

硬性结构面表面起伏形态测量及其尺寸效应研究

吉 锋, 石豫川

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 结构面表面形态与其力学性质密切相关, 对结构面表面形态进行精细测量是研究结构面变形和强度等力学机理的基础。在分析国内外结构面测量仪器优缺点基础上, 利用自主研发的新型便携式测量仪器——接触打孔器对硬性结构面进行机械化精细测量, 应用效果表明: 由接触打孔器获得的结构面粗糙度 JRC 值与结构面表面实际的 JRC 值十分接近。在此基础上, 对硬性结构面进行尺寸效应分析, 获得了结构面表面 JRC 值的统计方差随测量长度逐渐衰减的规律, 并且计算分析了粗糙度对结构面剪切强度影响的极限长度, 最后通过强风化粉砂岩节理、新鲜砂岩层面、泥岩层面进行了分析。结果表明, 对于研究区强风化粉砂岩构造节理, 当取样长度大于 50cm 时, 可以消除剪切方向上起伏粗糙度尺寸效应; 对于平直新鲜泥岩层面、平直的新鲜砂岩层面, 当取样长度大于 5cm 时, 可以消除剪切方向上起伏粗糙度尺寸效应。

关键词: 结构面; 表面形态; 测量工具; 接触打孔器; 强度尺寸效应

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)04-0063-06

硬性结构面的起伏粗糙程度与结构面强度密切相关^[1], 而硬性结构面表面一般起伏不平, 如何快速、准确地测量结构面表面形态是参数研究的关键点之一。目前, 硬性结构面起伏曲线测量有激光法、机械法两种。激光法测量精度较高, 但是测量仪器需要标准岩石断面, 受测量尺寸限制, 主要在实验室内应用。目前常用的激光测量结构面断面尺寸为 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \sim 15\text{cm} \times 15\text{cm}$, 其范围不能消除由于表面起伏造成的尺寸效应影响, 若按照大尺度进行取样分析, 按照岩石样品厚 20cm, 取样尺寸 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$, 重度 27kN/m^3 , 其重量约 135kg, 该岩样在室内进行搬运和放置均不方便, 因此, 结构面的大尺度分析要在野外进行, 但在野外受结构面露头范围或取样条件限值, 激光测量仪器不易使用, 尤其是在隧洞、地下水丰富地段, 激光测量仪器无法使用。野外常规测量方法主要是利用百分表测量结构面表面的起伏值, 然后绘制成线, 其测量的精度和绘制速度也均不理想, 而且手工测量仪器速度较慢, 尤其是在隧洞、含水地带等工作条件较差的情况下, 其工作条件不充足。为此, 笔者通过长期研究, 自主研发了一种新型的、可以实现结构面机械化测量的仪器——接触打孔器 CPD(Contact - Punching Device)(图 1、图

2)。该仪器在野外方便易用, 可连续测量数米长的结构面, 这是室内激光扫描仪不易实现的。

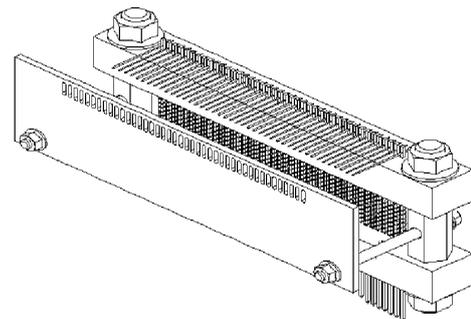


图 1 接触打孔器侧视图

Fig. 1 Side view of the contact punching device

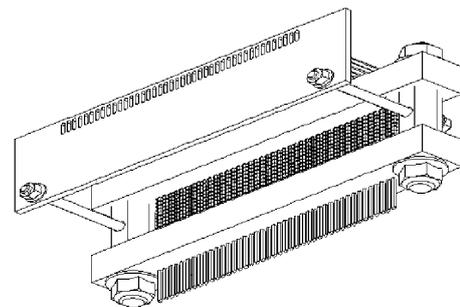


图 2 接触打孔器下侧视示意图

Fig. 2 Down-side view of the contact punching device

收稿日期: 2010-12-28; 修订日期: 2011-05-16

作者简介: 吉锋(1980-), 男, 博士, 主要从事岩土及工程地质教学及科研工作。

E-mail: jeifens@163.com

1 仪器构造特征及其应用

该仪器主要采用机械装置组成,通过可以上下自由活动的接触钢针反映结构面的起伏程度,然后推动垫纸板向打孔针方向运动,打孔针便在纸带上打下孔点,将这些孔点连接成线即为所要测量结构面起伏曲线。接触打孔器各部件的技术参数及主要功能如图 3、图 4 所示。

