

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0390

加筋土桥台承载特性的载荷试验研究

张 逍¹, 徐 超^{1,2}, 王裘申¹, 吴伟成¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土工程与地下结构教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 加筋土桥台作为承载结构, 其承载力及其影响因素备受关注。以美国鲍曼桥为工程原型, 通过大比例缩尺模型的静载试验研究加筋土柔性桥台的承载性能。试验研究中, 以有纺土工织物为筋材, 共设置 3 组加筋土柔性桥台模型的载荷试验, 主要考察桥梁基座的位置, 即桥梁承载区外沿与面板的水平净距对桥台承载力的影响及其变化规律。试验结果表明, 水平净距是影响加筋土桥台承载性能的重要因素, 承载能力随水平净距的增大而增大, 但增幅快速递减; 桥台面层水平位移和顶部沉降均随水平净距的逐渐增大而减小, 且减小趋势表现出收敛特征; 随着水平净距增大, 筋材应变极值减小, 桥台整体稳定性增强, 表现出良好的复合体特性。试验研究结果还表明, 美国现行规范关于加筋土桥台承载力计算方法可能仅限于特定的填料和加筋布置方式, 因此在工程实践中宜结合工程实际。

关 键 词: 土工合成材料; 加筋土桥台; 承载特性; 载荷试验

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 12-4027-08

Load test study of bearing characteristics of reinforced soil abutments

ZHANG Xiao¹, XU Chao^{1,2}, WANG Qiu-shen¹, WU Wei-cheng¹

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

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As a bearing structure, the reinforced soil abutment has attracted much attention for its bearing capacity and its influencing factors. Taking the Bowman bridge as the engineering prototype, this paper studies the bearing capacity of the reinforced soil flexible abutment by the scale model test. In the experimental study, three groups of load tests of the reinforced soil flexible abutment were set up, which uses the geotextile as the reinforcement material. This paper mainly studies the influence of bridge base position on the bearing capacity of the abutment. Test results show that the setback is an important factor affecting the bearing capacity of the reinforced abutment, and that the bearing capacity increases with the setback, but the amount of increase is rapidly diminishing. The horizontal and vertical settlements at the top of the abutment decrease with the increase of the setback, and the decreasing trend shows convergence. With the increase of setback, the maximum strain of reinforcement decreases, and the overall stability of abutment is enhanced, showing better complex characteristics. In addition, the results of this experimental study also prove that the calculation method of bearing capacity of reinforced abutments in the current US regulations may be limited to specific packing and reinforcement arrangement. Therefore, it should be combined with actual conditions in engineering practice.

Keywords: geosynthetics; reinforced soil abutment; load-bearing characteristics; load test

1 引 言

土工合成材料加筋土柔性桥台复合结构系统 (geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system, 简称 GRS-IBS) 由土工合成材料加筋土桥台、桥梁结构和连接路基构成, 两侧桥台采用压实填料与小间距 (小于等于 300 mm) 加筋材料交替填筑建造,

施工方便快捷, 相较桩承桥台具有显著优势^[1]。国外学者对正常服役期的 GRS-IBS 进行长期性能监测^[2-5], 证实了该结构在车辆荷载、超载及温度等外部环境因素影响下具有良好的工作性能。通过一体化设计建造, GRS-IBS 理论上能消除桥梁与引道路基之间的差异沉降, 解决桥头跳车难题。

作为承载结构, 加筋土桥台的承载性能及其影

收稿日期: 2020-04-03

修回日期: 2020-07-22

基金项目: 科技部国家重点研发计划 (No.2016YFE0105800)。

This work was supported by the Key Research and Development Project for the Ministry of Science and Technology of China(2016YFE0105800).

第一作者简介: 张逍, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为土工合成材料加筋土结构。E-mail: 1830163@tongji.edu.cn

响因素备受人们关注。Hoffman^[6]、Nicks^[7]、蔡华南^[8]等通过微型墩及缩尺模型试验研究发现,加筋间距与筋材刚度是桥台承载能力的重要影响因素。Xu 等^[9]指出竖向加筋间距对桥台稳定性的影响更为显著。王初生等^[10]给出 GRS 桥台合理加筋间距为 30~50 cm。Wu^[11]、Xu^[12]等分别基于准黏聚力加筋机制、等效围压增量加筋原理给出了 GRS 复合体极限压力的计算方法。

