

Ⅲ - B6

圧縮性を考慮した砂中の杭の先端支持力算定法に関する考察

九州大学工学部 正 大野司郎 正 落合英俊 正 安福規之

1. はじめに 破砕性地盤を対象とした杭の先端支持力の算定に際しては、破砕性に起因する地盤の圧縮性を考慮することの重要性が指摘されている。著者らは、圧縮性を取り入れた杭の先端支持力の算定法に関して、Prandtl系の支持力公式に圧縮係数 C_p 'を用いて修正する経験的な方法¹⁾と空洞膨張圧理論による方法²⁾の両面から検討している。本報は、両者の支持力係数に関する比較・検討を行い、経験的なアプローチと空洞膨張圧理論による方法との整合性を考察するものである。

2. 杭の先端支持力算定法 表1は、杭の先端支持力の算定式をまとめたものである。式(1)は杭先端地盤の破壊モードを全般せん断破壊と仮定して導出されたPrandtl系の支持力公式であり、支持力係数 N_q^* はMohr-Coulombの破壊基準に従う強度定数 ϕ' を用いたものである。式(2)は限界状態の強度定数 ϕ_{cv}' を用いて式(1)の ϕ' を ϕ_{cv}' とし、 N_q^* を定数 N_q^* として扱い、実験事実に基づいて支持力係数 N_q を F_f 倍修正するものである。ここで、修正係数 F_f は模型実験で得られた正規化沈下量（沈下量／杭径）100%の時の杭先端応力 $q_{p100\%}$ を上載圧 σ_v' で除し、それをさらにPrandtlの支持力係数 N_q で除した値として定義される。つまり、 $F_f = N_q^* / N_q$ ； $N_q = q_{p100\%} / \sigma_v'$ である。また、式(3)は杭先端地盤の破壊モードの観察に基づき³⁾、地盤がパンチング破壊すると仮定して空洞膨張圧理論により導出されたものである²⁾。その式の中で N_q は強度定数 ϕ_{cv}' と静止土圧係数 K_0 から構成されるが、 $K_0 = 1 - \sin \phi_{cv}'$ の関係⁴⁾を用いて K_0 値の関数として整理されている。

全ての式に共通して、先端支持力算定式では、杭先端位置の鉛直有効応力 σ_v' に掛かる支持力係数 N_q の取り扱いが最も重要な部分であるといえる。

3. 経験的な杭の先端支持力評価法 著者らが示した経験的な支持力の評価法¹⁾は、等方圧縮時の圧縮係数 C_p ' (= $de / \log(dp)$) : e ; 間隙比, p ; 平均有効応力) から F_f を推定し、それにより先端支持力度 q を求めようとする方法である。この方法の特色は、試料、密度、および土かぶり圧の違いによらず、 C_p 'と F_f との間にある一義的な関係が存在すると思われるところにある。図1は4種類の試料における模型杭の載荷試験の結果を F_f と C_p 'の関係で整理したものであり、これには、土かぶり圧や密度の違う実験結果が全て含まれている。 F_f と C_p 'の間には試料によらず反比例のユニークな関係があることがわかる。また、図1の関係を近似式で表すと、

$$F_f = 0.012 / C_p' + 0.1 \quad \dots (4)$$

である。ここで、圧縮係数 C_p 'は応力レベルに依存するパラメータであるため、第1項は拘束圧の影響を受ける項、第2項は拘束圧によらない定数項から成り立っていることがわかる。

類似した結果はコーン貫入値 q_c とオedometa試験の体積圧縮係数 m_v の関係で指摘されている⁵⁾。それによれば、 q_c と m_v の相関はある程度ばらつくものの、経験的な比例定数 α を用いて、概ね

$$q_c = \alpha \cdot 1 / m_v \quad ; 1.5 \leq \alpha \leq 4.0 \quad \dots (5)$$

表1 支持力算定式と支持力係数

$q = N_q^* \sigma_v'$; $N_q^* = \tan^2(\pi/4 + \phi'/2) \cdot \exp(\pi \tan \phi')$	(1)
$q = F_f N_q \sigma_v'$; $N_q = \tan^2(\pi/4 + \phi_{cv}'/2) \cdot \exp(\pi \tan \phi_{cv}')$	(2)
$q = N_q^{**} \sigma_v'$; $N_q^{**} = \left\{ \left(\frac{1+2K_0}{2+K_0} \right) \left(\frac{2-K_0}{K_0} \right) [I_{rr}]^{\frac{4(1-K_0)}{3(2-K_0)}} \right\}$	(3)

ここに、 q : 先端支持力度、 N_q^* , N_q , N_q^{**} : 支持力係数、 σ_v' : 鉛直応力、 ϕ' : 破壊時の強度定数、 ϕ_{cv}' : 限界状態の強度定数、 K_0 (= $1 - \sin \phi_{cv}'$): 静止土圧係数、 I_{rr} : 修正剛性係数 である。

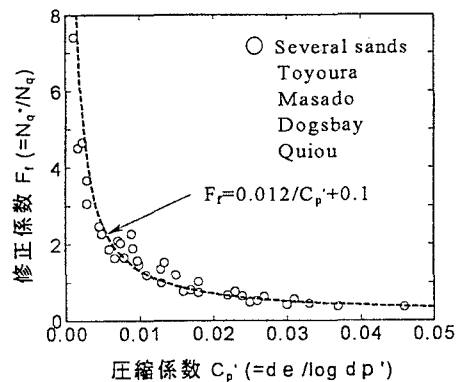


図1 圧縮係数と修正係数の関係

杭、圧縮性、先端支持力、強度定数、拘束圧

〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1 TEL 092-642-3285 FAX 092-642-3285

