

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.03.014

强震作用下高拱坝抗震安全分析

李晓娜¹, 王嘉威¹, 李同春², 黄灵芝¹, 何金文³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 河海大学 农业工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 一大批高拱坝在我国西部强震区建设、运行,高拱坝抗震安全至关重要。本文采用混凝土四参数损伤模型,模拟高拱坝在强震作用下的抗震安全问题。通过超载地震加速度峰值,研究不同超载倍数下,高拱坝抗震安全性能。分析表明,在强震作用下,坝体靠近建基面及坝体中上部损伤值较大,且随着加载倍数增加,损伤值逐渐加大,分布区域亦相应增加,当超载地震加速度峰值倍数为2.0时,坝体已偏于不安全。研究给出了高拱坝坝面损伤分布情况,为高拱坝抗震安全评价提供一种新的思路。

关键词: 强震作用; 高拱坝; 四参数损伤模型; 抗震安全

中图分类号: TV313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2018)03-0332-06

Seismic safety analysis of high arch dam under strong earthquake

LI Xiaona¹, WANG Jiawei¹, LI Tongchun², HUANG Lingzhi¹, HE Jinwen³

(1. School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Large quantities of high arch dams have been constructed and have worked in the high seismic southwest of China. The seismic safety of arch dams is of great importance. The concrete four-parameter damage model is used to simulate earthquake safety of a high arch dam subjected to severe earthquakes. Peak acceleration of earthquake is overloaded. Different overload ratios are analyzed to study the seismic safety performance of high arch dams. The analysis shows that under severe earthquake, nearby plane base surface and middle-upper part of dam, the damage is larger than those in other parts. The damage is gradually increasing with the load multiple increasing and the distribution area also increases accordingly. Under overload 2.0 times of the peak seismic acceleration, the dam is unsafe with the high arch dam surface damage distribution given. This paper provides a new train of thought for high arch dam seismic safety evaluation.

Key words: strong earthquake action; high arch dam; four-parameter damage model; seismic safety

在强震作用下高拱坝一旦发生溃决将严重威胁下游人民群众的生命财产安全。历史上也曾有拱坝发生震害的例子,例如,秘鲁的费雷尔拱坝遭受强震后,坝体出现一垂直裂缝,与基岩接触处有渗漏,最终导致大坝处于危急状态^[1];美国的 Pacoima 拱坝连续两次遭受强震作用,坝身所有横缝均有不同程度的张开,并且与推力墩相邻的坝段在不同高程出现两条水平裂缝,同时伴有上部坝块向下游的明显错动,压水试验表明裂缝是上下游贯通的,该坝段悬

臂梁完全断裂^[2]。2008年汶川地震中的沙牌拱坝遭受的地震动也超过设计地震动^[3],尽管大坝保持整体安全,但在下游坝体中上部高程也发生了水平开裂^[4]。因此,研究强震作用下的高拱坝抗震安全是非常必要的。

林皋院士^[5]提出“为了对混凝土坝,特别是对三维拱坝-无限地基体系的抗震安全性进行更为科学的评价,进行混凝土坝地震损伤破坏发展过程的数值模拟是十分必需的”。从20世纪80年代至今,国内外学者提出了一些混凝土材料损伤模型:主要有

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609200,51809212);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JQ5132)

作者简介: 李晓娜,女,讲师,博士,研究方向为水工结构。E-mail:lixjn@163.com

弹性损伤模型、塑性损伤模型、弹塑性损伤模型、随机损伤模型、非局部化损伤模型^[6]、统计损伤模型^[7]及四参数损伤模型^[8-11]等。弹性损伤模型由于未考虑不可恢复变形,故具有一定的局限性。弹塑性损伤模型较弹性损伤模型有所改进,认为混凝土卸载时存在不可恢复变形。李杰等^[12]建立了混凝土受拉随机损伤本构模型,并在随机受拉损伤基础上,建立随机受压损伤本构模型。胡少伟等^[13]基于随机损伤本构关系提出了一种混凝土轴拉加卸载模型,并进行了试验验证。彭刚等^[14]选用基于 Weibull 统计理论的动态损伤本构模型,对饱和混凝土循环荷载后动态抗压性能进行了研究。

