

文章编号:1673-2049(2011)02-0084-11

基于损伤理论的圆形隧洞围岩应力场分析

马青,赵均海,魏雪英,朱倩

(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,考虑地下水渗流作用的影响,应用弹塑性损伤力学理论,根据不同的地应力情况,对施工工况下的圆形隧洞围岩进行应力和稳定性分析;通过算例分析了内摩擦角和粘聚力对围岩应力场和位移场的影响。研究表明:内摩擦角对围岩损伤半径、应力、位移有着比较显著的影响;粘聚力对围岩损伤半径、应力、位移的影响不太显著;所得结论具有广泛的适用性。

关键词:统一强度理论;地下水渗流作用;隧洞围岩;岩石损伤;应力场;位移场

中图分类号:TU457

文献标志码:A

Stress Field Analysis of Circular Tunnel Surrounding Rock Based on Damage Theory

MA Qing, ZHAO Jun-hai, WEI Xue-ying, ZHU Qian

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the unified strength theory, considering the impact of underground water seepage, using the elasto-plastic damage mechanics theory, according to different stress conditions, stress and stability analyses of circular tunnel surrounding rock under construction conditions were carried out. The effects of internal friction angle and cohesion on surrounding rock stress field and displacement field were analyzed through an example. The study results show that the internal friction angle has more significant impact on surrounding rock damage radius, stress, displacement; the cohesion has less significant on surrounding rock damage radius, stress, displacement. The conclusion has broad applicability.

Key words: unified strength theory; underground water seepage; tunnel surrounding rock; rock damage; stress field; displacement field

0 引言

近几年来,水资源紧缺已经成为许多国家社会经济发展的制约因素,因此各国修建了许多水工隧洞来缓解这一情况,如格鲁吉亚卡杜里水电站引水隧洞^[1]、山西万家寨引黄工程^[2]、西藏羊湖抽水蓄能电站引水隧洞^[3]、四川色尔古水电站引水隧洞^[4]和锦屏二级水电站引水隧洞^[5]、辽宁大伙房水库输水工程^[6]。这些水工隧洞的规模远远超出了现行规范

的应用范围,因此“长、大、深”水工隧洞的稳定性及可靠性研究已成为当前水电开发中亟待解决的重大课题。

以往大多是基于弹塑性理论,应用 Mohr-Coulomb 强度准则对圆形隧洞进行分析^[7-17]。Mohr-Coulomb 强度准则虽然数学表达式简洁、明确、计算结果安全可靠,但是有 2 个明显不足:首先没有考虑中间主应力 σ_2 的影响而偏于保守,而大量的岩石试验结果证实,中间主应力 σ_2 可使岩石强度提高

收稿日期:2011-02-17

基金项目:陕西省自然科学基金计划项目(SJ08E204)

作者简介:马青(1984-),女,陕西榆林人,工学博士研究生,E-mail:maqing20032003@yahoo.com.cn。

30%左右;其次 Mohr-Coulomb 强度准则仅适用于 $\tau_s = \sigma_t \sigma_c / (\sigma_t + \sigma_c)$ 的材料,其中 σ_t 、 σ_c 、 τ_s 分别为材料的抗拉强度、抗压强度和抗剪强度^[18]。俞茂宏提出的统一强度理论能合理地反映中间主应力效应^[19],可以灵活地应用于工程上的各种材料,已获得了广泛的应用,并取得了很好的效果,近年来统一强度理论已被用于压力隧洞的弹塑性分析^[20-23]。

由于隧洞掘进破坏了原岩地应力场,使得围岩应力重新分布,应力集中区的高应力通常会引起隧洞周边围岩的损伤,隧洞围岩应力场的计算应该考虑岩石材料的损伤特性^[24-28],因此以往基于弹塑性理论的分析结果已不再适用。李忠华等基于损伤理论计算得到了不同地应力情况下的圆形巷道围岩应力场。地下水是岩体赋存的重要环境因素之一。岩石是可变形的多孔介质材料,在荷载和地下水压力的作用下,岩石的变形将引起其孔隙、裂隙通道的改变,从而影响孔隙水的流动^[29]。孔隙水压力、流动速度变化等也会引起岩石变形,这样,岩石变形与地下水流动间存在相互作用,即流-固耦合作用^[30-31]。荣传新等^[32]考虑地下水渗流作用的影响,导出了巷道围岩的应力分布规律以及损伤区半径与孔隙水压力之间的关系,给出了渗流作用下巷道围岩稳定的孔隙水压力的临界值,但是以上分析都只集中在某一方面且没有考虑中间主应力影响而偏于保守。

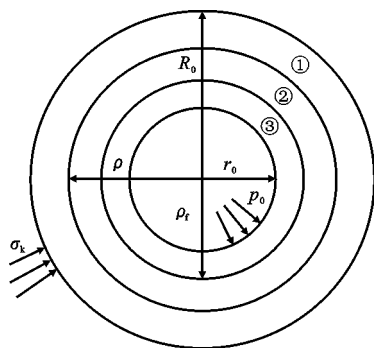
为了研究地下水渗流和岩石材料的损伤特性对圆形隧洞围岩稳定性的影响,本文中笔者基于统一强度理论,考虑在施工工况下地下水渗流作用的影响,应用流-固耦合理论和弹塑性损伤力学理论^[33-45],根据不同的地应力情况,对施工工况下的圆形隧洞围岩进行了应力场和位移场分析。

1 计算模型

取隧洞断面的形状为圆形,如图 1 所示,隧洞半径为 r_0 ,损伤区的损伤半径为 ρ ,完全损伤区半径为 ρ_t ,支护阻力为 p_0 ,计算区域半径为 R_0 ,远场($R_0 \rightarrow +\infty$)地应力为 σ_k ,孔隙水压力为 p_w 。取单位长度隧洞进行计算,为轴对称平面应变问题。当地应力 σ_k 比较小时, $\sigma_k < \sigma_{k1}$,隧洞围岩发生全弹性变形;当 $\sigma_{k1} < \sigma_k < \sigma_{k2}$ 时,出现塑性,进入弹塑性损伤区;当 $\sigma_k > \sigma_{k2}$ 时,进入完全塑性损伤区,其中, σ_{k1} 为进入塑性临界地应力, σ_{k2} 为完全塑性临界地应力。

2 岩石材料的损伤本构模型

假设岩石材料为均质的和各向同性的。采用



①—弹性区; ②—弹塑性损伤区; ③—塑性完全损伤区

图 1 圆形隧洞的计算模型

Fig. 1 Calculation Model of Circular Tunnel

Bui 弹塑性损伤模型,单轴压缩下其应力-应变($\sigma-\epsilon$)曲线简化为双线性,AB 段为弹性阶段,弹性模量为 E ;BC 段为塑性损伤软化阶段,降模量为 λ , λ 描述 BC 段的下降程度,如图 2 所示。

