**文章编号：**1000－7598－(2005) 05－0728－05

# 软岩膨胀崩解试验及分形机理

苏永华，赵明华，刘晓明

( 湖南大学 土木工程学院，长沙 410082 )

**摘 要：**在室内崩解试验和大气条件模拟的渐进崩解试验中，通过跟踪崩解过程物碎屑的颗粒级别变化发现，软岩膨胀崩解过程是一个多重分形过程。在崩解达到一定程度后，崩解碎屑物的颗粒级别不再发生变化，软岩吸水膨胀崩解停止，此时崩解物的分数维亦达到一个不再变化的临界值。该临界值可用来定量表征软岩崩解的机理。该结论对工程实际具有指导意义。

**关 键 词：**软岩；膨胀崩解；分数维；碎屑物

**中图分类号：**TU 458 **文献标识码：**A

## Research of fractal mechanism for swelling & collapse of soft rock

SU Yong-hua, ZHAO Ming-hua, LIU Xiao-ming

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Through grain-size analysis of scrap for soft rock that was produced during test of collapsing in laboratory and test of gradual collapsing in field atmospheric condition; it was found that absorbing water and collapsing progress of soft rock is also a progress that fractal dimension of soft rock scrap change successively. When collapsing of soft rock arrived to some extent, grade of scrap of soft rock collapsed is no more change; absorbing water and collapsing of soft rock stopped; fractal dimension of scrap of soft rock collapsed incline to a critical value. The critical value opens out fractal mechanics of soft rock when it swells and collapses after absorbing water. The above-mentioned conclusion exists a guidance significance to engineering.

**Key words:** soft rock; swell and collapse; fractal dimension; scrap

## 1 问题的提出

软岩在地面、地下工程中是一种常见的岩体。由于常含有大量的高龄石、伊利石和蒙脱石等粘土矿物，所以其工程性状也表现出独有特性。其中主要性状之一是其原始状态被扰动后，一定尺寸的块度与大气及水相遇后容易软化和崩解。对于其软化和崩解机理，许多学者进行了大量的研究[1~3]，分别从工程地质、分子晶包之间的作用力和距离、结构面滑移、水理性质等方面对其机制进行了研究。但是由于其复杂性，一直很难找到一个定量的指标来描述，在工程应用上极为不便。因此，迫切需要研究能表征软化和崩解机理的定量指标。

## 2 软岩崩解方法和特征

软岩是一个庞大的体系，在岩性上通常由泥岩、砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥质细砂岩、泥质砂岩、泥质或砂质页岩等沉积岩类组成。其强度因成分和胶结物质的差异而变化颇大，岩块吸水可崩解碎裂，颗粒级别组成发生变化，强度降低，工程性质变差。给工程带来很大不便。目前，软岩崩解试验方法可分为两种：室内和大气模拟崩解试验。

### 2.1 软岩室内崩解试验[1]

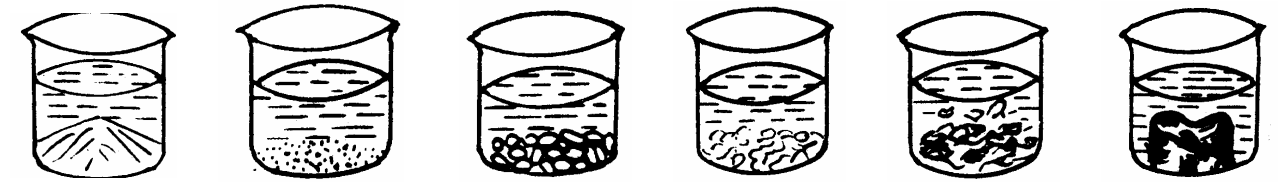
在室内试验中常用的崩解方法和崩解物的特征见表 1。崩解物形态示意图见图 1。在试验中发现软岩浸水后所表现出来的不同崩解特征与软岩的成因、成分以及胶结状态密切相关。崩解物为泥状的软岩，主要是以蒙脱石为主要矿物成分的弱胶结软岩。由于蒙脱石亲水性很强，加之颗粒间胶结较弱，所以遇水后很快崩解；该类软岩的干燥-饱和吸水量在 50 %以上，更大者可达 137.7 %，如此高的吸水量说明该类软岩具有很大的膨胀性。其他软岩，情

