

静动荷载作用下加筋土桥台变形特性研究

董彦莉^{1,2}, 张浩东^{1,3}, 赵致艺¹, 张军², 冯浩然¹

- 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原 030051;
- 山西交通科学研究院 交通运输部黄土地区公路建设与养护技术重点实验室, 山西 太原 030006;
- 国能朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 沧州 062350)

摘要: 加筋土桥台具有工程造价低、易于施工、绿色环保等优点, 并且能解决传统桥台的桥头跳车的问题, 因此得到了推广与应用。本文以一座现有的加筋土桥台为原型, 通过FLAC3D有限差分软件进行数值模拟, 分析了静荷载与车辆动荷载对不同面板形式的加筋土桥台沉降及侧向位移的影响。研究表明, 随着荷载的增大, 静荷载作用下桥台沉降与面板位移均明显增大, 但动荷载作用下的桥台沉降与面板水平位移变化不是很明显; 加筋土桥台设置筋材加密区能够有效减小静荷载作用下的桥台面板水平位移; 在本文所研究的小型车辆重量下, 车辆行驶速度不是影响桥台沉降量的主要因素, 且车辆行驶速度对桥台面板水平位移的影响也很有限; 加筋土桥台设置混凝土面板能够有效减小桥台面板的水平位移, 且无论是在静荷载作用下还是动荷载作用下, 有混凝土面板的土工格栅平铺式加筋土桥台都比其它两种桥台控制桥台面板水平变形的效果更好。研究结果可为加筋土桥台的工程设计及维护使用提供一定参考。

关键词: 土工合成材料加筋土; 静动荷载; 加筋土桥台; 荷载工况; 变形特性

中图分类号: TU43; U443.21 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.07.0019

引用格式: 董彦莉, 张浩东, 赵致艺, 等. 静动荷载作用下加筋土桥台变形特性研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 188-196.

DONG Yanli, ZHANG Haodong, ZHAO Zhiyi, et al. Study on deformation characteristics of reinforced soil abutment under static and dynamic loads[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2025, 46(2): 188-196.

Study on Deformation Characteristics of Reinforced Soil Abutment Under Static and Dynamic Loads

DONG Yanli^{1,2}, ZHANG Haodong^{1,3}, ZHAO Zhiyi¹, ZHANG Jun², FENG Haoran¹

- School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Ministry of Transport, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China;
- Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Cangzhou 062350, China)

Abstract: Reinforced soil abutment has the advantages of low engineering cost, easy construction, green environmental protection, etc., and can solve the problem of traditional abutment head jump, so it has been popularized and used. Using an existing reinforced soil abutment as a prototype, the effects of static load and vehicle dynamic load on the settlement and lateral displacement of reinforced soil abutment with

收稿日期: 2024-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278360); 山西省黄土地区公路建设与养护技术国家交通行业重点实验室开放基金资助项目(KLTLR-Y23-2); 山西省自然科学基金资助项目(202403021211082)

作者简介: 董彦莉(1982-), 女, 副教授, 博士, 主要从事加筋土结构的研究。E-mail: dongyli82@nuc.edu.cn。

different panel forms were analyzed by numerical simulation using FLAC3D finite difference software. The results show that with the increase of load, the abutment settlement and panel displacement increase obviously under static load, but the change of abutment settlement and panel horizontal displacement under dynamic load is not obvious. The horizontal displacement of the slab of the reinforced soil abutment under static load can be effectively reduced by setting the reinforcement filler area. At the weight of the small vehicle studied in this paper, the vehicle speed is not the main factor affecting the settlement of the abutment, and the influence of the vehicle speed on the horizontal displacement of the abutment panel is limited. The horizontal displacement of the reinforced soil abutment can be effectively reduced by installing concrete panels, and the geogrid flat reinforced soil abutment with concrete panels is more effective than the other two types of abutments in controlling the horizontal deformation of the abutment panels, no matter under static load or dynamic load. The research results can provide some reference for the engineering design and maintenance of reinforced soil abutment.

Key words: geosynthetic reinforced soil; static and dynamic load; reinforced soil bridge abutment; loading condition; deformation characteristics

0 引 言

土工合成材料加筋土柔性桥台复合结构(Geosynthetic Reinforced Soil-Integrated Bridge System, GRS-IBS), 本文简称为加筋土桥台, 是土工合成材料加筋土(Geosynthetic Reinforced Soils, GRS)的进一步应用。美国联邦公路管理局的“未来桥梁计划”中提出了用加筋土桥台替换中、小型单跨桥梁的方法, 用以解决桥梁的更新换代问题^[1]。加筋土桥台具有施工工期短、工程造价低、占地面积小等优点, 且能在极大程度上消除由桥台与引道之间的不同沉降而引起的桥头跳车的问题。

一些学者已经对加筋土桥台的影响因素进行了很多研究。对于静荷载作用下的加筋土桥台, Xu等^[2]对具有垂直或近垂直面角的加筋土桥台承载力进行了分析研究, 提出了一种基于y型破坏机制的极限分析方法, 以确定加筋土桥台的承载能力和相应的破坏面几何形状。Ardah等^[3]通过二维有限元模型分析发现, 回填材料的内摩擦角对加筋土桥台的性能有显著影响。二次加筋、setback距离、支座宽度对加筋土桥台性能影响较小, 加筋土基础宽度和筋材长度对加筋土桥台性能的影响可以忽略不计。Abu-Farsakh等^[4]通过有限元分析发现桥台高度和跨长对沿筋材方向最大应变的分布和侧向位移有显著影响。Zheng等^[5]通过数值模拟发现筋材刚度、桥梁荷载和桥台高度对横向位移和桥座沉降的影响最大; 彭铁坤等^[6]通过数值模拟分析了静荷载作用下的变形及应力应变分布规律; 张道等^[7]通过大比例缩尺模型

