

基于分形理论的红层软岩填料缩尺料制备方法

刘晓明^{1†}, 刘凯¹, 梁新权², 曲诗章¹, 陈仁朋¹

(1.湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2.长沙市轨道交通集团有限公司, 湖南 长沙 410005)

摘要:采用分形理论研究了在室内采用球磨机制备与现场填料具有相同分形维的缩尺料的方法.基于对模拟现场重复破碎机制的考虑,选用球磨机作为破碎岩块制备缩尺料的设备.通过正交试验,研究了岩块初始粒径、球磨机转数、钢球数等参数对分形模型拟合优度、颗粒分形维的影响.在此基础上,通过中三轴制样试验进一步研究了试样制作过程对缩尺料二次破碎的影响.研究表明,对于红层软岩,采用破碎参数:球磨机转数 100 转,钢球数 9 个、岩块初始粒径 20 mm,可以制备得到与现场原料相同分形维的中三轴试样缩尺料.

关键词:红层软岩;分形理论;缩尺试样;正交试验;球磨机

中图分类号: TU451

文献标志码: A

Scale Sample Preparation Method of Red Bed Weak Rock Filling Material Based on Fractal Theory

LIU Xiaoming^{1†}, LIU Kai¹, LIANG Xinquan², QU Shizhang¹, CHEN Renpeng¹

(1.Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Changsha Metro Group Co Ltd, Changsha 410005, China)

Abstract: Using the fractal theory, the preparation method on the scale sample with same fractal dimension of the in-site filling material produced by ball mill was studied. Based on the requirements of simulating the in-site repetitive crush mechanism, the ball mill was selected to prepare the scale sample. The effects of the experimental influence parameters such as the number of rotation, number of steel balls and initial particles size on the goodness of the fractal simulation and fractal dimensions were investigated by using the orthogonal tests. The effect of secondary crushing on the filling material during the preparation of middle Triaxial specimen was further examined. The results show that with the following crushing parameters: the number of ball mill rotation is 100 rad, the number of steel ball is 9, the initial particle size of the rock is 20mm, the middle Triaxial specimen scale sample with the same fractal dimension as the in-site filling material can be prepared.

Key words: red bed weak rock; fractal theory; scale sample; orthogonal test; ball mill

红层软岩在我国分布广泛,在自然环境中会崩解.红层软岩的这种特殊性质,导致红层地区工程地

质问题大量出现.20 世纪 70 年代起,美国大规模修建高速公路,开始对易破碎、易崩解软岩作为路基

* 收稿日期:2018-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578230,51608188), National Natural Science Foundation of China(51578230,51608188); 湖南省重点研发计划项目(2016WK2005), Key Research Plan of Hunan Province (2016WK2005)

作者简介:刘晓明(1975—),男,江西永新人,湖南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: lxmcivil@hnu.edu.cn

填料进行了大量研究^[1]。2000 年前后,我国高速公路、铁路建设加速推进,国内学者开始对利用红层软岩筑路技术进行系统研究。工程中的试验表明,红层软岩填料经充分破碎后,最大颗粒粒度一般在 200 mm 左右。为了取得填料各种物理力学指标,在室内对填料进行试验需要对填料进行缩尺。一般粗颗粒填料的缩尺方法有:剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法等。这些方法都需对原型土料粒径进行缩尺,而缩尺后颗粒大小、形状、组成会有较大的改变,从而导致试验结果与实际的力学性质产生较大差异。因此,研究两者间的内在联系尤显重要^[2-3]。

分形理论是由 Mandelbrot^[4]在 1967 年提出,在岩土工程领域,许多学者采用分形理论进行研究,验证了诸多不同成因岩土的粒度分布属于分形^[5-6]。既有研究表明经充分破碎的土粒将趋于一种自相似的分形分布^[7-8],该理论为缩尺料的研究提供了新的思路^[9]。朱晟等^[10-11]等采用分形理论对粗粒土密度缩尺效应进行了研究,并且通过引入级配参数和分形维数,提出了原级配粗粒料在指定最大控制粒径条件下的物理力学条件基本一致的缩尺级配公式^[12]。赵娜等^[13]采用分形理论研究了粒径分形维数与级配缩尺方法、最大干密度的变化规律。陈镬芬等^[14]采用分形理论研究了 4 种传统缩尺方法所制备的相同最大粒径、不同分形维的缩尺料特性,建立了分形维与岩土性质指标之间的关系。

