

文章编号: 1000-7598-(2007) 01-0123-05

P 波对大体积混凝土裂缝的扩展作用研究

陈 明, 卢文波

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 根据断裂动力学理论及弹性 P 波与裂缝相互作用的分析, 利用混凝土的动态断裂韧度, 研究了大体积混凝土深层或贯穿裂缝在爆炸应力波 P 波作用下的扩展, 得到了含裂缝混凝土的安全质点振动速度, 并讨论了 P 波频率及其入射角对安全质点振动速度的影响。结果表明, 频率越低、入射角越大的应力波对混凝土裂缝的扩展作用越大, 频率为 10 Hz 垂直入射条件下, 混凝土裂缝不扩展的安全质点振动速度仅为 0.95 cm/s, 与水利水电工程施工组织设计手册中规定的混凝土重力坝、混凝土闸墩等大体积混凝土结构的安全振速 5 cm/s 有较大差距, 含裂缝混凝土更加容易被破坏。

关 键 词: P 波; 混凝土; 断裂韧度; 爆破震动; 质点峰值振动速度

中图分类号: TU 751.9; TV 542

文献标识码: A

Research on crack propagation of mass concrete under effect of longitudinal wave

CHEN Ming, LU Wen-bo

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the theory of fracture dynamics, the analysis of the interaction of longitudinal wave and crack, and the dynamic fracture toughness of concrete, the deep or the perfoliate crack propagation of mass concrete under blasting longitudinal wave was studied; the safe peak particle velocity (PPV) for concrete with crack was obtained; and the effect of the frequency and the incidence angle of longitude wave was studied. The result indicated that the lower frequency and the higher incidence angle of longitudinal wave will easily lead to the crack propagation. On condition of frequency at 10 Hz and incidence angle at 90 degree, the safe PPV of concrete with crack is 0.95 cm/s; it is lower than the value on the handbook of construction planning of hydraulic and hydroelectric projects, which is 5 cm/s for concrete gravity dam and concrete sluice board, the concrete with crack is easily been destroyed.

Key words: longitudinal wave; concrete; fracture toughness; blasting vibration; peak particle velocity

1 前 言

在水电站扩容、加固的施工过程中, 有时需要直接在坝体外部或内部进行爆破作业, 如丹江口水库大坝加高过程中部分坝体旧混凝土拆除爆破、大黑汀水库大坝溢流面修补拆除爆破、湖北朝阳电站进水口坝体混凝土拆除爆破等, 因此, 存在爆炸应力波对混凝土的影响问题。而大坝等大体积混凝土结构由于混凝土干缩徐变、温度应力、基础不均匀沉降等因素影响, 一般都存在表面裂缝、深层裂缝及贯穿裂缝, 危害较大的主要是深层裂缝及贯穿裂缝。有关混凝土中的裂缝在爆破震动作用下是稳定还是扩展方面的研究尚未见到。本文所做的工作就

是在分析混凝土的动态断裂韧度的基础上, 根据 P 波与裂缝相互作用原理, 利用断裂动力学理论来研究混凝土深层及贯穿裂缝在爆炸应力波 P 波作用下混凝土裂缝的稳定性能。

为简化问题, 方便研究, 做如下假定:

- (1) 主要研究 P 波对深层及贯穿裂缝的影响, 混凝土表面对 P 波与裂缝相互作用的影响较小;
- (2) 混凝土是均质各向同性材料, P 波与裂缝的作用近似符合平面应变条件。

2 混凝土的动态断裂韧度

根据断裂力学理论, 在实际构件中的裂纹, 由于外加作用力的不同, 可以分为 3 种基本状态, 即

收稿日期: 2005-03-14

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (No.50239070); 教育部科学技术研究重点项目 (No.02133); 湖北省自然科学基金项目 (No.2002AB006)。
作者简介: 陈明, 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 主要从事工程爆破与岩石动力学方面的研究。E-mail: whuchm@yahoo.com

张开型裂纹(I型)、滑开型裂纹(II型)和撕开型裂纹(III型),如果裂纹同时受正应力和剪应力作用,或裂纹与正应力成角度,这时就同时存在I型和II型,或I型与III型裂纹。实际裂纹体中的裂纹可能是两种或两种以上的基本型的组合。但由于I型裂纹是低应力断裂的主要原因,是最危险的,所以即使裂纹是复合型的裂纹,也往往作为I型处理^[1]。

