

鱼欢,郑俊杰,曹文昭,等.非对称交通荷载作用下拓宽路堤动力特性分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1111-1117.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1111
YU Huan,ZHENG Junjie,CAO Wenzhao,et al.Dynamic Characteristics Analysis of Widening Embankments under Asymmetric Traffic Loading[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1111-1117.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1111

非对称交通荷载作用下拓宽路堤动力特性分析^①

鱼欢^{1,2},郑俊杰²,曹文昭²,郭震山²

(1. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室,山西太原 030006;

2. 华中科技大学土木工程与力学学院,湖北武汉 430074)

摘要:针对山西省境内长期承受非对称交通荷载的公路拓宽路堤,采用FLAC^{3D}建立数值模型,土工格栅采用FLAC^{3D}内置土工格栅单元(geogrid)模拟,其余部分均采用实体单元,屈服准则采用Mohr-Coulomb准则。将交通荷载简化为半正弦波荷载,分析非对称交通荷载作用下不加筋和加筋两种工况下拓宽路堤的变形特性及稳定性,进而改变拓宽路堤部分填土参数、交通荷载幅值、频率和行车间隔等参数,分析其对加筋工况下拓宽路堤变形的影响。结果表明:非对称交通荷载作用下,设置土工格栅加筋对新、旧路堤变形的约束作用有限,但能提高路堤的整体稳定性;增大拓宽路堤填土的压缩模量和黏聚力,可减小新、旧路堤沉降差;增大交通荷载一侧幅值会引起新、旧路堤过大差异沉降;增大交通荷载频率和时间间隔,路堤沉降均逐渐减小,但沉降差保持不变。上述结论对受非对称交通荷载拓宽路堤的施工提供了一定的理论依据。

关键词: 拓宽路堤; 非对称交通荷载; 数值模拟; 路堤变形; 路堤稳定性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)06-1111-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1111

Dynamic Characteristics Analysis of Widening Embankments under Asymmetric Traffic Loading

YU Huan^{1,2}, ZHENG Junjie², CAO Wenzhao², GUO Zhenshan²

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Taiyuan 030006, Shanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: A numerical model was established for the widening of a road embankment subjected to long-term asymmetric traffic loading in Shanxi Province, China. The model was created using FLAC^{3D} software, with traffic load simplified to half-sine wave. The geogrid was simulated by FLAC^{3D} structural element, and the soil was modeled by solid element. Mohr-Coulomb criterion was used to estimate the failure of geogrid and soil. The deformation and stability of both unreinforced and reinforced embankment widening under asymmetric traffic load were analyzed. Furthermore, parametric study was conducted to investigate the deformation of reinforced

^① 收稿日期:2016-04-25

基金项目:黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题(KLTLR-Y14-2);国家自然科学基金项目(51278216)

作者简介:鱼欢(1991-),女,硕士研究生,主要从事地基加固处理方面的研究工作。E-mail:m201473095@hust.edu.cn。

通信作者:郑俊杰(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程与隧道工程方面的教学、科研与技术咨询工作。

E-mail:zhengjj@hust.edu.cn。

widening embankment under different parameters including: fill properties of the widening embankment, amplitude and frequency of traffic load, and running interval. The results show that the deformation of the widened embankment is only partially restricted by the geogrid, while the global stability of the embankment under asymmetric traffic load is effectively improved. Differential settlement decreases as the fill properties of the widening embankment increases. Through comparative analysis, it was found that the effect of cohesion on the differential settlement is more obvious than that of the compression modulus. Smaller differential settlement can be obtained when the soil properties of the new and old embankments are similar. In practical engineering use, by ensuring the properties of new embankment fill are the same as those of the old embankment fill, differential settlement can be effectively controlled under dynamic load situations, and will not affect the comfort and safety of the vehicle. The increase in amplitude of traffic load only on one side of the embankment will lead to excessive differential settlement and the pavement smoothness will be seriously affected. As the frequency of asymmetric traffic load and running interval increases, embankment settlements gradually decrease, while the differential settlement will remain constant. The findings in this investigation can provide a theoretical basis for the construction of the widening embankment under asymmetric traffic load.

