

考虑应变软化、剪胀和渗流的水工隧洞解析解

张常光^{1, 2}, 张庆贺^{1, 2}, 赵均海³

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 基于统一强度理论和弹脆塑性软化模型, 考虑不同工况下主应力顺序、岩石应变软化、剪胀和渗流等综合影响, 推导了圆形水工压力隧洞应力和洞壁位移解析解。通过工程算例, 比较本文方法与传统方法的不同, 说明考虑第一主应力的变化和渗流体积力更符合工程实际, 并得出统一强度理论参数、软化特性参数和剪胀特性参数对隧洞切向应力和洞壁位移的影响特性。隧洞设计时, 应依据围岩材料特性合理地选取统一强度理论参数, 并考虑由于软化特性参数和剪胀特性参数的减小对隧洞切向应力和洞壁位移增大的影响。该结果为圆形水工压力隧洞弹塑性分析提供了理论依据, 对工程设计有一定的参考价值。

关键词: 地下工程; 水工压力隧洞; 统一强度理论; 应变软化; 剪胀; 渗流

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)12-1941-06

作者简介: 张常光(1982-), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 从事地下结构和强度理论研究。E-mail: zcg1016@163.com。

Analytical solutions of hydraulic tunnels considering strain softening, shear dilation and seepage

ZHANG Chang-guang^{1, 2}, ZHANG Qing-he^{1, 2}, ZHAO Jun-hai³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on the unified strength theory and the elastic-brittle-plastic softening model, analytical solutions of stress and tunnel wall displacement for circular hydraulic pressure tunnels are deduced considering the principal stress orders under different engineering conditions, rock strain softening, shear dilation and seepage. Comparisons are made between the results obtained in this paper and those of the traditional methods through an engineering example. It can be found that it more accords with the engineering practice to consider the variation of the maximal principal stress and volumetric force of seepage. The effects of the unified strength theory parameter, strain softening characteristic parameters and shear dilation characteristic parameter on the tunnel tangential stress and tunnel wall displacement are discussed. In tunnel design, the unified strength theory parameter should be reasonably adopted according to surrounding rock material properties. The increasing effects on the tunnel tangential stress and tunnel wall displacement also should be considered with the decrease of the strain softening characteristic parameters and shear dilation characteristic parameter.

Key words: underground engineering; hydraulic pressure tunnel; unified strength theory; strain softening; shear dilation; seepage

0 引 言

水工压力隧洞是地下工程中常见的隧道结构, 常设计为圆形。隧洞在开挖前, 岩体处于静止、平衡状态, 开挖破坏了初始平衡状态, 隧洞周围岩体应力发生重分布, 达到二次应力状态。地下水是岩体赋存的重要环境因素之一, 由于地下水的作用, 常引起岩体应力重分布, 从而影响岩体的变形与破坏, 关系到隧洞工程的稳定和安全。对于水工压力隧洞, 运行期均匀内水压力是主要荷载。外水压力是渗流过程中作用

在围岩上的渗流体积力, 且受隧洞施工和运行的影响, 有自己的荷载历史。岩石、硬黏土、结构性土、密实性砂土和混凝土等材料在应力-应变关系上具有明显的峰值, 峰值后应力随变形增大而降低, 称为应变软化, 之后趋于稳定的数值-残余强度。在体积应变与主应变曲线上, 随着主应变的增大, 体积应变先是减

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(SJ08E204)

