

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2572

基于数值流形法的重力坝水力劈裂研究

杨石扣¹, 任旭华², 张继勋²

(1. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 运用数值流形法在非连续介质领域的独特优势, 并结合断裂力学的基本原理, 分析了重力坝的水力劈裂破坏问题, 实现了重力坝起裂、扩展和渐进破坏的全过程。充分发挥应力强度因子判别法和带抗拉强度的摩尔-库仑破坏准则各自的优势, 根据不同情况选取其中某种方法确定断裂和扩展方向, 且不需要预制初始裂纹。选取一个算例两种工况分析了重力坝在不考虑裂纹面内水压力和考虑裂纹面内水压力的水力劈裂破坏情况。计算结果表明, 在重力坝的水力劈裂中, 当不考虑裂纹面内水压力时, 坝踵处裂纹向下游和深部扩展, 上游折坡点处裂纹属于压剪型破坏; 当考虑裂纹面内水压力时, 坝踵处裂纹偏向深度方向扩展, 折坡点处的裂纹逐渐由压剪破坏变成了拉剪破坏, 并且考虑裂纹面内水压力后坝体破坏所需要的时步减少, 故而考虑裂纹面内水后降低了重力坝的安全系数。该方法加深了对重力坝水力劈裂破坏的认识, 具有较大的实际应用价值。

关 键 词: 重力坝; 水力劈裂; 数值流形法; 应力强度因子; 摩尔-库仑破坏准则

中图分类号: TV 313

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)08-3055-07

Study on hydraulic fracture of gravity dam using the numerical manifold method

YANG Shi-kou¹, REN Xu-hua², ZHANG Ji-xun²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The hydraulic fracture of the gravity dam was analysed by considering the advantages of the numerical manifold method in the non-continuum field and the basic principle of fracture mechanics. Besides, this study realised the whole process of dam crack initiation, propagation and progressive failure. With the respective advantages of the Mohr-Coulomb failure criterion with tensile strength and the stress intensity factor discriminant criterion, the fracture and its propagating direction were determined according to different conditions, and no pre-notched model was required. One example under two different conditions was selected to analyse the hydraulic fracture of the gravity dam with or without considering the inner water pressure on crack. The results showed that for the hydraulic fracture of gravity dam without considering inner water pressure on crack, the crack of dam site propagated toward the direction of downstream and depth, and the crack propagation at the upstream slope belonged to the compression-shear failure. However, when considering the inner water pressure on crack, the crack of the dam site was extended in the direction of depth, and the crack propagation of slope point belonged to the tension-shear failure. Furthermore, the required time steps for the dam failure were reduced, resulting in the decrease of the safety factor of the dam. This study has deepened the understanding of hydraulic fracture of the gravity dam and has great practical application value.

Keywords: gravity dam; hydraulic fracture; numerical manifold method; stress intensity factor; Mohr-Coulomb failure criterion

1 引 言

重力坝作为水电工程中常见的坝型之一, 具有许多明显的优点, 在我国很多河流应用广泛。我国兴建的大中型水利水电工程的拦河坝中, 各种类型

的重力坝始终占有较大的比例。因此, 对已建重力坝的实时安全评价就十分重要, 大坝安全评价的首要问题是确定已有微裂纹是否稳定, 是否会扩展以及预测其可能的破坏形式, 以便在事发前采取控制措施^[1-2]。

收稿日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51739006); 中国博士后科学基金项目 (No. 2017M611678)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51739006) and the China Postdoctoral Science Foundation (2017M611678).

