

DOI: 10.11779/CJGE201608020

# 上覆水平煤层采空区衬砌受荷模型试验研究

方 勇<sup>1</sup>, 姚志刚<sup>1</sup>, 符亚鹏<sup>1,2</sup>, 徐 晨<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘 要:** 隧道近接上覆水平采空区地层施工易扩大上覆围岩松动范围, 增大松动荷载, 为探明隧道衬砌结构受荷特性, 采用室内相似模型试验量测了上覆水平煤层采空区地层隧道二次衬砌结构内力(轴力、弯矩), 分析了不同边界压力作用下位移、轴力和弯矩的变化情况和特定压力下间距对二次衬砌受力的影响。结果表明: 上覆采空区对洞周位移和二衬内力造成了一定影响, 采空区底板与隧道间距越小, 位移越大, 当竖向压力为 1000 kPa 时, 与无采空区工况相比, 0.5D 工况最大位移增加 93.73%, 1.0D 工况增加 27.90%; 弯矩和轴力的增加越明显, 当竖向压力为 500 kPa 时, 与无采空区工况相比, 间距 0.5D 工况最大弯矩增加 139.68%, 间距 1.0D 工况最大弯矩增加 34.39%, 采空区的存在导致轴力分布形态变化较大, 间距 0.5D 工况平均轴力增加 78.39%, 间距 1.0D 工况平均轴力增加 37.81%; 最大偏心距出现在仰拱部位, 承载能力相对较低, 是隧道主体结构的薄弱环节; 二次衬砌仰拱位置最先开裂, 煤层采空区对裂缝展开顺序有一定影响。

**关键词:** 上覆煤层采空区地层; 模型试验; 受荷特性

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)08-1513-09

**作者简介:** 方 勇(1981-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事隧道施工力学行为等方面的教学与研究工作。

E-mail: fy980220@swjtu.cn.

## Model tests on loading characteristics of linings in overlying horizontal coal mined-out area

FANG Yong<sup>1</sup>, YAO Zhi-gang<sup>1</sup>, FU Ya-peng<sup>1,2</sup>, XU Chen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The tunnel construction adjacent to the overlying mined-out area is easy to expand the rapping range of the overlying rock and to increase the loose load. In order to study the characteristics of lining structures under loads in overlying horizontal thin coal mined-out area, indoor scaled model tests are carried out to measure contact force between tunnel lining and surrounding rock and structural internal force of the secondary lining (axial force and bending moment) in the strata thin seam mined-out area. The variations of displacement, axial force and bending moment under different pressures and the influences of pitch under confining pressure on the earth pressure and internal forces of the secondary lining are analyzed. The results show that the overlying mined-out area has a certain effect on convergence displacement of tunnel. The smaller the distance, the greater the displacement and the more obvious the increase of bending moment and axial force. The internal force of the secondary lining is discretely distributed, the maximum eccentricity distance appears in the invert site and the bearing capacity has a certain degree of reduction, so it is the weak part of the main structure of the tunnel. The first crack appears in the inverted arch of the secondary lining, and the overlying mined-out area has remarkable influence on the order of cracks.

**Key words:** overlying mined-out area; model test; loading characteristic

## 0 引 言

在隧道工程领域, 水平上覆煤层采空区指水平煤层开采后遗留下的空间区域, 且隧道断面位于采空区冒落带下方。当采空区位于隧道开挖影响范围以内时, 上覆采空区给隧道施工及后期营运带来的危害主要表现在增大了隧道上覆围岩开挖失稳风险, 扩大了隧道

开挖引起的围岩松动塌落范围, 增大了隧道设计荷载, 改变了上覆围压传递路径, 若隧道设计施工以及对采

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278422, 51578460); “十二五”  
国家科技支撑计划课题(2012BAG05B03); 四川省青年科技基金项目  
(2012JQ0021)

收稿日期: 2015-11-19

空区地层处治不当,上覆围岩松动荷载过大将导致隧道衬砌结构变形、开裂引起隧道轮廓侵限等一系列病害<sup>[1-2]</sup>。

目前,上覆采空区地层隧道设计施工以及对采空区处治等方面已获得了一些可靠成果<sup>[3-6]</sup>。上覆采空区隧道开挖稳定性方面亦取得了许多研究成果,杨斌<sup>[7]</sup>运用 FLAC<sup>3D</sup> 和室内模型试验手段针对上覆单煤层采空区隧道开挖稳定性及施工安全间距开展研究,获得了上覆采空区地层围岩破坏形态以及初支受力特性;赵晨<sup>[8]</sup>研究了上覆采空区与隧道间距、不同煤层开采方式下,隧道洞周围岩应力以及位移的变化情况,综合分析了上覆采空区空间位置关系对隧道开挖稳定性的影响;FU 等<sup>[9]</sup>完成了采空区“三带”承载能力模拟,研究了上覆煤层采空区倾角对隧道开挖稳定性的影响,得到了不同倾角隧道洞周位移及初支内力特性;廖沛源等<sup>[10]</sup>研究了煤层采空区引起的隧道附加荷载问题;方勇等<sup>[11-12]</sup>通过室内模型试验研究了上覆单层和双层煤层采空区地层隧道开挖过程中洞周围岩、采空区上覆、下伏岩体的移动特性、初支背后接触压力及内力分布特征;崔戈等<sup>[13]</sup>研究了上覆三层采空区对隧道开挖稳定性的影响,得到了一些施工建议。

综上,关于上覆煤层采空区地层隧道建设问题取得了大量的研究成果,但在隧道衬砌结构受荷特性等方面鲜有报道,且以往研究大多将采空区冒落带简化为空洞,本文以煤矿开采采顶塌落后形成的老采空区冒落带,即由松散垮塌的不规则岩块填充的区域为研究对象,采用大比例模型试验完成了上覆煤层采空区地层承载能力和构造形态的近似模拟,获得了上覆水平煤层采空区地层中不同围岩压力下隧道衬砌结构受荷特性。

