

# 上软下硬地层隧道围岩渐进破坏机制分析

王鸣涛<sup>1,2</sup>, 吴波<sup>1,2</sup>, 赵勇博<sup>1,2</sup>

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 软硬结构面的存在阻断了岩体性质的连续性, 结构面倾角的位置和角度会造成多种破坏模式。文章对上软下硬地层隧道的破坏过程和破坏模式进行数值模拟研究。结果表明: 分界结构面倾角在 $30^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 时隧道稳定性较差; 围岩变形破坏特征在对称模式下, 围岩位移、破坏区和塑性区呈对称分布; 在非对称模式下, 结构面倾角和围岩的力学参数决定了破坏区的位置和范围, 破坏区的位置主要受结构面倾角的影响。

**关键词:** 地层隧道; 分界结构面; 渐进破坏; 破坏模式

**中图分类号:** TU45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2016)04-0344-08

## Study on progressive failure mechanism of surrounding rock of upper-soft and lower-hard stratum tunnel

Wang Mingtao<sup>1,2</sup>, Wu Bo<sup>1,2</sup>, Zhao Yongbo<sup>1,2</sup>

(1.College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informationization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The existence of soft and hard structural planes block the continuity of rock mass properties, the position and angle of structural plane inclination angle can cause a variety of failure modes. A simulation study on the failing process and the failure modes of the tunnel with soft and hard structural planes was conducted. The results indicate that the stability of the tunnel is considerably low when the boundary structural inclination angle is between  $30^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ; under the failure-symmetric mode, the displacement of the surrounding rock, failure zone and plastic zone are symmetrically distributed; under the asymmetrical mode the mechanical parameters of boundary structural plane inclination angle and mechanical parameters of the surrounding rock determine the location and scope of the failure zone, the location of which is mainly affected by the structural plane angle.

**Keywords:** stratum tunnel; boundary structural plane; progressive failure; failure mode

地下工程岩体是一种历经各种地质构造运动的变形与破坏, 包含各种节理的复杂地质体。岩体在某个初始应力状态下处于一定的平衡状态, 隧道的开挖打破了上述平衡状态, 使围岩发生卸荷回弹和应力重分布。如果隧道围岩应力状态变

化大, 或因隧道所处围岩质量较差, 就会导致围岩适应不了回弹应力和重分布应力的作用而丧失其稳定性<sup>[1]</sup>, 这在上软下硬地层隧道中尤为常见。所谓上软下硬地层, 即隧道断面上部是第四系的松软地层而下部是坚硬的岩石地层或者上部是软

收稿日期: 2016-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478118); 福建省自然科学基金资助项目(2014J01170)

第一作者简介: 王鸣涛(1989-), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事隧道与地下工程技术研究。

弱的岩层而下部是坚硬的岩层。即该类地层是由上部较软地层+下部硬岩地层+软硬地层分界结构面构成的复杂组合地层系统。分界结构面常常是地下水富集和渗流的通道,地下水会引起围岩软化劣化、强度降低和渗漏潜蚀等,容易引发围岩和掌子面滑移失稳;上部软弱地层常常因为埋深较浅、围岩自稳能力差,引发围岩坍塌、大变形和掌子面挤出等工程灾害。就隧道设计而言,其核心问题是如何确定合理的支护参数,而隧道围岩破坏模式往往决定了支护参数的选择<sup>[2]</sup>。因此,上软下硬地层隧道围岩破坏模式的研究对于隧道结构设计具有重要意义。

隧道围岩破坏机理与破坏形态的研究,一般是基于现场实际观察与室内模型试验,由此获得一些定性的概念,在此基础上提出一些关于破坏机理的假设<sup>[3]</sup>。周小文<sup>[4]</sup>等通过离心模型试验,对隧洞周围砂土随支护压力降低而发生位移和破坏的过程和规律进行了研究;王思敬<sup>[5]</sup>等学者针对实例分析了地下工程,总结了5种地下工程领域岩体结构常见的变形机理、方式和特征;于学馥<sup>[6]</sup>等按围岩破坏形态、破坏过程及其成因,将围岩变形破坏模式划分为局部落石破坏、拉断破坏、重剪破坏、剪切破坏、复合破坏、岩爆破坏和潮解膨胀破坏6种。而考虑上软下硬地层隧道软硬结构面倾角变化影响,从分析围岩的渐进破坏过程,到归纳围岩的变形破坏模式,少有研究。本文应用有限元强度折减法对不同分界结构面倾角下的上软下硬地层隧道围岩、匀质地层隧道围岩及圆形隧道断面围岩的破坏过程和破坏模式进行对比分析,总结出不同结构面倾角状态下隧道围岩的破坏演化规律,以期同类隧道工程建设过程中采取有效的施工方案或者切实可行的支护措施提供参考。

