

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201707052



# 改进 H-B 准则的层状岩体隧洞 塑性区半径与应力场分析

余振兴<sup>1</sup>, 俞缙<sup>1</sup>, 张建智<sup>2</sup>, 刘士雨<sup>1</sup>, 张玉<sup>3</sup>, 张大山<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044;

3. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 基于改进的各向异性 Hoek-Brown(H-B)强度准则,推导出层状岩体隧洞围岩塑性区应力场表达式,获得围岩塑性应力分布和塑性区半径解析解.与横观各向同性应力解对比,论述应力分布计算式的正确性与优越性,并分析层理面与最大主应力方向夹角 $\beta$ ,地应力 $p_0$ ,围岩单轴抗压强度,以及 H-B 强度准则经验参数 $m_i$ 对塑性区半径的影响规律.以片麻岩体隧洞为例,重点讨论文中解对 $\beta$ 的敏感性.结果表明:当 $\beta=90^\circ$ 时,应力随着隧洞半径 $r$ 增大而增大的速度最快; $\beta$ 对塑性区半径 $R_p$ 的大小有重要影响.

**关键词:** 层状岩体; Hoek-Brown 准则; 隧洞塑性区; 片麻岩; 解析解

中图分类号: TU 452

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)02-0192-06

## Plastic Zone Radius and Stress Analysis of Tunnel in Layered Rock Based on Improved H-B Criterion

YU Zhenxing<sup>1</sup>, YU Jin<sup>1</sup>, ZHANG Jianzhi<sup>2</sup>,  
LIU Shiyu<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>, ZHANG Dashan<sup>1</sup>

(1. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering,

Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** A stress field expression for plastic zones of layered rock was derived based on improved anisotropic Hoek-Brown (H-B) failure criterion. An analytic solution for the rock plastic stress distribution and plastic zone radius was obtained and the validity and superiority of the formulas was discussed by contrasting with the transversely isotropic stress solution. The effects of various factors on the radius of plastic zone were analyzed, such as the angle  $\beta$  between the bedding plane and the maximum principal stress direction, Geostress, uniaxial compressive strength and H-B strength criterion empirical parameters  $m_i$ . Taking the gneiss tunnel as an example, the sensitivity of this solution to  $\beta$  is mainly discussed. When  $\beta=90^\circ$ , the stress increases fastest with the increase of the radius of tunnel, and  $\beta$  value influences significantly the radius of the plastic zone.

收稿日期: 2017-07-20

通信作者: 俞缙(1978-),男,教授,博士,主要从事岩土力学与地下工程的研究. E-mail:bugyu0717@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679093, 51774147); 福建省自然科学基金资助项目(2017J01094); 福建省自然科学基金面上项目(2015J01210); 福建省高校新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(2015年度); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(2016年度); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划基金资助项目(1611404015)

**Keywords:** layered rock mass; Hoek-Brown criterion; plastic zone of tunnel; gneiss; analytical solution

隧道工程中常遇到层状岩体地层,隧洞围岩的变形与破坏受层理面控制,具有明显的各向异性力学特性,与均质岩体相比,表现更为复杂.如何准确地预测层状岩体隧洞开挖后围岩的塑性区范围及应力分布形式是工程中的难点<sup>[1]</sup>.邓荣贵等<sup>[2]</sup>利用模拟实验,得到石膏试样的应力-应变全过程曲线,模拟试样的变形模量和强度随试样所含节理数、轴向应力与节理面间的夹角和围压之间的变化关系;李晓红等<sup>[3]</sup>采用现场监测和数值模拟对层状岩体的破坏特征进行分析,得出隧道围岩变形破坏区在岩体层理垂直方向;耿大新等<sup>[4]</sup>对层状岩体进行数值模拟研究,得出洞室开挖以后,层面的存在会影响洞周围岩次生应力的分布及围岩变形;Shi 等<sup>[5-6]</sup>建立了考虑软弱面的层状岩石各向异性强度模型预测岩石的抗压强度;Cho 等<sup>[7]</sup>研究页岩弹性参数和强度的各向异性.然而,在工程中更实用的简化计算方法方面的成果却相对较少.鲁海峰等<sup>[8]</sup>将采动底板层状岩体视为横观各向同性体,利用弹性力学方法推导出煤层采动后的底板任一点应力解析解;余东明等<sup>[9]</sup>考虑中间主应力及围岩的减胀性能的影响,推导出平面应变情况下,横观各向同性深埋圆形隧道理想弹塑性围岩的塑性区应力和位移解析表达式;Vu 等<sup>[10]</sup>研究了横观各向同性隧洞的应力和位移半解析解.这些研究均未考虑层理面与最大主应力夹角对应力分布的影响.因此,本文基于改进的各向异性 H-B 强度准则<sup>[11]</sup>,研究不同层理面与最大主应力方向夹角  $\beta$  下,层状岩体在塑性区的应力分布,  $\beta$  对塑性区半径的影响,分析塑性区半径对  $m_i$  的敏感性.

