

DOI: 10.11779/CJGE201903016

# 浅埋地铁隧道施工影响下含空洞地层的变形特征分析

蔡 义<sup>1, 2</sup>, 张成平<sup>\*1, 2</sup>, 闵 博<sup>1, 2</sup>, 杨公标<sup>1, 2</sup>

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 地层空洞的存在使得隧道结构周围的地层环境变得更为复杂, 在地铁隧道施工的影响下极易引起地表沉降加剧甚至地表坍塌。针对 V 级围岩地铁隧道, 采用三维模型试验和数值模拟研究了不同位置地层空洞对地表沉降的影响规律以及空洞的变形特征, 同时通过修正后的 Peck 公式对试验结果进行拟合分析。研究表明: 空洞的存在使得地层损失加剧, 地表沉降槽深度和宽度均有所增大, 沉降槽曲线整体向空洞一侧偏移, 通过修正后的 Peck 公式能较好地拟合出沉降曲线形态; 从地表整体沉降形状上看, 空洞上方一定范围内地表沉降较大, 地表会出现明显的沉降盆形态; 综合考虑空洞对地表沉降槽宽度和深度以及地层损失率的影响, 认为空洞位于隧道斜上方是最不利位置, 在施工过程中对这一方位地层空洞应重点关注; 不同方位空洞的变形模式不同, 主要表现为立式椭球体和卧式椭球体等变形模式。  
**关键词:** 浅埋地铁隧道; 地层空洞; 地层变形; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)03-0534-10

**作者简介:** 蔡 义(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的研究。E-mail: 13115295@bjtu.edu.cn。

## Deformation characteristics of ground with voids induced by shallow metro tunnelling

CAI Yi<sup>1, 2</sup>, ZHANG Cheng-ping<sup>1, 2</sup>, MIN Bo<sup>1, 2</sup>, YANG Gong-biao<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The existence of the ground voids makes the ground conditions around the tunnel more complex, which may increase the ground surface settlement and even induce collapse during shallow metro tunneling. Concerning the metro tunnels in the surrounding rock grade V, a series of model tests and 3D numerical simulations are conducted to investigate the characteristics of the void deformation and the impact of different void positions on the ground surface settlement. Besides, an improved Peck formula is proposed to perform the curve-fitting analysis on the model test results. The main conclusions are as follows: the ground voids increase the ground loss, depth and width of settlement trough of the ground surface, and the settlement trough moves towards the ground voids. The curve-fitting results of the improved Peck formula correspond well with those of the model tests and numerical simulations. Furthermore, from an overall perspective of the settlement trough shape of the ground surface, the ground surface settlements are relatively larger within a certain range above the void, and a basin-shaped groove occurs on the ground surface. Considering the overall influences of the ground loss, depth and width of settlement trough, the void locating on the inclined top of the tunnel is the worst position for the tunnel construction, in which case the engineers should pay more attention to monitoring of the ground movement. According to the results of the numerical simulations, the void deformation modes are different with different positions of the void, and the main deformation modes are vertical ellipsoid and horizontal ellipsoid.

**Key words:** shallow metro tunnel; ground void; ground deformation; numerical simulation; model test

## 0 引 言

地铁作为城市地下空间开发的重要组成部分, 很大程度的减小了地面交通的拥堵情况。但是由于地下空间的封闭性, 无法获得全面准确的地下勘探信息, 尤其是不良地质体的存在, 如空洞、水囊等, 对施工过程中造成的危害不能及时预警, 而且一些地质体的危

害具有突发性<sup>[1-2]</sup>。空洞作为地下工程中常见的不良地质体, 根据其形成原因可以分为自然地质空洞和人工

基金项目: 北京市自然科学基金面上项目(8172037); 国家自然科学基金面上项目(51378002)

收稿日期: 2018-02-08

\*通讯作者(E-mail: chpzhang@bjtu.edu.cn)

形成的空洞<sup>[3-4]</sup>。在北京、成都等地以粉砂、粉质黏土和砂卵石为主的地层条件下, 地铁施工中都发现许多地层空洞的存在, 其中有些空洞是开挖前就已形成, 有些则是在施工扰动下形成。

鉴于地层空洞对浅埋隧道施工安全的危害, 越来越多的学者和技术人员通过数值模拟和模型试验对相关问题进行了研究。吴梦军等<sup>[5-8]</sup>和赵明阶等<sup>[9-11]</sup>对岩溶区公路隧道围岩稳定性进行了一系列的大型相似模型试验研究, 探讨了溶洞大小、位置对围岩稳定性的影响规律, 并将试验结果与数值模拟结果进行了对比验证。莫阳春<sup>[12]</sup>通过模型试验研究了隧道掌子面前方存在高压充水溶洞时不同水压、不同围岩条件下隧道突水的安全距离, 此外还探讨了不同条件下充水溶洞对隧道二衬内力的影响规律。李倩倩等<sup>[13-17]</sup>利用平面模型试验对不同位置、不同形状、不同大小的空洞的破坏形式以及围岩应力的变化规律进行了探讨。现有研究主要针对的含空洞地层的破坏规律和机制<sup>[18]</sup>, 而对含空洞地层的地表沉降研究甚少或未见。地表沉降作为浅埋隧道施工中的重点监测项目, 关系到地表行人、车辆和建筑物的安全, 若缺少地层空洞对地表沉降的影响规律和基础数据, 则难以对现场施工进行科学有效的指导。

由于传统的平面应变试验忽略了空洞在隧道开挖方向的空间效应, 平面模型试验更类似于研究了两平行隧道系统, 而三维模型试验则更能准确地反映隧道施工过程中空洞对地表变形的影响规律。本文以含空洞地层中的浅埋地铁隧道为研究对象, 通过三维重力相似试验, 研究不同位置的地层空洞对开挖引起的地表沉降以及围岩应力的影响规律, 同时通过数值模拟验证模型试验结果的合理性, 为含空洞地层浅埋隧道施工的地表沉降控制提供参考。

1 模型试验

1.1 模型试验系统及试验方案

模型试验台架长 1600 mm、宽 1500 mm、高 1500 mm, 台架正面为带圆孔钢板, 圆孔直径为 200 mm, 与模型隧道直径相同, 台架底部也为钢板, 其余三面均为有机玻璃板, 如图 1 所示。其中与正面钢板相对的有机玻璃板可根据试验需要调整位置。本次试验地层模型的尺寸为 1600mm×1500 mm×1000 mm(长×宽×高), 隧道拱顶埋深为 400 mm。

