

# 城市轨道交通新建路基对邻近既有桩筏结构 路基水平变形的影响<sup>\*</sup>

王长丹<sup>1,2</sup> 散骞骞<sup>1,2</sup> 王炳龙<sup>1,2</sup> 周 伟<sup>1,2</sup> 陈凯祥<sup>1,2</sup>

(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//第一作者, 副教授)

**摘 要** 目的:城市轨道交通新建线路并行或接轨既有线路时,往往需要在邻近既有线路新建路基。新建路基的加载会产生地基附加应力,这将导致土体发生沉降及水平位移,从而使得既有线路路基发生变形,同时可能会造成既有线路基发生后续固结变形,进而危害列车运营安全。因此,需要研究邻近既有线路新建路基对既有城市轨道交通桩筏结构路基水平变形的机制和主要影响因素,以保障轨道交通路基建设的安全。**方法:**以软土地区某邻近新建线路路基工程既有城市轨道交通线路桩筏结构路基为例,采用有限元数值模拟与离心模型试验的方法,研究新建路基加载对邻近既有路基水平变形的影响。**结果及结论:**在新建路基荷载作用下,邻近地层水平位移随地层深度先增大后减小,其最大值发生在地表以下 4 m 位置。新建路基与既有路基相邻坡脚间的地层水平位移同距既有路基坡脚距离呈指数关系递增。在邻近加载作用下,既有路基各排桩均向背离新建路基方向产生水平偏移,水平变形量值随着与邻近加载距离增大以及深度的增大而减小,水平变形差异主要位于上中段桩体。靠近加载位置桩基可以有效地阻拦邻近加载在地基中产生的水平土压力和水平位移的发展。

**关键词** 城市轨道交通; 桩筏结构路基; 软土地区; 邻近加载; 水平变形

**中图分类号** U213.1<sup>+</sup>5; U238

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.12.007

## Influence of Newly-constructed Urban Rail Transit Subgrade on Horizontal Deformation of Adjacent Existing Pile-raft Structure Subgrade

WANG Changdan, SAN Qianqian, WANG Binglong, ZHOU Wei, CHEN Kaixiang

**Abstract** Objective: When newly-built urban rail transit lines are parallel or connected to existing lines, it often necessitates the construction of a new subgrade adjacent to the existing

line. The loading of the new subgrade will generate additional stress on the foundation, causing deformation and horizontal displacement of soil mass, which may result in existing line subgrade deformation and then the subsequent consolidation deformation, posing a risk to the safety of train operation. Therefore, it is crucial to study the mechanism and main influencing factors of existing urban rail transit pile-raft structure subgrade horizontal deformation caused by the construction of adjacent existing line newly-built subgrade, to ensure the safety of rail transit subgrade construction. **Method:** Based on the pile-raft structure subgrade of an existing urban rail transit line adjacent to the newly-built subgrade project in soft soil area as example, the influence of adjacent newly-built subgrade loading on the horizontal deformation of existing subgrade is studied by using finite element numerical simulation and centrifugal model test. **Result & Conclusion:** Under newly-built subgrade loading, the horizontal displacement of adjacent strata first increases and then decreases with the depth of strata, and the maximum value occurs at 4 m below the surface. For the newly-built subgrade and existing subgrade slope toes, the horizontal displacement of adjacent strata between them increases exponentially with their distance. Under the action of adjacent loading, each row of piles of in the existing subgrade experiences horizontal displacement away from the newly-built subgrade. The magnitude of horizontal deformation decreases with increasing distance from the adjacent loading and the depth, with the main differences in horizontal deformation occurring in the upper and middle sections of the pile body. Pile foundations near the loading point can effectively inhibit the development of horizontal earth pressure and horizontal displacement caused by adjacent loading in strata.

