

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.014

老路边坡桩对拓宽路堤沉降控制影响的数值模拟

滕世权, 杨涛, 张文彦

(上海理工大学 土木系, 上海 200093)

摘要: 采用二维弹塑性有限元方法, 对不同布桩方式下 PHC 桩桩承式拓宽路堤的变形特性进行了数值模拟分析, 研究了老路边坡下布桩减小拓宽路堤沉降和差异沉降的机理。基于沪宁高速公路拓宽工程沉降控制标准, 对 PHC 桩加固区的位置和桩间距进行了优化。研究表明: 老路边坡下布桩可以显著地减小拓宽路堤路中心处的最终沉降和路表工后坡率。在路堤高度不超过 5 m 且软基厚度不超过 20 m 情况下, 桩帽宽 1.2 m 的 PHC 桩加固软基时, 第一排 PHC 桩应布设在老路边坡下距老路坡脚不小于 4.7 m 处, 桩间距可放宽至 3.0 m。

关键词: 桩承式拓宽路堤; 带帽 PHC 桩; 工后坡率

中图分类号: U416.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)02-0076-05

Numerical Simulation of Effects of Piles Installed under Slope of Existing Embankment on Settlement Control of Widening Embankment

TENG Shiquan, YANG Tao, ZHANG Wenyan

(Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A two dimensional elastic-plastic finite element model was developed to analyze the settlement behavior of a PHC pile-supported widening embankment under different layout of the piles. The mechanism of the reduction of settlement and differential settlement of the widening embankment by installing some piles under the existing embankment was revealed. The optimal location of the improved zone with PHC piles and the spacing of PHC piles were investigated according to the settlement control standard for the Shanghai - Nanjing highway widening project. The results show that the piles installed into soft soil bellow the existing embankment can significantly reduce the final settlement at the center of the widening embankment and the post-construction transverse gradient on the surface of the widening embankment. When the height of the widening embankment improved by PHC piles which have caps with the width of 1.2 m is not higher than 5 m and the thickness of the soft soil to be improved is smaller than 20 m, the first row of PHC piles near the centerline of the widening embankment should not less than 4.7 m from the toe of the existing embankment, and the optimal spacing of PHC piles is 3 m.

Keywords: piled widening embankment; PHC pile with cap; post-construction transverse gradient

随着国家经济的快速发展, 原有高速公路已不能满足迅速增长的交通量需求, 对原有公路进行拓宽改建是提高高速公路通行能力的有效方法。

软土地基上公路拓宽较公路新建更为复杂。工

程实践表明, 拓宽公路须以新老路基间的差异沉降控制设计。目前, 国内学者对软土地基上的公路拓宽问题进行了大量研究。对于天然地基上的公路拓宽工程, 章定文等^[1]和沈国印^[2]采用有限元法研究

了老路基削坡和台阶开挖方式对老路堤和地基沉降的影响。范红英等^[3]基于有限元法,对单、双侧拓宽方式下的公路拓宽工程沉降特性进行了比较。Huang X M 等^[4]和沈立森等^[5]分别采用离心模型试验和数值模拟方法研究了土工合成材料处置新老路基结合部的机制、效果和最佳的加筋层数。国内许多学者^[6-10]对高速公路拓宽工程新老路基相互作用机理、沉降与差异沉降特性进行了数值模拟分析。

对于深厚软土地基上的公路拓宽工程,仅由土工合成材料加筋无法有效地控制新老路基的差异沉降,必须对新路软基进行加固。张军辉^[11]采用有限元法,对排水固结与复合地基等传统地基处理方法加固双侧拓宽路堤新路软基的适用性进行了分析。Kamash W E 等^[12]采用有限差分法,对新路软基不同布桩方式下的单侧桩承式拓宽路堤的沉降与差异沉降特性进行了数值模拟分析。刘卢海等^[13]采用有限元法,研究了强夯处理新路地基的动力响应、不同地基处理方式下新老路基的变形及边坡稳定性。

目前,在国内外公路拓宽工程研究成果中很少涉及老路边坡桩的减沉效用问题。由于我国尚无专门的设计规范,各地区公路拓宽工程设计带有较大的区域经验性,对老路边坡下是否布桩认识不一。沪宁高速公路拓宽工程老路坡下布设了 1~2 排桩^[14-15],北方某高速公路拓宽工程老路边坡下甚至布设了 3~4 排桩^[16],而广清高速公路拓宽工程却几乎没有老路边坡桩。老路边坡下布桩不仅加大了工程造价,而且施工也较为困难。因此,必须研究老路边坡桩在减小拓宽路堤沉降中所起的作用及其机理。

