

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20220922001

文章编号:1674-599X(2023)03-0001-09

引用格式:唐凛,张俊逸,查旭东.路堤衡重式挡墙体外扶壁加固结构数值模拟[J].交通科学与工程,2023,39(3):1-9.

Citation:TANG Lin,ZHANG Junyi,ZHA Xudong.Numerical simulation on external counterfort reinforcement structure for embankment balance weight retaining wall[J].J. Transp. Sci. Eng.,2023,39(3):1-9.

路堤衡重式挡墙体外扶壁加固结构数值模拟

唐凛¹,张俊逸²,查旭东²

(1.安徽省交通控股集团有限公司,安徽合肥230088;2.长沙理工大学交通运输工程学院,湖南长沙410114)

摘要:为研究既有路堤衡重式挡墙体外扶壁的加固技术,根据正交试验设计原理和单因素敏感性分析,采用Geostudio和FLAC^{3D}软件,建立某实际工程挡墙边坡数值模型,对旧护栏立柱钢管加筋的体外混凝土扶壁加固挡墙结构进行模拟,分析挡墙墙身最大剪应力、最大拉应力和边坡稳定安全系数随扶壁加固结构设计参数变化的变化规律。研究表明:极端降雨工况下,既有挡墙的最大剪应力和最大拉应力超出了浆砌片石墙身强度设计要求,是墙身产生竖向开裂和局部鼓胀病害的主要原因;体外扶壁加固后,挡墙最大剪应力和最大拉应力显著降低,边坡稳定安全系数明显提高;扶壁的间距、厚度、高度及钢管的长度、间距等参数优化后,各验算指标均满足设计要求。该研究结果为类似重式挡墙加固工程提供参考。

关键词:衡重式挡墙;扶壁加固;数值模拟;立柱钢管

中图分类号:U417.1¹

文献标志码:A

Numerical simulation on external counterfort reinforcement structure for embankment balance weight retaining wall

TANG Lin¹,ZHANG Junyi²,ZHA Xudong²

(1. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To research the external counterfort reinforcement technology for the existing embankment balance weight retaining wall, Geostudio and FLAC^{3D} software were applied to establish the retaining wall slope model of the real project based on the orthogonal experimental design principle and the single factor sensitivity analysis method. The numerical simulation of the reinforced retaining wall structure with the external concrete counterfort reinforced by steel tube of waste guardrail post was carried out. The variation laws were analyzed for the maximum shear stress and maximum tensile stress of the retaining wall body as well as the safety coefficient of slope stability with change in the design parameters of the counterfort reinforcement structure. The results showed that the maximum shear stress and maximum tensile stress of the existing retaining wall exceeded the design requirements of mortar rubble wall body strength under the working condition of extreme rainfall, which is the main reason for the retaining wall's vertical cracking and local bulging. After counterfort reinforcement, the maximum shear stress and maximum tensile stress of the retaining wall were significantly reduced, and the safety factor of slope stability was improved considerably. After optimizing the design parameters such as the spacing, thickness, and height of the counterfort as well as the length and spacing of the steel tube, all the checking indexes meet the design requirements. This could be used as a reference for the reinforcement project of the gravity retaining wall.

收稿日期:2022-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878077);安徽省交通运输科技进步计划项目(201839)

作者简介:唐凛(1970—),女,安徽省交通控股集团有限公司高级工程师。

Key words: balance weight retaining wall; counterfort reinforcement; numerical simulation; post steel tube

由于挡墙具有结构灵活、施工简便、经济实用、节约用地等优点,被广泛应用于各等级公路边坡的支护工程^[1-3]。但其在服役一定年限后,受到施工质量、动静荷载、自然条件和气候环境等因素的影响,易发生鼓胀、沉陷、开裂、滑移、坍塌和倾覆等破坏,尤其是重力式挡墙,危及行车安全^[4-7]。因此,有必要对潜在失稳风险或已产生局部变形的服役挡墙进行加固治理。

对于挡墙破坏处治,传统方法是将原挡墙拆除重建,但该方法造价高、费工费时,施工过程也会对周边环境造成较大影响,且存在边坡失稳的风险^[8-9]。加厚既有挡墙的方法虽然适用于重力式挡墙,但是对提高既有挡墙抗倾覆、抗滑移等稳定性的效果不明显,且占用较多土地。锚杆加固仅适用于有可靠锚固持力层的情况,当墙背为松散土体时,加固效果较差^[10-11]。新增钢筋混凝土抗滑桩加固技术造价高,且桩基开挖会对既有挡墙稳定性产生不利影响^[12-14]。在场地条件允许的情况下,一种新增体外扶壁加固既有挡墙具有效果好、造价低的优点^[15],但目前对该技术的相关研究和应用少见。因此,本研究依托G35济广(济南至广州)高速公路安徽省岳潜(岳西至潜山)段路堤衡重式挡墙边坡加固工程,在既有挡墙的基础上,拟采用旧护栏立柱钢管加筋的体外混凝土扶壁结构进行挡墙加固,并通过数值模拟对体外扶壁加固结构方案进行优化和验证,以期类似挡墙加固工程提供参考。

1 体外扶壁加固结构建模

1.1 方案设计

安徽省岳潜高速公路位于皖西大别山区,2009年底建成通车,路基宽为24.5 m,双向4车道,设计速度为80 km/h。K765+300~K765+500处上行方向路堤边坡为衡重式挡墙边坡,最大坡高约为20 m,因2015年受“暴力梅”降雨的影响,2016年初巡查时发现M7.5浆砌片石墙身出现竖向裂缝和局部鼓胀等病害,如图1所示。为加固该边坡,提出了体外混凝土扶壁加固结构设计方案(即在原有衡重式挡墙

