

抽水蓄能电站进出水口土工膜局部变形适应性分析

王樱峻¹,雷显阳¹,姜晓桢²,王颂翔¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014;

2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要:为提高抽水蓄能电站上水库进出水口的防渗土工膜在挖填分界部位受力变形计算分析的可靠性和精确性,在库盆回填体有限元整体模型计算分析的基础上,采用子模型法对整体模型中靠近挖填分界部位建立局部子模型进行分析,同时利用该方法分析了在整体模型中增设增模区和局部子模型中改变土工膜铺设方式相结合的措施对降低土工膜局部应变的效果。结果表明:通过增设增模区和局部改变土工膜铺设方式相结合的措施,能够降低土工膜局部应变,使之满足工程要求,但具体采用何种局部土工膜铺设方式,还需结合水头大小、土工膜下支持层模量等不同情况进行具体分析。

关键词:土工膜局部变形;子模型法;支持层;抽水蓄能电站

中图分类号: 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2022)04-0051-04

Adaptability analysis of local deformation of geomembrane at inlet and outlet of a pumped storage power station// WANG Yingjun¹, LEI Xianyang¹, JIANG Xiaozhen², WANG Songxiang¹ (1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: To improve the reliability and accuracy of the calculation and analysis for the stress and deformation of the anti-seepage geomembrane at the excavation and filling boundary from the inlet and outlet of a pumped storage power station upper reservoir, the submodel method was adopted to establish a local submodel for the whole model near the boundary of excavation and filling based on the calculation and analysis of the whole finite element model of the reservoir basin backfill. At the same time, this method was used to analyze the effect on reducing the local large strain of geomembrane at the cut fill boundary by the combination of adding additional model area in the overall model and changing the laying modes of geomembrane in the local sub model. The results show that the above measures can reduce local strain so as to meet engineering requirements. Specific laying modes of geomembrane should be analyzed by water head and modulus of the support layer.

Key words: local deformation of geomembrane; submodel method; support layer; pumped storage power station

抽水蓄能电站的部分上水库因地形地质条件差,常采用全库盆防渗。同时,为了达到较好的土石方挖填平衡,库底需要填筑一定厚度的土石料。由于填渣深度大,填料来源复杂,蓄水后库盆会产生不均匀沉降。土工膜具有适应地基变形能力强、防渗性能好、节省工程投资等特点,已被越来越多地应用于抽水蓄能电站水库防渗工程中^[1],如日本的今市电站(1990年)、冲绳海水蓄能电站(1999年),我国的泰安抽水蓄能电站(2006年)、溧阳抽水蓄能电站(2017年)、洪屏抽水蓄能电站(2018年)等。

根据已建工程经验,土工膜的渗漏主要来源于土工膜与周边结构的锚固处^[2],下支持层挖填分界

处等。锚固处及挖填分界处两侧由于材料“软硬”程度不同,变形量仅由该处局部土工膜承担,从而导致局部土工膜拉伸应变过大,甚至撕裂破坏,影响了土工膜的正常使用功能^[3-5]。为了消除这种现象,减小土工膜的应变,常采取2种措施:一是局部土工膜采用特殊铺设方式,即在搭接部位预留一定超高或凹坑,以抵消“软硬”交界面上的绝对变形量^[6];二是对土工膜支持层的模量进行调整和控制,减小整体的土工膜变形^[7]。

由于土工膜的较大变形梯度主要集中在靠近锚固处或挖填分界处的局部较小范围内,并且土工膜局部特殊铺设方式也仅局限在较小的尺寸范围内,

因此采用有限元法对工程结构整体建立网格模型进行计算时,对局部及整体同时进行保证计算精度的网格剖分难度较大,如何在土工膜结构受力变形计算中实现较小整体模型计算规模与局部较高计算精度的兼顾是一个主要难点问题。本文依托某在建抽水蓄能电站的上水库进出水口土工膜防渗工程,对其前池与周边结构连接部位的局部变形适应性开展深入研究,以期能为类似工程建设提供参考。

