

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.02.005

希德拉顿颗粒铺盖防渗性能试验

梁越^{1,2}, 马士谦^{1,2}, 魏琦³, 杨德宏⁴, 张宏杰^{1,2}

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074;
3. 长江水利水电开发集团有限公司, 湖北 武汉 430000; 4. 重庆诺为生态环境工程有限公司, 重庆 404100)

摘要: 为了探讨不同铺盖条件下希德拉顿颗粒的防渗效果, 堆建了 3 座内含不同渗漏隐患的土石坝模型。将不同铺盖厚度和不同铺盖面积的希德拉顿颗粒铺盖在坝面渗漏处, 并统计渗漏流量随时间的变化。试验结果表明: 铺盖希德拉顿颗粒后, 3 种渗漏模型的渗漏流量都随时间呈指数规律下降, 接触带渗漏模型的渗漏流量下降速率最大, 库底渗漏模型的渗漏流量下降较缓; 铺盖厚度增大, 3 种渗漏模型的防渗效果增强; 对于接触带渗漏模型和集中渗漏模型, 铺盖面积增大其防渗效果反而减弱; 认为水合希德拉顿颗粒具有良好的防渗能力, 可用于预防和修复堤坝的渗漏。

关键词: 土石坝; 渗漏; 希德拉顿颗粒; 铺盖; 模型试验

中图分类号: TV223.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)02-0031-06

Experimental study of the anti-seepage characteristics of the Sidraton particles blanket

LIANG Yue^{1,2}, MA Shiqian^{1,2}, WEI Qi³, YANG Dehong⁴, ZHANG Hongjie^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group Co., Ltd., Wuhan 430000, China;
4. Chongqing Nuowei Ecological Environment Engineering Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: In order to investigate the anti-seepage characteristics of Sidraton particles under different cover conditions, three earth rock-fill dam models with different hidden trouble of leakage were constructed. Sidradon particles with different blanket thickness and different blanket area were covered in the seepage area of dam surface and the change of seepage flow with time was recorded. The experiment shows that after covering the Sidraton particles, the seepage flow of the three leakage models decreases exponentially with time. The seepage flow of the contact leakage model decreases the most, and the seepage flow of the reservoir bottom leakage model decreases slowly. With the increase of blanket thickness, the anti-seepage effect of the three leakage models is enhanced. For the contact leakage model and the concentrated leakage model, the anti-seepage effect decreases with the increase of the blanket area. Hydrated Sidraton particles with a good anti-seepage ability can be used to prevent and repair the leakage of dam.

Key words: earth rock-fill dam; seepage; Sidraton particles; blanket; model test

据水利部统计^[1],我国共有水库 98 112 座,其中大型水库 744 座、中型水库 3 978 座。很多水库建于 20 世纪 50—70 年代,由于当时填筑技术的不成熟及年久失修,导致土石坝出现各种隐患,渗漏便是土石坝常见的隐患之一^[2]。渗漏不仅会导致水资源的流失,还可能通过内部侵蚀导致大坝溃决。因此,对土石坝渗漏进行探测和修补尤为重要。随着高密度电阻率法^[3-4]、瞬变电磁法^[5-6]、流场法^[7-8]和电阻率层析法^[9-10]等大地物理探测方法在土石坝渗漏探测研究的迅速发展,用于预防和修复土石坝渗漏的结构和材料也得到了广泛的发展。目前,对于大坝加固防渗措施,常用的是在大坝临水一面设置防渗透保护墙技术和灌浆加固水坝技术^[11]。在设置防渗墙技术方面,我国在施工机具、固壁泥浆、施工工艺、混凝土材料等方面均取得了重大

基金项目: “十三五”重点研发计划(2019YFC1510802);重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0559);重庆市交通大学研究生科研创新项目(学生项目)(2020B0005)

作者简介: 梁越(1985—),男,教授,博士,主要从事地下水渗流理论等研究。E-mail:liangyue2560@163.com

通信作者: 马士谦(1995—),男,硕士研究生,主要从事水利工程灾害防治研究。E-mail:3014205083@qq.com

引用本文: 梁越,马士谦,魏琦,等. 希德拉顿颗粒铺盖防渗性能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):31-36.
LIANG Yue,MA Shiqian,WEI Qi,et al. Experimental study of the anti-seepage characteristics of the Sidraton particles blanket [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):31-36.

