

文章编号:1671-6833(2017)05-0044-06

高速公路拓宽中桩类型优选与板桩适应性分析

李海滨<sup>1,2</sup>, 柯胜旺<sup>1</sup>, 申艳军<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 普渡大学 工程学院, 印第安纳 西拉法叶 47906)

**摘要:** 结合板桩结构在铁路中的广泛使用,在高速公路改扩建工程中引入板桩结构,通过模拟不同桩体类型和荷载不同位置时拓宽路堤的力学行为,提出优选的桩体类型和最不利荷载位置.然后连续观测并分析板桩结构与 CFG 桩处治段的沉降,阐明板桩结构在改扩建工程中的适应性.研究结果表明,PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩对拓宽工程沉降的影响效果逐渐减弱,从控制沉降角度应优选 PTC 桩和 CFG 桩;荷载的最不利位置是新路堤,施工过程中必须着重控制加宽行车道内侧的质量;板桩结构对降低差异沉降的效果在半刚性基层施工过程中逐渐显现,在面层施工阶段优势明显,板桩结构是传统软土地基处治方法的有效补充,在改扩建工程中具有很好的适用性和推广前景.

**关键词:** 道路工程;改扩建工程;差异沉降;水泥混凝土板桩;桩体类型优选

**中图分类号:** U416.2      **文献标志码:** A      doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.006

0 引言

现阶段软土地区高速公路的改扩建工程中,旧路路基经过多年固结沉降已经基本稳定,新路基由于填筑时间短,在交通荷载作用下易引起新老路基的差异沉降,目前降低沉降的常用方法是 PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩等,其中,CFG 桩技术可有效提高软土地基承载力,在高速公路路基处理中有良好应用前景<sup>[1-2]</sup>.

板桩结构目前主要应用在轨道交通中,在道路领域的应用非常少.板桩结构最初是由芬兰人于 20 世纪 90 年代初提出<sup>[3]</sup>,在欧洲其他地区普遍采用,如德国 Nuremberg-Ingolstadt 新建线的北段南部延长线<sup>[4-5]</sup>,英法海底隧道连接线的 7 km 沼泽地区<sup>[6]</sup>,美国路易斯安那州东南部公路的路桥过渡段<sup>[7]</sup>.本世纪初,板桩结构逐渐在我国客运专线路基建设中得到推广,如京沪高速铁路软土地段,沈哈客运专线和沪杭客运专线地基加固<sup>[8-9]</sup>,哈大线、西宝线、郑西线的路基工程<sup>[10-11]</sup>.

鉴于此,笔者针对高速公路改扩建中桩体结构处治沉降的实际情况,以石安高速改扩建工程为依托,以差异沉降为控制目标,对常见的

桩体类型和不同荷载作用位置时的路基拓宽段的力学响应进行模拟,指出扩建路基受力与桩体类型和荷载位置的关系,明确最不利荷载位置,并对目前在改扩建中常用的桩复合地基进行优选.通过板桩结构与 CFG 桩处治路段连续沉降观测对比,分析板桩结构在高速公路改扩建工程中的适用性,为其在高速公路扩建工程中的推广和应用打下基础.

1 不同桩体类型和不同位置荷载对拓宽路堤的力学行为影响

本节以采用双侧同时加宽两个车道的石安高速改扩建工程为依托,通过 ANSYS 建模,模拟加宽路堤在 PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩及承受不同荷载时的受力,实现现场工程试验段的室内虚拟化验证,并在此基础上提出改扩建工程中软基处治时的桩体类型优选次序.

1.1 模型构建

1.1.1 基本假定

(1)路基和地基各结构层界面处置较好,接触状态为完全连续,不考虑温度对路基路面应力分布的影响,依托工程为双向对称各加宽两个车

收稿日期:2017-03-22;修订日期:2017-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208047、1302228);中国博士后科学基金资助项目(2013M532005、2013M532070、2014T70931);河北省省级计划资助项目(Y-2011004、Y-2011005)

作者简介:李海滨(1980—),男,西安科技大学副教授,博士,主要从事道路工程结构与材料的研究,E-mail:lihaib-in1212@126.com.

道,因此计算模型取加宽结构的一半;

(2)桩体为线弹性体且符合广义虎克定律;土体为理想弹塑性体,均匀分布且各向同性;

(3)旧路及其下方地基自身固结变形已完成,旧路与加宽新路结合处不发生相对脱离和滑移,只有新拓宽路基部分有重力;

(4)桩体用八节点三维结构实体 SOLID-45 单元,土体用八节点三维结构实体 SOLID-185 单元,本构模型用扩展的线性 Drucker-Prager 模型.

