

# 层状岩体抗剪强度产状效应的数值试验研究

赵海斌<sup>1</sup>, 蒋中明<sup>1, 2</sup>, 伍东卫<sup>2</sup>

(1. 中南勘测设计研究院 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410014; 2. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**层状岩体力学特性呈现出明显的各向异性特点,其强度和变形参数不但与作用力和岩体结构面之间的夹角有关,同时还与岩体结构面的走向密切相关。为研究岩体结构面产状对层状岩体抗剪强度参数的取值影响,首先对某工程现场直剪试验进行模型辨识研究,然后采用数值试验方法对层状岩体抗剪断试验进行拓展性数值研究,进而对岩体的抗剪断强度各向异性进行了深入研究,分析了层状岩体抗剪断强度特性与结构面产状之间的变化规律。研究结果表明:层状岩体的抗剪强度参数呈现明显的非正交各向异性特点;随着结构面倾角的增大,抗剪断强度参数与结构面产状之间关系可采用空间椭圆面来描述。

**关键词:**层状岩体; 抗剪强度; 现场直剪试验; 数值试验; 各向异性

中图分类号: TU443

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.13.017

在工程建设中会经常遇到以沉积岩(如砂岩、泥岩)、部分变质岩(如板岩)等层状结构和火山岩(如玄武岩)等似层状结构为特点的岩体。人们通过大量的工程试验和实践经验,对这类特殊结构的岩体力学性质进行了研究和总结,提出了层状结构岩体力学性能的“各向异性”概念<sup>[1-5]</sup>。节理化岩体的强度,一方面受岩石材料性质的影响,另一方面取决于岩块的活动自由度。后者又受结构面特征(数量、方向、间距、性质等)和赋存条件(地应力、水、温度等)的控制。大量研究表明,岩体具有明显的结构面产状强度效应特征<sup>[6-14]</sup>。近年来,许多学者对岩体强度的各向异性展开了深入研究。曾纪全<sup>[15]</sup>采用石膏材料模拟不同裂隙倾角的层状岩体室内剪切试验和常规三轴剪切试验,揭示了层状、似层状结构岩体力学性质各向异性的本质和机理,及抗剪强度参数的结构面倾角效应,并在此基础上,提出了一系列层状结构岩体强度参数与结构面倾角的相关公式。张玉军<sup>[16]</sup>提出了一种层状岩

体抗剪强度 $c$ 、 $\varphi$ 值随结构面倾角变化的经验关系式。上述研究主要针对结构面倾角对层状岩体强度及参数的影响。从现有文献看,无论是现场试验,还是室内试验,均未发现有关研究结构面走向变化对岩体抗剪强度参数影响的报道。实质上岩体作为岩块和结构面的组合体,试验加载作用力的方向对岩体强度的影响是显而易见的。之所以目前关于层状岩体强度走向效应特性的试验研究成果很少,主要是受岩体结构复杂,物理试验成本较高等众多因素的影响。数值试验方法的提出与不断发展<sup>[17]</sup>,为研究层状岩体抗剪强度的结构面产状效应特性提供了一条可行而有效的途径。为此,本文以淋溪河水电站坝址岩体现场直剪试验为依据,通过岩体直剪试验的数值模型辨识,然后采用数值试验的方法,探索层状岩体抗剪特性的结构面产状效应的研究方法。

本文所指的倾向效应,是指试验剪切荷载方向不变(指向正东)、结构倾角不变而倾向角变化引起的岩

收稿日期:2015-03-13

基金项目:“十二五”科技支撑计划课题(2012BAK03B04);水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金资助项目(PKLHD201305)

