

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220887

# 考虑混凝土损伤特性的拉西瓦拱坝破坏路径分析

费新峰, 武志刚, 马基栋, 李桂林

(国家电投集团青海黄河电力技术有限责任公司, 青海 西宁 810016)

**摘要:** 针对高拱坝破坏路径分析的问题, 当前数值模拟方法对坝体混凝土的拉压损伤特性仍考虑不足。为此, 采用混凝土塑性损伤(CDP)本构模型, 模拟分析了拉西瓦拱坝在静力超载、气温骤降及最大可信地震工况下的损伤破坏特性。结果表明, 超载工况下坝体主要以坝踵、岸坡坝基处的混凝土拉伸破坏为主, 并在形成损伤贯通区后失去承载力; 气温骤降工况下坝体混凝土在表孔及 1/4 拱坝顶、拱端及坝踵区域可能产生拉伸损伤; 地震工况下则主要以坝顶下游面表孔拱冠梁附近的拉伸破坏为主, 逐渐形成水平带状破坏区域而失去承载力。研究结果明确了拉西瓦拱坝可能出现的损伤特性及破坏路径, 为确定拉西瓦拱坝结构安全监测的关键部位提供了参考。

**关键词:** 拉西瓦拱坝; 混凝土损伤塑性; 超载破坏; 地震; 破坏路径

**中图分类号:** TV642.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0103-05

## 1 概况

拉西瓦水电站位于青海省贵德县与贵南县交界的黄河干流上, 水库正常蓄水位为 2 452 m, 总库容  $10.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 工程规模为 I 等大(1)型工程。水库大坝坝型为混凝土双曲薄拱坝, 坝顶高程 2 460 m, 最大坝高 250 m。研究其在高寒、强震运行环境下可能发生的破坏路径及损伤特性, 对于拉西瓦拱坝的运行安全与管理具有重要意义<sup>[1]</sup>。当前, 针对高拱坝超载及地震工况下数值模拟研究较多<sup>[2,3]</sup>, 但对结构破坏的判断多以单一的极限抗压、抗拉强度为主, 难以直观表现坝体不同区域混凝土的损伤程度及损伤演化过程, 对于高拱坝在多种不利工况下的破坏过程及破坏特征分析不够明确<sup>[4]</sup>。因此, 为分析高拱坝坝体混凝土在超载、温降及地震工况下可能发生的损伤破坏特性, 明确高拱坝在不同运行工况下可能出现的破坏路径, 本文基于混凝土的损伤塑性本构模型, 对拉西瓦高拱坝的静力超载、气温骤降及最大可信地震工况开展数值模拟研究, 分析总结了相应工况下坝体结构的拉压损伤特性及破坏路径, 以为类似工程实践提供参考。

## 2 计算原理

混凝土损伤塑性(CDP)模型可充分考虑坝体混凝土的拉压异性和刚度恢复效应<sup>[5]</sup>, 引入了拉伸损伤、压缩损伤及具有多个硬化变量的屈服函数, 以解释不同的损伤状态。该模型混凝土受拉本构关系的输入形式为  $\sigma_t - \epsilon_t^{\text{ck}}$ , 其中开裂应变  $\epsilon_t^{\text{ck}}$  的表达式为:

$$\epsilon_t^{\text{ck}} = \epsilon_t^{\text{pl}} + \frac{d_t \sigma_t}{(1 - d_t) E_0} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_t^{\text{pl}}$  为塑性应变;  $d_t$  为受拉损伤因子;  $\sigma_t$  为单轴应力;  $E_0$  为初始弹性模量。

受压本构关系的输入形式为  $\delta_c - \epsilon_c^{\text{in}}$ , 其中非弹性应变  $\epsilon_c^{\text{in}}$  的计算公式为:

$$\epsilon_c^{\text{in}} = \epsilon_c^{\text{pl}} + \frac{d_c \sigma_c}{(1 - d_c) E_0} \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_c^{\text{pl}}$  为塑性应变;  $\sigma_c$  为单轴应力;  $d_c$  为受压损伤因子。

相应的, CDP 本构下混凝土单轴应力-应变曲线公式为:

$$\begin{cases} \sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \epsilon_t^{\text{pl}}) & \text{受拉} \\ \sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \epsilon_c^{\text{pl}}) & \text{受压} \end{cases} \quad (3)$$

## 3 有限元计算模型

### 3.1 模型构建

拉西瓦拱坝有限元计算模型包括坝体及山体

收稿日期: 2022-04-30, 修回日期: 2022-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809212)