Key words: widening embankment; asymmetric traffic loading; numerical simulation; embankment deformation; embankment stability

0 引言

随着我国西部地区经济的快速发展,早期建设的道路尤其是高速公路已远远不能满足交通量持续增长的需求。相比新建高速公路,拓宽既有高速公路具有投资规模小、节约用地及交通管理和养护较为方便等优点,从而成为优先考虑的方法。但对于山西省的运煤公路,大量重载运煤车辆经一侧道路将煤运出,而经另一侧空载返回,路堤长期承受非对称交通重载的作用,容易引起沿路堤横向的差异沉降,并增大重载一侧路堤边坡失稳风险,特别是对于拓宽路堤,上述非对称交通重载的不利影响更为突出。

国内外许多学者对交通荷载作用下的路堤动力特性进行了研究。Deng^[1]、邓学钧等^[2]采用解析解和有限元数值分析方法研究了车辆水平和竖向荷载对路堤的影响;徐毅^[3]通过现场试验及循环三轴试验对交通荷载下路基动力特性进行了研究;Saad等^[4]运用有限元软件对柔性路面结构的动态响应进行了分析,其模拟车速 50 km/h,加载时间 0.1 s,采用三角形加载;吕爱欣^[5]采用移动荷载和移动简谐荷载模拟交通荷载,获得了加固后的软土路基在交通荷载作用下不同深度和宽度范围内的竖向位移、加速度和动应力变化规律;唐朝生等^[6]以沪宁高速公路为例,运用 FLAC^{3D} 对拼接路基在荷载作用下

的应力与变形发展过程进行了研究;陈剑等^[7]运用 ABAQUS 有限元软件将交通荷载简化为三维立体模型,分别以静荷载、移动荷载和正弦荷载的形式模拟交通荷载,从而得到路基的动力响应;孙钊^[8]采用 FWD 动载模拟行车荷载,通过改变轴重分析了超载下拓宽道路路堤不均匀沉降的情况;孙玲^[9]考虑非对称交通荷载的影响,分析了非对称交通荷载对黄土非对称加筋路堤变形特性的影响,并对交通荷载振幅、频率、行车间隔和路堤两侧高差等重要设计参数进行了参数分析。

目前,对于交通荷载作用下拓宽路堤动力特性的研究较少,特别是对于承受非对称交通荷载的运煤公路拓宽路堤,更需开展相关方面的研究。本文采用 FLAC^{3D} 建立拓宽路堤数值模型,从变形和稳定性两个方面分析非对称交通荷载作用下拓宽路堤的动力特性,进而分析填土参数、荷载幅值、荷载频率及行车间隔对拓宽路堤变形的影响。

1 工程概况与数值建模

1.1 工程概论

选取山西某高速公路典型拓宽路堤断面,原有旧路堤顶面宽 26 m,高 8 m,采用对称拓宽的方法,两边各拓宽 8 m,路堤边坡坡度比保持 1:1.5 不变。根据文献[10],拓宽既有路堤时,应在既有路堤

坡面开挖台阶,且台阶宽度不应小于 1 m。该路堤拓宽工程采用开挖台阶的拼接方式,台阶设计尺寸为 1.5 m×1 m(宽×高),随拓宽部分路堤的填筑自下而上逐级开挖。对于加筋工况,土工格栅自台阶处开始铺设,第一层位于路堤底面处,自下而上共铺设 3 层,层间距 3 m。