的基础上,按一定的纵向间距增设体外混凝土扶壁墙进行加固)。同时,为有效利用公路废弃物,将高速公路交通安全设施进行升级改造,拆除埋设地基中用于扶壁墙的旧护栏立柱钢管,并进行加筋处理。

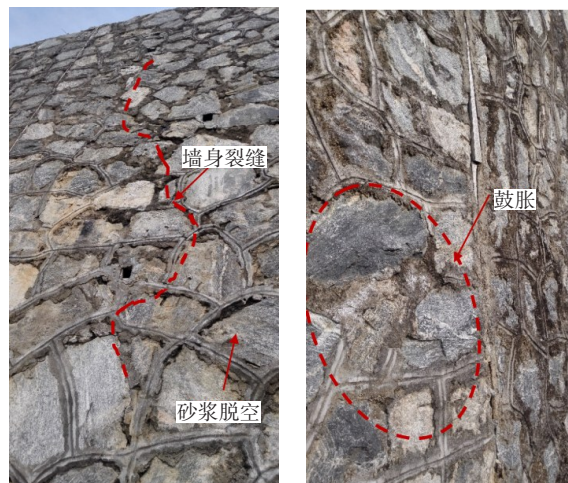


图1 既有路堤衡重式挡墙病害

Fig. 1 Diseases of existing embankment balance weightretaining wall

扶壁加固结构如图2~3所示,其中, S 、 T 、 L 、 H 和 D 分别为扶壁间距、扶壁厚度、钢管长度、扶壁高度和钢管间距(垂直于挡墙方向)。考虑到中国高速公路常用的护栏立柱为碳素结构钢圆管,其外径为114.0 mm,管壁厚为4.5 mm,所以在实际工程应用中,每片扶壁基础设置2排,共4根钢管,且每一排钢管将扶壁厚度分为三等分,并将长度不小于2 m的钢管埋入扶壁基础内,其顶部与基础顶部平齐,其余埋入地基。

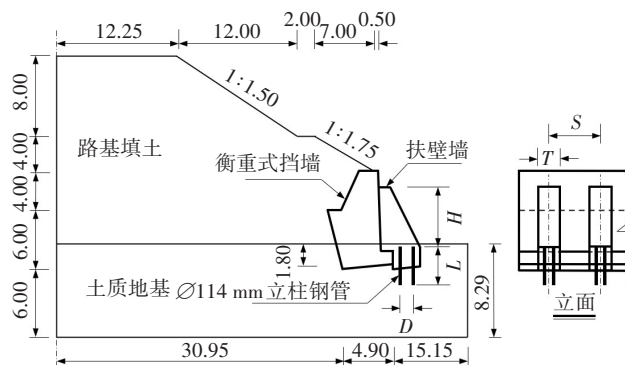


图2 路堤衡重式挡墙边坡扶壁加固断面(单位:m)

Fig. 2 Counterfortreinforcement section of balance weight retaining wall in embankment slope(unit:m)

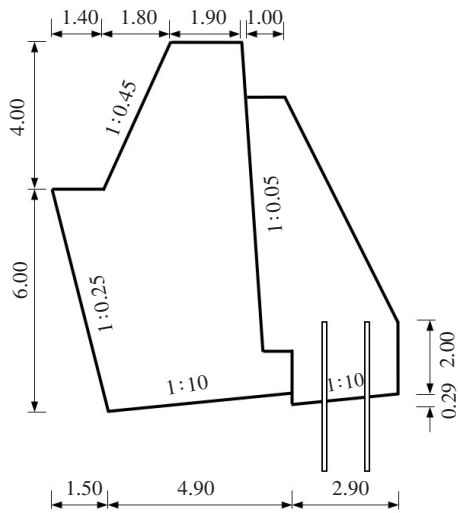


图3 衡重式挡墙及体外扶壁加固结构断面(单位:m)

Fig. 3 Structure section of balance weight retaining wall and external counterfort reinforcement(unit:m)

1.2 二维渗流场模拟

现场勘察分析表明:该挡墙路堤填料土体为花岗片麻岩风化砂土,虽然其承载能力较高,但因渗透性较强,在极端降雨入渗的作用下,随着土体湿密度增加,抗剪强度降低,加之渗水动压力作用,造成挡墙墙后土压力剧增。当挡墙墙身强度不足时,容易导致开裂和鼓胀病害。因此,为分析该衡重式挡墙边坡加固前、后的整体稳定性,优化扶壁结构,根据室内测得的压实填料VG模型的土水特征曲线及其渗透系数曲线,并考虑当地极端降雨条件(降雨强度400 mm/d,降雨历时1 d,地下水位深度5 m),采用Geostudio软件对路堤边坡1/2断面的二维渗流场进行模拟计算,计算结果如图4所示。从图4可以看出,受降雨和地下水位的影响,墙后路堤及地基土体体积含水率随深度增加呈先降低后增加趋势,总体呈较均匀的层块分布。

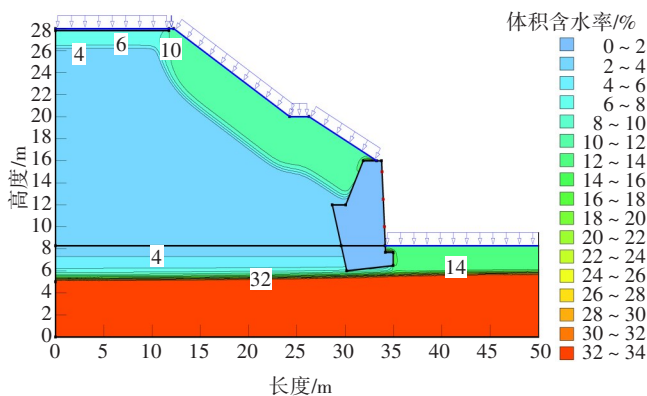


图4 路堤挡墙边坡渗流场体积含水率分布

Fig. 4 Volumewater content distribution of seepage field of embankment retaining wall slope

