

浅埋隧道施工扰动诱发地表塌陷破坏模式研究^{*}

肖晋, 黄阜

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 隧道围岩稳定性是岩土工程中的热点问题之一, 确定极限状态下隧道围岩潜在破坏范围并对隧道稳定性进行安全评估意义重大。文中基于极限分析有限元法, 利用岩土分析软件 OptumG2 模拟浅埋隧道开挖过程, 调用 Hoek-Brown 本构模型, 得到极限状态下浅埋隧道施工扰动诱发地表塌陷的破坏模式和塌陷范围, 结合强度折减法得到对应的隧道围岩安全系数, 并对隧道围岩安全系数在不同单一参数作用下的变化规律进行分析。结果显示, 隧道围岩安全系数随地质强度指标 GSI、隧道支护力 q 、围岩抗压强度 σ_c 及 Hoek-Brown 参数 m_i 的增大而增大, 随土体容重 γ 的增大而减小。

关键词: 隧道; 浅埋隧道; 施工扰动; 地表塌陷; Hoek-Brown 破坏准则; 安全系数

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)05-0160-05

浅埋隧道掘进过程中对岩土体产生扰动, 会导致地层损失, 而地层损失会引发上层岩土体变形和沉降, 如果处治不及时, 极易诱发地表塌陷。而且这类地表塌陷大多具有瞬时性和突发性的特点, 会给地面交通和既有建筑物的结构安全带来巨大威胁。已有许多学者对这一问题开展了研究, 如 Yang X. L. 等采用极限分析上限定理, 分析得到了考虑支护力的浅埋圆形隧道顶部围岩塌陷破坏范围, 并利用极限分析上限法对两层岩层中浅埋隧道顶部围岩塌陷破坏机理进行了分析; Wang H. T. 等根据上限定理与变分原理, 结合地下水位变化的影响, 提出了两层岩层中浅埋隧道顶部围岩塌陷破坏机制, 并采用极限分析上限定理, 结合变分原理, 计算得到了多层岩层中浅埋隧道的三维塌落面方程。目前大部分学者采用有限元软件结合强度折减法, 在隧道围岩达到临界破坏状态时求得隧道围岩安全系数, 以此作为隧道稳定性定量评估依据。但由于对隧道围岩是否达到临界状态的判别标准存在争议, 采用不同判据计算得到的安全系数差别较大。针对以上缺陷, 有学者提出采用有限元法结合极限分析理论和强度折减法对土工构筑物在临界破坏状态下安全系数进行计算。极限分析有限元法避免了复杂的应力-应变增量迭代问题, 可通过计算机软件自动搜索得到岩土体极限状态下速度场(极限分析上限法)或应力场(极限分析下限法), 直接对最终破坏的临界状

态进行分析, 进而快速研究各土工结构的稳定性, 其效率比传统有限元法高, 已被广泛用于求解隧道稳定性问题。但结合极限分析有限元方法和强度折减法对 Hoek-Brown 破坏准则作用下浅埋隧道施工扰动诱发地表塌陷的研究还未见报道。该文利用极限分析有限元软件 OptumG2 模拟破碎围岩中浅埋隧道开挖过程, 调用 Hoek-Brown 本构模型, 基于 Hoek-Brown 非线性破坏准则分析极限状态下浅埋隧道施工扰动诱发地表塌陷的破坏模式, 确定塌落面形状与塌落体范围, 并结合强度折减法得到对应安全系数。

1 模型的建立

1.1 计算原理

极限分析有限元法的基本思路: 采用有限元法将连续体内的速度场或应力场离散化, 在离散的速度场或应力场内建立满足机动许可条件或静力许可条件的约束方程或不等式, 并以连续体内总外力荷载(下限分析)或总内能耗散率(上限分析)作为目标函数, 依据极限分析上、下限定理构建相应数学规划模型; 然后采用合适的数学规划算法搜索该模型的最优解, 并由计算机软件自动搜索岩土体临界破坏时的速度场或应力场, 快速研究各土工结构的稳定性问题。极限分析有限元法不需要预先假定岩土体的破坏机制, 同时可考虑多种复杂工况条件与非均

