

DOI: 10.11779/CJGE2024S10044

欠压实斜坡桩竖向承载特性离心模型试验研究

任佳丽, 程永辉, 李波, 胡胜刚, 张华伟

(长江水利委员会长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 现有的桩基理论与经验基本上是基于平坡条件下建立的, 而工程中常见的欠压实斜坡桩的受力特性与平坡桩基存在着较大差异。基于斜坡桩的受力特点, 开展了 3 组离心模型试验, 研究了欠压实斜坡桩在竖向荷载作用下的承载特性, 获得了桩侧摩阻力、桩身轴力、桩体竖向位移的分布特征以及桩周土体的沉降规律, 分析了边坡填筑压实度、坡比等因素对桩土非协调变形的影响。主要研究成果为: ①欠压实斜坡桩桩体受力主要包括桩侧正摩阻力、桩侧负摩阻力、桩端端阻力及边坡土体对桩体产生的下滑力等 4 部分。②桩周土体压实度对桩侧摩阻力沿深度分布及桩端阻力影响较大; 斜坡坡度对桩侧摩阻力沿同截面桩身分布及侧阻力的峰值影响较大。③斜坡桩负摩阻力中性点约在 0.5~0.6 倍桩长埋深处, 若按常规的承载桩基进行设计, 桩体额外承受的负摩阻力和侧向荷载容易引起桩体破坏。

关键词: 欠压实; 斜坡; 离心模型试验; 承载特性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0069-06

作者简介: 任佳丽(1983—), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程地基基础处理和边坡支护方面的研究工作。

E-mail: 23670689@qq.com。

Centrifugal model tests on vertical bearing characteristics of undercompacted slope piles

REN Jiali, CHENG Yonghui, LI bo, HU Shenggang, ZHANG Huawei

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of The Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research

Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The existing theories and experience of pile foundation are based on the flat slopes, and the stress characteristics of undercompacted slope piles are quite different from those of flat slope piles. Based on the stress characteristics of slope piles, three groups of centrifugal model tests are carried out to study the bearing characteristics of foundation piles under vertical loads. The distribution characteristics of side friction resistance, axial force, vertical displacement of piles and the settlement laws of soils around the piles are obtained. The influences of compaction degree and slope ratio on the uncoordinated deformations of the piles and soils are analyzed. The results are as follows: (1) The stress of the undercompacted slope piles includes the positive friction resistance at the pile side, the negative friction resistance at the pile side, the resistance at the pile end and the sliding force of the slope. (2) The compaction degree of soils has a great influence on the distribution of pile side friction along the depth and pile tip resistance. The slope gradient has a great influence on the distribution of pile side friction resistance and the peak value of side resistance. (3) The neutral point of the negative friction resistance of the slope pile is about 0.5 ~ 0.6 times the length of the pile along the burial depth. According to the conventional design, the additional negative friction resistance and lateral load of the piles are easy to cause pile damage.

Key words: undercompaction; slope; centrifugal model test; bearing characteristic

0 引言

现有的确定桩基受力的理论和经验基本上是基于平坡条件下的桩基建立的, 平坡桩基将桩周土体视为半无限空间体, 而位于边坡上的桩基其边界条件不再是半无限体, 桩周土体不是以基桩呈对称分布, 此时, 斜坡桩的受力特性与平坡桩基有着很大的差异, 现有的桩基承载力设计方法还能否应用于斜坡桩基, 值得

深入研究^[1]。程刘勇等^[2]开展了竖向荷载下斜坡桩基极限承载力研究, 提出了一种斜坡桩基竖向极限承载力实用计算方法。胡明源等^[3]通过模型试验和数值模

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CKSF2019199/YT); 国家自然科学基金项目 (51979009); 安徽省引江济淮集团有限公司科技资助项目 (YJH-ZT-ZX-20230118528)
收稿日期: 2024-04-29

拟对斜坡上桩基的承载特性进行探讨,指出了影响桩基承载力的影响因素。Jiang 等^[4]利用响应面方法开展横向荷载下斜坡桩的可靠性研究。彭文哲等^[5]针对斜坡地基桥梁桩基承载特性和水平荷载下平地应变,提出适用于斜坡地基桩前土抗力计算分析的桩前土楔模型。尹平保等^[6]通过室内模型试验研究了水平荷载作用下斜坡桩基的斜坡空间效应对其承载特性的影响。文松霖等^[7]通过模型试验得出基桩处在渠坡上的抗变形能力比处在水平地基上的抗变形能力弱,水平承载能力比基桩处在水平地基上的要小。

