

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.073



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 列车荷载作用下倾斜基岩加筋路堤的动力响应特性数值模拟研究

蔡维龙<sup>1,2</sup>, 任寄瑜<sup>3</sup>, 邹利明<sup>2</sup>, 包建新<sup>3</sup>, 欧强<sup>3</sup>

(1. 重庆大学溧阳智慧城市研究院, 江苏常州 213332; 2. 广东省重工建筑设计院有限公司, 广州 510670; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**中国中西部地区以山区为主,在已建及规划建设的轨道交通工程中,大量路堤修建于山区倾斜地层上,目前针对倾斜地层加筋路堤的动力特性研究较少。采用有限元数值模拟软件,建立倾斜基岩地层土工加筋路堤数值模型,并将计算结果与试验结果进行对比验证;基于该数值模型,深入分析加筋轨道路堤的动力响应特性,重点探讨列车循环荷载幅值、土工格栅加筋层数等对路堤动力响应的影响规律。结果表明:路堤竖向循环位移幅值与速度峰值的动力响应呈现显著的空间非均匀分布特征,极值出现在加载中心正下方位置;路堤侧向位移高值区主要分布于左侧坡底与右侧坡顶;随着各参数的变化,路堤右侧坡顶侧向峰值位移增长更为显著,成为侧向位移最大区域;土工格栅对加筋路堤侧向位移幅值具有显著的约束作用;随着格栅层数的增加,路堤整体侧向位移幅值逐渐减小,侧向位移幅值较大的区域缩小,并逐渐上移;在各层格栅所处深度,路堤侧向位移幅值随路堤深度的变化曲线出现明显谷值,谷值位置与格栅所处深度基本一致;当设置4层格栅时,格栅层间与格栅顶部的侧向位移幅值相近,能有效发挥土工格栅控制土体侧向位移的作用。

**关键词:**倾斜基岩;土工格栅;轨道路堤;动力响应;竖向位移;数值模拟

中图分类号:U213.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2026)03-0171-14

## Numerical simulation analysis of dynamic response characteristics of inclined bedrock reinforced embankment under train loading

CAI Weilong<sup>1,2</sup>, REN Jiyu<sup>3</sup>, ZOU Liming<sup>2</sup>, BAO Jianxin<sup>3</sup>, OU Qiang<sup>3</sup>

(1. Institute for Smart City of Chongqing University in Liyang, Changzhou 213332, Jiangsu, P. R. China; 2. Guangdong Zhonggong Architectural Design Institute Co., Ltd. Guangzhou 510670, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

收稿日期:2025-03-31

基金项目:国家自然科学基金(U2268213、52108299);重庆市技术创新与应用发展专项重大项目(CSTB2023TIAD-STX0042)

作者简介:蔡维龙(1987-),男,高级工程师,从事城市轨道交通工程、地下工程研究,E-mail:751985338@qq.com。

欧强(通信作者),男,博士,E-mail:ouq126@cqu.edu.cn。

Received: 2025-03-31

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos. U2268213, 52108299); Chongqing Technology Innovation and Application Development Special Major Project (No. CSTB2023TIAD-STX0042).

**Author brief:** CAI Weilong (1987-), senior engineer, main research interests: urban rail transit engineering and underground engineering, E-mail: 751985338@qq.com.

OU Qiang (corresponding author), PhD, E-mail: ouq126@cqu.edu.cn.

**Abstract:** The central and western regions of China are predominantly mountainous, and in the constructed and future railways, a substantial proportion of embankments must be constructed on inclined strata in mountainous areas. However, the extant research on the dynamics of reinforced embankments on inclined strata is relatively limited. Therefore, based on the finite element numerical software, this paper establishes a numerical model of geotechnical reinforced embankments under inclined bedrock conditions, and compares and verifies the computational results with the existing experimental results, and then conducts an in-depth study and analysis of the dynamic response characteristics of the reinforced track embankment based on this model, focusing on the effects of cyclic load amplitude and the number of layers of geogrid on the dynamic response of the reinforced embankment. The results show that the dynamic response of the vertical cyclic displacement amplitude and peak velocity of the embankment shows a significant spatial non-uniform distribution, and their extreme values appears directly below the loading centre. The high-value areas of lateral displacement of the embankment are distributed at the bottom of the left slope and the top of the right slope. With the change of each parameter, the lateral peak displacement at the top of the right slope of the embankment increases more significantly, and it becomes the area with the largest lateral displacement. The limiting effect of geogrids on the amplitude of lateral displacement of the reinforced embankment is significant. With the gradual increase in the number of geogrid layers, the overall lateral displacement magnitude of the embankment decreases, and the area where the lateral displacement magnitude occurs shrinks and gradually moves upward. At the position of each layer of geogrid, the curve of the lateral displacement magnitude of the embankment versus the depth of the embankment shows an obvious valley value, and the depth of the valley is consistent with the location of the geogrid arrangement. When four layers of geogrid are set, the lateral displacement amplitude between geogrids and the lateral displacement amplitude at the top of the geogrids are similar, which can effectively play the role of geogrids in limiting the lateral displacement of the soil body.

**Keywords:** inclined bedrock; geogrid; railway embankment; dynamic response; vertical displacement; numerical simulation

近年来,交通基础设施建设迅猛发展,在高速铁路、高速公路、城市轨道交通等大规模工程建设过程中,常面临复杂的地形、地质条件,易引起轨道交通路堤发生整体或局部破坏,进而造成严重的经济损失。为了提高轨道交通路堤的稳定性,减小沉降变形,需进行地基处理。传统地基处理方法施工难度大、造价偏高,而土工合成材料的发展,为岩土工程提供了一系列新型工程材料,也为解决轨道交通路堤问题提供了思路。针对土工加筋路堤,学者们采用理论分析<sup>[1-3]</sup>、数值模型<sup>[4-7]</sup>、室内外模型试验<sup>[8-13]</sup>等多种研究手段开展了大量研究,但目前大部分研究仅针对水平地基加筋路堤,对倾斜地层条件下加筋路堤的动力响应特性研究较少。另外,在上部列车荷载作用下,路堤内部应力分布和动力响应规律与水平地基加筋路堤相比存在较大差异。

对于斜坡加筋路堤的工作性状,部分学者开展了相关研究。罗烈日等<sup>[14]</sup>采用数值模拟方法研究了交通循环荷载振幅、频率及行车间距等参数对斜坡加筋路堤动力特性的影响,发现交通荷载振幅与频率越大、行车间距越短,路堤顶面沉降量越大。杨森等<sup>[15]</sup>依托西南地区某高速公路高填方红层路基,

采用FLAC3D模拟了路基在加筋与未加筋工况下的变形与应力特征,结果表明,土工加筋能有效抑制路基竖向沉降与水平位移发展,提升路基稳定性。赵炼恒等<sup>[16]</sup>建立了考虑模型试验槽及斜坡地基边界效应的数值计算模型,模拟了高填方路堤的完整破坏过程。基于弹塑性平面应变有限元法,刘晋南等<sup>[17]</sup>建立了斜坡软弱地基在路堤荷载作用下的数值分析模型,获得了包括斜坡软弱地基在内的4种工况下地基侧向变形与竖向沉降随路堤填筑施工的动态变化规律。丁选明等<sup>[18-20]</sup>、瞿立明等<sup>[21-23]</sup>、杨金川等<sup>[24-27]</sup>采用理论分析、模型试验、数值模拟及现场试验等方式,针对倾斜地层中桩基的动力响应特性、动荷载传递机理、波传播特性及桩-土-桩动力相互作用机理与群桩动响应计算方法等开展了系统研究。熊克健<sup>[28]</sup>利用PLAXIS软件对不同截面形式的双面加筋路堤开展抗震性能研究,分析了加筋路堤在不同倾角、台阶宽度、挡墙间距、布筋形式以及设计加速度下的顶部沉降、面板侧向位移、筋材最大拉力等指标。Wang等<sup>[29-31]</sup>基于等效附加应力提出了新的数值分析方法,该方法能较好地反映不同纤维分布形式和体积含量下纤维加筋土的强度和