作者简介:赵海斌,男,教授级高级工程师,博士,主要从事岩土工程设计方面的工作。E-mail:hbzhao@139.com

通讯作者:蒋中明,男,教授,博士,主要从事岩土工程设计方面的工作。E-mail:zzmmjiang@163.com

体抗剪断强度参数的变化特性。

1 岩体现场直剪试验的模型辨识

1.1 数值模型基本条件

以淋溪河水电站坝区岩体硬性结构面直剪试验组(τx1)为例,采用有限差分软件 FLAC\_3D 进行数值仿真试验。结构面性状为层间错动并充填方解石脉,岩性为红色瘤状泥质灰岩。岩体层面直剪试验采用平推直剪法。每组 5 块试件,分别施加不同的法向载荷。基于工程岩体的连续性理论及概化方法,对不含明显裂隙的岩体部分采用实体单元进行模拟,结构面用无厚度的接触面单元模拟。为消除剪切缝以下岩体尺寸对计算结果的影响,下部岩石几何尺寸取试件尺寸的 10 倍。数值仿真模型单元数 9 732,节点数量 13 528。结构面数值仿真计算网格见图 1。

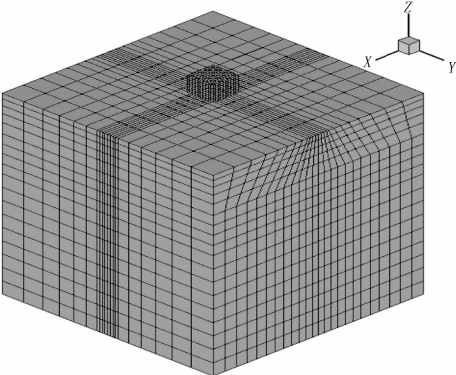


图 1 数值仿真计算网格

- (1) 计算边界条件。铅直边界上施加水平约束;水平底部边界上施加铅直约束。
- (2) 本构模型采用应变软化模型。
- (3) 计算参数选取。数值分析所需要的参数采用国电公司中南院提供的地质报告建议值,相关力学参数取值为:弹性模量 14.5 GPa;泊松比 0.23;密度 2 500 kg/m<sup>3</sup>;凝聚力 1.1 MPa;摩擦角 44.5°。
- (4) 荷载施加方式。垂直荷载按预定值由低到高逐步施加,待计算达到平衡后,再逐级施加水平荷载,直到剪切面发生剪切塑性流动。

数值计算过程中,剪切破坏标准按以下方法控制:  
① 无法施加剪切载荷或无法稳定;② 在剪应力与剪切位移关系曲线上出现明显突变段;③ 在剪应力与剪切位移曲线上未出现明显突变段,但总剪切位移已达到试件边长的 10%。

1.2 数值模型辨识成果

表 1 给出了各级荷载情况下岩体直剪数值试验和现场试验的抗剪断强度,及岩体抗剪断强度参数。数

值试验中正应力和剪应力分别取结构面单元上的垂直应力和剪应力均值。由表 1 可知,数值试验与物理试验的试验成果相对误差均在 10% 以内(现场试验库伦强度拟合值:  $f' = 0.646$ ,  $c = 0.014$  MPa;相关系数为 0.967;相对误差为 8.50%。数值试验库伦强度拟合值:  $f' = 0.591$ ,  $c = 0.013$  MPa;相关系数为 0.997;相对误差为 7.14%)。由此可见,采用数值仿真方法得到的岩体抗剪断强度参数成果可以满足工程要求。

表 1 数值仿真和现场试验结果对比分析

试件 编号	现场试验/ MPa	数值试验/ MPa	绝对 误差	相对误差/ %
τx1-1	1.478	1.468	0.01	0.68
τx1-3	0.286	0.287	0.001	0.35
τx1-4	1.796	1.789	0.007	0.39
τx1-5	0.683	0.688	0.005	0.73

2 数值试验方案

在岩体现场直剪试验模型辨识的基础上,以某一性质的结构面为对象,通过变换结构面的方位,来研究层状岩体抗剪断强度的结构面产状效应,试验方案如表 2 所示。

表 2 结构面走向与倾向组合

产状要素	角度取值/(°)	法向应力/MPa
方位角	0,15,30,45,60,75,90,105,120,135,150,165,180,195,210,225,240,255,270,285,300,315,330,345,360	0.6,1.2,1.8,2.4
倾角	0,15,30,45,60,75,90	

由数值试验几何模型的对称性可知,部分结构面倾角相同、倾向不同的层状岩体直剪试验结果相同,基本原理如图 2 所示。图 2 中角度 α 为走向线与南北方向的夹角,β 为方位角。数值试验方案中剪切荷载方向始终为正东向。图 3 为结构面产状为 120°∠90°的层状岩体数值模型及结构面分布图。