## 1 基本理论与假设

### 1.1 强度折减法

有限元强度折减法,即利用数值方法,不断折减地层围岩的黏结力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ ,同时进行弹塑性数值计算,直至达到极限状态,进而求得保持隧道稳定的最小安全系数。这种方法与传统的极限分析方法不同,不需要先假定破坏面。

强度折减法最初是应用于边坡稳定性计算中,随着数值极限方法的不断发展,有限元强度折

减法在边坡、地基等工程中得到了更为广泛的应用。郑颖人<sup>[7]</sup>等首先将这一方法引用到了隧道围岩的稳定性分析中,不仅可以求出围岩的最小安全系数,还可求出隧道围岩的破坏面位置及破坏模式。

按摩尔-库仑准则,强度折减系数可以定义为

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) / F_s = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (1)$$

$$c' = c / F_s, \tan \varphi' = (\tan \varphi) / F_s \quad (2)$$

式中: $F_s$ 为剪切强度折减系数; $c$ 和 $\varphi$ 均为原始抗剪强度参数; $c'$ 和 $\varphi'$ 为折减后的抗剪强度参数。

目前隧道工程采用的失稳判据有3种:①抗剪破裂面是否贯通,即通过观察塑性区大小来判断隧道是否稳定;②位移是否发生突变,即通过观察隧道围岩位移大小来判断隧道是否稳定;③计算是否收敛,即通过查看模型分析过程中的收敛性来判断隧道是否稳定。

### 1.2 基本假设

1)隧道纵向足够长,可当做平面应变问题进行分析;

2)隧道由2种地层组合而成,上部地层剪切强度小于下部地层;

3)地层隧道岩土体为理想弹塑性材料,破坏准则服从摩尔-库仑准则;

4)强度折减只对抗剪强度指标进行折减,且不考虑受拉破坏。

## 2 上软下硬地层隧道渐进破坏过程及破坏模式分析

### 2.1 上软下硬地层隧道渐进破坏过程分析

隧道采用全断面一次开挖,模拟上软下硬地层隧道开挖后毛洞状态下围岩的渐进破坏过程。针对围岩分级为上部Ⅳ级与下部Ⅲ级的上软下硬地层进行分析,对于隧道断面开挖尺寸,根据《公路隧道设计规范》(JTGD70-2004)<sup>[8]</sup>中两车道 $v=100$  km/h情况的标准断面和公路隧道建筑界限横断面组成最小宽度确定,统一将模型计算断面采用直墙拱形,保持高跨比为0.75不变<sup>[9]</sup>。模型横截面总宽取11倍洞跨,下部取2倍洞跨,拱顶上部覆土深度 $h$ 取Ⅳ级围岩一般埋深情况,即20 m<sup>[10]</sup>。软硬分界结构面采用Goodman接触单元模拟,围岩及隧道采用实体单元模拟。模拟采用的概化模型如图1所示。图中 $\beta$ 为软硬分界结构

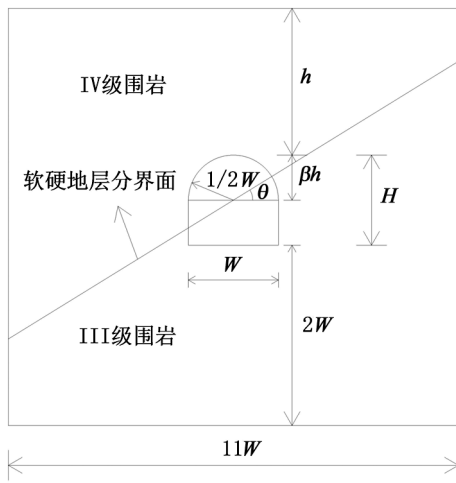


图 1 上软下硬地层隧道平面概化模型

Fig.1 Plan conception model of upper-soft and lower-hard stratum tunnel

面位置参数,取  $1/2$ ;  $\theta$  为软硬分界结构面倾角,取值范围  $0^\circ \sim 90^\circ$ ,为了进行对比,取一模型不设置软硬分界结构面;隧道跨度  $W$  取 18 m。综合参考《铁道工程地质手册》<sup>[11]</sup>、《铁路隧道设计规范》<sup>[12]</sup>、《公路隧道设计规范》<sup>[8]</sup> 中相关数据,采用表 1 中地层及结构面的物理力学参数。