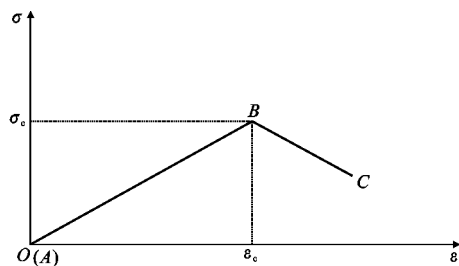


图 2 弹塑性损伤模型

Fig. 2 Elastoplastic Damage Model

忽略峰值应力 σ_c (对应的峰值应变为 ϵ_c) 前的初始损伤;超过峰值应力 σ_c 后为线性各向同性损伤演化。一维损伤演化方程为

$$D = \begin{cases} 0 & \epsilon \leq \epsilon_c \\ \frac{\lambda}{E} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} - 1 \right) & \epsilon > \epsilon_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为损伤参数。

三维损伤情况下,应以等效应变 $\bar{\epsilon} = (\sqrt{2}/3) \cdot \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}$ 代替 ϵ , ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 为主应变。

3 基本方程与边界条件

3.1 施工期隧洞渗透水压力的分布规律

忽略计算区域内水自重的影响,由达西定律得水流过半径为 r 的单位长度柱面的流量为 $q' = -2\delta rk(dP/dr)$, δ 、 k 为渗透参数, P 为渗透水压力,由边界条件 $P|_{r=r_0} = 0$, $P|_{r=R_0} = p_i$,可得施工期隧洞围岩渗透水压力沿半径方向的分布规律为

$$p_w = p_i \ln \frac{r}{r_0} / \ln \frac{R_0}{r_0} \quad r_0 \leq r \leq R_0 \quad (2)$$

式中: p_i 为保持渗流场稳定的外水压力; R_0 可由钻孔抽水试验确定。

3.2 平衡方程和本构关系

视含水围岩为两相介质体, 受到渗透水的作用, 形成渗透水压力场, 于是平衡微分方程为

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

式中: η 为渗透水压力的作用面积系数; σ_θ 为切向应力; σ_r 为径向应力。

几何方程分别为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r &= du/dr \\ \epsilon_\theta &= u/r \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$r_{r\theta} = 0 \quad (5)$$

式中: u 为围岩径向的相对位移; ϵ_r 为径向应变; ϵ_θ 为切向应变; $r_{r\theta}$ 为剪应变。

统一强度理论具有多种不同的表达形式, 在岩土工程中, 常用粘聚力 c 和内摩擦角 φ 作为材料的基本参数, 其统一强度理论可表示为^[46-47]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b} + (\sigma_1 + \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b}) \sin \varphi &= 2c \cos \varphi \\ \sigma_2 &\leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi \\ \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} - \sigma_3 + (\frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} + \sigma_3) \sin \varphi &= 2c \cos \varphi \\ \sigma_2 &> \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为单元体的最大主应力和最小主应力; b 为反映中间主剪应力以及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的系数, b 也可作为选用不同强度理论的参数, $0 \leq b \leq 1$ 。

考虑到隧洞围岩施工期含水围岩满足 $p=0 < q$, p 为均匀内水压力, q 为初始地应力, 此时 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$ 。因此, 含水围岩破坏时的剪应力 τ 与正应力 $\sigma + \eta p_w$ 满足统一强度理论式(6)的第2式, 该式可以改写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{2+bm}{2\alpha(1+b)}(\sigma_r + \eta p_w) - \frac{2\alpha(1+b)-bm}{2\alpha(1+b)}(\sigma_\theta + \eta p_w) &= \sigma_c \\ \alpha &= (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi) \\ b &= [(1 + \alpha)\tau_0 - \sigma_i] / (\sigma_i - \tau_0) \\ \sigma_c &= (2c \cos \varphi) / (1 - \sin \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: α 为材料的拉压强度比; τ_0 为材料的剪切强度极限; m 为中间主应力系数, m 可以通过理论和试验来确定, $0 < m \leq 1$ 。

根据经验, 在弹性区, 可取 $m=2\mu$, μ 为材料泊松比, 可以用广义 Hooke 定律来解释; 在塑性区, 可取 $m \rightarrow 1$, 最简单的方法是假定 $m=1$, 此时对应于塑性不可压缩假设。

4 含水围岩应力与位移计算

4.1 围岩发生全弹性变形

4.1.1 围岩弹性区应力

当地应力 σ_k 较小时, 隧洞围岩发生全弹性变形, 这时可将围岩看作无穷远处作用着初始地应力 σ_k 、隧洞内半径 r_0 处作用着径向压应力 $-p_0$ 、且受渗透水压力 ηp_w 作用的厚壁圆筒。围岩应力分量由 Lamé 公式确定, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\sigma_k(1 - r_0^2/r^2) - p_0 r_0^2/r^2 - \eta p_w \\ \sigma_\theta &= -\sigma_k(1 + r_0^2/r^2) + p_0 r_0^2/r^2 - \eta p_w \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

随地应力的增加, 隧洞周边开始出现损伤, 且满足式(7), 在 $r=r_0$ 时将式(8)代入式(7), 此时临界地应力为

$$\sigma_{k1} = \frac{\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm}\sigma_c - \frac{\alpha(1+b)+1}{2\alpha(1+b)-bm}p_0 \quad (9)$$

由此可以看出, 当 $\sigma_k < \sigma_{k1}$ 时围岩发生全弹性变形。

4.1.2 围岩弹性区相对位移

减去成洞前岩体在初始地应力 σ_k 作用下产生的变形, 得围岩径向相对位移为

$$u = -\frac{(1+\mu_d)r_0^2}{E_d r}(\sigma_k - p_0) \quad (10)$$

式中: E_d 、 μ_d 分别为围岩的弹性模量和泊松比。

4.2 围岩出现损伤区

4.2.1 围岩损伤区应力

当 $\sigma_k > \sigma_{k1}$ 时, 隧洞围岩出现损伤区。损伤区内有效应力满足统一强度理论, 则

$$\frac{2+bm}{2\alpha(1+b)}(\sigma'_r + \eta p_w) - \frac{2\alpha(1+b)-bm}{2\alpha(1+b)}(\sigma'_\theta + \eta p_w) = \sigma_c \quad (11)$$

式中: σ'_r 为有效径向应力; σ'_θ 为有效切向应力。

假设围岩为各向同性损伤, 则

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_r &= \sigma_r / (1 - D) \\ \sigma'_\theta &= \sigma_\theta / (1 - D) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 得

$$\frac{2+bm}{2\alpha(1+b)}(\frac{\sigma_r}{1-D} + \eta p_w) - \frac{2\alpha(1+b)-bm}{2\alpha(1+b)}(\frac{\sigma_\theta}{1-D} + \eta p_w) = \sigma_c \quad (13)$$

