

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.02.002

# 柔性石笼护坡在湖区软土路基的适用性研究

苏卫卫<sup>1,2</sup>,雷明轩<sup>1</sup>,刘国田<sup>1</sup>,张留俊<sup>1,2</sup>,刘军勇<sup>1,2</sup>

(1.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710065;2.陕西省公路交通防灾减灾重点实验室,陕西 西安 710065)

**摘要:**基于FLAC<sup>3D</sup>有限差分软件,通过对湖区柔性石笼护坡结构和刚性护坡结构的数值模拟,对比分析两者的变形和受力特点。结果表明:对湖区软土路基,柔性石笼护坡结构具有良好的适用性。相比刚性护坡结构,石笼护坡结构通过基础内部的协调变形不仅有效地提高了结构的抗倾覆稳定性,而且显著减小了基底应力,降低了对地基承载力的要求,还使得基底应力分布更均匀,减小了不均匀沉降,有利于地基的稳定;此外,石笼护坡结构的土压力分布更均匀,避免了应力集中现象,有效增强了结构的耐久性。

**关键词:**柔性石笼护坡;湖区;变形;受力;数值分析

**中图分类号:**U416.1+4

**文献标志码:**A

## 0 前言

石笼作为一种柔性生态防护系统,具有适应变形能力强、透水性好、防浪性好等特点,在边坡防护工程中得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。在石笼结构的研究中,部分学者将其作为散体结构或刚性结构进行分析研究,毛昶熙等<sup>[6]</sup>将石笼等效成块石,通过波浪作用下海堤渗流场的有限元模拟,进行了石笼块体的稳定性分析;凌天清等<sup>[7]</sup>基于土斜墙及保护层计算方法和水利工程堆石坝设计经验,推导了刚性填石路堤石笼护坡的极限平衡方程。实际上,石笼作为一种柔性结构,既产生协调变形,又通过钢丝网的连接限制发生大变形,目前已有部分学者进行了这方面的研究,其中苏洁等<sup>[8]</sup>、王秀丽等<sup>[9]</sup>模拟分析了柔性石笼拱结构在动力冲击荷载作用下的应力应变特点;Leshchinsky等<sup>[10]</sup>、杨开业<sup>[11]</sup>、葛允雷等<sup>[12]</sup>通过对格宾加筋挡墙数值模拟,分析总结了格宾加筋挡墙的应力应变特点及稳定性影响因素。

对于湖区软土路基,在路基填土及水的作用下容易导致边坡产生不均匀变形甚至失稳,因此对于该类边坡,目前常采用混凝土结构封闭防护。但是近年来养护发现,在水流的长期冲刷和地基软土的

长期蠕变作用下,这类刚性护坡结构会发生一定程度的不均匀塌陷、变形,继而引发剥落、开裂、坍塌等病害,造成护坡结构受损、渗漏水,并进一步加剧结构损坏。石笼结构在该类边坡防护工程中具有较好的适应性,但对石笼护坡的研究则相对较少,且多集中在设计和施工工艺方面,缺乏对其应力-应变规律和适用性的理论分析。

本文基于FLAC<sup>3D</sup>有限差分软件,以新疆台特玛湖地区软土路基为研究对象,模拟分析湖区柔性石笼护坡和刚性护坡的应力-应变规律,并据此进行石笼护坡在湖区软土路基中的适用性分析。

## 1 工程概况

台特玛湖位于塔里木盆地东南部、若羌县北部,水深一般为0.4~2.5 m,路基主要受静水浸泡,除填料抗剪强度因浸水有所降低外,受其他因素如流速、动水压力等的影响较小。湖底及其影响范围内的松软土,以松散的饱和粉砂或粉土为主,土质松软,承载力低,软弱土层以下主要为饱和粉砂,承载力为90 kPa。

湖区路基采用砾石土填筑,基底软弱土采用强夯置换处理。湖区路基横断面布置为阶梯形断面,

收稿日期:2021-01-19

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0802203)

作者简介:苏卫卫,男,硕士,工程师.E-mail:changdasuwei@163.com

自湖面常水位至常水位以上 1.5 m 范围内坡面采用石笼防护,石笼厚度 0.5 m,边坡坡率 1:2;石笼基础底面位于软弱土层底面,宽 2 m;常水位以上 1.5 m 位置设置 5~8 m 宽的护坡道,护坡道以上边坡坡率为 1:1.75(图 1)。

