

文章编号: 1674-599X(2020)01-0014-06

拓宽路基差异沉降监测及数值分析

张军辉¹, 吴厚铭¹, 周平²

(1. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114;

2. 云南省建设投资控股集团有限公司, 云南 昆明 650501)

摘要: 为研究高速公路路基改、扩建施工过程中的沉降规律, 以莲株高速公路改、扩建工程 K1100+360 段为研究对象, 采用横剖管监测路基沉降, 并运用 ABAQUS, 建立了扩建路堤模型。提取模拟沉降数据与现场监测数据进行对比, 验证了数值模型的有效性。对路基高度、容重及宽度开展了敏感性分析。研究结果表明: 越靠近新路路基中线, 其沉降量越大。沉降量的最大值发生在新路基断面形心垂直位置下, 路基沉降量呈现中间大、两边小, 呈“碗盆状”。随着填筑高度继续增加到填筑完成, 路基沉降量逐渐减小并趋于稳定; 实测沉降量的最大值与数值模拟沉降量的最大值接近, 误差为 1.23%, 日均沉降量均小于设计规范的 5 mm。随着填土高度、容重及宽度的增加, 路基承受的自重应力也会增加, 沉降量先变大后逐渐减小至稳定。通过对数值模拟和现场实测数据进行对比分析, 得出现场实际路基沉降变形的一般规律, 以期为类似高速公路拓宽路基的沉降控制提供借鉴。

关键词: 路基沉降; 现场监测; 差异沉降; 数值模拟

中图分类号: TU433

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.003

Widening subgrade differential settlement monitoring and numerical analysis

ZHANG Jun-hui¹, WU Hou-ming¹, ZHOU Ping²

(1. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Yunnan Construction and Investment Holding Group Co., Ltd., Kunming 650501, China)

Abstract: In order to explore the settlement law during the construction and reconstruction of highway subgrade, the pile number K1100+360 of the reconstruction and expansion project of Lianzhu Expressway was taken as the research object. The subgrade settlement was monitored by cross-section pipe, and the ABAQUS software was used to establish the extended embankment model for numerical simulation. The extraction settlement data was compared with the on-site monitoring to verify the validity of the numerical model, and sensitivity analysis was carried out on the height, severity and width of the subgrade. The results show that the larger the settlement value is, the larger the settlement is. The maximum settlement occurs under the vertical position of the new subgrade. The settlement of the subgrade is small and small in the middle. As the filling height continues to increase until the filling is completed, the settlement gradually decreases and tends to be stable. The measured maximum settlement value is close to the numerical simulation maximum settlement value, the error value is 1.23%, and the daily average settlement is less than the design specification of 5 mm. With the increase of the height, gravity and width of the fill, the self-weight stress of the fill increases, and the settlement becomes larger and then gradually decreases to be stable. By comparing and analyzing the numerical simulation and the field measured data, the general law of settlement and deformation of the actual roadbed

收稿日期: 2019-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878078)

作者简介: 张军辉(1978-), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。

on site is obtained. With a view to providing reference for the settlement control of similar highways to widen the roadbed.

Key words: subgrade settlement; on-site monitoring; differential settlement; numerical simulation

近年来, 中国建成运营的高速公路已不能满足当前社会发展所需的交通量^[1]。车流量和行车荷载急剧增加, 局部地区拥堵、超载现象严重, 道路病害日益剧增, 严重地影响和危害着道路的交通安全。一些高速公路的改、扩建已成为当前缓解交通拥堵的迫切需求。高速公路改、扩建是一项复杂的工程。为了防止拓宽路基在填筑过程中产生过大的不均匀沉降, 必须采取有效措施提高路基的强度和稳定性。找出适宜的测试沉降的方法, 控制填筑过程中路基的差异沉降, 对道路施工和后期维护具有重要意义。