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878074)

质材料等,相比传统极限分析法,极限分析有限元法的优势更明显。

利用极限分析有限元软件 OptumG2,通过模拟浅埋隧道开挖过程中诱发的地层变形,结合强度折减理论,得到极限状态下浅埋隧道施工诱发地表塌陷的潜在破坏面及对应安全系数,作为浅埋隧道施工过程中围岩稳定性评估依据。

1.2 构建模型

隧道稳定性分析模型的长、宽分别设置为 50 和 30 m,以浅埋圆形隧道的中心点作为坐标原点,隧道埋深为 5 m,半径为 5 m,隧道底部至模型顶部间距为 15 m。由于隧道开挖会对周边围岩产生较大扰动,计算模型采用不均匀网格,隧道周边区域采用加密网格,其他区域采用较稀疏的网格以提高计算效率(见图 1)。

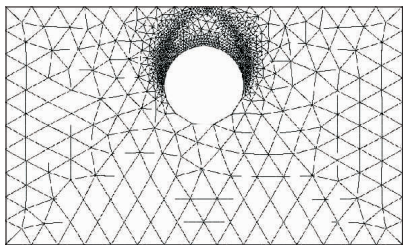


图 1 浅埋隧道稳定性分析模型

该模型采用 Hoek-Brown 破坏准则:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

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

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

$$a = \frac{1}{2} + \left(\frac{e^{-GSI/15} - e^{-20/3}}{6} \right) \quad (4)$$

式中: σ_1 为岩体最大有效主应力; σ_3 为岩体最小有效主应力; σ_{ci} 为岩体单轴抗压强度; m_b 为岩体软硬程度; s 为岩体破碎程度; a 为无量纲岩体特征参数; m_i 为组成岩体完整岩块的 Hoek-Brown 参数; GSI 为地质强度指标; D 为考虑隧道爆破破坏和应力释放对节理岩体扰动程度的参数,其值为 0~1。

相关参数的取值见表 1。

表 1 初始围岩参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	20	a	0.5
σ_{ci} / MPa	0.5	GSI	30
m_i	8	D	0

2 数值计算过程

利用极限分析有限元软件 OptumG2 进行破坏模式研究时,模型采用标准边界条件:在模型左右边界施加法向约束,在模型底部边界施加法向约束与切向约束。然后选取 Hoek-Brown 本构模型,并将 Hoek-Brown 非线性破坏准则的各岩土体参数赋值给隧道围岩。隧道中心至计算模型顶部的距离为 10 m,隧道半径为 5 m,设置重力加速度为 10 m/s^2 。在模型达到初始地应力平衡后模拟隧道开挖,并在隧道表面施加环向均布力模拟隧道支护力,在地表施加竖向均布荷载模拟城市道路地面荷载。为提高计算精度,选择网格自适应功能,自适应迭代次数取 3,最后对该工况进行计算分析。

3 数值模拟结果分析

在不改变其他初始参数的情况下,分析浅埋隧道施工扰动下围岩的破坏模式,同时计算单一参数变化下隧道围岩安全系数,分析这些参数对围岩安全系数和隧道拱顶围岩破坏范围的影响。

3.1 支护力 q 对围岩安全系数、塌落范围的影响

在岩体扰动系数 $D=0$ 、容重 $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ 、围岩抗压强度 $\sigma_{ci}=0.5 \text{ MPa}$ 、Hoek-Brown 参数 $m_i=8$ 、地质强度指标 $GSI=25$ 的情况下,求解不同支护力 q 作用下隧道围岩安全系数。 q 分别为 30、40、50、60、70 kPa 时隧道围岩安全系数见图 2, q 为 30 和 70 kPa 时隧道围岩剪切耗散图见图 3。极限状态下隧道周边围岩剪切耗散图反映了极限状态下隧道围岩进入塑性流动状态后塑性流动区域的分布情况,可利用剪切能耗散图研究隧道施工诱发周边围岩剪切破坏的发生范围和破坏模式。