但是,对相同分形维、不同最大粒径缩尺料性质的研究尚属空白,有待深入。而开展对相同分形维、不同最大粒径缩尺料性质研究,首先要解决相同分形维缩尺料的制备问题。红层填料属于重复破碎的填料,其破碎机制可在室内模拟。因此,本文选定操作简便的球磨机作为制备缩尺料的设备,研究相同分形维缩尺料的制备方法,为下一步研究打下基础。

1 现场红层填料的分形特征

1.1 现场红层填料破碎机理与级配

缩尺料是对现场填料的缩尺,因此首先需要知道现场填料的颗粒级配及其分形维。本研究的现场填料分形维测试试验是依托长沙市某实际工程进行的。该工程填筑材料采用的是本地区广泛分布的红层软岩^[15],其地质名称为“中风化泥质粉砂岩”,岩石天然含水率 9%,天然含水率下抗压强度 2.5 MPa,24 h 浸水全部崩解成渣状,可定为“I 类红砂岩”。

现场填筑工艺采用“预崩解-耙压”工艺^[16]破碎

岩块。“耙压”破碎机理如图 1 所示^[17-18]:机械设备直接压在岩块上、岩块间互相挤压等导致的开裂破碎(体积破碎)、岩块互相摩擦导致表面磨损(表面破碎)等。

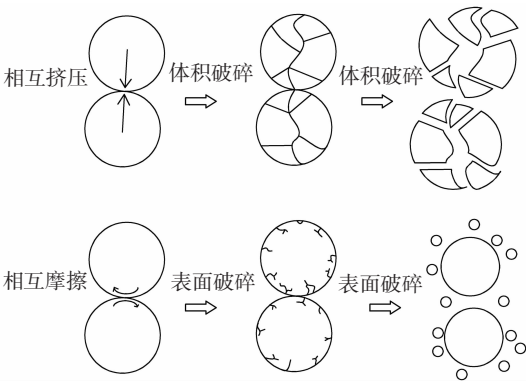


图 1 软岩耙压破碎示意图

Fig.1 Schematic diagram of pressure breaking of weak rock

工程实践表明,填料的最大粒径随“耙压”遍数增多而减小,但是颗粒减小速率随着“耙压”遍数增多越来越缓慢,经试验发现“耙压”4 遍后颗粒减小速率明显减小,所以确定实际填筑工艺为“耙压”4 遍。在“耙压”4 遍后,取样运回实验室,筛分后统计分析得到现场填料的颗粒级配,如图 2 所示,其中 1# 试验坑的最大颗粒粒径为 120 mm,2# 试验坑的最大颗粒粒径为 140 mm。

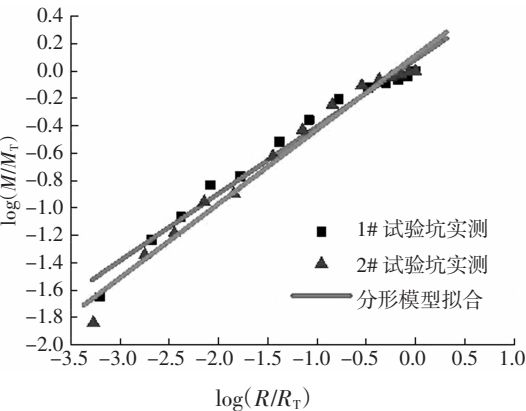


图 2 原始样粒度分布双对数关系图

Fig.2 Two-logarithmic relationship of original particle size distribution

1.2 粒度分形模型及现场红层填料分形维

根据分形的概念,Turcotte 提出如下颗粒数量-粒径关系颗粒分布分形模型^[7]:

$$N(r > R) \propto R^{-D} \tag{1}$$

式中: $N(r > R)$ 为粒径大于 R 的颗粒的数量; D 为分维数。

因为颗粒的数量很难量测,因此 Tyler 和 Wheatcraft^[19]在式(1)基础上,提出采用质量-粒径关系描述颗粒分布:

