

考虑诱导缝的碾压混凝土重力坝 三维强震响应分析

周天宇¹, 赵飞², 申家辰¹, 王进廷¹, 郝鹏², 潘坚文¹

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要:碾压混凝土重力坝因具有施工速度快优势,自20世纪80年代以来发展迅速。碾压混凝土重力坝各坝段之间一般设置诱导缝,采用切缝机不连续切割成缝,缝面为非暴露式。考虑诱导缝影响的整体大坝抗震响应和安全性值得关注。提出一种碾压混凝土重力坝诱导缝模拟方法,建立某碾压混凝土重力坝三维整体有限元模型,计算分析了其静力及动力作用下的应力、变形及塑性损伤行为,并与单坝段模型对比,研究了诱导缝对于坝体响应的影响。结果表明,河床最高坝段在2种模型下应力水平、损伤程度接近,单坝段模型在个别部位的地震响应更大。此外,整体模型能够模拟碾压混凝土重力坝诱导缝损伤开裂过程,可更合理地模拟坝体整体响应,特别是两岸坝肩坝段的应力分布。

关键词:碾压混凝土坝;诱导缝;有限元法;塑性损伤模型;抗震性能

中图分类号:TV642.2

文献标志码:A

Seismic response of roller compacted concrete gravity dams under strong earthquakes considering induced joints effects

ZHOU Tianyu¹, ZHAO Fei², SHEN Jiachen¹, WANG Jinting¹, HAO Peng², PAN Jianwen¹

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: Roller compacted concrete gravity dams have developed rapidly since the 1980s due to their advantage of fast construction speed. Generally, induced joints are set between the dam sections of roller compacted concrete gravity dams and the joints are cut discontinuously with a slotting machine, with the joint surface being non-exposed. The overall seismic response and safety of the dam considering the influence of induced joints are worth attention. This paper proposed a simulation method for the induced joints of roller compacted concrete gravity dams. Established a three-dimensional finite element model of a certain roller compacted concrete gravity dam. Calculated and analyzed the stress, deformation and plastic damage behavior under static and dynamic loads of the overall model of the roller compacted concrete gravity dam and compared it with a single dam section model to study the influence of induced joints on the dam seismic response. The results showed that the stress level and damage degree of the highest dam section in the riverbed are similar under the two models and the seismic responses of the single dam section model were greater in some parts. In addition, the overall model can simulate the damage and cracking process of the induced joints of the roller compacted concrete gravity dam and can more reasonably simulate the overall response of the dam, especially the stress distribution of the dam sections at both dam abutments.

收稿日期:2024-07-18; 修回日期:2024-08-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52350393);中国华能集团有限公司科技项目(HNKJ22-H108);中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2021-03);贵州省水利厅科技专项经费项目(KT201902)

作者简介:周天宇(1999—),男,博士研究生,主要从事高坝结构抗震安全研究。E-mail:zty19990610@sina.com

通信作者:王进廷(1973—),男,教授,博士,主要从事高坝结构抗震安全研究。E-mail:wangjt@tsinghua.edu.cn

Key words: roller compacted concrete dam; induced joints; finite element method; concrete plastic damage model; seismic performance

0 引言

自 20 世纪 30 年代以来,混凝土坝施工通常采用柱状浇筑的方法^[1-2]。这种方法通常需要大量机器的投入,并且在施工过程中需要采用较多的温控措施^[3-4]。1980 年,日本岛地川坝工程中首次采用了碾压混凝土施工方法^[5],引起了坝工技术人员的极大关注。碾压混凝土施工与以往分块浇筑不同,其采用分层连续浇筑的方式,每层厚度约为 30~50 cm^[6-7]。与传统混凝土重力坝相比,碾压混凝土重力坝施工速度更快,自 20 世纪 80 年代起,国内外水利工程中采用碾压混凝土坝筑坝不断增多^[8-11]。

对于碾压混凝土坝,其横缝与常态混凝土坝有所不同。常态混凝土坝横缝在水平高程上连续贯通上下游坝面,使得坝体分成若干独立的坝段,其施工形式采用分块施工,柱状浇筑的方式,而碾压混凝土坝通常采用切缝机成缝,缝面为非暴露式^[12-13]。20 世纪 80 年代末,丁汉涛^[14]针对碾压混凝土坝提出了间断缝的概念,其破坏机理与水利工程中岩体预裂爆破孔类似,利用耗能最少原理,当坝体温度应力大于碾压混凝土抗拉强度时,间断缝的间隔部分被拉开,并由部分间隔向全部间隔扩散,最后全部间隔部分被拉裂形成一条规律的贯穿横缝。在实际工程中,碾压混凝土坝施工通常采用的方式是^[15-16]:浇筑混凝土后,操作人员摊铺平仓,使层厚稳定在 30~35 cm,随后使用切缝机进行切缝,切缝深度约为 20~25 cm,切缝面积约为缝面面积的 2/3,切缝内部通过无纺布等材料进行填充。

目前,碾压混凝土坝的数值模拟研究中,对于切割式横缝的模拟方式通常与常态混凝土坝横缝模拟相同,即假设缝面全部切割,相互作用考虑接触及摩擦,或是不考虑切割式横缝的连接方式,或是采用二维有限元模型或假三维有限元模型,不考虑横缝连接导致的坝体整体性作用^[17-19]。韩燕等^[20]采用数值仿真方法研究了碾压混凝土重力坝切缝深度对于坝内应力变化的影响,胡良明等^[21]基于 ABAQUS 有限元分析软件,考虑了坝体切割式横缝接触面的初始强度,研究了碾压混凝土重力坝在地震作用下的动位移响应,其研究结果表明,考虑切割缝接触面初始强度时,坝体动位移响应更大,这种方法可以模拟横缝对于坝体的影响,但没有考虑到横缝本身的破坏形式及其带来的影响等因素。

本文基于上述研究内容,提出一种新的碾压混凝土重力坝切割缝模拟方法,以某水电站碾压混凝土重力坝工程为例,建立整体三维有限元模型,计算其在静力及动力作用下的应力、变形及塑性损伤等结果,并与单坝段模型对比,分析切割缝对于坝体应力及位移的影响。

