

文章编号: 1000-7598 (2012) 02-0354-07

含二阶起伏体的模拟岩体节理试样 剪切特性试验研究

朱小明^{1,2}, 李海波¹, 刘 博¹, 邹 飞¹, 莫振泽¹, 宋全杰¹, 牛 磊¹

(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, 武汉 430071; 2.甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司, 兰州 730030)

摘 要: 利用规则的小尺寸锯齿构造二阶起伏体, 对不同二阶起伏体高度的人工节理进行常法向应力下的直剪试验, 研究了节理剪切力学特性。对节理的剪切强度、变形特征进行了分析, 并对破坏特征做出解释。试验结果表明: 二阶起伏体对节理剪切力学特性有重要影响, 含二阶起伏体节理的剪切力学特性与只含有一阶起伏体节理的剪切力学特性不同, 只含一阶起伏体的节理剪应力只有一个峰值, 含二阶起伏体的节理会出现波浪状的剪胀曲线和多峰值剪应力, 且峰值剪应力随剪切位移增大依次出现并逐个减小; 随着二阶起伏体高度增大, 节理峰值剪切强度增大, 节理依次出现磨损破坏、多次性剪断破坏、一次性剪断破坏。

关 键 词: 岩石力学; 节理; 二阶起伏体; 剪切特性; 剪应力; 剪胀

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental study of shear characteristics by simulating rock mass joints sample with second-order asperities

ZHU Xiao-ming^{1,2}, LI Hai-bo¹, LIU Bo¹, ZOU Fei¹, MO Zhen-ze¹, SONG Quan-jie¹, NIU Lei¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Gansu Province Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: The monotonic shear tests are carried out to investigate the mechanical properties of rock mass joints with the second-order asperities, which simulated by small regular saw tooth; and gypsum material is used to simulating rock mass joint samples. Five artificial joint samples with different heights of second-order asperities are tested under low normal stress, which keep constant during the tests. Characteristics of shear strength and deformation are analyzed; an interpretation of the joints failure modes is given. Based on the experimental results, it can be found that the second-order asperities have important influence on the shear mechanical properties of joints, and the mechanical properties are different from the joints with first-order asperities only, for which shear stress vs. shear displacement curve just has one peak shear stress; by contrast, the joints with second-order asperities have multi-peak shear stress, which decreases gradually one after one with the increase of shear displacements. As well, the dilatancy curves of the joints with second-order asperities show wave shape. With the increase of second-order asperities height, peak shear strength increases; the failure modes appear wearing, many-times shearing of asperities, and one-time shearing failure of asperities.

Key words: rock mechanics; joints; second-order asperities; shear characteristics; shear stress; dilatancy

1 引 言

节理的剪切力学特性(强度、变形特性)对岩体的力学性质起控制性作用, 其力学参数也是岩体工程稳定性分析及安全性评价研究中的基本参数。过去几十年来, 国内外学者对此做了大量的研究工作。其中, Saeb^[1]、Haberfield^[2]、Grasselli^[3]、赵

坚^[4-5]、蒋宇静^[6-7]等分别从节理剪切的机制、多凸体模型、接触面积、吻合度、常法向刚度等方面研究了节理剪切的力学特性, 并给出了剪切强度公式。Plesha^[8]、Jing^[9]、Huang^[10]、Lee^[11]等研究了循环荷载作用下节理的剪切行为; 李庆松^[12]、李海波^[13-14]、沈明荣^[15]、彭从文^[16]等分别对具有不同变形历史、不同剪切速率、规则锯齿状节理进行了直剪试验及

收稿日期: 2010-07-30

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (No. 51025935); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2010CB732001); 国家自然科学基金资助项目 (No. 40872188)。

第一作者简介: 朱小明, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事岩石节理力学特性方面的研究。E-mail: xmzhu126@126.com

