

# 开茂水库面板堆石坝坝料碾压试验及成果分析

向学忠, 李旺盛, 赵启强

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:**结合面板堆石坝的施工特点,选取不同特性的筑坝材料进行现场碾压试验。通过试验成果,分析了该类筑坝材料的颗粒级配、渗透系数以及干密度等技术参数是否能够满足设计要求并选取合理、经济的碾压参数进行面板堆石坝填筑施工。

**关键词:**北川开茂水库;面板堆石坝;现场碾压试验;碾压参数;成果分析

中图分类号:TV7;TV52;TV523;TV522

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2015)05-0016-04

## 1 工程概述

开茂水库位于四川省绵阳市北川羌族自治县安昌镇及永宁镇境内,库区枢纽主坝为钢筋混凝土面板堆石坝,坝顶高程 612 m,最大坝高 56 m,坝顶长 357.35 m。大坝分区自上游至下游依次为坝体盖重区、上游粘土铺盖区、面板、II B 特殊垫层区、II A 垫层区、III A 过渡区、III B 主堆石区、

III C2 次堆石区、III C1 下游堆石区等几部分。堆石区填筑料从杨家湾石料场爆破开采,II A 垫层料从安昌河下河街料场开采,III A 过渡料原计划也从安昌河下河街料场开采,但由于该料场储量不足,在工程建设过程中调整为采用北川老县城唐家山堰塞湖下游河道冲淤料。图 1 为开茂水库面板堆石坝典型断面图。

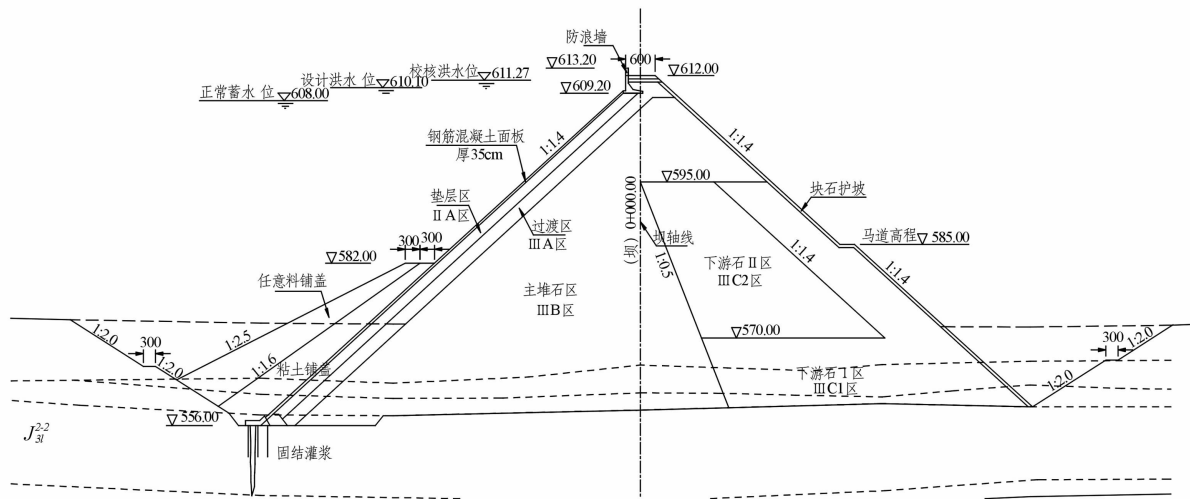


图 1 开茂水库面板堆石坝典型断面图

## 2 料源情况

杨家湾堆石料场长约 350 ~ 600 m,宽约 420 m,料场所处地层为侏罗系莲花口组第⑦层中下部,地层产状为 N75° ~ 80°E/NW ∠9° ~ 12°。岩相变化较大,岩性主要为灰白色砾岩与紫红色泥岩互层,其中灰白色砾岩为有用层,紫红色泥岩为无用层,需剔除。下河街砂砾石料场分布于安昌河河道上,枯水期部分产地高出河水面 0.5 ~ 1.2 m

漫滩,绝大部分产地位于水下,有用储量主要位于水下。老县城河道料场的物料来源于两岸岸坡崩塌岩体碎块经洪水搬运堆积,块碎石级配在水平分布及竖向分布上均表现为不均匀性和级配的不连续性,块石岩性强度较高,碎砾石岩性强度较低。

