

「杭基礎の設計と施工」に関する土質工学のポイント

Geotechnical Engineering Consideration on Design and Construction of Pile Foundation

小 椋 仁 志 (おぐら ひとし)

ジャパンパイル㈱執行役員・技監

吉 川 那 穂 (よしかわ なお)

ジャパンパイル㈱技術本部 主任技師

本 間 裕 介 (ほんま ゆうすけ)

ジャパンパイル㈱技術本部 主任技師

富 永 晃 司 (とみなが こうじ)

広島大学名誉教授

1. はじめに

土質工学を学んだだけでは、杭の設計・施工はできない。最近では地盤工学とも呼ばれる土質工学は、真理の追究を基本とする学問の一つであり、自然材料である非常に複雑な物性を持つ「土」を対象とした土質力学の上に成り立つ。すなわち、地盤中に構築される基礎構造物の挙動を土質力学により説明づける学問といえる。

一方、杭基礎に限らず設計や施工は期限の定まった実務行為であり、学問上の真理は未解明であっても、それを分かった上で前に進めなければならない。したがって、設計や施工には多くの経験を積むことが重要であり、それに勘と度胸を加えた「KKD」が必須事項と言われる。

しかし、杭基礎の設計や施工は、土質工学の上に成り立っている。このため、より良い設計や施工を行うには、しっかりした土質工学の知識を持つことが必要不可欠である。そこで本報では、土質工学の視点から見た杭基礎の設計・施工の概要や注意すべき点を解説し、杭基礎の設計・施工を行う上で学ぶべき土質工学のポイントを紹介する。また、基礎設計に関する新しい資格である建築基礎設計士についても紹介する。

2. 杭基礎設計時の土質工学上のポイント

杭基礎の設計目標は、地盤に応じて最も安全にかつ経済的に構造物を支えることにある。図-1に、その設計目標を実現する手順となるフローチャートの一例を示す。おおまかにいえば、①与条件(地盤、敷地、構造物)を確認・検討したうえで杭材(杭種)・杭径・杭長・施工法などを設定→②液状化の検討→③鉛直支持力の検討→④引抜き抵抗の検討→⑤地盤沈下・負の摩擦力の検討→⑥本数・配置の設定→⑦水平力に対する検討→⑧杭・構造物の沈下の検討→⑨杭頭接合部の検討という流れになる(①~⑨は図-1中の番号に対応)。以下に、土質工学との関連が比較的薄い⑨を除く①~⑧の事項について、土質工学に関わってくるポイント(学ぶべき事項)および初心者が注意すべき点などを概説する。

① 与条件の検討, 杭の設定

杭の設計に際しては、敷地・地盤(環境・敷地・搬入路の状況, 地盤調査や土質試験の結果など), 構造物(用途・規模・構造種別・設計用外力など)に関して与

えられた諸条件を確認・検討しなければならない。与条件のうち土質工学と特に関連の深いものは、地盤調査や土質試験の結果に関する事項である。粒度(土質種類), 地下水位, N 値, 一軸圧縮強さ q_u , 粘着力, 内部摩擦角, 透水係数, 圧密降伏応力, 圧縮指数, 間隙比など杭の設計に重要な項目は、調査・試験方法を理解するだけでなく、これらのデータに潜むばらつきなどの問題点も十分に認識しておく必要がある。

基礎構造の検討で最も多く使う地盤定数は N 値であり、設計定数の多くは N 値からの換算式が用意されている。しかし、 N 値に頼り過ぎるのはよくない。 N 値を測る標準貫入試験は、最近主流の半自動方式に比べ、以前多かったコーンプリー法は落下効率が低いために大きめの N 値が測定される。このように、 N 値には試験法によって評価が異なることなど、問題点も多く残されている。

