

今年の建築学会大会で得られたこと

(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

今年の建築学会大会基礎構造の会場の発表では関心を惹かれる論文がいくつかみられた。とくに筆者が最近考え続けてきた「パイルドラフトは支持形式の言葉である」に関しては、最終的な整理に行き着く結論を得たような経験をしたので、それらについて記述しておきたい〔以下、参考のために論文番号と表題、ページを併記するが、著者はいずれもよく知った方々なので「さん付け」で呼ぶことにする〕。

先ず鈴木直子さんの論文〔20195 鈴木直子ほか：画像解析を用いた互層地盤における杭先端支持力の発現機構の一検討, pp.389～390〕は模型実験であるが、杭や地盤の材料には構わずに定性的な意味の範囲内で関心を惹かれたことがある。杭先端より下に柔らかい薄い粘性土層〔カオリン+セメントで模している〕があると、杭径の10%沈下時には先端が鉛直下方へ貫入している画像が図5として示されている

〔図5の左下赤い部分〕。文章にはこれが「パンチング破壊」と説明されており、筆者は自らの論文(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)を思い出したのである。いしずえ通信54号でも書きたいつも話題に挙げる図〔杭先端が杭径の10%沈下した時の地盤の動きを測定した図-17〕を右に示す。試験は杭径1.5mと2.5mのストレート杭の2本を行ったが、先端支持力は面積比例ではなく、杭径比例となって支持力の主体は先端の接地圧による抵抗よりも先端支持層の周面摩擦抵抗によるのかと推定された。杭先端より下方の地盤については、論文を書いている時には圧力球根がどのような形になるかばかりが考察の対象であったが、地盤の動きに注目し直せば杭先端は下方へ垂直に滑るように貫入していることに気づき、その下の地盤は下方になるほど下に向かう変位の鉛直成分が減少して、水平方向成分が次第に大きくなり45°方向へ動いている様子の方が重要かと思い直したのである。

この状況から、杭径の10%沈下時の挙動は“パンチングシア状態での貫入”と呼ぶことにしたが、鈴木直子さんの論文で“パンチング破壊”と呼ばれているものと非常に似ていて、場所打ちコンクリート杭の支持メカニズムを再認識した思いを持ったのである。掘削したことによる応力解放と底ざらいし残しのスライムが支持力に影響

