

不同位置和尺寸的裂隙对岩体破坏影响的试验研究

周 辉, 孟凡震, 张传庆, 卢景景, 徐荣超

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为研究节理裂隙岩体中节理位置和尺寸对岩体综合抗剪强度的影响, 以水泥砂浆作为模型材料, 通过在试件的不同位置预制相同长度的节理裂隙和相同位置预制不同长度的节理裂隙, 进行不同法向压力下 3 种具有不同起伏角的节理面剪切试验。试验结果表明: 当节理位置和长度一定时其抗剪强度随法向压力增加而增加; 对于同一节理裂隙, 当其位于试件中间时抗剪强度和黏聚力最小, 位于试件后端时抗剪强度和黏聚力最大, 位于试件前端时介于两者之间; 内摩擦角随节理位置的变化规律不明显; 当节理裂隙位置固定时, 节理裂隙越长, 抗剪强度和黏聚力越低, 且抗剪强度随节理长度的增加呈近乎线性的减小。节理位置和尺寸对综合抗剪强度的影响可能由于节理、岩桥的强度参数及岩桥内部损伤劣化程度共同作用所致, 现场节理岩体的抗剪强度取值应考虑节理的位置影响。

关键词: 岩石力学; 节理裂隙; 节理位置; 尺寸; 抗剪强度; 岩桥劣化

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)增 1-3018-11

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF JOINTS WITH DIFFERENT LOCATIONS AND SIZES ON ROCK FAILURE

ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, LU Jingjing, XU Rongchao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In order to study the effects of joint location and size on comprehensive shear strength of rock mass, cement mortar is selected as model material and specimens were prepared with prefabricated joints of the same size at different locations and with joints of various sizes at the same location, and shear tests were conducted under various normal stress of 3 different joints undulating angles. Experimental results indicate that shear strength increases with the increase of normal stress when the location and size of the joint are definite, and when the joint is located in the middle of the specimen, the shear strength and cohesion are the lowest, while largest when the joint is located at the back and fall in between them when located in the front of the specimen, but change law of the internal friction angle with different joint location is not obvious. When the joint location is definite, the longer the joint the lower the shear strength and cohesion. Moreover, shear strength of joint decreases linearly with increase of joint length. Effects of joint location and size on comprehensive shear strength of rock mass may be decided by both the strength parameters of joint and rock bridge and damage degradation of rock bridge. Position of joint should be considered when shear strength of in-situ jointed rock mass is estimated.

Key words: rock mechanics; rock joint; joint location; size; shear strength; rock bridge degradation

收稿日期: 2014-03-24; **修回日期:** 2014-07-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046902); 中国科学院科技创新“交叉与合作团队”(人教字(2012)119 号); 国家自然科学基金资助项目(41172288)

作者简介: 周 辉(1972-), 男, 1994 年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0336

1 引 言

作为一种天然形成的地质体，岩体由各种节理裂隙和被裂隙切割成的岩块组成。众多研究成果表明，无论是压应力、拉应力或剪应力状态下，岩体最容易从裂隙尖端起裂、扩展、分叉和贯通从而发生失稳破坏。因此裂隙岩体的基本特性、破坏机制和力学模型等的研究对正确合理的评价岩体质量、保证岩体工程的安全稳定性具有重要意义。

调查发现，水电隧洞、地下厂房、岩质边坡等岩体内不仅广泛存在贯通的节理裂隙，还有大量的非贯通裂隙(节理、结构面、层面等)，如图 1^[1]所示。岩桥与裂隙面相互作用，共同承担岩体中的应力。虽然现场原位试验是研究节理裂隙力学性质最直接的方法，试验结果可以直接应用，但由于工程现场岩体中的裂隙(原生结构面、次生结构面、节理、层理、断层)往往随机分布，位置、产状、尺寸不一，且具有不连续性(断续分布的，结构面—岩桥组成)和不均匀性(硬性结构面、软弱结构面、不同类型)的特点，造成试验成本高、周期长和结果离散性大。模型试验是指利用与岩石性质相似的类岩石材料(石膏、水泥砂浆等)代替岩石进行试验，可以根据研究目的设计不同的试验条件，如裂隙尺寸、位置、倾角、间距和外力等，定性或半定量获得裂隙岩体的破坏规律或参数，指导现场施工。

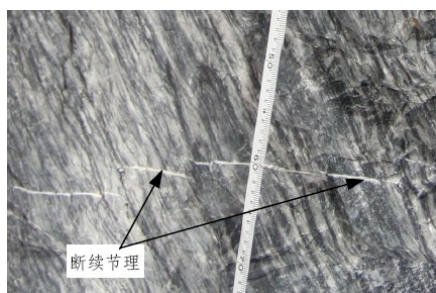


图 1 现场断续节理照片^[1]

Fig.1 Photo of intermittent joint^[1]

对于由岩桥和节理组成的岩体的强度、变形等性质的研究主要通过压缩试验和剪切试验进行。白世伟等^[2]利用砂、石膏作为相似材料，研究了平面应力条件下含 2 种分布形态闭合断续节理试样的变形和强度破坏特征，发现翼裂纹起始点的切线方向与节理面夹角(起裂角) $68^{\circ} \sim 81^{\circ}$ ，且逐渐转向最大主应力方向，含节理试样的变形破坏过程经历了线弹

性、节理面错动、节理尖端起裂和岩桥贯通失稳 4 个阶段。朱维申等^[3]利用模型试验研究了双轴压力作用下雁行裂纹在不同水平压力、倾角和间距等条件下的开裂角、起裂荷载、岩桥贯通机制等，研究表明随水平压力及裂纹水平距离垂直距离的增加，裂纹起裂荷载、贯通荷载和临界失稳荷载增大，岩桥的破坏方式有剪切破坏、拉剪复合破坏和翼裂纹扩展破坏。张平等^[4]研究了单轴压缩下不同应变速率的含裂隙类砂岩的力学特性，发现随加载速率增加，裂隙砂岩初始压密段不再明显，弹模与无裂隙试样接近；随裂隙试样内裂隙数目的增加，应力的跌落次数越多；含 2 条共面裂隙试样强度随岩桥倾角增大先增后减，35°时达到最小；裂隙数目多的试样不一定比裂隙数目少的试样强度低，试样强度取决于对破坏起控制作用的裂隙。

