

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.195



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



贯通型锯齿状节理岩体的剪切力学行为

刘新荣, 曾夕, 许彬, 周小涵, 刘馨琳, 王继文

(重庆大学土木工程学院; 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:为探究一阶起伏角和法向应力对贯通型锯齿状节理岩体剪切强度及变形的影响规律,在不同法向应力作用下对含不同一阶起伏角的锯齿节理试样进行室内直剪试验,建立一个贯通型锯齿状节理岩体剪切强度估算公式并进行验证。结果表明:相同法向应力作用下,根据其形态特征的不同,剪切应力-位移曲线分为滑动型曲线、滑动-峰值型曲线和峰值型曲线3类,滑动型曲线和滑动-峰值型曲线可分为非线性缓慢上升阶段、线性陡升阶段、“上凸形”缓慢上升阶段、近似平直阶段和平直阶段,峰值型曲线可分为非线性缓慢上升阶段、线性陡升阶段、“微凸型”上升阶段、脆性跌落阶段和波动缓降阶段;根据起伏角的不同,锯齿节理岩体的破坏模式可概化为滑移破坏、爬坡破坏和爬坡啃断破坏,每种破坏模式下节理损伤演化过程均可分为3个阶段,即滑移破坏模式可分为压密阶段、克服摩擦阶段和滑移阶段,爬坡破坏模式可分为压密阶段、爬坡滑移阶段和塑性流动阶段,爬坡啃断破坏模式可分为压密爬坡阶段、爬坡啃断阶段和啃断滑移阶段;含不同一阶起伏角的锯齿节理岩体剪切强度均随法向应力和起伏角的增加而增大,其计算表达式仍然遵循M-C准则。

关键词:锯齿状节理;直剪试验;剪切力学行为;破坏模式;剪切强度

中图分类号: TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)05-0001-09

Shear mechanical behavior of rock with through-type saw-tooth joints

LIU Xinrong, ZENG Xi, XU Bin, ZHOU Xiaohan, LIU Xinlin, WANG Jiwen

(School of Civil Engineering; National Joint Engineering Research Center for Prevention and Control of Environmental Geological Hazards in the TGR Area; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To explore the effect of undulating angle and normal stress on the shear strength and deformation of the rock with regular saw-tooth joints, direct shear tests were carried out on the limestone samples with different undulating angles under different normal stresses. Subsequently, a shear strength estimation formula was established and verified. The results show that, under the same normal stress, according to the morphological

收稿日期: 2021-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(41972266, 52074042); 重庆市研究生科研创新项目(CYS21024); 2018年重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0453)

作者简介: 刘新荣(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学及地下工程研究, E-mail: liuxrong@126.com。

许彬(通信作者), 男, 博士生, E-mail: geotechnicale2016@163.com。

Received: 2021-06-04

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 41972266, 52074042); the Graduate Scientific Research and Innovation Foundation of Chongqing, China (No. CYS21024); Basic Research and Frontier Exploration Project of Chongqing in 2018 (No. cstc2018jcyjAX0453)

Author brief: LIU Xinrong (1969-), professor, doctoral supervisor, main research interests: rock mechanics and underground engineering, E-mail: liuxrong@126.com.

XU Bin (corresponding author), PhD candidate, E-mail: geotechnicale2016@163.com.

characteristics, the shear stress-displacement curves can be divided into three types: the sliding curve, the sliding-peak curve and the peak curve. The sliding curve and the sliding-peak curve can be divided into nonlinearly slow rising, linear steep rising, and "upward convex" slow rising stage, approximately straight and flat stage. The peak type curve can be divided into nonlinearly slow rising, linear steep rising, "slightly convex" rising, brittle falling and gently descending stage. The failure mode of rock with saw-tooth joints with different undulating angles can be generalized into three failure modes: sliding failure, climbing failure and gnawing failure. The evolution of joint damage under each failure mode can be divided into three stages, i.e., the sliding failure mode can be divided into compaction, friction-over-coming and sliding stage. The climbing failure mode can be divided into compaction, climbing-sliding and plastic flow stage. The gnawing failure modes can be divided into compaction-climbing, climbing-gnawing and gnawing-sliding stage. The shear strength increases with the increase of the normal stress and undulating angle, and the evolution of shear strength still follows M-C criterion.

Keywords: saw-tooth joints; direct shear test; shear mechanical behavior; failure mode; shear strength

经过漫长的地质构造作用后,岩石内部发生变形破坏而形成若干不连续结构面,使得其剪切力学行为与完整岩石差异较大且对岩体结构稳定性影响显著^[1]。岩体的剪切力学行为受到岩石材料、结构面特征、地应力、外营力及含水率等因素的影响^[2]。其中,结构面形态特征及其展布往往决定了岩体的工程地质性质和力学性状,同时也构成了各类岩体工程地质问题的重要控制因素^[3]。因此,探究不同法向应力作用下不同表面形态节理岩体剪切力学行为对边坡、隧道、水库大坝及基坑等地表、地下工程的稳定性评价和地质灾害防治有着重要意义。