收稿日期: 2008-08-28

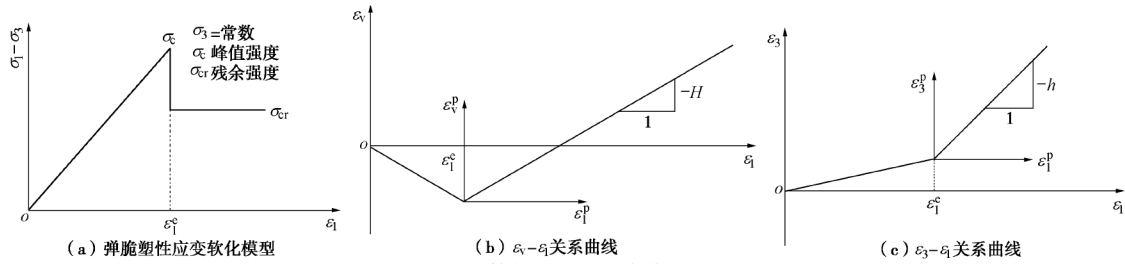


图 1 简化的应力应变曲线

Fig. 1 Reduced stress-strain curves

小, 随后逐渐增大, 称为剪胀。目前压力隧洞的研究多是集中在某一方面^[1-5], 如强度准则的选取、不同工况下主应力顺序的变化、岩石材料的应变软化和剪胀特性、渗流体积力的影响等, 所得结果与实际情况存在差异。本文针对圆形水工压力隧洞, 采用统一强度理论和弹脆塑性软化模型, 考虑不同工况下主应力顺序、岩石应变软化、剪胀和渗流等综合影响, 推导了隧洞应力和洞壁位移解析解, 并通过工程算例分析本文方法与传统方法的不同, 及各参数对隧洞切向应力和洞壁位移的影响。

1 统一强度理论

统一强度理论能合理地考虑中间主应力 σ_2 效应, 适用于各种拉压特性不同的材料。由于圆形隧洞纵向尺寸远大于其横向尺寸, 且荷载和几何形状均是轴对称的, 可认为隧洞处于平面应变状态, σ_2 为中间主应力, 且在塑性区 $\sigma_2 = \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 。对于平面应变弹塑性问题, 统一强度理论表达式为^[6-7]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= -\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_1 + c_1 \cos \varphi_1, \\ \sin \varphi_1 &= \frac{2(1+b) \sin \varphi}{2(1+b) + b(\sin \varphi - 1)}, \\ c_1 &= \frac{2(1+b) c \cos \varphi}{2(1+b) + b(\sin \varphi - 1) \cos \varphi_1}, \\ \alpha &= \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad b = \frac{(1 + \alpha) \tau_s - \sigma_t}{\sigma_t - \tau_s} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 c , φ 分别为材料的黏聚力和内摩擦角; c_1 , φ_1 分别为材料的统一黏聚力和统一内摩擦角; σ_t , σ_c , τ_s 和 α 分别为材料的抗拉强度、抗压强度、抗剪强度和拉压比; b 为反映中间主剪应力及相应面上的正应力对材料屈服或破坏影响程度的参数, 称为统一强度理论参数, $0 \leq b \leq 1$ 。

为突出反映岩土材料达到强度峰值后的应变软化特性, 峰值至残余强度用应力跌落表示, 称为弹脆塑性软化模型^[4]; 用两折线分别模拟体积应变 ε_v 、第三主应变 ε_3 与第一主应变 ε_1 的关系, 如图 1 所示。图中, ε_1^p , ε_3^p , ε_v^p 为峰值后局部坐标中的塑性应变, 以拉

伸为正, 压缩为负; h , H 为剪胀特性参数, 且 $h=1+H$ 。

采用平面应变状态下的统一强度理论, 其塑性软化前、后的屈服准则为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= -\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_j + c_j \cos \varphi_j, \\ \sin \varphi_j &= \frac{2(1+b) \sin \varphi}{2(1+b) + b(\sin \varphi_j - 1)}, \\ c_j &= \frac{2(1+b) c_j \cos \varphi_j}{2(1+b) + b(\sin \varphi_j - 1) \cos \varphi_j} \cdot 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 c_j , φ_j 分别为材料的黏聚力和内摩擦角; c_j , φ_j 分别为材料的统一黏聚力和统一内摩擦角; $j=0$ 表示材料应变软化前, $j=1$ 表示材料应变软化后。

2 渗流体积力

岩体的渗流主要是地下水在裂隙(或孔隙)内的流动, 一般情况下属层流, 符合达西(Darcy)定律^[8]。设在隧洞施工期, 距隧洞中心半径 R_0 范围以外, 外水压力与原始渗流场外水压力 p_i 相同, 如图 2 所示。