第一作者简介: 杨石扣, 男, 1985 年生, 博士, 主要从事水工地下结构工程方面的研究工作。E-mail: yangshikou@126.com

通讯作者: 任旭华, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高坝及复杂地基、地下结构稳定、水工建筑物除险加固技术等方面的研究工作。E-mail: renxh@hhu.edu.cn

重力坝的水力劈裂正是坝内的微裂纹在上游库水压力作用下的结果。重力坝的水力劈裂破坏是力学家和工程技术人员非常关心的问题,一直以来众多科研工作者致力于这些问题的研究。常见的非连续分析方法主要有扩展有限元法(XFEM)、广义有限元法(GFEM)、无网格法(Meshless)和数值流形法(NMM)等。数值流形法由于不需要扩展有限元中的阶跃函数^[3],可以直接描述结构中的非连续特性,近年来受到广泛关注。

王水林等^[4]较早就采用数值流形法进行裂纹扩展模拟。李树忱等^[5]充分发挥数值流形法和无网格法各自的优点,提出了无网格数值流形方法,摆脱了传统的数值流形方法中网格所带来的困难。刘红岩等^[6]研究了节理岩体在受到冲击荷载作用时的破坏情况。朱爱军等^[7]采用数值流形法模拟开挖卸荷问题,获得了不同开挖步下的位移场;焦健等^[8]也进行了类似的模拟。徐栋栋等^[9-10]通过旋转数学网格说明数值流形法处理奇异性时的网格无关性,并研究了重力坝的多裂纹扩展问题。杨永涛等^[11]讨论了动载下裂纹尖端应力强度因子的计算。张友良^[12]、杨石扣^[13]等讨论了网格的加密问题。Zhang 等^[14]采用数值流形法研究了一般块体的水力劈裂问题。近期,陈远强等^[15]结合数值流形法考虑了重力坝的抗滑稳定问题。

以往对重力坝水力劈裂破坏的研究,要么没有考虑裂纹的动态扩展,要么没有考虑裂纹面内水压力的影响。重力坝的水力劈裂破坏是一个渐进的动态过程,裂纹扩展后常常伴随着裂纹面内水压力的拓展和延伸。为了更好地描述裂纹尖端的奇异特性,本文在传统数值流形法中引入裂纹尖端奇异覆盖函数扩展传统数值流形法,即,扩展的数值流形法(ENMM),并从裂纹渐进扩展的角度,将其用于研究分析重力坝水力劈裂破坏的过程,并比较分析不考虑裂纹面内水压力和考虑裂纹面内水压力两种情况。

2 扩展的数值流形法

2.1 传统的覆盖函数

数值流形法是石根华^[16]于 1991 年在关键块体理论(KBT)和非连续变形分析(DDA)的基础上提出的,主要包含 3 个基本概念,即数学覆盖、物理覆盖和流形单元。数学覆盖(MC)是由一系列覆盖研究区域的有限重叠网格所组成,每个小网格称为一个数学覆盖,设为 M_i , $i=1 \sim n_M$, n_M 为数

学覆盖总数,如图 1 所示。数学网格可以是三角形网格,也可以是四边形网格或多边形网格。只要在每个数学覆盖 M_i 上选择合适的权函数 $\varphi_i(\mathbf{x})$,并且满足下列条件即可:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i(\mathbf{x}) &\geq 0, \mathbf{x} \in M_i \\ \varphi_i(\mathbf{x}) &= 0, \mathbf{x} \notin M_i \\ \sum_{\{k|\mathbf{x} \in M_k\}} \varphi_k(\mathbf{x}) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

