

DOI: 10.11779/CJGE20240308

宽级配砾石土防渗料含水率快速检测试验研究

郑 星^{1,2}, 敖大华^{1,2}, 张 胜^{1,2}, 魏伟琼^{1,2}, 陈晓华^{1,2}

(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)

摘要: 针对 RM 水电站宽级配砾石土防渗料, 系统统计分析了大量含水率与级配试验数据, 在掌握粗、细料含水率及级配规律的基础上, 结合微波湿度法和加权法对全级配土料含水率快速检测进行了试验研究, 结果表明: 微波湿度法可以实现 5 mm 以下细颗粒土料含水率的快速准确检测, 微波湿度法和加权法相结合可以快速获得全级配砾石土料的含水率, 与传统烘干法试验结果相比, 误差可以控制在 $\pm 0.5\%$ 。整个检测过程可以控制在 15 min 之内完成, 可提升土料生产过程和填筑碾压过程的质量控制效率。

关键词: 宽级配砾石土; 含水率; 微波湿度法; 加权法; 快速检测

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)08-1775-08

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

Experimental study on quick detection of moisture content of widely graded gravel soil

ZHENG Xing^{1,2}, AO Dahua^{1,2}, ZHANG Sheng^{1,2}, WEI Weiqiong^{1,2}, CHEN Xiaohua^{1,2}

(1. Powerchina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 2. Province Key Laboratory of Geomechanics and Engineering Safety, Guiyang 550081, China)

Abstract: A large amount of moisture content test data of the widely graded gravel soil impervious material for Rumei Hydropower Station are analyzed. On the basis of ascertaining the moisture content and gradation of coarse and fine particles, an experimental study on the moisture content of fully graded soil materials is conducted by combining the microwave humidity method and the weighting method. The results show that the microwave humidity method can realize the rapid and accurate detection of the moisture content of finely grained soil materials below 5 mm, and the combination of the microwave humidity method and the weighting method can quickly obtain the moisture content of fully graded gravel soil materials. A comparison with the test results by the traditional drying method shows that the error can be controlled within $\pm 0.5\%$. The entire testing process can be controlled to be completed within 15 minutes, which can strengthen the quality control efficiency of the soil production process and the filling and rolling processes.

Key words: widely graded gravel soil; moisture content; microwave humidity method; weighting method; quick detection

0 引言

近几十年来, 心墙土石坝由于其结构简单, 技术成熟, 可以就近选择土石材料, 钢材、混凝土等用量少, 建设效益比较经济, 坝体具有良好的抗变形能力, 对坝基适应能力强等优点, 已经逐渐成为世界高坝建设的主流坝型^[1]。从国内外已建和在建的 200 m 级以上高土石坝的筑坝经验来看, 防渗体基本上都采用砾石土和风化岩等宽级配土料^[2-3]。宽级配砾石土含水率的快速精确检测对于提高高土石坝土料生产和坝体填筑的效率、有效控制材料和施工的质量具有重要意义。

烘干法是用于检测土料含水率的常规方法, 也是公认最准确可靠的方法, 但由于烘干法耗时较长, 效率较低, 不能满足现场测试快速便捷的要求^[4-6]。

针对土壤含水率的快速检测需求, 出现了很多在线接触式间接检测方法, 例如微波湿度法、近红外法、中子法、时域反射法(TDR)、 γ 射线法、电阻法等^[7]。以上方法均能实现土壤含水率的快速检测, 但是精度通常无法满足规定的要求, 而且不同检测方法之间差异较大^[7], 存在各自的缺陷。杨林等^[7]、李小虎等^[8]采用微波湿度法分别对最大粒径 5 mm 以下的砂类

土、黏性土进行了含水率快速检测试验,发现试验结果具有较高的精度,但目前仅用于检测颗粒较细较均匀的土料,对于用粗粒土筑坝的工程领域,微波湿度法还需进一步研究;近红外法检测土料含水率速度快,在检测粒径较大的非黏性土含水率时精度较高,但是检测结果会受土料形状、颗粒大小、密度等影响,无法用于检测黏性土的含水率^[7-8];杨德志等^[9]、孙浩等^[10]采用中子法对农田均质沙壤土进行了含水率检测,发现中子计数与土壤含水率之间的标定关系存在有效适用范围,且用于检测浅层土壤含水率时误差偏大;Topp 等^[11]对 TDR 法进行了大量研究,获得了多种不同土料的介电常数,建立了土料介电常数和体积含水率的数学模型,为 TDR 法检测土料含水率提供了依据;徐爱珍等^[12]的对比试验研究认为, TDR 法作为自动监测方法,简便、灵敏度高、准确性好。但上述采用 TDR 的研究对象均是颗粒较为均匀的细粒土,并未用于宽级配粗粒土; γ 射线法是利用 γ 射线在穿透土壤时的衰减现象来测定土壤的含水率,张训时等^[13]针对粉砂的试验研究结果表明 γ 射线含水率仪对含水率变化反应灵敏,性能良好,可用于现场实测,但也并未用于宽级配粗粒土的检测。此外,电阻法、电容法对土的含水率检测精度较低^[8]。