1.3 模型建立

根据图4体积含水率分布特点,可将土体分为6个层块,依此建立FLAC^{3D}三维有限差分数值模型,如图5所示。为简化计算、考虑安全和便于扶壁布置,根据挡墙分段的对称性,取纵向挡墙的1/2建立模型,长度为9 m。路堤及地基土体均采用莫尔-库仑屈服准则的理想弹塑性本构模型,衡重式挡墙、扶壁和立柱钢管采用弹性本构模型。实体结构采用六面体单元划分网格,最小尺寸为0.3 m,立柱钢管采用壳体结构单元。模型四周竖向侧面设置水平向位移约束,竖向自由变形。模型底部设置竖向和水平位移为全约束,各土层及结构物之间为连续接触。为模拟墙体与土体之间的相互错动滑移,衡重式挡墙及扶壁与土体之间设置接触面摩擦单元,根据已有研究成果和工程经验,假设接触面的法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 为相邻区域等效刚度的10倍,摩擦参数 c' 和 φ' 分别取与墙体相邻土层 c 和 φ 值的50%。

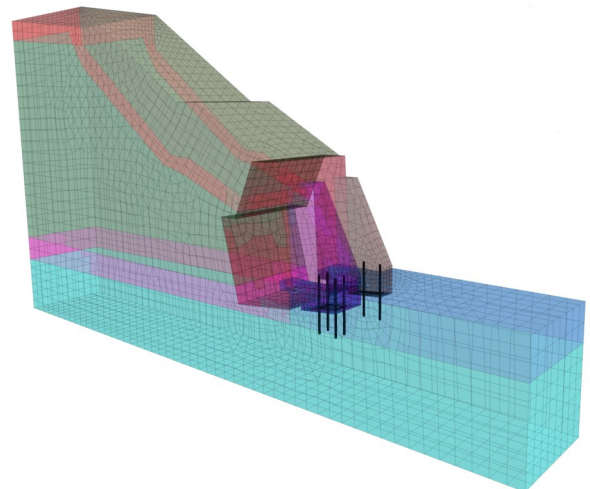


图5 扶壁加固路堤挡墙边坡三维数值模型

Fig. 5 3D numerical model of embankment retaining wall slope reinforced by counterfort

1.4 计算参数的确定

对于路表的行车荷载,按公路-I级车道荷载的均布荷载标准值 $q_k=10.5 \text{ kN/m}^2$ 取值。基于营运期路基压实度的衰减特性,取路堤土体压实度为90%,根据图4渗流场体积含水率分布特点,将体积含水率转换为质量含水率,并根据室内试验结果及工程经验,确定各层土体和墙体以及钢管的物理力学参数取值,见表1。

表1 物理力学参数

Table 1 Taking values of physical and mechanical parameters

组成部分	厚度/m	含水率/%	湿密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
土层1	1.8	6.08	1.989	17.8	37.3	11.8	0.35
土层2	3.0	4.00	1.950	12.9	37.8	13.3	0.35
土层3	19.0	1.28	1.899	12.9	38.2	18.2	0.35
土层4	2.2	9.60	2.055	37.9	35.8	10.4	0.35
土层5	2.4	6.56	1.998	22.2	37.1	11.6	0.35
地基土	5.8	17.55	2.204	12.9	29.3	8.8	0.35
衡重式挡墙	-	-	2 300	-	-	7.0×10 ³	0.20
扶壁墙	-	-	2 300	-	-	2.8×10 ⁴	0.15
立柱钢管	-	-	-	-	-	2.0×10 ⁵	0.33

2 体外扶壁加固结构的优化

2.1 加固前稳定分析

依据《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)^[16], M7.5浆砌片石挡墙墙身抗剪强度和抗检强度分别取 147、89 kPa,在非正常工况 I 时,边坡稳定安全系数大于等于 1.25。根据本研究建立的模型,通过模型计算可知,在未进行扶壁加固前,挡墙边坡稳定安全系数为 1.32,满足非正常工况 I 不小于 1.25 的要求。墙顶最大水平位移为 3.2 mm,且墙顶与墙底之间的相对水平位移为 2.4 mm,变形较小,但墙身截面的最大剪应力为 269.0 kPa,位于墙趾与下墙面纵向交界处,超过了 M7.5 浆砌片石墙身

抗剪强度为 147.0 kPa 的要求,超出量为 83.0%;最大拉应力为 119.1 kPa,位于挡墙纵向中部衡重台与上墙墙背交界处,大于所要求的抗拉强度 89.0 kPa,超出了 33.8%。因此,该路堤挡墙边坡在极端降雨工况下总体稳定,且衡重式挡墙水平位移较小,但在增大的墙后土体推力和渗透压力作用时,会产生过大的墙身剪应力和拉应力,造成剪切和拉裂破坏。计算结果与现场挡墙出现的竖向开裂和局部鼓胀等病害较为吻合,所以有必要对该挡墙进行加固。

