

# 利用 TLS 技术测定闭合节理直剪试验剪切面面积

杨荣华<sup>1</sup>, 万震<sup>1</sup>, 谢强<sup>1</sup>, 曹志林<sup>2</sup>, 杨文君<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 大连理工大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对现行直剪试验中未考虑剪切面“闭合不规则空间曲面”特性对剪切面面积测定的影响, 提出了一种基于地面三维激光扫描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)技术的闭合节理直剪试验剪切面面积测定方法。该方法首先通过三维激光扫描仪获取岩石试样的三维点云数据, 然后进行点云去噪和提取岩石剪切面轮廓点云数据, 接着由剪切面轮廓点云数据拟合最佳投影面, 计算轮廓点云在投影面上的投影点集及其各点投影坐标, 最后利用逐点插入的 Delaunay 三角剖分算法获得轮廓点云投影点集的凸包, 凸包三角形面积和即为剪切面的面积。实验结果表明: 基于 TLS 的闭合节理直剪试验剪切面面积测定方法操作简单, 且面积计算精度高, 适用于任意形状闭合节理面的剪切面面积计算。

**关键词:** 直剪试验; 闭合节理; 剪切面; 面积测定; 地面激光扫描; 点云

中图分类号: TU455; P237

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0046-05

## Determination of shear area in closed joint direct shear test using TLS technique

YANG Ronghua<sup>1</sup>, WAN Zhen<sup>1</sup>, XIE Qiang<sup>1</sup>, CAO Zhilin<sup>2</sup>, YANG Wenjun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Institute of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** According to the fact that the effect of closed irregular space surface on shear area determination is not considered in current shear test, a determination method of shear area in closed joint direct shear test based on Terrestrial Laser Scanning(TLS) technique is proposed. In this study, the three dimensional(3D) point cloud data of rock samples are obtained using a 3D laser scanner, and then the point cloud data of rock shear surface contour are extracted from denoised data and used to fit the best projection plane. Furthermore, the set of projection points and projection coordinates of each point in point cloud of contour on projection plane are calculated. Finally, the incremental insertion algorithm of Delaunay triangulation is adopted to determine the convex hull composed by the projection point set, and the sum of the area of triangle in convex hull is the shear area. The experimental results show that the TSL-based determination method of shear area in closed joint direct shear test is simple for operation, and the high accuracy of area calculation is suitable for the determination of shear area in closed joint surface with arbitrary shape.

**Key words:** direct shear test; closed joint; shear surface; area determination; TLS; point cloud

岩体是长期地质构造运动的产物, 节理作为不连续结构面广泛分布于其中, 岩体强度及变形特征主要受节理的力学特性影响, 节理岩体的剪切特性是主导岩体工程稳定性的关键因素, 大量工程实践表明岩体的变形、破坏和失稳往往是由赋存于其中的原生节理在荷载作用下产生新生裂纹, 并且逐渐扩展、连通, 使岩桥贯通造成的<sup>[1]</sup>。因此, 研究节理岩体的剪切特性是分析岩体力学性质、进行岩体稳定性评价的基础, 具有重要的

理论研究意义<sup>[2]</sup>。

抗剪强度是研究节理岩体剪切特性的一个重要内容, 其计算精度主要受岩体不规则剪切面面积的计算精度影响<sup>[3]</sup>, 因此开展剪切面面积的计算方法研究对岩石的抗剪强度计算至关重要。目前直剪实验中剪切面面积计算的常用方法是取试件的横截面面积, 如矩形面积<sup>[4-5]</sup>或圆面积<sup>[6-8]</sup>等, 但该方法忽略了“节理面的各向异性、剪切面与试件主轴经常不垂直、剪切面面积随接触面剪切位移

收稿日期: 2018-01-10

修改稿日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51008319); 中央高校基本科研业务费(CDJZRPY14200001)

第一作者: 杨荣华(1979—), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事误差理论与激光点云数据处理研究工作。E-mail: rh\_yang@cqu.edu.cn

通信作者: 谢强(1975—), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学与工程方面的科研和教学工作。E-mail: xieqiang2000@163.com