以上在线检测方法的共同点是均只应用于黏土、砂土、壤土等颗粒较细较均匀的土壤,这是由于这些方法的原理均对探头周围土壤的均匀性有一定要求,而对于粗颗粒(5 mm 以上颗粒)含量较多的宽级配砾石土,以上方法还需要进一步研究。为了实现宽级配粗粒土的含水率快速检测,相关学者也进行了一些试验研究。陈思迪等^[14]针对砾类土或粒径小于 20 mm 的非黏性土,以 5 mm 为粗细料的分界,分别考虑 5 mm 以上颗粒含量(P_5 含量)和 5 mm 以下颗粒含量百分比和含水率,采用加权计算的方法得到了全级配粗粒料的含水率,并且结果与烘干法测试结果接近,但是其研究的对象为 20 mm 以下的非黏性土,并未针对含相当黏粒的宽级配砾石土进行试验;车维斌等^[15]针对长河坝水电站砾石土防渗料颗粒较粗、烘干耗时等问题,研制了土料含水率快速检测移动试验室采用车载大型微波炉对土料进行含水率检测,其本质与传统烘干法相同,与传统常规试验方法相比,具有快速、准确、灵活方便的优点,比常规检测缩短了近 6 h。

针对以上土料含水率快速检测方法的特点以及加权法计算粗粒土料含水率的可行性,本文对 RM 水电站宽级配砾石土心墙防渗料,采用微波湿度法和加权法结合的方法对全级配砾石土料含水率进行了验证性试验研究,以期为宽级配砾石土含水率快速精准检测提供新的思路。

1 基于加权法计算宽级配砾石土含水率

1.1 土料含水率的加权计算法

RM 水电站用于大坝防渗体填筑的砾石土是含砾的粉质黏土,防渗土料设计最大粒径为 60 mm, 小于 0.075 mm 细粒含量不小于 15%, 小于 0.005 mm 黏粒含量不小于 6%。5 mm 以上砾石含量(P_5 含量)范围较宽,设计含量为 30%~50%, 属于宽级配非均匀土料。这类土料多使用烘干法测定其含水率,暂缺乏快速检测方法,导致土料的生产和施工过程质量检测耗时较长,影响了施工效率。

解决宽级配砾石土全级配含水率快速检测的思路之一,是分别考虑土料中小于 5 mm 的细粒部分和 5 mm 以上砾石的级配组成及其含水率,并建立各粒组砾石含水率和 5 mm 以下细粒部分含水率的可靠相关关系,采用某种快速检测方法对小于 5 mm 的细粒部分的含水率进行检测,并根据现场筛分快速获得全级配土料的各粒组含量关系,则可根据加权算法快速得到全级配土料的含水率。

RM 水电站全级配土料按照粒组划分为 60~40, 40~20, 20~10, 10~5, <5 mm 等 5 个粒组。在级配组成中,假设 5 个粒组的质量百分比分别为 P_A, P_B, P_C, P_D, P_E , 含水率分别为 w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 , 则全级配土料的含水率 w 可以通过加权算法计算得到

$$w = P_A w_1 + P_B w_2 + P_C w_3 + P_D w_4 + P_E w_5 \quad . \quad (1)$$

1.2 砾石土干湿级配关系

式(1)表明,各粒组颗粒的干质量百分比及其含水率是计算全级配土料的含水率的关键参数。目前,宽级配砾石土级配的快速检测尚未出现颠覆性的新方法。快速检测土料 5 mm 以上各粒组含量的思路是在各粒组湿质量百分比与干质量百分比之间建立可靠的相关关系。实际实施中,只需要对成品土料进行筛分,获得各粒组颗粒的湿质量百分比,并根据各粒组湿质量百分比与干质量百分比的关系,即可计算得到各粒组的干质量百分比。

在 RM 水电站土料场开展了 270 组筛分试验及含水率试验,获得了各粒组颗粒的含水率、相应湿级配和干级配。各粒组湿质量百分比与干质量百分比的关系见图 1~3。从关系曲线相关性可见,各粒组湿质量百分比与干质量百分比呈现很好的线性相关性。因此,可以根据土料各粒组的湿质量百分比,准确地计算干土中各粒组的百分比。