1 试验材料配制

1.1 依托工程概况

本试验依托达万公路天坪寨隧道。该隧道开挖跨度约为 12.0 m,开挖高度约为 9.99 m,横断面设计见图 1。隧址局部处于含煤地层,其中隧顶煤层已被开采,填充泥岩、粉砂岩、炭质泥岩,岩体较破碎,呈镶嵌碎裂结构。地下水具弱腐蚀性,主要呈点滴状、浸润状,局部呈线状。根据地勘资料采空区段基岩围岩级别为Ⅳ级。

1.2 相似关系

模型试验中,模型和原型需满足应力和应变相似,根据相似第二定理<sup>[14]</sup>,模型试验中凡同一类物理参量当单值条件相似且由单值条件中的物理参量组成的相似准则对应相等时,则这些现象必定相似。在试验中,

地层参量主要包括应力 $\sigma$ 、应变 $\varepsilon$ 、弹性模量 $E$ 、泊松比 $\nu$ 、内摩擦角 $\varphi$ 、黏聚力 $c$ 、位移 $\delta$ 、重度 $\gamma$ 和几何尺寸 $L$ 等。试验中选取几何相似比 $C_L=20$ 和重度相似比 $C_\gamma=1$ 为基础相似比,根据量纲分析法计算得到其余各物理量之间的相似关系为

$$\left. \begin{aligned} C_\sigma &= C_c = C_E = C_\delta = 20, \\ C_\mu &= C_\varepsilon = C_\phi = 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据上述相似关系,通过控制相似材料的黏聚力、内摩擦角、重度、弹性模量等参数相似来模拟围岩。

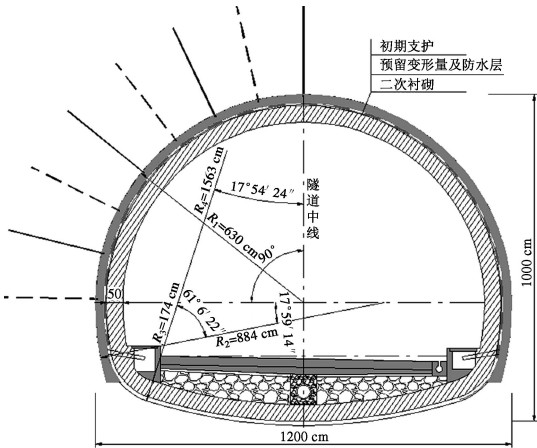


图 1 隧道衬砌断面图

Fig. 1 Cross-section of tunnel lining

1.3 相似材料配制

(1) 试验围岩配制

为保证试验材料的稳定性,选取性能较稳定的机油、河砂、石英砂、粉煤灰作为原材料,通过直剪试验和抗压试验调整材料配比,最终获得满足Ⅳ级围岩参数(表 1)的相似材料配比(质量比)为河砂:石英砂:机油:粉煤灰=1:1:0.275:0.75。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rock					
类型	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$E / \text{GPa}$	$\nu$	$c / \text{MPa}$	$\varphi / (^\circ)$
原型	20~30	1.3~6.0	0.30~0.35	0.2~0.7	27~39
模型	21	0.07	0.35	0.0172	31.8

(2) 采空区地层模拟

采空区“三带”中对隧道影响最大的为冒落带,试验中主要进行了对冒落带的模拟。在冒落带内,岩体呈破碎、离散状态,岩层移动变形和围岩压力变化规律主要取决于破碎岩石散体的压缩变形特性,而该特性主要由冒落带高度、冒落岩石强度、空隙率、级配和颗粒形状等控制。现场钻探表明采空区及其覆岩破裂岩石结构体根据其破碎的程度可以划分为:1.0 m 以上块体,0.2~1.0 m 不规则块体,0.2 m 以下碎石散体,级配比为 0.5:0.4:0.1,且大致由上而下分布。

采空区冒落带岩石抗压强度通过单轴抗压强度试

验获得（图 2），最终确定模拟岩块的配比为：石英砂：石膏：水=2.56：1：0.68，抗压强度为 1.1 MPa；岩块的尺寸根据几何相似比进行控制，空隙率和冒落岩石分布形态主要通过不同级配的岩块在填筑过程中近似控制，试验中空隙率为 0.24。在满足以上参数相似的条件，可以认为试验中冒落带的整体稳定性基本与原型相符。

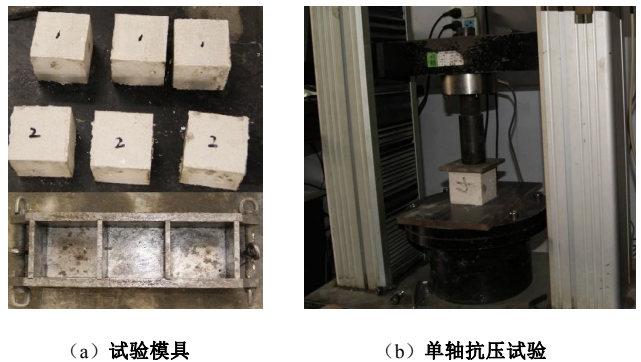


图 2 采空区地层基岩抗压强度试验

根据《采空区公路设计与施工技术细则》<sup>[15]</sup>，水平薄煤层单层开采采空区高度计算公式如下：

$$h_m = m / [(k - 1) \cos \alpha]$$
 (2)

式中， $m$  为开采煤层厚度（m）， $\alpha$  为煤层倾角，水平分布， $k$  为岩石碎胀系数，取 1.2。故得到开采厚度为 1 m 时，采空区冒落带高 5 m。

(3) 隧道主体结构模拟

试验中完成了初期支护钢支撑、喷射混凝土和二次衬砌的相似模拟，各组分相似材料、控制参数及材料配比如表 2，3 所示。

表 2 模型试验初期支护参数

Table 2 Primary supporting parameters of model tests		
项目	喷砼	钢拱架
原型	C25 喷砼/cm	工字钢/cm
	24	I18@80
模型	石膏/cm	铜条/cm
	1.2	0.3×0.5 @4

