

阶坎状硬性结构面剪切贯通机制研究

刘涛¹, 张波¹, 吉锋¹, 黄鑫²,

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 四川省蜀通岩土工程公司, 成都 610081)

摘要: 岩体所表现出来的力学性质和工程特性主要受其内部的结构面控制, 正因为结构面的重要性, 大量学者对此进行了大量研究, 也取得了许多有意义的成果, 但对于阶坎状结构面在剪切试验过程中的破裂贯通机制、裂纹演化过程分析等方面研究相对较少。为进一步阐明阶坎状岩石结构面裂纹扩展贯通的机制, 设计两种不同间距的阶坎状结构面进行剪切试验。结合直剪试验与PFC^{2D}数值模拟, 将阶坎状岩石结构面破裂过程分为线弹性阶段、初裂阶段、稳定发展、失稳扩展和残余摩擦5个阶段。通过三维激光扫描技术, 分析并揭示了阶坎状结构面在直剪过程中的破裂贯通过程, 并对裂纹产生的位置、结构面破坏区域的划分进行了阐述, 取得了较好的效果。

关键词: 剪切试验; 阶坎状结构面; 数值模拟; 裂纹扩展与贯通

中图分类号: P583; TU452; TU458 **文献标识码:** A

STUDY ON THE PENETRATION MECHANISM OF STEPPED ROCK STRUCTURAL PLANE UNDER SHEAR CONDITION

LIU Tao¹, ZHANG Bo¹, JI Feng¹, HUANG Xin²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Shutong Geotechnical Engineering Company, Chengdu 610081, China)

Abstract: The mechanical and engineering properties of rock mass are mainly controlled by its internal structural plane. Because of the importance of structural plane, a large number of scholars have done a lot of research on it and achieved many meaningful results. However, there are few studies on the fracture and coalescence mechanism and crack evolution process of stepped structural plane in shear test. In order to further clarify the mechanism of crack propagation and coalescence of step-like rock structural planes, two kinds of step-like structural planes with different spacing were designed for shear test. Combined with direct shear test and PFC^{2D} numerical simulation, the failure process of step-shaped rock joints is divided into five stages: linear elastic stage, initial crack stage, stable development stage, unstable extension stage and residual friction stage. Through 3D laser scanning technology, the rupture and coalescence process of step structural plane in direct shear process is analyzed and revealed. The location of cracks and the division of failure area of structural plane are expounded. Good results are obtained.

Key words: shear test; the stepped structural plane; numerical simulation; crack propagation and coalescence

岩体是由结构面和岩石两部分组成。结构面的存在常使岩石的力学性质劣化。诸多工程实践表明,岩体的变形和失稳通常是岩体内部结构面的变形、扩展乃至贯通引起的,故结构面常成为各类岩体破坏的控制因素^[1-2]。图1为重庆市彭水县某顺层岩质边坡的前缘,其侧面可见阶梯状结构面(图1a),在降雨、地震等诱发因素作用下,易沿该阶梯状结构面滑动失稳,经简化得物理模型示意图(图1b)。研究该种结构面岩体的失稳则应先清楚结构面在失稳过程中的剪断破坏过程。

