

混凝土坝的损伤及损伤仿真计算

徐道远,王向东,朱为玄,王振波,邓爱民

(河海大学土木工程学院,江苏南京 210098)

摘要 通过对混凝土坝体破坏机理的损伤分析,介绍了坝体损伤计算、损伤场计算和损伤仿真计算的概念、理论和方法,并进行了坝体损伤仿真计算.在坝体损伤仿真计算中,考虑到温度损伤与荷载损伤的不同,采用了温度损伤概化模型及相应的损伤演变方程;同时还考虑到拉、压损伤的等效性,引入了相同应变水平下混凝土拉、压损伤的等价系数.

关键词 混凝土坝;损伤;仿真计算

中图分类号 TV642;TU31 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2002)04-0014-04

混凝土是筑坝的主要材料之一,各种型式的混凝土坝如重力坝、拱坝等在国内外的水利工程中最常见的.

混凝土是一种多相颗粒复合材料,在坝体混凝土浇筑成形过程中,将不可避免地存在各种缺陷,而混凝土中的相界面也是较薄弱之处,易发生界面裂纹,虽然这些缺陷和微细裂纹是不连续的和随机的,但当混凝土坝体在荷载、温变、动力、边坡不稳定等外界因素作用下,不仅原有的这些裂纹和缺陷会发展,而且还将出现一些新的微裂纹,再经微裂纹的汇集、连通过程而导致出现宏观裂缝.在外界因素作用下,上述过程不仅会持续发生,并有可能引起宏观裂缝的失稳扩展.裂缝的萌生和扩展在混凝土坝中虽只是一种局部破坏行为,但如裂缝甚至众多裂缝扩展到严重的程度,必将危及大坝的耐久性和安全运行.

混凝土大坝出现裂缝及裂缝扩展几乎是不可避免的,虽然坝体开裂后会引起应力重分配而可能缓和裂缝的扩展,同时,坝体中局部部位的应力超过控制标准值也不会导致大坝立即失效,只要裂缝是稳定的,大坝仍能安全运行.但是如裂缝不断扩展,并最终穿透坝体,引起大坝失效也不是不可能的,国内外坝工史上,大坝因开裂而失效、报废的事例已屡见不鲜.

混凝土坝的体形特征和受力情况一般都比较复杂,其破坏的原因也常是多元的和综合的,但归根结底,混凝土坝的失效和破坏总是经由坝体混凝土的裂缝萌生和裂缝扩展所引起的,从这个意义上说,对坝体混凝土破坏机理进行研究,是最最基本的.在坝体混凝土破坏机理的研究中,应用损伤的概念和理论,是一种有力的手段和一条新的途径.

不仅如此,应用损伤理论,还可对混凝土坝进行损伤状态的分析计算.由于混凝土坝是经过较长时间逐层逐段浇筑而成的,其形体和受载(包括温度荷载)将不断变化,运行期中,水位和温度也是变化的.所以,从施工期到运行期,坝体的损伤是一个历史过程,这就表明必须进行损伤仿真计算,方能反映坝体损伤的发展过程和得出任一时刻坝体的损伤状态.这对全面了解坝体的工作性态和正确采用运行管理措施无疑都是大有裨益的.

温度荷载是混凝土坝的主要荷载之一,尤其在施工期,温度荷载将引起温度损伤,并可能发展成温度裂缝.虽然温度损伤和外荷载引起的损伤都是应力损伤,对混凝土坝体破坏机理的影响有共同之处,但在混凝土坝的损伤计算中,又必须特殊对待.

1 混凝土坝破坏机理的损伤分析

按损伤力学的观点,前述混凝土体中的原生缺陷是一种异化的微细观结构,其力学性能不同于正常结

构,一般来说是呈现劣化态势,混凝土体中相界面处裂纹的出现,也将引起该处性能的劣化,这些都称之为损伤,而且可理解是混凝土体的初始损伤。在外界因素作用下,原生缺陷和界面裂纹的发展,逐渐形成微裂纹和宏观裂缝,则可以看作是损伤积累的结果,当然,与此同时也会在其他部位发生新的损伤和损伤积累,从而混凝土的破坏机理可以这样描述:由于混凝土体中不可避免地存在初始损伤,在外界因素作用下,损伤会有所发展并出现新的损伤,当损伤积累到一定程度时,混凝土体中将出现宏观裂缝或其他破损形态,裂缝端部和破损区周围又将发生新的损伤,再积累而引起裂缝扩展或破损区扩大,直至混凝土体完全破坏。这种由损伤描述的混凝土破坏机理,在混凝土单轴拉伸试验中有典型的反映。

