

非贯通节理岩体直剪贯通模型和强度研究

刘远明^{1,2}, 夏才初¹

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 贵州大学土木建筑工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 基于 Lajtai 和 Jennings 理论, 研究了直剪应力状态下共面闭合非贯通节理岩体的受力特点, 将非贯通节理岩体破坏分为三种模型; 分析了各种模型的破坏机理; 通过修正 Lajtai 理论, 建立了非贯通节理岩体的贯通破坏强度准则。重点推导了岩桥以拉剪复合破坏时, 非贯通节理岩体的峰值强度公式。通过与前人的试验比较, 表明提出的破坏机理能较好地解释试验现象, 理论计算的峰值强度与试验实测值吻合较好。

关键词: 节理岩体; 直剪; 贯通模型; 贯通破坏强度; 破坏机理

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)10-1242-06

作者简介: 刘远明(1975-), 男, 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。

Study on models and strength behavior of rock mass containing discontinuous joints in direct shear

LIU Yuan-ming^{1,2}, XIA Cai-chu¹

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

Engineering and Architecture, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: Based on the Lajtai's theory and Jennings' theory, the mechanical behavior of brittle rock mass containing coplanar close discontinuous joints under direct shear condition was analyzed. Three failure models were proposed, and the mechanism of the models was also analyzed. Through modifying the Lajtai's theory, the failure strength criteria of such rock mass were proposed. The shear strength of jointed rock mass under the combined action of shear and tension was determined. The proposed mechanism could explain the phenomenon in direct shear test, and the calculated results coincided well with experimental results.

Key words: jointed rock mass; direct shear; failure model; failure strength; failure mechanism

0 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。岩体作为一种地质体, 在其形成和存在的整个地质历史时期中, 经受过各种复杂而不均衡的地质作用, 并最终赋存于一定的地质环境中。岩体不是均质的, 而是由许许多多的滑动面、裂隙、节理、弱面、夹层以及断层等组成的非均质各向异性和非连续的复合结构体。大量工程岩体(如边坡、坝基等)的破坏和失稳, 通常是由于在荷载作用或在条件改变下, 岩体中的某些结构面的张开、闭合、起裂、扩展及贯通而产生新的剪切滑动面所引起的^[1-2]。在这些剪切面上除了结构面外, 一般都包含新发生破坏的完整岩石即所谓岩桥部分。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^[3]。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^[4]。非贯通节理岩体的变形和强度特性的研究在理论上和工程上都具有十分重要的意义。

岩体中的节理主要处于压剪应力状态下, 国内外学者广泛采用直剪试验进行研究。分析大量的模型试验结果^[6-7, 10, 12-13, 17], 共面非贯通节理岩体的扩展贯通破坏可分为3种类型: 张拉扩展贯通、剪切扩展贯通和拉剪复合扩展贯通。不共面的非贯通节理岩体, 其扩展贯通模式与此类似。

由于非贯通节理岩体对工程的安全、经济影响很大, 非贯通节理岩体的抗剪强度一直是国内外学者研究重点内容^[3-17]。基于 Mohr-Coulomb 破坏准则的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40472142, 50579088)

