

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201910031

循环荷载作用下加筋土路基动力响应研究*

高海军¹, 董丁明¹, 赵琪¹, 叶万军^{2,3}, 景宏君^{2,3}, 董琪⁴

(1. 陕西省延安公路管理局, 陕西 延安 716000; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;
3. 西安科技大学道路工程研究中心, 陕西 西安 710054; 4. 陕西科技控股集团有限责任公司, 陕西 西安 710003)

摘要:为明确模块面板式加筋土路基在顶面循环荷载作用下的受力变形规律与机制,以延安市某加筋土路基工程为背景,开展动三轴试验,关注不同荷载强度下试样动应力、动应变等多项指标的演化趋势,同时搭建加筋土路基数值模型并完成计算,明确路基水平沉降与面板侧向位移的潜在规律,进而探讨循环荷载作用下加筋土路基工程的动力响应机制。认知如下:在循环荷载的参与下,累积轴向塑性应变随加载次数的增加呈增长趋势,即先快速增大,随后趋缓,最后稳定;塑性应变曲线形态不一,呈“宽胖型”与“陡峻型”并存的态势;Monismith模型和改进Monismith模型均可较好表达累积轴向塑性应变与循环次数的内在联系,但改进Monismith模型更为理想,动应力幅值越大,试样变形稳定所需加载次数越多;路基沉降和面板水平变形随着荷载强度的增加而增大,但所据位置较为稳定,其中峰值路基沉降始终处于荷载外侧处,峰值水平变形则位于0.36~0.43 h区间。

关键词: 道路工程; 土工格栅; 加筋土路基; 力学行为; 动三轴试验; ABAQUS

中图分类号: TU411.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0208-08

Study on Dynamic Response of Reinforced Soil Subgrade under Cyclic Loading

GAO Haijun¹, DONG Dingming¹, ZHAO Qi¹, YE Wanjun^{2,3}, JING Hongjun^{2,3}, DONG Qi⁴

(1. Yan'an Highway Administration Bureau of Shaanxi, Yan'an 716000, China;

2. College of Civil and Architectural Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. Road Engineering Research Center of Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

4. Shaanxi Science & Technology Holding Group Co., Ltd., Xi'an 710003, China)

Abstract: To clarify the law and mechanism of the deformation of the modular panel reinforced soil subgrade under the top surface cyclic load, a dynamic triaxial test was carried out with a reinforced soil subgrade project in Yan'an as the background. The evolution trend of various indicators such as stress, dynamic strain, is investigated. At the same time, a numerical model of reinforced soil roadbed is set up and calculations are performed. The potential laws of horizontal settlement of the roadbed and lateral displacement of the slab are clarified. Response mechanism. The cognition is as follows: With the participation of cyclic loads, the cumulative axial plastic strain increases with the increase of the number of loadings, that is, it increases rapidly first, then slows down, and finally stabilizes. The shape of the plastic strain curve is different, showing the tendency of "broad fat" and "steep" coexisting; both

* 收稿日期:2019-10-22;修回日期:2020-03-23

基金项目:陕西省延安公路管理局项目(2017-16k)、国家自然科学基金项目(41672305)资助

作者简介:高海军(1976—),男,高级工程师。主要从事公路工程科研及管理工作。E-mail:318609187@qq.com

the model and the improved model can better express the internal relationship between the cumulative axial plastic strain and the number of cycles, but the improved model is more ideal. The larger the magnitude of the dynamic stress, the more times the sample needs to be stabilized for deformation. The settlement of the subgrade and the horizontal deformation of the slab increase with the increase of the load intensity, but the location is more stable. The peak subgrade settlement is always outside the load. The peak horizontal deformation is in the range of 0.36h ~ 0.43h. The study provides a useful reference for scientific operation and preventive maintenance of reinforced earth roadbed engineering in mountainous areas.

