

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201712067



非贯通节理岩体抗剪强度 影响因素分析

刘超, 刘远明

(贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 基于修正的 Lajtai 岩桥破坏理论, 研究连通率、形貌节理起伏角、法向压力等因素对非贯通节理岩体抗剪强度的影响, 利用人工混凝土模拟类岩石材料, 并进行直剪实验论证。结果表明: 非贯通节理岩体抗剪强度与起伏角大小成正相关关系, 与连通率成负相关关系; 其他影响因素相同时, 法向压力越大, 非贯通节理岩体抗剪强度越大。

关键词: 岩体; 非贯通节理; 直剪试验; 抗剪强度

中图分类号: TU 45

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)04-0551-05

Analysis of Influence Factors on Shear Strength of Non-Penetration Jointed Rock Mass

LIU Chao, LIU Yuanming

(School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Based on the modified Lajtai rock bridge failure theory, the influence of connection rate, topographic joint undulation angle, normal pressure et al. on shear strength of non-penetration jointed rock mass is studied. Using artificial concrete to simulate the rock, the direct shear experiment is conducted. The result shows that: the shear strength of non-penetration jointed rock mass is positively correlated with the undulation angle, but is negatively correlated with the connection rate; under the same other factors, the normal pressure is positively correlated with the shear strength of non-penetration jointed rock mass.

Keywords: rock mass; non-penetration jointed rock mass; direct shear test; shear strength

在非贯通节理裂隙岩体中, 由于岩桥的存在, 使岩体受力和变形破坏特性发生改变, 预制非贯通节理试件的变形破坏机制比完整的岩体试件复杂得多^[1]。非贯通节理岩体破坏通常由节理和岩桥破坏共同组成。由于节理间的相互作用使非贯通节理岩体主要处于压剪应力状态, 很多情况下, 非贯通节理岩体破坏面以剪切破坏为主, 所以采用直剪试验方法能很好地研究其抗剪强度特性^[2]。国内外许多学者采用直剪试验方法研究非贯通节理岩体力学性质, Savilahti 等^[2]采用含节理的石膏进行模拟试验, 研究节理数量和节理倾角对非贯通节理岩体剪切破坏方式的影响。Gehle 等^[3]采用石膏材料模拟非贯通节理岩体进行直剪试验, 研究不同节理长度、节理排列方式、倾角等因素的影响, 提出法向压力和节理倾角对节理的剪切强度影响最大, 但是没有研究各因素对非贯通节理岩体强度影响关系。Wong 等^[4-5]对 3 组

收稿日期: 2017-12-27

通信作者: 刘远明(1975-), 教授, 博士, 主要从事隧道及地下工程、岩土工程的研究。E-mail: liuyuanming75@sohu.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11562005); 贵州大学研究生创新基金资助项目(2016012)

平行节理类岩石材料进行直剪试验,研究节理裂隙的扩展规律和峰值剪切强度,论证了裂隙的发展机制取决于节理的分布及节理面上的摩擦因数.徐亮等^[6]根据 36 组节理岩体直剪实验结果,对基于起伏度和粗糙度等剪切强度公式进行对比.俞缙等^[7-8]假定卸载曲线和重加载曲线在法向的起始刚度由前一次加载曲线和卸载曲线决定,从而确定岩体节理循环加载本构方程,并验证了模型的可行性.刘远明等^[9]通过对具有不同粗糙程度(以节理面起伏角表示)的共面非贯通人工节理进行不同法向应力水平下的直剪试验,研究形貌节理起伏角对非贯通节理岩体抗剪强度的影响,分析了剪切过程中岩桥力学参数的弱化机制.文献^[10-14]采用水泥砂浆模拟类岩石材料,研究非贯通节理岩体直剪贯通模型和岩桥力学性质弱化机制,基于非贯通节理岩体的直剪试验,将非贯通节理岩体破坏模式分为 4 种,论证了非贯通节理岩体的 4 种破坏模型和法向压力对抗剪强度的影响,并提出相应的贯通破坏强度.为了进一步研究非贯通节理抗剪强度影响因素,本文基于修正的 Lajtai 岩桥破坏理论,利用人工混凝土模拟类岩石材料,针对不同连通率、形貌节理起伏角及法向应力的非贯通节理岩体进行直剪试验,以研究连通率、节理起伏角、法向压力对非贯通节理岩体抗剪强度的影响规律.

1 修正的 Lajtai 岩桥破坏理论

Lajtai 岩桥破坏理论将岩桥破坏模式分为张拉破坏、剪切破坏和挤压破坏等 3 种破坏模式,其抗剪强度曲线如图 1 所示.