理论模型方面的研究, 刘博^[17]系统研究了规则状节理在循环荷载下的剪切力学特性。

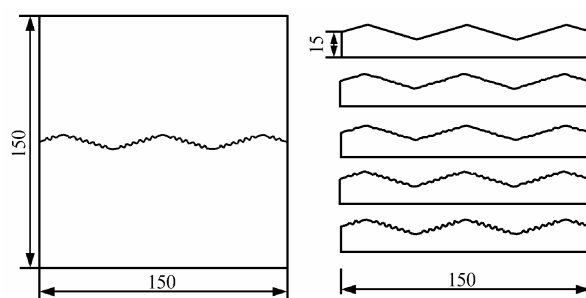
节理表面包含了代表节理面起伏趋势的尺寸相对较大的起伏体和代表节理面粗糙程度的尺寸相对较小的起伏体。在有些文献中, 尺寸较大的起伏体可以称之为起伏度, 尺寸较小的起伏体可以称之为粗糙度^[18], 起伏度的尺寸比粗糙度的尺寸大一个数量级。有些文献^[8]则把尺寸较大的起伏体称作一阶起伏体 (first-order asperities), 把尺寸较小的起伏体称作高阶起伏体 (high-order asperities), 由于高阶起伏体的尺寸较小, 一般只考虑到二阶起伏体 (second-order asperities), 起伏体的角度称为起伏角 (asperities angle)。已有的研究工作大多只是针对一阶起伏体节理表面, 或者天然节理表面 (不区分一阶起伏体和二阶起伏体)。部分文献提到了二阶起伏体的影响。夏才初^[18]进行了不同形貌节理的剪切强度研究, 认为不同形貌成分对节理的剪切强度作用不同, 波纹度对节理的爬坡效应的影响可以不考虑法向应力的关系。Kana^[19]指出, 起伏体对于建立精确的节理剪切模型的重要性, 并将二阶起伏体的影响简单的归入剪切特性曲线的高频响应部分。Homand^[20]、Belem^[21]指出, 经典的节理剪切强度模型由于没有考虑二阶起伏体的影响, 在低法向应力时会低估剪切强度。Jafari^[22]指出, 当法向应力较低时, 节理循环剪切机制主要为表面滑动, 此时一阶起伏体和二阶起伏体都将磨损, 当法向应力较高时, 剪切机制主要为剪断, 此时在剪切曲线中反映不出二阶起伏体的影响, 他提出的模型因没有考虑二阶起伏体的影响, 导致其在低法向应力时预测的剪切强度比实际值要低。Plesha^[8]、Lee^[11]提出了等效起伏体角度磨损模型, 即起伏角的磨损为一阶起伏度磨损与二阶起伏度磨损二者线性叠加, 但没有进一步的探讨其相互关系。Yang^[23]对含二阶起伏体节理面的剪切强度与变形特征进行了初步的试验研究, 研究表明, 当法向应力远小于岩壁强度时, 二阶起伏体起控制作用, 不同二阶起伏体影响的大小可以在剪切曲线上明显区分出来, 二阶起伏角越大, 节理剪切强度、剪胀角越大; 当法向应力接近岩壁强度时, 二阶起伏度大小的影响不再明显, 在剪切曲线上难以分辨。

本文采用高强石膏浇注含二阶起伏体的节理试件, 进行常法向应力作用下的直剪试验, 通过改变二阶起伏体尺寸, 研究了二阶起伏体对节理强度和变形特征的影响, 并分析了节理的破坏特征。

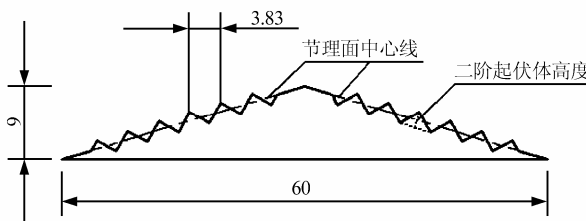
2 试验设备与试验材料

试验在中国科学院武汉岩土力学研究所的RMT-150C试验机上进行。该系统垂直液压缸最大出力为1000 kN, 活塞行程为50 mm; 水平液压缸最大出力为500 kN, 活塞行程为50 mm; 变形速率0.000 1~1 mm/s。

