

# 用断裂力学研究混凝土裂缝的允许灌浆压力

张国新, 李海枫

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 混凝土大坝在施工期或运行期产生裂缝的现象较为普遍, 为了满足工程安全运行要求, 一般对危害较大的裂缝进行灌浆处理。灌浆压力是裂缝灌浆中非常重要的设计参数, 合理选择灌浆压力是控制灌浆质量好坏的关键。但灌浆压力同时又是作用于缝面的劈裂力, 如果灌浆压力控制不当, 会导致裂缝因注浆劈裂而扩展。文中从简单模型出发, 研究混凝土裂缝灌浆临界压力以及灌浆压力对裂缝稳定性的影响, 从而研究不同缝长和不同约束条件下混凝土裂缝安全灌浆压力。

**关键词:** 流形方法; 混凝土裂缝; 灌浆压力

中图分类号: TV 313

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2009)12-0052-04

## Research on allowable grouting pressure of concrete crack by means of fracture mechanics

ZHANG Guo-xin, LI Hai-feng

(China Institute of Water and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract** It is common that concrete dams occur cracks in construction or operation. In order to operate safely, grouting is always adopted as the treatment for some harmful cracks. Grouting pressure is a very important parameter for crack grouting, the selection of correct grouting pressure is the key for good grouting quality. However, grouting pressure is a kind of splitting power acting on crack. If grouting pressure control is not well, it will lead to crack propagation due to expansion of grouting. In this paper, starting from the simple model to study the critical grouting pressure of concrete cracks and grouting pressure on the stability of cracks, then to research on allowable grouting pressure of concrete crack under conditions of different fracture length and constraints.

**Key words** manifold method; concrete crack; grouting pressure

## 1 引言

混凝土坝在施工及运行期间出现裂缝是非常普遍的问题, 未见任何裂缝的混凝土坝少之又少, 甚至可以用“罕见”来形容, 因此有“无坝不裂”之说。裂缝, 尤其是规模大、位于重要部位的裂缝, 削弱坝体整体性, 影响受力安全和正常使用。施工中出现的裂缝还有可能随着混凝土浇筑及运行荷载的施加继续发展, 因此施工中发现的裂缝一般都要进行处理。

灌浆是裂缝处理的重要手段, 灌浆压力是混凝土裂缝灌浆中非常重要的一个参数, 正确选择灌浆压力是控制灌浆质量好坏的关键。目前, 在对裂缝进行灌浆处理时, 都是通过压水试验或以往工程经验来确定

灌浆压力, 很少有人从理论上研究混凝土裂缝灌浆的安全压力问题。本文从简单模型出发, 研究混凝土裂缝灌浆的临界压力以及灌浆压力对裂缝稳定性的影响, 从而研究不同缝长和不同约束条件下混凝土裂缝的安全灌浆压力。

## 2 混凝土抗裂能力

经典断裂力学认为, 裂纹扩展并不取决于整体的应力状态, 而是取决于裂纹尖端附近的应力集中程度

收稿日期: 2009-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50909105)。

作者简介: 张国新(1960-), 男, 山东临朐人, 教授级高级工程师, 博士。

(应力强度因子)及其与混凝土自身抵抗这种应力集中程度能力(混凝土断裂韧度)的对比。若应力强度因子大于混凝土断裂韧度,则裂缝扩展,反之,则裂缝稳定。对于复合型断裂模式,裂缝扩展准则可用下式<sup>[1]</sup>表示

$$a \cdot K_1 + b \cdot K_2 \geq K_{Ic} \quad (1)$$

式中,  $K_1$ 、 $K_2$ 为 I、II 型应力强度因子;  $K_{Ic}$ 为材料断裂韧度。

与混凝土抗拉强度一样,混凝土断裂韧度  $K_{Ic}$ 是材料特性,它与混凝土配合比、强度、龄期等有关,必须通过混凝土断裂试验来确定。综合国内外近三十年试验研究成果,混凝土断裂韧度  $K_{Ic}$ 在  $0.3 \sim 1.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ 之间<sup>[2]</sup>。