收稿日期：2004-02-02 修改稿收到日期：2004-04-06
基金项目：湖南大学人才基金(No.531103011143)和自然科学基金(No.521101619) 。
作者简介：苏永华，男，1966 年生，博士，副教授，从事岩体力学与地下结构工程领域的科研与教学。E-mail: syh5327@hnu.cn

表 1 软岩室内崩解试验 [1]

Table 1 Collapsing test of soft rock in laboratory

| 崩解分类 | 崩解物形态 | 崩 解 特 征 |
|---|---|---|
| I | 泥状 | 浸入水中即刻“土崩瓦解”呈泥状。 |
| II | 碎屑泥、碎片泥、碎块泥 | 浸入水中呈絮状、粉末状崩落，短则几分钟，长则 20~30 min，样品即崩解完毕。崩解物为粒状、片状碎屑或碎块，但用手搓仍为泥。 |
| III | 碎岩片、碎岩块 | 浸入水中呈块状崩裂、塌落或片状开裂，全部样品崩解完毕需 1 h 至数小时，崩解物为碎岩片或碎岩块。 |
| IV | 整体岩块 | 浸入水中经数天半月以至更长时间都不发生崩解破坏，或仅在局部沿隐微裂隙、节理开裂。 |



(a) I 类，入水即呈泥状； (b) II 类，碎屑泥； (c) II 类，碎片(块)泥； (d) III 类，碎岩片； (e) III 类，碎岩块； (f) IV 类，整体岩块

图 1 崩解物形态示意图

Fig.1 Sketch of Collapsed substances configurations

况较为复杂。软岩的矿物成分，有以蒙脱石为主的，也有的是蒙脱石和伊利石或蒙脱石与高岭石以及三者兼有的混合物，而且它们具有不同数量的胶结物。因此，当这类软岩浸于水中时，虽然也常常呈絮状或粉末状崩落，但最终崩解物为鳞片状碎屑或大小不等的碎块，用手指揉搓，其仍为泥状物[1]。由于开挖扰动后，其吸水崩解是在大气中进行的。为了验证崩解物性质，还必须分析在大气条件下软岩的崩解物特征。

### 2.2 大气条件模拟的软岩渐进崩解试验

赵明华教授[4]在室内崩解试验的基础上进行了野外大气环境中渐进崩解模拟试验。其过程是将一定块度尺寸的软岩试样置于野外大气环境中，并间隔性淋水浇湿，以造成周期性的干湿循环试验条件，观察软岩的渐进崩解过程并分析颗粒级配的变化。试验表明：随着暴露时间的延长和干湿循环次数的增加，岩块不断崩解碎化，最后呈渣状或泥状，其颗粒级配也随着时间而变化。但崩解作用经过一定时间后便处于相对稳定状态，颗粒级配基本保持不变，这与野外实际料场的崩解情况相符。图 2 以曲线形式给出湘南某地两个软岩试样崩解过程中细颗粒（粒径小于 2 mm）含量的渐进变化[4]。

## 3 软岩崩解分形机理

### 3.1 地质体与分形

分形理论主要是研究一些具有自相似性（Self-similar）的不规则曲线和形状（称为线性分形）；具

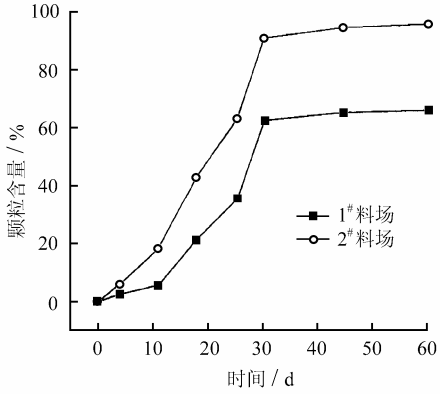



图 2 某地软岩在野外大气环境中的崩解试验曲线[4]

Fig. 2 The disintegration experimental curve of soft rock atmospheric environment