近年来,高坝抗震研究取得了丰硕的研究成果。M. A. Hariri-Ardebili 等^[15]采用同轴旋转弥散裂缝模型模拟裂缝开展,采用三维接触单元模型模拟横缝及周边缝,在考虑库水相互作用等因素的基础上对拱坝抗震安全进行了分析;Peng Lin 等^[16]采用三维地质模型试验和数值模型对锦屏 I 级拱坝整体稳定性进行了研究;Jianwen Pan 等^[17]和 Mohammad Alembagheria 等^[18]采用增量动力分析方法对拱坝进行了抗震分析。由于拱坝抗震安全涉及多方面复杂因素^[19],因此,建立切近实际的地震响应分析模型,探索基于损伤力学的高混凝土坝的地震破坏过程分析方法^[20]成为亟待解决的关键科学技术问题。

本文运用四参数损伤模型,考虑实际地质地形,对某高拱坝在超载地震加速度峰值作用下的抗震安全进行分析与研究。

1 计算理论及方法

1.1 应变空间四参数破坏准则

参考 Hsieh-Ting-Chen 1979 年提出的应力空间的四参数破坏准则,文献[10]提出了一种建立在应变空间上的四参数破坏准则,其表达式为:

$$F(I'_1, J'_2, \epsilon_0) = A \frac{J'^2_2}{\epsilon_0} + B \sqrt{J'_2} + C\epsilon_1 + DI'_1 - \epsilon_0 = 0 \quad (1)$$

式中, $I'_1 = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$, 表示应变张量的第一不变量, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 为三个主应变, ϵ_1 为最大主应变; $J'_2 = \frac{1}{6} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]$, 表示应变偏

$$\epsilon^* = \frac{(B \sqrt{J'_2} + C\epsilon_1 + DI'_1) \pm \sqrt{(B \sqrt{J'_2} + C\epsilon_1 + DI'_1)^2 + 4AJ'_2}}{2} \quad (7)$$

由于等效应变不可能为负值,因此只能取式(7) 中的正解:

$$\epsilon^* = \frac{(B \sqrt{J'_2} + C\epsilon_1 + DI'_1) + \sqrt{(B \sqrt{J'_2} + C\epsilon_1 + DI'_1)^2 + 4AJ'_2}}{2} \quad (8)$$

量的第二不变量; ϵ_0 为材料达到单轴拉伸强度极限 f_t 的峰值应变; A, B, C, D 为四个常数。

由于混凝土的抗拉强度比抗压强度要小很多,为此,本文中的 $\epsilon_0 = C_t f_c / E = f_t / E$, 其中, f_t 为材料抗拉强度, f_c 为材料的抗压强度, C_t 为拉压强度比, E 为材料的弹性模量。

A, B, C, D 四个常数,可以由四组强度试验数据来确定, μ 为泊松比。

单轴拉伸:

$$\epsilon_1 = \frac{f_t}{E}, \quad \epsilon_2 = -\mu \frac{f_t}{E}, \quad \epsilon_3 = -\mu \frac{f_t}{E} \quad (2)$$

单轴压缩:

$$\epsilon_1 = \mu \frac{f_c}{E}, \quad \epsilon_2 = \mu \frac{f_c}{E}, \quad \epsilon_3 = -\frac{f_c}{E} \quad (3)$$

双轴等压:

$$\begin{cases} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{cases} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu \\ -\mu & 1 & -\mu \\ -\mu & -\mu & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} 0 \\ -1.28f_c \\ -1.28f_c \end{cases} \quad (4)$$

三轴压缩:

$$\begin{cases} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{cases} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu \\ -\mu & 1 & -\mu \\ -\mu & -\mu & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{2.7}{\sqrt{2}}f_c - 4f_c \\ \frac{2.7}{\sqrt{2}}f_c - 4f_c \\ -2.7\sqrt{2}f_c - 4f_c \end{cases} \quad (5)$$

