

考虑松动效应的松动圈厚度计算方法

周 清, 朱洪威

(江西理工大学 a. 江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室; b. 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 为研究隧道工程中围岩的开挖损伤与采动应力耦合作用对围岩的影响, 基于广义 Hoek - Brown 强度准则, 建立考虑围岩松动效应的围岩松动区厚度解析解表达式, 并提出 3 种强度准则参数的确定方式。通过对既有工程案例的对比分析, 验证所提出解析解的准确性。结果表明: 1) 采用组合 3 确定的强度准则参数计算得到的结果显著优于其他两种组合所对应的结果; 2) 在不同开挖半径的等效方法下, 基于组合 3 计算得到的结果均具有较高的精度; 3) 相较于有限差分法的迭代解, 本文解析解的计算偏差小于 2%, 且无需进行复杂数值运算。本文研究成果可为隧道围岩稳定性评价提供快速的分析工具。

关键词: 隧道工程; 应变软化; 松动区厚度; 解析解; 参数折减; 塑性区

中图分类号: U452.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 8993(2025)07 - 0014 - 06

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.07.083

A loosening circle thickness calculation method considering loosening effect

ZHOU Qing, ZHU Hongwei

(Jiangxi University of Science and Technology a. Jiangxi Key Laboratory of Environmental Geotechnical and Engineering Disaster Control; b. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: In order to study the influence of the coupling effect of excavation damage and mining stress on the surrounding rock in tunnel engineering, based on the generalized Hoek-Brown strength criterion, the analytic solution expression of the thickness of the surrounding rock loosening zone considering the loosening effect of the surrounding rock is established, and three methods for determining the parameters of the strength criterion are proposed. Through comparative analysis of existing engineering cases, the accuracy of the proposed analytic solution is verified. The results show that: 1) The results calculated by the strength criterion parameters determined by combination 3 are significantly better than those corresponding to the other two combinations; 2) Under the equivalent method of different excavation radii, the results calculated based on combination 3 have high accuracy; 3) Compared with the iterative solution of the finite difference method, the calculation deviation of the analytic solution in this paper is less than 2%, and there is no need for complex numerical operations. The results can provide a rapid analysis tool for the evaluation of tunnel surrounding rock stability.

Key words: tunnel engineering; strain softening; thickness of the loose zone; analytic solution; parameter reduction; plastic zone