有反演性的（Self-reverse）不规则图形，具有自平方性（Self-squaring）的分形变换以及具有自仿射性（Self-affine）的分形集等。地质学领域分形是描述自然界地质体具有局部与整体相似性的一种理论。大量的研究已经表明，岩体在各种非人为的外界力（包括自然力和机械力）随机作用下的破碎是一个分形。该结论在岩体空隙、结构面，岩体的开挖、尾矿场、爆破等的块度分析中得到了验证[5]。软岩在吸水后的崩解破碎是随机破碎，自然也是一个分形。分形的刻画指标是分维数。

### 3.2 崩解层次

收稿日期：2004-02-02 修改稿收到日期：2004-04-06
基金项目：湖南大学人才基金(No.531103011143)和自然科学基金(No.521101619) 。
作者简介：苏永华，男，1966 年生，博士，副教授，从事岩体力学与地下结构工程领域的科研与教学。E-mail: syh5327@hnu.cn

软岩岩体沿结构面的大规模崩解滑动，主要由大型结构面的性质控制，其解体与细观上吸水崩解具有不同的机制。其机理在地学上已经有了大量的成果。开挖扰动后的软岩受到爆破、机械等外力的作用，其尺寸、水理性质产生了变化。根据现场崩解试验，软岩碎裂成一定尺度的块度后，软岩膨胀崩解主要由粘土矿物及裂隙的水理性质引起。根据崩解物筛分试验发现，在崩解到一定程度后，崩解物颗粒粒组在一定的范围内保持不变[4]，即崩解基本停止。

### 3.3　分数维计算方法

分数维的计算方法很多，主要有码尺法、修正的码尺法、盒维数方法、自仿射分形方法、幂律谱方法、周长-面积关系方法、信息维维数及无标度关联维数等计算方法[6~10]。

但通常人们所谈到的分维是立足于自相似性的，对于软岩体崩解分形描述，可采用下式所定义的关联分数维：

$$D=-\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln\varepsilon}\ \text{或}\ N(\varepsilon)\propto\varepsilon^{-D} \tag{1}$$

式中　$\varepsilon$ 为标度；$N(\varepsilon)$ 为在该标度下所得到的量度值；$D$ 为研究对象的分数维。

式（1）也提供了测定分数维的方法，即只要测出一系列的 $\varepsilon$ 与相应的 $N(\varepsilon)$。在双对数坐标下，$N(\varepsilon)$-$\varepsilon$ 直线部分的斜率就是所研究对象的分数维 $D$。自然界的分形不象理论分形那么纯粹和“干净”，存在着无标度区，研究对象是否为分形的区别准则是无标度性。根据分形基本理论和软岩崩解物的特性，采用关联分维数方法来描述岩体崩解的机理。结合岩体崩解，具体可采用如下两种方法。

（1）用数量求分维数

设有一系列不同直径 $r$ 的球，用孔径为 $\varepsilon$ 的筛子来筛选这些球。显然，直径比 $\varepsilon$ 小的球就漏下去，记为 $N_{下}(\varepsilon)$；直径比 $\varepsilon$ 大的球就留在上面，记为 $N_{上}(\varepsilon)$。球的总数记为 $N(\varepsilon)$，且有

$$N(\varepsilon)=N_{下}(\varepsilon)+N_{上}(\varepsilon) \tag{2}$$

$$C(\varepsilon)=\frac{N_{下}(\varepsilon)}{N(\varepsilon)}=1-\frac{N_{上}(\varepsilon)}{N(\varepsilon)} \tag{3}$$

则当 $N(\varepsilon)=N_{下}(\varepsilon)$ 时，$C(\varepsilon)=1$，全部漏下；当 $N(\varepsilon)=N_{上}(\varepsilon)$ 时，$C(\varepsilon)=0$，全部留在上面。

若改变不同的孔径 $\varepsilon$，求得某级 $\varepsilon$ 区间范围内，存在关系 $C(\varepsilon)\propto\varepsilon$-$D$，则 $D$ 就是关联维数的一种逼近。根据上述基本定义，可以推得关联维数通过数量方法的精确值为

$$D=-\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln\varepsilon} \tag{4}$$

因此，如果能做出 $\ln C(\varepsilon)-\ln\varepsilon$ 的图形，直线部分的斜率即为关联维数。但具体对于软岩来说，在崩解后要准确估计碎块的数目相当困难。所以，用数量求关联分维数只使用简单情况下的分形。

