

考虑桩 - 土相互作用的深厚软土桩侧极限抗力分析

王 雄

(中铁五局集团有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 为正确描述深厚软土层中桩 - 土相互作用, 求解桩侧极限抗力, 采用有限差分法对软土中不同桩径、不同深度的桩 - 土相互作用进行研究, 基于 Soft-Soil 本构模型对桩周土体的受力变形、桩侧极限土抗力进行探讨分析, 并对软土模量、强度参数以及 $p-y$ 曲线等经验公式在深厚软土层中的应用进行了修正优化。研究表明: 1) 桩体承受的横向荷载水平对桩周土抗力分布影响大, 在横向荷载作用下桩周土抗力呈椭圆分布; 2) 修正后的公式能够较好地描述软土层中桩 - 土相互作用关系; 3) 当软土地层较深 (大于 25 m) 时, 数值计算结果与修正后的公式计算结果较吻合。本文成果可为深厚软土层中的桩基设计提供参考。

关键词: 水平承载特性; 桩 - 土相互作用; 深厚软土; $p-y$ 曲线; 数值分析

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1673 - 8993(2024)11 - 0046 - 08

doi: 10. 13402/j. gcjs. 2024. 11. 148

Analysis on ultimate resistance of deep soft soil pile side considering pile-soil interaction

WANG Xiong

(China Railway No. 5 Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410200, Hunan, China)

Abstract: In order to correctly describe the pile-soil interaction in deep soft soil and solve the ultimate resistance of the pile side, the pile-soil interaction of different pile diameters and depths in soft soil are studied by using the finite difference method. Based on the Soft-Soil constitutive model, the stress and deformation of the soil around the pile and the ultimate soil resistance of the pile side are discussed and analyzed, and the application of empirical formulas such as soft soil modulus, strength parameters and $p-y$ curve in deep soft soil layers is modified and optimized. The research shows that: 1) the lateral load level of the pile has a great influence on the distribution of soil resistance around the pile. Under the action of lateral load, the soil resistance around the pile is distributed in an elliptical manner; 2) The revised formula can better describe the pile-soil interaction in soft soil layers; 3) When the soft soil layer is deep (greater than 25 m), the numerical calculation results are consistent with the calculation results of the modified formula. The results can provide some reference for the design of pile foundation in deep soft soil layers.

Key words: horizontal load-bearing characteristics; pile-soil interaction; deep soft soil; $p-y$ curve; numerical analysis

桩基础因其承载力大、稳定性高、沉降均匀等特点, 常被用作高层建筑物的基础, 是保证建筑物稳定的重要基础形式^[1]。确定桩基水平承载力是桩基础设计中一项不可或缺的工作^[2-3]。仲

召银等^[4]采用单向多循环加载法和慢速维持荷载法对深厚软土地区单桩进行水平静荷载试验, 提出了淤泥质黏土、软土水平反力系数的比例系数的取值建议; 刘晓明等^[5]通过对典型桩柱式桥墩

收稿日期: 2024 - 04 - 10

作者简介: 王 雄 (1989—), 男, 高级工程师, 从事道路与桥梁施工及建设管理工作。

的临界荷载进行计算，并与现有简化计算方法结果进行对比，指出现有简化计算方法的适用范围；张静^[6]采用指数曲线法预测卸载后不同时刻的工后沉降及沉降速率，提出负摩阻力在上部结构竣工后对桩基承载力最为不利，而桩侧承担的负摩阻力远小于规范提出的极限值；邹新军等^[7]通过考虑桩侧土体应力状态，得到新的 $p-y$ 曲线分析方法；柯学^[8]基于现场水平静载试验、数值方法，探究横向荷载作用下大直径混凝土灌注桩的受力变形特性。

目前，桩基设计规范中一直采用传统弹性地基反力法^[9-10]。然而，当作用于桩基的外荷载较大、桩基埋置于深厚软土层时，弹性地基反力法难以准确表示桩-土相互作用。基于上述考虑，本文拟采取 $p-y$ 曲线法研究桩基水平承载特性，以软土 $p-y$ 曲线经典公式^[10]为基础，采用数值方法建立桩-土相互作用数值模型，建立适用于深厚软弱地层环境的 $p-y$ 曲线经验公式，以期明确深厚软土层中桩基水平承载力计算方法，为深厚软土层中的桩基设计提供指导。

1 深厚软土桩侧极限水平抗力分析模型建立

桩基水平承载特性研究本质上是一个非线性、复杂的桩土相互作用问题。桩在水平荷载作用下产生挠曲变形并挤压桩侧土体，而桩侧土体对桩基产生土体抗力。桩周土体抗力控制着桩基的水平承载力，其大小和分布受桩基变形、土体性质及桩入土深度等因素影响，水平荷载作用下的桩侧土反力分布如图 1 所示。其中： M 为桩顶作用弯矩， $\text{kN}\cdot\text{m}$ ； V 为桩顶作用水平方向荷载， kN ； P_x 为桩顶竖向荷载， kN ； z 为深度， m ； z_1 为特征点到桩顶的竖向距离， m ； y_1 为特征点横向偏移

