

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.067



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



加筋土桥台柔性复合结构设计方法

赵建斌¹, 白晓红¹, 郑俊杰², 谢明星¹

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 太原 030024; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要:加筋土桥台柔性复合结构(简称 GRS-IBS)作为加筋土的一种改进技术,可有效控制路-桥过渡段差异沉降,以减少“桥头跳车”现象的发生。但目前 GRS-IBS 结构多参照加筋土挡墙进行设计,由于二者承载特性存在差异,其设计方法有待完善。以山西省太行一号风景道 K43+175 处桥梁工程为例,借鉴相关规范和标准进行 GRS-IBS 结构设计,并采用 FLAC^{3D} 建立有限差分数值模型进行数值分析,分别对桥台变形、筋材和墙面板受力进行验算,以确保工程结构安全。结果表明:GRS-IBS 结构设计除需进行结构内部和外部稳定性验算外,还需采用 FHWA 推荐的计算方法对结构承载力和筋材拉力进行验算;采用现浇混凝土墙面板的 GRS-IBS 结构能满足相关规范对路桥过渡段不均匀沉降控制的技术要求,但为保证工程结构安全,需对墙面板顶部进行局部加强设计;GRS-IBS 结构墙面板最大拉应力位于桥台中部偏下位置,建议在现浇混凝土墙面板受拉侧配置一定数量的钢筋,以避免混凝土产生开裂破坏。

关键词:加筋土桥台;加筋土;设计方法;工作特性;数值分析

中图分类号:TU431;U472.99 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)04-0001-09

Design method of geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system

ZHAO Jianbin¹, BAI Xiaohong¹, ZHENG Junjie², XIE Mingxing¹

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: As an improved technique of reinforced soil, the geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system (GRS-IBS) could reduce the differential settlement at the roadbed-bridge transition section so as to avoid “bridgehead bump” effectively. But at present, GRS-IBS structure is mostly designed with reference to reinforced earth retaining wall, and its design method needs to be improved on account of the difference in bearing characteristics between two structures. Considering this, based on a bridge in Taihang No.1 Tourism

收稿日期:2022-05-17

基金项目:国家自然科学基金(52008285、52178341);山西交通控股集团有限公司科技项目(18-JKKJ-23)

作者简介:赵建斌(1983-),男,博士生,高级工程师,主要从事岩土工程与公路路基研究,E-mail:zjbhust@hotmail.com。

郑俊杰(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zhengjj@hust.edu.cn。

Received:2022-05-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52008285, 52178341); Technological Project of Shanxi Transportation Holdings Group Co., Ltd (No. 18-JKKJ-23)

Author brief: ZHAO Jianbin (1983-), PhD candidate, senior engineer, main research interests: geotechnical engineering and highway subgrade, E-mail:zjbhust@hotmail.com.

ZHENG Junjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

Road K43+175 in Shanxi Province, the GRS-IBS was designed referring to the relevant specifications, and a Finite difference numerical model in the same condition was also established by FLAC3D to analyze the abutment deformation, the geogrid tensile force and the panel stress respectively to guarantee the safety of engineering structure. The results show that not only the internal and external stability of GRS-IBS should be validated, but also the bearing capacity and the geogrid tensile force should be checked using the formula recommended by FHWA; the GRS-IBS structure with cast-in-place concrete panel could meet the requirement of relevant specifications for the differential settlement at the roadbed-bridge transition section, but the top of the panel should be reinforced to ensure the safety of engineering structure; the maximum tensile stress of the panel with GRS-IBS structure was located in its lower part, and the reinforcement was suggested on the tension side to avoid concrete cracking.

Keywords: geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system; reinforced soil; design method; operating characteristic; numerical analysis

受经济、技术等条件制约,低等级公路普遍存在“桥头跳车”现象,不仅严重影响公路行车的舒适性和安全性,而且还大大增加了后期的维护频率和成本,由此造成的交通事故屡见不鲜^[1-3]。

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结构)最早由美国在“未来桥梁创新计划”(Bridge of the Future Program,BOF)中针对小型单跨桥梁的更新换代问题而提出,为公路桥梁建设提供了一个环保、经济的技术方案。由于桥梁上部结构直接搭设在GRS-IBS结构之上,路桥过渡段路基可与GRS-IBS结构无缝衔接,组成变形协调的路-桥一体化结构,进而可有效控制路-桥过渡段的差异沉降,缓解“桥头跳车”问题^[4-6]。另外,GRS-IBS结构还具有绿色环保、造价低廉、施工便捷等特点,在低等级公路小跨径桥涵工程中具有较高的推广应用价值。一些学者已经通过模型试验验证了GRS-IBS结构良好的承载特性,如,徐超等^[7]通过平面应变振动台试验研究了不同筋材刚度和间距组合对GRS-IBS结构抗震性能的影响;Zheng等^[8]设计了4个半缩尺GRS-IBS结构进行振动台试验,采用模块化面板和单向土工格栅加筋,探讨了动荷载条件下附加应力、筋材间距和筋材抗拉刚度对加筋土桥台的影响;Zhang等^[9]则通过开展筋材返包式、模块式和整体现浇式3种常用墙面类型GRS-IBS结构的缩尺模型试验,研究了墙面类型对其承载性能的影响。

