

文章编号: 1007-2993(2026)02-0237-08

# 超厚软土条件下不同受力特性 桩基负摩阻力分布研究

向黎<sup>1</sup> 付国顺<sup>1</sup> 张振<sup>2</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 上海 200063; 2. 同济大学土木工程学院 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**【摘要】** 桩周存在软弱土层, 邻近桩侧地面承受较大的长期荷载或地面堆载时, 需考虑基桩负摩阻力。本文依托某变电站软基处理工程, 通过三维有限元数值模型研究桩网复合地基、桩承台基础和桩筏基础三种场景下基桩负摩阻力分布特性。研究表明: 桩网复合地基可不考虑负摩阻力, 桩承台基础和桩筏基础的中性点深度比为 0.33 ~ 0.44; 施工期土体固结将减少基桩负摩阻力; 桩网复合地基中, 在土拱效应与筋材张力膜效应作用下, 桩承担了大部分上部荷载, 显著减小了负摩阻力。研究结果对于大面积堆载下超厚软土地区基桩负摩阻力设计计算具有借鉴价值。

**【关键词】** 软土; 负摩阻力; 桩网复合地基; 桩承台基础; 桩筏基础

**【中图分类号】** TU473

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0578

## Distribution of negative skin friction of pile foundations with different mechanical characteristics under ultra-thick soft soil conditions

XIANG Li<sup>1</sup> FU Guoshun<sup>1</sup> ZHANG Zhen<sup>2</sup>

(1. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**【Abstract】** When there are soft soils around the piles, and large long-term load or ground surcharge is applied adjacent to the pile foundation, the negative skin friction should be considered. Previous studies have not taken into account the influence of pile foundation form on negative skin friction of the pile foundation. This paper investigates the distribution characteristics of negative skin friction of pile foundations under different working conditions through a three-dimensional finite element numerical model, including pile-net composite foundation, pile-cap foundation and pile-raft foundation, based on a soft ground treatment project at a certain substation. The test results present that pile-net composite foundation may not need to consider negative skin friction. The neutral point depth of pile-cap foundation and pile-raft foundation is in the range of 0.33 to 0.44. Ground consolidation during construction may reduce skin friction. Due to the arching effect and membrane effect in the pile-net composite foundation, the pile carries majority of external load, leading to a significant reduce in skin friction. The research results are valuable for the design of negative skin friction of pile foundations in areas with thick soft soil under large area surcharge.

**【Key words】** soft soil; negative skin friction; pile-net composite foundation; pile-cap foundation; pile-raft foundation

### 0 引言

自负摩阻力的概念提出后, 基桩的负摩阻力受到越来越多的学者关注<sup>[1-2]</sup>, 特别是在超厚软土地区, 土体存在强度低、压缩性高等特点, 在大面积堆载下, 桩周土体沉降往往会大于桩体沉降, 导致负摩阻力的产生, 减小桩基承载力, 造成安全隐患<sup>[3-6]</sup>。此外, 堆载作用还可能导致邻近桩基发生弯曲变形, 可能引发

桩基钢筋屈服并导致混凝土发生严重裂缝, 造成工程破坏<sup>[7-9]</sup>。

已有学者针对软土地区基桩负摩阻力问题开展研究。常采用套管防护<sup>[10]</sup>、拦桩防护<sup>[11]</sup>及涂层等<sup>[12]</sup>方式降低基桩负摩阻力的影响。Poulos<sup>[13]</sup>根据负摩擦桩的结构承载力、沉降状态及地基承载力, 提出了一种实用的设计方法, 并讨论了残余应力、桩顶荷载

作者简介: 向黎, 男, 1982年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电站结构设计。E-mail: 2467@ecepdi.com

通信作者: 付国顺, 男, 1991年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电站结构设计。E-mail: 3037@ecepdi.com

等因素对负摩阻力的影响。杨庆等<sup>[14]</sup>通过单桩静载模型试验研究了含水率变化的粉土在堆载条件下的桩侧摩阻力和桩端阻力变化规律,以及中性点位置变化规律。Ellis<sup>[15]</sup>根据负摩擦桩的周围土体沉降、桩顶沉降及桩侧应力分布,提出了一种简化设计方法。

此外,一些学者也开展了负摩阻力中性点的相关研究。黄挺等<sup>[16]</sup>通过模型试验研究了土表堆载分布对基桩负摩阻力的影响,结果显示,分级加载作用下,基桩在边载时的附加沉降较围载时减少,黏土中基桩中性点深度也相应减小。孔纲强等<sup>[17]</sup>采用透明土和PIV技术,探究了堆载对中性点位置和桩-土相对位移的影响。马学宁等<sup>[18]</sup>探究了不同桩端下卧层对中性点的影响,结果表明黄土和粗砂下卧层的中性点位置分别为桩长的0.51~0.6和0.6~0.8。郑一峰等<sup>[19]</sup>通过现场土层沉降和基桩承载力测试等方法,研究了粉质黏土在回填堆载时确定中性点的问题。叶观宝等<sup>[20]</sup>结合现场试验建立了单桩有限元分析模型,研究了大面积填土场地中填土重度、填土厚度等参数对基桩中性点的影响,并进行了敏感度分析。

