

文章编号: 1000-7598 (2010) 06-1929-08

应变软化模拟与圆形隧道衬砌分析

王水林, 吴振君, 李春光, 汤 华

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 在岩土工程中, 有许多类岩体呈现应变软化特性。在应变软化过程中, 如果多个材料强度参数分析发生变化, 就很难给出软化问题的解析解。已有的文献研究表明, 在经典的弹塑性理论框架下, 模拟岩土介质的应变软化过程依然值得深入研究。利用应变软化材料强度参数随塑性应变增加而弱化的特点, 提出了将应变软化过程简化为一系列的脆性应力跌落与塑性流动过程的思想, 应变软化行为的模拟转化为一列脆塑性过程的分析。将这种模拟应变软化过程的思想方法用于求解均匀初始应力场中应变软化介质内的圆形隧道开挖问题, 研究了衬砌对减少岩土开挖扰动的作用以及考虑应变软化对衬砌内力的影响。数值结果表明, 对于应变软化岩土材料, 忽略其强度软化的行为是偏于危险的。

关 键 词: 应变软化; 脆塑性模型; 圆形隧道; 数值解; 屈服准则

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Modeling of strain-softening and analysis of a lining for circular tunnel

WANG Shui-lin, WU Zhen-jun, LI Chun-guang, TANG Hua

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In geotechnical engineering, many types of rock masses behave in a strain-softening way. It is not easy to get the closed form solution when strength parameters change in the strain-softening process. Literature review shows that the strain-softening problem has not been sufficiently analyzed within the framework of the classical theory of elastoplasticity. Based on the characteristics of strain-softening material in which the strength parameters change while the plastic strain increases, a new method for solving strain-softening problems is proposed. In the proposed numerical scheme, stress-strain curve in the strain-softening stage is approximated in a stepwise way; and the processes of the strain-softening is simplified as a series of stress drop and plastic flow during the increase of plastic strain. Therefore, modeling a strain-softening problem becomes a series of brittle-plastic analysis. The approach is employed to examine the circular opening excavation in a homogeneous and isotropic rock mass subjected to a hydrostatic in situ stress. The effect of lining on the plastic region and deformation in the surrounding rock mass is analyzed; and the influence of strain-softening behaviour is also discussed. Numerical results indicate that it is unsafe to ignore the strength decrease when tunnel excavation and liner installation are carried out in the strain-softening rock mass.

Key words: strain-softening; brittle-plastic model; circular tunnel; numerical solution; yield criterion

1 引 言

室内外岩土力学试验表明, 按照岩土材料应力-应变曲线后区行为划分, 岩土材料的本构关系可以划分为理想弹塑性、弹脆塑性、应变强化与应变软化关系。对于前 3 种本构关系的分析, 研究方法已经发展得非常成熟了。但对于应变软化本构关系的模拟, 由于峰值后区的负斜率, 导致传统弹塑性理论中增量应力-应变矩阵出现奇异或负定, 从而使得

数值解变得不稳定或者不可解^[1-2]。

在岩土工程的实践中, 多数岩、土体材料在工程载荷作用下表现为应变软化, 因此, 研究应变软化问题的解析解 (如果可以得到的话) 或者研究模拟应变软化行的数值方法有很重要的工程意义。

由于应变软化过程中应力、塑性应变与强度参数之间的复杂关系, 即使针对理想化的工程问题, 如在承受均匀地应力的岩体中开挖圆形隧道这样简单的平面应变问题 (以下简称“圆形洞室问题”), 也

收稿日期: 2009-08-19

基金项目: 岩土力学与工程国家重点实验室探索项目 (No. SKLQ005)。

第一作者简介: 王水林, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事地下工程与边坡数值模拟方面的工作。E-mail: slwang@whrsm.ac.cn

很难得到显式表达形式的解。除采用某些屈服准则（如 Tresca 屈服准则）或者对软化过程作适当的简化外，一般需要借助近似的数值方法求解上述圆形洞室问题。

对于该类问题，国内外有许多学者进行过研究。文献[3]的作者是较早对 Hoek-Brown 介质中的应变软化行为进行分析的学者，但因其忽略了塑性区弹性应变的变化，得到的圆形洞室位移量值存在较大误差；文献[4]采用 Tresca 屈服准则，推导了应变软化过程的解析解；文献[5-6]对 Mohr-Coulomb 介质中的应变软化过程进行了研究，其中考虑了黏结力和剪张角的下降，内摩擦角在软化变形过程中保持不变；文献[7]采用经典弹塑性理论，通过求自相似解（self-similar solutions）的方法，分析了圆形洞室问题在应变软化介质中的地层反应曲线（ground reaction curve）以及软化区与残余强度区的范围；文献[8]将圆形洞室围岩内形成的塑性区划分为一系列的同心圆环，对平衡方程和协调方程等进行差分离散，采用差分方法求解，得到了软化区与残余强度区尺寸以及相应的位移分布。