表 3 模型试验二次衬砌参数

Table 3 Secondary supporting parameters of model tests		
项目	模筑混凝土	钢筋骨架
原型	C25 模铸砼/cm	钢筋网/cm
	50	φ2.2@20
模型	石膏/cm	钢丝网/cm
	2.5	φ0.1@1

2 试验方案

2.1 试验台架

本试验采用的卧式隧道加载系统横向由 14 个高精度液压千斤顶、5 块施力钢板构成，通过控制千斤顶压力可以模拟不同土体高度、不同侧压力系数下的土体应力场，如图 3，本试验模拟试验土体尺寸为 3.00 m×3.00 m×3.00 m。

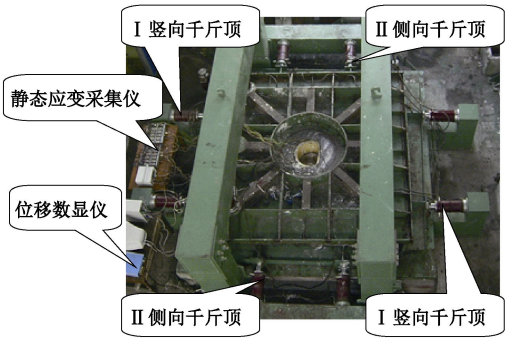


图 3 试验台架

Fig. 3 Test bench

试验中通过控制千斤顶油缸压力，并减去试验设备的摩擦力，换算得到作用在试验土体上的边界压力，如图 4。同时在试验槽钢板上铺设双层塑料薄膜，层间涂以流动油质材料，这样有效降低了试验土体与试验槽的摩擦力。根据应力传递原理，作用在模型上的荷载为施加的模型边界压力。

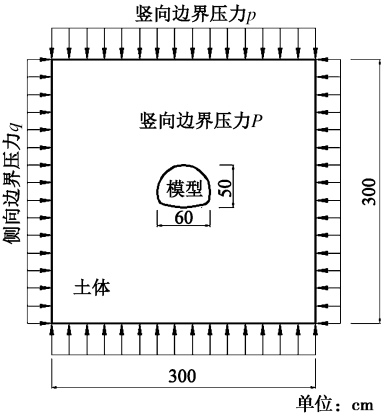


图 4 边界压力加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of boundary pressure

2.2 试验量测系统

试验中主要量测了加载过程中洞周特征位移、二次衬砌内力情况。

(1) 洞周特征位移

共布置了 6 个高精度差动式数显位移计（精度为 0.01 mm），具体布置位置和布置方式见图 5。

(2) 二次衬砌内力

在试验模型内外 14 个点对称布置了 28 个电阻应变片（图 6），通过静态应变采集仪获得试体在加载过程中的应变值，通过下式计算获得试体在弹性变形阶段的内力值：

弯矩： $M = \frac{1}{12}E(\varepsilon_{\text{内}} - \varepsilon_{\text{外}})bh^2$ ，

轴力： $N = \frac{1}{2}E(\varepsilon_{\text{内}} + \varepsilon_{\text{外}})bh$ ，

(3)

式中， $b$  为二次衬砌截面长度，计算中取单位长度， $h$  为衬砌截面厚度， $E$  为材料实测弹性模量。

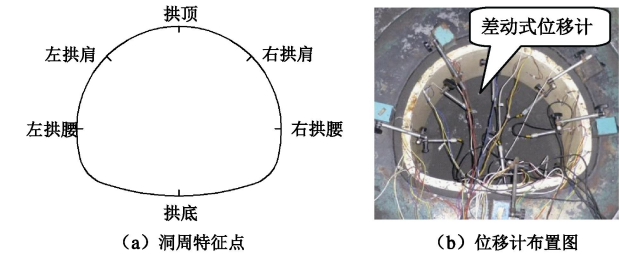


图 5 洞周特征位移量测图

Fig. 5 Measurement of convergence of tunnel inner perimeter

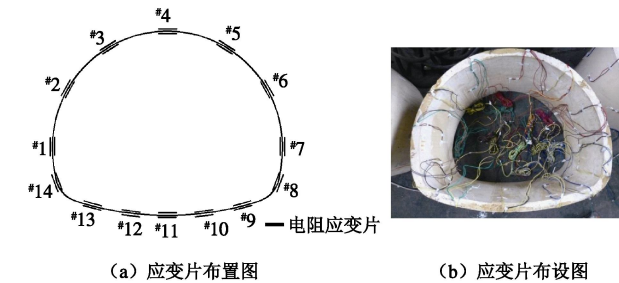


图 6 二次衬砌内力量测图

Fig. 6 Measurement of internal force of secondary lining

2.3 试验系列及加载方案

(1) 试验系列

三维空间上覆采空区地层隧道施工是一个三维空间问题，当采空区分布方向与隧道纵向开挖方向一致时，隧道三维开挖问题可以简化为无数个二维问题来分析，如图 7，隧道与采空区的空间位置关系主要体现在改变其分布间距上。

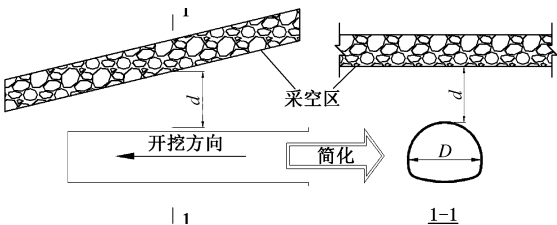


图 7 隧道与采空区空间位置示意图

Fig. 7 Spatial position between tunnel and mined-out area

根据试验装置尺寸选取煤层厚度为 1 m，间距  $d$  (采空区底板与隧道间的最小距离) 为  $0.5D$  和  $1.0D$  ( $D$  为隧道跨径，60 cm)，如图 8，并选择无采空区工况作为对照。

