

文章编号:1673-9469(2024)02-0023-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.004

成层土中长桩竖向承载激发规律研究

马鹏程^{1,2,3}, 刘润², 李国和^{1,3}, 苏伟¹, 施威¹, 蒋成强¹

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300354;
3. 城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程研究中心, 天津 300308)

摘要: 针对成层土中长桩承载问题, 结合试桩数据建立了成层土中长桩-土相互作用特性分析模型, 基于分析模型研究了上砂下黏和上黏下砂中砂-黏占比对长桩竖向荷载-位移曲线的影响, 分析了成层土中长桩侧阻和端阻承载分担比, 揭示了达到极限承载力时成层土中桩基侧阻、端阻激发规律, 即黏土层侧阻可完全激发、砂土层侧阻未完全激发, 桩底端阻完全激发, 为实际工程中长桩承载力计算选取合理参数提供依据。

关键词: 长桩; 成层土; 竖向承载力; 现场试验; 砂-黏占比

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Research on Vertical Bearing Excitation Law of Long Piles in Layered Soil

MA Pengcheng^{1,2,3}, LIU Run², LI Guohe^{1,3}, SU Wei¹, SHI Wei¹, JIANG Chengqiang¹

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 3. China National Engineering Research Center for Digital Construction and Evaluation of Urban Rail Transit, Tianjin 300308, China)

Abstract: A model for analyzing the interaction characteristics between long piles and soil in layered soil is established based on test pile data to address the bearing problem of long piles in layered soil. Based on the analysis model, the influence of sand to clay ratio on the vertical load displacement curve of long piles is studied. The lateral and end resistance bearing ratios of long piles in layered soil are analyzed, and the excitation laws of lateral and end resistance of pile foundations in layered soil are revealed when the ultimate bearing capacity is reached. It is shown that the lateral resistance of the clay layer can be fully excited, the lateral resistance of the sand layer is not fully excited, and the resistance at the bottom of the pile is fully excited. The results provide a basis for selecting reasonable parameters for calculating the bearing capacity of long piles in practical engineering.

Key words: long pile; layered soil; vertical bearing capacity; field test; sand-clay thickness ratio

在覆盖层巨厚的平原地区进行工程建设时, 经常遇到砂黏互层的复杂地质。为满足复杂地质上工程建设的严格标准, 需增加基础埋深以使基础承载力更高、沉降量更小。桩基础是目前应用最广泛的基础形式之一, 目前桩基向超长柔性桩演变, 针对长桩承载能力问题, 袁海超等^[1-2]基于长桩荷载试验结果, 分析了考虑埋深和考虑桩身压缩的竖向荷载下桩身轴力衰减规律, 发现桩身轴力衰减速率随埋深和桩身压缩量的增加而逐渐

增加的规律。王茂凯等^[3-4]分别通过现场试验和模型试验分析了桩长对承载力的影响规律。杨仲轩等^[5-6]对比了国内外基于触探计算桩基承载力的方法在特定工程中的适用性, 提出了适用于特定场地的桩基承载力计算方法。针对长桩压缩具有自上而下逐步压缩的承载激发特点, 郭一斌等^[7-8]分别通过长桩荷载试验结果研究了桩身压缩导致的长桩侧阻软化规律, 发现桩身中上部侧阻较早激发至极限之后衰减, 而长桩下部侧阻达

收稿日期: 2023-06-15

基金项目: 天津市科技计划项目(20YFZCSN00890); 中国铁路设计集团有限公司科技开发重点课题(2022A02538004, 2020YY241008); 国铁集团科技研究开发青年科研专项(Q2023G022)

作者简介: 马鹏程(1992-), 男, 山东德州人, 博士, 工程师, 从事结构物与土相互作用方面的研究。

到极限后未衰减。李永辉等^[9]则采用传递矩阵增量方式建立了考虑桩侧摩阻软化的超长灌注桩承载变形计算方法。实际工程中考虑上部荷载的分布特点,长桩常与短桩结合使用,为此卢萍珍等^[10-14]分别对比了长桩与扩底桩、长桩与短桩及长桩与后注浆长桩的承载特性,提出了考虑工程实际需要的桩基设计方法。郜新军等^[15-16]分别就不同的异型桩开展了模型试验,研究了异型桩型对承载力的影响规律。