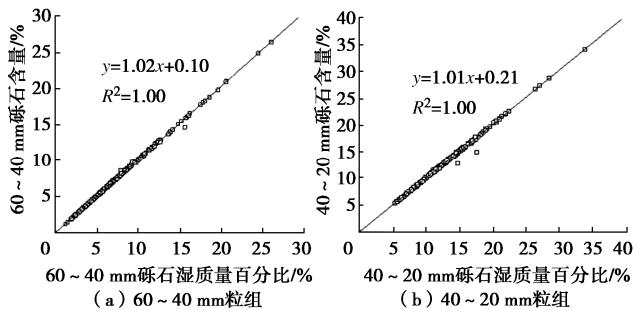


图 1 60~40 mm 和 40~20 mm 粒组砾石干湿质量比

Fig. 1 Dry and wet percentage of gravel with particle in 60~40 mm and 40~20 mm

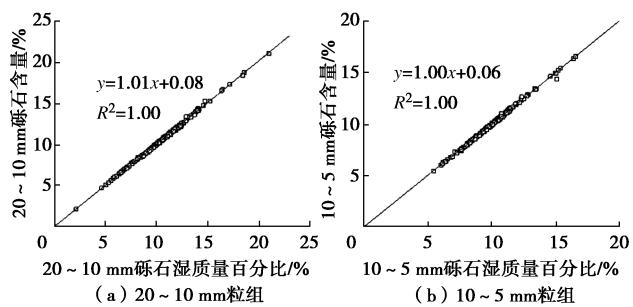


图 2 20~10 mm 和 10~5 mm 粒组砾石干湿质量比

Fig. 2 Dry and wet percentages of gravel with particle in 20~10 mm and 10~5 mm

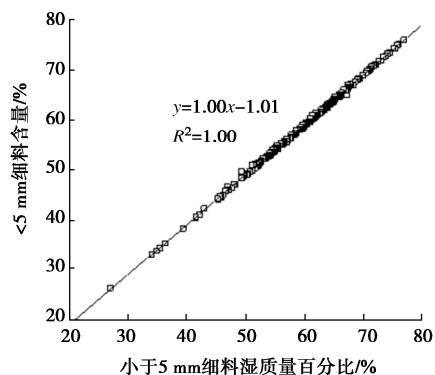


图 3 小于 5 mm 细料干湿质量百分比关系

Fig. 3 Dry and wet percentages of fine soil with particle less than 5 mm

1.3 砾石土粗粒与细粒含水率关系

为了建立各粒组砾石含水率和 5 mm 以下细粒部分含水率的可靠相关关系, 对 270 组各粒组砾石含水率与 5 mm 以下细粒含水率的相关性进行了统计, 见图 4~7。各粒组砾石含水率与细料含水率成正相关, 且颗粒越细, 其含水率与 5 mm 以下细料含水率的相关性越好, 这是由于颗粒越细, 其比表面积越大, 其被细料包裹越好, 越能反映细料的含水率。

值得注意的是, 虽然各粒组粗颗粒与 5 mm 以下细料含水率的相关系数均不高, 但由于拟合关系考虑了粗颗粒含水率随着细料含水率增加而增加的事实,

采用拟合关系式计算粗颗粒含水率仍然比仅采用平均值更能反映粗颗粒的含水特征。

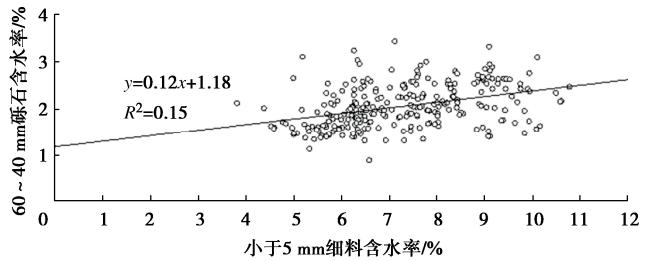


图 4 60~40 mm 砾石含水率与细料含水率关系

Fig. 4 Moisture content relationship between gravel with particle in 60~40 mm and fine soil with particle less than 5 mm

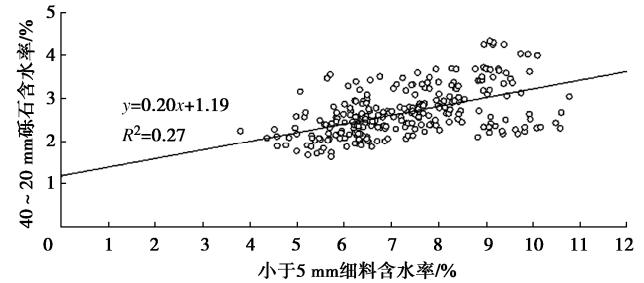


图 5 40~20 mm 砾石含水率与细料含水率关系

Fig. 5 Moisture content relationship between gravel with particle in 40~20 mm and fine soil with particle less than 5 mm

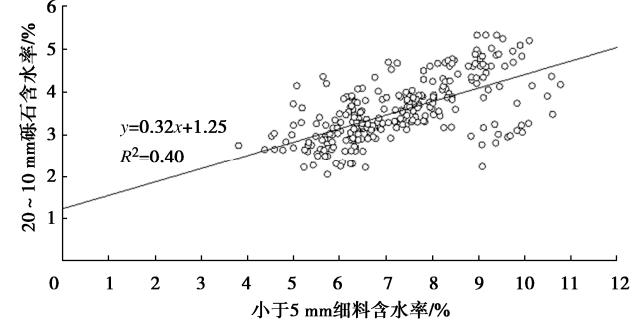


图 6 20~10 mm 砾石含水率与细料含水率关系

Fig. 6 Moisture content relationship between gravel with particle in 20~10 mm and fine soil with particle less than 5 mm

