

文章编号: 1006—2106(2009)03—0048—06

# 隧道围岩渐进性破坏机理模型试验方法研究<sup>\*</sup>

汪成兵<sup>1</sup> 朱合华<sup>2\*\*</sup>

(1. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013; 2 同济大学, 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 研究目的: 模型试验是研究隧道工程问题的一个重要手段, 而围岩破坏问题模型试验一直是一个难点。通过本研究, 建立隧道围岩渐进性破坏机理模型试验方法, 为围岩破坏机理的研究提供试验基础。

研究结论: 将隧道围岩简化为均匀介质, 以公路隧道Ⅳ、Ⅴ级围岩为研究目标, 以围岩级别、隧道埋深、隧道断面为参量设计了模型试验内容、试验装置, 研制了围岩模型材料, 建立了隧道围岩渐进性破坏机理模型试验方法, 实现了自重应力场作用下毛洞状态时隧道围岩塌方破坏过程的试验模拟, 并结合模型试验结果对隧道围岩渐进性破坏过程及破坏过程中围岩应力、地表位移变化规律进行了分析。

关键词: 隧道塌方; 渐进性破坏; 模型试验

中图分类号: U456 文献标识码: A

## Study on the Test Method for Progressive Failure Mechanism of the Surrounding Rock of Tunnel with Model

WANG Cheng—bing, ZHU He—hua

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Research purposes: Model test is one of the most important methods for studying the problem of tunnel engineering, but the model test concerning the failure problem of the surrounding rock is very difficult. Through the study, the method of model tests on the progressive failure mechanism of the surrounding rock of tunnel is established for the purpose of providing favorable test foundation for studying the failure mechanism of the surrounding rock.

Research conclusions: Setting the surrounding rocks (grades Ⅳ, Ⅴ) of road tunnel as the study objective, the rocks are simplified as homogeneous medium. puts forward the content, device and method of model tests on the progressive failure mechanism of the surrounding rock of tunnel are offered and the model material of the surrounding rock is conected. The rank of surrounding rock, the cross section and buried depth of tunnel are taken as the parameters for the model test. The test simulation of the failure process of the surrounding rock under gravitational stresses and unsupported condition is carried out successfully. Finally the model test results of the progressive failure process of the surrounding rock, the laws of the stress of surrounding rock and their displacement during the collapse are analyzed.

Key words: tunnel collapse; progressive failure; model test

隧道的开挖打破了岩体内原有的应力平衡, 随着隧道掘进面向前推进, 隧道围岩的破坏因隧道开挖卸

荷而产生的围岩应力重分布及岩体的应变软化而渐进出现<sup>[1]</sup>。隧道塌方是一种常见的围岩破坏模式, 也是

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008—11—27

<sup>\*\*</sup> 作者简介: 汪成兵, 1979年出生, 男, 工程师; 朱合华, 1962年出生, 男, 教授, 博士生导师。

隧道施工中最常见的灾害现象之一, 常会造成严重的安全事故<sup>[2]</sup>。

模型试验是研究隧道工程问题的一个重要手段。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>[3-6]</sup>, 部分破坏试验主要是通过超载即“先开洞, 后加载”的方法达到其目的<sup>[7-8]</sup>, 不能反映隧道围岩的真实受力状态。美国加州 Lawrence Livermore 国家实验室采用内华达州核试验场 2 号区冲击层砂, 通过离心模型试验, 采用气囊卸载的方法对地下洞穴的塌落形态、塌落过程等进行了研究<sup>[9]</sup>; 周小文等通过离心模型试验, 对隧洞周围砂土随着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<sup>[10]</sup>; Serp 等人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<sup>[11-12]</sup>。

众所周知, 模型试验的尺寸效应、边界效应及模型材料是制约破坏试验成功的几个关键问题, 已有的破坏试验均是通过超载或采用砂等无黏聚力材料作为模型材料而实现的。本文以公路隧道 IV、V 级围岩为研究目标, 将隧道围岩简化为均匀介质, 以围岩级别、隧道埋深、隧道断面为参量设计了模型试验内容、试验装置, 研制了围岩模型材料, 建立了隧道围岩渐进性破坏机理模型试验方法, 实现了自重应力场作用下毛洞状态时隧道围岩塌方破坏过程的试验模拟, 并结合模型试验结果对隧道围岩渐进性破坏过程及破坏过程中围岩应力、地表位移变化规律进行了分析。

