文章编号: 1000-8608(2007)04-0567-06

混凝土弹塑性多轴损伤模型及其应用

杜 荣 强*[1,2], 林 皋[1]

(1.大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;
2.山东科技大学 土木工程系, 山东 青岛 266510)

摘要: 针对混凝土多轴应力状态下各向异性损伤的特点,建立了各向异性弹塑性损伤模型. 该模型具有可清晰地表征混凝土的渐进破坏过程和表达当前损伤水平及结构破坏趋势的优点. 引入了一个应力状态因子,用以表征当前应力状态在应力空间中距离破坏面的程度,从而对损伤演化方程进行了改进以考虑多轴效应. 此外,在三轴破坏准则的基础上,还建立了考虑混凝土各向异性损伤破坏的多轴损伤破坏准则,其中包含了塑性、损伤内变量和有效主应力的影响. 本模型可有效地表达出混凝土的各向异性和多轴损伤特点.

关键词: 弹塑性损伤;各向异性;多轴损伤破坏准则;损伤演化方程;动态破坏过程;拱坝;损伤安全系数

中图分类号: O346.5; TU528.01 **文献标识码:** A

0 引 言

混凝土具有损伤敏感性[1],强度、变形的各向异性以及破坏是由于损伤渐进发展所致等材料和物理力学特性. 研究已经证明,损伤力学可较为成功地模拟混凝土的应变软化和渐进破坏等特征,可用于解释混凝土结构的静、动态破坏机理;也有很多工作建立了混凝土各向同性破坏准则并被广泛采用,如 Hsieh-Ting-Chen准则等,但这些准则难以模拟其各向异性破坏特性. 复合材料、金属等建立的各向异性破坏准则如 Hill准则等,并不适用于混凝土材料,因为混凝土包含弹脆性、延塑性和损伤以及与其他材料相比具有不一样的率敏感表现等;并且不含损伤因素的破坏准则在描述混凝土渐进破坏过程和度量破损程度方面比较困难. 因此,建立考虑各向异性性状的混凝土损伤破坏准则和相应模型,对研究混凝土结构的破坏趋势、结构破损程度和动态渐进破坏过程有重要意义,尤其像大型复杂混凝土建筑物如高拱坝等这样的结构.

数值模拟度量损伤的有效途径之一是利用基于维象学方法的损伤演化方程. 已经有不少研究混凝土大坝损伤破坏的工作,如 Zhou等[2]、Ghrib等[3]、Valliappan等[4]均采用单轴损伤演化方程计算损伤,利用建立的损伤模型分析了重力坝或拱坝的损伤破坏;陈健云等[5]利用李庆斌建立的动力损伤模型[6]并考虑拉压损伤影响,分析了地震作用下的拱坝损伤等. 但这些工作均是利用基于混凝土单轴应力 -应变关系的单轴损伤演化方程来度量损伤,而实际上很多混凝土结构如拱坝等基本上处于多轴应力工作状态下,此时围压对损伤演化的阈值和混凝土的强度及变形均有显著影响,应力 -应变关系也发生了变化,损伤演化自然也发生了改变;并且混凝土损伤的各向异性将对结构破坏产生重要影响,在多轴状态下尤其如此;还有,混凝土损伤机理中不仅含有拉脆性损伤,也存在压缩下的延性损伤. 因此,为能全面反映混凝土损伤的各向异性、多轴应力状态(多向破坏的影响)和延性或脆性,需要建立考虑多轴损伤破坏的混凝土各向异性弹塑性损伤模型.

文献[7]考虑了压缩状态下混凝土多轴塑性破坏模型,多轴破坏条件包含了 3个独立的破坏准则. 而对于混凝土,拉伸强度比压缩强度小很多,工程中拉伸破坏要比压缩破坏更为常见,对工

收稿日期: 2005-11-04; 修回日期: 2006-12-25.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(重点项目 90510018; 50139010).
作者简介: 杜荣强*(1973-),男,博士, E-mail: longqd@163.com; 林 皋(1929-),男,教授,博士生导师,中国科学院院士.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

程安全更不利. 为较准确地模拟混凝土结构在实际工作状态下的响应,建立考虑拉伸破坏的多轴各向异性损伤破坏准则很有必要,然而这方面的工作还很少,既考虑损伤又和塑性联系的多轴损伤破坏准则目前还未见到.

