

# 基于化学 - 力学耦合损伤的高拱坝地震响应分析

杨景文<sup>\*</sup>, 王欢

中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东, 广州 510610

DOI:10.61369/WCEST.2025080017

**摘要 :** 通过引入孔隙率和损伤参数, 构建耦合化学 - 力学的混凝土损伤分析模型, 同时结合某高拱坝工程, 对比分析了不同运行期下的地震响应。计算结果表明: 与建成时相比, 运行 25、50、100 年后地震作用下坝顶位移极值向上游分别增加 7.43%、15.5%、23.3%, 向下游分别增加 7.07%、14.3%、19.6%; 上游面由于混凝土刚度退化, 地震反应剧烈程度减小, 峰值拉应力分别下降 4.46%、9.75%、17.27%; 拱冠梁塑性区范围明显扩大, 塑性应变水平增加; 说明随着运行年限增加拱坝的抗震安全性是下降的, 在实际工程设计中应注重提高坝体上游面混凝土强度和抗渗等性能。

**关键词 :** 化学 - 力学耦合; 地震响应; 高拱坝; 损伤

## Seismic Response Analysis of High Arch Dam Based on Coupled Chemo-mechanical Damage

Yang Jingwen<sup>\*</sup>, Wang Huan

China Water the Pearl River Planning, Survey and Design Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510610

**Abstract :** A coupled chemical-mechanical concrete damage analysis model is constructed by introducing porosity and damage parameters. Meanwhile, combining with a high arch dam project, the seismic responses under different operation periods are comparatively analyzed. The calculation results show that compared with the completion time, the maximum displacement of the dam crest under seismic action increase by 7.43%, 15.5%, and 23.3% upstream and 7.07%, 14.3%, and 19.6% downstream after 25, 50, and 100 years of operation, respectively; due to the degradation of concrete stiffness on the upstream side, the intensity of seismic response decreases, and the peak tensile stress decreases by 4.46%, 9.75%, and 17.27%, respectively; The plastic zone of the arch crown beam expands significantly, and the level of plastic strain increases. This indicates that the seismic safety of arch dams decreases with the increase of operation years, in practical engineering design, attention should be paid to improving the strength and impermeability of the concrete on the upstream face of the dam body.

**Keywords :** chemistry-mechanics coupling; seismic response; high arch dam; damage

## 引言

近 20 年来我国先后建成了许多达到 300m 级的拱坝, 例如溪洛渡、小湾、锦屏、乌东德、白鹤滩, 这些高拱坝的共同特点是处于我国地震活动频繁且烈度高的西南地区, 一旦发生溃坝灾变, 后果将不堪设想<sup>[1]</sup>。国内众多的研究人员在坝基 - 水库动力相互作用、地基辐射阻尼、非均匀地震输入和水库压缩性效应等<sup>[2-3]</sup>多方面取得了实质性进展, 但是以上的地震安全研究中未考虑长期复杂水环境影响作用下化学侵蚀造成混凝土退化对坝体抗震性能的影响。

引起混凝土材料和耐久性退化的长期复杂化学侵蚀作用有: 钙溶蚀、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、冻融循环、碱集料反应和碳化等。混凝土作为一种以水泥基为基本骨架的多孔介质材料, 在多因素耦合作用下容易发生化学损伤。服役多年的大坝、水库混凝土和码头等建筑物, 受环境水作用的化学侵蚀较为普遍, 甚至一些服役较短时间的混凝土结构也出现了侵蚀现象<sup>[4]</sup>。通过对服役多年的多座大坝进行了调研, 结果发现, 丰满、古田溪、南告、新安江、梅山、云峰等混凝土坝体, 均存在不同程度的化学损伤问题。拱坝长期受高应力、高渗压作用, 其不仅存在化学损伤问题, 也存在力学损伤的问题, 混凝土单一化学损伤或力学损伤演化模型不能合理地描述荷载和环境因素耦合作用下混凝土的性能退化规律。高拱坝的规模大, 地震动力响应高, 设计合理使用年限长达 100 年甚至要求更长, 长期的化学侵蚀引起拱坝抗震安全性能下降的问题不容忽视。目前, 该方面的分析研究较少, 本文在现有学者对化学与力学对混凝土材料的耦合作用研究基础上, 结合某高拱坝为例, 开展了化学 - 力学耦合作用下的地震响应分析。

