

# 基于堆石料颗粒破碎特性的抽蓄大坝填筑压实质量控制技术

李会雄

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

**[摘要]**抽水蓄能电站大坝填筑质量直接关系到工程安全与长期稳定运行,堆石料在压实过程中发生的颗粒破碎现象显著影响填筑体的压实特性与力学性能。通过系统分析堆石料颗粒破碎的影响因素及其与压实特性的内在关联,揭示了颗粒破碎对级配演化与密实度提升的作用机理。提出了基于分形维数变化评估破碎程度的方法,明确了破碎率的合理控制区间。在此基础上构建了涵盖级配控制、参数优化、动态监测与质量评价的全过程填筑压实质量控制技术体系,结合工程实践验证了技术方案的适用性。

**[关键词]**堆石料; 颗粒破碎; 压实质量; 控制技术

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19880

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

## Quality Control Technology for Filling and Compaction of Pumped Storage Dams Based on the Crushing Characteristics of Gravel Particles

LI Huixiong

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

**Abstract:** The quality of dam filling for pumped storage power stations is directly related to the safety and long-term stable operation of the project. The particle crushing phenomenon that occurs during the compaction process of the rockfill material significantly affects the compaction characteristics and mechanical properties of the filling body. By systematically analyzing the influencing factors of particle breakage in rockfill materials and their inherent correlation with compaction characteristics, the mechanism of particle breakage on gradation evolution and density improvement was revealed. A method based on fractal dimension variation was proposed to evaluate the degree of fragmentation, and the reasonable control range of fragmentation rate was clarified. On this basis, a full process filling and compaction quality control technology system covering grading control, parameter optimization, dynamic monitoring, and quality evaluation was constructed, and the applicability of the technical solution was verified through engineering practice.

**Keywords:** rockfill material; particle fragmentation; compaction quality; control technology

### 引言

抽水蓄能电站上水库大坝大多采用混凝土面板堆石坝型式,填筑质量直接影响到大坝的变形稳定以及长期安全。堆石料在碾压过程中都存在着颗粒破碎的情况,颗粒破碎会改变原状级配,从而影响到填筑体的压实状况。颗粒破碎有双重作用,适度破碎可以改善级配、填充孔隙、提高密实度,过度破碎会带来细粒过多、压实效果差、压缩性增大的问题。因此掌握破碎规律并根据破碎规律来优化控制参数,就是实现高质量压实的关键问题。传统的压实质量控制依靠经验参数和事后抽检,对于颗粒破碎规律的认识不够。根据颗粒破碎特性来改进压实质量控制方法,具有重大的科研价值和工程意义。

### 1 堆石料颗粒破碎与填筑压实作用机理

堆石料在振动碾压荷载的作用下会破碎成小块,这个过程一直持续到压实结束为止。颗粒破碎的力学本质就是颗粒在接触点处的局部应力大于颗粒强度极限时,颗粒就会发生断裂或者棱角磨圆。筑坝堆石料是由颗粒粒径、形状不同的土颗粒组成的分散体系,在压实作用下,粗颗粒之间相互接触形成土体骨架,细颗粒起胶结作用填充在粗颗粒孔隙中。填筑压实过程可以分为两部分。压实初期以颗粒滑移、翻滚、重排为主,颗粒间的孔隙逐渐减小。随着压实作用的不断加强,颗粒间的接触应力增大,颗粒的破碎程度也变得越来越严重。破碎后的小颗粒填充到粗颗粒骨架的孔隙里,使得级配呈自优化状态,干密度也得到

提高。堆石料的压缩模量大，只有应力超过颗粒破碎应力时，压缩曲线才会出现较大的下降，而颗粒破碎应力则是堆石料产生弹塑性变形的临界点。

## 2 堆石料颗粒破碎特性试验研究

### 2.1 堆石料颗粒破碎影响因素分析

母岩性质是造成颗粒破碎的第一要素。母岩强度越大，颗粒抵抗破碎的能力就越大。试验结果表明，母岩强度越大，堆石料的压缩性越小。颗粒粒径对破碎行为有明显的影 响，大粒径颗粒体积大，所受压力大，容易造成颗粒内部的破碎。初始级配也属于重要因素，粗粒含量较多时颗粒间接触力较大，破碎率随之增大。含水量对破碎行为影响较大，适量的水分可以润滑颗粒之间的接触面，减小破碎所需的能量。在相同的含水量下，堆石料的分形维数随着粗粒含量的增加而减小；在相同的粗粒含量下，堆石料的分形维数随着含水量的增大而增大。表 1 给出了各个影响因素的作用规律。

