

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^{*}

秦晓光^{1,2}

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 200120, 上海; 2. 上海有轨电车工程技术研究中心, 200120, 上海//工程师)

摘 要 在软土地区的现代有轨电车线路设计和建设中, 深厚软土地基合理处理方式是其难点和重点。针对实际工程建设需要, 通过调研、数值计算、理论分析、试验研究等方法, 提出了道床板-减沉疏桩一体化桩板结构设计方案。介绍了一体化桩板结构的特点, 计算分析了其沉降变形控制能力, 通过实验室试验得到了5年后路基的最大沉降量。通过对上海松江现代有轨电车线路的现场监测, 得到了路基的年沉降变化量。路基沉降量的计算值、试验值和现场监测值三者较为接近, 证明了一体化桩板结构设计可有效控制软土地区现代有轨电车轨道基础长期不均匀沉降, 能够减少对地下管线的影响, 可降低建造和维护成本。

关键词 现代有轨电车; 路基工程; 深厚软土地基; 结构一体化设计; 沉降控制

中图分类号 TU433

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.018

Settlement Control of Modern Tram Integrated Pile-slab Structure in Deep Soft Soil Foundation

QIN Xiaoguang

Abstract Rational treatment of deep soft soil foundation is one of the difficulties and key points in the design and construction of modern tram line in soft soil area. According to the actual engineering construction needs, and based on investigation, numerical calculation, theoretical analysis, experimental research and other methods, an integrated design of slab track-bed structure and sparse piles is proposed. In this paper, the structural characteristics of the integrated pile-slab structure is introduced, the settlement deformation control capability is simulated, and a lab test demonstrates the largest roadbed settlement in 5 years. Through site monitoring of Songjiang modern tram in Shanghai, it shows that the design of the integrated pile-slab structure can effectively control the long-term uneven settlement of the tram track foundation in soft soil area, reduce the tram impact on underground pipelines, the construction and maintenance costs as well.

Key words modern tram; embankment engineering; deep soft soil foundation; integrated structure design; settlement control

Author's address Shanghai Urban Construction Design and Research Institute, 200120, Shanghai, China

我国现代有轨电车轨道结构设计及其养护维修标准尚无规范可依, 现代有轨电车轨道结构及其基础设计只能套用高速铁路或其他城市轨道交通的相关规范, 但其与现代有轨电车运营速度和轴重等技术指标难以匹配^[1-4]。此外, 对深厚软土地基的处理也是设计的难点^[5-8]。

目前, 现代有轨电车路基以及桩板结构可以参考的规范比较少, 本文针对现代有轨电车线路在深厚软土地基建设中的要求和工程难点, 提出一体化桩板结构方案。该方案由桩、板与地基土共同组成一个承载结构体系, 能充分利用了桩-土、板-土之间的相互作用, 以满足现代有轨电车无砟轨道的强度与变形要求。实践证明, 该结构可以有效控制软土地区现代有轨电车轨道基础长期不均匀沉降, 减少了对地下管线的影响, 降低了建造和维护成本。

1 一体化桩板结构

结合现代有轨电车荷载、速度指标, 以及铁路系统中桩板结构的特点, 提出了如图1所示的一体化桩板结构方案。其轨道采用短轨枕, 埋入路基板中, 一次浇筑完成; 横梁处开挖深度1.1 m, 普通段开挖深度0.7 m。该方案能够有效减少结构厚度, 同等条件下减少混凝土用量约30%, 降低钢筋用量约为20%; 同时, 该方案在板结构钢筋外侧单设排流网, 因此, 结构耐久性好, 杂散电流对周边管线影响小。该结构设计已经在上海市松江区和浙江省台州市现代有轨电车线路的深厚软基处理中得到应用。

^{*} 国家自然科学基金(51608384)

