

設計からみた地盤工学と基礎構造物のかかわり

Geotechnical Engineering for Design of Foundation

片 桐 雅 明 (かたぎり まさあき)

㈱日建設計シビル 地盤調査設計部門

1. はじめに

各種構造物の設計は、「仕様設計」から「性能設計」へと移行している。その背景には、国際的な競争力の確保・育成、建設市場の開放、責任所在の明確化、公共投資の効率化などが挙げられ、社会資本整備の手段など制度の変革も、それを後押ししている。

性能設計は、その構造物の目的、要求性能、性能規定ならびに性能照査に対して、数値解析・模型実験などの適切な手法によって、その性能が満足されることを照査することからなる。すなわち、設計者が構造物に求められる性能と重要性を規定し、その性能を保証するための規定値を設定し、何らかの方法で照査して、その品質を保証するのである。

構造物を構築する主な材料であるコンクリートや鋼は、JIS規格としてその性質が保証されている。しかしながら、構造物を支える地盤は、周知のとおり、その成立ち、構成される土質の種類、環境状況などの違いによって、支持する荷重の大きさや生じる変形が異なる。さらに、同じ地盤でも、施工順序などによって、変形挙動が異なる。このような地盤の特性を考慮して、構造物を設計・施工していくことが、建設技術者として重要となる。

本文では、構造物基礎の設計を念頭に、地盤工学が必要となる留意点を中心に取りまとめている。

2. 設計フローと留意点

物体に力が作用すると、その物体は変形し、ある大きさ以上の力が作用すると破壊する。たとえば、梁に荷重を加えると、梁はたわみ、その形状は加えた荷重の大きさや分布に依存する。さらに荷重を加えていくと、ある時点で梁は崩壊する。このように、物体の変形は加えた作用に対する物体の応答であり、加えた作用と作用を受けた物体の特性で定まるのである。

土粒子で構成される地盤に対しても同様で、地盤に加えられる作用の応答として、地盤の特性が反映されたものが地盤の変形（ときには破壊）となるのである。しかも、土粒子の大きさやその配合割合、詰り方などにより、地盤の特性は複雑となることから、生じる変形は梁のような単純挙動とはならず、非常に複雑なものとなる。例として、砂地盤と粘土地盤の支持力特性を考える。単純のために、両者のせん断抵抗角と粘着力成分を同じとし、同じ速度で載荷した場合を考える（図一参照）。

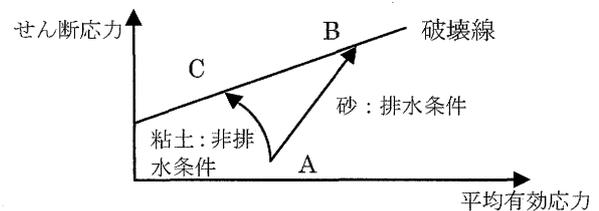
砂地盤では、透水性が高いため、地盤内には過剰間隙水圧は蓄積されず、載荷により有効拘束圧が増加して、有効応力経路は右上に移行し、破壊線に達して破壊に至る（A⇒B）。一方、粘土地盤では、透水係数が低いため、載荷により生じた過剰間隙水圧は蓄積されて、平均有効応力は左上に移動し、破壊線に達する（A⇒C）。このように、破壊線に達したときのせん断抵抗が異なることが支持力の違いとなるのである。

このように、地盤に与える作用が同じでも、対象とする地盤特性が異なれば、地盤挙動が異なるのである。地盤に構築する構造物の設計は、構造物を構築したときならびにその後の作用に対する地盤の応答を予測し、それが構造物の機能を損なわないようにすることである。

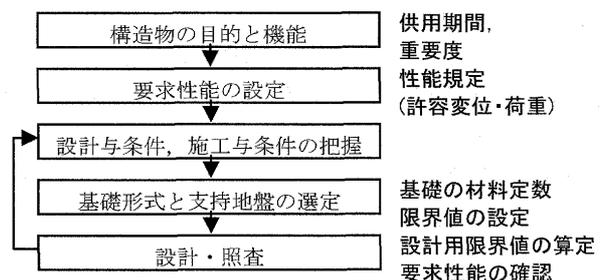
性能設計では、要求性能を満たすための条件を性能規定として定め、数値解析等で性能照査するという流れとなる。図一に、基礎構造の設計フローを示す。構造物の目的と機能から、必要とされる構造物の要求性能が設定される。以下、設計フローを概説する。

