

DOI: 10.11779/CJGE202007021

# 面板堆石坝深覆盖层处理技术研究及在河口村水库工程中的应用

邢建营<sup>1, 2</sup>, 关志诚<sup>2</sup>, 吕小龙<sup>1</sup>

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

**摘要:** 深覆盖层上的面板堆石坝通常采用面板—趾板—连接板—防渗墙的防渗系统。由于连接板、趾板及坝体修筑在覆盖层上, 填筑和蓄水期引起的覆盖层变形对防渗体接缝位移影响较大。因此, 坝基覆盖层处理质量是保证工程安全的关键。针对坝基覆盖层处理问题, 结合河口村水库工程, 制定了固结灌浆、旋喷桩等多种坝基处理方案。采用非线性有限元法, 系统研究了各坝基处理方案对坝体和防渗体接缝变形的影响。计算结果表明, 对于固结灌浆和高压旋喷桩, 两种方案均能满足设计要求。然而, 固结灌浆方案实施困难, 且效果不明显, 很难达到预期的设计目标。最终选用高压旋喷桩方案, 并提出了分区渐变式的新型布置形式。长期现场监测资料表明, 加密区能有效降低防渗系统变形, 处理后的覆盖层变形较小。

**关键词:** 覆盖层; 砂卵石; 地基处理; 固结灌浆; 高压旋喷桩

中图分类号: TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)07-1368-09

作者简介: 邢建营(1978—), 男, 河南确山人, 高级工程师, 主要从事水工建筑物设计和基础处理方面的研究工作。

E-mail: 40637323@qq.com.

## Overburden treatment for concrete face rockfill dams and its application in Hekoucun project

XING Jian-ying<sup>1, 2</sup>, GUAN Zhi-cheng<sup>2</sup>, LÜ Xiao-long<sup>1</sup>

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. The General Institute of Water Conservancy and Hydropower Planning and Design of the Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China)

**Abstract:** The concrete face, toe-slab, connecting slab, cut-off wall are usually used as the anti-seepage system of concrete face rockfill dams (CFRDs) on deep overburden. As the toe slab and dam body are built on the overburden, the deformation caused by filling and impoundment significantly affects the joint displacement of the anti-seepage system. Therefore, the quality of overburden treatment is the key to ensure the safety of the CFRDs. Aiming at the problem of overburden treatment, considering the Hekoucun project, several treatment schemes for dam foundation, such as dynamic compaction, consolidation grouting and high-pressure rotary spray, are proposed. Using the non-linear finite element method, the effects of various foundation treatment schemes on the joint deformation of anti-seepage system are systematically studied. The results show that consolidation grouting and high-pressure jet grouting pile can meet the design requirements. However, the consolidation grouting scheme is difficult to implement and difficult to achieve the design goal. Finally, the high-pressure jet grouting pile scheme is employed, and a new type of partition gradient layout is proposed. The on-site monitoring results show that the infiltration zone can effectively reduce the deformation of anti-seepage system. After reinforcement, the deformation of the overburden decreases significantly.

**Key words:** overburden layer; sand pebble; foundation treatment; consolidation grouting; high-pressure jet pile

## 0 引言

中国已建水库大坝约 9.8 万座, 其中 90%以上为土石坝。在水能资源丰富的西南地区, 地质条件较理想的坝址基本已完成建设或正在建设。近年来, 随着坝工和覆盖层处理技术的不断发展, 在覆盖层上修建

的面板堆石坝越来越多<sup>[1]</sup>。如 2009 年完工的湖北老渡口面板堆石坝, 最大坝高 95 m, 建在 21.5 m 的砂砾石覆盖层上; 2006 年竣工的云南那兰面板堆石坝, 最

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404804)

收稿日期: 2019-08-01

大坝高 108.7 m, 建在 17~24 m 的砂砾石覆盖层上; 2008 年竣工的新疆察汗乌苏面板堆石坝, 最大坝高 110 m, 建在最大深度 46.7 m 的砂砾石覆盖层上; 2008 年竣工的甘肃九甸峡面板堆石坝, 最大坝高 136.5 m, 建在最大深度 54~56 m 的砂砾石覆盖层上; 正在施工的新疆阿尔塔什面板砂砾石坝, 最大坝高 164.8 m, 建在最大深度 93.9 m 的砂砾石覆盖层上。河口村面板堆石坝最大坝高 122.5 m, 建在 41.87 m 的砂砾石覆盖层上, 覆盖层中存在黏性土夹层、砂卵石层、砂层透镜体等, 压缩性差异较大, 且空间分布极不均匀, 坝基覆盖层处理难度较大。

对于修筑于深厚覆盖层上的高土石坝, 国内外学者已开展了大量研究工作<sup>[2~5]</sup>。针对深厚覆盖层取样困难, 无法准确获取天然密度的问题: Palmer 等<sup>[6]</sup>和汪小刚等<sup>[7]</sup>采用反演方法确定覆盖层参数; 程展林等<sup>[8]</sup>通过统计分析, 得出旁压模量与密度之间服从对数关系, 提出了利用旁压或动探试验推求覆盖层密度的新方法, 并成功应用于乌东德工程。在深覆盖层数值分析方面: 温立峰等<sup>[9]</sup>结合实测资料和有限元方法, 系统研究了建于深覆盖层地基上面板堆石坝的应力变形特性; 孙大伟等<sup>[10]</sup>采用有限元加速技术, 分析了大河水电站深覆盖层上面板坝和防渗体接缝的变形情况; 吴梦喜等<sup>[11]</sup>系统研究了覆盖层坝基潜蚀造成应力变形变化的机理, 并提出了潜蚀的有限元计算方法。在防渗墙模拟方面: 郑能惠等<sup>[12]</sup>详细分析了各影响因素对覆盖层中防渗墙应力变形特性的影响; 潘迎等<sup>[13]</sup>详细研究了河谷地形对深覆盖层中防渗墙应力变形的影响。余翔等<sup>[14]</sup>在对覆盖层上土石坝进行三维有限元精细模拟时, 采用非协调元模拟防渗墙变形规律和拉应力演化机理。

