DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2019. 05. 34

基于横观各向同性模型的片岩隧洞稳定性研究

孙 涛¹,杨渝南¹,高素芳¹,刘 杰^{1,2},谢晓康¹,韩绍康¹ (1.三峡大学 土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北 宜昌 443002)

摘 要:以四川大渡河丹巴水电站引水隧洞为研究对象,结合三轴试验和自主研发的空间多角度片理抗拉强度测试技术,对不同片理夹角下石英云母片岩的力学参数进行测定,得出石英云母片岩的弹性模量、c 和 φ 与围压之间的关系,并分别给出干燥和饱和条件下各力学参数围压敏感性排序。通过表征各向异性的参数 k_1 、 k_2 ,对不同片理夹角下石英云母片岩的各向异性与围压的关系进行评价,并进一步指出不同高度岩样抗拉强度随片理角度的变化规律。采用横观各向同性本构模型,通过设定材料主轴空间方位,可模拟片理空间任意角度展布的岩体。针对大区域模型存在的不足,提出一种主应力构造精细应力场的新方法,避免了大模型的应力边界效应,可方便快捷对局部区域进行精细应力构造。根据片理走向及不同倾角选定 15 个不同片理空间展布模型进行计算分析,分别得出应力、位移、塑性区随片理角度的变化规律,并指出不同片理展布条件下的最不利工况。

关键词: 石英云母片岩; 横观各向同性模型; 物理力学参数; 应力场; 隧洞围岩稳定性; 片岩隧洞中图分类号: TV732.3; U451.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2019)05-0221-09

Research on stability of schist tunnel based on transversely isotropic model

SUN Tao¹, YANG Yunan¹, GAO Sufang¹, LIU Jie^{1,2}, XIE Xiaokang¹, HAN Shaokang¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Taking the diversion tunnel of Danba Hydropower Station of Dadu River in Sichuan Province as the research object, we developed the space multi-angle tensile strength test technology and combined with the triaxial test. The mechanical parameters of quartz mica schist under different angles were measured. The relationships between elastic modulus, c, φ and confining pressure of quartz mica schist were obtained, and the order of confining pressure sensitivity rankings of the mechanical parameters under dry and saturated conditions were calculated. By analyzing the anisotropic parameters $k_1 \ k_2$, the relationship between the anisotropy of quartz mica schist and the confining pressure under different angles was evaluated, and the change law of the tensile strength of different heights along with the angle of schistosity was further obtained. Using a transversely isotropic constitutive model and setting the spatial orientation of the material's principal axis, it is possible to simulate the rock mass distributed at any angle in the schistosity space. In view of the deficiencies of the large-area model, this paper proposes a new method for constructing the fine stress field with principal stress, avoiding the stress boundary effect of the large model, and making it possible to perform fine stress construction on the local area quickly and easily. According to the trend of the schistosity and different dip angles, fifteen different schistosity spatial distribution models were selected for calculation and analysis. The changes of the stress, displacement, and plasticity regions with the angles of the schistosity were respectively given, and the worst working conditions under different

收稿日期:2018-12-14; 修回日期:2019-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51439003、51579138);国家自然科学基金杰出青年人才计划项目(2018CFA065);三峡大学硕士学位论文培优基金项目(2019SSPY035)

作者简介:孙涛(1994-),男,江苏盐城人,在读硕士研究生,主要从事岩土边坡工程及卸荷岩体力学研究。

通讯作者:杨渝南(1979-),女,重庆人,硕士,讲师,主要从事环境岩土等方面研究。

schistosity distribution were pointed out.

Key words: quartz mica schist; transversely isotropic model; physical and mechanical parameter; stress field; tunnel surrounding rock stability; schist tunnel

1 研究背景

片岩在深部高地应力区域大量存在,可近似为 层厚极小的层状岩体,其变形和强度具有明显的各 向异性特性,这一特点又会对工程岩体稳定性产生 特殊影响[1]。在室内试验方面,刘志勇等[2]利用 MTS815 岩石试验系统研究石英云母片岩在加、卸 荷应力路径下的力学特性;周新等[3]探讨片岩加速 蠕变阶段的轴向应变 - 应变率 - 偏应力关系特征: 杨以荣等[4]系统研究高围压卸荷条件下石英云母 片岩变形破坏特征及能量演化规律:何忠明等[5]通 过室内试验和数值模拟分析层状岩体单轴压缩情况 下的应力应变响应以及强度特征;于德海等[6]对干 燥和饱水状态下的绿泥石片岩进行三轴压缩试验, 获取水对试样强度和变形特性的影响规律;刘廷 等[7]通过室内三轴试验,研究不同含水率状态下云 母片岩的强度和变形特性;王章琼等[8]研究片岩在 片理面倾角分别为0°、45°、90°时的变形参数各向异 性特征及破坏机制;郑松林等[9]通过片岩在单轴应 力作用下的岩石力学特性试验研究,得出岩石试块 的强度特征、变形特征与作用应力的大小、作用应力 与结构面之间夹角有密切联系的一般规律;张晓平 等[10]研究了与片岩裂纹扩展相关的应力门槛值。

