

三峡库区岸坡消落带岩体劣化分形特征与演化预测研究

闫国强^{1,2,3)}, 黄波林^{*2,3)}, 殷跃平⁴⁾, 胡雷^{2,3)}, 陈云飞^{2,3)}

1) 中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉,430074; 2) 防灾减灾湖北省重点实验室,三峡大学,湖北宜昌,443002; 3) 三峡大学土木与建筑学院,湖北宜昌,443002; 4) 中国地质环境监测院,北京,100081

内容提要:三峡库区岸坡岩体劣化的关键在于岩体节理的持续扩展。本文采用分形理论对消落带上下岸坡测窗岩体劣化程度、劣化破碎相变时间及发展趋势进行了分析。研究表明:岩体节理劣化分布具有分形属性,可将缺项值 $\Delta(r)$ 曲线陡缓转折点视为 REV (表征单元)岩体尺寸下限;整体来看,劣化使得岩体节理生长向更加均匀、密布的趋势发展,呈现升维特征;进一步利用节理升维值 ΔD_b 建立了劣化程度分级标准,升维值 ΔD_b 与面积节理数增量 ΔJ_{av} 、地质强度指标变化值 ΔGSI 满足指数函数关系;最后探讨并提出了 2 种节理分维数劣化演变模式,采用岩体劣化破碎相变时间计算式可进行相应的演化预测分析,且岩体劣化破碎相变时间预测是基于割线的估计。由于分维数 D_b 具有较高的统计稳定性,能够满足工程应用需求。研究成果为库区岸坡劣化程度调查以及劣化演化预测提供了新的方法。

关键词:岩体劣化;破碎相变时间;分形理论;演化预测;三峡库区

自 2008 年三峡工程 175 m 试验性蓄水以来,在 145~175 m 之间形成了高差达 30 m 的水库消落带,导致岸坡岩体节理增生并向失稳方向发展(黄波林等, 2019; 刘新荣等, 2020; 殷跃平等, 2020)。三峡库区岸坡灰岩溶蚀岩体劣化发展诱发地质灾害引起学者广泛关注,典型案例有龚家坊滑坡、箭穿洞危岩体(Wang Luqi et al., 2020)、板壁岩危岩体、棺木岭危岩体、龙门寨危岩体(黄波林等, 2021)等。由于灰岩岩体的劣化时效性较长,如何对原位灰岩岩体劣化进行有效的定量刻画和表征是极为重要的工作。前人通过室内试验,研究了灰岩标准岩样在水岩耦合(Wang Luqi et al., 2020)、不同溶液环境(Dochez et al., 2014)、不同应力环境(冯夏庭等, 2005)、不同温度(Mutlutürk et al., 2004)下的劣化特征,取得了大量成果。但是室内试验不能揭示原位节理岩体的劣化程度(Hoek et al., 2019)。针对灰岩岸坡岩体劣化,殷跃平等(2020)通过多期次原位跨孔声波测试结合广义 H-B 准则,深

入研究了“完整岩块+岩体结构面”的二元劣化规律,并指出岩体结构面劣化对岸坡的长期稳定性不利。黄波林等(2019)、殷跃平等(2021)、Yan Guoqiang et al. (2022)进一步采用原位消落带典型灰岩岩体测窗影像进行节理统计对比分析,给出了消落带岩体的劣化程度分级标准。

基于岩体节理高清影像进行岩体劣化程度评估是一种直接高效的方法(Huang Bolin et al., 2020)。岩体劣化最直观的表现是节理的新增、延长、变宽(黄波林等, 2019; 张永双等, 2019; Yan Guoqiang et al., 2022)。传统的基于节理数 J_v 的统计往往具有较大的局限性,受控于测线位置以及测窗分布,对高度随机分布的节理信息统计容易产生“偏差”和“遗漏”(卢波等, 2005),而且岩体节理长度、条数等统计受观测人员的主观因素影响较高(徐黎明等, 2011)。分形理论采用分形维数(fractal dimension)则可以很好地对自然界中不规则线、面、体等天然随机分布物件测度(Mandelbrot,

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 42077234)和重庆市地质灾害防治中心(编号 KJ-2021047)联合资助的成果。

收稿日期:2022-02-28; 改回日期:2022-06-03; 网络发表日期:2022-06-28; 责任编辑:张永双; 责任编辑:潘静。

作者简介:闫国强,男,1992 年生。博士,主要从事水库地质灾害防治与岸坡劣化机理研究。E-mail:1491095791@qq.com。

* 通讯作者:黄波林,男,1979 年生。研究员,博士生导师,从事水库地质灾害及涌浪灾害方面研究。E-mail:bolinhuang@aliyun.com。

引用本文:闫国强,黄波林,殷跃平,胡雷,陈云飞. 2023. 三峡库区岸坡消落带岩体劣化分形特征与演化预测研究. 地质学报, 97(7): 2399~2407. doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022052.
Yan Guoqiang, Huang Bolin, Yin Yueping, Hu Lei, Chen Yunfei. 2023. Research on fractal characteristics and evolution prediction of rock mass deteriorating in bank slope drawdown zone of the Three Gorges Reservoir area. Acta Geologica Sinica, 97(7): 2399~2407.

1967),在岩石损伤过程、破碎分形等多个方面取得成功应用(涂新斌等, 2005; 蔡建超等, 2015; Ju Yang et al., 2018; Kou Miaomiao et al., 2019; 张艳博等, 2021)。本文结合前期研究成果,采用分形理论对多个典型消落带岩体测窗节理进行了统计分析,在量化评估岩体劣化程度的基础上,对三峡库区未来表层岩体的劣化发展模式及破碎相变时间进行了预测,对于库区岸坡劣化程度调查及岩体结构劣化的演化趋势预测具有一定指导作用。

1 消落带岩体节理劣化分形计算方法

分形理论中最重要的两个参数为分维数与缺项值。分维数可以反映分形集(岩体节理)所占空间(测窗)大小以及节理的不规则性(平直度)。缺项值可以表征岩体节理集群化程度、分布的均匀性、各向异性。联合分维数与缺项值可以较好地描述消落带岩体节理的生长过程与节理分布的集群化程度。分维数的计算有多种方法(如码尺法、沙盒法等),目前最为常用的方法为计盒法(Gagnepain et al., 1986)。缺项值的计算则多采用滑盒法进行统计分析(Roy et al., 2010)。下面主要针对这两种方法在消落带岩体节理劣化中的应用进行介绍和推导。