上述研究成果对把握深覆盖层上高土石坝及其防渗系统的应力变形特性具有重要意义, 但是在覆盖层坝基的设计施工中, 一般根据工程经验确定坝基处理方案, 系统的数值研究成果较少。

本文结合河口村水库工程, 制定了固结灌浆、旋喷等多种坝基处理方案。采用非线性有限元法, 系统研究了各坝基处理方案对坝体和防渗体接缝变形的影响, 并结合工程地质条件确定了覆盖层处理的设计施工方案。通过对现场监测资料, 验证了坝基处理方案的合理性。本文研究成果可以为类似工程的坝基覆盖层处理提供参考。

## 1 坝基覆盖层处理技术简介

在覆盖层坝基上修筑高土石坝, 由于其变形模量较低且不均匀, 需采取处理措施提高地基变形模量, 降低覆盖层压缩性, 减少坝体沉降及不均匀变形, 防

止产生防渗体失效。根据国内外利用覆盖层筑坝的实践, 坝基覆盖层的处理技术主要有挖除法、强夯法、振冲加密法、固结灌浆法、高压旋喷桩等。

挖除法对坝体稳定和变形最为有利, 但基坑处理和排水难度大, 施工工期长<sup>[15]</sup>。

强夯法技术成熟、施工方便, 但处理深度有限, 强夯影响深度一般在 8~10 m, 坝基处理效果随覆盖层组成和地下水位情况变化较大。

振冲碎石桩<sup>[16]</sup>是通过对软弱地基进行置换及挤密形成复合地基, 可提高地基变形模量和承载力, 改善地基不均一性, 减少不均匀沉降。同时, 软弱地层经过激振后, 碎石桩加速了孔隙水压力的消散, 能够有效防止地基液化。自 1977 年引入中国以来, 因设备简单、施工方便、经济快捷等优点, 在工程上得到了广泛应用, 但一般适用于处理松散砂土、粉土、粉质黏土等地基。

固结灌浆<sup>[17]</sup>是指将水泥浆液灌入坝基覆盖层, 提高坝基的抗变形能力及降低渗透性。其中架空或大孔结构及大部分连通性较好的孔隙被水泥结石充填, 但对于地下水流速较大的地基, 灌浆效果不理想。固结灌浆工期较长, 且必须在大坝截流之前开始施工, 施工强度较大, 灌浆质量不易保证。

高压旋喷桩<sup>[18]</sup>是将带有特殊喷嘴的注浆管置于预定深度, 在喷射的同时, 以一定的速度旋转、提升喷嘴, 形成喷浆液与土体混合的圆柱形桩体。该技术在 20 世纪 70 年代发展起来, 之后在国内外发展十分迅速。

## 2 工程概况

河口村水库工程, 位于黄河一级支流沁河最后一段峡谷出口处, 是黄河下游防洪体系的重要组成部分。挡水建筑物采用混凝土面板堆石坝, 坝址处岸坡陡峻, 河谷呈“U”型。坝顶高程 288.5 m, 最大坝高 122.5 m, 坝顶长度 481.0 m, 坝顶宽 10.0 m, 上、下游坝坡分别为 1:1.5 和 1:1.5。趾板置于覆盖层上, 布置在面板的周边, 与防渗面板通过设有止水的周边缝连接, 形成坝基以上的防渗体, 趾板上游坝基采用混凝土防渗墙截渗。趾板与防渗墙之间采用连接板连接, 连接板宽度 4.0 m, 厚度 0.9 m。防渗墙两端和底部嵌入基岩 0.5 m, 为防止产生过大的应力集中, 嵌入处设置石渣柔性支座。典型剖面见图 1。其中, Gr 为含砾石覆盖层, ZHL 为重粉质壤土, ZL 为中粉质壤土, qL 为轻粉质壤土, ZS 为中砂。如图 1 所示, 在 170 m 高程处, 沿上下游方向布置 1 套水平固定测斜仪 (标识为“|”)。

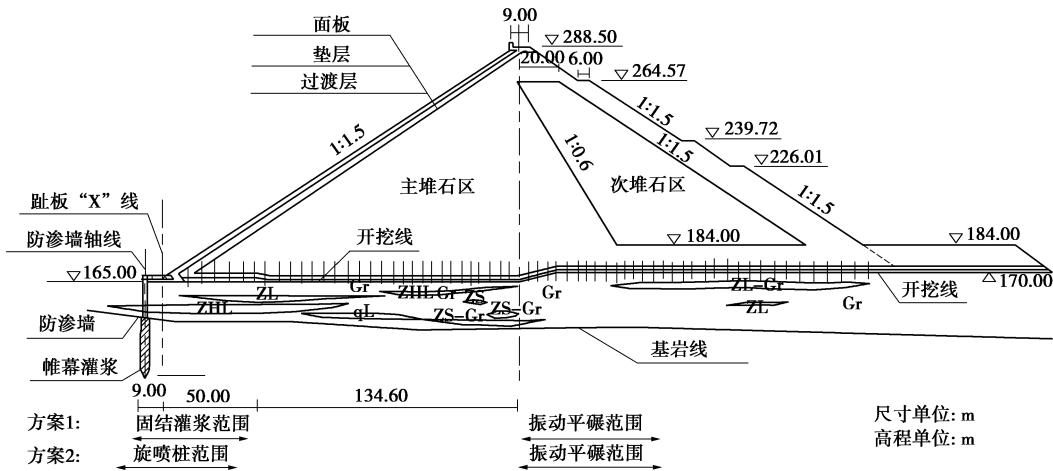


图 1 河口村大坝典型剖面

Fig. 1 Typical section of Hekoucun CFRD

大坝基础座落在含漂石、孤石及泥化夹层的砂卵石覆盖层上, 覆盖层平均厚度约 30 m, 最大厚度 41.87 m。根据河床钻孔资料, 在趾板线附近及下游内存在 14 个砂层透镜体, 其中 6 个透镜体分布在地面以下 8 m 以内, 4 个分布在地面 20 m 以下。覆盖层中发现 4 层较连续的黏性土夹层, 最厚达 12 m, 顺河延伸 350~800 m, 对坝基稳定、变形起控制作用。渗透系数  $k$  一般为 40~60 m/d。