变形特性。

学者研究了加筋路堤在列车循环荷载下的动力响应。然而,模型试验往往工作量大、耗时长,且工况有限,难以全面反映路堤内部的动应力传递规律。相比之下,数值模拟能够有效解决这一问题。总体来看,针对斜坡地形的土工加筋路堤研究较少,而针对倾斜地层的土工加筋路堤研究更是鲜见。这导致土工加筋轨道路堤的设计理论仍滞后于工程实践,缺乏系统、合理的计算方法。开展倾斜地层下土工加筋轨道交通路堤动力响应特性的数值研究,有助于完善加筋土技术的研究体系,并为相关规范的制定提供参考,具有重要的理论意义和工程实践价值。笔者利用有限元软件ABAQUS建立倾斜基岩条件下的土工加筋路堤数值模型,并采用与现有文献相同的加载工况,将计算结果与模型试验数据进行对比验证。在此基础上,针对倾斜地层条件下的加筋路堤,深入研究和分析其动力响应特性,重点研究列车循环荷载幅值与土工格栅层数对加筋路堤动力响应特性的影响,未考虑地下水的影响。

### 1 数值模型

轨道交通路堤在纵向上延伸较长,且列车荷载垂直作用于路堤。因此,在仅考虑列车荷载的情况下,可沿路堤纵向选取任一平面,将其视为平面应力问题。这样可将三维路堤模型简化为二维平面模型进行分析。根据前期开展的倾斜地层加筋路堤土工模型试验<sup>[32]</sup>,采用ABAQUS有限元软件建立与模型试验一致的倾斜地层路堤数值模型。通常,列车荷载作用下土体的动应变远小于 $10^{-4}$ <sup>[33]</sup>,根据土工加筋路堤的实际问题,结合既有模型试验的结果,作出以下基本假定:

- 1)列车荷载作用下,将路堤表面轨道加载板与地基基岩假定为弹性的,满足弹性小变形假定;
- 2)路堤填土与地基土体假定为弹塑性材料,采

用摩尔库伦本构模型;

3)地基初始地应力由土体竖向自重应力构成,路堤填筑过程中仅考虑填土自重应力的增量;

4)在土工加筋路堤填筑过程中,土体弹性模量、塑性模量及黏滞阻尼系数保持不变;

5)加载板、路堤填土、地基碎石土、基岩及土工格栅变形连续,不发生相对滑移。

#### 1.1 模型几何尺寸与材料参数

建立的数值模型尺寸与模型试验<sup>[32]</sup>中的横截面保持一致,如图1所示。路堤模型共包含5个部分,从上至下依次为:钢制加载板、路堤填土、土工格栅、地基碎石土以及倾斜基岩。建立的数值模型断面如图2所示。

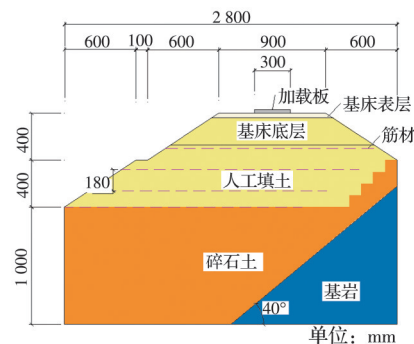


图1 倾斜基岩模型断面图

Fig. 1 Cross-section diagram of inclined bedrock model

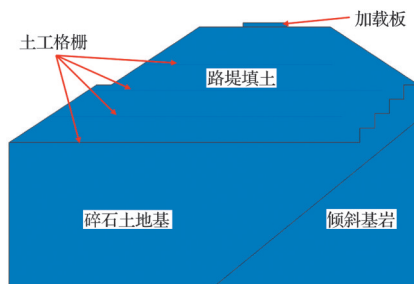


图2 数值模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of numerical model

为验证数值模型的合理性,采用的材料参数与模型试验保持一致,其中土体的基本物理力学参数如表1所示,土工格栅的参数如表2所示。

表1 土体基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil

材料	天然密度/(g/cm <sup>3</sup> )	土天然含水率/%	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	最优含水率/%	不均匀系数	曲率系数
黏土	1.91	9.28	33.08	28.31	1.94	14.2	10	1.2
碎石	1.88	4.16	35.81	33.72	1.98	8.7	9.4	0.34

#### 1.2 土体阻尼的确定

在列车荷载作用下,土体介质中传播的振动波因土体自身阻尼效应使振动能量逐步耗散。在有限元数值分析过程中,根据瑞利阻尼假设,阻尼力

与质量和刚度满足式(1)所示关系。

$$C = \alpha M + \beta K \tag{1}$$

式中:C为阻尼矩阵;M为质量矩阵;K为刚度矩阵; $\alpha$ 、 $\beta$ 为瑞利阻尼系数,可根据振型阻尼比 $\xi_i$ 计算得

表 2 土工格栅拉伸强度

Table 2 Geogrid tensile strength

应变/%	强度/(kN/m)
2	1.9
5	3.0
10	4.7
最大应变	6.0

出,即

$$\xi_i = \alpha / (2\omega_i) + \beta \omega_i / 2 \quad (2)$$

式中: $\omega_i$ 为结构第*i*阶模态的固有频率。在动力分析中,阻尼主要受结构前几阶振型的影响,因此采用土体前两阶自振频率确定阻尼系数,即<sup>[27]</sup>

$$\begin{cases} \alpha = [2\omega_1\omega_2(\xi_2\omega_1 - \xi_1\omega_2)] / (\omega_1^2 - \omega_2^2) \\ \beta = [2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)] / (\omega_1^2 - \omega_2^2) \end{cases} \quad (3)$$

由于土层分布情况较复杂,将路堤作为整体结构进行计算。采用 ABAQUS 软件中 Frequency 分析步提取土体模型的前两阶固有频率,得到倾斜地层条件和非倾斜地层条件下路堤土体的前两阶自振频率,如图 3 所示。

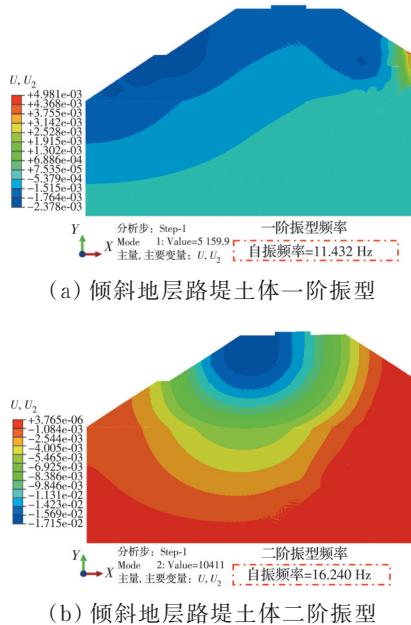


图 3 路堤土体模型前两阶振型  
Fig. 3 First two vibration modes of the embankment soil model

由图 3 可知,倾斜地层条件下路堤土体的前两阶自振频率分别为 11.432、16.240 Hz,对应角频率分别为  $\omega_1=71.829 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_2=102.039 \text{ rad/s}$ 。振型阻尼比  $\xi_i$  用于表征土体的耗散能量能力,对于土体,  $\xi_1$  常取 5%,  $\xi_2$  常取 3%。将上述数据代入式(3)可计算得到倾斜地层下路堤土体的瑞利阻尼系数  $\alpha = 8.225, \beta = 2.019 \times 10^{-4}$ 。

1.3 地应力平衡

在该数值模型中,初始地应力作用使模型产生了 2.2 mm 的最大竖向位移和 0.72 mm 的最大水平位移。因此,为保证模拟结果符合实际工况并确保数值计算收敛,需先对模型进行初始地应力平衡计算。数值模拟采用 ABAQUS 自带的重力加载与 ODB 导入法实现地应力平衡状态,即在土工加筋路堤受列车循环荷载之前,先计算模型在自重荷载下的应力场分布,并将该结果作为模型的初始应力场导入,使模型在获得自重应力分布的同时不产生位移增量。地应力平衡结果如图 4 所示。

