

# 官路水库穿坝涵洞地基处理和变形控制

葛 鹏<sup>1</sup>, 陈 举<sup>2</sup>, 焦志勇<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024;

2. 青岛市水利勘测设计研究院有限公司青岛中心, 山东 青岛 266061)

**【摘 要】**文章在分析青岛市官路水库及其穿坝涵洞地质条件的基础上, 针对 4 处穿坝涵洞的地基承载力与变形控制问题, 提出了造价经济、施工便捷的埋石混凝土基础处理方案。以泄洪放空洞为例, 利用 MIDAS GTS NX 软件建立了穿坝涵洞、大坝和地基土层结合的三维有限元模型, 采用增量法分步模拟计算了施工填筑与蓄水等各阶段的应力应变, 验证了综合变形控制措施的有效性, 揭示了穿坝涵洞竖向变形的分布规律, 为类似工程设计提供参考。

**【关键词】**官路水库; 穿坝涵洞; 基础处理; 三维有限元

**【中图分类号】**TV697

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1009-6159(2026)-05-0050-05

## Foundation Treatment and Deformation Control of Dam-crossing Culverts in Guanlu Reservoir

GE Peng<sup>1</sup>, CHEN Ju<sup>2</sup>, JIAO Zhiyong<sup>2</sup>

(1. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China;

2. Qingdao Branch, Qingdao Water Conservancy Construction Survey Design Research Institute Co., LTD. Qingdao, Shandong 266061, China)

**Abstract:** Based on the geological conditions of Guanlu Reservoir and its dam-crossing culverts in Qingdao Municipality, this paper proposes a cost-effective and construction-convenient rubble concrete foundation treatment scheme to address the bearing capacity and deformation control issues of four dam-crossing culverts. Taking the flood discharge tunnel as an example, a three-dimensional finite element model integrating dam-crossing culverts, dam body and foundation soil layers is established by using MIDAS GTS NX software. The incremental method is adopted to simulate and calculate the stress and strain during construction filling, water impoundment and other stages step by step. The results verify the effectiveness of comprehensive deformation control measures and reveal the distribution law of vertical deformation of dam-crossing culverts, providing a reference for the design of similar projects.

**Key words:** Guanlu Reservoir; Dam-crossing culvert; Foundation treatment; Three-dimensional finite element

在土石坝工程体系中, 穿坝涵洞是连接库区内外的关键交叉建筑物, 其安全性与长期稳定性直接关系到整个水库枢纽的任务和效益的发挥。青岛市官路水库针对穿坝涵洞覆盖层地基承载力不足及建筑物变形控制问题, 提出了以埋石混凝土换填为核心的地基处理方案, 并以泄洪放空洞穿坝涵洞埋石混凝土基础方案为例, 通过 MIDAS GTS NX 软件建立穿坝涵洞、大坝和地基土层结合的三维有限元模型, 模拟分析变形控制效果和分布规律, 以期同类工程设计提供参考依据。

## 1 工程概况

青岛市官路水库位于青岛胶州市和潍坊高密市交界处墨水河下游, 南距青岛胶州市 15 km, 西距潍坊高密市 18 km, 是为缓解胶东地区尤其是青岛市日益严重的水资源短缺而建设的大型调蓄工程。水库工程规模为大(2)型, 总库容 2.11 亿 m<sup>3</sup>, 设计最高蓄水位 28.80 m, 兴利库容 1.92 亿 m<sup>3</sup>, 死水位 9.70 m, 死库容 0.19 亿 m<sup>3</sup>。工

收稿日期: 2026-01-11

作者简介: 葛鹏(1989—), 男, 高级工程师

程主要包括围坝、入库泵站、青岛出库泵站、高密平度出库泵站工程、泄洪放空洞、河道改道工程、引黄济青连接工程、管理设施及信息化工程等。

为实现水库的进水、供水和泄水功能,工程共设有穿坝涵洞4处,分别为入库泵站穿坝涵洞、青岛出库泵站穿坝涵洞、高密平度出库泵站穿坝涵洞和泄洪放空洞。各穿坝涵洞的基本设计参数如下:

1)入库泵站穿坝涵洞。全长84.0 m,采用4孔 $3.5\text{ m}\times 4.0\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)矩形断面,结构材料采用C30钢筋混凝土内衬12 mm厚钢板形式,边墙坡比1:0.25。