混凝土断裂韧度不仅依赖于材料性质,而且与试件尺寸有关,使混凝土断裂韧度呈现尺寸效应<sup>[3]</sup>。

### 3 缝面作用均匀压力时的断裂力学解

最简单裂缝是如图 1 所示的无穷大含裂纹板问题<sup>[1]</sup>,缝面作用有均匀压力。根据断裂力学理论解,缝端应力强度因子为

$$K_1 = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2)$$

式中,  $\sigma$ 为缝面作用均匀压应力;  $a$ 为缝长。

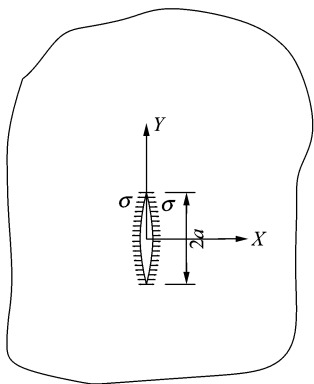


图 1 无限大含裂缝板

不同缝长、缝面上作用不同压力时缝端应力强度因子见表 1。表 1 为无限大板时的计算结果,当缝长

$2a < \frac{1}{10}L$ (见图 2)时,精度是可以接受的。

对于有限尺寸板(见图 2),可采用式(3)进行计算

$$K_1 = f \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (3)$$

式中,  $f$ 为形状系数<sup>[4]</sup>,有  $f > 1$ 。

对于有限含缝板,由于  $f > 1$  所以相同缝长、相同缝面压力,其缝端应力强度因子比表 1 要大。

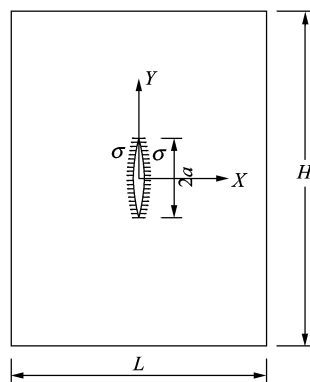


图 2 有限含裂缝矩形板

表 1 无限板不同缝长、缝面作用不同压力时缝端应力强度因子汇总

缝长 /m	不同缝面压力时缝端应力强度因子 /MPa·m <sup>-1/2</sup>					
	0.1 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa	0.6 MPa
0.5	0.09	0.18	0.27	0.35	0.44	0.53
1.0	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75
5.0	0.28	0.56	0.84	1.12	1.40	1.68
10	0.40	0.79	1.19	1.59	1.98	2.38
20	0.56	1.12	1.68	2.24	2.80	3.36
30	0.69	1.37	2.06	2.75	3.43	4.12
40	0.79	1.59	2.38	3.17	3.96	4.76
50	0.89	1.77	2.66	3.54	4.43	5.32
60	0.97	1.94	2.91	3.88	4.85	5.82

### 4 整体一次灌浆时允许灌浆压力

当缝长较小时,可以采用整条裂缝一次灌浆的方式,即同时对全部缝面施加灌浆压力进行灌浆。当不考虑由于裂缝非水平分布、两缝端存在高差时灌浆材料自重引起压力沿缝长方向的不均匀分布,可以直接用式(2)或式(3)计算不同压力、不同缝长时的缝端应力强度因子,或已知混凝土断裂韧度条件下计算允许灌浆压力。

假设  $K_{Ic} = 0.8 \quad 1.0 \quad 1.2 \quad 1.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ , 取  $H = 100\text{m}$ 、 $L = 70\text{m}$ , 不同缝长时允许灌浆压力见表 2。

由表 2 可知,随着缝长增大,允许灌浆压力急剧减小。当缝长 = 1.0m 时,断裂韧度取  $0.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ , 允许采用 0.64 MPa 的灌浆压力;  $K_{Ic} = 1.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$  时的最大允许灌浆压力可以提高到 1.2 MPa, 但当缝长为 12 m,  $K_{Ic} = 0.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$  时的允许压力仅为 0.18 MPa,  $K_{Ic} = 1.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$  时的允许压力为 0.33 MPa, 缝长进一步加大,允许灌浆压力会进一步减小。

表 2 不同缝长允许灌浆压力

初始缝长 /m	断裂韧度 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$			
	0.8	1.0	1.2	1.5
0.3	1.17	1.46	1.75	2.18
0.5	0.90	1.13	1.35	1.69
1.0	0.64	0.80	0.96	1.20
3.0	0.37	0.46	0.55	0.69
6.0	0.26	0.33	0.39	0.49
12.0	0.18	0.22	0.27	0.33
24.0	0.11	0.14	0.17	0.21
48.0	0.06	0.07	0.09	0.11
60.0	0.04	0.05	0.07	0.08

