

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201908065

## 压实黏土变角剪切试验及其尺寸效应\*

武立清<sup>1,3</sup>, 王俊杰<sup>1,2</sup>, 黄诗渊<sup>1,2</sup>, 张婧<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学重庆市高校水工建筑物健康诊断技术与设备工程研究中心, 重庆 400074; 3. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430050)

**摘要:** 滑带土的抗剪强度指标对于边坡稳定性分析具有重要作用, 相比于直剪试验, 变角剪切试验能更好的模拟滑带土的受力状态。利用岩土体变角剪切试验仪, 对不同尺寸试样进行变角剪切试验, 介绍了变角剪切试验研究压实黏土剪切参数的方法, 结合 Weibull 统计尺寸效应理论研究压实黏土尺寸效应。结果表明: 变角剪切试验结果符合幂函数型 Mohr 准则; 与直剪试验测得的剪切参数相比, 变角剪切试验得出的内摩擦角与直剪试验相近, 黏聚力较直剪试验大; 压实黏土的尺寸效应基本符合 Weibull 尺寸效应理论, 经过修正的 Weibull 尺寸效应式能更好地描述压实黏土剪切强度的尺寸效应。

**关键词:** 变角剪切试验; 压实黏土; 剪切参数; 尺寸效应

**中图分类号:** TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1295-06

## Study on Variable Angle Shear Test of Compacted Clay and Its Size Effect

WU Liqing<sup>1,2</sup>, WANG Junjie<sup>1,2</sup>, HUANG Shiyuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Engineering Research Center of Diagnosis Technology and Instruments of Hydro-Construction, Chongqing 400074, China; 3. CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Co.ltd., Wuhan 430050, China)

**Abstract:** The shear strength parameters of soil in shear band play an important role in slope stability analysis. Compared with the direct shear test, variable angle shear test can simulate the stress state of slip band soil better. In this paper, variable angle shear tests are carried out on specimens of different sizes by means of rock and soil fracture tester. The method of studying shear parameters of compacted clay by variable angle shear tests is introduced. The size effect is studied with Weibull statistical size effect theory. The research shows that the results of variable angle shear test conform to the power function Mohr criterion; compared with the shear parameters measured by direct shear test, the internal friction angle obtained by variable angle shear test is similar, and the cohesion force is larger; the size effect of compacted clay basically conforms to Weibull size effect theory, and the modified Weibull size effect formula can describe the size effect of compacted clay better.

**Keywords:** variable angle shear test; impacted clay; shear parameters; size effect

\* 收稿日期: 2019-08-26; 修回日期: 2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1865103)、重庆交通大学研究生教育创新基金项目(2019S0133)资助

作者简介: 武立清(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事水利工程和岩土工程研究。E-mail: wulq0315@126.com

# 引言

滑坡通常是斜坡岩土体在重力作用下,沿着一定的软弱面或者软弱带,顺坡向下滑动。取滑动带中的一个单元ABCD进行受力分析,土体ABCD受到上部岩土体自重和坡顶荷载作用,方向竖直向下(图1),可以分解为法向应力 $\sigma$ 和切向应力 $\tau$ ,对于ABCD,不论岩土体自重 $G$ 与坡顶荷载 $p$ 值的大小如何变化,法向压应力 $\sigma$ 与切应力 $\tau$ 的比值始终等于 $\cos\alpha/\sin\alpha$ ,在剪切过程中最大主应力始终为法向应力或始终为切向应力,不会发生转换。

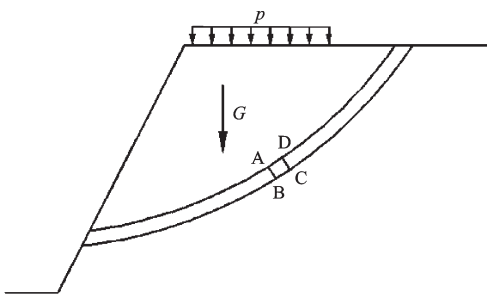


图1 滑动带示意  
Fig.1 Sketch of sliding zone

滑带土的抗剪强度指标对于边坡稳定性分析具有重要作用<sup>[1]</sup>。实验室常采用应变控制式直剪仪对试样进行直接剪切试验,测定土体抗剪强度指标。

直剪试验过程中,先对试样施加法向压力,然后上下剪切盒相对运动,对试样施加水平剪切力<sup>[2]</sup>。土体中法向压应力不变,切应力随应变 $\epsilon$ 增大而增大,直至试样破坏。剪切过程中,法向压应力 $\sigma$ 与切应力 $\tau$ 的比值不断减小,最大主应力可能由法向转换为切向。另外,直剪仪使用的试样通常尺寸较小,且仅能对一种尺寸的试样进行试验,忽略了尺寸效应对土体力学特性的影响。