2.1 要求性能

基礎構造の要求性能は、三つの性能レベルに対して、表一¹⁾のように設定されている。具体的には、それぞれの性能レベルに対して限界状態を想定し、あらかじめ抽出された性能項目（基礎の変形角、傾斜角、部材の応力・変形、地盤の鉛直支持力・沈下・液状化など）の算



図一 異なる排水条件下でのせん断応力経路



図二 性能設計における基礎構造の設計フロー

表一 基礎構造の要求性能¹⁾

性能レベル	要求性能		
	上部構造	基礎部材	地盤
終局限界	地盤および基礎の破壊あるいは過大な変位・変形の影響によって、上部構造が破壊しない。建物が転倒しない。	基礎部材が脆性的な破壊を生じない。また、変形性能の限界に達して、耐力低下を生じない。	地盤が崩壊しない・直接基礎全体が鉛直支持性能を喪失しない。
損傷限界	基礎の変位・変形の影響によって、上部構造に構造上の補修・補強を必要とするような損傷を生じない。過大な傾斜を生じない。	基礎部材に構造上の補修・補強を必要とするような損傷が生じない。	過大な変形が生じない。
使用限界	基礎の変位・変形の影響によって、上部構造が使用性・耐久性に支障を生じない。	耐久性に支障が生じない。有害なひび割れが生じない。	使用上有害な地盤の変形が生じない。

定値と設計用の限界値を比較し、評価するのである。

2.2 基礎形式と支持地盤の選定

構造物の基礎には、構造物に働く力を地盤に確実に伝え、安全を確保する働きが要求される。地盤に伝える荷重は、構造物の自重、構造物に作用する荷重・土水圧、地盤変状に伴う荷重、地震荷重、などがある。

基礎形式を選定する概略設計では、上記のような想定される荷重や施工条件を明確にし、次のような手順で進めていく。

- (1) 構造物規模と地盤の状況を整理する
- (2) 基礎の種類と想定される支持地盤を仮決めする
- (3) 周辺環境からの制約、影響を吟味する
- (4) 候補となる基礎形式、寸法を定める
- (5) 数種の施工方法を設定し、施工環境による工事の難易度を明確にする
- (6) 候補案の工期、工費を算定する
- (7) 工期、工費のいずれかの優先性を検討し、全体的な総合順位をきめる

このように、設計者は地盤条件、施工環境にあった施工方法を踏まえた基礎形式を選定することが重要であり、施工の常識と地盤工学が概略設計には必要なのである。

2.3 設計・照査

選定した基礎形式に対して、詳細な設計を行い、それが妥当かどうかを照査して、施工に進む。この過程では、2.2の検討において不足している地盤情報を収集するための地盤調査や土質試験を行うことも含まれる。これら地盤情報を踏まえて、設計のための地盤モデルを策定し、想定される作用を与えて、地盤や構造物の応答を算出する。その結果と性能規定としての規制値とを比較・評価して、基礎の寸法や剛性、地盤の補強や基礎の設置深度などを決定していくのである。

建築基礎の照査項目は、鉛直支持力、滑動、浮上り、即時沈下、圧密沈下、基礎部材の健全性などである。これら照査式は基準の中で示されており、設定した地盤モデルによって応答値が決まってくるのである。それゆえ、構造物を設置する地盤のモデル化、すなわち、層構成と

その層の地盤定数をどのように与えるかが重要となる。

たとえば、粘土と砂の互層地盤があったとすると、それを互層と見るのか、単一の粘性土層、もしくは砂質土層とするかで、評価が異なる。しかも、土質試験の結果は、ある大きさの供試体で行われるため、それがその層を代表するものとしてよいか判断に苦しむこともある。このような場合、どうするかが技術者の腕の見せ所であろう。一般には、応答が安全側となるようなモデル化が行われる。例として、沈下を問題とする場合には、粘性土層としてモデル化し、圧密沈下量を算定するのである。ただし、ばらついている物性値を一様の地盤としての代表値とする際には、いくつかの注意点がある。

2.4 設計におけるその他の留意点

地盤はそれを構成する土粒子群と間隙からなる。間隙が水で満たされていると、土粒子には浮力が働き、土粒子の自重を与える有効応力は浮力を差し引いたものとなる。そのため、対象とする地盤の地下水位を把握することが重要となる。特に、砂層が存在する場合には、液状化検討のために地下水位の情報が必要となるのである。通常、地下水位は地盤調査結果としての孔内の地下水位が報告される。この値は調査時点の水位であり、年間を通じてその値ではない可能性があることを認識しておくことが必要であろう。特に、埋立地など潮汐の影響を受ける海岸部では留意すべき点である。