以往研究主要考虑桩周存在软弱土层,邻近桩侧地面承受较大堆载的情况,未考虑桩基受力特性对基桩负摩阻力的影响。本文基于某变电站软基处理工程建立三维有限元模型,研究桩网复合基础、桩承台基础和桩筏基础在大面积堆载下超厚软土地区基桩负摩阻力情况及中性点位置,并与规范参考值对比,研究结果对于大面积堆载下超厚软土地区基桩负摩阻力设计计算具有借鉴价值。

## 1 工程概况

### 1.1 场地概况

某拟建500 kV变电站位于温瑞平原区,场地属浅海滩涂堆积平原地貌,主要由滨海堆积而成,地形

平坦、开阔,拟建场区灌溉水渠较多,宽约1.5 m;场地地面自然标高一般为0.9~3.2 m,平均标高为2.3 m,现开垦为农田,种有蔬菜、瓜果等农作物(见图1)。拟建工程场地设计标高为5.80 m。



图1 拟建场区地貌图  
Fig. 1 Topography of the proposed site

拟建场地典型地质剖面如图2所示。场地地土以黏性土和淤泥为主,土层含水量高、压缩性高、灵敏度高。场地土层物理力学性质指标见表1。场地上部为超厚淤积软土层,平均厚度约为35 m,最大厚度达45.8 m,若不经有效处理,将会导致极大的工后沉降,严重影响后期使用,增加维护费用。场地表层分布有人工填土,为达到设计场坪标高后期还需要补填土方,人工填土和补填土方均为新近回填,结构松散,不均匀且承载力低,需要压实处理后才能用作电缆沟、道路施工地基。场区拟建建(构)筑物对于工后沉降的要求较高(20~30 cm),需采用合理的地基处理方案有效控制建(构)筑物的地基变形。

### 1.2 基础设计方案

本工程场地存在深厚软土,地质条件复杂,综合考虑上部建(构)筑物设计要求,设计三种地基基础形式,具体如下:

(1)配电站地采用桩网复合地基。基桩采用桩径550 mm的PHC管桩,壁厚110 mm,桩长52 m,正方

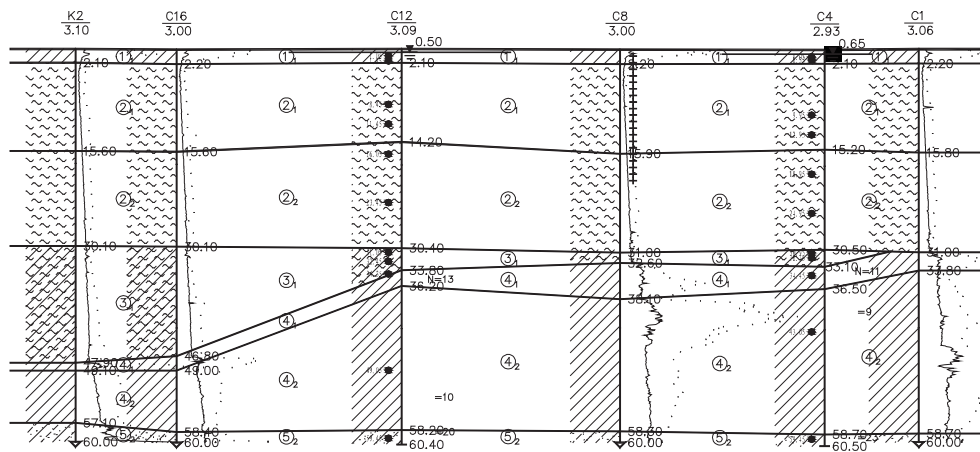


图2 地质剖面图  
Fig. 2 Geological profile

表 1 土的物理力学性质指标  
Tab. 1 Physical mechanical parameters of the soil

编号	土层名称	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	泊松比
	填土	20	10.0	35	20.0	0.3
	垫层	20	5.0	38	35.0	0.3
① <sub>1</sub>	黏土	18.40	19.3	13.0	3.6	0.3
② <sub>1</sub>	淤泥	16.70	8.4	8.5	2.2	0.35
② <sub>2</sub>	淤泥	16.50	9.5	8.9	3.0	0.35
③ <sub>1</sub>	淤泥质黏土	17.90	13.8	10.9	6.0	0.32
④ <sub>1</sub>	黏土	18.70	26.0	12.2	10.8	0.3
④ <sub>2</sub>	黏土	18.50	25.1	10.9	10.0	0.3
⑤ <sub>2</sub>	粉砂粉质黏土	19.10	12.0	25	21.4	0.3