本文采用弹塑性有限元数值模拟方法,研究老路边坡下是否布桩、布桩间距和加固区位置对 PHC 桩承式拓宽路堤沉降与差异沉降特性的影响,并基于沪宁高速公路拓宽工程沉降控制标准,优化 PHC 桩加固区位置与桩间距。

1 有限元模型

1.1 几何模型与边界条件

PHC 桩承式拓宽路堤典型计算断面见图 1。老路堤高 5 m,顶宽 26 m,双侧拓宽,每侧新路基宽 8 m,新老路基边坡都为 1:1.5,地表铺设 0.5 m 的碎石垫层。地基土从上到下分别是 3 m 的人工填土、23 m 的淤泥和 4 m 的中细砂,下面为岩石。地下水

位于地表下 1 m 处。新路软基采用正方形布设的带帽预应力高强度管桩加固,管桩型号为 C80-PHC-A300(70),外径为 30 cm,壁厚 7 cm,长度 26 m,打穿淤泥层。方形桩帽宽度 1.2 m,厚 0.35 m。为能按平面应变问题进行有限元分析,按照竖向刚度相等的原则,将空间分布的带帽桩简化为沿路基纵向连续分布的桩帽梁^[17]。

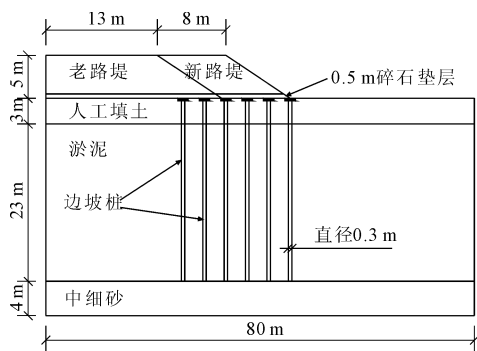


图 1 典型计算断面

利用对称性,有限元分析中取拓宽路堤一半计算域进行计算,如图 1 所示。采用大型岩土工程有限元软件 PLAXIS 进行数值分析,模型用 16 结点三角形单元离散。模型左边界为路堤中心线,竖向自由,水平向约束,不排水;模型下边界竖向和水平约束,不排水。模型右边界水平向约束,竖向自由,不排水。地基表面自由,排水。图 2 给出有限元网格示意图。

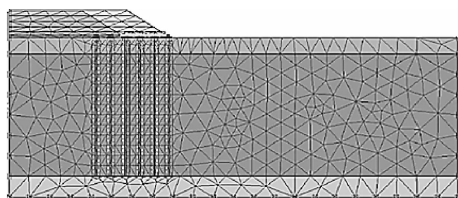


图 2 有限元网格

1.2 材料本构模型与参数

人工填土、中细砂、碎石垫层和新、老路基填土采用 Mohr-Coulomb 模型,淤泥采用程序自带的软土模型,各类土的模型参数见表 1 和表 2,其中 γ 、 k_h 、 k_v 、 c 和 φ 分别是重度、水平和竖直渗透系数以及黏聚力和内摩擦角, E 和 μ 分别是弹性模量和泊松比, λ^* 和 κ^* 分别为等向压缩指数和等向回弹指数。桩帽梁采用线弹性模型。PHC 桩弹性模量为 38 GPa,桩帽混凝土的弹性模量为 21 GPa。桩与桩帽泊松比都取为 0.17。简化后桩帽宽度和厚度不变,桩墙的厚度等于桩的直径。

表 1 地基与路堤土模型参数

土类	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$k_h/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$k_v/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	E/MPa	μ
老路基	15	1×10^{-4}	1×10^{-4}	3	40	31.0	0.30
新路基	17	1×10^{-4}	1×10^{-4}	21	33	24.0	0.30
人工填土	18	6×10^{-4}	4×10^{-4}	37	21	8.4	0.30
中细砂	21	1	1	1	35	60.0	0.25
碎石垫层	20	1	1	1	38	60.0	0.25