应变空间四参数破坏准则的合理性和正确性的验证见文献[11]。研究表明,该破坏准则与应力空间已有的破坏准则具有很好的一致性,不仅能正确反映混凝土单轴拉压应力状态下的强度,也能较好地反映多轴应力状态下的强度。

1.2 四参数等效应变

从应变空间四参数破坏准则的思想出发,假定在应变软化段内四参数破坏准则仍适用,且参数不变,将式(1)中的 ϵ_0 用等效应变 ϵ^* 替代,则可得各向同性损伤模型的四参数等效应变为:

$$\epsilon^* = A \frac{J'^2_2}{\epsilon^*} + B \sqrt{J'_2} + C\epsilon_1 + DI'_1 \quad (6)$$

式(6)为一个关于 ϵ^* 的二次方程,求解这个二次方程即可得到各种应力状态下的等效应变 ϵ^* :

该等效应变形式单一,计算简单。经算例证明,该等效应变不仅适用于求解单轴应力的情况,而且可以推广到求解多轴应力的情况^[11]。

1.3 损伤变量值计算

本文损伤变量 D 采用 Faouzi 各向同性损伤模型公式进行计算。

$$\begin{cases} D = 0 & (\epsilon^* \leq \epsilon_0) \\ D = 1 - \left[\frac{f_t}{E\epsilon^*} [2\exp(-b(\epsilon^* - \epsilon_0)) - \exp(-2b(\epsilon^* - \epsilon_0))] \right]^{\frac{1}{2}} & (\epsilon^* > \epsilon_0) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $b = \frac{3}{\epsilon_0 \left(\frac{2G_f E}{l_{ch} f_t^2} - 1 \right)}$, G_f 为断裂能, l_{ch} 为特征长度^[8]。

2 工程概况

某水电站工程枢纽建筑物为混凝土双曲拱坝,坝顶高程 1 135 m,坝底高程 925 m,最大坝高为 210 m。水库正常蓄水位 1 130 m,死水位 1 120 m。该工程抗震设防类别为甲类。取 100 年内超越概率为 0.02 的概率水准确定该工程的基岩平坦地表水平向设计地震动峰值加速度为 5.575 m/s²。

3 计算参数及边界条件

3.1 材料参数

本文计算所采用的地基材料参数如表 1 所示。坝体混凝土容重为 2 400 kg/m³,弹性模量为 24 GPa,坝体混凝土泊松比为 0.17,基岩泊松比为 0.25。计算中设置坝体横缝初始间隙为 0,摩擦系数为 0.7,不计缝面上的凝聚力 and 抗拉强度,裂缝抗拉强度取为 1.78 MPa。结构动力分析时,坝体混凝土材料动态弹性模量在静态基础上增加 30%;坝体混凝土动态抗压强度取为 20.04 MPa,坝体混凝土动态抗拉强度取为 2.0 MPa。

表 1 地基各控制高程变形模量

Tab. 1 Foundation deformation modulus of each control the elevation

高程/m	设计综合变形模量/GPa	
	左岸	右岸
925	21.10	21.43
950	21.90	21.44
980	19.52	18.71
1 010	19.70	19.55
1 050	19.74	20.60
1 090	17.90	17.85
1 120	15.10	12.44
1 135	10.00	11.50

3.2 荷载条件及计算工况

正常蓄水位工况下,上游水位高程为 1 130 m,上游淤沙高程为 1 050 m,淤沙浮容重为 5 kN/m³,内摩擦角为 0°。坝体所受温度荷载如表 2 所示。

表 2 坝体温度荷载

Tab. 2 Temperature load of dam

高程/m	坝体温度荷载/°C	
	T_m	T_d
1 135	-1.09	0
1 120	0.11	-0.25
1 090	1.96	3.43
1 050	1.55	5.09
1 030	1.51	5.39
1 010	1.82	4.95
980	1.28	4.24
950	1.64	3.84
925	1.19	1.94