(2) 试验方案

a) 调试好各个加载方向的加载系统，确保性能完好，并对试验土体进行预压。

b) 人工填筑上覆采空区地层，开挖设计轮廓线内土体；放入预制好的二次衬砌隧道模型，然后施作初支。

c) 安装差动式数显位移计。

d) 根据选取的侧压力系数，确定各个方向千斤顶施加压力，逐级加载并每级荷载稳压约 5 min，并记录各量测项目值。

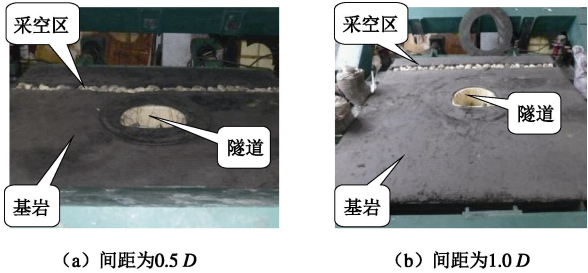


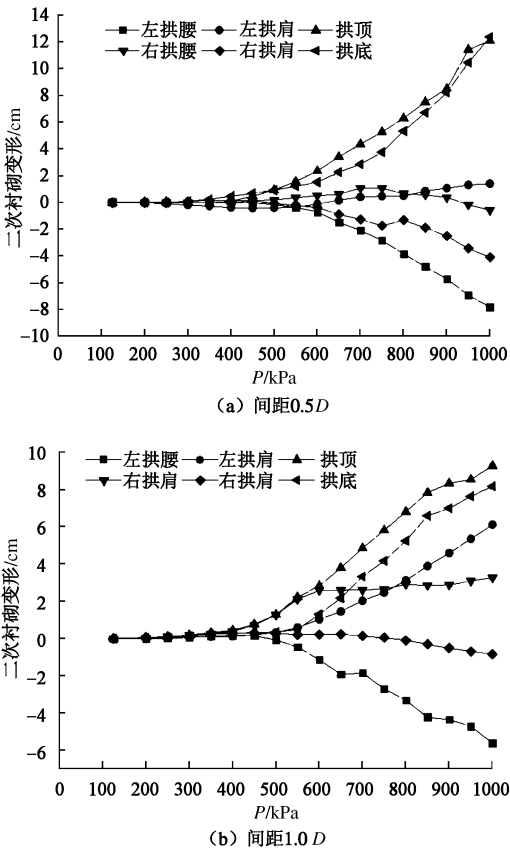
图 8 试验系列

Fig. 8 Test series

3 试验结果分析

3.1 洞周特征位移分析

加载模型试验中所得洞周特征位移随竖向（I 方向）压力关系如图 9。图中设定向隧道内变形为正值，反之为负（下文中所用值均为原型值）。



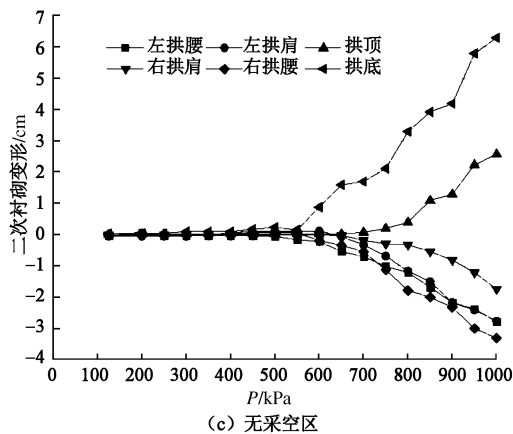


图 9 洞周位移随竖向压力变化曲线

Fig. 9 Curves of convergence of tunnel inner perimeter and vertical loads

由图 9 可以得出,采空区工况下当竖向压力在 500 kPa 以下时,隧道主体结构变形很小,基本完好;大于 500 kPa 后,变形速率急剧增大,且洞周变形值与竖向压力大致呈正比,由于隧道受力以竖向荷载为主,体现在隧道拱顶和拱底向隧道内侧变形,而拱腰产生向隧道外侧受约束的变形,不同特征点位移随竖向压力的变化速率不同,而无采空区工况在压力为 550 kPa 时位移开始明显变化。竖向压力为 1000 kPa 时,洞周位移如表 4 所示。

表 4 洞周位移值

Table 4 Convergence of tunnel inner perimeter (cm)						
项目	左拱腰	左拱肩	拱顶	右拱肩	右拱腰	拱底
间距 0.5D	-7.80	1.42	12.08	-0.58	-4.08	12.36
间距 1.0D	-5.60	6.12	9.28	3.28	-0.82	8.18
无采空区	-4.74	-2.76	2.58	-0.74	-1.80	6.38

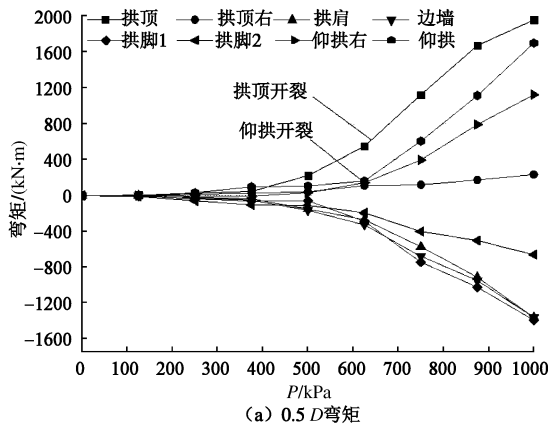
从表 4 可以看出当竖向压力为 1000 kPa 时,间距 0.5D 工况时仰拱拱底位移最大,其中间距 0.5D 时拱底位移为 12.36 cm,比无采空区工况最大位移增加 93.73%。与无采空区相比,采空区工况下位移普遍增大,且洞周位移间距越小,洞周位移越大,上覆采空区对隧道结构变形影响越大。

