

基于断裂力学理论的裂缝转异诊断

李雪红¹ ,张小稳² ,顾冲时³ ,徐洪钟¹

(1.南京工业大学土木工程学院 ,江苏 南京 210009 ;2.无锡市城市防洪工程管理处 ,江苏 无锡 214031 ;
3.河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :针对某重力拱坝的实际运行情况 ,应用断裂力学理论 ,结合数值仿真分析结果 ,依据采用概率分析法反演得到的混凝土的断裂韧度 ,绘制裂缝转异诊断曲线图 ,判断裂缝是否发生转异 .分析结果显示 ,当出现低温较低水位组合时 ,该坝 105 m 高程裂缝在开裂深度达到 5.077 m 时仍可能继续扩展 ,在运行过程中应密切关注 .
关键词 :裂缝 ;转异诊断 ;断裂力学 ;反演分析
中图分类号 :TV313 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2008)02-0209-04

对于带缝运行的水工混凝土结构 ,裂缝稳定与否直接关系到整个结构的安全状况 ,是判定结构稳定性的一个重要指标 .在正常的使用条件下 ,原有裂缝是否会进一步扩展 ,会不会突然发生失稳转异 ,是该领域近几十年来致力于研究的一个课题^[1-5] .而断裂力学^[6-7]主要研究裂纹尖端附近的应力场和应变场、能量释放率等 ,从而建立宏观裂缝的起裂、稳定扩展和失稳扩展的判据 .此外 ,混凝土的断裂韧度一般通过试验获得 ,但混凝土是非匀质材料 ,很多因素对断裂韧度均有影响 ,并且有较大的尺寸效应 ,试验值与实际值之间有一定的偏差 .因此 ,本文应用断裂力学理论 ,采用概率分析法来反演混凝土的断裂韧度 ,绘制裂缝转异诊断曲线图 ,判断裂缝是否发生转异 ,由此对工程的安全运行提供指导 .

1 裂缝转异诊断判据

断裂力学中对于各种复杂的断裂形式可分解为 3 种基本断裂类型的组合 :第Ⅰ类为张开型 ,第Ⅱ类为滑开型 ,第Ⅲ类为撕开型 ,如图 1 所示 .

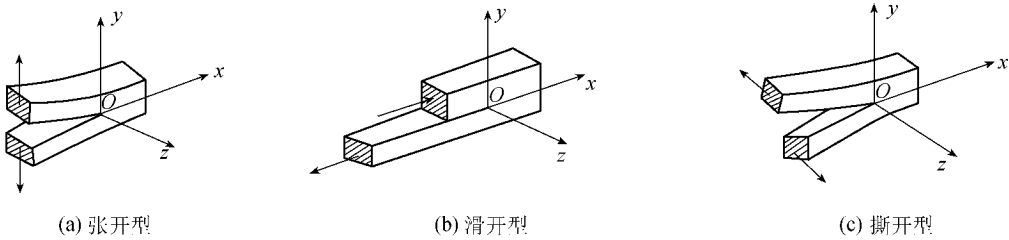


图 1 混凝土的基本断裂类型

Fig.1 Basic types of concrete fracture

以第Ⅰ类裂缝为例 ,应力强度因子 K_I 表征裂缝尖端的应变能 ,反映了缝端的应力场 . K_{IC} 为混凝土的断裂韧度 ,断裂韧度是混凝土的一种机械性能参数 ,是混凝土抵抗断裂的一个韧度指标 .因此 ,可根据 K_I 与 K_{IC} 之间的关系 ,判断裂缝是否出现转异 ,即裂缝转异诊断的判据为 : $K_I < K_{IC}$,裂缝稳定 ; $K_I = K_{IC}$,裂缝处于临界状态 ; $K_I > K_{IC}$,裂缝失稳扩展 ,发生转异 .

2 混凝土断裂韧度的反演分析

由于材料性能和荷载等因素的随机性 ,裂缝的扩展过程也表现出随机的特征 ,因此本文采用概率分析法

收稿日期 2007-04-29
基金项目 国家自然科学基金重点项目(50539010) ,国家科技支撑计划(2006BAC14B03) ,高等学校博士点学科专项基金(20070294023)
作者简介 李雪红(1974—) ,女 ,河南长垣人 ,副教授 ,博士 ,主要从事结构健康监测及新型混凝土材料研究 .

反演混凝土的断裂韧度.