根据地质勘查资料, 黏性土夹层累计厚度为 5~20 m, 占覆盖层总厚度的 1/6~1/2, 分布极不均匀。黏性土夹层塑性指数为 6~11, 压缩系数为 0.1~0.2 MPa<sup>-1</sup>, 属中低压缩性土; 砂卵砾石层的压缩系数为 0.01~0.068 MPa<sup>-1</sup>, 属低压缩—不可压缩; 根据标贯击数及相对密度, 砂层透镜体相当于中密—密实。上述 3 种坝基材料, 不仅密实度差别较大, 且空间分布也极不均匀。因此, 需对坝基覆盖层进行处理, 降低不均匀沉降对坝体防渗系统的不利影响。

### 3 坝基处理方案设计

根据国内坝基处理经验, 覆盖层含漂石、孤石且砂卵石粒径较大时, 振冲碎石桩的处理方式不适用。对于强夯方案, 由于河口村水库坝基覆盖层含漂石、孤石多, 强夯施工难度大; 河床渗透系数大、地下水位高, 强夯时需要降水, 降水较困难; 强夯处理深度有限, 不能有效解决下部覆盖层变形, 同时强夯施工时间受截流直接影响, 工期相对较长, 导致 2011 年截流目标难以实现, 继而影响整个工期。因此, 首先排除强夯方案。针对河口村水库覆盖层岩性复杂、状态多变的特点, 初步拟定了固结灌浆、旋喷桩两种坝基处理方案。

根据工程经验, 混凝土面板堆石坝坝基基础变形

对面板影响较大的区域集中在大坝上游 1/3 坡高范围, 即上游防渗墙至趾板下游约 50 m 范围区域是大坝基础变形控制的核心区域, 也是防渗墙—连接板—趾板—周边缝变形较大的区域, 需要对该区域进行重点处理。对于坝轴线下游地基, 对防渗系统影响较小, 可适当放宽坝基处理要求。因此, 提出分区渐变式的布置型式。将防渗墙及趾板区域作为重点区域, 按照变形控制要求, 并考虑技术经济性, 在防渗墙至坝轴线区域进行处理。共设计 3 组地基处理方案: 方案 1 为对照组, 坝基不处理; 方案 2 为固结灌浆方案; 方案 3 为高压旋喷桩方案。各方案的处理范围见表 1 和图 2。

### 4 计算模型及参数

根据坝体分区、防渗墙的连接型式, 剖分大坝的三维有限元网格。模型以 8 节点六面体等参单元为主, 单元总数为 16456, 节点总数为 17552, 见图 3。接触单元和摩擦单元情况见表 2。根据地层平面图和剖面图, 有限元模型可以真实模拟覆盖层中砂卵石层、壤土夹层和夹砂层的分布及厚度。

堆石料非线性本构关系采用邓肯-张 E-B 模型, 材料参数通过室内三轴试验确定, 见表 3。面板、趾板和防渗墙均采用 C25 混凝土浇筑, 重度为 25 kN/m<sup>3</sup>, 弹性模量  $E$  为  $2.8 \times 10^4$  MPa, 泊松比  $\nu$  为 0.167。

根据施工进度安排, 面板堆石坝填筑蓄水过程如下: ①浇筑防渗墙及趾板; ②填筑一期坝体至 225.0 m 高程; ③填筑二期坝体至 238.5 m 高程; ④浇筑一期面板至 233.0 m 高程, 同时浇筑连接板; ⑤汛期, 库水位蓄至 219.0 m; ⑥全断面填筑三期坝体至 288.5 m 高程; ⑦浇筑二期面板至 288.5 m; ⑧蓄水至设计洪水位 285.4 m。