目前,学者们已对不同形态节理岩体剪切力学行为开展了大量研究。在理论研究方面,Patton^[4]提出了一阶起伏体的概念并系统分析了节理形态对岩体剪切力学行为的影响;在此基础上,Goodman^[5]和 Barton^[6]进一步验证了起伏度和粗糙度对节理岩体剪切力学行为和破坏模式的控制作用;孙广忠^[7]指出,在力学作用和破坏机制上,结构面对岩体控制显著,研究岩体力学性能时必须充分考虑结构面的形态效应。由此可见,研究节理表面形态对岩体剪切力学行为的影响十分必要。在试验研究方面,Belem 等^[8]对含人工规则齿形及天然片理的节理岩体分别进行了直剪试验,探究了其剪切特性并提出了描述粗糙度的几个参数;周辉等^[9]对含锯齿节理大理岩试样开展了不同法向应力下的直剪试验,总结了其剪切力学特性;Zhao 等^[10]对由水泥和砂混合制备而成的试样进行了室内直剪试验,揭示了二阶起伏角对节理岩体剪切力学特性及破坏机理的影响。由此可见,室内直剪试验是探究锯齿节理岩体剪切力学行为的常用试验手段。此外,为探究锯齿节理岩体剪切过程中的特殊响应,其他相关试验也有所开展。周小平等^[11]通过声发射试验,探讨了结

构面性质与声发射的关系;周辉等^[12]对水泥砂浆制成的锯齿节理岩样进行了声发射试验,揭露了规则锯齿型结构面在剪切过程中的声发射特征;张峰瑞等^[13]进行了不同孔隙水压力下锯齿结构面剪切蠕变试验,揭示了孔隙水压力对剪切蠕变特性的影响规律;Liu 等^[14]对锯齿节理砂岩进行了峰前循环剪切试验,揭示了其疲劳累计损伤特征。在数值模拟方面,唐雯钰等^[15]利用 FLAC3D 有限差分软件对规则锯齿结构面的受力变形特征进行了研究;刘新荣等^[16]基于颗粒离散元法进行了峰前循环剪切试验,探究了锯齿节理累计损伤规律及循环剪切特性;刘永权^[17]和黄达等^[18]利用 PFC2D 二维颗粒流程序模拟了不同形态结构面的剪切过程。由此可见,利用 FLAC3D 有限差分法模拟研究锯齿节理岩体剪切力学行为是可行的。总的来说,目前相关试验研究主要以相似材料模型为主,而以天然岩样为研究对象的还较少。此外,在研究内容方面,多以锯齿节理岩体的强度及变形变化规律研究为主,而对锯齿节理岩体剪切损伤演化过程和破坏模式进行分析总结的很少。

鉴于此,在已有研究^[14, 17-19]的基础上,通过对含贯通规则锯齿状节理灰岩试样进行直剪试验,分析不同一阶起伏角下锯齿节理岩体剪切应力-位移曲线特征,总结不同一阶起伏角下锯齿节理岩体的破坏模式及不同破坏模式下的损伤演化阶段,并揭示一阶起伏角及法向应力对锯齿节理岩体剪切强度的影响规律,从而建立内摩擦角和黏聚力随一阶起伏角变化的相关关系式。此外,结合 M-C 准则,提出剪切强度随一阶起伏角变化的估算公式,并利用极限平衡法和强度折减法对该公式进行对比验证,以期对岩体结构面剪切强度计算及其参数取值研究做补充,同时也为边坡稳定性评价提供一定参考。

1 室内直剪试验

1.1 试验材料及模型设计

自三峡水库蓄水以来,由于水位涨落、微震频发等因素的影响,库区内时常发生类型多、危害大的地质灾害^[19],其中,含锯齿状节理的岸坡失稳破坏不少。室内直剪试验灰岩取自三峡库区(巫山段)某库岸边坡(见图 1),该岸坡地形坡角范围为 40°~75°,其出露地层为三叠系下统嘉陵江组二、三段,且坡体岩性以灰岩、泥质灰岩及白云岩为主,呈中厚平直状结构。为得到灰岩物理力学参数,对试样分别进行密度试验、单轴压缩试验和三轴压缩试验,测定参数值见表 1。

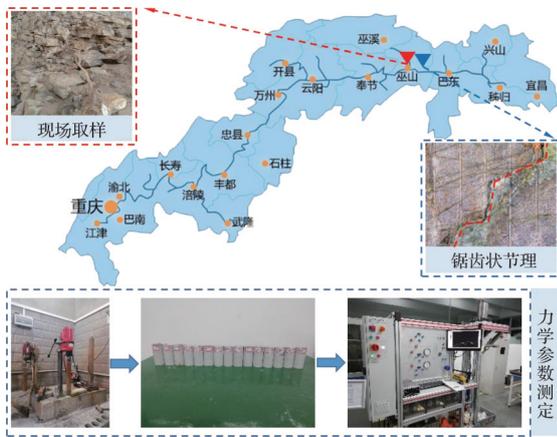


图 1 现场取样及力学参数测定

Fig. 1 Field sampling and determination of the mechanical parameters

表 1 试验材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the test materials

密度/ (kg/m ³)	抗压强 度/MPa	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角 φ (°)
2.65	57.26	6 600	0.24	5 260	44.53

考虑到一阶起伏角对锯齿状节理岩体剪切强度及变形的影响,为探索其剪切强度随一阶起伏角变化的估算公式,试验设计了含 6 种不同一阶起伏角度(0°、10°、20°、30°、40°、50°)的锯齿状节理岩体模型,其中,一阶起伏角为 0°的节理岩体作为只含有基本摩擦角的平直节理岩体,与其他 5 种节理岩体模型形成对照。根据相关理论、规范^[20]对剪切面尺寸的要求及水刀切割对岩板厚度的限制,将模型长、宽、厚分别取为 150、100、50 mm,具体尺寸如图 2 所示, $L=50\text{ mm}$, $d=50\text{ mm}$, $h=50\text{ mm}$, $\alpha_1=0^\circ$, $\alpha_2=10^\circ$, $\alpha_3=20^\circ$, $\alpha_4=30^\circ$, $\alpha_5=40^\circ$, $\alpha_6=50^\circ$ 。