作为承载结构,GRS 桥台的承载力还与桥梁基础与桥台面板的距离有关。肖成志等^[13]开展了桥梁基础与加筋土桥台面板水平净距对桥台承载力影响的试验研究,获得了桥台极限承载力随水平净距的变化规律。Murad 等^[14]通过数值模拟也发现,水平净距和基础宽度等对桥台承载力均有一定影响,但并未进行相应模型试验予以验证。

本文在 GRS-IBS 和加筋土桥台已有研究成果

和工程经验基础上,以实际工程案例为依托,以土工织物作为筋材,以砌块作面层,采用大比例缩尺模型的静载试验,进一步研究加筋土桥台的承载力、变形特征及其随桥梁承载区位置的变化规律。

为便于后文表述,将桥梁基座(或桥台顶部承载区)外沿与加筋土桥台面层之间的水平距离定义为水平净距,与英文文献里桥梁基础的 setback 相对应。

2 模型试验

2.1 试验模型及材料

模型以美国俄亥俄州 Bowman 桥为工程原型。模型试验依托同济大学交通运输工程学院道路与交通工程教育部重点实验室车辆荷载模拟加载平台进行。限于试验场地尺寸及实际加载条件,模型按 1:3 进行缩尺。工程原型与模型的主要几何尺寸见表 1。

表 1 工程原型与模型具体尺寸

Table 1 Parameters for engineering prototype and test model

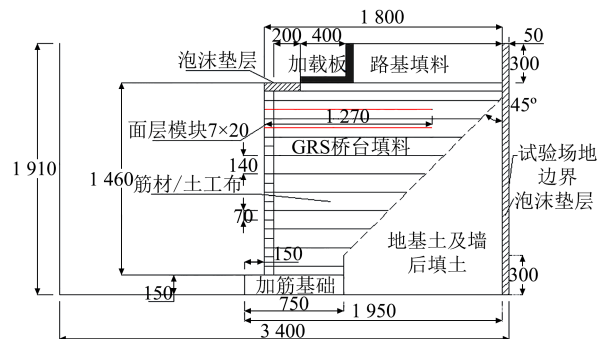
类型	桥台高/m	基础高/m	路堤高/m	墙宽/m	墙底长/m	墙顶长/m	桥梁承载区长度 b/m	基底长度/m	水平净距/cm	加筋间距/cm
工程原型	4.70	0.45	0.9	13.3	1.8	5.5	1.2	2.30	20	20
室内模型	1.46	0.15	0.3	1.5 (平面应变)	0.6	1.8	0.4	0.75	30 参照	14

拟建模型为 GRS-IBS 结构的单侧桥台。如图 1 所示,模型由 GRS 桥台、加筋基础、地基土及墙后填土、连接路基和桥跨结构等 5 部分组成,模型总长为 3.4 m,总高为 1.91 m,总宽为 1.5 m。其中 GRS 桥台全高 H 为 1.46 m。桥台填土坡率与原型保持一致,均为 1:1。桥梁承载区宽度为 0.4 m,连接路基的尺寸依据水平净距的变化而改变。

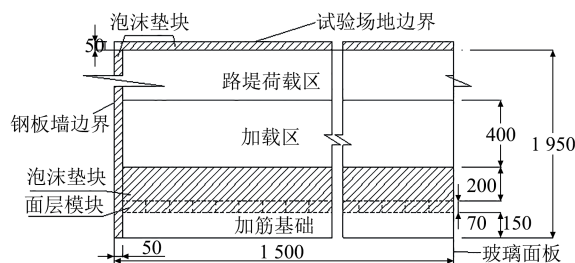
加筋间距设置为 14 cm (两倍层间距),在满足小间距加筋原则下使桥台模型的极限承载力降低,试验容易做到桥台破坏。根据美国现行标准^[15]的设计要求,桥台基座下方密加筋区的加筋长度不低于两倍水平净距与桥梁承载区之和,定为 1.27 m。

本次模型试验涉及的变量为水平净距,利用 L 型钢板代替桥跨结构与桥台接触,焊接钢轨以满足其刚度要求,其尺寸为 0.4 m×1.5 m,并将桥跨自重等效为部分桥台加载量。采用均匀分布的预制混凝土试块来模拟连接路基区填土。模型试验符合平面应变条件,模型一侧设置为钢板墙,另一侧设置为有机玻璃挡板,并在玻璃板内外侧粘贴对应颜色的十字标记点,便于观察桥台整体变形趋势。

