

# 路堤高度和加筋对软土地基累积塑性变形的影响

王仕传<sup>1,2</sup>, 凌建明<sup>1</sup>, 黄琴龙<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 安徽建筑工业学院 土木工程系, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 运用有限单元法对交通荷载作用下软土地基进行隐式动力分析, 基于累积塑性变形的计算和影响因素分析, 研究路堤高度对交通荷载引起的软土地基累积塑性变形的影响, 在此基础上, 从地基中动偏应力分布的角度, 揭示了土工格栅加筋对于减小交通荷载引起的软土地基累积塑性变形的意义和机理. 分析结果表明: 当路堤高度 1 m 左右时, 在交通荷载作用下, 地基中会产生显著的累积塑性变形; 随着路堤高度的增加, 地基中由交通荷载引起的累积塑性变形迅速减小. 对于受交通荷载影响显著的软土地基, 土工格栅加筋改善地基表面的压应力分布, 减小传递到地基表面的剪应力, 加筋后地基土累积塑性变形明显减小, 主要是由于加筋减小了地基土的上部由交通荷载引起的动偏应力.

**关键词:** 道路工程; 累积塑性变形; 数值分析; 软土地基; 加筋; 路堤高度

中图分类号: U 416.01

文献标识码: A

reinforcement could decrease cumulative plastic deformation of soil foundation. Analysis result shows that the cumulative plastic deformation of soil foundation with about 1 m thickness embankment develops rapidly under traffic loading. The cumulative plastic deformation decreases distinctly with the increasing of the thickness of embankment. As for soft soil foundation which is influenced significantly by traffic loading, geogrid reinforcement can improve vertical stress distribution, and decrease shear stress on the surface of soil foundation. The main reason of the decrease of cumulative plastic deformation of reinforced soil foundation is that reinforcement can diminish deviator stress on the upper part of it induced by traffic loading.

**Key words:** pavement engineering; cumulative plastic deformation; numerical analysis; soft soil foundation; reinforcement; embankment thickness

## Influence of Embankment Thickness and Reinforcement on Cumulative Plastic Deformation of Soft Soil Foundation

WANG Shichuan<sup>1,2</sup>, LING Jianming<sup>1</sup>, HUANG Qinlong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Civil Engineering, Anhui Institute of Architecture & Industry, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Soft soil foundation under traffic loading was modelled by implicit dynamic finite element method (FEM). Based on numerical model, calculation and influential factor analysis of cumulative plastic deformation, a study was made of the influence of the thickness of embankment on cumulative plastic deformation induced by traffic loading. Then, from the standpoint of distribution of dynamic deviator stress of soil foundation underneath the center of loading area, an investigation was made into the meaning and mechanism that

软土地基上修筑的公路, 除了路堤、路面结构自重引起地基的固结变形外, 交通荷载反复作用下, 地基会产生显著的累积塑性变形<sup>[1-2]</sup>. 为了预测交通荷载作用下地基中的累积塑性变形, 各国学者进行了大量的试验研究和理论分析. 凌建明等对上海市外环线某路口交通开放后 2 年的实测表明, 道路路面残余变形达到 9~10 cm<sup>[3]</sup>. Miura 等通过实测发现 Saga 机场道路由于 2 年的交通荷载作用产生的附加沉降达到了 15 cm 左右<sup>[4]</sup>. 黄茂松等通过不同静偏应力和动应力组合情况下的上海地区典型饱和软黏土不排水循环三轴试验, 引入相对偏应力水平参数, 分析了累积塑性变形特征<sup>[5]</sup>. Monismith 等的试验结果指出: 动偏应力是累积塑性变形发展的主要应力影响因素, 动偏应力的增加将会导致塑性应变的增加<sup>[6]</sup>.

收稿日期: 2009-12-03

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2004 318 822 06); 高等学校优秀青年人才基金(2009SQZR106); 安徽建筑工业学院博士启动基金

第一作者: 王仕传(1976—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为加筋土路基工程. E-mail: wangsc1230@163.com

通讯作者: 凌建明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程. E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

Li 和 Selig 在室内试验研究的基础上,对 Monismith 提出的指数模型进行了改进,提出了修正的累积塑性应变计算模型:先计算累积塑性应变,然后利用分层总和法计算总的累积塑性变形<sup>[7]</sup>.该模型除了反映循环加载次数、土的物理状态和土的类型的影响外,还考虑了动偏应力的影响.此外,Chai 提出的累积塑性应变计算模型,也反映了动偏应力对路基累积塑性变形的影响<sup>[1]</sup>.可见,动偏应力对于循环荷载作用下地基中的累积塑性变形的发展具有重要影响.