1.2 数值建模

假设路基足够长,采用有限差分软件 FLAC^{3D} 建立数值模型,X 方向(路堤横断面)计算宽度 130 m,Y 方向(路堤纵向)计算宽度 1.0 m,模型尺寸与边界条件如图 1 所示,底部采用固定边界,两侧仅约束水平方向位移。为便于对计算结果进行分析,分别在右侧拓宽路堤中心和旧路堤中心设置监测点 A 和 B。土工格栅采用 FLAC^{3D} 内置土工格栅单元(geogrid)模拟,其余部分均采用实体单元,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则。

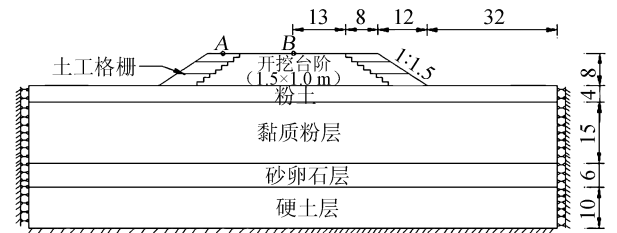


图 1 模型尺寸与边界条件(单位:m)
Fig.1 Dimension and boundary conditions of the model (Unit:m)

山西省的运煤车辆经常从一侧将煤运出,而从另一侧空车返回。为模拟这种荷载工况,将交通荷载简化为半正弦波交通荷载^[11-12],左侧幅值 q_1 为 50 kPa,右侧幅值 q_2 为 20 kPa,荷载施加时间间隔为 3 s,频率 f 为 0.4 Hz,周期 T 为 4.25 s。交通荷载随加载时间的变化规律见式(1)和图 2。

$$q_u = \begin{cases} q_0 \sin \frac{4}{5} \pi t & nT \leq t \leq nT + 1.25 \\ 0 & nT + 1.25 \leq t \leq (n+1)T \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_0 为荷载幅值; T 为荷载周期; $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

考虑新旧路堤的实际建造过程,数值模拟分以下 3 步开展:(1)在旧路堤上施加非对称交通荷载至路堤顶面沉降稳定;(2)分层填筑路堤两侧拓宽部分,每层填筑高度 1 m,分不加筋和加筋两种工况;(3)在拓宽完成后的路堤顶面施加非对称交通荷载。建模型参数见表 1,路堤拓宽完成后的数值模型如图 3 所示。本文主要对步骤(3)的模拟结果进行分析。

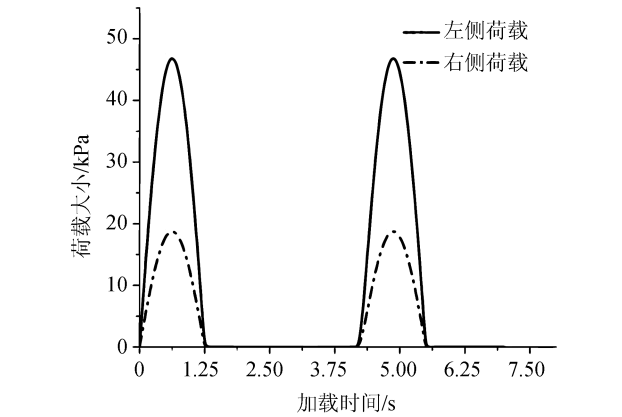


图 2 半正弦波交通荷载示意图
Fig.2 Schematic diagram of traffic load simplified to half-sine wave

表 1 模型参数
Table 1 Parameters of model

土层	压缩模量 /MPa	重度 /(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
新路基	18	19.2	0.3	30.0	15
旧路基	20.4	19.2	0.3	38.4	17.6
粉土	8.2	18.4	0.33	18.4	20.8
黏质粉土	12.6	19.2	0.33	26.0	17.3
砂卵石层	18.4	19.2	0.3	14.2	24.6
硬土层	25.4	19.7	0.3	44.5	18.2
土工格栅	86	-	-	30.72	12.96