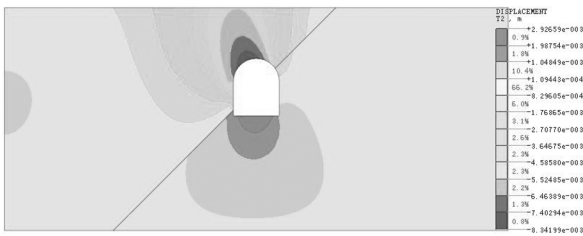
当软硬结构面倾角为  $45^\circ$  时对其进行有限元极限数值模拟,求出隧道在开挖完成时能够保持稳定的最小安全系数以及极限状态。图 2~5 为上软下硬地层隧道渐进破坏过程中的水平位移云图和塑性区云图,图 6 为隧道拱顶最大沉降值与折减系数关系折线图。

1) 强度折减系数为 1.0 (即自然状态下进行隧道开挖) 时,最大竖向位移因结构面的旋转而旋转,出现在拱顶与左拱肩之间;塑性应变主要出

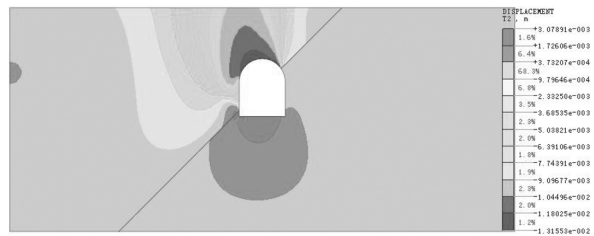
表 1 各级岩体围岩物理力学参数

Tab.1 The physical and mechanical parameters of different class rock mass

类别	容重 $\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 $c/$ MPa	法向刚度 $K_n/\text{GPa}$	切向刚度 $K_s/\text{GPa}$
III	23	6.0	0.30	39	0.70	—	—
IV	20	1.3	0.35	27	0.20	—	—
结构面	—	—	—	13	0.18	0.3	0.13



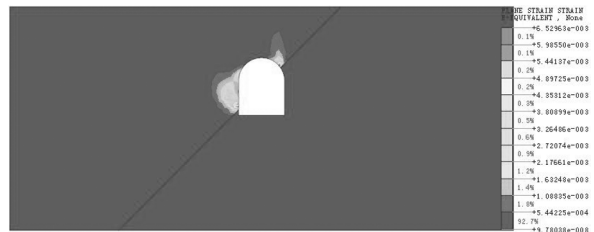
(a) 水平位移云图



(a) 水平位移云图



(b) 等效塑性云图



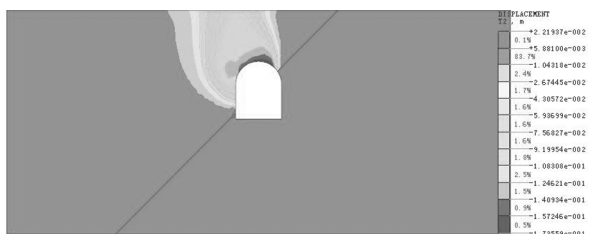
(b) 等效塑性云图

图 2 水平位移云图和等效塑性云图 (折减系数 1.0)

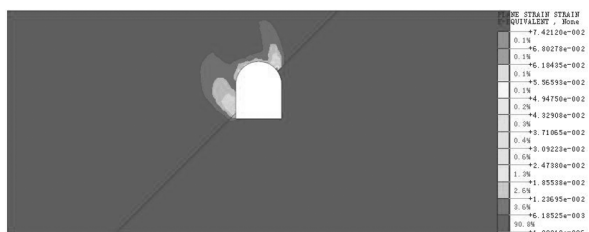
Fig.2 Horizontal displacement and equivalent plastic contours (with a reduction factor of 1.0)

图 3 水平位移云图和等效塑性云图 (折减系数 1.4)

Fig.3 Horizontal displacement and equivalent plastic contours (with a reduction factor of 1.4)