量， m 。

桩侧土体在未开裂或发生较大位移之前，处于受压状态；当水平荷载较小时，土体跟桩基一样，处于弹性状态；当水平荷载较大时，土体进入塑性屈服阶段；当水平荷载大于极限荷载时，对于配筋率较低的灌注桩，通常桩身先出现裂缝，后断裂破坏。而柔性桩（即桩土相对刚度较小的桩），其柔度很大，在水平荷载作用下，桩基可以看作一段嵌固的地基梁。当水平荷载过大时，桩身因某个截面出现过大的弯矩而屈服，因此，柔性桩水平承载力由桩身水平位移及最大弯矩控制。桩身在水平荷载作用下的破坏如图 2 所示。其中： y_0 为桩顶的横向偏移量， m ； y 为桩的横向偏移量， m ； α 为桩中轴线与水平面的夹角， $(^\circ)$ 。

采用 $p-y$ 曲线法研究深厚软土中桩基水平承载特性，以数值模拟方法为手段，建立桩-土相互作用模型，获得深厚软土中不同桩径、不同深度处的 $p-y$ 曲线，建立适用于深厚软土地层环境的 $p-y$ 曲线经验公式。

1.1 桩-土相互作用本构模型介绍

软土模型中，初始压缩假定为

$$\Delta\varepsilon_v = -\frac{\lambda^* \Delta p}{p + c \cot \varphi} \quad (1)$$

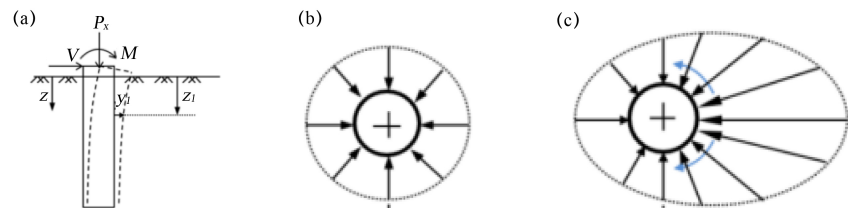
式中： $\Delta\varepsilon_v$ 为体积应变增量； Δp 为平均压力增量， kPa ； c 为土体黏聚力， kPa ； φ 为内摩擦角， $(^\circ)$ ； λ^* 为修正压缩指数； p 为平均有效压力， kPa ，计算公式如下。

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (2)$$

式中： σ_1 为土体最大主应力， kPa ； σ_2 为土体次大主应力， kPa ； σ_3 为最小主应力， kPa 。

卸载及再加载压缩可假定为

$$\Delta\varepsilon_v^e = -\frac{k^* \Delta p}{p + c \cot \varphi} \quad (3)$$



(a) 桩基础受力示意；(b) 受轴向力作用抗力分布；(c) 受横向力作用抗力分布

图 1 横向受荷桩的单位应力分布

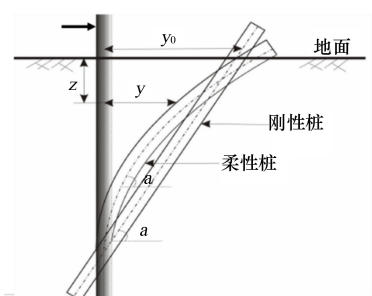


图 2 桩体破坏模式示意

式中: $\Delta \varepsilon_v^e$ 为弹性体积应变增量; k^* 为修正回弹指数。

弹性体积模量 K 与应力相关, 相关函数表达式:

$$K = -\frac{p + c \cot \varphi}{k^*} \quad (4)$$

λ^* 和 k^* 为基于体积应变增量修正参数。在软土模型中, k^* 、 λ^* 计算公式如下。

$$k^* \approx \{ (1 + 2K_0)(1 - \nu)C_s / [(\ln 10)(1 + e)] \} \quad (5)$$

$$\lambda^* = C_c / [(\ln 10)(1 + e)] \quad (6)$$

式中: e 为近似为回弹路径中的平均孔隙比; ν 为泊松比; K_0 为土体静止土压力系数; C_s 为一维回弹指数, 典型值为 $(1/5) \sim (1/10)C_c$, 其中 C_c 为土体压缩指数, $C_s \approx PI(\%) / 370$ (PI 为初始压缩应变); 对于正常固结土, C_c 一维压缩指数计算公式如下。基于修正 Cam-Clay 模型, 一维压缩指数可被预估为 $PI(\%) / 74$ 。