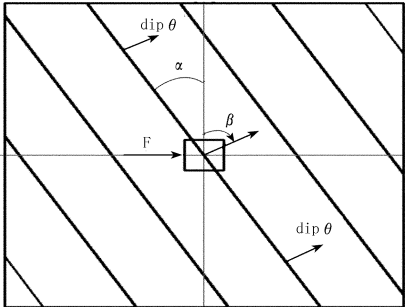


图 2 走向与倾向关系示意

3 抗剪断强度的倾向效应分析

由于岩体抗剪强度结构面的倾角效应研究已有较多的文献成果,故本文重点分析抗剪强度的倾向效应。根据数值试验数据整理并绘制了不同倾角条件下层状岩体抗剪断强度随结构面倾向的变化曲线,如图 4 所示。图中 4 条曲线分别代表不同正应力条件下的抗剪强度数值试验结果。

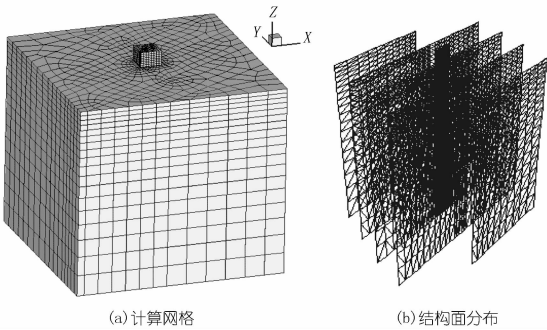


图 3 数值试验模型

由图 4 可知:作用在试件顶面的法向应力越大,岩体抗剪断强度越大;法向应力的对结构面倾角为  $0^{\circ}$  的层状岩体抗剪断强度的影响,要比其它倾角条件下的岩体抗剪强度影响要大。

在结构面倾角不同的情况下,层状岩体抗剪强度随结构面倾向变化的规律也不相同。当结构面倾角等于  $0^{\circ}$  时,无论结构面倾向如何变化,岩体抗剪强度值均相同,即抗剪强度分布呈圆形。其原因是在这种产状条件下,无论试件受力方向如何变化,它们之间均会保持完全相同的受力条件,故数值试验得到的结果完全相同。当结构面倾角等于  $90^{\circ}$  时,岩体抗剪强度值在南北向和东西方向略有差异,抗剪强度分布呈椭圆形。当岩体受力方向与结构面方向垂直时,岩体抗剪强度受结构面影响相对较小;当岩体结构面方向与试验剪切水平力方向平行时,抗剪强度受结构面影响相对较大。当结构面倾角在  $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$  之间变化时,岩体抗剪强度在不同结构面倾向方向上的取值各不相同,表明岩体抗剪强度具有明显的倾向变化效应;同时不同倾向条件下岩体的抗剪强度值基本都关于试验剪切荷载方向呈轴对称关系。

4 抗剪断强度参数的倾向效应分析

根据数值试验得到的层状岩体抗剪断强度值,基于莫尔-库伦强度准则,求得不同结构面产状的层状岩体抗剪断强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值,并绘制不同结构面倾角的层状岩体  $c$ 、 $\varphi$  值随结构面倾向的变化曲线分别如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可知:层状岩体抗剪

