

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220919

# 300 m 级土质心墙堆石坝防渗砾石土料加水工艺试验

郭 勇<sup>1</sup>, 张建博<sup>1</sup>, 张 胜<sup>1</sup>, 胡永福<sup>2</sup>, 王照英<sup>2</sup>

(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. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

**摘要:** 针对某 300 m 级特高土质心墙堆石坝的天然宽级配砾石防渗土料存在“天然含水率低”的特点, 进行了“皮带机加水+堆料机堆料+料仓闷料”工艺和“分层摊铺+管网加水+料仓闷料”工艺的现场对比试验, 验证相关加水工艺的合理性、可行性。试验结果表明, 皮带机加水工艺较管网分层加水工艺具有优势, 主要表现在皮带机自动化加水系统能实时、高效、精准地实现土料自动化加水; 补水后的土料经过皮带运输由堆料机堆料, 可实现自动化均匀堆料; 土料加水完毕, 闷制 3~4 d 后内部含水率基本稳定, 闷料所需时间短; 并提出了皮带机加水工艺的改进措施, 改进后的“皮带机加水+堆料机堆料+料仓闷料”工艺可为类似土石坝的土料含水率调整提供参考。

**关键词:** 300 m 级土质心墙堆石坝; 天然宽级配砾石土; 防渗土料改性; 提高含水率; 工艺流程

**中图分类号:** TV22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0100-03

## 1 工程概况

某水电工程大坝为砾石土心墙坝, 最大坝高为 315 m, 工程选用的防渗土料是天然宽级配砾石土, 存在“粗颗粒含量较多、粘粒含量偏少、均匀性较差和含水率低”的特点, 经过筛分、混合搅拌后解决了土料级配和不均匀的问题。但防渗土料天然含水率偏低, 室内试验研究表明需加水 3%~6% 方能满足设计要求<sup>[1-3]</sup>, 加水量较大、土料上坝强度也较大, 须解决传统加水工艺中加水不均匀, 加水、闷制时间加长等问题<sup>[4]</sup>。鉴此, 本文结合土料特性和工程设计指标要求, 通过对加水量分析、加水时序选择、提高含水率措施的比选, 提出了该工程防渗土料含水率提高的措施; 为了验证相关提高含水率工艺的可靠性、可行性, 开展了“皮带机加水+堆料机堆料+料仓闷料”和“分层摊铺+管网加水+料仓闷料”加水工艺的现场对比试验, 相关结论在天然宽级配砾石土增加含水率的工艺和方法研究方面具有一定的创新性。

## 2 两种加水工艺设计

### 2.1 加水试验工艺流程

(1) 皮带机加水+堆料机堆料+成品料堆闷制工艺。结合堆料工艺, 在运输成品土料的皮带机上设置喷洒设备, 通过中央控制系统控制自动

补水系统在带料皮带机上洒水, 达到自动化、定量补水目的。为了减少土料闷制时间, 堆料设备采用桥式堆料机, 加水后土料混合物经过堆料机(减少了摊铺设备的碾压)同时进入料仓闷料。

(2) 堆料仓分层摊铺+管网喷洒加水+成品料堆闷制工艺。结合堆料仓的设计, 在土料堆料仓上部布置喷洒管网, 均布喷头, 由自动化补水系统控制喷头采用雾状喷洒水, 土料摊铺采用后退法, 每层土料摊铺完成后进行统一喷洒掺水, 然后再进行上层土料铺摊。

两种加水工艺的具体流程见图 1。

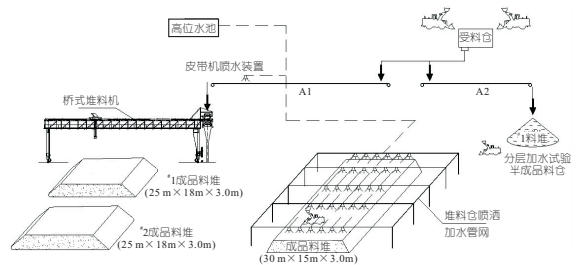


图 1 加水试验工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water test process

### 2.2 皮带机自动化补水系统工作原理

皮带机自动化补水系统在使用前需将土料的供料强度和最优含水率两个参数输入加水控制系统。设备启动运行后在物料运输过程中, 通过皮带机上的实时含水率检测装置对物料含水率进行监测, 将土料的含水率数据反馈给控制系统, 控制

