

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.04.019

某特高土石坝防渗砾石土料含水率特性 及现场改良试验研究

郑 星^{1,2}, 张建博¹, 魏伟琼^{1,2}, 杨文超^{1,2}, 毛 华³, 段兴林³

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 贵州省岩土力学与工程安全重点实验室, 贵州 贵阳 550081;

3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘 要: 高海拔地区某 300 m 级特高土石坝防渗土料天然含水率偏低, 且高海拔气候对土料含水率有独特的影响, 需要进行含水率改良试验研究。通过对该特高土石坝防渗土料天然含水率及级配改良后成品土料含水率进行大量数据分析, 明确了土料进行含水率改良的必要性。针对高海拔防渗土料场气候特点, 探究了土料在曝露及覆盖条件下含水率的变化规律。现场进行了大规模含水率改良工艺试验, 采用了创造性的大体积料堆含水率取样方法, 在土料闷制过程中进行了大量的含水率试验工作。对比试验结果表明, 在覆盖条件下, 加水后的土料料堆表面失水速率和含水率影响深度均低于不覆盖条件。因此提出了后续实际生产过程加强土料料堆覆盖封闭, 从而避免水分过度损失的指导性建议。

关键词: 高海拔地区; 特高土石坝; 砾石土; 防渗土料; 含水率; 改良试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)04—0128—07

Experimental Study on Moisture Content Characteristics and In-situ Improvement of Impervious Gravel Soil Material of an Ultra-high Earth-rockfill Dam

ZHENG Xing^{1,2}, ZHANG Jianbo¹, WEI Weiqiong^{1,2}, YANG Wenchao^{1,2}, MAO Hua³, DUAN Xinglin³

(1. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. Province Key Laboratory of Geomechanics and Engineering Safety, Guiyang, Guizhou 550081, China;

3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming, Yunnan 650214, China)

Abstract: The natural moisture content of impervious soil material of a 300m ultra-high earth-rockfill dam in high altitude area is low, the high-altitude climate has unique impacts on the moisture content of soil material, so it is necessary to carry out experimental research on moisture content improvement. The necessity of soil moisture content improvement is clarified by analyzing numerous data on the natural moisture content of impervious soil and the moisture content of the finished soil after grading improvement for the project. According to the climate characteristics of the high-altitude impervious soil borrow, the variation pattern of soil moisture content under the conditions of exposure and coverage is explored. A large-scale moisture content improvement process test was carried out on site, and a creative moisture content sampling method of large volume pile was adopted. A large number of moisture content tests were carried out in the process of soil material stuffing. The comparative test results show that the moisture loss rate on the surface of soil pile and the influence depth of moisture content after adding water under the condition of covering is lower than that under the condition of exposure. According to the test results, the guiding suggestions for strengthening the covering and sealing of soil pile and avoiding the excessive loss of moisture in the subsequent actual production process are proposed.

Keywords: high attitude area; ultra-high earth-rockfill dam; gravel soil; impervious soil material; moisture content; improvement test

收稿日期: 2022-04-07

修稿日期: 2022-05-14

作者简介: 郑 星(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程岩土研究工作。E-mail: 714726255@qq.com

通讯作者: 魏伟琼(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程岩土研究工作。E-mail: 529940823@qq.com

某水电站工程位于高海拔、高寒地区,拦河大坝枢纽为300 m级特高土质心墙堆石坝。建设世界级高土石坝,防渗心墙对防渗土料的要求很高,除应满足防渗性能外,还应具有良好的力学性能,使心墙与坝壳堆石体的变形相协调,改善心墙的应力和变形。世界上已建和在建的200 m以上高土石坝,防渗体基本上都采用砾石土等宽级配土料。砾石土在自然界广泛分布,压实后具有密度大、抗剪强度高、变形模量大、防渗性能好等工程特性^[1-5]。以冰碛土、风化石料、冲洪积、残坡积砾石土等为代表的宽级配砾质土,拓宽了高土石坝防渗土料的选择范围,克服了纯黏土料作为高坝防渗料的前述局限,使土石坝可以更好地发挥“就地取材”的优势,进一步促进了高土石坝的发展^[4]。

