

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.014

损伤与断裂耦合效应的能量理论研究及应用

安丽媛 朱为玄 卓鹏飞 孙伟伟

(河海大学力学与材料学院 江苏 南京 210098)

摘要 :以 I 型裂纹为主要研究对象 , 基于能量法和损伤能量释放率的概念 , 推导出一种用于描述裂纹尖端邻域内损伤场与断裂场的耦合效应参数 : 损伤型能量释放率 . 运用双 G 模型理论 , 应用 ANSYS 仿真分析三点弯曲梁的裂纹扩展过程 , 把得到的损伤型能量释放率结果与损伤断裂的参数进行对比分析 . 结合盖下拱坝工程有限元模型 , 将人工底缝前沿损伤型的能量释放率、平均损伤、能量释放率以及损伤能量释放率 4 者随水位变化的发展进行比较 , 说明该参数可以综合考虑损伤与断裂的耦合效应 . 此外 , 建立了该参数的应用模式 .

关键词 :土木工程结构损伤 ; 能量法 ; 耦合效应参数 ; 损伤型能量释放率 ; 盖下拱坝

中图分类号 : TU311.2 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1000-1980(2012) 02-0201-05

Energy theory and its application to damage and fracture coupling effect

AN Li-yuan , ZHU Wei-xuan , ZHUO Peng-fei , SUN Wei-wei

(College of Mechanics and Materials , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : A mode I crack was regarded as the main research focus in this study . Based on the energy method and the concept of the damage energy release rate , a parameter , namely the damage energy release rate , that describes the coupling effect of the damage field and fracture field in the crack tip neighborhood was deduced . Based on the dual- G energy criterion , ANSYS simulation was used to analyze the crack propagation process of a three-point bending beam , and the solution of the damage energy release rate was compared with the damage fracture parameters . Using the FEM model of the Gaixia Arch Dam in Chongqing , the variations of the damage energy release rate at the front of the base joint , the average damage , the energy release rate , and the damage energy release rate with the change of water level were compared , in order to demonstrate that the parameter can take into integrated consideration the coupling effect of the damage and fracture . The application mode of the parameter was also established .

Key words : civil engineering structural damage ; energy method ; coupling effect parameter ; damage energy release rate ; Gaixia Arch Dam

混凝土中微细裂纹和缺陷的生长与发展实质上是一个损伤断裂耦合的物理过程^[1-2] . 根据裂缝扩展时整个系统能量的变化来判断裂缝的稳定性^[3] , 这种分析方法的概念比应力应变概念更为有利 . 在材料的破坏过程中 , 损伤和断裂裂纹是同时存在的 , 断裂力学只研究宏观裂缝的扩展稳定性及其扩展规律问题 , 损伤力学不涉及宏观裂缝的存在及其失稳扩展行为 . 因此 , 将二者结合起来研究材料的破坏就显得必要且合理 .

笔者针对张开型裂纹的破坏过程^[4] , 通过损伤力学^[5]和能量法推导出一种耦合效应参数 : 损伤型能量释放率 , 并采用数值仿真模拟三点弯曲梁的断裂过程 (应用 ANSYS 有限元模拟)^[6] , 以形成该参数的理论应用基础 . 结合盖下拱坝的工程实例 , 建立设置人工底缝的有限元模型 , 进行裂纹前沿的断裂损伤分析 , 验证耦合理论的合理性 , 为该理论提供一种应用途径 .

1 双 G 断裂模型与损伤型能量释放率的推导

混凝土的非线性断裂行为已经是公认的事实^[7],因此为了尽可能地使用线弹性公式描述,断裂过程区常常被等效为弹性裂缝^[8],如以线弹性渐进叠加假定^[9]作为基本前提,大连理工大学提出了双 G 断裂模型^[10].该模型基于能量法分析原理,通过引进起裂断裂韧度 $G_{IC_{ini}}$ 和失稳断裂韧度 $G_{IC_{un}}$ (为 I 型裂纹)作为 2 个阶段的分界点.混凝土的非线性断裂过程可归纳如下 (a) $G < G_{IC_{ini}}$, 裂缝不扩展 (G 为断裂韧度) (b) $G = G_{IC_{ini}}$, 裂缝初始起裂 (c) $G_{IC_{ini}} < G < G_{IC_{un}}$, 裂缝稳定扩展 (d) $G = G_{IC_{un}}$, 裂缝处于临界失稳状态 (e) $G > G_{IC_{un}}$, 裂缝失稳扩展.