上述研究成果主要是通过模型试验或数值模拟的手段开展的,且鲜有考虑斜坡竖向受荷桩及桩周土体的压实状态。本文通过 3 组离心模型试验,研究欠压实斜坡基桩在竖向荷载作用下的受力特性,分析桩侧摩阻力、桩身轴力、桩体竖向位移沿桩体的分布特征以及桩周土体的沉降规律以及边坡填筑压实度、坡比等因素对桩土非协调变形的影响,研究成果可为类似工程提供参考。

1 工程背景

1.1 依托项目概况

以河南焦东路城市交通桥梁桩为例进行分析,该桩基坐落在填方边坡上,坡高约 30 m,坡比 1:2,桩基采用大直径混凝土灌注桩,桩径为 1800 mm,桩长 45 m,桩端持力层为密实的砂卵石层。边坡填料为欠压实的粉质黏土,最大干密度 1.74 g/cm^3 ,最优含水率 18.4%,击实试验曲线如图 1。

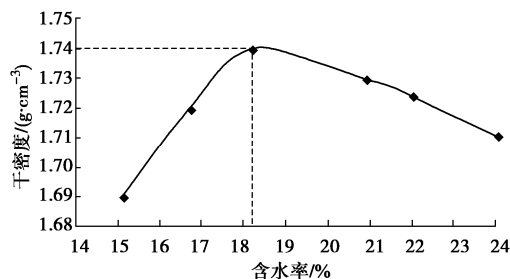


图 1 击实试验曲线图

Fig. 1 Curves of compaction tests

1.2 简要受力分析

欠压实边坡承载桩在竖向荷载作用下,首先桩身上部受到压缩而发生相对于土的向下位移,于是桩周土在桩侧界面上产生向上的侧摩阻力 q_a ,荷载沿桩身向下传递的过程就是不断克服这种摩阻力,并沿深度方向在土中扩散,在桩端处 q_b 与桩底土反力相平衡,随着桩周欠压实土体的固结沉降,桩体上半部分土体沉降量大于桩体沉降量,桩侧产生负摩阻力 q_s ,当边坡坡体填筑压实度较低,边坡沿某一滑动面滑动,将

对桩体产生下滑力 q_t ,桩体受力简要分析,如图 2。

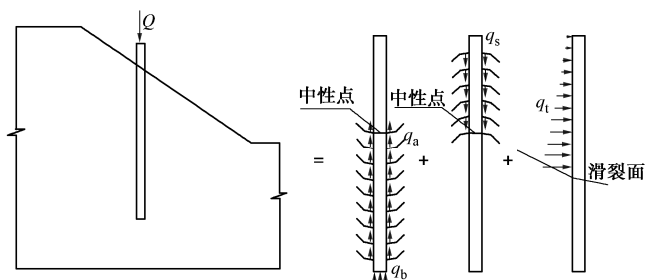


图 2 欠压实斜坡承载桩受力分析

Fig. 2 Stress analysis of bearing pile in undercompacted slope

2 离心模型试验设计

2.1 试验设备

试验在长科院 CKY-200 型土工离心实验室开展,如图 3。离心机有效半径 3.75 m,最大加速度 200g,最大有效荷载容量 200 g·t;采用双吊篮方式,吊篮采用开敞式,模型箱尺寸 100 cm×40 cm×80 cm;离心机配有数据采集系统、录像照相拍摄系统及量测系统。



图 3 CKY-200 型离心机

Fig. 3 CKY-200 centrifuge

2.2 模型设计

根据离心模型试验的相似理论,在综合考虑原型规模、模型箱尺寸及模型桩易得性等方面的基础上,采用离心加速度为 100g 的相似比开展离心模型试验。

(1) 模型桩选取及标定

原型桩为大直径灌注桩,桩径 1.8 m,桩长 45 m。模型桩采用无缝不锈钢管,模型桩长取 45 cm。灌注

桩弹性模量取 20 GPa, 钢管弹性模量取 100 GPa, 根据 $(EI)_m/(EI)_p=1/n^4$ 计算得出, 选用外径 19 mm, 壁厚 0.6 mm 的无缝钢管作为试验桩是合适的。

