

地震作用下大体积混凝土结构损伤发展估计

刘 军¹, 林 皋^{* 1,2}

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 建议了一种地震荷载作用下混凝土结构损伤发展估计的思路和方法, 通过混凝土结构在循环荷载作用下损伤演化特点的分析, 推导出一种考虑组合效应的损伤演化方程. 该方程反映了混凝土材料在复杂荷载作用下的多轴效应, 形式简单便于数值实现. 对实际工程动力损伤分析的结果表明, 损伤理论更适用于混凝土结构的力学性能分析.

关键词: 地震荷载; 损伤演化; 动力损伤分析

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A

0 引 言

混凝土结构破坏机理是极其复杂的, 工程界已广泛采取断裂力学的方法来加以研究. 但在断裂理论涉及的宏观裂纹出现之前结构内部已经出现了一定量的微缺陷, 单纯从宏观角度无法揭示结构在服役过程中内在的本质性变化. 而损伤理论则通过宏观物理量变化来描述结构微观的实质性变化. 一般地, 作用于结构上的荷载无非是静力荷载和动力荷载两种, 静力荷载下结构的损伤状况取决于荷载的大小及其加载方式, 而动力荷载作用下结构损伤状况还明显地受到加载路径的影响, 问题变得更为繁杂. 国内外对静力荷载作用下结构损伤的研究内容^[1-2]浩繁, 而动力作用下该研究由于受原理复杂性和有限元发展的制约, 正处于研究的初级阶段. 在已有的成果中, 大部分介绍的加载形式是有规律的循环加卸载, 现有的理论模型有内时理论^[3]、塑性-断裂理论、连续损伤模型^[4]等. 然而, 内时理论和塑性-断裂理论过于复杂, 连续损伤模型又需要确定各个破坏面, 使得参数的确定相当困难, 都很难推广应用到冲击、地震、风等随机、无规律荷载作用的实际结构上.

现行的结构设计主要基于弹性理论分析, 一般没有考虑地震造成的结构损伤. 因此, 有的结

构即便在设计控制的范围内服役, 仍旧有发生破坏的可能. 典型的例子就是我国的新丰江大坝^[5]等. 为了更科学地设计, 必须针对大体积混凝土结构地震作用下损伤发展做出适当的估计, 本文对此进行研究.

1 循环荷载作用下混凝土损伤演化特点

地震作用实质上是一种循环荷载, 判断出当前的应力状态是分析损伤演化过程的前提也是关键性问题. 图1是循环加卸载下的应力-应变关系包络图, 并假定当结构内某点的应力状态位于包络线上时, 该点处损伤值将随应变或应力的变化而不断发展; 当应力状态位于包络线内时, 损伤值保持卸载点处的损伤值不变即损伤无演化, 无论加卸载情况均同. 例如某点的应力状态从图中O点开始沿着OA曲线变化到A点, 则该段内有损伤产生且不断演化. 在A点卸载至B点段内, 认为损伤值保持A点处的损伤值不变, 并且在该段内无论怎么加卸载, 都认为结构是处于弹性阶段, 损伤值不变化. 而当再加载重新到达A点之后又在包络线上前进至C点, 则认为AC段曲线损伤是发展的, 如果在C点再卸载则损伤的变化规律同AB段, 依次下去, 拉压情况均同.

收稿日期: 2005-08-19; 修回日期: 2007-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(重点项目 50139010).

作者简介: 刘 军(1978-), 男, 博士生, E-mail: liujundlu@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

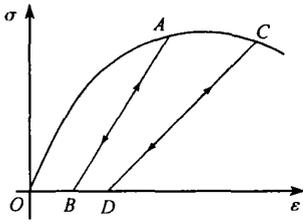


图 1 应力 - 应变关系

Fig. 1 Relation of stress and strain

以下介绍判断某时刻的应力状态在应力应变关系图上位置的步骤。假定 A 点是某次卸载点, 程序中记录 A 点的总应变 X_0 , 若该点某时刻的应变 $X < X_0$ 时, 则认为该点位于包络线内。当 $X \geq X_0$ 时可能是在 A 点之后的包络线段上, 也可能在 A 点之后某点的卸载斜线段上, 需查看该时刻以前的应变历史, 若大于前段时刻的最大应变, 则可判断是应力点在包络线上, 如果小于历史上最大应变则是在卸载线上。当判断了应力点的位置后, 只有在包络线上的点才计算损伤的演化, 在包络线以外的所有情况均视为损伤没有发展。

