

基于拓宽路面附加变形的 地基差异沉降控制标准

翁效林¹,高建华²,宋文佳¹,马豪豪¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 河南交通职业技术学院 公路系,河南 郑州 450000)

摘 要:为建立拓宽路基荷载下地基差异沉降控制标准,以拓宽路面结构附加变形临界值为控制目标,依托有限元分析软件,建立拓宽路基荷载下地基沉降的计算模型,通过拟合地基沉降曲线,并将其作为位移约束条件施加到路堤底面,分析路堤顶面的沉降特性,反算出拓宽荷载下地基差异沉降控制限值,并以此作为拓宽荷载下地基差异沉降控制标准。研究结果表明:随着填方高度的增加,地基差异沉降限值呈增大趋势;随着拓宽比的增加,地基差异沉降限值呈减小趋势;随着路堤填料弹性模量的增加,地基差异沉降限值呈增大趋势,然而随着地基填料弹性模量的增大,地基差异沉降的限值呈减小趋势;4 个影响因素的影响程度大小依次为新老路堤拓宽比、路堤填料模量、地基填料模量、路堤填方高度;得出了地基差异沉降控制值与新老路堤拓宽比和路面结构反坡率之间的关系表达式。

关键词:道路工程;拓宽路面;附加变形;差异沉降;控制标准

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Control criterion for foundation differential settlement based on additional deformation in widening pavement

WENG Xiao-lin¹, GAO Jian-hua², SONG Wen-jia¹, MA Hao-hao¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Highway, Henan Vocational and Technical College of Communications, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: In order to establish the control criterion for differential settlement of the foundation in widening roadbed under load, using the critical value of the additional deformation in widening pavement structure as control objective, and relying on the finite element analysis software, foundation settlement calculation model was established. Through fitting the foundation settlement curve, and exerting it to the embankment bottom as a constraint condition, the settlement properties of the embankment surface were analyzed, anti-calculating the limit value of differential settlement of the foundation was conducted, and the control criterion for differential settlement of the foundation was obtained. The results show that the limit value of differential settlement increases as the embankment fill height or the elastic modulus of embankment fill increases, howev-

er, it decreases as the widening ratio or the elastic modulus of foundation fill increases. The degrees of these four factors' influence from the largest to the smallest are: old and new embankment's widening ratio, elastic modulus of foundation fill, elastic modulus of foundation fill and embankment fill height. The study has also obtained a relational expression between the limit value of differential settlement of the foundation and the widening ratio of the old and new embankment, the anti-slope change ratio of pavement. 5 tabs, 6 figs, 13 refs.

Key words: road engineering; widening pavement; additional deformation; differential settlement; control criterion

0 引言

目前,越来越多的公路建设项目是将原有低等级公路进行拓宽、改建,在这些公路改、扩建工程中产生了很多诸如纵向裂缝、错台等的相关病害^[1]。拓宽荷载下新老地基路基间的差异沉降是导致拓宽路基路面变形破坏的主要原因,但目前交通行业设计与施工规范未涉及地基差异沉降控制标准的规定,使得有关地基差异沉降控制技术的设计参数要么过于保守,要么过于浪费^[2]。因此,国内外技术人员针对拓宽工程展开了一系列研究工作,并针对拓宽路面结构层或者路基表层的差异沉降变形建立了相关控制标准^[3-12]。可以看出,以往有关拓宽工程差异沉降都是面向路面层结构性和功能性要求而建立的。针对拓宽荷载作用下地基差异沉降控制限值没有给出明确标准,本文依托有限元分析软件,建立拓宽路基地基沉降计算模型,运用 Matlab 软件拟合地基沉降曲线作为位移约束条件施加到路堤底面,分析新老路基顶面的沉降形状,由路堤顶面的差异沉降控制标准反算出地基沉降的控制限值,并结合正交层次分析法,明确了地基差异沉降限值的影响因素,并推导出地基差异沉降控制限值与新老路堤拓宽比和路面附加变形反坡率之间的关系表达式;建立了基于拓宽路面附加变形的地基工后差异沉降控制标准,并通过大比尺模型试验对差异沉降标准进行了验证。研究成果可为高速公路改扩建工程设计施工提供理论依据和技术支撑。

