

砂砾石大坝填筑碾压的相关试验与研究

张朋辉¹, 韩赛超², 李晓帅¹, 张小东¹

(1. 北京振冲工程股份有限公司, 北京 100102; 2. 北京勘察技术工程有限公司, 北京 100192)

摘要: 针对南疆砂砾石填筑大坝进行碾压试验, 验证坝体填筑设计压实标准的合理性、检验 22 t 自行式振动碾的适用性及其性能的可靠性。本试验主要采用室内相对密度试验、现场的碾压测定出碾压遍数、碾压沉降及相应密实度及其他试验参数, 通过试验参数列表、试验参数包络线图与设计标准值的比较, 得出最佳砂砾石填筑方案, 同时也确定大坝填筑时的施工碾压控制参数, 从而确保了工程质量。

关键词: 砂砾石; 坝体; 填筑; 碾压试验; 坝壳料; 过渡料; 密实度

中图分类号: TV23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)05-0072-06

Tests and Research on Filling and Roller Compaction of Sand Gravel Dam/ZHANG Peng-hui¹, HAN Sai-chao², Li Xiao-shuai¹, ZHANG Xiao-dong¹ (1. Beijing Vibroflotation Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China; 2. Beijing Exp-
lo-Tech Engineering Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The filling and compacting tests are made for sand gravel filled dam in southern Xinjiang to verify the rationality of dam filling design compaction standard and test the 22t self-propelled vibration roller on the applicability and the performance reliability. The test determined the number of rolling passes, compaction settlement, the corresponding compactness and other parameters mainly by indoor relative density test and field RCC. By comparing the list of test parameters, test parameters enveloping line diagram and design standard values, the best sand gravel filling scheme is obtained and the construction RCC dam filling control parameters are also determined to ensure the engineering quality.

Key words: sand gravel; dam; filling; roller compaction test; dam shell materials; transition material; compactness

1 工程概况

迪那河五一水库枢纽工程位于新疆巴音郭楞蒙古自治州轮台县群巴克乡境内, 距轮台县以北 40 km, 迪那河开发方式为一库九级, 水库及上游四级处于深山, 下游四级位于出山口下游, 本工程是迪那河干流控制性工程, 具有供水、灌溉、防洪兼顾发电等综合效益。拦河坝为碾压式沥青混凝土心墙砂砾石坝, 最大坝高 102.5 m, 总库容 0.995 亿 m³, 调节库容 0.591 亿 m³, 为不完全年调节水库。

水库大坝坝顶高程 1375.7 m, 建基面高程 1272.0 m, 最大坝高 102.5 m。坝顶宽度为 10 m, 坝长 384.6 m。坝体填筑分区从上游至下游分为: 上游砂砾料区、上游过渡料区、沥青混凝土心墙、下游过渡料区、下游砂砾料区、利用料区、下游排水区。

2 试验目的及内容

2.1 试验目的

收稿日期: 2016-11-05; 修回日期: 2017-02-20

作者简介: 张朋辉, 男, 汉族, 1984 年生, 工程师, 从事水利水电工程施工以及岩土工程相关工作, 北京市朝阳区望京西园 221 号博泰大厦 11/12 层, zphlj@163.com; 韩赛超, 女, 汉族, 1985 年生, 工程师, 从事岩土工程相关工作, 北京市海淀区双泉堡 125 号院 60 号楼, 418016521@qq.com。

- (1) 验证坝体填筑设计压实标准的合理性;
- (2) 检验 22 t 自行式振动碾的适用性及其性能的可靠性;
- (3) 通过试验确保达到填筑标准的压实方法(含铺填卸料方法、振动碾行车及振动技术性能、免加水碾压效果等);
- (4) 通过试验确定大坝填筑时的施工碾压参数。