## 3 现场碾压试验及结果分析

### 3.1 碾压设备选型

面板堆石坝筑坝时,堆石料、过渡料及部分垫层料采用 20 t 自行式振动碾进行碾压,靠近上游

收稿日期:2015-08-25

挤压边墙 1m 范围内垫层料采用 2 t 小型振动碾进行碾压。试验时,选用的大型碾压设备为中国龙工集团生产的龙工 LG520B;选用的小型碾压设备为济宁德瑞得机械有限公司生产的 FYL - 600 型压路机。

### 3.2 试验采取的取样方法

垫层料、过渡料、堆石料现场密度检测采用挖坑灌水法。垫层料的挖坑直径为 40 cm,过渡料、堆石料的挖坑直径为 150 ~ 200 cm,挖坑深度分别为各区的填筑层厚。

垫层料含水量检测采用烘干法;过渡料、堆石料含水量检测采用烘干和风干联合法。

### 3.3 垫层料现场碾压试验及成果分析

垫层料填筑厚度与挤压边墙高度一致,按压实厚度 40 cm 控制。靠近挤压边墙 1 m 宽范围内分 2 次填筑,单次铺填厚度按 20 cm 控制,采用 2 t 小型振动碾碾压。碾压试验前,先对筛分加工后的半成品垫层料进行颗粒筛分试验以验证各级颗粒含量是否满足设计要求。半成品垫层料颗粒筛分试验成果见图 2。

孔径 (mm)	留筛试样质量 (g)	累积留筛试样质量 (g)	小于该孔径试样的质量 (g)	小于该孔径试样的质量百分数 (%)	小于该孔径试样质量占总试样质量百分数 (%)
100	0	0	92660	100.0	100.0
80	2060	2060	90600	97.8	97.8
60	5250	7310	85350	92.1	92.1
40	9630	16940	75720	81.7	81.7
20	20900	37840	54820	59.2	59.2
10	14740	52580	40080	43.3	43.3
5	22720	75300	17360	18.7	18.7
2	212.71	212.71	287.57	57.5	10.8
1.000	68.00	280.71	219.57	43.9	8.2
0.500	84.95	365.66	134.62	26.9	5.0
0.250	62.23	427.89	72.39	14.5	2.7
0.100	38.94	466.83	33.45	6.7	1.3
0.075	4.70	471.53	28.75	5.7	1.1
筛底	28.75	500.28			

土的颗粒分析

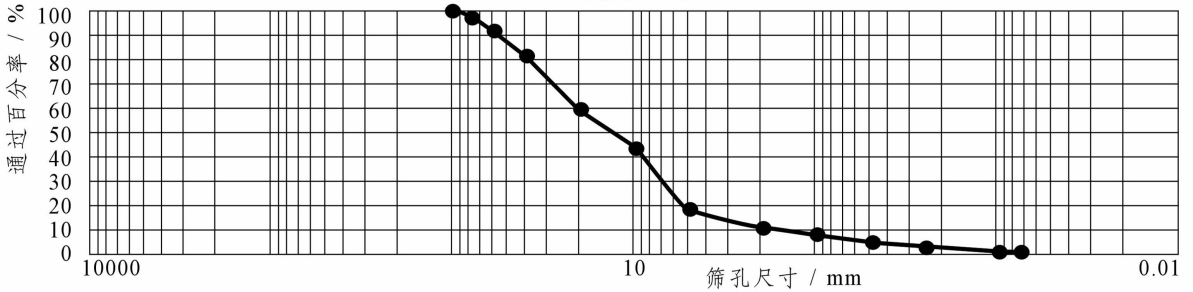


图 2 半成品垫层料颗粒筛分试验成果图

从图 2 中可以看出,粒径 < 5 mm 的颗粒含量为 18.7%,设计要求为 35% ~ 55%,不满足设计要求,需要掺加细粒径料;粒径 < 0.075 mm 的颗粒含量为 5.7%,设计要求为 4% ~ 8%,满足设计要求。