随着经济建设的高速发展和矿山浅部资源的逐渐枯竭, 深部地下空间已成为国家未来发展的

重要战略资源。在煤炭及矿产资源的深部开采过程中, 受采动应力、开挖损伤以及地应力等多重

收稿日期: 2024 - 10 - 29

作者简介: 周 清(2001—), 男, 硕士研究生, 从事道路工程、隧道稳定性等方面的研究。

通信作者: 朱洪威(1977—), 男, 副教授, 从事道路工程、隧道结构的耐久性、工程项目全寿命周期管理等方面的研究。

因素的影响, 隧道断面往往会出现较大的塑性变形与破坏。因此, 如何快速确定开采隧道的塑性变形范围(即松动圈厚度)成为深部地下空间开发中的关键环节。

近年来, 许多研究人员对围岩松动圈厚度的确定展开了深入研究。吴锋等^[1]基于围岩弹塑性理论, 推导了结合 Sidoroff 损伤模型的围岩应力损伤下松动圈厚度解析解, 并通过整合 Mohr-Coulomb 准则与损伤演化理论进一步提高了解析解的精确性。ZARAFARD^[2]以广义 Hoek-Brown 强度准则为基础, 开发了一种半数值解方法, 用于爆破损伤区的应变软化建模。该方法通过将理论分析与数值计算结合, 实现了对隧道周边应力-应变分布的高精度模拟, 但由于其较高的技术门槛, 在工程推广方面受到了一定限制。WANG 等^[3]基于统一强度准则, 系统论证了深层高应力软岩隧道进行弹塑性力学分析的必要性, 并构建了应力-应变分布的数值仿真模型。尽管其应力演化趋势与 LEEYKY 等^[4]模型预测结果吻合良好, 但数值方法较低的计算效率严重制约了其在工程快速评估的适用性。SHENG 等^[5]利用统一强度准则, 提出了双轴应力场下的弹-脆-塑性本构模型半解析解法, 并发展了一种改进型等效圆近似方法。虽然该方法受到弹-脆-塑性本构模型固有理论限制的制约, 但其计算效率较 WANG 等^[3]的方法更高。吴佳俊等^[6]采用 FLAC 3D 软件建立三维地质模型, 模拟隧道循环开挖过程, 研究表明: 数值模拟可有效预测围岩响应, 但其结果需通过实测数据进行参数反演修正; 此外, 该方法的工程应用中存在显著的技术壁垒。王俊杰等^[7]通过软岩峰后刚度与强度统一劣化模型及统一强度准则, 得到了超前导洞及正洞围岩的松动区厚度弹塑性解, 并通过摩尔-库仑强度参数与 Hoek-Brown 强度准则参数定义软化弹性模量, 为隧道围岩软化研究提供了重要参考。经来旺等^[8]研究了巷道围岩在应力作用下的软化与扩容行为及其对巷道变形和破坏的影响, 并使用 Zienkiewicz-Pande 准则和非关联流动法则, 考虑围岩软化与扩容特性, 推导出含中间主应力的圆形巷道弹塑性解析解, 进而分析了中间主应力对围岩松动圈厚度的影响。

综上所述, 隧道围岩松动圈厚度的理论分析与计算受多方面因素的影响: 1) 不同强度准则的选取会导致推导结果出现较大差异; 2) 在理论分析中, 若考虑围岩的软化现象, 则强度准参数会发生不同程度的折减, 这一现象会显著影响围岩松动圈厚度的分析结果, 导致其与实际值之间存在较大误差; 3) 在工程实践中, 尽管其某些计算方法具有较高的精度, 但由于其复杂性, 难以直接应用于实际工程。因此, 本文提出了一种基于广义 Hoek-Brown 强度准则并考虑岩石软化效应的围岩松动圈厚度计算方法, 推导出简洁的方程, 并在此基础上对强度准则参数进行折减。通过两个工程算例对该方程及方法进行论证, 证明其在围岩松动圈厚度计算方面的准确性, 以期为隧道工程松动区厚度计算手段方面提供一定的借鉴与参考。

1 广义 Hoek-Brown 强度准则

在岩石力学领域, Hoek-Brown(H-B)强度准则^[9]基于大量岩石试验数据和研究成果, 并通过数学统计与分析方法推导得出。该准则揭示了岩体破坏时岩体强度与岩体参数之间的关系, 相较于传统的 Drucker-Prager 准则和 Mohr-Coulomb 准则, H-B 强度准则更适用于岩石材料的强度评估。其表达式如下。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: σ_1 为最大压应力, MPa; σ_3 为最小压应力, MPa; σ_c 为岩石单轴抗压强度, MPa; m_i 为针对不同岩石的无量纲经验参数, 反映岩石的软硬程度, 取值范围为 0.001 ~ 25.000。

1997 年, HOEK 等^[10]对 H-B 强度准则进行了改进, 使其适用于岩体, 从而提出了广义 Hoek-Brown 岩体强度准则(简称 GHB 强度准则)。该准则的表达式如下。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (2)$$

式中: m_b 、 a 为针对不同岩体的无量纲经验参数; s 为反映岩体破碎程度的参数, 取值范围为 0 ~ 1.0, 对于完整的岩体(即岩石), 取 1.0。

对于 a 、 s 以及 m_b 三者的确定, HOEK 等通

过一系列试验, 最终于 2002 年提出了基于地质强度指标 X_{GSI} 与扰动因子 D 确定岩体参数的取值方法^[11]。该取值方法的表达式如下。

$$\begin{cases} a = 0.5 + (e^{-X_{GSI}/15} - e^{-20/3})/6 \\ m_b = m_i e^{(X_{GSI}-100)/(28-14D)} \\ s = e^{(X_{GSI}-100)/(9-3D)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: D 为工程扰动程度, 取值范围为 $0 \sim 1.0$ 。