假设隧洞围岩损伤区的岩石骨架不可压缩,由弹性区和损伤区交界处的应变条件,得等效应变为 $\varepsilon = (\rho^2/r^2)\varepsilon_c$, 因此损伤演化方程为

$$D = \frac{\lambda}{E} \left(\frac{\rho^2}{r^2} - 1 \right) \quad (14)$$

由式(2)、(3)、(13)、(14)并结合边界条件 $\sigma_r|_{r=r_0} = -p_0$, 得隧洞围岩损伤区的应力分布为

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \left\{ \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{2\alpha(1+b)-bm}{2+bm} - \frac{2\alpha(1+b)\sigma_c}{2+bm} \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) + \right. \\ & \frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{[2+4\alpha(1+b)-bm]^2} \cdot \\ & \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda \rho^2}{Er_0^2} + \frac{\lambda \rho^2}{Er_0^2} \frac{2\alpha(1+b)\sigma_c}{2+4\alpha(1+b)-bm} - \\ & \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) \cdot \\ & \frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{(2+bm)^2} - \\ & p_0 \left. \right\} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2+bm}{2\alpha(1+b)-bm}} - \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{2\alpha(1+b)-bm}{2+bm} + \\ & \frac{2\alpha(1+b)\sigma_c}{2+bm} \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) + \\ & \frac{2\alpha(1+b)-2-2bm}{2+bm} \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \ln \frac{r}{r_0} + \\ & \frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{(2+bm)^2} \cdot \\ & \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) - \frac{2\alpha(1+b)\sigma_c}{2+4\alpha(1+b)-bm} \cdot \\ & \frac{\lambda \rho^2}{Er^2} - \frac{2\alpha(1+b)-2-2bm}{2+4\alpha(1+b)-bm} \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \frac{\lambda \rho^2}{Er^2} - \\ & \frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{[2+4\alpha(1+b)-bm]^2} \cdot \\ & \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda \rho^2}{Er^2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & \frac{2+bm}{2\alpha(1+b)-bm} \sigma_r + \frac{2+2bm-2\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm} \cdot \\ & (1-D) \eta p_w - \frac{2\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm} (1-D) \sigma_c \end{aligned} \quad (16)$$

4.2.2 围岩弹性区应力

弹性区($r \geq \rho$)内应力分量为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r = & -\sigma_k(1-\rho^2/r^2) + \sigma_{rp}\rho^2/r^2 - \eta p_w \\ \sigma_\theta = & -\sigma_k(1+\rho^2/r^2) - \sigma_{rp}\rho^2/r^2 - \eta p_w \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\frac{2+bm}{2\alpha(1+b)} (\sigma_{rp} + \eta p_w) -$$

$$\frac{2\alpha(1+b)-bm}{2\alpha(1+b)} (\sigma_{\theta p} + \eta p_w) = \sigma_c \quad (18)$$

式中: σ_{rp} 为两区边界处的径向应力; $\sigma_{\theta p}$ 为两区边界处的切向应力。

4.2.3 围岩损伤区半径

将式(17)在 $r=\rho$ 时代入式(18),得

$$\sigma_{rp} = \frac{\alpha(1+b)}{\alpha(1+b)+1} \sigma_c - \frac{2\alpha(1+b)-bm}{\alpha(1+b)+1} \sigma_k \quad (19)$$

由围岩损伤区半径的径向应力连续条件,得

$$\begin{aligned} \sigma_k = & \left(\eta p_i / \ln \frac{R_0}{r_0} \right) \frac{1+\alpha(1+b)}{2+bm} - \\ & \sigma_c \frac{2\alpha(1+b)[1+\alpha(1+b)]}{(2+bm)[2\alpha(1+b)-bm]} \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) - \\ & \left(\eta p_i / \ln \frac{R_0}{r_0} \right) \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) \cdot \\ & \frac{[1+\alpha(1+b)][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{(2+bm)^2} + \\ & \eta p_i \left(\ln \frac{\rho}{r_0} / \ln \frac{R_0}{r_0} \right) \frac{\lambda}{E} \cdot \\ & \frac{[2\alpha(1+b)-2-2bm][1+\alpha(1+b)]}{[2+4\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-bm]} - \\ & \eta p_i \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) \left(\ln \frac{\rho}{r_0} / \ln \frac{R_0}{r_0} \right) \cdot \\ & \frac{[2\alpha(1+b)-2-2bm][1+\alpha(1+b)]}{(2+bm)[2\alpha(1+b)-bm]} + \\ & \frac{2\alpha(1+b)[1+\alpha(1+b)]}{[2+4\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-bm]} \cdot \\ & \sigma_c \frac{\lambda}{E} - \left\{ -p_0 + \eta p_i \frac{1}{\ln(R_0/r_0)} \cdot \right. \\ & \frac{2\alpha(1+b)-bm}{2+bm} - \sigma_c \frac{2\alpha(1+b)}{2+bm} \cdot \\ & \left. \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) + \sigma_c \frac{\lambda \rho^2}{Er_0^2} \frac{2\alpha(1+b)}{2+4\alpha(1+b)-bm} - \right. \\ & \frac{1}{\ln(R_0/r_0)} \left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) \cdot \\ & \frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{(2+bm)^2} \eta p_i + \\ & \frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{[2+4\alpha(1+b)-bm]^2} \cdot \\ & \eta p_i \frac{1}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda \rho^2}{Er_0^2} \left. \right\} \left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{\frac{2+bm}{2\alpha(1+b)-bm}} \frac{1+\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm} + \\ & \frac{[\alpha(1+b)+1][2\alpha(1+b)-2-bm]}{[2+4\alpha(1+b)-bm]^2} \cdot \\ & \left[\eta p_i / \ln(R_0/r_0) \right] \frac{\lambda}{E} + \frac{\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm} \sigma_c \end{aligned} \quad (20)$$

由式(20)可确定损伤区的损伤半径 ρ 。

当满足 $D(r_0)=1$ 时,隧洞周边达到完全损伤,此时损伤区半径 $\rho_1 = r_0(1+E/\lambda)^{1/2}$, 将其代入式(20),得

$$\begin{aligned} \sigma_{k2} = & \frac{\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm} \sigma_c + \left(\eta p_i / \ln \frac{R_0}{r_0} \right) \cdot \\ & \frac{1+\alpha(1+b)}{2+bm} - \sigma_c \frac{2\alpha(1+b)[1+\alpha(1+b)]}{(2+bm)[2\alpha(1+b)-bm]} \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (1 + \frac{\lambda}{E}) - (1 + \frac{\lambda}{E}) \eta p_i \ln \sqrt{1 + \frac{E}{\lambda}} / \ln \frac{R_0}{r_0} \cdot \\
& \frac{[2\alpha(1+b) - 2 - 2bm][1 + \alpha(1+b)]}{(2+bm)[2\alpha(1+b) - bm]} - \\
& \frac{[1 + \alpha(1+b)][2\alpha(1+b) - 2 - 2bm]}{(2+bm)^2} \cdot \\
& (\eta p_i / \ln \frac{R_0}{r_0}) (1 + \frac{\lambda}{E}) + \\
& \frac{2\alpha(1+b)[1 + \alpha(1+b)]}{[2 + 4\alpha(1+b) - bm][2\alpha(1+b) - bm]} \cdot \\
& \sigma_c \frac{\lambda}{E} + \frac{[\alpha(1+b) + 1][2\alpha(1+b) - 2 - 2bm]}{[2 + 4\alpha(1+b) - bm]^2} \cdot \\
& (\eta p_i / \ln \frac{R_0}{r_0}) \frac{\lambda}{E} + \\
& \frac{[2\alpha(1+b) - 2 - 2bm][1 + \alpha(1+b)]}{[2 + 4\alpha(1+b) - bm][2\alpha(1+b) - bm]} \cdot \\
& \eta p_i \frac{\lambda}{E} (\ln \sqrt{1 + \frac{E}{\lambda}} / \ln \frac{R_0}{r_0}) - \\
& (\sqrt{1 + \frac{E}{\lambda}})^{\frac{2+bm}{2\alpha(1+b)-bm}} \frac{1 + \alpha(1+b)}{2\alpha(1+b) - bm} \cdot \\
& \{ \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{2\alpha(1+b) - bm}{2 + bm} - \sigma_c \frac{2\alpha(1+b)}{2 + bm} \cdot \\
& (1 + \frac{\lambda}{E}) + \sigma_c \frac{\lambda}{E} (1 + \frac{E}{\lambda}) \cdot \\
& \frac{2\alpha(1+b)}{2 + 4\alpha(1+b) - bm} - p_0 - \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} (1 + \frac{\lambda}{E}) \cdot \\
& \frac{[2\alpha(1+b) - bm][2\alpha(1+b) - 2 - 2bm]}{(2+bm)^2} + \\
& \frac{[2\alpha(1+b) - bm][2\alpha(1+b) - 2 - 2bm]}{[2 + 4\alpha(1+b) - bm]^2} \cdot \\
& (\eta p_i / \ln \frac{R_0}{r_0}) \frac{\lambda}{E} (1 + \frac{E}{\lambda}) \} \quad (21)
\end{aligned}$$