从现场进行天然节理表面取样十分困难, 随机轮廓表面几何特征表达困难, 在规律性的研究方面多采用人工制造的几何特征简单的节理面, 即认为节理面由一系列几何特征简单的单元组合构成, 例如三角形、三角函数曲线等。本文试验采用规则三角形锯齿状节理表面, 用步长为60 mm的大三角形代表一阶起伏体, 在一阶起伏体斜边上叠加步长为4 mm的小三角形代表二阶起伏体, 一阶起伏体轮廓线为二阶起伏体小三角形的中线, 一阶起伏体高度 h_1 保持9 mm不变, 通过改变二阶起伏体的高度 h_2 模拟不同的二阶起伏角, 图1为试验用的钢模几何示意图, 二阶起伏体齿高分别为0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm, 二阶起伏体尖端间距为3.83 mm。试件制备过程中, 试件上下两部分分开浇注, 首先将不同二阶起伏角的钢模放入试件制备盒中, 然后将搅拌均匀的石膏浇注, 振捣使气泡跑出, 以便试件密实, 然后待石膏终凝, 强度形成, 即可拆模。上下两部分试件合在一起后, 试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm, 图2为典型试件照片。



(a) 几何示意图



(b) 二阶起伏体示意图

图1 钢模示意图 (单位: mm)

Fig.1 Joint modules (unit: mm)



图 2 典型节理试件（二阶起伏体高 2 mm）
Fig.2 Typical gypsum joint samples (second-order asperities of 2 mm height)

由于现场岩体取样困难，难以进行数量和规模较大的试验研究，因此，对岩体节理的研究多采用人工材料进行模拟，试验材料有混凝土、水泥砂浆、石膏等。考虑到二阶起伏体尺寸较小，混凝土或者水泥砂浆中的骨料颗粒对试件制备不利，且养护时间较长，本文试验材料采用高强石膏，水灰比为 0.33，该水灰比下的石膏浆液气泡较少，稠度适合浇注，且强度形成较快。对该水灰比浇注的石膏进行了单轴抗压试验，单轴抗压强度可以达到 40 MPa。

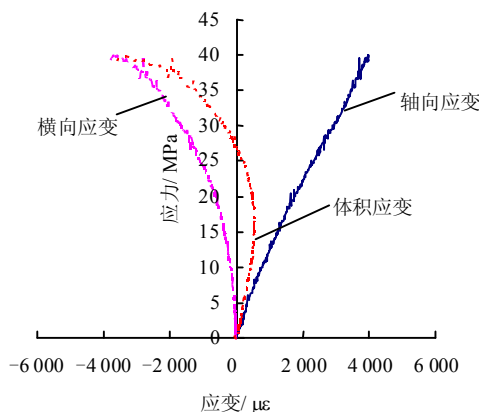


图 3 石膏试件单轴压缩应力-应变曲线
Fig.3 Stress vs. strain curves of gypsum sample under uniaxial compression test

本文试验为常法向应力直剪试验，即在剪切过程中保持法向应力不变，以恒定的速率施加剪切力，当剪切位移达到规定值时，停止试验。因二阶起伏体的作用主要体现在低法向应力下^[23]，所以本文中法向应力取 0.25 MPa，剪切速率取 0.02 mm/s，剪切位移终点取 12 mm。

3 试验结果及分析

3.1 节理强度特征

图 4 为节理试件的剪应力 τ -剪切位移 u 关系曲线，图中数字为二阶起伏体高度。

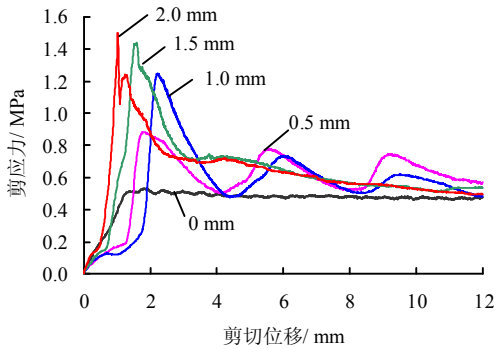


图 4 不同二阶起伏体高度节理面的剪切位移曲线
Fig.4 Shearing displacement curves of joints with different second-order asperities heights