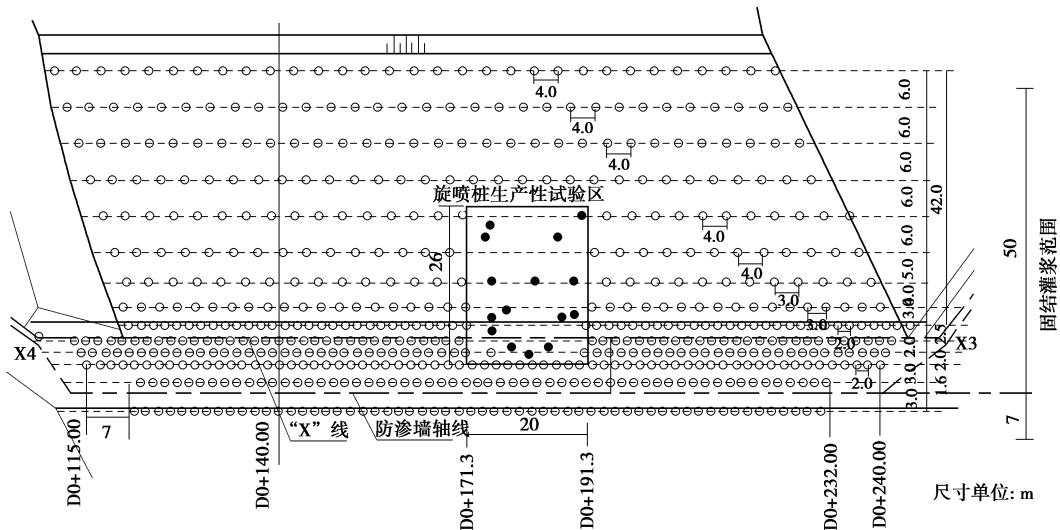


图 2 覆盖层处理方案平面布置图

Fig. 2 Layout of overburden treatment scheme

表 1 坝基处理范围

Table 1 Treatment scope of dam foundation

加固方案	坝轴线上游方向	坝轴线下游方向
固结灌浆+振动平碾	从防渗墙上游 7 m 向下游 50 m 范围内, 对砂砾石地基固结灌浆	70 m 范围内振动平碾
旋喷桩+振动平碾	防渗墙和趾板下部布置 5 排旋喷桩, 向下游再布置 9 排旋喷桩	70 m 范围内振动平碾

表 2 接触单元和缝单元汇总

Table 2 Summary of contact and joint elements

物理接触	有限元模型
覆盖层-趾板	Goodman 单元
覆盖层-防渗墙	Goodman 单元
覆盖层-连接板	Goodman 单元
垫层料-面板	Goodman 单元
特殊垫层料-面板	Goodman 单元
面板-面板	缝单元
面板-趾板	缝单元
趾板-连接板	缝单元
连接板-防渗墙	缝单元

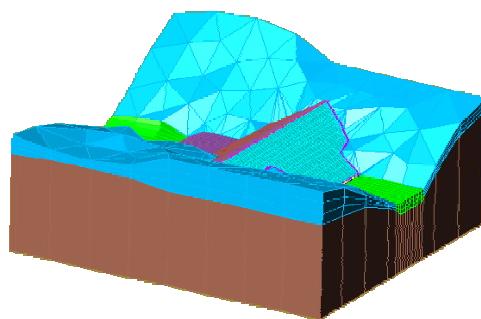


图 3 三维有限元模型

Fig. 3 Finite element meshes

表 3 邓肯-张 E-B 模型参数

Table 3 Parameters of Duncan-Chang E-B model

坝料类型	$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\varphi$ /( $^\circ$ )	$\Delta\varphi$ /( $^\circ$ )	$k$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$
主堆石	21.5	53	13	940	0.35	0.83	500	0.20
次堆石	20.5	52	12	700	0.25	0.81	350	0.15
垫层料	22.0	55	12	1200	0.45	0.85	600	0.2
过渡料	21.9	54	12	1000	0.48	0.9	500	0.15
库区堆渣	20.0	52	9.9	720	0.44	0.65	250	0.50
砂卵石层	21.2	44	0.7	913	0.33	0.85	225	0.29
壤土夹层	16.5	23	0	264	0.25	0.85	134	0.4
夹砂层	16.3	28	0	300	0.5	0.89	150	0.4

表 4 覆盖层 E-B 模型参数 (固结灌浆)

Table 4 E-B parameters of overburden (consolidation grouting + dynamic compaction)

覆盖层	$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$k$	$n$	$R_f$	$K_{ur}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi_0$ /( $^\circ$ )	$\Delta\varphi$ /( $^\circ$ )	$K_b$	$m$
砂卵石层(固灌)	21.5	1150	0.42	0.85	1600	0	44	2	600	0.28

表 5 旋喷区域 E-B 模型参数 (旋喷桩)

Table 5 E-B parameters of overburden (rotary jet grouting pile + replacement)

覆盖层	$\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$k$	$n$	$R_f$	$K_{ur}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi_0/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	$K_b$	$m$
砂卵石层(密孔)	21.5	1150	0.42	0.85	2300	0	44	1	550	0.28
砂卵石层(疏孔)	21.5	1100	0.42	0.85	2200	0	44	1	500	0.28