3. 地盤モデルの設定方法

地盤調査・実験の目的は、応答値を求めるために必要な地盤の構成とそれらの地盤定数を決定する情報を得ることである。対象地において、どの層が支持層となるかどうか、どのような地層で構成されているかを確認するために、まず標準貫入試験などのサウンディングが行われる。次に、沈下や安定に関する定量的な検討が必要となる場合には、Terzaghiの一次元圧密解析や円弧すべり解析を行う。それらに必要な地盤定数を決定するために、サンプリング試料に対する圧密試験や一軸圧縮試験が実施される。このように、設計や解析に用いる地盤モデルを設定するために、地盤調査や土質試験が計画される。なお、標準貫入試験は予備調査である²⁾ので、 N 値だけで詳細な地盤モデルを作成することは不可能である。

近年目覚しく発展した土の弾（粘）塑性構成理論を組み込んだ土-水連成多次元解析を用いて、沈下や安定性を定量的に評価する場合も、その解析が必要とする土質パラメータを決定できる土質試験を行うことが原則である。しかしながら、通常の土質試験の内容は、Terzaghi理論や円弧すべり理論などというある種古典的な解析を前提として基準化されていることが多く、多くのパラメータを必要とする弾（粘）塑性土-水連成多次元解析に用いるには不十分である。そのため、物理定数や力学特性から推定した値や経験値が用いられる。このように、いかに精緻な解析手法を用いても、それに用いる地盤定数に不確定要素が多い場合には、得られた結果の信憑性が低くなる。また、三軸圧縮試験結果を事後解析

報告

し、これら多くのパラメータを同定する方法もある。この場合も、対象とした供試体はその層を代表するものかどうかという不確定要素が残る。

先に述べたように、一様でない地盤に対しては、その地盤をどのようにモデル化するのが大きな課題である。以下、地盤のモデル化の考え方を概説する。

3.1 地盤調査・土質試験結果の評価

地盤調査・土質試験で得られたデータを吟味し、調査不足がないかの確認、ばらつきの判定、異常値の抽出を行う。地盤は自然の創造物であり、部分的には均質とみなせるものも深度や位置の違いにより均質とはみなせないことも多い。埋立や造成など、人為的に造成した地盤においても、造成管理を厳しくしたとしても、均質なものとすることはできない。また、浚渫土砂を埋立材とした場合には、埋立状況に応じて複雑な地盤が構成される。このような地盤からサンプリングし、試験室まで運搬し、供試体の作製から設置までの間で、試料の乱れや応力解放、吸水などの違いによって、試験値そのものが低下することもある。

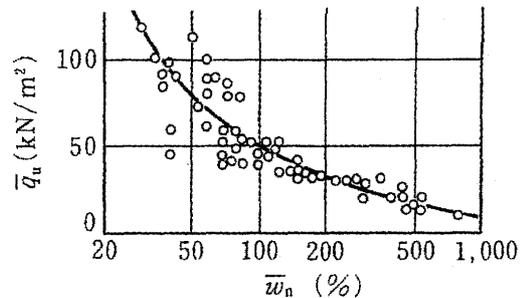
このような試験値に対して、次のように地盤物性値としての妥当性を評価していく。

- i) 資料調査との比較：既往の調査・設計・工事の報告書、災害記録等で得られている類似地盤での情報を、対象とする層の特性と比較する。
- ii) 土質試験と原位置試験との比較：コーン貫入抵抗とせん断強さの関係など、サウンディング結果と地盤定数の相関関係を用い、お互いの傾向から異常値を見つけることが可能となる。また、乱さない試料による室内試験の結果が離散的な情報であるのに対し、サウンディングをはじめとする地盤調査からの情報は連続情報となり、地盤調査結果は室内試験結果を補完する役割もある。
- iii) 物理試験と力学試験の比較：力学試験結果と物理特性を比較することで、異常値を見つけることができる。たとえば、図-3に示すように、一軸圧縮強さと自然含水比の関係³⁾、圧縮指数と液性限界の関係⁴⁾などが利用できる。
- iv) 調査データの補完：複雑な層構成地盤では、全ての層から乱さない試料を採取して室内試験を行う