将图 4 中的各曲线的峰值剪切强度 τ_p （剪切应力最大值）及曲线形态列于表 1。

表 1 节理峰值剪切强度及应力曲线特征
Table 1 Peak shear strength and stress curves properties of joints with different second-order asperities heights

h_2 / mm	h_2/h_1	τ_p / MPa	应力曲线特征
0	0	0.532	无明显峰值，无明显软化阶段
0.5	1/18	0.884	
1.0	1/9	1.247	多次明显的峰值，硬化-软化反复出现
1.5	1/6	1.434	
2.0	2/9	1.494	只有一次明显峰值

从图 4 和表 1 可以得知，随着二阶起伏体高度增加，节理的 $\tau-u$ 关系依次出现 3 种类型，类型 I：如图 4 中的 0 mm 曲线，该类曲线无明显峰值，无明显软化阶段；类型 II：如图 4 中的 0.5、1.0 mm 曲线，该类曲线在剪切过程中有 3 个明显的峰值出现，硬化-软化反复出现；类型 III：如图 4 中的 1.5、2.0 mm 曲线，该类曲线在剪切过程中只出现 1 次明显的峰值，之后剪应力逐渐减小，无明显的峰值剪应力出现。在各曲线的剪切位移终值处，剪应力接近无二阶起伏体节理面剪应力值。

剪切过程中，节理两侧错动爬升，在剪切位移 12 mm 之内，节理跨过 3 个二阶起伏体尖端（尖端间距为 3.83 mm，见图 1(b)所示），剪应力-剪切位移曲线应出现 3 个峰值剪应力现象，图 4 中的 0.5、1.0 mm 2 条曲线的峰值剪应力间距亦基本上等于相邻二阶起伏体尖端间距；但二阶起伏体高度为 1.5、2.0 mm 时，节理只出现一次明显的峰值剪应力，这是因为二阶起伏体高度较大的节理的破坏特征与二阶起伏体高度较小的节理的破坏特征不同：在剪切过程中，节理两侧逐个跨越二阶起伏体，当二阶起伏体高度较小时，每次跨越二阶起伏体时，二阶起

伏体只在尖端部分剪断, 再次跨越时, 前一次跨越残留二阶起伏体端部剪断, 二阶起伏体仍然残留着较大部分, 因此, 会出现多次明显的峰值剪应力; 而当二阶起伏体高度较大时, 所有二阶起伏体在第1次跨越时就一次性地从根部剪断, 形成的碎块亦被压碎, 节理进一步剪切时不再遇到明显的残留二阶起伏体, 因此, 只出现一次明显的峰值剪应力。关于节理破坏特征的解释见第4节。

图5为节理的峰值剪切强度与二阶起伏体高度的关系。从表1和图5可以得到, 峰值剪切强度随着二阶起伏体高度的增大而增大, 当二阶起伏体高度为0, 0.5, 1.0 mm时, 峰值剪切强度-二阶起伏体高度呈近似线性关系, 当二阶起伏体高度大于1 mm时, 峰值剪切强度增加趋势变缓。

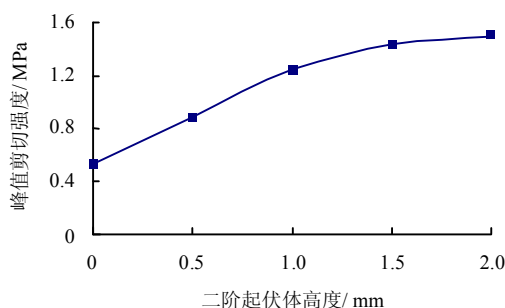


图5 峰值剪切强度-二阶起伏体高度关系

Fig.5 Relation curve of peak shear strength vs. second-order asperities height

对于出现多次峰值剪应力的节理, 将峰值剪应力按剪切位移从小到大依次出现的顺序编号, 其顺序依次为1、2、3。对于只出现一次明显峰值剪应力的节理, 节理第2个、第3个峰值剪应力可以从剪切位移-剪应力曲线上距离第一个峰值剪应力3.83 mm、7.66 mm (1倍、2倍二阶起伏体尖端间距) 处取值。峰值剪应力随着剪切位移增大而变化的情况如图6所示。当二阶起伏体高度 $h_2 = 0.5$ mm时, 峰值剪应力依次降低12.11%, 4.56%; 二阶起伏体高度 $h_2 = 1.0$ mm时, 峰值剪应力依次降低41.20%, 15.54%; 二阶起伏体高度 $h_2 = 1.5$ mm时, 峰值剪应力依次降低48.36%, 26.50%; 二阶起伏体高度 $h_2 = 2.0$ mm时, 峰值剪应力依次降低55.18%, 21.11%。从图4、6可以看出, 峰值剪应力随着剪切位移增大而依次出现并逐个减小, 二阶起伏体高度越大, 峰值剪应力衰减越快。

