

いよいよ耐震2次設計の時代に入って来た感がある(その6) -中間層支持杭の耐震性-

(一社)基礎構造研究会代表理事 杉村義広

今回の建築学会大会で気づいたことの最後として、2次設計の時代になると心配だなと思っていた事項の一つである中間層支持杭に関して答えを出してくれた論文発表があったので、それについて述べてみたい。杭鉛直(3)のセッションで発表されていた論文(鈴木直子、西山高士、渡辺和博、佐原守:中間層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)である。中味について問い合わせたいことがあってメール連絡したところ、大会論文よりはやや詳しく書かれた技報論文(鈴木直子、西山高士、渡辺和博、佐原守:中間層支持杭の鉛直支持性能に関する研究、大林技術研究所報、No.80、pp.1~6、2016)を送ってくれたので、そちらの方を主体にして考察する。

最も関心を惹かれたのは結論の3)であり、中間層支持杭の支持力と即時沈下について非線形FEM解析を行って検討したところ、「中間層支持杭の杭先端の支持力性能は、支持層直下の軟弱層のN値が支持層の0.3倍以上あり、かつ、支持層厚が杭径の2倍以上あれば、完全支持杭と同等とみなせる」という点である。この論文では支持層のN値として解析的検討ではよく用いられる手法でもある換算N値100を使っている点に注意する必要がある。すなわち、N値100に対しての0.3倍とはN値30ということになる。これに対して、中間層を支持層として選択する場合には、一般には“N値30以上で3~5m程度”という条件がよく使われている。これは一種の通念ともなっているので、この結論はこの通念とも一致することで妥当であると頷ける。そのことから、2次設計においても中間層支持杭は問題ないと知ることができて一安心したのである(上記0.3倍を例えば実測値であるN値60に対するものと解釈するとN値18以上ということになってしまうので、支持層としては柔らかすぎて判断を間違ってしまうことは言うまでもない)。

ここで述べてみたいと思っているもう一つのことがある。上記「完全支持杭と同等とみなせる」とした上で議論が続けられているFig.10(大会論文では図5)の正規化した荷重-沈下曲線についてであり、その図を以下に引用する。この図に関しては、「Fig.10の解析値をみると、極限支持力が支持層下の軟弱層の影響で低下しても、正規化した荷重~沈下曲線は軟弱層のN値によらず完全支持杭とほぼ同一と見なせる。」とした上で、「解析で得た曲線は、基礎指針やBCSの提案式よりも大口径杭の載荷試験の曲線に近い結果となった。」と指摘されている。この点について(基礎指針の曲線がほかと比べて一番下に離れた位置にあることが目を引くので、とくにそれについて)考察してみたいのである。

まず、「基礎指針」とあるのは2001年版の建築学会建築基礎構造設計指針であり、その提案式とは同書の(6.3.29)式、それを図化した図6.3.19を指している。この式と図は、山肩ほか