1.1 分维数的计盒法运算

计盒法是指采用不同尺度 r 的盒子去覆盖分形体(如节理曲线、面、孔隙体等),所需盒子数目 $N(r)$ 将随盒子尺度 r 变化,且 $N(r)-r$ 在统计意义上满足:

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

式中, D_b 即为计盒法得到的分形维数。对式(1)两边取对数可得岩体节理 $\ln N - \ln r$ 拟合回归线,该回归线的斜率即为分维数 D_b 。

$$D_b = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N}{\ln r} \quad (2)$$

数学上的严格自相似分形无论选取多大尺度进行计算,其分形维数应是严格一致的。但是在实际中,由于不同统计尺度的精准性以及拍照像素的限制,观测窗只是满足统计意义上的自相似性和无标度特性。在工程应用中,选取的测窗满足工程尺度大小即可,本文中统计的测窗长宽尺度是在5~19 m之间,可以满足代表性岩体的统计分析。由公式(1)、(2)不难求得欧氏几何中线、面、体的分维数 D_b 分别为1、2、3(图1)。对于消落带岩体节理来讲,初始仅含一条或若干条平直光滑节理时(图1a),测窗岩体节理的分维数 $D_b=1$ 。随着节理的生

长、发育,整个测窗区域极限状态为全面密布节理(图1b),理想状态下此刻分维数 $D_b=2$ 。根据相关文献研究(Mandelbrot, 1982; Gibson et al., 2006),对于同一均匀节理分布区,二维与三维空间对应节理的分维数在统计上近似相差1,即有:

$$D_{b3} = D_{b2} + 1 \quad (3)$$

式中, D_{b3} 、 D_{b2} 代表三维、二维空间对应的节理分维数。本文采用由美国NIH实验室开发的Image J分形计算程序进行计盒法运算(Smith Jr et al., 1996)。

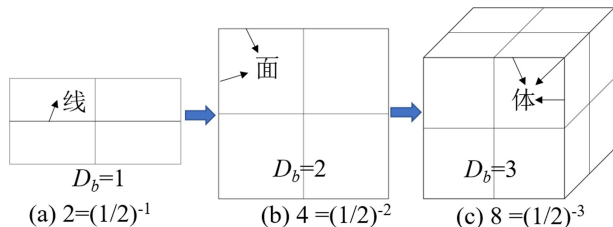


图1 线(a)、面(b)和体(c)盒维数计算示意图

Fig. 1 Schematic picture of box-counting of line (a), surface (b) and volume (c)

1.2 缺项值的滑盒法运算

以 5×5 的节理二元图像缺项值计算为例进行展示说明(图2)。图中仅包含黑色(1)和白色(0)两种数据单元,分别表示研究对象的分形集(如节理)以及其他区域(如固体基质以及非量测对象),黑色像元的不同排列代表了现实岩体节理的不同长度、

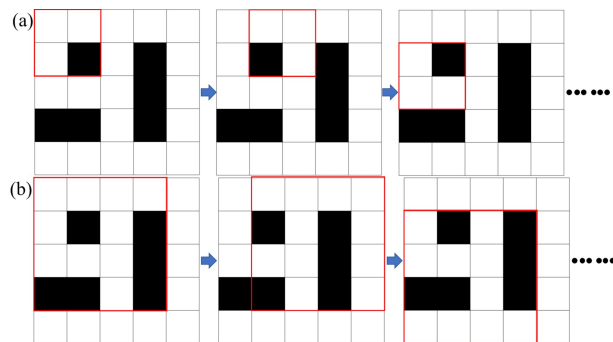


图2 节理缺项值的滑盒法计算示意图

(据 Smith Jr et al., 1986 修改)

Fig. 2 Schematic picture of gliding box-counting of joint lacunarity (modified after Smith Jr et al., 1986)

(a)— $r=2$ 滑盒法计算示意图,其中红框为滑盒大小,小黑框为节理分形集;(b)— $r=4$ 滑盒法计算示意图,其中红框为滑盒大小,小黑框为节理分形集

(a)—schematic diagram of gliding box method ($r=2$), in which the red box is the gliding box and the small black box is the joints fractal; (b)—schematic diagram of gliding box method ($r=4$), in which the red box is the gliding box and the small black box is the joints fractal

产状的排列组合。采用一个 $r \times r$ 大小的滑盒从图像左上角开始计数。图 2a 中滑盒大小 $r=2$, 统计每个盒子包含分形集(节理/孔隙)的个数(记为 M), 盒子每次向右移动一个单元(一般为图像最小像元), 当盒子平移到每一行尾部时, 需向下移动一个单元, 直到滑盒移动轨迹覆盖整个图像/测窗区域; 增加滑盒大小 r (图 2b), 重复上述移动, 可以获得不同 r 值对应缺项值。每个滑盒包含分形集个数(记为 M)出现的频次记为 $n(M, r)$, $n(M, r)$ 除以全部滑盒个数得概率分布函数 $Q(M, r)$, 其中全部滑盒数记为 $(r_{\text{总}} - r_b + 1)^2$, $r_{\text{总}}$ 为图像总长, r_b 为滑盒尺寸。

为方便分析概率函数 $Q(M, r)$, 构建统计动差函数 $Z_Q^{(q)}(r)$ 如下(蔡建超等, 2015):

$$Z_Q^{(q)}(r) = \sum_M M^q Q(M, r) \quad (4)$$

缺项值 $\Delta(r)$ 可定义为 $q=2$ 时的统计代差函数除以 $q=1$ 时的统计代差函数的平方, 如下式(蔡建超等, 2015):

$$\Delta(r) = \frac{Z_Q^{(2)}(r)}{[Z_Q^{(1)}(r)]^2} = \frac{\sum_M M^2 Q(M, r)}{[\sum_M M Q(M, r)]^2} \quad (5)$$