作者简介 (第一作者兼通讯作者): 杨景文 (1993-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事研究水工结构等工作。

## 一、耦合化学—力学的混凝土损伤模型

混凝土在长期服役期间，既有外荷载引起的力学损伤，又有化学侵蚀作用所引起的化学损伤。Kuhl等<sup>[5-6]</sup>通过总孔隙率来研究了混凝土的化学—力学的损伤，总孔隙率表达为：

$$\phi = \phi_0 + \phi_c + \phi_m \quad (1)$$

式中： $\phi_0$  为初始孔隙率， $\phi_c$  为化学作用引起的孔隙率变化值， $\phi_m$  为力学损伤对应的孔隙率变化值。

化学作用引起孔隙率增加随时间是个不断累积过程，本文引入退化因子表征化学作用孔隙率的时间相关性， $\gamma=0$  表示新浇筑的混凝土， $\gamma=1$  表示完全退化的状态，退化过程的演变方程可表示为<sup>[21]</sup>：

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\tau_a} (1 - \gamma) \quad (2)$$

当  $\tau_a \rightarrow 0$  时  $\gamma=1$ ， $\tau_a \rightarrow \infty$  时  $\gamma \rightarrow 0$ ，通过积分变换可得到与时间相关的退化指标：

$$\gamma = 1 - e^{(-t/\tau_a)} \quad (3)$$

因此，化学作用引起的结构孔隙率变化用下式来表示：

$$\phi_c = \phi_{c\max} \left[ 1 - e^{(-t/\tau_a)} \right] \quad (4)$$

式中： $\phi_{c\max}$  为化学作用下完全退化的最大孔隙率值； $\tau_a$  为特征时间量，可取结构的设计使用年限。

力学损伤对应的孔隙率  $\phi_m$  是由于外荷载作用下混凝土微裂纹和微小孔隙数量发生变化所引起的，由 Kuhl<sup>[5]</sup>推导用下式来表示：

$$\phi_m = (1 - \phi_0 - \phi_c) d_m \quad (5)$$

式中： $d_m$  为代表力学损伤量的标量损伤参数。

$d_m$  与加载相关，分受拉、受压行为描述力学荷载作用引起的混凝土力学损伤演化规律，受拉行为的损伤参数  $d_{mt}$  演化可以用下式来确定<sup>[9]</sup>：

$$d_{mt} = \begin{cases} 1 - \rho_t \left( 1.2 - 0.2 \left( \varepsilon / \varepsilon_{t,r} \right)^5 \right) & \text{if } \left( \varepsilon / \varepsilon_{t,r} \right) \leq 1 \\ 1 - \frac{1}{\alpha_t \left( \varepsilon / \varepsilon_{t,r} - 1 \right)^{1.7} + \varepsilon / \varepsilon_{t,r}} & \text{if } \left( \varepsilon / \varepsilon_{t,r} \right) > 1 \end{cases} \quad (6)$$

受压行为的损伤参数  $d_{mc}$  演化可以用下式来确定：

$$d_{mc} = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + \left( \varepsilon / \varepsilon_{c,r} \right)^n} & \text{if } \left( \varepsilon / \varepsilon_{c,r} \right) \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c \left( \varepsilon / \varepsilon_{c,r} - 1 \right)^2 + \varepsilon / \varepsilon_{c,r}} & \text{if } \left( \varepsilon / \varepsilon_{c,r} \right) > 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中： $\rho_t = f_{t,r} / (E \cdot \varepsilon_{t,r})$ 、 $\rho_c = f_{c,r} / (E \cdot \varepsilon_{c,r})$

