

节理研究进展及在非贯通节理岩体研究的应用*

刘远明^{1,2,3}, 夏才初^{1,2}, 李宏哲^{1,2}

(1. 同济大学岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 贵州大学土木建筑工程学院, 贵阳, 550003)

摘要:节理的表面形貌可按其规模大小分为起伏度和粗糙度两类。节理面的几何和力学特性对非贯通节理岩体扩展贯通有重要影响。典型节理面的粗糙形貌可以模拟为一系列非规则的、齿形凸台形貌。综述了贯通节理破坏理论新的进展, 并探讨了节理破坏理论的适用性。结合非贯通节理岩体研究的现状, 提出了考虑节理的粗糙度和起伏度情况下研究非贯通节理岩体扩展贯通强度和变形特性的新思路。

关键词:节理; 应用; 直剪试验; 破坏机理; 剪切强度

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2007)04-0682-06

Development in Joints Research and Its Application to
Rock Mass Containing Discontinuous JointsLIU Yuan-ming^{1,2,3}, XIA Cai-chu^{1,2}, LI Hong-zhe^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: The surface profile of joints can be characterized by the waviness and unevenness components. The geometric and mechanical properties of discontinuous joints rockmass have important influence on its failure mechanism and strength. The rough profile of the joint surface is modeled as a series of irregular shaped, triangular asperities. Both the typical theories and development of failure mechanism for joints were summarized and their applicability was discussed. According to the current situation of the study, a new idea is proposed that new failure mechanism and theories are applied to study strength and deformation properties for discontinuous joint rockmass with considering joint waviness and unevenness.

Keywords: joints; application; direct shear test; failure mechanism; shear strength criteria

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。工程岩体的破坏通常是由节理和岩桥共同破坏组成的。对于非贯通节理岩体, 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, 将导致

脆性断裂破坏。整体的破坏特征表现为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]。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]。

节理的表面形态是节理表面空间展布的几何属性, 可按其规模大小分为起伏度和粗糙度两类。

* 收稿日期: 2006-09-29 (修改稿)

作者简介: 刘远明 (1975 -), 男 (侗族), 贵州万山人, 博士研究生, 主要从事地下结构方面的研究工作。

E-mail: liuyuanming75@souh.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40472142 和 No. 50579088)

起伏度表征大规模的起伏,粗糙度表征小规模的不规则凹凸点。国际岩石力学学会建议起伏度分为平面的、波浪形的和台阶形的三种;粗糙度可分为粗糙的、平坦的和光滑的三级。天然节理面的表面形态是起伏度和粗糙度的不同组合^[3]。

对于贯通节理岩体,Barton 提出了考虑节理面粗糙度的 Barton 公式^[4],Patton 提出了 Patton 剪胀公式^[5],Ladanyi 和 Archambault 提出了 Ladanyi 和 Archambault 公式^[6],这三个公式已得到广泛应用。近年来,节理研究取得了新的进展,提出了新的理论。Saeb 修正了 Ladanyi 和 Archambault 模型,使修正后的模型理论上更严密,形式上更简单^[7]。Useng 综合考虑齿形节理剪切过程中的各种破坏模式,提出以抗剪应力最小值为准则的节理破坏模式模型^[8]。Johnston 和 Lam 在试验的基础上,提出了单凸台 Johnston - Lam 模型^[9-10]。Haberfield 考虑节理变形协调性,结合 Kodikara 试验结果,提出了多凸台 Johnston - Lam 模型^{[11][12]}。Yang 研究了沿剪切方向凸台排列次序对剪切强度的影响,提出了两凸台的节理剪切行为是单个凸台的剪切行为的分段组合^[13]。Jilian 提出了考虑凸台间相互作用的模型^[14]。Handanyan 研究了节理剪切破坏过程中,凸台抗拉强度对剪切强度的影响^[15]。

对于非贯通节理岩体,有些学者将非贯通节理视作裂纹,用岩石的断裂和裂纹扩展的方法来模拟非贯通节理的开裂和扩展。但是,节理与裂纹在几何尺度、表面形态、边界条件,进而在力学性质等方面都有较大的差别,如裂纹是微观的,节理是宏观的,节理的表面形态对节理开裂扩展前的滑移有较大的接触摩擦作用。由此可见,断裂力学理论和方法对于非贯通节理的开裂和扩展适用性有待研究。