针对强度理论和本构关系方面,肖明砾等[11]基于带 Kachanov 蠕变损伤因子的蠕变模型,研究丹巴水电站石英云母片岩的三轴蠕变特性及其各向异性特性;张春生等[12]以颗粒流方法为基础,开展不同尺寸、不同结构组成的各向异性特征研究,揭示变形参数和强度参数的变化规律;文献[13-17]针对层状岩体弹性参数的各向异性进行了试验与理论分析,并构建了相应的破坏准则,张学民等[18]研究了岩石材料的变形和强度各向异性性状、各向异性破坏准则和弹塑性本构关系及各向异性特征对层状围岩隧道变形和稳定性的影响;张嘉威[19]根据单轴压缩试验及统计损伤理论,建立了针对单轴压缩状态下的岩石损伤本构模型。

在工程应用方面,已有许多结合大型工程的片岩研究成果,如 Nasseri 等^[20]研究了片岩力学参数和变形破坏特征的各向异性特征;刘杰等^[21]、许振华^[22]及单治刚等^[23]运用大型岩土分析软件 ADINA和单轴试验阐明了丹巴石英云母片岩各向异性特

征,且岩体的变形和破坏规律主要取决于地应力及 岩体的结构特征;在基于隧道等含片岩岩体的大型 工程方面,Hwang等^[24]研究了各向异性的片理角度 对隧道稳定性的影响;Shrestha等^[25]指出当隧洞通 过高度片状化的岩层时,在塑性变形和剪切区域存 在严重的隧道变形。

在上述各方面取得丰硕成果的同时,有以下几方面需进一步深入研究:

- (1)不同片理角度下岩体力学参数取值无试验依据。很多学者在进行岩体参数的取值时往往按经验进行参数折减或仅按数值反演来确定,人为主观性太强,参数取值无试验数据支持。
- (2)现有研究未系统考虑岩样在不同高度和不同片理角度下的岩样抗拉强度尺寸效应的规律。
- (3)现有研究多数采用的计算模拟范围较大, 在各边界施加的应力边界效应显著,应力影响范围 较小,无法影响到内部局部精细区域,无法对局部区 域进行精细的片理模拟和精细应力构造。
- (4)现有研究未深入考虑围岩片理与隧洞洞轴 不同夹角下隧洞围岩稳定性影响规律并给出最不利 工况。

随着我国西部大开发和可持续发展战略的实施,西部区域的引水隧洞工程和交通隧洞工程正不断涌现,针对地下工程中围岩开挖后岩体各向异性显著的研究越来越成为热点。本文基于丹巴引水隧洞工程,通过对该工程中石英云母片岩的各项物理和力学性质进行试验研究,并建立隧洞模型,从位移、塑性区、塑性应变值3个方面对隧洞开挖后围岩稳定性进行评价,对于隧洞开挖加固设计有着重要的理论意义和工程参考价值。

2 工程概况

丹巴水电站位于四川省甘孜藏族自治州丹巴县境内的大渡河干流上,引水隧洞位于大渡河左岸山体中,全长约16710 m,垂直埋深基本为500~900 m,最大埋深可达约1220 m,大部分洞室位于石英云母片岩软岩区域,岩石坚硬程度初步分类属较软岩,岩体质量以IV类为主,成洞条件差,开挖后有可能出现较严重的大变形破坏现象,遇水也易发生软化现象,如图1所示。因此,丹巴水电站引水隧洞软岩成洞问题突出,为枢纽开发的关键技术问题之一。

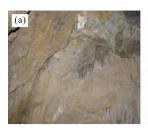




图 1 隧洞工程围岩破坏图

3 片理在不同空间角度下的参数测定

为获得石英云母片岩在高地应力下三轴加卸载 力学特性和变形破坏规律,本文开展了室内三轴压 缩试验测定不同围压作用下岩样的力学参数。

3.1 室内三轴试验

3.1.1 三轴试验方案 试验以RMT-150C 岩石力学试验系统为平台,三轴试验采用3组不同片理倾角,4种围压循环加卸载。由于引水隧洞段实测最大主应力为36 MPa,故将围压分为0~10、0~15、0~20、0~30、0~35、0~40 MPa 共6级,轴向和围压同时加载,速率均为0.2 kN/s,每次循环2~4次,轴向应力线性增加直至岩样破坏,不同倾角岩样三轴