收稿日期: 2005-07-22

Jennings 方法(即加权平均法)和基于 Lajtai 岩桥破坏理论的计算方法得到广泛应用。加权平均法强度准则最早由 Jennings 提出, 假设节理和岩桥的破坏同时遵循 Mohr-Coulomb 破坏准则, 将节理和岩桥抗剪强度参数按连通率进行加权平均, 得到的加权平均强度作为抗剪强度^[5]。该准则经过两次重要的修正, 一是考虑到岩桥和节理面上应力的差别, 采用一个考虑破坏面上的正应力分布的影响因子进行修正; 二是考虑变形效应问题, 对节理面的抗剪强度参数考虑一折减系数。美国垦务局的《拱坝设计》指出了变形效应问题, 即岩桥在达到其本身的峰值强度时, 变形较小, 节理面在发生同样变形时尚未达到其本身的峰值强度, 仅是它的百分之几, 应对节理面提供的强度进行折减^[9]。然而, 经过修正的 Jennings 方法还是有其固有的不足, 因为在计算抗剪强度时, 节理面按未破损时的情况来计算抗剪强度, 没有考虑岩体在受力过程中, 与节理相连的岩桥端部发生应力集中, 这些部位比岩桥其他部位先发生破坏, 随着受力的进一步增大, 岩桥的破坏不断发展, 而且, 破坏面也并非全与剪切方向平行; 故按 Jennings 方法的理论计算值总是比节理岩体的抗剪强度偏高, 只有在节理连通率较大或法向正应力较大时才能应用^[10-11, 13-15]。Lajtai 岩桥破坏理论是由 Lajtai 提出的, 按不同的正应力, 将岩桥的破坏分为张性破坏、剪性破坏和挤压破坏等 3 种模式。然而, 由于将这 3 种模式截然分开考虑, 没有考虑到拉剪复合破坏情况, 故按这种准则计算的节理岩体的抗剪强度偏低^[6-7]。为准确计算非贯通节理的抗剪强度, 文献[13]、[14]基于文献[12]的试验, 对直剪条件下共面闭合非贯通岩体的变形和破坏机理进行了分析, 提出了拉剪复合破坏的峰值强度准则, 并与文献[12]模型试验研究结果进行了比较, 发现理论计算值和试验结果吻合较好。但是该峰值强度表达式中需要先计算裂纹扩展长度, 且按照等效次生裂纹计算。计算的裂纹扩展长度公式较复杂且含有断裂强度因子, 导致计算时有一定困难。更重要的是, 该裂纹长度公式中还含有剪应力, 经分析可知这是一个未知量。由于文献[13]、[14]采用实测的裂纹长度进行计算, 这相当于增加了一个已知条件, 这个未知量的影响没有显示出来, 故其理论计算和试验结果吻合较好。如果不采用实测的裂纹长度, 用其推导的公式预测峰值抗剪强度, 还需作进一步的研究。尽管文献[13]、[14]的提出的峰值强度表达式还有待完善, 还是为改进基于 Lajtai 岩桥破坏理论的拉剪复合破坏模式的剪切峰值强度计算提供了很好的思路。

基于许多直剪试验观察到的现象, 本文首先提出了直剪条件下非贯通节理岩体扩展贯通模型, 其次建

立非贯通节理扩展贯通强度准则, 然后与前人的试验作了比较和分析。重点推导了岩桥以拉剪复合破坏时, 非贯通节理岩体的峰值强度公式。该公式通过迭代求解, 克服了文献[13]、[14]所推导的峰值强度的不足, 且理论计算值和试验实测值吻合较好。

1 非贯通节理岩体扩展贯通模型

非贯通节理岩体在直剪条件下, 其受力特点如图 1 所示。由图 1(b), 可知微元体内方向与剪切荷载夹角为 α 的斜面上^[6]

$$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_a + \frac{1}{2}\sigma_a \cos 2\alpha + \tau_a \sin 2\alpha \quad , \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{2}\sigma_a \sin 2\alpha - \tau_a \cos 2\alpha \quad , \quad (2)$$

式中 σ_a 、 τ_a 表示法向正应力和剪应力; α 表示斜面与剪切面的夹角。

$$\text{令} \quad \frac{d\sigma}{d\alpha} = -\sigma_a \sin 2\alpha + 2\tau_a \cos 2\alpha = 0$$

$$\text{则} \quad \tan(2\alpha) = \frac{2\tau_a}{\sigma_a} \quad , \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_a}{\sigma_a}\right) \quad , \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_a}{\sigma_a}\right) \quad , \quad (5)$$

式中 α_1 、 α_3 表示最大主应力面和最小主应力面与剪切面的夹角。

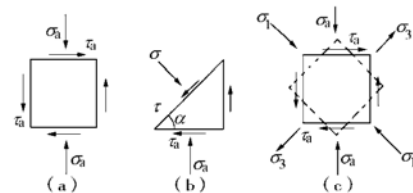


图 1 直剪试验应力分析图

Fig. 1 Stress analysis in direct shear test (after Lajtai^[6])