在具有平移不变性(理想均匀分布的分形集)的测窗对象分布中, 由于 $Q(M, r)$ 为狄拉克函数, 则有 $Z_Q^{(2)}(r) = [Z_Q^{(1)}(r)]^2$, 此时缺项值恒为 1, 而非平移不变性的分形集缺项要大于 1, 且分形集分布越不均匀对应缺项值相对越大。如图 2 所示, 当 $r=2$ 时, $Z_Q^{(2)}(2) = \sum_M M^2 Q(M, 2) = 2.125$ 和 $Z_Q^{(1)}(2) = \sum_M M Q(M, 2) = 1.375$, 代入式(5)得 $\Delta(2) = 1.124$; 当 $r=4$ 时, $Z_Q^{(2)}(4) = \sum_M M^2 Q(M, 4) = 30.5$ 和 $Z_Q^{(1)}(4) = \sum_M M Q(M, 4) = 5.5$, 可得 $\Delta(4) = 1.0083$ 。本文采用 Vadakkan(2009) 公布的开源程序进行滑盒法计算, 且对图 2 所示算例进行计算、验证, 与公式(4)、(5)手算结果一致。

2 消落带岩体劣化分形计算结果

选取典型测窗岩体进行劣化分形计算。这里仅选取岩体劣化强烈、较强烈、一般的 3 个测窗案例进行计算展示, 其他典型测窗采用类似的计算分析步骤。首先处理照片获得二值化节理图像(图 3~5), 然后采用前文所述程序进行计算分析, 获得消落带测窗上下岩体节理的分维数 D_b 以及缺项值 $\Delta(r)$ 。消落带上下测窗像素精度大小完全相同, 为 $1605 \times$

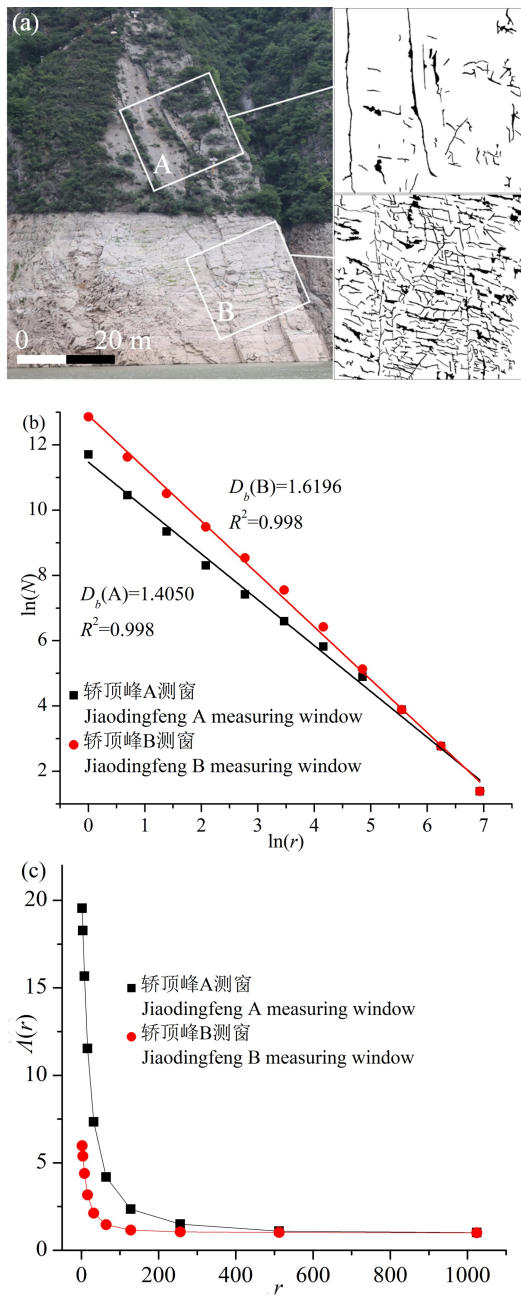


图 3 三峡库区岩体劣化强烈区——轿顶峰 1# 顺向岸坡消落带岩体测窗

Fig. 3 Intense deterioration area in Three Gorges Reservoir area—bedding bank in Jiaodingfeng 1#

(a)—轿顶峰 1# 消落带上下测窗岩体节理二值化图像(据殷跃平等, 2021 改); (b)—对应测窗岩体节理分维数拟合曲线; (c)—对应测窗岩体节理缺项值曲线

(a)—binary image of rock mass joints in upper and lower measuring windows of Jiaodingfeng 1# drawdown zone (modified from Yin Yueping et al., 2021); (b)—fitting curve of fractal dimension of rock mass joints corresponding to measuring window; (c)—lacunarity curve of rock mass joints corresponding to measuring window

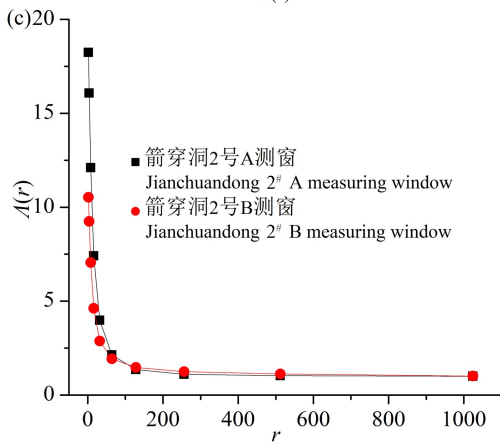
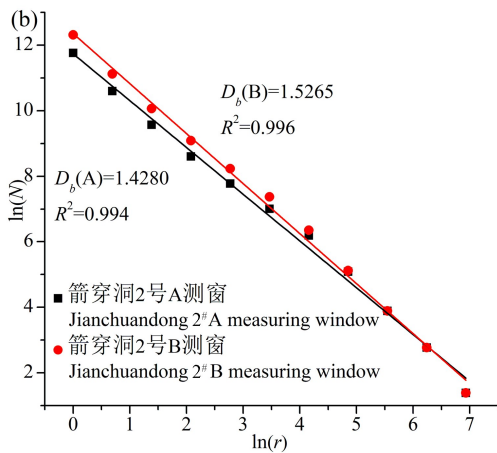
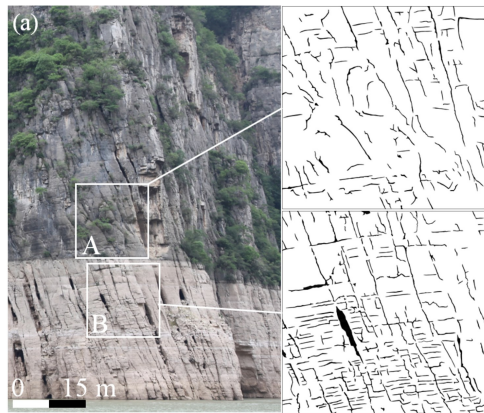