**Key words** urban rail transit; pile-raft structure subgrade; soft soil area; adjacent loading; horizontal deformation

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51778485);青年科学基金项目(51608384)

**Author's address** The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

城市轨道交通新建线路并行或接轨既有线路时,往往需要邻近既有线路新建路基。新建路基的加载会产生地基附加应力,导致土体发生沉降及水平位移,从而使得既有线路路基发生变形,同时可能会造成既有线路路基发生后续固结变形,进而危害列车运营安全。

目前对于 CFG(水泥粉煤灰碎石)桩复合路基竖向沉降变形控制的研究已有一定成果<sup>[14]</sup>,形成了一些沉降计算方法<sup>[5-6]</sup>。关于邻近加载或邻近土体的水平运动对既有结构物影响的研究,主要集中在影响对象为边坡抗滑桩与桥梁桩基的研究<sup>[7-8]</sup>。近年来,有学者开始就邻近施工活动对既有铁路路基产生的影响开展研究。文献[9]对新建沪宁城际、既有京沪铁路的并行段进行现场试验,结合有限元模拟,总结了土体侧向位移、路基沉降和既有线路坡脚水平应力随深度的变化规律。文献[10]利用离心模型试验与有限元的手段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,但还未形成一定体系的成果,仍需做进一步的深入研究。

本文依托邻近城市轨道交通既有线路基的某新建路基工程,采用数值模拟与离心试验手段,就邻近路基加载对既有路基水平变形的影响进行探究与分析。

### 1 工程概况

邻近既有线路路基的新建城市轨道交通线路路基工程位于华东某地区,地处河谷平原间残丘,其地形起伏不大。地层自上而下主要为:第四系冲洪积的粉质黏土,下伏弱风化灰岩,岩质坚硬。

既有路基线路为无砟轨道,正线线间距为 5.0 m;路基填筑高度约为 5.0 m,路基基底软土层采用 CFG 桩筏结构加固,桩间距为 1.4 m,桩径为 0.5 m 正方形布置,桩长为 5.6 ~ 39.7 m,桩底至灰岩层顶面。

新建线路路基采用钻孔灌注桩 + 承载板结构加固,桩径为 1.0 m,桩横向间距为 3.0 ~ 5.0 m,纵向间距为 5.0 m,桩长为 5.0 ~ 26.0 m,承载板横向宽为 5.0 ~ 9.0 m,纵向长为 19.0 m,板厚为 0.8 m。

选取路基典型断面示意图如图 1 所示。

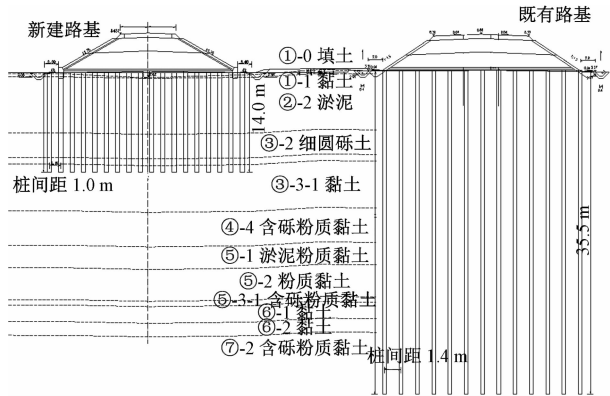


图 1 路基典型断面示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of subgrade typical profile

## 2 数值模拟

### 2.1 数值模型建立

为研究新建路基对既有路基水平变形的影响,采用有限元软件 Plaxis3D 建立数值计算模型。模型包含了邻近段既有线及新建线路路基以及地基加固区,地基加固区采用将原土层替换为换算后高强度加固区材料的方法进行模拟。新建路基坡脚与既有路基坡脚间距离为 10 m,考虑新建路基对于既有线路路基的影响范围,新建线及既有线路基坡脚两侧各取 50 m,模型尺寸为 150 m × 150 m,有限元数值模型如图 2 所示。有限元模型中的土体本构模型选用 HS(土体硬化)模型,可有效模拟软黏土的剪切硬化和体积硬化过程。土体及路基结构采用 10 节点四面体单元进行网格划分。

