

弾塑性連成モデルによる鋼管杭の閉塞効果の評価

喜多直之 崎本純治
平間邦興

Estimation of Sand Plug in Open-end Steel Pipe Pile Based on Elasto-plastic Model

Naoyuki Kita Junji Sakimoto
Kunioki Hiram

Abstract

The constitutive model for the bearing sand layer and the failure of ground pose problems in FEM analysis of bearing capacity of a pile. Especially, the behavior of an open-end steel pipe pile involves difficulties in dealing with disturbance of the ground due to pile driving and the effect of sand plug occurrence. Firstly in this paper is reported applications of an elasto-plastic model to two tests on an open-end steel pipe pile. The effects of pipe diameter and thickness of bearing layer on a sand plug are then examined analytically. The results are as follows: ① A sand plug is retained when penetration depth to the bearing layer is more than five times the diameter of the pipe pile. Therefore the current design method may be considered to be appropriate. ② When thickness of the bearing layer is less than three times the diameter of the pipe pile, the bearing capacity is mainly influenced by the underlying layer rather than the sand plug.

概要

杭の鉛直支持力解析では、支持砂層の構成則、地盤の破壊の評価などが問題になるが、中でも開端鋼管杭はこれらの要因に加えて杭打設による地盤の乱れ、先端閉塞効果の取扱いが難しい。この報告では、粘性土、砂質土の両方に対して優れた弾塑性モデルを使用したプログラムを導入し、杭打設の影響を考慮した条件設定を行った上で、まず2例の開端鋼管杭載荷試験についてその適用性を検証した。次に支持層への根入れ長が鋼管径の5倍以上という条件において鋼管径と支持層厚さが先端閉塞効果に与える影響について解析的に検討を加えた結果、① 鋼管径によらず先端プラグが保たれており、現行の設計法は妥当であると考えられること、② 支持層が鋼管径の3倍程度よりも薄い場合、支持力は先端閉塞効果よりもむしろ下部粘土層の影響を強く受けることがわかった。

1. はじめに

開端鋼管杭は通常ハンマを用いた打撃工法によって打設されるため、支持特性を評価する際に地盤の乱れの影響を無視することができない。最近では波動理論を用いた解析が施工管理の有力な手法として実績を挙げているが、この方法によって打込み時の地盤の乱れの程度や応力状態の変化を知ることは現状では困難である。また、開端鋼管杭の支持力は打込み時に管内に侵入する土の閉塞状態に大きく影響されることが知られている。閉塞の程度は鋼管の仕様や地盤条件によって変化するため、その挙動は非常に複雑となる。

この報告では、杭の支持力解析を精度よく行うことが

可能である弾塑性連成プログラム¹⁾を新たに導入し、まず開端鋼管杭の鉛直支持力解析への適用性を検証する。そのために杭打設による地盤状態の変化を考慮した条件設定を行う。次に、鋼管径と支持層厚さが先端閉塞効果に与える影響について解析的に検討し、その結果について述べる。

2. 解析モデル

2.1 解析手法

今回の解析に用いたプログラムでは、粘性土、砂質土それぞれに対して松井・阿部モデル²⁾、安福モデル³⁾を用いている。これらのモデルは土質材料の力学挙動を的確に表現しうる弾塑性構成モデルである。松井・阿部モデ