通常,对于未受损的材料,由有效应力的概念和应变等价原理,并考虑张量性质后,假定材料为各向同性,各向同性损伤时损伤能量释放率 Y ^[11]可以表示为式(1),当为单轴应力时损伤能量释放率可简化表示为式(2).

$$Y = -\frac{W_e}{1-D} \quad (1)$$

$$Y = \frac{\sigma^2}{2E(1-D)^2} \quad (2)$$

式中: W_e ——弹性应变能密度; D ——平均损伤; σ ——应力; E ——弹性模量.

式(2)形式简单,从热力学势的角度给出了材料由于损伤所引起的能量损耗,应用中要求损伤较均匀地分布在材料一定区域内(式(2)为损伤的二阶函数),但实际材料往往由于缺陷复杂以至于产生应力奇异性和损伤的复杂性,导致式(2)在应用中存在困难.

笔者拟结合以上分析结果,考虑将式(2)应用于材料断裂(奇异性产生)时的情况.由式(1)给出了损伤能量释放率和弹性应变能密度的关系,而对于 I - II - III 复合型的裂纹运用叠加原理^[12],可以得到弹性应变能密度表达式.当材料裂纹为 I 型裂纹时(此时裂纹扩展路径已定,取断裂角 $\theta = 0$),可导出损伤能量释放率表达如下^[12]:

$$Y = -\frac{W_e}{1-D} = \begin{cases} -\frac{1}{r} \frac{1-2\nu}{2\pi(1-\nu)} \frac{G_I}{1-D} & \text{平面应变} \\ -\frac{1}{r} \frac{1-\nu}{2\pi} \frac{G_I}{1-D} & \text{平面应力} \end{cases} \quad (3)$$

标记

$$G_{ID} = \begin{cases} \frac{1-2\nu}{2\pi(1-\nu)} \frac{G_I}{1-D} & \text{平面应变} \\ \frac{1-\nu}{2\pi} \frac{G_I}{1-D} & \text{平面应力} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ν ——泊松比; G_I ——I 型裂纹断裂韧度.

综合损伤能量释放率及断裂能量释放率,同时考虑损伤和断裂效应对材料的影响,推算得 I 型裂纹损伤型的能量释放率,记为 G_{ID} ,对照式(3),该参数反映了裂纹尖端小邻域内的物理场强.需要说明的是,虽然式(4)中包含能量释放率 G_I ,但由于 G_{ID} 是由损伤能量释放率推求得到,与 G_I 的本质含义却不同.结合式(1)可推断 G_{ID} 的物理意义是一种变形能,表示裂纹附近一种耦合场的能量场强,是表示材料发生损伤后的一种能量“储存”能力. G_I 是一种无损材料的应变能释放率,可作为一种裂纹扩展力. G_{ID} 和 G_I 两者有一定的等值关系,可以用 G_I 来计算 G_{ID} ,但 G_{ID} 却不被看做材料损伤后的能量释放.尽管如此,仍然可以利用 G_I 的断裂准则来对比分析 G_{ID} 的变化规律,从该角度建立一种耦合分析的方法.

2 三点弯曲梁的断裂损伤耦合仿真分析

基于文献[2]的试验过程与结果,对 4 组高度分别为 200 mm、300 mm、400 mm、500 mm 的三点弯曲梁进行 ANSYS 仿真分析^[13].试验龄期为 60 d,试验时测得试件的抗压强度为 29.56 MPa,密度为 2 250 kg/m³.基于线性渐进叠加假定,裂缝开裂方向加密的单元尺寸为 10 mm (考虑实际混凝土材料骨料的尺寸,未将单元尺寸取更小值),其余单元尺寸近似为 30 ~ 50 mm,在裂纹扩展处布置 COMBIN14 弹簧单元,采用虚拟裂纹闭合法^[14]对以上

试件进行数值模拟 根据裂缝扩展全过程得到 G_I, Y, G_{ID} 随缝长 a 的变化情况(图 1, P 为荷载).

