

# 摩擦杭の支持力機構を再考する

## —摩擦杭の復活 (その 9) —

(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

### 1. はじめに

杭の支持力は、先端での抵抗 [先端支持力と呼んでいる] と杭周面での摩擦抵抗 [周面摩擦力と呼んでいる] の和として当然のように求められている。式表示すれば、 $R_u = R_p + R_f$  である [これを (1) 式としておく]。先端支持力  $R_p$ 、周面摩擦力  $R_f$  もも極限值を採用するのが通常であるので値  $R_u$  は極限支持力と呼ばれ、その何割を設計値とするかが問題となる。

建築基礎構造設計指針 (2019) では限界状態設計法が採用されているので、耐力係数  $\phi_R$  という概念を用いて設計用限界値を求めるとし、使用限界状態には  $\phi_R = 1/3$ 、損傷限界状態には  $\phi_R = 1/1.5$ 、終局限界状態には  $\phi_R = 1/1.0$  を掛けて、それぞれの設計用限界値  $R_d$  を求めることが示されている。ただ、筆者には限界状態設計法は新規で高尚過ぎるので、従来の安全率 [ $\phi_R$  の逆数] の概念を用いて安全率 1.0 とする極限支持力 [終局限界状態に対応] に対して、安全率 3 を考えて求める長期許容支持力 [使用限界状態に対応]、安全率 1.5 を考えて求める短期許容支持力 [損傷限界状態に対応] の設計法で以後考えることにしたい。

### 2. 物体の支持とは

ここでは摩擦杭の支持機構を再考することを目的としているが、まず図 1 のように建物の代わりに箱を考え、地表面に置かれている場合を考えてみる。箱の重さすなわち重量は、地球の重力と言い直すこともできるであろう [厳密には物理学的に見て地球は自転しているので、重力という引力のほか自転による遠心力も合わせたものというべきであるが、ここでは簡単に地球の中心に向かって引かれる力と考えておく]。その重さは底面での反力 (底面積に働く地盤の支持力) によって支えられており、(地盤の支持力=箱の重量) の力の釣合い式が成立する。これは静的釣合い式と呼ばれ、条件の変化がない限り持続的に続く状態である。

図 1 は、地盤が例えば岩盤のような非常に硬い場合を想定しているが、一般には地盤は軟らかい場合もあるので、そうした場合は箱を支えきれないこともあって、箱は地盤の中にめり込むことになる。そのような場合を図 2 に示すが、底面での支持力のほかにめり込んだ側面における摩擦力も生じることになる。

地盤には場所によって地下水が大量に溜まっている条件にある場合がある。その参考として極端な例であるが、水中に箱が存在していると想定した場合を図 3 に示す。水中に沈んだ部分の体積に等しい水の重さが浮力となって釣り合うことはよく知られた事実であるが、図では箱の 2/3 程度が沈んで釣り合っている場合を表示している。これは支持というよりも浮かんでいると表現するのが妥当であるが、構造物の支持方式として、このようなあり方もあると考えておくことは必要であると思われる。

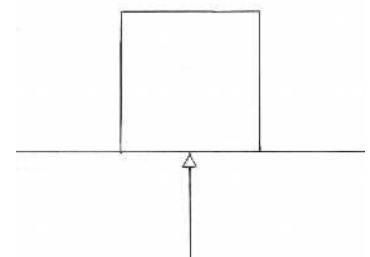


図 1 物体の支持の意味

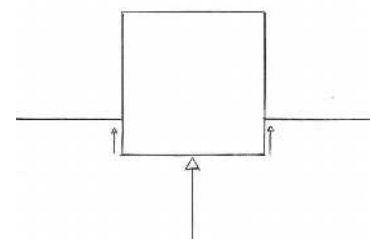


図 2 地盤が軟らかい場合

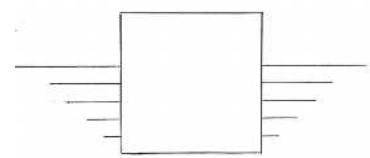


図 3 物体が水中にある場合

### 3. 摩擦杭の支持機構とは

さて摩擦杭の場合であるが、その名の通り摩擦杭は周面摩擦抵抗を主体とするものなので図2が近い条件にあるように見えるが、先端抵抗すなわち先端支持力との関係で図2が本当に近いのかどうかは微妙に思える要因がある。先端支持力は図1に示したように重力に対する反力であるので持続性があるが、周面摩擦力は杭が沈下している時、すなわち箱が“動いている”時に発揮されるもので、沈下しない〔すなわち止まっている〕時には生じない。したがって、周面摩擦力は静的な持続性はないことになり、厳密には先端支持力に加算できるのかとの疑問が生じるのである。設計では当然のように用いられている力の釣り合いである(1)式が常に〔したがって持続的に〕成立するのか、その点を解決しておかないと支持力式自体に問題が残るのである。

周面摩擦力が比較的持続して作用するのではないかと思われる例として圧密沈下地盤での負の摩擦力が考えられる。いしずえ通信 82号で引用した基礎基準(1974改)の図30.7〔負の摩擦力の実測結果〕を例にとって右に示し、これについて考察してみたい。

