

基于强度折减法的隧道掌子面 稳定性及破坏形态

安永林*, 欧阳鹏博, 岳健, 胡文轩

(湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了获得掌子面的稳定性及临界失稳破坏形态, 依托武广客运专线浏阳河隧道某断面里程位置的情况, 建立数值模型, 基于强度折减法的原理, 从掌子面中心点水平位移、最大塑性应变、塑性区面积/隧道面积等随折减系数的变化, 获得掌子面的临界稳定安全系数, 得到掌子面的塑性区分布及破坏形态, 并同现场监测及相关研究做了对比。结果表明: 该隧道的掌子面的稳定安全系数为 2.8, 与实际情况较吻合; 破坏形态是在掌子面斜上方一个火焰形状的区域, 未发展至地表, 与已有的相关试验有所不同, 主要是因为掌子面围岩失稳既有黏聚力的影响, 也有内摩擦角的影响。

关键词: 隧道工程; 强度折减法; 掌子面稳定; 破坏形态

中图分类号: U453.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2018)01-0039-06

Analysis of Stability and Failure Shape of Tunnel Face Based on Strength Reduction Method

An Yonglin, Ouyang Pengbo, Yue Jian, Hu Wenxuan

(Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to obtain the stability of tunnel face and failure shape, strength reduction method and finite element software is used to build simulation models under different strength reduction factors at Liuyang River Tunnel in the Wuhan-Guangzhou passenger railway line. The relation between strength reduction factor and the displacement of the central tunnel face, and the maximum plastic strain and plastic zones are analyzed. In addition, failure shape is also analyzed. Simulation results are compared with in-site monitoring and some experiments results. Results show that safety factor of the tunnel is 2.8, which is in good agreement with the actual conditions. Failure region looks like a flame shape, which is not extended to the surface. The failure shape is not well consistent with the existing experiment results due to the failure of having an effect of friction angle and cohesion.

Keywords: tunnel engineering; strength reduction method; stability of tunnel face; failure shape

掌子面失稳而发生隧道坍方的事故很多, 如广深港客运专线狮子洋隧道、合宁铁路亭子山 2 号隧道、宝中铁路堡子梁隧道等^[1,2]。因此, 隧道掌子面的稳定性问题得到了很多学者和工程界的关注和研究。

收稿日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408216; 51308209); 湖南省学位与研究生教育教学改革研究项目(2017B082); 湖南科技大学研究生培养改革研究项目(J151101)

* 通信作者, E-mail: aylcsu@163.com

目前隧道稳定性的研究工作主要采用数值模拟方法、理论解析法、极限平衡法、模型试验、极限分析法等^[3-5]。数值分析^[6,7]主要目的是研究围岩与支护结构的塑性区、应力、应变和位移等变化情况,进而评价隧道开挖稳定性,其中为了细化围岩的安全性,一部分学者提出了隧道屈服接近度的概念;为了得到整体稳定性,把强度折减法应用隧道稳定性分析中。解析法^[7]多用于圆形隧道的求解,对于洞室是非圆形时,就需要通过保角变换将单位圆外域映射到洞室外域。在进行围岩稳定性分析时,采用复变函数进行围岩应力与变形计算,能得出弹性解析解;而洞室的映射函数是问题的求解关键。在围岩稳定分析中,解析法适用于边界条件较为简单及围岩不复杂的情况。极限平衡法^[8]是将破坏区域划分成若干刚性体,通过建立刚性体之间的静力平衡方程,求解系统的安全系数或外荷载。根据分块不同,又有条分法、瑞典圆弧法等。模型试验方法^[9,10]主要有离心模型试验、重力场模型试验和现场试验监测。一些学者应用离心机试验研究了隧道支护压力和变形,用X射线CT扫描技术记录了不同参数下的隧道开挖面破坏形状的三维图像。极限分析^[3,11]在岩土的3大问题:边坡稳定性、土压力、地基承载力等方面已有了广泛应用;近几年,也开始应用于隧道的极限支护压力、山岭隧道围岩压力、围岩稳定性等方面^[12-15]。

本文借用边坡稳定性分析中的强度折减法,分析隧道掌子面的纵向稳定性,得到相应的安全系数,并获得临界的破裂面形状。

1 强度折减法分析隧道掌子面稳定性原理

1.1 强度折减法及掌子面稳定安全系数定义

在计算隧道掌子面稳定安全系数时^[11],首先按式(1)将围岩强度参数粘聚力 c 和内摩擦角 φ 值同时除以一个折减系数 F 得到一组新的 c' 、 φ' 值,然后作为新的材料参数输入,再进行试算;当达到隧道失稳标准时,对应的 F 被称为隧道掌子面的最小稳定安全系数。

$$\begin{cases} c' = \frac{c}{F}; \\ \varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F}\right). \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为折减系数; c 为围岩黏聚力; φ 为围岩内摩擦角; c' 为按 F 值折减后的黏聚力; φ' 为按 F 值折减后的内摩擦角。

