

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231109002

岩体结构面循环剪切设备和剪切力学特性的研究现状及展望*

尹敬涵^{1,2}, 盛谦^{1,2}, 陈健^{1,2}, 张茂础^{1,2,3}, 崔臻^{1,2}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:总结了岩体结构面在循环荷载作用下的力学特性若干重要问题的研究进展,包括4个方面:(1)岩体结构面表面形态信息;(2)岩体结构面循环剪切试验设备;(3)循环剪切试验影响因素;(4)结构面力学特性的描述与表征。在对现有研究成果进行评述的基础上指出了需要解决的问题和今后的发展方向。目前,结构面粗糙度描述缺乏统一的评判标准,在单向剪切中足以模拟地震动荷载的剪切设备仍有待进一步研发,且法向循环加载试验,特别是切向和法向循环荷载耦合剪切试验还有待研究,此外针对循环加载试验,仍缺乏一个完备的理论能够综合考虑所有影响因素;结构面的变形和强度公式如何选择也是一个较难解决的问题。研发新的动态、多自由度循环剪切设备,进行完备的循环剪切变形和强度公式研究是岩体结构面动态剪切问题研究的必由之路。希望本文可为今后的相关工作提供一定的参考和依据。

关键词:岩体结构面;循环剪切设备;结构面力学特性;综述

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1202-29

Research Status and Prospects of Cyclic Shear Apparatus and Shear Mechanical Properties of Rock Mass Structural Planes

YIN Jinghan^{1,2}, SHENG Qian^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, ZHANG Maochu^{1,2,3}, CUI Zhen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan, 430010, China)

Abstract: The paper summarizes the research progress on several critical issues related to the mechanical properties of rock mass structural planes under cyclic loading, encompassing four main aspects: (1) morphological information on the surface of structural planes; (2) cyclic shear test apparatus for structural planes; (3) influencing factors of cyclic shear test; and (4) description and characterization of mechanical properties of structural planes. Based on the review of existing research results, the unsolved problems and future development directions are pointed out. At present, there is no unified criterion

* 收稿日期:2023-11-09;修回日期:2024-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(U21A20159,52379112)、国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFB2390400)、水利部重大科技项目(SKS-2022103)、中国博士后科学基金面上项目(2024M752747)资助

作者简介:尹敬涵(1999—),女,博士研究生。主要从事岩体结构面研究。E-mail:yinjinghan21@mails.ucas.ac.cn

通信作者:崔臻(1986—),男,研究员,博导,博士。主要从事强震区地下工程稳定性评价研究。

E-mail:zcui@whrsm.ac.cn

for describing roughness of structural planes, and the shear apparatus that sufficiently simulates seismic loads in unidirectional shear still needs further development. Furthermore, normal cyclic loading tests, particularly coupled tangential and normal cyclic loading shear tests, require further investigation. In addition, a comprehensive theoretical framework that considers all influencing factors for cyclic loading tests is still lacking. Selecting appropriate deformation and strength formulas for structural planes remains a challenging issue. Developing new dynamic, multi-degree-of-freedom cyclic shear apparatus and conducting comprehensive research on deformation and strength formulas for cyclic shear is essential for advancing the study of dynamic shear problems of rock mass structural planes. It is hoped that this paper will provide some reference and basis for future related work.

Keywords: rock mass structural plane; cyclic shear apparatus; mechanical properties of structural planes; review

0 引言

岩石工程以岩体为工程赋存介质,而岩体的重要特征就是其中具有各种尺度并与周围岩石具有显著性质差异的界面,统称为“结构面”,如断层、节理、软弱夹层、层面等。结构面破坏了岩体的连续性,控制着岩体的力学特性,直接影响乃至破坏岩石工程的稳定性,处于不利地质结构控制下的岩石工程更易遭受损害与破坏。如1959年法国马尔帕塞大坝失稳和1963年的意大利瓦伊昂水库边坡失稳,均表现为结构面在工程稳定性中的控制性作用^[1-3],成为岩石力学基础课程中必讲案例^[4]。此外,我国西部地区地质构造复杂,地壳运动强烈,发生强震震害的风险较高,地震动其复杂随机非平稳振动特性使其荷载具有显著的动态特征。因此,复杂荷载条件下结构面的静态、动态力学性质与规律的

研究对岩体破坏模式以及岩石工程稳定性分析具有重要意义,其认知也是工程设计理论与技术发展中的薄弱环节。

国内外研究成果表明,结构面的力学性状认知,始终是岩石力学领域关注的重点。主要通过现场与室内直接剪切试验认识其演变规律(图1),并通过相应的本构模型与数值方法实现理论表达^[5-10]。结构面在剪切荷载作用下的力学性质,既受控于荷载的作用方式,也受控于结构面的几何特征,呈现典型的荷载与速率效应、粗糙度效应与方向性效应。当工程荷载方向明确时,结构面剪切力学性质的荷载效应与粗糙度效应突出;而当工程荷载表现为地震动荷载时,结构面剪切力学性质既呈现显著的荷载效应与粗糙度效应,更表现出强烈的方向性效应。从荷载特性上看,地震作用同时具有动态荷载和循环荷载的性质^[11],故除了静态剪切力学参数,多向动态循环剪切下的力学性质与规律

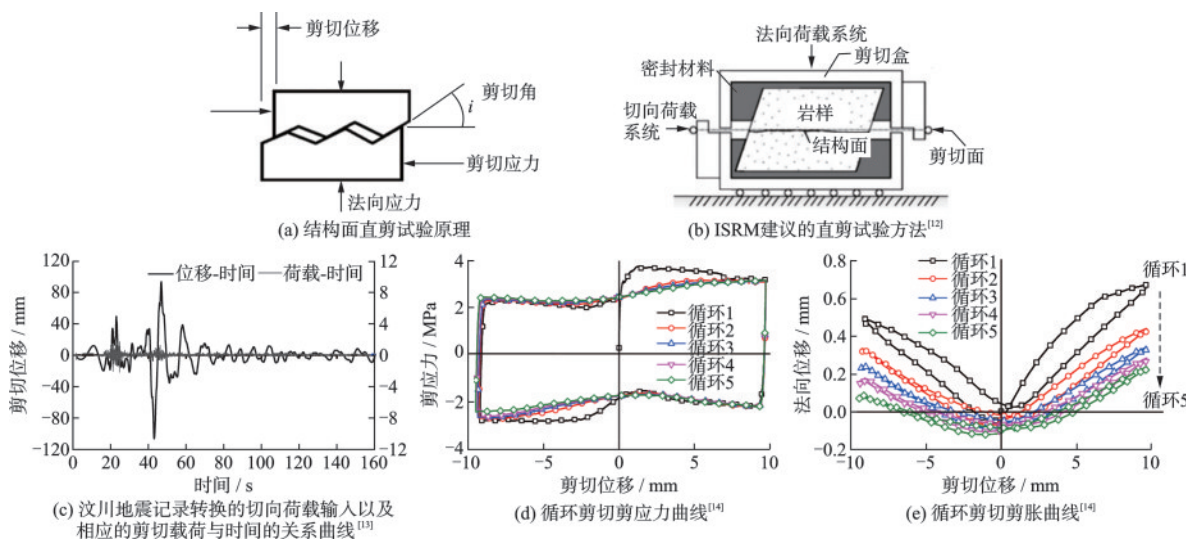


图1 岩体结构面直接剪切试验与试验结果曲线

Fig.1 Direct shear test and corresponding result curves of rock mass structural planes

同等重要,此外,大尺度、多尺寸结构面剪切试验需要更深入系统的研究,以便在数值方法中进行参数标定并开展工程尺度数值模拟。开展动态循环荷载作用下结构面变形损伤演化规律的研究,对于研究岩体结构面在地震作用为代表的动态循环作用下的力学响应机制及失稳破坏模式具有十分重要的意义。

岩体结构面在循环荷载作用下的力学特性问题,涉及到结构面试验设备、结构面自身物理特性表述、结构面试验成果、结构面力学特性的描述与表征等多个复杂的子问题。经过查阅大量文献,本文将从以下4个方面介绍近年来岩体结构面在循环荷载作用下的力学特性问题的研究进展:(1)岩体结构面表面形态信息;(2)岩体结构面循环剪切试验设备;(3)循环剪切试验影响因素;(4)结构面力学特性的描述与表征,并对领域内的研究趋势做出展望。

1 岩体结构面表面形态信息的采集与描述

天然岩体内部包含大量结构面,而结构面的力学性质与其表面形态密切相关,如何测量与表征岩体结构面的表面形态,以便将结构面形态引入抗剪强度准则,一直是岩土工程领域的热点问题。

1.1 岩体结构面表面形态信息的采集

岩体结构面粗糙度系数的数据采集手段可分为接触式与非接触式2种^[15]。其中,作为在研究初期被广泛使用的结构面信息采集手段,接触式测量根据触针与结构面的接触方式又可分为连续式和断续式2种^[16]。相较于连续式接触测量而言,断续式接触测量的量程较大,不存在触针被卡的情况,是接触式测量的首选方法。但总的来说,接触式测量其精度主要取决于探针的直径与探针排布的间距,往往较低,也一般仅用作2D测量,且由于其本身具有的局限性,即触针与结构面必须接触,接触式测量不适用于软质岩体和充填结构面,而工程尺度岩体中结构面往往延伸数米甚至数十米长,接触式测量的量程有限,分段测量很难保证参考线的一致性,故接触式测量具有较大的局限性。但随着计算机和传感器在接触式测量装置上的应用^[17-18],接触式测量的精度在发展中有所提高,也可以进行3D

剖面测量,即在垂直于轮廓线的方向上以一定间隔进行轮廓线的依次测量。目前,非接触式测量方法主要包括照相量测法^[19-20]、三维激光扫描法^[21-27]和X射线散射法^[28]等。相较于接触式测量,非接触式测量测量精度高,实验周期短,不会损伤结构面信息,通过点云,或者大量的坐标,经过逆向工程软件处理可以合成真实表面。但其中一些方法,如X射线散射法,成本较高限制了其使用;又如三维激光扫描法,采集过程中会产生噪音数据,影响粗糙度系数的估算^[29]。采集岩体结构面表面形态信息需要一种速度快、精度高、尺度大、成本低和便于复现的方法来实现,相较于接触式测量技术,利用非接触式测量技术采集结构面表面三维数据是该领域的研究热点。

1.2 岩体结构面表面形态信息的描述

准确描述岩体结构面表面形态信息是研究结构面剪切行为的基础,结构面粗糙度的准确定量分析,有利于评价结构面抗剪强度。目前,结构面粗糙度量化的方法主要分为统计方法和分形方法^[30-31]。统计方法可以细分为参数法和函数法,即产生一个单一的数值和函数来评价粗糙度;分形方法是将结构面的轮廓作为分形物体来处理,以获得在不同尺度上表征粗糙度的参数^[32]。此外,粗糙度参数可以进一步细分为高差参数和纹理参数两个主要类别,在这两者中,高差参数描述了结构面在高度方向上的变化特征和分布规律,而纹理参数则涉及到表面形态中各点之间位置和相互关系的统计量^[33]。常见高差参数计算公式见式(1)~(4),但单独的高差参数不能较好描述粗糙度,故陆续有学者提出平均微凸体倾角 A_i ^[34]、结构函数 SF ^[35]、粗糙度系数 $R_p(2D)$ ^[36]、轮廓面积比 $R_s(3D)$ 和吻合度系数 JMC ^[37]等参数来定量描述结构面的粗糙度(式(5)~(9))。此外,根据上述结构面的统计参数,学者们建立相应的 JRC 计算公式(式(10)~(13))^[38-40],提供了一种客观量化 JRC 值的方法,但要注意的是,采样间隔对粗糙度参数的量化和 JRC 的确定影响较大,一些经验公式是在特定采样间隔下确定的,故在使用时应考虑基于采样间隔进行相关修正^[41-42]。另外,也有学者认为用单一的统计参(函)数无法准确估计岩石结构面粗糙度,故提出分类加权拟合和用综合参数表征的新方法(式(14)~(15))^[43-44],通过加权或综合的表征方法,可以避免单一统计参数对结

构面描述的限制性。而分形方法最初是由B. Mandelbrot提出的^[45],根据分形理论计算出的分形维度也被证明可以用来评价结构面的粗糙度。因此,后续许多学者建立了分形维数 D 与 JRC 的量化关系^[46-47]。通常认为,随着 JRC 的增大,分形维数 D 也随之增大,即结构面越趋向粗糙。虽然分形维数 D 被证明可以用来描述结构面的粗糙度,但其不能描述结构面的各向异性,这一局限性也大大限制了其作为形貌参数的使用。总的来说,粗糙度表征方法使结构面表面纹理的测量不再是简单地定性描述,但结构面粗糙度受高度、角度、不规则性、各向异性以及采样间隔等众多因素影响^[48],我们可以主观地认为单一参数是不能完全正确的描述结构面的真实粗糙度的。可以预见,综合或加权评价指标是结构面形态信息描述未来发展的首要前进方向。另外,也有学者尝试运用神经网络方法进行结构面表面形态和抗剪强度的研究,这给其他学者提供了较新的研究思路^[49-50],通过机器学习的方法可以大量学习不同形貌参数的影响程度。总而言之,获得准确的结构面表面形态信息是评价结构面抗剪强度的首要前提。

$$R_a = \frac{1}{L} \int_L |z| dx \quad (1)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_L z^2 dx} \quad (2)$$

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left(\frac{1}{L} \int_L z^3 dx \right) \quad (3)$$

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left(\frac{1}{L} \int_L z^4 dx \right) \quad (4)$$

$$A_i = \tan^{-1} \left(\frac{1}{L} \sum |z_{i+1} - z_i| \right) \quad (5)$$

$$SF = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_L [z(x) - z(x + \tau)]^2 dx \quad (6)$$

$$R_p = \frac{1}{L} \sum \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (7)$$

$$R_s = \frac{A_t}{A_n} \quad (8)$$

$$JMC = \frac{A_c}{A_t} \quad (9)$$

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad (10)$$

$$JRC = 37.28 + 16.58 \log SF \quad (11)$$

$$JRC = 0.101 6 S_{ku} + 1.247 4 \quad (12)$$

$$JRC = c(R_p - 1) \quad (13)$$

$$JRC = 16.09 \log Z_2^{1st} + 12.70 \log Z_2^{2nd} + 33.75 \quad (14)$$

$$JRC = 10.725 \ln [A^a (\overline{SR}_v)^{1-a}] + 42.202 \quad (15)$$

2 结构面循环剪切试验设备现状

如何准确评估岩体结构面的抗剪强度,对岩质边坡稳定性分析、岩体深部设计等方面具有重要意义^[51]。结构面接触和受力演化规律的研究通常是采用室内试验和数值模拟相结合的方法,其中,室内试验多在实验室中使用直接剪切装置进行研究。迄今为止,国内外典型剪切设备如图2所示,设备技术参数见表1。