收稿日期: 2022-05-05, 修回日期: 2022-05-23

作者简介: 郭勇(1981-), 男, 高级工程师, 研究方向为水电水利工程施工组织设计及管理, E-mail: guoyong@163.com

系统根据接收的含水率数据自动计算所需的加水强度(或加水量),然后按程序依次启动系统的水泵电机、电动调节阀、电磁阀、喷水装置,水通过喷水装置喷洒在物料表面,达到对物料的补水操作。在喷水过程中,控制系统通过流量计对喷水装置的喷洒流量数据进行实时监控,当物料流量或含水率发生变化时,控制系统会通过控制电动调节阀来控制喷水的流量,最终达到对物料进行精确补水的目的。

自动化补水系统中的实时含水率检测装置采用的是一种改进的在线水分测量仪,试验开始前需采用该设备对不同含水率的土料进行  $n$  次含水率检测,得到大量数据信号值同时进行传统实验室含水率检测,在控制系统中建立不同含水率土料的数据信号值与实际含水率的关系模型曲线,在应用过程中针对不同来料初始含水率进行曲线选择即可。补水系统工艺流程见图 2。

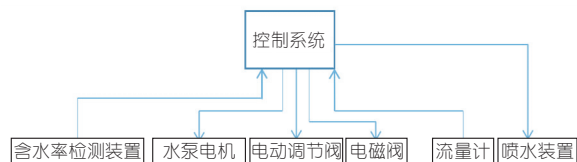


图 2 补水系统工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart of water refill system

### 2.3 管网分层加水工作原理

土料堆料仓分层摊铺管网喷水装置及操作过程见图 3。其中,加水管网(含喷头)由桁架顶部的电葫芦带动可以沿着竖向滑轨(立柱)上下移动,在土料摊铺时升高留出机械操作工作空间,加水时降落高度贴近土料实现分层均匀加水。

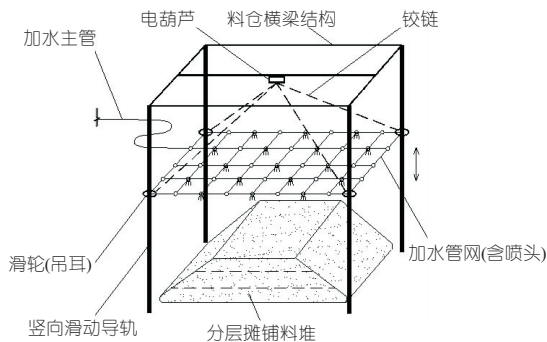


图 3 砾石土料堆料仓分层摊铺管网喷水装置操作过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of operation process of water spraying device in gravel silo

## 3 现场试验实施及结果

### 3.1 皮带机加水及闷料试验实施

现场共完成 3 场堆料机加水试验及土料闷制试验。3 次加水堆料试验分别完成堆料约 600、

620、1 100 t。

本工程防渗土料天然宽级配砾石土为非均匀的粗细颗粒混合物,设备调试阶段发现皮带机自动化补水系统的实时含水率检测设备(设置在皮带机上)的数据波动较大,尤其是土料来料的 P5 (粒径  $>5$  mm 颗粒含量)含量变化较大时测得数据较传统实验室检测结果误差较大。因此,皮带机加水正式试验时采用传统实验室取样法检测天然含水率。试验开始前将上料皮带的供料强度、土料的初始含水率、最优含水率等参数信息输入自动化补水控制设备,程序即自动算出所需的加水强度(或加水量),自动对土料进行加水操作。加水系统的补水喷头安装在皮带机上,土料经过搅拌机搅拌后以一定的运输强度(t/h)输送到皮带机上通过补水喷头,加水系统根据皮带机来料强度(t/h)及初始含水率,算出相应的补水强度(t/h 或  $m^3/h$ )后通过 4 个喷头喷洒在皮带机上的土料表面,完成补水过程。

