

加筋土桥台承载性能及影响因素的模型试验研究

徐超¹, 余晓晓¹, 杨阳², 左彬澧¹, 韦小当¹, 崔纪泽¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 作为承载桥梁的下部结构, 加筋土桥台的承载性能及影响因素历来备受关注。以桐岳高速公路上某加筋土桥台为原型, 完成了 4 组大比例加筋土桥台的缩尺模型试验, 研究了加筋间距、筋材与砌块面板连接形式、填料级配 3 个因素对桥台承载性能与变形特征的影响。试验结果表明: 加筋间距和填料级配(包括最大粒径)是加筋土桥台承载性能的重要影响因素, 筋材与砌块面板连接方式(强度)对加筋土桥台变形控制的作用不可忽视。减小加筋间距和改善填料级配, 可提升加筋土复合体的整体刚度, 减少桥台变形, 增强桥台的承载性能; 相较于筋材与砌块面板的摩擦连接, 机械连接限制了两者的相对位移, 增强了加筋土复合体的侧向约束, 对减小桥台变形效果显著。

关键词: 加筋土桥台; 承载性能; 加筋间距; 筋材与砌块面板连接形式; 填料级配

中图分类号: TU470

文献标志码: A

Model Experimental Study on Load-bearing Performance and Influencing Factors of Reinforced Soil Abutment

XU Chao¹, YU Xiaoxiao¹, YANG Yang², ZUO Binli¹, WEI Xiaodang¹, CUI Jize¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As the substructure of load-bearing bridge, the load-bearing performance of reinforced soil flexible abutment and its influencing factors have always been concerned. In this paper, a reinforced soil abutment on Tongyue Expressway is taken as a prototype, and four large scale model tests of reinforced soil abutment are completed. The effects of reinforcement spacing, the connection form between reinforcement and block panel, and the backfill gradation on the loading-bearing

performance and deformation characteristics of the abutment are studied. The test results show that the reinforcement spacing and backfill gradation (including the maximum particle size) are important factors affecting the load-bearing capacity of reinforced soil abutment, and the connection form (strength) between reinforcement and block panel has an important effect on the deformation control of reinforced soil abutment. Reducing the reinforcement spacing and improving the backfill gradation can increase the overall stiffness of the reinforced soil composite, reduce the deformation of the abutment, and enhance the load-bearing capacity of the abutment. Compared with the friction connection between reinforcement and block panel, the mechanical connection limits the relative displacement of the reinforcement from block panel, and enhances the lateral constraint of the reinforced soil composite, reducing the deformation of the abutment.

Keywords: reinforced soil abutment; load-bearing performance; reinforcement spacing; reinforcement and block panel connection form; backfill gradation

土工合成材料加筋土桥台(简称 GRS 桥台)是由压实度不小于 95% 的填料与加筋间距不大于 30 cm 的加筋材料交替构成的加筋复合体^[1], 具有良好的抗压强度和承载能力^[2]。基于此, 美国联邦公路局(FHWA)首先将 GRS 桥台应用于一体化桥梁系统(GRS-IBS)^[3]。采用 GRS-IBS 技术能有效减小道路与桥台间的差异沉降, 进而解决桥台跳车问题^[4]。此外, 该技术还具有施工快速、建造成本小、环境影响小与抗震性能良好等优点^[5]。

在 GRS-IBS 中, 作为下部承重结构, GRS 桥台承载性能一直受到科技界的关注, 诸多学者对 GRS 桥台的承载性能及影响因素进行研究, 探讨了加筋

收稿日期: 2023-08-15

基金项目: 安徽省交通控股集团科技项目(JKKJ-2020-08)

第一作者: 徐超, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土工合成材料和地基加固。

E-mail: c_axu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

间距、水平净距、基础偏移距、条形基础宽度、面板类型、筋材刚度、荷载形式等因素对GRS桥台承载特性的影响^[6-19]。加筋间距越小,加筋土复合体的承载性能越好;当加载板位置靠近墙面时,相较于摩擦连接,机械连接使土工格栅与砌块面板连接强度增大,显著提高了桥台极限承载力;级配良好的填料变形性能优于级配不良填料。Wu等^[2]、Zheng等^[20-21]、沈盼盼^[22]利用数值模拟分析了上述因素对GRS桥台承载能力与变形特征的影响规律。Adams等^[23]、Saghebfar等^[24]、Talebi^[25]的现场监测结果也表明,GRS桥台在工作荷载下服役性能良好,符合FHWA规范关于GRS桥台变形的要求^[3]。

综上可知,目前已有一些GRS桥台承载性能的影响因素相关研究,但这些研究集中于土工格栅与砌块连接强度的影响,缺乏土工织物与面板连接形式对GRS桥台承载特性的影响。在工程应用方面,对填料及加筋间距的选择也有争议,同时缺乏不同粒径范围内相似级配填料影响的研究。因此,以桐岳高速某跨线桥中的加筋土桥台为原型,开展4组室内大比例缩尺模型试验,研究加筋间距、筋材与砌

块面板连接形式、填料级配对GRS桥台承载性能及变形规律的影响,为GRS-IBS的工程应用提供借鉴。

1 模型试验

1.1 试验方案

以上海至武汉国家高速公路桐城至岳西段K126+618.821车行天桥下部承重式加筋土桥台为工程原型,原型监测图如图1所示。通过室内缩尺模型试验开展加筋土桥台在竖向静载作用下的承载性能及影响因素研究,试验场地为同济大学土木工程学院地下建筑与工程系岩体力学实验室地质灾害模型试验箱,以长度方向为筋材铺设长度方向。根据模型率越大则试验结果越能反映试验原型的实际规律,几何相似比 $C_L=4$,工程原型与模型主要几何尺寸如表1所示,其他物理量的相似关系如表2所示。路堤土质量采用砌块堆填进行模拟,被挡土按照原型相似进行坡度为1:1的斜坡块体设置,其余构造尺寸均按照相似关系进行缩尺模拟。