3.2 节理变形特征

由于节理面凹凸不平, 存在着起伏体, 当节理受到剪切荷载时, 节理沿着起伏体滑动, 在产生剪

切位移 u 同时, 还产生法向位移 v , 这种现象称为剪胀, 剪切位移 u -法向位移 v 曲线称为剪胀曲线。

图7为不同二阶起伏体高度的节理面剪胀曲线。法向位移为负值区域, 各曲线靠得很近, 不容易区分, 因此, 对该区域进行了放大, 如图7(b)所示。

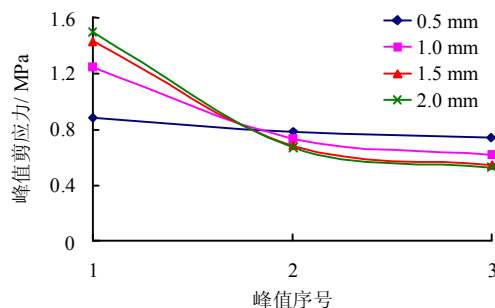
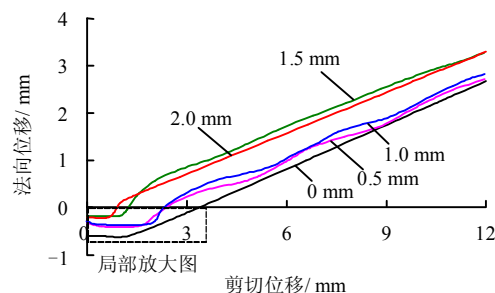
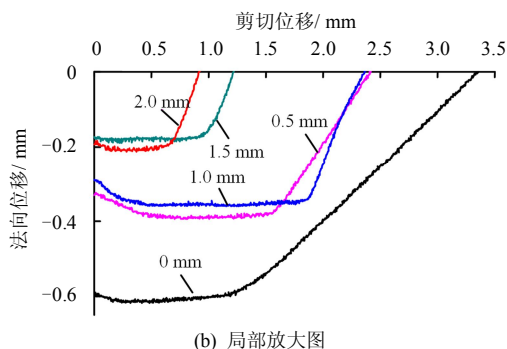


图6 含二阶起伏体节理的多峰值剪应力衰减曲线

Fig.6 Attenuation curves of multi-peak shear stress



(a) 各节理的剪胀曲线



(b) 局部放大图

图7 不同二阶起伏体高度节理的剪胀曲线

Fig.7 Dilatancy curves of joints with different second-order asperities heights

图7显示, 具有不同二阶起伏体高度的节理剪胀曲线不同, 相同剪切位移下的各节理法向位移大小不同, 从小到大的次序依次为 $v_{0.5}$, v_1 , v_0 , v_2 , $v_{1.5}$, 下标为二阶起伏体高度, 单位: mm。

剪胀曲线可以分为2个阶段: 阶段I——压缩滑移阶段, 因为试验程序是先施加法向荷载达到指定数值后再施加剪切荷载, 因此, 在施加剪切荷载之前, 试件处于压缩状态, 产生压缩变形, 法向位

移为负值;施加剪切荷载后,法向位移有一个负向非线性增大段,且增加斜率逐渐减小,此段的剪切位移很小,在 0.5 mm 之内;之后进入一个滑移段,剪切位移增加而法向位移几乎不变,各条曲线的滑移距离不同,二阶起伏体高度为 0、0.5、1.0、1.5、2 mm 节理的滑移距离依次为 0.95、1.07、1.42、0.92、0.49 mm;阶段 II——扩容阶段,滑移阶段结束后,法向位移开始由负值向正值转变,并按一定的速率增加,只含一阶起伏体的节理法向位移匀速增加,二阶起伏体高度为 0.5、1.0 mm 的两条节理剪胀曲线开始呈明显的波浪状上升,该 2 条曲线基本平行,波峰值间距基本等于模具上的相邻二阶起伏体尖端间距;二阶起伏体高度为 1.5 mm 的节理剪胀曲线呈不明显的波浪状上升;二阶起伏体高度为 2.0 mm 的节理剪胀曲线基本为一条直线。