由于GRS-IBS结构直接承受桥梁上部结构荷载,与常规加筋土结构相比,其整体功能和作用机制都存在较大差异,需要对GRS-IBS结构的关键部位和特定构件进行单独设计,以避免集中荷载对

GRS-IBS结构造成破坏。为保证GRS-IBS结构工程设计的科学性和合理性,以山西省晋城市陵川县太行一号风景道K43+175处工程为例,参照相关规范或标准开展GRS-IBS结构设计,并基于实际情况,采用有限差分软件FLAC^{3D}建立三维数值模型进行数值模拟,分别对桥台变形、筋材和墙面板受力状况进行分析验算,以保证设计方法的合理性和工程结构的安全性。

1 工程概况

依托工程位于山西省太行一号国家风景道陵川县(上上河—横水)公路K43+175处,为一座1 m×8 m装配式混凝土简支空心板通道桥,桥梁全长15.5 m,桥台拟采用GRS-IBS结构。该通道桥是寺掌1号、2号隧道之间的控制性工程,如图1所示。修建场地原为冲沟,为施工方便,修建隧道时对该冲沟进行了回填作业。隧道完工后开挖修建通道桥,以满足冲沟位置处的过水要求。

通道桥位于山间河谷区,地形总体起伏不大,桥址区地面标高为1 315.6~1 316.3 m,最大相对高差为0.7 m。经地调及钻探显示,项目场地地层



图1 工程区域位置

Fig. 1 Site location of project

岩性主要为第四系全新统冲积(Q₄^{al}),含碎石粉质黏土、卵石及奥陶系中统下马家沟组(O_{2x})灰岩。在大地构造位置上,桥址所在区域处于近南北向构造边缘,未见明显断裂构造形迹。勘察期间工程所在区域未见地表水,钻探深度范围内也未见地下水出露。综上判断,依托工程场地地质条件相对简单,稳定性较好。工程原方案采用重力式桥台,不仅需要较大的施工场地,开挖量大、施工期长,而且通道桥两侧均为填方路基,处置不当极易引起路-桥过渡段的不均匀沉降,因此,通过方案比选最终决定采用加筋土桥台,以解决上述工程问题。

2 GRS-IBS 结构设计

2.1 确定结构尺寸

依托工程桥梁为对称单跨结构,全长8.0 m,两侧桥台完全相同,每侧桥台均由加筋土地基、整体式现浇墙面加筋土桥台及复合引道组成。首先根据工程特点和场地条件确定桥台宽B_a为8.0 m,高H_a为4.2 m。桥台底部长度L_b是指桥台底部与地基接触面的长度,根据已有工程经验,对于跨度L_s≥7.5 m的单跨桥梁,L_b不应小于0.3H_a,且不应小于1.8 m^[10-11]。由于工程需要开挖桥台形成工作面,L_b取值太小不利于大型机械设备就位施工,因此确定L_b为3.6 m。桥台顶部长度L_a则可根据桥台后部边坡在保持自然稳定条件下的放坡开挖线确定,在受场地条件限制时,可适当调整坡率并增加边坡防护措施,以保证桥台施工的安全性,但L_a不应小于

0.7H_a。该工程地质条件较好,且桥台高度不大,桥台后部边坡采用两级台阶垂直开挖,以减少后期台背回填量,同时,考虑到桥台应有足够的加筋长度,综合分析后确定L_a取4.6 m。加筋土地基厚1.6 m、长15.0 m,完全覆盖整个基坑底部,以满足结构地基承载力的要求。条形基础高0.4 m、宽1.0 m,位于加筋土地基上方,直接支撑上部整体式现浇墙面。

GRS-IBS结构加筋间距不得大于30 cm^[3,10],该工程取20 cm,在桥台顶部承载区的主筋之间设置短筋加密,以支承桥梁上部结构传递的附加荷载。承载区高度应不小于5倍主筋布置的垂直间距,短筋布置长度应超出桥梁面板端面以外1.0 m。因此,该工程承载区高度和长度分别取1.0、3.0 m,桥梁上部搭接长度l取1.0 m。桥梁上部搭接区域与桥台面板之间预留一定的伸缩空间,用聚苯乙烯垫块填塞,预留宽度至少为20 cm。同时,桥台面板顶部距离桥梁面板底面预留不小于10 cm的净空距离,并填塞塑料泡沫块作为伸缩缓冲带,以避免桥梁上部结构荷载直接作用于桥台面板,导致其破坏。

路桥过渡段由土工织物返包式加筋土填筑,加筋间距同样为20 cm。返包端面与桥梁面板端面紧密衔接并平滑过渡,尤其要保证该端部填土的压实性,以使接触部位尽量达到变形协调。引道另一端延伸至切坡面以外一定距离,以覆盖加筋土结构与原有坡体之间的交界,防止降雨入渗。通过以上分析综合确定依托工程中GRS-IBS结构设计方案,如图2所示。

