

圧縮性の卓越した砂中の杭の荷重～沈下量関係の推定

九州大学工学部 正○清水 敬広 正 落合 英俊
九州大学工学部 正 安福 規之 正 大野 司郎

1. はじめに

カーボネイト砂等の石灰質砂は破碎性に富み、高い圧縮性を持つことで知られている。このような地盤を支持地盤として考える場合、その圧縮性に起因する過大な沈下と、発現する支持力が低いことが問題となる。杭の支持力算定における既存の理論では、極限支持力の評価のみでそれが発現されるまでに要する沈下量に関しては考慮されることが少ないため、カーボネイト地盤のように支持力が発揮されるまでに大きな沈下量を要する地盤では、杭の支持力だけでなく沈下量にも着目した評価が重要であると考えられる。

本報では、上述の観点から空洞膨張理論に基づく杭の先端支持力評価を行い、得られた支持力をもとにした荷重～沈下量関係の評価手法を提案し、その適用性を検討する。

2. 空洞膨張理論に基づく支持力評価

筆者らは杭先端の破壊形態の観察をもとに、まず図-1に示すような球状の破壊モードを仮定した。次いで、支持機構に材料の圧縮性を取り入れた空洞膨張理論の概念¹⁾を利用することによって、以下の先端支持力算定式を導出した。

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

ここで、 ϕ ：内部摩擦角、 I_r ：剛性指数、 Δ_{av} ：塑性域内における平均的な体積ひずみ、 σ_m ：平均主応力である。また、塑性域の平均的な体積ひずみ Δ_{av} は(2)式により与えられる等方圧縮過程およびせん断過程の体積ひずみの和を積分し、塑性域の体積で除することによって与えられる¹⁾。

$$v = C_1 (\sigma / \sigma_o)^m + C_2 + C_3 (\sigma / \sigma_o)^n \quad (2)$$

ここで、 σ_o は単位応力で、 C_1 および m は等方圧縮過程、 C_2 、 C_3 および n はせん断過程における体積変化特性を評価するための材料定数で、2～3本の三軸圧縮試験から決定される。また、式(1)中の内部摩擦角は、土の限界状態における強度定数 ϕ_{cr} を用いており、さらに、せん断剛性についてはせん断ひずみが0.1%における値 $G_{0.1}$ をとり、拘束圧の依存性を考慮して次式で近似している。

$$G_{0.1} = B (\sigma / \sigma_o)^l \quad (3)$$

ここで、 B 、 l は材料定数である。

表-1に上記の評価法により得られた材料定数の一覧を示す。

以上の先端支持力算定結果と模型杭載荷試験結果を用いて、予測された支持力が発揮されるのに要する沈下量 $(S/D)_{CE}$ と圧縮係数 C_p との関係を図-2に示した。ここで C_p は等方圧縮試験から得られる間隙比 e ～平均主応力 $\log \sigma_m$ 曲線の任意の σ_m における接線勾配として与えられ($C_p = \Delta e / \Delta \log \sigma_m$)、 C_p が大きいほど拘束圧の増加に伴う体積圧縮が著しくなることを示す²⁾。図中にはシリカ系の豊浦砂、カーボネイト系のQuiou砂、Dogsbay砂の3種類の砂のデータを示している。この図より、豊浦砂には多少ばらつきがあるものの、 C_p と $(S/D)_{CE}$ には一義的な関係があり、 C_p の増加に伴い $(S/D)_{CE}$ が減少することがわかる。また、カーボネイト砂のように C_p が

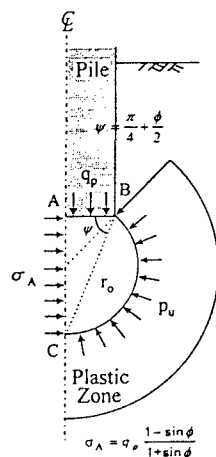


図-1 破壊モード

表-1 材料定数

Sample	C_1	C_2	C_3	m	n	B	l	ϕ_{cr}
Toyoura Sand	0.0038	-0.0250	0.0073	0.5650	0.3760	361	0.49	31°
Quiou Sand	0.0130	-0.0400	0.0430	0.6310	0.4640	213	0.38	39°
Dogsbay Sand	0.0090	-0.0500	0.0308	0.7180	0.6600	192	0.56	41°

大きい、すなわち圧縮性の大きな材料では $(S/D)_{CE}$ の値が小さく、理論値に到達する沈下量が少ないことがわかる。つまり、図-1に示すような破壊モードが発現するのに要する沈下量が小さいことを示唆している。