形布桩,桩间距 3 m,桩帽尺寸 1.8 m×1.8 m×0.5 m,桩顶采用填芯混凝土进行封闭,填芯高度 1.65 m,填芯混凝土强度等级为 C30。加筋层厚度 300 mm,垫层采用级配碎石,采用单层双向土工格栅正交铺设在桩帽顶面,土工格栅应变 5% 对应的刚度为 1500 kN/m,抗拉强度为 110 kN/m,筋材蠕变应变率为 2%。

(2)主控通信楼采用桩承台基础。基桩采用桩径为 550 mm 的 PHC 管桩,壁厚 110 mm,桩长 52 m,正方形布桩,桩间距 3 m,承台尺寸 4.8 m×1.8 m×0.5 m,桩顶采用填芯混凝土进行封闭,填芯高度 1.65 m,填芯混凝土强度等级为 C30。

(3)厂房采用桩筏基础。基桩采用桩径为 550 mm 的 PHC 管桩,壁厚 110 mm,桩长 52 m,正方形布桩,桩间距 3 m,筏板尺寸 16.8 m×1.8 m×0.5 m,桩顶采用填芯混凝土进行封闭,填芯高度 1.65 m,填芯混凝土强度等级为 C30。

## 2 模型建立

基于实际工程地质条件,建立地基数值模型。地基土层厚度为 86 m,由包括⑤<sub>2</sub>粉砂粉质黏土在内的 5 个工程地质层、7 个亚层组成。为减小计算模型的边界效应影响,根据地质剖面图及地基土物理力学指标,把参数相近的地层进行合并简化(如②<sub>1</sub>淤泥和②<sub>2</sub>淤泥),为提高计算效率,按地基对称性,取完整桩体的二分之一和桩间距的二分之一建立对称模型。模型底面采用固定边界,模型四周边界限制法向方向位移。

在桩、桩帽与土体间建立接触面以保证侧摩阻力的正常发挥,各接触面参数根据勘察报告的桩侧土阻力极限标准值选取,FLAC 3D 接触面本构模型为线性莫尔-库仑模型,可将界面摩擦角均设置为 0°,黏聚力选取侧阻力极限值推荐值来代表界面发挥的

最大侧摩阻力,各接触面法向及切向刚度按照等效刚度计算<sup>[21]</sup>,桩体最深到达④<sub>2</sub>层,各土层接触面参数见表 2。

表 2 桩-土接触面参数  
Tab. 2 Parameters of the pile-soil interface

土层	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	黏聚力/kPa
① <sub>1</sub> 黏土	3650	3650	22.0
② <sub>1,2</sub> 淤泥	3650	3650	13.5
③ <sub>1</sub> 淤泥质黏土	3650	3650	22.0
④ <sub>1</sub> 黏土	3650	3650	60.0
④ <sub>2</sub> 黏土	3650	3650	55.0

为了研究桩网复合地基、局部堆载的桩承台基础以及大面积堆载的桩筏基础 3 种场景下的桩基负摩阻力情况,构建了各场景的数值模型图,模型构建条件如下:

(1)局部堆载的桩网复合基础:取两桩影响区域建立模型。桩帽上填土高度为 3.5 m,上部所有场地设备局部荷载为 600 kN,结合填土自重折算成面荷载,按 15 kPa 施加于桩帽,如图 3(a)所示。

(2)局部堆载的桩承台基础:取建筑中心处两桩承台,根据对称建立模型,承台上结构荷载为 3000 kN,结合 4.35 m 的填土自重折算成面荷载,按 446 kPa 施加在承台上,如图 3(b)所示。

(3)大面积堆载的筏形基础:筏板承台上结构荷载为 900 kN,结合筏板承台上设备荷载为 15 kPa 和 2.7 m 的填土高度自重折算成面荷载,按 60 kPa 施加在筏板承台上,如图 3(c)所示。