2.2 试验内容

(1) 室内标准曲线的绘制。通过室内相对密度试验, 按规范方法剔除 60 mm 以上粒径后, 人工合成不同含砾率的级配料进行最大干密度、最小干密度试验, 绘制干密度与含砾率(P_s)关系曲线, 进而也可换算出在不同控制标准下(相对密度分别为 0.80、0.85、0.90)的干密度与含砾率(P_s)关系曲线, 称之为标准曲线。

(2) 现场标准曲线的修正。采用碾压法进行,

利用现场振动碾(22 t 自行式振动碾)对全级配砂砾石料进行碾压,碾压密实后进行干密度、颗粒分析试验,对室内标准曲线进行复核修正,为坝体填筑质量提供控制标准。

(3)对坝体砂砾料进行不同铺土厚度(拟选择 80、100、120 cm)、不同碾压遍数(6、8、10 遍)的组合碾压试验,了解不同区域的铺料方式、铺料厚度、碾压遍数、行车速度、压实效果。

(4)试验过程中进行相应的检测项目,主要包括沉降量、干密度、颗粒分析、渗透系数等试验。

(5)对填筑试验结果进行分析与评价,确定出最优碾压参数,编写碾压试验报告递交监理,根据设计要求对施工参数的选择作出论证。

3 试验用料确定

3.1 坝料设计要求

根据设计资料,大坝坝料类别主要有坝壳料、过渡料 2 种,根据施工进度计划,该阶段先对坝壳料区进行填筑,故本次碾压试验主要针对坝壳料进行,过渡料碾压参数可结合沥青混凝土心墙碾压试验进行确定。料源代表性直接影响碾压试验的成败,需明确料场的开采位置、各料场的级配情况、各种坝料的质量要求等,见表 1。

表 1 坝体填筑料主要设计指标

填筑料名称	坝料要求	填筑要求	填筑厚度/cm	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
坝壳料区	$D_{\max} \leq 500 \text{ mm}$, $< 0.075 \text{ mm}$ 颗粒含量 $< 8\%$	$D_r \geq 0.85$	100	$\geq 10^{-3}$
过渡料区	$D_{\max} \leq 80 \text{ mm}$, $< 5 \text{ mm}$ 的颗粒含量在 $20\% \sim 40\%$, $< 0.075 \text{ mm}$ 的颗粒含量 $< 5\%$	$D_r \geq 0.85$	50	$\geq 10^{-2}$

3.2 试验用料评价

根据前期勘察成果及本次料场复查结果,最终确定采用利用料场为主料场。对料场进行复查时,结合了前期地勘试验资料对各组颗分曲线进行统计分析,对每组料最大粒径 $D_{\max}$ 、特征含量 d_{10} 、 d_{20} 、 d_{30} 、 d_{60} 及不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 等参数进行统计,得到均值与方差,从而分析出料场级配的离散程度。

试验用料随着其性质的不同,影响到碾压试验的组数和试验场次的多少。对于坝壳料,当其上下级配包线在一个很窄小的范围内时,采用平均级配曲线近似的代表该料场的坝料性质,可以它为代表

进行碾压试验。若上下包线分布范围很大时,代表性坝料将是多组,则应审慎选取不同级配的代表坝料进行碾压试验。当有多个料场时,若不同料场坝料的性质相差较大时,也应分别对每个料场的坝料进行碾压试验。根据本次料场复核,坝料级配变化不大,平均线细料含量分布在 25% 左右,级配相对比较稳定。坝料与同类工程比较总体上偏细,不均匀系数较大, $C_u = 77.0$, 曲率系数 $C_c = 4.6$, 级配不良,故本次碾压试验采用平均线进行,见图 1。