剪胀曲线是反映节理破坏特征的一个重要信息,为了更好地研究含二阶起伏体节理的剪胀情况,将它们与不含二阶起伏体节理的剪胀曲线进行对比,即将含有二阶起伏体节理的法向位移与不含二阶起伏体节理的法向位移相减:

$$\Delta v_i = v_i - v_0 \quad (1)$$

式中: Δv_i 为法向位移差; v_0 为不含二阶起伏体节理的法向位移; v_i 为含有二阶起伏体节理的法向位移,下标 i 代表二阶起伏体高度,分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 mm。

图 8 显示,剪切位移为 0 mm 时,法向位移差不为 0,表明二阶起伏体高度不同,法向压缩程度不同;随着剪切位移增大,法向位移差开始有一个平缓段,对应着前文所述的压缩滑移段;当剪切位移进一步增大,法向位移差迅速增大,之后有一个拐点,拐点之后的法向位移差发生不同变化: $\Delta v_{0.5}$ 、 Δv_1 随剪切位移呈波浪状变化; $\Delta v_{1.5}$ 随剪切位移呈不明显的波浪状变化; Δv_2 的绝对值随剪切

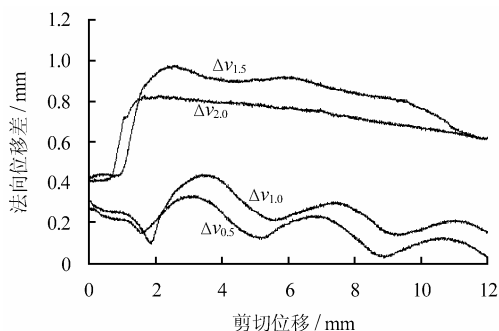


图 8 含二阶起伏体节理的法向位移差曲线

Fig.8 Normal displacement-difference curves of joints with second-order asperities

位移增大线性减小。因一阶起伏体轮廓为二阶起伏体轮廓的中线,见图 1(b),只含一阶起伏体节理的剪胀曲线扩容阶段基本是一条斜率不变的直线,对于含二阶起伏体的节理,当法向位移差增大时,表明节理两侧远离中线,当法向位移差减小时,表明节理两侧靠近中线。

4 节理破坏特征

通常,节理在剪切过程中发生的破坏主要有 3 种类型:磨损破坏、剪断破坏、磨碎破坏^[17]。在本文的试验条件下,随着二阶起伏体高度不同,节理在剪切过程中体现出不同的破坏特征。

破坏特征 I: 磨碎破坏。本文中的 5 个节理均出现此种破坏。起伏体尖角处由于承载面积很小,产生应力集中而被压碎,此外,起伏体被剪断的碎块在剪切过程中也被磨碎,被压碎的部分被挤压在未被压碎的部分上面,或者填充在节理面凹处,被压碎的石膏起到“润滑”作用,导致节理面摩擦力减小,在剪应力-剪切位移曲线上表现为剪应力刚开始时以斜率逐渐减小的非线性增加,在剪胀曲线上表现为剪切位移增加而法向位移基本不变,即压缩滑移阶段。

破坏特征 II: 磨损破坏。当二阶起伏体高度为 0,一阶起伏体角度较小(本文中的角度为 16.7°)时,节理出现此种破坏,一阶起伏角较大时会发生剪断破坏^[14, 17],本文仅限于讨论二阶起伏体的影响,不考虑一阶起伏体的影响。此种破坏特征的节理试件在剪切过程中起伏体很少(甚至没有)断裂,只是在表面上摩擦出一些稍许粉末,见图 9(a)。其剪应力-剪切位移曲线(图 4 中的 0 mm 曲线)只有“爬坡区”和“滑移区”两个阶段^[14],峰值剪应力和残余剪应力(剪切位移终值处的剪应力)差别不大,剪胀曲线(图 7 中的 0 mm 曲线)的扩容阶段曲线斜率没有拐点。

