

闸墩混凝土表面温度裂缝稳定性断裂力学分析

李先明 ,秦忠国

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :采用断裂力学方法对闸墩类大体积混凝土表面温度微裂缝的稳定性进行了分析 ,并预测了其发展趋势 .分析结果表明 :裂缝处温度变化幅度 Δt 、承受的拉应力 σ 以及裂缝端部应力强度因子 K_{Ic} 是影响裂缝发展趋势的主要因素 ;对承受较小稳定拉应力的混凝土来说 ,只要降温幅度保持在 $5 \sim 6 \text{ }^{\circ}\text{C/d}$ 以内 ,初始温度裂缝就不大可能发展成危害性深缝 .

关键词 :闸墩混凝土 ;温度裂缝 ;稳定性

中图分类号 :TV313 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2007)04-0422-03

在预测混凝土表面温度微裂缝的发展趋势时 ,一般以计算所得混凝土裂缝处拉应力是否超过混凝土的极限抗拉强度作为判断混凝土是否开裂的标准 .但在工程实践中 ,按此方法得出的结论往往与实际情况不符 .本文采用可以较全面地分析各种因素的影响并作出准确判断的断裂力学方法 ,对闸墩类大体积混凝土表面温度微裂缝的稳定性进行了分析 ,并预测了其发展趋势 .

1 断裂破坏机理与分析模型

在气温变化的情况下 ,混凝土表面微裂缝经过裂缝产生、稳定扩展和失稳扩展 3 个阶段后 ,会形成连续的宏观裂缝 ,从而导致混凝土整体破坏 .在裂缝产生后 ,裂缝终点处密集的微裂缝使沿主拉应力方向的混凝土不能承受拉应力 ,在弹性区开始处的混凝土拉应力仍为其抗拉强度 ,而裂缝尖端与弹性区之间的断裂区内部 ,由于骨料的咬合作用 ,微裂缝之间并不一定完全连通 ,可承受部分拉应力 .此阶段虚拟裂缝模型裂缝尖端的应力分布如图 1 所示^[1-2] .其中 : f_t 为混凝土抗拉强度 ; h 为断裂区高度 .

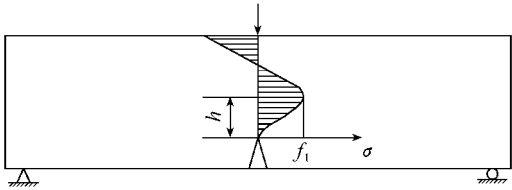


图 1 裂缝尖端的应力分布

Fig.1 Stress distribution at the end of crack

基本假定 (a) 闸墩混凝土为无限宽大板 ,受单向均匀拉应力 σ_y 作用 (b) 混凝土的拉伸应力应变关系及应变软化曲线均是线性的 (c) 断裂过程区外仍为弹性主导区 .断裂过程区模型^[3]如图 2、3 所示 .图中 :LEFM 为线弹性断裂力学应力应变曲线 ; a_0 为初始裂缝长 ; r 为断裂临界状态时的约束裂缝区长 ; $\sigma_y(x)$ 为约束微裂缝间闭合力 ; σ_y 为外应力 ; A_1 为弹性应力分布面积 ; A_2 为能量面积 ; a 为等效裂缝长 ; l 为断裂过程区长 ; r_0 为弹性区长 .

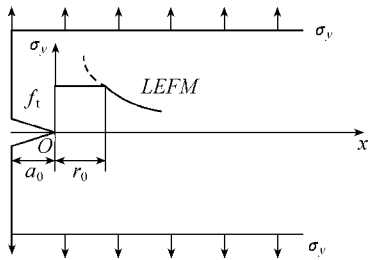


图 2 断裂区出现前的应力状态

Fig.2 Stress status before occurrence of fracture area

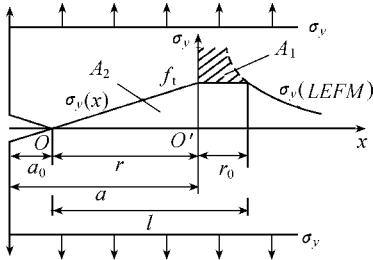


图 3 断裂过程区临界应力状态

Fig.3 Critical stress status for fracture area

初始裂缝尖端的临界断裂应力状态为 $\sigma_y(x)$ 和 σ_y 共同作用的线性叠加断裂状态,相应的等效裂缝长度为 $a_0 + r$.

