

浅埋大跨偏压隧道的破坏模式分析

白传鹏^{1,2}, 郑盘石^{3,*}, 王 勇², 张清光⁴, 陈建斌³

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 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, 湖北 武汉 430071; 3. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023; 4. 武汉光谷建设投资有限责任公司, 湖北 武汉 430205)

摘要: 为研究浅埋大跨偏压隧道破坏模式, 利用有限元强度折减法对三心圆曲墙式断面隧道和马蹄形断面隧道在不同埋深、坡比工况下的塑性应变和安全系数进行研究, 得到隧道的破坏模式及发展规律: 无偏压条件下, 随着埋深增加, 三心圆曲墙式断面隧道最大塑性应变由拱肩向下转移到边墙附近, 而对于马蹄形断面隧道, 当埋深较浅时, 在拱肩和边墙出现破裂面, 随着埋深的增加拱肩的破裂面逐渐向边墙脚转移; 当存在偏压时, 三心圆曲墙式断面隧道浅埋侧先破坏, 随着埋深的增加, 最大塑性应变由浅埋侧拱肩移到浅埋侧边墙位置, 对于马蹄形隧道, 破裂面从浅埋侧拱肩和深埋侧边墙转移到墙角; 在同一埋深条件下, 三心圆曲墙式断面隧道安全系数高于马蹄形隧道安全系数。

关键词: 浅埋偏压隧道; 大跨度; 有限元强度折减法; 埋深; 坡比; 安全系数

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2017.S2.018

中图分类号: U 45

文献标志码: A

文章编号: 2096-4498(2017)S2-0121-07

Analysis of Failure Mode of Shallow-buried Asymmetrically-pressured Tunnel with Large Span

BAI Chuanpeng^{1,2}, ZHENG Panshi^{3,*}, WANG Yong², ZHANG Qingguang⁴, CHEN Jianbin³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 3. Wuhan Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, Hubei, China; 4. Wuhan Optical Valley Construction Co., Ltd., Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: The failure mode of shallow-buried asymmetrically-pressured tunnel with large span is studied in the paper. The plastic strain and safety factor of triple-center curved wall tunnel and horse-shoe shaped tunnel under different depths and slope ratios are analyzed by finite element strength reduction method. Some conclusions are drawn as follows: 1) When the tunnel is under normal pressure condition, the maximum plastic strain of triple-center curved wall tunnel transfers from the arch to tunnel sidewall with the burial depth increase. When the tunnel is shallow-buried, the fracture surface of horse-shoe shaped tunnel transfers from the arch and sidewall to wall feet with the burial depth increase. 2) When the tunnel is under asymmetrically-pressured condition, the failure firstly occurs in tunnel shallow buried side, and the maximum plastic strain of triple-center curved wall tunnel transfers from the arch to sidewall with the burial depth increase. The fracture surface of horse-shoe shaped tunnel transfers from the arch of the tunnel shallow-buried side and sidewall of the deep-buried side to the tunnel wall feet with the burial depth increase. 3) The safety factor of triple-center curved wall tunnel is larger than that of horse-shoe shaped tunnel under same buried depth.

Keywords: shallow-buried asymmetrically-pressured tunnel; large span; finite element strength reduction method; burial depth; slope ratio; safety factor

收稿日期: 2017-06-01; 修回日期: 2017-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579237); 湖北省地方标准计划项目(2013014)

第一作者简介: 白传鹏(1991—),男,湖北鄂州人,安徽理工大学土木工程专业在读硕士,研究方向为岩土力学与工程。E-mail: 1084071649@qq.com。* 通信作者: 郑盘石, E-mail: pcbtwl@163.com。

0 引言

在我国隧道建设中浅埋隧道占一定比例,尤其是在城市地下工程建设中,很多隧道都是在浅埋或超浅埋条件下建设的^[1-2]。目前,浅埋隧道的上覆层越来越薄,隧道开挖后,围岩不容易形成自然拱,若施工支护不当,容易引发隧道坍塌事故。比较典型的如成昆铁路^[3]在隧道的建设和运营中,除发生大量不同规模的塌方外,许多隧道还出现了洞口仰坡变形、洞身偏压问题。因此对浅埋隧道建设的研究显得尤为必要。