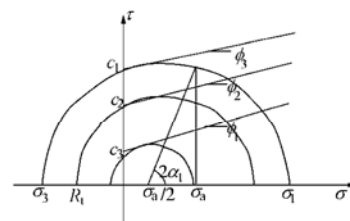


图 2 非贯通节理岩体破坏示意图

Fig. 2 Failure of rock mass containing discontinuous joints

将式(4)和(5)分别代入式(1), 得

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[\sigma_a + (\sigma_a^2 + 4\tau_a^2)^{1/2} \right] \quad , \quad (6)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \left[\sigma_a - (\sigma_a^2 + 4\tau_a^2)^{1/2} \right] \quad , \quad (7)$$

式中 σ_1 、 σ_3 表示最大、最小主应力。

对于非贯通节理岩体的贯通扩展，以下破坏准则成立：

(1) 当最小主应力达到 R_t 时，以张拉破坏扩展。

(2) 当 σ, τ 满足库仑准则时，以剪切破坏扩展。

由式 (4) ~ (7) 可知，在压剪应力作用下，应力状态具有明显特点，即最大主应力 σ_1 为压应力，最小主应力 σ_3 为拉应力^[6]。随着剪应力逐渐增加， σ_1 和 σ_3 的大小和方向都是不断变化的。图 2 表示具有不同抗剪强度参数的岩桥可能以不同的方式破坏。从图 2 可以看出：应力圆的圆心不变；若应力圆的最小主应力达到抗拉强度 R_t ，岩桥发生张拉破坏；若应力圆与莫尔库仑强度曲线相切，岩桥发生剪切破坏。破坏模式受法向应力的影响。由相应的非贯通节理扩展贯通模型示意图，即图 3，非贯通节理的贯通扩展模型可简化为如下几种类型：

模型 1：岩桥以张拉方式扩展，以张拉方式贯通。

模型 2：岩桥先以张拉方式扩展，后以剪切方式扩展，最终以剪切方式贯通。

模型 3：岩桥以剪切方式扩展，以剪切方式贯通。

以上破坏模型与许多学者的模型中试验观察到现象吻合^[6-7,10,12-13,17]。图 3 为共面非贯通节理岩体的破坏模型（为叙述方便，将扩展的裂纹、裂缝等统称新节理，下同）。对于不共面的平面非贯通节理，破坏形式与之类似，可参见文献[17]。

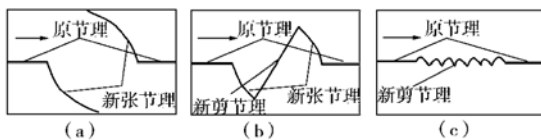


图 3 非贯通节理扩展贯通模型示意图

Fig. 3 Failure models of joints

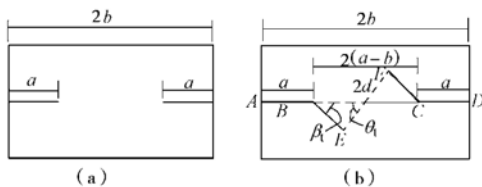


图 4 抗剪强度计算简图

Fig. 4 Shear strength of discontinuous joints

根据 Griffith 理论，在节理端部，节理端部扩展的条件为

$$\text{若 } \sigma_1 + 3\sigma_3 > 0, \quad -\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + \sigma_3)} = 2R_t, \quad (8)$$

$$\text{若 } \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0, \quad \sigma_3 = R_t. \quad (9)$$

将式 (4)、(5) 分别代入式 (8)、(9)，得

$$\tau_a < \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_a, \quad (10)$$

$$\tau_a > \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_a. \quad (11)$$