2.2 正交模拟优化

为验证体外扶壁的加固效果,并优化其结构,按照加固前不利指标,以衡重式挡墙墙身的最大剪应力 τ 和最大拉应力 σ_t 来反映既有挡墙受力状态,以边坡稳定安全系数 F_s 来反映路堤挡墙边坡稳定性。依据 M7.5 浆砌片石挡墙墙身对抗剪强度和抗拉强度的要求, τ 、 σ_t 分别取 147.0 kPa、89.0 kPa。在非正常工况 I 下边坡稳定安全系数 F_s 不小于为 1.25。参照图 2,选取扶壁间距 S 、扶壁厚度 T 、钢管长度 L 、扶壁高度 H 和钢管间距 D 5 个主要因素,每个因素各取 5 个水平,各因素取值范围根据扶壁结构特点和工程实际经验来确定。采用正交试验设计法,选用 $L_{25}(5^6)$ 六因素五水平正交试验表安排正交模拟试验,采用 FLAC^{3D} 软件建立模型,计算 25 个正交组合的 3 个验算指标结果,见表 2,相应的极差和方差分析结果见表 3,各指标平均值随取值水平变化如图 6 所示。

表2 正交模拟方案及分析结果

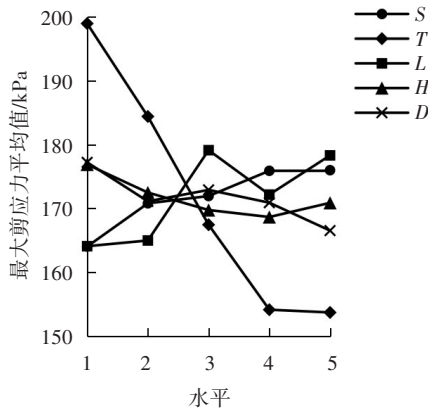
Table 2 Orthogonal simulation schemes and analysis results

方案号	各因素					验算指标		
	扶壁间距/m	扶壁厚度/m	钢管长度/m	扶壁高度/m	钢管间距/m	最大剪应力/kPa	最大拉应力/kPa	安全系数
1	4.0	1.5	4.0	5.0	1.3	194.32	69.41	1.756
2	4.0	1.8	4.5	5.5	1.4	171.61	86.76	1.663
3	4.0	2.1	5.0	6.0	1.5	161.84	72.14	1.726
4	4.0	2.4	5.5	6.5	1.6	146.10	70.27	1.716
5	4.0	2.7	6.0	7.0	1.7	146.33	80.71	1.748
6	4.5	1.5	4.5	6.0	1.6	188.28	85.20	1.717
7	4.5	1.8	5.0	6.5	1.7	182.65	87.74	1.775
8	4.5	2.1	5.5	7.0	1.3	173.11	64.19	1.717
9	4.5	2.4	6.0	5.0	1.4	159.82	62.03	1.693
10	4.5	2.7	4.0	5.5	1.5	150.19	77.61	1.751
11	5.0	1.5	5.0	7.0	1.4	208.24	78.97	1.797
12	5.0	1.8	5.5	5.0	1.5	191.19	81.13	1.786
13	5.0	2.1	6.0	5.5	1.6	174.22	88.82	1.706
14	5.0	2.4	4.0	6.0	1.7	141.03	104.34	1.737
15	5.0	2.7	4.5	6.5	1.3	145.08	74.64	1.834
16	5.5	1.5	5.5	5.5	1.7	194.63	101.26	1.677
17	5.5	1.8	6.0	6.0	1.3	201.80	82.52	1.719
18	5.5	2.1	4.0	6.5	1.4	160.07	92.36	1.731
19	5.5	2.4	4.5	7.0	1.5	151.92	88.07	1.701
20	5.5	2.7	5.0	5.0	1.6	171.11	58.29	1.732
21	6.0	1.5	6.0	6.5	1.5	209.43	93.03	1.708
22	6.0	1.8	4.0	7.0	1.6	174.84	103.33	1.694
23	6.0	2.1	4.5	5.0	1.7	168.05	66.70	1.736
24	6.0	2.4	5.0	5.5	1.3	171.84	81.36	1.631
25	6.0	2.7	5.5	6.0	1.4	155.85	63.42	1.603

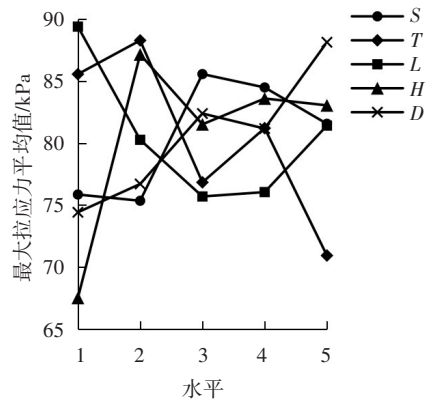
表3 极差和方差分析结果

Table 3 Resultsof range and variance analysis

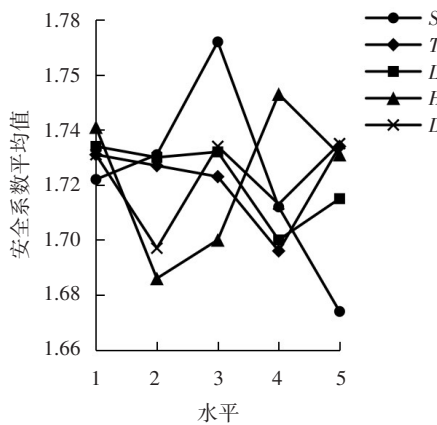
因素	τ		σ_t		F_s	
	极差/kPa	F	极差/kPa	F	极差R	F
S	11.96	2.9	10.23	1.9	0.098	6.3
T	45.27	47.7	17.36	4.0	0.038	1.2
L	15.05	6.2	13.71	2.6	0.034	1.1
H	8.23	1.3	19.65	4.8	0.067	4.0
D	10.69	1.8	13.73	2.4	0.038	1.4



