

软土地区新建城市轨道交通线路路基对邻近既有线路路基水平变形的影响分析*

李柱雄¹ 王长丹¹ 周顺华¹ 罗 强² 王炳龙¹

(1. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;

2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 依托东部沿海软土地区某城市轨道交通路基帮宽工程, 利用同济大学 L-30 土工离心机进行土工离心模型试验, 研究既有 CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基路基在邻近堆载作用下土体和桩体的水平变形规律。利用有限元数值模拟方法, 研究既有路基和新建路基的不同加固形式对既有路基水平变形规律的影响。研究表明: 在邻近堆载的作用下, 软土地区城市轨道交通线路路基坡脚外 2 m 土柱的水平变形呈现“弓”型变化规律, 随埋深增加, 水平变形先增大后减小; 路基 CFG 桩复合地基中的 CFG 桩的水平变形呈现漏斗型变化规律, 桩顶水平位移最大, 随埋深的增加, 水平变形逐渐减小; 新建路基中桩基的存在, 可有效减小既有路基的水平位移; 在 CFG 桩桩顶增加筏板, 能将 CFG 桩的水平变形规律由漏斗型改变为“弓”型, 同时减小桩体的最大水平变形。

关键词 城市轨道交通; 软土地区; 路基工程; 路基帮宽; 水平变形

中图分类号 U216.41⁺7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.07.024

Impact Analysis of Newly Constructed Urban Rail Transit Line Subgrade in Soft Soil Area on the Horizontal Deformation of Adjacent Line Subgrade

LI Zhuxiong, WANG Changdan, ZHOU Shunhua, LUO Qiang, WANG Binglong

Abstract Based on an urban rail transit subgrade widening project in eastern coastal soft soil area of China, a geotechnical centrifugal model test is conducted by using the L-30 geotechnical centrifuge of Tongji University, to study the horizontal deformation patterns of soil and pile in existing CFG (cement fly ash gravel) pile composite foundation subgrade under the action of adjacent loading. Then, the finite element numerical simulation method is used to study the influence of existing

subgrade and new subgrade reinforcement forms on horizontal deformation law of the existing subgrade. The result shows that under the adjacent loading, the horizontal deformation of the soil pillars, which are located 2 meters away from the subgrade slope foot of urban rail transit line in soft soil area, demonstrates a pattern of bow-shaped deformation, the horizontal deformation increases first and then decreases during the continuous increase of burial depth. The CFG piles in CFG pile composite centrifuge subgrade demonstrate a funnel-shaped pattern deformation, the horizontal displacement is the biggest at the pile top, and decreases during the continuous increase of burial depth; the existence of pile foundation in the newly built line subgrade can effectively reduce the horizontal displacement amount of the existing subgrade, while adding a plank on top of the CFG pile can change the horizontal deformation pattern of the CFG piles from the funnel-shaped to the bow-shaped, the maximum horizontal deformation of the pile body can also be reduced.

Key words urban rail transit; soft soil area; subgrade engineering; subgrade widening; horizontal deformation

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

我国各城市规划建设的轨道交通线网规模在持续增长, 特别是东部沿海经济发达地区, 新建线路在较为密集的既有线路的基础上持续增加。新建线路并行既有线路或新建线路接轨既有线路时, 需要在既有路基旁新建路基或进行路基帮宽。东部沿海地区广泛分布着工程性质差的软土, 软土有高含水量、高压缩性、低强度、低渗透性和高灵敏度等特点, 而城市轨道交通对变形控制有严格要求, 因此需要对路基邻近荷载进行影响分析。

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

在软土上填筑路基时,CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基对路基竖向沉降控制已得到了研究证明^[1-2],也形成了一定的沉降计算方法^[3],但同时路基也会产生较大的侧向变形,引起路基本体和邻近基础发生变形^[4-5]。文献[6-8]针对软土路基侧向变形影响路基本体沉降和稳定性问题,进行了理论计算和现场试验分析;文献[1]利用“绕流阻力法”对路基侧向变形范围进行了研究;文献[8]得出了路基堆载侧向变形沿深度呈“弓”型分布的变化规律,并提出了该分布的预测模型和参数求解方法。同时,众多学者采用理论分析、模型试验、数值模拟和现场监测等方法,对桩基等软土基础结构在邻近堆载作用下的表现进行了研究,得出了一些结论^[5,9-13],但尚未形成十分完善的成果体系。