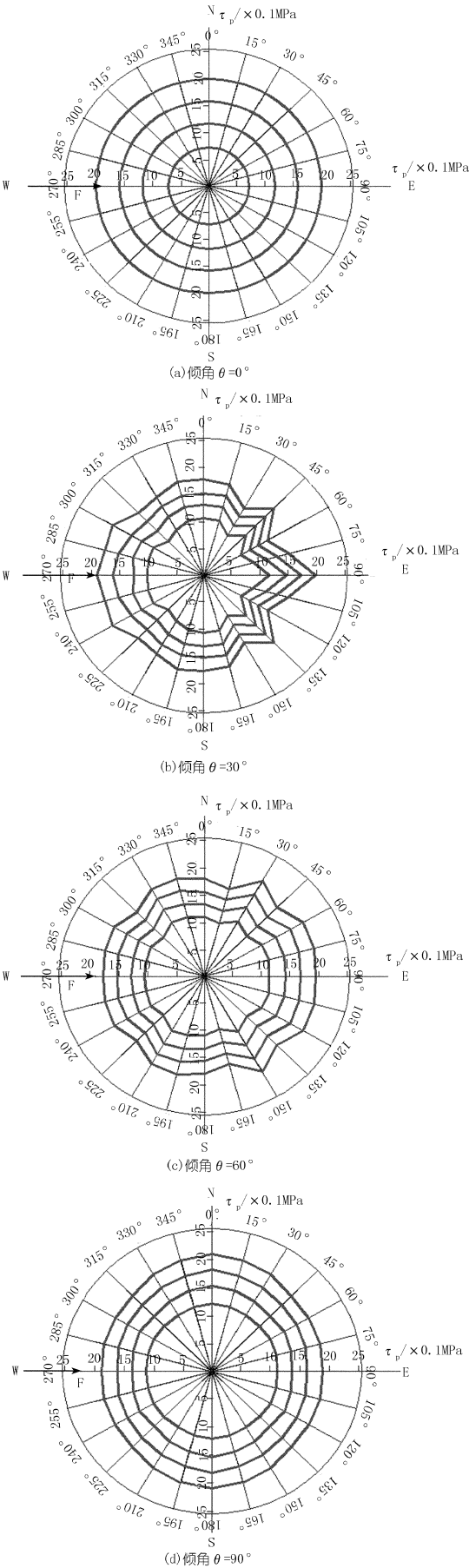


图 4 抗剪断强度与结构面倾向关系

断强度参数随结构面倾向的变化规律与抗剪断强度基本相似:当结构面倾角为 0 时,岩体凝聚力和内摩擦角大小与结构面倾向无关;当结构面倾角等于 90°时,岩体凝聚力和内摩擦角在倾向上呈椭圆形分布。当结构面倾角在 0°~90°之间变化时,岩体凝聚力和内摩擦角关于数值试验剪切作用力方向对称分布。

图 5 和图 6 展示的凝聚力 and 内摩擦角在倾向角上的分布规律表明,在构成岩体的岩块和结构面强度相同的情况下,岩体的宏观抗剪强度参数取值与倾角和倾向都具有强烈的相关性。这种相关性实质上反映的是岩体抗剪强度参数的各向异性特性。

5 抗剪强度参数各向异性特性描述

由前述数值试验成果可知,层状岩体抗剪强度参数具有强烈的各向异性特点。在实际工程中,岩体及结构面的几何形态是固定不变的,但不同部位岩体的受力方向却是各不相同的。从工程角度分析,根据岩体的实际受力方向,采用反映岩体各向异性的强度值进行分析,其结果更加科学合理。由于数值试验方法相对于物理试验方法在试验时间和成本等方面的优越性,使得全面研究层状岩体的各向异性特性成为可能。下面根据上述不同倾角和倾向组合条件下的成果,引入层状岩体的结构面产状影响系数来描述岩体的各向异性特性。

结构面产状影响系数  $\xi$  指一定产状的层状岩体抗剪强度参数与完整岩体抗剪断强度参数之比,其中  $\xi_c$  为凝聚力的产状影响系数,  $\xi_\varphi$  为内摩擦角的影响系数。根据结构面产状影响系数的定义,结合数值试验成果可求得岩体的凝聚力和内摩擦角影响系数  $\xi_c$ 、 $\xi_\varphi$  值。

为了反映结构产状对抗剪强度参数影响系数的影响,依据不同倾角和产状条件下得到的凝聚力和内摩擦角影响系数  $\xi_c$ 、 $\xi_\varphi$ ,实质上反映了岩体凝聚力和内摩擦角在以倾向和倾角构成的坐标空间中的取值,因此可以建立结构面产状影响系数与倾向和倾角相关的坐标系。为了获得更加简便的结构面产状影响系数表达式,建立坐标转换系统如图 7 所示。图中坐标转换关系为:  $x = \xi_c \cos\theta \sin\beta$  或  $\xi_\varphi \cos\theta \sin\beta$ ;  $y = \xi_c \cos\theta \cos\beta$  或  $\xi_\varphi \cos\theta \cos\beta$ ;  $z = \xi_c \sin\theta$  或  $\xi_\varphi \sin\theta$ 。

