

# 石碴料压实性能测试与分析<sup>①</sup>

阎宗岭<sup>1</sup>, 徐健<sup>2</sup>, 邱贤德<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 A 区资源及环境科学院, 重庆 400044; 2. 重庆市建筑科学研究院, 重庆 400015)

**摘要** 石碴料作为堆石坝的主要筑坝材料, 其工程性质对堆石坝的安全性有至关重要的影响. 本文基于现场测试的基础上对影响石碴料压实性能的因素进行了综合分析研究, 为工程设计、施工提供了理论依据.

**关键词**: 石碴料; 干密度; 级配; 含水率

**中图分类号**: TU641 **文献标识码**: A **文章编号**: 1007-855X(2001)06-098-03

## 1 工程概况

涪陵城区移民迁建防护工程是适应三峡工程库区移民而修建的大型堆石坝工程, 全长 4548.89m, 沿涪陵城区长江、乌江沿岸布设, 坝身用石碴料碾压回填. 涪陵防护工程所用的石碴料主要来自上鹅颈关砂岩料场, 料场岩层物理力学参数见表 1.

表 1 料场岩层物理力学参数

	比重	天然密度 $\times 10^3/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	饱和密度 $\times 10^3/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	孔隙率 /%	吸水率 /%	饱水率 /%	干抗压强度 /MPa	湿抗压强度 /MPa	软化 系数
鹅颈关砂岩	2.65	2.50	2.54	10.8	2.45	3.3	53.56	43.47	0.81

## 2 石碴料压实性能的现场测试与分析

### 2.1 石碴料压实性能的现场测试

石碴料的工程性质与其密度密切相关, 工程施工中常以干密度作为重要的技术参数. 为了控制堆石坝的填筑质量, 在填筑施工中进行质量检测, 以此对碾压堆石坝的干密度、含水率、颗粒级配进行分析研究, 测试结果见表 2<sup>[1]</sup>.

### 2.2 石碴料颗粒级配

用于筑坝的石碴料除了对其尺寸有一定的要求外, 还应满足以下要求: 1) 石碴料的总体沉陷尽量地小, 要求石碴料的颗粒级配曲线较连续、平滑, 使碾压后能达到尽量大的干密度. 2) 石碴料具有较大的内摩擦角, 以维持坝坡的稳定. 3) 使坝体本身具有一定的渗透能力.

因为粒径小的石碴料只要经过压实就可以得到较大的干密度, 因此在碾压施工时, 石碴料有适当的级配即可. 同时希望级配比较不均匀, 以获得较大干密度, 从而减小坝体变形、沉陷, 并增加抗剪强度. 料场开采的堆石料, 经检验合格后, 直接上坝进行填筑. 由填筑施工中检测的 19 组数据, 得到石碴料的颗粒级配曲线, 如图 1 所示.

从图 1 中可知, 石碴料  $d_{10} = 1.2 \sim 5\text{mm}$ ,  $d_{30} = 9 \sim 50\text{mm}$ ,  $d_{60} = 60 \sim 170\text{mm}$ . 则石碴料的不均匀系数  $C_u = 30 \sim 140$ , 曲率系数  $C_c = 3 \sim 35$ .

### 2.3 石碴料干密度与 $P_5$ 含量的关系

石碴料干密度与  $P_5$  含有密切的关系, 在达到最大干密度之前, 其干密度随  $P_5$  含量的增加而缓慢升高, 随后,  $P_5$  含量的增加反而会使干密度略有减小, 如图 2 所示. 由此可见, 在石碴料中  $P_5$  组细颗粒主要起着充填大颗粒间空隙的作用, 在  $P_5$  含量较低时, 不能足以充填大颗粒之间的空隙, 从而造成在宏观上

① 收稿日期: 2001-04-16;

第一作者简介: 阎宗岭, 男, 1976 年生, 博士, 发表论文数篇, 获省部级科技进步一、二等奖 2 项, 研究方向: 岩土工程.

石碴料的干密度较小. 随着  $P_5$  含量的逐渐增加, 大颗粒之间的空隙也随之被充填直至密实, 此时石碴料的干密度达最大值. 之后, 随  $P_5$  含量的增加, 大颗粒的含量就相应降低, 而大颗粒是较致密的块体, 本身密度较高, 在石碴料宏观密度中占主要地位, 其含量的降低使石碴料的宏观密度也随之缓慢降低.

