

基于岩桥力学性质弱化机制的非贯通节理岩体直剪试验研究

刘远明¹, 夏才初^{2, 3}

(1. 贵州大学 土木建筑工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于岩桥力学性质弱化机制, 采用带伺服系统的直剪试验仪进行试验, 在 5 级法向应力下, 对 3 种含齿形节理的非贯通节理岩体进行直剪试验, 研究非贯通节理岩体的强度特性和变形特性。在较低的法向应力下, 含起伏角较低齿形节理面的非贯通节理岩体出现破坏模式 I(张拉破坏模式)。在较高的法向应力下, 含起伏角较高齿形节理面的非贯通节理岩体可能出现破坏模式 II(先张拉后剪切破坏模式)。相同齿形节理面形貌的非贯通节理岩体, 随着法向应力增大, 峰值切向位移增大, 抗剪强度增大。在相同的法向应力下, 随着齿形节理面起伏角增大, 非贯通节理岩体的峰值切向位移减小, 抗剪强度增大。非贯通节理岩体黏聚力按 Jennings 方法计算值大于按试验拟合值; 节理面较粗糙非贯通节理岩体内摩擦角按 Jennings 方法计算值大于按试验拟合值。

关键词: 岩石力学; 岩桥; 节理岩体; 直剪试验; 切向变形; 贯通破坏强度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1467 - 06

RESEARCH ON ROCK MASS CONTAINING DISCONTINUOUS JOINTS BY DIRECT SHEAR TEST BASED ON WEAKENING MECHANISM OF ROCK BRIDGE MECHANICAL PROPERTIES

LIU Yuanming¹, XIA Caichu^{2, 3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on weakening mechanism for rock bridge mechanical properties, at five different normal stress levels, three different rock mass samples containing discontinuous joints which are tooth-shaped asperities have been studied by laboratory shear test. The tests are conducted with electro-hydraulic servo-controlled shear system. The tests are to study both failure mechanism and strength behavior, displacement behavior of rock mass containing discontinuous joints. At lower angle of tooth-shaped asperities and under lower normal stress, the failure model I is found, which is always in tension failure model. However, at higher angle of tooth-shaped asperities and under higher normal stress, the failure model II is found, which is in first tension but final shear failure. Under the same joint appearance, with the normal stress increasing, both the shear strength and the displacement for peak shear strength raised. However, at the same normal stress, with the joint appearance increasing, the displacement for peak shear strength decreased but the shear strength raised. Moreover, all of cohesion calculated based on Jennings' theory is higher than the experimental results. Some of angles of friction calculated based on Jennings' theory are more than the experimental ones.

收稿日期: 2010 - 02 - 27; **修回日期:** 2010 - 03 - 29

基金项目: 贵州大学引进人才科研基金项目(2007045); 国家自然科学基金资助项目(40472142)

作者简介: 刘远明(1975 -), 男, 博士, 1998年毕业于河海大学水资源规划及利用专业, 现任副教授, 主要从事地下结构方面的教学与研究工
作。E-mail: liuyuanming75@sohu.com

Key words: rock mechanics; rock bridge; jointed rock mass; direct shear test; tangential displacement; failure strength

1 引言

岩体是水利、交通、采矿、石油开采等工程广泛遇到的一类复杂工程介质。节理岩体可分为贯通节理岩体和非贯通节理岩体。对非贯通节理岩体，由于岩桥的存在使其受力及破坏特征都发生了质的变化。节理端部应力高度地集中，导致脆性断裂破坏，非贯通节理岩体整体的破坏特征表现为由原生节理和自节理端部扩展的岩桥断面所组成的复合破坏面^[1]。在非贯通节理岩体中，岩桥的贯通破坏模式及其变形和强度特性在很大程度上受非贯通节理面的规模、密度和空间分布特征的控制^[2]。因此，非贯通节理岩体贯通破坏的变形和强度特性研究具有重要的理论意义和工程实用价值。

Jennings 方法(即加权平均法)和 Lajtai 岩桥破坏理论广泛应用于计算非贯通节理岩体抗剪强度。然而，研究表明按 Jennings 方法计算的非贯通节理岩体抗剪强度偏高，按 Lajtai 岩桥破坏理论计算的非贯通节理岩体抗剪强度偏低^[3~7]。

