

黄土天然节理大型直剪试验研究

刘小军¹, 孔庆¹, 孙晓骥², 王震¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安, 710055 2. 西安长庆科技工程有限责任公司, 陕西 西安, 710021)

摘要: 黄土节理的抗剪强度及变形规律对工程稳定性有重要影响, 但目前对此的研究尚不充分. 为此本次研究首先采集了黄土天然垂直节理土样, 然后采用室内大型直剪试验方法, 研究了黄土天然节理的剪切强度及变形性质, 最后与小型直剪试验结果进行对比, 得到了尺寸效应对黄土节理剪切强度的影响规律. 结果发现, 大型直剪试验得到黄土节理剪切峰值内摩擦角为 47.37° , 小型直剪试验值为 35.17° ; 黄土节理直剪试验存在尺寸效应, 试样尺寸主要影响节理面起伏度对剪切强度的贡献, 尺寸越大, 其剪切强度也越大; 法向应力较小时, 初始剪切刚度较大, 应力—应变曲线存在峰值; 法向应力较大时, 初始剪切刚度较小, 应力—应变曲线无峰值, 剪切强度随应变增大而增大, 最终趋于稳定.

关键词: 黄土节理; 大型直剪试验; 剪切强度; 尺寸效应

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)05-0680-06

Large-scale direct shear test study on natural loess joint

LIU Xiaojun¹, KONG Qing¹, SUN Xiaoji², WANG Zhen¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Company limited of Changqing Sci. & Tech., Xi'an 710021, China)

Abstract: Shear strength and deformation law of loess joint has important influence on the engineering stability, but the research of this area is still inadequate. Therefore this study first collected loess vertical joints and natural soil samples, and then used the lab large-scale direct shear test method, in studying the natural joint shear strength and deformation properties of loess. Finally compared with small direct shear test results, the size effect of joint shear strength of loess are studied. Research has shown that large direct shear test to get the angle of internal friction peak is 47.37° , small direct shear test to get the angle of internal friction peak of 35.17° ; As the normal stress is small, initial shear stiffness is bigger, and the stress-strain curve peak; As the normal stress is larger, the initial shear stiffness is small, no peak stress-strain curve occurs, and the shear strength increases with strain, while ultimately tend to be stable. Loess joint size effect, and direct shear test mainly affects the sample size's contribution to the shear strength of joint surface fluctuation degree. The greater the size, the greater the shear strength.

Key words: loess joints; large-scale direct shear test; shear strength; Size effect

黄土节理在黄土地区普遍存在, 其抗剪强度及变形规律是影响工程稳定性的重要因素. 因此, 对黄土节理工程力学特性进行研究有重要意义. 目前, 已有一些学者研究了黄土节理的外貌特征、地域分布以及形成机制等特性^[1-3], 而对于黄土节理力学特性的研究则相对较少. 王铁行、罗扬^[4]等采用人工节理试样, 利用室内小型直剪试验, 对其强度和渗流问题进行了相关研究, 得出节理表面形态、干密度和含水量对黄土节理强度特性的影响规律. 对岩石节理力学特性的研究则较为充

分, 如 Barton^[5-6]等在大量节理剪切试验的基础上, 总结归纳得出岩体节理峰值强度公式. Gerra-rcdc 等^[7]在节理峰值强度理论分析的基础上, 提出岩体节理峰值强度理论公式. 对岩体节理的研究表明试样面积越大, 越接近节理真实的剪切受力状态. 如杨洁等^[8]使用尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的岩石节理试样, 通过大型直剪试验测定了岩石节理峰值强度, 并且建立了岩石节理强度模型. 刘明维等^[9]从工程实际出发, 讨论了岩体结构面直剪试验方法的选取原则, 并且通过大型直

收稿日期: 2017-01-17

修改稿日期: 2017-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408464); 陕西省教育厅基金专项资助(14JK1413); 西安建筑科技大学人才科技基金项目(RC1365)