国内学者采用不同的屈服准则，对该问题也做过系统的研究。文献[9-10]考虑统一强度理论，软化段采用双折线模型，得到了洞室围岩弹塑性分析的统一解；文献[11]对文献[7-8]中给出的软化算例进行了研究。

在类似的“孔洞扩张问题”研究方面，基于三折线软化模型，文献[12]采用 Tresca 屈服准则、文献[13-14]采用 Mohr-Coulomb 屈服准则对土体孔洞（包括圆形与球形）扩张过程中的扩展压力、位移与塑性区等进行了分析，其中文献[14]对以往的研究进行了总体评述。

上述圆形孔洞问题虽然简单，但孔洞周围岩土体力学行为的定量研究不仅对岩土工程中可以简化为类似问题的变形预测与支护设计有指导意义（如圆形洞室稳定、石油工程中的井壁稳定及土力学中的扩孔等问题），而且研究成果能够作为检验数值分析方法与程序正确与否的经典考题。

本文根据应变软化材料强度参数随塑性应变增加而弱化的特点，介绍了一种模拟应变软化问题的思想方法，该方法将应变软化过程简化为一系列的脆性应力跌落与塑性流动的组合，模拟应变软化过程就变成求解一系列的脆塑性问题。将这种模拟应变软化过程的思想方法用于求解均匀初始应力场中应变软化介质内的圆形隧道开挖问题，分析了衬砌对减少岩土开挖扰动的作用以及应变软化对衬

砌内力的影响。数值结果说明，对于应变软化岩土材料，忽略其强度弱化对工程是偏于危险的。

本文研究限于求解应变软化介质的变形与塑性区分布，有关软化过程中的分叉或局部化问题^[15-16]超出本文考虑的范围。

2 岩土材料应力-应变后区曲线及本构关系数值模拟

2.1 岩土材料应力-应变后区曲线

如果将岩土材料在加载过程中的应力-应变关系划分为前区的弹性段与后区的塑性段，那么岩土材料的本构关系可以用图 1 中的 4 条曲线（即理想弹脆塑性曲线①、应变软化曲线②、理想弹塑性曲线③与应变强化曲线④）形象地描述。在经典的弹塑性理论框架下，不管采用什么样的屈服准则和塑性势，理想弹塑性、应变强化与弹脆塑性本构模型的数值模拟可以直接参考相关教材与文献（如文献[2, 17-18]），其中文献[2]对脆塑性岩体分析的原理与数值实现方法进行了系统的研究，同时指出了采用经典弹塑性理论分析应变软化问题时，应变软化的负斜率的绝对值必须小于某一个极限值，否则，弹塑性本构方程积分是没有意义的。

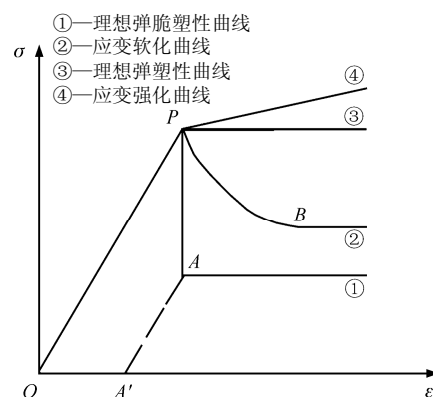


图 1 具有不同破坏后区的理想化的应力-应变曲线
Fig.1 Idealized stress-strain curves with different post failure behavior

2.2 脆塑性岩体与应变软化过程简化

图 1 中曲线①代表理想脆塑性岩体应力-应变关系，材料强度达到峰值时，当满足加载条件，材料由峰值强度跌落至残余强度，随后进入塑性流动阶段；曲线②代表峰值后区应变软化的过程曲线，由线弹性 OP 段、应变软化 PB 段与残余强度 BC 段组成。对于应变软化 PB 段，材料的强度随着与塑性变形相关的塑性软化参数的增加而降低。当塑性软化参数小于某一定义值时（如图 1 中 B 点对应的

塑性应变), 强度参数处于弱化阶段; 当塑性应变继续增加时, 强度参数达到残余值。

理想脆塑性应力-应变关系曲线与应变软化关系曲线有一个共同的特点, 那就是当峰值强度点对应的变形继续增加时, 介质的强度值开始下降。这一共同点给研究应变软化本构模型的数值实现提供了非常好的启示。

图2为图1中所示的典型的应变软化曲线, 岩体从峰值强度 P 点经历应变软化过程的 A_2 、 A_4 和 A_6 点直至到达残余强度点 B 。以材料从点 P 到点 A_2 的软化过程为例, 将强度随应变的软化简化为图中的应力脆性跌落 PA_1 段与塑性流动 A_1A_2 段, 那么强度随塑性应变的增加而降低的 PA_2 段的应变软化过程就转化为脆塑性过程中的脆性跌落 PA_1 段与塑性流动 A_1A_2 段。依此类推, 应力从峰值点 P 到残余强度点 B 的软化过程就转化为一系列的脆性与塑性交互发生的过程。而弹脆塑性过程的数值求解已经有了较为成熟的方法^[2, 17]。由此简化过程, 将应变软化问题的求解转化为求解一系列脆塑性问题, 避免了直接采用经典的弹塑性理论分析应变软化过程出现的所谓“软化率的极限值”的限制问题^[2]。