## 1 假设与模型解析

### 1.1 基本假设

文中作如下基本假设<sup>[12]</sup>:1)  $R_0$  为圆形隧道半径,  $R_p$  为塑性区半径;2) 隧道轴向长度远大于横截面尺寸,采用平面应变假设,隧道开挖方向平行于岩石层理方向;3) 最大主应力方向与层理面的夹角为  $\beta$ . 层状岩体中圆形隧道模型,如图 1 所示.

### 1.2 改进的各向异性 H-B 强度准则

改进的各向异性 H-B 强度准则<sup>[11]</sup>可以表示为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c,\beta} \left( k_\beta m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{c,\beta}} + 1 \right)^{0.5}. \quad (1)$$

式(1)中:  $\sigma_1, \sigma_3$  分别为最大、最小主应力;  $m_i$  为岩石量纲为一的经验参数,反映岩石的软硬程度,取值为 0.001~25.000;  $\beta$  为层理面与最大主应力间的夹角;  $\sigma_{c,\beta}$  为不同  $\beta$  下的围岩单轴抗压强度;  $k_\beta$  为一个与层状岩体各向异性有关的参数,其定义为

$$k_\beta = m_\beta / m_i. \quad (2)$$

式(2)中:  $m_\beta$  为层理面与最大主应力方向夹角为  $\beta$  时参数  $m$  的值;  $m_i$  为夹角  $\beta=90^\circ$  时,参数  $m$  的值.

### 1.3 公式推导

轴对称问题的平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (3)$$

Levy-Mises 增量本构关系为

$$\frac{2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\theta}{2\sigma_r - \sigma_\theta - \sigma_z} = \frac{d\epsilon_z}{d\epsilon_r}. \quad (4)$$

对于轴对称圆巷来说,轴向应变  $\epsilon_z=0$  (或者为常数),中间主应力表达式为

$$\sigma_z = (\sigma_r + \sigma_\theta) / 2. \quad (5)$$

联立式(1),(3),(5),可得塑性区应力表达式为

$$\sigma_r = A_1 \left( \ln \frac{r}{R_0} \right)^2 + A_2 \ln \left( \frac{r}{R_0} \right) + p_i, \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = A_1 \left( \ln \frac{r}{R_0} \right)^2 + (A_2 + 2A_1) \ln \left( \frac{r}{R_0} \right) + A_2 + p_i, \quad (7)$$

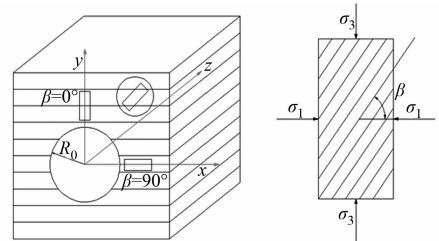


图 1 层状岩体中圆形隧道模型

Fig. 1 Circular tunnel model in layered rock

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = A_1 \left( \ln \frac{r}{R_0} \right)^2 + A_2 \ln \left( \frac{r}{R_0} \right) + A_1 \ln \left( \frac{r}{R_0} \right) + \frac{A_2}{2} + p_i. \tag{8}$$

式(6)~(8)中: $A_1 = \frac{k_\beta m_i \sigma_{c,\beta}}{4}$ ;  $A_2 = \sqrt{k_\beta m_i \sigma_{c,\beta} + p_i + \sigma_{c,\beta}^2}$ .