图4 三峡库区岩体劣化较强烈区——箭穿洞2#近水平层状岸坡消落带岩体测窗

Fig. 4 Medium deterioration degree area in Three Gorges Reservoir area—gently layered bank in Jianchuandong 2#

(a)—箭穿洞2#消落带上下测窗岩体节理二值化图像(据殷跃平等, 2021改);(b)—对应测窗岩体节理分维数拟合曲线;(c)—对应测窗岩体节理缺项值曲线

(a)—binary image of rock mass joints in upper and lower measuring windows of Jianchuandong 2# drawdown zone (modified from Yin Yueping et al., 2021); (b)—fitting curve of fractal dimension of rock mass joints corresponding to measuring window; (c)—lacunarity curve of rock mass joints corresponding to measuring window

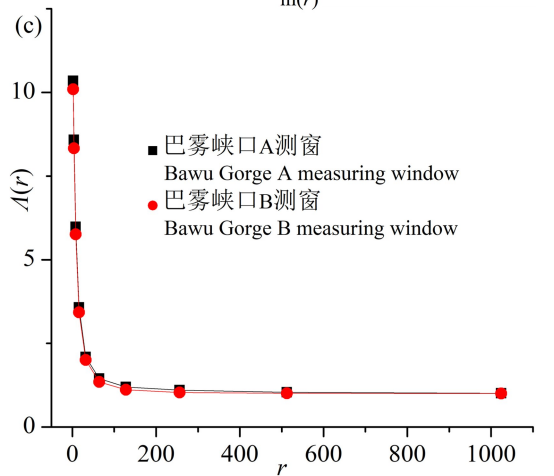
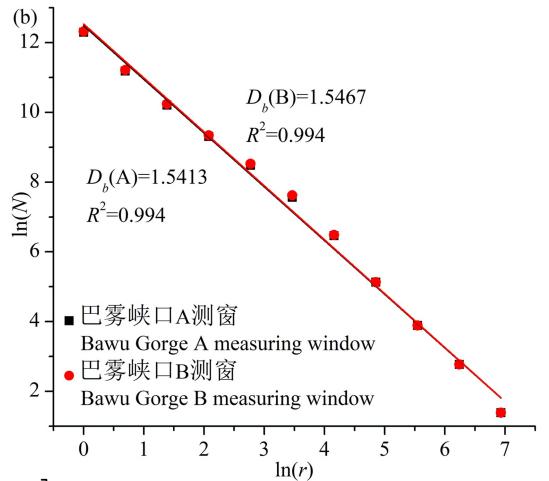
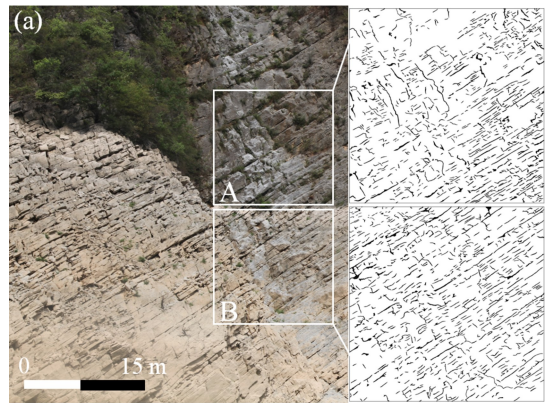


图5 三峡库区岩体劣化一般区——巴雾峡口斜向岸坡消落带岩体测窗

Fig. 5 General deterioration degree area in Three Gorges Reservoir area—inclined layered bank in Bawu Gorge

(a)—巴雾峡口消落带上下测窗岩体节理二值化图像(据殷跃平等, 2021改);(b)—对应测窗岩体节理分维数拟合曲线;(c)—对应测窗岩体节理缺项值曲线

(a)—binary image of rock mass joints in upper and lower measuring windows of Bawu Gorge drawdown zone (modified from Yin Yueping et al., 2021); (b)—fitting curve of fractal dimension of rock mass joints corresponding to measuring window; (c)—lacunarity curve of rock mass joints corresponding to measuring window

1605 左右。根据比拟法,消落带之上 A 测窗统计数据可视 2008 年的 B 测窗统计数据,消落带处 B 测窗为 2019 年拍摄的岩体(殷跃平等, 2021)。

图 3 中轿顶峰消落带岩体可视 为岩体劣化强烈的代表;岩体经过 11 年水位变动后,岩体结构发生明显降级由完整块状向碎裂状发展。由分维拟合曲线可以明显看出,随着岩体劣化,岩体节理逐渐延展、增生,节理分维数发生了明显的升维现象。具体升维数值为: $\Delta D_b = D_b(2019) - D_b(2008) = 0.2146$,且对应的缺项值 $\Lambda(r)$ 曲线发生明显下降。这表明随着岩体节理的生长、加密,节理分布相对更加均匀,消落带处 B 测窗节理分布的集群性明显要低于消落带之上的 A 测窗节理。图 4、图 5 中分维数 D_b 以及缺项值 $\Lambda(r)$ 呈现类似的规律,只是具体的变化量值不同。如图 4 中岩体劣化较强烈的箭穿洞 2 号测窗 $\Delta D_b = 0.0984$,缺项值 $\Lambda(r)$ 曲线呈现微弱下降。图 5 中岩体劣化一般的巴雾峡口测窗 $\Delta D_b = 0.0054$,缺项值 $\Lambda(r)$ 曲线呈现极其微弱下降。