在非贯通节理的剪切试验研究方面，E. Z. Lajai^[5-6]对内部含 2 条与剪切方向平行节理的石膏试样进行不同法向应力下的直剪试验，发现非贯通节理岩体的初裂方向与剪切方向并不一致，而是存在一定倾角，随法向应力大小不同岩桥的破坏有拉破坏、剪破坏以及拉剪复合破坏 3 种机制。T. Savilahti 等^[7]进行了不共面非贯通节理直剪试验，发现对于含 2 条与剪切方向平行的节理试样，分别从 2 条节理距离较近端部开始破坏，在与节理面接近垂直的方向扩展并最终贯通。白世伟等^[8]研究了不同节理连通率、节理排列方式、正应力下闭合断续节理剪切面的变形和强度特性，发现随连通率减小，峰值剪力、残余剪力、剪切刚度、剪切模量、峰值剪切位移、剪胀位移等都增大。任伟中等^[9]建立了共面闭合断续节理的起裂强度和贯通破坏强度准则，指出控制试件中节理尖端发生初裂的因素是节理长度及其抗剪强度参数、传压系数等节理面的几何和力学特性及岩桥材料的压剪断裂韧度。张庆伦等^[10]利用水泥砂浆材料研究了断续倾斜节理剪切时的破坏特征，提出类岩石断续裂纹试样破坏可分为 4 个阶段：破裂前期、裂纹扩展期、裂纹滑移期和岩桥破坏期，剪应力作用下岩桥呈锯齿形破坏。胡波等^[11]利用模型试验研究了 3 种节理连通率(0, 50%, 100%)节理的强度特征，认为每种连通率的节理其峰值剪应力和残余剪应力随法向压力增大而增大，同一法向应力下随连通率变大峰值剪切强度都减小，黏聚力对连通率的变化更敏感。相同条件下两边分布的节理强度大于集中的中间分布的节理。

陈洪凯和唐红梅^[12]对 11 种贯通率的单条预制节理砂浆试件进行直剪试验, 获得了 c , φ 值与贯通率之间的非线性试验曲线, 并采用二次多项式进行了拟合。刘顺桂和刘海宁^[11]用 PFC^{2D} 模拟了直线型断续节理的模型试验, 对断续节理预剪面上随剪应力的演化过程做了分析, 指出无论是节理面还是岩桥, 剪切过程中其剪应力、压应力不均匀分布, 岩桥上的剪应力和压应力要远高于节理面上的应力状况; 随连通率增大, 黏聚力显著下降。刘远明和夏才初^[13-14]通过分析非贯通闭合节理的破坏机制, 提出了含起裂角的共面闭合非贯通节理岩体贯通破坏强度准则。唐志成等^[15]认为 Jennings 强度准则计算值与断续节理岩体实测强度值并不能完全对应, 修正提出了考虑岩桥弱化的强度准则。

对于剪切作用下断续节理力学特性、贯通模式和破坏机制等方面的研究, 采用平直节理研究的居多, 粗糙节理相对较少。虽然前人也开展了诸多不同连通率的节理力学参数的研究, 但试件中的节理位置往往比较随机。对于同一节理位于岩体内的不同位置、相同位置具有不同长度的节理对岩体力学特性并没有开展系统的研究。实际工程中, 有的节理裂隙面可能随着开挖被揭露出来, 而有的节理裂隙可能没有被揭露出来, 蕴藏在洞周围岩内部但在集中应力作用下, 节理与洞壁之间的岩桥可能慢慢破裂使节理贯通并发生滑移。针对这种现象本文采用模型试验开展了具有一定起伏角度的同一节理裂隙位于试件中不同位置和相同位置具有不同的节理裂隙长度的含断续节理试样的直剪试验研究, 以期试验成果可以加深人们对断续节理裂隙岩体力学特性的理解, 并为现场施工提供参考和指导。

2 试验准备

2.1 试件制备及试验设备

采用石英砂和水泥作为模型材料, 两者质量比为 1 : 1。将称量好的石英砂和水泥拌和均匀后, 加适量的水搅拌, 至完全均匀后将混合料分层倒入边长为 15 cm 的立方体磨具中, 每倒入一层都要用夯实锤夯实。待浇筑完成 3~4 h 后, 在预定位置插入提前制作好的具有不同起伏角的薄铁片(铁片厚度为 0.3 mm), 并拔出。一天后拆模, 加水养护试件 30 d, 然后进行试验。为测试所采用配比的模型材料的力学性质, 同时制作了 4 块完整正方体试件, 其中一块用来钻孔取芯测试材料的单轴抗压强度,

其他 3 块用来做直剪试验。所制作的含节理裂隙的试件分别如图 2 所示, 3 块试件中的裂隙长度都为 9 cm, 裂隙起伏角分别为 0°, 30° 和 45°。



图 2 含 3 种不同起伏角的预制裂隙试件

Fig.2 Specimens with prefabricated joints of different undulating angles

试验在中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的 RMT-150C 试验机上进行。该系统垂直液压缸最大出力为 1 000 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。剪切试验时上剪切盒固定, 通过水平液压缸拉动下剪切盒前进对试件施加剪力。

2.2 试验方案及试验过程

根据试验目的, 本研究设计了 2 种试验方案, 分别研究相同节理裂隙在模型试件的不同位置对其破坏的影响和不同长度的节理裂隙在试件内部相同位置时对其破坏的影响。第一种方案将节理分别设置在试件前端、中间和后端, 节理与试件的相对位置如图 3 所示, 对每种情况施加 100, 200 和 300 kN 法向压力并以一定速率进行直剪。通过第一种方案的试验获了了节理的位置效应对岩体强度、变形等破坏力学行为的影响后, 开展第二种方案的试验, 即固定节理裂隙的位置(本次研究将节理预制在试件的前端, 分别进行节理长度为 3, 6, 9 和 15 cm(贯通节理))的直剪试验, 研究节理裂隙尺寸对其破坏机制的影响, 含有不同长度的节理试件如图 4 所示。为研究节理粗糙度对其强度等的影响, 上述 2 种试验方案都包括 3 种不同粗糙度节理的试验, 分别为平直节理、30° 起伏角和 45° 起伏角。

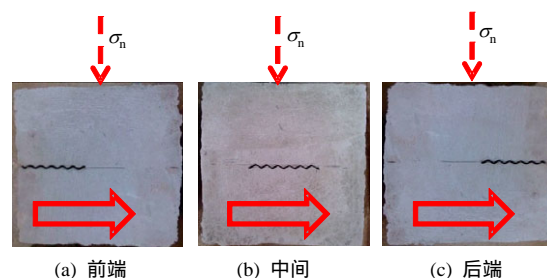


图 3 同一节理位于试件内不同位置的直剪试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of shear tests with the same joint at different locations

