

基于各向异性本构模型的隧道支护控制

代春泉^{1,2}, 王磊^{1,2}, 王渭明^{1,2}

(1. 山东科技大学 土木建筑学院, 青岛 266590; 2. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 青岛 266590)

摘要: 为了采用传统的力学模型来描述各向异性条件下隧道的受力特征与变形分布规律, 作者基于空间滑动面理论的各向异性弹塑性本构模型, 通过 C++ 编程形成动态链接库 dll 文件, 进行了 FLAC^{3D} 各向异性弹塑性本构关系的二次开发. 模拟分析结果表明, 在各向异性条件下, 隧道锚杆受力呈非对称分布的状态, 经破坏区锚杆加长后模拟分析, 围岩塑性区明显减小, 且锚杆受力趋向均匀. 通过胶州湾隧道接线工程现场应用, 基于各向异性本构关系的隧道关键区支护控制是可行的.

关键词: 隧道支护; 空间滑动面理论; 各向异性弹塑性; FLAC^{3D} 二次开发; 支护控制

中图分类号: TU 43

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)08-1202-06

Tunnel Supporting Control Based on Anisotropic Constitutive Model

DAI Chuan-quan^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, WANG Wei-ming^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to describe the tunnel's stress and deformation distribution by traditional mechanical model, the anisotropic elastic plastic model based on SMP was used, and through forming the dll file by programming with C++, the FLAC^{3D} secondary development of anisotropic elastic-plastic model was conducted. Results obtained from the simulation analysis indicate that the stress distribution of the tunnel anchors is asymmetric under the anisotropic condition. When the anchors in the plastic zone are lengthened, the plastic zone of the surrounding rock decreases obviously, and the stress distribution of the anchors becomes uniform. Through field application in Sichuan Road connecting line project of Jiaozhou Bay Tunnel, the key zone supporting method based on the anisotropic constitutive relationship proves to be available.

Key words: tunnel support; SMP; anisotropic elastic-plastic; secondary development in FLAC^{3D}; supporting control

0 引言

据地质学界统计, 地球表面 2/3 的面积被具有层状沉积结构或层状节理的沉积岩、变质岩覆盖, 在我国这个比例占到 77.3%^[1-2]. 从工程岩体力学分析, 这类岩石具有显著的各向异性特征, 其应力场、

位移场分布规律以及岩体破坏模式与各向同性假设条件下有明显差异^[3].

Nasseri 等^[4]通过室内试验分析了 4 种变质岩在不同倾角(0~90°)下的单轴与三轴压缩变形特征, 并给出了考虑各向异性的岩体破坏准则; Talesnick 等^[5]通过多种试验手段分析了岩体的各

收稿日期: 2010-10-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174128).

作者简介: 代春泉(1978—), 男, 博士研究生. 主要从事岩土力学理论与应用, 地下工程项目管理、风险管理, 工程法律方面的研究. E-mail: dcqwin@163.com.

向异性参数,并结合实际工程进行了各向异性稳定性分析;Lavrikov 等^[6]从微观角度分析了材料各向异性弹塑性变形特征,并通过数值模拟分析了各向异性条件下隧道开挖应力场与位移场的分布;Krivoi 等^[7]根据室内试验分析了不同应力空间下岩体的各向异性变形特征;李镜培等^[8]以 Max-well 黏性模型为基础给出了各向异性黏弹性本构关系,并分析了不同的各向异性参数对隧道围岩位移分布的影响;朱珍德等^[9]根据柱状节理岩体的变形特征,推导了基于空间 Cosserat 模型各向异性本构关系,并通过 FLAC^{3D} 二次开发分析了地下隧道的应力场与位移场分布规律;李晓红等^[10]根据层状岩体中隧道施工变形规律,以横观各向异性弹塑性模型分析了深埋隧道施工变形特征;高春玉等^[11-12]根据砂板岩室内三轴试验数据,分析了各向异性对材料变形的影响;张久长等^[13]根据层理状岩石的室内三轴循环加卸载试验,推导了各向异性条件下层理状岩石的各向异性弹塑性参数与应变的关系;王渭明等^[14]研究了各向异性条件下混凝土井壁的应力分布规律与变形特征;王磊等^[15]通过将各向异性材料分层计算,分析了冻结软岩的黏塑性变形。