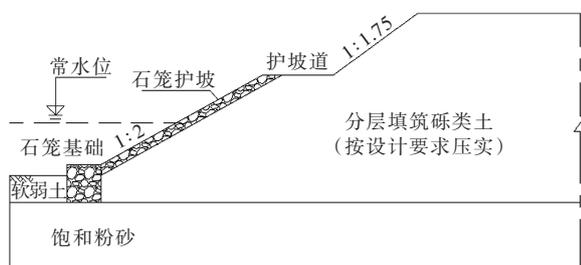


图 1 湖区路基的典型横断面示意图

## 2 模型与参数

根据工程设计资料,湖区路基的最大填高为 8 m,最大水深 2.5 m,软弱土层最大厚度 1.5 m。考虑路基强夯置换的影响,认为路基以下的软弱土全部被路基填料置换,与此同时,由于石笼与其他材料之间可能发生相对滑移,因此在其间设置无厚度的接触面单元。为了减少单元数量,提高计算速度,

$y$  方向长度取 1 m,网格划分以六面体为主,为了分析方便,护坡基础部分按正六面体划分网格,据此建立的有限元模型如图 2 所示。

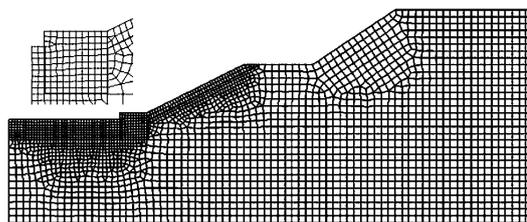


图 2 湖区石笼护坡路基的有限元模型

### 2.1 材料参数

本次模拟分析采用无渗流模式,模型材料均采用莫尔-库仑模型,单元体材料的参数见表 1。其中路基填料、软弱土和粉细砂的材料参数根据地勘资料和参考文献<sup>[13-14]</sup>拟定,石笼的材料参数参考文献<sup>[8-9,15-17]</sup>拟定。体积模量  $K$  和切变模量  $G$  由弹性模量和泊松比推算,具体关系如下<sup>[14,18]</sup>:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

表 1 材料力学参数

材料	模型	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	体积模量 $K/\text{MPa}$	切变模量 $G/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$
路基土	M-C	2 000	40	67.0	14.3	30.0	15
路基土(饱和)	M-C	2 100	40	67.0	14.3	29.0	13
软弱土	M-C	1 900	8	4.4	3.3	15.0	1
粉砂	M-C	2 080	24	20.0	9.2	34.0	3
石笼	M-C	1 760	6	5.0	2.3	44.8	560
石笼(饱和)	M-C	1 960	6	5.0	2.3	43.0	560
刚性护坡	M-C	1 760	22	12.2	9.2	44.8	560
刚性护坡(饱和)	M-C	1 960	22	12.2	9.2	43.0	560

为了比较分析石笼护坡柔性变形的特点,护坡结构分别按柔性石笼和刚性两种情况进行分析,其中刚性护坡除体积模量  $K$  和切变模量  $G$  取刚性材料参数外,其余材料参数与石笼护坡结构相同。

另外,根据石笼与其他材料之间接触面参数的不同,设置石笼-路基填料、石笼-粉砂、石笼-软弱土三组接触面,认为接触面相对于周围材料是刚性的,在荷载作用下可以产生滑移和分离。接触面的刚度

取周围“最硬”区域等效刚度的 10 倍<sup>[18]</sup>,即:

$$k_n = k_s = 10 \max \left[ \frac{\left( K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (3)$$

式中: $k_n$  为法向刚度; $k_s$  为切向刚度; $\Delta z_{\min}$  为接触面法向方向连接区域上最小尺寸。

石笼与其他材料之间接触面的黏结力为 0,摩擦参数由等效内摩擦角代替。接触面参数取值见表 2。

表2 接触面力学参数

接触面类型	法向刚度 $k_n/\text{MPa}$	切向刚度 $k_s/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$
石笼-路基填料	6 455	6 455	26.6	0
石笼-粉砂	1 612	1 612	21.8	0
石笼-软弱土	693	693	14.1	0