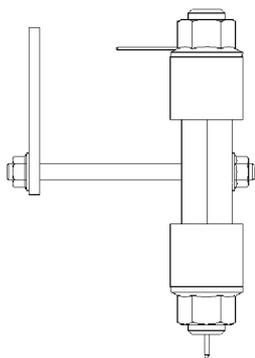


图 3 接触打孔器剖面外观图

Fig. 3 Section of the contact punching device

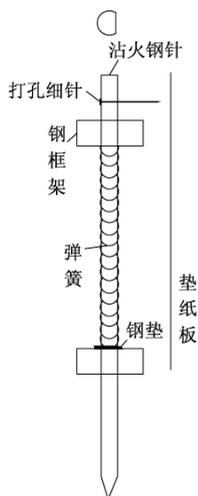


图 4 接触打孔器内部构造图

Fig. 4 Internal structural map of the contact punching device

沾火接触钢针: 共 42 根,间距 5mm,直径 3mm,该钢针上垂直镶嵌有打孔细针。为阻止接触钢针在工作时旋转,其断面特制为“Ω”型,钢针每根长 10cm,上下活动范围 3cm。

打孔细针: 用于横向打孔,直径 0.7mm。

钢框架: 45# 钢材料,为仪器框架。

弹簧: 弹簧直径略大于沾火接触钢针,当钢针受结构面凸起部位顶托时,其随着钢垫一起上升,当测量结

束时,弹簧能保证沾火钢针回归原位。

钢垫: 其固定于沾火钢针上,防止弹簧自由活动,保证钢针测量后及时归原位,使其克服重力作用,从而可以方便地测量包括平硐顶部结构面、竖直结构面在内的各个方位的结构面。

垫纸板: 其上开有 42 个方孔,方孔与打孔细针相对应。当打孔针随结构面起伏时,将白纸附于垫纸板上沿导向轴横向拉动,则钢针会在白纸上打孔,将离散各点用曲线连接,则为测量的起伏曲线。

岩石表面形貌的测量主要步骤如下: (1) 使用前,将测量仪器平行放置于岩石结构面之上; (2) 轻轻向下压仪器框架,当仪器向下运动时,接触钢针由于受到不同起伏程度结构面的顶托而向上运动; (3) 接触钢针随着下伏结构面的高低不平而呈现出不同的起伏量程; (4) 将纸带放入垫纸板,将纸带沿着导向轴向打孔细针方向移动、打孔,则纸带上出现了凹凸不平的针点; (5) 将这些凹凸不平的针点连接成线,就得到了结构面的起伏曲线。

在野外工作中,选择接触打孔器对结构面的起伏形态进行测量,可为进一步利用 Barton 公式预测结构面粗糙度 *JRC* 和最终的强度参数提供必要条件。图 5 为该仪器测量成果与结构面表面实际曲线对比图。通过对比可知,由接触打孔器测得的结构面粗糙度 *JRC* 值为 6.4,与结构面表面实际图的 *JRC* 值(6.90)十分接近^[5]。

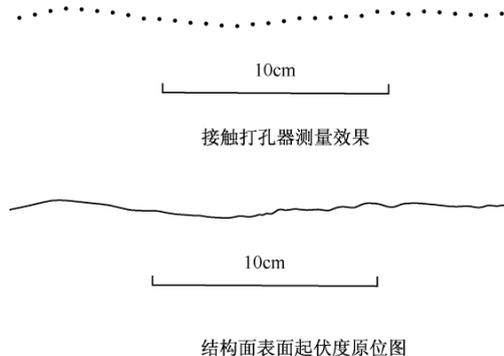


图 5 接触打孔器测量效果对比图

Fig. 5 Application and the result of comparing with pursuing of the contact punching device

