

文章编号:0559-9350(2008)07-0848-06

## 高拱坝地震损伤破坏的数值模拟

钟红,林皋,李建波,胡志强

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

**摘要:**本文在假设混凝土宏观均质的基础上考虑细观不均匀性的影响,采用带残余强度的双折线损伤演化模型和带幂函数下降段的损伤演化模型,结合带拉伸截断的摩尔-库仑破坏准则,探讨了高拱坝在地震作用下的裂缝扩展和破坏形态。某即将兴建的拱坝的计算结果表明,混凝土大坝破坏主要由拉应力引起,开裂从坝顶中部开始,裂纹主要出现在坝体上部,其余部位基本保持完好。计算结果得出的最终破坏形态与模型试验基本一致。

**关键词:**细观不均匀性;地震损伤破坏;拱坝

**中图分类号:**TV312

**文献标识码:**A

## 1 研究背景

我国有一批300m级的超高拱坝将在长江、黄河上游等西南、西北强地震区进行建设,大坝抗震安全成为需要解决的关键技术之一。混凝土拱坝的静动力分析传统上采用线弹性方法,对大坝的安全评价采用以混凝土单轴抗拉强度为标准的强度准则。分析结果往往有部分高应力区超过材料的抗拉强度,从而出现损伤或开裂。为了尽量准确地反映大坝的真实工作状况,必须采用非线性分析方法,考虑出现损伤或开裂后混凝土的行为以及对大坝的整体抗力的影响,以便对大坝的抗震安全性作出科学的判断。

混凝土为准脆性材料,对这类材料裂缝损伤发展的计算模型和数值计算方法目前还处于发展阶段。在有限元框架内的裂缝计算模型有分离式裂缝模型(discrete crack model)和弥散式裂缝模型(smeared crack model)两类。分离式裂缝模型应用断裂力学概念来模拟混凝土中的离散裂缝,可获得裂缝的几何形态,适用于裂缝较少、主干裂缝发生和发展的部位和方向都比较明确且事先接近已知的情形。缺点是需要对裂尖重新剖分网格,计算复杂且计算量大,在大坝尤其是拱坝的动力分析中很少采用。弥散式裂缝模型,包括Bazant的钝断裂带模型,应用连续介质力学理论,通过修改本构方程模拟混凝土的开裂行为。在反映裂缝引起的各向异性特性方面存在困难。有的作者近似地应用旋转裂缝模型来克服,但各方向裂缝耦合的根本性问题难以解决。此外,这种模型在分析过程中需要预测裂缝发展的部位,并且对网格的方向也十分敏感,需要在计算过程中不断调整网格拓扑,给大体积结构的数值分析带来相当大的难度。

有限元框架内的另一类裂缝计算模型是在连续介质损伤力学基础上建立的<sup>[1]</sup>。这种模型采用材料劣化的途径来模拟微裂纹萌生、扩展、桥接、成核的平均效应。对于脆性材料承受拉应力的情形,损伤被定义为刚度的退化。损伤力学模型在大体积混凝土结构动力分析中有较多应用。但这种模型只能模拟裂缝引起的结构损伤部位、损伤程度及其对结构力学性能的影响,而难以模拟裂缝引起的大坝损伤破坏模式及形态。这种模型同样存在各向异性损伤问题。特别对受到地震等循环荷载作用的裂缝开合过程

收稿日期:2007-08-27

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(90510018,50139010);中国博士后科学基金(20060390986)