模型桩应变片采用 1/4 桥路粘贴, 在桩体的对称位置各贴一个应变片, 共 7 组 14 个应变片, 距桩顶的距离为 5, 10, 15, 20, 25, 35, 45 cm, 模型桩应变片粘贴如图 4。模型桩应变片粘贴完成后应对模型桩进行标定。

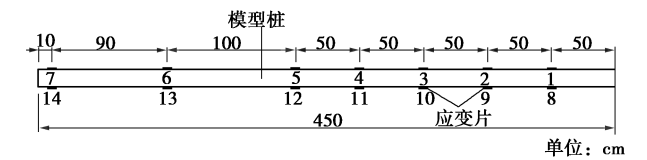


图 4 模型桩应变片粘贴图

Fig. 4 Diagram of strain gauges on model pile

(2) 模型地基及填筑体的制备

试验土样采用粉质黏土, 地基厚度为 30 cm; 模型制备时, 地基部分的控制干密度为 1.71 g/cm³, 控制含水率为 18.4%, 压实度为 96.0%; 填筑体按照工况压实度要求压实。

地基和填筑体的制备采用分层压实法, 每层厚度按照 5 cm 控制, 按预定干密度和击实后层高所需土的质量, 将土均匀倒入模型箱并击实至预定层高, 凿毛击实面, 再进行下一层土的击实直至达到预设坡高。最后根据不同断面形式及尺寸在模型箱内进行削样制作所需模型。在地基击实过程中要特别注意模型桩周围土体的击实, 避免桩体应变片的损坏以及桩体产生倾斜, 基于制备好的模型在桩体周围画 5 cm×5 cm 方格, 观测试验前后桩体以及土体的有关变形情况。

(3) 加载及量测装置

采用自行加工的一套装置进行桩头连接件和加载, 加载装置原理见图 5, 6。

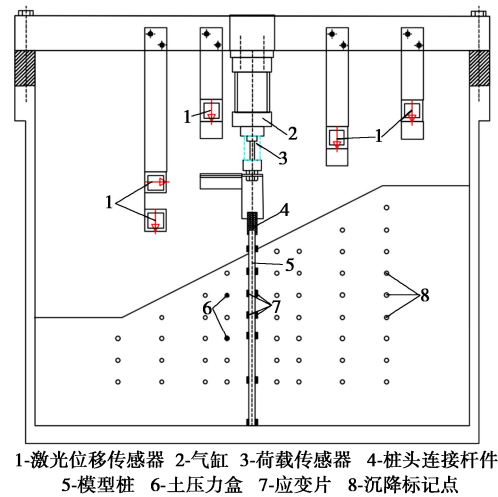


图 5 离心模型试验加载及量测设备布置图

Fig. 5 Test loading and layout of measuring equipment

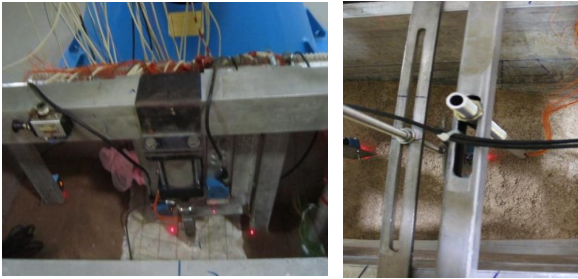


图 6 加载及量测设备布置实物图

Fig. 6 Test loading and layout of measuring equipment

试验主要通过气缸施加荷载, 量程为 5 kN, 荷载用 LUX-B-5KN-ID 传感器进行测定, 2 个激光位移传感器测定桩头位移, 3 个激光位移传感器测定边坡坡顶、中部、底部的竖向位移值, 14 个应变片测定桩身应变; 此外, 还布置了深层沉降标记点测定不同埋深的位移值。

(4) 试验组合工况

考虑两种压实度和两种坡比的组合工况, 开展了 3 组离心模型试验, 研究填筑压实度、坡比等因素对斜坡基桩竖向受力特性的影响, 组合工况见表 1。分析不同压实度下, 桩侧摩阻力、桩身轴力、桩体竖向位移沿桩体的分布特征以及桩周土体的沉降规律。

表 1 离心模型试验组合工况表

Table 1 Working conditions for centrifugal tests

编号	填方高度/ cm	填筑体压实 度/%	坡比	桩顶荷载
SY1	30	80	平坡	无荷载
SY2	30	95	1 : 2	竖向荷载
SY3	30	80	1 : 2	竖向荷载