1.2 隧道掌子面失稳判据

粘聚力 c 和内摩擦角 φ 折减多少,才能判断隧道掌子面失稳,是获得隧道掌子面稳定安全系数的关键。

相关研究有以等效塑性应变贯通作为临界失稳判据,也有以计算不收敛作为判据的^[4,16]。本数值模拟分析中以特征部位掌子面中心位移、最大塑性应变和塑性区面积与隧道面积之比的突变性或收敛性、塑性区是否贯通作为隧道掌子面失稳的判据^[16]。

2 依托工程概况与数值模拟分析

2.1 工程概况与数值模型建立

浏阳河隧道位于武广客运专线长沙市东部,捞刀河以南,止于黎托乡平阳村。隧道长度10 115 m,起讫里程DIK1560+785~DIK1570+900。模拟分析断面里程位置为DIK1563+375。该段是V级围岩(物理力学参数,弹性模量80 MPa,泊松比0.38,重度25.2 kN/m³,粘聚力50 kPa,内摩擦角34°),采用3台阶法开挖,初期支护中工字钢采用I20a间距0.6 m,喷射混凝土C25厚25 cm,超前小导管 Φ 42 mm,长度3.5 m。数值模型见图1,边界条件是顶面和洞内开挖掌子面为自由面,模型左边、右边和模型底面约束方向位移,洞内上部和下部约束法向位移。

本文主要是考虑初期支护稳定的情况下,研究掌子面的稳定性及临界破坏形态;同时为简化计算,取二维进行分析。屈服模型采用Mohr-Coloumb准则,强度折减系数如表1所示。为了快速获得临界折减系数,同时减少试算的模型,强度折减系数按0.5进行递增,当发现特征部位的监测指标发生突变,则在该折减系数和上一折减系数之间按0.1的递增进行折减。

表 1 强度折减系数

折减系数	1.0	1.5	2.0	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.5
c/kPa	50.0	33.3	25.0	20.0	19.2	18.5	17.9	17.2	16.7	14.3
$\varphi/(\text{°})$	34.0	24.2	18.6	15.1	14.5	14.0	13.5	13.1	12.7	10.9

注:表中阴影部分表示在 2.5 和 3.0 折减系数按照 0.1 增加

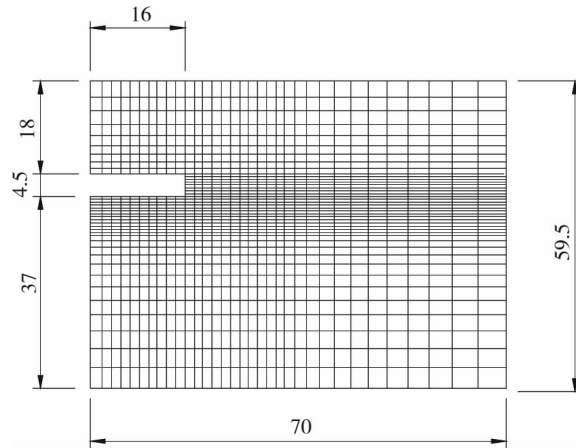


图 1 数值模型(单位:m)

2.2 判据指标随折减系数的变化

不同判据指标与折减系数的关系见图 2 和图 3.

1) 整体上,掌子面中心的位移、最大塑性应变、塑性区面积/隧道面积均随折减系数的增加而增大,但各自增加的梯度不一样,其中塑性区面积增加的梯度最大,这是因为强度指标 c 和 φ 直接影响到围岩的屈服准则, c 和 φ 强度指标越低,越易屈服.

2) 当折减系数大于 2.8 时,梯度增加的最快,而当折减系数大于 2.9 时,梯度变缓,特别是对于最大塑性应变和掌子面中心点位移的梯度是随折减系数降低的.因此,可以认为隧道掌子面的稳定安全系数为 2.8.