地层空洞通过一球形气囊模拟, 球形气囊上连接有软质导管, 用于充气与放气。埋入土体前先将球形气囊充气, 然后再埋入, 所有土体填装完毕后, 通过导管将气体完全放出形成空洞。经多次试验证明, 将

球形气囊内气体放出后, 能够形成稳定的空洞(如图 2)。由于气囊材质轻薄, 卸载后的体积相对于空洞体积可以忽略不计。

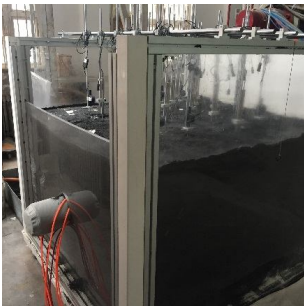


图 1 模型试验台架  
Fig. 1 Model test devices

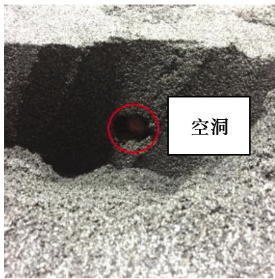


图 2 地层空洞模型  
Fig. 2 Ground void model

试验通过气囊卸载方式模拟隧道开挖过程中的应力释放。试验所用模拟隧道开挖的气囊断面为圆形, 直径  $D=200\text{ mm}$ , 气囊总长 1600 mm, 共分为 8 段, 每段长度均为 200 mm。每段气囊均独立与气泵相连, 通过气囊逐段卸载以模拟隧道向前开挖过程。为后续描述方便, 将气囊分别编号为 1~8, 如图 3 所示。试验中地层空洞中心位于气囊 4 中心所在断面。

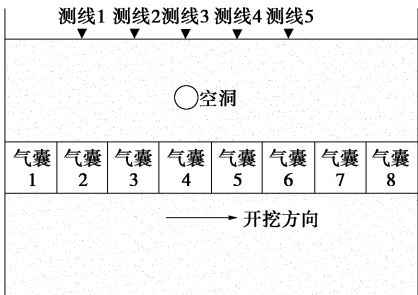


图 3 隧道开挖模拟示意图  
Fig. 3 Schematic of tunnel excavation

试验中采用 LVDT 位移传感器监测地表位移, 传感器量程为 50 mm, 精度为 0.01 mm。为获得地表沉降规律, 共设置了 5 条测线(如图 3 所示), 其中测线 3 为主测线, 布置了 7 个测点, 其余测线均为 5 个测

点,测线依次位于隧道 2~6 段的中心。每条测线中间的测点位于隧道轴线上方,测线上各个测点的横向间距均为 200 mm,如图 4 所示。

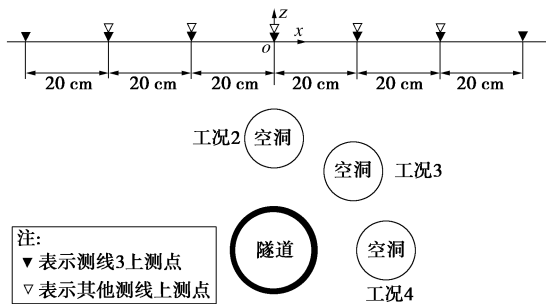


图 4 试验方案与地表位移传感器布置

Fig. 4 Test schemes and layout of displacement sensors

试验共设计了 4 种工况,其中工况 1 为无空洞的对照组,工况 2~4 中地层中存在一个直径为 14 cm ( $0.7D$ ) 的球型地层空洞,空洞与隧道之间的净距均为 10 cm ( $0.5D$ ),空洞分别位于隧道正上方、隧道斜上方  $45^\circ$  和隧道右侧,如图 4 所示。

1.2 相似材料的选择

本试验的原型隧道直径为 6 m,拱顶覆土厚度为 12 m,结合试验条件,确定几何相似比为 $\alpha_l=30$ ,依据相似理论<sup>[19]</sup>各物理力学参数的相似比如下:重度相似比 $\alpha_\gamma=1$ ,泊松比相似比 $\alpha_\mu=1$ ,内摩擦角相似比 $\alpha_\varphi=1$ ,黏聚力相似比 $\alpha_c=30$ ,弹性模量相似比 $\alpha_E=30$ 。

模型试验以地层位移作为主要结果,为实现变形完全相似,应满足以下条件:①原型与模型材料泊松比应相等;②原型与模型的应力应变关系曲线必须相似;③原型与模型边界条件必须相似。通常原型与模型的应力应变关系曲线完全相似以及边界条件完全相似是很难做到的,即难以严格满足位移相似比为 30。结果虽然无法准确的进行定量分析,但能反映出空洞位置对地层变形的影响规律。

基于选择相似材料的一般原则和各种常用材料的性能,并参考其他学者对相似材料的研究成果<sup>[16, 20]</sup>,选取重晶石粉、石英砂和凡士林为原料配制地层相似材料,其中所选用的重晶石粉包括 30 目和 100~120 目两种,石英砂包括 6~10 目、8~15 目和 30 目 3 种。经过多次调试,将各种原料的含量(质量所占百分比)确定,见表 1。经三轴压缩试验和弹性模量试验,得到围岩相似材料的物理力学参数如表 2 所示,其中三轴压缩试验为不固结不排水试验,弹性模量试验是在一定应力水平下多次加压和卸压,得到加压卸压与轴向变形关系曲线,以最后一个滞回圈的两端点连成直线,其斜率作为土的弹性模量。相似材料所模拟的原材料的围岩级别倾向于 V 级围岩,且为均质围岩。

表 1 地层相似模型各原料所占比例(质量比)

Table 1 Percentages of raw materials (mass ratio)

| 原料   | 重晶石粉  |         | 石英砂   |       | 凡士林   |   |
|------|-------|---------|-------|-------|-------|---|
| 粒径/目 | 30    | 100~120 | 6~10  | 8~15  | 30    | — |
| 含量/% | 23.50 | 19.74   | 13.16 | 11.28 | 26.32 | 6 |

表 2 围岩相似材料的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rocks

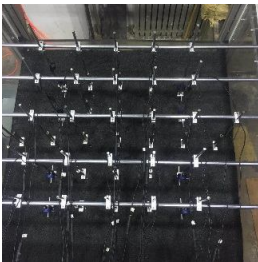
| 类型 | 重度<br>$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 弹性模量<br>$E/\text{MPa}$ | 泊松<br>比 $\nu$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(\text{^\circ})$ |
|----|--|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 模型 | 20   | 0.79                   | 0.29          | 2.40                  | 33.07                             |
| 原型 | 20   | 23.7                   | 0.29          | 72                    | 33.07                             |