2 结构面强度尺寸效应研究

根据大量试验成果可知,结构面试样尺寸大小对其强度有一定影响,称为强度尺寸效应。试验资料表明:一般情况下,随着样品尺寸的增大,结构面抗剪强度会减小,但这种减小并不是无限的,当剪切面积增大至 2 500cm² 以后抗剪强度减小缓慢,至 5 000cm² 以后

基本稳定,即剪切样品达到一定尺寸时可以消除节理表面起伏对剪切成果的影响。

硬性结构面剪切试验中,样品多大尺寸时可以消除节理表面起伏对强度的影响?亦即:能忽略尺度效应对强度影响的结构面极限尺寸 L_n 如何确定?这一问题在理论上要给出严格解比较复杂,笔者通过长期试验和理论研究,认为以下思路可一定程度上解决尺寸效应问题。众所周知,各向异性和各向同性都是相对一定刻度而言,比如对于小型剪切样品,结构面起伏对试验成果影响很大,但是当剪切样品尺寸达到一定程度时,结构面起伏度相对于剪切成果影响很小,此时任取一段岩石样品,其 JRC 基本相同。此时的样品尺寸即为可忽略结构面起伏影响的极限长度,那么这个界限长度如何确定呢?

首先,将用接触打孔器测量的岩石表面曲线分别按照 10cm、20cm、30cm、 \dots , 等分为众多曲线,计算不同岩样长度的 JRC 值^[5]。包括 JRC_{10} 、 JRC_{20} 、 \dots 、 JRC_{L_n} (JRC_{10} 、 JRC_{20} 、 \dots 、 JRC_{L_n} 分别代表取样长度 10cm 时的 JRC 值、取样长度 20cm 时的 JRC 值、 \dots 、取样长度 L_n 时的 JRC 值)。

其次,计算 JRC_{10} 、 JRC_{20} 、 \dots 、 JRC_{L_n} 数据集的平均值和方差,可知当测量长度达到一定程度时,结构面的起伏粗糙度相对于剪切强度影响甚微,即存在如下规

律:当测量长度为 10cm 时,该样品的起伏度对剪切成果影响较大,故大量 JRC_{10} 数据集的方差较大;当测量长度为 20cm 时,由于起伏度相对剪切样品尺寸而言减小,起伏度对剪切成果影响幅度亦减小,则 JRC_{20} 数据集的方差亦减小;依次类推,当测量长度为 L_n 时,任意取 L_n 或大于 L_n 长度所测的 JRC 值均基本稳定,即 JRC_{L_n} 数据集的方差为零,或总体标准差满足置信水平为 0.95 的置信区间,则此时的 L_n 即为可忽略尺寸效应的界限长度(也就是说,此时在该岩样剪切方向上任意取 L_n 长度,其 JRC 值均相差不大,不会再存在由于结构面起伏而对剪切结果的影响)。

3 工程实例分析

为研究不同岩性和风化程度结构面的起伏形态尺寸效应,本次在某高速公路开挖边坡中选择侏罗系浅灰色强风化粉砂岩、紫红色新鲜泥岩、浅灰色新鲜砂岩进行分析。

(1) 浅灰色强风化粉砂岩

该起伏曲线选自于侏罗系强风化砂岩,采用自主研发的接触打孔器绘制结构面曲线,结构面总长 2.8m,表面起伏不平,远看近似直线(图 6(a)),近距离观察可知其起伏形态各异,起伏粗糙度各向异性十分明显(图 6(b))。