2 考虑围岩软化的强度准则参数折减

经来旺等^[8]指出, 研究表明岩石在达到峰值应力后会出现软化现象, 其研究结果也证实了围岩的应变软化行为在分析围岩松动圈厚度时不可忽视。本文所研究断面位于掌子面影响范围之外, 经过应力重分布后, 侧压力系数为 1。对围岩作出假设: 1) 断面位于隧道掌子面影响范围之外, 不考虑掌子面的空间效应; 2) 隧道承担静水压作用, 侧压力系数为 1; 3) 围岩材料在开挖过程中会产生软化作用。隧道开挖力学模型如图 1 所示, 隧道开挖半径为 r_0 (m), 所处原岩应力为 P_0 (MPa), 洞壁的支护力为 P_i (MPa)。开挖卸荷后, 根据软化程度分为破碎区 (I 区)、塑性区 (II 区) 和弹性区 (III 区), 其中塑性区半径为 r_1 , 破碎区与塑性区共同组成松动圈。

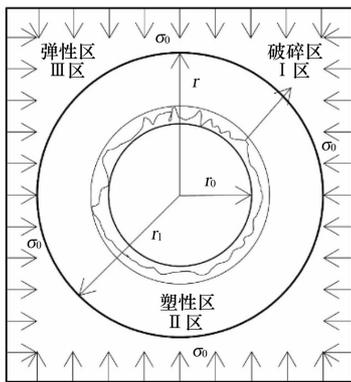


图 1 隧道开挖力学模型

由力学模型可知, 围岩松动圈厚度 B 的计算式:

$$B = r_1 - r_0 \quad (4)$$

隧道开挖过程中常用的开挖方式包括爆破开挖法^[12]、铣挖法^[13]、盾构开挖^[14]等。这些开挖方式均会对断面围岩均会造成较大损伤, 其中爆破开挖方式对强度准则参数取值的影响最为显著。

室内试验表明, 岩体材料在承受外力时会出

现软化或硬化现象。工程实践中发现, 隧道断面围岩开挖完成后, 围岩通常会表现出软化现象, 从而影响强度准则参数的取值。

在隧道断面研究中, 通常假定强度准则为常数, 但未充分考虑围岩内强度准则参数降低的影响, 也未对未扰动区所测得的强度准则参数进行合理折减。这是强度准则参数在应用于隧道松动圈厚度分析时的主要不足, 而这种不足往往源于强度准则参数确定方法的缺陷。式(3)中已给出了强度准则参数的计算公式, 不难发现, 强度准则参数的确定与扰动因子和工程地质强度指标密切相关。然而, 由于围岩软化现象的存在, 围岩中的强度准则参数会发生降低, 因此可以推断围岩中的扰动因子和工程地质强度指标也应相应降低。

韩龙强等^[15]研究了岩体的非线性破坏特征, 未采用传统的强度折减法对 Mohr - Coulomb 准则进行研究, 而是结合 H - B 强度准则进行了折减分析。在研究中引入了 3 个折减系数函数, 分别对 m_b 、 s 和 a 进行折减研究, 并通过数学方法将这 3 个相关折减系数函数理论推导为单一折减系数函数, 以简化计算工作量。然而, 该方法仍较为复杂, 不易直接应用于隧道围岩松动圈厚度分析中。

针对上述问题, 采用考虑松动软化的强度准则参数进行松动圈厚度的计算。根据文献 [15] 的方法, 可得到两组强度准则参数, 分别为强度准则峰值与强度准则残余值。将这两组参数组合分成 3 组代入计算, 具体组合: 1) 强度准则峰值; 2) 强度准则残余值; 3) 强度准则峰值与残余值的平均值。