非贯通节理岩体扩展贯通机理是：当法向正应力较小时，若节理端部应力满足式 (8)，节理开裂时，开裂角和最大主应力与原节理面的夹角不一致；节理扩展方向与原节理方向不一致，两者为斜交关系。如不对节理岩体继续施加荷载，节理发展到一定程度之后，将会停止扩展，而不致引起节理岩体发生贯通破坏。反之，如果对节理岩体继续施加荷载，则新节理方向继续稳定地扩展，趋向于最大主应力 σ_1 的方向。节理端部应力满足式 (9) 时，节理扩展方向与原节理方向相同，且是不稳定地扩展，即使对节理岩体不增加荷载，该节理也会继续扩展，导致节理岩体贯通破坏^[18]。在节理扩展过程中，当岩桥某一方向上的正应力和剪应力满足莫尔—库仑准则，节理岩体也可能因剪切而破坏。而在法向正应力较大时，节理岩体一般以剪切扩展方式贯通破坏。

如前所述，在压剪应力状态下， σ_1 、 σ_3 是不断变化的。节理扩展的过程中，外加法向荷载对节理岩体的破坏方式有重要影响。节理端部的应力状态不同时，非贯通节理岩体的扩展破坏方式也不相同。当剪应力达到峰值强度时，非贯通节理岩体最终贯通方式既可能是张拉拉破坏，也可能是剪切破坏，这取决于法向应力的和非贯通节理岩体几何形状和力学性质，包括节理几何位置、节理面的抗剪强度参数和岩桥的抗剪强度参数等。

2 非贯通节理岩体扩展贯通强度

对于前述的破坏模型，通过考虑原节理面和岩桥的抗剪作用，可计算非贯通岩体节理抗剪强度。本文重点论述模型 2，即拉剪复合破坏的峰值抗剪强度的计算。

2.1 张拉破坏模型

当节理端部应力满足式 (8)，非贯通节理岩体抗剪强度按下式计算

$$\tau_{at} = \frac{a}{b} (c_n \sigma_a \tan \phi_j + c_j) + \frac{1b-a}{4b} \left(-(\sigma_a^2 + 8\sigma_a R_t) \right)^{1/2}, \quad (12)$$

式中 c_j , ϕ_j 为弱化了了的岩块粘聚力和内摩擦角， c_n 为节理面传压系数 ($0 < c_n < 1$)， σ_a 为法向正应力， τ_{at} 为剪切强度， R_t 为抗拉强度。

当节理端部应力满足式 (9)，非贯通节理岩体抗剪强度可按 Lajtai 岩桥破坏理论计算^[7]

$$\tau_a = \frac{a}{b} (c_n \sigma_a \tan \phi_j + c_j) + \frac{b-a}{b} (R_t (R_t - \sigma_a))^{1/2}. \quad (13)$$

2.2 拉剪复合破坏模型

计算非贯通节理岩体的峰值强度见图 4。笔者曾将峰值强度的最小主应力方向近似取为初裂时最小主应力方向进行计算。在峰值强度和初裂强度相差不大时, 这种简化对计算峰值抗剪强度是合适的。但是, 在峰值强度和初裂强度相差较大时, 两者所对应的角度有一定的差别。

本文按峰值强度来计算最小主应力方向。实际上, 贯通破坏时, 拉伸裂缝的切线方向为最大主应力方向。如图 4, 本文近似地把割线 BE 作为最大主应力方向, 与之垂直的方向即为最小主应力方向。

当岩桥贯通破坏时, 最大主应力与剪切方向的夹角为 β_t , 最小主应力与剪切方向的夹角为 α_t , 则有

$$\alpha_t = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{at}}{\sigma_a}\right), \quad (14)$$

$$\beta_t + \alpha_t = \frac{\pi}{2}. \quad (15)$$

因发生剪切破坏面与最大主应力面夹角为 $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'_0}{2}$, 则

$$\theta_t = \alpha_t - \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'_0}{2}\right), \quad (16)$$

$$\theta_t = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{at}}{\sigma_a}\right) - \frac{\phi'_0}{2} - \frac{\pi}{4}, \quad (17)$$

$$\beta_t + \theta_t = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'_0}{2}\right). \quad (18)$$