补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,通过垂向的下料斗落至地面形成料堆。布料机通过开动大车及大车上的小车调整土料的落点进行堆料。堆存完毕后采用防水篷布进行覆盖,随即进入土料闷制阶段。在土料闷制过程中,每隔一段时间(1 d 或 2 d)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含水率随时间的变化规律。

### 3.2 皮带机加水及闷制试验成果

皮带机加水后土料的闷制试验时间持续 12~14 d,共进行了 580 组合含水率试验。3 场土料闷制试验的料堆情况及含水率取样方式见表 1。其中,对第 1、2 场闷制试验的料堆进行全覆盖,并只对料堆表面及内部(2 m 深处)进行取样;对第 3 场闷制试验的料堆,将其 1/2 覆盖、1/2 暴露,并分别对其表面、20 cm 深处、50 cm 深处、内部 2 m 深处进行取样检测含水率。

表 1 土料闷制试验场次、料堆情况及含水率试验取样方式  
Tab. 1 Soil material frowning test site, material pile condition and water content test sampling method

加水闷制试验场次	试验持续时间	料堆覆盖情况	含水率试验取样位置
第 1 场	14 d, 每 1~2 d 取样	全覆盖	料堆表面、料堆内部 2 m 左右
第 2 场	12 d, 每 1~2 d 取样	全覆盖	料堆表面、料堆内部 2 m 左右
第 3 场	12 d, 每 2~3 d 取样	覆盖+不覆盖	料堆表面、20 cm 深处、50 cm 深处、内部 2 m 深处

根据试验结果,绘制加水料堆不同部位土料含水率随时间的变化关系,见图 4。由图 4 可看出,土料加水完毕,闷制 3~4 d 左右内部含水率基本稳定在某一数值附近,仅出现微小的波动变化。

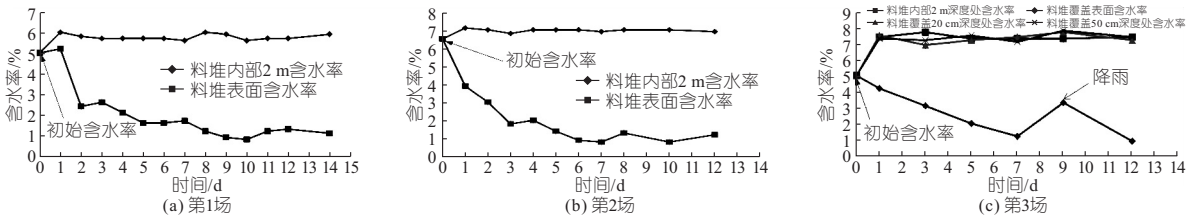


图 4 第 1~3 场加水闷料试验土料含水率随时间变化关系(覆盖条件下)

Fig. 4 Variation of soil moisture content with time in the first, second and third water-adding test (under mulching condition)

现场对比理论加水量、加水系统水箱的实际出水量、流量计读数,加水系统实际加水量与理论计算加水量差别对比见表 2。根据数据分析,加水系统实际加水量略大于理论加水量,由此造成土料含水率差值理论上在+0.04%~+0.30%之间,但由于皮带机返程皮带水造成加水量损失,导致实际实施中堆料机加水后闷料试验所测得的土料含水率略低于目标含水率+0.6%~+0.8%。因此,认为皮带机上布置喷头对土料进行加水是可以实现的,且加水量也较准确。

表 2 堆料机加水试验情况

Tab. 2 Water filling test of stoker

来料强度	初始含水率/%	目标含水率/%	理论计算加水量	实际流量计显示加水量	差值	加水量差值对含水率影响/%
200	4.0	4.5	0.96	1.14	0.18	+0.09
200	4.0	5.0	1.92	2.00	0.08	+0.04
200	5.0	7.0	3.81	4.22	0.41	+0.22
200	5.0	8.0	5.71	6.22	0.51	+0.27
100	6.0	10.0	3.77	3.84	0.07	+0.07
100	6.0	11.0	4.72	5.00	0.28	+0.30