突破性创新。在一些典型技术域,如超深防渗墙技术、病险水库防渗加固、围堰防渗墙的特殊施工工艺等方面都有重大突破^[12],如郭成超等^[13]对高聚物超薄防渗墙施工设备及工艺进行改进,保证了高聚物防渗墙的垂度及搭接完整性,提高了设备工作效率,加快了工程施工进度。虽然这些技术有其优点,但也存在施工难度大、防渗材料容易老化破损等缺点。近年来,科研人员研究出一些新型防渗材料。如谈叶飞等^[14]利用微生物巴氏芽孢杆菌对尿素进行水解产生大量碳酸根离子,并和钙镁离子结合生成碳酸钙沉积,可以用来堵塞坝体内部孔隙。翟祝贺等^[15]将新型防水防渗材料聚脲防水涂料应用在回龙抽水蓄能电站工程中,使其渗漏量大大降低,验证了聚脲防水涂料作为防渗材料的优异性能。Jiang 等^[16]在实验室通过使用不同粒度的砂-高岭土混合物,检验了微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)用于内部侵蚀控制的适用性。试验结果表明,土壤特性(如颗粒级配)对 MICP 是否适合防治坝体内部侵蚀非常重要。Gao 等^[17]提出了一种基于 MICP 的土壤改良方法,并通过试验证明经过该生物处理的土壤抗渗性远远高于未经处理的土壤。该方法可用于控制砂质土壤上修建的水库的渗漏。以上这些材料及方法都有一定的局限性,需要较长的时间发挥其作用,且更适用于防治坝体内部渗漏。

希德拉顿颗粒^[18]是一种新型的防渗材料,由膨润土、石英芯和聚合物黏合剂混合而成,内核为石英,外层为干燥的有机矿物包裹层,遇水形成水合物并凝聚,就能起到防渗的作用。与天然黏土、HDPE 膜等传统的防渗材料相比,希德拉顿颗粒有极低的渗透率、更好的协调变性和自修复能力。这些优点可使希德拉顿颗粒材料在堤坝、堤防渗漏修补等防渗工程中发挥良好的作用。本文通过堆建3座内含不同渗漏隐患的土石坝模型,在坝面的渗漏进口处铺盖不同厚度和不同面积的希德拉顿颗粒,并统计渗漏流量随时间的变化,以探讨希德拉顿颗粒的防渗性能。

1 模型试验方案

1.1 模型设计

试验在混凝土槽内进行,模型槽内部净空尺寸(长×宽×高)为3.6 m×1.0 m×0.8 m。为防止试验过程中墙面渗水引起较大误差,坝体与混凝土槽四周接触带处均进行了防水处理。试验设计3种不同堤坝渗漏类型,分别为接触带渗漏、集中渗漏和库底渗漏。接触带渗漏模型与集中渗漏模型如图1、图2所示,其坝高均为0.70 m,坝顶宽0.20 m,上下游坡脚距离2.30 m,上下游坡比均为1:1.5,其中接触带渗漏模型预设的渗漏带厚50 mm、宽0.6 m、长1.7 m;集中渗漏模型的渗漏带采用长1.7 m、直径20 mm的PVC管模拟,管中填充卵石。其渗漏中心轴线距离坝底均为0.2 m。库底渗漏模型如图3所示,坝高为0.4 m,坝顶宽为0.3 m,上下游坡脚距离为1.5 m,渗漏带的进水口和出水口采用PVC管模拟,内部预设的渗漏带厚100 mm,宽0.6 m,长1.1 m。

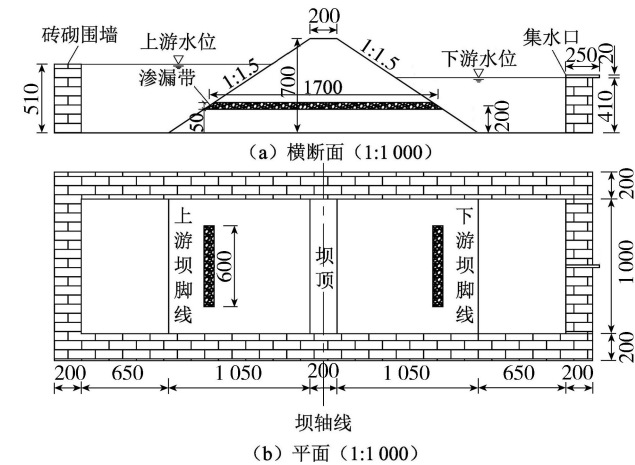


图1 接触带渗漏模型示意图(单位:mm)
Fig.1 Schematic diagram of contact leakage model(Unit:mm)

