

# 浅埋偏压隧道围岩渐进破坏机制分析

邓之友<sup>1</sup>, 彭立敏<sup>1</sup>, 刘正初<sup>2</sup>

(1. 中南大学土木建筑学院, 长沙 410075;  
2. 中铁二院昆明勘察设计研究院有限责任公司, 昆明 650200)

**摘要:** 为了研究浅埋偏压隧道围岩的渐进破坏过程和破坏模式,为隧道支护参数的确定提供依据。运用自行研制的隧道模型试验装置,对浅埋偏压工况下单洞及小净距隧道的破坏过程和破坏模式进行研究。研究表明:浅埋偏压隧道的破坏模式可以看作岩体在重力作用下的坍塌破坏,且浅埋偏压隧道的偏压角度和围岩的力学参数决定了破坏体的规模和范围,破坏体的范围主要受偏压角度的影响。

**关键词:** 浅埋偏压隧道; 渐进破坏; 模型试验

**DOI:** 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.02.004

**中图分类号:** U 451+.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-741X(2012)02-0150-06

## Study on Progressive Failure Mechanisms of Rock Mass of Asymmetrically-loaded Tunnel under Shallow Cover

DENG Zhiyou<sup>1</sup>, PENG Limin<sup>1</sup>, LIU Zhengchu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Kunming Survey & Research Institute Co., Ltd. of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Kunming 650200, China)

**Abstract:** The failure process and failure modes of shallow-covered and asymmetrically-loaded single-tube tunnels or shallow-covered and asymmetrically-loaded tunnels with small net spacing are studied by means of self-developed tunnel model testing facilities. The study results show that the failure of shallow-covered and asymmetrically-loaded tunnels can be regarded as the collapse failure under the action of gravity, the scale and scope of the failure depend on the asymmetrical loading angle of the shallow-covered and asymmetrically-loaded tunnel and depend on the mechanical parameters of the rock mass, with the scope of the failure mainly depending on the asymmetrical loading angle.

**Key words:** asymmetrically-loaded tunnel under shallow cover; progressive failure; model test

### 0 引言

我国山脉纵横,地形地势陡峻险要,地质条件复杂,在交通隧道建设中,偏压隧道占有一定的比例。隧道在开挖之前,岩体处于一定的应力平衡状态,开挖使隧道围岩发生卸荷回弹和应力重分布。如果隧道所处围岩等级不高,随着掌子面向前推进,隧道围岩因隧道开挖后产生围岩应力重分布以及岩体的应变软化而发生渐进破坏。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。因此,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。

国内外很多学者都对隧道围岩破坏进行了大量的研究。周小文等<sup>[1]</sup>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;D. Sterpi 等<sup>[2]</sup>采用砂及铝棒作为模型材料,用气囊逐步卸压的方法模拟隧道开挖,对隧道围岩的破坏过程和规律进行了二维及三维的模型试验研究。模型试验是研究隧道工程问题的一种重要手段。隧道工程模型试验目前主要集中在围岩稳定性的研究方面<sup>[3-5]</sup>,同时在相似材料制备、试验设备研制、试验数据采集等方面积累了许多宝贵的经验。

但具体到V级围岩条件下浅埋偏压隧道的围岩破坏机制,相关研究并不多。故本文应用室内模型试验对浅埋偏压隧道围岩的破坏过程和破坏模式进行分析,总结出不同偏压条件下隧道围岩的破坏规律,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。

收稿日期: 2011-10-11; 修回日期: 2012-02-08

作者简介: 邓之友(1986—),男,山东济宁人,中南大学隧道专业在读硕士,现从事隧道设计工作。

## 1 浅埋偏压隧道破坏模式模型试验

### 1.1 相似理论

相似理论是相似模拟试验的理论基础和模型制作的主要依据。任何物理现象相似的充分必要条件可归纳为相似理论的3个基本定理<sup>[6-7]</sup>。

1) 相似第1定理(相似正定理):过程相似,则相似准则不变,相似指标为1。

2) 相似第2定理( $\pi$ 定理):描述相似现象的物理方程均可变成相似准则组成的综合方程。现象相似,其综合方程必然相似,即 $f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_k, \dots) = 0$ 。

