

# 冬季大坝及围堰砂砾料碾压试验分析

王天恒

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6754

**[摘要]** 为探究西北寒旱区水库冬季施工的碾压工艺参数,本研究通过开展大坝与围堰砂砾料现场碾压试验得出:在冬季砂砾料自然含水率普遍较低(约0.6%~1.5%)的条件下,采用进占法卸料、松铺85cm厚度,并选用26t自行式振动碾以2.0~3.0km/h的速度按高振幅、低频率模式碾压8遍,可使压实质量达到相对密度不低于0.90的设计标准。该成果为西北寒旱区水库工程冬季施工提供了可行的技术参考与实践依据。

**[关键词]** 土石坝; 碾压试验; 碾压参数;

**中图分类号:** TV641 **文献标识码:** A

## Rolling test analysis of sand and gravel for dam and cofferdam in winter

Tianheng Wang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., LTD.

**[Abstract]** To explore the compaction process parameters for reservoir winter construction in the northwest arid region, this study conducted on-site compaction tests of sand and gravel materials for dams and cofferdams. The results showed that under the condition where the natural moisture content of sand and gravel materials in winter is generally low (about 0.6%–1.5%), using the advancing method for unloading, laying a 85 cm thickness, and selecting a 26 t self-propelled vibrating roller to compact at a speed of 2.0 – 3.0 km/h in a high-amplitude and low-frequency mode for 8 passes, the compaction quality can reach a relative density of no less than 0.90. This achievement provides feasible technical references and practical basis for winter construction of reservoir projects in the northwest arid region.

**[Key words]** earth-rock dam; Rolling test; Rolling parameters

### 前言

目前土石坝冬季施工典型案例集中在西北寒旱地区,主要原因是高海拔地区气温低,施工时间较短,为了推进工程进度,在保障质量安全的前提下开展冬季施工研究<sup>[1-3]</sup>。土石坝施工填筑现场试验是施工前期的一项重要工作,包括确定所选机械设备型号,验证、修正设计技术指标和施工工艺参数,提出有关质量控制技术要求和检验方法,通过碾压试验确定最优含水率,明确围堰砂砾料与坝体砂砾料的填筑程序和压实方法等,是制定有关施工技术措施的重要依据<sup>[4]</sup>。本文以在建工程为例,开展大坝及围堰砂砾料碾压试验,为冬季施工确定各项参数。本水库位于新疆南疆地区,挡水建筑物采用碾压式沥青混凝土心墙坝,主坝长406m,副坝长88.5m。围堰砂砾料填筑量102.5万m<sup>3</sup>,坝体砂砾料填筑量642.7万m<sup>3</sup>,垫层料填筑量40.9万m<sup>3</sup>。

### 1 试验方法

#### 1.1 试验方案

参照《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》(SL 251-2015)、《土石筑坝材料碾压试验规程》(NB/T 35016-2013)、《土石坝

施工组织设计规范》(SL648—2013)、《碾压式土石坝施工规范》<sup>[5-8]</sup>(DL/T 5129-2013);制定填筑料现场碾压试验方案,其试验设备与工程投入施工设备规格型号一致。

表1 现场生产性试验场次布置一览表

场次	试验材料	铺料厚度(cm)	碾压遍数(n)	总含水率	试验项目
1	砂砾料	65	6、8、10	天然含水 /6%/10%/14%	现场挖坑进行干密度、含水量、 相对密度试验、颗粒级配试验
2		85	6、8、10	天然含水 /6%/10%/14%	
3		最优厚度	最优遍数	最优含水	复核试验

#### 1.2 试验流程

(1) 测量放线。在选定的场地上,用白灰按照要求布设试验场地边框。

(2) 场地平整。场地需经碾压设备压实整平,直至连续碾压2遍后场地平均沉降量不超过2mm。同时,场地整体高差应小于20cm,局部起伏差控制在5cm以内。达到上述平整要求后方可进行铺料作业。

(3) 铺料平整。采用自卸汽车运输铺料至试验场规定卸料点, 砂砾料采用进占法铺料, 推土机整平。摊铺平整时用全站仪控制铺料厚度, 厚度误差控制在±10%以内。

(4) 碾压前测量。铺料完成后, 用50m钢卷尺对铺料后的碾压面重新放线, 并用白灰标记各测点, 然后实测并记录各测点初始高程核对铺料厚度。

(5) 碾压。使用26t振动碾实施碾压, 先进行2遍静压。振动碾压阶段采用进退错距法, 确保碾压带搭接宽度不低于30厘米。碾压过程中需严格控制行驶速度, 同时详细记录各试验块的碾压遍数、碾压速度、铺土厚度、是否存在粘碾现象, 以及碾压后砾石土表面是否出现龟裂等情况。

