

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201905002

返包式土工格栅加筋路堤现场试验与数值分析*

刘泽, 严文钦, 刘欢, 李洪, 黄振华, 易清曦

(湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要: 结合一座土工格栅加筋路堤的建造施工, 埋设土压力盒、柔性位移计等元器件, 测试了路堤在施工过程中竖向土压力、水平土压力、土工格栅拉应变的分布规律, 并在此基础上开展了加筋路堤的数值分析, 研究了加筋路堤的变形与潜在滑裂面形态。结果表明: ①土工格栅加筋路堤内竖向土压力随路堤填高的增加而增大, 在沿土工格栅布设方向上竖向土压力呈“单峰”状分布, 峰值出现在土工格栅中部附近; ②坡面生态袋后水平土压力较小, 且受路堤边坡侧向变形的影响明显, 加筋体后的水平土压力随填土高度增加近似线性增大; ③路堤内各层土工格栅主加筋部分的拉应变在布筋方向上也呈“单峰”状分布, 峰值一般都出现在距坡面 3.5 m 处; ④坡面返包部分筋材的拉应变主要产生于上部相邻两层填土施工期间; ⑤加筋路堤的潜在破裂面可简化为 0.35H 的折线型。

关键词: 土工格栅加筋路堤; 现场试验; 数值分析

中图分类号: TU471 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1105-08

Field Test and Numerical Analysis of embankment Reinforced by Geogrid

LIU Ze, Yan Wenqing, LIU Huan, LI Hong, HUANG Zhenhua, YI Qingxi

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201, China)

Abstract: Combined with the construction of a geogrid reinforced embankment, earth pressure cells and flexible displacement meters were embedded. The distribution of vertical earth pressure, horizontal earth pressure, and tension strain of geogrid during embankment construction were measured. Based on this test, a numerical model of the reinforced embankment was established, and the deformation and morphology of the potential slip surface of the reinforced embankment were studied. The results show that: (1) the vertical earth pressure in the geogrid-reinforced embankment increases with the increase of embankment filling height, and the vertical earth pressure along the direction of geogrid layout presents a "single peak" distribution; the peak value appears near the middle of geogrid; (2) the horizontal earth pressure behind the ecological bag on the slope surface was smaller, and is obviously affected by the lateral deformation of the embankment slope; the horizontal earth pressure after reinforcement increases approximately linearly with the increase of fill height; (3) the tension strain of the main reinforcement part of the geogrid in each layer of embankment also demonstrates a "single peak" shape in the direction of reinforcement distribution, and the peak value usually occurs at 3.5m away from the slope surface; (4) the tension strain of the backpack part of the reinforcement mainly occurs

* 收稿日期: 2019-05-01; 修回日期: 2019-06-21

基金项目: 浙江省交通科技项目(202004)、浙江省建筑技术创新项目(2020B50, 2020B51)资助

作者简介: 刘泽(1975—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事边坡支挡结构研究。E-mail: csuzeliu@163.com

during the construction of two adjacent layers of the upper fill; (5) the potential fracture surface of the reinforced embankment can be simplified to a 0.35H crease line type.

Keywords: geogrid reinforced embankment; field test; numerical analysis

引言

自20世纪60年代法国工程师H. Vidal^[1]首次提出加筋土理论并成功修建世界上第一座加筋土挡墙以来,加筋土技术引起了世界各国的广泛关注和大力推广,目前已成为边坡加固、地基处理、堤岸防护等领域的重要技术之一。将加筋土技术用于路基边坡处治,不仅可以有效提高路基边坡稳定性、收缩坡脚、减少耕地占用,而且可以降低工人劳动强度、提高施工效率,并获得良好的生态效益。国内外的许多专家学者针对加筋边坡开展了多角度的研究,如杨庆等^[2]在室内开展了土工格栅加筋路堤边坡的模型试验,发现加筋土工格栅后路堤边坡的稳定性和承载能力得到很大的提高;边坡破坏时,滑动面的位置较不加筋时更靠近坡底中心、向地基深部发展;张军等^[3]采用有限元分析了素土、格栅加筋和EPS轻质填料三种处治方案下非对称路堤的受力特性,结果表明交通荷载下加筋格栅时路堤的沉降和侧向变形最小。汪益敏等^[4]通过模型试验研究了拓宽路堤的变形特性,试验表明,相同荷载下加筋2层土工格栅后路堤的顶面沉降较无加筋时减少了62%。介玉新等分别采用不同方法对加筋边坡进行了稳定性分析^[5-7]。贾敏才等^[8-15]还开展了加筋路堤的现场试验,这些研究对深入了解加筋边坡的工作机理、结构特性起到了积极作用,有效地促进了加筋土技术在边坡工程中的应用。