本文依托某路基帮宽工程,借助有限元数值模拟方法和土工离心模型试验手段,对软土地区复合地基路基和邻近新建路基的相互作用及变形问题进行研究。

1 工程概况

某路基帮宽工程位于东部沿海地区,地处冲湖积微地貌,地势平坦。地层岩性分布为:表层 2~4 m 为人工填土;中部为淤泥质粉质黏土或粉质黏土,厚度为 10~15 m;下卧层为全风化或强风化粉砂质泥岩。地下水不发育,主要为第四系孔隙水及下伏基岩裂隙水。

帮宽段位于车站范围内,车站内有 6 条到发线(含 2 条正线),正线为无砟轨道,到发线为有砟轨道。HNK236+837—+877 段地基基底设 C30 钢筋混凝土筏板,厚度为 0.5 m,下设置 0.2 m 碎石垫层。筏板纵向节长 14.38 m、15.28 m,筏板根据现场实际情况截取及配筋;筏板与筏板、筏板与其它构筑物之间设伸缩缝,缝内填塞沥青麻筋。其余桩顶设直径为 1.0 m 扩大桩头,桩顶设 0.6 m 厚碎石垫层,内铺设二层土工格栅,其极限抗拉强度不小于 100 kN/m。CFG 桩桩头采用直径 1.0 m、高 0.6 m 的 C15 混凝土现浇桩帽;桩体原材料采用碎石、石屑、粉煤灰、水泥配合而成,材料按 C15 混凝土配比;桩径 0.5 m,桩间距 1.6~1.8 m,桩长 5.0~28.0 m(桩长嵌入持力层内不小于 1.0 m),按正方形布置。

新建联络线左右线与车站到发线 5 线、6 线联通,线路连通示意图如图 1 所示。新建联络线与既有正线线间距约 10 m,新建路基位于既有路基填土

范围内,轨面标高与既有线路相近,采用钻孔灌注桩+承载板结构加固,为非埋式桩板结构。钻孔灌注桩桩径为 1.0 m,桩长为 25 m,矩形布置,横向桩间距为 4.0 m,纵向桩间距为 5 m。

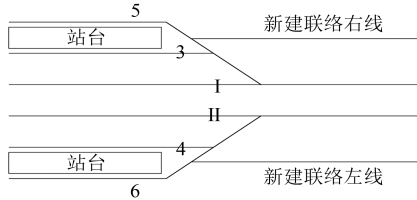


图1 新建联络线与既有到发线连通示意图

2 土工离心试验

本土工离心试验的目的是,得到单侧新建路基在未进行地基加固情况下对既有路基的水平变形影响。

2.1 试验设备

本次试验采用同济大学 20 g t(g 为重力加速度)土工离心机(L-30),该离心机的有效旋转半径为 1.55 m,最大离心加速度为 200 g。试验模型箱内壁尺寸为 415 mm×370 mm×230 mm,箱底有渗水孔。

2.2 试验设计

1) 模型比例确定。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,以及试验中模型材料制作等因素,模型比例尺取 1:100 较为适合,即试验中保持离心机离心加速度为 100 g。

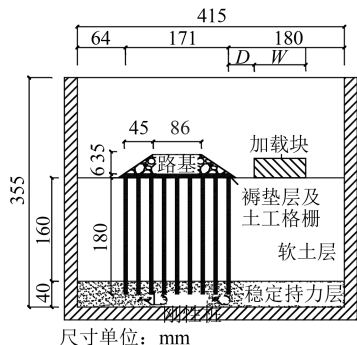
2) 模型土体制作。模型使用两层土体进行模拟,上层为软土,取用上海地层③-1 淤泥质粉质黏土,厚度 18 cm,模型箱底铺设 4 cm 厚的中粗砂作为持力层。试验模型用土的物理力学参数详见表 1。

表1 试验模型用土物理力学参数

土层	密度/ (g/cm ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	压缩模 量/MPa
淤泥质粉质黏土	1.68	10.3	4.9	2.7
中粗砂	1.90	2.0	32.0	33.0

3) 模型结构制作。通过相似原理进行计算。加固地基用空心铝管模拟,铝管外表面涂抹胶水处理 CFG 桩与土体的摩擦作用。碎石垫层采用细砂(粒径为 0.5~3.0 mm)进行模拟,铺设 60 mm 厚的模拟垫层。新建路基加载采用预制铝块进行等效模拟。加载块边缘距离既有路基坡脚为 4 cm,荷载大小为 60 kPa,相当于实际工程中 3 m 高路基填筑。

