DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2015.03.009

多轴等效应变损伤模型及其在混凝土坝工作性态分析中的应用

周秋景[1],李同春[2],张国新[1]

(1.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;
2.河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏 南京 210098)

摘要:基于混凝土单轴拉伸应力应变曲线模型和四参数等效应变,给出一种修正的四参数多轴等效应变损伤模型,通过与单轴拉伸、单轴压缩、双向拉伸、双向压缩、双向拉压以及三向压缩这6种受力状态的试验资料进行对比以验证其有效性。采用该多轴等效应变损伤模型对混凝土剪切试验组合受力情况、混凝土重力坝和混凝土拱坝等结构工作性态进行数值分析,得到静力荷载下的结构损伤和应力响应,评价了结构正常工作性能及安全性。结果表明,剪切试验数值模拟结果与试验成果吻合良好,可以对以剪切为主的组合受力情况进行分析,该模型适用于复杂应力状态下的计算;典型重力坝和拱坝损伤分布区域及应力分布规律合理,该模型可以对混凝土坝工作性态及其安全性进行分析。

关键词:混凝土坝;损伤模型;多轴等效应变;工作性态
中图分类号:TV642 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-7647(2015)03-0042-05

A multi-axis equivalent strain damage model and its application in analysis of working performance of concrete dams//ZHOU Qiujing[1], LI Tongchun[2], ZHANG Guoxin[1](1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 2. *National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: A modified four-parameter multi-axis equivalent strain damage model is presented based on a typical uniaxial tensile stress-strain curve model and four-parameter equivalent strain. To verify the concrete damage model, test results under six kinds of stress states, including uniaxial tension, uniaxial compression, biaxial tension, biaxial compression, biaxaial tension-compression, triaxial compression are compared with experimental results. With the concrete damage model, this paper numerically analyzed combined force situations of concrete shear tests and working performances of concrete gravity dams and concrete arch dams. The damage and stress distribution of these structures under static loadings are obtained and analyzed. The results showed that the numerical simulation results of shear tests coincide with experimental results. Therefore, the model can analyze the combined force situation with the shear as the main force and the model is suitable for the calculation under complex stress states. In addition, the reasonable damage and stress distribution rules of typical gravity dams and arch dams indicated that the model could analyze the working performance and safety of concrete dams.

Key words: concrete dam; damage model; multi-axis equivalent strain; working performance

混凝土坝的真实工作性态和安全研究一直备受关注[1],在工程建设和科学研究中取得了很多成果,但仍存在诸多问题,如缺乏简便有效的数值模型以及模型计算结果未得到广泛认可。近年来,损伤力学作为非线性分析的一种有效手段,得到了广泛应用和发展,但由于混凝土材料自身性质复杂、加载条件各式各样,适用于实际工程并便于设计人员理解的模型并不多,已有模型有的参数过多且不易确定,有的过于简单,同实际情况有较大差异,因此给出简便合理的损伤模型十分必要。

在实际结构中,混凝土基本是多轴受力,但多轴受力试验设备要求高,同时量测比较困难,目前成果不多,现有的一些理论模型比较繁杂,应用不便。为利用简单模型对多轴受力情况进行分析,一些研究

基金项目:国家自然科学基金(51439005);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB036406);"十二五"国家科技支撑计划(2013BAB06B02)