的静载试验得出基座位置是影响加筋土桥台承载性能的重要因素。对于加筋土桥台的抗震性能, 徐超^[8], 罗敏敏等^[9]通过振动台缩尺模型试验证明GRS-IBS结构具有良好的抗震性能且减小桥台的加筋间距有利于提高加筋桥台的抗震性能。罗敏敏等^[10]还深入研究了国内外关于加筋土挡墙抗震设计的规范标准, 得出了一个重要结果: 加筋土桥台在地震作用下的响应与一般加筋土挡墙存在显著差异。具体而言, 桥台在经历较大变形时所需的临界加速度明显高于一般加筋土挡墙的范围。在达到临界加速度之前, 桥台能够保持良好的结构完整性, 其侧向变形增量被严格控制在0.5%以内, 这说明对加筋土挡墙的变形研究结果并不完全适用于加筋土桥台。Askari等^[11]开发了一系列实际现场条件的数值模型, 利用FLAC程序中校准的数值模型发现, 在0.5g谐波基础加速度下, 面板水平约束对施工结束时加筋土墙体位移和筋材拉力的影响很大; Xu等^[12]通过振动台试验还发现相较于提升筋材刚度, 缩小加筋间距能更有效地减少地震对桥台的影响, 桥梁的纵向震动会增加加筋区的竖向应力, 而土工格栅的最大拉力则分别出现在梁座下方和桥台端面位置; Zheng等^[13-14]也通过振动台试验发现动荷载作用下加筋土桥台的最大拉应力出现在梁座下方; 对于车辆动荷载作用下的加筋土桥台, 王裘申等^[15]通过室内大比例缩尺模型试验对加筋土桥台在交通荷载下的工作性能进行了研究, 但该试验仅研究了一种面板; 徐超等^[16]研究了路面荷载下包裹式加筋土桥台的变形, 但只研究了静载下的变形。因此, 目前针对静动荷载下加筋土桥台变形特性的综合研究很少, 仍有进一步

研究的必要。

本文在已有研究成果和工程经验基础上,以实际工程案例为依托,以一座现有的加筋土桥台为原型,运用FLAC3D进行数值模拟分析,通过改变荷载类型、荷载大小及面板类型对加筋土桥台在不同变量下的变形进行综合分析。

1 工程概述

本文以美国路易斯安那州第一座加筋土桥Maree

Michel桥^[17-18]为原型进行研究,全桥跨径19.8 m,桥梁上部总宽度约为9.1 m。桥梁主体为7根钢梁,桥跨直接放置在加筋土桥台上,桥台长度为13.5 m,宽度约为11.9 m,从基础算起墙高约为5.3 m,从基础到梁座约为4 m。桥台内部土工格栅加筋间距为0.2 m,在桥台顶部的5层土工格栅内以0.1 m的间距设置筋材加密区,土工格栅采用有纺聚丙烯(PP)土工格栅,综合引道的路基同样也是使用加筋土并在梁座下进行反包处理。桥梁原型如图1所示。

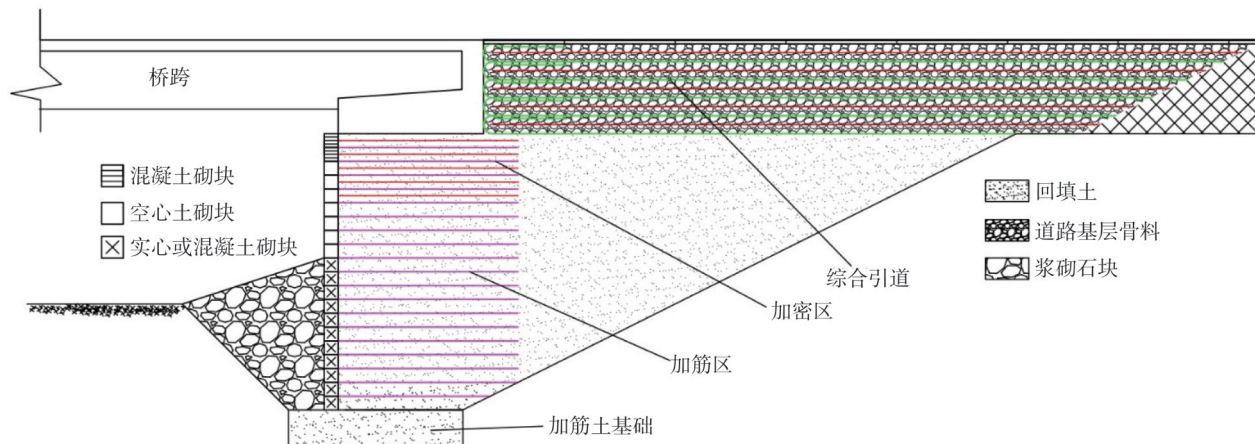


图1 Maree Michel桥原型

Fig. 1 Maree Michel bridge prototype

2 数值模型分析

FLAC3D常被应用于岩土工程的计算中,能模拟计算现实中岩体、土地等其他连续介质中结构的受力和变形情况,适合于本文加筋土桥台变形特性的分析。本文将依据Maree Michel桥原有工况建立加筋土桥台模型,将其变形数值与现场长期监测下的变形数值进行佐证,以验证数值模型的可靠性,从而进行更多相关参数的研究

