DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.34

格宾网箱覆绿功能反滤层优化设计研究

杨 凡[1], 张志红[1], 吴长路[2], 姚爱军[1], 陈祥国[2], 李立云[1]
(1.北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2.中铁建工集团有限公司, 北京 100160)

摘 要: 格宾网箱应用于边坡工程时具备护坡、覆绿及材料就地利用等多种特点。为了保证格宾网箱中的植被能够稳定存活,并且防止强降雨条件下植被土颗粒的流失,需对格宾网箱填充物进行反滤层的优化设计,从而实现绿色生态护坡的目的。依托北京冬奥会张家口赛区正在实施的"科技冬奥"项目,在模拟当地最大降雨强度条件下,采用自行设计的试验装置开展了反滤层的防冲刷试验,探究反滤层层数、厚度和反滤料粒径对反滤层防冲刷效果的影响,最终确定了格宾网箱覆绿功能反滤层的优化设计。试验结果表明:反滤层层数设置为两层,上下层厚度均为100 mm且上层碎石粒径小于20 mm、下层碎石粒径为20~100 mm时,反滤层的防冲刷效果最佳。

关键词: 格宾网箱; 冲刷试验; 反滤层; 生态护坡; 现场试验; 优化设计
中图分类号:TV640.33 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2020)05-0235-05

Optimal design of filter layers in Gabion mesh cages with landscaping function

YANG Fan[1], **ZHANG Zhihong**[1], **WU Changlu**[2], **YAO Aijun**[1], **CHEN Xiangguo**[2], **LI Liyun**[1]
(1 *Key Laboratory of Urban Security & Disaster Engineering*, *Ministry of Education*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*; 2. *China Railway Construction Engineering Group*, *Beijing* 100160, *China*)

Abstract: The application of Gabion mesh cages in slope engineering can achieve multiple goals such as slope protection, landscaping and the utilization of local materials. In order to ensure the survival of vegetation in the Gabion cages and prevent the loss of vegetation soil particles under heavy rainfall, the inverted filter layers in Gabion cages should be optimized for the achievement of ecological slope protection. In order to explore the influence of the number of layers, thickness and particle size of the inverted filters on its anti-scour effect, an on-site anti-scour test of inverted filters was carried out with a self-designed test device under the condition of simulated local maximum rainfall based on the project of "Science and Technology of Winter Olympics" in Zhangjiakou division of Beijing Winter Olymic Games. Meanwhile, the optimal design of filter layers in Gabion cages with landscaping function was determined. The test results show that the anti-scour effect of the inverted filters is optimal when the number of layers is two, the thickness of both layers is 100 mm, the particle size of the upper layer is less than 20 mm and that of the lower layer is in the range of 20 – 100 mm.

Key words: Gabion mesh cage; scouring test; filter layer; ecological slope protection; on-site test; optimal design

1 研究背景

反滤层由不同粒径的砂、碎石或卵石等反滤料构成,反滤料颗粒粒径顺着水流方向逐渐增大,在各种情况下,粒径较小的颗粒都不允许透过由粒径较大颗粒构成的孔隙,同一层的颗粒也不能产生相对移动[1]。设置反滤层能够有效防止实际工程遭受管涌、流土、冲刷等渗流破坏[1-2]。

反滤层在水利、交通、市政等众多工程领域中均得到了广泛的应用,目前研究主要集中在反滤层的滤水原则、排水减压原则等设计理论[3-8]及其可靠度的计算[9]等方面。刘杰等[3]在太沙基反滤层设

收稿日期:2020-01-02; **修回日期**:2020-02-25
基金项目:国家重点研发计划"科技冬奥"重点专项(2018YFF0300200)
作者简介:杨 凡(1993-),女,安徽芜湖人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。
通讯作者:张志红(1976-),女,河北深州人,博士,教授,博士生导师,研究方向为环境岩土工程。