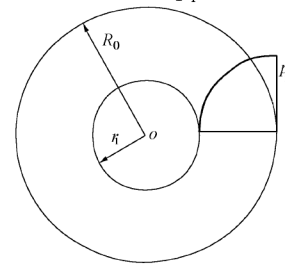


图 2 施工期渗流体积力

Fig. 2 Seepage volumetric force during construction stage

运行期由于隧洞内半径 r_1 处作用渗流水压力 p_m , 隧洞保持原始渗流场外水压力 p_i 的半径将由施工期的 R_0 调整为 R_c , 如图 3 所示。

施工期和运行期渗流体积力分别为

$$p_w = p_i \ln \frac{r}{r_1} / \ln \frac{R_0}{r_1} \quad (r_1 \leq r \leq R_0), \quad (3)$$

$$p'_w = p_m + (p_m - p_i) \ln \frac{r}{r_1} / \ln \frac{R_c}{r_1} \quad (r_1 \leq r \leq R_c), \quad (4)$$

式中, p_w , p'_w 分别为隧洞施工期和运行期的渗流体积力, R_0 , R_c 可由钻孔实测或抽水试验确定。

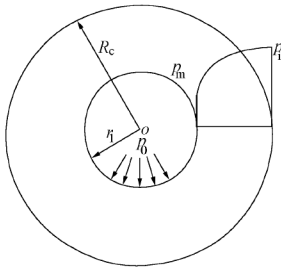


图 3 运行期渗流体积力

Fig. 3 Seepage volumetric force during operating period

3 施工期围岩应力和洞壁位移分析

3.1 应力分析

设围岩为弹脆塑性软化材料, 且在无穷远处受初始地应力 q 作用。隧洞在不同的工况下^[3], 第一主应力可能是径向应力, 也可能是切向应力。在施工期, 围岩由于开挖卸载进入塑性变形, 此时径向应力 σ_r 为第一主应力。施工期含水围岩破坏时, 剪应力 τ 与正应力 $\sigma + \eta p_w$ 满足平面应变状态下的统一强度理论为

$$\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} = -\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \sin \varphi_y - \eta p_w \sin \varphi_y + c_y \cos \varphi_y, \quad (5)$$

式中, η 为渗流体积力的有效面积 (单位面积上的有效面积) 系数。为安全起见, 在研究岩体的破坏和稳定时, 一般取 $\eta = 1$ 。

施工期隧洞应力计算简图, 如图 4 所示。图中, r_2 为施工期围岩塑性区外半径。

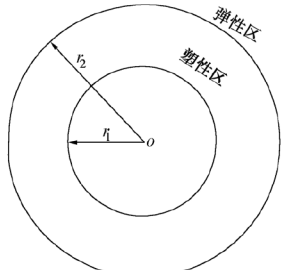


图 4 施工期隧洞计算简图

Fig. 4 Calculation sketch of tunnel during construction stage

视含水围岩为两相介质体, 由于渗流而形成渗流体积力场, 于是平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \eta \frac{dp_w}{dr} = 0. \quad (6)$$

由式 (5) ($j=1$) 和边界条件 $\sigma_r|_{r=r_1} = 0$, 解式 (6) 得

$$\sigma_r = - \left[c_{t1} \cot \varphi_{t1} - \eta p_1 \frac{(1 - \sin \varphi_{t1})}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_0}{r_1}} \right] \times \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{t1}}{1 - \sin \varphi_{t1}}} + \frac{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{r}{r_1} + (1 - \sin \varphi_{t1})}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_0}{r_1}} c_{t1} \cot \varphi_{t1} - \eta p_1, \quad (7a)$$

$$\sigma_\theta = - \frac{1 + \sin \varphi_{t1}}{1 - \sin \varphi_{t1}} \left[c_{t1} \cot \varphi_{t1} - \eta p_1 \frac{(1 - \sin \varphi_{t1})}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_0}{r_1}} \right] \times \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{t1}}{1 - \sin \varphi_{t1}}} + \frac{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{r}{r_1} + (1 + \sin \varphi_{t1})}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_0}{r_1}} c_{t1} \cot \varphi_{t1} - \eta p_1. \quad (7b)$$

式中, c_{t1} , φ_{t1} 分别为围岩应变软化后的统一黏聚力和统一内摩擦角。

设围岩弹塑性交界处的径向压力为 p_{r_2} , 则围岩弹性区应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -q \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) - p_{r_2} \frac{r_2^2}{r^2} - \eta p_w, \\ \sigma_\theta &= -q \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) + p_{r_2} \frac{r_2^2}{r^2} - \eta p_w, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, p_w 为施工期围岩的渗流体积力, 应取式 (3)。