## 5 裂缝分段灌浆时的允许灌浆压力

### 5.1 灌浆模拟方式

当缝长较大时, 一般采用分段灌浆的方式。对于竖向分布的裂缝, 缝面作用压力分布形式可分为如下 3 种形式: I 型, 自灌浆高程以下, 灌浆压力呈水压力分布如图 3(a)所示, 即灌浆顶部压力为零, 底部压力为灌浆材料的自重压力, 由于这种灌浆方式灌浆压力往往不够, 一般少有采用; II 型, 如图 3(b)所示, 灌浆方式是先在灌浆段顶部采取措施封闭, 防止浆液上流, 再施加压力进行灌浆, 此时压力为梯形分布, 对于这种分段封闭的灌浆方式在施工实施中有难度; III 型, 采取措施将裂缝四周封闭, 灌浆方式取底部打压, 通过灌浆材料充填裂缝, 浆液面不断抬高同时挤压缝内空气, 形成有压气闭区, 灌浆段顶面压力等同上部封闭气压, 下部压力随高程降低按灌浆材料自重方式增大 [见图 3(c)]。

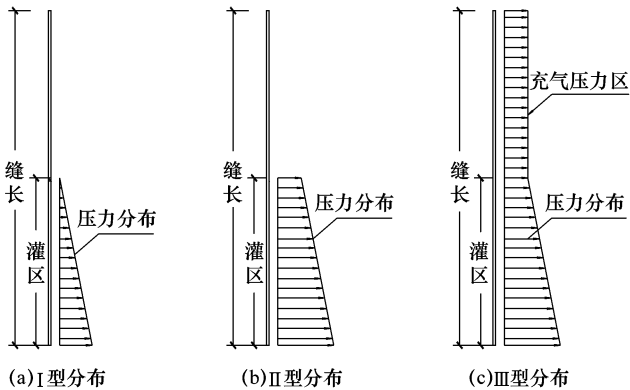


图 3 灌浆压力分布形式

对于如上 3 种灌浆压力分布, 结构形式简单且裂缝形态规则时仍可以采用理论解近似求解, 但当结构形式复杂且裂缝形态不规则时, 需要借助数值方法。

## 5.2 数值计算结果

以某拱坝典型坝段断面作为研究对象, 考虑裂缝长度为 40 m 和 60 m 两种情况, 建立数值计算模型见图 4。灌浆压力分布形式按图 3 中 (b) 和图 3(c) 考虑。

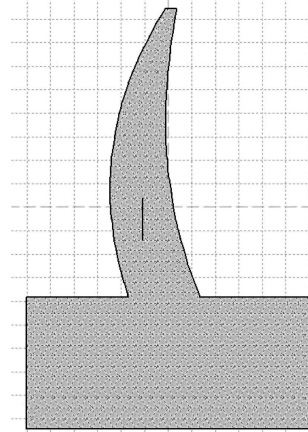


图 4 含裂缝的流形元计算模型

根据计算结果, 得到对不同灌浆高度条件下, 分段封闭与全段闭气两种情况时缝端应力强度因子如表 3 和表 4 所列。由表 3 和表 4 可以看出, 当混凝土断裂韧度取  $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$  时, 对于缝长为 40 m 的裂缝而言, 采用 10 m 一段进行裂缝灌浆, 全段闭气灌浆条件下灌浆段底部允许灌浆压力不能大于 0.2 MPa, 即气闭区压力为 0.1 MPa。每段灌浆 20 m 时, 分段封闭方式灌浆将灌浆压力提高到 0.25 MPa, 即气闭区允许压力降低到 0.05 MPa。若灌浆高度进一步增大, 则不能满足混凝土防裂要求。

当缝长为 60 m, 灌浆高度取 10 m 时, 可用 0.15 MPa 的压力进行灌浆。灌浆高度达到 20 m 时, 就只能采用静水压力 (无闭气压力) 方式进行灌浆, 否则可能引起裂缝扩展, 因此应进一步减小灌浆段高度。

对于较长裂缝, 采用 0.4 MPa 以上的压力进行灌浆, 要慎重研究灌浆方式。

## 6 结论

根据理论计算和数值分析的结果, 当缝长达到一定长度时, 只需在缝面上作用少许压力 (劈裂力) 就会使缝端的应力强度因子大于混凝土的断裂韧度, 引起裂纹扩展。如 40 m 缝长、注浆高度取 20 m, 允许的灌浆压力为 0.25 MPa 时引起的缝端应力强度因子为  $1.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ , 达到混凝土的断裂韧度; 当缝长 60 m、注浆高度 20 m 时, 0.25 MPa 的注浆压力即可引起裂缝扩展。