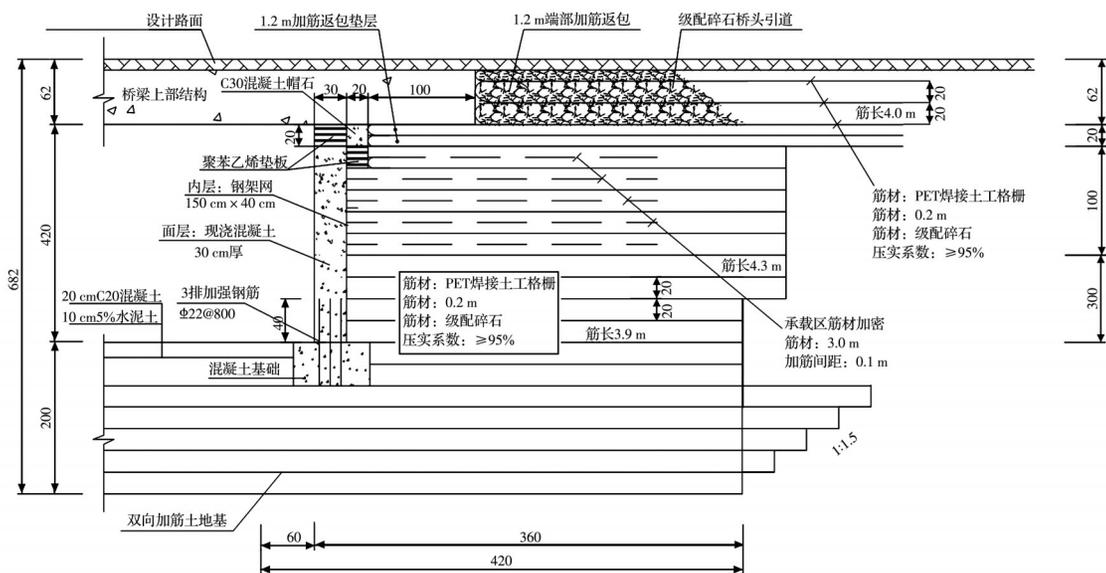


图2 GRS-IBS设计方案

Fig. 2 Designing scheme of GRS-IBS

2.2 结构设计验算

2.2.1 承载力验算 GRS-IBS 结构主要承受桥梁上部结构荷载和台背土压力。桥梁上部结构采用单跨 8.0 m 装配式混凝土简支空心板,设计荷载为公路-I 级。根据公路空心板桥标准通用图集说明,在恒载和汽车荷载作用下,单块板板端支点最大反力 Q_b 约为 250 kN(边板)。单块板宽 b 为 1.0 m,板端搭接长度 l 为 1.0 m,可按式(1)计算得到桥梁结构荷载 q_b 。

$$q_b = \frac{Q_b}{bl} = 250 \text{ kPa} \quad (1)$$

与传统加筋土挡墙主要承受侧向土压力荷载不同,GRS-IBS 结构还要承受上部桥梁荷载,结构承载力计算原理相对复杂,目前,还没有合适的理论计算方法。根据 FHWA 提供的半经验公式估算 GRS-IBS 结构极限承载力 p_u 为^[10]

$$p_u = \left[0.7 \left(\frac{s_v}{6d_{\max}} \right) \frac{T_f}{s_v} \right] K_{pr} \quad (2)$$

$$K_{pr} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_r}{2} \right) \quad (3)$$

式中: s_v 为加筋间距, m; d_{\max} 为填料的颗粒最大直径, m; T_f 为筋材的极限抗拉强度, kN/m; K_{pr} 为加筋土体的被动土压力系数; φ_r 为加筋土体的内摩擦角, ($^\circ$)。依托工程中, $s_v = 0.2 \text{ m}$ 、 $d_{\max} = 0.015 \text{ m}$ 、 $T_f = 75 \text{ kN/m}$ 、 $\varphi_r = 52^\circ$ (近似按填料内摩擦角取值)。桥台的容许极限承载力 p_a 则通过式(4)确定。

$$p_a = \frac{p_u}{F_s} \quad (4)$$

式中: F_s 为安全系数,通常取 3.5^[11]。

最终求得依托工程中桥台顶面承受的容许承载力为 409.1 kPa,大于桥梁荷载 250 kPa,表明 GRS-IBS 结构满足承载力要求。

2.2.2 内部稳定性验算 加筋土结构中筋材通过筋-土作用将墙面承受的水平土压力荷载传递到填料内部稳定区域,为保证结构内部稳定性要求,筋材拉力值的计算是加筋土桥台工程设计的重点。与传统加筋土挡墙设计理论相比,GRS-IBS 结构通常被认为具有自稳能力,只要筋材不被拉断就不会出现内部失稳问题,因此,可以不考虑筋材拉拔强度的评价(即评价一般加筋土挡墙抗拔稳定性时不存在有规律性的滑动面),只需验算筋材抗拉强度。根据 FHWA 提供的经验公式,按最不利工况计算筋材承受的水平向拉力 T_r

$$T_r = \left[\frac{\sigma_h}{0.7 \left(\frac{s_v}{6d_{\max}} \right)} \right] s_v \quad (5)$$