加卸载试验加载模式如图 2 所示,部分岩样三轴试验破坏形态图如下图 3 所示。

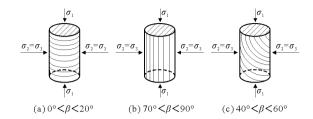


图 2 不同片理倾角的三轴加卸荷试验

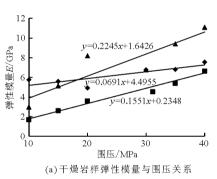


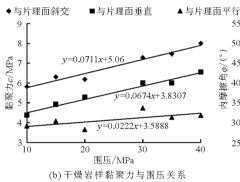




图 3 部分岩样三轴试验破坏形态

3.1.2 $c \varphi$ 值各向异性的试验分析 根据 3 组 36 个岩样的三轴试验成果,对石英云母片岩表现的特征绘制成图,如图 4~5 所示。





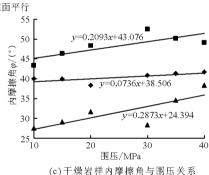
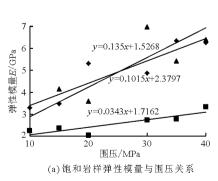
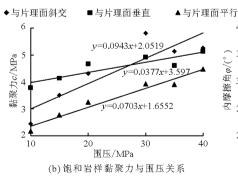


图 4 干燥岩样弹性模量、黏聚力和内摩擦角与围压关系图





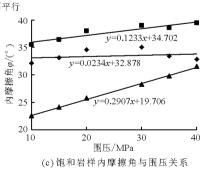


图 5 饱和岩样弹性模量、黏聚力和内摩擦角与围压关系图

由图 4~5 可知,随着围压的增加,石英云母片岩的弹性模量、内摩擦角和黏聚力均与围压呈线性增大规律,但不同片理倾角岩样的各力学参数对围压的敏感性有所差异。

(1)在干燥条件下,围压对岩样力学参数影响分析:由图 4 分析可知,①当轴向力与片理面平行时,随着围压的增加岩样参数弹性模量和内摩擦角线性增大速率最快,斜率分别为 0.2245 和 0.2873;②当轴向力与

片理面斜交时岩样黏聚力增大速率最快,斜率为0.0711;③根据斜率对比得出岩样力学参数对围压敏感性排序为内摩擦角>弹性模量>黏聚力。

- (2)在饱和条件下,围压对岩样力学参数影响分析:由图 5 分析可知,①当轴向力与片理面平行时,随着围压的增加岩样弹性模量、内摩擦角增大速率最快,斜率分别为 0.135 和 0.2907;②当轴向力与片理面斜交时,岩样黏聚力增大速率最快,斜率为 0.0943;③根据斜率对比得出岩样力学参数对围压敏感性排序为内摩擦角 > 弹性模量 > 黏聚力。
- (3)饱和石英云母片岩相对干燥状态的弹性模量降低 20%~40%,黏聚力降低 25%~40%,内摩擦角降低 20%-30%。表明水对片岩的弹性模量、内摩擦角和黏聚力有显著影响,在实际工程设计应用中应当考虑水对岩体质量的劣化影响。
- 3.1.3 各向异性与围压关系分析 由于片理的存在,石英云母片岩具有显著的各向异性特征,给出表征各向异性公式(1)和(2)。

$$k_1 = \frac{\left(\sigma_1 - \sigma_3\right)_{//}}{\left(\sigma_1 - \sigma_3\right)_{\perp}} \tag{1}$$

$$k_2 = \frac{E_{//}}{E_{\perp}} \tag{2}$$

式中: σ_1 为最大主应力, Pa; σ_3 为最小主应力(由于为单轴压缩, 故 $\sigma_3 = 0$), Pa; k_1 、 k_2 分别为石英云母片岩的单轴抗压强度和变形模量各向异性参数; $E_{//}$, E_{\perp} 分别为平行、垂直节理的变形模量。 k_1 和 k_2 等于1 时说明岩石各向同性, 当其越偏离1 时, 各向异性越明显。

根据表征各向异性的公式(1) 和(2) 计算得出各向异性参数 k_1 和 k_2 ,根据计算结果得出各向异性程度与围压关系图,如图 6 所示,在不同围压下对不同片理倾角的石英云母片岩的各向异性进行评价。

由图 6 可知,在低围压下 $k_1 > 1$ 且 $k_2 < 1$,各向异性显著,随着围压的增加, $k_2 \rightarrow 1$,而后逐渐减小; k_1 逐步降低,各向异性减小,而后逐步升高,各向异性增加。岩体强度受片理结构影响较大,在实际工程