试验采用自制水泥砂浆砌块作为桥台的面层,缩尺后的规格为 130 mm×70 mm×70 mm。面层砌块分层错缝码放,筋材夹在两层砌块之间,通过摩擦



(a) 模型剖面图



(b) 平面图

图 1 试验模型构成及尺寸 (单位: mm)

Fig.1 Configuration of test model(unit: mm)

连接。

试验选用 PP 双向土工织物为加筋材料。根据量纲分析, 10%筋材应变对应的拉伸强度应为

8 kN/m，筋材拉伸试验结果（见图 2）显示 10%应变对应的试验值为 7.53 kN/m，二者相近，基本满足设计要求。

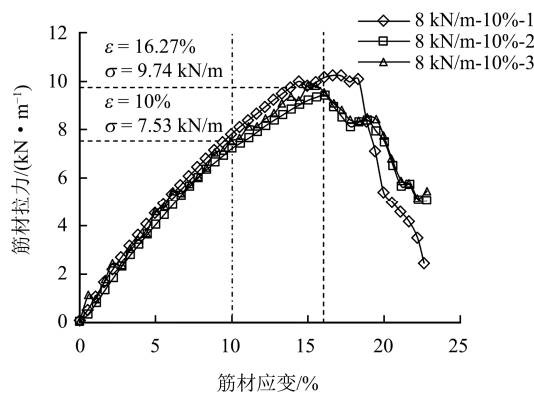


图 2 筋材拉伸曲线
Fig.2 Tensile curves of reinforcement

工程原型填土粒径范围为 0.3~12.7 mm，根据模型缩尺比例，试验选用填土粒径范围为 0.1~4.2 mm 的石英砂，采用修正类比法确定填土级配，根据原型指定粒径，计算得到模型指定粒径与相应过筛率，试验选用填土的级配曲线如图 3 所示。填土最大干密度为 1.86 g/cm³，通过 GDS 应力路径三轴试验，在压实度为 95%时，填料的内摩擦角 ϕ 约为 48°，黏聚力 c 为 0 kPa。

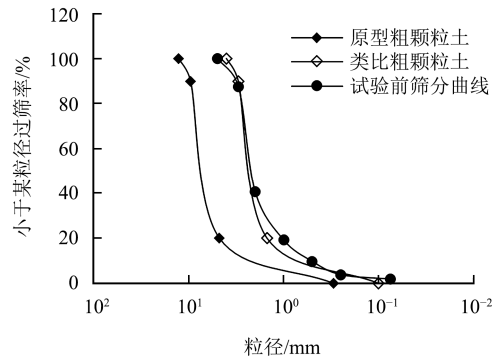


图 3 试验用填土的级配曲线
Fig.3 Grain size distribution of sands used in tests

2.2 试验方案与试验方法

根据原型特点，结合实际试验条件，共设计了 3 组模型试验，试验方案见表 2。

表 2 模型试验方案 Table 2 Model test plan		
试验组号	水平净距/cm	加筋间距/cm
T1	20	
T2	30（参照）	14
T3	40	

依据美国规范^[15]估算，GRS 桥台极限承载力为 48 kPa，换算成上部荷载约为 30 kN。根据加载设备能力，拟以 3 倍极限承载力确定模型的最大加载值。试验采用试验平台液压脉动疲劳试验机的静载模式，参考浅层地基平板载荷法，自 0 开始进行逐级加载，分级荷载为 10 kN。以模型整体发生明显破坏迹象、模型整体沉降量达桥台全高 5%（即 7.5 cm）或面层最大水平位移达桥台全高 10%（即 15 cm）为载荷试验终止条件。