2.1 模型的建立

使用FLAC3D软件进行建模,面板全高 H 为4 m,面板上部包括桥面板、支座、引道填土等,

高度共1.3 m,桥台总高度 Z 为5.3 m, X 方向宽度为11.9 m,沿 Y 方向长度为13.5 m,均按实际尺寸进行赋值。面层后填土中的土工格栅通过使用软件FLAC3D中内置的土工格栅结构单元(Geogrid)来建模,土工格栅的尺寸采用实际工程中使用筋材的尺寸,长2.6 m,桥台 Z 轴方向1 m到3 m处按照间隔0.2 m进行铺设,3 m到4 m处按照间隔0.1 m处进行铺设,综合引道与加筋材料分层压筑完成,因此,在综合引道内每隔0.2 m铺设土工格栅,共铺设6层。模型分为综合引道(approach)、面板(panel)、梁座(seat)以及填土(soil),各组按照实际加筋土桥台参数进行赋值,实际加筋土桥台各参数见表1,土工格栅参数见表2。

表1 加筋土桥台各组参数

Tab. 1 Parameters of each group of reinforced soil abutment

结构单元	力学模型	弹性模量/GPa	泊松比	干重度/(kN·m ⁻³)	湿重度/(kN·m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角 φ
填土	硬化土	—	0.2	18.0	19.00	20.0	51.0
面板	线弹性	30	0	12.5	—	—	—
地基	摩尔库伦	0.03	0.2	15.2	18.65	17.7	27.0
桥跨结构	线弹性	20	0.2	25.0	—	—	—
基岩	线弹性	2	0.2	20.0	—	—	—

表 2 土工格栅的参数
Tab. 2 Parameter of geogrid

厚度/mm	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	切向刚度/ $(\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1})$	抗拉刚度/ $(\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1})$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ
5	200	0.33	8.5×10^3	25	15	30

在本文中对加筋土模型施加静荷载时,将加筋土桥台模型底部 $Z=0\text{ m}$ 的界面设置为固定边界,将 $X=0\text{ m}$ 的界面设置为固定边界,在加筋土桥台模型上部采用自由边界,对 $X=11.9\text{ m}$ 的界面不做限制,在施加静荷载前,初始应力场需要考虑自重。在施加车辆动荷载时,采用与静荷载相同的边界条件,在进行动力分析之前先调用 FLAC3D 的动力分析模块,需开启该模块中大变形计算模式,在动力分析时由于模型边界受到波的反射的影响,需要考虑模型边界对模型计算准确性的影响,因此,在模拟过程中将模型的边界设置为自由场边界,使得边界上单元的属性等转移到自由场边界的单元上,使得模型边界能吸收入射波。在 FLAC3D 这一软件中共有 4 种阻尼:瑞利、滞后、局部以及混合阻尼,其中局部阻尼和混合阻尼用于静态模拟,滞后阻尼在用于各向同性弹性模型时运算效率较低,因此本文动态模拟使用瑞利阻尼。在软件模拟计算时,当收敛最大不平衡力与典型内力的比率小于 10^{-6} 时,计算终止。加筋土桥台数值模型见图 2。

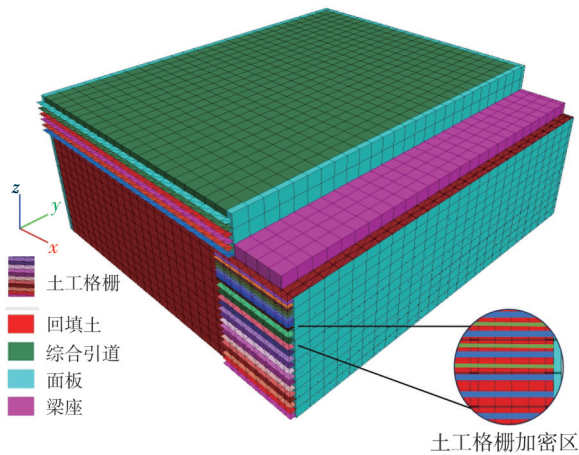


图 2 加筋土桥台数值模型

Fig. 2 Numerical model of reinforced soil abutment

2.2 模型验证

数值模型的验证基于现场监测数据来进行,本文通过对比现场监测下桥台变形位移与数值模拟下桥台的位移变形来确定所建模型的可行性。

Saghebfar 等^[17]为了监测 Maree Michel 大桥在使用期间的性能,在 GRS-IBS 体系中一侧桥台内安装

了位移传感器、压力器等 6 种监测仪器,用来监测桥台的地基以及填土回填引起的沉降等其他变形。按照文献中原位监测所安置的仪器位置进行数值模拟监测后的沉降位移云图见图 3,模拟沉降对比见图 4。由图 3 和图 4 可以看出两者在末端的差异较大,原因可能为现场监测使用的水平阵列式位移计末端固定于沉降板,对末端的沉降值有一定的影响。原位监测后的位移结果与软件模拟后的结果趋势一致,两者最大误差不超过 0.5 mm,模拟结果满足标准,说明所建模型满足可行性要求。