土工格栅用于软土地基加筋是一种简单常用的地基处理方法,一般将土工格栅设置在路堤底部.加筋能够较好地均化软土地基的应力、约束地基的侧向变形,减小由于路堤自重和路面结构增重引起的不均匀沉降,以及提高路基的整体稳定性<sup>[8]</sup>.

为了分析土工格栅加筋对交通荷载引起的软土地基累积塑性变形的影响,本文应用通用有限元软件 ABAQUS 对交通荷载作用下软土地基上的沥青混凝土路面进行隐式动力分析,基于累积塑性变形经验公式,评价路堤高度对交通荷载引起的软土地基累积塑性变形的影响;在此基础上,从地基中动偏应力分布的角度,研究土工格栅加筋对于减小交通荷载引起的软土地基累积塑性变形的意义和机理.

## 1 有限元计算模型

### 1.1 几何模型

路面结构组成为:16 cm 厚沥青混凝土面层,56 cm 厚半刚性基层(基层+底基层).数值计算分两种情况:加筋和未加筋,采用轴对称有限元模型计算.加筋时,筋材位于路堤和地基之间.图 1 为加筋几何模型示意图.

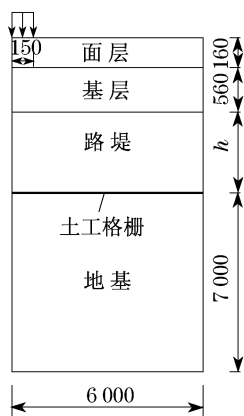


图 1 加筋几何模型(单位:mm)

Fig.1 Reinforced geometrical model(unit:mm)

为了反映交通荷载作用下路面结构的应力扩散作用,模型水平方向尺寸取 6 m,地基部分竖向尺寸为 7 m,路堤高度  $h$  根据计算取不同值.计算轴载取标准轴载 100 kN,接地压力取胎压 0.7 MPa,车轮荷载简化为单圆荷载,则单圆半径为 0.15 m.有限元模型中,面层、基层、路基采用轴对称四节点减缩积分单元 CAX4R;加筋时,筋材取轴对称两节点一次膜单元 MAX1.模型左边界为对称轴,右边界施加水平约束,下边界施加铰支约束.

### 1.2 动力有限元理论和材料模型

由弹性动力学理论,交通荷载作用下动力有限元方程为

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{u}\} = \mathbf{Q}(t) \quad (1)$$

式中: $\ddot{\mathbf{u}}$ ,  $\dot{\mathbf{u}}$  和  $\mathbf{u}$  分别是系统的节点加速度、节点速度和节点位移向量; $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\mathbf{Q}(t)$  是系统的节点荷载向量.ABAQUS 隐式动力有限元模块利用直接积分法,Newmark- $\beta$  法,对上述动力有限元方程求解.

数值计算时,对于路面结构中的阻尼,由于其机理很复杂,根据 Rayleigh 提出的线性阻尼假设来确定,即阻尼矩阵  $\mathbf{C}$  是质量矩阵  $\mathbf{M}$  和刚度矩阵  $\mathbf{K}$  的线性组合,如

$$[\mathbf{C}] = \alpha[\mathbf{M}] + \beta[\mathbf{K}] \quad (2)$$

式中: $\alpha$  和  $\beta$  为系数,采用简化的取值形式  $\alpha = \lambda_1 \omega_1$ ,  $\beta = \lambda_1 / \omega_1$ .  $\omega_1$  为计算体系的基本固有频率, $\lambda_1$  为该频率时的阻尼比.散体材料(包括粉细砂和含细粒土砾) $\omega_1$  为  $8.2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,路面材料(包括沥青混凝土和水泥稳定碎石) $\omega_1$  为  $18.6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,材料阻尼比  $\lambda_1$  皆取为 5%<sup>[9]</sup>.

面层、基层、路基、筋材均按连续、均质、各向同性线弹性材料考虑.材料参数见表 1.

表 1 材料参数

结构层	面层	基层	路堤	地基
回弹模量/MPa	1 200	1 400	40	6
泊松比	0.30	0.30	0.35	0.40
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 400	2 100	1 900	1 900

土工格栅为双向刚塑复合型格栅,经拉伸试验确定的格栅单位宽度模量  $K = 1\,200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,伸长率为 4.1%.