1 拓宽路面结构差异沉降计算模型

旧路加宽改造工程中新填筑的路基,尤其是软土地基,由于地基的压缩固结而产生的差异沉降,以及路堤自身的压缩变形和土基塑性累积变形的不均匀性,必将引起路基表层差异沉降的存在,从而可能

导致路面结构层的部分脱空或者悬空。新加宽路基和旧路基的搭接部分由于旧路边坡的存在,填土高度相对较小,故地基沉降和变形亦相对较小,而新加宽路基的边坡由于上层传递的压力较小,也不可能产生过大的沉降和变形,故新加宽路基的中部或者形心位置最可能出现脱空区。当地基沉降发生一段时间后,路面结构层和其上部土体协调变形,两者将再次“粘”到一起。但由于路基和路面结构层与土体刚度差异较大,路面结构层出现反弯曲状态,路面表面将会出现反坡。如图1所示,老路基宽度为 B_1 ,拓宽路基宽度为 B_2 ,则新老路基拓宽比为 B_2/B_1 。设旧路路基中线处为沉降最小值 S_1 ,新拓宽路基路肩处为沉降最大值 S_2 ,用 $S=S_2-S_1$ 表示拓宽路基最大沉降值点与老路基中心线位置处差异沉降值。本文以路面结构层反坡率 $\lambda=S/L$ 作为路面结构层差异沉降控制指标, L 表示差异沉降长度,为路堤最大沉降点到旧路中线之间的距离。

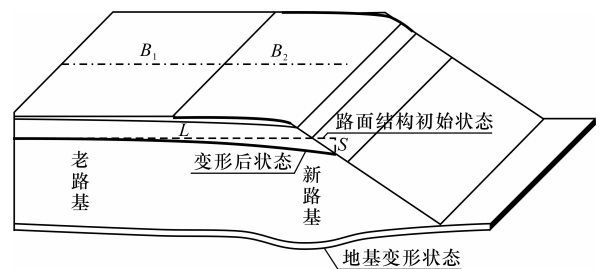


图1 差异沉降作用下路面结构反坡变形模式

Fig.1 Reverse slope of pavement layers as result of differential settlement

2 拓宽路基差异沉降控制标准

运用有限元分析软件,建立地基沉降计算模型,分析地基的沉降特性。继而运用 Matlab 软件拟合地基沉降曲线后,将其作为位移边界条件直接施加到新老路堤底部,通过对路基顶面差异沉降的控制,反算出地基沉降的控制标准。计算假定:①老路基

下的地基固结变形已完成;②地基和路堤中的初始应力场由地基土和老路堤土的自重形成,并将初始位移移 0;③新老路基、底基层、基层、面层等结合面处治较好,接触状态完全连续,不发生相对滑移和脱离。

路基顶面差异沉降变形曲线上相邻两点之间对应的割线斜率称为路基面的不均匀变形斜率,用 k 表示。根据前文计算假设,路基顶面与路面结构层接触良好,可以认为路基面不均匀变形斜率 k 等同于路面结构层反坡率。当地基差异沉降很小时,路基面最大不均匀变形斜率小于控制指标 λ 时,此时地基差异沉降对路基面的扰动可忽略不计。由不均匀变形斜率变化规律可知,对于一种模型,一定存在着某一地基差异沉降限值 S ,使路基面的最大不均匀变形斜率刚好等于 λ ,此时的地基差异沉降值即为地基差异沉降临界值,其对应的是路堤底部地基的差异沉降控制标准^[13]。

2.1 地基差异沉降影响因素分析

计算首先考虑路基填方高度的影响,以路面结构层反坡率 $\lambda=1\%$ 为控制目标,计算模型中路基填方高度 h 为 3、6、9 m 时,分别考虑新老路基拓宽比 l 为 1/2、2/3、1 这 3 种工况时的地基差异沉降限值,计算结果如图 2 所示。由图 2 可知,随着填方高度的增加,地基差异沉降限值呈增大趋势。