1.1.2 模型尺寸

石安高速公路改扩建工程采用两侧同时拓宽2个车道的方式,分析时沿路面中心取结构一半进行计算,即原路面宽度  $B = 26\text{ m}$  的一半,地基宽度取  $50\text{ m}$ ,土基高度取  $30\text{ m}$ ,其中上卧层土  $10\text{ m}$ ,下卧层土  $20\text{ m}$ ,两侧对称加宽,新路基与旧路基结合处采用台阶咬合方式进行搭接,台阶宽  $1\text{ m}$ ,高  $0.6\text{ m}$ ,几何模型如图 1 所示.

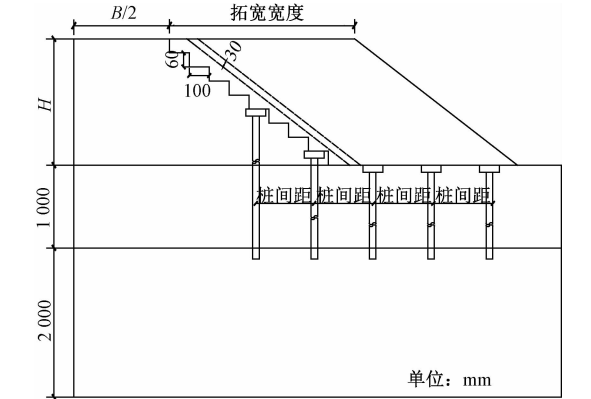


图 1 构建的几何模型  
Fig.1 Geometrical model

1.1.3 材料参数

根据现场取样试验,得到新旧路堤土及路基土参数及桩参数,如表 1 和表 2 所示.

表 1 土层材料参数  
Tab.1 Material parameters of soil

土层	弹性模量/MPa	泊松比	重度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
旧路堤	40	0.35	2 000
新路堤	30	0.38	2 000
地基	20	0.45	1 300

表 2 桩体材料参数  
Tab.2 Material parameters of pile

类别	容重/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
PTC 桩/桩帽	25	40 000	0.20
CFG 桩	23	10 000	0.20
水泥搅拌桩	25	8 000	0.22

1.1.4 网格划分及边界条件

拓宽路基的几何模型,采用空间八节点实体 SOLID-45 单元.

拓宽路段考虑自重和外荷载共同作用. 外荷载采用标准轴载 BZZ-100,轮胎内压  $0.7\text{ MPa}$ ,荷载圆半径为  $10.65\text{ cm}$ ,双轮间距为  $32\text{ cm}$ . 在满足计算精度前提下为方便单元划分,经试算选用单个轮压作用范围  $20\times 20\text{ cm}$ ,双轮间距  $30\text{ cm}$ ,布载方式如图 2 所示. 边界条件为模型底面完全约束,两侧水平方向约束,桩底完全约束.

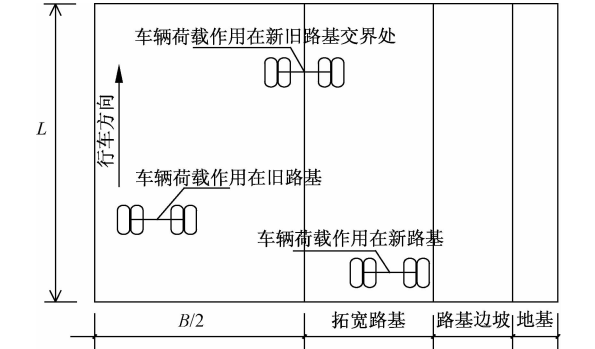


图 2 行车荷载分布  
Fig.2 Traffic load distribution

1.1.5 计算工况

工况一讨论桩体类型的影响. 无承台 PTC 桩:桩间距  $3\text{ m}$ ,桩长  $12\text{ m}$ ,桩径  $40\text{ cm}$ ,桩体模量  $40\text{ GPa}$ ,拓宽宽度  $8\text{ m}$ ,路堤填筑高度  $8\text{ m}$ ;有承台 PTC 桩:承台长宽均为  $4\text{ m}$ ,高  $0.5\text{ m}$ ,其他参数如无承台 PTC 桩. CFG 桩:桩间距  $2\text{ m}$ ,桩长  $12\text{ m}$ ,桩径  $40\text{ cm}$ ,桩体模量  $10\text{ GPa}$ ,拓宽宽度  $8\text{ m}$ ,路堤填筑高度  $8\text{ m}$ . 水泥搅拌桩:桩间距  $2.5\text{ m}$ ,桩长为  $12\text{ m}$ ,桩径  $50\text{ cm}$ ,桩体模量  $8\text{ 000 MPa}$ ,拓宽宽度  $8\text{ m}$ ,路堤填筑高度  $8\text{ m}$ .