数值计算时,层与层之间均设置 TIE 连接,不考虑剪切滑动,接触面各节点具有相同的自由度.

### 1.3 交通荷载加载模式

行驶的汽车对路面施加的荷载有瞬时性.大量

试验研究表明,行车荷载作用于地面的荷载波形无论是正弦波形或三角形波形,其对路面结构变形影响不大<sup>[10]</sup>.

湿软路基顶面压应力实测分析得出,当标准轴载作用于典型沥青混凝土路面结构时,路基顶面压应力分布近似三角形<sup>[3]</sup>.行车荷载作用下,铺面上任一点所经受到的轮载作用时间一般只有 0.01~0.10 s.本文进行动力有限元计算时,行车荷载波形采用三角形波形,加载时程曲线见图 2,  $P_1$  为峰值荷载,  $T$  为加载持续时间,  $T$  取 0.05 s.

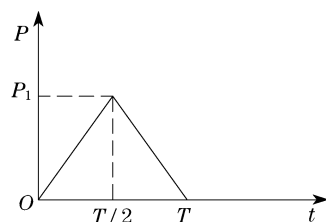


图2 加载时程曲线

Fig.2 Time history curve of traffic loading

## 2 路堤高度对未加筋地基累积塑性变形影响

### 2.1 地基累积塑性变形经验模型及影响因素

采用 Li 和 Selig 提出的累积塑性变形计算模型计算路基中的残余变形<sup>[7]</sup>.式(3)为 Li 和 Selig 提出的累积塑性应变计算公式,即

$$\varepsilon_p = a \left( \frac{q_d}{q_t} \right)^m N^b \quad (3)$$

式中:  $q_d$  为行车荷载作用下的动偏应力:  $q_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  为最大最小主应力,通过 ABAQUS 隐式动力有限元程序计算;  $q_t = 2\tau_t$ , 为地基静力破坏偏应力,  $\tau_t$  为地基不排水抗剪强度;  $a$ ,  $m$  和  $b$  为参数,取决于土的类型和物理状态<sup>[7]</sup>,取值见表 2.

表2 Li 和 Selig 建议参数<sup>[7]</sup>

Tab.2 Parameters proposed by Li and Selig

土类	参数取值		
	$a$	$m$	$b$
CH(高液限黏土)	1.20	2.4	0.18
CL(低液限黏土)	1.10	2.0	0.16
MH(高液限粉土)	0.84	2.0	0.13
ML(低液限粉土)	0.64	1.7	0.10

由式(3)先计算累积塑性应变,然后利用分层总和法计算总的累积塑性变形.

累积塑性变形计算模型表明,在地基土的类型、物理状态和重复加载次数一定的情况下,地基土的

累积塑性变形主要取决于交通荷载作用下地基中的动偏应力大小.改善交通荷载作用下地基中的应力水平,减小动偏应力大小会显著减小地基土的累积塑性变形.

### 2.2 不同路堤高度地基中动偏应力分布

图 3 为交通荷载作用下,不同路堤高度时,地基中动偏应力沿加载中心线的分布.路堤高度一定时,地基中动偏应力随深度逐渐衰减;随着路堤高度的增加,地基中相同深度处动偏应力迅速减小,特别是地基的上部动偏应力减小最为显著.路堤高度由 1 m 增加到 2 m 时地基顶面的动偏应力值减小近一半.主要是由于随着路堤高度的增加,交通荷载引起的附加应力沿深度衰减程度更高,另一方面,路堤高度越高,路堤的应力扩散作用越强.地基动偏应力沿竖向的分布以及累积塑性变形计算模型表明,地基的上部是交通荷载引起的累积塑性变形的主要区域.

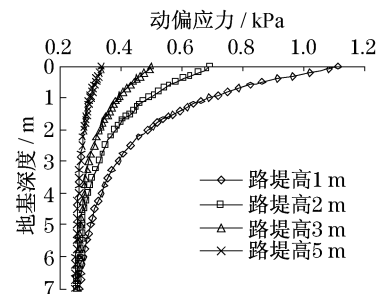


图3 沿加载中心线地基动偏应力

Fig.3 Dynamic deviator stress of foundation underneath the center of loading area

图 4 为路堤高度不同时,交通荷载引起地基顶面压应力分布.