式中: σ_h 为结构内任意深度处填料的水平向应力, kPa,不考虑上部荷载的扩散作用,按最不利情况考虑,取结构底部 σ_h 为 40.1 kPa,则求得 T_r 为 17.7 kN/m。

依托工程中加筋材料选用双向聚酯焊接土工格栅(PET-HSG80),极限抗拉强度 T_f 为 74.9 kN/m,容许抗拉强度 T_a 则由式(6)确定。

$$T_a = \frac{T_f}{F_s} \quad (6)$$

式中: F_s 为综合考虑筋材蠕变、老化等因素的安全系数,按 3.5 取值,可求得筋材容许抗拉强度 T_a 为 21.4 kN/m,同时,不得超过筋材应变达到 2% 时的抗拉强度,通过试验曲线可得到 $T_{\epsilon=2\%}$ 为 33.2 kN/m,可见,结构加筋材料能够满足抗拉强度的验算要求。

2.2.3 外部稳定性验算 GRS-IBS 结构还需进行外部稳定性验算,不同规范推荐的计算方法及原理基本相似,即将 GRS-IBS 结构视为一个“整体”进行考虑。其外部破坏模式主要包括水平滑移破坏、地基失稳和整体稳定性破坏 3 种,相应的验算内容包括抗水平滑移稳定性验算、地基承载力验算和抗深层滑动稳定性验算。采用南京库伦公司的 GEO5 加筋土挡墙设计模块建立二维模型对 GRS-IBS 结构的外部稳定性进行验算^[12],模型宽度按 1.0 m 考虑,顶部超载按《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中附录 H 取值,得到等代均布土层厚度为 1.4 m,桥梁结构附加荷载取 250 kN。另外,GRS-IBS 结构上部短筋加密区域更多是发挥其承载特性,对结构外部稳定性分析验算并无太大影响,因此模型中未予考虑。GRS-IBS 结构基底抗水平滑移稳定性和抗深层滑动稳定性计算模型分别如图 3 和图 4 所示,计算结果见表 1。

表 1 GRS-IBS 结构外部稳定性验算表

Table 1 Exterior stability checking calculation table of GRS-IBS

验算项目	一般工况		地震工况	
	计算值	规定值	计算值	规定值
抗水平滑移稳定性	13.56	1.30	8.37	1.10
抗深层滑动稳定性	1.86	1.35	1.80	1.15

计算得到 GRS-IBS 结构基础底部平均应力 p 为 82.1 kPa,边缘最大应力 p_{\max} 为 93.8 kPa,结构持力层卵石土的天然地基承载力特征值 f_a 为 400 kPa,

满足地基承载力设计要求。

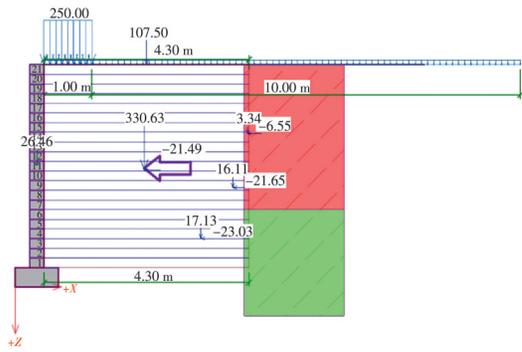


图 3 抗水平滑移稳定性验算示意图(单位:kN)

Fig. 3 Schematic diagram of checking calculation of stability against horizontal slip (Unit: kN)

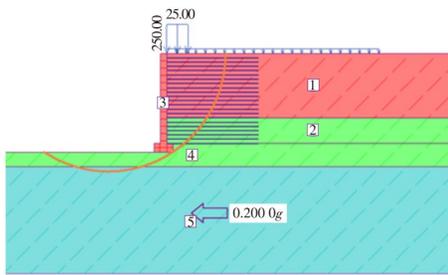


图 4 抗深层滑动稳定性验算示意图(单位:kN)

Fig. 4 Schematic diagram of checking calculation of stability against deep sliding (Unit: kN)

3 GRS-IBS 结构数值分析

3.1 建立模型

为进一步验证工程设计方案的合理性,基于现场实际工况,采用有限差分软件FLAC^{3D}建立 GRS-IBS 结构三维数值模型,对桥梁荷载作用下其工作特性进行分析。建模过程中对工程结构进行对称简化,设桥台模型高 4.2 m、宽 6.0 m,沿路线方向长