(a) 最大剪应力平均值



(b) 最大拉应力平均值



(c) 边坡稳定安全系数

图6 各验算指标平均值随取值水平变化趋势

Fig. 6 Variation trends of average value of each checking index with value level

由表2~3和图6可以看出,对于挡墙最大剪应

力 τ ,各因素影响显著程度从大到小的排序为: $T>L>S>D>H$,且 τ 随 T 总体递减,随 S 递增,随 L 和 D 呈一定波动变化,随 H 呈先减后增趋势;对于墙身最大拉应力 σ_t ,各因素影响的顺序从大到小为: $H>T>L>D>S$,且 σ_t 随 L 先减后增,与其他4个因素呈波动变化;对于边坡稳定安全系数 F_s ,各因素影响的顺序从大到小为: $S>H>D>T>L$,且 F_s 随 S 先增后减,随 T 先减后增,而与其他3个因素呈波动变化。这表明各因素水平对不同指标的影响程度和加固效果差异较大。对于25组正交模拟方案, F_s 均大于1.6,表明加固边坡的稳定性良好;而仅有4个 τ 满足小于抗剪强度的要求,不足20%;有20个 σ_t 满足抗拉强度的要求,达到80%。因此,为选择扶壁断面大小最经济,并满足3个验算指标的设计要求的方案, τ 取较小值,并考虑 σ_t 的影响,确定优化组合为 $S_1T_4L_2H_1D_5$,即 S 为4.0 m, T 为2.4 m, L 为4.5 m, H 为5.0 m, D 为1.7 m。经模型重新计算,该优化组合的 τ 、 σ_t 、 F_s 计算结果分别为:140.2 kPa、54.7 kPa和1.726,均满足设计要求,且 τ 和 σ_t 分别比加固前减小了47.9%和54.1%,而 F_s 增大了30.8%,表明正交优化后扶壁加固挡墙边坡的整体稳定性显著提高,该方案是一种技术可行的加固方案。

3 体外扶壁加固结构单因素分析

3.1 单因素模拟方案

为优化扶壁加固结构的设计参数,以正交优化方案为基准中值,采用单因素敏感性分析法进行数值模拟,其中,各因素按表4等间隔各取5个水平,分析某一参数取值变化对各验算指标的影响,其他参数取中值,为表4中标“*”的值。

表4 单因素分析的参数取值水平

Table 4 Parameter value levels for single factor analysis

S/m	T/m	L/m	H/m	D/m
3.0	1.8	3.5	4.0	1.5
3.5	2.1	4.0	4.5	1.6
4.0*	2.4*	4.5*	5.0*	1.7*
4.5	2.7	5.0	5.5	1.8
5.0	3.0	5.5	6.0	1.9

3.2 单因素敏感性分析

通过数值模拟,各验算指标与各设计参数的单因素敏感性变化规律如图7~11所示。

从图7可以看出,随着扶壁间距 S 的增加,挡墙最大剪应力 τ 也随之增大,且增幅逐渐变缓;最大拉

应力 σ_1 呈先减后增趋势,最小值出现在 S 为4.5 m时;边坡稳定安全系数 F_s 呈单峰曲线变化,安全系数最大值出现在 S 为4.0 m时。当 S 为3.0~5.0 m时,与加固前的相比, τ 减小了46.5%~51.1%, σ_1 减小了46.0%~56.8%,而 F_s 增加了23.3%~30.8%,且三者均满足《公路圪工桥梁设计规范》(JTG D61—2005)^[16]的要求。故优选最佳扶壁间距为5.0 m。

从图8可以看出,随着扶壁厚度 T 的增加, τ 和 σ_1 均呈减小趋势,且降幅逐渐趋缓;而 F_s 先增后减,峰值出现在 T 为2.4 m时。与加固前相比,当 T 为1.8~3.0 m时, τ 减小了41.4%~49.2%, σ_1 减小了33.0%~61.2%,而 F_s 增加了22.2%~30.8%;当 T 为1.8 m时, τ 大于147 kPa,不满足《公路圪工桥梁设计规范》(JTG D61—2005)^[16]的抗剪强度的设计要求,而其他情况下, τ 、 σ_1 和 F_s 均满足《公路圪工桥梁设计规范》(JTG D61—2005)^[16]的要求。故优选最佳扶壁厚度为2.1 m。

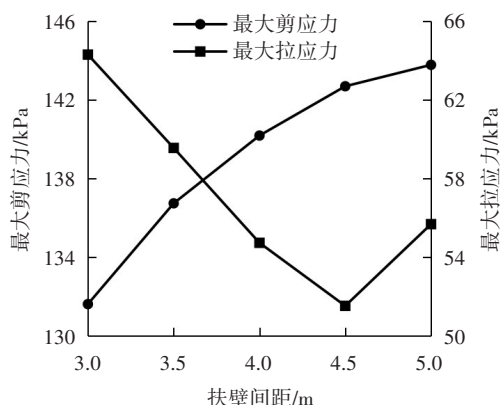
从图9可以看出,随着钢管长度 L 的增加, τ 呈先减后增趋势,最小值出现在当 L 为4.5 m时; σ_1 呈S型增长趋势;而 F_s 呈增大趋势,且增幅逐渐减小。与加固前相比,当 L 为3.5~5.5 m时, τ 减小了43.3%~47.9%, σ_1 减小了46.8%~68.9%,而 F_s 增大了22.7%~32.0%;当 L 分别为4.0 m和4.5 m时, τ 、 σ_1 和 F_s 均满足《公路圪工桥梁设计规范》(JTG D61—2005)^[16]的要求,故优选最佳钢管长度为4.0 m。