路基改、扩建中, 地基的基本特性直接影响到拓宽路基的沉降, 影响到施工的进度和稳定性。国内、外学者对此展开了相关研究。夏英志^[2]等人采用有限元软件, 对高填方路堤差异沉降特性进行了研究。李洪峰^[3-4]等人针对软土地基处置措施与地基沉降预测模型分析进行了研究。张军辉^[5-6]等人采用有限元模拟的方法, 分析了拓宽改建而成的路基变形演变规律。左文荣^[7]等人通过有限元计算了拓宽软土路基的沉降变形, 并与实测值进行了对比研究。傅珍^[8]等人利用离心模型试验, 研究了拓宽高速公路老路基固结沉降和新老路基拼接后表面沉降的变化规律。贾亮^[9]等人通过工后沉降的方法, 对高填方路堤进行了现场监测, 研究了路堤竖向位移与时间的相关性。范红英^[10]等人研究了非均匀沉降变形的影响因素与施工技术。葛苗苗^[11]等人采用数值分析与工后沉降结合的方法进行了反演预测。Zhang^[12]等人通过离心机模型试验和使用 ABAQUS 数值分析的方法, 模拟新路基的差异沉降。刘金龙^[13]等人基于非线性有限元方法, 对扩建工程的基本特征进行了探究。这些研究成果大多是运用不同

方法和手段, 研究了不同类型典型断面的沉降, 但多数是采用数值模拟或者是实测等单一的方式对路基沉降进行了研究, 而综合考虑数值模拟和实测的研究较少。因此, 作者拟通过现场实测结合数值模拟计算来研究新、老路基的差异性沉降规律, 并依托莲株公路改、扩建工程进行研究, 以期类似高速公路拓宽路基的沉降控制提供借鉴。

1 拓宽路堤沉降现场测试

1.1 工程概况

莲株公路改、扩建工程始于湘赣省界莲花冲, 终于株洲市红旗立交桥东, 连接莲易公路株洲至易家湾段, 全长 50.384 km。采用“单侧整体拓宽为主, 局部分离”的方式进行双向四车道改、扩建路基。K1100+360 是(K1093+829~K1111+907)高填方典型断面, 该段旧路宽 12 m, 已运营了 20 多年, 路基路用状况较差。采用右幅单侧拓宽, 拓宽宽度为 9.5 m, 路基填高 9.6 m。填料采用水泥改良土, 层铺横向未铺设土工隔栅, 边坡坡比为 1:1.5。采用横剖管综合测试技术, 对断面进行了沉降监测。

1.2 沉降监测点位的布设

1) 观测点位的布设

横剖管变形观测点位设置在新路堤的底部, 采用型号为 ZMZX-7030 的综合测试仪(量程为 650~3 000 Hz, 精度为 0.01% FS)进行检测, 对 2 次检测得出的数据进行了比较, 求得其沉降差, 观测点埋设位置如图 1 所示。

2) 沉降监测点的设置及埋设

采用剖面沉降观测的方法, 对断面 K1100+360 进行了长期沉降监测。该方法是指将剖面沉降仪通

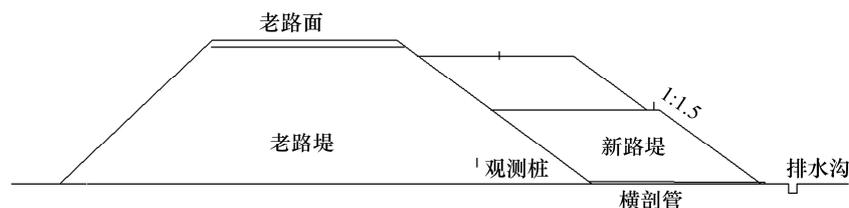


图 1 观测点埋设位置示意

Fig. 1 The buried point of the observation points

过塑料管绑定后插入埋设在路堤底部的横剖管中进行的测量方法。

3) 监测频率

监测频率取决于路基的沉降速率，如：在拓宽期间，沉降变形速率较大，则监测频率需要较高。通常每填筑 2~3 层或 5~10 d 监测一次。预压初期(1~2 个月)平均每月监测 3~4 次，后期沉降趋于缓和，可调整为平均每月监测一次。若上、下层施工间歇较长，则可适当提高监测频率。