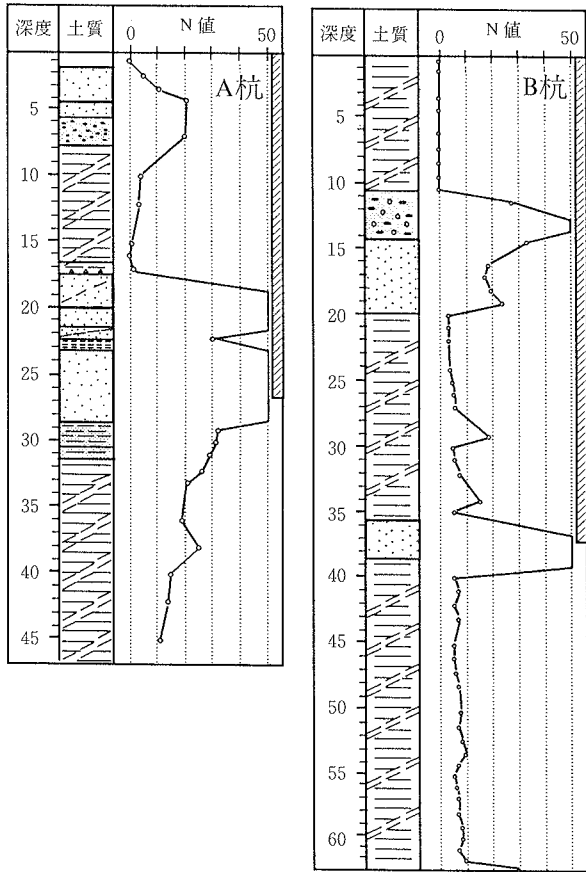


図-1 地盤構成

表-1 入力定数

支持砂層 (A杭)					
l	0.56	N_c	1.05	α_h	1.8
h	0.28	M	1.636	α_p	1.75
ka	0.0049	α	0.5	b	0.9
下部粘土層 (A杭)					
λ	0.094	Ma	1.2	α_{ao}	0.3
κ	0.0094	ηk_o	0.75	α_{af}	1.0
ジョイント (A杭)					
垂直剛性	K_n	kgf/cm^3	1.0×10^6		
せん断剛性	K_s	kgf/cm^3	1.0×10^6		
粘着力 (内面)	c_{in}	kgf/cm^2	0.72~1.09		
粘着力 (外面)	c_{out}	kgf/cm^2	0.003~0.82		
摩擦力 (内面)	ϕ_{in}	deg	40 (根入れ部)		

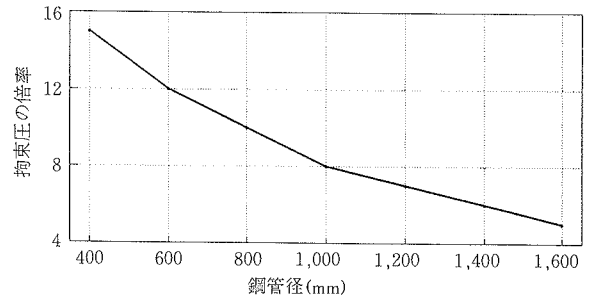


図-2 鋼管径と拘束圧の関係

ルは降伏曲面の特異点をなくすことによって安定した K_0 圧密解析を行うことができる点に特徴がある。また、安福モデルは粒子破碎による内部摩擦角の減少を考慮しており、広範な応力レベルに対応することができる。さらに、杭の鉛直支持力解析のために軟化パラメータの導入や、限界状態に達した要素の取扱いなどに工夫がされている。

2.2 モデル化

解析対象としたA杭、B杭はいずれも臨海地盤に施工された開端鋼管杭である。それぞれの地盤構成を図-1に示す。A杭は管径 $\phi=1,600$ mm、杭長 $l=26.65$ m、肉厚 $t=24$ mm、B杭は管径 $\phi=1,500$ mm、杭長 $l=37.1$ m、肉厚 $t=22$ mmである。メッシュ分割は軸対称で行い、特に杭先端付近では詳細な分割としたため、要素数は約2,500となった。地盤の材料定数は地盤調査結果からできる限り厳密に決定したが、情報の不足するものについては経験的な値を用いた。また、杭と地盤の間にはジョイント要素を挿入しており、強度については載荷試験結果をそのまま用いた。主な入力定数の一例を表-1に示す。

開端鋼管杭を打設したときの地盤の乱れについて、すべての要因を考慮することは不可能であるため以下のように考える。①打撃による間隙水圧の上昇は杭施工後の放置期間中に消散する。②機械的な乱れはシキソトロピ