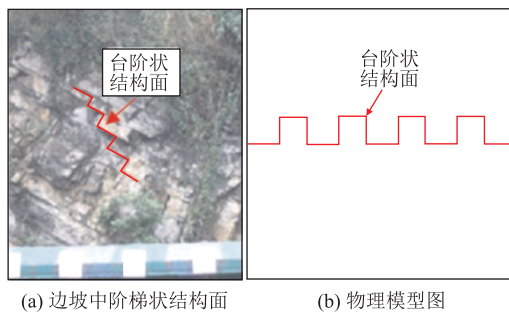


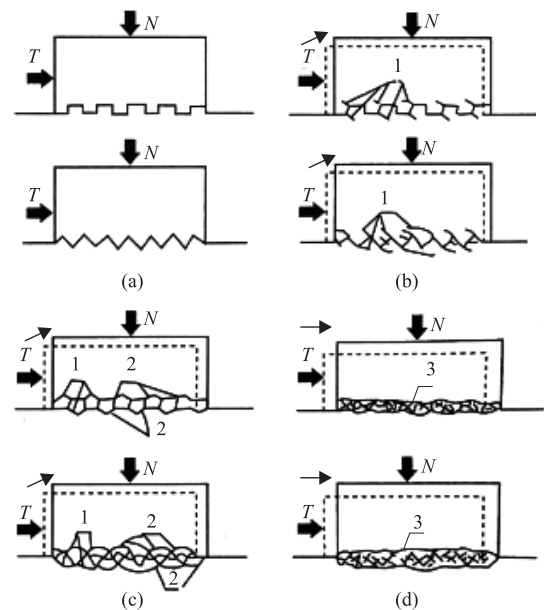
图1 力学模型示意图

岩体结构面展布的复杂性和组合的多样性,使岩体具备各向异性和非均一性,这对其研究造成了不小的困难^[3]。由于用原岩制做含结构面的试样较为困难,且变量难以控制,故将具备节理(结构面)的岩体进行简化,以类岩石材料重铸模型,通过物理模拟试验以达到研究该节理与岩体之间的关系,该方法因其较为简单和可靠度较高得到了充分的运用和发展^[4]。

对于含结构面岩体,前人已做了大量研究:Lajtai制备与剪切方向平行的两条节理的石膏试样,通过直剪试验,研究了单个软弱面对岩体剪切强度的影响^[5];梁作元等在对含多条节理的岩体进行直剪试验的基础上,发现了岩体在破坏过程中会发生剪胀和岩桥受力上抬的现象^[6];沈明荣等对贯通锯齿状结构面进行剪切试验,测定了结构面的力学特性,并分析了不同正应力下结构面的强度、变形等特征^[7];唐志成对含非贯通节理的岩体进行直剪试验,表明剪切变形的曲线具有明显的阶段性,法向应力与节理面的起伏角对剪切应力-位移的曲线有很大的影响;同时,根据峰值后的应力-位移曲线,提出位移软化的模型^[8,9];潘勇杰等通过室内非贯通结构面直剪试验,研究不同连通率 k 下岩体力学参数 c 、 φ 值的变化,建立 c 、 φ 与 k 之间的相关性模型,使得在岩土体工程实践中对具有一定张开度的非贯通结构面等效 c 、 φ 求解及取值更加方便^[10]。

张庆等通过对岩体结构携剪试验抗剪强度参数研究的基础上,结合Barton提出的JRC-JCS模型,综合分析获得更接近实际的结构面抗剪强度参数^[11];夏才初等对两种非贯通节理岩体进行直剪试验,研究了节理岩桥的软化机制,提出了弱化度的概念和其计算公式,以此来量化岩桥弱化的力学模型^[12];刘远明等在总结之前直剪试验的成果的基础上,对含非贯通节理的岩体的破坏机制及初裂强度进行了研究,并对其破坏准则提出了一种修正方法,同时,对两种情况下的力学强度特性进行研究,结果表明在其发生初裂之后到完全贯通之前,其所能承受的荷载大于初裂强度^[13];Niktabar通过大型直剪试验机对岩石节理进行剪切试验,研究了岩石节理与节理数量、节理粗糙程度的关系^[14]。

据张倬元教授等^[15]对于台阶状结构面的剪断过程的介绍,台阶状结构面的剪断实际上是一个拉张和压碎的过程(图2),但是对于台阶状结构面在剪切试验过程中,裂纹如何演化、扩展、破坏的过程并没有进一步阐述。为深入研究其裂纹扩展贯通的机制,结合岩体结构面的特征,设计了两种不同台阶状结构面进行剪切试验,达到揭示其裂纹扩展过程这一目的。



1. 拉裂面;2. 压碎带;3. 剪切破坏面
图2 台阶状结构面剪断过程模式图

1 模型设计与制作

岩样采取的困难性使得类岩石材料进行模拟岩体试验广泛运用,常用的类岩石材料有石膏、水泥砂浆等。为进一步模拟软、硬岩的剪切破坏过程,选取

水泥砂浆和石膏分别作为软、硬岩的相似材料制作试样。其中水泥砂浆材料的配比为水泥:砂:水=1:1:0.4;石膏的配比为石膏粉:水=1:2。设计A、B两组不同台阶间距的模型(其中A1、B1为石膏材料制成;A2、B2为水泥砂浆材料制成),模型尺寸为100 mm×100 mm×100 mm。单个台阶高度和宽度均为10 mm,两组模型的正视图如图3所示。