2.1 CNL与CNS法向条件的实现

正确评估岩石结构面的抗剪强度在岩石开挖设计和岩石边坡稳定性分析等工程中起着重要作用。早期,实验室中进行的结构面剪切试验通常是保持剪切过程中法向荷载不变(CNL)进行的^[52-53]。典型的CNL剪切装置包括加拿大多伦多大学研制的直剪仪^[54]、西班牙加泰罗尼亚理工大学研制的直剪设备^[55]和中国科学院武汉岩土力学研究所研制的RMT-150C^[11]等^[56-59]。然而,CNL边界条件有局限性,对于非平面结构面来说,在剪切过程中,如果微凸体不能充分变形,那么将不可避免地出现法向应力的增加,因此,CNL边界条件仅适用于部分工况,特别是对于大埋深的情况,因为垂直于剪切方向的法向应力不是一个恒定值,应由周围岩石的刚度决定,CNS边界条件比CNL边界条件更适用,CNS边界条件在大埋深条件下可能更具有代表性^[51,60]。鉴于此,国内外许多学者对CNL直剪仪进行了改进,以适应剪切过程中法向应力随剪胀变化的情况,使剪切可以在CNS边界条件下发生^[61]。澳大利亚伍伦贡大学^[62]、印度理工学院^[63-64]、布鲁克舍大学^[65]和中国科学院地质与地球物理研究所^[13]等机构^[66]研制的直剪仪可以实现CNS条件下的剪切试验。此外,法国国立高等地质学院^[67]、法国约瑟夫傅里叶大学^[68]和德国佛莱贝格工业大学^[69]研制的剪切仪能够进行常体积(CV即恒法向相对位移)条件下的直接剪切或循环剪切试验^[70]。随着剪切装置的精进,近年来,较多学者比较了CNL和CNS条件下的岩石结构面剪切特性的相关差异。B. Indraratna等^[62]认为CNL条件下获得的峰值剪应力总

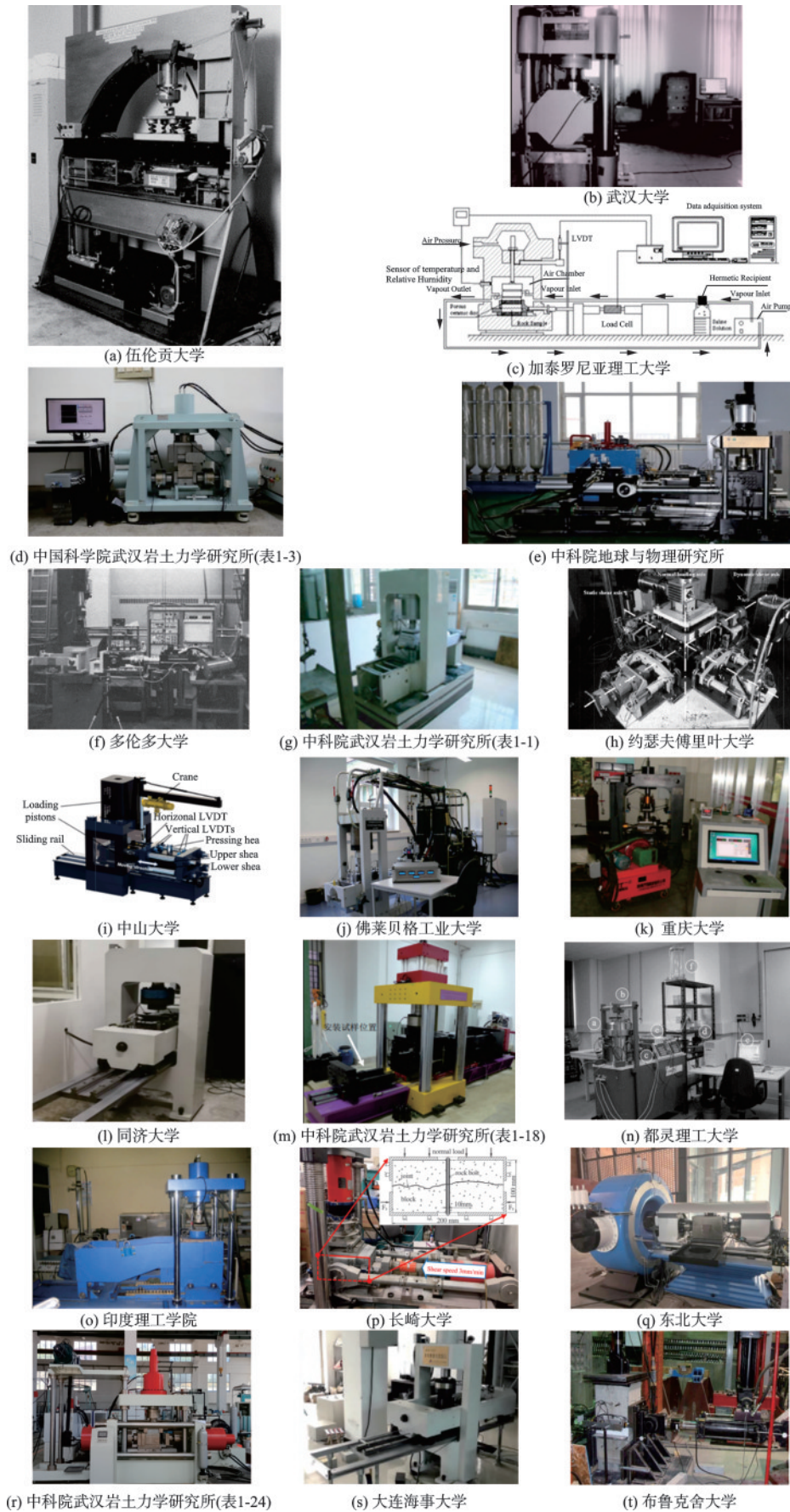


图2 各机构剪切设备
Fig.2 Diagrams of shearing apparatuses from various institutions

表 1 国内外现有剪切测试仪器指标参数表

Table 1 Parameters of domestic and foreign existing shear apparatuses

序号	剪切仪器所属机构	试样尺寸/ mm	法向最大 负荷/kN	水平最大 负荷/kN	最大剪切 距离/mm	剪切速率/ (mm·s ⁻¹)	定法向 刚度	渗流 剪切
1	中国科学院武汉岩土力学研究所 (李海波等 ^[11])	150×150	1 000	500	—	0.000 1~1	否	否
2	中国科学院地质与地球物理研究所 (S.W.Qi等 ^[13])	1 000×250	500	1 000	200	0.001~1 000	伺服控制	否
3	中国科学院武汉岩土力学研究所 (Z.Cui等 ^[66])	150×150	600	600	125	—	伺服控制	否
5	中山大学(W.G.Dang等 ^[109])	200×400	500	500	40	0.000 2~4	—	是
6	汉阳大学(D.Y.Kim等 ^[73])	140×75	147	147	25	—	伺服控制	否
8	都灵理工大学(G.Barla等 ^[74])	100×50	100	100	—	—	伺服控制	是
9	同济大学(夏才初等 ^[75])	200×100	600	600	25	0.000 1~1.67	伺服控制	是
10	武汉大学(G.Rong等 ^[89])	200×100	1 000	600	20	0~0.83	伺服控制	是
11	法国国立高等地质学院 (F.Homand等 ^[67])	—	120	120	—	—	伺服控制	否
12	伍伦贡大学(B.Indraratna等 ^[62])	250×75	180	120	—	0~20	弹簧控制	否
13	佛莱贝格工业大学 (H.Konietzky等 ^[69])	400×200	1 000	800	50	0~70	伺服控制	是
14	加泰罗尼亚理工大学 (M.T.Zandarin等 ^[55])	Φ50×24	5	—	—	0.005~33	否	—
15	多伦多大学(A.M.Crawford等 ^[54])	300×200	250	250	100	0.05~200	否	否
16	约瑟夫傅里叶大学(J.Hans等 ^[68])	100×100	100	100	—	0.05~500	伺服控制	是
17	长崎大学(Y.Jiang等 ^[51])	500×500	200	400	—	—	伺服控制	否
18	中国科学院武汉岩土力学研究所 (江权等 ^[76])	500×300	1 500	2 000	100	—	伺服控制	—
19	重庆大学(许江等 ^[90])	100×100	300	300	—	0.000 1~1.67	否	是
20	浙江工业职业技术学院 (杜时贵等 ^[79])	1 000× 1 000	1 000	1 000	—	—	否	否
21	首尔国立大学(H.S.Lee等 ^[110])	160×120	250	250	60	—	—	否
22	九州大学(T.Esaki等 ^[57])	100×80	2 000	400	20	—	—	是
23	舍布鲁克大学(Z.Moradian等 ^[63])	100×100	250	1 000	12	0.002	伺服控制	否
24	中国科学院武汉岩土力学研究所 (G.J.Cui等 ^[121])	300×150	1 800	1 800	100	0.000 5~10	伺服控制	否
25	东北大学(J.Zhao等 ^[102])	100×100	1 000	2 000	40	0.000 08~0.5	伺服控制	否
26	印度理工学院(K.S.Rao等 ^[63])	300×300	500	1 000	100	0.000 2~0.2	伺服控制	否
27	瑞典RISE研究院(L.Jacobsson ^[80])	400×600	5 000	5 000	70	—	伺服控制	否
28	大连海事大学(李婷等 ^[58])	200×100	600	600	25	—	—	否
29	南昌大学(周家乐 ^[59])	300×300	500	500	—	—	—	否

是低于对应于CNS条件的峰值剪应力,即CNL低估了结构面的峰值剪应力。与此不同的是,崔国健等^[9]认为低法向应力水平下,峰值及残余剪切强度均大于CNL试验结果,在高法向应力水平下,CNS和

CNL试验结果相近。众多试验成果有助于学者进一步认识CNL和CNS条件下结构面剪切力学特性及其差异,为工程建设提供理论依据。CNL、CNS和CV边界条件下的剪切加载路径示意如图3所示。

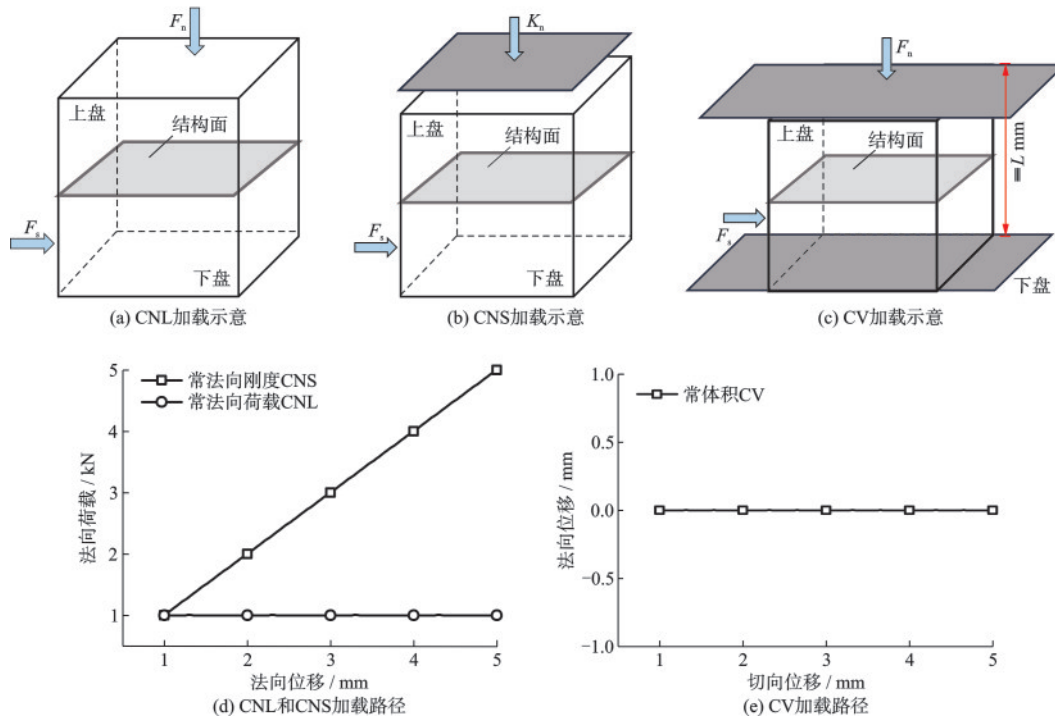


图3 加载控制方式示意

Fig.3 Schematic diagrams of loading control methods

2.2 伺服控制系统的应用

室内直接剪切试验是评估岩体剪切力学性能的重要实验方法之一。最初,为了实现常法向刚度(CNS)边界条件,并研究剪切过程中CNS边界的影响,研究人员在直接剪切设备中的法向传感器和岩石结构面试样之间设置弹簧,使用弹簧来模拟周围岩石的法向刚度^[71]。如澳大利亚伍伦贡大学的直剪仪^[72],该设备可以通过更换具有不同刚度的弹簧组来调整法向刚度。但用弹簧组控制法向刚度时,弹簧更换起来较为麻烦。随着技术的发展,伺服控制系统被研发并广泛应用于岩石剪切设备^[66,69,73-77]。日本长崎大学的Y. Jiang等^[51]研发的新型伺服控制剪切仪,可以在剪切过程中随时调整与切换边界条件,不仅简化了试验过程,还提高了试验结果的准确性。此外,S.W. Qi等^[13,78]为了研究不连续体在地震波载荷作用下的动态剪切行为,在伺服闭环CNS加载关键技术上进行创新,使得设备能够在法线和切线方向上真实地模拟强震波加载条件。在近20年间,已经有众多伺服剪切设备被研发并使用,伺服的实现加快了室内剪切试验的发展进程,使室内剪切试验变的更便捷、更精准^[13,66,68-69,75,79]。

2.3 一些非常规工况的结构面剪切设备

在深地层下,岩体处于高孔隙压力和高温的环境中,孔隙压力或温度的变化可能导致岩体或断层的破坏,进而诱发地震和地表隆起等地质灾害。因此,了解结构面在深地高温环境下的工程特性和水力特性具有重要意义。为了实现深地层、大埋深的室内试验条件,日本长崎大学研制的结构面直剪设备,能够模拟800 m埋深条件下的法向荷载^[51]。而近年中国科学院武汉岩土力学研究所研制的大型多功能高压岩石结构面剪切伺服试验基本可以满足2 500 m埋深的法向荷载条件^[76]。此外,瑞典RISE研究院研制的大型岩石结构面剪切设备可以在法向及切向上施加高达5 MN的力^[80]。虽然上述试验装置实现了结构面的室内高地应力模拟,但存在剪切过程中孔隙流体密封困难的现象,无法进行结构面剪切渗流试验^[81-82]。而含结构面岩体在高孔隙压力环境中剪切,流体不断流动,随着剪切位移和流体压力的改变,惯性力和粘性力也在改变,因此进行含结构面岩体的剪切渗流耦合试验并开展结构面水力学特性相关研究十分必要^[83-84]。故学者们对剪切盒进行精细设计与改进,提高剪切盒的密封性和渗透压力值,并进行不同边界条件下的剪切

