

空洞押し拡げ問題における体積圧縮量とせん断剛性の関係

九州大学大学院工学研究科 正〇大野 司郎 F 落合 英俊

九州大学大学院工学研究科 正 安福 規之

1. はじめに

破碎性地盤では、粒子破碎に伴う大きな圧縮性のために支持力が低く、またその支持力評価が難しいとされている。Yasufuku & Hyde¹⁾は、そのような問題に対処するため、圧縮性を考慮できる球状空洞膨張理論²⁾に基づく杭先端の破壊モードを考慮した支持力 q_p の評価式(1)を提案した。

$$q_p = \frac{1}{1 - \sin \phi} \frac{3(1 + \sin \phi)}{3 - \sin \phi} \left[\frac{I_r}{1 + I_r \Delta_{av}} \right]^{\frac{4 \sin \phi}{3(1 + \sin \phi)}} \cdot \sigma_m \quad (1)$$

ここに、剛性指数 $I_r = G / \sigma_m \tan \phi$ 、 σ_m : 地盤内平均有効応力、
 ϕ : 土の内部摩擦角、 Δ_{av} : 平均体積ひずみ、 G : 土のせん断剛性

式(1)による支持力算定には、平均体積ひずみ Δ_{av} 、剛性指数 I_r (せん断剛性 G によって算定)、内部摩擦角 ϕ の材料定数を定める必要がある。それぞれに顕著な拘束圧依存性をもっているため、パラメータ決定法の違いによって算定した解が大きく異なるという問題がある。特に、算定式(1)の大きな特徴である体積圧縮パラメータは、算定結果に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、評価が難しいことも指摘されている。本報は、式(1)中のパラメータの感度分析を行い、地盤の圧縮性に着目した合理的な先端支持力評価法を考察するものである。なお、式(1)の詳細な導出および本報に示した実験結果および実験に用いた器具、材料は参考文献³⁾を参照されたい。

2. 材料の圧縮性に着目したパラメトリックな考察

式(1)に対し、地盤材料定数がとりうる範囲を考慮して、それぞれのパラメータの感度分析を行った結果、最も変化が大きいものが修正剛性指数 $I_{rr} = I_r / (1 + I_r \Delta_{av})$ であった。図1には、 I_{rr} と平均体積ひずみ Δ_{av} の関係を I_r についてパラメトリックに示している。縦軸 (I_{rr}) が対数であることに注意すると、平均体積ひずみ $\Delta_{av} > 0.02 \sim 0.03$ で修正剛性指数 I_{rr} に対して剛性指数 I_r の影響が大きく低減していることがわかる。すなわち、平均体積ひずみの微小な範囲ではせん断剛性成分が卓越し、圧縮性が大きくなるとせん断剛性の影響が極めて小さくなることを意味している。このパラメトリックスタディに基づき、まず平均体積ひずみについて調べる。CD 試験によって得られた等方・せん断それぞれの過程での体積ひずみを用いて、平均体積ひずみ Δ_{av} を Baligh の示した Expand プログラム³⁾によって求め、その算定結果と圧縮係数 $C_p = \Delta e / \Delta \log p$ との関係を示したものが図2である。なお、豊浦砂の平均体積ひずみはこの応力範囲で負(膨張側)であるため、ゼロと仮定している。ここで、圧縮係数は地盤の圧縮性を等方圧縮試験による圧縮曲線 $e \sim \log p$ の傾きによって評価したもの