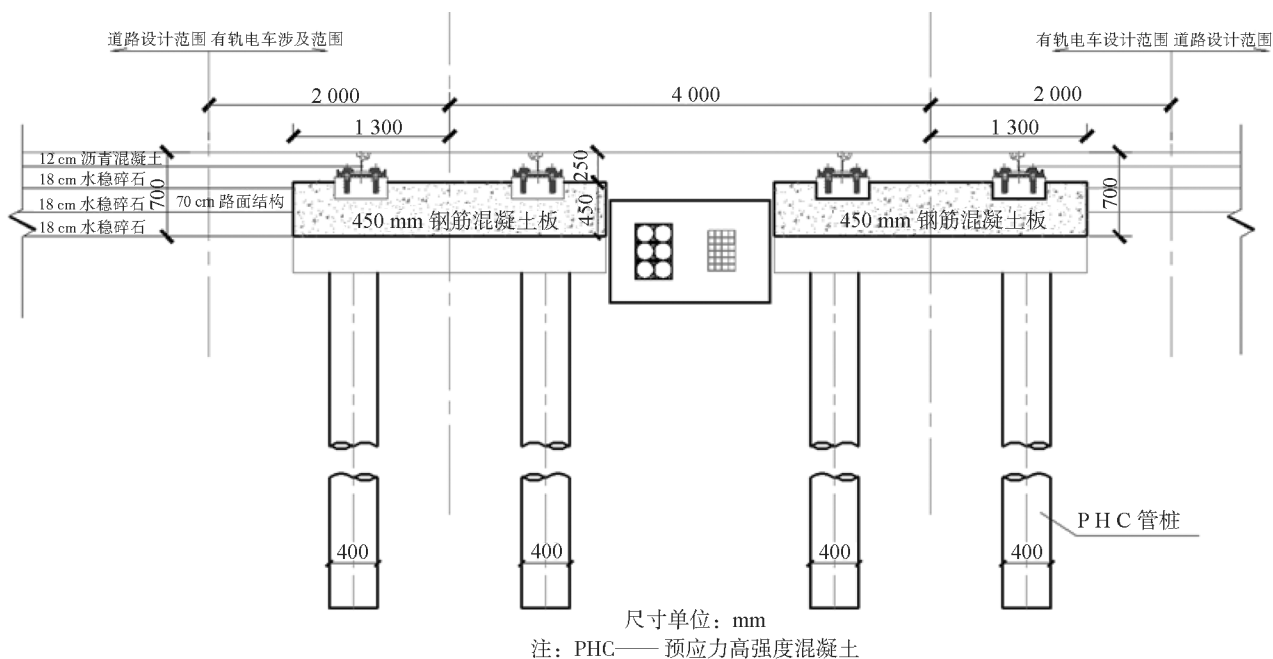


图1 一体化桩板结构横断面图

一体化桩板结构具有如下特点:①具有整体性强、稳定性好、轨道变形小、坚固耐用、变形累积缓慢等优点;②构造十分机动灵活,适应性强;③施工方便、快捷;④与桥梁结构相比,桩与板之间通过钢筋固结,可以节省昂贵的支座;⑤与普通路基结构相比,沉降相对小而快,施工工期短;⑥结构总高度小。

2 一体化桩板结构沉降变形控制能力

桩板结构对富含管线的深厚软土层的沉降变形能够起到很好的控制作用,但建设成本也会相应增加。因此,在桩板结构基础上提出了一体化桩板结构,在保证路基变形较小的前提下,优化板厚度,节约工程造价。

2.1 地基固结引起的沉降计算

为得到准确的路基沉降变形情况,首先通过Plaxis 3D 软件模拟计算沉降值。计算模型源于上海市松江区现代有轨电车试验段。模型长 50.0 m,宽 13.3 m,深 35.0 m。计算模型中,土体采用实体单元,本构模型采用理想弹塑性模型,屈服准则采用摩尔-库仑准则;钢筋混凝土板及横梁采用结构单元模拟;桩采用 Embedded 桩模型进行模拟;现代有轨电车正线地段采用管桩+混凝土承载板加固,桩径 0.4 m,纵向桩间距 5.0 m,桩长 21.0 m;承载板采用 C40 混凝土现浇,承载板板厚 0.45 m,承载板纵向每节长 20.0 m,横向宽度 2.6 m,埋深 0.25 m,为减少温度应力影响,两块承载板中间设置 2 mm 伸缩缝。土层参数的选取见表 1。