第一作者: 刘小军(1983—), 男, 副教授, 主要从事岩土及地下工程方面的教学与研究工作. E-mail: liuyu8345@163.com

剪试验研究了岩体结构面性状对结构面强度的影响以及水对结构面强度的弱化作用。胡伟^[10]研究了大型直剪试验的改进与应用,周志刚等^[11]则通过数值模拟研究了大型直剪试验的尺寸效应。

如前文所述,现有对于黄土节理剪切强度的研究,试样仅仅采用人工节理土样。人工节理试样表面形态单一,与天然节理面的复杂多变有着较大的差别,因此人工节理并不能很好的模拟天然节理。同时,还未有使用大型直剪试验仪器对黄土节理剪切强度进行研究,与小型直剪试验相比,大型直剪试验由于试样面积较大,能更好的模拟黄土节理剪切受力状态,试验结果更加接近实际情况。

考虑到黄土节理的复杂性以及目前对黄土节理抗剪强度特性研究的不足,项目组进行了大量野外调研,并选择合适场地采集了典型天然节理土样。根据黄土节理表面形态的判别标准,制备表面形态近似相同的试样,然后采用室内大型直剪试验方法,研究了黄土天然节理的剪切强度及变形性质。

1 黄土节理大型直剪试验

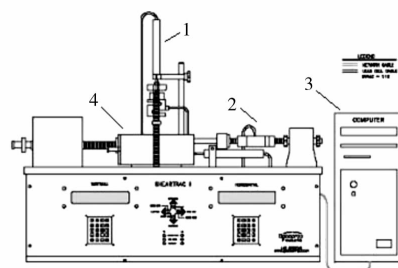
1.1 试验仪器介绍

本次试验采用西安建筑科技大学岩土工程实验室的土工大型界面剪切仪试验设备。该设备具有大型直剪系统 ShearTrac-III,可以自动完成土和土工纺织物的直剪试验,从而确定土和土工纺织物的强度特性,其试样尺寸为 305 mm×305 mm×200 mm。

该试验仪器的基本结构如图 1 所示。系统硬件由荷载架、水浴箱、剪切盒、电脑四个部分组成。其中荷载架有独特设计的荷载架包括 2 个嵌入式的控制系统,对试样产生水平和垂直方向的力,同时也测量水平和垂直方向的力和位移。两个 LCD 显示屏和键盘允许操作者手动操作 ShearTrac-II 荷载架并监视系统状态。水浴箱是包含剪切盒的容器,使试样一直浸泡在水中,并且可以在剪切实验阶段水平移动。

ShearTrac-III 是一个智能加载系统,根据传感器的反馈实时控制加载架。该系统有 2 个力传感器(水平和垂直)和 2 个位移传感器(水平和垂直)。电脑根据测试设定值对加载架进行加载和卸载。荷载架的操作都由电脑控制全自动完成,也可通过仪器前面板进行手动操作。为了避免损坏仪器,电脑每秒钟会对所有传感器的读数进行数百次检查,

任何模拟读数或数字读数超过允许的范围时对步进电机进行保护。电脑和监视器可实时显示测量结果,编辑测试结果和测试完成后出报告。



1—垂直加载系统 2—水平加载系统 3—电脑 4—剪切盒

(a) 剪切试验系统结构示意图



(b) 剪切试验系统实物照片图

1—垂直加载系统 2—水平加载系统 3—电脑 4—剪切盒

图 1 试验仪器

Fig. 1 Test instrument

1.2 试样制备

本次研究在大量野外调研的基础上,从陕西省彬县选取适合的场地采集土样。由于场地地形以及试验土样面积(土样面积较大)的限制,取得完整节理原状试样存在较大困难。经过反复试验,课题组自行制备了取土工具,最终采用以汽油锯和人工挖土相结合的方法,成功取得原状节理试样。为了模拟天然节理状态,土样含水量取天然含水量。因此在取得原状土样后,立刻用塑料膜密封土样,以保持土样含水量不发生变化。