然而,对于高土石坝来讲,由于土料用量大、要求高,天然砾石土料往往难以全面达到使用要求,工程实践中往往需要采取措施进行改性处理后才予以使用^[4]。天然砾石土料存在的缺陷一般来自两个方面:级配和含水率。砾石土料的级配和含水率决定了土料填筑后的密实度,进一步决定了防渗心墙及渗透性能,是决定其作为防渗材料能否支撑特高土石坝建设的重要指标。因此,对天然砾石土料的改良基本包括两个方面:其一为土料级配改良,其二为土料含水率改良。砾石土料的含水率对于其压实特性至关重要。当填筑含水率过低,防渗体浸水后容易产生较大附加沉陷,且碾压时容易出现松土层,碾压体空隙大,抗渗性差;填筑含水率过高,碾压时容易出现“弹簧土”,土不易被压实,防渗性能较好,但强度过低^[6-7]。因此,必须保证土料填筑时的含水率位于最优含水率附近,以获得最佳的压实度。绝大多数情况下,天然状态下的土料含水率不会恰好满足设计要求,大多数工程都会对土料含水率进行改良处理。一般来说,土料的含水率不是偏高就是偏低。对于天然含水率偏高的情况,一般采取料场井点降水^[8]、薄层通风翻晒^[8-13]、犁耙调整^[8]、平面薄层开采^[13-14]等方式,糯扎渡^[12]、两河口^[11,15]、双江口^[16]等工程的特高土石坝还采用了掺砾措施,同时对土料级配和高含水率进行改良。对于天然含水率偏低的情况,苗尾^[9,17]采用了料场挖沟补水及摊铺人工补水两种方式提高土料含水率,一些工程采用了自卸车堆土牛、坡面人工补水、洛阳铲钻孔人工灌水等方式对土料进行补

水^[6,18-20],糯扎渡^[12]、两河口^[15,20-21]、双江口^[16]等工程在掺砾过程中向砾石表面预先补水,或者在土料含水率偏低时按比例分别向砾石和土料人工补水等措施调整含水率。

某水电站拦河大坝枢纽为300 m级特高土石坝,防渗土料主要来源于第四系冲洪积、坡积宽级配碎石土,天然状态土料具有级配偏粗、含水率偏低的缺陷,即便经过级配改良工艺处理,获得的成品土料含水率仍然不满足设计要求。为此,在防渗料场现场开展了大规模含水率改良试验研究,对天然状态土料、成品土料含水率进行分析,探究了土料的含水变化特性,系统开展了土料自动化加水、堆存闷制等试验研究,通过对大量试验数据进行总结分析,对该工程防渗土料含水率改良工艺进行了客观评价,所取得的成果对该300 m级土石坝后续施工具有指导意义。

1 防渗土料含水率特性

1.1 天然土料含水率特性

在勘察阶段,对某工程防渗土料长开展了大口径钻孔取样,共计获得含水率试验样品403组(按实际试验组数统计)。天然原级配403组含水率试验结果显示,土料的天然含水率范围在1.1%~8.7%,平均值为3.7%,天然含水率的概率分布统计见表1。天然原级配土料偏粗,最大粒径达到500 mm以上,含水率的计算采用了加权平均算法,即将天然土料各粒组颗粒的含水率与该粒组所占百分比相乘计算总体含水率,60 mm以上粗颗粒的含水率按0%考虑。从结果可见,原级配土料的含水率大多集中在2%~4%之间,占60%以上;其次集中在4%~6%之间,占30%左右。本工程防渗土料的最优含水率在6%~7%之间,因此天然状态下土料的含水率偏低,加上土料级配偏粗,不满足特高土石坝防渗材料设计要求。

大孔径取样的最大深度达到40 m。从图1可见,天然状态下土料的含水率与取样深度相关性不大,整个料场土料含水率分布在深度上相对均一。

表1 原级配土料天然含水率分布统计

含水率/%	<2	2~4	4~6	6~8	>8
样本数/组	16	248	122	15	2
分布概率/%	4.0	61.5	30.3	3.7	0.5
累计概率/%	4.0	65.5	95.8	99.5	100.0