3) 相似第3定理(相似存在定理):在几何相似系统中,具有相同文字的关系方程式,单值条件相似,且由单值条件组成的相似准则相等,则此两现象相似。

### 1.2 相似关系的确定

隧道模型试验要求模型与实际工程中隧道埋深以及隧道开挖空间的几何尺寸均应满足几何比。本次模型试验采用了1:20的大几何比例尺模型,根据相似理论原理,可推得各原型的物理力学参数与模型值的相似比<sup>[8-10]</sup>。

1) 几何相似比  $C_L = 20$ ;

2) 泊松比  $\mu$ 、应变  $\varepsilon$ 、摩擦角  $\phi$  相似比  $C_\mu = C_\varepsilon = C_\phi = 20$ ;

3) 容重  $\gamma$  相似比  $C_\gamma = 20$ ;

4) 弹性模量  $E$ 、内聚力  $c$ 、应力  $\sigma$  相似比  $C_E = C_c = C_\sigma = 20$ 。

### 1.3 试验目的及试验工况

#### 1.3.1 试验目的

试验主要针对单洞和小净距浅埋偏压隧道在不同偏压条件下开挖过程中,地表沉降及隧道的变形规律、围岩破裂面发展过程及隧道在塌方后所形成滑裂面的破坏模式进行研究。

#### 1.3.2 试验工况

根据试验目的和要求,共设置了6个工况进行三维模型试验,试验工况如下:

1) 单洞浅埋偏压(15,30,45°)条件下破坏试验;

2) 小净距浅埋偏压(15,30,45°)条件下破坏试验。

### 1.4 试验设备的制作及材料的选取

为保证模型试验结果的稳定性,所有试验均在专门制作的试验模型箱内进行。选取几何相似比为1:20的隧道模型,模型箱的尺寸为3.5 m × 3.0 m × 2 m(长 × 宽 × 高),要求能够分别完成单洞和小净距隧道开挖试验,因此在试验箱一侧预留3个0.5 m × 0.6 m(宽 × 高)的开挖孔。为便于观察,整个模型箱的内表面采用1.2 cm厚的透明钢化玻璃,如图1所示。



图1 模型试验箱实体图

Fig. 1 Photo of model test box

围岩材料选用黏土:炉渣:河砂=1:1:2(质量比)的配比材料,围岩相似材料力学参数如表1所示。预先在模型的底部垫1层0.5 m厚的上述配比的围岩材料,并进行压实,防止出现沉降而影响试验效果。试验加载采用先开挖后加载的方式,初期加载量为围岩材料自然堆载,所加围岩的厚度以实际工程中土体的埋深通过相似理论换算而成。为观察围岩的破坏过程及其特征,进行二次加载,先在地表铺设1层钢板整平,保证加载均匀,然后采用千斤顶在围岩上部同步逐级加载的方式来实现,加载作用持续到围岩破坏明显且有连续通透裂缝出现的状态为准。小净距隧道加载断面如图2所示(单洞隧道加载情况与小净距隧道相同)。

表1 围岩相似材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of materials similar to rock mass

配合比代号	材料组成			材料物理力学特性(试块)			相似比	
	黏土/%	炉渣/%	河砂/%	弹性模量 $E$ /GPa	容重 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	抗压强度 $R_b$ /MPa	$Z_1$	$Z_2$
112	25	25	50	0.0275	9.53	0.012	1.045	0.912