$$C_c = 0.009(LL - 100) \quad (7)$$

式中: LL 为土体液限。

在软土模型中, 假定土体泊松比为恒定值, 模型弹性剪切模量为

$$G = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad (8)$$

式中: G 为剪切模量, kPa。

先期固结压力 p_c 为土体最大压力水平。在初始(主要)加载期间, p_c 随应力水平增加而增加, 导致不可逆的塑性体积应变。而土体的体积应变

$$M = 3 \sqrt{\frac{(1 - K_{nc})^2}{(1 + 2K_{nc})^2} + \frac{(1 - K_{nc})(1 - 2\nu)(\lambda^* - k^*)}{(1 + 2K_{nc})(1 - 2\nu)\lambda^* - (1 - K_{nc})(1 + \nu)k^*}} \quad (15)$$

式中: K_{nc} 为正常固结土条件下土体侧压力系数, 计算公式为 $K_{nc} = 1 - \sin \varphi$ 。

1.2 深厚软土中桩-土相互作用数值模型

为提高模型计算效率, 数值模型取 $50 \text{ m} \times$

按式(9)进行计算。

$$\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_v^e + \Delta \varepsilon_v^p \quad (9)$$

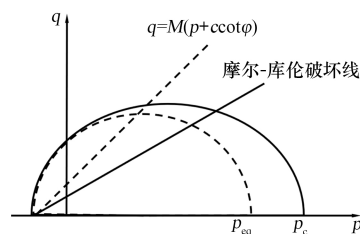
式中: $\Delta \varepsilon_v$ 体积应变增量; $\Delta \varepsilon_v^e$ 为弹性体积应变增量; $\Delta \varepsilon_v^p$ 为塑性体积应变增量。

结合体积应变增量和弹性体积应变增量公式可推导出先期固结压力 p_c :

$$\Delta p_c = -p_c \frac{\Delta \varepsilon_v^p}{\lambda^* - k^*} \quad (10)$$

式中: Δp_c 为先期固结压力增量, kPa; $\Delta \varepsilon_v^p$ 为塑性体积应变增量; λ^* 和 k^* 为基于体积应变增量修正参数。

Soft-Soil 模型的屈服面表现为 (p, q) 平面上的椭圆, 如图 3 所示。其中: p 为平均主应力, kPa; q 为广义剪应力, kPa; M 为材料相关参数; c 为黏聚力, kPa; φ 为内摩擦角, ($^\circ$); P_{eq} 为初始压力, kPa; P_c 为先期固结压力, kPa。

图 3 软土模型在 (p, q) 平面的屈服面

屈服面表示为

$$f = p_{eq} - p_c \quad (11)$$

$$p_{eq} = p + q^2 / (M^2(p + c \cot \varphi)) \quad (12)$$

$$q^2 = -[\sigma_1 + (\delta - 1)\sigma_2 - \delta\sigma_3] \quad (13)$$

$$\delta = (3 + \sin \varphi) / (3 - \sin \varphi) \quad (14)$$

式中: f 为先期固结压力与初始压力的差值, kPa; δ 为应力系数。 M 决定了屈服函数定义的椭圆半径的比值, 且其并非为输入型材料参数, 而是由材料其他参数通过相关关系所决定, 具体计算公式如下。

$25 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的半模型。土层本构模型采用 Soft-Soil 模型, 数值模型强度参数根据软土(以淤泥层为主)强度参数经验值进行选取, 具体参数如表 1 所示。

桩-土界面采用界面单元进行模拟, 其界面

表 1 Soft-Soil 本构模型参数选取

地层	修正回弹指数	修正压缩指数	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	正常固结系数
淤泥	0.051	0.080	18	0.4	0.930
淤泥质土	0.062	0.071	18	0.4	0.913

表 2 桩-土接触面参数选取

接触面	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
桩与淤泥层接触部分	5.4	5.4	10	10
桩与淤泥质土层接触部分	5.4	5.4	10	10

参数根据相关经验公式进行确定^[16]，具体参数如表 2 所示。

数值模型侧立面均采用简支约束。为模拟不同深度处的地层，数值模型底面与顶面采用应力边界，应力大小按 $\sigma_z = \gamma h$ 计算确定，其中： h 为土层深度，m； γ 为土体重度， kN/m^3 。数值模型及模型加载模式如图 4 所示。