为进一步探讨土工格栅加筋路堤边坡的结构特性,本文结合建金高速公路的建设,通过埋设土压力

盒、柔性位移计等元器件,对该土工格栅加筋路堤在施工过程中的受力特点进行了测试,获得了加筋路堤内竖向土压力、水平土压力、土工格栅拉应变的分布规律,并在这一基础上建立加筋路堤的数值分析模型,对加筋路堤的变形模式与潜在破裂面进行了研究,可为今后类似工程研究与设计施工提供参考。

1 工程背景与实验方案

建金高速公路K51+165~K51+265段位于浙江省金华马涧镇。该路段地形起伏较大,地表为含角砾粉质粘土与含粘性土碎石层,厚约3.9~12.7 m,砾石多风化强烈;下伏基岩岩性为灰绿色、青灰色砂岩、凝灰岩,基岩埋深较浅。该路段局部构造发育,岩体裂隙密集,风化强烈。为收缩坡脚,减少农田占用,并提高路堤边坡的稳定性,这一路段采用了返包式土工格栅加筋路堤方案(图1),路堤坡率为1:1,内设土工格栅14层,格栅为单向拉伸高密度聚乙烯土工格栅,极限抗拉强度要求不小于120 kN/m。格栅长度分为加筋段、坡面返包段和搭接段三部分,加筋段长度为13 m,坡面返包段长度由加筋间距和坡率控制,搭接段长度为2 m;路堤下部5层的加筋间距为0.6 m,上部9层的加筋间距为0.8 m,路堤总高10.9 m。路堤以工程附近取土场挖取的土石混合体为结构回填料,其物理力学参数见表1。每层加筋体外侧以充填植生土的生态袋码砌成坡面,一方面用于防止填料从格栅网内漏出、控制路堤边坡坡率,另一方面可以对边坡进行生态绿化,营造工程景观。

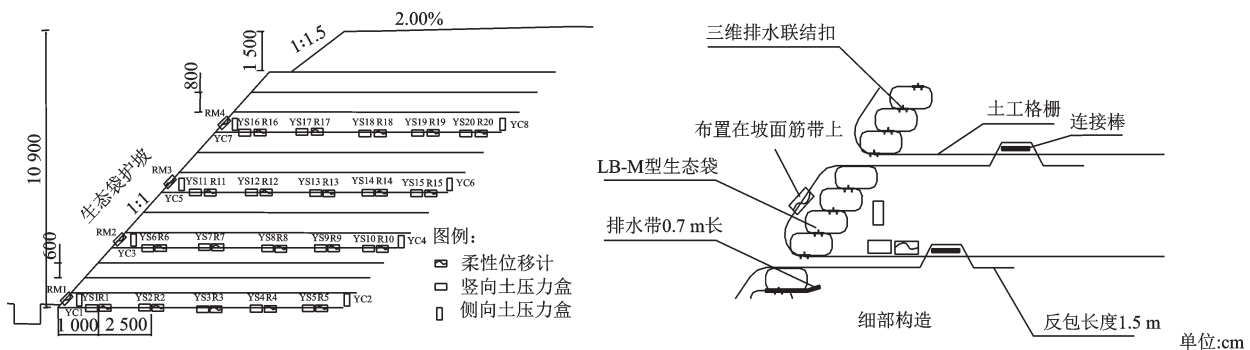


图1 监测元件布置图

Fig.1 Arrangement of instrument on the section

为了解这种加筋边坡的力学特性,选取K51+215左侧路堤进行现场测试,测试项目包括土工格栅的拉应变、生态袋后与加筋体后的水平土压力、加筋区的竖向土压力等。测试元器件的布置如图1