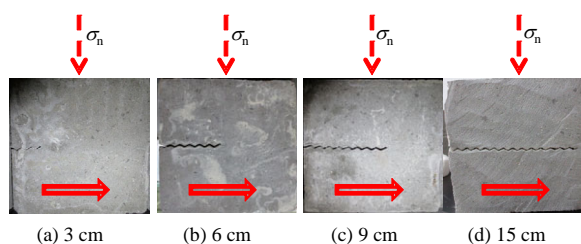


图 4 相同位置不同节理长度的直剪试验示意图

Fig.4 Schematic diagram of shear tests with different joint length at the same location

试验中先施加法向压力到预定值，再以 1 kN/s 的剪切速率施加剪力，直至试件破坏。

3 试验结果

3.1 所用水泥砂浆材料的力学性质

通过对钻取的 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准试样进行单轴压缩测试，获得该种配比下的试样的单轴压缩强度为 48.95 MPa，由图 5 可知此种配比的材料具有一定的脆性，可用来模拟岩石。利用完整试件进行法向压力为 100, 200 和 300 kN 的剪切试验，测得该种配比的试件抗剪强度参数为：黏聚力 c 为 8.3 MPa，黏摩擦角 φ 为 37.2° 。

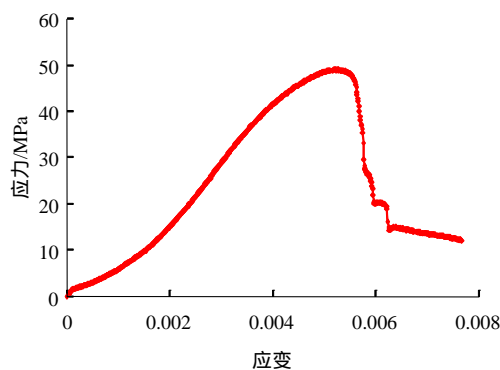


图 5 所用水泥砂浆材料的单轴压缩应力-应变曲线

Fig.5 Uniaxial compression stress-strain curve of the selected cement mortar

3.2 节理裂隙试件的破坏形态

在每一块试件剪切破坏后，详细观察和记录了其破坏形态，发现对于含平直节理面的试件，主要包括节理面的摩擦滑移和岩桥的剪断破坏，而对于含起伏角的节理裂隙岩体，除了包括锯齿的剪断磨碎和岩桥的剪断破坏，节理面上上下盘岩体还有拉伸断裂产生。图 6(a)为含 6 cm 平直节理的试件在法向压力为 100 kN 时的破坏照片，可见在节理面上有明

显的白色擦痕，岩桥部分具有凹凸不平的剪断面，但上下盘岩体中并没有其他裂缝出现。图 6(b)为含 6 cm、 45° 起伏角的裂隙面位于试件中间时在法向压力为 200 kN 作用下的破坏后的照片。从图 6(b)中第一幅图可见试件上下盘上有多条裂隙面，有的延伸至试件顶端或底面，有的延伸一定长度后则停止扩展。掰开裂隙面后内部干净无粉末为明显的拉伸断裂面，箭头方向为下盘剪切滑动方向，可见拉伸裂缝与剪切方向以锐角斜交。由于含平直节理面试件并没有出现这种倾斜的拉伸断裂，可以断定该种破坏形态是由具有一定尺寸和强度的起伏体在压-剪应力作用下，微裂纹从起伏体根部起裂并在拉应力作用下形成。



(a) 含 6 cm 长的平直节理在 100 kN 压力下的破坏形态

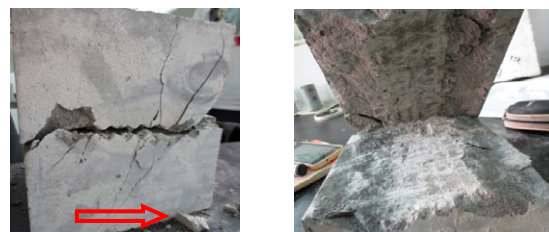
(b) 含 6 cm 长、 45° 起伏角的节理在 200 kN 压力下的破坏形态

图 6 含节理裂隙试件剪切后的破坏形态

Fig.6 Typical failure morphologies of the joint specimens after shearing

3.3 不同节理裂隙位置的岩体强度特征

图 7 为起伏角度为 45° 、 30° 和 0° 时，不同位置处的岩体抗剪强度随法向应力的变化规律。分析图中曲线可知，平直结构面的强度随法向压力的变化规律性最好， 30° 结构面次之， 45° 结构面规律性略差。综合图 7 可以获得如下的规律：随法向压力增加，三种粗糙度下的每种节理位置的剪切强度均近乎线性增大(少数个别点除外)，当节理裂隙面在岩体试件中间位置时，其综合抗剪强度最低，位于后端时强度最高，位于前端时强度介于上述两者之间。

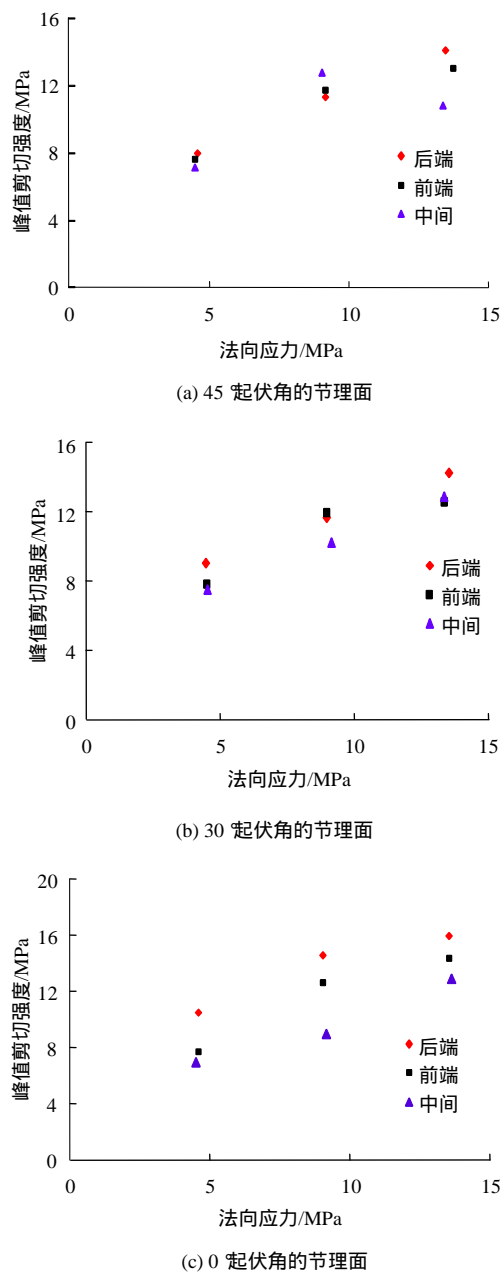


图 7 3 种不同起伏角的节理裂隙面抗剪强度随法向压力的变化规律

Fig.7 Change law of shearing strength of three different undulating angles of joints with normal pressure