依据数值试验得到的数据 ( $\xi_\varphi, \theta, \beta$ ) 可计算相应的当量 ( $x, y, z$ ) 的值。在三维坐标系中,原数据 ( $\xi_\varphi, \theta, \beta$ ) 对应的当量数据 ( $x, y, z$ ) 的空间分布形态在  $XY, ZX, ZY$  平面上的投影如图 8 所示。由图 8 可知,内摩擦角当量数据 ( $x, y, z$ ) 在  $XY$  平面上分布形态基本呈椭圆形,在  $ZX, ZY$  平面上接近半椭圆形。凝聚力

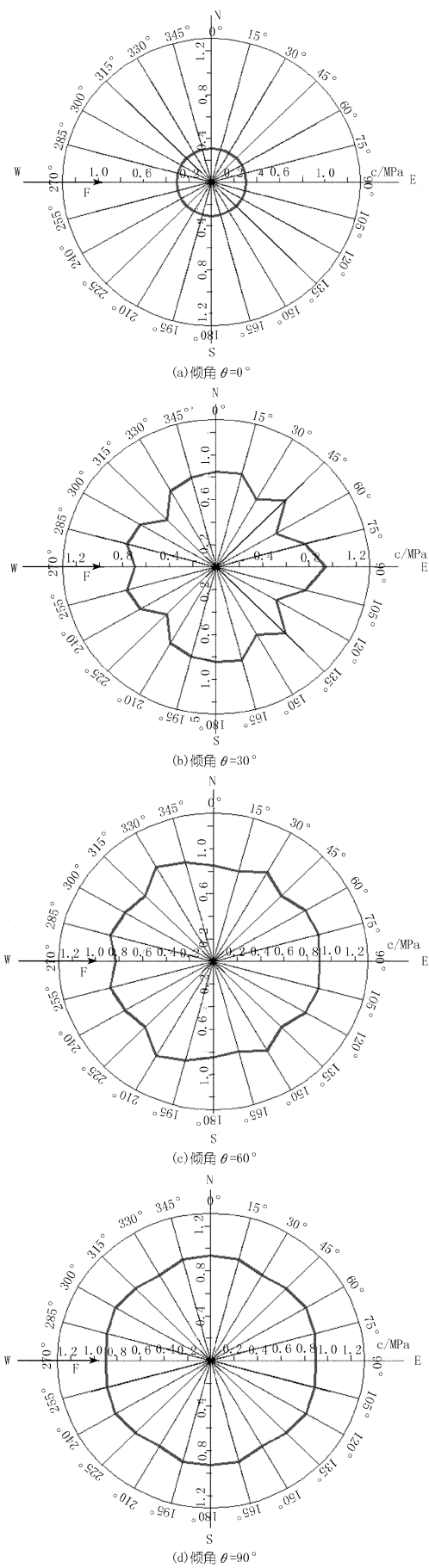


图 5 凝聚力与结构面倾向角关系

影响系数空间分布与内摩擦角影响系数的空间分布基本相同,故省略。图 9 给出了结构面产状影响系数的空间拟合曲面。