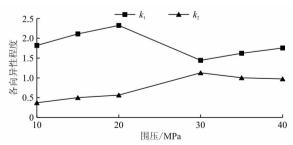


图 6 各向异性程度与围压关系图

设计应用中应当充分考虑岩样的各向异性特性。

3.2 抗拉强度各向异性劈裂试验分析

3.2.1 试验方案 该试验基于笔者自主研发的单个岩样多次劈裂测岩石抗拉强度的试验方法来测定不同片理产状的石英云母片岩抗拉强度。试验分为5组,每组4个岩样(岩样高度分别为2.5、3.5、4.5和5.5 cm),具体试验方案如表1所示,通过对破坏后岩样进行重粘接,旋转岩样调整加载力与片理交角实现通过单个岩样测不同片理角度下岩石抗拉强度,两次劈裂后岩样如图7~8所示:

表 1 劈裂试验方案表

试验组次	劈裂面与片理夹角/(°)			
	第1次劈裂	第2次劈裂		
P1	0	90		
P2	10	80		
P3	20	70		
P4	30	60		
P5	40	50		

3.2.2 不同高度岩样抗拉强度随片理角度的变化分析 由图 9 可知,石英云母片岩的抗拉强度受控于其片理特征,相同高度下岩样的抗拉强度随片理角度线性增大;相同片理夹角下,岩样抗拉强度随岩样高度递增呈良好线性递增关系。徐燕飞等^[26]研究结果显示,各种岩石的劈裂强度都存在尺寸效应,不同岩石劈裂强度尺寸效应主要受岩石的物质成分和结构所影响;硅质砂岩劈裂强度随试样厚度增加呈线性增大;本文研究试验结果与该结论观点相一致。

石英云母片岩的抗拉强度与其试验岩样高度和片理角度有关,为研究不同片理角度下岩样抗拉强度尺寸效应的规律,定义岩样抗拉强度尺寸效应(此处尺寸效应实际指岩样的高径比)系数为 k_{size} = $\sigma_{5.5}/\sigma_{2.5}$,其中 $\sigma_{5.5}$ 是高度为 5.5 cm 岩样的抗拉强度, $\sigma_{2.5}$ 是高度为 2.5 cm 岩样的抗拉强度, $\sigma_{2.5}$ 是高度为 2.5 cm 岩样的抗拉强度,得出岩样抗拉强度尺寸效应系数 k_{size} 随片理角度的变化关系图,如图 10 所示。



图7 第1次劈裂后岩样

图 8 第 2 次劈裂后岩样

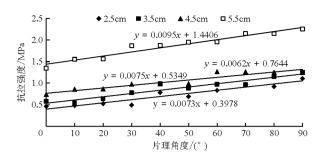


图 9 不同高度岩样抗拉强度随片理角度的变化关系

由图 10 可知,不同片理角度下岩样抗拉强度尺寸效应系数 k_{size} 均大于 2,即相同角度下 5.5 cm 高度岩样测得的抗拉强度一般为 2.5 cm 高度岩样抗拉强度的 2 倍以上,可见岩样的抗拉强度具有显著的尺寸效应,且岩样抗拉强度尺寸效应与片理角度呈线性递减的关系。

3.3 横观各向同性本构模型研究

根据前期室内试验成果和现场围岩破坏特征的 分析,石英云母片岩的变形与破坏均表现出显著的 横观各向同性特征。

根据横观各向同性理论可知,在局部坐标系下, 增量型弹性应力 - 应变的关系为:

$$[\Delta \sigma'] = [K'][\Delta \varepsilon'^e]$$
 (3)

式中: σ' 为岩体弹性应力; ε'' 为岩体线应变, [K'] 为局部刚度矩阵,即:

$$[K'] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$
(4)

其中:

$$C_{11} = \frac{E_1(1 - n\mu_{13}^2)}{(1 + \mu_{12})(1 - \mu_{12} - 2n\mu_{13}^2)},$$

$$C_{12} = \frac{E_1(u_{12} + n\mu_{13}^2)}{(1 + \mu_{12})(1 - \mu_{12} - 2n\mu_{13}^2)},$$

$$C_{13} = \frac{E_1\mu_{13}}{1 - \mu_{12} - 2n\mu_{13}^2},$$

$$C_{33} = \frac{E_3(1 - \mu_{12})}{1 - \mu_{12} - 2n\mu_{13}^2},$$

$$C_{66} = \frac{E_1}{1 + \mu_{12}}, \quad n = \frac{E_1}{E_3} \circ$$

式中: E_1 和 μ_{12} 分别为各向同性平面的弹性模量和 泊松比; E_3 和 μ_{13} 分别为垂直与同性平面的弹性模量、泊松比。

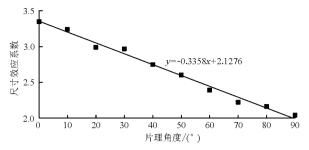


图 10 抗拉强度尺寸效应系数随片理角度的变化关系

通过对不同片理角度的岩样进行室内岩石物理力学试验(图 3、7、8),得到平行片理和垂直片理方向岩样的力学参数,如表 2,将其作为片理模型的计算参数,为公式(4)提供参数支撑。