注:  $Z_1 = C_\sigma / C_L C_\gamma$ ;  $Z_2 = C_E / C_L C_\gamma$ 。

为了方便观察隧道在破坏过程中V级围岩滑裂面的破坏情况,应使隧道衬砌模型在满足相似性条件的基础上,选用在开挖后和加载作用下易于变形和破坏

的模型材料,故试验时采用材质较软且与衬砌材料相似性较接近的白铁皮进行模型制作。隧道模型采用预埋的方式,施工过程中采用全截面开挖,尺寸大小如图

3 所示。

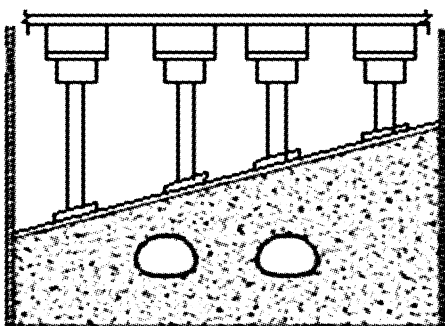


图2 加载后横断面示意图

Fig. 2 Cross-section of tunnel under loading

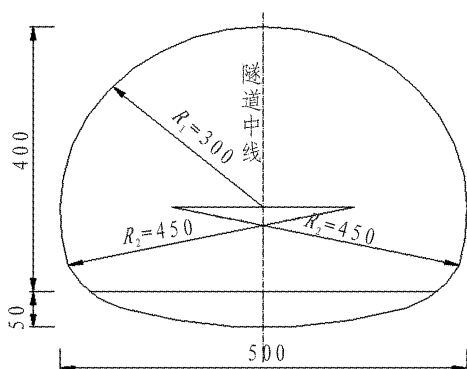


图3 隧道模型图(单位: mm)

Fig. 3 Tunnel model (mm)

## 2 单洞浅埋偏压隧道渐进破坏过程及破坏模式分析

### 2.1 单洞偏压隧道渐进破坏过程

隧道开挖采用全断面一次开挖,模拟隧道开挖后

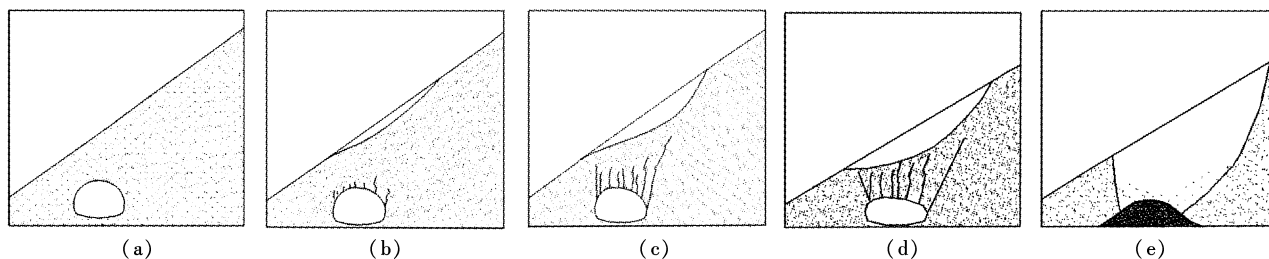


图4 单洞偏压隧道围岩渐进破坏过程

Fig. 4 Progressive failure process of rock mass of asymmetrically-loaded single-tube tunnel

### 2.2 单洞偏压隧道渐进破坏模式

单洞偏压隧道破坏前后的状态如图5所示。浅埋单洞偏压隧道的破坏模式是由洞口的偏压模式和偏压角度决定的,即由洞口边坡和洞门仰坡组合而成,破裂面的顶部基本在仰坡和边坡的交界线上,距离洞口2~3倍的隧道跨度。偏压角度越小,破裂面上部顶点距离隧道开挖面越远,但破裂面的深度越浅,塌落量越小;反之,破裂面顶部距离隧道开挖面越近,破裂面的深度越深,塌落量越大。破裂面的下部顶点与隧道的位置关系也表现出相同的规律。

毛洞状态下围岩的渐进破坏过程。单洞偏压隧道在地形偏压作用下,坡顶一侧的隧道上方围岩压力较大,坡脚一侧的隧道上方围岩压力较小。隧道开挖打破了原有围岩的静力平衡,在围岩压力的作用下,坡顶一侧的隧道结构开始出现沉降变形,同时挤压坡脚一侧的隧道结构,使隧道处于偏压受力状态。当出现隧道围岩应力超过围岩强度或隧道支护结构的承载能力不足以抵抗围岩压力时,隧道结构即会丧失其稳定性。隧道塌方过程如图4所示。

1) 在开挖前,隧道所在位置的岩体应力处于平衡状态。

2) 随着隧道的开挖,围岩压力直接作用于隧道结构,其中左侧围岩压力大于右侧,但由于隧道开挖的空间效应,围岩压力并没有完全释放,此时结构变形并不明显,如图4(a)所示。