渗流耦合试验^[85-88]。武汉大学研发的JAW-1000剪切渗流装置,水压可达1 MPa^[89]。同济大学研制的试验系统可进行3 MPa渗透压力下的剪切渗流耦合试验^[75]。重庆大学研发的煤岩剪切渗流耦合试验装置可提供5 MPa的水压或气压^[90],但其仅能提供300 kN的法向负荷。而德国佛莱贝格工业大学研制的GS1000动态直剪设备,可进行10 MPa下的水力耦合测试^[69]。中国地震局地质研究所研制的高温高压三轴实验系统甚至可以实现最高200 MPa孔隙水压下的三轴剪切试验^[88,91-97]。针对高温工况,装备了改进夹具的四川大学岩石力学测试系统^[98],可以通过圆柱体试样实现高温高压剪切以及高温剪切流变测试,能较真实地模拟深部岩石的赋存环境,但该设备暂不能进行立方体试样的耦合剪切试验。中国科学院武汉岩土力学研究所Zhang等研制的高孔压高温直剪系统,实现了150 °C条件下的圆柱体试样的高温渗流剪切耦合实验^[81]。中国地震局地质研究所研制的高温高压三轴实验系统,可以进行700 °C下的三轴斜剪实验,同样,该设备暂不能进行立方体试样的耦合剪切试验^[99-101]。而东北大学研制的真三轴高温剪切装置,实现了300 °C下的立方体试样的高温剪切耦合实验,但其未装配渗流模块^[102]。此外,中国地震局地质研究所研制的旋转剪切低速-高速摩擦实验机可以实现最大35 MPa孔隙压力下的断层泥旋转剪切摩擦试验^[103-104]。由此可见,目前还没有设备能够进行立方体试样的剪切渗流温度耦合试验,但现有设备的应用以及众多工况下剪切设备的研制仍有助于学者进一步地了解深地中含结构面岩体在剪切渗流高温化学耦合作用下的力学特性。

2.4 结构面动态与循环剪切设备

爆破和地震等情况会使岩体承受区别于静态荷载的动态或循环载荷,动态荷载扰动条件下的深部岩体演化与岩体的应变率密切相关。地震荷载的应变率范围在 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ ^[13],而岩石在爆破荷载作用下的应变率范围能达到 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$,特殊情况下会更高^[105]。一些研究人员考虑岩体动态影响对动态剪切设备进行研制,并对结构面在动态载荷条件下的力学特性进行了部分研究。图4给出了现有典型动态直接剪切装置的剪切应变率范围。相较于静态剪切设备,动态剪切设备需要具有大流量的伺服系统。典型的动态剪切设备包括澳大利亚伍伦贡大学^[62]和德国佛莱贝格工业大学^[69]研制的直接剪切设备。此外,加拿大多伦多大学研制的动态直接剪切装置,在法向应力高达 3.0 MN/m^2 的情况下,其剪切位移速率可以达到 200 mm/s ^[54]。法国约瑟夫傅里叶大学研制的BCR-3D剪切设备剪切位移速率可以达到 500 mm/s ^[68]。为了研究不连续体在地震波载荷作用下的动态剪切行为,真实地模拟强震波加载条件,中国科学院地质与地球物理研究所研制了TFD500/1000-JS,其可以在法向和切向方向上施加动态荷载^[13,78],剪切速率可达 1000 mm/s ,完全实现了模拟地震荷载中的应变率条件。除了直剪设备外,中国地震局地质研究所研制的旋转剪切试验机,其滑动速率范围可覆盖板块运动及地震滑动^[106]。然而在现有的剪切设备中,能够模拟地震动态荷载的剪切设备仍然较少,能模拟爆破荷载高应变率的设备更少,相较于静态剪切,动态剪切设备即高剪切速率直接剪切装置还有待研发。地震荷载既是动荷载又是循环荷载^[11]。法国约瑟夫傅里

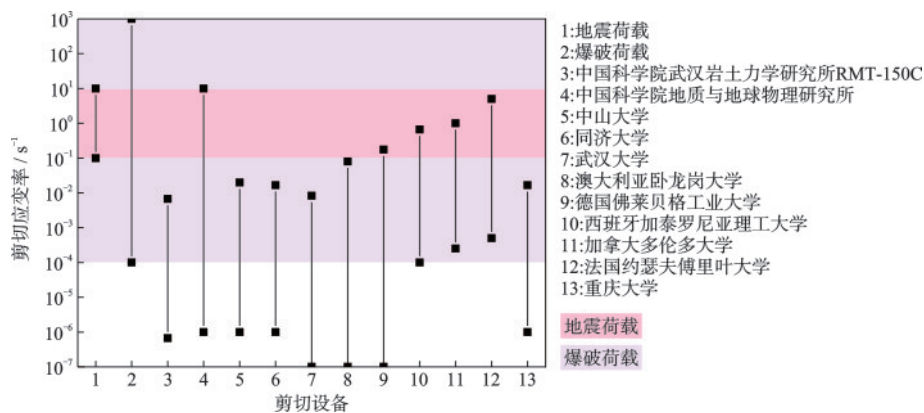


图4 典型动态直接剪切装置的剪切应变率范围

Fig.4 Range of shear strain rates for typical dynamic direct shear devices

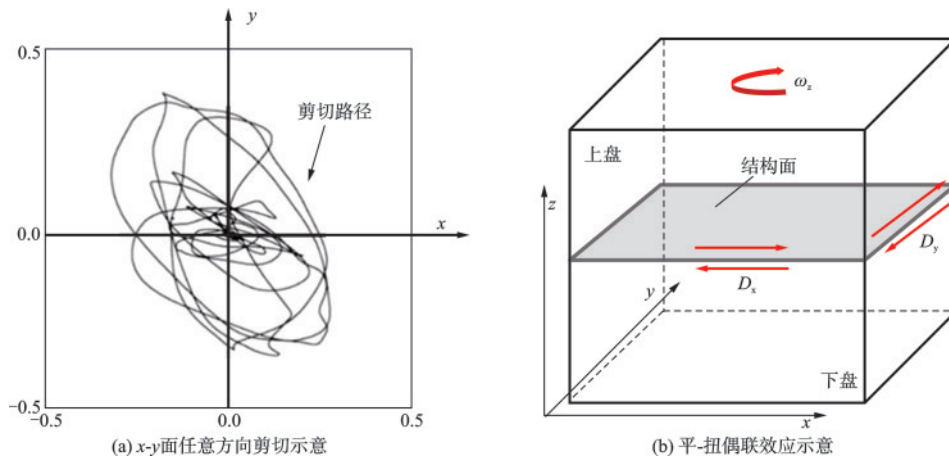


图5 剪切路径示意

Fig.5 Schematic diagrams of shear paths

叶大学研制的BCR-3D的剪切装置能较好地模拟循环荷载加载条件,并进行循环剪切试验^[68]。而法国国立高等地质学院设计的CC-3DSM剪切设备不仅可以进行循环剪切试验,还实现了在 x - y 面任意方向进行剪切如图5(a)所示^[67]。但纵观目前国内外岩体结构面剪切试验装备,仍未见多自由度即能模拟地震动荷载平-扭偶联效应的相关装置,如图5(b)所示,在结构面动态力学性质方向性效应上的认知还相对薄弱,制约了结构面动态力学性质的深入认识。

3 结构面循环剪切试验及其影响因素

3.1 结构面切向循环加载试验

循环荷载在各种地质过程和岩石工程应用中经常遇到,涉及地质构造运动、地震作用和爆破开挖。由于岩石极易受到循环荷载的影响,为了更好地评估岩石结构的长期稳定性,描述岩石在循环荷载作用下的变形和破坏机制以及构成模型具有重要意义。含结构面的岩体剪切试验主要有直接剪切试验和循环剪切试验,其中直接剪切试验被认为是测试岩石剪切强度最重要、最有效的方法^[107],但循环剪切试验可以看作是具有多次不同历史结构面直剪试验的重复^[108]。与岩石的循环抗压或抗拉试验相比,循环剪切试验通常在岩石结构面上进行。在循环剪切试验过程中,通过液压伺服控制在试件上下盘上施加推力来实现水平方向的循环剪切试验。到目前为止,结构面的切向循环加载试验

已经进行了大量研究^[13-14,66-67,109-110],并获得了一些成果。其中,循环加载的剪应力-剪切位移曲线存在的差异主要介于第一个循环和后续循环周期间。初次循环时,在正方向和负方向存在明显的峰值强度特性,且随着循环剪切次数的增加,破坏模式由剪断破坏向磨损破坏转变。随着岩体结构面循环剪切力学效应与破坏机制的日益完善^[14,110-115],学者们开始总结循环剪切下结构面表面形貌劣化规律,并尝试提出结构面切向循环加载的抗剪强度公式,为工程建设安全设计提供必要参考。此外,循环剪切荷载与循环法向荷载相结合,能够更合理地模拟地震动荷载情况下岩石结构面的循环剪切试验。

3.2 结构面法向循环加载试验

为了确定含结构面岩体在循环荷载下的力学响应,许多学者对含结构面试件的切向循环加载试验进行了研究^[110,116],但是实际上的地震荷载是非常复杂的,其存在不同方向的动态循环激励,并可以改变结构面的法向和切向载荷,故存在某种条件,即在循环的法向荷载条件下,发生沿结构面的剪切运动^[117]。W.G. Dang等^[118]研究了在DNL条件下不同循环法向荷载频率对平面结构面的影响,提出了一个在正弦法向载荷下的结构面剪切强度标准,并进一步地考虑法向荷载振幅^[119],认为动态剪切强度不能仅仅通过静态和动态荷载的简单叠加来估计。此外,W.G. Dang等提出了一种基于FLAC3D和Fluent CFD的方法来研究岩石裂缝在复杂应力状态下剪切时的裂隙流动特征,为动态载荷扰动下的裂隙流动模式提供了新的视角。对进一步揭示剪

切应力和循环法向荷载条件下的剪切过程中裂缝动态渗透率的演变具有重要意义^[120]。G. J. Cui等^[121]研制的循环剪切设备实现了CNL、CNS、VNS和DNL功能的无缝切换,克服了精确控制复杂边界条件的困难。虽然单轴和三轴法向循环加载剪切试验(圆柱样)的相关论文已经有了很多^[122-126],但是可以看出含结构面(立方体样)试件在法向循环加载下的剪切试验少有学者关注并深入研究,相关的研究仍存在空白,因此,了解循环法向荷载条件下结构面(立方体样)剪切的力学响应并开展法向循环加载剪切试验相关的研究十分必要。

3.3 结构面循环加载试验影响因素

依托于工程需要,岩体结构面循环加载试验发展至今,考虑的影响因素涵盖范围已经非常广泛,国内外许多学者对结构面循环加载试验影响因素进行了充分的研究与探索,其中包括人工结构面粗糙度与起伏度,接触状态、填充状态、循环剪切次数、剪切速率、剪切幅值、法向应力和尺寸效应等。岩体结构面力学特性的深入认知不仅有重要的科研价值,还是地震荷载作用下工程设计与评价的基石。

岩体结构面的剪切力学性质具有明显的加载速率效应,岩石结构面可能以不同的速率在准静态或动态载荷下被剪坏。了解岩石结构面在不同剪切速率下的力学响应,对于动态地质灾害具有重要意义^[127-130]。H. B. Li等^[52]、A. Mirzaghobanali等^[116]、S. Dong等^[131]通过试验发现峰值剪切强度是随着剪切速度的增加而降低的。且随着剪切速度的增加,下降率趋于减少。与此一致的是,G. Wang等^[132]认为结构面的峰值剪切强度是以非线性的方式随剪切速率的增加而下降。F. Meng等^[127]进一步地认为结构面的残余剪切强度也是随着剪切速率的增加而降低。而周辉等^[133]认为随着剪切速率增加,结构面抗剪强度是先增加后减小的。H. Li等^[134]认为不同结构面在不同剪切速率下的力学响应不同,对于平面结构面,剪切强度与剪切速率无关,而对于锯齿形结构面,剪切强度随剪切率的增加而增加。许多学者做了大量室内剪切试验探究剪切速率的影响机制与规律,其中,有学者认为岩石结构面的摩擦阻力是受剪切速率影响^[135-137],其影响程度取决于岩石类型和法向应力大小^[54]。为了确定法向应力对结构面力学特性的影响机制与规律,学者们对不

同法向应力下的结构面试件进行循环剪切试验,研究结构面峰值剪切强度和形貌的劣化规律并尝试提出结构面抗剪强度劣化公式^[67,131,138]。岩石结构面在不同法向应力下破坏机理并不相同,可能从滑动破坏变为断裂破坏^[139]。结构面峰值抗剪强度与法向应力呈正相关^[140-142],有学者通过试验发现结构面的残余强度也与法向应力呈正相关^[133]。更进一步,岩石结构面的抗剪强度随着法向应力的增加而线性增加^[52]。此外,岩石结构面的剪胀性是随法向荷载的增大而减小的^[143]。

结构面的原位剪切试验相比室内试验来说,往往能较好地反映出岩体真实情况。但由于场地的复杂性等原因,原位剪切试验比室内剪切显得不足。在室内剪切试验中,相比于天然岩体结构面试样,人工类岩结构面试样制作更加便捷,其粗糙度和起伏度易于调节,可批量制作后进行平行试验,便于探究各因素变量对结构面剪切力学特性的影响,因此,室内实验中多采用的是人工结构面试件^[144]。学者们通过对人工结构面中的锯齿状结构面进行直接剪切或循环剪切试验^[52,142],总结试验规律,提出评价锯齿状结构面特性的经验公式^[133,145],并研究了锯齿状结构面的强度特征和破坏机制。在不同工况下,锯齿状结构面的剪切过程可划分为剪变形、剪破坏和剪碎带改造三个阶段^[146],锯齿状结构面的破坏机制可总结为锯齿的滑移错断机制、结构面上下盘的拉伸断裂机制,以及结构面上盘前端下盘后端的冲击断裂机制^[133]。此外,锯齿状结构面独特的形貌特征使其便于研究一阶微凸体和二阶微凸体在循环剪切作用下的疲劳损伤机理^[147]。且根据试验结果可知,规则和不规则结构面在循环条件下的剪切机制是不同的,不规则起伏角度结构面剪切强度高于规则起伏角度结构面^[142]。但随着试验手段的不断进步,三维技术逐渐被引入到结构面的制备中,其中三维扫描与打印技术成为了制作真实结构面试样的新方法。学者开始对岩石自然结构面进行了批量制作并进行剪切试验^[148]。试验发现岩石结构面的峰值剪切强度由结构面粗糙度控制^[132],其与粗糙度呈正相关^[141]。此外,力学成因的差异会使结构面具有不同的表面形貌,导致结构面在循环剪切中的剪应力和法向位移演化规律不同^[149]。研究人员通过试验或数值方法,探讨岩石结构面表面形貌与抗剪强度之间的关系^[140,150],认为结构面的力学性质与其形态密切相关,但结构面的剪

切力学性质和破坏形态不仅取决于各因素的大小,还受其相互组合作用的影响^[151]。

结构面间的填充会显著影响结构面的力学性质,当岩体结构面中渗入淤泥或细沙等材料,即使只有一层很薄的填充物,结构面的抗剪强度也会降低。一旦填充物开始控制结构面的剪切行为,对应于峰值剪应力的剪切位移将大大减少^[72]。填充状态使结构面在循环剪切试验中的破坏模式发生明显改变,在无充填材料的情况下,结构面在循环剪切的过程中先发生剪断破坏后转为磨损破坏;当充填黄泥材料时,结构面主要发生填充材料间的滑移破坏;而充填石膏材料时,结构面将经历三个破坏阶段,即剪断、滑移、磨损破坏;而充填岩屑材料时,结构面则是由剪断破坏向磨损破坏转变^[14]。除了充填物不同,充填物的厚度也会通过影响结构面的破坏模式来影响其力学性质。随着充填厚度的增加,结构面的峰值剪切强度先下降后上升,充填物的厚度对结构面的剪切强度有较大影响^[111]。对于无起伏度的平直结构面,充填厚度对剪切强度影响较小,但对充填结构面的变形特性仍有重要的影响^[152]。

限于文章篇幅,此处仅具体地分析与阐述了剪切速率、法向应力、粗糙度、填充状态和锯齿状结构面对循环剪切下结构面的影响,实际上影响结构面粗糙度的因素由很多,例如岩壁强度、尺寸效应和各项异性等,此外,酸蚀和高温渗流耦合条件下的相关循环剪切试验还有待研究。