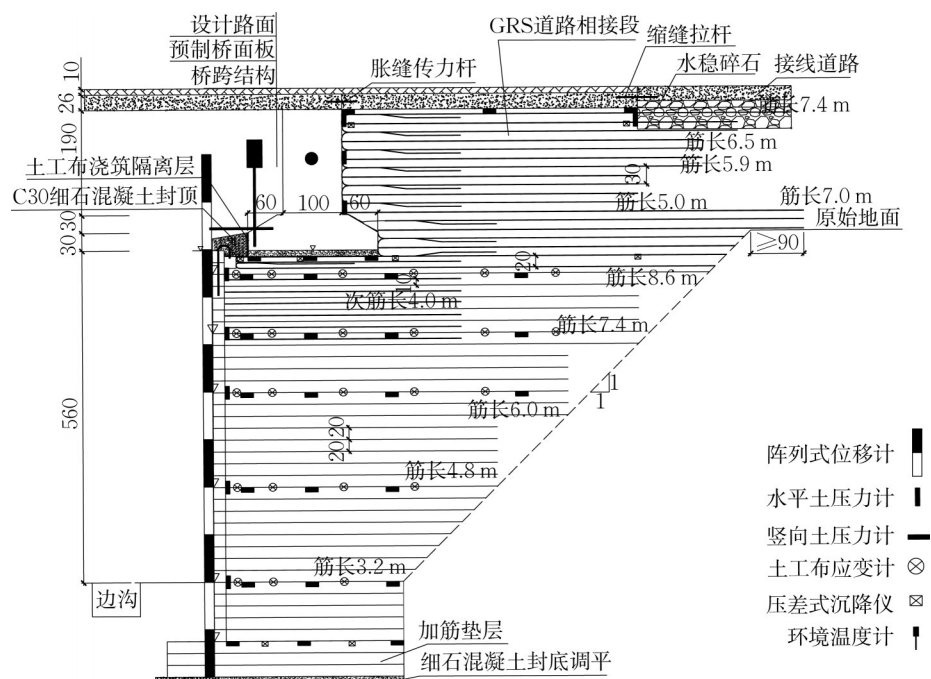


图1 原型监测图(单位:cm)

Fig.1 Monitoring diagram of the prototype(unit:cm)

采用平板荷载试验方法进行GRS桥台模型承载特性研究,考虑加筋间距、填料级配、筋材与砌块面板连接形式3种因素,共完成4组模型试验,具体试验方案见表3。

试验T1为基准组试验,几何尺寸严格按照预设

工况缩尺得到,其中加筋间距 S_v 的取值与一层模型砌块面板高度一致;试验T2在试验T1的基础上改变了加筋间距;试验T3在试验T1的基础上将筋材与砌块面板连接形式由摩擦连接变为机械连接;试验T4在试验T1的基础上将填料粒径增大1倍,颗

表1 原型与模型几何尺寸参数

Tab.1 Geometry parameters of prototype and model

项目	工程原型	室内模型
墙高/m	6.1	1.5
路堤高/m	2.5	0.6
台前挡土/m	1.00	0.25
墙宽/m	12.5	0.8
墙长/m	8	2
承载区域宽度/cm	200	50
模块尺寸/ (cm×cm×cm)	20×20×40	5×5×10
水平净距/cm	40	10
加筋间距/cm	20	5/10

表2 主要物理量相似比

Tab.2 Similarity ratio of main physical quantities

物理量	相似关系	理论相似比	实际相似比
几何尺寸, L	C_L	C_L	4
弹性模量, E	$C_L = C_E$	C_L	4
密度, ρ	$C_\rho = 1$	1	1
黏聚力, c	$C_c = 1$	C_L	4
内摩擦角, φ	$C_\varphi = 1$	1	1
泊松比, μ	$C_\mu = 1$	1	1
应力, σ	$C_\sigma = 1$	C_L	4
应变, ϵ	$C_\epsilon = 1$	1	1
重力加速度, g	$C_g = 1$	1	1

表3 试验方案

Tab.3 Test scheme

序号	加筋间距/m	填料级配	连接形式
T1	0.05	粗砂	摩擦连接
T2	0.10	粗砂	摩擦连接
T3	0.05	粗砂	机械连接
T4	0.05	砾砂	摩擦连接

粒粒径由0~5 mm变为0~10 mm。

1.2 试验材料

1.2.1 填料

采用2种机制石英砂作为填料,一种由原型填料缩尺得到,粒径范围为0~5 mm(石英砂1),另外一种粒径范围为0~10 mm(石英砂2),2种填料不均匀系数均为0.80,曲率系数均为3.72,属于级配不良填料。级配曲线如图2所示。粗砂与砾砂最大干密度分别为 $1.89 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.69 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-3}$,对2种填料进行三轴试验,偏应力-围压($q-p$)曲线如图3所示,得到粗砂与砾砂的内摩擦角分别为 43.96° 、 48.28° ,黏聚力均为0 kPa。依据质量体积控制法,2种石英砂均采用95%压实度进行填筑。