注:来料强度、理论计算加水量、实际流量计显示加水量、差值单位均为 t/h。

### 3.3 管网分层加水及闷料试验实施

管网分层加水设备采用型号为 JS-Zn/554-B40 型喷雾加水设备,并采用桁架式喷水管网,管网上布置 9 排共计 81 个喷头进行加水。分层加水铺料场长 30 m,宽 15 m,每层铺料厚度为 30 cm,实际铺料范围长 28 m,宽 14 m。土料采用装载机有料摊铺,辅以人工找平。现场对分层加水设备系统进行测试,发现喷出的水呈雾状。在不停机的情况下加完水需要 10 h 左右,加水效率很低。

为了继续开展分层加水试验,现场在洒水车上安装流量计,采用水车对土料进行加水。根据土料松铺密度、铺料面积和厚度、初始含水率计算每层土料的加水量,加水后采用防水篷布覆盖进行闷料。

### 3.4 管网分层加水及闷料试验成果

现场进行了 1 次分层加水试验,铺料厚度为单层 30 cm。加水完毕后采用塑料篷布覆盖进行土料闷制,每隔 1 d 对土料进行取样测试其内部含水率。现场连续 4 d 挖坑取样进行含水率检测,发现在仅摊铺一层土料的情况下,土料表面很

湿润,而 20 cm 深度处的土料的含水率与初始含水率相比几乎不变,水体很难完全均匀渗透至土体内部,因此未进行第二层土料试验。

## 4 皮带机加水工艺的改进

堆料机堆料过程中,由于土料是从约 6 m 高的布料机上以自由落体方式落下形成料堆,土料中的部分粗颗粒在下落过程中会向料堆四周滚落,造成粗细颗粒离析现象。

现场通过对堆料机下料斗的出口进行缩口处理、在伸缩漏斗底部设置料位计来探测卸料的高度,以控制伸缩漏斗的升降来控制物料的下落高度,可以较大程度地避免物料分离。而且现场通过控制堆料机的运行方式,料堆采用分层堆存,分层高度按 0.5 m 进行控制,形成“人字形料堆”。当每层堆料至设计长度后,通过卸料小车行走,调节堆料平面位置,紧邻已堆存的一条小“人字形”料堆进行堆料。随着卸料小车行走,堆料机往复运行,每一层形成波浪式的小料堆,通过增加料堆层数的方法,降低每层料堆的高度,每完成一层堆料,料位计可根据探测的料堆高度,伸缩漏斗可收缩,使卸料自由高度控制在 0.5 m 以内,再进行下一层堆料,这样保证每层料堆高度不变,从而保证物料的均匀。

## 5 结论

a. 通过总结传统加水工艺,结合堆料工艺提出了“皮带机加水+堆料机堆料+料仓闷料”工艺,结合堆料仓的设计提出了“分层摊铺+管网加水+料仓闷料”工艺,是对土料加水工艺的机械化、自动化改造的探索。

b. 通过现场对比试验“皮带机加水+堆料机堆料+料仓闷料”工艺可实现快速、自动化准确加水,加水效果良好,“分层摊铺+管网加水+料仓闷料”工艺加水效率低,闷料效果差,“皮带机喷水+桥式布料机下料+成品料堆闷制”工艺具有明显的优越性。

## 5 结论

研究区域进行绿色屋顶改造后,设计降雨重现期可从 1 年提高到 5 年,并且产生了良好的经济和社会效益。研究发现,沙土是绿色屋顶土壤层的最佳土质类型;绿色屋顶径流控制率与降雨量存在显著的四次幂函数负相关规律,TP、TN、SS、COD 四种污染物控制率与降雨量之间存在显著的五次幂函数负相关规律,该研究可为绿色屋顶的设计规划提供精确指导。

### 参考文献:

- [1] 卡地尔亚·库尔班,魏强,张健,等. 海绵机场雨水径流仿真模拟[J]. 水电能源科学,2022,40(3):35-37.
- [2] 赵沛,程伍群,庞立军,等. 基于 SWMM 的透水铺装系统的水文效应研究[J]. 水电能源科学,2019,37(1):29-31.