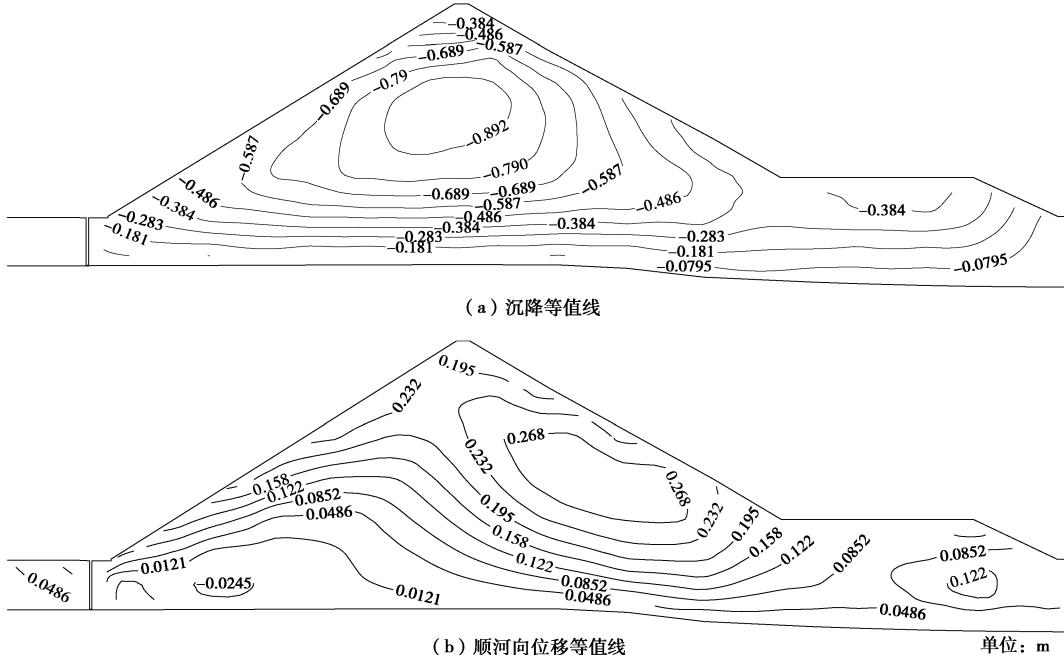


图 4 有限元计算坝体变形

Fig. 4 Dam deformations by FEM

## 5 坝基覆盖层处理计算

### 5.1 坝基覆盖层参数

对于固结灌浆区和高压旋喷区, 当覆盖层厚度小于 20 m 时, 固结灌浆孔和旋喷桩直接与基岩连接; 若覆盖层厚度大于 20 m, 固结灌浆和旋喷桩长度均取 20 m。

为了验证高压旋喷注浆法的适用性, 并确定高压旋喷区域的计算参数, 在现场进行了高压旋喷桩试验。试验区选择在地基加固区, 包含地层结构复杂 (如含多层黏性土夹层和夹砂层) 地段, 面积约 520  $\text{m}^2$ 。生产性试验桩数量按大坝基础处理总桩数的 8%选取, 共布置 50 根, 桩间距根据生产桩的要求布置。试验前后, 分别采取静载、钻孔旁压、跨孔波速等一系列试验手段对天然地基和处理后的复合地基进行对比检测: ①地基承载力, 坝基高压旋喷处理前, 175 m 高程附近天然河床砂卵石层的承载力特征值一般在 500~600 kPa 左右, 处理后相应的复合地基承载力特征值达到 990~1100 kPa 左右, 承载力提高近 200%。②地基变形模量, 坝基高压旋喷处理前, 天然河床表层砂卵石层的变形模量为 40 MPa 左右, 处理后相应处复合地基变形模量达到 46.1~154.1 MPa, 最大提高

约 300%。基于以上天然地基载荷试验及复合地基静载试验资料, 充分考虑加固前后覆盖层承载力和变形模量的变化情况, 经咨询专家组讨论, 拟定了旋喷区域的模型参数。现场未开展固结灌浆试验, 采用工程类比法, 确定固结灌浆区域的模型参数。灌浆区域和旋喷区域的计算参数见表 4, 5。其中, 密孔桩间距为 2.0, 3.0 m, 疏孔桩间距为 4.0, 5.0, 6.0 m。两种覆盖层处理方案范围见图 2。

### 5.2 有限元计算结果

根据三维有限元计算, 蓄水后, 坝体沉降和顺河向位移见图 4。如图 4 所示, 最大沉降发生在坝体中部, 最大值为 0.89 m。在水荷载作用下, 顺河向位移均指向下游, 最大值约 0.27 m。沉降和顺河向位移等值线符合土石坝变形规律, 沉降率仅 0.58%。对于坝基不处理方案, 最大沉降量为 1.15 m。固结灌浆方案的最大沉降量为 0.97 m。表明, 两种坝基处理方案均可有效控制坝体沉降量。

图 5, 6 为旋喷桩方案的防渗墙变形和应力图。如图所示, 防渗墙的坝轴向和竖向位移都很小, 最大值分别为 0.40, 0.34 cm。顺河向位移指向下游, 最大值为 12.9 cm。防渗墙竖向应力随深度的增加逐渐增大, 在墙底最大值为 10.30 MPa, 两岸防渗墙底部出现拉