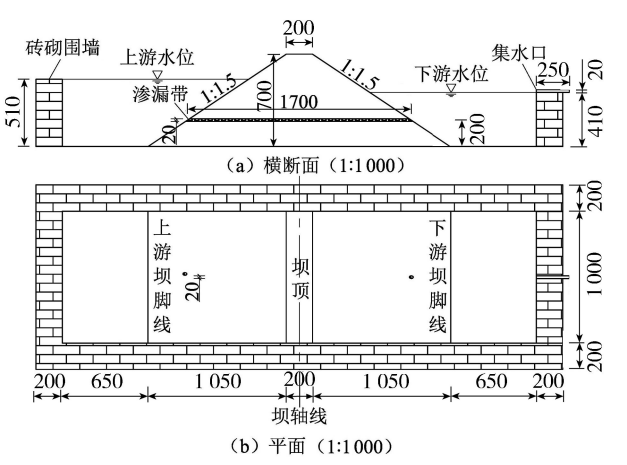


图2 集中渗漏模型示意图(单位:mm)
Fig.2 Schematic diagram of concentrated leakage model(Unit:mm)

1.2 试验材料

建造土坝所用的土料天然密度为2.43 g/cm³,天然含水率为1.76%,饱和密度为2.72 g/cm³,土粒比重

G_s 为 2.71。通过筛分法得到粒径级配并绘出颗粒级配累计曲线,算出不均匀系数 $C_u=17.3$ 和曲率系数 $C_c=1.56$,由此可知试验材料级配良好,适合作为土坝填筑材料。渗漏带填充材料采用粒径为 8~10 mm 的卵石。防渗材料采用希德拉顿颗粒如图 4 所示,颗粒外观整体呈灰白色,散粒状。其基本物理性质为:天然密度 ρ 松装为 1.308 2 g/cm³,密装为 1.486 1 g/cm³;干密度 ρ_d 松装为 1.274 7 g/cm³,密装为 1.448 0 g/cm³,天然容重 γ 松装为 12.820 4 kN/m³,密装为 14.563 8 kN/m³;干容重 γ_d 松装为 12.492 1 kN/m³,密装为 14.190 4 kN/m³;饱和容重 γ_{sat} 松装为 17.522 4 kN/m³,密装为 18.570 0 kN/m³;孔隙比 e 松装为 1.055 5,密装为 0.808 7;比重 G_s 为 2.620;自由膨胀率 δ_{ef} 为 20%;内摩擦角 φ_u 为 27.57°;黏聚力 c_u 为 30.95 kPa^[18]。 φ_u 和 c_u 是用水合希德拉顿颗粒测试的。

1.3 试验流程与试验工况

试验主要包括 3 个步骤:①将希德拉顿颗粒铺盖在坝面渗漏处,向下游加水至刚好与渗漏口中心线平齐,向上游加水至预定水位,此时水流经渗漏带流向下流。维持上游水位高度不变,直至下游集水口有水流出,维持上下游水头差不变,开始测量。②每次测量连续进行 4 组,每组测量进行 30 s,测量时用量桶收集所流出的水量,计算渗漏流量,视情况每隔 5~20 min 测量一次,直至流量为 0 或一段时间内流量变化不明显。③测量完成后,排出水槽中的水,清理坝面的希德拉顿颗粒,铺盖下一工况的希德拉顿颗粒,并重复步骤①②。

依照上述步骤进行试验,通过改变铺盖厚度和铺盖面积,研究希德拉顿颗粒铺盖的防渗效果。针对不同渗漏类型,共设计 18 种工况,详细试验方案见表 1。

表 1 希德拉顿颗粒铺盖防渗性能试验方案
Table 1 Test scheme of the anti-seepage characteristics of the Sidraton particles blanket