- [3] 王雷,杨凤阁,五诚杰,等. 基于 SWMM 模型的低影响开发模式在城市雨洪控制中的研究[J]. 中国农村水利水电,2019(5):83-86.
- [4] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水,2009,35(11):213-217.
- [5] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展,2019,30(1):45-55.
- [6] 刘小壮. 基于 SWMM 建筑小区 LID 方案比选及水量水质的模拟评估[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [7] 熊子鹰,肖存艳,蔡甜,等. 基于 SWMM 的初期雨水调蓄池容积确定及截污效能模拟[J]. 水电能源科学,2019,37(1):36-39.
- [8] 王恩,章银柯,林佳莎,等. 杭州西湖风景区绿地货币化生态效益评价研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(1):209-213.
- [9] 陈龙,谢高地,盖力强,等. 道路绿地消减噪声服务功能研究:以北京市为例[J]. 自然资源学报,2011,26(9):1526-1534.

## Stormwater Control and Benefit Analysis of Green Roof Based on SWMM Model

WANG Lei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shao-song<sup>1</sup>, LIANG Jing-kun<sup>1</sup>, MA Ai-hua<sup>1</sup>, AN Qi<sup>1</sup>, QIAN Liu-yang<sup>1</sup>

(1. Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China; 2. Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control, Cangzhou 061001, China; 3. Water Resources Automation and Information Application Technology Research and Development Center of Hebei College, Cangzhou 061001, China)

**Abstract:** Water environment safety has always been an important issue that plagues the healthy development of country's social economy. Low-impact development technologies have good resilience in dealing with water environment safety issues. Taking Cangzhou China-Europe Green Industrial Park as the research object, the rainstorm flood model and the rainwater resource utilization benefit model were established. The study found that green roofs have an obvious control effect on ground runoff. The reduction rate and control rate of the total runoff are 56.31% and 68.32%, respectively, and the peak flow reduction rate is 48.58%. The control rate for pollutants of TP, TN, SS and COD is 72.92%, 74.82%, 74.44% and 73.89%, respectively. However, with the increase of rainfall intensity, the runoff control rate and the pollutant concentration control rate decreased, showing a significant negative correlation between the fourth and fifth power functions. After calculation, green roof can produce better economic and environmental benefits.

**Key words:** SWMM; green roof; control rate; economic benefit; environmental benefit

(上接第 102 页)

### 参考文献:

- [1] 顾淦臣,束一鸣,沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 马洪琪,赵川. 糯扎渡水电站掺砾黏土心墙堆石坝基础理论与关键技术研究[J]. 水力发电学报,2013,

- 32(2):208-212.
- [3] 熊亮. 长河坝水电站大坝砾石土心墙料含水率调整工艺及设备选择[C]//高坝建设与运行管理的技术进展—中国大坝协会 2014 学术年会论文集,2014.
- [4] 陶益民,刚永才. 毛尔盖水电站大坝砾石土心墙防渗土料的特性研究及质量控制[J]. 水电站设计,2012,28(增刊 1):29-33.

## Field Test of Water Filling Technology of Impervious Gravel Soil for 300 m Height Earth Core Rockfill Dam

GUO Yong<sup>1</sup>, ZHANG Jian-bo<sup>1</sup>, ZHANG Sheng<sup>1</sup>, HU Yong-fu<sup>2</sup>, WANG Zhao-ying<sup>2</sup>

(1. HydroChina Guiyang Engineering Corporation, Guiyang 550081, China;

2. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

**Abstract:** Aiming at the low natural moisture content of natural wide graded gravel anti-seepage soil material in 300 m level high core wall rockfill dam, field contrast test between the process of "belt conveyor filling water + stacker heap + bin stuffy material" and the process of "layered paving + pipe network water + bin stuffy material" was carried out to verify the rationality and feasibility of the relevant filling water process. The test results show that the combination process of belt conveyor with water is superior to the pipe network stratified water process, mainly manifested that the belt conveyor automatic water system can achieve real-time, efficient and accurate automatic water filling soil; After water replenishment, the soil material is transported by the belt and piled by the stacker, which can realize automatic and uniform piling. After adding water to soil material, the moisture content inside the soil material is basically stable during 3-4 days of smother, and the time required for smother is short. This paper also put forward the improvement measures of water filling process of belt conveyor. The improved process of "water filling of belt conveyor + stoker + silo boring" can provide reference for soil water content adjustment of similar earth-rock dam.

**Key words:** 300 m grade earth core rockfill dam; natural broad-graded gravel soil; impervious soil material modification; increase of water content; technical process