表1 土层参数表

层序	地层名称	土层底埋深/m	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/ kPa	渗透系数/(cm/s)	
						竖向向	水平向
②	粉质黏土	3.6	17	19.5	3.97	1.21×10^{-8}	1.70×10^{-7}
②t	黏质粉土	6.4	8	29.0	6.51	8.00×10^{-8}	1.20×10^{-7}
③1	淤泥质粉质黏土	8.5	12	18.0	3.31	4.59×10^{-7}	1.32×10^{-6}
③3	黏土	19.0	13	12.0	3.01	8.58×10^{-8}	1.14×10^{-7}
④	淤泥质黏土	19.5	10	13.0	2.41	5.67×10^{-8}	8.70×10^{-8}
⑤1	粉质黏土	21.3	14	16.5	3.59	1.21×10^{-8}	1.70×10^{-7}
⑤2-1	砂质粉土	31.3	5	32.5	10.46	1.20×10^{-6}	3.00×10^{-6}
⑤2-2	粉砂	34.6	3	35.0	12.06	1.20×10^{-5}	3.00×10^{-5}

将计算过程划分为如下 4 种施工工况:自重应力平衡;激活模型中的管桩及承载板;施加现代有轨

电车车辆荷载,计算现代有轨电车荷载作用下引起的路基的瞬时沉降;计算现代有轨电车荷载作用下

引起的地基固结沉降。

通过对计算数据的分析可知,结构沉降主要由地基主固结沉降和有轨电车动、静荷载引起的路基沉降组成。下文针对这两部分沉降情况进行分析。

2.2 地基主固结沉降的分布规律

为研究地基土体固结引起的土层沉降情况,提取和观察当固结度达到 95% 时土中超孔隙水压力的分布情况。通过计算可知:持力层为⑤₂₋₁砂质粉土,渗透系数较大,因此土中的水压力全部消散;而其上部⑤₁粉质黏土和④淤泥质黏土层,由于

土层渗透系数较小,且桩板结构的存在,使得桩周围土中的超孔隙水压力并未完全消散,此时超孔隙压主要集中在④淤泥质黏土和⑤₁粉质黏土层桩体周围。

地基固结沉降分布情况如图 2 所示。从图 2 中可以看出:固结沉降主要发生在上部粉土及黏土层,而下部砂层固结沉降几乎为零;最大固结沉降量发生于④淤泥质黏土层和⑤₁粉质黏土层中,而不是路基顶面,这是由于桩板结构将力通过桩向下传递导致的;由固结引起的路基沉降值为 8.2 mm。