数值模拟过程：在计算过程中记录每一级荷载对桩基中心点处的水平位移，得到不同桩径、不同地层深度处的 $p-y$ 曲线。模型计算过程中对

桩基采用分级加载的形式，初始荷载和荷载梯度均取 10 kN，每施加一级荷载计算到收敛后再进行下一级荷载的施加，直至土体发生破坏为止。

2 考虑桩-土相互作用的深厚软土中桩侧极限水平抗力分析

2.1 桩周土体受挤压变形特性分析

淤泥层中 1、2、3 m 深处桩周土体在桩基(直径为 1.6 m)挤压作用下产生的屈服情况如图 5~7 所示。

由图 5 可知：当荷载达到 30 kN 时，土体开

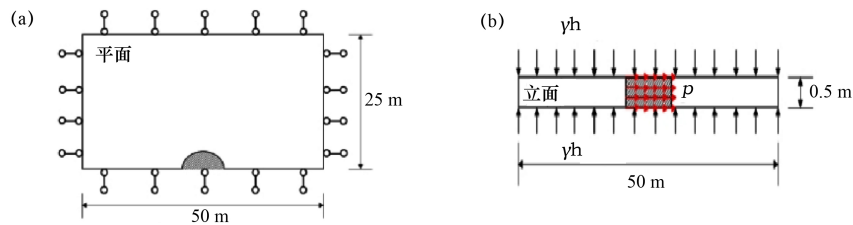
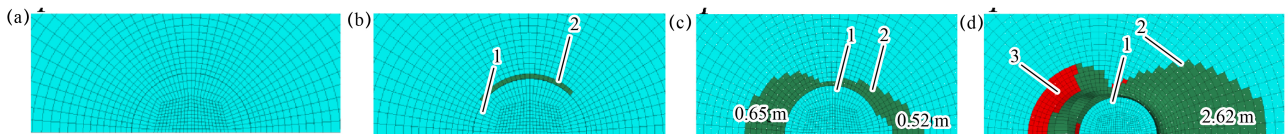
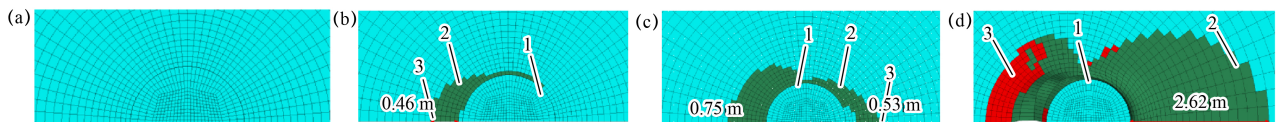


图 4 模型平面及立面



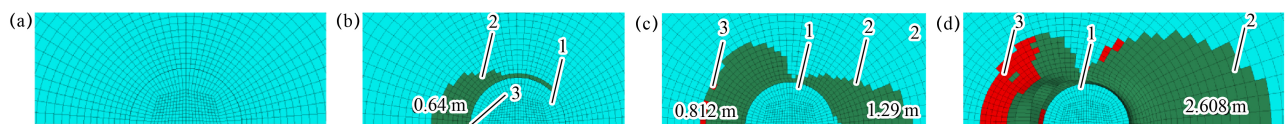
平均主应力/kN: (a) 10~20; (b) 30; (c) 40; (d) 50

图 5 深度为 1 m 处土体屈服情况



平均主应力/kN: (a) 10~30; (b) 40; (c) 50; (d) 60

图 6 深度为 2 m 处土体屈服情况

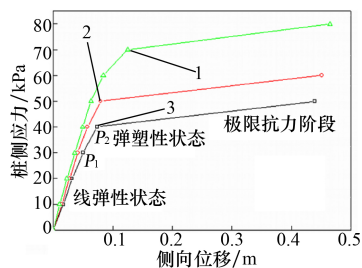


平均主应力/kN: (a) 10~40; (b) 50; (c) 70; (d) 80

图 7 深度为 3 m 处土体屈服情况

始出现剪切破坏,此时塑性区较小;当荷载达到 50 kN 时,受压方向土体出现隆起破坏。由图 6 可知:相较于深度 1 m 处的土体,2 m 深的土体在荷载 40 kN 时产生塑性屈服;桩基受荷达到 60 kN 时,桩周土体进入失稳状态。由图 7 可知:对于 3 m 深的土体,桩基受力为 80 kN 时,桩周土体进入极限抗力塑性段。