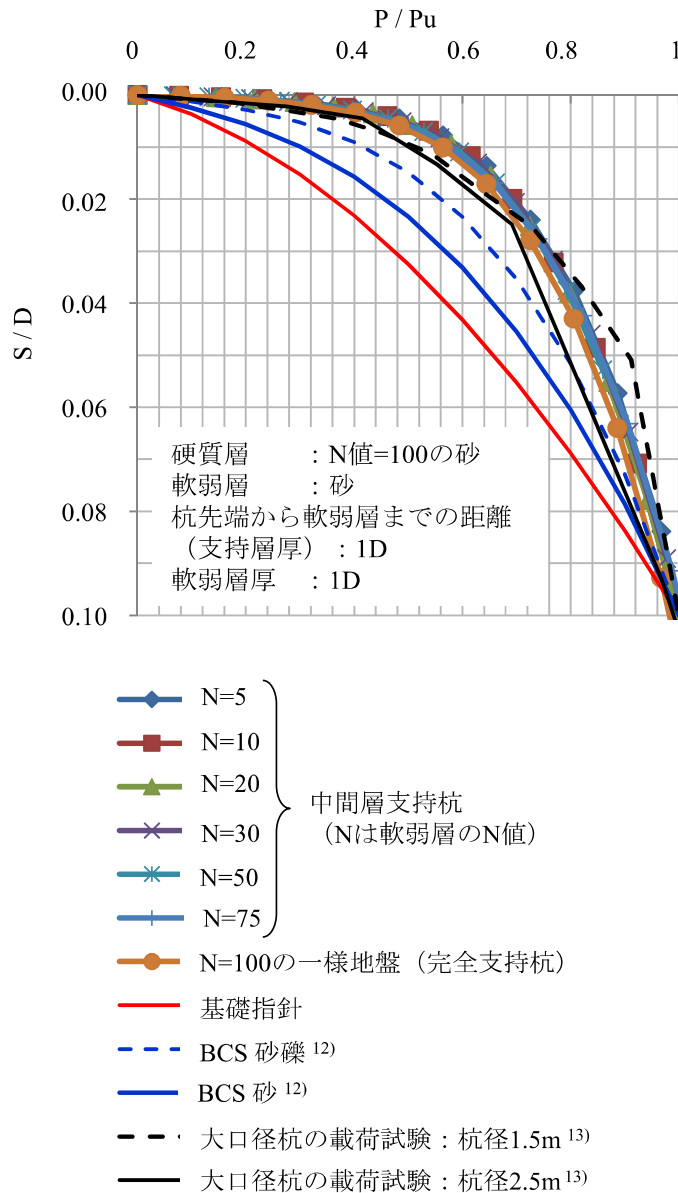


Fig. 10 杭先端における正規化した荷重～沈下曲線
 Normalized Curve between Load and Settlement

の論文 (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、建築学会構造系論文報告集、第423号、pp.137～146、1991.5)、すなわち円形杭0.6～1.3m12本、壁杭等価直径1.1～1.4m12本、拡底杭1.8m 2本、合計33本、平均等価直径1.207mの載荷試験結果を統計的に整理したものと、加圧砂地盤タンクを用いた模型杭の載荷試験に関する論文 (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.21～28、第23回土質工学シンポジウム、1978)の“平均に相当するもの”として示されたものである。

「BCSの提案式」とあるのは、(特田悟ほか：場所打ちコンクリート杭の支持力性能(その1)、建築学会大会、pp.725-726、2000.7)の論文、あるいはBCS基礎杭評価研究会終了報告書(2000.12)

に示されたもので、アースドリル、オールケーシング、リバース 3 工法による 1.0m2 本、1.2m 7 本、1.5m、2.2m、2.5m それぞれ 1 本、合計 12 本の載荷試験結果をまとめたものである。この論文では砂礫層での結果（1.0m2 本、1.2m 1 本、1.5m、2.5m の各 1 本）と、砂層での結果（残りの 1.2m 7 本）とに別けて整理されている。

「大口径杭の載荷試験」とされているものは筆者も関係した実験（速報として発表したものは「杉村義広、板橋薫、田村昌仁、鳥井信吾、萩原康嘉、藤岡豊一：低コスト化を目的とした大口径場所打ち杭の鉛直載荷試験、基礎工、第 293 号、pp.129~135、1997.12」。詳報として発表したものは「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」）であり、上記 BCS 砂礫層結果に含まれた 1.5m と 2.5m の杭（アースドリル工法）に該当している。したがって、上記 Fig.10 ではこの 2 本が BCS の論文にも含まれているが、それとは別に独立させて表示された関係にあることに注意して見る必要があるが、「解析で得た曲線は…大口径杭の載荷試験の曲線に近い結果となった」との記述が心に響いたのである。