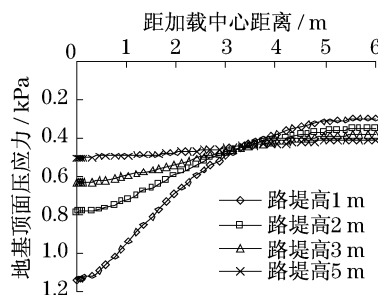


图4 地基顶面压应力

Fig.4 Vertical stress on the top of soil foundation

路堤高度 1 m 时,地基顶面压应力分布明显不均匀,应力集中程度最高;远离加载中心,地基顶面的压应力分布迅速衰减.路堤高度 5 m 时,地基顶面压应力近似均匀分布.地基顶面压应力越不均匀,加载中心位置地基的动偏应力越大,而累积塑性变形

计算模型影响因素分析表明,交通荷载引起的动偏应力是地基中产生累积塑性变形的最主要应力影响因素。

由于有限元计算时水平方向计算区域选取的限制,地基顶面压应力和地基沿加载中心线动偏应力均偏大.水平方向区域选取越大,地基顶面压应力和地基沿加载中心线动偏应力越准确。

### 2.3 地基累积塑性变形计算

图 5 为不同路堤高度时,交通荷载作用下地基中产生的累积塑性变形和交通荷载重复加载次数间的关系曲线.其中,地基土为低液限黏土,不排水抗剪强度为 13.5 kPa.图中曲线关系表明,重复加载次数一定,路堤高度 1 m 时的地基累积塑性变形比路堤高度 2 m 时的地基累积塑性变形大近一倍.路堤高度达到 2 m 以后,随着路堤高度的增加,地基累积塑性变形逐渐减小,但不如路堤高度由 1 m 增大到 2 m 时减小得显著.路堤高度分别为 1、2、3 和 5 m 时,重复加载次数 400 万次由交通荷载引起的地基累积塑性变形分别为 18.43 mm、10.03 mm、6.93 mm 和 4.82 mm.可见,对于软土地区沥青混凝土路面,交通荷载作用下,路堤高度显著影响地基累积塑性变形的发展;当路堤高度 1 m 左右时,必须考虑由交通荷载引起的地基累积塑性变形对路面结构使用性能的影响。

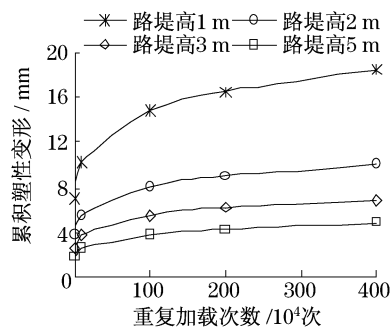


图 5 不同路堤高度地基累积塑性变形

Fig.5 Cumulative plastic deformation of soil foundation with different depth of embankment

## 3 加筋后地基的累积塑性变形

软土地基中由交通荷载产生的累积塑性变形取决于交通荷载作用下地基中附加应力大小.上述路堤高度对地基累积塑性变形的影响分析表明,当路堤高度降低后,地基中动偏应力明显增大,地基表面有明显的应力集中现象,交通荷载的反复作用会引

起显著的累积塑性变形。

土工格栅刚度大、强度高.在国外的粒料基层沥青混凝土路面中,广泛应用于路基加筋(筋材置于粒料基层和路基的界面),减小行车荷载作用下地基中产生的累积塑性变形<sup>[11-12]</sup>.在软土地基加筋中(筋材置于路堤和地基的界面),加筋更多是用于减小路堤自重作用下地基中产生的不均匀沉降。

以 1 m 高路堤为例,通过加筋前后地基应力响应分析和变形响应分析,评价土工格栅用于上述软土地基加筋对于减小交通荷载引起的累积塑性变形的意义和机理。

### 3.1 加筋后地基应力响应分析

图 6 为交通荷载作用下加筋和未加筋时地基表面的最大压应力分布.加筋后,在交通荷载作用下,位于轮载作用中心线位置处,地基表面的压应力减小,地基顶面压应力分布更加平缓,这表明加筋减小了加载中心线位置处地基土的大主应力  $\sigma_1$ 。

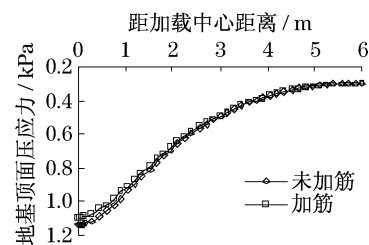


图 6 加筋和未加筋地基顶面压应力

Fig.6 Vertical stress on the top of reinforced and unreinforced soil foundation

图 7 为加筋和未加筋时,交通荷载作用下,地基顶面受到的剪应力分布.交通荷载作用下,路堤和地基间有相对剪切运动,没有加筋时,路堤向地基顶面传递向外的剪应力,见图 7 中未加筋时地基顶面剪应力分布;加筋以后,土工格栅和路堤底面散粒体间形成摩擦嵌锁作用,土工格栅刚度大、强度高,车辆荷载作用下,筋材通过筋土界面的剪阻力对路堤底面散粒体施加侧压力,加筋后路堤底面受到的剪阻力显著提高,而筋材传递到地基顶面的剪阻力明显减小,见图 7 中加筋时地基顶面剪应力分布。