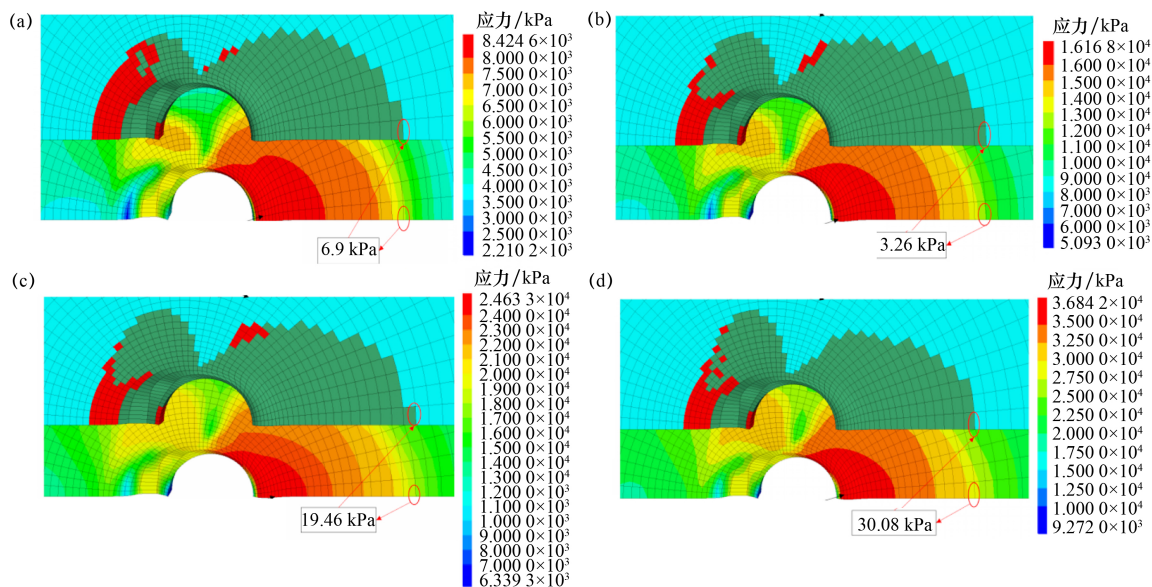
图 8 为淤泥层中 1、2、3 m 深处桩(桩径 1.6 m) $p-y$ 曲线。由图 8 可知: P_1 点处于 1 m 深处土体 $p-y$ 曲线弹性段末尾,桩周土体刚好进入弹塑性状态,此时的桩基位移为 49.6 mm。当荷载达 40 kN 时,桩周土体均进入弹塑性状态, x 方向上土体塑性区发展的最大长度为 0.65 m,桩周土体已进入塑性屈服一段时间,此时的土体抗力及桩基位移对应 P_2 点。当荷载达到 50 kN 时,土体进入极限抗力阶段,此时计算因土体破坏而无法收敛。



不同深度/m: 1—3; 2—2; 3—1。

图 8 软土中不同深处土体的 $p-y$ 曲线

综上所述:桩周土体在受荷桩基的挤压作用



深度/m: (a) 2; (b) 5; (c) 8; (d) 12

图 9 淤泥层不同深处土体抗剪强度云图

下,桩后土体(与桩基受力方向相反)开始屈服,且屈服范围逐渐增加;随着荷载增大,屈服范围随荷载增大而增加,直至土体产生破坏;同时,随着地层深度的增加,土体进入弹塑性状态所需荷载越大,且土体极限抗力值越高。

图 9 为软土层中 1.6 m 桩径情况下 2、5、8、12 m 深处土体破坏后单元塑性屈服区和抗剪强度云图。由图 9 可知:软土层中土体塑性屈服区分布与土体抗剪强度大小分布相关。2 m 深处土体抗剪强度大于 6.9 kPa 时,土体就会发生剪切破坏,土体进入塑性屈服阶段;5、8、12 m 深处土体抗剪强度分别为 13.26、19.46、30.08 kPa。

2.2 桩侧极限土抗力分析

将不同地层深度处、不同桩径情况下的桩侧极限土体抗力与施加的静力进行对比,结果如图 10 所示。由图 10 可知:软土层中 8 m 地层深度以内由桩-土界面得到的桩侧土抗力与直接施加在桩基上的静力大小基本一致,8 m 深度以下二者最大误差仅为 12.4%。综上,利用数值计算提取的桩侧极限土体抗力构建软土层 $p-y$ 曲线经验公式合理可行。