$$\frac{M(r < R)}{M_T} = \left(\frac{R}{R_T}\right)^{3-D} \tag{2}$$

式中: $M(r < R)$ 为粒径小于 R 的颗粒的质量; M_T 为颗粒总质量; R_T 为颗粒最大粒径。

该颗粒分布模型,一般是对 $\log(R/R_T) - \log(M(r < R)/M_T)$ 双对数关系进行线性回归,若试验数据与直线相关性好,则可根据回归直线的斜率求出分维数 D ,否则,不能用分形理论研究该问题。

根据式(2),分析计算图 2 中 1#、2# 试验坑所示颗粒级配,分别得到 $D = 2.510$ 和 2.490 。由图 2 可见,试验数据的双对数结果与分形模型吻合良好,相关系数分别达到 0.991 6 和 0.992 1,说明用分形理论研究红层填料粒度是合理的。本文将选取 1# 试验坑的颗粒分布作为原型进行缩尺料制备。

2 缩尺料制样设备运转参数正交试验

2.1 制样设备破碎工作原理

对于室内研究而言,采用现场耙压工艺制备试样费时费力,而且现场耙压所得填料最大颗粒过大,一般大于 150 mm,不适于室内试验,因此需要研究室内试样制备方法。从分形原理看,红层填料现场破碎工艺的核心是“重复”和“压碎-翻松”,室内试样制备方法模拟只要能模拟“重复”和“压碎-翻松”,就可得到与现场类似的填料。

本文采用搁板式洛杉矶球磨机(简称球磨机)作为制样设备对填料进行破碎试验研究。球磨机由圆筒、搁板、密封盖、变速箱、电机、料斗及计数器等部件所组成。球磨机的主要技术参数:外形尺寸为 1 100 mm × 780 mm × 100 mm(长×宽×高),圆筒尺寸为 710 mm × 510 mm(±5 mm)(内径×内长),转速为 30 r/min,工作电压为 380 V,最大工作功率为 1.1 kW。

球磨机磨料作业是在球磨机筒体内进行的,岩块从球磨机入口装入,同时按照试验需求装入不同数目、相同规格尺寸的钢球,每个钢球质量为 510 g。开动滚筒,筒体转动时,钢球在球磨机旋转作用力和反向作用力的影响下运动,与填料摩擦或碰撞,从而破碎岩块。当研磨结束后,打开密封盖,取出粉状物料。

由上可知,球磨机对岩块的破碎作用也是基于如图 1 所示的两种破碎机制:①钢球、岩块之间互

相碰撞引起的破碎(体积破碎);②钢球、岩块之间互相摩擦产生的破碎(表面破碎)。与此同时,通过控制球磨机转数,可以实现重复破碎岩块的目的。因此,用球磨机对填料进行室内破碎试验,可以模拟现场填料压实“重复”和“压碎-翻松”两种作用。

要采用球磨机进行相同分形维填料的制备,首先需要解决设备运转参数的问题,即选用何种运转参数,可以获得应用分形理论所需的最大相关系数;选用何种参数,可以获得与现场填料分形维最接近的缩尺料。这些设备运转参数包括:适合的岩块初始粒径、球磨机转动次数(转数)、钢球数。虽然只有 3 个设备参数,但是每个参数可以取很多数值,因此需采用正交试验方法^[20]来确定这些参数对破碎结果的影响程度,然后选择合适的参数进行缩尺料制备。

2.2 设备运转参数正交试验

本文对岩块初始粒径、球磨机转数和钢球数各取 3 个水平,各试验因素及相应的水平如表 1 所示。

表 1 球磨机破碎试验因素及其水平

水平	初始粒径/mm	转数	钢球数
I	20	50	3
II	40	300	9
III	60	500	12

根据正交表选择方法,采用 $L_9(3^4)$ 建立试验方案如表 2 所示,共有 9 种组合。

表 2 球磨机运转参数组合正交试验方案

方案	初始粒径/mm	转数	钢球数
1	I (20)	I (50)	I (3)
2	I	II (300)	II (9)
3	I	III (500)	III (12)
4	II (40)	I	II
5	II	II	III
6	II	III	I
7	III (60)	I	III
8	III	II	I
9	III	III	II