由于筋材和路堤底面散粒体间的摩擦嵌锁作用,加筋抑制路堤底面散粒体向两侧扩展,增加侧向约束力,相应增加路堤底面散粒体的平均应力  $\sigma_m$ ,即

$$\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 \quad (4)$$

而散粒体材料回弹模量  $E_R$  和平均应力  $\sigma_m$  具有正相关关系.这说明,交通荷载作用下,筋材对路堤

底面散粒体的侧向约束作用,相应提高路堤底面散粒体回弹模量,增加其刚度.而刚度提高,路堤对下覆地基土起到进一步的应力扩散作用,加筋后,地基顶面的压应力更加平缓,图6中未加筋和加筋时的地基顶面压应力分布也说明了这点.

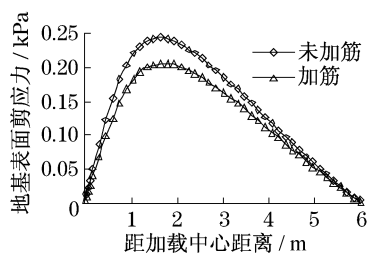


图7 加筋和未加筋地基顶面剪应力

Fig.7 Shear stress on the top of reinforced and unreinforced soil foundation

和未加筋时地基顶面受到的剪应力相比,加筋后,地基顶面的剪应力明显减小,见图7.轮载作用中心线为对称轴,位于中心线位置处地基土受到的侧压力均为主应力.无论是加筋还是未加筋,地基顶面受到的剪应力相对于轮载作用中心线总是向外的,剪应力越大,加载中心线处,路基土的侧压力越小.加筋后,减小路堤底面散粒体传递到地基顶面的剪应力,相当于增大地基的侧压力 $\sigma_3$ .即,加筋后,位于加载中心线处地基土大主应力 $\sigma_1$ 减小、小主应力 $\sigma_3$ 增大,偏应力 $q_d = \sigma_1 - \sigma_3$ 因此而减小,但地基顶面受到的剪阻力对地基土侧压力的影响主要表现在浅层.

数值计算结果同时表明,加筋对地基顶面竖向压应力分布的影响不是很明显,对侧压力影响更大,但范围有限.

图8为加筋和未加筋情况时,地基中由交通荷载引起的动偏应力沿竖向加载中心线的分布.和未加筋地基中相同位置动偏应力相比,加筋后,地基上部80 cm范围内动偏应力明显减小,最大减小率达11.1%.随着地基深度的增加,加筋对动偏应力的影响迅速减小.

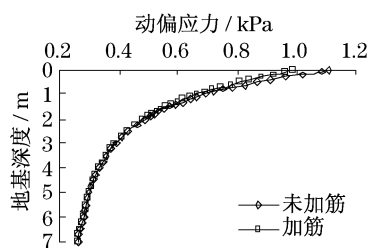


图8 加筋和未加筋地基动偏应力

Fig.8 Dynamic deviator stress of reinforced and unreinforced soil foundation

### 3.2 加筋后地基变形响应分析

和地基累积塑性变形计算方法一样,先由ABAQUS进行隐式动力有限元分析,获取加筋和未加筋时动偏应力沿地基加载中心线的分布值,然后由累积塑性变形经验公式计算加筋前后由交通荷载引起的地基累积塑性变形.图9为由累积塑性变形模型计算的交通荷载引起的地基累积塑性变形和重复加载次数关系曲线:先计算加筋和未加筋时不同加载次数地基的累积塑性应变,然后利用分层总和法计算累积塑性变形.分层计算过程表明,加筋主要影响地基上部的累积塑性变形,这和加筋只影响地基上部的动偏应力分布是一致的.本算例地基加筋后累积塑性变形减小达9%.