郑可跃等^[16]综合考虑围压效应、强度软化特征以及剪胀扩容特征的影响, 通过定义临界塑性偏应变和岩石的峰值剪胀扩容系数, 对隧道围岩变形进行评定。

3 基于广义 Hoek - Brown 强度准则松动圈厚度计算

针对处于静水压力下的圆形隧道围岩进行受力分析, 得到围岩单元体的静力平衡方程, 如式 (5) 所示。

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

式中: σ_r 为围岩中任意一点处的径向应力, 也即最小应力 σ_3 , MPa; σ_θ 为围岩中任意一点处的切向应力, 也即最大应力 σ_1 , MPa; r 为该点距离隧道断面中心距离, m。

将式(5)与式(2)联立可得:

$$\begin{cases} \sigma_\theta = \sigma_r + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_r}{\sigma_c} + s \right)^a \\ \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)进行变量分析后, 对其进行积分可得:

$$\ln(r) + c_1 = \left(\frac{m_b}{\sigma_c} \sigma_r + s \right)^{1-a} / m_b (1-a) \quad (7)$$

式中: c_1 为积分常数, 当 $r = r_0$ (r_0 为隧道开挖半径, m) 时 $\sigma_r = P_i$ (P_i 为隧道支护压力, MPa), 将其代入可得:

$$c_1 = (m_b P_i / \sigma_c + s)^{1-a} / m_b (1-a) - \ln(r_0) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中, 将 r 显化后可得:

$$\begin{cases} r = r_0 \exp \left[\frac{(s + b\sigma_r)^{1-a} - (s + bP_i)^{1-a}}{m_b (1-a)} \right] \\ b = m_b / \sigma_c \end{cases} \quad (9)$$

式中: 为避免重复冗长的复杂表达式, 令 $b = m_b / \sigma_c$, 其本身并无实际含义。

王睿等^[17]给出了弹塑性界面交界处的应力关系, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} \sigma_\theta^e = P_0 \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) - \sigma_R \frac{r_1^2}{r^2} \\ \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \\ \sigma_r^e = P_0 \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) + \sigma_R \frac{r_1^2}{r^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: σ_R 为弹塑性界面交界处的径向应力, MPa,

此时 $r = r_1$; P_0 为隧道的原岩应力, MPa; r_1 为塑性区半径, m; $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{\theta r}$ 为弹塑性界面交界处相对面上的切应力, MPa。

将式(10)代入式(2), 迭代求解可得弹塑性界面交界处的 σ_r^e , 将 σ_r^e 代入式(9), 可得:

$$r_1 = r_0 \exp \left[\frac{(s + b\sigma_R)^{1-a} - (s + bP_i)^{1-a}}{m_b (1-a)} \right] \quad (11)$$

当 $a \neq 0.5$ 时, 由于式(10)与式(2)之间的限制, 无法求得关于 r_1 的解析解, 只能通过迭代方式计算 σ_R ; 而当 $a = 0.5$ 时, σ_R 的解析解可由式(11)给出。

$$\begin{cases} \sigma_R = \frac{m_b + 8P_0 - \sqrt{m_b^2 + 16m_b P_0 + 16s}}{8} \\ r_1 = r_0 \exp \left[\frac{2(s + b\sigma_R)^{0.5} - 2(s + bP_i)^{0.5}}{m_b} \right] \end{cases} \quad (12)$$

4 工程案例

4.1 既有工程案例验证

选用郑可跃等^[16]提出的算例2进行计算, 其参数如表1所示。根据上文要求, 将强度准则参数分为3组, 具体参数如表2所示。

朱艳峰等^[18]对兴隆隧道进行了研究, 在不考虑强度准则参数软化效应的前提下, 基于 H-B 强度准则推导了松动圈厚度。该工程的相关参数如表3所示。根据上文要求, 将强度准则参数分为3组, 具体参数如表4所示。朱艳峰等^[18]利用不同等效方法获得4个隧道等效半径分别为 5.450 0、4.794 0、4.428 0、5.539 8 m。