以上の与条件やコストを十分に勘案して、設計の対象とする杭材(杭種)・杭径・杭長・施工法などを設定する。

② 液状化の検討

地下水位が高く表層から20 m以浅にゆるく堆積した砂質土層が存在すれば、液状化の検討が必要になる。一般には中地震動時と大地震動時の検討を行うが、これらの判定方法は各機関の基準類により少しずつ異なっている。検討に際しては、過剰間隙水圧の挙動など液状化発生のメカニズムと発生可能性の判定に用いる N 値, 細粒分含有率, 地下水位, 塑性指数などとの関係を十分に理解しておく必要がある。

判定の結果、液状化の可能性が高いと判断された場合には、杭の鉛直支持力における周面摩擦力の無視, 杭の水平抵抗における水平地盤反力係数の低減などを考慮した設計が必要となる。その結果, 当初設定した杭では設計が難しくなる場合は, サンドコンパクションなどの地盤改良をはじめとする液状化防止対策を併用することも検討する。また, 側方流動の検討を行わなければならない場合もある。

③ 杭の鉛直支持力の算定

実設計においては地盤から決まる杭の鉛直支持力は、各機関の基準類で定められている算定方法によって求める。支持力算定式は、杭の支持力機構を考えれば Vesic

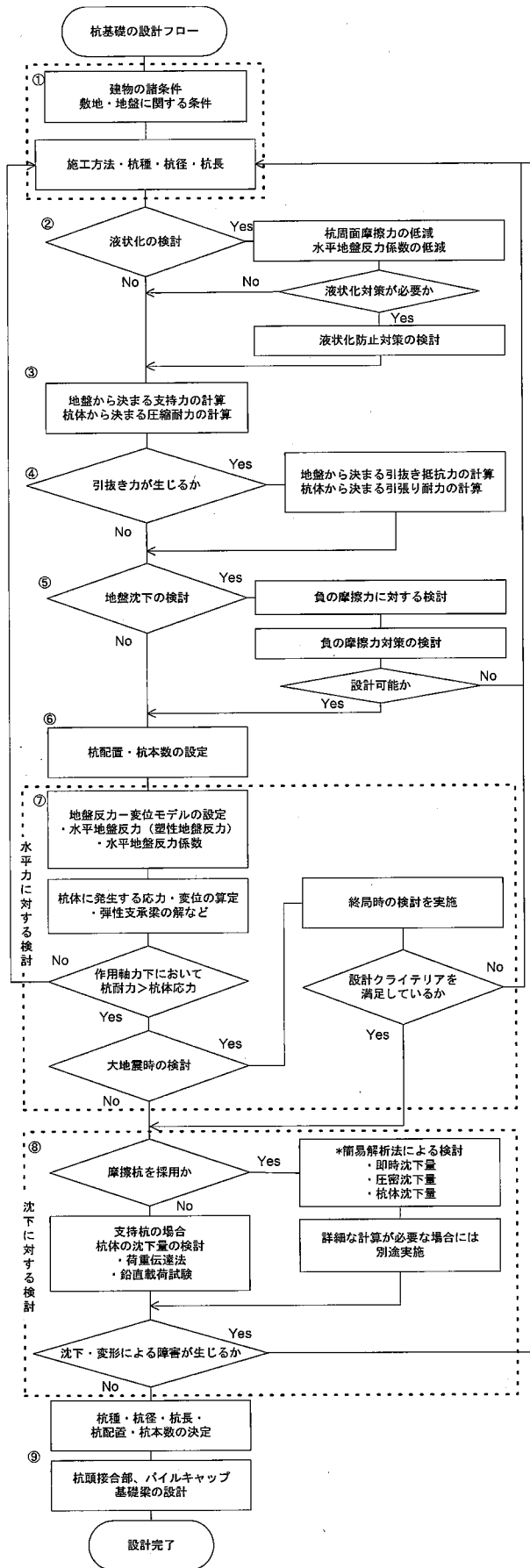


図-1 設計フローチャート

・山口の支持力理論などに基づいた先端支持力や、有効応力理論などに基づいた周面摩擦力の考え方に即した式とすべきであろう。しかし、有効上載圧などの評価が難

しいこともあって、各機関の基準類は、多数の鉛直載荷試験結果から求めた鉛直支持力と試験現場の地盤定数(N値、 q_u など)を関係づけた支持力係数を用いて鉛直支持力を求める算定式を採用している。たとえば、先端支持力 R_p は、先端支持力係数 α を用いて $R_p = \alpha N A_p$ (N :先端平均N値、 A_p :杭先端の面積)で与えられる。