从图 2、图 3 可看出:隧道顶部围岩形成的剪切破坏带一直延伸至地表,表明围岩在该剪切破坏带范围内发生了剪切破坏,且在该区域内地表有发生

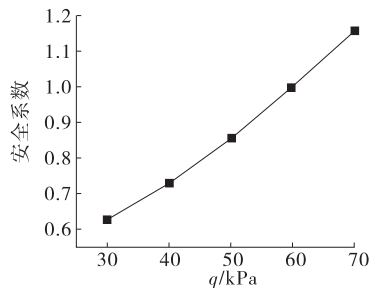


图 2 不同支护力 q 下隧道围岩安全系数

塌陷的潜在风险。在浅埋隧道开挖扰动的影响下,围岩安全系数随着支护力增大而增大,围岩塌落范围随支护力增大而减小,说明增大支护力是提高围岩稳定性的有效途径之一。

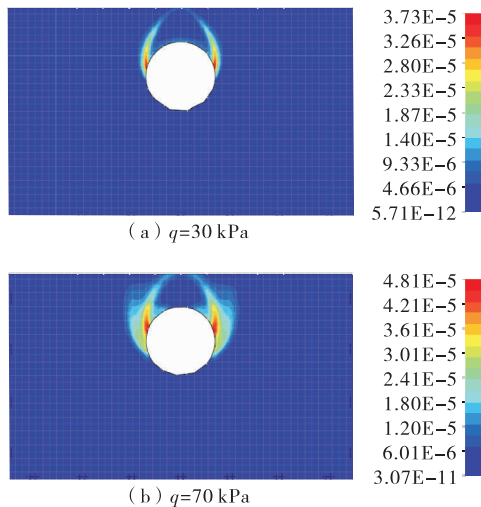


图3 支护力 q 为 30 和 70 kPa 时隧道围岩剪切耗散图(单位:kJ)

3.2 土体容重 γ 对围岩安全系数、塌落范围的影响

在 $D=0$ 、 $q=30$ kPa、 $m_i=8$ 、 $\sigma_{ci}=0.5$ MPa、 $GSI=25$ 的情况下,求解不同岩土体容重 γ 下隧道围岩安全系数。 γ 分别为 10、15、20、25 和 30 kN/m³ 时隧道围岩安全系数见图 4, γ 为 10 和 30 kN/m³ 时隧道围岩剪切耗散图见图 5。

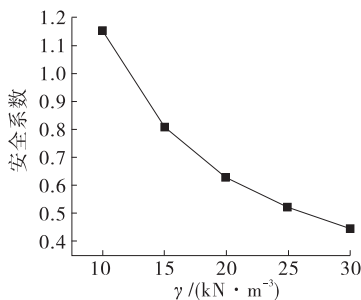


图4 不同岩土体容重 γ 下隧道围岩安全系数

从图 4、图 5 可看出:在其他参数不变的情况下,围岩安全系数随岩土体容重 γ 增大而减小,围岩塌落范围随 γ 增大而增大。

3.3 m_i 对围岩安全系数、塌落范围的影响

在 $D=0$ 、 $\sigma_{ci}=0.5$ MPa、 $\gamma=20$ kN/m³、 $q=30$ kPa、 $GSI=50$ 的情况下,求解不同 Hoek-Brown 参数 m_i 下隧道围岩安全系数。 m_i 分别为 5、10、15、20 和 25 时隧道围岩安全系数见图 6, m_i 为 5 和 25

