

碾压混凝土拱坝诱导缝断裂特性研究

顾爱军¹,王向东²

(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 通过数值计算分析了诱导缝的断裂特性,以实际工程为例,用断裂力学方法模拟了诱导缝的开裂过程,并对诱导缝的作用进行了探讨.结果表明,诱导缝开裂特性与诱导缝的位置、形式、两侧约束距离及相邻缝端的影响等因素有关.在诱导缝的开裂过程中,坝体应力有所降低,特别是诱导缝完全开裂时,应力下降非常明显.诱导缝设置可以首次开裂条件作为判别依据.为减少施工工序、提高施工效率,可在保证始终满足诱导缝开裂判别式的前提下适当加大中部诱导板的缝间距.

关键词 碾压混凝土 拱坝 诱导缝 断裂特性

中图分类号:TV313.30346.1

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2006)04-0418-04

在实际工程中,为确保在碾压混凝土拱坝坝体其他部位产生裂缝之前诱导缝首先张开,从而达到释放坝体拉应力,保护坝体其他部位不再开裂或缓解其他部位的开裂的目的,常根据碾压混凝土拱坝快速、连续施工的特点,以诱导缝分缝形式作为温控措施.但这并没有达到理想效果,在一些已建并设置了诱导缝的碾压混凝土拱坝坝体仍出现了裂缝.例如,普定碾压混凝土拱坝运行若干年后,2条诱导缝均未张开,却在诱导缝以外产生了裂缝^[1].

文献[2~5]对诱导缝的作用和合理布置等问题进行了研究.例如,文献[2]提出的诱导缝等效强度 f_{eq} 计算模型、开裂判别式 $\frac{\sigma_{crack}}{\sigma_{max}} > \frac{f_{eq}}{f_t}$ (σ_{crack} 为诱导缝断面上的拉应力, σ_{max} 为坝体的最大拉应力, f_t 为混凝土的抗拉强度)和有效作用范围估计方法为诱导缝的设计提供了理论依据.由于诱导缝的受力状态非常复杂,随着诱导缝的开裂,坝体的应力和诱导缝的等效强度也会随之发生变化,诱导缝能否在坝体应力达到抗拉强度之前张开是衡量诱导缝作用的关键.由开裂判别式可知,随着诱导缝的开裂,诱导缝断面上的拉应力 σ_{crack} 和坝体最大拉应力 σ_{max} 将同时降低, σ_{crack} 与 σ_{max} 的比值几乎没有变化.因此,诱导缝是否仍能保证首先开裂将主要取决于其等效强度的变化.由于等效强度的变化与诱导缝的局部开裂特性有关,所以,了解诱导缝的断裂特性对诱导缝的设计有一定的指导意义.为此,本文首先通过数值计算分析诱导缝的断裂特性,然后以实际工程为例,用断裂力学方法模拟诱导缝的开裂过程,并对诱导缝的作用进行探讨.

1 算 例

以我国西部某水电站碾压混凝土拱坝为例,用断裂力学方法研究诱导缝问题.该坝设置了2条诱导缝,其诱导板为长1m、高0.3m的矩形薄板.诱导板在水平方向等间距布置,缝长和缝间距均为1m,在铅垂方向每隔2个碾压层铺设1层诱导缝,缝长0.3m,缝间距0.6m.显然,诱导缝为双向间隔布置,诱导缝断面削弱了1/6.由于诱导缝在坝体中是间断布置的,并且为了确保缝在2块诱导板之间张开,在诱导板的铺设过程中,诱导板通过钢筋与碾压混凝土体牢固连接,故在实际计算时应将诱导缝视为间断裂缝.

2 缝长和缝间距对诱导缝的影响

由于诱导缝的局部断裂特性与诱导缝的缝长和缝间距有关,在获得坝体应力分布规律的情况下,可通过调整缝长和缝间距来改变诱导缝开裂的难易程度.文献[6]将双向间隔诱导缝问题简化为水平面和垂直于径向的铅垂面上的2个平面问题,并得出了在同样的应力条件下,诱导缝更易于沿上下游方向扩展的结论.因

此,本文主要研究诱导缝在水平面上的开裂问题.