岩体中的节理主要处于压剪应力状态下,国内外许多学者采用直剪试验对非贯通节理岩体进行研究^[16-19]。这些研究抓住了节理和裂纹的区别,考虑到了节理性质对非贯通节理岩体扩展贯通的重要性,故取得了较好的研究成果。然而,这些研究也存在不足,如没有考虑起伏度对非贯通节理岩体扩展贯通的影响。因而,节理的形貌对非贯通节理岩体的强度和变形特性的影响还有待深入研究。

总之,节理的几何和力学特性对贯通节理岩体、非贯通节理岩体强度和变形特性都有重要影响。对于非贯通节理岩体,应考虑节理的粗糙度和起伏度的影响,深入研究非贯通节理岩体的扩展贯通规律。

本文综述了贯通节理破坏理论研究新的进展,比较和讨论了贯通节理破坏理论在非贯通节理岩体扩展贯通研究中的适用性,结合非贯通节理岩体研究的现状,提出了考虑节理粗糙度和起伏度情况下研究非贯通节理岩体扩展贯通强度和变形特性的新思路。

2 齿形节理破坏理论及其新进展

2.1 Patton 双线性公式

基于规则锯齿形节理面,Patton^[5]提出双线性抗剪强度公式:

$$\tau = \sigma \tan(\varphi_j + i) \quad \sigma \leq \sigma_T \quad (1)$$

$$\tau = c_r + \sigma \tan(\varphi_r) \quad \sigma \geq \sigma_T \quad (2)$$

式中, τ 表示剪切应力, σ_n 表示法向应力, Φ_j 表示节理面基本摩擦角, i 表示剪胀角, C_r 表示节理面的粘结力, Φ_r 表示节理面残余摩擦角, σ_T 表示节理面从滑动转向剪断的临界应力。

Patton 公式仅适用于以下情况:在低法向应力时,沿锯齿形凸台的迎剪切方向的斜面发生剪胀;在较高法向应力时,沿锯齿形凸台根部剪断。

2.2 Lananyi 和 Archambault 公式

Landanyi 和 Archambault^[6]注意到在岩石节理表面,剪胀和剪断破坏模式是同时发生的,综合考虑了凸台面的内摩擦角、粘结力和凸台体的抗剪度对节理峰值剪切强度的影响,提出节理峰值剪切强度公式

$$\tau = \frac{\sigma(1 - a_s)(\tan i + \tan \varphi_j) + a_s(\sigma \tan \varphi_0 + c_0)}{1 - (1 - a_s) \tan i \tan \varphi_j} \quad (3)$$

式中, C_0 表示凸台岩体的凝聚力, Φ_0 表示凸台岩体内摩擦角, Φ_j 表示节理面基本摩擦角, a_s 表示剪断凸台面积与总凸台面积的比值, i 表示剪胀角。

若法向应力极低,凸台体几乎没有任何剪断,此时, $a_s \rightarrow 0$,则式(3)变为 Patton 剪胀公式;若法向应力很高,凸台体全部从根部被剪断, $a_s \rightarrow 1$,则式(3)变为完整岩石的剪切强度公式。因而 Langanyi 和 Archambault 剪切强度曲线是以 Patton 剪胀公式和完整岩石剪切强度公式这两条相交直线为过渡线的一条曲线^[3]。

2.3 修正 Ladanyi and Archambault 公式

基于 Ladanyi and Archambault 剪切理论的推导过程和砂岩的剪胀理论,Saeb^[7]提出其修正模型

$$\tau = \sigma(1 - a_s) \tan(\varphi_j + i) + a_s(\sigma \tan \varphi_0 + c_0) \quad (4)$$

修正 Ladanyi and Archambault 模型与原模型的剪切强度曲线很接近,且与试验结果基本一致;修正模型抓住了剪切模式和滑动模式对抗剪强度的贡献,形式上比原模型简单、理论上比原模型严密^[7]。

2.4 Ueng 破坏模式模型

如图 1 所示,节理形貌由一系列重复的规则锯齿形组成,两个底角分别为 θ_1, θ_2 。Ueng^[8]提出了满足莫尔-库仑强度准则的规则锯齿形节理的四种破坏模式,并给出相应抗剪应力计算公式。