3. 荷重～沈下曲線の推定

荷重沈下曲線の近似式は、図-2から求まる $(S/D)_{CE}$ を基準沈下量 x_0 として用いて、以下のように仮定した。

$$q_p = T_1 \left(\frac{\Lambda x/x_0}{1 + \Lambda_{av} \Lambda x/x_0} \right)^{T_2} \quad (4)$$

$$T_1 = \frac{1}{1 - \sin \phi} \frac{3(1 + \sin \phi)}{3 - \sin \phi} \sigma_m \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{4 \sin \phi}{3(1 + \sin \phi)} \quad (6)$$

ここで、 x は S/D 、 T_1 、 T_2 は内部摩擦角の関数として与えられる係数、 Λ は材料定数である。この式の特徴として、 $x \rightarrow \infty$ としたときの極限值は、式(1)において $Ir \rightarrow \infty$ としたときの値と等しくなる。従って、基準沈下量 x_0 と定数 Λ のバランスにもよるが、 x と x_0 がほぼ等しくなる

とき式(1)の理論値と式(4)の仮定式とが一致することになる。また、豊浦砂、Quiou砂、Dogsbay砂の Λ の値はそれぞれ750、150、50としている。図-3に実測値と比較した各試料の算定結果を示す。(a)が豊浦砂、(b)がQuiou砂、(c)がDogsbay砂のもので、いずれも相対密度 $Dr=80\%$ 、上載圧 $\sigma_v=100, 200, 400\text{kPa}$ に対する結果である。いずれの砂の場合においても幾つかの上載圧 σ_v に対しては予測値が実測値と比較的良好な対応を示すことがわかる。今後、推定式の精度とパラメータの決定法に関して検討する必要がある。

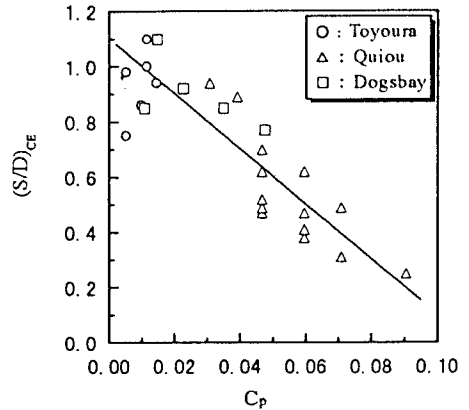


図-2 正規化沈下量と圧縮係数の関係

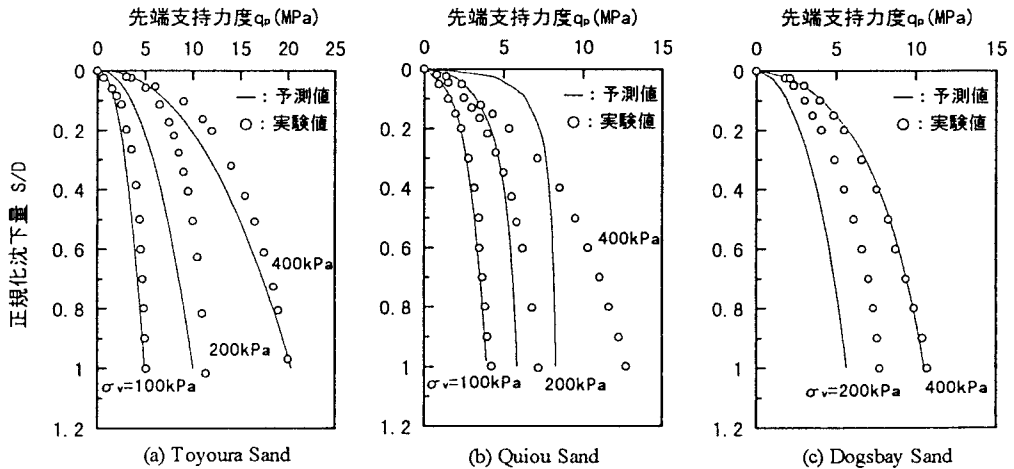


図-3 先端支持力と正規化沈下量の関係

4. まとめ

空洞膨張理論に基づく杭の先端支持力の評価を行い、また、荷重～沈下量関係を示す推定式を提案し、実験値との比較を行った。結果をまとめると以下ようになる。

(1) 圧縮係数と推定支持力値に至る杭の沈下量には一義的な関係がみられ、圧縮性が増大するほど支持力発現沈下量 $(S/D)_{CE}$ が減少する傾向にある。(2) 提案式による荷重～沈下量関係は幾つかの上載圧に対する実験データと良好な対応を示す。今後、推定式の精度とパラメータの決定法に関する検討が必要である。

参考文献：1) Vesic, A.S.: Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, Proc. of ASCE, Vol.98, No. SM3, pp.265-290, 1972. 2) 安福他：圧縮性の卓越した砂中の杭の先端支持力とその評価, 土木学会論文集, No.505, pp.191-200, 1994.