これらの記録は地盤が圧密沈下している〔一部は盛土して沈下を促進させているものも含まれている〕際の軸力分布を測定したものであるが、No.5とされているのが摩擦杭であり、ほかはそれぞれ示された条件下での支持杭である。これらの図では杭頭から深くになるにつれて杭の軸力が増大し〔負の摩擦力が下向きに働くので下方になるほど軸力は増大する〕、ある深さになると逆に減少していることが見られる。その状況は図の下にあるようなものと想像される。建物荷重による杭の沈下と圧密による地盤の沈下とを比較すると、圧密層の下方が支持層である場合であれば地盤の沈下は圧密層だけに生じる。それに対して、支持杭の場合は支持層に貫入している先端部もある程度は沈下すると考えられるので、地盤の沈下よりも杭の沈下の方が大きくなる。その領域では摩擦力の生じる方向が上方へ〔すなわち正の摩擦力へ〕変わることになる。その摩擦力の方向が変わる位置を中立点と呼ぶのである。杭の軸力分布の中立点は尖った凸状を示しているが、支持層が岩盤であるような場合には先端の沈下は起こらないと考えられるので、中立点は存在せず圧密層の下端(岩盤の表面)が軸力最大の分布になるとみられる。

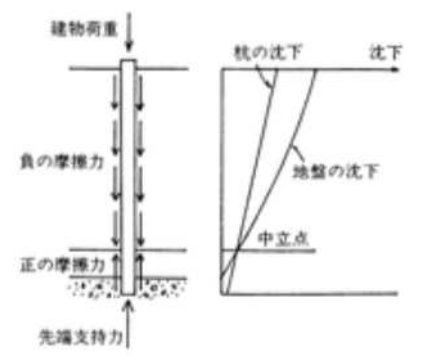
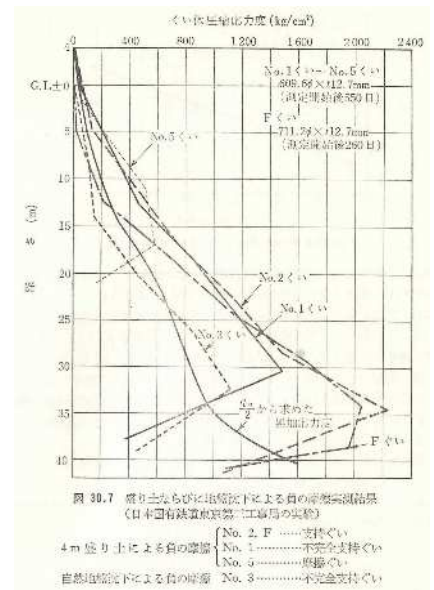


図30.7で摩擦杭と表示されている短いNo.5にも丸みがかかった凸型の反転形が見られるのは、筆者には一種の驚きであった。摩擦杭の場合は先端支持力が非常に小さいので地盤と共に沈下するのではないかと想像していたからである。この例では、急激な凸型ではないにしても緩やかに反転する形状を示して中立点が現れているのは、小さいながらも先端支持力が働いていることを示しているのであろう。圧密層が厚く存在する軟弱地盤では表層近くに薄い砂層が存在していることが多く、そこまで摩擦杭として設計されることもあるが、先端が届いているそれらの層が不完全ながらも支持層の働きを示して緩やかな中立点に結び付いたのではないかとと思われる。摩擦杭の場合は、そうした微妙な条件が重要性を表すということかも知れない。

杭の支持の仕組み〔すなわちメカニズム〕をカラクリ絵のごとく考えてみると、〈圧密沈下地盤の場合には常に地

盤沈下が進んでいるので負の摩擦力が持続的に作用していると想定される。設計では安全をみて周面摩擦力だけで建物荷重を支えるに十分となるようにしているので沈下は止まると考えられる。沈下が止まると、小さな先端支持力だけでは不足しているので、すぐに沈下が始まる。そうするとまた摩擦力が働いて沈下が止まる。…。このような沈下・静止・沈下が繰り返されているのではないかと考えられる。(1) 式は沈下している瞬間、瞬間には成立するが、静止した場合も含めて持続しているわけではないということである。

とはいえ、この摩擦力と先端支持力が抵抗力として作用することには変わりはないので、長い歴史の中で使われて来た(1) 式を基本にして、設計では両者の性質に差があることに注意しながら用いるのがよいであろう。すなわち、支持杭〔持続的に働く先端支持力が大きい〕とは違って摩擦杭の場合は、沈下している時に生じる摩擦力が主要となる断続的な抵抗力であることを意識して設計することである。言い換えれば、大きな先端支持力に期待するのが支持杭の場合であるのに対して、摩擦杭の場合は“大きすぎない先端支持力”とすることが重要になるということである。

その意味では、前号で紹介した論文を思い出してみよう。上述してきた記述が圧密沈下を生じている粘性土地盤の場合であるのに対して、その論文は液状化による摩擦杭基礎の沈下様相に関する内容、すなわち砂質土地盤の典型的な事例であるからである。その論文では、液状化後の摩擦杭基礎の状況は地盤と共に沈下するタイプと、基礎が抜け上がってしまうタイプに分かれ、ほぼ半々であるが後者がやや多いという結果であった。どちらのタイプになるかは、先端支持力が効いているかどうかの地盤条件によって決まるというのである。先端支持力が大きいケースでは、地震後に先端で突っ張ることで地盤が沈下した時に基礎が抜け上がって段差が生じ、その修復が必要となる。杭先端支持力が大きくないケースでは、地盤と共に沈下することになるので、修復の必要がなくなるというメリットがある。したがって、摩擦杭の場合は先端支持力が大きくなりすぎない方が有利になるということである。

以上を要約すると、摩擦杭基礎は支持杭基礎と違って“支持する”ではなく、地盤中に浮かせるかのように“バランス”させて支える均衡方式ともいうべきものなのである。それを意味する“地盤と共に沈下する”というキーワードは今後も銘記しておくべき重要な考えになると思われる。

**追記：**能登半島地震(2024)の際に転倒した建物が思い出される。〈もしあの建物に地下1階と摩擦杭基礎が採用されていたら、少なくとも転倒は避けられたのではないかと夢想されるので、この記述の結論とくに“地盤と共に沈下する”のキーワードは重要である。