试验需保证土样节理表面形态相同。因此首先利用轮廓曲线仪对黄土节理试样表面形态进行量测,计算得到高度均方根 z_1 、峰点密度 η 、坡度均方根 z_2 三个形态参数。参照岩石节理的研究方法^[12]运用模糊数学方法对节理面进行分级,具体分级方法限于篇幅,不在此文中赘述。最后利用表面形态分级指标 R_j 对节理试样进行分类,选取 R_j 值接近的土样认为其表面形态相同,作为试验土样。在室内制备土样时,保持节理上下表面保持原始吻合状态,再制成尺寸为 305 mm×305 mm×200 mm 的试样。图 2 为取土过程和试样制备,采集土样的物理指标见表 1。

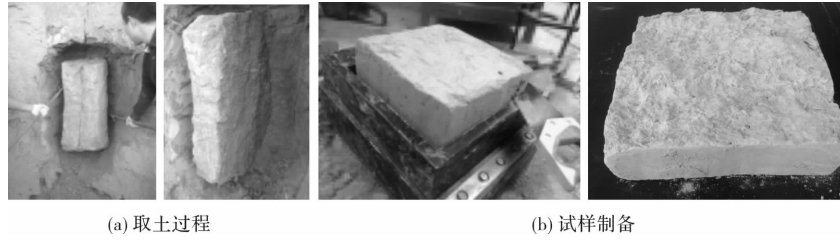


图 2 取土及试样制备

Fig. 2 Soil and sample preparation

表 1 土样的物理指标

Tab. 1 Physical indexes of the soil

土样物理指标	干密度 $\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比/ e	塑限/ U_L	液限/ U_P	塑性指数/ I_P	饱和含水 量/%	天然含 水量/%
物理指标数值	1.32	1.09	16.87	28.11	11.24	40.62	6.57

1.3 直剪试验方法

试验采用了 8 组黄土节理土样, 为了试验结果的精确性, 进行了两组平行试验. 试样含水量为天然含水量, 含水量很小, 所以不考虑排水问题. 施加的法向应力分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa 及 200 kPa, 为使上下节理面充分闭合, 在施加法向应力后, 等到节理面法向位移稳定后再开始剪切试验. 试验采用快剪法, 剪切速率为 $v = 0.8 \text{ mm/min}$, 待剪切强度稳定后, 停止试验, 试验时间一般持续 20~30 min 不等.



图 3 实验过程

Fig. 3 Experimental process

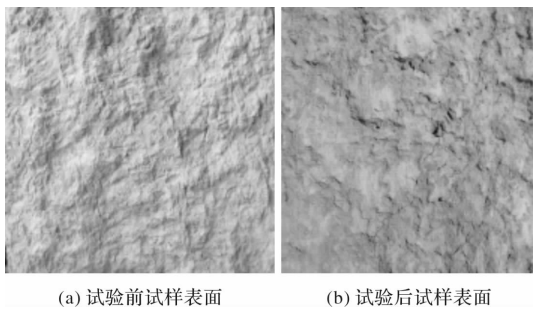


图 4 试验前后试样表面

Fig. 4 Sample surface before and after the test

2 试验结果分析

2.1 节理剪切强度

通过土工大型直剪试验, 得到了各组试样的峰值剪切强度, 如表 2 所示.

表 2 节理试样剪切强度

Tab. 2 Joint sample shear strength

法向应力/kPa	试验编号	峰值强度/kPa	峰值强度 平均值/kPa
50	Z1	72.34	80.53
	Z2	88.71	
100	Z3	78.83	92.53
	Z4	106.22	
150	Z5	199.00	180.60
	Z6	162.20	
200	Z7	176.30	205.56
	Z8	234.81	

图 5 绘制了剪切强度-法向应力关系图. 由于土体粘聚力由原始粘结力和固化粘结力组成, 而黄土节理面之间这两种粘结力均很小, 可不考虑其对抗剪强度的贡献. 通过去除粘聚力的摩尔库伦准则 $\tau = \sigma \tan \varphi$, 按照最小二乘法拟合, 得到黄土节理剪切强度等效峰值内摩擦角为 $\varphi = 47.37^\circ$.