在低法向压力下,岩桥发生张拉破坏,如图 1 中 AB 段曲线所示,其抗剪强度准则计算式为

$$\tau_a = [R_t(R_t + \sigma_a)]^{1/2}. \tag{1}$$

在中等法向压力下,岩桥发生剪切破坏,如图 1 中 BD 段所示,其抗剪强度准则计算式为

$$\tau_a = \left[\frac{(2c_0 + \sigma_a \tan \phi)^q}{1 + \tan^2 \phi} - \sigma_a^2 \right]^{1/2}. \tag{2}$$

在高法向压力下,岩桥发生挤压破坏,如图 1 中 DH 段所示,其抗剪强度准则计算式为

$$\tau_a = \sigma_a \tan \phi_u. \tag{3}$$

Lajtai 岩桥破坏理论的缺陷在于将张拉破坏、剪切破坏及挤压破坏区分开,并没有考虑到 2 种或 3 种破坏模式同时存在的情况,使得按照式(1)~(3)破坏准则计算出的抗剪强度偏低^[5,9-10].夏才初等^[11]对 Lajtai 岩桥破坏理论进行了修正,提出岩体破坏为拉剪复合破坏模式^[14-15],即考虑岩体抗拉强度、节理、粘结力、法向压力等因素时,岩桥破坏表现为张拉破坏和剪切破坏共同存在的情况.

2 非贯通节理岩体实验

从天然节理的形态及法向压力的角度出发,设计一系列非贯通节理岩体的直剪实验,用以论证修正的 Lajtai 岩桥破坏理论的正确性.实验方案设计如下.

1) 非贯通节理岩体试样制备方案.选用合适配合比的类岩石材料,进行抗压强度、抗剪强度、泊松比、弹性模量等基本力学性质测试.

采用配合比为水泥:砂:水=2:3:1 的水泥砂浆模拟岩石材料.配备的该类岩石材料物理力学性质参数如下:密度为 2.65 g·cm⁻³;抗压强度为 39.5 MPa;抗拉强度为 3.025 MPa;弹性模量为 8.75 GPa;泊松比为 0.25;黏聚力为 5.25 MPa;摩擦角为 46°.设计非贯通节理岩体试样尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm,节理形貌的制作选用起伏角分别为 15°,30°,45°的齿形片.将齿形的薄铝片(或防水硬纸片)插入试样预定节理位置,在水泥砂浆凝固前抽出该铝片(或防水硬纸片),即可模拟非贯通节理.连通率为 0.5、形貌起伏角为 30°齿形的节理岩体效果图,如图 2 所示.

2) 非贯通节理岩体试验方案.采用 RMT-301 型岩体剪切试验机,通过带伺服循环位移控制加载的方式,将试样放入制定的试验剪切盒内,并对不同的非贯通节理岩体样品进行直剪试验.在试验中,采用高灵敏位移传感器监测试样表面破坏现象,观察剪切曲线变化,记录曲线转折点的时间和试验现象(高

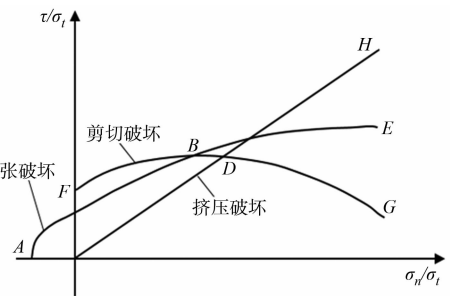


图 1 Lajtai 岩桥破坏理论
抗剪强度曲线

Fig. 1 Shear strength envelope
of Lajtai rock bridge failure

压进行剪切试验,位移控制速率为 $1.0\text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$). 非贯通节理岩体剪切试验场景,如图 3 所示.

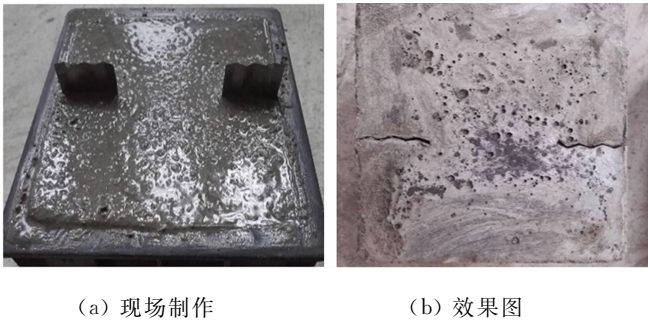


图 2 非贯通节理岩体效果图

Fig. 2 Effect of non-penetration jointed rock mass

研究连通率、形貌起伏角和法向压力对非贯通节理岩体的抗剪强度的影响. 选取连通率分别为 0.3, 0.5, 0.7, 形貌节理起伏角度分别为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 的非贯通节理岩体作为实验组, 法向压力设置 5 个级别, 分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 MPa. 通过设置 14 组直剪实验数据分析各因素对非贯通节理岩体抗剪强度的影响, 实验方案如表 1 所示. 表 1 中: φ 为连通率; θ 为起伏角; F_y 为法向压力.