为全面探究超厚软土条件下桩基负摩阻力分布规律,采用两种计算工况进行模拟及分析。模拟工况 1:考虑施工过程中填土及结构荷载、使用荷载引

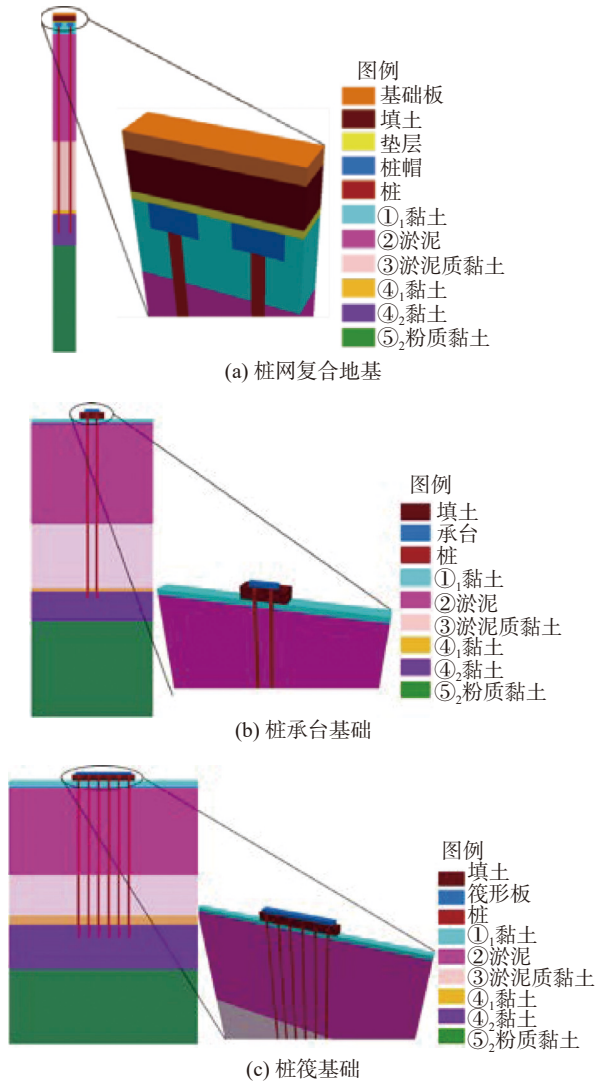


图3 数值分析模型  
Fig. 3 Numerical model

起的地基总沉降, 不考虑填土施工过程中固结对桩基负摩阻力的影响, 计算结果偏于保守; 模拟工况 2: 考虑填土在施工期的固结, 忽略该部分桩土差异沉降引起的负摩阻力, 仅考虑填土及结构荷载、使用荷载引起的工后沉降对桩基负摩阻力的影响, 计算结果更接近于真实值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 桩土相对位移

图4为桩网复合地基的沉降位移云图。桩网复合地基总沉降最大值约为 118.6 mm, 填土在施工期的固结最大沉降约为 48.6 mm, 桩网复合地基中桩长范围内的差异沉降控制较好, 桩长范围内的桩沉降及桩周土体沉降基本相同, 桩端处会出现一定程度的刺入, 即桩端沉降大于桩周围土体沉降。

图5为桩承台基础的沉降云图。桩承台基础总沉降最大值约为 232.1 mm, 填土在施工期固结沉降

最大值约为 145.4 mm。桩长范围内的桩周土体沉降显著大于桩体沉降, 桩身产生负摩阻力, 对桩基承载力造成不利影响。填土在施工期的固结后, 桩体沉降值仍大于桩周土, 但差异显著减小, 有利于减少桩基负摩阻力。随着深度的增加, 桩与桩周土体沉降趋于一致。