上述研究成果从不同角度研究了材料各向异性对其变形特征的影响,本文尝试从室内岩石单轴、三轴压缩试验分析各向异性条件下岩石的变形特征,推导基于空间滑动面理论(以下简称 SMP 准则)的各向异性弹塑性本构模型,并通过 FLAC^{3D} 二次开发结合胶州湾隧道进行了施工变形分析。

1 空间滑动面理论

在现有的强度准则中,SMP 准则考虑了中间主应力的影响,能较好反映岩土材料的实际变形状态^[16]。张连卫等^[17]、罗汀等^[18]、邹博等^[19]、连锁营等^[20]分别基于 SMP 准则研究了不同材料的强度与变形特性。

SMP 准则中主应力的形式可以表示为^[21-23]

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{\mu^2 \sigma_1 \sigma_2} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{\mu^2 \sigma_2 \sigma_3} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\mu^2 \sigma_1 \sigma_3} = 8 \quad (1)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为第 1、第 2、第 3 主应力; μ 为材料摩擦系数 $\mu = \tan \varphi$ φ 为材料的摩擦角。

式(1)所表示的 SMP 准则并没有考虑材料黏聚力的影响,Houlsby^[21]根据土的变形特征提出了考虑材料黏性效应的 SMP 准则,即

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{(c + \mu\sigma_1)(c + \mu\sigma_2)} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{(c + \mu\sigma_2)(c + \mu\sigma_3)} +$$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(c + \mu\sigma_1)(c + \mu\sigma_3)} = 8 \quad (2)$$

式中 c 为材料黏聚力。

当 $c=0$ 时,式(2)为式(1)所表示的 SMP 准则。在 π 平面上 SMP 准则以及莫尔-库伦(M-C)准则如图 1 所示。

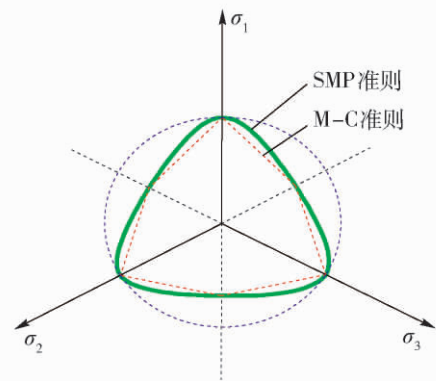


图 1 π 平面上 SMP 准则和 M-C 准则
Fig. 1 SMP criteria and M-C criteria in π plane

2 基于 SMP 的各向异性模型

2.1 各向异性弹性本构关系

在如图 2 所示的各向异性体中,增量形式的各向异性弹性本构关系为

$$\Delta \sigma = D \Delta \epsilon \quad (3)$$

式中: D 为刚度矩阵,可以由工程弹性常数表示; $\Delta \sigma$ 为弹性应力增量矩阵; $\Delta \epsilon$ 为弹性应变增量矩阵。

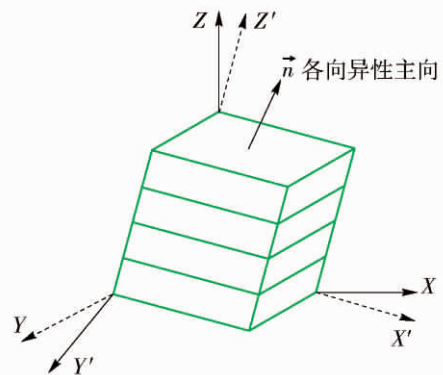


图 2 各向异性材料
Fig. 2 Anisotropic materials

2.2 基于 SMP 的各向异性模型推导

由式(2)构造屈服函数

$$f(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 (c + \mu\sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 (c + \mu\sigma_1) + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 (c + \mu\sigma_2) - 8(c + \mu\sigma_1)(c + \mu\sigma_2)(c + \mu\sigma_3) \quad (4)$$

材料在受力条件下应变增量可以表示为

$$\Delta \varepsilon_i = \Delta \varepsilon_i^e + \Delta \varepsilon_i^p \quad (5)$$

式中: $\Delta \varepsilon_i^e$ 为弹性应变增量; $\Delta \varepsilon_i^p$ 为塑性应变增量.