1.2.2 筋材与应变片

采用聚丙烯编织土工织物作为加筋材料,实际工程中筋材在10%应变时径向抗拉强度为 $125 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,强度相似比为16,由量纲分析得到缩尺后对应

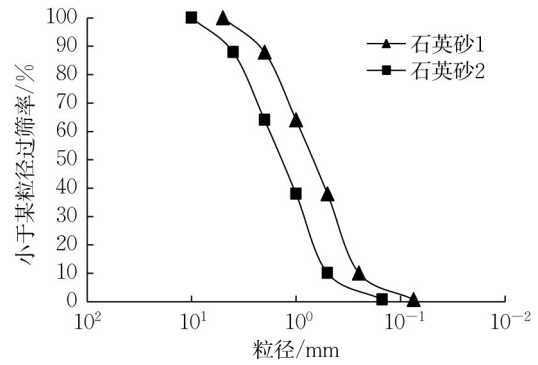


图2 2种填料级配曲线

Fig.2 Two kinds of backfill gradation curves

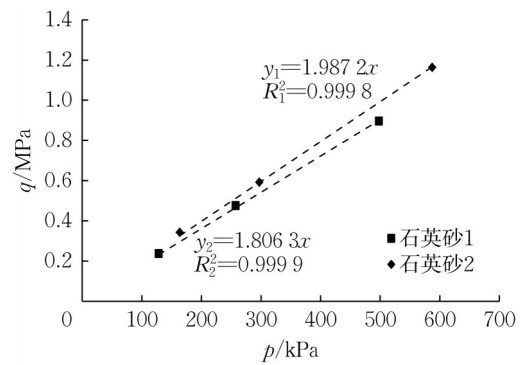


图3 $q-p$ 曲线

Fig.3 $q-p$ curves

的模型筋材拉伸强度为 $7.81 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。选用相应抗拉强度的土工织物进行测试,实测筋材强度平均值为 $8.95 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,接近缩尺后筋材强度理论值,基本满足要求。筋材拉伸曲线如图4所示。

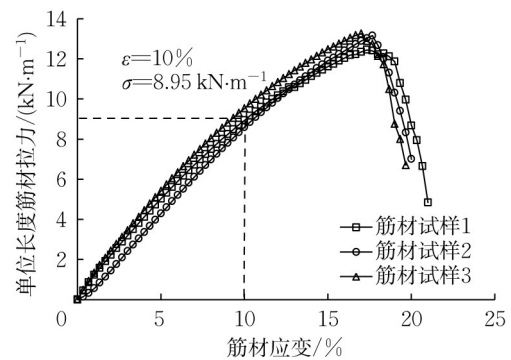


图4 筋材拉伸曲线

Fig.4 Tensile curves of reinforcement

1.2.3 砌块及其与筋材连接形式

采用定制实心青砖砌块,长×宽×高为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。土工织物与砌块面板连接形式设置为:①土工织物与砌块直接接触的摩擦连接;②在土工织物与砌块的接触面粘贴双面胶模拟的机械连接。

1.3 模型建造

模型箱容积尺寸为4 000 mm×1 500 mm×2 000 mm(长×宽×高)。由于现场桥台原型的地基情况良好,因此直接采用混凝土垫层,不再设置地基土层。被挡斜坡采用实心木块进行模拟,表面铺设砂纸并固定,从而模拟现场喷涂混凝土形成的粗糙表面。建造过程主要包括面层填筑、承载板放置与路基堆载。为了保证试验过程中始终保持平面应变条件,桥台填筑之前首先对模型箱2个侧壁进行润滑减阻,通过粘贴聚四氟乙烯膜、涂抹润滑油以减弱两侧壁对桥台模型的摩阻效应。墙面与玻璃板两侧分别贴上1 mm厚的聚四氟乙烯膜,顶部和侧面采用透明胶固定,从而形成一层减阻区域。此后,按照码放面层模块、回填填料、碾压振实、砂土整平、铺设筋材的流程逐层进行桥台填筑工作直至设计高度。面层模块采用错缝码放,并保持同一水平面,避免发生面层侧倾与旋转,在面层与模型箱侧壁接触处插入合适尺寸的泡沫薄片以防漏砂并减少侧壁阻力。填料采用质量体积控制法,设置填料压实度为95%,筋材沿桥台长度方向进行铺设。此外,为了控制桥台填筑过程中的面层水平位移,现场采用外部钢架支撑,而试验中采用钢架与挡板的组合结构,待桥台填筑完毕再拆除挡板。桥台施工完成后,将荷载加载装置移动到施加荷载区域正上方,并使加载板距离砌块内边缘10 cm,然后放置混凝土砌块进行路基堆载,至此整个模型建造完成,如图5所示。



图5 试验模型

Fig.5 Test model

1.4 加载与监测

采用地质灾害试验系统的加载装置进行加载,竖向加载装置量程200 kN。在满足平面应变条件下,设置桥台宽度为0.8 m,加载板为刚性板,底面尺寸

为0.8 m×0.5 m。加载方式为逐级加载,加载范围为0~487.5 kPa,试验设置20级,除最后一级受仪器量程阈值保护限制加载12.5 kPa外,其余每级为25 kPa。根据美国规范^[3]计算,试验T1、T2、T3、T4的GRS桥台极限承载力理论值分别为502.41、138.63、502.41、676.31 kPa。加载装置与承载板直接接触,每次模型稳定时间间隔为5 min,保证各变形点监测值稳定在某一数值。每次模型稳定时观察试验现象并拍照,数据采用不清零连续保存。加载过程中,未发现试验T1、T3、T4模型有明显的破坏现象。在各级荷载的连续作用下均观察到:面层外倾并产生一定程度的相对位移,少量填料被挤进砌块之间的缝隙,桥台顶部产生不同大小的沉降。试验T2模型增大1倍加筋间距,变形远超其余试验模型,在487.5 kPa荷载作用下发现明显破坏现象,面层位移与顶部沉降较大,并导致桥台后部出现塌陷等现象。