一的な効果によって回復する。③振動などによる締め固め効果は無視できる程度に小さい。以上の点を仮定することにより、ここでは杭が貫入するときの排土効果による拘束圧の増加のみを考慮する。具体的には、拘束圧を考慮しない状態で杭に鉛直変位を与え、そのときの支持層の拘束圧の変化を各杭径について求めるという方法を解析的に行った。その結果を参考に、単位体積重量から求めた初期応力に対する拘束圧の倍率を図-2のように決定した。鋼管径 1,500 から 1,600 mm では拘束圧は初期応力に対して5倍程度となっている。参考までに、A杭はラム重量 8 tf のディーゼルハンマによって落下高 2.5 m で打設され、載荷試験までの放置期間は50日、B杭はラム重量 7.2 tf のディーゼルハンマによって落下高 2.4 m で打設され、放置期間は35日であった。

3. 解析結果

3.1 実測値との照合

A杭、B杭それぞれの杭頭および杭先端の荷重沈下関係、軸力分布を図-3から図-5に示す。杭頭、杭先端ともに解析値は実測値の傾向によく対応していることがわかる。B杭の極限状態における実測荷重の減少は急激

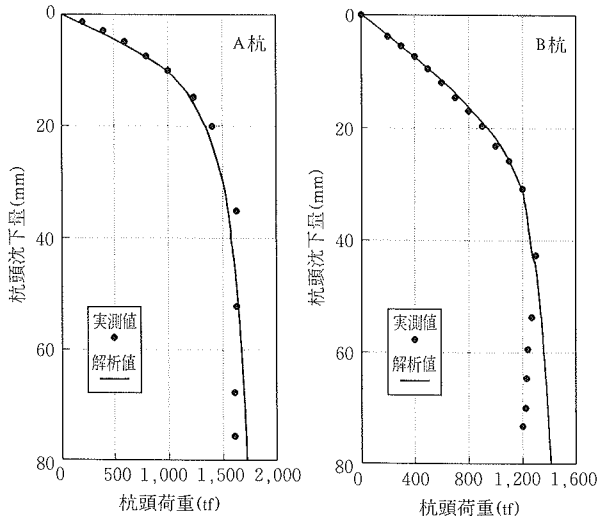


図-3 杭頭の荷重沈下関係

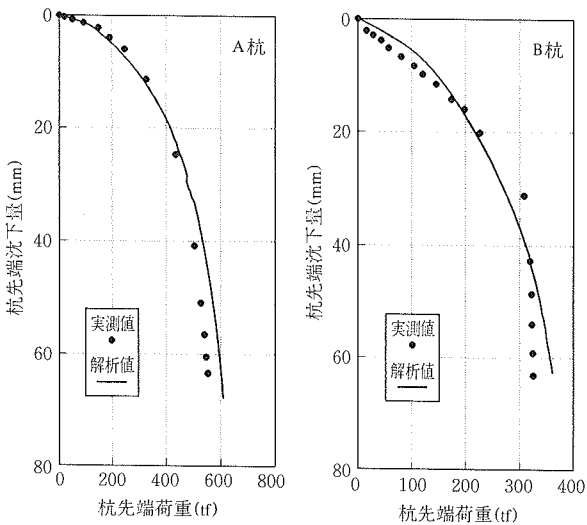


図-4 杭先端の荷重沈下関係

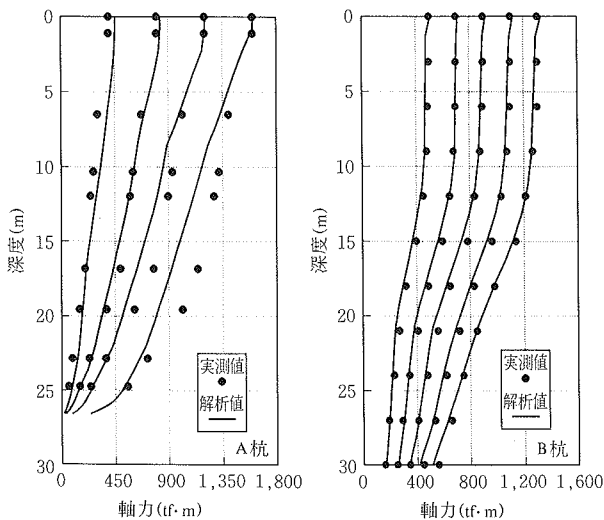


図-5 軸力分布

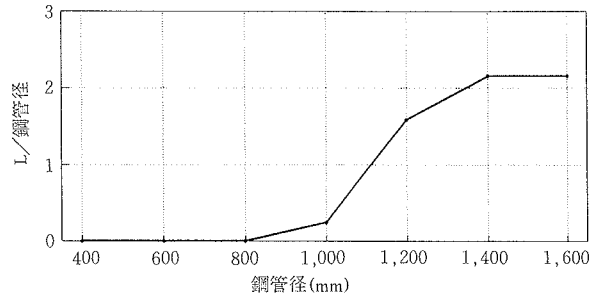


図-6 鋼管径の影響