借鉴文献[7]的混凝土压缩下多轴塑性破坏准则,本文结合混凝土的各向异性损伤和多轴损伤破坏特点,建立 3个不仅能反映压缩塑性损伤软化破坏,而且可反映拉伸损伤破坏的多轴损伤破坏准则,破坏准则中使用有效应力和损伤的主量.

1 建立考虑各向异性的多轴损伤破坏准则

文献[7]提供了压缩状态下混凝土的多轴塑性破坏准则,并用试验验证了所建立的模型. 其形式为

$$F = \{f_1(\varepsilon_{ij}, X_{p1}), f_2(\varepsilon_{ij}, X_{p2}), f_3(\varepsilon_{ij}, X_{p3})\} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = \hat{\varepsilon}_1(I_1) - \sigma_1(\hat{X}_{p1}) = 0 \\ f_2 = \hat{\varepsilon}_2(J_2, J_3) - \sigma_2(\hat{X}_{p1}, \hat{X}_{p2}) = 0 \\ f_3 = \hat{\varepsilon}_3(J_2, J_3) - \sigma_3(\hat{X}_{p1}, \hat{X}_{p3}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\hat{X}_{p1}$为等效塑性体积应变; $\hat{X}_{pi}$ ($i = 2 \sim 3$)为偏量等效塑性应变; σ_1、σ_2和 σ_3表达了在相应有效应力下的破坏面应力大小; $\hat{\varepsilon}_i$ ($i = 1 \sim 3$) 与有效应力主量有关,可表示为

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_1(I_1) &= |I_1/\sqrt{3}| \\ \hat{\varepsilon}_2(J_2, J_3) &= |\sqrt{2J_2}\cos(\pi/3 - \theta)| \\ \hat{\varepsilon}_3(J_2, J_3) &= |\sqrt{2J_2}\sin(\pi/3 - \theta)| \end{aligned} \quad (3)$$

相应的力学含义: 有效应力 $\hat{\varepsilon}_1$表征了静水应力大小,有效应力 $\hat{\varepsilon}_2$、$\hat{\varepsilon}_3$为偏应力平面定义的偏应力.

在压缩状态下,破坏面的应力表达式如下:

$$\begin{aligned} \sigma_1/f_c &= [(1 + \hat{X}_{p1}/a)^{-s} + (\hat{X}_{p1}/b)^t]\hat{X}_{p1}E_c/(1 - 2\nu) \\ \sigma_2/f_c &= e^{[-(\hat{X}_{p2}/c_2)^{m_2}]}\hat{X}_{p2}E_c/(1 + \nu) \\ \sigma_3/f_c &= e^{[-(\hat{X}_{p3}/c_3)^{m_3}]}\hat{X}_{p3}E_c/(1 + \nu) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 a、b、s、t为材料参数.

本文为能够分别反映混凝土压缩下的损伤塑性破坏和拉伸下的损伤破坏,将它改进为不仅包括压缩情况下的损伤破坏准则,还包含拉伸情况下的损伤破坏准则.

首先利用有效主应力判断拉压状态,计算与损伤相关的有效应力. 按照文献[8]的表达,真实应力和有效应力有如下变换:

$$\tilde{\sigma} = \boldsymbol{M}^{-1}(\omega) : \sigma \quad (5)$$

式中: σ 为真实应力; $\tilde{\sigma}$ 为相应的有效应力,可用它求得有效应力主应力,并可进一步用于求式(3); $\boldsymbol{M}^{-1}(\omega)$ 为损伤影响张量的逆,起着真实应力向有效应力变换的作用,具体表达可见文献[8].