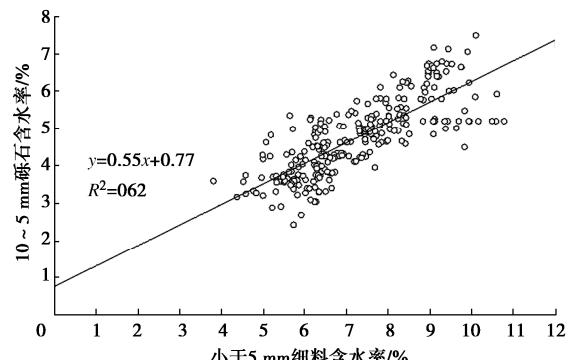


图 7 10~5 mm 砾石含水率与细料含水率关系

Fig. 7 Moisture content relationship between gravel with particle in 10~5 mm and fine soil with particle less than 5 mm

1.4 真实含水率与加权含水率的关系

对 RM 水电站 350 组砾石土全级配烘干含水率与全级配加权含水率进行相关性统计, 结果见图 8。其中, 烘干含水率采用了传统的烘箱烘干法, 烘干时间 8 h 以上, 结果可以作为土料的真实含水率。加权含水率采用了式(1)进行计算, 各粒组干质量百分比采用了烘干后的质量进行计算, 各粒组颗粒含水率采用的是烘干含水率。从图 8 中可以看出, 砾石土全料的真实含水率与加权含水率相关性较好, 所有数据点集中于较窄的条带状区域内, 用线性关系对以上数据进行拟合, 若将拟合截距设置为 0, 得到拟合关系式为 $y=0.997x$ (相关系数为 0.688), 可见该拟合直线斜率接近于 1, 基本通过点群中心, 表明土料的真实含水率和加权含水率较为一致。

通过平移试验点群中心的线性拟合直线, 可以得到点群分布的上限方程为 $y=0.997x+1.0$, 下限方程为 $y=0.997x-1.0$ 。可见, 绝大部分试验点分布在上下限方程所夹的条带内, 误差约在土 1% 左右, 这个检测误差对于 RM 水电站砾石土防渗料的碾压质量控制来说是可以接受的。试验表明 RM 水电站防渗砾石土料的真实含水率在较宽的范围内 (3%~9%) 均可采用加权法进行计算。

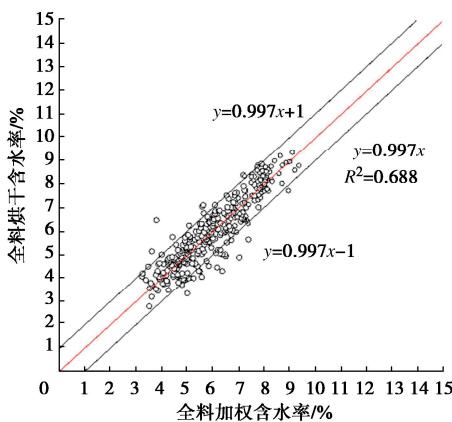


图 8 砾石土全料烘干含水率与加权含水率关系

Fig. 8 Oven-dried and weighted moisture content relationship of fully grade gravel soil

1.5 加权法确定砾石土含水率的步骤

掌握了砾石土干湿级配关系、砾石土各粒组砾石含水率与 5 mm 以下细颗粒含水率的关系, 以及砾石土全料真实含水率与加权含水率良好的相关特性以后, 即可在土料的生产过程中或者碾压后的质检过程中快速获得土料的级配及其含水率, 以确定土料的含水率是否满足设计要求, 其实施步骤如下。

(1) 在土料生产过程中 (或者碾压坝面上), 取出一部分土料快速筛过网孔尺寸为 40, 20, 10, 5 mm 的土工筛, 分别得到 60~40, 40~20, 20~10, 10~