（2）通过质量求分维数

设崩解后软岩碎石的总质量为 $M$，筛网孔径为 $\varepsilon$，设 $M(\varepsilon)$ 为直径小于 $\varepsilon$ 的质量，通过一系列的筛网孔径为 $\varepsilon$ 的筛分，得到一系列的 $M(\varepsilon)$。在正常情况下，碎石质量遵从一定的频率分布：

$$M(\varepsilon)/M=1-\exp[-(\varepsilon/\sigma)b] \tag{5}$$

式中　$\sigma$ 为平均尺寸，当 $\varepsilon/\sigma\leqslant 1$ 时，上式可简化为

$$M(\varepsilon)/M=(\varepsilon/\sigma)b] \tag{6}$$

则 $\mathrm{d}M\propto\varepsilon^{b-1}\mathrm{d}\varepsilon$，结合分形维数的概念：$N(\varepsilon)\propto\varepsilon^{-D}$，则 $\mathrm{d}N\propto\varepsilon^{-D-1}\mathrm{d}\varepsilon$。而 $\mathrm{d}M\propto\varepsilon^{3}\mathrm{d}N$，故

$$\varepsilon^{b-1}\mathrm{d}\varepsilon\propto\varepsilon^{3}\varepsilon^{-D-1}\mathrm{d}\varepsilon \tag{7}$$

因此，$D$ 为

$$D=3-b \tag{8}$$

式中　$D$ 为分维数，$b$ 为 $\log\varepsilon-\log(M(\varepsilon)/M)$ 坐标系下的斜率值。$M(\varepsilon)/M$ 是直径小于 $\varepsilon$ 的碎石的累计百分含量。

### 3.4　计算实例

（1）样本结构特征和成分

软岩的试验样品来自上—瑞高速公路湖南湘—耒段”。根据工程地质和岩石学的分类，试验样品属于粘土岩类，呈泥状结构或含粉砂泥状结构，以基底式胶结和泥质接触式胶结为主，有时表现为碳酸盐胶结，碎屑含量低于 20 %，一般为 5 %～10 % 或更低[4]。粘土矿物的含量一般约为 15 %～50 %，其中高岭石含量为 7 %～40 %；伊利石含量为 5 %～30 %；蒙脱石含量为 3 %～10 %；主要化学成分有 9 种，其中 $SiO_2$ 的含量占主要部分，其次为 $Al_2O_3$、CaO 及 $Fe_2O_3$ 等，其余 5 种化学成分均不超过 4%。

（2）崩解试验

由于本项目中研究的软岩主要用来作为公路路基的填料，根据施工工艺要求，填料的块度的最大尺寸不大于 250 mm。故在现场随机取样，崩解试验按如下过程进行：

① 在工地爆破后的石料中，用$\phi$ 250 mm 筛子取软岩混合体若干，于试验室内晾干。

② 分别用直径为 200，60，20，2，0.5，0.25，0.075 mm 等不同规格的筛子进行筛分试验，记录颗粒级别。

③ 将所有岩块及已经崩解的碎屑物混合到一起，进行室内崩解试验。若干天后，重复步骤②，并比较前后两次颗粒级别的变化幅度,着重观察粒径最小的颗粒所占的百分数。

④ 如果颗粒级别在一个较长时间内变化幅度很小，说明崩解基本停止，崩解试验终止。

为了相互验证，分别进行室内崩解试验和大气条件下的渐进崩解试验，采用通过质量求分数维。崩解试验过程中崩解物的颗粒级别变化见表 2、表 3，分数维随时间的变化见图 3、图 4。从实验和分数维变化过程发现：软岩的膨胀崩解是一个时间过程，在该过程中其颗粒组成一直处于变化之中，其分数维也不断变化。在不同的试验条件下，崩解的速度不同，分数维的变化快慢不同，但崩解达到一定程度的时候，颗粒级别达到稳定，膨胀崩解最终趋于停止，分数维值趋于一个稳定值。为方便起见，简称稳定分数维。对于本次所采用的试样，分数维的稳定值大约为 2.7 左右。