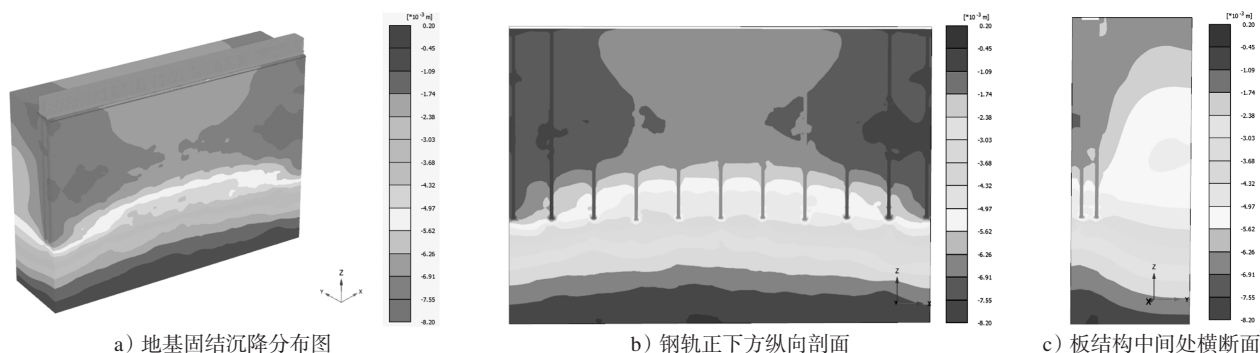


图 2 地基固结沉降分布图

2.3 现代有轨电车动荷载引起的沉降计算

为得到循环荷载作用下路基中动应力场分布情况,利用 ANSYS-DYNA 有限元软件建立车辆-轨道-路基三维耦合模型。模型中车辆、转向架及轮对采用刚体模拟,二系悬挂及扣件系统采用弹簧阻尼单元模拟,钢轨采用梁单元模拟,轨下结构采用实体线弹性单元模拟。为消除边界效应影响,建立的模型长为 60.0 m,宽为 26.6 m,高为 30.0 m。由于结构具有对称性,因此建立一半模型,并在对称面上施加对称边界。

模拟计算结果及分析如下:

(1) 土动应力沿深度方向分布规律。为研究路基中竖向动应力的分布规律,提取了模型中各节点的动应力。其中,在现代有轨电车通过过程中,当现代有轨电车运行到节点正上方时,该点动应力水平最大。在现代有轨电车行驶到该断面上方时,该断面上各点竖向动应力呈现出沿着深度方向分布的规律,其他断面的分布规律与之相同。从图 3 中可以看出:在现代有轨电车荷载的作用下,土中竖向动应力在路基顶面最大,沿着深度逐渐递减;当深度达到 6 m 以下时动应力水平很小(小于与自重应力的比为 20%),因此仅需考虑埋深 6 m 范围内土中动应力水平即可;埋深越浅处,动应力越大,最大值在 5 ~ 6 kPa 之间。

(2) 土动应力沿线路横向分布规律。一体化结

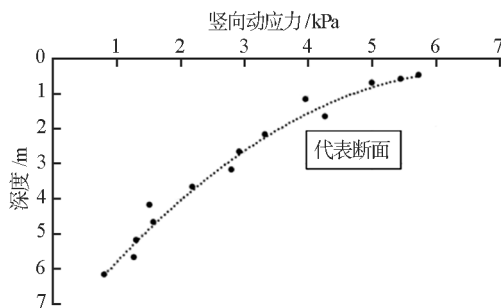


图 3 竖向动应力随深度分布曲线

构路基中土沿着线路横向的应力分布情况如图 4 所示。从图 4 中可看出:由于桩板结构的存在,桩板结构承担了大部分应力;现代有轨电车的荷载通过钢轨、桩板结构传到路基中时,应力已基本均匀,大概有 5 ~ 7 kPa;在桩板结构边缘和路基交界处,存在应力集中现象,竖向动应力最大值达 9 kPa,而两侧的路基中应力则迅速减小。图 5 为上述断面上板结构下表面路基中钢轨正下方 2 个点的竖向动应力时程曲线。由图 5 可见:当现代有轨电车通过时,车轮及转向架到达该点的正上方时,该点的竖向动应力达到最大值;车轮及转向架驶过后,应力水平迅速减小。

