

文章编号:1001-4179(2015)07-0026-04

提高堆石坝过渡料细颗粒含量的措施

钟 权¹, 杨晨光¹, 冷振东²

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:堆石坝过渡料对垫层料具有反滤保护作用,其细颗粒含量是评价过渡料级配优劣的重要指标。结合Kuz-Ram爆破块度预测模型,分析了影响过渡料细颗粒含量的主要因素,并在长河坝过渡料开采爆破试验的基础上,总结了提高细颗粒含量的工程技术措施。爆破试验表明,选用爆速较高的炸药、适当减小炮孔间排距、选择合理的装药结构以及合适的起爆时差等措施,能够有效提高堆石坝过渡料的细颗粒含量,使由爆破开采获得的过渡料能直接上坝填筑,节省工程投资。

关键词:过渡料;细颗粒含量;爆破;堆石坝

中图法分类号:TV641.4

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.07.007

堆石坝中的过渡料主要用于垫层区与主堆石区之间的过渡,其目的在于防止垫层中的细料在渗透水流作用下流失而导致坝体渗透破坏,因此,过渡料能否满足设计要求直接影响坝体局部安全甚至整体稳定性。堆石坝过渡料的级配要求是相当严格的,其级配曲线应处于设计级配包络范围之内^[1]。国内外许多学者针对堆石坝级配料进行了大量研究^[2-10]。

堆石坝过渡料用量往往较大,一般可达数百万方,若采用传统机械破碎、筛分等施工工艺,加工成本高,且其生产强度远远达不到填筑要求,影响工程工期。采用爆破直采法进行过渡料生产具有显著的工程效益。其主要特点是,通过理论结合实际试验,采用爆破直接大量生产,省去传统二次机械破碎,在堆料过程中利用自然筛分,所生产过渡料满足设计要求,可直接上坝填筑,以满足堆石坝快速高效施工的要求。根据坝体对不同粒径材料的要求,可将粒径控制在一定范围内,同时满足其他各项指标。过渡料的开采主要运用深孔台阶爆破技术,充分考虑各项爆破参数对不同粒径级配料的控制作用。然而,在大渡河长河坝水电站过渡料爆破开采中,爆破试验筛分曲线未能处在设计包络线内,分析其主要原因是细颗粒含量偏低。因此,如何根据不同岩性及地质情况采取相应措施,使爆出

的级配料不需要筛分或掺和就可以满足设计及规范要求的各项指标,是过渡料开采过程中的关键技术问题。

1 堆石坝过渡料的相关要求

由于堆石坝过渡料对坝体局部安全及整体稳定性具有重要影响,《混凝土面板堆石坝设计规范》(DL/T5016-2011)等行业标准都对堆石坝筑坝材料及填筑标准进行了规定。其中,对过渡料进行了如下规定:过渡料对垫层料应具有反滤保护作用;过渡料需具有连续级配,最大粒径宜为300mm;压实后具有低压缩性和高抗剪强度,并具有自由排水性;过渡料可用洞室开挖石料、专门开采的细堆石料、经筛分加工的天然砂砾石料。针对过渡料需具有连续级配的要求,长河坝水电站过渡料设计要求为“过渡料最大粒径不大于300mm,小于0.075mm的颗粒含量不大于5%,小于5mm的颗粒含量不大于30%,不小于10%, $D_{15} \leq 8$ mm”。可见,堆石坝过渡料的级配要求相当严格,尤其表现在对细颗粒含量的控制上。