4) 动态控制标准

根据《公路路基设计规范(JTG D30-2015)》和《公路软土地基路堤设计与施工技术细则(JTGT D31-02-2013)》，在路基拓宽施工期采用动态控制标准。即：在路基填筑施工期，沉降位移速率小于 5 mm/d，水平位移速率小于 3 mm/d。

1.3 现场监测结果分析

1) 不同填筑高度与沉降变形分析

K1100+360 断面处为挖 2 层面板铺筑新路面，不同填高度路堤的累积沉降量如图 2 所示。

从图 2 中可以看出，填土高度与累积沉降量呈正相关性。即：填高越高，沉降越显著，但填高与沉降量并非线性关系。随着填高继续增加至填筑完成，沉降量逐渐减小且趋于稳定。从图 2 中还可以看出，管终端为路基沉降量的最大点，也就是沉降量的最大值发生在靠近老路基边缘即横剖管顶端处。

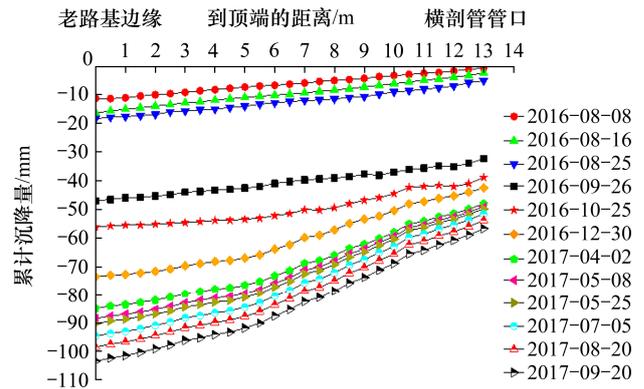


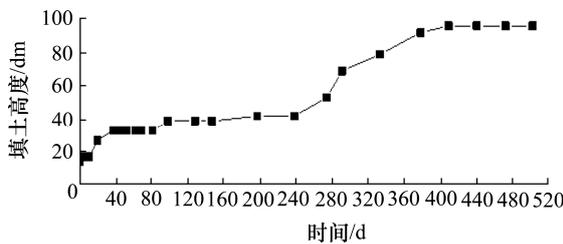
图 2 K1100+360 断面不同填土高度路堤的累积沉降量

Fig. 3 The accumulated settlement of embankment at different filling heights of K1100+360 section

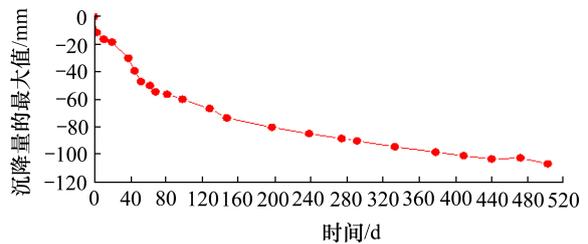
2) 填筑过程与沉降变形分析

根据 K1100+360 断面的现场横剖管沉降监测结果，得出每次监测时沉降量的最大值及对应的横剖管上的填土高度，如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，从填筑开始到填筑完成，横剖管顶端靠近老路堤边坡坡脚的沉降量最大，新路堤最外侧坡脚的沉降量最小。填筑到设计填高 9.6 m 时，老路堤边坡坡脚累积沉降量的最大值为 100.98 mm，累积沉降速率为 0.25 mm/d，满足设计规范(<5 mm/d)要求。设计填高完成后，继续进行监测，测得工后累积沉降量的最大值为 106.89 mm。随着填筑高度的增加，横剖管靠近老路堤坡脚的沉降量呈现直线下降，沉降较为明显，而新路堤最外侧坡脚的沉降量趋于平缓。