各试验中监测元件的布置详情如图6所示。监测内容包括桥台顶部竖向沉降、面层水平位移、加筋土体竖向附加土压力、面板处水平附加土压力与筋材应变,同时记录桥台外部试验现象。为了监测土工织物应变,试验所用电阻应变片型号为BF350-3EB(11)-P30,栅长×栅宽尺寸为2.7 mm×3.2 mm,电阻值为(350.0±17.5) Ω,灵敏系数为(2.110±0.021),精度等级为A。筋材为土工织物,若采用502胶水粘贴则形成刚度较大的一小片粘贴区域,从而与应变片存在较大的刚度差,使得数据可信度降低。因此,采用聚丙烯专用胶进行应变片粘贴,经测试效果较稳定,粘贴后的应变片表面涂抹一层703硅胶进行保护。应变片丝栅受力方向与筋材的受力方向保持一致。应变数据通过YE2539高速静态应变仪采集,仪器分辨率为1 με,测量误差为±0.3%(量程)。由于应变片刚度与筋材刚度不同,应变片的局部应变值与筋材的整体应变值存在一定的差异,且该差异受粘贴剂性能的影响,因此在筋材拉伸试验过程中对筋材整体应变与应变片监测读数之间的修正系数进行标定。图7所示为土工织物-应变片标定曲线,相应的标定系数为3.299。

2 试验结果与分析

对试验中各指标正负作出如下规定:对于面板水平位移,以指向临空面为正;对于桥台顶部竖向沉降,以向下为正;对于竖向附加土压力与水平附加土压力,以压应力为正;对于筋材应变,以拉应变为正。

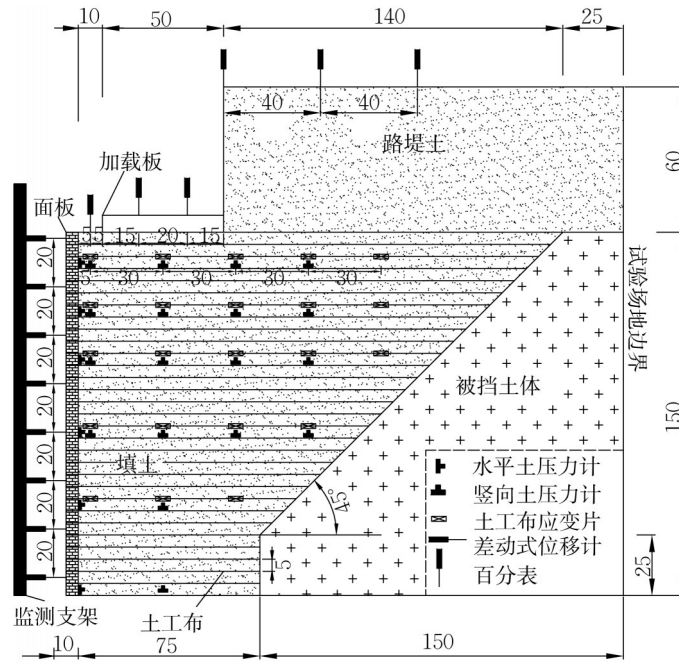


图 6 监测元件布置(单位:cm)

Fig.6 Monitoring element layout (unit:cm)

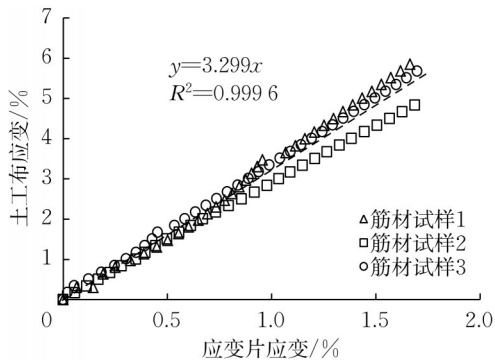


图 7 土工织物-应变片标定曲线

Fig.7 Geotextile-strain gauge calibration curves

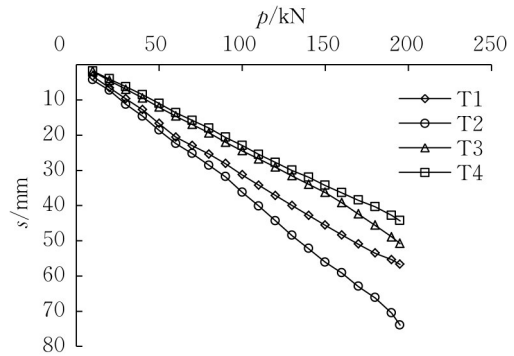


图 8 荷载-沉降曲线

Fig.8 Load-settlement curves

2.1 荷载-沉降曲线

图 8 所示为 4 组加筋土桥台模型试验的荷载-沉降($p-s$)曲线。对比试验 T1、T3 和 T4 的荷载-沉降曲线可知,各曲线均近似呈线性变化,未出现明显沉降突变点,表明 3 组加筋土桥台模型仍处于似弹性变形阶段,所加最大荷载均未达到桥台的极限承载力;试验 T2 的荷载-沉降曲线末端呈突变迹象,结合现场观察,加筋土桥台模型临近破坏状态。

