

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.003

软-硬自然节理的改进 *JRC-JCS* 剪切强度公式

宋磊博¹, 江 权², 李元辉¹, 杨成祥¹, 刘 畅², 杨 冰², 李邵军²

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 借助三维白光扫描技术和 3D 打印技术, 浇筑了若干块含相同自然节理面、上下盘壁面强度不同的吻合软-硬节理混凝土试块, 并对其进行了不同常法向应力下的剪切试验。试验表明, 试件的剪胀程度随着节理壁面强度系数 λ_{σ_c} 值的增大而增大, 剪切强度随着 λ_{σ_c} 值的增大而减小。同时, 研究表明, 对于软-硬节理, 在剪切过程中, 软-硬节理两侧都发生了破坏, 节理的等效壁面强度 $JCS_{\text{等效}}$ 受壁面强度系数 λ_{σ_c} 的影响, 相对于硬节理侧, 较软节理侧对等效壁面强度 $JCS_{\text{等效}}$ 的贡献更大, 并且这种趋势随壁面强度系数 λ_{σ_c} 的增大而增强, 这也是 *JRC-JCS* (节理粗糙系数-节理壁面强度) 强度公式预测软-硬节理强度时具有一定局限性的原因。根据以上分析, 以较软节理侧的壁面强度 $JCS_{\text{软}}$ 为基准, 建立了关于壁面强度系数 λ_{σ_c} 的修正关系函数 $f(\lambda_{\sigma_c})$ 来确定软-硬节理的等效壁面强度 $JCS_{\text{等效}}$, 进而提出了考虑软-硬节理不同壁面强度组合类型的修正 *JRC-JCS* 剪切强度公式, 该新公式是对现有的 *JRC-JCS* 强度公式的完善。

关 键 字: 软-硬节理; 节理壁面强度 JCS ; 剪切强度公式; 节理面的破坏特征

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)10-2789-10

Improved *JRC-JCS* shear strength formula for soft-hard natural joints

SONG Lei-bo¹, JIANG Quan², LI Yuan-hui¹, YANG Cheng-xiang¹,
LIU Chang², YANG Bing², LI Shao-jun²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: With the help of 3D scanning technology and 3D printing technology, several specimens with the same natural joint but different joint wall compressive strengths were first made, and shearing tests under different constant normal stresses were conducted on them. The direct shear test results show that the strength characteristics on both sides of soft-hard joints affect the shear expansion and shear strength, that is, with the increase of wall strength coefficient λ_{σ_c} , the shear dilatation increases but the shear strength decreases. Moreover, the study also indicates that the damages in the joints surfaces occur on both sides of the soft-hard joints during the shearing process, and the equivalent joint wall strength JCS_{eq} is affected by the wall strength coefficient λ_{σ_c} . Compared with the hard joint side, the equivalent wall strength JCS_{eq} is improved to a greater extent by the soft joint side, and the trend is strengthened with the increase of the wall strength coefficient λ_{σ_c} . That is why *JRC-JCS* strength formula has some limitations in predicting the strength of soft-hard joints. Based on the above analysis, JCS_{soft} is the basis for establishing the modified relational function $f(\lambda_{\sigma_c})$ of soft-hard joints equivalent wall strength JCS_{eq} with respect to wall strength coefficient λ_{σ_c} . And an improved *JRC-JCS* shear strength formula considering different wall compressive strength combination types of soft-hard joints is proposed, which is the complement of current *JRC-JCS* strength formula.

Keywords: soft-hard joint; joint wall compressive strength JCS ; shear strength formula; failure characters of joints

1 引 言

工程岩体中一般含有大量纵横交错、产状各异、

规模不同的节理面, 它们的存在往往对岩体的变形和破坏起着控制作用, 工程实践证明, 关于工程岩体的失稳问题大部分与节理的破坏有直接关系^[1-2]。

收稿日期: 2016-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2016YFC0600707, No. 2016YFC0801605); 国家自然科学基金资助(No. 41372315)。

This work was supported by the State Key Research Development Program of China (2016YFC0600707, 2016YFC0801605) and the National Natural Science Foundation of China (41372315).

第一作者简介: 宋磊博, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事岩石节理表面特征分析和岩石节理剪切力学特性的研究工作。

E-mail: song_leibo@163.com

通讯作者: 江权, 男, 1978 年生, 博士, 研究员, 主要从事地下工程数值模拟、大型硐室群稳定性分析、工程地质灾害治理等方面的研究工作。

E-mail: qjiang@whrsm.ac.cn

因此, 含有软弱节理岩体的剪切行为性质一直是国内外学者研究的热点问题。

岩体节理的剪切强度是度量岩体稳定性、反映剪切行为的重要因素, 自 Patton^[3]基于剪胀效应首次将起伏角引入摩尔-库仑公式提出双线性剪切强度公式以来, 国内外学者相继提出了数十个在常法向应力下的节理峰值剪切强度公式。例如 Ladanyi 等^[4]在考虑锯齿状节理互锁作用的基础之上, 提出了非线性节理峰值剪切强度公式; Barton 等^[5-6]以天然节理的剪切试验为基础, 通过引入节理粗糙系数 *JRC* 来表征节理表面的形态特征对剪切行为的影响, 提出了 *JRC-JCS* 峰值剪切强度公式; 岩石节理的剪切行为受剪切方向的影响, Kulatilake 等^[7]提出了可以表征节理各向异性特征的剪切强度公式; Zhao^[8]考虑了节理的吻合状态, 并以节理吻合系数 *JMC* 表征节理的吻合程度, 提出了 *JRC-JMC* 峰值剪切强度公式; Homand 等^[9]单纯从节理面几何特征出发, 用 5 个形貌参数来描述三维节理面的形貌特征, 并建立了考虑三维形貌参数的节理剪切强度公式; Grasselli 等^[10]借助节理微元有效剪切倾角与其对应接触面积的统计数学模型, 建立了节理的三维剪切强度公式; Xia^[11]在 Grasselli 剪切公式的基础上建立了含有剪胀形式的三维剪切强度公式; 孙辅庭等^[12]在考虑节理面三维形貌特征的基础上, 提出了节理三维形貌特征的 Patton 剪切模型; 唐志成等^[13]建立了含统计参数坡度均方根 Z_2 的剪切强度公式。

以上大部分剪切公式中牵涉到表征岩石节理壁面性质的参数, 例如在 *JRC-JCS* 剪切强度公式^[5-6]、Kulatilake^[7]的剪切强度公式、*JRC-JMC* 剪切强度公式^[8]、Belem^[9]的剪切强度公式以及孙辅庭等^[12]的强度公式中, 以节理壁面的单轴抗压强度来表征其对剪切强度的影响; 而 Grasselli^[10]的剪切强度公式、Xia 等^[11]的剪切强度公式以及唐志成等^[13]的剪切强度公式则以抗拉强度来衡量节理壁面强度对剪切强度的作用。上述剪切公式中都是在上、下盘节理面壁面性质相同的基础上提出的, 但在部分工程中岩体接触面两侧的节理壁面强度是不一样的, 例如采矿工程中充填尾砂胶结体 CPB (cemented paste backfill) 与围岩接触面的稳定性 (CPB-岩石) 问题^[14]以及矿岩接触面的稳定性问题 (岩石-矿石)^[15]以及边坡工程中软硬岩互层边坡的失稳问题 (硬岩-软岩)^[16]等, 此类工程难题从科学研究角度可归结于具有不同壁面性质软-硬节理的破坏问题。当涉及到不同壁面强度节理的稳定性问题时, 通常的做法

是以壁面强度较低侧的力学参数作为节理的计算参数, 例如在计算充填采矿中尾砂胶结充填体 CPB 与围岩接触面的稳定性时, 常常以胶结充填体的力学参数为计算参数^[17-18]。但 Nasir^[19]分别对 CPB-CPB 试件和 CPB-岩石 (石灰岩) 试件进行剪切试验发现, 在相同的法向应力条件下, CPB-岩石试件的剪切强度要比 CPB-CPB 试件的剪切强度要低。Atapour 等^[20]以石膏-混凝土试件为研究对象, 发现在相同条件下, 虽然软-硬节理试件的剪切行为更接近于软-软节理, 但石膏-混凝土试件的剪切强度要大于混凝土-混凝土试件、小于石膏-石膏试件的强度。故将壁面强度较低侧的力学参数作为软-硬节理的计算参数的方法也存在一定的问题。

针对以上问题, Ghazvinian 等^[16]以锯齿状软-硬节理为研究对象, 发现在剪切过程中节理凸起体的剪断全部来自较软节理面一侧, 并在假设硬节理面的一侧是刚性的基础上首次建立了常法向应力下考虑壁面强度特征的软-硬剪切强度公式。但在实际工程中, 自然节理的表面远比锯齿状节理面复杂。例如, Johnston 等研究了光滑的^[21]、规则锯齿状的^[22]、不规则锯齿状的^[23]岩石-混凝土试件的剪切行为特征, 发现其剪切行为与其表面形貌有密切关系。因此, 相对于锯齿状节理, 自然节理的剪切行为必定更加复杂, 在剪切过程中在硬节理的表面一侧也可能发生剪断破坏, 故有必要对软-硬自然节理的剪切强度特征进一步研究。

因此, 本文借助 3D 扫描技术和 3D 打印技术, 浇筑了若干块含相同自然节理面、上下盘壁面强度不同的完全吻合混凝土试块, 并对其进行了常法向应力下的剪切试验; 根据试验结果, 分析了壁面强度特征对试件变形、强度以及破坏特征的影响, 在此基础上, 建立了常法向应力下含自然节理面, 考虑壁面强度特征的软-硬节理的修正 *JRC-JCS* 剪切强度公式。

2 软-硬节理试件的制备及试验结果

2.1 试验材料及试验设计方案

真实岩石节理表面形态复杂多样, 获取具有相同表面形貌特征的岩石节理试样是非常困难的, 进而导致试验结果的重复性和稳定性较差。为避免这些问题, 本文借助三维光学面扫描系统和 3D 打印技术来获得原岩节理形貌特征和节理的 PLA 打印模型, 并利用水泥砂浆来浇筑含有相同自然节理面的混凝土试样进行研究。

选择合适的浇筑材料是制作含相同形貌吻合节

理的关键因素。本文为更好地复制出与原岩节理的形貌特征，对试验材料进行了慎重的选择：①选择超细石英砂，以消除因大颗粒骨料无法更好地复制出节理面微小形貌特征的影响；②选择快硬硅酸盐水泥，以缩短浇筑节理面的凝固时间，消除因浇筑凝固时间过长而导致上、下盘浇筑试件间间隔太长而造成的影响。

为研究软-硬自然节理的剪切强度特征，以取自工程现场的自然节理面 A 为研究对象（见图 1），并选取图 1 所示的区域为研究对象，其尺寸为 150 mm×150 mm。本文共设计 3 组含不同壁面强度组合的试验，如图 1 所示，其中，LLJCS 组节理的壁面强度为低-低强度组合，LHJCS 组节理的壁面强度为低-高强度组合，LMJCS 组节理的壁面强度为低-中等强度组合。

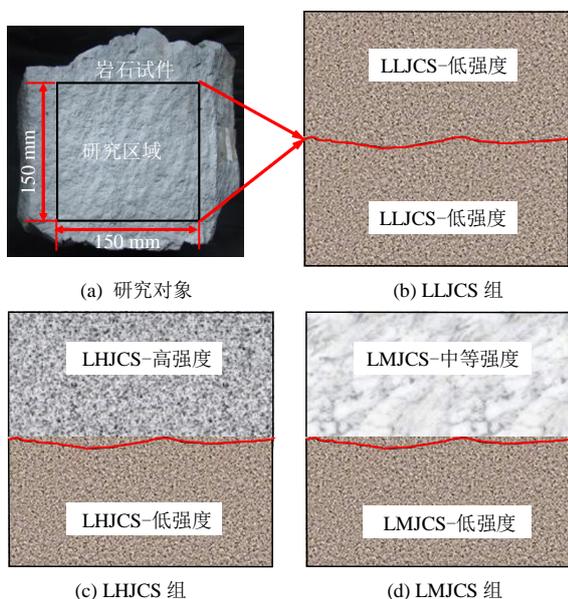


图 1 试件浇筑方案
Fig.1 Specimen casting scheme

确定合适的材料配比是试验的关键，为此以水泥、超细石英砂为研究因素进行正交试验，分别以不同的配比浇筑混凝土试件，然后在 RMT-150C 岩石力学试验机上进行单轴压缩试验，经过测试后选择如表 1 所示的配比，其中 3 种不同配比类型按单轴抗压强度不同分别命名为低强度、中等强度、高强度 3 种，力学参数如表 1 所示，试验曲线如图 2 所示。另外，为表征节理壁面强度不同的组合方式，定义节理的壁面强度系数为

$$\lambda_{\sigma_c} = \frac{\sigma_{c_hard}}{\sigma_{c_soft}} \quad (1)$$

式中： λ_{σ_c} 为壁面强度系数； σ_{c_soft} 为节理壁面强度较小侧的抗压强度； σ_{c_hard} 为节理壁面强度较大侧

的抗压强度。

因此，LHJCS 组、LMJCS 组和 LLJCS 组试件的 λ_{σ_c} 分别为 3.12、1.97、1.00。

表 1 不同配比试件的基本力学参数
Table 1 Basic mechanical parameters of specimens with different proportions

类型	水泥：石英砂：水	单轴抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E/GPa
高强度	1:1:0.3	68.37	22.58
中等强度	1:2:0.4	43.14	21.27
低强度	1:4:0.6	20.91	12.21

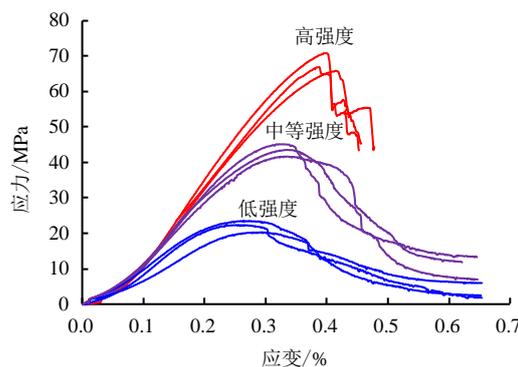


图 2 试件试验结果
Fig.2 Experimental results of specimens

2.2 剪切试件的制备

部分学者的研究中也涉及过利用水泥砂浆浇筑含原岩节理面的试件^[24-25]，本文借助 3D 光学面扫描系统和 3D 打印技术以及合适的浇筑方法来进行剪切试件的制备工作。

3D 光学面扫描系统主要完成原岩节理面 A 的测量工作，该系统采用国际先进的微结构白光投影技术和外差式多频相移三维光学测量技术，主要由三维白光扫描仪、扫描控制软件及后处理软件组成（如图 3(b)所示），具有测量精度高（单幅测量精度 ± 0.005 mm）、测量速度快（单面扫描时间 < 3 s）、抗干扰能力强等优点。该测量方法属于非接触测量方式，可以有效地防止测量过程中原岩节理面的破坏。3D 打印技术主要完成节理模型的打印，它是一种以数字模型文件为基础的快速成型技术，其打印精度为 0.02 mm，本文采用高分子材料 PLA 为打印原材料，获得的打印实体模型具有一定强度，可以避免在浇筑过程中节理表面形态的损伤，并且可以重复利用。剪切试件的制备步骤如下（见图 3）：

(1) 节理表面的测量。

①岩石表面预处理：首先在节理面表面喷涂一层薄薄的白色显像剂，以确保扫描时的测量效果；然后在节理表面粘贴标志点，以实现多次扫描数据

的全自动智能多视拼接（见图 3(a)）。

②节理的扫描和后处理：将处理后的试块放置于扫描台上，通过扫描控制软件控制三维白光扫描仪进行扫描，并利用系统所提供的后处理软件进行扫描数据的处理便可得到节理面的点云（见图 3(c)）。

(2) 节理 3D 打印模型的制作

首先利用 MATLAB 软件编程提取研究区域内的点云数据（见图 3(d)），并利用点云数据创建节理的数字打印模型（见图 3(e)），然后将其导入 3D 打印机中按照一定的步骤打印，进而得到了节理面的 PLA 打印模型（见图 3(f)）。

(3) 软-硬剪切试件的浇筑

①固定 PLA 打印模型：将制作好的 PLA 打印模型放置于 150 mm×150 mm×150 mm 的方型钢制

混凝土试模中，然后在其含节理面侧的表面以及试模内侧涂刷一层液体脱模剂，以防止试件凝固后无法脱模（见图 3(g)）。

②上盘节理 A 的制作：首先，将超细石英砂、快硬水泥和水等按照一定的比例混合、搅拌；然后采用分层加料、分层捣实的方法进行浇筑，以保证制作试件的质量和密实度；当浇筑至与模具上部平齐时停止浇筑，并将表面抹平（见图 3(h)）；最后等到浇筑试件完全凝固后，拆开模具，分离 PLA 打印模型和上盘节理面 A。

③下盘节理 B 的制作：将制得的上盘节理 A 置于混凝土试模中，在节理 A 表面涂一层液体脱模剂，同样采用分层加料、分层捣实的方法浇筑节理面 B（见图 3(i)），并且对其按照《混凝土结构工程施工质量验收规范》^[20]进行养护。

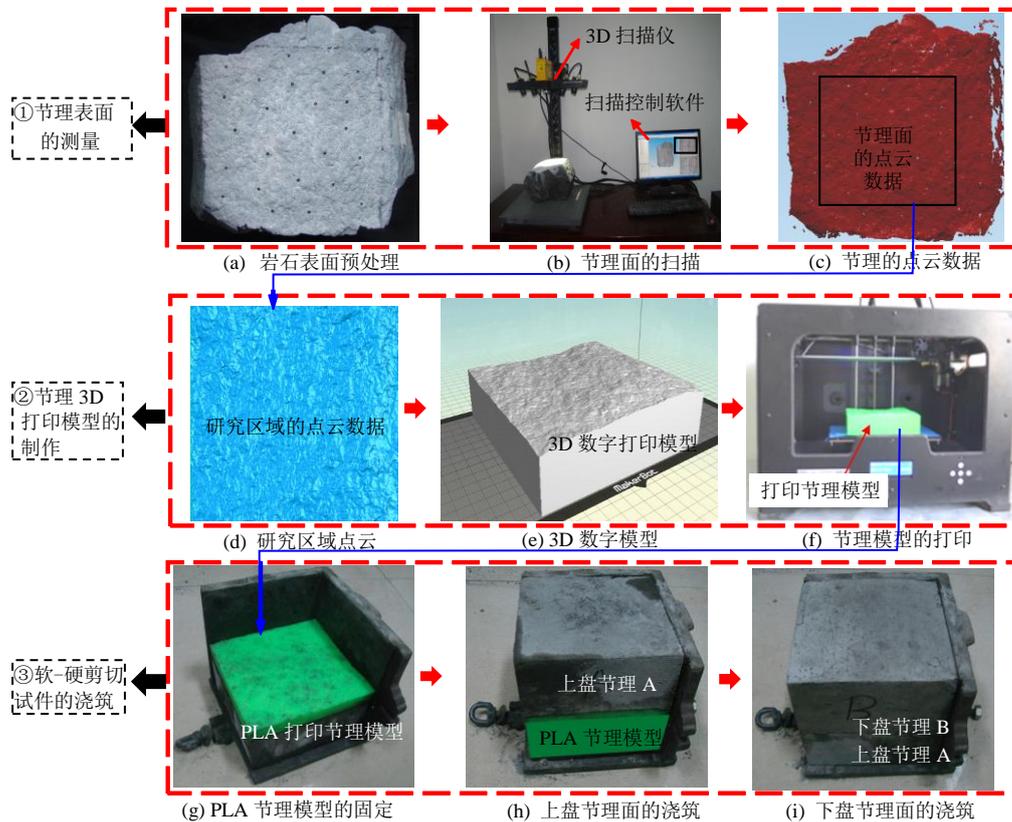


图 3 岩石节理面的扫描过程
Fig.3 Scanning process of rock joint

值得指出的是，当上、下盘节理的壁面强度不同时，为便于节理面的成型，先浇筑壁面强度较高侧的节理面。本文共浇筑 27 块混凝土试块，每组 9 块。另外为测量 3 组试块节理面的基本摩擦角，每组分别浇筑了 3 块起伏度为 0 的混凝土试块，并在低法向应力下进行了剪切试验，测得 LLJCS 组试件、LMJCS 组试件以及 LHJCS 组试件的基本摩擦

角分别为 34.0°、32.0°和 31.1°。

2.3 试验方案及试验结果

本文是在常法向应力 (CNL) 条件下的剪切试验，每组试块以节理较弱壁面强度侧的 $\sigma_n / \sigma_{c_soft}$ 为梯度分 3 种不同法向应力 σ_n 施加，分别取 $\sigma_n / \sigma_{c_soft} = 1/80, 1/20, 1/5$ ，即法向应力每个法向应力梯度做 3 块试块， σ_n 分别为 0.27、1.06、4.21 MPa。

该试验是在 RMT-150C 岩石力学试验系统上完成的,该系统是计算机控制的多功能电液伺服试验机,主要用于岩石和混凝土一类材料的力学性能试验,可以完成单轴压缩、单轴间接拉伸、三轴压缩和剪切等多种岩石力学试验。另外,利用 3D 光学面扫描系统对剪切前后试块的节理表面形态进行测量,为后续分析做准备。

常法向应力 (CNL) 条件下的剪切试验过程可分为 3 步: ①对试件按载荷控制方式以一定的加载速度施加法向载荷至预定值,加载速度为 0.5 kN/s; ②再按变形控制方式施加切向载荷,加载速度为 0.005 mm/s; ③在试验过程中法向应力由伺服控制系统保持恒定,当试验达到残余强度值或剪切位移到达 10 mm 时停止试验。在试验过程中,通过剪切

伺服控制软件,采集整个剪切过程中的法向应力、法向变形、剪切应力和剪切位移等试验数据,典型试件试验结果如图 4 所示。

从图中可知: ①峰值剪切强度随着法向应力的增加而增加,在达到峰值剪切强度后出现了不同程度的应变软化现象。②在试验初期剪胀曲线都出现了一定程度的压密剪缩,且随后都出现了不同程度的剪胀现象;但最终的剪胀程度却随着法向应力的增大而减小,且当法向应力达到一定程度后,在剪切过程中可能将不出现剪胀现象。③在相同的法向应力条件下,试件的剪切强度和剪胀程度受节理壁面强度的影响,其剪切强度随着壁面强度系数 λ_{σ_c} 的增大而减小,而剪胀程度却随着 λ_{σ_c} 的增大而增大。

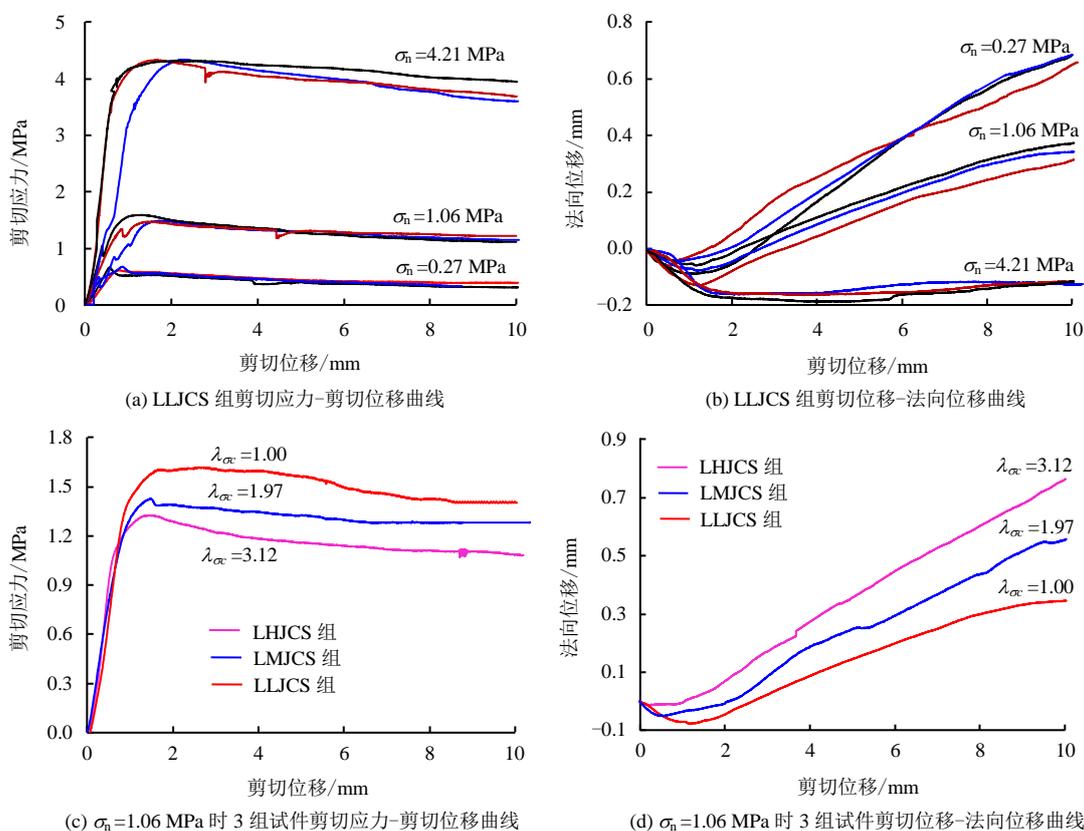


图 4 典型的剪切试验曲线
Fig.4 Typical shear strength-shear displacement curves

3 JRC-JCS 强度公式对软-硬节理强度适用性分析

Barton 以自然节理面为基础所提出的 JRC-JCS 峰值剪切强度公式是工程中运用最为广泛的剪切强度准则,其表达式为^[5-6]

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi \right] \quad (2)$$

式中: τ 为节理面峰值剪切强度; φ 为节理面表面的基本摩擦角。

从式 (2) 可以看出,节理的壁面强度 JCS 是强度准则中一个重要的参数,对于新鲜节理, JCS 一般取为节理的单轴抗压强度。但针对类似于本文中软-硬节理的情况,节理两侧壁面的抗压强度是不同的,有必要对 JRC-JCS 强度公式针对软-硬节理的适用性进行分析。

3.1 JRC-JCS 强度公式对软-硬节理强度的估算

在 JRC-JCS 公式的使用过程中,首要问题就是确定节理的粗糙度系数 JRC 值,但由于 JRC 值的确定具有主观性和局限性,往往会低估节理面的形貌特征,导致其估算值较试验值偏低^[9-10, 27]。因此,为消除该问题对研究的影响,本文利用 LLJCS 组试件在不同法向应力下的剪切试验结果反算出节理面的 JRC 值。LLJCS 组试件的参数都是已知的 ($\varphi = 34^\circ$, $JCS = 20.9$),经计算节理的 $JRC = 16.917$ 。

软-硬节理试件两侧的壁面强度是不同的,为更全面地分析 JRC-JCS 剪切强度的适用性,强度公式中的 JCS 分别取较低壁面强度侧和较高壁面强度侧的单轴抗压强度 σ_c ,然后将其代入 JRC-JCS 强度公式中进行估算。图 5 给出了 LHJCS 组的计算结果,从图中可知,当以较低壁面强度侧的强度 σ_{c_soft} 作为 JCS 的计算值时, JRC-JCS 公式的计算值较试验值偏小,而以较高壁面强度侧的 σ_{c_hard} 作为 JCS 的计算值时,其估算值较试验值偏大,并且这种偏差随着法向应力的增加而增大。因此,针对类似于软-硬节理的工程问题中, JRC-JCS 剪切强度公式具有一定的局限性。

3.2 节理壁面强度对剪切破坏程度的影响

岩石材料的破坏与能量的变化密切相关^[28],试块的破坏是上、下盘节理在剪切过程中的爬坡滑移和凸起剪断造成的,其间伴随着能量的存储及耗散,这是宏观力学响应的深层原因,而峰值剪切强度正是宏观力学特征的其中一种体现,剪切强度特征必然与试件的破坏形态差异性有关。而节理两侧不同的壁面强度特征是软-硬节理区别于一般节理的最

大特点,因此,本文从软-硬两侧的壁面破坏特征入手分析。

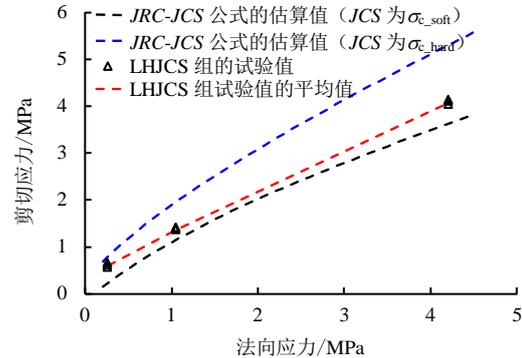


图 5 JRC-JCS 强度公式对软-硬节理强度的估算
Fig.5 Estimation of soft-hard joint shear strength by JRC-JCS strength formula

由于自然岩石节理面的形态复杂,并具有一定的随机性,因此,本文首先从节理面的 2D 局部破坏特征入手分析,分别在 LHJCS 组试件的节理表面上选取两条剖面线,其位置如图 6 所示。利用扫描所得的点云数据,画出不同法向应力下剪切前、后剖面线的形态,进而分析节理表面的 2D 局部破坏特征,从直观上观察节理的破坏程度。需要说明的是,为了获得与自然节理面一致的浇筑样,虽然在浇筑方法和材料选择上进行了慎重地选择和改进,但因浇筑过程的人为主观原因不可避免地会出现一些可接受的离散性误差^[25],但为了统一观察不同试块剪切前、后的变化,本文剪切前的剖面线取自岩石表面的扫描数据,这样会为观察剪切前、后剖面线的形态变化带来一些影响,但这是可以接受的。其结果如图 6 所示,由图可知:

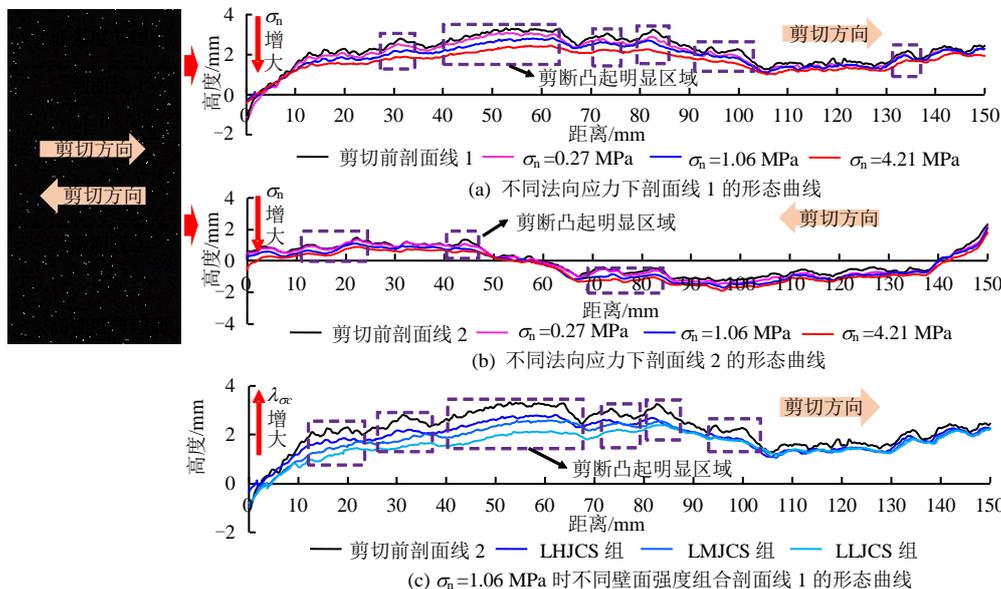


图 6 剪切试块的局部微观破坏特征

Fig.6 Failure mechanism of block in shear test

(1) 在低法向应力下 ($\sigma_n=0.27$ MPa), 节理两侧的剖面线 1、2 的曲线形态与未剪切的形态基本保持一致, 这说明在低法向应力下, 节理面两侧的破坏区域主要以爬坡磨损为主。

(2) 随着法向应力的增加 ($\sigma_n=1.06$ 、 4.21 MPa), 剖面线 1 出现明显的剪断凸起现象, 并且节理面的剪断轨迹逐渐下移, 这说明剪断的程度随着法向应力的增大逐渐增强。剖面线 2 也表现出与剖面线 1 相类似的规律, 但其剪断破坏的程度和范围远小于剖面线 1。

为分析相同法向应力下壁面强度对剪切破坏特征的影响, 图 6(c)给出了在法向应力 1.06 MPa 下 3 组试件剖面线 1 的曲线形态。从图中可知, 3 组试件的剖面线 1 都发生了较大范围的凸起剪断, 并且 3 组试件微凸体剪断位置基本一致; 但对比三者凸起剪断的程度可以发现, 随着壁面强度系数 λ_{σ_c} 的增大, 其破坏位置的迹线逐渐升高, 剪断破坏程度逐渐减小。

上文直观地分析了壁面强度特征对节理面的 2D 局部破坏特征的影响, 值得指出的是, 由于自然节理具有复杂的表面形貌特征, 因此, 很难区分破坏区域是由爬坡磨损还是由微凸体剪断造成的, 但

试块的宏观破坏特征是由每个凸起体破坏形态的综合表现。为此从 3D 宏观角度, 定量计算试块剪切后节理的剪切破坏体积, 进而分析壁面强度对节理剪切破坏程度的影响。定量计算试块剪切前、后体积的变化方法如下: ①点云数据的对齐: 以剪切前节理面的中位基准面为对齐平面, 利用相关软件将试件剪切前、后的点云数据对齐, 如图 7 所示; ②剪切破坏面积的计算: 以经过剪切前节理面最低点且平行于对齐平面的水平面为计算基准面, 对等间距点云数据进行三角剖分, 以每个剖分三角形在基准面上的投影为底面, 构成斜截三棱柱体积元, 求出所分割成的斜截三棱柱之和作为试块体积, 剪切前、后的体积相减即为剪切破坏体积。3 组试件节理两侧的剪切破坏体积其结果如图 7(b)、7(c)所示, 从图中可知: ① 3 组试块节理两侧的剪切破坏体积都随着法向应力的增加而增大, 并且相对于 LLJCS 组试件, LHJCS 和 LMJCS 两组试件的体积变化趋势更接近; ②在相同法向应力下, 试块的剪切破坏体积受节理强度特征的影响, 即随着节理面壁面强度系数 λ_{σ_c} 值的增大而减小。由以上可知, 两侧节理对壁面强度 JCS 的贡献程度受法向应力和节理强度特征的影响。

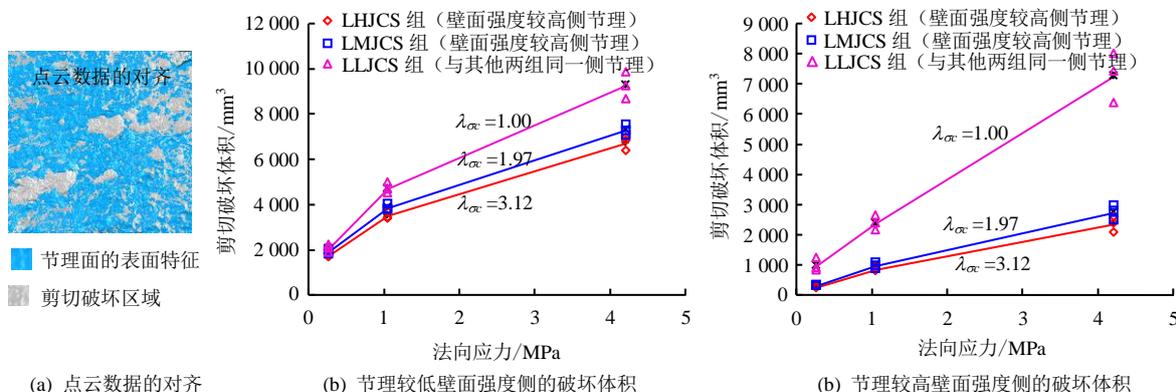


图 7 试块的剪切破坏体积
Fig.7 Shear failure volume of specimens

对比图 7(b)、7(c), 可以发现, 节理两侧的破坏体积是有差别的, 壁面强度较弱侧的破坏体积比壁面强度较高侧的体积大, 为定量统计节理两侧破坏体积之间的区别, 图 8 给出了较高壁面强度侧破坏体积所占总破坏体积的比例。由图可知, 随着法向应力的增加, 剪切总破坏体积中壁面强度较大侧节理所占比例逐渐增大, 但对于节理两侧壁面强度不同的两组试件, 剪切破坏的总破坏体积中壁面强度较高侧的破坏体积所占比例最大也不超过 30%, 节理面的破坏体积以壁面强度较低侧为主。经以上

分析, 充分地说明对于软-硬节理在剪切过程中, 软-硬节理两侧对剪切强度都起作用, 但相对于硬节理侧, 弱节理侧对节理壁面强度 JCS 的贡献更大, 并且这种趋势随壁面强度系数 λ_{σ_c} 的增大而增强。

4 不同壁面强度节理面的改进 JRC-JCS 剪切强度公式

4.1 不同壁面强度 JRC-JCS 强度公式的改进

从上文分析可知, 软-硬节理的破坏程度与壁面强度组合有直接关系, 软-硬节理两侧对节理壁面强

度 JCS 都起作用, 且较低侧节理对节理壁面强度 JCS 的贡献更大。故以强度较低节理侧的壁面强度 $JCS_{低}$ 为基准, 建立关于壁面强度系数 λ_{σ_c} 的修正关系函数 $f(\lambda_{\sigma_c})$ 来确定软-硬节理的等效壁面强度 $JCS_{等效}$ 为

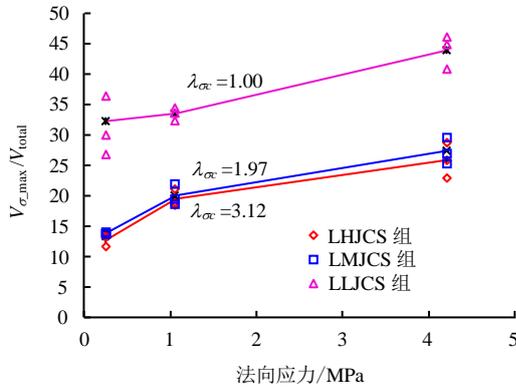


图 8 壁面强度对剪切破坏体积的影响
Fig.8 Effect of wall strength on shear failure volume

$$JCS_{等效} = JCS_{低} f(\lambda_{\sigma_c}), \text{ 即 } \frac{JCS_{等效}}{JCS_{低}} = f(\lambda_{\sigma_c}) \quad (3)$$

当 $\lambda_{\sigma_c} \geq 1$ 且满足当 $\lambda_{\sigma_c} = 1$ 时, $f(\lambda_{\sigma_c}) = 1$ 。

若要确定软-硬节理等效壁面强度 $JCS_{等效}$ 的修正关系函数 $f(\lambda_{\sigma_c})$, 首先需要确定具有不同壁面强度组合节理的等效壁面强度 $JCS_{等效}$, 节理的剪胀角 i 为

$$i = JRC \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \quad (4)$$

对式 (4) 进行变形, 有

$$i = JRC \lg JCS_{等效} - JRC \lg \sigma_n \quad (5)$$

若以 $JRC \lg(JCS/\sigma_n)$ 为 X 坐标, 剪胀角 i 为 Y 坐标, 理论上两者满足斜率为-1 的线性函数, 而线性函数截距 I 即为 $JRC \lg JCS$ 的值, 利用式 (6) 即可求得节理的等效壁面强度 $JCS_{等效}$ 。

$$JCS_{等效} = 10^{I/JRC} \quad (6)$$

以 LHJCS 组试件为例, 图 9(a)给出了其拟合结果, 由图可知, 两者具有很好的拟合关系, 且斜率基本为-1, 代入式(6)求得其等效壁面强度 $JCS_{等效} = 24.448 5$, 利用相同的方法求得 LMJCS 组试件的等效壁面强度 $JCS_{等效} = 22.972 2$ 。然后利用 3 组试件的等效壁面强度 $JCS_{等效}$ 对系数函数 $f(\lambda_{\sigma_c})$ 进行拟合, 其结果如图 9(b)所示。从图中可知, 利用所构造的幂函数能很好地度量两者关系, 因此, 节理面等效壁面强度 $JCS_{等效}$ 的修正系数函数满足下式:

$$JCS_{等效} = JCS_{低} \left[a(\lambda_{\sigma_c})^b + (1-a) \right] \quad (7)$$

式中: a 、 b 为系数, 且 $0 \leq a \leq 1$ 。

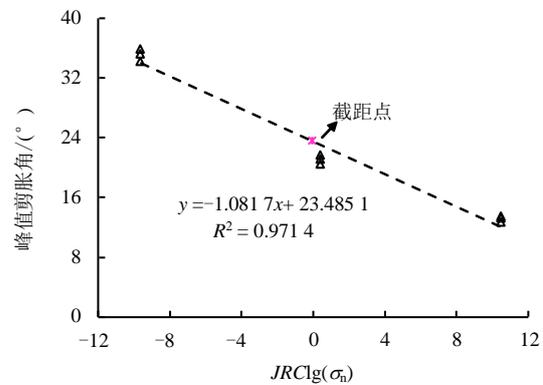
进而可以得到关于不同壁面强度节理面的修正 JRC - JCS 剪切强度公式为

$$\tau = \sigma_n \tan \left\{ JRC \lg \left[\frac{JCS_{低} (a(\lambda_{\sigma_c})^b + (1-a))}{\sigma_n} \right] + \varphi \right\} \quad (8)$$

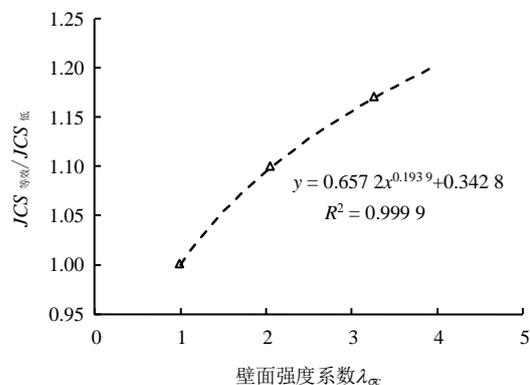
其中当 $\lambda_{\sigma_c} = 1$ 时, 修正 JRC - JCS 剪切强度公式就是 Barton 的 JRC - JCS 剪切强度公式。利用式 (8) 对 3 组试件的剪切强度公式进行估算, 其结果图 10 所示, 从图中可以看出, 改进 JRC - JCS 剪切强度公式的估算值与试验值具有很好的一致性。

4.2 改进 JRC - JCS 强度公式的验证及其适用性

为进一步验证公式的可靠性, 本文对 LMJCS 类型的节理试件进行了法向应力为 0.52、2.1 MPa 下的剪切试验, 其应力-应变曲线如图 11 所示。利用修正 JRC - JCS 强度公式估算其剪切强度, 并算出其相对误差, 如表 2 所示, 可以看出, 其相对误差较小, 故修正 JRC - JCS 强度公式具有较好的估算结果。



(a) 拟合等效壁面强度 $JCS_{等效}$



(b) 修正函数 $f(\lambda_{\sigma_c})$ 的拟合过程

图 9 节理面壁面强度的修正过程
Fig.9 Modifying process of joint wall compressive strengths

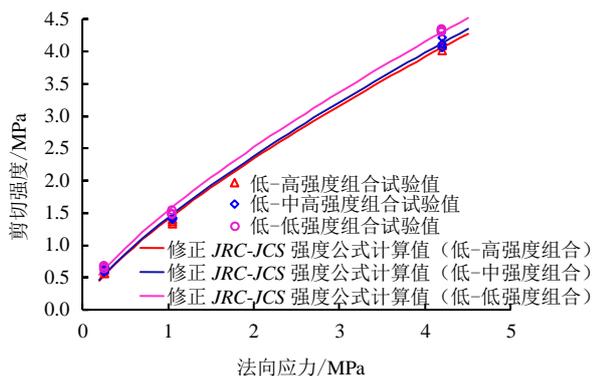


图 10 峰值剪切强度的估算
Fig.10 Estimation of peak shear strength

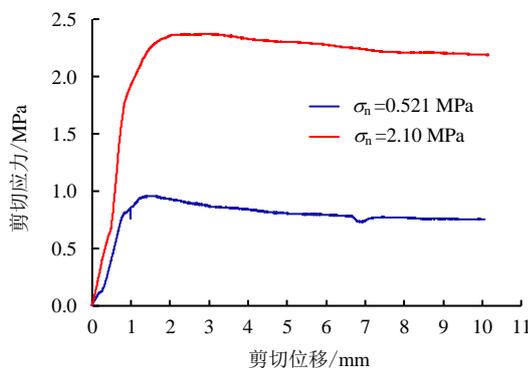


图 11 节理面的剪切应力-剪切位移曲线
Fig.11 Shear stress-shear displacement curves of specimens

表 2 修正 JRC-JCS 公式的估算结果

Table 2 Estimation results of modified JRC-JCS formula

JCS _{等效}	法向应力	剪切强度试验值	估算值	相对误差
	σ_n /MPa	/MPa	/MPa	/%
22.97	0.52	0.93	0.90	3.23
	2.10	2.37	2.47	4.22

根据试验结果，本文提出了改进 JRC-JCS 剪切强度公式，它是对现有 JRC-JCS 公式的完善，它的使用不受壁面强度系数的限制，但使用中也有一些注意事项。壁面强度系数 λ_{σ_c} 是改进 JRC-JCS 强度公式中一个关键性的参数，但它是以值 $\sigma_{c_hard} / \sigma_{c_soft}$ 的方式定义的，为确定 λ_{σ_c} 的修正关系函数 $f(\lambda_{\sigma_c})$ ，要求 σ_{c_hard} 或 σ_{c_soft} 中有一个必须是定值，类似于本文与 Ghazvinian^[16]所研究的情况。改进 JRC-JCS 强度公式更适合类似于充填采矿中尾砂胶结充填体 CPB 与围岩接触面的稳定性、嵌岩桩的荷载传递特性以及大坝与基岩的稳定等工程问题，因为此类问题中人工浇筑体的力学性质是定值。

5 结 论

(1) 在相同法向应力下，节理的壁面强度特征

影响着剪切试件的变形和强度特征，节理的剪胀程度随着节理壁面强度系数 λ_{σ_c} 值的增大而增大，剪切应力随着 λ_{σ_c} 值的增大而减小。

(2) 针对软-硬节理，JRC-JCS 强度公式具有一定的局限性，当参数壁面强度 JCS 值取为较软节理侧或较硬节理侧的单轴抗压强度时，其估算值较试验值往往偏小或偏大。为此，利用节理面的点云数据，从剪切的破坏特征入手分析其原因，研究发现，在剪切过程中软、硬节理两侧都发生了破坏，节理两侧对剪切强度都有一定影响，节理的等效壁面强度 JCS_{等效} 受壁面强度系数 λ_{σ_c} 的影响，且相对于硬节理侧，较软节理侧对等效壁面强度 JCS_{等效} 的贡献更大。

(3) 根据以上分析，以较软节理侧的壁面强度 JCS_软 为基准，建立了关于壁面强度系数 λ_{σ_c} 的修正关系函数 $f(\lambda_{\sigma_c})$ 来确定软-硬节理的等效壁面强度 JCS_{等效}，进而提出了考虑节理不同壁面强度组合类型的修正 JRC-JCS 剪切强度公式，该新公式是对现有的 JRC-JCS 强度公式的完善。

参 考 文 献

- [1] POLLARD D, AYDIN A. Progress in understanding jointing over the past century[J]. **Geological Society of America Bulletin**, 1988, 100: 1181—1204.
- [2] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
GU De-zhen. Basic mechanics of engineering geology for rock mass[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [3] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]//Proceedings of the First Congress of International Society of Rock Mechanics. Lisbon: [s. n.], 1966: 509—513.
- [4] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass[C]//Proceedings of the 11th US Symposium on Rock Mechanics(USRMS). Berkeley, California: [s. n.], 1969: 105—125.
- [5] BARTON N. Review of a new shear strength criterion for rock joints[J]. **Engineering Geology**, 1973, 7(4): 287—332.
- [6] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. **Rock Mechanics**, 1977, 10(1—2): 1—54.
- [7] KULATILAKE P H S W, SHOU G, HUANG T H, et al. New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(7): 673—697.
- [8] ZHAO J. Joint surface matching and shear strength part B:

- JRC-JMC shear strength criterion[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(2): 179—185.
- [9] HOMAND F, BELEMT T, SOULEY M. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2001, 25(10): 973—999.
- [10] GRASSELLI G, EGGER P. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2003, 40(1): 25—40.
- [11] XIA Cai-chu, TANG Zhi-cheng, XIAO Wei-ming, et al. New peak shear strength criterion of rock joints based on quantified surface description[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(2): 387—400.
- [12] 孙辅庭, 余成学, 万利台, 等. 基于三维形貌特征的岩石节理峰值剪切强度准则研究[J]. **岩土工程学报**, 2014, 36(3): 529—536.
- SUN Fu-ting, SHE Cheng-xue, WAN Li-tai, et al. Peak shear strength criterion for rock joints based on three-dimensional morphology characteristics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(3): 529—536.
- [13] 唐志成, 黄润秋, 张建明, 等. 含坡度均方根的节理峰值剪切强度经验公式[J]. **岩土力学**, 2015, 36(12): 3433—3438.
- TANG Zhi-cheng, HUANG Run-qiu, ZHANG Jian-ming, et al. Empirical peak shear strength criterion for rock joints based on slope root-mean-square[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3433—3438.
- [14] NASIR O, FALL M. Shear behaviour of cemented paste fill rock interfaces[J]. **Engineering Geology**, 2008, 101: 146—153.
- [15] 岩小明, 李夕兵, 郭雷, 等. 地下开采矿岩稳定性的模糊灰元评价[J]. **矿冶工程**, 2005, 25(6): 21—25.
- YAN Xiao-ming, LI Xi-bing, GUO Lei, et al. Fuzzy-grey-element evaluation on ore-rock stability[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2005, 25(6): 21—25.
- [16] GHAZVINIAN A H, TAGHICHIAN A, HASHEMI M, et al. The shear behaviour of bedding planes of weakness between two different rock types with high strength difference[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43(1): 69—87.
- [17] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- [18] LI L, AUBERTIN M, SIMON R. Modelling arching effects in narrow backfilled stopes with FLAC[C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on FLAC & FLAC^{3D} Numerical Modelling in Geomechanics. Ontario, Canada: [s. n.], 2003: 211—219.
- [19] NASIR O, FALL M. Shear behaviour of cemented paste fill rock interfaces[J]. **Engineering Geology**, 2008, 101: 146—153.
- [20] ATAPOUR H, MOOSAVI M. Some effects of shearing velocity on the shear stress deformation behaviour of hard-soft artificial material interfaces[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2013, 31: 1603—1615.
- [21] JOHNSTON I W, LAM T S K. Frictional characteristics of planar concrete-rock interfaces under constant normal stiffness conditions[C]// Proceedings of the 4th ANZ Conference on Geomechanics. Perth: [s. n.], 1984: 105—108.
- [22] JOHNSTON I W, LAM T S K. Shear behaviour of regular triangular concrete/rock joints: Analysis[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 115: 711—727.
- [23] KODIKARA J K, JOHNSTON I W. Shear behaviour of irregular triangular rock-concrete joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(4): 313—322.
- [24] 熊祖强, 江权, 龚彦华, 等. 基于三维扫描与打印的岩体自然结构面试样制作方法与剪切试验验证[J]. **岩土力学**, 2015, 36(6): 1566—1572.
- XIONG Zu-qiang, JIANG Quan, GONG Yan-hua, et al. Modeling natural joint of rock mass using three dimensional scanning and printing technologies and its experimental verification[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1566—1572.
- [25] JIANG Quan, FENG Xia-ting, GONG Yan-hua, et al. Reverse modelling of natural rock joints using 3D scanning and 3D printing[J]. **Computers and Geotechnics**, 2016, 73: 210—220.
- [26] 中国建筑科学研究院. GB50204—2015 混凝土结构工程施工质量验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- China Academy of Building Research. GB50204—2015 Code for acceptance of construction quality of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [27] BEER A J, STEAD D, COGGAN J S. Technical note estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual comparison[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2002, 35(1): 65—74.
- [28] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(6): 778—781.
- YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Energy analysis on failure process of rock specimens[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 778—781.