所示。表2为相应的元器件一览表。元器件埋设和相应的测试紧随路堤施工进度开展。图2为路堤的施工进程图。图3为元器件埋设时的情景。图4为竣工后的加筋路堤。

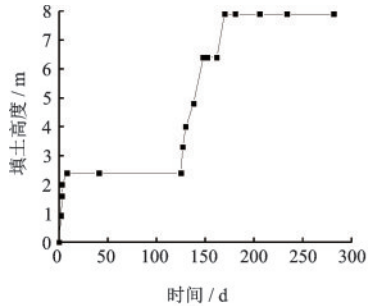


图2 路堤的施工进程
Fig.2 Construction flowchart



图3 安装测试元器件
Fig.3 Installation of instruments



图4 竣工后的加筋路堤
Fig.4 the reinforced embankment

表1 填料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the fill

参数	天然含水率/%	比重 G_s	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性指数 I_p	粘聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /(°)	最优含水率/%	最大干密度/ $(g \cdot cm^{-3})$
取值	12.66	2.74	32.33	14.48	16.65	25	21	12.84	1.95

表2 试验内容与元器件一览表

Table 2 List of test items and the corresponding components

测试项目	元器件名称	型号/规格	量程	灵敏度
竖向土压力	土压力盒	JMZX-5003A	0~1 MPa	0.001 MPa
水平土压力	土压力盒	JMZX-5003A	0~1 MPa	0.001 MPa
筋材拉应变	柔性位移计	JMDL-2405A	0~50 mm	0.01 mm

2 测试结果与分析

2.1 竖向土压力

图5为第1、5、8、11层加筋体内竖向土压力随路堤高度增加的变化曲线。分析可知,在沿土工格栅布设方向上,竖向土压力为非线性分布,由坡面向路堤中心,竖向土压力呈“单峰”状分布,即先增大后减小,最大值基本上都出现在该层筋材的中部。随着路堤填土高度增加,各层加筋体内的竖向土压力相应增大,但分布模式保持不变。

竖向土压力主要来自加筋区填土的自重,但也会受到路堤结构的影响。由于边坡坡率为1:1,坡

面侧土体压力卸荷载作用明显;且由筋材和生态袋构成的坡面防护结构刚度较小,坡面生态袋在侧向土压力的作用下会产生一定的侧向变形,引起应力释放,使得靠坡面侧的竖向土压力减小。同时,加筋体后的侧向土压力对加筋体有一定的弯矩作用,会对加筋体施加一个附加应力:靠生态袋侧大,筋材末端小。两者的共同作用就使得路堤内竖向土压力呈“两端小中间大”的分布形态。

竖向土压力的分布规律直接关系到加筋土结构稳定性分析中筋材抗拔稳定系数的计算,影响到筋材长度设计和工程造价。目前竖向土压力的分布理论主要有三种:均匀分布、梯形分布和梅氏分布^[12],工程中应用较多的为均匀分布理论,即认为作用在筋材上方的竖向土压力沿筋长方向均匀分布,其值为填土重度 γ 与筋材埋深 h_i 的乘积。从测试结果可知,该加筋路堤内加筋区的竖向分布规律显然不是均匀分布,也不同于梯形分布和梅氏分布,可以简化为如图6所示的折线型:筋材末端的竖向应力为 $\sigma_{ie}(\sigma_{ie} = \gamma h_i)$,沿筋长方向由内向外逐渐增大,在边坡顶下方达到最大值 $\sigma_{i\max}$,随后逐渐减小,在坡面处达到最小值 σ_{if} 。现场测试数据表明 $\sigma_{i\max} = (1.1 \sim 1.4) \sigma_{ie}$ 、 $\sigma_{if} = (0.1 \sim 0.3) \sigma_{ie}$ 。