Keywords: road engineering; geogrid; reinforced soil subgrade; mechanical behavior; dynamic triaxial test; ABAQUS

引言

黄土地区公路加筋土路基运营多年后,在长期上部交通荷载及周围环境综合作用下工程效果衰减显著,出现面板掉落、路基塌陷、格栅断裂等工程病害。因此,开展长期循环荷载作用下加筋土路基工程破坏失效的潜在规律及机制研究具有重要意义。

多年来,加筋技术的研究一直是国内外工程建设领域的热点。加筋土强度作用机制方面,主要手段集中为理论计算^[1]、试验研究^[2]、数值计算^[3]。李婷等^[4]基于胡克定律建立了加筋结构体因筋材伸长而产生的侧向位移解析式,再引入虚功原理建立了加筋区受外荷载影响而产生的侧向位移解析式。徐超等^[5]对加筋土界面强度研究的原理、侧重点、手段等多方面的进展进行了阶段性总结。J. Li等^[6]开展常规三轴和界面拉拔试验,揭示了纤维加筋土的剪切强度也受未加筋处理部分土体的峰值强度或残余强度影响;杨敏等^[7]、苏立海等^[8]通过界面直剪拉拔试验及大尺寸三轴蠕变试验,系统研究了土体压实度、围压、布筋方式对加筋结构体蠕变特性的潜在影响。刘宽等^[9-10]模拟冻融、干湿等极端耦合环境下,深入探讨黄土力学强度劣化机制及土中水分运移等问题。

综上所述,目前对各类土工合成材料组成的加筋结构体界面强度研究日趋完善,但大多集中于对加筋土路基或挡墙整体强度影响规律的研究,并未着重考虑路面交通荷载对加筋结构体力学行为产生的影响,其次对于公路加筋路基结构,长期的循环交通荷载是影响加筋土路基工程性能的关键因素之一,尤其是荷载强度的影响,早有研究^[11]发现,路基受动荷载的影响远大于相同大小的静荷载影响。

以G210国道延安段一处加筋土路基为工程背景,实地取样制备加筋试样,首先开展室内动三轴试验,全面研究加筋试样的动应力动应变响应特征,而后借助ABAQUS软件建模分析不同动载强度下路基及面板内在应力及变形的基本规律,最后探讨其潜在的动力学响应机制。研究成果可为黄土地区加筋土路基工程预防性养护工作提供理论参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验用土取自延安市宝塔区镰刀湾加筋土路基某一路桥过渡段的基础旁,该处填土各项基本物理力学参数见表1,颗粒级配曲线如图1所示。通过标准击实试验确定填料的最佳含水率及干密度,分别为17.5%,最大干密度1.78 g/cm³。

表1 土样主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical parameters of the soil

指标	天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	相对密度
取值	15.80	1.39	1.24	1.05	31.2	20.6	2.71

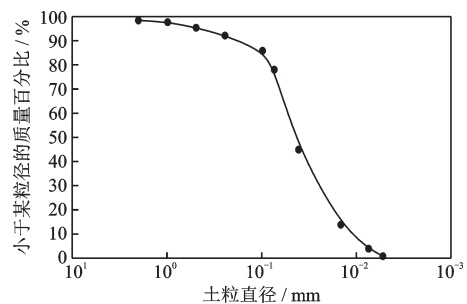


图1 土体的颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of the soil

1.2 试验装备

动三轴试验采用西安科技大学煤炭绿色开采地质研究院土体力学行为综合测定实验室德国 Wille-Geotechnik 生产的 LO7010/5DYN 型非饱和静动三轴仪。该仪器轴向加载系统由轴向加载控制器与伺服控制器组成, 主要实现轴向加载、卸载, 最大静态轴向压力可达 100 kN, 动态轴向荷载可达 10 kN, 频率可达 15 Hz, 精准度高, 适用于模拟车辆、地震等动载荷条件。

1.3 试验方法

本次试验对最佳含水率及干密度条件下的加筋土样展开研究, 首先配置最佳含水率的土样, 将现场选取的土样过 2.0 mm 筛, 去除草根、碎石等杂物, 随后烘干, 采用酒精燃烧法确定干土的含水率, 以确定目标含水率所加蒸馏水的质量, 采用喷雾器将蒸馏水与干土均匀混合, 而后根据所需干密度准确称取已配置好含水率的土料, 采用静压仪分三次压实试样, 试验采用的试样直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm。由于试样较小, 若使用土工格栅会带来较大的尺寸效应, 由此结合 M. Suzuki 等^[12]制样经验, 本次试验所用的加筋材料采用窗纱代替, 共设置两层筋材, 上下层各距顶面和底面 25 mm, 上下两层间距 30 mm, 所制试样照片及加筋位置示意如图 2 所示。制样完成后在养护箱内静置 48 h, 使筋土界面之间充分接触。