图 1 为混凝土单轴拉伸试验所得到的典型的 $\sigma \sim \epsilon$ 全曲线。由曲线可见,当应力 $\sigma < \sigma_f$ 时, $\sigma \sim \epsilon$ 基本呈线性增长关系,只在约 $(0.7 \sim 0.9) \sigma_f$ 以上部分,稍偏离直线,这就是全曲线的上升段。在上升段中,初始损伤将有所发展,并可能萌生新的损伤,但上升段中的损伤基本上不引起试件不可恢复的变形,因而属于脆弹性损伤,且上升段的损伤度 D 不大。当应力达到 σ_f 时,表示在试件的最薄弱区段内,材料已开始开裂破坏,该处损伤发展较快,并开始产生不可恢复的变形,对应此时的损伤度 D_f 称为损伤阈值。在应力达到 σ_f 时,由于开裂处混凝土材料的啮合作用,还可继续传递应力,因而应变还会继续增加,所以 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线还将延续下去,并进入新阶段。在新阶段中,由于仍有应力作用,不可恢复的变形将继续增大,同时损伤也逐渐扩展,表示在这一阶段中损伤度 D 是逐渐增大的,且其中不可恢复的成分越来越大,因而属于弹塑性损伤。在这一阶段中,由于损伤的发展,材料性能将不断劣化,因而传递应力的能力将逐渐下降,所以 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线随着 ϵ 的增大而下降,这就是全曲线的下降段。在下降段, ϵ 随应力渐减而继续增大的现象称为混凝土的应变软化效应。下降段是损伤发展的主要阶段,也正是由于损伤的发展,所以才出现“软化”,这就是混凝土应变软化效应的损伤机理。在下降段的末端,当传递应力的能力已降到零时,表明材料已完全破坏,即已完全裂开,此时的损伤达到极限值 D_c 。从理论上说 D_c 应为 1,事实上可能是小于 1 但接近于 1。

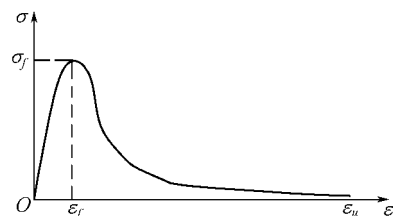


图 1 混凝土 $\sigma \sim \epsilon$ 全曲线

Fig.1 $\sigma \sim \epsilon$ curve for concrete

其他受力情况的试件也同样可由测出的 $P \sim \Delta$ 全曲线得到 $\sigma \sim \epsilon$ 全曲线^[1],它们的 $\sigma \sim \epsilon$ 全曲线有与单轴拉伸形态类似的上升段和下降段,可见,在其他受力情况下,混凝土也是由损伤发展而最终导致材料破坏。混凝土坝的破坏机理实质上就是具有初始损伤的混凝土体在荷载等外界因素作用下的损伤发展和积累的过程,混凝土坝无论是在施工期、蓄水期或运行期,显然都存在损伤和损伤发展,因此也可以说混凝土坝在任何时刻都是一个损伤场,其材料性能的变化、工作形态、开裂与否等都是损伤场中的行为。

混凝土坝体的温度损伤是由温变(温升或温降)引起的。温变将引起变形,并在坝体内引起温度应力,温度应力将与荷载应力一样使混凝土体发生损伤和损伤积累。温度损伤是坝体损伤场的重要组成部分。

2 混凝土损伤计算

2.1 混凝土损伤演变方程

按损伤理论,由损伤变量 D 的基本公式并应用 Lemaitre 的应变等价原理,可得^[2]

$$D = 1 - \tilde{E}/E_0 \quad (1)$$

式中: E_0 ——材料初始弹模; $\tilde{E}$ ——受损弹模或卸载弹模。

由式(1)可知,由给定的混凝土 $\sigma \sim \epsilon$ 本构关系, E_0 和 $\tilde{E}$ 都可求得,再考虑 $\sigma \sim \epsilon$ 的发展过程,并选用一定的损伤模型,则可由式(1)扩展成损伤演变方程。例如,在文献[3]中采用了由试验实测所得的 $P \sim \Delta$ 全曲线直接演变而得的 $\sigma \sim \epsilon$ 全曲线,其本构方程为

$$\begin{cases} \sigma = E_0 \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_f \\ \sigma = \sigma_f \left[1 - \left(\frac{\epsilon - \sigma_f/E_0}{\epsilon_u} \right)^\alpha e^{-\beta \epsilon_u / (\epsilon - \sigma_f/E_0)} \right] & \epsilon_f \leq \epsilon \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (2)$$