在 $r = r_2$ 处, 围岩弹性区的应力满足初始屈服方程式 (5) ($j=0$), 整理得

$$p_{r_2} = q(1 - \sin \varphi_{t0}) - c_{t0} \cos \varphi_{t0}, \quad (9)$$

式中, c_{t0} , φ_{t0} 分别为围岩初始的统一黏聚力和统一内摩擦角。

在 $r = r_2$ 处, 根据弹塑性区径向应力连续, 由式 (7a) 和式 (9) 得

$$\begin{aligned} & \left[c_{t1} \cot \varphi_{t1} - \eta p_1 \frac{(1 - \sin \varphi_{t1})}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_0}{r_1}} \right] \times \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{t1}}{1 - \sin \varphi_{t1}}} \\ &= q(1 - \sin \varphi_{t0}) + c_{t1} \cot \varphi_{t1} - c_{t0} \cos \varphi_{t0} - \frac{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{r_2}{r_1} + (1 - \sin \varphi_{t1})}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_0}{r_1}} \eta p_1. \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 洞壁位移分析

弹性区内边界 $r = r_2$ 处的应变和位移分别为

$$\varepsilon_r^e|_{r=r_2} = -\varepsilon_\theta^e|_{r=r_2} = \frac{1 + \mu}{E} (q \sin \varphi_{t0} + c_{t0} \cos \varphi_{t0}), \quad (11)$$

$$u^e|_{r=r_2} = -\frac{(1 + \mu)r_2}{E} (q \sin \varphi_{t0} + c_{t0} \cos \varphi_{t0}). \quad (12)$$

式中, E , μ 分别为围岩的弹性模量和泊松比。

采用简化的应变关系曲线, 见图 1(b) 和图 1(c)。在塑性区,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \varepsilon_1^e|_{r=r_2} + \varepsilon_1^p, \quad \varepsilon_\theta = \varepsilon_3^e|_{r=r_2} + \varepsilon_3^p, \\ \varepsilon_3^p &= -h\varepsilon_1^p, \quad \varepsilon_v^p = -H\varepsilon_1^p. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由式 (11) 和式 (13), 并考虑到 $\varepsilon_r^e = -\varepsilon_\theta^e$, 得

$$h\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = (h - 1)\varepsilon_r^e|_{r=r_2},$$

$$\text{即 } \frac{du}{dr} + \frac{u}{hr} = \frac{(1+\mu)(h-1)}{Eh} (q \sin \varphi_{t0} + c_{t0} \cos \varphi_{t0}) \quad (14)$$

以式 (12) 为边界条件, 求得式 (14) 通解, 进而得隧洞洞壁位移

$$u_0 = -\frac{1+\mu}{E(1+h)} (q \sin \varphi_{t0} + c_{t0} \cos \varphi_{t0}) \cdot r_1 \left(2h \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\frac{1+h}{h}} - h + 1 \right) \quad (15)$$

由式 (10) 计算出 r_2^* 后, 再由式 (7) ~ (9) 分别求出施工期围岩塑性区和弹性区应力。将 r_2 代入式 (15), 得施工期隧洞洞壁位移。

4 运行期围岩应力和洞壁位移分析

在运行期, 隧洞围岩由于均匀内水压力 p_0 太大 (一般均满足^{[3]110} $p_0 \geq q(1 + \sin \varphi_{t0}) + c_{t0} \cos \varphi_{t0}$), 进入塑性变形。此时隧洞应力水平受均匀内水压力 p_0 控制, 切向应力 σ_θ 为第一主应力 (满足 $p_0 > q$)。因此含水围岩破坏时, 剪应力 τ 与正应力 $\sigma + \eta p'_w$ 满足平面应变状态下的统一强度理论变为

$$\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} = -\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \sin \varphi_{t1} - \eta p'_w \sin \varphi_{t1} + c_{t1} \cos \varphi_{t1} \quad (16)$$