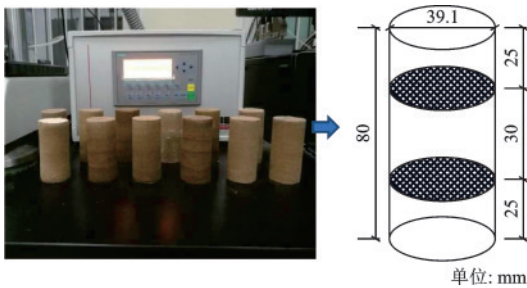


图2 土样及布筋方式

Fig.2 Soil sample and the reinforcement method

试验采用正弦波模拟车辆荷载, 探究相同围压条件下不同荷载强对加筋土试样变形特性的影响。参考研究区长期车流状况, 试验设置 3 种不同动应力幅值, 分别为 30、45、60 kPa, 以分别实现各类载重车辆超载条件, 即正常满载、超载 50%、超载 100%, 围压均为 50 kPa。考虑研究区车流量和汽车行驶速

度, 根据相关测试经验^[13], 最终确定动三轴试验详细方案, 见表 2。试验采用 Cyclic stress control 模块控制, 单次应力循环采集 10 次数据, 每个动应力幅值做 3 组平行试验以充分确定规律, 共计 12 组。

表 2 动三轴试验方案

Table 2 Dynamic triaxial test plan

围压/ kPa	动应力 幅值/kPa	加载 频率/Hz	加载 波形	停止条件
50	30/45/60	2	正弦	5 000 次或 5% 应变

2 试验结果及分析

2.1 滞回曲线

由于轴向应力的循环变化和土体变形的滞后性, 试验期间土样动应力和动应变的峰值并非同时出现, 因而试样的动应力-动应变曲线出现了明显的椭圆形滞回圈。介于且各加筋土试样滞回圈结果较为相似, 现仅展示动应力幅值为 45 kPa 下的滞回曲线, 如图 3 所示。

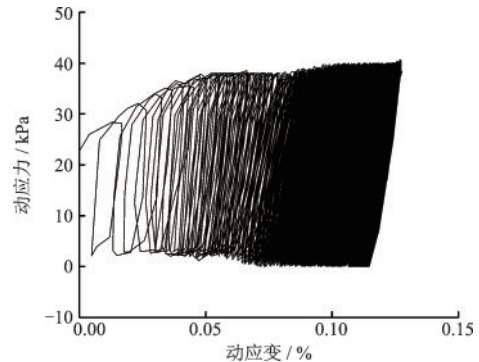


图3 动应力-动应变曲线

Fig.3 Dynamic stress-dynamic strain curve

分析图 3 发现, 整体上, 滞回圈数量较多且形状不一。具体表现为施加循环荷载初期, 滞回圈形态呈“宽胖型”, 在首个动应力循环后就出现了较为显著的动应变, 这说明加筋土样变形尚未稳定, 随着循环荷载次数的增加, 滞回圈由“宽胖型”逐渐向“陡峻型”过渡, 即单个动应力循环产生的动应变在不断减小, 试样的轴向变形向稳定趋势发展。需要指出的是, 试验时荷载的施加采用 Cyclic stress control 模式下固定幅值的正弦荷载, 由于试验装置结构的自身特点, 加载初期, 整个系统本身存在一个

初始调整的过程,此时预设的正弦荷载在10余次循环后才达到稳定,进而在试验初期所测记的动荷载幅值较设定数值稍小。

2.2 轴向变形特征

在动力循环加载过程中,单次循环中的轴向动应变并非恒定,而是在一定范围内波动,以30 kPa动应力幅值作用下的轴向动应变与加载次数的部分原始数据曲线为例(图4),不难看出一个循环次数对应了多个动应变。实际上,动应力循环加载条件下产生的动应变可以分成两个部分:即可恢复的动弹性应变 $\epsilon_{N,e}$ 和不可恢复的塑性应变 $\epsilon_{N,p}$,计算式如下:

$$\epsilon_{N,e} = \epsilon_{N,\max} - \epsilon_{N,p} \quad (1)$$

$$\epsilon_{N,p} = \frac{(\epsilon_{N,\max} + \epsilon_{N,\min})}{2} \quad (2)$$

式中, $\epsilon_{N,\max}$ 、 $\epsilon_{N,\min}$ 分别代表动应力循环加载条件下产生的最大、最小动应变。

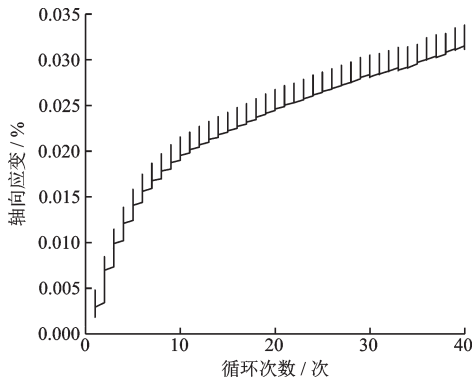


图4 轴向应变随循环次数发展曲线(30 kPa)

Fig.4 Development curve of axial strain with the number of cycles

由于运营期加筋土路基在反复车辆荷载作用下的沉降以不可恢复的塑性变形为主,因此试验主要探究累积塑性应变与加载次数的关系。选取有代表性的循环次数,通过式(1)计算该循环次数下的累积轴向塑性应变值,以动荷载的循环次数为横轴,累积轴向塑性应变为纵轴,绘制相应的演化曲线,如图5所示。

由图5可归纳以下差异性规律:当动应力幅值较小时(≥ 60 kPa),随着循环次数的增加,累积轴向塑性应变呈先快速增大,随后缓慢增长,最后趋近于某一定值的曲线,整体呈稳定增长型。累积轴向塑性应变的增长在前期十分迅速,约100次循环就达到最终应变的70%以上。将图5与滞回关系曲

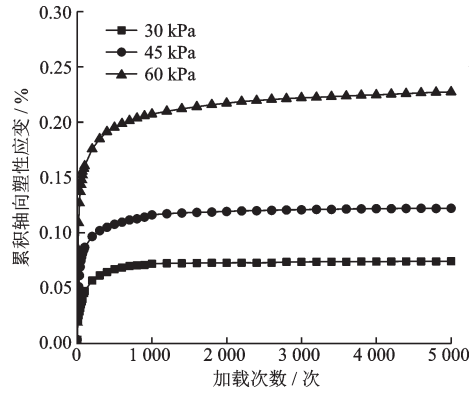


图5 累积轴向塑性应变随循环次数演化曲线

Fig.5 Evolution curves of cumulative axial plastic strain with the number of cycles

线对比发现,累积塑性应变曲线的斜率与滞回圈的形态有着密切关联,塑性应变曲线斜率较大的区域呈“宽胖型”,而斜率较小的区域对应着“陡峻型”,当塑性应变值趋于稳定时,滞回圈之间相互叠加,难以区分。

当动应力幅值较大时(60 kPa),轴向应变的增长速率也呈先增大后减小趋势,但达到试验结束条件时仍具备相当大的斜率,由此可见该动应力幅值作用下加筋土试样出现更大的变形,需要更多次数的循环荷载。就数值而言,5%轴向应变已经达到了严重危害行车安全的限值,因此60 kPa动应力幅值已经使路基产生严重变形。

2.3 改进 Monismith 模型

对于动应力幅值不足60 kPa的试验组,其累积轴向塑性变形是随着荷载循环次数的增加而逐步稳定的,因此可以构建稳定型曲线模型对其实现拟合。在土体材料的稳定变形拟合研究中,Monismith模型是一种常用的模型,如式(3)所示。但是在该模型中随着循环次数 N 的增长累积轴向塑性应变是不断增大的,与试验规律稍有不符。因此本次拟合也同时采用了改进后的Monismith模型,表达式见式(4):