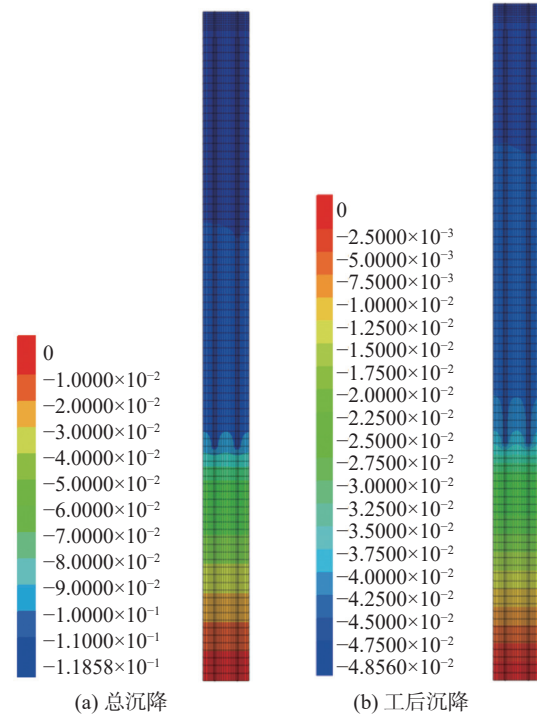


图4 桩网复合基础沉降  
Fig. 4 Settlement of pile-net composite foundation

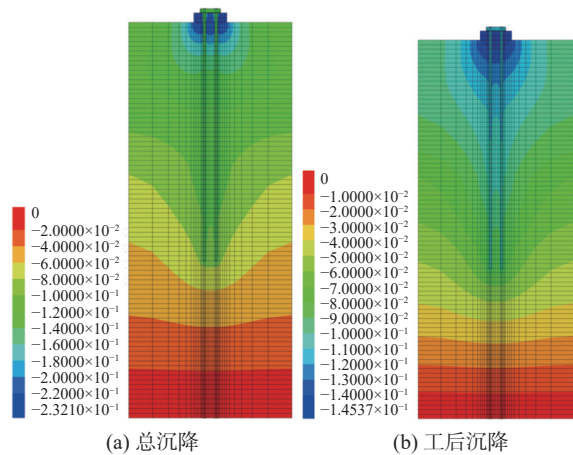


图5 桩承台基础沉降  
Fig. 5 Settlement of pile-cap composite foundation

图6为桩筏基础的沉降云图。桩筏基础的总沉降最大值约为 194.4 mm, 填土在施工期固结沉降最大值约为 177.6 mm。填土沉降显著大于桩体, 桩身产生负摩阻力, 填土在施工期的固结会减少桩土的差异沉降, 有利于减少负摩阻力。

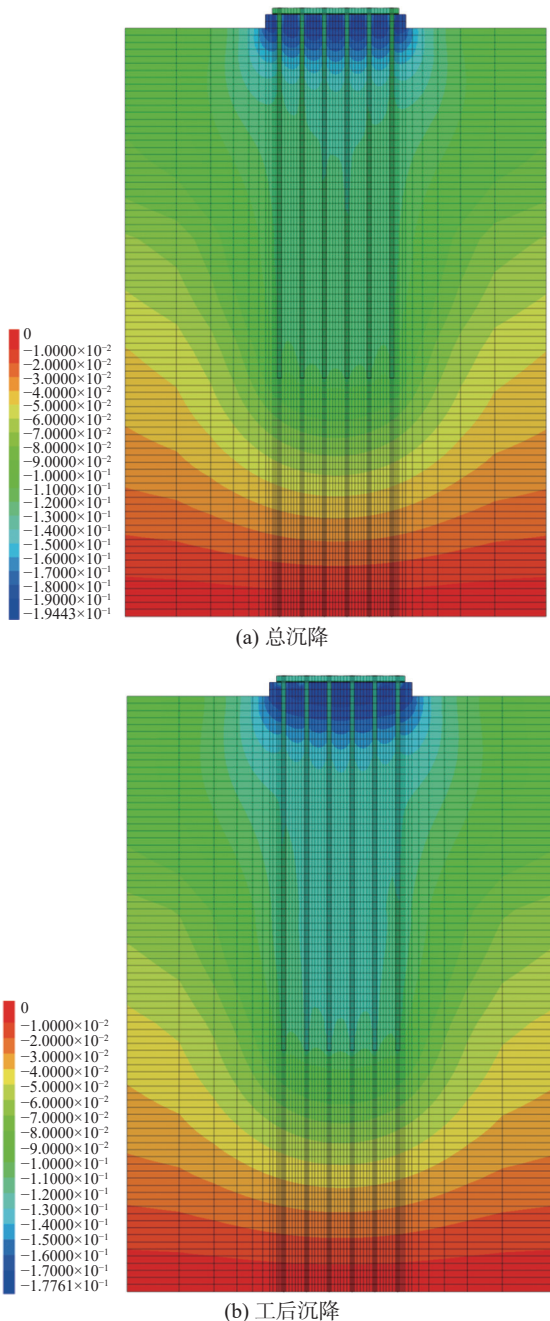


图6 桩筏基础沉降

Fig. 6 Settlement of pile-raft composite foundation

### 3.2 中性点位置

中性点定义为在桩的某一深度处, 桩土相对位移为零, 既没有负摩阻力, 也没有正摩阻力, 习惯上称该点为中性点。中性点深度比为自桩顶算起的中性点深度和桩周软弱土层下限深度的比值<sup>[22]</sup>。图7—图9为不同基础形式下桩及桩间土沉降沿深度分布曲线。两种工况下的桩网复合基础中性点均为3.5 m, 软弱土层下限深度为48 m, 则中性点深度比约为0.073。两种计算工况下的桩承台基础中性点分别为19 m和14 m处, 软弱土层下限深度为43 m, 则中性点深

度比约为0.442和0.326, 由于施工期土体固结对桩基负摩阻力的影响, 中性点位置上移, 导致中性点深度比下降。两种计算工况下的桩筏基础中性点均为17 m, 软弱土层下限深度为43 m, 故中性点深度比约为0.395, 相较于桩承台基础, 桩筏基础由于筏板作用, 使中性点位置基本不变。