4 结构面力学特性的描述与表征

结构面作为岩体的重要组成部分,在岩体的变形和破坏中发挥着关键的控制作用。深入研究结构面的力学性质对于岩石工程具有重要的意义。而结构面的力学特性可以概括为结构面的变形和强度性质,结构面的变形又可以分为法向变形和切向变形。

4.1 结构面变形性质及其表征

结构面变形表征模型是研究不连续岩体在不断变化的应力条件下的一个重要内容。在自然界中,岩体的变形由结构面的变形主导。结构面的变形可以用应力变形特征曲线来量化,其中需要主要关注的是结构面应力与法向变形和切向变形之间

的关系。

结构面法向变形的研究方法,通常可以分为两类:经验模型和理论模型^[153]。其中,经验模型是通过试验结果进行拟合获得的,其表达形式简洁,包含部分待定系数,对估算结构面的法向闭合变形有重要指导意义。W.M. Shehata^[154]最初采用半对数函数模型进行模拟,发现曲线在低应力和高应力区域呈线性拟合,但在中等应力范围内呈现非线性。随后 R.E. Goodman^[155]引入法向刚度(K_n),并建议用双曲线函数描述结构面法向闭合量和结构面法向压应力的关系。但与此同时,F.H. Kulhawy^[156]提出了另一种形式更为简洁的双曲线模型。研究表明,天然岩石结构面的变形过程通常呈现非线性特征。S.C. Bandis等^[2]和 N. Barton等^[157]在大量室内试验的基础上共同修正了Goodman模型,提出Bandis-Barton(BB)弹性非线性模型,并首次明确了初始法向刚度的含义。之后,基于Bandis模型,A. Baghbanan等^[158]提出了一个非线性模型来预测结构面的法向闭合行为。J.T. Oden等^[159]则认为法向应力与变形的关系与结构面上的峰点高度分布有关,当峰点高度在统计上遵循幂函数分布时,法向闭合变形曲线同样呈现幂函数形式。此外,G. Swan^[160]、Z. Sun等^[161]和孙宗硕^[162]采用幂函数模型描述结构面的非线性闭合变形性质,但该模型仅适用于在研究低应力水平下的岩石结构面变形特性。孙广忠等^[163]则认为结构面在法向压力作用下的变形基本规律可用闭合法则表征。B. Malama等^[164]在经典指数模型基础上,提出了统一指数模型,改进了岩石结构面非线性法向变形本构关系。俞缙等^[165]通过建立岩石结构面法向应力一位移关系曲线的控制微分方程,定义拟结构面最大允许闭合量的概念,提出了一种新的三参数本构模型,该模型将指数模型和BB模型进行统一。乔丽萍等^[166]考虑岩壁变形条件提出了新的结构面闭合本构模型。需要指出的是,Bandis-Barton模型因为其简洁直观、能较好的反映结构面变形的非线性特征,且满足应力连续,位移不连续,在实践中应用非常广泛。

在过去的七十年间,学者们已经确定,即使是光滑的、抛光的表面,也仅有一小部分的面积是接触的^[167]。所有的表面在某种程度上都是粗糙的,两个粗糙的表面之间的接触会影响大多数的物理特性,且真实的接触面积远小于名义接触面积。理论

模型^[153,160,168-172]指根据结构面的形貌特征采用赫兹接触理论计算法向闭合变形。作为经典接触力学的基石,赫兹接触模型至今在理解和解决表面接触问题方面仍具有重要的地位,是研究结构面接触问题的重要理论之一。结构面的形貌一般包含起伏度分量和粗糙度分量两部分,二者可通过傅立叶变换进行分离^[18],它们对结构面的闭合变形产生不同的影响。根据赫兹理论,J.A. Greenwood等^[168]认为两个粗糙表面的接触可简化为多个相互独立、高度服从高斯分布的微小球体与平坦光滑表面的接触,进而解决了光滑平面和粗糙平面的接触问题。尽管Greenwood模型为众多粗糙结构面接触变形理论奠定了基础,但它没有考虑基体与微凸体变形之间的相互作用。S.R. Brown等^[171]则假定结构面的接触变形与结构面两个表面的接触都有关,引入组合形貌对结构面的闭合变形问题进行分析。C.C. Xia等^[18]经研究发现,结构面的闭合变形可视为一个起伏光滑面与一个仅含粗糙度表面的接触问题,他们基于起伏体与微凸体对闭合变形影响不同的认知,在Brown模型的基础上,给出了考虑起

伏体影响的结构面闭合变形理论模型,该模型解决了含起伏度分量的结构面的闭合变形问题,但与Greenwood模型一样,同样未考虑变形和微凸体变形的相互作用。此外,Z.C. Tang模型^[153]也解决了含起伏度分量的结构面的闭合变形问题。N.G.W. Cook^[173]考虑微凸体变形相互作用的影响,认为邻近微凸体的变形相互作用随法向应力的增加而增加,且由于微凸体之间的相互作用,法向应力和剪应力分布不均匀,失效在低法向应力点开始,并随着微凸体的应力重新分布到邻近微凸体而传播^[174]。此外,在研究结构面的闭合变形时,D.L. Hopkins^[174]也强调了法向应力对微凸体变形相互作用的重要性。微凸体的变形被认为会导致基体的变形,这也是影响结构面闭合变形的一个关键因素。Z.C. Tang等^[153]、唐志成等^[175-176]考虑基体变形,基于赫兹接触理论提出了新的闭合变形理论模型。由此,基于经验模型和理论模型的许多非线性岩石结构面法向变形模型已被提出并应用,常见结构面法向应力—法向变形计算经验公式见表2。

表2 结构面法向应力—法向变形计算经验公式

Table 2 Empirical formulas for calculating normal stress-normal deformation of structural planes

公式类型	公式名称	应力—位移关系	刚度 K_n 计算公式	参数说明
法向应力与法向变形关系	Goodman 双曲模型 ^[155]	$d_n = d_{nmax} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_n}\right)$	$K_n = \frac{\sigma_n^2}{d_{nmax} \sigma_0}$	σ_n 为法向应力; σ_0 为初始法向应力; d_n 为结构面法向闭合量; d_{nmax} 为结构面法向最大闭合量; K_n 为结构面法向刚度
	Bandis-Barton 双曲模型 ^[2,157]	$d_n = \frac{\sigma_n}{K_{ni} + (\sigma_n/d_{nmax})}$	$K_n = \frac{K_{ni}}{[1 - (d_n/d_{nmax})^2]}$	K_{ni} 为结构面初始法向刚度; 其他参数含义同 Goodman 模型
	对数函数 模型 ^[162]	$d_n = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \sigma_n$	$K_n = \frac{\alpha_1}{\sigma_1}$	α_0, α_1 为常数, 通过试验确定; 其他参数含义同 Goodman 模型
	幂函数 模型 ^[160]	$d_n = \alpha \sigma_n^\beta$	$K_n = \frac{\alpha A \sigma^\beta}{\sigma}$	α, β 为经验常数, 且 $\beta < 1$; A 为法向接触面积; 其他参数含义同 Goodman 模型
	俞缙模型 ^[165]	$d_n = \frac{\xi d_{nmax} \left\{ \exp \left[\frac{(1-\xi)\sigma_n}{\xi K_{ni} d_{nmax}} \right] - 1 \right\}}{\exp \left[\frac{(1-\xi)\sigma_n}{\xi K_{ni} d_{nmax}} \right] - \xi}$	$C_n = \frac{\partial d_n}{\partial \sigma_n} = \frac{(d_{nmax} - d_n)(\xi d_{nmax} - d_n)}{\xi K_{ni} d_{nmax}^2}$	$D_{max} = \xi d_{nmax}$, 其中 $\xi \in (1, +\infty)$; D_{max} 为拟节理最大闭合量; C_n 为结构面法向柔度 ($C_n = 1/K_n$); 其他参数含义同 Bandis-Barton 模型
	孙广忠 指数模型 ^[163]	$d_n = \left(1 - e^{-\frac{\sigma_n}{K_n}}\right) d_{nmax}$	$K_n = \frac{K_{ni}}{d_{nmax} - d_n}$	参数含义同 Bandis-Barton 模型
Malama-Kulatilake 指数模型 ^[164]	$d_n = d_{nmax} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_n}{K_{ni} d_{nmax}}\right)\right]$	$K_n = \frac{K_{ni}}{\left[1 - \left(\frac{d_n}{d_{nmax}}\right)\right]}$	参数含义同 Bandis-Barton 模型	

在研究结构面变形时,不仅需要考虑结构面法向的闭合,还需关注沿结构面的剪切滑移变形。作为反映结构面剪切行为的剪应力剪切位移曲线,其通常可分为3段,即剪应力上升区、剪应力峰值区和剪应力峰后应力降低区,典型剪切应力剪切位移关系曲线如图6所示,三个阶段的特征和峰值/残余抗剪强度等信息对于理解结构面的变形和破坏行为具有重要意义。通常,剪切本构方程可以分为脆断型和软弱型两种,脆断型剪切本构又可以分为常刚度型和常位移型^[155]。结构面剪切时,发生如微凸体的劈裂和磨损等力学破坏过程^[177],且由于高应力区域的局部破坏,微凸体在剪切过程中可能经历非线性的压碎和张裂,R.E. Goodman^[155]提出的结构面弹性本构关系类似于广义Hook定律,认为坚硬结构面的剪切刚度是常数,而松软结构面的剪切刚度与法向应力大小相关。大量试验证明峰值前的应力一位移关系是非线性的^[178-179]。O. Hungr等^[180]为表示结构面剪切过程的屈服,推导了一个有屈服点的剪切应力位移曲线。F.H. Kulhawy^[156]则根据试验数据,用双曲线模型描述结构面剪应力上升区的非线性行为。此外,B. Amadei等^[181]和S.C. Bandis

等^[2]针对结构面峰值前剪切应力一位移关系,也提出用双曲线函数进行表达。在考虑峰值后的情况时,G. Grasselli等^[178-179]认为双曲线函数能很好的拟合峰值后的强度衰减曲线。R. Simon等^[182]则提出一种非线性指数函数形式来描述。而对结构面剪切应力一位移全过程曲线,S. Saeb等^[183]基于Goodman模型进行分析并采用分段线性函数描述其相互关系。R. Simon^[184]为避免了分段讨论的麻烦,提出用简单指数函数来描述剪切变形的全过程,但该模型求取参数相对复杂,可能需要更多的实验数据和数值优化方法。常见结构面剪切应力一位移位移

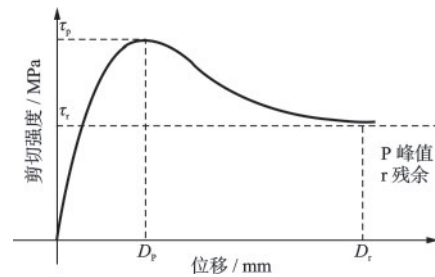


图6 结构面剪切应力剪切位移曲线

Fig.6 Shear stress-shear displacement curve of structural planes

表3 结构面剪切应力一位移变形计算经验公式

Table 3 Empirical formulas for calculating shear stress-shear deformation of structural planes

公式类型	公式名称	应力一位移关系	刚度 K_s 计算公式	参数说明
	双曲模型 ^[192]	$\tau = \frac{d_s}{m_1 + m_2 d_s}$	$K_s = \frac{m_1 d_s}{(m_1 + m_2 d_s)^2}$	m_1 和 m_2 为常数; d_s 为结构面切向位移; τ 为剪应力; K_s 为结构面切向刚度
	Kulhawy 模型 ^[156]	$\tau = \frac{d_s}{m_1 + m_2 d_s}$	$K_{st} = K_j(\sigma_n)^{n_j} \left(1 - \frac{\tau - R_f}{\tau_p}\right)^2$	σ_n 为法向应力; K_j 为结构面刚度参数; n_j 为结构面指数; τ_p 为峰值剪应力; $R_f = \tau/\tau_{ult}$; τ_{ult} 为剪应力水平渐近线; 其他参数含义同双曲模型
剪应力与剪切变形关系	Hungr 模型 ^[180]	$\tau = \frac{ut}{t - d_s} - u$, 其中: $u = -\frac{Ba_H f_H \sigma^2}{a_H \sigma - b}$, $t = -\frac{Bf_H b}{a_H(a_H \sigma - b)} < d_s$	$K_s = \frac{ut}{(t - d_s)^2}$	B 为剪应力屈服值与峰值之比; a_H 为屈服割线剪切刚度与法向应力之比; f_H 为法向应力 σ 作用下的峰值摩擦系数; b 为绘制 x 轴和 y 轴的尺寸系数; 其他参数含义同双曲模型
	Duncan 模型 ^[193]	$dd_s = \frac{d\tau}{K_s}$	$K_s = K_{si} \left(1 - \frac{R\tau}{(c - f\sigma)}\right)^2$	K_{si} 为初始切向刚度; c 为结构面粘聚力; f 为结构面摩擦系数; R 为剪切破坏比 (其值小于 1); 其他参数含义同双曲模型
	Bandis 模型 ^[2]	$dd_s = \frac{d\tau}{K_s}$	$K_s = K_{si} \sigma^m \left(1 - \frac{R\tau}{(c - f\sigma)}\right)^2$	m 为刚度指数; 其他参数含义同 Duncan 模型
	Barton 模型 ^[194]	$dd_s = \frac{d\tau}{K_s}$	$K_s = \frac{100\sigma \tan \left[JRC \lg \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) + \varphi_r \right]}{L}$	φ_r 为结构面残余摩擦角; L 为结构面的长度; JRC 为结构面粗糙度; JCS 为岩壁强度; 其他参数含义同双曲模型。该公式考虑了尺寸效应对剪切刚度的影响

计算经验公式见表3。

对于粗糙结构面,剪切过程中除了发生切向运动外,还伴随着向上的位移,呈现为非线性的体积膨胀,这种在剪切过程中产生的法向位移分量被称为剪胀^[177]。剪胀现象主要源于结构面不规则的宏观几何形状,由于在剪胀过程中伴随磨损破坏,因此采用剪胀角的增量形式来描述剪胀现象^[35]。B. Ladanyi等^[185]通过大量剪切试验提出了剪胀角与切向位移增量和法向位移增量之间的经验公式。M.E. Plesha^[186]提出用切向位移塑性功的指数函数形式来描述剪胀角磨损和破坏的关系。S. Saeb等^[183]提出的结构面模型考虑了剪胀的影响。H.J. Schneider^[187]则认为结构面在剪切过程中剪胀

角与初始剪胀角、材料和施加的法向应力有关,并提出一个负指数模型来描述结构面的剪胀角演化规律。L. Jing^[188]则提出了一个高次抛物线形式的峰值剪胀角模型。X.H. Qiu等^[189]基于结构面剪胀和微凸体磨损等现象,建立了考虑剪胀角和磨损参数的结构面弹塑性模型。J.G. Wang^[190]等利用关联流动法则,建立了结构面本构,结构面的剪胀性由等效相对位移来体现。此外,J.R. Seidel等^[191]提出了一种理论模型可以很好的预测软岩结构面剪切过程中发生的剪胀效应。周辉等^[145]研究不同粗糙度结构面岩体在压剪荷载作用下的力学特性,提出一个评价锯齿结构面剪胀特性的经验公式。常见结构面剪胀角计算公式见表4。