2.3 监测方案

试验监测内容包括桥台顶部沉降量、面层水平位移、GRS 桥台内水平及垂直附加应力、筋材应变，并观察记录桥台整体变形趋势。监测元件的布置如图 4 示。

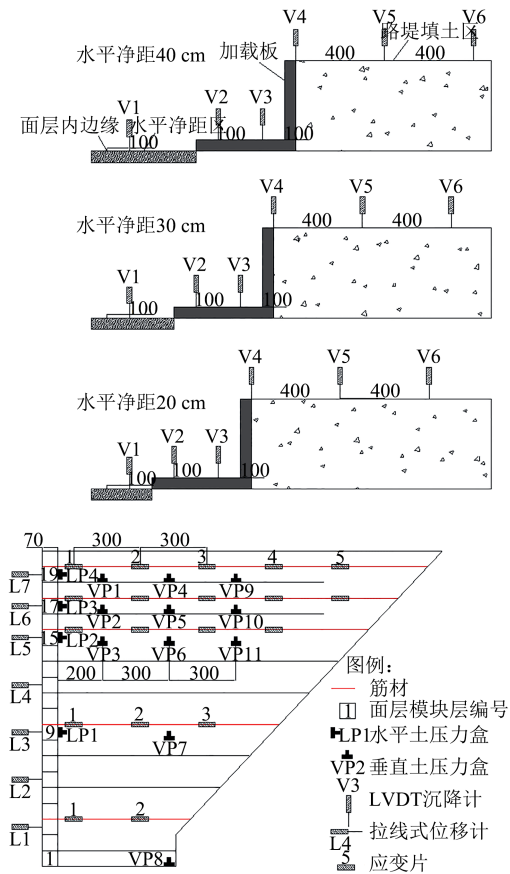


图 4 监测方案（单位：mm）
Fig.4 Monitoring instrumentation plan(unit: mm)

2.4 模型建造

按加筋基础施工—桥台填筑—承载区域处理—加载板安置的流程进行桥台建造，建成桥台模型如图 5 所示。桥台填筑之前，通过贴聚四氟乙烯膜—涂抹润滑油进行侧壁减阻处理。建造过程中，采用体积质量法分层控制填料压实度在 95%以上，分层厚度为 7 cm，共分 21 层填筑。面层码放过程中，

采用十字水准仪校核水平,并设置面层挡板防止面层外倾,在面层与外墙侧壁接触区域填塞合适尺寸泡沫薄片以防漏砂,也减小侧阻。



图5 试验模型
Fig.5 Test model

3 试验成果及分析

按工程惯例对采集数据进行方向标定,对于面层位移,以指向临空面方向为正;对于桥台顶部沉降,以向下为正;对于桥台内附加应力,以压应力为正;对于筋材应变,以拉应力为正。

3.1 试验现象描述

试验设备的加载装置阈值为 100 kN,因此,试验的最大荷载只能到 100 kN。在此荷载作用下,3 组桥台模型均未发生明显变形破坏,仅观察到面层中上部发生一定程度外倾、局部区域填料被挤入面层与侧壁、桥台顶部产生一定的沉降、筋材由水平变为弯曲、有机玻璃挡板内外侧十字标记点错位明显等局部受损现象,如图 6 所示。模型整体未发生面层位移突变、顶部显著沉降、筋材断裂等破坏迹象。这一试验结果表明,桥台的实际极限承载力应远大于公式计算值。Xu 等^[12]指出其原因在于该公式仅对大颗粒填料(填料最大粒径大于 10 mm)的复合体结构予以验证,而未考虑小颗粒填料(填料最大粒径小于 5 mm)对公式中影响因子 W 的削弱作用。同时,作为承载结构,加筋桥台的极限承载力势必受到水平净距、基座宽度、加筋基础尺寸等因素的影响。本文试验结果证明未考虑水平净距的该公式对加筋桥台极限承载力的预测误差较大,故美国规范^[15]给出的极限承载力公式可能仅适用于特定的填料和筋材,以及加筋的布置情况。因此,在实际工程应用中,不仅应考虑水平净距对承载力

的影响,而且在使用美国标准中的承载力计算公式时宜结合工程实际。

各监测物理量随水平净距的改变而有所差异,面层外倾程度与水平净距的改变未表现出明显相关性;面层水平位移和顶部沉降量随水平净距的增加而减小;填土内筋材挠曲程度随水平净距的增加而减弱,但均无明显拉裂现象。



(a) 面层侧壁外倾

(b) 填料挤入侧壁砌块



(c) 土工织物部分挠曲

图6 试验结束后桥台结构的破损情况

Fig.6 Local damage of abutment structure after test

3.2 荷载-沉降曲线

图 7 为 3 组模型试验荷载-沉降($p-s$)曲线。总体而言,各组曲线近似为线性,表明桥台模型未达极限破坏状态,且随水平净距增大,桥台沉降变小。水平净距从 30 cm 减小到 20 cm,沉降明显增大,而水平净距从 30 cm 增大到 40 cm,两条 $p-s$ 曲线非常接近,表明当水平净距满足一定要求后,再增大水平净距,对桥台整体承载能力的影响不大。模型 T1 试验中,出现沉降突变,而后沉降又随荷载线性增长,可能是施加 50 kN 这一级荷载时加载装置出现了异常。