表 1 堆石料颗粒破碎主要影响因素及作用规律

影响因素	作用机制	对压实质量的影响规律
母岩强度	决定颗粒抗破碎能力	强度越高破碎率越低，压缩性越小
颗粒粒径	大颗粒接触应力大	粒径越大越易破碎，需控制最大粒径
粗粒含量	影响骨架结构与力链传递	粗粒越多破碎越显著，分形维数减小
含水量	润滑效应与应力缓冲	存在最优含水量，与粗粒含量负相关
压实能量	决定破碎程度与速度	能量越高破碎越充分，但存在最优区间

### 2.2 颗粒破碎条件下压实特性演化规律

随着压实遍数的增多，堆石料的干密度呈上升趋势，但是增长速度越来越慢。初始阶段以颗粒重排为主，干密度迅速提高；中后期颗粒破碎所占的密实增量最大。堆石料击实试验的力学响应机理分为两方面，一方面是外力作用下粗颗粒之间产生摩擦、碰撞，土颗粒发生相互挤压、翻滚、旋转等空间位置的变化，从而导致粗颗粒的破碎；另一方面是粗颗粒破碎后逐渐形成细小颗粒，细小颗粒填充到粗颗粒之间的孔隙里。级配演化是压实过程中主要的变化特点。堆石料击实后分形维数明显增大，分形维数差值与破碎率有关，差值越大，破碎率越高。经过击实处理之后，堆石料的粒度分形维数比未处理前要大得多，击实前后分形维数差值和破碎率之间存在一定的关系，用分形维数差值来评价堆石料颗粒的破碎程度比较合适。随着碾压遍数的增多，干密度增长速度越来越慢，在标记点①处达到经济合理的碾压遍数。该曲线很好地体现了颗粒破碎

对压实密度演化的影响规律，也与上面的机理分析相吻合。

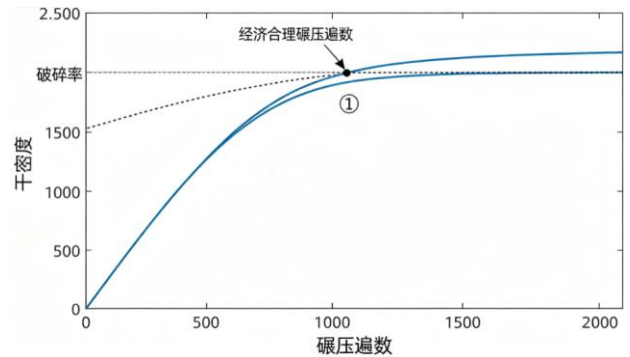


图 1 为堆石料干密度和颗粒破碎率随碾压遍数的变化趋势图

## 3 基于颗粒破碎特性的填筑压实质量控制技术

### 3.1 填筑料级配控制技术

根据颗粒破碎特性来优化填筑料级配，这是保证高质量压实的第一步。级配设计要考虑到压实过程中出现的破碎增量，使得最终的级配接近最优曲线<sup>[1]</sup>。研究表明，在初始级配中粗粒含量控制在 55%~70%之间时，压实后的破碎率比较合适，级配连续性较好。级配设计可以采用预留破碎空间法，即目标压实级配曲线向细粒方向偏移 5%~10%，使压实后实际级配正好落在设计包络线上。料源控制是级配管理的基础，开采时要按照母岩性质来确定爆破参数，防止过度破碎或者块径太大。对软岩堆石料应减小最大粒径、控制细粒含量下限。现场应每填筑 3~5 层进行一次全断面筛分检测，检测点设在填筑面上不同的位置。当堆石料颗粒破碎时分形维数减小，根据分形维数的变化可以判断级配是否偏移，及时调整。对于级配偏粗的区域可以掺入 5%~10%细料进行补强，对于级配偏细的区域要检查有无过度破碎或者料源混入的情况，再根据实际情况调整碾压参数。

### 3.2 压实参数优化控制技术

压实参数的选取会直接导致颗粒破碎程度以及压实效果。对易碎的堆石料采用低激振力、多遍数的压实方法，对硬岩堆石料适当增大激振力，使必要的颗粒得到破碎。振动频率应控制在 25~30Hz 之间，频率过低会造成破碎效率不高，频率过高会导致颗粒表面过分粉碎而内部破碎不够。行走速度控制在 2~3km/h 之间，速度过快能量在深度方向的衰减会变大，底部破碎效果明显变差。铺层厚度一般控制在 60~80cm 比较合适。对于硬岩堆石料可以取上限，对于软岩堆石料应取下限，保证能量能有效传递到层底。通过碾压试验确定最优参数组合是技术实施的重要环节，试验主要从三个方面入手，即研究碾压遍数和填筑料压实性能的关系、分析振动碾作业参数对压实效果的