1 工程概况与计算模型

图1为某在建抽水蓄能电站上水库进出水口断面示意图,水流方向依次布置前池反坡段、前池水平段及排水观测廊道。前池反坡段正面坡比1:6.5,长113.75m,前池水平段高程219.0m,长30.0m,前池上部铺设土工膜防渗,并在进出水口的混凝土排水观测廊道处进行锚固。由于土工膜下部为库盆回填料,与锚固的廊道混凝土、开挖基岩面的“软硬”程度不同,蓄水后势必在土工膜与进出水口锚固部位产生较大的变形梯度,故此处土工膜对较大变形梯度的适应性是确保防渗体系可靠的关键。

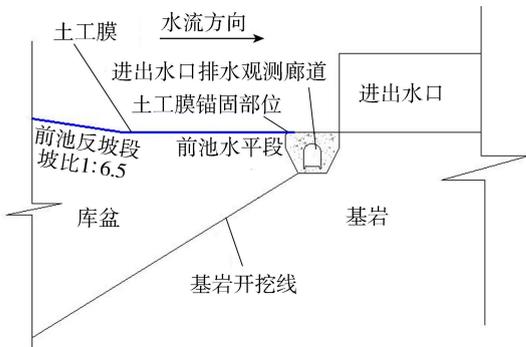


图1 上水库进出水口典型断面

取图1所示断面建立单宽整体模型(图2),为了提高土工膜与进出水口锚固部位应变计算的准确度,缩小这个部位的网格尺寸,加大库盆中部的网格尺寸,模型单元总数为720个,节点数1554个。忽略地基以及进出水口的变形影响,库盆回填料体的自重荷载依据施工填筑顺序进行,从底部高程146m开始至顶部高程236.5m分16级加载,用以模拟施工过程,随后分10级,每级3m水头施加水压力荷载至正常蓄水位267m。模型在基底设置固定边界约束,左侧边界仅约束水平位移。库盆回填料体的本

构模型采用邓肯E-B模型,参数见表1。

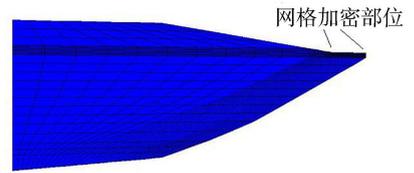


图2 进出水口库盆回填料有限元整体模型网格

工程采用的土工膜为1.5mm厚HDPE土工膜,屈服点拉伸应变为12%,屈服强度为22N/mm,假定土工膜屈服前为线弹性,则其弹性模量 $E = 122.2 \text{ MPa}$ 。土工膜采用膜单元进行模拟。土工膜在进出水口一侧采用锚固连接,即在锚固处对土工膜节点进行约束,膜与库盆之间则采用Goodman接触面模型模拟,参数取值根据相关工程经验,见表1。

整体模型中最右侧靠近进出水口处的单元网格宽度为2m,厚度0.33m,虽然与整体模型的尺度相比已是很小,但是对于在“软硬”界面处几十厘米范围的尺度来说,网格尺寸依然过大。近年来,采用子模型法对局部变形梯度变化大的区域进行分析计算,局部计算结果的真实性及计算精度得到大大提高,已被广泛应用在水工建筑物数值模拟计算中^[8-10],故本文对土工膜锚固部位采用子模型法进行精细化模拟计算,以期得到更为准确的结果。

子模型法基于圣维南原理,其计算基本流程:首先对整体模型建模计算,然后在整体模型中切取整体模型右上侧的库盆回填料的一个单元作为子模型(图3中的红色网格为子模型),并对子模型进行网格划分,由于子模型左右两侧以及底部的边界均位于整体模型内部,故子模型左右两侧和底部的边界条件必须与整体模型的计算结果相吻合,因此在子模型的左右两侧和底部的边界条件确定为整体模型位移计算结果进行插值而得,而子模型顶部的边界条件为水压力荷载边界条件,子模型的网格划分和边界条件如图4所示。

