

软土地区有轨电车线路复合桩板结构路基受力特性分析*

王长丹^{1,2} 周伟^{1,2} 姚青³ 散骞骞^{1,2} 陈凯祥^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;

3. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 200131, 上海//第一作者, 副教授)

摘要 目的:有轨电车线路如选用桩板结构作为其路基形式,将极大地增加工程造价。与之相比,复合桩板结构路基造价较低,且能充分发挥桩-板-土的协同受力作用,需对有轨电车线路复合桩板结构路基的受力特性进行深入研究。**方法:**依托上海松江有轨电车示范线工程,对深厚软土地区复合桩板结构路基的受力变形特性进行了阐述。采用数值模拟方法,详细分析了该工程在运营期和建设期的复合桩板结构路基跨中板下土体、桩体和桩土的受力变形特性,并进一步分析了不同桩长条件下复合桩板结构路基的力学性能。**结果及结论:**跨中板下土体的附加应力随埋深增加呈现先减小后增大再减小的变化规律,且在桩底下方 1~2 m 处达到峰值;桩体的承载力主要由桩侧摩阻力提供,桩侧土体与跨中板下土体间的差异沉降值与桩侧摩阻力呈正相关关系;随着荷载的增大,桩侧摩阻力自下而上逐渐达到极限值;随着桩体长度的增加,板下土体沉降量逐渐减小,且在桩体极限承载力范围内,适当减小桩体长度并不会显著减小桩体所能承担的上部荷载大小。

关键词 有轨电车线路;深厚软土地区;复合桩板结构路基;受力特性

中图分类号 TU43:U482.1;U213.2⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.11.001

Analysis on the Mechanical Characteristics of Composite Pile-plank Structure Subgrade for Tram Line in Soft Soil Area

WANG Changdan, ZHOU Wei, YAO Qing, SAN Qianqian, CHEN Kaixiang

Abstract Objective: Choosing pile slab structure as the subgrade form for tramline will significantly increase the construction cost. In contrast, the cost of the composite pile-plank structure foundation is lower, and it can fully utilize the synergistic force between the pile, slab, and soil. Therefore, it is necessary to conduct an in-depth study on the mechanical characteristics of the composite pile-plank structure subgrade for

tramline. **Method:** Based on the tram demonstration line project in Shanghai Songjiang, the stress and deformation characteristics of the composite pile-plank structure subgrade in deeply soft soil areas are elaborated. By using numerical simulation methods, the stress and deformation characteristics of the soil, pile body, and pile-soil under the subgrade middle plank are analyzed in detail during operation and construction periods of the project. Furthermore, the mechanical properties of the composite pile-plank structure subgrade under different pile lengths are analyzed. **Result & Conclusion:** The additional stress on the soil under the mid span slab shows a pattern of first decreasing, then increasing, and finally decreasing again with increasing depth, reaching a peak value at a depth of 1~2 m below the pile bottom; the bearing capacity of the pile is mainly provided by the lateral friction resistance of the pile, and the differential settlement value between the lateral soil and the soil under the mid span slab is positively correlated with the lateral friction resistance; with the increase of load, the lateral friction resistance gradually reaches the limit value from bottom to top; as the pile length increases, the settlement of the soil under the plate gradually decreases, keeping within the range of the ultimate bearing capacity of the pile. Appropriately reducing the length of the pile will not significantly reduce the size of the upper load that the pile can bear.

Key words tram line; deep soft soil area; composite pile-plank structure subgrade; mechanical characteristics

First-author's address Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, 201804, Shanghai, China

在我国东部沿海深厚软土和西北湿陷性黄土地区的高速铁路建设中,为更好地控制轨道路基的工后沉降和不均匀沉降,多采用桩板结构路基形式。桩板结构路基的桩端插入持力层中,计算时不

* 国家自然科学基金面上项目(51778485);青年科学基金项目(51608384)

