

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.06.005

填筑形象对土石坝结构性态影响的精细有限元分析

刘东海,张 钊,陈 辉

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要: 利用数字大坝施工技术,考虑实际施工质量的空间差异性带来的坝料模型参数在空间上的差异性,通过土石坝模型参数空间估计及任意单元赋值,构建精细三维有限元模型;进而以某心墙堆石坝为例,分析在实际施工进度滞后情况下,为了在汛前填筑到度汛高程,采用不同填筑进度方案对心墙堆石坝施工期应力变形的影响。结果表明,不同施工进度形象面貌对坝体水平位移影响较大,而对竖向位移和应力影响较小。

关键词: 心墙堆石坝;填筑形象;结构性态;精细化有限元模型

中图分类号: TV641.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)06-0514-09

Precise finite element analysis on influence of construction
appearances to earth-rock dam structural behaviors

LIU Donghai, ZHANG Zhao, CHEN Hui

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Using the digital dam construction technology, considering the spatial difference of the constitutive model parameters caused by the spatial difference of the actual dam construction quality, a three-dimensional precise finite element model is built by estimating and valuing each element of the model. Then, a core rock-fill dam is taken as an example to analyze the influence of two possible construction schedule appearances on the dam structure behaviors. These appearances are designed to fill up to the flood-control elevation before flood season under the condition of construction schedule lagging. The result shows that the different construction appearances mainly affect the horizontal displacement, and have little effect on vertical displacement and stress. Therefore, it can provide guidance for planning the filling schedule of dam during the actual construction.

Key words: core rock-fill dam; construction appearance; structural behavior; precise finite element model

心墙堆石坝填筑一般采用分期施工的方式。为减少坝体各部分之间的不均匀沉降,在可能的情况下,应尽量保持坝体全断面均衡上升。但是,在实际施工中,受降雨等因素影响,心墙施工常常出现进度滞后的情况。为了在汛前填筑到度汛高程,需要对不同的度汛面貌进行比选。如果利用坝体临时度汛断面挡水,则先行提升的坝体断面与后期填筑的坝体之间就会形成填筑高差,由于先期和后期填筑坝体的变形时序不同,对于坝体的应力变形特性必然会带来一定的影响。因此,研究不同的进度形象面貌对坝体结构性态的影响是心墙堆石坝施工中需要解决的重要问题之一。

基于原型观测资料的统计方法与基于本构关系模型的有限单元法是分析大坝结构性态的重要手段。杨杰等^[1]建立了土石坝竖向位移拟合和预测的灰色非线性模型;包腾飞等^[2]在传统统计模型中增加残差预测项,提出了大坝安全监测的统计和混沌混合模型;Habibagahi^[3]基于神经网络建立了大坝沉降预测模型;花

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51479132)

作者简介: 刘东海(1974—),男,教授,博士,主要从事大型工程系统仿真与优化、数字化施工与质量实时评估研究。E-mail:liudh@tju.edu.cn

引用本文: 刘东海,张钊,陈辉. 填筑形象对土石坝结构性态影响的精细有限元分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):514-522.

LIU Donghai, ZHANG Zhao, CHEN Hui. Precise finite element analysis on influence of construction appearances to earth-rock dam structural behaviors[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(6):514-522.

俊杰等^[4]、殷宗泽^[5]、朱敏等^[6]、Gikas 等^[7]、费康等^[8]、甘磊等^[9]、Zou 等^[10] 分别提出了不同的本构模型,利用有限单元法分析了大坝的结构性态;董威信等^[11]、赵迪等^[12] 考虑了坝料的实际模型参数与设计参数的差异,通过反演分析方法对坝料模型参数进行了反演。但是,以上研究基本都是假定同一分区的坝料力学模型参数相同,未考虑实际施工质量对坝料力学参数的影响,从而带来计算误差。

大坝实际施工质量存在空间差异性,受实际施工质量的影响,坝体物理力学模型参数在空间分布上也存在差异性。因此,根据大坝实际施工质量来客观地确定坝料力学模型参数,是精确分析土石坝结构性态的重要前提之一。国内外研究表明,大坝施工质量和坝料特性对于大坝性态(应力应变、沉降等)有着重要的影响^[13-16]。钟登华等^[17-20] 研发的数字大坝技术为实时监测大坝施工质量提供了可能。基于数字大坝系统实时监控到的碾压参数及坝料特性,可估计全仓面任意位置处的坝料压实质量^[21-23]。相关研究表明,堆石料压实质量与其力学特性存在密切关系^[24-26]。进一步地,陈辉等^[27] 结合大型三轴试验,建立了坝料压实质量与邓肯-张模型参数的定量关系,可实现坝料物理力学参数的空间估计及赋值。

因此,为了考虑坝料力学模型参数的空间差异性,克服常规分析中坝料均一性假设所带来的与实际不符合的弊端,同时考虑实际施工进度情况,本文将在现有研究基础上,结合课题组前期相关成果,构建精细化有限元三维模型,分析施工进度形象面貌对心墙堆石坝应力变形的影响,为实际施工进度方案制定提供依据^[28-29]。