工况二讨论荷载位置的影响. 采用 PTC 桩,桩间距  $3\text{ m}$ ,桩长  $12\text{ m}$ ,桩径  $40\text{ cm}$ ,桩体模量  $40\text{ GPa}$ ,拓宽宽度  $8\text{ m}$ ,填筑高度  $8\text{ m}$ ,模拟行车荷载分别作用在新路堤、旧路堤、新旧结合处时拓宽路段的位移和应力特性.

1.2 不同桩体类型下拓宽段力学行为分析

本节主要对 PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩的拓宽段受力进行分析,参数如表 1、表 2 和工况一,经过有效性验证后,各指标的最大值计算结果如图 3、图 4 所示.

不同桩体类型的复合地基对拓宽路基的影响不同,最大沉降值出现在拓宽道路新路肩附近,最大水平位移出现在新路基边坡坡脚和新旧路基搭接处,应力随之重新分布且最大应力出现在桩体下端.

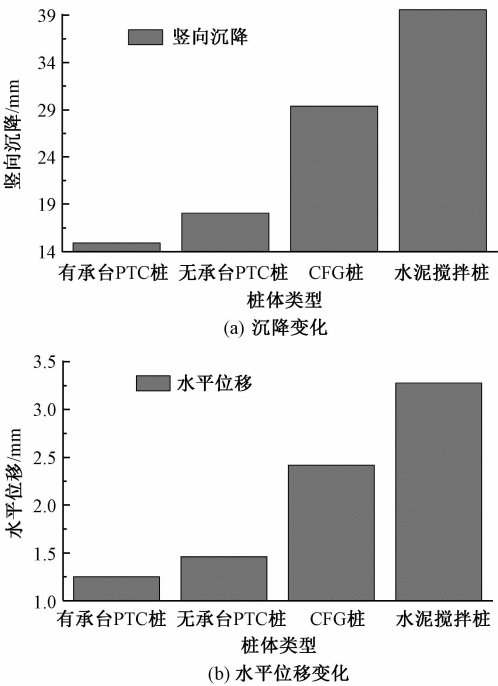


图 3 不同桩体类型下拓宽段沉降和水平位移图  
Fig.3 Settlement and horizontal displacement change trend in different pile kind

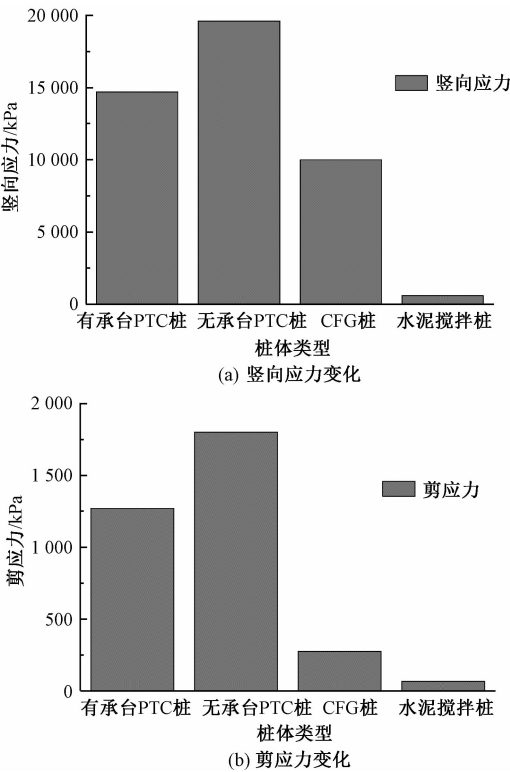


图 4 不同桩体类型下拓宽段竖向应力和剪应力变化图  
Fig.4 Vertical stress and shear stress change trend of different pile types