作者简介:周秋景(1979—),男,山东菏泽人,高级工程师,博士,主要从事复杂混凝土结构分析研究。E-mail:zhouqj@iwhr.com

者采用等效方法,将混凝土多轴受力情况下复杂的应力应变关系简化为单一应力应变关系进行研究。混凝土应变的等效方法有多种,以 Darwin 等[2]在1977 年首次给出的增量型等效单轴应变方法应用最为广泛,这种等效应变以增量形式给出,形式较为复杂,且考虑混凝土材料为正交各向异性材料。韦未等[3]以 H-T-C 四参数破坏准则为基础,将应力表达关系式转换为应变关系式,给出了三轴受力情况下等效应变的定义。Mazars 等[4]假设混凝土材料为各向同性材料,在三维受力情形下,直接定义全量型等效应变为三向主应变加和后开方,这种定义方式直接对应变全量进行计算,形式简洁易于计算,但与实际情况有一定出入。Labadi 等[5]同样假设混凝土材料为各向同性材料,采用能够反映混凝土材料在受拉和受压情况下不同变形情况的系数定义等效应变。而在一般塑性力学中,通常采用三向主应变分别相互做差并平方然后加和开方的形式给出定义。由此可见,Darwin 等[2]和韦未等[3]给出的等效应变是在一定条件下由公式推导出来的,有相应的理论基础,而一般塑性力学等效、Mazars 等效和 Labadi 等效直接由主应变通过各种组合方式组合得到,缺乏理论支撑。

本文根据已有混凝土试验成果,以单轴拉伸应力应变曲线为基础,采用韦未等[3]提出的四参数多轴等效应变定义损伤变量,建立可以考虑多轴受力的损伤模型,并与试验结果进行对比,验证了模型的可靠性,然后将模型应用于混凝土重力坝和混凝土拱坝等工程实例中,分析结构的损伤、变形等,并给出结构安全评价。

1 多轴等效应变损伤模型

假定混凝土材料是各向同性的,根据损伤理论可知单轴拉伸应力应变关系和损伤量之间的关系如下:

$$\sigma = (1 - D)E_0\varepsilon \tag{1}$$

$$D = 1 - \frac{1}{E_0}\frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2}$$

式中:σ、ε、D 和 E_0 分别为应力、应变、损伤变量和弹性模量。

一般而言,不同受力情况下混凝土应力应变曲线各不相同,但曲线之间具有很多共同特征,可以在不产生很大误差的情况下采用统一形式予以表达,本文采用能够合理模拟各种强度的混凝土受拉本构模型[5]:

$$Y = \begin{cases} \dfrac{AX - X^2}{1 + (A - 2)X} & X \leqslant 1 \\ \dfrac{X}{\alpha(X - 1)^{1.7} + X} & X > 1 \end{cases} \tag{3}$$

结合式(2)和式(3)可得损伤演化方程:

$$D = \begin{cases} 1 - \dfrac{1}{A}\dfrac{A - X}{1 + (A - 2)X} & X \leqslant 1 \\ 1 - \dfrac{1}{A}\dfrac{1}{\alpha(X - 1)^{1.7} + X} & X > 1 \end{cases} \tag{4}$$

其中 $X = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_p}$ $Y = \dfrac{\sigma}{\sigma_P}$ $A = \dfrac{E_0}{E}$ $E = \dfrac{f_t}{\varepsilon_p}$

式中:A 为控制上升段曲线的参数;α 为控制软化段曲线的参数,根据试验数据拟合得到;ε_p,σ_P,f_t 分别为峰值强度应变、峰值强度和抗拉强度。

式(4)为单轴情况下的损伤演化方程,现假定多轴情况下 $\bar{\sigma}_s$ 和等效应变 $\bar{\varepsilon}_s$ 满足单轴拉伸应力应变关系,其中等效应变采用式(5)[3]得到:

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{(B\sqrt{J_2'} + C\varepsilon_1 + DI_1') + \sqrt{(B\sqrt{J_2'} + C\varepsilon_1 + DI_1')^2 + 4AJ_2'}}{2} \tag{5}$$

其中 $\varepsilon_1 = \dfrac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{J_2'}\sin\left(\theta + \dfrac{2}{3}\pi\right) + \dfrac{1}{3}I_1'$

$$\theta = \frac{1}{3}\arcsin\left(-\frac{3\sqrt{3}J_3'}{2\sqrt{J_2'^3}}\right) \quad (|\theta| \leqslant 60°)$$

$$I_1' = \varepsilon_{ii} \quad J_2' = \frac{1}{2}e_{ij}e_{ij} \quad J_3' = \frac{1}{3}e_{ij}e_{jk}e_{kl} \quad (i,j,k = 1,2,3)$$