ここで、先端平均N値を評価する範囲に関しては、支持力機構から見て危険側になるような範囲が設定されている算定式もあるので注意を要する¹⁾。また、下部に粘性土層が続く中間層に杭先端を位置させる場合は、先端支持力の影響範囲とともに、中間層の圧縮性、せん断特性(パンチング破壊の有無)、下部粘性土層の支持力なども検討しておく必要がある。

一方、周面摩擦力は砂質土と粘性土に分けて算定するが、両者の中間的な土(たとえば、シルト質細砂、砂質シルト)は粒度の少しの違いで適用される算定式が異なることになる。このため、両方の算定式による値の小さい方を採用するなどの配慮が必要になることもある。

設計に採用する杭の鉛直支持力は、上記の地盤から決まる支持力と、杭材の圧縮耐力の小さい方の値となる。なお、群杭の場合は、杭1本あたりの支持力を低減することも提案されているが、実務設計レベルでは杭間隔が杭径の2倍以上であれば低減しないのが一般的である。

④ 杭の引抜き抵抗力の算定

杭に引抜き力が作用する設計においても、各機関の基準類で定められた算定式を用いる。地盤から決まる周面摩擦力による値と杭材の引張り耐力の小さい方の値が引抜き抵抗力となるが、前者の値は上記③の周面摩擦力よりも小さくなるのが一般的である。なお、引抜き抵抗力は最大値に達したあとと低下して残留値に至ることが多いので、終局状態の設計ではこの点に注意する必要がある。

⑤ 圧密沈下・負の摩擦力の検討

埋立地など軟弱粘性土層が厚く堆積している場合は、土質力学で最も重要な現象の一つである圧密の検討が必要になる。地盤が未圧密状態のときには圧密沈下が生じる恐れがあるので、杭の設計時には、主に摩擦杭の場合は⑧で述べる沈下量の検討が、支持杭では負の摩擦力の検討が重要事項になる。後者の検討結果、上部構造からの荷重と中立点より上方の摩擦力(負の摩擦力)との和が、中立点より下方の摩擦力(正の摩擦力)と先端支持力の和を安全率で除した値、および杭材の圧縮耐力より大きい場合は、構造物の沈下や杭の破損が生じる恐れがあるため、摩擦杭、摩擦力低減杭(SL杭)、先端支持力が大きい杭などに変更する必要が生じる。

⑥ 杭配置・本数の検討

①~⑤で示した検討結果などを踏まえて、構造物の荷重に応じた数の杭を各フーチングに配置する。

⑦ 水平抵抗の検討

杭の水平力に対する検討では、地震荷重などの水平力が作用したときに杭に生じる応力よりも、杭の有する耐力が大きいことを確認する。設計法は各機関が定めた基準類によるが、一般には杭体応力の算定には弾性支承上

梁理論に基づく Chang の解や剛性マトリクス法などが用いられている。

この解析法で最も重要となる地盤定数は、水平地盤反力係数 k_h である。 k_h は、杭の水平載荷試験から求める方法、ボーリング孔内水平載荷試験などの地盤調査や一軸・三軸圧縮試験などの室内試験の結果から求める方法などがある。 N 値から換算することもあるが、精度は低い。地盤定数のばらつきは、設計結果に直結している。その一例として図-2 を示す。荷重-変位量曲線(太線)は、地盤定数が $1/2$ になることによって細線の曲線になる²⁾。設計に際しては、 k_h の算定式の根拠やばらつきを十分に理解しておかねばならない。なお、 k_h は杭径によって変化するが、この影響を考慮する場合、杭の寸法として cm 単位を用いる算定式が多いので注意を要する。