每次试验前先称取准备好相同初始粒径的土粒 3 kg,然后选择表 2 中每组方案所用的参数,使用球磨机对填料进行破碎并筛分,得到每组试验方案破碎后的颗粒级配。根据各组试验数据,按式(2)计算所得的分形维及其线性回归结果,列于表 3 中。

表 3 红层填料分形维计算结果
Tab.3 The calculation result of fractal model
of red bed filling material

试样编号	$R_{\log M}$	D	试样编号	$R_{\log M}$	D
1	0.862 7	2.377	6	0.804	2.688
2	0.961 3	2.490	7	0.900	2.454
3	0.957 5	2.650	8	0.882	2.536
4	0.860 1	2.368	9	0.776	2.732
5	0.912 7	2.604	—	—	—

注: $R_{\log M}$ 表示颗粒试验数据 $\log R - \log M$ 关系与拟合模型的相关指数(系数), D 表示分形维.

2.3 设备运转参数对拟合相关系数影响分析

对表 3 中相关系数 $R_{\log M}$ 和分形维值进行分析,可知:随着球磨机转数或球数等参数的改变,其分形维亦会随之有所变化.根据表 3 中的结果,参照正交试验设计的数据处理方法,求得各个因素在不同水平下的相关系数平均值 ($\bar{R}_{\log M \text{ I}}, \bar{R}_{\log M \text{ II}}, \bar{R}_{\log M \text{ III}}$),以及相应的极差 R ,如表 4 所示.由表 4 中极差 R 值大小可知,球磨机破碎试验中各个因素对相关系数影响的主次顺序是:初始粒径→钢球数→球磨机转数.

表 4 红层填料破碎试验相关系数的极差分析
Tab.4 Range analysis of correlation coefficient
of red bed filling material fractal model

$R_{\log M}$	初始粒径/mm	转数	钢球数
$\bar{R}_{\log M \text{ I}}$	0.927 2	0.874 4	0.849 6
$\bar{R}_{\log M \text{ II}}$	0.918 7	0.918 7	0.865 8
$\bar{R}_{\log M \text{ III}}$	0.852 8	0.845 8	0.923 5
R	0.074 37	0.072 83	0.073 97

根据表 4 画出各因素与试样相关系数平均值的关系如图 3 所示,可知:不同因素对球磨机破碎填料的相关系数的影响趋势存在较大的差别,初始粒径是最主要的影响因素.

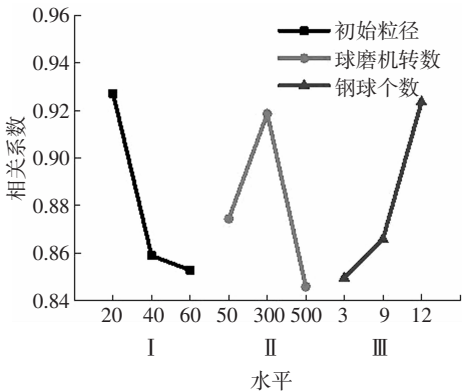


图 3 各因素与相关系数的关系

Fig.3 Relationship between every factor and the correlation coefficient

2.4 设备运转参数对分形维影响分析

接下来,就各因素对分形维有何影响展开分析,求得各个因素在不同水平下的分形维平均值 ($\bar{D \text{ I}}, \bar{D \text{ II}}, \bar{D \text{ III}}$),以及相应的极差 R ,如表 5 所示.