所以,当 $\sigma_k = \sigma_{k2}$ 时隧洞围岩周边达到完全损伤。

4.2.4 围岩弹性区的相对位移

围岩弹性区的相对位移为

$$u = \frac{(1 + \mu_d) \rho^2}{E_d r} (\sigma_k - \sigma_{rp}) \quad (22)$$

4.2.5 围岩损伤区的相对位移

假设损伤区体积变形为 0, 即 $\epsilon_r + \epsilon_\theta = 0$, 将式(4)代入 $\epsilon_r + \epsilon_\theta = 0$, 并由边界位移连续性条件, 在 $r = \rho$ 处, $u_d = u_e$, u_d 为围岩损伤区相对位移, u_e 为围岩弹性区相对位移, 解之得

$$\begin{aligned}
u_d = & \frac{(1 + \mu) \rho^2}{Er} \left[\frac{1 + 3\alpha(1+b) - bm}{1 + \alpha(1+b)} \cdot \right. \\
& \left. \sigma_k - \frac{\alpha(1+b)}{1 + \alpha(1+b)} \sigma_c \right] \quad (23)
\end{aligned}$$

由式(20)可解出 ρ , 将 ρ 代入式(23)可求得损伤区的相对位移。

4.3 围岩出现完全损伤区

4.3.1 围岩完全损伤区应力

当 $\sigma_k > \sigma_{k2}$ 时, 围岩出现完全损伤区。在完全损伤区 ($r_0 \leq r \leq \rho_i$) 内满足 $D=1$, 由式(2)、(3)、(13)并结合边界条件, 即 $r=r_0$ 处的径向应力 $\sigma_r^0 = -p_0$, 得围岩完全损伤区应力分量为

$$\begin{aligned}
\sigma_r = & \eta p_i \frac{1}{\ln(R_0/r_0)} \frac{2\alpha(1+b) - bm}{2\alpha(1+b) - 2 - 2bm} [1 - \\
& (\frac{r_0}{r})^{\frac{2\alpha(1+b) - 2bm - 2}{2\alpha(1+b) - bm}}] + \sigma_r^0 (\frac{r_0}{r})^{\frac{2\alpha(1+b) - 2bm - 2}{2\alpha(1+b) - bm}} \quad (24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_\theta = & \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{2 + bm}{2\alpha(1+b) - 2 - 2bm} [1 - \\
& (\frac{r_0}{r})^{\frac{2\alpha(1+b) - 2bm - 2}{2\alpha(1+b) - bm}}] + \sigma_r^0 \cdot \\
& \frac{2 + bm}{[2\alpha(1+b) - bm]} (\frac{r_0}{r})^{\frac{2\alpha(1+b) - 2bm - 2}{2\alpha(1+b) - bm}} \quad (25)
\end{aligned}$$

在 $r = \rho_i$ 处的径向应力 $\sigma_r^{\rho_i}$ 为

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{\rho_i} = & \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{2\alpha(1+b) - bm}{2\alpha(1+b) - 2 - 2bm} [1 - \\
& (\frac{r_0}{\rho_i})^{\frac{2\alpha(1+b) - 2bm - 2}{2\alpha(1+b) - bm}}] + \sigma_r^0 (\frac{r_0}{\rho_i})^{\frac{2\alpha(1+b) - 2bm - 2}{2\alpha(1+b) - bm}} \quad (26)
\end{aligned}$$

4.3.2 围岩损伤区应力

在损伤区 ($\rho_i \leq r \leq \rho$) 内, 用 $\sigma_r^{\rho_i}$ 代替 $-p_0$, ρ_i 代替 r_0 , 由式(2)、(3)、(13)、(14)和边界条件 $\sigma_r|_{r=\rho_i} = \sigma_r^{\rho_i}$, 得围岩损伤区的应力分量分别为

$$\begin{aligned}
\sigma_r = & \sigma_c \frac{2\alpha(1+b)}{2 + bm} (1 + \frac{\lambda}{E}) + \frac{2\alpha(1+b) - 2 - 2bm}{2 + bm} \cdot \\
& (1 + \frac{\lambda}{E}) \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \ln \frac{r}{r_0} - \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \cdot \\
& \frac{2\alpha(1+b) - bm}{2 + bm} + \\
& \frac{[2\alpha(1+b) - bm][2\alpha(1+b) - 2 - 2bm]}{(2+bm)^2} \cdot \\
& \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} (1 + \frac{\lambda}{E}) - \frac{2\alpha(1+b) - 2 - 2bm}{2 + 4\alpha(1+b) - bm} \cdot \\
& \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \ln(\frac{r}{r_0}) \frac{\lambda \rho^2}{Er^2} \{ \sigma_r^{\rho_i} + \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \cdot \\
& \frac{2\alpha(1+b) - bm}{2 + bm} - \sigma_c \frac{2\alpha(1+b)}{2 + bm} (1 + \frac{\lambda}{E}) + \\
& \frac{[2\alpha(1+b) - bm][2\alpha(1+b) - 2 - 2bm]}{[2 + 4\alpha(1+b) - bm]^2} \cdot \\
& \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda \rho^2}{Er^2} + \sigma_c \frac{\lambda \rho^2}{Er^2} \cdot \\
& \frac{2\alpha(1+b)}{2 + 4\alpha(1+b) - bm} - (1 + \frac{\lambda}{E}) \cdot \\
& \frac{[2\alpha(1+b) - bm][2\alpha(1+b) - 2 - 2bm]}{(2+bm)^2} \cdot \\
& \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \} (\frac{r}{\rho_i})^{\frac{2+bm}{2\alpha(1+b)-bm}} -
\end{aligned}$$

$$\frac{2\alpha(1+b)}{2+4\alpha(1+b)-bm}\sigma_c \frac{\lambda\rho^2}{Er^2} - \frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{[2+4\alpha(1+b)-bm]^2} \cdot \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda\rho^2}{Er^2} \quad (27)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2+bm}{2\alpha(1+b)-bm}\sigma_r + \frac{2+2bm-2\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm} \cdot (1-D)\eta p_w - \frac{2\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm}(1-D)\sigma_c \quad (28)$$