## 1 模型试验相似关系

岩土工程模型与原型不可能在各方面都满足相似原理的一切要求, 只能是针对所要研究的问题, 在主要条件上满足相似关系。因此必须对研究对象进行分析后, 根据相似理论, 求得相似判据, 据此进行模型设计。

根据文献[13]对隧道塌方的统计, 拱形塌方及塌穿型塌方是隧道塌方的两种主要类型, 模型试验以此两种类型的塌方为主要研究对象。由研究的总体意图出发, 根据试验的实际情况, 以几何相似比和容重相似比为基础, 确定的相似比如下:

- 几何相似比:  $C_l=50$
- 容重相似比:  $C_\gamma=1$
- 泊松比、应变、摩擦角相似比:  $C_\mu=C_\epsilon=C_\varphi=1$
- 强度、应力、粘聚力、弹性模量相似比:  $C_{Rc}=C_\sigma=C_c=C_E=50$

## 2 模型试验设计

### 2.1 试验内容设计

隧道塌方的统计分析结果表明, 围岩地质条件、隧道埋深、隧道断面形式及大小、地下(表)水、爆破扰动等是隧道塌方的主要影响因素<sup>[13]</sup>。本文将隧道围岩简化为均匀介质, 对围岩级别、隧道埋深、隧道断面对隧道塌方的影响进行模型试验。隧道开挖采用“断面芯”法按全断面一次开挖, 模拟隧道开挖后毛洞状态下围岩的渐进性破坏过程。试验内容如表 1 所示。

表 1 试验内容设计

试验组别	隧道埋深(原型)	隧道断面型式	围岩级别
1	10 m	二车道	V 级围岩
2	20 m	二车道	
3	30 m	二车道	
4	10 m	三车道	
5	30 m	三车道	IV 级围岩
6	5 m	二车道	
7	10 m	二车道	
8	20 m	二车道	
9	30 m	二车道	

### 2.2 试验装置

全部模型试验在专门制作的台架式钢板试验模型箱内进行, 试验模型箱用 2 组 180 工字钢以及 25 号加劲槽钢对模型箱前后进行约束, 模型箱净空尺寸为 1.6 m×1.3 m×0.4 m。试验采用平面应变模型。为方便观察, 在模型箱的前后面采用了厚度为 20 mm 的钢化玻璃, 玻璃的尺寸为 1.2 m×1.0 m。玻璃中下部预留开挖孔, 开挖孔的尺寸分别根据设计的隧道截面确定。模型箱截面如图 1 所示。试验所模拟的二车道隧道净宽 11 m 净高 8.8 m, 三车道隧道断面净宽 15.5 m 净高 8.8 m。

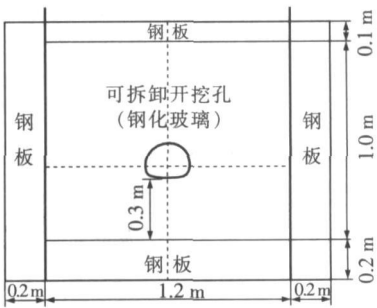


图 1 模型箱截面正视图

### 2.3 模型材料配比研究

模型材料对模型试验的成功与否起着决定性的作用。本文的研究对象主要是 IV、V 级围岩, 根据公路隧

道各级围岩的物理力学参数并参考已有的经验,选用一定比例的清洁河砂、重晶石粉、洗衣液的混合物作为

围岩的相似材料。模型材料配比及其物理力学性能如表 2 所示。

表 2 模型材料配比及其物理力学性能

序号	材料配比			材料物理力学性能					模拟围岩级别
	河砂 /g	重晶石粉 /g	洗衣液 /g	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	
材料 1	400	120	30	18.8	26.3	0.35	4.85	32.0	IV
材料 2	400	80	30	17.5	20.4	0.39	1.96	30.8	V

2.4 测试系统

试验的测试内容包括围岩应力、地表位移以及围岩塌方破坏过程。数据采集采用 YB2539 高速静态应变测试系统,应力量测采用量程为 30 kPa 的箔式微型土压力盒,地表位移采用量程为 ±25 mm 的 WBD 型机电两用式位移传感器,试验过程中隧道围岩的变形破坏过程用数字照相、摄像的方法观测记录。