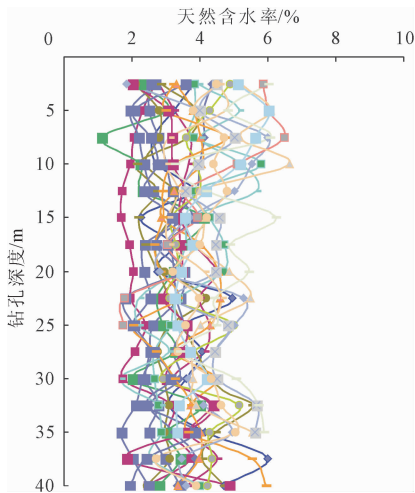


图 1 天然含水率随深度分布关系

1.2 级配改良土料含水率特性

由于本工程防渗土料存在级配偏粗的缺陷,现场采用了剔除超径颗粒的级配改良工艺进行处理,即将原级配土料中 60 mm 以上颗粒进行剔除,经过处理后获得的 60 mm 以下粒径土料,其级配满足特高土石坝的设计要求。本次试验现场对获得的 60 mm 以下土料进行了 282 组合含水率试验(按实际试验组数统计),级配改良后含水率概率分布统计见表 2。

表 2 级配改良后土料含水率分布统计

含水率/%	<2	2~4	4~6	6~8	>8
样本数/组	0	27	161	86	8
分布概率/%	0.0	9.6	57.1	30.5	2.8
累计概率/%	0.0	9.6	66.7	97.2	100.0

经过级配改良工艺处理, <60 mm 土料含水率范围在 2.8% ~ 9.3%, 平均值为 5.6%, 平均值较天然含水率提高了 1.9%。处理后的土料含水率主要集中在 4% ~ 6% 之间, 占 57.1%, 其次在 6% ~ 8% 之间, 占 30.5%。由于本工程所用 <60 mm 土料的最优含水率集中在 6.3% ~ 7.0% 之间, 相较而言经级配改良后获得的 <60 mm 土料含水率整体仍然偏低, 不满足特高土石坝土料设计要求, 因此必须对土料进行含水率改良。

2 土料含水率变化规律

2.1 料场天气数据

试验现场每天对料场的天气情况进行了记录。在图 2 中给出了 10 月 26 日、27 日、28 日三天的天气情况, 在这段时间内, 现场对 <60 mm 土料的含水率

变化规律进行了探究性试验。从图 2 可见, 由于料场位于高海拔、高寒地区, 10 月份每日温差及相对湿度差均较大, 晚间和日间温差在 25℃ 左右。上午 9:00 左右的相对湿度在 70% ~ 80% 之间, 日出之后相对湿度快速下降, 至下午 14:00 相对湿度只有 20% 左右, 日间空气相对比较干燥。由于早晚温差大, 相对湿度变化幅度大, 空气干燥, 土料表现出含水率损失快、表面风干迅速等特点。鉴于此, 现场通过试验探究了土料在此天气条件下的含水率变化规律。

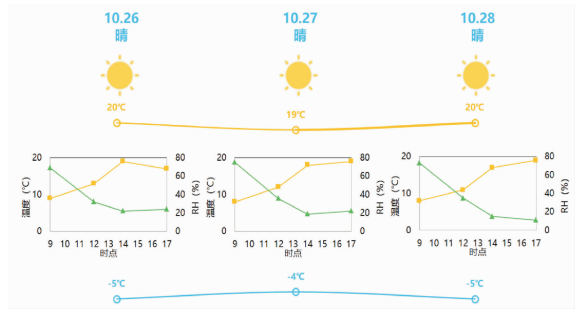


图 2 料场短时天气情况

2.2 曝露条件下含水率变化规律

原级配土料经过级配改良工艺处理后, 60 mm 以上粗颗粒被剔除, 60 mm 以下成品土料进行露天堆存。由于现场日照强、相对湿度低、空气干燥, 料堆表面水分损失较快。现场在 10 月 28 日对成品料堆的表面失水情况进行了观察测量。现场将两堆曝露 48 h、表面已经失水的料堆的表面铲开, 使其曝露出内部未失水的、颜色对比鲜明的土料, 然后开始计时, 观察新鲜土料表面在失水多长时间之后表面颜色与周围土料一致。经过现场观察测量, 新鲜土料表面在晴朗、有微风、温度为 18℃、相对湿度为 15% 条件下, 只需经过 17 min 后即失水干燥变色与曝露 48 h 的土料表面无异, 见图 3、图 4。

