

## 2019基礎指針へ「追記-その2」：場所打ち杭の先端荷重-沈下関係

(一社)基礎構造研究会 代表理事 杉村義広

今回は「追記その2」として、場所打ちコンクリート杭の先端荷重沈下関係の基準化式について新しく知り得たことについて記述してみたい。

本会の事務局を担当している小椋仁志博士が教えてくれたのであるが、いしずえ通信第24号で触れた2001年版基礎指針の場所打ちコンクリート杭の先端荷重沈下量関係の基準化グラフを表す式は高野昭信博士の学位論文〔高野昭信：砂地盤に設置されたNONDISPLACEMENT PILEの先端支持力、昭和56年3月〕が出典であることが判明したのである。早速高野の学位論文を入手して調べてみたのであるが、確かに(7-1)式から始まって以下に示す(7-4)式が誘導されていることと、加圧砂地盤タンクの実験結果から係数 $\alpha$ と $n$ を決めて(7-13)式が求められていることを確認出来た。

$$\frac{S}{S_{u1}} = \alpha \left( \frac{q}{q_{u1}} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{q}{q_{u1}} \right)^n \quad (7.4)$$

$$\alpha = \frac{q_{u1}}{S_{u1}/B} \cdot \frac{I_p}{E} \quad (7.4a)$$

$$\frac{S}{S_{u1}} = 0.3 \frac{q}{q_{u1}} + 0.7 \left( \frac{q}{q_{u1}} \right)^2 \quad (7.13)$$

ここで、 $q$ は支持力度、 $S$ は沈下量、 $S_{u1}$ は $q_{u1}$ が生じる時の沈下量〔そのほかに $I_p$ は沈下の影響係数、 $B$ は杭径、 $E$ は地盤の弾性係数〕と定義されているが、一つだけ違和感を持たせられたのは $q_{u1}$ が第1極限支持力度と定義されていることである。

「極限支持力」は文字通り荷重-沈下曲線が沈下軸と平行になり始める荷重が定義である筈であるのに“第1極限支持力”とはどういうことであろうか〔極限支持力は一つしかない筈なのに、第1とはほかにまだあるのか〕との疑問が生じたから

である。

その点を調べたところ、荷重-沈下曲線を両対数グラフで表した結果、明らかな変化を示す領域があり〔その過程で、建築基礎構造設計基準（1974）では最初に現れる折れ点を降伏荷重と定義しているが、それよりは沈下が大きいために降伏荷重を比例限界支持力と定義し直して、それとは別に〕「杭径の20%沈下時の荷重を第1極限支持力と定義することを提案する」と明記されていることが判明した。第1というからには第2極限支持力も定義されており、そちらは杭径の4倍程度貫入した時の支持力とされていることも判明した。

打込み杭では杭径の10%沈下時の荷重が事実上極限支持力となるのに対して〔この点は国際的にもコンセンサスを得ている定義であることは周知の事実である〕、場所打ちコンクリート杭や埋込み杭では施工性の関係で、杭径の数倍の沈下量を経験して初めて極限に到達する〔そのくらいの沈下量に至って施工の影響は消えて支持層本来の抵抗機構が現れる〕という事実も研究が重ねられた結果、得られて来た知見であるとの歴史がある。この点を考えるならば“第2極限支持力の「第2」という形容詞句は取り外して「極限支持力」でよく、「第1極限支持力」は「極限」とは無縁の途中の領域での現象であるから全く別の概念にすべきである”というのが筆者の見解である〔筆者はまとめ役を務めていた1988年版基礎指針の改定委員会の席で委員全員の議論の結果、案出された「基準支持力」がよいと今でも考えている〕。

高野論文への感想が少し長くなってしまったが、問題の2001年版基礎指針の(6.3.29) 式を以下に比較して示す。

$$\frac{S_p/d_p}{0.1} = 0.3 \frac{R_p/A_p}{(R_p/A_p)_u} + 0.7 \left\{ \frac{R_p/A_p}{(R_p/A_p)_u} \right\}^2 \quad (6.3.29)$$

ここで、左辺は杭径の10%沈下を1.0で基準化していること、右辺で $(R_p/A_p)_u$ が“極限先端支持力度”と定義されていることの二つを除いて〔 $R_p/A_p$ は当然ながら先端支持力度である〕、高野論文の(7.13) 式と全く同じであることが確認出来る。したがって、この式は高野論文が出典であることは明白であり、指針

の記述は以下の3点で学術的な誤謬を犯していることになる。

a) 「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度～沈下比の関係は(6.3.29)式で表せるものとする」との表現は行政基準を思わせるものであり、Recommendationsである指針としては相応しくはなく、正確に高野論文が出典であることを明記するべきであった。

b) 「(6.3.29)式は、削孔によって施工した杭を対象とした模型実験に基づく提案曲線〔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、pp.25～32、第23回土質工学シンポジウム、1978などが引用されている。実は上記高野論文がこの論文の根拠となっていることも今回判明した〕と、実杭の載荷試験結果に基づく提案曲線〔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が引用されている〕の平均に相当するものである」との記述も、文献を挙げるのであれば“平均に相当するもの”といった曖昧な表現ではなく、それらとの関係を明確に記述するのが学術的な態度である。

c) 右辺の第1項、第2項の分母を“極限先端支持力度”と定義したことは、高野論文のところでも触れたように、極限支持力よりはずっと小さい杭径の10%という中途沈下量領域である現象に対して“極限支持力”の概念を当てはめたことになり、強めに表現すれば“いわば学問を冒瀆する行為”とも受け取られかねず、学術的には罪が深いと言わざるを得ない。