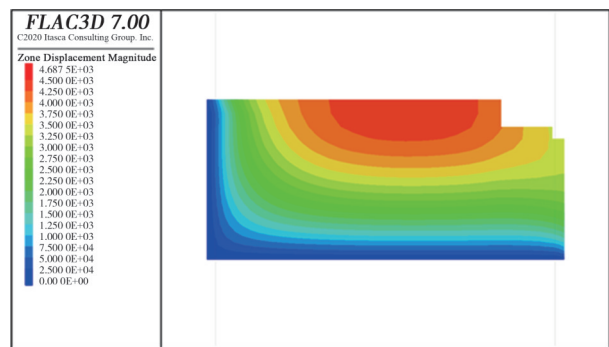


图 3 沉降位移云图

Fig. 3 Settlement displacement cloud map

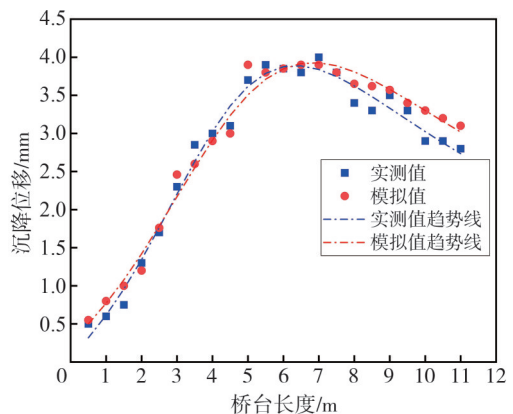


图 4 沉降位移对比

Fig. 4 Settlement displacement comparison

2.3 数值分析方案

2.3.1 荷载选取

本文桥台数值模型的原型是位于美国路易斯安那州的 Maree Michel 桥,根据美国加筋土桥台设计手册估算^[1],加筋土桥台的极限承载力为 48 kPa,换算成上部荷载约为 30 kN。本文参考张

道等^[7]以Bowman桥为模型进行的变形特性研究,用3倍的桥台极限承载力作为模型的最大加载值,即以90 kN作为模型最大加载值,最终选定30, 60, 90 kN的静荷载进行研究。

一般私家车重量在1.5~2.0 t之间,本文车辆重量取中间值1.75 t,按照工程实例Maree Michel桥的桥梁长度,根据规范划分为3级公路,3级公路的限速为30~60 km/h,因此,本文取30, 45和60 km/h三种速度,由于梁座的宽度并不宽,所以车辆经过梁座的时间远小于1 s,因此,车辆动荷载的施加时间为2 s,在这些条件下模拟连续车辆行驶过加筋土桥台的情况。本文荷载均施加在桥台的梁座位置。

在车辆动荷载模型的选择中,如果将荷载简单地简化为静力荷载模型或矩形荷载模型,则与车辆动荷载由远及近再由近及远的作用方式差别较大,而冲击荷载模型主要用于重型车辆行驶路段。因此,根据各个简化模型的适用情况及优缺点,同时结合本文的研究对象与目前国内外对车辆荷载模型的理论研究情况,最终选定半波正弦荷载模型来模拟交通荷载,其波形如图5所示。

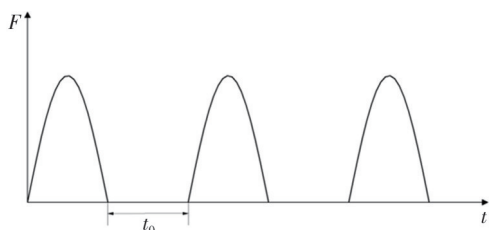


图5 半波正弦荷载模型

Fig. 5 Half wave sinusoidal load model

在这个简化模型中,一个半波表示车辆荷载作用一次, t_0 表示两辆车的荷载作用间隔。

作用于路面的车辆荷载可表示为^[19]

$$F(t) = p + q(t), \quad (1)$$

式中: p 为车辆静荷载; q 为车辆附加动荷载,其值随时间 t 变化,将其等效为正弦分布荷载。

$q(t)$ 表示为

$$q(t) = q_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{T}\right), \quad (2)$$

$$T = \frac{12R}{v}, \quad (3)$$

式中: q_{\max} 为汽车附加动荷载幅值; T 为荷载作用周期; R 为轮胎接触面积半径^[20]; v 为汽车行驶速度。

q_{\max} 的取值一般不超过汽车静荷载的1/3,本文取 $q_{\max} = 0.3p$,并将式(2)通过周期转换进行简化,最终得到半波正弦荷载的荷载作用公式为

$$F(t) = p + 0.3p \sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right). \quad (4)$$

2.3.2 位移监测点

为监测静荷载作用下的变形特征,本文在模型 $X=9$ m的面与 $Y=6.75$ m的面相交的线处按照 Z 轴方向每隔0.25 m设置一个监测点,第一个监测点设置在(9, 6.75, 5.25)处,共计21个监测点,用来监测桥台沉降;在加筋土桥台模型面板中央,即 $X=11.8$ m, $Y=6.75$ m处,在 Z 方向的0.25~4 m之间以0.25 m的间隔共设置16个监测点,用于监测面板的水平位移。

