

# 基于全粒径曲线的堆石料压缩模量预测与坝体变形控制

惠红强

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

**[摘要]**堆石料压缩模量是衡量特高堆石坝变形性能的重要力学指标, 本论文基于西南某大型水电站大坝工程, 对 300m 级砾石土心墙堆石坝堆石料的工程性质和变形约束困难等进行详细的研究, 在针对堆石料试验级配与原型级配之间缩尺效应的问题, 采用全粒径曲线理论建立压缩模量计算方式, 对堆石料力学参数进行精准化的确定。结合堆石料设计压实质量把控、变形监测及反馈分析、施工阶段动态调整优化、长期运行稳定性评估四个方面, 论述了大坝体变形约束的技术手段。进一步从工程建设的投资和融资安排、工程工期和进度管理、工程风险管控及效益评价、工程持续性与总体效益提升等角度进行经营分析。

**[关键词]**堆石料; 全粒径曲线; 压缩模量; 变形控制; 经营分析

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19415

中图分类号: TV64

文献标识码: A

## Prediction of Compressive Modulus of Rockfill Materials and Control of Dam Deformation Based on Full Particle Size Curve

HUI Hongqiang

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

**Abstract:** The compression modulus of rock fill material is an important mechanical indicator for measuring the deformation performance of ultra-high rock fill dams. Based on a large hydropower station dam project in Southwest China, this paper conducts a detailed study on the engineering properties and deformation constraints of rock fill material for a 300m level gravel soil core rockfill dam. In order to address the scaling effect between the experimental grading and the prototype grading of rock fill material, a compression modulus calculation method is established using the theory of full particle size curve, and the mechanical parameters of rock fill material are accurately determined. This paper discusses the technical means of dam deformation constraint from four aspects: quality control of compaction in the design of rockfill materials, deformation monitoring and feedback analysis, dynamic adjustment and optimization during the construction phase, and long-term operational stability evaluation. Further conduct business analysis from the perspectives of investment and financing arrangements for engineering construction, project schedule and progress management, project risk control and benefit evaluation, project sustainability and overall benefit improvement.

**Keywords:** rockfill material; full particle size curve; compressive modulus; deformation control; business analysis

### 1 工程概况与技术挑战

#### 1.1 工程概述

西南某大型水电站在四川甘孜州雅江县境内, 属于雅砻江干流规划开发 22 级电站中的中游控制性的龙头电站。挡水建筑物是砾石土心墙堆石坝、坝顶高程 2875m、建基面高程 2572m、最大坝高 303m、填筑总量 4315 万  $m^3$ 、中心墙砾石土达 442 万  $m^3$ 、是已建的世界最高心墙堆石坝<sup>[1]</sup>。电站总装机 300 万 kW (6×50 万 kW)、多年平均年发电量 110 亿 kW h、水库正常蓄水位 2865m、总库容 107.67 亿  $m^3$ 、调节库容 65.6 亿  $m^3$ 、具有多年调节能力。

#### 1.2 堆石料工程特性与变形控制难点

坝体的变形协调控制是高堆石坝设计以及施工过程中一个长期存在的主要问题, 在面对 300m 级的超高堆石坝时, 国内国外的设计与建设案例不足, 而且用于 300m 级超高堆石坝心墙防渗料的砾石土与普通砾石土相比力学特性有较大的区别, 现有研究成果对工程实践的作用有

限。通过对本文堆石料进行室内试验得到的心墙砾石土的试验结果显示, 心墙砾石土的压实程度较高, 自身的抗渗能力较强, 能够达到工程设计的技术指标, 根据压缩系数、压缩模量可以看出所研究的心墙砾石土是一种低压缩性土, 心墙砾石土在不同围压下的峰值强度有所改变。挡水建筑物用石料主要是坝体堆石料和过渡料, 级配有特殊要求, 开挖困难。本项目位于青藏高原气候寒冷地带, 最低气温达 -15.9℃, 冬期施工约 3 个月, 高寒环境给堆石料填筑压实质量控制以及变形分析造成很大影响。

### 2 全粒径曲线与压缩模量预测模型

#### 2.1 全粒径曲线理论及其工程意义

堆石料属于宽颗粒范围的大粒径粗料, 其工程性质跟颗粒大小的大小有很强的相关性, 但由于室内设备试验范围有限, 一般大型三轴室最大的试样颗粒也只有 60mm, 而用常规大型三轴室测试所得的堆积石料试样的模型参数来求土石坝变形时, 与实际建筑物检测结果相差很大,