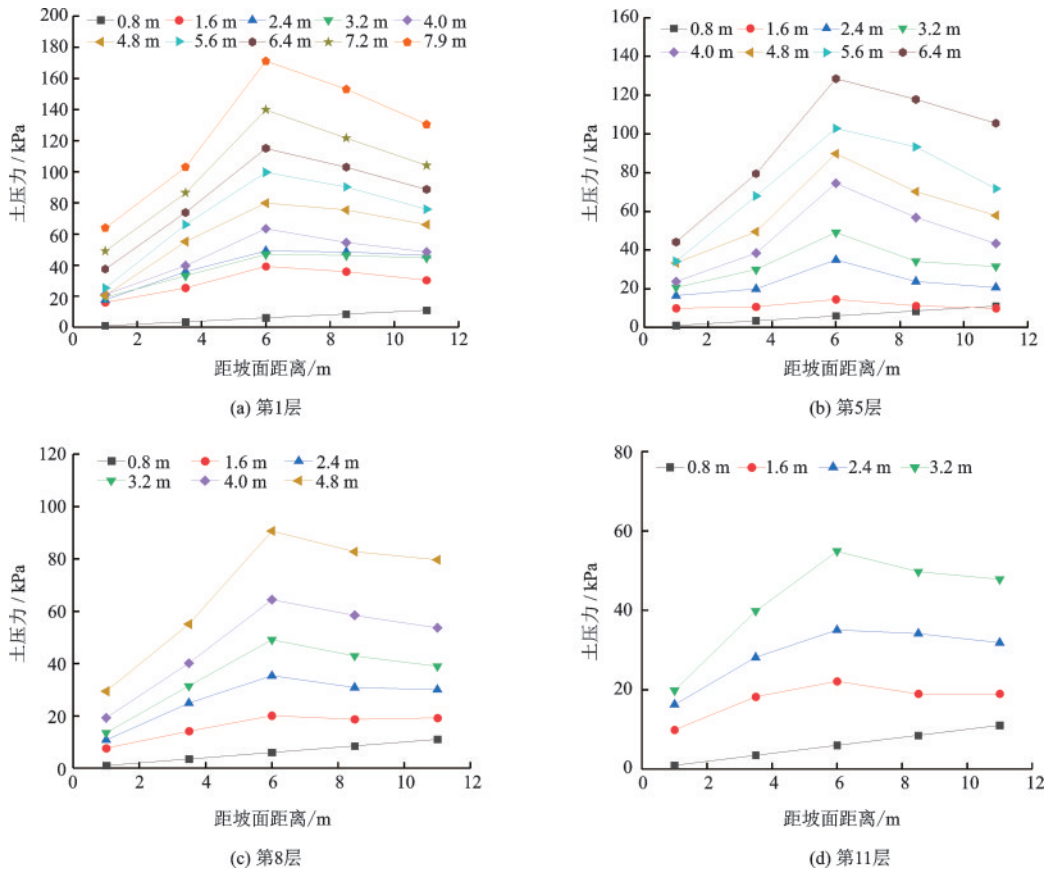


图5 坡内竖向土压力的变化规律

Fig.5 Variations of vertical earth pressure in the slope

注:图例为路堤填土高度,下同

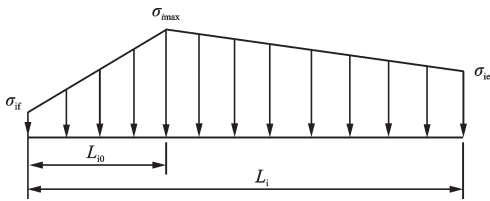


图6 竖向土压力的分布模式

Fig.6 Distribution pattern of vertical earth pressure

2.2 水平土压力

路堤填筑时,在第1、5、8、11层填土的生态袋后和距坡面13 m处(加筋体后)各布置一个土压力盒,用以测量生态袋后和加筋体后的水平压力变化规律。图7为各测点水平土压力随路堤填土高度增加的发展曲线。从图7(a)中可以看出:施工开始后,

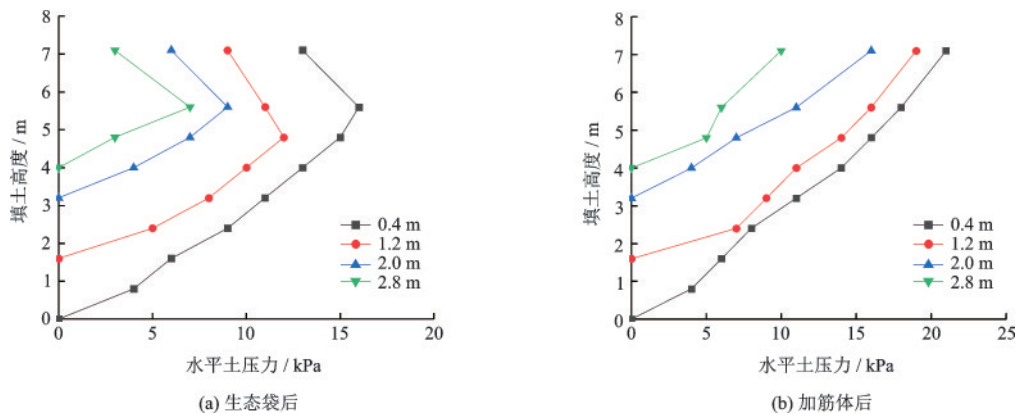


图7 不同位置处水平土压力随填土高度的变化曲线

Fig.7 Variation curve of horizontal earth pressure with fill height at different positions