试样采用大型岩石切割机切割成块并通过岩

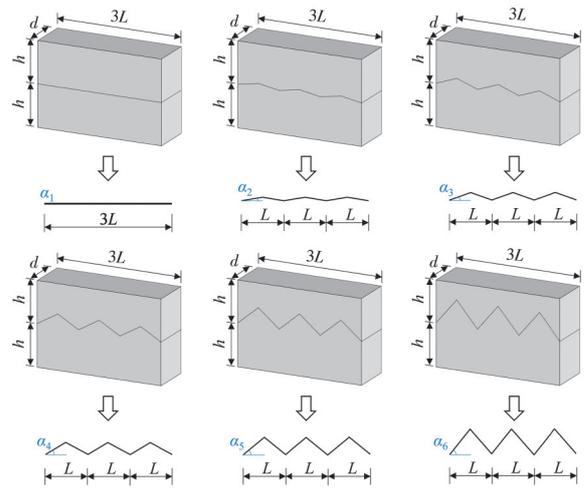


图 2 试样几何尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of samples geometry size

石打磨机打磨精细,其中,规则锯齿状节理采用高压水射切割机切割,原岩试样具体加工流程如图 3 所示。

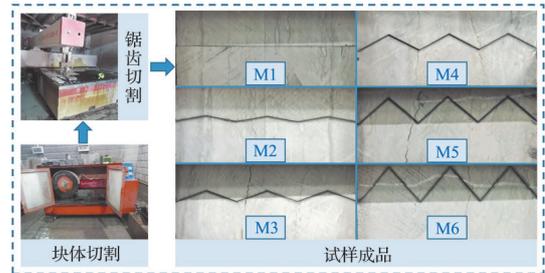


图 3 试样加工流程图

Fig. 3 Samples processing flowchart

1.2 试验工况

为探究含不同一阶起伏角节理岩体在不同法向应力作用下的剪切强度及变形变化规律,试样一阶起伏角选取 0°、10°、20°、30°、40°、50°六种,分别在 1.5、2.5、3.5、4.5 MPa 法向应力作用下对其进行剪切,共计 6×4=24 种工况,具体工况设计见表 2。

1.3 试验设备及加载方案

采用 WDAJ-600 型微机控制电液伺服岩石剪切流变试验机进行加载,其轴(切)向最大试验力达 600 kN,轴(切)向最大试验位移达 100 mm,试验力和位移加载速率范围分别为 0.1~100 kN/min 和 0.001~10 mm/min,试验力加载方式为活塞式油缸单向或双向加载,测力和位移传感元件分别为负荷式和磁致式传感器。试验所需数据由多通道智能数据采集仪及控制电脑采集得到。

为防止试样破坏时岩屑飞溅,危及操作人员生命财产安全,所用试样均放置在剪切盒中进行剪切。加载方案如下(以 30°起伏角为例):加载前,将

表 2 试验工况设计

Table 2 Design of test conditions

工况	起伏角/ (°)	法向应 力/MPa	工况	起伏角/ (°)	法向应 力/MPa
1 [#]	0	1.5	13 [#]	30	1.5
2 [#]	0	2.5	14 [#]	30	2.5
3 [#]	0	3.5	15 [#]	30	3.5
4 [#]	0	4.5	16 [#]	30	4.5
5 [#]	10	1.5	17 [#]	40	1.5
6 [#]	10	2.5	18 [#]	40	2.5
7 [#]	10	3.5	19 [#]	40	3.5
8 [#]	10	4.5	20 [#]	40	4.5
9 [#]	20	1.5	21 [#]	50	1.5
10 [#]	20	2.5	22 [#]	50	2.5
11 [#]	20	3.5	23 [#]	50	3.5
12 [#]	20	4.5	24 [#]	50	4.5

润滑剂涂抹于剪切盒接触面上,以减小摩擦对试验的影响,将试验机与剪切盒对中;加载时,法向应力保持恒定,剪切力采用位移控制连续加载方式加载,剪切速率恒定为 0.5 mm/min,直至破坏。试验所用设备及加载示意如图 4 所示。

2 试验结果及分析

2.1 节理剪切强度及变形特征

图 5 为各工况下锯齿节理剪切应力-剪切位移变化规律曲线,其中, A、B、C、D、E 为划分的阶段点,分别以工况 4[#]、6[#]、21[#] 为例,分析不同法向应力作用下含不同一阶起伏角锯齿节理岩体在直剪过程中的剪切应力及变形变化特征。

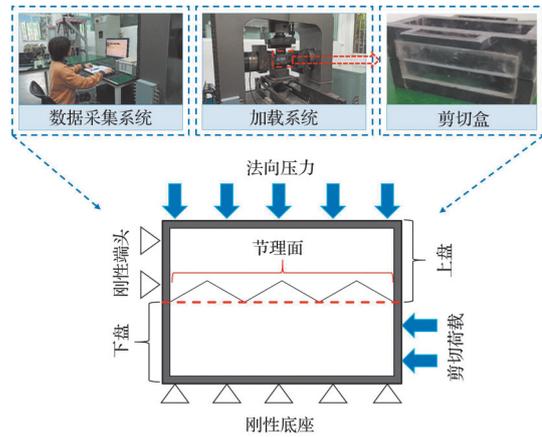


图 4 试验设备及加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test equipment and loading