目前研究多基于现场试桩数据或模型试验数据开展,土层分布复杂、试验难度大,较难系统分析砂-黏分布差异对长桩承载的影响。因此,结合试桩数据建立了成层土中长桩-土相互作用特性分析模型,基于分析模型研究了上砂下黏和上黏下砂中砂-黏占比对长桩竖向荷载-位移曲线的影响,分析了成层土中长桩侧阻和端阻承载分担比,揭示了典型成层土中长桩侧阻和端阻的激发规律,为实际工程中长桩承载力计算选取合理参数提供依据。

1 桩-土相互作用特性分析模型

1.1 分析模型概述

桩-土相互作用特性研究为小变形数值分析问题,采用静力分析方法进行研究。桩基础采用理想弹性本构模型,土体模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型。所建单桩顶面与土体顶面齐平,参照位移控制法进行加载。桩-土相互作用属性分桩-黏土相互作用和桩-砂土相互作用 2 种。桩-黏土相互作用中法向接触采用不可分离的硬接触,切向接触采用 Mohr-Coulomb 切向接触,切向摩擦系数为 0.4。桩-砂土相互作用中法向接触采用可分离的硬接触,切向接触采用 Mohr-Coulomb 切向接触,切向摩擦系数为 $\tan(2\varphi/3)$ 。土体模型底部采用全约束,侧面采用侧向约束。桩-土相互作用特性分析模型如图 1 所示。

1.2 模型合理性验证

桩-土相互作用特性分析模型采用沧德特大桥单桩试桩资料进行验证。沧德特大桥是位于京沪

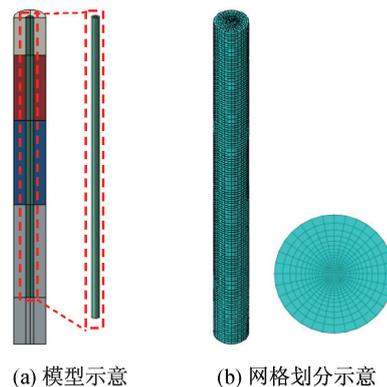


图 1 桩-土相互作用特性分析模型图

Fig. 1 Analysis model of pile-soil interaction characteristics

高速铁路在河北沧州至山东德州段的一座高架桥,位于沧州西站和德州东站之间。试桩的桩长为 59.9 m,桩径为 1.5 m,为混凝土灌注桩。试桩位置处的地质资料如表 1 所示。

单桩本构模型采用理想弹性模型,单桩材质为 C30 混凝土,密度为 $2\ 500\ \text{kg/m}^3$,杨氏模量 30 MPa,泊松比为 0.25。单桩采用实体单元建模,模型的网格单元采用 C3D8R 单元,单桩网格径向尺寸为 0.1 m,网格竖向尺寸为 0.5 m,单桩模型由 23 040 个单元组成。土体本构模型采用摩尔库伦理想弹塑性本构模型,相关参数如表 1 所示。土体采用实体单元建模,土体网格单元采用 C3D8R 单元。土体径向核心区($R=0.75\ \text{m}$)网格径向尺寸为 0.1 m,周围土体网格径向尺寸由 0.1 m 至 0.4 m 逐渐增加。土体网格竖向尺寸为 0.5 m。土体模型由 71 680 个单元组成。

通过计算得到单桩模型 $p-s$ 曲线,并与试桩 $p-s$ 数据进行对比,如图 2 所示。

由图 2 可知,数值模拟 $p-s$ 结果、轴力分布及桩身侧阻激发与沧德特大桥试桩结果具有较好的吻合性,验证了分析模型可有效反映桩基承载过程中桩-土相互作用特性。在达到极限承载力后试桩的沉降急剧增加,而数值模拟结果中单桩在达到极限承载力后沉降增加相对较小,这是由于数值模型采用的理想弹塑性,达到极限承载力后