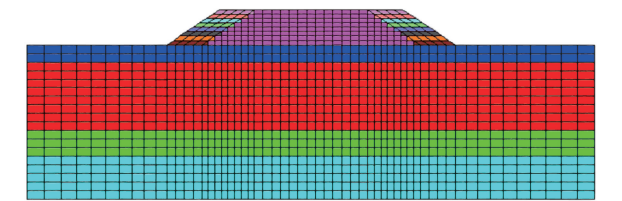


图 3 数值模型
Fig.3 Numerical model

2 数值模拟结果分析

2.1 拓宽路堤变形分析

图 4 为交通荷载作用下监测点 A 的沉降随时间变化曲线。交通荷载作用下,监测点 A 的沉降随时间呈波形变化,在一个荷载周期内先迅速增大,后迅速减小;随荷载作用时间增加, $t > 6T$ 后的最大沉降逐渐趋于稳定,不加筋和加筋工况的最大沉降分别为 39.6 mm 和 38.4 mm;荷载作用结束后,沉降分别回弹至 21.6 mm 和 20.3 mm。这是因为在交通荷载作用初期,路堤拓宽部分的填土在附加应力作用下发生错位并重新排列,土颗粒间隙减小,发生不可恢复的塑性变形。随时间增加,土颗粒之间相互挤压,发生剪切和压缩变形,路堤拓宽部分沉降增长缓慢,该阶段认为是可恢复的弹性变形。

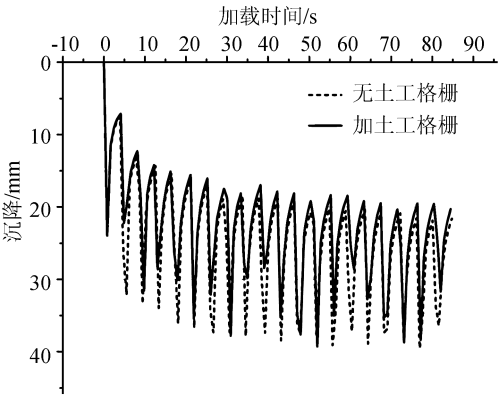


图 4 拓宽路堤中心沉降随时间的变化曲线
Fig.4 Variation of the settlement at the center of widening embankment with time

图 5 为加筋工况下交通荷载作用 $20T$ 后的拓宽路堤变形云图。最大沉降发生在路堤左侧拓宽部分,为 19.6 mm,这是由于路堤顶面承受 $q_1 > q_2$ 的非对称交通荷载,且路堤拓宽部分压实度不高,所以最大沉降发生在左侧拓宽部分。交通荷载作用下,土体发生剪切滑动被挤向两侧,最大水平位移发生在左部拓宽路堤下的地基内,为 4.04 mm。

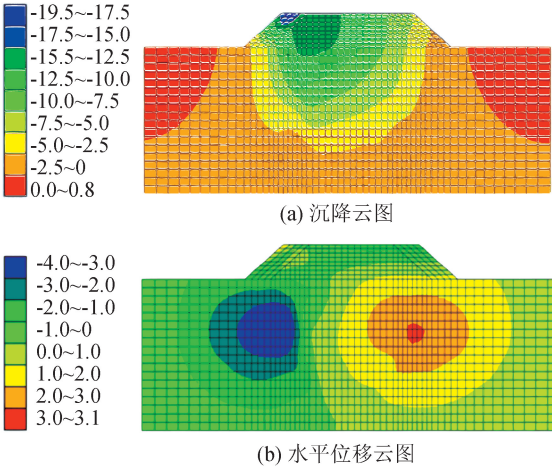


图 5 拓宽路堤变形云图($t=20T$)
Fig.5 Deformation nephogram of widening embankment ($t=20T$)

图 6 为路堤顶面位移曲线。非对称交通荷载作用下,路堤左侧拓宽部分沉降显著大于右侧拓宽部分,不加筋和加筋工况的最大沉降分别为 21.8 mm 和 19.6 mm。定义路面沉降差为最大沉降与路堤中心沉降的差值,则不加筋和加筋工况的沉降差分别为 10.2 mm 和 7.3 mm。从图 6(b)可以看出铺设土工格栅有效减小了新、旧路堤结合部的水平位移,且路堤右侧由于荷载较小,铺设土工格栅对路堤顶面

