

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.04.13

人工单节理砂岩的三轴试验研究

周杰^{1,2}, 刘礼标^{1,2}, 黄龙生³

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学山区桥梁与隧道工程
国家重点实验室培育基地, 重庆 400074; 3. 中交路桥技术有限公司, 北京 100011)

摘要: 采用云石胶黏结岩块的方法制备人工节理面, 通过直剪试验获得人工节理面的抗剪强度特性, 基于完整和单节理砂岩的常规三轴试验, 分析不同倾角(0° , 30° , 60° , 90°)对单节理岩体试样力学响应的影响。结果表明: 人工节理面在直剪试验中呈现脆性破坏, 其抗剪强度符合 M-C 准则; 不同围压下(2.5, 5.0 和 7.5 MPa)完整砂岩的破坏形态和弹性模量基本相同, 峰值强度随围压增大; 相同围压下(2.5 MPa)不同倾角单节理岩体的破坏形态、弹性模量、峰值强度均不相同, 单节理岩体试样的峰值强度-倾角曲线呈反对称“ ∇ ”形, 节理倾角对岩体力学性质的影响明显, 其中 60° 节理岩体试样的强度最低, 仅为完整岩石强度的 19.7%。推导了过圆柱体试样中心任意斜截面内力的三维计算公式, 根据其理论预测所得完整岩石的破裂面角度和 60° 节理试样的破坏方式均与试验结果相符, 其吻合度较传统的二维分析更高。

关键词: 完整砂岩; 人工单节理岩体; 直剪试验; 三轴压缩试验; 三维分析

中图分类号: TU 459⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)04-0085-06

Triaxial compression test on sandstone specimen with single artificial joint

ZHOU Jie^{1,2}, LIU Libiao^{1,2}, HUANG Longsheng³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing 400074, China;
3. CCCC Road and Bridge Consultants CO. LTD., Beijing 100011, China)

Abstract: The bonding interface of two intact rocks bonded by epoxy adhesive is taken as an artificial joint, the shearing strength characteristics of the artificial joint is obtained by direct shearing tests, and the behaviors of intact sandstone specimen and sandstone specimen with the single artificial joint (the angle between the joint plane and the minor principal stress are 0° , 30° , 60° and 90° , respectively) are analyzed based on the triaxial test results. The results show that the shearing failure mode of the artificial joint shows brittleness damage in the direct shearing tests, and the shear strength meets the Mohr-Coulomb theory. The failure modes and Young's modulus of intact rocks are similar under different confining pressures (2.5, 5.0 and 7.5 MPa), and the peak strength increases with the increasing confining pressure. The failure modes, Young's modulus and peak strengths of the sandstone specimen with the single artificial joint of different angles are different under the contact confining pressure of 2.5 MPa, the curve of peak strength and joint inclination angle is in the shape of anti-tick (∇), and the strength of 60° jointed specimen is only 19.7% of that of intact rocks, indicating that the angle of the artificial joint significantly affects the characteristics of rock mass. 3D calculation formulas for the section internal force through the center of the column specimen are derived.

收稿日期: 2016-12-25; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51308574); 重庆市科委基础与前沿研究项目资助(cstc2014jcyjA30023); 重庆市教委科学技术研究项目资助(KJ1400310)

第一作者: 周杰(1984-), 女, 副教授, 从事岩土工程和隧道工程设计理论及其离散元研究。E-mail: zhoujie_geo@foxmail.com

通讯作者: 刘礼标(1985-), 男, 讲师, 主要从事隧道工程安全风险评价及损伤健康诊断等研究。E-mail: llb0222@126.com

Theoretical analyses of the failure modes of intact rocks and 60° jointed specimen are consistent with the experimental results. The matching degree of theoretical analyses and experimental results is higher than that by the traditional 2D calculation formula.