考虑板下土体的承载作用。但对于轴重较小、运行速度较低且沉降控制标准较低的有轨电车线路而言,选用桩板结构作为其路基形式,无疑会极大地增加工程造价,且试验发现板下土体的荷载分担比例达到 12% 以上^[1]。基于此,复合桩板结构路基应运而生,目前其主要应用于深厚软土地区的有轨电车线路建设中^[2-3]。文献[4-7]表明:相比于传统的桩板结构,复合桩板结构路基考虑了板下土体的承载作用,且桩端未插入持力层中,当结构受荷下沉时,桩体发生向下的刺入变形,从而充分发挥了桩-板-土的协同受力作用。图 1 为复合桩板结构路基的承载示意图^[8]。本文主要通过有限元模拟的方式,对上海松江有轨电车示范线工程复合桩板结构路基的桩土受力变形特性进行详细分析,以期为后续工程设计提供一定的参考。

1 工程概况及地质

1.1 工程概况

上海松江有轨电车示范线工程包括 T1 和 T2

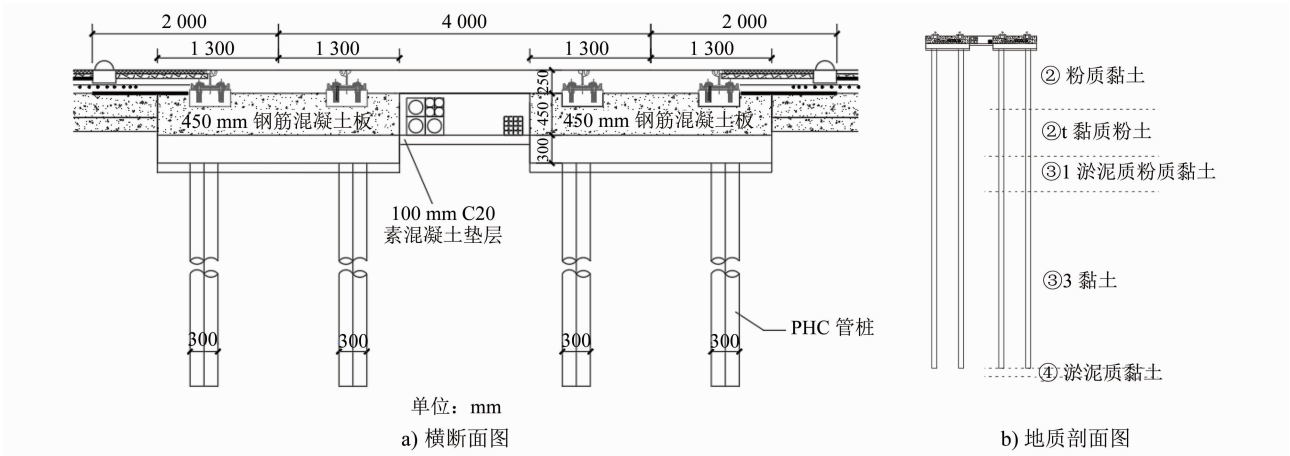


图 2 复合桩板结构路基的横断面图及地质剖面图

Fig. 2 The cross section of composite pile-plank structure subgrade and geological profile

1.2 地质条件

根据上海松江有轨电车示范线工程的地质勘

察资料,得到现场的岩土分层情况及各层土体的物理力学参数。表 1 为其土体物理力学参数列表。

表 1 土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层编号	地层名称	层底埋深/ m	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa	渗透系数/(cm/s)		重度/ (kN/m ³)
						垂直方向	水平方向	
②	粉质黏土	3.6	17	19.5	3.97	1.21×10 ⁻⁸	1.70×10 ⁻⁷	18.1
②t	黏质粉土	6.4	8	29.0	6.51	8.00×10 ⁻⁸	1.20×10 ⁻⁷	18.5
③1	淤泥质粉质黏土	8.5	12	18.0	3.31	4.59×10 ⁻⁷	1.32×10 ⁻⁶	17.5
③3	黏土	19.0	13	12.0	3.01	8.58×10 ⁻⁸	1.14×10 ⁻⁷	17.3
④	淤泥质黏土	19.5	10	13.0	2.41	5.67×10 ⁻⁸	8.70×10 ⁻⁸	16.8
⑤1	粉质黏土	21.3	14	16.5	3.59	1.21×10 ⁻⁸	1.70×10 ⁻⁷	17.7
⑤2-1	砂质粉土	31.3	5	32.5	10.46	1.20×10 ⁻⁶	3.00×10 ⁻⁶	18.4
⑤2-2	粉砂	34.6	3	35.0	12.06	1.20×10 ⁻⁵	3.00×10 ⁻⁵	18.5