沉降和水平位移的影响很小。由此可见,非对称交通荷载作用下,在拓宽路堤中铺设土工格栅能够减小新、旧路堤的沉降差和结合部的水平位移,但效果不明显。这是由于土工格栅是从开挖台阶处开始铺设,交通荷载作用下土工格栅无法有效约束和协调新、旧路堤的沉降和水平位移。

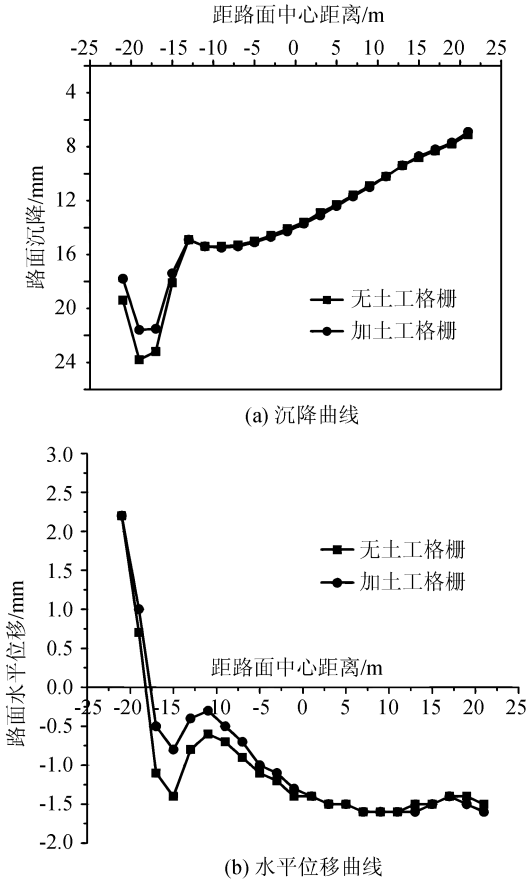


图 6 路堤顶面位移曲线
Fig.6 Displacement curves curves at the top of embankment

2.2 拓宽路堤稳定性分析

采用强度折减法^[13] 对非对称交通荷载作用下的拓宽路堤进行稳定性分析。对于稳定验算,失稳是在外部荷载超过抗剪强度的某个时刻发生的,所以选择最不利荷载工况进行验算。在路堤左、右两侧分别施加 50 kPa 和 20 kPa 静载,计算得到不加筋和加筋两种工况下的安全系数 F_s 分别为 1.242 和 1.383。路堤右侧剪切应变云图如图 7 所示。交通荷载作用下,不加筋工况下新、旧路堤交界处的剪切应变较大,安全系数 F_s 小于规范要求的 1.25^[14],而铺设土工格栅后安全系数提高了 0.141,从而满足了规范设计要求。由此可见,加筋虽然对路堤变形的影响有限,但可以有效增加新、旧路堤的整体稳定性,提高路堤拓宽后的安全系数。