2 考虑组合效应的损伤演化方程的推导

2.1 损伤演化方程推导

混凝土结构在地震荷载作用下, 每点的应力状态都是空间应力状态。空间应力状态的损伤演化不应该简单地套用单轴拉、压情况下的损伤演化表达式。假定材料是各向同性的, 而损伤是各向异性的, 并且主损伤和主应力、应变方向是一致的。根据能量等价原理^[6]有

$$e = \mathbf{E}(\mathbf{D})\mathbf{X} \quad (1)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{D}) = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} \\ A_{13} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $A_{ii} = (\lambda + 2G)d_i^2 (i = 1, 2, 3)$, λ, G 是拉梅常数; $A_{ij} = \lambda d_i d_j (i, j = 1, 2, 3 \text{ 且 } i \neq j)$; $d_i = (1 - D_i) (i = 1, 2, 3)$, D_i 是 i 轴的主损伤值。

根据单轴拉伸和压缩应力 - 应变关系拟合曲线的表达式, 推导平面问题的损伤计算式。由于混凝土的材料特性, 其拉压的损伤程度是不等的。实验表明, 混凝土拉压荷载作用下开裂的方向也是不同的。单轴拉伸时开裂方向是垂直于荷载

的, 而压缩时开裂方向则与荷载是平行的。这意味着拉伸时损伤与荷载方向一致, 是直接损伤, 而压缩损伤方向垂直于荷载方向, 是间接损伤。在平面问题中, 作者认为: 一个方向拉伸时, 在另一个方向上产生的压损伤可以忽略; 而一个方向压缩时, 在另一个方向上产生的拉损伤是不可以忽略的。根据这一思想, 双向拉伸时, 双向的劣化程度都加强; 双向压缩时, 双向的劣化程度都减弱; 而拉压组合时, 拉向损伤得到加强, 压向损伤几乎保持单向压缩的损伤值不变。

损伤采用矩阵 $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{pmatrix}$ 来表示。这里

假设损伤主轴和应力应变主轴都是重合的。 D_1, D_2 根据不同的应力状态表现出不同的值。具体分析如下:

假定单轴拉伸损伤遵循指数演化规律^[2]

$$D = D_0 + C |X|^N \quad (3)$$

式中: D_0 为初始损伤, C, N 为曲线拟合常数。

根据正交各向异性弹性损伤矩阵有

$$e = E(1 - D)^2 X \quad (4)$$

由式 (3)、(4) 联合边界条件 $\left. \frac{d^e}{dX} \right|_{X=X_0} = 0$ 可以求得

$$D = \frac{1 - D_0}{2N + 1} \left| \frac{X}{X_0} \right|^N \quad (5)$$

其中 X_0 为应力峰值点对应的应变。

压缩时得到类似的形式, 但对参数的取值拉压是有别的。将式 (5) 做如图 2 所示的 3 种情况分析, 推广到平面问题上。

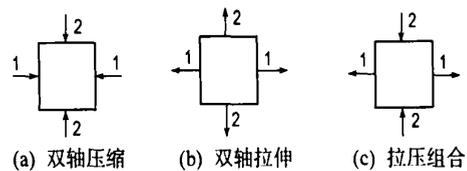


图 2 平面问题的 3 种应力状态

Fig. 2 The three states of stress referring plane problem

(1) 双轴受压情况, 如图 2(a) 所示

$$D_{1,1D} = \frac{1 - D_0}{2N_c + 1} \left| \frac{X}{X_0} \right|^{N_c} \quad (6)$$

$$D_{2,1D} = \frac{1 - D_0}{2N_c + 1} \left| \frac{X}{X_0} \right|^{N_c}$$

式中: $N_c = \frac{K_c}{2(1 - \frac{K_c}{K_0})}$, $K_c = E^c / E_0$, E_0 为初

始压缩模量, E_t 为压缩峰值割线模量; $\bar{\epsilon}$ 为压缩峰值应变.

为了表征双轴压缩的相互影响, 取式 (7) 形式为材料的实际损伤:

$$\begin{aligned} D_{1,2D} &= T_c D_{1,1D} + U_c D_{2,1D} \\ D_{2,2D} &= T_c D_{2,1D} + U_c D_{1,1D} \end{aligned} \quad (7)$$

称 T_c, U_c 为双压损伤影响系数, 取值方法参见文献 [7], 下同. $D_{1,1D}, D_{2,1D}$ 表示单轴损伤值, $D_{1,2D}, D_{2,2D}$ 表示平面问题两个方向的损伤值, 下同.