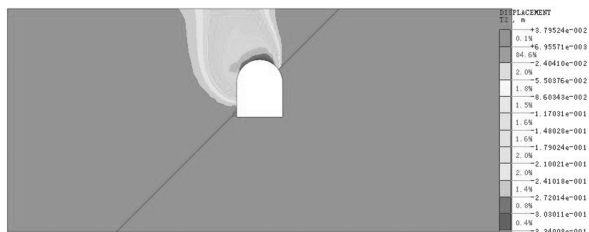
(a) 水平位移云图



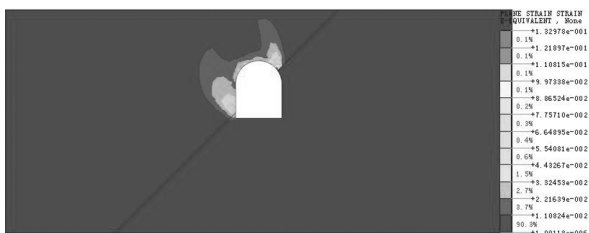
(b) 等效塑性云图

图 4 水平位移云图和等效塑性云图 (折减系数 1.8)

Fig.4 Horizontal displacement and equivalent plastic contours (with a reduction factor of 1.8)



(a)



(b)

图 5 水平位移云图和等效塑性云图 (折减系数 1.853)

Fig.5 Horizontal displacement and equivalent plastic contours (with a reduction factor of 1.853)

现在软硬结构面与洞周交点附近且左下侧塑性区的面积明显大于右上侧,这是因结构面倾角过大上部较软地层向左下侧滑移造成的,实际施工中若出现降雨或者地下水侵蚀,则隧道极有可能沿着软硬分界面出现滑移失稳现象,这是上软下硬

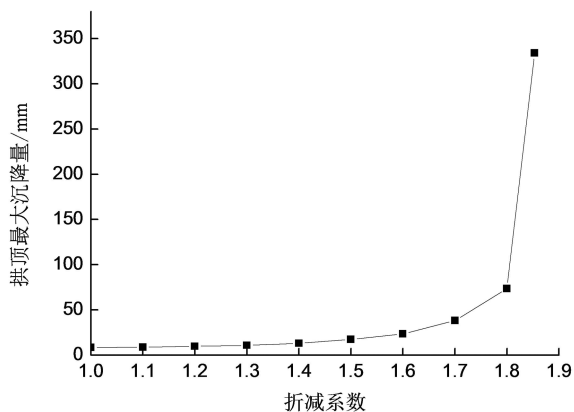


图 6 拱顶最大沉降量与折减系数关系图

Fig.6 Relationship between vault maximum settlement and (strength) reduction factor

地层隧道与均质地层隧道的最大不同之处。

2) 强度折减系数为 1.4 时,位移和塑性区变化均比较明显,结构面与左侧竖墙相交处因围岩沿结构面滑移而出现位移波动现象,最大位移在拱顶与左拱肩之间;塑性区面积逐渐增大且由右拱肩处向地表方向延伸。

3) 强度折减系数为 1.8 时,地表位移明显增大,最大沉降值的位置向拱顶右侧移动;塑性区面积也逐渐增大,上部软弱地层中洞周塑性区欲形成贯通趋势,右拱肩处塑性区进一步向地表方向延伸。

4) 强度折减系数为 1.853 时,隧道处于临界状态,拱顶位移及地表位移均发生突变,最大沉降位置发生在拱顶与右拱肩之间;上部软弱围岩中洞周塑性区贯通,围岩将沿右拱肩处向隧道内部产生无限发展的塑性应变和位移,使得上部较软岩体沿着破裂面发生无限流动,进而导致隧道整体失稳破坏。判断该模型的安全系数定为 1.853。

由图 6 可知,折减系数从 1 开始逐渐增大,在达到 1.6 之前,拱顶沉降变形随折减系数增大而缓慢增加,两者基本呈线性比例关系,表明在此阶段围岩属于弹塑性变形,隧道整体上处于稳定状态,能够继续承受外界荷载;当折减系数增大到 1.6 后,拱顶沉降变形速率进入快速增大变化阶段,表明拱顶围岩各类非贯通、半贯通裂隙逐渐贯通形成贯通裂缝,导致上部较软岩层开始断裂,进入了非稳定破裂阶段,围岩处于准极限平衡阶段。当折减系数大于 1.8 时,拱顶沉降变形几乎与表

征沉降变形位移的纵轴平行,表明上部较软地层临空面近处围岩出现刚性位移开始脱离母体而出现松动塌落<sup>[13]</sup>。当折减系数为 1.853 时拱顶围岩的塑性应变深入隧道内部,并向地表方向延伸,在拱顶上方的扇形区域内围岩亦发生了较大变形(图 5),将导致围岩整体失稳而失去承载能力。