5.0 m。由于依托工程场区内地质条件较好,地基经换填处理后完全能够满足承载力及变形方面的技术要求,因此,建模过程中并未考虑地基部分的影响,只是采用约束 Z 方向位移的边界条件代替。模型中土体采用摩尔-库仑屈服准则的理想弹塑性本构模型,并分别采用 liner 单元模拟桥台墙面, geogrid 单元模拟筋材,生成模型后删除 liner 单元和 geogrid 单元在墙面处与实体单元的连接,再在二者之间生成 link 单元,以模拟筋材与墙面之间的连接^[13-14]。根据实体工程建立 GRS-IBS 结构数值模型,如图 5 所示。

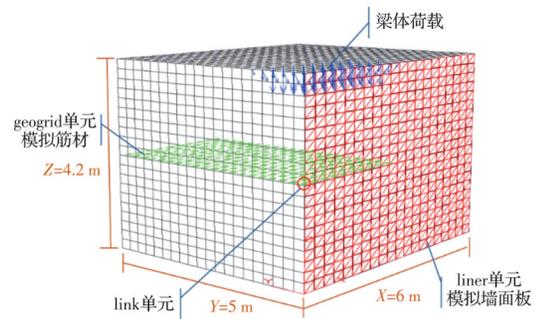


图 5 GRS-IBS 结构模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of numerical model of GRS-IBS

数值模型中台背填料和筋材的力学参数分别根据室内相关试验确定,筋-土界面参数则根据室内筋土拉拔试验确定,其余参数依据相关规范和文献取值,见表 2 和表 3。桥梁上部结构采用单跨 8.0 m 的装配式混凝土筒支空心板,设计荷载为 250 kPa。

表 2 模型材料参数

Table 2 Material parameters of numerical model

材料	E/MPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	ν
级配碎石填料	80.0	2 100	0.0	47.0	0.28

表 3 模型结构单元参数

Table 3 Structural element parameters of numerical model

单元	厚度/m	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	界面剪切刚度 $k_s/(10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3})$	界面剪切强度参数		界面法向刚度 $k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	界面法向抗拉强度 $k_{nt}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
					c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$		
liner	0.300	30 000	0.30	5.5	0.0	31	8.0×10^8	0
geogrid	0.002	1 000	0.25	4.0	0.0	31		

3.2 计算结果分析

3.2.1 桥台变形 GRS-IBS 结构的位移如图 6 所示。由图 6(a)可见,桥台最大水平位移位于临空侧,沿高度呈抛物线形状,最大水平位移点出现在桥台中上部,即距桥台底部约 3.2 m 位置处,变形量

约为 6 mm。由图 6(b)可见,桥梁荷载作用边界处差异沉降较为明显,并在桥台填料内部形成一个弧形的滑动趋势面,作用影响范围与水平位移云图相似,桥台顶部最大沉降约为 14 mm。根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)规定,相邻

墩台间不均匀沉降差不应使桥面形成大于 2‰ 的附加纵坡,依托工程桥梁跨径为 8.0 m,则单侧桥台工后容许沉降差为 16 mm,同时也满足《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/T D31-02—2013)中二级非干线及二级以下公路桥台与路堤相邻处工后沉降不得大于 20 cm 的规定。因此,在混凝土墙面和筋材的共同作用下,GRS-IBS 结构的变形能够满足相关规范中对台背回填沉降控制的技术要求。

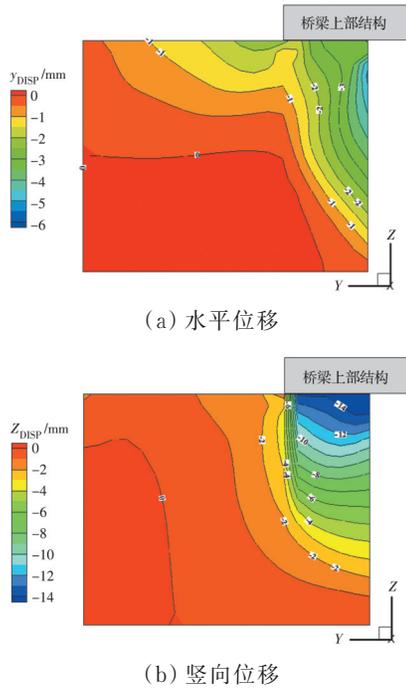


图 6 GRS-IBS 结构位移云图
Fig. 6 Displacement contour of GRS-IBS

图 7 为加筋土桥台墙面位移量。由于桥台墙面采用刚度较大的整体式混凝土结构,且采用扩大基础,基底埋深为 0.4 m,地基承载力较高,因此,可将现浇混凝土桥台墙面板近似看作刚性悬臂结构。由图 7 可见,桥台墙面板位移明显分为两段,从墙趾到桥台高度约 3.5 m 处墙面板位移随高度的增长线性增加,符合悬臂结构的整体转动变形规律;而在墙面板 3.5 m 以上部位,由于桥梁荷载直接作用于桥台顶部,加上筋-土界面抗拉强度与垂直荷载成正比关系,因此,该部位筋材可充分发挥其抗拉强度,以限制墙面板产生较大位移,从而使得墙面板顶部呈一定非线性变形规律。可见,GRS-IBS 结构墙面板顶部受力复杂且不均匀,但目前工程结构设计过程中并未考虑墙面板受力的影响。为保证结构安全,有必要在墙面板顶部 1.0 m 范围内采用插