(a) 路基填高



(b) 沉降量的最大值

图 3 K1100+360 断面路堤填筑过程与沉降曲线

Fig. 3 Embankment filling process and settlement curve of K1100+360 section

3) 设计填高完成后路堤沉降与时间的变化分析

填筑完成后，继续进行观测，测得工后变形与时间的关系，并与填筑期间的变形进行了比较，判断路堤是否稳定。填筑完成后，路堤工后沉降与时

间的关系，如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，在停止填筑以后，路堤还在继续沉降，期间累积沉降量为 5.91 mm，日均沉降速率为 0.064 mm/d，路堤的沉降量均较小且逐渐趋于稳定，符合设计规范要求(<5 mm/d)。

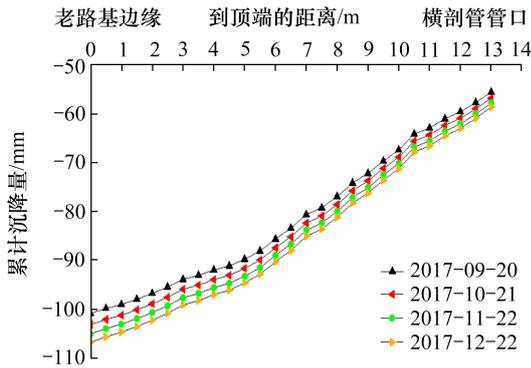


图 4 路堤沉降与时间的关系

Fig. 4 The relationship between the embankment settlement and time

2 拓宽路基差异沉降的数值分析

2.1 模型的建立

选择莲株公路改、扩建工程的一个典型断面进行模拟计算。将模拟段的地基厚度取 30 m, 设计高度为 9.6 m, 计算宽幅为 70 m, 填料选用老路标段附近的挖方改良土。考虑到莲株公路既有路基已运营了 20 多年, 其数值模拟时, 在自然条件和交通荷载的作用下固结已完成, 因此, 不考虑地下水的渗流、固结。该模型数值计算时, 假设: ①地基和填筑路基土体均选取 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型; ②以现有路基为中轴线, 选取加宽面进行模拟计算; ③地基底面受到水平和纵向约束, 左、右边界受到水平约束; ④地基已完成固结变形; ⑤结合面连接效果较好, 不发生相对移动; ⑥将既有路基的交通荷载等效为 10 kPa 静载^[14]。

K1100+360 断面路基的网格控制属性以四边形为主, 网格单元 2 770 个, 节点 2 479 个, 如图 5 所示。

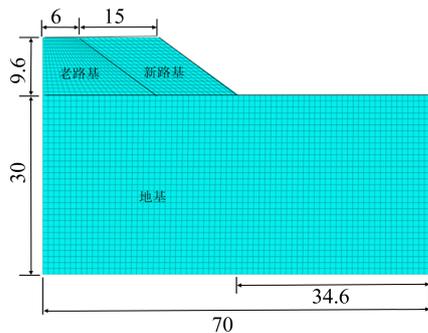


图 5 模型网格划分(单位: m)

Fig. 5 The mesh generation of the model (unit:m)

选取从室内固结试验、剪切试验测试中获得的标段老路基附近的挖方段水泥改良土的基本参数, 土样材料参数见表 1。

表 1 材料参数

Table 1 The material parameters						
材料名称	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
老路堤	9.6	15.0	0.38	20.0	30.0	31.0
新路堤	9.6	19.3	0.30	20.0	20.0	29.0
地基土	30.0	8.0	0.35	18.5	20.0	22.0