3.2 二次衬砌内力变化分析

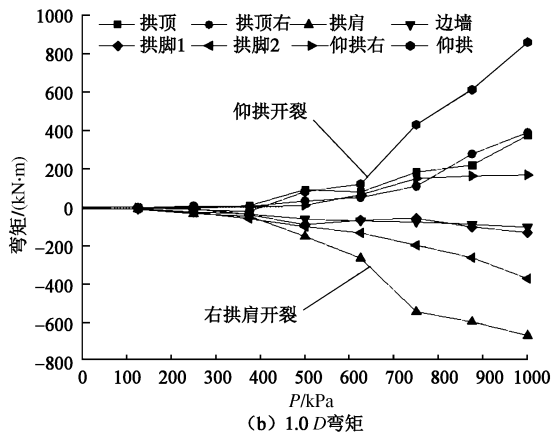
加载模型试验中所得二次衬砌内力随竖向压力变化关系如图 10, 11 所示,因为测点左右对称布置,对称点位变化规律类似,所以取模型右半部分测点进行分析。设定图中弯矩内弯、轴力受压为正值,反之为负。

从图 10 中可以看出,二衬弯矩随竖向压力增加而增大,但随着采空区间距的增大,弯矩增加速度明显降低。间距为 0.5D 时,当竖向压力为 400 kPa 时弯矩明显增大,其中拱顶处弯矩增加速度最快,竖向压力为 1000 kPa 时拱顶弯矩达 1957.67 kN·m,拱脚 1 (#8

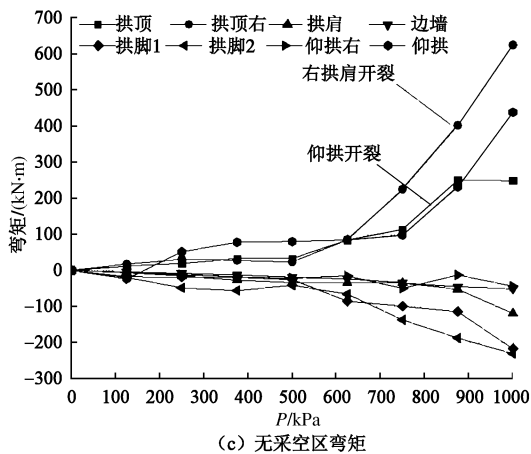
测点)为-1393.58 kN·m。间距为 1.0D 时,当竖向压力为 625 kPa 时弯矩表现出增大趋势,其中仰拱和右拱肩处弯矩增加速度较快。无采空区工况下竖向压力达到 625 kPa 时弯矩逐渐增大,仰拱和右拱肩位置增加速度较快,竖向压力为 1000 kPa 时最大正弯矩为 625.16 kN·m,最大负弯矩为-217.48 kN·m。



(a) 0.5 D 弯矩



(b) 1.0 D 弯矩



(c) 无采空区弯矩

图 10 二衬弯矩随竖向压力变化曲线

Fig. 10 Curves of bending moment of secondary linings and vertical loads

从图 11 可以看出,间距为 0.5D 时,当竖向压力为 125 kPa 时轴力表现出了较明显的增加趋势,达到 375 kPa 时进入较稳定状态,当竖向压力继续增大至

625 kPa 时轴力又表现出明显增大趋势,随着竖向压力继续增加,拱顶和仰拱部位数据过大溢出,竖向压力为 1000 kPa 时有效数据中拱脚 1 处轴力最大,达 6041 kN。间距为 1.0D 时,当竖向压力为 500 kPa 时大部分测点处轴力表现出增大趋势。无采空区工况下竖向压力达到 625 kPa 时大部分点位轴力开始增大,仰拱和右拱肩位置增加速度较快,竖向压力为 1000 kPa 时仰拱处轴力最大,为 4242 kN。

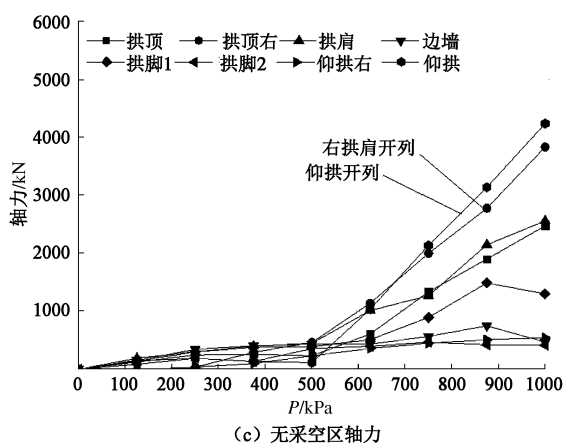
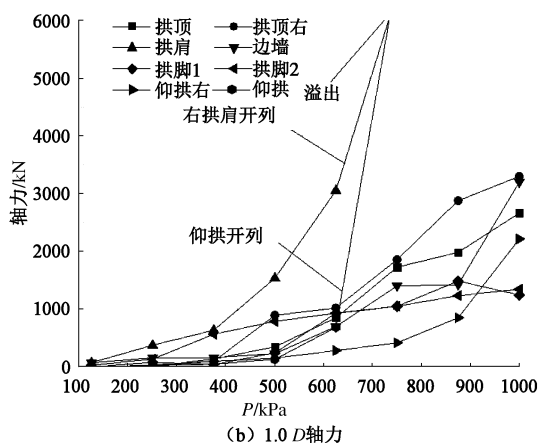
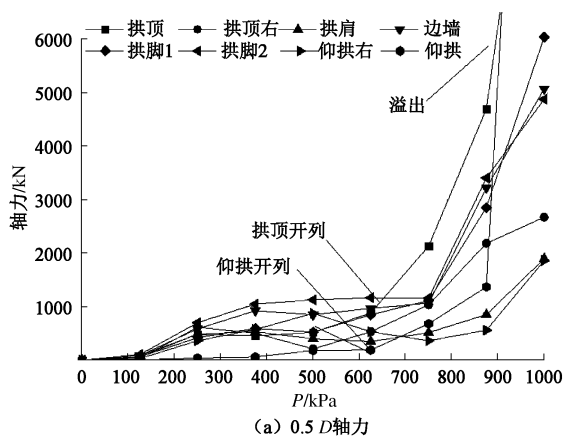