从图 5 可以看出,由于爬坡效应和啮齿效应的存在,剪切位移曲线的波动随着一阶起伏角的增大而增大,同时,各曲线所呈现出的形态特征也不尽相同,具体可将其分为 3 类:滑动型曲线、滑动-峰值型曲线和峰值型曲线。

2.1.1 滑动型曲线(一阶起伏角为 0° 时)

在 0° 起伏角(即平直节理)下,剪切应力-位移曲线呈现出滑动型曲线的特征,一般地,可将其分为 5 个阶段进行描述(以工况 4[#] 为例),即:① OA 段,受法向应力作用,平直节理面法向开始产生相互靠拢的微小位移(剪缩),剪切应力略微增大,切向位移也缓慢增加,曲线呈非线性缓慢上升趋势;② AB 段,受压剪复合作用,节理面处于弹性变形状态,剪切应力随着剪切位移的增加而线性增大,且增大幅度显著,曲线呈线性陡升趋势;③ BC 段,节理面开

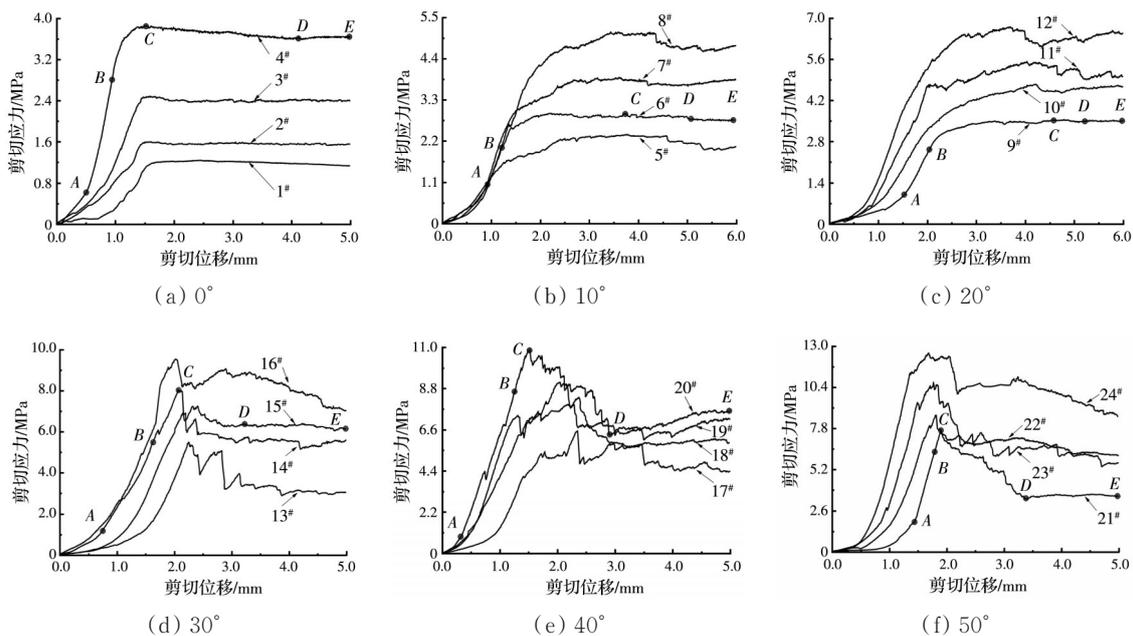


图 5 节理剪切应力-剪切位移变化规律曲线

Fig. 5 Variation curve of the shear stress-shear displacement

始产生塑性变形,随剪切位移的增加,剪切应力增幅逐渐减小,曲线呈现出“上凸形”缓慢上升趋势;④CD段,节理面产生大量塑性变形,剪切位移增幅较大,剪切应力在C点达到最大,随后出现微小跌落(与平直节理面表面平整度有关),曲线呈近似平直趋势;⑤DE段,平直节理已发生较大滑动,剪切应力基本保持恒定,而剪切位移不断增加,曲线呈平直状。

2.1.2 滑动-峰值型曲线(一阶起伏角为10°和20°时)

在10°和20°起伏角下,剪切应力-位移曲线呈现出滑动-峰值过渡型曲线的特征,此类曲线阶段趋势与滑动型曲线相似,但由于锯齿节理的爬坡效应,曲线整体波动更大且某些阶段特征与滑动型曲线不同(以工况6#为例):此种工况下,与0°起伏角下的剪切位移曲线相比,AB段(弹性变形段)更短,剪切应力增幅更小,曲线斜率更小;BC段(塑性变形发展段)更长,曲线上凸幅度更小,曲线波动较大;CD段(塑性流动段)曲线波动较大而长度更短。由此表明,在相同法向应力作用下,含10°和20°起伏角的锯齿节理塑性变形更大,塑性质质更加明显。

2.1.3 峰值型曲线(一阶起伏角为30°、40°、50°时)