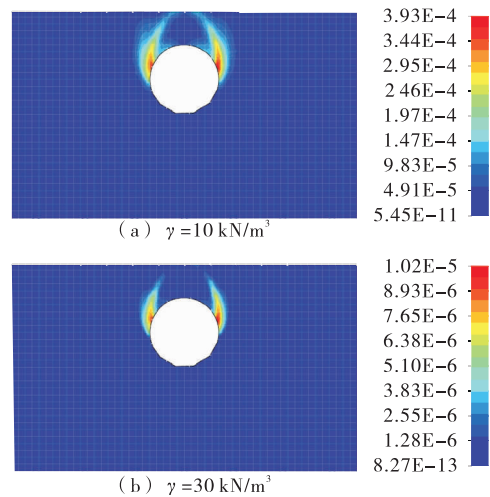


图5 岩土体容重 γ 为 10 和 30 kN/m³ 时隧道围岩剪切耗散图(单位:kJ)

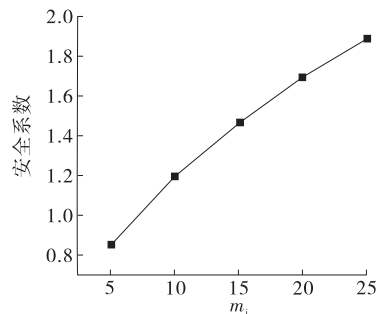


图6 不同 Hoek-Brown 参数 m_i 下隧道围岩安全系数
时隧道围岩剪切耗散图见图 7。

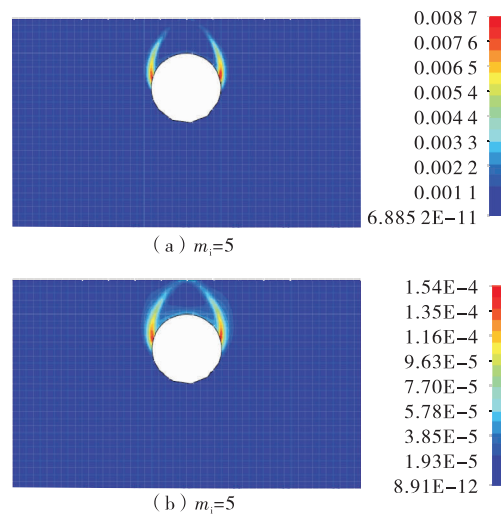


图7 Hoek-Brown 参数 m_i 为 5 和 25 时隧道围岩剪切耗散图(单位:kJ)

从图 6、图 7 可看出:在其他参数不变的情况下,围岩安全系数随 Hoek-Brown 参数 m_i 增大而增大,围岩塌落范围随 m_i 增大而减小。

3.4 围岩抗压强度 σ_{ci} 对围岩安全系数、塌落范围的影响

在 $D=0$ 、 $q=30$ kPa、 $m_i=8$ 、 $\gamma=20$ kN/m³、 $GSI=30$ 的情况下,求解不同围岩抗压强度 σ_{ci} 下隧道围岩安全系数。 σ_{ci} 分别为 0.5、1.5、2.5、3.5 和 4.5 MPa 时隧道围岩安全系数见图 8, σ_{ci} 为 0.5 和 4.5 MPa 时隧道围岩剪切耗散图见图 9。