图 11 二衬轴力随竖向压力变化曲线

Fig.11 Curves of axial force of secondary linings and vertical loads

二衬偏心距随竖向压力变化曲线如图 12 所示。

从图中可以看出,不同间距工况下,随着竖向压力的增加,二衬偏心距表现出不同的变化趋势。采空区间距为 0.5D 时,4 个监测点偏心距随着竖向压力的增加表现出较大的增加速度,在衬砌开裂后衬砌偏心距减小,且仰拱位置在较低压力时就出现了较大的偏心距。而在间距为 1.0D 和无采空区工况时,当竖向压力低于 500 kPa 时,偏心距随竖向压力增加而增大,在衬砌变形增加后偏心距减小。

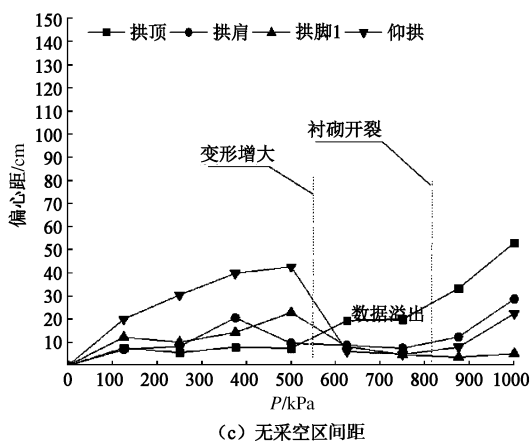
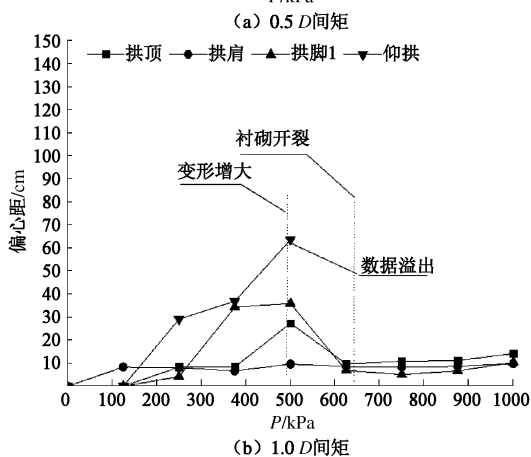
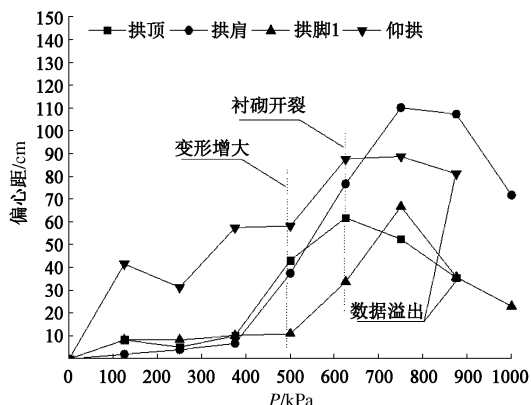


图 12 二衬偏心距随竖向压力变化曲线

Fig.12 Curves of eccentricity of secondary linings and vertical loads

### 3.3 二次衬砌内力分析

由二次衬砌位移和内力变化趋势可以看出,随着竖向压力的增加,位移及二衬内力都表现出了较为明



显的增加趋势, 而隧道变形过大会造成侵限、开裂掉块等病害, 由位移曲线可以看出当竖向压力为 500 kPa 左右时, 洞周位移显著增大, 选取竖向压力 500 kPa 对二次衬砌受力规律进行分析。

当竖向压力为 500 kPa 时, 上覆水平煤层采空区地层与无采空区地层隧道二次衬砌内力分布情况如图 13, 14。

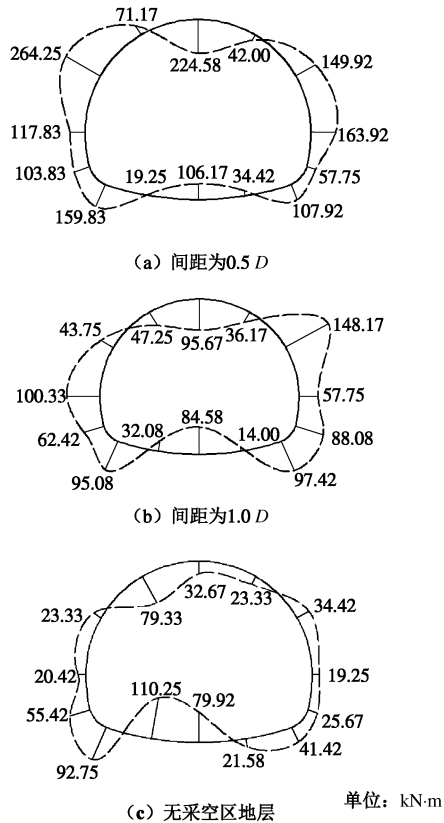


图 13 二次衬砌弯矩图

Fig. 13 Bending moments of secondary linings

由图 13 可以看出, 拱顶和拱底区域内侧受拉, 拱脚和拱腰外侧受拉。相对于无采空区地层, 采空区地层弯矩较大, 且间距越小, 弯矩越大, 间距为  $0.5D$  时, 最大负弯矩出现在左拱肩附近, 达  $-264.25 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 最大正弯矩出现在隧道拱顶, 达  $224.58 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ; 间距为  $1.0D$  时, 最大负弯矩出现在右拱肩附近, 为  $-148.17 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 最大正弯矩出现在隧道拱顶, 为  $95.67 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

由图 14 可以看出, 二次衬砌轴力均为压应力。间距为  $0.5D$  时, 最大轴力出现在右拱脚, 达  $1127.00 \text{ kN}$ , 最小轴力出现在拱底位置, 为  $182.00 \text{ kN}$ ; 间距为  $1.0D$  时, 右拱肩附近轴力最大, 为  $1540.00 \text{ kN}$ , 拱底偏左位置轴力最小, 为  $105.00 \text{ kN}$ 。相对于无采空区地层, 采空区地层轴力分布均匀性较差。