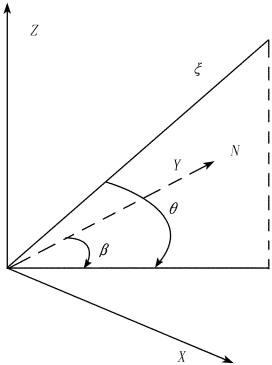


图 7 坐标转换示意

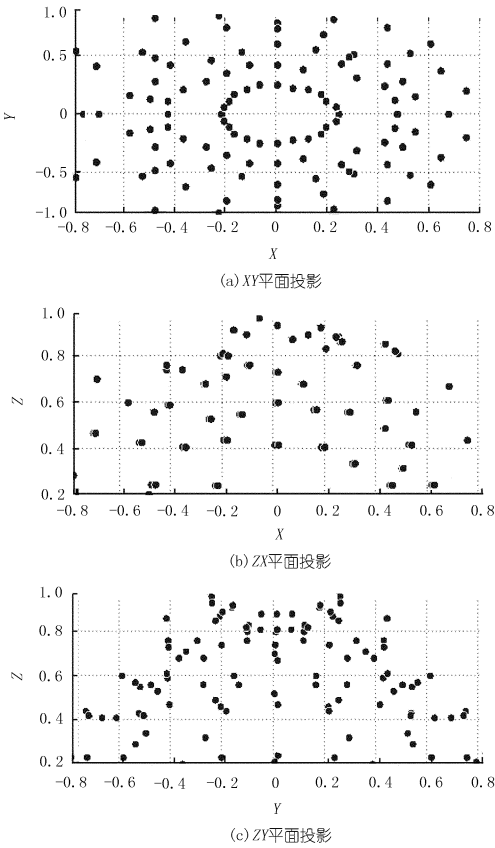


图 8 内摩擦角影响系数空间分布

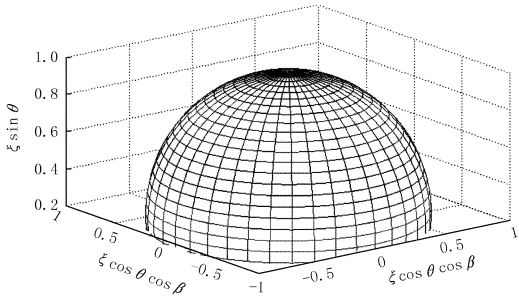


图 9 三维曲面拟合图

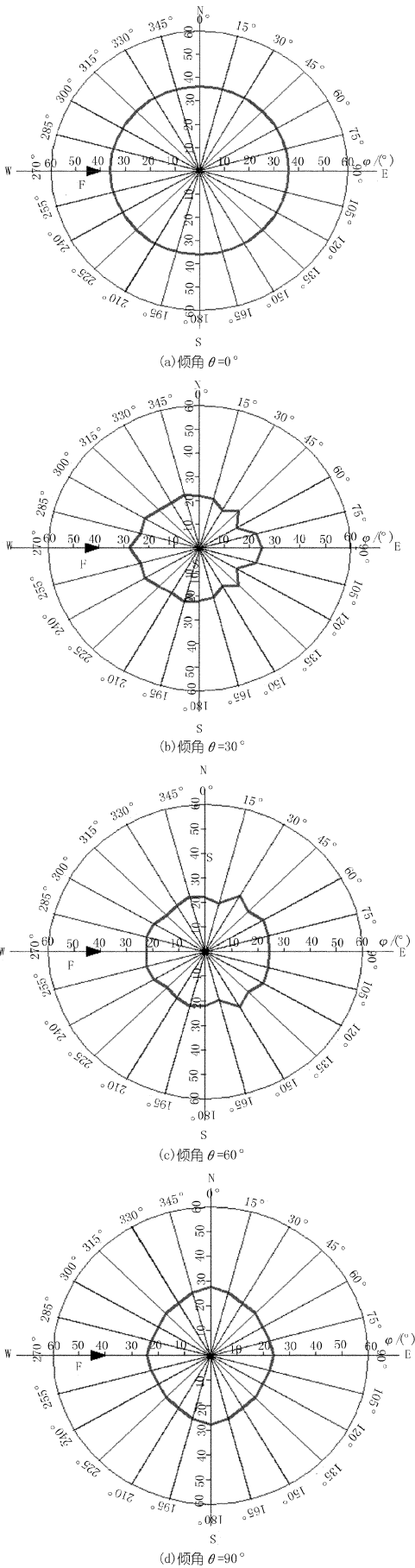


图 6 内摩擦角与结构面倾向角关系

按照三维数据拟合得到的当量内摩擦角影响系数的椭球面方程为

$$\frac{x^2}{0.55^2} + \frac{y^2}{0.71^2} + \frac{(z - 0.2)^2}{0.79^2} = 1 \quad (1)$$