从以上分析可得,软硬结构面倾角为  $45^\circ$  (逆时针旋转) 时上软下硬地层隧道的破坏演化规律:原始稳定状态—拱顶左侧出现最大沉降值,软硬分界结构面与洞周交点附近发生塑性应变,左侧尤为明显—最大沉降值位置由拱顶左侧逐渐向右侧移动,拱肩塑性区面积逐渐增大并由右拱肩处向地表方向延伸—拱顶及地表竖向位移发生突变,最大沉降值发生在拱顶和右拱肩之间,上部软弱围岩中洞周塑性区贯通,形成潜在破裂面—围岩沿右拱肩处向隧道内部产生无限发展的塑性应变和位移—隧道整体失稳破坏。

## 2.2 不同结构面倾角隧道变形破坏特征对比分析

因软硬地层分界结构面倾角的变化,隧道围岩的破坏模式也发生了明显的改变。但无论结构面倾角如何改变,隧道的破坏基本上都是从拱顶或拱肩处开始坍塌,进而引发隧道整体失稳破坏。故从拱顶最大沉降量的大小可以直观地看出不同分界结构面倾角对隧道稳定性的影响程度。图 7 为不同分界结构面倾角下拱顶和地表的沉降值,图 8 为不同分界结构面倾角下隧道的安全系数。

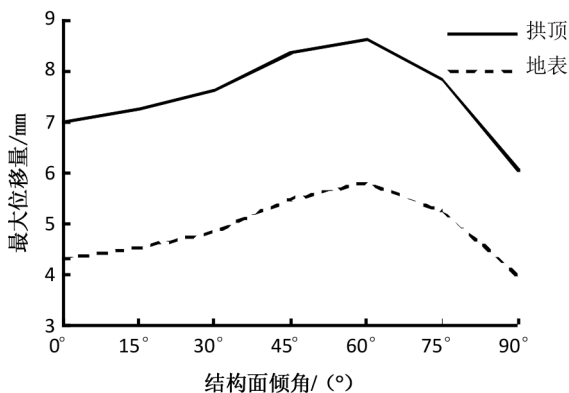


图 7 不同分界结构面倾角下拱顶和地表沉降值

Fig.7 Sedimentation value of vault and surface under different  $\theta$

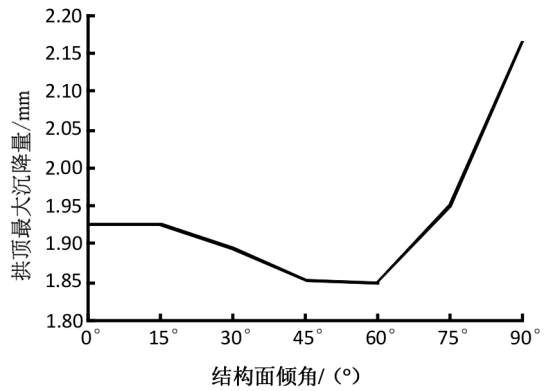


图 8 不同分界结构面倾角下隧道的安全系数

Fig.8 The safety factor of tunnel under different  $\theta$

1) 隧道拱顶沉降量曲线与地表沉降量曲线变化趋势一致,都是随分界结构面倾角的增大表现为先增大后减小。结构面倾角为  $60^\circ$  时,隧道开挖后的拱顶最大沉降量达到了最大值 8.6 mm,地表最大沉降量也达到了最大值 5.8 mm;结构面倾角为  $90^\circ$  时,拱顶最大沉降量达到最小值 6.1 mm,减小了 42.5%,地表最大沉降量达到了最小值 4.0 mm,减小了 46.2%。

2) 分界结构面倾角介于  $30^\circ$  与  $90^\circ$  之间的隧道拱顶最大沉降量曲线较陡急,故分界结构面的存在对该范围倾角的地层隧道影响较大;结构面倾角小于  $30^\circ$  的隧道拱顶最大沉降量曲线变化较平缓,故分界结构面的存在与否对该范围倾角的地层隧道影响较小。

3) 安全系数随着分界结构面倾角的增大表现为先减小后增大。倾角为  $60^\circ$  时安全系数达到最小值 1.85,倾角为  $90^\circ$  时安全系数达到最大值 2.166,增大了 17.08%。故分界结构面倾角是影响上软下硬地层隧道围岩稳定的重要因素之一。

4) 分界结构面倾角为  $90^\circ$  的地层隧道,安全系数大于其他任何倾角地层隧道的安全系数。但倾角为  $90^\circ$  的地层隧道不属于上软下硬地层隧道的范畴,只是分界结构面旋转时的极限状态,从图 7 和图 8 曲线的变化趋势可以预测当结构面倾角大于  $75^\circ$  小于  $90^\circ$  时安全系数曲线为递增趋势。故在其他力学参数一致的前提下,分界结构面倾角小于  $30^\circ$  或大于  $75^\circ$  的地层隧道更加稳定、安全。