应力、位移测点布置如图 2 所示,隧道拱底 T01、T02 均为垂直应力测点,侧壁左侧 T03 ~ T06 为垂直应力测点,侧壁右侧 T07 ~ T10 为水平应力测点,拱顶 T11 ~ T15 为水平应力测点。应力测点之间的间距均为 0.5B (B 为隧道跨度),其中拱顶测点数目根据试验时的隧道埋深确定。模型地表位移测点 W1 ~ W7 按等间距 20 cm 布置。

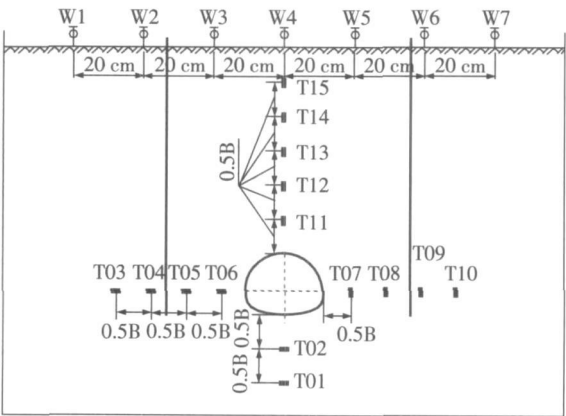


图 2 测点布置示意图

2.5 试验步骤

- (1) 在模型试验箱钢板部位铺设两层聚四氟乙烯薄膜,里层薄膜粘贴于钢板,外层薄膜不固定;在钢化玻璃板内侧均匀涂上洗衣液,从而减小模型箱与地层的摩擦力。
- (2) 按所确定的模型材料配比计算各原材料的用量,将经过晒干处理的河砂过筛并与重晶石粉经称量后,装入搅拌机搅拌均匀,将称量好的洗衣液加入,与上述拌和物充分搅拌均匀。
- (3) 将搅拌均匀的模型材料按落雨法加静压密实分层填入模型箱,模型制作中严格控制模型密度。

(4) 模型制作过程中在预先设定的位置埋设土压力传感器,并记录埋入前传感器的初始读数。

(5) 模型制作完成后在模型地表安装固定位移传感器,模型制作完成后静置 6 h 后开始试验。

(6) 隧道开挖模拟采用“断面芯”法。埋入模型土层前将木制“断面芯”裹以两层保鲜膜并在两层之间涂抹洗衣液,以降低摩擦力,减小“断面芯”拔出时对隧道围岩的扰动。

(7) 试验开始前,调试运行数据采集系统,安装固定照相机、摄像机。试验时,数据采集的频率设为 1 s,用数字照相、摄像的方法对围岩破坏过程进行观测记录。

3 典型试验结果与分析

下面以第 7 组试验结果为例来说明隧道塌方破坏过程及围岩应力、地表位移变化情况。

3.1 隧道围岩渐进性破坏过程

隧道开挖后约 32 s 隧道开始塌方,隧道围压渐进性破坏过程如图 3 所示。塌方破坏从隧道右侧起拱线处开始,该处围岩部分垮落,进而在隧道拱顶形成一贯穿型裂缝(图 3(a)),拱顶裂缝以下围岩呈块状掉落,在拱顶形成第 1 个塌落拱(图 3(b))。该拱稳定约 90 s 后,塌落拱右侧由拱脚至拱顶出现裂缝,裂缝以下围岩塌落后形成第 2 个塌落拱(图 3(c)),同时地表开始出现裂缝。第 2 个塌落拱稳定约 24 s 后,顶部部分围岩掉落,形成第 3 个塌落拱(图 3(d))。第 3 个塌落拱稳定约 32 s 后,塌落拱左、右侧拱顶到拱脚先后形成贯穿型裂缝(图 3(e)),裂缝以下围岩塌落,地表裂缝逐渐扩展。塌方发生后 170 s 塌方发展至地表,形成塌穿型塌方。塌方后,地表陷坑宽 27.4 cm,左侧有一贯穿性裂缝,距陷坑边缘 8.5 cm(图 3(f))。整个塌方过程持续约 310 s。

塌方稳定后,清理隧道内的塌体。清渣过程中围岩渐进性破坏过程如图 4 所示。清理隧道内塌体过程中,隧道塌方破坏进一步发展,隧道左侧地表裂缝逐渐向下发展,最终到达隧道边界,形成贯穿型裂缝,左侧岩体倾倒破坏。隧道右侧基本稳定。清渣后,地表陷