(1)破坏模式 1:上节理面沿着与节理基面成角度 θ_1 的迎剪切方向的斜面滑动,发生剪胀,如图 1(a)。节理的抗剪应力为

$$\tau = \sigma \tan(\varphi_j + \theta_1) \quad (4)$$

式中, θ_1 是与破坏模式 1 对应的剪胀角

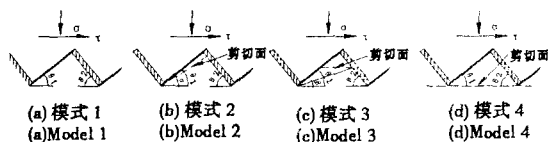


图 1 规则齿形节理的破坏模式

Fig. 1 Failure of a regular tooth-type joint

(2)破坏模式 2:剪切面穿过锯齿趾部,与节理基面成 α 角,如图 1(b)。节理的抗剪应力为:

$$\tau = \sigma \tan(\varphi_j + \alpha) + \frac{c \sin \theta_2 [\cos \alpha + \sin \alpha \tan(\varphi_j + \alpha)]}{\sin(\theta_2 + \alpha)} \quad (5)$$

式中, α 是与破坏模式 2 对应的剪胀角。

(3)破坏模式 3:剪切破坏面在锯齿型节理基面以上某个位置,并与剪切方向平行,如图 1(c)。节理的抗剪应力为:

$$\tau = \sigma \tan(\varphi_j + \beta) + cR \quad (6)$$

式中, β 是与破坏模式 3 对应的剪胀角, $\beta < \theta_1$, R 是剪切面的面积与整个节理面积的比值。

(4)破坏模式 4:剪切破坏面沿锯齿形的底部剪断,不发生剪胀,如图 1(d)。节理的抗剪应力为:

$$\tau = \sigma \tan \varphi_j + c \quad (7)$$

规则锯齿形节理面的剪切强度应是 4 个抗剪强度中的最小值,破坏模式为对应于最小抗剪强度的破坏模式。

从图 2 中可以看出,锯齿形节理的预测强度和试验强度吻合得较好。

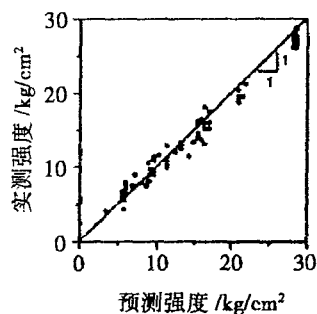


图 2 节理的预测强度和试验强度比较图

Fig. 2 Comparison between predicted and measured shear strength for tooth-type joint

2.5 多凸台的 Johnston-Lam 模型

假定节理面的粗糙形貌可以理想地用一系列不同长度的弦线(直线段)模拟,如图 3 所示,细线表示原节理面,粗线表示理想化后的节理面,也将原节理面模拟为由一系列非规则的、三角形(锯齿形)凸台组成的形貌。三角形凸台形貌由以下参数确定:弦线倾角 i_m (各弦线与剪切方向夹角 i 的平均值, i 取正值),弦线倾角的标准差 i_{sd} (夹角 i 的标准差),弦线高 h_m (从低于所有直线段最低端点的某平面到各弦线端点的距离),弦线高的标准差 h_{sd} (弦线高的标准差)。在此基础上, Johnston 和 Lam^[9-10]提出单个凸台节理面的 Johnston-Lam 模型。该模型将节理面破坏过程分为以下四个阶段:初始破坏阶段、凸台滑动阶段、凸台剪切阶段、凸台压碎阶段。对单凸台节理面,模型预测的剪切应力~剪切位移与实测的剪切应力~剪切位移是一致的。

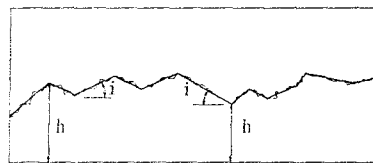


图 3 节理表面形貌模拟

Fig. 1 Modeling of the joint profile

然而,对于多凸台节理面,若直接引伸单凸台的 Johnston-Lam 模型,则会出现以下问题:所有荷载最初由最陡的凸台承担,破坏一发生,大部分荷载转移到第二陡的凸台上;依次类推,荷载逐渐转移到较缓的凸台。其预测的剪切荷载~剪切位移关系曲线如图 4(b)短虚线所示的由一系列锯齿形峰组成的曲线。显然,图 4(b)短虚线所示的预测曲线与图 4(a)的自然节理典型的剪切荷载~剪