作者简介: 费新峰(1971-), 男, 高级工程师, 研究方向为大坝安全监测, E-mail: xilijdy@163.com

部分,模型范围为上下游及左右岸分别延伸 1.5 倍坝高。坐标系原点设在拱冠梁剖面上游建基面,顺河向向下游为  $y$  轴正方向,横河向向左岸为  $x$  轴正方向,竖直向上为  $z$  轴正方向。如图 1 所示,模型包含 20 394 个单元,其中六面体单元 14 530 个,楔形单元 5 864 个。坝体部分包含单元 15 248 个,节点数 18 434 个。

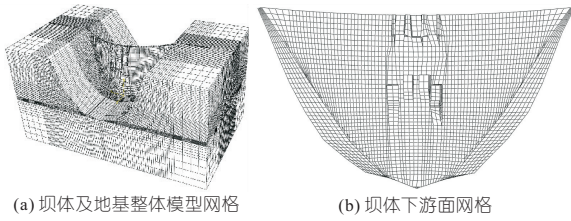


图 1 拉西瓦拱坝有限元计算模型

Fig. 1 Finite element calculation model of Laxiwa arch dam

### 3.2 计算参数

根据设计资料中坝体混凝土标号及两岸岩体的力学试验资料<sup>[1]</sup>,确定有限元计算参数见表 1。其中坝体混凝土视为均质材料,基岩根据不同高程地质力学试验弹性模量取值不同。

表 1 拉西瓦拱坝有限元模型计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of finite element model of Laxiwa arch dam

计算参数	取值
坝体混凝土弹模/GPa	30.000
坝体混凝土容重/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 450.000
坝体混凝土泊松比	0.167
2 210~2 320 m 基岩弹模/GPa	26.030
2 320~2 400 m 基岩弹模/GPa	24.050
2 400~2 460 m 基岩弹模/GPa	16.080
基岩容重/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 690.000
基岩泊松比	0.230

坝体混凝土的 CDP 模型中膨胀角  $\psi$  为  $30^\circ$ ,偏心率为 0.100 m,双轴与单轴极限抗压强度比值  $\alpha$  为 1.160,应力比  $k$  为 0.667,黏性参数  $\mu$  为 0.005。

结合式(3),参考《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)<sup>[6]</sup>中不同标号混凝土的拉压应力、损伤—应变本构关系的参数确定方法,可得到 C30 坝体混凝土 CDP 模型拉压应力、损伤—应变曲线,见图 2。

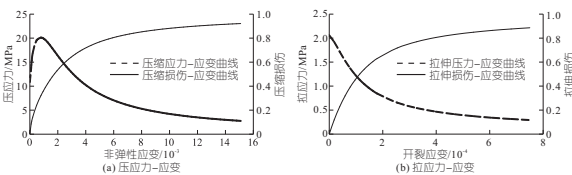


图 2 拉西瓦拱坝混凝土 CDP 模型拉压曲线

Fig. 2 Tensile-compression curve of concrete CDP model of Laxiwa arch dam

由图 2 可知,初始阶段为弹性阶段,此阶段不会产生拉伸损伤,弹性模量为初始弹性模量;当应力超过弹性极限应力后,进入软化阶段,混凝土材料内部形成微裂缝,产生一定的拉伸或压缩损伤。

### 3.3 模拟工况

超载破坏分析时采用超重度方法作为超载方式,通过逐渐增加水重度来改变坝体所受的超荷载。为较全面地分析拉西瓦拱坝的渐进破坏特征,共选取 1~9 倍的水重度作为超载法计算工况。气温骤降工况主要根据拉西瓦地区的气温骤降统计资料选定了 3 种工况分别为 1 d 内最大温降  $8.5^\circ\text{C}$ 、2 d 内最大温降  $14.1^\circ\text{C}$  及 3 d 内最大温降  $14.5^\circ\text{C}$ 。动力工况计算时,模型所施加荷载主要以水压及自重荷载为主,模型底部边界为固定边界,四周为法向约束。对于最大可信地震工况而言,其百年超越概率 1% 的设计反应谱见图 3,地震震级  $M=6.9$ ,震中距为 17 km,结构自振周期为 3.0 s。依据该反应谱生成 3 条不同方向的地震波,其水平向基岩峰值加速度为  $0.316g$ ,竖向峰值加速度取水平向的  $2/3$ ,见图 4。采用时程分析方法,先进行静力状态下的水压、泥沙、自重及降温荷载计算,然后施加地基边界上的地震波,采用无质量地基,其中动水压力采用附加质量单元予以考虑。阻尼比  $\xi=0.05$ ,根据满库工况下的前 5 阶自振特性计算得到模型的瑞利阻尼  $\alpha=0.5047, \beta=0.0045$ 。