任伟中等^[8]提出了非贯通节理岩体的初裂强度和峰值抗剪强度准则，但因需计算裂纹长度给实际应用带来不便；在对破坏机制研究基础上，进一步探讨了非贯通节理岩体的贯通破坏机制，并提出了修改的非贯通节理岩体的破坏强度准则。任伟中等^[8, 9]注意到在破坏过程中岩桥力学性质的变化，并通过降低岩桥抗剪强度参数反映了岩桥力学性质弱化影响。按任伟中等^[8, 9]提出的强度准则计算的非贯通节理岩体抗剪强度值与白世伟等^[10]的试验值较吻合。尽管前者通过降低岩桥抗剪强度参数反映岩桥力学性质弱化影响，但岩桥力学性质弱化机制及弱化系数需进一步进行试验研究。

基于岩桥张拉破坏、剪切破坏机制，梁作元等^[3, 4, 10, 11]对共面非贯通节理岩体进行了模拟试验研究。沈珠江等^[12~14]注意到了在破坏过程岩体力学性质变化，提出了考虑岩桥力学性质弱化的模型。目前尚鲜见到验证岩桥力学性质弱化的试验研究，因此基于岩桥力学性质弱化机制，进行非贯通节理岩体试验研究具有重要意义。

本文采用带伺服系统的岩体剪切试验机，在 5 级法向应力下，研究 3 种不同形貌的非贯通节理岩体的强度特性和变形特性。本次试验显示在贯通破

坏过程中，非贯通节理岩体的岩桥发生明显变化；节理面粗糙度和法向应力影响非贯通节理岩体的破坏模式，影响抗剪强度及峰值强度位移。

2 非贯通节理试验研究简介

岩石是脆性材料，具有 2 个重要特征：(1) 脆性特性；(2) 剪胀特性。由于非贯通节理岩体采样很困难，而类岩石材料(石膏、水泥砂浆等)可以满足这 2 个脆性材料特征，因此，国内外广泛采用类岩石材料进行试验研究。

本文采用配合比为水泥：砂：水 = 2：3：1 的水泥砂浆模拟岩石材料。本试验的类岩石材料物理力学性质参数见表 1。

表 1 类岩石材料物理力学性质参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of model material

密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
2.1	18.0	1.71	3 700	0.16	3.93	41.6

直剪条件下非贯通节理岩体岩桥力学性质弱化机制可见刘远明等^[15, 16]的研究。本文基于岩桥力学性质弱化机制，分别在 $\sigma_n = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ MPa 法向应力下对非贯通节理岩体直剪试验。起伏角 $\alpha = 0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}$ 的齿形节理面的非贯通节理岩体试样见图 1。

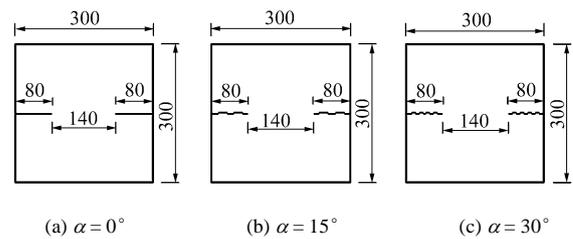


图 1 非贯通节理岩体试样(单位: mm)

Fig.1 Rock mass samples containing discontinuous joints(unit: mm)

直剪试验仪器为同济大学岩土工程重点试验室的岩体直剪试验机。该试验机由主机、液压系统、伺服控制系统、计算机控制及处理系统四大部分组成，可以方便地进行常法向应力、常法向位移下的直剪试验；加载实现了自动化，各项测量数据由计算机自动记录；测量精度高、量程大；控制方便灵活，操作界面友好。在试验过程中，可实时显示法

向、切向荷载和位移的数值, 绘制法向荷载 - 法向变形曲线、切向荷载 - 切向变形曲线、法向变形 - 切向变形曲线。

在非贯通节理岩体的直剪试验过程中, 观察节理端部和岩桥的破坏形态。记录并标记节理端部初始破坏的位置, 记录初裂荷载。在节理稳定扩展贯通过程中, 标记节理扩展路径。当切向变形曲线发生较大偏转时, 即要达到峰值剪切荷载, 注意观察岩桥破坏方式。同时, 采用高像素的数码照相机, 拍摄岩桥的初裂、扩展及贯通破坏的图片。在距岩桥一定距离位置处, 安装与计算机连接的摄像仪监控岩桥破坏过程。

试验结束后, 分析非贯通节理岩体的直剪试验曲线, 并对照试验过程中记录和标记、破坏过程图片, 得到在各法向应力下 3 种齿形节理表面形貌的非贯通节理岩体扩展贯通过程中各阶段的相应强度。