在30°、40°、50°起伏角下,由于爬坡与啮齿效应

的复合影响,剪切应力-位移曲线呈峰值型曲线特征,整个剪切过程中曲线波动均较大,脆性特征明显,同样地,也可以将其划分为5个阶段(以工况21#为例),即:①、②阶段与过渡型曲线类似,曲线分别呈非线性缓慢上升趋势和线性陡升趋势;③BC段,此阶段节理面虽已进入塑性变形发展状态,但变形量甚小,剪切位移增量也较小,曲线上凸不明显,曲线呈“微凸型”上升趋势;④CD段,此阶段塑性变形明显增大,剪切应力在C点达到峰值后迅速减小,剪切位移增量也较小,曲线呈脆性跌落趋势;⑤DE段,此阶段节理面已发生破坏,发生的变形均为残余变形,剪切应力不再增大,节理面处于塑性流动状态,曲线呈波动缓降趋势。

2.2 节理损伤演化过程及破坏模式

图6为锯齿节理宏观损伤演化过程,仅对典型工况下的节理宏观损伤演化过程进行可视化展示,如“40°+4.5 MPa”是指试样节理一阶起伏角为40°且法向应力为4.5 MPa的工况;损伤形态指试样剪切破坏后剪切面的破碎磨损情况;损伤裂纹概化图是由各破坏模式下锯齿节理面及其附近区域裂纹最终发展状态概化得到的。

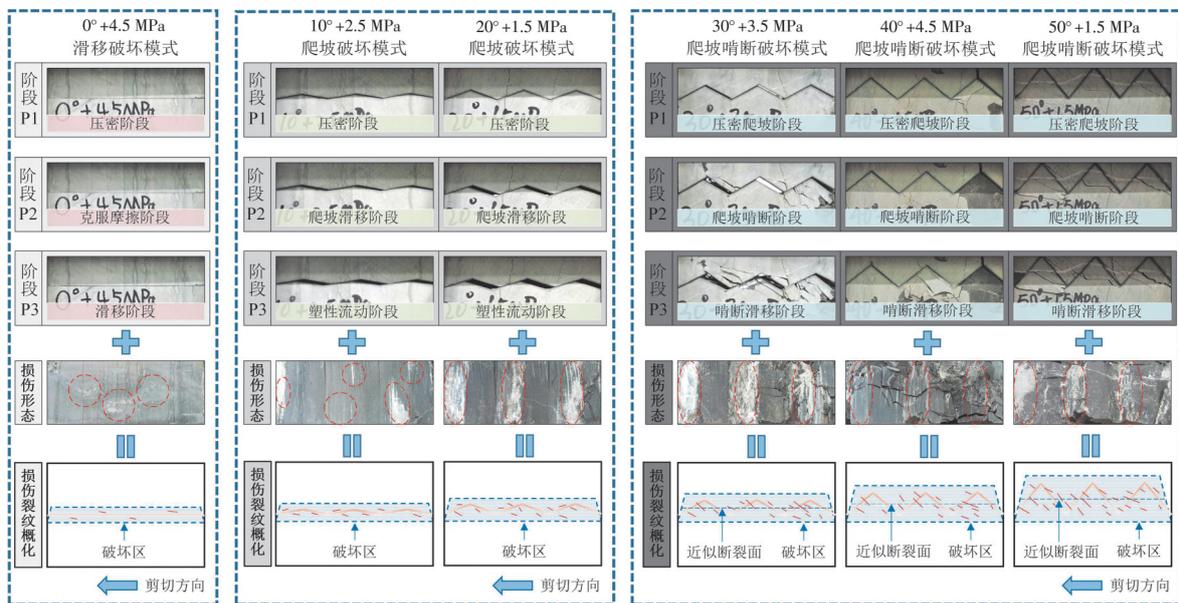


图6 节理宏观损伤演化过程
Fig. 6 The process of macro damage evolution of the joints

结合图5、图6,可根据节理岩体破坏时的剪切位移、剪切面磨损程度、裂纹位置及数量,总结出3种不同的破坏模式(分别对应前述3种剪切位移曲线),且在每个破坏模式下,可将节理岩体的损伤演化过程分为P1、P2、P3共3个阶段。对每种破坏模式下各个阶段做具体分析。

1) 滑动破坏模式(一阶起伏角为0°时,剪切位移

曲线为滑动型曲线)。阶段P1:节理面受法向应力的作用压紧闭合,其上粗糙微凸体相互接触,产生剪缩现象,但剪切变形甚微,此时节理面处于压密阶段;阶段P2:在法向应力和剪切应力的共同作用下,节理面上下发生摩擦,其上粗糙微凸体开始啮合剪切,少数损伤微裂纹萌生扩展,此时节理处于克服摩擦阶段;阶段P3:剪切力克服了节理面的最

大静摩擦力,节理面上的粗糙微凸体被剪断磨损,少数损伤微裂纹贯通,节理面产生滑移,剪切应力随着剪切位移的增大保持不变,此时节理处于滑移阶段。

2)爬坡破坏模式(一阶起伏角为 10° 、 20° 时,剪切位移曲线为过渡型曲线)。阶段P1:与滑移破坏模式阶段P1类似,锯齿节理面受压闭合并出现剪缩现象,原生微裂纹也被压紧闭合,此时节理面处于压密阶段;阶段P2:在法向应力和剪切应力的共同作用下,节理面上侧起伏体沿着下侧起伏角仰角方向斜向上爬坡,同时法向产生较小位移(剪胀),且有一定数量的损伤微裂纹萌生扩展,此时节理处于爬坡滑移阶段;阶段P3:相邻上下起伏体伏坡面完全脱离,且出现较大空隙,法向位移也较阶段P2显著增大,上侧起伏体也有翻越下侧起伏体的趋势,大量损伤裂纹萌生扩展但没有贯通,塑性变形进一步发展,剪切应力不再增大,此时节理处于塑性流动阶段。

