

P9. 地質解釈の違いが地盤解析結果に及ぼす影響

Influence of geological interpretation on geotechnical analysis

○珠玖隆行（岡山大学大学院）

1. はじめに

Terzaghi は Mechanism of land slide¹⁾の中で、「地質学者と土木技術者」という項目を立て、地質学者の力学的素養のなさと、土木技術者の地質・地質構造についての理解のなさを挙げ、両者の連携が必要であることを強調している²⁾。構造物を建設する際には、地質学的な視点と土木・地盤工学的な視点の両方が必要であることは言うまでもないが、Terzaghi の指摘から半世紀以上経過した現在においても、地質学と土木工学が連携した合理的な設計が一般的に実施されているとは言えない。

地質学と土木工学の十分な連携がなされない原因として、多くの建設プロジェクトでは経済性が優先され、十分な地質調査が実施されないことも挙げられるが、それ以上に、土木工学の知識と材料・地盤パラメータがあれば、構造物の設計を完了できてしまうことが大きく影響している。極端に言えば、設計者は構造物の建設サイトに行かないだけでなく、調査会社から得たボーリング柱状図において「地質が砂か粘土か、 N 値の深度分布はどうなっているか」にのみ着目し、設計を完了させるということも十分ありうる、ということである。しかしながら、地質を無視した設計が、危険かつ不経済な構造物に繋がる可能性を設計者は十分に認識しなければならない。

建設工事における地質的要因の重要性について示した研究として、例えば Poulos³⁾や Rollings and Rollings⁴⁾を挙げるができる。Poulos は、地質的な環境や施工における不確定性（論文中では imperfection と表記されているが、ここでは「不確定性」と訳して表記する）が杭基礎の挙動に大きく影響すること、およびそれらを設計に考慮することの重要性を、数値実解析や現場の観測データを用いて示した³⁾。また、Rollings and Rollings は地質学的な要因を無視した設計・施工により引き起こされたトラブル事例を収集し、建設工事における地質学的な視点の重要性を強調している⁴⁾。地質学と土木工学の連携は、互いの重要性を地質・土木両分野の技術者が認識することによって初めて成り立つため、上記のような啓蒙的な研究の果たす役割は大きい。

本稿においても、地質的要因の重要性を示すためにいくつかの数値シミュレーションを実施する。実地盤を対象とした解析ではなくあくまで数値実験であるため説得力に欠けるかもしれないが、地質学的な要因が構造物の設計・解析どのような影響を及ぼすかを示すことは可能であると考えられる。

2. 地質断面作成の困難さ³⁾

杭基礎などの構造物を設計する際には、まず地質・地盤調査が実施され、調査結果を基に構造物建設現場の地質の空間分布が推定される。推定される地盤断面図は調査で得られるデータの数以上に、推定する技術者に大きく依存する。ここでは、設計や地盤解析の際に見落としがちな地盤条件の例、誤った地盤断面図の作成例を挙げる。

杭基礎設計時に見落としがちな地質条件として、支持層下の圧縮性の地層（粘性土層）や粘性土層中の巨礫の存在が挙げられる（図 1 (a), (b)）。これらは、ボーリング柱状図の土質と N 値のみに着目していただいただけでは見落としがちな条件であるが、地盤の形成過程、堆積環境、周辺地形等の条件を考慮した大局的な視点で地盤を見ることにより、これらの存在を同定できる可能性がある。これらの地質条件を見落としとした際に生じる問題として、支持力不足や長期的な残留沈下の発生が挙げられる。

図 2 は誤った地盤構成の推定例を示している。(a)に示したように、2 個所で得られたボーリングデータを直線補完して地質断面を作成することは一般的に行われていることである。(b)のような地層の分布を限られたボーリングデータから同定することは困難であるが、先述したような地質学が得意とする大局的な視点から調査を行うことにより、地層の不連続性や支持層の空間分布を同定できる可能性が高い。