在 $r=\rho_i$ 处满足 $D=1$, 代入式(14), 得完全损伤区半径 ρ_2 为

$$\rho_2 = \rho_i(1+E/\lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

在弹性区($r \geq \rho$)内应力分量同式(17)。

4.3.3 围岩损伤区和完全损伤区半径

由 $r=\rho$ 处径向应力连续条件, 得

$$\sigma_k = \frac{\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm}\sigma_c + \eta p_i \frac{1}{\ln(R_0/r_0)} \frac{1+\alpha(1+b)}{2+bm} - \sigma_c \frac{2\alpha(1+b)[1+\alpha(1+b)]}{(2+bm)[2\alpha(1+b)-bm]} \cdot$$

$$(1+\frac{\lambda}{E}) - (1+\frac{\lambda}{E})\eta p_i \frac{\ln(\rho/r_0)}{\ln(R_0/r_0)} \cdot$$

$$\frac{[2\alpha(1+b)-2-2bm][1+\alpha(1+b)]}{(2+bm)[2\alpha(1+b)-bm]} -$$

$$\frac{[1+\alpha(1+b)][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{(2+bm)^2} \cdot$$

$$\frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} (1+\frac{\lambda}{E}) + \frac{\lambda}{E} \cdot$$

$$\frac{2\alpha(1+b)[1+\alpha(1+b)]\sigma_c}{[2+4\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-bm]} +$$

$$\frac{[2\alpha(1+b)-2-2bm][1+\alpha(1+b)]}{[2+4\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-bm]} \cdot$$

$$\eta p_i \frac{\ln(\rho/r_0)}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda}{E} + \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \cdot$$

$$\frac{[\alpha(1+b)+1][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{[2+4\alpha(1+b)-bm]^2} \frac{\lambda}{E} -$$

$$(\frac{\rho}{\rho_i})^{\frac{2+bm}{2\alpha(1+b)-bm}} \frac{1+\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm} \{ \sigma_{r_i}^{\rho_i} +$$

$$\frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{2\alpha(1+b)-bm}{2+bm} - \sigma_c \frac{2\alpha(1+b)}{2+bm} \cdot$$

$$(1+\frac{\lambda}{E}) + \sigma_c \frac{\lambda\rho^2}{E\rho_i^2} \frac{2\alpha(1+b)}{2+4\alpha(1+b)-bm} -$$

$$\frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} (1+\frac{\lambda}{E}) \cdot$$

$$\frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{(2+bm)^2} +$$

$$\frac{[2\alpha(1+b)-bm][2\alpha(1+b)-2-2bm]}{[2+4\alpha(1+b)-bm]^2} \cdot$$

$$\frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda\rho^2}{E\rho_i^2} \} \quad (30)$$

由式(26)、(29)、(30)可以确定 ρ_i 、 ρ 的大小。

围岩弹性区和损伤区的相对位移同前。

4.3.4 围岩完全损伤区的相对位移

将式(4)代入 $\epsilon_r + \epsilon_\theta = 0$, 并结合边界条件, 在 $r=\rho_i$ 处, $u_d = u_{d_i}^{\rho_i}$, $u_{d_i}^{\rho_i}$ 为径向相对位移, 解之得围岩完全损伤区的相对位移为

$$u_d = \frac{(1+\mu)\rho^2}{Er\rho_i} \left[\frac{1+3\alpha(1+b)-bm}{1+\alpha(1+b)} \cdot \sigma_k - \frac{\alpha(1+b)}{1+\alpha(1+b)}\sigma_c \right] \quad (31)$$

5 理论解答的广泛意义

以上含水围岩应力、应变分析是建立在应用较广的弹塑性损伤模型和统一强度理论基础上的, 其解答具有广泛性。在式(15)、(16)、(24)、(25)、(27)、(28)中, 令 $p_w=0, b=0$, 得围岩出现损伤区时损伤区应力为

$$\sigma_r = \left[-p_0 - \sigma_c \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + \sigma_c \frac{\lambda\rho^2}{Er_0^2} \frac{\alpha}{1+2\alpha} \right] \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + \sigma_c \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) - \frac{\alpha}{1+2\alpha} \sigma_c \frac{\lambda\rho^2}{Er^2} \quad (32)$$

$$\sigma_\theta = \alpha\sigma_r - (1-D)\sigma_c \quad (33)$$

出现完全损伤区时完全损伤区应力 $\sigma_r = \sigma_{r_0}^{\rho_0}$ ·

$(\frac{r_0}{r})^{\frac{\alpha-1}{\alpha}}, \sigma_\theta = \sigma_{r_0}^{\rho_0} \alpha (\frac{r_0}{r})^{\frac{\alpha-1}{\alpha}}$, 出现完全损伤区时损伤区应力

$$\sigma_r = \left[\sigma_{r_i}^{\rho_i} - \sigma_c \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + \sigma_c \frac{\lambda\rho^2}{E\rho_i^2} \frac{\alpha}{1+2\alpha} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) \right] \cdot \left(\frac{r}{\rho_i} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + \sigma_c \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) - \frac{\alpha}{1+2\alpha} \sigma_c \frac{\lambda\rho^2}{Er^2} \quad (34)$$

$$\sigma_\theta = \alpha\sigma_r - (1-D)\sigma_c \quad (35)$$

式(34)、(35)与文献[24]中不考虑渗透水压力和中间主应力的结果一致。

在式(15)中, 令 $b=0$, 忽略不同地应力影响, 得围岩塑性区径向应力为

$$\sigma_r = \left[\frac{\eta p_i \alpha}{\ln(R_0/r_0)} - \sigma_c \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + \frac{\lambda\rho^2}{Er_0^2} \frac{\alpha\sigma_c}{1+2\alpha} - (\alpha-1) \frac{\eta p_i \alpha}{\ln(R_0/r_0)} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + \frac{\alpha(\alpha-1)}{(1+2\alpha)^2} \cdot \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda\rho^2}{Er_0^2} - p_0 \right] \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - \frac{\eta p_i \alpha}{\ln(R_0/r_0)} + \sigma_c \alpha \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + (\alpha-1) \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) \eta p_i \cdot \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R_0/r_0)} + \alpha(\alpha-1) \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) -$$

$$\frac{\alpha\sigma_c}{1+2\alpha} \frac{\lambda\rho^2}{Er^2} - \frac{\alpha-1}{1+2\alpha} \eta p_i \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda\rho^2}{Er^2} - \frac{\alpha(\alpha-1)}{(1+2\alpha)^2} \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \frac{\lambda\rho^2}{Er^2} \quad (36)$$

式(36)与文献[32]中不考虑不同地应力影响和中间主应力的结果一致。

在式(15)、(16)、(23)中,令 $\lambda=0, b=0$,忽略不同地应力影响,得围岩塑性区应力分别为

$$\sigma_r = \left[\frac{\eta p_i \alpha}{\ln(R_0/r_0)} - \sigma_c \alpha - (\alpha-1) \frac{\eta p_i \alpha}{\ln(R_0/r_0)} - p_0 \right] \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - \frac{\eta p_i \alpha}{\ln(R_0/r_0)} + \sigma_c \alpha + (\alpha-1) \eta p_i \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R_0/r_0)} + \alpha(\alpha-1) \frac{\eta p_i}{\ln(R_0/r_0)} \quad (37)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_r}{\alpha} + \frac{1-\alpha}{\alpha} (1-D) \eta p_w - \frac{2\alpha(1+b)}{2\alpha(1+b)-bm} \sigma_c \quad (38)$$

$$u_d = \frac{(1+\mu)\rho^2}{Er} \left(\frac{1+3\alpha}{1+\alpha} \sigma_k - \frac{\alpha}{1+\alpha} \sigma_c \right) \quad (39)$$