从图10可以看出,随着扶壁高度 H 的增加, τ 呈反S型逐渐减小; σ_1 呈单峰曲线变化,且最大值出现在当 H 为5.5 m时;而 F_s 一直增加,且增幅逐渐变缓。当 H 为4.0~6.0 m时,与加固前相比, τ 减小了42.8%~49.0%, σ_1 减小了45.6%~73.6%,而 F_s 增大了24.4%~33.1%; σ_1 和 F_s 均满足《公路圪工桥梁设计规范》(JTG D61—2005)^[16]的要求,但 H 为4.0 m和4.5 m时, τ 大于147.0 kPa,不满足规范对抗剪强度的设计要求。故优选最佳扶壁高度为5.0 m。

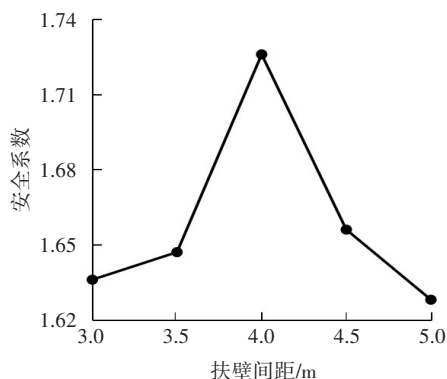
从图11可以看出,随着钢管间距 D 的增加, τ 先减后增,最小值出现在 D 为1.7 m时;而 σ_1 先增后减,最大值出现在 D 为1.8 m时; F_s 也呈单峰变化,最大值出现在 D 为1.7 m时。当 D 为1.5~1.9 m时,与加固前相比, τ 减小了42.6%~47.9%, σ_1 减小了52.4%~60.4%,而 F_s 增大了19.4%~30.8%;同时 σ_1 和 F_s 均满足规范要求,但只有 D 为1.7 m, τ 小于147.0 kPa,才能满足规范抗剪强度的设计要求。故优选最佳钢管间距为1.7 m。

扶壁加固后,既有路堤衡重式挡墙的最大剪应力和最大拉应力显著降低,边坡稳定性也得到较大的提高,这表明:体外扶壁加固效果明显。因此,优

化后的最佳扶壁加固结构设计参数 S 、 T 、 L 、 H 、 D 分别为5.0、2.1、4.0、5.0和1.7 m,对其重新建模并进行计算,得到 τ 、 σ_1 、 F_s 分别为:145.7 kPa、57.3 kPa、1.685;与正交优化方案相比, τ 增大了3.9%,而 σ_1 和 F_s 分别减小了4.8%和2.4%,各验算指标虽有变化,但均满足设计要求。同时,单因素优选方案除扶壁高度和钢管间距不变以外,扶壁间距增加1.0 m,扶壁厚度减薄0.3 m,钢管长度减小0.5 m,表明扶壁结构设计参数得到了进一步优化,降低了造价,提高扶壁断面经济效益和使用效率。