3.3 桥台顶部沉降

如图 8 所示,各模型桥台在 100 kN 荷载下顶部累计沉降量具有相同的分布规律:桥梁承载区沉降大,且远大于其他区域;模型顶部沉降量均远小于

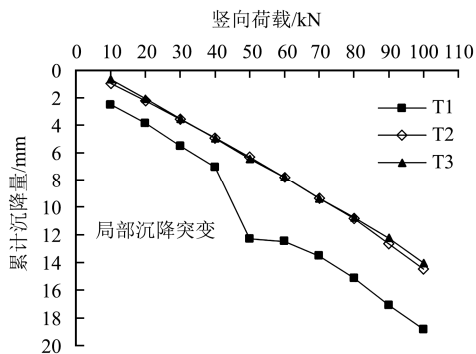


图 7 载荷试验 $p-s$ 曲线
Fig.7 $p-s$ curves of load test

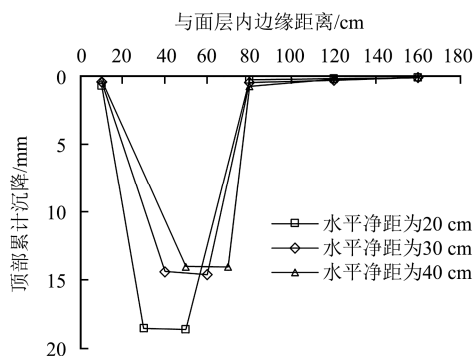


图 8 100 kN 荷载下桥台顶部沉降分布规律
Fig.8 Settlement distribution of abutment under 100 kN load

其极限承载状态下的沉降量 ($5\%H$), 表明桥台模型仍处于正常服役工作状态。对比 T1、T2、T3 可以发现, 随水平净距逐渐增大, 桥梁承载区沉降量先显著减小, 而后变化很小, 这一结果与前述荷载-沉降曲线一致。靠近面层一侧的沉降量随水平净距的增大略微减小, 而连接路基区沉降量略微增大, 表现为桥台顶部沉降由承载区向两侧逐渐分散, 桥台模型表现出变形协调能力逐渐增强的复合体特性。

3.4 面层水平位移

图 9 给出了各桥台在 100 kN 荷载下面层位移沿墙高的分布规律。从中可以发现, 随水平净距逐渐

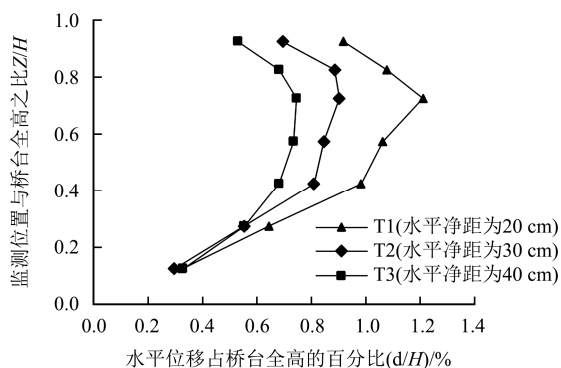


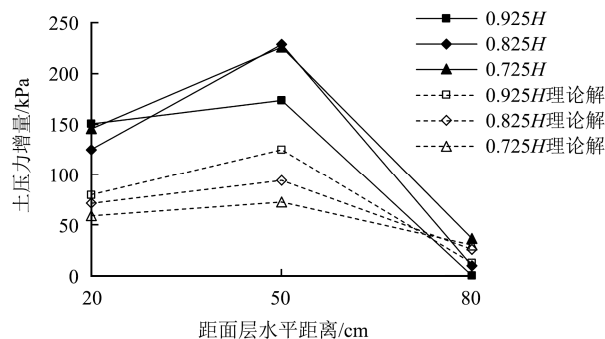
图 9 100 kN 荷载下面层水平位移分布规律
Fig.9 Surface displacement distribution under 100 kN load