2.1 荷载集与效应集的剖分

设运行过程中所有作用在坝体上的外荷载组成一个集合,称之为荷载集,记为 $\Omega(P)$,其中 P 表示荷载,是向量,记为 $P=(P_1,P_2,\dots)$;另一方面,称所有与外荷载 P 相对应的荷载效应 R 的集合为荷载效应集,简称为效应集,记为 $\Omega(R)$.将作用在坝体上的荷载集 $\Omega(P)$ 剖分为 3 个子集:裂缝不发生、不扩展的正常荷载集 $\Omega_N(P)$;裂缝可能发生、扩展的模糊荷载集 $\Omega_{FU}(P)$;裂缝必然发生和扩展的转异荷载集 $\Omega_C(P)$.3 个子集满足

$$\Omega(P)=\Omega_N(P)\cup\Omega_{FU}(P)\cup\Omega_C(P)\tag{1}$$

$$\Omega_N(P)\cap\Omega_C(P)=\Omega_C(P)\cap\Omega_{FU}(P)=\Omega_N(P)\cap\Omega_{FU}(P)=\varnothing\tag{2}$$

其中,令

$$\Omega_{FU}(P)=\varnothing$$

对应上述 3 个荷载子集的效应子集为 $\Omega_N(R)$, $\Omega_{FU}(R)=\varnothing$, $\Omega_C(R)$.

2.2 转异荷载集的确定

根据水工混凝土结构的运行情况、安全检查及裂缝、环境量等的实测资料,或应用基于神经网络的裂缝不利荷载组合挖掘方法^[8]计算分析,选择裂缝产生或扩展的不利工况,作为转异荷载集 $\Omega_C(P)$ 的元素.

2.3 裂缝类型的判定

根据选出的转异荷载集 $\Omega_C(P)$,采用有限单元法,利用接触模型模拟裂缝,计算裂缝尖端的应力集 $\Omega_C(\sigma)$,由此判别裂缝的形式.然后采用数值外插法^[9]计算应力强度因子,求出应力强度因子集 $\Omega_C(K)$.

2.4 断裂韧度的求解

由于 $\Omega_C(P)$ 是一个随机变量,因此 $\Omega_C(K)$ 同样也是一个随机变量,并具有一定的概率分布,且这种分布可以采用随机抽样的办法来模拟,然后用非参数检验法——K-S 法或 A-D 法进行 K 的分布检验,确定概率密度函数 $f(K)$ 或分布函数 $F(K)$.拟定显著性水平 α .则 K_C 可用式(3)计算:

$$K_C=F^{-1}(\bar{K},\sigma_K,\alpha)\tag{3}$$

式中: $\bar{K},\sigma_K$ —— $\Omega_C(K)$ 的均值和标准差;
 α ——显著性水平,一般取 0.01.

3 裂缝转异诊断分析

以某重力拱坝为例,综合应用数值仿真分析方法和断裂力学理论,计算水压和温度不同组合作用时,105 m 高程裂缝(以 18 号坝段为例)在不同开裂深度(4.442 m, 4.795 m, 5.006 m, 5.077 m)时的应力强度因子,如表 1 所示.该坝的工程概况、仿真模型、计算参数见文献[10].

3.1 断裂韧度的反演分析

3.1.1 转异荷载集 $\Omega_C(P)$ 的确定

根据大坝运行过程中的实际工况,以

表 1 不同荷载组合作用下应力强度因子统计

Table 1 Summary of stress intensity factor under different load combinations

开裂深度/m	不同水位应力强度因子 $K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$						温度/ $^{\circ}\text{C}$
	水位 90.00 m	水位 100.00 m	水位 105.00 m	水位 110.00 m	水位 120.00 m	水位 126.30 m	
4.442	2.2403	2.3859	2.4741	2.5423	2.2493	1.5060	-8
4.795	2.2157	2.3776	2.4754	2.5501	2.1997	1.3262	-8
5.006	2.0947	2.2706	2.3771	2.4583	2.0624	1.0813	-8
5.077	1.8851	2.0617	2.1686	2.2498	1.8461	0.8508	-8
4.442	1.8483	1.9925	2.0819	2.1442	1.8561	1.1135	-4
4.795	1.8296	1.9902	2.0891	2.1570	1.8122	0.9396	-4
5.006	1.7311	1.9057	2.0133	2.0870	1.6974	0.7172	-4
5.077	1.5584	1.7339	1.8418	1.9153	1.5179	0.5236	-4
4.442	1.5217	1.6669	1.7548	1.8173	1.5294	0.7872	0
4.795	1.5096	1.6714	1.7687	1.8367	1.4921	0.6200	0
5.006	1.4332	1.6092	1.7151	1.7888	1.3995	0.4198	0
5.077	1.2946	1.4713	1.5776	1.6511	1.2541	0.2853	0
4.442	0.5531	0.6970	0.7851	0.8443	0.5573	0.0050	10
4.795	0.5575	0.7177	0.8153	0.8794	0.5358	0.0242	10
5.006	0.5389	0.7131	0.8194	0.8887	0.5004	0.0545	10
5.077	0.4926	0.6676	0.7743	0.8434	0.4472	0.0657	10
4.442	0.1925	0.1829	0.1785	0.1776	0.1771	0.1845	25
4.795	0.3255	0.3142	0.3086	0.3068	0.2984	0.2691	25
5.006	0.4838	0.4703	0.4638	0.4615	0.4481	0.3922	25
5.077	0.5722	0.5596	0.5534	0.5508	0.5310	0.4634	25
4.442	0.2804	0.2709	0.2664	0.2655	0.2653	0.2540	30
4.795	0.4792	0.4678	0.4622	0.4605	0.4522	0.4119	30
5.006	0.7164	0.7029	0.6964	0.6941	0.6809	0.6256	30
5.077	0.8499	0.8374	0.8310	0.8285	0.8089	0.7419	30
4.442	0.3684	0.3589	0.3544	0.3543	0.3536	0.3321	35
4.795	0.6328	0.6214	0.6158	0.6153	0.6065	0.5640	35
5.006	0.9489	0.9355	0.9289	0.9284	0.9144	0.8561	35
5.077	1.1276	1.1150	1.1088	1.1081	1.0877	1.0171	35