3 试验成果分析

3.1 理论分析

本文是以原型为基础进行数据分析。具体是将试验中的位移值、荷载值、桩身内力值由各传感器测得后按式 (1) ~ (4) 转化为相应的试验值, 然后按模型的比尺规律转化为试验的原型值。

轴力: $N = \pi E(D^2 - d^2)\varepsilon / 4$, (1)

摩阻力: $q_{ai} = \Delta N_i / F$, (2)

弯矩: $M = E\pi(D^4 - d^4)\varepsilon / (32D)$, (3)

桩体深部水平变形: $v = -(2K / D) \int \left[\int \varepsilon dx \right] dx$ 。(4)

式中: N 为轴力; E 为模型桩体弹性模量; D 为模型桩体外直径; d 为模型桩体内直径; ε 为模型桩体截面处的应变值 ($1/10^6$), ΔN_i 为第 i 级荷载时桩身量测截面之间的桩身轴力差; F 为桩身量测截面之间桩段的侧表面积; M 为桩体截面弯矩; v 为水平变形 (mm); K 为修正系数。

3.2 成果分析

(1) 桩身轴力及桩侧摩阻力分析

桩身轴力传递特征是桩基承载特性的综合反映，它能反映桩侧摩阻力和端阻力的发挥状态。

a) SY1 组：压实度 80%，平坡，桩头固定，不施加桩顶竖向荷载，测得的轴力和桩侧摩阻力分布见图 7。由图可知：边坡为平坡时，土体固结沉降可使桩体产生负摩擦力，中性点位置处在 1/2 桩身处。

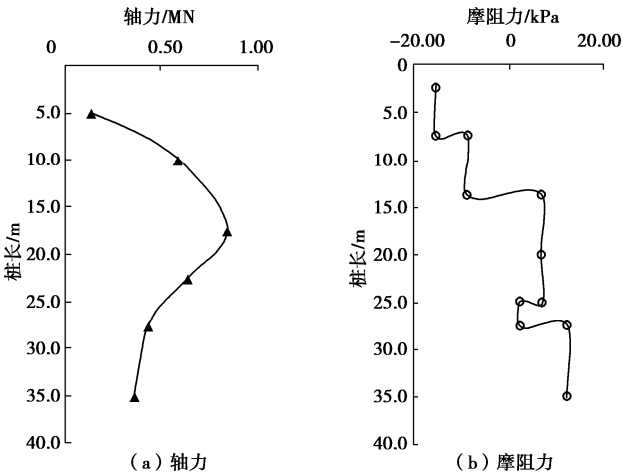


图 7 SY1 桩身轴力和摩阻力分布图

Fig. 7 Distribution of axial force and friction resistance of pile SY1

b) SY2 组：压实度 95%，坡比 1：2，桩头固定，逐步施加桩顶竖向荷载，桩身轴力和桩侧摩阻力分布见图 8。

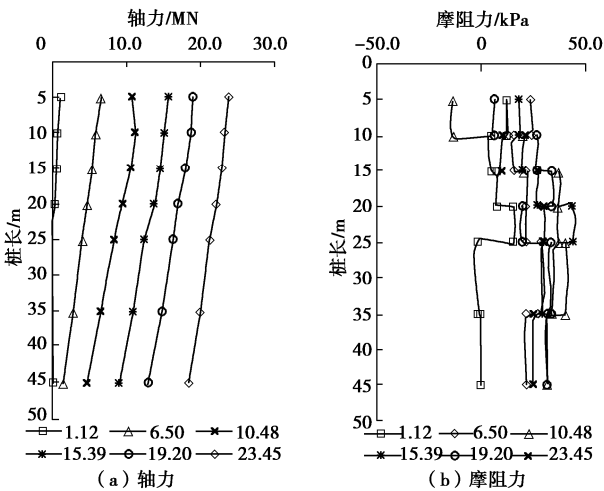


图 8 SY2 桩身轴力和摩阻力分布图

Fig. 8 Distribution of axial force and friction resistance of pile SY2

由图可知，①荷载较小时，桩体轴力主要由桩上部摩阻力承担；当荷载达到一定值时，桩端阻力开始发挥，并随着荷载的增大端部阻力越来越大，且随着荷载的增大轴力沿桩身变化趋于直线，桩侧摩阻力基本趋于定值，在极限荷载作用下，桩端承载力约占总