3 考虑桩土相互作用的深厚软土中 $p-y$ 曲线求解分析

3.1 不同地层深度处 $p-y$ 曲线对比分析

图 11、12 为桩基直径分别为 1.6、1.8、2.0 m

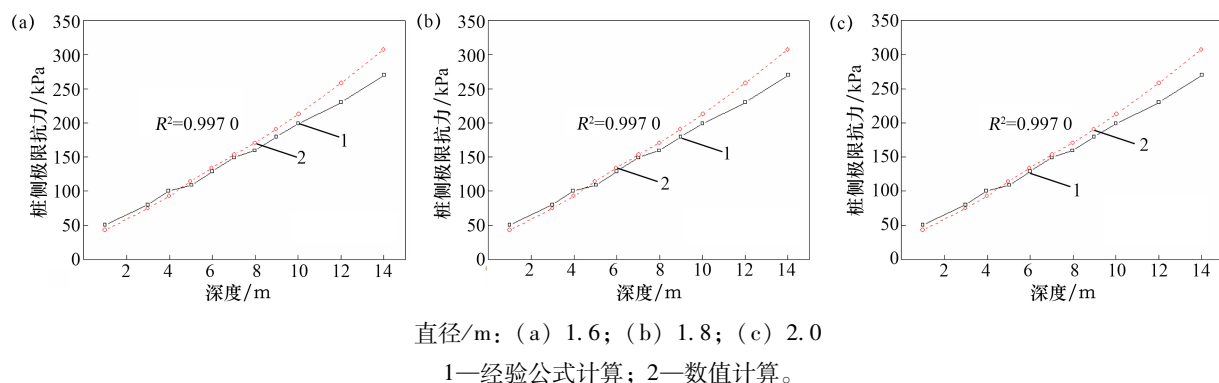


图 10 深厚软土中土体抗力与施加静力对比

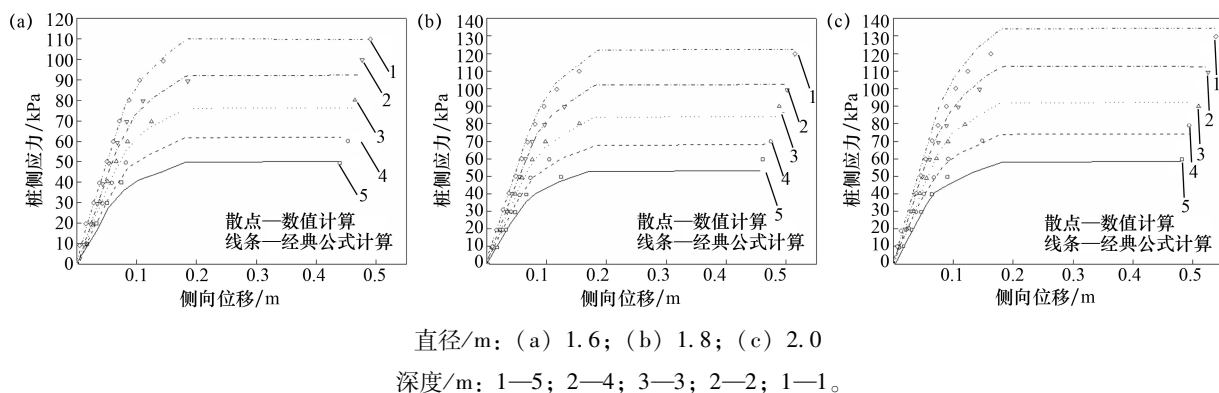
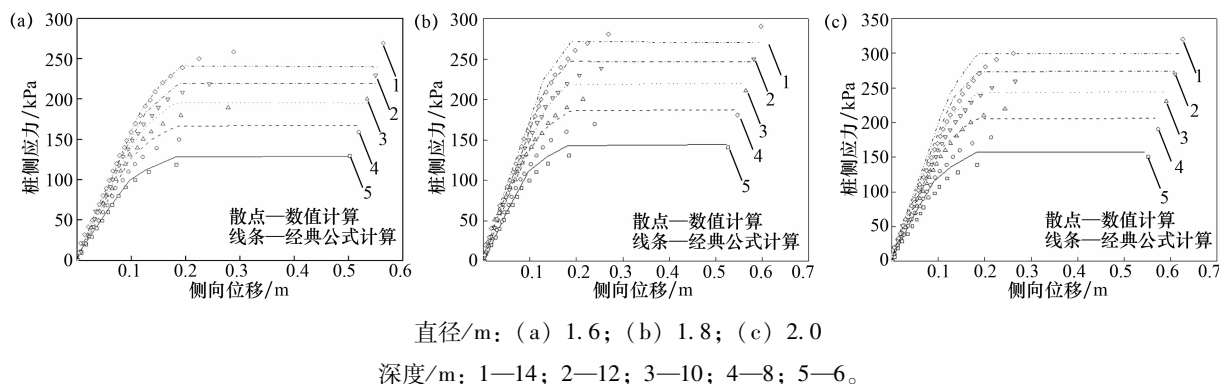
在不同深度的 $p-y$ 曲线, 其中散点为数值计算结果, 曲线为采用 Matlock 软土 $p-y$ 曲线经典公式求解的理论计算结果。