表4 结构面剪胀角计算公式

Table 4 Calculation formula for dilatancy angle of structural planes

公式类型	公式名称	计算公式	参数说明
结构面剪胀角	Barton模型 ^[1]	$i = \arctan\left(\frac{dv}{du}\right)$	dv 为垂直位移增量; du 为水平位移增量
	Ladanyi和Archambault模型 ^[185]	$\frac{dv}{du} = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_R}\right)^{k_i} \tan i_0$	i_0 为初始剪胀角; σ_R 为岩壁的单轴抗压强度; σ_n 为施加的法向应力; k_i 为材料参数; v 为垂直位移; u 为水平位移
	Schneider模型 ^[187]	$i = i_0 e^{-k_i \sigma_n}$	i_0 为初始剪胀角; σ_n 为施加的法向应力; k_i 为材料参数
	Plesha模型 ^[186]	$i = i_0 \exp(-c_P W_t^p)$	i_0 为初始剪胀角; c_P 为材料参数,体现剪胀角的磨损速率; W_t^p 为切向塑性功
	Jing模型 ^[188]	$i = i_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right)^{k_i}$	σ_c 为单轴抗压强度;其他参数同Ladanyi模型

岩体中结构面的存在会显著影响岩体的强度和变形特性。经过众多学者七十余年的努力,结构面变形特性得到了充分的研究。上述内容为准确了解岩体结构面的变形特性提供理论指导,明晰结构面变形特性对工程岩体项目建设具有重要意义。

4.2 结构面强度性质及其表征

除变形外,结构面最重要的力学性质之一就是抗剪强度,结构面在剪切的过程中力学机制复杂,影响抗剪强度的因素众多^[178,195]。多年来,人们提出了许多估算结构面峰值抗剪强度的模型。F.D. Patton的双线性强度准则^[196]是描述峰值剪切强度的最早模型之一。大量试验结果表明,库伦准则一般可以用来表述结构面的抗剪强度^[177,187-188,197-198]。F.D. Patton^[196,199]和M. Goldstein等^[200]用Newland的公式^[201]表示在低法向应力的抗剪强度,在高法向应力下则假定为库伦准则,但是事实上,岩石结构面的峰值剪切强度包络是非线性的,线性强度准则

与粗糙结构面表面剪切的实际情况存在一定的差异^[1,194,202]。B. Ladanyi等^[185]通过对齿形结构面进行试验,详细分析了剪切过程中结构面的受力状态,认为剪切抵抗力是由4部分构成并提出一个新的抗剪强度。但在自然界中,天然结构面一般是不规则的,故N. Barton^[202]提出了岩石中结构面的峰值抗剪强度的JRC-JCS方程,该方程假定抗剪强度由3个部分组成,即基本摩擦部分,JRC控制的几何部分和岩壁强度部分,由于Barton经验公式参数少,方法简单,实用性强,该公式是目前使用最普遍的抗剪强度计算公式,然而他在计算JRC时试样尺寸是一定的,但结构面粗糙度有明显的尺寸效应,故随后S. Barton等^[203]根据不同尺寸结构面抗剪强度试验提出了大尺寸结构面剪切强度的估算模型。B.W. Zheng等^[78]提出了一个同时考虑尺寸和剪切率的剪切强度标准,与以前的相关经验方程相比,新的剪切强度标准有一个尺寸统一的优势,促进了JRC-JCS模型的发展。除了粗糙度的统计参数外,

以 G. Grasselli^[178]为代表的学者也强调有效剪切面积在抗剪强度理论中的重要性。在随后的五十年间,学者们纷纷提出相应改进模型。常见岩体结构面抗剪强度公式见表 5,其中部分抗剪强度模型可以看作 Barton 的改进模型,它们或直接源于 Barton 模型,或将自己提出的粗糙度参数带入 Barton 模型进行回归分析^[37,44,151,198,204-205];另一部分抗剪强度模型则是源于 Grasselli 模型,通过改进或应用 Grasselli 所提出的形貌参数提出新的抗剪强度公式,来预测和估算结构面的峰值抗剪强度^[34,206-210];还有一些模型是在库伦模型上改进并能反映出结构面的特

性^[187-188,197,211];剩下一部分模型则通过分形理论研究结构面粗糙度,进而建立抗剪强度公式^[212-213]。虽然目前结构面抗剪强度模型公式众多,但作为 Barton 类模型,其使用首先需要明确 JRC 值,可是 JRC 确定的方法各异,如何衡量 JRC 的准确性成为目前难点,但如若想通过抗剪强度反算 JRC,则 Barton 模型会失去该公式的意义,而 Grasselli 类模型在形式上没有体现出剪胀角的发展与演化,是不符合库仑公式形式的,其他学者提出的基于试验回归拟合的经验公式,则很难确保公式在其他条件下的应用,甚至某些公式都没有明确的物理意义。

表 5 岩体结构面抗剪强度公式

Table 5 Shear strength formula for rock mass structural planes

序号	公式名称	计算公式	参数说明
1	Patton 模型 ^[196]	$\sigma < \sigma_T, \tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + \beta_b)$ $\sigma > \sigma_T, \tau = c + \sigma_n \tan \varphi_r$	σ_T 为过渡应力; σ_n 为法向应力; τ 为剪应力; φ_b 为基本内摩擦角; β_b 为粗糙体倾角; c 为凝聚力; φ_r 为基本内摩擦角
2	黄达模型 ^[197]	$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + 0.115\alpha_b) + 0.012\alpha C_b$	C_b 为完整岩石的凝聚力; α_b 为起伏角; 其他参数同 Patton 模型
3	Schneider 模型 ^[187]	$\tau = \sigma_n \tan[i_0 \exp(-k_1 \sigma_n) + \varphi_b]$	i_0 为初始剪胀角; k_1 为拟合参数; 其他参数同 Patton 模型
4	Jing 模型 ^[188]	$\tau = \sigma_n \tan\left[i_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right)^{k_2} + \varphi_b\right]$	k_2 为拟合参数; σ_c 为单轴抗压强度; 其他参数同 Schneider 模型
5	Liu 模型 ^[211]	$\tau = \sigma_n \tan\left[\phi_b + \left(\bar{\theta}^*/n\right)^{0.88} h e^{-\frac{\sigma_n}{\sigma_c}}\right]$	$\bar{\theta}^*$ 为特征角; h 为结构面平均高度; n 为三角形单元的外法向量; σ_c 为岩石单轴抗压强度; 其他参数同 Patton 模型
6	Barton 模型 ^[194]	$\tau = \sigma_n \tan\left[JRC \left(\lg \frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \varphi_b\right]$	JRC 为结构面粗糙度系数; JCS 为结构面岩壁的抗压强度; 其他参数同 Patton 模型
7	Grasselli 模型 ^[179,214]	$\tau = \sigma_n \tan\left[\varphi_b + \left(\frac{\theta_{max}^*}{C}\right)^{1.18\beta} \left[1 + \exp\left(-\frac{\theta_{max}^*}{9A_0 C} \frac{\sigma_n}{\sigma_t}\right)\right]\right]$	θ_{max}^* 为最大视倾角; A_0 为最大接触面积比; C 为粗糙度参数; σ_t 为单轴抗拉强度; 其他参数同 Patton 模型
8	Ladanyi 模型 ^[185]	$\tau = \frac{(1 - a_s)(\sigma_n \tan i_n + \sigma_n \tan \varphi_n) + a_s(c_0 + \sigma \tan \varphi_0)}{1 - (1 - a_s) \tan i \tan \varphi_n}$	φ_n 为齿形斜面的摩擦角; i_n 为结构面爬坡角; a_s 为剪断齿尖的面积与结构面的面积比值; c_0 为剪断齿尖时所表现的粘结力; φ_0 为剪断齿尖时所表现出的内摩擦角; 其他参数同 Patton 模型
9	郑博文模型 ^[215]	$\tau = \sigma_n \tan\left\{\log_{10}\left[\left(\frac{JCS}{\sigma}\right)^{JRC} \cdot \left(\frac{V_s}{V}\right)^M\right] + \varphi_b\right\}$	V 为剪切率; V_s 为恒定剪切速率; M 为与节理试样物性和微观几何形态有关的系数; 其他参数同 Barton 模型
10	Zheng 模型 ^[78]	$\tau = \sigma_n \tan\left\{\log_{10}\left[\left(\frac{JCS_0}{\sigma_n}\right)\left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.03JRC_0} JRC_0 \left(\frac{L_n}{16.27h_n}\right)^{-0.02JRC_0} \cdot \left(\frac{V_0}{V}\right)^M\right] + \varphi_b\right\}$	JRC_n 是长度为 L_n 的结构面的粗糙度系数; JCS_0 是长度为 L_0 的结构面的岩壁抗压强度; JRC_0 是长度为 L_0 的结构面的粗糙度系数; h_n 是长度为 L_0 的结构面的最大起伏幅度 ($L_0=100$ mm); V_0 是特征速率 ($V_0=1$ mm/s); 其他参数同 Barton 模型

续表

序号	公式名称	计算公式	参数说明
11	朱小明模型 ^[216]	$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_0 + 8.177\alpha_{n1}^{0.417} + 0.596\alpha_{n2}^{0.135})$	α_{n1}, α_{n2} 为结构面一阶和二阶起伏角;其他参数同Barton模型
12	陈世江模型 ^[44]	$\tau = \sigma_n \tan \left\{ \left\{ 10.725 \ln \left[A^{\alpha_c} (SR_v)^{1-\alpha_c} \right] + 42.202 \right\} \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right\}$	A 为结构面平均起伏度参数; SR_v 为结构面平均起伏角; α_c 为常数;其他参数同Barton模型
13	张茂础模型 ^[151]	$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + JRC a_z e^{b_z \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)} \right]$	a_z, b_z 为拟合参数;其他参数同Barton模型
14	Zhao模型 ^[37]	$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_r + JRC JMC \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$	JMC 为结构面吻合系数;其他参数同Barton模型
15	Lee模型 ^[204]	$\tau = \sigma_n \left[\tan \varphi_b + 0.017 (JRC)^{0.89} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0.42} \right]$	参数含义同Barton模型
16	Liu模型 ^[198]	$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \left(\frac{\bar{\theta}^*}{n} \right)^{1.05} h^{0.4} \lg \left(\frac{2.1 JCS}{\sigma_n} \right) \right]$	$\bar{\theta}^*$ 为特征角; n 为拟合参数; h 为结构面平均高度;其他参数同Barton模型
17	葛云峰模型 ^[205]	$\tau = \sigma_n \tan \varphi_b \left\{ 1 + 1.538 \times 10^{-6} (BAP)^{3.607} \left[\lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]^{3.481} \right\}$	BAP 为光亮面积百分比;其他参数同Barton模型
18	Xia模型 ^[206,207]	$\tau = \sigma_n \tan \left\{ \varphi_b + \frac{4A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \cdot \left[1 + \exp \left(-\frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{\max}^* \sigma_n}{C+1} \right) \right] \right\}$	参数含义同Grasselli模型
19	Yang模型 ^[208,209]	$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \frac{\theta_{\max}^*}{C^{0.45}} \exp \left(-\frac{\sigma_n}{JCS} C^{0.75} \right) \right]$	JCS 为结构面岩壁的抗压强度;参数含义同Grasselli模型
20	Tatone模型 ^[34]	$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \left(\frac{\theta_{\max}^*}{C+1} \right)^{1.34l^{0.058}} \cdot \left[1 + \exp \left(-\frac{\theta_{\max}^* \sigma_n}{9A_0(C+1)\sigma_t} \right) \right] \right]$	l 为采样间距;其他参数含义同Grasselli模型
21	Tian模型 ^[210]	$\tau = \sigma_n \tan \left(\varphi_b + \frac{160C'^{-0.44}}{\sigma_n/\sigma_t + 2} \right)$	C' 为粗糙度参数 C 的修正;其他参数含义同Grasselli模型
22	孙辅庭模型 ^[213]	$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \frac{1+4a}{\sqrt{D_{SRA}-1}} e^{A_{SRA} \left(1 + \frac{a D_{SRA} \sigma_n}{\sigma_n - \sigma_c} \right)} \right]$	D_{SRA} 为分形粗糙度维数; A_{SRA} 为分形粗糙度; a 为分布参数; σ_c 为岩石单轴抗压强度;其他参数同Patton模型
23	Kulatilake模型 ^[212]	$\tau = \sigma_n \tan \left(\varphi_b + a_K (SRP)^{c_K} \left[\lg \left(\frac{\sigma_J}{\sigma_n} \right) \right]^{d_K} + I \right)$	σ_J 为结构面岩壁强度; a_K, c_K, d_K 为基于剪切试验数据所确定的参数; I 为平均倾角; SRP 为平稳粗糙度系数;其他参数同Patton模型

4.3 循环荷载条件下结构面的变形与强度

结构面的抗剪强度与其变形历史密切相关,即新形成的结构面通常具有比经历剪切的结构面更高的抗剪强度^[177]。因此,研究结构面在循环荷载条

件下的变形与强度特性变得至关重要。

对于切向循环加载过程种,结构面将先发生剪断破坏、后转变为由碎屑控制的磨损破坏。M.M. Zaman等^[217]认为当进入宏观滑移阶段后,结构面发生明显的磨损破坏。M. Souley等^[218]将

Saeb-Amadei 结构面模型拓展到循环加、卸载的情况,然而模型中不可恢复的法向位移的定义较为模糊。王光纶等^[219]考虑三维循环剪切试验,提出双曲线函数和线性函数形式的循环剪切本构模型。H.S. Lee 等^[110]在进行大量循环剪切试验的基础上,考虑加载过程中的峰值剪切强度、磨损、非线性膨胀现象,提出一个弹塑性模型。D.D. Kana 等^[220]为描述结构面剪切应力与剪切位移的关系,通过循环剪切试验,建立了结构面互摩擦模型。肖卫国^[221]对单向加载本构模型进行修正,提出一个新的结构面循环加载本构模型,并使用 H.S. Lee 等^[110]、X. Huang 等^[222]和 D.D. Kana 等^[220]的试验数据进行验证。尹显俊等^[223]在研究切向循环加载时,用双曲线函数来拟合结构面的硬化阶段和软化阶段,而提出的模型包含较多参数。S. Dong 等^[131]则从循环剪切劣化对岩体结构面的影响和相对速度引起的滑动岩块间动摩擦系数的降低入手,提出了循环剪切载荷下岩体结构面的抗剪强度计算公式,但当使用该计算公式估算初始起伏角与基本摩擦角之和大于 70° 的结构面的循环抗剪强度时,计算结果可能存在一些误差。总的来说,结构面循环荷载条件下的本构模型和抗剪强度准则相较于直剪来说都相对较少,还有较大改进空间。

5 结 论

针对岩体结构面循环作用下的室内试验设备与力学特性问题,总结了结构面表面信息的表达、用于测试结构面循环剪切强度特性的国内外室内直剪仪以及典型力学特性描述方法的现状。目前,关于岩体结构面在循环荷载作用下的试验手段和力学特性依然存在以下的不足和问题,有待科研工作者进一步解决:

(1)虽然非接触测量技术实现了结构面粗糙度的快速测量,但由于测量过程中依然存在的环境干扰、人为主观意识(如采样间隔的选取)等因素,产生的测量误差始终难以避免,最终影响结构面表面信息形态的量化描述。同时目前量化描述结构面粗糙度的方法主要包括单一统计参数、单一形参数、分类加权拟合、综合参数表征法等,不同的方法对结构面粗糙度的描述存在较大差异,难以说明哪一种方法具有更好的量化效果,但可以预见的是,综合参数表征方法应是未来研究的重点。