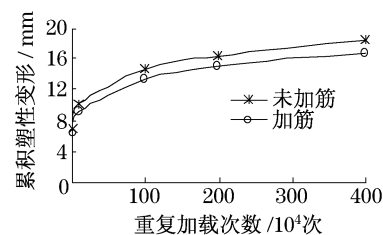


图9 加筋和未加筋地基累积塑性变形

Fig.9 Cumulative plastic deformation of reinforced and unreinforced soil foundation

表3为交通荷载作用下,和图9中关系曲线相对应的不同加载次数时地基累积塑性变形值.

表3 地基累积塑性变形

Tab.3 Cumulative plastic deformation

加载次数/ 10 <sup>4</sup> 次	累积塑性变形		
	未加筋/mm	加筋/mm	变化率/%
1	7.07	6.43	9.02
10	10.21	9.29	9.02
100	14.76	13.43	9.02
200	16.49	15.00	9.02
400	18.43	16.76	9.02

表3中数值和图9中关系曲线均表明,路基的累积塑性变形主要发生在加载初期,加载初期累积塑性变形快速发展,然后慢慢趋于稳定,当然,这是在荷载低于某一水平时,才会趋于稳定,即满足安定性要求.

## 4 结论

(1) 路堤高度显著影响地基中由交通荷载引起的累积塑性变形.对于较低路堤(路堤高度1 m左右),地基由行车荷载引起的累积塑性变形很显著.

随着路堤高度的增加,路面结构和路堤对地基的应力扩散作用增强,地基中的累积塑性变形迅速减小.算例分析表明,路堤高度 1 m 增加到 2 m 时,地基中的累积塑性变形减小近一半.

(2) 对于受交通荷载影响显著的软土地基,应用有限单元法对交通荷载作用下的加筋土地基进行隐式动力分析:土工格栅加筋改善地基表面的压应力分布,减小传递到地基表面的剪应力,加筋后地基土的上部 80 cm 范围内动偏应力大大减小,而动偏应力是引起路基土累积塑性变形的主要应力因素.

(3) 基于地基土累积塑性变形模型的分析,揭示了加筋前后软土地基累积塑性变形的计算,揭示了加筋减小地基累积塑性变形的机理是加筋减小了地基土上部由交通荷载引起的动偏应力.对于 1 m 高的路堤,计算结果表明,土工格栅加筋后地基的累积塑性变形减小达 9%.

#### 参考文献:

- [1] Chai J C, Miura N. Traffic load induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2002, 128(11): 907.
- [2] 边学成, 曾二贤, 陈云敏. 列车交通荷载作用下软土地基的长期沉降[J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 2990.  
BIAN Xuecheng, ZENG Erxian, CHEN Yunmin. Long-term settlements of soil ground induced by train traffic loadings[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 2990.
- [3] 凌建明, 王伟. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. *同济大学学报: 自然版*, 2002, 11(30): 1315.  
LING Jianming, WANG Wei. On residual deformation of saturated clay subgrade under vehicle load[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2002, 11 (30): 1315.
- [4] Miura N, Fujikawa K, Sakai A, et al. Field measurement of settlement in saga airport highway subjected to traffic load[J]. *Tsuchi-to-Kiso*, 1995, 43 (6): 49.
- [5] 黄茂松, 李进军. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(7): 891.  
HUANG Maosong, LI Jinjun. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests [J]. *China Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7): 891.
- [6] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subsoil due to repeated loading [C/CD]// *Transportation Research Record*, Washington D C: [ s. n. ], 1975.
- [7] Li D, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(12): 1006.
- [8] 程培峰, 慕万奎, 姜海洋. 土工格栅加固浅层软土地基的有限元分析[J]. *中国公路学报*, 2008, 21(2): 6.  
CHENG Peifeng, MU Wankui, JIANG Haiyang. Finite element analysis of shallow soft soil foundation reinforced by geogrids [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(2): 6.
- [9] 邱延峻, 阳恩慧, 向可明. 斜坡路基沥青路面结构动力响应分析[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(2): 6.  
QIU Yanjun, YANG Enhui, XIANG Keming. Dynamic analysis of asphalt pavement structures over slope subgrade[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26 (2): 6.
- [10] Terrel R L, Awad I S, Foss L R. ASTM STP 561 Fatigue and dynamic testing of bituminous materials [S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1974.
- [11] Berg R R, Christopher B R, Perkins S W. Geosynthetic reinforcement of the aggregate base course of flexible pavement structures-GMA White Paper II [R]. Roseville: Geosynthetic Material Association, 2000.
- [12] Moghaddas-Nadjad F, Small J C. Resilient and permanent characteristics of reinforced granular materials by repeated load triaxial tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2003, 26(2): 1.