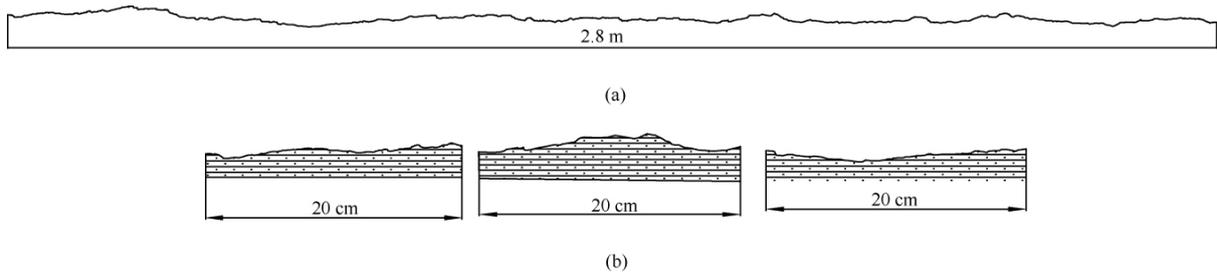


图 6 强风化粉砂岩曲线轮廓图

Fig. 6 Surface curve of intensively weathered siltstone

通过对 2.8m 长起伏曲线进行量化数据处理,得到该曲线 JRC 值为 8.66^[5]。当将整个曲线按照 10cm 均匀分割后,得到的 JRC 平均值为 7.16;当将整个曲线按照 20cm 均匀分割后,得到的 JRC 平均值为 7.34;当将整个曲线按照 30cm 均匀分割后,得到的 JRC 平均值为 7.89,当将整个曲线按照 50cm 均匀分割后,得到的 JRC 平均值为 8.30,此时总体平均值置信水平为 95% 的置信区间为 (7.74, 9.0),而且 2.8m 长曲线的总体 JRC 值 8.66 隶属于此区间内,表明此时均值方差满足要求,亦即当取样长度达到 50cm 后,任意所

截曲线 JRC 值基本相当,在剪切方向上结构面起伏粗糙度不会再对计算结果产生大的影响,尺寸效应分析结果如表 1 所示。

(2) 紫红色新鲜泥岩色

该段泥岩结构面总长 29cm,表面光滑,略微波状起伏(图 7),通过对起伏曲线总长进行数据处理,得到其 JRC 值为 2.79^[5]。当将整个曲线按照 5cm 均匀分割后,得到的 JRC 平均值为 3.01,此时平均值置信水平为 95% 的置信区间为 (1.39, 4.63);当将整个曲线按照 10cm 均匀分割后,得到的 JRC 平均值为 2.72;

表 1 强风化粉砂岩结构面粗糙度尺寸效应分析

Table 1 Size effect of intensively weathered siltstone

均匀分割长度(cm)	JRC 值	均值	置信水平 95% 的置信区间	总长 JRC 值是否属置信区间
	8.29			
	6.95			
	8.73			
	7.39			
10	8.88	7.17	(6.3 8.0)	否
	6.44			
	5.52			
	6.33			
	8.31			
	4.83			
	7.92			
	8.12			
20	7.68	7.35	(6.6 8.0)	否
	6.14			
	6.88			
	8.43			
30	7.97	7.89	(7.2 8.5)	否
	7.28			
	8.05	8.38		
50	9.32	(7.7 9.0)	是	
	8.22			
	7.92			
	8.3			
60	8.7	8.5	(8.3 8.7)	是
	8.5			

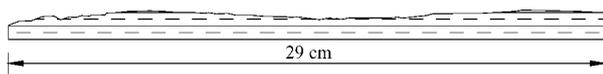


图 7 新鲜泥岩曲线轮廓图

Fig. 7 Surface curve of fresh mudstone

此时平均值置信水平为 95% 的置信区间为 (1.15 , 4.23) , 均值方差均满足要求(表 2) , 亦即当取样长度达到 5cm 后 , 任意所截结构面曲线的 JRC 值基本相当 , 在剪切方向上结构面起伏粗糙度不会再对计算结果产生大的影响。

(3) 浅灰色新鲜砂岩

该段新鲜砂岩轮廓曲线总长 56.3cm , 表面平直(图 8) , 通过对轮廓曲线全长进行数据处理 , 得到其 JRC 值为 4.0。当将整个曲线按照 2cm 均匀分割后 , 得到的 JRC 平均值为 3.77 , 此时平均值置信水平为 95% 的置信区间为 (3.10 , 4.46) ; 当将整个曲线按照 5cm 均匀分割后 , 得到的 JRC 平均值为 3.66 , 此时平均值置信水平为 95% 的置信区间为 (2.69 , 4.63) , 均值方差均满足要求 , 亦即当取样长度达到 5cm 后 , 任意所截结构面曲线的 JRC 值基本相当(表 3) , 在剪切