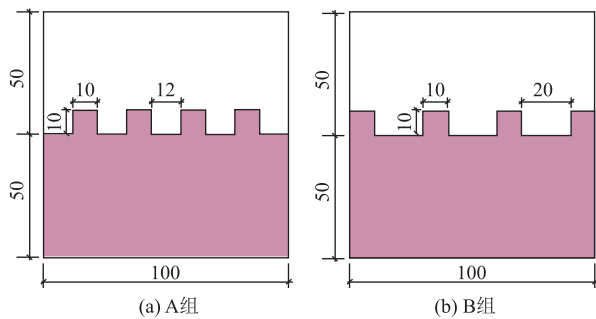


图3 A、B组设计方案正视图(单位:mm)

对于贯通台阶状结构面的制作,采取分半制作的方式,即先分别浇注上下两半部分试样,养护完成后将其组合成完整试样。为了便于观察在直剪试验过程中结构面发生剪切破坏时裂纹的产生、扩展以及贯通的现象,本次实验对结构面表面进行喷漆处理(图4)。

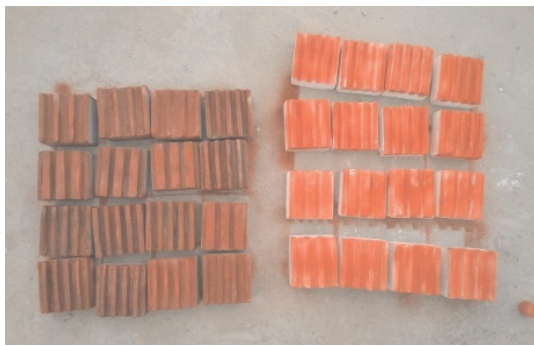


图4 经喷漆后的试样

2 结构面模型剪切试验

2.1 力学参数测试

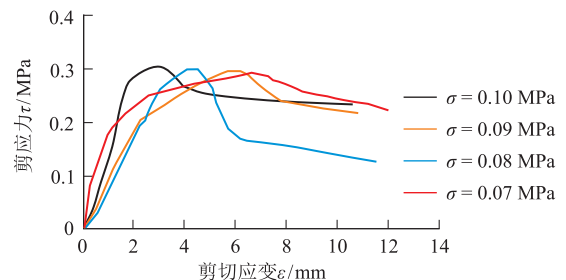
通过对石膏和水泥砂浆两种材料所制的长宽高为的立方体试样进行直剪试验及单轴压缩试验,得出材料基本参数如下表1所示。

表1 材料参数

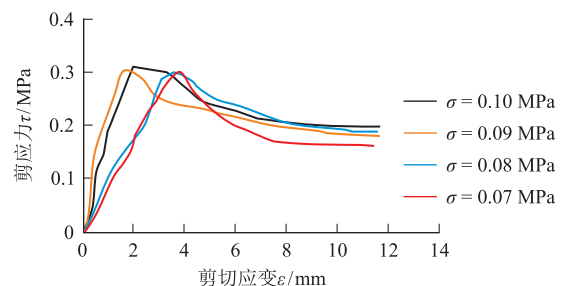
材料	参数				
	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	内聚力 C /MPa
石膏	2.26	0.06	0.001	29.2	0.55
水泥砂浆	32.58	2.41	0.150	48.8	1.25

2.2 台阶状试样剪切试验

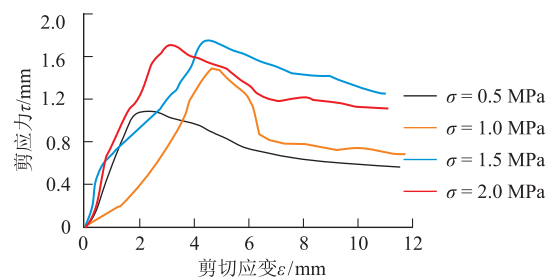
试验采用YDS-2型岩石力学多功能试验机对不同类型的台阶状结构面试样进行剪切试验,并根据实验结果,将试验数据经处理后绘制剪应力与剪切位移关系曲线(图5)。



