

## 公路扩建刚性桩和竖向土工材料加固研究

丰土根<sup>1,2</sup>,王路博<sup>1,2</sup>,宋海洋<sup>1,2</sup>,陈阳<sup>1,2</sup>,胡松<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

**摘要:**为控制软土地基公路拓宽工程中新旧路堤的差异沉降,提出一种新的软土地基处理方式,即综合应用刚性桩和竖向土工材料进行公路拓宽地基处理。为把握路堤荷载作用下综合应用刚性桩和竖向土工材料加固直接拼接方式的拓宽路堤工作性状,应用FLAC3D建立三维分析模型。通过数值模拟计算,从加固前后路堤的沉降、地基侧向位移和稳定性等方面进行了分析研究。计算结果表明:刚性桩和竖向土工材料的综合应用能够有效控制地基土体侧向位移,从而能够减小新老路基的总体沉降和路堤顶面的差异沉降,加固效果明显。

**关键词:**公路扩建;土工材料;刚性桩;侧向变形;数值分析

**中图分类号:**TU43

**文献标识码:**A

### Research on reinforcement of vertical geotextile material and rigid pile for expressway widening on soft ground

FENG Tu-gen<sup>1,2</sup>, WANG Lu-bo<sup>1,2</sup>, SONG Hai-yang<sup>1,2</sup>, CHEN Yang<sup>1,2</sup>, HU Song<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resource, Jiangsu Nanjing 210098, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** A new foundation treatment method is put forward in this thesis. The widened foundation was handled by the integrated application of rigid piles and vertical geotextile material. For investigating the performance of widened embankment under the embankment loads with the direct connection method on soft ground improved by application of rigid piles and vertical geotextile material, a 3D elastic-plastic finite difference model was established in FLAC3D. Through using numerical analysis, the settlement of widen embankment, lateral deformation and stability of the foundation were investigated from reinforcing or not. The results show that the comprehensive application of rigid piles and vertical geotextile material can effectively control the lateral deformation of foundation soil, thereby reducing the different settlement between the new and old embankment and surface, the reinforcement effect is obvious.

**Key words:** highway expansion; geotextile material; rigid pile; lateral deformation; numerical analysis

随着国民经济的发展,既有交通网络的通行压力日渐增大,针对这一现状,对现有公路网进行改扩建已成为大势所趋,高速公路的拓宽方式有直接加宽和分离式加宽两种方式。在我国截至目前的高速公路扩建工程中,大部分采用的是直接加宽方式<sup>[1]</sup>。高速公路扩建过程中,新建路堤地基需进行处理,以避免新旧路堤之间产生过大的

差异沉降,进而影响道路行车安全和路堤整体稳定性<sup>[2-4]</sup>。现有的路堤加宽处理方式主要有:一是通过对加宽路堤地基进行加固,从而提高其竖向承载能力;二是通过提高新旧路堤的整体性或者降低新建路堤的自重,以降低新旧路堤差异沉降<sup>[5-13]</sup>。针对软土地基中的高速公路扩建工程,章定文<sup>[14]</sup>、杨涛<sup>[15]</sup>等提出了应用刚性隔离墙进行

收稿日期:2015-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51009054);教育部科学技术研究重点项目(109077);江苏省自然科学基金资助项目(BK2010513);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014B04914)

作者简介:丰土根(1975-),男,浙江金华人,博士,教授,主要从事土动力学教学与研究。

地基加固,控制地基土侧向变形,改变地基附加应力分布,并控制新旧路堤不均匀沉降和老路堤坡比变化值,但此方法实际应用存在较大局限性。本文提出了一种综合应用刚性桩和竖向土工材料的地基加固方式,以某软土地基高速公路扩建工程为例,采用三维有限差分方法分析了该方法的适宜性,并对地基土的变形特性进行了深入分析,证明了该处理方法的合理性,为实际应用奠定基础。

## 1 计算模型建立

应用 FLAC3D 有限差分软件建立分析模型,老路堤高度为 5 m,顶宽 28 m,双侧加宽,单侧新建路堤宽度为 7.5 m,新老路堤边坡坡度均为 1:1.5,新旧路堤之间采用挖台阶处理方式以提高路堤整体性。地基土由上到下分别为 20 m 淤泥质粘土、30 m 中细砂土,最下层为全风化岩石,路堤和地基剖面如图 1。利用对称性,取一半区域进行分析,模型水平向取 100 m,模型竖向取 50 m,三维模型前后断面间距 6 m。