1 计算方法

1.1 诱导缝模拟方法

碾压混凝土重力坝诱导缝成缝以切缝为主,切缝面积为缝面面积的 2/3,切缝填无纺布。有限元模型中,横缝处设置双节点,使得各坝段独立,坝段与坝段之间采用 Tie 约束连接。对于横缝处不切缝的部位,通过 Tie 约束连接,对应的部位之间不能发生相对位移,使得坝体形成整体;切缝部位为双节点,允许切缝张开和相对滑移。

Tie 约束示意图见图 1,其中,左右两侧分别代表缝面两侧的有限元网格,虚线部分代表受 Tie 约束作用的双节点,为更好表示 Tie 约束的作用,示意图中的双节点间存在一定间隙,实际有限元模型中,双节点的物理位置是重叠的。受到 Tie 约束连接的缝面左右两侧的双节点满足以下条件:

$$\begin{cases} u_1^{(i)} = u_1^{(j)} \\ u_2^{(i)} = u_2^{(j)} \\ u_3^{(i)} = u_3^{(j)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_1, u_2, u_3 分别为对应节点沿 x, y, z 三轴方向的位移; i, j 为对应位置的双节点编号。

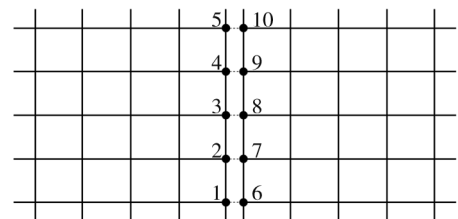


图 1 Tie 约束示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Tie constraint

在非线性和非线性工况中,坝体材料使用混凝土塑性损伤模型进行模拟,因此当诱导缝拉应力超过其抗拉强度时,由于受到 Tie 约束的连接,诱导缝处的混凝土进入应变软化阶段,发生塑性损伤,当损伤超过 0.8 时,认为诱导缝发生了宏观开裂。

1.2 坝体混凝土塑性损伤本构模型

在非线性和非线性动力计算分析中,采用塑性损伤本构模型模拟坝体的强震开裂^[22-23]。

一般混凝土在往复受拉荷载作用下通常表现出明显的受拉软化现象,而为了客观描述材料在达到峰值强度后损伤微裂带来的软化力学行为,需要给出关于抗拉强度、断裂能(裂缝扩展单位面积所需耗散能量)以及软化曲线形状的合理定义。

根据混凝土塑性损伤本构模型,对于宽度为 l_c 的断裂过程区(l_c 即为混凝土材料的特征长度),断裂能可按式(2)计算:

$$G_f = l_c \int_0^{\varepsilon_f} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

式中, ε_f 为极限拉伸应变。

1.3 无限地基辐射阻尼模拟

动力计算中,考虑无限地基辐射阻尼效应,采用黏弹性人工边界模型进行模拟^[24-27]。有限元模型截断地基的四周及底部设置黏弹性人工边界,人工截断边界上设置连续分布的并联弹簧阻尼系统。其中弹簧和阻尼器的力学参数由地基岩体材料决定,其刚度系数和阻尼系数分别为

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho C_s \quad (3)$$

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho C_p \quad (4)$$

式中: K_{BT} 、 K_{BN} 分别为切向弹簧和法向弹簧的刚度系数; C_{BT} 、 C_{BN} 分别为切向阻尼器和法向阻尼器的阻尼系数; α_T 、 α_N 为黏弹性边界的修正系数; R 为波源至人工边界点的距离; ρ 、 G 分别为岩体介质的密度和剪切模量; C_s 、 C_p 分别为岩体介质的剪切波速和纵波波速,可表示为

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (5)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

式中, E 和 ν 分别为介质的弹性模量和泊松比。

1.4 库水动水压力模型

地震动水压力采用 Westergaard 附加质量法计算^[28],其表达式为

$$p = \frac{7}{8} \rho \sqrt{H(H-Z)} \ddot{v}_g \quad (7)$$

式中: p 为坝面某点受到的动水压力; ρ 为库水质量密度; H 为坝前库水深度; Z 为该点在坝基面以上的高度; \ddot{v}_g 为坝面节点加速度。

2 有限元算例

2.1 工程概况

选择某水电站碾压混凝土重力坝工程为算例进行分析。该工程位于西藏昌都市察雅县境内,最大坝高 200 m,坝底最大宽度 184.10 m,正常蓄水位 3054 m。大坝上游折坡点高程 2945 m,上游坡比 1:0.3,下游坡比 1:0.78。

2.2 有限元模型

为确定切割缝对于坝体位移及应力的影响,建立了坝体-地基三维有限元模型见图 2(a)。有限元模型主要采用六面体 8 节点单元离散,局部区域采用五面体 6 节点单元或四面体 4 节点单元离散。整体有限元模型节点 629396 个,单元 1048286 个,其中,坝体节点 601457 个,单元 906520 个。有限元模型中,坝体及

地基通过 Tie 约束连接,二者之间不发生相对滑移,在非线性工况中,通过给坝体材料赋予混凝土塑性损伤本构关系来模拟坝基的损伤开裂。

根据大坝结构布置情况,大坝共设置 19 条诱导横缝,共 20 个坝段,横缝最大间距 29 m,最小间距 19 m,不设置纵缝。按照 1.1 节中的方法模拟该碾压混凝土重力坝的诱导缝。为更好地模拟实际碾压混凝土坝切缝,按照图 2(b) 方式进行模拟,其中,红色部分表示横缝连接部位,绿色部分表示切缝部位。

为进一步分析切割缝对于坝体整体性的影响,建立了典型坝段(河床最高坝段)的单坝段三维有限元模型,见图 3。

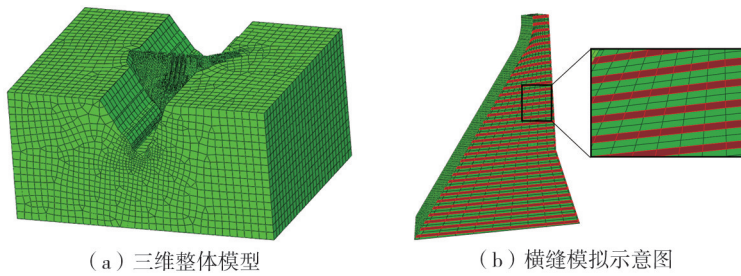


图 2 坝体-地基三维有限元模型

Fig. 2 Dam-foundation 3D finite element model

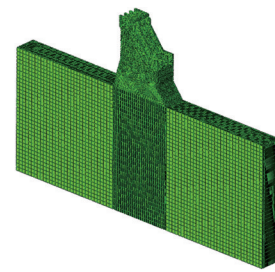


图 3 河床最高坝段单坝段有限元模型

Fig. 3 Finite element model of a single dam element in the highest dam section of the riverbed