计理论的基础上提出了自然界无黏性土、黏性土和砾质土的反滤层设计方法。Jacobsen 等[10]提出了一个能够描述开放滤层内的侵蚀和沉积模型,研究了反滤层的不同布局对系统性能的影响,以及不同滤层剖面对冲刷的影响。Tsujimoto 等[11]为研究滤层对海滩剖面的影响建造了铺设有砾石滤层的人工海滩,结果表明反滤层能促进护堤的防护效果,减少岸线的侵蚀,且具有滤层的海滩剖面趋于稳定,并通过数值模拟试验提出了适用于日本现有海滩保护的方法。王辉军[12]通过试验结果给出了适用于公路工程的反滤层层数为两层,最多不超过3层的建议。陶连金等[13]通过数值模拟证明了在一定范围内设置反滤层对土层液化有很好的防护性能,且随着碎石反滤层厚度和层数的增加,土层的抗液化能力明显提升。Li 等[14]对粉砂组合土样进行垂直渗透试验,模拟了人工回灌地下水时,反滤层对回灌井的渗透影响,试验表明,粉土会降低滤层的渗透性,从而降低回灌井的回灌能力。肖芳玲等[15]为研究均匀反滤层保护下的黄土抗渗强度与反滤层孔隙特性的关系,以横泉水库坝体黄土为研究对象进行了一系列抗渗试验和激光粒度分析试验,证明了反滤层颗粒粒径比越小,被保护土越易流失。Ju 等[16]通过不同渗透性的土工织物和不同粒径粗集料的组合作为滤层的上下部结构模拟测试了波浪作用下土工织物覆盖层顶部和下侧的压力,研究了不同土工织物渗透性的反滤层对被保护土表层稳定性的影响。Changsung 等[17]研究了抛石护坦的冲刷特性及其沉降特性,在试验测量的基础上,根据反滤层厚度计算了反滤层冲刷防护的沉降,用无量纲经验公式量化垂直落差下游无滤层抛石冲刷防护的沉降。

目前关于反滤层的研究主要涉及反滤层的类型、控制粒径以及反滤层在水利、交通等领域的应用,但尚未见反滤层在格宾网箱中的应用。相较于传统支护形式,格宾网箱具有良好的渗透和柔韧性,在边坡工程中能实现护坡、覆绿及材料就地利用等多重功能,达到工程结构和生态环境的有机结合[8,18]。本文依托北京冬奥会张家口赛区正在实施的“科技冬奥”项目,重点研究当地最大降雨条件下不同设计方案的反滤层防冲刷性能,从而为类似工程格宾网箱覆绿功能反滤层的优化设计提供参考。

2 格宾网箱反滤层结构形式

2.1 试验背景

本试验依托正在实施的“科技冬奥”项目,该项目位于河北省张家口市崇礼区枯杨树村,地处大陆性季风型山区气候区,四季分明,雨热同季。山区降雨量大,山体大都为全风化~中等风化的岩石构成,易发生滑坡,故需对山体进行支护。现场地形地貌如图1所示。



(a) 山体概况 (b) 山体构造

图1 研究项目现场地形地貌

需支护的山体坡度为1∶1.5,为防止滑坡,且满足生态保护要求,使用格宾网箱对其进行生态护坡。根据坡度比和工程目的对格宾网箱及其填充物的形式进行了设计,格宾网箱高为1 000 mm,其中上部种植土厚度为100 mm,中部设置反滤层,厚度为200 mm,底部700 mm厚的爆破碎石作为格宾网箱的承重部分。其具体结构形式如图2所示。

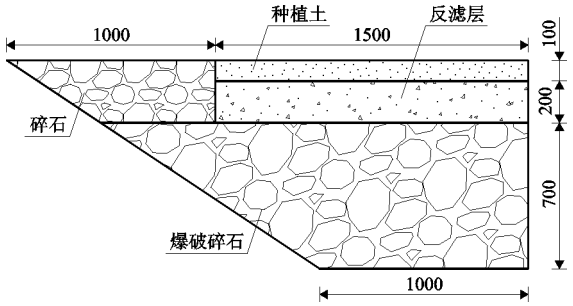


图2 格宾网箱结构图(单位:mm)

2.2 反滤层结构形式

反滤层按其结构形式主要划分为Ⅰ型反滤和Ⅱ型反滤两种类型[9]。

Ⅰ型反滤:反滤层位于被保护土下方,渗流自上而下进行,反滤层上部容易发生破坏。

Ⅱ型反滤:反滤层位于被保护土上方,渗流自下而上进行,反滤层下部容易发生破坏。

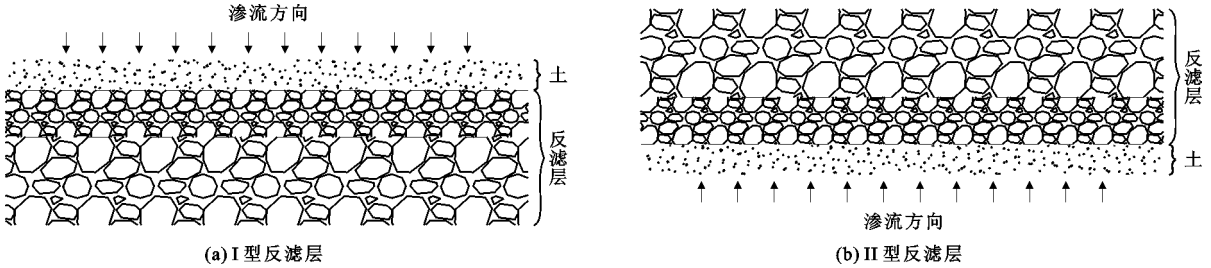
Ⅰ型反滤和Ⅱ型反滤的结构形式如图3所示。本文试验根据现场实际情况,将反滤层设计为Ⅰ型反滤层。