影响、观察填筑料碾压前后颗粒级配的变化规律。碾压试验应采用逐遍检测法,每碾压2遍进行一次试坑密度试验和级配分析,绘制干密度-破碎率-遍数关系曲线,以曲线拐点对应的遍数作为经济合理的碾压遍数。含水量控制也很重要,最优含水量应该使颗粒润滑充分但不过度。施工时根据天气情况及时调整,炎热天气适当提高1%~2%来弥补蒸发造成的损失,雨季要增加覆盖,防止含水量超标。表2给出了各种岩性堆石料的推荐压实参数。

表2 不同岩性堆石料推荐压实参数

岩性类型	铺层厚度/cm	激振力/kN	碾压遍数	含水量/%
硬岩堆石料	70~80	320~380	6~8	5~8
中等硬度岩	60~70	260~320	8~10	7~10
软岩堆石料	50~60	200~260	10~12	9~12

### 3.3 填筑过程动态监测技术

基于北斗定位的碾压监控系统是目前主流的技术方案,采用振动碾上高精度定位装置和振动传感器来实时采集碾压轨迹、速度、遍数、振动状态等参数。系统可以实时采集运行轨迹、高程、速度、碾压遍数、振动状态等关键数据,驾驶室监控终端用图形化的形式呈现行车轨迹等信息,和预设参数进行比较,发现漏碾、欠碾的时候立即提示<sup>[2]</sup>。监控精度要达到平面±5cm、高程±3cm,数据上传频率不小于1Hz。系统后台可以自动生成碾压遍数分布云图,用不同的颜色区分出欠碾区、合格区和超碾区,每层填筑结束后10min内输出质量报告。压实度实时监测技术利用加速度传感器对振动轮和填筑体相互作用产生的响应进行测量,建立压实响应值和干密度的关系模型。压实计值CMV和干密度的相关系数一般可以达到0.85以上,现场可以用每20~50m一个测点的密度进行标定。当CMV值超过设定的阈值时,系统就自动把异常区域标记出来,并且发出补碾指令给驾驶室终端。该系统采用北斗高精度定位和物联网传感技术,对碾压机械的作业数据进行实时采集,从而对施工质量进行全过程的数字化监控。监测数据自动上传到云端管理平台,可以实现多终端远程查看以及历史数据的回溯分析,为质量追溯、责任认定提供依据。

### 3.4 压实质量评价技术

压实质量检测包括试坑密度试验、颗粒分析试验和现场碾压试验。每层填筑完毕后,应按规范要求布置检测点,检测干密度,计算压实度。对于面板堆石坝,堆石区的压实度一般要达到98%以上。工程应用证明,主堆石区压实度稳定在98.5%以上,垫层区压实度不小于99%。除了压实度之外,孔隙率也是评价堆石料压实质量的重要指标,

主堆石区孔隙率控制在18%~22%之间,垫层区控制在15%~18%之间。现场可用灌水法或者灌砂法测定孔隙率,检测频率和密度检测同步进行。沉降率是综合反映压实效果的指标,当压实遍数增多而沉降率趋近于零的时候,说明填筑体已经进入稳定状态<sup>[3]</sup>。沉降率检测应在每层填筑完成后设置固定的观测点,用精密水准仪测量,沉降率小于1%时可以认为是压实稳定的。施工期坝体沉降速率达到3.2mm/d以下,保证沉降收敛、无异常变形。引入颗粒破碎程度作为辅助评价指标,压实后破碎率应控制在8%~15%之间,分形维数比压实前增加0.15~0.30。破碎率大于18%时,要复查级配是否出现细粒过量的情况;破碎率小于5%时,要查看压实能量是否足够。采用压实度、孔隙率、沉降率和破碎率四个指标综合评价填筑压实质量。

## 4 填筑压实质量控制技术工程应用

### 4.1 堆石坝填筑区料源与施工条件分析

某抽水蓄能电站上水库大坝为混凝土面板堆石坝,最大坝高大于90m,填筑总量约350万m<sup>3</sup>。料源为库区开挖料和专用料场,岩性以新鲜花岗岩为主,部分为风化岩。施工区位于山区,地形起伏较大。河谷地形及坝体结构特点决定施工区域要划分成若干个独立的作业单元,对各个作业单元的施工任务和进度作出具体规定。根据料源质量波动情况,建立贯穿开采全过程的料源鉴定追踪体系,从而保证坝料的准确供应。

### 4.2 堆石料填筑施工组织

料源开采采用梯段爆破,爆破参数随岩石风化程度的变化而变化。运输系统用永临结合的道路规划来解决狭窄河谷的运输问题。由于料场区岩体裂隙纵横交错、结构破碎、坝料粒径供应不稳定等,因此用时空置换的方法来达到多工作面协同开采的目的。现场填筑用进占法卸料,铺层厚度控制在70cm,振动碾为26t自行式。填筑过程中使用基于北斗定位的碾压监控系统,对碾压轨迹、速度和遍数进行实时采集。