方向上结构面的起伏粗糙度不会再对计算结果产生大的影响。

表 2 新鲜泥岩结构面曲线粗糙度尺寸效应分析

Table 2 Size effect of fresh mudstone

均匀分割长度(cm)	JRC 值	均值	置信水平为 95% 的置信区间	总长 JRC 值是否属置信区间
	4.39			
5	3.09	3.01	(1.39 4.63)	是
	1.54			
	6.27			
	1.79			
10	2.64	2.72	(1.15 4.29)	是
	3.39			
	1.27			
	0.92			

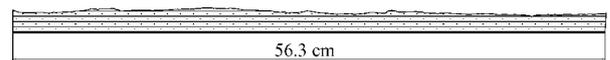


图 8 新鲜砂岩曲线轮廓图

Fig. 8 Surface curve of fresh sandstone

表 3 新鲜砂岩表面曲线粗糙度尺寸效应分析

Table 3 Size effect of fresh sandstone

均匀分割长度(cm)	JRC 值	均值	置信水平为 95% 的置信区间	总长 JRC 值是否属置信区间
	3.42			
2	4.12	3.77	(3.10 4.46)	是
	4.78			
	2.04			
5	3.59	3.66	(2.69 4.63)	是
	4.58			
	3.30			

通过以上分析可知 , 对于强风化粉砂岩 , 当取样长度大于 50cm 时 , 可以消除剪切方向上起伏粗糙度尺寸效应 , 这与试验中的认识相近 , 亦即对于表面起伏较大的结构面要用大型剪切试验(50cm × 50cm) 才能够较好地获得其强度参数; 对于平直光滑的新鲜泥岩 , 小型直剪试验能够较好地代表泥岩层面的参数; 对于平直的新鲜砂岩 , 当取样长度大于 5cm 时 , 可以消除剪切方向上起伏粗糙度尺寸效应。

4 结论

(1) 采用接触打孔原理自主研发了接触打孔器 , 其采用机械装置 , 经久耐用 , 可靠度较高 , 而且实现了测量的机械化 , 大大提高了野外工作效率。

(2) 通过室内外对比测量的结构面曲线 , 该仪器能够客观地反映结构面的表面起伏度。

(3) 通过对结构面尺寸效应研究 , 得到了消除起

伏粗糙度对剪切试验影响的极限尺寸计算方法,并将其应用于工程实践,结果表明:对于强风化粉砂岩,当取样长度大于50cm时,可以消除剪切方向上起伏粗糙度尺寸效应;对于平直光滑的新鲜泥岩,小型直剪试验能够较好地获得泥岩层面的参数;对于平直的新鲜砂岩,当取样长度大于5cm时,可以消除剪切方向上起伏粗糙度尺寸效应。

(4)影响结构面剪切的因素众多,包括边界条件,加载方式等,本文仅是针对剪切方向上的粗糙起伏度的尺寸效应予以了一定发展,还需进一步实践发展、验证。

参考文献:

- [1] 李庆松,杜守继. 经历剪切变形历史的岩石节理表面粗糙特性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 850 - 855. [LI Q S, DU S J. Surface roughness analysis of rock joints under different shear deformation histories[J]. Rock And Soil Mechanics, 2004, 25(6): 850 - 855. (in Chinese)]
- [2] 周枝华,杜守继. 岩石节理表面几何特性的三维统计分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1227 - 1232. [ZHOU Z H, DU S J. 3D statistic analysis of geometrical properties of a rock joint[J]. Rock And Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1227 - 1232. (in Chinese)]
- [3] 李志敬,朱珍德,朱明礼,等. 大理岩硬性结构面剪切蠕变及粗糙度效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2605 - 2611. [LI Z J, ZHU Z D, ZHU M L, et al. study on shear creep and roughness effect on hard discontinuities of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2605 - 2611. (in Chinese)]
- [4] 杜时贵,杨树峰. JRC快速测量技术[J]. 工程地质学报, 2002, 10(1): 98 - 102. [DU S G, YANG S F. A new technique for fast measurement of JRC [J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(1): 98 - 102. (in Chinese)]
- [5] 吉锋. 顺层边坡硬性结构面强度参数及工程技术研究[D]. 成都:成都理工大学, 2008. [JI F. Study on Strength Parameter of Hard Structural Plane and Engineering Technique for Consequent Slope [D]. Chengdu: Chengdu University doctor paper, 2008. (in Chinese)]
- [6] 张彦洪,柴军瑞. 考虑渗流特性的岩体结构面分形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3423 - 3429. [ZHANG Y H, CHAI J R. Study on fractal property of fractured rock mass considering seepage characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3423 - 3429. (in Chinese)]
- [7] 刘远明,夏才初,李宏哲. 节理研究进展及在非贯通节理岩体研究的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 682 - 687. [LIU Y M, XIA C C, LI H Z. Development in Joints Research and Its Application to Rock Mass Containing Discontinuous Joints [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 682 - 687. (in Chinese)]
- [8] 夏才初,孙宗顺. RSP—I型智能岩石表面形貌仪[J]. 水利学报, 1995, 3(6): 62 - 66. [XIA C C, SUN Z X. RSP—I Intelligent rock surface profilometer [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 3(6): 62 - 66. (in Chinese)]
- [9] 夏才初,孙宗顺,潘长良. 含波纹度的节理的形貌特征和剪切性质研究[C]//中国岩石力学工程学会第三次大会论文集,北京:中国科学技术出版社, 1994. [XIA C C, SUN Z X, PAN C L. Study on Waviness morphology and shear properties of joints [C]//Third General Assembly Technology of Rock Mechanics Engineering Society of China. Beijing: China Science and Technology Press, 1994. (in Chinese)]
- [10] Grasselli G. Shear strength of rock joints based on quantified surface description [D]. Lausanne, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology (EPEL) 2001.
- [11] LI Y S, XIA C C. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 467 - 475.

A study of the measuring and strength size effect of the surface shape of structure plane

JI Feng ,SHI Yu-chuan

(*State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection ,
Chengdu University of technology ,Chengdu 610059 ,China*)

Abstract: The surface shape of structure plane is closely related to its mechanics property. At present , the accurate measurement of structure plane surface shape is the foundation of the mechanism of studying the deformation and strength of structure plane. On the basis of examining the advantages and disadvantages of the measuring instrument , a kind of portable measuring instruments , a contact punching device , is innovatively developed , which has realized the mechanization that is finely measured the rigid structure plane , and has improved open - air working efficiency greatly. The size effect of rigid structure plane is also analyzed. The results indicate that the statistical variance of the undulating roughness of the structure surface decays gradually with length of the sample , and the limit length of the undulating roughness is obtained when the influence of shearing intensity of the structure is dispelled. Finally , it is proved through the embodiment of different rocks and different weathering rocks , indicating that this method can instruct the project well , and can be used in further popularizing.

Key words: structural plane; surface shape; measurement instrument; contact punching device; strength size effect

责任编辑: 张明霞

(上接第 57 页)

Experimental study on triaxial rheology property and constitutive model for sandstone

ZHU Bin¹ , WANG Zhi-liang^{1,2}

(1. *Department of Geotechnical Engineering ,Tongji University ,Shanghai 200092 ,China;*

*2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering
of Ministry of Education , Tongji University , Shanghai 200092 ,China*)

Abstract: Triaxial compression rheology tests for the sandstone from Jinping II Hydropower Station on Yalong River are conducted in this paper. Based on the recorded data , the change laws of axial strain , lateral strain , axial strain rate and lateral strain rate with time under different stress levels are obtained. Then , by using the Burgers constitutive model , the transient and steady creep of the sandstone can be reflected , and the related parameters are identified. This study may provide theoretical basis for analysis of long-term stability of surrounding rock in engineering.

Key words: sandstone; rheology; triaxial test; stress level; constitutive model

责任编辑: 张明霞