其次利用有效应力主应力判断当前主轴的拉压状态,因为混凝土的拉伸破坏比较常见且对结构较不利,所以优先选用拉伸状态,如果主应力为负则判断为压缩状态,否则为拉伸状态.

进而,可以考虑建立相应的多轴损伤破坏准则. 判断应力状态分别采用以下形式:

(1) 各轴均处于压缩状态下时,多轴损伤破坏准则采用:

$$F = \{g_1^c(\varepsilon_{ij}, X_{p1}, k_1),\ g_2^c(\varepsilon_{ij}, X_{p2}, k_2),\ g_3^c(\varepsilon_{ij}, X_{p3}, k_3)\} \quad (6)$$

其中 g_i^c ($i = 1 \sim 3$) 表示为

$$\begin{cases} g_1^c = \hat{\varepsilon}_1(I_1, k_1, k_2, k_3) - \sigma_1(\hat{X}_{p1}, k_1, k_2, k_3) = 0 \\ g_2^c = \hat{\varepsilon}_2(J_2, J_3, k_1, k_2, k_3) - \sigma_2(\hat{X}_{p1}, \hat{X}_{p2}, k_1, k_2, k_3) = 0 \\ g_3^c = \hat{\varepsilon}_3(J_2, J_3, k_1, k_2, k_3) - \sigma_3(\hat{X}_{p1}, \hat{X}_{p3}, k_1, k_2, k_3) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

它们代表各个方向的压缩损伤破坏准则. 将破坏面的应力考虑损伤因素后,按下述表达式计算 σ_i ($i = 1 \sim 3$):

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= [(1 + \hat{X}_{p1}/a)^{-s} + (\hat{X}_{p1}/b)^t]\hat{X}_{p1} \times f_c'^1 E_c'^1/(1 - 2\nu); \\ \sigma_2 &= e^{[-(\hat{X}_{p2}/c_2)^{m_2}]}\hat{X}_{p2} \times f_c'^2 E_c'^2/(1 + \nu); \\ \sigma_3 &= e^{[-(\hat{X}_{p3}/c_3)^{m_3}]}\hat{X}_{p3} \times f_c'^3 E_c'^3/(1 + \nu) \end{aligned} \quad (8)$$

上述各式中 $f_c'^i = f_c^i(1 - k_i)$ ($i = 1 \sim 3$) 表示当前状态下受到损伤劣化的主轴有效抗压强度, f_c^i 为初始抗压强度, $E_c'^i$ ($i = 1 \sim 3$) 为对应主轴受到损伤影响的有效弹性模量.

损伤量按照能量等效原理[4]计算:

$$k = 1 - \sqrt{E'/E^0}$$

其中 E'为当前有效弹性模量, E^0为初始状态弹性模量. 则

$$E_c'^i = E_c^{0i}(1 - k_i)^2 (i = 1 \sim 3) \quad (9)$$

假定混凝土初始状态下力学性能为各向同性,即 $f_c^i = f_c$、$E_c^{0i} = E_c^0$ ($i = 1 \sim 3$);产生损伤或塑性等非线性变形后变为各向异性.

(2) 各轴处于拉伸状态下时,各方向相应地采用如下的混凝土损伤破坏准则形式:

$$g^t = \hat{\varepsilon}_i - \tilde{\varepsilon}_i(k_i) = 0 \quad (10)$$

$$\tilde{\varepsilon}_i = f_t^i(1 - k_i) \ (i = 1 \sim 3) \quad (11)$$

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ε_i 表示由于拉损伤导致的混凝土各方向的拉伸强度劣化;而此时 $\hat{\varepsilon}_i$ ($i=1\sim3$) 则采用相应的有效应力主应力表达式; f_t^i 为各主轴的初始抗拉强度.

(3) 各轴出现拉压状态并存的情况下,则拉伸状态使用拉伸损伤破坏准则,如式 (10),压缩状态下使用压缩损伤破坏准则,如式 (7).