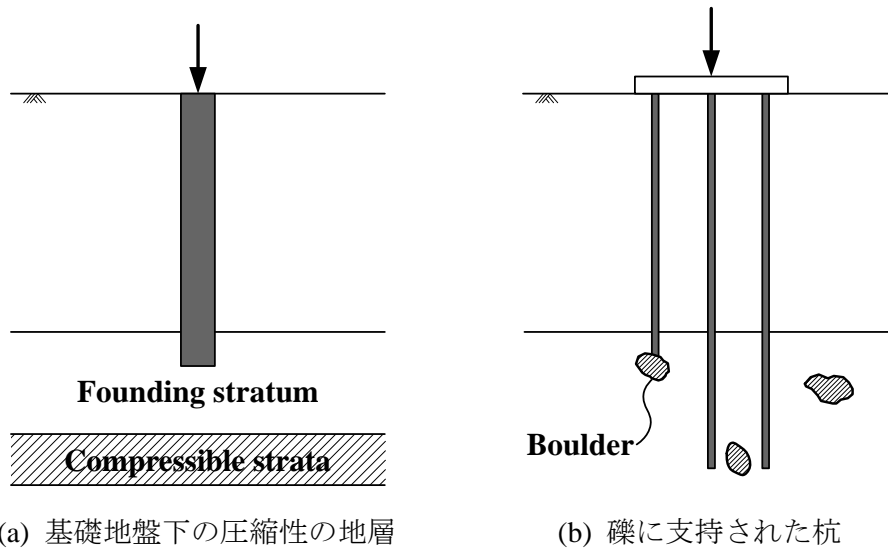


図 1 杭基礎設計の際に見落としがちな地質条件³⁾

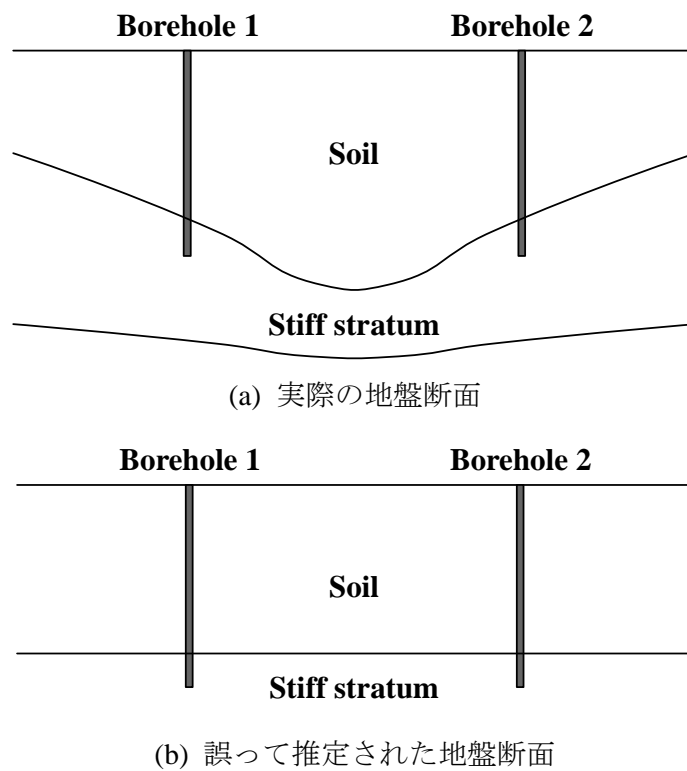


図 2 不十分な地質調査によって誤って推定された地盤断面の例³⁾

3. 数値実験

ここでは地質断面（地質解釈）の違いが地盤解析結果に及ぼす影響について検討する．全計算例を通して，実務で一般的に用いられている土-水連成有限要素法を用い，砂質土・礫質土層は線形弾性体，粘性土層は大野らの提案した LC モデル⁵⁾によりモデル化する．なお，本稿では地質要因が解析結果に及ぼす影響を検討し，その重要性を示すことを目的としているため，解析に用いたパラメータや詳細な解析条件は割愛する．

