

文章编号:1672-3961(2024)01-0131-10 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2022.309

锚杆加固作用下椭圆形深埋隧洞承载力分析

郝艳广¹,徐建升²,明道贵¹,雷霆¹,邱明喜¹,陈迪杨^{3*}

(1.中交二航局建筑科技有限公司,湖北武汉430050;2.山东科技大学土木工程与建筑学院,山东青岛266590;3.山东大学(齐河)新材料与智能装备研究院,山东德州251100)

摘要:考虑施工过程中大跨度开挖、锚杆的影响等现场实际情况,分别研究椭圆形隧洞承载力锚杆长度、锚杆数量、锚杆预应力、侧压力系数以及塑性区范围的变化规律。基于平面弹性复变函数的方法,得到围岩任意一点的应力分量表达式,结合摩尔-库伦(Mohr-Coulomb, MC)准则,分别得到剪判据和拉判据下的拱部承载力,讨论开挖半径以及锚杆各参数对于承载力的影响,分析不同参数对孔边应力的影响,孔边应力对形状参数更敏感,会直接影响承载力。利用3DEC软件验证了理论模型的正确性。

关键词:隧道工程;椭圆形隧洞;复变理论;承载力分析;预应力锚杆

中图分类号:O319.56 **文献标志码:**A

引用格式:郝艳广,徐建升,明道贵,等.锚杆加固作用下椭圆形深埋隧洞承载力分析[J].山东大学学报(工学版),2024,54(1):131-140.

HAO Yanguang, XU Jiansheng, MING Daogui, et al. Analysis of the bearing capacity of the elliptical deep tunnel under the action of the anchor rod reinforcement[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(1):131-140.

Analysis of the bearing capacity of the elliptical deep tunnel under the action of the anchor rod reinforcement

HAO Yanguang¹, XU Jiansheng², MING Daogui¹, LEI Ting¹, QIU Mingxi¹, CHEN Diyang^{3*}

(1. Construction Technology Company, Wuhan 430050, Hubei, China; 2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 3. Shandong University (Qihе) New Materials and Intelligent Equipment Research Institute, Dezhou 251100, Shandong, China)

Abstract: Considering the actual on-site conditions such as large-span excavation and the influence of anchor rods during the construction process, the bearing capacity of elliptical tunnels, including the length, quantity, and pre-installation of anchor rods changes in stress, lateral pressure coefficient, and plastic zone range were studied. Based on the method of plane elastic complex function, the stress component expression of any point of the surrounding rock was obtained. Combined with Moore-Coulen (MC) criterion, the arch bearing capacity under the shear criterion and drawing criterion were obtained respectively. The influence of excavation radius and anchor parameters on the bearing capacity were discussed. The sensitivity of pore edge stress to different parameters was analyzed, especially for the shape parameter, which affecting its capacity directly. Combining the theory and 3DEC software, the correctness of the theoretical model was verified.

Keywords: tunnel engineering; oval tunnel; complex theory; bearing capacity analysis; pretension anchor rod

0 引言

隧洞开挖施工过程中,由于开挖扰动以及地应力作用,围岩会产生应力的二次分布,同时在隧洞周边会产生塑性区^[1-2],因此为了保证施工的安全性和工程的可靠性,需要对围岩的承载力进行研究,当围岩不满足承载力要求时,就需要进行支

护^[3],采用预应力锚杆支护是隧洞开挖过程中常用的支护形式之一^[4],因此研究锚杆对于围岩承载力的影响对于工程具有重要意义。

围岩承载力计算目前仍处于发展阶段,为了从理论角度进行承载力进行求解,国内外诸多学者对于隧洞进行简化,通常按照弹性力学平面问题进行求解。文献[5]采用复变理论求解了带孔平板的应力问题。文献[6]对围岩应力与位移进行了解析

收稿日期:2022-09-08

第一作者简介:郝艳广(1982—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要研究方向为公路水运隧道工程围岩稳定性。E-mail: 67821205@qq.com

*通信作者简介:陈迪杨(1990—),男,山东德州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为隧道围岩变形与支护方面。E-mail: 1391580398@qq.com

分析,对于圆形、非圆形孔洞以及多孔问题进行了理论分析。文献[7-8]对非圆性隧洞进行了应力分析,提出了一种新的保角变换形式,同时研究了锚杆轴力的确定方法。文献[9]对椭圆形隧洞进行了解析分析,对隧洞洞边受力时的孔边应力进行了解析求解。文献[10]结合 Mohr-Coulomb 准则对于压力拱的范围进行了求解,确定了圆形隧洞压力拱的取值范围。文献[11]采用留数对解析函数进行了求解,提供了新的求解方法。文献[14]对于复杂形状的洞室进行了应力求解,基于留数提出了新的保角变换形式。文献[15]采用复变理论,结合 D-P 准则,得到了毛洞围岩塑性区范围。文献[16]求解了矩形孔口未支护状态下的围岩应力。文献[17]结合 M-C 准则得到了双向不等压条件下圆形隧洞应力和塑性区的解析解。

综上所述,目前进行围岩应力分析通常进行简化求解,主要是研究了孔边以及围岩的应力和位移问题,关于承载力计算的研究较少,本研究结合工程实际,考虑可能存在的拉应力,分别按照 Mohr-Coulomb 准则和最大拉应力准则进行塑性区求解,再结合弹性区应力,对围岩承载力进行了解析求解,同时将预应力锚杆简化为一对预应力,讨论了预应力对于承载力的影响,力求对工程的设计和施工能够起到一定的参考价值。

1 围岩承载力计算解析模型

1.1 模型与假设

在隧洞开挖过程中,由于开挖扰动,会产生应力的二次分布,造成围岩失稳。为了满足承载力要求,常采用锚杆加固的方法来加固围岩,提高围岩承载能力。现考虑开挖形状、锚杆长度与间距以及锚杆预应力等因素,分别分析各个因素对承载力的影响,做如下假设:

(1) 隧道开挖断面可简化为平面应变问题,将围岩视为各向同性均匀线弹性无限大平面,且忽略重力效应。

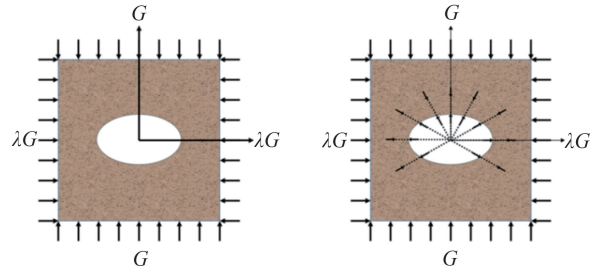
(2) 开挖断面为椭圆形,锚杆加固不会改变开挖断面的形状。

(3) 锚杆等长且均布分布,将预应力锚杆简化为一对集中力的作用。

1.2 计算模型简介

取隧洞开挖横断面为计算截面,支护前和支护后两种计算简图如图 1 所示。设上下两个方向所受到的围岩应力为 G ,左右两个方向所受到的围岩应

力为 λG , λ 为围岩的侧压力系数,采用复变函数理论,分别计算支护前和支护后的围岩应力 G ,从而确定锚杆对围岩承载能力的影响。



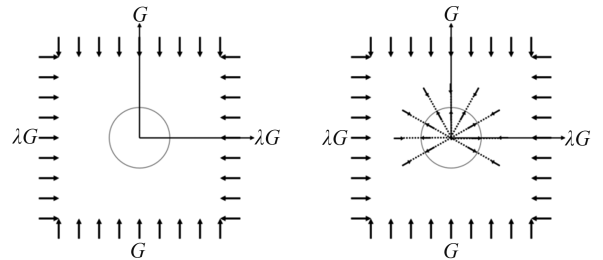
(a) 无锚杆椭圆形隧洞计算模型 (b) 有锚杆椭圆形隧洞计算模型

图 1 椭圆形隧洞双向不等压围岩二次应力场计算模型

Fig.1 Calculation model of secondary stress field of bidirectional isotropic surrounding rock of elliptical tunnel

1.3 围岩应力解析

z 平面椭圆形隧洞长半轴和短半轴分别为 a 和 b ,通过保角变换将 z 平面(如图 1)的隧洞外域映射为 ξ 平面(如图 2)的单位圆外域。



(a) 无锚杆 ξ 平面计算模型 (b) 有锚杆 ξ 平面计算模型

图 2 ξ 平面围岩力学计算模型

Fig.2 Mechanical calculation model of ξ plane surrounding rock

保角变换函数为:

$$z = \omega(\xi) = R\left(\xi + \frac{m}{\xi}\right), \quad (1)$$

式中, $z = re^{i\alpha} = r(\cos \alpha + i \sin \alpha)$, $\xi = \rho e^{i\theta} = \rho(\cos \theta + i \sin \theta)$, r, ρ 分别为 z 平面和 ξ 平面的极径, α, θ 分别为 z 平面和 ξ 平面的极角, R 与 m 为与开挖隧洞形状有关的参数, $R = \frac{a+b}{2}$, $m = \frac{a-b}{a+b}$ 。

保角变换后,弹性平面内任意一点应力如下所示^[6]:

$$\begin{cases} \sigma_r + \sigma_\theta = 4\text{Re}\left[\frac{\varphi'(\xi)}{\omega'(\xi)}\right] \\ \sigma_\theta - \sigma_r + 2\tau_{r\theta} = \frac{2\xi^2}{\rho^2} \frac{1}{\omega'(\xi)} \times \left\{ \frac{\omega(\xi)\varphi''(\xi)\omega'(\xi) - \omega''(\xi)\varphi'(\xi)}{[\omega'(\xi)]^2} + \psi'(\xi) \right\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, σ_r, σ_θ 和 $\tau_{r\theta}$ 为弹性平面内围岩任意一点所受应力分量, Re 为复函数的实部, $\varphi(\xi), \psi(\xi)$ 为根据孔边应力边界条件选取的两个解析函数。

弹性平面内位移场表达式^[6]为:

$$2G(u_\rho + iu_\theta) = \frac{\bar{\xi}}{\rho} \cdot \frac{\overline{\omega'(\xi)}}{|\omega'(\xi)|} \cdot \left[\frac{3-\mu}{1+\mu} \varphi(\xi) - \frac{\omega(\xi)}{\omega'(\xi)} \varphi'(\xi) - \psi(\xi) \right], \quad (3)$$

式中, $G=E/2(1+\mu)$, 其中 E 为岩石弹性模量, μ 为岩石的泊松比; u_ρ 、 u_θ 为洞室围岩沿着切向和法向的位移。

两个解析函数 $\varphi(\xi)$ 、 $\psi(\xi)$ 可以由弹性复变理论得到, 表达式^[4]:

$$\begin{cases} \varphi(\xi) = -\frac{1}{8\pi(1-\mu)}(F_x + iF_y) \ln[\omega(\xi)] + B\omega(\xi) + \varphi_0(\xi) \\ \psi(\xi) = \frac{3-4\mu}{8\pi(1-\mu)}(F_x + iF_y) \ln[\omega(\xi)] + (B' + iC')\omega(\xi) + \psi_0(\xi), \end{cases} \quad (4)$$

式中, F_x 、 F_y 为隧洞边界处的面力分量, μ 为岩体泊松比, 常数 B 、 B' 、 C' 与围岩无穷远处的应力有关。 $\varphi_0(\xi)$ 、 $\psi_0(\xi)$ 为单位圆外域的解析函数, 可以由孔边应力边界条件求得。

σ 为 ξ 平面在边界上的取值, 应力边界初始条件为

$$f_0(\sigma) = f(\sigma) + \frac{F_x + iF_y}{2\pi} \ln \sigma + \frac{1+\mu}{8\pi} \times (F_x + iF_y) \frac{\omega(\sigma)}{\omega'(\sigma)} \sigma - 2B\omega(\sigma) - (B' - iC')\overline{\omega(\sigma)}. \quad (5)$$

$f(\sigma)$ 为孔边应力边界条件, 表达式为^[6]:

$$f(\sigma) = \varphi(\xi) + \frac{\omega(\xi)}{\omega'(\xi)} \overline{\varphi'(\xi)} + \psi(\xi) = i \int (f_x + if_y) ds. \quad (6)$$

结合(1)(4)(5)(6)得到应力边界条件简化形式:

$$\varphi_0(\sigma) + \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\sigma^2 + m}{1 - m\sigma^2} \overline{\varphi_0'(\sigma)} + \psi_0(\sigma) = f_0(\sigma). \quad (7)$$

f_x 和 f_y 为隧洞边界处应力面力的两个分量, 其中 B 、 B' 、 C' 与无穷远处的主应力有关, 则

$$\begin{cases} B = \frac{\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty}{4} \\ B' = \frac{\sigma_y^\infty - \sigma_x^\infty}{2} \\ C' = \tau_{xy}^\infty \end{cases} \quad (8)$$

2 围岩双向受压应力场求解

2.1 解析函数 $\varphi(\xi)$ 、 $\psi(\xi)$ 求解

将预应力简化为作用于围岩空间任意一点的一对集中力进行处理^[8], 将围岩整体受力等效为横

向压缩、纵向压缩和锚杆预应力三部分的叠加, 分别进行计算^[9]。

(1) 横向压缩 $\varphi_1(\xi)$ 、 $\psi_1(\xi)$ 求解。

由外边界条件可以得到, $\sigma_x = -\lambda G$, $\sigma_y = 0$, 得到:

$$\begin{cases} B = -\frac{\lambda G}{4} \\ B' = \frac{\lambda G}{2} \\ C' = 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据边界条件, 隧洞不受面力的作用, 即 F_x 、 F_y 、 f_x 、 f_y 均为 0, 将(1)(6)带入(5)可得

$$f_0(\sigma) = \frac{\lambda G}{2} R \left(\sigma + \frac{m}{\sigma} \right) - \frac{\lambda G}{2} R \left(\frac{1}{\sigma} + m\sigma \right) = \frac{\lambda G}{2} R (1-m) \left(\sigma - \frac{1}{\sigma} \right). \quad (10)$$