作者简介:钟红(1981-),女,博士,主要从事大坝抗震数值模拟研究。E-mail:zhonghongm@126.com

的模拟缺乏有效的准则。开裂与塑性耦合也比较困难。对于预想的开裂区域,一般也需要加密网格。

近年来上述模型应用于混凝土坝地震损伤破坏的数值分析有了比较大的发展,但比较多的文献仍然偏重于二维重力坝的地震响应分析,对印度 Koyna 坝地震损伤断裂的模拟获得了较好的效果<sup>[2]</sup>。在三维拱坝方面比较有代表性的是 Valliappan 等<sup>[3]</sup>应用弹性损伤模型研究了刚性地基上拱坝的地震损伤范围, Lotfi<sup>[4]</sup>等应用弥散性裂缝模型研究了刚性地基上拱坝的地震拉应力分布,估计了可能的开裂范围。计算中单元出现非正交裂缝后,对应力应变关系进行调整,同时引入界面单元,可结合进行离散性裂缝的耦合分析。我国陈健云等<sup>[5]</sup>基于速率相关的损伤力学模型,研究了拱坝的地震响应与可能的损伤区域,杜荣强等<sup>[6]</sup>建立了反映多轴损伤破坏特性的各向异性弹塑性损伤模型进行拱坝地震响应分析。崔玉柱等<sup>[7]</sup>用刚体弹簧元研究了梅花拱坝的破坏机理,潘坚文等<sup>[8]</sup>在拱坝的地震开裂分析中考虑了塑性耦合影响。潘文的特点是网格分得比较细,考虑了横缝张合的影响,研究了配筋对损伤开裂的影响,地基采用无质量地基模型。总的看来,三维拱坝的地震损伤分析受到研究者愈来愈广泛的重视,但由于问题的复杂性,大多引入了一些比较简化的假定。例如,多轴损伤开裂只能近似考虑,弹塑性耦合中有的采用了理想塑性,有的采用了过度简化的塑性屈服面,对无限地基的影响一般都作了简化。因此,计算结果都存在有较大的局限性。上述计算一般只能估计拱坝的地震损伤范围,难以进行损伤发展进程的数值模拟。而且还会存在计算的稳定性和收敛性等问题。

还有必要指出,上述计算模型中都将混凝土看作宏观均质材料。实际上,混凝土为由骨料、水泥砂浆和界面等细观结构组成的。当结构受力和变形都在弹性范围内时,宏观应力-应变关系符合线性规律,从而可将混凝土在宏观上看作均质材料。但如果需要研究混凝土结构的损伤演化问题,研究非线性产生的物理机制,材料细观组成的不均匀性就不可忽略了。唐春安等<sup>[9]</sup>应用 Weibull 模型反映细观不均匀性的影响,研究岩石的破裂过程,取得了比较大的成功。然而对于大体积混凝土结构的地震响应分析,若是从严格的细观尺度上考虑微裂纹的产生及扩展,以目前的软硬件水平来说,显然是不现实的。但如果将结构离散后的有限元模型视为一个样本空间,每一个单元为一个样本点,在样本点足够多,也就是单元数量足够多的情形下,单元的材料特性可以认为服从某种随机分布规律。

本文认为在宏观均质假定基础上考虑细观不均匀性的影响是模拟拱坝地震破坏的一条有效途径。以随机分布函数反映细观不均匀性可以认为是一种等价模型。采用这种模型需要划分大量的单元,同时单元划分得足够细。这种作法的优点是每个单元可以采用比较简化的模型,例如,弹性损伤模型就足以反映脆性材料破坏的特点<sup>[10]</sup>。其次由于单元划分很细,则各向异性损伤、单元尺寸对断裂能的影响都淡化了,给计算带来比较大的方便。采用这种模型,可以模拟拱坝地震损伤发展的进程,直观地显示裂缝的形成和扩展,显示地震破坏的形态。

拱坝设计中混凝土的抗压强度采用了很高的安全系数。模型试验和地震观测都表明,在拱坝的地震响应过程中,坝体的开裂是由拉应力占主导地位的,很少出现由于压应力超过抗压强度导致混凝土材料劣化的情况。文中对于混凝土受拉状态采用了带残余强度的双折线损伤演化模型,对受压状态采用了带幂函数下降段的损伤演化模型,结合带拉伸截断的摩尔-库仑破坏准则,以某计划兴建拱坝为例,研究了高拱坝在地震作用下的裂缝扩展过程和破坏形态。

本文只是这方面的一种尝试,随着研究的深入,将不断趋于完善。

## 2 混凝土损伤的计算模型

混凝土材料是一种准脆性材料,其受力后变形和断裂过程的非线性是由内部微裂纹的萌生和扩展引起的,标志着材料特性的逐步劣化。传统的计算方法中,通过混凝土宏观单元的非线性和塑性来反映这种影响,需要采用复杂的理论和计算模型来模拟。事实上当将结构的有限元模型划分足够大量的单元,单元尺寸足够小时,可以采用较简单的本构关系,以及简单的损伤模型及破坏准则来反应其宏观性质的退化。