2.3 材料参数

整体模型中,坝体根据实际工程进行材料分区见图 4,共涉及 C15、C20、C25、C30 及 C35 这 5 种混凝土分区,地基采用分层地基,其中坝高(190,+∞)m 处基岩为微新岩体,坝高(100,190]m 处基岩为弱风化下带岩体,坝高(30,100]m 处基岩为弱风化上带岩体;坝高[0,30]m 以内处基岩弱卸荷岩体。混凝土及地基力学参数根据工程设计值及 SL 191—2008《水工混凝土结构设计规范》^[29]选取,见表 1 和表 2,其中混凝土的密度为 2 400 kg/m³,泊松比为 0.167,其动态弹性模量取为静态弹性模量的 1.5 倍。坝体混凝土材料的动抗拉强度按照坝体各分区混凝土静抗拉强度的 1.2 倍选取,混凝土动断裂能参数取为 300 N/m;根据有限元模型中的单元尺寸,混凝土梁向开裂时断裂过程区取为 1 m,混凝土软化曲线按线性软化进行简化描述,由此根据式(2)求得极限拉伸应变。

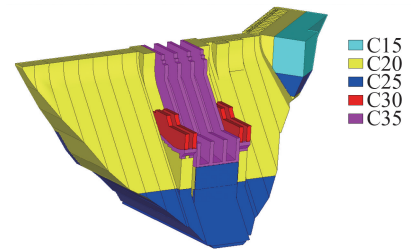


图 4 坝体材料分区

Fig. 4 Zoning of dam section materials

表 1 混凝土静力弹性模量及静态强度

Table 1 Concrete static elastic modulus and static strength

参数	混凝土标号				
	C15	C20	C25	C30	C35
弹性模量/GPa	22.0	25.5	28.0	30.0	31.5
轴心抗压强度/MPa	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4
轴心抗拉强度/MPa	1.27	1.54	1.78	2.01	2.00

表 2 地基岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of dam foundation rock

参数	材料			
	微新岩体	弱风化下带	弱风化上带	弱卸荷
密度/(kg/m ³)	2 680	2 670	2 660	2 640
变形模量/GPa	16	10	8	6
弹性模量/(kN/m ²)	31	23	17	13
泊松比	0.20	0.21	0.22	0.26

2.4 荷载条件与计算工况

有限元分析中,分别考虑静力分析、线弹性动力时程分析以及非线性动力时程分析,其中非线性动力时程分析中,坝体材料选用混凝土塑性损伤模型。

静力分析中,考虑大坝的自重、静水压力、扬压力及泥沙压力等作用,动力分析中,除上述荷载外,还考虑地震作用、动水压力作用。根据该工程校核地震设定地震谱,生成3组人工地震加速度时程,分别用于地震横河向、顺河向以及竖向的地震输入,其对应的水平峰值加速度 520 cm/s^2 。对于单坝段有限元模型,只考虑顺河向和竖向地震输入,不考虑横河向地震输入。场地相关设定地震反应谱及人工地震时程见图5和图6。

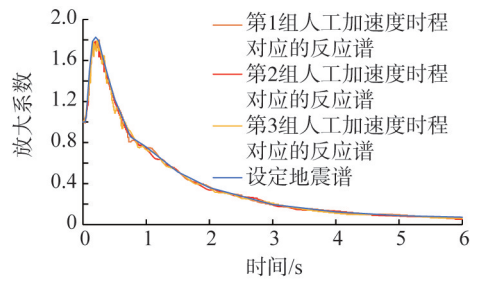
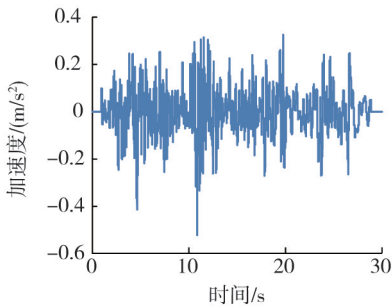
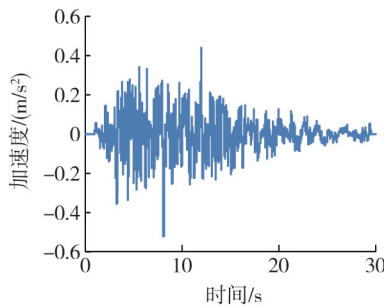


图5 场地相关设定地震反应谱

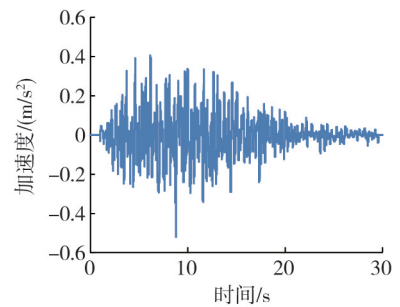
Fig. 5 Site-related specified seismic response spectrum



(a) 人工加速度时程1



(b) 人工加速度时程2



(c) 人工加速度时程3

图6 人工加速度时程

Fig. 6 Artificial acceleration time history

3 结果与分析

3.1 静力结果

静力作用下,整体模型应力计算结果见图7、图8。整体模型与单坝段模型应力计算结果对比见图9、图10。位移计算结果见图11。由计算结果可知,静力工况下,不考虑应力集中,整体模型与单坝段模型相比,其最大主应力及最小主应力水平接近,整体模型溢流面附近最大主应力偏小且在下游折坡点出最小主应力偏大,溢流坝段顺河向变形整体模型显著小于单坝段模型。