各向异性条件下, 广义胡克定律应力增量可以表示为

$$\Delta \sigma_i = S_i \Delta \varepsilon_i^e \quad (6)$$

式中 S_i 表示弹性条件下的刚度系数, $i = 1, 2, \dots, 6$, 该系数由实验确定.

根据 FLAC^{3D} 中增量算法, 由式(2) 可变换非关联流动法则条件下的塑性势函数为

$$g^s = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 (c + \eta \sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 (c + \eta \sigma_1) + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 (c + \eta \sigma_2) - 8(c + \eta \sigma_1)(c + \eta \sigma_2)(c + \eta \sigma_3) = 0 \quad (7)$$

式中: c, η 为由 M-C 准则确定的参数; $\eta = \tan \psi$ (ψ 为材料剪胀角, 且 c, ψ 值与材料倾角 \vec{n} 与 Z 轴夹角) 有关, 由不同倾角 ϕ 下三轴压缩试验数据确定, 可将 c, ψ 表示为

$$c = c(\phi) \quad \psi = \psi(\phi) \quad (8)$$

根据塑性力学理论, 塑性应变增量可以表示为

$$\Delta \varepsilon_i^p = \lambda \frac{\partial g^s}{\partial \sigma_i} \quad (9)$$

式中 λ 为屈服塑性因子.

由式(5) ~ (6)、(9) 可得在塑性条件下应力增量为

$$\Delta \sigma_i = S_i \left(\Delta \varepsilon_i - \left(\lambda \frac{\partial g^s}{\partial \sigma_i} \right) \right) \quad (10)$$

新的应力状态仍然在塑性屈服面上, 即满足

$$g^s(\sigma_i + \Delta \sigma_i) = 0 \quad (11)$$

将式(10) 代入式(11) 可求得非关联流动法则下塑性因子 λ .

根据 FLAC^{3D} 理论中的弹性应力假设和弹性应力猜想, 任一时步的应力可以表示为

$$\sigma_i^N = \sigma_i^0 + \Delta \sigma_i \quad (12)$$

式中: σ_i^N 表示当前应力; σ_i^0 表示前一状态的应力.

$$\sigma_i^1 = \sigma_i^0 + S_i \left(\Delta \varepsilon_i - \left(\lambda \frac{\partial g^s}{\partial \sigma_i} \right) \right) \quad (13)$$

式中 σ_i^1 为 FLAC^{3D} 中的弹性应力猜想

由式(10)、(12)、(13) 可得新的应力状态为

$$\sigma_i^N = \sigma_i^1 - \lambda S_i \left(\frac{\partial g^s}{\partial \sigma_i} \right) \quad (14)$$

由式(14) 在各向异性条件下根据前一时步的应力状态求得当前时步的应力状态.

以上为材料受压屈服推导, 在受拉条件下, 材料的屈服函数为

$$f^t = \sigma_3 - \sigma_1 \quad (15)$$

式中 σ_1 为材料的抗拉强度.

2.3 FLAC^{3D}二次开发流程

根据上述推导关系, 在各向异性条件下 FLAC^{3D} 二次开发基本流程如图3所示.

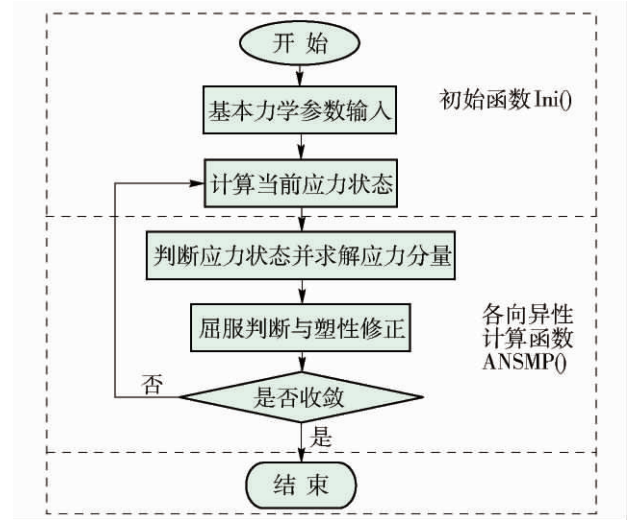


图3 FLAC^{3D}二次开发流程

Fig. 3 Secondary development in FLAC^{3D}

根据图3, 各向异性模型二次开发主要包括函数 $Ini()$ 和 $ANSMP()$ 的编译, 可通过 C++ 2005 编程调试并形成 dll 文件, 直接配置到 FLAC^{3D} 中即可.