柴肇云等<sup>[3]</sup>通过对泥岩试样的变角剪切试验,研究了泥岩压剪破坏过程中裂隙演化规律。对变角剪切试验过程中应力状态进行分析,发现最大主应力始终为法向应力或始终为切向应力,不会发生转换(最大主应力方向仅与 $\alpha$ 有关),土体单元受力分析如图2所示。相比于直剪试验,变角剪切试验能更好的模拟滑带土的受力状态。同时可以通过更换变角剪切仪夹具,测量不同尺寸试件的剪切强度参数。试验过程中,试样受到摩擦力和竖直方向

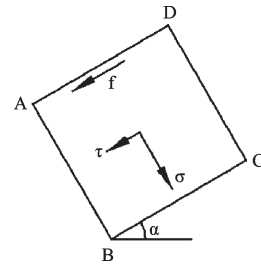


图2 土体单元受力分析  
Fig.2 Stress analysis of soil element

力 $P$ ,竖直力可分解为法向压力 $N$ 和切向力 $T$ , $\alpha$ 为试样底面与水平方向夹角,变角剪切试验受力分析如图3所示。

本文利用变角剪切试验的方法测试滑带土重塑样抗剪强度指标,讨论了变角剪切试验与直剪试验测得的剪切强度参数的关系,得出了直剪试验剪切强度参数与变角剪切试验剪切强度参数换算的修正系数;同时也对不同尺寸试样进行试验,最后结合Weibull统计尺寸效应理论,研究压实黏土剪切强度的尺寸效应。

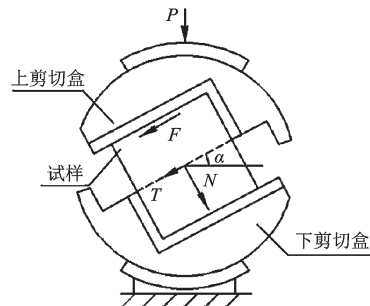


图3 变角剪切试验受力分析  
Fig.3 Force analysis of variable angle shear test

## 1 试验方法

### 1.1 试样制备

李远耀等<sup>[4]</sup>整理三峡库区近400处滑坡资料,发现三峡库区各类滑带土多为粉质黏土、黏土或粉质黏土、黏土夹碎石。本次试验采用重庆地区三峡库区黏土料制成重塑土样模拟滑带土,其基本物理性质为:土粒比重 $G_s=2.71$ ,液限 $w_L=50\%$ ,塑限 $w_p=30\%$ ,塑性指数 $I_p=20$ ;变角剪切试验所用的试样形状为立方体,边长75 mm,在专用的模具中制备。制样时,将试验用土料分三层击实,控制试样干密度为 $1.68 \text{ g/cm}^3$ ,含水率为 $12\%$ 。为研究压实黏土