5, <5 mm 等 5 个粒组的湿颗粒, 并分别称量其质量。

(2) 通过各粒组颗粒干湿质量百分比之间的关系, 可由各粒组的湿质量百分比计算其干质量百分比, 即

$$P_A = 1.02P_{Aw} + 0.10 \quad , \quad (2)$$

$$P_B = 1.01P_{Bw} + 0.21 \quad , \quad (3)$$

$$P_C = 1.01P_{Cw} + 0.08 \quad , \quad (4)$$

$$P_D = P_{Dw} + 0.06 \quad , \quad (5)$$

$$P_E = P_{Ew} - 1.01 \quad . \quad (6)$$

(3) 采用微波湿度法试验设备, 快速测得 5 mm 以下细颗粒料的含水率, 记为 w_5 。

(4) 通过各粒组砾石含水率与细料含水率之间的相关关系, 计算得到各粒组砾石的含水率, 即

$$w_1 = 0.12w_5 + 1.18 \quad , \quad (7)$$

$$w_2 = 0.20w_5 + 1.19 \quad , \quad (8)$$

$$w_3 = 0.32w_5 + 1.25 \quad , \quad (9)$$

$$w_4 = 0.55w_5 + 0.77 \quad . \quad (10)$$

(5) 根据以上步骤获得的各粒组质量百分比和含水率, 按式(1) 加权计算全料的含水率 w 。

2 快速检测宽级配砾石土含水率

2.1 细料含水率的微波湿度法快速检测

如前所述, 若要使用加权法快速计算全级配土料含水率, 需要快速准确地获取 5 mm 以下细料的含水率。本文采用微波湿度法对 RM 水电站 5 mm 以下土料开展了快速测试。本次试验选用的微波湿度法测试设备是德国默斯测控仪器生产的 MS-A-204 水分测量仪, 见图 9。它的微波发射-接收系统向被测介质发射微波信号, 该信号在被测介质的四周不断的进行传递及反射形成传播回路, 微波信号在相同介质中的能量衰减与其含水率为正比关系, 通过计算介质传播能量的衰减, 再根据内置的数据模型和特殊算法即可确定被测介质的含水率。微波湿度法的显著优点是检测速度快、灵敏度优良, 但是它受到土壤类型、密实度等因素的影响, 在实测时都需要进行一系列的标定工作, 建立含水率与量测参数之间的关系后才能用于实测, 因此首先需要用 MS-A-204 水分测量仪对待测土料进行标定。

制作了如图 10 所示的标定装置, 该装置为一尺寸为 25 cm×25 cm×30 cm 的钢制盒子, 传感器固定在盒子底部并伸入盒子内部。标定时, 按照预定的密度和盒子体积, 将土料倾倒入盒内, 采用图 10 所示的击实方法将土料击实至预定高度, 即完成待测土料的制样过程。接通仪器电源, 水分测量仪的微波发射探头

开始工作, 操作面板上显示的信号值即为当前密实状态下土料的体积含水率。对同一份土料重复进行两次平行试验, 若测得信号值接近, 则表示设备可靠稳定, 可进行下一份土料检测。不同含水率土料测试完毕后, 分别取样进行烘干法含水率检测, 获得土料的真实含水率, 与读取的土料的微波信号值相对应, 在水分测量仪上进行逐一标定, 得到该批土料的标定曲线。对待测土料进行检测时, 只需调用该标定曲线, 仪器即可根据获得的微波信号值推算出相应的含水率。



图 9 MS-A-204 水分测量仪: 主机及探头

Fig. 9 MS-A-204 moisture detection apparatus: pannel and probe



图 10 标定装置结构及制样方式

Fig. 10 Structure of calibration devices and preparation method for sample

本次标定配制的土料如图 11 所示, 共配制了 8 份不同含水率的土料, 含水率跨度从 2.8%~9.7%, 每个含水率的土料分别按照 1.50, 1.60, 1.79, 1.90 g/cm³ 四个密度进行了标定, 标定结果见表 1, 土样含水率与微波信号值的关系见图 12。从图 12 中可以看出, 在各个标定密度下, 土料的真实含水率与仪器所测微波信号值之间呈现出良好的相关性, 随着含水率和密实度增加, 信号值相应增大。

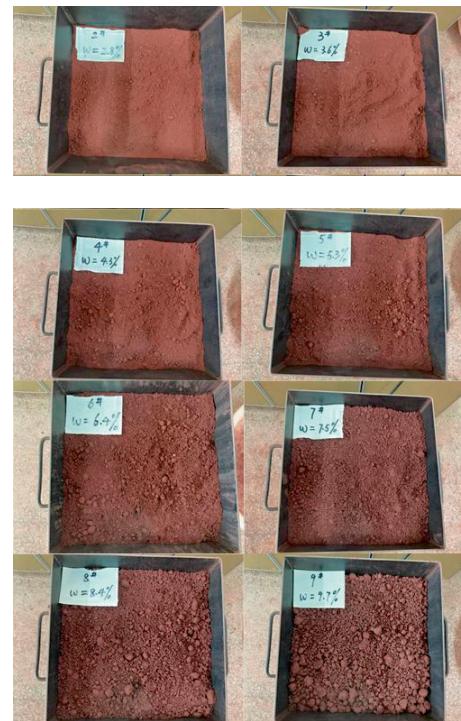


图 11 室内配制用于标定的不同含水率的土样

Fig. 11 Laboratory preparation of soil samples with different moisture contents for calibration