2.2 边界条件

模型底部设置为固定约束条件,在X、Z边界面上施加法向位移约束,整体施加Y方向位移约束。

对水位线以下的材料施加孔隙水压力(体力),同时在水位线以下的边界上施加静水压力(面力)。

3 结果分析

3.1 变形分析

为了重点研究石笼护坡的变形规律,分别作石笼护坡和刚性护坡的位移云图和剪切应变增量云图(图3、4)。

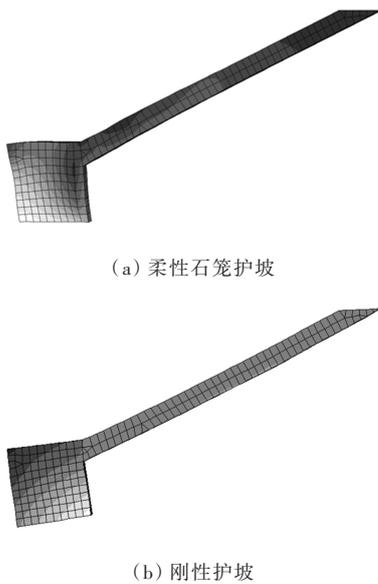
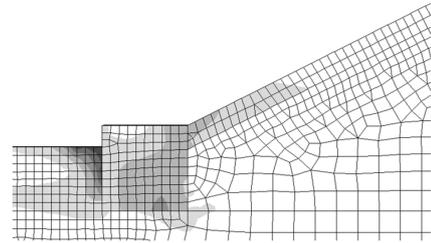
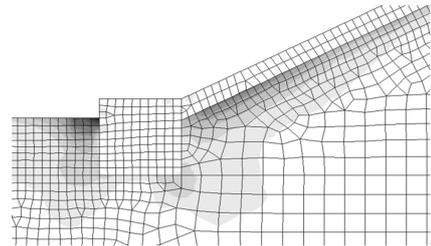


图3 放大100倍后护坡的位移云图和网格变形图

从图3、4可以看出:刚性护坡结构的变形以结构整体绕基础趾部的转动为主,并进而带动坡面上的结构整体滑移,其剪切变形主要发生在刚性护坡结构与路基的接触面上。对于柔性石笼结构而言,石笼基础通过内部的协调变形有效地减小了绕趾部的转动,极大地提高了抗倾覆稳定性,其协调变形主要是通过石笼基础内部的剪切变形来实现。



(a) 柔性石笼护坡



(b) 刚性护坡

图4 护坡的剪切应变增量云图

3.2 受力分析

通过对支挡结构的受力和稳定性分析可知,石笼基础的稳定与否对护坡结构的稳定性至关重要,石笼基础所受外力主要包括基础背面的土压力(包括水平分力和竖直压力)、基础底面的基底压力和剪应力、基础前面的被动土压力(作为安全储备,不予考虑)。

由于不考虑y方向的应力-应变,分析单元体的二维应力状态(图5)。由于基础的单元体为正六面体单元,因此,在基础底面单元体上,z方向应力和xz方向应力分别代表基底压力和基底剪应力;在基础背面单元体上,x方向应力和xz方向应力代表土压力的水平分力和竖直分力。