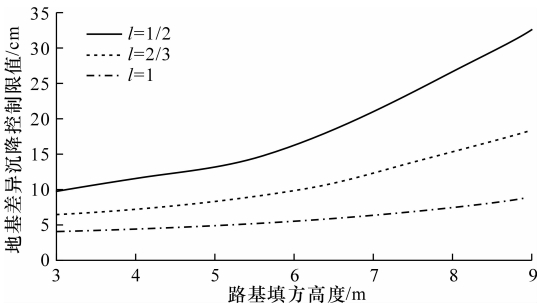


图 2 不同填方高度下地基表面的差异沉降限值
Fig. 2 Limit values of differential settlement with different foundation surface fill heights

新老路基拓宽比 l 分别为 1/2、2/3、1 时,路基填方高度 h 分别为 3、6、9 m 工况条件下,地基差异沉降限值的计算结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,新老路堤拓宽比对地基差异沉降控制标准的确定影响较为明显。随着拓宽比的增加,最大差异沉降控制值随新老路堤拓宽比的增大呈减小的变化规律。

计算模型中选取路堤填料模量 E_r 分别为 20、

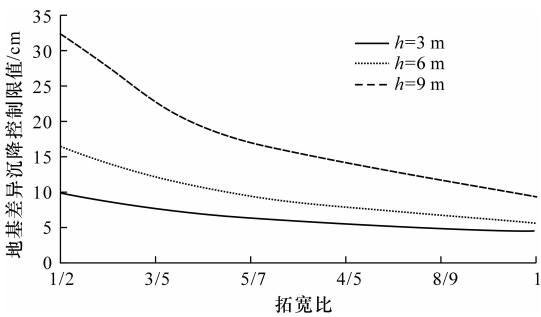


图 3 新老路堤不同拓宽比作用下地基的差异沉降限值
Fig. 3 Limit values of differential settlement with different old and new embankment widening ratios

40、60、80 MPa 时,地基填料模量 E_b 分别 4、6、8、10 MPa 等工况来分析地基差异沉降限值,计算结果见表 1。从表 1 可以看出,随着路堤填料模量的增加,地基差异沉降限值近似呈线性增长趋势,随着地基填料模量的增大,地基差异沉降的限值呈减小趋势。

表 1 不同路堤填料模量作用下地基的差异沉降限值

Tab. 1 Limit values of differential settlement with different embankment fill moduli				
E_r/MPa	不同地基填料模量 E_b (MPa) 的差异沉降限值/cm			
	4	6	8	10
20	6.3	5.8	5.6	5.4
40	7.5	6.7	6.4	6.0
60	8.3	7.3	6.8	6.5
80	9.2	8.0	7.4	7.0

2.2 参数变化的敏感性分析

拓宽路堤填方高度、新老路堤拓宽比、路堤填料模量和地基填料模量是影响地基差异沉降限值的主要因素,选取上述 4 个因素作为因子,以地基差异沉降限值作为指标,采用正交表对这 4 个参数变化的敏感性进行分析。根据工程实际情况,结合现行相关技术规范的推荐取值,确定表 2 所示的因子水平。不考虑各因素之间可能存在的交互影响,认为各因素相互独立。试验根据各影响因素及其所列的水平,选用正交试验表 $L_9(3^4)$,按此正交表设计的正交分析方案见下页表 3。

表 2 参数变化范围(因子水平)

Tab. 2 Factors levels				
水平	h/m	l	E_r/MPa	E_b/MPa
1	3	1/2	20	6
2	4	2/3	40	8
3	5	1	60	10

表 3 参数变化正交试验表
Tab. 3 Results of orthogonal test

因素序号	因素水平				S/cm
	h/m	l	E_r/MPa	E_b/MPa	
1	1	1	1	1	9.1
2	1	2	2	2	11.3
3	1	3	3	3	7.1
4	2	1	2	3	9.8
5	2	2	3	1	7.5
6	2	3	1	2	3.7
7	3	1	3	2	15.8
8	3	2	1	3	5.5
9	3	3	2	1	5.1

注:4 个因素 h 、 l 、 E_r 、 E_b 的离差平方和分别为 8.068 9、59.128 9、25.162 3 和 17.095 6。

从表 3 中离差平方和的结果可以看出,在因素水平范围内变化时,影响地基差异沉降限值的计算参数敏感性为:4 个因素的影响程度大小依次为新老路堤拓宽比 l 、路堤填料模量 E_r 、地基填料模量 E_b 、路堤填方高度 h 。因此高速公路拓宽工程的设计和施工中,应以新老路堤拓宽比作为主要考虑因素,综合考虑路堤和地基填料的模量和填方高度的影响,从而避免产生较大的差异沉降。