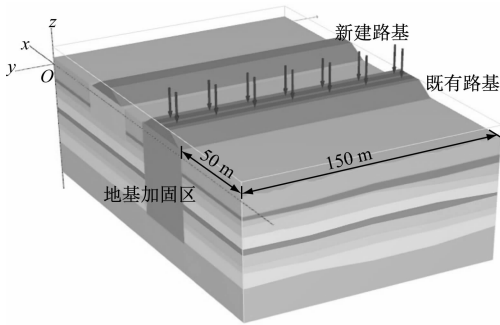


图 2 数值模型示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of numerical model

基于工程相关资料,数值模型相关计算参数如表 1 所示。

### 2.2 计算结果与分析

图 3 给出了新建路基与既有路基间地面水平位移。本文中,若无特殊说明,所定义水平位移均为

表 1 数值模型土层参数

Tab.1 Numerical model soil layer parameters

地层编号	岩土名称	土层模型参数取值			
		内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	压缩模量 $E/\text{MPa}$	基本承载力 $f_{a0}/\text{kPa}$
①-0	填土	10.00	10.00	3.00	100
①-1	黏土	20.00	20.00	4.00	100
②-2	淤泥	4.03	5.58	1.47	40
③-2	细圆砾土	32.00	2.00	20.00	250
③-3-1	黏土	8.00	11.33	2.91	100
④-4	含砾粉质黏土	15.00	10.00	5.00	180
⑤-1	淤泥质粉质黏土	14.85	5.50	2.31	80
⑤-2	粉质黏土	19.00	22.00	4.00	150
⑤-3-1	含砾粉质黏土	15.00	10.00	5.00	180
⑥-1	黏土	17.90	29.00	5.00	180
⑥-2	黏土	8.50	20.00	3.00	150
⑦-2	含砾粉质黏土	15.00	10.00	5.00	200
钻孔灌注桩加固区岩土		9.38	21.12	11.42	392

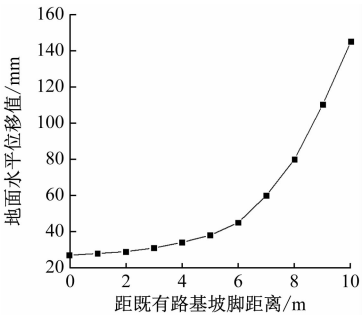


图 3 新旧路基间地面水平位移

Fig. 3 Horizontal displacement of surface between new and old subgrades

远离新建路基为正,靠近新建路基为负。可以看到,路基填筑完成后,新建路基坡脚水平位移约为 145 mm,邻近既有路基坡脚水平位移约为 27 mm,新建路基与既有路基相邻坡脚间的地层水平位移与距既有路基坡脚距离呈指数关系递增。

既有路基坡脚外(靠近新建路基侧)4 m、8 m、10 m(新建路基坡脚)土体水平位移随地层深度变化如图 4 所示。新建路基荷载作用下,新建路基与既有路基相邻坡脚间的地层水平位移随地层深度先增大后减小,最大值发生在地面以下 4 m 位置。既有路基坡脚外 4 m、8 m、10 m 处地层最大水平位移分别为 64 mm、141 mm、280 mm,地面水平位移分别为 34 mm、80 mm、145 mm,约为最大水平位移的 53%、57%、52%。

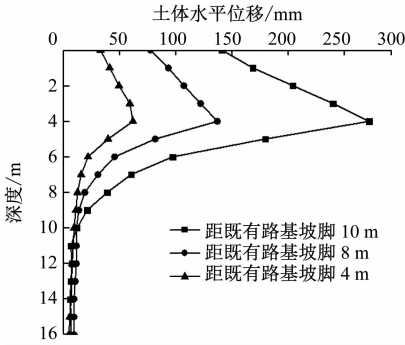


图 4 既有路基与新建路基相邻坡脚间的地层沿深度方向水平位移

Fig. 4 Horizontal displacement of adjacent strata between the existing and newly tuilt subgrade slope toes along the depth direction

3 离心模型试验

为验证数值计算结果,并进一步探究邻近加载作用下既有桩筏结构路基的水平变形规律,采用离心模型试验的手段进行更加深入的研究。

3.1 试验仪器

离心模型试验采用同济大学 L-30 型土工离心机,模型箱为一上部开口,左、右、后、下四壁为厚 20 mm 的铝合金板,前壁为厚 30 mm 的有机玻璃面板组成的箱体,箱内可供布置土工模型的净空间尺寸为 415 mm×230 mm×355 mm。

3.2 模型设计与制作

综合考虑试验设计与模型箱的净空尺寸、离心

机运转条件的相关要求,结合原型尺寸,为进行 CFG 桩筏结构路基在邻近加载工况下的全断面模拟,模型比例尺取 1:100。即试验中保持离心机离心加速度为 100g( $g$  为重力加速度)运转。土工模型中的土体固结度达到与原型土体相同所需的时间为原型的  $1/100^2$ 。

模型制作软土地基厚度 16 cm,所用土为采自上海的③-1 层土淤泥质粉质黏土,并于模型箱底铺设 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 2。