联合图 3、图 4、图 5 分维数 D_b 曲线以及缺项值 $\Lambda(r)$ 曲线可以明显看到,分维数拟合曲线相关系数 R^2 都高达 0.99,表明岩体测窗节理劣化分形特征明显。其次由于岩体节理劣化的存在,分维数皆呈现“升维”趋势,而缺项值皆呈下降趋势,且劣化程度越大,这种变化趋势愈发明显。表明库岸岩体表层节理的劣化生长、发育,整体是向“均匀密布”测窗的趋势发展的。缺项值 $\Lambda(r)$ 曲线显示,随着计盒尺寸 r 的增加,缺项值 $\Lambda(r)$ 对应下降。这其实也体现了随着统计尺寸的增加,岩体节理均匀性增大的普遍客观规律。比如标准岩芯宏观尺度上可视 为均质的,但是在微观尺度上则呈现劣化损伤、微观孔隙的高度不均质性,与统计尺度有很大的关系。

$\Lambda(r)$ 除了与分形集本身的离散性、集群性有关外,与计盒尺寸 r 也密切相关。可见采用可以代表

测窗岩体的尺寸 r 来刻画、描述缺项值 $\Lambda(r)$ 是有必要的。对于本文测窗缺项值 $\Lambda(r)$ 曲线来看(图 3c, 图 4c, 图 5c),选取不大于 200 的像元数进行描述是较为合理的(对应实际尺寸为 2~2.5 m)。采用缺项值 $\Lambda(r)$ 曲线陡缓转折点来反推岩体 REV(表征单元)尺寸的下限值是一种较为可靠的量化手段。对于本文岩体节理测窗 REV 尺寸下限值约为 2~2.5 m 左右,小于测窗整体尺寸 5~19 m,可见采用测窗尺寸 5~19 m 是可以有效代表岸坡岩体节理分布情况的。

对文献(殷跃平等, 2021)中所有典型测窗进行分维数 D_b 以及升维数 ΔD_b 值计算、统计如表 1 所示。在原有定性分级的基础上,发现采用分维数 D_b 以及升维值 ΔD_b 可以很好的刻画、划分岩体劣化程度。当 $\Delta D_b \geq 0.15$,岩体劣化强烈;当 $0.08 \leq \Delta D_b < 0.15$,岩体劣化较强烈;当 $\Delta D_b < 0.08$,岩体劣化一般(表 1)。利用这一分类标准进行岩体劣化程度划分的结果,与采用劣化变量 Det 、 ΔJ_{ov} 、 ΔJ_v 、 ΔGSI 值进行划分基本一致。

从表 1 来看,分维数升维值 ΔD_b 与 ΔJ_{ov} 与 ΔGSI 等具有很好的相关性,都呈现随岩体劣化程度加剧,数值递增趋势。将表 1 中的 10 个案例测窗数据进行相关统计拟合分析,可得分维数升维值 ΔD_b 与 ΔJ_{ov} 、 ΔGSI 拟合函数如下:

$$\Delta J_{ov} = 0.03151e^{16.69} \Delta D_b \quad (6)$$

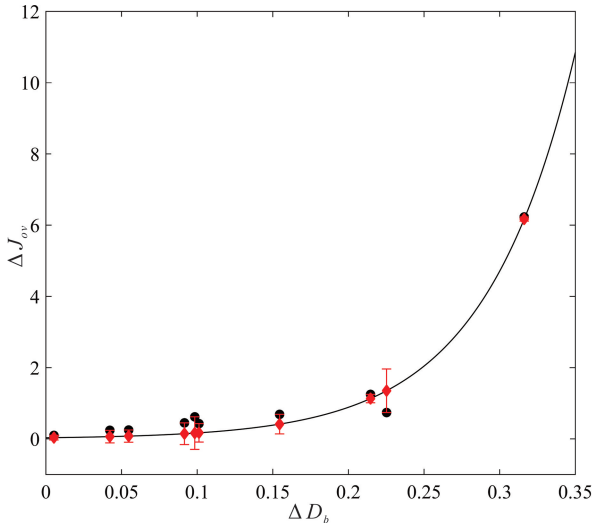
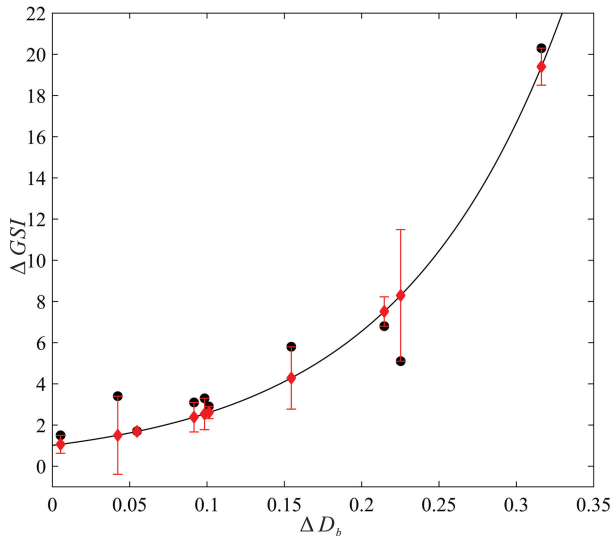
$$\Delta GSI = 1.013e^{9.337} \Delta D_b \quad (7)$$

结合公式(6)、(7)与图 6、图 7 可知,分维数升维值 ΔD_b 与 ΔJ_{ov} 以及 ΔGSI 之间可采用指数函数拟合,相关系数 R^2 分别达 0.967、0.923。可见随着岩体劣化分维数的升高,岩体测窗的劣化速度可能会呈现一个加速递增趋势,劣化变量 ΔJ_{ov} 以及 ΔGSI 增加明显。岩体劣化分维数的升维值 ΔD_b 可以很好地刻画岸坡岩体的劣化程度。

表 1 三峡库区岩体劣化分级量化指标范围表

Table 1 Table of classification index range for rock mass degradation in Three Gorges Reservoir area