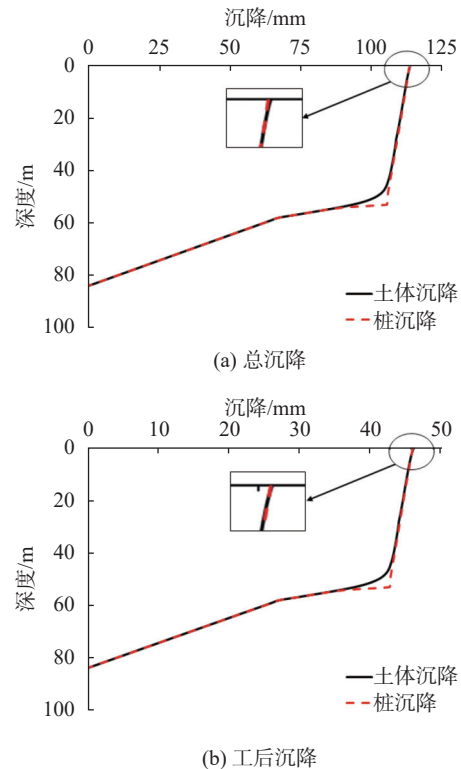


图7 桩网复合地基沉降-深度变化

Fig. 7 Variation of settlement of pile-net composite foundation and depth

### 3.3 不同受力特性桩基负摩阻力分布

本工程地基为超厚软土且桩顶承受大面积堆载, 桩端进入④<sub>2</sub>层黏土, 依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)<sup>[22]</sup>的规定, 桩周存在软弱土层, 邻近桩侧地面承受局部较大的长期荷载, 或地面大面积堆载(包括填土)时, 需考虑负摩阻力; 且持力层为黏性土或粉土时, 中性点深度比可取0.5~0.6。

本文工况中桩承台基础的中性点深度比0.33~0.44, 桩筏基础中性点深度比约为0.40, 略小于《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)桩中性点深度比推荐值。桩网复合地基的桩基中性点深度比仅为0.073, 这是由于桩土未发生明显差异沉降, 在设计时可不考虑负摩阻力的情况, 若按照规范中性点取值, 设计将过于保守。

桩网复合地基中桩基中性点远小于桩承台基础和桩筏基础, 这是与其独特的受力机制有关。三种地

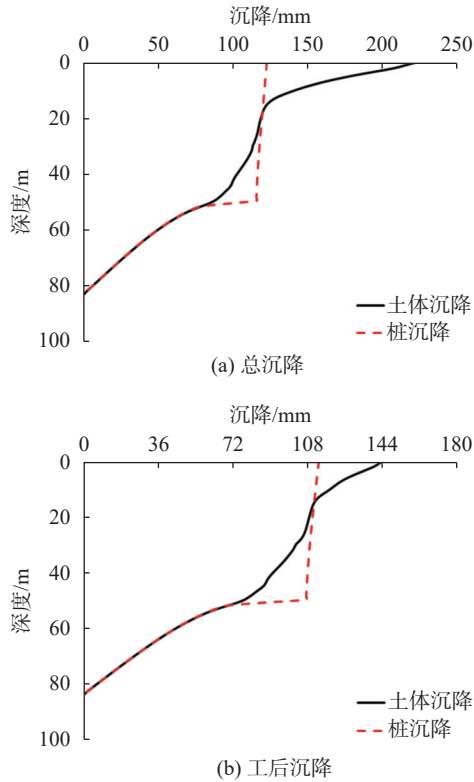


图 8 桩承台基础沉降-深度变化  
Fig. 8 Variation of settlement of pile-cap composite foundation and depth

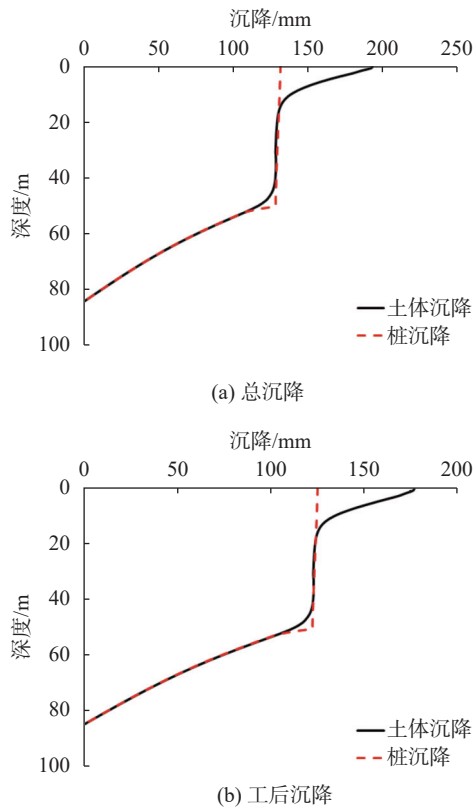
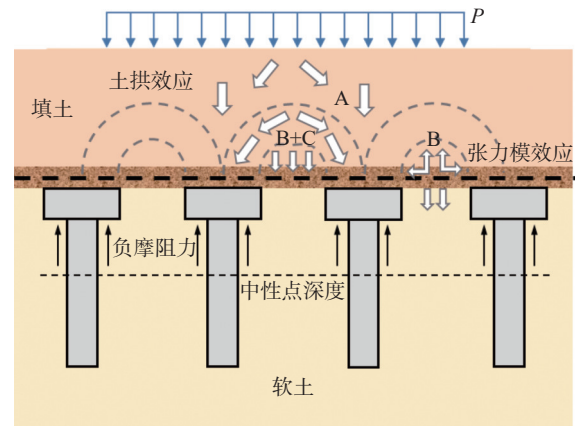
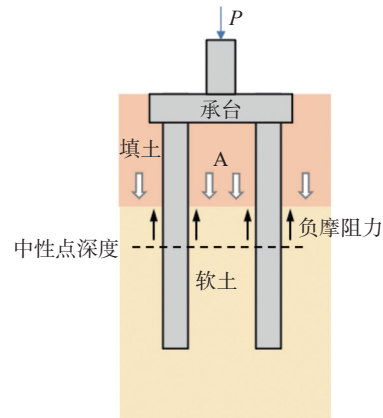