当桩类型从有承台 PTC 桩、无承台 PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩改变时,最大沉降分别相对增加 21.2%、96.9%、165.3%,最大水平位移分别相对增加 16.8%、93.6%、162.4%。采用 CFG

桩和水泥搅拌桩时的最大竖向应力分别减小 32.0% 和 95.9%,最大剪应力分别减小 78.3% 和 94.8%,说明不同桩体类型的路堤沉降和受力明显不同。因此,综合分析沉降和位移,从降低沉降的角度应优选 PTC 桩和 CFG 桩。

1.3 不同荷载位置时拓宽段力学行为分析

针对行车荷载在拓宽段、原路基和旧路基结合处,对拓宽段受力进行分析,参数如工况二,经过有效性验证,各指标最大值如图 5、图 6 所示。

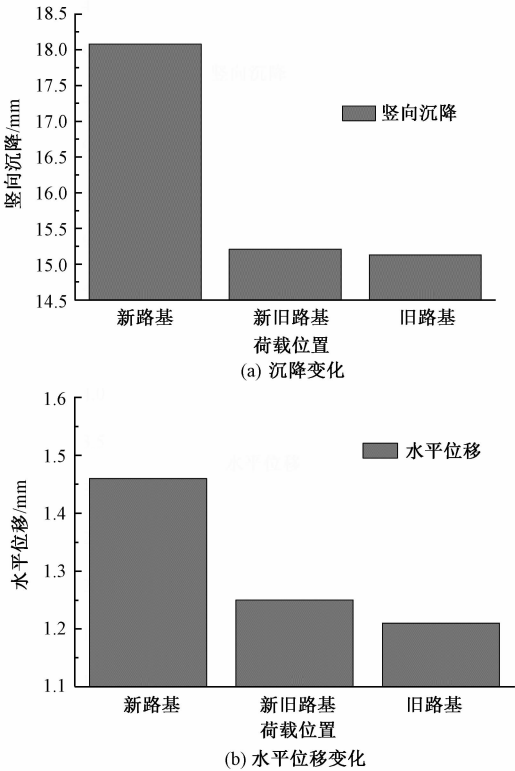


图 5 不同荷载位置下沉降和水平位移变化图  
Fig.5 Settlement and horizontal displacement change trend of different load positions

行车荷载作用在新路堤时沉降和水平位移最大,最大沉降出现在拓宽段新路肩边缘,水平位移最大值出现在新路基坡脚和旧路基搭接处。

荷载从新路堤过渡到旧路堤时,沉降和水平位移逐渐减小后趋于稳定,荷载作用在新路堤处最大沉降比旧路堤增加 19.5%,最大水平位移增加 17.4%。荷载作用在其他位置沉降变化不大,说明新路堤受行车荷载作用明显。

拓宽路基采取桩复合地基后,路基受桩体作用而再次密实,应力重新分布。荷载从新路基过渡到旧路基时,应力仅下降 1.03%,剪应力保持不变,说明行车荷载作用位置的变化对拓宽道路路基影响较小。

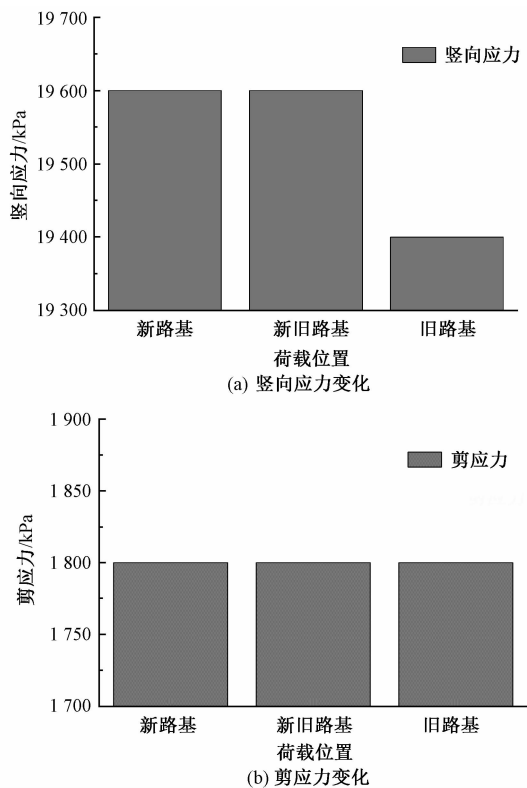


图 6 不同荷载位置下竖向应力和剪应力变化图  
Fig. 6 Vertical stress and shear stress change trend of different load positions

2 板桩结构在拓宽工程中的适应性

在依托工程中选取合适软土地基试验段,在原有 CFG 桩基础上埋设板桩,预埋沉降板和剖面管,通过沉降板实现连续沉降的点观测,剖面管实现沉降的断面观测,综合单点沉降和断面沉降,对比分析板桩结构在降低差异沉降方面的优势,为其在高速公路扩建工程中的广泛应用打下基础.