因为 $\varphi_0(\xi)$ 、 $\psi_0(\xi)$ 为外域解析函数, 因此表达式为:

$$\begin{cases} \varphi_0(\xi) = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k \xi^{-k} \\ \psi_0(\xi) = \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k \xi^{-k} \end{cases} \quad (11)$$

为得到 $\varphi_0(\xi)$ 、 $\psi_0(\xi)$ 的具体形式, 需要将(10)(11)代入(7)中, 左右两边同次幂系数相等得到最终结果, 因此采用级数对式(7)中第二项进行处理:

$$\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\sigma^2 + m}{1 - m\sigma^2} = \frac{\sigma^2 + m}{\sigma} (1 + m\sigma^2 + m^2\sigma^4 + \dots + m^n\sigma^{2n}). \quad (12)$$

对 σ 负次幂进行提取处理, 得到:

$$\begin{cases} \sigma \text{ 的负次幂: } \sigma^{-1}, \sigma^{-2}, \sigma^{-3}, \sigma^{-4}, \sigma^{-5} \\ \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k \xi^{-k}: \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 \\ f_0(\sigma): -\frac{\lambda GR}{2}(1-m), -, -, -, - \end{cases} \quad (13)$$

对 σ 正次幂进行提取处理, 得到:

$$\begin{cases} \sigma \text{ 的正次幂: } \sigma^1, \sigma^2, \sigma^3, \sigma^4, \sigma^5 \\ \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\sigma^2 + m}{1 - m\sigma^2} = \sum_{k=1}^{\infty} k \overline{\alpha_k \xi^{k+1}}: -\alpha_1 m, -\alpha_1(1+m^2) \\ -\alpha_1 m(1+m^2) \\ \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k \xi^k, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5 \\ f_0(\sigma): \frac{\lambda GR}{2}(1-m), -, -, -, - \end{cases} \quad (14)$$

根据式(13)(14)可得

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{\lambda GR}{2}(m-1) \\ \beta_1 = \frac{\lambda GR}{2}(m-1)^2 \\ \beta_3 = \frac{\lambda GR}{2}(m-1)(1+m^2) \\ \beta_5 = \frac{\lambda GR}{2}(m-1)(1+m^2)m \\ \dots \\ \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \dots = 0 \\ \beta_2 = \beta_4 = \dots = 0 \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)(11)(4),可得

$$\begin{cases} \varphi_1(\xi) = -\frac{\lambda GR}{4} \left[\xi + (2-m) \frac{1}{\xi} \right] \\ \psi_1(\xi) = \frac{\lambda GR}{2} \left(\xi + \frac{m}{\xi} \right) + \frac{\lambda GR}{2} (m-1)^2 \frac{1}{\xi} + \\ \frac{\lambda GR}{2} (m-1)(1+m^2) \frac{1}{\xi(\xi^2-m)} \end{cases} \quad (16)$$

(2)纵向压缩 $\varphi_2(\xi)$ 、 $\psi_2(\xi)$ 求解。

与横向压缩同理,外边界条件由 $\sigma_x = -\lambda G$, $\sigma_y = 0$, 变为 $\sigma_x = 0$, $\sigma_y = -G$, 可得

$$\begin{cases} \varphi_1(\xi) = -\frac{GR}{4} \left[\xi - (2+m) \frac{1}{\xi} \right] \\ \psi_1(\xi) = -\frac{GR}{2} \left(\xi + \frac{m}{\xi} \right) + \frac{GR}{2} (1+m)^2 \frac{1}{\xi} + \\ \frac{GR}{2} (1+m^2)(1+m) \frac{1}{\xi(\xi^2-m)} \end{cases} \quad (17)$$

(3)锚杆预应力 $\varphi_3(\xi)$ 、 $\psi_3(\xi)$ 求解。

开挖隧洞看成无限大,则 R 趋近于 0, 式(4)可以简化为

$$\begin{cases} \varphi(\xi) = -\frac{1}{8\pi(1-\mu)} (F_x + iF_y) \ln \left[R \left(\xi + \frac{m}{\xi} \right) \right] \\ \psi(\xi) = \frac{3-4\mu}{8\pi(1-\mu)} (F_x + iF_y) \ln \left[R \left(\xi + \frac{m}{\xi} \right) \right] \end{cases} \quad (18)$$

2.2 应力分量 σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{r\theta}$ 求解

根据 2.1 节计算得到的 $\varphi(\xi)$ 、 $\psi(\xi)$, 分别计算三种条件下的应力分量, 进行叠加, 得到围岩任意一点应力分量。

(1)横向压缩 σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta1}$ 、 $\tau_{r\theta1}$ 求解

由式(16)(2)得到横向压缩下的应力分量

$$\sigma_{r1} + \sigma_{\theta1} = -\lambda G \frac{\rho^4 - 2\rho^2 \cos 2\theta - m^2 + 2m}{\rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2} \quad (19)$$

(2)纵向压缩 σ_{r2} 、 $\sigma_{\theta2}$ 、 $\tau_{r\theta2}$ 求解

将式(17)带入式(2)得到横向压缩下的应力分量

$$\sigma_{r2} + \sigma_{\theta2} = -G \frac{\rho^4 + 2\rho^2 \cos 2\theta - m^2 - 2m}{\rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2} \quad (20)$$

(3)锚杆预应力 σ_{r3} 、 $\sigma_{\theta3}$ 、 $\tau_{r\theta3}$ 求解

$$\sigma_{r3} + \sigma_{\theta3} = -\frac{1}{2\pi R(1-\mu)} \frac{\rho^3 F \cos(\alpha-\theta) + m\rho F \cos(\alpha+\theta)}{\rho^4 + 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2} \quad (21)$$

将式(19)(20)(21)进行叠加, 得到围岩任意一点应力分量和

$$\begin{aligned} \sigma_r + \sigma_\theta = & \frac{G(1+\lambda)(\rho^4 - m^2) + G(1-\lambda)(2\rho^2 \cos 2\theta - 2m)}{\rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2} \\ & - \frac{L}{2\pi R(1-\mu)} \frac{\rho^3 F \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i - \theta) + m\rho F \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i + \theta)}{\rho^4 + 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2} \end{aligned} \quad (22)$$