表 2 岩体计算参数表

参数	平行片理方向	垂直片理方向
E_i /GPa	11.33	4.67
$oldsymbol{\mu}_i$	0.32	0.29
$[\tau]$ /MPa	28.27	38.61
$[\sigma]$ /MPa	4.52	1.57
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	2.85	2.85

4 计算参数及模型

4.1 计算参数

采用横观各向同性本构模型,在 ADINA 软件中通过空间两点坐标来定位材料主轴,通过改变空间两点坐标来调节材料轴的方位,如图 11,材料主轴 z 方向取垂直于片理参数,x 和 y 轴均以平行片理参数选取,在测点地应力实测与计算值(表 3)的基础上得出空间任意角度的岩体片理模型的计算参数,实现各种片理类型及角度的模拟。

4.2 引水隧洞软岩段地质体大区域三维模型

沿着引水隧洞方向建立三维模型,如图 12 所示,模型顺引水洞方向取 10 358.215 m,垂直引水洞方向取 2 066.367 m,根据地形,最大相对高度 3 750 m,选取实测地应力测点位置为 ZK2 和 ZK3,ZK2 和 ZK3 测点剖面位置如图 13 所示。

采用水压致裂法测取测点 ZK2 和 ZK3 的地应力实测值,通过调节所建立大区域三维模型边界应力的大小,反演分析得出与实测值相接近的反演计算值,如表 3。

4.3 主应力构造精细应力场方法的提出

4.3.1 大区域模型反演分析存在的不足 采用以

上大区域模型反演分析可较好地得出引水隧洞大区域的整体地应力场,但大区域模型反演分析存在以下不足:①隧洞开挖各工况下围岩片理角度在不断改变,无法对局部区域进行精细的片理模拟和精细应力构造;②大区域模型只是在各边界面上施加应力,应力边界效应显著,应力影响范围较小,无法影响到内部局部精细区域。因此本文对大模型局部区域建立小模型,进行精细计算模型应力场构造。

表 3 测点地应力实测与计算值 MPa

埋深/ m	测点	项目	$\sigma_{\scriptscriptstyle x}$	$\sigma_{\scriptscriptstyle y}$	$\sigma_{\scriptscriptstyle z}$	$ au_{\scriptscriptstyle xy}$	$oldsymbol{ au}_{zx}$	$oldsymbol{ au}_{yz}$
445	ZK2	计算	10.89	15.12	9.63	1.75	-0.98	-2.53
445							-1.38	
800	7K3	计算	11.12	14.11	10.42	1.39	-2.88	-2.72
800	ZIXJ							-2.67

建立小模型后,若直接采用测得各正应力、剪应力在各边界上施加应力,各边界面均有3个不同的应力,共18个应力,构造的应力场空间受力复杂,无法对局部区域进行精细应力场精准构造,空间单元体的受力示意图如图14所示。

4.3.2 精确主应力构造精细应力场的方法 本文基于此提出一种新的主应力构造精细应力场方法,提出的《一种精确主应力构造精细应力场的装置及方法》(201811096241.5)发明专利已公示 $^{[27]}$,且该方法在丹巴工程中得以成功运用。采用实际精确的主应力方式进行构造,首先根据 ZK2 测点实测地应力的6 个应力分量 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_x , τ_y , τ_z , τ_z 可得出3个不变量 I_1 , I_2 , I_3 。

$$I_{1} = \sigma_{x} + \sigma_{y} + \sigma_{z}$$

$$I_{2} = \sigma_{x}\sigma_{y} + \sigma_{y}\sigma_{z} + \sigma_{z}\sigma_{x} + 2\tau_{xy} + 2\tau_{yz} + 2\tau_{zx}$$

$$I_{3} = \sigma_{x}\sigma_{y}\sigma_{z} + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - 2\sigma_{x}\tau_{yz} - 2\sigma_{x}\tau_{yz}$$

$$(7)$$

$$\sigma_3 - I_1 \sigma_2 - I_2 \sigma_1 - I_3 = 0 \tag{8}$$

运用 Matlab 软件,可求出三元一次方程组(8),得到各主应力值大小,根据主应力值的大小,由公式(9)~(10)联立求解后按公式(11)计算主应力倾角 α_i 和方位角 θ_i ,测点 ZK2 各主应力、方位角和倾角 如表 4。

$$(\sigma_{x} - \sigma_{i}) l_{i} + \tau_{xy} m_{i} + \tau_{zx} n_{i} = 0$$

$$\tau_{xy} l_{i} + (\sigma_{y} - \sigma_{i}) m_{i} + \tau_{yz} n_{i} = 0$$

$$\tau_{xz} l_{i} + \tau_{yz} m_{i} + (\sigma_{z} - \sigma_{i}) n_{i} = 0$$

$$(9)$$

$$l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 1 ag{10}$$

公式(9) 中 $l_i \setminus m_i \setminus n_i$ (i = 1, 2, 3) 分别为主应力 σ_i 对于 $X \setminus Y \setminus Z$ 轴的方向余弦。

$$\alpha_i = \sin^{-1} n_i, \ \theta_i = \tan^{-1} \frac{m_i}{l_i}$$
 (11)