2 影响细颗粒含量的因素分析

2.1 爆破块度预测方法

Kuz-Ram模型是目前运用最为广泛的爆破块度

收稿日期:2014-07-11

作者简介:钟 权,男,工程师,主要从事水利水电工程施工组织工作。E-mail:whuzq2007@126.com

预测方法,它依据 Kuznetsov 方程和 R-R 分布函数提出。该模型从爆破参数导出 R-R 分布函数的指数,将爆破参数与块度分布联系起来。Kuz-Ram 模型与块度分布曲线具有良好的相关性。模型的基本表达式由 Kuznetsov 方程、R-R 分布函数和均度不均匀指数 3 部分所组成^[2]

$$\bar{x} = Aq^{-0.8} Q^{1/6} (115/E)^{19/30} \quad (1)$$

$$R = 1 - e^{-(\frac{\bar{x}}{x_0})^n} \quad (2)$$

其中,

$$n = (2.2 - 14w/d)(1 - e/w)[1 + (m - 1)/2]L/H \quad (3)$$

对于(2)式,当 $R = 0.5$ 时,有

$$0.5 = 1 - e^{-(\frac{\bar{x}}{x_0})^n} \quad (4)$$

此时, $\bar{x} = x_{50}$

$$x_0 = x_{50}/(\ln 2)^{1/n} \quad (5)$$

以上各式中, A 为岩石系数,取值大小与岩石的节理、裂隙发育程度有关,节理裂隙越发育其值越小; q 为炸药单耗, kg/m^3 ; Q 为单孔装药量, kg ; E 为炸药相对重量威力,铵油炸药为 100, TNT 时为 115; \bar{x} 为 d_{50} , 即爆破岩块的平均粒径, cm ; R 为小于某粒径的石料质量百分数, %; x 为岩块颗粒直径, mm ; x_0 为特征块度,即筛下累积率为 63.21% 时的块度尺寸, cm ; n 为不均匀指数,表示分布曲线的陡缓; e 为钻孔精度标准差, m ; L 为不计超钻部分的装药长度; d 为炮孔直径, mm ; w 为抵抗线, m ; m 为间排距系数,即孔距与真实排距(与起爆方式有关)之比; H 为台阶高度, m 。

2.2 主要影响因素分析

2.2.1 地质因素

岩体性质在某种程度上决定其可爆性,岩体结构面对爆破后岩体块度分布有重要影响。由式(1)可看出,岩石系数 A 与爆破平均块度成线性关系,即岩石越软、岩体的节理裂隙越发育,可爆性越好,其爆破平均块度就越小,细颗粒含量相应较高。从以往的面板堆石坝级配料开采爆破试验情况来看,节理裂隙发育岩体的 A 值较完整岩体小 30% ~ 50%,也就是说,地质因素对细颗粒含量影响非常大^[2]。

2.2.2 炸药品种

过渡料细颗粒主要依靠炮孔内药包周围的压缩破碎来产生,不同品种的炸药具有不同的爆速、威力及猛度等炸药性能,其破碎岩石的能力也就不一样。由式(1)可看出,爆破平均块度与炸药的相对威力有关。一般而言,威力越高,爆破平均块度越小,细颗粒含量相应越高。

2.2.3 爆破参数

(1) 抵抗线及间排距。研究表明,随着抵抗线的增加, d_{50} 随之增加,细颗粒含量相应减少。一般而言,在炸药单耗大体不变的条件下,过渡料细颗粒含量随着抵抗线减小而增加。抵抗线和排距确定后,孔距的选择对于块度分布影响很大。实践表明,当炮孔间距系数大于 2 后,爆破大块率及细颗粒含量都明显下降,块度分布变得均匀,这是级配料所不允许的;当炮孔间距系数小于 1 时,容易造成孔间过早拉开而泄气,不利破碎,也不宜采用。因此,堆石坝过渡料开采时,宜在 1 ~ 2 之间选取炮孔间距系数 m 值。

(2) 装药结构。装药结构主要指耦合装药或不耦合装药。不耦合装药由于削减了爆轰波作用到炮孔壁上的压力,导致细颗粒含量较少,使得岩石破碎块度的均匀化。耦合装药能够获得较大的压缩破碎圈,有效提高过渡料细颗粒含量。某工程在白云岩中的试验表明,耦合装药较不耦合装药(不耦合系数为 1.45)的爆破,可使 5 mm 以下粒径含量增加 2.6% ~ 2.8%, Cu 值也相应提高^[2]。因此,装药结构对过渡料细颗粒含量产生显著影响。