式中： $d_{mt}$ 、 $d_{mc}$  分别为受拉、受压损伤演化参数； $\alpha_t$ 、 $\alpha_c$  分别为混凝土单轴受拉、受压应力—应变曲线下降段控制参数； $f_{t,r}$ 、 $f_{c,r}$  分别为混凝土单轴抗拉强度、抗压强度代表值； $\varepsilon_{t,r}$ 、 $\varepsilon_{c,r}$  分别为混凝土峰值拉应变、峰值压应变。

故损伤后的混凝土骨架有效体积率可以表述为：

$$1 - \phi = (1 - \phi_0 - \phi_c)(1 - d_m) \quad (8)$$

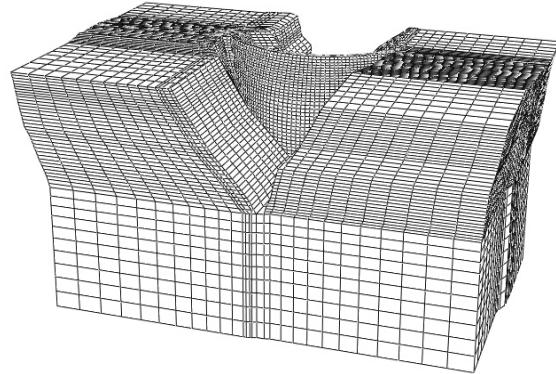
基于损伤变量与孔隙率的面积折减率等效的概念，耦合化学—力学混凝土损伤的应力应变关系表示为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E : (\varepsilon - \varepsilon_p) \\ E &= [(1 - \phi_0 - \phi_c)(1 - d_m)] E_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

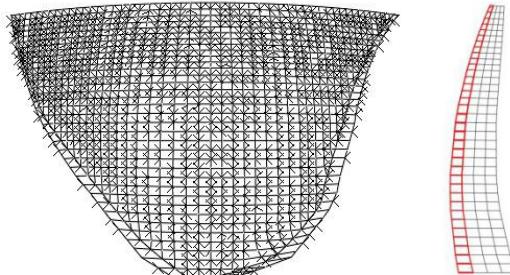
## 二、地震动力响应分析

### (一) 模型与参数

某拱坝最大坝高305m，坝顶弧长552.25m，坝顶宽度16m，坝底厚度63m。有限元模型计算范围：以拱坝中心线为基准，坝顶原点为基准，向上、下游方向各取750m，左右岸方向各取900m，建基面以下取了700m，忽略地基的惯性和阻尼效应，假定为无质量刚性地基。动水压力采用附加质量法模拟。



(a) 拱坝整体有限元模型  
(a) Overall finite element model of arch dam



(b) 坝体有限元模型（× 为附加质量的单元、红色部分表示耦合损伤区域）  
(b) Finite element model of dam (× elements with additional mass, red part represents coupled damage area)

图1 有限元模型

Fig1 finite element model

拱坝上游面长期与水接触，参考文献<sup>[10]</sup>，耦合损伤区域仅限于上游表面。考虑混凝土动态强度的标准值可较其静态标准值提高20%，在初始状态即拱坝刚建成时，坝体弹性模量38.19GPa，泊松比0.167，重度24.0kN/m<sup>3</sup>，初始孔隙率选 $\phi_0=0.05$ 。对于化学损伤的孔隙率 $\phi_c$ 在缺少实际数据下，其变化较难确定的，参考文献<sup>[10]</sup>，认为化学侵蚀引起的最大孔隙率 $\phi_{c\max}=0.32$ ，则运行100年时 $\phi_c=0.20$ 。混凝土的抗拉、抗压强度与弹性模量之间存在正相关的关系，本文取混凝土的强度与弹性模量的平方根成正比关系。