2.2 数值计算验证

为分析路基的整体沉降和新路基竖向沉降位移, 通过数值模拟计算与现场横剖管所得竖向沉降位移进行了对比分析, 对比曲线如图 6 所示。

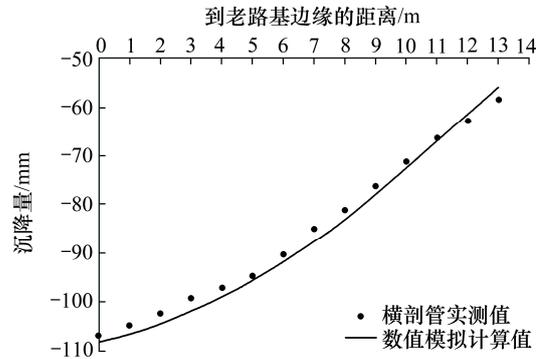


图 6 横剖管监测与数值模拟沉降量的对比

Fig. 6 The settlement contrast of cross-section tube monitoring with numerical simulation

从图 6 中可以看出, 现场沉降实测值与有限元计算值比对的沉降变化趋势一致。越靠近新路基路中线, 其沉降变形越大, 路基沉降量中间大、两边小, 呈现“碗盆状”。对于该模型, 在累积填筑完成后, 土体的沉降趋势逐渐放缓。随着时间的增加, 沉降量越来越小, 直至稳定。地基沉降量的最大值位于路堤整体形心位置, 路面沉降呈现“勺子”形状, 符合工程实际规律。

采用逐级施加荷载的有限元计算方法, 选取同一断面, 对不同填筑高度位移的实测值与有限元计算值进行对比, 验证了数值模型的有效性。拓宽地基的竖向位移随着填土高度的增加而增大, 有限元计算值与实测值的变化规律趋于一致。通过数值模拟计算, 可以预测路基的沉降量, 指导路基的填筑层厚和控制沉降速率, 保障拓宽路基的沉降量稳定。

2.3 参数灵敏度分析

1) 不同拓宽路基高度的影响分析

采用与 K1100+360 断面相同的数值模型和边界条件, 对不同拓宽路基填高进行了数值计算, 路基填高与坡脚沉降量的关系如图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 路基的拓宽填高从 2 m 增加到 10 m, 老路基边缘坡脚沉降量的最大值分别为 54.62, 93.54, 115.90, 118.07 和 122.62 mm。填高从 2 m 增加到 6 m 时, 沉降量为 61.28 mm, 老路基边缘坡脚沉降变形最大。填高从 6 m 增加到 10 m 时, 沉降量为 6.72 mm, 沉降变形减缓, 且趋于稳定。其原因在于: 随着路基填高的增加, 其承受的自重荷载也增加, 使得沉降量增加。故在设计和建造过程中, 要适当限制填土高度。

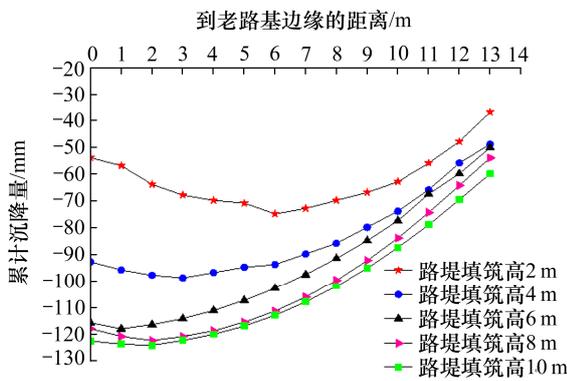


图 7 路基填高与坡脚沉降量的关系

Fig. 7 The relationship between the subgrade filling and the slope settlement

2) 不同路基填土容重的影响分析

在拓宽路基中, 选取 6 种不同填料容重进行了数值计算, 路基填土容重与坡脚沉降量的关系如图 8 所示。

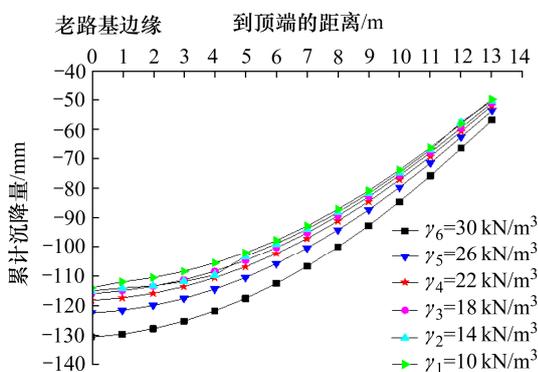


图 8 路基填土容重与坡脚沉降量的关系

Fig. 8 The relationship between the subgrade filling severity and the slope settlement