表 2 淤泥模型参数

土类	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$k_h/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$k_v/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	λ^*	κ^*	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
淤泥	12	7×10^{-4}	5.5×10^{-4}	0.076	0.016	14	21

2 计算结果与分析

2.1 老路边坡下布桩的加固效果

对于一般路堤,老路软基常采用排水固结法处理。老路运营近 15 年后进行拓宽时,老路软基中的排水体往往已经失效。为分析、比较老路边坡下布桩对拓宽路堤沉降与差异沉降的控制效果,设计了 7 个计算工况,各工况下桩的间距 $s = 2.6 \text{ m}$,用左侧第一排桩的中心线距路中心线的距离 R 表示 PHC 管桩加固区的位置,则各计算工况 R 值分别为: 14.3 m、14.8 m、15.3 m、15.8 m、16.3 m、17.4 m 和 20.5 m。在新路坡脚以内软基中布桩,工况 1 到工况 4 共设置 6 排桩,其中老路边坡下 2 排;工况 5 和工况 6 共设 5 排桩,老路边坡下分别有 2 排和 1 排桩;工况 7 只有 4 排桩,都布设在新路软基中,其中第 1 和第 4 排桩分别位于老路和新路坡脚下,此时老路边坡下没有桩。图 1 给出的是工况 1 布桩示意图。

2.1.1 沉降与工后沉降特性

图 3 给出不同计算工况下 PHC 桩桩承式拓宽路堤表面最终沉降分布曲线。从图 3 中可知,在工况 1~工况 4 中(6 排桩且老路边坡下 2 排桩),拓宽路堤表面沉降随距路中心距离的增加而逐渐减小,路中心沉降最大,老路肩处沉降最小。老路肩以外新路堤沉降随距路中心距离的增加而逐渐增大。新老路基差异沉降较小,沉降曲线的分布较为均匀。随着 R 的增加,即加固区的外移,路堤表面沉降增加,但增幅不大。加固区外移 1.5 m(工况 4)时路中心沉降从 2.07 cm 增加到 2.57 cm,老路中心与新路肩之间的差异沉降从 0.19 cm 增加到 0.56 cm。随着加固区的继续外移(工况 5~工况 7),路表沉降和新老路基差异沉降显著增加,路表沉降曲线呈路中心大而新路肩小的盆形分布,加固区外移到工况 5(老路边坡下 2 排桩)和工况 6(老路边坡下 1 排桩)

时,老路中心沉降分别达 3.34 cm 和 4.24 cm,新老路基差异沉降分别为 1.2 cm 和 1.93 cm。加固区继续外移达到工况 7 时(仅新路软基布设 4 排桩),路表沉降较之前述工况大幅增大,路表中心沉降达到 7.10 cm,老路中心与新路肩的差异沉降增大到 3.43 cm,但老路堤表面较为平坦,差异沉降只有 0.34 cm,数值较小,新路堤表面差异沉降较大,达到 3.09 cm。图 3 表明,老路边坡下不布桩会显著增大拓宽路堤表面最终沉降和新老路间的差异沉降。

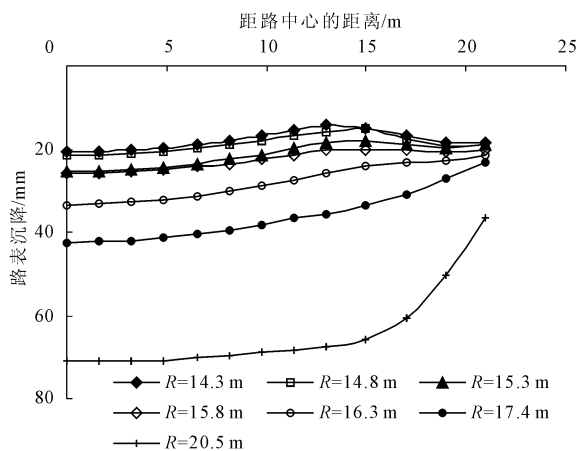


图 3 不同工况下路表沉降曲线

拓宽路面开裂与否主要取决于拓宽路堤表面老路中心与新路肩之间工后坡率。图 4 给出各计算工况下拓宽路堤表面工后沉降分布曲线。从图 4 中可以发现,各计算工况下拓宽路堤表面工后沉降曲线都呈老路中心大、新路肩小的盆形分布,工后出现“倒坡”现象。随着加固区的外移,工后沉降和工后坡率逐渐增大,工况 4 以后工后“倒坡”越来越严重。工况 1~工况 4 的路中心工后沉降较小,数值从 1.29 cm 增加到 1.57 cm。工况 4 以后工后沉降和工后坡率增幅明显增大,路中心工后沉降从 2.04 cm 增加到 4.93 cm,工后负坡率的数值从 0.07% 增加到 0.17%。表 3 给出各工况下拓宽路堤表面工后坡率