现场对分别曝露了 24 h、48 h、72 h 的料堆表面失水干燥影响深度进行了测量, 并对表层失水干燥土料和失水层下部土料取样进行含水率试验, 测量及试验结果见表 3。从测试结果可见, 成品料堆在 2.1 小节中的天气情况下, 曝露 24 h 表面形成约 1.0 cm ~ 1.5 cm 的失水干燥层, 该层土料的含水率降低到 1% 以下, 该失水层以下的土料则基本保持初始含水率; 曝露 48 h 之后, 失水干燥层的厚度略有增加, 达到 2 cm 左右, 2 cm 以下的土料基本保持初始含水率。曝露 72 h 之后, 料堆表面失水层的厚度增加到约 2.5 cm, 该深度以下的土料保持初始含水率。可见, 所述天气条件下, 料堆曝露 3 d 将影响料

堆表面 3 cm 深度范围内土料的含水率。

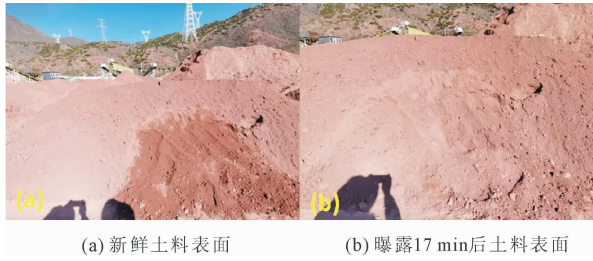


图 3 第 1 次料堆表面失水观察试验

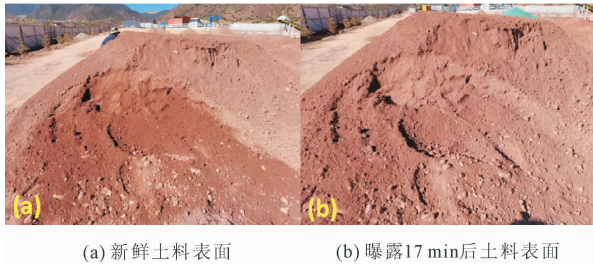


图 4 第 2 次料堆表面失水观察试验

表 3 成品料堆 (<60 mm 土料) 在曝露条件下失水情况

料堆编号	初始含水率/%	曝露时间/h	失水层深度/cm	取样位置	含水率/%
1	8.0	24	约 1.0 ~ 1.5	料堆表面 1 cm	0.6
				料堆表面 1 cm 以下	8.0
2	6.9	48	约 1.5 ~ 2.0	料堆表面 2 cm	0.5
				料堆表面 2 cm 以下	6.8
3	5.1	72	约 2.5 ~ 3.0	料堆表面 3 cm	0.8
				料堆表面 3 cm 以下	5.2

2.3 曝露及覆盖条件下含水率变化规律

现场对 60 mm 以下成品土料进行露天堆存,对有覆盖及无覆盖情况下,料堆的水分损失情况进行了对比试验研究。选取了来自料场不同位置的两堆 <60 mm 的成品料进行 2 场对比试验。首先分别将两堆土料用装载机拌和均匀,使其含水率分布均匀,再将其平均分为两个小料堆,对其中一个料堆分别用防水篷布和彩条布进行覆盖,另一个料堆不进行覆盖,见图 5。分别在第 1、3、5、7、9 天对两堆土料的表面、8 cm 深度处、20 cm 深度处取样进行含水率检测。

试验时的天气条件基本稳定如图 2 所示。试验结果见表 4、图 6、图 7。从试验结果可以看出,在相同的外部条件下,同一深度处的土料,覆盖条件下其含水率均高于曝露条件下的含水率。在第 1 场试验中,料堆采用防水篷布覆盖(覆盖效果较好),覆盖料堆 8 cm 和 20 cm 深度处的土料含水率在 5 d 之内