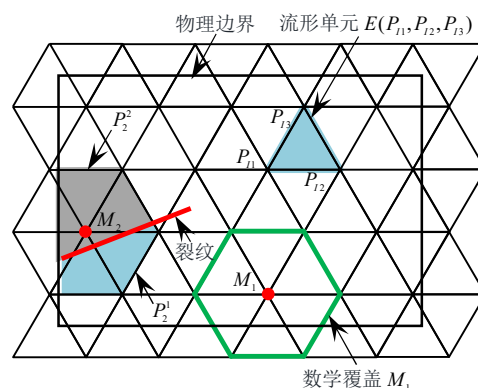


图 1 数值流形法的覆盖和单元
Fig.1 Covers and elements in the NMM

物理覆盖(PC)由数学覆盖和研究区域求交而成,当数学覆盖被研究域边界和内部裂纹完全切分成 n_p^i 个小块时,则共形成 n_p^i 个独立的小覆盖,这些小覆盖被称为物理覆盖,记为 P_i^j , $j=1 \sim n_p^i$,如图 1 中物理覆盖 P_2^1 和 P_2^2 所示。在获得研究域内所有物理覆盖后,将这些物理覆盖进行统一编号,设共有 N_p 个物理覆盖,则有一对一映射关系: $P_i^j \rightarrow P_I$, $I=1 \sim N_p$ 。物理覆盖(如 P_{I1} , P_{I2} 和 P_{I3})的公共区域则定义一个流形单元,记为 $E(P_{I1}, P_{I2}, P_{I3})$,如图 1 所示。

对每一物理覆盖 P_I ,定义覆盖位移函数 $\mathbf{u}_I(\mathbf{x})$,则连接这些覆盖位移函数的权函数可以表示为

$$\varphi_I^j(\mathbf{x}) = \delta_I(\mathbf{x}) \varphi_i(\mathbf{x}) \quad (2)$$

式中: $\delta_I(\mathbf{x})$ 为传递系数,对位于覆盖 P_I 内的点其值取为 1; 否则取为 0。

在每一物理覆盖 P_I 上,覆盖位移函数 $\mathbf{u}_I(\mathbf{x})$ 常采用一个多项式函数近似。对全 m 阶多项式近似,覆盖函数 $\mathbf{u}_I(\mathbf{x})$ 可以写为

$$\mathbf{u}_I(\mathbf{x}) = \mathbf{C}^T \mathbf{d}_I \quad (3)$$

式中: $\mathbf{d}_I$ 为未知系数列阵; $\mathbf{C}^T$ 为相应的完全多项式基,即

$$\mathbf{C}^T(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x & 0 & y & 0 & \cdots & x^n & 0 & x^{n-1}y & 0 & \cdots & xy^{n-1} & 0 & y^n & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x & 0 & y & \cdots & 0 & x^n & 0 & x^{n-1}y & \cdots & 0 & xy^{n-1} & 0 & y^n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{d}_I = \{d_{I1} \quad d_{I2} \quad d_{I3} \quad d_{I4} \quad d_{I5} \quad d_{I6} \quad \cdots \quad d_{I(n+1)(n+2)-1} \quad d_{I(n+1)(n+2)}\}^T \quad (5)$$

总位移函数 $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ 可以写为

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n_M} \sum_{l=1}^{n_P^i} \varphi_l^i(\mathbf{x}) \mathbf{u}_l(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n_M} \varphi_i(\mathbf{x}) \sum_{l=1}^{n_P^i} \delta_l(\mathbf{x}) \mathbf{u}_l(\mathbf{x}) \quad (6)$$

2.2 扩展的数值流形法

为了描述由于裂纹存在而引起单元内部位移的非连续性以及裂纹尖端附近应力场的奇异性, 对裂纹尖端附近一定范围内 (取决于单元平均尺寸, 一般为 2.5 倍单元平均尺寸) 的每一个物理覆盖 P_l , 附加位移非连续和应力奇异基函数, 则含附加项的覆盖位移函数 $\mathbf{u}_l^p(\mathbf{x})$ 表达式为

$$\mathbf{u}_l^p(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_l(\mathbf{x}) + \mathbf{u}_l^w(\mathbf{x}) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{u}_l^w(\mathbf{x})$ 为附加覆盖位移函数:

$$\mathbf{u}_l^w(\mathbf{x}) = \Psi \mathbf{d}_l^w \quad (8)$$

式中: Ψ 为附加矩阵:

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_0 & \mathbf{L} & \Psi_0 & \mathbf{L} & \Psi_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Psi_0 = \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & \psi_2 & 0 & \psi_3 & 0 & \psi_4 & 0 \\ 0 & \psi_1 & 0 & \psi_2 & 0 & \psi_3 & 0 & \psi_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} [\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4] = \\ \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

式中: n_l 为物理覆盖 P_l 具有的裂纹尖端数目, 若物理覆盖 P_l 没有裂纹尖端, 则 $n_l = 0$; $\mathbf{d}_l^w$ 为附加项未知系数列阵。