最后,将上面 (1)~ (3) 多轴拉伸和压缩损伤破坏准则统一写成

$$F=\{\bar{g}_1,\bar{g}_2,\bar{g}_3\} \tag{12}$$

式中

$$\bar{g}_i^j=\bar{g}_i(E_j^i,\hat{X}_{ki},f_j^{ki}(k_i))=0(i=1\sim3;j=t,c) \tag{13}$$

式中: t表示拉伸, c表示压缩; k_i 为主轴方向的损伤量; E_j^i 为对应主轴在拉伸下弹性模量或压缩下弹性模量. 简单起见,可假定损伤破坏中泊松比不受影响.

2　考虑三轴效应的损伤演化方程

为进一步反映混凝土多轴应力状态及围压的影响,考虑一个包含三轴应力的函数 $F(\varepsilon_{ij})$ 具体地可取为混凝土的三轴屈服或破坏准则,例如经典的 Hsieh-Ting-Chen四参数准则,以综合反映围压、应力偏量第二不变量和应力罗德角的影响,其形式为

$$F(d,a,\theta)=A\sigma^2+(B\cos\theta+C)\sigma+D\sigma^a-1=0 \tag{14}$$

式中: $\theta=\arccos(3\sqrt{3}\varepsilon_1-I_1)/(2\sqrt{3J_2})$, $\sigma=\sqrt{2J_2}$, $a=I_1/\sqrt{3}$; A、B、C、D 为混凝土试验参数, I_1、J_2、ε_1 分别为当前损伤主应力第一不变量、偏应力第二不变量和第一主应力. 建立考虑三轴效应函数的修正量 $r(\varepsilon_{ij})$ 来表征当前应力状态至破坏面的距离,即破坏程度的某种量度,形式如下:

$$r(\varepsilon_{ij})=r(d,a,\theta)=\begin{cases}d(\varepsilon_{ij})/d_0; F(d,a,\theta)<0\\ 1; F(d,a,\theta)\geqslant 0\end{cases} \tag{15}$$

以受压破坏子午面 ($\theta=60^\circ$) 为例说明此量在应力破坏面空间的位置 (见图 1). d_0 是当前应力状态点对应的子午面屈服 (破坏) 半径, $d(\varepsilon_{ij})$ 为当前应力点的半径. 可见, $r(\varepsilon_{ij})$ 有比较直观的物理意义,即当前应力状态达到三轴应力的屈服或破坏状态的距离比.

对于多轴应力状态,即至少有 2个主应力不为 0,便可将单轴损伤演化方程 k^u 扩展为多轴形式:

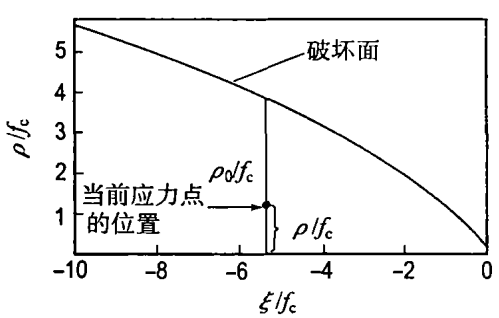
$$k^m=k^u\times r(\varepsilon) \tag{16}$$

k^m 即为改进的多轴损伤演化方程. 从已有的研究看,混凝土单轴损伤演化方程有多种形式,如线性损伤软化、幂损伤软化和双曲线损伤软化等. 但是为能够真实反映混凝土在单轴状态下的变形和渐进破坏,必须满足损伤发展到断裂时损伤耗散能和混凝土的断裂能一致的能耗连续性条件. 据作者分析[9],仅有双曲线损伤软化满足此要求,其方程形式为