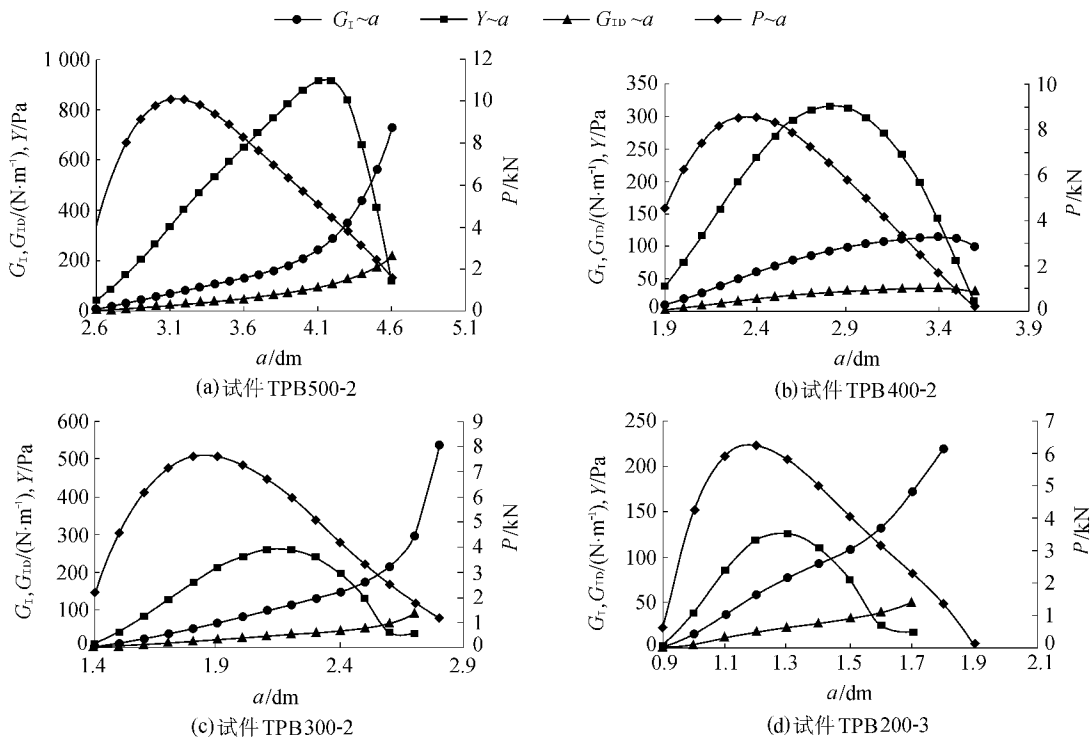


图 1 数值计算结果
Fig. 1 Numerical simulation results

对数值计算结果(图 1)进行分析,可以认为 Y 随外荷载的变化与外荷载(包含重力)随 a 的变化规律相似,都有着较明显的非线性性质.不同的是, Y 的最高点稍微滞后于 a 随裂缝发展的最高点.关于这一点可以解释为:外荷载施加到试件上后,材料的损伤是一个累积发展的过程,能量转换与释放过程并不是瞬时完成的,其反应理应滞后于外荷载的变化; G_I 基本表现为增长型变化,失稳后增长更快;裂尖单元平均意义上的损伤型能量释放率随裂纹的扩展有着较平稳的增长,其非线性特征明显弱于 Y 和 G_I ,即找到一种较为简单的损伤断裂耦合参数来描述混凝土的非线性性质.在外荷载-位移的加载曲线基础上,可获得损伤型能量释放率在裂纹失稳时的数值,结果显示该数值比较稳定,基本不随试件尺寸的变化而变化(相同材料属性下,失稳时的损伤型能量释放率为 20 N/m),可以作为反映材料随外界载荷条件变化时其相应的一种内在的物理场参数,用以描述在裂纹扩展及损伤发展过程中的耦合效应.