基準類の多くは、変位に応じた k_h の低減や、地盤反力の上限值(塑性地盤反力)を設定している。これは、杭頭に水平力が作用して杭の変位が増大すると、地表面近傍から塑性化する進行性破壊現象が生じる現象を考慮したものである。また、水平力を受ける杭の前面・後面には、受働・主働土圧が作用している。杭の水平抵抗に関しては、これらのことをよく理解しておく必要がある。

なお、基準類によっては、大地震動時の設計や地震時の地盤変位により杭に付加される応力の検討を規定したものもある。これらの検討を行う際には、地盤の動的性質の知識が必要になる。

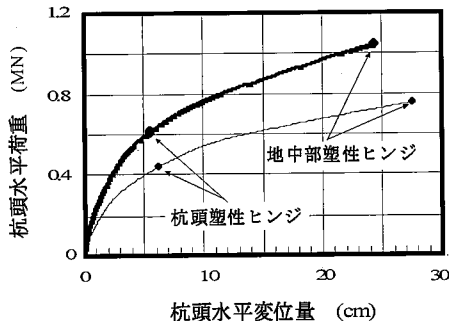


図-2 杭頭の荷重～変位量曲線の比較²⁾

⑧ 沈下の検討

杭の設計に関連する沈下としては、地盤自体の沈下と杭体の沈下とがある。前者は、主にゆるい砂質土層で生じる即時沈下と、主に軟弱粘性土層で生じる圧密沈下とに分けられる。後者は構造物の荷重による杭体の沈下であって、先端沈下量と杭体の縮み量の和となる。

即時沈下は、地盤を半無限弾性体と仮定し、地表面に荷重を与えたときの地盤変位量を示した Boussinesq や Steinbrenner の式によって算定される。ただし、構造物の竣工時にはこの沈下は終了していること、杭先端より下方にゆるい砂質土層があることはまれであることなどから杭の設計時に検討することは少ない。

圧密沈下に関しては、未圧密や正規圧密地盤では圧密対象層での鉛直応力を求め、Terzaghi の圧密理論に基づいて C_c 法により算定するのが一般的である(具体的な算定方法は文献3)などを参照されたい)。杭基礎の場

合、荷重の作用位置(杭の外周で囲まれた「荷重の仮想作用面」)をどの深さに想定するかが問題となる。一般には、簡易的に杭先端から上方に $L/3$ (L : 杭長) 上がった位置で評価しているが、杭先端と杭周面の抵抗の割合は荷重レベルによって変わるため、荷重伝達法⁴⁾などにより実際の荷重分布を考慮して決めるのが望ましい。

また、荷重の仮想作用面から分散する地中応力の算定方法にも、i) 各杭の荷重を仮想作用面深さで作用する集中荷重と仮定して算定する、ii) 杭群に働く荷重を仮想作用面深さで作用する等分布荷重と仮定して算定する、iii) 杭に働く荷重を仮想作用面から鉛直に対して30度で広がる面に等分布荷重として作用させる方法の3種類ある。文献5)では、この算定方法による沈下量の違いを検討しているので参考にされたい。

なお、上記のいずれの方法も、上部構造物の剛性や杭・地盤の相互作用などは考慮できない。これらを考慮するには有限要素法、境界要素法、ハイブリッド法などの詳細計算法³⁾、および詳細計算法を簡略化した格子梁法⁴⁾などを用いることになる。

