

交通荷载下斜坡加筋路堤动力特性研究

罗烈日<sup>1,2</sup>, 郑俊杰<sup>2</sup>

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北武汉 430074)

**摘 要:** 交通荷载作用下斜坡加筋路堤稳定性和变形特性一直是人们普遍关注的问题. 采用数值模拟方法, 在路堤顶面施加均布循环荷载, 分析了交通荷载作用下路堤的动力特性. 最后, 对交通循环荷载的振幅、频率以及行车间隔进行参数分析. 结果表明: 交通荷载作用下, 路堤顶面沉降随着循环次数的增加而增大, 但增大的幅度逐渐变小, 直至趋于稳定; 交通荷载振幅、频率越大, 行车间隔越短, 路堤顶面最终沉降越大.

**关键词:** 加筋路堤; 动力特性; 交通荷载; 稳定性; 变形

**中图分类号:** U416.1      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.04.017

0 引言

高速公路运营过程中, 主要承受交通荷载作用, 使道路产生沉降和不均匀沉降<sup>[1-3]</sup>. 而目前对交通荷载的研究, 主要将其模拟成静荷载, 而交通荷载作为一种动荷载, 其作用形式与作用效果与静荷载显著不同<sup>[4]</sup>. 为真实反映交通荷载作用下路基受力和变形特性, 近年来国内外一些学者开始将交通荷载作为动荷载进行针对性研究. 陈剑等<sup>[5]</sup>采用拟静力法分析动态数值问题, 分别将交通荷载模拟为静荷载、移动恒定荷载和正弦波荷载, 分析了交通荷载作用下路基土动力特性; 刘少文等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法, 研究了未加筋、加格栅和加 EPS 板 3 种工况下非对称路堤动力特性, 刘飞禹等<sup>[7]</sup>通过建立桩承式加筋路堤三维动力模型, 分析了桩间距、路堤高度、桩体模量等重要参数对路面沉降和路基孔隙水压力的影响; 魏星等<sup>[8]</sup>基于试验变形监测结果, 提出了一种描述交通荷载作用下软土残余变形发展经验模型, 并以日本 Saga 机场公路为例, 证明了该公路软土路基沉降简化计算方法的有效性. 但是, 目前针对交通荷载的研究较少且缺乏系统性, 尚未有交通荷载作用下斜坡加筋路堤的研究的报道. 因此, 为揭示交通荷载作用下斜坡加筋路堤动力特性, 笔者采用数值模拟方法, 在路堤顶面施加均布循环荷载,

分析交通荷载作用下路堤变形的动力响应.

1 工程概况与数值模拟

以岢临(岢岚—临县)高速公路 ZK115+693 断面斜坡路堤作为分析对象, 路堤填方高度为 39 m. 采用阶梯形路堤边坡形式, 当  $H < 19$  m 时, 边坡比为 1:2; 当  $H = 19 \sim 31$  m 时, 边坡比为 1:1.75; 当  $H = 31 \sim 39$  m 时, 边坡比为 1:1.5. 距路基顶面 20 m 范围“满铺”10 层土工格栅以增加路堤整体稳定性, 每层格栅间距 2.0 m. 采用 FLAC3D 建立数值分析模型, 模型左边界离路堤坡脚处 40 m, 右边界离路堤路肩处 20 m, 以减弱边界效应, 地基 8 m 深度处为基岩, 物理力学参数见表 1, 数值模型几何尺寸如图 1 所示.

表 1 物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters

项目	$E/\text{MPa}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$v$
填土	25.0	20.0	18.0	1 800	0.33
地基土	8.5	16.5	30.5	1 600	0.33
土工格栅	—	—	—	500	0.33

注: 土工格栅  $J = 1700 \text{ kN/m}$ ,  $t = 0.002 \text{ m}$ .

如图 2 所示, 采用半正弦波模拟路堤顶面交通荷载  $q_u$ ,  $q_u$  均布作用在路堤顶面宽 12 m 的路面范围内, 其频率  $f$  为 0.1 Hz, 振幅  $q_0$  为 20 kPa,  $t$  为荷载作用的时间,  $q_u$  的表达式见 (1) 式. 采用填筑

收稿日期: 2015-01-19; 修订日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51278216)

作者简介: 罗烈日 (1988-), 男, 湖南邵阳人, 工程师, 主要从事加筋土技术研究, E-mail: luo\_lr@163.com.