筋加强,在墙面板顶部和后侧设置聚苯乙烯垫块进行缓冲减载。

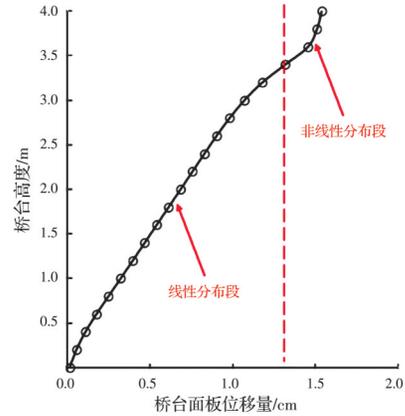


图 7 GRS-IBS 结构墙面位移
Fig. 7 Face deformation of GRS-IBS

3.2.2 筋材受力 图 8 为加筋土桥台筋材的受力分布云图。可见,筋材受力最大值位于桥台临空侧顶部,最大值约为 7.039 kN/m,远小于筋材抗拉设计强度,满足设计要求。而在桥台中下部远离墙面一侧,筋材基本不承受荷载作用,在桥台底部,由于填料发生反向的挤压变形,筋材还会承受轻微的反向拉力。

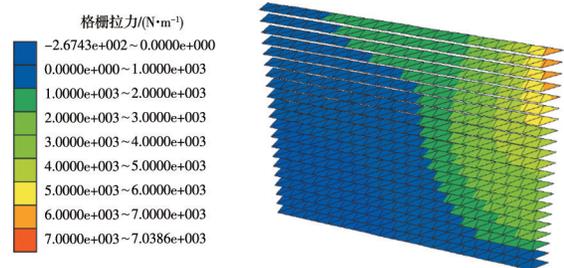


图 8 筋材拉力分布云图
Fig. 8 Tension distribution contour of geogrid

图 9 为筋材受力分布曲线。由图 9(a)可见,筋材拉力随着距桥台顶面距离的增加而逐渐减小,且桥台上部筋材拉力衰减速度更快;同时还可看出,桥台墙面板与筋材连接处筋材拉力最大,在距桥台墙面板 2.0 m 处,各层筋材拉力变化趋于稳定,可见,筋-土作用主要集中在靠近桥台墙面板的有限区域内。根据《土工合成材料应用技术规范》(GB/T 50290—2014),加筋土桥台筋材满铺后承受的拉力 T_i 应按式(7)计算。

$$T_i = [(\sigma_{vi} + \sum \Delta \sigma_{vi}) K_i + \Delta \sigma_{hi}] s_{vi} \quad (7)$$

由式(7)可见, T_i 只与土压力和加筋间距有关,

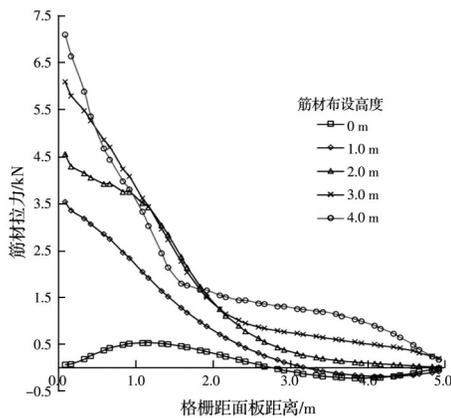
并未考虑实际工况中筋材对填料内部土压力的扩散作用及土体变形对筋材受力的相互影响关系。根据式(7)计算得出筋材拉力沿桥台高度方向与水平土压力的分布规律大致相同,即在桥梁上部结构荷载作用下,桥台筋材拉力 T_i 最大值为 7.2 kN/m,且位于桥台顶部,与数值模拟计算结果较为接近。随着上部结构附加荷载的减小及填料自重荷载的增大,沿深度方向,随着距桥台顶面距离的增加,筋材拉力 T_i 呈先减小后增大的变化趋势,如图 9(b)所示。而根据 FLAC^{3D} 数值模型中 geogrid 单元的计算原理,筋材拉力 T_i 计算式为

$$T_i = AE\varepsilon = AE \frac{\Delta L}{L} \quad (8)$$

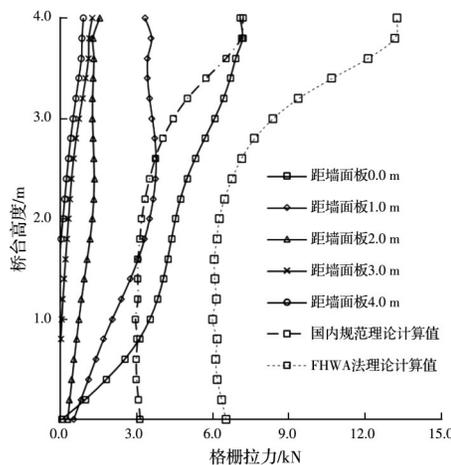
由式(8)可见,在筋材截面面积 A 和弹性模量 E 相同的情况下,筋材端部拉力 T_i 只与其变形量 ΔL 有关。由于筋材与墙面刚性连接, ΔL 等于桥台墙面变形量,因此,图 9(b)中数值计算得到的与墙面连接处的筋材拉力 T_i 沿桥台垂直方向的分布规律应