分析过程中,路堤土和地基土均采用弹塑性模型,屈服准则采用 Mohr - Coulomb 屈服准则,刚

性桩采用线弹性本构模型,土工材料应用模拟程序内置的土工格栅结构单元,刚性桩和地基土体之间设置接触面,具体材料参数详见表 1。

模拟软件内置的土工格栅结构单元的力学性能可以分成格栅材料的结构响应和格栅构件与网格的交互作用方式。在作用过程中假设格栅一直保持弹性状态,并且只在交界面发生破坏,同时假设土工格栅材料为各向同性。其中格栅结构单元的材料参数参考 FLAC3D 用户手册进行取值,具体参数详见表 2。

模型边界条件为:左右侧与前后侧水平方向约束,竖向自由;底部边界水平和竖直方向均为固定约束;其他边界自由。旧路堤地基采用刚性桩进行地基处理,在路堤填筑过程中底层设置土工聚合物加筋垫层,其中设定刚性桩间距为 3 m,桩径为 60 cm。新建路堤采用刚性桩和竖向土工材料进行地基处理,刚性桩间距为 3 m,桩径为 60 cm,竖向土工材料平行道路中心线沿道路方向通常布置,靠近刚性桩布置,并将竖向土工材料两端固定于模型前后断面,新建地基处理示意图如图 2,其中上部分为断面图,下部分为地基处理俯视图。

表 1 路堤土、地基土以及刚性桩模型参数

Tab. 1 Soil and rigid pile model parameters

土类	重度 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	凝聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	体积模量 $K/\text{kPa}$	剪切模量 $G/\text{kPa}$	泊松比 $\nu$
老路基	20	30	28	5	10.8	0.3
路基填土	20	30	28	33.3	15.4	0.3
淤泥质粘土	18	15	22	2.8	1.3	0.35
粉细砂土	20	1	30	13.9	7.9	0.30
刚性桩	25	--	--	$3 \times 10^4$	$1.25 \times 10^4$	0.32

表 2 土工格栅结构单元和界面参数参数

Tab. 2 Geogrids and interface specifications

杨氏模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	厚度 $t/\text{mm}$	耦合弹簧内聚力 $c/\text{kPa}$	耦合弹簧摩擦角 $\varphi/^\circ$	耦合弹簧刚度 $k/\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$
26	0.33	5	0	29.2	2.3

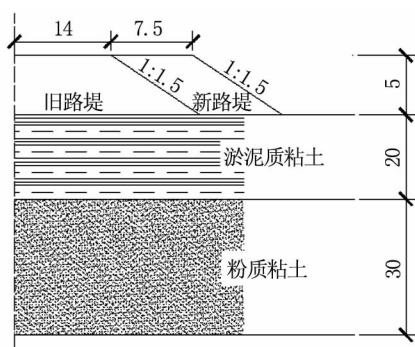


图1 路堤和地基剖面示意图 (m)

Fig. 1 Embankment and foundation cross-sectional schematic

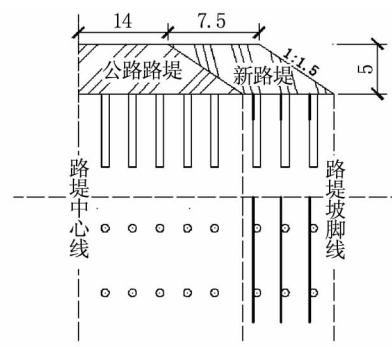


图2 地基处理示意图 (m)

