

考虑中间主应力影响的压力隧洞围岩抗力系数通用计算式

蔡晓鸿¹, 蔡勇斌¹, 蔡勇平², 康怀鹏³

(1. 江西省吉安市水务局, 江西 吉安 343000; 2. 江西省吉安市水利水电规划设计院, 江西 吉安 343000; 3. 江西省泰和县水利水电勘察设计院, 江西 泰和 343700)

摘要: 采用双剪统一强度理论, 考虑中间主应力影响, 建立了压力隧洞围岩抗力系数 K 的计算方法, 给出了其相应解析计算式, 并退化到莫尔-库仑屈服模型、特雷斯卡屈服模型, 验证了所获成果的正确性与通用性。

关键词: 中主应力; 围岩抗力系数; 统一强度理论

中图分类号: TV672.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)07-1004-05

作者简介: 蔡晓鸿(1944-), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事地下结构方向的研究。E-mail: mail_caixiaohong@yahoo.com.cn。

Calculation of resistance coefficient of adjoining rock for pressure tunnels considering effect of intermediate principal stress

CAI Xiao-hong¹, CAI Yong-bin¹, CAI Yong-ping², KANG Huai-peng³

(1. Jiangxi Province Ji'an City Hydropower Bureau, Ji'an 343000, China; 2. Jiangxi Province Ji'an City Hydropower Planning and Designing Institute, Ji'an 343000, China; 3. Jiangxi Province Taihe City Prefecture Hydropower Survey Institute, Taihe 343700, China)

Abstract: By use of the unified strength theory, a method to calculate the resistance coefficient K of adjoining rock for pressure tunnels was established considering effect of intermediate principal stress. The corresponding equations were given. They were degenerated to the Mohr-Coulomb yield model and Tresca yield model. The accuracy of test results were verified.

Key words: intermediate principal stress; resistance coefficient of adjoining rock; unified strength theory

0 前言

水工压力隧洞的围岩承受洞室开挖的重分布应力和内水压力产生的附加应力, 通常围岩抗力计算的基本前提是衬砌和围岩相互紧贴, 协调变形。本文定义围岩抗力: 隧洞衬砌受内水压力作用后, 产生径向变位压迫围岩, 围岩约束抵抗而作用于衬砌上的被动力, 这个被动作用力称为围岩抗力, 它表征围岩与衬砌联合承载时, 围岩分承载能力。显然, 围岩分承载能力的能力的发挥在很大程度上取决于衬砌和围岩之间的缝隙开度。工程界以往通常采用围岩弹性抗力系数 K 进行定量分析, 文献[1]指出在围岩均质各向同性条件下, 利用水工压力隧洞的轴对称特性, 采用文克勒(Winkler)假定不失其合理性, 并在此基础上, 将压力隧洞弹性抗力系数 K 拓展到隧洞围岩弹塑性变形状态, 给出了有裂缝区围岩、弹塑性强化围岩、弹塑性软化围岩、莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服条件下围岩抗力系数 K 的计算式^[1], 建立了围岩抗力系数新

概念, 拓宽了这一重要围岩物理学系数的应用范围。

笔者采用双剪统一强度理论屈服条件对水工圆形压力隧洞进行弹塑性分析, 给出相应的围岩抗力系数 K 的计算式, 并在退化条件下导出有诸计算公式。为便于与文献[1]给出的水工圆形压力隧洞围岩抗力系数 K 的计算公式进行比较, 应力正负号采用弹性力学的规定, 即以拉应力为正, 压应力为负。