表 2 中 T_m 、 T_d 分别为坝体的平均温度和等效温差,均取坝体相应高程的平均值,其中等效温差 T_d 为下游面温度与上游面温度之差。

计算采用的人工地震波按照《水工建筑物抗震设计规范》规定的标准设计反应谱生成,特征周期 $T_g = 0.2$ s,反应谱最大值 $\beta_{max} = 2.5$ 。设计地震工况下,水平向加速度峰值为 5.575 m/s²,竖直向加速度峰值取水平向的 2/3。经过归一化处理,三个方向的地震波加速度时程曲线如图 1 所示。

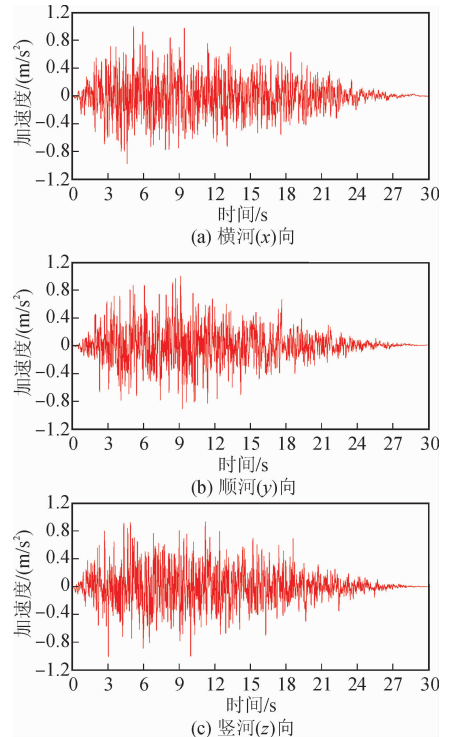


图 1 归一化人工地震波加速度时程曲线

Fig. 1 Acceleration time histories of normalization artificial seismic wave

计算工况考虑静力荷载与动力荷载相互作用,静力荷载为正常蓄水位温降荷载,动力荷载为按粘弹性边界考虑的地震荷载。

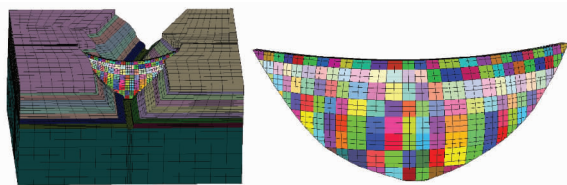
4 有限元模型

模型采用笛卡尔坐标系: x 轴取为坝轴向,以指向左岸为正; y 轴取为顺河向,以指向上游为正; z 轴取为竖直向,以竖直向上为正。

由于地震加速度的采集一般来自地表,而计算采用基底输入地震波的方式,因此需要选取合适的地基范围来消除地震波在地基传播过程中的放大效应。参照同类工程经验,本文计算模型选取的地基范围为:下游面地基 2 倍坝高,上游面地基、左右岸及自坝底向下均为 1.5 倍坝高。

静力计算时,对地基底边界进行固定约束,对侧边界进行法向约束;动力计算时,在地基边界上设置粘弹性人工边界以考虑地基辐射阻尼的影响,三个方向的地震波折半从模型底部输入,并以附加质量的方式计入动水压力作用。

坝体沿厚度方向划分 4 层网格,沿高度方向划分 21 层网格,整个计算模型总节点数 29 288,单元数 24 767。坝体内设置横缝 25 条(包含 1 750 个接触点对)。某拱坝有限元模型如图 2 所示。