选取相同的黄土节理土样, 本次研究通过小型直剪试验, 测定了该试样在含水量为 6% 时, 不同法向应力下的的剪切强度, 如表 3 所示. 同样不考虑黄土节理剪的粘聚力, 以摩尔库伦准则 $\tau = \sigma \tan \varphi$.

按照最小二乘法拟合, 得到黄土节理小型直

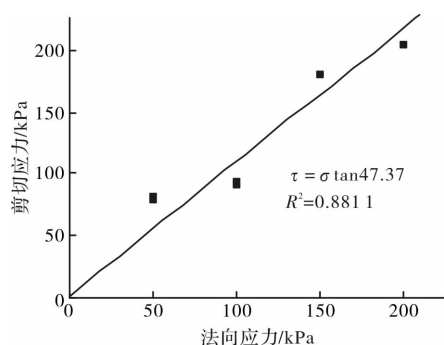


图5 剪切强度—法向应力关系图

Fig. 5 Normal stress shear strength-diagram

剪试验的剪切强度峰值内摩擦角为 $\varphi = 35.17^\circ$ 。

现有研究发现^[13-15], 黄土体剪切强度峰值内摩擦角范围为 $10 \sim 35^\circ$ 。本次研究, 小型直剪试验测得节理峰值内摩擦角为 35.17° 。文献[13]中, 内摩擦角为 35° 时, 粘结力为 27 kPa; 本文中, 节理的剪切强度仅内摩擦角提供, 未考虑粘聚力的作用, 使得拟合所得内摩擦角稍大。

表3 小型直剪试验剪切强度

Tab. 3 Small direct shear test of shear strength

法向应力/ kPa	试验编号	峰值强度/ kPa	峰值强度 平均值/kPa
50	XZ1	59.53	57.93
	XZ2	56.32	
100	XZ3	62.75	63.56
	XZ4	64.36	
150	XZ5	104.54	112.61
	XZ6	120.68	
200	XZ7	117.46	133.55
	XZ8	149.64	

2.2 黄土剪理直剪试验的尺寸效应

如前文所述, 表2和表3分别是大型直剪试验和小型直剪试验所测得的节理剪切强度, 对比两者的数值以及拟合所得的峰值内摩擦角, 可以发现, 大型直剪试验所得峰值剪切强度和内摩擦角分别为小型直剪试验的1.54倍和1.35倍, 工程应用中应考虑尺寸效应对黄土节理剪切强度的影响。

这是由于黄土节理试样尺寸影响其表面起伏度。当试样面积较小时, 试样表面起伏度变化也小, 在剪切过程中试样节理面之间的互锁效果就越弱。反之节理试样面积越大, 节理面起伏变化越多, 面壁之间的互锁效果就越强, 起伏度提供的爬坡效应也就越明显, 最终使得节理面剪切强度增大。