表 1 试桩场地土体物理力学参数表

Tab. 1 Table of physical and mechanical parameters of soil at pile testing site

土名	厚度/m	层底深度/m	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa	泊松比	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
粉质黏土	10	10	15.0	45	6.64	0.48	19.2
粉土	12	22	20.9	15	8	0.35	19.6
粉质黏土	3	25	14.7	76	8	0.48	20.2
粉质黏土	45	70	9.5	45	6.61	0.48	19.8

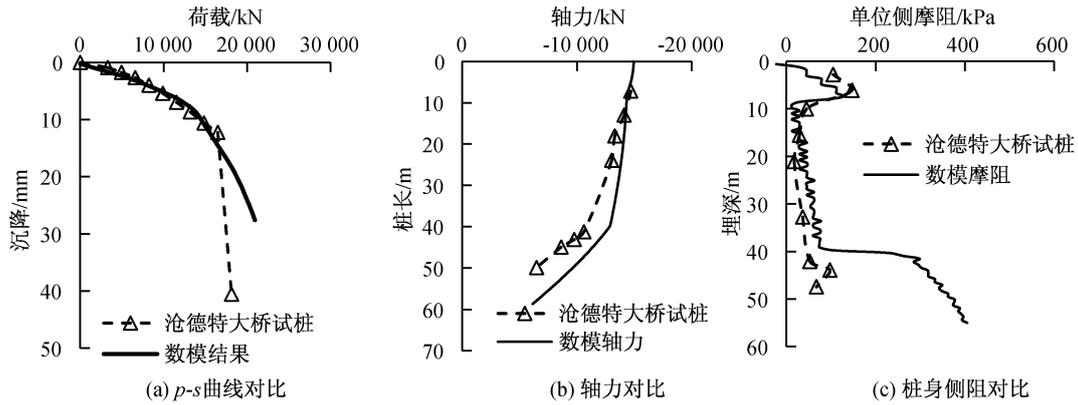


图 2 数模结果与试验结果对比图

Fig. 2 Comparison of simulation results and test results

表 2 成层土中砂土和黏土物理力学参数表

Tab. 2 Table of physical and mechanical parameters of sand and clay in layered soil

土名	重度/(kN · m ⁻³)	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	泊松比	压缩模量/MPa
砂土	18.0	30.0	0	0.30	20.0
黏土	18.0	0	20.0	0.48	10.0

表 3 成层土分析工况表

Tab. 3 Table of analysis condition of layered soil

编号	桩长/m	土厚/m	桩侧上层土体和占比	桩侧下层土体和占比	桩底土体
1	90	120	砂土 100%	—	砂土
2	90	120	黏土 25%	砂土 75%	砂土
3	90	120	黏土 50%	砂土 50%	砂土
4	90	120	黏土 75%	砂土 25%	砂土
5	90	120	黏土 100%	—	黏土
6	90	120	砂土 25%	黏土 75%	黏土
7	90	120	砂土 50%	黏土 50%	黏土
8	90	120	砂土 75%	黏土 25%	黏土

桩周土体受剪范围进一步增大,不会发生沉降剧增的现象。

2 成层土中长桩-土相互作用分析

采用上述模型研究成层土中桩-土相互作用特性,分析上黏下砂和上砂下黏工况。一般认为砂土的力学特性强于黏土,为研究砂土和黏土层厚占比对桩基承载的影响,设置黏土的强度参数弱于砂土。结合承载时黏土表现为不排水特性,黏土参数参照饱和软黏土取值,砂土、黏土参数如表 2 所示。