表 1 为通过对每种粗糙度下不同位置的节理抗剪强度与法向应力进行线性拟合，获得的每种情况下的抗剪强度参数。从图 7 可知除个别数据外，大部分强度参数都符合线性的莫尔－库仑强度准则。

由于黏聚力和内摩擦角分别对应拟合的直线的截距和斜率，因此拟合直线的位置和形态对两者的取值会产生很大影响，通过强度参数拟合的线性越强，得到的结果越准确，峰值剪切强度值偏离线性越多，结果可能越不准确。为了更直观地比较表 1

表 1 不同位置条件下节理裂隙面的抗剪强度参数

Table 1 Shear strength parameters of the joints under different conditions of joint position

粗糙度/(°)	位置	截距	斜率	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$
45	前端	5.477 4	0.590 9	5.48	30.58
	中间	5.339 2	0.414 6	5.33	22.60
	后端	4.938 4	0.692 8	4.93	34.71
30	前端	6.031 5	0.537 7	6.03	28.30
	中间	4.769 8	0.608 4	4.77	31.30
	后端	6.532 8	0.575 0	6.53	29.90
0	前端	4.904 3	0.743 1	4.90	36.60
	中间	3.756 6	0.650 0	3.76	33.00
	后端	8.211 4	0.610 4	8.20	31.40

中不同条件下的剪切强度参数，作出每种粗糙度下强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随位置的变化曲线，如图 8 所示。其中横坐标 1, 2, 3 分别表示节理在试件的中间、前端和后端。分析图 8 可知，对于起伏角为 0° 和 30° 的节理，黏聚力与前述的峰值剪切强度具有一致的变化趋势，即节理位于试件中间时最低，位于后端时最高，位于前端时居中，由于 45° 节理时强度参数随法向压力变化的规律性不好，有的试件偏差较大，如对于位于中间的强度拟合曲线是剔除 200 kN 压力后作出了，鉴于此，45° 倾角的节理时黏聚力随位置变化的规律性不好是可以理解的。另外从图 8 还可以看出，内摩擦角随节

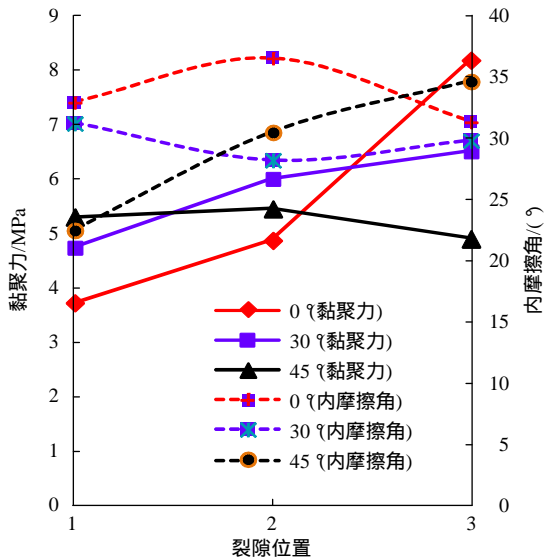


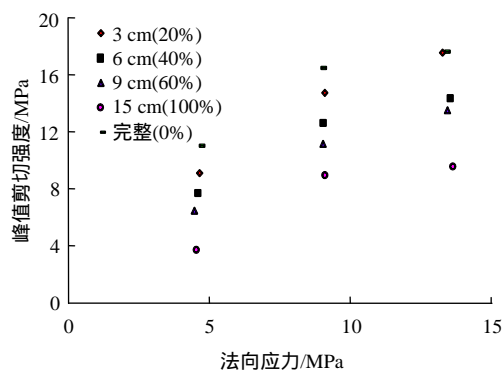
图 8 3 种不同起伏角的节理裂隙面的黏聚力和内摩擦角随裂隙位置的变化规律

Fig.8 Change law of cohesion and internal friction angle of different undulating angles and joints with different joint positions

理位置的变化规律不明显,除 45° 起伏角时内摩擦角具有中间 < 前端 < 后端外(与峰值剪切强度具有一致的变化趋势),其他的变化规律不明显,还有待于进一步研究。

3.4 不同节理裂隙尺寸的岩体强度特征

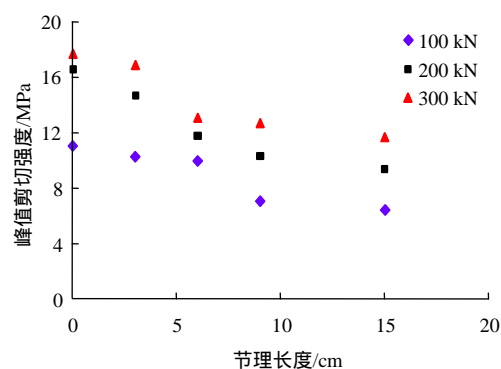
节 3.3 主要分析了在剪切方向和剪切位置相同时,某条相同的节理裂隙分别位于试件前端、中间和后端时的峰值剪切强度、黏聚力和内摩擦角随位置的变化规律,本节则具体分析当节理裂隙面位置固定但长度不同时的强度变化规律,本次试验将节理裂隙预制于试件的前端,如图 4 所示,分析比较了三种起伏角度下,完整试件和带有 3, 6, 9 cm 和贯通裂隙的试件(对应的连通率分别为 0, 20%, 40%, 60%, 100%)在三级法向压力下强度的变化规律,如图 9 所示,图 10 为以节理长度为横坐标,峰值剪切强度为纵坐标,在三级法向压力下的强度随节理长度的变化规律。分析图 9, 10 可知,随法向压力增加,3 种粗糙度下的每种节理长度的剪切强度均近乎线性增大,除少数个别试件外均符合线性的莫尔-库仑强度准则。随节理长度的增加,试件的峰值剪切强度以近似线性的规律减小(30° 起伏角时贯通节理在 100 和 300 kN 的偏差较大除外)。