通过设计与计算,最终确定的试验模型箱内布置情况及模型箱尺寸如图 2 所示。

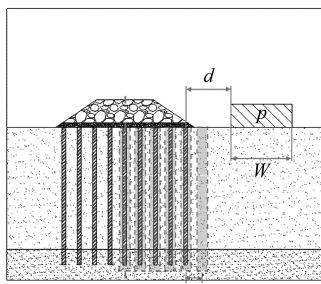


注: D 为荷载边缘距路基脚距离; W 为荷载宽度

图 2 1:100 离心试验模型箱剖面图

2.3 数据采集及误差分析

本试验采用的离心试验模型箱前侧为透明有机玻璃面板,用于观测。位移示踪光标由白色软质发泡塑料颗粒与钉头经黑色油漆浸泡后的大头钉组成,利用颜色对比,便于后续对于观测图像的点位识别。塑料粒子的位移与前侧土体的位移同步,通过定点高速同步摄影系统在试验的不同阶段对位移标志进行成像,通过计算机图形处理软件来分析土体不同阶段的位移情况。位移监测点主要选取对比较为明显的路基坡脚外 2 m(靠近加载侧)土体及桩网结构路基 1#—5# 桩桩体的水平变形情况。数据监测点布置如图 3 所示。



注: d 为荷载边缘至最近桩体的距离;
 p 为邻近荷载大小

图 3 位移数据监测点布置示意图

在试验设计阶段,通过预试验分析了本试验系统存在的系统误差(包括离心机启停引起的误差、模型箱边界效应、径向与切向加速度引起的误差),结果表明其最大相对误差等指标均可满足本试验的精度要求。

2.4 试验过程

根据试验设计的几何尺寸和试验模型的参数,在模型箱内制作试验模型。先布置既有路基和 CFG 桩复合地基,将模型箱放入土工离心机中,模

拟既有路基实际运营 5 年时间,土工离心机旋转相应的相似时间 270 min。在模拟既有路基实际运营 5 年后,布置新建路基加载块和观测点,安装并检测定点高速同步摄影系统和视屏跟踪系统。

观测阶段试验开始时,离心加速度逐渐增大到 100 g,过程中对每 20 g 加速度增量时刻土体变形进行观测,并在保持 100 g 离心加速度条件下定时对土体变形进行观测。

2.5 试验结果及分析

试验结束后,得到邻近加载下路基坡脚外 2 m(靠近加载侧)土体及路基 1#—5# 桩桩体的最终水平变形曲线,如图 4 所示。图 4 中水平位移正值表示为从新建路基往既有路基方向移动,反之为负值。

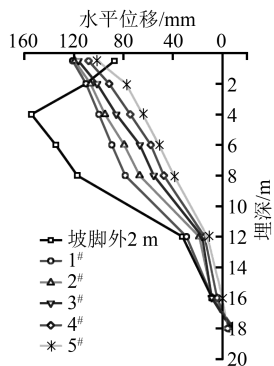


图 4 监测点水平位移曲线

由图 4 可以看出,既有路基坡脚外 2 m 处的土体和复合地基中桩体的水平变形随深度变化表现出不同的规律:坡脚外土体水平位移随深度增大呈现先增大后减小的“弓”型变化规律;路基以下 CFG 桩水平位移呈现顶部最大,逐渐减小的变化规律,称之为漏斗型变化规律。

经分析,既有路基坡脚外 2 m 土柱距离新建路基加载边缘 2 m,为新建路基坡脚位置,在新建路基荷载作用下,坡脚以下土体水平位移呈“弓”变化规律,与文献[8]的研究结论相吻合。复合地基中 CFG 桩的水平变形规律产生原因在于:桩体下部插入持力层中,而顶部约束较小,类似悬臂结构,在邻近新建路基的水平荷载作用下,产生顶部位移大、底部位移小的漏斗型变形规律。

3 数值模拟

3.1 研究内容和模型

本数值方法主要模拟既有路基和新建路基在不同加固形式下,既有路基的水平变形规律,以便

更好地从既有路基本身和外部邻近荷载两方面控制路基变形。根据该工程中既有路基地基处理方式的不同,将既有路基 CFG 桩复合地基顶部是否有筏板作为变量,同时考虑新建路基是否存在桩基,研究既有路基的水平变形规律,主要考虑路基下部 CFG 桩的水平变形规律。