1 考虑坝料空间差异和填筑进度的精细化有限元建模

1.1 三维模型参数空间估计

采用 Abaqus 邓肯-张非线性弹性模型的 E-B 模型(简称邓肯-张 E-B 模型),对大坝进行三维非线性静力有限元计算分析。

利用钟登华等^[17-19,22] 研制开发的数字化施工技术,可以获得大坝任意位置的碾压参数,并且根据试坑试验,可以获取压实密度、坝料级配、含水率等数据信息。基于以上数据,可针对不同坝料分区,将碾压参数和试坑试验数据样本作为回归模型的自变量,建立坝料压实质量多元回归模型^[25]。根据数字大坝系统监控到的已施工坝体任意位置处的碾压参数和试坑试验数据,估计已施工坝体任意位置处的压实质量。

对于未施工坝体的压实质量估计,可依据统计得到的已施工坝体各分区压实质量数据的均值对未施工坝体单元的压实质量进行取值,以模拟不同填筑形象面貌对施工期末坝体结构性态的影响。

利用相关大型室内三轴试验的成果,通过回归分析建立压实密度与邓肯-张 E-B 模型参数的回归模型^[27]。

$$X^T = \begin{Bmatrix} [\varphi_0, \Delta\varphi, K, n, R_f, K_b, m]^T \\ [f_1(\rho), f_2(\rho), f_3(\rho), f_4(\rho), f_5(\rho), f_6(\rho), f_7(\rho)]^T \\ Y^T \end{Bmatrix} \tag{1}$$

式中: φ_0 ——围压为大气压时的摩擦角; φ ——围压增加一个对数周期摩擦角的减小量; K ——弹性模量数; n ——弹性模量指数; R_f ——破坏比; K_b ——体积模量; m ——体积模量指数; $f_i(\rho)$ ——邓肯-张模型各个参数与坝料压实密度的回归函数($i=1,2,\cdots,7$)。

利用式(1),根据估计的任意“大坝网格”处的压实质量,可以估计任意“大坝网格”对应的邓肯-张模型参数值,从而实现模型参数空间估计。

1.2 任意单元赋值

为实现每个有限元计算单元对应一组能够反映大坝实际施工质量的力学模型参数,利用由数字大坝系统得到的施工仓面压实质量数据,建立有限元“大坝网格”,进而将 x 、 y 、 z 方向上不同标号范围内的所有施工仓面网格与相应大坝网格分别对应,实现施工仓面网格与“大坝网格”的匹配。由此,可根据每个网格上的实际施工质量,利用式(1)估算每个有限元单元的坝料模型参数。

模型参数的空间赋值,通过 Abaqus 软件的全命令流式 inp 文件,按单元集合编号编写各单元截面特性及力学模型参数,并提交给 Abaqus 软件。该赋值过程可用 Fortran 程序来实现^[27]。

1.3 填筑进度形象面貌建模

不同填筑进度形象面貌相应的逐级加载模拟,可通过 Abaqus 软件的“生死单元”功能实现。为了得到不同进度形象面貌对大坝结构性态的准确影响,应避免无关变量对模拟结果的干扰。故针对不同的进度形

象面貌,在建立模型和有限元处理时,采用在同一几何模型、同一套网格下进行逐级加载的方式模拟填筑过程,这就要求所建立的坝体三维几何模型对不同进度形象面貌的加载顺序具有兼容的特点。具体填筑进度形象面貌建模和填筑模拟过程如下:

- a. 利用 AutoCAD、Rhino 等软件建立坝体三维进度形象面貌模型。将不同进度形象面貌绘于同一大坝典型横剖面,取并集,并依据后续有限元计划加载层数,将合并后的面貌图进行细化分层,得到以坝料分区线、各进度形象面貌特征线和分层线为界限的二维进度形象面貌网格模型,以便在后续有限元模拟中实现以进度形象面貌网格为界限划分有限元网格,进而实现在同一套网格下模拟不同进度形象面貌填筑方案,达到控制变量的目的。最后,利用放样等操作将所有二维进度形象面貌网格沿坝轴线分别建立独立实体,再利用布尔操作将实体集合与地形作差集,得到大坝三维进度形象面貌模型,保存为 Abaqus 可接收的 SAT、STP 和 IGES 等文件格式。
- b. 模型导入与有限元网格划分。将大坝三维进度形象面貌模型导入 Abaqus 软件,以进度形象面貌网格为界限对坝体进行有限元网格划分,保证各分级加载单元集合的独立性,以便于后续为了实现分层加载而进行的生死单元操作。
- c. 模拟不同填筑进度形象面貌的加载过程。借助 Abaqus 软件提供的“生死单元”功能,分别由 model change, add, type = element 和 model change, remove, type = element 两条 input 文件中的命令来实现单元集合的激活和杀死。首先,将坝体所有单元杀死,随后依据填筑进度形象面貌方案,依次在后续荷载步中激活相应单元集,以实现分级施加荷载,直到坝体竣工。最后,再在同一套有限元网格下,依据其余填筑进度形象面貌方案,利用生死单元功能对其进行分级加载设置。

2 实例建模及分析

2.1 工程概况

西南某砾石土直心墙堆石坝最大坝高 261.5 m,心墙上、下游设置有 I、II 两层反滤,堆石料与反滤层间为细堆石过渡料区,细堆石过渡料区以外为堆石体坝壳。坝体分区见图 1。枢纽施工区属亚热带气候,旱雨季分明。每年 5—10 月为雨季,11 月至次年 4 月为旱季。