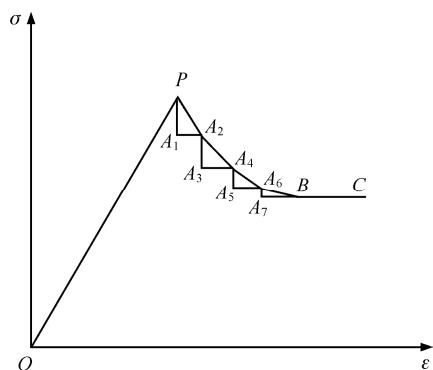


图2 应变软化段应力-应变曲线的简化
Fig.2 Simplification of stress-strain curve in strain-softening process

3 研究问题的描述与求解

图3表示在岩土体内开挖圆形隧道的平面应变问题, 圆形隧道表面有衬砌内压 p_{in} 作用。如果不考虑重力, 介质为均匀各向同性, 处于应力为 σ_0 的初始应力场中, 图示问题可以简化为轴对称问题 (所有的力学量只是半径 r 的函数, 与极角 θ 无关)。当圆形洞壁内压 p_{in} 小于某一个极限值 p_c , 洞室围岩体内将形成一定范围的塑性区。支护内压 p_{in} 越小, 塑性区越大。

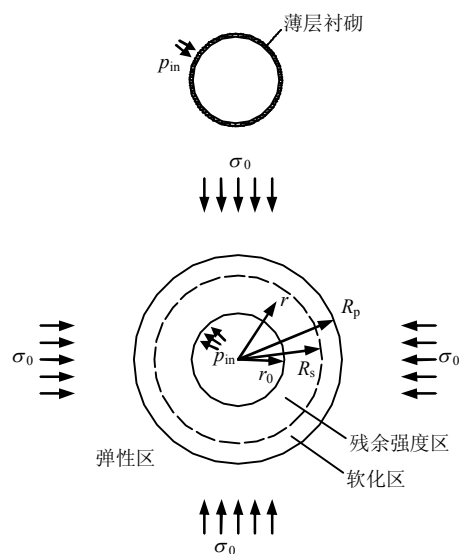


图3 无限区域岩体内的圆形洞室
Fig.3 A circular opening in an infinite rock mass

在塑性区外部的弹性区内有现成的解析解 (Lame 解); 当塑性区内岩体应力-应变关系为弹脆塑性或理想弹塑性时, 针对 Mohr-Coulomb 与 Hoek-Brown 屈服准则, 文献[19]给出了完整的解析解的表示式。如果塑性区内岩体呈现应变软化行为, 那么塑性区有残余强度区和应变软化区 (图3)。考虑软化过程中强度参数弱化时 (如 Mohr-Coulomb 屈服准则中 c 、 ϕ 等随塑性变形的增加而减少), 采用数值方法求解是比较好的选择。

数值求解过程中, 将内压从 p_c 下降至 p_{in} 分成 n 次, 即 $p_c = p_{in} + \sum_{i=1}^n \Delta p_i$ 。当内压下降 Δp_1 时, 即内压变为 $p_c - \Delta p_1$, 洞周形成一宽度为 $r_1 - r_0$ 的塑性环 (见图4(a)中水平线阴影部分); 当内压进一步下降 Δp_2 , 塑性环的宽度也将增加, 出现一个宽度为 $r_2 - r_1$ 的新塑性环 (见图4(b)中左倾斜线阴影部分), 同时, 宽度为 $r_1 - r_0$ 的塑性环内继续发生塑性变形; 依次类推, 当内压下降 j 次, 洞壁内压 $p_i = p_c - \sum_{k=1}^j \Delta p_k$ 时, 围岩内塑性区可以看成 j 个塑性圆环, 第 j 个塑性圆环的内外半径分别为 r_{j-1} 和 r_j (见图4(c)中右倾斜线阴影部分)。每一个塑性环在内压的变化过程中, 经历一系列的脆性应力跌落与塑性流动过程, 强度参数不断下降, 直至进入残余强度。例如, 洞壁内压从 p_c 经过 n 次下降至 p_{in} 时, 宽度为 $r_1 - r_0$ 的塑性环经过 Δp_1 、 Δp_2 、 $\cdots$ 、 Δp_n 共 n 次内压的下降, 通过 n 次脆塑性变形分析, 其强度参数随着塑性应变的增加逐渐下降, 直至进入残余强度; 宽度为 $r_2 - r_1$ 的塑性环经过 Δp_2 、 $\cdots$ 、 Δp_n 共 $n-1$ 次内压的下降,