边界条件:当  $r=R_p$  时,有  $\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z = 3p_0$ ,代入得塑性区半径,即

$$R_p = R_0 e^x. \tag{9}$$

式(9)中:

$$x = \frac{\sqrt{\sigma_{c,\beta}^2 + A_2^2 + 4A_1 p_0}}{2A_1} - \frac{A_2}{2A_1} - \frac{1}{2}.$$

2 算例分析与对比

2.1 应力场分析

取文献[11]中 2 种片麻岩试验参数进行分析.对 Gneiss A,角度  $\beta$  取  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  时,  $\sigma_{c,\beta}$  分别为 39.4, 35.5, 46.7, 66.5 MPa,  $k_\beta$  分别取值 1.79, 0.42, 0.38, 1.00,  $m_i = 24.6$ ,  $s = 0.003\ 87$ ,  $p_i = 0.8$  MPa,  $p_0 = 0$ , 扩容角  $\psi = 0^\circ$ ,  $R_0 = 3$  m.对 Gneiss B,角度  $\beta$  取  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  时,  $\sigma_{c,\beta}$  分别为 45.4, 23.4, 34.5, 85.7 MPa,  $k_\beta$  分别取值 0.88, 0.59, 0.41, 1.00,  $m_i = 23.2$ ,  $s = 0.003\ 87$ ,  $p_i = 0.8$  MPa,  $p_0 = 0$ ,  $\psi = 0^\circ$ .岩石质量指标  $GSI = 50$ ,计算不同夹角  $\beta$  下塑性区三向应力,切向应力  $\sigma_\theta$ 、径向应力  $\sigma_r$  分布,如图 2 所示.