将式 (3) 和式 (8) 代入式 (7), 则含附加项的覆盖位移函数 $\mathbf{u}_l^p(\mathbf{x})$ 可以写为

$$\mathbf{u}_l^p(\mathbf{x}) = \mathcal{C}^{\mathcal{G}} \mathcal{d}_l^{\mathcal{G}} \quad (12)$$

式中: $\mathcal{d}_l^{\mathcal{G}}$ 为位移系数和附加系数列阵; $\mathcal{C}^{\mathcal{G}}$ 为相应的全多项式基和附加基函数形成矩阵, 即

$$\mathcal{C}^{\mathcal{G}} = [\mathbf{C}^T \quad \mathbf{M} \quad \Psi] \quad (13)$$

$$\mathcal{d}_l^{\mathcal{G}} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_l \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{d}_l^w \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式 (12) 代入式 (6), 含附加项的总位移函数 $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ 可以写为

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n_M} \varphi_i(\mathbf{x}) \sum_{l=1}^{n_P^i} \delta_l(\mathbf{x}) \mathbf{u}_l^p(\mathbf{x}) \quad (15)$$

2.3 ENMM 的控制方程

扩展的数值流形法的控制方程可以由传统数值流形法的控制方程获得, 只需将其中的形函数矩阵 $\mathbf{N}$ 和应变转换矩阵 $\mathbf{B}$ 换成相应的带裂纹尖端基函数的形函数矩阵 $\mathbf{N}^{\mathcal{G}}$ 和应变转换矩阵 $\mathbf{B}^{\mathcal{G}}$ 即可, 则控制方程可以写为

$$\mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{R} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{d}$ 为未知系数列阵; $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别为刚度矩阵和荷载向量。

对任一个单元 e , 其对 $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{R}$ 的贡献可以表示为

$$\mathbf{K}^e = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^{\mathcal{G}T} \mathbf{D} \mathbf{B}^{\mathcal{G}} d\Omega + k \int_{\Gamma_u^e} \mathbf{N}^{\mathcal{G}T} \mathbf{N}^{\mathcal{G}} d\Gamma + \frac{2\rho}{\Delta^2} \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^{\mathcal{G}T} \mathbf{N}^{\mathcal{G}} d\Omega \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^e = \int_{\Gamma_t^e} \mathbf{N}^{\mathcal{G}T} \bar{\mathbf{t}} d\Gamma + \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^{\mathcal{G}T} \mathbf{b} d\Omega + k \int_{\Gamma_u^e} \mathbf{N}^{\mathcal{G}T} \bar{\mathbf{u}} d\Gamma - \\ \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^{\mathcal{G}T} \boldsymbol{\sigma}^0 d\Omega + \frac{2\rho}{\Delta} \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^{\mathcal{G}T} \mathbf{N}^{\mathcal{G}} d\Omega \mathcal{d}(t_0) \end{aligned} \quad (18)$$

其中:

$$\mathbf{B}^{\mathcal{G}} = \mathbf{L} \mathbf{N}^{\mathcal{G}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^{\mathcal{G}} & \mathbf{B}_2^{\mathcal{G}} & \cdots & \mathbf{B}_i^{\mathcal{G}} & \cdots & \mathbf{B}_{n_P^e}^{\mathcal{G}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{B}_i^{\mathcal{G}} = [\mathbf{L} \mathbf{N}_i \quad \mathbf{M} \quad \mathbf{L} \mathbf{N}_i^w] = [\mathbf{B}_i \quad \mathbf{M} \quad \mathbf{B}_i^w] \quad (20)$$

$$\mathbf{B}_i^w = \mathbf{L} \mathbf{N}_i^w = \begin{bmatrix} 644444444447 & 44444444448 \\ \mathbf{B}_i^{w1} & \mathbf{B}_i^{w2} & \mathbf{B}_i^{w3} & \mathbf{B}_i^{w4} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{B}_i^{w\alpha} = \begin{bmatrix} (\varphi_i \psi_{\alpha})_{,x} & 0 \\ 0 & (\varphi_i \psi_{\alpha})_{,y} \\ (\varphi_i \psi_{\alpha})_{,y} & (\varphi_i \psi_{\alpha})_{,x} \end{bmatrix}, (\alpha = 1 \sim 4) \quad (22)$$