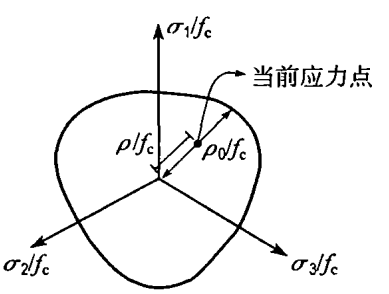
$$k=1-\frac{\bar{X}_0}{X}\frac{T_u}{(X+\bar{X}a^{-1/3}+a^{1/3})} \tag{17}$$

式中: $\bar{X}_0$ 为混凝土峰值强度对应的应变; $T_u=T(\bar{X}_0)$,为和 $\bar{X}_0$ 相关的常数; $a=a(X,\bar{X}_0)$,为与 $\bar{X}_0$ 和当前混凝土应变有关的量,详细可参见文献 [9].

利用分析得到的主轴应变可求出主轴方向的损伤 k_i ($i=1\sim3$),进而可构造损伤的二阶张量,其谱分解的形式为



(a) 在破坏面内



(b) 在偏平面内

图 1　破坏面内应力状态

Fig. 1　The current stress state in the failure space

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\omega = \sum_{i=1}^{3} k_i \boldsymbol{n}^i \otimes \boldsymbol{n}^i \tag{18}$$

式中: k_i 为 k_{ij} 的主值, $\boldsymbol{n}^i$ 为 k_{ij} 相应的主方向. k_i 就是式(13)所需要的损伤主量. 进而可将二阶损伤张量用于构造单元的弹塑性损伤刚度矩阵,这是最基本的损伤刚度构造. 为反映拉、压损伤的不同特性,下面进行损伤的拉压分解.

3 损伤的拉、压分解

假定材料主轴和应变主轴一致,损伤后材料主轴随应变主轴变化. 将应变进行拉、压谱分解:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i \boldsymbol{p}_i \otimes \boldsymbol{p}_i \tag{19}$$

其中 $\| \boldsymbol{p} \| = 1$, $\boldsymbol{p}_i$ 为对应主应变 λ_i 的单位主方向矢量.

定义 ε^+ (ε 中正的部分)为

$$\varepsilon^+ = (\boldsymbol{Q}^+)\,\mathbf{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3](\boldsymbol{Q}^+)^{\mathrm{T}},\ \varepsilon = \varepsilon^+ + \varepsilon^- \tag{20}$$

$$T(\varepsilon^+) = \sum_{i=1}^{3} \langle \lambda_i \rangle \Big/ \sum_{i=1}^{3} |\lambda_i| \tag{21}$$

$$\omega^+ = T(\varepsilon^+)\omega,\ \omega^- = T(\varepsilon^-)\omega \tag{22}$$

$$\omega = \omega^+ + \omega^- \tag{23}$$

从而完成了损伤的拉压分解.

4 模型耦合过程和实现

在数值分析中需实现弹塑性和损伤互相耦合,其主要步骤如下:

① 建立含损伤和弹塑性的应力-应变关系

$$\sigma = \boldsymbol{E}(k)\varepsilon \tag{24}$$

其中 $\boldsymbol{E}(k)$ 为弹塑性损伤矩阵.

② 结合式(5)、(20)~(23)、(12)、(13)、(15)、(16)建立包含混凝土拉压状态、拉压多轴损伤破坏准则以及考虑塑性和损伤影响的本构关系;

③ 进行结构分析,预测结构应力场和损伤场;

④ 预测的应力和损伤进行耦合,进一步校正应力场和损伤场;

⑤ 耦合收敛判定,条件不满足,则继续④;

⑥ 进行多轴损伤破坏准则判定,如满足破坏准则,则进行应力回拉校正,并进行结构重分析,进行平衡迭代,求新的应力场和损伤场直至平衡;

⑦ 损伤场和应力场等输出.