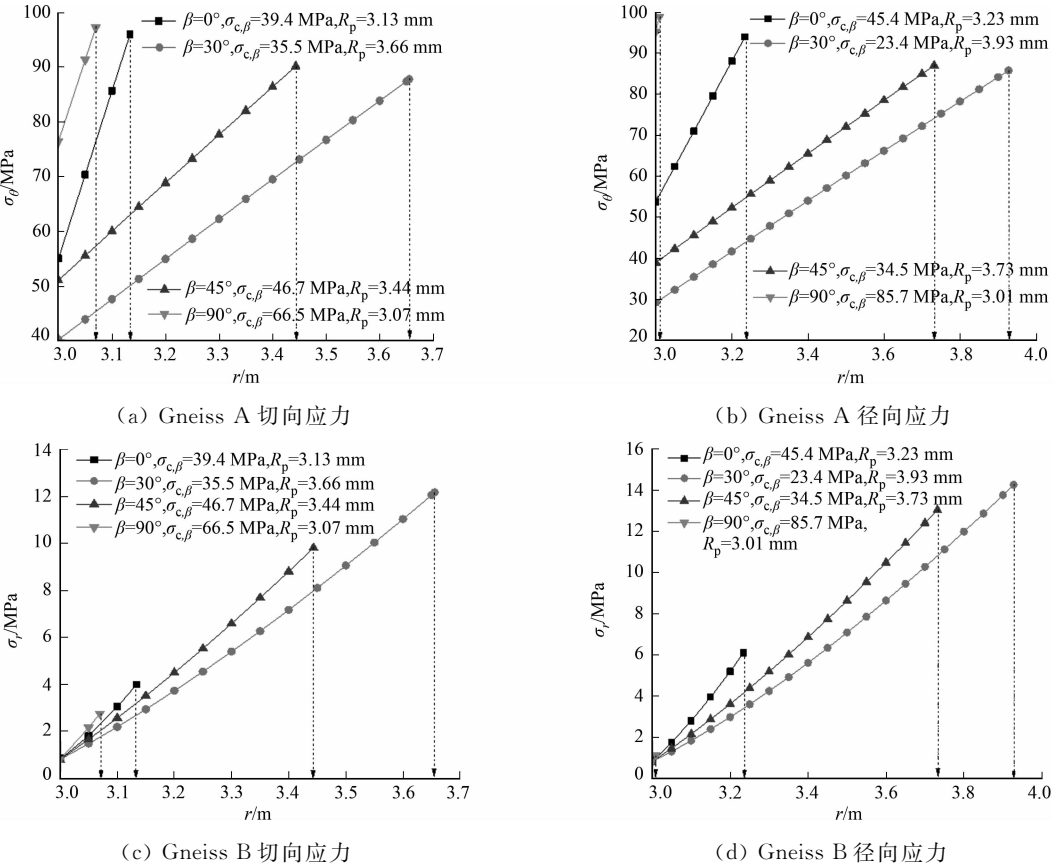


图 2 不同角度下应力与半径的关系

Fig. 2 Relationship between stress and radius at different angles

由图 2 可知:切向应力  $\sigma_\theta$ , 径向应力  $\sigma_r$  均随半径  $r$  的增大而增大,  $\sigma_\theta$  与  $r$  之间呈线性关系,  $\sigma_r$  与  $r$  之间为非线性增长关系.当  $\beta = 90^\circ$  时,应力增大的速度最快,曲线斜率最大,曲线最陡;当  $\beta = 30^\circ$  时,应力增大速率最慢,曲线斜率最小.中主应力的应力曲线与大主应力趋势类似,在此不多赘述.洞壁处的小主应力值不受夹角  $\beta$  影响,均为 0.8 MPa,即初始的支护力大小.当  $\beta = 30^\circ$  时,塑性区半径  $R_p$  最大为 3.66 m;当  $\beta = 45^\circ$  时,  $R_p = 3.44$  m;当  $\beta = 0^\circ$  时,  $R_p = 3.13$  m;当  $\beta = 90^\circ$  时,  $R_p = 3.07$  m.最大值与最小值相差

0.59 m.

两种片麻岩的应力变化趋势是一致的,区别在于不同角度  $\beta$  下岩石的强度有所不同,因此,应力大小与塑性区半径的值有所差异.当  $\beta=90^\circ$  时,  $k_\beta=1$ ,两种片麻岩塑性区半径相差仅为 0.01 m,造成差异的原因是岩石的强度与参数  $m_i$  取值有细小的差别;当  $\beta=30^\circ$  时,受  $\sigma_{c,\beta}, k_\beta$  的影响,两种岩石塑性区半径相差 0.27 m.在  $\sigma_3$  取值相同时,  $\beta=90^\circ$  情况下的  $\sigma_1$  取值最大,  $\beta=30^\circ$  情况下的  $\sigma_1$  取值最小.

2.2 塑性区半径分析

参数  $\sigma_{c,\beta}, p_0, m_i, p_i, k_\beta$  均会影响塑性区半径大小. Gneiss A 和 Gneiss B 两种岩石塑性区半径与原岩应力的关系曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:随着地应力  $p_0$  增大,围岩塑性区半径也增大,两者之间呈现线性关系.当  $\beta=30^\circ$  和  $\beta=45^\circ$  时,地应力对塑性区半径的影响要比  $\beta=0^\circ$  和  $\beta=90^\circ$  情况下明显.由图 3 中还可知:4 条曲线的斜率不相同,  $\beta=30^\circ$  曲线最陡,  $\beta=90^\circ$  曲线最平缓.对 Gneiss B,当  $p_0=50$  MPa 时,  $\beta=90^\circ$  情况下的塑性区半径为 3.01 m,比  $\beta=30^\circ$  情况下的塑性区半径小了 27%.

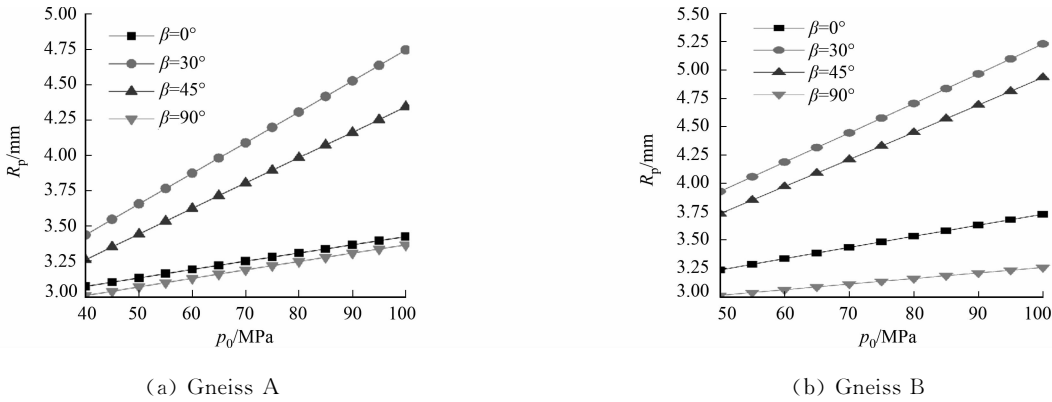


图 3 塑性区半径与原岩应力的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between plastic zone radius and in-situ stress