对于I型裂纹,裂纹尖端应力场强度因子 K_I 控制了裂纹尖端的应力、应变场,它是判断裂纹是否将进入失稳状态的一个指标,当构件的 K_I 值达到其临界值 K_{Ic} ,即材料的断裂韧度,构件就会失稳断裂。国内外学者基于线弹性断裂力学理论,用三点弯曲梁和紧凑拉伸试件进行了大量的断裂韧度测试工作,水灰比控制在0.45~0.60,棱柱体抗压强度为30~45 MPa,测得的断裂韧度 K_{Ic} 在0.3~0.98 MPa·m^{1/2}范围内;关于断裂韧度 K_{Ic} 的主要结论是:随水灰比的增大而降低,随养护龄期的增长而增大,混凝土的抗拉强度高,则其 K_{Ic} 值大,断裂韧度强烈受到试验构件尺寸影响,当试件尺寸在500~800 mm以上时,断裂韧度的尺寸效应逐渐消除^[2~4]。

由于一般普通试验室进行大型试件断裂试验很困难,因此文献[5,6]提出了由小尺寸试件测定的名义断裂韧度 K_{Ic} 值推算大尺寸试件断裂韧度值的尺寸效应公式:

$$K_{Ic} = K_{Ics} \sqrt{\frac{h}{h_s} \left(\frac{V_s}{V} \right)^{1/a}} \quad (1)$$

$$a = \frac{\pi}{\sqrt{6.5C_v}}, (0.013 \leq C_v \leq 0.23) \quad (2)$$

式中:带下标s的 V_s 、 h_s 、 K_{Ics} 分别为小尺寸试件的体积、高度及断裂韧度;无下标的 V 、 h 、 K_{Ic} 分别为欲推算的大尺寸试件的体积、高度、断裂韧度; a 为Weibull模量; C_v 是断裂韧度 K_{Ic} 实验值的变异系数。

$$\text{令} \quad \eta = \sqrt{\frac{h}{h_s} \left(\frac{V_s}{V} \right)^{1/a}} \quad (3)$$

称 η 为混凝土断裂韧度的尺寸影响系数,可以知道 η 随变异系数 C_v 的增大而减小。设欲求大尺寸混凝土的体积变化主要由试件的高度和长度变化引起,且高度和长度变化与小尺寸混凝土成比例,则根据式(3)可以得到混凝土断裂韧度的最大和最小影响系数,见图1,可见,尺寸效应非常强烈。吴智敏^[3,4]等的试验及理论分析表明,大尺寸混凝土的静态断裂韧度在1.6625 MPa·m^{1/2}左右。

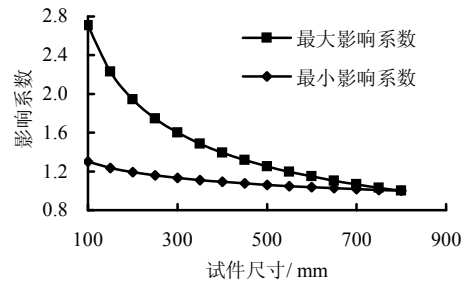


图1 混凝土尺寸影响系数

Fig.1 Influence coefficient of concrete dimensions

现有的资料中,对小尺寸混凝土试件的动态断裂韧度进行了较多的研究,而对大尺寸混凝土试件的动态断裂韧度研究相对较少。研究表明,动断裂韧度随裂纹的扩展速度增加而增加,裂纹扩展速率随加载率增加而增加,因此加载速率增加则动断裂韧度增大^[7~12]。动态断裂韧度能比静态断裂韧度大30%^[13]。Guo, Z.K.^[7]等的研究表明,小尺寸混凝土试件动态断裂韧度 K_{Id} 在1.2 MPa·m^{1/2}以上。

由于混凝土的动态断裂韧度与加载速率相关,因此,在较低频率荷载作用下,混凝土的动态断裂韧度与静态断裂韧度相当;而在较高频率作用下,动态断裂韧度将有较大提高。为安全起见,且考虑断裂韧度的尺寸效应,大体积混凝土的动态断裂韧度按大尺寸混凝土静态断裂韧度值提高10%取值,即 K_{Id} 取为1.8 MPa·m^{1/2}。