通过 $n-1$ 次脆塑性变形分析, 其强度参数同样随着塑性应变的增加逐渐下降, 直至残余强度。

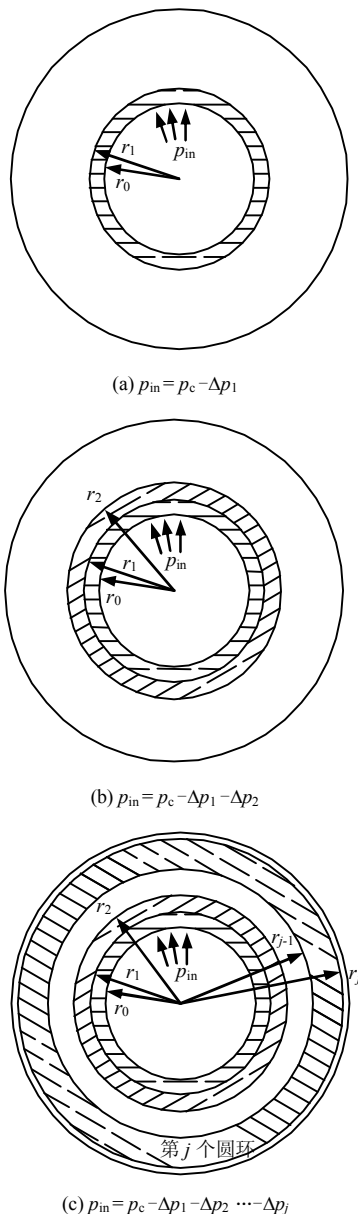


图 4 围岩内塑性区的演化

Fig.4 Plastic regions around a circular opening

下面以 Mohr-Coulomb 屈服准则为例, 给出脆塑性过程中求解应变软化问题的增量格式。

采用增量形式, 对于第 i 次载荷增量 (也就是洞壁内压第 i 次下降 Δp_i), 塑性区内岩体应力的变化为 $\Delta\sigma_{r(i)}$ 和 $\Delta\sigma_{\theta(i)}$, 记第 i 次内压下降前塑性区内岩体的应力为 $\sigma_{r(i-1)}$ 和 $\sigma_{\theta(i-1)}$ 。

在塑性区内, 岩体应力增量 $\Delta\sigma_{r(i)}$ 和 $\Delta\sigma_{\theta(i)}$ 必须满足平衡方程、屈服准则和力边界条件。

(1) 平衡方程 (不考虑重力的影响)

$$\frac{d(\Delta\sigma_{r(i)})}{dr} + \frac{\Delta\sigma_{r(i)} - \Delta\sigma_{\theta(i)}}{r} = 0 \quad (1)$$

(2) 屈服准则

在圆形洞室平面应变问题中, 塑性区内第 1 主应力为 σ_{θ} , 第 3 主应力为 σ_r 。第 i 次载荷增量过程中, 应力增量 $\Delta\sigma_{\theta(i)}$ 、 $\Delta\sigma_{r(i)}$ 满足:

$$\sigma_{\theta(i-1)} + \Delta\sigma_{\theta(i)} = \alpha_i (\sigma_{r(i-1)} + \Delta\sigma_{r(i)}) + Y_i \quad (2)$$

式中: α_i 和 Y_i 为与材料强度参数 (黏聚力 c 与内摩擦角 φ) 相关的参数, $\alpha_i = (1 + \sin \varphi_i) / (1 - \sin \varphi_i)$, $Y_i = 2c_i \cos \varphi_i / (1 - \sin \varphi_i)$ 。对于应变软化介质, 由于 c 和 φ 是塑性应变的函数, 所以 α_i 和 Y_i 在塑性区不同的位置, 其大小不一样, 是半径 r 的函数。

如果选择小的载荷增量步, 与载荷增量步对应的塑性环宽度就很小。以塑性环为研究对象, 在每一个塑性环内, 认为强度参数与半径 r 无关, 利用式 (1)、(2) 和塑性环的内边界或外边界条件, 就可以得到所在塑性环内的应力分布。

(3) 边界条件

如图 4 所示, 当圆形洞壁内压第 i 次的下降量为 Δp_i 时, 对第 $j(j < i)$ 个塑性环而言, 其内边界 (半径为 r_{j-1}) 或外边界 (半径为 r_j) 上的压力 (径向应力) 是未知的。但对于第 1 个塑性环, 其内边界上的径向应力变化量已知, 则有:

$$\Delta\sigma_{r(i)} \Big|_{r=r_0} = \Delta p_i \quad (3)$$

由此利用式 (1)、(2) 和第 1 个塑性环的内边界条件式 (3), 就可以得到第 1 个塑性环内的应力增量 $\Delta\sigma_{r(i)}$ 和 $\Delta\sigma_{\theta(i)}$ 的值, 将得到的第 1 个塑性环外边界上的径向应力增量作为计算第 2 个塑性环的边界条件, 即可计算该塑性环内的应力增量 $\Delta\sigma_{r(i)}$ 和 $\Delta\sigma_{\theta(i)}$ 。依次类推, 圆形洞壁内压下降 Δp_i 后塑性区内各塑性环的应力就全部确定了。

