

文章编号: 1000-4750(2011)12-0105-07

考虑水-力耦合时交通隧道非线性解析

邹金锋^{1,2}

(1. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075; 2. 湖南省交通规划勘察设计院, 长沙 410008)

摘 要: 将具有衬砌的圆形隧道各影响因素简化为轴对称问题。考虑水-力耦合、外水压力作用及 Hoek-Brown 强度准则, 求得交通隧道弹塑性非线性解析解。利用数值方法研究各参数对考虑水-力耦合非线性解的影响, 分析结果表明: 考虑水-力耦合时, 应力场、位移场和塑性区半径均较不考虑耦合因素时大, 因此隧道开挖时应充分考虑水-力耦合作用。实例分析表明: 随着 m_i 的增大, 应力和塑性区半径均随之增加, 塑性区半径与参数 m_i 为非线性递增关系。

关键词: 水-力耦合; 外水压力; Hoek-Brown 强度准则; 隧道; 渗流

中图法分类号: TV554 文献标志码: A

NONLINEAR ANALYTICAL SOLUTION OF TRAFFIC TUNNELS CONSIDERING THE HYDRAULIC-MECHANICAL COUPLING

ZOU Jin-feng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey and Design Institute, Changsha 410008, China)

Abstract: An analytical solution for the analysis of tunnels below a groundwater table in plane strain ax-symmetric conditions is presented. The seepage body force and secondary permeability of the rock mass due to the hydraulic-mechanical coupling, and external water pressure are taken into account. The Hoek-Brown empirical strength criterion for the rock mass is used in the analysis. The nonlinear solutions considering hydraulic-mechanical coupling are given in a pressurized flow tunnel. The results show that the stress field, displacement field and the plastic zone radius are larger than those of not accounting for coupling factors when the hydraulic coupling is taken into consideration. Thusly the tunnel excavation should take full account of the water - force coupling. The case analysis shows that the stress and plastic zone radius grows with the increases of m_i , the relation between plastic zone radius and parameter m_i is non-linear incremental.

Key words: hydraulic-mechanical coupling; external water pressure; Hoek-Brown failure criterion; tunnel; seepage

遭遇浸水的隧道在建设和运营期间都会遇到非常复杂的问题, 比如环境污染、结构破坏和地面沉降等。隧道围岩和衬砌受渗流场的影响, 孔隙水压力会从根本上改变隧道周围的应力场和应变场, 使岩体的残余粘聚力减小。渗流场的作用不仅会明显影响围岩与衬砌的应力状态和收敛值, 而且还会

使塑性区进一步扩展^[1-3]。目前, 国内学者对富水隧道的研究大多只考虑水的作用, 很少见到涉及水-力耦合因素的研究成果。如文献[4]针对一般的隧道只考虑了渗流场对隧道的影响, 而没考虑应力重分布的影响。文献[5]运用有限元法对裂隙岩体应力-渗流耦合模型在压力隧道工程中的应用进行了

收稿日期: 2010-03-29; 修改日期: 2011-04-10

基金项目: 高等学校博士点新教师基金项目(20090162120039); 博士后科学基金项目(20090461021)

作者简介: 邹金锋(1978-), 男, 河南新县人, 副教授, 博士后, 从事岩土与地下工程、道路工程方面的教学与科研工作

(E-mail: zoujinfeng_0@163.com).

研究。吕晓聪等^[6]对渗流场影响下的海底圆形隧道弹塑性解析进行了研究。刘成学等^[7]在线性强度准则下研究了应力重分布时深埋圆形透水隧道的弹塑性解,但其研究成果未涉及到非线性强度准则。