发生变化”等复杂实际情况, 简单地将剪切面假定为垂直于试件主轴的平面, 导致直剪试验计算结果往往偏离试件的真实值; 为提高剪切面面积的计算精度, 国内外学者做了大量工作, 先后建立了剪切面面积随倾角变化的修正模型<sup>[9]</sup>、剪切面面积变化对直剪试验结果影响的抗剪强度修正方法<sup>[10]</sup>、接触面剪切位移与有效剪切面积之间的数学关系<sup>[11-12]</sup>、顾及了剪切位移影响的剪切面面积算法方法<sup>[13]</sup>、顾及正应力偏心引起剪切面起伏的剪切面面积算法方法<sup>[13]</sup>、顾及颗粒组成造成剪切面粗糙度的剪切面面积算法方法<sup>[13]</sup>、基于节理面完整三维特征数据的剪切面面积算法方法<sup>[14-17]</sup>等, 同时, 国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)也关注此类问题, 在《室内岩石节理面抗剪强度测定实验建议方法》中指出<sup>[18]</sup>, “岩石试样剪切面面积计算, 对于常规几何形状计算标称截面积所需的相关尺寸可使用卡尺或千分尺测量; 对于不规则形状可跟踪剪切面轮廓后使用平面计等类似设备测量或使用 3D 非接触式测量剪切面面积”。因此, 研究基于 3D 非接触式测量设备地面三维激光扫描仪的剪切面面积计算方法具有重要的工程应用价值。

## 1 闭合节理剪切面面积测定方法

该测定方法的思想是通过地面三维激光扫描仪对含闭合节理的圆柱形岩石试样进行多视角扫描, 获取岩石试样的整体三维点云数据, 通过对岩石试样点云进行去噪和特征提取, 获取胶结闭合节理面轮廓的三维点云数据, 通过散乱点云几何信息计算, 获得轮廓点云的最佳平面投影点集, 通过逐点插入的 Delaunay 三角剖分算法对投影点集进行三角构网, 获取剪切面面积的最佳估值。算法具体步骤如下:

①在岩石试样周围布设标靶并进行不同视角扫描, 随后通过点云处理软件配准各视角点云, 由此获取岩石试样整体点云数据;

②对整体点云进行去噪处理, 随后提取胶结闭合节理面轮廓的三维点云  $P_n = \{p_1, \dots, p_n\}$ ;

③计算点云  $P_n$  的重心  $p_0 = \sum_{i=1}^n p_i$ ;

④采用主元分析法<sup>[19]</sup>, 计算点云  $P_n$  的协方差矩阵  $C_{3 \times 3}$ , 协方差矩阵  $C_{3 \times 3}$  的最小特征值所对应的特征向量即为点云  $P_n$  的最佳切平面  $\Gamma$  法线向量  $N_{p_0}$ , 其协方差矩阵为

$$C = \frac{1}{n-1} \begin{bmatrix} p_1 - p_0 \\ p_2 - p_0 \\ \vdots \\ p_n - p_0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} p_1 - p_0 \\ p_2 - p_0 \\ \vdots \\ p_n - p_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

⑤由重心  $p_0$ 、点  $p_i \in P_n$  和法向量  $N_{p_0}$  计算矢量  $\overrightarrow{p_0 p_i}$  在切平面  $\Gamma$  上的投影矢量  $T_i$  为<sup>[19]</sup>

$$T_i = (E - N_{p_0} N_{p_0}^T)(p_i - p_0) \quad (2)$$

式中:  $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $T_i$ 、 $p_0$  和  $p_i$  均为  $3 \times 1$  的列向量;

⑥投影面上构建二维正交坐标系  $O-UV$ , 该系的  $U$  轴方向取  $\max(|T_i|)$  的投影矢量方向  $T_{i_0}$ ,  $V$  轴方向取矢量  $N_{p_0} \times T_{i_0}$  的方向, 则  $U$ 、 $V$  轴向的单位正矢量  $e_U$  和  $e_V$  为<sup>[19]</sup>

$$e_U = \frac{T_{i_0}}{\|T_{i_0}\|} \quad (3)$$

$$e_V = \frac{N_{p_0} \times T_{i_0}}{\|N_{p_0} \times T_{i_0}\|} \quad (4)$$

⑦计算点  $p_i \in P_n$  的投影点  $q_i$  在  $O-UV$  系下的坐标  $(U_i, V_i)$  为<sup>[19]</sup>

$$U_i = T_i \cdot e_U \quad (5)$$

$$V_i = T_i \cdot e_V \quad (6)$$

其中,  $p_0$  点的投影点  $q_0$  对应的投影坐标为  $(U_0, V_0) = (0, 0)$ , 即投影坐标系原点;