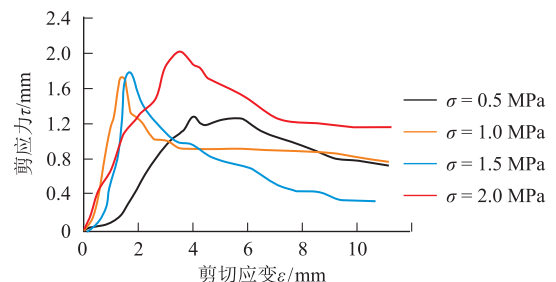
(a) 石膏材料A1组



(b) 石膏材料B1组



(c) 水泥砂浆材料A2组



(d) 水泥砂浆材料B2组

图5 各组试样 $\tau-\epsilon$ 曲线

对比各组实验 $\tau-\epsilon$ 曲线分析可知,在一定条件下,峰值剪应力随正应力的增大而增大,即剪应力峰值与正应力呈正相关。对比A、B组峰值剪应力和残余应力可知统计表数据可知,A组结构面的剪应力峰值均小于B组结构面,说明B组结构面更不易被剪断;A组残余强度均高于B组,这在一定程度上表明对于A、B两组台阶状结构面发生峰值剪切

破坏后, A 组结构面能提供的抗剪性能更好, 原因主要在于 A 组相邻台阶距离更小而使得破坏面相对更粗糙, 进而能提供更大的摩擦力。此外, 根据剪切实验结果, 以最小二乘法计算结构面的内聚力和内摩擦角, 计算结果见表 2。

表 2 各试件结构面抗剪强度统计表

材料及组别	抗剪强度参数	
	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	内聚力 C/MPa
石膏	A1 组	20.30
	B1 组	22.29
水泥砂浆	A2 组	22.55
	B2 组	24.98

对比材料的力学参数可知, 含阶坎状结构面实体的抗剪强度略低于材料参数, 表明结构面的存在对试件的力学性质存在一定的劣化效应。

3 结构面模型破坏过程

3.1 剪切破坏阶段

通过对剪切试验过程照片以及视频影像的整理, 并对裂纹的产生以及发展过程进行素描, 为避免重复, 仅选取部分试件的素描图进行展示(表 3), 并将剪切破坏过程划分为以下 5 个阶段: 线弹性阶段、

初裂阶段、稳定发展、失稳扩展、残余摩擦阶段。

(1) 线弹性阶段: 因剪切力与正应力的施加, 应力集中现象产生, 应变开始积累, 应力附近产生一系列的形变, 也即台阶面会产生微细的错动, 出现“脆皮皱起”现象, 以及可能出现试件台阶缝表面掉皮等, 此阶段可看作是裂纹的“孕育”。