切位移曲线不一致。

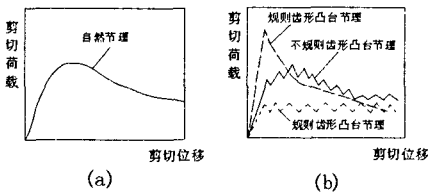


图 4 自然节理试验曲线与理想形貌预测曲线对比图
Fig. 4 Comparison of response curves for idealized and natural profiles

C. M. Haberfield^[11-12] 提出了基于新的接触机理的多凸台 Johnston—Lam 模型。该模型假定每个节理的行为独立于其他凸台,将每个凸台模拟为一根弹簧。在法向荷载作用下,由于凸台的弹性,最陡的凸台变形较小,故法向荷载不是由单个凸台承担,而是由一系列凸台承担。在施加剪切应力前,认为节理的两边充分接触,在接触面上法向应力平均分布。当剪切荷载作用时,剪切荷载逐渐从较陡的凸台转移到较缓的凸台。若节理的一边相对于另一边移动,不同的凸台倾角将引起仍处于接触状态的凸台间的法向应力的重新分布。几乎在同时,每个凸台迎剪切面上的法向应力将因为凸台背面的分离而增加一倍。每个凸台承担的新分布法向力依赖凸台的倾角、初始正应力、节理面的刚度和岩体的杨氏模量。图 4(b) 显示了的规则凸台节理表面、不规则凸台节理面的剪切荷载~剪切位移关系曲线,两者与图 4(b) 较为一致,但前者显示较多的脆性,而后者显示较多的弹性。

图 5 是 2 个凸台 Johnston—Lam 模型的典型破坏过程示意图,而 2 个以上凸台节理的破坏过程与此类似,可直接由 2 凸台模型扩展得到。图 6 是 Kodikara 所作 3 个凸台节理面剪切试验的预测值和试验值的对比图,可见预测曲线和试验曲线吻合较好。

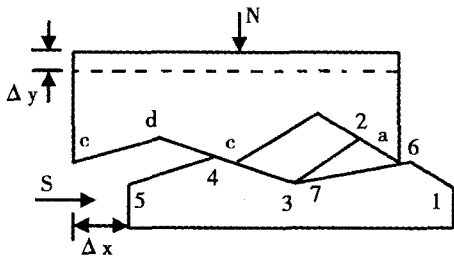


图 5 凸台破坏机理
Fig. 5 Mechanism for asperities failure
多凸台的 Johnston—Lam 模型的优点是模型仅要求描述节理粗糙度的简单的几何参数(h_m ,

h_{sd} , i_{sm} , i_{sd}), 基本的岩石特性(岩石和节理面抗剪强度参数,岩石的弹性模量),相应的边界条件(法向刚度和初始的法向应力)。

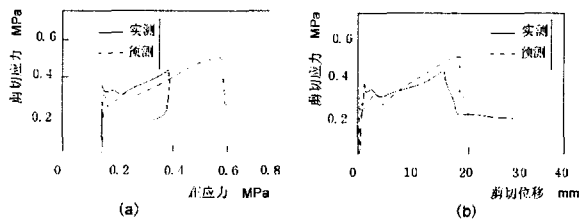


图 6 节理预测曲线和试验曲线对比
ig. 6 Comparison of actual and predicted curves of shear test
2.6 两个凸台剪切行为组合研究

Z. Y. Yang^[13] 用直剪试验揭示了两个不同倾角的凸台的渐变峰值强度行为。采用配合比为:石膏:水=1:0.6 的模型材料,凸台为等腰三角形锯齿,倾角为 15°或 30°,凸台高 5 mm,法向正应力分别为 0.39 MPa,0.69 MPa,1.47 MPa 等 3 种情况。

试验发现,在低法向应力下,剪切应力~剪切位移曲线显示两个明显的峰值;在高法向应力下,剪切应力~剪切位移曲线峰值不明显。这说明法向应力对节理面的剪切行为有重要影响,低法向应力下,倾角分别为 30°和 15°的凸台对剪切行为的影响基本上是分开的,它们对整个行为的贡献是先后有序的;在高法向应力下,倾角分别为 30°和 15°凸台对剪切行为贡献的差异不是很明显。

剪切行为可以分为两个阶段,倾角较高的凸台控制剪切行为的第一阶段,而第二阶段主要受倾角较低的凸台的影响。组合节理的剪切行为可以由两凸台基本剪切曲线分段组合,整个节理的抗剪强度可用倾角较高的凸台抗剪强度来预测。图 7 为较低应力下的剪切应力~剪切位移曲线图,由图 7 可见,第一部分剪切曲线与倾角较高凸台的剪切行为吻合较好,第二部分剪切曲线与倾角较低的凸台的剪切行为吻合较好。