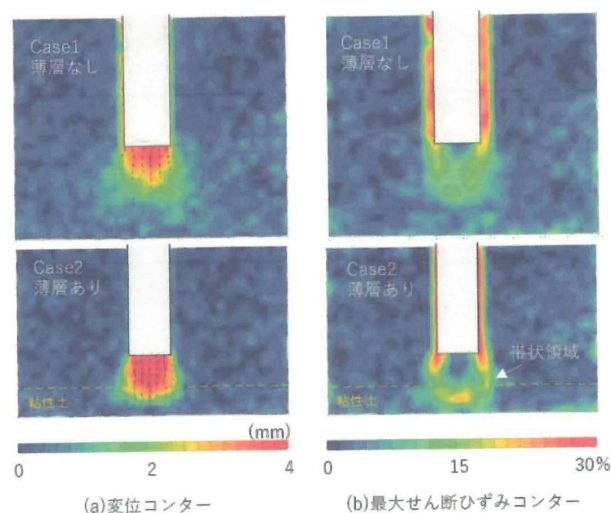


図5 杭径の10%変位時の変位と最大せん断ひずみのコンター

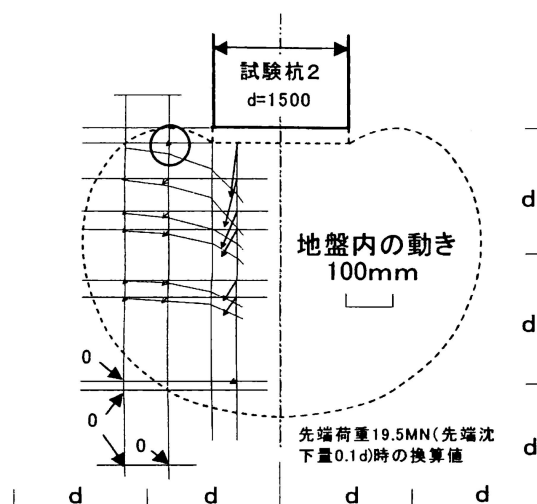


図-17 試験杭2の杭先端付近での地盤の動き

響を及ぼしていることが考えられるが、中でも応力解放の影響が大きいと想像され、下部に薄い粘性土層がある場合に相当するのかも知れないとの知見を得たのである。

長尾俊昌さんの論文〔20236 長尾俊昌：引抜き荷重を受ける場所打ちコンクリート拡張杭のシミュレーション解析杭応力、pp.403～

404〕も印象に残った。先端と中間を拡張する杭の引抜き抵抗を求めるために2019 基礎指針の(6.3.1) 式を適用している。ただし、基礎指針はストレート杭に対して示した式なので係数 α が使われているが、拡張底部に対しては α' に変えた(1) 式を適用し、中間の拡張部に対しては高さ H と周面積 S を(2) 式で求め、地盤の摩擦抵抗 τ を用いて方向余弦を考えて周面抵抗を求めるなどの工夫をしている〔図1, 図2 参照〕。ただ、ここでは論文の中味ではなく、(1)式の基となった2019 基礎指針(6.3.1)式について議論になった時に、極限支持力という言葉が出て来たことについて触れてみたい。

基礎指針の(6.3.1) 式を図化したものは鈴木直子さん達の論文でも図3 に示されているので、それを右に引用してみれば、杭先端より下に粘性土層がある場合(赤線)、ない場合が基礎指針2001 を挟んで下側の点線となる。もし、この図に打込み支持杭の場合を書き込むことを想定すれば、点(0,0) から右へ点

(1.0,0) まで進み下方に向かって点(1.0,0.1) に到達する経路に非常に近い曲線になる筈である。打込み支持杭の場合は、周面摩擦抵抗が一杯になるまでは(これは降伏点などと呼ばれることがある)沈下がほとんど進行せず、支持力抵抗要素が先端支持力に移ってから極限に達する傾向があるので、この経路で模式化ができるのに対して、場所打ちコンクリート杭の場合は赤線、基礎指針2001、点線になるほど、荷重-沈下関係が荷重の小さい初期の段階から非線形性を示す度合いが強いことを示す。この図は杭径の10%沈下時までの支持力特性がどの程度非線形性を示すかを知る上で分かりやすい図であるが、残る問題は(1.0,0.1) の点を持つ意味を明確にしておくことである。打込み杭の場合は「杭径の10%沈下時の荷重は極限支持力である」ということは国際的にも認められている事実であるが、場所打ちコンクリート杭の場合は極限支持力とは言えず、単に基準とするという意味で「基準支持力」に過ぎないことを強く認識しておく必要がある。

基礎指針では、場所打ちコンクリート杭の場合も打込み杭にならって杭径の10%沈下時の荷重を「見かけの極限支持力」と見立てて扱うことで出発したのであるが、議論を重ねているうちにいつの間にか“見かけの”が忘れられて“極限支持力”と呼ぶようになってしまっているのが現状である。基礎指針での約束事、“見かけの極限支持力”をよく知っている人々でさえ、何度も議論しているうちに“見かけの”をつい言い落として“極限支持力”と言ってしまふ場面を何度も経験することが多くなっている。言葉は常に大切にしたいものであることは何度でも繰り返し、今回も主張したい。“極限支持力”ではなく“基準支持力”という言葉を使わないと、要ら

$$\frac{S_p/d_p}{0.1} = \alpha' \frac{R_p/A_p}{(R_p/A_p)_u} + (1 - \alpha') \left\{ \frac{R_p/A_p}{(R_p/A_p)_u} \right\}^n \quad (1)$$

$$\text{ここに、} \quad \alpha' = \frac{\alpha \cdot D_1}{D_1 - D}$$

である(上式の各記号は基礎指針を参照されたい)。

一方、傾斜部の高さ H 及び周面積 S は次のようになる。

$$H = \frac{D_1 - D}{2 \cdot \tan \theta} \quad S = \frac{\pi^2 (D_1^2 - D^2)}{4 \cdot \sin \theta} \quad (2)$$