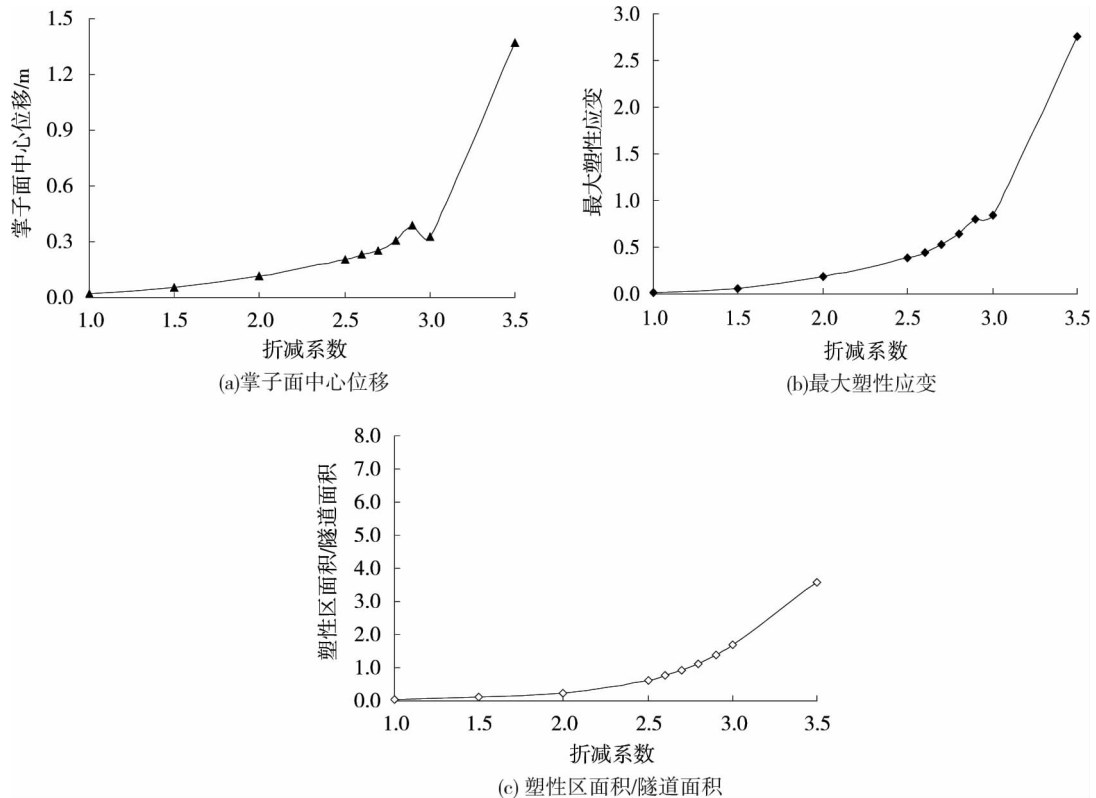


图 2 不同指标同折减系数的关系曲线

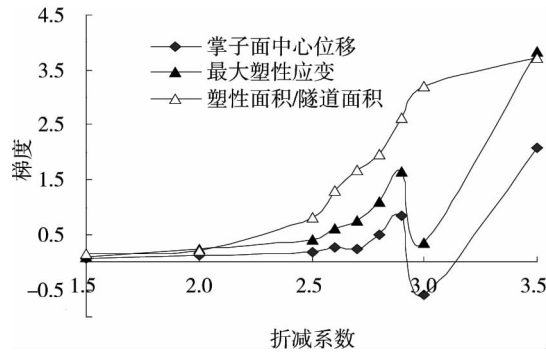


图 3 不同指标梯度同折减系数的关系曲线

2.3 塑性区随折减系数的变化

塑性区随折减系数的变化如图 4 所示.

1) 塑性区首先是发生在掌子面前方的半圆处,这与开挖面的顶部和底部的约束有关;随着折减系数的提高,塑性区不断向前方扩展,同时向拱顶和底板延伸,拱顶塑性扩展速度要大于底板的;折减系数小于 2.0 时,只可能出现掌子面小范围的坍塌.

2) 折减系数 2.5 时,拱顶上方塑性区贯通,折减系数 2.8 时,小部分塑性区贯穿到地表,很有可能出现冒顶塌方;折减系数 3.5 时,此时隧道上方出现大面积贯通地表的塑性区,这很有可能导致大范围的坍塌.同时折减系数 3.5 时,在掌子面的右下方 45°方向也出了一定的塑性应变,这是由于剪切应力所引起的.