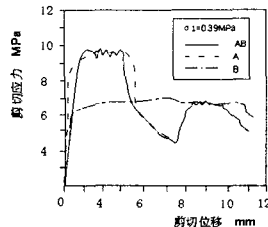


图 7 剪应力—位移曲线关系曲线
Fig. 7 The shear stress - displacement curve

2.7 凸台抗拉强度对剪切强度影响的研究

基于 Byerlee 研究, J. M. Handanyan^[15] 认为对于相互锁定和交迭的节理面, 其破坏模式决定于相互锁定和交迭的程度。在非常低的剪力和法向荷载下, 节理将以剪胀的形式破坏; 而在较高的法向荷载下, 节理破坏形式分为三种, 如图 8 所示: (1) 节理面的剪切破坏; (2) 弹性或塑性破坏和最终沿节理面滑动; (3) 节理面的张拉破坏。

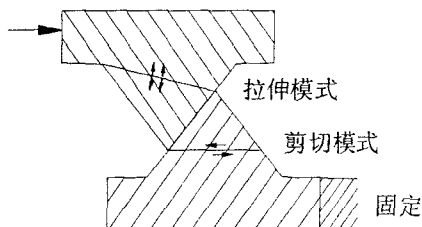


图8 张拉破坏模式

Fig. 8 Tension failure model

通过试验, J. M. Handanyan^[15] 发现当对于非剪胀破坏的剪切条件下, DieKeen 和 Maible 试件的凸台破坏是张拉破坏。

3 齿形节理破坏理论新进展在非贯通节理岩体研究中的应用

3.1 齿形节理破坏理论比较

Patton 的双线性抗剪强度公式形式简单, 但仅适用于规则锯齿节理面情况。

Lananyi 和 Archambault 剪切强度公式考虑了同时发生的剪胀和剪断机理, 仍有所不足。除了简单情况, 比如 Patton 建议的规则锯齿形形貌外, 节理的剪胀不是常量, 而是随着剪切位移的增加而逐渐减小。因而, 确定节理的剪胀代表值是非常困难的, 经常需要依靠经验判断。同样, 其修正模型也存在此问题。

Ueng 的破坏模式模型可以计算迎剪切方向和背剪切方向具有不同角度的规则锯齿形凸台节理面的剪切强度, 模型同样仅适用于由相同齿形多次重复组成的节理面。对于由不同倾角的、大小不同的凸台组成的节理面, 由于大凸台首先破坏, 大凸台和小凸台在剪切过程中的作用是不一样的, 该模型并不适用。

Yang 用试验研究了不同大小、不同形状的凸台对剪切变形的影响, 发现两个凸台齿形节理面的剪切行为可由单个凸台齿形的剪切行为分段组合, 但是, 其破坏机理还需在理论上进一步研究。

多凸台的 Johnston—Lam 模型考虑了变形协调性, 在剪切的初始阶段, 每个凸台承担相同的初始压力, 上下节理面保持接触。在剪切过程中, 剪切逐步由最陡的凸台体转移到其他凸台体。虽然其预测的剪切曲线与实测的剪切曲线吻合较好, 但是该模型对凸台的破坏模式考虑不够全面。

J. M. Handanyan 研究指出一定条件下, 剪切强度与岩石的抗拉强度也有关系。

3.2 非贯通节理岩体研究现状

尽管许多学者对非贯通节理岩体已作了较多研究, 但其扩展和贯通的强度和变形规律仍没有取得较大进展。

由于节理与裂纹在几何尺度、表面形态、边界条件, 进而在力学性质等方面都有较大的差别。裂纹是微观的, 节理是宏观的, 节理的表面形态对节理开裂扩展前的滑移有较大的接触摩擦作用。断裂力学理论和方法考虑节理的粗糙度和起伏度尚有困难。

岩体中的节理主要处于压剪应力状态下, 采用直剪试验是可行的, 具有许多优点, 且能够考虑节理的粗糙度和起伏度对非贯通节理岩体扩展贯通的强度和变形特性的影响。国内外许多学者对非贯通节理岩体进行直剪试验^[16-19], 研究了法向应力、岩桥的几何特性(长度和位置)和力学特性、节理的分布及连通率对非贯通节理岩体扩展和贯通的影响。然而, 以上研究对节理面的研究不够深入, 可视为考虑到了粗糙度的影响, 没有考虑到起伏度的影响。因而, 未能深入研究节理的形貌对非贯通节理岩体的扩展贯通的强度和变形特性的影响。