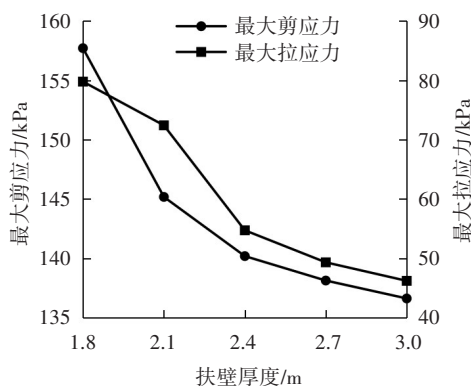
(a) τ 、 σ_1 随扶壁间距的变化曲线



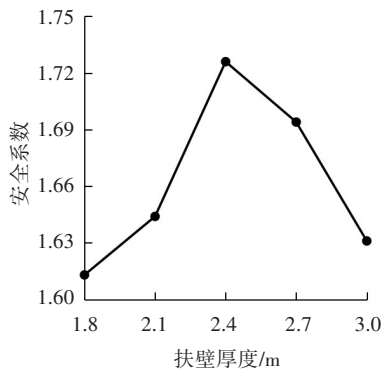
(b) F_s 随扶壁间距的变化曲线

图7 各验算指标随扶壁间距变化曲线

Fig. 7 Variation curves of each checking index with counterfort spacing

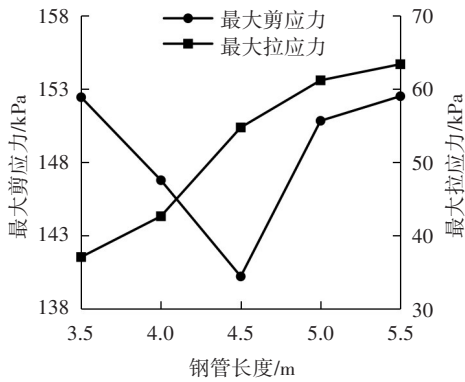


(a) τ 、 σ_1 随扶壁厚度的变化曲线

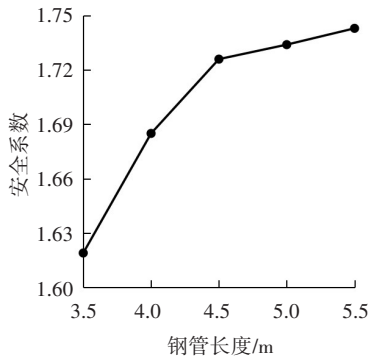


(b) F_s 随扶壁厚度的变化曲线
图8 各验算指标随扶壁厚度变化曲线

Fig. 8 Variation curves of each checking index with counterfort thickness

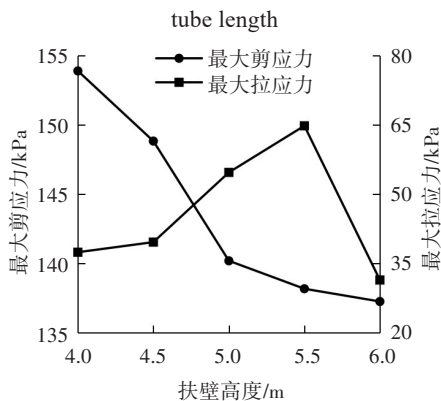


(a) τ, σ_t 随钢管长度的变化曲线

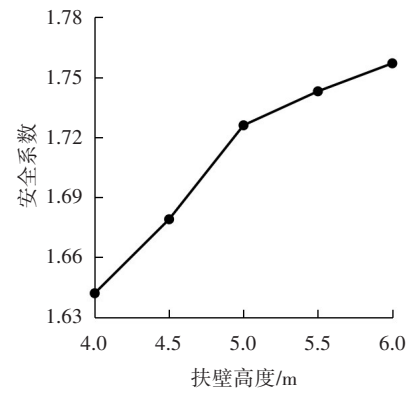


(b) F_s 随钢管长度的变化曲线
图9 各验算指标随钢管长度变化曲线

Fig. 9 Variation curves of each checking index with steel tube length



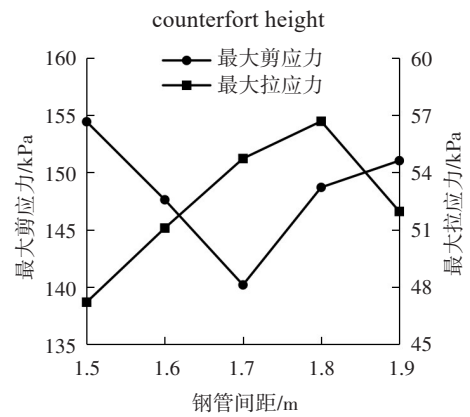
(a) τ, σ_t 随扶壁高度的变化曲线



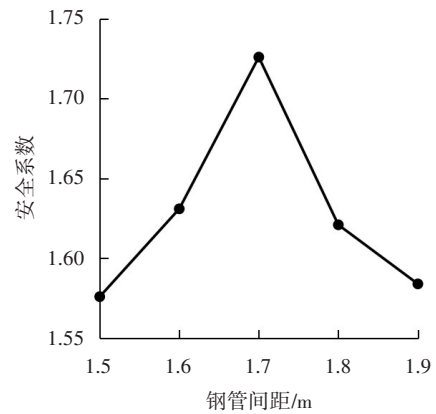
(b) F_s 随扶壁高度的变化曲线

图10 各验算指标随扶壁高度变化曲线

Fig. 10 Variation curves of each checking index with counterfort height



(a) τ, σ_t 随钢管间距的变化曲线



(b) F_s 随钢管间距的变化曲线

图11 各验算指标随钢管间距变化曲线

Fig. 11 Variation curves of each checking index with steel tube spacing

3.3 工程实例

2016年,采用体外混凝土扶壁结构对该既有路堤衡重式挡墙边坡进行了加固,至今已运营6年时间,该边坡整体结构稳定,使用效果好,达到了预期的加固效果。

为进一步验证旧护栏立柱钢管加筋的体外混凝土扶壁结构加固既有路堤挡墙边坡的应用效果,

对安徽省S42黄祁(黄山至祁门)高速公路K70+850处上行方向路堤挡墙边坡进行了加固。该边坡最大坡高约11 m,既有支护形式为衡重式挡墙,挡墙外侧为S326省道。沿线地质条件主要为碎石土,地势平缓。2012年,该边坡对应路段的沥青路面出现纵向通长裂缝,采取了灌缝处理。然而,在2015年巡查中发现裂缝持续发展,并伴随约20 mm的错台,该裂缝整体呈圆弧状;墙顶轻微外倾,挡墙墙面勾缝脱落、墙身开裂、鼓胀,泄水孔未见工作痕迹;病害路段挡墙墙趾至省道路基边沟距离为1.71~3.13 m。根据墙趾前空间情况,本研究采用了优化参数进行立柱钢管加筋的体外扶壁加固,处治长度约140 m,加固后现状如图12所示。经过近7年的运营,现场调查结果为:沥青路面未再发生纵向开裂,衡重式挡墙也无明显外倾迹象,墙面也未发现脱落、裂缝和鼓胀等病害,表明当前边坡稳定状态和加固效果良好。因此,钢管加筋的体外扶壁是一种经济可行的既有挡墙边坡加固技术,值得推广。



图12 黄祁高速公路体外扶壁加固既有挡墙

Fig. 12 Example of external counter for reinforcement of existing retaining wall in Huangqi Expressway

4 结论

针对实体工程既有路堤衡重式挡墙边坡的局部病害,提出了旧护栏立柱钢管加筋的体外混凝土扶壁加固结构,根据正交试验设计原理,结合单因素敏感性分析方法,选取扶壁结构5个主要设计参数及其5个水平,并考虑极端降雨工况的渗流作用,利用Geostudio和FLAC^{3D}软件对挡墙边坡加固前后的整体稳定性进行了数值模拟,优化了扶壁结构参

数,得到结论:

1) 极端降雨工况增加了墙后土体推力和渗透压力,降低了坡体抗剪强度,显著增大了挡墙的最大剪应力和最大拉应力,使其超出浆砌片石墙身的抗剪强度和抗拉强度,但其边坡仍保持总体稳定。因此,不利降雨条件和墙身强度不足是造成依托工程既有衡重式挡墙产生竖向开裂和局部鼓胀等病害的主要成因。