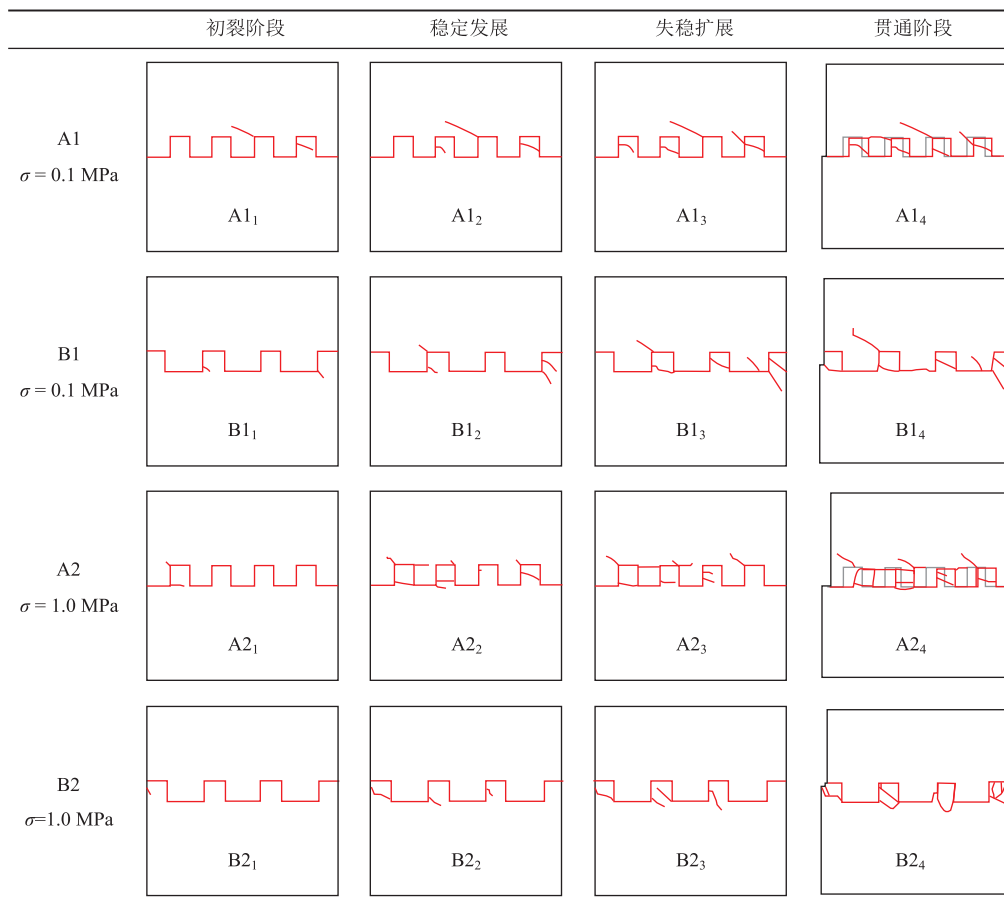
(2) 初裂阶段: 拉应力在台阶端部进一步集中, 当应力集中到一定程度, 材料的抗剪能力以及上下台阶的锁固作用无法抵抗时, 应力集中部位产生不规则波状裂纹。

(3) 稳定发展: 随着剪切力的增长, 裂纹进一步扩展, 并主要沿剪切力方向或与剪切方向成小角度方向扩展, 呈“一”字型。

(4) 失稳扩展: 裂纹进一步扩展, 正应力、剪切力、摩擦力以及上下台阶的约束力(锁固)等作用下, 次级裂纹生长, 裂纹不稳定扩展, 接着部分台阶被贯通。

(5) 残余摩擦: 当剪切力超过材料的峰值抗剪强度时, 下盘 4 个台阶均被贯通, 形成了完整的剪切面, 试件抵抗剪切力的能力大幅度下降, 主要依靠破裂面间的摩擦作用承担。

表 3 石膏材料试件素描



通过素描图以及裂纹产生先后顺序统计可知,各类型试样裂纹扩展的过程类似,具体过程如下:

(1) 下盘台阶裂纹主要产生于台阶底端,即节理端部,该处由于剪切力的作用,加上上盘台阶的锁固作用,使得该处应力集中明显,也就最易产生裂纹。

(2) 在剪切过程中,大部分试样从左至右依次产生裂纹,根据刘远明^[16]对此种受力方式时岩体内部剪应力分布水平的计算,右侧受力端部位剪应力水平最小,内部剪应力水平次之,左侧节理端部位置的剪应力水平最大,也说明了裂纹初裂发生的位置一般情况都在剪切力加力方向的对面,即本次剪切试验中试件的左侧(右侧下盘施加剪切力)。