3 重力坝水力劈裂在 NMM 中的实现

3.1 平面裂纹扩展的断裂准则

目前主要的断裂判据有 4 个, 即最大环向拉应力准则、最小应变能密度因子准则、最大拉应变准则和最大能量释放率准则。由于最大环向拉应力准则较为简单, 实施方便, 故而本文采用此准则, 即

$$K_{eq} \geq K_{IC} \quad (23)$$

式中: K_{IC} 为材料断裂韧度; K_{eq} 为等效应力强度因子^[17], 其表达式为

$$K_{eq} = K_I \cos^3 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \theta_0 \quad (24)$$

裂纹扩展角 θ_0 为

$$\theta_0 = \begin{cases} 2 \arctan \frac{1}{4} \left(\frac{K_I}{K_{II}} + \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) & K_{II} < 0 \\ 0 & K_{II} = 0 \\ 2 \arctan \frac{1}{4} \left(\frac{K_I}{K_{II}} - \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) & K_{II} > 0 \end{cases} \quad (25)$$

当裂纹尖端距离边界较近时, 由于应力强度因子的计算范围已经超过边界, 因而应力强度因子的计算已经不能直接进行, Ahmed^[18]、余天堂^[19]指出, 可以采用修正的方法进行, 但是计算过程相对复杂, 而且在裂纹尖端刚好位于边界单元上时, 其计算结果误差是很大的。本文采用另一种方法进行, 即当裂纹尖端和边界的距离小于某一个值 (一般为 2.5 倍单元平均尺寸) 时, 不采用断裂韧度作为其断裂判据, 而是采用带拉伸的摩尔-库仑破坏准则进行判断, 确定扩展后沿着与最大主应力垂直的方向扩展, 即

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \theta \quad (26)$$

$$\sigma_f = \sigma_t \quad (27)$$

式中: σ_f 和 τ_f 分别为数值流形单元破坏面上的法向应力分量和切向应力分量; c 、 σ_t 、 θ 分别为流形单元所属材料的黏结力、抗拉强度和内摩擦角。

3.2 水压力的施加

水压力作为一种主动力, 在研究重力坝水力劈裂破坏时, 对坝体的稳定性至关重要。在上下游水位作用下, 坝体除了受上游和下游静水压力以及坝体内的渗透力, 还有与上游贯通的裂纹面上的内水压力。本文主要讨论上游坝体中这种贯通的内水压力, 且内水压力按照面力的形式施加。由数值流形法的概念可知, 裂纹可以方便地穿越单元, 设一裂纹尖端与一流形单元的分割线如图 2 中线段 AB 所示, 其两端点坐标分别为 (x_A, y_A) 和 (x_B, y_B) , 上游水位为 y_0 , 则线段 AB 两端的水压力分别为