由文献[6]可知,当缝长与缝间距同时增加(保持缝断面削弱面积不变)时,缝端应力强度因子 K_I 也会增大.考虑缝长或缝间距单独变化时,可将诱导缝断面看作含一系列等长等间距共线裂纹的无限大板,并受远场拉应力作用,则其缝端应力强度因子表达式为

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a} \qquad F = \sqrt{\frac{2b}{\pi a}\tan\left(\frac{\pi a}{2b}\right)}$$

(1)

式中 $2a$ ——缝长 $2b$ ——相邻两缝的中间距 σ ——远场应力.

由式(1)可知,在缝长(即预制诱导板长度)不变的情况下,只要改变缝的间距就可以改变 K_I 的大小.由图 1 可知, F 随着缝间距与缝长比值(b/a)的增大而降低并逐渐趋于 1,即 K_I 逐渐趋于 $\sigma\sqrt{\pi a}$.

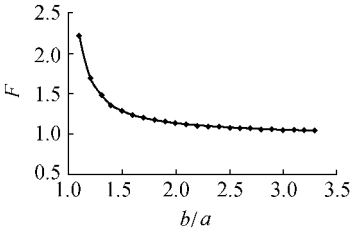


图 1 F 与 b/a 的关系
Fig.1 Relationship between F and b/a

3 诱导缝距两侧约束的距离对诱导缝 K_I 的影响

如图 2(a)所示,一个局部诱导缝典型结构,其上下两端会受到位移约束的作用.由数值计算结果可知,在温降作用下,其 K_I 的变化规律与位移约束的距离有关,并随着裂纹的扩展呈现一定的规律性(图 2(b)).由图 2(b)可见,当 f 值较小,即诱导缝距两端的位移约束较近(小于缝长 $2a$)时, K_I 随着诱导缝的开裂而降低,而当 f 值较大,即诱导缝距两端的位移约束较远时, K_I 随着诱导缝的开裂而增大.实际工程中诱导缝离两侧的距离一般较远.

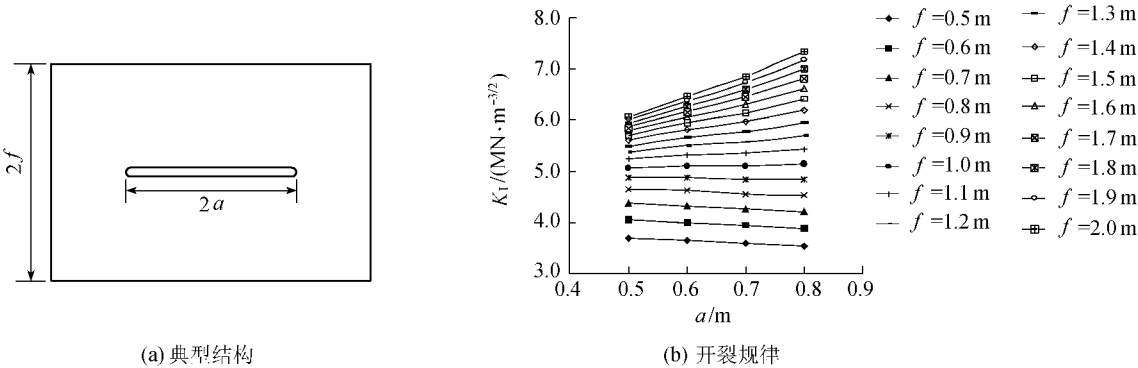


图 2 局部诱导缝典型结构及其开裂规律
Fig.2 Typical configuration of local induced joint and the regulation of its cracking

4 诱导缝开裂对诱导缝及相邻缝端的影响

当诱导缝某缝端开裂后,诱导缝本身及相邻缝端的断裂参数都将发生变化.若仅考虑相邻缝端的影响,可将诱导缝断面视为无限大板中 2 条不等长的裂纹受垂直于裂纹的单向拉伸作用,如图 3(a)所示.由文献[7]可知,缝端 A 和缝端 B 的断裂参数分别为 $K_{IA} = F_A\sigma\sqrt{\pi a_1}$, $K_{IB} = F_B\sigma\sqrt{\pi a_2}$.其中 F_A 和 F_B 可通过文献[7]查得.当缝端 A 开裂扩展时, F_A 及 F_B 均会增大且 F_B 的增幅约是 F_A 增幅的 2 倍,如图 3(b)所示.