在监测车辆动荷载下的变形特征时,因为动力模拟计算花费的时间较长,所以为了缩短计算时间,在监测桥台沉降时,将监测点的间距由静荷载下的0.25 m变为动荷载下的0.5 m,在加筋土桥台 $X=9$ m处设置监测点11个;在监测桥台面板的水平位移时,在加筋土桥台模型面板中央,即 $X=11.8$ m, $Y=6.75$ m处,在 Z 方向在的0.25 m处设置1个监测点,在1~4 m之间以0.5 m的间隔设置7个监测点,共8个监测点。监测点的整体位置如图6所示。

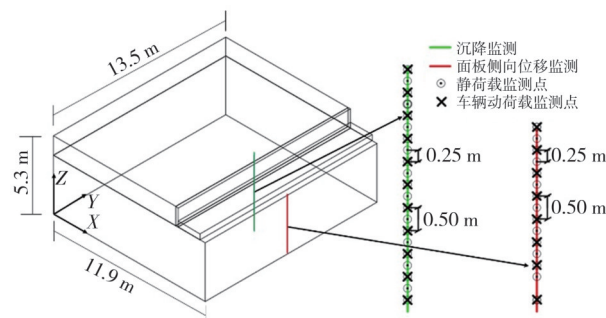


图6 位移监测点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of displacement monitoring points

2.3.3 工况选取

本次研究考虑了2种不同的参数:荷载类型与面板类型,其中荷载类型分为静荷载与车辆动荷载两种,且为使结果准确可靠,两种荷载从小到大各取3个值进行模拟研究;面板类型为反包式面板与混凝土面板。综上所述,共设计3组工况进行对照研究,并通过沉降量与面板水平位移来评估这些参数对加筋土桥台的影响。

1) 针对静荷载的工况组:荷载取值30, 60, 90 kN;桥台为有面板(本文所指面板皆为混凝土面板)的土工格栅反包式加筋土桥台。

2) 针对车辆动荷载的工况组:车辆速度取30, 45, 60 km/h三种速度;桥台为有面板土工格栅反包式加筋土桥台。

3) 工况组按面板划为无面板的土工格栅反包式加筋土桥台(桥台1), 有面板的土工格栅平铺式加筋土桥台(桥台2), 有面板的土工格栅反包式加筋土桥台(桥台3), 图7为桥台简化示意图。荷载分别为100 kN的静荷载和车辆速度为60 km/h的动荷载。

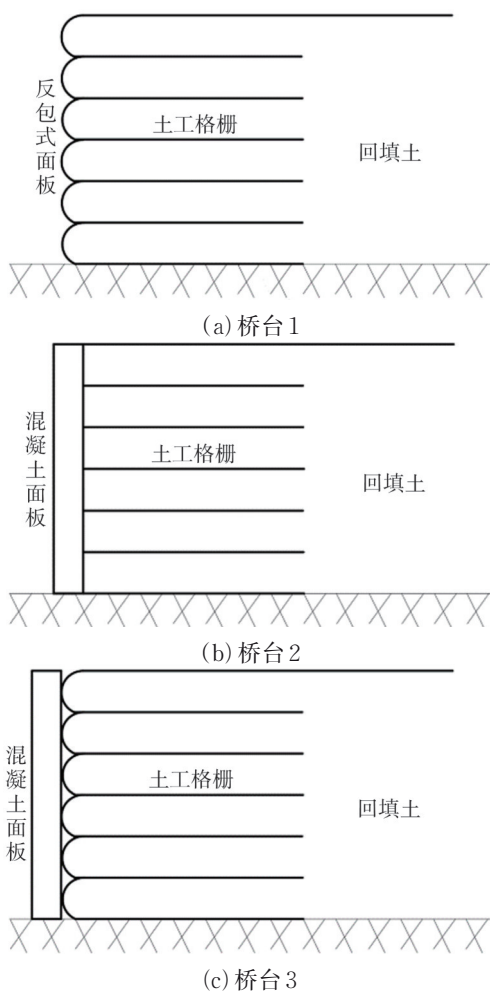


图7 3种加筋土桥台简化示意图

Fig. 7 Simplified diagram of three kinds of reinforced soil abutment

3 影响因素分析

3.1 荷载工况的影响

3.1.1 静荷载

图8为静荷载大小对有面板的土工格栅反包式加筋土桥台沉降量的影响。由图可知: 同一高度下荷载越大, 桥台沉降越大, 但最大也仅为0.11%, 即5.88 mm; 3种静荷载作用下的沉降比 $\Delta z/H$ (桥台沉降量 Δz 与桥台高度 H 之比, 下同)均随桥台高度的增加而增加, 但筋材未加密区增长曲线斜率均明显小于加密区, 可见设置筋材加密区能够有效减小静荷载作用下的桥台沉降; 加密区增长曲线的斜率均