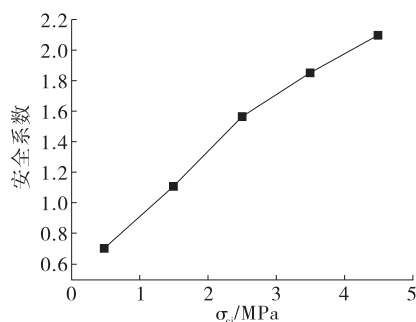


图 8 不同围岩抗压强度 σ_{ci} 下隧道围岩安全系数

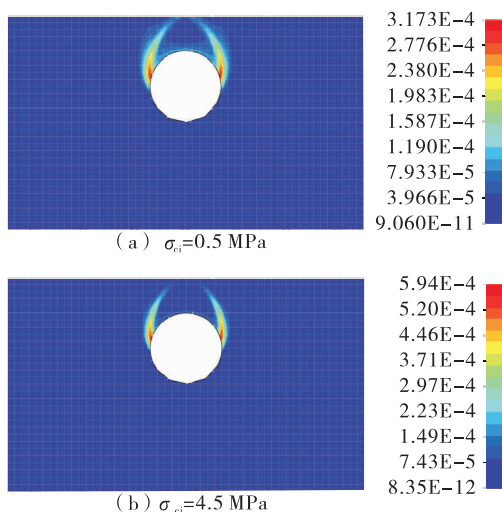


图 9 围岩抗压强度 σ_{ci} 为 0.5 和 4.5 MPa 时隧道围岩剪切耗散图(单位:kJ)

从图 8、图 9 可看出:在其他参数不变的情况下,围岩安全系数随围岩抗压强度 σ_{ci} 增大而增大,隧道顶部围岩塌落范围随 σ_{ci} 增大而减小。

3.5 地质强度指标 GSI 对围岩安全系数、塌落范围的影响

在 $D=0$ 、 $\gamma=20$ kN/m³、 $m_i=10$ 、 $q=30$ kPa、 $\sigma_{ci}=1$ MPa 的情况下,求解不同地质强度指标 GSI 下隧道围岩安全系数。 GSI 分别为 30、35、40、45 和 50 时隧道围岩安全系数见图 10, GSI 为 30 和 50 时隧道围岩剪切耗散图见图 11。

从图 10、图 11 可看出:在其他参数不变的情况下,围岩安全系数随地质强度指标 GSI 增大而增

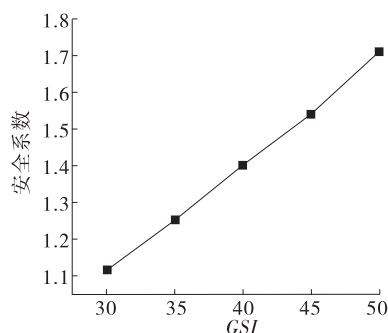


图 10 不同地质强度指标 GSI 下隧道围岩安全系数

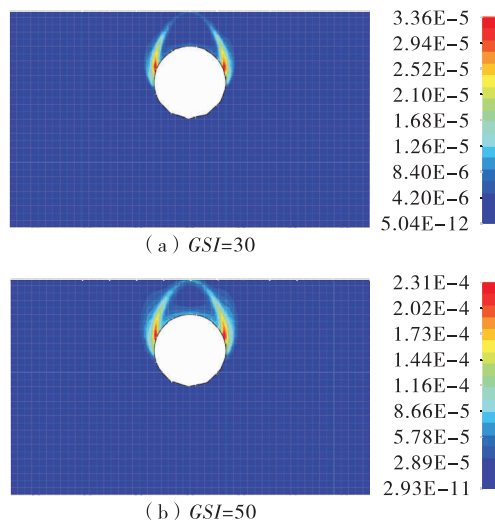


图 11 地质强度指标 GSI 为 30 和 50 时隧道围岩剪切耗散图(单位:kJ)

大,隧道顶部围岩塌落范围随 GSI 增大而减小。

4 结论

基于 Hoek-Brown 破坏准则,利用极限分析有限元软件 OptumG2,结合强度折减法,通过模拟浅埋隧道施工,得到浅埋隧道施工扰动诱发地表塌陷的围岩潜在破坏面及极限状态下围岩安全系数。对不同参数作用下破坏面范围和安全系数进行分析,得到以下结论:

(1) 浅埋隧道围岩安全系数随着支护力 q 增大而增大。浅埋隧道施工采用加强式衬砌结构,结合其他支护手段,可有效降低隧道施工过程中地表塌陷的潜在风险。

(2) 浅埋隧道围岩安全系数随 Hoek-Brown 参数 m_i 、地质强度指标 GSI 和围岩抗压强度 σ_{ci} 的增大而增大。实际工程中可根据隧道施工诱发地表塌陷的范围,采用地表注浆等加固措施提高潜在塌方区岩土体的强度和整体性,保障隧道施工安全。