式中:A、B、C、D 为中间参数,采用两种取值方法确定,第 1 种由 4 种受力状态(单轴拉伸、单轴压缩、双轴压缩和三轴压缩)下峰值强度对应应变确定,记作 A_s、B_s、C_s、D_s,第 2 种由上述 4 种受力状态下的真实破坏应变确定,记作 A_e、B_e、C_e、D_e;I_1'为应变张量第一不变量;J_2'为应变偏量第二不变量;J_3'为应变偏量第三不变量;ε_1 为最大主应变。

事实上,在不同受力状态下,强度变化程度与破坏应变变化程度并不相同,在计算等效应变和等效应力时参数取值相同必定会在应变或应力方面产生较大偏差,因此这里采用了上述 2 种不同取值方法。式(5)中 A、B、C、D 先由 A_s、B_s、C_s、D_s 代入,以计算等效应变 $\bar{\varepsilon}_s$,再根据 $X_s = \dfrac{\bar{\varepsilon}_s}{\varepsilon_p}$及 $Y_s = \dfrac{\bar{\sigma}_s}{\sigma_P}$判定当前应力状态在单轴应力应变关系曲线上的位置$(X_s, Y_s)$,进而得到等效应力 $\bar{\sigma}_s$;参数 A_e、B_e、C_e、D_e 由 4 种受力状态下的真实破坏应变确定,用以计算等效应变 $\bar{\varepsilon}_e$。将等效应变 $\bar{\varepsilon}_e$ 同等效应力 $\bar{\sigma}_s$ 相结合,由式(2)可求得损伤变量 D,这种采用 2 种参数取值的方法计算结果与试验结果吻合更好。

2 损伤模型验证

采用上述损伤模型,将单轴拉伸、单轴压缩、双向拉伸、双向压缩、双向拉压以及三向压缩试验结果[6-9]与相同条件下的计算结果进行对比,如

图 1 ~6 所示(图中 k_1 为两向拉力比,k_2 为两向压力比,k_3 为拉压应力比),可以看出各种受力状态下的模拟结果与试验结果变化规律一致,除三向压缩外,其他受力状态下的数值吻合也较好。在三向压缩状态下,随着围压的增加,混凝土强度和破坏应变大幅度增加,尤其是破坏应变增长很大。在混凝土单轴压缩时,破坏应变仅为 0.002 左右,但一旦存在围压(分别为单轴抗压强度的 15%、30%、53% 和 112%),混凝土破坏应变增长幅度变大(分别增大至 0.008、0.012、0.030 和 0.045 左右)。模型对混凝土强度不同程度的增长能够进行较好的模拟,但对于破坏应变的超常规增加,目前无法准确进行模拟。总体而言,模型能够比较准确地模拟结构在各种受力状态下的非线性变化特性。

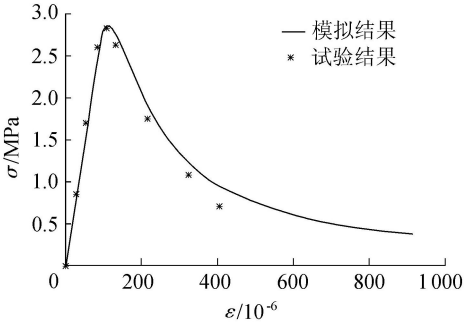


图 1　单轴拉伸试验结果和模拟结果对比

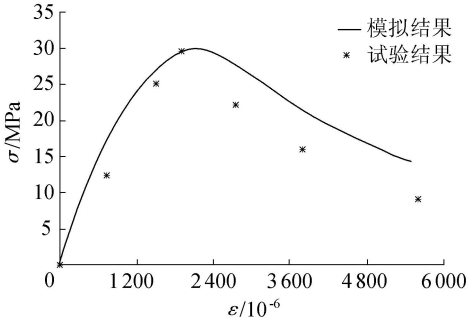


图 2　单轴压缩试验结果和模拟结果对比

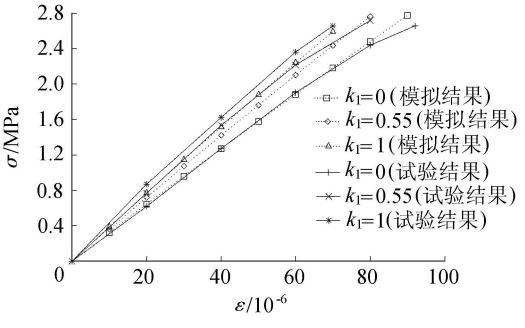


图 3　双向拉伸试验结果和模拟结果对比

3　数值算例

为验证多轴等效应变损伤模型在复杂受力状态下的适用性,采用该模型对混凝土剪切试验组合受力情况、混凝土重力坝和混凝土拱坝等结构工作性态进行数值计算,以分析计算模型的可行性和计算结果的合理性。