本文采用弹性损伤力学的本构关系来描述细观单元的性质。按照应变等价原理,认为应力 作用

在受损材料上引起的应变与有效应力作用在无损材料上引起的应变等价。根据这一原理,受损材料的本构关系可以通过无损材料的名义应力与应变 的关系表示,即

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

式中:  $E_0$  和  $E$  分别表示材料的初始弹性模量和损伤后的弹性模量;  $D$  为损伤变量,  $D = 0$  对应无损伤状态,  $D = 1$  对应完全损伤状态。

当单元的最大拉应力达到其单轴抗拉强度时,该单元开始发生拉伸损伤。本文采用了带残余强度的双折线损伤演化模型。对于如图 1 给出的本构曲线,拉伸损伤变量的表达式为:

$$D_t = \begin{cases} 0 & \varepsilon_t < \varepsilon_{t0} \\ 1 - \left( \frac{\sigma_t - f_{tr}}{f_t - f_{tr}} + \frac{\varepsilon_{tr} - \varepsilon_t}{\varepsilon_{tr} - \varepsilon_{t0}} \right) & \varepsilon_{t0} < \varepsilon_t < \varepsilon_{tr} \\ 1 - \frac{\varepsilon_{tr} - \varepsilon_t}{\varepsilon_{tr} - \varepsilon_{t0}} & \varepsilon_{tr} < \varepsilon_t < \varepsilon_{tu} \\ 1 & \varepsilon_t > \varepsilon_{tu} \end{cases} \tag{2}$$

式中:  $f_t$  和  $f_{tr}$  分别指单元的单轴抗拉强度和极限抗拉强度;  $\varepsilon_{t0}$ 、 $\varepsilon_{tr}$ 、 $\varepsilon_{tu}$  分别表示单元的拉伸弹性极限应变、残余强度对应的应变以及极限应变;  $\alpha$  为残余强度系数,  $\alpha = f_{tr}/f_t$ , 易知  $0 < \alpha < 1$ ;  $\beta$  为残余应变系数,  $\beta = \varepsilon_{tr}/\varepsilon_{t0}$ ,  $0 < \beta < 1$ , 当  $\beta = 1$  是退化为弹脆性损伤演化方程;  $\gamma$  为极限应变系数,  $\gamma = \varepsilon_{tu}/\varepsilon_{t0}$ ;  $\varepsilon_t$  为单元的主拉应变。

本文中取  $\alpha = 0.1$ ,  $\beta = 2.0$ ,  $\gamma = 5.0$ 。

文中同时考虑了单元在压缩或剪切作用下的损伤。当单元的应力状态满足摩尔-库仑准则时,认为单元开始发生剪切损伤。摩尔-库仑准则中的摩擦角 取为 30 度,根据单轴受压状态下的摩尔-库仑准则反算求得黏聚力  $c = \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} f_c$ 。剪切损伤的演化方程采用如图 2 的幂函数形式。

$$D_c = \begin{cases} 0 & \varepsilon_c > \varepsilon_{c0} \\ 1 - \left( \frac{\varepsilon_{c0} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{cu}} \right)^N & \varepsilon_{c0} > \varepsilon_c > \varepsilon_{cu} \\ 1 & \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} \end{cases} \tag{3}$$

式中:  $f_c$  表示单元的单轴抗压强度;  $\varepsilon_{c0}$  和  $\varepsilon_{cu}$  分别表示单元的压缩弹性极限应变和极限应变;  $\alpha$  为极限应变系数,  $\alpha = \varepsilon_{cu}/\varepsilon_{c0}$ , 文中取  $\alpha = 100.0$ ;  $\varepsilon_c$  为单元的单轴压缩应变,多轴条件下用等效应变  $\bar{\varepsilon}$  代替,  $\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + \frac{1}{2}(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + \frac{1}{2}(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$ ;  $N$  为与下降段形状有关的参数。

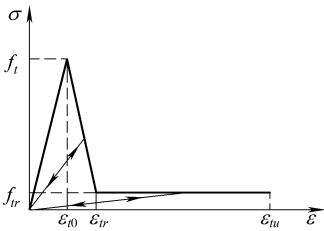


图 1 带残余强度的双折线损伤演化模型

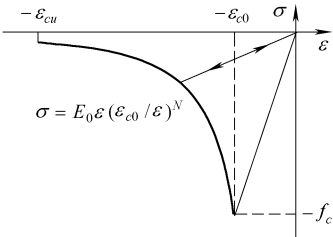


图 2 幂函数下降段的损伤演化模型

考虑到混凝土材料的拉压不等性,程序设计中优先判断拉损伤。只有当单元在本次迭代未产生新的拉损伤时才采用摩尔-库仑准则判断是否产生剪切损伤,损伤的数值由剪切损伤演化方程求得。