1 双剪统一强度理论

双剪统一强度理论是文献[2]提出的一个强度理论, 其屈服条件具有多种不同的表达式。如果采用内摩擦角 φ 、黏聚力 c 作为围岩体基本参数, 注意到水工压力隧洞围岩切向应力 $\sigma_\theta > 0$, 径向应力 $\sigma_r < 0$, 且泊松比 $\mu \leq 0.5$, 则水工压力隧洞围岩双剪统一强度屈服准则改写成^[2]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} - \frac{b\sigma_2 + \sigma_r}{1+b} + (\sigma_{\theta} + \frac{b\sigma_2 + \sigma_r}{1+b})\sin\varphi &= 2c\cos\varphi \\ (\sigma_2 \leq \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_{\theta}) + \frac{1}{2}(\sigma_{\theta} - \sigma_r)\sin\varphi), \\ \frac{\sigma_r + b\sigma_2}{1+b} - \sigma_{\theta} + (\frac{\sigma_r + b\sigma_2}{1+b} + \sigma_{\theta})\sin\varphi &= 2c\cos\varphi \\ (\sigma_2 \geq \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_{\theta}) + \frac{1}{2}(\sigma_r - \sigma_{\theta})\sin\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, σ_2 为压力隧洞围岩的中间主应力, 系数 b 为反映中间主应力以及相应面上的径向应力、切向应力对围岩屈服影响的权系数, 其取值范围为闭区间 $[0, 1]$ 。特别 $b=0$ 时, 双剪统一强度屈服准则就变成莫尔-库仑屈服准则; $b=1$ 时, 就变成双剪强度准则。

圆形水工压力隧洞长度远较其横断面大, 可视作轴对称平面应变问题, 于是中间主应力可表示为

$$\sigma_2 = \mu(\sigma_r + \sigma_{\theta}) \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1), 整理后可得式 (1) 的统一表达式:

$$\sigma_{\theta} - c_1\sigma_r - c_2 = 0 \quad (3)$$

式中, 参数 c_1 和 c_2 只与材料性质有关。即当

$$\sigma_2 \leq \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_{\theta}) + \frac{1}{2}(\sigma_{\theta} - \sigma_r)\sin\varphi \text{ 时,}$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{(1+b\mu)(1-\sin\varphi)}{(1+b+b\mu)(1+\sin\varphi)-2b\mu}, \\ c_2 &= \frac{2(1+b)c\cos\varphi}{(1+b+b\mu)(1+\sin\varphi)-2b\mu}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\text{当 } \sigma_2 \geq \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_{\theta}) + \frac{1}{2}(\sigma_r - \sigma_{\theta})\sin\varphi \text{ 时,}$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{(1+b\mu)(1+\sin\varphi)}{(1+b+b\mu)(1-\sin\varphi)-2b\mu}, \\ c_2 &= \frac{-2(1+b)c\cos\varphi}{(1+b+b\mu)(1-\sin\varphi)-2b\mu} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

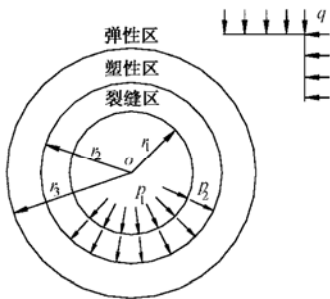


图1 弹塑性裂缝围岩计算简图

Fig. 1 Theoretical elasto plastic model with crack

2 围岩抗力系数

假设围岩洞壁的径向变位为 u_{r_1} , P_1 为围岩承受的

内压力, 据文克尔假定, 围岩抗力系数为

$$K = \frac{P_1}{u_{r_1}} \quad (6)$$

2.1 塑性区内的应力

在均匀内压力作用下, 压力达到一定数值, 孔口周围产生环形裂缝区, 其厚度为 $r_2 - r_1$; 裂缝区外层是环形塑性区, 其厚度为 $r_3 - r_2$; 塑性区外围是弹性区 (图1)。

将式 (3) 代入平衡微分方程 $\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0$, 得

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + (1-c_1)\frac{\sigma_r}{r} - \frac{c_2}{r} = 0 \quad (7)$$

据边界条件 $\sigma_r|_{r=r_2} = -P_2$, 求解式 (7) 得

$$\sigma_r = \frac{c_2}{1-c_1} - \left(\frac{c_2}{1-c_1} + P_2 \right) \left(\frac{r_2}{r} \right)^{1-c_1} \quad (8a)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{c_2}{1-c_1} - c_1 \left(\frac{c_2}{1-c_1} + P_2 \right) \left(\frac{r_2}{r} \right)^{1-c_1} \quad (8b)$$