图 9 桩筏基础沉降-深度变化  
Fig. 9 Variation of settlement of pile-raft composite foundation and depth

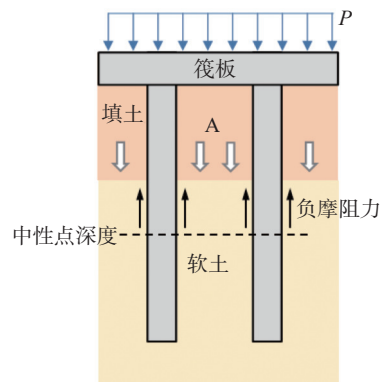
基础形式的受力模型如图 10 所示。在桩网复合地基中,土拱效应与筋材张力膜效应是其核心荷载传递机制。如图 10(a)所示,假设上部填土自重及超载由 A, B, C 三部分组成。填土中的土拱效应先将 A 部分的荷载传递至桩顶,剩下 B+C 部分的荷载则由筋材承担。筋材在竖向荷载作用下发生挠曲变形后,通过张力膜效应将其中 B 部分的荷载传递至桩顶,而余下 C 部分的荷载则由筋材下方桩间土承担。因此,该体系中桩承担了大部分上部荷载,从而减少传



(a) 桩网复合地基



(b) 桩承台基础



(c) 桩筏基础

图 10 基础受力模型  
Fig. 10 Force forms of foundations

递到地基土上的荷载,进而控制了桩土差异沉降,减小了桩基负摩阻力。Xing等<sup>[23]</sup>指出桩网复合地基中的加筋垫层可有效减小桩基负摩阻力。桩承台和桩筏基础中,上部荷载由承台或筏板传递至桩基,而填土自重荷载A全部由桩间软土承担,造成较大的桩土差异沉降,引起可观的桩基负摩阻力。

#### 4 结论

本文基于某变电站工程,开展超厚软土条件下不同受力特性桩基负摩阻力数值模拟研究,主要结论如下:

(1)桩网复合地基桩长范围内的桩沉降及桩周土体沉降基本相同,桩端处会出现一定程度的刺入。桩承台基础和桩筏基础桩长范围内的桩周土体沉降显著大于桩体沉降,桩身产生负摩阻力,若考虑施工期填土固结影响,桩土的差异沉降将会减小,从而减少基桩负摩阻力。

(2)桩网复合地基中性点深度比约为0.07,桩承台基础的中性点深度比0.33~0.44,桩筏基础中性点深度比约为0.40。若考虑施工期土体固结对基桩负摩阻力的影响,中性点位置将上移。

(3)桩承台基础和桩筏基础中性点深度比略小于《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中的中性点深度比推荐值。桩网复合地基可不考虑负摩阻力。桩网复合地基中,在土拱效应与筋材张力膜效应作用下桩承担了大部分上部荷载,显著减小了桩土差异沉降。而桩承台和桩筏基础中,填土自重荷载全部由桩间软土承担,造成较大的桩土差异沉降,引起可观的基桩负摩阻力。