2)青岛出库泵站穿坝涵洞。全长141.00 m,采用4孔 $\Phi 2200$ 圆形断面,结构材料采用C30钢筋混凝土内衬 $\Phi 2240\times 20$ 钢管形式,边墙坡比1:0.25。

3)高密平度出库泵站穿坝涵洞。全长144.10 m,采用2孔 $\Phi 2200$ 圆形断面,结构材料采用C30钢筋混凝土内衬 $\Phi 2240\times 20$ 钢管形式,边墙坡比1:0.25。

4)泄洪放空洞穿坝涵洞。全长150 m,采用2孔 $4.0\text{ m}\times 4.0\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)矩形断面和1孔 $\Phi 3000$ 圆形断面组合的形式,圆孔位于水流方向的右侧;结构材料采用C30钢筋混凝土内衬20 mm厚钢板(左、中孔)和 $\Phi 3044\times 22$ 钢管(右孔)形式,边墙坡比1:0.25。

## 2 工程地质条件

官路水库坝址区地表为第四系冲人工堆积物、冲洪积物,下伏基岩,地层由老至新为:

白垩系王氏组( $K_2W_2$ ),为紫红色、砖红色泥质粉砂岩夹粉砂岩,局部夹砾岩,中厚层状夹薄层状。该层是穿坝涵洞基础的潜在持力层,其物理力学性质相对较好。

第四系覆盖层,上更新统( $Q_3^{pl}$ )为灰黄夹灰白色砂层,下部为黄褐色粉质黏土,底部偶见薄层姜石,砂层之上发育不连续粉质壤土层;全新统( $Q_4^{pl}$ )为一套粉质壤土、含姜石粉质壤土、姜石土地层,偶夹砂壤土透镜体,地层层理交错,结构上松下紧,表部含植物根系。

各穿坝涵洞洞底地层存在差异,基岩埋深情况如下:入库泵站穿坝涵洞洞底基岩埋深约7.5 m,

青岛出库泵站穿坝涵洞洞底为基岩,高密平度出库泵站穿坝涵洞洞底基岩埋深约3.1 m,泄洪放空洞穿坝涵洞洞底基岩埋深约4.0 m。

## 3 地基处理方案及变形控制措施

### 3.1 地基处理方案比选

针对坐落于第四系覆盖层上的穿坝涵洞,结合3处穿坝涵洞基岩埋深均较浅的特点,设计阶段重点比较了两种具有代表性的地基处理方案:埋石混凝土基础和钢筋混凝土箱形基础。以泄洪放空洞穿坝涵洞为例,对两种方案进行技术经济比较,方案断面如图1所示。

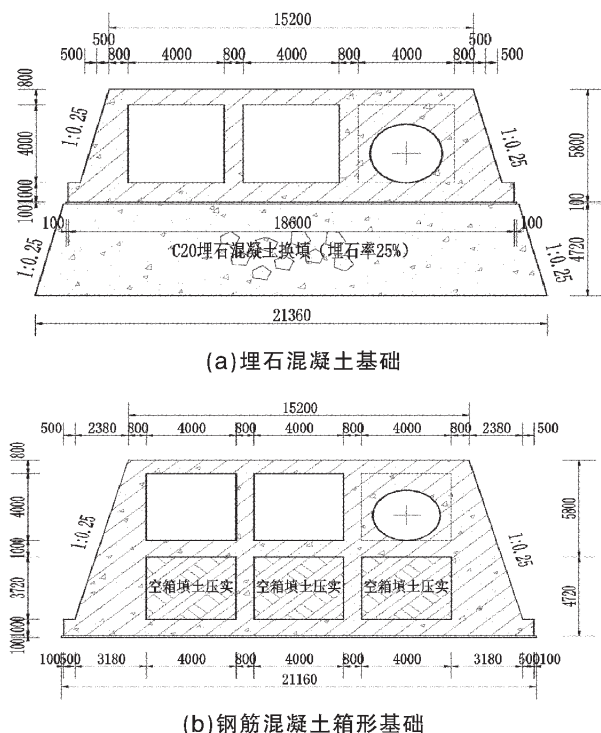


图1 泄洪放空洞基础处理方案断面图 mm

1)埋石混凝土基础方案。采用C20埋石混凝土(埋石率25%)换填处理,边坡1:0.25,与涵洞边墙坡度一致。该方案的优点是:①造价经济,每延米涵洞造价约26万元;②施工便捷,工艺成熟,类似于大体积混凝土施工,无需复杂模板和特殊设备,可显著缩短工期。