为分析不同黏-砂互层厚度下长桩基础承载特性,取不同砂土和黏土相对厚度进行分析,具体工况如表 3 所示。

2.1 上黏下砂工况

2.1.1 桩侧黏-砂占比对承载激发的影响

由上述参数计算所得上黏下砂工况长桩竖向

承载力-沉降关系,如图 3 所示。

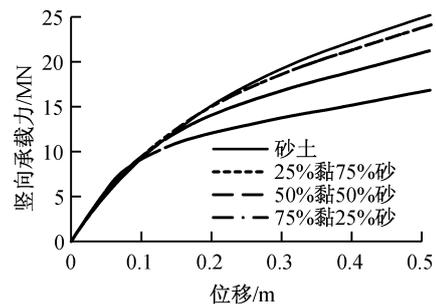


图 3 上黏下砂中单桩竖向承载力-沉降关系图

Fig. 3 Relationship between vertical bearing capacity and settlement in soil with upper clay and lower sand

由图 3 可知,对于上黏下砂工况,随着桩侧黏土所占比例的增加,桩基竖向承载力逐渐降低。黏土厚度占比 25%时,单桩的竖向承载力与纯砂土工况差值小于 3%,由此可判断在黏土厚度占比在 25%以内时,黏土占比对单桩承载力影响较小,

尤其是对达到极限承载力前的单桩承载力-沉降关系影响较小。值得注意的是,桩顶位移较小时,桩侧黏土占比 75% 的竖向承载力略大于纯砂土工况,桩侧黏土占比 75% 的桩基承载激发较快。

为进一步分析桩基竖向承载的激发速度,对比上黏下砂工况桩基极限承载力和破坏位移的归一化关系,如图 4 所示。

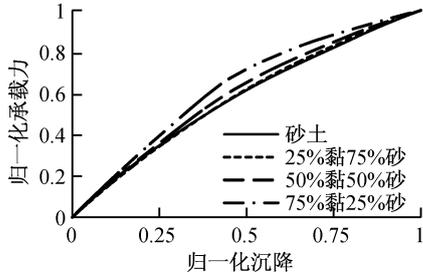


图 4 上黏下砂工况承载-位移归一化曲线图

Fig. 4 Normalized load-displacement curve under upper clay and lower sand working conditions

由图 4 可知,随着桩侧黏土占比的增加,相同归一化沉降下归一化承载力增加,说明随桩侧黏土占比的增加,桩基竖向承载力的激发速度相应增加。相比于纯砂土工况,上黏(75%)下砂(25%)工况曲线的拐点更加明显,这是由于桩侧土体黏土占比较高时,桩基承载时会优先激发黏土层的桩基承载能力,造成上黏下砂工况下小位移时桩基承载表现为黏土承载特性。

2. 1. 2 桩侧摩阻承载占比及激发规律

对桩基摩阻和端阻的承载分担比进行分析,承载分担比分析图如图 5 所示。

由图 5 可知,相比于纯砂土工况,桩周土体黏土占比越高,桩侧摩阻的分担比越小,桩端端阻的承载分担比越大。这是由于相比于砂土,黏土可提供的侧阻较小,桩侧的总阻力较小,而在桩基达到承载极限时,桩基端部均达到承载极限,桩基端

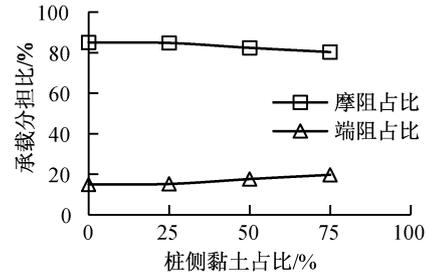


图 5 上黏下砂中桩基承载分担比分析图

Fig. 5 Analysis diagram of bearing ratio of pile in soil with upper clay and lower sand