式中, L 为锚杆长度, n 为锚杆数量, α_i 为锚杆与 x 轴的夹角。

2.3 承载力求解

隧道开挖过程中, 围岩中产生应力二次分布, 当围岩中应力达到破坏判据时, 围岩便会失稳, 考虑到隧道开挖过程中会产生拉、压两种应力, 本研究分别采用 Mohr-Coulomb 准则和最大拉应力准则进行求解^[10]。

单元体满足平衡方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (23)$$

Mohr-Coulomb 准则为

$$\sigma_\theta - N\sigma_r - R_c = 0 \quad (24)$$

式中, $N = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$, $R_c = \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi}$, c 、 φ 分别为围岩的黏聚力和内摩擦角, R_c 为单轴抗压强度。

最大拉应力准则为

$$\sigma_\theta - R_t = 0 \quad (25)$$

式中, R_t 为抗拉强度, $R_t = \frac{2c\cos\varphi}{1+\sin\varphi}$ 。

孔边应力边界条件为

$$\sigma_r|_{r=r_1} = 0 \quad (26)$$

(1)当围岩应力为压应力结合式(23)(24)(26)得到:

$$\begin{cases} \sigma_{rp} = \frac{R_c}{N-1} [(r_p)^{N-1} - 1] \\ \sigma_{\theta p} = \frac{R_c}{N-1} [N(r_p)^{N-1} - 1] \end{cases} \quad (27)$$

结合式(22)(27),得到承载力

$$G = - \frac{1-2m \cos 2\theta + m^2}{(1+\lambda)(1-m^2) + (1-\lambda)(2 \cos 2\theta - 2m)} \times \left[\frac{R_c}{N-1} [(N+1)(r_p)^{N-1} - 2] + \frac{L}{2\pi R(1-\mu)} \frac{\rho^3 F \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i - \theta) + m\rho F \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i + \theta)}{1+2m \cos 2\theta + m^2} \right] \quad (28)$$

(2) 当围岩应力为拉应力

结合式(23)(25)(26)得

$$\begin{cases} \sigma_{rp} = R_t \left(1 - \frac{1}{r_p}\right) \\ \sigma_{\theta p} = R_t \end{cases} \quad (29)$$

由式(22)(27),得到承载力

$$G = - \frac{1-2m \cos 2\theta + m^2}{(1+\lambda)(1-m^2) + (1-\lambda)(2 \cos 2\theta - 2m)} \times \left[R_t \left(2 - \frac{1}{r_p}\right) + \frac{L}{2\pi R(1-\mu)} \times \frac{\rho^3 F \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i - \theta) + m\rho F \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i + \theta)}{1+2m \cos 2\theta + m^2} \right] \quad (30)$$

3 算例分析

为了验证理论计算模型的正确性,现采用 3DEC 软件进行模拟,将模拟结果与理论计算结果进行对比。以青岛地铁为依据,进行实例分析。本研究仅采用青岛地铁 6 号线相关参数进行数值模拟,并不与工程进行对比。青岛地铁 6 号线某站场区地层自上而下依次为素填土、强-中-微风化花岗岩层,车站洞身基本位于微风化花岗岩层中,围岩级别Ⅲ2~Ⅳ2 级,地下水主要为基岩裂隙水。岩体弹性模量为 15 GPa,黏聚力为 1 MPa,泊松比为 0.26,内摩擦角为 47°;锚杆预紧力为 120 kN,锚杆长度为 3.5 m,间距为 1.5 m,椭圆形隧洞长半轴和短半轴分别为 9.75 m 和 7.1 m。

为了使数值模拟相关数据达到深埋条件,使得 λ 为定值,因此本研究根据黄岛水封石油库的现场测试取垂直应力为 1 MPa,水平应力为 8 MPa,取侧压力系数 $\lambda = 8$ 。

需要说明的是,本研究理论推导部分是深埋条件下隧道承载力的解,因此, λ 参数为不变量,实际

浅埋隧道求解过程 λ 为变化参数。从地质工程经验角度,如出现水平应力远大于垂直应力情况,一般考虑地处明显地质构造发育或深埋构造应力区域,青岛地区不会出现上述现象。但诸多学者开展了青岛城市尤其是黄岛地区的应力场及地质构造作用测试与分析工作,较一致地发现了水平应力远大于垂直应力现象^[18-22]。且本研究采用的青岛地铁 6 号线案例位于黄岛地区。只因青岛地区,尤其是黄岛地区,存在水平地应力远大于垂直地应力的情况,此工程地应力背景与深埋相似。故采用了青岛地铁的地应力参数和工程参数,且 λ 参数设置为不变量,主要目的是通过数值模拟方法验证理论结果可靠性。

3.1 应力求解

建立 3DEC 数值模型与解析方法对比,确定模型尺寸为 4 倍隧洞洞径,为方便模拟计算,模型厚度取 1 m 用于处理薄板平面问题,模型上下端面施加 1 MPa 应力,两侧施加 8 MPa 应力,各端面均为固定约束,数值模型尺寸及应力条件如图 3 所示。

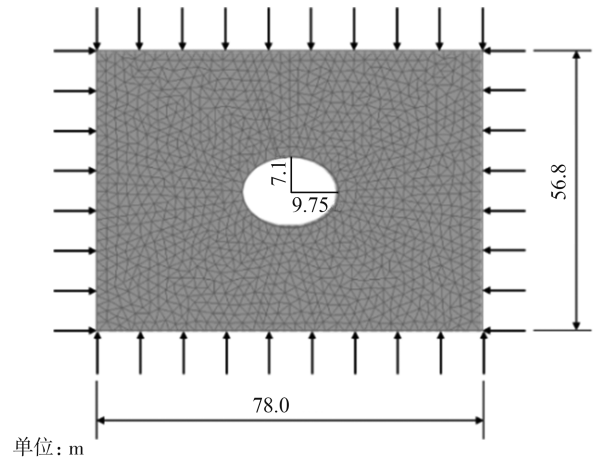


图 3 数值模型示意图

Fig.3 Diagram of numerical model

取微风化花岗岩力学参数作为模型块体参数赋值(见表 1),平衡地应力后进行开挖模拟计算。

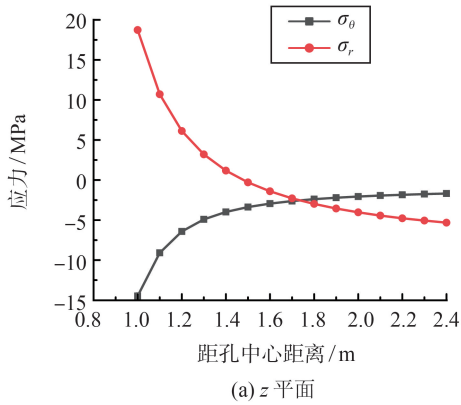
表 1 围岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock

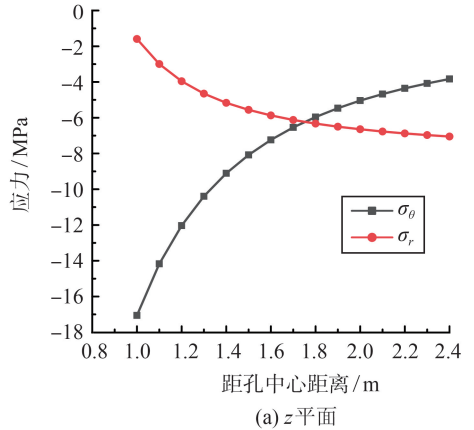
岩石	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量 E/GPa	泊松比	内摩 擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/MPa
微风化 花岗岩	2 400	15.0	0.26	47	1.0

理论计算求每个点的应力绘制应力场较复杂,因此本研究求解 0° 、 45° 、 90° 延长线上的应力与 3DEC 模拟结果进行对比,验证结果的正确性,理论

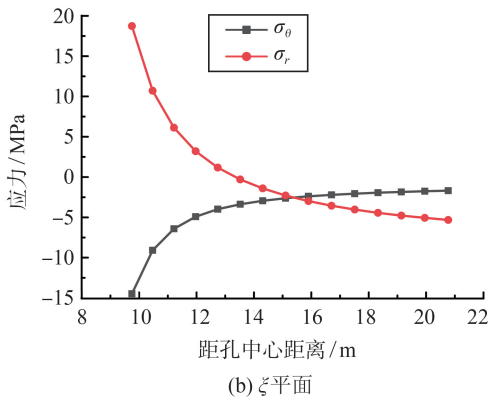
计算结果如图4~6所示。



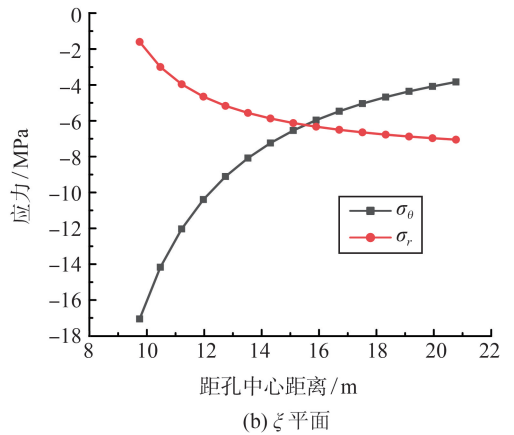
(a) z平面



(a) z平面



(b) xi平面



(b) xi平面

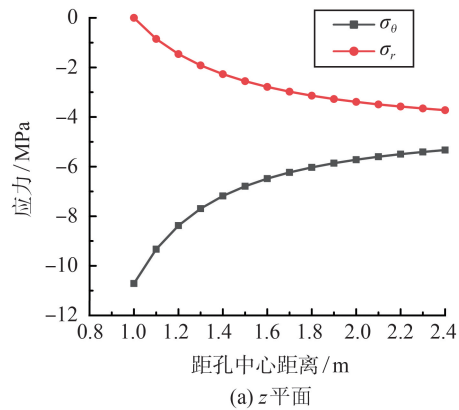
图4 0°延长线上应力

Fig.4 0° Stress on the extension line

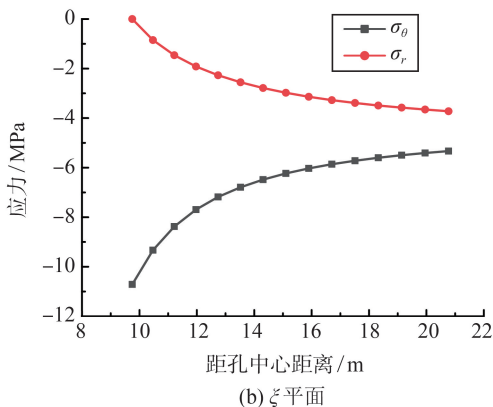
图6 90°延长线上应力

Fig.6 90° Stress on the extension line

根据理论计算的结果,发现径向应力在增大,切向应力在减小,最大应力产生在拱顶处,且三个方向应力最后均趋于平缓,这是因为隧洞开挖只影响隧洞孔边附近围岩的应力,对于远处应力影响很小。理论计算发现,距孔中心12 m、距孔边3.25 m处应力基本趋于稳定,因此为了保证承载力符合要求,进行锚杆支护加固时可以考虑锚杆长度大于等于3.25 m。为了验证正确性,采用3DEC软件进行模拟,模拟的应力图如图7所示。



(a) z平面



(b) xi平面

图5 45°延长线上应力

Fig.5 45° Stress on the extension line

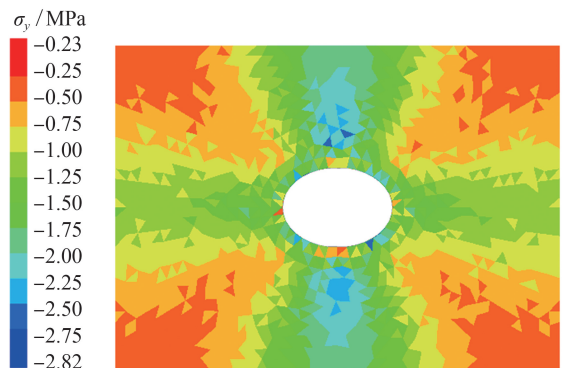


图7 竖向应力 σ_y

Fig.7 Vertical stress σ_y

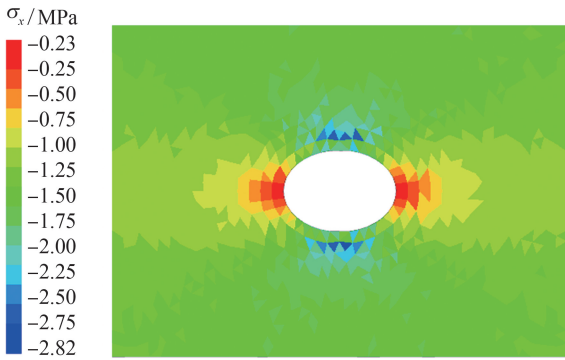
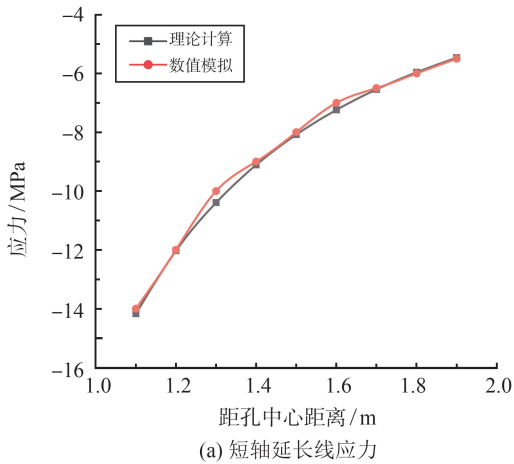
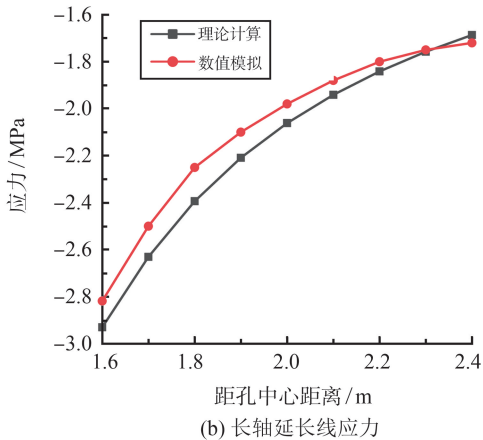