当载荷增量步变小, 相应的计算结果收敛到真实解。

(4) 塑性势函数与围岩位移求解

得到塑性区各塑性环内的应力增量后, 其对应的弹性应变增量由虎克定律计算, 塑性应变增量由总应变增量减去弹性应变增量计算。

塑性区内的应变增量是弹性应变增量和塑性应变增量的和, 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta\epsilon_r &= \Delta\epsilon_r^p + \Delta\epsilon_r^e \\ \Delta\epsilon_{\theta} &= \Delta\epsilon_{\theta}^p + \Delta\epsilon_{\theta}^e \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

塑性区内的塑性应变需要通过塑性流动法则确定。参照屈服准则构造塑性势函数, 得

$$G(\sigma_\theta, \sigma_r, \eta) = \sigma_\theta - \beta \sigma_r + Z \quad (5)$$

式中: $\beta = (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi)$; ψ 为材料的剪张角。如果 ψ 在应变软化过程中发生变化, 也可认为 ψ 是塑性剪应变的函数。

由上面的塑性势函数式 (5), 塑性区的径向与环向塑性应变增量有关系式:

$$\Delta \varepsilon_r^p + \beta \Delta \varepsilon_\theta^p = 0 \quad (6)$$

对于本文研究的小变形问题, 径向应变增量与环向应变增量和位移增量 Δu 之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_r &= \frac{d(\Delta u)}{dr} \\ \Delta \varepsilon_\theta &= \frac{\Delta u}{r} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由此就可以得到求解位移增量的微分方程:

$$\frac{d(\Delta u)}{dr} + \beta \frac{\Delta u}{r} = \Delta \varepsilon_r^e + \beta \Delta \varepsilon_\theta^e \quad (8)$$

式中: $\Delta \varepsilon_r^e$ 和 $\Delta \varepsilon_\theta^e$ 由虎克定律确定。如果所求解的塑性环位移增量边界条件已知, 那么式 (8) 中 Δu 就可以通过数值积分得到。

在弹塑性交界面上的位移（规定位移指向圆心的方向为正）由 Lamé 解确定：

$$u_c = R_p(\sigma_0 - p_v)/(2G) \quad (9)$$

式中: G 为剪切模量; σ_0 为均匀初始地应力值; p_y 为极限内压值, (对于 Morh-Coulomb 屈服准则, $p_y = \frac{(2\sigma_0 - Y)}{(\alpha + 1)}$); R_p 为塑性区半径。那么, 求解每

一次载荷增量对应的各塑性环内位移增量时, 从与弹性区相邻的最外面的塑性环开始, 逐个进行塑性环计算, 以求解得到的塑性环内边界位移作为下一个塑性环位移增量边界条件。由此进一步计算各塑性环内的位移增量、塑性应变增量以及累积塑性应变。

(5) 围岩与衬砌作用分析

考虑混凝土喷锚支护, 洞室衬砌层可以作为弹性厚壁圆筒处理, 围岩和衬砌交界面的压力 p_{in} 与变形 u 保持线性关系^[20]。

$$p_{\text{in}} = k u \quad (10)$$

式中: k 为衬砌层弹性系数, 与衬砌材料的弹性模量、泊松比、衬砌层的半径和厚度有关^[20]。

在计算过程中,先假设衬砌支护压力为 0,由表达式(1)~(9),根据开挖载荷计算开挖变形,由式(10)计算衬砌施加在围岩与衬砌交界面的压力;再重复上述计算过程直至结果收敛。

(6) 强度参数的演化

在上述多重迭代计算中, 岩体材料的峰后强度参数随着软化参数 (本文定义为塑性剪应变 $\eta = \varepsilon_1^p - \varepsilon_3^p$) 的增加逐渐降低。假设各强度参数在软化过程中与软化参数呈线性关系, 以 ω 代表 Mohr-Coulomb 屈服准则的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和剪胀角 ψ , ω 与 η 之间的关系可以表示为

$$\omega(\eta) = \begin{cases} \omega_p - (\omega_p - \omega_r) \frac{\eta}{\eta^*}, & 0 < \eta < \eta^* \\ \omega_r, & \eta \geq \eta^* \end{cases} \quad (11)$$