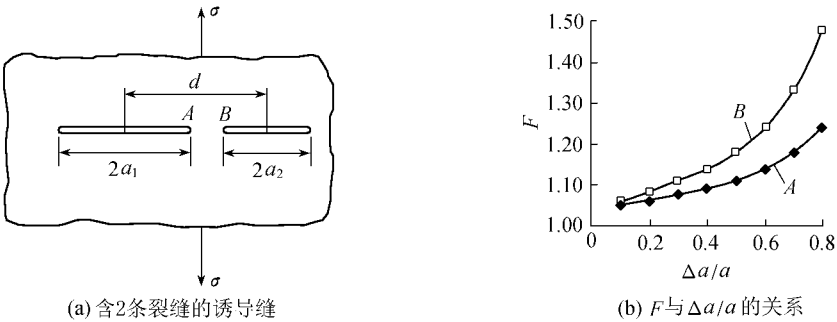


图 3 诱导缝开裂对相邻缝端的影响
Fig.3 Influence of cracking of induced joint on adjacent crack tip

5 实际拱坝诱导缝的开裂特性

碾压混凝土拱坝中诱导缝的开裂是一个三维问题,并且实际拱坝结构、诱导缝形式、约束情况、荷载情况以及材料的非线性性质等对诱导缝开裂特性有不同程度的影响,因此实际情况要比上述简化模型复杂得多.

通过对前述工程实例的数值模拟计算可知:(a)当某缝开裂时,其本身的应力强度因子将会降低,但也有少数开裂未到位的缝端的应力强度因子是升高的.图4为数值模拟计算的部分结果,其下降段反映了该缝开裂时 K_I 所发生的变化.(b)当某缝开裂时,其相邻或相近缝端的应力强度因子将会增大,而远处的应力强度因子则会减小.19号缝端和20号缝端是相邻的2个缝端,19号缝端开裂时20号缝端的 K_I 值增大,20号缝端开裂时19号缝端的 K_I 值增大.而30号缝端是远处的缝端,此时其 K_I 值减小.(c)当诱导缝开裂时,诱导缝断面的 $K_{I\max}$ 增大,即诱导缝的等效强度 f_{eq} 将会降低,变化后的断裂参数仍满足开裂判别式,即诱导缝仍能够保证在坝体其他部位开裂之前先开裂.

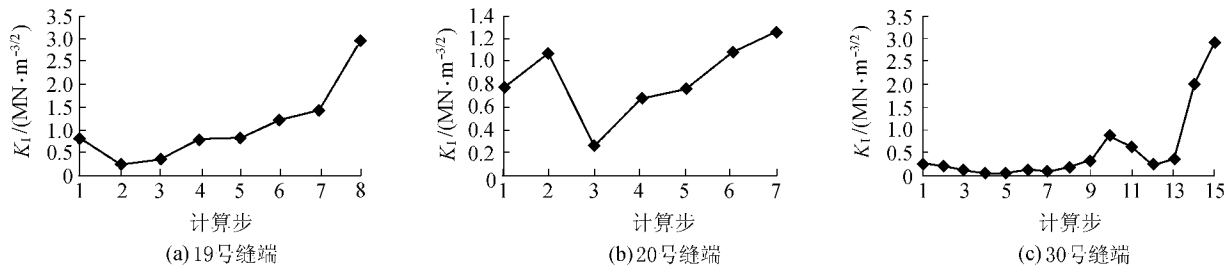


图4 相邻及远处缝端应力强度因子 K_I 的相互影响

Fig.4 Interactions between stress intensity factor K_I of crack tips at different distances

6 诱导缝开裂对坝体的作用分析

首先通过大坝三维温度场的仿真计算确定出坝体产生最大拉应力时最大应力点所在高程^[8],然后以该高程拱圈为对象进行平面断裂力学分析.

该模型设有2条诱导缝,每条诱导缝设有18个缝端,每个缝端均按奇异单元进行网格划分.根据碾压混凝土的材料性质,取弹性模量 $E=35\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.167$,热膨胀系数 $\alpha=1\times10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.关于断裂韧度 K_{IC} ,根据文献[9]给出的沙牌拱坝碾压混凝土试件的断裂试验结果并经尺寸效应换算后取 $K_{IC}=0.8\text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$.