3 模型应用分析

3.1 工程概况

胶州湾隧道青岛端接线工程穿越青岛市老城居民建筑密集区, 由于该地段岩层破碎、隧道断面大, 施工变形需要控制严格. 从地勘资料和现场观测分析, 隧道埋深范围内岩层具有层状沉积特性. 为分析各向异性条件下隧道施工变形分布规律, 取四川路主隧道 YK1+862—YK2+943 m 段进行模拟计算.

3.2 各向异性参数室内测试

目前测定岩体各向异性参数的常用方法是不同倾角下单轴压缩试验, 根据文献 Talesnick^[5] 和 Tien^[22] 等研究结果, 可取 $\beta = 0^\circ, \beta = 45^\circ, \beta = 90^\circ$ 三倾角岩体试件进行室内单轴压缩试验确定岩体的宏观各向异性参数.

根据测试结果, 岩体试件的各向异性参数分别为 $E_1 = 1.6 \text{ GPa}, E_2 = 1.3 \text{ GPa}, \mu_{12} = 0.24, \mu_{31} = 0.33, \mu_{23} = 0.26$. E 为弹性模量; μ 为泊松比; 下标 1 表示垂直于各向异性面方向; 下标 2、3 为平行各向异性面的 2 个方向.

3.3 隧道施工数值模拟分析

根据胶州湾隧道青岛端接线工程四川路主隧道

YK1 + 862—YK2 + 943 m 段地质状况和施工设计, 建立三维数值模型如图 4 所示。模型尺寸为 120 m × 60 m × 120 m, 其中拱顶以上为 18 m, 拱顶以下为 42 m。

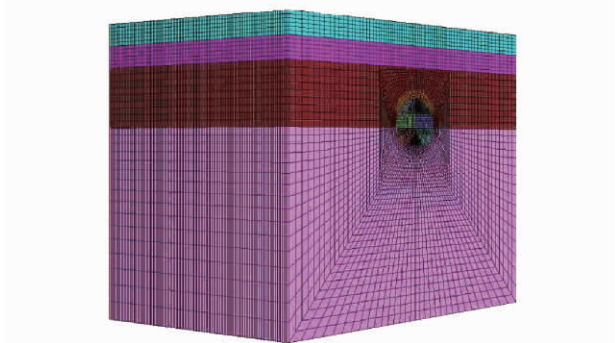


图 4 三维数值模型

Fig. 4 3D numerical model

深度范围内岩层分 4 层, 其中第 1 层(土层 1)和第 2 层(土层 2)采用 M-C 模型, 第 3 层(岩层 1)和第 4 层(岩层 2)采用本文基于 SMP 的横观各向异性模型, 各向异性参数根据试验结果和现场变形测试进行了修正, 各层力学参数取值如表 1、表 2 所示。

表 1 土层 1 和土层 2 力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the first and second layer of soil

参数	E/GPa	μ	$\varphi/(\text{°})$	σ_c/kPa
土层 1	0.05	0.30	15	5.5
土层 2	0.19	0.30	18	9.6

表 2 岩层 1 和岩层 2 力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the first and second layer of rock stratum

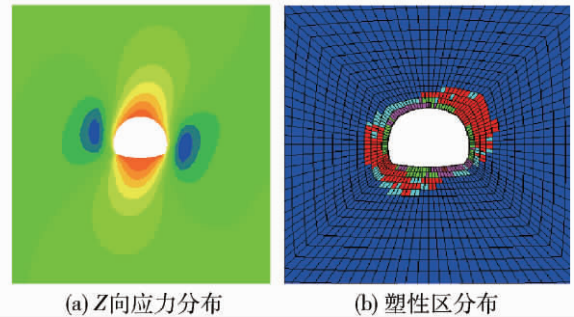
参数	E_1/GPa	E_3/GPa	μ_{12}	μ_{31}	μ_{23}	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa
岩层 1	1.6	1.3	0.24	0.33	0.26	0.61	0.47
岩层 2	2.7	1.9	0.21	0.31	0.27	1.12	0.86