(3) 裂纹的发展经历了“脆皮皱起”→“一字型伸展”→“羽状扩展”3个主要过程(图6)。

① 应变累积、上盘锁固的约束力作用,使得台阶状节理缝表面上产生类似“脆皮皱起”现象。

② 随着剪切力的增加,超过节理面静摩擦后,尖端便产生细小裂纹,细小裂纹一出现,便迅速生长,总体呈“一字型”,断裂面呈撕裂弯曲形态伸展。

③ 因材料内部差异、应力超过峰值破坏强度、破裂面摩擦力等相互叠加作用,裂纹出现转弯现象,或者分支裂纹产生,呈“羽状”扩展。

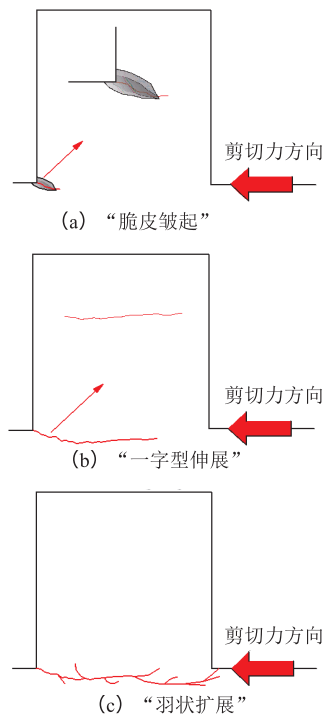


图6 裂纹扩展过程分析图

3.2 剪切过程的数值分析

(1) 参数标定

为进一步分析试样在剪切条件下的破坏过程,利用 PFC2D 对剪切过程进行模拟。通过试算,对微观参数进行标定,最终确定参数见表4。

表4 模型材料微观参数

法向刚度 K_n	切向刚度 K_s	法向强度 Pb_{ten}	内聚力 Pb_{coh}	内摩擦角 Pb_{fa}
350×10^6	130×10^6	6.65×10^6	13×10^6	24

用表4中的粒子力学参数,通过数值模拟得到试样的单轴压缩曲线,并与物理实验进行对比(图7),由图可知,两曲线基本吻合。

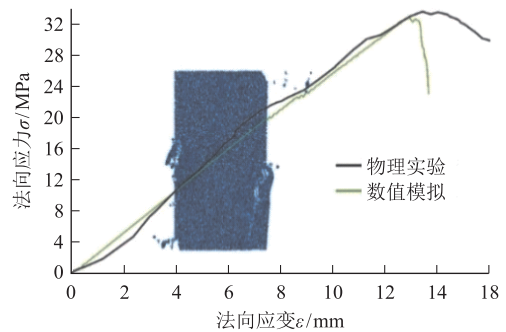


图7 试样单轴压缩试验应力-应变曲线

(2) 数值分析

由3.1节可知,各类型试样的破坏过程类似,在此仅对A2型试样进行模拟。通过对裂隙的检测,可得裂隙数量-时间步长的关系,为了便于观察,将其经处理后得到裂隙数量-时间步长关系曲线(图8)及部分不同时间步长下裂隙分布位置简化图(图9)。

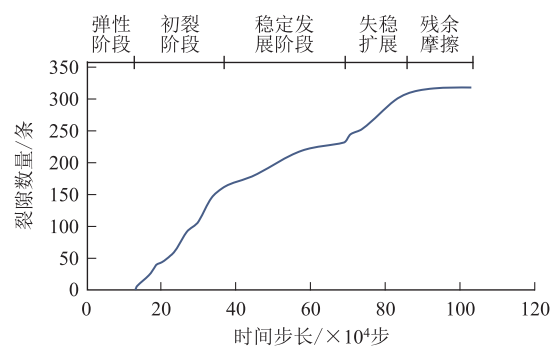


图8 裂隙数量-时间步长曲线

由图可知,其裂隙裂纹的产生以及发展与物理实验具有较好的对应关系,即:在线弹性阶段,试样发生剪切形变,几乎无裂隙产生;在初裂阶段,试样中产生大量微裂隙,新裂隙生成速度较快,进入稳定发展阶段后,大部分裂隙都沿原有裂隙张开、扩展,裂隙规模变大,但新裂隙生成量较少,生成速率降低;在失稳扩展阶段,试样中裂隙快速发展,已有的