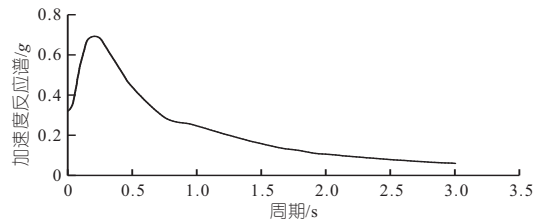


图 3 拉西瓦坝址设定地震加速度反应谱

Fig. 3 Seismic acceleration response spectrum for Laxiwa dam site

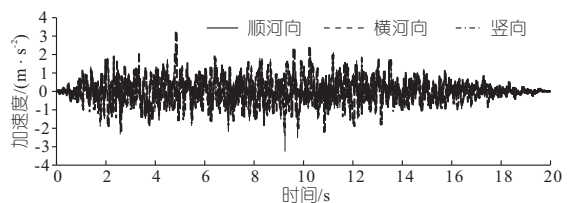


图 4 拉西瓦拱坝人工合成三向地震波

Fig. 4 Synthesis of three-way seismic waves for Laxiwa arch dam

## 4 计算结果分析

### 4.1 静力超载工况

图 5 为坝体等效塑性应变屈服区域变化特征。由图 5 可知,当  $K=1\sim 2$  时,拉西瓦拱坝存在小部分塑性应变区域,主要位于坝踵及靠近岸坡坝基附近。当  $K=2\sim 3$  时,水压荷载的增大使坝体下游面塑性屈服区域由岸坡坝基面逐渐向外扩展,且下游面两岸岸坡坝基处屈服区域并未在下游面坝趾处连通。此外,该加载阶段,坝体上游面表孔至中孔区域出现塑性屈服,同时坝踵向左右岸坝基逐渐形成延伸的屈服区域,且坝踵至坝趾处屈服区域并未连通。当  $K=4\sim 6$  时,随着荷载增大,坝体等效塑性应变屈服区域逐渐向两岸岸坡发展。 $K=6$  时,坝体下游面两岸坝基屈服区域进一步向外扩展,两岸屈服区域在坝趾处形成连通,此时上游面屈服区域在坝顶表孔处逐渐闭合,同时坝踵处屈服区域进一步向两岸扩展,且坝踵与坝趾处开始形成贯通的屈服区域。当  $K=7\sim 9$  时,坝体上游面原有屈服区域开始逐渐向两岸扩展,同时下游面岸坡坝基屈服区域逐渐扩展至上游,坝踵与坝趾贯穿的屈服区域进一步向两岸扩展,随着荷载的增加,坝体上游面屈服区域与下游面区域逐渐在岸坡坝基附近贯通。当  $K=9$  时,坝体底部及岸坡处建基面几乎全部贯通,坝体已失去承载力。

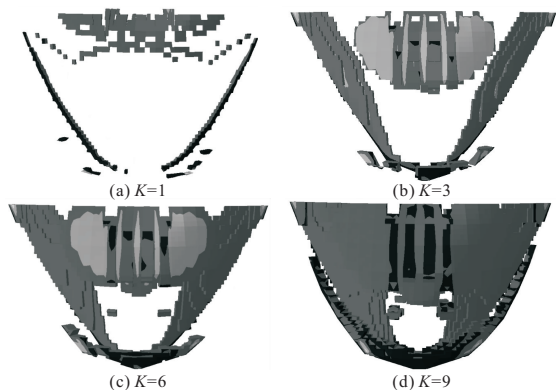


图 5 不同超重度系数  $K$  下的坝体等效塑性应变屈服区  
Fig. 5 Equivalent plastic strain yield zone of dam body with different overload coefficients

图 6 为不同超重度系数下建基面的拉伸损伤特征。根据混凝土 CDP 本构及相关文献<sup>[7]</sup>,将拉伸损伤因子大于 0.6 的单元视为破坏。当  $K=1$  时,坝体建基面损伤分布在上游面坝踵小部分区域,且损伤因子范围为 0.12~0.23。当  $K=2$  时,上游坝踵区域拉伸损伤逐渐向下游面及两岸岸坡处扩展,此时损伤因子范围为 0.28~0.33。当  $K=3\sim 6$  时,坝踵区域拉伸损伤进一步扩展,且坝基上游面均存在一定损伤,最大损伤因子达