$$\epsilon_{N,p} = aN^b \quad (3)$$

$$\epsilon_{N,p} = \frac{aN^b}{c + dN^b} \quad (4)$$

式中, $\epsilon_{N,p}$ 为累积轴向塑性应变,取百分数; a 、 b 、 c 为与试验过程有关的参数; N 为动荷载循环次数。

基于Levenberg-Marqudt法及最优化求解理论进行拟合,将上述两种模型的拟合数据与试验数据的对比情况展示于图6,拟合数据及误差见表3~表4。

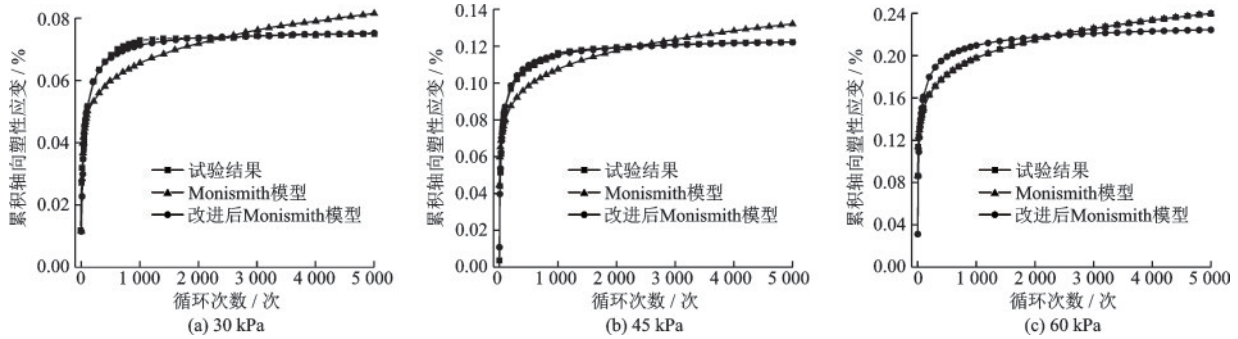


图6 轴向塑性应变拟合曲线与试验曲线对比

Fig.6 Comparison of experimental and fitted curves of cumulative axial plastic strain

表3 Monismith模型拟合参数

Table 3 Monismith model fitting parameters

动应力幅值/kPa	参数 a	参数 b	相关系数	决定系数
30	0.021 962	0.154 242	0.935 3	0.874 8
45	0.044 551	0.127 565	0.934 6	0.873 6
60	0.086 362	0.119 874	0.948 6	0.899 9

从拟合结果中看出, Monismith模型和改进后的 Monismith模型均可较好的描述累积轴向塑性应变与循环次数演化关系, 但改进 Monismith模型相关系数更高, 表达效果更好。全面分析改进 Monismith模型中的各参数, 可得以下认知: (1) 在

该模型中 a/d 具有极限意义, 象征了动应力无限次循环后的最终累积塑性应变, 随着动应力幅值的增大, a/d 也在增大, 这说明累积塑性应变随着动应力幅值的增大愈加显著; (2) 根据导数的定义, a 、 b 、 c 、 d 4个参数决定了动应变增速度, 试验中试样的动应变增速随着动应力幅值的增大而显著增大; (3) 动应力幅值越大, 试样达到变形稳定所需的动应力循环次数越多。

综上所述, 当围压一定时, 动应力幅值的增加会使加筋土变形量和变形增长速度显著增大, 加筋土的变形受动力影响十分显著。为进一步探究动应力对加筋土路基变形的影响, 拟采用数值模拟方法对该规律进行深入探究。

表4 改进后 Monismith模型拟合参数

Table 4 Improved Moonismith model fitting parameters

动应力幅值/kPa	参数 a	参数 b	参数 c	参数 d	相关系数	决定系数
30	0.005 270	0.801 940	1.689 966	0.068 408	0.998 0	0.996 0
45	0.032 882	0.687 624	2.753 308	0.261 374	0.998 1	0.996 2
60	0.000 311	0.574 560	0.008 567	0.001 322	0.997 6	0.995 3

3 数值计算分析

3.1 建立路基模型

为了研究车辆动荷载强度对加筋土路基变形的影响, 借助 ABAQUS 软件建立了如图 7 所示的二维加筋土路基计算模型。路基采用矩形断面, 加筋方式为分隔式加筋, 为简化计算, 研究模拟半幅路基, 其中地基的计算深度取 7 m, 计算宽度取 15.15 m, 假设地基和基础强度足够, 不考虑基础滑移。