当竖向压力为 500 kPa 时, 二次衬砌的偏心距如图 15 所示。

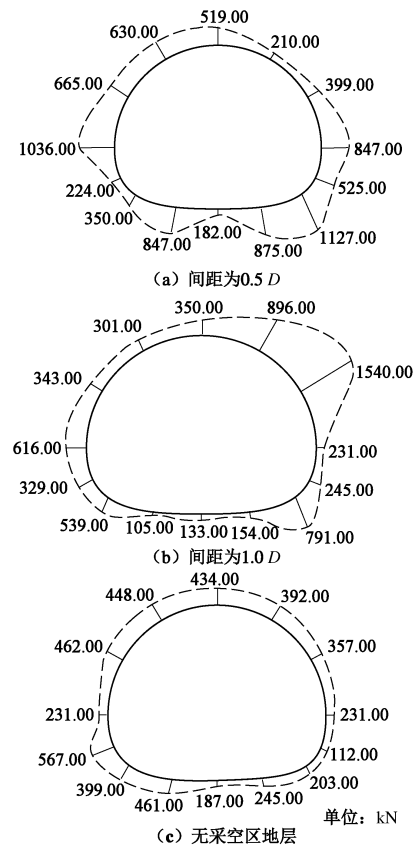


图 14 二次衬砌轴力图

Fig. 14 Axial forces of secondary linings

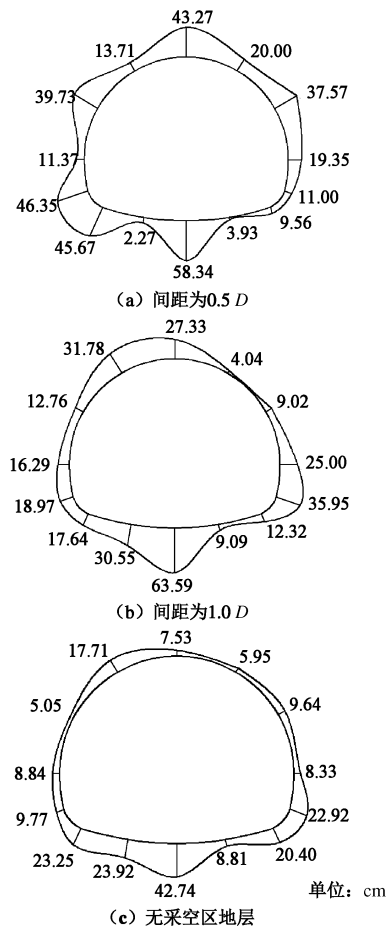


图 15 二次衬砌偏心距

Fig. 15 Eccentricities of secondary linings

从图 15 中可以看出,采空区地层中拱部偏心距大于无采空区地层偏心距,且间距越小,增大程度越高。隧道仰拱偏心距大于拱部偏心距,拱底偏心距最大,间距为  $0.5D$  时,拱底偏心距为 58.34 cm;间距为  $1.0D$  时,拱底偏心距为 63.59 cm。间距为  $0.5D$  时,左侧拱脚偏心距较大,间距为  $1.0D$  时,右侧拱脚偏心距较大。故为了后期采空区地层隧道营运安全,需注重上覆采空区的处治,增大采空区冒落带的黏聚力,发挥上覆围岩自承能力。

### 3.4 隧道二次衬砌开裂情况

试验环境中二次衬砌裂缝开展情况如图 16 所示,图中数字代表裂缝产生顺序。

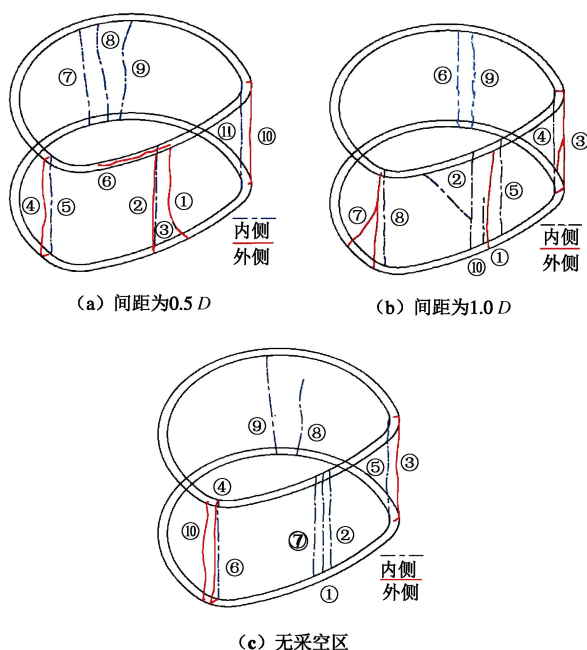


图 16 二次衬砌裂缝分布图

Fig.16 Cracking features of secondary linings

在加载过程中,3 种工况下仰拱位置均首先出现裂缝,随着竖向压力增加,陆续出现后续裂缝。上覆采空区间距为  $0.5D$  工况下,竖向压力为 625 kPa 时,拱底外侧相继出现两条压碎状裂缝①②,随着竖向压力增加,裂缝②向内扩展贯通,内侧出现裂缝③,然后左侧拱脚出现贯通裂缝,拱顶右侧也出现三条张开性裂缝,最后右侧拱脚开裂。上覆采空区间距为  $1.0D$  工况下,竖向边界压力为 640 kPa 时仰拱开裂,然后右侧拱脚出现贯通裂缝,然后右侧拱肩、左侧拱脚相继开裂。而无采空区工况下,竖向荷载为 830 kPa 时仰拱开裂,而后左右拱脚相继开裂,然后右拱肩开裂。

从试验结果可以看出,3 种工况下仰拱位置最先开裂,主要是因为隧道仰拱位置曲率半径大,成拱作用差,抗变形能力弱引起的;上覆采空区对裂缝出现顺序也有一定影响,采空区的存在降低了拱部开裂荷