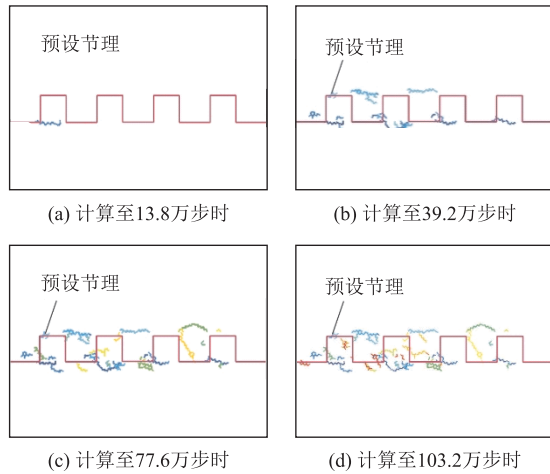


图 9 不同时间步长下裂隙分布位置

裂纹开始追踪试样的软弱面,并逐步连接在一起,并在此过程中新产生大量细小裂纹,直至完全贯通;进入残余摩擦阶段后,试样的强度主要靠摩擦力提供,由于摩擦力相对较低,难以达到试样本身强度,使试样产生新的裂隙而进一步破坏。

4 破坏机制分析

根据破坏面的特点,本文将台阶状节理的破坏模式分为压剪破坏、拉张破坏、摩擦破坏。就本试验加力方式而言,单独一个台阶,其左右两侧分别主要为拉张破坏和压剪破坏。

从力学角度分析,对于单个台阶,当下盘受到剪切力的作用,上盘会对下盘施加一个向左的剪切反力,在剪切反力作用下,台阶会受到一顺时针方向力矩,表现为台阶左侧受力拉应力,右侧受压应力。由于试样抗拉强度远小于其抗压强度,左侧应力集中部位先产生大量微裂隙;随着应力的增长,裂纹进一步张开,并主要沿剪切力方向或与剪切方向成小角度方向扩展;随着裂隙快速发展,次级裂纹生长,裂纹逐步连接,直至完全贯通。

由于台阶左右两侧所受应力性质不同,破坏方式也不同,左侧主要发生拉张破坏,右侧主要发生压剪破坏,相邻台阶间的节理面主要为摩擦破坏。整体而言,试样主要有 3 种破坏模式,即拉张破坏、压剪破坏、摩擦破坏,对应的,试样破坏面主要分为拉张破坏区、压剪破坏区和摩擦区,现以 B2₂ 试件的破坏面为例进行说明,各区域分布情况如图 10 所示。