增大, 面层的水平位移不断减小, 且沿墙高趋于均匀分布; 各桥台面层水平位移的最大值均位于距桥台顶部约 $1/3H$ 处。

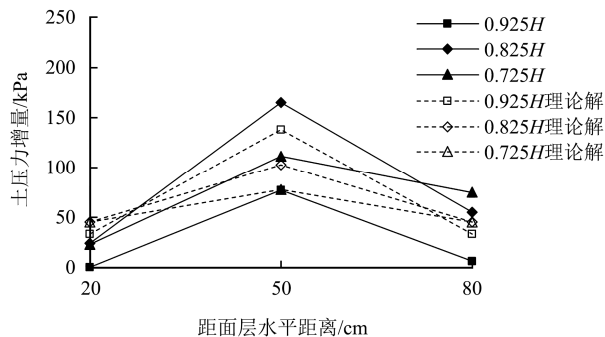
从图 7~9 所示的竖向荷载下加筋土桥台的顶部沉降和侧向位移分析, 加筋土桥台的承载力随着水平净距的增大而增大, 但从本次 3 组模型试验结果看, 水平净距从 20 cm 增大到 30 cm, 从 30 cm 增大到 40 cm, 承载力的增幅明显减小。这说明加筋土桥台需要有一定的水平净距, 但过大的水平净距意义不大, 而且增加桥梁结构长度, 反而不合理。

3.5 垂直附加应力

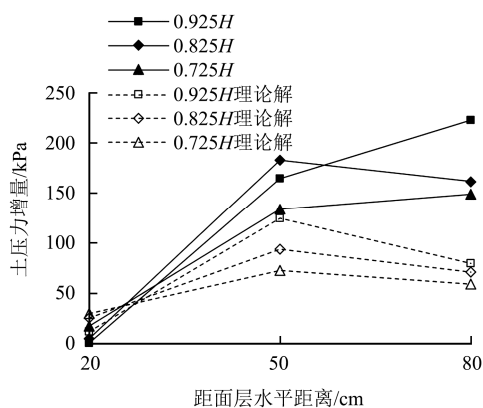
图 10 为 100 kN 荷载下, 桥台模型内部垂直附加应力的分布规律。总体来看, 加筋桥台内部垂直



(a) T1(水平净距为 20 cm)



(b) T2(水平净距为 30 cm)



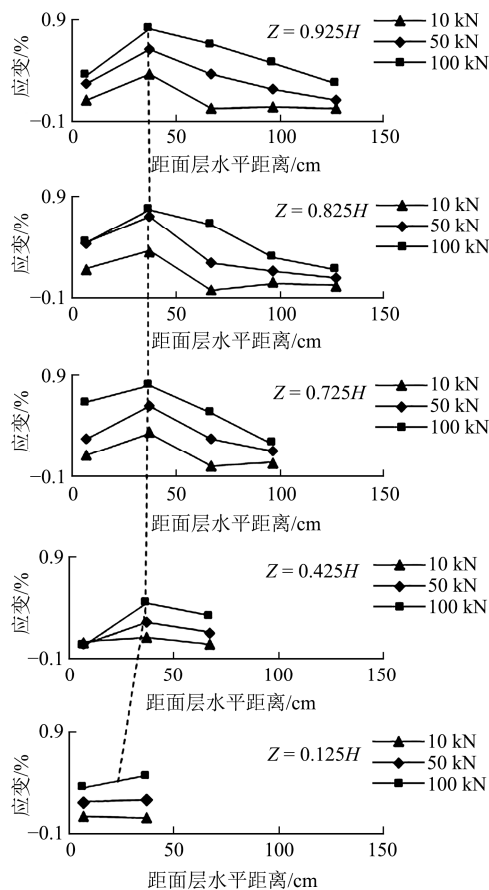
(c) T3(水平净距为 40 cm)

图 10 100 kN 荷载下垂直土压力分布规律
Fig.10 Distribution of vertical earth pressure under 100 kN load

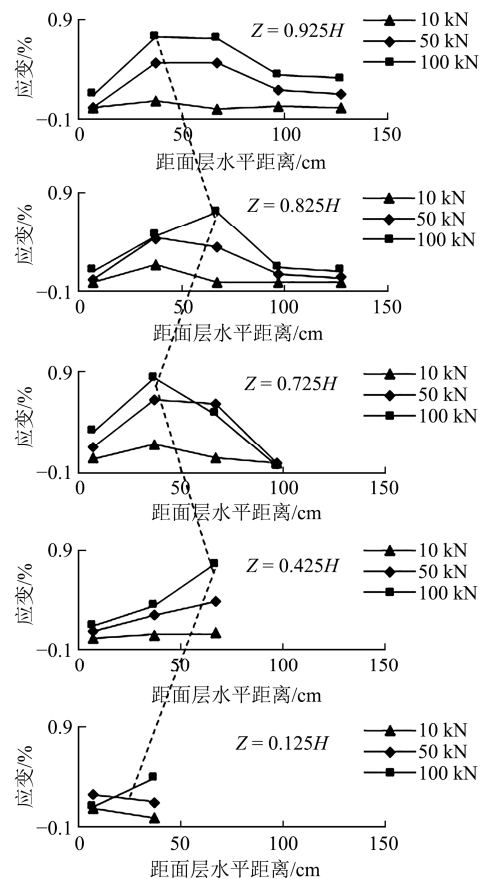
土压力沿水平方向的分布规律与矩形均布荷载下角点法求得的理论解较为吻合,均表现为中部土压力较大,两侧偏小。承载板下方土压力实测值明显高于理论值,而在远离承载区域则相反,表明加载位置下方会产生一定程度的应力集中。这一结果印证了在承载区下方一定深度范围内减小加筋层间距的合理性。由于承载区与桥台模型顶部尺寸比并不满足半无限空间下均布荷载的假设条件,且加筋土复合体为各向异性介质,故实测值与理论解有一定差异。另外,3组模型试验中,随着水平净距的变化,土压力分布规律并不相同,实测值与理论解的吻合程度也不同,说明水平净距对土压力分布有一定影响,其中的影响机制有待进一步探讨。