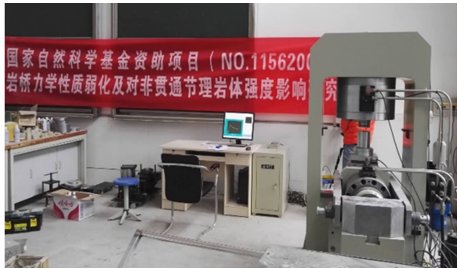


图 3 非贯通节理岩体剪切试验场景

Fig. 3 Shear test set-up of non-penetrating jointed rock mass

表 1 非贯通节理岩体实验方案设计

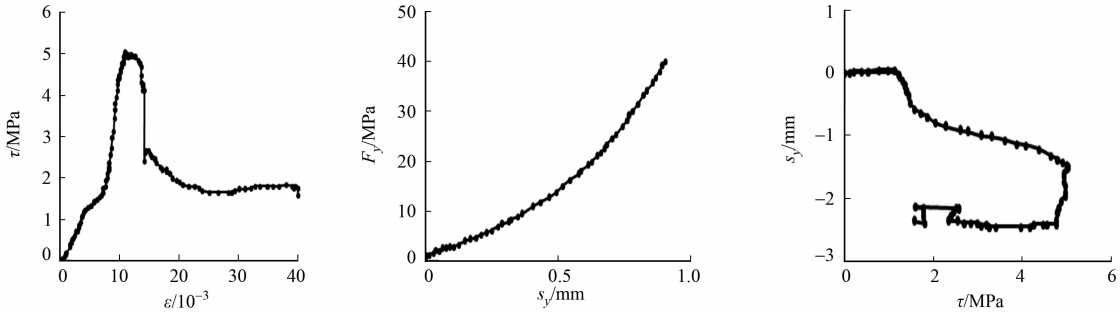
Tab. 1 Experiment design of non-penetrating jointed rock mass

编号	φ	$\theta/(^\circ)$	F_y/MPa	编号	φ	$\theta/(^\circ)$	F_y/MPa
1	0.3	15	1.0	8	0.5	45	1.0
2	0.5	15	1.0	9	0.7	45	1.0
3	0.7	15	1.0	10	0.3	15	0.5
4	0.3	30	1.0	11	0.3	15	1.0
5	0.5	30	1.0	12	0.3	15	1.5
6	0.7	30	1.0	13	0.3	15	2.0
7	0.3	45	1.0	14	0.3	15	3.0

3 非贯通节理岩体抗剪强度影响因素分析

3.1 直剪试验原始数据图

采用 RMT-301 型岩体剪切试验机,该设备能够通过计算机同步记录剪切实验过程中应力(σ)-应变(ϵ)曲线关系图. 以连通率为连通率 0.3、形貌节理起伏角 30° 、法向压力 1.0 MPa 为例,直剪试验过程中的抗剪强度曲线图,如图 4 所示. 图 4 中: τ 为剪切应力; ϵ 为切向应变; s_y 为法向位移.



(a) 剪切应力-切向应变 (b) 法向压力-法向位移 (c) 法向位移-剪切应力

图 4 直剪试验过程中抗剪强度曲线

Fig. 4 Curve of shear strength during direct shear test

3.2 直剪试验抗剪强度分析

3.2.1 不同节理形貌起伏角对抗剪强度的影响 为研究不同节理形貌起伏角对非贯通节理岩体的抗剪强度的影响,固定法向压力为 1.0 MPa,分别设定形貌节理起伏角 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 进行直剪试验,得到不同连通率下的峰值剪切应力(τ_{\max}),如图 5 所示.

由图 5 可知:当法向应力为 1.0 MPa、形貌节理起伏角为 15° 时,抗剪强度最小;形貌节理起伏角为 30° 时,抗剪强度次之;形貌节理起伏角为 45° 时,抗剪强度最大. 因此,可认为非贯通节理岩体抗剪强度与节理形貌起伏角为正比例关系,抗剪强度随着节理形貌起伏角的增大而增大. 这种趋势在连通率为 0.3 时变化最为明显,连通率为 0.5 时的抗剪强度略低于连通率为 0.3 时,但二者增长速率相似.