2 模型建立与验证

2.1 模型建立

利用有限元软件 PLAXIS 3D 建立有轨电车线路复合桩板结构路基的数值模型,以模拟有轨电车线路从施工建设到后期运营的受力变形规律。模拟计算时仅考虑单向有轨电车线路作用下的受力和变形。为排除有限元计算边界的影响,纵向取两联复合桩板结构路基,总长度为 60 m,建立的三维有限元模型如图 3 所示。该模型尺寸为 60 m(长)×50 m(宽)×35 m(高),土体本构为 HSS(硬化本构模型),并基于 Biot 固结理论对土体固结沉降进行计算。

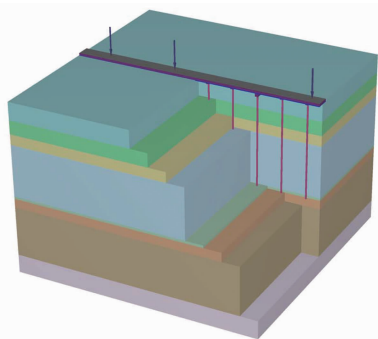


图 3 有限元计算模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of finite element calculation model

为保证数值计算的收敛性和可行性,同时尽可能模拟现场复杂的环境,本文对有限元模型的边界条件和加载条件进行了以下合理假设:

1) 地下水位不变,均位于地表以下 1 m;各土层水平方向和竖直方向的渗透系数按照地质勘察资料分别选取;

2) 模型的竖向边界水平固定,只可以产生竖向位移且不透水;下边界为固定边界且不透水;上边界为自由面,为渗透边界;

3) 将承载板上部的轨道结构和列车荷载换算为均布面荷载,模拟面荷载瞬时施加于承载板顶部;固结计算过程中面荷载保持不变,轨道结构换算为 6 kPa 的均布荷载,列车荷载换算为 30 kPa 的均布荷载。

2.2 基于现场实测的模型验证

在进行后文的分析前,先通过上海松江有轨电车示范线工程现场实测数据^[3]来验证本文所建有限元模型的可靠性。将建设期(2018 年 4 月 17 日沥青面层浇筑)和开通运营后 6 个月(2019 年 11 月 24 日—2020 年 5 月 24 日)线路中跨跨中和承载板

两端板下土体沉降量的现场实测值与数值模拟值进行对比,其结果如图 4 所示。

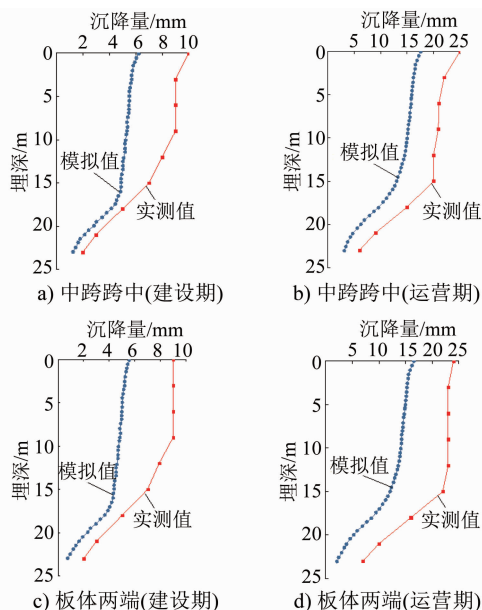


图 4 线路中跨跨中和承载板两端板下土体沉降的现场监测值与数值模拟值对比

Fig. 4 Comparison diagram between on-site measured values and numerical simulations of soil settlement under the line middle span and both ends of the bearing plate