破坏特征 III: 剪断破坏。随着二阶起伏体高度增大,节理呈此种破坏特征。此种破坏特征的节理试件在剪切过程中,起伏体发生断裂,形成碎块,见图 9(b)~图 9(e)。随着剪切位移增大,节理剪应力以及法向位移逐步增大,当剪切位移达到一定程度时,剪应力达到峰值然后迅速下降,进入“啃断区”^[14],剪胀曲线的扩容阶段则有一个拐点,曲线斜率发生变化,如图 7(a)、图 8 所示。在本文的法向应力 0.25 MPa 下,剪断破坏又可以分为多次性剪断和一次性剪断 2 种类型。

当二阶起伏体尺寸较小时(对应本文中的 0.5,

1.0 mm), 节理出现多次性剪断破坏。在剪切过程中, 节理两侧逐个跨越二阶起伏体, 每次跨越时只有起伏体的尖端部分被剪断, 起伏体大部分残留下来, 再次跨越时, 在前一次剪断残留起伏体的端部继续剪断, 形成剪应力-剪切位移曲线上的多峰值应力现象, 见图 4, 剪胀曲线出现波浪状起伏扩容阶段, 见图 7; 随着二阶起伏体高度逐渐增大, 起伏体咬合较深, 剪断体积增大, 需要克服的剪切阻力增大, 导致峰值剪应力随二阶起伏体高度增大而增大, 见图 5, 之后由于二阶起伏体被逐次剪断, 且剪断体积逐步减小, 需要克服的剪切阻力减小, 形成多峰值剪应力逐个减小的现象, 且峰值剪应力随二阶起伏体高度增大衰减加快, 见图 6。由于只有尖端部分被剪断, 在剪切结束时, 起伏体凹处仍保存完好, 节理面参加剪切的一边仍留有明显沟槽, 见图 9(b)、(c)。当二阶起伏体尺寸较大时 (对应本文中的 1.5, 2.0 mm), 节理出现一次性剪断破坏。因为二阶起伏体高度较大, 锯齿陡峭, 咬合较深, 节理两侧第 1 次跨越二阶起伏体时, 所有二阶起伏体在剪切过程中几乎一次性从根部剪断, 形成的碎块残留在二阶起伏体凹处或者被磨碎填铺在二阶起伏体凹处, 节理两侧再次跨越时, 基本不再遇到明显的二阶起伏体, 因此, 在剪应力-剪切位移曲线上只出现一次明显应力峰值, 见图 4, 剪胀曲线扩容阶段不出现明显的波浪状起伏, 见图 7, 在试验结束后, 表面上沟槽基本消失, 见图 9(d)、9(e)。