对比试验 T1 与 T2 的荷载-沉降曲线可知,当加筋间距扩大 1 倍后,筋材对填土约束下降,加筋土复合体刚度降低,因此变形较大;对比试验 T1 与 T3 的荷载-沉降曲线可知,机械连接使面板对加筋土复合体的侧向约束增强,在相同竖向荷载作用下,限制了桥台侧向变形,有利于减小竖向沉降,但作用效果没

有试验 T4 明显;对比试验 T1 与 T4 的荷载-沉降曲线可知,填料由粗砂变为砾砂,在保证不均匀系数与曲率系数不变的前提下,将填料粒径平均增大 1 倍,填料的内摩擦角与模量增大,压缩性降低,加筋土复合体的抗变形能力增强,则桥台竖向沉降显著减小。

2.2 桥台顶部沉降

图 9 所示为 487.5 kPa 局部荷载作用下的累积沉降。可以看出,4 组试验展现出相似的沉降分布规律。顶部承载区域沉降量最大,面板至承压板之间的沉降量次之,引道路基区域沉降量最小,这与朱晨^[26]得到的规律一致。试验 T1、T3 和 T4 的最大沉降量分别为 55.94、50.50、45.13 mm,均小于模型桥台极限承载状态下对应的沉降值(5% H , H 为桥台高度),表明此时桥台仍处于正常工作状态,而试验

T2 此时最大沉降量约为 $5\%H$, 同时观察到填土塌陷与面板开裂的破坏现象, 表明达到桥台的承载力极限状态。对比试验 T1 和 T2 的结果可知, 扩大 1 倍加筋间距, 加载区域沉降量有较大变化, 最大沉降量增加 31.5%, 说明加筋间距与 GRS 桥台的稳定性和变形关系密切。对比试验 T1 和 T3 的结果可知, 试验 T3 的最大沉降量较试验 T1 减少了 10.13%, 表明当筋材与砌块面板采用机械连接时, 面板对加筋土复合体提供了较强的侧向约束, 有利于减小桥台的竖向变形。对比试验 T1 和 T4 的结果可知, 试验 T4 的最大沉降量比试验 T1 减少了 19.73%, 表明采用材料力学性能更好的填料时, 即使筋材与砌块面板之间为摩擦连接, 也能有效减小桥台的沉降。

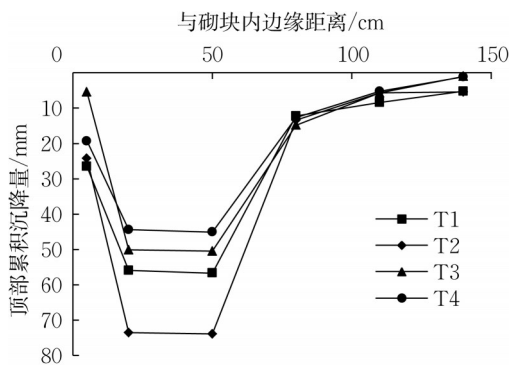


图9 累积沉降

Fig.9 Cumulative settlement

2.3 面板水平位移

图 10 所示为 487.5 kPa 荷载作用下面板水平位移, Z 表示某个测量点高度。可知, 在底部位移最小, 桥台面板在 $0.70H$ 处水平位移最大, 这与 Ren 等^[27] 的研究结果相似; 试验 T1、T2、T3 和 T4 在 487.5 kPa 荷载水平(远大于按相似比折算的工作荷载 75 kPa)下, 面板最大水平位移分别为 26.24、46.10、18.45、20.36 mm, 除了试验 T2, 其他 3 组试验桥台的最大水平位移均小于 $2.0\%H$ 。

将试验 T2 与 T1 对比, 当加筋间距扩大 1 倍时, 面板最大水平位移由 26.24 mm 增加到 46.10 mm, 增大了 75.69%; 试验 T3 与 T1 对比, 筋材与砌块面板采用机械连接时, 面板最大水平位移由 26.24 mm 减小到 18.45 mm, 减少了 29.68%; 试验 T4 与 T1 对比, 面板最大水平位移由 26.24 mm 减小到 20.36 mm, 减小了 22.41%。这一结果表明, 加筋间距是影响加筋土桥台侧向变形的最主要因素; 筋材与砌块面板的机械连接比摩擦连接更能增强对桥台的侧向约束, 从而限制桥台的侧向变形; 增大填料的颗粒

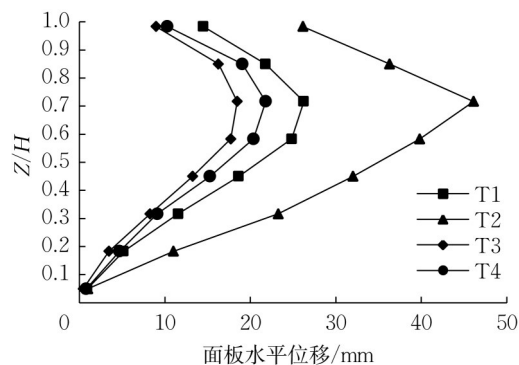


图 10 面板水平位移

Fig.10 Horizontal displacement of panel

粒径, 实质上提高了填料的强度和刚度, 进而提升筋土复合体抵抗变形能力, 在其他条件相同的情况下, 展现出更强的抗变形能力。

2.4 竖向土压力增量

图 11 所示为 487.5 kPa 荷载作用下桥台内部竖向土压力增量。试验中各处竖向土压力增量均随上部荷载的增加而增加, 在同一层位水平方向上, 承载板正下方竖向土压力增量最大, 远离承载板桥台内竖向土压力增量减小; 在承载板正下方 $0.80H$ 处均出现峰值土压力增量, 该现象与承载板下填土中的应力扩散有关, 张道等^[12] 的研究中也有类似现象。此外, 在竖向局部荷载作用下筋材会产生一定的张力膜效应, 对应力传递有一定的屏蔽作用。这几种机制共同作用可以解释试验 T2 竖向土压力增量最大的原因, 也能够说明为什么筋材与砌块面板采用机械连接的 T3 组的竖向土压力增量小于 T1 组。前者是因为加筋间距增大 1 倍, 筋材对应力的屏蔽作用减弱; 后者是因为采用机械连接时张力膜效应更显著。