解析とはいえ、実際の地盤条件と杭の組み合わせを考えた一種の数値実験であるから、載荷試験結果と同じ土俵で考えてよいであろうとの観点からは、BCS、大口径、解析結果がばらつきを示すものの、それらと比べて指針の曲線がさらに離れた位置にあることが指摘されていることが最大の問題であると気づいたのである。

$$S/D = \alpha (P/P_n) + (1-\alpha) (P/P_n)^n$$

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

この表は、上記 BCS 基礎杭評価研究会終了報告書の中で示された基準化の一般式と、各論文で示された曲線の式の係数を抽出して示したものである（ただし、記号は Fig.10 に倣っており、 P_u （極限支持力）は後述する理由で P_n （基準支持力）に書き直している。それに合わせてグラフも正規化ではなく、基準化グラフと呼ぶことにする）。

係数 α と $(1-\alpha)$ の比率は原点からの初期勾配に関係し、べき乗係数 n は曲率の大きさを表す（ $n=1$ であれば原点と終点を結ぶ直線、すなわち線形の荷重～沈下関係となる）ことを示しているから、この表は各曲線の曲がり具合が最も緩やかな 2001 指針から急な BCS 砂礫まで並べたことに対応している。山肩ほかは Fig.10 に図示されていないが、2001 基礎指針よりやや上方に位置することは想像出来るであろう。また、解析結果と大口径杭と称されている筆者らの実験結果についても、この一般式に当てはめて近似的な関係を求めるとすれば、さらに α は小さく、 n は大きくなることも容易に推定出来るであろう。

これらの曲線の曲がり具合の差は、BCS の結果から砂礫と砂など支持層の違いによって変

わることは明らかであり、そのほか杭径によっても差が生じることが予想されるが、それらのさらなる究明は今後の課題とすることにし、ここでは 2001 基礎指針の曲線が最も下側に離れていることに絞って考察を続けよう。

実は、この指針の図を見たときの筆者の第一感は“平坦過ぎるな”であり、(6.3.29) 式中の $(R_p/A_p)_u$ が極限先端支持力度 (kN/m²) と定義されていることに疑念を抱かせられたのである。この指針は、上記したように山肩ほかの論文を下敷きにしており（上記の表でも山肩ほかの係数を単純化したことが類推される）、その論文では“極限荷重”の用語が用いられているのでそのまま準用したものと推定される。筆者は、著者の山肩先生が学会の委員会の席で“対象とした杭径の範囲”であれば、杭径の 10%沈下時の荷重を“見かけの極限荷重”と見なすことで綺麗に整理できるという意味の発言をされていた記憶があるが、その“杭径の範囲”と“見かけの”が欠落して指針に記述された関係になっている。さらに、1988 基礎指針では打込み杭の場合には「極限支持力」と呼んでも適切であるが、場所打ちコンクリート杭の場合にはまだまだ荷重の増大進行中の領域であるので極限支持力とは言い難く、それに代わる「基準支持力」と呼び、用語にも明示されていたのであるが、2001 基礎指針ではそれらがすべて廃棄されていることが問題である。なぜなら、その後、杭径が数メートルに及ぶ場所打ちコンクリート杭が出現するようになっても、この式と図が一人歩きしてそれらの杭に対しても適用できるという状況に繋がっているからである（今回の PD の杭基礎鉛直の改定では、その後の新しい載荷試験のデータが追加されるようであるが、「極限支持力度（杭先端沈下は杭径の 10%）」という記述が見られるので（2017 基礎構造 PD 資料「改定によって基礎構造設計指針はどのように変わるのか」の p.55 左下 2 行）、2001 基礎指針が大きく変更されるとは思えない不安が残る）。

この問題については、別の機会に改めて記述してみたいと思うが、ここでは 2 次設計においても中間層支持杭の安全性について安心させてくれたこの論文が、図らずも完全支持杭の先端荷重～沈下関係についても触れており、2001 基礎指針が問題で見直しの必要性を思い出させてくれたことを指摘するに留めておきたい。