2.3 反滤料的选择

对于反滤料一般就地、就近选择,且有3个方面的要求:一是要保土,即要求被保护土体中的颗粒不得透过反滤层,以免造成土颗粒大量流失;二是具有一定的渗透性,即要求水体能顺利排出,以使得直接

作用在下部地基土上的水动力荷载最小化,但需保证渗透系数不能过大,否则无法阻止细颗粒移动;三是具有一定的水密性,以防止颗粒较小的泥沙被冲出,无法达到保护土颗粒的目的[15,19-21]。目前大部分的反滤料为不均匀反滤料,相对于均匀反滤料,不均匀反滤料具有易就地取材、筛分量小、工程造价低等优点。并且由于小一级的颗粒能够填充下一级颗粒形成的孔隙,不均匀反滤料更容易满足上述 3 方面的要求。

本试验的反滤料均为当地岩石经爆破之后形成的粒径小于 100 mm 的不均匀碎石,上部的种植土为适合当地植被生长的黄土。



(a) I 型反滤层　　(b) II 型反滤层

图 3　两种类型的反滤层结构形式

3　试验原理与方法

3.1　试验原理

反滤层的基本作用是滤土排水,即要求反滤层既能够防止被保护土随渗流水析出,又能够保证渗流水的排出,除了这两个基本作用外,还需保护相邻反滤层不遭渗流破坏。反滤层层数和厚度的确定是由保护效果决定的,当该层反滤不需另一层反滤层来保护时,即在该反滤层下,被保护土不会被冲刷,则该反滤层层数和厚度有效[12,22-23]。因此,有效的反滤层呈两方面特征:(1)在加上试验水头后短时间内渗水变清,渗流量不断减少;(2)防渗体与反滤接触面没有遭到冲蚀破坏,无大量土颗粒流失[24]。由此可确定反滤层层数和厚度。

3.2　试验设计

为了研究最大降雨量下反滤层对被保护土的保护效果,本试验设计了由不同层数、不同厚度和不同颗粒粒径组成的 6 种反滤层,通过比较雨水冲刷后收集到的被保护土质量,可确定出最适宜的反滤层构造形式。反滤层的设计形式如表 1 所示。表 1 中 2-1、2-2 和 2-3 表示反滤层设置为 2 层,厚度比分别为 100∶100、150∶50、50∶150;3-1、3-2 和 3-3 表示反滤层设置为 3 层,厚度比分别为70∶70∶60、100∶50∶50、50∶50∶100。

3.3　试验装置

本试验采用自行设计的反滤层试验装置,该装置共分为 3 部分:(1)进水装置(水箱);(2)反滤层放置装置;(3)土颗粒收集装置。

水箱尺寸为 1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm,由钢板制成,底部布满直径为 3 mm 的小孔,孔间距为 50 mm,用于模拟降水;反滤层放置装置直径 800 mm、高 300 mm,由亚克力有机玻璃板制成,共分为上、下两部分,底部 200 mm 放置反滤料即反滤层总厚度为 200 mm,上部 100 mm 放置被保护土,反滤层底部放有孔径为 2 mm 的筛网,目的是为了防止反滤料颗粒流失,只能够让水和土颗粒透过反滤层进入土颗粒收集装置;土颗粒收集装置直径 200 mm,高 100 mm,由亚克力有机玻璃板制成。试验装置如图 4 所示。

表 1　反滤层结构的不同形式　　mm

反滤层形式	上层		中层		下层	
	厚度	粒径范围	厚度	粒径范围	厚度	粒径范围
2-1	100	<20			100	20~100
2-2	150	<20			50	20~100
2-3	50	<20			150	20~100
3-1	70	<20	70	20~50	60	50~100
3-2	100	<20	50	20~50	50	50~100
3-3	50	<20	50	20~50	100	50~100