与连通率为 0.3,0.5 时的对照组相似,连通率为 0.7 时的非贯通节理岩体抗剪强度随形貌节理起伏角的增大而增大,但是增大的速率发生了变化,形貌起伏角为 15°~30°时的增长速率明显高于形貌起伏角为 30°~45°时.由此可知,随着连通率增大,抗剪强度随节理形貌起伏角的变化幅度也增大.

根据修正的 Lajtai 岩桥破坏理论,在较小连通率和低节理起伏角的情况下,试件发生的破坏模式以张拉破坏为主,并伴有剪切破坏;随着节理起伏角的增加,试件发生剪切破坏的位置及频率增加,破坏模式转为以剪切破坏为主,伴有张拉破坏,进而使岩体发生张拉破坏占总破坏的比率降低,即抗拉强度增加.综上所述,可认为当连通率和法向压力一定时,非贯通岩体节理形貌起伏角越大,非贯通节理岩体抗剪强度越大,且随着连通率的增大,抗剪强度降低.

3.2.2 不同连通率对抗剪强度的影响 为研究不同连通率对非贯通节理岩体抗剪强度的影响,固定法向压力为 1.0 MPa,分别进行连通率为 0.3,0.5,0.7 时的直剪实验.不同节理形貌起伏角的抗剪强度变化,如图 6 所示.

由图 6 可知:非贯通节理岩体抗剪强度与节理连通率的大小成负相关关系.当形貌节理起伏角一定时,节理连通率越大,非贯通节理岩体抗剪强度越小.这是因为非贯通节理岩体的岩桥随着连通率的增大而减小,非贯通节理岩体抗剪强度大小随着连通率大小变化明显.当连通率为 0.3 时,抗剪强度最大;当连通率为 0.5 时,抗剪强度次之;当连通率为 0.7 时,抗剪强度最小.

当法向压力固定为 1.0 MPa,节理形貌起伏角为 30°和 45°时,抗剪强度随连通率的增大而减小,且二者变化趋势大致相同;节理形貌起伏角为 15°时,非贯通节理岩体的抗剪强度变化趋势更加明显.由图 6 可知:当连通率为 0.7、节理形貌起伏角为 15°时,抗剪强度约为 3.29 MPa,该数值远小于其他参数下的抗剪强度.

形貌节理起伏角会增加剪切过程中节理面的相对接触面积,并使剪切实验中预设节理位置处所受的水平剪切力更小,根据修正的 Lajtai 岩桥破坏理论,在剪切力较小的情况下,岩体的抗剪强度明显高于抗拉强度,试件的破坏模式为以张拉破坏为主伴有剪切破坏.综上所述,非贯通节理岩体的抗剪强度与节理形貌起伏角和连通率密切相关,具有高节理形貌起伏角、低连通率的岩体具有较大的抗剪强度,不易发生剪切破坏;反之,具有较低节理形貌起伏角和较高连通率的岩体,其抗剪强度则较小,比较容易发生剪切破坏.

3.2.3 不同法向压力对抗剪强度的影响 为研究不同法向压力对非贯通节理岩体抗剪强度的影响,选取连通率为 0.3、形貌节理起伏角度为 15°的非贯通节理岩体,分别在法向压力为 0.5,1.0,1.5,2.0,3.0 MPa 下进行实验,可得对应的剪切应力分别为 3.702 75,4.820 50,5.182 75,7.187 25,8.738 25 MPa.非贯通节理岩体剪切试验的剪切应力(τ)-切向位移(s_x)曲线,如图 7 所示.

由图 7 可知:当确定其他变量(连通率,形貌起伏角)不变时,非贯通节理岩体抗剪强度随法向压力变化比较明显.当法向压力为 0.5 MPa 时,非贯通节理岩的抗剪强度约为 3.7 MPa,随着法向压力的增大,岩体的抗剪强度也随之增大;当法向压力为 3.0 MPa 时,非贯通节理岩体抗剪强度达到 8.7 MPa.