5) 拱顶最大沉降量变化曲线与安全系数变

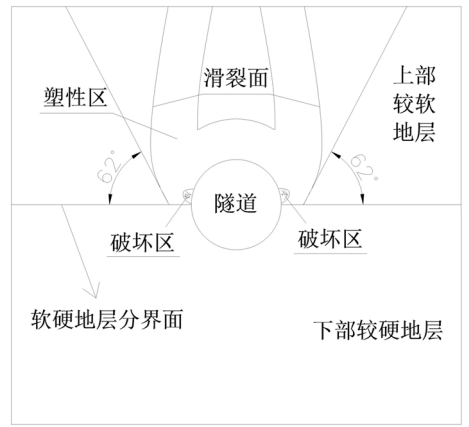
化曲线趋势是相呼应的,安全系数越大则位移越小,相应的隧道也就越稳定。而且安全系数具有严格的力学意义,故以安全系数和位移作为评价上软下硬地层隧道稳定性的双重指标合理、科学。

### 2.3 上软下硬地层隧道破坏模式分析

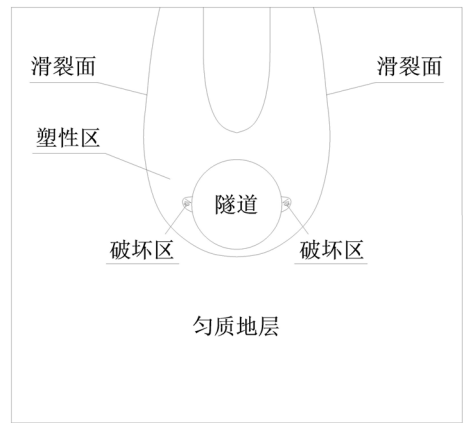
应用有限元强度折减法对不同分界结构面倾角下的上软下硬地层隧道围岩、匀质地层隧道围岩及圆形隧道断面围岩的破坏过程和破坏特征进行对比分析发现,围岩的变形破坏特征受分界结构面倾角的控制,不同分界结构面倾角下围岩的变形破坏模式可归纳为以下两种。

#### 2.3.1 对称模式

对称模式以分界结构面倾角为  $0^\circ$ 、匀质地层隧道和圆形断面隧道为代表,如图 9,在对称模式下,围岩应力、位移、塑性区分布均呈对称状态。



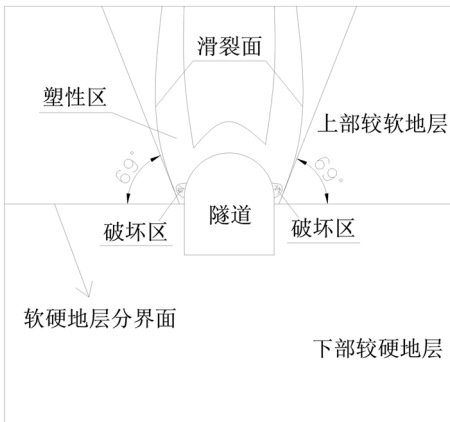
(c) 圆形断面隧道复合地层  $0^\circ$  倾角



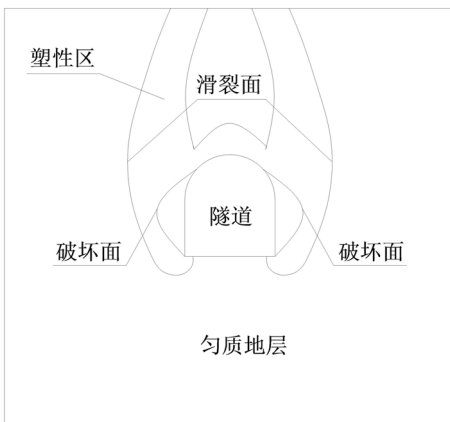
(d) 圆形断面隧道匀质地层

图 9 结构面倾角为  $0^\circ$ 、匀质地层隧道及圆形断面隧道的破坏模式

Fig.9 Failure mode of homogeneous layer and circular section tunnel at  $\theta = 0^\circ$



(a) 直墙拱形断面隧道复合地层  $0^\circ$  倾角



(b) 直墙拱形断面隧道匀质地层

#### 2.3.2 非对称模式

除了分界结构面倾角为  $0^\circ$  以外,其余的均为非对称模式,如图 10 所示,在非对称模式下,围岩应力、位移、塑性区并不与水平面对称分布,而是随着分界结构面倾角变化发生偏转,偏转的方向和幅度随着结构面倾角的变化而变化。