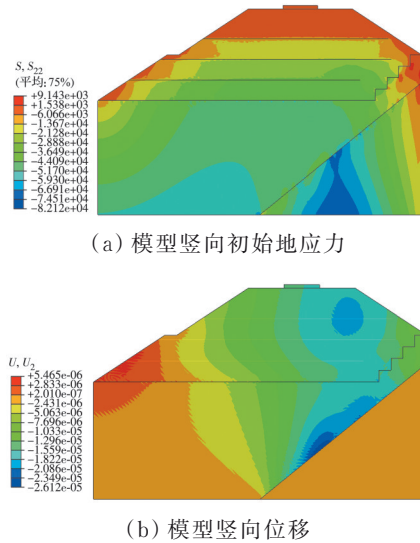


图 4 初始地应力平衡  
Fig. 4 Initial geostatic stress equilibrium

由图 4 可以看出,路堤模型竖向初始地应力沿深度逐渐增加,整个路堤模型底部最大地应力为 80 kPa 左右,计算结果与模型土体自重应力分布规律基本相符;同时,由地应力产生的位移很小,竖向位移量级为  $10^{-5} \text{ m}$ ,基本可忽略不计,表明该模型初始地应力平衡结果良好。

1.4 边界条件与相互作用

数值模拟边界条件设置为:地基土体与基岩底部为完全固定约束,即  $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$ ,其中  $U_1、U_2、U_3$  分别为 1、2、3 方向的位移,  $UR_1、UR_2、UR_3$  分别为 1、2、3 方向的转角;对模型左侧边界约束碎石土地基的水平位移,即  $U_1=0$ ;实际工程中路堤左侧地基为半无限空间,因此在路堤左侧边界采用基于实体单元的无限元模型进行模拟。在 ABAQUS 中无法直接选用无限单元,需通过修改 inp 文件中的单元形式来定义无限元。路堤模型的边界设置如图 5 所示。

采用 ABAQUS 相互作用模块中的接触作用模拟填土与土工格栅以外各部件间的摩擦约束作用,

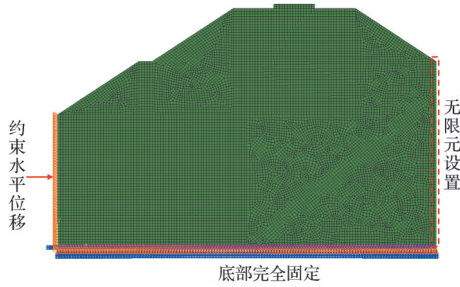


图 5 模型边界设置

Fig. 5 Model boundary settings

接触类型为表面与表面接触,设置为有限滑移。接触作用属性主要包括切向行为与法向行为,其中切向行为的摩擦公式设置为罚函数,根据工程经验取摩擦系数为 0.4,法向行为设置为“硬”接触。对于土工格栅嵌入路堤填土的相互作用,采用 ABAQUS 中的嵌入区域(embedded region)实现土工格栅嵌在路堤填土中的嵌固效果。通过设置权重系数舍入误差为  $10^{-6}$ 、绝对外部容差为 0、外部百分比容差为 0.05,创建嵌入区域约束,分析过程中 ABAQUS 将使用两个公差中的较小值。

1.5 网格划分与荷载施加

建立的二维数值模型忽略路堤纵向的变形与受力,长度方向 Z 轴应变为 0,即  $\epsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ ,可将其看作平面应变问题。因此,采用 CPE4R 单元(4 结点双线性平面应变单元)对路面加载板、路堤填土、碎石土地基及倾斜基岩进行网格划分;同时在路堤右侧边界处设置无限单元,即 CINPE4 单元。土工加筋格栅在二维中可视作桁架结构,主要承担拉力作用,因此采用 T2D2 实体单元,即二结点二维桁架单元。

为精确计算波在模型中的传播过程,实体单元网格尺寸需小于输入波最高频率对应波长的  $1/10 \sim 1/8$ 。波长与频率的关系如式(4)所示。

$$\lambda = v/f \tag{4}$$

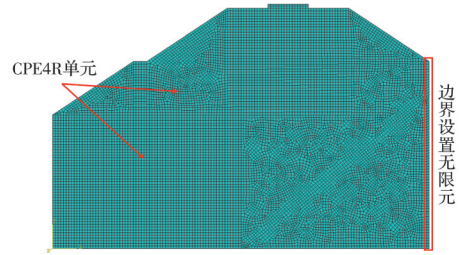
式中: $\lambda$ 为波长; $f$ 为输入波频率; $v$ 为输入波在土体中的传播速度,其计算公式为

$$v = \sqrt{E/\rho} \tag{5}$$

式中: $E$ 为土体弹性模量; $\rho$ 为土体密度。

根据模型试验<sup>[32]</sup>,输入列车荷载的最高频率为 17.5 Hz,对应波长为 5.06 m,因此,实体单元最大网格尺寸需小于 0.5 m。为兼顾计算精度与计算效率,在满足网格划分要求的前提下,将实体单元网格尺寸设为 0.2 m。模型整体网格划分如图 6 所示。

数值模型中施加的荷载也与模型试验保持一



(a) CPE4R 和无限元设置



(b) T2D2 桁架单元设置

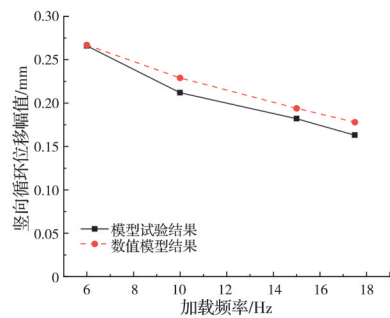
图 6 模型整体网格设置

Fig. 6 Overall mesh configuration of the model

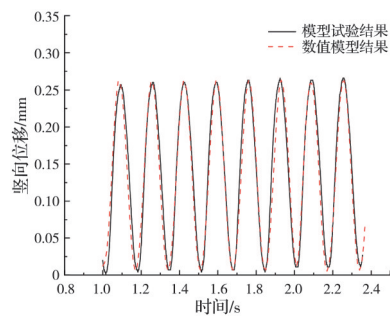
致。由于数值分析主要考察荷载幅值变化对加筋路堤的影响,因此将荷载频率统一设为 6 Hz,荷载波形为正弦波,以表面载荷形式施加于加载板<sup>[32]</sup>。

2 模型验证

为验证所建立数值模型的合理性,在荷载频率为 6 Hz、荷载幅值为 20 kPa 的条件下,对比模型试验<sup>[32]</sup>与数值模拟中加载中心正下方的竖向循环位移幅值及竖向循环位移时程曲线。图 7 为倾斜基岩路堤模型计算结果与试验数据的对比,包括加载中心



(a) 竖向循环位移幅值对比



(b) 加载频率 6 Hz 下位移时程曲线

图 7 倾斜基岩路堤数值模型验证

Fig. 7 Validation of the numerical model for embankment with inclined bedrock

下方各加载频率下的竖向循环位移幅值以及 6 Hz 加载频率下的位移时程曲线。

图 7(a)表明,与模型试验相比,倾斜基岩路堤数值模拟的竖向循环位移幅值虽略大,但二者竖向峰值位移变化趋势基本一致,数值也比较接近,基本处于 0.16~0.27 mm 之间,且在加载频率较小时重合度较高。从图 7(b)中可知,在 6 Hz 加载频率工况下,数值模拟得到的路堤顶部位移时程曲线与模型试验数据吻合良好,变化规律较为一致,表明所建立的数值模型具有较高可靠性。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 列车循环荷载幅值的影响

