

支持杭神話と拡底利益—摩擦杭の復活(その5)—

(一社)基礎構造研究会代表理事 杉村義広

表題は、思っていたほどには十分に効力が発揮されない場合を“神話”、思いがけずに効力を発揮する場合を“^{りやく}利益”と皮肉りたい意図を込めて作ったものである。したがって、ここ数回にわたって書いてきたように、支持杭神話とは杭基礎を設計する場合には支持杭ばかりが使われている現状を、むしろ憂えている筆者の心境を理解いただけるであろう。ここでは拡底利益について言及してみたい。

場所打ちコンクリート杭の場合は当然のごとく拡底杭として設計されていることが多いが、既製コンクリート杭も高支持力杭と呼ばれているように先端を拡大しているものが少なくない。掘削を伴う杭の場合には、載荷試験を行うと、先端支持力が面積比例ではなく杭径比例の関係にあることが知られるようになった〔筆者は「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」(共著)を書いたことがある〕。その経験から“拡底杭は支持力的には思ったほどに効果はない”と言い続けて来ており、むしろ引抜きに対しての効果は考えられると推測していたのであるが、例えば昨年(2025)の建築学会大会基礎分野で発表された論文のうち、杭の引抜き抵抗に関連するものは4編あったが、それらの第一著者と表題を挙げてみると以下の通りである。

20202 長尾俊昌ほか：引抜き荷重を受ける場所打ちコンクリート拡径杭のシミュレーション解析

20203 永井宏ほか：杭施工による地盤への影響を考慮した引抜き荷重を受ける多翼鋼管杭の解析的検討

20204 桐山貴俊ほか：砂地盤に打設した拡底杭の先端引抜き抵抗算出式の検証

20205 堀井良浩ほか：砂地盤における多段杭の引抜き抵抗に関する遠心力模型実験、その4 中間拡大杭と拡底杭等の実験

これらはコンクリート系では拡底杭だけではなく突起を多段に造るものや、鋼管杭では多翼とするものなど杭種、形状、施工法も含めれば多種多様な内容となっている。この国では杭と言えれば鉛直支持力ばかりが対象とされていたのが基礎分野の現状であり、引抜き抵抗について触れる論文はあっても、地震を想定するような押し引きの交番載荷を試みる研究は皆無であった。そうした総合的な見方をすべきことが、ようやく理解されて根付いてきた証^{あかし}であると思うようになったのである。今後は、高い建物が増えて地震時に杭が引抜き力を受けるケースが多くなるとも予想されるので、こうした研究の必要性はますます増大するのは間違いないと思われる。

それに関連して思い出すことがある。筆者が建研の基礎研究室長を務めていた最後の頃に、鉄筋コンクリート構造の分野で高層壁式ラーメン構造建築物の合理化に関する研究(通称HFW)プロジェクトが検討されていた。その担当者から「この種の構造の場合、建物の最終耐力が基礎の浮き上がりで決まってしまう。したがって、杭基礎支持の場合などでは、杭の引抜き耐力はどの程度か、浮き上がりが生じる限界はどの程度かについての情報が欲しいので提供して貰いたい」との要請があった。

しかし、当時基礎の分野では浮き上がりが生じるなどは考えるべくもなく、設計上は自重までしか認めないというのが不文律の時代であって、杭には引抜き力は生じさせないようにするとの考えがあるだけという状態であった。したがって、応えられる情報は何一つ持っていないというのが現実であったわけである。上部構造が高層

壁式ラーメン構造となれば、ロッキング動が主体的になるのは目に見えるように明らかであり、その規模から考えて支える基礎形式としては場所打ちコンクリート杭が想定されるので、その種の杭の引抜き実験などをしてみる以外に方法はないということになって、急遽、各方面に呼びかけて官学民共同研究を行うことにしたのである。手を挙げてくれたのはジェネコン研究所、場所打ちコンクリート杭施工業者、地盤調査会社の人々であり、それらの方々と建研のメンバーで基礎・杭 WG 委員会を建築センター内に立ち上げたのである。そこで一から研究