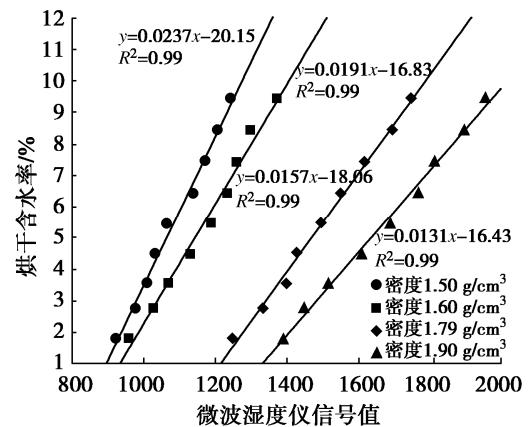


图 12 5 mm 以下细料标定结果

Fig. 12 Calibrated results of fine soil with particle less than 5 mm

表 1 细料标定结果

Table 1 Calibrated results for fine soil

序号	含水率/%	仪器微波信号值			
		1.50/(g·cm ⁻³)	1.60/(g·cm ⁻³)	1.79/(g·cm ⁻³)	1.90/(g·cm ⁻³)
1	1.8	923	1010	1319	1391
2	2.8	977	1050	1404	1448
3	3.6	1009	1099	1413	1517
4	4.3	1034	1148	1460	1610
5	5.3	1065	1210	1533	1690
6	6.4	1139	1250	1584	1769
7	7.5	1173	1306	1668	1815
8	8.4	1207	1361	1755	1896
9	9.7	1243	1402	1800	1956

采用该批土料重新配制不同含水率的土料作为待测料进行含水率快速检测, 选择密度为 1.60, 1.79

g/cm^3 对应的标定关系进行检测, 仪器测得的含水率和烘干法测得的含水率关系见图 13。可见, 仪器测得的含水率与烘干法含水率具有良好的吻合度, 误差基本在 $\pm 0.5\%$ 以内, 表明仪器可以准确测定 5 mm 以下细料的含水率。

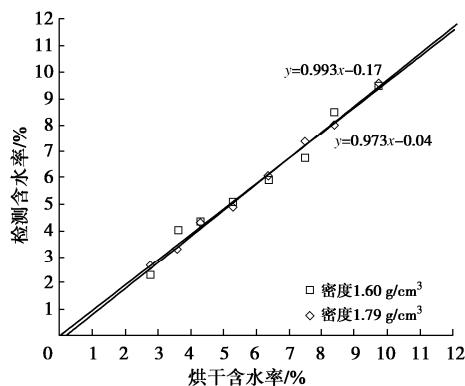


图 13 5 mm 以下细料烘干含水率与检测含水率关系

Fig. 13 Oven-dried and measured moisture content results of fine soil with particle less than 5 mm

2.2 碾石土含水率快速检测试验验证

在 5 mm 以下细料快速准确检测的基础上, 配制了 20 组不同含水率的宽级配砾石土料, 基于微波湿度法和加权法对其进行快速含水率检测验证试验。配制不同含水率土料时, 随机从料仓取出从土料场取回的不同粗细的袋装土料加水进行配制, 每袋 40~50 kg 以保证有足够的细料进行微波湿度法检测, 控制加水量使土料含水率分布在 2%~10% 范围。土料加水拌匀后, 闷制过夜, 次日进行筛分, 分别测定 60~40, 40~20, 20~10, 10~5, <5 mm 各粒组的湿质量百分比以及含水率, 并对 5 mm 以下细料进行微波湿度法快速含水率检测, 流程见图 14。根据微波湿度法检测的 5 mm 以下细料含水率及前述的加权法计算全级配含水率步骤, 计算得到 20 组全级配土料的含水率见表 2。表中同时给出了全级配土料烘干法测得的含水率作为验证。

将表 2 中 5 mm 以下细料的烘干含水率和微波湿度法检测含水率数据绘制在图 15 中, 并用过原点的直线进行线性拟合, 可见两者的相关性高达 0.998, 且拟合系数为 1, 误差在 0.5% 以内, 再次表明采用微波湿

度法可以较准确地检测细料含水率。将表 2 中全级配土料的烘干含水率和加权法计算含水率数据绘制在图 16 中, 并用过原点的直线进行线性拟合, 两者的相关性高达 0.953, 且拟合系数为 0.984, 误差基本在 0.5% 以内, 表明采用微波湿度法和加权法联合计算得到的含水率与烘干法试验结果很接近。

表 2 基于微波湿度法和加权法的宽级配砾石土快速检测结果

Table 2 Quick detection results of wide graded gravel soil based on microwave humidity method and weighting method

序号	5 mm 以下 细料烘干 含水率/%	5 mm 以下 细料检测 含水率/%	全级配烘 干含水 率/%	全级配加 权法含水 率/%	绝对误 差/%
1	6.1	6.2	4.9	4.7	-0.2
2	4.7	4.8	3.6	3.8	0.2
3	6.6	6.9	4.4	4.7	0.3
4	6.6	6.7	5.3	5.1	-0.2
5	5.2	5.7	3.3	3.7	0.4
6	3.6	3.9	3.4	3.5	0.1
7	8.9	8.7	6.7	6.3	-0.4
8	8.4	8.7	6.0	6.3	0.3
9	6.2	6.0	5.1	4.8	-0.3
10	6.0	5.9	4.9	4.8	-0.1
11	4.7	5.0	4.1	4.4	0.3
12	8.2	8.4	5.8	5.7	-0.1
13	7.1	7.5	5.7	5.2	-0.5
14	6.7	6.6	5.5	5.2	-0.3
15	5.3	5.8	4.5	4.2	-0.3
16	8.0	8.0	7.0	7.2	0.2
17	8.5	8.2	7.0	6.4	-0.6
18	8.5	8.3	7.3	7.1	-0.2
19	9.8	9.6	7.9	8.0	0.1
20	3.8	3.9	3.0	3.1	0.1