2 断裂过程区长度和厚度的影响

闸墩混凝土等效断裂裂缝长度和过程区长度可根据能量原理^[1]以及虚拟裂缝尖端的弹性应力分布面积 A_1 和断裂过程区所产生的能量面积 A_2 平衡条件求出.由上述模型,得

$$\sigma_y = \frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi r}} \tag{1}$$

$$f_t = \frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi r_0}} \Rightarrow r_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K_{IC}}{f_t} \right]^2 \tag{2}$$

$$A_1 = \int_0^{r_0} \sigma_y dx = r_0 f_t \tag{3}$$

$$A_2 = \int_0^r \frac{f_t x}{r} dx = \frac{f_t r}{2} \tag{4}$$

式中 K_{IC} 为混凝土材料的断裂韧度^[4],其大小与混凝土配合比、强度、龄期等有关.将式(1)(2)代入式(3)可得 $A_1 = r_0 f_t$,由 $A_1 = A_2$ 可得:

约束裂缝区长
$$r = 2r_0 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_{IC}}{f_t} \right]^2 \tag{5}$$

等效裂缝长度
$$a = a_0 + r = a_0 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_{IC}}{f_t} \right]^2 \tag{6}$$

断裂过程区长度
$$l = r + r_0 = 3r_0 = \frac{3}{2\pi} \left[\frac{K_{IC}}{f_t} \right]^2 \tag{7}$$

断裂过程区厚度
$$w_0 = \frac{9}{8\pi} \left[\frac{K_{IC}}{f_t} \right]^2 \tag{8}$$

由文献[2]可知 $\frac{K_{IC}}{f_t} = 0.286 \sqrt{m}$.若取混凝土表面裂缝深度 $a_0 = 200\text{mm}$,则可得 $a = 226\text{mm}$, $l = 39\text{mm}$, $w_0 = 29\text{mm}$.可见考虑断裂过程区影响的等效裂缝深度增大并不明显,且裂缝过程区长度和厚度相对闸墩来说很小.因此,可忽略混凝土上断裂过程区的影响而直接用线弹性断裂力学方法来分析裂缝的扩展规律和稳定性.

3 初始裂缝的稳定性分析

3.1 温度骤降情况

气温骤降后,初始裂缝端部会形成很陡的温度梯度,表面裂缝端部会形成应力集中,表面裂缝会发展成危害性深缝.由于闸墩结构初始裂缝深度方向的混凝土尺寸远大于裂缝深度,因而可按有边缝无限大板计算裂缝尖端部温度应力和应力强度因子^[2,5],即: $\sigma = \frac{E\alpha}{1-\mu} \Delta t$; $K_I = 1.772\sigma \sqrt{a_0}$.其中: E 为弹性模量; α 为线膨胀系数; μ 为泊松比.若取 $E = 200\text{GPa}$, $\alpha = 7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\mu = 0.167$,则 $K_I = 0.298 \Delta t \sqrt{a_0}$.气温骤降值与裂缝端部应力强度因子的关系如图4所示.

对于 C25 的闸墩混凝土来说,断裂韧度设计指标^[6] $K_{IC} = 0.7\text{MPa} \sqrt{m}$,若取初始裂缝深度 $a_0^1 = 0.10\text{m}$, $a_0^2 = 0.15\text{m}$, $a_0^3 = 0.20\text{m}$, $a_0^4 = 0.25\text{m}$,则裂缝发展的临界降温幅度分别为 $\Delta t^1 = 7.4\text{ } ^\circ\text{C/d}$, $\Delta t^2 = 6.1\text{ } ^\circ\text{C/d}$, $\Delta t^3 = 5.3\text{ } ^\circ\text{C/d}$, $\Delta t^4 = 4.7\text{ } ^\circ\text{C/d}$.由此可见 (a)气温骤降幅度相同时,混凝土初始裂缝越长,越容易发生不稳定扩展 (b)对于同一长度的初始裂缝来说,气温骤降幅度越大,越容易发生不稳定扩展 (c)对于常见的初始裂缝为 20 cm 左右的工程来说,若做好保温工作,使降温幅度保持在 5 ~ 6 $^\circ\text{C/d}$ 的范围内,初始裂缝就不可能发展成为危害性裂缝.

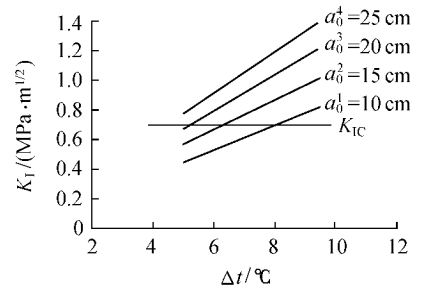


图 4 气温骤降值与裂缝端部应力强度因子的关系

Fig.4 Relationship between sudden temperature reduction and stress strength factor at the end of crack

3.2 短期过水情况

闸墩短期过水情况通常指的是泄洪情况.对于泄洪状态下闸墩混凝土表面的微小裂缝,所承受的水压力和渗流压力不大,只要考虑水温变化的影响,分析过程与温度骤降情况相同^[7].