本次主要通过有限元软件 Plaxis 2D 进行建模计算和分析。建立以下 4 个模型:无筏板既有路基+无桩基新建路基、无筏板既有路基+桩基新建路基、有筏板既有路基+无桩基新建路基、有筏板既有路基+桩基新建路基。模型宽度为 100 m,厚度为 55 m。既有路基 CFG 桩采用嵌入式排桩进行模拟,桩径为 0.5 m,桩长为 18 m,桩间距为 2 m,材料为 C15 混凝土;筏板为实体,厚度为 0.5 m,材料为 C30 混凝土。对于新建路基桩板结构,桩采用嵌入式排桩进行模拟,桩径为 1 m,桩长为 25 m,单排桩数量为 2,桩间距为 4 m;板结构为实体,宽度为 6 m,厚度为 0.5 m,桩和板的材料均为 C30 混凝土。土体根据工程勘察资料进行参数选取。混凝土材料用线弹性本构进行模拟,土体材料用土体硬化本构进行模拟,模型边界条件为侧边界和底面约束全部自由度。数值模拟模型示意图如图 5 所示。

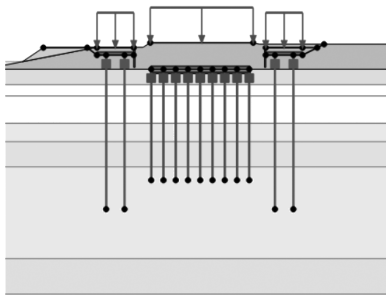


图 5 数值模拟模型示意图

3.2 计算结果与分析

提取既有路基最外侧 CFG 桩和坡脚外 2 m 处土柱的水平位移数据进行分析,计算结果如图 6~7 所示。图中水平位移正值表示为从新建路基往既有路基方向移动,反之为负值。

从计算结果可以看出,无筏板既有路基+无桩基新建路基计算模型的 CFG 桩水平变形随埋深的增加而逐渐增大,而既有路基坡脚外 2 m 土柱的水平变形呈现先增大后减小的“弓”形变化规律。考虑到该模型的路基结构和邻近荷载条件与土工离心试验组的设置相同,并且两者的桩体和土体的水平变形规律一致,因此可以认为数值模拟结果可信。

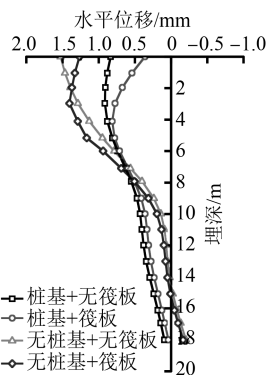


图 6 既有路基 CFG 桩水平位移

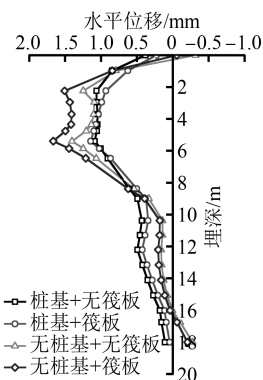


图 7 既有路基外 2 m 土柱水平位移

对比新建路基有桩基组模型和无桩基组模型的水平位移可知,有桩基组模型的 CFG 桩和坡脚外土柱两者上部的水平变形均小于无桩基组模型的水平变形,但其下部的水平变形较无桩基组的水平变形大,无桩基组的整体水平位移峰值较大。通过上述的位移变化分析可知:桩基的存在,使得部分路基及上部荷载能够传递到深层土体中,减小了上层土体的附加应力,有利于减小对既有路基地基上部的变形影响;虽然对地基下部的变形影响有所增大,但其整体位移峰值有所减小,对整体变形控制和受力是有利的。

对比既有路基有筏板组模型和无筏板组模型的水平位移曲线可知,有筏板组模型的既有路基坡脚外土柱的水平位移变化规律和无筏板组模型的没有明显差异,但有筏板组模型的 CFG 桩桩顶的水平位移较无筏板组模型的 CFG 桩桩顶位移有显著减小,且桩体水平位移峰值出现的位置下移,位移峰值有一定程度的减小,桩体的水平变形规律从漏斗型变为“弓”型。通过上述的位移变化分析可知:CFG 桩复合地基顶部筏板的存在,增加了 CFG 桩复合地基的水平抗变形能力,能够较大程度减小桩顶的水平位

移,可在一定程度上减小桩的最大水平位移。

4 结论

1) 在邻近堆载的作用下,软土地区城市轨道交通线路路基坡脚外 2 m 土柱的水平变形呈现“弓”型变化规律,随埋深增加,水平变形先增大后减小;路基 CFG 桩复合地基中的 CFG 桩的水平变形呈现漏斗型变化规律,桩顶水平位移最大,随埋深的增加,水平变形逐渐减小。

2) 在既有路基邻近修建新路基时,新建路基中桩基的存在能够较好地传递路基及上部荷载,有利于减小对既有路基地基上部的变形影响;虽然对地基下部的变形影响有所增大,但其整体位移峰值有所减小,对既有路基整体变形控制和受力是有利的。

3) 对于利用 CFG 桩进行地基加固的城市轨道交通线路路基,桩顶筏板的存在,增加了 CFG 桩复合地基的水平抗变形能力,能够较大程度减小桩顶的水平位移,可在一定程度上减小桩的最大水平位移。

参考文献

[1] 王炳龙,杨龙才,周顺华,等.CFG 桩控制深厚层软土地基沉降的试验研究[J].铁道学报,2006(6): 112.

