

文章编号:1671-6833(2014)02-0041-05

# 交通荷载下非对称加筋路堤动力特性研究

刘少文, 张 军, 孙 玲

(山西省交通科学研究院 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)

**摘 要:**黄土地区公路路堤尤其是非对称路堤,经常出现过大沉降、不均匀沉降和边坡失稳等病害,严重影响了公路长期运营性能.为研究交通荷载下非对称路堤动力特性,考虑山西省运煤车辆行车荷载的影响,将交通荷载视为半正弦波循环荷载,通过数值模拟研究了黄土地区非对称路堤未加筋、加格栅和加 EPS 板 3 种工况的动力特性,着重对交通荷载振幅、频率和行车间隔的影响进行了参数分析.结果表明:交通荷载振幅和频率对路堤变形影响较大,而行车间隔的影响较小;采用格栅加筋的黄土非对称路堤变形控制效果好于加 EPS 板.

**关键词:**交通荷载;非对称路堤;动力特性;加筋路堤

**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.010

## 0 引言

近年来,交通荷载对路堤的影响越来越受到人们的重视.实践表明,交通荷载作用下路堤易产生较大的工后沉降和不均匀变形,对公路的使用寿命、行车安全及舒适性产生严重影响,特别是超载车辆对道路的影响更大<sup>[1-4]</sup>.

交通荷载是一种随机荷载,其大小、运动方式及空间位置都具有随机性,这种随机性与路面不平整度、路面材料特性及车型、车速等诸多因素相关.从简化的角度而言,对交通荷载的描述主要分为两种<sup>[5]</sup>:一是将交通荷载视为移动的恒载,即大小为车辆自重的恒载沿着车辆行驶的方向移动;二是将交通荷载视为稳态简谐振动,如半正弦波<sup>[5-7]</sup>,通过荷载振幅、频率及其周期性来描述交通荷载的变化规律.

黄土地区高等级公路建设中,受公路线形设计与地形制约,不可避免的会形成大量非对称路堤,主要表现为路堤断面几何形状和工程地质条件的非对称.在山西省,大量运煤车满载从一侧道路将煤运出,经另一侧道路空载返回,路堤长期受不对称行车荷载的影响,容易引发路堤失稳和路面不均匀沉降,制约了公路的长期运营性能.

笔者将交通荷载视为半正弦波循环荷载,通

过数值模拟对交通荷载作用下非对称路堤的动力响应进行深入研究,分析交通荷载作用下黄土地区非对称路堤未加筋、加格栅和加 EPS 板 3 种加筋工况下路堤的动力特性.

## 1 计算模型建立

选取山平(山阴至平鲁)高速公路 K210+987~K211+087 现场试验路段为分析对象,数值模型几何尺寸如图 1 所示.试验路段填方高度为 8~10 m,该路段地质与水文条件较为复杂,属于桥-涵过渡段,且穿越深冲沟.该冲沟与现有公路管涵相连,冲沟影响区域土质较差.鉴于加筋技术的优点<sup>[8-10]</sup>,拟采用土工格栅或 EPS 板进行加筋处理.计算模型物理力学参数见表 1.图 2 为加格栅和加 EPS 板 2 种工况下的数值模型,模型尺寸和网格划分完全相同,格栅每 3 m 铺设一层,共 4 层,最上层格栅距路堤顶部 2 m, EPS 板宽 26 m,高 3 m.

采用不对称的半波正弦荷载模拟路堤顶部交通荷载, $q_0$  为交通荷载,作用于路堤顶部 26 m 的路面范围内,频率  $f$  为 0.1 Hz,行车时间间隔  $\Delta t$  为 4 s,左幅荷载振幅  $q_1$  为 50 kPa,右幅荷载振幅  $q_2$  为 20 kPa.动力计算时采用自由边界,以减小边界效应对计算结果的影响. $q_0$  随加载时间  $t$  的

收稿日期:2013-12-01;修订日期:2014-03-05

基金资助:山西省交通建设科技资助项目(11-02-05)

作者简介:刘少文(1970-),男,山西吕梁人,山西省交通科学研究院教授级高工,博士,主要从事路基路面工程方面的研究工作,E-mail:lsw1970@hatmail.com.