3) 随着隧道的继续开挖,隧道支护结构受力也逐渐增大,并开始出现偏压变形,地表围岩开始出现下沉,如图4(b)所示。

4) 隧道开挖完成后,在地表对上部围岩进行加载,此后隧道底部变形增大,围岩多处出现破裂面,且隧道结构出现局部破坏,如图4(c)所示。

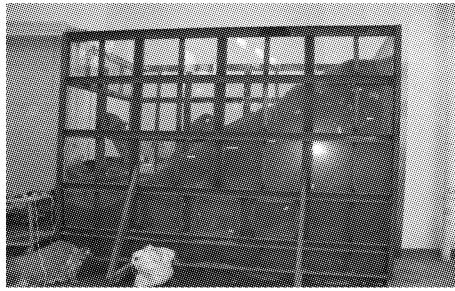
5) 整个隧道结构被压屈变形,破裂带继续增大并逐渐相互连接形成破裂面,岩体逐渐由坡顶向坡脚滑移,如图4(d)所示。

6) 随着破裂面的贯通,围岩压力继续增大,而隧道结构的支持作用基本不变,此时整个岩体开始加速滑移,并最终在较短的时间内被破坏,如图4(e)所示。

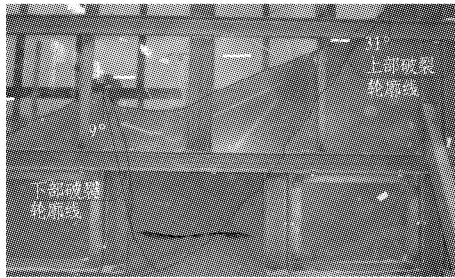
单洞隧道的破裂角在 $56 \sim 71^\circ$ 。其中靠近坡脚一侧的破裂角较小,与水平面的夹角为 $56 \sim 66^\circ$ ,靠近坡顶一侧的破裂角较大,与水平面的夹角为 $66 \sim 71^\circ$ ,如图6所示。

整个滑落体可近似看作一个锥形体,其各垂向和水平破裂面均可看作抛物线。需要说明的是,试验中采用的为各向同性的散粒体作为围岩材料,当偏压角度达到 $55^\circ$ 后围岩即无法自稳,而实际围岩应有一定的胶结强度,当实际工程中出现大角度偏压时,可能会出现斜切隧道开挖面的重力坍塌破坏。





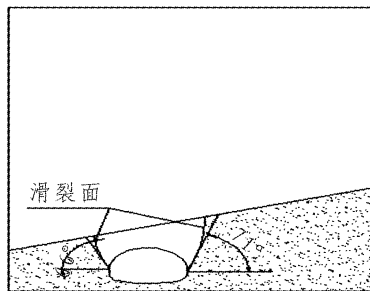
(a) 开挖前的模型



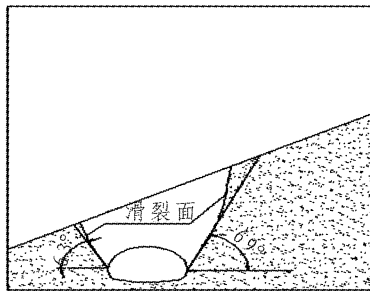
(b) 开挖后的破坏模型

图 5 单洞偏压隧道破坏前后对比图

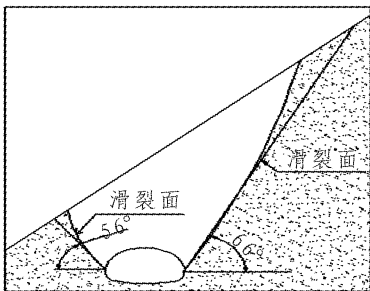
Fig. 5 Asymmetrically-loaded single-tube tunnel before and after failure



(a) 15° 偏压角



(b) 30° 偏压角



(c) 45° 偏压角

图 6 不同偏压角度单洞偏压隧道破坏模式

Fig. 6 Failure modes of asymmetrically-loaded single-tube tunnel under different asymmetrical loading angles

因此,浅埋单洞偏压隧道可以看作岩体在重力作用下的坍塌破坏,破坏体可近似看作以隧道洞口为顶、以仰坡变坡线为底的锥形体。地形的偏压模式决定了隧道的破坏模式,偏压角度和偏压范围决定了破坏体的规模和范围。