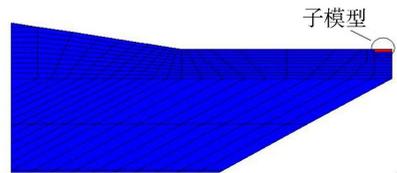


图3 整体模型中子模型位置示意图

表1 邓肯E-B模型参数

筑坝材料	$\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	K	n	R_f	K_b	m	c / MPa
库盆回填料	1.91	32.6	11.2	440	0.4	0.66	180	0.38	
库盆与土工膜接触面		32.0		1500	0.2	0.89			0.56
库盆增模区	2.28	54.4	10.2	1094	0.3	0.69	620	0.17	

注:表中 ρ_d 为干密度; φ_0 为围压为0时摩擦角; $\Delta\varphi$ 为摩擦角随围压增大而减小的系数; K 为杨氏模量系数; n 为杨氏模量指数; R_f 为破坏比; K_b 为体积模量系数; m 为体积模量指数; c 为黏聚力。

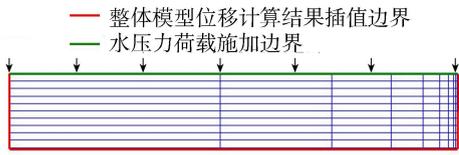


图4 子模型网格划分与边界条件

2 计算结果分析

2.1 整体模型计算结果

由图5可知,土工膜的变形主要是沉降变形。由图6可知,土工膜应变最大值为5.07%,位于整体模型右侧与进出水口交界部位,其次是在前池坡脚位置(2.50%),而库盆中部的土工膜基本不受拉。

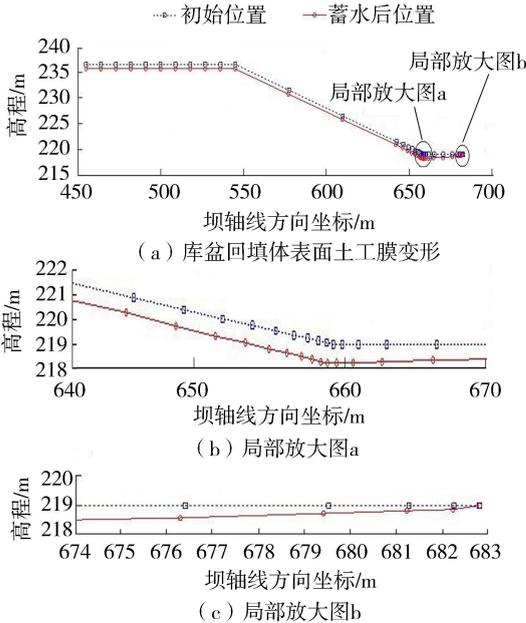


图5 整体模型土工膜蓄水前后变形对比

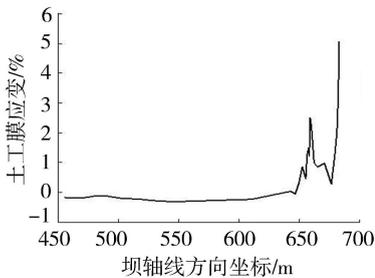


图6 蓄水后整体模型土工膜应变分布

2.2 子模型计算结果

由图7可知在最右侧土工膜与进出水口锚固部位的土工膜应变最大为13.26%,较整体模型计算结果5.07%增大较多,根据图7中子模型中土工膜应变分布曲线与横坐标围成的面积来看,其基本与整体模型中该部位土工膜应变与横坐标围成的面积相当,说明整体模型的计算结果仅是该部位子模型土工膜应变的平均值,实际在更靠近进出水口土工

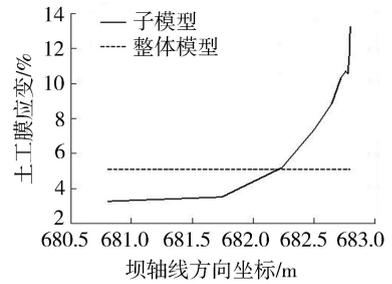


图7 子模型与整体模型土工膜应变对比

膜锚固部位一侧的土工膜应变则要更大。

3 变形适应性措施分析

土工膜在靠近进出水口锚固处的整体模型中最大应变达到了5.07%,局部子模型中则达到了13.26%,考虑到工程选取的土工膜正常工作状态下的应变限值(屈服点)仅为12%,子模型中的土工膜应变已超限,整体模型中土工膜应变虽未超限,但考虑到目前设计时常考虑不小于3的安全系数(需考虑材料老化、低应力状态施工质量等要求),整体模型中土工膜应变也过大,所以对于进出水口的土工膜来说,要从整体和局部两个方面共同考虑制定合理的变形适应性措施。