变化规律如图 3（a）所示， $T$  为加载周期，此时  $T=5\text{ s}$ ；图 3（b）为前三个周期路面两侧半波正弦交通荷载随加载时间变化的波形图。

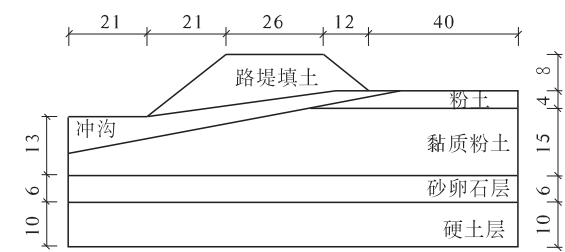


图 1 数值模型几何尺寸(单位:m)  
Fig.1 Geometric dimensions of numerical model( Unit: m)

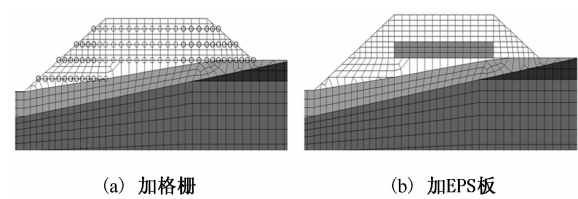


图 2 加筋工况下数值模型  
Fig.2 Numerical model of reinforced cases

表 1 计算模型中物理力学参数

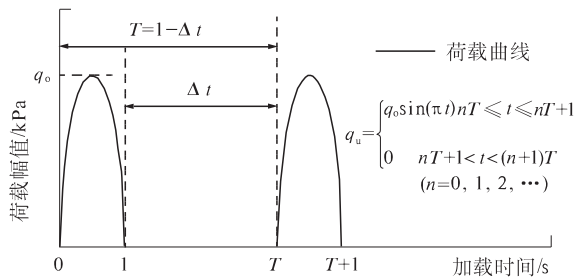
材料	压缩模量/ MPa	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )
	MPa	( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )		kPa	角/( $^\circ$ )
路堤填土	20.4	19.2	0.3	38.4	17.6
冲沟填土	4.5	17.8	0.35	12.0	16.0
粉土	8.2	18.4	0.33	18.4	20.8
黏质粉土	12.6	19.2	0.33	26.0	17.3
砂卵石层	18.4	19.2	0.3	14.2	24.6
硬土层	25.4	19.7	0.3	44.5	18.2
EPS 板	6.7	0.2	0.3	-	-
土工格栅	$EA=86.0\text{ MN/m}$				

2 动力响应分析结果

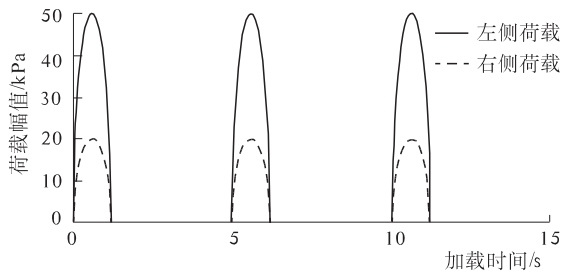
图 4 为前 20 个循环周期路堤顶面中点沉降随加载时间的变化曲线， $q_u$  作用下，路面中心沉降随加载时间呈波形变化，单次循环的最大沉降随加载时间的增加而不断增大，并逐渐趋于稳定；荷载作用初期路面中心沉降波动明显，沉降急剧增大，约  $14T(70\text{ s})$  后沉降基本稳定，最大沉降量为  $28.26\text{ mm}$ ，荷载作用结束后，沉降又回弹至  $17.36\text{ mm}$ ，回弹量为  $10.90\text{ mm}$ 。

图 5 为荷载作用  $20T(100\text{ s})$  后路堤的沉降和水平位移等值线图，路堤最大沉降处位于路堤左侧，最大沉降约  $20\text{ mm}$ 。路堤向沉降最大处收缩，地基向两边挤压。这是由于在行车荷载作用下

路堤部分受压沉降明显，形成弧槽，导致两侧土体向中部靠拢，而地基土体的压实度较高，沉降较小，在上部传来的楔形应力作用下，土体发生剪切滑动被挤向两侧，最大水平位移出现在左侧冲沟层处，达  $12\text{ mm}$ 。



(a) 含时间间隔的交通荷载



(b) 半波正弦交通荷载

图 3 半正弦波交通荷载示意图  
Fig.3 Traffic load as semi-sine wave

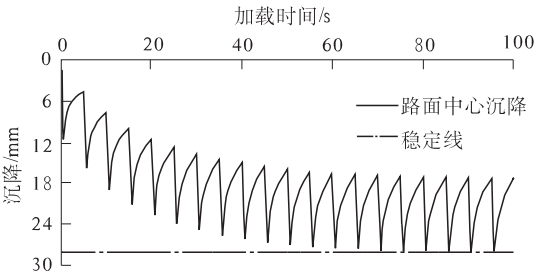


图 4 路面中心沉降随加载时间的变化曲线  
Fig.4 Variation of settlement with loading time at the centerline of embankment crest