3.1 支持層に挟まれた軟弱層

はじめに，図 1 (a) に示した問題を対象に解析を実施する．解析に用いた地盤構成と有限要素メッシュ，荷重過程を図 3 に示す．ここでは単杭の押し込みを考え，杭の対称性を考慮し半断面のみモデル化した．なお，解析は平面ひずみ条件で解析を行っており，軸対象解析ではないことに注意されたい．計算は図 3 の条件に従った計算と，支持層中の粘性土層が無い場合の 2 ケース行った．支持層中の粘性土が無いケースは，調査不足や地質の解釈の誤りによりその存在を明らかにできなかった場合を想定している．

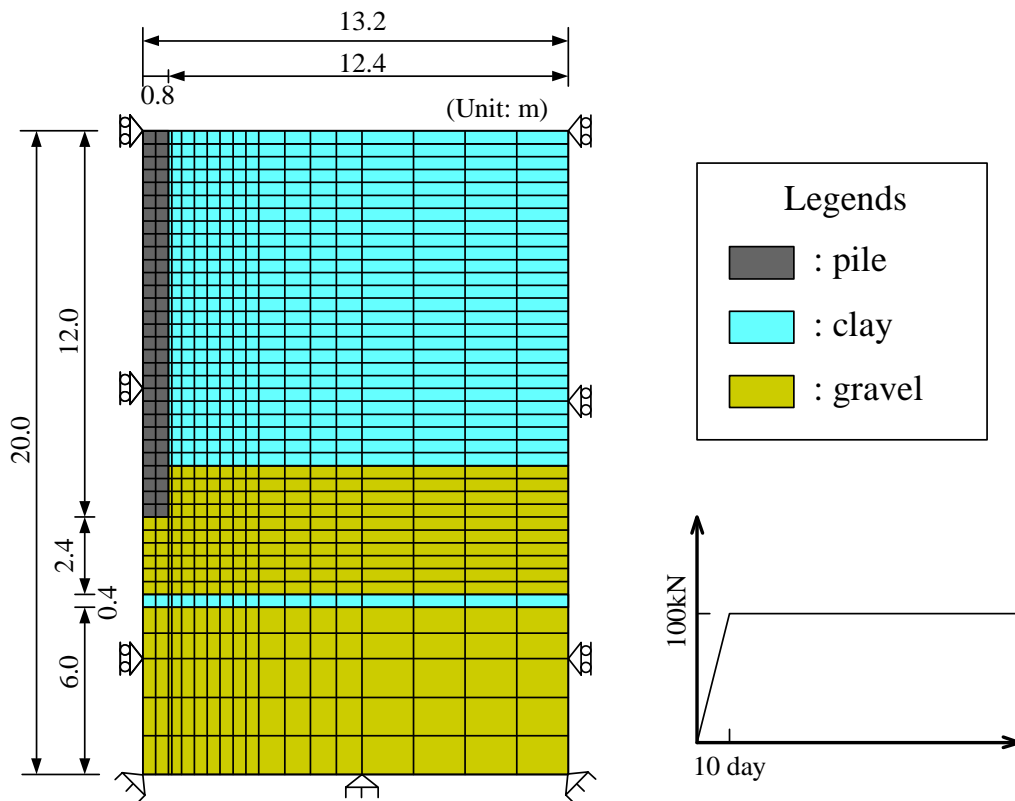


図 3 有限要素メッシュと荷重荷重過程

図 4 は，解析から得られた単杭頭部の時間－沈下曲線を示したものである．図中の赤線は，支持層中に軟弱粘性土層がある場合の解析結果であり，黒線が含まない場合の解析結果である．支持層の弾性係数 E は $140,000\text{kN/m}^2$ ($E = 2800N$, $N=50$ と仮定) と極めて剛なものであり，かつ軟弱層が杭先端から 2.4m 離れているにも関わらず，軟弱層がある場合と無い場合で鉛直変位が 2 倍程度異なる．また，軟弱層を含む場合には，荷重荷重終了後も緩やかに変形が進行していることが分かる．杭基礎を採用する構造物では，通常沈下は許されなため，このような残留沈下の発生は，杭基礎に支えられた上部構造物の性能に大きな影響を及ぼす．この結果から明らかなように，設計段階で支持層中の軟弱粘性土層の存在を見落としてはな