5 损伤模型的数值实验验证

采用文献[10]的实验资料和分析算例. 结构网格和作用荷载如图 2,结构尺寸为 0.85 m× 0.3 m× 1.3 m(长× 宽× 高),其性能参数如下: E = 21.87 GPa; ν = 0.2; f_t = 2.26 MPa. 实测破坏荷载为 740 kN. 利用本文建立的模型进行有限元数值验证,得到在临界荷载作用下的荷载-位移曲线和文献[10]的实测结果比较如图 3,本文得到的结构损伤分布和文献分析得到的损伤分布分别如图 4(a)和图 4(b).

由图 3可见,利用本文模型获得的荷载-位移结果和文献基本一致,得到的破坏荷载为 772.36 kN,较接近实验值. 这说明本文模型是有效的.

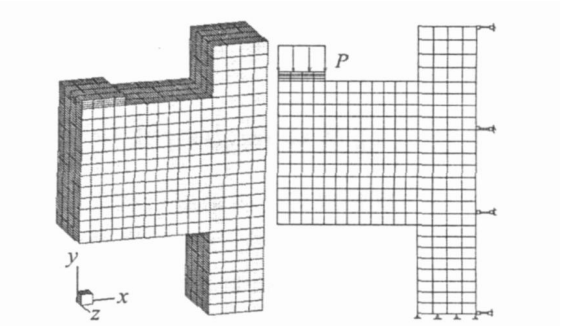


图 2 混凝土结构网格和加载示意图

Fig. 2 Mesh and load for concrete console

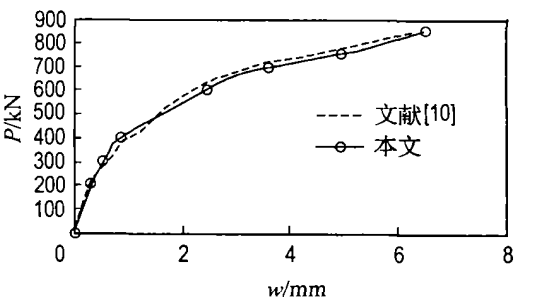
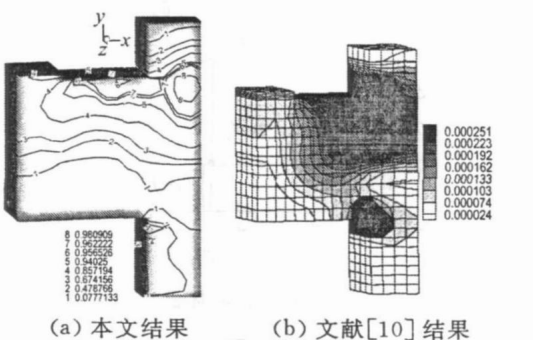


图 3 混凝土计算荷载位移曲线

Fig. 3 Load-deflection curves for concrete



(a) 本文结果 (b) 文献[10]结果

图 4 临界荷载下混凝土结构损伤分布对比

Fig. 4 Damage patterns under critical load for concrete console

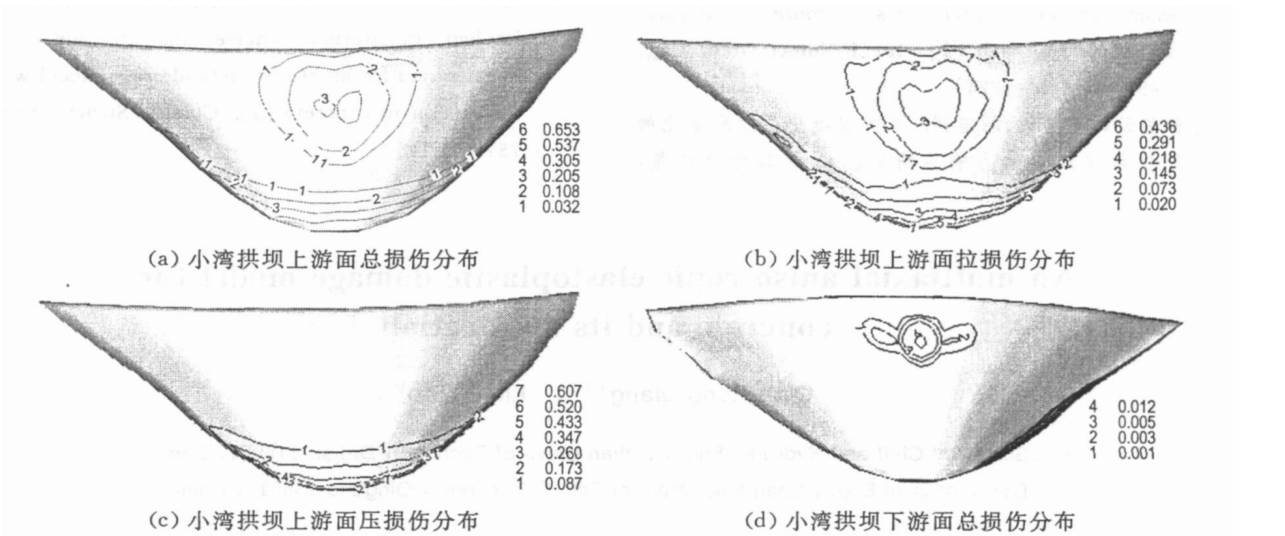
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6　混凝土拱坝损伤分析