式中, p'_w 为运行期围岩的渗流体积力, 应取式 (4)。

运行期隧洞应力计算简图, 如图 5 所示。图中, r_2^* 为运行期围岩塑性区外半径。

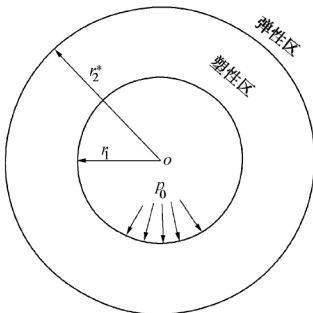


图 5 运行期隧洞计算简图

Fig. 5 Calculation sketch of tunnel during operating period

在围岩塑性区内, $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r$, 若施工期隧洞围岩处于弹性状态, 则可按第 3 节的方法, 得如下结果:

关于围岩塑性区外半径 r_2^* 的隐式计算式为

$$\left(\frac{r_2^*}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{t1}}{1 + \sin \varphi_{t1}}} = \frac{p_0 + c_{t1} \cot \varphi_{t1} + \eta \frac{(1 + \sin \varphi_{t1})(p_i - p_m) - \sin \varphi_{t1} p_m \ln \frac{R_c}{r_1}}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_c}{r_1}}}{q(1 + \sin \varphi_{t0}) + c_{t0} \cos \varphi_{t0} + c_{t1} \cot \varphi_{t1} + \eta \frac{(1 + \sin \varphi_{t1})(p_i - p_m) + \sin \varphi_{t1} \left(p_m \ln \frac{r_2^*}{R_c} - p_i \ln \frac{r_2^*}{r_1} \right)}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_c}{r_1}}} \quad (17)$$

围岩弹性区应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -q \left(1 - \frac{r_2^{*2}}{r^2} \right) - p_{r_2^*}^* \frac{r_2^{*2}}{r^2} - \eta p'_w, \\ \sigma_\theta &= -q \left(1 + \frac{r_2^{*2}}{r^2} \right) + p_{r_2^*}^* \frac{r_2^{*2}}{r^2} - \eta p'_w, \\ p_{r_2^*}^* &= q(1 + \sin \varphi_{t0}) + c_{t0} \cos \varphi_{t0} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

围岩塑性区应力为

$$\sigma_r = - \left(p_0 + c_{t1} \cot \varphi_{t1} - \eta p_m + \eta \frac{(1 + \sin \varphi_{t1})(p_i - p_m)}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_c}{r_1}} \right) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{-\frac{2 \sin \varphi_{t1}}{1 + \sin \varphi_{t1}}} + c_{t1} \cot \varphi_{t1} + \eta \frac{(1 + \sin \varphi_{t1})(p_i - p_m)}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_c}{r_1}} + \eta \frac{p_m \ln \frac{r}{R_c} - p_i \ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{R_c}{r_1}} \quad (19a)$$

$$\sigma_\theta = - \frac{1 - \sin \varphi_{t1}}{1 + \sin \varphi_{t1}} \left(\frac{p_0 + c_{t1} \cot \varphi_{t1} - \eta p_m + \eta \frac{(1 + \sin \varphi_{t1})(p_i - p_m)}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_c}{r_1}}}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_c}{r_1}} \right) \times \left(\frac{r}{r_1} \right)^{-\frac{2 \sin \varphi_{t1}}{1 + \sin \varphi_{t1}}} + c_{t1} \cot \varphi_{t1} + \eta \frac{(1 - \sin \varphi_{t1})(p_i - p_m)}{\sin \varphi_{t1} \ln \frac{R_c}{r_1}} + \eta \frac{p_m \ln \frac{r}{R_c} - p_i \ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{R_c}{r_1}} \quad (19b)$$

洞壁位移

$$u_0 = \frac{1+\mu}{E(1+h)} (q \sin \varphi_{t0} + c_{t0} \cos \varphi_{t0}) \cdot r_1 \left(2h \left(\frac{r_2^*}{r_1} \right)^{\frac{1+h}{h}} - h + 1 \right) \quad (20)$$

由式 (17) 计算出 r_2^* 后, 再由式 (18)、式 (19) 分别求出运行期隧洞围岩弹性区和塑性区应力。将 r_2^* 代入式 (20), 得运行期隧洞洞壁位移。