两种岩石塑性区半径与围岩单轴抗压强度的关系,如图 4 所示.由图 4 可知:围岩抗压强度越大,塑性区半径越小,当围岩强度在 10~40 MPa 区间内增大时,塑性区半径减小得十分显著,当围岩强度大于 50 MPa 时,塑性区半径受强度的影响逐渐减弱.

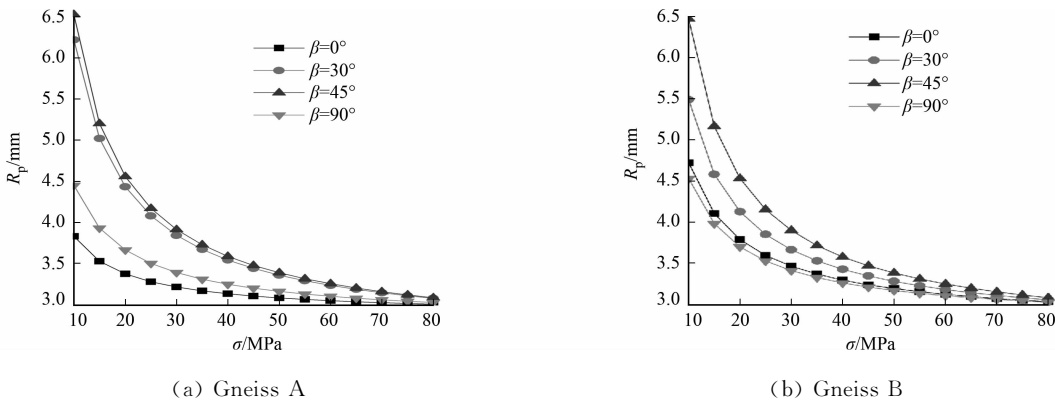


图 4 塑性区半径与围岩单轴抗压强度的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between plastic zone radius and uniaxial compressive strength of surrounding rock

参数  $m_i$  对塑性区半径具有重要影响.塑性区半径与参数  $m_i$  的关系曲线,如图 5 所示.由图 5 可知:两种岩石塑性区半径均随着  $m_i$  的增大而呈现非线性减小的趋势,当  $m_i$  为 6~12 时,其对塑性区半径的影响最为明显,曲线下降最快;当  $m_i$  大于 12 时,  $m_i$  对塑性区半径的影响逐渐减弱,曲线走向趋于平缓.当参数  $m_i$  取值相同的情况下,  $\beta=30^\circ$  和  $\beta=45^\circ$  时的塑性区半径要显著大于  $\beta=0^\circ$  和  $\beta=90^\circ$ ;当  $\beta=90^\circ$  时,也就是各向同性材料时,可以看出  $m_i$  对塑性区半径的影响很小,曲线接近水平.由此可见,夹角  $\beta$  对层状岩体的塑性区半径有重要影响.