⑧对投影点集  $\{(U_i, V_i)\}$  进行 Delaunay 三角剖分构网<sup>[20]</sup>, 其流程图如图 1;

⑨计算所有 Delaunay 剖分三角形的面积, 其和为岩石节理面面积。

## 2 剪切面面积计算实验

为了验证本文提出的闭合节理直剪试验剪切面面积 TLS 测定方法的可靠性, 选择规则闭合节理模拟实验和不规则真实闭合节理扫描实验两种方案, 具体实验过程如下:

①假设圆柱形岩石表面为圆柱体  $x^2 + y^2 = 2.5^2$  ( $-6 \leq z \leq 6$ ), 平面  $x + y + z = 1$  与其相交的截面为规则闭合节理剪切面(matlab 模拟结果如图 2 所示), 其理论面积为  $34.0087 \text{ cm}^2$ ;

②在规则闭合节理面轮廓线上均匀取 200 个点, 假定此点集  $P_n$  为规则闭合节理面轮廓的三维扫描点云数据(matlab 模拟结果如图 3 所示);

③按第 1 节③~⑨步骤计算规则闭合节理剪切面的面积为  $34.0031 \text{ cm}^2$ ;

④野外采集 3 个含闭合节理的岩石试样, 其直

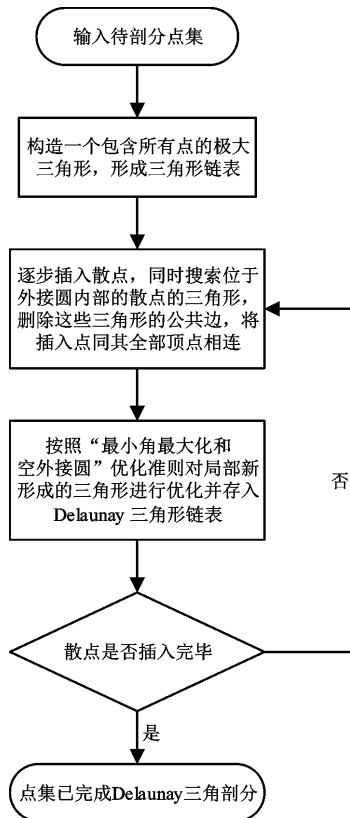


图 1 逐点插入的 Delaunay 三角剖分算法流程

Fig. 1 Flow of Delaunay triangulation algorithm of incremental insertion

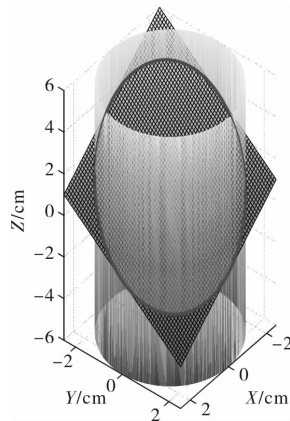


图 2 数值模拟图

Fig. 2 Numerical simulation diagram

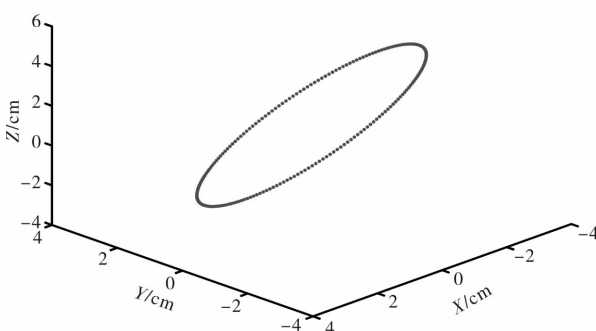


图 3 规则闭合节理轮廓

Fig. 3 Regular closed joint contour

径为 50 mm, 高为 120 mm, 胶结节理环绕柱体、空间形状不规则, 如图 4 所示;