渗漏类型	厚度试验				面积试验			
	编号	铺盖厚度/cm	铺盖尺寸/cm	铺盖面积/cm ²	编号	铺盖厚度/cm	铺盖尺寸/cm	铺盖面积/cm ²
接触带渗漏	A1	3	100× 60	6 000	B1	4	100× 20	2 000
	A2	4	100× 60	6 000	B2	4	100× 40	4 000
	A3	5	100× 60	6 000	B3	4	100× 60	6 000
集中渗漏	C1	3	20	100π	D1	4	5.5	30.25π
	C2	4	20	100π	D2	4	7.5	56.25π
	C3	5	20	100π	D3	4	10	100π
库底渗漏	E1	3	10× 6	60	F1	4	10×6	60
	E2	4	10×6	60	F2	4	10×8	80
	E3	5	10×6	60	F3	4	10×10	100

注:表中尺寸为长×宽或半径。

2 试验结果与分析

2.1 接触带渗漏模型试验

在进行接触带渗漏模型的希德拉顿颗粒铺盖防渗试验时,不同铺盖条件下所测渗漏流量 Q 随水化时间 T 的变化如图 5 所示。

在图 5(a)中, $T=0$ 时,虽然希德拉顿颗粒的铺盖厚度不同,但由于希德拉顿颗粒刚接触水没有立即膨胀,且希德拉顿颗粒层的渗透系数较大,因此不同厚度的希德拉顿颗粒层对渗漏的阻挡效果十分接近,渗漏

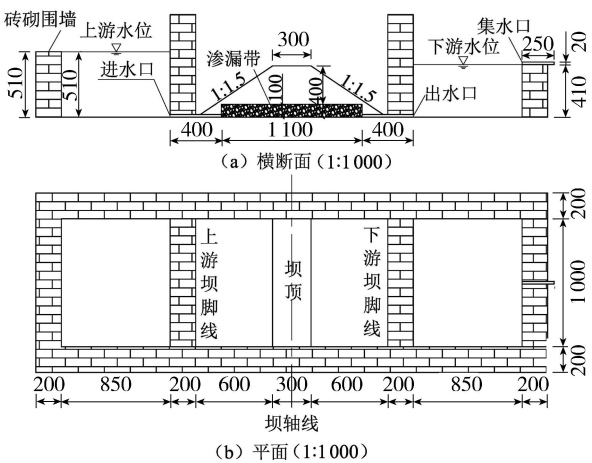


图 3 库底渗漏模型示意图(单位:mm)
Fig.3 Schematic diagram of
reservoir bottom leakage model(Unit:mm)



图 4 希德拉顿颗粒
Fig.4 Photograph of
the Sidraton particles

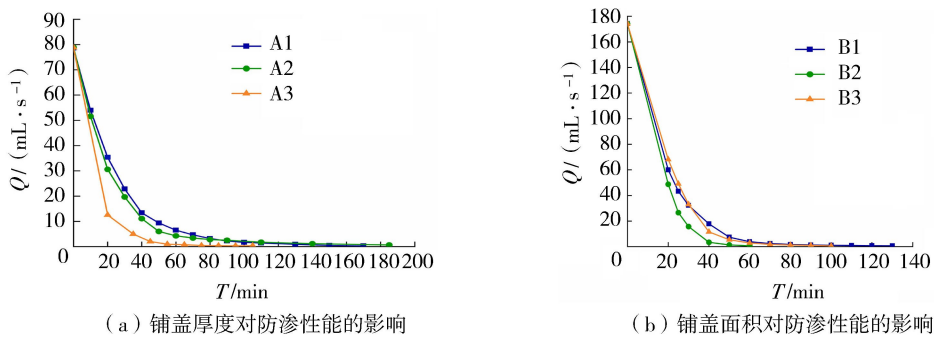


图 5 希德拉顿颗粒对接触带渗漏模型防渗性能影响

Fig. 5 Influence of Sidraton particles on anti-seepage characteristics of contact leakage model

流量均在 78.5 mL/s 左右。随着水化的进行,希德拉顿颗粒的铺盖厚度对防渗效果的影响逐渐显现。随着厚度的增加,渗漏流量的减小速率增大。其中 A1、A2 组铺盖厚度对防渗效果的影响差别不大,A3 组防渗效果对比 A1、A2 组明显更好,渗漏流量曲线下降最快且达到最优防渗效果的时间最短。试验结束时 3 组试验渗漏流量均在 1 mL/s 以下。试验结束后,将希德拉顿颗粒从坝体表面清除时,可以明显看到有水流从下游坝面流出,表明希德拉顿颗粒很好地将渗透水流阻隔在上游。综上所述,对于接触带渗漏模型的防渗,希德拉顿颗粒铺盖防渗效果十分显著,且铺盖厚度越大,防渗效果越好。