3.3 剪切应力—应变关系

试验得到了在不同法向应力下, 节理剪切应力—应变关系, 如图6所示。

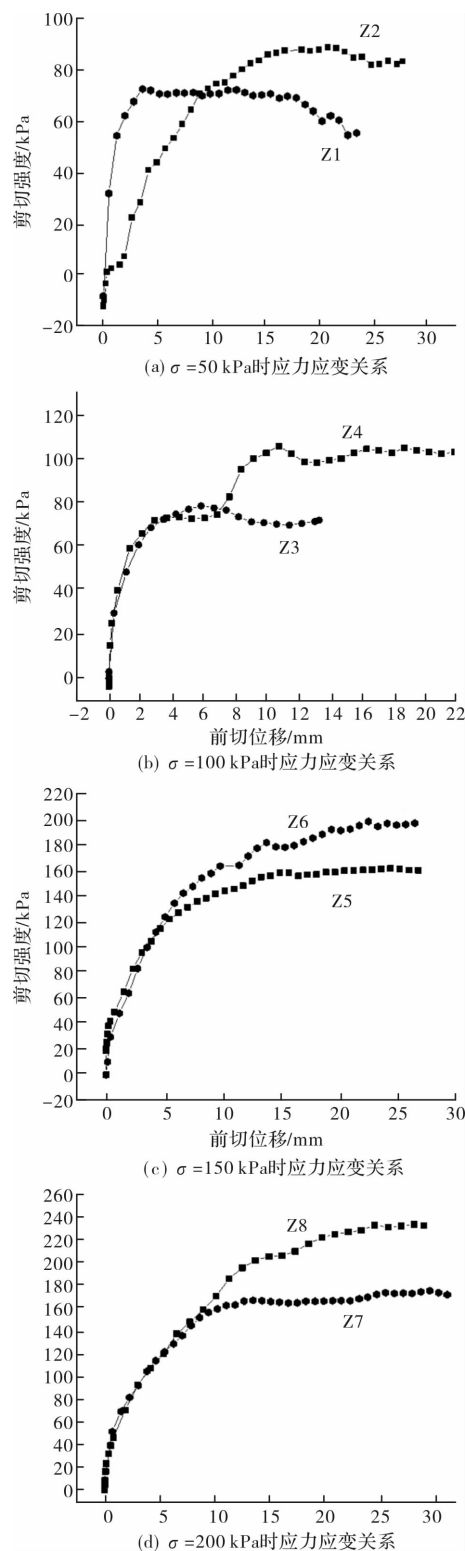


图6 节理剪切应力—应变关系

Fig. 6 Joint shear stress-strain relationship

观察图6, 可以发现如下规律:

(1)在法向应力分别为 $\sigma = 50$ kPa、100 kPa时, 两者对应的剪切应力应变关系具有相似性。剪

切初期均有较大的剪切刚度, 剪切强度大幅度增加. 之后剪切强度达到峰值, 随后随着切向应变的增大, 剪切强度略有减小, 最终趋于稳定.

(2)在法向应力 σ 分别为 150 kPa、200 kPa 时, 两者对应的剪切应力应变关系具有相似性. 剪切初期剪切强度大幅度增加, 但是相比法向应力 σ 为 50 kPa、100 kPa 所对应的应力应变关系, 剪切刚度明显减小. 随后随着切向应变的增大, 剪切强度并未出现峰值, 而是缓慢增大, 最终趋于稳定.

(3)如图 6(b)所示, 对于直剪试验试验 Z4, 其应力应变关系出现了两次屈服. 这可以说明天然节理面复杂多变, 会影响到其剪切变形规律, 但是不影响其最终的剪切强度.

在岩体节理剪切过程中, 节理受到法向与切向荷载的共同作用. 由于微凸体的爬坡和啃断作用, 节理面壁受到磨损, 累积到一定程度就宏观表现为软化, 即剪切强度会有峰值出现. 同时, 因微凸体的破碎而产生的颗粒, 在剪切过程中被碾压、迁移, 节理面壁间出现颗粒夹层, 剪切强度的逐渐增大, 即表现出强化现象. 黄土节理在剪切过程中, 软化与强化现象同时存在. 黄土体自身的抗压强度较小, 而当施加法向应力时, 节理凸起部分首先接触, 由于应力集中的原因, 微凸体受到较大的法向应力.

当法向应力较小时, 节理接触的凸起部分未完全被压碎, 节理面壁之间能够维持原来互锁的状态. 随着剪切的进行, 就会出现爬坡啃断, 因此表现出节理剪切强度大幅增加, 即具有较大的剪切刚度. 随后累积到一定程度就表现出软化现象, 由此节理剪切应力应变关系中就会出现峰值. 当法向应力增大到一定值时, 由于黄土体自身的抗压强度较小, 节理接触的凸起部分几乎完全被压碎, 节理面壁之间被破碎黄土颗粒填充, 破坏了节理面之间原来互锁的状态. 因此, 初始剪切强度就会变小. 随着剪切的进行, 节理面壁间出现颗粒夹层, 剪切强度会逐渐增大, 最终趋于稳定.