在国外,最近也有不少学者对隧道开挖时地下水渗流问题进行了比较深入的研究。如 El Tani (2003)^[8]给出了关于 Mobius 变换和傅里叶级数为基础的地下水解析解;通过对比分析其他学者关于渗流解析的近似及精确解,指出了隧道开挖时地下水渗流预测的不同之处。Bobet 和 Nam (2006)^[9]给出了考虑渗透力和孔隙水压力等因素的解析结果,但是其结果中没有考虑到水-力耦合的因素。Lee S W 等^[10]从工程应用的角度,获得了考虑稳定渗流的渗透力时隧道开挖对地面沉降影响的简化解析结果,并采用数值结果进行对比验证;但是其理论成果是基于线性强度准则上的线性结果,并且只考虑了渗透力的影响,并未考虑到渗透力和隧道开挖时应力的耦合作用。Kolymbas 和 Wagner (2007)等^[11]分别给出了适用于深埋和浅埋隧道,且地下水头变化的地下水渗流的解析解。但是,其结果只适用于线性围岩的地下水渗流问题,并未涉及到水力耦合的情况。Kyung H P 等^[12]分析比较了现有理论解中关于半无限含水层中排水隧道中稳态渗流的解析结果,并对其中部分结果进行了重新阐释。Fahimifar A 和 Zareifard M R^[13]在 Kolymbas 和 Wagner (2007)^[11]的基础上,给出了隧道开挖后地下水渗流的耦合解析,但没有给出非线性围岩考虑水-力耦合时的解析结果。

基于此,本文将在非线性强度准则和文献[13]研究成果的基础上,研究隧道开挖时水-力耦合因素对围岩应力场和位移场的影响,以期获得可为工程应用提供技术支持的理论依据。其创新点如下:1) 综合考虑了水-力耦合因素对围岩塑性区应力场和位移场的影响;2) 塑性区应力-应变分析都是基于非线性强度准则且考虑了水-力耦合因素。

1 Hoek-Brown 强度准则

Hoek-Brown 强度准则的屈服条件为^[14]:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \sigma_c \left(m \frac{\sigma_r}{\sigma_c} + S \right)^n \quad (1)$$

式(1)称为广义的 Hoek-Brown 经验强度准则。在式(1)中系数 m 、 S 、 n 是半经验参数,用来描述岩石的基本特征。在实际中,这些参数是根据地质强度

指标(GSI)的半经验指标来计算,其取值范围在 0~100 之间。

在最新的 Hoek-Brown 破坏准则中,式(1)中系数 m 、 S 、 n 与 GSI 关系如下^[14]:

$$m = m_i \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2)$$

$$S = \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3)$$

$$n = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp\left(-\frac{\text{GSI}}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right) \right] \quad (4)$$

在式(3)和式(4)中, D 是岩石破坏程度或是应力松弛程度参数,其取值在 0~1 之间; m_i 的取值分别为^[14]: 7、10、15、17 和 25。

2 塑性区中的应变位移

位移协调方程^[15]:

$$h \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = -B(h-1) \quad (5)$$

式中, $B = (1+\nu)(\sigma_{rp} - \sigma_0)/E$, $h = (1 + \sin\psi)/(1 - \sin\psi)$, ψ 为剪胀角。

求解式(5),可得弹塑性交界处的径向位移边界条件为: $u_{rp} = Br_p$, 塑性区中围岩位移为:

$$u = -\frac{h-1}{h+1}rB + \frac{2h}{(h+1)}Br_p \left(\frac{r_p}{r}\right)^{\frac{1}{h}} \quad (6)$$

当 $r = r_0$ 时,可得开挖轮廓线的位移 u_{r_0} 为:

$$u_{r_0} = -\frac{h-1}{h+1}Br_0 + \frac{2h}{(h+1)}Br_p \left(\frac{r_p}{r_0}\right)^{\frac{1}{h}} \quad (7)$$

则围岩的径向位移 ε_r 、环向位移 ε_{θ} 和体变 ε_v 分别为:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = -\frac{du}{dr} = \frac{h-1}{h+1}B + \frac{2}{(h+1)}B \left(\frac{r_p}{r}\right)^{\frac{1}{h}+1} \\ \varepsilon_{\theta} = -\frac{u}{r} = \frac{h-1}{h+1}B - \frac{2h}{(h+1)}B \left(\frac{r_p}{r}\right)^{\frac{1}{h}+1} \end{cases} \quad (8)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_r + \varepsilon_{\theta} = 2\frac{h-1}{h+1} + \frac{2B}{(h+1)}(1-h) \left(\frac{r_p}{r}\right)^{\frac{1+h}{h}} \quad (9)$$