[2] 李昌宁,王炳龙,周顺华.CFG 桩-网复合结构软基加固技术及其实际应用[J].铁道工程学报,2006(1): 27.

[3] 杨龙才,王炳龙,赵国堂,等.CFG 桩网复合地基沉降计算方法研究[J].铁道建筑,2009(7): 19.

[4] 柴春阳,张广泽,巫锡勇.软土路基侧向变形对邻近建筑基础的影响分析[J].铁道工程学报,2017(6): 23.

[5] 张浩,石名磊,胡伍生,等.互通区跨线桥邻近路基墩柱偏移事故分析[J].东南大学学报(自然科学版),2013(3): 617.

[6] 李建国,王珣.路基承载力与路堤稳定性及沉降关系研究[J].铁道工程学报,2014(5): 12.

[7] 陈继彬,赵其华,彭社琴,等.不同方式处理后软土地基侧向变形规律[J].岩土力学,2013(增刊 1): 340.

[8] 余闰,刘松玉.路堤侧向变形性状及预测模型研究[J].岩土力学,2008(5): 1305.

[9] 魏汝龙.大面积填土对邻近桩基的影响[J].岩土工程学报,1982(2): 132.

[10] 刘毓璜,陈福全,左广洲.大面积堆载下软土地基的应力隔离与加固实例分析[J].岩土力学,2006(5): 846.

[11] 王剑文.软土地基上堆载对临近桥梁桩基的影响[D].福州:福州大学,2014.

[12] 张浩,石名磊,郭院成,等.不平衡堆载作用下邻近结构桩的侧向受力机制[J].岩土工程学报,2016(12): 2226.

[13] ZHOU S H, WANG B L, SHAN Y. Review of research on high-speed railway subgrade settlement in soft soil area[J]. Railway Engineering Science, 2020, 28: 129.

(收稿日期:2020-02-16)

(上接第 115 页)

域,车顶、端墙结构的应力均低于材料屈服强度。S2.1 工况各模块应力分布如表 3 所示。图 9 为 S2.1 工况下 BM1 模块车体应力云图。相同类型载荷的其他工况与该典型工况的应力分布相似,其他工况强度校核均合格,各模块车体结构强度满足设计要求。

表 3 S2.1 工况各模块应力分布

模块	位置	最大应力/MPa	安全系数
CM1 司机室	防爬器安装板	347.0	1.02
BM1 底架	一位端端头横梁 司机室连挂孔区域	338.1	1.05
BM1 侧墙	二位端右上门角处	272.0	1.31
SM2 底架	端头横梁上盖板圆弧区域	333.0	1.07
SM2 侧墙	二位端右下门角处	261.0	1.36

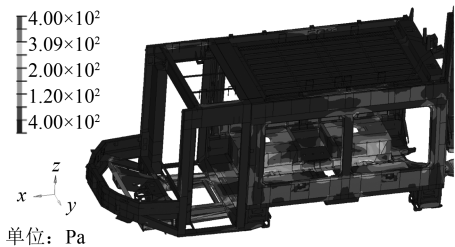


图 9 S2.1 工况下 BM1 模块车体应力云图

4 结语

本文介绍了由 5 个模块组成的 100%低地板轻轨列车车体及其铰接系统设计方案,对组成车体的各部件结构做了详细介绍,对铰接机构的选型布置进行了重点分析。有限元分析表明,车体结构强度校核合格,完全满足设计要求。

参考文献

[1] 赵大斌,任利惠.70%低地板轻轨车辆的型式比较[J].城市轨道交通研究,2007(4): 29.

[2] 王忠杰,尹力明.“六轴五车体”100%低地板轻轨车辆技术方案[J].上海电气技术,2011(4): 47.

[3] 葛党朝.低地板轻轨车辆的总体方案研究[J].城市轨道交通研究,2011(9): 58.

[4] 赵明花,牛锡平,杨丹燕,等.我国自主研发 100%低地板轻轨车[J].机车电传动,2013(3): 59.

[5] CENELEC. Railway applications: Structure requirements of railway vehicle bodies: EN 12663-1: 2010 [S]. Brussels: CENELEC, 2010.

(收稿日期:2018-08-28)