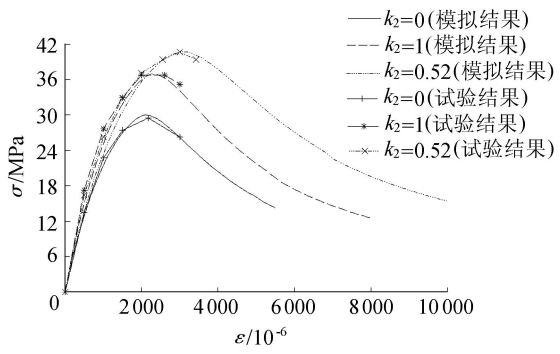


图 4　双向压缩试验结果和模拟结果对比

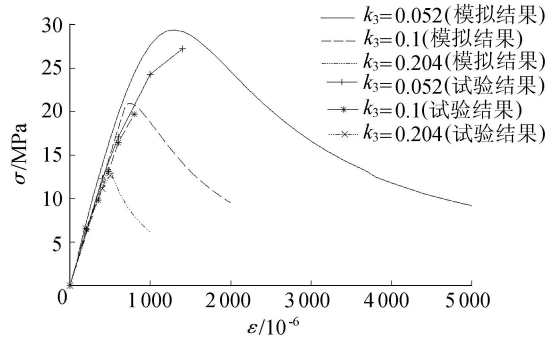


图 5　双向拉压试验结果和模拟结果对比

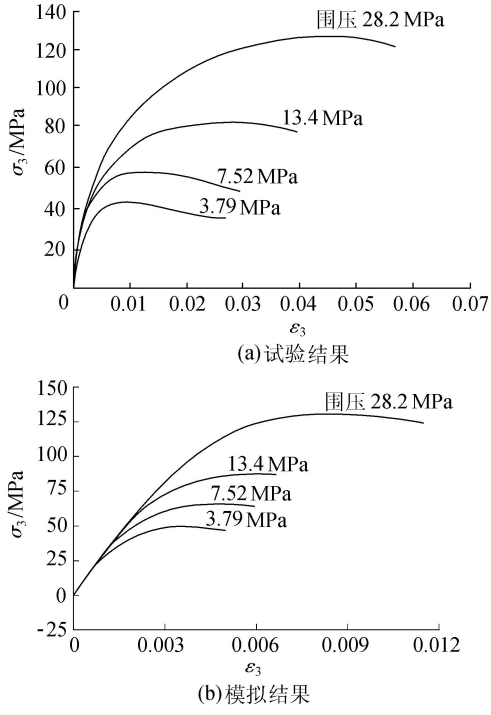


图 6　三向压缩试验结果和模拟结果对比(单轴抗压强度 25.2 MPa)

3.1　混凝土剪切试验

对文献[9]中静力剪切试验进行模拟分析,以位移控制方式施加荷载。材料参数取 $f_c = 6.5$ MPa,$f_t = 0.7$ MPa,$E_0 = 10$ GPa,$\varepsilon_t = 0.0001$,采用多轴损伤模型

