

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0041

交通荷载下加筋土桥台工作性能试验研究

王裘申^{1,2}, 徐 超^{1,2}, 张 振^{1,2}, 沈盼盼³, 吴伟成^{1,2}, 张 逍^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

摘 要: 加筋土桥台因其具有良好的复合体特性, 被广泛应用于各项工程建设, 研究它在实际工程条件下的工作性能对其设计和推广具有重要意义。加筋土桥台在服役过程中主要承受交通荷载作用, 通过室内大比例缩尺模型的加速应力试验, 研究交通荷载条件下加筋土桥台的工作性能, 考虑加筋间距与筋材刚度的影响, 综合分析了不同交通荷载等级和循环次数下桥台变形与筋材应变的变化规律。研究结果表明, 加筋土桥台在交通荷载作用下整体变形随循环次数趋于收敛, 其顶部沉降、面板水平位移与筋材应变均远小于规范给出的阈值; 各变形值随加载时间呈阶梯状发展, 不同条件下变形收敛趋势有所差异; 增大筋材刚度和减小加筋层间距有利于控制桥台的变形, 筋材刚度对变形的控制作用要优于加筋间距; 交通荷载作用下面板水平应变与顶部竖向应变并不满足 2 倍关系, 二者之间的定量关系有待进一步研究。

关 键 词: 加筋土桥台; 交通荷载; 模型试验; 加速应力法; 工作性能

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 12-3416-10

Experimental study on service performance of reinforced soil abutment subjected to traffic loads

WANG Qiu-shen^{1,2}, XU Chao^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, SHEN Pan-pan³, WU Wei-cheng^{1,2}, ZHANG Xiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: Reinforced soil abutment is widely used in various engineering constructions because of the good composite performance. The study of its working performance under actual conditions is of great significance to design and popularization. Reinforced soil abutment is mainly subjected to traffic loads in service. In this study, an accelerated stress test of large-scale model was carried out to investigate the working performance of reinforced soil abutment under traffic loads, and to analyze the deformation characteristics of the abutment and the strain of the reinforcements under different loading levers and numbers of loading cycles considering some factors such as spacing and stiffness of the reinforcement. The results indicate that the overall deformation of the reinforced soil abutment tends to converge under traffic loads. The settlement at the top of the abutment, the lateral displacement of the facing and the strain of the reinforcements are much less than the threshold suggested by the current specification. The deformation exhibits stepped variations over loading time and the convergent tendency differs under various conditions. Increasing the stiffness of reinforcement and reducing the spacing of reinforcement are beneficial to improve the ability of deformation resistance of the abutment, while the stiffness of reinforcement plays a more important role in deformation control. In addition, the quantitative relationship between the maximum lateral strain at the facing and the maximum vertical strain at the top of the abutment is not two times, and the quantitative relationship between the two needs to be further studied.

Keywords: reinforced soil abutment; traffic loads; model test; accelerated stress method; service performance

1 引 言

土工合成材料加筋土结构近年来广泛应用于

边坡挡土墙、公路和铁路路堤、桥台等方面。当加筋间距较小时 (一般小于 0.3 m), 该结构呈现出明显的复合体特性, 其承载能力大幅提高, 常用作桥

收稿日期: 2022-01-08

修回日期: 2022-03-29

基金项目: 国家科技部重点专项 (No.2016YFE0105800); 国家自然科学基金 (No.41772284, No.42002270)。

This work was supported by the Key Research and Development Project of Chinese Ministry of Science and Technology (2016YFE0105800) and the National Natural Science Foundation of China (41772284, 42002270).

第一作者简介: 王裘申, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事土工合成材料加筋土桥台及其他相关结构的研究。E-mail: 476981141@qq.com

台等承载结构。美国学者提出并率先采用土工合成材料加筋土柔性桥台复合结构（geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system，简称 GRS-IBS），用以解决长期以来桥路连接处由于桥梁与引道路堤之间差异沉降导致的“桥头跳车”问题^[1-3]，且具有施工快、成本低等优点。

大量静载试验结果表明 GRS 复合体呈现较好的承载特性与变形特性^[4-10]及良好的抗震性能^[11-12]，但对于交通荷载条件下的相关研究较少。肖成志等^[13]通过模型试验研究了循环荷载水平、频率和循环次数等因素对加筋土挡墙变形和筋材应变的影响，但该循环荷载的形式与量值与实际交通荷载差异较大；Ardah^[14-16]、Zheng^[17-18]等在数值模拟中将交通荷载简化为拟静力均布荷载的方式进行分析，这与实际情况存在一定差异；此外，Adams^[3]、Talebi^[19]和 Saghebfar^[20]等对部分已建工程的现场监测数据进行整理分析，发现已建 GRS 柔性桥台表现出良好的服役性能，但部分桥台的沉降增长收敛趋势不明显，在桥台寿命期内仍可能超过规范给出的沉降阈值。

为了探究 GRS 桥台在交通荷载作用下的工作性能，填补该领域研究空白，并为 GRS 桥台技术在国内推广和技术标准的制定提供理论依据与数据支撑，本文开展了加筋土桥台大比例缩尺模型试验，重点研究桥台变形特性与筋材应变水平。

2 模型试验概况

2.1 试验模型

试验桥台以美国俄亥俄州 Bowman Bridge 桥台为原型，该桥台为美国第一座以 GRS-IBS 技术建成的桥台，2005 年建成通车至今运行良好。试验依托同济大学道路与交通工程教育部重点实验室车辆模拟加载平台与液压脉动疲劳试验机。模型按 1:3 对单侧桥台缩尺并按平面应变条件设计，本试验所采用的相似关系由 Iai^[21]推导提出，表 1 为试验模型相似常数取值，表 2 为加载相关相似转换关系，图 1 为试验模型及其主要几何尺寸。

表 1 试验材料与模型尺寸相似关系
Table 1 Similitude relationships for materials and dimensions

相似常数	长度	应力	应变	填料重度	筋材刚度
理论值	n	n	1	1	n^2
实际值	3	3	1	1	9

表 2 加载相关相似关系
Table 2 Similitude relationships for loading

物理量	原型荷载	相似常数	模型荷载	模型实现
路基静载	19 kPa	n	6.3 kPa	路基混凝土块堆载
路基活载	13 kPa	n	4.3 kPa	
桥梁静载	125 kPa	n	41.7 kPa	25 kN 静载
桥梁活载（交通荷载）	67 kPa	n	22.3 kPa	
加载时间	100 a	$n^{1/2}$	58 a	加速应力法
加速度	1g	1	1g	