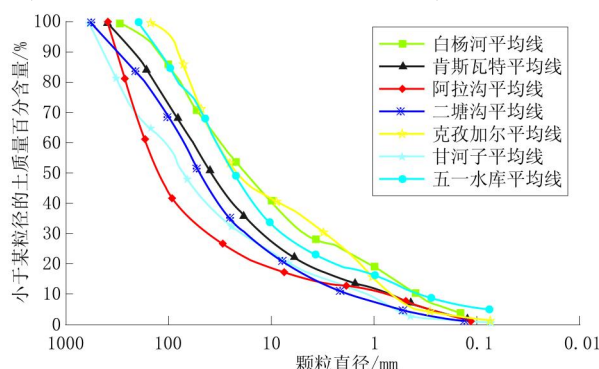


图 1 同类工程坝料颗粒级配曲线

4 标准曲线的推求

4.1 室内标准曲线

砂砾料填筑的压实标准以相对密度控制,施工前先通过试验确定填筑料的最大和最小干密度,对施工质量控制具有重要意义。然而确定砂砾料的现场最大干密度还没有一个完整、成熟的方法,致使质检结果难以评价,影响工程填筑质量。《土工试验规程》(SL 237—1999)中规定了粒径 $< 60 \text{ mm}$ 粗粒土的相对密度试验方法。该方法虽然对粒径 $> 60 \text{ mm}$ 的土料试验提出了可采用剔除法、等量代替法、相似级配法、混合法等方法,但同时也指出这几种方法各有一定局限性,要求在使用时要根据土料性质和试验项目来决定。工程实践证明,这些方法确有不足之处,经常出现相对密度 > 1 或反复碾压也达不到压实标准,难以满足工程实际的需要。本次碾压试验先在室内对坝料进行超径剔除,测定不同含砾率最大、最小干密度,绘制试验室最大、最小干密度标准曲线。

4.2 实验室配料

实验室为得到较可靠的标准曲线,以坝料上、下包线含砾率作为边界,选择砾石含量为 45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%、85% 进行人工配

料,每组级配料用量 100 kg,进行最大、最小干密度试验,为保证试验成果的可靠性,均做平行试验。

相对密度试验样筒尺寸为 $\varnothing 300 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$,最小干密度试验采用固定体积法,试验按《土工试验规程》(SL 237—054—1999)方法进行,最大干密度试验采用振动击实法,以模拟堆石坝现场施工振动碾振动压实,试验采用粗粒料相对密度仪,试样顶部静载 14 kPa,振动频率为 20 Hz,振动历时 8 min,结果见表 2。绘制最大、最小干密度与不同砾石含量的关系曲线,根据设计要求推算出相对密度为 0.80、0.85 及 0.90 时对应的干密度曲线,结果见图 2。

表 2 不同砾石含量实验室最大、最小干密度试验结果

砾石 含量/ %	最大干密 度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最小干密 度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$D_r = 0.80$ 时干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$D_r = 0.85$ 时干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$D_r = 0.90$ 时干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
85	2.16	1.74	2.06	2.08	2.11
80	2.19	1.77	2.09	2.11	2.14
75	2.22	1.80	2.12	2.14	2.17
70	2.24	1.83	2.14	2.17	2.19
65	2.26	1.85	2.16	2.19	2.21
60	2.26	1.86	2.17	2.19	2.21
55	2.24	1.85	2.15	2.17	2.19
50	2.22	1.84	2.13	2.15	2.18
45	2.20	1.83	2.11	2.14	2.16

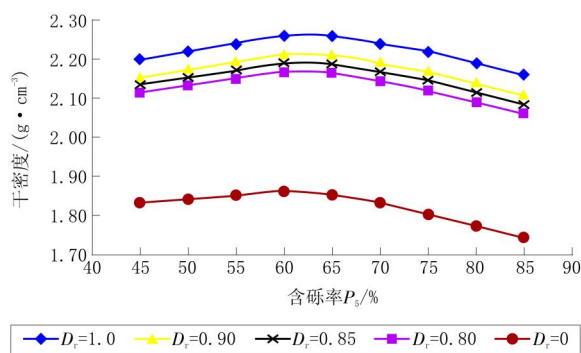


图 2 实验室最大、最小干密度标准曲线

4.3 标准曲线的修正

对室内标准曲线的修正采用现场原级配料碾压法,结合碾压试验场地基础工作进行,按试验要求场地基础需碾压密实,选择碾压试验场地 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,表面平整度 $< 10 \text{ cm}$,周边均填 3 m 宽约束料,在该单元中部布设变形观测点,进行碾压后变形量观测,见图 3。