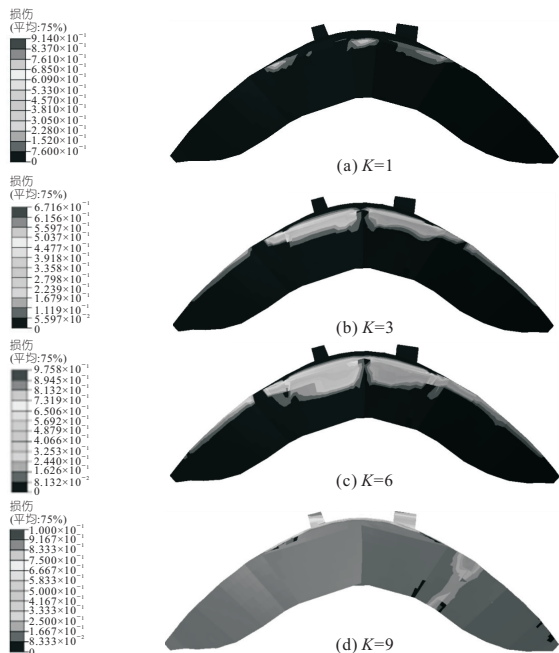


图 6 不同超重度系数下建基面的拉伸损伤特征  
Fig. 6 Tensile damage characteristics of foundation surfaces with different overload coefficients

0.65,此时坝基面将形成贯通拉裂。当  $K=7$  时,坝踵区域及坝体两岸岸坡中上部坝基面存在整体贯通性拉伸损伤,拉伸损伤因子达 0.83。当  $K=8$  时,坝踵与坝趾区域整体拉裂。当  $K=9$  时,整个建基面均产生拉伸损伤,且贯穿上下游面,此时坝体失去承载力,坝体拉伸损伤变化过程与屈服区域的变化特征基本一致。

根据屈服区域及建基面拉伸损伤特征,可将拉西瓦拱坝在超载工况下的破坏路径总结为当坝体受到超正常荷载时,先在上游坝踵、岸坡坝基附近及上游坝顶表孔、中孔区域开始出现接近于贯通的拉应力区,随着荷载的进一步增加,超越拉伸极限的拉应力进入屈服阶段使该区域混凝土承载力大幅减弱,同时相对增加了周围混凝土的抗力,使该区域混凝土更易进入屈服阶段,因此荷载的增加会使屈服区域在原分布区域逐渐扩展,部分混凝土已产生损伤;随着荷载进一步增大,沿坝踵、坝趾及岸坡坝基处的混凝土屈服域开始沿建基面及上下游面部分区域形成贯通,此时坝体混凝土基本达到极限承载能力,伴随着贯通区域拉伸损伤的增加,坝体失去承载力。

### 4.2 气温骤降工况

拱坝在低温环境时坝体拱圈往下游方向收缩,坝体下游面产生一定拉应力,因此对气温骤降工况主要以下游面拉应力及损伤特性分析为主<sup>[8]</sup>。由于 3 种气温骤降工况下的拉应力区及损伤区域分布基本一致,仅展示 3 d 内气温骤降

14.5 °C 的计算结果,见图 7。由图 7(a)可知,3 d 型气温骤降工况下坝体最大拉应力达 1.061 MPa,高于 1 d 型气温骤降工况的 1.021 MPa 和 2 d 型气温骤降工况的 1.048 MPa,3 种工况的坝体拉应力区均主要分布在表孔下游面、坝踵及拱端附近区域。由图 7(b)可知,对于 3 d 型气温骤降工况,除各泄流孔出现损伤区域外,坝体其余部位损伤因子均较小,基本位于 0~0.298 之间,该工况相较于 1、2 d 型气温骤降工况,坝体损伤因子稍有增加,但总体损伤区域的分布基本不变,呈现出温度骤降值越大拉应力越大,拉伸损伤程度越高的特点。