与桥台墙面位移基本一致。由于计算理论上的差异,筋材拉力 T_i 的规范计算值与数值模拟结果在分布规律上有明显差异,虽然根据中国规范得到的计算值与数值分析结果更为接近,但在桥台的中上部区域计算值明显偏小,对于实际工程而言,偏不安全,而采用 FHWA 推荐公式计算得到的筋材拉力则相对较大,具有足够的安全储备。

图 10 为筋-土界面剪应力分布云图,与图 9(a)中曲线的斜率相对应,反映了筋材拉力衰减的程度。由图 10 可见,筋-土界面剪应力呈弓形分布,在桥台中部临近墙面一侧存在一个明显的过渡区,该区域内筋-土相互作用较小。这是由于筋-土界面的剪应力增量 $\Delta\tau$ 与二者的相对位移 v_s 成正比,该区域内筋材与填料变形量大致相同,无法通过筋-土界面的剪应力增量 $\Delta\tau$ 将筋材拉力 T_i 有效传递至填料中。



(a) 不同高度筋材受力分布



(b) 距桥台墙面不同距离筋材受力分布

图 9 筋材受力分布曲线

Fig. 9 Distribution curve of reinforcement stress

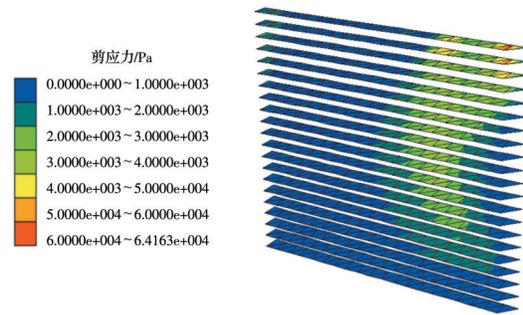
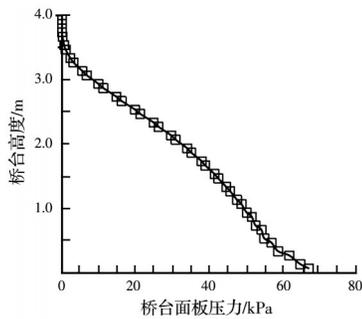


图 10 筋-土界面剪应力分布云图

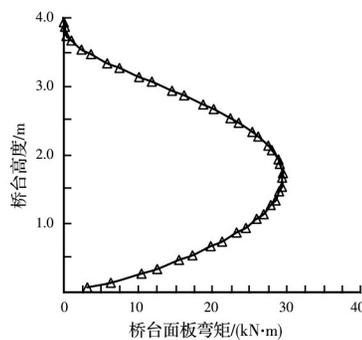
Fig. 10 Shear stress distribution contour of interaction between geogrid and soil

3.2.3 墙面板受力 依托工程采用 30 cm 厚的现浇混凝土作为桥台墙面板,可近似看作刚性面板。由于模型中桥台墙面板采用了 liner 单元,可以在模拟结果中查看墙面板承受的压力、弯矩及不同厚度位置的平面应力分布情况。图 11 为桥台墙面受力图,可反映墙面侧向土压力及弯矩的分布状况。由图 11(a)可知,在填土自重荷载和桥梁荷载作用下,随着深度的增加,桥台墙面承受的侧向土压力基本呈线性增大趋势。在土压力作用下,由于桥台墙面板发生以基础为轴心的整体转动,桥台上部向外侧的倾斜变形量较大,此时作用在墙面板上的主动土压力会随着墙面变形的增大而减小,当变形超过一定范围时甚至会产生墙面与填料之间的脱空,这也是桥台墙面板顶部压力接近于 0 的原因。图 11(b)为桥台墙面所受弯矩沿墙高的分布,可见,在侧向

土压力和筋材拉力的耦合作用下,弯矩沿墙高呈抛物线状分布,最大弯矩值位于桥台中部附近,约为 $29.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。



(a) 土压力沿墙高度变化曲线



(b) 弯矩沿墙高度变化曲线

图 11 桥台墙面受力图

Fig. 11 Force diagram of the face

由于混凝土材料抗拉强度较低,因此,将桥台墙面板受拉侧的应力分布作为分析重点。图 12 为桥台墙面板受拉侧主应力方向的分布云图,可以看出,最大拉应力位于桥台中部偏下位置,其值达到 1.85 MPa ,已略大于 C30 混凝土的抗拉强度设计值,因此,需在桥台墙面板受拉侧配置一定数量的钢筋,以分担部分拉应力,避免墙面板混凝土开裂破坏。