(6) 碾压后的测量。每碾压两遍后, 对各标记点的高程进行测量并记录, 将其与前一次测得的高程进行对比, 从而得到各点在碾压后的沉降值。在此基础上, 计算该试验分区单元内的平均沉降值, 并绘制沉降量与碾压遍数的关系曲线图。

(7) 干密度及级配检测。达到碾压遍数后采用灌水法, 检测标点的干密度, 绘制干密度与碾压遍数的关系曲线, 干密度与含水率的关系曲线, 砾石(5mm、20mm)含量与干密度的关系曲线, 沉降量与碾压遍数的关系曲线, 干密度、相对密度、平均沉降量、平均累计沉降率的频率分配曲线与累计频率曲线<sup>[9]</sup>。

## 2 试验结果

### 2.1 碾压数据成果

对砂砾料碾压试验数据结果进行整理分析, 得到P20含量、P5含量与最大最小干密度数据, 统计如表2所示, 碾压试验数据结果统计表见表3。

表2 碾压试验数据结果统计表

序号	>20mm	>5mm	最小干密度	最大干密度
1	78	89	1.97	2.32
2	71	84	2.01	2.36
3	63	80	2.03	2.38
4	56	76	1.98	2.33
5	48	71	1.92	2.26

### 2.2 干密度与碾压遍数及铺料厚度的关系

根据表2中的数据, 得到不同填铺厚度时压实干密度与碾压遍数的关系为: 随着铺料厚度的增加, 压实干密度有所下降, 总的趋势是铺料越薄, 压实后干密度越大, 对于本次试验而言, 铺土厚度对压实效果的影响符合一般规律<sup>[10]</sup>。

### 2.3 沉降量与碾压遍数及填铺厚度之间的关系

根据表3中的数据, 得到不同含水率、不同填铺厚度试验组合情况碾压沉降量与碾压遍数关系为: 碾压6遍时沉降变形较大, 堆石料在26T振动平碾碾压8遍(一来一回计2遍)后, 其沉降增加速度降低, 可从沉降曲线初步判断, 碾压土料在碾压8遍后, 其沉降基本已经完成, 后续碾压其压缩量增加较小。

### 2.4 初步确认的施工工艺参数

表3 碾压试验数据结果统计表

序号	铺料厚度 h(cm)	碾压遍数	含水率 (%)	干密度 ρ (g/cm³)	平均干密度 ρ (g/cm³)	相对密度	平均相对密度	沉降量 (mm)	平均沉降量 (mm)	渗透系数 (cm/s)
1	65	6	1.2	2.31	2.320	0.82	0.85	60	61	4.3×10 <sup>-2</sup>
2		6	1.5	2.33		0.88		61		6.5×10 <sup>-2</sup>
3		6	0.8	2.32		0.85		63		6.3×10 <sup>-2</sup>
4		6	1.0	2.32		0.85		63		
5		6	0.9	2.32		0.85		59		
6		8	1.2	2.35	2.358	0.93	0.95	82	81	6.6×10 <sup>-2</sup>
7		8	1.5	2.36		0.95		81		7.8×10 <sup>-2</sup>
8		8	1.2	2.36		0.95		78		7.6×10 <sup>-2</sup>
9		8	0.9	2.36		0.95		78		
10		8	0.8	2.36		0.95		84		
11		10	1.0	2.37	2.368	0.98	0.97	84	85	7.2×10 <sup>-2</sup>
12		10	1.1	2.36		0.95		83		
13		10	1.4	2.38		1.00		85		6.8×10 <sup>-2</sup>
14		10	1.1	2.36		0.95		87		7.0×10 <sup>-2</sup>
15		10	1.0	2.37		0.98		85		
16	85	6	0.6	2.29	2.306	0.77	0.81	79	73	5.5×10 <sup>-2</sup>
17		6	1.2	2.30		0.80		72		
18		6	1.1	2.32		0.85		74		6.2×10 <sup>-2</sup>
19		6	1.0	2.31		0.82		73		7.1×10 <sup>-2</sup>
20		6	1.1	2.31		0.82		68		
21		8	1.2	2.35	2.350	0.93	0.93	92	91	6.7×10 <sup>-2</sup>
22		8	1.0	2.36		0.95		92		
23		8	1.2	2.35		0.93		91		6.4×10 <sup>-2</sup>
24		8	0.9	2.35		0.93		91		6.6×10 <sup>-2</sup>
25		8	1.1	2.34		0.90		90		
26		10	1.2	2.36	2.358	0.95	0.95	99	97	5.2×10 <sup>-2</sup>
27		10	1.5	2.37		0.98		95		
28		10	1.4	2.35		0.93		96		4.8×10 <sup>-2</sup>
29		10	1.1	2.35		0.93		97		5.0×10 <sup>-2</sup>
30		10	1.0	2.36		0.95		98		