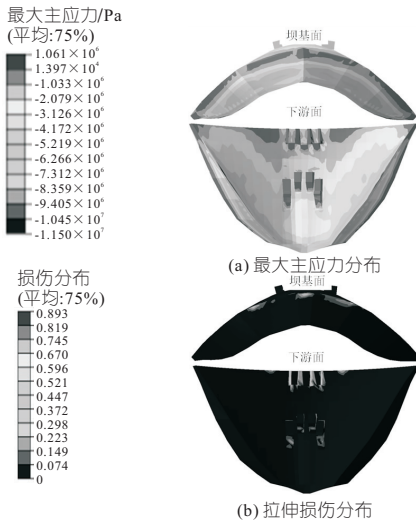


图 7 3 d 型气温骤降工况下的最大主应力及拉伸损伤分布  
Fig. 7 Distribution of maximum principal stress and tensile damage under three-day temperature slump condition

### 4.3 最大可信地震工况

#### 4.3.1 拉伸损伤分析

为更显著反映坝体混凝土的损伤破坏,将拉伸损伤因子大于 0.6 的单元视为破坏并剔除,得

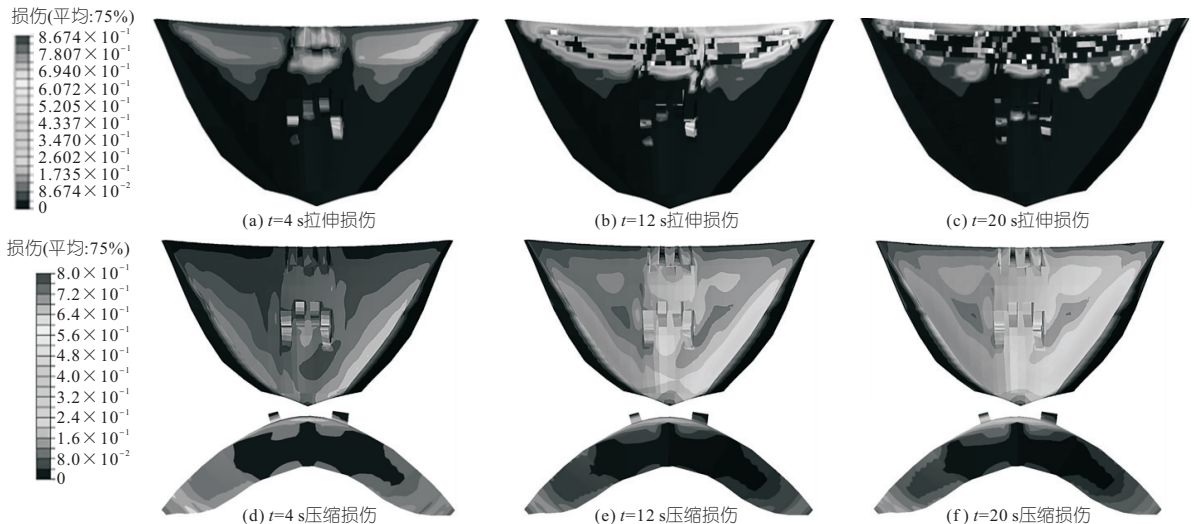


图 8 拉西瓦拱坝地震工况下拉伸损伤及压缩损伤

Fig. 8 Tensile damage and compression damage distribution of Laxiwa arch dam under seismic condition

到坝体损伤发展过程见图 8(a)~(c)。在地震波发生 4 s 时,坝体混凝土未发生拉伸破坏,虽然整体拉伸损伤因子均小于 0.6,但并不代表坝体结构绝对安全,坝顶表孔区域及靠近表孔坝段的坝顶部位出现较为集中的损伤分布,此时该区域出现拉伸塑性,但并未宏观破坏。当地震波发生至 8 s 时,下游面坝体表孔及左岸靠近拱端处出现损伤因子大于 0.6 的小部分区域,随着地震荷载加载至 10 s 时,坝体下游面表孔向左右岸拱端呈现贯穿性破坏,此时下游面坝顶区域混凝土基本已拉伸开裂。当  $t = 12$  s 时,坝体坝顶高程区域混凝土继续扩展破坏,坝体上游面损伤特征进一步明确,左右岸靠近拱端处已出现贯穿上下游的损伤破坏。随着地震荷载进一步作用,坝体下游面顶部区域混凝土拉伸破坏向左右岸拱端附近进一步扩展,同时左右岸拱端区域上下游面混凝土贯穿性破坏进一步扩大。最终  $t = 20$  s 时,坝体下游面坝顶区域已完全破坏,且上游面已形成贯穿性的水平破坏区。