3)爬坡啃断破坏模式(一阶起伏角为 30° 、 40° 、 50° 时,剪切位移曲线为峰值型曲线)。阶段P1:在法向应力和剪切应力的共同作用下,锯齿节理经压密后上侧起伏体呈沿仰坡面向上爬坡的趋势,并产生微小的法向位移(剪胀),压剪损伤微裂纹开始萌生,锯齿表面出现少量宏观细小损伤裂纹,此时节理处于压密爬坡阶段;阶段P2:锯齿节理面上侧起伏体爬坡趋势更加明显,上下侧起伏体伏坡面空隙进一步扩大,剪胀现象更加显著,拉剪作用下损伤微裂纹迅速扩增,在靠近锯齿尖端及中部区域出现大量的宏观损伤斜裂纹但未完全贯通,此时节理处于爬坡啃断阶段;阶段P3:锯齿节理面上侧起伏体爬坡趋势减弱,法向位移不再增加,锯齿表面宏观裂纹骤增,锯齿尖端及中部宏观损伤裂纹迅速贯通破碎,致使锯齿从根部被剪断,被剪断破碎的裂隙碎屑掉落在节理面上被锯齿碾压磨损,出现滞滑现象,此时节理处于啃断滑移阶段。

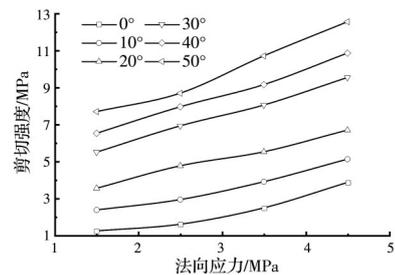
3 节理剪切强度估算公式及其验证

3.1 节理剪切强度估算公式探索

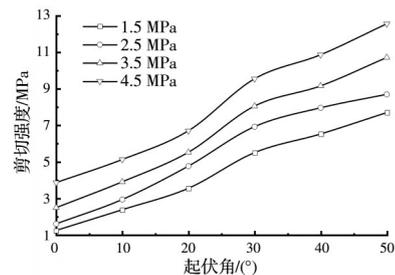
3.1.1 法向应力与起伏角对节理剪切强度的影响

图7(a)、(b)分别为锯齿节理岩体剪切强度随法向应力及一阶起伏角的变化规律曲线,其中剪切强度指图5曲线中的峰值应力。如图7(a)所示,在相同一阶起伏角下,试样剪切强度均随着法向应力的增大而近似线性增大,且不同一阶起伏角下的曲线斜率近似相等;如图7(b)所示,在相同法向应力作用下,试样剪切强度均随着一阶起伏角的增大而增大,且每条曲线形状相似。特别注意到,每条曲线的剪切强度均在 $20^\circ\sim 30^\circ$ 区间内增幅最大,这是

由于起伏角从 20° 增大到 30° 时,试样破坏模式也从爬坡破坏模式转变为了爬坡啃断破坏模式,即剪切力从主要克服节理表面摩擦(锯齿状节理的爬坡效应)转变为主要克服岩石内聚力(锯齿状节理的啃断效应),而相较于主要由完整岩石内聚力,主要由锯齿节理摩擦角控制的摩擦力控制的锯齿节理黏聚力更小,从而使得节理剪切强度明显增大。由此可见,一阶起伏角与剪切强度之间存在一定的关系,而试样剪切强度的计算表达式仍然遵循M-C准则,故可分别对一阶起伏角与黏聚力、摩擦角之间的关系进行探究。



(a) 法向压力-剪切强度变化规律曲线



(b) 起伏角-剪切强度变化规律曲线

图7 法向应力与起伏角对剪切强度的影响曲线
Fig. 7 Effect of normal stress and undulating angle on shear strength

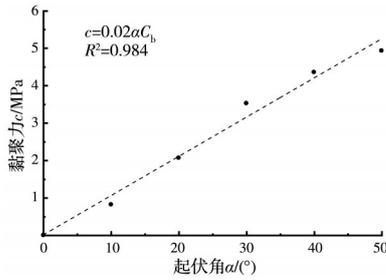
3.1.2 节理剪切强度估算公式

图8为黏聚力、起伏角与一阶起伏角的关系曲线。为充分考虑一阶起伏角对节理剪切强度的影响,同时反映出锯齿的爬坡效应和啃断效应,在M-C准则的基础上建立一个贯通型锯齿状节理岩体剪切强度估算公式

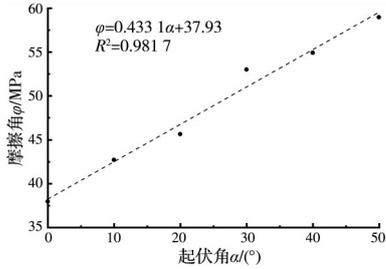
$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c = \sigma_n \tan(\varphi_j + g(\alpha)) + h(\alpha C_b) \quad (1)$$

式中: τ 为节理剪切强度; σ_n 为节理法向应力; φ 为节理的综合摩擦角; c 为节理的综合黏聚力; φ_j 为节理的基本摩擦角; C_b 为完整岩石的黏聚力; $g(\alpha)$ 和 $h(\alpha C_b)$ 均为与一阶起伏角 α 相关的函数,其中, $h(\alpha C_b)$ 还与完整岩石的黏聚力相关。