2001年版基礎指針では、限界状態設計法を前面に押し出すことに急であり過ぎたために、こうした無理な当てはめ〔重ねて言えば、中途段階での現象に対して極限の領域の概念を持ち込むこと〕に走った嫌いがあり、この点を真摯に反省する必要があるように思える。今回の改定指針でも、基本的には2001年版基礎指針を継承するものと考えられるので、ここでは、この反省の上に立って次のように考えることを提案したい。

1) (6.3.29) 式の右辺 1 項と 2 項の分母は $(R_p/A_p)_s$ と置き換え、基準先端支持力度と定義する〔1988年基礎指針の「基準先端支持力度」を復活させる〕。

2) 杭径の概念を導入し、杭先端径1mまでは杭径の10%沈下時の荷重を基準支持力とする〔打込み杭の場合は、杭径の10%沈下時の荷重が事実上極限支持力であるという事実との整合性を保つ。また、場所打ちコンクリート杭、埋込み杭の場合も杭径1m程度までは打ち込み杭にならって杭径の10%沈下時の荷重を基準とすれば、設計支持力の設定に実務上の有効性が保てるとの考え方が世間的には受け止められて来ていることとの整合性を保ち、最近大口径杭が多くなってきていることとの連続性も実現するためである〕。

3) 杭先端径1m以上の杭に対しては、沈下量10cmの時の荷重を基準支持力として採用する。今後、さらに大口径杭が増える状況では、杭径の10%沈下にいつまでも拘ると、2mや3mの杭径では20cmや30cmという現実的ではない沈下量を対象とする必要が生じてしまうから、この3) が最も重要な内容となると考えられる。

繰り返すことになるが、この提案は、地表から打ち込むことによって支持層まで到達させる打込み杭では、事実上杭径の10%沈下時で極限に達するのに対して、掘削を伴うことで生じる応力解放と泥水等を使うことで先端に溜まるスライムが主な原因となって極限に達するまでには杭径の数倍の沈下を要する場所打ちコンクリート杭や埋込み杭では考え方を考える必要があることに根拠を置いているのである。すなわち、打込み杭では極限支持力を基本にして安全率を考え、設計支持力を設定してもよいが、場所打ちコンクリート杭や埋込み杭では極限支持力を基本にするのは無理であるので、それに代わって沈下量を基本にするという考え方である。杭径の数倍まで貫入させた後であれば〔その条件載荷試験を行ったとすれば〕、場所打ちコンクリート杭や埋込み杭の荷重—沈下関係も打込み杭と大差ない結果になり、杭径の10%程度で極限に到達すると想定されるのであるが、2mや3mの杭径では上記したように10%程度でも沈下量は現実的ではない数値に達してしまうので、10cmで頭打ちにしてはど

うかという提案である。1m径の杭までは打込み杭にならって杭径の10%沈下時を基準とすることが歴史的に受け止められて来ているので、それを尊重すると意味も含まれている。

筆者がこの考えに拘るのは、場所打ちコンクリート杭や埋込み杭に対して“杭径の10%沈下時の荷重を極限支持力とする”という間違っただ定義が定着してしまうと、若い構造設計者が疑うことなくそれを信じ込んでしまい、今後の学問の進展にまで影響を及ぼす結果になってしまうのではないかと心配するからである。

〔注〕場所打ちコンクリート杭や埋込み杭の先端支持力について沈下量を基準にして決めるという考え方は、そのメカニズムが先端の接地圧を主体とする抵抗力ではなく、むしろパンチングシア状態で貫入すること、すなわち支持層での周面摩擦抵抗力にあるという事実気付いたことに根拠があるが、それについては別途考察することにする。

(2019.6.13追記)

ちなみに地盤工学会の「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」では、第2限界抵抗力の変遷が以下のようにになっている。

土質工学会基準 (JSF1811-1993) 杭の押込み試験方法

(杭の鉛直載荷試験方法・同解説、1993)

「第2限界荷重は、杭先端直径の10%相当の杭先端沈下量が生じたときの荷重と杭頭の荷重-沈下量曲線が沈下量軸にほぼ平行とみなされる荷重のうち、小さい方とする。ただし、杭先端沈下量の代わりに杭頭沈下量を採用してもよい。」

地盤工学会基準 (JGS1811-2002) 杭の押込み試験方法

(杭の鉛直載荷試験方法・同解説第一回改訂版、2002)

「第2限界抵抗力は、押込み抵抗が最大となった時の荷重とする。ただし、先端変位量が先端直径の10%以下の範囲とする。」