3.1 整体变形适应性措施分析

为了降低整体模型中土工膜的应变,研究提出在前池库盆土工膜应变较大的区域设置增模区的方案,增模区内库盆回填料采用模量较高的材料进行填筑,从而达到降低该区域变形量的目的,增模区的材料力学参数见表1。

由图8可知,与未设置增模区相比土工膜应变的2处峰值均明显减小,整体模型中最大土工膜应变值由原来的5.07%降为0.97%,减小较为明显。说明增设增模区后降低了库盆增模区上部土工膜的整体变形,相应地也降低了土工膜的应变。

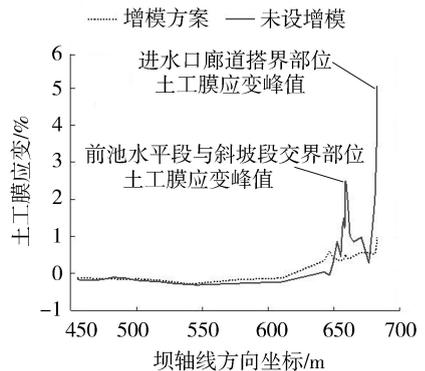


图8 设置增模区前后整体模型土工膜应变的分布对比

3.2 局部适应性措施分析

局部适应变形措施为在靠近土工膜锚固部位改变土工膜水平铺设的方式,采取“鼓包”或“凹坑”的

方式缓解该处较大的土工膜应变。为了分析2种局部适应性措施对土工膜应变影响,将图4的子模型网格进行调整(图9),使之产生“鼓包”和“凹坑”,并在整体模型设置增模区的基础上再取子模型进行计算分析,得出子模型内土工膜的应变分布情况(图10)。由图10可知,未设置增模也未采取局部适应性措施时,子模型中的土工膜应变最大为13.26%(整体模型中为5.07%),在增设增模区但未采取局部适应性措施条件下,子模型的土工膜应变最大降低为2.85%(整体模型中为0.97%),说明在整体模型中增设增模区后,不论是整体模型中还是子模型中,土工膜应变都发生了明显降低。通过局部适应变形措施的“鼓包”和“凹坑”2种方案的结果对比可知,“鼓包”方案土工膜应变降低的部位集中在“鼓包”中部,而在“鼓包”边缘两侧的土工膜应变基本未发生改变(靠近锚固侧还略有增大);“凹坑”方案则相反,在“凹坑”中部土工膜应变略有增大,而“凹坑”边缘两侧的土工膜应变有不同幅度的降低。造成这种现象主要与“鼓包”和“凹坑”内的水压力荷载分布情况不同有关,在“凹坑”方案中,“凹坑”中部的水压力作用的方向是向两侧排开,从而造成了“凹坑”中部土工膜应变较土工膜水平铺设时有所增大,但两侧应变有所减小;而“鼓包”方案下由于水压力作用方向是向中部挤压收

紧,故在“鼓包”中部土工膜应变减小,而“鼓包”两侧存在土工膜应变增大的趋势。最终通过对比可知,“凹坑”方案子模型的土工膜最大应变为0.93%,比未设置局部适应性措施(土工膜水平铺设)时的2.85%,又有一定幅度的降低。

4 结 语

土工膜防渗结构受力变形分析的关键是要准确反映出土工膜与周边锚固部位局部的受力变形特性,本文基于子模型法对某在建抽水蓄能电站进出水口锚固处的土工膜应变进行了精细化模拟计算,实现了较小整体模型计算规模与局部较高计算精度的兼顾,计算结果显示土工膜最大应变已超过设计允许值。应采取适应变形的措施以缓解土工膜在锚固处应变集中的现象。本文从降低土工膜整体变形量以及改变局部土工膜变形分布的思路出发,通过对进出水口前池土工膜支持层设置增模区结合土工膜锚固部位设置局部适应变形措施,土工膜最大应变可降至0.93%,此时设计安全系数可达到12.9,能够满足工程需要。