**表 2　大气条件下的渐进崩解试验过程中颗粒级配变化**
**Table 2　Grade variety of soft rock during gradually collapsing test in atmospheric condition**

| 时间 | 不同粒径(mm)　成分组成/ % | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| /d | <200 | <60 | <20 | <2 | <0.5 | <0.25 | <0.075 |
| 4 | 100 | 34.4 | 20.7 | 6.8 | 1.1 | 0.5 | |
| 11 | 100 | 100 | 49.6 | 18.0 | 3.7 | 1.4 | 0.4 |
| 18 | 100 | 100 | 88.9 | 42.1 | 8.1 | 2.9 | 1.0 |
| 25 | 100 | 100 | 95.7 | 62.4 | 13.0 | 5.0 | 1.7 |
| 31 | 100 | 100 | 97.9 | 90.7 | 24 | 7.5 | 3.8 |
| 39 | 100 | 100 | 97.9 | 92.4 | 28.8 | 7.8 | 4.0 |
| 45 | 100 | 100 | 97.9 | 93.3 | 31.6 | 13.1 | 5.5 |
| 51 | 100 | 100 | 98.2 | 94.1 | 32.7 | 14.1 | 6.1 |
| 57 | 100 | 100 | 98.5 | 94.4 | 33.6 | 14.5 | 6.8 |
| 67 | 100 | 100 | 98.7 | 94.9 | 34.8 | 14.9 | 7.2 |

**表 3　室内崩解试验过程中颗粒级配**
**Table 3　Grade variety of soft rock during collapsing test in laboratory**

| 时间 | 不同粒径(mm)　的级配组成/ % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| / d | <200 | <60 | <20 | <2 | <0.5 | <0.25 |
| 4 | 100 | 61.7 | 23.4 | 2.2 | 0.4 | |
| 11 | 100 | 76.1 | 47 | 5.6 | 0.8 | 0.3 |
| 18 | 100 | 92.3 | 78.9 | 21.4 | 2.1 | 0.9 |
| 25 | | 100 | 87.4 | 34.9 | 3.1 | 1.2 |
| 31 | | 100 | 93.2 | 47.8 | 5.1 | 2.5 |
| 38 | | 100 | 94.8 | 52.4 | 7.6 | 3.5 |
| 45 | | 100 | 96 | 57.8 | 9.0 | 4.4 |
| 52 | | 100 | 97.4 | 64.4 | 10.6 | 5.8 |
| 60 | | 100 | 99 | 70.9 | 12.1 | 6.9 |
| 67 | | 100 | 99 | 77.6 | 16.8 | 7.8 |
| 75 | | 100 | 99 | 82.4 | 20.6 | 9.5 |
| 83 | | 100 | 99.4 | 88.5 | 28.4 | 11.8 |
| 90 | | 100 | 99.7 | 93.5 | 33.2 | 13.2 |
| 98 | | 100 | 100 | 94.7 | 35.1 | 14.4 |



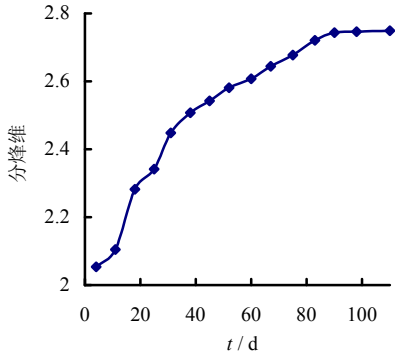
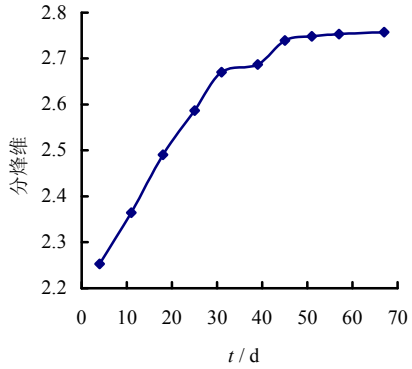



**图 3　大气条件下渐进崩解试验颗粒分维数随时间变化**
**Fig. 3　Fractal dimension variety of scrap with time during gradually collapsing test in atmospheric condition**




注: 分数维相关系数最大为 0.9855，最小为 0.945 6

**图 4　室内崩解试验过程中颗粒分维数随时间的变化**
**Fig. 4　Fractal dimension variety of scrap with time during collapsing test in laboratory**