基本不变,5 d 之后才逐渐降低。而曝露料堆的 8 cm 和 20 cm 深度处的土料含水率从虽然从一开始就逐渐降低,但 5 d 之内曝露料堆与覆盖料堆同深度的含水率基本接近,5 d 之后曝露料堆相同深度含水率降低的幅度大于覆盖料堆。在第 2 场试验中,料堆采用彩条布覆盖(覆盖效果较差),覆盖料堆和曝露料堆的相同深度处土料的含水率均从一开始就逐渐降低,但覆盖料堆相同深度土料的含水率始终高于曝露料堆。在试验进行 5 d 以后,两场试验土料的天然含水率均呈现出“覆盖 20 cm 处 > 覆盖 8 cm 处 > 不覆盖 20 cm 处 > 不覆盖 8 cm 处 > 覆盖表面 > 不覆盖表面”的规律。

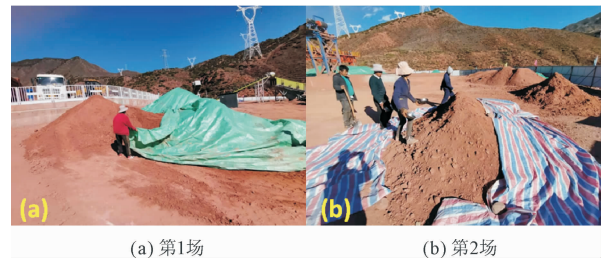


图 5 成品料曝露及覆盖条件下含水率损失

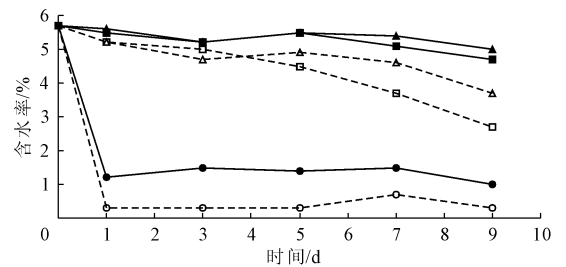


图 6 第 1 次覆盖/不覆盖料堆天然含水率对比试验结果

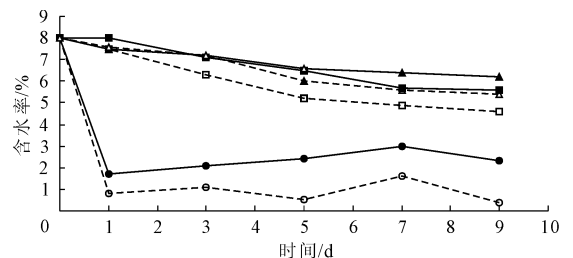


图 7 第 2 次覆盖/不覆盖料堆天然含水率对比试验结果

不管是否采取覆盖措施,料堆表面(约 2 cm 深度)的含水率都降低很快。1 d 以后覆盖料堆表面含水率降低了 78% 以上,不覆盖料堆表面含水率则降低了 90% 以上。9 d 以后,在覆盖良好的条件下

(第 1 场), 8 cm 和 20 cm 深度处土料含水率分别降低了 12.3% 和 17.5%, 而不覆盖条件下则相应降低了 35.1% 和 52.6%。可见, 有效的覆盖能大大降低成品料堆的水分损失。

3 含水率现场改良试验研究

3.1 含水率改良工艺

现场采用皮带机送料、自动化喷水的方式对土

料进行补水。检测 <60 mm 成品料的初始含水率, 在加水前对土料进行全料击实试验, 获得土料的最优含水率。将皮带机送料强度、土料初始含水率、拟达到目标含水率等数据输入自动加水控制系统, 土料以一定的来料强度 (t/h) 输送到补水喷头处, 加水系统根据皮带机来料强度、初始含水率、目标含水率, 自动计算出相应的补水强度 (t/h 或 m³/h), 通过 4 个喷头喷洒在皮带机上的土料表面, 完成补水过程, 见图 8。