根据振动压实理论,强振具有较强的穿透能力,影响深度大,有利于压实层中间至底层的压实;弱振



图 3 现场最大干密度试验场地

具有较高的能量,有利于压实层中间至表面的压实。对全级配坝料碾压试验采用振动碾先静压 2 遍,采用全站仪测定各基点的高程,再强振 2 遍,测量各基点高程,以后每 2 遍测量一次高程,在振动过程中应防止颗粒离析现象,适当调整振动频率,通过测定其沉降率几乎至 0 时,停止强振,再弱振 2 遍,认为级配料达到最大密实度,可停止振动。

本次碾压试验在大坝基础碾压区内布设 12 个变形观测基点,选择有代表性的测量基点取其平均值后,绘制碾压遍数与观测点平均高程(采用相对高程)变化曲线(见图 4),可以看出当强碾遍数为 12 遍时,沉降量几乎不变,认为此时坝基碾压达到最大密实度,可以进行最大干密度的量测。

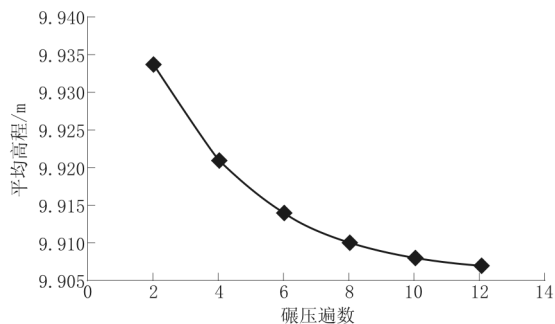


图 4 碾压后沉降量与碾压遍数关系曲线

在基础碾压区内进行干密度试验,一方面可以评价基础碾压效果,另一方面可以对室内标准曲线进行修正。工程中砂砾料干密度测定一般采用灌砂法或灌水法(加套环)进行,为保证试验精度,采用灌砂法测定现场碾压最大干密度,计划取点 3 组,见图 5。将试料过 60 mm 及 5 mm 筛,测定超径含量及 5~60 mm 砾石含量值,对实验室绘制最大、最小干密度- P_s 关系曲线进行超粒径修正,最终得到坝壳料最大和最小干密度曲线,即现场标准曲线,以此作为今后坝料碾压的控制标准。

现场采用灌砂法测定最大干密度,根据《土工



图 5 现场干密度试验(灌砂法)

试验规程》(SL 237—041—1999)原位密度试验要求及坝料最大粒径,制作了 $\varnothing 40$ cm 的灌砂筒,采用 0.25 ~ 0.5 mm 标准砂进行试验,坝壳料碾压区选取了 3 个点测定了干密度,试坑深度 10 ~ 60 cm。对每坑挖出的试料进行了筛分试验,测定细料含量 (<5 mm 颗粒含量),结果见表 3。

表 3 现场实测不同细料含量下的坝基料最大干密度

测点	>5 mm 砾石含量/%	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度 D_r
1	63.9	2.26	0.99
2	61.4	2.26	0.99
3	70.9	2.24	1.00

通过检查量测孔的颗粒级配情况,计算出粒径 >5 mm 颗粒含量,对室内标准曲线修正。坝壳料细料含量值多在 30% ~ 40% 之间,即砾石含量为 60% ~ 70% 所对应的最大干密度平均值为 2.26 ~ 2.24 g/cm³,与室内标准曲线对比砾石含量为 60% ~ 70% 所对应的最大干密度平均值为 2.26 ~ 2.25 g/cm³,故坝壳料现场标准曲线与实验室标准曲线基本一致,对应现场标准曲线见图 6。