(3) 堵塞长度。为了保持和延长炮孔内高压气体的作用时间,提高破碎效果和减少个别飞石,必须进行炮孔堵塞,一般炮孔堵塞长度宜选为 $(0.7 \sim 1.0)w$ ^[6]。根据对条形药包爆破作用特性的研究,条形药包端部轴线方向爆炸应力波衰减最快。深孔梯段爆破顶部爆炸作用能量仅为中部的一半左右,爆破效果较差,所以孔口堵塞段的长短会影响过渡料的细颗粒含量。

(4) 起爆时差。合理的起爆时差能减小爆破中应力波对相邻炮孔的影响,能使爆破过程符合预先设计;同时,起爆时差的长短影响爆渣在空中碰撞的机率,影响爆破破碎效果,从而对过渡料细颗粒含量产生影响。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

长河坝水电站总装机容量 2 600 MW,大坝为砾石土心墙堆石坝,最大坝高 240.0 m,坝顶长度 502.85 m,坝顶宽度 16.0 m,总填筑方量达 2 763.87 万 m^3 ,其中过渡料达 200 多万 m^3 ,主要由响水沟和江咀石料场供应。料源岩性为花岗岩,岩石呈弱~微风化,岩质致密坚硬,浅表有厚约 0.5 ~ 1.5 m 的根植残积土层。饱和湿抗压强度为 94.5 ~ 120 MPa,软化系数为 0.74 ~ 0.78,天然密度为 2.61 ~ 2.99 g/cm^3 ,冻融损失率为 6% ~ 16%。据平硐勘探资料,岩体卸荷较强烈,强卸荷水平深度为 46 m,弱风化弱卸荷水平深度为 90 m,

以里为微新岩体。地质勘测未发现有大断裂通过,岩体中主要发育的构造裂隙有 4 组。岩体受裂隙切割,块径多呈 80 ~ 150 cm,此外,随机短小裂隙亦发育。

3.2 过渡料爆破试验

2012 年 7 月至 11 月,水电五局在响水沟料场进行了 3 场 9 个区的过渡料开采爆破试验,并于 2013 年 7 月至 9 月在该料场进行了过渡料开采生产性试验。各场次爆破后颗粒级配检测结果均偏粗,细颗粒含量偏低,颗粒级配筛分曲线不在设计包络线内,不能满足设计要求。2013 年 9 月至 12 月,长江科学院在响水沟料场及江咀料场进行了多次爆破试验,各场次试验结果表明,当单耗达 2.5 kg/m³ 时,爆破开采料的平均块度将低于或接近设计下包络线的平均块度 5.2 cm,这不利于起爆网络安全性,同时也增加开采成本。

3.3 提高细颗粒含量的技术措施

各场次爆破试验虽然未能获取符合设计要求的过渡料,但是通过总结分析各场次爆破试验参数及试验结果可以看出,采取适当的技术措施能够改善爆破效果,可在不同程度上提高爆破料细颗粒含量,使颗粒级配筛分曲线进入或者接近设计包络线,得到满足设计要求的过渡料。

3.3.1 选用爆速较高的炸药

水电五局 2012 年在响水沟料场进行的第 1 场Ⅱ区和第 2 场Ⅲ区爆破试验,其主要爆破参数见表 1,爆破试验筛分曲线见图 1。

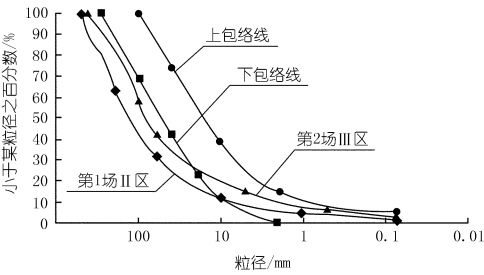


图 1 第 1 场Ⅱ区和第 2 场Ⅲ区爆破试验筛分曲线

根据表 1 可知,除炸药类型不同外,两次试验所选用的其他爆破参数基本一致。第 1 场Ⅱ区采用铵油炸药,其爆速一般为 2 000 ~ 2 800 m/s,第 2 场Ⅲ区采用乳化炸药,现场实测爆速达 5 100 m/s。由图 1 可看出,粒径小于 5 mm 的细颗粒含量由 9.0 % 提高到