3 P波与裂纹相互作用分析

对I型动态裂纹问题,弹性波与裂纹相互作用的控制方程是波动方程组^[13,14]:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi &= \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \psi &= \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: φ 与 ψ 为Lame势函数; c_1 为纵波波速; c_2 为横波波速。

设 $\varphi^{(i)}(x,y,t)$ 与 $\psi^{(i)}(x,y,t)$ 表示入射波场, $\varphi(x,y,t)$ 与 $\psi(x,y,t)$ 表示散射波场,而总波场表示为 $\varphi^{(t)}(x,y,t)$ 与 $\psi^{(t)}(x,y,t)$,则有:

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{(t)}(x,y,t) &= \varphi^{(i)}(x,y,t) + \varphi(x,y,t) \\ \psi^{(t)}(x,y,t) &= \psi^{(i)}(x,y,t) + \psi(x,y,t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

因为入射波在时间上是稳态的,即与时间有关的部分可以用因子 $\exp(-i\omega t)$ 表示, ω 是波的圆频率。因而散射波 $\varphi(x,y,t)$ 与 $\psi(x,y,t)$ 也具有相同的时间因子,即

$$\left. \begin{aligned} \varphi(x, y, t) &= \varphi'(x, y) \exp(-i\omega t) \\ \psi(x, y, t) &= \psi'(x, y) \exp(-i\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

显然空间因子 $\varphi'(x, y)$ 与 $\psi'(x, y)$ 满足 Helmholtz 方程, 即

$$(\nabla^2 + \alpha_1^2)\varphi' = 0, \quad (\nabla^2 + \alpha_2^2)\psi' = 0 \quad (7)$$

其中 α_n 为波数, $\alpha_n = \omega/c_n$ ($n=1, 2$)

设一 P 波入射, 记为:

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{(i)} &= \varphi_0 \exp\{-i[\alpha_1(x \cos \gamma_1 + y \sin \gamma_1) + \omega t]\} \\ \psi^{(i)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: φ_0 为 φ 的幅值; γ_1 为 P 波的入射角。P 波与裂缝作用示意图见图 2。

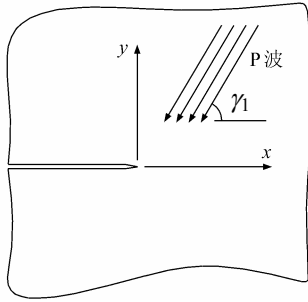


图 2 P 波与裂缝作用示意图
Fig.2 Sketch map of the interaction of longitudinal wave and crack

则入射波的应力场为

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^i &= \sigma(1 - 2\kappa^2 \sin^2 \gamma_1) \cdot \exp\{-i[\alpha_1(x \cos \gamma_1 + y \sin \gamma_1) + \omega t]\} \\ \sigma_{yy}^i &= \sigma(1 - 2\kappa^2 \cos^2 \gamma_1) \cdot \exp\{-i[\alpha_1(x \cos \gamma_1 + y \sin \gamma_1) + \omega t]\} \\ \sigma_{xy}^i &= \sigma\kappa^2 \sin 2\gamma_1 \exp\{-i[\alpha_1(x \cos \gamma_1 + y \sin \gamma_1) + \omega t]\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中:

$$\sigma = -\mu\alpha_1^2\varphi_0, \quad \kappa = c_2/c_1, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

式中: μ 为拉梅材料常数; E 为材料弹性模量; ν 为材料泊松比。

对式 (7) 做 Fourier 变换, 可以化成以 y 为自变量的常微分方程组, 其中含有待定函数 $A_1(s)$ 与 $A_2(s)$, 再由 Fourier 变换的反演公式同时乘上时间因子 $\exp(-i\omega t)$, 得到:

$$\left. \begin{aligned} \varphi(x, y, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_1(s) \exp[-\beta_1 y - i(sx + \omega t)] ds \\ \psi(x, y, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_2(s) \exp[-\beta_2 y - i(sx + \omega t)] ds \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $\beta_n = (s^2 - \alpha_n^2)^{1/2} = -i(\alpha_n^2 - s^2)^{1/2}$, ($n=1, 2$)