1.3 试验步骤

试验开始前,先将隧道模型气囊和空洞模型气囊充气,隧道气囊初始气压等于隧道中心处竖向土压力,约为 10 kPa。在向试验台架内填土过程中在预设位置安放隧道和空洞模型,并埋设土压力计,最后在试验台架顶部架设位移传感器。填充地层相似材料过程为逐层填充,严格控制填土重量,保证每层土的密度相同。所有传感器通过计算机数据采集软件记录试验过程中的数据。先将空洞气囊中的气体放出形成空洞,并静置 30 min,然后从气囊 1 至气囊 8 逐个卸载以模拟隧道开挖过程。每个隧道气囊卸载时均是缓慢卸载至初始压力的 40%,以此模拟隧道开挖过程中的应力释放,稳定 30 min 后再开始下一段气囊的卸载。试验主要步骤如图 5 所示。为方便描述试验现象,将卸载气囊 1~8 过程分别称为开挖步 1~8。



(a) 预埋隧道气囊



(b) 安装位移传感器

图 5 主要试验过程

Fig. 5 Main testing processes

2 数值模拟

由于模型试验只能采集到特定点的应力和位移数据,不能得到整个模型各点的应力和位移值,而数值模拟方法可以对各个区域、各个测点进行应力分析和位移分析,不仅能验证试验结果的准确性,还能对试验进行补充。因此,通过 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件对 4 种工况进行了模拟。在数值模拟建模过程中,所有使用的参数均为原型参数。



与模型试验一致,数值模型中隧道断面为圆形,隧道直径及隧道上覆土厚度均为原型尺寸,地层空洞为直径4.2 m的球形空洞。不考虑实际大范围岩体的多岩层情况,即采用单一地层模拟围岩。围岩的力学参数按表2中的原型选取,采用Mohr-Coulomb模型。

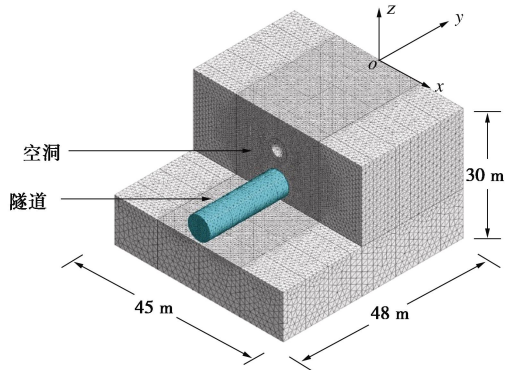


图6 三维数值计算模型

Fig. 6 Model of numerical simulation

数值模拟中,模型尺寸沿 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向分别取45, 48和30 m。采用应力释放的方法模拟隧道开挖及支护过程。实际工程中地铁隧道的开挖方法多样并且过程复杂,施工方法和施工过程并不是本文的研究重点。为节省计算时间并考虑到计算结果与模型试验的对应,建立计算模型时对开挖工程进行了适当简化。隧道沿 $y$ 轴方向分8步开挖,每步6 m,每步开挖去掉隧道处单元后在隧道周边加上反向结点力实现开挖卸载作用,反向结点力为原来的40%。计算模型如图6所示。

### 3 结果分析

#### 3.1 地表沉降分析

##### (1) 模型试验中地表沉降结果

通常空洞上方是地表变形过大甚至发生破坏的主要位置,因此本文主要关注的断面为空洞中心所在断面。图7为试验中空洞上方(测线3)地表沉降随着隧道逐段开挖的变化曲线,可以看出:

a) 无论是否有空洞的存在,在整个开挖通过监测断面的过程中,监测断面地表都要经历“沉降缓慢增加阶段”、“沉降剧烈增加阶段”到“沉降稳定阶段”的过程。从图7中可以看到,在开挖距离监测面较远时(开挖1~3),沉降曲线较为接近,且曲线之间的间隔逐渐增大,说明随着开挖逐渐接近监测断面,监测断面受开挖作用扰动逐渐增强,地表沉降逐渐增大。在开挖通过监测断面时(开挖4~6),沉降曲线间隔较大,说明开挖作用扰动剧烈,地表沉降增大明显。在开挖远离监测断面时(开挖7~8),沉降曲线间隔又逐渐减小,说明随着开挖面的远离,扰动作用