3 渗流规律研究

3.1 基本假设

1) 考虑到隧道深度的基准面,其压力水头由贝

努力方程确定, 即:

$$\frac{p_w(r, \theta)}{\gamma_w} + r \sin \theta = h_w(r, \theta) \quad (10)$$

式中: r 和 θ 为极坐标的半径和夹角; γ_w 为水的重度; h_w 为压力水头。

2) 在塑性区中形成径向渗流网。隧道围岩的弹性塑性界面假定为圆形, 并保持同一压力水头。因此, 半径和水头压力比 r_e/h_1 非常小, 可以忽略不计。

3) 地下水位为一个恒定水头, 地下水的渗透力不影响地下水的水平面。

4) 地下水为稳定渗流场。

5) 流入隧道内部的渗流方向为正。

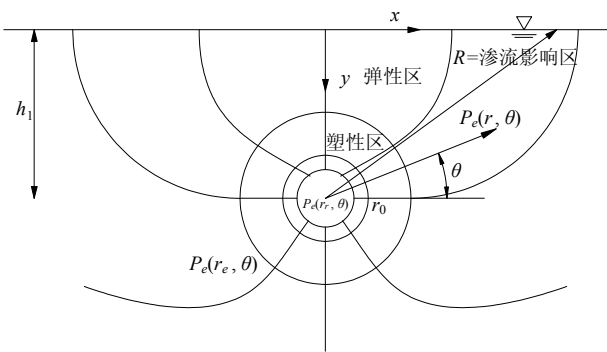


图1 圆形隧道周边不同区域中的渗透力^[13]

Fig.1 Seepage flow net in different zones around the tunnel^[13]

3.2 渗透力和孔隙水压力分布

根据 Kolymbas 和 Wagner 的理论^[11], 在直角坐标系中水位线以下的隧道周边任何一点, 其水头压力可以通过下式获得:

$$h(x, y) = \frac{h_c}{\log \left(\frac{r_c}{h_1 - \sqrt{h_1^2 - r_c^2}} \right) \log \left(c_w \cdot \left| \frac{x + i(h_1 - y) - c_w i r_c}{c_w i [x + i(h_1 - y)] + r_c} \right| \right)} \quad (11)$$

式中: $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位; x 是复变函数的实部; y 是虚部; h_1 为隧道中心距离水平面的距离; r_c 为隧道开挖半径; 参数 c_w 可以通过下式求得:

$$c_w = \frac{h_1 - \sqrt{h_1^2 - r_c^2}}{r_c} \quad (12)$$

由式(11)可知: $h_1 - y = r \sin \theta$, $x = r \cos \theta$, 则有:

$$h(r, \theta) = \frac{h_c}{\log \left(\frac{r_c}{h_1 - \sqrt{h_1^2 - r_c^2}} \right)}$$

$$\log \left(c_w \cdot \left| \frac{r \cos \theta + i r \sin \theta - c_w i r_c}{c_w i (r \cos \theta + i r \sin \theta) + r_c} \right| \right) \quad (13)$$

式中, 每延米隧道的排水量可以通过下式获得:

$$q = \frac{2\pi k_{r0} h_c}{\log \left(\frac{r_c}{h_1 - \sqrt{h_1^2 - r_c^2}} \right)} \quad (14)$$

式中, k_{r0} 是围岩的初始渗透系数。

假设在塑性区中的径向渗流继续发展, 弹塑性边界面上具有相同的水头等势面。因此, 在式(13)中, 如果考虑到 $r_c = r_e$, 且弹塑性界面具有相同水头等势面时, 则可得弹性区中的孔隙水压力。将 $r_c = r_e$ 和 $h_c = h_e$ 代入到式(13)中, 根据文献[13], 可得弹性区中的孔隙水压力为:

$$p_w(r, \theta) = \frac{h_e}{\log \left(\frac{r_e}{h_1 - \sqrt{h_1^2 - r_e^2}} \right) \left(\log c_w \cdot \sqrt{\frac{r^2 + (c_w r_e)^2 - 2c_w r_e r \sin \theta}{(c_w r)^2 + r_e^2 - 2r_e r c_w \sin \theta}} \right) + \gamma_w (h_1 - r)} \quad (15)$$

在弹性区中, 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 可得垂直方向的孔隙水压力为:

$$p_w(r, \theta = 90^\circ) = \frac{\gamma_w q}{2\pi k_{r0}} \log \left(\frac{c_w^2 r_e - c_w r}{c_w r - r_e} \right) + \gamma_w (h_1 - r) \quad (16)$$

在弹性区中, 当 $\theta = 0^\circ$ 时, 可得水平方向的孔隙水压力为:

$$p_w(r, \theta = 0^\circ) = \frac{\gamma_w q}{2\pi k_{r0}} \log \left(c_w \sqrt{\frac{r^2 + c_w^2 r_e^2}{c_w^2 r^2 + r_e^2}} \right) + \gamma_w h_1 \quad (17)$$