待定函数 $A_1(s)$ 与 $A_2(s)$ 的关系式由下列对偶积分方程确定:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \beta_1 A_1(s) \exp(-isx) ds &= 0, |x| > a \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(s) A(s) \exp(-isx) ds &= P_j \exp(-i\alpha_j \cdot x \cos \gamma_j), |x| < a \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $A(s)$ 代表 $A_1(s)$ 或 $A_2(s)$; $f(s)$ 为给定的函数; P_j 为常数; α_j 由 α_1 与 α_2 给出, 具体可以参考文献[14]。对式 (11) 可用 Wiener-Hopf 方法求解。求出了 $A_1(s)$ 与 $A_2(s)$ 后, 由式 (10) 可知, $\varphi(x, y, t)$ 与 $\psi(x, y, t)$ 即可确定, 因而问题的应力场和位移场和应力强度因子得以确定。

对于式 (8) 所示 P 波, 利用上述方法可以得到 I 型裂纹的动态应力强度因子

$$K_I(t) = \sigma' \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_1}} F_1(\nu, \gamma_1) \exp[-i\omega(t - T/8)] \quad (12)$$

其中:

$$\sigma' = 2\mu\alpha_1^2\varphi_0 \left[\cos^2 \gamma_1 - \frac{1}{2\kappa^2} \right]$$

函数 $F_1(\nu, \gamma_1)$ 的值由泊松比 ν 和入射角 γ_1 确定, 具体值可以查阅文献[14]。

4 混凝土的安全质点振动速度

根据分析可知, 欲保证 P 波作用下混凝土裂缝不扩展, 则必须控制 P 波的入射强度, 即必须控制入射 P 波幅值 φ_0 。根据断裂力学理论, 当 $K_I(t) \geq K_{Id}$ 时, 裂缝失稳扩展。为确保混凝土安全, 裂缝不扩展, 必有:

$$K_I(t) < K_{Id} \quad (13)$$

由式 (13) 可以得到不使混凝土裂缝失稳扩展的容许入射应力波幅值 φ_0 。把应力波视为简谐波, 则可近似得到容许的质点振动速度值:

$$[V] = \alpha_1 \omega [\varphi_0]_{\max} \quad (14)$$

式中: $[V]$ 为容许的质点振动速度值; $\omega = 2\pi f$, f 为波的频率; 爆炸应力波 P 波的卓越频率取 10~

200 Hz 进行计算。

根据式 (13)、式 (14) 可以推算得到混凝土裂缝不扩展的安全质点振动速度表达式:

$$[V] = \left| \frac{K_{Id} \sqrt{2fc_1}}{2\mu F(\nu, \gamma_1) [\cos \gamma_1 - c_1^2 / (2c_2^2)]} \right| \quad (15)$$

由式 (15) 可知, 影响安全质点振动速度的主要因素是入射波的频率、入射角、混凝土的弹性模量及泊松比。但对于龄期大于 7 d 的普通水工混凝土, 弹性模量变化较小, 泊松比基本上是一个定值, 因此, 不讨论混凝土弹性模量及泊松比变化对裂缝扩展的影响。计算中混凝土的参数取值见表 1。

表 1 混凝土参数表

Table 1 Parameters of concrete

弹性模量 E / GPa	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	泊松比 ν	动态断裂韧度 K_{Id} / $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
30	2.40	0.18	1.8

由式 (15) 计算得到混凝土在不同入射角和频率的 P 波作用下的安全振动速度, 见图 3。

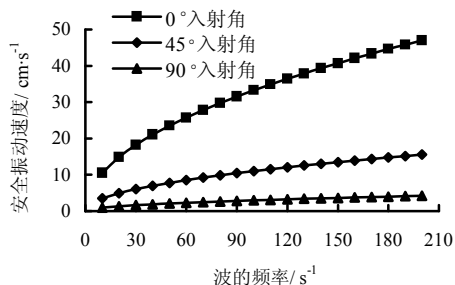


图 3 安全质点振动速度与频率、入射角的关系

Fig.3 Safe PPV versus wave frequency and incidence angle

由计算结果可知, 在频率 10 Hz、入射角等于 90° 条件下, 混凝土裂缝不扩展的安全质点振动速度仅 0.95 cm/s。所以当入射 P 波与混凝土裂缝垂直以及频率较低时, 混凝土裂缝在较小的震动作用下即将扩展。而当 P 波以较小的入射角、较高的频率入射时, 混凝土具有较大的安全质点振动速度, 最大安全质点振动速度甚至达到 40 cm/s 以上。这也反映了低频地震波对混凝土危害的严重性。

