

基于抛物线型 Mohr 强度准则的隧洞弹塑性分析

罗小艳¹, 刘伟平²

(1. 江西科技师范学院建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要 : 基于具有抛物线型 Mohr 强度准则, 分析渗流作用下隧洞的弹塑性力学行为。通过考虑和不考虑渗流场影响的实例对比分析, 结果表明 : 考虑渗流场时所得塑性区半径比不考虑时大, 而且随着孔隙水压力的增大, 渗流场的影响越来越显著, 隧洞径向应力和切向应力都与渗流场密切相关。所得结果可为强度包络线近似于二次抛物线的围岩隧洞设计提供理论依据。

关键词 : 隧洞 ; 抛物线型 Mohr 强度准则 ; 渗流场 ; 弹塑性分析

中图分类号 : TV672⁺.1 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2011)03-0034-02

Elastoplastic analysis of tunnels based on parabolic Mohr strength criterion // LUO Xiao-yan¹, LIU Wei-ping² (1. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract : Based on the Mohr strength criterion with parabolic failure envelope, an elastoplastic analysis of tunnels under seepages was given. Comparative analysis of an example with and without consideration of seepages indicates that the radius of the plastic zone considering influence of seepage fields is larger than that without considering it. With the increase of the pore water pressure, the influence of seepage fields is more and more significant. The seepage fields have close relation with the radial and tangential stresses of the tunnels. It may provide theoretical supports for the design of tunnels whose strength envelopes similarly take the form of quadratic parabolas.

Key words : tunnel ; parabolic Mohr strength criterion ; seepage field ; elastoplastic analysis

工程界通常采用 Mohr-Coulomb 强度准则对隧洞进行弹塑性分析^[1]。有研究表明, 岩性较坚硬至较弱的岩石, 如泥灰岩、砂岩、泥页岩等岩石的强度包络线近似于二次抛物线^[2]。对极限曲线接近抛物线型的岩性, 在埋深较大时, 若仍采用直线型的公式计算将会有很大误差^[3]。研究表明, 渗流作用对隧洞的应力场等有显著影响^[4], 文献[5]考虑了地下水渗流作用的影响, 应用弹塑性损伤力学理论导出巷道围岩的应力分布规律。文献[6]采用数值分析法分析计算渗流场与应力场耦合时隧洞周围的应力位移场。文献[7]在岩体线性软化和具有水平残余强度的应力-应变关系下, 同时考虑地下水渗流作用的影响, 得出海底隧道围岩应力分布规律。文献[8]通过考虑和不考虑渗流场影响 2 种工况的实例分析, 表明渗流场对应力场的影响作用随着洞内外水头差的逐渐增大而显著增大。笔者在考虑地下水渗流作用下, 采用抛物线型 Mohr 强度准则对隧洞进行弹塑性分析。

1 抛物线型 Mohr 强度准则

二次抛物线包络线的一般表达式为

$$|\tau|^2 = \lambda(\sigma + \sigma_1) \tag{1}$$

式中 : τ 为剪应力 ; λ 为待定正常数, 由试验得出, 若采用单向压缩试验确定时其表达式为 $\lambda \approx \sigma_c^2 / [2(\sigma_c + 2\sigma_1)]$; σ_c 为材料的单轴拉压强度 ; σ 为正应力 ; σ_1 为材料的单轴抗拉强度。

主应力表达式为

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 = \lambda\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) + B \tag{2}$$

其中 $B = \lambda\sigma_1 - \frac{\lambda^2}{4}$

式中 : σ_1 和 σ_3 分别为大主应力和小主应力。

2 考虑渗流时隧洞的弹塑性分析

某圆形隧洞如图 1 所示, 洞室半径为 r_0 , 隧洞支护反力为 p , 作用在无穷远处的初始地应力为 q , 围

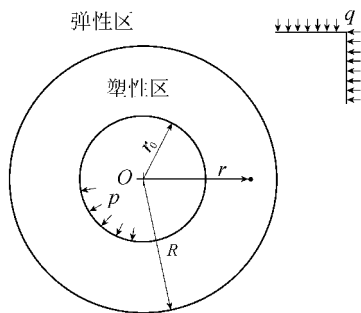


图 1 计算简图

岩塑性区与弹性区交界面的径向应力为 σ_p , 塑性区半径为 R , 渗透水压力为 ηp_w (η 为渗透水压力作用面积系数, 取值范围为 $0 \sim 1$, 与材料的孔隙率有关) 洞室为无限长, 可作为平面应变问题处理。