计算结果。表 3 表明,加固区布设 6 排 PHC 桩且老路边坡下布设 2 根桩时(工况 1~ 工况 4),工后负坡率数值较小,数值约为 0.05%。随着加固区外移,加固区桩的数目减小,拓宽路堤工后负坡率数值快速增大,当老路边坡下不设桩(工况 7)时,工后坡负坡率数值增加到 0.17%。

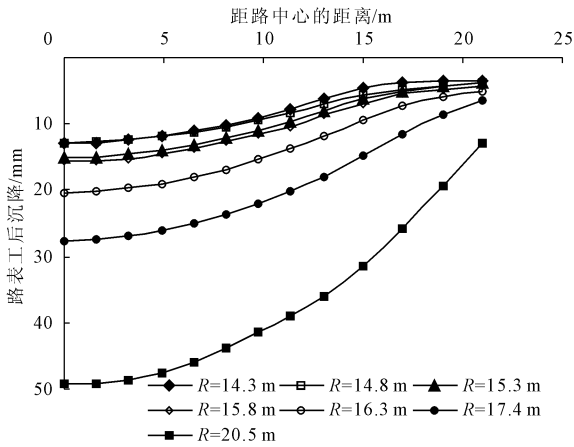


图 4 不同工况下路表工后沉降

2.1.2 软基加固区的适宜位置

前面研究表明,老路边坡下布桩对控制拓宽路堤中心沉降、工后沉降和工后坡率具有明显效果。工程设计中需要确定加固区的合理位置以及经济的桩间距,显然,这取决于公路拓宽工程沉降与差异沉

降的控制标准。鉴于我国目前尚无专门的高速公路拓宽工程国家或行业规范。本文采用如下沪宁高速公路拓宽工程设计指标和标准^[18]:

- (1) 老路中心沉降 ≤ 3 cm;
- (2) 路拱工后坡率 $\leq 0.5\%$;
- (3) 新路基最大沉降 ≤ 15 cm;
- (4) 新路基最大工后沉降 ≤ 5 cm。

按沪宁高速公路拓宽工程沉降控制标准,各工况计算获得的控制指标值见表 3。由表 3 可以看出,桩间距 2.6 m 时将 PHC 桩打穿 23 m 软土层,无论老路边坡下是否布桩,新路基的最大沉降和最大工后沉降都未超 15 cm 和 5 cm 的控制要求,但工况 5~ 工况 7 的老路中心沉降超过都了 3 cm 的控制要求,特别是当老路边坡下不布桩(工况 7)时,老路中心沉降达到 7.1 cm,远超过 3 cm 控制要求,且工后负坡率数值达到 0.17%,影响路面排水。老路边坡下仅布设 1 排桩(工况 6)时老路中心最终沉降为 4.2 cm,也超过 3 cm 的控制标准。工况 1~ 工况 4 中各指标均满足沉降控制标准,工后负坡率约 0.05%,数值很小。研究表明,老路边坡下应布设二排桩,左侧第一排桩的中心线距老路中心的距离不宜超过 15.8 m,即距老路坡脚的距离不宜小于 4.7 m。

表 3 不同工况下各指标计算值

工况	1	2	3	4	5	6	7
老路中心沉降/cm	2.07	2.16	2.54	2.57	3.34	4.2	7.1
新路基最大沉降/cm	1.87	1.90	1.91	2.01	2.6	3.6	6.8
新路基最大工后沉降/cm	0.61	0.75	0.79	0.87	1.18	1.8	3.6
拓宽路堤工后坡率/%	-0.05	-0.05	-0.05	-0.06	-0.07	-0.1	-0.17