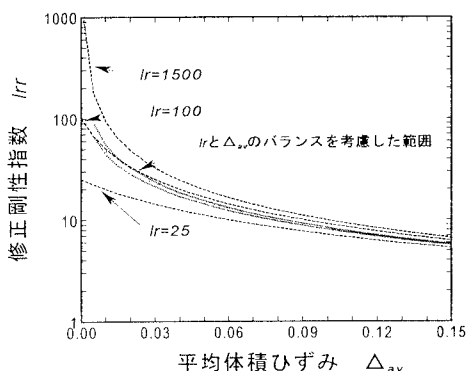


図1 修正剛性指数のパラメトリックスタディ

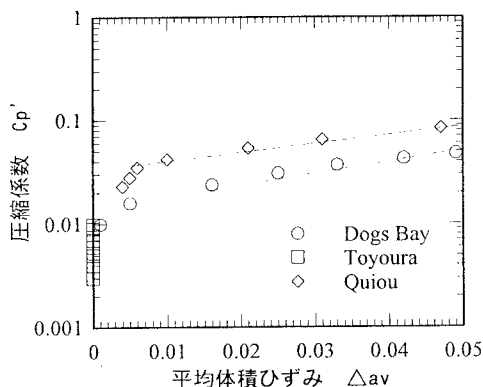


図2 圧縮係数と平均体積ひずみの関係

で(一般的に定義される圧縮指数と同じ), 一般的な土の挙動として圧縮係数が 0.01 にも満たないような微小な範囲は弾性挙動が卓越し(体積圧縮量小), 圧縮係数が大きくなると体積圧縮を生じて塑性的な挙動が卓越するという傾向は広く知られている。図2における傾向として, 圧縮係数は $\Delta_{av}<0.005$ なる小さな平均体積ひずみで急増し, $\Delta_{av}>0.005$ の範囲で概ねグラフ上の直線的な傾向があることがわかる。図1の平均体積ひずみの感度を参考にする, 図2の $\Delta_{av}>0.005$ において $\Delta_{av}=A\log C_p'+B$ (A, B は材料定数)として概ね近似できる。次に, 剛性指数の影響を調べてみる。土材料要素の応力~ひずみ挙動において, 一般に圧縮性の大きな材料ほど初期の立ち上がり(せん断剛性に相当)が鈍いことに着目すると, 平均体積ひずみ Δ_{av} とせん断剛性の間に相関があるものと推察される。図3は, 平均体積ひずみ Δ_{av} とせん断剛性から算出した剛性指数 I_r の関係である。プロットによれば平均体積ひずみが大きくなると剛性指数が減少してくることが明らかで, 4種の材料の特性値は斜線部の範囲内に収まっていることがわかる。この結果を利用して修正剛性指数の取りうる範囲を求め, 図1に描くと(黒塗り部)実際に地盤材料が取りうる範囲はごく狭いものであることがわかった。残る材料パラメータの内部摩擦角 ϕ' は, 本研究では材料固有の値, 限界状態の摩擦角 ϕ_{cv}' を用いることとする。そのように仮定すると, 土の要素の最低強度を確実に保証

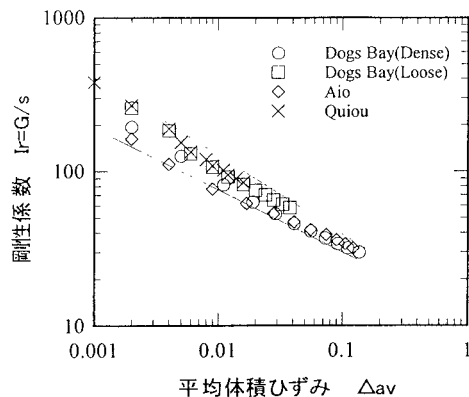


図3 剛性指数と平均体積ひずみのとりうる範囲

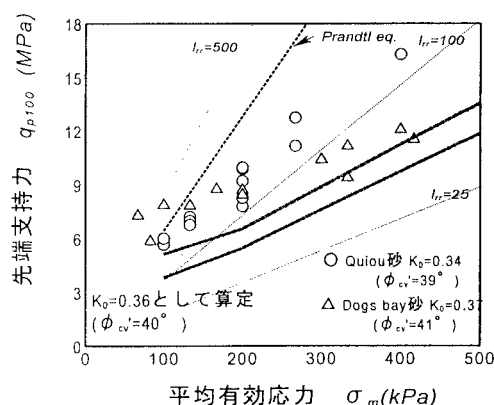


図4 圧縮性の卓越する($C_p>0.01$)砂の支持力算定

し, Vesic が示した球状空洞膨張理論の解を Closed Form で繰返し計算なしに容易に求められるという利点がある。これらのパラメータの決定結果をもとに, 式(1)を用いて破砕性砂である Quiou 砂, Dogs Bay 砂支持力推定を行ったものが図4である。それぞれの図中には修正剛性係数 I_{rr} のパラメトリックな算定値, Prandtl の先端支持力算定値(Terzaghi 式の N_q)および任意の鉛直・水平応力を付与した模型実験結果⁴⁾(杭径まで貫入した際の模型杭の载荷応力結果)をプロットしている。なお, 斜線部は図1に示した I_{rr} をもとに圧縮性をとり入れた算定結果である。地盤内の平均有効応力が 100kPa 程度と比較的低い場合には, 実験結果, それぞれの算定結果, ともに大差ないといえるが, 平均有効応力の増加にともなって支持力算定値の増加傾向がそれぞれの支持力算定結果によって大きく異なることがわかる。式(1)による支持力算定結果(斜線部)は, 修正剛性指数 I_{rr} が有効応力の増加に伴いせん断剛性成分, 体積圧縮成分の両方の効果で大きく低下するため, 実験結果の傾向をうまく表しているといえる。

3. おわりに 以上の結果から, 材料特性として圧縮係数 C_p が 0.01 以上の大きな圧縮性を示す場合には, 内部摩擦角, せん断剛性, あるいは, 圧縮係数を反映した圧縮パラメータがわかれば図3を利用することによって支持力推定ができることが明らかとなった。

- 参考文献 1) Yasufuku, N. and Hyde, A. F. L.: Pile end-bearing capacity in crushable sands, Geotechnique 45, No.4, pp.663-676, 1995.
2) Vesic, A.S.: Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, SMFE, ASCE, Vol.98, No.SM3, pp.265-290, 1972.
3) Baligh, M.M.: Cavity Expansion in Sands with Curved Envelopes, Journal of the GE Division, pp.1131-1146, 1976.
4) 清水, 落合, 安福, 大野(1998) 杭の先端支持力に及ぼす地盤内初期応力の影響, 九大工学集報, 71/2, pp.103-110.