在塑性区中, 采用达西定律 $V = -K_r i_w$, 其中, i_w 表示水力梯度。则塑性区中的孔隙水压力可以通过对塑性区中达西孔隙水压力增量的积分获得^[13]。因此, 塑性区中的孔隙水压力为:

$$p_w(r, \theta) = \frac{\gamma_w q}{2\pi} \int_{r_0}^r \frac{1}{k_r(r)} dr + p_w(r, \theta) - \gamma_w (r - r_0) \quad (18)$$

式中, k_r 为破碎围岩的次渗透系数, 可通过耦合方程求得。

根据 Brown 和 Bray (1982)的假设, 在平面应变条件下, 破碎围岩中的弹性体应变对岩体中的渗透

性并无影响。因此在上述假设的基础上,提出如下耦合方程^[13]:

$$k_r = k_{r0}(1 + \eta \varepsilon_v^2) \quad (19)$$

式中: ε_v 是体应变, $\varepsilon_v = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta$; η 是耦合常数。

在塑性区中,当 $\theta = 90^\circ$ 时,可得垂直方向上的孔隙水压力为:

$$p_w(r, \theta = 90^\circ) =$$

$$\frac{\gamma_w q}{2\pi} \int_{r_0}^r \frac{1}{k_r(r)r} dr + p_w(r_0, \theta = 90^\circ) - \gamma_w(r - r_0) \quad (20)$$

在弹塑性交界处,利用其渗透力相等的边界条件。令式(15)与式(18)相等,则可得塑性区中的渗流量为^[13]:

$$q = \frac{2\pi[\gamma_w(h_1 - r) - p_w(r, \theta = 90^\circ)]}{\int_{r_0}^r \frac{1}{k_r(r)r} dr - \frac{\gamma_w}{k_{r0}} \log(c_w)} \quad (21)$$

同理,当 $\theta = 0^\circ$ 时,可得塑性区中水平方向的孔隙水压力为:

$$p_w(r, \theta = 0^\circ) = \frac{\gamma_w q}{2\pi} \int_{r_0}^r \frac{1}{k_r(r)r} dr + p_w(r_0, \theta = 0^\circ) \quad (22)$$

4 考虑渗流的应力场

考虑渗透体积力时,微单元的力平衡微分方程为:

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

式中: σ_r , σ_θ 分别为径向和切向有效应力(拉应力为正,压应力为负)。

边界条件为: $\sigma(r)_{r=r_a} = -p_a$, $\sigma(r)_{r \rightarrow \infty} = -p_0$ 。

将式(1)代入式(20),再考虑边界条件 $\sigma(r)_{r=r_a} = -p_a$, 求解微分方程式(23)可得:

$$\int_{p_0}^{\sigma_r} \frac{d\sigma_r}{\sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + S \right)^n} + \int_{p_{we}}^{p_w} \frac{dp_w}{\sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + S \right)^n} = \ln \frac{r}{r_0} \quad (24)$$

解式(24),可得考虑渗流时的塑性区应力和塑性区半径分别为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{ci}}{m_b} \left(\frac{\left[m_b(1-n) \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) + \left(m_b \frac{p_0}{\sigma_{ci}} + S \right)^{1-n} \right]^{\frac{1}{1-n}}}{[1 + (p_w - p_{we})m_b(1-n)]} \right) - \frac{\sigma_{ci}}{m_b} S \quad (25)$$

$$r_p =$$

$$r_0 \exp \left\{ \frac{2}{m_b(1-n)} \left[\left(m_b \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + S \right)^{1-n} - \left(m_b \frac{p_0}{\sigma_{ci}} + S \right)^{1-n} \right] + \left(m \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + S \right)^{1-n} (p_w - p_{we}) \right\} \quad (26)$$

当 $a=1/2$ 时,则可得塑性区应力和半径分别为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{ci}}{m_b} \left(\frac{\left[\frac{m_b}{2} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) + \left(m_b \frac{p_0}{\sigma_{ci}} + S \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2}{\left[1 + \frac{m_b}{2} (p_w - p_{we}) \right]} \right) - \frac{\sigma_{ci}}{m_b} S \quad (27)$$

$$r_p = r_0 \exp \left\{ \frac{2}{m_b} \left[\left(m_b \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + S \right)^{\frac{1}{2}} - \left(m_b \frac{p_0}{\sigma_{ci}} + S \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \left(m \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + S \right)^{\frac{1}{2}} (p_w - p_{we}) \right\} \quad (28)$$