改变土工膜铺设方式的局部适应变形措施目前主要有“鼓包”和“凹坑”2种方案,利用子模型法对“鼓包”和“凹坑”2种方案进行了分析计算,结果显示,由于“鼓包”和“凹坑”2种方案的体形不同,导致两方案的土工膜水压力作用方向发生变化。“鼓包”方案的土工膜出现两侧向中央收紧的变形趋势,土工膜应变减小的部位主要在“鼓包”中部,而“凹坑”方案的土工膜出现中央向两侧张开的变形趋势,土工膜应变减小的部位主要集中在“凹坑”两侧,2种方案均能起到减小局部土工膜应变量的作用,但对于最终哪种方案下土工膜最大应变可达到最小,还需结合水头大小、土工膜下支持层模量等不同情况进行具体分析得出。

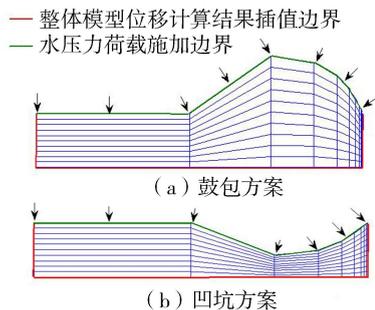


图9 设置局部适应变形措施后子模型网格

参考文献:

- [1] 吴关叶,黄维,王樱峻,等. 抽水蓄能电站水库防渗技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [2] 束一鸣,陆忠民,侯俊芳,等. 土工合成材料防渗排水防护设计施工指南[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [3] 何世海,吴毅谨,李洪林. 土工膜防渗技术在泰安抽水蓄能电站上水库的应用[J]. 水利水电科技进步,2009,29(6):78-82. (HE Shihai, WU Yijin, LI Honglin. Application of geomembrane in seepage control technique in upper reservoir of Tai'an pumped storage power station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(6):78-82. (in Chinese))

(下转第73页)

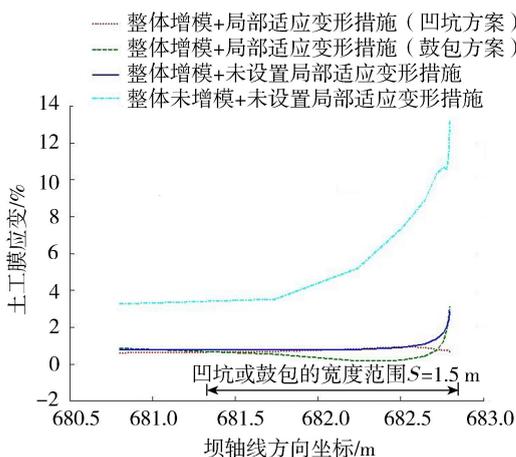


图10 “整体增模+局部适应变形措施”