由图 4 可知:数值模拟得到的土体沉降量随埋深的变化曲线与现场实测结果在变化趋势上基本一致,现场实测值大于数值模拟值。其原因主要是有限元建模时为了节省计算资源,只建立了 1 条有轨电车线路,而现场有 2 条有轨电车线路,未模拟的有轨电车线路的轨道结构和列车荷载会对监测点位的土层沉降产生附加应力,这导致现场监测值大于数值模拟值。因此,本文建立的有限元模型总体上具有较高的可靠度。

3 复合桩板结构路基受力特性分析

3.1 跨中板下土体应力与沉降分析

通过数值模拟得到上海松江有轨电车示范线工程建设期和运营期的复合桩板结构路基中跨跨中板下土体的附加应力和沉降随埋深的变化曲线,如图 5 所示。

从图 5 a)可知:随着埋深的增加,建设期和运营期的跨中板下土体附加应力均呈现先减小后增大再减小的变化规律,附加应力最大值出现在 20 m 埋深位置附近(即桩底下方 1~2 m 处)。其原因可归结为跨中板下土体的附加应力由两部分组成:一

部分为桩板结构承载板直接施加在土体上表面的荷载产生的附加应力,另一部分为桩顶承担的余下上部荷载通过桩侧摩阻力传递给土体,使土体产生了附加应力。加固区(即桩长范围内)上部土体的附加应力随埋深的增加呈递减趋势,这是承载板产生的附加应力在起主要作用;而加固区下部和下卧层的附加应力随埋深的增加呈先增加后减小趋势,则是桩侧产生的附加应力在起主要作用。

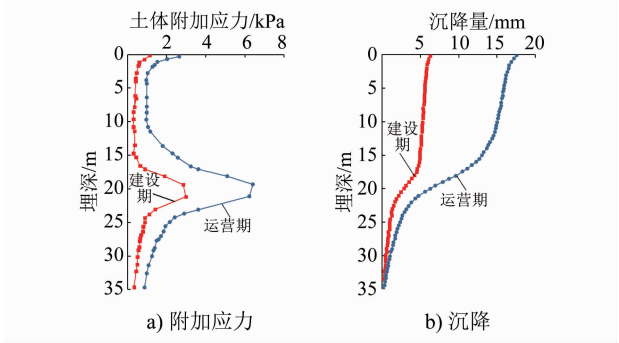


图 5 中跨跨中板下土体附加应力与沉降随埋深的变化曲线
Fig. 5 The variation curve of additional stress and settlement of soil with depth under the mid span slab of the line

与传统桩基在桩底处土体附加应力突然增大至峰值的情况不同,深厚软土地层中的有轨电车线路复合桩板结构路基跨中板下土体的附加应力是在桩底以上一定区域开始逐渐增加,然后在桩底附近达到最大值。这种差异与复合桩板结构路基桩体的受力特征有关,较小的桩底反力并不会引起附加应力的突然增大,而是桩侧摩阻力导致土体的附加应力逐渐增大。

此外,根据土力学原理,附加应力是土体发生压缩固结的原因。从附加应力的变化曲线可看出,深厚软土地区复合桩板结构路基的沉降变形应主要发生在桩顶和桩底的一定范围内,图 5 b) 所示的沉降曲线变化规律证明了该结论的正确性。

3.2 桩体受力分析

复合桩板结构路基在有轨电车线路建设期和运营期的桩体轴力和桩侧摩阻力随埋深的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可看出:桩体轴力随埋深的增加逐渐减小;桩深范围内的侧摩阻力均表现为正值,即复合桩板结构路基桩体未出现负摩阻区。由此可知,在深厚软土地区,在复合桩板结构路基桩底未刺入持力层的情况下,桩体沉降一般大于板下土体沉降。此外,不管是在荷载水平较低(6 kPa)的建设期,还是在荷载水平较高(36 kPa)的运营期,桩