2.1 埋设位置

选取石安高速公路 K435 + 550 ~ K435 + 600 为试验路段,现场制作 50 m 的钢筋混凝土板,与下方 CFG 桩绑结为整体,分别在板桩段和 CFG 桩段埋设沉降板和水平剖面管,上面层铺筑完成后,采取埋设道钉方式继续测量沉降,布设点位如图 7 所示.

2.2 观测点沉降分析

扩建工程施工伊始,对图 7 所示的 6 个测点进行间隔为 7 d 的持续观测,根据施工的各个阶段记录沉降值,汇总后得到图 8 ~ 图 10 的扩建过程沉降走势图.

2.2.1 沉降观测

路基填筑期间沉降趋势基本一致,在路基填筑完成后沉降最大.板桩处的沉降增加明

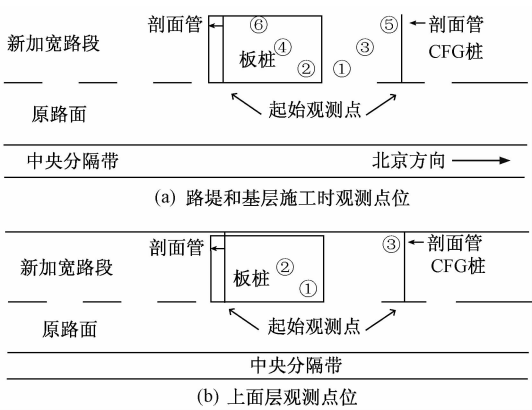


图 7 路堤、基层施工时和上面层施工时的观测点位  
Fig. 7 Monitoring points in process of embankment, base and upper pavement construction

显,主要是板桩自重加大了下方土体的固结速度.板桩和 CFG 桩的路段最大沉降量分别为 8.1 mm 和 7.1 mm,均位于路堤填筑施工末期的路肩位置,新旧路基搭接处沉降差距最小.

半刚性基层填筑期间,剔除由于施工和人为原因出现的反常数据,其余观测点处沉降随填土高度和时间增加而增大,但变化趋势和沉降增量较小.从该层施工开始,板桩处与 CFG 桩处的沉降差开始缩小,板桩结构的整体效应逐渐显现,CFG 桩处路段沉降仍继续增加.

在下、中面层施工中,沉降继续增加,板桩路段最大沉降量为 8 mm,CFG 桩路段最大沉降量 9.2 mm.路面结构施工完成后,CFG 桩路段的最大沉降量为 11 mm,板桩结构段的最大沉降量为 9.1 mm.在面层施工过程中,混凝土板对加强路堤稳定性和降低差异沉降的效果明显.

2.2.2 剖面沉降观测

K435 + 500 断面为 CFG 桩路段,K435 + 550 断面是板桩试验段,同一观测断面的沉降量随施工进度逐渐增大,越靠近新旧路基结合处的沉降增加越大.距离管口 0 ~ 2.5 m 部分,在填筑初始阶段沉降明显,距离管口 5.0 ~ 6.0 m 部分,填筑阶段沉降明显增大,沉降增速达到 2.12 mm/m 和 2.02 mm/m,最大沉降出现在加宽车道内侧处,即沉降突变明显区主要集中在加宽车道的内侧.按照沉降阶段性变化,参考距管口距离,加宽过程中可大致分为 3 个主要沉降位置,即路肩部分、加宽车道外侧部分和加宽车道内侧部分,越靠近新旧路堤交接处,路段沉降越明显,说明后期运营中加宽车道内侧容易出现破损,在施工过程中必须着重控制加宽行车道,特别是行车道内侧的施工质量需要受到重视.