2.2 PHC 桩间距优化

PHC 桩刚度很大,工程设计中需考虑尽可能采用疏桩方案以降低软基加固的工程造价。根据前面的研究结果,选择加固区位置参数 $R = 15.8$ m,即左侧第一排桩布设在距老路中心 15.8 m 处。桩距 s 分别取 2.4 m、2.6 m、2.8 m 和 3.0 m 四个疏桩方案进行分析。 $s = 3.0$ m 时地基内共布设 5 排桩,其它桩间距情况下地基内布设 6 排桩。图 5 和图 6 分别给出不同桩间距下拓宽路堤表面最终沉降分布曲线和工后沉降分布曲线。从图 5 可知,拓宽路堤沉降随桩间距的增加而增大,最大沉降出现在路中心处,新路堤最大沉降出现在新路肩内侧距新路肩约 2 m 处,但 $s = 3$ m 时新路堤最大沉降出现在新路肩处。由于老路边坡下设置了两排桩,桩间距的变化对拓

宽路堤沉降影响不大。桩间距从 $s = 2.4$ m 增大到 $s = 3.0$ m 时,路中心处路表沉降由 2.19 cm 增加到 2.41 cm,新路基最大沉降由 1.8 cm 增加到 2.21 cm。图 6 表明,拓宽路堤工后沉降随桩间距的增加而增大,不同桩间距下拓宽路堤工后沉降曲线均呈盆形分布,老路中心处工后沉降最大,新路基肩处工后沉降最小,工后出现“倒坡”现象。桩间距从 $s = 2.4$ m 增大到 $s = 3.0$ m 时,老路中心工后沉降由 1.28 cm 增加到 1.52 cm,新路肩处工后沉降由 0.3 cm 增加到 0.46 cm。总的来看,路表工后沉降随桩间距变化并不大。表 4 给出 $s = 2.8$ m 和 $s = 3$ m 情况下按沪宁高速公路拓宽工程沉降控制标准计算的各控制指标数值。从表 4 可见,桩间距 $s = 3.0$ m 时拓宽路堤各项控制指标数值都满足沪宁高速公路拓宽工程沉

降控制标准,路表工后负坡率也很小。因此,桩间距取为 $s = 3 \text{ m}$ 是可行的,此时,软土地基中可少布置一排桩,达到节约工程造价目的。优化后 PHC 桩的布设形式见图 7 所示。

高速公路拓宽工程,老路边坡下布桩与否对桩承式拓宽路堤沉降特性有较大影响。对于较为深厚软基上的公路拓宽工程,仅在新路软基中布桩会导致拓宽路堤中心有较大的沉降和较大的路表工后负坡率。

(2) PHC 桩桩承式拓宽路堤设计中,老路边坡下是否需要布桩及布桩的排数,取决于拓宽工程沉降和差异沉降的控制标准。若不需要控制老路中心最终沉降,则老路边坡下可不布桩。若老路中心最终沉降控制在 5 cm 以内,老路边坡下可仅布设一排桩,若老路中心最终沉降控制在 3 cm 以内,老路边坡下需布设二排桩。

(3) PHC 桩桩承式拓宽路堤设计宜采用疏桩方案。软土厚度不超过 20 m 且桩帽宽度 1.2 m 情况下,对于高度 5 m 以下的 PHC 桩桩承式拓宽路堤,桩间距可以放宽到 3 m 。左侧第一排桩宜布设在距老路坡脚内侧,距老路坡脚的距离不小于 4.7 m 处。

参考文献:

- [1] 章定文,刘松玉.软土地基高速公路扩建中新老路堤相互作用数值分析[J].中国公路学报,2006,19(6):7-12.
- [2] 沈国印.高速公路新老路基拼接的台阶开挖效果分析[J].公路,2012(7):49-52.
- [3] 范红英,折学森,边汉亮,等.高速公路拓宽方式对路基沉降的影响[J].交通运输工程学报,2012,12(1):13-18.
- [4] Huang Xiao-ming, Wang Hao. Comparison between responses of reinforced and unreinforced embankments due to road widening[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(5):857-864.
- [5] 沈立森,杨广庆,程和堂,等.高速公路路基加宽土工格栅加筋优化技术研究[J].岩土工程学报,2013,35(4):789-793.
- [6] 张军辉,黄晓明,彭 娟.软土地基上高速公路双侧加宽工程的数值分析[J].公路交通科技,2007,24(3):20-24.
- [7] 刘金龙,张 勇,陈陆望,等.路基拓宽工程的基本特性分析[J].岩土力学,2010,31(7):2159-2163.
- [8] 姜景山.考虑新老路基相互作用的软基高速公路拓宽变形性状分析[J].长江科学院院报,2012,29(5):32-39.
- [9] 杨春风,庄 灿,李洪亮,等.泡沫轻质土用于软基路基拓宽时应力应变分析[J].广西大学学报(自然科学版),2016,41(1):234-245.
- [10] 李国林,宋春雨,李硕娇,等.滨水高堤路拓宽差异沉降数值模拟及现场监测[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):96-101.