(a) 拱坝-地基整体有限元模型 (b) 拱坝坝体示意图

图 2 拱坝有限元模型

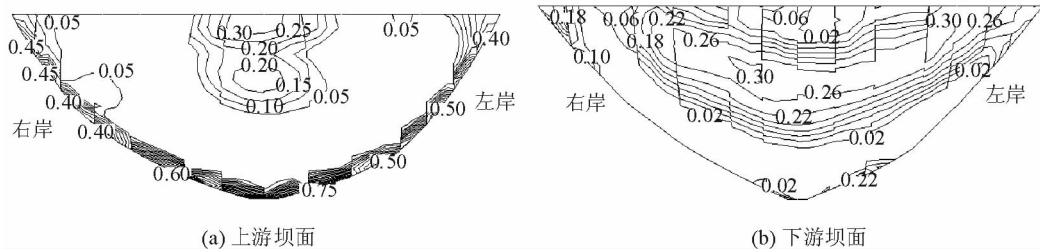
Fig. 2 Finite element model of arch dam

5 计算结果分析

依据前述材料参数,得到四参数 $A=0.0148$ 、 $B=0.1852$ 、 $C=0.7073$ 、 $D=0.2421$,断裂能 $G_f=336$,特征长度 $l_{ch}=1.056$ 。

图 3 给出了某拱坝在地震作用下上下游坝面的损伤等值线分布图。从图 3(a)可以看出,在靠近建基面附近损伤值较大,最大为 0.80,坝顶靠近拱冠梁附近损伤值最大为 0.34,其次在拱冠梁 1 060 m 高程附近,损伤值达到 0.23。从图 3(b)可以看出,下游坝面损伤最大值为 0.34,发生在坝体中上部 1 080 m 高程附近,其次是 1 050 m 高程至 1 060 m 高程附近,损伤值最大为 0.30。

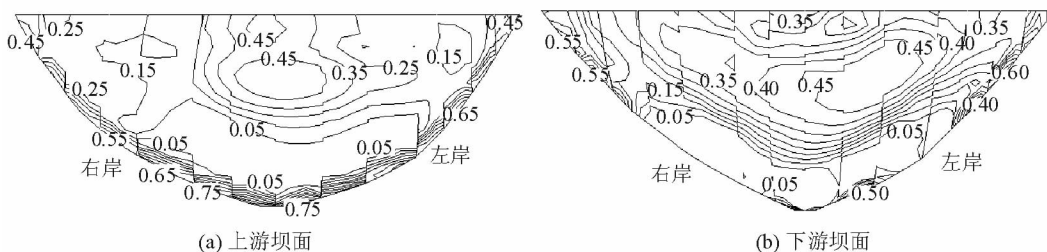
图 4~图 6 分别给出了超载 1.3 倍、1.5 倍和 2.0 倍地震峰值加速度时上下游坝面损伤等值线分布图,并将坝面损伤最大值及其分布范围列于表 3。



(a) 上游坝面 (b) 下游坝面

图 3 地震作用下坝面损伤等值线

Fig. 3 Damage contour of dam face under earthquake action



(a) 上游坝面 (b) 下游坝面

图 4 超载 1.3 倍地震峰值加速度时坝面损伤等值线

Fig. 4 Damage contour of dam face under overload 1.3 times of the peak seismic acceleration

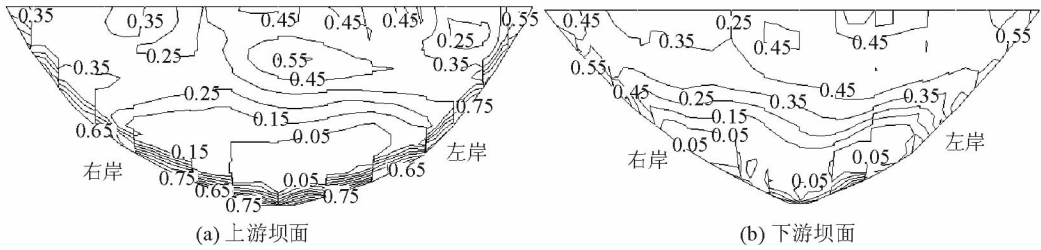


图5 超载1.5倍地震峰值加速度时坝面损伤等值线

Fig. 5 Damage contour of dam face under overload 1.5 times of the peak seismic acceleration