表 4 成品料堆覆盖 - 不覆盖条件下含水率损失统计

场次	时间 /d	不覆盖条件下含水率						覆盖条件下含水率					
		表面 /%	降低百分比 /%	8 cm 深处 /%	降低百分比 /%	20 cm 深处 /%	降低百分比 /%	表面 /%	降低百分比 /%	8 cm 深处 /%	降低百分比 /%	20 cm 深处 /%	降低百分比 /%
第 1 场	0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0
	1	0.3	94.7	5.2	8.8	5.2	8.8	1.2	78.9	5.5	3.5	5.6	1.8
	3	0.3	94.7	5.0	12.3	4.7	17.5	1.5	73.7	5.2	8.8	5.2	8.8
	5	0.3	94.7	4.5	21.1	4.9	14.0	1.4	75.4	5.5	3.5	5.5	3.5
	7	0.7	87.7	3.7	35.1	4.6	19.3	1.5	73.7	5.1	10.5	5.4	5.3
	9	0.3	94.7	2.7	52.6	3.7	35.1	1.0	82.5	4.7	17.5	5.0	12.3
第 2 场	0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0
	1	0.8	90.0	7.5	6.3	7.6	5.0	1.7	78.8	8.0	0.0	7.5	6.3
	3	1.1	86.3	6.3	21.3	7.2	10.0	2.1	73.8	7.1	11.3	7.2	10.0
	5	0.5	93.8	5.2	35.0	6.0	25.0	2.4	70.0	6.5	18.8	6.6	17.5
	7	1.6	80.0	4.9	38.8	5.6	30.0	3.0	62.5	5.7	28.8	6.4	20.0
	9	0.4	95.0	4.6	42.5	5.4	32.5	2.3	71.3	5.6	30.0	6.2	22.5



(a) 补水系统

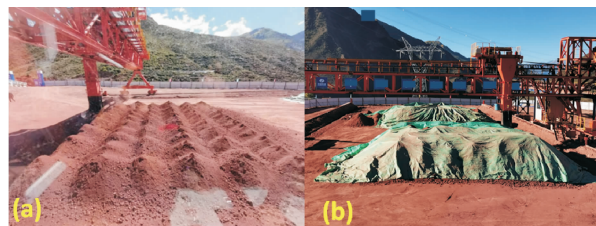
(b) 土料表面喷水

图 8 土料含水率改良工艺

加水完成的土料通过堆料机皮带运输系统运送至堆料场地上方的布料机上, 通过垂向的下料管以自由落体方式落至地面形成大体积料堆。堆料机通过开动大车及小车调整土料的落点进行堆料, 采用菱形料堆的形式堆存加水后的成品土料。土料堆存完毕后, 采用防水篷布进行覆盖, 随即进入闷制阶段。土料堆存闷制情况见图 9。

在土料闷制过程中, 每隔一段时间对堆存的料堆表面及内部取样进行含水率检测, 探究料堆表面及内部土料含水率随时间的变化规律。对料堆取样进行含水率检测的取样方式为: 料堆表面的土料, 只取表面约 1 cm ~ 2 cm 厚度的薄薄一层土料进行检测; 对料堆内部的土料, 从料堆侧面不同位置, 水平往内部按不同深度进行取样, 现场按 20 cm、50 cm、内部

约 2 m 三个深度进行取样。20 cm、50 cm 深度取样采用人工挖取, 内部约 2 m 处取样采用独创的双管取样法, 即用外力 (装载机) 将大口径钢管强制插入料堆内部至预定取样深度再将其拔出形成取样空间, 采用小口径钢管再次顶至预定深度取样, 见图 10。



(a) 菱形料堆

(b) 覆盖闷料

图 9 补水后土料堆存



(a) 双管取样法

(b) 获取样品

图 10 含水率试验取样

3.2 含水率改良试验成果及分析

现场共进行了 3 场加水及土料闷制试验,加水后土料的闷制试验时间持续了 12 d~14 d,三场土料闷制试验的料堆情况及含水率取样方式见表 5。其中,对第 1 场、第 2 场闷制试验的料堆进行了全覆盖,并且只对料堆表面及内部深处进行取样。对第 3 场闷制试验的料堆,将其一半覆盖、一半曝露,并分别对其表面、20 cm 深处、50 cm 深处、内部 2 m 深处取样进行含水率检测,以进行对比。

现场共进行了 580 组含水率试验。根据试验结果,绘制出料堆闷制过程中不同深度处土料含水率随时间的变化关系,见图 11—图 13。

表 5 土料闷制试验场次、料堆情况及含水率试验取样方式

试验场次	持续时间 /d	取样间隔 /d	料堆覆盖情况	含水率试验取样位置
第 1 场	14	1~2	全覆盖	料堆表面、内部 2 m 左右
第 2 场	12	1~2	全覆盖	料堆表面、内部 2 m 左右
第 3 场	12	2~3	覆盖 + 不覆盖	料堆表面、20 cm 深处、50 cm 深处、内部 2 m 深处