な沈下に起因するものであり、FEM 解析によって再現することは難しいと考えられる。杭頭における荷重沈下関係は主として周面摩擦力の発現状況に支配されることから、いずれのケースも杭周面、杭先端の挙動がともによく評価できていると考えられる。これは軸力分布の変化状況からも確認できるが、A 杭の中間部分では杭の内面、外面の摩擦抵抗の評価に改善の余地があると思われる。以上のことから総合的に見て、このプログラムの適用性が確認でき、材料定数、初期応力状態などの解析条件の設定もほぼ適切であると判断される。

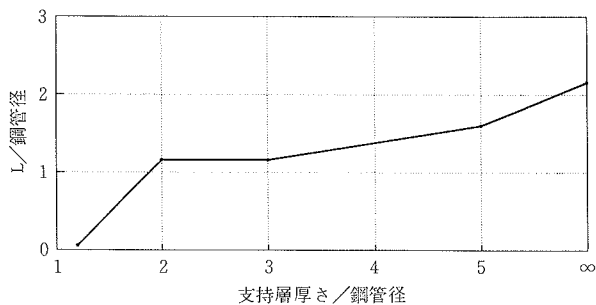
3.2 鋼管径の影響

現行の設計法（道路橋示方書下部構造編）では、鋼管径に関係なく支持層への根入れ長が径の 5 倍以上あれば完全閉塞杭と考えることになっているが、径の大きい開端鋼管杭の先端閉塞効果の影響については十分に検討されていない。そこで、鋼管径が先端閉塞効果に与える影響について数値解析的に検討する。鋼管径は 400 mm から 1,600 mm まで 200 mm ピッチで 7 ケースとする。支持層は十分に厚く、支持層への根入れ長は鋼管径によらず径の 5 倍以上確保されている。

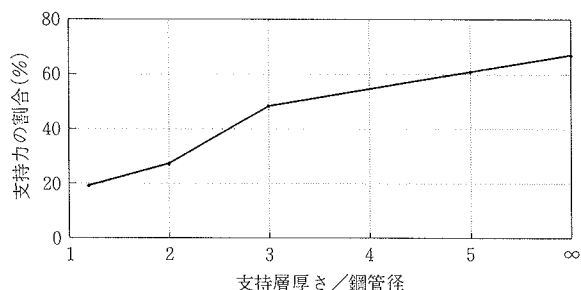
先端閉塞の程度を示す一つの指標として、ここでは杭先端沈下量が径の 10% に達した時点における、支持層に根入れした部分の鋼管内面ジョイント要素がモビライズした（切れた）割合を用いる。ジョイント要素が切れた長さ L と鋼管径 ϕ との比は鋼管径に対して図-6 のような関係になる。径が 800 mm 以下ではジョイント要素がほとんど切れておらず、完全閉塞に近い状態であると考えられる。一方、径が大きくなると径の 2 倍以上のジョイント要素が切れていることがわかる。この解析では支持層への根入れ長が杭径の 5 倍以上あるため、支持層内のすべてのジョイント要素が切れた状態には至っておらず、いずれのケースも先端プラグが保持されている。したがって、現行設計法の設定はこの結果から見る限り適切であるといえる。しかし、根入れ長によっては鋼管径の違いが支持力度に大きな影響を与えるものと推測される。