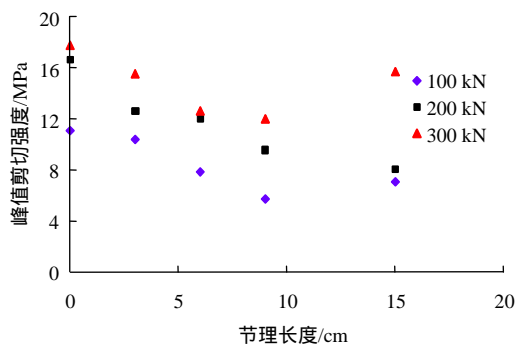
(c) 0° 起伏角的节理面

图 9 3 种不同起伏角的节理裂隙面抗剪强度随法向压力的变化规律

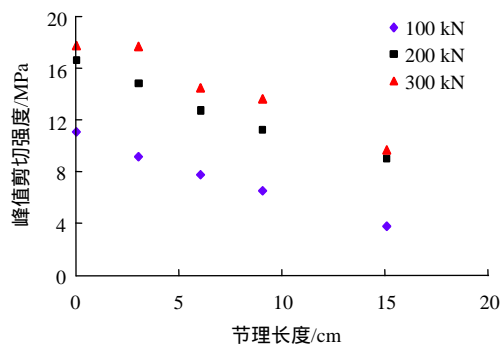
Fig.9 Change law of shearing strength of three different undulating angles of joint with normal pressure



(a) 45° 起伏角的节理面



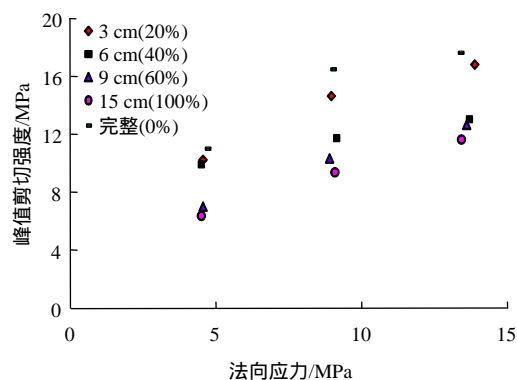
(b) 30° 起伏角的节理面



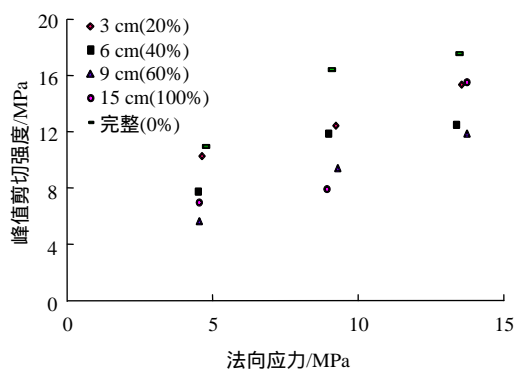
(c) 0° 起伏角的节理面

图 10 试件剪切强度随节理长度的变化曲线

Fig.10 Change law of shearing strength of three different undulating angles of joint with different joint lengths



(a) 45° 起伏角的节理面



(b) 30° 起伏角的节理面

表 2 为图 9 中各个起伏角度的节理裂隙抗剪强度值和法向应力拟合获得线性的莫尔强度包络线，得到的不同工况下的抗剪强度参数。

表 2 不同节理裂隙长度条件下节理面抗剪强度参数
Table 2 Shear strength parameters of the joints with different lengths

粗糙度/(°)	长度/cm	截距	斜率	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$
45	0	8.304 0	0.757 9	8.30	37.16
	3	7.588 0	0.698 8	7.59	34.95
	6	5.477 4	0.590 9	5.48	30.58
	9	4.476 7	0.620 0	4.48	31.80
	15	3.896 1	0.590 2	3.90	30.55
30	3	7.623 7	0.569 8	7.62	29.67
	6	6.031 5	0.537 7	6.03	28.27
	9	2.869 4	0.680 1	2.87	34.22
	15	1.758 3	0.941 8	1.76	43.28
0	3	5.005 5	0.985 0	5.00	44.57
	6	4.904 3	0.743 1	4.90	36.62
	9	3.371 8	0.787 2	3.37	38.21
	15	1.627 0	0.644 5	1.63	32.80

同样为了比较方便，以节理长度为横坐标，以黏聚力和内摩擦角为纵坐标作出图 11。每种节理长度对应的抗剪强度参数 c 、 φ 随节理长度的变化曲线，为便于比较，也把完整试件的 c 、 φ 绘于图中。分析图 11 可知，无论哪种粗糙度的节理，随节理长度增加，黏聚力均减小，贯通节理的黏聚力最低，但并不为 0。内摩擦角 φ 的变化规律并不如黏聚力那么明显和有规律性：45°起伏角度的节理面， φ 随节理长度增加而减小；30°起伏角度的节理面 φ 则是先减小后增大；平直节理面的 φ 除了 3 cm 节理长度时稍外，其他长度节理的 φ 同样随节理长度增加

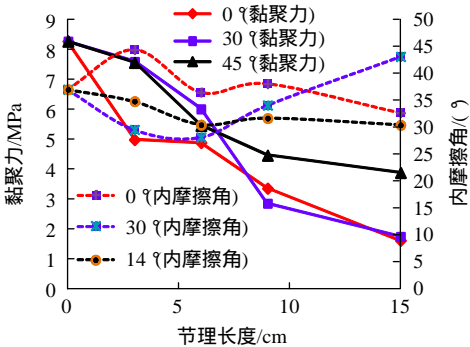


图 11 3 种不同起伏角的节理裂隙面黏聚力和内摩擦角随节理长度的变化规律

Fig.11 Change law of cohesion and internal friction angle of joints with different undulating angles and different lengths