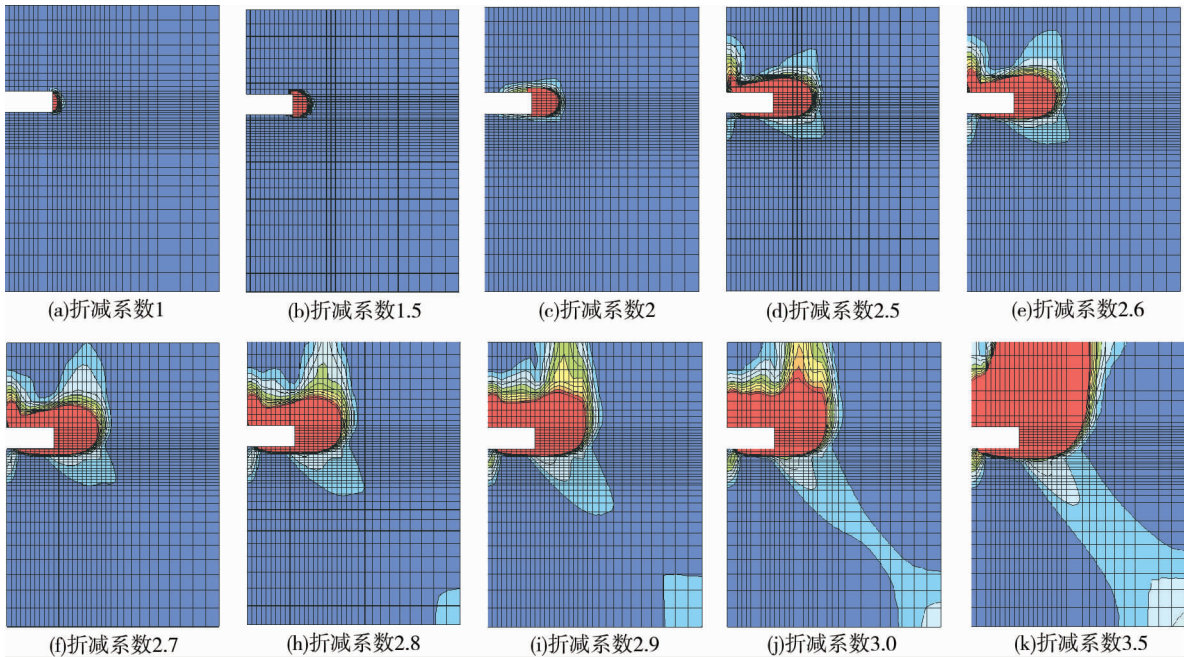


图 4 不同折减系数下塑性区分布形态

2.4 围岩临界破坏时形态

折减系数为 2.8 时的围岩位移矢量及沉降图,如图 5 所示.

1) 围岩临界破坏时,掌子面附近围岩的速度要比别的地方大的多,最大位移集中在掌子面中心位置,此处也是受隧道开挖周边约束最弱的地方.

2) 围岩破坏范围在掌子面上部斜上方的一个火焰形状内,塌方未发展至地表.

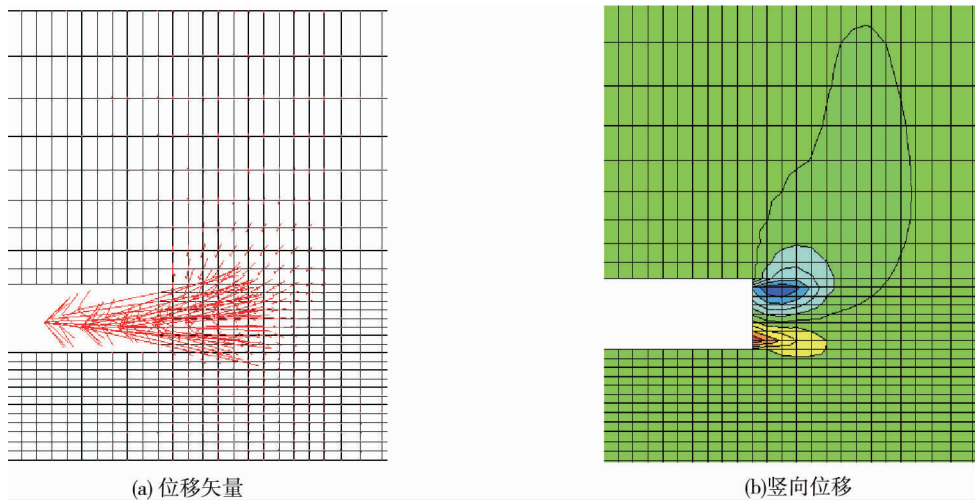


图 5 围岩破坏形态

3 结果合理性的分析

3.1 稳定安全系数合理性分析

数值模拟所得的安全系数为 2.8,表明掌子面具有较大的安全性,不会发生失稳坍塌.这与该地段的现场和监测情况是一致的,如掌子面观察是稳定的,拱顶沉降监测值也较小(见图 6),表明强度折减法所得的稳定安全系数较合理.