顶承担的上部荷载大部分通过桩侧摩阻力传递给桩侧土体,桩端反力仅占其中较少的一部分。

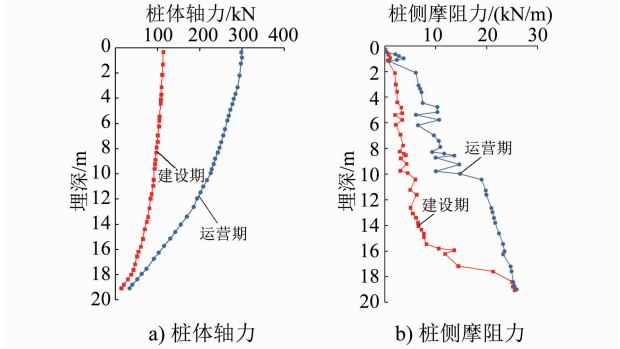


图 6 桩体轴力和桩侧摩阻力随埋深的变化曲线
Fig. 6 The variation curve of pile stress and pile side frictional resistance with depth

3.3 桩土差异沉降分析

加固区内,桩侧土体和跨中板下土体间、桩体与桩侧土体间在建设期和运营期的差异沉降情况分别如图 7、图 8 所示。

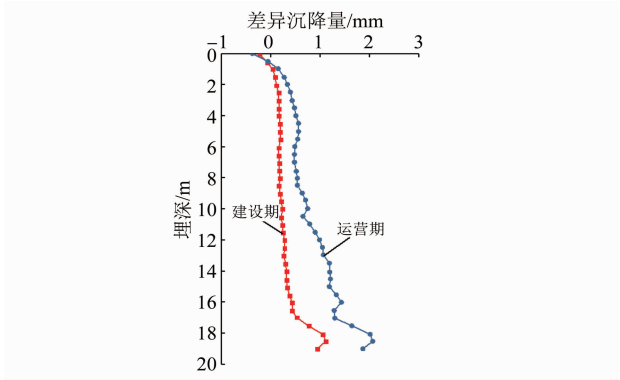


图 7 桩侧土体与跨中板下土体间的差异沉降
Fig. 7 Differential settlement between the pile side soil and the soil under the mid span slab

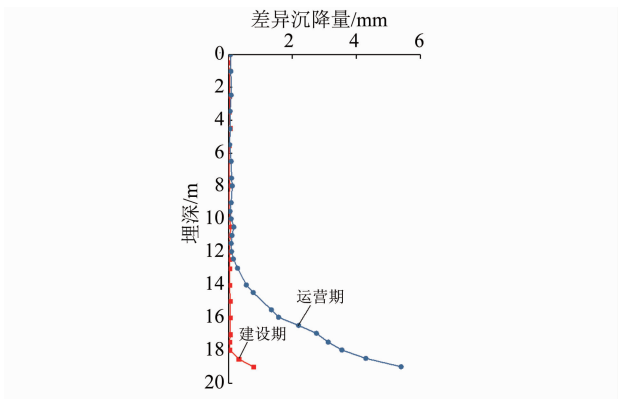


图 8 桩体与桩侧土体间的差异沉降
Fig. 8 Differential settlement between the pile and the pile side soil

由图 7 可知:桩侧土体与跨中板下土体的差异沉降量随埋深的增加逐渐增大,且运营期的差异沉降量大于建设期的差异沉降量。进一步将图 6 b) 与图 7 进行对比,可以发现桩侧土与跨中板下土体的差异沉降量与桩侧摩阻力呈正相关关系,差异沉降量越大,桩侧摩阻力越大。

将图 6 b) 和图 8 进行对比可知:由于复合桩板结构路基桩端未插入持力层中,且因桩体和土体的刚度差异及承载板的限制作用,在上部荷载作用下,桩端会发生向下的刺入变形,因此桩侧阻力是自下而上逐渐发挥作用的。当桩侧摩阻力达到极限值后,桩体与桩侧土体便发生相对滑移,即:在建设期仅桩底以上一小段桩体与桩侧土体发生相对滑移;在运营期,由于上部荷载增大,桩侧摩阻力达到极限值的范围增大,桩体与桩侧土发生相对滑移的范围向上扩充。