的剪切强度尺寸效应,制备四种不同尺寸的立方体试样(图4),尺寸分别为:75,100,150,200 mm。

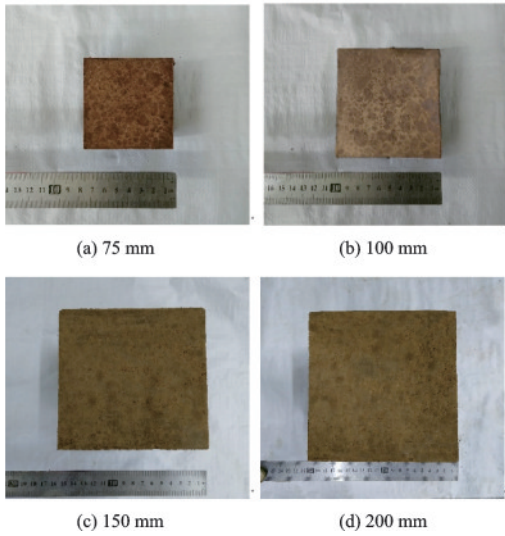


图4 不同尺寸试样示意

Fig.4 Specimen with different sizes

## 1.2 试验方案

变角剪切试验应选择适当的角度进行,角度过大,会产生力偶作用,在试样内部形成拉应力;角度过小,可能因试样受压应力过大,出现破裂不沿预定截面发生的现象<sup>[3]</sup>。根据前期试验经验,确定采用试样垂直方向倾斜70°,60°,50°,45°,35°五个不同角度进行剪切试验。为研究压实黏土剪切强度的尺寸效应,制备四种不同尺寸的压实黏土试样。试验位移加载速率为1 mm/min。具体试验方案见表1。为避免偶然性,同一种试样制备3个,即进行3组平行试验,得到的试验指标取平均值。

表1 试验方案  
Table 1 Test schedule

试验方案	角度/(°)	试样尺寸/mm	加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )
不同角度压剪	70	75	1.0
	60	75	
	50	75	
	45	75	
	35	75	
不同尺寸压剪	60	75	1.0
	60	100	
	60	200	

## 2 试验结果及分析

### 2.1 变角剪切试验结果

在变角剪切试验过程中,裂缝首先出现在试样中部,并沿预定剪切面扩展;随着剪切过程的进行,裂缝继续扩展,试样与夹具接触边缘部分出现近似试样倾斜角度 $\alpha$ 的细小裂缝;继续剪切,试样最终沿预定剪切面破坏。试样与夹具接触的边缘部分开展的裂缝为局部压应力所致,但试样的破坏仍以沿剪切面的剪切破坏为主。 $\alpha=60^\circ$ 试验过程如图5所示。

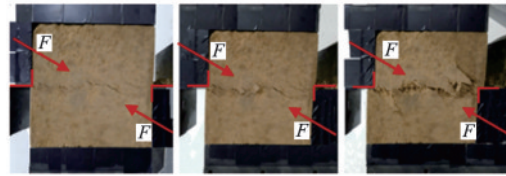


图5 60°剪切试验过程

Fig.5 Failure process with 60° shear angle

Mohr认为<sup>[5]</sup>,材料的破坏是剪切破坏,当任意一平面上的剪应力等于材料的剪切强度时材料就发生破坏,并提出,破坏面上的剪应力 $\tau_f$ 是该面上法向应力 $\sigma_n$ 的函数,满足如下函数关系:

$$\tau_f = f(\sigma_n) \quad (1)$$

一般在应力范围较小时,近似的认为强度包络线为线性函数<sup>[5]</sup>。将包络线简化为直线,即为Mohr-Coulomb准则,其表达式为:

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (2)$$

式中, $\tau_f$ 为剪应力峰值; $\sigma_n$ 为正应力; $c$ 为材料的黏聚力; $\varphi$ 为材料的内摩擦角。

事实上,强度包络线是一条曲线。因此许多学者对Mohr强度理论进行修正<sup>[6-7]</sup>,修正的Mohr强度理论主要是将其强度包络线修正为曲线,包括双曲线型,抛物线型及幂函数型等。

变角剪切试验剪切面与水平面间的夹角可通过转动仪器上下剪切盒进行调整。断裂面上的正应力 $\sigma$ 和剪应力 $\tau$ 可根据下式计算:

$$\sigma = \frac{P}{A} (\cos \alpha + f \sin \alpha) \quad (3)$$

$$\tau = \frac{P}{A} (\sin \alpha + f \cos \alpha) \quad (4)$$

式中, $P$ 为试样剪断破坏载荷; $A$ 为剪切面面积; $\alpha$ 为

试样放置角度;  $f$  为摩擦系数, 本次试验在试样与仪器间涂抹润滑油, 摩擦系数较小, 近似取为 0。

经过计算, 变角剪切试验得到的压实黏土的剪切强度如图 6 所示。观察试验数据发现, 与传统的直线型 Mohr-Coulomb 准则相比, 采用幂函数型 Mohr 准则能更好的拟合试验数据, 得到强度包络线。幂函数型 Mohr 强度包络线的一般表达式为:

$$S(\sigma) = a\sigma^b + c \quad (5)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为材料常数;  $c$  为材料黏聚力;  $S(\sigma)$  表示强度包络线。