表1 拱坝上游面的材料参数

Tab.1 Material parameters of the upstream face of the arch dam

运行年限 (年)	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
建成	3.22	32.16	38.19
25	3.09	30.94	35.34
50	3.00	29.95	33.13
100	2.85	28.53	30.06

不同运行期拱坝耦合损伤区的应力应变关系曲线如图2所示，曲线明显出现软化，混凝土峰值抗拉强度和抗压强度降低。

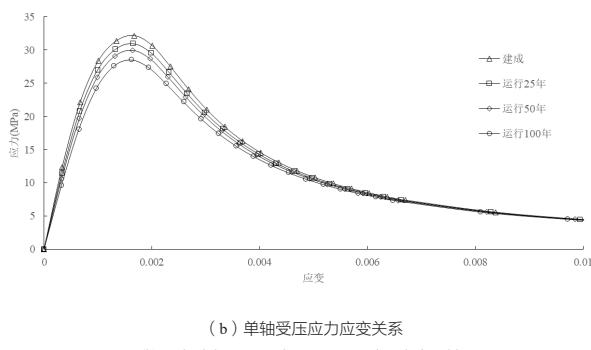
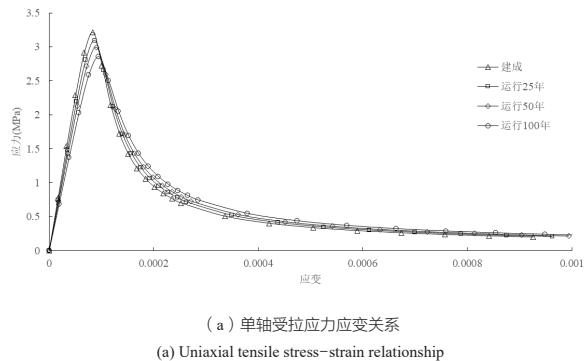


图2 不同运行期混凝土的应力应变关系曲线

Fig3 Stress strain relationship curve of concrete at different operating periods

地震烈度为Ⅷ度，通过标准反应谱生成的地震的时程曲线见图3，地震持时25s，顺河向和横河向的地震峰值加速度为0.2g，竖直向的地震峰值加速度为0.167g。

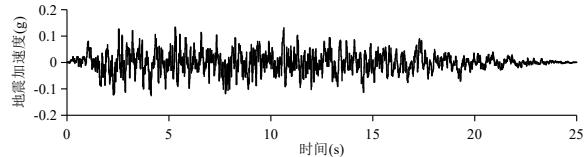
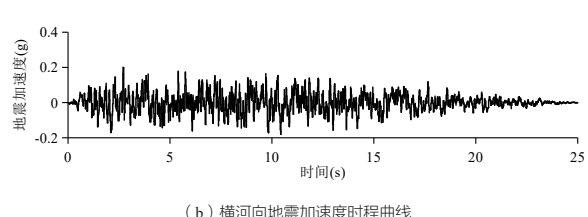
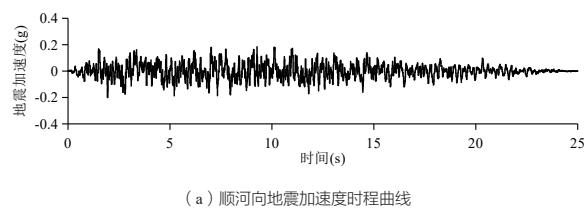


图3 地震加速度时程曲线

Fig4 Seismic acceleration time history curve

## (二) 结果及分析

### 1. 动态位移

不同运行期拱坝向上游发生极值位移时刻在地震11.4s左右，向下游的发生极值位移时刻在地震3.2s左右，随着运行年限增加，坝体位移极值增加。由于拱坝坝体非对称，位移极值位置发生在坝中心偏左侧位置。不同运行期向上游的坝顶位移极值分别为59.2mm、63.6mm、68.4mm、73.0mm，与建成时相比，运行25、50、100年分别增加7.43%、15.5%、23.3%；拱冠梁向上游的位移曲线呈现中下部向下游变位，中上部向上游变位。向下游的坝顶位移极值分别为131.5mm、140.8mm、150.3mm、157.3mm，与建成时相比，运行25、50、100年分别增加7.07%、14.3%、19.6%。分析其原因是上游面坝体材料退化导致混凝土的刚度减小，柔性增大，地震动力作用下坝体摆动幅值增大。