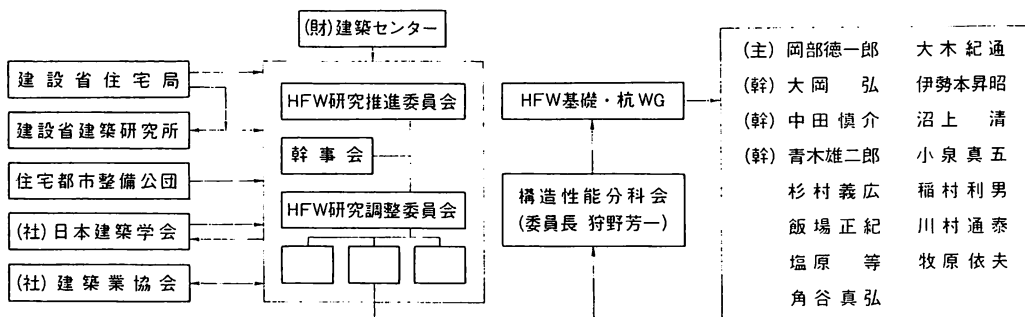


図-1. HFWプロジェクト基礎・杭WG委員会

を始めることにし、議論した結果が「高層壁式ラーメン構造に関する研究」と副題を付けた「場所打ちコンクリート杭基礎の引抜き耐力に関する研究」(建築学会大会(近畿)昭和62年10月)である。この論文は(その1)から(その8)まで続く大部のものであり、大会梗概集では16ページ(pp.1045~1060)にわたって内容が示されている。「論文(その1)研究の主旨と背景」では、図-1に官学民共同研究におけるこのWGを位置づけた組織図とメンバーを記述している。

当時は杭の試験と言えば載荷試験を意味し、地震時の挙動を意識した上での押し引抜の試験は実施されることは全くなかった。この論文は言わばパイオニアの仕事であった。そのことを意識して、このWGでは地盤調査から杭の設計、施工、試験の計画、実験結果の考察まですべて熱い議論を通じて進めていたことが懐かしく思い出される。論文は「(その2)試験地の地盤概要と土性」、「(その3)試験体の設計」、「(その4)試験体の施工と材料試験」、「(その5)載荷計画・実施」、「(その6)小変位領域における挙動」、「(その7)大変位領域における挙動」、「(その8)まとめ」と別けて発表した。何らかの意味で全員がどこかに貢献したことを表す意味で、誰一人抜けがないように著者として明記するように配置したことも思い出す。

とくに議論した点などを挙げると以下の通りである。

1) 実験地は小田急線相模大野駅近くの関東ローム層が10数m堆積する敷地とし、杭はアースドリル工法(無水掘)によるストレート杭を選定した[(その2)の図2参照]。この組み合わせは、地盤の性質[関東ロームは比較的均一に近い]や杭周面摩擦力を正確に測定しやすい[杭底杭周面摩擦力が複雑である]ことを考慮したものである。それぞれの深さで各種地盤調査を行い、杭の周面摩擦力を推定することで設計した結果としての鉄筋籠を図-2では示している。また、上部構造の重さが長期荷重として作用している状態が初期条件であることを意識して、杭頭には少し小さめの荷重ではあるが基礎スラブを付け、その底面を利用して引抜き力を与える載荷装置を計画するなどの工夫をしている。

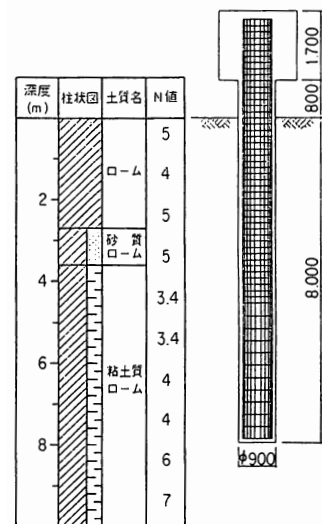


図-2. 試験体断面図

2) 現場打ちの場所打ちコンクリート杭なので、施工後の掘削孔の各深さで口径を測定することなども行った。

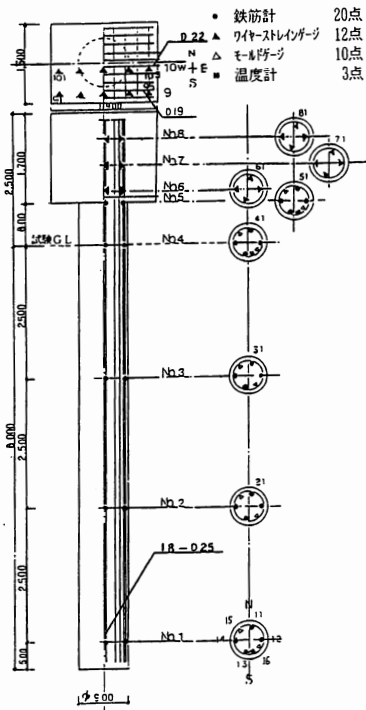


図-4. 試験体内蔵計測器の配置

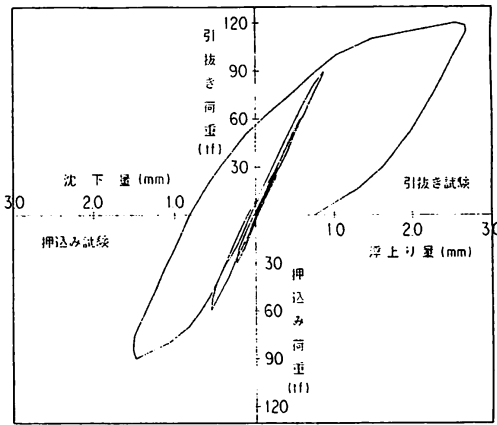


図-1 荷重-杭頭変位量 (第3シリーズ)