从图 11 可以看出, 试验 T4 与 T1 的峰值土压力增量相差不大。此外, 采用 Boussinesq 解对桥台监测点土压力理论值进行计算并与实测值进行对比, 发现两者分布规律相似, 但实测值明显高于理论值。这主要因为 Boussinesq 解适用于半无限空间下均布介质, 而加筋桥台为一侧是临空面的各向异性介质, 此外实测值也会受到应力集中的影响。

2.5 水平土压力增量

图 12 所示为 487.5 kPa 荷载作用下桥台面板背后水平土压力增量。可见, 水平土压力增量呈现“K”型分布, 即中上部 ($0.80H$ 处) 与底部水平土压力增量最大, 这与 Mirmoazen 等^[28] 的结论类似。中上部水平土压力增量增大主要是由于上部承载板应力扩散以及挤土效应, 底部水平土压力增加是由于墙

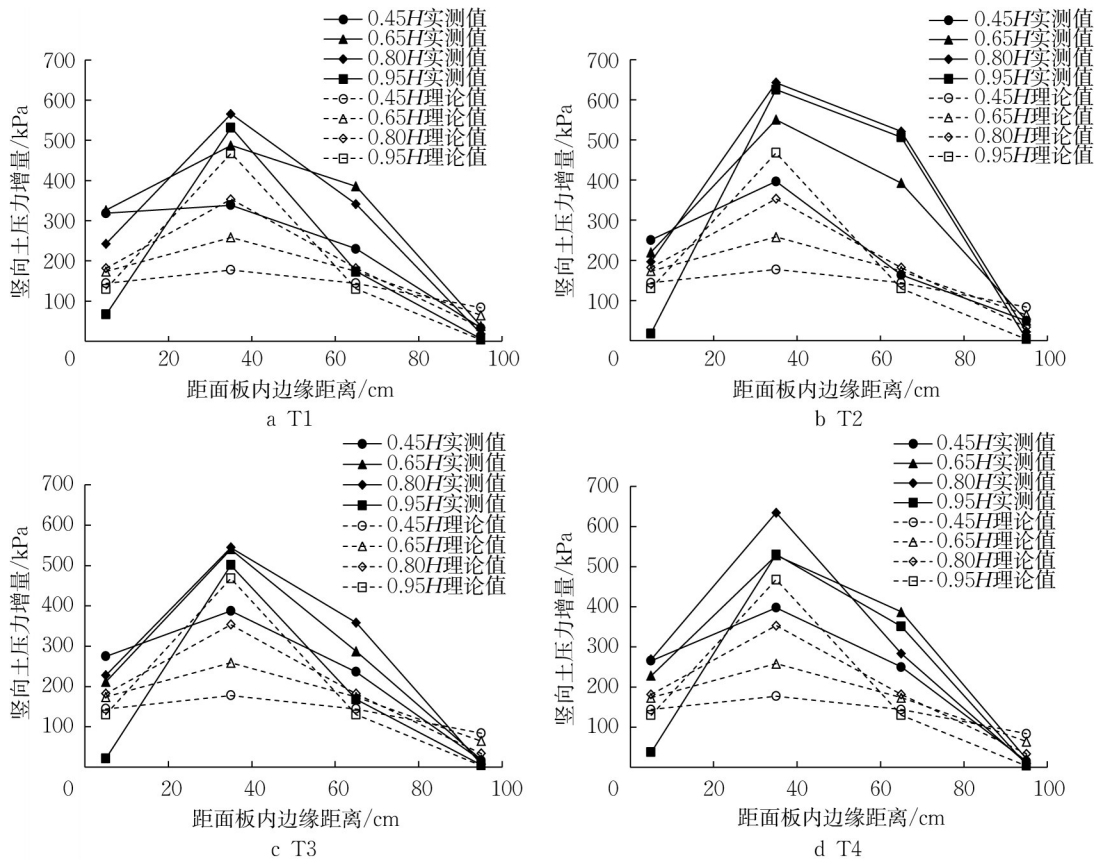


图11 竖向土压力增量

Fig.11 Vertical earth pressure increment

趾约束作用明显,而中下部水平土压力增量的减小主要是由面板水平位移增大引起的。

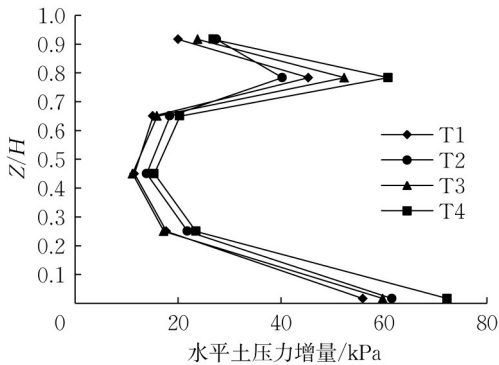


图12 水平土压力增量

Fig.12 Horizontal earth pressure increment

对比试验 T2 与 T1,加筋间距增大1倍使得水平土压力增量有所减小,是由试验 T2 更大的水平位移造成的;对比试验 T3 与 T1,机械连接使得试验 T3 的水平土压力增量有所增大,这是因为筋材与砌块面板之间采用的机械连接使墙面的侧向位移变小(见图 10),增强了面板对加筋土复合体的侧向约束;对比试验 T4 与 T1,同样可以从面板水平位移与面