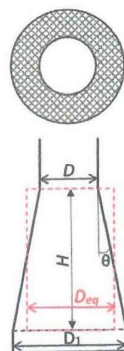


図1 拡張部

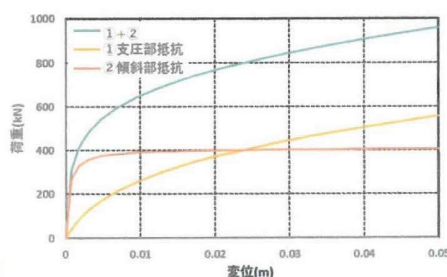


図2 拡張部の荷重～変位関係 (No.7)
基準化荷重 P/P_u

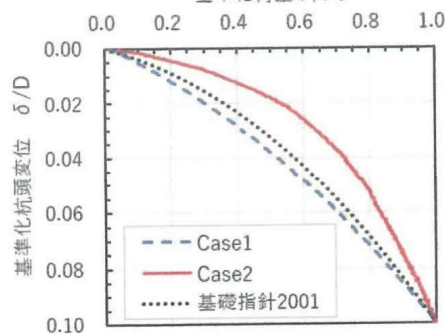


図3 基準化した
杭頭荷重～杭頭変位

め誤解が蔓延してしまうとの危惧を今回も強く感じたからである。

場所打ちコンクリート杭の先端支持力は、とくに大口径杭になるほど面積比例ではなく杭径比例となる。したがって、摩擦杭的な性質を強く持っているので打ち込み支持杭とは全く異なり、これもまた支持形式としては“パイルドラフト”となっているのではないかと、との印象を改めて感じているのである〔筆者は「パイルド・ラフト」と区別して用いていることに注意していただきたい〕。

BCP 委員会の実験結果を 1988 基礎指針が引用した図 6.2.1 を思い出していただきたい。これもよく引用するものであるが、杭は試験用として製作された 20cm 径の鋼管であり、真の極限支持力は杭径の 1.5 倍 ($1.5D=30\text{cm}$)〔赤四角で示す〕沈下時であると厳密な意味で探し出されている。薄線で示した杭径の 10% ($0.1D=2\text{cm}$) 沈下時〔赤丸で示す〕の荷重は、真の極限支持力とそれほど変わらない値であるので事実上の極限支持力と解釈することができる〔筆者は、この事実上の極限支持力と真の極限支持力の値を含む荷重範囲を「極限支持力領域」と呼んで $0.1D$ 沈下時の場合をその入り口であるということは何度も繰り返し述べている〕。したがって、打ち込み杭の $0.1D$ 沈下時までの過程を前述の図 3 に書き入れると赤線よりもずっと (1.0, 0.0) の点に近づくことが理解できよう。

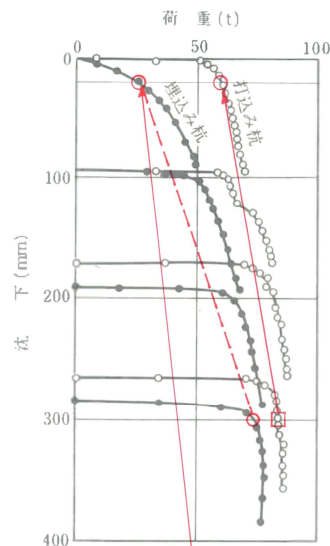


図 6.2.1 打ち込み杭と埋込み杭の先端荷重—沈下関係の相違^{6.2.1)}

一方で埋込み杭〔掘削を伴うという点では場所打ちコンクリート杭も同様に考えられる〕の場合は、載荷試験によって真の極限支持力は杭径の 4.5 倍 ($4.5D=90\text{cm}$) 沈下時と見出されている。これは図の下方へ飛び出してしまうので、極限支持力領域でそれらしい点を探し直してみると、たまたま杭径の 1.5 倍 ($1.5D=30\text{cm}$) 沈下時がそれと判断できる。これを仮の極限支持力と考えて赤丸で示し、杭径の 10% 沈下 ($0.1D=2\text{cm}$) 時の赤丸と比較すると、打ち込み杭の場合とは全く違って極限支持力領域の入り口と考えた打ち込み杭の事実上の極限支持力である ($0.1D=2\text{cm}$) の赤丸の値に対しても半分程度の大きさであることが確認出来る〔前述の図 3 の意味も明確になるであろう〕。このことから“見かけの極限支持力”とも言えないことが明確である。したがって、掘削を伴う杭の場合は $0.1D$ 沈下時の荷重は“基準支持力”と呼ぶ以外にないことも理解出来るであろう。

以上のことから、掘削を伴う場所打ちコンクリート杭の場合は〔埋込み杭も併せて〕基準支持力時でも少し大きな荷重がさらにかかると明らかに沈下しやすい状況にあることがわかる。したがって、支持力メカニズムとしてはパイルドラフトになっていると言わざるを得ない。そのことを再確認しておきたい。