らないし、数値解析上無視することはできない。

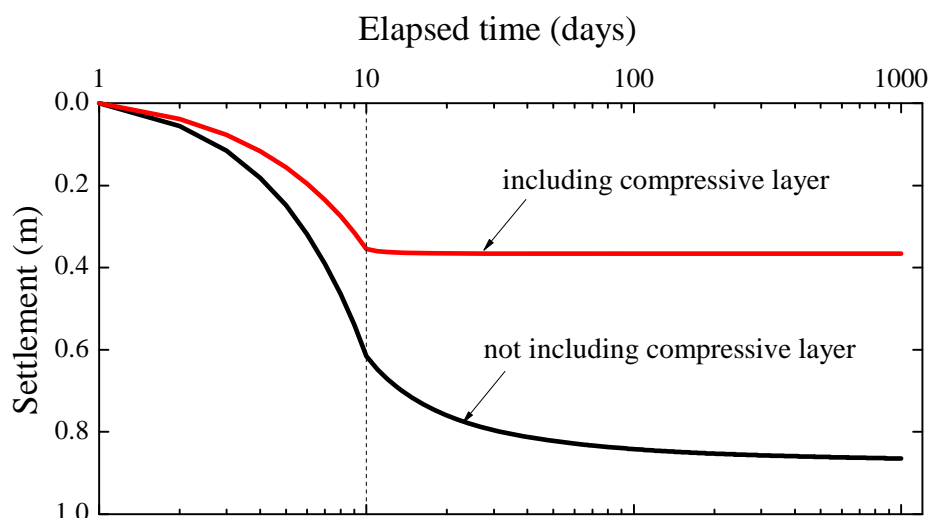


図4 軟弱層を含む支持層に支持された単杭頭部の時間－沈下曲線

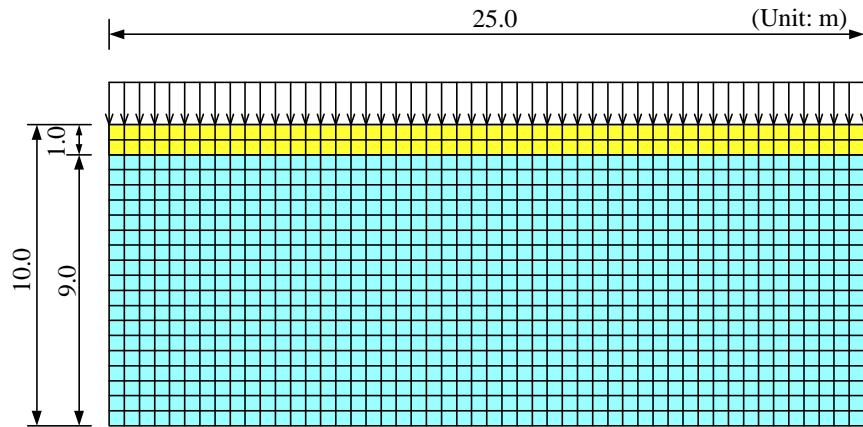
3.2 粘性土層中のレンズ状砂層

陸生の粘性土層は層中にレンズ状の薄い砂層を含む場合があるが、これら砂層の存在は土質調査・室内試験の際に見逃されることが多い。レンズ状砂層が存在すると、地盤のマスとしての透水性や圧縮性に大きな影響を及ぼすことが知られており⁹⁾、地質的な知識に基づいてその存在を同定することは構造物の合理的な設計に必要不可欠である。ここでは、粘性土層中のレンズ状（シーム状）砂層の有無が解析結果に及ぼす影響について検討し、その同定の重要性について示す。