3.6 筋材应变

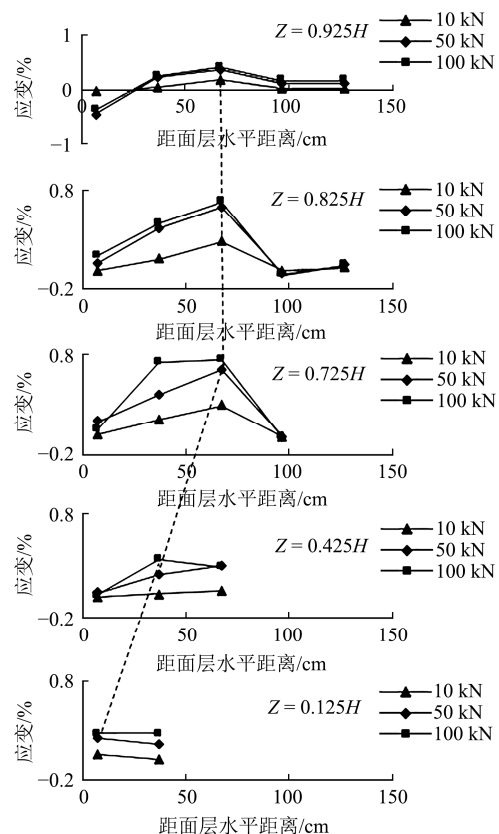
为清晰见,本文仅给出了3级竖向荷载下筋材应变量测结果,如图11所示。从图中可以看出:①筋材应变随施加荷载的增大而增大,每层筋材的极大值均位于承载区下方,而非面层连接处;②随着水平净距增加,筋材应变极值也不断内移,离面层越来越远;③从各层筋材的应变极值来看,桥台上部、靠近承载区的应变极值最大,向下逐渐减小,



(a) T1 (水平净距为 20 cm)



(b) T2 (水平净距为 30 cm)



(c) T3 (水平净距为 40 cm)

图 11 各层筋材应变沿其长度分布规律

Fig.11 Distribution of reinforcement strain along the length

到桥台下部, 筋材应变极值明显减小。这一结果反映了小间距加筋土桥台在竖向荷载下的变形特征和工作机制, 亦即筋材与填土协调变形, 在竖向应力集中的区域, 填土侧向变形大, 筋材应变亦同步增大, 筋材对填土发挥侧向作用, 而非像常规加筋土挡墙中那样, 面板承受侧向土压力, 而后传递给筋材。加筋土桥台下部的筋材应变极值变小, 是因为附加应力扩散后变小和底部边界的限制所致。

如果将各层筋材应变极值点连线 (见图 11), 作为加筋土柔性桥台的潜在破裂面, 3 组模型试验结果并不具有一致性, 规律性不强。基于试验监测结果可以推测, 潜在破裂面呈双折线形式, 下部接近于朗肯破裂面, 而上部为与水平净距相关的、通过承载区某一位置的竖直面, 而非通过承载区后沿的破裂面。这一试验结果与高江平^[16]及王家全^[17]等的研究成果较为相似。

4 结 论

本文完成了土工织物加筋土桥台的静载模型试验, 通过对试验结果的分析, 可得如下结论:

(1) 随水平净距逐渐增大, 桥台面层水平位移、顶部沉降均不断减小, 且表现出收敛性; 筋材应变极值逐渐减小, 表明在一定范围内, 增大水平净距可增大桥台承载力, 但过大的水平净距意义不大。加筋桥台的实际承载力应考虑水平净距的影响。