通过试验, 可以得到黄土节理的应力应变关系符合下式, 限于篇幅不再赘述. 详见文献[16].

$$\tau = \tau_m \left[1 - \exp\left(-\frac{a}{\tau_m} u\right) \left(\frac{b}{\tau_m} u + 1\right)^{-1} \right]$$

式中: τ 为剪切强度, u 为剪切位移, τ_m 为极限剪切强度, k_0 为初始剪切刚度, a 、 b 为拟合参数.

3 结论

通过大型直剪试验对黄土天然节理的剪切强度及变形规律进行了研究, 得出主要结论如下:

(1)试验测得了黄土节理的剪切强度, 通过大型直剪试验得到其峰值内摩擦角为 47.37° , 通过

小型直剪试验得到其峰值内摩擦角为 35.17° .

(2)黄土节理直剪试验存在尺寸效应, 试样尺寸主要影响节理面起伏度对剪切强度的贡献. 试样尺寸越大, 其剪切强度也越大.

(3)法向应力不同, 黄土节理剪切阻力形成机制不同. 法向应力较小时, 初始剪切刚度较大, 应力—应变曲线存在峰值; 法向应力较大时, 初始剪切刚度较小, 应力—应变曲线无峰值, 剪切强度随应变增大而增大, 最终趋于稳定.

参考文献 References

- [1] 王正贵, 康国瑾, 马崇武. 关于黄土垂直节理形成机制的探讨[J]. 中国科学. 1993, 23(7): 765-770.
WANG Zhenggui, KANG Guojin, MA Chongwu. The discussion of formation mechanism about the loess vertical joints[J]. Science in China. 1993, 23(7): 765-770.
- [2] 骆进, 项伟, 吴云刚, 等. 陕北黄土垂直节理形成机理的试验研究[J]. 长江科学院学报. 2010, 27(3): 38-41.
LUO Jin, XIANG Wei, WU Yungang, et al. Experimental study on the formation mechanism of loess vertical joints in Northern Shaanxi[J]. Journal of Changjiang Academy of Sciences. 2010, 27(3): 38-41.
- [3] 李同录, 王红, 付昱凯, 等. 黄土垂直节理形成机理的试验模拟[J]. 地球科学与环境学报. 2014, 36(6): 127-134.
LI Tonglu, WANG Hong, FU Yukai, et al. Test simulation on the forming mechanism of loess vertical joints[J]. Journal of Earth Sciences and Environment. 2014, 36(6): 127-134.
- [4] 王铁行, 罗扬, 王娟娟. 黄土节理抗剪强度特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报. 2013, 9(3): 497-501.
WANG Tiehang, LUO Yang, WANG Juanjuan. Experimental research on shear strength of the loess joints[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2013, 9(3): 497-501.
- [5] BARTON N R. The Shear strength of rock and rock joints[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1976, 13: 255-279.
- [6] BARTON N R, Bandis S. Sttength deformation and conductivity coupling of rock joints [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1985, 22: 121.
- [7] GERRARD C. Shear failure of rock joints: appropriate constraint for emoirical relation [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1986, 23: 401-429.
- [8] 杨洁, 荣冠, 程龙, 等. 节理峰值抗剪强度研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2015, 34(5): 884-894.
YANG Jie, RONG Guan, CHENG Long, et al. Experimental study of peak shear strength of rock joints [J]. Journal of rock mechanics and engineering. 2015, 34(5): 884-894.
- [9] 刘明维, 何沛田, 钱志雄, 等. 岩体结构面抗剪强度参数试验研究[J]. 重庆建筑, 2005, (6): 42-46.
LIU Mingwei, HE Peitian, QIAN Zhixiong, et al. Experimental study on the shear strength of rock discontinuities. [J]. Chongqing Architecture. 2005, (6): 42-46.