在图 5(b)中,B3 组的试验效果在前 30 min 不如 B1、B2 组,但在 30 min 之后产生了比 B1 组更好的效果。B2 组的防渗效果始终较 B1 和 B3 组更好(在经过 3 组重复试验后,仍得到相同结果),表明希德拉顿颗粒在接触带渗漏模型的铺盖防渗试验中,铺盖面积并非越大越好,在铺盖面积超过一定范围后,防渗效果反而变弱。

2.2 集中渗漏模型试验

集中渗漏模型的希德拉顿颗粒铺盖防渗试验,不同铺盖条件下 Q 随 T 的变化如图 6 所示。

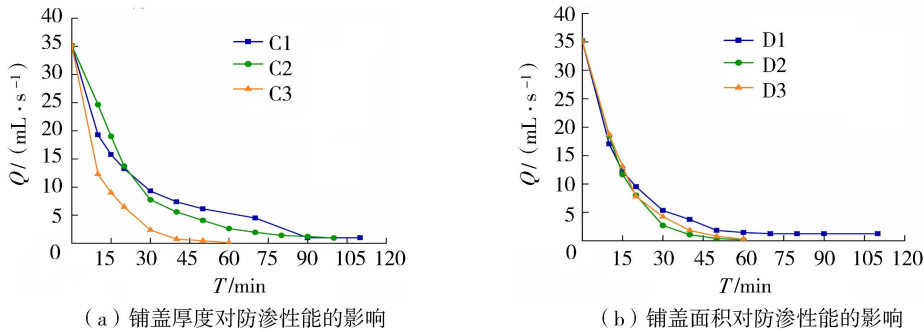


图 6 希德拉顿颗粒对集中渗漏模型防渗性能影响

Fig. 6 Influence of Sidraton particles on anti-seepage characteristics of concentrated leakage model

在图 6(a)中, $T=0$ 时,集中渗漏较为严重,渗漏流量达 35 mL/s 。铺盖希德拉顿颗粒之后,随着水化的进行,3 组试验结果产生一定的差别。在前 20 min 时 C1 组比 C2 组的防渗效果好,20 min 之后 C2 组的防渗效果明显优于 C1 组。C3 组在整个试验过程中防渗效果明显优于 C1、C2 组。由于集中渗漏的渗漏面积较小,因此在铺盖面积不变的情况下,希德拉顿颗粒铺盖效果随铺盖厚度的增大而提高,厚度最大的 C3 组达到最优防渗效果的时间最短。不同铺盖厚度下希德拉顿颗粒的防渗效果不同,说明铺盖厚度对于集中渗漏的防渗有一定的影响,且防渗效果随着厚度的增加而提高。在图 6(b)中 3 条曲线在开始前 20 min 变化大致相同,在 20 min 之后铺盖面积最小的 D1 组防渗效果较差,D2 组的防渗效果最好,达到最优防渗效果的时间最短。表明希德拉顿颗粒在集中渗漏模型的铺盖防渗试验中,并非铺盖面积越大防渗效果越好,铺盖面积超过一定值后,防渗效果反而变弱。

2.3 库底渗漏模型试验

库底渗漏模型的希德拉顿颗粒铺盖防渗试验,不同铺盖条件下 Q 随 T 的变化如图 7 所示。

在图 7(a)中,随着厚度的不断增加,渗漏流量的减小速率越大,3 组试验结果差别越明显。在开始的前

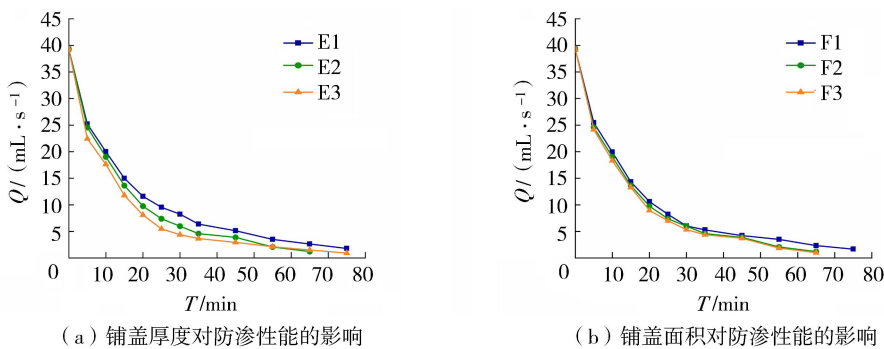


图 7 希德拉顿颗粒对库底渗漏模型防渗性能影响

Fig.7 Influence of Sidraton particles on anti-seepage characteristics of reservoir bottom leakage model