进行计算,最大控制位移为0.25 mm,计算模型见图7。

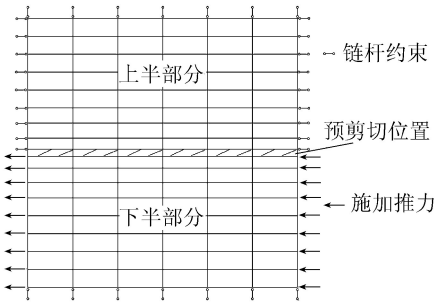


图7　混凝土剪切试验计算模型

图8为预剪切平面(竖直方向中断面)水平剪切应力比与剪切位移比的关系曲线,与图9中试验结果[10]特征相符,但由于损伤后没有考虑残余强度,使得损伤区域贯通后承载力几乎降低为零。图10为数值模拟试件剪切破坏的整个过程,试件损伤首先发生在试件前后边缘,当荷载增加时,损伤不断向试件内部扩展,但并非沿预定剪切面的水平方向发展,而是偏向一边,当两侧损伤破坏增大到一定程度时,上下部分的宏观损伤相互贯通,形成凹凸不平的剪切面,与试验结果是相符的,只是在实际情况下材料性质不均匀,往往造成一边先破坏另一边后破坏的现象。上述结果说明该损伤模型是合理有效的,不但可以考虑拉、压情况,还可以对剪切为主的组合受力情况进行分析,可以适用于复杂应力状态下的计算。

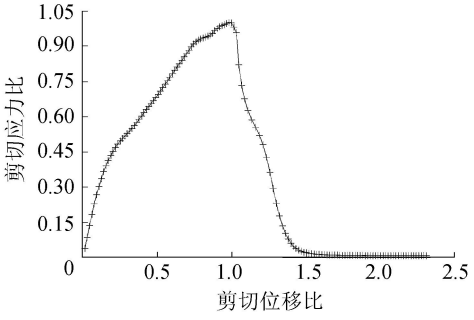


图8　剪切位移比与水平剪切应力比关系曲线

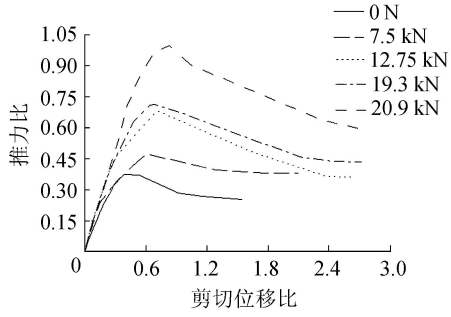


图9　不同竖向压力下剪切位移比与推力比关系曲线

3.2　混凝土重力坝

以Koyna混凝土重力坝[11-12]为例,说明损伤模型在重力坝工作性态分析中的可行性和有效性。混凝土材料参数如下:f_c = 24.1 MPa,f_t = 2.9 MPa,E = 30 GPa,μ = 0.2,ρ = 2 630 kg/m^3,地基考虑为刚性地基。图11和图12分别是正常水压和水压超载40%时坝体损伤和应力云图(以拉应力为正)。可知正常水压时,坝踵拉应力不超过0.2 MPa,坝趾压应力不超过3 MPa,坝体结构没有出现损伤;水压超载40%时,坝体仅坝踵部位出现一定程度的损伤,应力分布相比正常水压下有较大改变,坝踵部位和上游坝面高60 m处有超过1 MPa的拉应力出现,最大值为1.86 MPa;压应力最大值约6 MPa,与抗压强度相比较小。与文献[11-12]的研究结果相比,由于本文采用的强度参数偏大,因此损伤范围稍小,但考虑损伤后应力值及其变化规律与文献[11-12]研究成果接近。

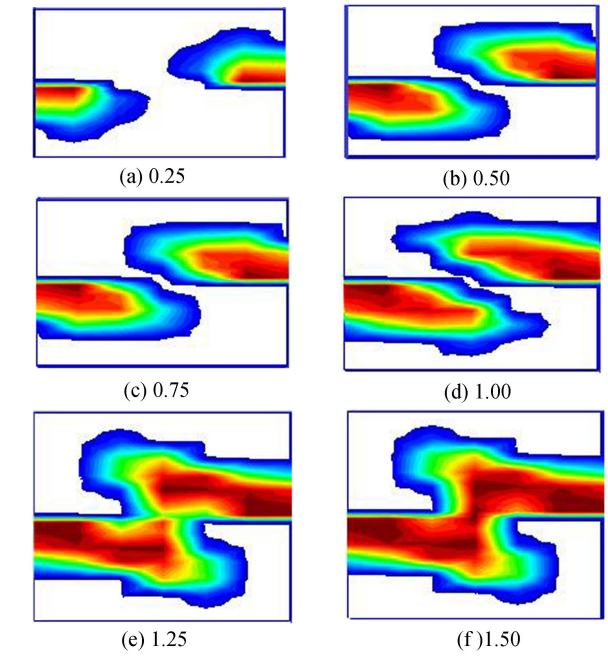


图10　不同剪切位移比时混凝土剪切损伤破坏过程(深色区域为损伤区域)