5 工程算例及参数分析

某水工压力隧洞^[8]内半径 $r_1 = 2.5$ m, 围岩力学参数为: $E = 2 \times 10^7$ kPa, $\mu = 0.3$, $c_0 = 450$ kPa, $\varphi_0 = 30^\circ$, $c_1 = 250$ kPa, $\varphi_1 = 28^\circ$; 初始地应力 $q = 10^3$ kPa, 运行期隧洞承受均匀内水压力 $p_0 = 6 \times 10^3$ kPa。隧洞围岩与上覆岩体有水力联系, $p_i = 10^3$ kPa, $p_m = 500$ kPa, $\eta = 1.0$ 。由钻孔实测及抽水试验知 $R_0 = 12r_1 = 30$ m, $R_c = 8r_1 = 20$ m。

5.1 方法比较

依据工程参数, 当统一强度理论参数 $b=0$ 时, 由式 (10) 求得 $r_2 = r_1 = 2.5$ m, 即由于初始地应力不大,

施工期隧洞围岩在开挖应力重分布后仍处于弹性状态, 隧洞安全等级高; 当 $b=0, 0.5$ 和 1 时, 由式 (17) 求得 r_2^* 分别为 $4.79, 4.38$ 和 4.18 m, 均大于 2.5 m, 即运行期隧洞围岩处于弹塑性状态, 隧洞安全等级低, 并且随着内水压力 p_0 的增大, 围岩塑性区范围在不断扩大, 隧洞安全等级不断降低。如果不考虑第一主应力的变化, 即在隧洞运行期仍以径向应力 σ_r 为第一主应力, 按第 3 节思路, 经计算知不管内水压力多大, 隧洞围岩都将处于弹性状态, 隧洞安全等级较高, 这与实际情况矛盾, 说明考虑第一主应力的变化是正确的^[2-3, 8], 结束了强度理论在水工压力隧洞应力分析具体应用中的误区, 更符合工程实际。

如果不考虑渗流体积力 ($\eta=0$), 当 $b=0, 0.5$ 和 1 时, 由式 (17) 求得 r_2^* 分别为 $4.57, 4.19$ 和 4.02 m, 较考虑渗流体积力 ($\eta=1$) 时的围岩塑性区范围小, 说明考虑渗流体积力的影响是非常必要的, 不考虑渗流体积力时隧洞安全等级偏高。

5.2 参数影响分析

通过统一强度理论参数 b 的取值来分析中间主应力 σ_2 的影响。当 $b=0$ 时, 统一强度理论退化为 Mohr-Coulomb 强度准则; $b=1$ 时, 退化为双剪应力强度理论。由上述可知, 在隧洞运行期无论考虑渗流体积力与否, 不同的 b 值对围岩塑性区范围都有比较显著的影响, 随着 b 的增大, 围岩塑性区半径在逐渐减小, 这说明考虑中间主应力 σ_2 的影响, 可以更加充分地发挥岩石类材料的强度潜能, 更客观地认识材料的自承载能力。

通过软化特性参数 c_1, φ_1 的取值来分析不同软化特性的影响。在运行期隧洞围岩一般径向受压, 切向受拉, 因岩石抗拉强度较低, 对设计一般起控制作用, 因而只分析软化特性参数对切向应力 σ_θ 的影响。当 $b=0.5$ 时, 取 $c_1=350, 250$ 和 150 kPa, 按第 4 节方法求得运行期隧洞围岩塑性区、弹性区的切向应力分布, 如图 6 所示; 当 $b=0.5$ 时, 取 $\varphi_1=30^\circ, 28^\circ$ 和 26° , 按第 4 节方法求得运行期隧洞围岩塑性区、弹性区的切向应力分布, 如图 7 所示。