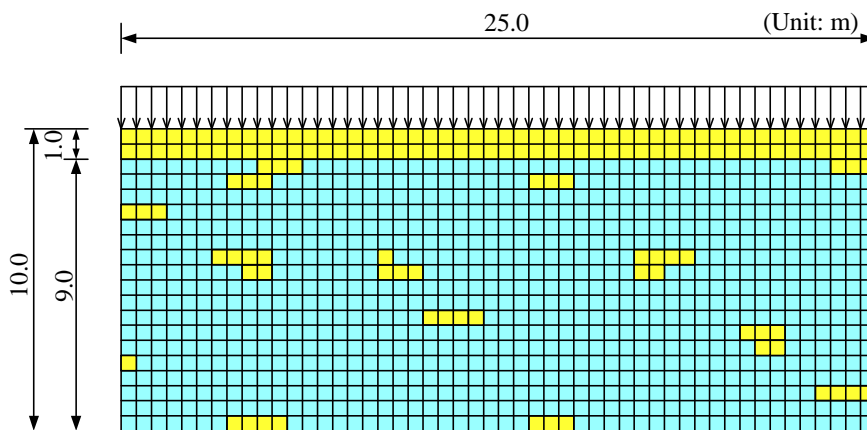
解析に用いた有限要素メッシュを図5に示す。図中の黄色の要素が砂層を示し、水色が粘性土層を示す。表層には厚さ1.0mの埋土層を仮定した。上載荷重として $2\text{kN/m}^2/\text{day}$ の鉛直荷重を10日間、地表面全面に載荷した。境界条件として、メッシュ上下面を排水境界とし、両端で側方変位固定、下端で完全固定条件とした。砂層の透水係数は粘性土層の100倍の値を用いた。

図6は、解析から得られた時間－地表面沈下曲線を示している。凡例の数字は、メッシュ左端を0.0mと設定したときの左端からの距離(m)を示している。図中のシンボルはレンズ状砂層を全く含まないと仮定して計算された時間－地表面沈下曲線を表している。なお、レンズ状砂層を考慮しないケースは、全ての地表面観測点で同じ沈下量になることに注意されたい。レンズ状砂層を含む場合では、地表面で観測される沈下速度・沈下量に違いが認められ、最大2cm程度の差が生じている。

図7は、荷重載荷開始から10000日経過後の地表面沈下量の分布図を表したものである。レンズ状砂層を含む場合では、沈下量の分布が位置によってばらついている。また、図6からも明らかであったが、レンズ状砂層を含む地盤は、含まない場合と比較して地盤の「マス」としての透水係数が大きくなり、沈下速度も速くなることがわかる。計算において粘性土層中のレンズ状砂層（の有限要素）の占める割合はたかだか6%であるが、解析結果に大きな差が認められた。このことは、地盤断面推定の際にレンズ状砂層の存在を見逃してはならないこと、そのためには地質的な視点を考慮しつつ地盤断面図を推定する必要があることを示している。