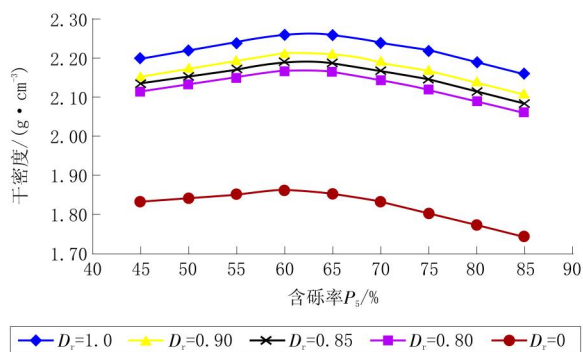


图 6 修正后坝壳料现场最大、最小干密度标准曲线

5 坝料碾压试验

5.1 试验场地布置

干密度试验场地要求平整坚实,平整后采用 22 t 自行式振动碾静碾一遍。按 3 种铺土厚度(80、100、120 cm)、3 种碾压遍数(6、8、10 遍)进行 9 种情况

组合,共分 9 个碾压单元,每个单元尺寸 10 m × 10 m,周边填 3 m 宽约束料,场地布置如图 7 所示。

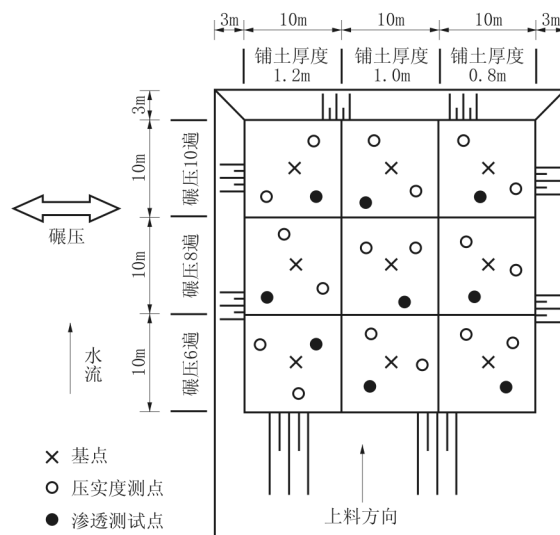


图 7 碾压试验场地布置

铺料厚度的选择应考虑以下因素:

(1)应结合坝料的最大粒径来选择铺料厚度,最大粒径的确定直接影响到料场施工的难易和料场利用率、施工的效益,根据经验填筑允许的最大粒径可以与填筑层等厚。

(2)铺料厚度必须控制在碾压机械有效影响深度范围以内,不能过厚与过薄。应考虑碾压设备的效益发挥。

(3)对于分区填筑坝,碾压厚度的选择应结合各料区的填筑厚度合理的匹配,确保填筑坝面齐平均上升,通常过渡料厚度取主堆石之半。

5.2 施工机械配置

振动碾通常可分为自行式和牵引式 2 大类。由于牵引式振动碾的有效净重和最大离心力约为自行式振动碾的 1.6 倍,基于施工效率、质量和经济角度,在沥青混凝土心墙坝施工中,对砂砾石填筑区多采用重型(>15 t)牵引式振动碾进行碾压,本工程采用 22 t 自行式振动碾。对于过渡料区和心墙,因工作面狭窄,考虑施工的灵活性,采用 2.5 t 自行式振动碾。本次现场碾压试验施工机械及数量配置见表 4。

5.3 碾压试验工艺

本次碾压试验按下述步骤进行。

第一步:测量放线。在碾压好的场地上,用白灰线按布置要求布设试验分区并在场外设置分区控制

表 4 碾压试验主要施工机械配置

序号	机械设备名称	型 号	数量/台	备 注
1	自行式振动平碾	XS220J, 22 t	1	砂砾料、反滤料
2	自行式振动平碾	BW120AC-3, 2.5 t	1	过渡料、沥青心墙
3	挖掘机	1.6 m ³ 台	2	
4	装载机	3 m ³	1	
5	推土机	TY220	1	
6	自卸汽车	15 t	3	
7	自卸汽车	20 t	2	
8	水车	8 t	1	
9	全站仪	TCR702	1	
10	水准仪	KL-50	1	