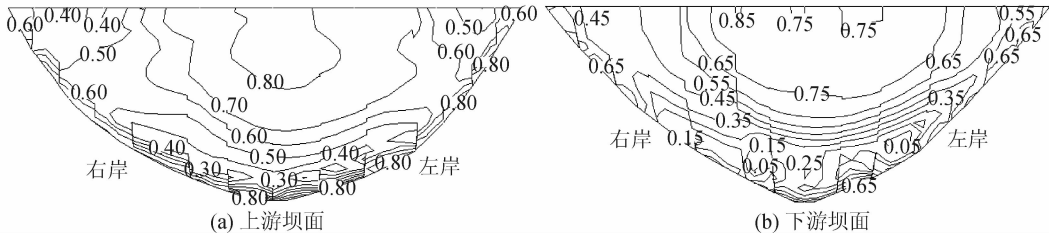


图6 超载2.0倍地震峰值加速度时坝面损伤等值线

Fig. 6 Damage contour of dam face under overload 2.0 times of the peak seismic acceleration

表3 不同超载倍数时坝面损伤最大值及其分布范围

Tab. 3 Maximum damage and distribution range of dam face under different overload ratio

超载倍数	上游面		下游面	
	损伤最大值	位置	损伤最大值	位置
1.3	0.84	左岸坝踵(▽935)	0.61	左岸坝肩(▽1070)
1.5	0.87	左岸坝踵(▽935)	0.65	左岸坝肩(▽1050)
2	0.9	左岸坝踵(▽945)	0.85	右侧坝顶

表3给出了不同超载倍数时上下游坝面损伤最大值及其位置。

超载1.3倍峰值加速度时,上游坝面损伤最大值为0.84,发生在左岸坝踵935 m高程处,其次在拱冠梁1 060 m高程附近达到0.53;下游坝面损伤最大值为0.61,发生在左岸坝肩1 070 m高程处,其次在坝体左侧1 060 m高程附近达到0.50。

超载1.5倍峰值加速度时,上游坝面损伤最大值为0.87,发生在左岸坝踵935 m高程处,其次在坝体中部靠近拱冠梁1 080 m高程处达到0.56;下游面损伤最大值为0.65,发生在1 050 m高程处,其次在左侧坝体1 070 m和1 100 m高程附近都达到了0.55。

超载2.0倍峰值加速度时,上游坝面损伤最大值为0.90,发生在左岸坝踵945 m高程处,其次在坝体中部靠近拱冠梁1 100 m高程处达到0.87,且上游面坝体大部分区域损伤值大于0.5;下游面损伤最大值为0.85,发生在右侧坝顶,其次在坝体中部1 070 m高程附近达到0.82,且下游面大部分区域损伤值大于0.5。

6 结 语

本文采用四参数损伤模型,对某高拱坝在1倍地震峰值加速度,超载1.3倍、1.5倍和2倍地震峰值加速度时的坝体损伤分别进行了计算。结果表明:在坝体靠近建基面附近损伤值较大,其次是坝体中上部;随着超载倍数的增加,坝体损伤值逐渐增大,较大值分布区域愈来愈大;从损伤分布范围来看,超载倍数为1.3和1.5时,坝体损伤最大值虽然达到了0.87,但总体损伤程度不大,坝体较安全,超载倍数为2.0时,坝体总体损伤程度已较大,已经偏于不安全。

参考文献:

- [1] 徐福卫, 田斌. 高拱坝裂缝成因分析 [J]. 湖北水力发电, 2005, (2): 14-17.
XU Fuwei, TIAN Bin. Analysis of contributing factors to cracks of high arch dam [J]. Hubei Water Power, 2005, (2): 14-17.
- [2] STEVEN W. Nonlinear analysis of Pacoima Dam with spatially nonuniform ground motion [D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2005.