塑性剪应变 η^* 可以通过试验测定或者工程经验确定。各强度参数与塑性剪应变 η 之间也可以有不同函数关系。

有关该问题更详细地求解过程与算法,可参考文献[11]。

4 数值算例与结果分析

表 1 给出了求解带衬砌的圆形洞室问题采用的几何与力学参数, 岩体材料遵守 Morh-Coulomb 屈服准则。当软化参数 $\eta^*=0$ 时, 应变软化模型蜕化为脆塑性模型; 而当 η^* 理论上趋于无穷大时 (这里 η^* 取 1.0 即可), 应变软化模型蜕化为弹塑性模型。

首先, 计算没有衬砌作用时围岩表面的位移与屈服区半径, 表 2 给出了无量纲形式的计算结果。从表 2 中可以看出, 对于圆形洞室问题, 不同的本构模型计算得到的塑性区范围与洞室表面位移相差很大。因此, 对于表现出应变软化或者脆塑性行为的岩体材料, 必须考虑这种差异。

表 1 几何与力学参数
Table 1 Geometric and mechanical parameters

[illegible]

表 2 不同本构模型对应的围岩表面
无量纲位移与屈服区半径

Table 2 Dimensionless displacement and plastic radius
corresponding to different models

本构模型	$\frac{uE}{r_0\sigma_0}$	$\frac{r_p}{r_0}$
弹塑性模型	3.35	1.61
应变软化模型	8.59	2.27
脆塑性模型	13.50	2.69

4.1 介质为理想弹塑性体时围岩与衬砌作用分析

当考虑洞室衬砌支护时, 围岩与衬砌共同承受开挖载荷的作用。在此将岩体视为理想弹塑性材料, 混凝土衬砌看成为弹性体, 衬砌厚度取 20 cm。衬砌体交界面的压力与变形满足式 (10), 衬砌与洞室围岩接触面上位移与应力连续。

一般而言, 洞室开挖与衬砌支护存在一定的时间差。衬砌支护施工完成并开始发挥作用时, 围岩变形有一部分已经释放。变形释放量大小与衬砌支护体的受力等密切相关。以围岩表面没有支护力作用时最大无量纲变形值 3.35 (见表 2) 作为参考, 对应的径向位移 $u=1.341$ cm。位移释放率为 1 时, 指开挖载荷完全释放 (即围岩表面无量纲变形值达到 3.35) 后进行衬砌支护, 此时衬砌体不承受开挖载荷的作用, 这是一种理想情况 (计算数据见表 3 中最后一行); 位移释放率为 0 时, 指开挖卸载引起的位移没有释放时进行衬砌支护, 开挖载荷完全由衬砌与围岩体共同承担, 这也是一种理想情况 (计算数据见表 3 中第一行)。表 3 给出了不同位移释放率所对应的洞室围岩表面变形 u 、塑性区半径 r_p 、作用在衬砌与围岩交界面上的压力 p_1 以及混凝土衬砌体环向压应力 σ_t 。从给出的计算数据可以看出, 衬砌的作用是很明显的。以位移释放率等于 0.5 为例, 即支护开始发挥作用之前位移 ($uE/(r_0\sigma_0)$) 已经释放了 50%。衬砌与围岩体进入平衡状态时洞室围岩表面无量纲位移为 2.15, 是无支护状态对应变形的 64%; 无量纲塑性区大小 (r_p/r_0) 为 1.38, 是无支护状态下的 86%; 作用在衬砌径向的压力为 1.19 MPa, 衬砌体环向压应力为 17.8 MPa。

表 3 计算结果说明, 位移释放率越小 (即支护越早), 围岩体变形与塑性区越小, 说明衬砌支护作用的效果越好, 但作用在衬砌径向与环向方向的压力也越大。当位移释放率不超过 0.4 时, 衬砌体环向方向上的压应力均大于 23 MPa。如果衬砌混凝土等级低于 C30, 其对应的强度标准值小于 20.1 MPa, 这说明在开挖变形释放率过小的情况下, 为保证衬砌体的安全, 要么增加衬砌厚度, 要么提高衬砌混

凝土强度等级。但如果在变形释放率为 0.5~0.6 的情况下开始衬砌支护, 衬砌既能在一定程度上限制围岩变形、减少围岩塑性区范围, 也不至于因压力过大而破坏。这与新奥法设计施工中的“充分发挥岩体的自承载能力, 又允许并控制岩体的变形”思想是一致的。事实上, 从工程的角度而言, 支护更重要的作用则是限制围岩体变形的同时使支护结构和围岩体形成一个支护体系, 提高了整体的承载能力。

表 3 不同位移释放率对应的围岩与衬砌体力学行为
(弹塑性本构模型)

Table 3 The behavior of lined circular tunnel with
different displacement release rates (perfectly plastic model)