明显小于综合引道加密区, 这是因为本文荷载作用位置所在平面位于综合引道所在平面下方的梁座, 不直接作用于综合引道。

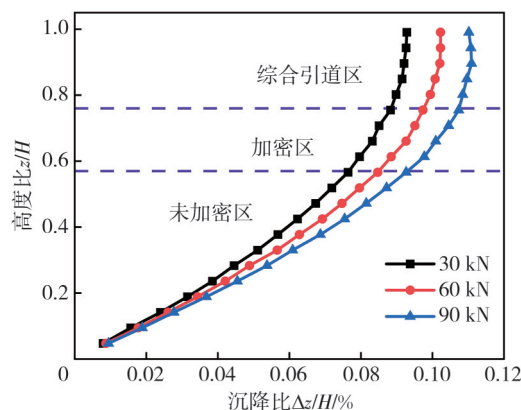


图8 静荷载对桥台沉降的影响

Fig. 8 Influence of static load on abutment settlement

图9为静荷载大小对有面板的土工格栅反包式加筋土桥台面板水平位移的影响。由图可知: 同一高度下的面板水平位移比(桥台面板水平位移量 Δx 与桥台高度 H 之比, 下同)同样随荷载的增大而增大, 最大值发生在桥台高度3 m处, 为0.047%, 即位移量为2.47 mm; 在3种静荷载作用下, 桥台面板整体上均呈外倾趋势, 这是由于模型所采用面板为整体式混凝土刚性面板, 该面板能够承受弯矩, 所以在水平方向的变形有绕基础旋转的趋势; 在筋材加密区的水平变形明显收敛, 且有回缩趋势, 是因为模型采用反包式加筋形式, 随着筋材加密, 面板所受到的土压力能够更好地由土工格栅传递至面板后的填土中, 从而减少混凝土面板所受压力, 有效控制其变形。

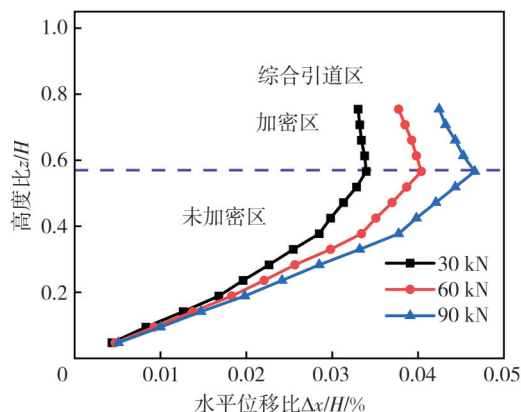


图9 静荷载对面板水平位移的影响

Fig. 9 Influence of static load on horizontal displacement of panel

3.1.2 车辆动荷载

图10为动荷载大小对有面板的土工格栅反包式加筋土桥台沉降量的影响。由图10可知, 在

车辆动荷载作用下,最大沉降比为60 km/h下的0.088%,即4.68 mm,在30 km/h与45 km/h的动荷载作用下加筋土桥台的沉降趋势基本相同,在60 km/h的动荷载作用下的桥台沉降则略大于前两者,说明在相同作用时间下,车辆行驶速度不是影响桥台沉降量的主要因素。3种动荷载作用下的沉降曲线斜率变化规律与静荷载作用下的沉降曲线斜率变化规律基本相同,不再重复。

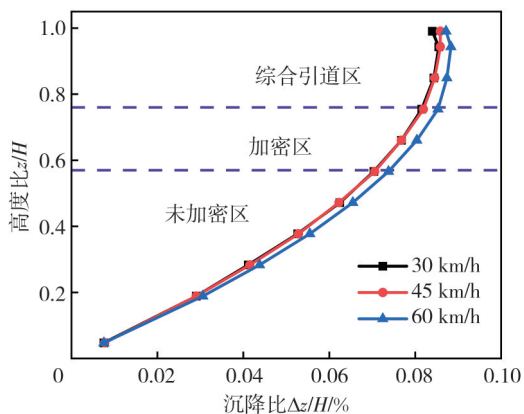


图10 车辆动荷载对桥台沉降的影响

Fig. 8 Influence of vehicle dynamic load on abutment settlement

图11为动荷载大小对有面板的土工格栅反包式加筋土桥台面水平位移的影响。其中,60 km/h的动荷载引起的桥台面水平位移最小,45 km/h的动荷载引起的面板水平位移最大,最大水平位移比为0.092%,即位移量为4.90 mm,但三者相差并不大,表明车辆行驶速度对桥台面水平位移的影响也很有限。筋材加密区增长曲线斜率相对未加密区变化很小,可见设置筋材加密区对车辆动荷载作用下桥台面水平位移的控制效果没有静荷载作用下那么显著。

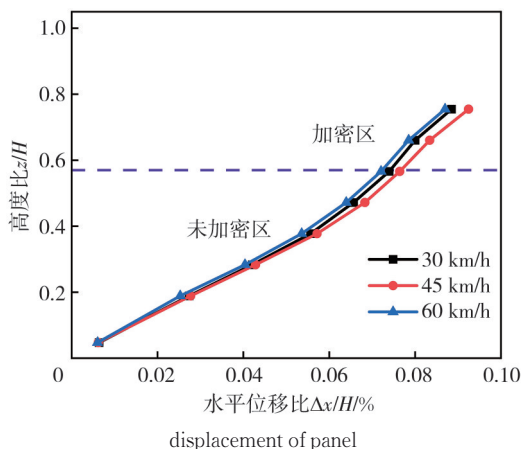


图11 车辆动荷载对面板水平位移的影响

Fig. 11 Influence of vehicle dynamic load on horizontal displacement of panel

3.1.3 综合分析

本节分别对有面板的土工格栅反包式加筋土桥台(桥台3)在静荷载和动荷载下的沉降与面板水平位移进行了研究,对比分析可知,静荷载的大小对桥台沉降与桥台面水平位移均存在明显影响,随着静荷载的增大,两者均随之增大,而动荷载的大小对桥台沉降与桥台面水平位移的影响很小。同时,筋材加密区的设置能够有效控制静荷载作用下的桥台面水平位移,且对静荷载与动荷载作用下的桥台沉降趋势有一定的减缓作用。