2)钢筋混凝土箱形基础方案。在穿坝涵洞底部设C30钢筋混凝土空箱,边坡1:0.25,与穿坝涵洞形成整体,空箱内部填土压实。该方案的优点是整体性强。缺点是:①造价较高,每延米涵洞造价约31万元,较埋石混凝土基础方案高出约19%;②施工复杂,空箱结构模板支设、钢筋绑

扎、混凝土浇筑、空箱填土等施工工序多,而且结构上需分层分期浇筑施工,导致工期延长。

从造价和施工方面综合比较,设计最终确定采用埋石混凝土基础方案。

3.2 综合变形控制措施

地基处理解决了地基的承载力不足和压缩沉降问题,但要保证穿坝涵洞与坝体之间的长期变形协调,还需从结构设计和施工措施层面提出辅助变形控制措施。

1)设置纵向分缝止水。为适应和释放涵洞纵向可能因温度变化、地基微量不均匀沉降和洞顶覆土荷载等产生的应力和应变,洞身纵向采用分节设计,每节长度 14 m 或 15 m。节与节之间设置 20 mm 宽的变形缝,缝内采用内嵌紫铜止水带和橡胶止水带、外贴不锈钢板止水带的复合止水型式。这种多道设防的设计,确保了止水系统的可靠性。

2)优化混凝土结构边坡。为避免混凝土涵洞(刚度大)与周边填土(刚度相对较小)之间因刚度突变而产生应力集中或开裂,将洞身及基础与两侧土体接触面坡度设计为 1:0.25。这一边坡形成了一个从刚性结构向柔性填土平顺过渡的“缓冲区”,促进了接触面区域的变形协调。

3)采用缓坡基坑开挖和高标准回填。穿坝涵洞基坑两侧开挖边坡采用 1:3.0 的缓坡,同时按照坝体填筑标准进行回填压实。该措施能有效促

进坝体沉降变形的平顺分布,避免在涵洞侧壁附近产生明显的沉降差或剪切带,是实现土体与建筑物协同变形的关键施工控制环节。

4 有限元变形分析

4.1 分析目的与方法

为评估上述地基处理与变形控制综合措施的效果,采用数值模拟方法进行分析。以泄洪放空洞穿坝涵洞埋石混凝土基础方案为例,利用专业岩土工程有限元软件 MIDAS GTS NX 建立穿坝涵洞、大坝和地基土层结合的三维有限元模型,分析采用非线性有限元增量法,模拟施工与加载的时序过程,依次计算基坑开挖卸荷、穿坝涵洞及基础浇筑、基坑回填、坝体分层填筑和蓄水等各个阶段的应力和位移。

4.2 本构模型与计算参数

针对模型中不同类型的材料,采用不同的本构模型:坝体填土及地基土层(粉质壤土、含姜石粉质壤土、粗砾砂)材料采用邓肯-张双曲线 E-B 本构模型,岩层(强风化、弱风化泥质粉砂岩)材料采用摩尔库伦本构模型,混凝土(C30 钢筋混凝土、C20 埋石混凝土、C15 垫层)材料采用弹性模型。