对模型建立时采用的单元及约束作出以下说明: (1) 建模时把填料区作为 Embedded region, 将加

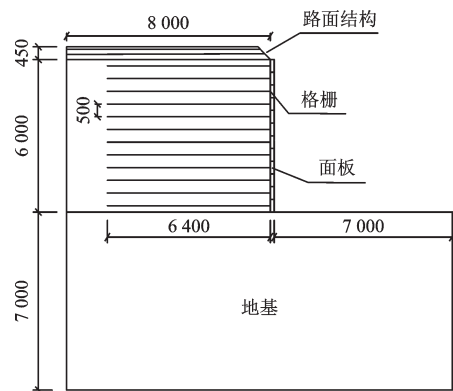


图7 路基模型几何尺寸示意图

Fig.7 Schematic diagram of the roadbed model geometry

筋材料“嵌入”到填料中; (2) 研究区所布设的筋材是通过预埋钢筋件与面板固定, 属于铰接, 故采用 TIE

约束实现筋材和面板界面的相互作用;(3)鉴于研究区面板基础是埋在地基当中的,假设地基不产生滑移,故在面板和地基接触的位置设置TIE约束。

对模型各面自由度的约束进行以下说明:(1)对地基底面进行全部位移自由度约束;(2)模型左

侧限制沿路基宽度方向的位移(X轴向);(3)地基右侧边缘限制X轴向位移,面板和路面为自由面,不设置约束。

结合有关文献和试验结果^[13-14],参数取值见表5。

表5 模型参数取值

Table 5 List of model parameters

材料名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
沥青混凝土面层	2 400	1 000	0.30	—	—
水泥稳定级配碎石	2 200	1 200	0.25	—	—
级配砾石垫层	2 300	500	0.30	—	—
黄土填料	1 900	60	0.30	40	25
混凝土面板	2 500	30 000	0.22	—	—
土工格栅	950	180	0.25	—	—
地基	1 930	70	0.25	45	28

3.2 车辆荷载的确定

根据相关模拟经验^[15-16],车辆荷载可以用稳态正弦波动模型近似表示,见式(5):

$$P(t) = P_s + \alpha P_s \sin \omega t \quad (5)$$

式中, P_s 为车辆静载的大小; α 为动轮载系数,本次模拟取值为0.12; ω 为震动圆频率,其取值受车辆类型和行驶速度的影响。

研究区市加筋土路基常年交通量大,尤以大型货车居多且超载现象严重。本次分析选取了该路段常见的东风三轴后八轮重卡为加载模型,对加筋土路基在不同载荷条件下的变形规律进行分析。本文在上述车辆模型的基础上确定了3种不同类型的载荷,即:满载、50%超载和100%超载。每种载重条件下的车辆轴重参数见表6。

3.3 模拟结果分析

图8为不同载重条件下加筋土路基内部综合位

表6 三轴重卡在不同载重条件下的轴重参数值

Table 6 Axle weight parameter values of three-axis heavy truck under different load conditions

装载条件	总重/ kN	载重/ kN	前轴重/ kN	后轴重(双轴)/ kN
满载	300	180	80	220
超载50%	390	270	95	295
超载100%	480	110	370	

移云图。分析可知:3种载重情况下加筋土路基内的变形整体上较为一致,位移分值线贯穿于路基顶面和面板,在路基内部形成了一个向外侧滑动的楔形,可见路基顶部和面板底部是位移产生的集中区。综合位移峰值出现在路基顶部靠近面板一侧,这是由于该处直接承受车辆荷载的作用,变形明显。而路基内部,地基区域变形幅度不足1 mm,显然微弱。

加筋土路基变形破坏最直观的表现是路面沉

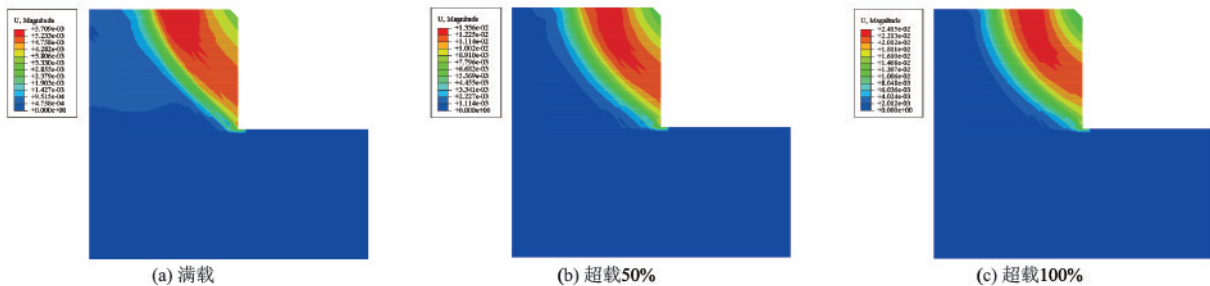


图8 不同载重下加筋土路基综合变形云图

Fig.8 Comprehensive deformation contour of the reinforced soil roadbed under different loads