越来越小,监测断面地表沉降逐渐趋于稳定。

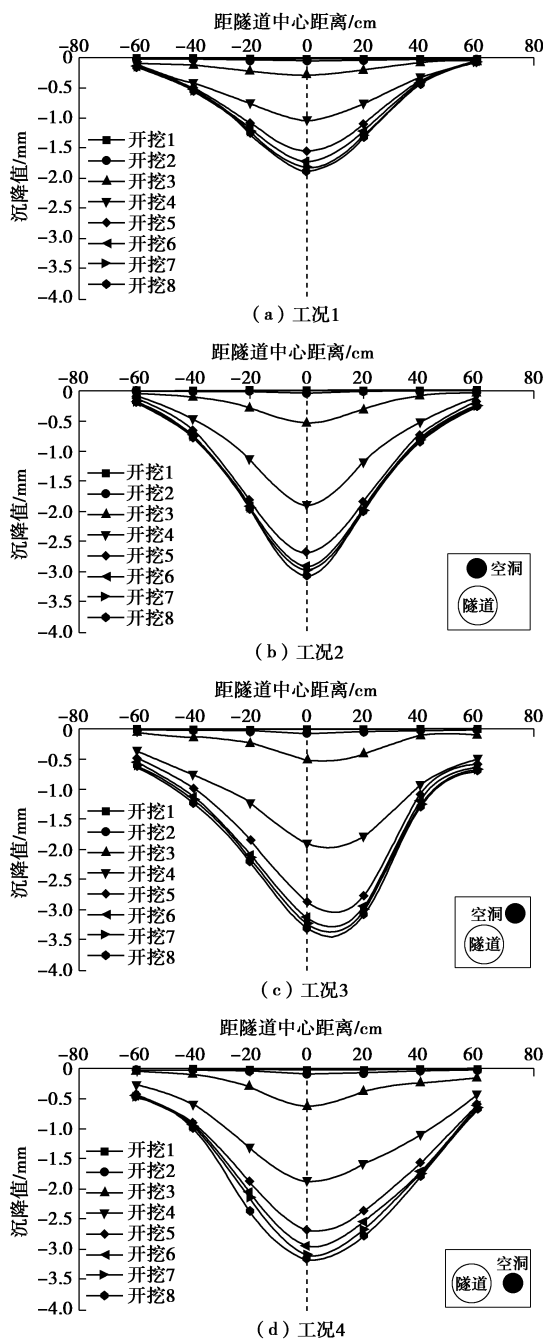


图7 模型试验地表沉降变化曲线

Fig. 7 Evolution of ground surface settlements of model tests

b) 从图中沉降槽曲线的发展过程可以看出,随着气囊的逐段卸载,各个测点沉降量均不断增大,最终趋于稳定,工况1、工况2和工况4中地表最大沉降均出现在隧道正上方测点处( $x=0$ ),而工况3中地表最大沉降大致出现在 $x=10$  cm处。图8为4种工况中隧道正上方( $x=0$ )地表沉降随着开挖的变化过程。图8中曲线形态与隧道开挖引起的地表纵向沉降槽曲线相似,说明本试验采用的开挖模拟方法能够较好的呈现隧道动态开挖过程。对比4种工况的沉降曲线发现,工况1中地表沉降的最大值为1.87 mm;工况2~

4 中, 地表沉降最大值分别为 3.05, 3.34 和 3.14 mm, 分别为工况 1 的 1.63 倍、1.79 倍和 1.68 倍。

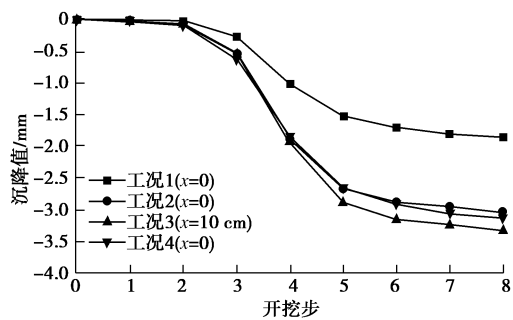


图 8 模型试验地表最大沉降变化曲线

Fig. 8 Maximum ground surface settlements of model tests during tunnelling

(2) 沉降曲线的拟合分析

由于试验条件有限, 布置测点较少, 单从试验所测得沉降值难以准确说明沉降槽曲线的变化规律。因此, 可采用 Peck 公式<sup>[21]</sup>对试验数据进行拟合, 通过拟合曲线的形状变化分析沉降曲线的变化规律。单洞隧道开挖引起的地表沉降为 Peck 公式形如:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right], \tag{1}$$

$$S_{\max} = \frac{AV_1}{i\sqrt{2\pi}}, \tag{2}$$

$$i = Kz_0. \tag{3}$$

式中  $A$  为隧道开挖面积;  $V_1$  为地层损失率;  $K$  为地层沉降槽宽度参数, 与地层的组成有关;  $z_0$  为地表到隧道中心的深度。

通过 Peck 公式对 4 种工况的地表沉降最终值进行拟合后得到的拟合结果如表 3 所示。应当指出的是, 由于数值模拟采用的是原型参数, 为方便比较, 以下所有数值计算结果均为除以几何相似比为  $\alpha_L=30$  后的结果。

表 3 模型试验最终沉降值通过 Peck 公式拟合结果

Table 3 Fitting results by Peck formula of model tests

| 工况   | 最大沉降<br>值 $S_{\max}/\text{mm}$ | 反弯点位<br>置 $i/\text{cm}$ | 地层损失<br>率 $V_1/\%$ | 相关系<br>数 $Adj-R^2$ |
|------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| 工况 1 | -1.81                          | 22.59                   | 3.26               | 0.99               |
| 工况 2 | -2.91                          | 24.72                   | 5.73               | 0.99               |
| 工况 3 | -3.23                          | 30.88                   | 7.97               | 0.92               |
| 工况 4 | -3.12                          | 31.78                   | 7.91               | 0.92               |

从拟合结果中可以看到, 工况 1 和工况 2 中拟合相关系数  $Adj-R^2$  均达到了 0.99; 而对于工况 3 和工况 4, 使用 Peck 公式拟合得到的相关系数  $Adj-R^2$  相对较小, 这是由于地层空洞和隧道组成的系统不再是关于隧道中心轴线 ( $x=0$ ) 对称, 轴线两侧位移相差较大, 使得拟合曲线形状与实际沉降槽形状相差较大, 此种情况下 Peck 公式显然已经不再适用, 有必要对 Peck

公式进行适当改进。考虑到靠空洞一侧地层沉降明显大于无空洞一侧, 且整体形状依然符合正态概率密度函数曲线, 可将其看作是沉降槽整体向空洞一侧发生了偏移在 Peck 公式中引入沉降槽偏移量  $x_c$ , 以此反映沉降槽的偏移现象, 改进后的 Peck 公式为

$$S(x) = S_{\max} \exp\left[-\frac{(x - x_c)^2}{2i^2}\right]. \tag{4}$$

采用改进后的 Peck 公式对试验结果进行拟合, 结果如表 4。工况 3 和工况 4 通过改进后的 Peck 公式拟合得到的曲线更加贴近于试验值, 尤其对于工况 4, 改进后的 Peck 公式拟合得到相关系数  $Adj-R^2$  达到了 0.99, 相较于原始 Peck 公式的拟合结果有了较大幅度提升, 说明改进后的 Peck 曲线拟合结果能够更真实的反映沉降槽形状。

表 4 模型试验最终沉降值通过改进后 Peck 公式拟合结果

Table 4 Fitting results by improved Peck formula of model tests

| 工况   | 最大沉降值<br>$S_{\max}/\text{mm}$ | 反弯点<br>位置 $i/\text{cm}$ | 沉降槽偏<br>移量 $x_c/\text{cm}$ | 地层损失<br>率 $V_1/\%$ | 相关系数<br>$Adj-R^2$ |
|------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------|
| 工况 1 | -1.81                         | 22.58                   | 0.13                       | 3.26               | 0.99              |
| 工况 2 | -2.91                         | 24.72                   | 0.53                       | 5.73               | 0.99              |
| 工况 3 | -3.28                         | 30.26                   | 3.61                       | 7.91               | 0.94              |
| 工况 4 | -3.16                         | 31.34                   | 5.26                       | 7.91               | 0.99              |