式中 α 和 β 为由试验确定的常数。

若采用幂函数损伤模型,则可得损伤演变方程为

$$\begin{cases} D = D_0 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}(D_f - D_0) & \varepsilon \leq \varepsilon_f \\ D = \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{\varepsilon_u - \varepsilon_f}\right)D_f + \frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{\varepsilon_u - \varepsilon_f}\left(1 - \frac{\tilde{E}}{E_0}\right) & \varepsilon_f \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (3)$$

图 2 为对应的损伤演变曲线.在由实验测得 D_0 和 D_f 后,就可由式(3)进行混凝土损伤的定量计算.关于混凝土温度损伤的计算,相对要困难得多,温变应力通常可表示为

$$\sigma = \alpha E_0 R \Delta T \quad (4)$$

式中: α ——混凝土线胀系数; ΔT ——温变值; R ——约束系数,取决于约束条件、徐变及塑性变形等.

到目前为止,还未见到有较成熟的温度损伤模型及相应的损伤演变方程的文献.笔者针对混凝土温度损伤问题进行了专题研究,并在文献[4]中提出了一个可用于大体积混凝土的温度损伤概化模型及相应的损伤演变方程:

$$D = 1 - \frac{1}{1 + N\pi R^2(a_0 + A\Delta T)^2} \quad (5)$$

式中: R ——概化处理后的混凝土骨料粒径; a_0 ——混凝土中微裂纹的初始长度; N ——单位面积中微裂纹的数量; A ——常数,由试验确定.

2.2 混凝土坝损伤场计算

对如大坝这样的混凝土结构,其损伤场的计算通常可用有限元方法,按文献[5]中的推导,考虑材料损伤的有限元支配方程为

$$K(D)\delta = R \quad (6)$$

式中 $K(D) = \sum_e \int_e B^T \tilde{E} B dV$,为考虑了材料损伤因素的劲度矩阵,损伤的影响由 $\tilde{E}$ 反映,这就是损伤有限元的特点和关键所在.荷载列阵 R ,包含了集中力、面力、体力和温度荷载.

但是由于材料的损伤对材料的应变和结构的变形都有影响,即 $K(D)$ 与 δ 和 ε 耦合,作解耦处理后,得到以荷载增量形式表示的损伤有限元非线性支配方程:

$$K(D)\Delta\delta = \Delta R \quad (7)$$

具体计算是将荷载分成若干等级,先由第一级荷载计算 δ 和 ε ,再由损伤演变方程式(3)和(5)计算 D ,经迭代计算得出损伤场.

由于混凝土是抗拉、压性能不同的材料,其拉、压损伤行为也不相同,因而混凝土虽可作为各向同性材料,但其损伤是各向异性的,笔者在文献[6]中已得出在相同应变水平下混凝土拉、压损伤的等价系数:

$$\lambda = \frac{D_{拉}}{D_{压}} = \frac{\lambda(1 - D_1)}{\mu(1 - D_3)} \quad (8)$$

式中: D_1, D_3 ——主应力 σ_1 和 σ_3 方向的损伤变量; μ ——泊松比.

在对混凝土坝作损伤场计算时,应将此等价系数计入.

3 混凝土坝的损伤仿真计算

混凝土坝的浇筑是一个长期的过程,运行期更为漫长.在混凝土坝的施工期和运行期,不仅其形体和荷载在不断变化,而且坝体混凝土的很多性能也在不断变化.弹模、徐变、水化热、边界温度、水压力、自重等都是随时间变化的,且其变化各有各的规律.而这些因素都将会引起坝体混凝土的损伤,所以混凝土坝的损伤场又是时间的函数,混凝土坝的损伤及其演变、积累是一个动态参数作用的动态过程.因此,要了解混凝土坝任一时刻的损伤状态,必须从开始施工起进行损伤仿真计算才有足够的可信度.否则对混凝土坝的在线工作性态评估、危险度的判断、剩余寿命的估算等将是不符合实际的.

混凝土坝的损伤仿真计算,基本上可按照温度仿真计算的办法,逐层逐块、逐日逐旬地进行,但在做每一步计算时,必须以上一步计算出的损伤场,即考虑坝体混凝土已不同程度地受损为基础,而在每一步计算中,又要采用相应的随时间变化的弹模、徐变、自重、边界温度、水位等,并最终计算出该步的损伤场.