16.2 %。

3.3.2 适当减小间排距

长科院在江咀料场进行了江咀(2)和江咀(3)爆破试验,其主要爆破参数见表 2,爆破试验筛分曲线见图 2。

表 2 江咀(2)和江咀(3)爆破试验参数

试验 编号	台阶 高度/m	间排距/ (m×m)	布孔 方式	单耗/ (kg·m ⁻³)	堵塞 长度/m	单孔 药量/kg	起爆 方式	炸药 类型	装药 结构
江咀(2)	10	2.0×1.9	正方形	1.84	1.2	54	斜线	乳化炸药	连续不耦合
江咀(3)	10	1.7×1.7	正方形	1.87	1.5	54	斜线	乳化炸药	连续不耦合

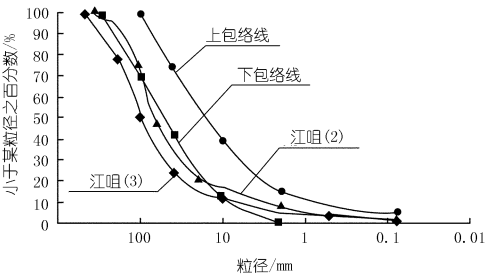


图 2 江咀(2)和江咀(3)爆破试验筛分曲线

根据表 2 可知,除间排距不同外,两次试验所选用的其他爆破参数基本相同。江咀(2)间排距为 2.0 m×1.9 m,单孔负担面积为 3.8 m²,江咀(3)间排距为 1.7 m×1.7 m,单孔负担面积为 2.8 m²。由图 2 可看出,粒径小于 5 mm 的细颗粒含量由 7.1 % 提高到 12.9 %。

3.3.3 合理的装药结构

水电五局 2013 年在响水沟料场进行了Ⅰ区和Ⅲ区爆破试验,其主要爆破参数见表 3,爆破试验筛分曲线见图 3。

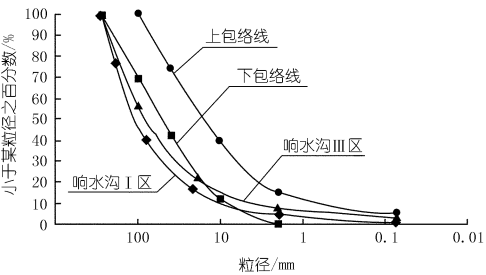


图 3 Ⅰ区和Ⅲ区爆破试验筛分曲线

说明:两组筛分曲线均为剔除粒径大于 300 mm 超径石颗粒的级配情况

根据表 3 可知,除装药结构不同外,两次试验所选

表 1 第 1 场Ⅱ区和第 2 场Ⅲ区爆破试验参数

区次	台阶高度/ m	超钻深度/ m	钻孔直径/ mm	钻孔角度/ (°)	布孔 方式	堵塞长度/ m	负担面积/ m ²	单耗/ (kg·m ⁻³)	起爆 方式	装药 结构	炸药 类型
第 1 场Ⅱ区	15	1.5	120	90	矩形	2.5	10.85	0.85	梯形	连续不耦合	铵油炸药
第 2 场Ⅲ区	15	1.5	120	90	矩形	2.5	11.76	0.90	梯形	连续不耦合	乳化炸药

表 3 I 区和Ⅲ区爆破试验参数

区次	台阶 高度/m	超钻 深度/m	钻孔 直径/mm	钻孔 角度/(°)	布孔 方式	堵塞 长度/m	间排距/(m×m)	单耗/ (kg·m ⁻³)	起爆 方式	装药 结构	炸药 类型
I 区	15	1.5	120	90	矩形	2.5	3.0×2.4	1.1	V 形	连续不耦合	铵油炸药
Ⅲ区	15	1.5	120	90	矩形	2.2	3.0×2.3	1.1	V 形	连续耦合	铵油炸药