2.3 误差分析及效率评估

根据文献[7], 将烘干法检测结果作为土样的真实含水率, 在已知真值的情况下, 可以用均方偏差平方和评价检测精度, 从整体上衡量加权法结果与烘干法结果的接近程度, 将均方偏差平方和记为

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_n^2}{n}} \quad (12)$$

式中: s_i 为检测值与真实值的偏差; n 为检测的试样个数。

S 越小, 表示与烘干法结果越接近, S 越大, 表示与烘干法结果越疏远。20 组检测结果的均方偏差平方和为 0.293, 整体检测精度较高。



图 14 全级配砾石土料含水率快速检测验证试验

Fig. 14 Quick detection tests on moisture content of fully grade gravel soil

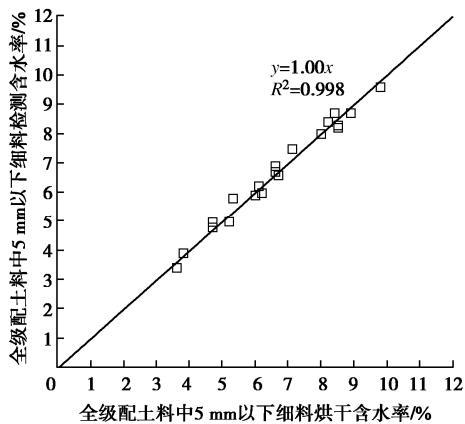


图 15 5 mm 以下细料的微波湿度法与烘干法含水率关系

Fig. 15 Relationship between moisture content of fine soil with particle less than 5 mm by microwave humidity and oven drying method

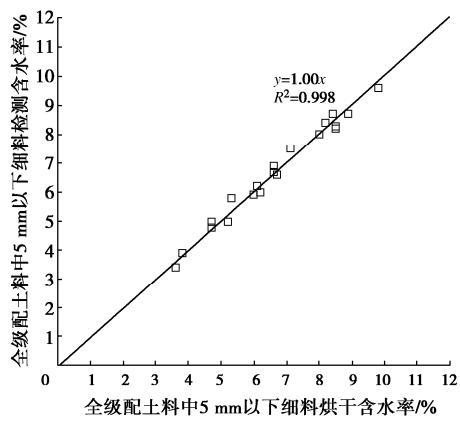


图 16 全级配砾石土料的加权含水率与烘干含水率关系

Fig. 16 Relationship between oven-dried and weighted moisture content of fully grade gravel soil

提出基于微波湿度法和加权法检测宽级配砾石土含水率的目的, 是期望在保证准确率的基础上, 相对于传统烘干法大幅提升检测效率, 从而节约工期, 创造经济效益。从该方法的实施过程来看, 土料的筛分过程耗时大约 10 min, 微波湿度法细料含水率检测过程耗时大约 5 min, 计算过程可以通过计算机编制程序, 输入数据后即可快速得出结果, 耗时可忽略不计, 采用本方法可以在 15 min 之内获得全级配砾石土的含水率, 且准确率较高, 误差可控制在±0.5%。

3 结论及展望

(1) 基于 RM 水电站防渗土料的大量含水率试验数据的统计分析, 表明通过加权法计算宽级配砾石土料的含水率是可行的, 其前提是准确检测细料的含水率。

(2) 微波湿度法对 5 mm 以下细料含水率的检测结果表明, 土料含水率的高低与微波信号值的大小成

正比, 采用不同密度进行标定, 含水率与信号值之间都具有良好的线性相关性, 调用不同的标定关系检测土料, 均能获得准确性较好的检测结果, 采用微波湿度法对 5 mm 以下细料的含水率检测是可靠的。

(3) 采用微波湿度法与加权法联合对 RM 水电站宽级配砾石土料含水率进行检测计算, 可以得到较为准确的结果, 检测误差可控制在±0.5%, 且可将检测过程控制在 15 min 以内, 相较于传统的烘干法大大提高了效率, 基本实现了快速检测的要求, 为宽级配砾石土含水率的快速检测提供了一种新的思路。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 郑星和张胜参与了试验设计, 郑星、魏伟琼、陈晓华完成了所有试验工作, 郑星、魏伟琼参与了试验数据的整理和论文的写作, 敖大华作为技术咨询, 并对论文进行了修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。ZHENG Xing and ZHANG Sheng participated in the experimental design. ZHENG Xing, WEI Weiqiong, and CHEN Xiaohua completed all experimental work. ZHENG Xing and WEI Weiqiong were involved in organizing the experimental data and manuscript writing. AO Dahua served as a technical consultant and revised the manuscript. All authors have reviewed and approved the final manuscript for submission.