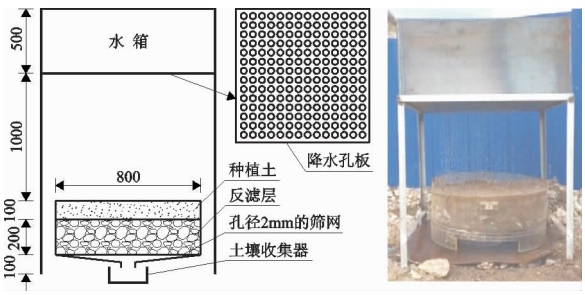


图 4　自制试验装置结构及实物图

3.4　试验过程

对粒径小于 100 mm 的碎石进行筛分,为便于

现场施工应用,将碎石筛分成 3 种粒径范围,分别为粒径小于 20 mm、粒径为 20 ~ 50 mm 以及粒径为 50 ~ 100 mm。根据上述设计方案铺设反滤层,底部碎石粒径最大,中层次之,上层碎石粒径最小。反滤层铺设完成后,在顶部均匀覆盖 100 mm 厚的黄土。

具体的试验步骤及过程如图 5 所示。先将水放入进水装置中,共分 3 次进水,时间间隔为 5 h,每次模拟的降雨强度均为 45 mm/h,属于暴雨级别,与崇礼区气象记载的最大降雨强度相一致。降水试验完成后将土壤收集于装置中的土颗粒收集袋中,带回室内实验室静置、烘干、称量。通过分析不同层数、不同厚度比、不同颗粒粒径组成的反滤层条件下收集到的土颗粒质量,可以确定不同形式反滤层的防冲刷效果。



(a) 铺设反滤层 (b) 模拟降雨 (c) 土颗粒收集

(d) 静置 (e) 烘干 (f) 称量

图 5 试验步骤及过程示意图

4 试验结果与分析

表 2 为不同冲刷次数两层不同厚度比反滤层被冲刷的土颗粒质量,反滤层形式为两层反滤层,上、下两层厚度比分别为 100∶100、150∶50、50∶150。

表 2 不同冲刷次数两层不同厚度比反滤层被冲刷的土颗粒质量 g

冲刷次数	反滤层上、下两层厚度比		
	100∶100	150∶50	50∶150
1	110.894	156.662	198.009
2	5.020	85.415	139.617
3	0	30.083	3.643
总质量	115.914	272.160	341.269

由表 2 可以看出,随着冲刷次数的增加,每次收集到的被冲刷的土颗粒质量逐渐减小。两层厚度比为 100∶100 的反滤层收集到的被冲刷土颗粒质量最小,表明其防冲刷能力优于其他两种形式的反滤层。

表 3 为不同冲刷次数 3 层不同厚度比反滤层被冲刷的土颗粒质量,3 层反滤层的上、中、下各层厚度比分别为70∶70∶60、100∶50∶50、50∶50∶100。

表 3 不同冲刷次数 3 层不同厚度比反滤层被冲刷的土颗粒质量 g

冲刷次数	反滤层上、中、下 3 层厚度比		
	70∶70∶60	100∶50∶50	50∶50∶100
1	104.411	118.956	153.992
2	2.726	53.874	98.328
3	0	15.688	3.333
总质量	107.137	188.518	255.653

由表 3 可以看出,随着冲刷次数的增加,收集到的被冲刷的土颗粒质量不断减小。3 层厚度比为 70∶70∶60的反滤层收集到的被冲刷土颗粒质量最小,表明其防冲刷能力优于其他两种形式的反滤层。结果表明,当反滤层为 3 层且厚度比为 70∶70∶60 时,被冲刷的土颗粒总质量为 107.137 g,其对于土颗粒的防冲刷效果最好;当反滤层层数为两层且厚度比为 100∶100 时,被冲刷的土颗粒总质量为 115.914 g,两者土颗粒总质量相差 8.777 g(约 8%),可以认为这两种形式反滤层的防冲刷效果相

近。从施工角度考虑,两层的反滤层相较于 3 层反滤层更易于施工,故可以认为层数为两层、厚度比为 100∶100 的反滤层为最佳选择。

由反滤层试验结果可知,不同粒径组成的反滤层厚度越接近,防冲刷能力越强;反滤层层数越多,防冲刷能力越强。当反滤层层数为 3 层且厚度比为 70∶70∶60 时,该结构的反滤层防冲刷效果最好,这是因为大粒径颗粒形成的孔隙被下一级粒径的颗粒填充,下一级粒径颗粒形成的孔隙又被最小粒径的颗粒填充。若大粒径颗粒的含量过大,则小粒径颗粒无法填满孔隙,土颗粒就会穿过孔隙流失,不能满足反滤层保土的要求;若小粒径含量过大,则无法很好地满足反滤层滤水的要求,使得土壤含水量过高,不能保证植被正常生长。故当不同粒径的颗粒含量相当时,既能使得颗粒间的孔隙被填充,也能很好地满足反滤层滤水保土的要求,则该结构的反滤层具有较好的防冲刷效果。