选取局部小区域,根据 ZK2 测点各主应力倾角和方位角建立隧洞模型,在模型边界上施加与之垂直的相应面力,其大小为3个主应力值,即为精细计算模型应力场构造,如图 15 所示。该方法用实际精确的3个主应力进行精细应力场精准构造,大大优化了空间多个应力构造应力场的复杂性并提高了精准度。

表 4 测点 ZK2 各主应力、方位角和倾角计算值

应	i力/MI	Pa	方	立角/	(°)	倾	角/(°	,)
σ_1	σ_2	σ_3	θ_1	θ_2	θ_3	α_1	α_2	α_3
17.08	10.63	5.40	157	66	136	-22	-9	65

根据表 4,建立尺寸为 240 m×240 m×240 m的立方体隧洞模型,隧洞断面为圆形,直径为 16 m,片理层面产状取 N65°、WNE \angle 80°,岩体强度参数和变形参数参照表 2 进行取值,对开挖后隧洞围岩稳定性进行评价。

5 隧洞开挖后围岩稳定性评价

5.1 空间多角度片理与隧洞轴向夹角关系说明

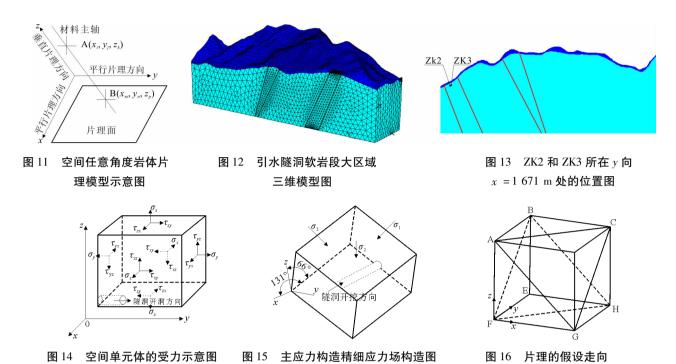
由于施工现场开挖各工况下围岩片理角度在不断改变,使得围岩片理与隧洞轴向夹角也在不断改变,施工现场实地考察结果显示,片理与洞轴方向水平面夹角的度数分布集中在 45°~90°之间,局部地段也可能出现其他类型及各种角度穿切情况。由此设定了 3 类片理走向类型及 0°、15°、45°、75°、90°片理进行模拟计算,如图 16 所示,假定洞轴方向为 x 方向,定义第 1 类 45°片理面为与平面 ACHF 平行,第 2 类 45°片理面为与平面 ABHG 平行,第 3 类 45°片理面为与平面 BCGF 平行,其他角度亦按照此进行分类,以此对空间多角度片理与隧洞轴向夹角的关系进行说明。

5.2 空间多角度片理产状下隧洞围岩稳定性分析

本文以洞长 36 m,洞径 8 m 的试验洞为例,研究洞室围岩的稳定性随片理产状的变化规律,从而预测最不利片理隧洞工况和隧洞失稳破坏可能性最大的位置。通过调整材料主轴来实现 3 类片理走向及 0°、15°、45°、75°、90°片理进行模拟计算,下面主

要从应力、位移、塑性区3个方面对开挖后隧洞围岩稳定性进行分析,计算云图中位移和应力数据均为

以开挖隧洞为中心点的径向位移和径向应力,其方 向以指向隧洞圆心为正,反之为负。



5.2.1 应力分析 隧洞开挖后洞室围岩处于受压 状态,各工况下洞室周围应力分布基本一致,主要集 中于洞室的左下方拱脚和右上方拱肩,水平方向应 力均较小,没有明显的变化规律。

由计算结果得出不同片理工况下应力变化趋势 图,如图 17 所示。

由图 17 分析可知,不同片理角度工况下围岩应力随着片理角度总体趋势是先递增而后递减。第 2 类和第 3 类不同片理产状的隧洞围岩的应力变化规律较为一致,均在片理角度为 15°时,隧洞围岩应力值达到最大,分别为 25.81 和 23.07 MPa,第 1 类片理变形规律略有差异,在片理角度为 45°时,隧洞围岩应力值达到最大,为 24.14 MPa,表明工程中 3 类片理走向类型在片理角度分别为 15°、15°、45°时为最不利工况,围岩应力对隧洞稳定性影响较大,应重点加固并监测该工况下隧洞围岩的变形情况。