2.3 地基差异沉降控制标准

通过对地基表面差异沉降限值影响因素的分析得出,随着路堤高度的增加,地基差异沉降限值呈现增长趋势。取定拓宽高度 $h=3\text{ m}$,考虑不同新老路堤拓宽比情况下,通过路基表面的沉降曲线满足控制反坡率 λ ,反算出地基表面的差异沉降限值 S ,计算结果如表 4 所示。从图 3 中可以看出,当新老路堤拓宽比 l 一定时,地基差异沉降限值 S 随路基面差异沉降斜率限值的增加呈线性增加趋势,地基差异沉降限值 S 与新老路堤拓宽比 l 和反坡率 λ 之间的关系可以近似用下式表示

$$S=1\,000\lambda(16.8l^2-30.4l+17.1)$$

表 4 地基差异沉降控制值

Tab. 4 Limit values of differential settlement									
l	1/2	1/2	1/2	2/3	2/3	2/3	1	1	1
$\lambda/\%$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S	6.4	12.3	18.1	4.4	8.6	12.9	3.5	6.9	10.3

3 差异沉降控制标准验证

3.1 地基差异沉降控制标准足尺模型试验验证

模型试验单幅老路基顶部宽度为 6 m,拓宽后

宽度为 10 m,底部为 14.5 m,路基路面模型如图 4 所示。路基土填料取自西安市郊区高速公路填筑用黄土,依据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007),根据室内击实试验得出土体最佳含水量 $w_{\text{opt}}=13.2\%$,当老路基灰土层填筑至 2.2 m 高度时,开始进行拓宽路基的填筑,为了保证新老路基拼接部位粘合整体性好,填筑拓宽路基前要对老路基开挖 50 cm×75 cm 的台阶。为模拟新老路基刚度差异,在铺筑老路基时候,路基填料掺加 6% 生石灰,考虑到实际路基边界条件,将老路路基中心线位置处紧贴模型试验平台混凝土立墙填埋。

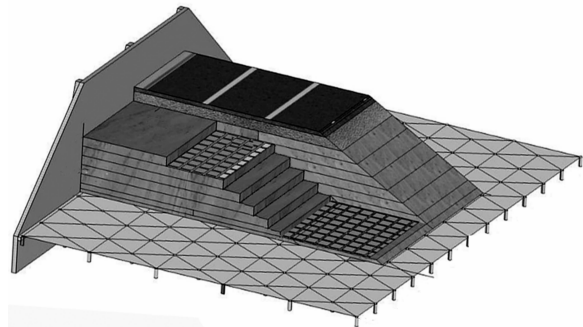


图 4 整体模型示意
Fig. 4 Diagram of model road

路面结构层按照实际施工情况设计,路面上面层为 4 cm 厚 AK-13C 沥青混凝土,中面层和下面层分别为 6 cm 和 10 cm 厚 AC-25 沥青混凝土层。基层为 3 层厚 18 cm 的水泥稳定碎石。水泥稳定碎石半刚性基层采用人工现场拌和、摊铺,12 t 压路机进行压实成型。沥青混凝土面层采用 AC-13 型沥青混合料,钻芯取样测试结果表明,施工压实度大于 95%,能够满足施工规范要求。试验中通过调节不同位置千斤顶升降来实现路基不同点地基的沉降值,进而达到预定 S 的试验模拟。试验中设定老路路基中线处为沉降最小值处 S_1 ,新拓宽路路基肩处为沉降最大值处 S_2 ,用 $S=S_2-S_1$ 表示拓宽路基最大沉降值点与老路基中心线位置处差异沉降值。模型试验中通过控制系统设置 S 值分别为 2~22 cm 等工况,沉降过程中,在路面结构层中埋设应变计来测定其应变变化值,模型如图 4 所示。

根据模型试验路基模型构造尺寸可知,模型新老路基拓宽比 $l=2/3$,路面结构反坡率 $\lambda=3\%$,结合表 4 结果可知地基差异沉降 $S=12.9\text{ cm}$,为临界控制限值。下页图 5 显示出地基差异沉降条件下不