Keywords: intact sandstone specimen; sandstone specimen with single artificial joint; direct shearing test; triaxial compression test; 3D calculation formulas

大多数天然岩体具有大量的节理面^[1],工程中经常会遇到一组优势节理的岩体,单节理岩体强度的研究不仅具有理论意义,而且可以指导相关岩体工程的加固与设计^[2]。室内试验研究单节理岩体的力学性质,可以采用钻取含节理岩样的方法^[2-5],张志刚等^[2]、Ranjith 等^[3]、王在泉等^[4]、宋彦琦等^[5]对含单一贯通天然节理的岩体进行单轴或三轴压缩试验,分析了节理特性对完整岩石的弱化作用;李宏哲等^[6]先沿单一贯通节理将岩体分成两个岩块,再拼合成耦合接触的岩体试样,其三轴试验表明沿节理面滑移破坏试样的强度和弹性模量均低于完整岩石试样。但含天然节理岩体的制样要求高,且天然节理性质的离散性大,不利于进行单因素分析,为此很多研究成果均基于人工节理岩体试样。Zuo 等^[7]制作了岩石-煤-岩石的复合岩体,研究不同围压下含软弱水平煤层岩体的力学响应。Yang 等^[8]、Heekwang Lee 等^[9]预先在岩石试样上切割不贯通的裂纹,通过室内试验获得不同节理倾角或围压下岩体的宏观破坏特征。此外,很多研究采用相似材料来模拟岩体^[10-13],制备含平行节理、分形分布节理或断续非贯通节理等不同节理特性的人工岩体,分析节理对岩体力学响应的影响。

本文采用云石胶粘结的方法制备人工节理面,通过直剪试验获得其抗剪强度特性;基于完整砂岩和不同倾角($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)单节理砂岩的常规三轴试验,分析单节理倾角对岩体试样三轴破坏特性的影响;推导通过圆柱体试样中心任意斜截面内力的三维计算公式,理论预测完整和单节理试样的破坏特征。

1 完整砂岩的常规三轴压缩试验

完整砂岩在常规三轴试验中的宏观力学响应是分析单一节理对砂岩力学性质响应的基准。按照国际岩石力学试验标准,将重庆地区的砂岩加工成标准圆柱体试样,其直径 $\Phi \times$ 高度 (H) = 50×100 mm。砂岩的常规三轴试验由 RMT-150C 岩石力学试验机完成,试验加载采用位移控制,加载速率为 0.005 mm/s。试验共设置 3 组围压水平,分别为 $2.5, 5.0$ 和 7.5 MPa。

试验结果表明,3 组围压下的砂岩均呈现单一破

裂面(图 1),围压为 $2.5, 5.0$ 和 7.5 MPa 时,破裂角分别为 $75^\circ, 75^\circ$ 和 68° ,破裂角随围压减小^[14]。

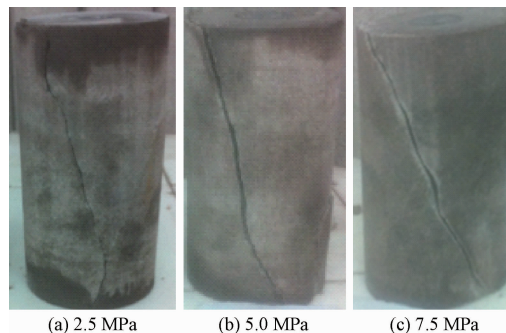


图 1 完整砂岩试样破坏形态

Fig. 1 Failure modes of intact sandstone specimens

结合砂岩应力-应变曲线(图 2)可知,不同围压下,完整砂岩的弹性模量基本相同,约为 9.5 GPa;围压从 2.5 MPa 增长到 7.5 MPa,完整砂岩的峰值强度由 75.0 MPa 增加到 103.0 MPa,峰值应变由 0.86% 增加到 1.02% ,残余强度也有所提高。本试验结果与岩石力学理论及类似试验的结果一致^[14-16]。经计算,试验所用重庆地区完整砂岩的抗剪强度符合 Mohr-Coulomb 准则,黏聚力 $c = 11.7$ MPa、内摩擦角 $\varphi = 47.5^\circ$ 。根据 M-C 准则预测试样的破裂面角度为 $45^\circ + \varphi/2 = 69^\circ$,其值稍小于与试验结果^[16]。