保证灌浆质量和避免裂缝劈裂扩展是一对矛盾。

表 3 裂缝长度为 40 m 缝端应力强度因子汇总

灌浆压力 M Pa	不同灌浆高度对应的缝端应力强度因子 /MPa·m <sup>-1/2</sup>											
	10 m				20 m				30 m			
	分段封闭		全段闭气		分段封闭		全段闭气		分段封闭		全段闭气	
	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
0.1	0	0.217	0	0.217								
0.15	0	0.345	0.548	0.765								
0.2	0.1	0.625	1.234	1.510	0.157	0.717	0.157	0.717				
0.25	0.187	0.997	2.320	2.705	0.34	1.282	0.819	1.437				
0.3	0.302	1.424	3.671	4.143	0.614	1.963	1.381	2.348	0.537	1.59	0.537	1.59
0.4	0.57	2.368	7.231	7.668	1.096	3.496	3.689	4.257	1.784	3.496	2.305	3.619
0.5	0.856	3.416	11.471	11.961	2.105	5.257	5.963	6.559	3.31	5.726	4.949	5.952
0.6	0.943	4.522	16.366	17.053	2.948	7.157	9.556	9.53	5.006	8.001	7.369	8.33

表 4 裂缝长度为 60 m 缝端应力强度因子汇总

灌浆压力 M Pa	不同灌浆高度对应的缝端应力强度因子 /MPa·m <sup>-1/2</sup>											
	10 m				20 m				30 m			
	分段封闭		全段闭气		分段封闭		全段闭气		分段封闭		全段闭气	
	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
0.1	0	0.216	0.000	0.217								
0.15	0	0.345	0.656	1.101								
0.2	0.081	0.67	1.730	2.235	0.142	0.795	0.142	0.795				
0.25	0.146	1.084	3.317	3.472	0.318	1.452	1.105	1.889				
0.3	0.215	1.543	4.980	5.099	0.516	2.225	1.899	3.103	0.467	1.832	0.467 21	1.831 5
0.4	0.375	2.529	8.191	8.241	0.953	3.997	5.17	5.984	1.222	3.931	2.322 6	4.607 2
0.5	0.568	3.637	12.034	12.159	1.544	6.051	8.529	9.56	1.845	6.48	5.892 5	8.112 2
0.6	0.788	4.978	15.832	15.698	2.165	8.261	12.187	13.059	3.332	9.254	9.130 3	11.695

灌浆压力小, 则难以保证灌浆质量; 压力大则可能导致裂缝劈裂扩展。因此, 对于具体的裂缝形式和缝长, 须对灌浆压力和灌浆段长进行严格论证, 在保证灌浆质量的同时, 避免裂缝的劈裂扩展。

#### 参考文献:

[1] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[2] 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.

[3] 田明伦, 黄松海, 刘恩锡, 等. 混凝土断裂韧性[J]. 水利学报, 1982 (6): 38-46.

[4] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[Z]. 北京: 科学出版社, 1981.

(责任编辑 陈小敏)

#### · 简 讯 ·

## “973”海河项目第八课题研讨会在京召开

近日, 海河水利委员会在北京组织召开国家“973”计划项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”第八课题“海河流域水循环多维临界整体调控阈值与模式”研讨会, 听取专题负责人关于最新研究进展的汇报, 就研究工作的进一步开展进行深入研讨。项目首席科学家王浩院士出席会议, 海河水利委员会曹寅白总工程师主持会议并就下一阶段研究工作的开展进行部署。

会议认为, 该课题以流域水循环及其伴生过程综合模拟为基础, 以水资源高效利用为核心开展了面向和谐社会的流

域水循环整体多维调控的基础理论、调控模式、阈值标准与方案研究, 形成了缺水地区水资源高效利用和促进人水和谐的调控定量标准集, 提出了流域关键性控制指标的临界调控阈值确定方法。从总体上看, 课题研究工作进展顺利, 研究深入、细致, 取得了预定的成果。

课题承担单位海河水利委员会和中国水利科学研究院课题组成员参加了会议。

(摘自“中国水利 国际合作与科技网”2009年12月7日)