参考文献:

- [1] 唐茂颖. 双江口水电站特高心墙土石坝筑坝材料工程特性及坝体变形管控研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. (TANG Maoying. Study on Engineering Characteristics of Dam Materials and Dam Deformation Control of Extra-High Core Earth-Rock Dam of Shuangjiangkou Hydropower Station[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [2] 李永红, 余挺, 王观琪, 等. 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. 成都, 2018. (LI Yonghong, YU Ting, WANG Guanqi, et al. Research and practice on the modification of impervious soil materials for ultra high earth-rock fill dams[C]// 2018 Academic Conference of Sichuan Society of Hydropower Engineering, Chengdu, 2018. (in Chinese))
- [3] Materials for Embankment Dams[M]. Broomfield: US Society on Dams, 2019.
- [4] 窦金熙, 郭玉明, 王盛, 等. 土壤含水率测定方法研究[J]. 山西农业科学, 2017, 45(3): 482-485. (DOU Jinxi, GUO

- Yuming, WANG Sheng, et al. Study on determination methods of moisture content in soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, **45**(3): 482-485. (in Chinese))
- [5] 李 瑶, 汪雅婷, 黄致绮. 土壤含水率测量方法分析及比较[J]. 仪表技术, 2017(8): 15-17. (LI Yue, WANG Yating, HUANG Zhiqi. Study on probe-type soil moisture sensor[J]. Instrumentation Technology, 2017(8): 15-17. (in Chinese))
- [6] 常 丹, 李 旭, 刘建坤, 等. 土体含水率测量方法研究进展及比较[J]. 工程勘察, 2014, **42**(9): 17-22, 35. (CHANG Dan, LI Xu, LIU Jiankun, et al. Study progress and comparison of soil moisture content measurement methods[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, **42**(9): 17-22, 35. (in Chinese))
- [7] 杨 林, 李小虎, 姚 强, 等. 基于微波湿度法的土料含水率快速检测试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(10): 222-227. (YANG Lin, LI Xiaohu, YAO Qiang, et al. Experimental research on the rapid detection of soil moisture content based on microwave humidity method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(10): 222-227. (in Chinese))
- [8] 李小虎, 姚 强, 李洪涛, 等. 基于微波湿度法的黏性土含水率快速检测试验研究[J]. 人民长江, 2021, **52**(9): 172-177. (LI Xiaohu, YAO Qiang, LI Hongtao, et al. Experimental study on rapid detection of moisture content of cohesive soil based on microwave humidity method[J]. Yangtze River, 2021, **52**(9): 172-177. (in Chinese))
- [9] 杨德志, 李琳琳, 杨 武, 等. 中子法测定土壤含水量分析[J]. 节水灌溉, 2014(3): 14-15, 19. (YANG Dezhi, LI Linlin, YANG Wu, et al. A study on using neutron method to measure soil water content[J]. Water Saving Irrigation, 2014(3): 14-15, 19. (in Chinese))
- [10] 孙 浩, 李明思, 丁 浩, 等. 用中子仪测定土壤含水率时的标定问题研究[J]. 节水灌溉, 2009(4): 18-21, 25. (SUN Hao, LI Mingsi, DING Hao, et al. Study on calibration of neutron probe in soil moisture measurement[J]. Water Saving Irrigation, 2009(4): 18-21, 25. (in Chinese))
- [11] TOPP G C, DAVIS J L. Measurement of soil water content using time-domain reflectrometry (TDR): a field evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, **49**(1): 19-24.
- [12] 徐爱珍, 胡建民, 熊 永, 等. TDR 法、干烧法及烘干法测定土壤含水量的比较研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, **29**(2): 253-256. (XU Aizhen, HU Jianmin, XIONG Yong, et al. Comparison of soil moisture measurement using TDR method, dry burning method and oven drying method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, **29**(2): 253-256. (in Chinese))
- [13] 张训时, 黄泽民, 刘平生, 等. γ 射线测土的含水量仪[J]. 水文地质工程地质, 1984, **11**(6): 51-54. (ZHANG Xunshi, HUANG Zemin, LIU Pingsheng, et al. Moisture content meter for γ -ray soil testing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1984, **11**(6): 51-54. (in Chinese))
- [14] 陈思迪, 李小虎, 姚 强, 等. 基于加权法的砾类土含水率检测[J]. 人民长江, 2020, **51**(5): 172-177, 196. (CHEN Sidi, LI Xiaohu, YAO Qiang, et al. Water content detection of gravel soil based on weighting method[J]. Yangtze River, 2020, **51**(5): 172-177, 196. (in Chinese))
- [15] 车维斌, 江万红, 郭林平, 等. 土料含水率快速检测移动试验室的研制与应用[J]. 土石坝技术, 2016: 274-280. (CHE Weibin, JIANG WanHong, GUO Linping, et al. Development and application of a mobile laboratory for rapid detection of soil moisture content[J]. Earth Rock Dam Technology, 2016: 274-280. (in Chinese))