2.2 塑性区的外半径 r_3

设塑性区与弹性区交界面的半径为 r_3 , 界面上的径向应力为 σ_{r_3} , 这时可把整个弹性区看作为一外半径趋向于 ∞ , 内半径为 r_3 的厚壁圆筒, 据厚壁圆筒应力表达式可得

$$\sigma_r = \sigma_{r_3} \frac{r_3^2}{r^2} - (1 - \frac{r_1^2}{r^2})q \quad (9a)$$

$$\sigma_{\theta} = -\sigma_{r_3} \frac{r_3^2}{r^2} - (1 + \frac{r_1^2}{r^2})q \quad (9b)$$

由接触条件 $(\sigma_r + \sigma_{\theta})|_{r=r_3}^{\text{塑}} = (\sigma_r + \sigma_{\theta})|_{r=r_3}^{\text{弹}}$, 得

$$r_3 = r_2 \left[\frac{(1+c_1) \left(\frac{c_2}{1-c_1} + P_2 \right)}{2 \left(\frac{c_2}{1-c_1} + q \right)} \right]^{\frac{1}{1-c_1}} \quad (10)$$

或改写为

$$P_2 = -\frac{c_2}{1-c_1} + \frac{2 \left(\frac{c_2}{1-c_1} + q \right)}{1+c_1} \left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{1-c_1} \quad (11)$$

式 (11) 实际上就是围岩产生部分塑性区, 其内压力与隧洞特性参数之间必需满足的充要条件。

2.3 塑性区的位移 u_r

对于弹塑性平面应变问题, 有

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_{\theta}) \quad (12)$$

塑性区内弹性应变为

$$\varepsilon_r^e = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_{\theta} + \sigma_z)] \quad (13)$$

将式 (12) 代入式 (13), 得

$$\varepsilon_r^e = \frac{1}{E} \left[\left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) \sigma_r - \frac{3}{2} \mu \sigma_\theta \right] \quad (14)$$

类似可得

$$\varepsilon_\theta^e = \frac{1}{E} \left[\left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) \sigma_\theta - \frac{3}{2} \mu \sigma_r \right] \quad (15)$$

塑性区内塑性应变为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r^p &= \frac{\psi}{4G} (\sigma_r - \sigma_\theta) \\ \varepsilon_\theta^p &= \frac{\psi}{4G} (\sigma_\theta - \sigma_r) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中, G 为围岩剪切模量, ψ 为塑性函数。

塑性区内总应变为

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p = \frac{du}{dr} = \frac{1}{E} \left[\left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) \sigma_r - \frac{3}{2} \mu \sigma_\theta \right] + \frac{\psi}{4G} (\sigma_r - \sigma_\theta) \quad (17a)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_\theta^p = \frac{u}{r} = \frac{1}{E} \left[\left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) \sigma_\theta - \frac{3}{2} \mu \sigma_r \right] + \frac{\psi}{4G} (\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (17b)$$

$$\text{将式 (17) 代入形变协调方程 } \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \frac{\varepsilon_\theta - \varepsilon_r}{r} = 0,$$

得

$$\frac{1}{E} \left[\left(1 - 2\mu \right) \frac{d\sigma_\theta}{dr} - \frac{3}{2} \mu \frac{d\sigma_r}{dr} \right] + \frac{\psi}{4G} \left(\frac{d\sigma_\theta}{dr} - \frac{d\sigma_r}{dr} \right) + \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{4G} \frac{d\psi}{dr} + \left(\frac{1+u}{E} + \frac{\psi}{2G} \right) \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0 \quad (18)$$

又据平衡方程 $\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$, 得

$$\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = \frac{d\sigma_r}{dr} \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (18), 整理后得

$$\left(\frac{1 - \frac{1}{2} \mu}{E} + \frac{\psi}{4G} \right) \frac{d}{dr} (\sigma_\theta + \sigma_r) + \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{4G} \frac{d\psi}{dr} = 0 \quad (20)$$

再将式 (8) 代入式 (20), 整理后得

$$\frac{d\psi}{dr} + (1 + c_1) \frac{\psi}{r} + \frac{2G(2 - \mu)}{E} \frac{1 + c_1}{r} = 0 \quad (21)$$