杭体の沈下は、載荷試験を行って得られる荷重-沈下量曲線から設計荷重時の沈下量を求める方法の他に、先端抵抗-先端沈下量曲線と周面摩擦抵抗-沈下量曲線を適切な関数で置き換えて荷重伝達法などで推定する方法³⁾、杭頭ばねを杭の寸法や施工法から決まる係数によって推定する方法⁶⁾などがある。支持杭の場合、一般に地盤自体の沈下の検討は不要であるが、荷重による杭体の縮みなどは無視できないことが多いため、杭体の沈下は検討しておくことが望ましい。

3. 杭基礎施工時の土質工学上のポイント

基礎杭の施工法は、図-3のように分類される。ここでは、各施工法の詳細は文献7)などにゆずり、施工法の検討時や施工時に土質工学上注意すべき事項を概説する。

まず、地盤図によって杭の施工ができるかどうかを判断する必要がある。大きな径の礫や硬質粘性土層が存在する地盤は、打込み工法・圧入工法や中掘り工法は施工が難しくなることがある。また、地下水位が高くてゆるい砂層や砂礫層が存在する場合、プレボーリング工法やアースドリル工法は、掘削孔が崩壊する可能性が生じる。さらに、支持層に伏流水がある場合、埋込み工法では根固め液が流失することがあるので注意を要する。

施工時には、埋込み工法や場所打ち杭工法では、排出された土から土質などを判断する必要が生じることがあ

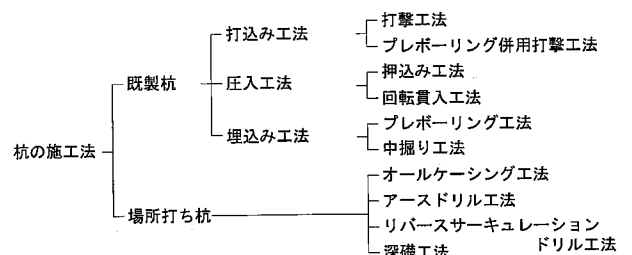


図-3 基礎杭の施工法による分類

る。そのためには、触覚・視覚・嗅覚・聴覚・味覚（時と場合によるが）の5覚を総動員して判断できるように訓練しておく。また、高止まりなど施工トラブルに対処するためには、設計定数や支持力算定式などの根拠やばらつきを十分に理解しておく必要がある。

4. 基礎構造に関する資格（建築基礎設計士）

以上のように、杭基礎など基礎構造物の設計・施工には土質工学の知識だけでなく、多くの経験を積むことが重要となる。ここでは、設計・施工の技量を向上し、確認する有効な手段としての試験・資格について概説する。

杭基礎の施工に関する資格には、(社)日本基礎技術協会が行う基礎施工士と、(社)コンクリートパイル建設技術協会が行う既製杭施工管理技士があり、それぞれ試験と資格認定が行われている。前者は主に場所打ち杭を、後者は主に既製コンクリート杭を対象にしている。

基礎構造の設計に関する資格は、技術士（建設部門：土質及び基礎）が代表である。他に土木設計技士、一級・二級建築士、構造設計一級建築士、JSCA 建築構造士があるが、これらは基礎構造に特化した資格ではない。これに対して米国には、土質工学や基礎構造に関する専門資格 GE (Geotechnical Engineer) がある。建築物の設計は PE (Professional Engineer) が行うが、一定規模以上の建築物については基礎構造を GE が、上部構造を SE (Structural Engineer) がチェックするようになっている。

日本では、基礎構造を含む建築物の構造設計は建築設計事務所やゼネコンの構造設計者が担当するが、大半は建築系学科の出身である。しかし、建築系学科に地盤や基礎構造を専門とする先生は少なく、大半の大学では土質工学をきちっと履修する学生は少ないのが現状である。このため、上部構造の設計には堪能でも、ばらつきが非常に大きい地盤が相手で、有効応力など他の材料にはない概念がでてくる土質工学の知識が必要な基礎構造の設計を苦手とする構造設計者が多い（もちろん、得意な設計者も存在するが）。米国の GE のように土質工学に精通した技術者が建築物の基礎構造の設計に関わるような仕組みには、日本はなっていない。そのため、苦手な基礎構造の設計は基礎専門建設会社の技術者に委ねる構造設計者が少なくないのが実情である。