及对裂缝的实际观测和检查,水库运行期间,经历了 2 次高温低水位(1976 年 7 月,1978 年 7 月)和 3 次低温低水位(1976 年底和 1977 年初、1977 年底和 1978 年初、1978 年底和 1979 年初)的袭击并且 1992 年 12 月初至 1993 年 3 月 3 日的水库水位一直在 100.00~102.00 m 之间,裂缝开度随着气温的降低而增大,大部分测点在 1993 年 1 月 18 日(库水位为 101.82 m,气温为 -3.0℃)出现裂缝最大开度,该年度出现裂缝开度的最大变幅。由于受这次不利荷载的影响,裂缝的局部区域,如 15-Ⅰ,16-Ⅰ,18-Ⅰ,18-Ⅱ,18-Ⅳ,18-Ⅴ等测点处,原灌浆胶结的部位被拉开。因此,转异荷载集 $\Omega_c(P)$ 选择上述运行区间出现的不利荷载组合。

3.1.2 应力强度因子集 $\Omega_c(K)$ 的计算

根据转异荷载集 $\Omega_c(P)$ 计算缝端的应力,由计算结果分析,该裂缝为第Ⅰ类裂缝,由转异荷载集 $\Omega_c(P)$ 中随机抽取 15 种荷载组合,计算不同开裂深度时,缝端应力强度因子 K_I 值,如表 2 所示。

表 2 不同荷载组合时各开裂深度下的 K_I

Table 2 Samples of K_I for different crack depths under different load combinations

开裂深度/m	$K_I/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4.442	2.240	1.848	1.522	2.386	1.993	1.667	2.474	2.082	1.755	2.542	2.144	1.817	2.249	1.856	1.529
4.795	2.216	1.829	1.509	2.378	1.990	1.671	2.475	2.089	1.7697	2.550	2.157	1.837	2.199	1.812	1.492
5.006	2.095	1.731	1.433	2.271	1.906	1.609	2.377	2.013	1.715	2.458	2.087	1.789	2.062	1.697	1.399
5.077	1.885	1.558	1.295	2.062	1.734	1.471	2.169	1.842	1.578	2.249	1.915	1.651	1.846	1.518	1.254

3.1.3 K_{IC} 的计算

对表 2 的计算数据采用 K-S 法检验,结果表明 K_I 服从正态分布 $K_I \sim N(\bar{K}_I, \sigma_K^2)$,则 $K_{IC} = F^{-1}(\bar{K}_I, \sigma_K, \alpha)$,求得的 $\bar{K}_I, \sigma_K, K_{IC}$ 如表 3 所示。由表 3 可看出,不同开裂深度下反演出的断裂韧度值基本接近。该重力拱坝混凝土断裂韧度的小样品试验值为 $0.279 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,考虑尺寸效应后,得到该混凝土重力拱坝的断裂韧度 K_{IC} 的试验值为 $1.278 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,与反演值较接近。

表 3 各开裂深度下 K_{IC} 的反演值

Table 3 Inversed value of K_{IC} for different crack depths

开裂深度/m	$\bar{K}_I/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	σ_K/MPa	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
4.442	1.976	0.341	1.414
4.795	1.956	0.362	1.391
5.006	1.910	0.323	1.379
5.077	1.770	0.277	1.314