表2 石碴料压实质量检测

	湿密度 $\times 10^3/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	干密度 $\times 10^3/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	含水率 /%	$P_{0.5}$ /%	$P_5$ /%	$P_{10}$ /%	$P_{50}$ /%	$P_{200}$ /%
1	2.46	2.3	7.1	0.32	14.5	20	38.8	86.3
2	2.61	2.47	5.6	0.31	12.1	19.4	39.7	67.1
3	2.2	2.13	2.75	1.24	9.8	19.6	51.5	72.4
4	2.6	2.45	6.0	0.29	12.1	26	52.1	76.6
5	2.23	2.05	8.85	0.16	18.9	31.2	54.9	73.8
6	2.29	2.21	3.1	0.54	11.2	23.4	53.6	81.5
7	2.33	2.16	7.9	0.43	9.0	31.7	55.2	90.0
8	2.56	2.38	6.7	1.7	15.4	16.6	50.8	79.8
9	2.57	2.42	6.0	0.51	14.1	21	51.4	86.5
10	2.258	2.07	9.1	0.3	19.4	29.5	51.7	96.4
11	2.29	2.21	3.7	0.27	16.8	26.6	43.5	77.2
12	2.302	2.116	8.8	0.74	17.7	26.9	50	78.7
13	2.352	2.29	4.0	1.12	13.2	32.9	68.6	87.0
14	2.258	2.1	7.5	0.26	16.5	18.8	47	94.1
15	2.2	2.26	7.0	1.03	16.7	22.3	45.4	79.4
16	2.42	2.4	4.8	0.56	13.1	18.7	27.1	81.5
17	2.31	2.22	2.5	0.47	14.1	15.5	35.6	89.2
18	2.53	2.41	5.0	0.61	14.9	18.8	34.1	83.8
19	2.27	2.1	8.2	0.27	10.9	19.6	49.8	88.4

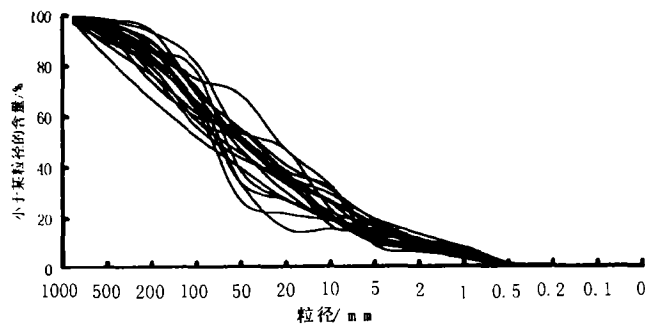
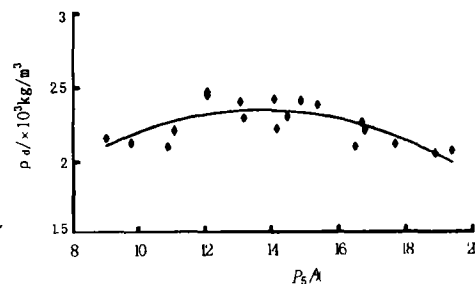


图1 石碴料颗粒级配曲线

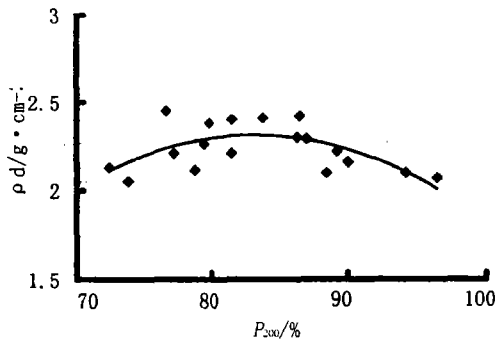
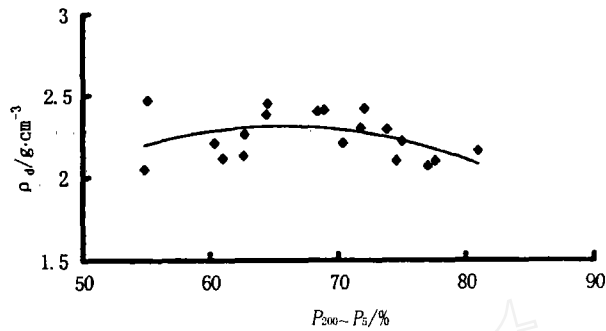
图2 干密度— $P_5$  含量关系曲线