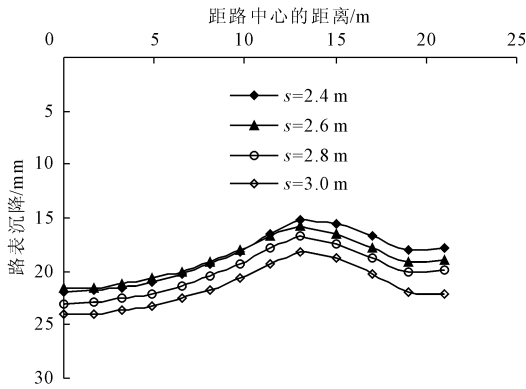


图 5 不同桩间距下拓宽路堤表面沉降曲线

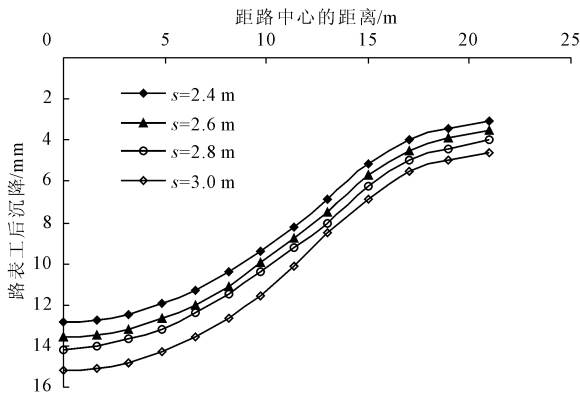


图 6 不同桩间距下拓宽路堤表面工后沉降曲线

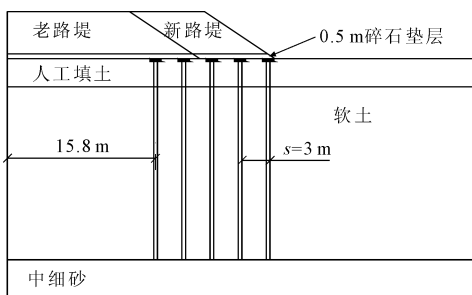


图 7 优化的 PHC 布桩方式

表 4 不同桩间距下沉降控制指标计算结果

s/m	老路中心沉降/cm	新路基最大沉降/cm	新路基最大工后沉降/cm	拓宽路堤工后坡率/%
2.8	2.30	2.01	0.81	-0.05
3.0	2.41	2.21	0.85	-0.05

3 结 论

(1) 对于老路软基未处理或排水固结法处理的

(下转第 175 页)

(上接第 80 页)

- [11] 张军辉.不同软基处理方式下高速公路加宽工程变形特性分析[J].岩土力学,2011,32(4):1216-1222.
- [12] Kamash W E, Han J. Displacements of column-supported embankments over soft clay after widening considering soil consolidation and column layout: Numerical analysis [J]. Soils and Foundations, 2014, 54(6):1054-1069.
- [13] 刘卢海,沙成满.类风积沙路基高速公路加宽工程的数值分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):36-40.
- [14] 刘观仕,孔令伟,丁 锋,等.高速公路扩建工程软基拓宽的沉降监测与分析[J].岩土力学,2007,28(2):331-335.
- [15] 杜 浩,陈小琪,凌建明,等.拓宽路堤下 PHC 桩复合地基变形特性监测分析[J].土木工程学报,2009,42(9):139-144.
- [16] 谭儒蛟,张建根,徐鹏道.带帽 PTC 桩在高速拓宽软土路基处理中的试验监测分析[J].工程勘察,2015(1):26-31.
- [17] 邓永峰.水泥土搅拌桩桩土相互作用理论与应用研究[D].南京:东南大学,2005.
- [18] 袁胜强,朱银乐.沪宁高速公路(上海段)拓宽工程设计的几个关键问题[J].上海公路,2009(1):5-10.