计算中认为地震作用是在大坝已承受静态作用的正常运行工况下发生的,动态应力是叠加在坝体已有静态应力基础上。每一荷载步内,按前一步末的刚度阵,求解节点位移场和应力场。进行损伤判断后如无单元产生损伤,进入下一荷载步计算。否则根据损伤值更新单元刚度,重新求解位移和应力场,直到不再出现新单元损伤且前后两次迭代位移范数满足给定的收敛准则,进入下一荷载步计算。

3 高拱坝地震损伤破坏数值模拟

3.1 计算模型及计算条件 以某计划兴建拱坝整体坝情形为例,研究了其在地震作用下的裂缝扩展过程和破坏形态。

该拱坝坝高 296m,设计地震加速度为 0.408g。计算分析中采用刚性地基模型,在坝体底部施加固定约束。模型采用六面体等参元进行网格剖分,少量三棱柱单元作为网格过渡之用。用随机分布函数来反映混凝土的细观不均匀性,必须要有足够多数量的计算单元。在此基础上,根据计算机的计算能力,单元尺寸选择为大约 4m,整个模型共分为 73728 个单元,82095个节点。

坝体混凝土采用 R300,抗拉强度 2.74MPa,抗压强度 14.75MPa,弹性模量根据规范取为 30GPa。动力分析中强度和弹模均提高 30 %。

研究了拱坝在正常蓄水位及相应下游尾水位 + 自重 + 泥沙压力 + 温降 + 地震荷载 ( $a = 0.408g$ ) 的荷载组合下的破坏形态。其中地震荷载加速度时程曲线如图 4 所示。竖直向加速度幅值取为水平向幅值的 2/3。