(2) 水平净距对桥台内垂直附加应力分布影响显著, 水平净距为 $0.2H$ 时, 其分布规律与角点法理论解近似吻合, 表明桥台具有良好的复合体特性。

(3) 试验结果表明, 美国现行 GRS-IBS 设计规范中关于加筋土桥台极限承载力计算公式可能只在特定的填料、筋材和布筋方式下成立, 须进一步完善。

由于试验场地条件和加载装置最大加载量的限定, 本次试验未达到加筋土桥台极限承载力, 关于该结构在极限荷载状态下的破坏模式有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] ADAWS M T, SCHLATTER W, STABILE T. Geosynthetic reinforced soil integrated abutments at the Bowman Road Bridge in defiance county Ohio[C]//Geo-Denver. Reston: [s. n.], 2007.

[2] DAVID SUITS L. Geosynthetics, forging a path to bona

fide engineering materials—a case study: geosynthetic reinforced soil-integrated bridge structure (GRS-IBS)[C]//American Society of Civil Engineers Geo-Chicago 2016. Chicago, Illinois: [s. n.], 2016.

- [3] TALEBI MAJID, MEEHAN CHRISTOPHER L, LESHCHINSKY DOV. Applied bearing pressure beneath a reinforced soil foundation used in a geosynthetic reinforced soil integrated bridge system[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2017, 45(6): 580-591.
- [4] MOHAMED K, ABOUZAKHM M, ELIAS M. Applications and performance of geosynthetic-reinforced soil abutments on soft subsurface soil conditions[J]. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2011, 2212(1): 74-81.
- [5] MAMATHA K H, DINESH S V. Evaluation of strain modulus and deformation characteristics of geosynthetic-reinforced soil-aggregate system under repetitive loading[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 12(6): 545-555.
- [6] HOFFMAN P, WU J T H. An analytical model for predicting load-deformation behavior of the FHWA GRS-IBS performance test[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 9(2): 150-162.
- [7] NICKS J E, ESMAILI D, ADAMS M T. Deformations of geosynthetic reinforced soil under bridge service loads[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2016, 44(4): 641-653.
- [8] 蔡华南. 柔性加筋土复合体强度及变形特性试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- CAI Hua-nan. Experimental research on properties of strength and deformation of flexible reinforced soil composites[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [9] XU Chao, MEI Xue-song. Model test investigating the behavior of Geosynthetic-Reinforced soil(GRS) abutments subjected to static footing load[C]//Geosynthetics Conference. Houston: [s. n.], 2019.
- [10] 王初生, 杜灏洁. 柔性桥台合理加筋间距的力学模型试验[J]. **力学与实践**, 2004, 24(4): 33-36.
- WHANG Chu-sheng, DU Hao-jie. Mechanical model test for determination of intervals of flexible abutment[J].

- Mechanics in Engineering**, 2004, 24(4): 33-36.
- [11] WU J T H, PHAM T Q. Load-carrying capacity and required reinforcement strength of closely spaced soil-geosynthetic composites[J]. **Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering**, 2013, 139(9): 1468-1476.
- [12] 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(3): 417-428.
- [13] 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): 169-174.
- 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): 169-174.
- [14] MURAD ABU-FARSAKH, ALLAM ARDAH, GEORGE VOYIADJIS. 3D finite element analysis of the geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system (GRS-IBS) under different loading conditions[J]. **Transportation Geotechnics**, 2018, 15: 70-83.
- [15] ADAMS M, NICKS J. Design and construction guidelines for geosynthetic reinforced soil abutments and integrated bridge systems[R]//Design and Construction Guidelines for Geosynthetic Reinforced Soil Abutments and Integrated Bridge Systems. McLean: Federal Highway Administration, 2018.
- [16] 高江平, 俞茂宏, 胡长顺, 等. 加筋土挡墙滑动破裂面的大型模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(6): 6-9.
- GAO Jiang-ping, YU Mao-hong, HU Chang-shun, et al. Large model experiment on sliding rupture of reinforced earth retaining wall[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2005, 25(6): 6-9.
- [17] 王家全, 徐良杰, 黄世斌, 等. 动载下土工格栅加筋桥台挡墙承载性能分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4220-4228.
- WANG Jia-quan, XU Liang-jie, HUANG Shi-bin, et al. Bearing capacity analysis of geogrid reinforced abutment retaining wall under dynamic load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4220-4228.