求解式 (21) 有

$$\psi = Br^{-(1+c_1)} - \frac{2G(2-\mu)}{E} \quad (22)$$

式中, B 为积分常数, 可由接触条件确定。

当 $r = r_3$ 时, $\psi = 0$, 据式 (22) 可得

$$B = \frac{2G(2-\mu)}{E} r_3^{1+c_1} \quad (23)$$

于是得塑性函数 ψ 的表达式为

$$\psi = \frac{2G(2-\mu)}{E} \left[\left(\frac{r_3}{r} \right)^{1+c_1} - 1 \right] \quad (24)$$

将式 (8)、(24) 代入式 (17b), 得塑性区位移为

$$u_r = r\varepsilon_\theta = \frac{(1-2\mu)r}{E} \left[\frac{c_2}{1-c_1} - \left(\frac{c_2}{1-c_1} + p_2 \right) \left(\frac{r_2}{r} \right)^{1-c_1} \right] + \frac{\left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) r}{E} (1-c_1) \left(\frac{c_2}{1-c_1} + p_2 \right) \left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{1+c_1} \left(\frac{r_2}{r} \right)^2 \quad (25)$$

塑性区内半径 r_2 处的变形为

$$u_{r_2} = u_r \Big|_{r=r_2} = \frac{r_2}{E} \left\{ -(1-2\mu)p_2 + \left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) [c_2 + (1-c_1)p_2] \left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{1+c_1} \right\} \quad (26)$$

2.4 围岩抗力系数 K 的计算式

对于围岩裂缝区, 只能传递径向应力, 切向抗拉强度为零。此时应力平衡方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r}{r} = 0 \quad (27)$$

积分式 (27), 并以边界条件 $\sigma_r \Big|_{r=r_1} = -P_1$ 为定解条件, 可得

$$\sigma_r = -\frac{P_1 r_1}{r} \quad (28)$$

再利用边界条件 $\sigma_r \Big|_{r=r_2} = -P_2$, 便得到

$$P_2 = \frac{P_1 r_1}{r_2} \quad (29)$$

由弹性理论几何方程和平面应变问题的物理方程可得

$$du_r = \varepsilon_r dr = -\frac{1-\mu_0^2}{E_0 r} P_1 r_1 dr \quad (30)$$

式中, E_0 , μ_0 分别为围岩裂缝区的弹性模量、泊松比。以裂缝区与塑性区边界上变形连续为式 (30) 的定解条件, 即以式 (26) 中的 u_{r_2} 为定解条件, 对式 (30) 积分得

$$u_r = \frac{1-\mu_0^2}{E_0} P_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r} + \frac{r_2}{E} \left\{ -(1-2\mu)p_2 + \left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) [c_2 + (1-c_1)p_2] \left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{1+c_1} \right\} \quad (31)$$

由式 (31) 可求得半径 r_1 处的变形为

$$u_{r_1} = u_r \Big|_{r=r_1} = \frac{1-\mu_0^2}{E_0} P_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2}{E} \left\{ -(1-2\mu)p_2 + \left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) [c_2 + (1-c_1)p_2] \left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{1+c_1} \right\} \quad (32)$$

据文克尔假定, 将式 (32) 代入式 (6), 即得统一强度理论屈服条件的水工压力隧洞围岩抗力系数 K 的解析计算式:

$$K = \left[\frac{1-\mu_0^2}{E_0} r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2}{E p_1} \left\{ -(1-2\mu) \frac{P_1 r_1}{r_2} + \left(1 - \frac{1}{2} \mu \right) [c_2 + (1-c_1) \frac{P_1 r_1}{r_2}] \left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{1+c_1} \right\} \right]^{-1} \quad (33)$$

为将式(33)与文献[1]中围岩抗力系数 K 的计算公式相比较,进而说明式(33)所具有的普适性,下面令 $b=0$, $q=0$, 则据式(4)有

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}, \\ c_2 &= \frac{2c\cos\varphi}{1+\sin\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

由式(11)得

$$p_2 = (1+\sin\varphi)(c\cot\varphi+q)\left(\frac{r_3}{r_2}\right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} - c\cot\varphi, \quad (35)$$