劣化程度	地点	Det	ΔJ_{ov}	ΔJ_v	ΔGSI	$D_b(2008)$	$D_b(2019)$	ΔD_b	升维值 ΔD_b 分级指标
强烈	船棺	>0.069	6.23	12.5	20.3	1.2343	1.5505	0.3162	$\Delta D_b \geq 0.15$
	轿顶峰 1 [#]	0.075	1.25	2.50	6.8	1.4050	1.6196	0.2146	
	黄岩窝	0.052	0.74	1.48	5.1	1.2862	1.5114	0.2252	
	龙门寨	>0.080	0.69	1.38	5.8	1.4920	1.6465	0.1545	
较强烈	箭穿洞 2 [#]	0.032	0.62	0.93	3.3	1.4280	1.5264	0.0984	$0.08 \leq \Delta D_b < 0.15$
	孙家崖	0.043	0.45	0.68	3.1	1.4488	1.5404	0.0916	
	板壁岩	0.023	0.43	0.65	2.9	1.3744	1.4756	0.1012	
一般	剪刀峰	0.017	0.24	0.48	3.4	1.5549	1.5972	0.0423	$\Delta D_b < 0.08$
	穿箭峡	0.009	0.25	0.38	1.7	1.3756	1.4303	0.0547	
	巴雾峡口	0.0002	0.10	0.15	1.5	1.5413	1.5466	0.0053	

图6 三峡库区典型岸坡的 ΔD_b 与 ΔJ_{ov} 关系图Fig. 6 Relationship between ΔD_b and ΔJ_{ov} of typical bank slope in Three Gorges Reservoir area图7 三峡库区典型岸坡的 ΔD_b 与 ΔGSI 关系图Fig. 7 Relationship between ΔD_b and ΔGSI of typical bank slope in Three Gorges Reservoir area

3 讨论

由图1、表1可知,岩体节理的分维数介于1~2之间。理想状态下起始岩体仅含有若干条平直光滑的节理,对应分维数 $D_b = 1$;当岩体节理逐渐新生、延展,整个测窗区域极限状态为全面密布曲折节理,此时对应极限分维数 $D_b = 2$ 。这一过程是由完整结构岩块破裂演变为碎裂结构岩体,可将其定义为“劣化破碎相变”,对应时间即为“劣化破碎相变时间”。通过 $D_b(2019)$ 、 $D_b(2008)$ 两期分维数可以大体推测岩体节理分维数升维速率公式如下:

$$\lambda = \frac{\Delta D_b}{\Delta t} = \frac{D_b(2019) - D_b(2008)}{2019 - 2008} \quad (8)$$

式中, λ 为节理分维数升维速率;则当岩体节理逐渐发展达到极限分维数 $D_b = 2$ 时,可得所需的劣化破碎相变时间为:

$$T = \frac{2 - D_b(2019)}{\lambda} \quad (9)$$

采用公式(8)、(9)对10个测窗计算达到极限分维数所需的劣化破碎相变时间统计汇总见表2。由表2可知,对于不同劣化程度岩体来讲,呈现出岩体劣化愈强烈,岩体劣化至极限破碎相变的时间最短、最快;这和现场调查中的定性认知是一致的。对于岩体劣化为强烈程度的测窗,极限破碎相变时间 $T < 50$ 年,建议开展专业监测并关注岩体劣化对岸坡稳定性的影响程度。

表2 三峡库区典型测窗岩体劣化破碎相变时间预测

Table 2 Prediction of fragmentation phase transition time of rock mass deterioration in typical observation windows in Three Gorges Reservoir area

劣化程度	地点	升维值 ΔD_b	升维值劣化分区	升维速率 λ	劣化破碎相变时间 T (年)
强烈	船棺	0.3162	$\Delta D_b \geq 0.15$	0.02875	16
	轿顶峰 1#	0.2146		0.01951	20
	黄岩窝	0.2252		0.02047	24
	龙门寨	0.1545		0.01405	25
较强烈	箭穿洞 2#	0.0984	$0.08 \leq \Delta D_b < 0.15$	0.00895	53
	孙家崖	0.0916		0.00833	55
	板壁岩	0.1012		0.00920	57
一般	剪刀峰	0.0423	$\Delta D_b < 0.08$	0.00385	105
	穿箭峡	0.0547		0.00497	115
	巴雾峡口	0.0053		0.00048	941

结合现场调查并借鉴岩石强度损伤演化过程,岩体节理分维劣化演变模式可概化为两种(图8)。A型节理分维数先快速劣化升维之后缓慢升维并不断逼近极限分维数 $D_b = 2$ 。部分较致密岩体如灰岩整体呈现B型类“S”状的劣化升维形式,早期劣化衰变较慢,历经一定的损伤劣化周期后出现一段加速劣化过程,在后期劣化速率再次放缓(Wang Luqi et al., 2020)。随着岩体劣化的发展,节理分维数虽然在逐渐抬升,但是现实中岩体节理的生长、延展是不可能真正达到极限分维数 $D_b = 2$ 。通过公式(8)、(9)结合两期节理实测分维数进行极限破碎相变时间的计算,实际上是图8中展示的割线估计方法。割线与极限分维数交点计算的极限破碎相变时间是偏小的,计算结果偏保守。由图可知,割线估计法计算的劣化破碎相变时间,已逼近两种演变

模式的节理分维曲线拐点,是基本满足工程实际应用的。

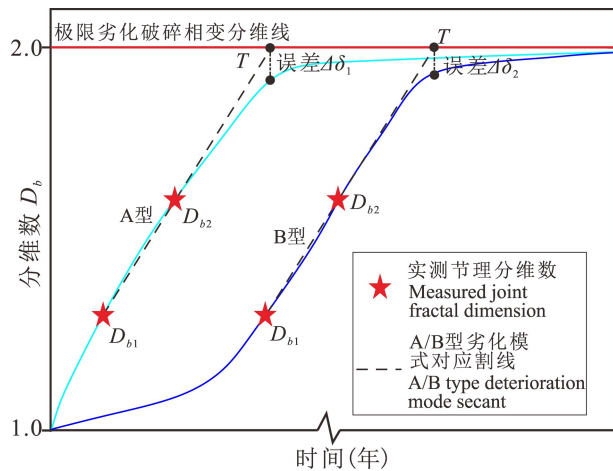


图 8 两种典型劣化模式与劣化破碎相变计算示意图

Fig. 8 Schematic diagram of two typical deterioration modes and phase transition calculation of deterioration crushing