在文[15]中规定, 混凝土重力坝、混凝土闸墩等大体积混凝土建筑物的安全质点振动速度不超过 5 cm/s, 因此, 如果在现场的施工爆破中, 对于存在深层及贯穿裂缝的大体积混凝土, 采用不当的安全质点振动控制标准, 爆破震动则可能导致裂缝扩展。

5 结 论

通过上述理论分析与计算, 可以得如下结论:

(1) 爆炸应力波 P 波作用下, 含有深层或贯穿裂缝的大体积混凝土的安全质点振动速度, 主要受波的频率和入射角影响。频率越低、入射角越大, 混凝土裂缝扩展的可能性越大;

(2) 频率为 10 Hz, 垂直入射条件下, 混凝土裂缝不扩展的安全质点振动速度仅为 0.95 cm/s, 与设计通常采用的 5 cm/s 的控制标准有一定差距。应当充分重视低频、大入射角 P 波对含裂缝混凝土的破坏作用。

参 考 文 献

- [1] 李庆芬. 断裂力学及其工程应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1998.
- [2] 于晓中, 谯常忻, 周群力. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
- [3] 吴智敏, 赵国藩, 徐世烺. 大尺寸混凝土试件的断裂韧度[J]. 水利学报, 1997, 6: 67—70, 76.
WU Zhi-min, ZHAO Guo-fan, XU Shi-lang. Fracture toughness of large concrete specimen[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 6: 67—70, 76.
- [4] 吴智敏, 赵国藩. 混凝土断裂韧度的尺寸效应研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(4): 20—22, 55.
WU Zhi-min, ZHAO Guo-fan. Studies on size effect of fracture toughness of concrete[J]. *Industry Construction*, 1995, 25(4): 20—22, 55.
- [5] 徐世烺. 混凝土断裂韧度的概率统计分析[J]. 水利学报, 1984, (10): 51—58.
XU Shi-lang. Statistics and probability analysis of concrete fracture toughness[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, (10): 51—58.
- [6] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土断裂韧度的概率模型研究[J]. 土木工程学报, 1988, (4): 9—23.
XU Shi-lang, ZHAO Guo-fan. Research on probability model of concrete fracture toughness[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1988, (4): 9—23.
- [7] Guo Z K, Kobayashi A S, Hawkins N M. Dynamic mixed mode fracture of concrete[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1995, 32(17—18): 2 591—2 607.
- [8] Shah S P, John R. Strain rate effects in mode I crack propagation in concrete[A]. *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*[M]. Edited by F. H. Wittmann, Elsevier, Amsterdam, 1986.

- [9] 钱济成, 蔡尚荣, 黄孟生. 高速荷载下混凝土断裂性能的试验研究[J]. 水利学报, 1995, (1): 35—39.
QIAN Ji-cheng, CAI Shang-rong, HUANG Meng-sheng. Experimental study of the fracture characteristics of concrete under high speed loading[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1995, (1): 35—39.
- [10] 张玉美, 曹建国, 祁桂兰. 混凝土动断裂特性的试验研究[J]. 水利学报, 1986, (4): 68—72.
ZHANG Yu-mei, CAO Jian-guo, QI Gui-lan. Experimental study of concrete dynamic fracture characteristics[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1986, (4): 68—72.
- [11] Lambert David E, Allen Ross C. Strain rate effects on dynamic fracture and strength[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2000, 24(10): 985—998.
- [12] Mindess Sidney, Banthia Nemkumar, Yan Chen. Fracture toughness of concrete under impact loading[J]. **Cement and Concrete Research**, 1987, 17(2): 231—241.
- [13] 范天佑. 断裂动力学引论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [14] 范天佑. 应用断裂动力学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.
- [15] 水利电力部水利水电建设总局. 水利水电工程施工组织设计手册 (第二卷) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1986.