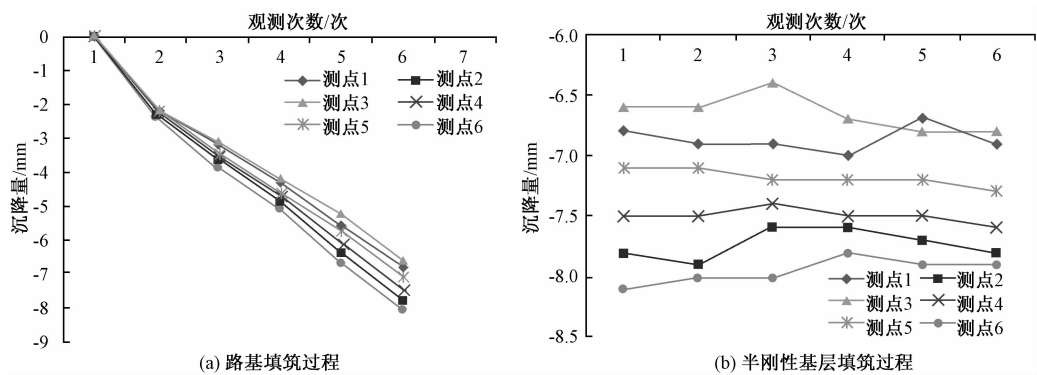


图 8 路基和半刚性基层填筑过程路段沉降走势图

Fig. 8 Settlement trend graph after embankment and semi-rigid base construction

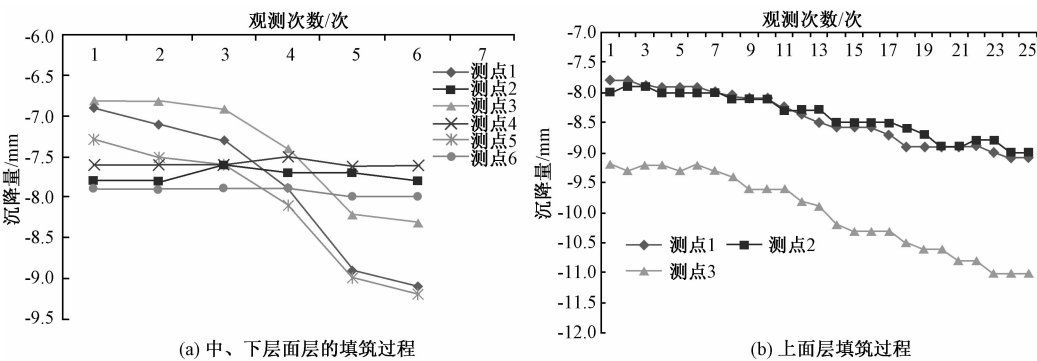


图 9 中、下面层和上面层铺筑完后路段沉降观测图

Fig. 9 Settlement trend graph after middle/base layer pavement and upper layer pavement construction

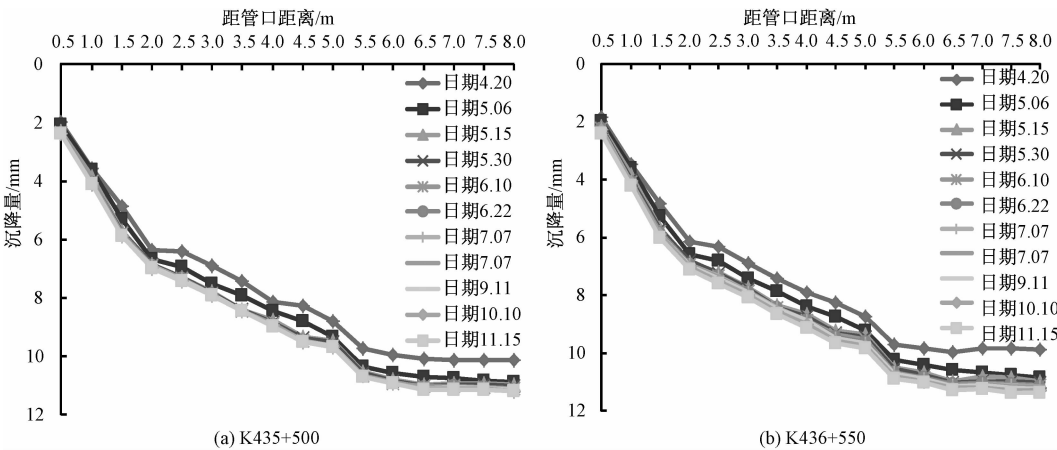


图 10 K435 + 500 和 K436 + 550 剖面管单点沉降曲线走势

Fig. 10 Single-point settlement curve trend of profile tube in K435 + 500 and K436 + 550