表 2 模型用土物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of soil used in the model				
土层	体积质量/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	压缩模量/ MPa
淤泥质粉质黏土	16.8	10.3	4.9	2.7
中粗砂	19.0	2.0	32.0	33.0

试验中 CFG 桩采用铝管进行模拟。根据相似原理进行计算,制作模型桩尺寸长度为 180.0 mm,桩径为 5.0 mm,壁厚为 0.4 mm。为尽量真实模拟复合垫层的作用,碎石垫层采用细砂(粒径为 0.5 ~ 3.0 mm)进行模拟,铺设厚度采用几何相似,铺设 6 mm 厚模拟垫层,并于模拟垫层中部铺设细孔窗纱,模拟土工格栅。邻近新建路基加载采用预制铝块进行等效模拟,加载块边缘与既有路基坡脚距离为 10 cm,等效荷载大小为 80 kPa,相当于实际工程中 5 m 高路基填筑。试验模型示意图如图 5 所示。

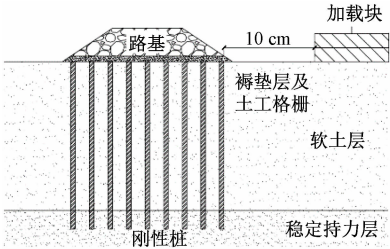


图 5 离心试验模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the centrifugal test model

为验证前文数值计算结果,试验位移监测点选取既有路基坡脚外(靠近加载侧)4 m、8 m、10 m 土体以及既有路基 1<sup>#</sup>—5<sup>#</sup>桩体,位移监测点布置如图 6 所示。

3.3 试验过程

本次离心模型试验步骤具体过程为:土样分层

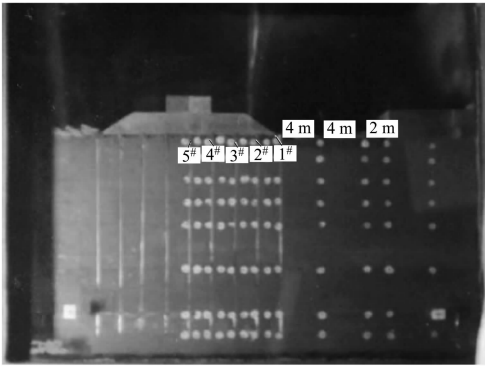


图 6 试验位移监测点布置示意图

Fig. 6 Layout diagram of test displacement monitoring points

固结;布置既有路基模型并加速至 100g,待其稳定后,为模拟既有路基所处的实际环境,按既有路基运营 5 年考虑,旋转相应的相似时间 270 min;布置等效新建路基荷载及测点;加速至 100g 后,保持加速度稳定不变,每隔 9 min 通过高速同步摄影系统对观测面在各时间下的观测光标点阵进行拍摄,记录其变形过程。

3.4 试验结果与分析

试验结束后,通过数据处理,得到新建路基加载作用下各测点的水平变形结果,图 7 所示为离心模型试验与数值模拟结果对比。可以看到,离心试验中既有路基与新建路基相邻坡脚间的地层土体水平位移随地层深度先增大后减小,最大值也发生在地面以下 4 m 位置。由于试验采用的土体为单一的软土土层,故试验结果略大于数值模拟结果。数值模拟与离心试验新旧路基间地层水平位移结果规律相似,大小相差不大,说明采用前述数值模

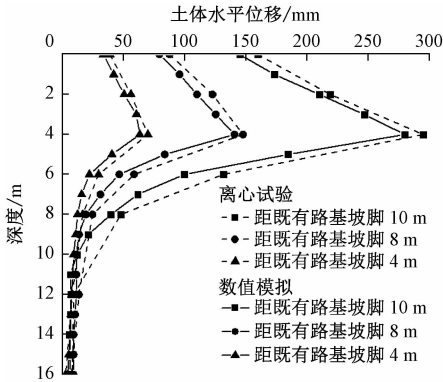


图 7 既有路基与新建路基相邻坡脚间的地层沿深度方向水平位移对比

Fig. 7 Comparison of horizontal displacement of adjacent strata between the existing and newly-built subgrade sope toes along the depth direction