### 3 小净距浅埋偏压隧道渐进破坏过程及破坏模式分析

#### 3.1 小净距偏压隧道渐进破坏过程

小净距偏压隧道的渐进破坏过程与单洞偏压隧道具有一定的相似性。在隧道未开挖前,原有地层保持应力平衡状态,隧道开挖造成岩体的原有应力平衡被打破,且在隧道开挖过程中岩体的应力状态不断进行变化和调整,处于应力失衡—变形调整—应力平衡—变形调整—应力失衡的循环动态变化之中。开挖过程如图 7 所示。

当隧道结构或岩体本身提供的支撑强度不足时,隧道或岩体将发生破坏,整个渐进破坏过程如下:

1) 隧道开挖前,隧道所在位置的岩体应力处于平衡状态,隧道开挖发生应力释放,围岩体开始出现变形,但不显著,如图 7(a)所示。

2) 随着隧道继续开挖,结构受力也逐渐增大,并开始出现偏压变形,地表围岩开始出现下沉,如图 7(b)所示。

3) 在隧道开挖完成后,隧道变形继续增大,其中坡顶一侧的隧道结构变形大于坡脚一侧;与之相对应的是,靠近坡顶一侧隧道的左拱腰位移量最大,其次为靠近坡脚一侧隧道的右墙脚,如图 7(c)所示。

4) 围岩出现多处破裂面,其中坡顶一侧的裂缝分布更为密集,随着坡顶荷载的增大,围岩破裂面继续增多和扩展,并开始连通,如图 7(d)所示。

5) 随着围岩变形的扩大,靠近坡顶一侧的隧道上部岩体首先发生急速滑移,紧接着靠近坡脚一侧的围岩也出现快速变形,二者几乎在瞬间出现坍塌,形成空间塌落体,整个围岩和隧道最终被破坏,如图 7(e)所示。

#### 3.2 小净距偏压隧道的渐进破坏模式

小净距偏压隧道的塌落体可看作 2 个平行的锥形体。其中各锥形体均是以隧道洞口为底,锥顶位于边坡线和仰坡线的交汇处,因此,靠近坡顶侧的塌落体大于靠近坡脚侧的锥型塌落体。小净距隧道两塌落体中间为左右两侧滑裂面对称的楔型结构,靠近坡顶侧滑裂面的角度较小,与水平面的夹角为 56~58°;靠近坡脚侧滑裂面的角度相对较大,与水平面的夹角为 62~75°。滑裂面的角度大小与偏压角度相关,偏压角越大,滑裂面的角度也越大;反之则相反,如图 8 所示。

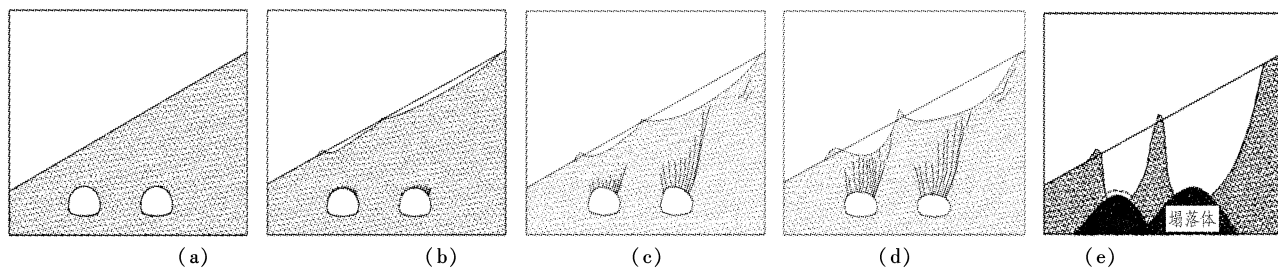


图 7 小净距浅埋偏压隧道围岩渐进破坏过程

Fig. 7 Progressive failure process of rock mass of asymmetrically-loaded tunnel with small net spacing