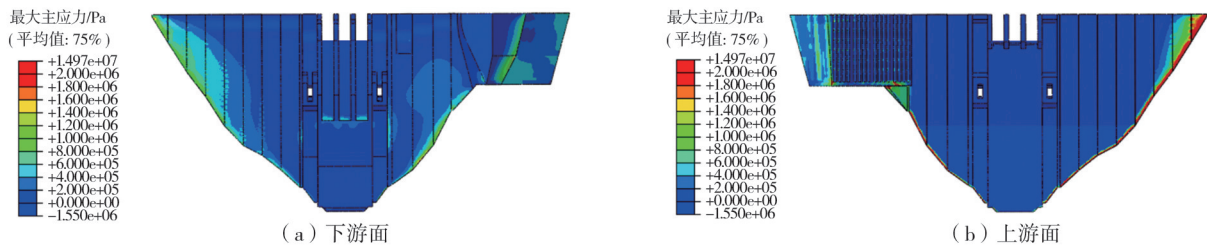


图7 整体模型正常蓄水位工况最大主应力

Fig. 7 The maximum principal stress under the normal storage water level condition of the overall model

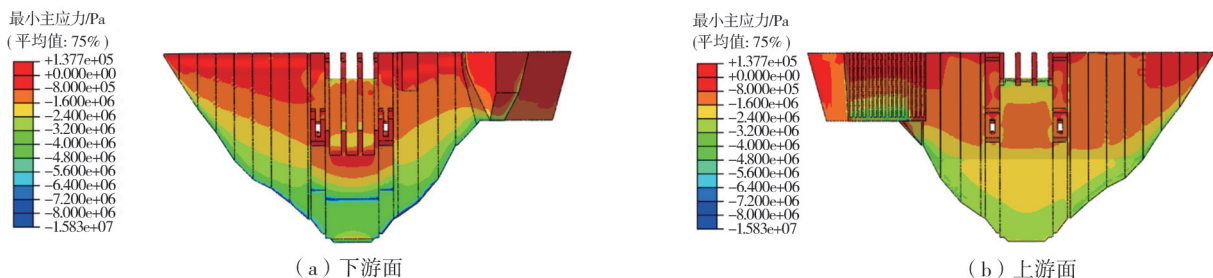


图8 整体模型正常蓄水位工况最小主应力

Fig. 8 The minimum principal stress under the normal storage water level condition of the overall model

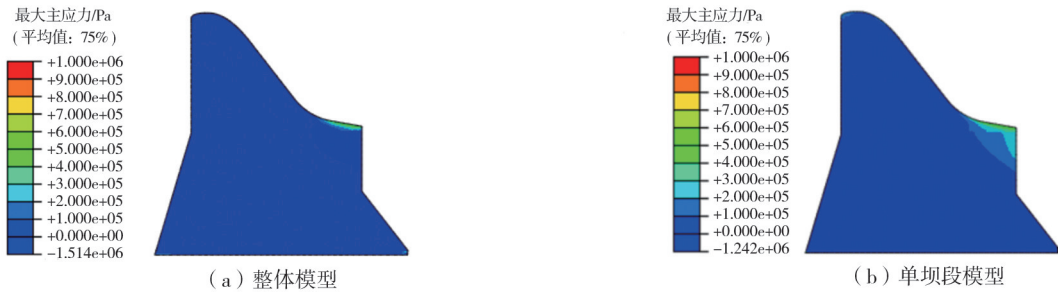


图 9 整体模型溢流坝段与单坝段模型正常蓄水位最大主应力对比图

Fig. 9 Comparison diagram of the maximum principal stress at the normal storage water level between the overflow dam section of the overall model and the single dam section model

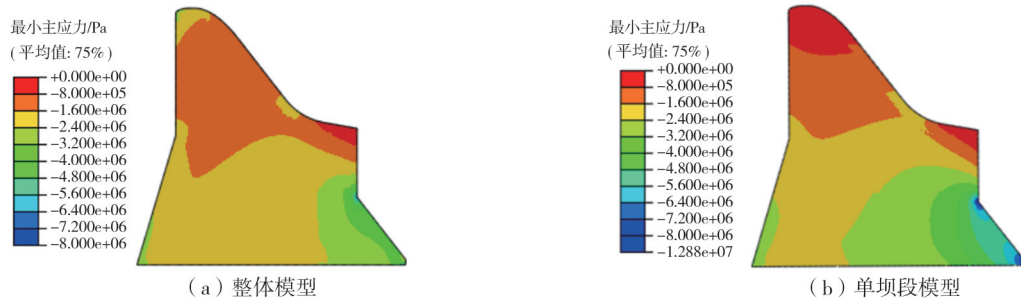


图 10 整体模型溢流坝段与单坝段模型正常蓄水位最小主应力对比图

Fig. 10 Comparison diagram of the minimum principal stress at the normal storage water level between the overflow dam section of the overall model and the single dam section model

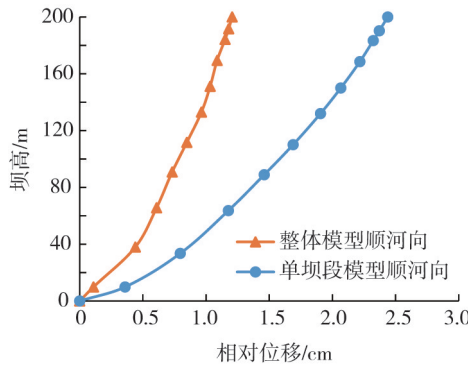


图 11 河床最高坝段相对位移对比图(静力)

Fig. 11 Comparison diagram of relative displacement of the riverbed highest dam section (statics)

注意到该工程坝址河谷较窄,坝高较高,且由于考虑横缝连接,坝体形成整体,因此形成“反拱”,使得坝体中部坝段顺河向变形减小,且应力水平减小,对于靠近坝肩的坝段,在整体变形趋势的牵制下,将出现沿顺河向方向的扭转,进而产生较大剪应力,使得其最大主应力水平偏大。