用的其他爆破参数基本一致。I 区爆破试验采用连续不耦合装药,Ⅲ区爆破试验采用连续耦合装药。由图 3 可看出,粒径小于 5 mm 的细颗粒含量由 5.8% 提高到 10.5%。

3.3.4 选择合理的起爆时差

长科院在响水沟料场的响水沟(1)和江咀料场的江咀(4)进行了爆破试验,其主要爆破参数见表 4,爆破试验筛分曲线见图 4。

表 4 响水沟(1)和江咀(4)爆破试验参数

试验 编号	台阶 高度/m	间排距 (m×m)	单耗/ (kg·m ⁻³)	堵塞 长度/m	单孔 药量/kg	起爆 方式	雷管 类型	炸药 类型	装药 结构
响水沟(1)	10	1.6×1.4	2.46	1.5	57.0	V 型	高精	乳化炸药	连续不耦合
江咀(4)	10	1.5×1.5	2.50	1.2	56.8	V 型	普通	乳化炸药	连续不耦合

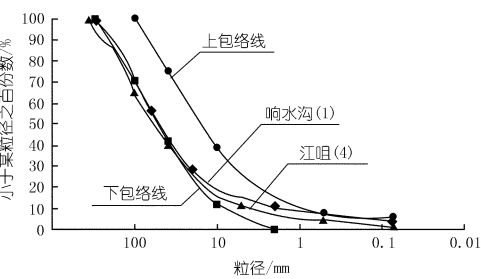


图 4 响水沟(1)和江咀(4)爆破试验筛分曲线

根据表 4 可知,除使用不同雷管类型外,两次试验所选用的其他爆破参数基本相同。江咀(4)采用普通导爆管雷管,孔内采用 MS13 段延时,排间采用 MS2 段接力,从爆堆形状可看出,孔内延时误差导致前后排窜段,爆渣向后翻;响水沟(1)采用高精度雷管,爆破效果较为理想。由图 4 可看出,粒径小于 5 mm 的细颗粒含量由 10.4% 提高到 15.2%。

此外,提高炸药单耗量、减小抵抗线、减小堵塞长度以及合理的起爆方式等都能有效改善过渡料爆破开采的级配情况,从而提高细颗粒含量,在工程实践中都得到了很好的运用。

4 结 语

水电五局及长科院都针对长河坝过渡料进行了多次爆破试验,尽管试验结果与设计要求有一定的偏差,但通过采取以上措施,改善了爆破效果,在不同程度上提高了细颗粒含量,使颗粒级配筛分曲线不断接近设计的包络线。分析表明,选用爆速较高的炸药、适当减小间排距、选用合理的装药结构以及合理的起爆时差,

能够有效提高堆石坝过渡料细颗粒含量,可提供符合设计要求的直供上坝过渡料。但是,由于岩体自身的不均匀性、爆破试验的有限性及爆破工程的模糊性,使得堆石坝过渡料在爆破开采过程中具有不确定性。因此,如何通过控制爆破参数准确获取所需级配的过渡料,还有待进一步研究和实践。

参考文献:

[1] DLT 5016-2011. 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

[2] 张正宇,张文煊,吴新霞,等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[3] 赵伟,王近宏. 浅谈大渡河长河坝水电站大坝堆石料爆破开采技术[J]. 四川水力发电,2012,31(4):86-89.

[4] 孙文明. 过渡料爆破直采技术简述[J]. 山西水利,2012,(4):33-34.

[5] 张戈平. 浅谈降低深孔梯段爆破大块率的措施[J]. 工程爆破,2009,15(6):48-51.

[6] 熊亮,丁庆. 长河坝水电站堆石料爆破施工参数选择[J]. 水利水电施工,2013,(4):32-35.

[7] 王保田,余湘娟,刘汉龙. 面板堆石坝坝料力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):332-336.

[8] 张家发,定培中,张伟,等. 混凝土面板堆石坝中过渡区的渗流控制作用研究[J]. 岩土力学,2011,32(12):3548-3554.