图 4 圆柱形岩石试样

Fig. 4 Cylindrical rock specimen

⑤采用文献[13]中的方法计算 3 个试样的不规则闭合节理剪切面面积如表 1 所示;

⑥将岩石试样置于实验桌上, 在其周围布设三个纸质标靶, 利用 Leica ScanStation P40 三维激光扫描仪分三站扫描(扫描距离设置为 2 m, 水平和垂直扫描间隔均为 5 mm), 如图 5 所示;

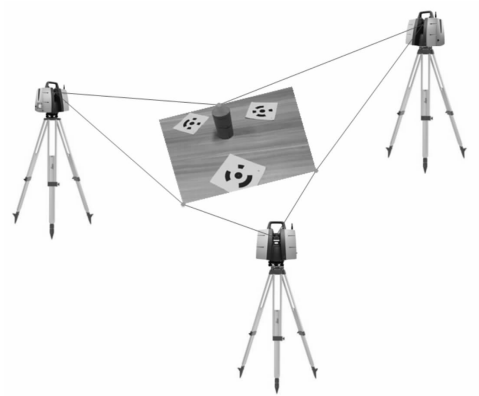


图 5 三维激光扫描岩样

Fig. 5 3D laser scanning rock sample

⑦利用 Cyclone 软件对三站岩样扫描点云数据进行配准、去噪等处理, 获取岩样整体点云数据, 如图 6 所示, 并提取闭合节理面轮廓点云数据, 如图 7 所示;



图 6 圆柱形岩样点云

Fig. 6 Point cloud of cylindrical rock sample



图7 不规则闭合节理轮廓点云

Fig. 7 Point cloud of irregular closed joint contour

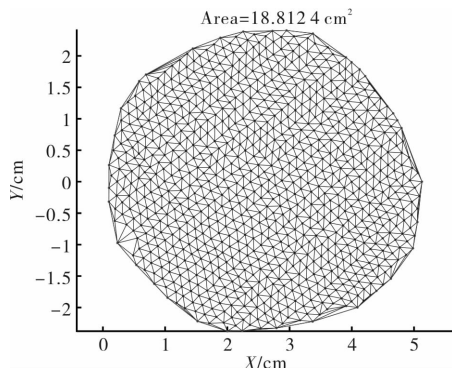


图8 不规则闭合节理 Delaunay 三角剖分

Fig. 8 Delaunay triangulation of irregular closed joint

⑧按第1节③~⑨步骤计算不规则闭合节理剪切面的面积如表1所示。

表1 提出方法与现行方法计算结果对比

Tab. 1 Results comparison between the proposed method and the current method

试样 编号	本文方法 / cm <sup>2</sup>	文献[13]方法 / cm <sup>2</sup>	相对误差 /%
1	18.812 4	18.809 9	0.013
2	19.677 9	19.674 9	0.015
3	19.282 2	19.279 9	0.012

### 3 实验分析

由规则闭合节理剪切面面积计算值以及不规则节理剪切面面积计算值(表1)可以看出:本文方法计算规则闭合剪切的面积值与理论真值高度吻合,相对误差为0.016%,剪切面面积计算值与理论真值基本一致,说明本文方法适用于高精度规则闭合节理剪切面面积计算;本文方法计算不规则闭合剪切的面积值与文献[13]方法计算值高度吻合,相对误差最大为0.015%,说明本文方法与文献[13]方法计算精度基本一致,适用于不规则闭合节理剪切面面积的实际工程计算。本文实验主要针对“岩样中节理面完全闭合”的试样,采用闭合节理面轮廓点云的最佳切平面代替有一定起伏的闭合节理空间曲面,最大程度逼近剪切面真