完毕后的斜坡加筋路堤模型,将分级加载产生的速度场和位移场清零,忽略路面结构并考虑路面结构对交通荷载的均化作用,在路堤顶面施加动力均布荷载  $q_u$ .

$$q_u = q_0 \left| \sin \omega t \right| = 20 \cdot \left| \sin (0.1 \pi \cdot t) \right|. \quad (1)$$

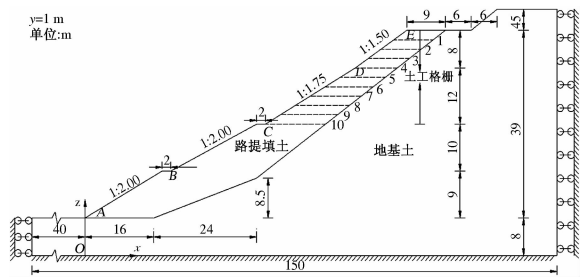


图 1 斜坡路堤数值模型

Fig. 1 Numerical model of a slope embankment

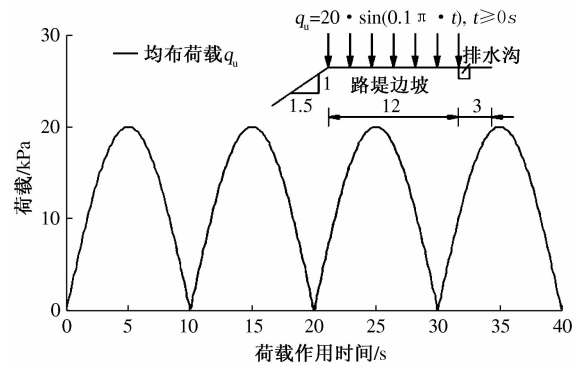


图 2 路堤顶部半正弦波交通荷载示意图

Fig. 2 The half sine traffic load on the embankment surface

图 3 为前 10 个循环周期路堤左侧路肩以及路面中心的沉降随加载时间的变化规律. 从总体上看,在循环荷载  $q_u$  作用下,沉降随加载时间大致呈半正弦波增加且逐渐趋于稳定. 在荷载作用初期 ( $t < T/2$ ,  $T$  为循环荷载周期),沉降急剧增大,且  $t = T/2$  时  $q_u$  最大,左侧路肩及路面中心的沉降分别增大至 1.16 cm 和 2.10 cm;当  $T/2 < t < T$  时,  $q_u$  逐渐减小,沉降发生回弹,第一个荷载周期完成时,左侧路肩及路面中心沉降分别减小至 1.00 cm 和 1.25 cm. 随着循环次数的增加,左侧路肩及路面中心沉降逐渐增大,但沉降增长的幅度逐渐减小.

图 4 为不同循环次数时路堤顶面沉降曲线. 由图可知,路堤顶面沉降呈先增大后减小的抛物线型变化,最大沉降出现在距坡顶 6~7 m 处,且随着循环次数的增加,路堤顶面沉降逐渐增加,沉降曲线沿竖向坐标轴向下平移,但其增加的幅度逐渐减小. 第 1 次循环结束时,路堤顶面最大沉降约为 1.38 cm;第 2 次循环结束后,最大沉降增大

至 1.73 cm,增幅为 0.35 cm;第 8 次循环结束后路面最大沉降较第 6 次循环仅增加了 0.01 cm;当循环次数超过 8 之后,路堤顶面沉降曲线几乎保持不变.

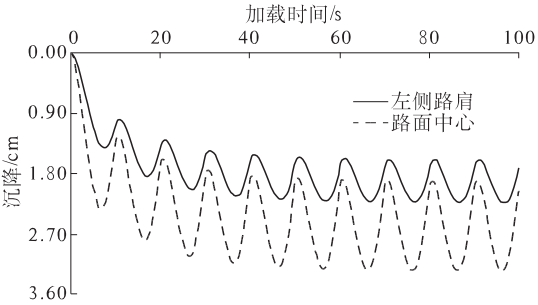


图 3 路堤顶面沉降随时间变化规律

Fig. 3 The variation of settlements of embankment surface with time

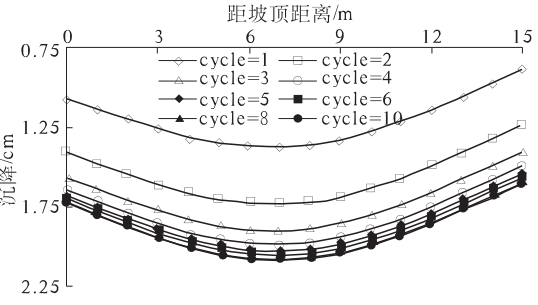


图 4 交通循环荷载对路堤顶面沉降的影响

Fig. 4 The influence of cyclic traffic load on the settlements of embankment surface