对于弹性区, 围岩的应力为^[1]

$$\sigma_r = \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) q + \frac{R^2}{r^2} \sigma_p + \eta p_w \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) q - \frac{R^2}{r^2} \sigma_p + \eta p_w \quad (4)$$

式中 σ_r 和 σ_θ 分别为径向和切向应力; r 为任意一点的径向半径。

平衡方程如下:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \eta \frac{dp_w}{dr} = 0 \quad (5)$$

由于隧洞原始渗流场水压力 p_0 的影响, 由边界条件 $p_w|_{r=r_0} = 0$, $p_w|_{r=R_0} = p_0$, 则渗流水压力分布规律为

$$p_w = p_0 \frac{\ln\left(\frac{r}{r_0}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)} \quad (6)$$

式中: p_0 为孔隙水压力; R_0 为原始渗流场水压力的围岩半径, 由钻孔实测或抽水试验确定。

这时 $\sigma_\theta > \sigma_r$, 洞室处于轴对称平面应变状态, 塑性区围岩的应力具有如下关系:

$$\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 = \lambda \left(\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2}\right) + B \quad (7)$$

令 $\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = m$, 则

$$\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} = \sqrt{\lambda m + B} \quad (8)$$

因此得

$$\sigma_\theta = m + \sqrt{\lambda m + B} \quad (9)$$

$$\sigma_r = m - \sqrt{\lambda m + B} \quad (10)$$

将式(9)和(10)代入式(5), 联立式(6)可得

$$\left(1 - \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\sqrt{\lambda m + B}}\right) \frac{dm}{dr} - \frac{2\sqrt{\lambda m + B}}{r} - \frac{A}{r} = 0 \quad (11)$$

其中

$$A = \frac{\eta p_0}{\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)}$$

分离变量, 解得

$$r = (4\sqrt{\lambda m + B} + 2A)^{\frac{\lambda + A}{4\lambda}} \exp\left(\frac{\sqrt{\lambda m + B}}{\lambda} - C\right) \quad (12)$$

由边界条件($r = r_0$ 时 $\sigma_r = p$)解得

$$m_0 = p + \frac{\lambda}{2} + \sqrt{\lambda(p + \sigma_t)} \quad (13)$$

代入可求得常数 C , 则

$$r = r_0 \left(\frac{2\sqrt{\lambda m_0 + B} + A}{2\sqrt{\lambda m + B} + A} \right)^{D_1} \exp\left(\frac{\sqrt{\lambda m + B} - \sqrt{\lambda m_0 + B}}{\lambda}\right) \quad (14)$$

其中

$$D_1 = \frac{\lambda + A}{4\lambda}$$

由式(14)可知, 给出 m 值即可求得 r 的对应值, 再结合式(9)和式(10)即可确定 r 与 σ_r 及 σ_θ 的对应关系。

根据应力的连续性原则, 在弹性区和塑性区的分界处应力应相等, 即在 $r = R$ 时有

$$(\sigma_r + \sigma_\theta)_e = (\sigma_r + \sigma_\theta)_p \quad (15)$$

联立式(4)和(5)和(11)可得

$$m = q + \eta p_w \quad (16)$$

联立式(6)和(14)和(16)可解得 m , 再把 m 代回式(14)可得塑性区半径 R 。

3 计算与讨论

隧洞内径 $r_0 = 2$ m, 围岩力学参数如下: $\sigma_c = 2.5$ MPa, $\sigma_t = 0.35$ MPa, $\eta = 1$, $p = 10$ MPa, $q = 20$ MPa, $p_0 = 2$ MPa, 由钻孔实测及抽水试验^[1]知 $R_0 = 12r_0 = 24$ m。根据上述参数, 给出了围岩在渗流与不考虑渗流工况下的塑性区半径、径向应力和切向应力(表1), R 与 p_0 的关系如图2所示, R 与 p 的关系如图3所示。

表 1 考虑渗流与不考虑渗流的计算结果

工 况	R/m	σ_r/MPa	σ_θ/MPa
考虑渗流	4.30	1.61	2.51
不考虑渗流	4.17	1.56	2.44

为了较好地分析渗流场的作用, 进行考虑和不考虑渗流场2种情况分析, 将计算结果进行比较, 结果表明考虑渗流场时所得塑性区半径比不考虑渗流场时大, 所得弹性区和塑性区分界处的径向应力和切向应力比不考虑渗流场时大。从图2可知, 随着孔隙水压力的增大, 塑性区半径也 (下转第94页)