比较图 9 中试验、数值模拟以及拟合结果可以得出:

a) 数值模拟与拟合后沉降槽的形态基本相似, 沉降曲线之间的形状差异可认为是由于试验测点有限引起的。数值模拟所得沉降值要小于试验结果, 这是由于数值计算偏于理想化, 而试验中客观影响因素较多造成的。

b) 工况 1 中, 最大沉降值  $S_{\max}$  和反弯点位置  $i$  均小于其他 3 组工况, 说明当地层中存在空洞时, 沉降槽的深度和宽度均会有所增大。所有工况中沉降槽深度最大的是工况 3,  $S_{\max}=3.28\text{ mm}$ ; 沉降槽宽度最大的是工况 4,  $i=31.34\text{ cm}$ 。

c) 工况 2 中, 空洞位于隧道正上方, 在隧道两侧距离相等地表处沉降值相差不大, 沉降槽偏移量  $x_c$  仅为  $0.53\text{ cm}$ , 沉降槽形状基本关于隧道中心轴线 ( $x=0$ ) 对称。工况 3 和工况 4 中, 空洞偏向于隧道右侧, 在隧道两侧距离相等处, 靠近空洞一侧的地表沉降量要大于无空洞一侧, 沉降槽曲线整体向空洞一侧偏移, 其中工况 4 的沉降槽偏移量最大,  $x_c=5.26\text{ cm}$ 。

d) 由于所有试验过程中模拟隧道开挖的气囊卸载量控制均一样, 可以认为隧道开挖产生的地层损失是相同的。工况 1 中地层损失均小于其它 3 种含地层空洞的工况, 地层损失的增量则可认为是由于隧道施工扰动下空洞变形引起。通过比较各工况的地层损失率,

发现在空洞大小和净距一定的情况下,地层损失率的大小关系为:工况3>工况4>工况2>工况1。

(3) 地表沉降等值线

图10为数值模拟过程中主要步骤的地表沉降等值线图,从图中可以看出:

a) 当隧道开挖面距空洞较远时,4种工况中地表沉降等值线图形状和分布均相同,说明当隧道开挖面距空洞较远时,可认为空洞与隧道间无相互影响。

b) 当隧道开挖至空洞下方时,空洞附近等值线间距离减小,即空洞上方一定范围内地表沉降加剧明显。对比3组含空洞工况,工况2和工况3中,空洞上方地表等值线密度要大于工况4。这是因为工况2和工况3中,空洞距地表更近,在隧道开挖影响下空洞变

形引起的地表沉降更加明显。

c) 无空洞时,隧道开挖完成后,地表会形成一个沿隧道开挖方向的均匀沉降槽。地层中存在空洞时,最终地表在空洞上方形成一个沿隧道开挖方向坡度较小、垂直隧道开挖方向坡度较大的沉降盆。当空洞位于隧道正上方时,沉降盆中心在隧道正上方,隧道中心两侧沉降盆壁坡度相同。当空洞位于隧道斜上方45°时,沉降盆中心明显偏向空洞一侧,且空洞一侧沉降盆壁坡度明显大于无空洞一侧。当空洞位于隧道右侧时,沉降盆中心略微偏向空洞一侧,但隧道中心两侧沉降盆壁坡度相差不大。

图11为试验中测线1和测线5之间地表沉降等值

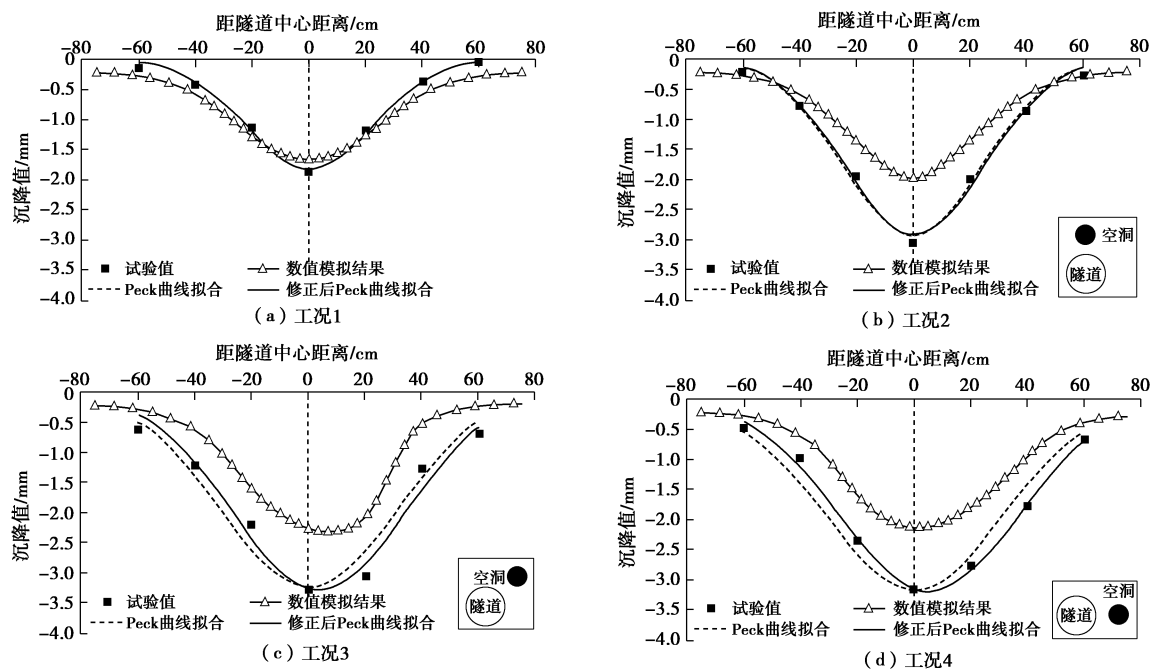
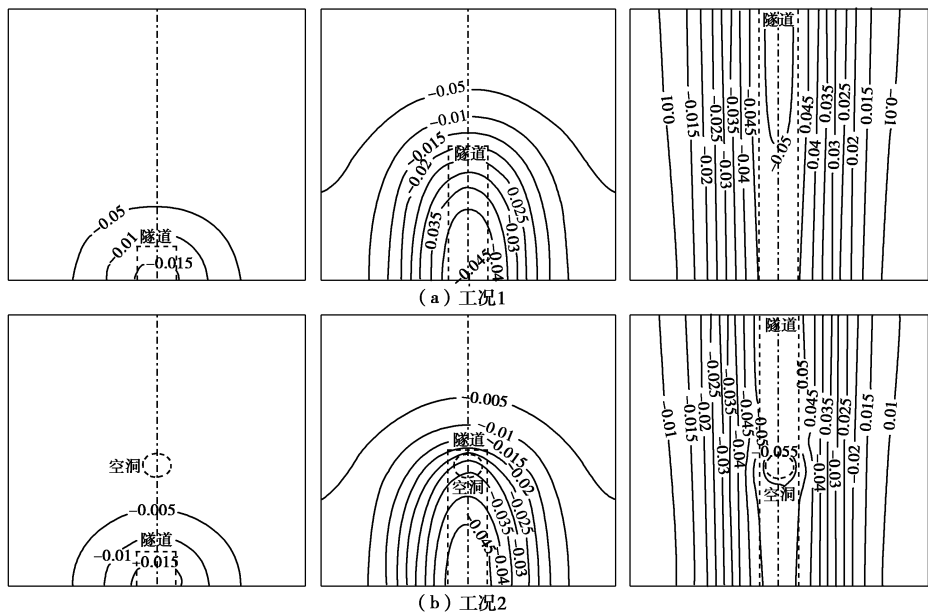