方案下子模型土工膜应变分布

- [14] 顾淦臣,沈长松,岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2009.
- [15] 杨泽艳,周建平,蒋国澄,等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电,2011,37(2): 18-23. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, JIANG Guocheng, et al. Development of concrete faced rockfill dam in China[J]. Water Power,2011,37(2): 18-23. (in Chinese))
- [16] 朱晟,邓石德,宁志远,等. 基于分形理论的堆石料级配设计方法[J]. 岩土工程学报,2017,39(6): 1151-1155. (ZHU Sheng, DENG Shide, NING Zhiyuan, et al. Gradation design method for rockfill materials based on fractal theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(6): 1151-1155. (in Chinese))
- [17] 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 rockfill dam[J]. Science China(Technological Sciences), 2011,41(8): 1027-1034. (in Chinese))
- [18] 贾金生,郝巨涛,吕小彬,等. 高混凝土面板堆石坝周边缝新型止水[J]. 水利学报,2001,32(2): 35-38. (JIA Jinsheng, HAO Jutao, LYU Xiaobin, et al. New type of waterstop for perimetric joints of high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(2): 35-38. (in Chinese))
- [19] 王樱峻,赵琳,雷显阳. 某抽水蓄能电站高面板堆石坝坝体分区优化[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5): 47-52. (WANG Yingjun, ZHAO Lin, LEI Xianyang. Dam zoning optimization for a high concrete face rockfill dam of a pumped storage power station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5):47-52. (in Chinese))
- [20] 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. (CHEN Shengshui, LI Guoying, FU Zhongzhi. 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))
- [21] 朱安龙,张胤,廖洁,等. 大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):48-55. (ZHU Anlong, ZHANG Yin, LIAO Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):48-55. (in Chinese))
- [22] 束一鸣. 高面膜堆石坝关键设计概念与设计方法[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):46-53. (SHU Yiming. Key design concepts and approaches of high membrane faced rock-fill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):46-53. (in Chinese))
- [23] 魏国民,陈生水,马洪玉,等. 黏弹性方法用于面板堆石坝动力分析时必要的改进[J]. 岩土力学,2021,42(12): 3475-3484. (WEI Kuangmin, CHEN Shengshui, MA Hongyu, et al. A necessary improvement of the viscoelastic method for calculating the dynamic behaviors of the concrete faced rockfill dams [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3475-3484. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-23 编辑:刘晓艳)

(上接第54页)

- [4] 王永明,邓渊,任金明,等. 高土石围堰复合土工膜应变集中计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2016,35(增刊1): 3299-3307. (WANG Yongming, DENG Yuan, REN Jinming, et al. Research on the calculation method of strain concentration of composite geomembrane for high earth and stone cofferdam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(Sup1): 3299-3307. (in Chinese))
- [5] 张岚,单海年,潘琳. 某大型抽水蓄能电站上水库初蓄期安全运行性态分析[J]. 水电能源科学,2019,37(9):55-58. (ZHANG Lan, SHAN Haimian, PAN Lin. Analysis of upper reservoir operation state of a large pumped storage power station during initial impoundment [J]. Water Resources and Power, 2019,37(9): 55-58. (in Chinese))
- [6] 束一鸣,吴海民,姜晓桢,等. 高面膜堆石坝周边的夹具效应机制与消除设计方法[J]. 水利水电科技进展. 2015,35(1): 10-15. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen, et al. Mechanism of anchoring influence at perimeter of high membrane faced rockfill dam and eliminating approach [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 10-15. (in Chinese))
- [7] 宁宇,喻建清,崔留杰. 软岩堆石高坝土工膜防渗技术[J]. 水力发电,2016,42(5):62-67. (NING Yu, YU Jianqing, CUI Liujie. Anti-seepage of geomembrane for high soft rock filling dam [J]. Water Power, 2016, 42(5):62-67. (in Chinese))
- [8] 李佳男,赖国伟,王义鹏. 基于子模型的高面板堆石坝周边缝变形分析[J]. 水电能源科学,2014,32(8):81-84. (LI Jia'nan, LAI Guowei, WANG Yipeng. Study on deformation regularity for peripheral joints of high concrete faced rockfill dam based on submodel method [J]. Water Resources and Power, 2014,32(8):81-84. (in Chinese))
- [9] 张志兴,邓长根,巩俊松. 基于子模型法的钢拱桥关键梁段精细化分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(20): 8656-8662. (ZHANG Zhixing, DENG Changgen, GONG Junsong. Refined analysis of the key beam segment of steel arch bridge based on sub-model method [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8656-8662. (in Chinese))
- [10] 曹学兴,何蕴龙,迟福东,等. 基于子模型法的高堆石坝坝基廊道抗震安全性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):87-93. (CAO Xuexing, HE Yunlong, CHI Fudong, et al. Seismic safety analysis of high rockfill dam foundation gallery using submodeling analysis method [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018,16(6):87-93. (in Chinese))

(收稿日期:2021-05-19 编辑:刘晓艳)