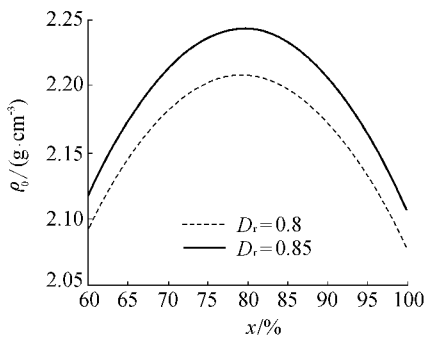


图3 砂砾石坝壳料现场碾压质量控制曲线

现场进行压实干密度检测时,可以根据每次检测的砾石质量分数查出对应的控制压实干密度,经与实测压实干密度比较,可比较直观地得出实测压实干密度是否满足设计要求。

4 结 语

通过对砂砾石坝壳料现场松铺 80 cm 厚并采用 20 t 振动碾强振 20 遍时的压实干密度进行数理分析,分别得出最大干密度和最小干密度与砾石质量分数的关系曲线。根据设计相对密度控制指标,得出现场碾压质量控制曲线,为现场砂砾石坝壳料填筑碾压试验检测提供了更为直接的依据。值得注意的是,现场试验是根据旁多砂砾石料场特有的砂砾

石坝壳料进行的,试验数据及结论只适用于旁多水利枢纽坝体填筑工程中砂砾石坝壳料填筑碾压的质量控制,试验方法可供类似工程参考。为确保质量控制的连续性和一致性,大坝实际填筑碾压施工过程中一直使用现场试验时使用的振动压实设备。此外,若砂砾石坝壳料级配发生变化,相应的最大、最小干密度也会发生变化。因此,施工过程中要对压实干密度、最大干密度和最小干密度等施工参数进行动态控制,一般每填筑 30 万 m^3 对施工参数进行 1 次复核。当料场填筑料级配发生变化或在施工检测过程中出现较高频率的异常情况时,随时复核控制标准,以准确、真实地反映填料的实际压实效果。

参考文献:

- [1] SL237—1999 土工试验规程[S].
- [2] 李祥年.老龙口土石坝坝壳料相对密度曲线确定试验[J].水利水电技术,2008,39(12):25-26.
- [3] 季慧峰,金学哲,高瑞德.老龙口土石坝砂砾石填料现场碾压试验[J].水利水电施工,2007(增刊):12-13.
- [4] 曹社堂.超大粒径砂砾石坝料填筑标准的近似确定[J].陕西水力发电,1999,15(4):1-5.
- [5] 章天长.黄河积石峡水电站面板堆石坝砂砾料最大干密度确定方法试验研究[J].中国科技博览,2009(16):122-123.

(收稿日期 2010-11-01 编辑 骆超)

(上接第 35 页)

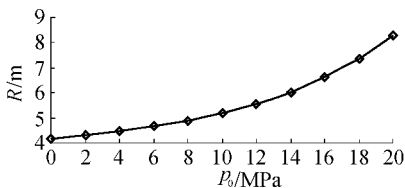


图2 R 与 p_0 的关系

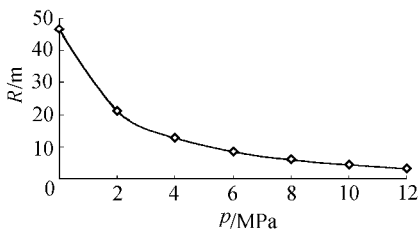


图3 R 与 p 的关系

不断扩大,渗流场对塑性区半径的影响越来越显著。从图3可知,塑性区半径随着支护反力的增大而减小。

4 结 语

a. 采用抛物线型 Mohr 强度准则对隧洞进行弹塑性分析,结果表明渗流场对塑性区半径以及弹性区和塑性区分界处的径向应力和切向应力都有影响。塑性区半径随着孔隙水压力的增大而增大。因此,在隧洞设计时,应充分考虑孔隙水压力的影响。

同时,塑性区的应力状态与支护反力也有密切关系。

b. 在考虑岩体的强度包络线为非线性条件下,对比分析考虑渗流和不考虑渗流 2 种情况的结果,为强度包络线近似于二次抛物线的围岩隧洞设计提供理论依据。

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:中国水利水电出版社,2004.
- [2] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [3] 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.
- [4] 张常光,张庆贺,赵均海.考虑应变软化、剪胀和渗流的水工隧洞解析解[J].岩土工程学报,2009,31(12):1941-1946.
- [5] 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.
- [6] 王建秀,杨立中,何静.深埋隧道衬砌水荷载计算的基本理论[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1339-1343.
- [7] 王星华,章敏,王随新.考虑渗流及软化的海底隧道围岩弹塑性分析[J].岩土力学,2009,30(11):3267-3272.
- [8] 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.

(收稿日期 2010-05-28 编辑 高建群)