3.3 非贯通节理岩体研究的新思路

结合贯通节理的破坏理论, 特别是新的研究进展, 可以考虑节理的形貌对非贯通节理岩体扩展和贯通的影响, 深入研究非贯通节理岩体的强度和变形特性。

首先, 将复杂的节理表面形貌简化为锯齿形凸台形貌。其次, 综合考虑 Ueng 提出的凸台破坏模式, Yang 提出的分段组合的剪切行为, Haberfield 提出的多凸台的 Johnston—Lam 模型, 建立其理论模型。再次, 将节理的起伏度可以用不同倾角的凸台来模拟, 节理的粗糙度可以用凸台上的不规则凸起来模拟的试验, 通过试验研究节理的起伏度和粗糙度对非贯通节理岩体扩展和贯通的影响。最后, 再结合岩桥的几何和力学特性参数, 节理的分布和连

通率,综合研究非贯通节理岩体的强度和变形特性。此外,也应研究凸台抗拉强度对剪切强度的影响。

以上研究思路,考虑了节理的粗糙度和起伏度对非贯通节理岩体扩展贯通的强度和变形特性的影响,还可探求非贯通节理扩展和贯通的新理论。

5 结 论

本文综述了贯通节理破坏机理的典型理论研究和新的研究进展;比较并探讨了贯通节理破坏机理在非贯通节理岩体扩展贯通研究中的适用性;提出深入研究考虑节理的粗糙度和起伏度情况下非贯通节理岩体扩展贯通强度和变形特性的新思路。主要结论归纳如下:

(1)非贯通节理岩体的节理表面形貌可以简化为一系列锯齿形(三角形)凸台形貌。这种简化可以考虑节理的起伏度和粗糙度形貌。

(2)Patton 剪胀理论仅适用于由相同齿形多次重复组成的规则锯齿形节理面,Lananyi 和 Archambault 剪切强度理论不易确定剪胀角,其修正模型也存在同样的问题。

(3)多凸台的节理面剪切行为可以由单个凸台剪切行为的分段组合,能够应用于考虑不同大小凸台组成的节理面。

(4)在分析节理对非贯通节理岩体的扩展贯通规律影响时,应该结合 Ueng 破坏模式模型和 Johnston - Lam 模型进行研究。

(5)深入研究非贯通节理岩体扩展贯通的强度和变形特性,应综合考虑结合节理面的形貌、岩桥的几何和力学特性参数、节理的分布和连通率,并探求非贯通节理扩展和贯通的新理论。

参考文献:

- [1] 朱维申,李术才,陈卫忠.节理岩体破坏机理何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 Mechanics 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 [A]. Proceedings of 7th International Congress of Rock Mechanics [C]. USA: Balkema Publishes, 1991: 333 - 340.
- [3] 夏才初,孙宗顺,工程岩体节理力学[M]. 同济大学出版社,2002. (Xia Caichu. Joints Rock Mass Mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.

(in Chinese))

- [4] N Barton, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock mechanics. 1977, 10: 1 - 54.
- [5] Patton FD. Multiple models of shear failure in rock. Proceedings of the First Congress of ISRM, Lisbon, 1966: 509 - 513.
- [6] Ladanyi B, Archambault G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. Proc. 11th symp. on rock mech (AIME), 1970, 105.
- [7] S Saeb. A variance on the Ladanyi and Archambault's shear strength criterion. In: Barton N R, Stephansson O.. rock joints. Proc Int Symp Rock Joints. Norway, 1990: 701 - 705.
- [8] T S UENG, W C CHANG. Shear strength of joints surface profiles, In: Barton N R, Stephansson O.. rock joints. Proc Int Symp Rock Joints. Norway, 1990: 295 - 300.
- [9] JOHNSTON I W, LAM T SK. Shear behavior of regular triangular concrete /rock joints - analysis. J. Geotech. Engng. Div Am. Soc. civ. Engre. 1989, 115 (7): 711 - 727.
- [10] LAM T S K, JOHNSTON I W. Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints - evaluation. J. Geotech Engng. Div Am. Soc. civ. Engre. 1989, 115 (7): 728 - 740.
- [11] C M HABERFIELD, I W JOHNSTON. A mechanistically - based model for rough rock joints. International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences, 1994 31: 279 - 292.
- [12] J K KODIKARA, I W JOHNSTON. Shear behavior of irregular triangular rock - concrete joints. International Journal of rock mechanics and mining science. 1994, 37 (4): 313 - 322.
- [13] Z Y YANG, D Y CHIANG. An experimental study on the progressive shear behavior of rock joints with tooth - shaped asperities. International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences, 2000 (37): 1247 - 1259.
- [14] JILIAN P, SELDEL. A theoretical model for rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear. International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences, 2002 (39): 539 - 553.
- [15] J M HANDANYAN, ER DANEK RAD ANDREA, et al.. The role of tension in failure of jointed rock. In: Barton N R, Stephansson O.. rock joints. Proc Int Symp Rock Joints. Norway, 1990: 295 - 300.