边桩及技术要求标牌。结合边桩,在各测点上用石灰标记,也可用全站仪实测各测点的坐标位置,并进行水准测量,获得高程基准。

第二步:铺料整平。采用自卸汽车运料至试验场地规定点卸料,对砂砾石坝料采用后退法铺料(即汽车在碾压完毕的作业面上行走),以避免砂砾石坝料分离。按计划要求的铺料厚度用推土机摊铺整平,并用带有刻度的尺杆控制铺料厚度,厚度误差控制在±5 cm 范围以内。

第三步:碾压前测量。用全站仪对第一步记录的各测点对应放线,用白色石灰标记各测点,然后实测并记录各点初始高程,核对铺料厚度。

第四步:碾压前后级配检验。在坝料铺填面上选定测试点,并用石灰做好圆圈标记,在圈内挖坑取样,坑深应与铺料层厚相同,对取出的坝料进行筛分试验,记录碾压前的级配。然后在试坑内铺设塑模,并将各粒组坝料均匀混掺后回填到试坑内,待碾压完成后,取出塑模范围内的坝料再次进行级配检测,以评价碾压作业对坝料级配及其他工程性质的影响。

第五步:碾压。采用先静碾 2 遍,后动碾 6 遍、8 遍或 10 遍,按前进、后退全振不错位法进行碾压作业,即振动碾滚筒宽度在同一条碾压带上进退碾压。两条碾压条带之间的搭接宽度为 10~20 cm,往返一个来回为碾压 2 遍。

第六步:碾压后测量。以此完成规定的碾压遍数后,对各区的标记点进行碾压后的高程测量,与碾压前的高程对比,求出碾压后各点的沉降值,并计算试验分区内的沉降平均值,绘制沉降值-碾压遍数关系曲线。

第七步:干密度及级配检测。用灌砂法(标准砂粒径:0.25~0.5 mm)测定标定点的干密度,绘制

干密度-碾压遍数关系曲线。

第八步:原位渗透试验。在碾压作业面上选取测试点,采用双环法进行渗透系数的检测,以评价坝料的透水性能。

5.4 碾压试验成果

采用灌砂法(标准砂粒径:0.25~0.5 mm)测定干碾试验场地各碾压单元标定点的干密度(见表 5),并绘制碾压厚度为 100 cm 的干密度-碾压遍数关系曲线(见图 8)。

表 5 干碾试验场地各单元测点干密度试验结果汇总

铺土厚度/cm	碾压遍数	>5 mm 的砾石含量/%	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度 D_r	结果评价
80	6	62.9	2.18	0.83	不满足要求
		69.8	2.19	0.85	
	8	70.7	2.23	0.97	满足要求
		70.7	2.21	0.93	
	10	62.5	2.23	0.93	满足要求
		69.4	2.24	1.00	
100	6	65.7	2.18	0.83	不满足要求
		64.5	2.16	0.80	
	8	63.2	2.20	0.87	满足要求
		67.3	2.22	0.93	
	10	71.1	2.22	0.95	满足要求
		70.4	2.23	0.97	
120	6	66.0	2.13	0.72	不满足要求
		72.6	2.12	0.76	
	8	60.1	2.16	0.79	不满足要求
		61.4	2.14	0.74	
	10	67.3	2.17	0.83	不满足要求
		59.3	2.19	0.85	

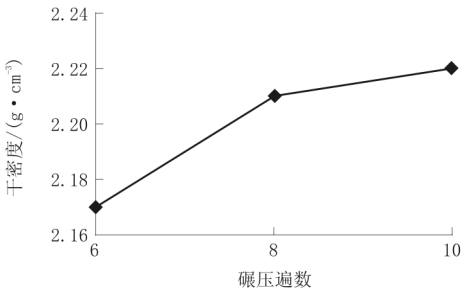


图 8 碾压厚度为 100 cm 的干密度-碾压遍数关系曲线

从表 5 可以看出:铺土厚度为 80 cm、碾压遍数为 6 遍时有 1 个试验点不合格,铺土厚度为 100 cm、碾压变数为 6 遍时 2 个试验点均不合格,铺土厚度为 120 cm,仅有 1 个试验点合格。图 8 可以看出铺土厚度为 100 cm 时,随着碾压遍数的增加,干密度也在增大。