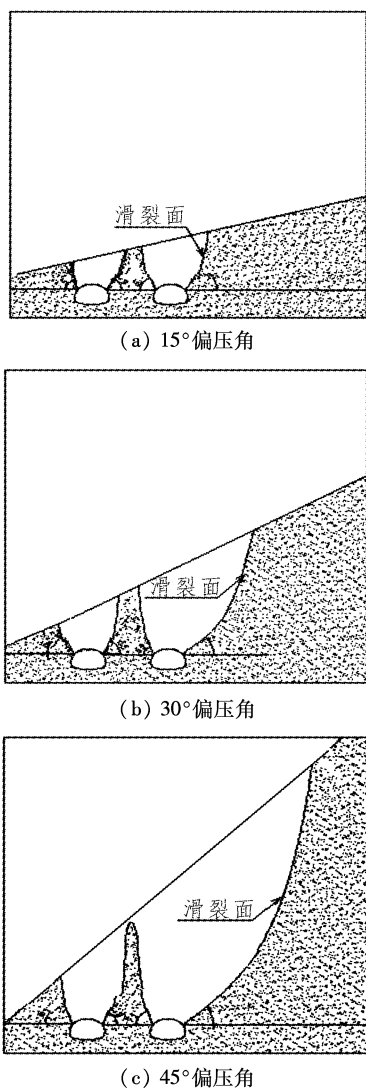


图 8 不同偏压角度小净距隧道破坏模式

Fig. 8 Failure modes of asymmetrically-loaded tunnel with small net spacing under different asymmetrical loading angles

整个滑落面为一个空间破裂面,破裂面起点位于坡顶一侧的边坡和仰坡的交线处,距隧道开挖范围约 3 倍的单洞洞跨处,然后以隧道为中心向后延伸,直至两隧道中间的楔型体位置处。靠近坡顶的破裂面与上部破裂面相切,并以坡脚处的隧道为中心,形成下部的破裂体,并在坡脚侧隧道的墙脚处消失。

与单洞偏压隧道的破坏模式相似,小净距浅埋偏压隧道的破坏范围与地形的偏压模式和偏压角度相

关。破坏范围距离洞口 2~3 倍的隧道跨度,且偏压角度越近,破裂面上部顶点距离隧道开挖面越远,反之越近。其中小净距偏压隧道的围岩自稳条件比单洞差,当偏压角度达到  $50^\circ$  左右后,在隧道开挖过程中整个围岩即可发生失稳。

#### 4 结论与讨论

依据室内模型试验结果,总结分析了浅埋偏压隧道(单洞、小净距)围岩的渐进破坏过程及破坏模式,对隧道支护参数确定、支护结构设计、分析隧道破坏原因以及隧道维护等方面都具有重要意义。

1) 浅埋偏压隧道的破坏模式可以看作岩体在重力作用下的坍塌破坏。单洞偏压隧道的破坏体可近似看作以隧道洞口为顶和以仰坡线为底的锥形体;小净距偏压隧道的破坏体则以隧道洞口为顶和以仰坡变坡线为底的 2 个并列锥形体组合,且较高的岩体破坏较早,较低的岩体破坏较晚,当靠近隧道底部范围内的岩体出现破坏时,整体的滑裂面最终形成并瞬间破坏。

2) 由本试验研究与一般隧道试验研究对比分析可见,浅埋偏压隧道的偏压角度和围岩的力学参数决定了破坏体的规模和范围,且破坏体的范围主要受偏压角度的影响。其具体表现为:偏压角度越小,破裂面上部顶点距离隧道开挖面越远,破裂面的深度越浅,塌落量越小;反之,破裂面顶部距离隧道开挖面越近,破裂面深度越深,塌落量越大。

3) 单洞隧道的破裂角为  $56 \sim 71^\circ$ 。其中靠近坡脚一侧的破裂角较小,与水平面的夹角为  $56 \sim 66^\circ$ ,靠近坡顶一侧的破裂角较大,与水平面的夹角为  $66 \sim 71^\circ$ 。小净距隧道两塌落体中间为左右两侧滑裂面对称的楔型结构,靠近坡顶侧滑裂面的角度较小,与水平面的夹角为  $56 \sim 58^\circ$ ;靠近坡脚侧滑裂面的角度相对较大,与水平面的夹角为  $62 \sim 75^\circ$ 。

本试验研究着重于 V 级围岩条件,对隧道围岩破坏问题进行了初步研究,并得到了较好的认识。但对其他围岩类别及偏压角度条件下破坏模式的研究,还有待今后进一步开展工作。