综上所述,交通循环荷载作用下,路堤顶面沉降随着荷载循环次数增加非线性增大,且沉降增加的幅度越来越小,当荷载循环次数超过某一定值之后,沉降趋于稳定. 对于本例而言,当半正弦波交通荷载的频率  $f = 0.1$  Hz、振幅  $q_0 = 20$  kPa 时,可认为循环次数达到 8 次时路堤顶面沉降已达到稳定.

2 数值建模分析

2.1 交通循环荷载振幅的影响

改变荷载振幅大小,考虑  $q_0$  分别为 10, 20, 30 kPa 3 种工况下,交通循环荷载对斜坡路堤工作性状的影响,荷载频率  $f$  为 0.1 Hz.

图 5 描述了  $q_0$  对路面中心沉降变化的影响. 由图 5 可知,不同  $q_0$  条件下,荷载作用时间  $t = 8T$  时,路面中心的沉降基本趋于稳定;路面中心的沉降随着的  $q_0$  增加逐渐增大,且  $q_0$  越大,其变化幅度也越大. 当  $q_0$  分别为 10, 20 及 30 kPa 时,  $t = T/2$  时路面中心的沉降分别为 1.04, 2.07 及 3.11 cm,  $t = T$  时路面中心的沉降分别为 0.69, 1.37 及 2.06

cm,路面中心沉降发生回弹的幅度分别为0.35, 0.70 及 1.05 cm,比较第 1 次循环荷载作用下路面中心的沉降变化规律可知,路面沉降及回弹随 $q_0$ 增加大致呈线性增长.

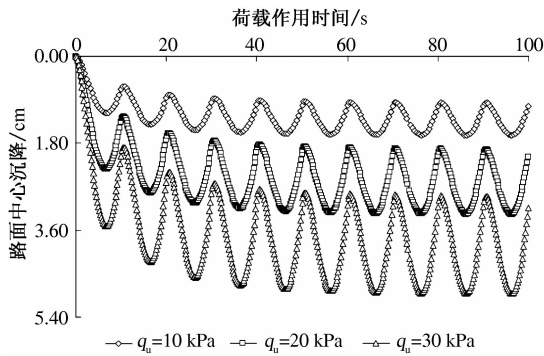


图 5 交通循环荷载振幅对路面中心沉降的影响

Fig.5 The influence of cyclic traffic load amplitude on the settlements of embankment surface center

### 2.2 交通循环荷载频率的影响

改变荷载频率,考虑 $f$ 分别为 0.1,0.2 以及 0.4 Hz 情况下,交通循环荷载对斜坡加筋路堤工作性状的影响,荷载振幅 $q_0$ 为 20 kPa.

图 6 描述了加载时间 $t=100$  s 时,不同 $f$ 条件下,路面中心沉降随加载时间的变化规律.由图可知,随着 $f$ 的增大,荷载周期 $T$ 逐渐减小,交通荷载作用下路面中心最大沉降减小,且发生回弹的幅度降低.当 $f=0.1$  Hz, $T=10$  s 时,循环次数达到 8 次后,路面中心沉降变化基本趋于稳定,达到稳定状态后荷载循环过程中路面沉降的最小值为 2.10 cm,最大值为 3.27 cm,弹性变形为 1.17 cm;当 $f=0.2$ , $T=5$  s 时,交通荷载循环次数达到 16 次时,路面中心沉降变化基本稳定,沉降趋于稳定所需的加载时间仍为 80 s,沉降趋于稳定后路面中心沉降的最小值和最大值分别为 2.33 cm 和 3.11 cm,弹性变形为 0.78 cm;当 $f=0.4$  Hz, $T=2.5$  s 时,交通荷载循环加载 24 次路面中心的沉降变化趋于稳定,达到稳定状态所需的加载时间 $t$ 为 80 s,达到稳定状态后路面中心沉降的最小值为 2.50 cm,最大值为 2.97 cm,弹性变形为 0.49 cm.因此,不同 $f$ 条件下振幅相同、交通循环荷载作用时,路面中心沉降趋于稳定时所需的循环次数随着 $f$ 呈倍数增加,但所需的加载时间 $t$ 基本保持不变,对于本例而言, $t$ 约为 80 s;当 $f$ 由 0.1 Hz 增大到 0.4 Hz 时,路面中心沉降变化达到稳定后,其最大值逐渐减小,最小值逐渐增大,弹性变形由 1.17 cm 减小至 0.49 cm.