としている。ここで、コーン先端が比較的鈍角な場合には平坦杭との差はほとんどないことを考慮し、式(2)と式(5)の先端支持力 q と q_c を等置すると F_f は

$$F_f = \frac{q_c}{N_q} = \frac{\alpha}{N_q} \frac{1}{m_v} \quad \dots (6)$$

と表される。式(6)の支持力係数 N_q は、限界状態の強度定数 ϕ_{cv} を用いるため定数扱いとなり、体積圧縮やせん断剛性などの考慮すべき拘束圧依存性が定数 α や体積圧縮係数 m_v に含まれることに注目したい。また、 $m_v \propto C_p'$ であるので式(4)と式(6)は本質的に同意であると考えられ、 F_f は定数 α が1.5～4.0の範囲をもつとしているから、式(4)中の定数項は式(6)の α に含まれているといえる。この方法は実験結果を良く反映しているが、式(2)を用いる際に杭先端の地盤の破壊モードを全般せん断破壊と仮定しているため、あくまでも経験的な取り扱いをしなければならない。

4. 空洞膨張圧理論による杭の先端支持力算定式

模型杭の載荷試験を行い、杭径程度貫入した際の地盤の破壊モードはパンチング破壊となる。その破壊モードとともに圧縮性を考慮した理論式として空洞膨張圧理論をもとに式(3)が組み立てられている²⁾。式(3)において K_0 は限界状態の強度定数から求められると仮定されており、修正剛性係数 I_{rr} は体積圧縮特性、せん断剛性が関わっている。（詳細は2)を参照）

図2、図3は表1の式(3)を用いてそれぞれ $\phi_{cv}'=30^\circ$ 、 40° の場合の、 I_{rr} の変化と応力レベル毎に推定される極限支持力度を示したものである。図中では、式(2)で $F_f=1$ を仮定した場合の結果および実験結果もまた示されている。

実験結果は図2が豊浦砂($\phi_{cv}'=31^\circ$)、図3がDogs bay砂($\phi_{cv}'=41^\circ$)およびQuiou砂($\phi_{cv}'=39^\circ$)の結果である。なお、実験結果は正規化貫入量100%を極限支持力(q_{p100})とみなしている。式(2)、(3)では ϕ_{cv}' を用いるため、強度定数に関わる支持力係数が定数となる。式(3)で推定される結果は I_{rr} が大きくなると支持力係数が増加する平行な曲線群となり、式(2)では F_f が変化することによって I_{rr} と同様の变化を表現できる。すなわち、せん断剛性と体積圧縮に関わる効果を F_f が表していると判断できる。図2における豊浦砂の結果は対象とした応力域では圧縮性が比較的小さいために、対応する実験結果が修正剛性係数 $I_{rr}=1500$ 一定のラインに沿うような形になったものと考えられる。また、図3の結果から高い圧縮性をもつDogs bay砂およびQuiou砂の実験結果は、修正剛性係数 I_{rr} が応力レベルに応じて徐々に低下する傾向を間接的に表している。

4. おわりに 圧縮性を取り入れた杭の先端支持力の算定法に関して、Prandtl系の支持力公式を用いて修正する経験的な方法と空洞膨張圧理論による方法の整合性を考察し、①修正係数が拘束圧の影響を受ける項と拘束圧によらない項から成っていることを示した。また、②空洞膨張圧理論による方法の修正剛性係数は経験的な手法による修正係数の特性を説明できることがわかった。

最後に、本研究の一部は前田記念工学振興財団研究助成金の補助を受けたことを付記する。

参考文献 1) 安福ら：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/III-29, pp.191-200, 1994.12. 2) 安福ら：圧縮性を考慮した砂中の杭の先端支持力と破壊メカニズム、第32回地盤工学研究発表会、1997（投稿中）。3) 清水ら：圧縮性を有する砂中の杭の先端地盤の局所変形、第52回土木学会年次学術講演会講演概要集、1997（投稿中）。4) 落合：砂の静止土圧係数、土質工学会論文報告集、Vol.16/No.2, pp.105-111, 1976. 5) J.K.Mitchellら：In situ measurement of volume change characteristics, State-of-the-art Report session V, GE, ASCE, pp.279-345, 1975. 6) A.S.Vesic: Bearing capacity of shallow foundations, Foundation engineering handbook, pp.121-147, 1975.

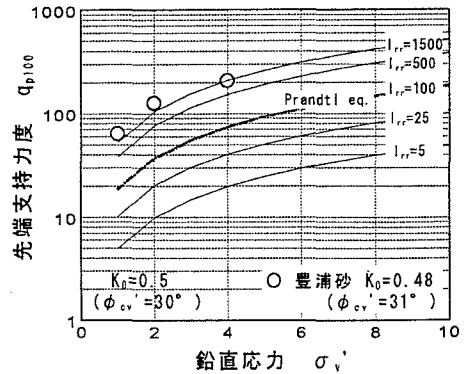


図2 鉛直応力～先端支持力度 ($K_0=0.5$, $\phi_{cv}'=30^\circ$)

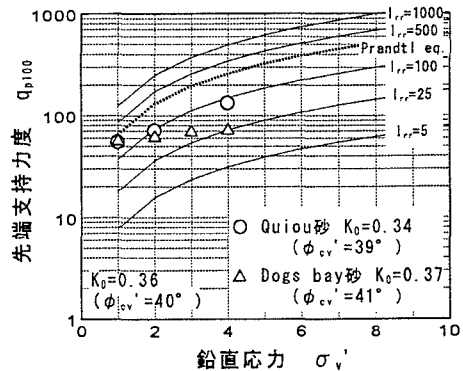


図3 鉛直応力～先端支持力度 ($K_0=0.37$, $\phi_{cv}'=40^\circ$)