(下转第 707 页)

- system in southwest mountainous cities[J]. Chinese Landscape Architecture, 2011(8):58-61.
- [5] SALAT Serge. 关于可持续城市化的研究:城市与形态[M]. 陆阳,张艳,译. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- SALAT Serge. Cities and forms: on sustainable urbanism[M]. LU Yang, ZHANG Yan, Translated. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [6] 陈群元,尹长林,陈光辉. 长沙城市形态与用地类型的时空演化特征[J]. 地理科学, 2007(2):273-280.
- CHEN Qunyuan, YIN Changlin, CHEN Guanghui. Spatia temporal evolution of urban morphology and land use sorts in Changsha[J]. Geographic Science, 2007(2):273-280.
- [7] BATTY M. Cities as Fractals: Simulating Growth and form[M]. Newyork: Springer Verlag, 1991.
- [8] 陈彦光,罗静. 城市形态的分维变化特征及其对城市规划的启示[J]. 城市发展研究, 2006(5):35-40.
- CHEN Yanguang, LUO Jing. A tentative theoretical in-terpretation of the fractal dimension of urban form [J]. Urban Studies, 2006(5):35-40.
- [9] 田达睿,周庆华. 分形视角下黄土高原沟壑区城乡用地形态研究——以陕北米脂研究区为例[J]. 城市规划, 2017, 41(4):33-40.
- TIAN Darui, ZHOU Qinghua. The suitable urban and rural form in the loess plateau from the perspective of fractal theory: the case study of mizhi [J]. City Planning Review, 2017, 41(4):33-40.
- [10] 惠怡安. 陕北黄土丘陵沟壑区川谷型城镇空间扩展模式及其开发策略研究[D]. 西安:西北大学, 2007.
- HUI Yian. Study on the town space developing mode and exploring strategy of northern Shannxi's plain-valley-city in loess hill and gully area[D]. Xian: North-west University, 2007. 5:67.
- [11] 刘军民,唐伊娟,郑建栋. 传统聚落人居环境保护的现状、问题及对策研究——以陕西省米脂窑洞古城为例[J]. 城市发展研究 2015, 22 (9):12-15.
- LIU Junmin; TANG Yijuan; ZHENG Jiandong. Situation, Question and Solution on Protection of Vernacular Settlements: Cave Dwelling in Mizhi County as Example[J]. Urban Development Studies, 2015, 22 (9): 12-15.

(编辑 沈 波)

(上接第 684 页)

- [10] 胡伟,闵弘,陈健,等. 大型原位直剪试验设备改进研制与应用[J]. 岩土力学. 2015, 36(3):905-912.
- HU Wei, MIN Hong, CHEN Jian, et al. Improvement of a large scale in-situ direct shear test apparatus and its application[J]. Rock and Soil Mechanics. 2015, 36 (3):905-912.
- [11] 周志刚,李文胜,宋勤德. 大型直剪仪试验的尺寸效应[J]. 长沙交通学院学报. 1999, 15(1):47-49.
- ZHOU Zhigang, WEN Shengli, SONG Qinde. The size of the large direct shear apparatus test effect[J]. Journal of changsha institute of transportation. 1999, 15(1):47-49.
- [12] 孙宗颀,徐放明. 岩石节理表面表面特性的研究及其分级[J]. 岩石力学与工程学报. 1991, 10(1):63-73.
- SUN Zongqi, XU Fangming. The study of the surface characteristics of the joint surface of rocks and its classification[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering. 1991, 10(1):63-73.
- [13] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科技出版社, 1996.
- LIU Zudian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996.
- [14] 米海珍,李如梦,牛军贤. 含水量对兰州黄土剪切强度特性的影响[J]. 甘肃科学学报. 2006, 18(1):78-81.
- Mi Haizhen, Li Rumeng, Niu Junxian. The influence of water content on shear strength characteristics of Lanzhou intact loess. [J]. Journal of Gansu Sciences, 2006. 18 (1):78-81.
- [15] JING L, STEPHANSSON O, NORLUND E. Study of rock joints under cyclic loading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1993, 26(3): 215-232.
- [16] 刘小军,王震,王铁行,等. 原状黄土节理抗剪强度试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2003-2010.
- LIU Xiaojun, WANG Zhen, WANG Tiehang, et al. Experimental study on shear strength of loess joints[J]. JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY, 2017, 42 (8): 2003-2010.

(编辑 沈 波)