图 7 描述了 $t=300$  s 时,交通循环荷载频率 $f$

对路面沉降的影响.由图可知,不同 $f$ 条件下,路堤顶面沉降呈先增大后减小的抛物线型变化,在距坡顶 7 m 处沉降最大,且随着 $f$ 的增加,沉降逐渐变大.当 $f=0.1$  Hz 时,路堤顶面沉降的最大值和最小值分别为 2.10 及 1.62 cm,其变化幅度为 0.48 cm;当 $f=0.2$  Hz 时,路堤顶面最大沉降为 2.33 cm,较前者增加了约 0.23 cm,最小沉降为 1.66 cm,沉降的变化幅度为 0.67 cm;当 $f$ 增大至 0.4 Hz 时,路堤顶面最大沉降增加了约 0.17 cm,最小沉降几乎保持不变,沉降变化的范围由 0.67 cm 增大至 0.84 cm.因此,路堤顶面沉降随着 $f$ 的增大而逐渐变大,且其变化幅度也越来越明显.

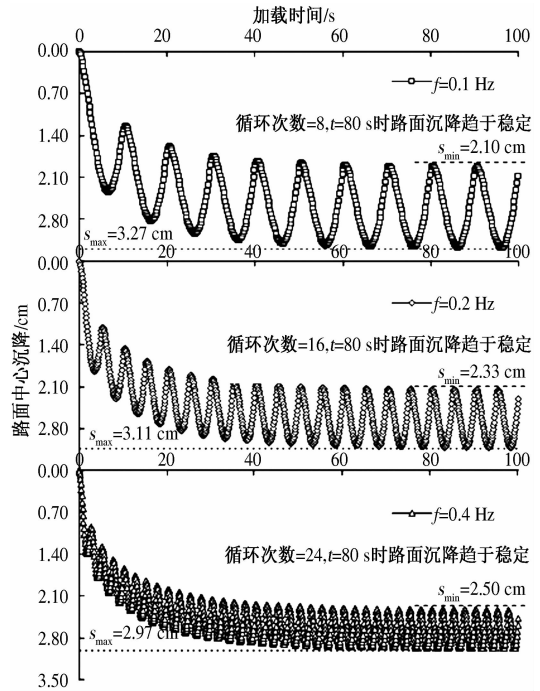


图 6 交通循环荷载频率对路面中心沉降的影响

Fig.6 The influence of cyclic traffic load frequency on the settlements of embankment surface center

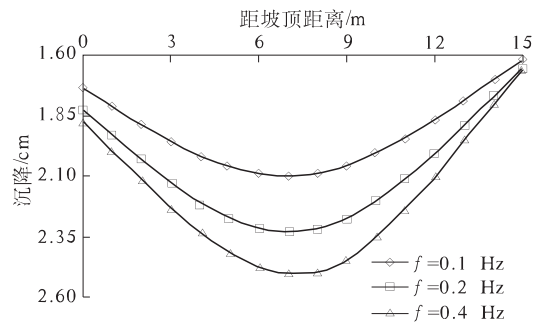


图 7 交通循环荷载频率对路堤顶面沉降的影响

Fig.7 The influence of cyclic traffic load frequency on the settlements of embankment surface

### 2.3 交通循环荷载行车间隔的影响

假设车辆通过路堤横断面的时间为 1 s,车辆

荷载以半正弦波的形式均布作用在宽度为 12 m 的路堤顶面范围内,其振幅为 20 kPa,假设连续两辆车通过同一断面的行车间隔为  $\Delta t$ ,则循环荷载的周期  $T$  为  $(1 + \Delta t)$  s,考虑  $T$  分别 10、20 和 30 s,即  $\Delta t$  分别为 9、19 和 29 s 3 种工况下斜坡路堤的工作性状,交通荷载  $q_u$  随加载时间  $t$  的变化规律如式(2)及图 8 所示.