3 结论

(1)采用不同类型桩体处治路基,行车荷载在不同位置时,沉降最大值出现在拓宽段新路基,水平位移最大值出现在新路基边坡坡脚和新旧路基搭接处,其中行车荷载最不利位置是新路堤。

(2)桩体类型改变会影响处治沉降的效果。采用有承台 PTC 桩、无承台 PTC 桩、CFG 桩和水

泥搅拌桩时,沉降分别相对增加 21.2%、96.9% 和 165.3%,水平位移分别相对增加 16.8%、93.6% 和 162.4%;采用 CFG 桩和水泥搅拌桩时,竖向应力分别减小 32.0% 和 95.9%,剪应力分别减小 78.3% 和 94.8%,从降低沉降的角度考虑,在常用桩体中应优选 PTC 桩和 CFG 桩。

(3)路肩、加宽车道外侧和加宽车道内侧是改扩建工程的 3 个主要沉降区,越靠近新旧路堤交接处,路段沉降越明显,施工过程中须着重控制

加宽行车道内侧质量,防止后期运营车道内侧靠近新旧路堤结合处出现路面病害。

(4)在路堤改扩建过程中,水泥混凝土板桩结构对加强路堤稳定性和降低差异沉降的效果在半刚性基层施工阶段逐渐显现,面层施工阶段优势明显,表明板桩结构在改扩建工程中具有良好的推广应用前景。

参考文献:

[1] 栗培龙,饶文字,冯振刚,等. 沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2016,37(5):1-5.

[2] 潘殿琦. 水泥搅拌咬合桩的施工与检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 518-521.

[3] PEKKA T, ANTONI V, MIKKO H. Real time safety and structural stability monitoring of a reconstructed concrete slab railway embankment on a soft ground after its collapse[J]. Keep concrete attractive, 2005(5):1-6.

[4] 王忠文,徐鹤寿. 德国纽伦堡-英格尔施塔特新建线

的无碴轨道[J]. 中国铁路,2006(6):21-24.

[5] WOLFGANG F, HERMANN S, MATHIAS S, et al. SSF engineering: earthwork construction for balastless track on HSLs [J]. RTR special,2006(9):69-76.

[6] 顾湘生. 客运专线路基工程几个问题的讨论[J]. 铁道工程学报,2005(1):31-38.

[7] REDA M B, MARK A S, ZHONG J Q, et al. Performance of pile-supported bridge approach slabs[J]. Journal of bridge engineering ASCE,2005(4):228-237.

[8] 陈尚勇. 管桩桩筏基础在宿州站地基处理中的应用[J]. 铁道建筑,2009(7):108-111.

[9] 白皓,苏谦,梁龙标,等. 新建铁路路基上跨超浅埋地铁的变形监控与安全评估[J]. 中国安全科学学报,2011,21(7):144-150.

[10] 赵明志,罗强. 高速铁路深厚地层 CFG 桩复合地基变形计算经验系数分析[J]. 高速铁路技术,2015,37(1):69-73.

[11] 杜传球. 客运专线路基处理中 CFG 桩的质量控制及路基沉降观测[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2014,27(5):94-97.

Piles Kind Optimal and Sheet Pile Adaptability Analysis in Highway Extension Projects

LI Haibin<sup>1,2</sup>, KE Shengwang<sup>1</sup>, SHEN Yanjun<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. Engineering Management College, Purdue University, West Lafayette, 47906, USA)

**Abstract:** With the increasing of highway extension projects and widely use of sheet piles in railway construction, the mechanical behavior of extension embankment was analyzed through simulating different kinds of pile and load of different positions. Then the optimal pile kind and the most unfavorable load position were proposed. Through continuous observing of settlement in sheet pile section and CFG pile section, the optimal adaptability of sheet pile was showed in extension projects. The analysis results showed that the effect on settlement of PTC pile, CFG pile and cement mixing pile was gradually decreased. The PTC pile and CFG pile should be firstly selected from the options of controlling settlement. The most unfavorable load position was in new embankment and its quality was the key control point in construction. The effect on decreasing differential settlement was appeared in process of semi-rigid base construction, and it would be even obvious in pavement construction. The sheet pile was an effective supplement to traditional soft soil treatment methods. It had better adaptability and foreground in highway extension projects.

**Key words:** road engineering; extension projects; differential settlement; cement concrete sheet pile; pile kinds optimal