以 CRH 系列高速列车为例,列车动荷载幅值为 16.5 kPa。在实际运营中,高速列车需兼顾运行速度与轨道承载能力,因此轴重相对较轻,一般要求荷载不超过 170 kN,如日本新干线 700 系列高速列车最大轴重为 110 kN,中国 CRH3 型、CRH5 型列车轴重分别为 140、170 kN。而对于重载列车,根据国际重载运输协会规定,其车辆轴重不小于 270 kN;在中国大秦铁路、朔黄铁路等重载铁路线上,部分运行列车轴重甚至可达 300 kN。模型试验以轴重 170 kN 的列车为原型,对应的列车荷载取 20 kPa,据此设置列车循环荷载幅值分别为 10、20、30、40 kPa 四种工况,对应的列车轴重范围为 85~340 kN,可基本覆盖各类轨道列车的轴重工况,用以研究不同荷载幅值下加筋路堤的竖向位移与侧向位移动力响应特性。其余参数统一设置为:荷载频率 6 Hz、土工格栅加筋层数 4 层、路堤土体弹性模量 26 MPa、地层基岩倾角 40°,具体工况如表 3 所示。

表 3 不同列车循环荷载幅值工况表

Table 3 Working conditions with different cyclic load amplitudes of trains

单位:kPa			
工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
10	20	30	40

首先对不同列车循环荷载幅值下加筋路堤的整体位移进行分析研究,循环荷载幅值 10 kPa 工况下加筋路堤所产生的位移幅值如图 8 所示,其余 3 种荷载幅值工况下加筋路堤的位移幅值与其趋势较为一致,仅在所产生的位移幅值大小上有所增长。由图 8 可知,在上部列车循环荷载作用下,加筋路堤所产生的最大变形位于加载中心下方,形成明显的位移核心区,并向四周呈逐渐衰减的趋势。此外,由于倾斜地层的存在改变了土体的应力分布,

加筋路堤两侧受力不均,路堤土体不仅承受垂直荷载,还因地层倾斜产生水平附加应力,路堤整体呈现非对称位移模式,其位移倾斜方向与地层倾斜方向一致,在右侧坡顶和左侧坡底的区域产生了较大位移响应,表明路堤土体存在沿倾斜地层的潜在滑动倾向。在实际工程中,其右侧坡顶因土体受拉可能产生裂缝,而左侧坡底区域因受压可能产生更大的剪切变形。

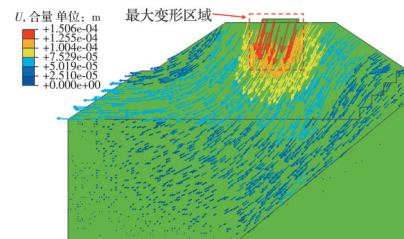


图 8 荷载幅值 10 kPa 下路堤整体变形图

Fig. 8 Overall deformation of embankment under a load amplitude of 10 kPa

荷载作用下加筋路堤的最大变形区域集中于路堤顶部的荷载作用区,因此分析了不同循环荷载幅值下加筋路堤最大位移的变化规律,如图 9 所示。结果表明,加筋路堤的位移幅值随循环荷载幅值的增大而增大,且二者呈近似线性正相关关系。当循环荷载幅值从 10 kPa 逐渐增至 40 kPa 时,路堤位移幅值分别增长 80%、160%、240%,表明在 10~40 kPa 循环荷载幅值范围内,加筋路堤的位移动力响应以弹性变形为主。

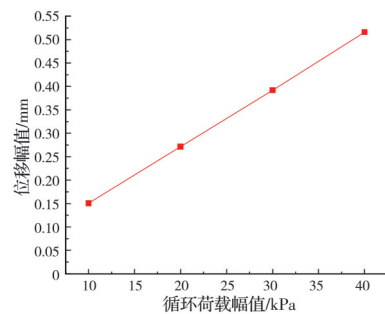


图 9 不同荷载幅值下加筋路堤的位移幅值

Fig. 9 Displacement amplitude of the reinforced embankment under different cyclic load amplitudes

加筋轨道路堤在 4 种不同循环荷载幅值工况下的竖向循环位移幅值云图如图 10 所示。由图 10 可知,各工况下路堤竖向循环位移幅值的动力响应规律基本一致:路堤顶部(加载中心区域)的竖向位移幅值最大,表现出明显的应力集中特征,并由中心向四周逐渐衰减,形成自上而下的递减梯度;荷载传递效应随深度的增加逐渐减弱,相应变形也随之减小。

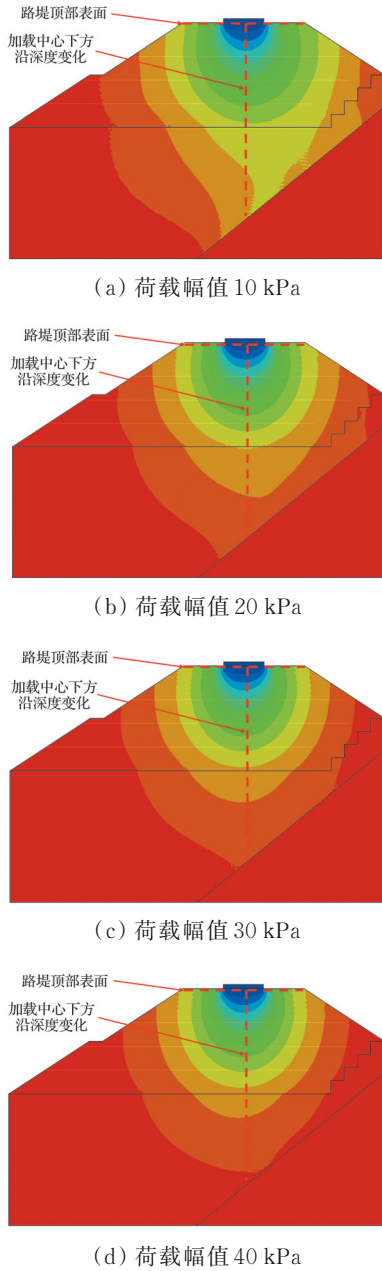


图 10 竖向循环位移幅值云图

Fig. 10 Nephogram of vertical cyclic displacement amplitude

此外,当荷载幅值从 10 kPa 增至 40 kPa 后,云图中位移幅值较大区域(蓝色、绿色、黄色区域)范围逐渐缩小,表明荷载幅值为 10 kPa 时路堤竖向位移幅值在土体表层衰减较快,沿深度方向衰减相对缓慢;而随着荷载幅值的增加,竖向位移幅值沿深度衰减显著加快,说明循环荷载传递的能量大部分被路堤浅层土体耗散与吸收。这是由于土体中应力传递遵循扩散规律,荷载幅值较小时应力分布相对均匀;荷载幅值增大后,顶部应力集中效应显著增强,应力向周边及深部扩散的速率随之加快。加载结束后,各工况下加筋路堤的位移均能恢复至初始地应力平衡状态,由此表明,在 10~40 kPa 循环荷

载幅值范围内,该加筋路堤的位移基本为弹性变形。

由图 10 可知,在 4 种不同荷载幅值作用下,加筋路堤均在加载中心下方出现最大竖向循环位移幅值。据此,不同工况下加载中心下方路堤竖向循环位移幅值沿深度的变化规律如图 11 所示。由图 11 可知,随着荷载幅值的增大,加筋路堤竖向循环位移幅值整体呈逐渐增大趋势,但二者并不呈线性正相关关系。当荷载幅值由 10 kPa 依次增至 20、30、40 kPa 时,加载中心下方竖向循环位移幅值分别增大 0.85、1.69、2.53 倍。同时,随着路堤埋深的增加,4 种工况下竖向循环位移幅值均呈现衰减特征;至路堤底部时,位移幅值分别为 0.044、0.067、0.090、0.113 mm,相较于 10 kPa 工况,20、30、40 kPa 工况下分别增长了 0.53、1.07、1.60 倍。这表明,荷载幅值越大,路堤竖向循环位移幅值的衰减幅度越大,该结论亦可从图 12 所示的路堤顶部表面竖向位移幅值变化中得到佐证。依据弹性力学理论,其内在机理为:应力随深度的衰减速率与荷载水平相关,荷载越大,应力在浅层土体中扩散越快,深部土体应力增量占比急剧降低,最终表现为位移沿深度衰减加快。