(1) 拉张破坏区:破坏面粗糙不规则,主要分布在台阶状节理端部左侧,由于力矩的作用,台阶左侧受到拉应力作用,当拉应力超过其抗拉强度时而发

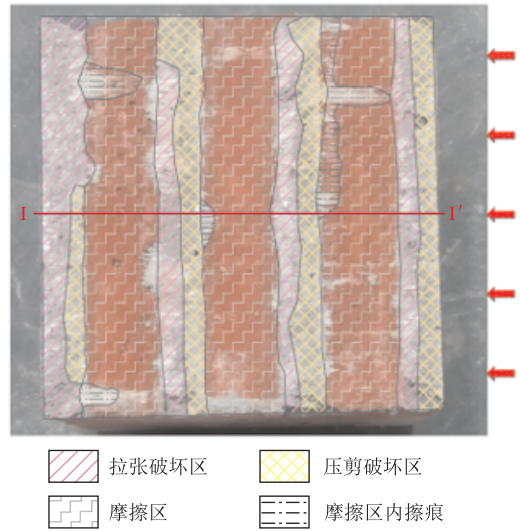


图 10 典型试件破坏分区图

生破坏,剪断面凹凸不平。

(2) 压剪破坏区:破坏面可见明显白色擦痕,其摩擦面相对较光滑,主要分布于台阶右侧,为正应力和剪切力共同作用产生的剪切破坏。

(3) 纯摩擦区:主要为台阶与台阶之间的节理面,因较易产生相对错动,静摩擦和动摩擦兼有,形成了较为明显的擦痕,擦痕方向与剪切力施加方向相反。

根据三维激光扫描建模数据提取剖面线,以研究结构面发生剪切破坏后的起伏情况,如图 11 所示。

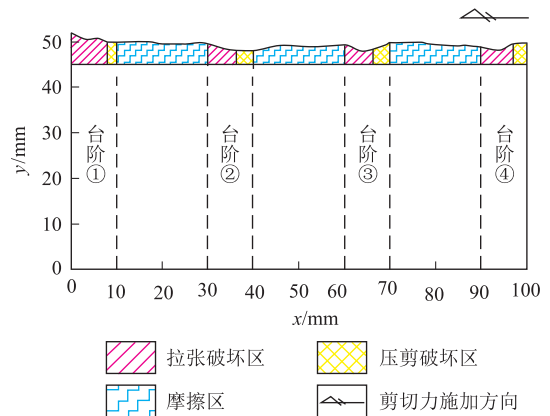


图 11 试件破坏后表面起伏形态

据图分析,拉张破坏主要发生在台阶节理左侧,压剪破坏则主要发生在台阶右侧,且相对面积较拉张破坏区域小。拉张破坏形成的剪切面主要为斜截面,原因在于以拉应力为主,并且与剪切方向呈小角度相交;而压剪破坏是由于压应力与剪应力的共同作用,故易形成较为平整的剪切面。

5 结论

本文通过对不同应力条件下,两种材料两组台阶状结构面的剪切试验过程观察、描述、分析,结合数值模拟结果进行的整理分析,就本次剪切试验而言,主要有以下几个结论:

(1) 在一定条件下,试件的剪应力峰值随正应力的增大而增大,即剪应力峰值与正应力呈正相关。且根据计算,结构面的抗剪强度低于试件自身的抗剪强度。

(2) 对比 A、B 两组结构面, A 组峰值抗剪强度均小于 B 组,说明 B 组结构面更安全,不易被剪断; A 组残余强度高于 B 组,说明剪切破坏发生后,即台阶均被贯通后,由于 A 组试样破坏面更粗糙,而使得破坏面能提供更大的摩擦力,宏观表现为更大的残余强度。

(3) 对于整个剪切过程,可分为线弹性阶段、初裂阶段、稳定发展、失稳扩展、残余摩擦 5 个阶段;对裂纹的产生及发展过程,主要划分“脆皮皱起”、“一字型伸展”、“羽状扩展”3 个过程。

(4) 台阶状结构面的破坏模式分为压剪破坏、拉张破坏、摩擦破坏 3 种。对一次剪切试验,三者破坏模式兼有。对单个台阶来说,左侧常发生拉张破坏,右侧常发生压剪破坏。

参考文献

- [1] 杜时贵. 结构面与工程岩体稳定性[M]. 北京:地震出版社, 2006.
- [2] 林兴超. 节理岩体破坏过程模拟及参数确定方法研究[D]. 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [3] 赵家成. 非连续结构面破坏过程试验研究[D]. 中国地质大学, 2013.
- [4] 张磊, 黄正均, 刘钰. 岩体结构面直剪试验方法研究[J]. 实验技术与管理, 2015, (6): 55-58.
- [5] Lajtai E Z. Shear strength of weakness planes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1969, 6(5): 499-515.
- [6] 梁作元. 某种节理岩体整体力学性质的模型试验研究[D]. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.
- [7] 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.
- [8] 唐志成, 夏才初, 黄继辉, 等. 节理峰值后归一化位移软化模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2013-2016.
- [9] TANG Z C, LIU Q S, HUANG J H. New criterion for rock joints based on three-dimensional roughness parameters [J]. Journal of Central South University (in english). 2014, (12): 4653-4659.
- [10] 潘勇杰, 周会信, 吉锋, 等. 不同连通率下非贯通硬性结构面抗剪强度参数变化规律研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(1): 86-90.
- [11] 张庆, 郑光, 许强, 等. 携剪实验和 JRC-JCS 模型在结构面抗剪强度取值中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, (1): 103-107.
- [12] 夏才初, 肖维民, 刘远明. 非贯通节理的岩桥弱化力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1538-1546.
- [13] 刘远明, 夏才初. 共面闭合非贯通节理岩体贯通机制和破坏强度准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2086-2091.
- [14] 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.
- [15] 张倬元, 王士天, 等. 工程地质分析原理(第四版)[M]. 北京:地质出版社, 2016.
- [16] 刘远明. 基于直剪试验的非贯通节理岩体扩展贯通研究[D]. 上海:同济大学, 2007.

作者简介: 刘涛(1997—),男,硕士研究生,研究方向为滑坡等灾害稳定性预测评价。E-mail: 2687154432@qq.com