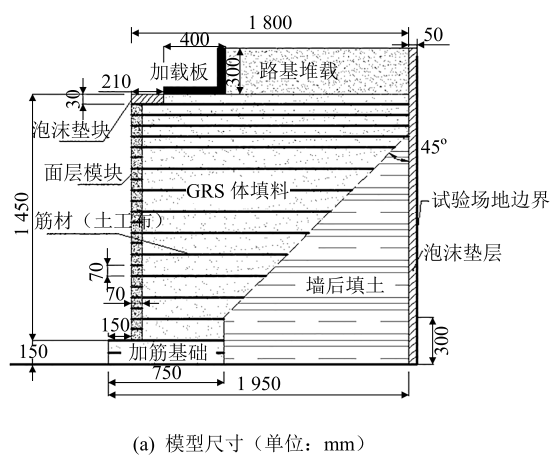


图 1 试验模型及尺寸
Fig.1 Configuration of the test model

模型主要由 GRS 复合体、加筋基础、面板模块组成。桥台（不包括加筋基础 0.15 m）高度为 1.47 m，宽为 1.5 m。为了模拟实际工程情况，模型桥台后填土按坡度 1:1 开挖。其余尺寸均按相似关系进行

缩尺。垂直于桥台宽度方向上，模型与水泥墙壁之间铺设 5 cm 厚泡沫垫层以允许产生变形。宽度方向一侧为试验场地刚性墙壁，另一侧为用于观测的 2 cm 厚有机玻璃板（设置钢架保证其刚度）。顶部加载板

采用 0.4 m×0.3 m 的 L 型带肋钢板, 路基堆载采用混凝土块堆填。考虑桥台构造要求, 面板与承载板边缘距离 (setback) 为 0.21 m, 并用泡沫垫块充填。

2.2 填料

采用修正类比法选择填料类型, 该方法可使模型与原型填料的相关粒径拥有相同的过筛比例且力学性能匹配良好, 所选填料为粒径范围为 0.1~4.0 mm 的石英砂, 其级配曲线如图 2 所示, 曲率系数 $C_c = 2.1$, 不均匀系数 $C_u = 5.4$, 为良好级配填土。其最大干密度为 1.86 g/cm³, 填筑时采用 95% 压实度, 即干密度控制在 1.76 g/cm³。三轴试验得到的填土内摩擦角约为 48°, 黏聚力为 0 kPa。

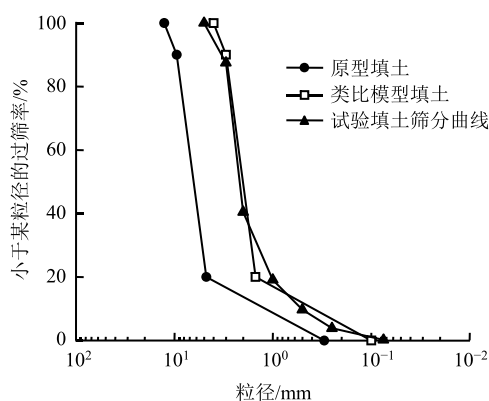


图 2 填土级配曲线

Fig.2 Grain size distribution of the backfills

2.3 筋材

考虑到对原型筋材刚度的折减, 采用聚丙烯土工织物模拟筋材, 得到筋材应变为 10% 时, 单层、双层、三层筋材目标拉伸强度分别为 8、16 kN/m 和 24 kN/m, 采用喷胶粘合得到的多层筋材, 其强度基本为单层筋材强度的相应倍数, 实测拉伸强度平均值分别为 7.53、14.90 kN/m 与 21.38 kN/m。材料拉伸曲线如图 3 所示。

试验用电阻应变片型号为 BFH120-3AA-D100, 基底尺寸为 6.9 mm×3.9 mm, 丝栅尺寸为 3.0 mm×2.3 mm, 电阻值为 120 Ω, 灵敏系数 2.0±1%。若采用 502 胶水粘贴则将形成刚度较大的粘贴区域, 所测数据离散性较大。采用道康宁 3145 RTV 胶水进行应变片粘贴, 经测试其效果较稳定。图 4 为筋材整体应变与应变片读数的相关系数标定曲线, 得到标定系数为 4.16。该差异主要由于应变片刚度与筋材 (尤其是土工织物) 刚度差异、粘贴剂性能等导致。

2.4 面板及筋材与面板连接方式

桥台模型采用模块组合面板, 缩尺后尺寸 (长×宽×高) 为 130 mm×70 mm×70 mm, 用水泥:砂为

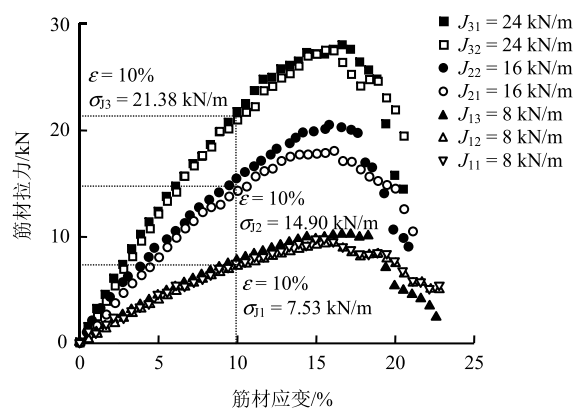


图 3 筋材拉伸曲线

Fig.3 Tensile curves of the reinforcements

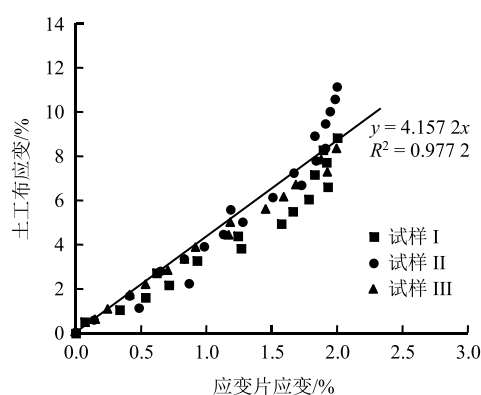


图 4 应变片标定曲线

Fig.4 Calibration curves of strain gauge

1:1.5 配比事先预制。为模拟实际工程, 除顶部三层采用双面胶将模块与土工布粘合的机械连接外, 筋材与面板模块之间连接方式均为摩擦连接 (见图 5)。

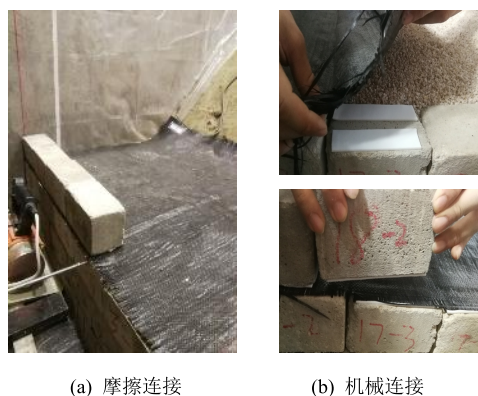


图 5 面板与筋材的连接方式

Fig.5 Connection mode of the facing with reinforcement

2.5 试验方案与模型建造

考虑加筋间距和筋材刚度对 GRS 桥台工作性能的影响, 共完成 5 组模型试验 (见表 3)。

表 3 试验方案
Table 3 Test plan

试验组号	加筋间距 s/m	筋材刚度 $J/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
T1	0.14	80
T2	0.07	80
T3	0.21	80
T4	0.14	160
T5	0.14	240