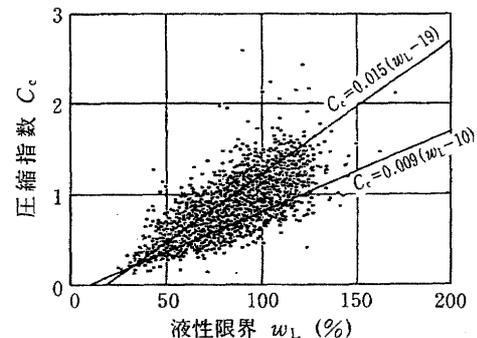
ことは、層の厚さ、試料の量や品質、調査コスト等の面から、困難なことがある。この場合、他の地盤調査結果の同じ層のデータなど、既往の資料から類推して補完することが行われる。また、盛土や裏込めなどの設計基準書では、土質分類に応じて標準的なせん断強さを設定しているものもある。

- v) データのスクリーニング：得られた地盤データを他の情報と比較する他に、データそのものを地盤工学的見地から詳細に吟味することも必要となる。たとえば、同じサンプリングチューブから切り出して行った一軸圧縮試験において、得られた応力-軸ひずみ関係が大きく異なっているものを除くといったことが行われる。

図-4に、土質柱状図だけでなく、土質試験の結果を踏まえて設定した地盤モデルの一例⁵⁾を示す。有機物混じり粘土の層が10 m程度堆積しているが、深度によりその物理・圧密特性が異なっていることが確認できる。



(a) 自然含水比と一軸圧縮強さの関係³⁾



(b) 液性限界と圧縮指数の関係⁴⁾

図-3 物理特性と力学特性の相関性例

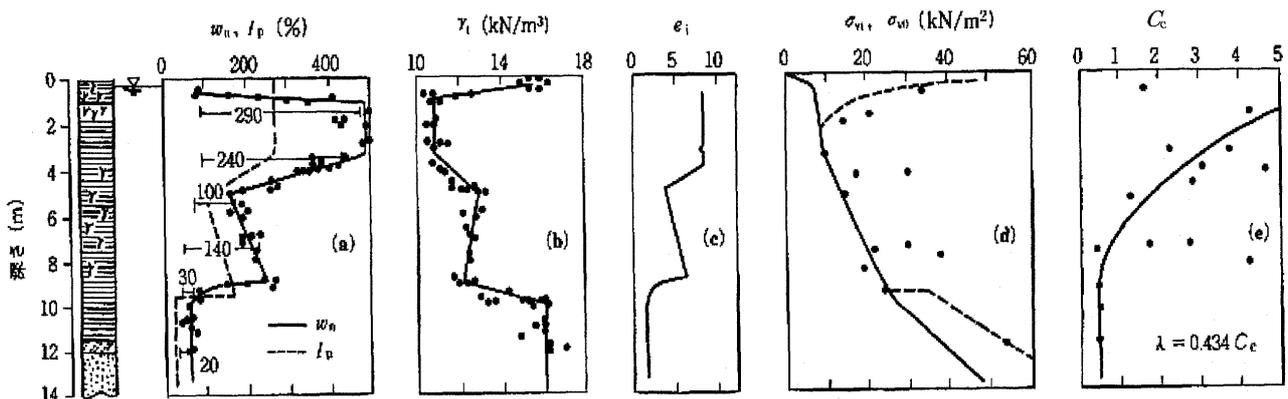


図-4 地盤調査結果ならびに土質試験結果を踏まえて設定した地盤モデル例⁵⁾

3.2 調査データ数の評価

信頼性設計に基づいた性能設計では、地盤定数の特性値は統計処理によって、ばらつきを考慮して設定される。この場合、必要なデータ数やその信頼性が問題となる。渡部ら⁶⁾は、新港湾基準⁷⁾と一般化された設計コードとの特性値を比較して、前者で求めた特性値は後者の95%信頼水準による特性値と整合性がとれていることを示し、データ数の不足や著しいばらつきにも実用的に対応していると報告している。それによると、特性値は推定値に補正係数 b_1 と b_2 を乗じて求めればよいのである。ここで、 b_1 が変動係数に対応させるもので、累積確率密度が30%程度となるように設定されている。 b_2 はデータ数が10個未満の場合に導入するものである。

しかしながら、ばらつきやデータ数を考慮できる方法が妥当であったとしても、対象とする地盤の層構成の決定、その層に対して実施する試験の本数や内容など、地盤技術者として判断すべき課題がある。