坡面生态袋后(距坡面约 50 cm)的水平土压力随填土高度增加而增大,但当填筑第七层填土后,生态袋后的水平压力出现了减小现象。其原因主要是由于土工格栅返包生态袋形成的坡面防护结构刚度较小,当路堤高度较大时,坡面出现了一定的侧向变形,从而造成土压力值降低。而加筋体后的水平压力(图 7(b))受坡面变形的影响小,在路堤施工过程中,各测点的水平土压力随填土高度增加近似线性增大。

2.3 筋材拉应变

图 8 为不同填土高度时第 1、5、8、11 层土工格栅的拉应变分布曲线。分析可知:在路堤横断方向从外向内,各层筋材的拉应变分布基本上都是先增大后减小、呈“单峰”状分布,峰值一般出现在距坡面 3.5 m 处,且随路堤填土高度增加,各层筋材的拉应变增大,但分布模式基本不变。在路堤高度方向上,不同层位筋材的拉应变分布模式基本相同,但越是下层的筋材,其应变越大,第一层筋材的拉应变最大,其最大值达到了 1.2%。

图 9 为第 1、5、8、11 层土工格栅坡面返包部分

的拉应变在路堤施工过程中的变化曲线。土工格栅坡面返包部分的拉应变主要产生于上部相邻两层填土施工期间,随着填土荷载增加,各层筋材坡面返包部分的拉应变有所减小并逐渐趋于稳定。对比图 8 和图 9 可知,筋材坡面返包部分的拉应变较加筋部分要小。

3 加筋路堤的稳定性数值分析

3.1 模型建立

现场试验的测点有限,且测试结果受到施工工艺、填料颗粒分布等多种因素的影响。为使研究更有普遍性,这里采用 FLAC^{3D} 建立数值模型开展进一步的探讨。由图 1 建立如图 10 所示的半路堤式数值分析模型。模型中的岩土体采用莫尔-库仑准则,土工格栅采用 FLAC^{3D} 自带的 Geogrid 单元模拟,其力学参数见表 3;模型的底部固定,前后两个面限制沿路线方向(Y 方向)的位移,左右两个面限制沿路堤横断面方向(X 方向)的位移。模型建立后先进行自重平衡,然后在路堤顶部施工加 10 kN/m 的等效车辆荷载。