隧道开挖模拟计算 Z 向应力及塑性区分布如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 由于各向异性的影响, 隧道开挖后应力分布与塑性区分布都呈现非对称性, 而在各向同性条件下, 应力分布和塑性区分布都是对称的, 因此本文模型可以描述各向异性材料的变形特征。

3.4 模型验证分析

当材料在各个方向的弹性模量和泊松比分别相同时, 模型退化为各向同性弹塑性本构关系, 此时塑性区分布应对称。为进一步验证模型的可靠性, 设计数值模拟试验, 材料参数取值如下: 土层 1 和土层



(a) Z 向应力分布 (b) 塑性区分布

图 5 Z 向应力分布、塑性区分布

Fig. 5 The arrangement of σ_z and plastic zone

2 的力学参数取值不变, 如表 1 所示, 岩层 1 和岩层 2 的力学参数取值如表 3 所示。

表 3 验证模型岩层 1 和岩层 2 的力学参数

Table 3 Mechanical parameters of the first and second layer of rock stratum in the verification model

参数	E_1/GPa	E_3/GPa	μ_{12}	μ_{31}	μ_{23}	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa
岩层 1	1.6	1.6	0.24	0.24	0.24	0.61	0.61
岩层 2	2.7	2.7	0.21	0.21	0.21	1.12	1.12

模拟计算塑性区分布如图 6 所示。

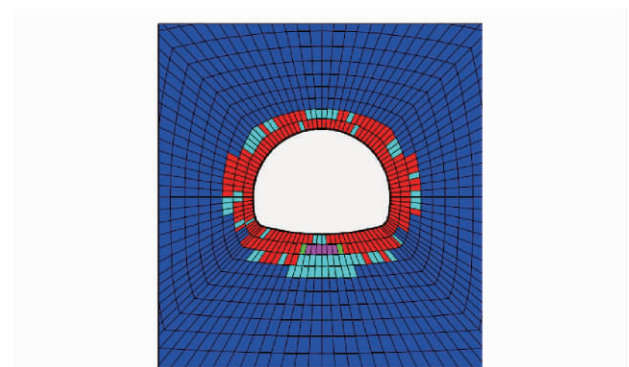


图 6 塑性区分布

Fig. 6 Arrangement of plastic zone

从图 6 中可以看出, 将各个方向材料参数取值相同后, 塑性区分布大致对称, 符合各向同性弹塑性本构关系下塑性区分布规律, 因此模型是可靠的。

3.5 隧道施工支护分析

由于岩体分布的各向异性, 使得隧道开挖后最大应力集中区发生变化。传统分析模型塑性区对称出现在拱肩部, 对两肩同时加强支护虽然可以有效控制施工变形, 但是造成极大的材料浪费。根据文中提出的本构模型, 分析各向异性条件下隧道施工关键部位支护技术。

地层参数见表 1、2。根据 FLAC^{3D} 计算程序, 锚

杆支护参数为: $L = 3.5 \text{ m}$, $\rho_{\text{carea}} = 380 \text{ cm}^2$, $E_{\text{mod}} = 200 \text{ GPa}$, $\gamma_{\text{tens}} = 3 \text{ GPa}$, $\rho_{\text{gr_k}} = 6.5 \text{ GPa}$, $\rho_{\text{gr_coh}} = 36 \text{ kPa}$, $\rho_{\text{gr_per}} = 314 \text{ mm}$, $\rho_{\text{gr_fric}} = 24^\circ$.

经模拟计算,原设计锚杆受力如图7(a)所示.

由图7(a)原设计锚杆受力可以看出,由于地层各向异性分布特征,使得锚杆受力呈现明显偏压状态,需要修改锚杆支护参数.根据塑性区分布状态,将右侧肩部锚杆长度改为4.5 m,其他参数不变,经模拟计算锚杆受力如图7(b)所示.