(3) 由动荷载引起的路基沉降值。应用累积塑性应变模型对路基的累积塑性变形进行计算,计算

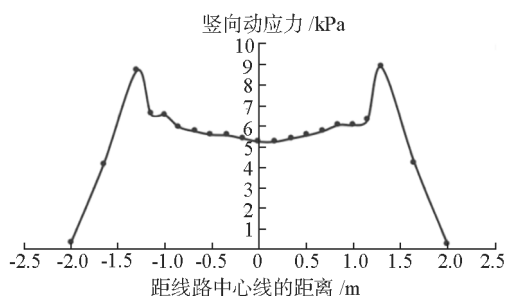


图4 竖向动应力沿线路横向分布曲线

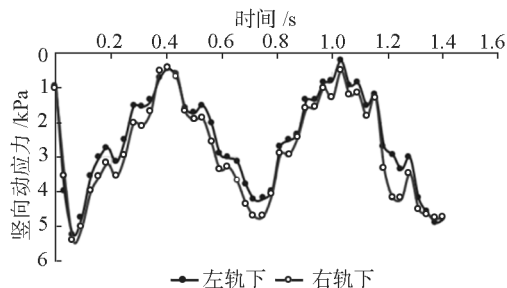


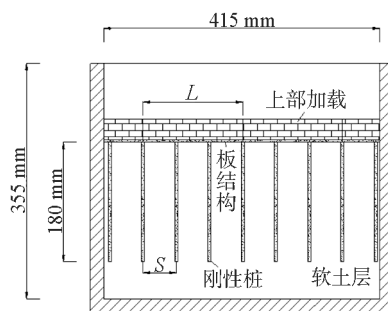
图5 断面上轨下某点竖向动应力时程曲线

结果为:现代有轨电车动荷载作用 100 万次,引起的路基的沉降值为 3.3 mm。沉降各组成部分计算结果汇总如下:对于一体化结构,在现代有轨电车荷载作用下,现代有轨电车轨道地基固结沉降为 8.2 mm,由动应力引起的沉降为 3.3 mm,总沉降量为 11.5 mm。

3 离心模型试验验证

3.1 试验设备和设计

本次试验采用同济大学 20g-ton 土工离心机 (L-30 型)。该离心机的基本参数为:有效旋转半径为 1.55 m,最大离心加速度为 200 g,模型箱尺寸为 415 mm × 370 mm × 230 mm。综合考虑离心机的技术参数和试验原型条件、测量精度的要求,以及试验中模拟模型材料制作等因素,确定本次试验的离心加速度为 100 g。试验模型(见图 6)比例尺为 1:100(模型率 $N = 100$)。在土工模型试验中,为使模型材料与原型材料的物理力学特性相似,取用松江现代有轨电车线路现场土料来模拟实际土层。对于承受以竖向荷载为主的桩,按桩身竖向抗压刚度及抗弯刚度相似要求选用模型桩。试验中的刚性桩在满足横截面面积及惯性矩相似的条件下选用铝管模拟。试验中刚性桩体自身的压缩变形量忽略不计。桩基入土采用打入方式。钢筋混凝土板材料选用铝合金板模拟。原型试验时间按固结问题的计算公式进行换算。路堤设计参数、现代有轨电车及轨道结构荷载的要求参照相关规范^[9]。



a) 试验模型正面设计图



c) 试验模型

图6 试验设计方案及模型图

3.2 与计算数据比较分析

通过试验研究工作获取现代有轨电车路基中心工后 5 年的最大沉降量为 16.7 mm,年最大沉降速率为 4.7 mm/年。试验数据略高于计算结果,其原因主要是重塑土体扰动后和原状土体的性质差异导致。根据理论计算及试验工作结论,原位测试工作在上海松江现代有轨电车试验段进行。

4 上海松江现代有轨电车试验段沉降变形监测分析

上海市松江区现代有轨电车示范线共规划 T1 和 T2 两条线路。其中,T1 线沿松江主要道路荣乐路贯穿松江老城,并向东延伸至松江工业区及新桥镇。本工程主要负责 T1 线后半段新车公交站到新桥站 4 站及其间的 3 个区间,工程采用减沉疏桩一体化桩板结构方案对线路地基进行加固处理。本工程的综合监测及布点方案针对板下土压力、土层分层沉降、桩板沉降变形、桩板结构内力、孔隙水压力及轨道板动力响应等方面,并对基础的变形情况进行跟踪及研究。监测值与计算值和试验值比较接近,但也存在一些差异。对造成结果差异的原因进行分析,结论为:这种差异是由工程现场复杂施工环境及工程机械的影响引起的。

5 与其他设计方案综合对比

沉降分析结果表明,桩板结构方案在现代有轨电车轨道基础沉降控制方面明显优于换填处理方案和复合地基方案,在此基础上提出了增强道床板-

减沉疏桩一体化方案。下面再从修建成本、对既有管线影响和施工工期等方面对以上方案进行进一步的比选,如表2所示。综合各评价指标,现代有轨电车轨道基础设计方案中,道床板-减沉疏桩一体化方案最为合理。