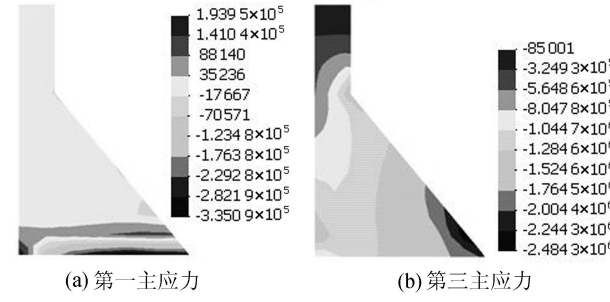
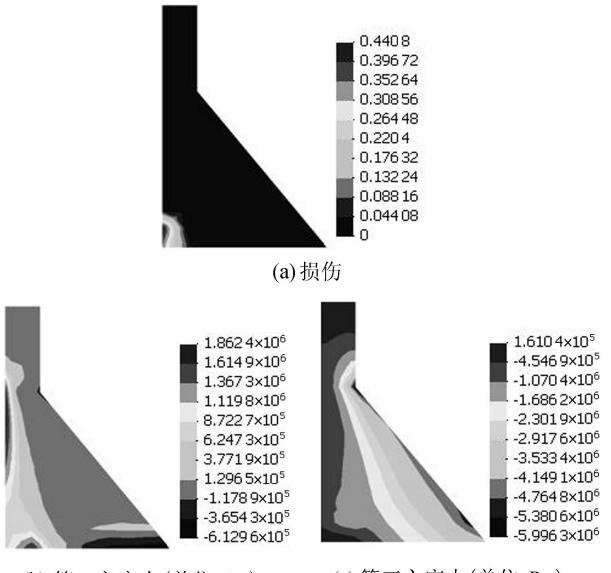


图11　正常水压下坝体应力云图(单位:Pa)

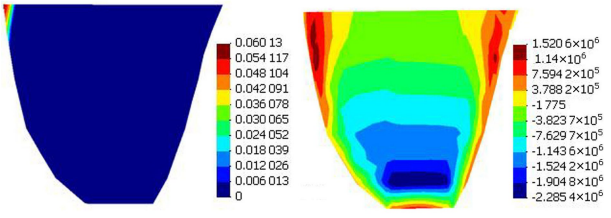
3.3　混凝土拱坝

以乌东德拱坝[13]为例,说明损伤模型在拱坝安全分析中的可行性和有效性。乌东德拱坝混凝土材料参数:f_c = 23.0 MPa,f_t = 2.3 MPa,E = 20 GPa,μ = 0.167,ρ = 2 400 kg/m^3;基岩材料参数:E = 25 GPa,μ = 0.22,ρ = 2 600 kg/m^3。图13和图14分别为拱坝



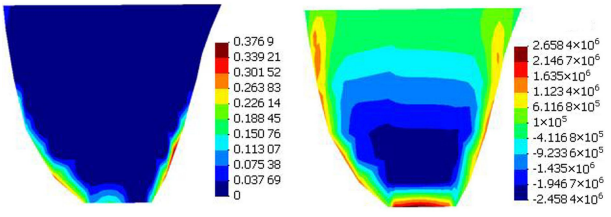
(a)损伤　(b) 第一主应力(单位:Pa)　(c) 第三主应力(单位:Pa)

图 12　水压超载 40% 时坝体损伤和应力云图



(a)损伤　(b)第一主应力(单位:Pa)

图 13　正常水压下坝体上游面损伤和第一主应力云图



(a)损伤　(b)第一主应力(单位:Pa)