当法向压力增加时,岩体节理面受到的法向挤压随之增加,由于节理表面是粗糙的,这也增加了节

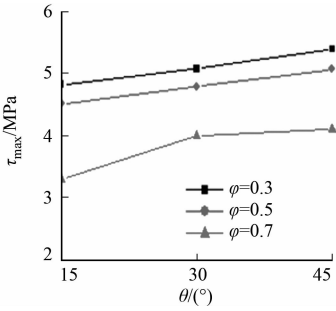


图 5 抗剪强度-起伏角曲线
Fig. 5 Shear strength-undulation angle curve

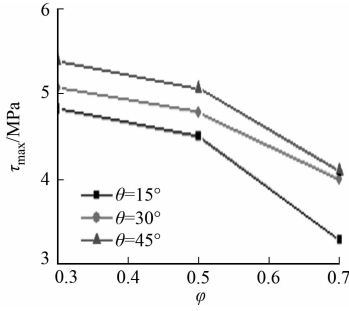


图 6 抗剪强度-连通率曲线
Fig. 6 Shear strength connection rate curve

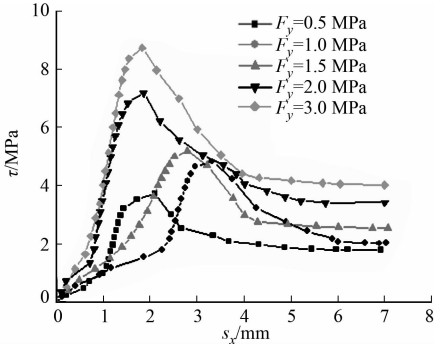


图 7 剪切应力-切向位移曲线
Fig. 7 Curve of shear stress-tangent displacement

理面间的颗粒相互作用力,由修正的 Lajtai 岩桥破坏理论可知,岩体的抗挤压破坏能力与受力成正比。综上所述,可以认为当连通率和形貌节理起伏角不变时,随法向压力的增大,非贯通节理岩体抗剪强度不断提高,二者成正比关系。

4 结论

通过直剪试验,研究了连通率、形貌起伏角及法向压力对非贯通节理岩体剪切强度的影响,并结合 Lajtai 岩桥破坏理论,得出 3 个影响非贯通节理岩体抗剪强度规律的结论。

- 1) 非贯通节理岩体抗剪强度与起伏角大小成正相关关系,起伏角越大,抗剪强度越大。
- 2) 非贯通节理岩体抗剪强度与连通率大小成负相关关系,连通率越大,抗剪强度越小。
- 3) 在其他影响因素相同情况下,法向压力越大,非贯通节理岩体抗剪强度越大。

参考文献:

- [1] 刘远明,夏才初.非贯通节理岩体直剪试验研究进展[J].岩土力学,2007,28(8):1719-1724. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2007.08.036.
- [2] SAVILAHTI T, NORDLUND E, STEPHANSSON O. Shear box testing and modeling of joint bridges[C]// Proceedings of the International Symposium on Rock Joints. Norway: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1990: 295-300.
- [3] GEHLE C, KUTIER H K. Breakage and shear behavior of intermittent rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 687-700. DOI:10.1016/S1365-1609(03)00060-1.
- [4] WONG R H C, CHAU K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 147-164. DOI:10.1016/S0148-9062(97)00303-3.
- [5] WONG R H C, CHAU K T, TANG C A, *et al.* Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws - Part I: Experimental approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 909-924. DOI:10.1016/S1365-1609(01)00064-8.
- [6] 徐亮,林从谋,张在晨,等.节理岩体剪切强度的计算方法及其应用[J].华侨大学学报(自然科学版),2013,34(5): 570-575. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2013.05.0570.
- [7] 俞缙,赵晓豹,李晓昭,等.改进的岩体节理弹性非线性法向变形本构模型研究[J].岩土工程学报,2008,30(9): 1316-1321.
- [8] 俞缙,林从谋,赵晓豹.岩体节理非线性法向循环加载本构模型的改进[J].华侨大学学报(自然科学版),2009,30(6): 694-697. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2009.06.0694.
- [9] 刘远明,夏才初.非贯通节理岩体直剪贯通模型和强度研究[J].岩土力学与工程学报,2006,28(10): 1242-1247. DOI:10.3321/j.issn:1000-4548.2006.10.012.
- [10] 刘远明,夏才初.基于岩桥力学性质弱化机制的非贯通节理岩体直剪试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(7): 1467-1472.
- [11] 夏才初,肖维民,丁增志.非贯通节理 Jennings 强度准则的岩桥弱化和节理面起伏角修正[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3): 485-492.
- [12] 刘远明,夏才初.直剪条件下非贯通节理岩体岩桥力学性质弱化机制及贯通模型初步研究[J].岩土力学,2010,31(3): 698-701. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2010.03.005.
- [13] LAJTAI E Z. Shear strength of weakness planes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1969, 6(5): 509-508. DOI:10.1016/0148-9062(69)90016-3.
- [14] 刘远明.基于直剪试验的非贯通节理岩体扩展贯通研究[D].上海:同济大学,2007.
- [15] 刘远明,夏才初.修正 Lajtai 岩桥破坏模式研究[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会.沈阳:中国岩石力学与工程学会,2006: 747-753.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)