模型桥台的建造包括基础建造、桥台填筑、吊装承载板和引道堆载。桥台填筑之前首先对两个侧壁进行润滑减阻。根据 Wu 等^[9]的研究经验,通过贴聚四氟乙烯膜和涂抹润滑油进行处理,基本上可消除侧壁阻力。本试验中,在墙面与玻璃板表面分别贴上 1.2 mm 厚的聚四氟乙烯膜(外膜),顶部和侧面用胶带与侧壁贴合固定,然后在膜内侧涂抹一层约 2 mm 厚的硅油进行润滑,再将一层 0.6 mm 厚的聚四氟乙烯膜(内膜)平贴在硅油上,顶部胶带固定(试验前拆除固定胶带,使内膜与填料同时移动),使从侧壁到填料之间形成一层厚膜-硅油-薄膜的双层膜减阻区域。桥台填筑采用质量体积分层控制法,保证填料压实度为 95%。筋材沿桥台长度方向由面板向后铺设。按照码放面板模块-填土-振实-铺设筋材的顺序循环建造至设计高度,这与实际施工过程一致。其中面板模块采用错缝码放,且与侧壁接触处塞填 5 mm 薄泡沫片以防漏砂,并减少由侧壁挤压产生的对面板模块的约束力。

2.6 试验与监测

模型建造完成后进行各级荷载的施加。加载过程包括两部分,首先施加 25 kN (41.7 kPa) 静荷载并稳定 10 min,模拟桥跨结构放置。此后采用 1 Hz 正弦波模拟交通荷载作用于承载板区域。一般来说,可将小型车辆荷载假设为 20 kN,考虑到车辆荷载放大系数为 0.25,则小型车产生的最大过车荷载为 $20 \times 1.25 = 25$ kN,缩尺后约为 8 kN,因此为方便计算可取逐级加载增幅为 4 kN。同时,可将大型车辆荷载假设为 50 kN,缩尺后最大过车荷载约为 20 kN。加载示意图如图 6 所示,其中 II 级加载可视为小型车辆作用于本模型的情况,V 级加载可视为大型车辆作用于本模型的情况。每级交通荷载施加 1 200 次或 1 800 次(视加载设备条件与变形收敛趋势而定),此后降到 25 kN 并维持 30 s,再施加下一级交通荷载。

每组试验中监测元件的详细布置见图 7,监测元件主要包括面板后和 GRS 体内部的土压力计、面板位移计、GRS 体顶部位移计、筋材应变片,以及玻璃板上十字标记点(图 7 中未标出,具体布设情

况见图 13)。试验中通过各监测传感器与相应采集仪器对各物理量进行采集。

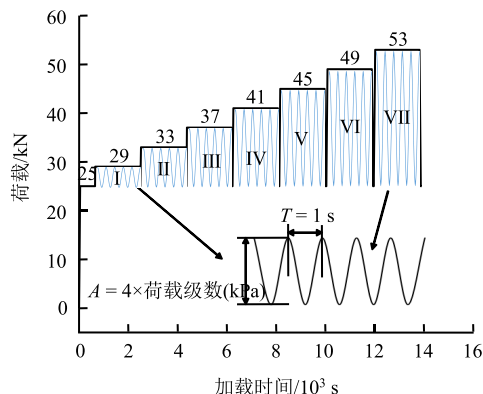


图 6 加速应力法加载曲线示意图

Fig.6 Schematic of loading curve of accelerated stress method

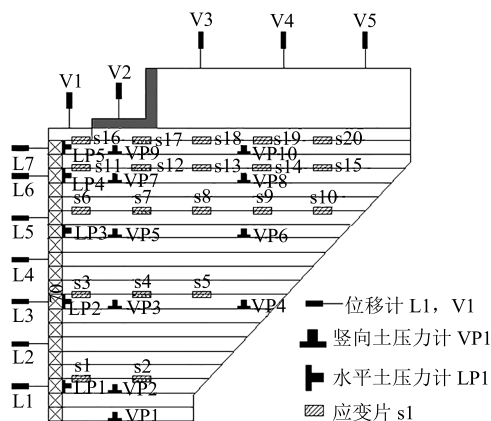


图 7 监测方案

Fig.7 Monitoring plan

2.7 加速应力零点修正方法

采用加速应力法进行加载,是对同一试样逐级进行等幅值增量等频率连续加载,即在保持结构失效机制不变的条件下,用加大应力的方法加速结构失效,从而大幅度减少试验时间和成本。在后续工作中通过数据处理,推算出正常应力水平下试样的寿命。该方法在混凝土材料、气泡轻质土以及路面材料疲劳寿命研究方面取得了较理想的成果^[22-23],但目前尚未有学者利用加速应力试验方法研究 GRS 桥台等复合结构的寿命或工作性能。

本试验得到的结果是各个荷载等级下的累计沉降值,将某级荷载下曲线移至原点(零点修正),通过图 8 所示叠加方式得到每级荷载单独作用下加载次数-沉降曲线,从而消除应力历史影响^[22-23]。 N 为某级应力水平 ($N > 1$)。应力水平 $N+1$ 下应变修正值为 ε_{N+1} ,该值由应力水平 $N+1$ 下曲线直接平移至

原点得到测量值 ε'_{N+1} ，与应力水平 N 下曲线测量值 ε_N 叠加得到。此后以应力水平 $N+1$ 下曲线末端斜率线性发展（接近 0° 水平线）。以此得到各级交通荷载单独作用下的累积沉降曲线。