根据半成品垫层料的颗粒筛分结果,采用层铺法在半成品垫层料中掺配满足设计要求的人工

砂,在料场选择碾压场地,分 4 个区进行现场碾压试验。铺填厚度为 20 cm 时,采用 2 t 小型振动碾碾压,分不加水 and 加水 5% 两种,碾压遍数为 6 和 8 遍;铺填厚度为 40 cm 时,采用 20 t 自行式振动碾碾压,分不加水、加水 5% 和加水 10% 三种,碾压遍数为 6 和 8 遍。碾压试验成果见表 1、2。

表 1 铺填厚度为 20 cm 时垫层料碾压试验成果表

铺料厚度 /cm	碾压遍数 /遍	加水 0%		加水 5%		渗透系数 /cm · s <sup>-1</sup>
		干密度 /g · cm <sup>-3</sup>	孔隙率 /%	干密度 /g · cm <sup>-3</sup>	孔隙率 /%	
20	静 2 + 振 6	2.06	22.4	2.17	19.5	/
	静 2 + 振 8	2.19	18.05	2.26	17.3	/

表2 铺填厚度为40 cm时垫层料碾压试验成果表

铺料厚度 /cm	碾压遍数 /遍	加水0%		加水5%		加水10%		渗透系数 /cm·s <sup>-1</sup>
		干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	孔隙率 /%	干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	孔隙率 /%	干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	孔隙率 /%	
40	静2+振6	2.03	23.1	2.09	21.8	2.18	20.5	7.2×10 <sup>-3</sup>
	静2+振8	2.11	21	2.2	19.6	2.28	18.2	3.6×10 <sup>-3</sup>

从表1和表2中可以看出,在垫层料铺料厚度不变、碾压遍数不变的情况下,随着加水量的增加其压实度相应升高,孔隙率相应减小,说明碾压时加水对压实度有积极影响;在垫层料铺料厚度相同、加水量相同的情况下,振碾8遍比振碾6遍的干密度高、孔隙率低,说明碾压遍数越多、压实效果越好。

从碾压试验中干密度数据可以看出,铺料厚度为20 cm、加水5%、振碾6遍时其干密度能够达到设计要求;加水5%、振碾8遍时其干密度较高,孔隙率较低,同样满足设计要求;振碾6遍且不加水时其干密度达不到设计要求。因此,结合工程实际情况,从经济性等各方面考虑,铺填厚度为20 cm时,采用2 t小型振动碾碾压,碾压参数:振碾8遍,不加水,激振力15 kN,行驶速度1.2 km/h。铺料厚度为40 cm时,不加水和加水5%、

振碾6遍时其干密度小于设计要求的2.17 g/cm<sup>3</sup>;加水5%、振碾8遍和加水10%碾压时,均能达到设计要求;但加水10%、振碾6遍时其孔隙率偏高,渗透系数均在10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup>之间,因此,铺填厚度为40 cm时,采用20 t自行式振动碾碾压,碾压参数:振碾8遍,加水5%,激振力350 kN,行驶速度为2.1 km/h。

### 3.4 过渡料现场碾压试验及成果分析

过渡料铺料厚度与垫层料铺料厚度一致,为40 cm。试验前,对开采的石料经过条筛筛分剔除粒径300 mm以上的颗粒后,在开采料源附近选择一块试验场地进行现场碾压试验。根据已有工程经验,碾压遍数从振碾8遍和振碾10遍中选择,加水量在加水5%和加水10%中选择,试验成果见表3。

表3 过渡料碾压试验成果表

铺料厚度 /cm	碾压遍数 /遍	加水5%				加水10%				渗透系数 /cm·s <sup>-1</sup>
		干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	孔隙率 /%	<5 mm 颗粒含量 /%	<0.075 mm 颗粒含量 /%	干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	孔隙率 /%	<5 mm 颗粒含量 /%	<0.075 mm 颗粒含量 /%	
40	静2+振8	2.23	16.8	17.2	4.5	2.24	16.5	18.2	4.9	3.75×10 <sup>-2</sup>
	静2+振10	2.34	15.6	21.3	5.9	2.34	15.2	21.9	6.3	4.30×10 <sup>-3</sup>