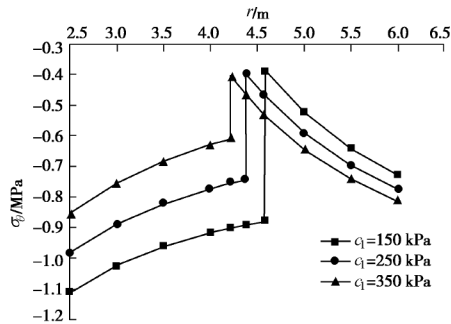


图 6 c_1 对切向应力的影响

Fig. 6 Effect of c_1 on tangential stress

由图 6 可以看出, 切向应力 σ_θ 在围岩弹塑性交界处不连续, 且 c_1 越小应力变化越大, 这是由于围岩塑性应变软化造成其力学参数发生改变, 处在弹性区边界的应力满足初始屈服面方程, 而塑性区边界的应力满足后继屈服面方程, 且只能保证其径向应力 σ_r 连续; 在围岩塑性区, c_1 越小, 切向压应力 σ_θ 越大, $c_1=350$ kPa 时洞壁处 σ_θ 比 $c_1=150$ kPa 时减小了 23.07%, 在围岩弹性区却相反。从图 7 可以看出, φ_1 值对切向应力 σ_θ 的影响规律和 c_1 值的相似。随着 φ_1 的增大, 围岩塑性区的切向压应力逐渐减小, $\varphi_1=30^\circ$ 时洞壁处 σ_θ 比 $\varphi_1=26^\circ$ 时减小了 10.27%。

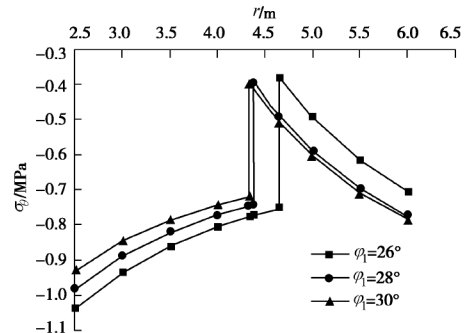


图 7 φ_1 对切向应力的影响

Fig. 7 Effect of φ_1 on tangential stress

通过剪胀特性参数 h 的取值来分析不同剪胀特性的影响, 剪胀对应力无影响。当 $b=0.5, \varphi_1=28^\circ$ 时, h 值从 1 (峰后无剪胀) 取到 2.77 (由相关关联流动法则计算的 h 最大值^[4]), 图 8 给出了运行期洞壁相对位移 u_0/r_1 与 h 及 c_1 的关系; 当 $b=0.5, \varphi_1=30^\circ, 28^\circ$ 和 26° 时, h 值分别从 1 取到 3, 2.77 和 2.56, 图 9 给出了运行期洞壁相对位移 u_0/r_1 与 h 及 φ_1 的关系。

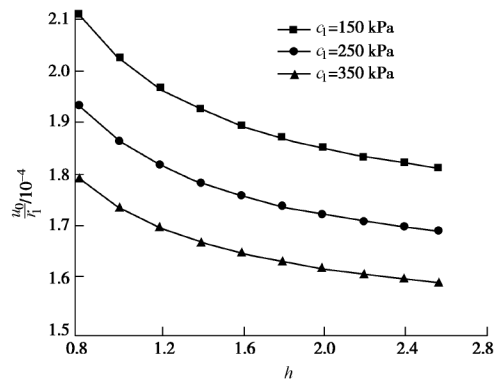


图 8 u_0/r_1 与 h 及 c_1 关系

Fig. 8 Relationship among $u_0/r_1, h$ and c_1

由图 8 可以看出, 洞壁位移 u_0 随 h, c_1 的增大而迅速减小。当 $c_1=150$ kPa 时, $h=2.77$ 时的洞壁位移 u_0 比 $h=1$ 时减小了 14.11%; 当 $h=1$ 时, $c_1=350$ kPa 时的洞壁位移 u_0 比 $c_1=150$ kPa 时减小了 15.05%。由图 9 同样可以看出, 洞壁位移 u_0 随 h, φ_1 的增大而迅速减小。当 $\varphi_1=26^\circ$ 时, $h=2.56$ 时的洞壁位移 u_0 比 $h=1$ 时减小了 14.14%; 当 $h=1$ 时, $\varphi_1=30^\circ$ 时的洞壁位移

u_0 比 $\varphi_1=26^\circ$ 时减小了 13.36%。即剪胀和软化特性参数的减小对洞壁位移有增大的影响,这说明此类以洞壁位移或变形作为控制条件的工程,不能不考虑围岩剪胀和应变软化的影响。