坑宽 38.3 m, 最终破裂面约从隧道起拱线处开始, 按 对称原则, 隧道破裂角为 74°。

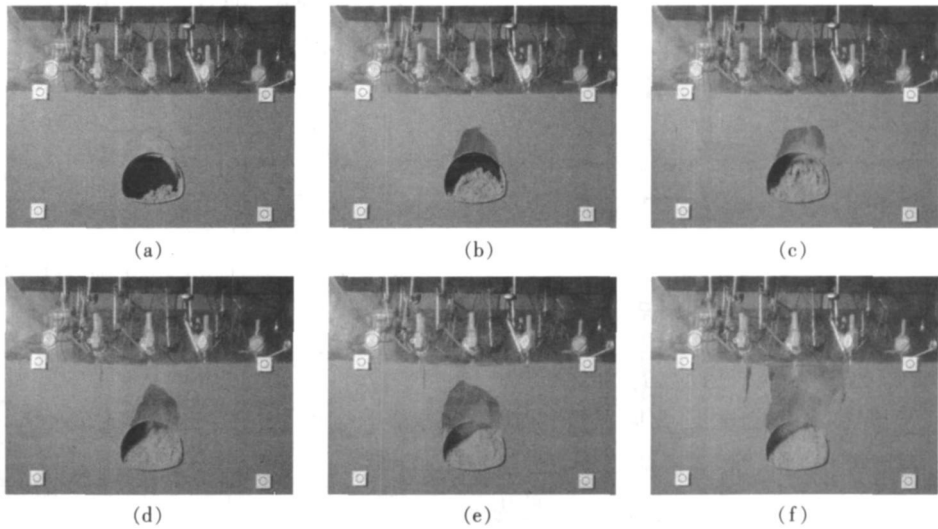


图 3 开挖后隧道围岩渐进性破坏过程

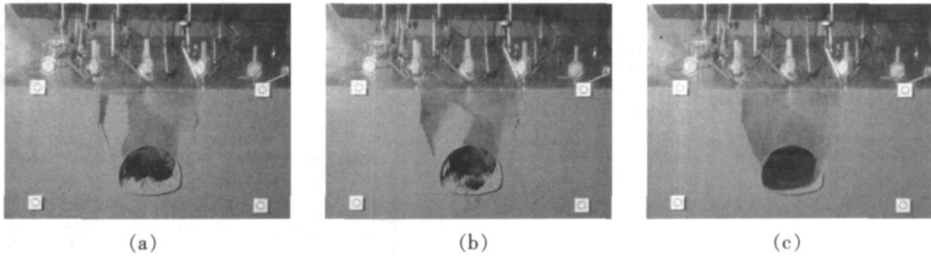


图 4 清渣过程中围岩渐进性塌方破坏过程

3.2 围岩应力变化规律

试验过程中隧道拱底、侧壁垂直应力及侧壁、拱顶水平应力变化情况如图 5~图 8 所示, 其中应力变化曲线中的“平台”是由数据采集仪器的测量精度引起的。从图中可以看出, 隧道开挖过程中, 因受隧道开挖过程中抽出断面芯对围岩扰动的影响, 隧道拱底垂直应力及侧壁水平应力在隧道开挖期间明显增加, 且越靠近隧道应力增加幅度越大。开挖后, 侧壁垂直应力及拱顶水平应力增加, 侧壁水平应力减小。塌方后拱底垂直应力增加, 侧壁垂直应力、水平应力及拱顶水平应力均减小, 开始清渣后, 各测点应力均进一步减小。离隧道越近的测点, 应力调整越快, 变化幅度越大。