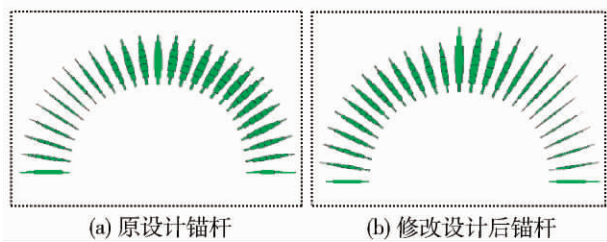


图7 锚杆受力分布

Fig. 7 Arrangement of anchor force

修改锚杆支护参数后,围岩塑性区分布如图8所示.

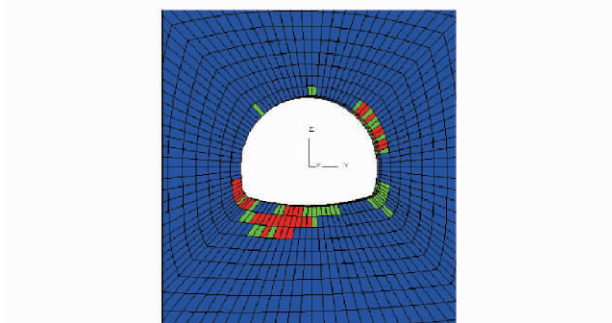


图8 塑性区分布

Fig. 8 Monitoring points arrangement

从图8可以看出,经塑性区锚杆长度修正后,围岩塑性区明显减小,且锚杆受力趋向于均匀.经胶州湾隧道青岛端接线工程四川路主隧段现场应用测试,效果良好,修正锚杆参数前,临时支护左侧喷浆开裂明显,修改锚杆参数后,支护体稳定没有明显的喷浆开裂现象.

4 结论

1) 通过实例分析,在各向异性条件下,隧道开挖围岩的应力分布以及破坏区都呈现非对称性,而各向同性并不能反映隧道施工非对称破坏的现象;

2) 通过各向异性参数在各主向上取相同值,模型退化为各向同性弹塑性模型,围岩塑性区分布呈现对称分布的特征,经过模拟分析,模型是可靠的;

3) 结合胶州湾隧道某主隧段进行了横观各向异性条件下锚杆支护分析,根据模拟结果,锚杆受力呈现明显不对称,经修改锚杆支护参数,将破坏区锚杆加长,根据模拟结果,围岩塑性区分布明显减小,且锚杆受力趋向均匀;

4) 根据隧道施工现场应用,基于各向异性的关键区锚杆支护对控制围岩变形是有效的.

参考文献:

- [1] 周应麟,邱喜华.层状岩层围岩隧道稳定性的探讨[J].地下空间与工程学报,2006,2(2):345-348.
ZHOU Ying-lin, QIU Xi-hua. Study on stability of stratified rock tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 345-348. (in Chinese)
- [2] 孙钧.海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1514-1522.
SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1514-1522. (in Chinese)
- [3] 张坤勇,殷宗泽,梅国雄.土体各向异性研究进展[J].岩土力学,2004,25(9):1503-1509.
ZHANG Kun-yong, YIN Zong-ze, MEI Guo-xiong. Development of soil's anisotropy study [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1503-1509. (in Chinese)
- [4] NASSERI M H B, RAO K S, RAMAMURTHY T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40(1): 3-23.
- [5] TALESNICK M L, BLOCH-FRIEDMAN E A. Compatibility of different methodologies for the determination of elastic parameters of intact anisotropic rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1999, 36(7): 919-940.
- [6] LAVRIKOV S V, MIKENINA O A, REVUZHENKO A F. A non-archimedean number system to characterize the structurally inhomogeneous rock behavior nearby a tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(2): 153-160.
- [7] KRIVOI A F, POPOV G Y. Features of the stress field near tunnel inclusions in an inhomogeneous anisotropic space [J]. International Applied Mechanics, 2008, 44(6): 626-634.
- [8] 李镜培,饶平平,张述涛.各向异性黏弹性隧道开挖位移时变解析解[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):94-98.
LI Jing-pei, RAO Ping-ping, ZHANG Shu-tao. Time-varying displacement analytical solution of anisotropic