$a$ 、 $b$ 、 $c$  必须满足以下条件:  $a \geq 0$ ,  $c \geq 0$  且  $1/2 \leq b \leq 1$ 。当  $b=1$  时, 式(5)退化为直线型 Mohr 强度准则,  $a = \tan\varphi$ ; 当  $b=1/2$  时, 式(5)退化为 Griffith 强度准则, 此时  $a = 1/4R_t$ 。当  $1/2 \leq b \leq 1$  时, 幂函数型 Mohr 强度准则是直线型 Mohr-Coulomb 准则与 Griffith 强度准则的组合<sup>[6]</sup>。

本文采用幂函数型 Mohr 强度准则拟合试验数据, 得到压实黏土幂函数型 Mohr 强度包络线方程为:

$$\tau = 10.77\sigma^{0.51} + 185.36 \quad (6)$$

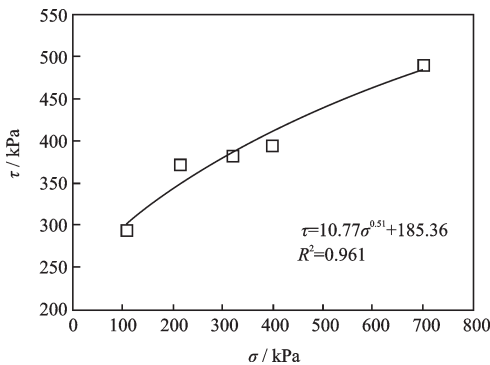


图 6 幂函数型 Mohr 强度包络线

Fig.6 Power function mohr failure envelope

由试验结果可得, 压实黏土的黏聚力  $c = 185.36$  kPa, 另外, 因为  $S(\sigma)$  的导数  $S'(\sigma)$  是内摩擦角  $\varphi(\sigma)$  的正切值, 故可根据(5)式反算得内摩擦角:

$$\varphi(\sigma) = \arctan(ab\sigma^{b-1}) \quad (7)$$

由式(7)计算得,  $\sigma$  等于 200, 300, 400 kPa 时的内摩擦角分别为  $22.2^\circ$ ,  $18.6^\circ$ ,  $16.3^\circ$ , 平均值为  $19.03^\circ$ 。试验结果表明: 幂函数型 Mohr 强度准则能够较好地反映压实黏土的剪切强度特征。

## 2.2 关于试验结果的讨论

观察上述试验数据, 笔者发现变角剪切试验得

出的黏聚力值较大, 对此, 笔者设计了测量土体剪切强度常用的直剪试验与上述试验对比。

直剪试验选用仪器为 DZ-4 型四联直剪仪, 采用同种黏土料, 控制试样干密度为  $1.68 \text{ g/m}^3$ , 含水率为 12%, 试验剪切速率为  $1.0 \text{ mm/min}$ , 每种试样分别施加 4 个不同大小的法向应力: 100、200、300、400 kPa, 为避免偶然性, 同一试验安排 3 组平行试验, 并对试验结果取平均值。

将直剪试验结果绘制于以法向应力为横坐标, 剪切强度为纵坐标的直角坐标系中, 并拟合得到强度包络线。由于法向应力范围较小, 仅为 100~400 kPa, 再加上试验数据点十分接近线性分布, 故采用 Mohr-Coulomb 准则对试验结果进行拟合<sup>[6]</sup>。

$$\tau_f = c + \sigma \tan\varphi \quad (8)$$

式中,  $\tau_f$  为剪切强度;  $c$  为黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角;  $\sigma$  为正应力。