3.3 地盤モデルの設定例

ある構造物を構築する場合、まずその地域の地盤図や周辺構造物に対する既存の地盤調査結果を調べ、構造物の基礎形式や地盤調査仕様等を決定していく。例として、図—5に示す調査結果に対し、構造物の規模を踏まえた支持層の設定と必要となる地盤情報を抽出してみる。

- i) 小規模の構造物を除いて、深度1.5 m程度の砂層に基礎を置くことは、その下のシルト層が圧密沈下するため不可能と考える。
- ii) 中規模の構造物では、深度12 m程度の砂まで杭を打ち込み、基礎とすることも考えられるが、その下のシルト層の圧密が気になる。
- iii) 大規模の構造物の場合、深度25 mの砂礫層を支持層とする杭基礎が考えられるが、砂礫層の厚さやその下の層の情報が必要となる。
- iv) 構造物の規模によらず、上部砂層に対する液状化判定が必要である。そのため、地下水位がどこにあるか確認する必要がある。

このように、構造物の規模（支える荷重）によって、支持する層の設定が異なるため、基礎形式に応じた地盤情報をそれぞれ抽出して、それらが得られるような調査

計画を策定する必要がある。

4. おわりに

本文では、構造物を支える地盤を対象に、その設計において留意すべき点を紹介してきた。設計における地盤のモデル化では、複雑な地盤を忠実にモデルとすることは必ずしも妥当ではなく、解析に用いる層構成やその地盤定数、用いる解析手法などに応じて設定すべきと考える。留意すべきことは、構造物を構築したときに地盤はどのような挙動を示すのか、どこが変形して破壊に至るのか、どの層が問題となる層なのか、地震に対してはどんな挙動を示すのか、などを想定し、課題（検討すべき内容）を抽出することであろう。その際、構造設計者と協働すればより妥当な課題を抽出できる。あとは、それらをよりよい方法で解決していけばよいのである。

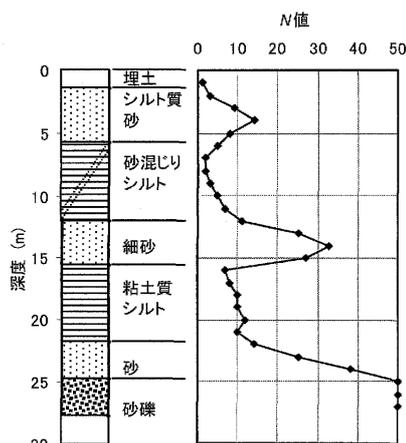
地盤は自然が作り出したものであり、どのように形成されたかを理解しておくことが、地盤工学では重要となる。事前調査²⁾として、地形図や地盤図といったその地域のグローバルな情報をベースに現地調査を行い、当該地の地盤特性を概略把握することが第一歩である。地盤工学会の各支部で取りまとめられた地盤図は大いに役立つものと思われる。また、当該地周辺での地盤調査結果があれば、さらに参考となる。これらの情報から、上記の課題を抽出し、それを解決するための地盤調査・土質試験計画を策定するのである。

解析ツールに地盤の物性値を代入すれば、何らかの答えが出てくる。地盤技術者は、出てきた答えが妥当かどうか判断できるかどうか問われるのである。解析に用いる地盤モデルとしての層構成や物性値の妥当性を評価することが判断の第一歩であるが、同時に、設定した条件における地盤挙動を想定できる能力を必要とするのである。これは、それまでの経験によるところが大きく、一朝一夕には得られないであろう。この能力を得るのは、多くの事例を把握するだけでなく、実際に地盤モデルを設定し、各層の物性値をパラメトリックに振ったときの解析結果としての地盤挙動と想定したそれとのギャップを体験しておくことも重要と考える。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，p. 51, 2001.
- 2) 日本建築学会：建築基礎設計のための地盤調査計画指針，pp. 5~9, 2009.
- 3) 稲田信穂：軟弱地盤の土質工学—予測と実際—，p. 161, 鹿島出版会，1994.
- 4) 田中洋行・榊原基夫：港湾地域における土の1次性質の統計解析，港湾技術資料，No. 719, 36p., 1991.
- 5) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，pp. 322~328, 1999.
- 6) 渡部要一ほか：新港湾基準による地盤定数特性値と一般化された設計コードによる地盤定数特性値の比較，土木学会第63回年次学術講演会，第3部，pp. 885~886, 2008.
- 7) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp. 249~298, 2007.

(原稿受理 2011.1.4)



図—5 ある地盤における土質柱状図