从图 8 中可以看出, 随着拓宽路基填土容重的增加, 老路基边缘坡脚沉降量也增加, 填土容重从 10 kN/m³ 增加到 30 kN/m³, 老路堤边缘坡脚沉降量的最大值分别为 113.98, 115.09, 116.02, 118.24, 122.51 和 130.65 mm。特别是当填土容重达到 26 kN/m³ 时, 沉降量显著增加。表明: 拓宽路堤填料达到一定容重时, 随着容重的增加, 沉降量会急剧增大, 路基的稳定性降低。采用轻质路堤填筑材料可以显著减小路基的竖向位移, 并随着填筑的完成, 其沉降量逐渐减小, 并趋于稳定。其原因在于: 使用轻质填筑材料可以减少地基承受的上部荷载, 并减少对路基的扰动。因此, 在高速公路扩建工程中, 采用轻质填料是一种经济、有效降低路基沉降量的选择。

3) 不同路基拓宽宽度的影响分析

选取 3.75, 7.5, 11.25 和 15 m 等不同拓宽宽度, 对路基沉降变形的影响进行了数值计算, 如图 9 所示。

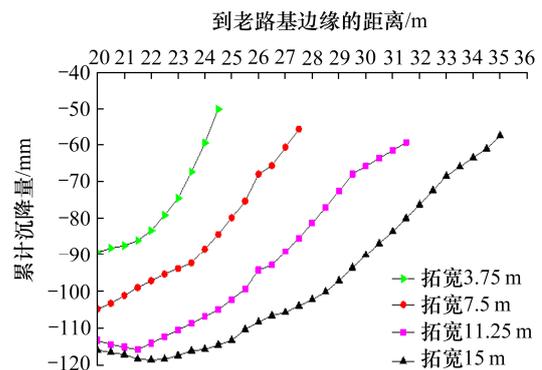


图 9 不同拓宽路基的沉降曲线

Fig. 9 Settlement curves of different widened roadbeds

从图 9 中可以看出, 路基从 3.75 m 拓宽到 15 m, 沉降变形显著, 老路基边缘坡脚沉降量的最大值分别为 89.29, 99.42, 106.77 和 112.93 mm。其原因在于: 随着拓宽宽幅的增加, 地基所承受的荷载也增加, 同时, 对老路基的附加应力也变大, 进而使得坡脚沉降量增加。因此, 在增加路基沉降量的同时也加剧了新老路基的差异沉降。

3 结论

1) 通过有限元软件进行拓宽路基沉降量的计算以及现场监测沉降数据进行研究分析, 得出现场监测沉降量的最大值为 106.89 mm, 数值计算沉降量的最大值为 108.19 mm, 日平均沉降量均小于规

范的 5 mm。研究表明:越靠近新路基路中线,沉降量越大,最大沉降量发生在新路基断面形心垂直位置下。路基沉降量中间大、两边小,呈“碗盆状”。

2) 随着拓宽路基的填高、宽度以及容重的增加,沉降量显著增加,地基所承受的上部荷载也增大。随着填筑的逐渐完成,沉降量先变大后减小至逐渐稳定,其不仅增加了路基的沉降量,同时也增加了不均匀沉降,提高了拓宽路基发生破坏的几率,对施工的进度和安全性产生影响。