得到的拟合曲线如图 7 所示。由拟合曲线得压实黏土的黏聚力为 129.37 kPa, 内摩擦角为  $20.47^\circ$ 。与变角剪切试验结果对比容易发现, 两种试验得出的内摩擦角值接近, 但变角剪切试验得出的黏聚力值较大。可以通过乘以修正系数的办法, 通过直剪试验测量的剪切强度参数预测变角剪切试验测量的剪切强度参数。

$$c_v = \alpha c_d \quad (9)$$

$$\theta_v = \beta \theta_d \quad (10)$$

式中,  $c_v$  为变角剪切试验得出的黏聚力值;  $c_d$  为直接剪切试验得出的黏聚力值;  $\theta_v$  为变角剪切试验得出的内摩擦角值;  $\theta_d$  为直接剪切试验得出的内摩擦角值;  $\alpha$ 、 $\beta$  为修正系数, 对于本试验采用的压实黏土,  $\alpha = 1.4$ ,  $\beta = 1.1$ 。

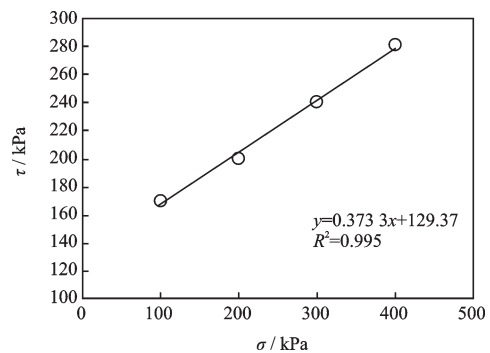


图 7 直剪试验强度包络线

Fig.7 Strength envelope of direct shear test

### 2.3 尺寸效应分析

目前,针对脆性与准脆性材料的尺寸效应研究主要有以下三种理论<sup>[8]</sup>:(1)统计理论的尺寸效应理论;(2)基于能量释放的尺寸效应理论<sup>[9]</sup>;(3)基于裂纹分形特征的尺寸效应理论<sup>[3]</sup>。

1926年Peirce<sup>[8]</sup>给出了最薄弱环节模型链的公式表达形式,同时介绍了Tippett<sup>[10]</sup>提出的极值统计理论,后来的学者对该理论进行修正和完善,其中Weibull做出了重大的贡献。Weibull<sup>[8]</sup>提出了统计学中著名的Weibull分布,他建议利用具有阈值的幂函数来描述强度极值的分布规律。

Weibull经典统计尺寸效应理论被广泛应用于岩土体尺寸效应研究中。Weibull理论应用于均匀应力场时的表达式为<sup>[9-12]</sup>:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1/m} \quad (11)$$

式中, $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 为试件的平均强度; $V_1$ 、 $V_2$ 为试件的体积; $m$ 为材料常数。

本次试验的破坏标准取剪切应力 $\tau$ 与剪切位移 $s$ 曲线上的峰值作为试样的剪切强度,无峰值时,取15%剪切应变时的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 值作为剪切强度。不同尺寸试样的压剪试验典型曲线如图8所示。试验结果表明:随着应变的增加,剪切应力也不断增加,但增加速度逐渐减小,剪切应力最终趋于稳定,剪应力-剪位移曲线没有明显的峰值。对不同尺寸的试验结果运用Weibull尺寸效应理论进行拟合,拟合时采用正交距离回归算法,得到 $m=3.302$ , $R^2=0.992$ 。

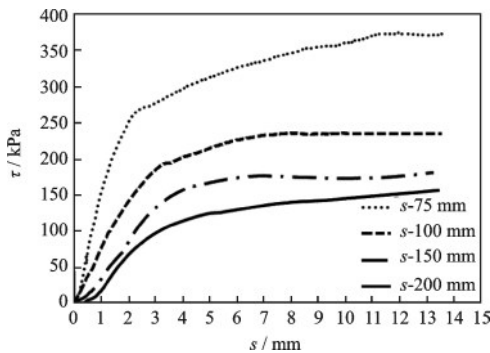


图8 不同尺寸试样典型试验曲线

Fig.8 Typical test curve of different specimen sizes

何渐渐等<sup>[13]</sup>根据混凝土单轴压缩试验,对式(11)进行了修正:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left( \frac{V_2 a_1}{V_1 a_2} \right)^{1/m} \quad (12)$$

式中, $a$ 为试件短边尺寸。

然而,混凝土与压实黏土的性质有很大的不同,直接运用现有的混凝土和岩石的尺寸效应理论是不准确的。Weibull尺寸效应式只包含1个材料参数 $m$ ,笔者认为,应该在Weibull尺寸效应式的基础上再增加1个材料参数来描述压实黏土的尺寸效应,修正后的表达式如下:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left( \eta \frac{V_2}{V_1} \right)^{1/m} \quad (13)$$