国内外许多学者对浅埋偏压隧道进行了研究,并取得了很多成果。如:文献[4]运用有限元对浅埋偏压隧道的开挖方案进行数值仿真模拟,对比不同开挖工况下围岩和支护结构受力变形规律,并分析埋深、偏压角度、围岩等级对隧道稳定的影响;文献[5]基于“规范法”计算了浅埋偏压开挖围岩压力,并分析埋深、偏压角度、围岩等级对隧道稳定的影响;文献[6]采用刚性块上限法和极限分析法研究黏土不排水圆形隧道在平面应变情况下的稳定性;文献[7-8]在摩尔-库仑准则的基础上,采用有限元模拟了浅埋沙土隧道开挖时保持掌子面稳定性需要的最小压力;文献[9]基于弹塑性理论和极限平衡理论,采用有限元极限分析方法求解浅埋隧洞松散压力;文献[10-11]采用离心机试验和有限元模拟方法分析砂土条件下浅埋圆形隧道的地震效应;文献[12]在太沙基模型的基础上采用线性和非线性破坏准则,通过改进太沙基理论来推导浅埋隧道垂直土压力,并用极限平衡法求解水平土压力;文献[13]从围岩不均匀变形的角度研究土压力拱效应,结果表明当隧道埋深较浅时,土压力拱的作用范围会影响到地表,尚未完全发挥支撑作用,表现为隧道上方土体整体沉陷变形;文献[14]对偏压隧道下的岩体应力状态进行了详细的分析,推导出偏压状态下的围岩应力解析解,并对偏压状态下的应力场特性进行探讨。综上可知,对隧道围岩压力及破坏模式的认识经历了很长的阶段,数值极限方法也已成为确定围岩破坏模式的有效手段之一。现行规范中对偏压隧道围岩的压力及破坏模式确定没有考虑隧道断面形式的影响,对不同断面类型隧道设计和施工存在不确定性和随意性。

目前,通常的数值分析方法和传统的极限分析方法不能直接得出隧道的安全系数和应力变化规律。1975年,英国力学家辛克维兹(O. C. Zienkiewicz)提出了有限元强度折减法^[15],文献[16-18]指出可以采用此方法求解隧道的安全系数,但当前工程上很少采用安全系数对隧道围岩的稳定性进行研究,在设计和施工时一般按照经验取值。本文以武汉市东湖开发区拥军路浅埋大跨偏压隧道为研究对象,利用有限元强度

折减法研究三心圆曲墙式断面隧道和马蹄形断面隧道开挖时隧道的破坏模式及安全系数,以期为工程设计及施工提供参考。

1 有限元强度折减法计算原理

传统的边坡稳定极限平衡方法^[19]计算安全系数采用如下公式:

$$w = \frac{s}{\tau} = \frac{\int_0^l (c + \sigma \tan \varphi) dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (1)$$

式中 w 、 s 、 τ 分别为传统的安全系数、滑面上的抗剪强度和滑面上的实际剪力。

将式(1)两边同除以 w , 则式(1)变为:

$$1 = \frac{\int_0^l (\frac{c}{w} + \sigma \frac{\tan \varphi}{w}) dl}{\int_0^l \tau dl} = \frac{\int_0^l (c' + \sigma \tan \varphi') dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (2)$$

其中

$$c' = \frac{c}{w} \quad (3)$$

$$\varphi' = \arctan(\frac{\tan \varphi}{w}) \quad (4)$$

由此可见,传统的极限平衡方法是将土体的抗剪强度指标 c 、 $\tan \varphi$ 减小为 c/w 、 $\tan \varphi/w$, 使岩土体达到极限稳定状态,此时的 w 即为安全系数。

有限元强度折减法采用理想弹塑性模型,目前广泛采用摩尔-库仑屈服准则,即

$$F = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + (\cos \theta_\sigma - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi = 0 \quad (5)$$

式中: I_1 、 J_2 、 θ_σ 分别为应力张量的第一不变量、应力偏量的第二不变量和洛德角; c 、 φ 为岩体的黏聚力和内摩擦角。

由于摩尔-库仑准则的屈服面在 π 平面上为不规则的六角形,存在尖顶和棱角,给数值计算带来困难,因此,有限元法采用了简化方法,利用广义米赛斯屈服准则^[16]。此时屈服面为圆形,其表达式为:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (6)$$

式中 α 、 k 是与围岩材料黏聚力 c 和内摩擦角 φ 有关的常数。

有限元强度折减法通常采用式(7)定义安全系数,即

$$F = \frac{\alpha}{w_1} I_1 + \sqrt{J_2} = \frac{k}{w_1} \quad (7)$$

式中 w_1 为达到极限状态时的安全系数。

本文采用摩尔-库仑等面积圆屈服准则代替传统摩尔-库仑准则^[20],其面积等于不等角六边形摩尔-库仑屈服准则,按此准则计算的塑性区能比较准确地

反映围岩实际塑性区的大小,其系数 α, k 计算如下:

$$\alpha = \frac{2\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{2\sqrt{3} \pi (9 - \sin^2 \varphi)}}, \quad (8)$$

$$k = \frac{6\sqrt{3} c \cos \varphi}{\sqrt{2\sqrt{3} \pi (9 - \sin^2 \varphi)}}. \quad (9)$$