当不考虑渗透力时,可得 Sharan S K^[16]关于隧道围岩的径向应力和塑性区半径非线性解析:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{ci}}{m} \left\{ \left[\left(m \frac{p_i}{\sigma_{ci}} + S \right)^{1-n} + m(1-n) \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \right]^{\frac{1}{1-n}} - S \right\} \quad (29)$$

$$r_p = r_0 \exp \left\{ \frac{1}{m(1-a)} \left[\left(m \frac{\sigma_{rp}}{\sigma_{ci}} + S \right)^{1-a} - \left(m \frac{p_i}{\sigma_{ci}} + S \right)^{1-a} \right] \right\} \quad (30)$$

因此, Sharan S K 解是本文解析结果的一个特例。

5 计算分析

5.1 参数分析

为了研究参数对应力、塑性区半径及水压力的影响,选取以下参数进行计算分析,具体为: $r_a = 5\text{m}$, $h_0 = 200\text{m}$, $\eta = 100000$, $\beta = 3$, $\theta = 0$, $B = 0.01$, $\gamma = 1.0$, $p_0 = 10\text{MPa}$, $\text{GSI} = 50$, $\sigma_c = 5\text{MPa}$, $m_i = 20$, $E = 9\text{MPa}$, $\mu = 0.25$ 。

考虑水-力耦合和不考虑水-力耦合时,应力增量沿径向分布规律如图 2 所示。

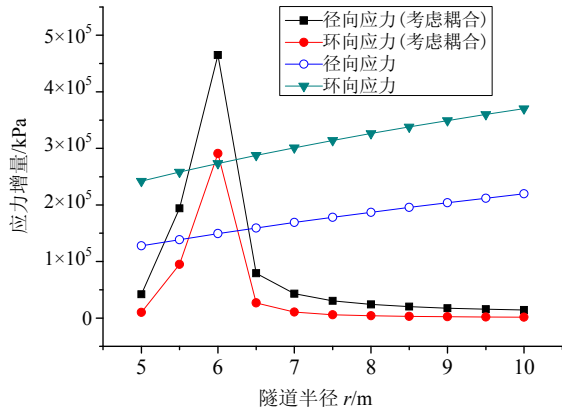


图2 考虑水-力耦合和不考虑水-力耦合时应力增量沿径向分布规律

Fig.2 Distribution rules between stress and radius r considering the hydraulic-mechanical coupling or not considering the hydraulic-mechanical coupling

从图 2 中可以看出：当径向距离 $r=6.0\text{m}$ 时，考虑水-力耦合时的径向、环向应力增量出现突变，说明水-力耦合效应对应力增量的影响是显著的，而且在 $r=6.0\text{m}$ 处隧道围岩为塑性区，由于围岩开挖后的应力调整过程中，水-力耦合效应致使塑性区中的应力增量较不考虑耦合效应时更加显著。因此，在 $r=6.0\text{m}$ 处，水-力耦合效应对隧道围岩的开挖具有显著影响。但是随着距离的增大，其影响程度逐渐降低。

考虑水-力耦合和不考虑水-力耦合时，应力与非线性参数 n 的关系如图 3 所示。

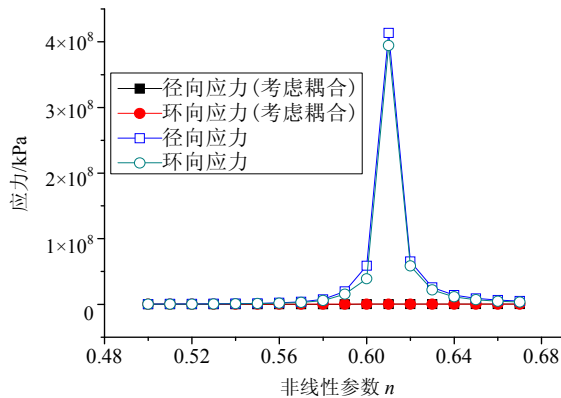


图3 考虑水-力耦合和不考虑水-力耦合时应力与非线性参数 n 的关系

Fig.3 Relationships between stress and n considering the hydraulic-mechanical coupling or not considering the hydraulic-mechanical coupling