[9] 王明寿,张光科,张正忠,等. 堆石坝坝料爆破开采试验细粒含量控制[J]. 云南水力发电,2004,21(1):28-30.

[10] 陈同俭,杨建文. 洪家渡水电站面板堆石坝坝料开采爆破[J]. 人民长江,2004,(7):3-5.

(编辑:郑 毅)

(下转第 40 页)



对比是否含有类泥状物夹层情况下浸润线、水力梯度及渗流量的变化,可得出如下结论:类泥状物夹层的存在对坝体渗流场虽然有影响,但是范围有限,不会导致坝体产生渗透破坏和渗流量变大的危险。

(2) 通过对大坝典型断面的二维稳定性分析可知,类泥状物夹层对于坝坡稳定性产生了一定的影响:在蓄水期,对下游坝坡稳定性的影响较小;在泄放洪期,上游坝坡稳定安全系数减小较多,且随着水位下降速率的增大,坝坡稳定系数逐步减小;当水位消落速率控制在 10 m/d 以内时,坝体仍在安全范围内运行,从而验证了设计方提出的水位消落速率应不超过 6 m/d 的结论。

参考文献:

- [1] 陈守开,严俊,李健铭.面板堆石坝垂直缝破坏下三维渗流场有限元模拟[J].岩土力学,2011,(11):3473-3478.
- [2] 李海成.混凝土面板堆石坝止水失效对坝后渗流场影响的研究[D].兰州:兰州理工大学,2011.
- [3] 张嘎,张建民,洪锦.面板堆石坝面板出现裂缝工况下的渗流分析[J].水利学报,2005,(4):420-425.
- [4] 许宝田,钱七虎,阎长虹,等.多层软弱类泥状物夹层边坡岩体稳定性及加固分析[J].岩石力学与工程学报,2009,(2).
- [5] 白寅虎,王正中,余小孔.高面板堆石坝坝坡稳定性分析[J].中国农村水利水电,2012,(6):168-171.
- [6] 李莉,胡建平.克里金插值算法在等高线绘制中的应用[J].天津城市建设学院学报,2008,(1):68-71.

(编辑:郑毅)

Influence of rolled mud - like intercalation on seepage and stability of a rock - fill dam

LUO Jiman

(Stung Russei Chrum Department, China Huadian Corporation, Beijing 100031, China,

Abstract: Impacted by rainy weather in Cambodia, mud - like intercalations with thickness of 5 ~ 10cm were generated in the rolling layers of sandstone materials of a rock - fill dam at downstream of Stung Russei Chrum. In order to understand the influences of these intercalations on seepage and stability performance of the dam body, 3D seepage analysis and 2D dam slope stability analysis are carried out aiming at three typical cases, the impoundment period, the normal operation period and the flood discharge period. The results show that the mud - like intercalations have slight influence on the seepage field, but the stability of upstream slope decreases, so the rate of water level fluctuating should be controlled rationally during operation.

Key words: mud - like intercalation; seepage field; dam slope stability; slab rock - fill dam

(上接第 29 页)

Measures of increasing fine particle content in transition material of rock - fill dams

ZHONG Quan¹, YANG Chenguang¹, LENG Zhendong²

(1. Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 2. National Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In rock - fill dams, the transition material plays a role of filtration - prevention for the cushion material, and the fine particle content is an important assessing indicator for the gradation quality of transition material. Based on the Kuz - Ram size prediction model for explosion blocks, we analyze the influential factors to the fine particle content. And on the basis of the explosion tests in mining of transition material at Changheba Hydropower Station, we summarize the main technical measures increasing the fine particle content. The explosion test shows that the following measures could effectively increase the fine particle content in mining process of transition material, namely adopting high detonation velocity explosive, reducing the interval space of blasting holes moderately, selecting rational charging structures and adopting rational ignition time - differences. By adopting the presented measures, we could use the blasted stones as transition material directly, saving engineering cost effectively.

Key words: transition material; fine particle content; explosion; rock - fill dam