3 非贯通节理岩体直剪试验研究

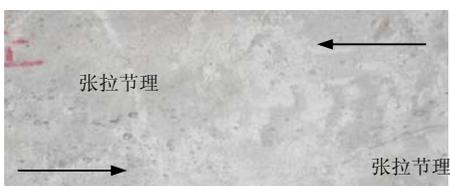
3.1 非贯通节理岩体破坏模式

本次试验观察到非贯通节理岩体两种破坏模式。

(1) 破坏模式 I: 在非贯通节理岩体原节理端部先出现张拉节理(新节理, 下同), 张拉节理沿最大主应力的方向, 呈弧形不断扩展; 当新节理扩展到一定程度时, 在岩桥的中部又出现一条倾斜节理, 且倾斜节理与岩桥的夹角小于 90°; 斜节理扩展一定长度后, 非贯通节理岩体贯通破坏。初裂形成的新节理和后来形成的斜节理表面干净、无碎裂状物质。这说明与扩展方向垂直的方向具有较大的张拉应力, 张拉破坏导致非贯通节理岩体的贯通破坏。

在 $\sigma_n = 1.0 \text{ MPa}$, $\alpha = 0^\circ$ 齿形节理面的非贯通节理岩体进行试验时观察到破坏模式 I(见图 2)。在 $\sigma_n = 0.5 \text{ MPa}$, $\alpha = 15^\circ$ 齿形节理面的非贯通节理岩体进行试验也观察到破坏模式 I。

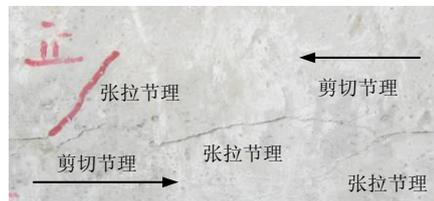
(2) 破坏模式 II: 在原节理端部先出现张拉节理, 张拉节理沿最大主应力的方向扩展; 当新节理扩展到一定程度时, 在岩桥的中部出现一条斜节理, 倾斜节理与岩桥的夹角大于 90°; 斜节理扩展一定长度后, 岩桥贯通破坏。在岩桥中部出现的节



(a) 初始破坏



(b) 扩展破坏



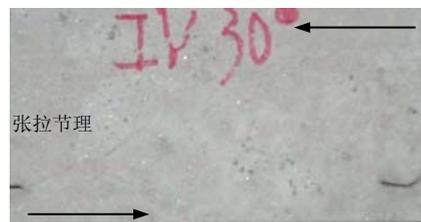
(c) 贯通破坏

图 2 破坏模式 I ($\sigma_n = 1.0 \text{ MPa}$, $\alpha = 0^\circ$)

Fig.2 Failure model I ($\sigma_n = 1.0 \text{ MPa}$, $\alpha = 0^\circ$)

理表面裂隙面有剥离状物质出现, 表面有薄片或碎裂状物质, 且试样破坏后, 形成的剪切节理表面粗糙, 呈台阶状, 具有明显压痕。这说明该节理是剪切破坏形成的新节理。

在 $\sigma_n = 1.0 \text{ MPa}$, $\alpha = 30^\circ$ 齿形节理面的非贯通节理岩体进行试验观察到破坏模式 II(见图 3)。在 $\sigma_n = 1.5 \text{ MPa}$, $\alpha = 30^\circ$ 齿形节理面的非贯通节理岩体进行试验也观察到破坏模式 II。



(a) 初始破坏



(b) 扩展破坏



(c) 贯通破坏

图 3 破坏模式 II ($\sigma_n = 1.0 \text{ MPa}$, $\alpha = 30^\circ$)

Fig.3 Failure model II ($\sigma_n = 1.0 \text{ MPa}$, $\alpha = 30^\circ$)

可见，在起伏角较低($\alpha = 0^\circ, 15^\circ$)非贯通节理岩体在较低($\sigma_n = 0.5, 1.0$ MPa)法向应力进行试验，可能出现破坏模式 I；在起伏角较高($\alpha = 30^\circ$)的非贯通节理岩体在较高($\sigma_n = 1.0, 1.5$ MPa)法向应力进行试验，可能出现破坏模式 II。

3.2 岩桥力学性质弱化现象

非贯通节理岩体扩展贯通过程中，在岩桥表面逐渐出现许多细小的裂纹。可以推断，在岩桥内部也存在许多细小的裂纹。这些裂纹的发生、发展过程，就是岩桥力学性质逐步变化的过程，也是岩桥力学性质弱化的过程。