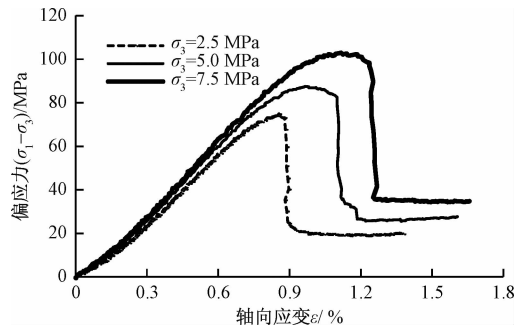


图 2 完整砂岩试样的应力-应变曲线图

Fig. 2 Stress-strain curves of intact sandstone in lab

2 人工节理面的直剪试验

天然节理抗剪性质离散性很大,与节理粗糙度、填充物等诸多因素有关。为分析节理倾角这一单因素对

岩体力学性质的影响,采用云石胶粘结完整岩块的方法制备人工节理面(图3),以保证不同节理面具有相同的力学性质。通过直剪试验获得人工节理面抗剪强度,首先沿垂直方向加载到设定的法向应力,然后保持法向应力恒定,施加剪切力(1 kN/s)直至试样破坏。为获得剪切面的抗剪强度指标,共设置了3组法向应力水平,分别为1.0、1.5和2.5 MPa。



图3 人工节理面直剪试验

Fig. 3 Direct shear test of the artificial joint

直剪试验结果表明,节理面发生脆性剪切破坏,其剪应力-剪应变的发展规律见图4。在剪切开始阶段,较小的剪切力导致节理面发生较大位移。此后,剪应力与剪应变基本呈线性增长,直至剪应力超过其抗剪强度,节理面突然破坏。人工剪切面破坏模式在剪切初期与天然节理不同,这与云石胶的性质及粘结面较为光滑有关。

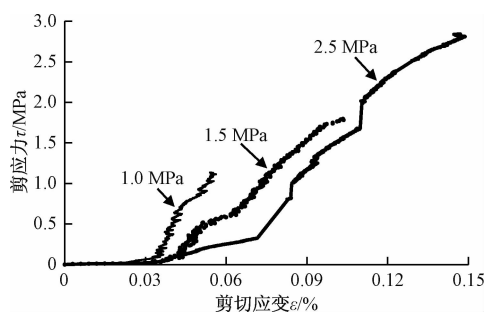


图4 人工节理面剪应力-剪应变曲线

Fig. 4 Shear stress-displacement curves of the artificial joint

直剪试验中施加的法向应力越大,节理面的抗剪强度越高,并满足 M-C 准则(图5)。经计算可得,节理面的黏聚力 $c_j = 0.11$ MPa、内摩擦角 $\varphi_j = 48.5^\circ$ 。制作人工节理面的云石胶相对岩石而言是一种柔性材料,虽然试验所得人工节理面的内摩擦角稍高于完整岩石,但由于人工节理面的黏聚力很小,故人工节理面相对于岩石而言仍然是软弱面。