## 参考文献 (References):

- [1] 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. (ZHOU Xiaowen, PU Jialiu, BAO Chenggang. A study of the movement and failure characteristics of sand mass above the crown of a tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999(2): 33-37. (in Chinese))
- [2] D. Sterpi, A. Cividini. A physical and numerical investigation on the stability of shallow tunnels in strain softening media[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004(4): 277-298.
- [3] 吴梦军, 连晋兴, 黄伦海, 等. 连拱隧道围岩稳定性模型试验[J]. 地下空间, 2004(4): 39-42, 142. (WU Mengjun, LIAN Jinxing, HUANG Lunhai, et al. Experimental study on surrounding rock stability model of double-arch tunnel[J]. Underground Space, 2004(4): 39-42, 142. (in Chinese))
- [4] 赵明阶, 敖建华, 刘绪华, 等. 岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 33-37. (ZHAO Mingjie, AO Jianhua, LIU Xuhua, et al. Model test research on influence of karst cave size on stability of surrounding rock masses during tunnel construction[J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 33-37. (in Chinese))
- [5] 蒋树屏, 黄伦海, 宋从军. 利用相似模拟方法研究公路隧道施工力学形态[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 50-54. (JIANG Shuping, HUANG Lunhai, SONG Congjun. Physical simulation analysis on construction mechanics behavior of road tunnel[J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 50-54. (in Chinese))
- [6] 崔广心. 相似理论与模型试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [7] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- [8] 赵刚. 双连拱隧道模型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学桥梁与隧道工程专业, 2005. (ZHAO Gang. Study on the modeling tests of double-arch highway tunnel [D]. Chengdu: Bridge and Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [9] 叶志华, 丁浩, 刘新荣. 龙潭隧道围岩相似材料的实验研究[J]. 公路交通技术, 2005(5): 111-113. (YE Zhihua, DING Hao, LIU Xinrong. Experimental study on similar materials for surrounding rock of Longtan tunnel [J]. Technology of Highway and Transport, 2005(5): 111-113. (in Chinese))
- [10] 黄伦海, 刘伟, 刘新荣. 单洞四车道公路隧道开挖的模型试验[J]. 地下空间, 2004, 24(4): 43-47, 52, 142. (HUANG Lunhai, LIU Wei, LIU Xinrong. Model test on single four-lane highway tunnel excavation [J]. Underground Space, 2004, 24(4): 43-47, 52, 142. (in Chinese))



人民交通出版社  
China Communications Press (1952-2012)

国家一级出版社  
全国百佳图书出版单位

## 隧道及地下工程领域图书及多媒体作品征稿启事

人民交通出版社为国家一级出版社、全国百佳图书出版单位,主要致力于交通、土木与地图领域的出版,产品涉及标准规范、教材、工具书、实用图书、学术著作等。自1952年建社以来,人民交通出版社伴随并服务于中国的交通发展,形成了鲜明的交通专业出版特色,具有广泛的品牌认知度,是国内交通专业图书出版的市场领先者、全国最主要的交通教育教材出版基地和交通地图提供商,是土木工程、铁路与轨道交通、物流领域图书的重要提供者。

人民交通出版社是隧道及地下工程领域图书出版数量最多的专业出版机构,在业内拥有极好的口碑和影响力,多年来出版了一大批水准较高、影响深远、品质优秀的著作,对于推动我国隧道及地下工程领域的发展发挥了重要作用。为进一步推动该领域的图书出版工作,更好地为广大技术人员服务,进而推动行业整体技术水平的提高,现面向广大专家学者征稿,征稿范围包括:隧道及地下工程领域各类学术著作、行业指南、手册及工具书、工程建设与管理总结、实用性图书及各类教材和培训用书。多媒体作品包括本领域内自有版权的视频、录像、动画及相关电子类产品。

诚挚希望各位专家、学者踊跃投稿,人民交通出版社将与您共同努力,为广大读者贡献更有价值的出版物,为隧道及地下工程事业的发展做出我们应有的贡献!

联系人: 刘彩云      电 话: (010)85285995      邮 箱: 544641689@qq.com  
通讯地址: 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号人民交通出版社      邮编: 100011