Fig. 2 Ground handling schematic

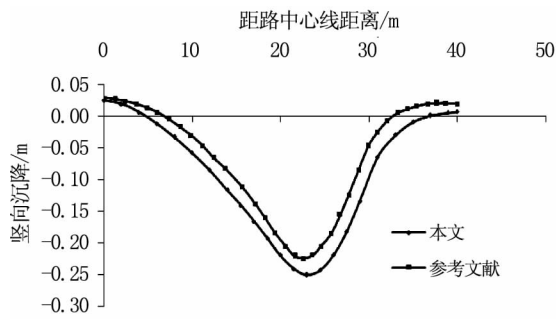


图3 沉降曲线对比

Fig. 3 Settlement curve comparison

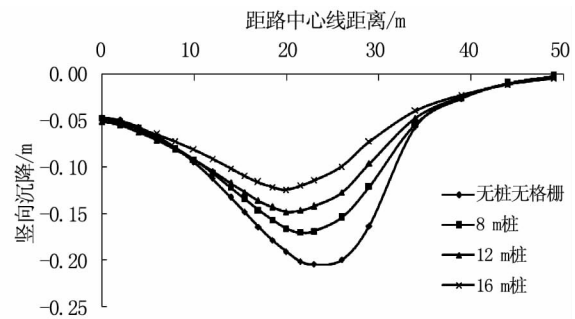


图4 加宽引起地表附加沉降分布曲线

Fig. 4 Curve of additional ground settlement caused by widening

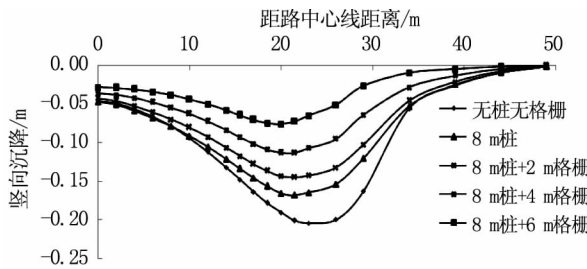


图5 桩长8 m时加宽引起地表附加沉降分布曲线

Fig. 5 Curve of additional ground settlement caused by widening

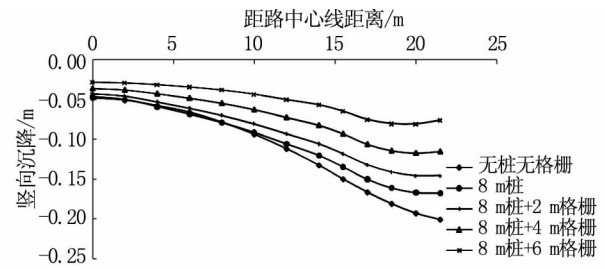


图6 桩长8 m时路堤顶面沉降分布曲线

Fig. 6 Curve of additional embankment settlement caused by widening with the 8m piles

## 2 模型验证

为验证本文中应用FLAC3D建立的模型正确性,采用文献[15]中的地基和路堤材料参数进行本文模型的正确性验证。将本文中模型赋予文献[16]中B类地基的路堤和地基的材料参数,同时地基土的分层情况也参考文献[16]进行设置,并对路堤扩建部分采用水平分层填筑,进行模拟计算,并对计算结果进行总结分析,可以得出公路扩建引起地基表面的附加沉降,并与文献[16]中图6(b)进行显示的结果进行比较,可得两者的计算结果较为吻合,如图3所示,证明了本文中模型的正确性。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 竖向沉降分析

图4给出了地表附近地基土竖向沉降曲线,表明在深厚软土情况下,单纯应用刚性桩进行新建路堤地基加固时对竖向沉降的控制作用较为有限,并且随着桩长的增加,路基沉降的改善效果没有明显提高。因为在深厚软土地基情况下,经过延长之后刚性桩底端如仍不能接触到持力层,在新建路堤荷载作用下,刚性桩会与软土同时发生

沉降,故改良效果并不理想。

图4与文献[17]中的实测结果进行比较,两者的地基表面竖向沉降变化趋势相近,进一步说明本文三维分析模型的合理性。

图5给出了刚性桩长为8 m情况下,竖向土工材料植入深度不同时,地表附近地基土竖向沉降曲线,表明当综合应用刚性桩和竖向土工材料进行地基加固时,两种材料的协同作用能够很好的限制地基土竖向沉降,并且能在很大程度上控制路堤中心线处的竖向沉降。随着竖向土工材料植入深度的增加,竖向沉降会有明显减小的趋势,当植入深度为6 m时,竖向沉降最大值能够比仅只应用8 m刚性桩时降低70%以上,并且使得整个公路拓宽工程对地基横向影响范围也大大的缩小,加固效果显著。

图6给出了当桩长为8 m时,竖向土工材料植入深度不同时,路堤顶面竖向沉降曲线。当拓宽部分地基不处理时的路堤顶面差异沉降为15 cm,并且沉降最大值发生在加宽路堤路肩处,综合应用刚性桩和竖向土工材料进行加固后,不仅差异沉降会显著降低,沉降最大值会明显向道路中心线移动,对抑制裂缝和保证行车安全十分有利<sup>[18]</sup>。