根据损伤特性的模拟结果,参考大连理工大学室内动力模型试验拉西瓦拱坝最终破坏形态<sup>[2]</sup>,所得坝体损伤特性与该试验坝体最终破坏形式基本吻合,均为拉伸破坏由表孔拱冠梁附近逐渐扩展至坝顶附近区域的两岸拱端,形成水平带状破坏区域,并失去承载力。证明了采用 CDP 本构模型模拟拉西瓦拱坝地震损伤结果的可靠性。

#### 4.3.2 压缩损伤分析

图 8(d)~(f)为坝体压缩损伤分布。由图 8(d)~(f)可知,坝体下游面地震工况下压缩损伤区域起始于岸坡坝基附近,该区域最大压缩损伤因子随着地震波的输入,由  $t = 4$  s 的 0.20 逐渐

增加至  $t=20$  s 的 0.48 左右,损伤区域由岸坡坝基逐渐扩展至下游面中孔及底孔附近,逐渐贯通岸坡坝基与坝趾,但整体下游面并无宏观压缩破坏。此外,地震工况下坝基处的压缩损伤主要存在于两岸拱端区域,可明显看出该区域随着地震的发生有逐渐向中下部高程的岸坡坝基发展的趋势,最终其损伤因子基本位于 0.26~0.30 之间,并未发生明显破坏。

## 5 结论

a. 静力超载工况下,随着超载系数增加,坝体产生超越拉伸极限的拉应力,形成拉伸损伤,坝体混凝土塑性区迅速增加,伴随着拉伸损伤区域的贯通,坝体失去承载力。

b. 气温骤降工况下,坝体混凝土在下游面坝体表孔附近、拱端及上游面坝踵区域可能发生拉应力损伤破坏,在更极端温降运行条件下易形成多区域拉伸破坏的整体失稳。

c. 地震工况下,以坝顶下游面表孔拱冠梁附近的拉伸破坏为主,随着地震的发生,拉伸破坏逐渐扩展至坝顶附近区域的两岸拱端,形成水平带

状破坏区域,此时拱坝已失去承载力,而压缩损伤为次要破坏。

### 参考文献:

- [1] 姚栓喜,李蒲健,雷丽萍. 拉西瓦水电站混凝土双曲拱坝设计[J]. 水力发电,2007(11):30-33.
- [2] 范书立,陈健云. 高拱坝振动台地震破坏试验研究及数值仿真[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3):467-474.
- [3] 林聪,杨强,王海波,等. 基于非线性有限元的孟底沟拱坝数值模拟研究[J]. 岩土力学,2016,37(9):2624-2630.
- [4] 赖长江,赵兰浩. 高拱坝与地基体系损伤破坏分析[J]. 水电能源科学,2016,34(10):36-39,51.
- [5] LEE J, FENVES L G. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of engineering mechanics,1998,124(3):892-900.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB50010-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [7] 杜玉涛,朱彤. 基于无限元边界模型的高拱坝损伤开裂数值分析[J]. 人民长江,2019,50(9):175-179,213.
- [8] 廖欣,包腾飞,朱茜,等. 构皮滩拱坝温度荷载反馈分析方法研究[J]. 水电能源科学,2019,37(4):80-83.

## Failure Path Analysis of Laxiwa Arch Dam Considering Concrete Damage Characteristics

FEI Xin-feng, WU Zhi-gang, MA Ji-dong, LI Gui-lin

(State Power Investment Corporation Qinghai Yellow River Electric Power Technology Co., Ltd., Xining 810016, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of failure path analysis of high arch dams, the current numerical simulation methods still do not take into account the tensile and compressive damage characteristics of dam concrete. Therefore, the concrete damaged plasticity (CDP) constitutive model was used to analyze the damage and failure characteristics of the Laxiwa arch dam under the conditions of static overload, sudden temperature drop and maximum credible earthquake. The results show that the dam body mainly suffers from the tensile failure of concrete at the dam heel and bank slope dam foundation under overload conditions, and loses its bearing capacity after the damage penetration zone is formed; Under the condition of sudden temperature drop, the concrete of the dam body may cause tensile damage in the surface hole and the 1/4 arch dam crest, arch end and dam heel area; While under the earthquake condition, the surface hole near the crown beam of the dam crest downstream surface is mainly used for tensile damage. Tensile failure is dominant, and a horizontal band-shaped failure area is gradually formed and the bearing capacity is lost. The research results clarified the possible damage characteristics and failure paths of the Laxiwa arch dam, and provided a reference for determining the key parts of the Laxiwa arch dam structural safety monitoring analysis.

**Key words:** Laxiwa arch dam; concrete damage plasticity; overload failure; earthquake; damage course