采用有限元强度折减法计算时,首先选取初始折减系数,折减土体强度参数,将折减后的参数作为下一步计算时的输入值进行有限元计算,若程序收敛,则说明土体处于稳定状态;然后继续增加折减系数,直到程序不收敛为止,此时的滑动面即为实际滑动面,这种方法称为土体强度折减系数法。

2 实例分析

2.1 工程概况

东湖开发区拥军路隧道设计长度为 333 m,其中暗挖段 265 m,明挖段 68 m。暗挖段隧道顶最小埋深约 2.2 m,最大埋深约 13 m,平均埋深约 6.5 m。根据工程地质勘察报告,隧道场地主要分布岩层为志留系砂岩、泥盆系石英砂岩、泥岩和石炭系灰岩。本文选取隧道出口段 K0+972 段面,该断围岩以强风化泥质砂岩为主,属 V 级围岩,地形偏压坡比为 1:4。

利用 ABAQUS 软件进行模拟,采用摩尔-库仑等面积屈服准则,按照平面应变问题分析隧道的破坏模式。模型边界条件横向取 100 m(约 5 倍洞径),纵向取 30 m,竖向下边界取 30 m(约 3 倍洞高),上边界为山体实际边界,岩体力学参数如表 1 所示。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rock

围岩	弹性模量/ GPa	泊松比	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
风化泥质砂岩	0.162	0.35	19	0.1	25

2.2 隧道施工过程

先开挖左侧导洞(浅埋侧)上台阶,再开挖右侧导洞(深埋侧)上台阶—开挖左侧导洞下台阶,随后开挖右侧导洞下台阶—开挖中导洞上台阶及下台阶,导洞错开距离保持在 16 m 左右—各导洞纵向 30 m 开挖完成以后拆除临时中隔壁,同时施作二次衬砌。在开挖导洞下台阶时拆除临时仰拱。

2.3 破坏模式分析

2.3.1 无偏压条件下浅埋隧道破坏模式分析

为比较分析不同埋深下隧道的破坏模式,采用有限元强度折减法对 1 个洞跨 18 m、洞高 11.5 m 的三心圆曲墙式断面隧道与 1 个洞跨 18 m、洞高 11.5 m、拱高 3 m 的马蹄形断面隧道进行分析研究。不同埋深下 2 种洞形的等效塑性应变云图和安全系数如图 1 和图 2 所示。