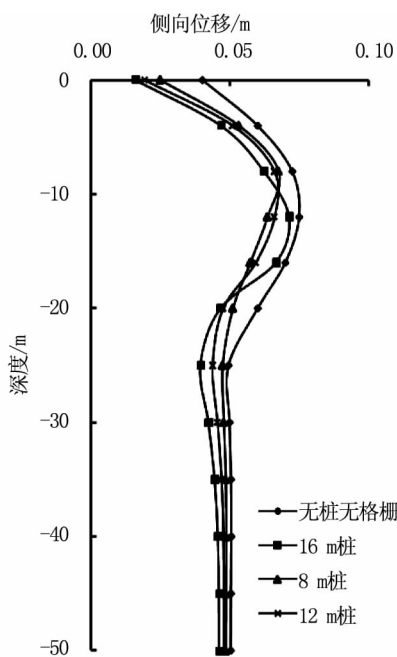


图7 加宽引起路堤坡脚附加侧向位移分布曲线  
Fig.7 Curve of additional lateral deformation of the new embankment toe caused by widening

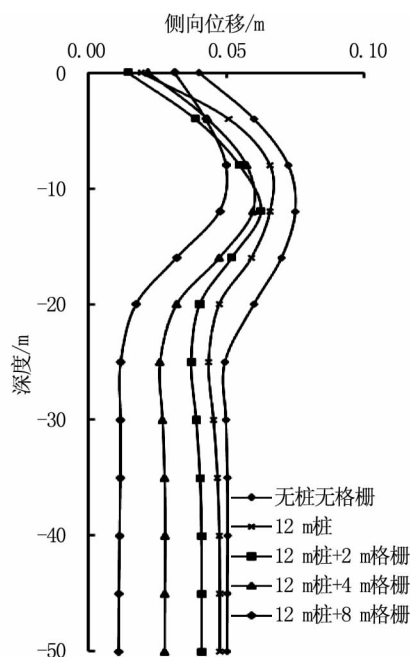


图8 桩长12 m附加侧向位移分布曲线  
Fig.8 Curve of additional lateral deformation of the new embankment toe with 12 m piles

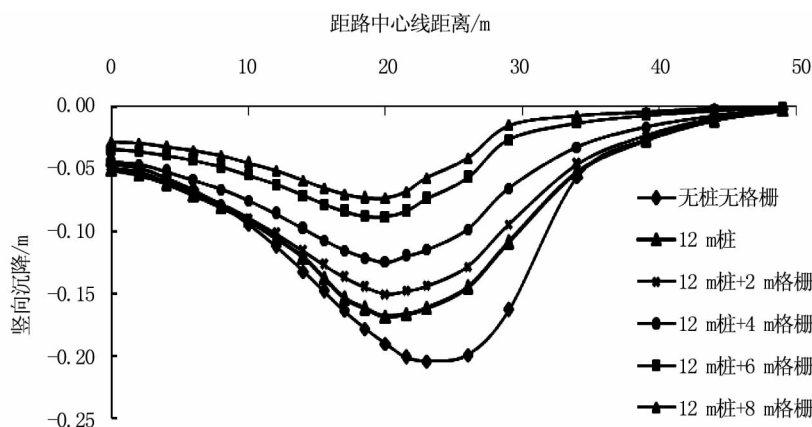


图9 桩长12 m地表附加沉降分布曲线  
Fig.9 Curve of additional surface settlement with 12 m piles

### 3.2 地基侧向变形分析

图7给出了新建路堤边坡坡脚处侧向位移随深度的变化情况,表明仅应用刚性桩对地基土的侧向变形限制作用有限,并且侧向位移最大值随着桩长的增加会有向下移动的趋势,分析可知刚性桩只对桩附近土体有一定的限制作用,对桩间地基土侧向变形的限制作用有限。由于刚性桩对路堤荷载的竖向传递作用,侧向变形的最大值随着桩长的增加有向下移的趋势,但是从图7可知侧向变形的总量变化有限。并且侧向变形在深度达到25 m以上时趋于稳定,稳定值与刚性桩长并没有明显关系。