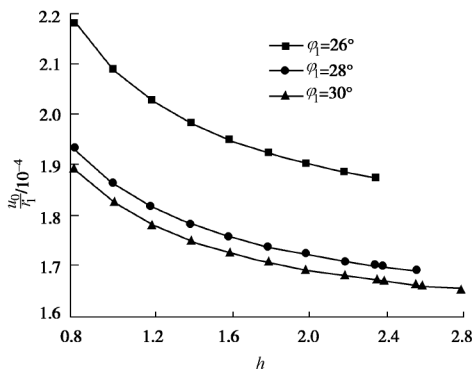


图 9 u_0/r_1 与 h 及 φ_1 关系

Fig. 9 Relationship among u_0/r_1 , h and φ_1

6 结 论

(1) 针对圆形水工压力隧洞,采用统一强度理论和弹脆塑性软化模型,考虑不同工况下主应力顺序、岩石应变软化、剪胀和渗流等综合影响,推导了隧洞应力和洞壁位移解析解。经算例计算表明,如果不考虑第一主应力的变化,在隧洞运行期就会出现不管内水压力多大,隧洞围岩都将处于弹性状态,这与实际情况矛盾,说明考虑第一主应力的变化是正确的,结束了强度理论在水工压力隧洞应力分析具体应用中的误区,更符合工程实际,并应考虑渗流体积力的影响,确保隧洞安全。

(2) 统一强度理论参数 b 值对围岩塑性区范围有着比较显著的影响,随着 b 的增大,围岩塑性区半径在逐渐减小,这说明考虑中间主应力 σ_2 的影响,可以更加充分地发挥岩石类材料的强度潜能,更客观地认识材料的自承载能力;软化特性参数 c_1 , φ_1 值对围岩切向应力 σ_θ 和洞壁位移 u_0 影响都很显著,随着 c_1 , φ_1 的增大,围岩塑性区的 σ_θ 和 u_0 迅速减小,最大分别减小了约 23%, 15% 和 10%、13%;剪胀特性参数 h 值也显著影响着 u_0 , h 最大值时的 u_0 比不考虑剪胀时减小了约 14%。隧洞设计时,应依据围岩材料特性合理地选取 b 值,并应考虑由于 c_1 , φ_1 和 h 的减小对围岩切向应力和洞壁位移增大的影响。

(3) 在隧洞施工期,要注意保护围岩,适时实施初期支护,避免围岩产生塑性变形,保证隧洞安全;若围岩在施工期产生塑性变形(需设置衬砌),其应力应变关系呈非线性,力的叠加原理不再适用,此时运行期隧洞的应力和位移可采用有限环变位协调法计算,详细内容将另文研究。

参考文献:

- [1] JIANG Y, YONEDA H, TANABASHI Y. Theoretical estimation of loosening pressure on tunnels in soft rocks[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(2): 99 - 105.
- [2] 蔡晓鸿, 蔡勇斌, 蔡勇平, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1004 - 1008. (CAI Xiao-hong, CAI Yong-bin, CAI Yong-ping, et al. Calculation of resistance coefficient of adjoining rock for pressure tunnels considering effect of intermediate principal stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1004 - 1008. (in Chinese))
- [3] 任青文, 张宏朝. 关于芬纳公式的修正[J]. 河海大学学报, 2001, 29(16): 109 - 111. (REN Qing-wen, ZHANG Hong-chao. A modification of Fanner formula[J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(16): 109 - 111. (in Chinese))
- [4] 蒋明镜, 沈珠江. 岩土类软化材料的柱形孔扩张统一解问题[J]. 岩土力学, 1996, 17(1): 1 - 8. (JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Unified solution of expansion of cylindrical cavity for geometries with strain softening behaviour[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [5] 李宗利, 任青文, 王亚红. 考虑渗流场影响深埋圆形隧洞的弹塑性解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1291 - 1295. (LI Zong-li, REN Qing-wen, WANG Ya-hong. Elasto-plastic analytical solution of deep-buried circle tunnel considering fluid flow field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1291 - 1295. (in Chinese))
- [6] 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 - 10. (YU Mao-hong. Unified strength theory for geomaterials and its applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1 - 10. (in Chinese))
- [7] 谢群丹, 何杰, 刘杰, 等. 双剪统一强度理论在土压力计算中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 343 - 345. (XIE Qun-dan, HE Jie, LIU Jie, et al. Unified twin shear strength theory for calculation of earth pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 343 - 345. (in Chinese))
- [8] 蔡晓鸿, 蔡勇平. 水工压力隧洞结构应力计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (CAI Xiao-hong, CAI Yong-ping. Structure stress calculation for hydraulic pressure tunnel[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))