计算所需的各类材料物理力学参数,均根据地勘报告中的试验数据、类似工程经验及规范建议值综合确定,详见表 1。

表 1 计算参数

| 材料分区名称       | 弹性模量/<br>kPa | 泊松比 | 容重/<br>(kN·m <sup>-3</sup> ) | 饱和容重/<br>(kN·m <sup>-3</sup> ) | 黏聚力/<br>kPa | 摩擦角/<br>(°) | 模量系数<br>k | 模量指数<br>n | 破坏比<br>Rf | 试验常<br>数 Kb | 试验常<br>数 m |
|--------------|--------------|-----|------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|
| 坝体填土         | 27 290       | 0.3 | 21.2                         | 22.0                           | 47.0        | 22.6        | 269.33    | 0.41      | 0.88      | 116.45      | 0.25       |
| 2 粉质壤土       | 7 057        | 0.3 | 20.0                         | 20.6                           | 20.1        | 15.7        | 69.65     | 0.65      | 0.70      | 34.16       | 0.54       |
| 3 含姜石粉质壤土    | 10 615       | 0.3 | 20.0                         | 20.6                           | 20.1        | 15.3        | 104.76    | 0.36      | 0.80      | 48.01       | 0.19       |
| 4 粉质壤土       | 12 518       | 0.3 | 20.1                         | 20.6                           | 38.7        | 20.2        | 123.54    | 0.39      | 0.84      | 52.65       | 0.20       |
| 5-2 粗砾砂      | 40 530       | 0.3 | 21.0                         | 22.0                           | 0.0         | 35.3        | 400.00    | 0.40      | 0.65      | /           | /          |
| 7-1 强风化泥质粉砂岩 | 1 000 000    | 0.3 | 21.7                         | 21.8                           | 3.5         | 37.9        | /         | /         | /         | /           | /          |
| 7-2 弱风化泥质粉砂岩 | 3 520 000    | 0.3 | 24.1                         | 24.7                           | 100.0       | 45.0        | /         | /         | /         | /           | /          |
| C30 钢筋混凝土    | 30 000 000   | 0.2 | 25.0                         | 25.0                           | /           | /           | /         | /         | /         | /           | /          |
| C15 垫层       | 22 000 000   | 0.2 | 24.0                         | 24.0                           | /           | /           | /         | /         | /         | /           | /          |
| C20 埋石混凝土    | 25 500 000   | 0.2 | 24.5                         | 24.5                           | /           | /           | /         | /         | /         | /           | /          |

4.3 模型建立与网格划分

建立的三维有限元模型尺寸充分考虑了计算效率与边界效应的影响,总长 225 m(涵洞轴线方向,模型 X 轴方向),总宽 120 m(坝轴线方

向,模型 Y 轴方向),总高度 42.1 m(模型 Z 轴方向)。网格划分充分考虑在涵洞、基础及附近土体等关键部位加密,在其他区域适度稀疏,在保证计算精度的同时控制规模。模型共划分网格单元



223 093 个,节点 141 976 个,如图 2 所示。

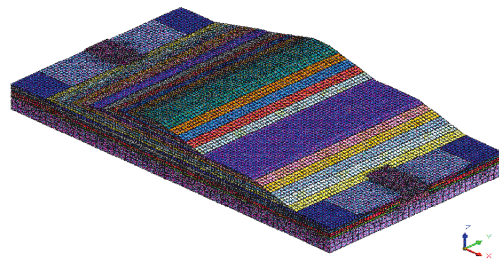


图 2 整体模型三维视图

4.4 计算结果与分析

通过模拟完整的加载过程,得到完建工况(坝体填筑结束)和蓄水工况(正常蓄水位 28.8 m)两种典型工况下的变形场,从涵洞的纵断面和横断面两方面展开分析。

1)涵洞纵断面竖向变形分析。统计穿坝涵洞纵剖面顶面、底面竖向变形分布,如图 3 所示。

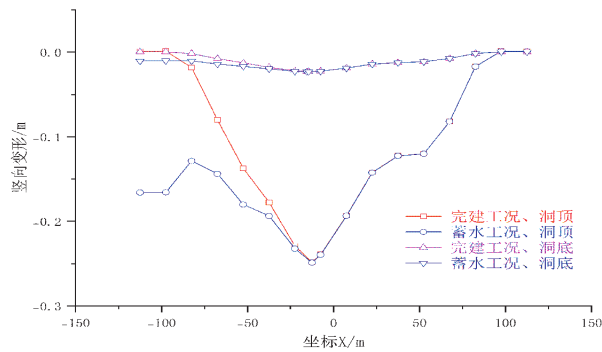
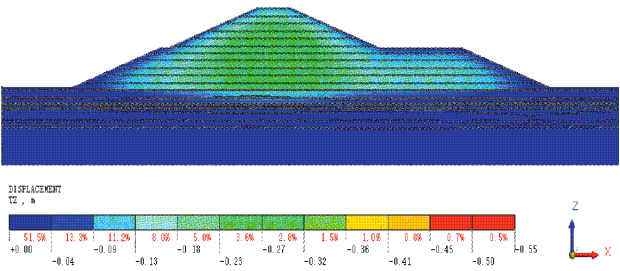