在满足技术标准要求、保证施工质量的前提下, 综合考虑施工功效, 保证施工质量, 初步推荐采用的施工工艺为: 松铺厚度85cm, 冬季天然含水率(0.6%~1.5%), 碾压机具为26t振动平碾, 振动碾行驶速度为2.0~3.0km/h, 振碾8遍作为现场施工控制参数。

### 2.5 初步确认施工工艺参数复核

表4 砂砾料碾压复核试验颗粒级配汇总

粒径/mm	100	94.8	83.5	79.5	73.6	65.3	52	28.8	15.9	7.8	6.7	5.2	最大粒径
上包线	100	72.4	43.6	37.1	33.2	27.2	22.1	11.5	8.6	4.6	2.8	1.3	/
平均线	100	90.1	74.1	65.8	54.6	48.1	29.8	18.9	11.1	4.9	3.4	1.7	/
下包线	100	87.6	73.9	68.7	58.6	51.3	32.4	18.9	10.2	5.0	3.6	1.5	/
PH-01	100	89.1	75.2	70.0	57.2	51.3	34.4	19.7	9.8	5.3	3.5	2.4	384
PH-02	100	88.2	77.4	71.6	58.2	51.6	33.9	20.1	10.8	5.8	3.9	2.2	320
PH-03	100	90.3	75.6	70.5	57.0	51.1	33.9	19.6	9.9	5.1	3.3	2	315
PH-04	100	89.3	73.9	68.6	56.3	50.1	33.7	19.8	10.6	5.7	3.6	2.2	355
PH-05	100	89.7	74.6	68.7	56.4	50.7	33.9	19.8	10.3	5.4	3.3	2.3	335
PH-06	100	88.7	75.1	69.3	57.8	51.8	34.9	20.2	10.9	6.2	4.0	2.4	360
PH-07	100	88.9	74.1	68.2	55.5	49.8	33.3	19.8	10.8	6.0	4.0	2.5	365
PH-08	100	89.4	75.4	69.0	56.2	50.2	33.9	20.0	11.4	5.8	3.8	2.3	374
PH-09	100	90.6	75.1	69.8	55.9	49.9	32.1	18.2	12.3	6.1	3.8	2.1	365
PH-10	100	89.3	74.4	68.7	54.5	48.4	31.2	18.8	10.8	5.5	3.7	2.3	263

根据以上三个参数碾压试验结果分析对比, 综合考虑, 再次选择松铺85cm厚度, 碾压8遍、天然含水率等条件下进行砾石料复核试验。

(1) 砾石料复核试验级配检测结果分析。砾石料复核试验级配检测结果分析见砂砾料碾压复核试验颗粒级配检测成果汇总表4、砂砾料碾压复核试验颗粒级配曲线图1。

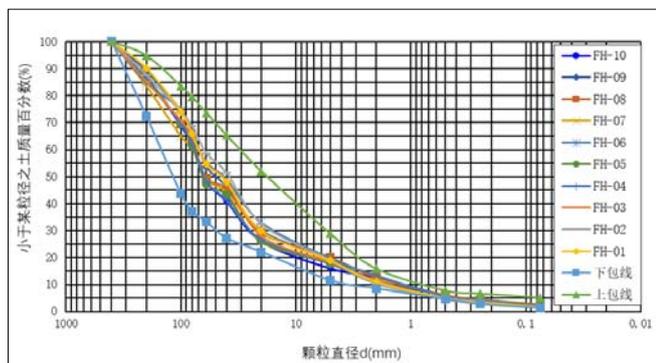


图1 砂砾料碾压复核试验颗粒级配曲线

从复核试验表4、图1级配线可以看出，试验料级配在C4料场的上包线和平均线范围内，具有代表性。

检测最大粒径263mm~384mm，平均344mm。小于5mm含量18.2%~20.2%，平均19.7%，P5砾石含量在80%~82%之间，平均在71%~89%的控制范围内，小于0.075mm含量在2.0%~2.5%之间，满足不大于8%标准。