5　结　论

本试验依托北京冬奥会张家口赛区正在实施的“科技冬奥”项目,模拟当地最大降雨量,采用自行设计的反滤层试验装置,开展了具有覆绿功能的格宾网箱内反滤层优化设计试验,主要结论如下:

(1)反滤层设计层数越多,其防冲刷效果越好。

(2)构成反滤层的颗粒粒径范围组分越多,反滤层的防冲刷能力越强。

(3)从便于施工的角度考虑,反滤层设置为两层,每层厚度为 100 mm 即厚度比为 1∶1,且粒径构成为小于 20 mm 和 20 ~ 100 mm 时,反滤层防冲刷效果最佳。

参考文献:

[1] 徐石磊,谢成奎,王超中,等. 水利工程中砂石反滤层的设计与施工组织要点[J]. 河南水利与南水北调, 2013(2):17 - 18.

[2] 谭川蓉,王正成,毛海涛,等. 反滤层在土石坝防渗中的作用研究[J]. 云南水力发电, 2016,32(3):27 - 29.

[3] 刘 杰,谢定松. 反滤层设计原理与准则[J]. 岩土工程学报,2017,39(4):609 - 616.

[4] 龚 松. 高土石坝反滤料动强度特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.

[5] 段国军,张顺福,介玉新. 滤网孔径和层数对反滤保土效果的影响分析[J]. 水利水电技 术,2020,51(1):39 - 45.

[6] 张凤德,杨云超,荣 冠,等. 砂土管涌的反滤机理颗粒流模拟研究[J]. 水电与新能源,2017(6):11 - 16.

[7] 刘 杰,谢定松. 砾石土渗透稳定特性试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(9):2632 - 2638.

[8] 刘 杰. 土的渗透破坏及控制研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.

[9] 肖芳玲. 基于孔隙特征的反滤层设计准则研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.

[10] JACOBSEN N G, VAN GENT M R A, FREDSØE J. Numerical modelling of the erosion and deposition of sand inside a filter layer [J]. Coastal Engineering, 2017, 120: 47 - 63.

[11] TSUJIMOTO G, HOSOYAMADA T, OHNISHI T, et al. Beach profile changes of an artificial coast with a gravel filter layer [M]. Coastal Structures, 2015.

[12] 王辉军. 浅谈公路路基路面排水设计[J]. 城市建筑, 2016(12):268 + 270.

[13] 陶连金,索新爱,刘春晓. 基于反滤原理的地下结构抗液化处理方法[J]. 黑龙江科技大学学报,2016,26(3):256 - 61.

[14] LI Wanglin, LI Yingte. Influence of sediments on permeability of recharge well with filter layer during artificial recharge of groundwater [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255 - 260: 2806 - 2809.

[15] 肖芳玲,张爱军. 均匀反滤层下黄土的抗渗与颗粒流失特性研究[J]. 人民黄河,2018,40(11):144 - 149.

[16] JU Liehong, PAN Junning, YANG Fan, et al. Experimental study on the impact of filter layer permeability on revetment stability under wave action[J]. Procedia Engineering, 2015, 116: 778 - 785.

[17] CHANGSUNG K, JOONGU K, HONGKOO Y, et al. An experimental study for the empirical equation to quantify the subsidence of riprap scour protection at downstream of vertical drop structures [J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2010, 43(5): 433 - 443.

[18] 赵正云. 生态河道治理中的格宾网应用研究[J]. 农业科技与信息,2018(21):97 - 98.

[19] 邹玉华,陈 群,何昌荣,等. 不同应力条件下砾石土防渗料和反滤料联合抗渗试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2323 - 2329.

[20] 潘 攀. 黑方台滑坡机理及防治对策研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.

[21] 李方振,柳 侃,陈志波. 宽级配砾质土三轴渗透试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(1):126 - 129 + 133.

[22] 杨小龙. 土石坝湿化变形及反滤料液化可能性研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.

[23] 张智雄,王 磊,郑 伟. 渗渠取水工程反滤结构的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(11):143 - 147.

[24] 朱建华,游 凡,杨凯虹. 宽级配砾石土坝料的防渗性及反滤[J]. 岩土工程学报,1993,15(6):18 - 27.