3.2 临界破坏形态的合理性分析

Chambon 通过离心试验,得到不同埋深下无粘性土的破坏模式如图 7a,Mair 和 Taylor 总结已有的试验结果,认为破坏模式如图 7b 所示^[3].浏阳河隧道 DIK1563+375 的围岩不是纯粹的无粘性土(如砂土),也不是纯粘土,该地段围岩既有内聚力,也有内摩擦角,同时,按照规范坍塌判断深浅埋的方法,该地段属于深埋,所以不会坍塌至地表,上方的部分荷载通过拱效应,传递到两侧,破坏形状即没有砂土的陡峭,也不像粘土的范围很大.

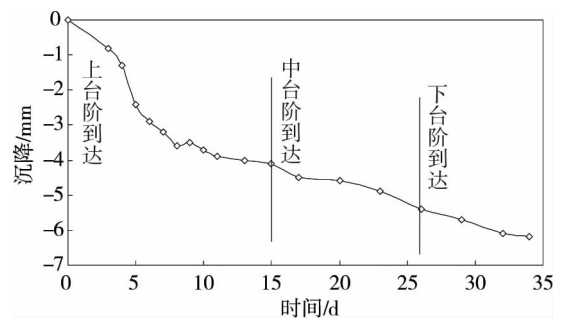


图 6 拱顶沉降时程曲线

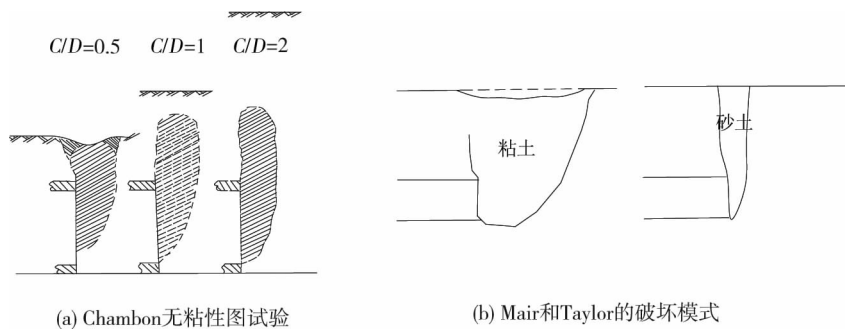


图 7 其他学者提出的围岩破坏形态

4 结论

1)隧道掌子面的稳定安全系数为 2.8,具有较高的安全性.

2)围岩从稳定到失稳是一个渐进过程,首先掌子面处围岩发生破坏,然后向前上方扩展,最终破坏范围集中在掌子面斜上方的一个火焰形状内,未发展至地表.

参考文献:

- [1] 胡亚峰,董新平,马晓良,等.浅埋软弱地层隧道施工中掌子面稳定性研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(6):1368-1373.
- [2] 宁文国.基于隧道开挖空间效应的掌子面坍塌分析[J].山西建筑,2013,39(28):138-140.
- [3] 杨峰.浅埋隧道围岩稳定性的极限分析上限法研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [4] Li Y, Emeriault F, Kastner R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009,24(4):472-481.
- [5] Ibrahima E, Soubra A H, Mollon G, et al. Three-dimensional face stability analysis of pressurized tunnels driven in a multilayered purely frictional medium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015,49(1):18-34.
- [6] 柳群义,朱自强,钟正强,等.基于 Hoek-Brown 准则的隧道围岩屈服接近度分析[J].岩土力学,2009,30(8):2247-2251.
- [7] 张黎明,郑颖人,王在泉,等.有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J].岩土力学,2007,28(1):97-102.
- [8] Nomikos P P, Sofianos A I, Tsoutrelis C E. Symmetric wedge in the roof of a tunnel excavated in an inclined stress field[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002,39(1):59-67.
- [9] Loganathan N, Poulos H G, Stewart D P. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations[J]. Geotechnique, 2000,50(3):283-294.
- [10] Bilotta E, Taylor R N. Centrifuge modelling of tunnelling close to a diaphragm wall[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2005,5(1):27-41.
- [11] Chen W F. Limit analysis and soil mechanics[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [12] Lee I M, Nam S W. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001,16(1):31-40.
- [13] Lee I M, Nam S W. Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004,19(3):273-281.
- [14] Lee I M, Lee J S, Nam S W. Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004,19(6):551-565.
- [15] Fraldi M, Guarracino F. Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek-Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(4):665-673.
- [16] 安永林,黄勘,彭立敏,等.强度折减法分析隧道整体稳定性[J].公路交通科技,2011,28(3):138-141.