在图 2(b)和 3(b)中，尽管非贯通节理岩体尚未达到抗剪强度，但是非贯通节理岩体岩桥已发生明显变化。这些变化导致了岩桥力学性质发生弱化。

本文不累述岩桥力学性质弱化过程，相关内容可见张平等^[13, 14]的研究。

3.3 非贯通节理岩体的变形特性

在五级法向应力下，3 种起伏角齿形节理面的非贯通节理岩体的切向应力 - 变形曲线见图 4。

非贯通节理岩体的抗剪强度对应的位移可称为峰值强度位移。本次试验的峰值切向位移见表 2。由表 2 可见，在节理面形貌相同的情况下，非贯通节理岩体的峰值切向位移随着法向应力增大而增大，法向应力越高，峰值切向位移越大。在相同的法向应力下，随着齿形节理面起伏角增大，非贯通节理岩体的峰值切向位移减小。

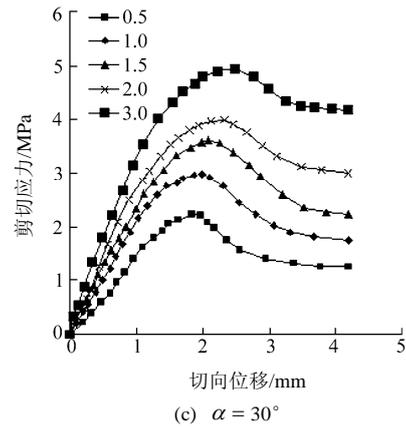
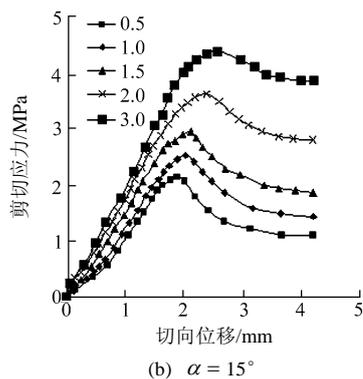
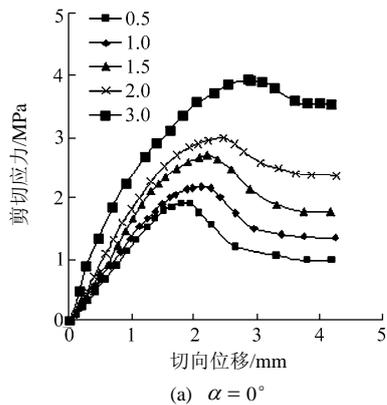


图 4 剪切应力 - 切向位移曲线
Fig.4 Curves of shear stress-displacement

表 2 峰值切向位移

Table 2 Displacements of peak shear strength mm			
法向应力 /MPa	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
0.5	1.95	1.89	1.84
1.0	2.12	2.05	1.99
1.5	2.22	2.12	2.01
2.0	2.47	2.39	2.32
3.0	2.86	2.57	2.48

3.4 非贯通节理岩体的强度特性

本次试验在扩展贯通过程中，非贯通节理岩体的初裂强度、抗剪强度见表 3, 4。

表 3 非贯通节理岩体初裂强度

Table 3 Initial tension failure strength of rock mass containing discontinuous joints MPa			
法向应力 /MPa	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
0.5	1.32	1.52	1.61
1.0	1.53	1.81	2.15
1.5	1.88	2.07	2.61
2.0	2.03	2.54	2.86
3.0	2.67	3.06	3.53

由表 3, 4 中非贯通节理岩体的峰值强度绘成图 5。由图 5 可见，非贯通节理岩体的峰值强度(抗剪强度)随法向应力和节理面形貌的变化而变化。节理面形貌相同的非贯通节理岩体，随着法向应力的增加，抗剪强度增大，且法向应力越大，抗剪强度越高。在相同的法向应力下，随着齿形节理面的起伏角 α 增加，非贯通节理岩体的抗剪强度增大，起伏角 α 越大，抗剪强度越高。

表 4 非贯通节理岩体峰值剪切强度

Table 4 Peak shear strength of rock mass containing discontinuous joints MPa

法向应力 /MPa	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
0.5	1.89	2.13	2.19
1.0	2.18	2.53	2.98
1.5	2.70	2.95	3.63
2.0	2.98	3.62	3.99
3.0	3.93	4.38	4.93