式(37)、(38)、(39)与文献[48]中不考虑损伤特性、不同地应力影响和中间主应力的结果一致。

6 工程算例与参数分析

取文献[49]中的资料,压力隧洞洞室半径 $r_0=2.5$ m。围岩力学参数为 $p_0=280.847$ kPa, $E=20$ GPa, $\mu=0.3$, $c=250$ kPa, $\varphi=30^\circ$, $E/\lambda=0.5$, $R_0=12r_0=30$ m, $\eta=1$, $m=1$, $p_i=1$ MPa,将以上数据代入式(9)、(21),得 $\sigma_{k1}=3\,136\,285$ Pa, $\sigma_{k2}=13\,054\,082$ Pa。取 $\sigma_k=6.5$ MPa,得到围岩出现损伤区时的分析,如图3、4所示。取 $\sigma_k=60$ MPa,得到围岩出现完全损伤区时的分析,如图5、6所示。

由图3~6可以看出:

(1)内摩擦角 φ 对围岩出现损伤区时的损伤半径有着比较显著的影响,随着 φ 的增大,围岩损伤半径在逐渐减小。内摩擦角 φ 对围岩出现完全损伤区时的损伤和完全损伤区半径有着显著的影响,随着 φ 的增大,围岩损伤和完全损伤区半径都在逐渐减小。但是内摩擦角 φ 对围岩出现损伤区时与完全损伤区时的损伤半径的影响相比,对围岩出现完全损伤区时的损伤半径的影响较大。

(2)粘聚力 c 对围岩出现损伤区时的损伤半径的影响不太显著,随着 c 的增大,围岩损伤半径在逐渐减小。粘聚力 c 对围岩出现完全损伤区时的损伤和完全损伤区半径的影响也不太显著,随着 c 的增大,围岩损伤和完全损伤区半径都在逐渐减小。但是粘聚力 c 对围岩出现损伤区时与完全损伤区时的

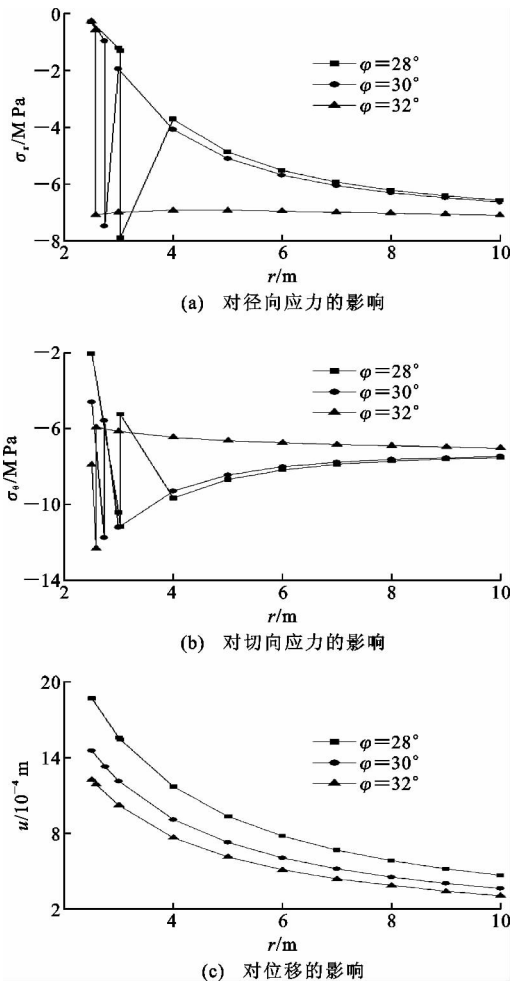


图3 出现损伤区内摩擦角的影响

Fig. 3 Impacts of Internal Friction Angles in Damage Area

损伤半径的影响相比,对围岩出现损伤区时的损伤半径的影响较大,但总的来看都不明显。

(3)内摩擦角 φ 和粘聚力 c 对围岩损伤区和完全损伤区半径、应力、位移的影响规律相同。内摩擦角 φ 对围岩出现损伤区和完全损伤区时的应力、位移都有相当显著的影响,与 φ 相比,粘聚力 c 对围岩出现损伤区和完全损伤区时的应力、位移的影响却不明显。

7 结语

(1)考虑地下水渗流作用和岩石材料的损伤特性对圆形隧洞围岩稳定性的影响,基于统一强度理论,应用流-固耦合理论和弹塑性损伤力学理论,根据不同的地应力情况,得到了应用广泛的施工工况下的圆形隧洞围岩应力场和位移场的解析解。

(2)通过分析得出粘聚力 c 和内摩擦角 φ 对围岩分别出现损伤区和出现完全损伤区时的半径、应

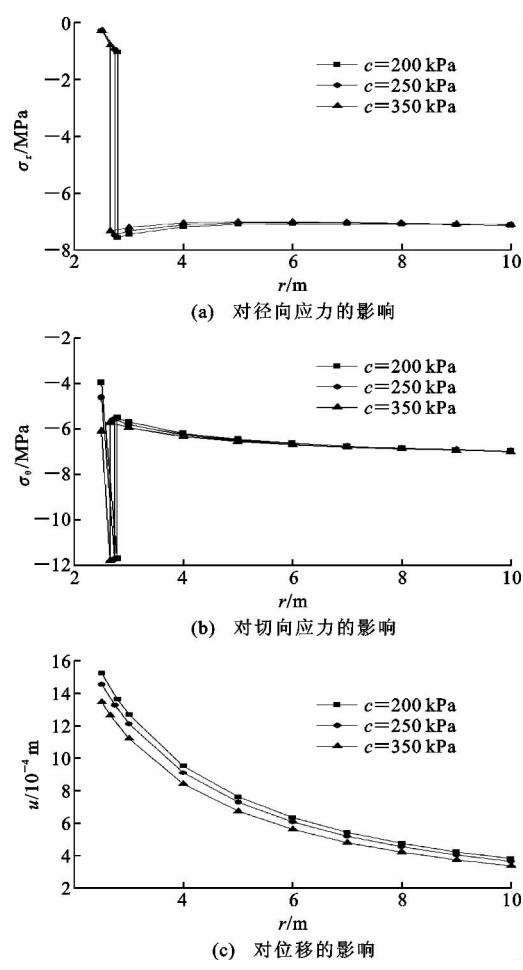


图 4 出现损伤时粘聚力的影响

Fig. 4 Impacts of Cohesions in Damage Area

力、位移的影响规律,对工程实际具有一定的参考价值。

(3)所得结论具有广泛的适用性。本文中推得的统一解中,令 $b=0$,若分别不考虑渗透水压力、不同地应力影响、岩石材料的损伤特性,则分别可退化为文献[24]、[32]、[48]中的结果。

参考文献:

References:

[1] 王世春. 格鲁吉亚卡杜里水电站引水隧洞 TBM 施工工艺[J]. 水电站设计, 2009, 25(1): 57-60.
WANG Shi-chun. Georgia Khadori Hydropower Diversion Tunnel Construction Technology of TBM[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2009, 25(1): 57-60.