で引抜き試験があとの順番になっているものばかりであることを考えて、この実験では地震時を想定し、引抜きを重要視して初期荷重は常に引抜きから始める交番载荷とすること、変位が小さい領域と大きい領域の性状の違いや、荷重速度の影響も考えることなども目的とした。

4) 計測に関しては、基礎スラブと杭体からなる試験体を論文(その2)の図-4に示すように各位置に鉄筋計、ワイヤーストレインゲージ、モールド

ゲージ、温度計を配置し、可能な限り詳細な情報収集を行った。また、杭頭付近の杭周地表面で杭が引き抜かれることによって生じる盛り上がり量の測定も試みた。

5) 実験結果として得られた最重要点である荷重-変位関係 [(その7)図-1] を上に示したが、これについてはとくに多くの議論を交わしたので、少し詳細に説明を加えたい。初期荷重载荷は引抜きから始めたので、同図では引抜きを+領域として表示してあるが、小変位領域では+-の両方向で直線の弾性的な関係にあることが特徴として言える。ただ、直線的な関係は+領域では90t付近まで続くのに対して、-領域では60t付近までであって押し<引きの関係になり、既往の研究とは全く異なった結果であることは何故かが問題となった。そこで議論を重ねた結果、基礎スラブと杭からなる試験体の重量として計算される約25tを背負った状態が実験の初期条件となっていることに気が付いた。実際の場合として考えれば、建物の重量が杭に作用している状態が地震時の初期条件であることを意味するので、その分だけグラフの原点を上方へ移動させれば、引き≒押しの関係となり、既往の研究の粘性土の場合に対応するという結論を得たわけである。

この結論を得るまでに相当の時間を要してしましたが、解ってみれば当然のことであると改めて納得し、メンバー全員で喜びあったのである。その上で最終的に第4シリーズとして引抜き方向について極限まで試験を行い、論文(その7)の図-5のような結果を得た。土のせん断強度との関係では、その下限に相当するという結果、すなわち $q_u/2$ とするのは妥当であるとの結論になったのである。しかし、せん断強度が高い場合には周面摩擦力がさらに小さめになるので注意が必要であるとの記述も忘れずに記述している。

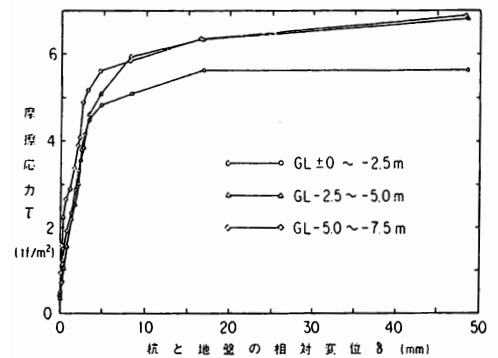


図-5 摩擦応力-相対変位 (第4シリーズ)

この論文は、地震時における杭の押し引きに関する研究として我が国では最初のパイオニア実験であるとの感想を持っているが、必ずしもこの論文が参考にされていることはないらしく、引抜きに関して発表されたものだけが個々に引用されているのが現実であるようで、論文の主旨が正確に伝わっていないことが少し残念である。

また、この論文には後日談もある。どこか権威のある研究誌で発表しようかということになり、たまたま第9回アジア土質基礎会議が論文募集をしていたので、そこに投稿したのが、Y. Sugimura, T. Okabe, N. Ohki and Y. Aoki: Cyclic Pull and Load Tests on Cast-in-Place Concrete Piles, Proc. 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.293-296, 1991.12 である。WGメンバーのうち主要な4人の連名で論文としたのである。ただ、今思い返してみると少し勇み足があったかと反省していることがある。場所打ちコンクリート杭に関する一般的な議論としたいとの思いが強くて書いた表題であるが、行った種々の実験を Tests と複数形で表現したのは許されるかも知れないが、研究対象としたのは1本の杭であるので最後の Piles は実態と掛けは離れてしまっているので、やはり無理であったかとの感想に襲われる。Cyclic Pull and Load の部分も Alternating Pulling and Pushing など別の表現もあったかとも思っている。