2.2 坝料压实质量与模型参数关系建立

为了考虑由于实际施工质量差异导致的坝料参数空间分布的差异性,基于课题组研发的数字大坝系统,针对心墙区和粗堆石区,以真实的碾压参数、试坑数据和室内三轴试验为基础数据支撑,采用 1.2 节介绍的方法,进行精细空间赋值。同时,为了减少计算工作量,其他次要分区采用设计计算参数,详见文献[26]。

利用 1.2 节的方法,首先以不同试坑点处的压实密度和数字大坝系统监测到的相应点处的碾压参数为样本,选取心墙区的 130 组样本、粗堆石 I 区的 80 组样本和粗堆石 II 区的 80 组样本^[30]建立坝料压实质量多元回归模型;进而,根据式(1),建立邓肯-张 E-B 模型参数与压实密度的回归模型。限于篇幅,此处仅列出心墙区 E-B 模型参数与坝料压实密度之间的回归模型,如表 1 所示。由分析结果可知,所建立的回归模型决定性系数 R^2 均大于 0.9,平均相对误差(δ_{MRE})不大于 2.12%,并且均通过了 $\alpha=0.05$ 置信区间下的显著性 F 检验,说明建立的回归模型拟合度很好。

心墙区各邓肯-张模型参数 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 、 K 、 n 、 R_f 、 K_b 、 m 的实际压实质量下估计平均值分别为 44.36°、14.64°、422.8、0.52、0.771、433.8、0.300,设计值分别为 39.47°、9.72°、387.7、0.40、0.770、304.8、0.187,模型参数估计值与设计值的平均相对差异值为 12.4%、50.6%、9.1%、30.0%、0.1%、42.3%、60.4%。实际压实质量下的参数(φ_0 、 $\Delta\varphi$ 、 n 、 K_b 、 m)平均值与设计值相比,差异值在 10% 以上。其中,平均相对差异值最大的 3 个参数分别为 K_b (42.3%)、 $\Delta\varphi$ (50.6%)和 m (60.4%)。可见,实际压实质量下的参数估计平均值与设计参数值差别较大。

表 1 心墙区邓肯-张模型参数回归模型

Table 1 Regression models of Duncan-Chang's model parameters in core zone			
回归模型	决定性系数 R^2	F 检验值	平均相对误差 $\delta_{MRE}/\%$
$\varphi_0 = 16.609\rho + 11.204$	0.919 3	22.78	0.34
$\varphi = 30.473\rho - 46.193$	0.983 4	118.62	0.79
$K = 1123.9\rho - 1820.5$	0.962 3	51.07	1.83
$n = -0.284\rho + 1.087$	0.996 4	547.88	0.09
$R_f = 0.285\rho + 0.203$	0.926 3	25.14	0.35
$K_b = 2680.4\rho - 4916.3$	0.991 9	243.92	2.12
$m = -1.513\rho + 3.325$	0.981 7	107.47	1.84

2.3 填筑进度形象面貌方案

该工程坝体挡水的第一年汛期前(12月初),由于基坑处理时间过长,导致坝体填筑进度落后于计划进度。为在汛前(次年5月末)填筑到度汛高程(691.63 m),会出现 2 种常见的度汛面貌:临时断面选在坝体中部,即先加高心墙,堆石体相对滞后;或临时断面选在坝体上下游部位,即先加高堆石体,心墙相对滞后。

为研究不同的度汛面貌对坝体应力、变形特性的影响,综合考虑大坝的机械配置、施工条件及强度等因素后,将计算分为 2 种工况:按施工组织设计计划的临时断面选在坝体中部的度汛面貌(方案一)和考虑实际施工条件的临时断面选在坝体上下游部位的度汛面貌(方案二),如图 1 所示。

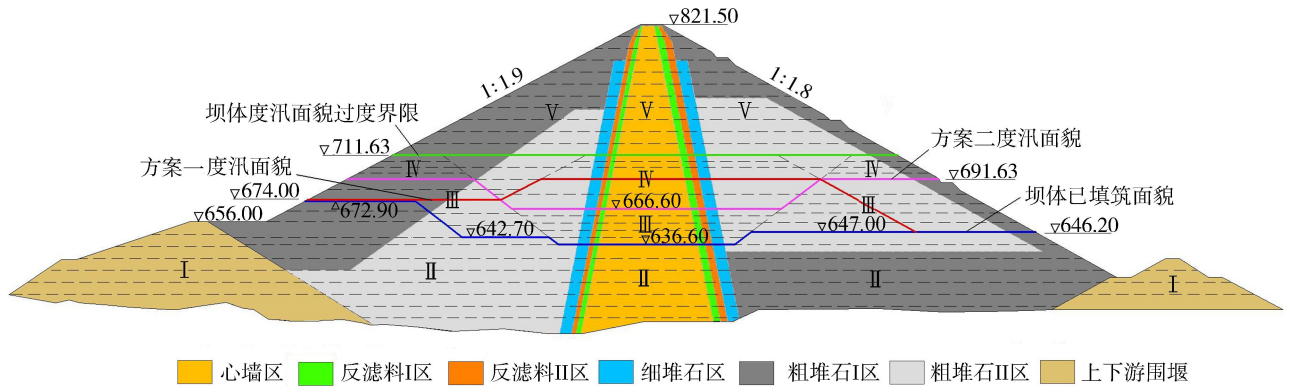


图 1 坝体填筑方案(单位:m)
Fig.1 Dam filling schedules (units: m)