板后土压力增量的关系找到原因,即试验 T1 组水平位移增大,则水平土压力增量变小。

2.6 筋材应变

试验过程中加载到 300 kPa 时,部分应变片开始失效,因此仅对 0~300 kPa 范围内各级荷载下筋材应变分布规律进行分析,如图 13 所示。

可知,筋材应变随荷载增加而增加,但各层筋材应变特征基本保持不变。不同层筋材应变分布差异较大,0.47H、0.67H、0.80H、0.93H 处筋材最大应变出现在承载板正下方,而 0.27H 处筋材应变最大值出现在靠近面板处,这与王裘申等^[17]的研究结果类似。每层筋材应变沿水平方向分布并不均匀,特别是桥台顶部(0.93H),在 300 kPa 附加荷载时承载板正下方筋材应变均超过 2%,而在承载板两侧由于应力扩散导致筋材应变逐渐降低。

对比试验 T2 与 T1,应变规律相似,而随着加筋间距的增大,各层筋材应变最大值平均增加约 30%;对比试验 T3 与 T1,由于受到机械连接的侧向约束作用大于摩擦连接,因此试验 T3 各层筋材与砌块面板连接处筋材出现较大应变,尤其在 0.67H 处;对比试验 T4 与 T1,填料粒径的增大使得桥台各层筋材