同位置处沥青混凝土面层应变变化趋势。由图 5 可以看出,路面结构面层在地基差异沉降作用下,整体呈现受拉状态。随着差异沉降的增加,拉应变逐渐增加。当 S 小于 13 cm 时,路面结构层应变值较小且变化较为平稳,说明较小的地基差异沉降在路基体和基层构造的缓解作用下,路面结构表层附加应变值不明显;当 S 增加到 13 cm 时,应变值开始剧烈增加,此时路面结构层开始出现塑性应变破坏。此时,较大的地基差异沉降导致路面结构层内部产生较大的附加应力,路面结构层有塑性变形产生。从而,大比例尺寸模型试验结果验证了所建立的差异沉降标准的准确性。

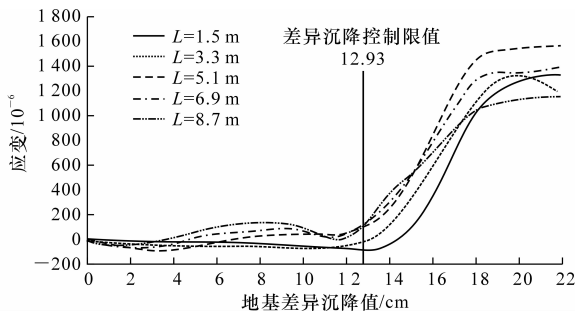


图 5 不同地基差异沉降长度 L 下沥青混凝土面层应变变化趋势
Fig. 5 Asphalt concrete pavement strain trends corresponding to varying degrees of differential settlement

3.2 足尺模型路面结构层附加变形有限元分析

以足尺模型路面结构层作为分析对象,计算参数见表 5。只考虑重力荷载及路基表层差异沉降引起的路面结构附加应力,不考虑温度变化及交通荷载对路面结构应力的影响。边界条件为底基层底面竖直方向直接施加不协调变形,左边界水平向约束,上边界和右边界自由。采用平面 8 节点等参单元。

表 5 典型路面结构和材料参数

Tab. 5 Typical pavement structure and material parameters					
结构层	材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	厚度/ cm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
面层	沥青混凝土	1 200	0.25	22	2 400
基层	水泥稳定碎石	1 500	0.25	36	2 100
底基层	水泥稳定碎石	1 000	0.25	18	2 100

运用有限元程序,将路堤顶面的差异沉降作为位移约束条件直接施加到路面结构底部,模拟计算路基的差异沉降对路面结构应力的影响情况。差异沉降对路面的力学影响主要体现在产生的附加应力上,为分析不同沉降量对路面各结构层附加应力的影响,计算中将最大差异沉降量控制在 1~10 cm 变

化范围内进行计算。计算获得面层顶面、基层顶面和底基层顶面的水平向附加应力峰值,结果如图 6 所示。可以看出,面层顶面附加应力表现为拉应力,且随着差异沉降量的增加呈近线性增大;差异沉降量从 1 cm 变化到 10 cm 时,附加拉应力值从 0.282 MPa 增加到 2.806 MPa。由于基层材料的抗拉强度较低,所以当差异沉降量超过约 2.71 cm 时,基层的上部最大附加拉应力为 0.61 MPa,超过了基层材料水泥稳定级配碎石的劈裂抗拉强度。此时,路面结构层因为附加变形产生的反坡率 λ 约为 3‰。计算结果验证了足尺模型试验结果的合理性。

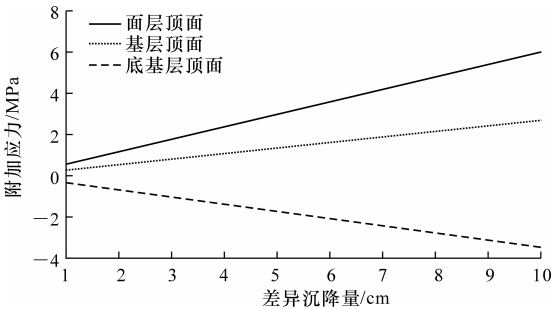


图 6 差异沉降量对路面结构层附加应力的影响

Fig. 6 Effect of differential settlement amount on additional stress of pavement structure layer