图 1 中蓝线表示第一年汛前(12月初)的已填筑面貌,红线表示至次年 5 月末方案一坝体度汛面貌,粉线表示至次年 5 月末方案二坝体度汛面貌,绿线表示由度汛填筑面貌过渡到全断面均衡上升填筑面貌的分界线。方案一和方案二的坝体填筑分为 5 个阶段(I ~ V),在第 I 、 II 和 V 阶段,坝体分层填筑简化为断面均衡上升;在第 III 和 IV 阶段,对坝体分层填筑过程进行重点细化,心墙区(心墙、两侧反滤料和部分堆石料)和堆石区按照各自的填筑量,全时间段内均衡上升,即心墙区和堆石区在当前面貌下同时开始填筑,同时达到下一阶段起始面貌各自对应高程。汛前坝体实际填筑强度为 87.6 万 m³/月,方案一和方案二汛前的坝体填筑强度分别为 87.4 万 m³/月和 92.0 万 m³/月,基本符合实际填筑强度要求。

分层填筑模拟的层数对 300 m 级高土石坝的数值模拟具有一定影响^[31]:经计算,当模拟层数达到 14 层时,由网格密度产生的最大沉降量误差可忽略不计;当模拟层数达到 25 ~ 30 层时,坝体最大沉降量随模拟层数的变化趋于稳定。因此,本文的填筑模拟层数定为 26 层,并在局部细化。

水库蓄水分 2 期进行,第一期蓄水至 670.0 m 高程,第二期蓄水至 765.0 m 高程。坝体填筑分 38 个荷载步,荷载级、填筑范围和蓄水水位关系如表 2 所示。

2.4 精细化有限元模型

利用 1.2 节方法,通过对已填筑坝体的坝料试坑试验数据和数字大坝系统采集到的碾压参数进行回归分析,得到已填筑坝体任意“大坝网格”的压实密度。对于未施工坝体的压实质量估计,采用已施工坝体各分区的压实密度样本的均值,经统计,已施工坝体心墙区、粗堆石 I 区和粗堆石 II 区的压实密度均值分别为 1.996 g/cm³、2.091 g/cm³ 和 2.180 g/cm³;进而,对未施工坝体单元的压实质量按相应均值进行赋值,再利用 2.2 节建立的邓肯-张 E-B 模型参数与压实密度的回归模型,得到任意“大坝网格”对应的邓肯-张模型参数值;最后,利用 1.3 节方法,对大坝有限元计算模型参数进行空间赋值,从而得到精细化有限元模型。与设计参数相比,平均相对差异值较大的 2 个参数(K_b, m)在心墙区的空间分布情况如图 2(a)(b)所示。

对不同的填筑进度形象面貌,采用在同一几何模型、同一套网格下进行逐级加载的方式模拟填筑过程。

表 2 坝体填筑分期和荷载步

Table 2 Dam filling stages and loading steps

分期	填筑范围	填筑高程/m	计算分层	水位/m
I	上下游围堰填筑	560.00 ~ 656.00	1 ~ 7	601.5
II	当前已完成坝体填筑	560.00 ~ 672.90	8 ~ 18	601.5
III	汛前坝体填筑	636.60 ~ 691.63	19 ~ 23	601.5
IV	汛后过渡阶段 填筑进度面貌	646.20 ~ 711.63 (方案一)	24 ~ 27	601.5
		666.60 ~ 711.63 (方案二)	24 ~ 27	601.5
V	坝体后期填筑	711.63 ~ 821.50	28 ~ 32	601.5
			33 ~ 35	670.0
			36 ~ 38	765.0