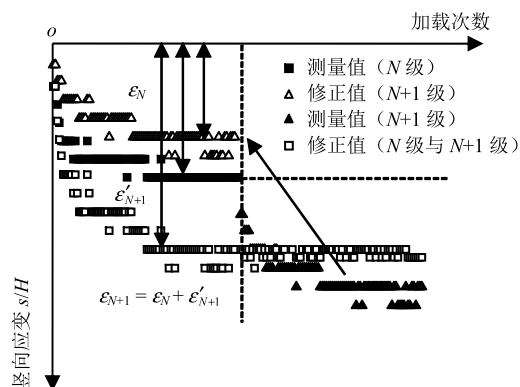


图 8 加速应力法零点修正示意图

Fig.8 Schematic of the correction of the accelerated stress method

3 试验结果与分析

由于施加荷载主要为工作荷载，最高仅达 $1/3$ 极限荷载计算值，最终未发生面板位移突变，桥台顶部沉降与筋材受拉迹象亦不明显，桥台保持稳定。各组试验模型表现出相似的变化规律，如图 9 所示：①桥台面板的整体性良好，只发生微小程度的外倾；②内部位移整体呈向面板临空面和桥台底部发展，十字标记点错动，内外膜褶皱，且桥台顶部、承载板正下方区域变形较大；③桥台上部筋材向下弯曲，面板附近筋材表面出现褶皱，但无明显拉伸迹象。

取静载 25 kN 、第 2 级交通荷载 $25\sim 33\text{ kN}$ 与第 5 级交通荷载 $25\sim 45\text{ kN}$ 3 个具有代表性的荷载等级进行影响因素分析，其分别代表桥梁面板放置



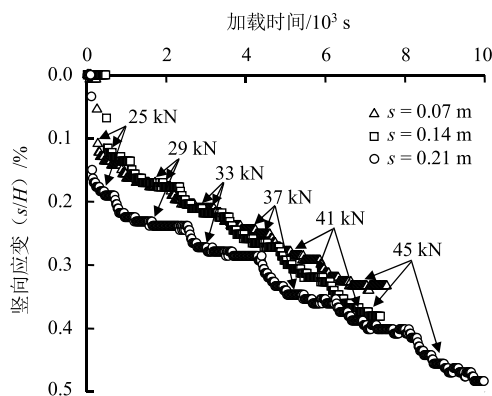
图 9 试验结束时桥台服役情况

Fig.9 Service condition of abutment at the end of test

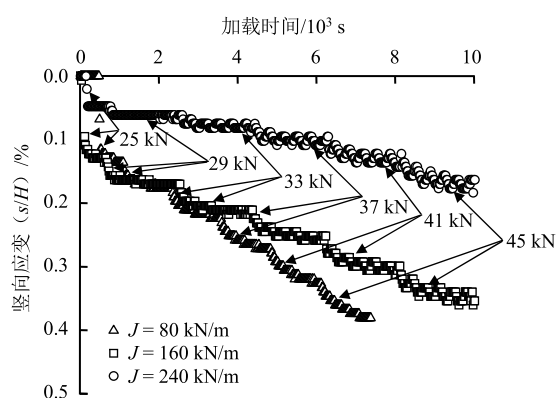
（即无车辆通过或交通荷载为零）、小型车辆通过、大型车辆通过 3 种工况。

3.1 桥台顶部沉降

图 10 为承载板处桥台竖向应变随荷载和时间的变化曲线，竖向应变为 V2 位移计所测累积竖向沉降与桥台高度的比值， H 为桥台总高度。可以看出，桥台顶部竖向变形随荷载的施加呈阶梯状发展，由于交通荷载量级较小，每级荷载约 300 次循环即开始呈现收敛趋势。变形收敛所需时间随荷载的增加而增加，减小加筋间距与提高筋材刚度均能使变形加速收敛。加筋间距对桥台顶部沉降的控制效果要小于筋材刚度的控制效果，各级荷载下加筋间距减小 $1/2$ ，应变减小 $10\%\sim 20\%$ ，而筋材刚度增大 1 倍，应变减小 $50\%\sim 100\%$ 。可见，加筋间距与筋材刚度对加筋土桥台变形的影响规律与对极限承载力的影响规律不一致。Wu 等^[10]研究发现，在静载条件下加筋间距对极限承载力的影响远大于筋材刚度的影响。



(a) 不同加筋间距时竖向应变随加载时间变化



(b) 不同筋材刚度时竖向应变随加载时间变化

图 10 承载板区域竖向应变随加载时间变化规律

Fig.10 Variations of vertical strain at the beam seat with traffic loads

从图 10 中还可以看到,在筋材刚度较小时,交通荷载下桥台竖向应变发展规律无明显峰谷值,始终处于“累进”的状态。而当筋材刚度增加,应变曲线出现明显“震荡”($J = 160 \text{ kN/m}$ 与 $J = 240 \text{ kN/m}$)。这是由于较大的筋材刚度不但能有效分担上部荷载,交通荷载下还能增强复合体抵抗变形的能力,即对顶部交通荷载产生的脉冲型能量起到隔离和反射作用,进而影响位移向下传递,引起曲线震荡。

图 11 为每级荷载作用下竖向应变峰值分布情况,顶部位移计依次测量的是 setback (缩进) 区域、承载板、引道路基的沉降值。总体上看,整个桥台顶部结构沉降很小,最大变形仅约为 0.5% 墙高,远

小于规范给出的服役状态阈值 1%^[1]。图 10(a)~10(c)表明,减小加筋间距可有效减小桥台竖向应变,加筋间距从 0.21 m 减小至 0.07 m,最大竖向应变从 0.48% 减小至 0.34%; 图 10(b)、10(d)、10(e)表明,增大筋材刚度亦可有效减小桥台竖向应变,筋材刚度从 80 kN/m 增大至 240 kN/m,最大竖向应变从 0.39% 减小至 0.17%。当加筋间距大于 0.14 m,或筋材刚度大于 160 kN/m 时,对桥台竖向应变的控制效果不再明显。此外,由图 10(a)、10(d)可以看出,若保持筋材刚度与加筋间距之比一致,桥台的变形规律基本一致,因此有必要在加筋土桥台变形设计中合理搭配加筋间距与筋材刚度,使其在节省材料的同时亦能满足变形控制要求。