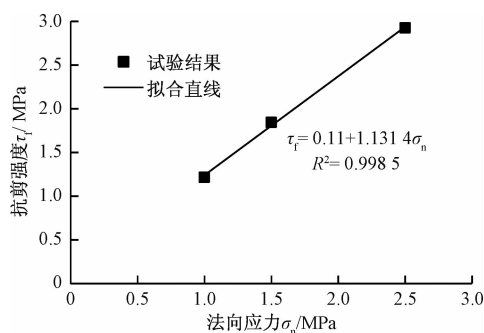


图5 人工节理面抗剪强度线

Fig. 5 Shear strength curves of the artificial joint

3 人工单节理砂岩的三轴压缩试验

3.1 人工单节理砂岩的制备

人工单节理砂岩试样是将完整砂岩试样切割后由云石胶粘结所得。首先,制备完整砂岩试样,直径 $\Phi \times$ 高度(H) = 50 × 100 mm。然后,按照设定的倾角 β (节理面与小主应力夹角)对试样进行切割,保证切割面中心与试样中心重合(图6)。最后,用云石胶将切割后的砂岩岩块进行粘结,形成单节理岩体。室温养护3 d后可进行人工单节理砂岩试样的三轴压缩试验。本实验共制备4组倾角的单节理砂岩试样,节理倾角分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° ,每组3个试样。

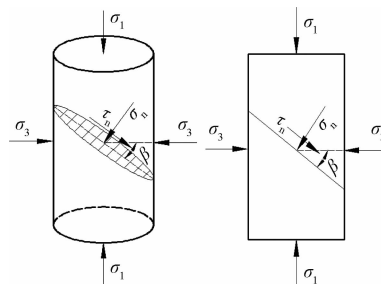


图6 三轴试验中单节理岩体试样示意图

Fig. 6 Specimen with the single artificial joint in triaxial test

3.2 试验结果及分析

不同倾角单节理砂岩试样的三轴压缩试验也是由 RMT-150C 岩石力学试验机完成,保证试验围压均为 2.5 MPa。根据图7所示不同倾角单节理试样的破坏形态可知,试验所用4组倾角的节理岩体呈现4种破坏模式: 0° 节理岩体产生穿节理面的破裂面; 30° 节理岩体不仅产生穿节理面的破裂面,而且还沿节理面发生了滑动; 60° 节理岩体沿节理面发生破坏; 90° 节理岩体产生单一的破裂面,但破裂面未穿过节理面,仅在试样中一个岩块中产生。节理面的存在明显影响了岩体试样的破坏形态,导致试样表现出不同的应力-应变关系特性

(图8)。根据图8可知,节理倾角影响岩体的弹性模量^[2,6],0°节理岩体与完整岩石的弹性模量基本相同,约为9.5 GPa;而30°,60°和90°节理岩体的弹性模量相近,约为4.7 GPa,仅为完整岩石弹性模量的49.5%。

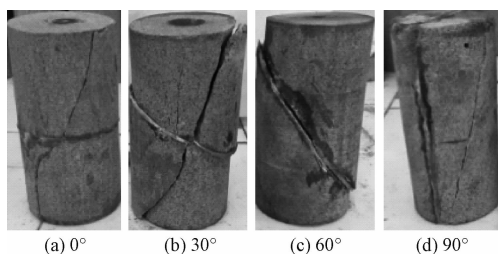


图7 人工单节理砂岩试样的破坏形态

Fig. 7 Typical failure modes of sandstone specimens with the single artificial joint

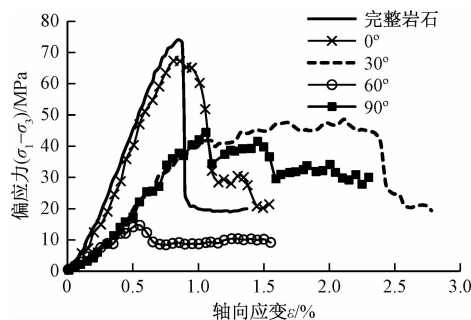


图8 人工单节理砂岩试样的偏应力-轴向应变

Fig. 8 Stress-strain curves of sandstone specimens with the single artificial joint