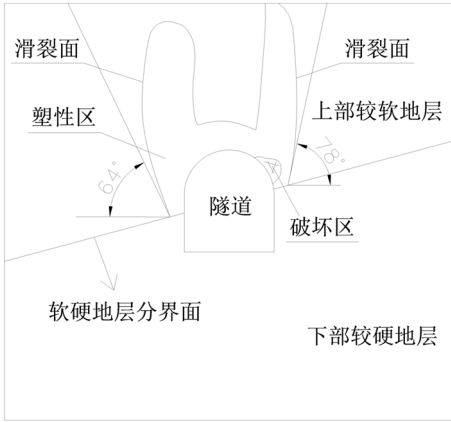
2.3.3 不同结构面倾角隧道破坏模式对比分析  
由图 9~10 可以看出:

1) 上软下硬地层隧道的破裂角范围为  $-23^\circ \sim 129^\circ$ 。其中靠近左竖墙与底板交点一侧的破裂角较小,与水平面的夹角为  $-23^\circ \sim 69^\circ$ ,靠近右拱肩一侧的破裂角较大,与水平面的夹角为  $69^\circ \sim 129^\circ$ ,两侧角度都是随着分界结构面倾角的增大而递增。

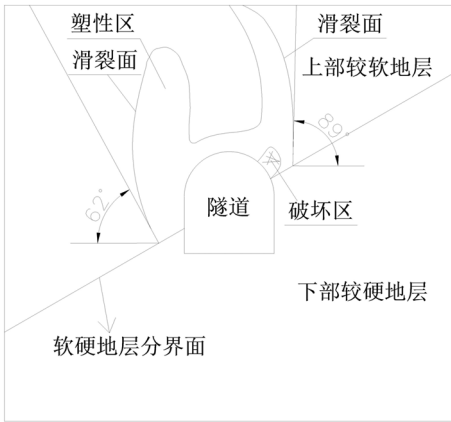
2) 分界结构面倾角越大, 隧道开挖对地表的影响范围也就越大, 则围岩的塌落量就越大。

3) 整个滑落体可近似看作一个锥形体, 各垂向和水平滑裂面均可看作抛物线。

4) 无论软硬地层分界结构面倾角如何变化, 隧道围岩的破坏区均在塑性区内, 即塑性区并非



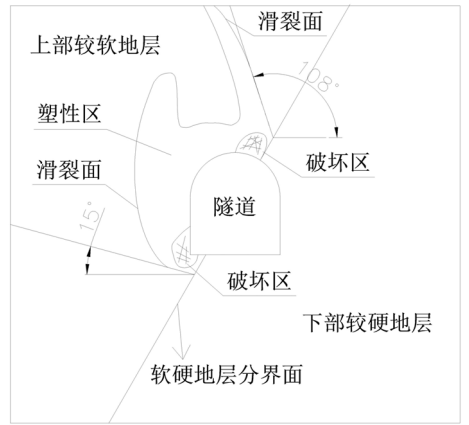
(a) 15°倾角



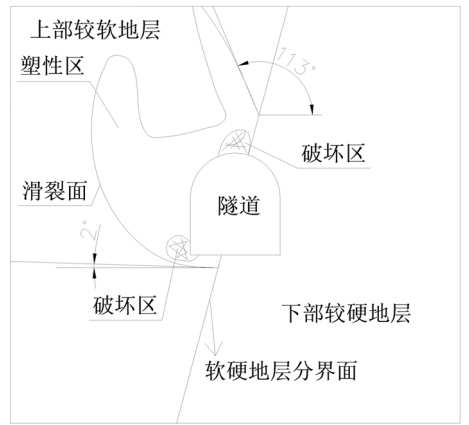
(b) 30°倾角



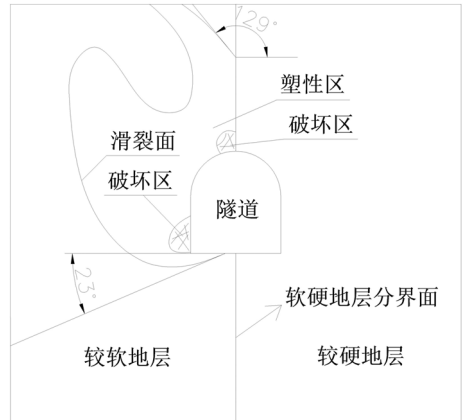
(c) 45°倾角



(d) 60°倾角



(e) 75°倾角



(f) 90°倾角

图 10 不同分界结构面倾角上软下硬地层隧道破坏模式

Fig.10 Failure mode of upper-soft and lower-hard stratum tunnel under different  $\theta$