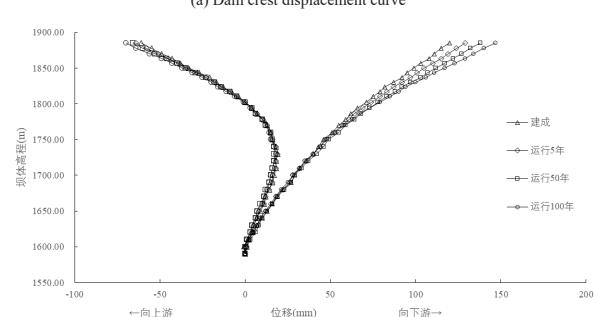
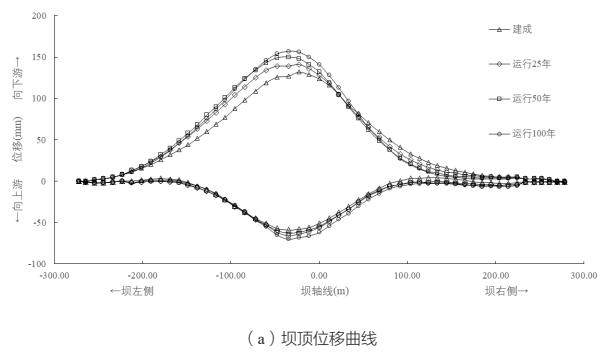


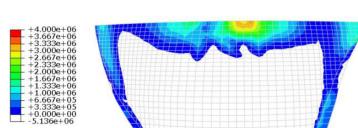
图4 最大位移时刻拱坝的位移曲线

Fig5 Displacement curve of arch dam at maximum displacement moment

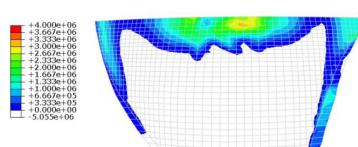
### 2. 上游面拉应力

不同运行期拱坝上游面发生峰值应力时刻在5.1s左右，如图5所示，灰色区为受压区，彩色区为受拉区，应力的分布规律基本类似，拉应力集中发生在坝体的上部三分之一以及坝肩两岸

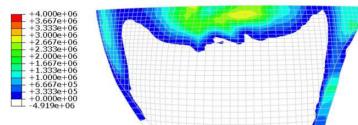
部位，说明拱坝顶部和坝肩区域是地震危险区域，容易发生拉伸破坏。坝体上游面最大拉应力极值分别为 $3.59\text{ MPa}$ 、 $3.43\text{ MPa}$ 、 $3.24\text{ MPa}$ 、 $2.97\text{ MPa}$ ，峰值应力是呈下降趋势，与建成时相比，运行25、50、100年分别下降4.46%、9.75%、17.27%。分析原因是混凝土刚度的降低使得地震作用下能量耗散更均匀，反应剧烈程度减小。