3.4 桩长因素分析

进一步对不同桩长条件下有轨电车线路复合桩板结构路基的力学性能进行分析,桩长 L 分别取 13 m、16 m、19 m 及 22 m 共 4 种工况。提取运营期不同桩长工况下复合桩板结构路基的跨中板下土体附加应力随埋深的变化曲线,如图 9 所示。由图 9 可知:不同桩长工况下,跨中板下土体的附加应力均在桩底下方 1~2 m 处达到最大值,且最大值比较接近;桩长范围内跨中板下土体附加应力的大小随 L 的增大而减小,其主要与承载板直接作用在土体表面的荷载大小及桩侧摩阻力的大小有关。

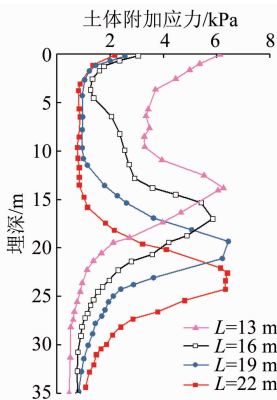


图 9 不同桩长工况下运营期跨中板下土体附加应力随埋深变化曲线

Fig. 9 The curve of the additional stress of the soil below the mid span slab with depth during operation period under different pile lengths

不同桩长工况下,建设期和运营期跨中板下土体沉降量随埋深的变化曲线如图 10 所示。

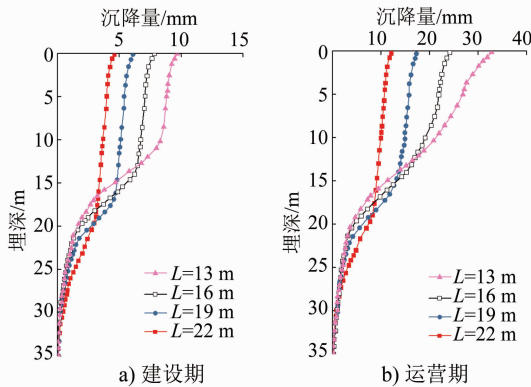


图 10 不同桩长工况下跨中板下土体沉降随埋深变化曲线
Fig. 10 The variation curve of soil settlement below the mid span slab with depth under different pile lengths

由图 10 可知:随着复合桩板结构路基桩长的增大,建设期和运营期跨中板下土体的沉降量均呈减小趋势。

不同桩长工况下,运营期的桩体轴力和桩侧摩阻力随埋深的变化曲线如图 11 所示。由图 11 可知:除了 $L=13$ m 的桩外,另外 3 组复合桩板结构路基的桩顶轴力大小基本相同,即这 3 组复合桩板结构路基中桩体承担的上部荷载大小相差不大,而 $L=13$ m 的桩由于接近或达到桩体的极限承载力而无法承担更大的荷载。这说明在桩体极限承载力范围内,适当减小桩体长度并不会显著减小桩体所能承担的上部荷载大小,且能更充分地发挥桩体的承载能力。

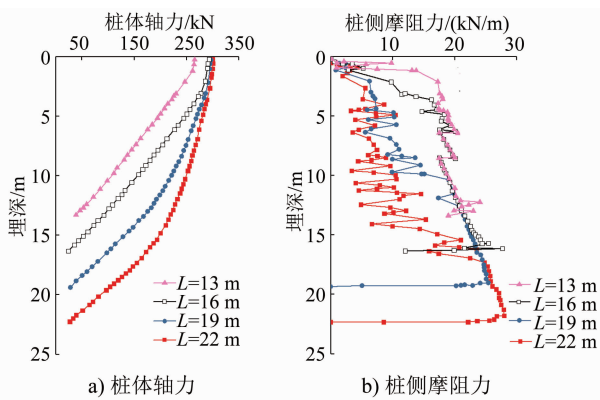


图 11 不同桩长工况下运营期的桩体轴力和桩侧摩阻力随埋深的变化曲线

Fig. 11 The variation curve of pile stress and pile side frictional resistance with depth during operation period under different pile lengths