[2] 宋连瑞, 王 峰. 万家寨引黄工程北干线 1 号隧洞出口段施工方案比选[J]. 科技情报开发与经济, 2008, 18(7): 212-213.
SONG Lian-rui, WANG Feng. Comparison and Selection of the Construction Schemes for the Outlet Sec-

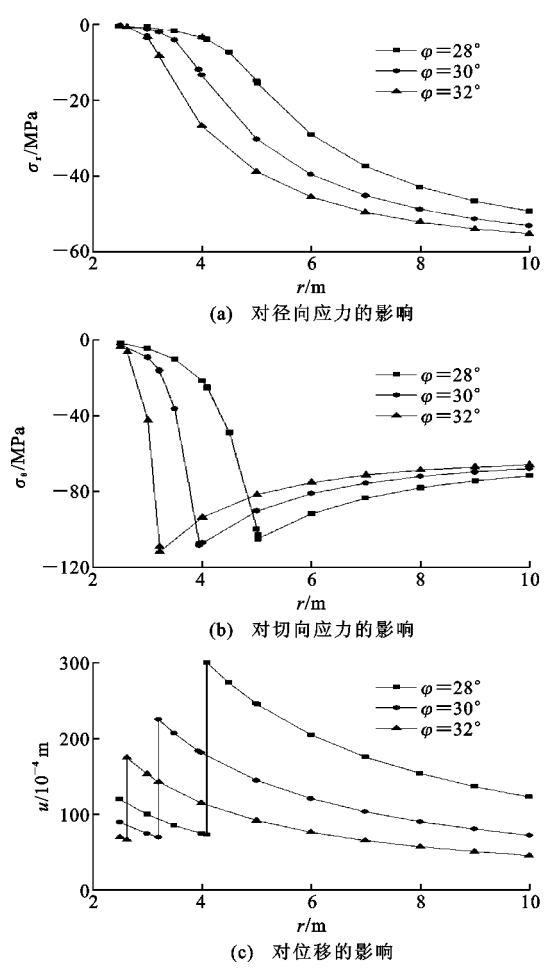


图 5 完全损伤时内摩擦角的影响

Fig. 5 Impacts of Internal Friction Angles in Full Damage Area

tion of NO. 1 Tunnel in the Northern Main Line of Wanjiazhai YRDP (Yellow River Diversion Project) [J]. Sci-tech Information Development & Economy, 2008, 18(7): 212-213.

[3] 何 坤. 高原地区水电站引水隧洞施工通风设计[J]. 水电站设计, 2009, 25(1): 32-34.
HE Kun. Construction Ventilation Design for Water Conveyance Tunnels of Hydropower Stations in Plateau Area[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2009, 25(1): 32-34.

[4] 杨德军. 色尔古水电站软岩隧洞的开挖与支护[J]. 水电站设计, 2008, 24(4): 79-81.
YANG De-jun. Fall Color in Soft Rock Station Ancient Tunnel Excavation and Support[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2008, 24(4): 79-81.

[5] 陈卫忠, 伍国军, 戴永浩, 等. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1184-1190.
CHEN Wei-zhong, WU Guo-jun, DAI Yong-hao,

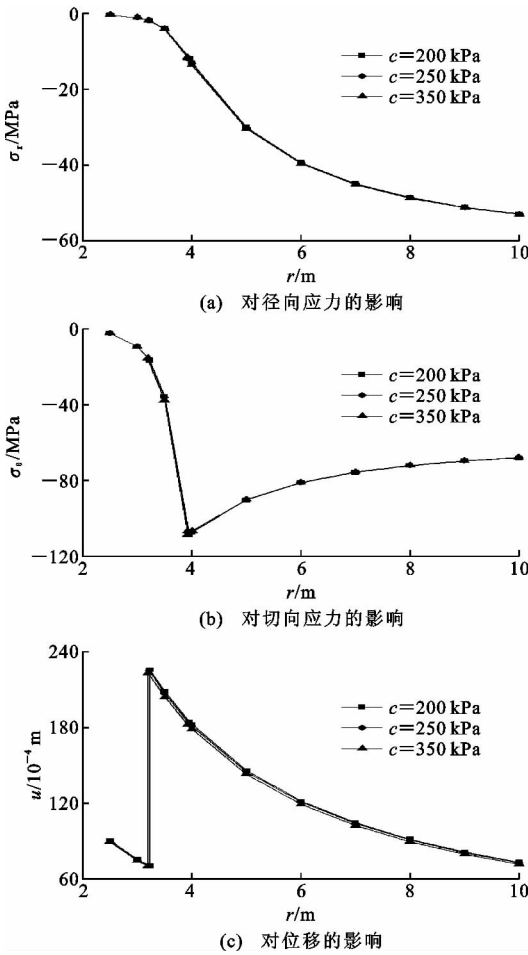


图 6 完全损伤时粘聚力的影响

Fig. 6 Impacts of Cohesions in Full Damage Area

et al. Stability Analysis of Diversion Tunnel for Jin-ping Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1184-1190.

[6] 汪 洋,魏明海. 水工隧洞断层破碎带施工技术[J]. 科技风, 2009(4): 171.

WANG Yang, WEI Ming-hai. Fault Broken Hydraulic Tunnel Construction Technology [J]. Technology Trend, 2009(4): 171.

[7] JIANG Y, YONEDA H, TANABASHI Y. Theoretical Estimation of Loosing Pressure on Tunnels in Soft Rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(2): 99-105.

[8] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983.

YU Xue-fu, ZHENG Ying-ren, LIU Huai-heng, et al. Stability Analysis of Surrounding Rock in Underground Engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1983.

[9] 肖树芳,杨淑碧. 岩体力学[M]. 北京:地质出版社, 1987.

XIAO Shu-fang, YANG Shu-bi. Rock Mass Mechanics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.

[10] 齐明山,蔡晓鸿,冯翠霞. 隧道围岩压力的弹塑性新解[J]. 土工基础, 2006, 20(2): 73-76.

QI Ming-shan, CAI Xiao-hong, FENG Cui-xia. New Elasto-plastic Analytic Solution of Tunnel Surrounding Rock Pressure[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(2): 73-76.

[11] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京:中国水利电力出版社, 1986.

XU Zhi-ying. Rock Mechanics [M]. Beijing: China Water Power Press, 1986.

[12] JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of Rock Mechanics[M]. London: Chapman & Hall, 1979.

[13] GEORGIOS A, KALMAN K. Significant Parameters in Elastic-plastic Analysis of Underground Openings [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 119(3): 401-409.

[14] PAN X D, BROWN E T. Influence of Axial Stress and Dilatancy on Rock Tunnel Stability [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(2): 139-146.

[15] WANG Y. Ground Response of Circular Tunnel in Poorly Consolidated Rock[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(9): 703-708.

[16] 任青文,张宏朝. 关于芬纳公式的修正[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2001, 29(6): 109-111.

REN Qing-wen, ZHANG Hong-chao. A Modification of Fenner Formula[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2001, 29(6): 109-111.

[17] 任青文,邱 颖. 具有衬砌圆形隧洞的弹塑性解[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 212-217.