$$q_u = \begin{cases} 20\sin(\pi t), nT \leq t \leq nT + 1; \\ 0, nT + 1 < t < (n + 1)T, \end{cases} \quad (2)$$

$(n = 0, 1, 2, \cdots).$

图 9 为  $T = 10$  s,  $\Delta t = 9$  s 时,路面中心的沉降随加载时间的变化规律. 由图可知,当  $nT \leq t \leq nT + 1$  ( $n = 0, 1, 2 \cdots$ ) 时,交通荷载呈半正弦波变化,路面中心的沉降随  $t$  先增大后减小,且当  $q_u = 20$  kPa 时,沉降最大;当  $nT + 1 \leq t \leq (n + 1)T$  ( $n = 0, 1, 2 \cdots$ ) 时,  $q_u = 0$  kPa,路面中心沉降继续减小,但减小的幅度逐渐降低,沉降趋于稳定;随着交通荷载循环次数的增加,路面中心沉降逐渐增大,但增加的幅度越来越小,沉降逐渐趋于稳定.

表 2 为不同行车间隔时,沉降与循环次数的关系. 由表 2 可知,  $\Delta t$  越大,路面中心沉降达到稳定状态所需的循环次数越少,且达到稳定状态时的沉降越小. 当  $\Delta t$  分别为 9、19 及 29 s 时,路面中心沉降变化趋于稳定所需的循环次数分别为 9 次、

表 2 不同行车间隔时沉降与循环次数的关系

Tab. 2 The relationship between settlements and cycle number under different running interval									cm
$\Delta t/s$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 7$	$n = 9$	$n = 20$	
9	0.29	0.41	0.47	0.50	0.52	0.53	0.54	0.54	
19	0.12	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	
29	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	

隔下路面中心沉降变化规律. 由图 10 可知,当  $\Delta t = 9$  s 时,路面中心沉降变化达到稳定时其最大值和最小值分别为 0.48 cm 及 0.05 cm,其弹性变形为 0.43 cm;当  $\Delta t = 19$  s 时,路面中心沉降的最大值和最小值分别减小了 0.04 cm,弹性变形仍为 0.43 cm;随着  $\Delta t$  的继续增大,循环荷载作用下路面中心沉降继续减小,但路面中心的弹性变形保持不变. 因此,  $\Delta t$  不同、振幅和频率相等的交通循环荷载引起路面中心的弹性变形约为 0.43 cm,其塑性变形即最终沉降随着  $\Delta t$  的增大而减小.

图 11 为不同  $\Delta t$  条件下,交通循环荷载作用 20 个周期之后路堤顶面的沉降变化曲线. 由图 11 可知,随着  $\Delta t$  的增大,路面沉降逐渐减小,且其变化越来越均匀. 当  $\Delta t = 9$  s 时,路面沉降随着距左

4 次及 2 次. 图 10 为第 20 次循环时不同行车间

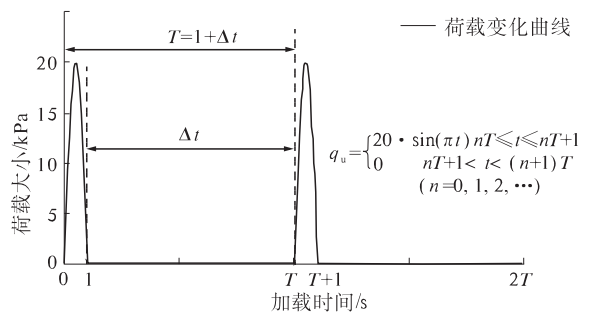


图 8 含行车间隔的交通循环荷载示意图  
Fig. 8 The cyclic traffic load including running interval on the embankment surface

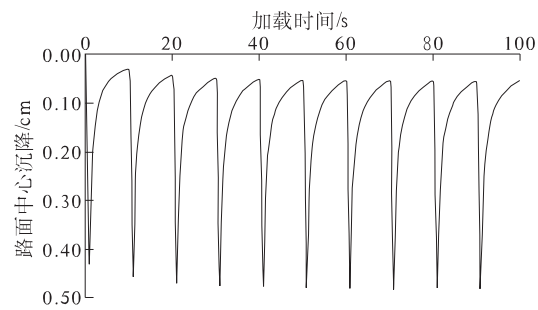


图 9 行车间隔为 9 s 时路面中心沉降的变化规律  
Fig. 9 The variation of settlements of embankment surface center with time while the running interval equals 9 seconds

