

応力緩和に着目した打込み杭の周面摩擦力の算定

九州大学大学院 正○安福規之 正 落合英俊
九州大学大学院 正 大嶺 聖 学 金川博幸

1. はじめに

杭の周面摩擦力は、実務設計においては、通常標準貫入試験による N 値を用いて評価されているが、この手法は経験式に基づくものであり、力学的な根拠は明確にはない。支持力発現のメカニズムを考慮したバランスの取れた支持力算定法の確立は、合理的な設計を行う上で重要であるし、また設計の自由度を高める上でも必要である。著者らは、こうした考えから杭の周面摩擦力に関して地盤力学的な考察に基づく検討を行っている¹⁾。本研究は、打ち込み時の杭周辺地盤の応力増加と打ち込み後の経時的な応力緩和に着目して、周面摩擦力の算定法を検討したものである。

2. 打ち込み時の周面摩擦力の考え方

1) 基本式

打ち込み杭の周面摩擦力は、一般に次式で与えられる。

$$f_s = c'_s + p_{uc} \tan \phi'_s \quad (1)$$

ここに、 c'_s :土の粘着力、 ϕ'_s :土と杭の間の摩擦角

p_{uc} :水平応力、 σ'_v :垂直応力である。

著者らは、場所打ち杭の周面摩擦力算定に際し、式(1)中の地盤物性値として、限界状態における強度定数を用いるのが有用であることを地盤力学的考察に基づいて示している¹⁾。この考え方が打ち込み杭に対しても有効であるとする、土の限界状態では粘着項は存在しないので、式(1)は、次式となる(図1参照)。

$$f_s = p_{uc} \tan \phi'_{cv} \quad (2)$$

ここに、 ϕ'_{cv} は限界状態における土の摩擦角である。さて、垂直応力 σ'_v と水平土圧係数 K を用いて水平応力 p_{uc} を表すと、

$$p_{uc} = K \sigma'_v = K_0 \sigma'_v + \Delta \sigma'_{ho} \quad (3)$$

を得る。ここに、 $\Delta \sigma'_{ho}$ は杭が打込まれたときの水平応力の増加分である。つまり杭打設直後の周面摩擦力の発現に寄与する水平応力は、初期の応力にこの増加分が付加された状況を想定する。

2) 杭打ち込み時の水平応力 p_{uc} の考え方

杭の貫入によって土が押し拡げられる問題を考える。土を図2のような均質な等方弾・完全塑性体とし、図3に示すように内径が R_i から R_u まで円柱状に押し拡げられるとして、Vesicの円柱空洞の考え方²⁾を適用すると、 p_{uc} は結果として以下のように表される。

$$p_{uc} = K \sigma'_v$$

$$K = \left(1 + \sin \phi'_{cv}\right) \left(\beta I_{rr}' \sec \phi'_{cv}\right)^m \frac{(1 + 2K_0)}{3} \quad (4)$$

$$I_{rr}' = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta \sigma'_{av} \sec \phi'_{cv}}, \quad I_r = \frac{3G}{(1 + 2K_0) \sigma'_v \tan \phi'_{cv}}$$

$$m = \frac{\sin \phi'_{cv}}{1 + \sin \phi'_{cv}}, \quad \beta = 1 + \Delta \sigma'_{av} - \alpha^2, \quad K_0 = 1 - \sin \phi'_{cv}$$

ここに、 I_{rr}' :修正剛性指数、 I_r :剛性指数、 G :せん断剛性、 $\Delta \sigma'_{av}$:塑性域における平均的体積ひずみ、 K_0 :落合による静止土圧係数³⁾である。

また、 α は、初期の空洞の内径 R_i と押し拡げ後の空洞の内径 R_u の比として、

$$\alpha = R_i / R_u \quad (5)$$

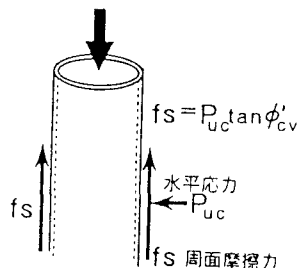


図1 打ち込み杭の周面摩擦力の考え方

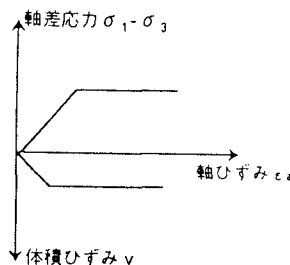


図2 仮定した応力ひずみ関係

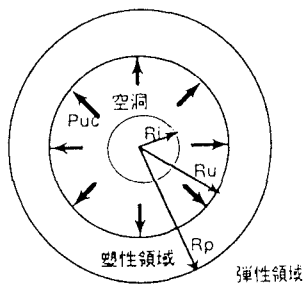


図3 円柱空洞のイメージ図

で定義される。この α は、杭貫入時における地盤の押し広げの程度を表すパラメーターであり、 $\alpha=1$ であれば物理的な押し広げはないということになる。図4は、 α が0.9から1.0まで変化したときの K/K_0 の変化の様子の一例を示したものである⁴⁾。これから、一般的な傾向として、 α の増加と共に、 K/K_0 の値は小さくなることが知れる。