0°节理岩体与完整岩石试样的应力-应变曲线基本一致,节理面的存在不影响试样的宏观力学响应,这与 Jeager 的单弱面理论吻合^[2]。30°节理岩体呈现塑性破坏的特征,峰值强度减小至47.6 MPa,峰值应变为2.11%,远大于完整岩石的峰值应变。试样的残余强度与完整岩石相近,说明30°节理岩体中的穿节理破坏面为其主破坏面。60°节理岩体发生脆性破坏,岩体强度由节理面的强度决定,峰值强度为14.7 MPa,仅为完整岩石强度的19.7%。节理岩体的峰值应变为0.55%,小于完整岩石的峰值应变,表现出更明显的脆性破坏。90°节理岩体发生塑性破坏,其峰值强度为44.4 MPa,为完整岩石强度的59.2%。残余强度高于完整岩石试样的残余强度,这是由于90°节理岩体试样破裂面仅发生在岩体内的一个岩块中,相对完整的另一半岩块保证了残余强度的发挥。

不同倾角节理岩体试样的峰值强度随节理倾角的变化呈现反对号“∨”的形态(图9),0°节理岩体峰值强度最高且与完整岩石强度相近。随后,岩体试样强

度随节理倾角增大而降低,节理倾角为60°时达到最低;此后岩体试样强度随节理倾角增大,但90°节理岩体的峰值强度仍小于完整岩石的强度。试验所得人工单节理岩体峰值强度随节理倾角的变化规律与 Jeager 单弱面理论的“U”形变化不同,但与 Salcedo 所得节理倾角对石墨千枚岩单轴压缩强度的影响规律相同^[17]。

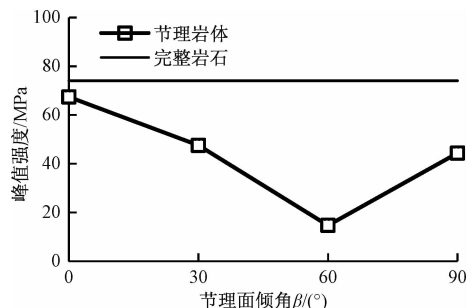


图9 人工单节理砂岩试样峰值强度-节理面倾角关系

Fig. 9 Effects of the joint inclination angles on peak strength of sandstone specimens with the single artificial joint

根据 Jeager 单弱面理论,30°和90°节理的存在不会影响岩体强度,但试验所得30°和90°节理岩体试样的应力-应变曲线不同于完整岩石,其峰值强度较小、峰值应变较大。这可能是因为人工节理岩体试样在切割时产生了一定的损伤,且人工节理面的存在改变了岩体试样内应力的传递,导致人工节理岩体试样的弹性模量和强度均小于完整岩石试样。

人工单节理岩体试验结果与已见研究成果基本相同^[2,6,18],由此说明通过云石胶粘结完整岩块制备人工节理面的方法是可行的。

4 三维力学原理分析

三维圆柱体试样在常规三轴试验中的受力状态可简化为图6所示的二维模式,通过受力平衡可求出试样内任意倾角截面上的正应力 σ_n 和剪应力 τ_n :

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \quad (1)$$

式中: σ_1 ——试样破坏时的轴向应力;

σ_3 ——试验的围压水平;

β ——计算截面的倾角,节理面与小主应力方向的夹角。

对于单节理岩体,节理面上的内力也可根据式(1)进行简化的二维计算,并结合岩石和节理面的抗剪强度公式,预测单节理岩体是发生沿节理面还是穿

节理面的破坏。

实际圆柱体试样处于三维受力状态,沿节理面斜切岩块的三维示意图见图10。据空间几何知识可知,斜切圆柱体节理的截面为椭圆形,其面积 S_e 与圆柱正切面面积 S_c 之比为 $\cos\beta$ 。故节理面面积 S_e 为:

$$S_e = \frac{S_c}{\cos\beta} = \frac{\pi r^2}{\cos\beta} \quad (2)$$

式中: r ——圆柱体岩样的半径。

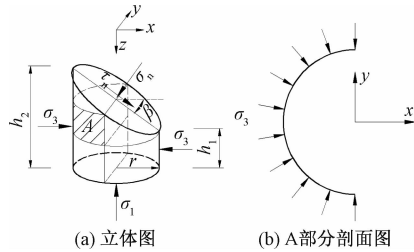


图10 节理面受力的三维分析图

Fig. 10 3D stress diagram of the artificial joint in triaxial test

本文所用人工单节理岩体试样的节理中心通过圆柱体中心,则图10中斜切岩块的高度 h_1 和 h_2 分别为:

$$\begin{aligned} h_1 &= h/2 - r \tan\beta \\ h_2 &= h/2 + r \tan\beta \end{aligned} \quad (3)$$

对于沿节理面斜切所得的岩块隔离体,作用在其右半侧(以 yz 面分界)的围压被左半侧的围压全部抵消,故围压 σ_3 对斜切岩块隔离体的作用力仅剩左侧部分半圆柱体(图10中阴影部分A)上的均布力,该半圆柱体的半径为 r 、高度为 $r \tan\beta$ 。根据极坐标向直角坐标的变换式,可求出围压 σ_3 对斜切岩块隔离体在水平方向的合力为:

$$\begin{aligned} F_{3x} &= \int_0^{r \tan\beta} \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sigma_3 r \cos^2 \theta d\theta \right] dh = \frac{\pi}{2} r^2 \sigma_3 \tan\beta \\ F_{3y} &= \int_0^{r \tan\beta} \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sigma_3 r \sin^2 \theta d\theta \right] dh = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

因为 $F_{3y} = 0$,故节理面上的剪应力仅存在于滑动方向。根据斜切岩块的受力平衡,可求得节理面上的正应力 σ_n 和剪应力 τ_n :

$$\begin{aligned} \tau_n \text{ 方向: } \sigma_1 S_e \sin\beta - F_{3x} \cos\beta &= \tau_n S_e \\ \sigma_n \text{ 方向: } \sigma_1 S_e \cos\beta + F_{3x} \sin\beta &= \sigma_n S_e \end{aligned} \quad (5)$$

将 S_e, S_c 与 F_{3x} 的表达式代入式(5),可得:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3/2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3/2}{2} \cos 2\beta \\ \tau_n &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3/2}{2} \sin 2\beta \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)即为过圆柱体试样中心的任意倾角截面内力的三维计算公式,与式(1)所示截面内力的二维计

算公式形式类似,但两者所代表的莫尔应力圆的半径和圆心坐标不同。

对于完整的岩石试样,若假设其单一破裂面通过试样的中心,可根据式(6)所示的截面内力三维计算公式绘制不同围压下的莫尔应力圆,作其公切线以求试样的抗剪强度参数。对于本文所用的完整砂岩试样,根据截面内力三维计算公式(式(6))可计算出其内摩擦角为 59.3° ,则破裂面角度的理论预测值为 $45^\circ + \varphi/2 = 74.6^\circ$,更接近砂岩试样的实际破裂角 75° 。

对于沿节理面发生破坏的 60° 节理岩体试样,围压 $\sigma_3 = 2.5 \text{ MPa}$ 时,破坏应力 $\sigma_1 = 17.9 \text{ MPa}$ 。假设节理面的黏聚力为0,采用截面内力二维和三维计算公式可分别求得节理面的内摩擦角为 46.4° 和 53.1° ,三维计算结果偏大 14.4% 。根据人工节理面直剪试验结果,节理面黏聚力 $c_j = 0.11 \text{ MPa}$,内摩擦角 $\varphi_j = 48.5^\circ$ 。只有当节理面受力按照式(6)进行三维分析时,理论上节理面才会发生破坏,与试验结果保持一致。

根据对完整岩石和 60° 节理岩体试样破坏模式的理论预测可知,采用本文提出的过圆柱体试样中心任意倾角截面内力的三维计算公式,其理论计算结果与试验结果的吻合度较传统的二维计算结果高。

5 结论

(1)通过 $2.5, 5.0$ 和 7.5 MPa 围压下重庆地区完整砂岩的三轴压缩试验,获得完整砂岩的黏聚力 $c = 11.74 \text{ MPa}$ 、内摩擦角 $\varphi = 47.52^\circ$;不同围压下的砂岩试样均呈现单一破裂面,破裂角与根据 M-C 准则计算的理论破裂面角度有一定差异。

(2)采用云石胶粘结完整岩块的方法制备人工节理面,其在直剪试验中呈现脆性破坏,抗剪强度符合 M-C 准则,黏聚力 $c_j = 0.11 \text{ MPa}$,内摩擦角 $\varphi_j = 48.5^\circ$,相对岩石为软弱面。

(3)不同倾角的人工单节理砂岩试样在三轴压缩试验(围压 2.5 MPa)中表现出明显不同的破坏特性和应力-应变力学响应: 0° 节理岩体试样的强度和弹模与完整岩石相近, $30^\circ, 60^\circ$ 和 90° 节理岩体试样的弹模相近,强度均明显小于完整砂岩试样;人工单节理砂岩试样峰值强度-倾角曲线呈现反对号形“ ∇ ”,节理对岩体强度和破坏特征具有明显影响。

(4)根据刚体受力平衡原理,推导了过圆柱体试样中心任意倾角截面内力(正应力 σ_n 和剪应力 τ_n)的

三维计算公式,据此预测了完整岩石的破裂角度及60°节理岩体的破坏模式,均与试验结果相符,其吻合度较传统的二维分析更好。

参考文献:

- [1] 朱维申,周浩,李邦翔,等. 节理岩体剪切试验的非连续变形方法分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5):49-53. [ZHU W S, ZHOU H, LI B X, *et al.* DDARF analysis of shear tests of jointed rock mass [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5):49-53. (in Chinese)]
- [2] 张志刚,乔春生,李晓. 单节理岩体强度试验研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(4):34-39. [ZHANG Z G, QIAO C S, LI X. Experimental study on the strength of single joint rock mass[J]. China Railway Science, 2007, 28(4):34-39. (in Chinese)]
- [3] Ranjith P G, Fourar M, Pong S F, *et al.* Characterisation of fractured rocks under uniaxial loading states [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2004, 41(3):1-6.
- [4] 王在泉,张黎明,孙辉. 含天然节理灰岩加、卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1):3308-3313. [WANG Z Q, ZHANG L M, SUN H. Experimental research on mechanical properties of limestone containing natural joints under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1):3308-3313. (in Chinese)]
- [5] 宋彦琦,李名,刘江,等. 含不同倾角天然软弱夹层的大理岩破坏试验[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4):623-629. [SONG Y Q, LI M, LIU J, *et al.* Experimental test on marble containing natural weak interlayer of different angles[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4):623-629. (in Chinese)]
- [6] 李宏哲,夏才初,王晓东,等. 含节理大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10):2118-2123. [LI H Z, XIA C C, WANG X D, *et al.* Experimental study on deformation and strength properties of jointed marble specimens [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10):2118-2123. (in Chinese)]
- [7] Zuo Jianping, Wang Zhaofeng, Zhou Hongwei, *et al.* Failure behavior of a rock-coal-rock combined body with a weak coal interlayer[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(6):907-912.
- [8] Yang S Q, Jiang Y Z, Xu W Y, *et al.* Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45:4796-4819.
- [9] Heekwang Lee, Seokwon Jeon. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48:979-999.
- [10] 王谦源,李晔. 分形节理岩体强度与变形尺度效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5):1325-1328. [WANG Q Y, LI Y. Experimental study of scale effects in strength and deformation of fractal-joint rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5):1325-1328. (in Chinese)]
- [11] 陈新,廖志红,李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度变形影响的单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4):781-789. [CHEN X, LIAO Z H, LI D J. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4):781-789. (in Chinese)]
- [12] 张波,李术才,张敦福,等. 含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩试验及断裂损伤研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6):1647-1652. [ZHANG B, LI S C, ZHANG D F, *et al.* Uniaxial compression mechanical property test, fracture and damage analysis of similar material of jointed rock mass with filled cracks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6):1647-1652. (in Chinese)]
- [13] Hadi Haeri, Kourosh Shahriar, Mohammad Fatehi Marji, *et al.* Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67:20-28.
- [14] 胡卸文,伊小娟,王帅雁,等. 不同三轴应力途径下红砂岩力学特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4):57-61. [HU X W, YI X J, WANG S Y, *et al.* Study on red sandstone mechanical property under different stress path by triaxial test [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4):57-61. (in Chinese)]