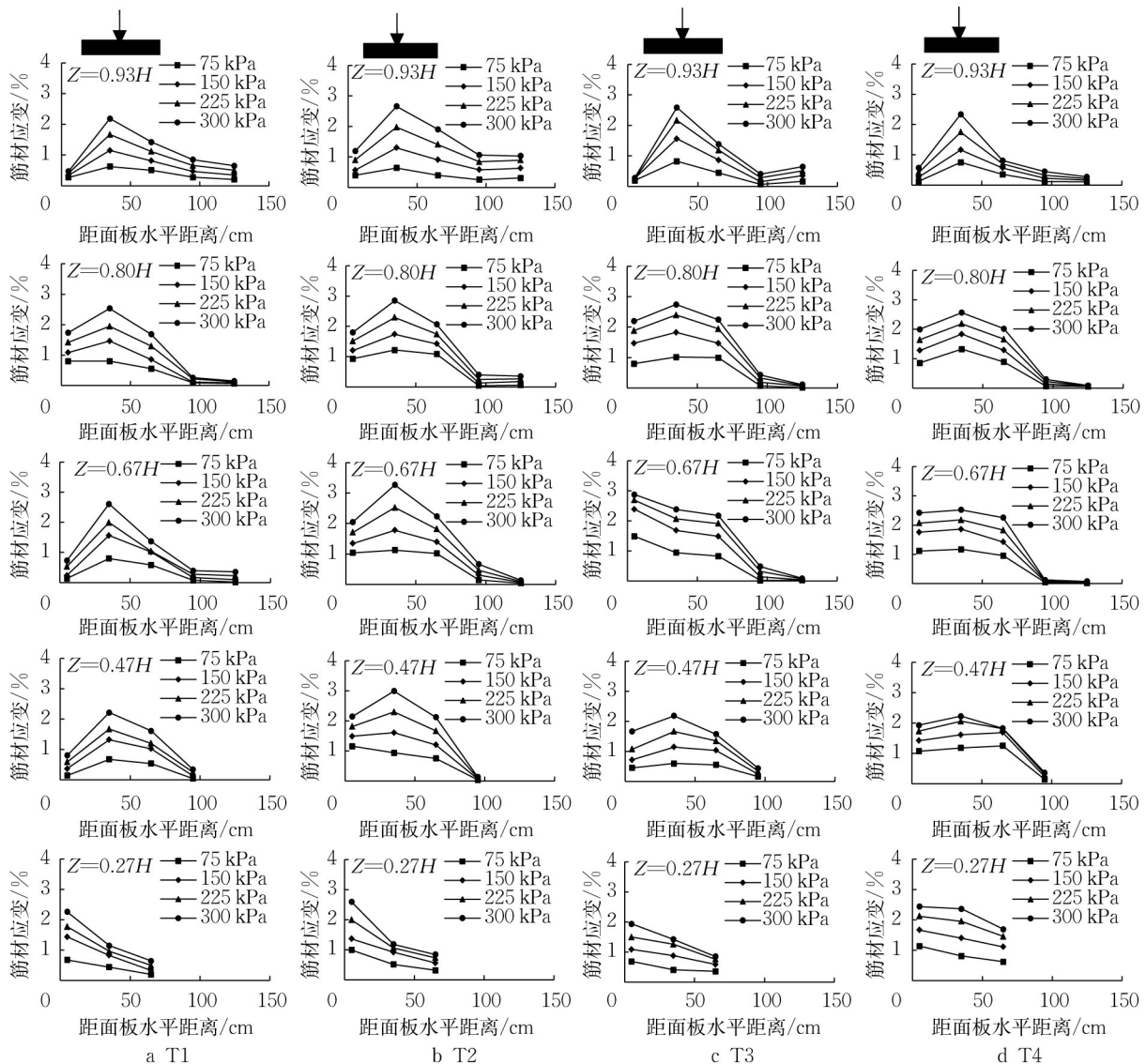


图 13 筋材应变分布

Fig.13 Strain distribution of reinforcements

轴力分布更加均匀,加筋土复合体刚度增加,应力扩散角增加,应力集中程度减弱,因此试验 T4 的筋材应变也最小。

3 结论

(1) 采用筋材与砌块面板摩擦连接和粗砂建造的加筋土桥台展现出良好的承载性能,在 487.5 kPa 墙顶局部荷载作用下仍处于似弹性状态,表现出极强的变形协调能力。在此基础上,改用机械连接或砾砂填筑可以进一步提升加筋土桥台的承载性能,而增大 1 倍加筋间距的桥台承载性能较差,加载至 487.5 kPa 时桥台沉降明显增大。

(2) 在桥台顶部竖向荷载作用下,桥台内竖向土

压力增量和桥台沉降最大值出现在加载板正下方,面板水平位移最大值出现在 $0.70H$ 处。桥台面板后水平土压力增量受附加应力扩散、桥台面板和底部墙趾约束的影响,呈现“K”型分布,水平土压力增量与桥台水平位移关系密切。

(3) 相较于筋材与砌块面板的摩擦连接,机械连接能够限制两者之间的相对位移,使加筋土复合体侧向约束增强。在相同荷载作用下,采用机械连接的试验 T3 比 T1 的竖向沉降与水平位移分别减少约 10% 与 30%,对控制 GRS 桥台变形效果显著,而面板后水平土压力增量有所增大。

(4) 采用砾砂的 T4 桥台的竖向沉降与水平位移相较于采用粗砂的 T1 桥台减少了约 20%。在保证不均匀系数与曲率系数不变的前提下,增大填料粒

径则增大加筋土复合体内摩擦角和刚度,可使加筋土桥台变形减小,承载力提升。

作者贡献声明:

徐超:规划试验,指导试验,修改论文。
余晓晓:开展试验,处理数据,撰写论文。
杨阳:参与试验方案制定,安排试验场所。
左彬灏:协助试验开展。
韦小当:协助试验开展。
崔纪泽:协助试验开展。

参考文献:

- [1] ADAWS M T, SCHLATTER W, STABLE T. Geosynthetic reinforced soil integrated abutments at the Bowman Road Bridge in Defiance County Ohio [C]// Proceedings of the Geo-Denver 2007. Denver: American Society of Civil Engineers, 2007:1-17.
- [2] WU J T H, LEE K Z Z, PHAM T. Allowable bearing pressures of bridge sills on GRS abutments with flexible facing [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(7): 830.
- [3] ADAMS M, NICKS J. Design and construction guidelines for geosynthetic reinforced soil abutments and integrated bridge systems[R]. McLean: Federal Highway Administration, 2018.
- [4] 罗敏敏, 徐超, 杨子凡. 土工合成材料加筋土柔性桥台复合结构及应用 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(S1): 226.
LUO Minmin, XU Chao, YANG Zifan. Geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system and its applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 226.
- [5] RAMALAKSHMI M, VIDHYALAKSHMI S. Large displacement behaviour of GRS bridge abutments under passive push[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45(7): 6921.
- [6] 徐超, 罗敏敏. GRS结构与MSE结构的性能差异及评价方法 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(3): 1.
XU Chao, LUO Minmin. Performance difference and evaluation method of GRS and MSE structures [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2019, 36(3):1.
- [7] XU C, LIANG C, SHEN P. Experimental and theoretical studies on the ultimate bearing capacity of geogrid reinforced sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47: 417.
- [8] 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.
LUO Minmin, XU Chao, YANG Yang, *et al.* Seismic performance test of composite structure with reinforced soil flexible abutment [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(11): 1541.
- [9] HELWANY S, WU J T, MEINHOLZ P, *et al.* Seismic behavior of GRS bridge abutments with concrete block facing: an experimental study [J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2017, 4(4): 85.
- [10] 肖成志, 刘贺, 王荣霞, 等. 土工格栅加筋土柔性桥台结构性能试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 767.
XIAO Chengzhi, LIU He, WANG Rongxia, *et al.* Experimental study on structural performance of flexible geogrid-reinforced soil abutment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 767.
- [11] XIAO C Z, HAN J, ZHANG Z. Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44: 81.
- [12] 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.
ZHANG Xiao, XU Chao, WANG Qiushen, *et al.* Load test study on bearing characteristics of reinforced soil abutment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 4027.
- [13] HATAMI K, DOGER R. Load-bearing performance of model GRS bridge abutments with different facing and reinforcement spacing configurations [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49: 1139.
- [14] 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.
- [15] 郑俊杰, 邓嘉隆, 漆子文, 等. 地基土类型对加筋土桥台承载性能的影响研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(7): 1.
ZHENG Junjie, DENG Jialong, QI Ziwen, *et al.* Study on the influence of foundation soil type on the bearing capacity of reinforced soil abutment [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(7): 1.
- [16] KOST A D, FILZ G M, COUSINS T, *et al.* Full-scale investigation of differential settlements beneath a geosynthetic-reinforced soil bridge abutment [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Record, 2014, 2462: 28.
- [17] 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.
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.
- [18] ZHENG Y, FOX P J, SHING P B, *et al.* Physical model tests of half-scale geosynthetic reinforced soil bridge abutments. I: static loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 04019094.
- [19] 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.
- [20] 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.