5.2.2 位移分析 根据计算结果统计得出 3 类片 理角度位移云图对比表,如表 5 所示。

由表 5 分析可知,第 1 类和第 2 类不同片理产 状的隧洞围岩的变形规律较为一致,其最大变形多 发生在左侧拱肩和右侧拱脚,第 3 类片理不同片理 倾角下,变形规律略有差异,45°时最大变形位于拱 顶和拱底。工程中应针对变形较大的区域重点加固 监测。

表 5 3 类片理角度位移云图对比表

从 ○ ○ 天月 柱用反应物公图 / 1 化					
角度分类/(°)	第1类	第2类	第3类		
0		0	0		
15	0	O	O		
45	0	O	C		
75	C	O	S		
90	O	O			

由计算结果得出不同片理工况下位移值随片理 角度变化图,如图 18 所示。

由图 18 分析可知,3 类片理走向类型均在片理 角度为 90°时,隧洞围岩位移值达到最大,分别为 10.88、10.88、9.72 cm;表明工程中 3 类片理走向类 型均在片理角度为 90°时为最不利工况,隧洞围岩 会出现较大变形或失稳,应着重考虑隧洞开挖的安 全性。 5.2.3 塑性区分析 根据计算结果统计得出 3 类片理角度塑性区云图对比图,如表 6 所示。

对表 6 各工况进行分析可知, 开挖卸荷后 3 类 各角度片理均出现较大塑性区, 塑性区开展部位均 类似, 其主要集中于隧洞左侧拱底和右侧拱肩处。 多数片理角度工况下, 隧洞开挖后左侧拱底塑性区 开展深度较右侧拱肩塑性区略大, 仅在第 1 类 45°和第 3 类 45°工况下, 右侧拱肩塑性区深度大于左侧拱底。

由计算结果得出不同片理工况下围岩塑性区深 度和面积变化趋势图,如图 19 和 20 所示。

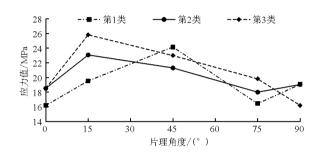


图 17 不同片理工况下应力变化趋势图

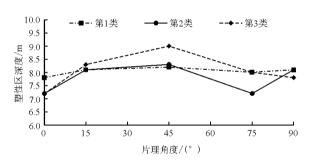


图 19 不同片理工况下围岩塑性区深度变化趋势图

由图 19~20 分析可知,不同片理角度工况下的 围岩塑性区深度及面积差异很大,但总体趋势是随 着片理角度的增加围岩塑性区深度和面积先递增而 后递减。

- (1)围岩塑性区深度及面积分析:①第1类片理角度隧洞开挖后,45°时塑性区开展深度最大,为8.2 m,15°时塑性区面积最大,为139.7 m²;②第2类片理角度隧洞开挖后,45°时塑性区开展深度最大,为8.3 m,且45°时塑性区面积也最大,为200.1 m²;③第3类片理角度隧洞开挖后,45°时塑性区开展深度最大,为9.0 m,75°时塑性区面积最大,为188.5 m²。
- (2)从围岩塑性区深度和面积分析可得出:①3 类片理均在45°时塑性区深度最大,为最不利片理 角度:②不同类片理塑性区面积无明显规律性,第1

表 6 3 类片理角度塑性区云图对比表

角度分类/(°)	第1类	第2类	第3类
0			
15			
45			
75			
90			

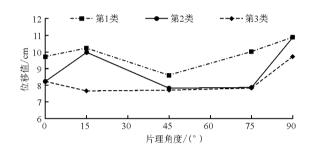


图 18 不同片理工况下位移变化趋势图

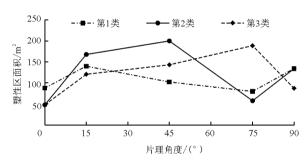


图 20 不同片理工况下围岩塑性区面积变化趋势图

类在 15°时为最不利工况,第 2 类在 45°时为最不利工况,第 3 类则在 75°时为最不利工况。

6 结 论

- (1)随着围压的增加,石英云母片岩的弹性模量、内摩擦角和黏聚力均与围压呈线性增大的关系,但不同片理倾角岩样的各力学参数对围压的敏感性有所差异。在干燥和饱和两种条件下,岩样力学参数对围压敏感性排序均为内摩擦角>弹性模量>黏聚力。
- (2)饱和石英云母片岩相对干燥状态的弹性模量降低 20%~40%,黏聚力降低 25%~40%,内摩擦角降低 20%~30%。表明水对片岩的弹性模量、内摩擦角和黏聚力有显著影响,在实际工程设计应用中应当考虑水对岩体质量的劣化影响。