REN Qing-wen, QIU Ying. Elastic-plastic Solution of Circular Tunnel with Liner[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 212-217.

[18] 许东俊,耿乃光. 岩石强度随中间主应力变化规律[J]. 固体力学学报, 1985, 6(1): 72-80.

XU Dong-jun, GENG Nai-guang. The Variation Law of Rock Strength with Increase of Intermediate Principal Stress[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1985, 6(1): 72-80.

[19] 俞茂宏. 双剪强度理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 1998.

YU Mao-hong. Twin Shear Unified Strength Theory and Its Applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.

[20] 范 文,俞茂宏,孙 萍,等. 洞室形变围岩压力弹塑性分析的统一解[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2003, 23(3): 1-4.

- FAN Wen, YU Mao-hong, SUN Ping, et al. Unified Solution of Elastic-plastic Analysis for Surrounding Rock Mass Stress Under Cave Deformation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(3): 1-4.
- [21] 宋 俐, 张永强, 俞茂宏. 压力隧洞弹塑性分析的统一解[J]. 工程力学, 1998, 15(4): 57-61.
SONG Li, ZHANG Yong-qiang, YU Mao-hong. Elastoplastic Unified Analysis of Pressure Tunnel[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(4): 57-61.
- [22] 胡小荣, 俞茂宏. 统一强度理论及其在巷道围岩弹塑性分析中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 1021-1026.
HU Xiao-rong, YU Mao-hong. Unified Strength Theory and Its Application in Elasto-plastic Analysis to Tunnel [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(5): 1021-1026.
- [23] 徐栓强, 俞茂宏, 胡小荣. 基于双剪统一强度理论的地下圆形洞室稳定性的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 522-526.
XU Shuan-qiang, YU Mao-hong, HU Xiao-rong. The Stability Analysis of Circular Tunnel Based the Twin Shear Unified Strength Theory[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 522-526.
- [24] 李忠华, 官福海, 潘一山. 基于损伤理论的圆形巷道围岩应力场分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增2): 160-163.
LI Zhong-hua, GUAN Fu-hai, PAN Yi-shan. Analysis of Stress Field of Rock Surrounding Circular Roadway Based on Damage Theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 160-163.
- [25] 殷有泉. 岩石的塑性、损伤及其本构表述[J]. 地质科学, 1995, 30(1): 63-70.
YIN You-quan. On Rock Plasticity, Damage and Their Constitutive Formulation[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, 30(1): 63-70.
- [26] 周光泉, 陈德华, 席道瑛. 岩石连续损伤本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(3): 229-235.
ZHOU Guang-quan, CHEN De-hua, XI Dao-ying. The Constitutive Equation of Continuum Damage for Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(3): 229-235.
- [27] 潘一山, 徐秉业. 考虑损伤的圆形洞室岩爆分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 152-156.
PAN Yi-shan, XU Bing-ye. The Rockburst Analysis of Circular Chamber Under Consideration of Rock Damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 152-156.
- [28] 唐雪松, 蒋持平, 郑健龙. 各向同性弹性损伤本构方程的一般形式[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(12): 1317-1323.
- TANG Xue-song, JIANG Chi-ping, ZHENG Jian-long. General Expressions of Constitutive Equations for Isotropic Elastic Damaged Materials[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2001, 22(12): 1317-1323.
- [29] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
KONG Xiang-yan. Advanced Mechanics of Fluids in Porous Media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999.
- [30] 梁 冰, 孙可明, 薛 强. 地下工程中的流-固耦合问题的探讨[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2001, 20(2): 129-134.
LIANG Bing, SUN Ke-ming, XUE Qiang. The Research of Fluid-solid Coupling in the Ground Engineering[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2001, 20(2): 129-134.
- [31] 速宝玉, 詹美礼, 王 媛. 裂隙渗流与应力耦合特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 73-77.
SU Bao-yu, ZHAN Mei-li, WANG Yuan. Coupled Seepage and Stress Fracture Experimental Study[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 73-77.
- [32] 荣传新, 程 桦. 地下水渗流对巷道围岩稳定性影响的理论解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 741-744.
RONG Chuan-xin, CHENG Hua. Stability Analysis of Rocks Around Tunnel with Ground Water Permeation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 741-744.
- [33] 刘玉石, 白家祉, 周煜辉, 等. 考虑井壁岩石损伤时保持井眼稳定的泥浆密度[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 123-128.
LIU Yu-shi, BAI Jia-zhi, ZHOU Yu-hui, et al. Mud Density for Wellbore Stability when Formation Rock is Damaged[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(3): 123-128.
- [34] 白 矛, 刘天泉. 孔隙裂隙弹性理论及应用导论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
BAI Mao, LIU Tian-quan. Elastic Fracture Porosity Introduction to Theory and Application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [35] 李敬元, 李子丰. 渗流作用下井筒周围岩石内弹塑性应力分布规律及井壁稳定条件[J]. 工程力学, 1997, 14(1): 131-137.
LI Jing-yuan, LI Zi-feng. Rock Elastic-plastic Stresses

- Around a Wellbore and Wellbore Stability Under Permeation Osmosis[J]. Engineering Mechanics, 1997, 14 (1): 131-137.
- [36] 陈仲颐, 周景星. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing. Soil Mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [37] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
XIE He-ping. Damage Mechanics of Rock and Concrete[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.
- [38] 李朝弟, 刘信声. 考虑材料损伤时厚壁圆筒的承载能力[J]. 力学与实践, 1993(1): 23-26.
LI Zhao-di, LIU Xin-sheng. The Capacity of Thick-walled Cylinder when Considering Material Injury [J]. Mechanics in Engineering, 1993(1): 23-26.
- [39] YEW C H, CHENEVERT M E, WANG C L, et al. Wellbore Stress Distribution Produced by Moisture Adsorption[J]. SPE Drilling Engineering, 1990, 5(4): 311-316.
- [40] CHENEVERT M E. Shale Alteration by Water Adsorption[J]. Journal of Petroleum Technology, 1970, 22(9): 1141-1148.
- [41] CHENEVERT M E, OSISANYA S. Shale Testing Procedures for the Prevention of Borehole Collapse [C]//OSISANYA S. Proceedings of the Energy-sources Technology Conference & Exhibition. Houston: ETCE, 1993: 141-146.
- [42] MODY F K, HALE A H. A Borehole Stability Model to Couple the Mechanics and Chemistry of Drilling Fluid Shale Interaction[C]//SPE. Proceeding of SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE, 1993: 473-490.
- [43] 徐芝伦. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
XU Zhi-lun. Elasticity Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [44] 黄荣樽. 地层破裂压力预测模式的探讨[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 1984(4): 335-347.
HUANG Rong-zun. A Model for Predicting Formation Fracture Pressure[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 1984 (4): 335-347.
- [45] 郑雨天. 岩石力学的弹塑粘性理论基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1988.
ZHENG Yu-tian. Theoretical Basis of Viscous Plastic Shells of Rock Mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1988.
- [46] 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.
- [47] YU M H. Unified Strength Theory and Applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [48] 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 [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.
- [49] 马青. 基于损伤理论的圆形水工压力隧洞围岩应力场分析[D]. 西安: 长安大学, 2009.
MA Qing. Analysis of Stress Field of Rock Surrounding Reinforced Concrete Filled Steel Columns Based on Damage Theory[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.