利用本文建立的混凝土弹塑性损伤模型,并考虑拉压损伤分离,对小湾双曲拱坝(292 m)某优化体型作静力弹塑性损伤分析. 计算模型考虑坝体自重与水压力: 上游水位 1 240.0 m,下游垫塘水位高程 1 000.0 m. 不考虑温度变化影响,暂不考虑地基的影响,对大坝作有限元离散,厚度方向剖分 2层单元,得到节点 3 465个,单元 2 176个. 混凝土弹性模量 21 GPa 泊松比 0.17 混凝土密度 2.4 t/m^3、水密度 1 t/m^3、混凝土抗拉强度 3.0 MPa 抗压强度 35 MPa.

图 5直观地表达了小湾拱坝在正常工作条件下的损伤响应,表明了相应的损伤程度. 图 5(a)、5(b)和 5(c)分别表示拱坝上游面总损伤分布、拉损伤分布和压损伤分布;图 5(d)为下游面总损伤分布.

由图 5(a)知,在水压、自重作用下小湾拱坝上游面产生了一定的损伤,较大值分布于拱坝坝底和基岩交界处,最大值为 0.68;在拱坝 2/3高程处也有一部分损伤域,但损伤值不大,约 0.5;两岸坝肩处没有损伤. 图 5(b)表达了拉损伤单元分布于坝基交界处和坝腹部,坝腹部损伤程度比坝体下部损伤轻微. 图 5(c)表示拱坝压损伤集中在坝底靠河谷中间部分;在大坝其他部分无压损伤发生. 图 5(d)显示下游面总体损伤比较轻微.



(a) 小湾拱坝上游面总损伤分布　(b) 小湾拱坝上游面拉损伤分布

(c) 小湾拱坝上游面压损伤分布　(d) 小湾拱坝下游面总损伤分布

图 5　小湾拱坝损伤分布

Fig. 5　Damage distribution for Xiaowan arch dam

由上述大坝损伤模式可见,小湾拱坝在正常水位条件下损伤较小,如按照损伤值达到 1.0破坏的标准,大坝的局部最小损伤安全系数为 1.0/0.68 = 1.47,大坝不会产生局部破坏,安全系数较高. 图 5也表明了小湾拱坝将在坝中和坝底及基岩相近区域产生一定程度的损伤,其中坝体损伤基本是由于受拉造成的,坝下部坝基处损伤是拉、压共同作用的结果. 可以在相应部位采取适当的工程措施预防损坏的进一步发展. 需说明的是,由于将坝基作刚性处理,使静力条件下坝基处损伤较大. 下一步的工作将考虑坝基柔性的影响,坝基结合处损伤程度可能有所降低.