图 8 水平应力 σ_x
Fig.8 Horizontal stress σ_x

对模拟和理论计算数据进行提取对比,分别取孔边两轴延长线进行对比,结果如图 9 所示。可以看出,理论计算与数值模拟结果符合,验证了理论计算的正确性,同时,与实际工程对照,当趋于无穷远时,理论计算和数值模拟均趋于同一个值,说明无穷远处不受隧洞影响,同时也从侧面验证了理论计算的正确性。



(a) 短轴延长线应力



(b) 长轴延长线应力

图 9 理论计算与数值模拟对比

Fig.9 Comparison between theoretical calculations and numerical simulations

3.2 承载力分析

采用前文得到的承载力公式(28)(30)进行承

载力计算,研究分析锚杆长度、锚杆数量、锚杆预应力、侧压力系数以及塑性区半径对于承载力的影响趋势。

3.2.1 锚杆长度对于承载力的影响

锚杆长度在 1 m 到 4 m 之间每 0.2 m 进行等差取值,最终得到结果图如图 10 所示。

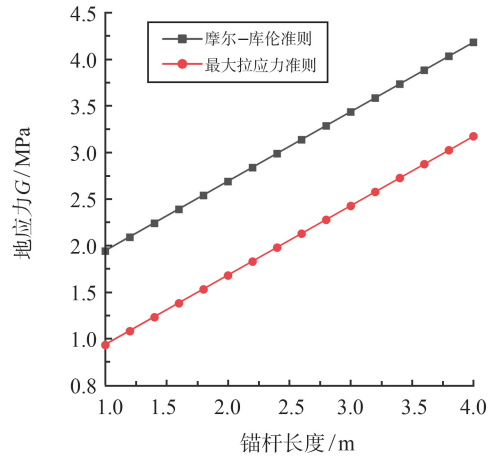


图 10 锚杆长度对承载力的影响

Fig.10 Influence of anchor rod length on bearing capacity

分别采用摩尔-库伦准则和最大应力准则两种计算方法,计算结果可以看出,锚杆越长,承载力越大,且采用摩尔-库伦准则计算的承载力更大。这是因为锚杆越长,围岩的加固范围越大,导致承载力越大,采用摩尔-库伦准则计算时,没有考虑拉应力的影响,所以承载力会偏大。

3.2.2 锚杆数量对于承载力的影响

其他参数保持不变,锚杆长度在 1 m 到 4 m 之间取值,同时假定塑性区半径为最终得到结果如图 11 所示。

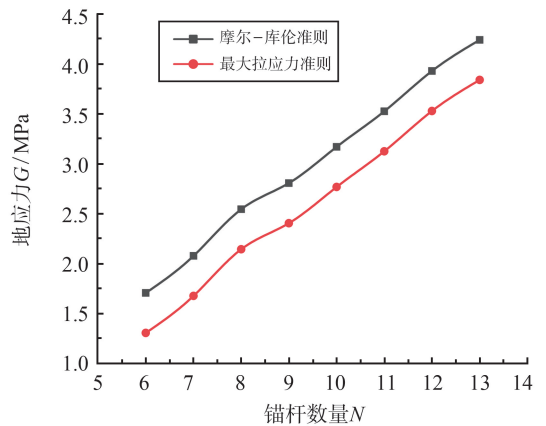


图 11 锚杆数量对承载力的影响

Fig.11 Influence of the number of anchors on the bearing capacity

从计算结果可以看出,锚杆数量越多,承载力越大,且摩尔-库伦准则计算的承载力更大,这是因

为锚杆数量越多,加固范围内收到的预应力越大,就能承受更大的力。

3.2.3 锚杆预应力对于承载力的影响

锚杆预应力在 50 kN 到 150 kN 之间进行 10 kN 等差取值,最终得到结果如图 12 所示。

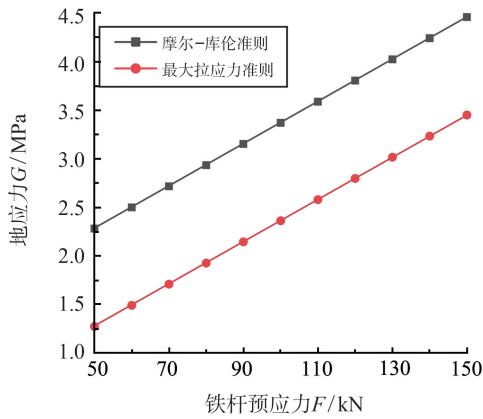


图 12 锚杆预应力对承载力的影响

Fig.12 Influence of anchor rod pretension on bearing capacity

从计算结果可以看出,预应力越大,承载力越大,且摩尔-库伦准则计算的承载力更大,这是因为施加的预应力越大,锚杆加固范围内的围岩就越密实,承载力就会越大。

3.2.4 侧压力系数对于承载力的影响

侧压力系数在 5 到 15 之间取整数,最终得到结果如图 13 所示。

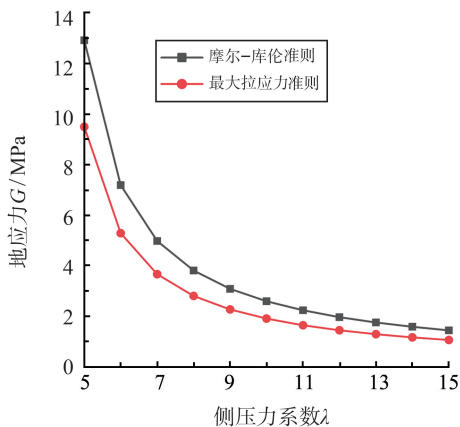


图 13 侧压力系数对承载力的影响

Fig.13 Influence of side pressure coefficient on bearing capacity

从计算结果可以看出,侧压力系数越大,承载力越小,侧压力趋向于某一个值时,侧压力趋向于无穷大,且摩尔-库伦准则计算的承载力更大,这是因为侧压力系数越大,侧压力就会越大,同一支护条件下,承载力就会变小,同时说明,在某一个值时,计算条件不适用,并不是说承载力