阻变化较小,导致桩侧摩阻的占比减小。

根据各工况的桩基轴力计算桩周土体在承载过程中提供的单位侧摩阻,上黏下砂工况下单位侧摩阻分布如图 6 所示,图中节点位移是指荷载作用下桩身某处节点发生的位移量。

由图 6 可知,上黏下砂各工况下长桩单位侧摩阻激发呈现相同的规律,即对于不同砂-黏占比的成层土工况,砂土中单位侧摩阻随节点位移的增加逐渐增加,在达到极限承载力后,砂土中单位侧摩阻继续增加,但增加速率相较达到极限承载力前有所降低。相比于砂土,黏土中单位侧摩阻随节点位移的增加逐渐增加后达到恒定值。根据图 6 可知,节点位移较小时黏土中单位侧摩阻即可达到恒定值,对于上黏下砂工况,黏土中侧摩阻达到极限时节点位移约为砂土中的 75%。

随着节点位移的增加(即竖向荷载的增大),砂土的单位侧摩阻相应增大,在达到极限承载力后单位侧摩阻仍会继续增大,这是由于长径比较大的长桩达到承载极限时,桩侧土体中黏土的承载能力接近完全激发,砂土的承载能力则未完全激发,上黏下砂工况长桩的承载极限主要表现为桩侧黏土和桩端砂土承载能力的完全激发。

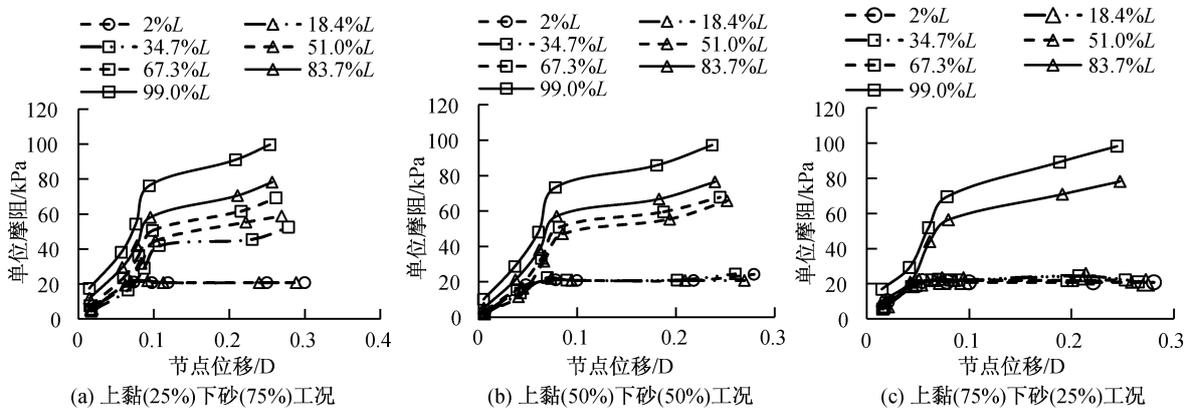


图 6 上黏下砂中桩基单位侧摩阻分布图

Fig. 6 Distribution diagram of pile unit friction in soil with upper clay and lower sand

2.2 上砂下黏工况

2.2.1 桩侧砂-黏占比对承载激发的影响

由上述参数计算得上砂下黏工况长桩竖向承载力-沉降关系图 7 所示。

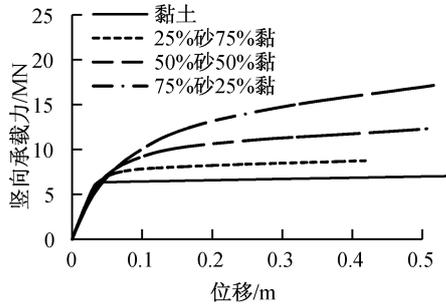


图 7 上砂下黏中单桩竖向承载力-沉降关系图

Fig. 7 Relationship between vertical bearing capacity and settlement in soil with upper sand and lower clay

由图 7 可知,对于上黏下砂工况,随着桩侧砂土所占比例的增加,桩基极限竖向承载力逐渐增加。桩顶位移较小时,桩侧砂土占比 75%的竖向承载力略小于纯黏土工况,桩侧砂土占比 75%的桩基承载激发较慢。