于是有

$$\left(\frac{r_3}{r_2}\right)^{\frac{2}{1+\sin\varphi}} = \left[\frac{\frac{p_1 r_1}{r_2} + c\cot\varphi}{(1+\sin\varphi)(c\cot\varphi+q)}\right]^{\frac{1}{\sin\varphi}}, \quad (36)$$

从而式(33)可写成

$$K = \left\{ \left[\frac{1-\mu_0^2}{E_0} r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2}{E p_1} \left\{ -(1-2\mu) \frac{p_1 r_1}{r_2} + \left(1 - \frac{1}{2}\mu\right) \cdot \left(\frac{p_1 r_1}{r_2} + c\cot\varphi\right) \frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \left[\frac{\frac{p_1 r_1}{r_2} + c\cot\varphi}{(1+\sin\varphi)(c\cot\varphi+q)}\right]^{\frac{1}{\sin\varphi}} \right\} \right]^{-1} \right\}, \quad (37)$$

此即文献[1]中的式(4-172)。若忽略塑性区弹性变形,则据式(22)有

$$\psi = B r^{-(1+c_1)} = B r^{-\frac{2}{1+\sin\varphi}}. \quad (38)$$

利用式(8)、(34)、(38)与(17b),可得围岩塑性区位移表达式:

$$u_{\text{塑}} = \frac{B \sin\varphi r_2^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} (p_2 + c\cot\varphi)}{2G(1+\sin\varphi)r}. \quad (39)$$

令式(8a)与式(9a)中 $r=r_3$, 并利用径向应力连续条件,得

$$\sigma_{r_3} = -c\cos\varphi. \quad (40)$$

据广义虎克(Hooke)定律得围岩弹性区位移表达式:

$$\begin{aligned} u_{\text{弹}} &= r\varepsilon_{\theta} = r \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_{\theta} - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_r \right) \\ &= \frac{1+\mu}{E} \frac{c r_3^2 \cos\varphi}{r}. \end{aligned} \quad (41)$$

由位移连续条件 $u_{\text{弹}}|_{r=r_3} = u_{\text{塑}}|_{r=r_3}$, 得积分常数

$$B = \frac{r_3^2 r_2^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} (1+\sin\varphi) c \cot\varphi}{p_2 + c\cot\varphi}. \quad (42)$$

将式(43)代入式(38)得

$$\psi = \frac{\left(\frac{r_3}{r_2}\right)^2 \left(\frac{r_2}{r}\right)^{\frac{2}{1+\sin\varphi}} (1+\sin\varphi) c \cot\varphi}{p_2 + c\cot\varphi}. \quad (43)$$

将式(42)代入式(39)得

$$u_{\text{塑}} = \frac{c r_3^2 \cos\varphi}{2Gr}. \quad (44)$$

塑性区内半径 r_2 处的变位为

$$u_{r_2} = \frac{c r_3^2 \cos\varphi}{2G r_2}, \quad (45)$$

以式(45)为式(30)的定解条件,积分后得

$$u_r = \frac{1-\mu_0^2}{E_0} p_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r} + \frac{c r_3^2 \cos\varphi}{2G r_2}, \quad (46)$$

据式(46)可求得半径 r_1 处的变位为

$$u_{r_1} = \frac{1-\mu_0^2}{E_0} p_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1+\mu}{E} \frac{c r_3^2 \cos\varphi}{r_2}, \quad (47)$$

于是可得忽略塑性区弹性变形的围岩抗力系数为

$$K = \frac{p_1}{u_{r_1}} = \frac{1}{r_1 \left(\frac{1-\mu_0^2}{E_0} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1+\mu}{E p_1} \cdot \frac{c r_3^2 \cos\varphi}{r_1 r_2} \right)}, \quad (48)$$

利用式(36),式(48)可改写成

$$K = \left[\frac{1-\mu_0^2}{E_0} r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{(1+\mu) c r_2 \cos\varphi}{E p_1} \left[\frac{\frac{p_1 r_1}{r_2} + c\cot\varphi}{(1+\sin\varphi) c \cot\varphi} \right]^{\frac{1+\sin\varphi}{\sin\varphi}} \right]^{-1}. \quad (49)$$