表1 算例2强度准则参数

隧道开挖 半径/m	原岩应 力/MPa	支护力/ MPa	单轴抗压 强度/MPa	m_b		a		s	
				峰值	残余值	峰值	残余值	峰值	残余值
3.0	15	0	30	2	0.6	0.004	0.002	0.5	0.6

表2 算例2中强度准则参数组合

强度准则参数组合	m_b	a	s
1	2.0	0.50	0.004
2	0.6	0.60	0.002
3	1.3	0.55	0.003

表 3 兴隆隧道强度准则参数

原岩应力	支护力	单轴抗压强度残余值	单轴抗压强度峰值	m_b		a		s	
				峰值	残余值	峰值	残余值	峰值	残余值
22.03	4.80	23.30	29.60	3.17	1.41	0.60	0.505	0.003 1	0.001 6

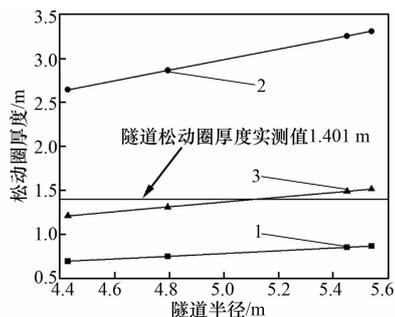
表 4 兴隆隧道中强度准则参数组合

强度准则参数组合	m_b	a	s	单轴抗压强度
1	3.17	0.600	0.003 10	29.60
2	1.41	0.505	0.001 60	23.30
3	2.29	0.550	0.002 35	26.45

4.2 计算结果分析

在算例 2 中,对于组合 1 采用式(12)的解析解方法进行计算;对于组合 2、3 采用式(11)进行计算。计算结果如下:1) 组合 1 得到的松动圈厚度为 5.223 m;2) 组合 2 得到的松动圈厚度为 18.15 m;3) 组合 3 得到的松动圈厚度为 7.23 m。文中实测得到的松动圈厚度为 7.32 m。通过对比可知,3 个组合的误差分别为 28.6%、148.0%、1.2%,因此组合 3 相较于另外两个组合具有更好的应用价值。

兴隆隧道 3 个组合的计算结果如图 2 所示。由图 2 可知:朱艳峰等^[18]提出的 4 种隧道半径等效方法中任意一种推导出的松动圈厚度计算结果均满足需求。与文中通过理论迭代计算得到的松动圈厚度(约为 1.534 m)相比,两者精度相差不大,但本文提出的方法更为简便。



1—组合 1; 2—组合 2; 3—组合 3。

图 2 兴隆隧道松动圈厚度结算结果

式(12)为本文基于 H-B 强度准则及围岩应变软化特性建立的松动圈厚度解析解模型,对其采用组合 3 的参数取值方法进行验证。通过与现有研究成果对比发现,本文解析解模型代入参数计算所得结果与朱艳峰等^[18]基于有限差分法的迭代解相比,最大偏差仅为 1.22%;相较于郑可跃

等^[16]的迭代计算结果,差异控制在 1.25% 以内。特别需要指出的是,解析解的计算过程较有限差分迭代法更为简便,无需复杂数值迭代即可直接求解,且计算结果与高精度数值方法保持高度一致性。这充分表明,本文提出的解析解模型不仅保证了计算精度,还显著提升了求解效率,为工程实践中围岩稳定性评估提供了一种兼具理论严谨性与工程实用性的分析方法。