(a) レンズ状砂層を考慮しない地盤断面



(b) レンズ状砂層を考慮した地盤断面

図5 不十分な地質調査に起因する不確定性の計算例

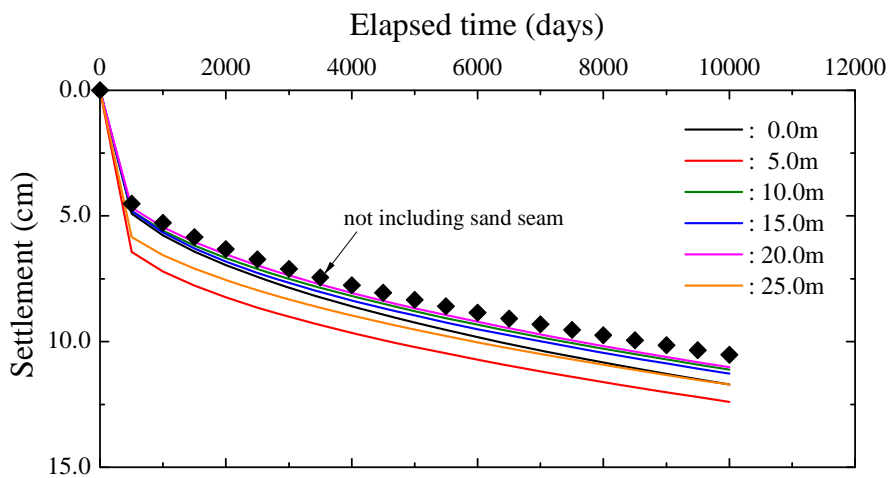


図6 時間 - 地表面沈下曲線の比較

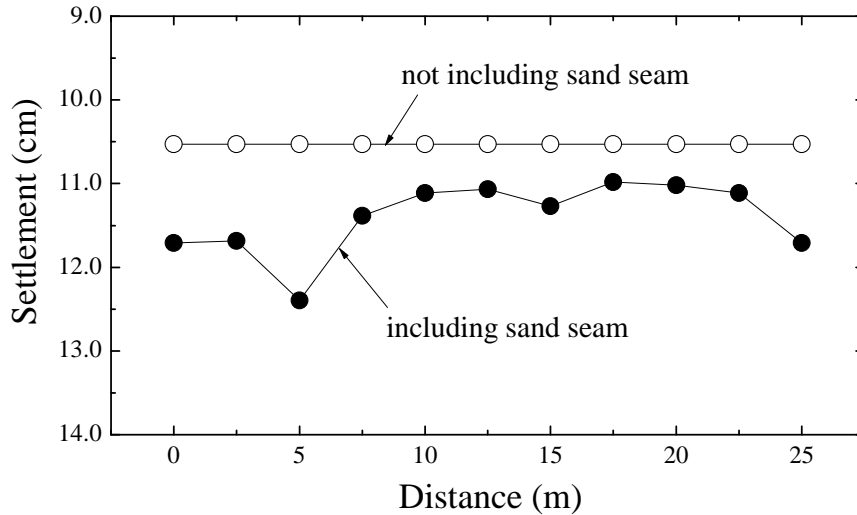


図7 載荷開始から10000日後の地表面沈下の分布

4. まとめ

本稿では、地質解釈（地盤断面）の違いが地盤解析結果に及ぼす影響について検討した結果を報告した。計算結果からも明らかなように、構造物設計の際は地質学的な視点と土木工学的な視点の両方から設計条件（地盤条件）を決定する必要がある。地質と土木工学の完全な連携の実現を図るためには、本稿で示したように構造物設計における地質学の重要性を強調し続けることも重要であるが、両者が連携した具体的な方法論の構築も必要であると考えられる。例えば、構造物設計の過程で地質技術者の論理的思考を取り入れることのできる方法論、エキスパートシステムと構造設計を融合させた計算プログラムの開発も有効であろう。

参考文献

- 1) Terzaghi, K. (1950): Mechanism of landslides, *Applications of geology to engineering practice*, geological society of America, New York, pp.83-123.
- 2) 日本応用地質学会編 (2011) : 原典からみる応用地質学 その論理と実用 (第4章 災害地質学), 古今書院, pp.81-82.
- 3) Poulos, H. G. (2005): Pile behavior - Consequences of geological and construction imperfections, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, No.5, pp.538-563.
- 4) Rollings, M. and Rollings, S. (2005): Geology: Engineer ignore it at your peril, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, No.6, pp.783-791.
- 5) 大野進太郎, 飯塚 敦, 太田秀樹 (2006) : 非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル, 応用力学論文集, Vol.9, pp.407-414.
- 6) 小林正樹 (1991) : サンドドレーンの効果に関する有限要素解析, 港湾技術研究所報告, Vol.30, No.2, pp.275-303.