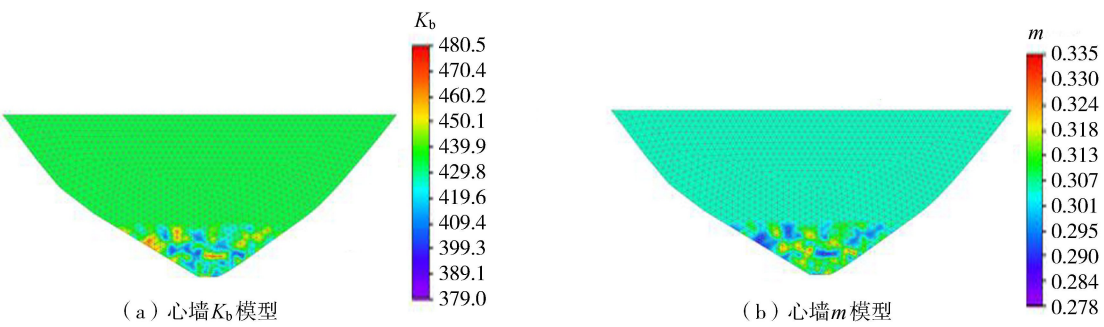


图 2 大坝心墙参数模型
Fig.2 Parameter models in core zone

在分级加载的过程中,按方案一,坝体填筑到度汛面貌的有限元模型如图 3(a)所示;按方案二,坝体填筑到度汛面貌的有限元模型如图 3(b)所示。

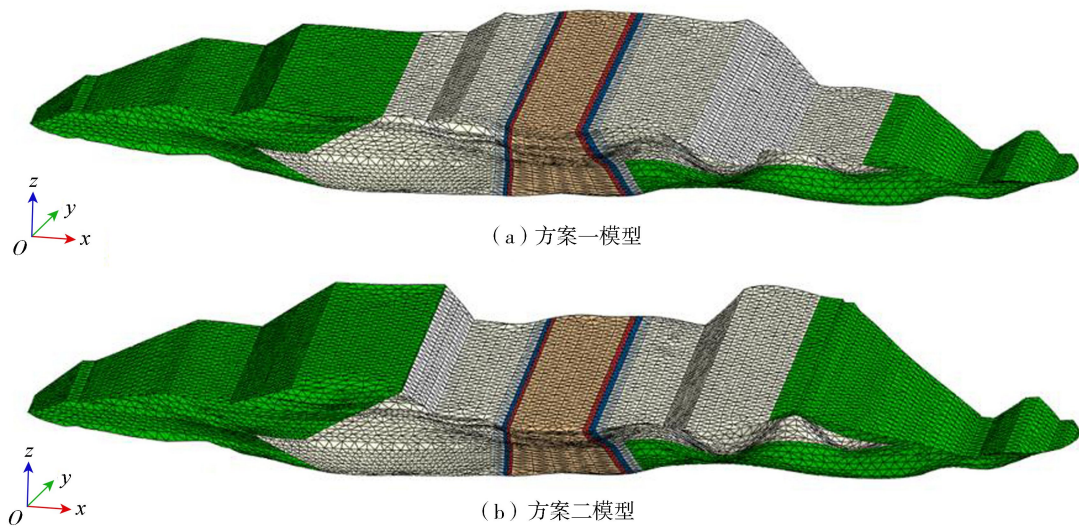


图 3 大坝填筑三维有限元模型
Fig.3 Three-dimensional finite element models of dam construction

大坝三维有限元模型底部设置全约束,在 Abaqus 软件中采用 10 节点四面体单元(C3D10)对坝体进行有限元网格剖分,该单元为二次单元,相比普通的六面体结构化网格,计算精度可以提升。整个有限元模型共划分为 360 531 个单元,501 227 个节点。

2.5 计算结果及分析

2.5.1 施工期末变形

2 种方案计算得到的施工期末坝体变形特征值如表 3 所示。

2 种方案计算得到的坝体竖向位移等值线如图 4 所示。可见,2 种方案计算得到的坝体竖向位移分布规律基本一致,施工期末坝体最大沉降均位于心墙内约 1/2 坝高处,且数值由该位置向四周递减。方案一的最大沉降值为 2.86 m,发生在心墙约 688.8 m 高程处。方案二的最大沉降值为 2.87 m,位移值较方案一增加 1 cm,增幅 0.3%,亦发生在心墙约 688.8 m 高程处。

2 种计算方案得出的坝体不同纵剖面的水平位移云图如图 5 所示。可见,2 种方案计算的坝体水平位移分布规律基本相同。对于不同的纵剖面,其水平位移等值线的分布不同,剖面越大,水平位移的程度越大。方案一的最大正位移为 0.68 m,发生在坝体下游粗堆石区高程约 709.9 m 高程处;最大负位移为-0.23 m,发

表 3 施工期末坝体变形特征值
Table 3 Dam deformation statistics at the end of construction period

施工 方案	最大 沉降量/m	占坝高 百分比/%	最大水平 正位移/m	最大水平 负位移/m
方案一	2.86	1.016	0.68	-0.23
方案二	2.87	1.020	0.63	-0.22

生在坝体上游粗堆石区约 623.9 m 高程处。方案二的最大正位移为 0.63 m,发生在坝体下游粗堆石区约 704.3 m 高程处;最大负位移为-0.22 m,发生在坝体上游粗堆石区约 623.8 m 高程处。方案二的最大正位移较方案一减小 7.4%,最大负位移较方案一减小 4.3%。且方案二的水平位移大于 0.6 m 的等值线区域面积明显小于方案一,方案二的其余水平位移较大值等值线区域面积相较于方案一也有不同程度的减小。由此可见,方案二具有更小的水平位移,对大坝后期变形影响更小。