如图8所示,黏聚力和摩擦角均随着一阶起伏角的增大而增大,且曲线呈线性上升趋势,故基于



(a) 粘聚力-起伏角拟合曲线



(b) 摩擦角-起伏角拟合曲线

图 8 剪切强度参数与起伏角的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of shear strength parameters and undulating angle

最小二乘法,采用一元线性回归分析方法对其进行线性拟合,分别得到一阶起伏角 α 与综合黏聚力 c 、综合摩擦角 φ 的拟合函数 $c = 0.02\alpha C_b$ 、 $\varphi = 0.4331\alpha + 37.93$,其中,37.93 为节理的基本摩擦角 φ_i 的值,从而得出相关函数 $g(\alpha) = 0.4331\alpha$ 、 $h(\alpha C_b) = 0.02\alpha C_b$,故最后的剪切强度估算公式为

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_i + 0.4331\alpha) + 0.02\alpha C_b \quad (2)$$

3.2 典型岩质边坡稳定性算例分析

图 9 为含贯通规则锯齿状节理的灰岩边坡稳定性分析概化示意图,其中,边坡高度 $H = 10$ m,坡角 $\beta = 75^\circ$,锯齿节理位置如图中蓝色实线所示,坡顶断裂位置距右侧顶点 $l = 5$ m,锯齿状节理平均倾角 $\theta = 60^\circ$,一阶起伏角分别为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° ,其具体形态如图中虚线框内所示。为验证剪切强度估算公式的合理性,分别采用极限平衡法和强度折减法对概化边坡的稳定性安全系数进行计算,并对两种方法计算所得结果进行对比分析^[18, 21]。

3.2.1 极限平衡法

根据图 6 中的损伤裂纹概化图可知,试样破坏时,其破坏区域位于锯齿状节理附近,呈现出一个损伤带,且试验结果表明,在整个损伤带内岩石均有着滑动趋势,故将锯齿中线所在平面看作宏观近似断裂面,假定边坡沿着其近似断裂面滑动破坏,其近似断裂面如图 9 红色虚线 AB 所示, $L_{AB} = 20$ m。故按照极限平衡法计算稳定性安全系数 K_1

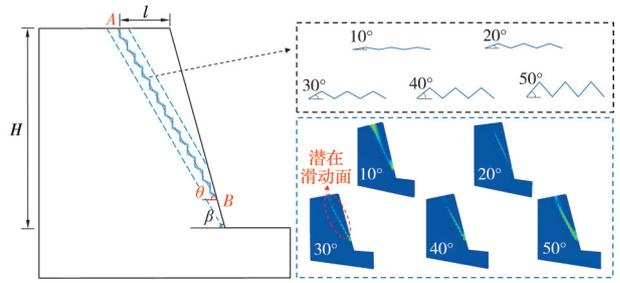


图 9 概化边坡示意及强度折减法计算云图

Fig. 9 Schematic diagram of slope and contours of strength reduction method

$$K_1 = \frac{\tau L_{AB}}{W \sin \theta} \quad (3)$$

式中: τ 为采用式(2)计算所得的节理面剪切强度,其中 $\sigma_n = W \cos \theta / L_{AB}$; L_{AB} 为近似断裂面长度; W 为滑体的质量。

3.2.2 强度折减法

采用FLAC^{3D}有限差分强度折减法计算边坡的稳定性安全系数。其基本原理是每进行新一轮计算,岩体的黏聚力 c 和摩擦角 φ 就与折减系数 F_s 相除得到新的岩体抗剪参数,并带入下一轮计算中,即 $c_{n+1} = c_n / F_s$, $\varphi_{n+1} = \arctan(\tan \varphi_n / F_s)$,而最终破坏时的折减系数 F_s 即为概化边坡的稳定性安全系数 K_2 。

按照图 9 所示概化边坡建立计算模型,选取接触面单元(Interface)模拟节理面,模型左右及下侧边界采用法向位移约束边界条件,而其他边界采用自由边界条件,模型岩石材料选用表 1 所示参数,锯齿节理基本摩擦角采用试验所得的 37.93° 。

3.2.3 对比分析

采用两种方法分别计算得到的边坡稳定性安全系数结果见表 3。计算结果表明,使用含剪切强度估算公式的极限平衡法计算得到的稳定性安全系数 K_1 与强度折减法计算得到的稳定性安全系数 K_2 相吻合,表明建立的锯齿节理剪切强度估算公式基本合理。

表 3 边坡稳定性安全系数计算结果

Table 3 Calculation results of safety factor for slope stability

方法	安全系数				
	10°	20°	30°	40°	50°
极限平衡法 K_1	0.838	0.983	1.152	1.353	1.602
强度折减法 K_2	0.896	1.054	1.223	1.447	1.705

4 结论

1) 相同法向应力作用下,根据一阶起伏角的不同,锯齿节理岩体剪切应力位移关系曲线可分为滑

动型曲线、滑动-峰值型曲线和峰值型曲线,且每类曲线均可分为5个阶段。其中,滑动型及滑动-峰值型曲线包括非线性缓慢上升阶段、线性陡升阶段、“上凸形”缓慢上升阶段、近似平直阶段和平直阶段,但滑动-峰值型曲线整体波动性更大,且线性陡升阶段相对更短而“上凸形”缓慢上升阶段相对更长;峰值型曲线包括非线性缓慢上升阶段、线性陡升阶段、“微凸型”上升阶段、脆性跌落阶段和波动缓降阶段。