5 结 语

在考虑围岩软化效应的情况下,通过折减广义 H-B 强度准则参数推导得到的隧道围岩松动圈厚度表现良好;本文提出的围岩隧道松动圈计算方法对不同等效方法下的等效隧道半径均具有较高精度;本文基于广义 H-B 强度准则推导得到的松动圈厚度方程较常规结果更为简洁,且更易于使用。然而,该方法在强度准则参数折减程度、各强度准则参数折减对围岩松动圈厚度影响的敏感性以及各强度准则参数折减特点的研究方面存在不足,同时在折减理论支持方面较为薄弱。后续研究应采用控制变量法对某一强度准则参数单独折减进行分析;综合考虑部分强度准则参数折减组合对围岩松动圈厚度的影响,并以此为基础分析各参数对围岩松动圈厚度的敏感性;进一步加强理论研究,深入探讨强度准则参数折减的机理。

参考文献:

- [1] 吴锋,李明,宋新涛,等. 基于损伤理论的深井巷道围岩松动圈计算方法[J]. 金属矿山,2024(9):13-18.
- [2] ZAREIFARD M R. A new semi-numerical method for

- elastoplastic analysis of a circular tunnel excavated in a Hoek - Brown strain-softening rock mass considering the blast-induced damaged zone [J]. *Computers&Geotechnics*, 2020,122;103476.
- [3] WANG R,ZHANG Z Y,DENG X H, et al. Calculation Method for the Loose Circle of Tunnel-Surrounding Rock Considering the Strain-Softening Effect [J]. *International Journal of Geomechanics*,2024,24(10);1 - 10
- [4] LEEYKY,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(5);588 - 599
- [5] SHENG YM,ZOU JF,CHENG H. Semianalytical solutions for elastic - brittle - plastic surrounding rock under biaxial in situ stress field based on unified strength criterion [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023,23(10);1 - 17.
- [6] 吴佳俊,胡祖栋. 基于 FLAC3D 的隧道施工数值模拟及现场监测分析[J]. *工程建设*,2021,53(11):66 - 72.
- [7] 王俊杰,张帅. 基于超前应力释放与注浆加固的隧道围岩大变形控制分析[J/OL]. *西南交通大学学报*, 2024;1 - 11 [2024 - 10 - 27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20240417.0850.002.html>.
- [8] 经来旺,谢金鑫,尚佳乐,等. 考虑软化和扩容的圆形巷道围岩 Z - P 准则弹塑性解 [J]. *金属矿山*, 2024(2);88 - 96.
- [9] HOEK E, BROWN E T. *Underground excavations in rocks*[M]. London:Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [10] HOEK E,BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,1997,34(8):1165 - 1186.
- [11] HOEK E, CARRANZA - TORRES C T, CORKUM B. Hoek - Brown failure criterion - 2002 Edition [C]// *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium*. Toronto: Scientific Research, 2002(8): 267 - 273.
- [12] 陈璐,曹洪涛,周子龙,等. 硬岩小净距隧道先行洞的爆破振动响应规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2024,55(9):3354 - 3367.
- [13] 马殷军. 新乌鞘岭隧道岭脊段高地应力软岩大变形控制技术[J]. *中国铁路*,2023(11):1 - 7.
- [14] 殷宪辉,牟朝群,陈艺震,等. 机理增强的盾构掘进过程横纵双向地表沉降联合智能预测[J]. *工业工程与管理*,2025,30(2):126 - 140.
- [15] 韩龙强,吴顺川,李志鹏. 基于 Hoek - Brown 准则的非等比强度折减方法[J]. *岩土力学*,2016,37(增刊2): 690 - 696.
- [16] 郑可跃,施成华,赵前进,等. 考虑围压效应和中主应力的深埋软岩隧道弹塑性解[J]. *岩石力学与工程学报*,2023,42(12):3070 - 3084.
- [17] 王睿,袁崇洋,张进增,等. 基于 Hoek - Brown 强度准则的隧道围岩松动圈分析[J]. *中国安全生产科学技术*,2017,13(3):58 - 63.
- [18] 朱艳峰,张雪松,王和平. Hoek - Brown 强度准则的非圆形隧道塑性区半径预测[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*,2020,52(2):200 - 206.