表 5 红层填料破碎试验分形维的极差分析
Tab.5 Range analysis of fractal dimension
of red bed filling material fractal model

$R_{\log M}$	初始粒径/mm	转数	钢球数
$\bar{D \text{ I}}$	2.506	2.400	2.534
$\bar{D \text{ II}}$	2.553	2.543	2.530
$\bar{D \text{ III}}$	2.574	2.690	2.569
R	0.068	0.290	0.039

由表 5 中极差 R 值大小可知,球磨机破碎试验中各因素对分形维数影响的主次顺序是:球磨机转数→初始粒径→钢球数. 根据表 5 画出各因素与试样分形维平均值的关系图(如图 4 所示),可知:

1) 不同因素对球磨机破碎填料的分形维的影响趋势存在较大的差别,球磨机转数是最主要的影响因素,随球磨机转数从 50 转增加到 500 转,其分形维近似呈线性增长,分形维增量 ΔD 与球磨机转数增量 Δr 之间的关系可表示为:

$$\Delta D = 0.029\Delta r + 1.812, 50 \leq r \leq 500 \quad (3)$$

2) 岩块初始粒径以及钢球球个数的变化对分形维数影响较小.

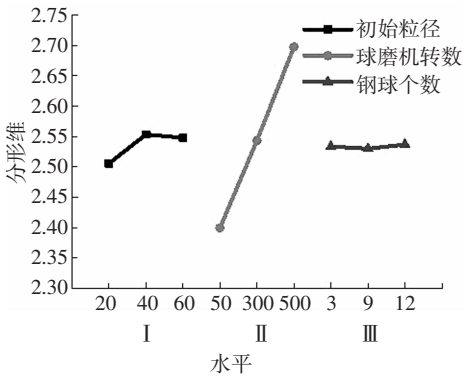


图 4 各因素与分形维的关系

Fig.4 Relationship between every factor and the fractal dimension

3 红层填料试件缩尺料制备方法

3.1 缩尺料原料制备方法

室内试验试样制作的流程是:首先用球磨机破碎得到粒料,然后在试模中击实(或静力压实)该粒料制作得到各种密度和规格的试件.粒料在击实(或静力压实)过程中,还会产生破碎.因此,球磨机所制粒料只是试样的原料.

本文以现场 1# 试验坑填料作为原型料,其分形维为 2.510.由第 2 节的分析结果可以确定选取初始粒径 20 mm、球磨机转数 200 转、钢球数 9 个时,破

碎产物颗粒分布用分形模型拟合分形维接近目标值且相关系数较大.因此,为了寻找与现场填料分形维最相近且相关系数最大的缩尺料,本研究在正交试验结果基础上,进一步细化各参数.取岩块初始粒径 20 mm、转数 200±100、球数 9±3 进一步试验,试验方案如表 6 所示.

表 6 缩尺料原料制备试验方案
Tab.6 Test programs of scale material production

方案	初始粒径/mm	转数	钢球数
10	20	100	6
11	20	200	6
12	20	300	6
13	20	100	9
14	20	200	9
15	20	300	9
16	20	100	12
17	20	200	12
18	20	300	12

表 6 中方案 15 为第 2 节方案 2,已经完成,因此只需做 11 组试验,由于篇幅所限,在这里只展示试验 16~18 所得分形模拟曲线见图 5.

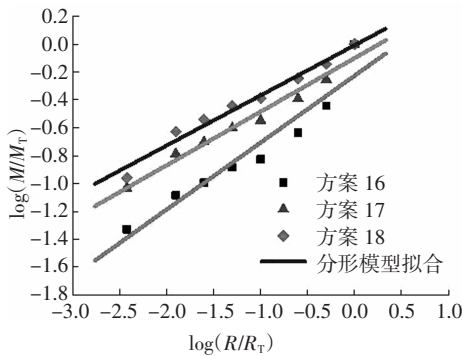


图 5 方案 16~18 球磨机破碎料的分形模拟
Fig.5 Fractal simulation of crushed material
in ball mill of the scheme 16 to 18

试验所得红层填料分形维计算结果见表 7.

表 7 球磨机破碎作用下红层填料分形维计算结果

Tab.7 The fractal particle size calculate result of
red bed filling material under crushing of ball mill

试样编号	R_{lgM}	分形维	试样编号	R_{lgM}	分形维
10	0.931 1	2.435	15	0.961 3	2.549
11	0.940 6	2.471	16	0.967 1	2.485
12	0.944 6	2.535	17	0.986 1	2.510
13	0.937 8	2.455	18	0.981 8	2.580
14	0.958 1	2.485	—	—	—

由表 7 可发现:按表 6 所示破碎方法,所得破碎产物颗粒分布与分形模型的相关系数均大于 0.93,说明取表 6 中的破碎参数,红层填料所得破碎结果是分形,各试验结果均可用分形模型研究.