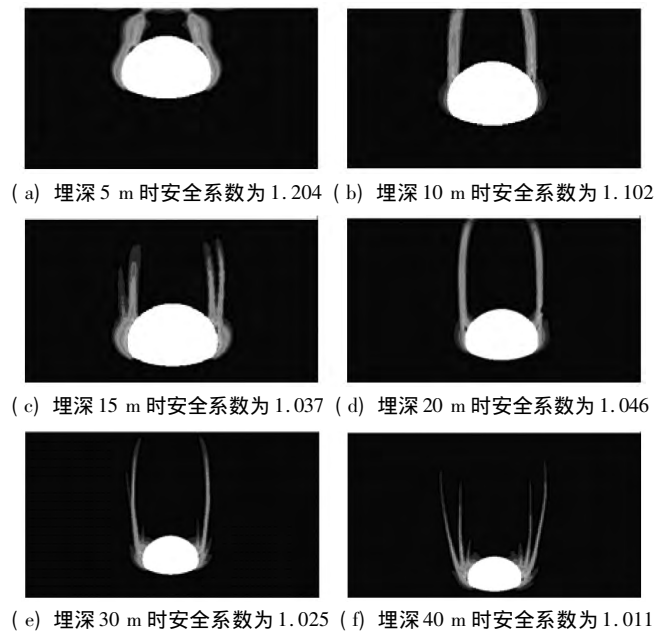


图 1 三心圆曲隧道的等效塑性应变图

Fig. 1 Diagrams of equivalent plastic strain of triple-center curved wall tunnel

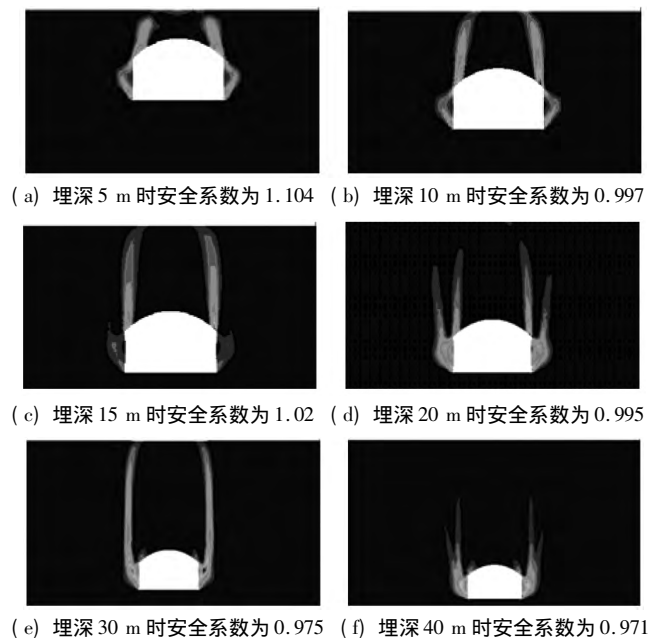


图 2 马蹄形隧道的等效塑性应变图

Fig. 2 Diagrams of equivalent plastic strain of horse-shoe shaped tunnel

对于三心圆曲墙式断面,由图 1(a) 可知,当埋深为 5 m 时,主要在拱腰处出现沿地表方向的破裂面,随着埋深的增加破坏区域越来越大。由图 1(c) 可知,当埋深为 15 m 时,在原有的破裂面下方出现了另一条向上发展的破裂面。当埋深达到 20 m 时,破坏模式开始发生变化,最大塑性应变位置由拱腰移至拱脚处,破裂面沿拱脚发展到地表。随着埋深增加到 40 m 时,由图 1(f) 可知,最大塑性应变发生在拱边墙附近,破裂面沿拱边墙向上发展。

对于马蹄形断面隧道,由图 2(a)可知,当埋深为 5 m 时,在马蹄形隧道断面侧壁和拱顶均出现破裂面,其破坏模式是侧壁先出现破坏,然后拱顶破裂面沿拱肩向上发展直至地表。随着埋深的增加,破裂面逐渐增大。当埋深增大到 20 m 时,破坏模式开始发生变化,由图 2(d)可知,在墙角处出现了 1 条沿地表方向的新破裂面。当埋深达到 30 m 时,由图 2(e)可知,拱肩处的破裂面消失,其破坏模式是侧壁先出现破裂面,随后另一条破裂面沿着拱脚向上发展。当埋深增加到 40 m 时,由图 2(f)知,破坏模式与埋深为 30 m 时相似,但拱顶上方破裂范围有扩大的趋势。

由以上分析可知,三心圆曲墙式断面隧道的破裂面在拱腰处形成,而马蹄形断面隧道的破裂面先在两侧壁形成然后沿拱肩向上形成破裂面。随着埋深的增加,三心圆曲墙式断面最大塑性应变由拱腰向下转移到边墙附近,而在马蹄形断面隧道中出现由墙角向上的破裂面。

2.3.2 偏压条件下浅埋隧道破坏模式分析

坡比分为 1:4 时三心圆曲墙式断面和马蹄形断面隧道在不同埋深条件下的等效塑性应变云图及安全系数如图 3 和图 4 所示。

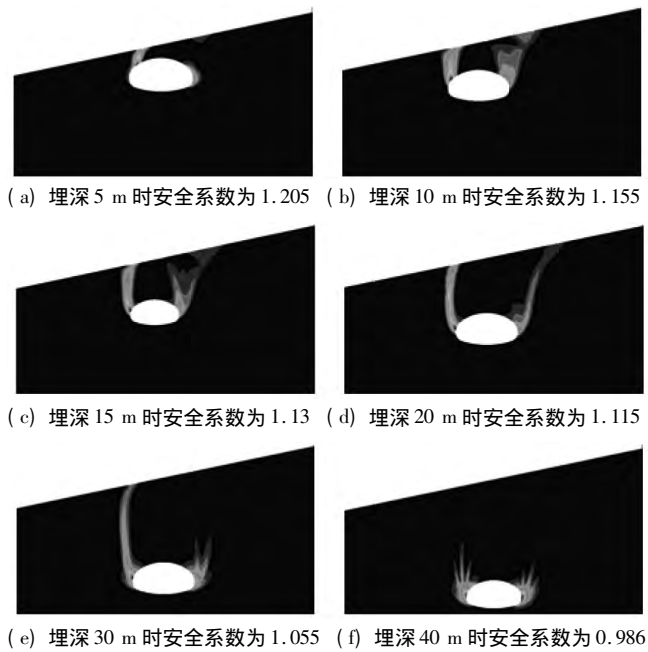


图 3 坡比 1:4 条件下三心圆曲墙式断面隧道的等效塑性应变图
Fig. 3 Diagrams of equivalent plastic strain of triple-center curved wall tunnel with slope ratio of 1:4