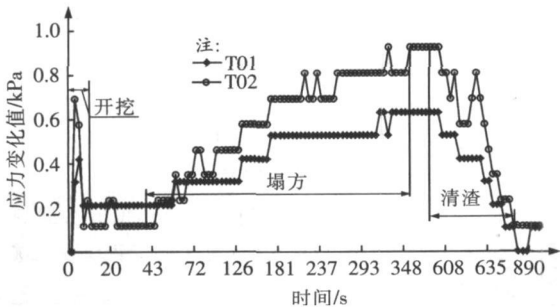


图 5 隧道拱底垂直应力变化情况

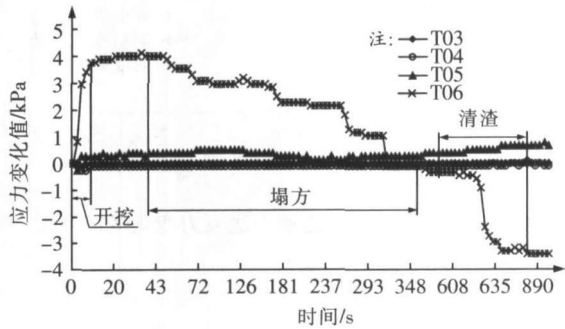


图 6 隧道侧壁垂直应力变化情况

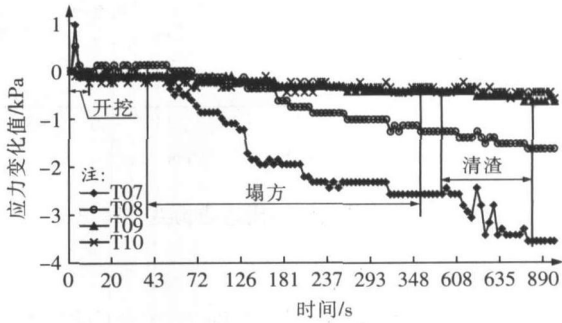


图 7 隧道侧壁水平应力变化情况

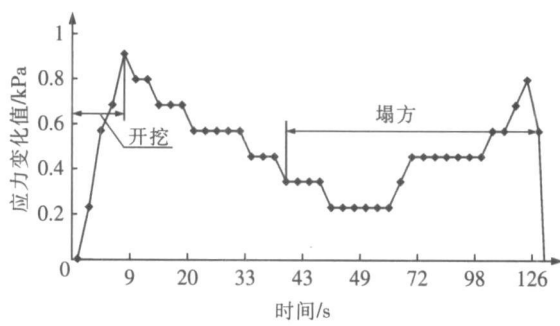


图 8 隧道拱顶水平应力变化情况

塌方前后及清渣前后隧道周边应力变化情况如图 9、图 10 所示。从图中可以看出,塌方后,隧道拱底垂直应力增加,最大增幅 0.81 kPa;隧道侧壁垂直应力和水平应力减小,其中 T06 测点应力减小幅度最大,为 4.3 kPa;隧道侧壁垂直应力影响范围约为 1.5 倍的隧道跨度,水平应力影响范围较大;清渣后,除 T05 测点外各测点应力均减小,其中 T06 测点应力减小幅度最大,为 3.1 kPa;隧道侧壁垂直应力影响范围约为 1.5 倍的隧道跨度,水平应力影响范围较大;塌方前后侧壁应力变化幅度较清渣前后小。

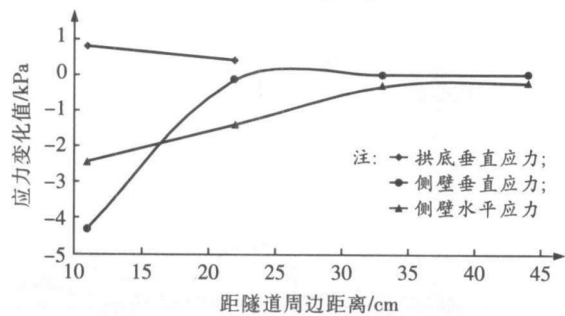


图 9 塌方前后隧道周边应力变化情况

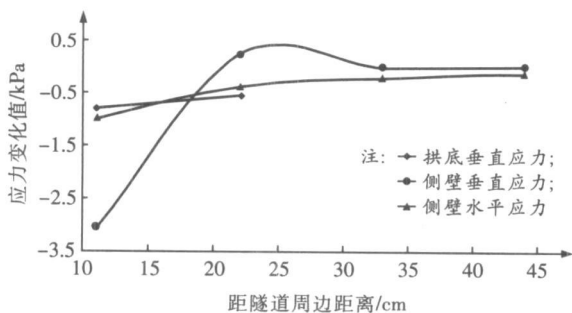


图 10 清渣前后隧道周边应力变化情况

### 3.3 地表位移变化规律

试验过程中不同时刻隧道地表沉降曲线如图 11 所示。从图中可以看出,离隧道最近的 3 个测点 W3、

W4、W5 位移变化较大,其他测点位移不明显。隧道开挖后, W3、W4、W5 3 个测点位移持续增加。在形成第一个塌落拱前,地表位移相对较小,最大位移量为 2.3 mm; W3、W5 测点位移量分别为其最终位移量的 39.6%、29.6%。第一个塌落拱破坏后,地表位移增加较大。至塌方到达地表前,位移增加明显,且位移速率明显增大,尤以 W4 测点为甚。至塌方结束, W3、W5 测点位移趋于稳定,最终位移量分别为 0.79 mm、0.88 mm。