对图 4 所示的几何条件, 由正弦定理

$$d = \frac{\sin \beta_t}{\sin(\theta + \beta_t)}(b - a). \quad (19)$$

对图 4 所示的破坏路径, 按照静力平衡条件,

$\sum X = 0$, $\sum Y = 0$, 则

$$2a(c_n \sigma \tan \phi_j + c_j) + 2d(\tau_{EF} \cos \theta + \sigma_{EF} \sin \theta) = 2b\tau_a, \quad (20)$$

$$2ac_n \sigma_a + (\sigma_{EF} \cos \theta - \tau_{EF} \sin \theta) \times 2d = 2b\sigma_a. \quad (21)$$

σ_{EF} 、 τ_{EF} 满足莫尔-库仑准则, 即

$$\tau_{EF} = C'_0 + \sigma_{EF} \tan \phi'_0. \quad (22)$$

将式 (20)、(21) 代入式 (22), 解得^[14]

$$\tau_{at} = \left[\frac{(b - ac_n)}{b} \tan(\theta_t + \phi'_0) + \frac{a}{b} c_n \tan \phi_j \right] \sigma_n + \frac{(b - a)c'_0 \cos \phi'_0 \sin \beta_t}{b \cos(\theta_t + \phi'_0) \sin(\theta_t + \beta_t)} + \frac{a}{b} c_j, \quad (23)$$

式中 c_j , ϕ_j 为弱化了了的岩块内聚力和内摩擦角; c'_0 , ϕ'_0 为弱化的岩桥内聚力和内摩擦角; c_n 为节理面传压系数 ($0 < c_n < 1$); σ_a 为法向正应力; τ_{at} 为剪切强度。

将式 (19) 代入式 (23) 得

$$\tau_{at} = \left[\frac{(b - ac_n)}{b} \tan\left(\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{at}}{\sigma_a}\right) + \frac{\phi'_0}{2} - \frac{\pi}{4}\right) + \frac{a}{b} c_n \tan \phi_j \right] + \frac{(b - a)c'_0 \cos \phi'_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{at}}{\sigma_a}\right)\right)}{b \cos\left(\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{at}}{\sigma_a}\right) + \frac{\phi'_0}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'_0}{2}\right)} + \frac{a}{b} c_j. \quad (24)$$

通过对式 (24) 迭代求解, 可解得峰值剪应力, 此时的 τ_{amin} 为直剪条件下岩体的贯通破坏强度。

由式 (24) 可见, 峰值强度反应了非贯通节理岩体的几何特性和力学性质, 包括节理几何位置、节理面的抗剪强度参数和岩桥的抗剪强度参数等。

2.3 剪切破坏为主模型

可按 Jennings 方法, 即非贯通节理岩体抗剪强度按下式计算

$$\tau_{at} = \frac{a}{b}(c_n \sigma_a \tan \phi_j + c_j) + \frac{b - a}{b}(\sigma_a \tan \phi'_0 + c'_0), \quad (25)$$

式中 c_j , ϕ_j 为弱化的岩块内聚力和内摩擦角; c'_0 , ϕ'_0 为弱化的岩桥内聚力和内摩擦角, c_n 为节理面传压系数 ($0 < c_n < 1$); σ_a 为法向正应力; τ_{at} 为剪切强度。

3 非贯通节理岩体贯通模型分析验证

3.1 模型试验中观察到的现象及解释

白世伟选取砂: 石膏: 水 = 3: 3: 2 (重量比) 的混合料制作模型试件, 进行模拟共面闭合非贯通节理直剪试验。所做的图 5 中 (a) 方式 (几何形式为两边节理、中间岩桥) 典型断面破坏形态如图 5 (a) 所示。剪断面粗糙不平, 起伏度大; 节理尖端起始破裂方向都不沿原有的节理平面扩展。在正应力较小时, 图 5 中 (a) 方式的下半块试体中出现一条由节理尖端并一直切穿试体下表面的贯通裂纹^[15]。后者与模型 1 的破坏机理吻合。