4 结 语

(1)随着填方高度的增加,地基差异沉降限值呈增大趋势;随着拓宽比的增加,地基差异沉降限值呈减小趋势;随着路堤填料弹性模量的增加,地基差异沉降限值呈增大趋势,然而随着地基填料弹性模量的增大,地基差异沉降限值呈减小趋势。4 个因素的影响程度大小依次为新老路堤拓宽比、路堤填料模量、地基填料模量、路堤填方高度。

(2)地基差异沉降限值 S 与新老路堤拓宽比 l 和路面结构反坡率 λ 之间的关系可以近似表示为 $S=1\,000\lambda(16.8l^2-30.4l+17.1)$ 。

参考文献:

References:

[1] 黄琴龙,凌建明,唐伯明,等.旧路拓宽工程的病害特征和机制[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(2):197-201.
HUANG Qin-long, LING Jian-ming, TANG Bo-ming, et al. On distress characteristics and mechanism in road widening engineering[J]. Journal of Tongji

- University; Natural Science, 2004, 32(2): 197-201. (in Chinese)
- [2] 王 鹏, 张军辉, 黄晓明. 加宽工程路面开裂影响因素的数值分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(4): 671-675.
WANG Peng, ZHANG Jun-hui, HUANG Xiao-ming. Analysis of influence factors of widening pavement cracking [J]. Journal of Southeast University; Natural Science Edition, 2007, 37(4): 671-675. (in Chinese)
- [3] 傅 珍, 王选仓, 陈星光, 等. 拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 54-55.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54-55. (in Chinese)
- [4] 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.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Controlling criterion of differential settlements after widening expressway[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2008, 28(5): 10-13. (in Chinese)
- [5] 翁效林, 张 超, 马豪豪, 等. 差异沉降对路面附加变形大比尺模型试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 1-6.
WENG Xiao-lin, ZHANG Chao, MA Hao-hao, et al. Large scale test on additional deformation of widening pavement with differential settlement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 1-6. (in Chinese)
- [6] 黄琴龙, 凌建明, 钱劲松. 新老路基工后差异变形对路面结构的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 759-762.
HUANG Qin-long, LIN Jian-ming, QIAN Jin-song. Influence of pavement under discrepant deformation after construction between existing subgrade and that to be widened[J]. Journal of Tongji University; Natural Science, 2005, 33(1): 759-762. (in Chinese)
- [7] 翁效林, 张留俊, 李林涛, 等. 拓宽路基差异沉降控制技术模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 159-164.
WENG Xiao-lin, ZHANG Liu-jun, LI Lin-tao, et al. Model tests on control techniques for differential settlement of road widening[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 159-164. (in Chinese)
- [8] 傅 珍, 王选仓, 陈星光, 等. 高速公路拓宽差异沉降对路面结构的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(3): 36-39.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Influence of differential settlement on pavement structure in expressway widening project[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2008, 28(3): 36-39. (in Chinese)
- [9] Akou Y, Magnan J P, Dubreucq T, et al. Centrifuge study concerning the widening of embankments on a soft clay foundation[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 221-233.
- [10] 翁效林, 张留俊. 拓宽路基下软土地基工后沉降预测[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(1): 17-21.
WENG Xiao-lin, ZHANG Liu-jun. Settlement prediction of soft subgrade under broaden embankment[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2011, 31(1): 17-21. (in Chinese)
- [11] 张美坤, 徐志红, 黄晓明. 改扩建道路工后差异沉降分级及控制标准研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(1): 109-113.
ZHANG Mei-kun, XU Zhi-hong, HUANG Xiao-ming. Research on classification and controlling criterion of differential settlement after widening expressway[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 8(1): 109-113. (in Chinese)
- [12] 郑明辉, 曹小林, 袁 明. 新加宽路基填筑对既有路堤工后沉降的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2005, 6(3): 47-49.
ZHENG Ming-hui, CAO Xiao-lin, YUAN Ming. Analysis of influence on post-construction settlement of existing embankment by filling newly widened subgrade[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 6(3): 47-49. (in Chinese)
- [13] 李 铁, 罗 强, 王佳敏, 等. 基于路基面不均匀变形的路堤地基差异沉降限值研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 90-94.
LI Tie, LUO Qiang, WANG Jia-min, et al. Limit value of the differential settlement of embankment foundation based on uneven deformation of subgrade surface [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 90-94. (in Chinese)