图8给出了刚性桩长为12 m时,应用竖向土工材料情况下,新建路堤边坡坡脚处侧向位移随深度的变化情况,本图表明竖向土工材料的植入对地基土土体侧向变形有显著影响,植入竖向土工材料不仅能够较大程度上减小侧向变形,同时侧向变形最大值随着土工材料植入深度的增加有上移趋势,且深度25 m以下侧向变形稳定值会有明显的减小。

文献[10]中,应用FLAC3D分析二维弹塑性模型得出的地基土体侧向变形趋势与图6所示相近,并且模拟表明刚性桩底端进入持力层后,地基土体侧向变形会有十分显著的减小。

刚性桩和竖向土工材料共同作用,竖向土工

材料能够在桩间限制地基土的侧向变形,刚性桩起到侧向支撑土工材料的作用,两者协同作用能够很好限制侧向变形,控制深度并不仅限于竖向土工材料植入深度范围,整个模型观察范围内地基土的侧向变形会有整体上的减小,并且随着植入深度的增加,控制效果愈加明显,但施工时须考虑到施工难度和经济因素,并不能单纯考虑处理效果,竖向土工材料植入深度应视情况而定。

### 3.3 路堤稳定性

图9给出了桩长为12 m时,地表附近地基土竖向沉降的分布情况,表明在未处理情况下,沉降最大值出现在新建路堤截面形心处,应用刚性桩并植入竖向土工材料之后,加宽部分路堤底面的竖向沉降得到了有效的控制,沉降最大值会向路堤中心线移动,当竖向土工材料植入深度达到4 m以上时,最大沉降会发生在原路堤上,对边坡稳定有利<sup>[19]</sup>。同时从图5中可以看出,由于竖向土工材料的植入,使得路堤沉降最大值向路堤中心移动,同样有利于边坡的稳定性。

## 4 关于施工方法

本文的地基处理方法是针对软土地基提出的,主要是因为在地基土为非软土时植入竖向土工材料有一定的难度,并且会对原状土有较大的扰动,造成竖向土工材料对地基土侧向变形的限制作用会受到严重影响,故软土地基宜使用该地基处理方式。以下针对软土地基的施工方法进行概述。

竖向土工材料的植入深度应根据沉降差控制标准和土质情况确定。竖向土工材料做成设计尺寸,并沿道路方向进行竖向插入,并保证接头部位连接牢固。

通过专门的施工机械(与塑料排水板植入机械类似)将竖向土工材料植入到预定深度,施工过程中如果遇到孤石等特殊地质情况,应及时暂停施工,处理完成之后再继续进行施工。并且在施工中应注意施工速度,通过试验段施工确定最佳的施工速度,的确保竖向土工材料不致被拉坏。

一定区段的竖向土工材料施工完成之后,应将竖向土工材料沿纵向进行拉紧处理,使土体在发生侧向变形时,竖向土工材料能够充分发挥限制作用。

竖向土工材料施工完成之后,进行刚性桩施

工,刚性桩宜采用预制混凝土桩,靠近竖向土工材料打入,保证两者能够协同作用,并应避免刚性桩的施工破坏竖向土工材料。

竖向土工材料和刚性桩施工完成后,进行路堤填筑,并做好对变形的监控工作。

## 5 结论

1)综合应用刚性桩和竖向土工材料加固直接拼接的高速公路加宽工程软土地基,可显著减小新老路堤的沉降,并能够很好的控制路堤顶面的差异沉降,保证行车安全。路堤底面的沉降最大值因植入竖向土工材料会向路堤中心线移动。

2)综合应用刚性桩和竖向土工材料进行加宽工程软基加固时,能够明显的降低刚性桩之间路堤地基土的侧向变形,并且控制范围并不仅限于竖向土工材料的植入深度内,能够达到通过控制地基土的侧向变形以降低地基土竖向沉降的目的。