3.2 试样制作中原料二次破碎特性

根据试验目的不同,粗粒料试验样品的规格有很多种,本文研究需制备直径 100 mm、高度 200 mm,粒料分形维数与现场填料相同的中三轴试样.因此选择表 7 中分形维数小于 2.510 的填料进行试样制作.

为研究制样对粒料的破碎特性,本文根据三轴试样的制作方法,按方案 10、11、13、14 和 16 破碎得到原料,制作得到与现场相同干密度的圆柱形试样,然后手工将试样分解(辅以橡皮槌、毛刷等工具),再次筛分并计算其分形维数,结果见表 8.

表 8 制样后红层填料分形维计算结果
Tab.8 The fractal particle size calculate result of
red bed filling material under secondary breaking

试样编号	R_{lgM}	分形维	试样编号	R_{lgM}	分形维
10	0.942 8	2.468	14	0.966 3	2.518
11	0.951 6	2.499	16	0.974 4	2.510
13	0.953 8	2.486	—	—	—

由表 8 可知,方案 16 二次破碎后得到的填料分形维与原型料相同,其相关系数为 0.974 4,因此可采用方案 16 制备中三轴试样.

3.3 红层填料缩尺料试样制备方法

根据以上研究可知:选取岩块初始粒径 20 mm、球数 12 个、球磨机转数 100 转、所得的原料,可制得与原型料分形维最接近的中三轴试样.相应原型料(现场 1# 试验坑, $D=2.510$)、球磨机破碎原料($D=2.485$)、中三轴试件粒料($D=2.510$)颗粒分布曲线如图 6 所示.

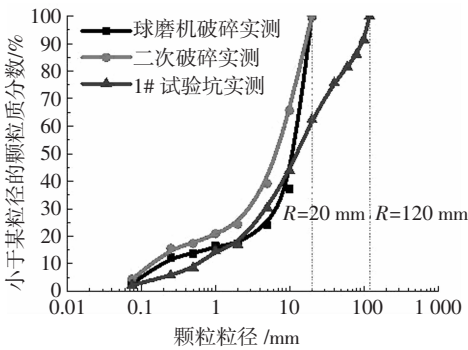


图 6 红层填料典型颗粒分布测试结果
Fig.6 The result of typical particle distribution test
of red bed filling material

4 结 语

本文首先研究了填料重复破碎的机理,基于分形理论提出采用球磨机制备与现场填料相同分形维缩尺料的思想,设计了正交实验探讨了钢球数量、滚动转数、岩块初始粒径等设备参数对破碎产物的颗粒分形特征的影响;然后,考虑试件制作的二

次破碎作用,提出了用球磨机制备与现场填料等分形维室内试验缩尺料的方法,研究得到以下结论:

1) 现场红层填料是经重复破碎形成的,用球磨机选择合适的岩块初始粒径、球磨机转数、钢球数,可以破碎得到与现场填料分形维接近的特定粒径缩尺料,再经试件制作二次破碎环节,可得与现场原型料分形维相同的粒料。

2) 球磨机破碎试验中各个因素对破碎后的红层填料与分形模拟的相关系数影响主次顺序是:初始粒径→钢球数→球磨机转数;对破碎后的红层填料分形维数影响的主次顺序是:球磨机转数→初始粒径→钢球数。