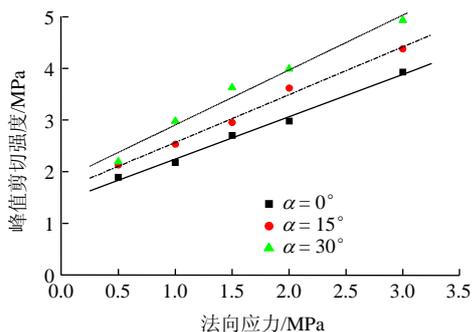


图 5 非贯通节理岩体峰值剪切强度曲线

Fig.5 Peak shear strength curves of rock mass containing discontinuous joints

3.5 非贯通节理岩体抗剪强度参数分析

由图 5 中非贯通节理岩体抗剪强度可拟合得到 3 种非贯通节理岩体的抗剪强度参数。同时, 按照 Jennings 方法计算非贯通节理岩体的抗剪强度参数。试验拟合和按 Jennings 方法计算的非贯通节理岩体抗剪强度参数见表 5。

表 5 非贯通节理岩体抗剪强度参数值

Table 5 Shear parameters results from test and calculation MPa

非贯通齿形节理面岩体	试验拟合值		Jennings 方法	
	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^\circ$)	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^\circ$)
$\alpha = 0^\circ$	1.42	39.4	2.14	37.0
$\alpha = 15^\circ$	1.64	42.8	2.14	44.8
$\alpha = 30^\circ$	1.84	46.8	2.14	54.8

由表 5 可见, $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 齿形节理面非贯通节理岩体黏聚力按试验拟合值分别为 1.42, 1.64, 1.84 MPa, 而按 Jennings 方法计算值都为 2.14 MPa。可见, 3 种非贯通节理岩体的黏聚力按 Jennings 方法计算值大于按试验拟合值; 两者的差值随法向应力的增大而减小; 在较小的法向应力下, 两者相差较大, 在较大的法向应力下, 两者相差较小。

$\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 齿形节理面的非贯通节理岩体内摩擦角按试验拟合值分别为 $39.4^\circ, 42.8^\circ, 46.8^\circ$, 按 Jennings 方法计算值分别为 $37.0^\circ, 44.8^\circ, 54.8^\circ$ 。可见, $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$ 齿形节理面的非贯通节理岩体内摩擦角按 Jennings 方法计算值大于按试验拟合值。

本次试验也显示: 按 Jennings 方法计算黏聚力大于试验拟合黏聚力; 按 Jennings 计算内摩擦角大于试验拟合内摩擦角($\alpha = 0^\circ$ 齿形节理面的非贯通节理岩体除外)。故按 Jennings 方法计算非贯通节理抗剪强度值将大于实际非贯通节理岩体抗剪强度值。

4 结 论

基于非贯通节理岩体岩桥力学性质弱化机制, 采用岩体直剪伺服试验机, 在 5 级法向应力下, 对 3 种不同形貌的非贯通节理岩体进行了直剪试验研究。本次试验为岩桥力学性质弱化机制研究提供基础研究资料, 并为非贯通节理岩体破坏准则研究提供试验验证。主要结论如下:

(1) 观察到的现象显示在节理的扩展破坏过程中, 非贯通节理岩体的岩桥发生明显变化, 导致岩桥力学性质发生弱化。

(2) 节理面粗糙度和法向应力影响非贯通节理岩体的破坏过程。起伏角较低齿形节理面的非贯通节理岩体在较低的法向应力进行试验, 可能出现破坏模式 I; 起伏角较高的非贯通节理岩体在较高的法向应力进行试验, 可能出现破坏模式 II。

(3) 节理面粗糙度和法向应力影响非贯通节理的峰值强度位移。随着法向应力增大, 相同齿形节理面形貌的非贯通节理岩体的峰值切向位移增大。在相同的法向应力下, 随着齿形节理面起伏角增大, 非贯通节理岩体的峰值切向位移减小。

(4) 节理面粗糙度和法向应力影响非贯通节理的峰值强度。节理面形貌相同的非贯通节理岩体, 随着法向应力的增加, 抗剪强度增大, 且法向应力越大, 抗剪强度越高。在相同的法向应力下, 随着齿形节理面的起伏角增加, 非贯通节理岩体的抗剪强度增大, 起伏角越大, 抗剪强度越高。

(5) 非贯通节理岩体黏聚力按 Jennings 方法计算值大于按试验拟合值; 两者的差值随法向应力的增大而减小; 在较小的法向应力下, 两者相差较大, 在较大的法向应力下, 两者相差较小。节理面较粗糙非贯通节理岩体内摩擦角按 Jennings 方法计算值大于按试验拟合值。