降和面板变形,这也是公路管养部门最为关注的问题。现提取各荷载强度条件下的路面沉降变形云图,如图9所示,以分析车辆载重对加筋土路基竖向沉降和水平变形的影响。

分析图9可知:不同载重条件下,加筋土路基的沉降整体规律较为相近,但路面不同位置处产生沉降的幅度存在明显差异,其中路基中线附近沉降最小,荷载直接作用区域最大,车辆行驶位置直接产生了显著的“凹陷”变形。且随着载重的不断增加,路基的凹陷幅度也越大,直至超载100%情况时,“凹陷”深度达到了2.39 cm。近面板一侧的沉降变形显著大于路基中线一侧,这与已有的室内动载模型试验研究结果较为一致^[12]。

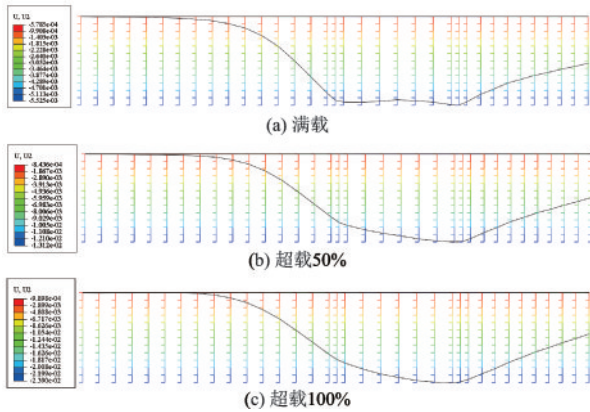


图9 不同载重下加筋土路基路面沉降变形云图

Fig.9 Settlement deformation contour of the reinforced soil roadbed under different loads

为进一步探究车辆载重对路基面板产生的变形影响,绘制不同载重情况下面板侧向变形与面板高度的关系曲线,如图10所示。

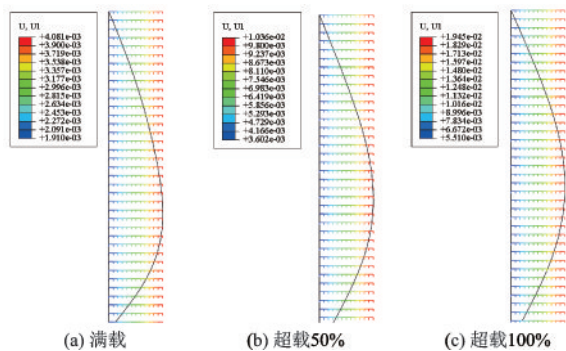


图10 不同载重下加筋土路基面板水平变形云图

Fig.10 Horizontal deformation contour of the reinforced soil roadbed panel under different loads

从图10中可知:不同载重情况下,路基面板的侧向变形具有相似分布规律,均沿着面板高度增加方向,呈先增大后减小的演化趋势,且面板底部侧向位移较顶部更为显著,其次数值也有较大的差异。汽车载重的增加使面板的水平变形迅速增长,满载条件下路基的最大水平变形为4.08 mm,超载50%时水平变形达到了10.36 mm,当超载达到100%时这一值骤然达到了19.45 mm,三者的相对比值为1:2.54:4.77。由此可见,超载对加筋土路基水平变形的影响亦是非常显著的。

其次,面板水平位移较大,量级在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ m之间。究其原因是面板外侧为临空面,没有支挡所致。其次需要指出的是,面板水平变形峰值出现在0.36~0.43 h处,数值模拟计算的面板最大水平位移所处位置较已有模型试验测试结果更加靠下,分析认为主要原因有:各模型试验和有限元分析中路基顶面荷载分布位置、大小和类型存在差异,各方法中填料、面板、筋带参数均不相同且模拟面板与筋带间的接触形式均各有差异。

4 动力响应机制

加筋土路基工程在长期车辆载荷下产生疲劳损伤,尤其是明确路基在不同荷载幅值下,产生变形的规律及内在机制均是工程预防性养护工作的关键。开展动三轴试验及数值模拟,研究了不同荷载强度下的加筋土单元的应力应变响应,三轴试验发现当动应力幅值分别为30、45、60 kPa时,累积轴向塑性应变随循环次数的增加表现为稳定型增长(图5)。因此加筋土路基工程的预防性养护工作应将车流强度及载荷强度控制工作作为重点。