渗透试验采用单环法,各碾压单元渗透试验结

果见表 6。

表 6 干碾试验场地各单元测点渗透试验结果汇总

试验位置		渗环面积/ cm ²	渗透系数/ (10 ⁻³ cm·s ⁻¹)	结果评价
铺土厚/cm	碾压遍数			
80	6	706.8	8.44	满足要求
80	8	706.8	7.42	满足要求
80	10	706.8	6.16	满足要求
100	6	706.8	6.06	满足要求
100	8	706.8	5.26	满足要求
100	10	706.8	4.01	满足要求
120	6	706.8	9.32	满足要求
120	8	706.8	7.23	满足要求
120	10	706.8	6.00	满足要求

从表 6 可以看出:各测点渗透系数均在 10⁻² ~ 10⁻³ cm/s 之间,坝料基本能满足自由排水的要求,局部点渗透系数略偏小。

6 结论

通过对本工程大坝沥青混凝土心墙坝筑坝材料碾压试验工作,可以得出以下结论。

(1)从坝料颗粒分析成果上看,坝料总体偏细,细料含量分布在 25% 左右,比较稳定。同时坝料不均匀系数较大, $C_u = 77.0$,曲率系数 $C_c = 4.6$,级配不良,该坝料可以得到较好的碾压密实度。

(2)从现场渗透试验结果看,坝料碾压后渗透系数均在 10⁻² ~ 10⁻³ 数量级,最小为 4.01×10^{-3} cm/s,说明坝料在碾压后整体渗透性较好,但局部渗透性较差,设计考虑排水体料是合适的。

(3)从现场干碾试验结果看,坝料碾压后干密

度较高,铺土厚度 80 cm 及 100 cm 碾压 8 ~ 10 遍均可以达到较好的密实度,但铺土厚度 120 cm 时,底层密度略偏低。综合考虑坝壳料采用 22 t 自行式振动碾是可行的,行车速度选择 I - 2,建议选择铺土厚度 80 cm、碾压 8 遍,也可选择铺土厚度 100 cm、碾压 8 遍。坝体碾压质量控制密度见表 7,建议在施工检测过程中对碾压密度做进一步验证复核。

表 7 坝壳料填筑控制标准

砾石含量/ %	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最小干密度/ (g·cm ⁻³)	$D_r = 0.85$ 时 干密度/(g·cm ⁻³)
75	2.22	1.80	2.14
70	2.24	1.83	2.17
65	2.26	1.85	2.19
60	2.26	1.86	2.19
55	2.24	1.85	2.17

参考文献:

- [1] 曹琳. 阿海水电站碾压混凝土长心样取心技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(4): 65 - 67.
- [2] 许波. 复杂条件下碾压混凝土施工方案设计[J]. 吉林水利, 2007, (12): 46 - 48.
- [3] 苏尔好. 浦东机场跑道冲击碾压地基处理试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, 33(12): 9 - 13.
- [4] 程敦海. 福宁高速公路 A7 标段软土路堤填筑变形观测成果的整理与分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2003, 30(5): 19 - 21.
- [5] 刘克玉, 张道全. 水利工程土方填筑碾压施工质量控制[J]. 科技创新与应用, 2015, (34).
- [6] 李新, 李玲, 等. 水利工程土方填筑的施工质量控制[J]. 现代企业文化, 2008, (32).
- [7] 龙小明. 基于水利工程土方填筑碾压施工技术质量控制分析[J]. 中国水运, 2014, (8): 224 - 226.