在三峡库区中受岩体劣化作用消落带岩体节理逐渐扩展,岩体完整性进一步下降,岸坡稳定性趋于下降。特别是消落带岩体对应的极限劣化破碎相变时刻,岸坡稳定性剧烈下降,可能使得消落带岸坡处于一种几近失稳的临界状态。本文提出的基于岩体节理图像学的分维计算法来预测岩体的极限劣化破碎相变时刻可作为传统定性调查、评估岸坡稳定状态的一种有益补充。极限分维计算有望通过简单、大量的图像调查,如区域高精度无人机、三维激光扫描、航空摄影调查等,对岩体的劣化状态以及可能的破坏时间进行大范围的快速评估。

4 结论

采用分形理论中的分形维数以及缺项值对三峡库区巫峡段灰岩岩体劣化程度、标准划分、可能的劣化破碎相变时间以及发展趋势进行了初步研究,得到如下主要结论:

(1)消落带岩体节理劣化分布具有分形属性。消落带之下的 B 测窗分维数 D_b 大于其上部 A 测窗,呈现升维特性;对应缺项值 $\Lambda(r)$ 则小于上部,且随着计盒尺寸增加,节理分布的“集群性”降低,缺项值 $\Lambda(r)$ 曲线陡缓转折点可视为 REV 岩体尺寸下限;整体来看,劣化使得岩体节理生长向更加均匀、密布的趋势发展。

(2)消落带岩体节理分维数的升维值 ΔD_b 可以定量刻画岩体的劣化程度。当 $\Delta D_b \geq 0.15$,岩体劣化程度为强烈等级;当 $0.08 \leq \Delta D_b < 0.15$,岩体劣

化较强烈;当 $\Delta D_b < 0.08$,岩体劣化程度为一般。且分维数升维值 ΔD_b 与 ΔJ_{ov} 、 ΔGSI 满足指数函数关系。

(3)讨论提出了灰岩岩体可能的劣化破碎相变时间计算公式。采用割线法计算了岩体劣化强烈的消落带极限破碎相变时间为 $T < 50$ 年。探讨了 2 种典型节理分维数劣化演变模式,其中 A 模式岩体劣化分维数持续快速增长,更值得关注。

(4)分维数 D_b 受观测尺度影响较小,应用范围广,对于岩体劣化调查具有较高的统计稳定性。建议在岩体劣化调查中进行多期次的分形维数计算、调查,为三峡库区岸坡劣化演化预测提供更好的支撑。

References

- Cai Jianchao, Hu Xiangyun. 2015. Fractal Theory in Porous Media and Its Applications. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Dochez S, Laouafa F, Franck C, Guedon S, Martineau F, d'Amato J, Saintenoy A. 2014. Multi-scale analysis of water alteration on the rockslope stability framework. Acta Geophysica, 62(5): 1025~1048.
- Feng Xiating, Ding Wuxiu. 2005. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under coupled mechanical-hydrological chemical environment. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(9): 1465~1473 (in Chinese with English abstract).
- Gagnepain J J, Roques-Carmes C. 1986. Fractal approach to two-dimensional and three-dimensional surface roughness. Wear, 109(1-4): 119~126.
- Gibson J R, Lin H, Bruns M A. 2006. A comparison of fractal analytical methods on 2- and 3-dimensional computed tomographic scans of soil aggregates. Geoderma, 134(3-4): 335~348.
- Hoek E, Brown E T. 2019. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3): 445~463.
- Huang Bolin, Yin Yueping, Zhang Zhihua, Wang Jian, Qin Zhen, Yan Guoqiang. 2019. Study on deterioration characteristics of shallow rock mass in water the level fluctuation zone of karst bank slopes in Three Gorges Reservoir area. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(9): 1786~1796 (in Chinese with English abstract).
- Huang Bolin, Yin Yueping, Yan Guoqiang, Li Bin, Qin Zhen, Wang Jian. 2020. A study on in situ measurements of carbonate rock mass degradation in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(2): 1091~1101.
- Huang Bolin, Yin Yueping, Li Bin, Bai Linfeng, Qin Zhen. 2021. Simplified numerical model and verification for the impulse wave generated by situated collapse of a dangerous columnar rock mass. Rock and Soil Mechanics, 42(8): 2269~2278 (in Chinese with English abstract).
- Ju Yang, Xi Chaodong, Zhang Yang, Mao Lingtao, Gao Feng, Xie Heping. 2018. Laboratory *in situ* CT observation of the evolution of 3D fracture networks in coal subjected to confining pressures and axial compressive loads: A novel approach. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51(11): 3361~3375.
- Kou Miaomiao, Liu Xinrong, Tang Shangding, Wang Yunteng. 2019. 3-D X-ray computed tomography on failure characteristics of rock-like materials under coupled hydro-mechanical loading.

- Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 104: 102396.
- Liu Xinrong, Jing Rui, Miu Luli, Han Yafeng, Deng Zhiyun, Xiong Chao. 2020. Reconstruction models and typical case analysis of the fluctuation belt of reservoir bank slopes in Wushan. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(7): 1321~1332 (in Chinese with English abstract).
- Lu Bo, Ge Xiurun, Zhu Donglin, Chen Jianping. 2005. Fractal study on the representative elementary volume of jointed rock masses. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(8): 1355~1361 (in Chinese with English abstract).
- Mandelbrot B. 1967. How long is the coast of Britain? statistical self-similarity and fractional dimension. Science, 156(3775): 636~638.
- Mandelbrot B. 1982. The Fractal Geometry of Nature. New York: WH Freeman and Company.
- Mutlutürk M, Altındag R, Türk G. 2004. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(2): 237~244.
- Roy A, Perfect E, Dunne W M, Odling N, Kim J. 2010. Lacunarity analysis of fracture networks: Evidence for scale-dependent clustering. Journal of Structural Geology, 32(10): 1444~1449.
- Smith Jr T G, Lange G D, Marks W B. 1996. Fractal methods and results in cellular morphology—dimensions, lacunarity and multifractals. Journal of Neuroscience Methods, 69(2): 123~136.
- Tu Xinbin, Wang Sijing, Yue Zhongqi. 2005. Fractal fragmentation of weathered rock and its application in engineering geology. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(4): 587~595 (in Chinese with English abstract).
- Vadakkan T. 2009. Lacunarity of a binary image. MATLAB Central, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25261-lacunarity-of-abinary-image>.
- Wang Luqi, Yin Yueping, Huang Bolin, Dai Zhenwei. 2020. Damage evolution and stability analysis of the Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area. Engineering Geology, 265: 105439.
- Xu Liming, Wang Qing, Chen Jianping, Zhou Fujun, Tan Chun. 2011. Study of correlation between fractal dimension and RQD of three-dimensional jointed rock mass. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(S1): 2667~2674 (in Chinese with English abstract).
- Yan Guoqiang, Huang Bolin, Qin Zhen, Dai Zhenwei, Zhang Quan. 2022. Rock mass deterioration model of bank slope based on high-precision 3D multiperiod point clouds in the Three Gorges Reservoir, China. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 55(1): qjeh2020-100.
- Yin Yueping, Yan Guoqiang, Huang Bolin, Dai Zhenwei, Qin Zhen. 2020. Geological strength index of the slope rock mass deterioration process of the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges Reservoir, China. Journal of Hydraulic Engineering, 51(8): 883~896 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yueping, Huang Bolin, Li Bin, Zhang Zhihua, Yan Guoqiang, Zheng Jiahao. 2021. Research on deterioration index of karst rock mass in water level fluctuating zone of Three Gorges Reservoir area. Acta Geologica Sinica, 95(8): 2590~2600 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanbo, Xu Yuedong, Liu Xiangxin, Yao Xulong, Wang Shuai, Liang Peng, Sun Lin, Tian Baozhu. 2021. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT. Rock and Soil Mechanics, 42(10): 2659~2671 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Ren Sanshao, Guo Changbao, Yao Xin, Zhou Nengjuan. 2019. Research on engineering geology related with active fault zone. Acta Geologica Sinica, 93(4): 763~775 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 蔡建超, 胡祥云. 2015. 多孔介质分形理论与应用. 北京: 科学出版社.
- 冯夏庭, 丁梧秀. 2005. 应力-水流-化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验. 岩石力学与工程学报, 24(9): 1465~1473.
- 黄波林, 殷跃平, 张枝华, 王健, 秦臻, 闫国强. 2019. 三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究. 岩石力学与工程学报, 38(9): 1786~1796.
- 黄波林, 殷跃平, 李滨, 白林丰, 秦臻. 2021. 柱状危岩体坐落式崩塌产生涌浪的简化数值模型与校验. 岩土力学, 42(8): 2269~2278.
- 刘新荣, 景瑞, 缪露莉, 韩亚峰, 邓志云, 熊超. 2020. 巫山段消落带岸坡库岸再造模式及典型案例. 岩石力学与工程学报, 39(7): 1321~1332.
- 卢波, 葛修润, 朱冬林, 陈剑平. 2005. 节理岩体表征单元体的分形几何研究. 岩石力学与工程学报, 24(8): 1355~1361.
- 涂新斌, 王思敬, 岳中琦. 2005. 风化岩石的破碎分形及其工程地质意义. 岩石力学与工程学报, 24(4): 587~595.
- 徐黎明, 王清, 陈剑平, 周福军, 谭春. 2011. 三维节理岩体分形维数与RQD相关性研究. 岩石力学与工程学报, 30(S1): 2667~2674.
- 殷跃平, 闫国强, 黄波林, 代贞伟, 秦臻. 2020. 三峡水库消落带斜坡岩体劣化过程地质强度指标研究. 水利学报, 51(8): 883~896.
- 殷跃平, 黄波林, 李滨, 张枝华, 闫国强, 郑嘉豪. 2021. 三峡库区消落带溶蚀岩体劣化指标研究. 地质学报, 95(8): 2590~2600.
- 张艳博, 徐跃东, 刘祥鑫, 姚旭龙, 王帅, 梁鹏, 孙林, 田宝柱. 2021. 基于CT的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究. 岩土力学, 42(10): 2659~2671.
- 张永双, 任三绍, 郭长宝, 姚鑫, 周能娟. 2019. 活动断裂带工程地质研究. 地质学报, 93(4): 763~775.

Research on fractal characteristics and evolution prediction of rock mass deteriorating in bank slope drawdown zone of the Three Gorges Reservoir area

YAN Guoqiang^{1,2,3)}, HUANG Bolin^{* 2,3)}, YIN Yueping⁴⁾, HU Lei^{2,3)}, CHEN Yunfei^{2,3)}

1) Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

2) Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation,

China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

3) College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

4) China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China

* Corresponding author: bolinhuang@aliyun.com

Abstract

The key to the deterioration of bank slope rock mass in the Three Gorges Reservoir area lies in the continuous expansion of rock mass joints. The fractal theory is used to study the deterioration degree, deterioration crushing phase transition time, and development trend of the bank slope measuring window rock mass in the upper and lower drawdown zone. The main conclusions are as follows: the distribution of rock mass joint deterioration has fractal properties, and the steep and gentle turning point of the $\Delta(r)$ curve can be regarded as the lower limit of the *REV* rock mass size. On the whole, deterioration makes the growth of rock mass joints develop to a more uniform and denser trend, showing the characteristics of dimension increase. Further, the deterioration classification standard is established by using the joints fractal dimension increment ΔD_b . Fractal dimension increment value ΔD_b , the increment of area joint number ΔJ_{ov} , and the variation of geological strength index ΔGSI satisfy the exponential function relationship. Finally, two joints fractal dimension deterioration evolution modes are proposed. The corresponding evolution prediction and analysis can be carried out by using calculation formula of rock mass deterioration and crushing phase transition time, and the prediction of rock mass deterioration and crushing phase transition time is based on secant estimation. Due to the high statistical stability of fractal dimension D_b , it can meet the needs of engineering applications. This research provides a new method for the investigation of bank slope deterioration degree and the prediction of deterioration evolution in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: rock mass deterioration; crushing phase transition time; fractal theory; evolution prediction; Three Gorges Reservoir area