(2)CNL、CNS、CV 和非常规条件的室内剪切试验得到了较好的实现,进一步在室内还原了大理深、高温、高水压、多场耦合等工况。同时,伺服系统的应用简化了试验流程,提高了试验结果的准确性。但对于剪切试验的动态加载大多停留在单向的伪动态加载方式,足以拟真模拟地震动荷载的剪切设备还有待进一步的研发,且未见能模拟地震动荷载下平—扭偶联效应的相关装置,制约了结构面动态力学性质的深入认识。

(3)含结构面的岩体剪切试验主要有直接剪切试验和循环剪切试验,随着研究的深入,研究人员对结构面切向循环加载试验积累了大量的认识。对于地震荷载,其不仅仅是循环荷载,而是非常复杂的,存在不同方向的动态激励,含结构面(立方体样)试件在循环法向荷载条件下剪切试验还较少见到,且循环剪切荷载与循环法向荷载相结合的剪切试验也有待研究。

(4)大量研究表明,结构面变形模型可以分为经验模型和理论模型。早期多数模型均为线性,难以描述结构面的一些非线性行为。随着双曲、对数等非线性模型的提出,结构面变形的描述越来越复杂,适用条件存在较大差异,如何根据实际的工况选择合适的描述模型仍然是一个较难解决的问题。同时结构面强度性质影响因素众多,力学机理复杂,但其中部分模型的物理意义匮乏,仅在特定条件下适用,存在一定局限性,对实际问题的处理仍然有较大影响。此外,结构面的抗剪强度与变形历史有密切关系,虽然结构面循环剪切设备的研发已经有了很大进展,但是循环荷载条件下结构面的变形与强度公式还相对薄弱,亟待加强。

参考文献:

- [1] Barton N. The shear strength of rock and rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13 (9) : 255-279.
- [2] Bandis S C, Lumsden A C, Barton N R. Fundamentals of rock joint deformation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 249-268.
- [3] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993(1): 14-18.
Sun G Z. On the theory of structure-controlled rockmass [J]. Journal of Engineering Geology, 1993, 1(1): 14-

18. (in Chinese)
- [4] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [5] 杜时贵, 黄曼, 罗战友, 等. 岩石结构面力学原型试验相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2263-2270.
Du S G, Huang M, Luo Z Y, et al. Similar material study of mechanical prototype test of rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2263-2270. (in Chinese)
- [6] 葛云峰, 唐辉明, 王亮清, 等. 天然岩体结构面粗糙度各向异性、尺寸效应、间距效应研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 170-179.
Ge Y F, Tang H M, Wang L Q, et al. Anisotropy, scale and interval effects of natural rock discontinuity surface roughness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 170-179. (in Chinese)
- [7] 黄曼, 杜时贵, 罗战友, 等. 基于多尺度直剪试验的岩石模型结构面抗剪强度特征研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3180-3186.
Huang M, Du S G, Luo Z Y, et al. Study of shear strength characteristics of simulation rock structural planes based on multi-size direct shear tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3180-3186. (in Chinese)
- [8] 沈明荣, 张清照. 规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 713-719.
Shen M R, Zhang Q Z. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 713-719. (in Chinese)
- [9] 崔国建, 张传庆, 韩华超, 等. CNL及CNS条件下结构面剪切特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增2): 3384-3392.
Cui G J, Zhang C Q, Han H C, et al. Experiment study on shear behavior of artificial joint under CNL and CNS boundary conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup2): 3384-3392. (in Chinese)
- [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 W, Min H, Chen J, 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. (in Chinese)
- [11] 李海波, 冯海鹏, 刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2435-2440.
Li H B, Feng H P, Liu B. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2435-2440. (in Chinese)
- [12] Muralha J, Grasselli G, Tatone B, et al. ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47: 291-302.
- [13] Qi S W, Zheng B W, Wu F Q, et al. A New dynamic direct shear testing device on rock joints [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(10): 4787-4798.
- [14] 许江, 瞿佳美, 刘义鑫, 等. 循环剪切荷载作用下充填物对结构面剪切特性影响试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1627-1637.
Xu J, Qu J M, Liu Y X, et al. Influence of filling material on the behavior of joints under cyclic shear loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1627-1637. (in Chinese)
- [15] Sharma V M. In-situ characterization of rocks [M]. Tokyo: Balkema Publishers, 2002: 200-310.
- [16] 夏才初, 孙宗顺. 节理表面形貌的室内和现场量测及其应用 [J]. 勘察科学技术, 1994(4): 27-31.
Xia C C, Sun Z Q. Laboratory and field measurements of the superficial morphology of joints and their applications [J]. Site Investigation Science and Technology, 1994(4): 27-31. (in Chinese)
- [17] Develi K, Babadagli T, Comlekci C. A new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness [J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(3): 265-277.
- [18] Xia C C, Yue Z Q, Tham L G, et al. Quantifying topography and closure deformation of rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2003, 40(2): 197-220.
- [19] Grasselli 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.
- [20] Krohn C E, Thompson A H. Fractal sandstone pores: automated measurements using scanning electron microscope images [J]. Physical Review B, 1986, 33(9): 6366.
- [21] 王金安, 谢和平, Kwasniewski M A. 应用激光技术和分形理论测量和描述岩石断裂表面粗糙度 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 61-68.

- Wang J A, Xie H P, Kwasniewski M A. Application of laser technique and fractal theory the measurement and characterization on roughness of rock fracture surfaces [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(4): 61-68. (in Chinese)
- [22] 周枝华, 杜守继. 岩石节理表面几何特性的三维统计分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1227-1232.
Zhou Z H, Du S J. 3D statistic analysis of geometrical properties of a rock joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1227-1232. (in Chinese)
- [23] 陈翔, 李尤嘉, 黄醒春, 等. 基于 GIS 三维统计的膏溶角砾岩断面几何特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 2): 3541-3546.
Chen X, Li Y J, Huang X C, et al. Study on geometrical properties of fracture appearance in gypsum breccia base on 3D GIS statistic [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Sup2) : 3541-3546. (in Chinese)
- [24] Jiang Y J, Li B, Tanabashi Y. Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(6): 837-846.
- [25] 李庆松, 杜守继. 经历剪切变形历史的岩石节理表面粗糙特性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 850-855.
Li Q S, Du S J. Surface roughness analysis of rock joints under different shear deformation histories [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (6) : 850-855. (in Chinese)
- [26] Huang S L, Oelfke S M, Speck R C. Applicability of fractal characterization and modelling to rock joint profiles [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29 (2): 89-98.
- [27] 何秉顺, 丁留谦, 孙平. 三维激光扫描系统在岩体结构面识别中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(1): 43-48.
He B S, Ding L Q, Sun P. The application of 3-D laser scanning technology in rock joint sets identification [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(1): 43-48. (in Chinese)
- [28] Rojanski D, Huppert D, Bale H D, et al. Integrated fractal analysis of silica: adsorption, electronic energy transfer, and small-angle x-ray scattering [J]. Physical Review Letters, 1986, 56(23): 2505.
- [29] Khoshelham K, Altundag D, Ngan-Tillard D, et al. Influence of range measurement noise on roughness characterization of rock surfaces using terrestrial laser scanning [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1215-1223.
- [30] Kulatilake P, Balasingam P, Park J, et al. Natural rock joint roughness quantification through fractal techniques [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, 24: 1181-1202.
- [31] Ficker T. Fractal properties of joint roughness coefficients [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 94: 27-31.
- [32] Magsipoc E, Zhao Q, Grasselli G. 2D and 3D Roughness Characterization [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(3): 1495-1519.
- [33] 夏才初. 工程岩体节理力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [34] Tatone B S A. Quantitative characterization of natural rock discontinuity roughness in-situ and in the laboratory [M]. Toronto: University of Toronto, 2009.
- [35] Sayles R S, Thomas T R. The spatial representation of surface roughness by means of the structure function: a practical alternative to correlation [J]. Wear, 1977, 42 (2): 263-276.
- [36] El-Soudani S M. Profilometric analysis of fractures [J]. Metallography, 1978, 11(3): 247-336.
- [37] Zhao J. Joint surface matching and shear strength part A: joint matching coefficient (JMC) [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 1997, 34 (2): 173-178.
- [38] Tse R, Cruden D M. Estimating joint roughness coefficients [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16 (5): 303-307.
- [39] 李坤, 王卫华, 严哲, 等. 岩石节理形貌粗糙度系数与分形维数及几个参数的关系分析 [J]. 世界科技研究与发展, 2016, 38(5): 1029-1034.
Li K, Wang W H, Yan Z, et al. Analysis of relationship among rock joint surface roughness and fractal dimension including several parameters [J]. WorldSci-Tech R & D, 2016, 38(5): 1029-1034. (in Chinese)
- [40] Maerz N H, Franklin J A, Bennett C P. Joint roughness measurement using shadow profilometry [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1990, 27(5): 329-343.
- [41] Yu X, Vayssade B. Joint profiles and their roughness parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(4): 333-336.
- [42] Yang Z Y, Lo S C, Di C C. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z 2 [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2001, 34:

- 243-251.
- [43] Liu X G, Zhu W C, Yu Q L, et al. Estimation of the joint roughness coefficient of rock joints by consideration of two-order asperity and its application in double-joint shear tests[J]. *Engineering Geology*, 2017, 220: 243-255.
- [44] 陈世江,朱万成,王创业,等. 考虑各向异性特征的三维岩体结构面峰值剪切强度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(10): 2013-2021.
Chen S J, Zhu W C, Wang C Y, et al. Peak shear strength of 3D rock discontinuities based on anisotropic properties[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(10): 2013-2021. (in Chinese)
- [45] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. *Science*, 1967, 156(3775): 636-638.
- [46] Xie H P, Zhu J B, Zhou T, et al. Conceptualization and preliminary study of engineering disturbed rock dynamics[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, 6: 1-14.
- [47] Lee Y H, Carr J R, Barr D J, et al. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1990, 27(6): 453-464.
- [48] 夏才初. 岩石结构面的表面形态特征研究[J]. *工程地质学报*, 1996, 4(3): 71-78.
Xia C C. A study on the surface morphological features of rock structural faces[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1996, 4(3): 71-78. (in Chinese)
- [49] 戚国庆,盛金昌,速宝玉. 用人工神经网络预测岩石节理的抗剪强度[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(3): 107-110.
Qi G Q, Sheng J C, Su B Y. Predicting the shears strength of rock mass by using artificial neuron network [J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(3): 107-110. (in Chinese)
- [50] 王卫华,李坤,严哲,等. 基于BP神经网络方法研究岩石节理形貌粗糙度系数[J]. *世界科技研究与发展*, 2016, 38(3): 518-521.
Wang W H, Li K, Yan Z, et al. Roughness coefficient of rock joints based on BP neural network [J]. *World Sci-Tech R & D*, 2016, 38(3): 518-521. (in Chinese)
- [51] Jiang Y, Xiao J, Tanabashi Y, et al. Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 275-286.
- [52] Li H B, Feng H P, Liu B, et al. Experimental studies on mechanical properties of rock joints under dynamic loading [J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 326: 1709-1712.
- [53] Jaber J, Conin M, Deck O, et al. Investigation of the mechanical behavior of 3D printed polyamide-12 joints for reduced scale models of rock mass [J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2020, 53(6): 2687-2705.
- [54] Crawford A M, Curran J H. The influence of shear velocity on the frictional resistance of rock discontinuities [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(6): 505-515.
- [55] Zandarin M T, Alonso E, Olivella S. A constitutive law for rock joints considering the effects of suction and roughness on strength parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 2013, 60: 333-344.
- [56] Saiang D, Malmgren L, Nordlund E. Laboratory tests on shotcrete-rock joints in direct shear, tension and compression [J]. *Rock mechanics rock engineering*, 2005, 38(4): 275-297.
- [57] Esaki T, Du S, Mitani Y, et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint[J]. *International journal of rock mechanics mining sciences*, 1999, 36(5): 641-650.
- [58] 李婷,姜谱男,张峰瑞,等. 高温作用后类岩石结构面剪切力学特性研究[J]. *实验力学*, 2022, 37(4): 488-496.
Li T, Jiang A N, Zhang F R, et al. Study on shear mechanical properties of rocklike discontinuities after high temperature [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(4): 488-496. (in Chinese)
- [59] 周家乐. 岩石-砂浆异性结构面剪切特征研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
Zhou J L. Study on shear characteristics of rock-mortar heterogeneous structural plane [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021. (in Chinese)
- [60] Cuisiat F D E, Hyett A J, Hudson J A. Numerical investigation of the boundary conditions effect on rock joint behaviour [C]//*International Symposium on Rock Joints*. Netherlands: A. A. Balkema, Rotterdam, 1990: 611-616.
- [61] Olsson R, Barton N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 2001, 38(3): 317-329.

- [62] Indraratna B, Haque A, Aziz N. Laboratory modelling of shear behaviour of soft joints under constant normal stiffness conditions[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 1998, 16(1): 17-44.
- [63] Rao K S, Shrivastava A K, Singh J. Development of an automated large scale direct shear testing machine for rock[C]//IGC2009. Guntur: Indian Geotechnical Society, 2009: 238-244.
- [64] Shrivastava A K, Rao K S. Shear behaviour of rock joints under CNL and CNS boundary conditions[J]. *Geotechnical Geological Engineering*, 2015, 33: 1205-1220.
- [65] Moradian Z, Gravel C, Fathi A, et al. Developing a high capacity direct shear apparatus for the large scale laboratory testing of rock joints[C]//EUROCK2013. Poland: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013: 315-320.
- [66] Cui Z, Sheng Q, Zhang M C, et al. A new direct shear apparatus for rock joints specialized in cyclic loading[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2021, 54(8): 4321-4327.
- [67] Homand F, Belem 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.
- [68] Hans J, Boulon M. A new device for investigating the hydro-mechanical properties of rock joints[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003, 27(6): 513-548.
- [69] Konietzky H, Frühwirt T, Luge H. A new large dynamic rockmechanical direct shear box device[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(3): 427-432.
- [70] Pellet F L, Keshavarz M, Boulon M. Influence of humidity conditions on shear strength of clay rock discontinuities[J]. *Engineering Geology*, 2013, 157: 33-38.
- [71] Ferrero A M, Migliazza M, Tebaldi G. Development of a new experimental apparatus for the study of the mechanical behaviour of a rock discontinuity under monotonic and cyclic loads[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2010, 43(6): 685-695.
- [72] Indraratna B, Haque A, Aziz N. Shear behaviour of idealized infilled joints under constant normal stiffness[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 331-355.
- [73] Kim D Y, Chun B S, Yang J S. Development of a direct shear apparatus with rock joints and its verification tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, 29(5): 365-373.
- [74] Barla G, Barla M, Martinotti M E. Development of a new direct shear testing apparatus[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2010, 43: 117-122.
- [75] 夏才初, 钱鑫, 桂洋, 等. 多功能岩石节理全剪切-渗流耦合试验系统研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2219-2231.
Xia C C, Qian X, Gui Y, et al. A novel multi-functional shear-flow coupled test system for rock joints and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2219-2231. (in Chinese)
- [76] 江权, 李力夫, 冯夏庭, 等. 大型多功能高压岩石结构面剪切伺服试验系统及功能测试分析[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 3159-3169.
Jiang Q, Li L F, Feng X T, et al. High pressure shearing servo test system for rock joint with multi modes and corresponding function test analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 3159-3169. (in Chinese)
- [77] 姚孟迪, 荣冠, 侯迪, 等. 节理三维形貌与抗剪强度相关性研究[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(12): 163-166, 162.
Yao M D, Rong G, Hou D, et al. Estimation of vertical limiting bearing capacity of single pile based on bayes generalization theory in small sample case[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(12): 163-166, 162. (in Chinese)
- [78] Zheng B W, Qi S W, Huang X L, et al. An advanced shear strength criterion for rock discontinuities considering size and low shear rate[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(12): 4095.
- [79] 杜时贵, 罗战友, 黄曼, 等. 多尺度岩体结构面直剪试验仪的研制与应用[C]//第三届全国水工岩石力学术会议论文集. 上海: 中国岩石力学与工程学会, 2010: 5.
Du S G, Luo Z Y, Huang M, et al. Development and application of multi-scale direct shear test instrument for rock joint [C]//National Conference on Hydraulic Rock Mechanics. Shanghai: China Society for Rock Mechanics and Engineering, 2010: 5. (in Chinese)
- [80] Jacobsson L, Flansbjer M, Larsson J. Direct shear tests on large natural and artificially induced rock fractures in a new laboratory equipment [C]//Proceedings of the 15th ISRM Congress. Salzburg: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023: ISRM-15CONGRESS-2023-452.
- [81] Zhang Q, Li X, Bai B, et al. Development of a direct-shear apparatus coupling with high pore pressure and elevated temperatures[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(9): 3475-3484.