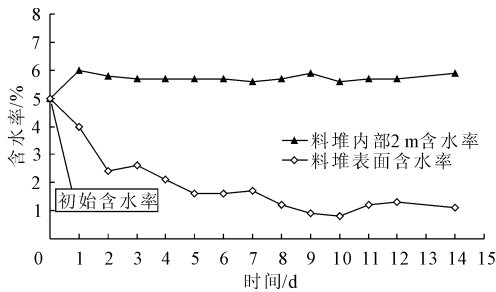


图 11 第 1 场加水闷料试验土料含水率随时间变化关系

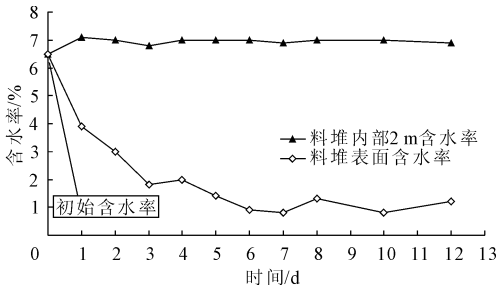


图 12 第 2 场加水闷料试验土料含水率随时间变化关系

从上述土料加水闷制试验成果,可以得出以下结论:

(1) 土料加水完毕,闷制 3 d~4 d 左右内部含水率基本稳定在某一定值附近,仅出现微小的波动变化。图 11—图 13 中的含水率是从料堆侧面不同部位取样的平均值,数值波动不大,表明土料闷制 3

d~4 d 后内部含水率趋于均匀,可以上坝使用。

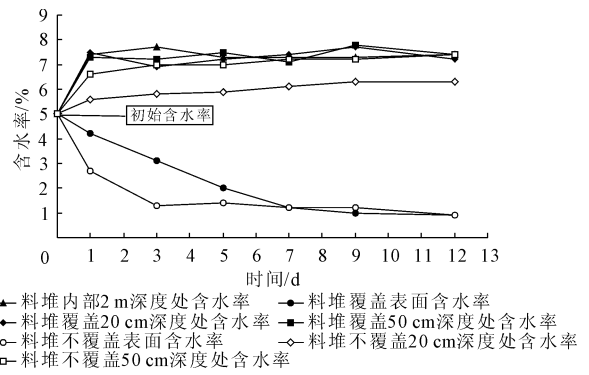


图 13 第 3 场加水闷料试验覆盖及不覆盖条件下含水率变化

(2) 在覆盖条件下,料堆表面的土料含水率在 6 d~8 d 降低至 1% 左右,表面含水率最终稳定在 1% 左右上下小幅变化。而从第 3 场闷制试验覆盖和不覆盖条件下的对比试验看,在不覆盖条件下,仅需 3 d 时间料堆表面的土料含水率即可降低至 1% 左右,不覆盖时料堆表面含水率损失很快。

(3) 料堆在覆盖条件下闷制,随着闷制时间增加,20 cm 深处、50 cm 深处、内部 2 m 深度处的含水率基本保持一致(见图 13)。这表明在覆盖条件下,距料堆表面 20 cm 深度以上,土料的含水率基本不会受到外部条件影响。由于未在更浅的深度取样,实际影响深度应该更小。若料堆在不覆盖条件下闷制,随着闷制时间增加,50 cm 深处、内部 2 m 深度处的含水率的含水率趋于一致,而 20 cm 深度处的土料含水率则低于前两者约 1% 左右(见图 15)。这表明在不覆盖条件下,距料堆表面 20 cm 深度以内的土料含水率会受到外部条件的影响。

(4) 从第 3 场闷制试验结果看出,土料闷制相同的时间,料堆同一深度位置的土料,在覆盖条件下其含水率均要高于不覆盖条件下的含水率。由于本工程防渗土料具有水分蒸发快,在实际施工过程中应采取必要的覆盖措施以防止水分流失。

4 结 论

本文基于高海拔、高寒地区某水电站防渗土料的天然含水率缺陷分析,对土料在当地气候条件下的含水率变化规律进行了探究,并针对土料含水率改良进行了大量试验研究,主要结论如下:

(1) 土料天然级配偏粗、天然含水率偏低,在采用级配改良工艺处理后,粒径 < 60 mm 土料的含水率整体仍然偏低,不满足 300 m 及特高土石坝防渗

土料设计要求,需采用适宜的措施进行含水率改良。

(2) 防渗土料场位于高海拔高寒地区,气候情况表现出早晚温差大、相对湿度变化幅度大、空气干燥等特点,造成成品土料表面风干迅速、失水严重,露天堆存情况下曝露 3 d,表层深度 3 cm 范围内的土料基本处于完全干燥状态。实际施工时对土料应采取覆盖遮挡等措施以减少水分损失。

(3) 含水率改良工艺可以有效、可靠地实现对土料进行补水。补水后的土料经过堆料机以大体积料堆方式进行闷制,可以有效实现土料含水率的均匀化。

参考文献:

- [1] 高 鹏,吴世勇. 两河口水电站心墙防渗料掺砾试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):64-66.
- [2] 张宗亮,冯业林,相 彪,等. 糯扎渡心墙堆石坝防渗土料的设计、研究与实践[J]. 岩土工程学报,2013,35(7):1323-1327.
- [3] Ma H Q, Chi F D. Major technologies for safe construction of high earth-rockfill dams[J]. Engineering, 2016,2(4):498-509.
- [4] 李永红. 特高土石坝防渗土料改性研究与实践[C]//四川省水力发电工程学会 2018 年学术交流会暨“川云桂湘粤青”六省(区)施工技术交流会论文集. 四川省水力发电工程学会,2018.
- [5] 石 云,何昌荣,徐丽丽. 掺砾改性土心墙料的特性试验研究[J]. 路基工程,2009(6):140-141.
- [6] 王晓栋. 浅谈山口水电站粘土心墙土料含水率的控制[J]. 广西水利水电,2014(3):27-29.
- [7] United States Department of Agriculture, Part 645 Construction Inspection National Engineering Handbook[M]. Washington DC, USDA, 2015.
- [8] 何福江,郭 瑞,张雨游. 土料含水率调整快速施工关键技术研究[J]. 四川水力发电,2013,32(5):27-28.
- [9] 安可君,胡永福. 苗尾水电站大坝心墙防渗土料开采施工工艺研究[J]. 安徽农业科学,2014,42(30):10772-10776.
- [10] 李朝政,李 伟,沈 蓉,等. 苗尾水电站高含水率心墙防渗土料碾压试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(2):158-163.
- [11] 王小二. 双江口水电站大坝心墙砾石土料掺和方案选择及掺和场设计[J]. 水电站设计,2009,25(1):42-45.
- [12] 杨晓鹏,韩建东,钟贤五. 糯扎渡水电站心墙土料掺砾工艺及质量控制技术[J]. 西北水电,2012(S2):101-103.
- [13] 张燕燕,姚林章. 亚热带山地季风气候地区红黏土含水率控制方法的研究[J]. 施工技术,2019,48(S1):1418-1420.
- [14] 梁为邦. 含水率对黏性土力学性质影响研究及施工对策[J]. 人民珠江,2017,38(2):72-77.
- [15] 王森荣. 两河口砾石土心墙坝施工技术综述[C]//四川省水力发电工程学会 2018 年学术交流会暨“川云桂湘粤青”六省(区)施工技术交流会论文集. 四川省水力发电工程学会,2018.
- [16] 边晓明,刘小翠,雷敬伟. 砾石土心墙堆石坝防渗料掺和工艺研究[J]. 水电与新能源,2011(3):22-24,26.
- [17] 黄 斌. 苗尾大坝砾质土填筑料上坝前补水方案比选研究[J]. 水利水电快报,2021,42(S1):75-77.
- [18] 罗小辉,左建江,陈宏兵. 轻粉质壤土筑坝施工中土料制备工艺的研究[J]. 广东水利水电,2005(5):78-79,81.
- [19] 严力江. 水库大坝心墙填筑土料制备控制要点[J]. 水利建设与管理,2013,33(7):24-25,28.
- [20] 魏 雄,武 波,杨晓鹏,等. 大坝心墙砾石土料制备动态调整质量控制方法[J]. 西北水电,2019(3):61-64,67.
- [21] 徐 亮,宋建坤. 两河口水电站心墙料掺砾工艺研究及现场碾压试验[J]. 水电站设计,2014,30(3):60-67.