3) 本文所用设备可以制备最大粒径为 20 mm 及以下的缩尺料,可满足中、小三轴试验要求。如果需要制备大三轴缩尺料,还需选用其他设备制备。

制样问题解决以后,本研究将对相同分形维、不同最大粒径缩尺料的性质进行更进一步的试验研究,后续成果将另文发表。

参考文献

- [1] STROHM W E JR, BRAGG G H JR, ZIEGLER T W. Design and construction of completed shale embankments. Vol.5 Technical guidelines [R]. Vicksburg, MS: Army Engineer Waterways Experiment Station, 1978: 78—141.
- [2] BISHOP A W, HENKEL D J. The measurement of soil properties in the triaxial test [R]. London: Edward Arnold Ltd, 1957: 145—164.
- [3] 王永明, 朱晟, 任金明, 等. 筑坝粗粒料力学特性的缩尺效应研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1799—1807.
WANG Y M, ZHU S, REN J M, et al. Research on scale effect of coarse-grained materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1799—1807. (In Chinese)
- [4] MANDELBROT B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. Science, 1967, 155: 636—638.
- [5] 赵明华, 戴杰, 张玲, 等. 基于分形理论的粉煤灰渗透率研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 41(1): 75—80.
ZHAO M H, DAI J, ZHANG L, et al. Research on the permeability properties of fly-ash based on fractal theory [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 41(1): 75—80. (In Chinese)
- [6] 刘晓明, 徐汉飞, 赵明华. 基于分形理论的红层软岩崩解性消除方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 27—32.
LIU X M, XU H F, ZHAO M H. Research on the method of eliminating the slaking properties of red beds weak rock based on fractal theory [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(6): 27—32. (In Chinese)
- [7] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91: 1921—1926.
- [8] 张季如, 胡泳, 张弼文, 等. 石英砂砾破碎过程中粒径分布的分形行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 784—791.
ZHANG J R, HU Y, ZHANG B W, et al. Fractal behavior of particle-size distribution during particle crushing of quartz sand and gravel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 784—791. (In Chinese)
- [9] 尤培波, 武利强, 宋师奇, 等. 缩尺方法的分形解释[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 37—39.
YOU P B, WU L Q, SONG S Q, et al. Fractal description of scale methods [J]. Journal of Chinese Three Gorges University (Natural Science), 2013, 35(4): 37—39. (In Chinese)
- [10] 朱晟, 王永明, 翁厚洋. 粗粒筑坝材料密实度的缩尺效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 348—357.
ZHU S, WANG Y M, WENG H Y. Study of scale effect of density of coarse-grained dam materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 348—357. (In Chinese)
- [11] 朱晟, 梁现培, 冯树荣. 基于现场大型承载试验的筑坝原级配堆石料力学参数反演研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 155—160.
ZHU S, LIANG X P, FENG S R. Back analysis of mechanical parameters of naturally graded rockfill materials based on large-scale loading plate tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 155—160. (In Chinese)
- [12] 朱晟, 武利强, 魏匡民, 等. 一种基于分形理论的粗粒料缩尺方法: 103134906 [P]. 2013—06—05.
ZHU S, WU L Q, WEI K M, et al. A method of scaling of coarse grain based on fractal theory: 103134906 [P]. 2013—06—05. (In Chinese)
- [13] 赵娜, 左永振, 王占彬, 等. 基于分形理论的粗粒料级配缩尺方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3513—3519.
ZHAO N, ZUO Y Z, WANG Z B, et al. Grading scale method for coarse-grained soils based on fractal theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3513—3519. (In Chinese)
- [14] 陈镬芬, 朱俊高, 殷建华. 基于分形理论的粗粒土缩尺效应及强度性质研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(10): 121—124.
CHEN M F, ZHU J G, YIN J H. Study on scale and strength properties of coarse grained soil based on fractal theory [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(10): 121—124. (In Chinese)
- [15] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34—40.
CHENG Q, KOU X B, HUANG S B, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34—40. (In Chinese)
- [16] 赵明华, 邓颢宇, 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—5.
ZHAO M H, DENG J Y, CAO W G. 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—5. (In Chinese)
- [17] 陆厚根. 粉体技术导论 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1998: 125.
LU H G. Introduction to powder technology [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1998: 125. (In Chinese)
- [18] 朱忠喜, 柳贡慧, 岳达明, 等. 气体钻井岩屑运移破碎研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(1): 19—22.
ZHU Z X, LIU G H, YUE D M, et al. Study on gas drilling cuttings breaking during the return process [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(1): 19—22. (In Chinese)
- [19] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle size distribution: analysis and limitations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 362—370.
- [20] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 35—55.
FANG K T, MA C X. Orthogonal and uniform experimental design [M]. Beijing: Science Press, 2001: 35—55. (In Chinese)