2.3 与横观各向同性围岩塑性区应力场对比

余东明等<sup>[9]</sup>从 D-P 准则出发,得出横观各向同性理想弹塑性围岩塑性区的应力公式.根据文献[13-

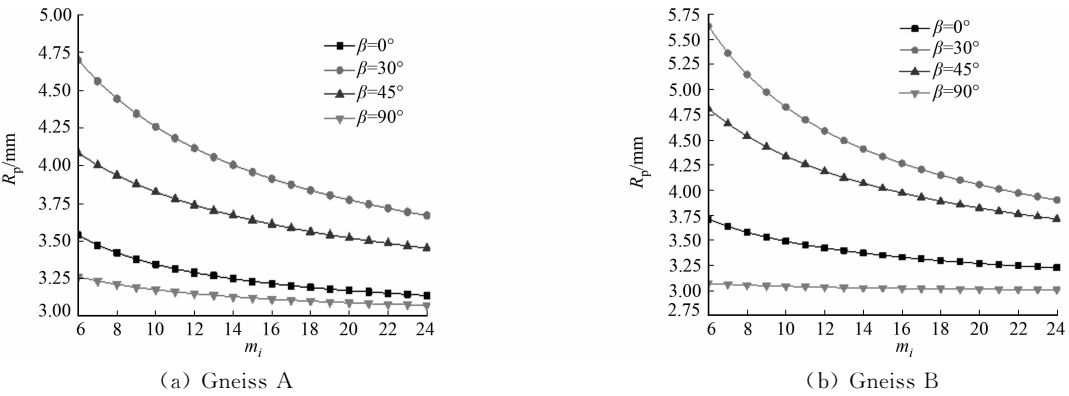


图 5 塑性区半径与参数  $m_i$  的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between plastic zone radius and parameter  $m_i$

14]提出的参数转换关系式,将文中 H-B 准则参数转化为 M-C 准则参数,结果如表 1 所示.表 1 中: $c$  为黏聚力; $\varphi$  为内摩擦角.

Gneiss A,Gneiss B 两种岩石与横观各向同性材料的大主应力对比曲线,如图 6 所示.由图 6(a)可知:当  $\beta$  取  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  时,其塑性区半径分别为 3.13, 3.66, 3.45, 3.07 m,在塑性区与弹性区交界处,大主应力分别为 96.01, 87.83, 90.19, 97.25 MPa,中主应力均为 50 MPa,小主应力分别为 3.99, 12.17, 9.81, 2.75 MPa;对于横观各向同性材料,当  $\beta$  取  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时,塑性区半径分别为 3.13, 3.07 m,大主应力分别为 92.46, 94.92 MPa,相差 3.55 和 2.32 MPa,中主应力分别为 48.16, 48.84 MPa,与 50 MPa 分别相差 1.84 和 1.16 MPa,小主应力分别为 3.86, 2.75 MPa,相差仅为 0.124 67 和 0.001 64 MPa.由此可以看出,文中推导的解析解公式有很好的适用性.

表 1 转化后的 M-C 准则参数

Tab.1 Parameters of the M-C criterion after transformation

岩石种类	$\beta/(^\circ)$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(^\circ)$
Gneiss A	90	13.84	52.93
	0	10.52	50.09
Gneiss B	90	10.08	58.82
	0	8.06	58.82

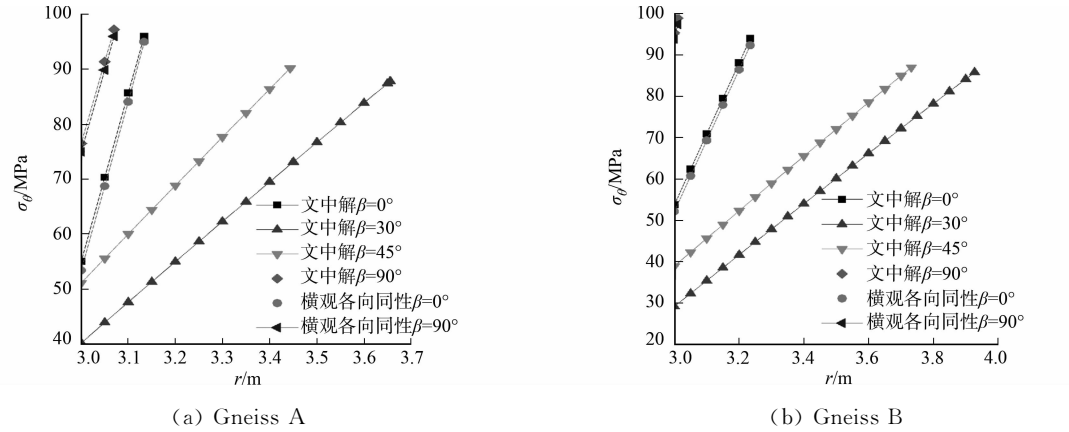


图 6 两种岩石的大主应力对比图

Fig. 6 Comparison of maximum principal stress of two rocks

由图 6(b)可知:当  $\beta$  取  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  时,其塑性区半径分别为 3.23, 3.93, 3.73, 3.01 m,在塑性半径处,中主应力均为 50 MPa,大主应力分别为 93.91, 85.75, 86.97, 98.89 MPa,小主应力分别为 6.10, 14.25, 13.03, 1.12 MPa;而对于横观各向同性材料, $\beta$  取  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时, $R_p$  分别为 3.23, 3.01 m,中主应力分别为 49.67, 48.58 MPa,仅相差 0.33, 1.42 MPa,大主应力分别为 93.30, 96.14 MPa,相差 0.604 和 2.753 MPa,小主应力分别为 6.05, 1.03 MPa,相差 0.048 和 0.088 MPa.

