

单轴压缩条件下三峡坝基岩石破裂的分形特征*

易顺民 赵文谦

(四川大学高速水力学国家重点实验室 成都 610065)

摘要 基于分形理论,研究了单轴压缩状态下三峡坝基岩石破裂的分形结构。结果表明,在单轴受压时,岩石破裂系和主破裂均表现出很好的分形性质,分维随着压力增加而上升。分维可作为描述岩石破裂过程的参数,同岩石抗压强度和风化程度有很好的相关性,表征了岩石裂隙的形成演化特征。

关键词 分形,单轴压缩,分维,岩石破裂,三峡坝基

分类号 TU 453, O 242 1

1 引言

岩石脆性破裂系呈现典型的分形现象,自相似性不仅存在于岩体宏观断裂之中,而且存在于岩石的微破裂中,在一个很宽的无标度区内,岩石脆性破裂均表现出很好的自相似性。文[1~6]分别分析了实验室内岩石预制缺口试件微破裂的分形特征。本文根据野外岩体的实际情况,使用扫描电镜及计算机图像分析系统研究了三峡坝基岩石在单轴压缩条件下不带预制缺口试样的微破裂的分形特征。

试验用的岩石材料取自宜昌三斗坪三峡坝区,主要为闪斜斜长花岗岩、细粒花岗岩、闪斜煌斑岩及辉绿岩等,其基本物理力学性质见表1。

表1 岩石的物理力学性质指标统计

Table 1 Statistics indexes of physical and mechanical property for the rocks

样品号	岩石名称	结构	密度 /g·cm ⁻³	吸水率 /%	孔隙率 /%
T-D-10	闪斜花岗岩	中粗粒	2.87	0.12	0.43
T-D-20	闪斜煌斑岩	粗粒	2.72	1.31	2.08
T-D-30	细粒花岗岩	细粒	2.72	0.27	0.97
T-D-40	辉绿岩	细粒	2.71	0.19	0.41

样品号	岩石名称	结构	单轴抗压 强度/M Pa	变形模量 /GPa	泊松比 μ
T-D-10	闪斜花岗岩	中粗粒	121.7	64.2	0.23
T-D-20	闪斜煌斑岩	粗粒	55.8	78.4	0.32
T-D-30	细粒花岗岩	细粒	142.3	61.3	0.26
T-D-40	辉绿岩	细粒	151.2	65.1	0.27

2 岩石单轴压缩试验和分维值的计算

岩石的断裂破坏同其内部微裂隙特征有密切的关系,定量地分析岩石微观裂隙的破裂发展过程,是认识岩石断裂破坏机理的基础。为了认识受压条件下岩石破裂的变化特征,对岩石试样表面进行抛光喷金处理,制成规格为20mm×10mm×4mm的试验样品,采用扫描电镜实时观察系统观察不同荷载条件下试样破裂系的变化特征。

将制成的试样置于试验压力室中,按0.45α(α为岩石单轴抗压强度),0.65α,0.85α及0.96α四级荷载进行加压试验。采用盒维数法计算破裂系的分维值,具体做法是对试样在不同荷载下的破裂系分布图用边长为r的正方形来度量,统计出含有裂纹的正方形数N(r),改变r的值,可得一系列的N(r)值。这样,在N(r)和r的双对数图上,如果存在一直线段,即无标度区间,则说明破裂系分布具有分形特征。由分形的定义可知

$$N(r) = A r^{-D} \quad (1)$$

两边取对数得

$$\lg N(r) = \lg A - D \lg r \quad (2)$$

拟合直线的斜率,即得岩石破裂系的分维值。

3 岩石破裂系的分维特征

利用前述盒维数法计算了4种不同岩性试样在

1998年4月20日收到初稿,1998年7月29日收到修改稿。

* 中国博士后科学基金资助项目(中博基9806号)。

作者 易顺民 简介:男,1964年8月生,博士,1987年毕业于中国地质大学工程地质专业,现任副教授,四川大学在站博士后,主要从事环境水力学与岩土工程方面的研究工作。

不同荷载条件下破裂系的分维值, 并分析了相应压力状态下岩石微破裂的变化特征。图 1 是闪斜花岗岩、闪斜煌斑岩、细粒花岗岩和辉绿岩试样在不同荷载条件下的微裂隙分布特征。图 2 是相同条件下岩石微裂隙空间分布的 $N(r)-r$ 关系曲线。表 2 是相应状态下全域范围内岩石破裂系的分维和裂隙特征值统计。通过扫描电镜分析可以发现, 岩石试样在原始状态时(没有外力作用), 岩石内部已随机地分布有大量的原生裂隙。随着轴向应力的增加, 岩石内部不同长度的微裂隙数目逐渐增加, 分维值也逐渐变大。同时, 随着轴向应力的逐渐加大, 相对较短的微裂隙数量随着轴向应力的迅速增大而增长较慢, 相对较长的微裂隙数量随着轴向应力的迅速增大而快速增加, 分维值也迅速变大而趋于一稳定值。也就是说, 随着外载的增加, 长度较大的微裂隙数量增加的速度大于长度较小的微裂隙增加的速度, 分维值逐渐变大, 直到主破裂形成前, 岩石产生宏

