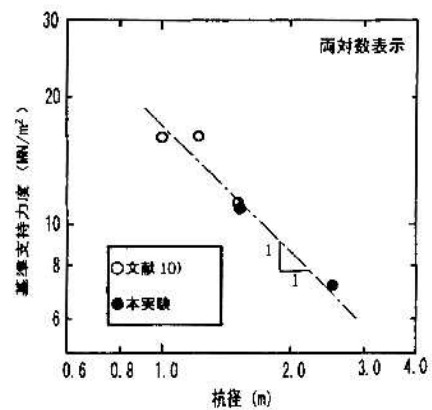


図-19 杭径と基準支持力度