#### 2.4 石碴料干密度与 $P_{200}$ 及 $P_{200} \sim P_5$ 含量的关系

石碴料干密度与  $P_{200}$  及  $P_{200} \sim P_5$  含量的关系见图3、图4. 由图3和图4可以看出,  $P_{200}$  颗粒对石碴料的干密度影响显著, 当  $P_{200}$  含量小于80%时, 其干密度较小. 这是因为大颗粒含量过高, 没有足够的小颗粒来充填大颗粒之间的空隙, 从而导致石碴料干密度降低; 当  $P_{200}$  含量在80%~87%时, 石碴料较易获得比较大的干密度; 当  $P_{200}$  含量超过87%之后, 大颗粒含量较低直接导致了石碴料的干密度的减小. 当  $P_{200} \sim P_5$  的含量在65%~72%之间, 石碴料的干密度取得较大值, 此时小颗粒与大颗粒的比例适当, 大颗粒间的孔隙恰好被小颗粒所充填, 碾压后密实度最高.

#### 2.5 石碴料干密度与含水率的关系

石碴料干密度与含水率的关系如图5所示. 从图5中可以看出, 含水率较小, 干密度也较小, 随着含水率的逐渐增加, 石碴料的干密度也随之增加. 在达到最大值之后, 则随含水率的增加反而减小, 最大干密度

图3 干密度与  $P_{200}$  含量的关系曲线图4 干密度与  $P_{200} \sim P_5$  含量的关系曲线

所对应的含水率为最佳含水率。

### 3 石渣料工程性质参数的统计特征

对试验所测定的数据组  $(\rho_{di}, \omega_i)$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 18$ ) 进行二次多项式  $\rho_d(\omega_i) \sum_0^{18} k\omega_k$  拟合<sup>[2]</sup>, 可得石渣料的干密度与含水率之间的关系为:

$$\rho_d = -0.0284\omega^2 + 0.3077\omega + 1.5488 \quad (1)$$

把所测定的数据以最大干密度为界分成两部分, 并选用下列表达式表示二者之间的关系<sup>[3]</sup>:

$$\omega = a + k/\rho_d \quad (2)$$

运用最小二乘法分别求解图5中最大干密度两侧数据中的试验常数  $a$  和  $k$  值, 将图5中最大干密度两侧的数据代入式(2)计算得:

$$\omega = \begin{cases} 36.093/\rho_d - 8.792 & \omega \leq 5.42 \\ -15.194/\rho_d + 27.52 & \omega > 5.42 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得图6.

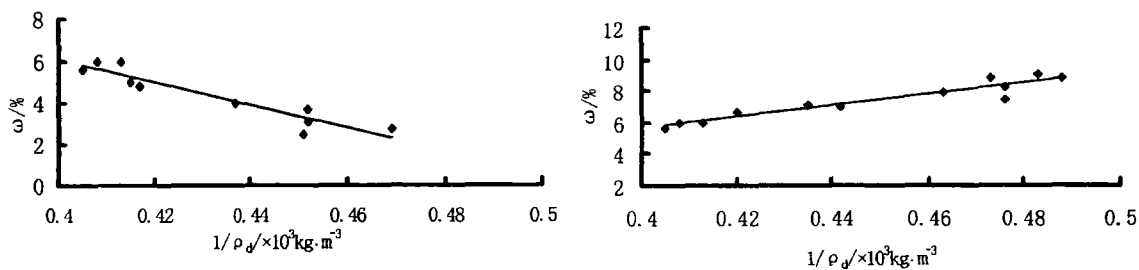


图6 石渣料干密度—含水率关系曲线

从图6中可以看出, 含水率的高低直接影响石渣料的干密度, 含水率与最大干密度的倒数成线性关系, 适当的含水量可以使石渣料颗粒充分软化及润滑, 从而得到较高的压实度。