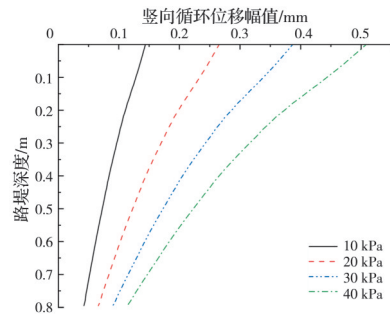
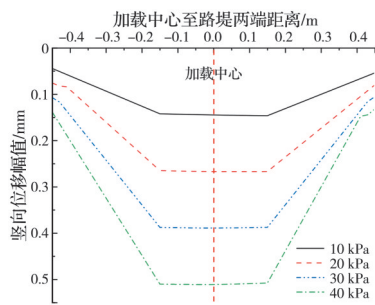


图 11 不同荷载幅值下竖向循环位移幅值沿路堤深度的变化

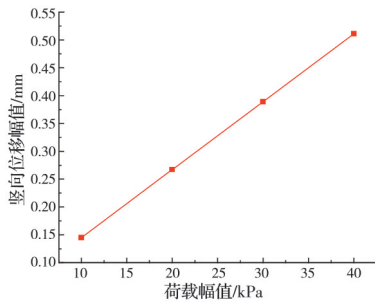
Fig. 11 Variation of vertical cyclic displacement amplitude along the embankment depth under different cyclic load amplitudes

路堤顶部通常是位移变化最为剧烈的区域,同时其两侧坡顶也易发生破坏,因此需重点关注路堤顶部表面竖向位移的动力响应特征。图 12(a)为路堤顶部表面竖向位移幅值分布。由图 12(a)可知,随着循环荷载幅值由 10 kPa 增至 40 kPa,路堤顶部竖向位移幅值整体显著增大,由约 0.15 mm 增至约 0.5 mm。路堤顶部表面竖向位移幅值在加载中心下方达到最大,并向路堤两端快速衰减,且两侧位移幅值基本一致。

图 12(b)为不同荷载幅值下路堤加载中心下方竖向位移幅值的变化曲线。由图 12(b)可知,随着



(a) 路堤顶部表面竖向位移幅值



(b) 荷载幅值与竖向位移幅值关系曲线

图 12 路堤顶部表面竖向位移幅值

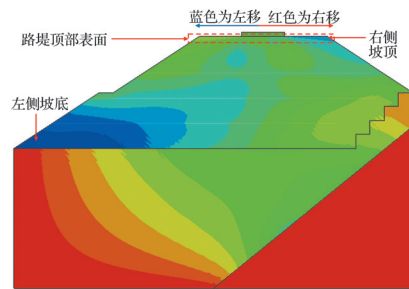
Fig. 12 Vertical displacement amplitude of embankment top surface

荷载幅值的增加,路堤加载中心下方的竖向位移幅值同步增大,二者呈近似线性正相关关系,表明在 10~40 kPa 荷载幅值范围内路堤的竖向位移基本为弹性变形。

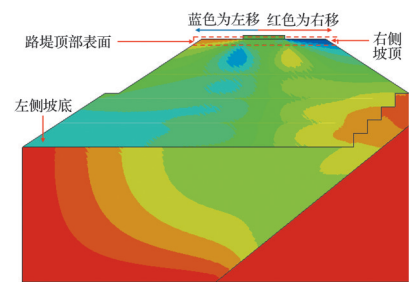
路堤的侧向位移是轨道路堤工程中重要的控制指标,已有不少学者<sup>[34-37]</sup>针对路堤侧向位移开展了相关研究。图 13 为不同荷载幅值下加筋轨道路堤的侧向峰值位移云图。由图 13(a)可知,不同荷载幅值下路堤侧向峰值位移的分布规律基本一致,侧向位移较大区域主要集中在路堤左侧坡底及右侧坡顶位置。略有不同的是,当荷载幅值为 10 kPa 时,侧向位移幅值主要集中于左侧坡底附近,呈局部集中特征,侧向位移分布范围较窄,未明显延伸至路堤顶部表面;当荷载幅值由 10 kPa 增至 40 kPa 时,路堤右侧坡顶处的侧向峰值位移增长更为明显,超过左侧坡底成为侧向位移最大区域,路堤侧向位移非对称性分布加剧,并沿基岩倾斜方向呈现更为明显的滑动趋势。其主要原因在于,倾斜地层使加筋路堤内部应力分布不对称,更易产生沿倾斜基岩面的滑动。结合路堤竖向位移分析结果可知,倾斜基岩对路堤侧向位移具有更为显著的影响作用。

土工格栅加筋体对土体侧向位移的抑制作用如图 13(b)所示,加筋区域侧向位移幅值增幅较小。此外,路堤顶部表面侧向位移亦出现明显增长,因

此需对路堤顶部侧向位移幅值进一步分析。



(a) 荷载幅值为 10 kPa



(b) 荷载幅值为 40 kPa

图 13 路堤侧向位移幅值云图

Fig. 13 Nephogram of lateral displacement amplitude of embankment

由图 13 可知,在不同循环荷载幅值作用下,加筋路堤左侧坡底和右侧坡顶的侧向位移幅值最大,其余位置侧向位移较小。因此,需重点分析这两个区域的侧向位移幅值变化规律,得到不同荷载幅值下二者的侧向位移幅值曲线,如图 14 所示。由图 14 可知,左侧坡底和右侧坡顶的侧向位移均随荷载幅值的增大而增大,但二者并未呈现简单的线性正相关关系,其中荷载幅值由 20 kPa 增至 30 kPa 时,侧向位移增长幅度最大。此外,剔除地应力产生的侧向位移后,右侧坡顶的侧向位移幅值显著大于左侧坡底,且二者差距随着荷载幅值的增大而逐渐扩大:荷载幅值为 10 kPa 时,左侧坡底、右侧坡顶侧向位移幅值分别为 0.005 6、0.018 mm;荷载幅值增至 40 kPa 时,二者分别为 0.025、0.075 mm,其差距维持在 3 倍左右。造成这一现象的原因可能是倾斜地层使上部竖向荷载向下传递时产生水平分量,推动土体形成沿倾斜基岩面滑移的趋势,进而使路堤坡顶产生更为显著的侧向位移。因此,实际工程中应对倾斜基岩一侧上方的加筋路堤顶部采取额外加固补强措施。

为更直观地比较路堤顶部的侧向位移变化规律,提取加筋路堤顶部表面的侧向峰值位移,结果如图 15 所示。由图 15 可知,整个路堤顶部表面自右侧(靠近基岩侧)向左侧(远离基岩侧)倾斜,在右侧边缘出现最大侧向位移,且整体倾斜幅度随荷载幅

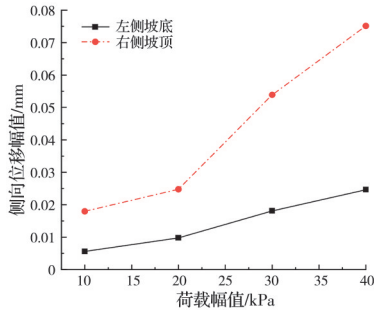


图 14 不同荷载幅值下左侧坡底和右侧坡顶的侧向位移  
Fig. 14 Lateral displacement of left slope bottom and right slope top under different load amplitudes

值的增大而加大。当荷载从 10 kPa 增至 20、30、40 kPa 时,右侧边缘侧向峰值位移依次增长 32.4%、68.1%、102%,主要原因可能是受倾斜基岩影响,路堤内部应力呈非对称分布;尽管路堤变形处于弹性变形阶段,但整体变形趋势近似于圆弧滑动破坏,这与已有研究在静载下测得的加筋路堤变形规律基本一致<sup>[38]</sup>。因此,在实际工程中,应针对靠近基岩侧的路堤上方土体采取更有效的加固处理措施,如在该区域设计多排竖向短桩,以抑制土体的侧向变形。