$$P_1 = \rho g h_1 = \rho g (y_0 - y_A) \quad (28)$$

$$P_2 = \rho g h_2 = \rho g (y_0 - y_B) \quad (29)$$

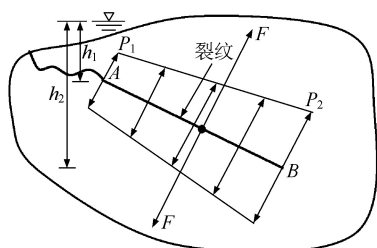


图 2 裂纹面内水压力施加

Fig.2 The applied water pressure on crack surface

按照梯形面积公式将水压力的等效合力 F 作用于其边界重心处, 裂纹面两侧, 合力大小相等, 方向相反, 并且随着裂纹扩展不断动态重复这一过程。

4 数值应用

为了便于比较分析, 算例为一个高 196.5 m 的重力坝, 上游水头为 190 m, 模型尺寸参考潘坚文等^[20]的计算模型, 详见图 3。

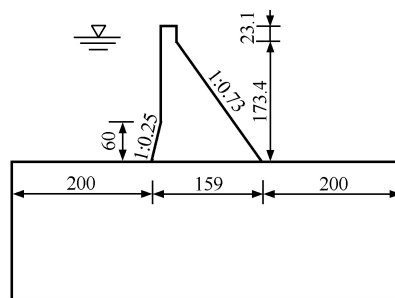


图 3 重力坝剖面简图 (单位: m)

Fig.3 The sketch of a gravity dam (unit: m)

坝体材料弹性模量为 22 GPa, 泊松比为 0.163, 重度为 25 000 N/m³, 断裂韧度 $K_{IC} = 10\,000 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$, 内摩擦角为 54°, 黏聚力为 2.5 MPa, 抗拉强度为 2.5 MPa; 基岩材料弹性模量为 16 GPa, 泊松比为 0.27, 断裂韧度 $K_{IC} = 10\,000 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$, 重度为 25 000 N/m³, 内摩擦角为 52°, 黏聚力为 2.0 MPa, 抗拉强度为 2.0 MPa; 坝体和基岩接触面内摩擦角为 52°, 黏聚力和抗拉强度均为 2.0 MPa。上游水深为 190 m, 其对于坝体和坝基的作用按面力施加, 下游无水, 未预设初始裂纹, 取网格密度 $k_h = 39$, 则物理覆盖和流形单元的初始数目分别为 3 439 和 6 555。

设裂纹每步扩展步长 $\Delta a = 5.0 \text{ m}$, 水压力采用重度超载方式按照面力施加, 即水头维持 190 m 不变, 增加水的重度, 其值大小与正常水重度的比例即为超载系数, 本算例中取超载系数 $K = 2.25$ 。为了便于分析比较裂纹面内水压力对坝体渐进破坏的影响, 计算了不考虑裂纹面内水压力和考虑裂纹面内水压力两种情况, 并按平面应变问题进行计算。

不考虑裂纹面内水压力的重力坝渐进破坏过程如图 4 所示。坝踵基岩初始裂纹方向与水平方向夹角约为 47°, 并逐渐向下游和深部扩展, 与此相应的是董玉文等^[3]获得的角度大约为 60°, 说明上游坡折形态改变了坝踵附近的应力状态, 影响了初裂纹的起始扩展角度; 上游折坡点初始裂纹方向与水平方向夹角约为 12°, 裂纹面处于压剪状态, 裂纹

逐渐扩展至下游坝址附近，引起坝体破坏，这与潘坚文^[20]、Roth^[21]等的研究成果是一致的。

采用相同的模型和网格（见图 4(a)），考虑裂纹面内水压力的重力坝水力劈裂渐进破坏过程如图 5 所示。坝踵和上游折坡点处的初始裂纹扩展方向与图 4 是相同的，但坝踵和折坡点处的裂纹扩展路径

均发生了变化：坝踵处裂纹偏向深度方向扩展；由于裂纹表面水压力的作用，折坡点处的裂纹扩展路径则偏向水平方向，坝体逐渐由压剪破坏变成了拉剪破坏。由图 5(b)可知，考虑裂纹面内水后坝体破坏所需要的时步减少，故而考虑裂纹面内水后降低了重力坝的安全系数。