破裂区, 但破裂区一定在塑性区之内。对于隧道工程, 塑性区贯通时围岩并不一定达到破坏状态,

只有当塑性应变发展到一定程度时,才会在围岩中形成潜在的破坏面,进而围岩达到破坏状态。

5)滑裂面的角度随着分界结构面倾角的旋转而转动,且转向一致,但破坏区位置转动的方向与结构面倾角的旋转方向并不完全一致。结构面倾角从 $0^\circ$ 旋转至 $45^\circ$ 时,破坏区位置的转动方向与结构面倾角旋转方向相反,均发生在结构面与右拱肩交点附近;结构面倾角从 $45^\circ$ 旋转至 $90^\circ$ 时,破坏区位置的转动方向与结构面倾角旋转方向相反。

因此,上软下硬地层隧道可以看作上部较软岩体在重力作用下的坍塌破坏,隧道最终破坏区可近似看作以隧道洞口为顶、以地表线为底的锥形体。软硬分界结构面倾角决定了隧道的破坏模式,分界结构面倾角和范围决定了破坏区的规模和范围。

### 3 结论

1)上软下硬地层隧道软硬分界结构面倾角介于 $30^\circ$ 与 $90^\circ$ 之间的隧道拱顶最大沉降量曲线较陡急,表明分界结构面的存在对该范围倾角的地层隧道影响较大;结构面倾角小于 $30^\circ$ 的隧道

拱顶最大沉降量曲线变化较平缓,说明分界结构面的存在与否对该范围倾角的地层隧道影响较小。

2)上软下硬地层隧道的破裂角范围为 $-23^\circ \sim 129^\circ$ 。其中靠近左竖墙与底板交点一侧的破裂角较小,与水平面的夹角为 $-23^\circ \sim 69^\circ$ ,靠近右拱肩一侧的破裂角较大,与水平面的夹角为 $69^\circ \sim 129^\circ$ ,两侧角度都随分界结构面倾角的增大而递增。

3)上软下硬地层隧道的破坏模式可以看作上部较软岩体在重力作用下的坍塌破坏。隧道最终破坏区可近似看作以隧道洞口为顶、以地表线为底的锥形体。

4)上软下硬地层隧道分界结构面倾角和围岩的力学参数决定了破坏区的规模和位置,且破坏区的位置主要受结构面倾角的影响。其具体表现为:结构面倾角从 $0^\circ$ 旋转至 $45^\circ$ 时,破坏区位置的转动方向与结构面倾角旋转方向相反,均在结构面与右拱肩交点附近;结构面倾角从 $45^\circ$ 旋转至 $90^\circ$ 时,破坏区位置的转动方向与结构面倾角旋转方向相反。

### 参考文献:

- [1] 汪成兵.软弱破碎隧道围岩渐进性破坏机理研究[D].上海:同济大学,2007.
- [2] 邓之友,彭立敏,刘正初.浅埋偏压隧道围岩渐进破坏机制分析[J].隧道建设,2012,32(2):150-155.
- [3] 郑颖人,朱合华,方正昌,等.地下工程围岩稳定分析与设计理论[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [4] 周小文,濮家骝,包承钢.隧洞拱冠砂土位移与破坏的离心模型试验研究[J].岩土力学,1999(2):33-37.
- [5] 王思敬,杨志法,刘竹华.地下工程岩体稳定分析[M].北京:科学出版社,1984.
- [6] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等.地下工程围岩稳定性分析[M].北京:煤炭工业出版社,1983.
- [7] 郑颖人,丛宇.隧道稳定性分析与设计方法讲座之二:隧道围岩稳定性分析及其判据[J].隧道建设,2013,33(7):531-536.
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组.公路隧道设计规范:JTGD70-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [9] 王明年,刘大刚,刘彪,等.公路隧道岩质围岩亚级分级方法研究[J].岩土工程学报,2009,31(10):1590-1594.
- [10] 刘大刚.公路隧道施工阶段岩体围岩亚级分级研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [11] 铁道第一勘察设计院.铁路工程地质手册[M].北京:中国铁道出版社,2002.
- [12] 铁道第二勘察设计院.铁路隧道设计规范:TB10003-2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.
- [13] 苏永华,何新亮,罗正东.基于强度折减法的隧道围岩稳定性研究[J].水文地质工程地质,2014,41(1):48-53.

(责任编辑:陈雯)