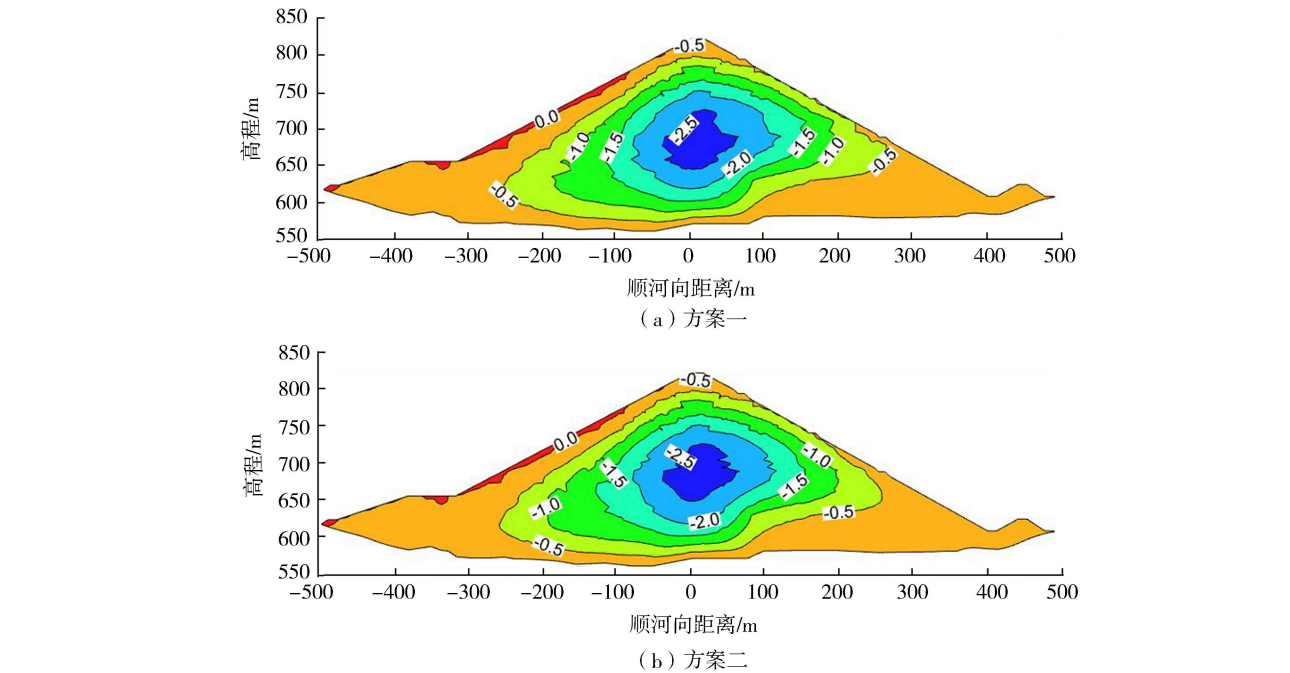


图 4 竖向位移等值线(单位:m)
Fig.4 Vertical displacements (units: m)

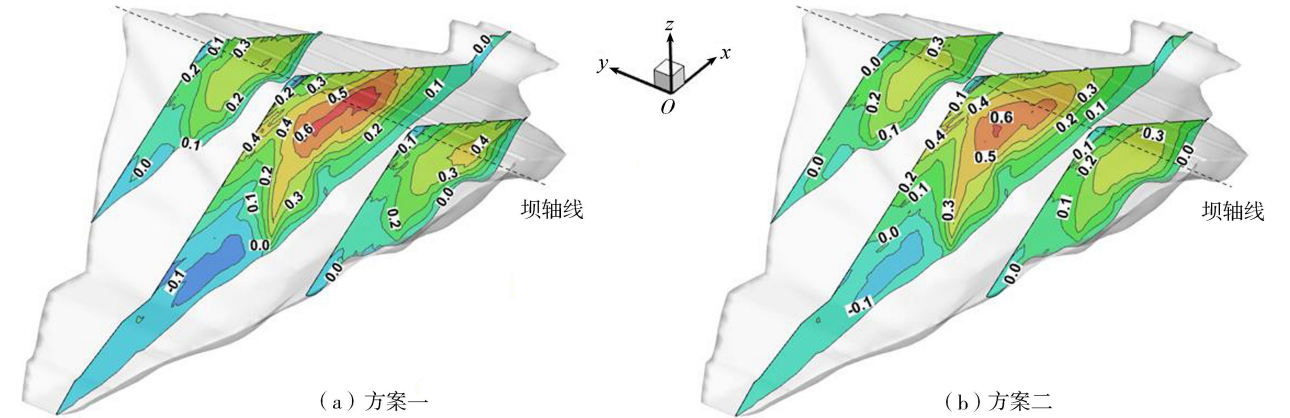


图 5 不同纵剖面的水平位移云图(单位:m)

Fig.5 Horizontal displacements at the different longitudinal sections (units: m)

上述结论与文献[32-34]结论类似。

2.5.2 施工期末应力

经计算,方案一施工期末坝体的大主应力最大值和小主应力最大值分别为 7.10 MPa 和 3.11 MPa;方案二施工期末坝体的大主应力最大值和小主应力最大值分别为 7.14 MPa 和 3.14 MPa。2 种方案计算所得的坝体大主应力(小主应力)分布规律基本相同,且最大值变幅均在 1% 内。

2 种方案的坝体最大主应力等值线如图 6 所示,坝体上下游最大主应力均呈对称分布,数值自下而上逐渐减小,且最大值均发生在坝底反滤层与心墙交界位置(约 600.1 m 高程)。这是由于心墙料的变形模量比堆石料小,导致了应力重分布,坝壳与反滤层对心墙产生了“拱效应”。