采用动水附加质量来反应坝体-库水动力相互作用的影响。坝体及地基的材料阻尼采用 Rayleigh 阻尼假定  $C = M + K$ ,振型阻尼比为 5 %。

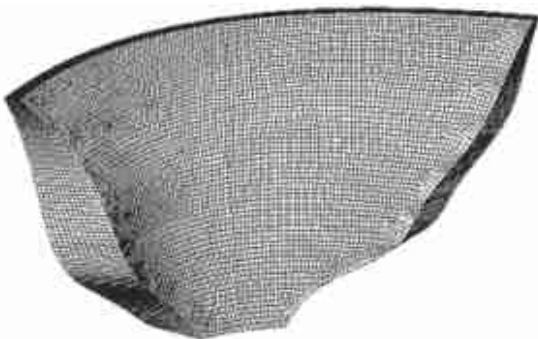


图3 有限元计算模型

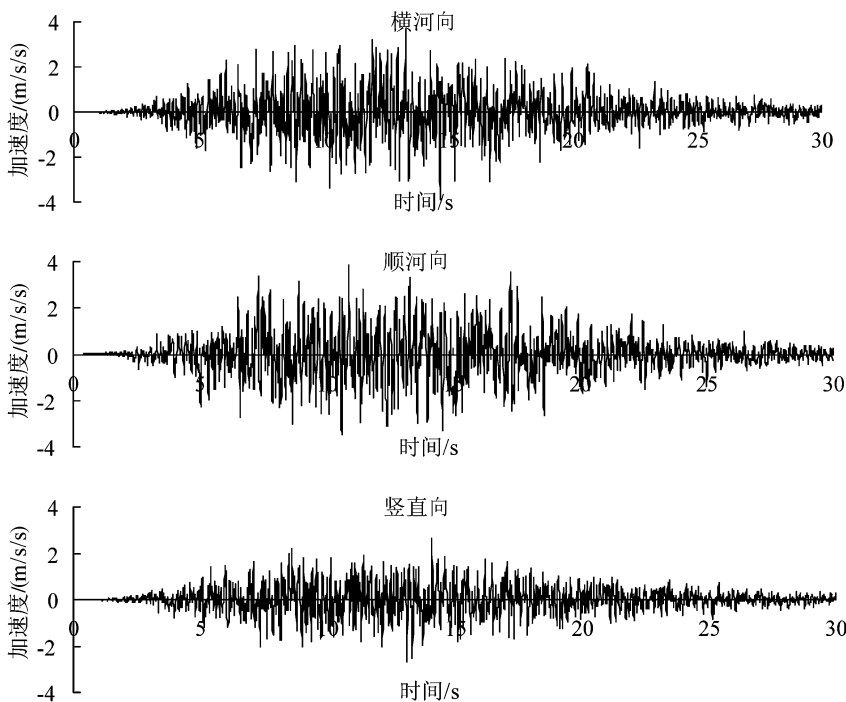


图4 地震加速度时程曲线

3.2 破坏形态 静载阶段以及动载加载初期,坝体大部分区域受压,只有少数材料特性较弱的单元发生损伤,坝体基本保持完好。9.58s 时,顶拱中部偏右出现第一条可见裂缝(图 5(a)),向下延伸,这是由于顶拱中部为高拉应力区,应力值超过混凝土抗拉强度导致的。该裂缝向下延伸坝体高度的 1/5 时,拱向应力的释放使得裂缝底部梁向应力增大,该裂缝转而向左发展。对于图 5(b)中坝顶中部附近的混凝土块体来说,此时来自其右方和下部的支撑力由于裂缝的出现大大减弱,从而其左方在往复荷载下承受

高应力,最终被拉断。第一条竖直向裂缝的出现同时使得其右方梁向应力增大,图 5(b)中可见该部位出现单元破坏,至图 5(c)可见明显的水平裂缝。此水平裂缝与前述竖直裂缝造成了坝顶又一块混凝土体获得的支承减弱,其右部在高拉应力下形成了竖直裂缝,该混凝土体与大坝脱离图 5(d)。随着动载继续施加,坝体上部水平裂缝和竖直裂缝交替出现,坝块连续崩落。坝体右上角则被宏观的剪切裂缝破坏。本文研究的拱坝底部较厚,且由于震动能量大部分在坝体上部消耗,坝体中下部得以保持完好。对照上游面和下游面的最终破坏形态,可看出几条主要的裂缝都贯穿了坝体。裂缝的出现使拉应力得到释放,因此由于裂缝贯穿而与坝体脱离的混凝土体其内部仍保持完好。