对比上砂下黏工况桩基极限承载力和破坏位移的归一化关系,如图 8 所示。

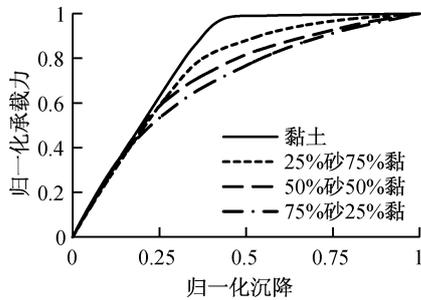


图 8 上砂下黏工况承载-位移归一化曲线图

Fig. 8 Normalized load-displacement curve under upper sand and lower clay working conditions

由图 8 可知,4 种工况中,黏土工况下桩基达到极限状态前,曲线斜率变化较小,说明纯黏土工况在达到极限状态前相对刚度变化较小。相较于黏土工况,上砂下黏的砂-黏互层工况的归一化承载力-归一化沉降曲线向内收缩,随着归一化沉降的增加,砂-黏工况的曲线斜率逐渐减小直至趋于恒定值,即达到极限承载力。对比不同砂-黏占比的承载-位移归一化曲线可知,砂土占比的增加使曲线向内收缩,曲线更加平滑,这是由于砂土承载力与应力水平成正比,荷载逐渐增大,砂土承载力逐渐升高,而黏土的承载力主要与黏土自身粘聚

力有关,因此在荷载逐渐增大时黏土承载力增加明显,达到极限后曲线拐点明显。

2.2.2 桩侧摩阻承载占比及激发规律

分析桩基摩阻和端阻的承载分担比,如图 9 所示。

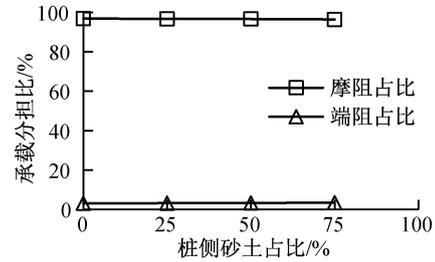


图 9 上砂下黏中桩基承载分担比分析图

Fig. 9 Analysis diagram of bearing ratio of pile in soil with upper sand and lower clay

由图 9 可知,桩周砂土和黏土的相对占比对摩阻占比和端阻占比的影响较小,对于上砂下黏工况,摩阻承载占比均大于 90%,桩基承载特性表现为摩擦桩的特性。

根据各工况的桩基轴力计算桩周单位侧摩阻,上砂下黏各工况下单位侧摩阻分布如图 10 所示,图中节点位移是指荷载作用下桩身某处节点发生的位移量。

由图 10 可知,表层砂土(2%L 以内)、浅层砂土(2%L~18.4%L 内)及黏土中单位侧摩阻随节点位移的变化规律受砂-黏占比的影响较小;表层砂土中桩基单位侧摩阻随节点位移的增加呈近线性的增加趋势;浅层砂土和黏土中单位侧摩阻随节点位移的增加逐渐增加至相对恒定值。不同的是,对于上砂下黏工况,黏土中侧摩阻达到极限时节点位移约为表层砂土中的 15%。砂层占比小于 50%的工况下较深砂土中单位侧摩阻随节点位移的变化规律与浅层砂土相近;砂层占比大于 50%的工况下,较深砂土中单位侧摩阻随节点位移的增加逐渐增加,在桩基达到极限承载力后,较深砂土中单位侧摩阻继续增加。

随着节点位移的增加(即竖向荷载的增大),砂土的单位侧摩阻相应增大,在达到极限承载力后单位侧摩阻仍会继续增大。这与长桩承载特点有关,长径比较大的长桩达到承载极限时,桩侧土体中黏土的承载能力接近完全激发,砂土的承载能力则未完全激发,上砂下黏工况长桩的承载极限主要表现为桩侧黏土和桩端砂土承载能力的完全激发。