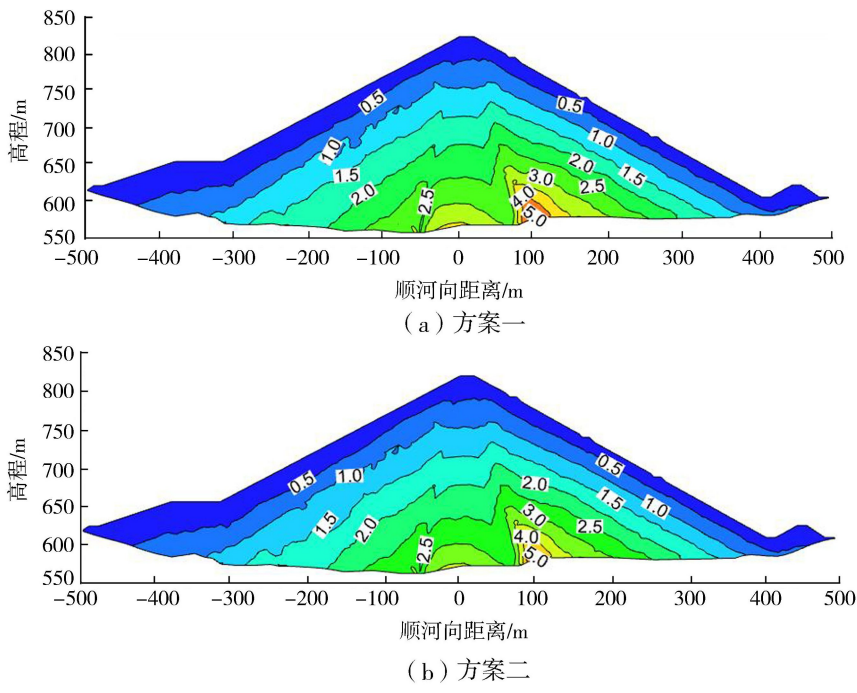


图 6 最大主应力等值线(单位:MPa)
Fig.6 Maximum principal stress (units: MPa)

3 结 语

基于数字化施工技术,考虑了实际施工质量坝料模型参数空间差异性,结合课题组在土石坝模型参数空间估计及赋值的相关成果,精细分析了高土石坝在实际施工进度滞后的情况下,在汛前填筑到度汛高程而可能出现的 2 种常见施工进度形象面貌对大坝结构性态的影响。

以某工程为例,通过精细化有限元计算模拟了坝体填筑过程,重点分析了 2 种工况:依照施工组织设计,临时断面选在坝体中部的度汛面貌,以及综合考虑各实际施工约束条件,临时断面选在坝体上下游部位的度汛面貌。对比分析 2 种工况下的计算结果可知:方案一和方案二的坝体应力变形分布规律大致相同,仅计算数值和局部区域的分布有所差别。其中,方案二的最大竖向位移及最大最小主应力值较方案一,变幅均在 1% 内,且极值位置基本相同;方案二的最大水平负位移与最大水平正位移相较于方案一的减小幅度分别为 4.3% 和 7.4%,极值位置不同;方案二的水平位移较大值区域面积相较于方案一均有不同程度的减小。可见,不同施工进度形象面貌主要会影响水平位移,而对竖向位移和应力的影响较小,该结论与相关研究^[30-32]的结论类似。因此,在心墙堆石坝实际施工进度滞后的情况下,为了在汛前填筑到度汛高程,临时度汛断面宜选在坝体上下游部位,该度汛面貌对大坝后期变形影响更小。研究结论可为指导实际施工进度形象面貌提供依据。

参考文献:

[1] 杨杰,党志良,吴中如,等. 土石坝竖向位移的灰色非线性拟合与预测[J]. 水电能源科学, 2002, 20(4): 31-33. (YANG Jie, DANG Zhiliang, WU Zhongru, et al. Grey nonlinear simulation and forecasting of vertical displacement of earth-rockfill dam[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2002, 20(4): 31-33. (in Chinese))
[2] 包腾飞,吴中如,顾冲时. 基于统计模型与混沌理论的大坝安全监测混合预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 534-538. (BAO Tengfei, WU Zhongru, GU Chongshi. Statistic model and chaos theory-based hybrid forecasting model for dam safety monitoring[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(5): 534-538. (in Chinese))
[3] HABIBAGAHI G. Post-construction settlement of rock-fill dams analyzed via network-based fuzzy inference systems[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(3): 211-233.
[4] 花俊杰,周伟,常晓林,等. 300 m 级高堆石坝长期变形预测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(3): 33-38. (HUA Junjie, ZHOU Wei, CHANG Xiaolin, et al. Long-term deformation prediction of 300 m high rockfill dams[J]. Journal of