#### 参 考 文 献

- [1] VON TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [2] 孔纲强,杨庆,杨钢,等.负摩阻力引起的桩身下拽力和桩顶下拽位移研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(4):411-417.(KONG G Q, YANG Q, YANG G, et al. Research progress of dragload and downdrag on piles by negative skin friction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(4): 411-417. (in Chinese))
- [3] 夏力农,柳红霞,欧名贤.垂直受荷桩负摩阻力时间效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1177-1182.(XIA L N, LIU H X, OU M X. Experimental research on time effects of negative skin friction behaviors of vertical-loaded piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1177-1182. (in Chinese).)
- [4] CUI J F, LI J P, ZHAO G W. Long-term time-dependent load-settlement characteristics of a driven pile in clay[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112: 41-50.
- [5] HUANG W, WEN K J, DENG X J, et al. Constitutive model of lateral unloading creep of soft soil under excess pore water pressure[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 5017546.
- [6] 孙健.软土地区超高层建筑岩土工程关键问题及沉降控制研究[J].上海国土资源,2024,45(2):53-57,68.(SUN J. Research on key problems of geotechnical engineering and settlement control of super-high-rise buildings in soft soil area[J]. Shanghai Land & Resources, 2024, 45(2): 53-57,68. (in Chinese))
- [7] HEYMAN L, BOERSMA L. Bending moments in piles due to lateral earth pressure[C]//5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris: A. A. Balkema, 1961: 425-429.
- [8] HEYMAN L. Measurement of the influence of lateral earth pressure on pile foundations[C]//6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Montréal, 1965: 257-260.
- [9] LEUSSINK H, WENZ K P. Storage yard foundation on soft cohesive soils[C]//7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969.
- [10] 柴清,陈天镭,张杰,等.钢筋混凝土套管桩及其施工方法:201811151170.4[P].2018-09-29.(CHAI Q, CHEN T L, ZHANG J, et al. Reinforced concrete casing pipe pile and construction method thereof: 201811151170.4[P]. 2018-09-19. (in Chinese))
- [11] ABDRABBO F M, ALI N A. Behaviour of single pile in consolidating soil[J]. Alexandria Engineering Journal, 2015, 54(3): 481-495.
- [12] KHARE M G, GANDHI S R. Skin friction of piles coated with bituminous coats[M]//CAMP W, CASTELLI R, LAEFER D G, et al. Contemporary Issues in Deep Foundations. Reston: American Society of Civil Engineers, 2007: 1-10.
- [13] POULOS H G. A practical design approach for piles with negative friction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 2008, 161(1): 19-27.
- [14] 杨庆,孔纲强,郑鹏一,等.堆载条件下单桩负摩阻力模型试验研究[J].岩土力学,2008,29(10):2805-2810.(YANG Q, KONG G Q, ZHENG P Y, et al. Model test study of negative skin friction for single pile under surface load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10):

- 2805-2810. (in Chinese.)
- [15] ELLIS E A. Briefing: serviceability of piles with negative skin friction[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 2013, 166(1): 3-7.
- [16] 黄挺, 龚维明, 戴国亮. 不同土表堆载分布形式下桩基负摩阻力特性模型试验 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2015, 45(6): 1169-1174. (HUANG T, GONG W M, DAI G L. Model tests on characteristics of pile foundation negative skin friction under different distributions of surcharge load[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(6): 1169-1174. (in Chinese).)
- [17] 孔纲强, 孙学谨, 曹兆虎, 等. 楔形桩和等截面桩中性点位置可视化对比模型试验 [J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 38-42. (KONG G Q, SUN X J, CAO Z H, et al. Visualization comparative model tests on neutral point position of tapered pile and equal section pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S1): 38-42. (in Chinese).)
- [18] 马学宁, 张沛云, 贾喜翠, 等. 不同桩端下卧层桩基负摩阻力模型试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2017, 34(1): 11-15, 22. (MA X N, ZHANG P Y, JIA X C, et al. Model test of pile negative friction for different pile-end underlying layers[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(1): 11-15, 22. (in Chinese).)
- [19] 郑一峰, 毛健, 梁世忠, 等. 高填土地地考虑土体固结的桩基负摩阻力 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2017, 47(4): 1075-1081. (ZHENG Y F, MAO J, LIANG S Z, et al. Negative skin friction of pile foundation considering soil consolidation in high fill site[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(4): 1075-1081. (in Chinese).)
- [20] 叶观宝, 郑文强, 张振. 大面积填土地地中摩擦型桩负摩阻力分布特性研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 440-448. (YE G B, ZHENG W Q, ZHANG Z. Investigation on distribution of negative friction of frictional piles in large filling sites[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(S1): 440-448. (in Chinese).)
- [21] 禄云华, 李盛, 马莉, 等. 高填土地地不同桩径桩土相互作用及桩基负摩阻力研究 [J]. 应用力学学报, 2025, 42(4): 860-868. (LU Y H, LI S, MA L, et al. Study on pile-soil interaction and negative friction of piles with different diameters in high fill site[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2025, 42(4): 860-868. (in Chinese).)
- [22] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [23] XING H F, ZHANG Z, LIU H B, et al. Large-scale tests of pile-supported earth platform with and without geogrid[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(6): 586-598.

收稿日期: 2024-12-09