2) 正交模拟优化得到的体外扶壁加固结构参数组合为:扶壁间距4.0 m,扶壁厚度2.4 m,钢管长度4.5 m,扶壁高度5.0 m,钢管间距1.7 m。数值模拟验算表明:与加固前相比,挡墙最大剪应力和最大拉应力分别减小了47.9%和54.1%,而边坡稳定安全系数增大了30.8%,且均满足设计要求,表明扶壁加固显著提高了既有挡墙边坡的整体稳定性,是一种可行的加固方案。

3) 分析了单因素优化扶壁结构与正交优化结果相比,在所有验算指标均满足设计要求的基础上,扶壁间距增加1.0 m,扶壁厚度减薄0.3 m,钢管长度减小0.5 m,而扶壁高度和钢管间距不变,表明最终扶壁优化的结构提高了其经济效益和使用效率。经实际工程应用验证了钢管加筋体外扶壁的加固效果优良,可为同类工程加固提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 郑俊杰, 吕思祺, 曹文昭, 等. 高填方膨胀土作用下刚柔复合桩基挡墙结构数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 395-402.
ZHENG Junjie, LYU Siqu, CAO Wenzhao, et al. Numerical simulation of composite rigid-flexible pile-supported retaining wall under the action of high-filled expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 395-402.
- [2] 宋桂锋, 茶增云, 王庆龙, 等. 全强风化边坡破坏机理及加固措施研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 7-15.
SONG Guifeng, CHA Zengyun, WANG Qinglong, et al. Study on failure mechanism and reinforcement measure of completely weathered rock slope [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 7-15.
- [3] 肖成志, 李海谦, 高珊, 等. 交通荷载下台阶式加筋土挡墙动力响应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1789-1797, 1961.

- XIAO Chengzhi, LI Haiqian, GAO Shan, et al. Dynamic response of tiered geogrid-reinforced soil retaining walls under traffic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (10): 1789-1797, 1961.
- [4] KHELIFA T, BENMEBAREK S. Dilation effect on 3D passive earth pressure coefficients for retaining wall [J]. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 2014, 2(2): 1-6.
- [5] 刘忠玉, 陈捷. 平动模式下考虑剪应力作用的刚性挡土墙主动土压力计算 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2254-2261.
LIU Zhongyu, CHEN Jie. Active earth pressure against rigid retaining wall considering shear stress under translation mode [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2254-2261.
- [6] 李刚, 谈忠坤, 易鑫, 等. 某城市防洪土建工程衡重式挡土墙病害分析与加固 [J]. 建筑结构, 2017, 47(23): 103-108.
LI Gang, TAN Zhongkun, YI Xin, et al. Damage analysis and reinforcement of balance weight retaining wall for a city flood control and civil engineering [J]. Building Structure, 2017, 47(23): 103-108.
- [7] 王雪冰, 张楠, 杨跃辉. 考虑填土泊松比变异性的挡土墙失稳概率分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14680-14687.
WANG Xuebing, ZHANG Nan, YANG Yuehui. Failure probability analysis of retaining wall considering poisson's ratio variability of backfill soil [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (34): 14680-14687.
- [8] PARK B S, LEE J, LEE S D. Experimental investigation of three-dimensional earth pressure according to aspect ratio of retaining wall [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(2): 181-189.
- [9] 邵先锋, 朱克亮, 刘流, 等. 二级垛式悬臂式挡土墙的受力与变形特征分析 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (12): 121-125, 138.
SHAO Xianfeng, ZHU Keliang, LIU Liu, et al. Stress and deformation characteristics of two-level cantilever retaining wall [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(12): 121-125, 138.
- [10] 周伟, 郭师心, 熊磊, 等. 散粒体中的锚杆加固效应规律及作用机理分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(5): 648-656.
- ZHOU Wei, GUO Shixin, XIONG Lei, et al. Laws of anchoring effect with anchor bolts in granular mixtures and analysis of acting mechanism [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(5): 648-656.
- [11] 黄代茂, 汪小静, 赵文. BFRP 锚杆公路岩质边坡加固工程应用研究 [J]. 中外公路, 2020, 40(4): 7-11.
HUANG Daimao, WANG Xiaojing, ZHAO Wen. Study on application of BFRP bolt in reinforcement of rock slope of highway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 7-11.
- [12] 朱泳, 朱鸿鹄, 张巍, 等. 抗滑桩加固边坡稳定性影响因素的参数分析 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 833-840.
ZHU Yong, ZHU Honghu, ZHANG Wei, et al. Parametric analysis on factors influencing stability of slopes reinforced by anti-slide piles [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 833-840.
- [13] 贺炜, 陈宇林. 土体震致剪切变形条件下斜坡桩的受力特性 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17 (1): 53-59.
HE Wei, CHEN Yulin. Mechanical characteristics of slope piles under soil seismic shear deformation [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 17(1): 53-59.
- [14] 彭文哲, 赵明华, 肖尧, 等. 抗滑桩加固边坡的稳定性分析及最优桩位的确定 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 23-30.
PENG Wenzhe, ZHAO Minghua, XIAO Yao, et al. Stability analysis of anti-slide pile reinforced slope and determination of optimal pile position [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(5): 23-30.
- [15] 卓雄华. 漳泉铁路 K56 路肩挡墙病害原因分析及综合治理 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58(3): 41-45.
ZHUO Xionghua. Reason analysis and comprehensive treatment of subgrade shoulder retaining wall disease at K56 section of Zhangzhou-Quanzhou railway [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(3): 41-45.
- [16] 中交公路规划设计院. 公路圬工桥涵设计规范: JTG D61-2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
CCCC Highway Consultants. Code design of highway masonry bridges and culverts: JTG D61-2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005.

(责任编辑: 欧兆虎; 校对: 罗容; 英文编辑: 田湘)