从图 3 中可以看出：考虑耦合时，应力值在 $n=0.6\sim 0.64$ 之间会出现一个突变，突变之后应力有逐渐减小的趋势。这是因为在文中给定的参数所界定的岩体中，在 $n=0.6\sim 0.64$ 时水-力耦合作用最为突出。因此，围岩特性对应力场的影响是显著的，

尤其是水-力耦合效应参与作用时表现更为显著。

R/r_0 与非线性参数 n 的关系曲线如图 4 所示。

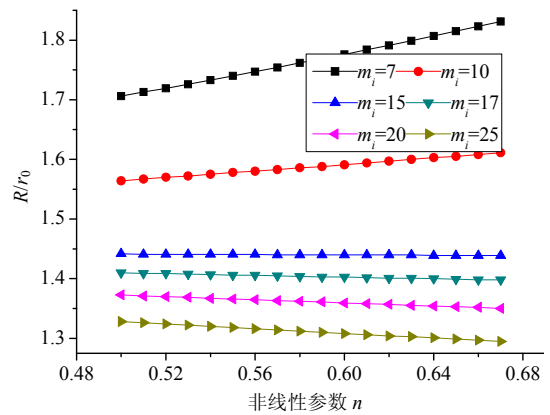


图4 R/r_0 与非线性参数 n 的关系曲线

Fig.4 Relationships between R/r_0 and n

从图 4 中可以看出：当 $m_i > 10$ 时，半径随着非线性参数 n 的增加而非线性减小，当 $m_i \leq 10$ 时，其半径随着非线性参数 n 的增加而增大。其原因是 m_i 值反映了岩体的完整性，当 m_i 值越大时，其完整性越好；当围岩应力和应力-应变关系相同时，其塑性区半径也就越小。因此，围岩级别对塑性区半径的影响是显著的。

孔隙水压力沿径向的分布规律如图 5 所示。

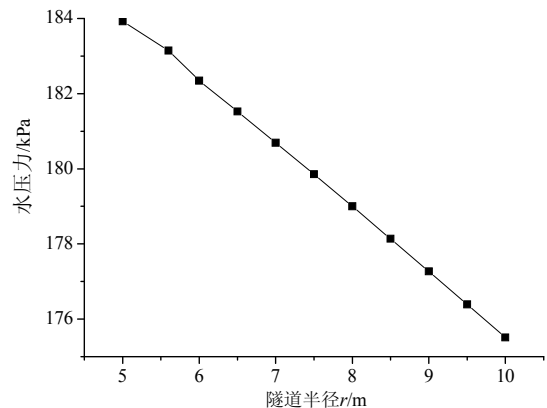


图5 孔隙水压力沿径向的分布规律

Fig.5 Distribution rules of pore water pressure along the radial

从图 5 中可以看出：围岩周围的水压力分布随着半径的增大而逐渐减小，且考虑水-力耦合时的水压力要比不考虑水-力耦合时的水压力小。当 $\theta > 0^\circ$ 时，因为沿着径向方向，其距离水平面的距离越来越近，所以其水压力越来越小。

孔隙水压力沿水平方向的分布规律如图 6 所示。

从图 6 中可以看出：孔隙水压力沿水平方向的分布规律为非线性增大，但后来的增长速率逐渐减小，说明渗流的影响范围是有限的。

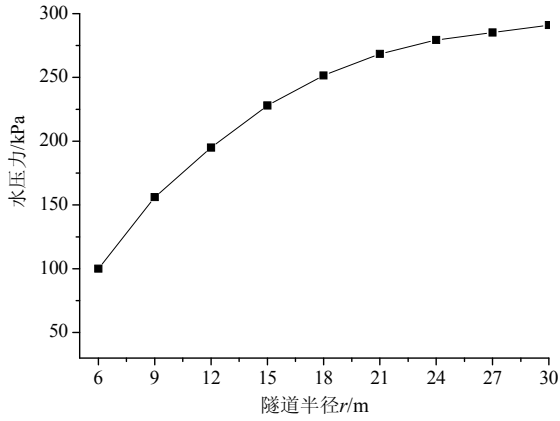


图6 孔隙水压力沿水平方向的分布规律

Fig.6 Distribution rules of pore water pressure along the horizontal

在图5中,当 $\theta=0^\circ$ 时,水平方向与径向方向一致;但 $\theta \neq 0^\circ$ 时,水平方向与径向方向并不一致,因此图5中孔隙水压力沿径向的分布规律与图6中孔隙水压力沿水平方向的分布规律有所不同。