3. 応力緩和を伴う水平応力と周面摩擦力の算定

式(3)に示したように、杭貫入直後の周面摩擦力に直接寄与する水平応力の増分を $\Delta\sigma'_{h0}$ とおくと、この応力は通常、時間の経過と共に減少していくと考えられる。図5は、模型杭を貫入させたときの杭周面近傍における水平応力の時間的な変化の様子を示している⁴⁾。この図から、水平応力の増加分は、時間の経過と共に減少し、ある値に収束する傾向を示す。また、その収束値は、杭の材質によって異なることも理解できる。本研究では、この最終的な水平応力の収束値を $\Delta\sigma'_h$ とおき、貫入直後の $\Delta\sigma'_{h0}$ と次式で関係づける。

$$\Delta\sigma'_h = n\Delta\sigma'_{h0} = n(K - K_0)\sigma'_v \quad (6)$$

ここに、 n は応力緩和の程度を規定するパラメーターであり、1よりも小さく、図5からは0.2から0.4程度にあることがわかる。この関係を式(3)に代入し、若干の整理をすると式(6)の右辺の第2項の式を得る。さらに、この関係を式(1)に代入し、整理すると杭打設による応力増分とその後の応力緩和の特性を取り入れた周面摩擦力の算定式が得られる。すなわち、

$$f_s = \{K_0 + n(K - K_0)\}\sigma'_v \tan\phi'_{cv} = \bar{K}\sigma'_v \tan\phi'_{cv} \quad (7)$$

であり、 K と K_0 の定義は、式(4)中に示されている。

4. 提案式の特徴

式(7)を用いて f_s を算定するためには、 ϕ'_{cv} 、 σ'_v 、 G 、 $\Delta\sigma'_v$ 、 α と n の6つのパラメーターを具体的に決定することが必要である。 ϕ'_{cv} 、 σ'_v 、 G 、 $\Delta\sigma'_v$ の4つの定数についての考察は参考文献5)で詳しくなされているので、ここでは、特に、応力緩和の程度を規定する定数 n に着目して、式(7)で得られる水平土圧係数 $\bar{K}$ の特色を解析的に検討する。図6は、 n をパラメーターにして描いた $\bar{K}/K_0$ 値と α の関係をまとめたものである。計算に必要な定数は、図中にまとめて示している。この図から、応力緩和量の増大、すなわち n の減少に伴う $\bar{K}/K_0$ の低下の様子が理解できる。 $n=0$ 、つまり応力緩和により初期の水平応力に戻る場合には、 $\bar{K}/K_0$ は押し広げの程度に関わらずつねに1.0である。

5. まとめ

本報では、応力緩和特性を反映した打込み杭の周面摩擦力の算定法を提示した。杭貫入時における地盤の押し広げの程度を表すために、円柱空洞膨張の考え方に押し広げの程度を定めるパラメーター α を導入したと応力緩和特性を評価するための指標 n を取り入れたことが本算定法の特徴である。この算定式を通して、 α と n の決め方が、打込み杭の支持力算定には重要であることを示した。

<参考文献> 1) 安福, 落合, 前田: 限界状態摩擦角に着目した場所打ち杭の周面摩擦力算定法, 土木学会論文集, No.617/III-46, pp.89-100, 1999. 2) Vesic, A.S.: Expansion of cavities in infinite soil mass, J. Soil Mech. Fdn. Engng ASCE 98, SM3, pp.265-290, 1972. 3) 落合: 土の静止土圧係数, 土質工学会論文報告集, Vol.16, No.2, 1976. 4) 金川ら: 砂地盤における杭貫入に伴う経時的側方応力緩和特性, H12年度西部支部研究発表会, 2001 (投稿中). 5) 安福, 落合, 大野: 圧縮性を考慮した杭先端支持力の実用的評価式とその適用, 土と基礎, Vol.49, No.3, 2001.

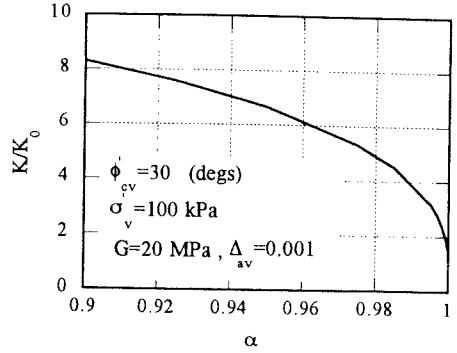


図4 K/K_0 と α の関係

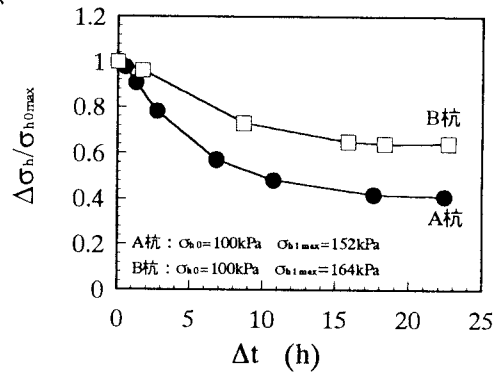


図5 杭周面近傍の水平応力の時間変化

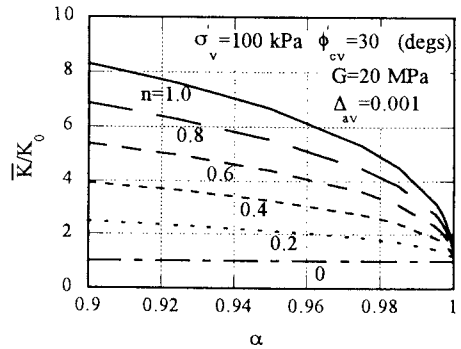


図6 応力緩和に着目した $\bar{K}/K_0$ と α の関係