下面引入特雷斯卡(Tresca)屈服条件

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = 2\tau_s, \quad (50)$$

式中, τ_s 为围岩极限抗剪强度。

利用式(8)、(34),求 $\varphi \rightarrow 0$ 时的极限,得

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = 2c. \quad (51)$$

比较式(50)、(51),得

$$\tau_s = c, \quad (52)$$

于是可见,特雷斯卡屈服条件即为莫尔-库仑屈服条件在 $\varphi \rightarrow 0$, 且忽略塑性区弹性变形时的特例。

令 $\varphi \rightarrow 0$, 对式(36)取极限,并利用式(28),得

$$r_3 = r_2 \exp\left[\frac{1}{2} \left(\frac{p_1 r_1}{\tau_s r_2} - 1 \right)\right], \quad (53)$$

将式(52)、(53)代入式(49),得特雷斯卡屈服条件下的围岩抗力系数:

$$K = \frac{1}{r_1 \left[\frac{1-\mu_0^2}{E_0} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{(1+\mu) r_2 \tau_s}{E p_1 r_1} \exp\left(\frac{p_1 r_1}{\tau_s r_2} - 1\right) \right]}. \quad (54)$$

对式(54)作进一步讨论有如下结论:

(1) 若不出现塑性区,有 $r_3 = r_2$, 据式(53)得

$$\frac{p_1 r_1}{\tau_s r_2} = 1, \quad (55)$$

将式(55)代入式(54),有陶振宇公式:

$$K = \frac{1}{r_1 \left(\frac{1-\mu_0^2}{E_0} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1+\mu}{E} \right)} \quad (56)$$

(2) 若式(56)中围岩裂缝区的弹性模量及泊松比与围岩弹性区的弹性模量及泊松比相同, 并进而取 $1-\mu_0^2 \approx 1$, 则据式(54)得钱令希公式:

$$K = \frac{E}{r_1 \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + 1 + \mu \right)} \quad (57)$$

(3) 若将式(55)改写成 $\frac{r_2}{r_1} = \frac{p_1}{\tau_s}$, 且 $E_0 = E$, $\mu_0 = \mu$, 则据式(54)得叶金汉公式^[3]:

$$K = \frac{E}{r_1 \left[(1-\mu^2) \ln \frac{p_1}{\tau_s} + 1 + \mu \right]} \quad (58)$$

(4) 若没有裂缝区, 即 $r_2 = r_1$, $p_2 = p_1$, 则据式(54)得理想塑性变形围岩抗力系数计算公式:

$$K = \frac{1}{\frac{(1+\mu)\tau_s r_1}{E p_1} \exp\left(\frac{p_1}{\tau_s} - 1\right)} \quad (59)$$

(5) 若没有裂缝区, 也无塑性区, 即 $r_3 = r_2 = r_1$, $p_1 r_1 = \tau_s r_2$, 则据式(54)得著名的喀列尔金 (Галеркин) 公式:

$$K = \frac{E}{r_1 (1 + \mu)} \quad (60)$$

3 结 论

本文采用有限环接触模型, 建立了统一强度理论考虑中间主应力影响屈服条件下的水工压力隧洞围岩抗力系数计算方法, 给出了围岩抗力系数 K 的相应解析计算式, 并退化到莫尔-库仑屈服模型、特雷斯卡屈服模型及其他概化模型, 得出了相应的围岩抗力系数适用表达式, 揭示了所获成果具有的广泛通用性。

参考文献:

- [1] 蔡晓鸿, 蔡勇平. 水工压力隧洞结构应力计算[M]. 北京: 水利水电出版社, 2004. (CAI Xiao-hong, CAI Yong-ping. Structure stress calculation for hydraulic pressure tunnel[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1-9. (YU Mao-hong. Unified strength theory for geomaterials and its applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1-9. (in Chinese))
- [3] 蔡晓鸿. 圆形压力隧洞岩石抗力系数 K 的理论和计算[J]. 工程力学, 1988(3): 100-108. (CAI Xiao-hong. The theories and computation of the rock resistant factor "K" in circular pressure tunnel[J]. Engineering Mechanics, 1988(3): 100-108. (in Chinese))