载;上覆  $1.0D$  工况下开裂压力大于  $0.5D$  工况,无采空区工况下开裂压力最大。

## 4 结 论

通过室内相似模型试验获得了不同边界压力下上覆水平煤层采空区地层隧道二次衬砌位移和内力变化规律及特定围压下二次衬砌内力分布特性,具体结论如下:

(1) 相对于无采空区地层,上覆煤层采空区增大了洞周位移,且间距越小,增大程度越高,当竖向压力为 1000 kPa 时,与无采空区工况相比,  $0.5D$  工况最大位移增加 93.73%,  $1.0D$  工况增加 27.90%。

(2) 随着竖向压力的增大,采空区的存在对二次衬砌内力和偏心距变化过程有一定影响,间距越小,内力增加越明显,当竖向压力为 500 kPa 时,与无采空区工况相比,间距  $0.5D$  工况最大弯矩增加 139.68%,间距  $1.0D$  工况最大弯矩增加 34.39%,采空区的存在导致轴力分布形态变化较大,间距  $0.5D$  工况平均轴力增加 78.39%,间距  $1.0D$  工况平均轴力增加 37.81%,间距  $0.5D$  工况下偏心距普遍大于  $1.0D$  工况和无采空区工况。

(3) 相对于无采空区地层,煤层采空区地层的离散性引起隧道二次衬砌内力分布离散性较大,最大最小值相差较大;隧道仰拱区域偏心距最大,是衬砌结构的薄弱环节。

(4) 二次衬砌仰拱位置最先开裂,煤层采空区对裂缝展开顺序也有一定影响,在设计施工中应给予重视,随着采空区间距增大,开裂荷载也随着增大。

### 参考文献:

- [1] 谢晓东, 张显伟, 李之利. 煤层采空区对铁山隧道病害区的影响[J]. 中国煤田地质, 2000, 12(4): 44 - 47. (XIE Xiao-dong, ZHANG Xian-wei, LI Zhi-li. Influence of coal mined-out area on disaster zones in tieshan tunnel[J]. Coal Geology of China, 2000, 12(4): 44 - 47. (in Chinese))
- [2] 李治国, 曹桢楹. 铁山隧道病害治理技术[J]. 铁道工程学报, 2000(1): 77 - 81. (LI Zhi-guo, CAO Zhen-ying. Techniques for treatment of disasters in tieshan tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000(1): 77 - 81. (in Chinese))
- [3] 李晓红, 姜德义, 刘 春, 等. 公路隧道穿越采空区治理技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 910 - 914. (LI Xiao-hong, JIANG De-yi, LIU Chun, et al. Study on treatment technology of highway tunnel through working out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 910 - 914. (in Chinese))



- Chinese))
- [4] 叶 飞, 霍三胜, 常文伟. 公路隧道穿越软弱破碎煤系地层及采空区施工安全控制技术[J]. 公路, 2011(6): 199 - 205. (YE Fei, HUO San-sheng, CHANG Wen-wei. Construction safety control technology in highway tunnel traversing soft and weak coal formation and mined-out area[J]. Highway, 2011(6): 199 - 205. (in Chinese))
- [5] 秦国刚. 隧道穿越顶部既有富水空区的综合施工技术[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(1): 30 - 33. (QIN Guo-gang. Comprehensive construction technique for tunnel passing through already-existing depletion region being rich in water[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2008, 6(1): 30 - 33. (in Chinese))
- [6] 李治国. 铁山隧道采空区稳定性分析及治理技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1168 - 1173. (LI Zhi-guo. Stability analysis and reinforcement technology of mined-out area in Tieshan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1168 - 1173. (in Chinese))
- [7] 杨 斌. 单煤层采空区公路隧道施工力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (YANG Bin. Study on construction mechanical behavior of highway tunnel traversing single coal seam mined-out area stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [8] 赵 晨. 采空区下隧道安全稳定评价及数值模拟分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2011. (ZHAO Chen. Numerical simulation analysis and stability evaluation of tunnel surrounding rock under mined-out areas[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [9] FU Y P, FANG Y, CUI G, et al. Influence of overlying goaf dip angle on stability of highway tunnel during excavation[C]// IACGE2013, ASCE. Chengdu, 2013: 507 - 514.
- [10] 廖沛源, 郑国强, 袁 松. 采空区地层变形产生的隧道附加荷载及变形容许值计算与分析[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(3): 72 - 78. (LIAO Pei-yuan, ZHENG Guo-qiang, YUAN Song. Calculation and analysis of the additional load upon tunnels caused by stratum deformation and allowable deformation values in mined-out areas[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(3): 72 - 78. (in Chinese))
- [11] 方 勇, 符亚鹏, 杨志浩, 等. 公路隧道下穿煤层采空区开挖过程相似模型试验[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 125 - 134. (FANG Yong, FU Ya-peng, YANG Zhi-hao, et al. Similarity model test of highway tunnel excavation underlying coal mined-out area[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 125 - 134. (in Chinese))
- [12] 方 勇, 符亚鹏, 周超月, 等. 公路隧道下穿双层采空区开挖过程模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2247 - 2257. (FANG Yong, FU Ya-peng, ZHOU Chao-yue, et al. Model test of highway tunnel construction underlying double-deck mined-out area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2247 - 2257. (in Chinese))
- [13] 崔 戈, 方 勇, 徐 晨, 等. 公路隧道下穿 3 层采空区施工模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 257 - 266. (CUI Ge, FANG Yong, XU Chen, et al. Model test of highway tunnel construction underlying triple-decker mined-out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 257 - 266. (in Chinese))
- [14] 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: 5 - 11. (YANG Jun-jie. Similarity theory and structure model test[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005: 5 - 11. (in Chinese))
- [15] JTG/T D31—03—2011 采空区公路设计与施工技术细则[S]. 2011. (JTG/T D31—03—2011 Guidelines for design and construction of highway engineering in the mined-out area[S]. 2011. (in Chinese))