图 3 穿坝涵洞纵剖面顶面、底面竖向变形分布图

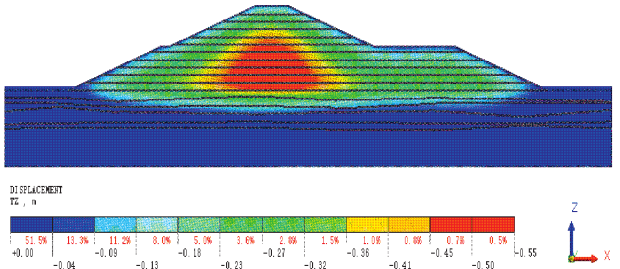
由图 3 可以看出:完建和蓄水工况下,穿坝涵洞顶面最大竖向变形为 0.25 m,底面最大竖向变形为 0.02 m,位于坝顶中心线( $X=-13.5\text{ m}$ )附近;穿坝涵洞顶面竖向变形分布与洞顶的坝体高度呈现良好的正相关性;穿坝涵洞底面竖向变形趋近于 0 m,原因是下部采用刚性的埋石混凝土基础处理,与下部刚性的岩基连成一体,变形很小;蓄水工况下,随着水荷载的施加,坝顶中心线上游部分穿坝涵洞竖向变形也随之增加。

穿坝涵洞两侧影响范围以外的大坝横断面(即常规大坝填筑段)竖向变形云图如图 4~5 所示。

可以看出,在常规大坝填筑段,坝体最大沉降(约 0.55 m)发生在坝高最大处;而在穿坝涵洞段,由于刚性基础的“托举”作用,同一高程处的坝体沉降值显著减小(约 0.14~0.27 m)。这一对比证明了埋石混凝土基础处理方案对于降低穿坝

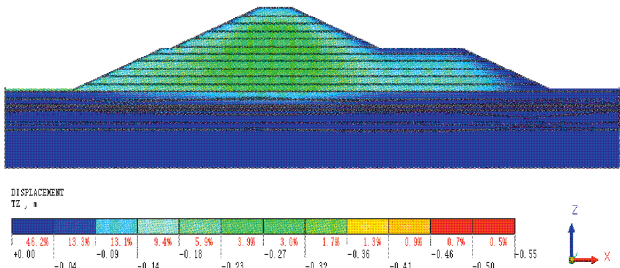


(a)穿坝涵洞纵轴线断面

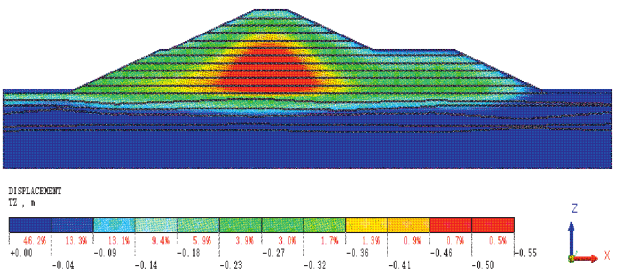


(b)穿坝涵洞两侧大坝横断面

图 4 完建工况整体竖向变形云图



(a)穿坝涵洞纵轴线断面



(b)穿坝涵洞两侧大坝横断面

图 5 蓄水工况穿坝涵洞纵轴线断面整体竖向变形云图

部位坝体沉降的突出效果。

2)涵洞横断面竖向变形分析。统计坝轴线断面、穿坝涵洞洞顶 1 m 处坝体竖向变形分布,如图 6 所示。

可以看出:该处完建和蓄水工况下的坝体竖向变形基本一致;穿坝涵洞范围内,受穿坝涵洞自身结构刚度差异的影响,坝体竖向变形分布不均,总体变形值 0.14~0.27 m,相较于两端常规大

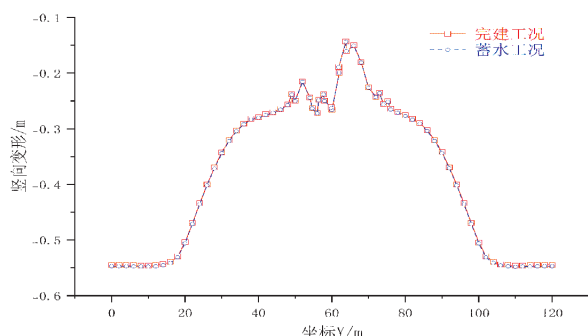


图6 坝轴线断面、穿坝涵洞洞顶1 m处坝体竖向变形分布图  
坝填筑段的最大变形0.55 m, 竖向变形较小;穿坝涵洞两侧的竖向变形呈平滑曲线与两端常规大坝填筑段竖向变形平顺衔接, 验证了采用1:3缓坡开挖基坑并按坝体标准回填压实这一措施的有效性。该措施创造了一个力学性质渐变的过渡区, 成功避免了在土体与建筑物交界处产生陡峭的沉降差, 实现了变形的协调过渡。