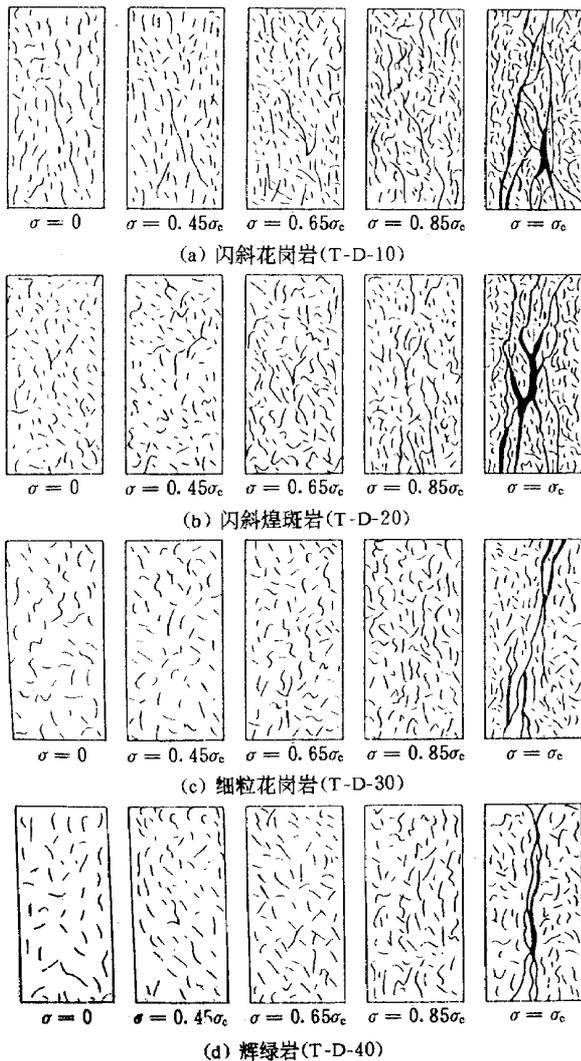


图 1 不同荷载条件下岩石微裂隙分布特征

Fig 1 The distributional feature of rock microfracture under different load

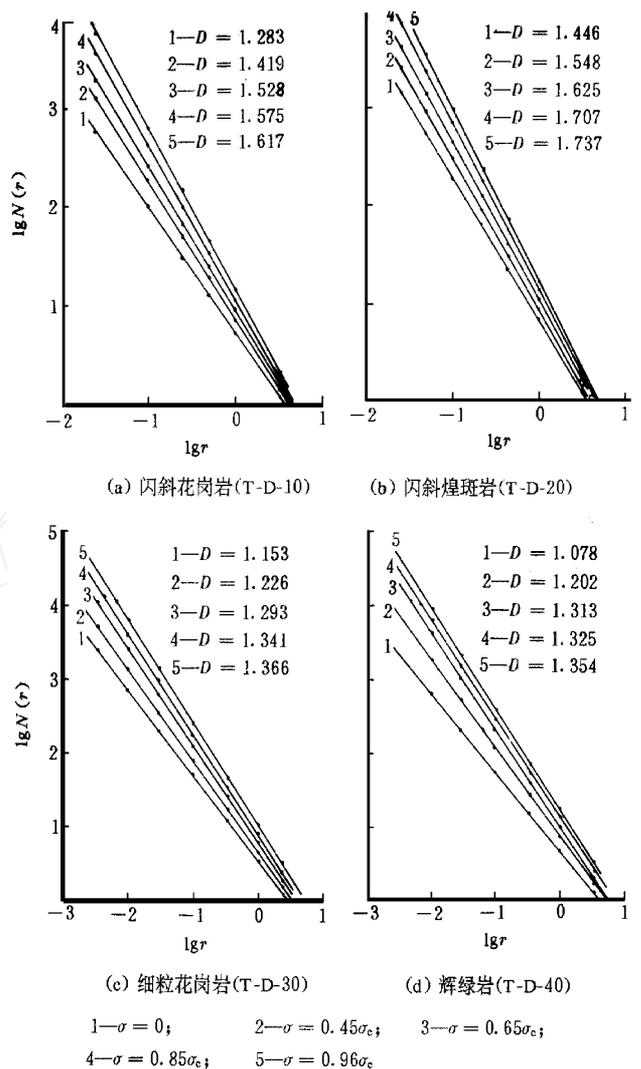


图 2 不同荷载条件下岩石破裂系空间分布的 $\lg N(r)-\lg r$ 关系曲线

Fig 2 The $\lg N(r)-\lg r$ curve of the spatial distribution of rock microfracture under different load