孔隙水压力沿环向的分布规律如图7所示。

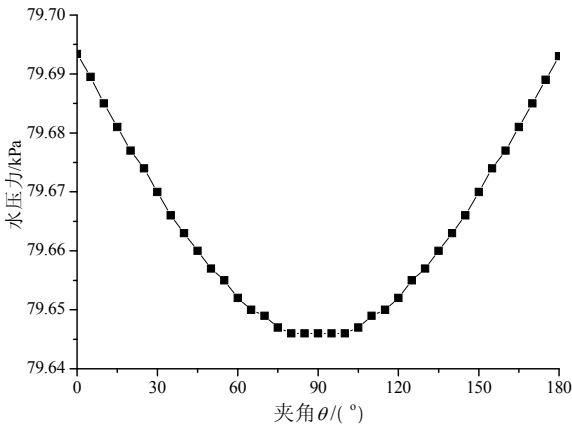


图7 孔隙水压力沿环向的分布规律

Fig.7 Distribution rules of pore water pressure along the circumferential

从图7中可以看出:孔隙水压力沿环向的分布规律为上凹型的抛物线。这是由于隧道开挖后,其顶部距离水位线较近,因而,孔隙水压力分布是沿环向向上凹的。

耦合效应对应力的影响规律如图8所示。

从图8中可以看出:耦合效应对应力的影响是显著的,考虑水-力耦合时的应力场要比不考虑耦合时的应力场更大。因此,隧道开挖的设计和施工中应该考虑耦合效应问题。

从图9中可以看出:耦合系数对渗流场的影响是存在的,随着耦合系数的增大,其影响更加显著。当耦合系数达到一定数值后,其渗流量趋于恒定值。

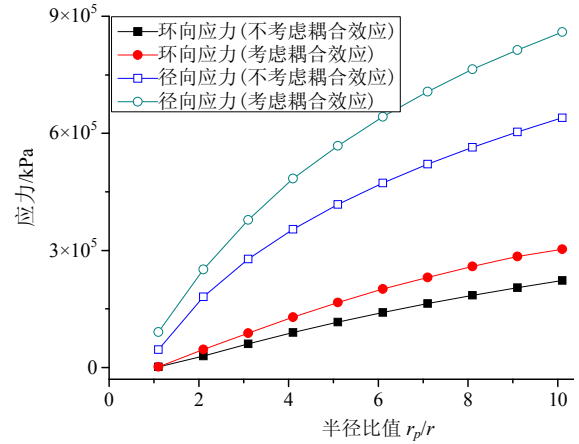


图8 耦合效应对应力的影响

Fig.8 Influence of hydraulic-mechanical coupling effects on stress

耦合系数对渗流量的影响如图9所示。

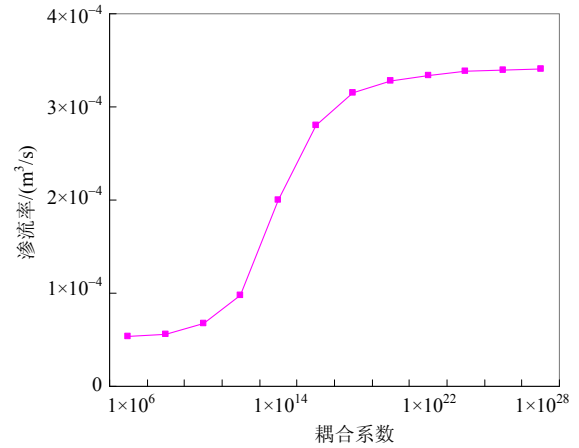


图9 耦合系数对渗流量的影响

Fig.9 Influence of hydraulic-mechanical coupling parameters on seepage

5.2 工程算例分析

为了验证本文理论的可靠性和有效性,利用湖南省某高速公路隧道监测试验结果进行验证。具体计算参数如下: $r_a=5m$, $h_0=150m$, $p_0=10MPa$, $GSI=50$, $\sigma_c=80$, $m_i=15$, $E=9MPa$, $\mu=0.25$ 。考虑耦合和不考虑耦合的应力、位移与理论计算值的比较见表1所示。