3.3 长期过水情况

长期稳定过水时,裂缝处于相对稳定的水温下 $\Delta t \approx 0^\circ\text{C}/\text{d}$,但其表面承受均布水压力 σ ,则裂缝端部应力强度因子计算公式为^[1] $K_{\text{I}} = 1.988\sigma \sqrt{a_0}$,取 $a_0 = 200 \text{ mm}$, $\sigma = 0.1 \text{ MPa}$ 得相应的应力强度因子 $K_{\text{I}} = 0.089 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} \ll K_{\text{Ic}} = 0.7 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$.可见,在过水运行情况下,闸墩混凝土的初始裂缝一般不会沿闸墩厚度方向发展成危害性裂缝.

4 限裂措施

在承受温度作用的混凝土结构中通常配置有温度钢筋,由于钢筋和混凝土之间具有黏结作用,混凝土不能自由回缩,能够减小裂缝的开展宽度和深度,使裂缝分布均匀分散,从而可有效地防止贯穿性裂缝的出现.温度钢筋对温度裂缝的开展具有显著的限制作用,但其限裂作用并不与钢筋用量呈简单的线性关系.配筋后,即使钢筋用量很少,其裂缝开展宽度也较无钢筋时大大减小.当配筋量相同时,单排布置较双排布置效果好^[8].因此温度钢筋应尽可能布置在混凝土近表面处,以充分发挥其抗裂限裂作用.当施工过程出现裂缝时,一般垂直裂缝走向铺设钢筋或钢丝网.钢筋会约束混凝土的塑性变形,从而分担混凝土的拉应力,延缓混凝土裂缝的出现时间,提高混凝土的极限拉应变,限制裂缝的进一步扩展.

5 结 论

闸墩类结构,由于混凝土沿裂缝深度方向的厚度远大于初始裂缝深度,可忽略其断裂过程区的影响,用线弹性断裂力学方法来分析裂缝的扩展规律和稳定性.混凝土表面初始温度裂缝的稳定性与裂缝处温度变化幅度 Δt 、承受的拉应力 σ 以及裂缝端部应力强度因子 K_{Ic} 有关^[9].对于一般条件下的混凝土来说,只要将降温幅度保持在 $5 \sim 6^\circ\text{C}/\text{d}$ 的范围内,初始裂缝就不大可能发展成危害性裂缝.另外,在混凝土近表面处铺设适当的温度钢筋,可有效地限制温度裂缝的开展.

参考文献:

- [1] 朱伯芳,王同生,丁宝英,等.水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M].北京:水利水电出版社,1976:43-57.
- [2] 徐世烺.混凝土断裂机理[M].大连:大连理工大学出版社,1988:26-40.
- [3] 韩菊红,赵国藩,张雷顺.新老混凝土黏结面断裂损伤过程区研究[J].工程力学,2004,21(6):31-35.
- [4] 蔡晓鸿,贺昔元.断裂力学在水工高压隧洞限裂设计中的应用探讨[J].江西水利科技,2000,26(3):25-29.
- [5] 于晓中.岩石和混凝土断裂力学[M].长沙:中南工业大学出版社,1991:84-88.
- [6] 郑秋菊.闸墩混凝土结构温度应力分析及其应用[J].郑州大学学报,2005,33(5):46-51.
- [7] 麦家焯,李惠娟,裴文林.用断裂力学法研究混凝土表面温度裂缝问题[J].水力发电学报,2002(2):31-37.
- [8] 周瑞忠.工程裂缝防治效果的断裂力学评价[J].工程力学,1994(增刊):198-203.
- [9] 崔德密,沈敏,顾洪,等.泵浇混凝土闸墩裂缝成因计算分析[J].水利水电技术,2001,33(10):22-26.

Fracture mechanics analysis of temperature crack stability at pier concrete surface

LI Xian-ming, QIN Zhong-guo

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The stability of temperature cracks at mass concrete surface of piers was analyzed by use of fracture mechanics method, and its development trend was predicted. The result shows that the range of temperature variation Δt at cracks, the tensile stress σ , and the stress strength factor at the end of cracks K_{Ic} are the main factors affecting the development of cracks. To concrete in low tensile stress, it is impossible for initial cracks to develop into deep cracks with serious harmfulness if the range of temperature reduction is controlled within $5 \sim 6^\circ\text{C}/\text{d}$.

Key words pier concrete; temperature crack; stability