また、最近では設計ソフトが充実しており、データさえ入れると一応の計算結果が出てくるようになっている。このため、計算内容をあまり理解せずに設計ソフトに頼る「ブラックボックスエンジニア」も存在すると聞く。

このような状況から、「日本版 GE」の確立を目標に、基礎設計担当者の技量の向上と、その基礎設計力の客観的な評価を目指した「建築基礎設計士（補）」の資格試験が実施されている。2006年に始まり当初は社内資格であったが、2008年からは(社)建築研究振興協会が受託した「建築基礎設計士試験運営委員会（委員長：富永晃司）」が運営・認定する資格となっている。建築基礎設計士と土工補の2ランクあり、所属・分野・経験年数

などの受験資格に制限は一切設けられていない。

建築基礎設計士（補）の試験科目は、基礎設計に必要な知識を問う基本試験と、基礎構造の最適な設計やコスト管理の技量を判定する実技試験である。時間内に基礎構造物を設計する実技試験では設計ソフトは使えないため、ブラックボックスエンジニアでは合格できない。また、建築基礎設計士試験には、基本・実技試験の合格者に対して、提案・説明能力やトラブルへの対処法などを運営委員会委員の面接により判定する二次試験も加わる。

建築基礎設計士試験運営委員会は、「建築基礎設計士テキスト（2010年度版）」を発行している。このテキストは、第1編に土質力学に関する基本事項をまとめ、第2編にそれを応用する形で基礎設計に必要な地盤調査、直接基礎、杭基礎、擁壁、地盤改良、上部構造からの外力、関連法規、設計例などの基礎構造に関する事項がまとめられている。本報で述べた基礎構造の設計と土質工学の関連が分かりやすい構成になっている。試験やテキストの問い合わせ先は、jimukyoku@kisosekkeishi.com である。

5. おわりに

杭基礎を始めとして基礎構造の設計や施工を行うには、上部構造、コストなど専門的な幅広い知識が必要であるが、根幹をなすのは土質工学（土質力学＋基礎工学）である。基礎構造技術者を養成する場合、建築物を対象とする場合でも、土質工学を学ぶ機会の少ない建築系学科出身者よりも、一とおりに学んでいる土木系学科出身の方が適しているという声をよく聞く。これは基礎構造の業務には土質工学の知識が不可欠であることを示している。

冒頭で述べたように土質工学を学んだだけでは、杭の設計・施工はできない。しかし、当初は誰でも基準類に頼る「マニュアルエンジニア」であるが（前述のブラックボックスエンジニアは論外）、基礎構造に関しては土質工学を学ぶことによって基準類の裏付けなども理解する「ハンドブックエンジニア」に、そして現場の経験を十分に積むことにより「真のエンジニア」に進化できるものと考えられる。本報がその一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 小椋仁志：杭の先端支持力算定式に関する一考察（先端平均 N 値の平均範囲を中心として）、第45回地盤工学シンポジウム，pp. 199～204, 2000.
- 2) 富永晃司：建築基礎構造設計指針に基づく解析値の意味—地盤定数の誤差が支持力・変形の解析値に与える影響—、日本建築学会大会 PD・基調講演資料，2005.
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.
- 4) 地盤工学会：基礎の沈下予測と実際，2000.
- 5) 板東真平・小椋仁志・二見智子：摩擦群杭を用いた建物の沈下量の計算値と実測値の比較，第46回地盤工学シンポジウム，pp. 205～210, 2001.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編，2002.
- 7) 地盤工学会：杭基礎の調査・設計・施工から検査まで，2004.

(原稿受理 2011.1.6)