表 2 为不同加载周期下路面最大沉降，加载初期，沉降随加载周期的增加迅速增大；加载  $10T$  后，沉降增幅减缓并趋于稳定，加载  $20T$  后路面最大沉降为  $36.04\text{ mm}$ 。

图 6 为未加筋、加 EPS 板和加格栅 3 种工况下路面中心沉降随加载时间的变化曲线，交通荷载作用下，未加筋、加 EPS 板和加格栅 3 种工况下沉降趋于稳定的时间分别为  $16T$ 、 $11T$ 、 $8T$ ，路面中心最大沉降分别为  $28.45\text{ mm}$ 、 $25.54\text{ mm}$  和  $18.62\text{ mm}$ ，加格栅的路面沉降能更快趋于稳定，且路面最大沉降明显减少，与未加筋工况相比，减少了  $34.6\%$ 。加

EPS 板后,路面沉降较未加筋工况有所减小,但由于 EPS 为弹性模量较小的线弹性材料,交通荷载作用下路面起伏较大,沉降回弹量也较大。

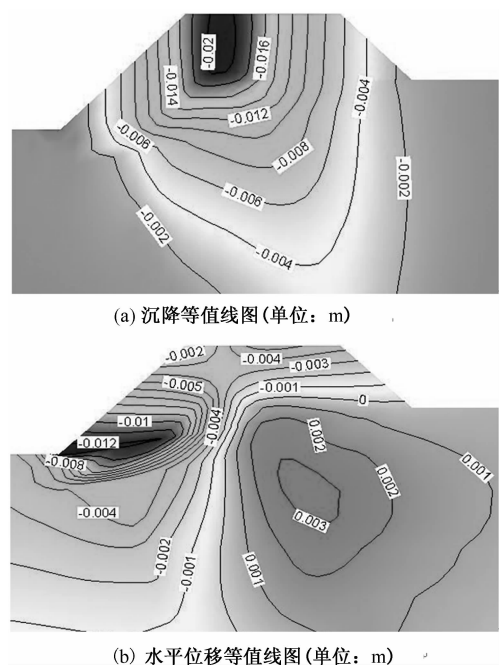


图 5 20T 后路堤沉降和水平位移等值线图  
Fig.5 Isoline of embankment settlement and lateral displacement after 20 T

表 2 不同加载周期下路面最大沉降  
Tab.2 Maximum settlement of embankment crest under different loading cycles

加载周期/T	1	4	7	10	15	20
沉降/mm	16.07	26.88	31.49	33.75	35.44	36.04

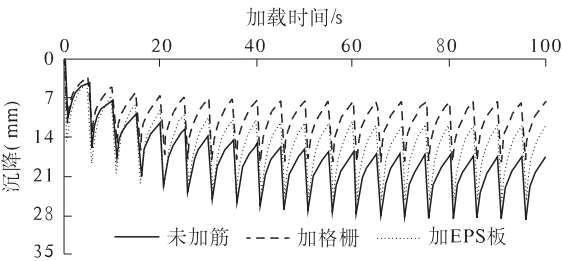


图 6 不同加筋工况下路面中心沉降  
Fig.6 Settlement curve at the centerline of embankment crest under different reinforced cases

如图 7 和图 8 所示,未加筋、加 EPS 板和加格栅 3 种工况下,路面最大沉降均发生在路面中心左侧 7 m 处,最大沉降分别为 36.04 mm、31.88 mm、23.58 mm,最大水平位移分别为 6.49 mm、4.50 mm、3.20 mm. 由此可见,交通荷载作用下,两种加筋工况下的路面沉降和水平位移均显著减小,其中加格栅的效果最为显著。

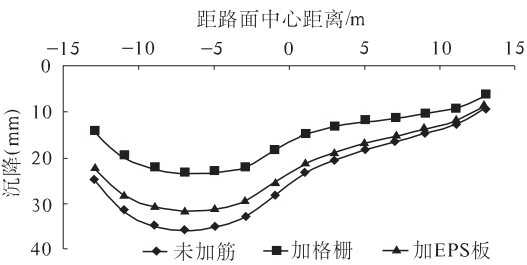


图 7 不同加筋工况下路面沉降曲线  
Fig.7 Settlement curve of embankment crest under different reinforced cases