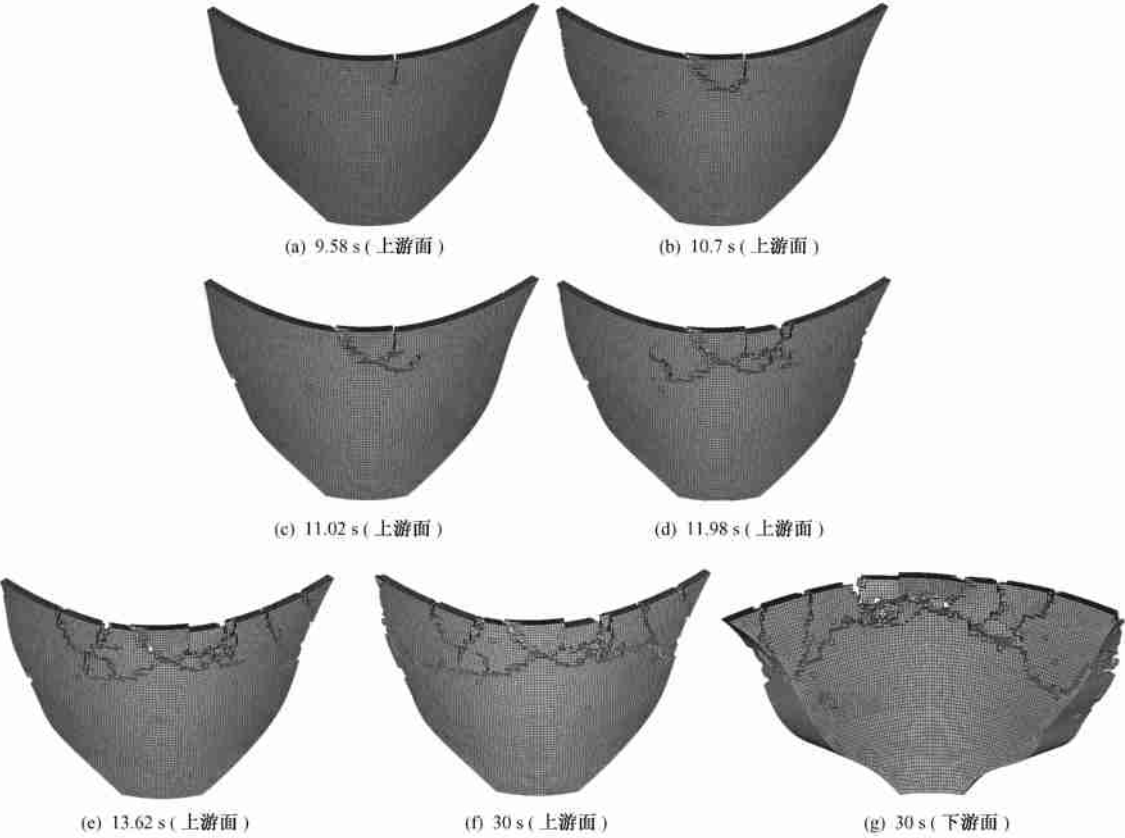


图 5 大坝地震作用下破坏形态

由于混凝土的拉压不等性,裂缝的出现基本上都是由拉应力超过混凝土抗拉强度引起的,而在宏观上可能表现为拉裂缝或剪切裂缝。由于坝顶中部为高应力区,坝体从该处起裂,向下延伸,裂缝引起的应力重分布继而改变了裂缝的扩展方向,裂缝水平扩展,直接导致裂缝包围的混凝土体在往复荷载下脱离坝体。开裂在细观层次上是由拉应力超过混凝土抗拉强度引起的。裂缝的出现使得其附近的混凝土拉应力释放,从而裂缝之外的混凝土基本保持完好。

大连理工大学在上世纪 90 年代进行了拉西瓦拱坝的动力模型试验,最终的破坏形态如图 6 所示。通过对比图 5 和图 6 可看出,应用本文模型得到的大坝破坏形态与振动台模型试验的结果是一致的。此外,美国垦务局进行了 1/100 比尺的薄拱坝和 1/150 比尺的中厚拱坝的振动台模型试验<sup>[11]</sup>,研究了拱坝在地震作用下的损伤破坏形态。在整体坝的试验中,观察到坝顶以下出现一条水平裂缝,该裂缝在左右两侧分别斜向上发展,形成与拱座大致平行的贯穿裂缝。被裂缝包围的混凝土块脱离大坝主体的约束,独立振动,直至倾覆,大坝主体保持完好。由于模拟条件不完全相同,我们的数值模拟结果与垦务局的物理试验存在一定的差别。但可以看出,拱坝的拱冠梁顶部区域是抗震设防的薄弱部位,在地震作用下往往成为起裂部位,裂纹贯穿坝体后继续扩展将使得混凝土块脱离大坝主体,并有可能倾覆。如地震持时足够长,坝体上部将产生连锁反应,先后丧失承载能力,相继倾覆。

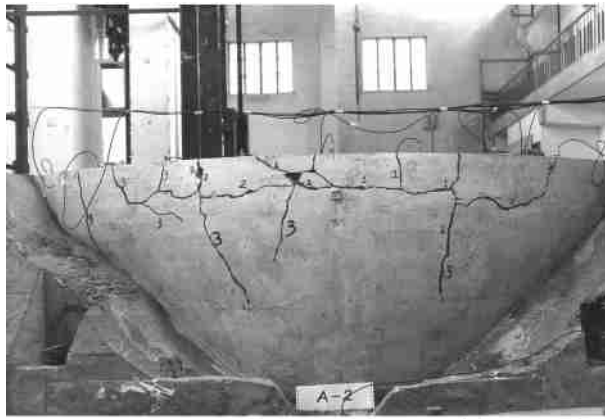


图6 拉西瓦拱坝动力模型试验最终破坏形态

#### 4 结论

本文在宏观均质假定基础上引入随机分布函数考虑细观不均匀性的影响,基于拉压状态下的弹性损伤本构关系以及带拉伸截断的摩尔-库仑破坏准则,研究了某计划兴建拱坝在地震作用下的裂缝扩展过程和破坏形态。计算结果表明,拱坝的拱冠梁顶部区域是抗震设防的薄弱部位,这与拉西瓦拱坝的动力模型试验以及美国垦务局模型试验的结论基本一致。

本文的模型,考虑了混凝土材料的细观非均匀性,通过修改材料参数模拟单元层次上材料的劣化,在有限元框架内,可以用连续介质力学的方法重现拱坝在地震作用下裂纹萌生、扩展、桥接,直至拱坝破坏的全过程。以一种统一模型模拟连续变形和非连续变形行为,避免了对裂缝单元进行单独处理带来的编程和计算上的困难,且便于研究拱坝开裂的机理。