- [3] 李静, 陈健云, 徐强, 等. 高拱坝抗震性能评价指标研究 [J]. 水利学报, 2015, 46(1): 118-124.
LI Jing, CHEN Jianyun, XU Qiang, et al. Study on index of seismic performance evaluation of arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (1): 118-124.
- [4] 林森. 地震动非均匀输入特性及沙牌拱坝抗震机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
LIN Sen. The study on the non-uniform ground motion input and seismic mechanism of Shapai arch dam [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [5] 林皋. 混凝土大坝抗震安全评价的发展趋向 [J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(1): 1-12.
LIN Gao. Developing tendency of the seismic safety evaluation of large concrete dams [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26 (1): 1-12.
- [6] 余志武, 吴玲玉, 单智. 混凝土确定性及随机性损伤本构模型研究进展 [J]. 工程力学, 2017, 34(9): 1-12.
YU Zhiwu, WU Lingyu, SHAN Zhi. Models for deterministic and stochastic damage constitutions of concrete: a short review [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 1-12.
- [7] 白卫峰, 孙胜男, 管俊峰, 等. 基于统计损伤理论的混凝土双轴拉-压本构模型研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(5): 873-885.
BAI Weifeng, SUN Shengnan, GUAN Junfeng, et al. Constitutive model for concrete under biaxial tension-compression stresses based on statistical damage theory [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23 (5): 873-885.
- [8] 韦未, 李同春, 姚纬明. 建立在应变空间上的混凝土四参数破坏准则 [J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(5): 27-29, 68.
WEI Wei, LI Tongchun, YAO Weiming. Four-parameter failure criterion for concrete in strain space [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(5): 27-29, 68.
- [9] 王志强, 吴晓彬, 万怡国. 基于损伤本构关系的高拱坝安全度评价方法 [J]. 南昌工程学院学报, 2014, 33(3): 6-9.
WANG Zhiqiang, WU Xiaobin, WAN Yiguo. Study on safety evaluation method for high arch dam based on damage constitutive relation [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2014, 33(3): 6-9.
- [10] 韦未. 拱坝开裂分析及拉应力控制方法研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
WEI Wei. Cracking analysis and tensile stress control method research for arch dam [D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [11] 韦未, 李同春. 一种新的用于各向同性损伤模型的四参数等效应变 [J]. 工程力学, 2005, 22(6): 91-96.
WEI Wei, LI Tongchun. A new four-parameter equivalent strain for isotropic damage model [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 91-96.
- [12] 李杰, 冯德成, 任晓丹, 等. 混凝土随机损伤本构关系工程参数标定与应用 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1099-1107.
LI Jie, FENG Decheng, REN Xiaodan, et al. Calibration and application of concrete stochastic damage model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(8): 1099-1107.
- [13] 胡少伟, 黄逸群. 混凝土轴拉加卸载随机损伤模型的建立与试验验证 [J]. 应用数学和力学, 2017, 38(6): 652-662.
HU Shaowei, HUANG Yiqun. A stochastic tensile damage model for loading/unloading of concrete and experimental validation [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(6): 652-662.
- [14] 徐童淋, 彭刚, 杨乃鑫, 等. 饱和混凝土循环荷载后动态抗压性能研究 [J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(4): 469-475.
XU Tonglin, PENG Gang, YANG Naixin, et al. Studies of the dynamic uniaxial compressive properties of saturated concrete after mechanical cyclic loading [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(4): 469-475.
- [15] HARIRI-ARDEBILI M A, KIANOUSH M R. Integrative seismic safety evaluation of a high concrete arch dam [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 67: 85-101.
- [16] LIN P, SHI J, ZHOU W Y, et al. 3D geomechanical model tests on asymmetric reinforcement and overall stability relating to the Jinping I super-high arch dam [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 102: 28-41.
- [17] PAN J W, XU Y J, JIN F. Seismic performance assessment of arch dams using incremental nonlinear dynamic analysis [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015, 19(3): 305-326.
- [18] MOHAMMAD A, MOHSEN G. Seismic performance evaluation of a jointed arch dam [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12(2): 256-274.
- [19] 张楚汉, 金峰, 王进廷, 等. 高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展 [J]. 水利学报, 2016, 47(3): 253-264.
ZHANG Chuhan, JIN Feng, WANG Jinting, et al. Key issues and developments on seismic safety evaluation of high concrete dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 253-264.
- [20] 陈厚群. 高混凝土坝抗震设计面临的挑战 [J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(2): 1-13, 49.
CHEN Houqun. Challenge confronted in seismic design of high concrete dams [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, 3(2): 1-13, 49.