- Sichuan University (Engineer Science Edition), 2011, 43(3): 33-38. (in Chinese))
- [5] 殷宗泽. 高堆石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 1-14. (YIN Zongze. Stress and deformation of high earth and rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 1-14. (in Chinese))
- [6] 朱敏, 邓华锋, 许晓亮. 基于子模型法的面板堆石坝三维应力变形分析[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(6): 27-30. (ZHU Min, DENG Huafeng, XU Xiaoliang. 3D stress-deformation nalysis of CFRDs based on sub-model method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(6): 27-30. (in Chinese))
- [7] GIKAS V, SAKELLARIOU M. Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): evidence from numerical modeling and geodetic monitoring [J]. Engineering Structures, 2008, 30(11): 3074-3081.
- [8] 费康, 刘汉龙. ABAQUS 的二次开发及在堆石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 881-890. (FEI Kang, LIU Hanlong. Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 881-890. (in Chinese))
- [9] 甘磊, 沈振中, 肖钧升, 等. 河谷坡度对高面板堆石坝应力变形特征的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 78-83. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XIAO Junsheng, et al. Effect of valley slopes on stress and deformation characteristics of a high concrete face rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5): 78-83. (in Chinese))
- [10] ZOU Degao, LIU Jingmao, KONG Xianjing, et al. A simple permanent deformation model of rockfill materials[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(4): 302-309.
- [11] 董威信, 袁会娜, 徐文杰, 等. 糯扎渡高心墙堆石坝模型参数动态反演分析[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 203-208. (DONG Weixin, YUAN Huina, XU Wenjie, et al. Dynamic back-analysis of material parameters of Nuozhadu high earth-rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 203-208. (in Chinese))
- [12] 赵迪, 张宗亮, 陈建生. 粒子群算法和 ADINA 在土石坝参数反演中的联合应用[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 43-47. (ZHAO Di, ZHANG Zongliang, CHEN Jiansheng. A combined application of particle swarm optimization algorithm and ADINA for parametric inversion of earth-rock dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 43-47. (in Chinese))
- [13] 汝乃华, 牛运光. 大坝事故与安全·土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [14] UDDIN N. Lessons learned: failure of a hydroelectric power project dam[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(1): 69-77.
- [15] 张玉琴. 碾压式土石坝压实质量控制中若干问题的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2007, 49(6): 122-124. (ZHANG Yuqin. Discussion on several problems in compaction quality control of roller compacted earth-rock dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, 49(6): 122-124. (in Chinese))
- [16] 李君纯. 青海沟后水库溃坝原因分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 1-14. (LI Junchun. Analysis on causes of dam breaking in Qinghai Gully Reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(6): 1-14. (in Chinese))
- [17] ZHONG Denghua, CUI Bo, LIU Donghai, et al. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rockfill dam[J]. Science China (Technological Sciences), 2009, 52(11): 3406-3412.
- [18] 钟登华, 刘东海, 崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(8): 1027-1034. (ZHONG Denghua, LIU Donghai, CUI Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rock-fill dam[J]. Science China (Technological Sciences), 2011, 41(8): 1027-1034. (in Chinese))
- [19] 马洪琪, 钟登华, 张宗亮, 等. 重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12): 20-27. (MA Hongqi, ZHONG Denghua, ZHANG Zongliang, et al. Key technologies of real-time construction control for major hydraulic and hydroelectric projects[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(12): 20-27. (in Chinese))
- [20] 钟登华, 贾晓旭, 杜成波, 等. 心墙堆石坝4D施工信息模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 95-103. (ZHONG Denghua, JIA Xiaoxu, DU Chengbo, et al. 4D construction information model for core rock-fill dam and its application [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(2): 95-103. (in Chinese))
- [21] LIU Donghai, LI Zilong, LIAN Zhenhong. Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller-integrated compaction monitoring technology[J]. Automation in Construction, 2014, 44(8): 234-246.
- [22] ZHONG Denghua, SONG Lingguang, LIU Donghai, et al. Compaction quality control of earth-rock dam construction using real-time field operation data[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2012, 138(9): 1085-1094.
- [23] 刘东海, 王爱国, 柳育刚, 等. 基于碾轮振动性态分析的土石坝压实质量实时监测与评估[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 163-170. (LIU Donghai, WANG Aiguo, LIU Yugang, et al. Real-time monitoring and assessment of compaction quality

- for earth-rock dam basing on roller vibration behavior analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 163-170. (in Chinese))
- [24] 傅华, 陈生水, 凌华, 等. 高应力状态下堆石料工程特性试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(增刊2): 83-89. (FU Hua, CHEN Shengshui, LING Hua, et al. Experimental study on engineering properties of rockfill under high stress state[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 31(Sup2): 83-89. (in Chinese))
- [25] 姜景山, 刘汉龙, 程展林, 等. 密度和围压对粗粒土力学性质的影响[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(8): 46-50. (JIANG Jingshan, LIU Hanlong, CHENG Zhanlin, et al. Influences of density and confining pressure on mechanical properties for coarse grained soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(8): 46-50. (in Chinese))
- [26] 陈志波, 朱俊高. 宽级配砾质土三轴试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 704-710. (CHEN Zhibo, ZHU Jungao. Triaxial tests on widely graded gravelly soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(6): 704-710. (in Chinese))
- [27] 陈辉, 刘东海, 戚蓝. 数字化施工下堆石坝模型参数空间估计及赋值[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 278-286. (CHEN Hui, LIU Donghai. Spatial estimation and assignment of finite element model parameters for rockfill dams under digitized construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 278-286. (in Chinese))
- [28] 余春勇, 张可, 杨圣涛. 碾压混凝土坝施工质量风险评价研究[J]. 水利经济, 2018, 36(3): 45-49. (SHE Chunyong, ZHANG Ke, YANG Shengtao, QI Lan. Risk evaluation of construction quality of roller compacted concrete dams[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(3): 45-49. (in Chinese))
- [29] 黄黎明, 张可, 龚寻, 等. 大数据视角下水利工程质量风险管理[J]. 水利经济, 2017, 35(6): 66-70. (HUANG Liming, ZHANG Ke, GONG Xun, et al. Management of quality risk of water conservancy projects from perspective of big data[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(6): 66-70. (in Chinese))
- [30] 王越. 数字化施工下高土石坝施工期结构性态有限元精细分析[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [31] 唐岷, 陈群. 分层填筑模拟的层数对300m级高土石坝沉降量的影响[J]. 水电站设计, 2008, 24(4): 15-18. (TANG Min, CHEN Qun. Influence of filling simulation layers on settlement of 300 m level high earth-rock dam [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2008, 24(4): 15-18. (in Chinese))
- [32] 谭丽丽. 300m级面板堆石坝填筑分期分区优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [33] 徐泽平. 面板堆石坝应力变形特性研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.
- [34] 高莲士, 宋文晶, 汪召华. 高面板堆石坝变形控制的若干问题[J]. 水利学报, 2002, 47(5): 3-8. (GAO Lianshi, SONG Wenjing, WANG Zhaohua. Several problems in deformation control of high concrete face rockfill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(5): 3-8. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-09-19 编辑: 张志琴)