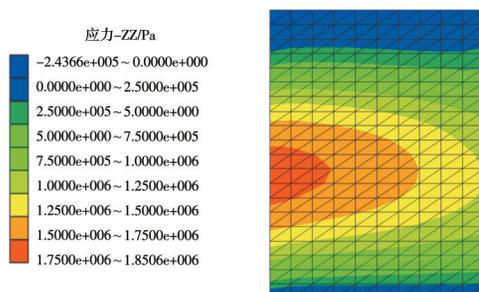


图 12 桥台墙面受拉侧应力分布图

Fig. 12 Stress distribution contour of the face on tension side

该桥段已于 2021 年初投入运营,基于该方法建造的 GRS-IBS 结构工作状况良好,路桥过渡段并未产生明显不均匀沉降和“桥头跳车”现象,满足工程使用要求。

4 结论

以山西省太行一号国家风景道陵川段公路 GRS-IBS 结构示范工程为依托,根据 FHWA 和中国相关规范详细介绍了 GRS-IBS 结构的设计流程,采用数值模拟方法验算并分析了 GRS-IBS 结构的受力性状,得到以下结论:

1) 由于与传统加筋土挡墙在结构形式和承载方式上的差异,GRS-IBS 结构设计除需进行结构内部和外部稳定性验算外,还需进行结构承载力验算,目前可采用 FHWA 提供的 GRS-IBS 结构极限承载力经验计算公式进行结构设计,筋材拉力计算建议采用 FHWA 推荐公式。

2) 采用现浇混凝土墙面板的 GRS-IBS 结构能够满足相关规范中对路桥过渡段不均匀沉降控制的技术要求,为保证工程结构安全,需对墙面板顶部进行局部加强设计。

3) GRS-IBS 结构墙面板最大拉应力位于桥台中部偏下位置,建议在现浇混凝土墙面板受拉一侧配置一定数量的钢筋,以分担部分拉应力,避免墙面板混凝土开裂破坏。

参考文献

- [1] 冯忠居,方贻立,龚坚城,等. 高等级公路桥头跳车的危害及其机理的分析[J]. 西安交通大学学报, 1999, 19(4): 33-35.
FENG Z J, FANG Y L, GONG J C, et al. Analysis of the harmful effect of vehicle bump at bridge head of the highway and its mechanism [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(4): 33-35. (in Chinese)
- [2] 郑俊杰,张军,马强,等. 路桥过渡段桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 355-362.
ZHENG J J, ZHANG J, MA Q, et al. Experimental investigation of geogrid-reinforced and pile-supported embankment at bridge approach [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 355-362. (in Chinese)
- [3] 李俊,卫星,唐朝勇,等. 桥梁养护 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(Sup1): 190-197.
LI J, WEI X, TANG C Y, et al. State-of-the-art

- review of bridge maintenance in 2020 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(Sup1): 190-197. (in Chinese)
- [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(Sup1): 226-232.
- LUO M M, XU C, YANG Z F. Geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system and its applications [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(Sup1): 226-232. (in Chinese)
- [5] ADAMS M, KETCHART K, RUCKMAN A, et al. Reinforced soil for bridge support applications on low-volume roads [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1999, 1652(1): 150-160.
- [6] NICKS J E, ADAMS M T, STABILE T, et al. Thermal interaction of a geosynthetic reinforced soil integrated bridge system in St. Lawrence County, NY [C]//*Geotechnical Frontiers 2017*. March 12-15, 2017, Orlando, Florida. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2017: 84-93.
- [7] 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(Sup1): 179-186, 194.
- XU C, LUO M M, REN F F, et al. Experimental study on seismic behaviour of reinforced soil flexible abutment composite structures [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(Sup1): 179-186, 194. (in Chinese)
- [8] ZHENG Y W, 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.
- [9] ZHANG J, JIA Y F, GUO W H, et al. Experimental study on the load bearing behavior of geosynthetic reinforced soil bridge abutments with different facing conditions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(4): 632-643.
- [10] TALEBI M, MEEHAN C L, CACCIOLA D V, et al. Design and construction of a geosynthetic reinforced soil integrated bridge system [C]//*Geo-Congress 2014*. February 23-26, 2014, Atlanta, Georgia. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2014: 4176-4190.
- [11] ADAMS M, NICKS J, STABILE T, et al. Geosynthetic reinforced soil integrated bridge system, interim implementation guide [R]. McLean: The US Federal Highway Administration, 2012.
- [12] 南京库伦软件技术有限公司. Geo5岩土软件[CP]. 南京, 2022.
- Nanjing Kulun Software CO., LTD. Geo5 Geotechnique Software [CP]. Nanjing, 2022.
- [13] 李立, 郑俊杰, 曹文昭, 等. 考虑地基土流变性的桩承式加筋土挡墙拓宽路基数值模拟[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(2): 65-72.
- LI L, ZHENG J J, CAO W Z, et al. Numerical analysis of widening subgrade using pile-supported reinforced-earth wall considering rheological characteristics of subsoil [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(2): 65-72. (in Chinese)
- [14] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D基础与工程实例[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- CHEN Y M, XU D P. Basics and Engineering Examples of FLAC/FLAC3D [M]. 2nd edition. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)