要克服这种缩尺效应,全颗粒曲线法的基本原理就是用一条完整的从小颗粒至大颗粒的全部颗粒级配曲线,把室内试验小尺度的结果折算成相应原型级配条件下的性能指标。如图 1 所示,图为堆石料原型颗粒级配曲线同缩尺的各种方法所得到的不同颗粒级配曲线之间的比较关系示意图。由此可以得出,缩小比例后的级配曲线在细小颗粒含量以及最大颗粒尺寸上都发生了较大的变化。

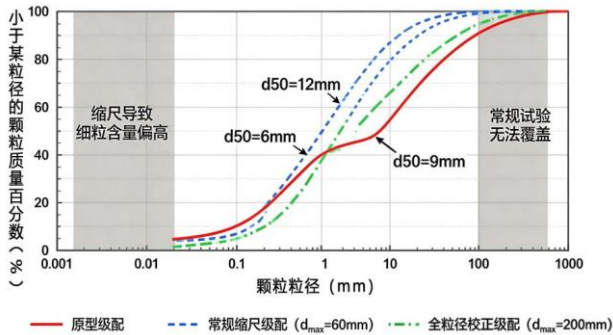


图 1 堆石料原型级配与试验级配对比示意图

运用中国首个巨型三维压缩试验装置,最大直径 200mm 以及巨型三维压缩试验装置开展五个世界最高坝工程堆石料力学特性缩尺效应试验研究,详细探讨了本构模型对坝体计算变形的影响<sup>[2]</sup>。研究表明,颗粒大小效应对堆石体的压缩模量和抗剪强度参数的影响较大,常规的缩尺手段可能会造成压缩模量参数偏大 10%~30%,进而影响坝体变形预报精度。

### 2.2 基于全粒径曲线的压缩模量预测方法

对于堆石料的侧限压缩行为,在开展大尺寸侧限压缩试验与蠕变试验中得出如下结论:在恒定加载速率下进行的体积蠕变随时间变化呈现相同的一般规律,变形量同应力成正比增长,蠕变速率随着时间推移有所下降,且有较好的双对数函数线性关系;侧限压缩模量在初始再加载情况下远大于一般加载状况下,但是随着再加载次数增多而趋近于后一种情况。

根据以上实验规律,提出了考虑全粒径效应的压缩模量预测模型。此模型有以下三个主要部分:首先,在模型建立过程中,要找到原型级配和试验级配间粒径的等效转换关系,然后利用特征粒径  $d_{50}$ 、 $d_{85}$  来构造缩尺因子  $\lambda$  与压缩模量的校正函数。其次,根据等向压缩试验得到不同的围压下压缩模量随应力变化的关系曲线。在低中应力时,高的应力梯度造成了大的变形增量以及小的侧向收缩模量;而在高应力情况下,高的应力梯度使得应力应变过程的变化减小,同时由于高的应力梯度造成的是小的变形增量以及大的侧向收缩模量。最后是引入了时间效应调整系数。堆石料应变明显具有时效特征,应该把蠕变应变考虑进去作为长期的弹模预报因素之一。文中所得到的压缩模量参数可以很好地反映出原型堆石体在复杂的应力作用

下发生的变形规律。

从表 1 可以看出,经过全尺寸校正之后的压缩模量相较于传统的缩尺试验有 10%~20% 的提升,校正因子也随着所施加的压力不同而有所区别,说明了缩尺效应对不同围压情况下的非一致性影响。

表 1 不同应力条件下堆石料压缩模量对比

应力水平	缩尺试验模量 /MPa	全粒径校正模量 /MPa	校正系数
低应力 (<1MPa)	45~60	52~68	1.15
中应力 (1~3MPa)	60~85	72~98	1.20
高应力 (>3MPa)	85~110	94~121	1.10

## 3 坝体变形控制的关键技术与应用

### 3.1 堆石料设计与压实质量控制

此项目针对大坝堆石料的质量管理采用了一些新的技术创新方法。项目组创建了多源杂填土料场三因素立体化动态设计方案并研制了宽粒度范围土料搅拌动态精确调整系统,构建了综合岩性和开挖经历的爆破混合材料预报模型以及建立了一种根据工艺参数及效果非线性关联的智能爆破设计软件,从而达到对堆石级配准确把控的目的。

堆石坝级配料开挖智能爆破关键技术的应用极大地提高了级配料的开挖质量。使用这种技术可以增加炸药的能量利用率,炸药单耗下降 20%~40%,级配优良率由 70% 提高到 90%,通过此项目所进行的堆石料开挖爆破,应用这个技术之后单耗降至只有 0.45kg/m<sup>3</sup>。而且对两河口电站各个区压制后的坝料颗粒级配测试超过了两万组。