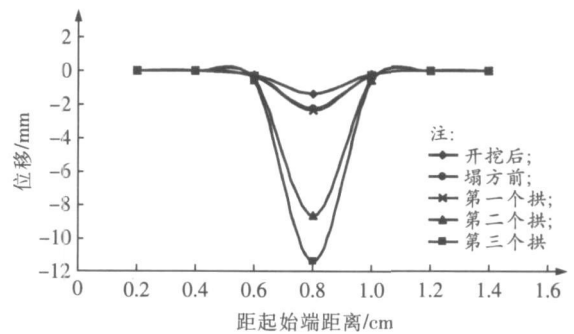


图 11 不同时刻地表沉降曲线

## 4 结论

(1) 以围岩级别、隧道埋深、隧道断面为参量设计了平面应变模型试验内容、试验装置,研制了围岩模型材料,建立了隧道围岩渐进性破坏机理模型试验方法,实现了自重应力场作用下毛洞状态时隧道围岩塌方破坏过程的试验模拟;

(2) 试验结果表明:隧道塌方破坏从拱顶开始,并逐渐向上发展;在发生塌穿型塌方的情况下,塌方后拱底垂直应力增加,侧壁垂直应力及水平应力减小,地表各测点发生不同程度的沉降,且离隧道越近的测点应力及位移调整越快,变化幅度越大;隧道发生塌方后的清渣可使隧道塌方状况进一步恶化,因此在实际工程中,在处理塌方事故前应事先对塌体采取一定的加固措施。

## 参考文献:

- [1] Sawedzicki T. Rock mass behavior prior to failure [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geotech Absr, 2003(40): 573—584
- [2] 闫天俊, 吴立. 现代隧道施工中的常见地质灾害问题及防治 [J]. 探矿工程, 2003(4): 62—64
- [3] 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): 662—666

[ 4 ]

Seokwon Jeon, Jongwoo Kim, Youngho Seo, Changwoo Hong. Effect of a fault and weak plane on the stability of a tunnel in rock— a scaled model test and numerical analysis [ J ] // Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2004, 41(3): 1—6

[ 5 ]

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): 213—217.

[ 6 ]

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, 24(4): 461—464

[ 7 ]

王明年, 关宝树, 何川. 三车道公路隧道在不同构造应力作用下的力学行为研究 [ J ]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 51—55

[ 8 ]

王戌平. 破碎围岩隧道的模拟试验研究 [ D ]. 杭州: 浙江大学, 2004

[ 9 ]

张祥康. 鉴定地下洞穴坍塌机理的离心模型试验研究 [ J ]. 四川水力发电, 1989(9): 54—59

[ 10 ]

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, 20(2): 32—36

[ 11 ]

SterpiD. An analysis of geotechnical problems involving strain softening effects [ J ]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999(23): 1427—1454

[ 12 ]

SterpiD. and CividiniA. A Physical and numerical investigation on the stability of shallow tunnels in strain softening medium [ J ]. Rock mechanics and rock engineering, 2004, 37(4): 277—298

[ 13 ]

汪成兵, 朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟 [ J ]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 450—456

(上接第 47 页)

伏溶洞探测,发现空腔或破碎带应予加固。

(3)岩溶地区,特别是有高压水存在时,进行隧道衬砌设计,辅助坑道与正洞其防排水等级可以不同,但其抗水压承载能力应保持一致。

(4)富水高压溶洞在其两端应设置加强隔离措施,适当分仓,防止岩溶水纵向或横向窜流。

(5)溶洞水一般由大气降雨补给,从某一排泄口很快排出,对于溶洞水在进行隧道的防排水设计时应坚决地排,不会因排泄溶洞水对环境造成危害。

参考文献:

[ 1 ]

中铁隧道集团有限公司. 高压富水岩溶深埋特长隧道修建技术 [ J ]. 洛阳: 中铁隧道集团有限公司, 2007

[ 2 ]

YJGF 24—2004 高压富水深埋充填型岩溶隧道施工工法 [ S ].

[ 3 ]

罗琼. 岩溶隧道施工技术 [ J ]. 铁道工程学报, 2005(3): 65—71.

[ 4 ]

齐传生. TSP202 隧道地震波超前地质预报系统的应用 [ J ]. 现代隧道技术, 2000(1): 36—40