55 min, 希德拉顿颗粒铺盖效果随铺盖厚度的增大而提高, 55 ~ 65 min, E2 组的防渗效果更好。试验结束时, E3 组的防渗效果比 E1、E2 组更好, 其渗漏流量最小。不同铺盖厚度下希德拉顿颗粒的防渗效果不同, 说明铺盖厚度影响库底渗漏模型的防渗效果, 防渗性能随着厚度的增加而提高。图 7(b) 中 3 条曲线在开始的前 30 min 变化大致相同, 其防渗效果随铺盖面积的增大会有细微区别。35 min 之后, 铺盖面积最小的 F1 组的防渗效果明显劣于 F2、F3 组, F2、F3 组的防渗效果大致相同。表明希德拉顿颗粒在库底渗漏的铺盖防渗试验中, 铺盖面积对防渗效果并不起决定作用, 铺盖面积达到一定值时防渗性能不再增强。

3 讨 论

a. 在接触带渗漏模型试验过程中, 每次试验后会对膨胀的希德拉顿颗粒进行清理。改变铺盖厚度试验后, 在维持坝体不变的条件下, 对坝体表面希德拉顿颗粒进行清理, 同时对接触带表面的卵石进行清洗替换, 导致改变铺盖面积试验所测的初始流量较之前大。

b. 在接触带渗漏模型和集中渗漏模型改变铺盖面积的试验过程中, 铺盖面积增大防渗效果反而变差。原因可能是铺盖面积过大, 导致希德拉顿颗粒铺盖整体质量过大。在重力的作用下, 沿着迎水坡面向下滑移, 而由于希德拉顿颗粒表面的有机矿物包裹层具有黏性, 会携带土坝表层的黏土一同向下移动, 反而使得渗漏处周围的土层变薄, 水更易流过, 因此导致防渗效果变差。

4 结 论

a. 试验所测得渗漏流量都随水化时间呈指数下降, 对于接触带渗漏破坏, 渗漏流量受希德拉顿颗粒铺盖的影响最为明显, 渗漏流量产生急剧下降, 表明希德拉顿颗粒更好地适用于接触带渗漏类型。

b. 试验所测得渗漏流量都在试验开始时变化较大, 45 min 后皆形成一种缓慢的减小趋势, 该趋势随着铺盖条件的不同而产生细微的变化, 最终渗漏流量趋近于 0, 表明希德拉顿颗粒充分水化约需 45 min。

c. 铺盖希德拉顿颗粒厚度越大, 防渗效果越明显, 但铺盖面积并非越大越好。在实际应用中, 铺盖面积的选择需进行试验对比分析, 选择合适的铺盖面积有利于达到最优的防渗效果。

d. 希德拉顿颗粒具有良好的防渗性能, 而且这一性能不受施工含水量的影响。该材料可作为修建土石坝的防渗材料, 且希德拉顿颗粒有很高的抗冲蚀性能, 可以减小反滤层的压力, 节省费用, 简化施工。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2019 年全国水利发展统计公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

[2] 臧少慧, 张明占, 刘仲秋, 等. 我国水库除险加固研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(6): 1097-1103. (ZANG Shaohui, ZHANG Mingzhan, LIU Zhongqiu, et al. Research progress on reservoir reinforcement in China[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2019, 50(6): 1097-1103. (in Chinese))

[3] 孙钦同, 徐淑贞, 李才明. 应用高密度电阻率法实现坝体渗漏快速探测[J]. 地质与勘探, 2019, 55(6): 1436-1441. (SUN Qintong, XU Shuzhen, LI Caiming. Rapid detection of dam seepage using the high-density resistivity method[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(6): 1436-1441. (in Chinese))

[4] 刘晓, 彭友文, 袁志辉, 等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 71-75. (LIU