表1 理论计算值与实测值的比较

Table 1 Results comparison of theory and local test

距离/m	径向应力理论值/MPa		径向位移理论值/mm	
	考虑耦合	不考虑耦合	考虑耦合	不考虑耦合
6	38.6	33.3	5.92	5.55
7	49.2	47.1	4.56	4.16
8	47.5	42.0	3.83	3.53
9	30.3	23.3	3.45	3.15
10	20.6	18.0	3.21	3.02

从表 1 中可看出: 考虑耦合时应力和位移的理论值比不考虑耦合时的值大。

6 结论

(1) 考虑水-力耦合和外水压力的影响时, 推导了基于 Hoek-Brown 强度准则下的富水交通隧道的弹塑性非线性解析, 给出了考虑水-力耦合效应的隧道围岩应力场与塑性半径的非线性解析, 并获得了富水隧道开挖后渗流场的分布规律。其理论计算结果与实测结果较为接近。

(2) 将本文方法求得的富水透水隧道弹塑性解答与不考虑和考虑渗流影响的弹性解进行了对比分析。结果表明: 考虑水-力耦合效应时, 其应力场、塑性区半径、位移等都较不考虑水-力耦合时的大, 当隧道围岩较差时表现尤为突出。因此, 水-力耦合因素是隧道开挖时值得考虑的关键因素之一。

(3) 考虑弹塑性应力重分布及渗流影响时, 随着 m_i 值的增大, 其塑性区半径逐渐非线性增加; 应力场也是呈现非线性增加的趋势。

参考文献:

- [1] 杨家岭, 邱祥波, 陈卫忠. 海峡海底隧道及其最小岩石覆盖厚度问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 1): 2132—2137.
Yang Jialing, Qiu Xiangbo, Chen Weizhong. Subsea tunnel through channel and its minimum rock cover [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp. 1): 2132—2137. (in Chinese)
- [2] Palmstrom A, Skogheim A. New milestones in subsea blasting at water depth of 55m [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(1): 65—68.
- [3] 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 Qingwen, Qiu Ying. Elastic-plastic solution of circular tunnel with liner [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 212—217. (in Chinese)
- [4] 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 Zongli, Ren Qingwen, Wang Yahong. Elastic-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)
- [5] 陈卫忠, 杨建平, 杨家岭. 裂隙岩体应力渗流耦合模型在压力隧洞工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2384—2391.
Chen Weizhong, Yang Jianping, Yang Jialing. Hydro-mechanical coupled model of jointed rock mass and its application to pressure tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2384—2391. (in Chinese)
- [6] 吕晓聪, 许金余. 海底圆形隧道在渗流场影响下的弹塑性解[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 216—221.
Lu Xiaocong, Xu Jinyu. Elastic-plastic solution for subsea circular tunnel under the influence of seepage field [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 216—221. (in Chinese)
- [7] 刘成学, 杨林德, 李鹏. 考虑应力重分布的深埋圆形透水隧洞弹塑性解[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 16—20.
Liu Chengxue, Yang Linde, Li Peng. Elastic-plastic analytical solution of deep buried circle tunnel considering stress redistribution [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 16—20. (in Chinese)
- [8] El Tani M. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18: 49—55.
- [9] Bobet A, Nam S W. Lining stresses in deep tunnels below the water table [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21: 626—635.
- [10] Lee S W, Jung J W, Nam S W, Lee I M. The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 22: 28—38.
- [11] Kolymbas D, Wagner P. Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007, 22: 23—275.
- [12] Kyung H P, Adisorn O, Lee J G. Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23: 206—209.
- [13] Fahimifar A, Zareifard M R. A theoretical solution for analysis of tunnels below groundwater considering the hydraulic-mechanical coupling [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24: 634—646.
- [14] Yang Xiaoli, Zou Jingfeng. Stability factors for rock slopes subjected to pore water pressure based on the Hoek-Brown failure criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43(6): 1146—1152.
- [15] 邹金锋. 扩孔问题的线性与非线性解析及其工程应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
Zou Jinfeng. Studies on cavity expansion based on the linear and nonlinear failure criteria and its engineering applications [D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [16] Sharan S K. Analytical solutions for stresses and displacements around a circular opening in a generalized Hoek-Brown rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45: 78—85.