(2) 砂砾料复核试验干密度(相对密度)检测结果分析。铺料厚度85cm，碾压遍数8遍，砂砾料复核试验成果分析见砂砾料碾压工艺试验复核试验成果汇总表5。

砂砾料碾压工艺试验复核试验松铺厚度85cm，碾压8遍，冬季天然含水率0.6%~1.5%时，碾压机具为26t振动平碾，振动碾行进速度为2.0km/h~3.0km/h，作为现场施工控制参数压实后，沉降量平均9.1cm，相对密度0.90~0.95，平均0.93，合格率100%，相对密度能够满足设计≥0.90的要求。

表5 最优参数复核试验结果统计表

序号	铺料厚度 h(cm)	碾压遍数(遍)	实测含水率(%)	干密度 ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	相对密度	沉降量(mm)	渗透系数(cm/s)
01	85	8	1.0	2.34	0.90	89	5.3×10 <sup>-2</sup>
02	85	8	1.2	2.36	0.95	92	/
03	85	8	1.2	2.35	0.93	93	6.4×10 <sup>-2</sup>
04	85	8	1.1	2.34	0.90	91	3.5×10 <sup>-2</sup>
05	85	8	1.0	2.36	0.95	91	/
06	85	8	1.1	2.34	0.90	91	6.3×10 <sup>-2</sup>
07	85	8	1.2	2.35	0.93	90	/
08	85	8	1.1	2.36	0.95	92	5.4×10 <sup>-2</sup>
09	85	8	1.0	2.35	0.93	92	6.5×10 <sup>-2</sup>
10	85	8	0.9	2.36	0.95	93	/

(3) 复核渗透试验成果分析。对砂砾料碾压工艺试验复核试验松铺85cm厚度，振碾8遍试验区进行渗透试验，渗透试验做平行试验，进行双环法渗透试验，由表5可知，检测渗透系数分别为3.5×10<sup>-2</sup>cm/s~6.5×10<sup>-2</sup>cm/s，渗透系数满足设计要求<sup>[11]</sup>。

(4) 推荐施工工艺。推荐砂砾料填筑施工工艺详见表6。

表6 砂砾料填筑施工工艺参数

料源	料种	铺料厚度	碾压遍数	行车速度	碾压方式
C3、C4、C6料场	砂砾料	85cm	振碾8遍	2~3km/h	进退错距法
备注	砂砾料含水率为天然含水率				

### 3 结论

基于上述试验结果可知，在砂砾料自然含水率普遍较低的冬季(含水率通常为0.6%~1.5%)，通过进占法进行卸料，松铺厚度控制在85cm，并选用26t自行式振动碾，以2.0~3.0km/h的速度在高振幅、低频率模式下碾压8遍，可使压实质量达到设计相对密度不低于0.90的要求。对于围堰砂砾料与坝体砂砾料的结合部位以及坝内斜坡道路的填筑，采用台阶接缝法施工，所留台阶宽度应不小于1m。在进行砂砾料填筑时，使用坝面挖掘机对坡面进行修整，将聚集在坡脚的大粒径石料分散，随后再进行铺料。针对接缝区域，采用自行式振动平碾实施骑缝碾压处理。

### 【参考文献】

- [1]王建帮,王真平,张芳军.阿尔塔什大坝砂砾石冬季填筑施工技术研究[J].水力发电,2018,44(02):14.
- [2]陈龙.西藏高寒地区砂砾石大坝冬季干填碾压法施工技术研究与应用[J].水电与新能源,2019(12).
- [3]韩建东,杜臣.大坝砾石土心墙料冬季施工技术研究与实践[J].建设监理.2019(10):11.
- [4]童达.“双碳”背景下抽水蓄能电站监理特性及控制要点[J].水利水电快报,2023(12):50-53.
- [5]中华人民共和国水利部.SL251-2015水利水电工程天然建筑材料勘察规程[S].中国水利电力出版社,2015.
- [6]国家能源局.NB/T35016-2013土石筑坝材料碾压试验规程[S].中国电力出版社,2014.
- [7]中华人民共和国水利部.SL648-2013土石坝施工组织设计规范[S].中国水利电力出版社,2013.
- [8]国家能源局.DL/T5129-2013碾压式土石坝施工规范[S].中国电力出版社,2014.
- [9]牛婉君.道路桥梁工程的原材料试验检测技术探究[J].商品与质量,2019(12):76-78.
- [10]房小波,郭奎.某水库砂砾石坝坝壳料碾压试验及结果分析[J].四川水利,2018(01):14-16.
- [11]冯炜.胶凝砂砾石坝筑坝材料特性研究与工程应用[D].《中国水利水电科学研究院》,2013.

### 作者简介:

王天恒(1995--),男,汉族,新疆乌鲁木齐市人,本科毕业,工程师,现从事水利试验检测。