图9 模型试验最终沉降槽拟合结果

Fig. 9 Fitting curves of ground surface settlements of model tests



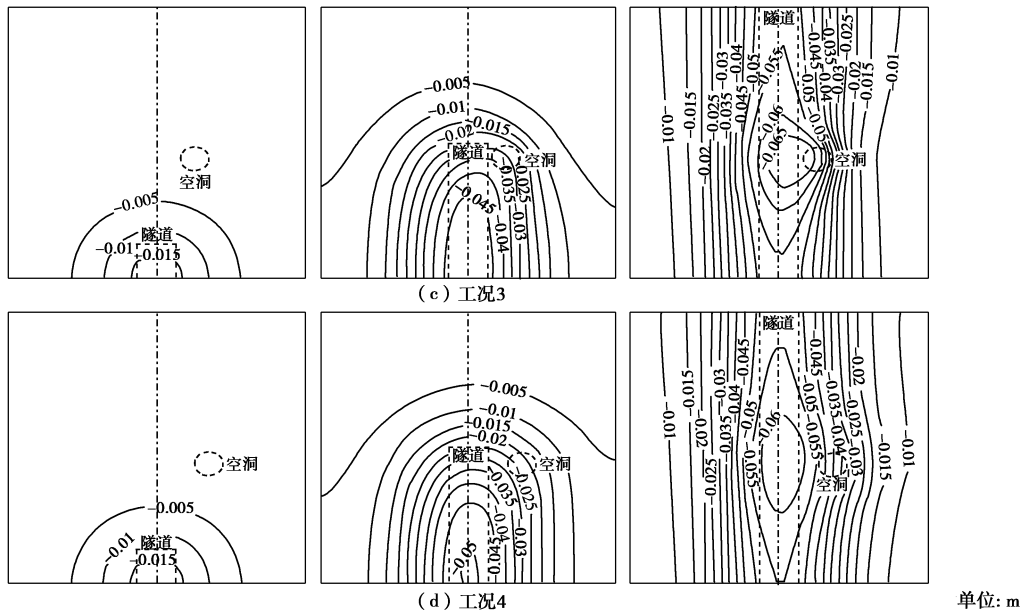


图 10 数值模拟地表沉降等值线图

Fig. 10 Contours of ground surface settlements of numerical simulations

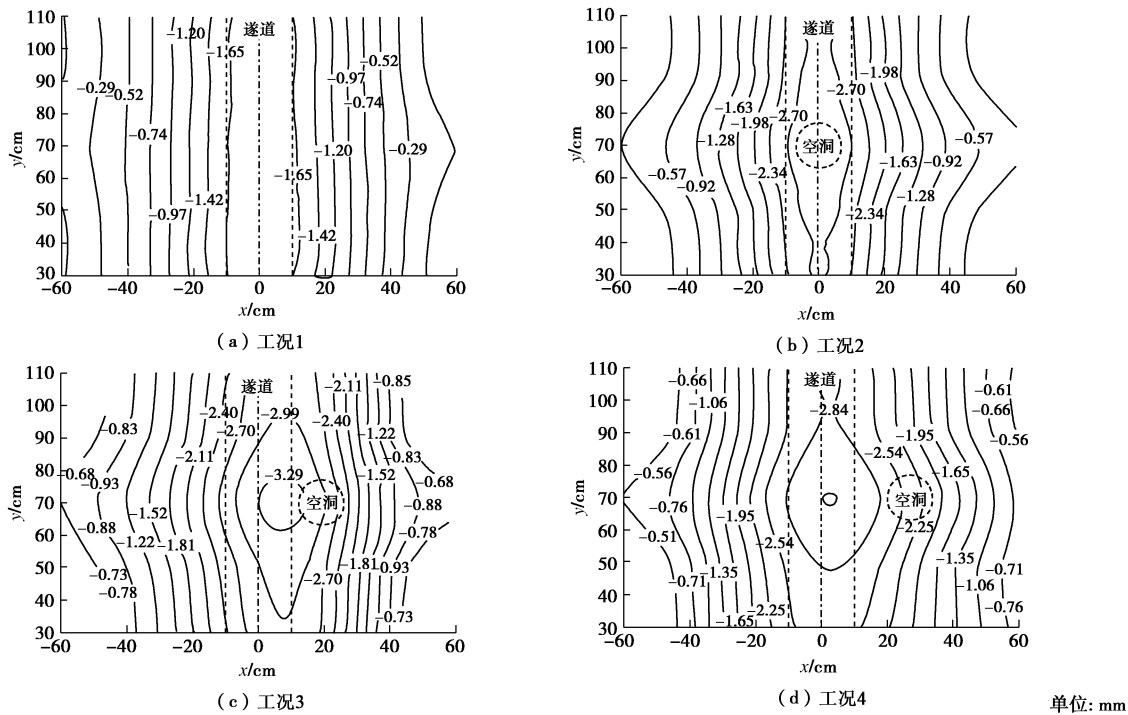


图 11 模型试验地表沉降等值线图

Fig. 11 Contours of ground surface settlements of model tests

线图。由于在靠近试验台架两侧处测点布置有限，所以在距隧道较远区域试验和数值模拟得到的等值线图略有差异，但隧道附近试验结果与数值模拟基本一致。

3.2 空洞变形分析

地层中存在空洞时，隧道开挖引起围岩应力场改变，地层中原本稳定的空洞在施工扰动下失去原有的平衡状态，进而发生变形。三维模型试验无法通过合理有效的方式监测到空洞的变形破坏过程，而数值模