荷载的 72%，为摩擦端承桩。②随着桩顶竖向荷载的增大，桩侧摩阻力逐渐得到发挥，当荷载增加到 19.20 MN，侧阻力增加缓慢，桩体上部局部土体出现软化现象，下部侧阻力趋于定值。

c) SY3 组：压实度 80%，坡比 1：2，桩头固定，逐步施加桩顶竖向荷载。在桩顶竖向荷载作用下，欠压实边坡承载桩基桩侧应变片形值由桩体压缩和桩体弯矩两部分组成，当应变片的变形值全部由桩体压缩产生时，桩体轴力分布见图 9，当应变片的变形值全部由桩体弯曲产生时，桩体弯矩变形曲线见图 10。

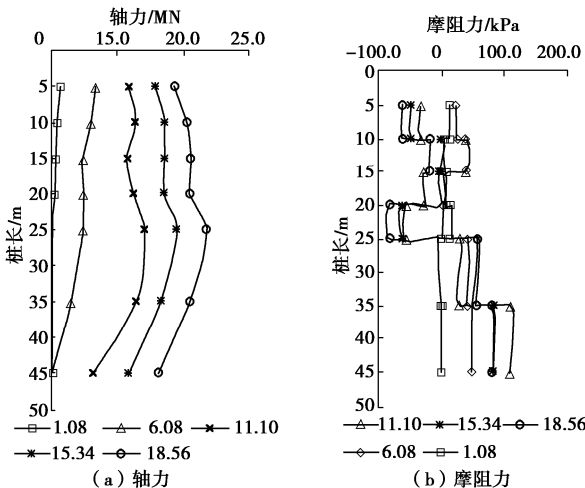


图 9 SY3 桩身轴力和摩阻力分布图

Fig. 9 Distribution of axial force and friction resistance of pile SY3

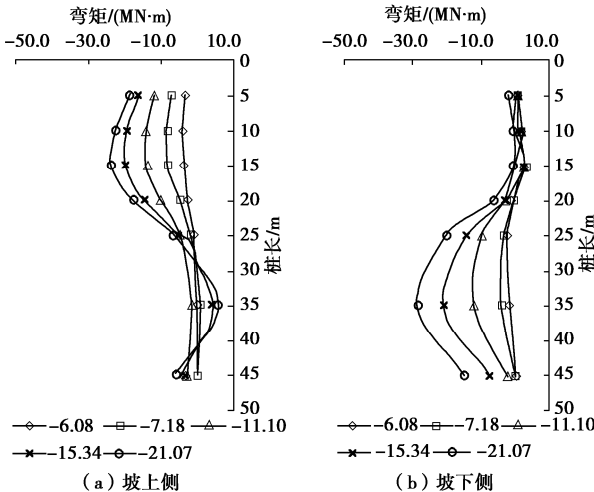


图 10 SY3 桩身弯矩分布图

Fig. 10 distribution of bending moment of pile SY3

由图 9 可知：填筑体压实度 80%时，桩身轴力沿埋深先增加后减小，桩侧存在负摩阻力；当荷载大于 11.10 MN 时，轴力最大值发生在桩体埋深 20 m 处，在埋深 0~20 m 桩身轴力沿深度逐渐增大，在埋深 15 m 处轴力曲线出现拐点，此处正好是填筑体与地基的分界面，说明压实度对桩体受力有一定影响；在埋深

20~40 m 范围内, 桩身轴力沿深度逐渐减少, 当荷载值大于 15.34 MN 时, 随着荷载增大, 轴力减少程度基本一致, 说明桩侧摩阻力在竖向荷载 15.34 MN 作用下已发挥最大。

由图 10 可知, 填筑体压实度为 80% 时, 桩侧局部存在拉应力区, 说明边坡土体在固结过程中对桩产生一定侧向力, 结合 SY1 和 SY2 试验成果可知, 欠压实边坡桩除了受到桩侧摩阻力、桩端阻力外, 还承受欠压实边坡引起的负摩阻力和下滑力。