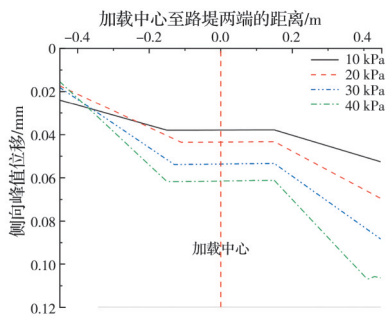


图 15 路堤顶部表面侧向峰值位移

Fig. 15 Lateral peak displacement of embankment top surface

### 3.2 土工格栅加筋层数的影响

对于土工加筋路堤而言,通过合理设计加筋层数与间隔,能在控制施工成本的同时有效抑制路堤竖向沉降和土体侧向位移。数值模拟中,自下而上分别设置土工格栅层数为 1、2、3、4 层共 4 种工况,以探究加筋层数对加筋路堤位移响应的影响。其余参数设定为:荷载频率 6 Hz、荷载幅值 20 kPa、路堤土体弹性模量 26 MPa、地层基岩倾角 40°。具体工况如表 4 所示。

表 4 不同格栅加筋层数工况表

Table 4 Table of working conditions with different layers of geogrid reinforcement

工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	2	3	4

对不同土工格栅加筋层数下路堤的整体变形进行分析,图 16 为 1、4 层加筋时的路堤整体变形图。由图 16 可知,土工格栅加筋层数从 1 层增至 4 层时,二者的整体变形趋势基本一致:路堤顶部受荷载作用产生最大变形,形成明显的位移核心区,且变形量从核心区向四周逐渐衰减。二者的差异为:由于土工格栅对土体侧向位移的约束作用,随着加筋层数的增加,路堤整体变形幅值有所降低,最大值由 1 层加筋时的 0.28 mm 降至 4 层加筋时的 0.216 mm。

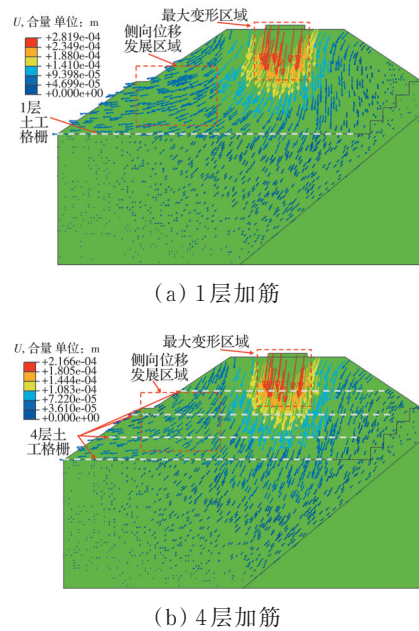


图 16 不同加筋层数下路堤整体变形图  
Fig. 16 Overall deformation of embankment with different reinforcement layers

此外,尽管倾斜基岩的存在使路堤在上部荷载作用下产生水平附加应力,导致路堤左侧沿倾斜基岩方向产生较为明显的滑动趋势,形成侧向位移发展区域,但随着土工格栅加筋层数的增加,该区域的侧向位移显著减小。具体表现为:加筋层数为 1 层时,路堤整体变形图中侧向位移发展区域的变形矢量箭头以水平方向为主;而当加筋层数增至 4 层时,该区域的变形矢量箭头更偏向垂直方向。

从图 16 可知,路堤整体变形的最大区域位于路堤顶部,且在路堤左侧坡底出现显著的侧向位移。不同加筋层数下路堤顶部与左侧坡底的变形规律如图 17 所示。结果表明:路堤顶部与左侧坡底的位移幅值均随加筋层数的增加而逐渐减小,其中路堤顶部位移从约 0.28 mm 降至 0.22 mm,左侧坡底从约 0.07 mm 降至 0.05 mm。路堤顶部位移幅值的下降幅度显著大于左侧坡底,说明加筋层数对顶部

变形的抑制效果更为突出。其原因在于:路堤顶部为荷载直接作用区域,应力集中明显,加筋层数的增加对顶部受荷区域变形的抑制更直接,因此顶部位移降幅更大;而左侧坡底远离荷载中心,自身位移幅值较小,加筋的约束作用体现较弱,因而降幅较小。与此同时,路堤顶部的位移幅值始终远高于左侧坡底处。

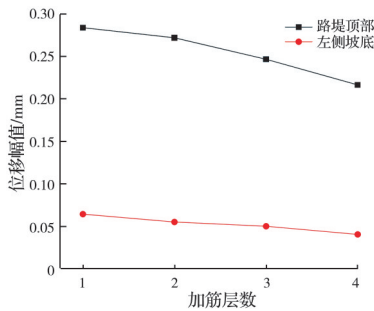


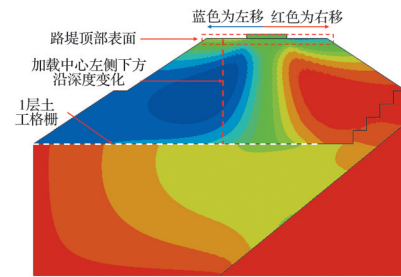
图 17 路堤顶部和左侧坡底处的位移幅值

Fig. 17 Amplitude of displacement at the top of the embankment and at the base of the left-hand slope

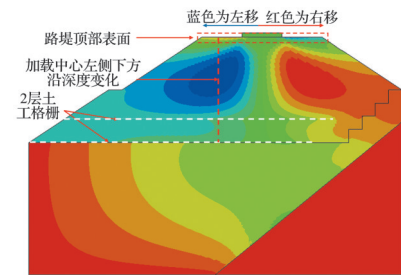
在不同土工格栅加筋层数下,路堤竖向位移幅值云图的分布规律与不同荷载幅值下的分布规律基本相似,均表现为加载中心处路堤竖向位移幅值最大,并向四周逐渐衰减。加筋层数对路堤竖向位移的影响较小,在 4 种不同加筋层数工况下,路堤竖向位移分布整体较为一致。

不同土工格栅加筋层数下路堤侧向位移幅值云图如图 18 所示。图中蓝色区域代表水平向左位移,红色区域代表水平向右位移,且蓝色区域侧向位移幅值更大。由图 18 可见,路堤侧向位移幅值较大的区域主要集中在加载中心下方两侧及路堤顶部表面。此外,土工格栅对加筋路堤侧向位移幅值的约束效果显著:当路堤底部仅设置 1 层土工格栅时,路堤整体侧向位移幅值较大,发生显著侧向位移的区域较大,较大侧向位移幅值区域的分布范围也较广(图中深蓝色区域),且主要分布在加载中心下方左侧。而随着土工格栅层数逐渐增多,路堤整体侧向位移幅值有所减小,且较大侧向位移幅值区域范围缩小(图中深蓝色区域),并随着加筋层数的增加逐渐上移。当设置 4 层土工格栅时,其最大侧向位移幅值区域已转移到路堤右侧坡顶位置处,路堤顶部、加载中心下方左侧沿深度方向的侧向位移幅值均小于 1 层加筋工况。

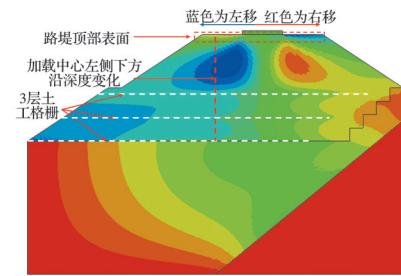
从图 18 可知,加筋路堤的侧向位移主要集中于加载中心下方左侧区域,且该区域随着土工格栅加筋层数的增加不断上移并缩小。据此绘制不同土工格栅加筋层数下路堤加载中心下方左侧的侧向



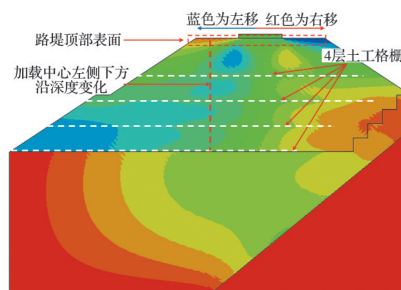
(a) 1层土工格栅



(b) 2层土工格栅



(c) 3层土工格栅



(d) 4层土工格栅

图 18 不同加筋层数下路堤侧向位移幅值云图

Fig. 18 Nephogram of lateral displacement amplitude of the embankment under different reinforcement layers