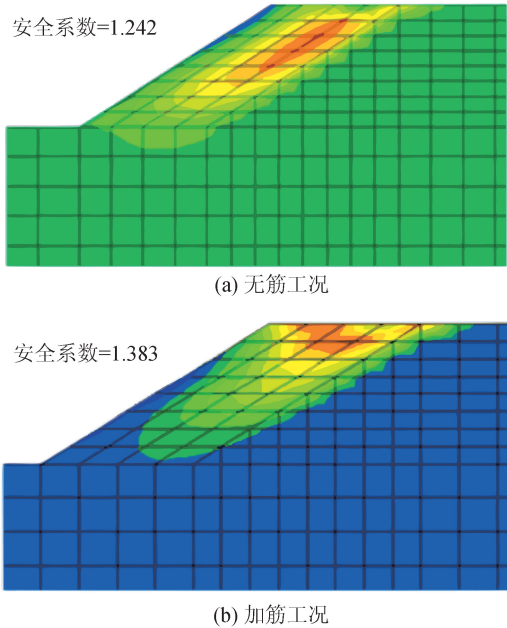


图 7 剪切应变云图

Fig.7 Nephogram of shear strain

3 参数分析

由上述分析可知非对称交通荷载作用下不加筋拓宽路堤的边坡稳定性不满足规范要求,因此本节仅以加筋拓宽路堤为对象,依次分析填土参数、荷载幅值、荷载频率和行车间隔对路堤沉降的影响。

3.1 填土参数的影响

分别取拓宽路堤填土的压缩模量为 10、12、16 和 18 MPa,旧路堤填土压缩模量保持 20.4 MPa 不变。压缩模量对路堤沉降的影响如图 8 所示,可见随压缩模量增大,监测点 A 沉降逐渐减小,而旧路堤沉降变化不大,因此随拓宽路堤填土压缩模量增大,新、旧路堤的沉降差减小。

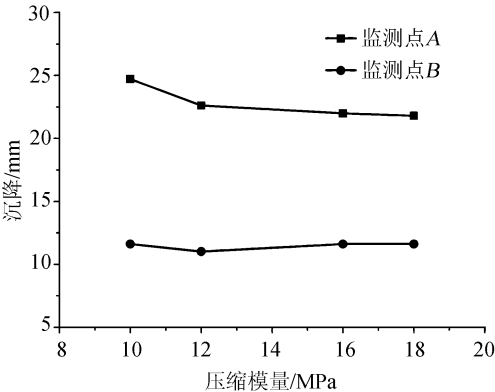


图 8 填土压缩模量对路堤沉降的影响

Fig.8 Influence of compression modulus of fill on embankment settlement

图 9 所示为拓宽路堤填土黏聚力对新、旧路堤沉降的影响,保持其他参数不变,黏聚力分别取为 25、28、30 和 35 kPa。随黏聚力增大,监测点 A 的沉降先迅速减小,在黏聚力接近旧路堤填土的黏聚力时沉降趋于稳定。可见增大拓宽路堤填土的黏聚力可明显降低新、旧路堤沉降差,从 35.1 mm 减小至 1.7 mm。

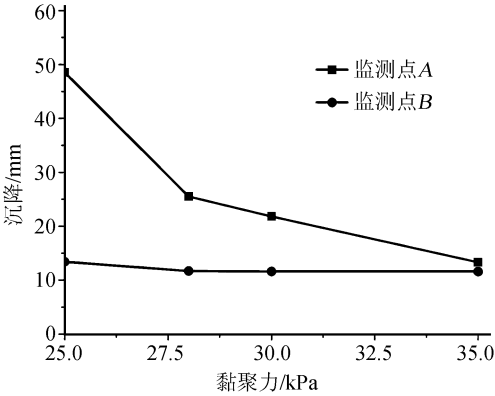


图 9 填土黏聚力对路堤沉降的影响

Fig.9 Influence of cohesion of fill on embankment settlement

综合图 8 和图 9 可知,提高抗剪强度参数比提高压缩模量对减小新、旧路堤沉降差的效果更明显,且新路堤填土材料参数越接近旧路堤参数,沉降差越小。因此在施工中,尽量选取与旧路堤填料参数相近的填土填筑新路堤,可有效保证新、旧路堤在动荷载下的沉降差不至于过大,从而影响车辆行驶的舒适度和安全性。

3.2 荷载幅值的影响

通过改变荷载幅值,设计如图 10 所示的 4 种非对称交通荷载幅值工况,右侧荷载幅值保持 20 kPa 不变,左侧荷载幅值分别为 75、50、40 和 30 kPa。