3.3 支持層厚の影響

開端鋼管杭の先端閉塞効果は通常、十分に厚い支持層に支持された杭について検討する。しかし、互層地盤などでは十分な厚さの支持層が存在しないために不完全支



図一七 支持層厚の影響



図一八 支持層厚と支持力の関係

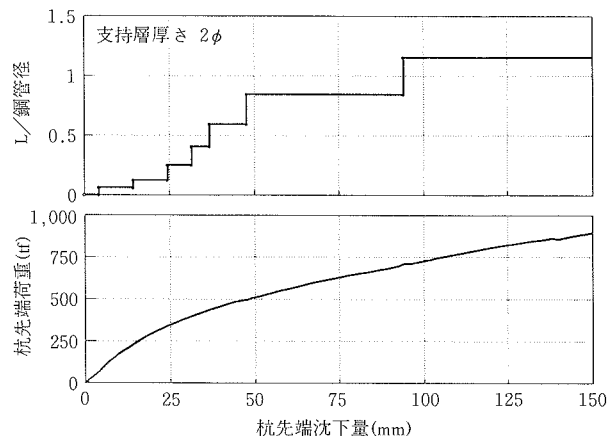
持杭として設計されることが多い。このような杭では支持層の下にある粘土層によって先端閉塞効果にも影響があるものと考えられるため、支持層厚さの影響について検討する。解析ケースは杭径 1,600 mm に対して支持層厚が杭径の1.2倍、2倍、3倍、5倍、∞倍の5ケースとした。

前節と同様にジョイント要素が切れた長さ L と鋼管径 ϕ との比を支持層厚に対して示すと図一七のようになる。また、図一八には杭先端面が支持する荷重と支持層厚が十分に厚い場合の中実杭が支持する荷重との比を示す。これらの結果から、支持層厚が鋼管径の3倍程度以下のときはジョイント要素があまり切れない、すなわち先端プラグが保持されたままで、下部粘土層の影響によって先端支持力が小さくなっていると推測される。これを確認するために、支持層厚さが鋼管径の2倍の場合を例にとって杭先端の荷重沈下関係とそのときのジョイント要素の変化を示すと図一九のようになる。杭先端荷重 300 tf 付近から沈下が大きくなっているのに対して、沈下量が 50 mm を越えるとジョイント要素の破壊があまり進行していない。このことは下部粘土層が破壊し、比較的薄い支持層を杭の下面全体が押し抜くモードに対応するものである。

4. まとめ

弾塑性連成プログラムを用いて開端鋼管杭のシミュレーション解析および閉塞効果に関する解析を実施した結果、以下の点が明らかになった。

- ① 粘性土、砂質土の弾塑性モデルを用いたプログラ



図一九 ジョイントと支持力の関係

ムの導入と、開端鋼管杭打設時の排土効果を考慮した条件設定によって開端鋼管杭の挙動を表現できる。

② 支持層への根入れ長が鋼管径の5倍以上確保されている場合は先端プラグが保たれており、現行設計法の設定は妥当であると考えられる。また、支持層の厚さが管径の3倍程度以下の薄層支持杭の場合の支持特性は、先端閉塞効果よりも、支持層の下部にある粘土層の影響を強く受ける。ただし、この結果は限られた条件における一例であり、今後適用例を増やしていく必要がある。

今回の解析では、ごく簡易的な方法によって鋼管杭打設による地盤状態の変化を考慮したが、杭先端付近の実際の地盤状態は非常に複雑であると考えられる。今後は詳細な現場計測データをさらに収集し、鋼管杭打設後の地盤状態を調査するとともに、モデル実験の実施によって杭先端付近の挙動を把握し、より適切な評価方法を提案したい。また、解析については、支持層への根入れ長をパラメータにした検討を実施し、支持力との関連を明らかにしていく予定である。

謝 辞

この解析を実施するにあたり、ご指導いただきました大阪大学松井保教授ならびに小田和広助手に謝意を表します。

参考文献

- 1) 松井, 小田, 吉澤: 大口径場所打ち杭の先端支持特性におよぼす支持層の拘束圧依存性の影響, 第28回土質工学研究発表会講演概要集, p. 1629~1630 (1993)
- 2) Matsui, T. and N. Abe.: Multi-dimensional Elastoplastic Consolidation Analysis by Finite Element Method, Soils and Foundations, Vol. 21, No. 4, p. 79~95, (1981)
- 3) Yasufuku, N. et al: A Stress-strain Relationship for Anisotropically Consolidated Sand over A Wide Stress Region, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 4, p. 75~92, (1991)