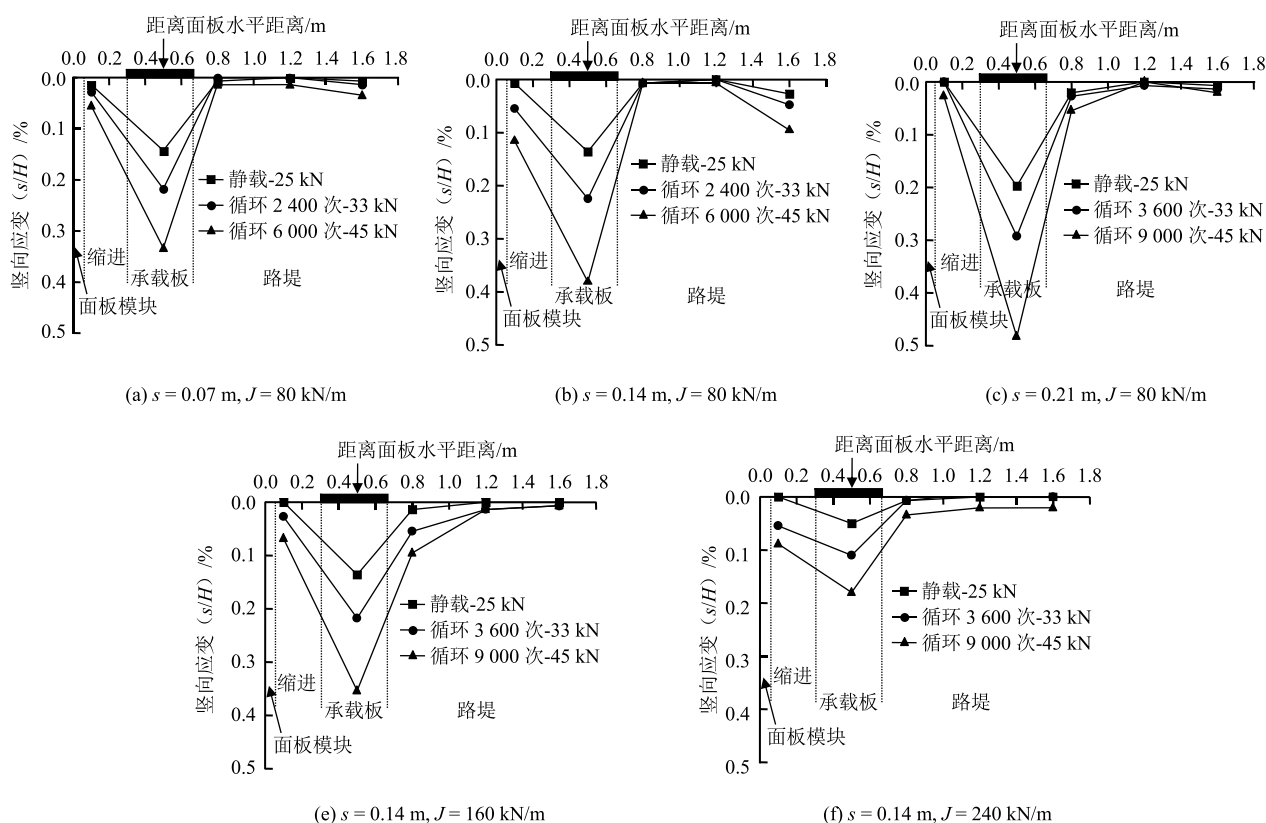


图 11 桥台顶部竖向变形分布规律

Fig.11 Distribution law of vertical strain at the top of abutment

3.2 面板水平位移

图 12 为桥台面板处拉线式位移计所测水平位移 d 与该层加筋体长度 L (沿筋材铺设方向) 的比值,即累积水平应变随加载时间变化规律。面板水平位移的发展规律和承载板处沉降规律类似,即呈阶梯状发展和收敛规律,在较高应力水平或加载时间条件下应变收敛速率减慢。减小加筋间距或提高筋材刚度对减少面板水平位移、加速变形收敛的效

果尤为明显,其中筋材刚度发挥了更重要的作用。

每级荷载作用下桥台面板水平变形分布规律如图 13 所示, y 轴表示测量点的相对高度 (z/H), x 轴为每级荷载作用下面板水平应变峰值,该应变值取 d 与同层筋材长度 L 的比值。总体上看,面板整体略微外倾,整体性始终保持良好,与试验现象吻合,最大变形约为 0.7% 墙高。各组试验模型具有统一的分布特征:整体呈“鼓肚”型分布,底部变