由计算结果可知:当坝体温度降低 $6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,右侧诱导缝的上游缝端开始开裂,随后逐步沿诱导缝断面向下游扩展,直至整个诱导缝断面开裂.在诱导缝开裂过程中,坝体大部分区域的应力均有所降低,特别是诱导缝完全开裂时,应力下降非常明显.这可从危险点的主应力变化看出,如图5所示,其余各点情况与之相似.但在诱导缝附近区域,坝体应力变化较为复杂,规律不明显.这是由于裂缝附近应力场变化急剧所致.另外,从坝体应力分布情况来看,在诱导缝开裂过程中,坝体应力变化不大,只是在诱导缝附近区域变化较明显.

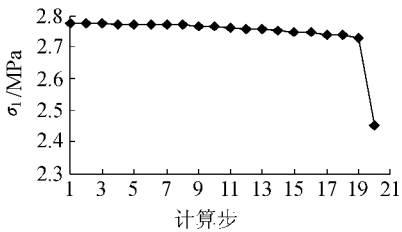


图5 危险点主应力 σ_1 的变化

Fig.5 Variation of principal stress σ_1 at critical points

7 结 论

- a. 对工程实际中常见的等间距诱导缝来讲,随着诱导缝的开裂,诱导缝等效强度将会下降,但其断裂参数始终满足诱导缝开裂判别式.因此,诱导缝的设置可以首次开裂条件作为判别依据.
- b. 在保证诱导缝开裂判别式始终满足的前提下,适当加大中部诱导板的缝间距,可减少施工工序,提高施工效率.
- c. 在诱导缝的开裂过程中,除诱导缝附近外,坝体其他部位应力均有所降低,特别是诱导缝完全开裂时,应力下降非常明显.这说明,诱导缝在释放应力方面可起到一定的作用.

参考文献：

[1] 陈德祥,许勇. 普定水电站碾压混凝土拱坝裂缝成因探讨[J]. 贵州水力发电,2000,14(1) 34-39.
[2] 曾昭扬,马黔. 高碾压混凝土拱坝中的构造缝问题研究[J]. 水力发电,1998(2) 30-33.
[3] 黄达海,宋玉普,赵国藩. 碾压混凝土拱坝诱导缝的等效强度研究[J]. 工程力学,2000,17(3) 16-22.
[4] 宋玉普,张林俊,殷福新. 碾压混凝土坝诱导缝端应力强度因子计算研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2003,25(5) 385-390.
[5] 宋玉普,王学志,黄志强,等. 碾压混凝土拱坝单向间隔诱导缝等效强度研究[J]. 水利学报,2005,36(4) 544-548.
[6] 顾爱军,朱为玄,王向东,等. 碾压混凝土拱坝诱导缝的断裂力学分析[J]. 红水河,2004,23(1) 21-24.
[7] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[K]. 北京: 科学出版社,1981 38-39.
[8] 顾爱军,王向东,徐道远,等. 碾压混凝土拱坝诱导缝的作用探讨[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2003,6(1) 66-70.
[9] 张林,徐进,陈新,等. 碾压混凝土断裂试验研究[J]. 水利学报,2001(5) 45-49.

Study on fracture behaviors of induced joints in RCC arch dams

GU Ai-jun¹, WANG Xiang-dong²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China ;
2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The fracture behaviors of induced joints were analyzed by numerical calculation at first. Then, with a practical project taken as an example, the cracking course of induced joints was simulated by use of the method of fracture mechanics, and the function of induced joints was discussed as well. Some conclusions are drawn: the opening of induced joints depends on such factors as their position, type, distance to the constraints at two sides of the joints, and adjacent crack tip; the stress of the dam body gradually decreases in the cracking course of induced joints, and the stress decreases sharply when induced joints are cracked thoroughly. As a conclusion, the condition for the first opening of induced joints could be taken as a criterion for their setting; thus it could be ensured that the first opening of induced joints occurs before the cracking of other parts of the arch dam. To simplify the working procedure and improve the construction efficiency, the distance between induced plates in the middle section of the dam body could be enlarged properly under the condition that opening criterion of induced joints is satisfied.

Key words RCC; arch dam; induced joint; fracture behavior