3.2 线弹性动力结果

线弹性动力工况作用下,整体模型与单坝段模型最大主应力包络图及最小主应力包络图见图 12、图 13。位移包络图见图 14。

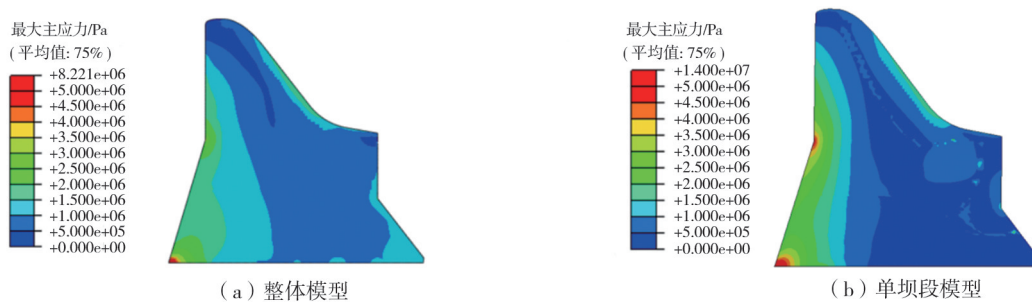


图 12 最大主应力包络图

Fig. 12 The maximum principal stress envelope

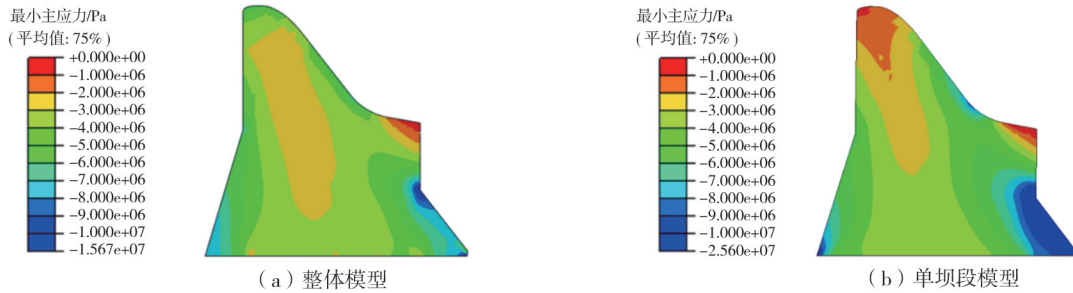


图13 最小主应力包络图

Fig. 13 The minimum principal stress envelope

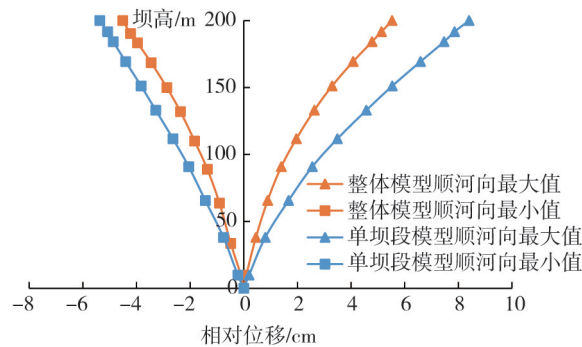


图14 河床最高坝段相对位移对比图(动力)

Fig. 14 Comparison diagram of relative displacement of the riverbed highest dam section(dynamics)

由计算结果可知,对于线弹性工况最大主应力,整体模型与单坝段模型相比,坝体内部应力水平接近,对于上游折坡点,坝踵以及下游溢流面等部位,单坝段模型应力水平大于整体模型;对于线弹性工况最小主应力,整体模型内部应力与单坝段模型相比基本一致,单坝段模型在上游折坡点,坝踵以及下游溢流面等部位处应力水平较大。此外,在地震作用下,整体模型的顺河向最大变形及最小变形均小于单坝段模型。

为进一步研究2种模型计算结果差异的成因,分别计算了整体模型与单坝段模型的各阶频率,见表3。由计算结果可知,整体模型的各阶频率明显大于单模型的各阶频率。

在动力作用下,结构的响应与其自振频率、动力输入的反应谱均有较大关系。本文中使用的3条人工地震动是基于图5所示的反应谱生成的。对于整体模型1阶频率为2.17 Hz,对应周期为0.46 s,单坝段模型的1阶频率均不超过1.5 Hz,对应的周期在0.7 s以上。从地震动输入的反应谱来看,放大系数峰值对应的周期为0.25 s左右,整体模型对应的放大系数大于单坝段模型对应的放大系数。

综合来看,考虑横缝的整体模型与不考虑横缝的单坝段模型在计算结果上存在差异的原因是复杂的。一方面,当各坝段间有横缝连接,形成整体后,坝体形成“反拱”,中部坝段受到两岸坝段的牵制,顺河向变形程度显著减小;另一方面,各坝段形成整体后,结构整体刚度增加,对应自振频率增加,对应反应谱曲线的放大系数更大,使得整体模型在动力荷载作用下产生的响应更剧烈。

对于该碾压混凝土重力坝,在上述2种因素的作用下,2种模型的河床最高坝段(溢流坝段)应力水平基本一致,在部分关键部位,例如坝踵、坝趾以及坝体上游折坡点处,单坝段模型应力水平更大,因此,采用单坝段模型进行结构的抗震分析时,其评估结果是更保守的。

3.3 非线性动力结果

非线性动力工况下,整体模型与单坝段模型损伤计算结果对比见图15。

由计算结果可知,非线性损伤计算结果与前文中应力计算结果所呈现出的规律相似,整体模型与单坝段模型相比,整体损伤水平基本一致,而在部分关键部位,如坝踵、坝趾及坝体上游折坡点处,单坝段模型损伤比整体模型更加显著。

表3 2种模型坝体自振频率

Table 3 Natural frequencies of the dam of two different models

频率	整体模型	单坝段模型	Hz
1阶	2.17	1.15	
2阶	3.30	2.25	
3阶	3.85	2.92	

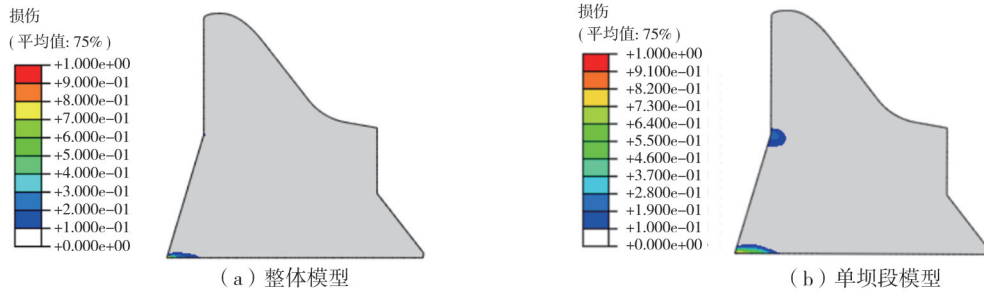


图 15 整体模型与单坝段模型损伤计算结果对比

Fig. 15 Comparison diagram of damage results between the overall model and the single dam section model