(2) 双轴受拉情况, 如图 2(b) 所示

$$\begin{aligned} D_{1,1D} &= \frac{1 - D_0}{2N_t + 1} \left| \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_t} \right|^{N_t} \\ D_{2,1D} &= \frac{1 - D_0}{2N_t + 1} \left| \frac{\bar{\epsilon}_2}{\bar{\epsilon}_t} \right|^{N_t} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $N_t = \frac{K_t}{1 - K_t}$, $K_t = E_t / E_0$, E_t 为拉伸峰值割线模量; $\bar{\epsilon}$ 为拉伸峰值应变.

为了表征双轴压缩的相互影响, 取式 (9) 为材料的实际损伤:

$$\begin{aligned} D_{1,2D} &= T_t D_{1,1D} + U_t D_{2,1D} \\ D_{2,2D} &= T_t D_{2,1D} + U_t D_{1,1D} \end{aligned} \quad (9)$$

称 T_t, U_t 为双拉损伤影响系数.

(3) 拉压组合情况, 如图 2(c) 所示

假设 1 方向为受拉, 2 方向受压, 方向反之亦成立.

$$\begin{aligned} D_{1,2D} &= \frac{1 - D_0}{2N_t + 1} \left| \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_t} \right|^{N_t} + H D_{2,1D} \\ D_{2,2D} &= \frac{1 - D_0}{2N_c + 1} \left| \frac{\bar{\epsilon}_2}{\bar{\epsilon}_c} \right|^{N_c} = D_{2,1D} \end{aligned} \quad (10)$$

称 H 为压缩损伤对拉伸损伤的贡献系数.

本损伤模型既考虑了初始损伤及双向受力的相互影响, 又兼顾了混凝土拉压损伤不等性的特点.

2.2 混凝土开裂处理

当结构中某点的体单元产生损伤后, 随着应变的增加, 损伤不断地发展直至体元完全断裂. 从理论上说, 用有效面积定义的损伤, 当 $D = 1$ 时, 体元完全断裂, 但实验表明, 当 $D < 1$ 但足够大时, 体元就可能完全断裂了, 即在结构内部形成了宏观裂纹. 设体元完全断裂时的损伤度为 D_c , 则断裂准则为 $D = D_c$. 当某单元出现宏观裂纹以

后, 需要对该单元的损伤弹性矩阵进行修正. 假定裂纹方向垂直于 ϵ_1 方向, 即认为混凝土是受拉的脆性开裂, 开裂后 ϵ_1 被完全释放, 而产生应力重分布, 这时在应力-应变关系矩阵里这个方向上的刚度降为零即可.

3 重力坝地震作用损伤场的计算及结果分析

将以上理论应用在柯依那坝损伤断裂分析上. 柯依那坝^[5]位于印度孟买市, 1963 年建成, 坝基为玄武岩, 坝型为混凝土重力坝, 坝段宽度为 15.24 m, 如图 3 所示. 有限元计算中坝体混凝土动弹性模量取为 31.5 GPa, 泊松比取为 0.2, 密度取为 2 640 kg/m³; 坝基动弹性模量取为 28.0 GPa, 泊松比取为 0.2, 按无质量地基考虑地基动力相互作用的影响. 式 (7)、(9) 中的 T_c, T_t 分别取为 0.864、0.921, U_c, U_t, H 分别取为 0.115、0.127、0.216. 输入地震波波如图 4 所示.