对于三心曲墙式断面隧道,当坡比为 1:4 时,由图 3(a)可知,埋深为 5 m 时,破裂面由浅埋侧拱脚延伸至地表,随着埋深的增加,在深埋侧拱脚也会出现破裂面贯通至地表,同时最大等效塑性应变由浅埋侧拱脚位置向下移;当埋深达到 20 m 时,最大塑性应变在浅

埋侧边墙位置;随着埋深的进一步增加,当埋深达到 30 m 时,由图 3(e)可知在浅埋侧出现由边墙向地表贯通的等效塑性应变带,而深埋侧破裂面并未贯通;当埋深达到 40 m 时,在两侧边墙均会出现较大的塑性应变,但是塑性区并未贯通到地表。

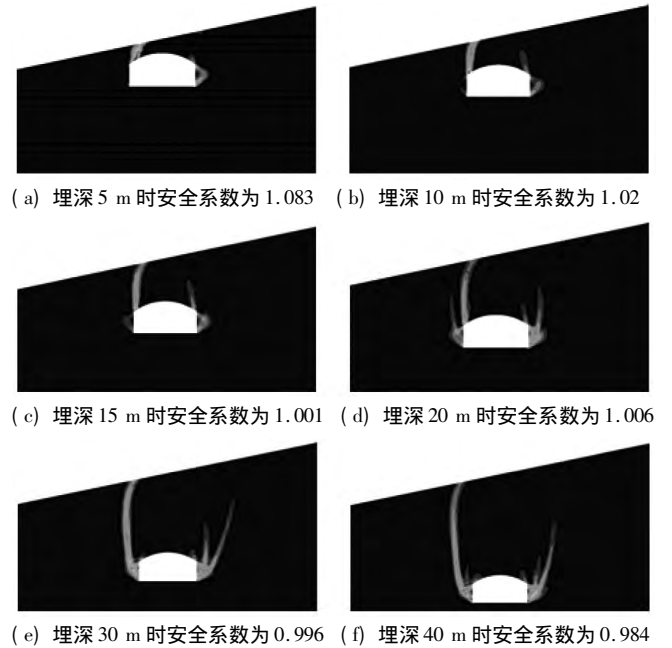


图 4 坡比 1:4 条件下马蹄形断面隧道的等效塑性应变图
Fig. 4 Diagrams of equivalent plastic strain of horse-shoe shaped tunnel with slope ratio of 1:4

对于马蹄形断面隧道,坡比为 1:4 时,由图 4(a)可知,当埋深为 5 m 时,浅埋侧边缘出现沿拱肩处贯通至地表的破裂面,在深埋侧边墙处也出现破裂面,但没有贯通至地表;随着埋深增加,由图 4(b)知,埋深为 10 m 时,浅埋侧边墙会增加 1 条破裂面,同时在深埋侧拱肩处也会出现沿地表的塑性区;随着埋深进一步增加,当埋深为 20 m 时在两侧侧墙角均出现沿地表的带状塑性区;当埋深增加到 40 m 时,破裂面由拱肩向边墙角转移,最大塑性区也由拱肩转移到墙角处。

坡比为 1:2 时三心圆曲墙式断面和马蹄形断面隧道在不同埋深条件下的等效塑性应变云图及安全系数如图 5 和图 6 所示。

当坡比为 1:2 时,三心圆曲墙式断面隧道破坏模式的发展情况与坡比为 1:4 时相似,不同的是从 15 m 埋深开始深埋侧难以形成塑性贯通区。

对于坡比为 1:2 的马蹄形隧道,与坡比 1:4 时的破坏模式有所不同,当埋深为 10 m 时,深埋侧拱肩没有出现沿地表的塑性区,而在深埋侧墙角出现斜向上贯通至地表的塑性带;当埋深超过 20 m 时,主要以侧墙的破坏为主。

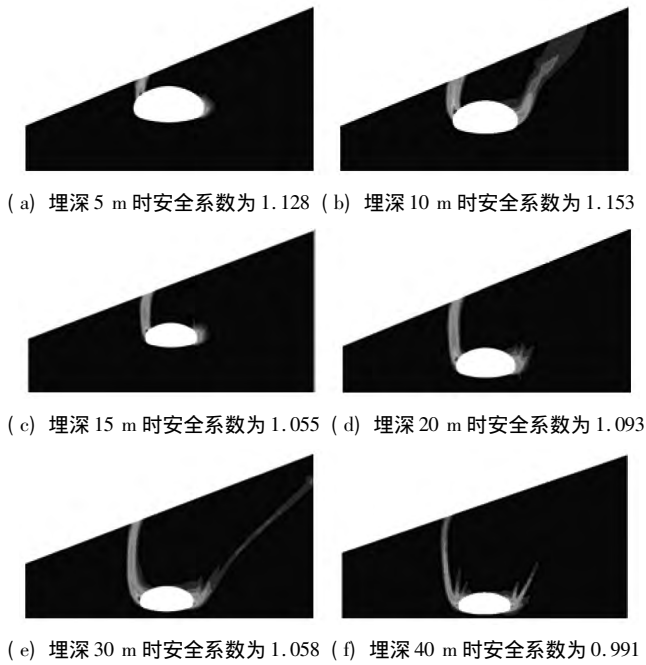


图 5 坡比 1:2 条件下三心圆曲墙式断面隧道的等效塑性应变图
 Fig. 5 Diagrams of equivalent plastic strain of triple-center curved wall tunnel with slope ratio of 1:2