从表3中可以看出,在铺料厚度、碾压遍数相同的情况下,其干密度并没有随加水量的增加而提高,说明加水加到一定量后对压实度没有“积极”作用;在铺料厚度、加水量一定的情况下,碾压遍数的增加对干密度有较大幅度的提高,说明压实度随着碾压遍数的增加而增加,同时,粒径<5 mm颗粒含量和粒径<0.075 mm颗粒含量亦随着碾压遍数的增加而增多,其渗透系数也随之减小,说明该料场料源中软岩颗粒掺加其中,在强振碾压下软岩颗粒被碾压破碎成细颗粒反而对过渡料渗透性不利。因此,过渡料铺填厚度为40 cm,采用20 t自行式振动碾碾压时选择的碾压参数为:振碾8遍,加水5%,激振力350 kN,行驶速度为2.1 km/h。

### 3.5 堆石料现场碾压试验及成果分析

杨家湾料场爆破后软岩料无法剔除,经设计研究要求分别进行含软岩30%和50%的混合料进行碾压试验,碾压试验场地在采石场附近选定。试验时分铺填厚度60 cm,振碾6遍、8遍和铺填厚度80 cm,振碾6遍、8遍控制。碾压时,由于混合料中泥岩含量较多未进行洒水。图3为含软岩料50%混合料的碾压后颗粒级配表,图4为含软岩料30%混合料的碾压后颗粒筛分级配图。表4为含软岩料30%和50%混合料碾压试验成果表。

从图3、4中可以看出,碾压后,无论含30%软岩的混合料还是50%软岩的混合料中粒径<0.075 mm颗粒含量均远大于设计要求,其中含50%软岩混合料中粒径<0.075 mm颗粒含量为28%,含30%软岩混合料中粒径<0.075 mm颗粒含量为19.2%;根据计算,含30%软岩混合料

孔径 (mm)	筛前试样质量 (g)	筛后试样质量 (g)	小于该孔径试样的质量 (g)	小于该孔径试样的质量百分数 (%)	小于该孔径试样的质量占总试样质量百分数 (%)
1000	0	0	2275200	100.0	100.0
800	172330	172330	2102870	92.4	92.4
600	79820	252150	2023050	88.9	88.9
400	86890	339040	1936160	85.1	85.1
200	106090	445130	1830070	80.4	80.4
100	265660	710790	1564410	68.8	68.8
80	48860	739650	1515550	66.6	66.6
60	223370	983020	1292180	56.8	56.8
40	137550	1120570	1154630	50.7	50.7
20	246850	1367420	907180	39.9	39.9
10	246220	1613640	661960	29.1	29.1
5	210070	1823710	451490	19.8	19.8
2	164180	1987890	287310	12.6	12.6
1.000	30.36	30.36	371.88	92.5	11.7
0.500	72.85	103.21	299.03	74.3	9.4
0.250	67.36	170.67	231.67	57.6	7.3
0.100	100.92	271.49	130.75	32.5	4.1
0.075	18.22	289.71	112.53	28.0	3.5
筛底	112.53	402.24			

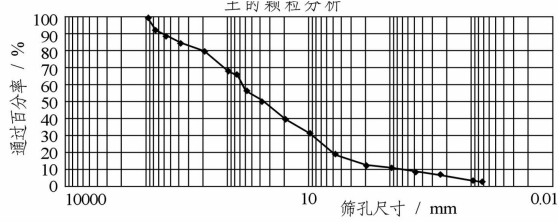


图3 含软岩料50%混合料的碾压后颗粒筛分级配图

孔径 (mm)	筛前试样质量 (g)	筛后试样质量 (g)	小于该孔径试样的质量 (g)	小于该孔径试样的质量百分数 (%)	小于该孔径试样的质量占总试样质量百分数 (%)
1000	0	0	3615920	100.0	100.0
800	121110	121110	3494810	96.7	96.7
600	82980	204090	3411830	94.4	94.4
400	71330	275420	3340500	92.4	92.4
200	424050	699470	2916450	80.7	80.7
100	325160	1024630	2591290	71.7	71.7
80	125850	1150480	2465440	68.2	68.2
60	304720	1455200	2160720	59.8	59.8
40	223290	1678490	1927430	53.6	53.6
20	432380	2110870	1505090	41.6	41.6
10	363320	2474190	1141730	31.6	31.6
5	361970	2836160	779760	21.6	21.6
2	286870	3123030	492890	13.6	13.6
1.000	53.79	53.79	346.14	86.6	11.8
0.500	94.34	148.13	251.80	63.0	8.6
0.250	69.92	218.05	181.88	45.5	6.2
0.100	89.80	307.85	92.08	23.0	3.1
0.075	15.19	323.04	76.89	19.2	2.6
筛底	76.89	399.93			