非线性动力工况下,整体模型的损伤过程见图 16~图 21。由计算结果可知,在地震作用下,坝体右岸坝肩坝段处的诱导缝最先发生损伤,随后左岸坝肩坝段处诱导缝发生损伤。随着地震的进行,沿着各个坝段,从两岸坝肩至坝体中部,各个诱导缝依次发生不同程度的损伤,靠近坝肩处的诱导缝损伤程度最大,右岸坝肩处 3 个坝段间的 2 条诱导缝以及左岸坝肩处 2 个坝段间的诱导缝的损伤因子均超过 0.8,可以认为诱导缝已基本完全开裂。此外,对于单一诱导缝,损伤最先发生在建基面附近,随后逐渐由建基面向坝顶方向上发展,直至完全损伤。

由上述结果可知,对于采用了本文提出的横缝模拟方法的整体模型,在使用混凝土塑性损伤本构关系时,可以较好地模拟地震过程中切割式诱导缝破坏的过程。

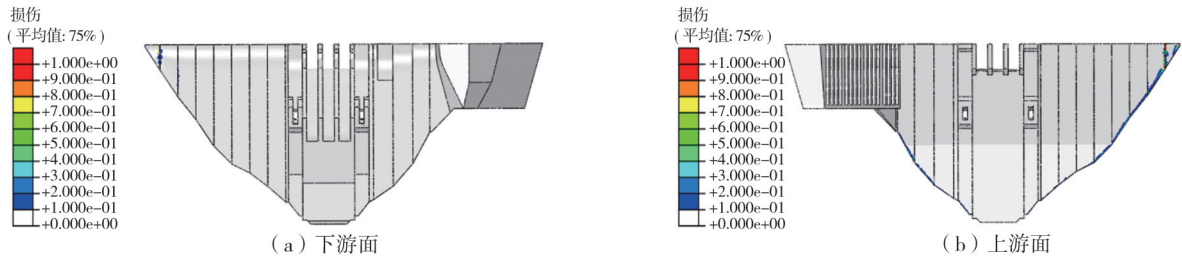


图 16 第 3 s 整体模型损伤计算结果

Fig. 16 Overall model damage calculation results at the 3rd second

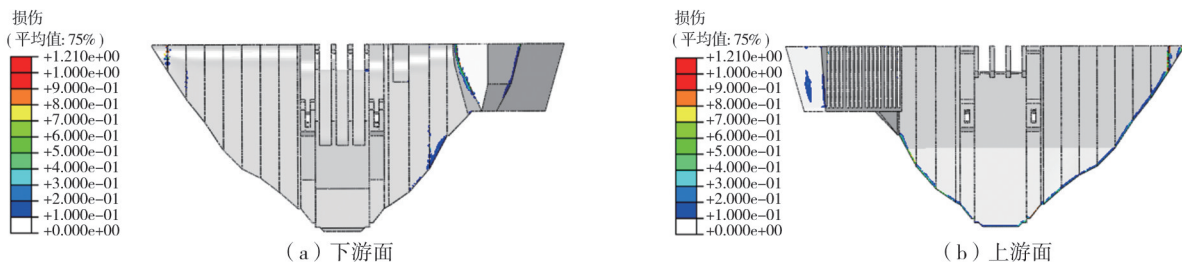


图 17 第 4 s 整体模型损伤计算结果

Fig. 17 Overall model damage calculation results at the 4th second

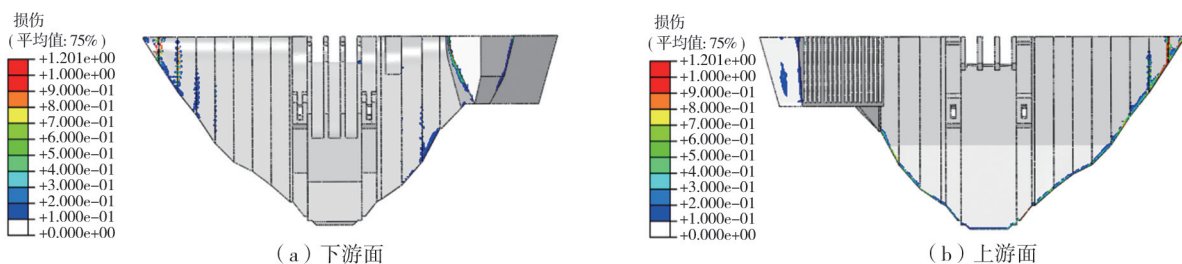


图 18 第 5 s 整体模型损伤计算结果

Fig. 18 Overall model damage calculation results at the 5th second

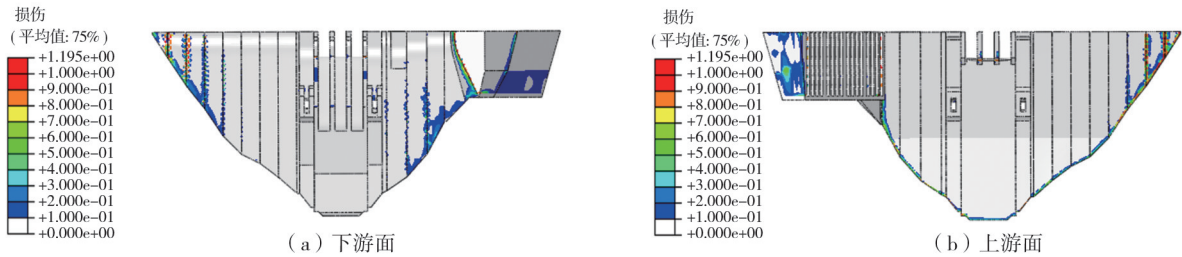


图19 第6 s整体模型损伤计算结果

Fig. 19 Overall model damage calculation results at the 6th second