- [82] Lee H S, Cho T F. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, 35(4): 299-318.
- [83] Zhou J Q, Chen Y F, Tang H, et al. Disentangling the simultaneous effects of inertial losses and fracture dilation on permeability of pressurized fractured rocks[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(15): 8862-8871.
- [84] Zhou J Q, Chen Y F, Wang L, et al. Universal relationship between viscous and inertial permeability of geologic porous media[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1441-1448.
- [85] 王刚, 蒋宇静, 王渭明, 等. 新型数控岩石节理剪切渗流试验台的设计与应用[J]. *岩土力学*, 2009, 30(10): 3200-3208.
Wang G, Jiang Y J, Wang W M, et al. Development and application of an improved numeric control shear-fluid coupled apparatus for rock joint[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3200-3208. (in Chinese)
- [86] Gui Y, Xia C C, Ding W Q, et al. Hydraulic characteristics of rough joints under coupled shear-flow conditions: an experimental study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(7): 3341-3352.
- [87] 田平, 何昌荣. 热水条件下透辉石的摩擦本构特征[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(12): 4440-4450.
Tian P, He R C. An experimental study of frictional constitutive properties of diopside under hydrothermal condition[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(12): 4440-4450. (in Chinese)
- [88] 雷蕙如. 水热条件下花岗岩脆塑性转化带的摩擦实验研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2022.
Lei H R. Friction properties of brittle-ductile transition with a granite gouge at hydrothermal cond[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)
- [89] Rong G, Yang J, Cheng L, et al. Laboratory investigation of nonlinear flow characteristics in rough fractures during shear process[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 1385-1394.
- [90] 许江, 刘义鑫, 尹光志, 等. 煤岩剪切-渗流耦合试验装置研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增1): 2987-2995.
Xu J, Liu Y X, Yin G Z, et al. Development of shear-flow coupling test device for coal rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Sup1): 2987-2995. (in Chinese)
- [91] 刘洋. 龙门山断层带浅钻花岗岩中断层泥的摩擦本构参数研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2017.
Liu Y. Frictional properties of natural fault gouges from drilled cores in the Longmenshan fault zone cutting granitic rock [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2017. (in Chinese)
- [92] 张慧婷. 中性麻粒岩高温流变的实验研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2015.
Zhang H T. Experimental study on the rheology of intermediate granulite at high temperature [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2015. (in Chinese)
- [93] 姚胜楠. 斜长石在下地壳温度及多种正应力条件下的摩擦滑动[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2015.
Yao S N. Frictional sliding of plagioclase gouge under different normal stresses and lower-crust temperature conditions [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2015. (in Chinese)
- [94] 焦裕, 周永胜, 张雷, 等. 流体对石灰岩断层摩擦滑动影响的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(1): 159-171.
Jiao Y, Zhou Y S, Zhang L, et al. Experimental study on the effect of fluid to friction sliding of limestone fault gouge [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(1): 159-171. (in Chinese)
- [95] 刘世民, 张雷, 何昌荣. 高压流体条件下叶蛇纹石摩擦特性及其对俯冲带慢滑移事件的启示[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(4): 1334-1347.
Liu S M, Zhang L, He C R. Frictional properties of antigorite under high pore fluid pressure and implications for slow-slip events in subduction zones [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(4): 1334-1347. (in Chinese)
- [96] 何邦超, 张雷. 水热条件下白云石的摩擦滑动稳定性实验研究以及对潜在地震风险的启示[J]. *中国煤炭地质*, 2023, 35(9): 48-53.
He B C, Zhang L. Experimental study on frictional sliding stability of dolomite under hydrothermal conditions and implications for potential earthquake risk [J]. *Coal Geology of China*, 2023, 35(9): 48-53. (in Chinese)
- [97] 刘洋, 何昌荣. 龙门山断层带浅钻花岗岩中断层泥的摩擦本构参数[J]. *地震地质*, 2017, 39(5): 917-933.
Liu Y, He C R. Frictional properties of a natural fault gouge from drilled cores in the Longmenshan fault zone cutting granitic rock [J]. *Seismology and Geology*, 2017, 39(5): 917-933. (in Chinese)
- [98] 刘洋, 艾婷, 张朝鹏, 等. 基于MTS 815岩石力学试验机的直接剪切测试夹具设计[J]. *实验科学与技术*, 2020, 18(5): 85-90.

- Liu Y, Ai T, Zhang C P, et al. Design of direct shear test fixture based on the MTS 815 rock mechanics test system [J]. *Experiment Science and Technology*, 2020, 18(5): 85-90. (in Chinese)
- [99] 罗丽, 何昌荣. 热水条件下斜长石和辉石断层泥的摩擦滑动研究[J]. *地震地质*, 2009, 31(1): 84-96.
- Luo L, He C R. Frictional sliding of pyroxene and plagioclase gouges under hydrothermal conditions[J]. *Seismology and Geology*, 2009, 31(1): 84-96. (in Chinese)
- [100] 兰彩云, 何昌荣, 姚文明, 等. 热水条件下角闪石断层泥的摩擦滑动性质: 与斜长石断层泥的对比[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(12): 2929-2937.
- Lan C Y, He C R, Yao W M, et al. Frictional sliding of hornblende gouge as compared with plagioclase gouge under hydrothermal conditions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(12): 2929-2937. (in Chinese)
- [101] 刘贵, 周永胜. 花岗岩剪切变形与矿物成分变化的高温高压实验[J]. *地质通报*, 2020, 39(11): 1840-1849.
- Liu G, Zhou Y S. An experimental study of shear deformation and mineral composition changes of granite under the condition of high temperature and high pressure [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1840-1849. (in Chinese)
- [102] Zhao J, Feng X T, Wang J R, et al. A multifunctional shear apparatus for rocks subjected to true triaxial stress and high temperature in real-time[J]. *Journal of Rock Mechanics Geotechnical Engineering*, 2024, 16(9): 3524-3543.
- [103] 李晓慧. 龙门山断裂带金河磷矿剖面断层泥的低速至高速摩擦性质研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2018.
- Li X H. Low- to high-velocity frictional properties of the Longmenshan fault gouges retrieved from the Jinhe shallow drilling cores[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2018. (in Chinese)
- [104] 覃伟峰. 断层摩擦滑动中的力—化学效应对其动态弱化的影响[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2023.
- Qin W F. Mechanochemical changes of fault-zone materials during shear deformation: implications for dynamic fault weakening[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2023. (in Chinese)
- [105] 陈洋, 吴亮, 陈明, 等. 高应力岩体爆破卸荷过程中应变率及应变能特征[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(10): 60-70.
- Chen Y, Wu L, Chen M, et al. Characteristics of strain rate and strain energy during blasting unloading of high stress rock mass [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10): 60-70. (in Chinese)
- [106] 马胜利, 姚路, 嶋本利彦, 等. 岩石高速摩擦实验的进展[J]. *地震地质*, 2014, 36(3): 814-824.
- Ma S L, Yao L, Toshihiko S, et al. Progress in high-velocity frictional experiments on rocks at state key laboratory of earthquake dynamics[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(3): 814-824. (in Chinese)
- [107] Liu Y X, Xu J, Yin G Z, et al. Development of a new direct shear testing device for investigating rock failure [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(3): 647-651.
- [108] 瞿佳美. 循环荷载作用下结构面剪切特性试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Qu J M. Experimental study on shear characteristics of rock joints under cyclic loading [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [109] Dang W G, Tao K, Huang L C, et al. A new multi-function servo control dynamic shear apparatus for geomechanics[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110345.
- [110] Lee H S, Park Y J, Cho T F, et al. Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading[J]. *International journal of rock mechanics mining sciences*, 2001, 38(7): 967-980.
- [111] 许江, 陈奕安, 焦峰, 等. 循环荷载条件下充填厚度对结构面剪切力学特性影响试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(1): 146-156.
- Xu J, Chen Y A, Jiao F, et al. Experimental study on the influence of filling thickness on shear mechanical properties of structural plane under cyclic loading [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(1): 146-156. (in Chinese)
- [112] 朱小明, 李海波, 刘博. 循环剪切荷载作用下含二阶起伏体模拟岩石节理力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(2): 371-379.
- Zhu X M, Li H B, Liu B. Study of mechanical characteristics of simulated rock joints with second-order asperity under cyclic shear loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2): 371-379. (in Chinese)
- [113] 刘日成, 尹乾, 杨瀚清, 等. 恒定法向刚度边界条件下三维粗糙节理面循环剪切力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(6): 1092-1109.
- Liu R C, Yin Q, Yang H Q, et al. Cyclic shear mechanical properties of 3D rough joint surfaces under constant normal stiffness (CNS) boundary conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(6): 1092-1109. (in Chinese)

- [114] Cui Z, Sheng Q, Leng X L. Analysis of S wave propagation through a nonlinear joint with the continuously yielding model[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2017, 50(1): 113-123.
- [115] Cui Z, Sheng Q, Leng X L, et al.. Analysis of the seismic performance of a rock joint with a modified continuously yielding model[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2017, 50(10): 2695-2707.
- [116] Mirzaghobanali A, Nemcik J, Aziz N. Effects of shear rate on cyclic loading shear behaviour of rock joints under constant normal stiffness conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47 (5) : 1931-1938.
- [117] Stein R S. The role of stress transfer in earthquake occurrence[J]. *Nature*, 1999, 402(6762): 605-609.
- [118] Dang W G, Konietzky H, Frühwirt T. Direct shear behavior of a plane joint under dynamic normal load (DNL) conditions [J]. *Engineering Geology*, 2016, 213: 133-141.
- [119] Dang W G, Konietzky H, Frühwirt T. Direct shear behavior of planar joints under cyclic normal load conditions: effect of different cyclic normal force amplitudes [J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2017, 50 (11): 3101-3107.
- [120] Dang W G, Chen X F, Li X Y, et al. A methodology to investigate fluid flow in sheared rock fractures exposed to dynamic normal load[J]. *Measurement*, 2021, 185: 110048.
- [121] Cui G J, Zhang C Q, Zhou H, et al. Development and application of multifunctional shear test apparatus for rock discontinuity under dynamic disturbance loading [J]. *Rock Soil Mechanics*, 2022, 43(6): 8.
- [122] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1353-1359.
Guo Y T, Zhao K L, Sun G H, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1353-1359. (in Chinese)
- [123] Bagde M N, Petros V. Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading [J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2005, 38(3): 169-196.
- [124] Liu E L, Huang R Q, He S M. Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2012, 45 (1) : 89-102.
- [125] Liu E L, He S M, Xue X, et al. Dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions[J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2011, 44(5): 629-634.
- [126] Liu E L, He S M. Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions[J]. *Engineering Geology*, 2012, 125: 81-91.
- [127] Meng F, Wong L N Y, Zhou H, et al. Shear rate effects on the post-peak shear behaviour and acoustic emission characteristics of artificially split granite joints [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52 (7): 2155-2174.
- [128] 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(5): 1603-1615.
- [129] Atapour H, Moosavi M. The Influence of shearing velocity on shear behavior of artificial joints[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47 (5) : 1745-1761.
- [130] 倪卫达, 唐辉明, 刘晓, 等. 考虑结构面震动劣化的岩质边坡动力稳定分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(3): 492-500.
Ni W D, Tang H M, Liu X, et al. Dynamic stability analysis of rock slope considering vibration deterioration of structural planes under seismic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32 (3): 492-500. (in Chinese)
- [131] Dong S, Zhang H, Peng Y, et al. Method of calculating shear strength of rock mass joint surface considering cyclic shear degradation [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 9406.
- [132] Wang G, Zhang X, Jiang Y, et al. Rate-dependent mechanical behavior of rough rock joints [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 83: 231-240.
- [133] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 结构面剪切破坏特性及其在滑移型岩爆研究中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(9): 1729-1738.
Zhou H, Meng F Z, Zhang C Q, et al. Characteristics of shear failure of structural plane and slip rockburst [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9): 1729-1738. (in Chinese)
- [134] Li H, Deng J H, Yin J H, et al. An experimental and analytical study of rate-dependent shear behaviour of rough joints [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142: 104702.