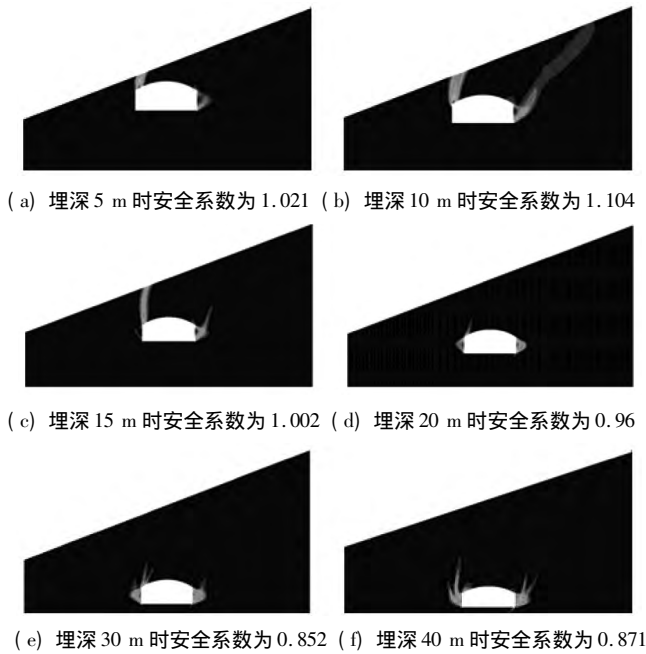


图 6 坡比 1:2 条件下马蹄形断面隧道的等效塑性应变图
 Fig. 6 Diagrams of equivalent plastic strain of horse-shoe shaped tunnel with slope ratio of 1:2

2.4 安全系数分析

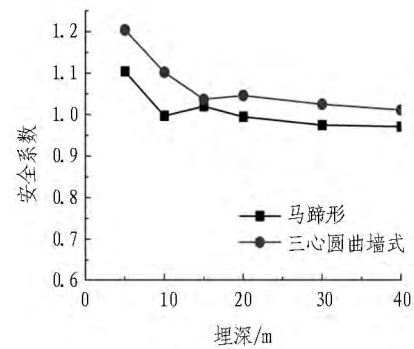
三心圆曲墙式断面隧道和马蹄形断面隧道在不同埋深不同坡比条件下的安全系数如表 2 所示,其安全系数的变化情况如图 7 和图 8 所示。由图 7(a)、7(b)、7(c) 可知,同一条件下三心圆曲墙式断面隧道的安全系数大于马蹄形断面隧道的安全系数。在同一坡比的条件下,随着埋深的增加安全系数呈递减趋势,同时不同断面类型隧道的安全系数趋于相等,说明随

着埋深的增加,断面类型对于隧道安全系数的影响越来越小;由图 7(d)、7(e) 可知,当坡比变化时,三心圆曲墙式断面隧道的安全系数变化不大,而马蹄形隧道的安全系数变化比较明显,当坡比增加到 1:2 时,隧道安全系数明显降低,随着埋深的增加,安全系数趋于相等。

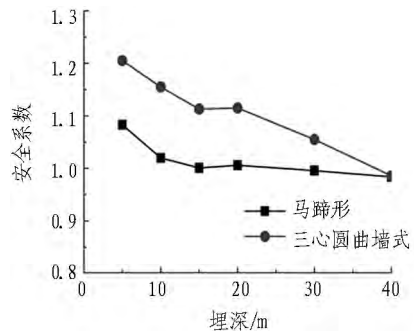
表 2 不同工况下的安全系数

Table 2 Safety factors under different working conditions

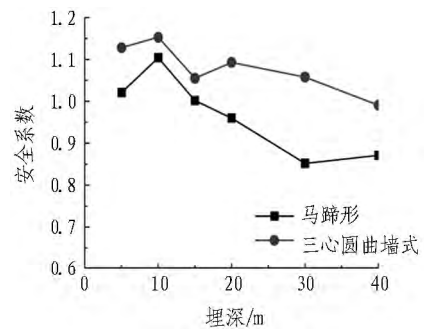
埋深/m	三心圆曲墙式断面			马蹄形断面		
	0	1:4	1:2	0	1:4	1:2
5	1.204	1.205	1.128	1.104	1.083	1.021
10	1.102	1.155	1.153	0.997	1.02	1.104
15	1.037	1.13	1.055	1.02	1.001	1.002
20	1.046	1.115	1.093	0.995	1.006	0.96
30	1.025	1.055	1.058	0.975	0.996	0.852
40	1.011	0.986	0.991	0.971	0.984	0.871