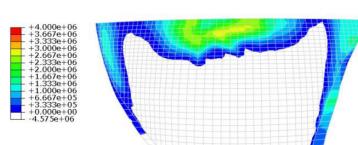
(a) 建成时  
(a) Completion period



(b) 运行25年  
(b) Running for 25 years



(c) 运行50年  
(c) Running for 50 years



(d) 运行100年  
(d) Running for 100 years

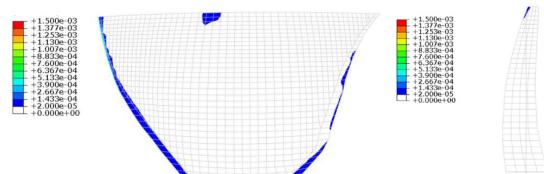
图5 最大拉应力时刻坝体应力分布

Fig6 Stress distribution of the dam body at the moment of maximum tensile stress

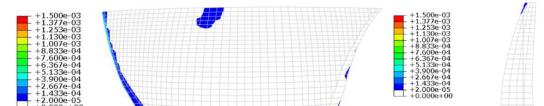
### 3. 塑性应变

坝体上游面都是率先在拱冠梁顶部附近出现塑性区，随着运行年限增加，地震作用下的塑性区向下扩大。上游面最大塑性应变值分别为 $0.04\text{E-}3$ 、 $0.09\text{E-}3$ 、 $0.67\text{E-}3$ 、 $1.48\text{E-}3$ 。拱坝建成时和运行25年时，仅在坝顶偏左侧位置出现局部塑性区，塑性变形水平极低，抗震能力较好。运行50年后地震作用下的上下游面塑性区均有所扩大，但水平仍较低。而当运行100年后，拱冠梁

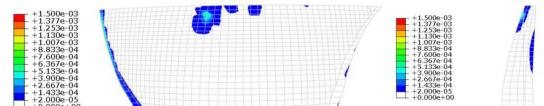
顶部上游面和下游面均出现了更大范围的塑性区和更高的塑性应变值，说明抗震能力下降较多，拱冠梁顶部易开裂，影响拱坝的运行安全。



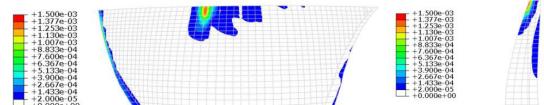
(a) 运行0年  
(a) Completion period



(b) 运行25年  
(b) Running for 25 years



(c) 运行50年  
(c) Running for 50 years



(d) 运行100年  
(d) Running for 100 years

图6 塑性应变分布

Fig6 Plastic strain distribution

## 三、结论

本文构建耦合化学—力学损伤的模型来模拟混凝土的退化作用，对不同运行期的拱坝进行地震响应分析，得出以下结论：a. 在化学侵蚀影响下，拱坝上游面的混凝土弹性模量退化，峰值抗拉强度和抗压强度降低，削弱了拱坝有效承载能力。b. 长期运行的高拱坝地震响应发生了明显变化，动态位移和塑性应变增加、上游面峰值拉应力下降，运行初期拱坝具有较好的抗震性能，但随着化学侵蚀的影响期抗震性能不断降低，尤其注意拱冠梁顶部是最薄弱位置。

## 参考文献

[1] 陈灯红, 胡昊文. 基于随机比例边界有限元法的高混凝土坝地震响应不确定量化分析 [J]. 工程力学, 2024.

- [2]周维垣，杨若琼，刺公瑞.高拱坝的有限元分析方法和设计判据研究[J].水利学报，1997(8).
- [3]潘坚文，王进廷，张楚汉.超强地震作用下拱坝的损伤开裂分析[J].水利学报，2007(2).
- [4]邢林生，聂广明.混凝土坝坝体溶蚀病害及治理[J].水力发电，2003(11): 60–63.
- [5]Kuhl D, Bangert F, Meschke G. Coupled chemo-mechanical deterioration of cementitious materials. Part I : Modeling[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(1): 15–40.
- [6]Kuhl D, Bangert F, Meschke G. Coupled chemo-mechanical deterioration of cementitious materials. Part II : Numerical methods and simulations[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(1): 41–67.
- [7]张研，张子明，邵建富.混凝土化学-力学损伤本构模型[J].工程力学，2006, 23(9): 153–156.
- [8]Nguyen V H, Colina H, Torrenti J M, et al. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete: Part I: Experimental results[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(20): 2083–2089.
- [9]中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范：GB 50010–2012[S].北京：中国建筑工业出版社，2010.
- [10]Wang J T, Jin F, Zhang C H. Seismic safety of arch dams with aging effects[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(3): 522–530.