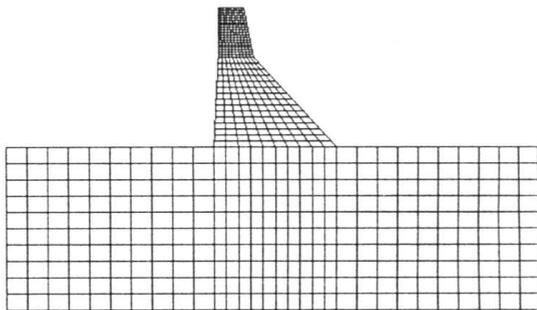


图 3 柯依那坝断面图

Fig. 3 The Koyna Dam diagram of cross section

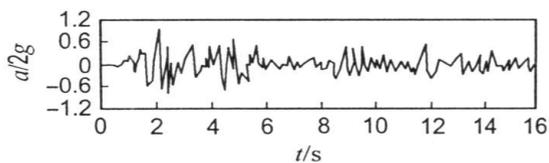


图 4 El Centro 地震波波图形

Fig. 4 El Centro form diagram of earthquake wave

2.24 s 以前结构尚未出现宏观裂纹, 2.24 s 时结构出现宏观裂纹, 之后宏观裂纹随荷载持续作用而增多. 不包括基岩, 坝体共剖分 350 个单元. 单元自左向右、自上而下编号. 绘制不同时刻坝体损伤等值线图如图 5、6 所示.

结果比较, 分析如下:

(1) 从不同时刻的各个单元拉压损伤随时间变化关系看出,随着时间的发展,每个单元的损伤也在不断增加,进而整个结构损伤不断增大,这和损伤的不可逆性是相符合的。

(2) 开始阶段,在坝底部出现损伤带,该损伤带的损伤不断演化,最终在坝踵处混凝土材料最先达到临界受拉损伤值,出现宏观裂纹。

(3) 在开裂后,由于应力、应变场的重新分布,损伤进一步发展,损伤区不断扩大。在 2.50 s

时除了坝的底部有较大的损伤区外,在下游坝坡几何形状改变处也出现了较大的拉损伤区。在 16.0 s 时在坝的迎水面也出现了拉损伤区。

(4) 结构的开裂是在 2.24 s,从计算数值可以看出,该时刻地震加速度达到峰值,这和实际破坏情况相符。

(5) 压损伤区在宏观裂纹未出现前,主要集中在坝踵和坝趾。而开裂后,应力重分布,压损伤区主要向坝趾转移。

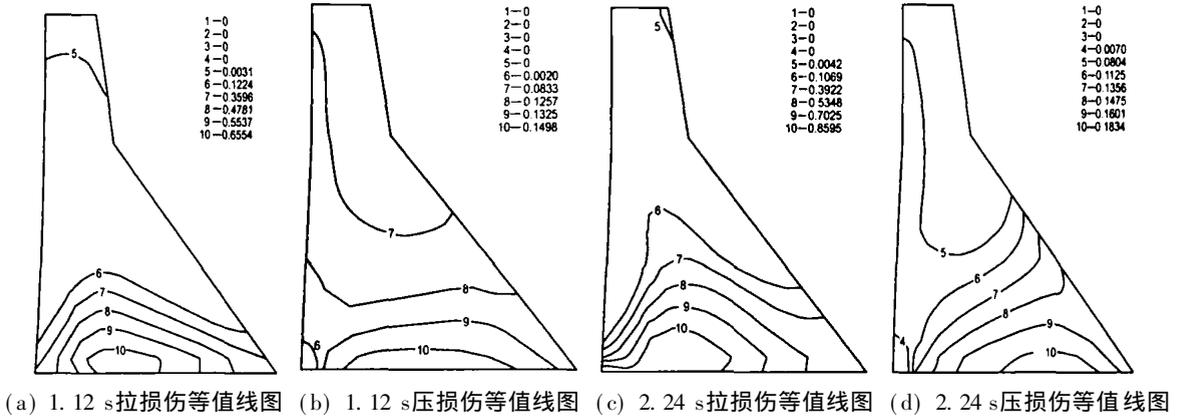


图 5 开裂前不同时刻拉、压损伤等值线图

Fig. 5 The equal values of tensile damage and compressive damage at different time before cracks occur