观破坏, 分维达到一最大值。由式(2)可知, 岩石破裂系的分维值就是 $\lg N(r)-\lg r$ 曲线中直线的斜率, 直线段区间即为无标度区。在无标度区内, 相同压力下一定放大倍率范围的裂纹系照片, 其破裂系分布图的 $\lg N(r)-\lg r$ 曲线的斜率应一致。通过分析 4 种不同岩性的岩石试样在同一级载荷下不同放大倍率的微破裂的 $\lg N(r)-\lg r$ 曲线, 可以求得闪斜花岗岩的无标度区间上限为 4 mm 左右, 下限小于 0.003 mm; 闪斜煌斑岩的无标度区间上限为 5 mm 左右, 下限小于 0.003 mm; 细粒花岗岩的无标度区间上限为 2 mm 左右, 下限小于 0.003 mm; 辉绿岩的无标度区间上限约为 2 mm, 下限小于 0.002 mm。因此, 岩石微裂隙的自相似性成立的范围应该在 3 个数量级以上。

从表2和图1, 2中可以认识到, 在单轴受压条

表 2 各级应力状态下岩石微裂隙数量、总长度及分维统计

Table 2 The statistics of fractal dimension, total length and number of rock microfractures in different stress state

应力	闪斜花岗岩(T-D-10)			闪斜煌斑岩(T-D-20)			细粒花岗岩(T-D-30)			辉绿岩(T-D-40)		
	微裂隙数量/个	微裂隙长度/mm	微裂隙分维值	微裂隙数量/个	微裂隙长度/mm	微裂隙分维值	微裂隙数量/个	微裂隙长度/mm	微裂隙分维值	微裂隙数量/个	微裂隙长度/mm	微裂隙分维值
$\sigma = 0$	134	41.8	1.283	203	105.1	1.446	114	31.2	1.153	97	28.3	1.078
$\sigma = 0.45\alpha$	276	94.6	1.419	362	143.6	1.548	185	40.3	1.226	121	34.5	1.202
$\sigma = 0.65\alpha$	328	128.4	1.528	465	218.6	1.625	209	47.8	1.293	157	50.9	1.313
$\sigma = 0.85\alpha$	407	156.3	1.575	501	237.8	1.701	292	84.7	1.341	226	77.4	1.325
$\sigma = 0.96\alpha$	455	207.8	1.617	587	291.3	1.737	393	162.8	1.366	317	135.6	1.354

件下,随着轴向应力的增加,不同岩性的岩石样品内部微裂隙数量和总长度均不断增加,分维值上升;在轴向应力超过 0.85 倍破裂强度后直到岩石产生宏观断裂破坏前,岩石内部微裂隙数量及总长度急剧增加,分维值快速上升。因此,分维定量地表明了岩石随着轴向应力的增加,岩石试样内部微裂隙破裂扩展愈来愈烈的特征。

通过对岩石破裂过程的扫描电镜观察发现,在单轴受压条件下,岩石产生宏观破坏时,主破裂的发生主要在岩石内部的原生裂隙缺陷处、矿物颗粒边界及胶结物中产生,岩石的断裂破坏正是这些部位的大致平行于加载方向的微裂隙扩展和相互作用,逐渐向相对软弱的方向及部位贯通形成近似平行于轴向应力方向的主破裂带。采用盒维数法,计算了前述 4 种不同岩性的岩石试样的主破裂的分维值,分别是闪斜花岗岩为 1.341,闪斜煌斑岩为 1.507,细粒花岗岩为 1.187 及辉绿岩为 1.132。分维的高低同主破裂的分布特征和复杂程度也有很好的一致性,主破裂的展布形态愈复杂,其分维值也愈大。