3 损伤型的能量释放率分析法在混凝土拱坝中的应用

盖下拱坝水电站采用混凝土双曲拱坝,为了将损伤断裂耦合理论应用于拱坝^[15],设置人工底缝^[16],设缝方案为自坝踵向坝内延伸距离与坝厚之比等于 $0.153^{[17]}$,即缝深为 2.29 m ,缝面高程为 260.00 m ,坝基底高程为 253.00 m .坝体混凝土弹性模量为 39.2 GPa ,泊松比为 0.167 ,密度为 2420 kg/m^3 ,基岩弹性模量为 30 GPa ,泊松比为 0.21 ,密度为 2660 kg/m^3 .对拱坝进行网格划分及添加弹簧单元后的模型见图 2、图 3.坝体和基岩总共为 9563 个单元,模型节点总数为 35841 个,基于虚拟裂纹闭合法^[18-20]分析拱坝中截面处裂纹前沿的损伤断裂情况.

考虑水位从 260 m 上升到设计蓄水位时裂纹前沿的损伤场和断裂场,设在裂纹不扩展的情况下计算每荷载步水位上升 5 m 时裂纹前沿的损伤断裂情况.计算中损伤演化方程采用试件 TPB500-2 的参量获得缝面前沿的损伤情况.由于计算中损伤能量释放率、损伤型能量释放率以及损伤演化方程都是基于平面问题得到的,严格来说,并不能将其直接应用于三维模型,但是本文由于只考虑裂纹面前沿单元的损伤断裂情况,此时 I 型裂纹张开的趋势很大,张开应力(z 向比其他 2 个方向的大很多,基本为 10 倍关系)可以近似简化为平面的 I 型裂纹问题来考虑,结果如图 4、图 5 所示.

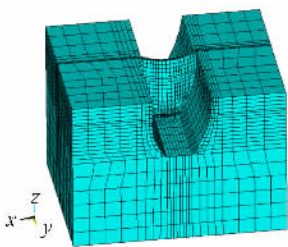
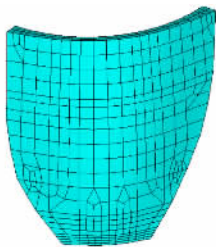
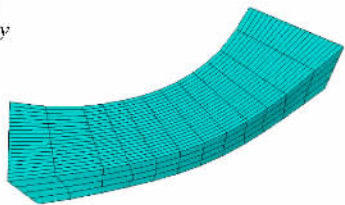


图 2 设置人工底缝坝体模型
Fig. 2 Dam model with base joint



(a) 拱坝坝体



(b) 底缝(260.00 m 高程)处

图 3 坝体网格剖分示意图

Fig. 3 Mesh map of arch dam

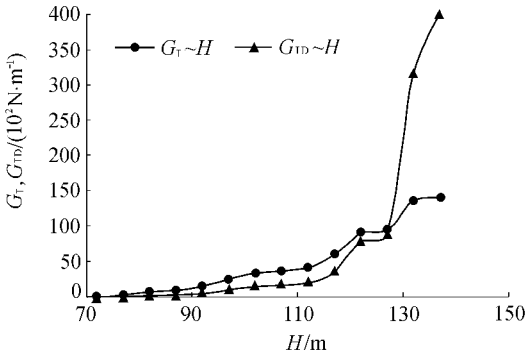


图 4 G_{ID} 和 G_I 随蓄水深 H 变化曲线对比
Fig. 4 Change curves of G_{ID} and G_I with water level change