- visco-elastic tunnel excavation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43 (4): 94-98. (in Chinese)
- [9] 朱珍德,秦天昊,王士宏,等. 基于 Cosserat 理论的柱状节理岩体各向异性本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4068-4076.
ZHU Zhen-de, QIN Tian-hao, WANG Shi-hong, et al. Study of anisotropic constitutive model of columnar jointed rock masses based on cosserat theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S2): 4068-4076. (in Chinese)
- [10] 李晓红,夏彬伟,李丹,等. 深埋隧道层状围岩变形特征分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1163-1167.
LI Xiao-hong, XIA Bin-wei, LI Dan, et al. Deformation characteristics analysis of layered rockmass in deep buried tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (4): 1163-1167. (in Chinese)
- [11] 高春玉,徐进,李忠洪,等. 雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1361-1365.
GAO Chun-yu, XU Jin, LI Zhong-hong, et al. Experimental study of anisotropically mechanical characteristics of sandy slate in Xuefeng mountain tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1361-1365. (in Chinese)
- [12] 李丹,夏彬伟,陈浩,等. 缓倾角层理各向异性岩体隧道稳定性的物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1933-1938.
LI Dan, XIA Bin-wei, CHEN Hao, et al. Research on stability of tunnel in anisotropic layered rockmass with low inclination angle bedding by model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (7): 1933-1938. (in Chinese)
- [13] 张久长,彭立,许湘华,等. 横观各向同性岩石弹塑性耦合变形的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 2(30): 267-274.
ZHANG Jiu-chang, PENG Li, XU Xiang-hua, et al. Experimental study of elastoplastic coupling deformation for transversely isotropic rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 2 (30): 267-274. (in Chinese)
- [14] 王渭明,路林海. 正交各向异性复合井壁应力变形分析与应用[J]. 力学与实践, 2009, 31(1): 52-56.
WANG Wei-ming, LU Lin-hai. Analysis of stresses and deformations of a compound and orthotropic shaft with applications [J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31 (1): 52-56. (in Chinese)
- [15] 王渭明,王磊,代春泉. 基于强度分层计算的弱胶结软岩冻结壁变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 4110-4116.
WANG Wei-ming, WANG Lei, DAI Chun-quan. Frozen wall deformation analysis in weakly cemented soft rock based on layered calculation of strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (S2): 4110-4116. (in Chinese)
- [16] MTSUOKA H, HOSHIKAWA T, UENO K. A general failure criterion and stress-strain relation for granular materials to metals [J]. Soils and Foundations, 1990, 30 (2): 119-127.
- [17] 张连卫,张建民,张嘎. 基于 SMP 的粒状材料各向异性强度准则[J]. 岩土工程学报, 30(8): 1107-1111.
ZHANG Lian-wei, ZHANG Jian-min, ZHANG Ga. SMP-based anisotropic strength criteria of granular materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 30 (8): 1107-1111. (in Chinese)
- [18] 罗汀,李萌,孔玉侠,等. 基于 SMP 的岩土各向异性强度准则[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 127-131.
LUO Ting, LI Meng, KONG Yu-xia, et al. Failure criterion based on SMP for anisotropic geomaterials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 127-131. (in Chinese)
- [19] 邹博,姚仰平,路德春. 变换应力三维化方法在清华模型中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4303-4307.
ZOU Bo, YAO Yang-ping, LU De-chun. Qinghua model revised by SMP criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4303-4307. (in Chinese)
- [20] 连镇营,韩国城,姚仰平. 基于 SMP 准则的改进剑桥模型及其在基坑工程中应用[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(1): 93-97.
LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, YAO Yang-ping. Revised cam-clay model based on SMP criterion and its application to foundation engineering [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 42(1): 93-97. (in Chinese)
- [21] HOULSBY G T. A general failure criterion for frictional and cohesive materials [J]. Soils and Foundations, 1986, 26(2): 97-101.
- [22] TIEN Yong-ming, KUO Ming-chuan, JUANG Chang-hsein. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2006, 43(8): 1163-1181.
- [23] PIETRUSZCZAKA S, LYDZBA D, SHAO J F. Modelling of inherent anisotropy in sedimentary rocks [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39 (3): 637-648.

(责任编辑 郑筱梅)