(2) 桩顶荷载与沉降曲线分析

桩顶荷载 P -沉降 s 曲线是桩受力和荷载传递特征的宏观反映, 能较好揭示桩的受力机理。图 11 给出了不同压实度下桩基竖向荷载-桩顶沉降曲线。

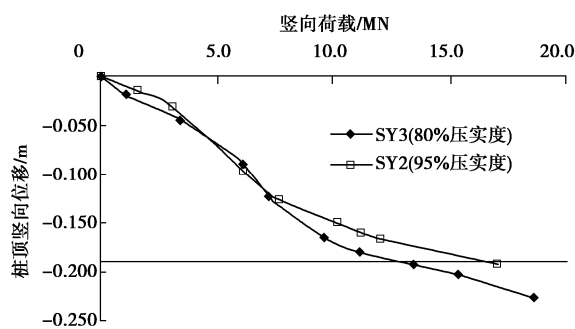


图 11 桩基竖向荷载-竖向位移图

Fig. 11 Load-vertical displacement of pile foundation

由图 11 可知, 两种试验的 P - s 曲线变化均缓慢, 属于缓变型, 没有明显的陡降点, 因此, 采用变形控制的原则确定其极限承载力比较合理。取 10% 桩径对应的荷载值作为对比值, 95% 压实度对应的荷载值为 17.0 MN, 80% 压实度对应的荷载值为 13.0 MN。在加载前期, 当竖向荷载小于 7.8 MN 时, 压实度对桩顶竖向位移影响很小。

(3) 不同压实度下坡体变形分析

为分析土体深层变形与固结时间相关, 模型中埋设了深层变形标记点。固结 1000 d, 土体位移变化见图 12 所示, 图中位移放大了 2 倍。

由图 12 可知, 边坡土体深层变形主要由竖向沉降量和水平位移组成, 土体竖向沉降量会引起桩侧负摩阻力, 土体水平位移会对桩基产生侧向力。图中红色标记为该列深层变形测点水平位移与竖向位移比值最大处, 这些标记点所在位置为边坡最可能存在的滑动面, 桩体容易发生剪切破坏。80% 压实度下, 桩体处滑动面深度为 17.4 m; 95% 压实度下, 桩体处滑动面深度为 15.1 m。