4 岩石破裂结构分维的研究意义

4.1 分维表征了岩石强度的差异性

从岩石脆性破裂的分形特征看,岩石微裂隙结构的分维值高低同岩石的受压状态相对应。不同岩石的抗压强度同其原始微裂隙、破裂系和主破裂的分维值的大小呈负相关关系。从统计平均的角度看,相同岩性的岩石产生宏观断裂破坏时,破裂系分维值变化幅度不大,分别趋于一稳定值。其中闪斜花岗岩破裂系分维为 1.62 ± 0.06 (9 组样品平均),闪斜煌斑岩为 1.72 ± 0.04 (10 组样品平均),细粒花岗岩为 1.40 ± 0.07 (5 组样品平均),辉绿岩为 1.36 ± 0.05 (7 组样品平均)。相应的岩石抗压强度平均值分别为 107.8MPa, 64.6MPa, 126.3MPa 及 140.5MPa。对 31 组前述 4 种岩石试样的单轴抗压强度 α 同岩石初始裂隙分维 D_1 , 破裂系分维 D_2 及主破裂分

维值 D_3 进行多元回归分析得

$$\alpha = 438.777 - 177.344D_1 - 58.086D_2 - 11.644D_3 \quad (3)$$

$$r = 0.94$$

4.2 分维是反映岩石风化程度的参数

三峡工程坝基花岗岩体风化作用强烈,岩石微裂隙发育,不同的风化带内,岩石裂隙的发育状况有明显的不同。岩石初始裂隙空间分布的发育程度是岩石遭受风化作用的具体体现,而岩石受压破坏时破裂系的分布特征更深刻地表征了岩石风化程度的强弱,分维可定量地表示这种变化特征,表 3 是坝基不同花岗岩风化带岩石的原始微裂隙分维值和破裂系分维值的统计结果。从表 3 中可以看出,随着风化程度的降低,岩石裂隙的空间分布应趋于简单,分维值变小。从强风化带到新鲜基岩,三峡坝基岩石微裂隙和破裂系的分维变化区间基本上是连续的。分维值非常直观地反映了岩石风化程度的差异性,可作为岩石风化分带的定量表示参数,使用方便。

表 3 不同风化带岩石原始微裂隙和破裂系分维统计

Table 3 The statistics of fractal dimensions of initial microfracture and fracture system of rock in different weathering zones

风化带类型	岩石原始裂隙分维		岩石破裂系分维		统计样品数
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	
强风化带	1.51~1.61	1.58	1.82~1.93	1.87	21
弱风化带上部	1.28~1.37	1.33	1.53~1.74	1.63	20
弱风化带下部	1.21~1.32	1.26	1.42~1.61	1.52	18
微风化带	1.05~1.18	1.14	1.36~1.48	1.45	15
新鲜基岩	1.02~1.09	1.05	1.25~1.39	1.35	20

5 结论及讨论

综上所述,有以下几点认识:

(1) 在单轴压缩条件下,三峡坝基岩石破裂系具有很好的分形性质,分维是表征岩石破坏程度的

一个定量参数,体现了岩石破裂的损伤演化特征,可作为岩石风化程度的描述参数。

(2) 岩石破裂结构的分维值大小同岩石受压状态相关,随着轴向应力的增加,分维值逐渐上升,破裂系愈复杂,分维值愈大。

(3) 岩石微破裂的自相似性成立的范围在 3 个数量级以上。

参 考 文 献

1 Hirata T, Imoto M. Fractal structure of spatial distribution of

microfracturing in rock. G. J. R. Abstr. Soc., 1987, 90(2): 369 ~ 374

2 谢和平, 高峰. 岩石类材料损伤演化的分形特征. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(1): 74~ 82

3 谢和平. 动态裂纹扩展中的分形效应. 力学学报, 1995, 27(1): 18~ 28

4 谢和平. 分形-岩石力学导论. 北京: 科学出版社, 1996, 123~ 178

5 程海旭, 吴开统, 庄灿涛. 岩石破裂系分形及分维测定. 地球物理学进展, 1995, 10(1): 92~ 103

6 赵永红, 黄杰藩, 耿金达等. 岩石破裂带的分维及变化特征. 地质科学, 1994, 29(2): 137~ 143

THE FRACTAL CHARACTERISTICS OF ROCK FRACTURE IN DAM FOUNDATION OF THE THREE GORGES PROJECT UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

Yi Shunmin Zhao Wenqian

(State Key Hydraulic Laboratory of High Speed Flows, Sichuan University, Chengdu 610065 China)

Abstract The fractal structure of rock fracture in dam foundation of the Three Gorges Project under uniaxial compression is studied based on fractal theory. The results show that the fracture system and the main fractures of rock under uniaxial compression tests are of highly self-similar characteristic in statistics. The fractal dimension values of rock fracture raise with increase of pressure. The fractal dimension can be taken as a parameter to describe the process of rock fracture and there are good correlation among fractal dimension of rock fracture, uniaxial compressive strength and rock weathering degree. The fractal dimensions reflect the formational and evolutionary features of rock fractures and the difference of rock weathering.

Key words fractal, uniaxial compression, fractal dimension, rock fracture, dam foundation of the Three Gorges Project