通过将推导的公式结果与横观各向同性解析解结果进行验证对比,可以发现不论是切向应力、轴向应力还是径向应力,两种解的结果十分接近,误差很小,可以验证文中解的正确性.除此之外,文中解相对横观各向同性解而言,具有更好的适用性,不仅能算出  $\beta$  为  $0^\circ, 90^\circ$  时的塑性区应力,还能算出  $\beta$  为其他角度时的塑性区应力,在应用上文中解优于横观各向同性解.

### 3 结论

1) 在二维 H-B 强度准则上添加考虑岩石各向异性的因子, 将所得的三向应力分布与横观各向同性岩石的应力对比, 发现不论是各向同性面还是各向异性面, 三向主应力的吻合程度都比较高, 可以证明文中推导的应力表达式的正确性, 横观各向同性体和各向同性体的应力分布是各向异性体应力分布的一种特殊情况。

2) 基于改进的各向异性 H-B 强度准则, 分析不同层理面与最大主应力夹角  $\beta$ 、地应力、围岩单轴抗压强度和 H-B 强度准则经验参数  $m_i$  对 Gneiss A 和 Gneiss B 两种岩石塑性区半径的影响, 得出了层状岩体塑性区半径受到夹角  $\beta$  的重要影响的结论。

3) 中主应力具有能充分发挥围岩强度的力学作用, 而改进的各向异性 H-B 强度准则没有考虑中主应力的影响, 计算得出的塑性区半径会比考虑了中主应力影响的情况偏大。

#### 参考文献:

- [1] 梅松华. 层状岩体开挖变形机制及破坏机理研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.
- [2] 邓荣贵, 付小敏. 层状岩体力学特性模拟实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(6): 721-729.
- [3] 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. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2010.04.028.
- [4] 耿大新, 杨林德. 层状岩体的力学特性及数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2003, 23(4): 380-383. DOI:10.3969/j.issn.1673-0836.2003.04.008.
- [5] SHI Xiangchao, YANG Xu, MENG Yingfeng, *et al.* Modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic rocks[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(11): 995. DOI:10.1007/s12665-016-5810-3.
- [6] SHI Xiangchao, YANG Xu, MENG Yingfeng, *et al.* An anisotropic strength model for layered rocks considering planes of weakness[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 1-10. DOI:10.1007/s00603-016-0985-1.
- [7] CHO J W, KIM H, JEON S, *et al.* Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 50(2): 158-169. DOI:10.1016/j.ijrmms.2011.12.004.
- [8] 鲁海峰, 姚多喜. 采动底板层状岩体应力分布规律及破坏深度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2030-2039. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.10.009.
- [9] 余东明, 姚海林, 段建新, 等. 考虑中主应力和剪胀的深埋圆形隧道黏弹塑性蠕变解[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3586-3592.
- [10] VU T M, SULEM J, SUBRIN D, *et al.* Semi-analytical solution for stresses and displacements in a tunnel excavated in transversely isotropic formation with non-linear behavior[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(2): 213-229. DOI:10.1007/s00603-012-0296-0.
- [11] SAROGLU H, TSIAMBAOS G. A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(2): 223-234. DOI:10.1016/j.ijrmms.2007.05.004.
- [12] 唐胜兰, 俞缙, 张建智, 等. 顾及沉积岩应变强化与扩容效应的围岩弹塑性力学状态理论分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 691-697. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201606007.
- [13] 吴顺川, 金爱兵, 高永涛. 基于广义 Hoek-Brown 准则的边坡稳定性强度折减法数值分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1975-1980. DOI:10.3321/j.issn:1000-4548.2006.11.011.
- [14] HOEK E, CARRANZA-TORRES C. Hoek-Brown failure criterion: 2002 Edition[C]// Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium. Toronto: [s. n.], 2002: 18-22.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)