そこで 2019 基礎指針の図 7.1.2 に戻って考えてみる必要が出てくる。同図の (c) は杭基礎とされ、ラフトに対する支持力の矢印が描かれていないのが特徴的である。この図を見ると、旧住宅公団の高層アパートで鋼管杭が支持層に深く打ち込まれたために大きな杭先端

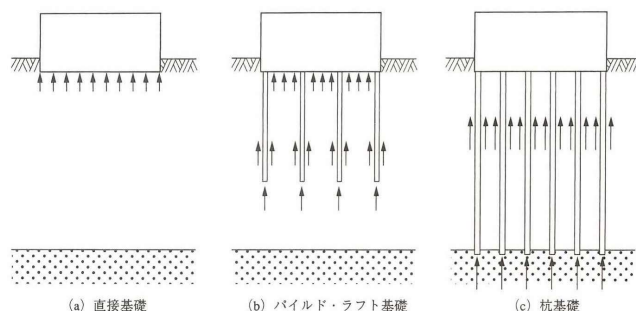


図 7.1.2 基礎形式

支持力が発揮されることで、地盤沈下が生じると建物が地表に浮き出してしまう現象が起こる。地表面だけが沈下

することで建物が浮いてしまい、階段を4, 5段造らないと出入りができなくなる事例が東京近郊で多数認められた事実があったことが思い出される。

ただ、市街地での打込み工法が禁止されて以来、今日ではこのような打ち込み支持杭は皆無となったとも言ってもよい状況になっている。代わって場所打ちコンクリート杭や埋込み杭など掘削を伴う工法が主流となっているが、上述したようにその種の杭は基準支持力時でさえ杭先端自体が沈下しやすいので、常時において杭頭ではラフトとの間に隙間ができることは考えられない。したがって、ラフトの支持力は小さいかも知れないが必ず働いていると想像され、パイルドラフトの支持形式になっているので、今日では同図(c)のような基礎は存在しないと言っても過言ではないことになる〔回転貫入工法による杭というものがあるが、打込み杭とは性質が違うのでそれを含めてもこの点は言えるであろう〕。それ故に、同図(c)は打込み支持杭基礎だけを表す狭い定義となる。したがって、設計理念を貫くべき基礎指針としてはこの図は不適切となるので、修正が必要である。

濱田純次さんの論文〔20236 濱田純次ほか：地震時の基礎回転角を考慮した一様地盤中のパイルド・ラフト基礎の杭応力評価式、pp.471～472〕の発表を聴いていて前が開けるような気持ちになった。というのも、論文の中味、難しい弾性理論式が並ぶ内容には筆者の理解が及ばなくなっているが、少なくとも基礎指針が「Burland らが提案した」〔Burland らの論文は国際土質基礎工学会議の総括論文であるので「指摘した」と表現するのが学術的には正しいということは何度も述べた〕としているのは沈下抑止杭としての記述であることを改めて確認できたからである。というのも、濱田さんの今回の論文は、最早 Burland らが指摘した抑止杭の範疇を超えて杭基礎全体を支援する研究であると感じたからである。会場では「支持杭基礎を援用するような研究のように思える」とやや見当外れの発言をしてしまったが、「伝統的で慣習的な検討法しかない摩擦杭を支援する研究のように思える」という意味のことを言えばよかったと今では考えている。繰り返すが、その主旨は“パイルド・ラフト基礎を名乗るよりは、もっと杭基礎一般を、とくに摩擦杭基礎支援する研究のように思える”からである。

摩擦杭といえば図 7.1.2 の (b) がどうしても気に掛かる。基礎規準の時代にはこの種の図は摩擦杭基礎とされていた筈であるし、筆者が学生時代には、摩擦杭基礎としてこの種の図が示されていた記憶があることも繰り返し述べてきた。したがって、基礎指針にパイルド・ラフト基礎と記述されているのは摩擦杭に取って代わることを意図しているのか、摩擦杭を閉め出すのかという気さえするのである〔学生や若い技術者に与える影響も気に掛かる〕。その点からすれば、用語で「杭：パイルキャップからの荷重を地盤に伝えるため、地盤中に設ける柱状の構造部材」とされていることも〔1柱1杭方式に象徴されるように、パイルキャップは上部構造の荷重を柱下に集中させて支持する方式であるから〕、“基礎指針は打込み支持杭が杭基礎であると決めてかかる方向を向いているのか”と思わせる。杭頭接合部がパイルキャップに限定されてしまい、基礎梁やベタ基礎状とした床に直接に杭を接合する形式の基礎としては摩擦杭が昔から多く存在していたのに、それらを排除しているのかとの疑問に結びつくからである。