为了分析桩周土体深层沉降及桩基沉降变化情况, 把离心模型试验的固结沉降量和固结时间转化为模拟实体的沉降量和固结时间, 则不同压实度下边坡

深层沉降曲线见图 13。

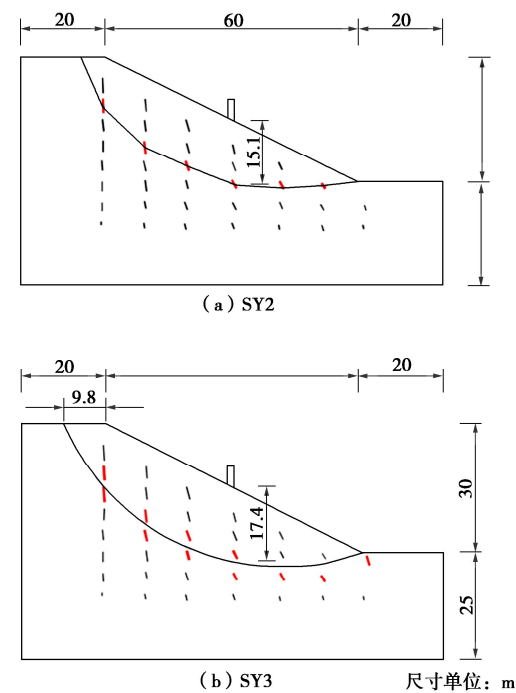


图 12 边坡深层位移分布图

Fig. 12 Distribution of deep displacement of slope

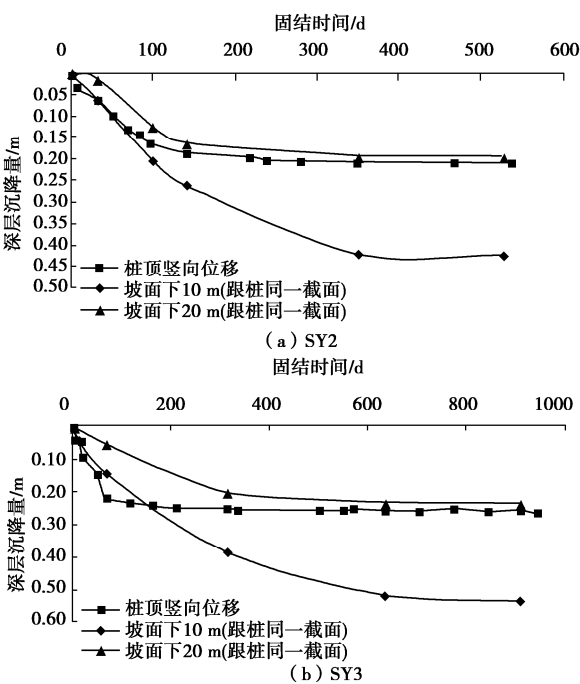


图 13 深层沉降变化曲线

Fig. 13 Variation curves of deep settlement

由图 13 可知, 95% 压实度的边坡, 桩体负摩阻力中性点位置在桩体埋深 20 m 处, 80% 压实度的边坡, 中性点位置在距坡面 25 m 处。结合轴力和桩侧摩阻力成果, 斜坡桩负摩阻力中性点约在桩体埋深 20~25 m 处, 即 0.5~0.6 倍桩体埋深处。

4 结 论

本文采用离心模型试验研究了欠压实斜坡桩竖向荷载作用下的受力特性,分析了不同压实度下,桩侧摩阻力、桩身轴力、桩体竖向位移沿桩身的分布特征以及桩周土体的变形规律,主要得到以下3点结论。

(1)欠压实斜坡基桩在桩顶竖向荷载和边坡土体作用下,桩体除了平地基桩存在的桩侧正摩阻力和桩端端阻力外,还承受欠压实桩周土体和斜坡坡度引起的桩侧负摩阻力和边坡土体对桩体产生的侧向推力。桩周土体压实度对桩侧摩阻力沿桩深分布及桩端阻力影响较大;斜坡坡度对桩侧摩阻力沿同截面桩身分布及侧阻力的峰值影响较大。

(2)在竖向荷载作用下, $P-s$ 曲线呈缓变型,取10%桩径对应的荷载值作为承载力时,95%压实度对应的荷载值为17.0 MN,80%压实度对应的荷载值为13.0 MN,桩侧土体压实度对基桩承载力影响较大。

(3)斜坡桩负摩阻力中性点约在桩体埋深20~25 m处,即0.5~0.6倍桩体埋深处,桩周土体压实度越低,边坡固结沉降量越大,沉降收敛速度越慢;同时渠坡土体压实度越低,边坡对桩体的侧向荷载就越大,若按照常规的承载桩基进行设计,则桩体额外承受的负摩阻力和侧向荷载易引起桩体破坏。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 桩基工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (GONG Xiaonan. Handbook of Pile Foundation Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 程刘勇, 陈善雄, 余 飞, 等. 竖向荷载下斜坡桩基承载力及影响因素数值研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5399-5403, 5422. (CHENG Liuyong, CHEN Shanxiong, YU

Fei, et al. Numerical simulation for vertical ultimate capacity and influencing factors of oblique slope pile under vertical loads[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5399-5403, 5422. (in Chinese))

- [3] 胡明源, 张建伟, 王宏权, 等. 复杂荷载下斜坡上单桩水平承载特性研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 584-590. (HU Mingyuan, ZHANG Jianwei, WANG Hongquan, et al. Study on the bearing characteristics of pile on slope under complex loads[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2017, 47(5): 584-590. (in Chinese))
- [4] JIANG C, LI T B, ZHOU K P, et al. Reliability analysis of piles constructed on slopes under laterally loading[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1955-1964.
- [5] 彭文哲, 赵明华, 杨超炜, 等. 斜坡地基桩前土抗力的应变楔模型修正[J]. 中南大学学报(自然科学版) 2020, 51(7): 1936-1945. (PENG Wenzhe, ZHAO Minghua, YANG Chaowei, et al. Modification of strain wedge model for soil resistance in front of piles in sloping ground[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(7): 1936-1945. (in Chinese))
- [6] 尹平保, 赵明华, 赵 衡, 等. 考虑斜坡效应的桩柱式桥梁基桩稳定性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(11): 20-25. (YIN Pingbao, ZHAO Minghua, ZHAO Heng, et al. Stability analysis of pile-column bridge pile considering slope effect[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(11): 20-25. (in Chinese))
- [7] 文松霖, 胡胜刚, 胡汉兵, 等. 渠坡上基桩的水平承载机制试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1786-1790. (WEN Songlin, HU Shenggang, HU Hanbing, et al. Test study of horizontal bearing mechanism of pile on canal slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1786-1790. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)