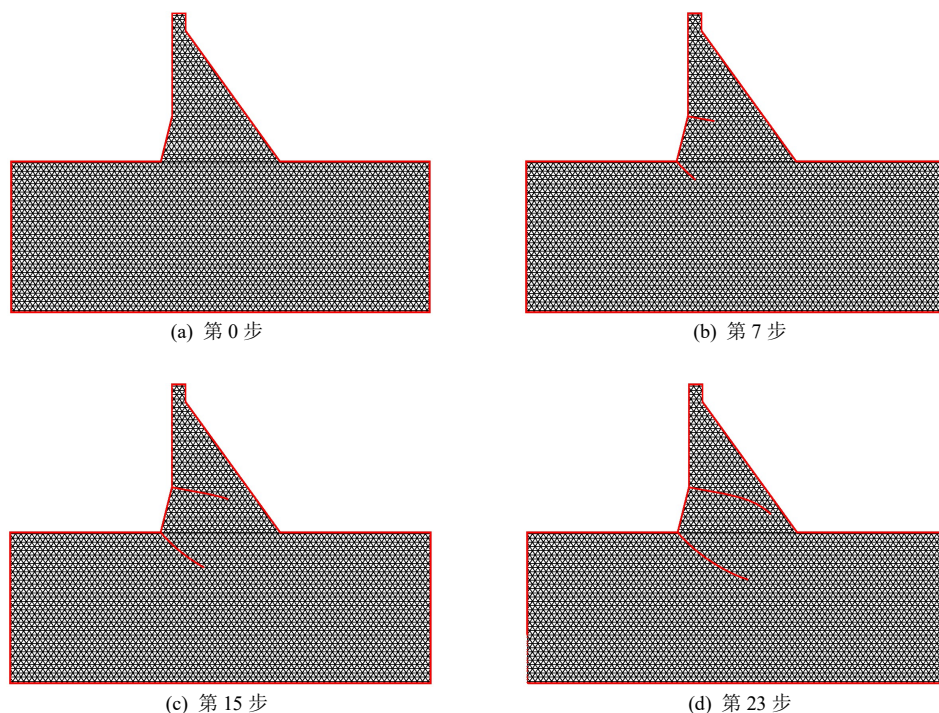


图 4 不考虑裂纹面内水压力不同时步下重力坝的渐进破坏过程

Fig.4 The failure process of gravity at various time steps without considering the water pressure on the crack surface

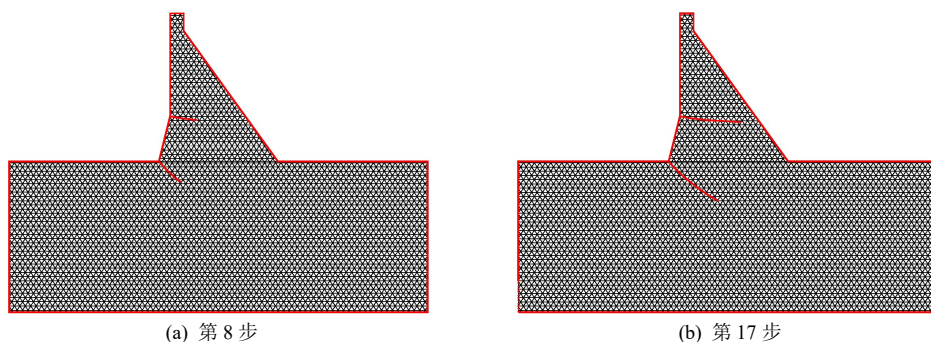


图 5 考虑裂纹面内水压力不同时步下重力坝的渐进破坏过程

Fig.5 The failure process of gravity at various time steps by considering the water pressure on the crack surface

5 结 论

(1) 本文从断裂力学的角度分析了重力坝的水力劈裂破坏问题。通过数值流形法实现了重力坝起裂、扩展和渐进破坏的全过程，加深了对重力坝劈裂破坏的认识，具有较大的实际应用价值。

(2) 为了体现裂纹尖端位移的非连续性和应力的奇异性，在覆盖位移场中引入了断裂力学解析解

中的基函数。对于远离物理域边界的裂纹尖端，将复合应力强度因子作为断裂判据参数，并用来确定扩展方向；对于靠近边界的裂纹尖端，则采用带抗拉强度的摩尔-库仑准则作为断裂判据，并且裂纹沿着与最大主应力方向垂直的方向扩展。重力坝渐进扩展两个工况的计算结果表明了文中方法的可行性。