拟正好能弥补试验的不足。

隧道开挖后的收缩变形主要发生在垂直于隧道走向方向，即垂直于  $y$  轴。为方便说明，以下描述空洞变形特征均为空洞中心横截面上边界的变形，并且取该平面上空洞的顶部、底部、左侧和右侧，共 4 个特征点作为监测对象。

图 12 为隧道工况 2~工况 4 中地层空洞在隧道开挖过程中的变形。从图中可以看出空洞的形状随着隧

道逐渐开挖不断变化。图 12 (a) 中空洞位于隧道正上方, 在隧道开挖的过程中, 空洞整体下沉, 且整个空洞边界均向空洞中心收缩。图 12 (b) 中空洞位于隧道斜上方  $45^{\circ}$ , 在隧道开挖过程中, 空洞底部无明显位移出现, 空洞顶部出现明显的收缩位移, 虽然空洞左右两侧均出现了收缩变形, 但不如顶部变形明显。图 12 (c) 中空洞位于隧道右侧, 在隧道开挖过程中, 空洞顶部出现明显的收敛变形, 空洞底部变形较小。空洞左右两侧虽然均出现了收缩变形, 但空洞左侧(靠近隧道一侧)变形明显大于空洞右侧(远离隧道一侧)。

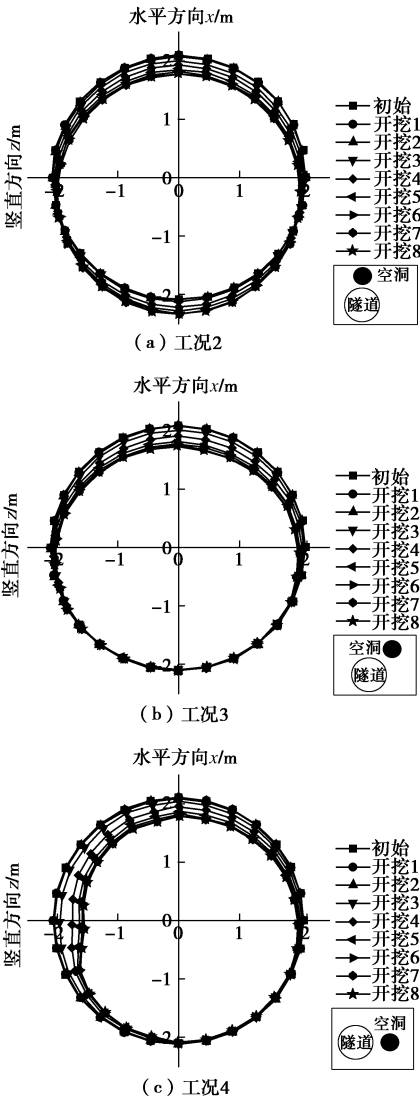


图 12 数值模拟地层空洞的变形过程

Fig. 12 Deformations of ground void of numerical simulations

图 13 为工况 2~工况 4 中空洞周边特征点的位移, 图 13 中正值表示位移方向指向空洞内侧, 负值表示位移方向指向空洞外侧。图中能明显看出, 在整个隧道开挖过程中, 各个特征点的位移均逐渐增大, 说明空洞变形一直在不断发展, 且图中曲线在两竖线之间段斜率最大, 说明在隧道开挖通过空洞过程中, 空

洞的变形最为剧烈。此外, 在隧道开挖通过空洞之后, 空洞的变形依然有所增大, 因此开挖通过后也不能忽略空洞的进一步变形。

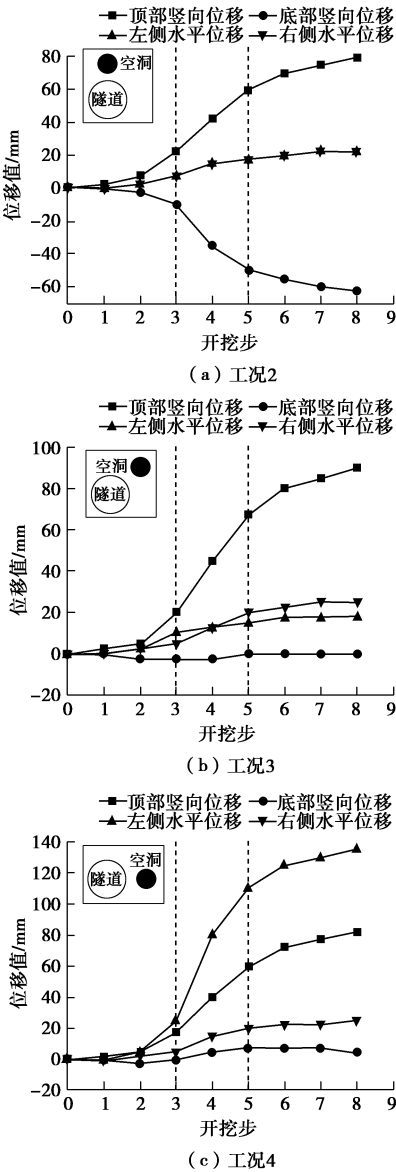


图 13 数值模拟空洞周边特征点位移

Fig. 13 Displacements of feature points around void of numerical simulations

分析图 13 中各曲线特征可得: 隧道正上方空洞竖直方向轴线长度减少了 17.5 mm, 水平方向轴线长度减少了 45 mm, 空洞底部向下沉降了 62.5 mm, 空洞形状也由最初的球形变为了立式椭球体; 隧道斜上方  $45^{\circ}$  空洞底部位移几乎为零, 因此竖直方向轴线长度减少量即为空洞顶部的下沉量, 为 90 mm, 在空洞左、右两侧均出现了收缩变形, 空洞左侧(靠近隧道一侧)水平收缩量要略小于右侧(远离隧道一侧)水平收缩量, 总体上水平方向轴线长度减少了 42.5 mm, 空洞整体形状由球形变成了重心偏向左侧的卧式椭球体;



隧道右侧空洞底部位移很小,顶部位移较大,竖直方向轴线长度减少量约为 87.5 mm,空洞左侧(靠近隧道一侧)水平收缩量要明显大于右侧(远离隧道一侧)水平收缩量,水平方向轴线长度减少了 160 mm,空洞整体变形表现为不均匀的收缩变形,空洞由球形变为重心偏向右侧的不规则立式椭球体。

## 4 结 论

通过三维模型试验研究了浅埋地铁隧道施工扰动下含空洞地层中不同位置空洞对地表沉降的影响规律,并通过 FLAC3D 有限差分软件对模型试验结果进行对比分析,得出如下结论:

(1) 相对于无空洞地层,隧道附近地层空洞的存在使得隧道施工引起的地表沉降加剧,主要影响区域在隧道上方一定范围内,且地表会出现明显的沉降盆。

(2) 与无空洞情况相比,在地层空洞影响下,空洞上方地表沉降曲线的沉降槽宽度和深度均有所不同,且沉降曲线会随着空洞位置变化而发生偏移,原始的 Peck 公式已经不再适用,通过改进后的 Peck 公式则能较好的对试验数据进行拟合。

(3) 隧道施工影响下,不同位置空洞的变形模式不同:空洞位于隧道正上方和右侧时,空洞最终变为立式椭球体;空洞位于隧道斜上方时,空洞最终变为卧式椭球体。

(4) 结合模型试验、数值模拟以及拟合分析,综合考虑地层损失率、沉降槽深度和宽度,可认为空洞位于隧道斜上方是最不利位置,施工过程中应对该方位空洞高度重视,及时采取合理处置措施。

## 参考文献:

- [1] 张顶立, 张成平, 候艳娟, 等. 北京地铁施工事故案例分析[R]. 北京: 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京交通大学, 2006. (ZHANG Ding-li, ZHANG Cheng-ping, HOU Yan-juan, et al. Analysis of safety accidents in Beijing subway construction[R]. Beijing: Beijing MTR Construction Administration Corporation, Beijing Jiaotong University, 2006. (in Chinese))
- [2] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 303 - 309. (ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, et al. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 303 - 309. (in Chinese))
- [3] 苗宇宽, 郭景力. 地质雷达在城市道路地下空洞勘察中的应用[J]. 矿产勘查, 2008, 11(9): 85 - 88. (MIAO Yu-kuan, GUO Jing-li. Application of geological radar in underground voids exploration of urban roads[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 11(9): 85 - 88. (in Chinese))
- [4] 薛建, 曾昭发, 王者江, 等. 探地雷达在城市地铁沿线空洞探测中的技术方法[J]. 物探与化探, 2010, 34(5): 617 - 621. (XUE Jian, ZHEN Zhao-fa, WANG Zhe-jiang, et al. The technical methods for applying GPR to underground cavity detection along the subway[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(5): 617 - 621. (in Chinese))
- [5] 吴梦军. 岩溶地区公路隧道围岩稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2003. (WU Meng-jun. Study on stability of surrounding rock of highway tunnel in karst area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2003. (in Chinese))
- [6] 吴梦军, 许锡宾, 刘绪华, 等. 岩溶对公路隧道围岩稳定性的影响研究[J]. 地下空间, 2003, 23(1): 59 - 63. (WU Meng-jun, XU Xi-bin, LIU Xu-hua, et al. Study on effect of karst to surrounding rock stability of highway tunnel[J]. Underground Space, 2003, 23(1): 59 - 63. (in Chinese))
- [7] 吴梦军, 许锡宾, 赵明阶, 等. 岩溶地区公路隧道施工力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(9): 1525 - 1529. (WU Meng-jun, XU Xi-bin, ZHAO Ming-jie, et al. Construction mechanics response study of highway tunnel in karst region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(9): 1525 - 1529. (in Chinese))
- [8] 吴梦军, 赵明阶, 刘绪华, 等. 岩溶区公路隧道围岩稳定性模型试验研究[C]// 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京, 2002. (WU Meng-jun, ZHAO Ming-jie, LIU Xu-hua, et al. Test research on model of surrounding rock stability on highway tunnel in karst area[C]// The Seventh Academic Conference of Rock Mechanic and Engineering in China. Beijing, 2002. (in Chinese))
- [9] 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. (ZHAO Ming-jie, AO Jian-hua, LIU Xu-hua, et al. Model testing research on influence of karst cave size on stability of surrounding rock masses during tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 213 - 217. (in Chinese))
- [10] 赵明阶, 徐容, 刘绪华, 等. 隧道顶部溶洞影响围岩稳定性的模型试验研究[J]. 地下空间, 2003, 23(2): 153 - 157. (ZHAO Ming-jie, XU Rong, LIU xu-hua, et al. A model test

- study on influence of top karst cave on stability of the surrounding rock-mass during tunnel construction[J]. Underground Space, 2003, **23**(2): 153 - 157. (in Chinese))
- [11] 赵明阶, 徐 容, 许锡宾. 岩溶区全断面开挖隧道围岩变形特性模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, **32**(6): 710 - 715. (ZHAO Ming-jie, XU Rong, XU Xi-bin. Deformation modeling of surrounding rock during full-face excavation of tunnel in karst regions[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2004, **32**(6): 710 - 715. (in Chinese))
- [12] 莫阳春. 高水压充填型岩溶隧道稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (MO Yang-chun. Research on stability of tunnels with high water pressure filled karst caves[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [13] 何 岳. 地层空洞影响下城市隧道施工引起的地层变形规律及控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (HE Yue. Study on ground deformation discipline and control techniques of subway tunnel excavation under the influence of strata defect[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [14] 李 贺. 浅埋隧道施工影响下含空洞地层失稳破坏模式及演化规律[D]. 北京: 北京交通大学, 2013. (LI He. Instability mode and corresponding evolution law of the ground with voids induced by shallow tunnelling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [15] 余 乐. 城市地层不同形态空洞失稳破坏机制的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013. (YU Le. Test study on failure mechanism of underground cavity in different forms in urban strata[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [16] 李倩倩. 复杂城市地层的细观结构稳定性及其变形效应[D]. 北京: 北京交通大学, 2015. (LI Qian-qian. Stability and deformation effect of defects in complicated strata[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [17] 李倩倩, 张顶立, 张成平, 等. 不同埋深下暗挖隧道施工的地层响应[J]. 北京交通大学学报, 2013, **37**(1): 27 - 33. (LI Qian-qian, ZHANG Ding-li, ZHANG Cheng-ping, et al. Study on ground response caused by undercutting subway tunnel under different overburden depths[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, **37**(1): 27 - 33. (in Chinese))
- [18] 张成平, 张 旭, 李 贺, 等. 浅埋隧道施工扰动下含空洞地层破坏演化规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 263 - 270. (ZHANG Cheng-ping, ZHANG Xu, LI He, et al. Model tests on failure laws of ground with voids induced by shallow tunnelling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 263 - 270. (in Chinese))
- [19] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998. (YUAN Wen-zhong. Simulation theory and statics model test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998. (in Chinese))
- [20] 王成平. 破碎围岩隧道的模拟试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. (Model test study on the tunnel within cracked surrounding rocks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))
- [21] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969.