而减小。总体来看，内摩擦角随节理长度有减小的趋势，但减小的幅度较小。

通过位于试件前端的峰值剪切强度、黏聚力和内摩擦角随节理裂隙长度的变化规律，不难推断当裂隙位于试件中其他位置时也应具有相同或相似的规律。

3.5 不同节理粗糙度的岩体强度特征

无论从前人的直剪试验结果还是理论分析可知，在其他条件相同时，节理粗糙度越大，结构面岩体直剪强度越高。通过分析同种裂隙位置或裂隙尺寸，同一法向压力下，3 种不同粗糙度节理的剪切强度发现，有的试验结果符合上述规律，如当节理位于试件前端时，在 100 kN 法向压力下，45°、30°和 0°起伏角度的节理峰值剪切强度分别为 9.99、7.87 和 6.99 MPa；有的试验结果部分符合，如在 200 kN 法向压力的上述条件下，3 种节理的剪切强度分别为 11.8、11.9 和 9.01 MPa，前两者强度随都大于平直节理的，但它们本身却差别很微小，也有的情形部分符合但差别略大。通过分析图 8 和图 11，同一位置或相同尺寸的节理裂隙的抗剪强度参数 c 、 φ 值随节理粗糙度的变化规律同样有的试验结果符合上述理论规律，也有的结果只是部分符合，如图 11 中 45°起伏角的节理的黏聚力在相同节理长度时均大于平直节理的；30°起伏角的节理黏聚力除了 9 cm 长度外，其他长度下的节理中也大于平直节理。内摩擦角随节理粗糙度的变化则更复杂，没有什么明显的规律。

对于本次试验中节理的峰值剪切强度及其抗剪强度参数随节理粗糙度的变化情况与常识的理论分析并不完全一致，主要有如下原因：试验中的节理裂隙面是通过在试件中插入具有一定起伏角度的薄铁片，然后拔出形成的。如果铁片过早插入试件中，水泥砂浆因水分还较多呈一定流塑态，拔出铁片时容易将铁片周围砂浆带出，即使能够形成的规整的裂隙面也可能继续闭合。如果铁片在试件内停留时间太久，铁片则会完全拔不出来。本次试验是在立方体试件浇筑完后接近 4 h 后将铁片插入预定位置并接着拔出形成的，此时砂浆基本初凝不再流动，铁片也不易带出附近的砂浆。但由于铁片具有一定厚度，预制的裂隙也会有一定的开度，不能保证预制裂隙面 100% 的达到闭合，而且本试验所采用的水泥砂浆材料强度高、施加的法向压力相对较小，最大压力仅为单轴强度的 27%，施加法向压力后可能

有的裂隙并没有完全闭合，因此粗糙节理的摩擦强度可能没有完全发挥出来，这可能是造成本次试验内摩擦角偏小的一个原因。另一方面砂浆初凝后具有一定强度，预制裂隙越长，铁片越不容易插入，插入过程中可能部分偏离预制位置，造成预制的节理裂隙面不完全在剪切面上，这也是可能造成试验结果产生误差的原因。

4 岩体强度的节理位置和尺寸效应分析

断续节理岩体的剪切强度由岩桥和节理共同承担。在剪切力作用下，节理部分具有向前滑动的趋势，但由于节理面本身的抗剪切能力和前端岩桥的存在限制节理面的向前滑动。随着剪应力的不断增加，节理与岩桥交界处产生很大的拉应力集中，当应力强度因子达到砂浆材料的断裂韧度时，裂隙尖端裂纹起裂，并逐渐扩展，最终剪应力达到岩体的综合剪切强度，试件发生失稳破坏。基于 Mohr-Coulomb 准则的 Jennings 准则是目前应用较为广泛的确定断续节理岩体综合抗剪强度的公式。该准则认为岩体综合剪切强度有岩桥和节理的剪切强度承担，而各自的贡献值则通过节理连通率进行加权平均求的，计算公式如下：

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \tag{1}$$

$$c = kc_j + (1 - k)c_b \tag{2}$$

$$\tan \varphi = k \tan \varphi_j + (1 - k) \tan \varphi_b \tag{3}$$

式中： τ 为剪应力， σ_n 为法向正应力， c 为加权平均黏聚力， φ 为加权平均内摩擦角， c_j 为节理面的黏聚力， c_b 为岩桥的黏聚力， φ_j 为节理面的内摩擦角， φ_b 为岩桥的内摩擦角， k 为节理的连通率。

夏才初等^[16]通过进行具有不同起伏角的非贯通节理的直剪试验，认为采用 Jennings 准则计算的强度参数与实测值并不能完全对应，于是提出了可以考虑岩桥弱化和节理起伏角的修正的 Jennings 强度公式，计算的结果与实测值具有很好的一致性。无论从 Jennings 准则还是修正后的 Jennings 准则均可知，由于完整岩块的黏聚力和内摩擦角都比节理高，岩桥长度占总剪切面长度的比例越大，岩体的综合抗剪强度越高。另一方面，岩桥尺寸越小，应力集中越厉害，内部裂隙越容易形成和扩展，导致岩桥部分黏聚力劣化越严重，因此抗剪强度越低。

然而对于本文所研究的节理裂隙相同但位于试件内不同位置时，无论是 Jennings 准则还是修正后的 Jennings 准则显然都无法从机制上进行解释。按照 Jennings 准则，三种节理裂隙无论位置如何，只要连通率相同，那么岩体的综合剪切强度就是相同的，即本次所研究的 3 种不同节理位置的强度和强度参数应该是相同的。显然试验证明这是错误的。而对于修正的 Jennings 准则或许可以根据试验获得的强度值，重新进行数据拟合，推导出可以表示某一位置下断续节理综合强度的数学表达式，但却无法考虑位置效应，也无法从破坏机制上给出解释。数值模拟方法可以方便直观地研究节理和岩桥内部受力和变形情况，获得岩桥内应力集中程度和损伤演化规律，因此对于同一节理位于试件内不同位置导致强度差异的机制解释可以通过数值方法获得。为定性分析本次试验中当节理裂隙分别位于试件前端、中间和后端时对岩体强度影响的内在机制，采用 FLAC^{3D} 数值分析软件建立了平面应变模型(0.15 m×0.15 m×0.01 m，网格个数分别为 30×30×1)，采用 interface 命令建立长度为 0.06 m 的平直接触面代表本次研究的平直节理，采用应变软化的莫尔-库仑屈服准则，数值计算所采用的参数均为本次试验实测所得，如表 3 所示。其中， ρ 为密度， K 为体积模量， G 为剪切模量， c_0 为初始黏聚力， φ_0 初始内摩擦角， c_t 为残余黏聚力， φ_t 为残余内摩擦角， σ_t 为抗拉强度，接触面的黏聚力的内摩擦角采用试验获得的平直节理面强度参数值，黏聚力和内摩擦角分别为 1.63 MPa 和 32.8°。