位移沿路堤深度的变化曲线,如图 19 所示。由图 19 可知,在不同加筋层数下,该位置侧向位移幅值随深度的增加均呈先增大后减小的趋势。其原因在于:路堤顶部受垂直荷载作用显著,受倾斜地层影响产生的水平附加应力较小,此时侧向位移幅值随深度的增加而增大;而在路堤底部,土工格栅对土体侧向位移的约束作用逐渐显现,加筋约束效果增强,土体侧向位移幅值随之减小。

此外,图 19 更为直观地展示了土工格栅层数的增加对路堤侧向位移幅值的约束效果。当加筋层

数由1层逐渐增至4层时,每增加1层,路堤侧向位移幅值均出现显著降低,降幅依次为13.03%、18.64%、48.87%。同时可知,在各层格栅所处深度位置,路堤侧向位移幅值均显著减小。当设置4层格栅时,路堤侧向位移幅值随深度的变化曲线呈现3个明显谷值,其对应深度位置与格栅布设位置一致,该规律在其余3条曲线中也存在。且在4层加筋工况下,格栅层间与格栅顶部的侧向位移幅值较为接近。这是因为单层加筋时荷载引发的侧向应力集中释放,导致变形峰值显著;而多层加筋可分层分散侧向应力,使应力传递更为均匀,协调土体沿深度方向的变形,避免局部变形集中。在加筋路堤结构中,土工格栅与土体紧密接触,通过界面摩阻力协同变形;在循环荷载作用下,土体颗粒重新排列,格栅承担的拉应力不断调整,从而有效限制土体侧向位移的发展,最终表现为各深度位移幅值随加筋层数的增加而减小。说明采用4层土工格栅较为合理,能有效发挥其限制土体侧向位移的作用。

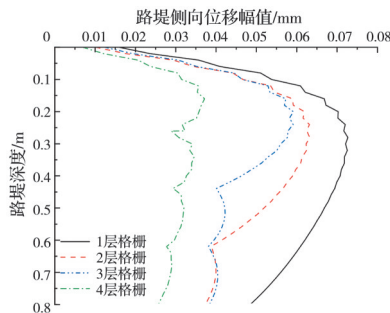


图19 加载中心左侧下方路堤侧向位移沿深度的变化

Fig. 19 Variation of lateral displacement of embankment below the left side of loading center along depth

从图18可知,随着加筋层数的逐渐增多,路堤加载中心下方的侧向位移幅值逐渐减小,产生侧向位移的区域不断上移,最大侧向位移幅值的位置也从路堤加载中心下方逐渐转移至路堤右侧坡顶。不同加筋层数下路堤顶部表面侧向位移分布如图20所示。由图20可知,加载中心右侧侧向位移幅值显著大于左侧,且最大值均出现在路堤右侧坡顶,这一规律与不同荷载幅值下的变化特征较为相似。值得关注的是,侧向位移幅值随着格栅层数的增加呈逐渐衰减趋势;当格栅层数由1层增至4层时,路堤右侧坡顶处侧向位移幅值依次减小9.9%、19.3%、20.7%。

此外,随着土工格栅加筋层数的增加,路堤顶部表面侧向位移幅值整体呈逐渐减小趋势,且加载

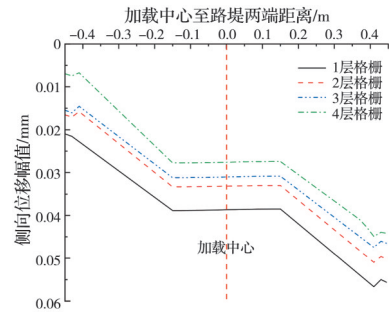


图20 不同加筋层数下路堤表面顶部侧向位移

Fig. 20 Lateral displacement at the top of embankment surface under different reinforcement layers

中心下方左右两侧位移的减幅差异较小,左侧减幅甚至略大于右侧。主要原因可能在于:路堤顶部表面虽无加筋材料,但格栅层数的增加能显著提升路堤整体抗侧向变形能力。由图18中可知,路堤左侧下方格栅加固效果更为显著,因此传递至上部表面时,其侧向位移幅值的衰减程度也更大。该现象进一步表明,多层加筋结构可通过优化土体内部应力传递路径,协同提升路堤整体的变形控制能力。

## 4 结论

基于倾斜基岩加筋轨道交通路堤数值分析模型,深入分析了列车循环荷载幅值、土工格栅层数等因素对加筋轨道交通路堤竖向位移与侧向位移动力响应规律的影响,得出以下主要结论:

1)受地层倾角的影响,路堤两侧土体在自重及外部荷载作用下呈非对称应力状态,并产生水平附加应力分量。该应力分布特征使得路堤土体表现出与地层倾向一致的非对称位移特征,其变形量与荷载幅值呈正相关关系。增加加筋层数可有效抑制路堤的不均匀变形。

2)在不同荷载幅值与加筋层数条件下,路堤侧向位移幅值的分布规律基本一致,侧向位移高值区出现在路堤左侧坡底与右侧坡顶。随着各参数的改变,路堤右侧坡顶的侧向峰值位移增长更为显著,成为侧向位移最大区域,主要原因是倾斜基岩使路堤内部应力分布呈非对称特征。在实际工程中,应对靠近基岩一侧的路堤顶部土体采取更为有效的加固措施,以控制其侧向变形。

3)土工格栅对加筋路堤侧向位移幅值的约束作用显著。随着土工格栅层数的增加,路堤整体侧向位移幅值逐渐减小,产生侧向位移的区域缩小,并逐渐上移。在各层格栅所处深度位置,路堤侧向位移幅值随路堤深度的变化曲线出现明显谷值,谷