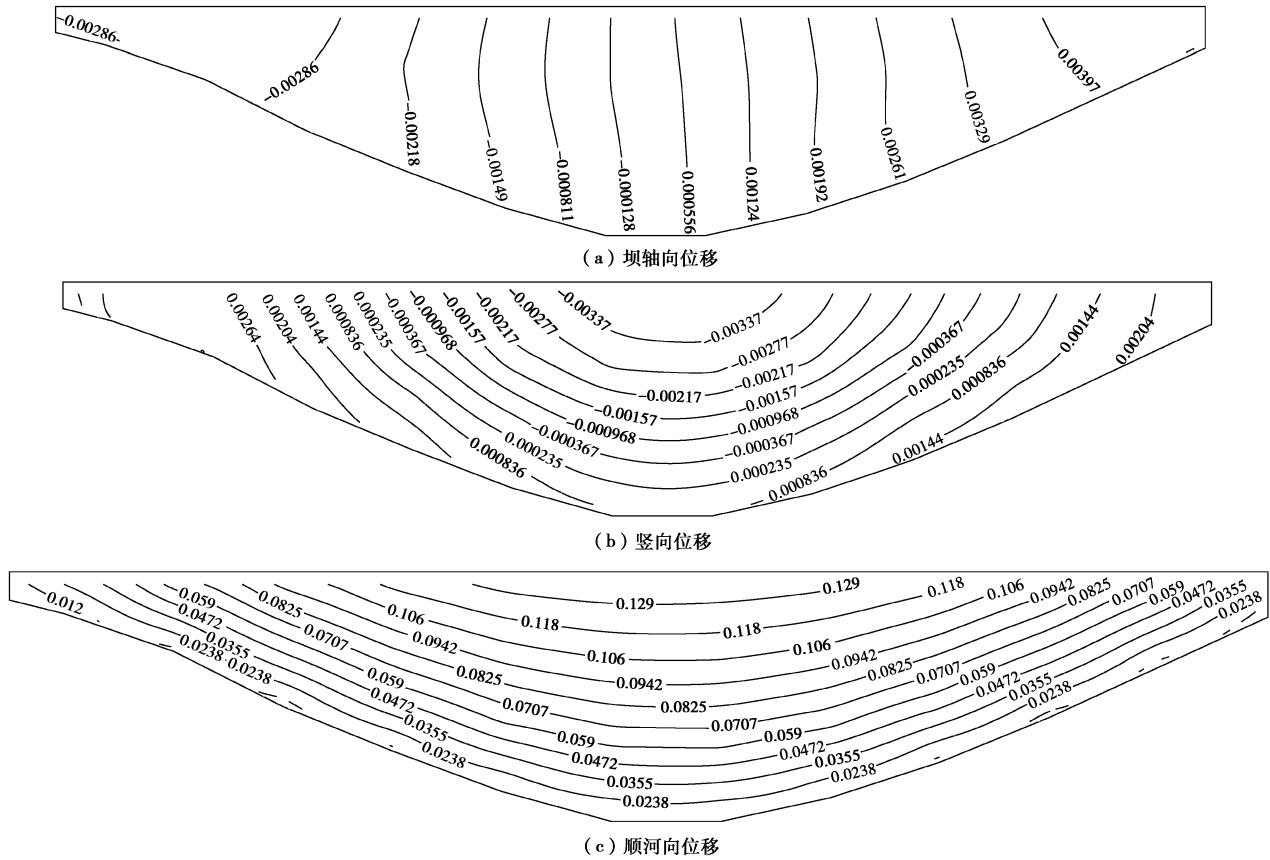


图 5 防渗墙位移 (m)

Fig. 5 Displacements of cut-off wall (m)

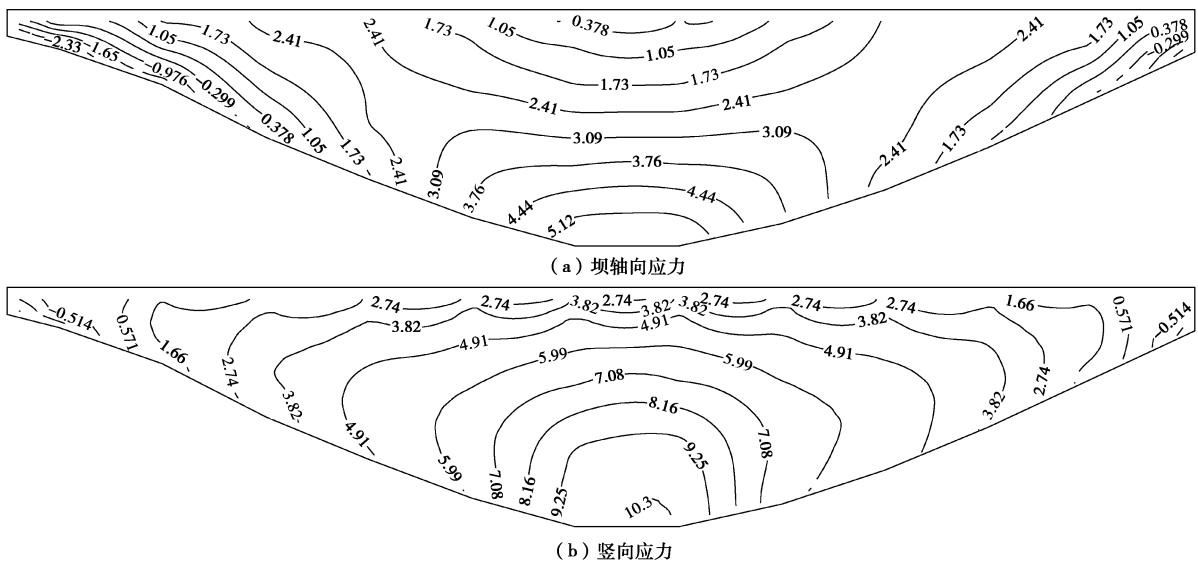


图 6 防渗墙应力 (MPa)

Fig. 6 Distribution of stress of cut-off wall (MPa)

应力, 最大值为 0.51 MPa。坝轴向应力也随深度增加而增大, 在防渗墙底部, 最大压应力为 5.12 MPa, 两岸墙底出现拉应力, 右岸防渗墙底部的最大拉应力为 2.33 MPa。综上, 防渗墙内压应力均小于 C25 混凝土的抗压强度 11.9 MPa, 局部区域拉应力大于抗拉强度 1.27 MPa。说明防渗墙的抗压强度是满足要求的, 抗

拉强度局部不满足要求, 防渗墙需要配筋。

图 7 为有限元计算结果(旋喷桩方案)与坝基覆盖层监测数据的对比。如图所示, 坝基上游侧经旋喷桩处理后, 覆盖层沉降显著减小。有限元计算的覆盖层沉降与现场监测结果数值上稍有差别, 趋势基本一致。

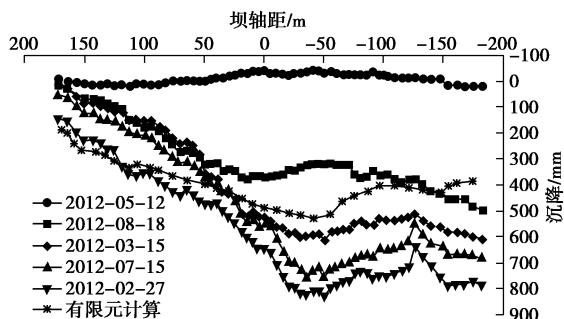


图 7 坝基沉降变形分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of settlement of dam foundation

有限元计算结果表明,3 种方案防渗墙的变形和应力分布规律基本一致。然而,如果不对坝基覆盖层进行处理(方案1),防渗墙的顺河向位移最大值为 23.1 cm,防渗墙内最大压应力和拉应力将达到 13.61, 2.17 MPa。通过高压旋喷和固结灌浆均可显著降低防渗墙应力,控制防渗墙的变形。