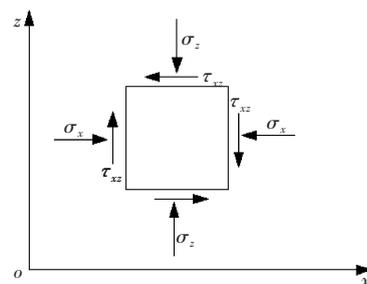


图5 单元体的二维应力状态

3.2.1 基底受力特点及影响分析

基础底面的基底压力和剪应力分布曲线见图6、7。

由图6、7可知:由踵部到趾部,石笼基础基底压力逐渐增大,水平应力逐渐减小,符合单向偏心荷载

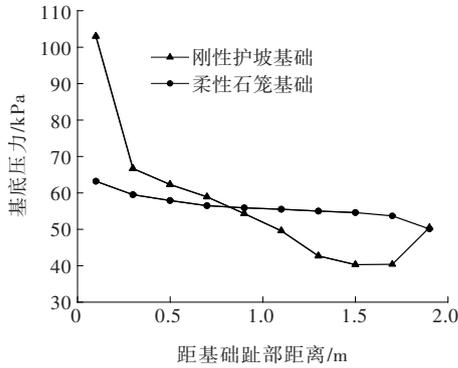


图6 基底压力分布曲线

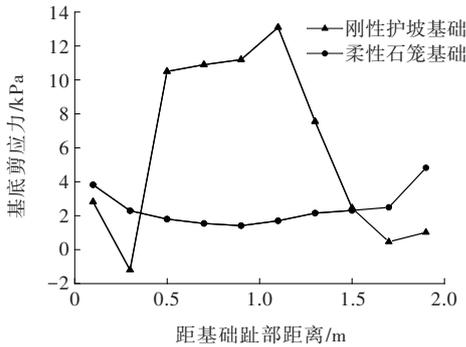


图7 基底剪应力分布曲线

作用下基底压力分布规律。刚性结构的基底压力分布则极不均匀,在趾部,最大压应力集中明显,在踵部,压应力也出现了突变,应力集中现象明显,既易引起地基的失稳破坏,又易产生不均匀沉降,不利于地基的稳定,反观石笼基础,其基底最大压应力则较刚性结构减小了约38.6%,且基底压力的分布更均匀,这不仅有利于地基土承载力的发挥,减小地基失稳的风险,而且极大地减弱了不均匀沉降,有利于地基的稳定。

此外,由基底剪应力分布曲线可知,石笼基础的基底剪应力(距基础趾部0.3~1.2 m处)较刚性结构减小了,且整体分布更均匀,大大增强了抗滑移稳定性。

### 3.2.2 土压力的变化规律及影响分析

基础背面土压力的水平分力和竖直分力分布曲线见图8、9。

由图8、9可知:土压力的竖直分力远小于土压力的水平分力,为了分析简便,可不考虑土压力的竖直分力,假定土压力≈土压力的水平分力。从基础顶面到底面,石笼基础的土压力逐渐增大,符合土压力分布规律,而刚性结构则在基础顶面、坡面护坡结构和基础连接处、基础底面均产生了应力突变,尤其在

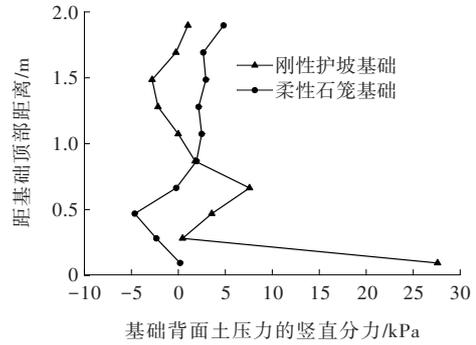


图8 土压力的竖直分力分布曲线

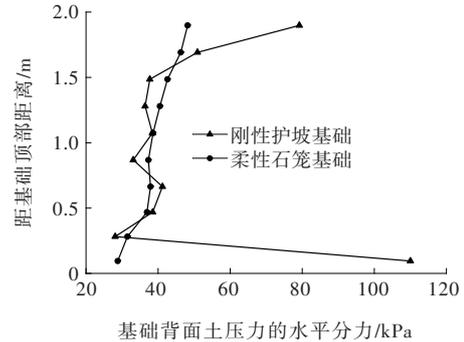


图9 土压力的水平分力分布曲线

基础的顶、底处,应力集中明显,这两处对应的土压力分别为石笼基础土压力的3.8倍和1.6倍,更易造成结构的受损破坏,影响结构的使用耐久性,而石笼护坡结构则有效地避免了该风险。

### 3.3 柔性石笼护坡的适用性分析

由上面的分析可知,相比刚性护坡结构,石笼护坡通过内部的协调变形,不仅增大了抗倾覆稳定性,而且显著减小了基底应力,且基底应力分布更均匀,既降低了对地基承载力的要求,又减小了不均匀沉降,更好地保证了地基的稳定性。

此外,对于湖区护坡结构,一旦出现破损,由于受水流冲刷、风浪等长期作用的影响,将进一步加剧结构的冲蚀和损坏,严重影响结构的耐久性。柔性石笼护坡结构显著减弱了结构的应力集中,降低了结构受损的风险,保证了结构的耐久性。