值深度与格栅布置位置基本一致。

### 参考文献

- [1] Sharma R, Chen Q M, Abu-Farsakh M, et al. Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(1): 63-72.
- [2] Deb K, Basudhar P K, Chandra S. Axi-symmetric analysis of geosynthetic-reinforced granular fill-soft soil system with group of stone columns[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(2): 177-186.
- [3] Zhang L, Ou Q, Zhao M H. Deformation behavior of geocell reinforced granular cushion over soft soil with stone columns[C]//*Proceedings of the 2nd International Symposium on Asia Urban Geo Engineering*. Singapore: Springer, 2018: 412-424.
- [4] Mukherjee S, Sivakumar Babu G L. Three-dimensional numerical modeling of geogrid reinforced foundations[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 158: 105397.
- [5] 张玲, 欧强, 赵明华, 等. 移动荷载下土工加筋路堤动力响应特性数值分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2865-2874.  
Zhang L, Ou Q, Zhao M H, et al. Numerical analysis on dynamic response characteristics of geosynthetic reinforced embankment under moving load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2865-2874. (in Chinese)
- [6] Wang Z J, Xia Q S, Yang G Q, et al. Effects of transverse members on geogrid pullout behavior considering rigid and flexible top boundaries[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, 51(4): 72-84.
- [7] 芮瑞, 贺世开, 刘浩, 等. 基于混合试验的桩承式加筋路堤参数影响分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(7): 1476-1487.  
Rui R, He S K, Liu H, et al. Parametric analysis of geosynthetic-reinforced pile-supported embankments using hybrid tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1476-1487. (in Chinese)
- [8] 肖宏, 蒋关鲁, 魏永幸. 遂渝线无砟轨道桩网结构路基现场动车试验测试分析[J]. *铁道学报*, 2010, 32(1): 79-84.  
Xiao H, Jiang G L, Wei Y X. Dynamic test analysis on ballastless-track column-net structure subgrade of the Suining-Chongqing railway line[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(1): 79-84. (in Chinese)
- [9] Luo Z G, Ding X M, Ou Q, et al. Bearing capacity and deformation behavior of rigid strip footings on coral sand slopes[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 267: 113317.
- [10] 陈育民, 谢云飞, 薛珊珊, 等. 列车荷载作用下X形桩网复合地基动力响应研究[J]. *振动工程学报*, 2022, 35(4): 857-865.  
Chen Y M, Xie Y F, Xue S S, et al. Dynamic response of XCC pile-net composite foundation under train loading [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(4): 857-865. (in Chinese)
- [11] Ding X M, Luo Z G, Ou Q. Mechanical property and deformation behavior of geogrid reinforced calcareous sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(4): 618-631.
- [12] 徐鹏, 蒋关鲁, 任世杰, 等. 简谐波作用下加筋土挡墙动土压力模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增刊2): 4283-4289.  
Xu P, Jiang G L, Ren S J, et al. Study on dynamic earth pressure of reinforced soil retaining walls under harmonic wave by model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Sup 2): 4283-4289. (in Chinese)
- [13] 牛婷婷, 刘汉龙, 丁选明, 等. 高铁列车荷载作用下桩网复合地基振动特性模型试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(3): 872-880.  
Niu T T, Liu H L, Ding X M, et al. Piled embankment model test on vibration characteristics under high-speed train loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 872-880. (in Chinese)
- [14] 罗烈日, 郑俊杰. 交通荷载下斜坡加筋路堤动力特性研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(4): 72-76.  
Luo L R, Zheng J J. Study on dynamic characteristics of slantwise geosynthetic reinforced embankment under traffic load[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2015, 36(4): 72-76. (in Chinese)
- [15] 杨森, 王宁, 卢萍, 等. 斜坡地基上高填方加筋路堤变形应力特征研究[J]. *施工技术*, 2014, 43(17): 102-106.  
Yang S, Wang N, Lu P, et al. Study on deformation and stress characteristics of high fill reinforced subgrade on slope foundation[J]. *Construction Technology*, 2014, 43(17): 102-106. (in Chinese)
- [16] 赵炼恒, 王志斌, 李亮, 等. 斜坡地基高填方路堤模型试验极限承载力数值分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2010, 34(3): 488-491.  
Zhao L H, Wang Z B, Li L, et al. Ultimate bearing capacity numerical analysis of laboratory model tests for high fill embankments on slope foundation[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2010, 34(3): 488-491. (in Chinese)
- [17] 刘晋南, 蒋鑫, 邱延峻. 路堤荷载作用下斜坡软弱地基变形耦合特性研究[J]. *铁道学报*, 2015, 37(4): 94-100.  
Liu J N, Jiang X, Qiu Y J. Deformation coupling characteristics of sloped weak ground under embankment load[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(4): 94-100. (in Chinese)
- [18] Ding X M, Qu L M, Yang J C, et al. Experimental study on the pile group-soil vibration induced by railway

- traffic under the inclined bedrock condition[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(12): 3613-3620.
- [19] Ding X M, Qu L M, Yang J C, et al. Soil vibration induced by railway traffic around a pile under the inclined bedrock condition[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2021, 24(2): 143-156.
- [20] 丁选明, 杨金川, 王成龙, 等. 复杂地形下山区轨道交通振动传播规律现场测试[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2019, 1(3): 39-45.  
Ding X M, Yang J C, Wang C L, et al. Field tests on attenuation of train induced soil vibration under inclined topography conditions[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2019, 1(3): 39-45. (in Chinese)
- [21] 瞿立明. 倾斜地层中桩基竖向动力响应模型试验与计算分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
Qu L M. Model tests and calculation analysis on vertical dynamic responses of piles in inclined strata[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [22] 瞿立明, 丁选明, 巫崇荣, 等. 竖向受荷单桩动力响应特性模型试验研究[J]. *振动工程学报*, 2020, 33(6): 1282-1290.  
Qu L M, Ding X M, Wu C R, et al. Model test investigation on dynamic response of a single pile under vertical cyclic loading[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(6): 1282-1290. (in Chinese)
- [23] Qu L M, Ding X M, Kouroussis G, et al. Dynamic interaction of soil and end-bearing piles in sloping ground: numerical simulation and analytical solution[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 134: 103917.
- [24] 杨金川, 丁选明, 瞿立明, 等. 山区地形条件下高架轨道交通引起地面振动实测研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(1): 133-139, 151.  
Yang J C, Ding X M, Qu L M, et al. Field tests on ground vibration caused by viaduct rail transit under mountainous terrain conditions[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(1): 133-139, 151. (in Chinese)
- [25] 杨金川, 丁选明, 王成龙, 等. 交通荷载下考虑倾斜基岩影响的单桩桩周土振动特性数值模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(6): 1575-1583.  
Yang J C, Ding X M, Wang C L, et al. Numerical simulation of vibration response of soil around a single pile under traffic load and sloping bedrock condition[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(6): 1575-1583. (in Chinese)
- [26] 杨金川, 丁选明, 瞿立明, 等. 倾斜基岩条件下轨道交通振动衰减规律研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(5): 27-34.  
Yang J C, Ding X M, Qu L M, et al. Study on the vibration attenuation caused by rail traffic under sloping bedrock condition[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(5): 27-34. (in Chinese)
- [27] 杨金川. 复杂地形条件下轨道交通引起桩周土振动衰减规律研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.  
Yang J C. Study on the attenuation of train induced soil vibration around piles under complicated topography condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [28] 熊克健. 不同截面形式双面加筋路堤抗震性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.  
Xiong K J. Study on seismic performance of back-to-back geosynthetic-reinforced soil(GRS) road embankments with different cross-sections[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [29] Wang Y X, Guo P P, Ren W X, et al. Laboratory investigation on strength characteristics of expansive soil treated with jute fiber reinforcement[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(11): 04017101.
- [30] Wang Y X, Guo P P, Dai F, et al. Behavior and modeling of fiber-reinforced clay under triaxial compression by combining the superposition method with the energy-based homogenization technique[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(12): 04018172.
- [31] Wang Y X, Guo P P, Lin H, et al. Numerical analysis of fiber-reinforced soils based on the equivalent additional stress concept[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(11): 04019122.
- [32] 丁选明, 任寄瑜, 欧强, 等. 倾斜地层土工加筋路堤列车荷载动力响应特性模型试验研究[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*. [\(https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20241215.0833.002\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20241215.0833.002.DING X M, Ding X M, Ren J Y, Ou Q, et al. Model test study on dynamic response characteristics of geotechnical reinforced embankment under train loads in inclined stratum [J/OL]. <i>Journal of Civil and Environmental Engineering</i>. <a href=). (in Chinese)
- [33] 欧强. 移动荷载下土工加筋路堤动力响应特性及其分析方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020.  
Ou Q. The research on dynamic response characteristics and analytical methods of geotechnical reinforced embankment under moving load[D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)
- [34] Ding X M, Zhao J Q, Ou Q, et al. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced embankment performance under moving loads[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(2): 682-696.

- [35] 张兴强, 邓卫东, 陈文金, 等. 动载作用下土工格栅加筋土计算模型的研究[J]. 水利学报, 2001, 32(7): 91-97. Zhang X Q, Deng W D, Chen W J, et al. Computation model for interaction of soil and geogrid under dynamic load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(7): 91-97. (in Chinese)
- [36] Abu-Farsakh M, Hanandeh S, Mohammad L, et al. Performance of geosynthetic reinforced/stabilized paved roads built over soft soil under cyclic plate loads[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(6): 845-853.
- [37] 陈义军, 刘长武, 徐进, 等. 山区公路斜坡填筑路堤应力变形特征及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1051-1056. Chen Y J, Liu C W, Xu J, et al. Analysis of deformation stress feature and influential factors about road-dike on ramp in mountainous region expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1051-1056. (in Chinese)
- [38] 郭小川, 刘德富, 肖衡林. 新型土工格栅加筋土路堤模型试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2014, 29(2): 5-9. Guo X C, Liu D F, Xiao H L. Model tests on geogrid reinforced embankment[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2014, 29(2): 5-9. (in Chinese)

(编辑 朱备)