位移释放率	$\frac{uE}{r_0\sigma_0}$	$\frac{r_p}{r_0}$	p_1/MPa	σ_t/MPa
0.0	1.38	1.19	3.42	51.4
0.1	1.50	1.22	2.89	43.3
0.2	1.63	1.26	2.39	35.9
0.3	1.79	1.30	1.95	29.2
0.4	1.96	1.34	1.54	23.2
0.5	2.15	1.38	1.19	17.8
0.6	2.36	1.43	0.87	13.1
0.7	2.59	1.47	0.61	9.0
0.8	2.83	1.52	0.37	5.6
0.9	3.09	1.57	0.17	2.5
1.0	3.35	1.61	0.0	0.0

4.2 呈现应变软化行为时围岩与衬砌的作用分析

为了与理想弹塑性岩体的计算结果进行比较, 现将岩体视为有应变软化行为的介质, 以理想弹塑性模型对应的最大无量纲位移值 3.35 为参考变形来计算位移释放率。表 4 给出了应变软化岩体不同位移释放率所对应的围岩表面变形、塑性区半径、衬砌外表面的压力和衬砌体环向压应力。

表 4 不同位移释放率对应的围岩与衬砌体力学行为
(应变软化本构模型)

Table 4 The behavior of lined circular tunnel with
different displacement release rates (strain-softening model)

位移释放率	$\frac{uE}{r_0\sigma_0}$	$\frac{r_p}{r_0}$	p_1/MPa	σ_t/MPa
0.0	1.54	1.22	3.82	57.3
0.1	1.70	1.27	3.40	51.0
0.2	1.89	1.31	3.03	45.5
0.3	2.10	1.36	2.71	40.7
0.4	2.32	1.41	2.43	36.5
0.5	2.56	1.45	2.19	32.8
0.6	2.80	1.50	1.96	29.4
0.7	3.05	1.55	1.76	26.4
0.8	3.31	1.59	1.57	23.6
0.9	3.58	1.64	1.41	21.1
1.0	3.86	1.68	1.26	18.9

在没有衬砌支护的情况下, 应变软化模型得到的围岩变形与塑性区半径大于弹塑性模型得到的相应值(见表2), 即使位移释放率为1(对应的已释放的无量纲变形值为3.35)时进行衬砌支护施工, 由于应变软化围岩体仍继续变形, 因此, 衬砌体上仍然承担来自围岩的压力。在相同的位移释放率下, 比较表3与表4中相应的各力学量可以看出, 表4中围岩体变形、塑性区大小、衬砌上的压力与环向压应力等都大于表3中对应的量值。这说明如果岩体表现为应变软化时, 采用弹塑性模型计算得到的结果是偏于危险的。如果应变软化岩体受到扰动后, 其强度参数随时间出现弱化现象, 那么按照弹塑性理论计算结果设计的衬砌体, 在施工结束后承受的压力有可能超过其设计强度。以位移释放率为0.5的情况为例, 弹塑性模型计算得到的衬砌体环向方向上的压应力为17.8 MPa(见表3), 而按表1中应变软化岩体力学参数计算得到的衬砌压应力为32.8 MPa(见表4), 因此, 如果考虑岩体的应变软化行为的话, 为保证衬砌体的安全, 在衬砌材料强度等级不变的情况下就要增加衬砌体的厚度。

5 结 论

(1) 岩土工程中, 岩土体呈现应变软化行为是比较常见的现象, 本文提出了一种模拟应变软化过程的思想方法, 针对 Morh-Coulomb 屈服准则, 编制了计算程序, 并对带衬砌的圆形洞室问题进行了分析。

(2) 岩土体受到扰动后可能因各种因素的影响而出现强度弱化的行为, 通过弹塑性模型计算结果与应变软化模型计算结果的对比, 说明了不考虑强度软化对衬砌支护的作用有可能使施工结束时完好的衬砌体在后期出现破坏的现象。由此也说明了对于应变软化岩土材料, 忽略其强度软化行为得到的计算结果是偏于危险的。

(3) 本文给出的数值算例虽然比较简单, 但得到的结果与某些实际工程现象的定性分析是吻合的, 对工程有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 赵启林, 牛海清, 卓家寿. 应变软化材料的几个基本问题研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2001, (3): 73—77.
ZHAO Qi-lin, NIU Hai-qing, ZHUO Jia-shou. Basic problems of strain-softening material[J]. **Hydro-science and Engineering**, 2001, (3): 73—77.
- [2] ZHENG H, LIU D F, LEE C F, et al. Principle of analysis