7　结　论

本文建立了考虑多轴拉压损伤破坏准则的各向异性弹塑性损伤模型和考虑多轴应力条件的多轴损伤演化方程,用来模拟混凝土多轴工作状态下的各向异性损伤破坏. 利用文献[10]的实验结果和算例验证了模型的有效性,并应用于小湾高拱坝损伤响应分析,得到了正常工作状态下的坝体损伤响应和破坏趋势,拉伸和压缩损伤分布可解释大坝的破坏机理. 考虑混凝土抵抗拉、压破坏能力的差异,在拱坝这种典型空间结构的不同部位将会产生不同程度的拉压损伤. 小湾拱坝在正常工作条件下受损机理是: 坝基处的损伤是拉压损伤共同作用的结果,坝中部损伤主要是拉损伤. 所建立的模型,可应用于混凝土拱坝这种复杂水工建筑物结构的非线性损伤分析;可度量混凝土结构的破损程度和破坏趋势. 下一步工作为将模型应用于结构动力损伤响应分析,表征结构

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的动态损伤破坏进程.

参考文献:

[1] KRAJCINOVIC D. Damage mechanics: accomplishments, trends, and needs [J]. **Int J Solids Struct**, 2000, **37**: 267–277

[2] ZHOU W, ZHAO J, LIU Y, *et al*. Simulation of localization failure with strain-gradient-enhanced damage mechanics [J]. **Int J Numer Anal Methods Geo**, 2002, **26**: 793-813

[3] GHRIB F, TINAWI R. Non-linear behavior of concrete dams using damage mechanics [J]. **J Eng Mech**, 1995, **121**(4): 513-527

[4] VALLIAPPAN S, YAZDCHI M, KHALILI N. Seismic analysis of arch dams – a continuum damage mechanics approach [J]. **Int J Numer Meth Eng**, 1999, **45**: 1659–1724

[5] 陈健云, 林 皋, 胡志强. 考虑混凝土应变率变化的高拱坝非线性动力响应研究 [J]. 计算力学学报, 2004, **21**(1): 45–49

[6] 李庆斌, 张楚汉, 王光纶. 单轴状态下混凝土的动力损伤本构模型 [J]. 水利学报, 1994(12): 55–60

[7] PARK H, KIM J Y. Plasticity model using multiple failure criteria for concrete in compression [J]. **Int J Solids Struct**, 2005, **42**: 2303-2322

[8] LEMAITRE J, DESMORAT R. **Engineering Damage Mechanics** [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005

[9] DU Rong-qiang, LIN Gao, SUN Lin-song, *et al*. Tensile and compressive elastoplastic damage analysis for massive concrete structures [C]// **6th International Symposium on Test and Measurement**. Taiyuan: [s n], 2005: 4062–4065

[10] MAHNKEN R, TIKHOMIROV D, STEIN E. Implicit integration scheme and its consistent linearization for an elastoplastic-damage model with application to concrete [J]. **Comput Struct**, 2000, **75**: 135–143

An multiaxial anisotropic elastoplastic damage model for concrete and its application

DU Rong-qiang[*1,2], LIN Gao[1]

(1.School of Civil and Hydraul. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
2.Dept. of Civil Eng., Shandong Univ. of Sci. & Technol., Qingdao 266510, China)

Abstract In view of the anisotropic damage characteristics of concrete under multiaxial stress state, an anisotropic elastoplastic damage model is presented. It has the advantages of expressing the failure process progressively, displaying the damage level and failure trend clearly. A stress state factor reflecting the degree of the current stress state apart from the failure surface in stress space is introduced, so that the damage evolution equation can be improved to take account of multiaxial effect. In addition, based on the triaxial failure criterion, an isotropic multiaxial damage failure criterion is established, in which the attribute of internal plastic and damage variables and effective principle stresses are included. The proposed model reveals the anisotropic multiaxial damage characteristics of concrete effectively.

Key words elastoplastic damage; anisotropic; multiple damage failure criteria; damage evolution equation; dynamic failure process; arch dam; damage safety factor

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net