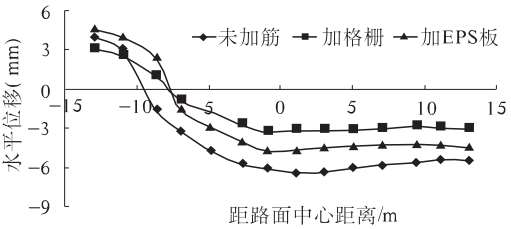


图 8 不同加筋工况下路面水平位移曲线  
Fig.8 Lateral displacement curve of embankment crest under different reinforced cases

3 参数分析

3.1 交通荷载振幅的影响

通过改变交通荷载幅值,设计如图 9 所示的 5 种交通荷载工况,包括 3 种非对称荷载和 2 种对称荷载,分析交通荷载工况对未加筋、加格栅和加 EPS 板 3 种工况下路面沉降特性的影响。

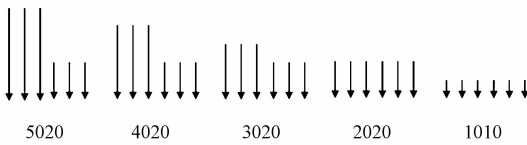


图 9 交通荷载工况 (单位:kPa)  
Fig.9 Distribution cases of traffic load (Unit: kPa)

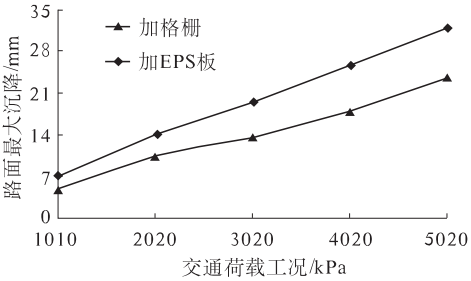


图 10 交通荷载工况对路面最大沉降的影响  
Fig.10 Influence of traffic load amplitude on the maximum settlement of embankment crest

图 10 为交通荷载工况对加筋路堤路面最大沉降的影响,随左幅道路荷载幅值的增加,2 种加筋工况下的路面最大沉降均近似线性增大,加

EPS 板工况的沉降增长速率大于加格栅工况,沉降差值也逐渐增大;不同交通荷载工况下,加格栅时的路面最大沉降均小于加 EPS 板。

### 3.2 交通荷载频率的影响

分别取  $f$  为 0.05 Hz、0.1 Hz、0.2 Hz 和 0.4 Hz。图 11 为交通荷载频率对加筋路堤路面沉降的影响曲线,交通荷载频率越小,两种加筋工况下的路面沉降越大,沿路面横向的差异沉降也越明显;荷载频率从 0.5 Hz 变为 2 Hz 时,沉降快速减小,其后变化幅度较小。

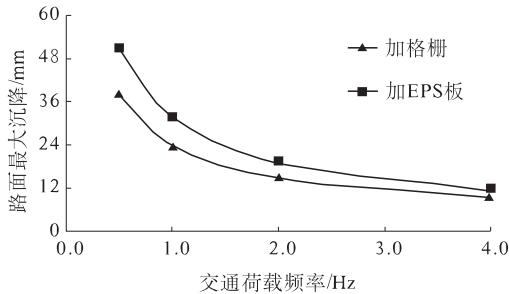


图 11 交通荷载频率对路面最大沉降的影响

Fig. 11 Influence of traffic load frequency on the maximum settlement of embankment crest

### 3.3 交通荷载行车间隔的影响

假设车辆通过计算路堤断面的时间为 1 s,连续两辆车通过的时间间隔为  $\Delta t$ ,考虑  $\Delta t$  分别为 1 s、4 s、9 s 和 19 s,相应荷载循环周期分别为 2 s、5 s、10 s 和 20 s。

图 12 为在交通荷载循环周期对加筋路堤路面最大沉降的影响曲线,荷载循环周期越长,路面沉降量越小;行车间隔从 1 s 增加到 4 s 时,路面最大沉降迅速减小,随行车间隔继续增加,沉降增加不大;行车时间间隔相同时,加格栅路堤路面沉降始终比加 EPS 板路堤路面沉降小,行车间隔时间越小,加格栅的效果越显著。

## 4 结论

(1) 交通荷载作用下,路堤顶面沉降随着荷载循环次数的增加而非线性增大,当荷载循环次数超过某一定值之后,沉降变化趋于稳定;对称荷载作用时,路面中心沉降最大;非对称荷载作用时路面最大沉降位于路面中心左侧 7 m 处。

(2) 路堤顶面最大沉降随左幅道路荷载幅值的增加而增大;随荷载频率的增加,路面中心最大沉降减小,沉降趋于稳定所需的时间非线性减少;行车时间间隔  $\Delta t$  大于 4 s 时,继续增加  $\Delta t$  对路面