### 4 结论

石渣料的最大干密度主要受含水率和各粒组含量的影响: 其干密度随  $P_5$  含量的增加而缓慢升高, 在达到最大干密度之后,  $P_5$  含量的增加反而使干密度有降低; 当  $P_{200}$  含量在 80%~87% 之间时, 石渣料获得较大的干密度; 当  $P_{200}$  与  $P_5$  含量之差在 65%~72% 之间, 石渣料的干密度取得较大值; 石渣料的含水率对其最大干密度的影响程度比粘土、黄土要低得多。

(下转第 105 页)

技术时, 最常用的是从专家或有经验的操作工人中获取口头和语言信息, 而且还要调整其隶属函数, 因此比较费时费事; 而采用神经网络技术时, 最常用的是从被训练或受控的系统中抽取信息, 系统需要大量的样本来训练, 也较费事. 前人研究发现<sup>[5, 11]</sup>, 模糊技术与神经网络存在某种等价和互补关系, 二者结合起来将拥有模糊系统和神经网络两方面的优点. 这样就可以构造神经模糊系统、模糊神经网络及模糊-神经混合系统, 应用到铝电解槽的过程控制中, 应起到更令人满意的效果.

随着科技的进步, 过程控制模型不断开发和优化, 加之采样的频率和精度不断提高, 铝电解槽智能控制系统将向实时和精确方向发展, 在铝电解生产中, 提高电效、降低能耗的作用将愈来愈显著.

#### 参考文献:

- [1] 邱竹贤. 铝电解原理与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998. 8~16.
- [2] 席灿明. 模糊技术在铝电解过程控制中的开发应用[C]. 中国有色金属学会第三届学术会议论文集, 127~133.
- [3] T. Moen 等. 采用点式加料器的铝电解槽的自适应控制[J]. Light Metals 1985, 459~469.
- [4] 周铁托, 张建. 大中型预焙铝电解槽自适应控制过程的研究[J]. 轻金属, 1994, (2): 22~25.
- [5] 廉师友. 人工智能技术导论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 214~216.
- [6] 周济, 查建中, 肖人彬. 智能设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 106~114.
- [7] 吴良刚, 高阳, 单汨源. 神经网络专家系统的研究与展望[J]. 中国有色金属学报, 1996, 第6卷增刊1, 18~21.
- [8] 张泰山, 袁艳, 唐国华. 铝电解槽神经网络专家系统[J]. 中国有色金属学报, 1996, 第6卷增刊1, 87~90.
- [9] 邱竹贤. 铝电解[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 251~255.
- [10] 张金平等. 新型铝电解槽控制系统[J]. 冶金自动化, 2000, 24(1): 12~14.
- [11] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 169~181, 209~216.

## Application of Intelligent Control in Aluminium Cell

CUI Heng, XIE Gang, CHEN Shu-rong, ZHANG Xiong-fei

(The Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract** The intelligence control is a new study field. The principle of neural network expert system, fuzzy control and fuzzy expert system, and the application of them in aluminium cell are stated. The advantages and disadvantage of the three systems are summarized. That the fuzzy neural networks is the best choice of aluminium cell is proposed.

**Key words:** intelligent control; neural networks; expert system; fuzzy control; aluminium cell

(上接第 100 页)

#### 参考文献:

- [1] 阎宗岭. 碾压堆石体物理力学特性及其稳定性研究[D]. [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2000.
- [2] 杨大地等. 数值分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998. 25~30.
- [3] 李小泉. 瀑布沟水电站黑马土料的最大干密度与最优含水量的关系[J]. 水电站设计, 1994, (12).

## The Testing and Analysis of the Compactness of Rockfill

Yan Zong-ling<sup>1</sup>, Xu Jian<sup>2</sup>, Qiu Xian-de<sup>1</sup>

(1. Resource and Environment Science College of Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Architecture Scientific Research Institute, Chongqing 400015, China)

**Abstract** As the main material in constructing compacted rockfill dam, the engineering properties of rockfill have a vital effect on dam's security. In this thesis, the factors affecting compactness of rockfill are analyzed comprehensively on the basis of field tests, which provides theoretical basis for design and construction.

**Key words:** rockfill; dry density; particle graduation; water content