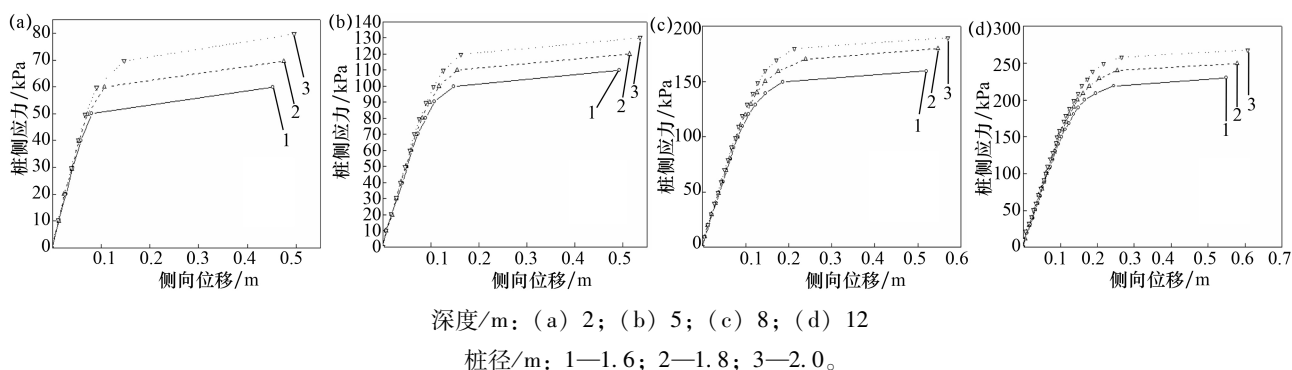
由图 11、12 可知: 桩径对 $p-y$ 曲线的变化趋势影响较小, 且数值计算与理论计算结果相差不大。以桩径 1.6 m 为例, 对于直径为 1.6 m 的桩基, 1~5 m 地层范围内理论计算结果与数值分析结果在弹性段与弹塑性屈服段基本一致; 在极限抗力塑性段稍有误差, 最大误差为 7.50%; 12、14 m 深处数值结果与理论结果弹性段基本相同, 但在极限抗力塑性阶段有较大的差异; 8、10 m 深

度处理论结果与数值结果在极限抗力塑性段最大误差分别为 4.70%、11.11%。

图 13 为软土中不同桩径在同一深度处的 $p-y$ 曲线。由图 14 可知: 同一地层深度, 桩径越大, 桩侧极限土抗力值越高。增大桩基直径能有效提高土体抗力, 在不同地层深度处同样存在该规律。

对软土中不同桩径情况下不同地层深度处桩基位移与土体抗力的数值分析结果进行拟合, 得到淤泥层桩-土相互作用曲线经验公式。 $p-y$ 曲线的确定需要确定桩侧极限土体抗力以及初始地基反力模量。以 Matlock 软土 $p-y$ 曲线经典公式

图 11 淤泥层中不同桩径在地层深度 1~5 m 处 $p-y$ 曲线图 12 淤泥层中不同桩径在地层深度 6~14 m 处 $p-y$ 曲线

图13 淤泥层中同一地层深度处不同桩径 $p-y$ 曲线

为参照, 设拟合公式形式为

$$P = \begin{cases} ap_{ult}(y/r)^m (y < 8r) \\ p_{ult} (y > 8r) \end{cases} \quad (12)$$

式中: P 为桩侧土体抗力, kPa; a 、 m 为软土 $p-y$ 曲线经典公式中指定的土层系数, 参考 Matlock 软土 $p-y$ 曲线经典公式分别取 0.5、1/3; y 为土层侧向位移, m; r 为桩基半径, m; p_{ult} 为桩侧极限土抗力, kPa, 根据 $p-y$ 曲线提取模型计算结果, 软土层桩侧极限土抗力为式(13)中的较小值。

$$P = \begin{cases} \left(3 + (0.1D + 0.04) \frac{\gamma z}{s_u} + \frac{Jz}{D} \right) s_u D + 20 \\ 9s_u D \end{cases} \quad (13)$$

式中: γ 为土体重度, kN/m^3 ; z 为距离地表面的地层深度, m; s_u 为土体不排水抗剪强度, kPa; J 为影响因子, 取 0.5; D 为桩基直径, m。

淤泥层中 1.6、1.8、2.0 m 直径桩基桩侧极限土抗力随地层深度变化的数值分析结果与理论结果对比如图 14 所示。

由图 14 可知: 桩径为 1.6、1.8、2.0 m 时数值分析结果与理论结果的相关系数分别为 0.999 2、0.999 1、0.999 5, 桩侧极限土抗力拟合效果较

好。考虑到超长桩基服役过程中深层土体很难进入弹塑性阶段且桩基位移很小, 可认为通过连立式(9)、(10)得到的 $p-y$ 曲线能够较好描述软土层中桩-土相互作用关系。