(a) 坡比 0



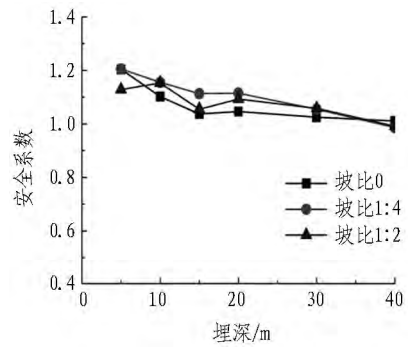
(b) 坡比 1:4



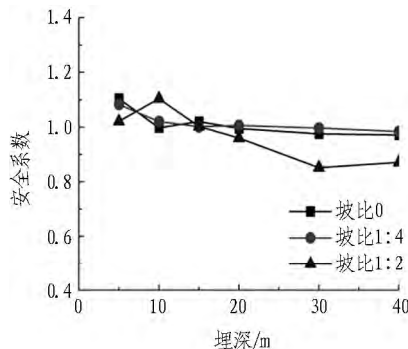
(c) 坡比 1:2

图 7 不同偏压条件下安全系数与埋深的关系曲线

Fig. 7 Relationship between safety factor and burial depth under different slope ratios



(d) 三心圆曲墙式



(e) 马蹄形

图8 不同断面条件下安全系数与埋深的关系曲线

Fig. 8 Relationship between safety factor and burial depth under different tunnel cross-sections

3 结论与讨论

对三心圆曲墙式断面隧道和马蹄形断面隧道在不同埋深和不同偏压角2组工况下进行数值模拟,分析其等效塑性应变云图和安全系数,得到以下结论:

1) 通过比较不同断面类型、不同埋深等工况下隧道的安全系数可知,同一条件下三心圆曲墙式断面隧道的安全系数高于马蹄形隧道的安全系数。

2) 隧道的破坏模式与埋深及偏压角等因素相关。无偏压条件下,随着埋深的增加,三心圆曲墙式断面隧道破裂面由拱肩向下移至边墙脚,当存在偏压时,浅埋侧拱肩先破坏,随着埋深的增加,最大塑性应变由浅埋侧拱肩移到浅埋侧边墙位置;对于马蹄形隧道,无偏压条件下,埋深较浅时,在拱肩和边墙出现破裂面,随着埋深增加拱肩的破裂面逐渐向边墙脚转移,当存在偏压且埋深较浅时,浅埋侧拱肩和深埋侧边墙会先出现破裂面,随着埋深的增加,浅埋侧边墙和深埋侧边墙脚也会出现破裂面。

3) 分析三心圆曲墙式断面隧道和马蹄形断面隧道在偏压条件下的安全系数,发现偏压作用对于三心圆曲墙式隧道安全系数影响较小,对马蹄形断面隧道影响较大。浅埋条件下,随着埋深的增加,安全系数有降低的趋势;随着埋深增大,不同断面类型隧道安全系数有接近的趋势,说明随着埋深的增加,隧道断面类型对安全系数的影响并不明显,所以当隧道处于浅埋偏

压的情况下应该选择三心圆曲墙式断面,当隧道处于深埋偏压的情况下,无论选择三心圆曲墙式断面还是马蹄形断面区别不大。

本文对大跨偏压隧道破坏模式的分析是建立在假定围岩均质、连续及各向同性的前提下,在此基础上考虑围岩力学性质随埋深的变化。不同的施工方法和支护措施等也会对浅埋偏压隧道破坏模式产生影响,这些影响也有待进行研究。

参考文献(References):