(下转第97页)

- [5] 黄志军,赖远明,李双洋,等. 交通荷载作用下冻土路基动力响应分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 418 - 426. [HUANG Z J, LAI Y M, LI S Y, *et al.* Dynamic response of embankment in permafrost regions under traffic load [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 418 - 426. (in Chinese)]
- [6] 陈剑,苏跃宏. 交通荷载作用下公路路基动力特性的数值模拟研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 44 - 48. [CHEN J, SU Y H. Numerical simulation of dynamic perform of highway subgrade under traffic loads [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(5): 44 - 48. (in Chinese)]
- [7] 刘飞禹,张乐,余炜,等. 交通荷载作用下桩承式加筋路堤性能分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊): 50 - 54. [LIU F Y, ZHANG L, YU W, *et al.* Parametric study on geogrid-reinforced pile-supported embankments under traffic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Sup): 50 - 54. (in Chinese)]
- [8] 王贺,杨广庆,吴连海,等. 墙顶荷载对加筋土挡墙工作特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2573 - 2581. [WANG H, YANG G Q, WU L H, *et al.* Experimental study of geogrids reinforced retaining wall under overhead loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2573 - 2581. (in Chinese)]
- [9] 刘飞禹,赵国兴,蔡袁强,等. 移动荷载下加筋道路系统的动力响应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1): 57 - 64. [LIU F Y, ZHAO G X, CAI Y Q, *et al.* Dynamic response of reinforced pavements system subjected to moving loads [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(1): 57 - 64. (in Chinese)]
- [10] 刘飞禹,杨风云. 移动荷载作用下加筋路堤和轨道系统的三维动力响应[J]. 土木建筑与环境学报, 2013, 35(4): 101 - 108. [LIU F Y, YANG F Y. 3-D Dynamic response of reinforced embankment and track system subjected to moving traffic load [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4): 101 - 108. (in Chinese)]
- [11] 罗烈日,郑俊杰. 交通荷载下斜坡加筋路堤动力特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(4): 72 - 76. [LUO L R, ZHENG J J. Study on dynamic characteristics of slantwise geosynthetic reinforced embankment under traffic load [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2015, 36(4): 72 - 76. (in Chinese)]
- [12] 刘少文,张军,孙玲. 交通荷载下非对称加筋路堤动力特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(2): 41 - 45. [LIU S W, ZHANG J, SUN L. Study on dynamic behavior of asymmetric reinforced embankment under traffic load [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35(2): 41 - 45. (in Chinese)]
- [13] 王仕传,凌建明. 交通荷载作用下加筋土路基残余变形减小的机理分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 115 - 120. [WANG S C, LING J M. Mechanism analysis of the decrease of residual deformation of reinforced subgrades under traffic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 115 - 120. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞

(上接第90页)

- [15] 徐永福,孙长龙,俞鸿年. 常温下砂岩的变形特征及其影响因素[J]. 岩土力学, 1995, 16(1): 61 - 63. [XU Y F, SUN C L, YU H N. Deformation characteristics of sandstone under normal temperature and affecting factors [J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(1): 61 - 63. (in Chinese)]
- [16] 苏承东,付义胜. 红砂岩三轴压缩变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3164 - 3169. [SU C D, FU Y S. Experimental study of triaxial compression deformation and strength characteristics of red sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1): 3164 - 3169. (in Chinese)]
- [17] 郭靛. 节理岩体变形与强度特征的三维数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2009. [GUO L. Three-dimensional numerical simulation of the deformation and strength characters of jointed rock mass [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