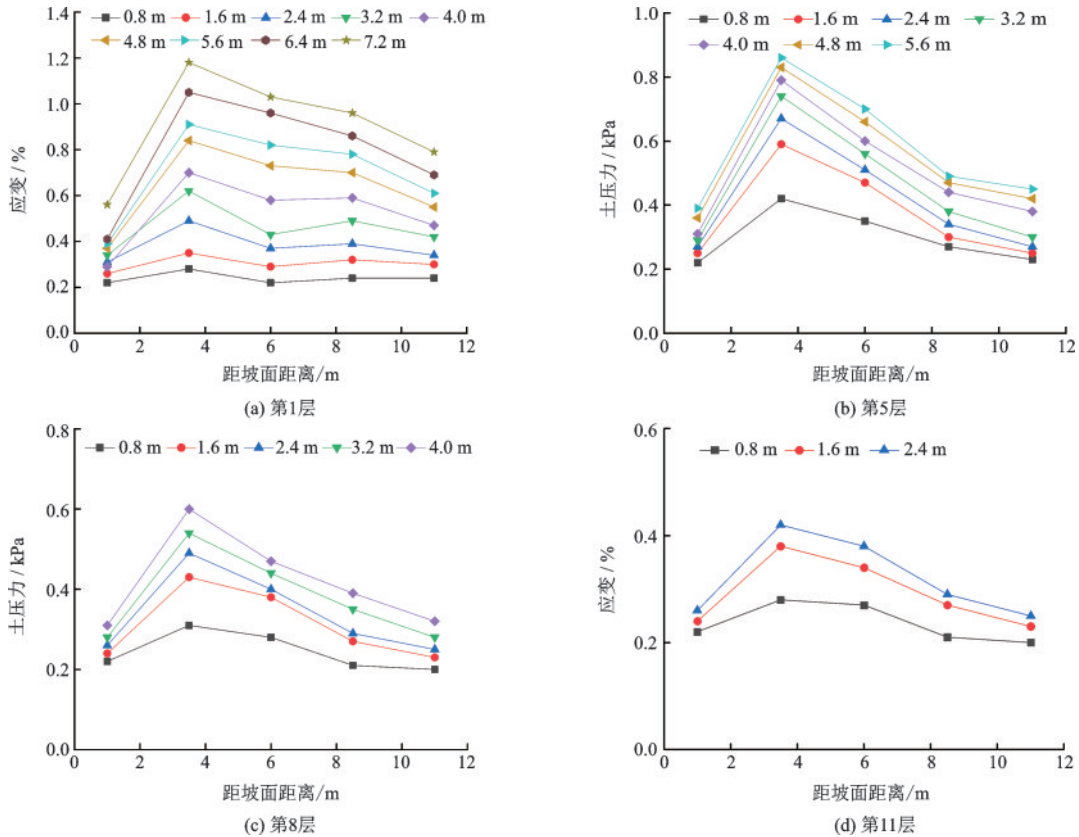


图 8 不同填土高度时土工格栅的拉应变分布规律

Fig.8 Tensile strain distribution law of geogrids under different fill heights

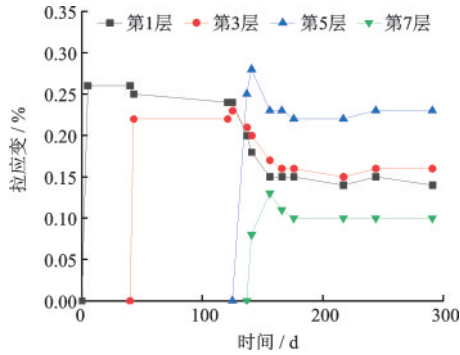


图9 坡面返包部分筋材拉应变的变化
Fig.9 Variations of tensile strain of the reinforcement in back-wrapped part of the slope

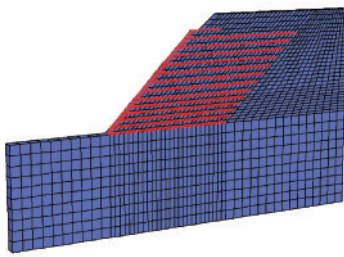


图10 数值分析模型
Fig.10 Numerical model

表3 筋材的力学参数

参数	数值
弹性模量/MPa	3×10^5
泊松比	0.3
厚度/mm	5
耦合弹簧的刚度/kPa	1.86×10^5
耦合弹簧的粘聚力/kPa	14.3×10^3
耦合弹簧的摩擦角/(°)	28

3.2 加筋边坡的应力应变分布特点

图11和图12为由数值分析得到的加筋路堤内竖向应力和水平应力分布云图。加筋后路堤内的应力分布规律和常规路堤应力分布基本相同,但加筋体上部的水平应力有明显的波动或调整。为

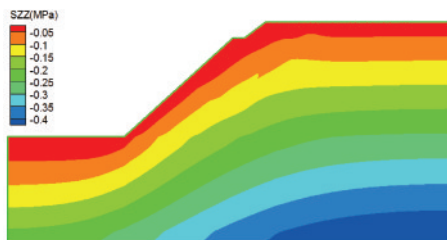


图11 竖向应力分布云图
Fig.11 Contour of vertical stress distribution

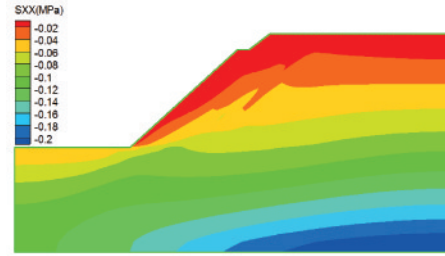


图12 水平应力分布云图
Fig.12 Contour of horizontal stress distribution

了便于比较,取距坡面0.5 m处的单元体水平应力作为生态袋后的水平土压力。图13为生态袋后和加筋体后的水平土压力沿路堤高度的分布曲线。与实测结果对比可知,两个位置的数值分析结果与实测水平土压力的分布规律基本相同,总体上都呈上小下大的趋势;且生态袋后水平土压力和实测值大小比较接近,但加筋体后的水平土压力数值解较实测值大。产生这种差异的原因主要有两方面:一是路堤以返包方式加筋土工格栅后,靠坡面侧土体的下滑趋势会对筋材形成拉拔力,并通过筋土界面的摩擦作用被传递到土体内部,引起内部土体颗粒受到向外的作用力与位移,从而使加筋体后的土压力出现减小。二是现场回填土一般都就地取材,多种材料的混杂(夹)着用,为非均质体;而数值分析是将材料视为均质的,这必然会导致实测值与数值解间出现一定的差别。