完建工况下坝轴线断面、穿坝涵洞洞顶不同高度处坝体竖向变形分布和云图如图7~8所示。

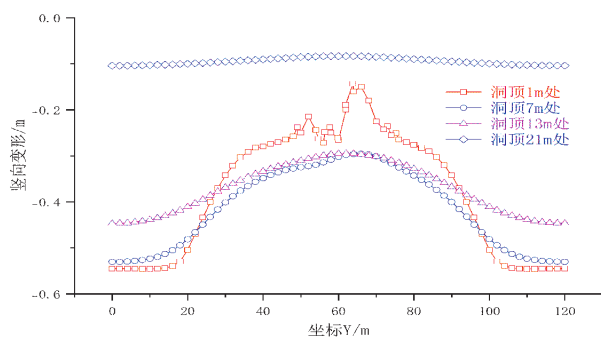


图7 坝轴线断面、穿坝涵洞洞顶不同高度处坝体竖向变形分布图(完建工况)

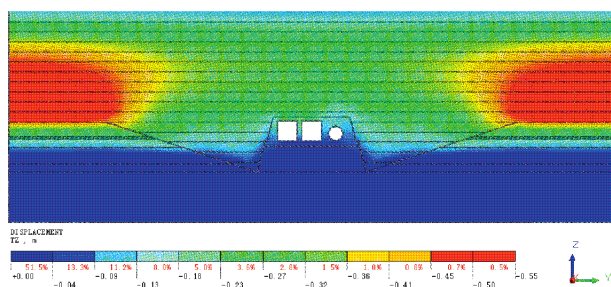


图8 完建工况坝轴线断面整体竖向变形云图

可以看出:随着坝体填土高度的增加,穿坝涵洞顶部的竖向变形曲线逐渐趋于平缓,在坝顶处基本趋于一致。说明刚性结构对坝体变形的影响是局部的、有限的,通过合理的措施可以使这种影响向上平顺扩散,不致引起危害性的不均匀沉降。

## 5 结 语

通过对官路水库穿坝涵洞地基处理方案的系统设计与三维非线性有限元仿真分析,得出以下主要结论:

1)技术经济合理方案的选择。对于坐落于承载力较低、压缩性较高且覆盖厚度较小的第四系覆盖层上的平原水库穿坝涵洞,采用埋石混凝土换填基础是一种技术可靠、经济合理、施工便捷的地基处理方案。它能显著提高基础刚度,有效解决承载力不足和变形控制问题。

2)综合变形控制措施的有效性。单一的刚性基础处理尚不足以全面确保工程长期的变形协调,本工程采用的“纵向分缝止水、混凝土结构边坡、缓坡基坑开挖和高标准回填”等综合措施,经数值模拟验证是有效的。特别是缓坡基坑开挖与高标准回填,是实现涵洞两侧坝体变形平滑过渡的关键,能有效避免土体与建筑物交界处的应力集中和差异沉降。

3)穿坝涵洞竖向变形分布的规律。通过数值分析揭示了本工程穿坝涵洞竖向变形的两个主要规律,一是纵断面竖向变形分布与其上部填土厚度分布呈正相关,二是横断面穿坝涵洞两侧的竖向变形在不同高度处均呈平滑曲线与两端常规大坝填筑段竖向变形平顺衔接,直至坝顶处趋近一致。

4)分析方法的价值。采用能够考虑土体非线性和施工过程的三维有限元增量分析法,可以较为真实地模拟穿坝涵洞这类复杂土体与建筑物相互作用的受力与变形过程,是进行方案优化和安全性预测的有力工具。

## 参考文献

- [1] 李文新,柳莹.某水库大坝和构筑物变形控制与变形协调[J].水利水电技术,2011,42(1):80-88.
- [2] 田荣林,赵长清,周本民.软土地基穿坝构筑物的沉降变形与控制[J].中国农村水利水电,2003(3):52-53.
- [3] 李清华,叶昆,唐山君.平原水库穿坝建筑物基础堆载预压处理[J].山东水利,2013(10):18-19.
- [4] 代玉华.高填方穿坝涵管顶土压力变化规律数值模拟研究[J].东北水利水电,2021(7):50-52.
- [5] 中华人民共和国水利部.碾压式土石坝设计规范:SL274-2020[S].北京:中国水利水电出版社,2021.

(责任编辑 崔春梅)