各坝基覆盖层处理方案下的防渗体接缝位移见表 6。如表 6 所示,若不处理覆盖层,接缝位移均较大。周边缝错动量为 35.2 mm, 路板—连接板错动量达 50.8 mm, 连接板—防渗墙相对沉降量为 52.2 mm。经固结灌浆处理后,周边缝、路板—连接板错动、连接板—防渗墙相对沉降量分别减小 6.2, 14.4, 5.2 mm。旋喷桩方案分别可降低 14.1, 22.0, 13.2 mm 的接缝变形。

表 6 各坝基处理方案下接缝位移

Table 6 Deformations of joints with various foundation treatment schemes (cm)

位置	变形	方案 1	方案 2	方案 3
周边缝	错动	35.2	29.0	21.1
	相对沉降	28.4	27.1	22.9
	张开	25.7	22.8	19.4
路板—连接板	错动	50.8	36.4	28.8
	相对沉降	0.8	0.6	0.2
	张开	15.3	11.4	10.6
连接板—防渗墙	错动	25.0	18.1	14.0
	相对沉降	52.2	47.0	39.0
	张开	40.3	17.4	15.5

陈生水等<sup>[19]</sup>统计了大量面板堆石坝周边缝变形与坝高的资料,考虑到这些大坝均未出现因接缝失效而溃决的事实,取统计资料的上包线作为面板接缝变形的安全控制标准,并建议面板堆石坝止水接缝安全控制指标见表 7。对比表 6, 7 可知,若不进行坝基处理,河口村水库工程周边缝位移将逼近安全控制指标,安全裕度较低。固结灌浆和旋喷桩方案均能够大幅降低防渗体的接缝位移,确保工程的安全运行。

表 7 高面板堆石坝周边缝变形安全控制值<sup>[19]</sup>Table 7 Safety control values for displacement of peripheral joints of high concrete faced rockfill dams<sup>[19]</sup>

坝高/m	沉降/mm	张拉/mm	剪切/mm
100	45	30	30
200	60	40	40
300	80	50	50

## 6 坝基处理设计及验证

### 6.1 优选坝基处理方案

根据三维有限元计算,对于固结灌浆和高压旋喷桩处理方案,接缝位移均能达到设计要求。然而,固结灌浆工程量较大,需要盖重并配合降水,而河口村大坝覆盖层渗透系数较大,降水难度较大。特别是占用工期较长,影响截流,投资费用较高。高压旋喷桩方案,施工相对灵活,围堰截流与否均能施工,不影响截流,在坝基清理前后均可进行施工,同时受地下水影响较小,工期相对较短,费用相对较低。因此,最终选用高压旋喷桩方案:坝轴线以上范围挖至 165 m 高程进行换填,对上游防渗墙至路板下游约 50 m 范围内的河床覆盖层采用高压旋喷桩进行处理,其他部位则采用不小于 25 t 振动碾碾压 12 遍处理。

高压旋喷桩的布置情况为:防渗墙和路板下部布置 5 排间距 2m 的高压旋喷桩;为满足变形过渡的要求,向下游方向,桩间距逐渐变大,依次为 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 m; 桩长 20 m, 桩径 1.2 m, 共计布置 630 根。

高压旋喷桩技术要求:采用硅酸盐水泥,强度等级为 42.5。要求成桩后,桩体最小直径不小于 1.2 m, 桩体 28 d 抗压强度不小于 3 MPa。

### 6.2 坝基处理效果验证

为监测坝基沉降变形,在坝基 0+140 断面 170.0 m 高程,沿上下游方向布置 1 套水平固定测斜仪(图 1)。坝基沉降变化分布曲线见图 7。监测结果表明,随坝体填筑高度增加,坝基沉降量逐渐增大。由于采用了高压旋喷桩加固,上游坝基沉降量较小,且收敛较快。下游仅采用振动平碾处理的覆盖层变形较大,在坝轴距 180 m 的下游坝基处仍有 80 cm 的沉降。

根据坝基覆盖层开挖处理情况(图 1),坝轴线上游至防渗墙之间基础由原河床 175.0 m 高程挖至 165.0 m 高程,并对防渗墙、连接板、路板及防渗墙下游 50 m 范围基础采用高压旋喷桩进行了专门加固处理;坝轴线下游次堆区覆盖层基础开挖至 170.0 m 高程,但在坝下 0+000—0+180 靠近右岸岸坡部位有较厚的黏性土层及砂层透镜体,该层黏性土并未完全挖除。结

合水平固定测斜仪的监测结果, 可以看出坝基覆盖层沉降主要受地质情况和基础处理情况的影响。

现场监测结果显示, 经处理后的上游覆盖层变形显著减小, 目前已趋于稳定。下游覆盖层变形较大, 但已经收敛, 不影响工程的安全。表明, 坝基覆盖层处理设计方案合理有效。

## 7 结 论

本文依托河口村水库工程, 制定了固结灌浆、旋喷桩等多种坝基覆盖层处理方案。采用非线性有限元法, 系统研究各坝基处理方案对坝体和防渗体接缝变形的影响, 并考虑施工可行性和技术经济性, 最终确定了坝基处理方案。主要结论如下:

(1) 对于趾板座落于覆盖层上的面板堆石坝, 基础处理宜采用分区渐变式的布置型式, 即防渗墙与趾板之间设置加密区, 趾板下游至坝轴线为过渡区, 坎轴线下游区域可适当放宽对坝基覆盖层的处理要求。

(2) 有限元计算结果显示, 采用固结灌浆或旋喷桩方案, 防渗体接缝位移均能满足设计要求。对于具体工程, 应综合考虑坝基覆盖层性质、施工可行性、技术经济性等因素, 确定最佳的坝基处理方案。