最大沉降的影响较小。

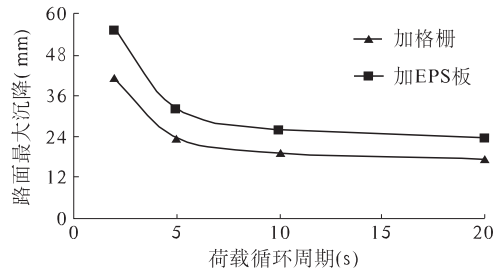


图 12 交通荷载作用时间间隔对路面最大沉降的影响

Fig. 12 Influence of interval between trucks on the maximum settlement of embankment crest

(3) 不同交通荷载工况下,路堤加格栅的变形控制效果均优于加 EPS 板;由于 EPS 为弹性材料,致使路面在交通荷载作用下起伏较为明显,沉降回弹量较大,容易造成路堤土体发生疲劳破坏,对行车安全性和舒适度有一定的影响。

## 参考文献:

- [1] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially - drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty - clay [J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1): 33 - 46.
- [2] 董忠红, 吕彭民. 交通荷载下沥青路面结构动力响应理论研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2007, 28(4): 88 - 91.
- [3] 陶云川. 高路堤涵洞土压力计算方法研究[J]. 山西交通科技, 2012, 215(2): 45 - 47.
- [4] 卢正, 王长柏, 付建军, 等. 交通荷载作用下公路路基工作区深度研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 315 - 352.
- [5] 黄永强. 高速公路路基沉降及路面动力特性研究[D]. 长沙: 中南大学土木工程学院, 2010.
- [6] 卜鑫. 交通荷载下软土路基的动力响应分析[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2006.
- [7] 张军, 申俊敏, 赵建斌. 交通荷载作用下高填方涵洞动力响应研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2013, 34(4): 10 - 14.
- [8] 李广信. 从息壤到土工合成材料[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 144 - 149.
- [9] 马强, 肖衡林, 李丽华, 等. 吹填土地基加筋路堤稳定性的数值模拟[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 47 - 50.
- [10] LIU Hua-bei, WANG Xiang-yu, SONG Er-xiang. Long-term behavior of GRS retaining walls with marginal backfill soils [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(4): 295 - 307.

Study on Dynamic Behavior of Asymmetric Reinforced Embankment under Traffic Load

LIU Shao-wen, ZHANG Jun, SUN Ling

(Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In the loess region, the excessive settlement and differential settlement, slope instability, occur frequently on the embankment, especially on the asymmetric embankment. In this paper, the dynamic behaviors of the asymmetric unreinforced, reinforced with geogrid or EPS embankment were studied through numerical simulation considering the effects of traffic load of coal trucks and regarding the traffic load as semi-sine wave. Parametrical analysis was also conducted considering the amplitude, frequency of traffic load and the interval between trucks. The results showed that the amplitude and frequency of traffic load had great effects on the deformation of embankment, while the interval between trucks was of less effect. The reinforcement effect of geogrid was always better than EPS.

**Key words:** traffic load, asymmetric embankment, dynamic behavior, reinforced embankment

(上接第 40 页)

参考文献:

[1] 郑茂余. 严寒地区窗的保温[J]. 建筑节能,1999 (2):256-258.

[2] 王爱民. 中高层密肋壁板结构密肋复合墙体受力性能及设计方法研究[D]. 西安建筑科技大学土木学院,2006.

[3] 唐强. 秸秆泥坯生态复合墙体抗震性能及抗震设计方法研究[D]. 西安建筑科技大学土木学院,2009.

[4] 陕西省建设厅. DBJ/T 61-43-2006,密肋壁板结构技术规程[S]. 2006.

[5] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997,4.

[6] 王新玲 朱俊涛,品林,等. 碳纤维布加固完好混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2008,29(4):82-85.

Seismic Experimental Study on Two Types of Rural House Structure in North Cold Region

ZHENG Yao<sup>1</sup>, WANG Ai-min<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Department of Structure, Changchun Engineering University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** With two types of wall structure-aerated concrete block and straw grey mud bricks as research object, using the test and theory analysis method, we conducted a deep and meticulous research in two kinds of composite wall with antiseismic performance. We made an analysis of the wall of broken process, breaking mode, bearing capacity, ductility, energy dissipation and so on. We put forward the design principle of composite wall structure and seismic structural requirements. The results provide a scientific basis on the composite wall structure design theory and engineering application.

**Key words:** aerated concrete block wall, straw mud brick wall, seismic performance, damage