- (3)随着围压的增加,石英云母片岩的各向异性程度呈线性递减趋势;且石英云母片岩的抗拉强度具有显著的尺寸效应。
- (4)本文提出一种新的主应力构造精细应力场方法,避免了大计算模型的边界效应,可对局部区域进行精细的片理模拟和精细应力构造。
- (5)根据片理走向及不同倾角选定 15 个不同 片理空间展布模型进行计算分析,分别得出应力、位 移、塑性区随片理角度的变化规律,并指出不同片理 展布条件下的最不利工况。

参考文献:

- [1] SERRANO A ,OLALLA C. Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass, Part I; Basic modes of failure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(3):301-324.
- [2] 刘志勇,肖明砾,卓莉,等. 石英云母片岩加卸荷力学特性及其卸荷本构研究[J]. 岩土工程学报,2016,35(S2);85-91.
- [3] 周 新,巨能攀,赵建军,等. 片岩三轴蠕变特性及蠕变模型研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(33):218-223.
- [4] 杨以荣,谢红强,肖明砾,等. 高围压卸荷条件下横观各向同性岩体变形破坏与能量特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(8):1999-2006.
- [5] 何忠明,彭振斌,曹平,等. 层状岩体单轴压缩室内试验分析与数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010,41(5):1906-1912.
- [6] 于德海,彭建兵. 三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1): 205-211.
- [7] 刘 廷,张家铭,徐晓波,等. 三轴压缩下云母片岩强度和变形特性试验研究[J]. 工程勘察,2013,41(1):5-9+19.
- [8] 王章琼,晏鄂川,刘毅学,等. 片岩变形参数各向异性特征及机制研究[J]. 岩土力学,2014,35(5):1317-1322+1328.
- [9] 郑松林,程世佐. 片岩的力学特性试验研究[J]. 江西有色金属,1993,7(1):9-13.
- [10] 张晓平,王思敬,韩庚友,等. 岩石单轴压缩条件下裂纹 扩展试验研究——以片状岩石为例[J]. 岩石力学与 工程学报,2011,30(9):1772-1781.
- [11] 肖明砾,卓 莉,谢红强,等. 三轴压缩蠕变试验下石英云母片岩各向异性蠕变特性研究[J]. 岩土力学,2015,36(S2):73-80.
- [12] 张春生,刘宁,褚卫江,等.石英云母片岩各向异性特征多尺度精细化描述[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3):573-582.

- [13] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rock[J]. Geological Magazine, 1960, 97(1):65-72.
- [14] TALIERCIO A, LANDRIANI G S. A failure conditionfor layered rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25(5):299-305.
- [15] RAMAMURTHY T. Strength, modulus responses of anisotropic rocks[J]. Compressive Rock Engineering, 1993, 1:313-329.
- [16] TALESNICK M L, BLOCH FRIEDMA E. Compatibility of different methodologies for the deformation of elastic parameters of intact anisotropicrocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36 (7):919-940.
- [17] TIEN Y M, KUO M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3):399-412.
- [18] 张学民. 岩石材料各向异性特征及其对隧道围岩稳定性影响研究[D]. 长沙:中南大学,2007.
- [19] 张嘉威. 考虑损伤与残余强度的岩石类材料本构模型及其应用研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [20] NASSERI M H B, RAO K S, RAMAMURTHY T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003,40(1):3-23.
- [21] 刘杰,骆世威,李建林,等.大渡河丹巴水电站长大深 埋软岩各项异性及宏观力学参数研究[J],岩土力学, 2013,34(10):2919-2927.
- [22] 许振华. 片理结构岩体采场稳定性研究[D]. 赣州: 江 西理工大学,2007
- [23] 单治钢,陈国庆,周春宏,等. 丹巴水电站石英云母片岩力学特性及岩体质量分类[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(3):2070-2078.
- [24] HWANG R H, YANG Tianhong, SUN Peifeng. Influence of anisotropic rock on tunnel stability with consideration of fluid solid coupling [J]. Applied Mechanics and Materialsv, 2011, 90 93:2101 2107.
- [25] SHRESTHA P K, PANTHI K K. Plastic deformation behavior in tunnel in schist and schistose mica gneiss based on a case from Nepal himalaya [C]//Proceedings of the 13th World Conference of ACUUS, 2013;408 418.
- [26] 徐燕飞,赵伏军,王国举,等.不同岩石巴西劈裂强度的尺寸效应[J]. 矿业工程研究. 2012,27(4):7-12.
- [27] 刘杰,兰 俊,高素芳,等. —种精确主应力构造精细应力场的装置及方法:中国,201811096241.5[P].2019 02-19.