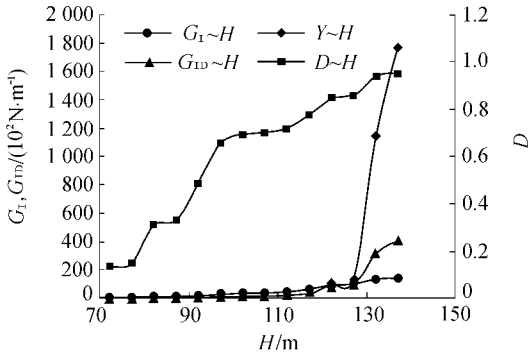


图 5 水位上升时损伤与断裂的发展情况对比
Fig. 5 Comparison of variations of damage and fracture with rise of water level

随着水位的均匀增长,裂纹张开位移也不断变大,最大张开位移为 2.495 mm。距离裂纹前沿 1 个单元位置处的损伤发展较裂纹前沿处的损伤发展滞后且缓慢,可以预测出材料损伤的发展总是在缺陷的某邻域内按一定大小关系分布(小邻域内)。通过计算分别给出 G_I 和 Y ,以及 G_{ID} 随水位上升的发展情况。 G_I 经历较平缓的变化,这一点对于无损材料(本文建模实际上基于无损材料)而言较为符合,但并不能反映由于损伤(此时并未断裂)所带来的影响;由于裂纹尖端损伤发展过快导致此处损伤能量释放率失去意义,因此实际计算是由裂纹前沿相距 1 个单元处的损伤值得求,是裂纹前沿一定范围外的耦合情况,但未将断裂过程区作为一个整体考虑; G_{ID} 结果如图 4 所示,从较缓慢的阶段发展为快速增长,这一点可以从材料缺陷的角度解释,即材料在损伤断裂的一定程度内其“弱化”较慢,而当材料缺陷损伤进一步扩大时材料“弱化”直至失效的速率也加快了。图 5 综合地说明了裂纹前沿损伤与断裂的耦合情况,蓄水深度从 70 ~ 100 m 附近材料损伤发展较快,其余参数趋势近乎一致,蓄水深度 130 m 之后各参数变化趋势则不尽一致,变化速率都有所提高, G_I 未考虑损伤对裂纹发展的“加剧”影响,损伤能量释放率发展过快,低估了损伤接近最大值时的材料“容忍”限度; G_{ID} 介于 G_I 和 Y 两者之间,有待于用其描述裂纹前沿附近损伤断裂的耦合情况。

从数值计算的结果来看,对于裂纹附近的物理场而言,当问题从平面的三点弯曲梁到三维拱坝模型时,具有较大的差异,这表现在三点弯曲梁初始缝高比为 0.4 左右,能量释放率在缝高比发展到 0.6 左右(此时加载最大)时裂缝失稳扩展,而拱坝初始缝厚比仅为 0.153,蓄水至 335 m(本工程仿真最终蓄水位为 390 m)时拱坝裂缝前沿的能量释放率就达到了 146.07 N/m,损伤型能量释放率达到 22.728 N/m,达到了裂缝失稳的条件(本文中损伤型能量释放率在 20 N/m 附近失稳)。因此,对于实际处于三维形式的材料而言,张开型裂纹可能更加危险。

4 结 论

a. 从能量法的断裂力学理论出发,结合 Loland 损伤模型理论,以损伤能量释放率推导过程为基础,推导了一种用于描述损伤与断裂耦合过程的参数:损伤型的能量释放率。

b. 在线性渐进叠加假定的基础上,结合虚拟裂纹闭合法的仿真计算手段,运用通用仿真计算软件

ANSYS 对 1 组三点弯曲梁进行仿真计算,求得损伤型的能量释放率,将其发展过程与能量释放率、损伤能量释放率加以比较,得到相应裂纹失稳时的数值。

c. 结合盖下拱坝的工程实例进行仿真计算,提出设置人工底缝的验证思路,进行三维建模仿真分析,得到裂纹前沿的损伤、断裂、耦合参数随水位的发展情况,反映出损伤型的能量释放率能较合理地描述裂纹前沿邻域内损伤断裂的耦合场,但理论尚不完备,仍需检验,在采用其他损伤模型以及其他材料的应用上值得探究。

参考文献:

- [1] 孙雅珍,余天庆. 混凝土破坏的断裂与损伤耦合分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006,22(1):53-56.(SUN Ya-zhen,YU Tian-qing. Coupling analysis of fracture and damage mechanics of concrete failure[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science,2006,22(1):53-56.(in Chinese))
- [2] 田佳琳,李庆斌. 混凝土 I 型裂缝的静力断裂损伤耦合分析[J]. 水利学报,2007,38(2):205-210.(TIAN Jia-lin,LI Qing-bin. Fracture-damage coupled analysis for mode I cracking in concrete under static load[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(2):205-210.(in Chinese))
- [3] 张秀芳,徐世昉. 用能量方法研究混凝土断裂过程区的力学性能[J]. 工程力学,2008,25(7):18-23.(ZHANG Xiu-fang,XU Shi-lang. A study on mechanical behavior of fracture process zone in concrete using energy approach[J]. Engineering Mechanics,2008,25(7):18-23.(in Chinese))
- [4] 刘芳. 混凝土断裂过程区的研究和应用[D]. 南京:河海大学,2009.
- [5] 何建涛,马怀发,陈厚群. 混凝土损伤本构理论研究综述[J]. 水利水电科技进展,2010,30(3):89-92.(HE Jian-tao,MA Huai-fa,CHEN Hou-qun. Research review on concrete damage constitutive theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(3):89-92.(in Chinese))
- [6] 姚婷,杜成斌,孙立国. 含缺陷混凝土细观损伤破坏过程的数值模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(1):66-71.(YAO Ting,DU Cheng-bin,SUN Li-guo. Numerical simulation of meso-damage and failure process of concrete with defects[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2011,39(1):66-71.(in Chinese))
- [7] 何敏,张东焕,王利民,等. 混凝土断裂过程区拉伸软化的本构关系[J]. 水利水电科技进展,2010,30(4):8-11.(HE Min,ZHANG Dong-huan,WANG Li-min et al. Constitutive relation for tension softening of concrete in fracture process zone[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(4):8-11.(in Chinese))
- [8] JENQ Y S, SHAH S P. A fracture toughness criterion for concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1985, 21(5):1055-1069.
- [9] 徐世昉,赵国藩. 混凝土断裂力学研究[M]. 大连:大连理工大学出版社,1991.
- [10] 赵艳华,徐世昉,吴智敏. 混凝土结构裂缝扩展的双 G 准则[J]. 土木工程学报,2004,37(10):13-18.(ZHAO Yan-hua,XU Shi-lang,WU Zhi-min. A dual-G criterion for crack propagation in concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal,2004,37(10):13-18.(in Chinese))
- [11] 李灏. 损伤力学基础[M]. 济南:山东科学技术出版社,1992.
- [12] 尹双增. 断裂损伤理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
- [13] 卓鹏飞,安丽媛,孙伟伟. 应用能量法的混凝土损伤断裂耦合分析[EB/OL]. [2011-03-20]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/2011-03-25>.
- [14] RAJU I S. Calculation of strain-energy release rates with high-order and singular finite-elements[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1987, 28:251-274.
- [15] 江守燕,杜成斌,陈灯红. Nam Ngum5 水电站分缝重力拱坝地震响应分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(3):308-312.(JIANG Shou-yan,DU Cheng-bin,CHEN Deng-hong. Seismic response analysis of gravity jointed arch dam of Nam Ngum5 Hydropower Station[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2010,38(3):308-312.(in Chinese))
- [16] RESCHER O J. Arch dams with an upstream base joint[J]. Water Power and Dam Construction, 1993(3):17-25.
- [17] 邵勇. 基于线弹性断裂力学的高拱坝底缝分析[D]. 南京:河海大学,2005.
- [18] WITOMB J D. Three-dimensional analysis of a postbuckled embedded delamination[J]. Journal of Composite Materials, 1989, 23:862-889.
- [19] RAJU I S, SISTLA R, KRISHNAMURTHY T. Fracture mechanics analysis for skin-stiffener debonding[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 54:371-385.
- [20] WANG J T, RAJU I S. Strain energy release rate formulae for skin-stiffener debond modeled with plate elements[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 54:211-228.