在有限元实例分析当中,各荷载强度下的路基沉降及面板侧向变形存在一定规律,具体为满载、超载50%、超载100%荷载条件下路面的峰值竖向沉降均出现在外侧车轮处,数值分别为5.53、13.05、23.90 mm,面板的最大水平变形出现在0.36~0.43 h处,数值分别为4.08、10.36、19.45 mm,水平变形随车辆载重的增大而增幅显著。对此,将循环荷载作用下加筋土单元产生的动力学响应机制作出简要归纳:

循环荷载初期,加筋土试样处于弹性阶段,较少的循环次数即可产生显著的塑性应变,随着筋土

不断被压密,试样产生相同的塑性应变需要的振次更多,从而累积塑性变形逐渐步入平衡状态。值得注意的是,由加载初期到平衡阶段,动应力演化存在明显的渐进趋势,初始加载时,轴向累积应变增加显著,土体处于弹性变形阶段,类似简谐振动的状态。持续加载后,轴向应变增速开始减缓,在某一应变范围内,轴向累积应变趋于稳定,且在各级动载荷作用下,变形规律较为一致,仅是幅度略显差异。

5 结 论

(1) 动三轴试验中,各级荷载强度下时,累积轴向塑性应变随循环荷载次数的增加呈稳定型增长。改进 Monismith 模型可较好描述稳定变形状态下累积轴向塑性应变与加载次数的关系。

(2) 随着循环荷载次数的增加,累积轴向塑性应变先快速增大,随后缓慢增长,最后趋近于某一定值,基本呈稳定型增长。塑性应变曲线斜率较大的区域其滞回圈呈“宽胖型”,斜率较小的区域滞回圈呈“陡峻型”。

(3) Monismith 模型和改进后的 Monismith 模型均可描述累积轴向塑性应变与循环次数的关系,但改进后的 Monismith 模型相关系数和决定系数更大,表达效果更好。此外,动应力幅值越大,试样达到变形稳定需要更多的动应力循环次数。

(4) 各级荷载强度条件下,路面的最大竖向沉降均出现在外侧车轮处,数值随着荷载的增大竖向沉降明显增大;面板的水平变形峰值出现在 0.36~0.43 h 处,且面板底部侧向位移较顶部更为显著。

(5) 车辆动载的超额将会显著影响加筋土路基的水平变形和竖向沉降,公路管养部门必须严格控制车流量及载重。

参考文献:

[1] Vidal H. The principle of reinforced earth[R]. Washington D C: Highway Research Board, National Research Council, 1969.

[2] 雷胜友. 加筋黄土的三轴试验研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2000, 20(2): 1-5.

Lei S Y. Study on reinforced loess by triaxial tests[J].

Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2000, 20(2): 1-5. (in Chinese)

[3] 王钊, 王协群. 加筋地基的极限分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(6): 112-114.

Wang Z, Wang X Q. Limit analysis for reinforced foundations[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(6): 112-114. (in Chinese)

[4] 李婷, 苏谦, 刘宝, 等. 加筋土挡墙水平位移解析计算与参数分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 47-56.

Li T, Su Q, Liu B, et al. Analytical calculation and parametric analysis of lateral displacement of reinforced soil retaining walls [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 47-56. (in Chinese)

[5] 徐超, 赵春风, 叶观宝. 关于土与土工合成材料界面的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 307-311.

Xu C, Zhao C F, Ye G B. Research on interface between soil and geosynthetics[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(3): 307-311. (in Chinese)

[6] Li J, Ding D W. Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9): 977-983.

[7] 杨敏, 李宁, 刘新星, 等. 土工布加筋土界面摩擦特性试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 46-51.

Yang M, Li N, Liu X X, et al. Experimental research on interface frictional behaviors of the geotextile-reinforced soil [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1): 46-51. (in Chinese)

[8] 苏立海, 李宁, 朱才辉. 土工布加筋土的三轴蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1273-1280.

Su L H, Li N, Zhu C H. Triaxial creep tests on geotextile reinforced soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1273-1280. (in Chinese)

[9] 刘宽, 叶万军, 景宏君, 等. 季冻区黄土微观损伤识别与宏观力学响应研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增1): 192-197.

Liu K, Ye W J, Jing H J, et al. Microscopic damage identification and macroscopic mechanical response of loess in seasonal frozen areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (Sup1): 192-197. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)

(下转第 230 页)