软岩吸水膨胀崩解达到一定程度后，其质量关联分数维达到一个稳定值。崩解停止，达到稳定状态，这一性质对于路基填料来说非常重要，可以作为路基填筑施工工艺的控制指标。

## 4　工程应用

20 世纪 80 年代在湘南地区曾经采用软岩作为路基填料的公路，在修筑过程中，没有针对其特点采取措施，颗粒级别过大，加之施工工艺不当，导致路面沉陷，开裂、断板、错台等病害非常突出。有的路面纵向裂缝[4]长达 70～80 m，缝宽 2～4 cm，有的路面板错台 3～4 cm，严重者造成路基塌方。

最近在湘南上—瑞高速公路湖南湘—耒段的建设中，针对软岩的吸水膨胀崩解导致病害的状况，

采取了以填料颗粒分数维为主要控制参数的施工工艺。基本的过程为：在预崩解的基础上进行路面摊铺，然后机械耙压，让软岩进行充分的崩解，再测试填料颗粒分数维。在崩解物颗粒关联分维值达到临界分数维附近，再按施工工艺进行碾压和终压。具体的施工工艺：开挖→预崩解→装运→卸料→摊铺→耙压→初压→赶平→检测填料分数维→碾压→检测填料分数维→终压。

采用上述工艺施工的上—瑞高速公路湖南湘—耒段公路已经完工 3 年，运营良好，没有出现过路基、路面病害。

## 5　结 语

在软岩膨胀崩解力学机理研究方面，已经取得了许多进展，但由于问题的复杂性，找到合适的能定量描述其机制的指标一直是软岩研究领域的目标之一。本文将非线性的分形几何引入，利用分形理论分析崩解机制，认为软岩的吸水膨胀崩解是软岩属于多重分形，其稳定分数维可以作为膨胀崩解的一个定量指标。对工程实践具有较好的指导意义。

## 参 考 文 献


[1] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[2] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程地质力学研究进展[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 46－62.

HE Man-chao , JING Hai-he, SUN Xiao-ming . Research progress of soft rock engineering geomechanics in China coal mine[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2000, 8(1): 46－62.

[3] 冯启言, 韩宝平, 隋旺华. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J]. 工程地质学报, 1999, 9(3): 266－271.

FENG Qi-yan, HAN Bao-ping, SUI Wang-hua. Characteristics of water-rock interaction of red-bed sand and its application to engineering in Southwest Shandong[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, 9(3): 266－271.

[4] 赵明华, 邓觐宇, 曹文贵. 红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16 (3): 1－6.

ZHAO Ming-hua, DENG Jin-yu, CAO Wen-gui. Study of the disintegration character of red sandstone and the construction techniques of red sandstone embankment[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2003, 16 (3): 1－6.

[5] 毕先梅. 地质学运用分形理论需要考虑的问题[A]. 分形理论及其应用[C]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993, 323－236.

BI Xian-mei. Problem taken into consider when fractal theory was applied to geology[A]. Fractal theory and its application[C]. Hefei: Chinese Science and Technology University Press House, 1993, 323－236.

[6] 谢和平. 岩石节理的分形描述[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 18－23.

XIE He-ping. Fractal description of rock joints[J]. **China Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(1): 18－23.

[7] 徐永福, 史春乐. 用土的分形结构确定土的水份特征曲线[J]. 岩土力学, 1997, 18(2) : 40－43.

XU Yong-fu, SHI Chun-le. Calculation of soil-water characteristic curves by using fractal structure of soil [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(2) : 40－43.

[8] 高峰, 谢和平, 赵鹏. 岩石块度分布的分形性质及细观结构效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 240－246.

GAO Feng, XIE He-ping, ZHAO Peng. Fractal properties of size-frequency distribution of rock fragments and the influences of meso-structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1994, 13(3): 240－246.

[9] 王金安, 谢和平, M. A. 科瓦西涅夫斯基. 应用激光技术和分形理论测量和描述岩石断裂表面粗糙度[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 354－361.

WANG Jin-an, XIE He-ping, Kwasniewski M A. Application of laser technique and fractal theory to the measurement and characterization on roughness of rock fracture surfaces[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(4): 354－361.

[10] 徐永福, 董平. 饱和土的水分特征曲线的分形模型[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 400－405.

XU Yong-fu, DONG Ping. Fractal models for the

soil-water characteristic of unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 400－405.