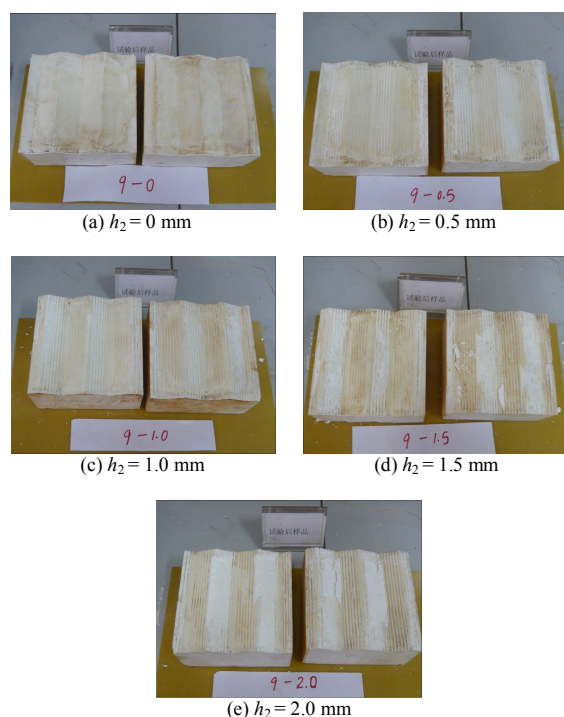


图9 节理破坏类型

Fig.9 Failure modes

5 结 论

(1) 二阶起伏体对节理剪切强度有贡献, 在低法向应力下, 节理剪切强度随二阶起伏体高度的增加而增加。

(2) 含二阶起伏体节理的剪切强度特征不同于只含有一阶起伏体的节理剪切强度特征。剪应力曲线可以 3 个类型, 只含有一阶起伏体的节理剪应力只有一个峰值, 而含二阶起伏体的节理剪应力则有两种可能, 当二阶起伏体高度不大时, 节理剪应力出现多个明显的峰值, 峰值剪应力逐个减小, 且随着二阶起伏体高度增大而衰减加快; 当二阶起伏体高度较大时, 节理剪应力只有一个明显的峰值。

(3) 节理剪胀曲线可以分为压缩滑移阶段、扩容阶段。各曲线的差别主要体现在扩容阶段, 只含有一阶起伏体节理扩容阶段曲线为一直线; 当二阶起伏体高度不大时, 节理扩容阶段曲线开始呈波浪状上升; 二阶起伏体高度较大时, 节理扩容阶段曲线基本为一条直线。

(4) 节理的破坏特征分为磨碎破坏、磨损破坏、剪断破坏, 节理破坏特征和剪切强度、变形特征相对应。二阶起伏体越大, 剪断体积越大, 需要克服剪切阻力越大。含二阶起伏体节理的剪断有多次性剪断和一次性剪断 2 种类型, 当二阶起伏体尺寸不大时, 节理发生多次剪断, 剪断体积逐步减小, 节理表面残存有沟槽; 当二阶起伏体高度较大时, 二阶起伏体几乎一次性从根部剪断, 无残存沟槽。

参 考 文 献

- [1] SAEB S. Effect of boundary conditions on the behavior of a dilatant rock joint[D]. Boulder: University of Colorado at Boulder, 1989.
- [2] HABERFIELD C M, JOHNSTON I W. A mechanistically-based model for rough rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(4): 279-292.
- [3] 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.
- [4] 赵坚. 岩石节理吻合系数及其对节理特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(6): 514-521.
ZHAO Jian. Joint matching coefficient and effects on behavior of rock joint[J]. *Chinese Journal of Rock*

- Mechanics and Engineering**, 1997, 16(6): 514—521.
- [5] 赵坚. 岩石节理剪切强度的 JRC-JMC 新模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 349—357.
ZHAO Jian. A new JRC-JMC shear strength criterion for rock joint[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(4): 349—357.
- [6] JIANG Y, 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.
- [7] 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 Gang, JIANG Yu-jing, WANG Wei-ming, 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.
- [8] PLESHA M E. Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1987, 11(4): 345—362.
- [9] JING L, STEPHANSSON O, NORDLUND E. Study of rock joints under cyclic loading conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1993, 26(3): 215—232.
- [10] 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 and Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(3): 257—269.
- [11] 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 and Mining Sciences**, 2001, 38(7): 967—980.
- [12] 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 Qing-song, DU Shou-ji. Shear tests on rock joints under different shear deformation histories[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 850—855.
- [13] 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 Hai-bo, FENG Hai-peng, LIU Bo. 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.
- [14] 李海波, 刘博, 冯海鹏, 等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1741—1746.
LI Hai-bo, LIU Bo, FENG Hai-peng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1741—1746.
- [15] 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 Ming-rong, ZHANG Qing-zhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2435—2440.
- [16] 彭从文, 朱向荣, 王金昌, 等. 基于 Plesha 本构的岩石节理多层结构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2059—2071.
PENG Cong-wen, ZHU Xiang-rong, WANG Jing-chang, et al. A hierarchical model of rock joints based on Plesha's constitutive model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2059—2071.
- [17] 刘博. 节理面循环剪切特性研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [18] 夏才初. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [19] 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**, 1996, 33(4): 371—386.
- [20] 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.
- [21] BELEM T, HOMAND F, SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2000, 33(4): 217—242.
- [22] JAFARI M K, AMINI H K, 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.
- [23] YANG Z Y, DI C C, YEN K C. The effect of asperity order on the roughness of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(5): 745—752.