- of brittle-plastic rock mass[J]. **International Journal of Solids & Structures**, 2005, 42(1): 139—158.
- [3] BROWN E T, BRAY J W, LADANYI B, et al. Ground response curves for rock tunnels[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 109: 15—39.
- [4] CARRANZA TORRES C. Self similarity analysis of the elastoplastic response of underground openings in rock and effects of practical variables[D]. [S. l.]: University of Minnesota, 1998.
- [5] PANET M. Understanding deformations in tunnels[C]// *Comprehensive Rock Engineering* (1). Oxford: Pergamon, 1993: 663—90.
- [6] GUAN Z, JIANG Y, TANABASI Y. Ground reaction analyses in conventional tunneling excavation[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2007, (22): 230—237.
- [7] ALONSO E, ALEJANO L R, VARAS F, et al. Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behavior[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2003, (27): 1153—1185.
- [8] LEE Y K, PIETRUSZCZAK S. A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, (23): 588—599.
- [9] 蒋明镜, 沈珠江. 考虑剪胀的线性软化柱形孔扩张问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(6): 550—557.
JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. On expansion of cylindrical cavity with linear softening and shear dilation behavior[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(6): 550—557.
- [10] 范文, 俞茂宏, 陈立伟, 等. 考虑剪胀及软化的洞室围岩弹塑性分析的统一解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3213—3220.
FAN Wen, YU Mao-hong, CHEN Li-wei, et al. Unified elastoplastic solution for surrounding rocks of openings with consideration of material dilatancy and softening[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3213—3220.
- [11] WANG SHUILIN, YIN XIAOTAO, TANG HUA, et al. A new approach for analyzing circular tunnel in

- strain-softening rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(1): 170—178.
- [12] 梁发云, 陈龙珠. 应变软化 Tresca 材料中扩孔问题解答及其应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 261—265.
LIANG Fa-yun, CHEN Long-zhu. Analytical solution to cavity expansion in strain-softening soils with Tresca yield criterion and its applications[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 261—265.
- [13] 王晓鸿, 王家来, 梁发云. 应变软化岩土材料内扩孔问题解析解[J]. 工程力学, 1999, 16(5): 71—76.
WANG Xiao-hong, WANG Jia-lai, LIANG Fa-yun. Analytical solution to expansion of cavity in strain-softening materials[J]. **Engineering Mechanics**, 1999, 16(5): 71—76.
- [14] 胡士兵, 王金昌, 朱向荣. 线性软化土体中球孔扩张问题的解析解[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(9): 1503—1507.
HU Shi-bing, WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Analytical solution to cavity expansion in linear softening soil[J]. **Journal of Zhejiang University(Engineering Science)**, 2007, 41(9): 1503—1507.
- [15] 钱建固, 吕玺琳, 黄茂松. 平面应变状态下土体的软化特性与本构模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 617—622.
- QIAN Jian-gu, LÜ Xi-lin, HUANG Mao-song. Softening characteristics of soils and constitutive modeling under plane strain condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 617—622.
- [16] 陈新, 杨强, 周维垣. 岩土材料塑性损伤模型及拱坝的变形局部化分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 865—870.
CHEN Xin, YANG Qiang, ZHOU Wei-yuan. An elastoplastic damage model for geomaterials and analysis of strain localization of arch dams[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 865—870.
- [17] 沈新普, 岑章志, 徐秉业. 弹脆塑性软化本构理论及其数值计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1995, 35(2): 22—27.
SHEN Xin-pu, CEN Zhang-zhi, XU Bing-ye. The characteristics of elasto-brittle-plastic softening constitutive theory and its numerical calculation[J]. **Journal of Tsinghua University(Sci. & Tech.)**, 1995, 35(2): 22—27.
- [18] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L. The finite element method[M]. [S. l.]: McGraw-Hill Book Company, 1991.
- [19] PARK K H, KIM Y J. Analytical solution for a circular opening in an elasto-brittle-plastic rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43: 616—622.
- [20] 王龙甫. 弹性力学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

书 讯

复杂地质条件下隧道施工安全保障技术 (交通版)

交通运输类, 林才奎、杨红军等编著, 16 开, 340 千字, 213 页, 平装, 估价: 20 元, 2010 年 4 月出版, ISBN: 978—7—114—08310—5

本书是根据广东交通厅科研项目“复杂地质条件下隧道施工安全保障技术研究”的研究成果总结而成, 论述了隧道不良地质体的超前预报技术及评价方法, 内容包括隧道不良地质体及其引起的地质灾害、隧道地质超前预报综合技术、隧道施工中不良地质体的评价策略评价模型及评价方法、隧道施工中不良地质预警及保障体系、隧道不良地质体及地质灾害处治措施数据库管理系统。读者对象: 隧道工程设计、施工和建设管理技术人员。

路基病害整治 (交通版)

交通运输类, 聂忠权主编, 16 开, 390 千字, 337 页, 平装, 估价: 32 元, 2010 年 4 月出版, ISBN: 978—7—114—08306—8

本书共分三部分, 即常见路基病害识别、病害整治设计、路基病害整治施工组织设计。其中, 路基病害整治设计又包括软土路基病害类型成因及防治措施、黄土路基病害类型成因及防治措施、膨胀土路基病害类型成因及防治措施、冻土路基病害类型成因及防治措施、高填方路基病害成因及防治措施、路基横向不均匀沉降病害类型成因及防治措施、路基纵向不均匀沉降病害类型成因及防治措施、路基边坡病害整治。读者对象: 相关读者。

(摘自 新华书目报·科技新书目)