参考文献(References):

- [1] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机制和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(ZHU Weishen, LI Shucai, CHEN Weizhong. Failure mechanism and anchorage effect of joints rock mass and its application to engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [2] REYES O, EINSTEIN H H. Failure mechanics of fractured rock—a fracture coalescence model[C]// Proceedings of 7th International Congress of Rock Mechanics. USA: Balkema Publishes, 1991: 333 - 340.
- [3] 梁作元, 朱维申. 压剪应力作用下含共面闭合节理岩石材料的剪切破坏准则探讨[C]// 朱维申编. 中国青年学者岩土工程力学及其应用讨论会议论文集. 北京: 科学出版社, 1994: 470 - 474.(LIANG Zuoyuan, ZHU Weishen. Research of shear failure criteria of rock containing coplanar closed joints under compression and shear loads[C]// ZHU Weishen ed. Proceedings of Chinese Youth Scholar Symposium on Application for Computer Method in Rock and Soil Engineering Mechanics and Application. Beijing: Science Press, 1994: 470 - 474.(in Chinese))
- [4] 朱维申, 梁作元, 冯光北, 等. 节理岩体强度特性的物理模拟及其强度预测分析[C]// 葛修润编. 计算机方法在岩石力学及工程中的应用国际学术讨论论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994: 486 - 493.(ZHU Weishen, LIANG Zuoyuan, FENG Guanbei, et al. Physics simulation and strength analysis and forecast for properties of joints rock mass[C]// GE Xiurun ed. Proceedings of International Symposium on Application for Computer Methods in Rock Mechanics and Engineering. Wuhan: Technical University of Surveying and Mapping Press, 1994: 486 - 493.(in Chinese))
- [5] 任伟中, 白世伟, 丰定祥, 等. 直剪条件下共面闭合非贯通岩体的强度特性分析[C]// 第六次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2000: 147 - 151.(REN Weizhong, BAI Shiwei, FENG Dingxiang, et al. Strength behavior of rockmass containing coplanar close intermittent joints under direct shear condition[C]// Proceedings of 6th Congress of Chinese Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2000: 147 - 151.(in Chinese))
- [6] 沈婷, 丰定祥, 任伟中, 等. 由结构面和岩桥组成的剪切面强度特性研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 33 - 38.(SHEN Ting, FENG Dingxiang, REN Weizhong, et al. Research on strength property of shear plane including discontinuity and rock bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(1): 33 - 38.(in Chinese))
- [7] 刘远明, 夏才初. 非贯通节理岩体直剪试验研究进展[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1 719 - 1 724.(LIU Yuanming, XIA Caichu. Advances in research of rock masses containing discontinuous joints in direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1 719 - 1 724.(in Chinese))
- [8] 任伟中, 王庚荪, 白世伟, 等. 共面闭合非贯通岩体的直剪强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 167 - 1 672.(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))
- [9] 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 of 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))
- [10] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 共面闭合非贯通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 test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 10 - 16.(in Chinese))
- [11] LAJAI E Z. Shear strength of weakness planes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1969, 6(7): 499 - 515.
- [12] 沈珠江, 陈铁林. 岩土破损力学 - 结构类型与荷载分担[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2 137 - 2 142.(SHEN Zhujiang, CHEN Tielin. Breakage mechanics of geomaterial-structure types and load sharing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2 137 - 2 142.(in Chinese))
- [13] 张平, 李宁, 贺若兰. 含裂隙类岩石材料的局部化渐进破损模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2 043 - 2 050.(ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruolan. Research on localized progressive damage model for fractured rocklike materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2 043 - 2 050.(in Chinese))
- [14] 张平. 裂隙介质静动应力条件下的破坏模式与局部化渐进破损模型研究[博士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2004.(ZHANG Ping. Research on failure modes and localized progressive failure model of the cracked media under static and dynamic stress conditions[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.(in Chinese))
- [15] 刘远明. 基于直剪试验的非贯通节理岩体扩展贯通研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2007.(LIU Yuanming. Study of failure models and strength of rockmass containing discontinuous joints in direct shear test[Ph. D. thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2007.(in Chinese))
- [16] 刘远明, 夏才初. 直剪条件下非贯通节理岩体岩桥力学性质弱化机制及贯通模型初步研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 1 - 7.(LIU Yuanming, XIA Caichu. Weakening mechanism on mechanical behaviors and failure models of rock mass containing discontinuous joints in direct shear[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 1 - 7.(in Chinese))