因此柔性石笼护坡对于湖区软土路基边坡防护具有良好的适用性,既有利于地基的稳定,又增强了护坡结构的整体稳定性和耐久性。

## 4 柔性石笼与刚性护坡对比分析

### (1) 施工难易程度对比

根据新疆台特玛湖地区软土路基护坡现场施工情况,采用柔性石笼护坡时,现场通过吊装完成装配化施工,施工速度快捷,施工不受环境因素影响。浇筑刚性混凝土施工需要支模,浇筑,设置伸缩缝等系列措施,对坡面平整度、压实度等要求较高,且施工质量不易控制,综合对比可知,石笼护坡施工难度小,施工质量容易控制。

### (2) 经济效益对比

石笼护坡截面积与刚性护坡相同,石笼护坡主要材料是石料和镀锌铁丝网,综合单价较混凝土低,总造价更低,经济性好。

### (3) 生态效果对比

刚性护坡直接封闭了坡面,后期植被无法生长,与周边环境不协调,而石笼护坡后植被可以生长,在景观要求较高的区域,石笼护坡适用性更强。

## 5 结论

(1) 石笼护坡结构通过基础内部的协调变形减小了绕趾部的转动变形,提高了护坡基础抗倾覆稳定性,且使得防护结构的受力更加均匀,避免了刚性护坡的应力集中现象,降低了防护结构的破坏风险,提高了防护结构的耐久性。

(2) 石笼护坡结构的基底最大压应力明显小于刚性结构,对地基承载力要求更低,且其基底压应力分布更均匀,降低了地基的不均匀沉降。

(3) 石笼护坡结构的基底剪应力较刚性结构小,分布更均匀,提高了结构抗滑稳定性。

(4) 石笼护坡在施工难度、经济性、生态恢复等方面均优于刚性护坡,且受力条件及耐久性更好,因此在湖区边坡防护上具有更好的适用性。

### 参考文献:

[1] 张路青,杨志法,祝介旺,等.可用于边坡加固的层状网式钢筋石笼挡墙技术[J].工程地质学报,2007,15(1):133-138.

[2] LELLI M, LANERI R, RIMOLDI P. Innovative reinforced soil structures for high walls and slopes combining

polymeric and metallic reinforcements[J]. Procedia Engineering, 2015, 125:397-405.

- [3] TANG V T, FU D F, BINH T N, et al. An investigation on performance and structure of ecological revetment in a sub-tropical area: A case study on Cuatien River, Vinh City, Vietnam[J]. Water, 2018, 10(5):636.
- [4] 张亚飞,徐光黎,谢书萌,等.格宾石笼拦挡坝在玉树地震灾区泥石流治理工程中的应用[J].安全与环境工程,2013,20(5):11-14.
- [5] 缪胜林.阿尔及利亚东西高速公路石笼网垫防护设计[J].路基工程,2010(5):99-101.
- [6] 毛昶熙,段祥宝,毛佩郁,等.海堤护坡块体的稳定性分析[J].水利学报,2000,31(8):32-38.
- [7] 凌天清,汤东,郑智能,等.石笼在填石路堤边坡防护中的应用[J].西部交通科技,2007(1):10-13.
- [8] 苏洁,周成,陈生水,等.石笼拱柔性拦截坝新技术及其数值模拟[J].岩土工程学报,2015,37(2):269-275.
- [9] 王秀丽,张智江,冉永红.泥石流格宾拦挡坝在冲击荷载下的动力响应分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):66-71.
- [10] LESHCHINSKY Dov, ZHU Fan. Resultant force of lateral earth pressure in unstable slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12):1655-1663.
- [11] 杨开业.加筋格宾支挡的路基边坡稳定性分析[J].公路工程,2016,41(4):196-201.
- [12] 葛允雷,张帅,杨果林,等.退台式格宾加筋挡土墙现场测试及数值模拟分析[J].公路工程,2018,43(2):72-78.
- [13] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [14] 彭文斌.FLAC<sup>3D</sup>实用教程[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [15] 付丹,郭红仙,程晓辉,等.石笼单元压缩试验研究[C]//第十八届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅱ册),广州:工程力学杂志社,2009.
- [16] MAZZON N, FERRAILOLO F, VICARI M. Experimental study of the mechanical behavior of double twisted steel mesh gabions[J]. Procedia Engineering, 2016, 158:422-427.
- [17] 柴贺军,胡元鑫,黄德长,等.石笼挡墙支挡结构在巫十路的工程应用[J].公路交通科技,2007,24(9):19-23.
- [18] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC<sup>3D</sup>基础与工程实例[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2013.