参考文献:

- [1] YANG X L, HUANG F. Collapse mechanism of shallow tunnel based on nonlinear Hoek-Brown failure criterion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(6): 686—691.
- [2] YANG X L, LI K F. Roof collapse of shallow tunnel in layered Hoek-Brown rock media[J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 11(6): 867—877.
- [3] WANG H T, WANG L G, LI S C, et al. Roof collapse mechanisms for a shallow tunnel in two-layer rock strata incorporating the influence of groundwater[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 98: 215—227.
- [4] WANG H T, LIU P, WANG L G, et al. Three-dimensional collapse analysis for a shallow cavity in layered strata based on upper bound theorem[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 124(1): 375—391.
- [5] 郑颖人, 邱陈瑜, 张红, 等. 关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 1968—1980.
- [6] 乔金丽, 张义同, 高健, 等. 强度折减法在盾构隧道开挖面稳定分析中的应用[J]. 天津大学学报, 2010, 43(1): 14—20.
- [7] 杨峰, 颜宾宾, 张箭, 等. 基于刚体平动运动单元上限有限元的毛洞隧道稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2015, 32(12): 108—113.
- [8] 杨峰, 何诗华, 吴遥杰, 等. 非均质黏土地层隧道开挖面稳定运动单元上限有限元分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1412—1419+1436.
- [9] YANG Feng, ZHANG Jian, ZHAO Lian-heng, et al. Upper-bound finite element analysis of stability of tunnel face subjected to surcharge loading in cohesive-frictional soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(6): 2270—2279.
- [10] 赵明华, 彭珩, 张锐. 方形隧道稳定性极限分析有限元数值模拟[J]. 公路交通科技, 2015, 32(5): 107—114.
- [11] 李艳祥, 蒋刚, 王旭东. 软土隧道支护压力与稳定性下限有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1558—1563.
- [12] 周海英. 土质地层圆形隧道均布支护反力上限有限元分析[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 182—186.
- [13] ANDREW J Abbo, DANIEL W Wilson, SCOTT W Sloan, et al. Undrained stability of wide rectangular tunnels[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 53: 46—59.
- [14] KENTARO Yamamoto, ANDREI V Lyamin, DANIEL W Wilson, et al. Stability of dual circular tunnels in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 50: 41—54.
- [15] 王爽. 基于极限分析有限元与强度折减法的边坡稳定性分析方法[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 51—55.
- [16] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(3): 445—463.
- [17] 熊远勋, 李绍聪, 李小刚, 等. 隧道开挖引起上覆岩体移动变形分析及控制措施研究[J]. 公路与汽运, 2020(4): 153—156+163.
- 收稿日期: 2020—09—24
- *****
- (上接第 159 页)
- tial effect due to tunnel excavation in hard rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84(2): 151—165.
- [10] 张建智, 俞缙, 张小燕, 等. 岩质隧道施工过程变形时空问题的位移释放系数法[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(2): 98—107.
- [11] 张常光, 曾开华. 等值地应力下岩质圆形隧道位移释放系数比较及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 498—510.
- [12] 左清军, 吴友银, 闫天玺. 特大断面板岩隧道施工期围岩变形时空效应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 233—243.
- [13] 吴顺川, 耿晓杰, 高永涛, 等. 基于广义 Hoek—Brown 准则的隧道纵向变形曲线研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 946—952.
- [14] 张常光, 曾开华. 收敛约束法中隧道开挖面空间效应方法比较[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1417—1424.
- [15] 福建省交通规划设计院. 平潭综合实验区麒麟大道东段工程龙兴岭隧道设计文件[Z]. 福州: 福建省交通规划设计院, 2017.
- [16] 李俊鹏, 段小强, 闫小虎. 开挖过程中隧洞围岩应力释放规律的数值研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(4): 59—62.
- 收稿日期: 2020—12—17