无穷大。

(5) 塑性区范围对于承载力的影响。

塑性区半径在 0.5 m 到 1.5 m 之间进行 0.1 m 等差取值,最终得到结果如图 14 所示。

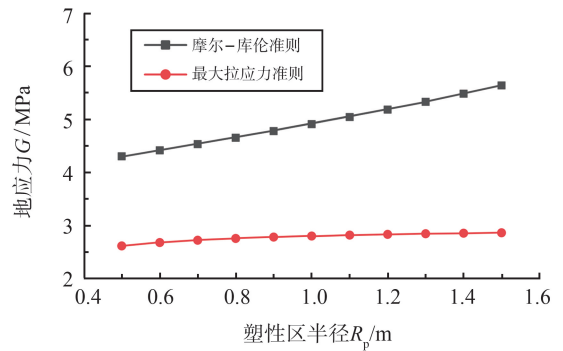


图 14 塑性区半径对承载力的影响

Fig.14 Influence of plastic zone radius on bearing capacity

从计算结果可以看出,塑性区越大,承载力越大,摩尔-库伦准则计算的承载力更大,且摩尔-库伦准则计算得到的承载力受塑性区影响更明显,这是因为同一种工况下,若产生的塑性区越大,则说明承受的地应力越大,同时说明,隧道中产生的应力以压应力为主,所以采用摩尔-库伦计算得到的承载力受塑性区影响更明显。

3.3 孔边应力分析

讨论孔边的应力情况,对参数敏感性进行分析,因为孔边不受外力作用,所以 $\sigma_r = 0$,同时将 $\rho = 1$ 带入式(19)(20)得

$$\sigma_{\theta} = \frac{G(1+\lambda)(1-m^2) + G(1-\lambda)(2\cos 2\theta - 2m)}{1 - 2m\cos 2\theta + m^2}$$

孔边切向应力与 G, λ, m 有关,分别讨论孔边应力与三者之间的关系,分析参数的敏感性。结果如图 15~17 所示。

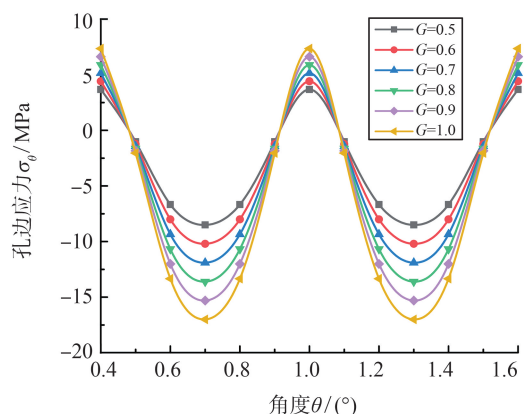


图 15 不同地应力 G 下的孔边应力

Fig.15 Holedge stress under different stresses G

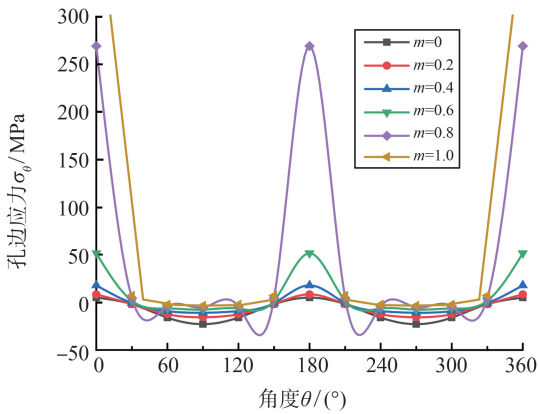


图 16 不同形状参数 m 下的孔边应力
Fig.16 Hole-edge stress under different shape parameters m

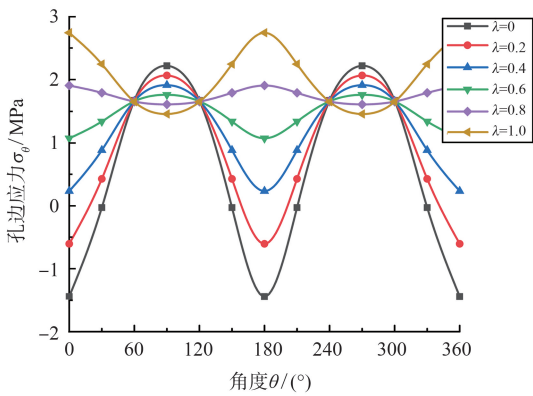


图 17 不同形状参数 λ 下的孔边应力
Fig.17 Well-edge stress under different shape parameters λ

由图 15、16、17 可以得出结论:

(1) 当 m 发生变化时,孔边应力变化更大,说明孔边应力对于形状参数 m 更加敏感。

(2) 当 $m=1$ 时,实际上是一种极限情况,即长轴等于短轴,椭圆就变成了圆形,由图 16 也可以看出来,形状为圆形时,孔边应力变化比较小,基本不会产生应力集中现象。

(3) 当 $m=0$ 时,是另外一种极限情况,即短轴无限小,椭圆就变成了一条扁平的裂缝,由图 16 也可以看出来,形状为裂缝时,孔边应力变化比较大,在长轴孔边上会产生较大的应力集中。

(4) 由图 15 可以得出,地应力不会影响孔边应力的整体形式,仅改变孔边应力的大小。

(5) 由图 17 可以得到结论, λ 对于孔边应力也会产生较大影响,当 $1 < \lambda < 1$ 时,孔边应力会出现相反趋势,这是因为 $\lambda < 1$ 时,垂直应力大于水平应力,垂直应力影响更大,而当 $\lambda > 1$ 时,垂直应力小于水平应力,此时水平应力影响更大。

4 结论

本研究分别得到了 Mohr-Coulomb 准则和最大

拉应力准则下的椭圆型隧洞承载力解析解,同时得到了预应力锚杆对于承载力的影响,将应力的解析解与 3DEC 模拟的数值解进行了对比,验证了解析解的正确性。

(1)对比 Mohr-Coulomb 准则和最大拉应力准则,最大拉应力准则下承载力更小,说明隧道工程中应该考虑拉应力的影响,最大拉应力准则比 Mohr-Coulomb 准则更加符合实际。

(2)锚杆长度和锚杆预应力越大时,承载力越大,锚杆数量越多,承载力越小。

(3)侧压力越大,承载力越小,但是侧压力系数存在一个特殊值,不适用于本研究的承载力计算,同种工况下,产生的塑性区越大,说明地应力越大。

(4)孔边应力对于形状参数 m 更加敏感,应力直接影响承载力,说明承载力对于 m 也更加敏感,当 $m=1$ 时,椭圆形隧洞就简化为裂缝,当 $m=0$ 时,椭圆就简化为圆形。

(5)当 $1 < \lambda < 1$ 时,对应力和塑性区产生相反的影响,这说明 $\lambda < 1$ 时,垂直应力对隧洞影响更大, $\lambda > 1$ 时,水平应力对于隧洞影响更大。

参考文献:

[1] 余涛,方勇,姚志刚,等. 隧道预应力锚杆锚固结构承载效应及围岩力学分析[J]. 岩土工程学报,2022,44(6): 1-10.
YU Tao, FANG Yong, YAO Zhigang, et al. Bearing effect and surrounding rock mechanical analysis of tunnel prestressed anchor anchor structure[J]. Geotechnical Journal, 2022, 44(6): 1-10.