3.2 裂缝转异诊断

将应力强度因子 K_I 与断裂韧度 K_{IC} 比较,对裂缝是否发生转异进行诊断。为节省篇幅,根据表 1 的计算结果,只绘出裂缝开裂深度为 5.077 m 时裂缝转异诊断图,如图 2 所示。首先绘出应力强度因子随不同工况的变化曲线,断裂韧度取表 3 所示的反演值作为控制值。将整个区间分为 2 个区域:失稳区(或转异区) $\Omega_1(H, T)$ 和稳定区 $\Omega_2(H, T)$ 。当应力强度因子落入 $\Omega_1(H, T)$ 时,裂缝失稳转异;当应力强度因子落入 $\Omega_2(H, T)$ 时,裂缝稳定。由图 2 可看出,当出现低温较低水位组合时,105 m 高程裂缝在开裂深度达 5.077 m 时仍可能继续扩展。

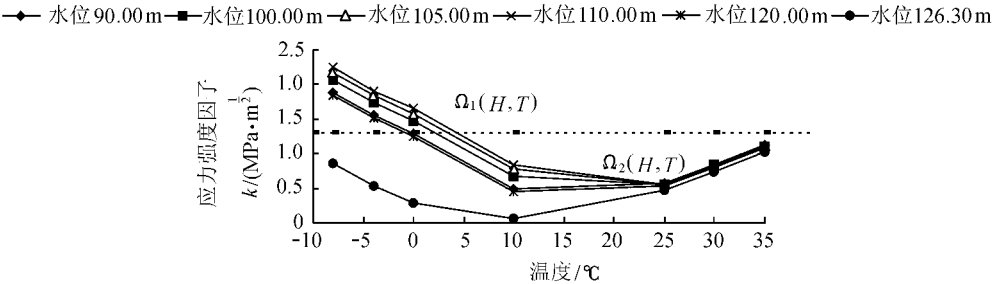


图 2 裂缝开裂深度 5.077 m 时裂缝转异诊断曲线

Fig.2 Abnormality diagnosis diagram of a crack 5.077 m in length

4 结 论

本文采用概率分析法来反演混凝土的断裂韧度,避免了水泥类型和强度、骨料类型、大小、形状、强度、含量、配合比、外加剂、掺和料、施工工艺和养护条件对断裂韧度的影响,以及混凝土断裂韧度较大的尺寸效应。提出了基于断裂力学理论的裂缝转异诊断方法,可用于分析混凝土坝在运行过程中裂缝的稳定性。在此

基础上,针对某重力拱坝的实际运行情况,结合数值仿真分析结果,对裂缝是否发生转异进行诊断.分析结果显示,当出现低温较低水位组合时,该坝 105 m 高程裂缝在开裂深度达到 5.077 m 时仍可能继续扩展,应引起重视.

参考文献:

- [1] 朱伯芳.重力坝的劈头裂缝[J].水力发电学报,1997(4):85-91.
- [2] 邓进标,邹志晖,韩伯鲤.水工混凝土建筑物裂缝分析及其处理[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1998.
- [3] 吴胜兴.混凝土裂缝开展宽度计算的有限元法[J].计算力学学报,1997,14(1):69-77.
- [4] 陈祖坪.拱坝强度裂缝的定量研究[J].水利学报,2001(8):12-18.
- [5] 李雪红,徐洪钟,顾冲时,等.基于小波和相空间重构的裂缝时变规律研究[J].水利学报,2007,38(2):250-254.
- [6] 徐世烺,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.
- [7] 蔡四维,蔡敏.混凝土的损伤断裂[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [8] 李雪红,徐洪钟,顾冲时,等.基于 ANFIS 的裂缝开度不利荷载组合提取方法[J].长江科学院院报,2005,22(2):53-56.
- [9] 李和平,巫绪涛,杨伯源.数值外插法求解 K 因子的插值基础及误差估计[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2000,23(6):26-29.
- [10] 李雪红.重大水工混凝土结构裂缝演变规律及转异诊断方法研究[D].南京:河海大学,2003.

Abnormality diagnosis of crack based on fracture mechanics

LI Xue-hong¹, ZHANG Xiao-wen², GU Chong-shi³, XU Hong-zhong¹

(1. School of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China ;

2. City Flood-prevention Management Division of Wuxi City, Wuxi 214031, China ;

3. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Based on the actual operation condition of a gravity arch dam, crack abnormality diagnosis diagrams were obtained using fracture mechanics, mathematical simulation and concrete fracture toughness that is inversed using probability analysis. The results indicate that the crack 5.077 m in length at Elevation 105 m will keep extending under low temperature and low water level. We should pay attention to this situation during the operation.

Key words : crack ; abnormality diagnosis ; fracture mechanics ; inverse analysis