拟方法研究新建路基对既有路基水平变形的影响结果是可靠的。

离心试验 1<sup>#</sup>—5<sup>#</sup>桩桩体的水平变形曲线如图 8 所示。可以看到,在邻近加载的作用下,各排桩均向背离新建路基产生水平向的偏移,且各排桩呈现出相似的水平变形趋势。水平变形量随着深度的增加而逐渐减小,由靠近加载位置至远离加载位置也逐渐减小,且水平变形差异主要出现于桩体上中段处(4~12 m 深),这是由于桩体下部位于持力层中,上部与复合垫层接触。距加载位置近的 1<sup>#</sup>桩整体水平变形量相对更大,由此可见,在邻近新建路基加载作用下,靠近加载位置的桩基可以有效地阻拦地基中附加的水平土压力传递和后排桩水平位移的发展。

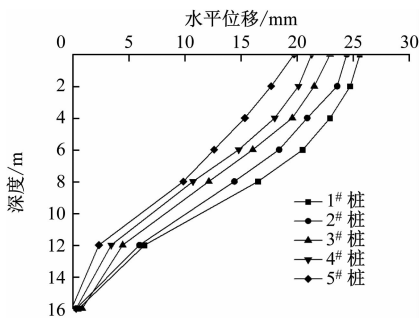


图 8 既有路基各排桩水平变形离心试验曲线

Fig.8 Centrifugal test curve of horizontal deformation of each drainage pile on the existing subgrade

## 4 结论

1) 新建路基荷载作用下,既有路基与新建路基相邻坡脚间的地层水平位移随地层深度先增大后减小,最大值发生在地面以下 4 m 位置。其地层水平位移与距既有路基坡脚距离呈指数关系递增。

2) 在邻近新建路基加载的作用下,既有各排桩均向背离新建路基方向产生水平向的偏移,水平变形量随邻近加载距离增大以及深度增大而减小,水平变形差异主要位于上中段桩体。

3) 对于既有的城市轨道交通线路桩筏结构路基,靠近加载位置桩基可以有效地阻拦邻近加载在地基中产生的水平土压力和水平位移的发展。

## 参考文献

[1] ESKIŞAR T, OTANI J, HIRONAKA J. Visualization of soil arching on reinforced embankment with rigid pile foundation using X-ray CT[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32: 44.

[2] WANG C, WANG B, GUO P, 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.

[3] 蔡德钧, 叶阳升, 闫宏业, 等. 桩网支承路基力学性能数值分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 1.

CAI Degou, YE Yangsheng, YAN Hongye, et al. Numerical analysis on the mechanical properties of geosynthetic reinforced and pile supported embankment[J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 1.

[4] 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, 28(6): 112.

WANG Binglong, YANG Longcai, ZHOU Shunhua, et al. Experimental study on the settlement control of high-speed railway subgrade over deep soft clay reinforced by CFG piles[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(6): 112.

[5] 王长丹, 周顺华, 王炳龙, 等. 高速铁路桩承式结构路基地基沉降计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1231.

WANG Changdan, ZHOU Shunhua, WANG Binglong, et al. Settlement calculation of rigid piled-structure embankment in high-speed railway[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1231.

[6] 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, 49(7): 19.

YANG Longcai, WANG Binglong, ZHAO Guotang, et al. Study on settlement calculation method of CFG pile-net composite foundation[J]. Railway Engineering, 2009, 49(7): 19.

[7] 李志伟. 软土地基邻近堆载对桥梁桩基偏位的影响研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3594.

LI Zhiwei. Study of influence of surcharge load on lateral displacement of bridge piled foundation in soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3594.

[8] 李忠诚, 梁志荣. 大面积堆载土体侧移模式及对邻近被动桩影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 128.

LI Zhongcheng, LIANG Zhirong. Calculation model and numerical analysis of passive piles subjected to adjacent surcharge loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 128.

[9] 左坤, 徐林荣. 新线地基施工对邻近运营铁路路基稳定性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(1): 93.

ZUO Shen, XU Linrong. Research of stability effect on adjacent existing rail lines due to new lines construction[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(1): 93.

[10] 李柱雄, 王长丹, 周顺华, 等. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 116.

LI Zhuxiong, WANG Changdan, ZHOU Shunhua, et al. Impact analysis of newly constructed urban rail transit line subgrade in soft soil area on the horizontal deformation of adjacent line subgrade[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 116.

(收稿日期:2021-04-22)