表 3 模型中试件采用的力学参数

Table 3 Mechanical parameters adopted in the model

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	K / GPa	G / GPa	c_0 / MPa	$\varphi_0 / (^\circ)$	c_t / MPa	$\varphi_t / (^\circ)$	σ_t / MPa
2.35	9.09	7.69	8.3	37.16	2.9	26.75	2.3

图 12 为当节理位于试件前端时的数值模型及边界条件。当节理位于中间和后端时边界条件与位于前端时相同，即法向均施加 100 kN 压力(本次计算仅考虑这一种情况)，下盘左侧施加推力(为简化计算采用位移控制方式，加载速率为 0.002 5 mm/s)，上盘右侧限制水平方向运动，下盘底面限制竖直方向运动，固定整个模型 y 方向位移边界。图 13 为设定计算时步 1 000 步时不同节理位置的塑性区的分布，可见此时节理位于试件前端时塑性区网格数目最多，位于后端时最少，仅在裂隙尖端处 4 个单元

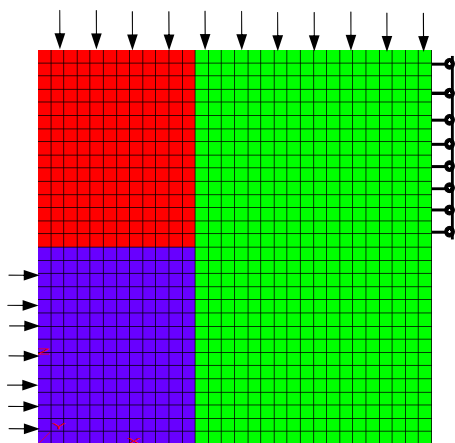


图 12 数值模型及边界条件(节理在前端)
Fig.12 numerical model and its boundary conditions(when the joint is in the front of the specimeh)

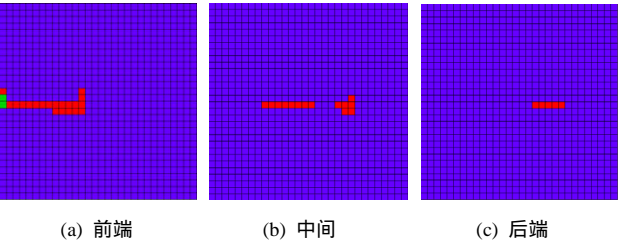


图 13 节理分别位于试件前端、中间和后端时塑性区分布
(加载步为 1 000)
Fig.13 Distribution of the plastic zone when joint is located in the front ,middle and back of the specimen(step 1 000)

达到塑性状态；而当节理位于试件中央时，在节理的两个端部都产生了塑性区，但整体数量少于节理位于前端时。可见在剪应力作用下，3 个试件都是在裂隙尖端处由于应力集中作用达到屈服状态。

图 14 为当加载步数为 3 000 步时试件上的塑性区分布情况，可见相比于第 1 000 步时，3 个试样塑性区都明显的增加，而且都向节理外的岩桥扩展，此时节理位于试件中间时塑性区已经相互连通，且数目最多。

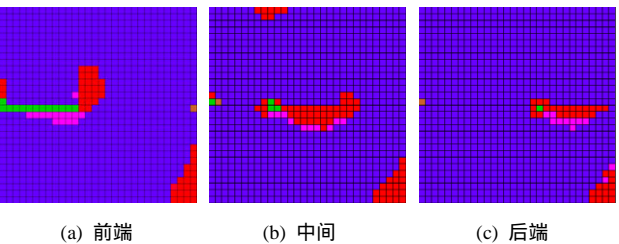


图 14 节理分别位于试件前端、中间和后端时塑性区分布
(加载步为 3 000)
Fig.14 Distribution of the plastic zone when joint is located in the front ,middle and back of the specimen(step 3 000)

表 4 为统计的当计算时步分别为 1 000 ,1 500 , 2 000 , 2 500 和 3 000 时剪切面附近塑性区的单元数量。可见随着加载步数(即剪切应力)的不断增加，三种条件下节理面附近达到塑性状态的单元个数都在增加，但不论加载到何种步数，当节理位于试件后端时塑性区数目总是最少的，这是说明岩桥和节理内的破坏损伤程度是最小的，因为在 6 cm 长的节理左侧有 9 cm 长的岩桥，而岩桥的抵抗剪切破坏的能力大于节理面，剪应力在下盘左侧面施加后，从岩桥传递到节理面，岩桥先将剪应力承担了下来，相当于对其后的节理起到了保护作用。随着加载步数的增加，节理位于试件中部时的塑性单元个数逐渐超过了节理位于前端，从 2 000 步之后，3 种工况下进入塑性状态的单元的个数与试验所得的峰值剪切强度趋势相反：进入塑性的单元数目越多，内部损伤劣化越严重，强度越低。从节理位于试件中央处的塑性区分布可知，塑性区在裂隙的两个尖端分别都在扩展，对岩桥起到了显著的弱化作用，导致其强度最低。

表 4 不同条件下进入塑性状态的单元数目
Table 4 Units number which are being in plastic state under different conditions

计算时步	单元进入塑性区数目/个		
	前端	中间	后端
1 000	22	15	5
1 500	33	31	12
2 000	40	43	19
2 500	46	51	25
3 000	53	55	33

5 讨论与结论

按照节理连通率进行加权平均求得含节理裂隙岩体综合抗剪强度的方法是不准确的，因为通过对含三种粗糙度的节理裂隙在节理长度相同但位于岩体内不同位置时的分析表明，岩体具有不同的强度值，而加权平均法则无法反映这点。同时通过本文的试验结果可知，对于现场节理裂隙岩体，即使有相同的连通率，也可能包括几个不同的布置形式，而节理裂隙位置不同，岩桥内部应力分布和造成的损伤就会有差别，宏观的综合抗剪强度也是不同的，

因此对于评价现场节理裂隙岩体的强度时应考虑节理裂隙的位置影响。

本次研究采用在水泥砂浆材料中预制节理裂隙面的方法制作含节理裂隙的类岩石代替原岩节理,开展了不同节理粗糙度(0° , 30° , 45°)条件下,同一节理(6 cm)位于试件的不同位置(前端、中间和后端)和相同位置不同节理尺寸(0, 3, 6, 9, 15 cm),在三级法向压力(100, 200, 300 kN)作用下的剪切试验,分析研究了不同条件下含裂隙岩体的峰值剪切强度和抗剪强度参数的变化规律及其发生机制,主要获得如下结论:

(1) 当节理位置和长度一定时,峰值剪切强度随法向压力的增加而增加,基本符合线性的莫尔-库仑强度准则。

(2) 对于同一节理裂隙,当其位于试件中间时峰值剪切强度和黏聚力最小,当位于试件后端时峰值剪切强度和黏聚力最大,位于试件前端时介于两者之间,内摩擦角随节理位置的变化规律不明显。

(3) 当节理裂隙位置固定时,节理裂隙越长,峰值剪切强度和黏聚力越低,且峰值强度随节理长度的增加近乎线性的减小,但不同法向压力下减小的速率不同。内摩擦角随节理长度的变化规律不明显,更为复杂,但具有随节理长度增加而变小的趋势。

(4) 节理位置相同时,其长度越大抗剪强度越低,这不仅是由于岩桥和节理抗剪强度参数差异导致,还与岩桥尺寸越小内部应力集中程度和损伤劣化越严重有关。数值计算结果表明,随着加载步数增加,节理位于试件中间时进入塑性状态的单元数目最多,主要由于中间节理对两侧岩桥显著的弱化作用所致。节理位于试件后端时塑性单元数目最少,主要因为岩桥对节理起到一定的保护作用。

(5) 对于现场节理裂隙岩体而言,即使节理连通率相同,由于节理裂隙位置可能不同,其综合抗剪强度也会有差别,因此评价现场节理裂隙岩体的抗剪强度时应考虑节理裂隙的位置影响。

虽然本次研究中对不同粗糙度的节理裂隙的强度特征的试验结果并不完全理想,但并不影响对节理裂隙位置和尺寸对岩体破坏影响规律、特征和机制的分析。本文获得的研究结论对加深断续节理裂隙岩体剪切破坏规律和破坏机制的认识、现场节理岩体强度的合理取值,具有一定指导意义。

参考文献(References):

- [1] 刘顺桂,刘海宁. 断续节理直剪试验与 PFC^{2D} 数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 828–1 836.(LIU Shungui, LIU Haining. Direct shear tests and PFC^{2D} numerical simulation of intermittent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 828–1 836.(in Chinese))
- [2] 白世伟,任伟中,丰定祥,等. 平面应力条件下闭合断续节理岩体破坏机制及强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 635–640.(BAI Shiwei, REN Weizhong, FENG Dingxiang, et al. Failure mechanism and strength properties of rock mass containing close intermittent joints under plane stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 635–640.(in Chinese))
- [3] 朱维申,陈卫忠,申 晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究[J]. 固体力学学报, 1998, 19(4): 355–360.(ZHU Weishen, CHEN Weizhong, SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism study of propagation of echelon pattern cracks[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1998, 19(4): 355–360.(in Chinese))
- [4] 张 平,李 宁,贺若兰,等. 不同应变速率下非贯通裂隙介质的力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 750–755.(ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruolan, et al. Mechanical properties of fractured media containing intermittent fractures at different strain rates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 750–755.(in Chinese))
- [5] LAJAI E Z. Shear strength of weakness planes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1969, 6(7): 499–515.
- [6] LAJAI E Z. Strength of discontinuous rocks in direct shear[J]. Geotechnique, 1969, 19(2): 218–233.
- [7] SAVILABTI T, NORDLUND E, TEPHANSSON O. Shear box testing and modeling of joint bridge[C]// Rock joints: Proceedings of the International Symposium on Rock Joints. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990.
- [8] 白世伟,任伟中,丰定祥,等. 共面闭合断续节理岩体强度特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 10–16.(BAI Shiwei, REN Weizhong, FENG Dingxiang, et al. Research on the strength behaviour of rock containing coplanar close intermittent joints by direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 10–16.(in Chinese))
- [9] 任伟中,王庚荪,白世伟,等. 共面闭合断续节理岩体的直剪强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 167–1 172.(REN Weizhong, WANG Gengsun, BAI Shiwei, et al. Strength behavior of

- rockmass containing coplanar close intermittent joints under direct shear condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003 , 22(10) : 1 167 – 1 672.(in Chinese))
- [10] 张庆伦, 赵延林, 刘 杰, 等. 剪切作用下类岩石断续裂纹岩桥破裂试验与数值分析[J]. 矿业工程研究, 2012 , 27(2) : 31 – 36. (ZHANG Qinglun , ZHAO Yanlin , LIU Jie , et al. Experimental and simulation analysis of fracture of rock bridge under shear pressure[J]. Mineral Engineering Research , 2012 , 27(2) : 31 – 36.(in Chinese))
- [11] 胡 波, 张 楠, 王思敬, 等. 断续节理岩体模型试验及强度分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011 , 7(7) : 657 – 665.(HU Bo , ZHANG Nan , WANG Sijing , et al. Model test and strength analysis research on intermittent joint rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering , 2011 , 7(7) : 657 – 665.(in Chinese))
- [12] 陈洪凯, 唐红梅. 危岩主控结构面强度参数计算方法[J]. 工程地质学报, 2008 , 16(1) : 37 – 41.(CHEN Hongkai , TANG Hongmei. Method for calculating strength parameters of structural planes controlling the rock block stability[J]. Journal of Engineering Geology , 2008 , 16(1) : 37 – 41.(in Chinese))
- [13] 刘远明, 夏才初. 非贯通节理岩体直剪贯通模型和强度研究[J]. 岩土工程学报, 2006 , 28(10) : 1 242 – 1 247.(LIU Yuanming , XIA Caichu. Study on models and strength behavior of rock mass containing discontinuous joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2006 , 28(10) : 1 242 – 1 247.(in Chinese))
- [14] 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) : 2 086 – 2 091.(LIU Yuanming , XIA Caichu. Study on models and strength behavior of rock mass containing discontinuous joints in direct shear[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25(10) : 2 086 – 2 091.(in Chinese))
- [15] 唐志成, 夏才初, 刘远明. 岩桥渐进弱化的 Jennings 抗剪强度准则[J]. 岩土工程学报, 2012 , 34(11) : 2 093 – 2 099.(TANG Zhicheng , XIA Caichu , LIU Yuanming. Modified Jennings shear strength criterion based on mechanical weakening model of rock bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2012 , 34(11) : 2 093 – 2 099.(in Chinese))
- [16] 夏才初, 肖维民, 丁增志. 非贯通节理 Jennings 强度准则的岩桥弱化和节理面起伏角修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2010 , 29(3) : 485 – 492.(XIA Caichu , XIAO Weimin , DING Zengzhi. Modification of Jennings strength criterion for intermittent joints considering rock bridge weakening and joint surface undulating angle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(3) : 485 – 492.(in Chinese))