1988 基礎指針からは表題に英語の副題のようなものが付けられていることをいしずえ通信に述べ、学術上の“リコメンデーション”であるから建築基礎の設計理念、敷地地盤条件への適合を第一とすることを述べたが、基礎指針がこの国の建築基礎設計のバイブルともなっている現状を考えれば、杭基礎をこのような狭い範囲に限定してしまうのは設計理念に反することになるので、もっと広く見渡すような視点に基づくべきである。

最後にもう一度バーランドらの論文との関係を復習してみよう。これも何度も触れて来たが、ここでも繰り返し述べてみると以下の通りである。杭基礎に関する結論は全部で3つあるが、3つ目の9の結論は砂質土地盤の場合で沈下はすぐに終わってしまい、沈下量も小さいので、あまり問題はないというのが主旨である。したがっ

て、残りの2つが重要となるが、その1つ目の7番目の結論が、4.2節で「地表近くの地層の支持力不足ばかりでなく、フーチングあるいはラフトでは沈下が大きいと考えられるために杭の採用が決心される多くの状況がある。そのような杭基礎 (piled foundation) の目的は、許容される沈下量まで低減するためであり、その故に“沈下抑止杭 (settlement reducing piles)”と名付けられる…」と書かれているもので、これを基礎指針がパイルド・ラフト基礎として受け取っている。これは2001基礎指針からであったので、すでに20年以上“パイルド・ラフト基礎”として定着し、杭基礎の発展に寄与してきたものは大きい。ただ、現在パイルド・ラフト基礎と称されているものは“沈下抑止杭”の範疇を超えてしまい、杭基礎全体に及ぶものとなってしまうことは前述した通りである。

そこでバーランドらの粘性土の場合の2つ目、結論の8番目「慣習的方法で設計された摩擦杭群は不同沈下の低減に非常に効果的である(4.5.4節) [(8) Friction pile groups designed by conventional methods can be very effective in reducing differential settlements (of Section 4.5.4).]」と書かれているのを思い出す必要が生じる。論文を読んでいて、この部分4.5.4節の文章がやや唐突に出て来るとの印象は持つが、これを基礎指針が忘れたのか、無視したのかが問題なのである。1つ目の結論、沈下抑止杭がどちらかというところを圧密沈下しない地盤の場合を指しているのに対して、この結論は圧密沈下地盤の場合を指して言っていると解釈することもできる。圧密沈下を起こすと沈下量は大きくなるが、均等沈下であれば事実上は問題ない。ただ、大きな沈下量であれば不同沈下の恐れも拡大するので、沢山の杭を配置する摩擦杭基礎はその対策として有効になる。その点をこの結論は指摘しているのである〔摩擦杭基礎は沢山の杭を配置し、一種の箱の状態を造ることに対応する。究極的には地下室に模擬される基礎形式であり、支持層には達していないが、全体として船のように浮かせるという考え方に通じるものである〕。したがって、基礎指針では粘性土地盤の場合バーランドらの2番目の結論、すなわち摩擦群杭基礎も1番目の結論、沈下抑止杭基礎と並べて示される必要があることが理解できるであろう〔したがって、基礎指針は片手落ちとなっていることを指摘したい〕。その主旨は“パイルドラフトは支持形式の言葉である”という点にあり、支持方式の典型例としてラフトの支持力を最大限に発揮させ、杭は支援材として使う沈下抑止杭基礎〔パイルド・ラフト基礎という用語に愛着が捨てきれないということであらう〕を併用し、杭の支持力を最大限に発揮させ、ラフトの支持力は支援として考える摩擦杭基礎があると考えればよい。

以上から、基礎指針は章別してパイルド・ラフト基礎を示す必要はなく、杭基礎の章の中で記述すればよいこと、用語の再整理、図7.1.2のようなイメージ図などを含めて改定されることが望まれる。学生や若い技術者への影響という観点からも、学会の出版物はそうしたものであるべきである。

(注) 1988基礎指針の改定時には、地盤調査も重要であるから計画指針とすること、小規模建築については戸建て住宅が中心であったために、あまり大きな費用が掛けられないことを考慮して「手引き」とすることで3部作として出発したが、後に、設計指針に格上げされたことは周知の事実である。これらは、共通して *Recommendations for...* との英語が付されているが、その主旨は共通している。地盤改良設計指針案(2006)についてもさらに英語が付されていることに筆者は関与していないが、地盤関係であるので主旨は基礎指針を継承しているものと推察する。