对于碾压来说,研发出了碾压路径及不漏碾准确把握的技术,开创性地建立了复杂环境下的无人驾驶碾压集群大范围同步碾压工艺,创下了单次碾压合格率达到 98.77% 的历史最高纪录。通过智慧化施工管控,做到了对堆石料施工质量的有效把控。

### 3.2 变形监测与反馈分析

为适应特高心墙堆石坝沉降观测要求提出了一种采用阵列式位移计进行特高心墙堆石坝沉降观测的方法并应用于该工程大坝心墙沉降观测取得良好的效果,在此工程大坝心墙轴线上沿高程 2760m 处贯通布置了三条阵列式位移计共长 400m 达到对心墙沉降进行了实时准确监测的目的<sup>[3]</sup>。同时,“管道机器人监测系统”的成功上线使用也为解决特高砾石土心墙堆石坝安全监测难题中遇到的高水压、高土压、大变形等问题提供了新的方案。如图 2 所示,在图中表示出大坝心墙,上下游堆石区、坝基等不同位置不同类型变形观测仪器的空间分布方式有:阵列式位移计、水管式沉降仪、弦式位移计等。

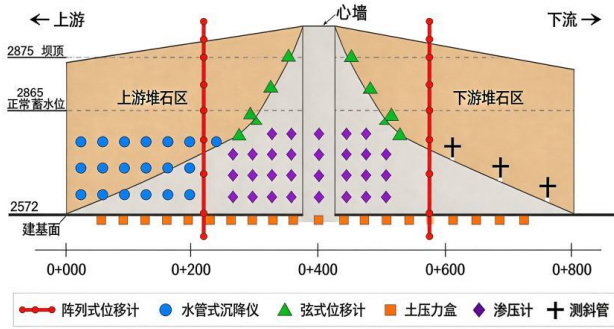


图2 大坝变形监测测点布置示意图

### 3.3 施工过程中的动态调整与优化

在实时监控以及计算反馈下,在施工阶段采取了及时调整及优化手段。首次提出高寒高海拔地区堆石坝心墙料冻结融化防治基本技术和标准,开发冬季心墙材料加工、运输、压实、质量控制的全过程连续作业一体化技术,首创特高土石坝冬季全年持续不间断连续施工。大坝的位移量控制较好。从观测结果来看,大坝上游、下游堆石区最大沉降变形分别为对应区域坝体填筑高度的 1.31%、1.37%,达到小于 1.5%的要求;底部廊道量水堰渗漏只有 0.5L/s。可见利用全颗粒级配曲线压缩模量推算出的相关参数较为准确,施工过程的质量管理到位。

### 3.4 长期运行中的变形稳定性评估

工程所有机组在 2022 年 3 月开始发电以来,在多年的运行中各建筑物、设备运行情况良好,各项运行参数满足设计值的要求,大坝的应力监测和渗流监测都很好,在地震方面也是比较可靠的,洞式溢洪道、深孔泄洪洞、竖井旋流泄洪洞、放空洞等泄水建筑物运行正常,三大洞室变形已经稳定下来,安全可靠而且防渗性能很好。水库在 2024 年 10 月底第一次蓄满到正常蓄水平面 2865m,在蓄水期间大坝的变形是和预测相符的,证明了对压缩模量预测的方法是正确的。

## 4 经营分析与管理优化

### 4.1 投资与成本控制分析

此工程项目总预算投资 664.57 亿元人民币,为迄今为止我国内地藏区投资量级最大、开工规模最大基础设施建设项目。工程建设的资金来源为项目资本金以及债务性融资,其中资本金 132.91 亿元,占总投资的比重为 20%,由中国国投电力有限公司与四川川投能源股份有限公司分别以 52%和 48%的股权比例进行共同注资;而债务性融资主要是通过银团贷款的方式进行筹措,由建设银行和工商银行承担银团联合牵头角色,中国邮政储蓄银行、农业银行、国家开发银行、中国银行及交通银行作为参加成员组建银团,向该项目提供总额达 530 亿元人民币的低息长期限信贷资金支持。

在费用控制上,本项目在主体工程期间利用先进技术大幅减少了施工造价。堆石坝级配料开采智能爆破技术使

得炸药消耗下降了 20%~40%,爆破费用就已节省了几千万元。无人驾驶碾压车群大批量联合碾压技术一次合格率高达 98.77%,大量减少了返工费用。

### 4.2 工期与进度管理优化

该工程的施工环境非常恶劣,每年六月份到九月份为雨季,十二月份到来年的二月份为寒冷的冬天,在这期间的有效工期仅约 200d。在高海拔地区作业的工作效率要比在平原地区低很多,例如进行大坝两侧坡脚挖掘工作,从物料堆场到工作面上要攀登 200m~500m 的高度,单趟就需要花费两个小时的时间。