### 4.3 压实质量控制实施过程

料源控制,每批填料进场前做筛分试验,不合格的料不得上坝。对级配偏粗的填料采用掺入5%~10%细料的方法调整;对级配偏细的填料适量掺入粗骨料恢复骨架结构。摊铺控制上厚度偏差控制在±5cm之内,每层摊铺后用网格法布设厚度检查点,发现超差立即补平或者刮除。碾压控制上,系统实时产生碾压遍数分布云图,操作手据此及时调整作业路线。碾压时每2遍做一次沉降观测,绘制沉降率随遍数变化曲线,连续两遍沉降率小于1%时停止碾压。检测验收采用试坑密度试验和级配分析相结合的

方式。试坑检测时同时取颗粒分析样品,分析压实前后级配曲线的变化,判断破碎是否造成细粒过多。试坑位置要避开碾压轮迹边缘和接缝处,每个检测点平行测定两次,相对误差不超过 2%。施工高峰期使用无人驾驶碾压机群协同作业,在北斗卫星和 5G 网络下实现精准定位和高效协同。无人驾驶碾压机群智能碾压系统及碾压数字化监控系统可以实时测量碾压遍数、行走速度、激振力等参数,从而达到碾压可视化的目的。

#### 4.4 质量控制效果分析

从压实度检测结果可知,主堆石区平均压实度为

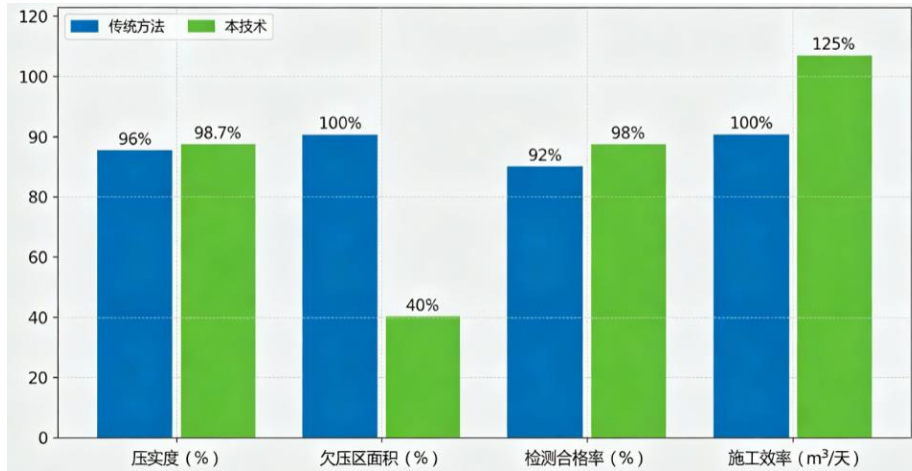


图2 填筑压实质量控制效果对比

### 5 结语

堆石料颗粒破碎属于填筑压实过程中的重要物理现象,对颗粒破碎的机理及演变规律有较深的认识,对改善压实质量控制有着基础性的意义。通过试验研究得到各个因素对破碎程度的影响规律,确定了颗粒破碎对于级配演化和压实特性之间耦合的机理。用分形维数来度量破碎程度,得到破碎率 8%~15%的合理范围。在此基础上建立的填筑压实质量控制技术体系包含级配控制、参数优化、动态监测和质量评价这四个部分。工程实践表明,该技术体系可以提高压实均匀性和密实度,压实度达到 98.5%以上,欠压区面积减少约 60%,给抽水蓄能电站大坝长期

安全运行打下基础。98.7%,垫层区平均压实度为 99.2%,均满足设计要求。从沉降观测结果可以看出,在填筑阶段最大沉降量占坝高比例小于 0.3%。级配分析结果表明,压实后的级配曲线趋于连续,分形维数增大了 0.15~0.25,破碎率控制在 8%~12%之间。击实前后分形维数差值和破碎率呈正相关,实际测得的差值范围可以证明破碎程度合适。与传统的质量控制方式相比,基于颗粒破碎特性的控制技术有如下优点:压实均匀性明显提高,欠压区面积减少约 60%;检测合格率达到 98%以上;施工效率提高约 25%,工期缩短约 30 天;填筑成本降低约 10% (图 2)。

安全运行打下基础。

#### [参考文献]

[1]李东,李晨晨,沈兴刚.筑坝堆石料颗粒破碎及分形特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2024,22(1):47-53.  
[2]颜子凯.云阳建全抽水蓄能电站面板堆石坝填筑施工关键技术研究[J].四川水利,2026,47(2):60-63.  
[3]郭传科,李蒋金,高昱芄.某抽水蓄能电站软硬岩掺合料碾压试验[J].水电能源科学,2026,44(1):99-103.  
作者简介:李会雄(1985—),男,高级工程师,毕业于中国地质大学,现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,项目副经理,长期从事水利水电、抽水蓄能项目管理工作。