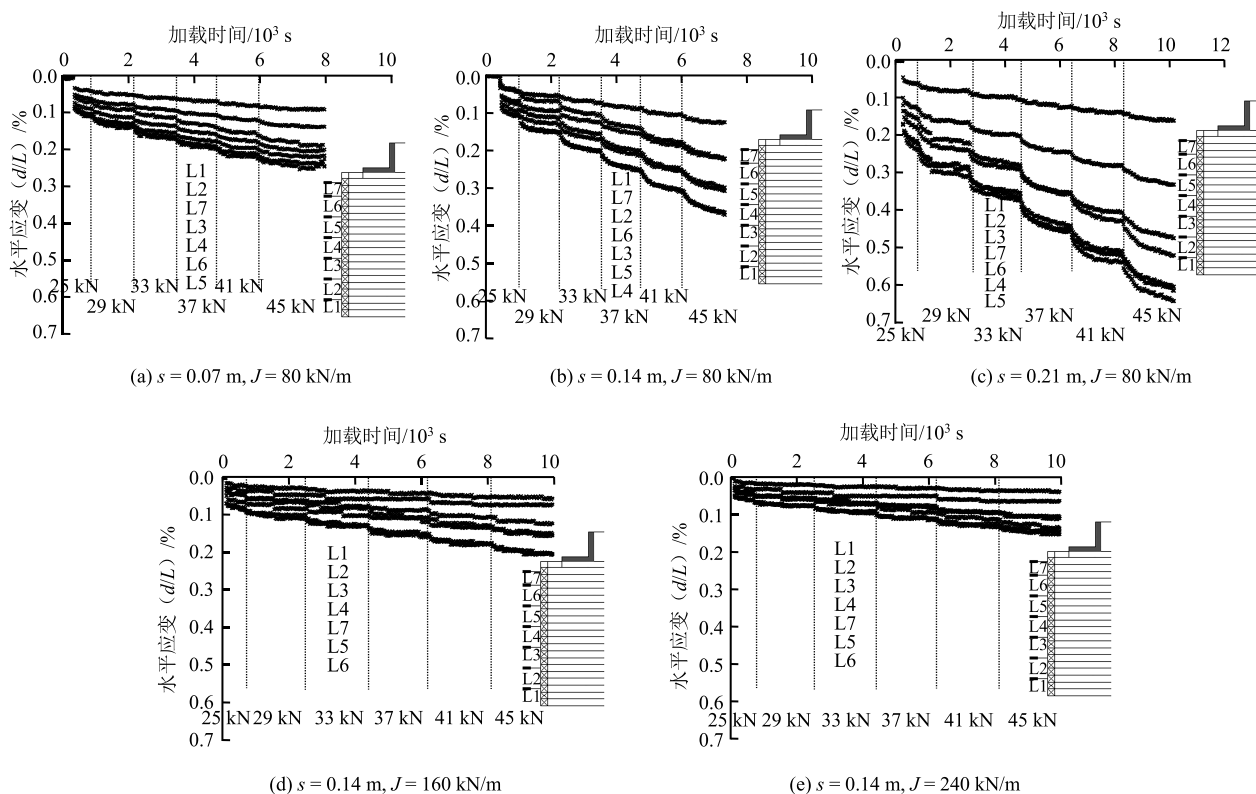


图 12 面板水平应变随加载时间变化曲线

Fig.12 Variations of horizontal strain of facing with traffic loading

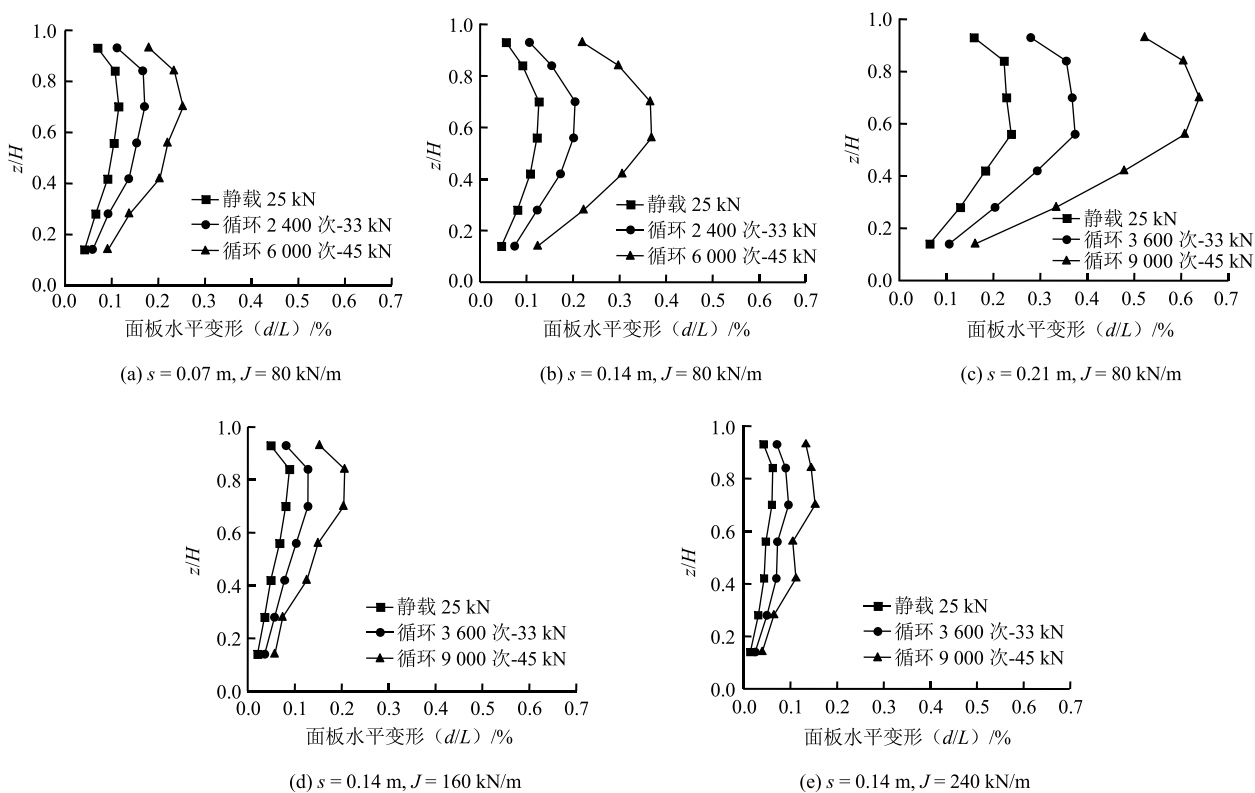


图 13 面板水平变形分布规律

Fig.13 Distribution law of horizontal strain of facing

形最小, 随着桥台高度递增, 最大值位于距离顶部约 1/3 墙高处, 再随高度增加而有所降低。以 0.07 m

加筋间距试验为例, 在 $z/H = 0.7$ 处最大, 是顶部的 1.35 倍, 底部的 2.69 倍。产生这种分布特征的原因

是 GRS 复合体用作承受竖向应力的桥台时,顶部局部荷载作用下向下应力扩散,其中面板位置距顶部 1/3 区域范围处于局部附加应力的应力扩散区域以外。张逍^[4]和肖成志^[7]等的试验结果显示,随着承载板位置逐渐远离面板,最大水平变形由顶部逐渐过渡到距顶部 1/3 处的结果。

随着筋材刚度从 80 kN/m 增加到 160 kN/m,面板水平变形减小幅度远大于筋材刚度从 160 kN/m 增加到 240 kN/m 的水平变形减少幅度,可见当筋材刚度达到一定程度时(该试验条件下介于 80~160 kN/m 之间)筋材刚度对面板水平位移影响变弱。加筋间距亦呈类似规律。这些规律与静载下的结果一致。同时,筋材刚度较大且加筋间距较小时,面板水平变形沿墙高分布更加均匀,这也有助于桥台整体稳定性。

Adams 等^[1]提出了一个名为“零体积变化假设”的理论,该理论假定 GRS 桥台竖向变形均匀分布、水平变形三角形分布,其在受力条件下垂直压缩和

水平膨胀不会导致净体积变化, FHWA 指南中采用该理论对桥台水平变形进行预测,提出水平应变的最大值为竖向应变的 2 倍。结合图 11 与图 13, 0.07 m 加筋间距时面板侧向位移最大值与桥台顶部竖向应变比值为 0.68, 0.14 m 加筋间距面板侧向位移最大值与桥台顶部竖向应变比值为 0.95, 0.21 m 加筋间距面板侧向位移最大值与桥台顶部竖向应变比值为 0.99,因此在交通荷载条件下,“加筋土桥台结构体积变化为零”的假设并不适用。

3.3 桥台内部变形

图 14 为桥台内部位移矢量图,即有机玻璃板内外侧十字标记点在试验前后的位移差。在桥台顶部荷载作用下,GRS 桥台内部填土变形不均匀,桥台填土发生向面板和向下位移:水平方向上越靠近面板,竖直方向上越靠近顶层,位移矢量越大,底层部分则位移很小甚至为零。减小加筋间距或增大筋材刚度,能够增强桥台内部抵抗变形的能力,但效果不明显。