3)在实际工程中,针对差异沉降的控制要求和不同的土质条件,可以通过应用现场试验和数值模拟确定经济合理的竖向土工材料植入深度。

4)通过模拟计算已经验证该地基处理方法的有效性,施工方法和施工工艺还有待通过实际现场试验进一步细化。

### 参考文献:

- [1]潘国强.高速公路改扩建工程中路基加宽方式及其特点综述[J].公路工程,2007,32(5):34-38.
- [2]BJERRUM L. Embankment on soft ground: Proceeding of the ASCE Specialty Conference on Earth and Earth-Supported Structures[J]. Purdue University, 2010(2):81-118.
- [3]LOGANATHAN N, BALASUBRAMANIAM A S, et al. Deformation analysis of embankments [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993(119):1185-1206.
- [4]聂鹏,曲向进.沈大高速公路改扩建工程路基加宽容许工后不均匀沉降指标研究[J].公路交通科技,2005,22(11):18-20.
- [5]王斌.高速公路拼接段沉降变形特性及地基处理对策研究[D].南京:河海大学,2004.
- [6]曾国熙.垂直荷载下软粘土地基的侧向变形[J].浙江大学学报,1962(1):93-124.
- [7]高成雷,凌建明.旧路拓宽地基差异沉降形成机理及控制对策[J].公路交通科技,2008,25(5):28-33.
- [8]尉世铭.土工加筋技术在高速公路路基加宽中的应用研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2014.
- [9]张军辉.不同软基处理方式下高速公路加宽工程变形

(下转第33页)

2) 堆载的简化同时也会造成桩基最大内力位置的偏移,如果桩基承载力不满足需要进行加固,会对加固位置的判断造成错误。

3) 如果在有限元分析中由于建模的复杂不得不简化荷载,需要动态地考虑上覆堆煤体或是其他需要简化成荷载的实体的变形趋势,准确地预估荷载作用面上的荷载压力值,否则结果的可参考性将大大降低。

#### 参考文献:

- [1] HETENYI M. Beams on elastic foundation[M]. Ann Arbor University of Michigan Press, 1946.
- [2] VORSTER T E B, KLAR A, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1399 - 1410.
- [3] 武亚军. 基坑工程中土与支护结构相互作用及边坡稳定性的数值分析[D]. 大连:大连理工大学, 2003.
- [4] 许锡昌. 土压力问题与基坑变形分析[D]. 武汉:中国科学院研究生院, 2004.

- [5] 韩伟平. 涵洞土压力有限元施工分层填筑模拟与试验研究[D]. 太原:太原理工大学, 2007.
- [6] 邢肖鹏. 挡土墙土压力有限元模拟分析[J]. 山西水利科技, 2002(4): 1 - 3.
- [7] 朱合华. 地下建筑结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [8] 翟建强, 薛飞, 葛忻声. 圆形煤场结构和地基共同作用设计方法简介[J]. 武汉大学学报:工学版, 2012(Z1): 247 - 250.
- [9] 李桂庆, 弓建新, 陈明祥. 发电厂圆形封闭煤场基础设计的有限元分析[J]. 内蒙古电力技术, 2015(2): 88 - 91.
- [10] 汪碧飞, 陈明祥, 汤正俊, 等. 大型整体式贮煤筒仓基础有限元分析[J]. 岩土力学, 2010(6): 1983 - 1988.
- [11] 北京金土木软件技术有限公司. PLAXIS 岩土工程软件使用指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2010.
- [12] 卢廷浩. 岩土数值分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.

(特约编辑 李 军)

(上接第5页)

- 特性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1216 - 1222.
- [10] 张磊. 拓宽路基变形数值分析[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [11] 吴拓, 李国维, 石磊. 佛开高速公路拓宽工程带帽CFG桩软基加固数值分析[J]. 公路, 2012(2): 63 - 67.
- [12] 晏莉, 阳军生, 高燕希, 等. 土工合成材料处治老路路基拓宽的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1670 - 1675.
- [13] 李利飞, 谢方媛, 许道军, 等. 动荷载作用下路基沉降规律试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2012(2): 7 - 10.
- [14] 章定文, 刘松玉. 深层搅拌桩隔离墙应用于软基高速公路扩建工程的数值分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 10 - 13.

- [15] 杨涛, 李磊, 石磊. 高速公路扩建工程软基隔离墙加固机理的数值分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(8): 51 - 56.
- [16] 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(6): 7 - 12.
- [17] 鄂海清. 搅拌桩和素混凝土桩处理高速公路拓宽工程软基的路堤性状分析[J]. 华东公路, 2011(6): 14 - 18.
- [18] 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 - 15.
- [19] 傅珍, 王选仓, 陈星光, 等. 拓宽道路工后差异沉降控制标准[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2008, 28(5): 10 - 13.

(特约编辑 李 军)