在获得抗剪强度参数影响系数的椭球面方程后,就可以求得层状岩体各向异性抗剪强度参数表达式,即

$$\begin{cases} c = \xi_c c_0 \\ \varphi = \xi_\varphi \varphi_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $c_0$ 、 $\varphi_0$  值代表完整岩体的凝聚力和内摩擦角;  $c$ 、 $\varphi$  为结构面产状一定条件下的层状岩体的凝聚力和内摩擦角。

## 6 结 论

(1) 数值试验表明层状岩体抗剪强度及相关参数具有明显的结构面产状效应,结构面方向与作用力方向关系不同,所得岩体强度特性亦不相同。

(2) 层状岩体抗剪强度参数的各向异性特性可以通过引入结构面产状影响系数来度量,且产状影响系数可以用椭球面来描述。

(3) 基于物理试验的数值试验方法可以有效拓展物理试验成果的范围,对全面研究岩体强度特性乃至变形特性参数具有重要的参考意义。

### 参考文献:

- [1] Tao G, King M S. Shear - wave velocity and Q anisotropy in rocks: a laboratory study [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1990, 27 (5): 353 - 361.
- [2] Homand F, Morel E, Henry J P, et al. Characterization of the moduli of elasticity of an anisotropic rock using dynamic and static methods

[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1993, 30 (5): 527 - 535.

- [3] Lerau J, Saint - Leu C, Sirieys P. Anisotropy of dilatancy of slates [J]. Rock Mechanics, 1981, 13 (3): 185 - 196.
- [4] 曾纪全, 邵小曼, 胡卸文. 岩体力学各向异性试验研究 [J]. 水电工程研究, 2001, (2): 8 - 21.
- [5] 刘东燕, 朱可善. 含断续节理岩体强度的各向异性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (4): 366 - 371.
- [6] 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.
- [7] 宋建波, 张倬元, 于远忠, 等. 岩体经验强度准则及其在地质工程中的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [8] Amadei B. Strength of a regularly jointed rock mass under biaxial and axisymmetric loading conditions [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, 1988, 25 (1): 3 - 13.
- [9] Hoek E. Strength of jointed rock masses [J]. Geotechnique, 1983, 33 (3): 187 - 223.
- [10] 李元霞. 板理化岩体结构面抗剪强度及结构面力学效应研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- [11] 何沛田, 黄志鹏. 层状岩石的强度和变形特性研究 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (S1): 1 - 5.
- [12] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (3): 335 - 339.
- [13] 周文, 朱自强, 柳群义, 等. 复杂节理面剪切强度和变形特征的数值分析 [J]. 中南大学学报, 2009, 40 (6): 1700 - 1704.
- [14] 周科峰, 李宇峙, 柳群义. 层状岩体强度结构面特征的数值分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 43 (4): 1424 - 1428.
- [15] 曾纪全. 结构面倾角对岩体抗剪强度参数的影响 [C] // 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004.
- [16] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体抗剪强度的方向性及剪切破坏面的确定 [J]. 岩土力学, 2001, 22 (3): 255 - 257.
- [17] 蒋中明, 伍东卫, 赵海斌, 等. 复杂裂隙岩体力学特性的数值试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30 (11): 72 - 76.

(编辑: 赵凤超)

## Numerical study on occurrence effect of shear strength of stratified rock mass

ZHAO Haibin<sup>1</sup>, JIANG Zhongming<sup>1,2</sup>, WU Dongwei<sup>2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Hydropower Development Key Technology, PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** Stratified rock mass has obvious anisotropic mechanical characteristics. The strength and deformation parameters of stratified rock mass are related to the angle between load and structural plane and the strike of structural plane. To explore the influence of rock occurrence on the shear strength parameters, the model identification study on in - situ direct shear test for a project is conducted, and further the shear parameters of stratified rock mass are studied numerically in an extended level. The relationship of shear strength characteristics and occurrence of the plane is analyzed. It indicates that the shear strength parameters of stratified rock mass show an obvious non - orthogonal anisotropic effect; with increase of dip angle of structural plane, the variation law of shear strength parameters and occurrence of structural plane could be described by a spatial ellipse surface.

**Key words:** stratified rock mass slope; shear strength; in - situ direct shear test; numerical experiment, anisotropy