3.2 面板类型的影响

由于面板类型对桥台的沉降量影响很小,故本节仅研究不同面板类型桥台分别在静荷载与动荷载作用下的水平位移随高度的曲线变化规律。

3.2.1 静荷载

图12为采用3种面板类型的桥台在100 kN静荷载作用下其面板水平位移比随高度变化的曲线,其水平位移比最大值均在桥台高度3 m处,桥台1、桥台2和桥台3在此处的面板水平位移比分别为0.068%,0.044%和0.048%,即位移量分别为3.90,2.33和2.60 mm。

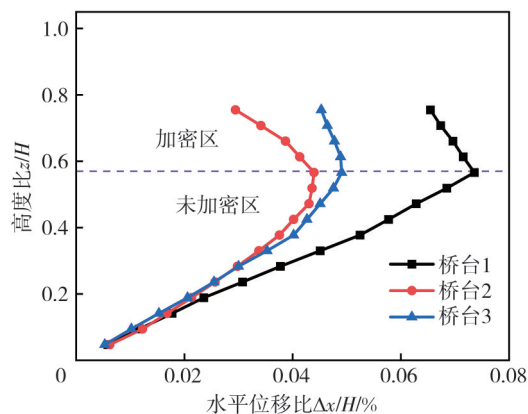


图12 静荷载作用下面板类型对其水平位移的影响

Fig. 12 Influence of panel type on its horizontal displacement under static load

由图12可知,在相同高度处,无面板的桥台1水平位移比远大于有面板的桥台2和桥台3,可见设置面板对减小桥台面水平位移有显著影响。然而同样是有面板,采用平铺式土工格栅的桥台2对面板水平位移的约束效果明显优于采用反包式土工格栅的桥台3。3种类型的桥台在加密区的面板水平位移比均出现了减小趋势,说明设置筋材加密区可以有效减小面板的水平位移。桥

台 1 由于未设置面板, 抵抗弯矩能力较差, 故在未加密区与加密区交界处的曲线存在突变, 桥台 2 和桥台 3 相对桥台 1 而言, 变化则较为平滑。

3.2.2 车辆动荷载

图 13 所示为在 60 km/h 的车辆动荷载作用下, 采用 3 种面板类型的桥台面水平位移比随桥台高度变化的曲线。由图 13 可知: 桥台 1 的最大水平位移比在靠近顶部的 3.5 m 处, 为 0.086%, 即位移量为 4.55 mm。桥台 2 和桥台 3 的最大水平位移比则均在桥台顶部, 分别为 0.072% 和 0.087%, 即位移量分别为 3.79 和 4.61 mm。桥台 2 对加筋土桥台面板的水平位移约束效果最好, 桥台 3 其次, 桥台 1 的约束效果相对较差。在面板顶部出现桥台 1 水平位移比小于桥台 3 的现象, 分析其原因可能是因为桥台 3 采用混凝土刚性面板, 当其变形较大时, 顶部有随下方最大水平位移点外倾的趋势, 导致面板与填料之间产生脱空, 从而使其顶部水平位移大于无面板的桥台 1, 而桥台 2 由于其变形较小, 水平位移变化曲线未出现这种现象。

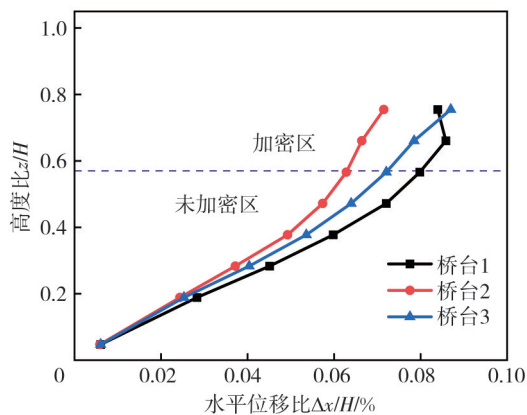


图 13 车辆动荷载作用下面板类型对其水平位移的影响

Fig. 13 Influence of panel type on horizontal displacement of vehicle under dynamic load

3.2.3 综合分析

本节主要分析 3 种不同面板类型桥台分别在 100 kN 静荷载与 60 km/h 的车辆动荷载作用下的水平位移, 对比可知, 随着面板类型的改变, 桥台面板的水平位移曲线也存在显著不同。无论哪种桥台, 筋材加密区对静荷载作用下的面板水平位移的控制效果均优于动荷载, 且无论是在静荷载还是动荷载作用下, 桥台 2 对面板水平位移的控制效果最好, 桥台 3 次之, 桥台 1 最差。

4 结 论

本文针对荷载类型和面板类型对桥台变形的影响, 在不同类型荷载和不同类型面板条件下, 对加筋土桥台沉降和面板水平位移进行了分析, 所得主要结论如下:

1) 随着荷载的增大, 静荷载作用下的桥台沉降与面板位移均明显增大, 但动荷载作用下的桥台沉降与面板水平位移变化不是很明显。

2) 静荷载作用下, 无论是同一面板不同荷载, 还是同一荷载不同面板, 其面板水平位移变化曲线在加密区与未加密区交界处均存在突变, 可见加筋土桥台设置筋材加密区能够有效减小静荷载作用下的桥台面水平位移。