表2 地基处理方案比选

比较项	换填处理方案	复合地基方案	一体化桩板结构方案
设计参数要点	200 mm 素混凝土+400 mm 碎石表层+800 mm 基床底层	三轴搅拌桩(ϕ 500@1200, 桩长为21 m)	微型桩(ϕ 4090 PHC 管桩, 桩长为21 m)
单价/(万元/km)	650	1 150	960
施工作业面宽度/m	14	12	11
管线改迁成本	大	较大	小
后期维修养护成本预测	大	较大	小
对地下管线影响	开挖深度为1.9 m,对密集管线影响较大	开挖深度为1.1 m,桩间距较小,对密集管线影响较大	开挖深度为0.7 m,对管线基本无影响
施工工期	工期短	桩等检测,施工周期较长	预制桩施工较快
施工对环境的影响	作业面宽,影响交通	施工有泥浆污染	静压法施工噪声小
施工质量	质量好	质量好,均匀性好	质量最好

6 结语

道床板与支撑板一体化桩板是一种包含承台-地基-桩基共同作用的系统,结构总厚度可缩小30%,有效减少对既有管线的影响。这种加固方案大大降低了基础沉降量,引起的地基沉降最大值仅为11.5 mm,差异沉降亦较小(3.2 mm)。该方案虽然初期建设成本较换填方案高,但后期养护维修成本较低。经综合评价,采用该方案在管线迁改、施工周期、后期维修养护和经济性方面都更具有优势,建议在深厚软土地基处理中采用。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通2017年度统计和分析报告[J].城市轨道交通,2018(4):6.
- [2] 张龙.高速铁路非埋式桩板路基结构变形机理及承载特性研究[D].兰州:兰州交通大学,2014.

- [3] 苏谦,王武斌,白皓,等.非埋式桩板结构路基承载机制[J].交通运输工程学报,2012,12(1):19.
- [4] 肖宏,龚小平,岳会婷.桩板结构中跨部分板的设计解析计算方法研究[J].铁道工程学报,2011,28(7):28.
- [5] WANG C D,ZHOU S H,WANG B L,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] WANG C D,WANG B L,GUO P J,et al. Experimental analysis on settlement controlling of geogrid-reinforced pile-raft-supported embankments in high-speed railway[J]. Acta Geotechnica,2015,10(2):231.
- [7] 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.
- [8] 刘刚玉.高速铁路运营线桩板结构软土路基沉降处理方法研究[D].上海:同济大学,2013.
- [9] 上海市住房与城乡建设管理委员会.有轨电车工程设计规范:DG/TJ 08-2213—2016[S].上海:同济大学出版社,2016.

(收稿日期:2018-10-25)

我国时速 600 km 高速磁浮试验样车下线

我国时速 600 km 高速磁浮试验样车 5 月 23 日在青岛下线。这标志着我国在高速磁浮技术领域实现重大突破。高速磁浮列车对于完善我国高速客运交通网具有重大的技术和经济意义。试验样车作为高速磁浮项目研发的重要环节,是高速磁浮的“实车级”试验验证平台。通过试验样车,可对高速磁浮关键技术及核心系统部件进行验证和优化。据了解,围绕高速磁浮项目,中车四方股份公司目前正在建设高速磁浮实验中心、高速磁浮试制中心,预计今年下半年投入使用。同时,5 辆编组时速 600 km 高速磁浮工程化样车的研制目前也在顺利推进中。按照计划,时速 600 km 高速磁浮工程样车将在 2020 年下线;2021 年在调试线上开展系统综合试验,完成集成验证,形成高速磁浮工程化能力。高速磁浮具有速度高、安全可靠、噪声低、振动小、载客量大、维护量少等优点,可以填补高铁和航空运输之间的速度空白。

(摘自新华社青岛 2019 年 5 月 23 日电,记者苏万明、温竞华、阳建报道)