图 14　水压超载 1 倍下坝体上游面损伤和第一主应力云图

在正常水压和水压超载 1 倍下坝体上游面损伤情况和第一主应力云图,下游面在两种情况下没有出现损伤,这里不予讨论。可知正常水位时左右拱端存在拉应力,出现了一定程度的损伤,这与一次性施加重力荷载有关;坝体出现损伤后拉应力得以释放,最大拉应力值较小。在水压超载 1 倍作用下,拱坝上游面底部损伤有较大程度的发展,表明坝体坝踵部位已有所破坏,但破坏程度不大,说明具有较强的承载能力。

4　结　语

笔者基于混凝土单轴拉伸应力应变曲线模型和四参数等效应变,给出了一种多轴等效应变损伤模型,编制了相应程序,通过将计算结果与具代表性的单轴拉伸、单轴压缩、双向拉伸、双向压缩、双向拉压以及三向压缩试验结果的对比,验证了模型的有效性和程序的正确性。将上述损伤模型应用于实际混凝土结构中,结果显示该损伤模型不但可以考虑拉、压情况,还可以对以剪切为主的组合受力情况进行分析,可以适用于复杂应力状态下的计算;重力坝算例和拱坝算例分析结果符合一般规律,与其他研究结果相近,表明该模型能够应用在重力坝和拱坝工作性能评价和安全分析中。但该模型在考虑混凝土三向压缩时,计算得到的应变值较试验值明显偏小,需要进一步研究改进。

参考文献:

[1] ZHANG Guoxin, LIU Yi, ZHOU Qiujing. Study on real working performance and overload safety factor for high arch dam[J]. Science in China: Technological Sciences, 2008,51(Sup2):48-59.

[2] DARWIN D, PECKNOLD D A. Nonlinear biaxial stress strain law for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1977, 115(2):229-241.

[3] 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. (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. (in Chinese))

[4] MAZARS J, HAMON F, GRANGE S. A new 3D damage model for concrete under monotonic, cyclic and dynamic loadings [J]. Materials and Structures, 2013,46: 1-15.

[5] LABADI Y, HANNACHI N E. Nonlinear damage behavior of concrete structures [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005,32(4):765-774.

[6] 丁发兴,余志武. 混凝土受拉力学性能统一计算方法[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2004,21(3):29-34. (DING Faxing, YU Zhiwu. Unified calculation method of mechanical properties of concrete in tension [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Sciences. 2004, 21(3): 29-34. (in Chinese))

[7] 杨木秋,林泓. 混凝土单轴受压受拉应力应变全曲线的试验研究[J]. 水利学报,1992,23(6):60-66. (YANG Muqiu, LIN Hong. Experimental research on stress-strain curves of uniaxial compressive and tension[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 23(6): 60-66. (in Chinese))

[8] KUPFER H, HILSDORF H K. Behavior of concrete under biaxial stresses[J]. ACI Journal,1969,66(8): 656-665.

[9] 过镇海. 混凝土的强度和变形:试验基础和本构关系[M]. 北京:清华大学出版社,1997.

(下转第 118 页)