(下转第 693 页)

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38: 59-56.
- [2] H. Mroueh, I. shahrour, A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction [J]. Computer and Geotechnics, 2003(30): 245-243.
- [3] 尚岳全. 岩体稳定和区域稳定数值模拟模型边界条件确定方法[J]. 岩石力学与工程学报. 1999, 18(2): 201-204 (Shang Yue-quan. The Ways of Determining Boundary Conditions in Geomechanical Numerical Simulation. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, Vol. 18, No. 2: 201 - 204. (in Chinese))
- [4] 宋宏伟. 围岩松动圈影响因素的数值模拟[J]. 矿冶工程. 2003, 2, 23(1): 1-3 (Song Hong-wei. Numerical Simulation of Factors Affecting Broken Rock Zone [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2003. February. Vol. 23, No. 1: 1 - 3. (in Chinese))
- [5] 王中勋. 隧道围岩变形监控量测的实践[J]. 铁道建设, 2000, (2): 7-10 (Wang Zhong-xun, Surrounding rock deformation monitoring and Its application in tunnel [J]. Railway Engineering 2000. Vol. 2: 7 - 10)
- [6] 《公路隧道施工技术规范》[S], (JTJ042-94). 北京: 人民交通出版社, 1995. (《Design code for Highway Tunnel Construction》[S]. (JTJ042 - 94). Beijing: China Communication Press, 1995. (in Chinese))
- [7] 杭新景高速公路建德段总说明书[R] (Zhejiang Provincial Plan Design & Research Institute of Communications. Instruction to Design of Hangxin jing Expressway (Jiande Section))
- [8] 王良. 软弱围岩隧道开挖的有限元模拟[J]. 重庆工学院学报, 2005, 19(8): 104-108. (Wang Liang. FEM Simulation of Tunnel Excavation of Soft and Weak Wall Rocks [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2005, Vol. 19, No. 8: 104 - 108. (in Chinese))
- [9] 俞林. 软岩隧道开挖与支护数值分析[D]. 大连理工大学申请硕士论文, 2005. (Yu Ling. Numerical Analysis on Tunnel Excavation and Support in Soft Rock [D]. Presented to Dalian University of Technology in candidacy for the master's of E. S. (in Chinese))
- [10] 黄成光, 于郭荣. 《公路隧道施工》[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. [5] (Huang Cheng-guang, Yu Guo-rong. 《Highway Tunnel Construction》[M]. Beijing: China Communication Press. 2001 [5]. (in Chinese))

~~~~~

(上接第 687 页)

- [16] LAJTAI E Z. Shear Strength of Weakness Planes in Rock [J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1969, 6(7): 499 - 515.
- [17] LAJTAI E Z. Strength of Discontinuous Rocks in Direct Shear [J]. Geotechnique, 1969, 19(2): 218 - 233
- [18] 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 behavior of rock containing coplanar close intermittent joints by direct shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 10 - 16. (in Chinese))
- [19] 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 [A]. 葛修润主编: 计算机方法在岩石力学及工程中的应用国际学术讨论文集, 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994: 486 - 493 (Zhu Weishen, Liang Zuoyuan, Feng Guangbei, et al. Physics simulation and strength analysis and forecast for properties of jointed rock mass [A]. In: Proceedings of International Symposium on Application of Computer Methods to Rock Mechanics and Engineering [C]. Wuhan: Technical University of Surveying and Mapping Press, 1994: 486 - 493. (in Chinese))