(3) 河口村水库工程的现场监测资料表明, 经旋喷桩处理后的上游覆盖层变形显著减小, 目前已趋于稳定。坝基处理完成了预期设计目标。

## 参考文献:

- [1] 党林才, 方光达. 深厚覆盖层上建坝的主要技术问题[J]. 水力发电, 2011, 37(2): 24 - 29. (DANG Lin-cai, FANG Guang-da. Major technical problems of constructing dam on deep overburden[J]. Water Power, 2011, 37(2): 24 - 29. (in Chinese))
- [2] 邓铭江, 严寒, 高震. 深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 985 - 996. (DENG Ming-jiang, YAN Han, GAO Zhen. Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 985 - 996. (in Chinese))
- [3] 沈振中, 田振宇, 徐力群, 等. 深覆盖层上土石坝心墙与防渗墙连接型式研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 939 - 945. (SHEN Zhen-zhong, TIAN Zhen-yu, XU Li-qun, et al. Reasonable connection type for cutoff wall and core wall of earth-rock dams on deep overburden layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 939 - 945. (in Chinese))
- [4] 全海. 河床覆盖层高压旋喷灌浆效果检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 289 - 293. (QUAN Hai. Detection of effect of high-pressure rotary shotcreting grouting on river bed cover[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 289 - 293. (in Chinese))
- [5] 王启国. 水电工程坝基砾卵石层工程地质特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 3671 - 3690. (WANG Qi-guo. Study of engineering geological characteristics of gravel pebble layer for dam foundation of hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 3671 - 3690. (in Chinese))
- [6] PALMER D, NIKROUZ R, SPYROU A. Statics corrections for shallow seismic refraction data[J]. Exploration Geophysics, 2005, 36: 7 - 17.
- [7] 汪小刚, 刘小生, 陈宁, 等. 深厚覆盖层力学特性测试技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. (WANG Xiao-gang, LIU Xiao-sheng, CHEN Ning, et al. Researches on Testing Techniques for Mechanical Properties of Deep Overburden[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011. (in Chinese))
- [8] 程展林, 潘家军, 左永振, 等. 基础覆盖层工程特性试验新方法研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊2): 18 - 23. (CHENG Zhan-lin, PAN Jia-jun, ZUO Yong-zhen, et al. New experimental methods for engineering properties of overburden of dam foundation and their applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 18 - 23. (in Chinese))
- [9] 温立峰, 柴军瑞, 王晓. 深覆盖层上面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2386 - 2394. (WEN Li-feng, CHAI Jun-rui, WANG Xiao. Stress-deformation behavior of a concrete-faced rockfill dam with a deep overburden foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2386 - 2394. (in Chinese))
- [10] 孙大伟, 邓海峰, 田斌, 等. 大河水电站深覆盖层上面板堆石坝变形和应力性状分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 434 - 439. (SUN Da-wei, DENG Hai-feng, TIAN Bin, et al. Deformation and stress analysis of Dahe CFRD built on thick alluvium deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 434 - 439. (in Chinese))
- [11] 吴梦喜, 余挺, 张琦. 深厚覆盖层潜蚀对大坝应力变形影响的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2087 - 2095. (WU Meng-xi, YU Ting, ZHANG Qi. Finite element simulation of influence of deep overburden suffusion on dam stress and deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,

- 38(7): 2087 – 2095. (in Chinese))**
- [12] 郎能惠, 米占宽, 孙大伟. 深覆盖层上面板堆石坝防渗墙应力变形性状影响因素的研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 26 – 31. (LI Neng-hui, MI Zhan-kuan, SUN Da-wei. Numerical analysis of stress deformation behavior of concrete diaphragm wall in supper-deep overburdened layer of Yele hydropower station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 26 – 31. (in Chinese))
- [13] 潘迎, 何蕴龙, 周小溪, 等. 河谷地形对深覆盖层中防渗墙应力变形影响分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 2023 – 2030. (PAN Ying, HE Yun-long, ZHOU Xiao-xi, et al. Analysis of effect of canyon terrain on stress and displacement of cutoff wall in dam foundation with deep overburden[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 2023 – 2030. (in Chinese))
- [14] 余翔, 孔宪京, 邹德高. 混凝土防渗墙变形与应力分布特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, **51**(9): 1704 – 1711. (YU Xiang, KONG Xian-jing, ZOU De-gao. Deformation and stress distribution characteristics of concrete cut-off wall[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2017, **51**(9): 1704 – 1711. (in Chinese))
- [15] 碾压式土石坝设计规范: SL274—2001[S]. 2001. (Design Code for Rolled Earth-Rock fill Dams: SL274—2001[S].
2001. (in Chinese))
- [16] 傅少君, 王曼. 振冲碎石桩地基有限元分析的复合模型研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(2): 375 – 380. (FU Shao-jun, WANG Man. Study on composite model for vibro-replacement stone column foundation by FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(2): 375 – 380. (in Chinese))
- [17] 张希孟, 吕清岚. 长河坝水电站坝基覆盖层固结灌浆施工工艺试验[J]. 四川水力发电, 2015, **34**(3): 52 – 57, 76. (ZHANG Xi-meng, LU Qing-lan. Overburden consolidation grouting construction technology test at Changheba hydropower sation[J]. Sichuan Water Power, 2015, **34**(3): 52 – 57, 76. (in Chinese))
- [18] 安关峰, 张洪彬, 刘添俊. 旋喷群桩复合地基承载特性的数值分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 906 – 912. (AN Guan-feng, ZHANG Hong-bin, LIU Tian-jun. Numerical analysis of bearing characteristics of composite subgrade reinforced by chemical churning pile groups[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 906 – 912. (in Chinese))
- [19] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 59 – 65. (HEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 59 – 65. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
 封 3 北京理正软件股份有限公司  
 封 4 南瑞集团水利水电技术分公司