Air lock phenomenon and law during long-distance pipeline dewatering [J]. Petroleum Engineering Construction,2010,36(5):13-16. (in Chinese))
[14] 鞠岚,廖柯熹,陈莎,等. 成品油管道落差地段水力特性研究[J]. 天然气与石油,2011,6(3):14-16. (JU Lan, LIAO Kexi, CHEN Sha, et al. Hydraulic characteristics research of product oil pipeline at gap location[J]. Natural Gas and Oil,2011,6(3):14-16. (in Chinese))
[15] 陈家琅. 石油气液两相管流[M]. 北京:石油工业出版社,1989:20-22.
[16] 万五一. 长距离输水系统的非恒定流特性研究[D]. 天津:天津大学,2004.
[17] 胡建永,张健,陈胜. 串联加压输水工程事故停泵的应急调度[J]. 人民黄河,2013,35(8): 74-76. (HU Jianyon,ZHANG Jian,CHENG Sheng. Emergency dispatch of pump-stop for series connection pressurization water supply project [J]. Yellow River,2013,35(8):74-76. (in Chinese))
[18] 怀利 E B,斯特里特 V L. 瞬变流[M]. 清华大学流体传动与控制教研组,译. 北京:水利水电出版社,1983.
[19] 郑源. 输水管道系统水流冲击截留气团与含气水击研究[D]. 南京: 河海大学,2004.
[20] 李晓燕. 长距离重力流输水管道水击防护方法研究[D]. 西安:长安大学,2012.
[21] 梁兴,刘梅清,张进国,等. 空气罐对输水管道水击的防护研究[J]. 排灌机械,2005,23(6):16-18. (LIANG Xing,LIU Meiqing,ZHANG Jinguo,et al. Protection study on water hammer of pipelines by air vessel[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23 (6): 16-18. (in Chinese))
[22] 龙侠义. 输配水管线水击数值模拟与防护措施研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
[23] 童乐一,樊红刚,陈乃祥. 跨海引水工程的控压措施研究[J]. 水力发电学报,2008,27(4):71-76. (TONG Leyi, FAN Honggang, CHEN Naixiang. Research on the method of control pressure of diversion project in the sea [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2008,27(4): 71-76. (in Chinese))
[24] 龚娟,张健,俞晓东. 高扬程输水系统空气罐阻抗孔尺寸优化[J]. 水电能源科学,2013,31(5):166-169. (GONG Juan,ZHANG Jian,YU Xiaodong. Optimization of impedance orifice of air vessel in high-lift water supply system[J]. Water Resources and Power,2013,31(5): 166-169. (in Chinese))
[25] 唐寅. 水击的研究与防护[D]. 武汉:武汉科技大学,2008.
[26] KIM S H. Design of surge tank for water supply systems using the impulse response method with the GA algorithm [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010,24(2): 629-636.
[27] WAN W, HUANG W, LI C. Sensitivity analysis for the resistance on the performance of a pressure vessel for water hammer protection [J]. Journal of Pressure Vessel Technology,2014,136(1): 871-876.
[28] 高松竹,蒲家宁,许萍,等. 空气罐控制输液管道水击研究[J]. 管道技术与设备,2004,4:17-19. (GAO Songzhu,PU Jianing,XU Ping,et al. Study on controlling water hammer of pipelines by air tank [J]. Pipeline Technique and Equipment,2004,4:17-19. (in Chinese))
[29] 王文蓉,叶亚玲,鞠小明. 压力空气罐对火电厂补给水系统瞬态负压的防护研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2003,35(1):27-30. (WANG Wenrong,YE Yaling, JU Xiaoming. Protection study avoiding transient negative pressure by air vessel of thermal power station pumping system [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2003,35(1):27-30. (in Chinese))

(收稿日期:2014-04-15 编辑:骆超)

(上接第 46 页)

[10] 周秋景,李同春,宫必宁. 循环荷载作用下脆性材料剪切性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):573-579. (ZHOU Qiujing, LI Tongchun, GONG Bining. Experimental study on shear behaviors of brittle materials under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(3):573-579. (in Chinese))
[11] GHRIB F, TINAWI R. An application of damage mechanics for seismic analysis of concrete gravity dams [J]. Earthquake Engng Struct Dyn,1995,24:157-173.
[12] 杜荣强. 混凝土静动弹塑性损伤模型及在大坝分析中的应用[D]. 大连:大连理工大学,2006.
[13] 赵兰浩. 考虑坝体-库水-地基相互作用的有横缝拱坝地震响应分析[D]. 南京:河海大学,2006.

(收稿日期:2014-01-24 编辑:骆超)

(上接第 70 页)

[12] 梁健伟, 房营光, 陈松. 滨海盐渍土的强度特性试验与机理分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(7): 36-40. (LIANG Jianwei, FANG Yingguang, CHEN Song. Experiment and mechanism analysis on strength characteristics of coastal saline soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27 (7): 36-40. (in Chinese)
[13] 洪安宇, 杨晓松, 党进谦,等. 非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 52-55. (HONG Anyu, YANG Xiaosong, DANG Jinqian, et al. Shear strength property of unsaturated chlorine saline soill [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 52-55. (in Chinese))

(收稿日期:2014-03-18 编辑:郑孝宇)