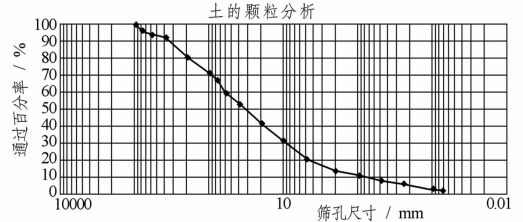


图4 含软岩料30%混合料的碾压后颗粒筛分级配图

表4 含软岩30%和50%混合料碾压试验成果表

铺料厚度 /cm	碾压遍数 /遍	含软岩30%的混合料		含软岩50%混合料	
		干密度 /g · cm <sup>-3</sup>	渗透系数 /cm · s <sup>-1</sup>	干密度 /g · cm <sup>-3</sup>	渗透系数 /cm · s <sup>-1</sup>
60	静2 + 振6	2.03	8.3 × 10 <sup>-4</sup>	1.93	3.9 × 10 <sup>-4</sup>
80	静2 + 振8	2.06	5.1 × 10 <sup>-4</sup>	1.95	4.4 × 10 <sup>-4</sup>

的不均匀系数  $C_u$  为 1.9, 含 50% 软岩混合料的不均匀系数  $C_u$  为 1.95, 均与设计要求的均匀系数大于 16 的要求相差甚远。

从表 4 中可以看出, 混合料不论是振碾 6 遍, 还是振碾 8 遍, 其干密度虽然有小幅度的提高, 但始终达不到设计要求, 渗透系数均在  $10^{-4}$  左右, 其满足不了面板堆石坝堆石料的渗透要求。

#### 4 结 语

(1) 从试验结果可以看出, 在其他可变量固定时, 碾压遍数的增加对筑坝材料的压实度有较大幅度的提高, 洒水量的增加对压实度也有一定的积极作用。同时, 有关数据表明: 碾压遍数过多会使坝料中细颗粒含量增加, 进而影响坝料的渗透性; 洒水量在达到一定量时, 对压实度的影响较小, 进而推测当洒水量达到某值时, 压实度将趋于一个稳定值或呈现下降趋势, 不再随洒水量的增加而增大。

(上接第 15 页)

本次灌浆试验结果表明: 所采用的孔位布置方式、灌浆材料、灌浆参数、结束标准等能够很好地满足岩溶及裂隙发育地区的帷幕灌浆施工质量和进度要求, 可供类似工程借鉴。

作者简介:

因此, 在进行面板堆石坝筑坝时, 应根据实际筑坝材料因地制宜, 选择合理、经济的碾压参数。

(2) 堆石料试验结果表明, 泥岩、砾岩混合料筑坝时, 由于泥岩强度很低、砾岩强度相对较高, 施工过程中受振动碾碾压后泥岩全部转化为土颗粒填充在砾岩骨架之间, 使坝料渗透系数大大降低, 无法满足筑坝要求, 需重新选定新的料场进行筑坝或结合面板堆石坝的特点改变坝型进行筑坝。

作者简介:

向学忠 (1970-), 男, 重庆丰都人, 基础工程分局副局长, 高级工程师, 从事水利水电、房屋建筑工程施工、技术管理及市场开发等工作;

李旺盛 (1987-), 男, 青海民和人, 工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理工作;

赵启强 (1975-), 男, 四川巴中人, 高级工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑: 李燕辉)

史青松 (1975-), 男, 内蒙古赤峰人, 基础工程分局副局长, 高级工程师, 学士, 从事水利水电基础工程施工技术与管理工作;

刘 炜 (1982-), 男, 四川南充人, 工程师, 从事水利水电基础工程施工技术与管理工作;

李成斌 (1989-), 男, 甘肃天水人, 助理工程师, 从事水利水电基础工程施工技术与管理工作。

(责任编辑: 李燕辉)