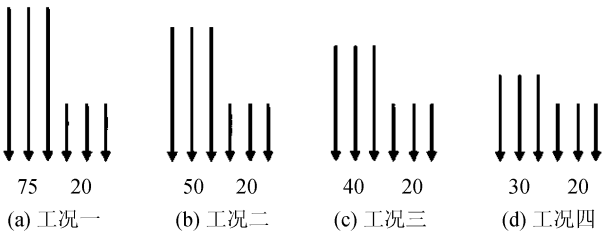


图 10 交通荷载工况(单位:kPa)

Fig.10 Traffic load cases (Unit:kPa)

图 11 为荷载幅值对路堤沉降的影响。可见随荷载幅值增大监测点 A 沉降逐渐增大,当荷载幅值超过 50 kPa 时该点沉降急剧增大,荷载幅值为 75 kPa 时沉降达 100 mm,此时新、旧路堤沉降差达

95 mm,严重影响了路面平整度,因此非常有必要对高速公路进行限重,尤其是对拓宽既有高速公路。

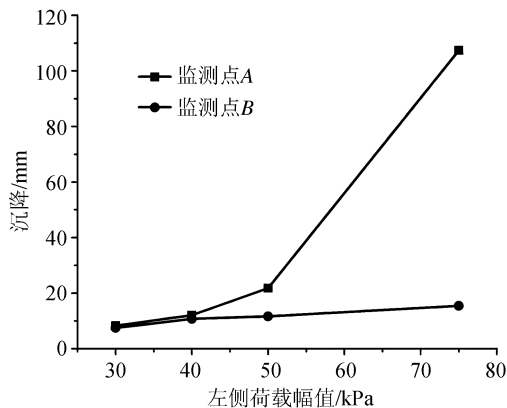


图 11 荷载幅值对路堤沉降的影响

Fig.11 Influence of amplitude of traffic load on embankment settlement

3.3 荷载频率的影响

保持其他参数不变,改变交通荷载频率,分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 Hz。图 12 为交通荷载频率对路堤沉降的影响。随荷载频率增大,监测点 A 和 B 的沉降都在减小,但沉降差基本不变。由此可见,改变交通荷载频率会引起路堤沉降变化,但对新、旧路堤的沉降差基本无影响。

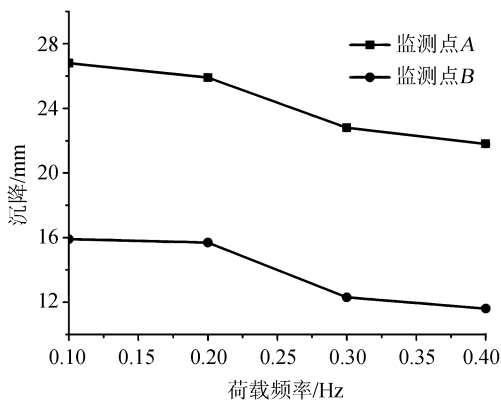


图 12 荷载频率对路堤沉降的影响

Fig.12 Influence of frequency of traffic load on embankment settlement

3.4 行车间隔的影响

分别取行车间隔为 3、6、9 和 12 s,图 13 为行车间隔对路堤沉降的影响。随行车间隔增大,即荷载循环周期的增大,监测点 A 和 B 的沉降都减小,最终趋于稳定,但沉降差变化不大。