不同桩长工况下,运营期的桩侧土体与跨中板下土体间、桩体与桩侧土体间的差异沉降情况如图

12 和图 13 所示。由图 12 和图 13 可知:随着桩长的增加,桩侧土体与跨中板下土体的差异沉降量呈减小趋势,即相同埋深位置的桩侧摩阻力减小;桩长越长,桩体与桩侧土体发生相对滑移的距离越小,且相对滑移的长度越小,即桩体充分发挥桩侧摩阻力的长度越小。

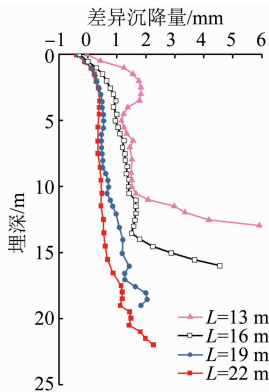


图 12 桩侧土体与跨中板下土体间的差异沉降

Fig. 12 Differential settlement between the pile side soil and the soil below the mid span slab

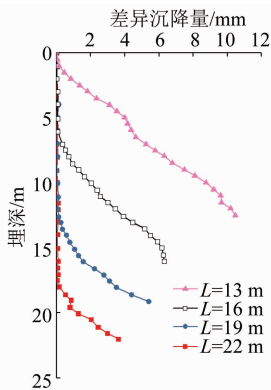


图 13 桩体与桩侧土体间的差异沉降

Fig. 13 Differential settlement between the pile and the pile side soil

4 结论

1) 深厚软土地区有轨电车线路复合桩板结构路基跨中板下土体的附加应力随埋深增加呈现先减小后增大再减小的变化规律,且在桩底下方 1~2 m 处附近达到峰值。同时,土体沉降变形主要发生在桩顶和桩底一定范围内。

2) 桩体的承载力主要由桩侧摩阻力提供。桩体沉降一般大于跨中板下土体沉降。桩体不会出现负摩阻力区域。桩侧土体与跨中板下土体间的差异沉降量与桩侧摩阻力呈正相关关系。随着荷

载的增大,桩侧摩阻力自下而上逐渐达到极限摩阻力,同时桩体与桩侧土体间产生差异沉降,即两者间发生了相对滑移。

3) 随着复合桩板结构路基桩长的增大,板下土体沉降量逐渐减小。在桩体极限承载力范围内,适当减小桩体长度,并不会显著减小桩体所能承担的上部荷载大小,且能更充分地发挥桩体的承载能力。

参考文献

- [1] 荆志东. 深厚软基新型桩板结构路基结构设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
JING Zhidong. Research on new embankment constructed of pile-plate in deep soft-clay region[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [2] 秦晓光. 现代有轨电车线路深厚软土地基一体化桩板结构沉降控制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 80.
QIN Xiaoguang. Settlement control of modern tram integrated pile-slab structure in deep soft soil foundation[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(6): 80.
- [3] 周向良. 有轨电车桩板结构内力变化规律与损伤特性[D]. 上海: 同济大学, 2020.
ZHOU Xiangliang. Variation law and damage characteristics of internal force of tram pile-slab structure[D]. Shanghai: Tongji University, 2020.
- [4] 黄龙. 桩板结构软土路基沉降影响因素及变形规律研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
HUANG Long. Study on settlement influence factors and deformation laws of pile-plank subgrade in soft ground[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [5] WANG C, ZHOU S, WANG B, et al. Settlement behavior and controlling effectiveness of two types of rigid pile structure embankments in high-speed railways[J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 11(6): 847.
- [6] 肖宏, 冯雁, 龚小平. 桩板结构桩-板-土相互作用模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 81.
XIAO Hong, FENG Yan, GONG Xiaoping. Model test research on pile-slab-soil interaction of pile-slab structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 81.
- [7] 詹永祥, 蒋关鲁. 桩板结构路基桩-土工作特性[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 38.
ZHAN Yongxiang, JIANG Guanlu. Pile-soil interaction properties of pile-plank embankment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 38.
- [8] 李柱雄. 深厚软弱土层复合桩板路基承载机制[D]. 上海: 同济大学, 2020.
LI Zhuxiong. Bearing mechanism of composite pile-sheet subgrade in deep soft soil layer[D]. Shanghai: Tongji University, 2020.

(收稿日期:2021-04-22)