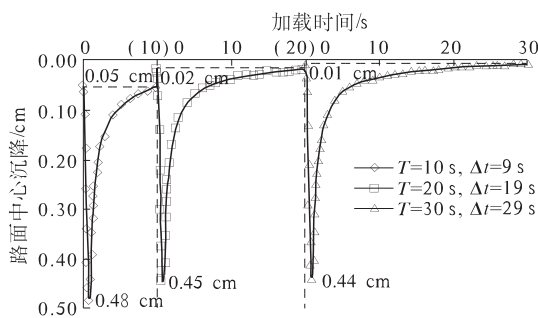


图 10 第 20 次循环时不同行车间隔下路面中心沉降变化规律  
Fig. 10 The variation of settlements of embankment surface center under different running interval while cycle number is 20

侧路肩距离的增加呈先增大后减小变化,其最大值和最小值分别为 0.54 mm 和 0.50 mm,其变化



幅度为 0.04 mm, 而  $\Delta t$  增大到 29 s 时, 路面沉降基本保持在 0.07 mm.

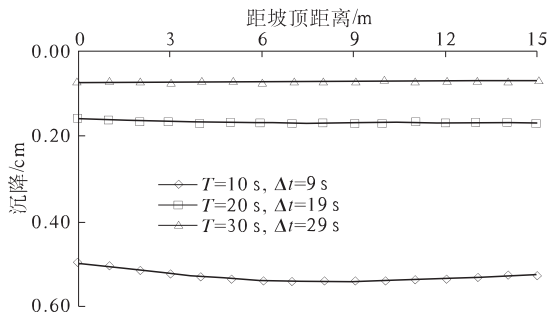


图 11 交通循环荷载行车间隔对路堤顶面沉降的影响

Fig. 11 The influence of cyclic traffic load running interval on the settlements of embankment surface

### 3 结论

采用有限差分软件 FLAC3D, 建立了斜坡加筋路堤动力模型, 在路堤顶面 12 m 宽的范围内施加动力均布荷载, 比较了荷载大小、荷载振幅和频率以及行车间隔对路面工作性状的影响, 分析认为:

(1) 半正弦波交通循环荷载作用下, 路堤顶面沉降及水平位移变化较均匀。随着循环次数的增加, 路堤顶面沉降逐渐变大, 直至趋于稳定, 且达到稳定状态所需的加载时间基本不变。

(2) 路堤变形稳定后, 交通循环荷载振幅及频率越大, 路堤顶面沉降变化越明显。

(3) 考虑动力荷载行车间隔时, 交通循环荷载

引起斜坡加筋路堤的沉降很小。

### 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] 刘飞禹, 蔡袁强, 徐长节, 等. 移动荷载作用下加筋道路系统的动力响应[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(1): 57-64.
- [3] 李进军, 黄茂松, 王育德. 交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 1-5.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 刘少文, 张军, 孙玲. 交通荷载下非对称加筋路堤动力特性研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(2): 41-45.
- [7] 刘飞禹, 张乐, 余炜, 等. 交通荷载作用下桩承式加筋路堤性能分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S2): 50-54.
- [8] 魏星, 黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3342-3346.

## Study on Dynamic Characteristics of Slantwise Geosynthetic Reinforced Embankment under Traffic Load

LUO Lie-ri<sup>1,2</sup>, ZHENG Jun-jie<sup>2</sup>

(1. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute CO., LTD., Beijing 100101, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The deformation characteristics and overall stability of high embankment under traffic load have been widely studied in recent years. Based on numerical simulation method, the response of embankment under dynamic uniform loads acting on the embankment surface is studied. Finally, the impacts of traffic loads' amplitude, frequency and running interval on the embankment response are analyzed. According to the results, the settlements of embankment surface under dynamic traffic loads grow with the cycle index, but the increase percentage of deformation diminishes gradually to a stable value. The maximum settlement of embankment surface increases with the increment of traffic load's amplitude, frequency and the decrement of running interval.

**Key words:** reinforced embankment; dynamic characteristics; traffic load; stability; deformation