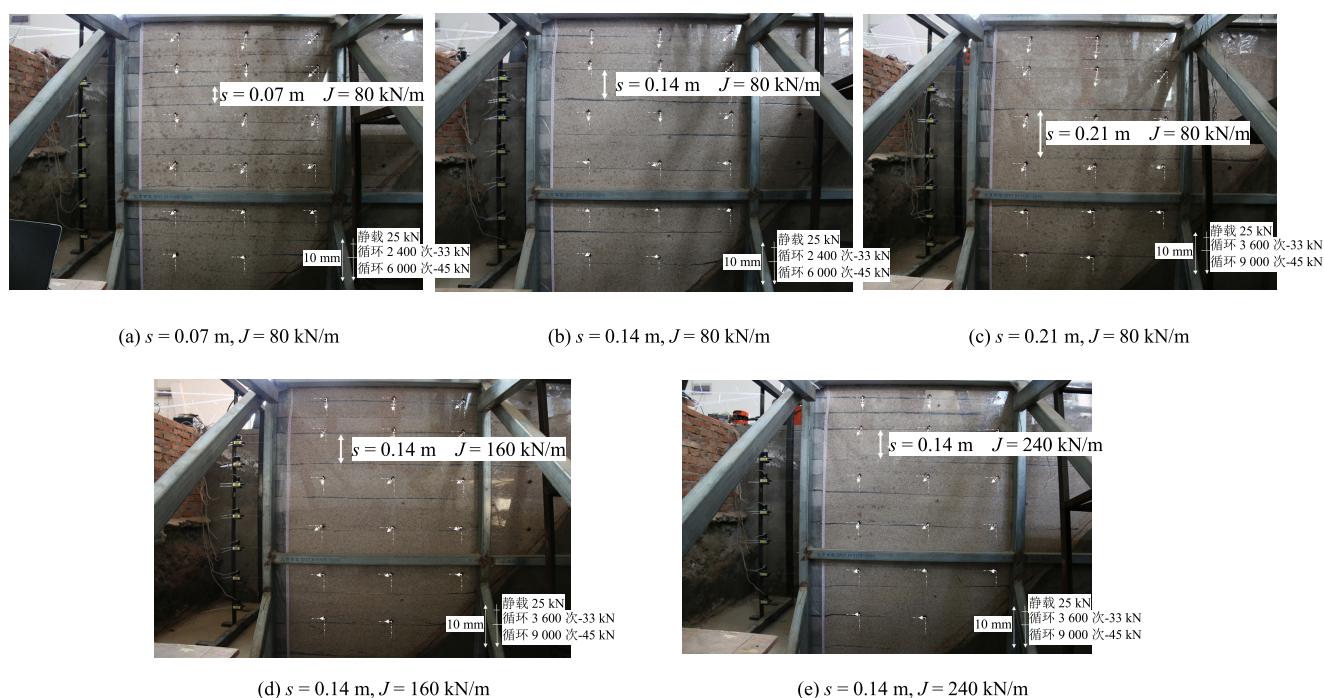


图 14 桥台内部位移矢量图
Fig.14 Internal deformation vector of abutment

3.4 筋材应变

图 15 为筋材应变沿筋材长度分布规律,其中 z 为桥台高度方向距离桥台底部的距离(z/H 即为相对位置)。从图中可以看到,交通荷载作用下筋材最大应变未超过 0.5%,远小于筋材极限应变,亦小于规范给出的 2%筋材应变阈值^[1]。水平方向上每层筋材在承载板下方或承载板边缘处应变最大,随着筋

材位置靠近承载板而差异愈加明显,这与桥台顶部沉降分布规律相一致。竖直方向上 $z = 0.86H$ 位置处应变最大,基本与面板水平位移最大位置相一致。以 0.07 m 加筋间距试验为例,布设在顶部承载板区域正下方筋材最大应变为 0.35%,为同层 setback 区域筋材应变的 2.8 倍,为同层路堤区域筋材应变的 2.9 倍,是底部同为承载板正下方区域筋材的 3.2 倍。

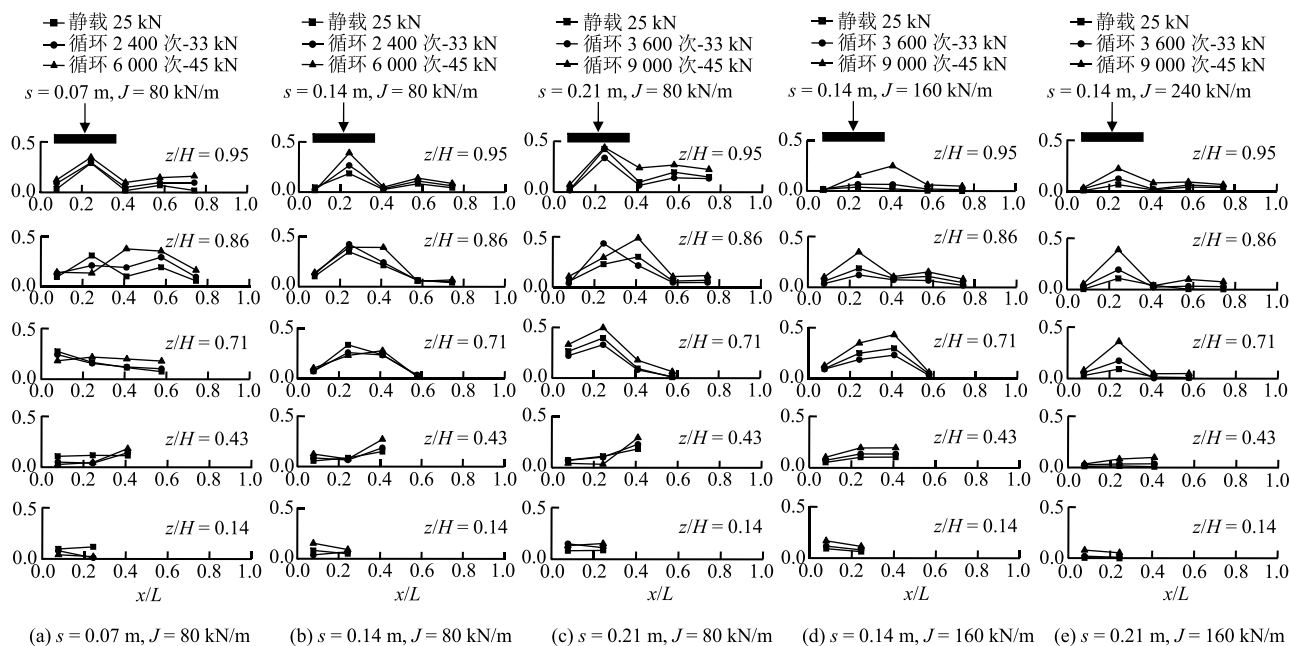


图 15 筋材应变分布规律

Fig.15 Distribution law of the strain of reinforcement

随着交通荷载峰值的增加,筋材应变增大,但底部筋材变化幅度较小。这一规律在靠近顶部的筋材中更为明显,这与桥台内部各层位移规律相一致,即顶部填料、筋材均受较大的荷载作用而产生较大变形。此外,图 15(a)~15(c)表明,加筋间距对筋材应变影响小,加筋间距由 0.21 m 变化到 0.07 m,顶层筋材最大应变仅降低约 0.08%;而图 15(b)、15(d)、15(e)表明,提高筋材刚度能明显降低筋材应变,且能使沿筋材长度筋材应变分布更加均匀。