3) 数值计算结果表现为路基监测沉降量与数值模拟沉降变化曲线趋于一致,验证了数值模型的有效性。故可以利用有限元软件模拟,计算拓宽路基的沉降量,按照施工工序加载,预测其工后总沉降量,为全线不同断面的拓宽路基设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] 况爱武,胡芬.考虑环境容量的混合交通网络设计[J].交通科学与工程,2019,35(3):91-96.(KUANG Ai-wu,HU Fen.Mixed traffic network design considering environmental capacity[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(3):91-96.(in Chinese))
- [2] 夏英志,程玉.高速公路高填方路堤差异沉降特性研究[J].公路工程,2019,44(4):268-273.(XIA Ying-zhi,CHENG Yu.Study on differential settlement characteristics of high fill embankment of expressway[J].Highway Engineering,2019,44(4):268-273.(in Chinese))
- [3] 李洪峰,刘亚男,张立敏.换填处置涵位软土地基沉降的监测[J].东北林业大学学报,2019,47(8):103-106.(LI Hong-feng,LIU Ya-nan,ZHANG Li-min.Monitoring settlement effect on soft foundation of high filling culvert in replacement and disposal[J].Journal of Northeast Forestry University,2019,47(8):103-106.(in Chinese))
- [4] 康洪,彭振斌.软土软土地基沉降预测模型分析与研究[J].矿冶工程,2009,29(2):9-11,15.(KANG Hong,PENG Zhen-bin.Research and analysis of forecast model for settlement of soft soil foundation[J].Mining and Metallurgical Engineering,2009,29(2):9-11,15.(in Chinese))
- [5] 张军辉.软土地基上高速公路加宽变形特性及差异沉降控制标准研究[D].南京:东南大学,2006.(ZHANG Jun-hui.Research on deformation behavior and differential settlement limitation of expressway widening on soft soil foundation[D].Nanjing:Southeast University,2006.(in Chinese))
- [6] 蒋鑫,蒋怡,梁雪娇,等.软土地基高速公路路基拓宽改建全过程变形特性数值模拟[J].铁道科学与工程学报,2015,12(5):1039-1046.(JIANG Xin,JIANG Yi,LIANG Xue-jiao,et al.Numerical simulation on deformation behaviors for widened expressway embankment over soft ground[J].Journal of Railway Science and Engineering,2015,12(5):1039-1046.(in Chinese))
- [7] 左文荣,陆钊,左人宇,等.路基差异沉降处治方案的对比研究[J].路基工程,2014(4):154-159.(ZUO Wen-rong,LU Zhao,ZUO Ren-yu,et al.Comparative study on treatment schemes for differential settlement of subgrade[J].Subgrade Engineering,2014(4):154-159.(in Chinese))
- [8] 傅珍,王选仓,李宏志,等.高速公路拓宽路基差异沉降[J].交通运输工程学报,2010,10(6):25-31.(FU Zhen,WANG Xuan-cang,LI Hong-zhi,et al.Differential settlement of the widening subgrade for expressway[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2010,10(6):25-31.(in Chinese))
- [9] 贾亮,贺世开,朱彦鹏,等.高填方路堤工后沉降监测试验研究[J].公路交通科技,2017,34(3):15-19,25.(JIA Liang,HE Shi-kai,ZHU Yan-peng,et al.Experimental study on monitoring of the post-construction settlement of the high-filled embankment[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2017,34(3):15-19,25.(in Chinese))
- [10] 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):13-18,37.(FAN Hong-ying,SHE Xue-sen,BIAN Han-liang,et al.Influence of widening modes on the subgrade settlement of expressway[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2012,12(1):13-18,37.(in Chinese))
- [11] 葛苗苗,李宁,张炜,等.黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):745-753.(GE Miao-miao,LI Ning,ZHANG Wei,et al.Settlement behavior and inverse prediction of postconstruction[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(3):745-753.(in Chinese))
- [12] Zhang J H,Zheng J L.Centrifuge model test and numerical analysis of geosynthetic-reinforced embankments[J].Geotechnical Special Publication,2011,213:204-211.
- [13] 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.(LIU Jin-long,ZHANG Yong,CHEN Lu-wang,et al.Basic characters of road widening engineering[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(7):2159-2163.(in Chinese))
- [14] Han J,Gabr M A.Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,ASCE,2002,128(5):44-53.