- [135]雷蕙如,周永胜,姚文明,等. 安宁河断层地震成核条件研究-来自天然花岗岩断层泥摩擦实验的启示[J]. 地球物理学报, 2022, 65(3): 978-991.
Lei H R, Zhou Y S, Yao W M, et al. Earthquake nucleation conditions of Anninghe Fault: constrains from frictional experiments on natural granite gouge [J]. 2022, 65(3): 978-991. (in Chinese)
- [136]姚文明,周永胜,张雷,等. 安宁河断裂假玄武玻璃摩擦滑动实验研究[J]. 地球物理学报, 2022, 65(8): 3088-3097.
Yao W M, Zhou Y S, Zhang L, et al. The frictional-slip experiments on pseudotachylytes gouge of Anninghe Fault[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(8): 3088-3097. (in Chinese)
- [137]刘洋,何昌荣. 普通角闪石的速率依赖性及其对俯冲带慢滑移机制的启示[J]. 地震地质, 2020, 42(6): 1267-1281.
Liu Y, He C R. Rate dependence of friction of hornblende and implications for unstable slips[J]. Seismology and Geology, 2020, 42(6): 1267-1281. (in Chinese)
- [138]Niktabar S M M, Rao K S, Shrivastava A K. Effect of rock joint roughness on its cyclic shear behavior [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(6): 1071-1084.
- [139]Jafari M K, Hosseini K A, Pellet F, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(7): 619-630.
- [140]曹平,范祥,蒲成志,等. 节理剪切试验及其表面形貌特征变化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 480-485.
Cao P, Fan X, Pu C Z, et al. Shear test of joint and analysis of morphology characteristic evolution of joint surface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 480-485. (in Chinese)
- [141]Zhang X B, Jiang Q, Chen N, et al. Laboratory investigation on shear behavior of rock joints and a new peak shear strength criterion [J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2016, 49(9): 3495-3512.
- [142]Niktabar S M M, Rao K S, Shrivastava A K. Shear behaviour of regular and irregular rock joints under cyclic conditions [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Mine Safety Science and Engineering. Montreal: McGill University, 2016: 193-198.
- [143]Fan W C, Cao P, Long L. Degradation of joint surface morphology, shear behavior and closure characteristics during cyclic loading [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(3): 653-661.
- [144]郑博文,祁生文. 岩体结构面动态剪切试验研究现状评述 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1971-1980.
Zheng B W, Qi S W. Review of research status of rock joints under dynamic shear test condition [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1971-1980. (in Chinese)
- [145]周辉,程广坦,朱勇,等. 大理岩规则齿形结构面剪切特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 852-860.
Zhou H, Cheng G T, Zhu Y, et al. Experimental study of shear deformation characteristics of marble dentate joints [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 852-860. (in Chinese)
- [146]周瑞光,陈诗才,孙广忠. 锯齿状结构面力学效应实验研究 [J]. 地质科学, 1979(2): 157-166.
Zhou R G, Chen S C, Sun G Z. Experimental study on mechanical effect of sawtoothed structural plane [J]. Geological Sciences, 1979(2): 157-166. (in Chinese)
- [147]Liu X R, Kou M M, Lu Y M, et al. An experimental investigation on the shear mechanism of fatigue damage in rock joints under pre-peak cyclic loading condition [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 106: 175-184.
- [148]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): 1557-1565.
Xiong Z Q, Jiang Q, Gong Y H, et al. A method for preparing natural joints of rock mass based on 3D scanning and printing techniques and its experimental validation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1557-1565. (in Chinese)
- [149]许江,瞿佳美,刘义鑫. 不同成因结构面循环剪切试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(11): 79-84.
Xu J, Qu J M, Liu Y X. Experimental study of different structural planes with different mechanical causes under cyclic shear loading [J]. Mining Research & Development, 2018, 38(11): 79-84. (in Chinese)
- [150]张雅慧,汪丁建,唐辉明,等. 基于PFC2D数值试验的异性结构面剪切强度特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1031-1041.
Zhang Y H, Wang D J, Tang H M, et al. Study of shear strength characteristics of heterogeneous discontinuities using PFC2D simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1031-1041. (in Chinese)
- [151]张茂础,盛谦,崔臻,等. 围岩-衬砌接触面剪切力学性质及破坏机制的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 550-559.
Zhang M C, Sheng Q, Cui Z, et al. Experimental study on shear properties and failure mechanisms of sur-

- rounding rock-lining contact surfaces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 550-559. (in Chinese)
- [152]刘婷婷,李建春,李海波,等. 剪切速率对平直充填节理的剪切力学特性影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1967-1973,1989.
- Liu T T, Li J C, Li H B, et al. Study of influence of shear velocity on shear mechanical properties of planar filled joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1967-1973,1989. (in Chinese)
- [153]Tang Z C, Liu Q S, Xia C C, et al. Mechanical model for predicting closure behavior of rock joints under normal stress [J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2014, 47(6): 2287-2298.
- [154]Shehata W M. Geohydrology of mount vernon canyon area[D]. Golden: Colorado School of Mines, 1971.
- [155]Goodman R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks [M]. New York: West Publishing, 1976.
- [156]Kulhawy F H. Stress deformation properties of rock and rock discontinuities[J]. Engineering Geology, 1975, 9(4): 327-350.
- [157]Barton N, Bandis S, StrengthBakhtar K. Deformation and conductivity coupling of rock joints[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121-140.
- [158]Baghbanan A, Jing L. Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2008, 45(8): 1320-1334.
- [159]Oden J T, Martins J A C. Models and computational methods for dynamic friction phenomena[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1985, 52(1-3): 527-634.
- [160]Swan G. Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements[J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 1983, 16(1): 19-38.
- [161]Sun Z, Gerrard C, Stephansson O. Rock joint compliance tests for compression and shear loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22(4): 197-213.
- [162]孙宗颀. 不连续面应力: 变形性质的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(4): 287-300.
- Sun Z Q. Study on mechanical characteristics of rock mass discontinuities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(4): 287-300. (in Chinese)
- [163]孙广忠,林文祝. 结构面闭合变形法则及岩体弹性变形本构方程[J]. 地质科学, 1983(2): 177-180.
- Sun G Z, Lin W Z. The compressional deformation law of rockmassstructure surface and a constitutive equation of rockmass elastic deformation [J]. Scientia Geologica Sinica, 1983(2): 177-180. (in Chinese)
- [164]Malama B, Kulatilake P. Models for normal fracture deformation under compressive loading [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2003, 40(6): 893-901.
- [165]俞缙,赵晓豹,赵维炳,等. 改进的岩石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.
- Yu J, Zhao X B, Zhao W B, et al. Improved nonlinear elastic constitutive model for normal deformation of rock fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1316-1321. (in Chinese)
- [166]乔丽苹,李旗,王者超,等. 岩壁变形条件下结构面向变形特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(10): 1479-1484.
- Qiao L P, Li Q, Wang Z C, et al. Normal deformation behavior of rock joint with deformable rock wall [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016, 37(10): 1479-1484. (in Chinese)
- [167]Holm E, Holm R, Shobert E I. Theory of hardness and measurements applicable to contact problems [J]. Journal of Applied Physics, 1949, 20(4): 319-327.
- [168]Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical Physical Sciences, 1966, 295(1442): 300-319.
- [169]Greenwood J A, Tripp J H. The contact of two nominally flat rough surfaces[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1970, 185(1): 625-633.
- [170]Brown S R, Scholz C H. Closure of random elastic surfaces in contact [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1985, 90(B7): 5531-5545.
- [171]Brown S R, Scholz C H. Closure of rock joints [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B5): 4939-4948.
- [172]Matsuki K, Wang E Q, Sakaguchi K, et al. Time-dependent closure of a fracture with rough surfaces under constant normal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2001, 38(5): 607-619.
- [173]Cook N G W. Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3): 198-223.

- [174]Hopkins D L. The implications of joint deformation in analyzing the properties and behavior of fractured rock masses, underground excavations, and faults[J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2000, 37(1/2): 175-202.
- [175]唐志成,夏才初,宋英龙,等. 考虑基体变形的节理闭合变形理论模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1): 3068-3074.
Tang Z C, Xia C C, Song Y L, et al. Joint closure deformation model based on asperity-substrate deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 3068-3074. (in Chinese)
- [176]唐志成,黄润秋,焦玉勇,等. 考虑基体变形和微凸体变形相互作用的岩石节理闭合变形理论模型[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1800-1806.
Tang Z C, Huang R Q, Jiao Y Y, et al. Theoretical closure model for rock joints considering interaction of deformations of substrate deformation and asperity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1800-1806. (in Chinese)
- [177]蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [178]Grasselli G. Shear strength of rock joints based on quantified surface description[D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [179]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.
- [180]Hung O, Coates D F. Deformability of joints and its relation to rock foundation settlements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(2): 239-249.
- [181]Amadei B, Wibowo J, Sture S, et al. Applicability of existing models to predict the behavior of replicas of natural fractures of welded tuff under different boundary conditions [J]. Geotechnical Geological Engineering, 1998, 16(2): 79-128.
- [182]Simon R, Aubertin M, Mitri H S. A non-linear constitutive model for rock joints to evaluate unstable slip [M]. Leiden: A A Balkema Publishers, 1999.
- [183]Saeb S, Amadei B. Modelling rock joints under shear and normal loading [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3): 267-278.
- [184]Simon R. Analysis of fault-slip mechanisms in hard rock mining[D]. Montreal: Mccill University, 1999.
- [185]Ladanyi B, Archambault G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass[C]//Proceedings of 11th US Symposium on Rock Mechanics. Berkeley: American Rock Mechanics Association, 1970: 105-125.
- [186]Plesha M E. Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation [J]. International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics, 1987, 11(4): 345-362.
- [187]Schneider H J. The friction and deformation behaviour of rock joints [J]. Rock Mechanics, 1976, 8(3): 169-184.
- [188]Jing L. Numerical modelling of jointed rock masses by distinct element method for two-and three-dimensional problems [D]. Sweden: Luleå Tekniska Universitet, 1990.
- [189]Qiu X H, Plesha M E, Huang X, et al. An investigation of the mechanics of rock joints: Part II. Analytical investigation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(3): 271-287.
- [190]Wang J G, Ichikawa Y, Leung C F. A constitutive model for rock interfaces and joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 41-53.
- [191]Seidel J P, Haberfield C M. A theoretical model for rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(5): 539-553.
- [192]石崇. 块体离散元数值模拟技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [193]Duncan N, Hancock K E. The concept of contact stress in the assessment of the behaviour of rock masses as structural foundations[C]//Proceedings of the 1st ISRM Congress. Lisbon: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1966: 487-492.
- [194]Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice [J]. Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches, 1977, 10(1/2): 1-54.
- [195]Maksimović M. The shear strength components of a rough rock joint [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1996, 33(8): 769-783.
- [196]Patton F D. Multiple modes of shear failure in rock [C]//Proceedings of the 1st ISRM Congress. Lisbon: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1966: 87.
- [197]黄达,黄润秋,雷鹏. 贯通型锯齿状岩体结构面剪切变形及强度特征 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1229-1237.

- Huang D, Huang R Q, Lei P. Shear deformation and strength of through-going saw-tooth rock discontinuity [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (7) : 1229-1237. (in Chinese)
- [198]Liu Q S, Tian Y C, Liu D F, et al. Updates to JRC-JCS model for estimating the peak shear strength of rock joints based on quantified surface description [J]. Engineering Geology, 2017, 228: 282-300.
- [199]Patton F D. Multiple modes of shear failure in rock and related materials[D]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1966.
- [200]Goldstein M, Goosev B, Pvrogovsky N, et al. Investigation of mechanical properties of cracked rock[C] // Proceedings of the 1st ISRM Congress. Lisbon: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1966: 521-529.
- [201]Barton N R. A model study of rock-joint deformation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1972, 9(5) : 579-582.
- [202]Barton N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints [J]. Engineering geology, 1973, 7 (4) : 287-332.
- [203]Bandis S, Lumsden A C, Barton N R. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18 (1): 1-21.
- [204]Lee Y K, Park J W, Song J J. Model for the shear behavior of rock joints under CNL and CNS conditions [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2014, 70: 252-263.
- [205]葛云峰. 基于BAP的岩体结构面粗糙度与峰值抗剪强度研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
Ge Y F. Research on roughness and peak shear strength for rock discontinuities based on BAP[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [206]Xia C C, Tang Z C, Xiao W M, et al. New peak shear strength criterion of rock joints based on quantified surface description [J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2014, 47(2): 387-400.
- [207]唐志成, 夏才初, 宋英龙, 等. Grasselli 节理峰值抗剪强度公式再探[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 356-364.
Tang Z C, Xia C C, Song Y L, et al. Discussion about grasselli s peak shear strength criterion for rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 356-364. (in Chinese)
- [208]杨洁, 荣冠, 程龙, 等. 节理峰值抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 884-894.
Yang J, Rong G, Cheng L, et al. Experimental study of peak shear strength of rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (5) : 884-894. (in Chinese)
- [209]Yang J, Rong G, Hou D, et al. Experimental study on peak shear strength criterion for rock joints [J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2016, 49(3): 821-835.
- [210]Tian Y C, Liu Q S, Liu D F, et al. Updates to Grasselli's peak shear strength model [J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2018, 51(7): 2115-2133.
- [211]Liu Q S, Tian Y C, Ji P Q, et al. Experimental investigation of the peak shear strength criterion based on three-dimensional surface description [J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2018, 51(4): 1005-1025.
- [212]Kulatilake P, 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.
- [213]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 F T, She C X, Wan L T, et al. Peak shear strength criterion for rock joints based on threedimensional morphology characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (3) : 529-536. (in Chinese)
- [214]Grasselli G. Manuel Rocha medal recipient shear strength of rock joints based on quantified surface description [J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2006, 39(4): 295-314.
- [215]郑博文, 祁生文, 詹志发, 等. 剪切速率对岩石节理强度特性的影响 [J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37 (5): 101-110.
Zheng B W, Qi S W, Zhan Z F, et al. Effect of shear rate on the strange characteristics of rock joints [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(5) : 101-110. (in Chinese)
- [216]朱小明, 李海波, 刘博, 等. 含一阶和二阶起伏体节理剪切强度的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1810-1818.
Zhu X M, Li H B, Liu B, et al. Experimental study of shear strength of joints with first-order and second-order asperities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1810-1818. (in Chinese)
- [217]Zaman M M, Desai C S, Drumm E C. Interface model

- for dynamic soil-structure interaction [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 110(9): 1257-1273.
- [218] Souley M, Homand F. Stability of jointed rock masses evaluated by UDEC with an extended Saeb-Amadei constitutive law [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(3): 233-244.
- [219] 王光纶, 尹显俊. 岩体结构面三维循环加载本构关系 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(9): 1193-1197.
Wang G L, Yin X J. 3D constitutive relation for rock joints during cyclic loading [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2005, 45(9): 1193-1197. (in Chinese)
- [220] Kana D D, Fox D J, Hsiung S M. Interlock/friction model for dynamic shear response in natural jointed rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(4): 371-386.
- [221] 肖卫国. 节理岩体本构模型和其细观力学方法理论研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
Xiao W G. Micromechanics-based continuum method and constitutive model for jointed rock masses [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [222] Huang X, Haimson B C, Plesha M E, et al. An investigation of the mechanics of rock joints: Part I. Laboratory investigation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(3): 257-269.
- [223] 尹显俊, 王光纶, 张楚汉. 岩体结构面切向循环加载本构关系研究 [J]. *工程力学*, 2005(6): 97-103, 57.
Yin X J, Wang G L, Zhang C H. Study of constitutive model for rock interfaces and joints under cyclic shear loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 97-103, 57. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)



(上接第 1157 页)

- [12] 朱霖, 何磊, 王章明, 等. 软土地基就地固化工艺的试验研究与工程应用 [J]. *公路*, 2023, 68(3): 75-80.
Zhu L, He L, Wang Z M, et al. Experimental research and engineering application of in-situ solidification technology for soft soil foundation [J]. *Highway*, 2023, 68(3): 75-80. (in Chinese)
- [13] 沈政, 陈龙, 陈永辉, 等. 滩涂地区软土就地固化技术 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(16): 6815-6822.
Shen Z, Chen L, Cheng Y H, et al. Solidification technology of soft soil in beach area [J]. *Science and Technology and Engineering*, 2021, 21(16): 6815-6822. (in Chinese)
- [14] 骆嘉成, 邵吉成. 固结-固化复合技术分层加固淤泥的试验研究 [J]. *铁道工程学报*, 2022, 39(11): 19-24, 32.
Luo J C, Shao J C. Experimental research on the layered reinforcement of sludge by consolidation and solidification composite Technology [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 39(11): 19-24, 32. (in Chinese)
- [15] Liu X Q, Zhang H Q, Yan Z, et al. Research on bearing characteristics of grid composite foundation based on silt solidification [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2021, 35(5): 04021070.
- [16] 刘曦. 带肋梁硬壳层软土地基应力分布与承载力研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.
Liu X. Research on the stress distribution and bearing capacity of the hard shell foundation with rib beam [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013. (in Chinese)
- [17] 王玉梅. 带肋梁硬壳层软土地基应力与变形的研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
Wang Y M. Research on the stress and deformation of the hard shell foundation with rib beam [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012. (in Chinese)