铺设土工格栅对减小路堤变形作用有限,但可以有效增强新、旧路堤间的整体稳定性,提高拓宽路堤边坡稳定性。

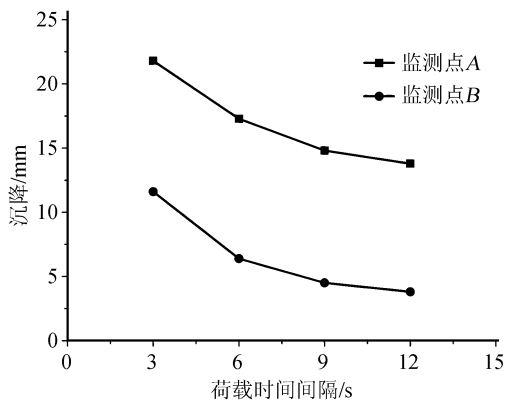


图 13 行车间隔对路堤沉降的影响

Fig.13 Influence of running interval of traffic load on embankment settlement

(2) 增大拓宽路堤填土的压缩模量和黏聚力都可以减小新、旧路堤沉降差,相比于提高压缩模量,提高黏聚力的效果更明显。

(3) 增大交通荷载一侧幅值会引起新、旧路堤过大差异沉降,严重影响路面平整度;增大交通荷载频率和行车间隔,路堤沉降均逐渐减小,但沉降差基本保持不变。

参考文献(References)

- [1] DENG X J. Predicting Dynamic Vertical Load Caused by Vehicle-pavement Interaction[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(5): 144-148.
- [2] 邓学钧, 李昶. 水平荷载作用下的路面结构应力[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 427-431.
DENG Xuejun, LI Chang. The Stress of Road Structure under Horizontal Load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 427-431.
- [3] 徐毅. 交通荷载对高速公路路基影响的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
XU Yi. Study on Dynamic Stability of Highway Subgrade under Traffic Loads[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [4] SAAD B, MITRI H, POOROOSHAB H. Three-dimensional Dynamic Analysis of Flexible Conventional Pavement Foundation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(6): 460-469.
- [5] 吕爱新. 交通荷载作用下滨海地区加固软土路基变形稳定性分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
LÜ Aixin. Deformation and Stability Analysis of the Reinforced Soft Soil Roadbed under Traffic Loading in Coastal Area[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2014.
- [6] 唐朝生, 刘义怀, 施斌, 等. 新老路基拼接中差异沉降的数值模

4 结论

(1) 非对称交通荷载会增加新、旧路堤沉降差,

拟[J].中国公路学报,2007,20(2):13-14.

TANG Chaosheng, LIU Yihuai, SHI Bin, et al. Numerical Simulation on Differential Settlement of Jointing of New and Old Roadbed[J].Chinese Journal of Highway, 2007, 20(2): 13-14.

[7] 陈剑,苏跃宏.交通荷载作用下公路路基动力特性的数值模拟研究[J].公路交通科技,2011,28(5):44-48.

CHEN Jian, SU Yuehong. Numerical Simulation of Dynamic Performance of Highway Subgrade under Traffic Loads[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2011, 28(5): 44-48.

[8] 孙钊.行车荷载作用下拓宽路堤沥青路面结构仿真[D].武汉:华中科技大学,2013.

SUN Zhao. Emulation of Widening Embankment and Asphalt Pavement Structure under Traffic Loads[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[9] 孙玲.黄土地区非对称加筋路堤作用机理及变形特性研究[D].武汉:华中科技大学,2014.

SUN Ling. Study on Mechanism and Deformation Behavior of Asymmetric Reinforced-embankment in Loess Area[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.

[10] 公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.

Code for Design of Highway Subgrades:JTG D30—2015[S]. Beijing:China Communications Press,2015.

[11] 卜鑫.交通荷载下软土路基的动力响应分析[D].杭州:浙江大学,2006.

BU Xin. Dynamic Response Analysis of Soft Soil Subgrade under Traffic Load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

[12] 汤连生,徐通,林沛元,等.交通荷载下层状道路系统动应力特征分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊 2):3876-3884.

TANG Liansheng, XU Tong, LIN Peiyuan, et al. Analysis of Dynamic Stress Characteristics of the Road System under Traffic Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp2): 3876-3884.

[13] ZIENKIEWICZ O C, HUNMPHENSON C, LEWIS R W. Associated and Non-associated Visco-plasticity and Plasticity in Soil Mechanics[J]. Geotechnique, 1975(25): 671-689.

[14] 建筑边坡工程技术规范:GB 50330-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

Technical Code for Building Slope Engineering: GB 50330-2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.