2)根据一阶起伏角的不同,锯齿节理岩体破坏模式可分为滑移破坏、爬坡破坏和爬坡啃断破坏,且每种破坏模式下的锯齿节理损伤演化过程均可分为3个阶段。其中,滑移破坏模式包括压密阶段、克服摩擦阶段和滑移阶段;爬坡破坏模式包括压密阶段、爬坡滑移阶段和塑性流动阶段;爬坡啃断破坏模式包括压密爬坡阶段、爬坡啃断阶段和啃断滑移阶段。

3)锯齿节理岩体剪切强度随法向应力和一阶起伏角的增大而增大,且呈近似线性关系;锯齿节理剪切强度参数均随着一阶起伏角的增大而增大,且呈线性相关关系。因此,基于M-C准则,建立了贯通型锯齿状节理岩体剪切强度估算公式 $\tau = \sigma_n \tan(\varphi_j + 0.4331\alpha) + 0.02\alpha C_b$ 。

4)采用极限平衡法和强度折减法对概化边坡的稳定性安全系数进行了计算和对比分析。结果表明,使用含剪切强度估算公式的极限平衡法计算得到的边坡稳定性安全系数 K_1 与采用强度折减法计算得到的边坡稳定性安全系数 K_2 相吻合,从而验证了剪切强度估算公式的合理性。

参考文献

- [1] GOODMAN R E. An introduction to rock mechanics [EB/OL]. <https://1lib.us/book/564447/dcd14c>.
- [2] 黄润秋. 岩石高边坡稳定性工程地质分析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
HUANG R Q. Engineering geology for high rock slopes [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [3] 赵延林, 彭青阳, 万文, 等. 直剪作用下不共面断续节理岩桥破断试验与数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(1): 59-67.
ZHAO Y L, PENG Q Y, WAN W, et al. Experimental and numerical analysis on rupture of rock bridge with non-coplanar intermittent joints under direct shear [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(1): 59-67. (in Chinese)
- [4] PATTON F D. Multiple models of shear failure in rock [C]// Proceedings of the 1st Congress of the International Society of Rock Mechanics (ISRM), 1966: 509-513.
- [5] GOODMAN R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks [EB/OL]. <https://1lib.us/book/4853691/dcaeba>.
- [6] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints [J]. Engineering Geology, 1973, 7(4): 287-332.
- [7] 孙广忠. 论岩体力学的地质基础[J]. 煤炭学报, 1980, 5(4): 26-35.
SUN G Z. On geological foundations of rock mass mechanics [J]. Journal of China Coal Society, 1980, 5(4): 26-35. (in Chinese)
- [8] BELEM T, HOMAND-ETIENNE F, SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33(4): 217-242.
- [9] 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)
- [10] ZHAO W H, XIE M L, ZHAO J J. The effect of secondary sawtooth height on shear properties of rock joints with rigid contact [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(4): 1-9.
- [11] 周小平, 张永兴. 岩石结构面直剪试验中声发射特性研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(Sup1): 158-162.
ZHOU X P, ZHANG Y X. Study on the property of acoustic emission in joint straight shearing test of the rock [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(Sup1): 158-162. (in Chinese)
- [12] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 结构面剪切过程中声发射特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(Sup1): 2827-2836.
ZHOU H, MENG F Z, ZHANG C Q, et al. Experimental study of acoustic emission characteristic of discontinuity under shearing condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup1): 2827-2836. (in Chinese)
- [13] 张峰瑞, 姜谔男, 杨秀荣. 孔隙水压力对锯齿状结构面剪切蠕变特性的影响[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2901-2912.
ZHANG F R, JIANG A N, YANG X R. Effect of pore water pressure on shear creep characteristics of serrate structural plane [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(9): 2901-2912. (in Chinese)
- [14] LIU X R, LIU Y Q, LU Y M, et al. Experimental and numerical study on pre-peak cyclic shear mechanism of

- artificial rock joints [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2020, 74(3): 407-423.
- [15] 唐雯钰, 林杭. 不同锯齿高度对软弱结构面剪切特性的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(5): 1300-1307.
- TANG W Y, LIN H. Influence of dentate discontinuity height on shear properties of soft structure plane [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(5): 1300-1307. (in Chinese)
- [16] 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 等. 岩石节理峰前循环直剪试验颗粒流宏观分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 2103-2115.
- LIU X R, DENG Z Y, LIU Y Q, et al. Macroscopic and microscopic analysis of particle flow in pre-peak cyclic direct shear test of rock joint [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 2103-2115. (in Chinese)
- [17] 刘永权. 频发微震下库区顺层岩质边坡累积损伤演化机理及稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- LIU Y Q. Study on cumulative damage evolution mechanism and stability of bedding rock slope in reservoir area under frequent microseismic [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 刘新荣, 许彬, 刘永权, 等. 频发微小地震下顺层岩质边坡累积损伤及稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(4): 632-641.
- LIU X R, XU B, LIU Y Q, et al. Cumulative damage and stability analysis of bedding rock slope under frequent microseisms [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 632-641. (in Chinese)
- [20] 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [21] 刘新荣, 许彬, 黄俊辉, 等. 多形态贯通型岩体结构面宏观剪切力学行为研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 406-415.
- LIU X R, XU B, HUANG J H, et al. Macro-meso shear mechanical behaviors of coalescent rock joints with different morphologies [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 406-415. (in Chinese)

(编辑 胡玲)