- Xiao,PENG Youwen,YUAN Zhihui,et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(5):71-75. (in Chinese))
- [5] 马振军,底青云,薛国强,等. 地-空瞬变电磁法电阻率成像研究与应用[J]. 地球物理学报,2021,64(3):1090-1105. (MA Zhenjun,DI Qingyun,XUE Guoqiang,et al. The research and application of resistivity imaging of semi-airborne transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics,2021,64(3):1090-1105. (in Chinese))
- [6] 魏海民,李星,孙帮涛,等. 地球物理方法在帷幕注浆治水中的探测分析[J]. 物探与化探,2021,45(1):245-251. (WEI Haimin,LI Xing,SUN Bangtao,et al. Exploration and analysis of geophysical methods in curtain grouting water control[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2021,45(1):245-251. (in Chinese))
- [7] 戴前伟,崔永生,韩行进,等. 流场法探测土石坝渗流矢量分布的有效性分析[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(1):270-276. (DAI Qianwei,CUI Yongsheng,HAN Xingjin,et al. Validity analysis of flow field method in detecting seepage vector distribution of earth-rock dam[J]. Coal Geology and Exploration,2021,49(1):270-276. (in Chinese))
- [8] 白广明,张守杰,卢建旗,等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):52-58. (BAI Guangming,ZHANG Shoujie,LU Jianqi,et al. Numerical modelling and verification of the dam leakage detection using the quasi-flowing field method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(1):52-58. (in Chinese))
- [9] 张再源,赵永辉,葛双成. 基于贝叶斯二维反演的地下连续墙隐患电阻率成像[J]. 地球物理学进展,2017,32(4):1868-1874. (ZHANG Zaiyuan,ZHAO Yonghui,GE Shuangcheng. Electrical resistance tomography for underground diaphragm wall defect based on Bayesian inversion[J]. Progress in Geophysics,2017,32(4):1868-1874. (in Chinese))
- [10] 余东,赵明阶,杨建国. 土石坝坝体渗漏通道的电阻率成像诊断试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(2):224-226. (YU Dong,ZHAO Mingjie,YANG Jianguo. Experimental research of electrical resistivity tomography detection method in leakage passage in earth-rock dam[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),2010,29(2):224-226. (in Chinese))
- [11] 庞琼,王士军,谷艳昌,等. 土石坝垂直防渗加固措施综述[J]. 水利水运工程学报,2014(4):28-37. (PANG Qiong,WANG Shijun,GU Yanchang,et al. A review of vertical anti-seepage reinforcement measures for earth and rockfilled dam[J]. Hydro-Science and Engineering,2014(4):28-37. (in Chinese))
- [12] 宗敦峰,刘建发,肖恩尚,等. 水工建筑物防渗墙技术60年II:创新技术和工程应用[J]. 水利学报,2016,47(4):483-492. (ZONG Dunfeng,LIU Jianfa,XIAO Enshang,et al. 60 years' perspective of the diaphragm wall technology for seepage control, Part II-Innovation and applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(4):483-492. (in Chinese))
- [13] 郭成超,杨建超,石明生,等. 高聚物超薄防渗墙施工设备及工艺改进[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):68-71. (GUO Chengchao,YANG Jianchao,SHI Mingsheng,et al. Improvement of construction equipment and technology of super-thin cut-off walls with polymer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(3):68-71. (in Chinese))
- [14] 谈叶飞,郭张军,陈鸿杰,等. 微生物追踪固结技术在堤防防渗中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):521-526. (TAN Yefei,GUO Zhangjun,CHEN Hongjie,et al. Study on application of microbial tracing consolidation technology in the seepage prevention of earth bank[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(6):521-526. (in Chinese))
- [15] 翟祝贺,盛亚龙,刘永川,等. 新型防水防渗材料在回龙抽水蓄能电站中的应用[J]. 新型建筑材料,2019,46(2):109-113. (ZHAI Zhuhe,SHENG Yalong,LIU Yongchuan,et al. The application of the new waterproofing and impermeable materials in the Huilong Pumped Storage Power Station[J]. New Building Materials,2019,46(2):109-113. (in Chinese))
- [16] JIANG Ningjun,KENICHI S,MATTHEW K. Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2017,143(3):04016100.
- [17] GAO Y,TANG X,CHU J,et al. Microbially induced calcite precipitation for seepage control in sandy soil[J]. Geomicrobiology Journal,2019,36(4):366-375.
- [18] LIANG Yue,WEI Qi,MA Chen,et al. Experimental study of the anti-seepage characteristics of Sidraton particles[J]. Materiali in Tehnologije,2020,54(6):829-835.

(收稿日期:2021-05-10 编辑:胡新宇)