致谢:本文的完成得到了唐春安教授和梁正召博士的大力支持,特此表示感谢。

#### 参 考 文 献:

- [1] Dougill J W. On stable progressively fracturing solids[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 1976, 27: 423 - 437.
- [2] Wang Guanglun, Pekau O A, Zhang Chuhan, Wang Shaomin. Seismic fracture analysis of concrete gravity dams based on nonlinear fracture mechanics[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65: 67 - 87.
- [3] Valliappan S, Yazdchi M, Khalili N. Seismic analysis of arch dams - a continuum damage mechanics approach [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, (45): 1695 - 1724.
- [4] Vahid Lotfi, Radin Espandar. Seismic analysis of concrete arch dams by combined discrete crack and non-orthogonal smeared crack technique [J]. Engineering Structures, 2004, (26): 27 - 37.
- [5] 陈健云,李静,林皋. 基于速率相关混凝土损伤模型的高拱坝地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 46 - 50.
- [6] 杜荣强,林皋. 混凝土弹塑性多轴损伤模型及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(4): 567 - 572.
- [7] 崔玉柱,张楚汉,徐艳杰,等. 用刚体弹簧元研究梅花坝的破坏机理[J]. 清华大学学报, 2002, 42(S1): 88 - 92.
- [8] 潘坚文,龙渝川,张楚汉. 高拱坝强震开裂与配筋效果研究[J]. 水利学报, 2007, 38(8): 926 - 932.
- [9] 唐春安,王述红,傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [10] Amitrano D. Brittle-ductile transition and associated seismicity: experimental and numerical studies and relationship with the b value[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108, No. B1, 2044.
- [11] Investigation of the failure modes of concrete dams-physical model tests, Dam Safety Office, Bureau of Reclamation[R]. Report No. DSO-02-02, May, 2002.

(下转第 862 页)

— 853 —

- [11] 杨树青. 基于 Visual-MODFLOW 和 SWAP 耦合模型干旱区微咸水灌溉的水-土环境效应预测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [12] 水利部国际合作司水利部农村水利司等编译. 美国国家灌溉工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [13] 杨树青, 史海滨, 杨金忠, 沈荣开. 干旱区微咸水灌溉对地下水环境影响的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 565 - 574.

## Prediction of water-soil environment effect under brackish water irrigation in arid area

YANG Shu-qing<sup>1,2</sup>, YANG Jin-zhong<sup>2</sup>, SHI Hai-bin<sup>1</sup>, SHEN Rong-kai<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia Agriculture University, Huhehot 010018, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The effect of soil-water environment under blackish water irrigation in arid area is predicted by using the visual MODFLOW model combining with SWAP model. The parameters of the models are calibrated by experimental data obtained in 2004 and the validity of the model is verified by using the observation data obtained in 2002. It is found that the accumulative salinity in soil and relative yield reduction for different crop under the condition of leaching treatment are decreased. The accumulative salinity tends to decrease and reaches an equilibrium state after 10 years with soil salinity concentration 0.126 % which is a kind of slightly salted soil. The lowering of ground water table and increase of salinity in aquifer under the condition of leaching treatment are lower than that under the condition of normal treatment. It may conclude that the environment effect of leaching treatment irrigation mode is better than that of normal treatment irrigation mode.

**Key words:** brackish water irrigation; water-soil environment effect; prediction; visual MODFLOW model; SWAP model

(责任编辑: 吕斌秀)

(上接第 853 页)

## Numerical simulation of damage in high arch dam due to earthquake

ZHONG Hong, LIN Gao, LI Jian-bo, HU Zhi-qiang

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Based on the assumption that concrete is macroscopic homogeneous the cracking evolution process and damage mode of high arch dams are studied in consideration of the heterogeneity of concrete in meso-scale. The bilinear damage evolution model and damage evolution model expressed in power function with descending section are adopted to combine with Mohr-Coulumb criterion to investigate the crack development and fracture mode of high arch dam under the action of earthquake. The analysis result of a high arch dam in China under design shows that cracks taken place in concrete are caused by excessive tensile stress. The cracks initiate at the middle of dam top and distribute at the upper half of the dam with the rest part remained intact. This conclusion agrees with the model test result.

**Key words:** mesoscopic heterogeneity; earthquake damage; arch dam

(责任编辑: 李福田)