[2] 石宗涛. 济南黄河隧道泥水盾构开挖面稳定性分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2022,4(4):71-77.
SHI Zongtao. Stability analysis of slurry shield excavation face of Jinan Yellow River Tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(4): 71-77.

[3] 孟强,赵洪波,茹忠亮,等. 锚杆支护圆形隧洞弹塑性解[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 17-25.
MENG Qiang, ZHAO Hongbo, RU Zhongliang, et al. The bar support round tunnel elastic plastic solution[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 17-25.

[4] 王庆瀚,赵继增,田宁. 硬岩地层大断面暗挖车站主动支护设计及其接口段施工技术[J].隧道与地下工程灾害防治,2021,3(2): 86-96.
WANG Qinghan, ZHAO Jizeng, TIAN Ning. Active support design and interface section construction technology of large section underground excavation station in hard rock stratum[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(2): 86-96.

[5] KNIGHT R. Stress functions for a plate containing groups

- of circular holes [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1939, 238(793):357-392.
- [6] 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1994.
- [7] 吕爱钟,张路青. 地下隧洞力学分析的复变函数方法[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [8] 吕爱钟, 祝二浩. 确定椭圆形隧洞端头锚固锚杆轴力的解析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(6): 1117-1128.
Lǚ Aizhong, ZHU Erhao. Analytic method for determining the axial force of the anchor rod at the end of the elliptic tunnel[J]. *Journal of Rock mechanics and Engineering*, 2019, 38(6):1117-1128.
- [9] 饶军应,傅鹤林,刘运思,等. 管状填充性椭圆形溶洞的围岩应力弹性解析分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(7):2605-2612.
RAO Junying, FU Helin, LIU Yunsi, et al. Elelastic analysis of surrounding rock stress in tubular filled oval cave[J]. *Journal of Central South University(Natural Science Edition)*, 2015, 46(7): 2605-2612.
- [10] 傅鹤林,张加兵,陈伟,等. 深埋圆形毛洞隧道围岩压力拱范围研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(7):117-124.
FU Helin, ZHANG Jiabing, CHEN Wei, et al. Study on surrounding rock pressure arch range of deep buried round wool hole tunnel[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2018, 45(7):117-124.
- [11] 祝江鸿. 隧洞围岩应力复变函数分析法中的解析函数求解[J]. *应用数学和力学*, 2013, 34(4): 345-354.
ZHU Jianghong. Analytic function solution in analysis of tunnel rock stress complex function[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, 34(4): 345-354.
- [12] 郭佳奇,乔春生. 椭圆孔口塑性区及其在岩溶隧道工程中的应用[J]. *铁道学报*, 2013, 35(3): 108-114.
GUO Jiaqi, QIAO Chunsheng. Oloptic orifice plastic zone and its application in karst tunnel engineering[J]. *Journal of Railways*, 2013, 35(3): 108-114.
- [13] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2013.
- [14] 朱大勇,钱七虎,周早生,等. 复杂形状洞室映射函数的新解法[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(3): 279-282.
ZHU Dayong, QIAN Qihu, ZHOU Zaosheng, et al. New solution to the complex shape hole chamber mapping function [J]. *Journal of Rock mechanics and Engineering*, 1999, 18(3): 279-282.
- [15] 刘淑红,范金录,朱永全. 非圆形隧道毛洞围岩的应力和塑性区[J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(3):78-85.
LIU Shuhong, FAN Jinlu, ZHU Yongquan. Stress and plastic zone in surrounding rock of noncircular tunnel [J]. *China Railway Science*, 2022, 43(3): 78-85.
- [16] 李元辉,刘明飞,李坤蒙,等. 矩形采场支护作用下围岩周边应力复变函数解析解[J]. *金属矿山*, 2021, 538(4):20-26.
LI Yuanhui, LIU Mingfei, LI Kunmeng, et al. Analytical solution of complex variable function of surrounding rock stress under rectangular stope support[J]. *Metal Mine*, 2021, 538(4): 20-26.
- [17] 王志强,武超,石磊,等. 基于复变理论的双向不等压圆形巷道围岩应力及塑性区分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(增刊2):419-429.
WANG Zhiqiang, WU Chao, SHI Lei, et al. Analysis of stress and plastic zone in surrounding rock of two-way unequal pressure circular roadway based on complex variable theory [J]. *Coal Journal*, 2019, 44 (Suppl. 2): 419-429.
- [18] 赵国彦,刘立顺,董陇军,等. 端锚预应力锚杆作用范围研究及其应用[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 25(1):1-7.
ZHAO Guoyan, LIU Lishun, DONG Longjun, et al. Study on action range of end-anchored prestressed anchor and its application[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 25(1): 1-7.
- [19] 徐彬,李仲奎. 地下水封石油洞库初始地应力回归分析[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(5):1390-1396.
XU Bin, LI Zhongkui. Regression analysis of initial geostress of underground water-sealed oil caverns [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26 (5): 1390-1396.
- [20] 王章琼,晏鄂川,季惠斌,黄岛地下水封油库地应力场及地质构造作用分析[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(1): 136-141.
WANG Zhangqiong, YAN Echuan, JI Huibin. Analysis of in-situ stress field and geological structure of Huangdao underground water sealed oil depot[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24 (1): 136-141.
- [21] 王章琼,晏鄂川,鲁功达,等. 我国大陆地下水封洞库库址区地应力场分布规律统计分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊1):251-256.
WANG Zhangqiong, YAN Echuan, LU Gongda, et al. Statistical analysis on distribution law of in-situ stress field of underground water-sealed caverns in mainland China[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2014, 35 (Suppl. 1): 251-256.
- [22] 陈祥,孙进忠,张杰坤,等. 黄岛地下水封石油洞库场区地应力场模拟分析[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(5): 713-719.
CHEN Xiang, SUN Jinzhong, ZHANG Jiekun, et al. Simulation analysis of in-situ stress field in Huangdao underground water-sealed oil cavern [J]. *Geotechnical Engineering*, 2009, 31(5): 713-719.