为了保证工期,在此工程中推行了一系列的进度管理改进措施:冬季心墙料的生产和运输、碾压、质检一条龙连续工艺的研究应用开创了特高土石坝冬季不间断连续施工先河;采用智能化施工系统对填筑进度进行实时跟踪管控以及动态调配;春节连续施工保证重点部位不停工。

### 4.3 风险控制与效益评估

此项目在施工建设和运维过程中存在多种风险因素主要包括:技术风险、环境风险以及财务风险三大类。工程技术风险防控包括了工程建设期间解决高海拔、高边坡、高土石坝、高泄洪流速等世界性重大工程技术问题的技术攻关以及开展了系统的科技试验研究工作。其中高边坡高达 684m,为当今世界上最大规模的高边坡群支护工程。工程运用“施工全智能技术”进行建造,填补高寒地带超土石坝建设领域空白。

在运营效益上,电站水库为多年调节型水库,在四川属于最大的多年调节型水库电站,同时是中国调节效益最佳的水库电站之一,与锦屏一级、二滩两个水电站组成三条联合调节水库,总调节库容达到 148 亿 m<sup>3</sup>,让雅砻江在中国成为调节性能最好的大型河流。而联合调度的最大动力来自电量增收效益,两河口对中下游电站带来的电量增收效益有 88.52 亿 kW h,相当于 8.94%的发电能力增加。年发电量为 110 亿 kW h,但是总的补偿效益高达 341 亿 kW h 是自身发电量的三倍之多。

表2 主要效益指标汇总

效益类型	指标数值	单位
自身年发电量	110	亿 kW h
总补偿效益	341	亿 kW h
电量增发效益(无楞占)	88.52	亿 kW h
发电能力提升	8.94	%
拉动四川省 GDP	>1000	亿元
直接带动就业	约 2	万人/年
年缴纳税费	>6	亿元

如表 2 所示,该项目整体效益十分可观,在发电方面就有着不错的效益,而同时由于流域联网调度产生的补偿效益更是远远超过了一倍,为当地社会经济发展做出了巨大的贡献。

#### 4.4 可持续运营与综合效益提升

电站作为川渝 1000kV 特高压交流送端电源的重要组成部分,在保障成渝地区双城经济圈供电方面起到至关重要的作用,发电站的调峰能力大大改善了电网的质量,雅砻江干流水电站平时电量和汛期电量基本持平,甚至超过汛期电量。

在可持续运行上,电站是雅砻江流域水风光互补可再生能源示范基地的重要支柱,它的多年调节作用给雅砻江流域风电、光伏发电等新能源的大规模并网提供了很好的调峰能力支持,两河口抽水蓄能电站会安装四个 30 万 Kw 的抽水蓄能可逆机组加上已经修建好的 300 万 kW 水电常规机组,总装机量达到 420 万 kW,可以消化掉约 700 万 kW 的风光新能源。再加上电站建设过程中对四川省 GDP 贡献超过 1000 亿,在运行以后每年都能为当地带来 6 亿的税收收入。为当地的经济发展和乡村振兴注入源源不断的活力。

#### 5 结束语

全粒径曲率下的堆石料压缩模量计算方法是一项针对特高堆石坝缩尺效应的有效处理办法,通过对原级配以及试验级配间粒径相等替代的关系进行构建,利用了时间因子对结果进行了校正从而取得更精确的压缩模量参数,

可以给大坝的变形预测提供参考。本项目采用堆石料级配精确把控、无人驾驶机群联合作业、全方位监测以及反馈等一系列技术成功使得大坝变形处于设计控制范围之内,上、下游堆石区最大沉降变形分别为坝体填筑高度的 1.31%, 1.37%。工程投资及融资合理,总投资 664.57 亿元,银行贷款额度为 530 亿元,资本金 132.91 亿元,在建期间带动四川省 GDP 超 1000 亿元,年发电量 110 亿 kW h,累积补偿效益 341 亿 kW h,具有较好的经济性。

#### [参考文献]

- [1]李东,杜俊,王孝东,等.筑坝堆石料动力特性试验研究[J].水电能源科学,2026,44(2):100-104.
- [2]庞锐,姚浩宇,徐明洋,等.考虑堆石料软化的三维坝坡优化动力稳定分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2026,7(4):1-11.
- [3]张东明,钟春欣,王继敏,等.基于改进粒子群算法的超高心墙坝堆石料湿化及其流变参数反演[J].水电能源科学,2026,7(4):1-11.

作者简介:惠红强(1982.3—),男,毕业院校:武汉科技大学/浙江大学,所学专业:工程造价管理/工商企业管理,当前就职单位:中国水利水电第十二工程局有限公司,职务:公司二级专家,职称级别:高级经济师。