- [1] 宋风超,许英姿,韩昌瑞,等. 沿街城市浅埋隧道的三维施工效应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 141.
SONG Fengchao, XU Yingzi, HAN Changrui, et al. 3D simulation and analysis on effect of construction process of urban shallow tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 141.
- [2] 安建永,项彦勇,安付军,等. 浅埋隧道施工对地表沉降影响的简化解析计算[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 184.
AN Jianyong, XIANG Yanyong, AN Fujun, et al. Simplified analytic calculation of the influence of shallow tunnel construction on ground deformation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(1): 184.
- [3] 周宗青,李术才,李利平,等. 浅埋隧道塌方地质灾害成因及风险控制[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1375.
ZHOU Zongqing, LI Shucai, LI Liping, et al. Causes of geological hazards and risk control of collapse in shallow tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1375.
- [4] 赵永国,邵生俊,韩常领. 浅埋、偏压隧道开挖施工方案的仿真分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 509.
ZHAO Yongguo, SHAO Shengjun, HAN Changling. Simulation on different excavation of the shallow-buried tunnel under the uneven rock pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 509.
- [5] ZHOU Xiaojun, YANG Changyu. Asymmetric rock pressure on shallow tunnel in strata with inclined ground surface [J]. Journal of Southwest Jiaotong University(English Edition), 2007, 15(3): 203.
- [6] WILSON D W, ABBO A J, SLOAN S W, et al. Undrained stability of a circular tunnel where the shear strength increases linearly with depth [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(9): 1328.
- [7] RUSE N M. Räumliche betrachtung der standsicherheit der ortsbau bei tunnel vortrieb [M]. [S. l.]: Institut für Geotechnik, 2004.

- [8] VERMEER P A , RUSE N , MARCHER T. Tunnel heading stability in drained ground [J]. *Felsbau* , 2002 , 20(6) : 8.
- [9] 向钰周,郑颖人,王成,等. 浅埋土体隧洞松散压力计算方法的探讨: 隧道稳定性分析讲座之四 [J]. *地下空间与工程学报* , 2012 , 8(3) : 467.
XIANG Yuzhou , ZHENG Yingren , WANG Cheng , et al. New method of calculation about shallow buried tunnel loosening pressure [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering* , 2012 , 8(3) : 467.
- [10] BILOTTA E , SILVESTRI F. A predictive exercise on the behaviour of tunnels under seismic actions [C] // *Proceedings of IS-Roma 2011 7th International Symposium Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Florida: CRC Press , 2012.
- [11] AMOROSI A , BOLDINI D , FALCONE G. Numerical prediction of tunnel performance during centrifuge dynamic tests [J]. *Acta Geotechnica* , 2014 , 9(4) : 581.
- [12] LEI Mingfeng , PENG Limin , SHI Chenghua. Calculation of the surrounding rock pressure on a shallow buried tunnel using linear and nonlinear failure criteria [J]. *Automation in Construction* , 2014 , 37: 191.
- [13] 路得春,曹胜涛,张波,等. 隧道开挖围岩土压力拱效应分析 [J]. *地下空间与工程学报* , 2015 , 11(6) : 1421.
LU Dechun , CAO Shengtao , ZHANG Bo , et al. Soil arching effect during tunnel excavation [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering* , 2015 , 11(6) : 1421.
- [14] 王立忠,郭东杰. 偏压隧道二次应力场分析及应用 [J]. *力学与实践* , 2000 , 22(4) : 25.
WANG Lizhong , GUO Dongjie. Secondary stress analysis of slope tunnel [J]. *Mechanics in Engineering* , 2000 , 22(4) : 25.
- [15] ZIENKIEWICZ O C , HUMPHESON C , LEWIS R W. Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics [J]. *Geotechnique* , 1975 , 25(4) : 671.
- [16] 胡文清,郑颖人,种昌云. 木寨岭隧道软弱围岩段施工方法及数值分析 [J]. *地下空间* , 2004 , 24(2) : 194.
HU Wenqing , ZHENG Yingren , ZHONG Changyun. Construction technique and numerical simulation analysis for the Muzhailing Tunnel with weak surrounding rock mass [J]. *Underground Space* , 2004 , 24(2) : 194.
- [17] 郑颖人,胡文清,王敬林. 强度折减有限元法及其在隧道与地下洞室工程中的应用 [J]. *现代隧道技术* , 2004 (增刊) : 239.
ZHENG Yingren , HU Wenqing , WANG Jinglin. Finite element strength reduction method and its application to tunnel and underground space engineering [J]. *Modern Tunnelling Technology* , 2004(S) : 239.
- [18] 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.
ZHANG Liming , ZHENG Yingren , WANG Zaiquan , et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels [J]. *Rock and Soil Mechanics* , 2007 , 28(1) : 97.
- [19] 郑颖人,龚晓南. 岩土塑性力学基础 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
ZHENG Yingren , GONG Xiaonan. *Fundamentals of geotechnical plasticity* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press , 1989.
- [20] 徐干成,郑颖人. 岩石工程中屈服准则应用的研究 [J]. *岩土工程学报* , 1990 , 12(2) : 93.
XU Gancheng , ZHENG Yingren. Application study of yield criterion in rock engineering [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* , 1990 , 12(2) : 93.