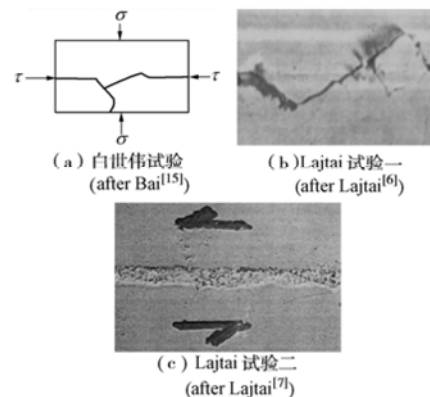


图 5 典型直剪试验破坏图

Fig. 5 Typical failure in direct shear test

Lajtai 选取水和石膏混合料制作模型试件, 模拟共面闭合非贯通节理直剪试验。典型的剪断面试验结

果如图 5 (b) 所示^[6]: 先以张拉方式扩展, 扩展一定距离后, 再以剪切破坏。这与模型 2 的破坏机理吻合。岩桥的应力满足式 (8) 时, 节理扩展方向与原节理方向斜交, 先稳定扩展, 最终节理岩体因剪切而破坏。

Lajtai 所做的另一模拟试验的典型剪断面试验结果如图 4 (c) 所示^[7]。节理直接以剪切方式破坏, 这与模型 3 的破坏机理吻合。

3.2 理论计算的峰值强度与试验实测值比较

将前述建立的剪切破坏强度准则应用于文献[12]所做的方式 (a) 试验工况, 材料的物理力学参数见表 1。压应力传递系数按文献[12]的建议取为 2/3, 弱化的岩桥的抗剪强度参数参照表 1 的抗剪强度参数取其值的 80%, 弱化后的抗拉强度亦参照表 1 的抗拉强度取其值的 80%, 计算结果如表 2 所示。表 2 中也列出了文献[15]根据试验实测的的夹角和裂纹长度 (以张拉破坏扩展的新节理长度) 进行计算的峰值强度。由表 2 可见, 本文理论计算和实测值吻合得较好, 最小误差为 2.97%, 最大的也仅为 7.54%。

诚然, 对于弱化抗剪强度参数的取值有一定局限性。然而, 各工况的理论计算值与实测值反映了相同的强度变化趋势, 数值也比较接近, 这说明建立的剪切破坏准则是正确的。

表 1 模型材料的物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of model materials						
容重 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度 σ_c/MPa	弹性模量 E_c/GPa	泊松比 ν	抗拉强度 σ_t/MPa	岩块粘聚力 c_0/MPa	岩块内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$
15.0	14.273	4.68	0.1	2.78	4.23	26.55
节理面粘聚力 C_f/MPa		节理面摩擦角 $\phi_f(^{\circ})$	节理面法向刚度 $K_n/(\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$	不同正应力下节理面切向刚度 $K_n/(\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$		
				$\sigma_n=1 \text{ MPa}$	$\sigma_n=2 \text{ MPa}$	$\sigma_n=3 \text{ MPa}$
0		35.2	431.10	4.67	16.25	38.54

表 2 理论值与试验值的对比表

Table 2 Comparison between theoretical and test results									
试验 编号	非贯通节理岩体			正应力	实测剪	文献[14]计	本文计算	相对 误差	
	几何特性/cm			σ_n	切强度	算剪切强度	剪切强度		
	节理	岩桥	节理	/MPa	τ /MPa	τ /MPa	τ /MPa		
1	13.5	3	13.5	2.0	1.4917	1.5070	1.4201	-4.76	
2	12	6	12	2.0	1.6650	1.7147	1.7190	3.24	
3	9	12	9	1.0	1.7505	1.8018	1.8824	7.54	
4	9	12	9	2.0	2.2917	2.3571	2.3597	2.97	
5	9	12	9	3.0	2.8678	2.9253	2.7815	-3.01	

同样, 将本文建立的剪切破坏强度应用于文献[6]和文献[10]的模型试验, 理论计算值和试验值吻合也较好, 这里不再列出。

4 结 论

本文经过理论分析, 提出了非贯通节理扩展贯通破坏模型并通过与前人的模型试验进行了分析验证。结论如下:

(1) 提出的非贯通节理直剪扩展贯通破坏模型为模型试验观察到的现象所验证; 非贯通节理直剪破坏

机理能解释模型试验观察到的现象。

(2) 通过修正 Lajtai 理论, 建立的拉剪复合破坏模型的峰值强度准则公式通过迭代求解, 克服了文献[13]、[14]的不足。

(3) 基于 Lajtai 理论, Jennings 方法, Griffith 理论等, 建立了直剪条件下非贯通节理岩体扩展贯通强度准则。该强度准则考虑的因素较全面, 包括节理几何位置、节理面的抗剪强度参数和岩桥的抗剪强度参数等, 能较好的反映实际情况。推导的拉剪复合扩展贯通抗剪峰值强度的理论计算值与模型试验结果吻合较好。

参考文献:

[1] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. (ZHOU Wei-yuan. Advanced rock mechanics [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990)

[2] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.)

[3] 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 Wei-shen, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong. Failure mechanism and anchorage effect of joints rock mass and its application in engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.)

[4] 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.

[5] Stimpson B. Failure of slope containing discontinuous planar joints[C]// Proc 19th U S Symp on Rock Mechanics, 1978: 296 - 300.

[6] LAJTAI E Z. Shear strength of weakness planes in rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1969, 6(7):499 - 515.

[7] LAJTAI E Z. Strength of discontinuous rocks in direct shear[J]. Geotechnique, 1969, 19(2):218 - 233.

[8] EINSTEIN H H, VENEZIANO D, BAECHER G B, et al. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1983, 20(5):227 - 236.

[9] 范景伟, 何江达. 含定向闭合断续节理岩体的强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(2):190 - 199. (FAN Jing-wei, HE Jiang-da. Strength properties of intermittently joints rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(2):190 - 199.)

- [10] 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]//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 Zuo-yuan, ZHU Wei-shen. Research of shear failure criteria of rock containing coplanar closed joints under compression and shear loads[C]// 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.)
- [11] 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]//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 Wei-shen, LIANG Zuo-yuan, FENG Guan-bei, et al. Physical simulation and strength analysis and forecast for properties of jointed rock mass[C]// 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.)
- [12] 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 Shi-wei, REN Wei-zhong, FENG Ding-xiang, et al. Research on the strength behavior of rock containing coplanar close intermittent joints by direct test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 10 - 16.)
- [13] 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.北京:2000:147 - 151.(REN Wei-zhong, BAI Shi-wei, FENG Ding-xian, et al. Strength behavior of rock mass containing coplanar close intermittent joints under direct shear condition[C]// Proceedings of 6th Congress of Chinese Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2000: 147 - 151.)
- [14] 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):1167 - 1672. (REN Wei-zhong, WANG Geng-sun, BAI Shi-wei, et al. Strength behavior of rock mass containing coplanar close intermittent joints under direct shear condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1167 - 1672.)
- [15] 沈婷,丰定祥,任伟中,等.由岩桥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 Ding-xiang, REN Wei-zhong, et al. Research on strength property of shear plane including discontinuity and rock bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(1): 33 - 38.)
- [16] 白世伟,任伟中,丰定祥,等.平面应力条件下闭合非贯通岩体破坏机理及强度特性[J].岩石力学与工程学报,1999, 18(6):635 - 640. (BAI Shi-wei, REN Wei-zhong, FENG Ding-xiang, et al. Failure mechanism and strength properties of rockmass containing close intermittent joints under plane stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 635 - 640.)
- [17] SAVILABTI T, NORDLUND E, STEPHANSSON O. Shear box testing and modeling of joint bridge[C]// BARTON N R, STEPHANSSON O. Proc Int Symp Rock Joints. Norway, 1990: 295 - 300.
- [18] 鲜学福,谭学术.层状岩体破坏机理[M].重庆:重庆大学出版社,1989.(XIAN Xue-fu, TAN Xue-shu. Failure mechanism on layered rock mass[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989.)