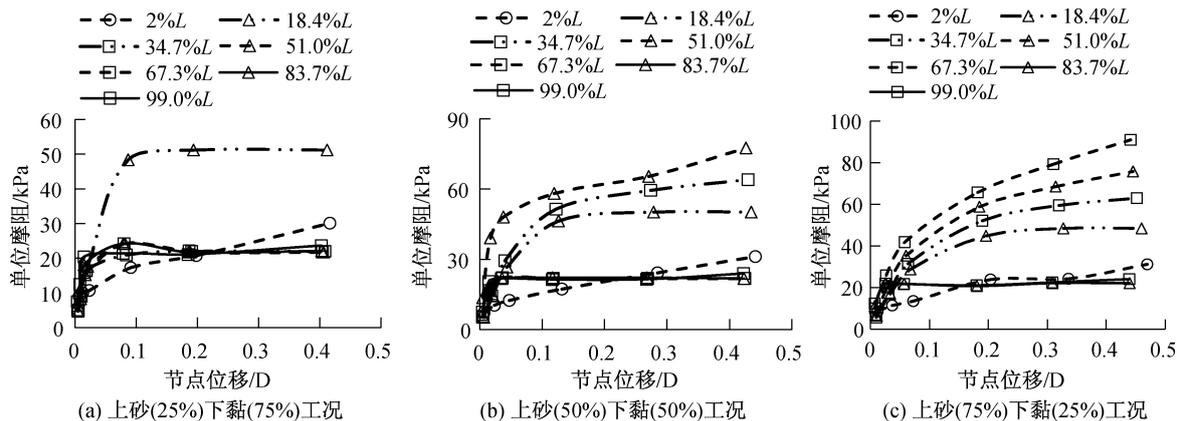


图 10 上砂下黏中桩基单位侧摩阻分布图

Fig. 10 Distribution diagram of unit lateral friction of pile foundation with upper sand and lower clay

3 结论

1) 经现场试桩数据验证,成层土中长桩-土相互作用数值模型可较好模拟桩-土相互作用特性。基于数值模型所得的 $p-s$ 曲线、轴力分布及桩身侧摩阻激发与沧德特大桥试桩结果具有较好的吻合性,验证了分析模型可有效反映成层土中长桩-土体相互作用特性。

2) 上黏下砂工况下,桩周土体黏土占比越高,桩侧摩阻的分担比越小;上砂下黏工况下,桩侧摩阻的分担比大于 90%,桩基承载特性表现为明显的摩擦桩特性。

3) 上黏下砂工况下,砂土中单位侧摩阻随节点位移的增加逐渐增加,在达到极限承载力后,砂土中单位侧摩阻继续增加,增加速率降低。黏土中单位侧摩阻随节点位移的增加逐渐增加至恒定值,黏土侧摩阻达到极限时节点位移约为砂土中的 75%。

4) 上砂下黏工况下,表层砂土(2%L 以内)中桩基单位侧摩阻随节点位移的增加呈近线性的增加趋势;浅层砂土(2%L~18.4%L)和黏土中单位侧摩阻随节点位移的增加逐渐增加至极限值,黏土中侧摩阻达到极限时节点位移约为浅层砂土中的 15%。砂层占比小于 50%的工况下较深砂土中单位侧摩阻随节点位移的变化规律与浅层砂土相近;砂层占比大于 50%的工况下,较深砂土中单位侧摩阻随节点位移的增加逐渐增加,在桩基达到极限承载力后,较深砂土中单位侧摩阻未达到极限值。

实际工程场地中,若长桩桩周地层分布近似上黏下砂工况,计算长桩竖向极限承载力选用侧

摩阻设计值时,黏土宜选用侧摩阻标准值,砂土则需根据节点位移量确定,选取侧摩阻标准值的 75%~100%;若近似上砂下黏工况,黏土和浅层砂土(2%L~18.4%L)宜选用侧摩阻标准值,较深层砂土需根据节点位移量确定。上述成果为实际工程中长桩承载力计算选取合理参数提供依据。

参考文献:

- [1] 袁海超,唐立刚,张向辉. 大直径灌注桩桩身轴力试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(2): 25-28.
- [2] 杨明,席培胜,项远. 长径比大直径长桩承载性能影响分析[J]. 兰州工业学院学报, 2020, 27(5): 1-6.
- [3] 王茂凯. 软土地区钻孔灌注桩桩长对竖向承载力的影响研究[J]. 公路, 2022(8): 255-259.
- [4] 冯忠居,陈慧芸,袁枫斌,等. 桩-土-断层耦合作用下桥梁桩基竖向承载特性[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 36-48.
- [5] 杨仲轩,黄中原,郭望波,等. 砂性土打入桩竖向承载力计算方法评价[J]. 太原理工大学学报, 2022, 53(4): 766-771.
- [6] 王李吉. 导管架大直径短桩竖向承载力 CPTU 方法应用分析[J]. 南方能源建设, 2023, 10(4): 193-199.
- [7] 郭一斌,赵广民,张立明,等. 软土地区大直径超长桩承载性状研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(21): 74-78.
- [8] 李甜甜,韩玉涛,刘永超,等. 天津软土地区超长桩试验及承载机理研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(3): 90-96.
- [9] 李永辉,王卫东,吴江斌. 基于桩侧广义剪切模型的大直径超长灌注桩承载变形计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2157-2166.
- [10] 卢萍珍,孙宏伟,方云飞,等. 北京南郊地区灌注桩长桩承载性状试验分析[J]. 建筑结构, 2017, 47

- (S1): 1039-1044.
- [11] 朱彦鹏, 杨校辉, 马天忠, 等. 黄土塬地区大直径长桩承载性状与优化设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4):1012-1023.
- [12] 张乾青, 李振宝, 马彬, 等. 刚性与柔性桩承式路堤竖向承载特性分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 991-999.
- [13] 丁凯, 寇利军, 宋臣, 等. 黄土地区后注浆长桩桩基优化设计分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2075-2079.
- [14] 孙玉辉, 张辉, 陈昌彦, 等. 桩基竖向承载力测试及桩土作用数值模拟分析[J]. 岩土工程技术, 2020, 34(6): 311-315.
- [15] 郜新军, 王剑博, 张浩, 等. 水泥砂浆扩体预制桩竖向承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 634-643.
- [16] 邓友生, 宋虔, 张克钦, 等. 锥形帽单桩竖向承载力模型试验研究[J]. 武汉科技大学学报, 2023, 46(6): 472-477.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 22 页)

- [8] 麻玉山, 董梦龙, 陈松, 等. 电塔塔基边坡受风荷载影响的稳定性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(04):63-70.
- [9] HE X H, DING H, JING H Q, et al. Wind-induced vibration and its suppression of photovoltaic modules supported by suspension cables[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206: 104275.
- [10] LIU J Q, LI S Y, LUO J, et al. Experimental study on critical wind velocity of a 33-meter-span flexible photovoltaic support structure and its mitigation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 236: 105355.
- [11] 吉柏锋, 邢盼盼, 吴会平, 等. 移动型下击暴流作用下定日镜动力响应特性研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(01):30-38.
- [12] 刘志超. 带弹性抗风索的柔性光伏支架的受力性能[D]. 南京:东南大学, 2021.
- [13] 陈俊岭, 高洁, 阳荣昌. 钢筋混凝土吸热塔顺风向风振响应特征与影响因素分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1):413-419.
- [14] 国家能源局. 光伏支架结构设计规程:NB/T 10115—2018[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.

(责任编辑 周雪梅)

《河北工程大学学报(自然科学版)》2024 年起由季刊变更为双月刊

为进一步缩短论文出版周期,更快推动科研成果的传播,满足广大专家学者学术交流需要,经主管主办单位同意,申请期刊刊期变更,获得河北省新闻出版局批复(冀新闻出版[2024]-060000001),《河北工程大学学报(自然科学版)》于 2024 年第 1 期起由季刊变更为双月刊,每逢双月的 25 号出版,特此公告。