图14为筋材拉应力分布云图。分析可知,各层筋材拉应力都为非均匀分布,并在路堤断面内形成一个弧形高应力分布区。通常将各层筋材的最大拉应力(变)所在位置的连线作为加筋体的潜在滑裂面,将数据导出后可获如图15所示潜在破裂面。为了对比,将工程中常用的0.3H型潜在破裂面和实测各层筋材最大拉应力位置连线也绘在图15中。对

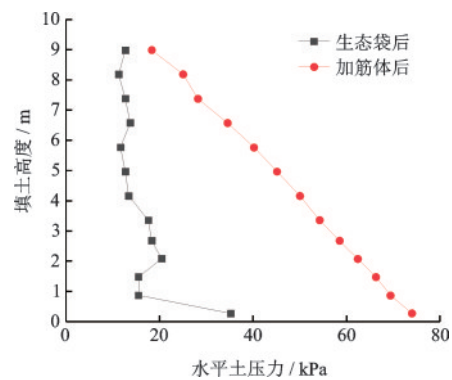


图13 水平土压力分布曲线
Fig.13 Distribution curves of horizontal earth pressure

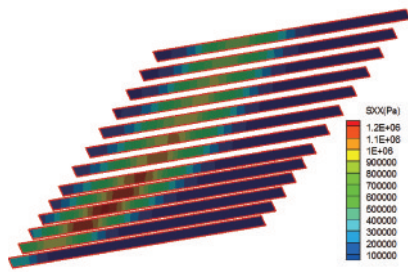


图14 筋材拉应力分布云图

Fig.14 Contour of tensile stress distribution of the reinforced bars

比可知,由数值分析得到潜在破裂面也可看作折线性,与 $0.3H$ 型潜在破裂面有相同的形态,特别是在路堤下部,两者较好的吻合性;但路堤上部,数值解距坡面距离稍远,为 $0.35H$ 。由于现场试验测点偏少,下部的破裂面没能测出来,上部实测的最大拉应变位置基本位于同一直线上,与前两者有相同的形状,但距坡面距离较 $0.3H$ 型大、较数值解小,为 $0.32H$ 。可见,将加筋体内部潜在破裂面简化为 $0.35H$ 型更有利于保证结构的安全性,即破裂面可简化为折线性,上部与坡面平行,距坡面距离为 $0.35H$ (H 为边坡高度),下部与水平面夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ 。

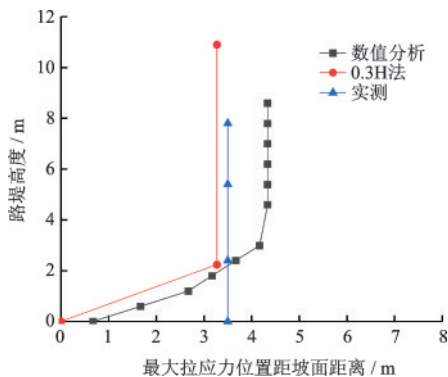


图15 潜在破裂面形态

Fig.15 Morphology of the potential rupture surface

4 结论

(1) 土工格栅包生态袋加筋路堤内竖向土压力随路堤高度的增加而增大,在沿土工格栅布设方向上竖向土压力分布呈单峰状分布,峰值出现在土工格栅中间部位附近。

(2) 生态袋后和加筋体后的水平土压力一般随填土高度增加而增大,但生态袋后的水平土压力受路堤边坡侧向变形的影响明显。

(3) 加筋路堤内各层土工格栅拉应变随填土荷载的增加而增大,在布筋方向上呈“单峰”状分布,峰值一般都出现在距坡面 3.5 m 处。筋材反包部分的拉应变主要产生于上部相邻两层填土施工期间。

(4) 加筋路堤内的潜在破裂面可简化为折线性,其上部与坡面平行,距坡面距离为 $0.35H$ (H 为边坡高度),下部与水平面夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ 。