4 结 论

本文基于数值分析方法对软土中不同桩径情况下、不同地层深度处的桩-土相互作用曲线进行研究, 对桩周土体的受力变形、桩侧极限土抗力进行探讨分析, 以静力的方式获取桩土相互作用曲线, 并基于桩侧极限土抗力数值提取结果建立 $p-y$ 曲线经验公式, 得到结论如下。

(1) 桩基在外力作用下产生位移, 从而挤压桩基受力方向土体; 土体在受力过程中从弹性状态进入弹塑性屈服状态, 最终进入极限抗力塑性状态, 直至土体破坏。

(2) 土体破坏时单元弹塑性屈服区域与最大有效剪应力发展区域基本一致。桩基未受力时, 桩周土体作用在桩基上的土抗力呈均匀分布。随着横向荷载的增大, 桩后土体作用在桩基上的土抗力减小, 桩前土体作用在桩基上的土抗力增大,

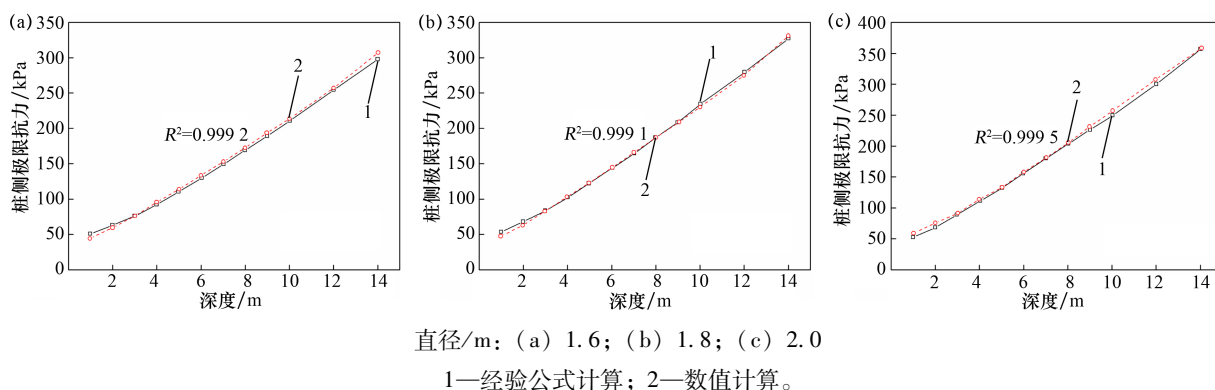


图14 淤泥层中不同桩径情况下极限抗力随地层深度变化的数值与理论结果

最终桩周土体抗力呈椭圆分布。

(3) 地层较浅时, 由数值模型计算得到的桩侧极限土抗力与直接施加在桩基上的静力基本相等, 可以采用由桩-土相互作用数值模型提取的桩侧极限土抗力构建软土层 $p-y$ 曲线经验公式。

(4) 根据数值计算结果, 以 Matlock 软土 $p-y$ 曲线经典公式为依据, 得到的软土层中桩-土相互作用曲线经验公式能够较好描述软土层中桩-土相互作用关系。地层较浅时, 公式计算结果与数值计算结果在弹性段、弹塑性段范围内有较好一致性, 在极限抗力塑性段存在误差; 当地层较深时, 二者计算结果较吻合。考虑到超长桩基在服役过程中, 深处土体基本处于弹性状态, 故软土层中桩-土相互作用曲线经验公式有较好的适用性。

参考文献:

- [1] 张懿丹, 韩伟, 张信贵, 等. PHC 管桩在螺纹挤土桩基础的补强应用[J]. 工程建设, 2023, 55(8): 29-34.
- [2] 谭鑫, 曹明, 冯龙健, 等. 土工织物包裹碎石桩力学特性的数值模拟研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 136-145.
- [3] 杨世捷, 陈伟, 张笑, 等. 基于极限抗力的微型群桩承载失效模式研究[J]. 公路工程, 2024, 49(2): 97-104; 151.
- [4] 仲召银, 冷伍明, 杨奇, 等. 深厚软土区桥梁基桩水平静载试验与 m 取值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3350-3361.
- [5] 刘晓明, 李曦, 刘齐建, 等. 深厚软土区桩柱式桥墩临界荷载简化计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 92-98.
- [6] 张静. 大面积填土下深厚软土中桩基负摩阻力分析[J]. 工程建设, 2022, 54(1): 18-23.
- [7] 邹新军, 聂思卿, 贺琼. 基于桩侧土体应力状态的单桩 $p-y$ 曲线分析模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2716-2724.
- [8] 柯学. 大直径灌注型嵌岩桩水平受荷特性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [9] 建筑桩基设计规范: GB 94-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [10] 杨学祥, 张瑜. 弹性地基梁法与经典土压力法计算支护桩内力的对比分析[J]. 工程建设, 2010, 42(2): 36-39; 44.