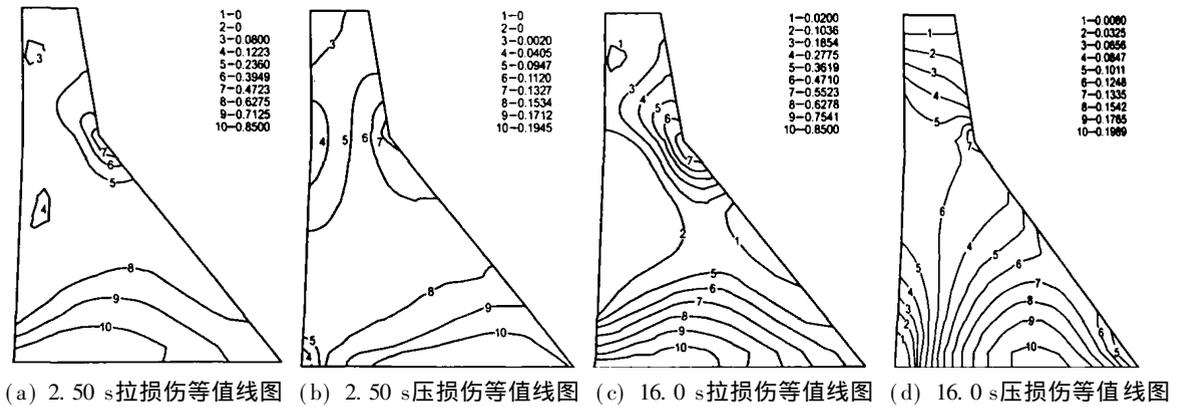


图 6 开裂后不同时刻拉、压损伤等值线图

Fig. 6 The equal values of tensile damage and compressive damage at different time after cracks occur

(6) 从图 6 来看,混凝土的损伤是各向异性的。拉损伤要大于压损伤 2~ 3 倍,结构中单元的破坏主要受拉损伤的控制,而压损伤不足以使单元产生破坏。

力反应不断地发生变化,而损伤场数值不断增加或者不变,范围不断扩大。

(7) 计算结果表明,地震作用使得材料的动

(8) 实际的坝体在遇到震害时也不是瞬时破坏的,其微结构有个劣化的过程,当劣化的程度即损伤达到某个量值后结构才出现宏观裂纹。本算

例中,结构在 2.24 s 之前是微结构劣化的过程,各个单元的损伤情况都随时间的推移而不断发展,在 2.24 s 时损伤演化达到临界值 0.85,结构产生宏观裂纹.之后,地震作用下结构产生累计损伤未达到临界,没有产生新的宏观裂纹,因此可以判定结构是稳定的.

(9) 在三维问题中,判断出当前的应力状态点位于屈服面上或者内部,按照本文的方法组合各种状况,可以估计出三维损伤的发展情况.

(10) 比较计算结果发现,用损伤理论来分析混凝土结构的安全稳定性、强度特性是符合实际的有效方法.在宏观裂纹出现之前,其微结构的变化从损伤场上可以一目了然地看出来,当出现了宏观裂纹之后,结构内部组织的微变化也是可以通过损伤场很直观地表现出来,而其他的固体力学理论很难实现这一点,充分体现了在分析动力作用下结构的强度、性能劣化特性方面损伤理论表现出的优越性.

4 结 语

本文在考虑混凝土材料拉压损伤的基础上,

建议了地震荷载作用下混凝土结构损伤发展估计的思路和方法,采用本模型对实际工程结构进行相应的动力损伤分析,得到的损伤场分布可为混凝土结构安全特性的评价提供依据.

参考文献:

- [1] 早川邦夫,村上澄男.热力学的构成式理论による塑性-损伤材料の构成式と異方损伤发展式[J].材料,1996,45(2): 176-182
- [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
- [3] 宋玉普.多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M].北京:中国水利水电出版社,2002
- [4] 江见鲸.钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M].西安:陕西科学技术出版社,1994
- [5] 倪汉根,金崇馨.大坝抗震特性与抗震计算[M].大连:大连理工大学出版社,1994
- [6] LEMAITRE J. Application of damage concepts to predict creep-fatigue failure [J]. *J Eng Mat Tech, ASME*, 1979,101(1): 284-292
- [7] 刘 军.混凝土损伤及其工程应用[D].大连:大连理工大学,2004

Prediction of damage evolution of massive concrete structure subjected to earthquake excitation

LIU Jun¹, LIN Gao^{* 1,2}

(1.School of Civil and Hydraul. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024,China;

2.State Key Lab. of Coastal and Offshore Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract A damage mechanics approach to predict the damage evolution of concrete structure subjected to earthquake load is proposed. In the approach, damage evolution equation in which the effect of combination of tension and compression is taken into consideration is obtained according to the analysis of feature of damage evolution for concrete structures under cyclic loads. In this equation, the multiaxial effect of concrete material is reflected under complicated load condition. Simple form is easy to numerical implementation. The dynamic damage analysis results of actual project indicate that damage theory is appropriate to analyze the concrete structure mechanics properties.

Key words earthquake load; damage evolution; dynamic damage analysis