在有限元损伤仿真计算中,关键有三:一是随时间变化的各参数必须要进行时间域的离散;二是其劲度

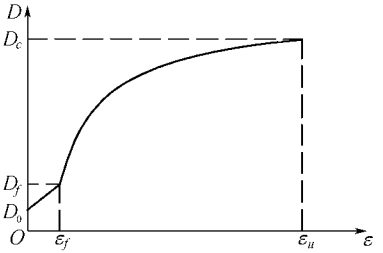


图 2 损伤演变曲线

Fig.2 Damage evolution

矩阵又必须是考虑已有损伤的 ;三是如果坝体某部位损伤已达 D_c ,表明实际已开裂 ,则应局部转入裂缝稳定性的断裂计算 ,而裂缝扩展 ,又引起新的损伤 ,可见 ,实际上是损伤-断裂耦合计算 .只要处理好这几个问题 ,混凝土坝损伤仿真计算就可以顺当进行 ,当然其计算规模和计算量都是相当庞大的 .

鉴于一个完整的工程算例篇幅过大 ,本文只介绍某混凝土重力坝损伤仿真计算的最后一部分 .该重力坝高 55 m ,正常水头 49.5 m ,完建时挡水坝段在自重及水压力作用下 ,并考虑此前的损伤积累 ,所算得的损伤等值线见图 3 ,其最大损伤达 0.4 ,尚不至于出现裂缝 .

4 结 论

混凝土坝是有初始损伤的 ,混凝土坝的破坏就内因来说 ,归根结底也是由损伤开始 ,经损伤积累而导致的 .

混凝土坝在各种外界因素作用下都会造成损伤 ,所以混凝土坝是一个损伤场 .由于外界因素和混凝土材料性能是随时间变化的 ,所以混凝土坝的损伤场是动态的、积累的 .其损伤可以定量计算 .

混凝土坝损伤仿真计算 ,可较符合实际地反映混凝土坝任何时刻的损伤状态 ,因而对坝的工作性态、危险程度、剩余寿命等的分析以及对保障混凝土坝的安全运行有着重要作用 .

参考文献 :

[1] 寿朝晖 ,章定国 ,徐道远 .混凝土三维裂缝的非线性数值分析 [J] .大连理工大学学报 ,1997(增 1) :29 ~ 33 .
[2] 余天庆 ,钱济成 .损伤理论及其应用 [M] .北京 :国防工业出版社 ,1993 .39 ~ 42 .
[3] 徐道远 ,王向东 ,朱为玄 ,等 .基于全曲线的混凝土损伤定量分析 [J] .岩石力学与工程学报 ,2001(专辑) :1428 ~ 1431 .
[4] 王振波 ,徐道远 ,朱杰江 .大体积混凝土结构温度荷载下的细观损伤分析 [J] .河海大学学报(自然科学版) ,2000 ,28(4) :19 ~ 22 .
[5] 徐道远 ,符晓陵 ,朱为玄 ,等 .坝体混凝土损伤-断裂模型 [J] .大连理工大学学报 ,1997(增 1) :1 ~ 5 .
[6] 邓爱民 ,符晓陵 ,徐道远 .混凝土拉、压损伤的等价关系研究 [J] .工程力学 ,2001(增刊) :343 ~ 349 .

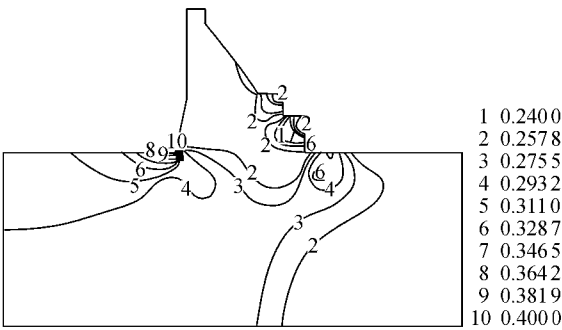


图 3 挡水坝段完建时损伤等值线
Fig.3 Isogram for damage

Damage to concrete dams and its simulation calculation

XU Dao-yuan , WANG Xiang-dong , ZHU Wei-xuan , WANG Zhen-bo , DENG Ai-min
(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Based on the analysis of the mechanism of damage to concrete dams , the concept , theory and methods are introduced for damage calculation , damage field calculation , and damage simulation , and damage simulation calculation is carried out for a concrete dam . In consideration of the difference between thermal damage and load-induced damage , a thermal damage model and its corresponding damage development equation are used in calculation . In addition , an equivalence coefficient of tension damage and compression damage of concrete under equal strains is introduced into calculation due to the equivalence of tension damage and compression damage .

Key words : concrete dam ; damage ; simulation calculation