运用式(13)对本次试验结果进行拟合,得到 $\eta=1.5$ , $m=3.79$ ; $R_2=0.999$ 。

### 3 结 论

(1)通过一组变角剪切试验,采用幂函数型Mohr准则,可以得到压实黏土的强度包络线,同时可以计算出压实黏土剪切强度参数 $c$ , $\varphi$ 值。

(2)变角剪切试验测得的内摩擦角值与直剪试验测得的值相近,但内摩擦角值较直剪试验所得值大,通过乘以一个修正系数 $\alpha=1.4$ ,可实现与直剪试验粘聚力值的转化。

(3)压实黏土的尺寸效应基本符合Weibull尺寸效应理论,在Weibull尺寸效应式的基础上再增加1个材料参数能够更好地描述压实黏土的尺寸效应。

### 参考文献:

- [1] 刘小丽,邓建辉,李广涛.滑带土强度特性研究现状[J].岩土力学,2004,25(11):122-126.(in Chinese)  
Liu X L, Deng J H, Li G T. Shear strength properties of slid soils of landslides: an overview [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 122-126.(in Chinese)
- [2] Wang J J, Zhang H P, Wen H B, et al. Shear strength of an accumulation soil from direct shear test [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2015, 33 (2) : 183-190.
- [3] 柴肇云,康天合,陈维毅,等.泥岩压剪破坏裂隙演化规律及其分形特征[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增2):3844-3850.  
Chai Zh Y, Kang T H, Chen W Y, et al. Fracture evolutionary rules of mudstone under coupled compression

- and shear and its fractal characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup 2):3844-3850.(in Chinese)
- [4] 李远耀, 殷坤龙, 柴波, 等. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1419-1424.
- Li Y Y, Yin K L, Chai B, et al. Study on statistical rule of shear strength parameters of soil in landslide zone in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1419-1424.(in Chinese)
- [5] 周春梅, 程月, 王勇, 等. 压实黄土抗剪强度参数影响因素研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 258-264.
- Zhou Ch M, Cheng Y, Wang Y, et al. Study on influencing factors of shear strength parameters of compacted Loess [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 258-264.(in Chinese)
- [6] 刘海明, 杨春和, 张超, 等. 高压下尾矿材料幂函数型摩尔强度特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1986-1992.
- Liu H M, Yang Ch H, Zhang Ch, et al. Study of characteristics of power function Mohr strength criterion for tailings material under high pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 1986-1992.(in Chinese)
- [7] 陈卫忠, 刘豆豆, 杨建平, 等. 大理岩卸围压幂函数型 Mohr 强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2214-2220.
- Chen W Zh, Liu D D, Yang J P, et al. Power function based Mohr strength criterion for marble with unloading confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2214-2220.(in Chinese)
- [8] 王文标, 黄晨光, 赵红平, 等. 结构破坏的尺度律[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 383-433.
- Wang W B, Huang Ch G, Zhao H P, et al. Scaling of structural failure[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(3): 383-433.(in Chinese)
- [9] Bazant Z, Chen E P. Scaling of structural failure [J]. Applied Mechanics Reviews, 1997, 50(10):593-627.
- [10] Tippett L C. On the extreme individuals and the range of samples taken from a normal population [J]. Biometrika, 1925(3/4):3-4.
- [11] 周江平, 彭雄志. 土体抗剪强度的尺寸效应[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(1): 77-81.
- Zhou J P, Peng X Zh. Investigation on size effect of shear strength of soil[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(1): 77-81.(in Chinese)
- [12] 梁正召, 张永彬, 唐世斌, 等. 岩体尺寸效应及其特征参数计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1157-1166.
- Liang Zh Zh, Zhang Y B, Tang S B, et al. Size effect of rock masses and associated representative element properties [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1157-1166.(in Chinese)
- [13] 何渐渐, 徐积善. 混凝土拉、压强度尺寸效应的研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(4): 49-55.
- He X X, Xu J Sh. Size effect of compressive or tensile strength of concrete [J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(4): 49-55.(in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)