参考文献:

- [1] Vidal H. The principle of reinforced earth[J]. Transportation Research Record, 1969, (282): 1-16.
- [2] 杨庆,季大雪,栾茂田,等.土工格栅加筋路堤边坡结构性能模型试验研究[J].岩土力学, 2005, 26(8): 1243-1246.
Yang Q, Ji D X, Luan M T, et al. Studies on structural performance of embankment slopes reinforced by geogrids with model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1243-1246. (in Chinese)
- [3] 张军,牛玺荣,孙玲.黄土山区非对称加筋路堤受力特性研究[J].武汉大学学报(工学版), 2017, 50(3): 422-428.
Zhang J, Niu X R, Sun L. Study of mechanical characteristics of asymmetric reinforced embankment in loess mountain region[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(3): 422-428. (in Chinese)
- [4] 汪益敏,闫岑,于恒,等.静载作用下土工格栅加筋拓宽路堤土中应力特征试验研究[J].岩土力学, 2018, 39(增1): 311-317.
Wang Y M, Yan C, Yu H, et al. Experimental study of soil stress characteristics of geogrid-reinforced widened embankment under static loadings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup1): 311-317. (in Chinese)
- [5] 介玉新,秦晓艳,金鑫,等.加筋高边坡的稳定分析[J].岩土工程学报, 2012, 34(4): 660-666.
Jie Y X, Qin X Y, Jin X, et al. Stability of high reinforced soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 660-666. (in Chinese)
- [6] 罗常青,陈征宙,李文勇,等.某加筋土边坡稳定性系数影响因素的敏感性分析[J].防灾减灾工程学报, 2008, 28(4): 479-483.
Luo Ch Q, Chen Z Z, Li W Y, et al. Sensitivity analysis of factors affecting stability coefficient of a reinforced soil slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 479-483. (in Chinese)
- [7] 李凯,陈国荣.基于滑移线理论的边坡稳定性有限元分析[J].河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(2):

- 191-195.
- Li K, Chen G R. Finite element analysis of slope stability based on theory of slip line field [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2010, 38(2): 191-195. (in Chinese)
- [8] 贾敏才, 黄文军, 叶建忠, 等. 超高无面板式土工格栅加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2220-2225.
- Jia M C, Huang W J, Ye J Zh. Field tests on super-high geogrid-reinforced soil embankment without concrete panel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2220-2225. (in Chinese)
- [9] 冯晓静, 杨庆, 栾茂田, 等. 土工格栅加筋路堤现场试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(4): 564-569.
- Feng X J, Yang Q, Luan M T, et al. Field experimental study of geogrid reinforced embankment[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(4): 564-569. (in Chinese)
- [10] 杨广庆, 吕鹏, 庞巍, 等. 返包式土工格栅加筋高路堤现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 517-522.
- Yang G Q, Lyu P, Pang W, et al. Research on geogrid reinforced soil retaining wall with wrapped face by in-situ tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 517-522. (in Chinese)
- [11] 杨广庆, 周亦涛, 周乔勇, 等. 土工格栅加筋路堤试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 206-210.
- Yang G Q, Zhou Y T, Zhou Q Y, et al. Experimental research on geogrid reinforced earth retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 206-210. (in Chinese)
- [12] 宋雅坤, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法在三维边坡中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 822-827.
- Song Y K, Zheng Y R, Zhao Sh Y, et al. Application of three-dimensional strength reduction FEM in slope [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 822-827. (in Chinese)
- [13] 李志勇. 陡坡路堤土工格栅加筋机制与合理铺设参数研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 925-930, 936.
- Li Zh Y. Study on reinforced mechanism and laid parameters of steep slope of highway embankment reinforced with geogrids [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 925-930, 936. (in Chinese)
- [14] 莫介臻, 何光春, 汪承志, 等. 台阶式格栅加筋路堤现场试验及数值分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(5): 52-58.
- Mo J Zh, He G C, Wang Ch Zh, et al. Study on a stepped retaining wall with geogrid reinforcement by using site test and numerical analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(5): 52-58. (in Chinese)
- [15] 张发春. 土工格栅加筋高路堤的现场试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(4): 1-7.
- Zhang F Ch. Field test research on geogrid reinforced earth high retaining wall [J]. China Railway Science, 2008, 29(4): 1-7. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)