(3) 在重力坝的水力劈裂中，当不考虑裂纹面

内水压力时, 坝踵处裂纹向下游和深部扩展, 上游折坡点处裂纹属于压剪型破坏; 当考虑裂纹面内水压力时, 坝踵处裂纹偏向深度方向扩展, 折坡点处的裂纹逐渐由压剪破坏变成了拉剪破坏, 并且考虑裂纹面内水后坝体破坏所需要的时步减少, 故而考虑裂纹面内水后降低了重力坝的安全系数。

参考文献

- [1] 杜效鹄, 段云岭, 王光纶. 重力坝断裂数值分析研究[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1035—1042.
DU Xiao-hu, DUAN Yun-ling, WANG Guang-lun. Numerical analysis of fracture in gravity dam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2005, 36(9): 1035—1042.
- [2] 董玉文, 任青文, 余天堂. 扩展有限元法在重力坝断裂分析中的应用研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(3): 36—40.
DONG Yu-wen, REN Qing-wen, YU Tian-tang. Application of extended finite element method to fracturing analysis of gravity dam[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2008, 30(3): 36—40.
- [3] 董玉文, 任青文. 重力坝水力劈裂分析的扩展有限元法[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1361—1367.
DONG Yu-wen, REN Qing-wen. An extended finite element method for modeling hydraulic fracturing in gravity dam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2011, 42(11): 1361—1367.
- [4] 王水林, 葛修润. 流形元方法在模拟裂纹扩展中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 405—410.
WANG Shui-lin, GE Xiu-run. Application of manifold method in simulating crack propagation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(5): 405—410.
- [5] 李树忱, 程玉民. 基于单位分解法的无网格数值流形方法[J]. 力学学报, 2004, 36(4): 496—500.
LI Shu-chen, CHENG Yu-min. Meshless numerical manifold based on unit partition[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2004, 36(4): 496—500.
- [6] 刘红岩, 王贵和. 节理岩体冲击破坏的数值流形方法模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3523—3527.
LIU Hong-yan, WANG Gui-he. Simulation of impact failure of jointed rock mass by numerical manifold method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3523—3527.
- [7] 朱爱军, 邓安福, 曾祥勇. 数值流形方法对岩土工程开挖卸荷问题的模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 179—183.
- [8] 焦健, 乔春生, 徐干成. 开挖模拟在数值流形方法中的实现[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2951—2957.
JIAO Jian, QIAO Chun-sheng, XU Gan-cheng. Simulation of excavation in numerical manifold method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2951—2957.
- [9] 徐栋栋, 郑宏. 数值流形法在处理强奇异性问题时的网格无关性[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2385—2393.
XU Dong-dong, ZHENG Hong. Mesh independence of numerical manifold method in treating strong singularity[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2385—2393.
- [10] 徐栋栋, 杨永涛, 郑宏, 等. 基于数值流形法的多裂纹扩展研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3598—3607.
XU Dong-dong, YANG Yong-tao, ZHENG Hong, et al. Study of multiple crack growth of gravity dam based on numerical manifold method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3598—3607.
- [11] 杨永涛, 徐栋栋, 郑宏. 动载下裂纹应力强度因子计算的数值流形元法[J]. 力学学报, 2014, 46(5): 730—738.
YANG Yong-tao, XU Dong-dong, ZHENG Hong. Evaluation on stress intensity factor of crack under dynamic load using numerical manifold method[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2014, 46(5): 730—738.
- [12] 张友良, 刘登学, 刘高敏. 数值流形法的 T 样条局部加密算法[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2404—2410.
ZHANG You-liang, LIU Deng-xue, LIU Gao-min. T-splines local refinement algorithm for numerical manifold method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2404—2410.
- [13] 杨石扣, 任旭华, 张继勋. 基于覆盖细化的数值流形法及其在裂纹扩展中的应用[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 47—54.
YANG Shi-kou, REN Xu-hua, ZHANG Ji-xun. Cover based refinement in the numerical manifold method and its application in crack propagation[J]. **Engineering Mechanics**, 2013, 30(11): 47—54.