值,具有较高的实用性和可靠性;本文方法也可用于“岩样中节理面完全张开”的剪切面面积计算问题,其步骤为第1节中的①②⑧⑨,无需投影计算,其计算精度更高。

### 4 结论

目前常用直剪试验剪切面面积计算方法往往未考虑“剪切面为不规则闭合空间曲面”这一特性,导致抗剪试验结果存在往往存在较大偏差,为此,本文提出一种利用 TLS 技术测定不规则闭合节理直剪试验剪切面积方法,研究结果表明:TLS 技术能够精确获取闭合节理面三维点云数据并为后续节理面面积计算提供可靠数据源;基于节理面轮廓散乱点云的最佳切平面剪切面面积计算方法更符合实际工程情况,计算精度较高;本文提出的基于 TLS 技术测定闭合节理剪切面面积计算方法适用于任意形状的闭合剪切面,也适用于节理面张开的剪切面面积计算,可靠性高。

### 参考文献 References

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社, 1988.  
SUN Guangzhong. Rock mass structure mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [2] 李晓峰,李海波,夏祥,等. 类节理岩石直剪试验力学特性的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 583-591.  
LI Xiaofeng, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Numerical simulation of mechanical characteristics of jointed rock in direct shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 583-591.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体试验方法标准:GB/T 50266-2013[S]. 北京:中国计划出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass:GB/T 50266-2013 [S]. Beijing:China Planning Press, 2013.
- [4] ASMIRZA M S. Direct shear testing[J]. Direct Shear Testing, 2004.
- [5] ZHANG B, ZHAO Q G, HORN R, et al. T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 59(3): 97-106.
- [6] ALIKONIS A, AMSIEJUS J, STRAGYS V. Improvement of shear box apparatus and methodology of test[C]. Twelfth European Conference on Soil Me-

- chanics and Geotechnical Engineering (Proceedings), 1999; 1053-1057.
- [7] AMŠIEJUS J, DIRGĖLIENĖ N, NORKUS A, et al. Comparison of sandy soil shear strength parameters obtained by various construction direct shear apparatuses[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(2): 327-334.
- [8] GROOVER M P. Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [9] ASTM. Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force: D5607-16[S]. Philadelphia: ASTM International, 2016.
- [10] 张敏江, 郭尧, 张丽萍, 等. 直剪试验中对土抗剪强度的一种修正方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(2): 96-98.
- ZHANG Minjiang, GUO Yao, ZHANG Liping, et al. A revising method of shear strength of soils in direct shear test[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute (Science and Technology), 2005, 21(2): 96-98.
- [11] SKUODIS S, TAMOSIUNAS T. Direct shear tests with evaluation of variable shearing area[J]. Mokslas: Lietuvos Ateitis, 2014, 6(5): 499.
- [12] 刘海波, 张丽华, 林大超, 等. 直剪试验有效剪切面积动态变化的改进计算[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(3): 503-506.
- LIU Haibo, ZHANG Lihua, LIN Dachao, et al. The improved calculation of the dynamic changes of the effective shear area in the direct shear test[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2010, 26(3): 503-506.
- [13] 董云, 王永存. 直剪试验剪切面积计算方法对抗剪强度的影响[J]. 实验技术与管理, 2015, (3): 57-62.
- DONG Yun, WANG Yongcun. Study on effect of calculation methods of shearing area on shear strength in direct shear test[J]. Experimental Technology and Management, 2015, (3): 57-62.
- [14] EL-SOUDANI S M. Profilometric analysis of fractures[J]. Metallography, 1978, 11(3): 247-336.
- [15] CZARNECKI L, GARBACZ A, KURACH J. On the characterization of polymer concrete fracture surface[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(4): 399-409.
- [16] GRASELLI G, WIRTH J, EGGER P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6): 789-800.
- [17] 蔡毅, 唐辉明, 葛云峰, 等. 岩体结构面三维粗糙度评价的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1101-1110.
- CAI Yi, TANG Huiming, GE Yunfeng, et al. A new method for evaluating the roughness of three-dimensional discontinuity surface of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1101-1110.
- [18] MURALHA J, GRASELLI G, TATONE B, et al. ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version [M]//The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. New York: Springer International Publishing, 2013: 131-142.
- [19] 杨荣华. 地面三维激光扫描点云角度分辨率与数据处理模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- YANG Ronghua. Research on point cloud angular resolution and processing model of terrestrial laser scanning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.
- [20] REBAY S. Efficient unstructured mesh generation by means of Delaunay triangulation and Bowyer-Watson algorithm[J]. Journal of computational physics, 1993, 106(1): 125-138.

(编辑 桂智刚)