4 结 论

通过交通荷载作用下加筋土柔性桥台模型的物理模拟和对筋材刚度与加筋间距影响的分析,可以获得如下结论:

(1) 交通荷载作用下,加筋土桥台未发生面板位移突变,桥台顶部沉降与筋材受拉迹象亦不明显,桥台整体稳定性满足要求。

(2) 桥台顶部沉降以承载板正下方为最大, setback 区域和路堤区域沉降很小,变形随加载时间呈阶梯状发展,最大竖向应变小于 0.5% 墙高;桥台面板水平位移以距顶部 1/3 处为最大,顶部与底部较小,呈三角形分布,变形随加载时间呈阶梯状发展,最大水平应变小于 0.7% 墙高。交通荷载作用下面板水平应变与顶部竖向应变并不满足 2 倍关系,即不符合 FHWA 规范中“桥台结构体积变化为零”假设;桥台内部各点向临空面处和向底部移动,水平方向上越靠近承载板,竖直方向上越靠近顶层,

位移矢量越大。

(3) 减小加筋间距、增大筋材刚度均能对桥台变形起到有效控制作用,但筋材刚度对变形的影响大于加筋间距。其控制作用有一定范围,本试验条件下,当加筋间距小于 0.14 m 或筋材刚度大于 160 kN/m 时,该效果明显减小。

桥台工作性能中还需要关注位移随时间的长期发展规律与收敛趋势,包括面板水平位移与桥台顶部沉降。可根据不同交通荷载下应变发展规律,结合加速应力法的零点修正,得到桥台在交通荷载下的长期性能,从而预测加筋土桥台的变形,这是今后研究的方向。

参 考 文 献

- [1] ADAMS M T, NICKS J. Design and construction guidelines for geosynthetic reinforced soil abutments and integrated bridge systems[R]. McLean, VA: The US Federal Highway Administration, 2018.
- [2] ADAMS M T, OOI P, NICKS J. Mini-pier testing to estimate performance of full-scale geosynthetic reinforced soil bridge abutments[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2014, 37(5): 884-894.
- [3] ADAMS M T, NICKS J, STABILE T, et al. Geosynthetic reinforced soil integrated bridge system, synthesis report[R]. McLean, VA: Federal Highway Administration, 2012.
- [4] 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 Qiu-shen, et al. Load test study of bearing characteristics of reinforced soil abutments[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(12): 4027-4034.
- [5] IWAMOTO M, OOI P, ADAMS M T, et al. Composite properties from instrumented load tests on mini-pier reinforced with geotextiles[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2015, 38(4): 397-408.
- [6] LESHCHINSKY D, LESHCHINSKY B, LESHCHINSKY O. Limit state design framework for geosynthetic-reinforced soil structures[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2017, 45(6): 642-652.
- [7] 肖成志, 刘贺, 王荣霞, 等. 土工格栅加筋土柔性桥台结构性能的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(4): 767-772.
- XIAO Cheng-zhi, LIU He, WANG Rong-xia, et al. Experimental study on performance of GRS bridge abutment with flexible face[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(4): 767-772.
- [8] WU J, KETCHART K, ADAMS M. Two full-scale loading experiments of geosynthetic-reinforced soil (GRS) abutment wall[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 2(4): 305-317.
- [9] WU J, PHAM T, ADAMS M T. Composite behavior of geosynthetic reinforced soil (GRS) mass[R]. McLean, VA: Federal Highway Administration, 2010.
- [10] WU J, PHAM T. Load-carrying capacity and required reinforcement strength of closely spaced soil-geosynthetic composites[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(9): 1468-1476.
- [11] 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(增刊 1): 179-186.
- XU Chao, LUO Min-min, REN Fei-fan, et al. Experimental study on seismic behaviour of reinforced soil flexible abutment composite structures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl.1): 179-186.
- [12] ZHENG Y, SANDER A C, RONG W, et al. Shaking table test of a half-scale geosynthetic-reinforced soil bridge abutment[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2017, 41(1): 171-192.
- [13] 肖成志, 王嘉勇, 周霞. 受静载和循环荷载作用的基础下加筋挡墙工作性能分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2017, 36(6): 1542-1550.
- XIAO Cheng-zhi, WANG Jia-yong, ZHOU Xia. Performance of geogrid-reinforced soil retaining walls subjected to static and cyclic footing loadings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(6): 1542-1550.
- [14] ARDAH A, ABU F, VOYIADJIS G. Numerical evaluation of the performance of a geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system (GRS-IBS) under different loading conditions[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2017, 45(6): 558-569.
- [15] ARDAH A, ABU F, VOYIADJIS G. Numerical evaluation of the effect of differential settlement on the performance of GRS-IBS[J]. **Geosynthetics International**, 2018, 25(4): 427-441.
- [16] ARDAH A, ABU F, VOYIADJIS G. Numerical parametric study of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS)[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2021, 49(1): 289-303.
- [17] ZHENG Y, FOX P. Numerical investigation of the geosynthetic-reinforced soil integrated bridge system under static loading[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2017, 143(6): 04017008.
- [18] ZHENG Y, FOX P, MCCARTNEY J. Numerical simulation of the deformation response of geosynthetic reinforced soil mini-piers[J]. **Geosynthetics International**, 2018, 25(3): 271-286.
- [19] TALEBI M. Analysis of the field behavior of a geosynthetic reinforced soil integrated bridge system during construction and operation[D]. Newark: University of Delaware, 2016.
- [20] SAGHEBFAR M, ABU M F, 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.
- [21] IAI S. Similitude for shaking table on soil-structure-fluid models in 1g gravitational fields[J]. **Soils and Foundations**, 1989, 29(1): 105-118.
- [22] 王瀚霖. 高速铁路路基力学性能及水分运移规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- WANG Han-lin. Mechanical characterization and moisture migration of the high-speed railway track-bed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [23] 刘鑫, 甘亮琴, 盛柯, 等. 基于加速应力试验方法的气泡混合轻质土使用寿命估计研究[J]. **岩土工程学报**, 2017, 39(10): 1793-1799.
- LIU Xin, GAN Liang-qin, SHENG Ke, et al. Experimental study on service life of foamed mixture lightweight soil based on method of accelerated stress tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(10): 1793-1799.