3) 在质量为 1.75 t 的小型车辆作用下, 车辆行驶速度不是影响桥台沉降量的主要因素, 且车辆行驶速度对桥台面水平位移的影响也很有限。

4) 加筋土桥台设置混凝土面板能够有效减小桥台面板的水平位移, 且无论是在静荷载作用下还是动荷载作用下, 有混凝土面板的土工格栅平铺式加筋土桥台都比其它两种桥台控制桥台面水平变形的效果更好。

参考文献:

- [1] ADAMS M, NICKS J, STABILE T, et al. Geosynthetic reinforced soil integrated bridge system interim implementation guide: FHWA-HRT-11-0026 [R]. Washington: Federal Highway Administration, 2012.
- [2] XU P, LI T, HATAMI K. Limit analysis of bearing capacity and failure geometry of GRS bridge abutments [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 127: 103758.
- [3] ARDAH A, ABU-FARSAKH M, VOYIADJIS G. Numerical parametric study of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS)[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(1): 289-303.
- [4] ABU-FARSAKH M Y, ARDAH A, VOYIADJIS G Z. Numerical parametric study to evaluate the performance of a Geosynthetic Reinforced Soil - Integrated Bridge System (GRS-IBS) under service loading [J]. Transportation Geotechnics, 2019, 20: 100238.
- [5] ZHENG Y, FOX P J. Numerical investigation of the geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system under static loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143 (6) :

- 04017008.
- [6] 彭铁坤, 龚硕, 朱云升. 加筋土桥台复合结构在静载下的性能研究[C]//2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(桥梁工程与隧道工程篇). 北京: 人民交通出版社, 2022: 9.
- [7] 张道, 徐超, 王裘申, 等. 加筋土桥台承载特性的载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4027-4034.
ZHANG Xiao, XU Chao, WANG Qiushen, et al. Load test study of bearing characteristics of reinforced soil abutments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 4027-4034. (in Chinese)
- [8] 徐超, 罗敏敏, 任非凡, 等. 加筋土柔性桥台复合结构抗震性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 179-186.
XU Chao, LUO Minmin, REN Feifan, et al. Experimental study on seismic behavior of reinforced soil flexible abutment composite structure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S1): 179-186. (in Chinese)
- [9] 罗敏敏, 徐超, 杨阳, 等. 加筋土柔性桥台复合结构抗震性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 1541-1547.
LUO Minmin, XU Chao, YANG Yang, et al. Seismic performance of geosynthetic reinforced soil-integrated structure in shaking table test[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1541-1547. (in Chinese)
- [10] 罗敏敏, 徐超, 梁程, 等. 基于振动台试验的加筋土柔性桥台抗震设计参数取值方法对比分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 375-387.
LUO Minmin, XU Chao, LIANG Cheng, et al. Comparative analysis of seismic design parameter values for geosynthetic-reinforced soil abutment based on shaking table test[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2024, 55(1): 375-387. (in Chinese)
- [11] ASKARI M, RAZEGHI H R, MAMAGHANIAN J. Numerical study of geosynthetic reinforced soil bridge abutment performance under static and seismic loading considering effects of bridge deck[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(5): 1339-1354.
- [12] XU C, LUO M, SHEN P, et al. Seismic performance of a whole geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system (GRS-IBS) in shaking table test[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(3): 315-330.
- [13] ZHENG Y, MCCARTNEY J S, SHING P B, et al. Transverse shaking table test of a half-scale geosynthetic reinforced soil bridge abutment[J]. *Geosynthetics International*, 2018, 25(6): 582-598.
- [14] ZHENG Y, MCCARTNEY J S, SHING P B, et al. Physical model tests of half-scale geosynthetic reinforced soil bridge abutments. II: Dynamic loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(11): 04019095.
- [15] 王裘申, 徐超, 张振, 等. 交通荷载下加筋土桥台工作性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3416-3425.
WANG Qiushen, XU Chao, ZHANG Zhen, et al. Experimental study on service performance of reinforced soil abutment subjected to traffic loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(12): 3416-3425. (in Chinese)
- [16] 徐超, 金宇, 杨阳, 等. 路面荷载下包裹式加筋土桥台变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 410-418.
XU Chao, JIN Yu, YANG Yang, et al. Experimental study of deformation of mixed reinforced soil abutment under pavement load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(S1): 410-418. (in Chinese)
- [17] SAGHEBFAR M, ABU-FARSAKH M, ARDAH A, et al. Performance monitoring of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS) in Louisiana[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(2): 34-47.
- [18] SAGHEBFAR M, ABU-FARSAKH M Y, ARDAH A, et al. Full-scale testing of geosynthetic-reinforced, soil-integrated bridge system[J]. *Transportation Research Record*, 2017, 2656(1): 40-52.
- [19] 肖川, 艾长发, 邱延峻. 动载作用下典型沥青路面剪应力特性分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(7): 19-26.
XIAO Chuan, AI Changfa, QIU Yanjun. Analysis on shear stress property of typical asphalt pavement under dynamic load[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33(7): 19-26. (in Chinese)
- [20] 张兴强, 闫澍旺, 邓卫东. 交通荷载作用下加筋道路机理分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 94-98.
ZHANG Xingqiang, YAN Shuwang, DENG Weidong. Principle analysis of reinforced pavement under automobile loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(1): 94-98. (in Chinese)