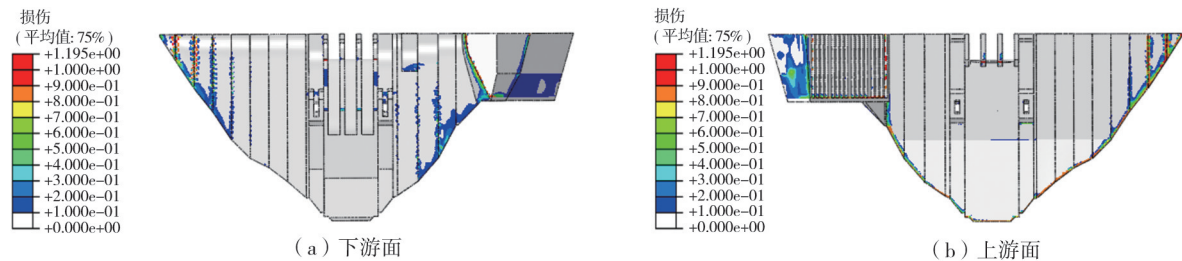


图20 第15 s整体模型损伤计算结果

Fig. 20 Overall model damage calculation results at the 15th second

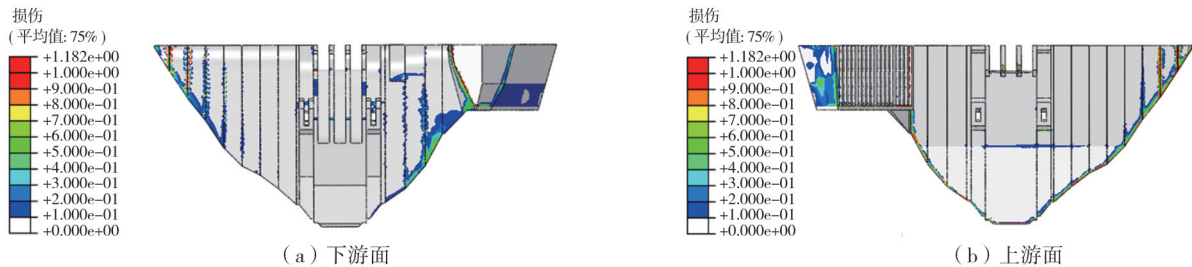


图21 第30 s整体模型损伤计算结果

Fig. 21 Overall model damage calculation results at the 30th second

4 结论

本文提出了一种新型碾压混凝土重力坝切割缝的模拟方法,采用有限元法,分析了某水电站碾压混凝土重力坝工程大坝整体模型在静力、线弹性动力以及非线性动力3种工况下的应力、位移及损伤情况,并与单坝段模型计算结果进行了对比,得到以下结论:

1) 整体模型与单坝段模型相比,河床最高坝段整体应力水平接近,在个别部位,如下游溢流面及下游折坡点等位置,整体模型的应力水平小于单坝段模型,整体模型的顺河向变形显著小于单坝段模型;此外,由于整体模型的“反拱作用”,靠近坝肩的坝段产生扭转变形,将产生较大的最大主应力。

2) 在线弹性动力工况下,2种模型的河床最高坝段应力水平基本一致,在部分关键部位,例如坝踵、坝趾以及坝体上游折坡点处,单坝段模型应力水平更大,因此,采用单坝段模型进行结构的抗震分析时,其评估结果是更保守的。

3) 在非线性动力工况下,2种模型损伤水平基本一致,在坝踵、坝趾及坝体上游折坡点处,单坝段模型损伤比整体模型更加显著,此外,整体模型能够模拟横缝损伤开裂的过程。

综上所述,采用单坝段模型进行碾压混凝土重力坝的抗震安全评估时,对于河床最高坝段,其结果是较为安全的,但仅以单坝段模型的计算结果无法评估坝体其余坝段的应力水平。若需分析碾压混凝土坝整体的应力及位移水平,并分析切割缝开裂过程,则根据本文提出的切割缝模拟方法所建立的碾压混凝土的整体模型能够提供更好的理论依据。

参考文献:

- [1] 刘毅, 杜雷功, 钱文勋, 等. 高寒区高混凝土坝关键技术难题与解决途径[J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 45-52.
LIU Yi, DU Leigong, QIAN Wenxun, et al. Study on key technical problems of high concrete dam construction in alpine region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(3): 45-52. (in Chinese)
- [2] 钟登华, 任炳昱, 宋文帅, 等. 高拱坝建设进度与质量智能控制关键技术及其应用研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(8): 8-17.
ZHONG Denghua, REN Bingyu, SONG Wenshuai, et al. Study on key techniques for intelligent control of construction progress and quality of high arch dam and their applications[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8): 8-17. (in Chinese)
- [3] GU C S, ZHU M Y, WU Y, et al. Multi-output displacement health monitoring model for concrete gravity dam in severely cold region based on clustering of measured dam temperature field[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(5): 3416-3436.
- [4] 张庆龙, 马睿, 胡昱, 等. 大体积混凝土结构温度应力智能控制理论[J]. 水力发电学报, 2021, 40(5): 11-21.
ZHANG Qinglong, MA Rui, HU Yu, et al. Intelligent control theory of thermal stress in mass concrete structures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(5): 11-21. (in Chinese)
- [5] 赵二峰, 顾冲时. 碾压混凝土坝安全服役关键技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 11-20.
ZHAO Erfeng, GU Chongshi. Review on key technologies for safe operation of roller compacted concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 11-20. (in Chinese)
- [6] 史广生. 高拱坝无人驾驶碾压筑坝技术实施与应用[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(9): 31-33.
SHI Guangsheng. Implementation and application of unmanned rolling dam construction technology for high arch dam[J]. Building Technology Development, 2020, 47(9): 31-33. (in Chinese)
- [7] 肖九庚, 赵毅. 黄登水电站大坝碾压混凝土施工技术研究[J]. 水力发电, 2019, 45(6): 60-64.
XIAO Jiugeng, ZHAO Yi. Research on dam rolling compacted concrete construction technology of Huangdeng hydropower station[J]. Water Power, 2019, 45(6): 60-64. (in Chinese)
- [8] 姚成鹏, 杨升乾. 水石门碾压混凝土双曲拱坝设计特点[J]. 水电与新能源, 2024, 38(4): 26-29.
YAO Chengpeng, YANG Shengqian. Design characteristics of shuishimen roller compacted concrete double-curvature arch dam[J]. Hydropower and New Energy, 2024, 38(4): 26-29. (in Chinese)
- [9] 严克兵, 杨翔, 朱代富, 等. 翁结水库碾压混凝土重力坝动力特性及其抗滑稳定分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 35-41.
YAN Kebing, YANG Xiang, ZHU Daifu, et al. Dynamic characteristics and anti-sliding stability analysis of Wengjie RCC gravity dam[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024, 46(2): 35-41. (in Chinese)
- [10] 梁俊群, 凤鑫, 韦洪枫. 川江水库碾压混凝土重力坝施工设计[J]. 小水电, 2023(4): 42-45.
LIANG Junqun, FENG Xin, WEI Hongfeng. Construction design of chuanjiang reservoir roller compacted concrete gravity dam[J]. Small Hydro Power, 2023(4): 42-45. (in Chinese)
- [11] PRASHANT V, SHANKAR S P. A case study for selecting the type of jamrani dam (roller compacted concrete vs. conventional concrete)[J]. Water and Energy International, 2022, 65(2): 24-27.
- [12] 王小毛. 高薄碾压混凝土拱坝设计创新与实践[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 149-153, 159.
WANG Xiaomao. Design innovation and practice of high and thin arch dams of roller compacted concrete[J]. Yangtze River, 2020, 51(1): 149-153, 159. (in Chinese)
- [13] 董京艳, 翟建, 杨晓箐, 等. 基于施工过程仿真的高碾压混凝土坝施工工艺研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(3): 75-78, 47.
DONG Jingyan, ZHAI Jian, YANG Xiaoping, et al. Study on construction technology of high RCC dam based on construction process simulation[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(3): 75-78, 47. (in Chinese)
- [14] 丁汉涛. 碾压混凝土坝横缝的新型结构——间断缝初探[J]. 水利水电技术, 1990(2): 23-25.
DING Hantao. New structure of transverse joints in roller compacted concrete dams: A preliminary exploration of intermittent joint[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1990(2): 23-25. (in Chinese)
- [15] 陈建江, 靳红会. 黑河黄藏寺重力坝碾压混凝土质量控制[J]. 人民黄河, 2023, 45(增刊2): 19-20.
Chen Jianjiang, JIN Honghui. Quality control of roller compacted concrete for Heihe Huangzangsi gravity dam[J]. Yellow River, 2023, 45(Sup. 2): 19-20. (in Chinese)
- [16] 张晓飞, 严涛, 张昕, 等. 削弱度和诱导片数量对碾压混凝土诱导缝等效强度影响研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1342-1350.
ZHANG Xiaofei, YAN Tao, ZHANG Xin, et al. Study on the influence of weakening degree and number of inducers on the equivalent strength of RCC induced joint[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(4): 1342-1350. (in Chinese)
- [17] 方卫华, 王润英, 杜智浩. 深厚覆盖层上RCC重力坝多场耦合强度折减法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(1): 40-49.
FANG Weihua, WANG Runying, DU Zhihao. Multi-field coupling strength reduction method of RCC gravity dam on thick overburden layer[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(1): 40-49. (in Chinese)
- [18] 王伟, 梁辉, 周兰生, 等. 某RCC抽水蓄能电站重力坝设计和三维全坝段抗震安全研究[J]. 西北水电, 2022(3): 70-79.
WANG Wei, LIANG Hui, ZHOU Lansheng, et al. Design of RCC gravity dam and seismic safety study of 3D full dam section for a pumped-storage hydropower project[J]. Northwest Hydropower, 2022(3): 70-79. (in Chinese)
- [19] 李金友, 胡江, 顾振华. 考虑地震动力响应的复杂地基碾压混凝土重力坝分缝优化研究[J]. 人民珠江, 2023, 44(6): 63-69.

- LI Jinyou, HU Jiang, GU Zhenhua. Joint optimization of RCC gravity dam on complex foundation considering seismic dynamic response[J]. *Pearl River*, 2023, 44(6): 63-69. (in Chinese)
- [20] 韩燕, 黄达海. 碾压混凝土重力坝横缝切缝深度研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(3): 26-29.
HAN Yan, HUANG Dahai. Study of horizontal transverse joint crevice depth of RCC gravity dams[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2008, 30(3): 26-29. (in Chinese)
- [21] 胡良明, 赵子楠, 杨旭, 等. 切割式横缝对高碾压混凝土重力坝地震损伤与抗震性能影响[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(7): 93-97.
HU Liangming, ZHAO Zinan, YANG Xu, et al. Influence of cutting transverse joints on seismic damage and seismic performance of high roller compacted concrete gravity dams[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(7): 93-97. (in Chinese)
- [22] 李清富, 匡一航, 郭威. CDP模型参数计算及取值方法验证[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2021, 42(2): 43-48.
LI Qingfu, KUANG Yihang, GUO Wei. CDP model parameters calculation and value method verification[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2021, 42(2): 43-48. (in Chinese)
- [23] 李晓琴, 张田. 循环荷载下混凝土开裂-闭合行为计算方法研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(9): 254-263.
LI Xiaoqin, ZHANG Tian. Calculation method of cracking-closing behaviour of concrete under cyclic loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(9): 254-263. (in Chinese)
- [24] ZHANG C H, PAN J W, WANG J T. Influence of seismic input mechanisms and radiation damping on arch dam response[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(9): 1282-1293.
- [25] 王展, 景立平, 陆新宇, 等. 粘弹性人工边界单元及地震动输入方法比较研究[J]. *世界地震工程*, 2023, 39(2): 167-177.
WANG Zhan, JING Liping, LU Xinyu, et al. Comparative study of viscous-spring boundary element and methods of seismic motion input[J]. *World Earthquake Engineering*, 2023, 39(2): 167-177. (in Chinese)
- [26] 刘晶波, 宝鑫, 李述涛, 等. 采用粘弹性人工边界时显式算法稳定性的改善研究[J]. *工程力学*, 2023, 40(5): 20-31.
LIU Jingbo, BAO Xin, LI Shutao, et al. Stability improvement of explicit algorithm when using viscoelastic artificial boundary[J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(5): 20-31. (in Chinese)
- [27] OLMOS B, JARA J M, MARTÍNEZ G. Radiation damping for rigid foundations. Approximate expressions[J]. *Vibroengineering Procedia*, 2019, 27: 103-108.
- [28] 邱奕翔, 魏楚函, 武志刚, 等. 库水模拟对拱坝动力特性的影响分析[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(6): 109-120.
QIU Yixiang, WEI Chuhan, WU Zhigang, et al. Effects of reservoir water on simulations of arch dam dynamic characteristics[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(6): 109-120. (in Chinese)
- [29] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
SL 191—2008 Design code for hydraulic concrete structures[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese)