

# 溶洞对轨道交通车站基坑开挖稳定性的影响规律<sup>\*</sup>

郝志强<sup>1</sup> 黄 伦<sup>1</sup> 吴 炫<sup>1</sup> 马 林<sup>1</sup> 吴遥杰<sup>2,3</sup>

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 610213, 成都; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

3. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 工程师)

**摘 要** 当轨道交通车站基坑位于溶洞地层上开挖时, 会面临很大的安全问题, 研究溶洞对车站基坑开挖稳定性的影响规律有助于改善轨道交通工程施工安全。以南京—句容城际轨道交通工程为例, 建立三维有限元模型分析了溶洞对轨道交通车站基坑开挖稳定性的影响。根据基坑开挖及支护过程中支护桩的水平位移、基坑坑底土体隆起量和支护桩后地面沉降的变化规律, 确定了溶洞的空间影响范围, 并将数值模拟结果与实际监测结果进行了对比, 验证了数值模拟结果的准确性。通过模拟基坑与溶洞的不同位置关系、不同溶洞尺寸下的基坑开挖与支护过程, 得到相应的围护结构变形和基坑土体位移, 进而总结出溶洞位置及其尺寸对基坑开挖及围护结构的稳定性的影响规律。

**关键词** 轨道交通车站; 溶洞; 基坑开挖; 稳定性

**中图分类号** U231.3; TU433

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2023.05.006

## Influence Law of Karst Cave on Rail Transit Station Foundation Pit Excavation Stability

HAO Zhiqiang, HUANG Lun, WU Xuan, MA Lin, WU Yaojie

**Abstract** When rail transit station foundation pit is excavated above Karst cave stratum, serious safety problem will occur. Research on the influence law of Karst cave on station foundation pit excavation stability can help to improve rail transit project construction safety. Taking Nanjing-Jurong intercity rail transit engineering as an example, a three-dimensional finite element model is established to study the influence of Karst cave on the stability of rail transit station foundation pit excavation. According to the variation law of horizontal displacement of supporting pile, soil heave amount of foundation pit bottom and land subsidence after pile support during foundation pit excavation and supporting process, the spatial influence range of Karst cave is determined, and the numerical simulation results are compared with the actual monitoring results to verify the reliability of the numerical simulation results. Through simula-

tion of the excavation and supporting process of the foundation pit under different location relations and different cave sizes, the influence law of cave position and size on foundation pit excavation stability is studied from the aspects of retaining structure deformation and foundation pit soil displacement.

**Key words** rail transit station; Karst cave; foundation pit excavation; stability

**First-author's address** Sinohydro Bureau No. 7 Co., Ltd., 610213, Chengdu, China

当基坑工程中的围护结构处于存在溶洞的岩溶地层时, 溶洞的存在可能会导致围护结构在服役过程中产生过大的变形, 并影响基坑结构的稳定性, 严重时可能危害人民生命财产安全。已有许多研究人员就溶洞对轨道交通工程施工的影响进行了大量研究。在溶洞处理方法方面, 文献[1]分析研究了广州岩溶地层某地铁车站基坑开挖对周边环境的影响规律。文献[2]研究了适用于武汉地区轨道交通工程建设的岩溶处理方法。在溶洞影响规律研究方面, 文献[3]建立二维有限元模型分析了溶洞对基坑稳定性的影响规律, 获得了岩溶的处理范围及原则。文献[4]通过二维数值计算对溶洞尺寸、桩长等因素对支护桩的稳定性进行了分析。文献[5]将有限元模型结合工程实例分析了溶洞的尺寸、桩径等因素对支护桩稳定性影响规律。上述研究主要采用二维数值模拟法, 并未考虑溶洞的空间影响。本文基于南京—句容城际轨道交通工程岩溶区段, 建立三维有限元计算模型, 研究溶洞对轨道交通车站基坑开挖稳定性的影响。基于支护桩的水平位移、基坑坑底土体隆起量及支护桩后地面沉降等指标, 分析溶洞位置、大小等因素对基坑开挖及围护结构稳定性的影响规律, 进而确定溶洞的影响范围。本文研究可为类似工程项目岩溶区段的现场施工提供借鉴与参考。

<sup>\*</sup> 中国水利水电第七工程局科技研发项目(201907001)

## 1 工程概况

### 1.1 车站概况

南京—句容城际轨道交通工程白水桥东站采用明挖法施工,车站标准段宽为 19.7 m,基坑底板埋深为 19.8 m。车站基坑围护结构采用  $\varphi$  1 000 mm@1 200 mm 钻孔灌注桩,桩长为 27 m。基坑竖向布设 4 道内支撑,其中第 1 道为 800 mm×900 mm 的混凝土支撑,其余 3 道为  $\varphi$  609 mm(钢管壁厚为 16 mm)的钢管支撑。

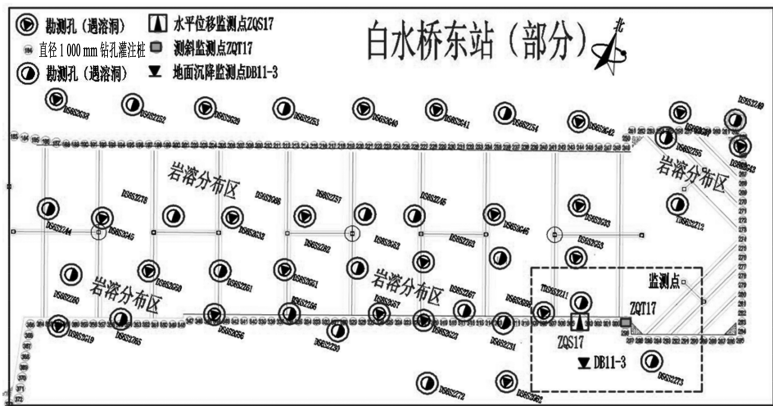
### 1.2 地质水文概况

车站范围内的地层从上至下主要为:①-1 层杂填土,厚度为 3 m;③-1ab1-2 层粉质黏土,厚度为 14 m; $\gamma$ -1 层全风化花岗岩,厚度为 5 m;T2z-3 层中风化泥

质灰岩,厚度为 38 m。车站基坑范围内的地下水主要为孔隙潜水、基岩裂隙水和岩溶水,各类型地下水间的水力联系不密切,溶洞含水量较少。基坑开挖前已将地下水水位降至基坑底板以下 1 m 处。

### 1.3 岩溶概况

车站里程 K2+370—K2+527 段为岩溶发育区,长度约为 157 m,分布面积约为 5 500 m<sup>2</sup>。溶洞分布在车站主体基坑开挖范围和车站主体结构底板下的中风化泥质灰岩层。车站范围内勘明溶洞共 158 个,主要分布在车站标准段,位于车站基坑主动区(56 个)、被动区(81 个)、支护桩底部(21 个),溶洞主要呈椭圆形,高度小于 3 m 的溶洞占 73%,溶洞充填率为 75%~95%。白水桥东站基坑溶洞平面分布示意图截图如图 1 所示。



注: DB11-3 测点垂直支护桩方向,与支护桩的距离为 2 m。

图 1 白水桥东站基坑溶洞平面分布示意图截图

Fig. 1 Screenshot of Karst cave planar distribution diagram of Baishuiqiao East Station foundation pit

## 2 有限元模型的建立与计算

### 2.1 有限元模型参数

由于有限元基坑模型具有对称性,利用 Abaqus 有限元软件,以过基坑中心纵向剖面为对称面建立 1/2 三维有限元模型。基坑开挖深度为 20 m,模型深度取 3 倍开挖深度即 60 m;基坑开挖宽度为 10 m,模型宽度取 3 倍开挖宽度即 30 m;沿基坑纵向长度截取 40 m,即模型长度为 40 m。支护桩简化为地下连续墙结构,选取 C30 混凝土进行模拟,并对混凝土强度进行 80% 的折减。按照实际工程,采用 C3D8R 实体单元模拟 4 道内支撑。将溶洞简化为长方体,长方体的长、宽、高分别对应溶洞的跨度  $a$ 、厚度  $b$ 、高度  $c$ (见图 2 a))。基坑开挖三维有限元计算模型如图 2 所示。地层土体均采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型进行模拟,溶洞位于底部中风

化泥质灰岩层,溶洞按最低填充率(75%)对溶洞填充物的密度和弹性模量进行折减。土层、溶洞填充物及支护结构物理力学参数如表 1 所示。

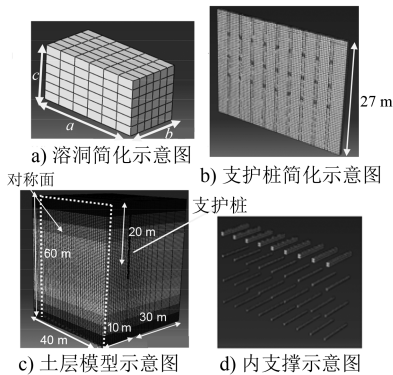


图 2 基坑开挖三维有限元计算模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element calculation model of foundation pit excavation



表 1 土层、溶洞填充物及支护结构物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layer, Karst cave filling material and retaining structure							
名称	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	静止侧压力系数
杂填土	19.3	3	14.9	0.31	38.0	10.5	0.45
粉质黏土	19.6	14	27.3	0.31	45.6	15.0	0.44
全风化花岗岩	19.6	5	27.3	0.31	51.4	18.8	0.49
中风化泥质灰岩	25.0	28	600.0	0.35	3730.0	44.6	0.49
支护桩	24.0	—	30 000.0	0.20	—	—	—
溶洞填充物	12.8	—	12.4	0.35	27.9	7.6	0.49

2.2 有限元模型模拟方案

本工程中溶洞与支护桩的相对位置可分为溶洞位于支护桩下方、溶洞位于基坑主动区及溶洞位于基坑被动区。设溶洞与支护桩的水平距离为  $L$ ，溶洞在基坑底部的埋深为  $H$ ，溶洞位置二维示意图如图 3 所示。根据所勘明的溶洞大小及其分布，模型影响因素及计算参数如表 2 所示。考虑其对称性，溶洞中心均位于基坑纵向中心面。按照每次开挖的埋深分别为 5.5 m、10.0 m、15.0 m、20.0 m 分 4 次开挖，每次开挖后均进行支护，支护深度分别为 0.5 m、5.5 m、11.0 m 和 16.0 m。模拟施工过程为：①初始地应力平衡及边界条件（步骤 1），施加相应边界条件，基坑开挖前先对已有溶洞地层进行初始应力平衡；②支护桩施工（步骤 2），在指定位置取消激活岩土层，激活支护桩墙，完成支护桩的施

工；③开挖（步骤 3、5、7、9），按照上述开挖深度，取消激活指定范围土层，实现开挖功能；④支护（步骤 4、6、8、10），按照上述支护深度，激活设置在相应深度的支撑，实现支撑功能。

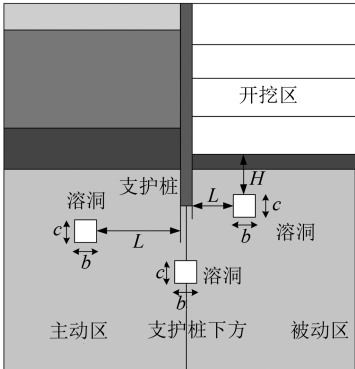


图 3 溶洞位置二维示意图

Fig. 3 Two-dimensional diagram of karst cave location

表 2 模型影响因素及计算参数

Tab. 2 Model influencing factors and calculation parameters		
影响因素	固定参数	可变参数
存在溶洞	$L=0.5\text{ m}, H=3.0\text{ m}$	$a\times b\times c=6.0\text{ m}\times3.0\text{ m}\times3.0\text{ m}$ 或 $0\times0\times0$
溶洞与支护桩的水平距离	$a\times b\times c=6.0\text{ m}\times2.5\text{ m}\times2.5\text{ m}, H=2.5\text{ m}$	$L=0.5\text{ m}$ 或 $1.0\text{ m}$ 或 $1.5\text{ m}$ 或 $2.0\text{ m}$ 或 $2.5\text{ m}$
溶洞在基坑底部的埋深	$a\times b\times c=6.0\text{ m}\times2.5\text{ m}\times2.5\text{ m}, L=0.5\text{ m}$	$H=2.5\text{ m}$ 或 $3.0\text{ m}$ 或 $3.5\text{ m}$ 或 $4.0\text{ m}$ 或 $4.5\text{ m}$ 或 $5.0\text{ m}$
溶洞尺寸	$a=6.0\text{ m}, L=0.5\text{ m}, H=2.5\text{ m}$	$b\times c=1.0\text{ m}\times1.0\text{ m}$ 或 $2.0\text{ m}\times2.0\text{ m}$ 或 $2.5\text{ m}\times2.5\text{ m}$ 或 $3.0\text{ m}\times3.0\text{ m}$ 或 $4.0\text{ m}\times4.0\text{ m}$

3 结果分析

3.1 监测数据与数值模拟结果对比分析

为验证数值模拟结果的准确性，选取现场监测数据与数值模拟结果进行对比，现场监测点包括由水平位移监测点 ZQS17 获取的支护桩顶水平位移、由测斜监测点 ZQT17 获取的支护桩水平位移、由沉降监测点 DB11-3 获取的支护桩后地面沉降量。监测数据与数值模拟计算结果对比如图 4 所示。

由图 4 a) 可知：实测支护桩顶水平位移与数值模拟结果基本契合，均随施工进行先较快增大，后趋于稳定，施工完成后支护桩顶水平位移稳定在

11.00 mm 左右，实测结果的波动性可能是由于实际施工的移动施工荷载及钢支撑预应力的影响；车站基坑开挖支护完成后实测的支护桩水平位移分布与无溶洞情况下数值模拟结果比较相似，实测支护桩最大水平位移为 25.33 mm，与无溶洞情况下 (26.57 mm) 比较接近，而最大位移所处的深度略小于数值模拟；随着开挖及支护施工过程的开展，现场实测支护桩后地面沉降先是逐渐增大，而后趋于稳定，沉降变化整体趋势与数值模拟结果相似，但由于数值模拟只能考虑开挖阶段而不能精确定义施工时间，因而两者存在一些差异。

综上，现场实测结果在一定程度上可以验证数值

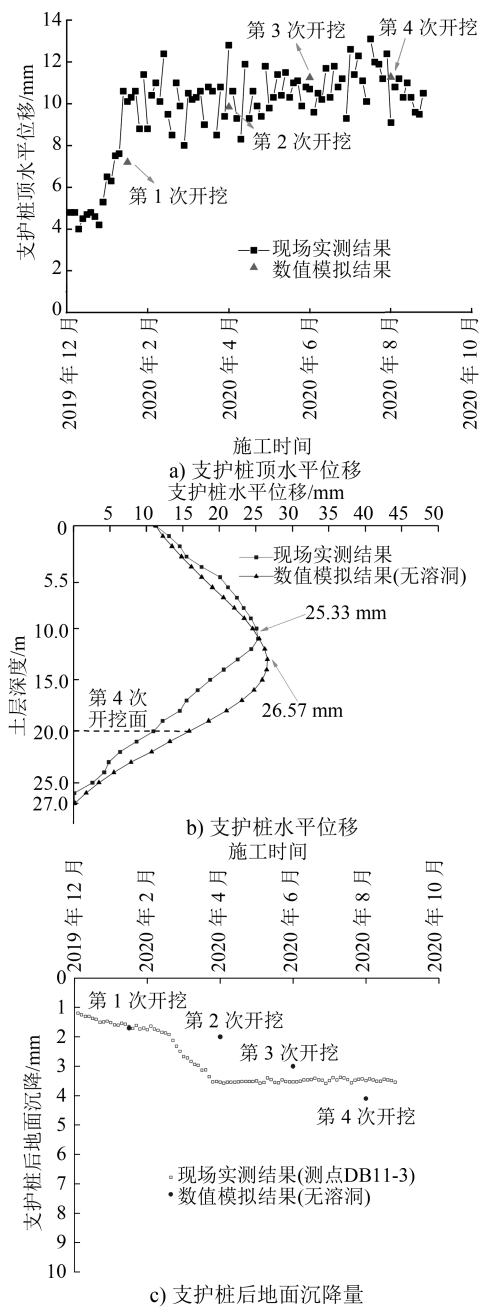


图4 监测数据与数值模拟计算结果对比图

Fig. 4 Comparison diagram of monitored data and numerical simulation calculation results

模拟结果,说明本次数值模拟结果能够较好地模拟施工过程,所研究的溶洞影响规律具有一定的可靠性。

### 3.2 有、无溶洞对围护结构变形的影响

根据过往的工程经验及研究表明,溶洞处于被动区时对基坑的影响最大<sup>[4-5]</sup>,故以溶洞处于被动区为例,分析溶洞对围护结构稳定性的影响。选取被动区典型溶洞,分析有、无溶洞情况下,基坑开挖

过程中支护桩水平位移、坑底隆起量和地面沉降的变化情况。

#### 3.2.1 支护桩水平位移

有、无溶洞情况下,支护桩水平位移随不同开挖深度的变化曲线如图5所示。由图5可知:两种情况下支护桩水平位移分布均呈现向坑内凸形分布;支护桩的最大位移随着开挖深度的增大而增大,且其位置随着开挖深度的增大逐渐向下移动;溶洞主要影响第4次开挖时的支护桩水平位移,其最大值由26.57 mm增至30.99 mm,增加了4.42 mm。

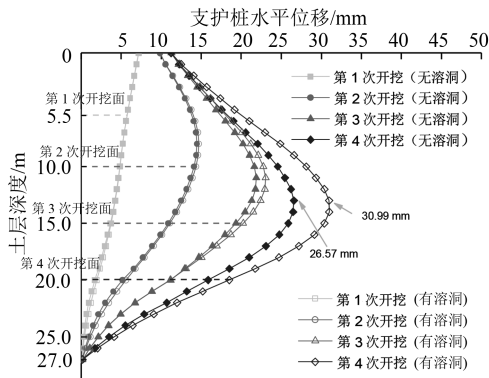


图5 有、无溶洞情况下支护桩水平位移随不同开挖深度的变化曲线

Fig. 5 Change curve of supporting pile horizontal displacement at different excavation depths with or without Karst cave

有、无溶洞情况下,支护桩水平位移沿基坑纵向的变化曲线如图6所示。由图6可知:溶洞对支护桩水平位移的影响随着与支护桩纵向距离的增大而逐渐减小至没有影响;溶洞中心沿两侧约8.0

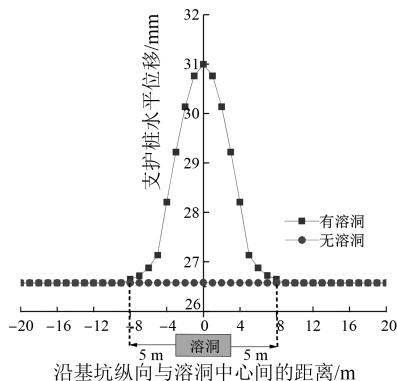


图6 有、无溶洞情况下支护桩水平位移沿基坑纵向的变化曲线

Fig. 6 Change curve of supporting pile horizontal displacement along foundation pit longitudinal direction with or without Karst cave

m 范围内,其支护桩水平位移值显著大于无溶洞条件下的支护桩水平位移值,即溶洞对基坑纵向 5.0 m 范围内的支护桩水平位移有影响。

3.2.2 基坑坑底土体隆起量

有、无溶洞情况下,基坑坑底土体隆起量沿基坑纵向和横向的变化曲线如图 7 所示。由图 7 a) 可知:溶洞主要影响第 4 次开挖,位于溶洞上方的坑底位置隆起量明显增大(由 22.00 mm 增至 37.20 mm);溶洞中心沿基坑纵向往一侧约 7.0 m 范围内的基坑坑底土体隆起量明显大于无溶洞时的基坑坑底土体隆起量,即溶洞对基坑坑底土体隆起的纵向影响范围约为 4.0 m。由图 7 b) 可知:溶洞同样仅影响第 4 次开挖,在沿基坑横向与模型对称面的水平距离大于 3.0 m 范围内的基坑坑底土体隆起量明显大于无溶洞时的基坑坑底土体隆起量,即溶洞对基坑坑底土体隆起的横向影响范围约为 3.5 m。

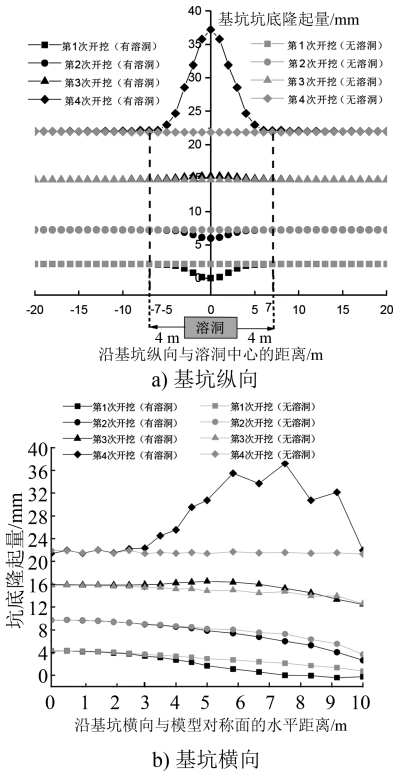


图 7 有、无溶洞情况下基坑坑底土体隆起量沿基坑纵向和横向的变化曲线

Fig. 7 Change curve of foundation pit bottom soil heave amount along foundation pit longitudinal and transverse directions with or without Karst cave

3.2.3 支护桩后地面沉降量

有、无溶洞情况下,支护桩后的地面沉降分布曲线如图 8 所示。由图 8 可知:随着开挖深度的增加,溶洞

对支护桩后地面沉降量的影响逐渐明显;第 4 次开挖后,支护桩后最大地面沉降由 9.08 mm 增至 10.22 mm。

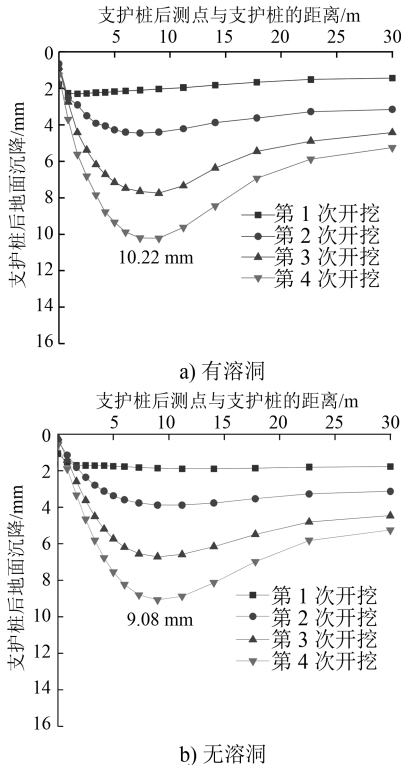


图 8 有、无溶洞情况下支护桩后的地面沉降分布曲线  
Fig. 8 Distribution curve of land subsidence behind supporting pile with or without Karst cave

3.3 溶洞与支护桩之间水平距离对围护结构变形的影响

为研究溶洞与支护桩水平距离对支护桩稳定性的影响,分别分析车站基坑开挖中溶洞与支护桩水平距离对支护桩最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量和支护桩后最大地面沉降的影响规律,其计算结果与曲线拟合结果对比图如图 9 所示。由图 9 可知:随着溶洞与支护桩距离的增大,支护桩的最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量、支护桩后最大地面沉降均呈近似抛物线形减小;当溶洞与支护桩的水平距离分别大于 2.3 m、2.6 m 和 2.2 m 时,溶洞对围护结构变形的影响极小。综合分析数值模拟和拟合关系可知,当溶洞与支护桩水平距离在 2.6 m 范围内时,溶洞对车站基坑支护桩的稳定性有明显影响。

3.4 溶洞在基坑底部的埋深对围护结构变形的影响

溶洞在基坑底部埋深对车站基坑开挖中支护桩水平位移、基坑坑底土体隆起量和支护桩后地面沉降的影响规律,如图 10 所示。由图 10 可知,随着

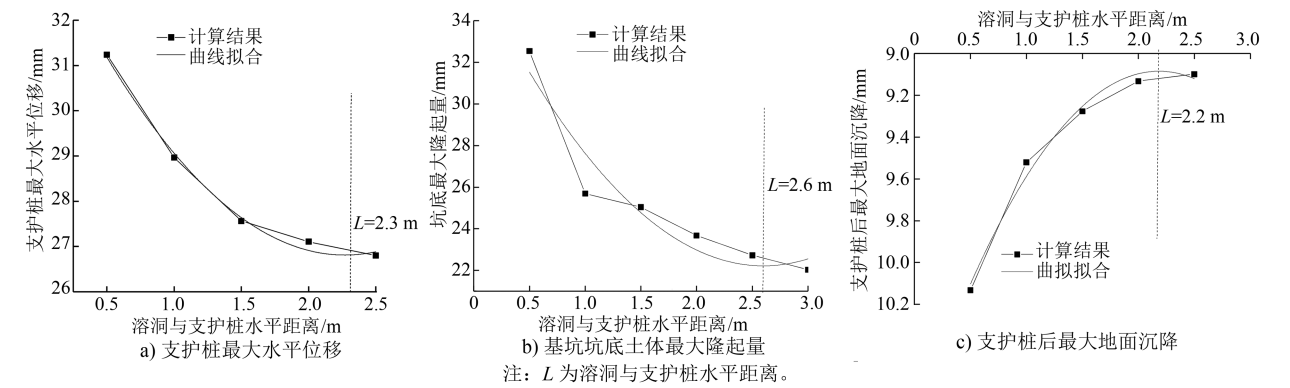


图 9 计算结果与曲线拟合结果对比图

Fig. 9 Comparison diagram of calculation results and curve fitting results

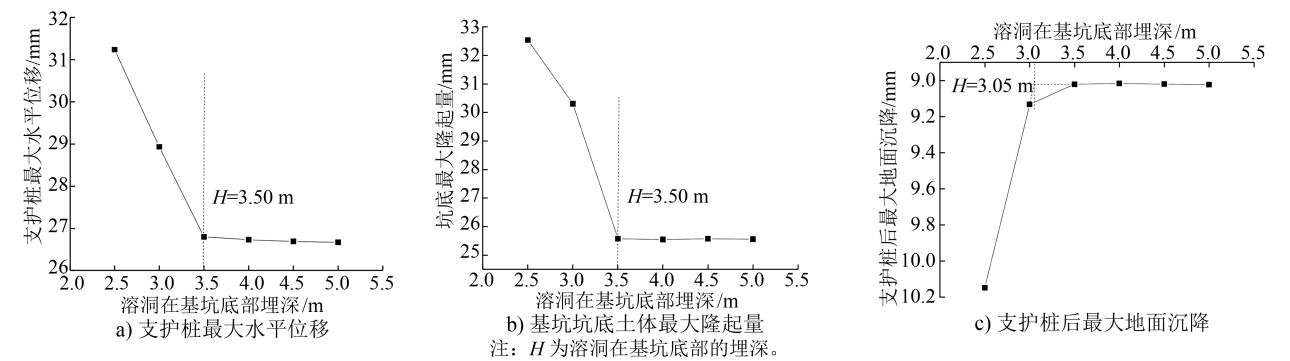


图 10 支护桩最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量及支护桩后最大地面沉降随溶洞在坑底埋深的变化曲线

Fig. 10 Curves of supporting pile maximum horizontal displacement, maximum soil heave amount at foundation pit bottom and maximum land subsidence behind supporting pile changing with the buried depth of Karst cave at pit bottom

溶洞在基坑底部埋深的增大, 支护桩最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量及支护桩后最大地面沉降先近似线性减小后基本保持不变, 三者的变化均存在明显拐点, 其埋深分别为 3.50 m、3.50 m 和 3.05 m。综上所述, 溶洞在基坑底部埋深为 3.50 m 范围内时, 溶洞对车站基坑支护桩的稳定性有明显

影响。

### 3.5 溶洞尺寸对围护结构变形的影响

溶洞尺寸(厚度×高度)将直接影响支护桩的稳定性, 因此有必要研究溶洞尺寸对基坑开挖过程中, 支护桩最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量和支护桩后最大地面沉降的影响规律, 如图 11 所

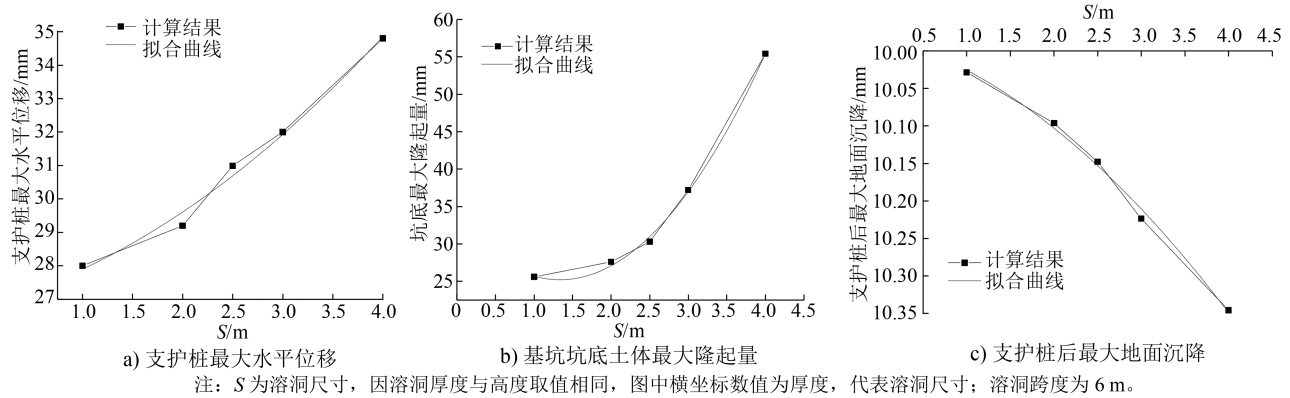


图 11 支护桩后支护桩最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量及支护桩后最大地面沉降随溶洞尺寸的变化曲线

Fig. 11 Curves of supporting pile maximum horizontal displacement, maximum soil heave amount at foundation pit bottom and maximum land subsidence behind supporting pile changing with Karst cave size

示。由图 11 可知,随着溶洞尺寸的增大,支护桩的最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量、支护桩后最大地面沉降近似抛物线形迅速增大。通过抛物线形拟合可获得三者与溶洞尺寸之间的关系,将拟合结果与无溶洞时的情况进行对比发现,相较于无溶洞的情况,5 种变动参数工况下,增大溶洞尺寸导致支护桩最大水平位移分别增大了 5.4%、9.9%、16.6%、20.4%、30.9%。当溶洞尺寸在 2.5 m×2.5 m 及以上时,溶洞会导致支护桩的最大水平位移大于 30 mm,超过规范设计限值,对围护结构的稳定性产生了较大影响;当溶洞尺寸大于 2.0 m×2.0 m 时,基坑坑底土体隆起量明显增大;当溶洞尺寸为 4.0 m×4.0 m 时,相较于无溶洞的情况,基坑坑底土体隆起量增大了 33.41 mm。溶洞尺寸对支护桩后地面沉降的影响相对不大,当溶洞尺寸为 4.0 m×4.0 m 时,相较于无溶洞的情况,支护桩后最大地面沉降增大了 1.27 mm。

#### 4 结语

本文以南京一句容城际轨道交通工程白水桥东站为例,基于三维有限元数值计算模型研究了溶洞对岩溶区段轨道交通车站基坑开挖稳定性的影响,分析了开挖过程中溶洞位置和溶洞尺寸等因素对基坑及围护结构稳定性的影响规律,现场实测结果验证了数值模拟的准确性。主要得到以下结论:

1) 基坑被动区溶洞的存在对基坑开挖及围护结构的稳定性影响较大,溶洞的存在会使支护桩水平位移、基坑坑底土体隆起变形、支护桩后地面沉降均有所增大。

2) 随着溶洞与支护桩水平距离、溶洞在基坑底部埋深的增加,支护桩最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量和支护桩后最大地面沉降均有所减小,并在一定范围内与溶洞与支护桩水平距离及溶

洞在基坑底部埋深大小呈较好的抛物线形关系。

3) 随着溶洞尺寸的增加,支护桩最大水平位移、基坑坑底土体最大隆起量和支护桩后最大地面沉降呈现抛物线形增大。溶洞尺寸对基坑坑底土体隆起量的影响较大,而对支护桩后地面沉降的影响较小。

#### 参考文献

- [1] 崔庆龙,沈水龙,吴怀娜,等. 广州岩溶地区深基坑开挖对周围环境影响的研究[J]. 岩土力学,2015,36(增刊1): 553.  
CUI Qinglong, SHEN Shuilong, WU Huaina, et al. Field investigation of deep excavation of metro station on surrounding ground in karst region of Guangzhou[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(S1): 553.
- [2] 李慎奎,陶岚. 武汉地区岩溶发育特征及地铁工程中岩溶处理[J]. 隧道建设,2015,35(5): 449.  
LI Shenkui, TAO Lan. Features of karst development in Wuhan area and treatment of karsts encountered in construction of Wuhan Metro[J]. Tunnel Construction,2015,35(5): 449.
- [3] 江杰,王彰庆,彭远胜,等. 岩溶区溶洞对基坑稳定性影响及处治技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(增刊1): 471.  
JIANG Jie, WANG Zhangqing, PENG Yuansheng, et al. Effect study of karst cave on the stability of foundation pit and treatment technology in karst region[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(S1): 471.
- [4] 王倩. 溶洞对支护桩稳定性影响研究[D]. 南宁: 广西大学,2014.  
WANG Qian. The research on the effect of karst cave on the stability of retaining pile [D]. Nanning: Guangxi University,2014.
- [5] 梅博轩. 岩溶区基坑支护桩的稳定性分析[D]. 广州: 广东工业大学,2018.  
MEI Boxuan. Stability analysis of foundation pit supporting pile in karst area[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.

(收稿日期:2020-12-12)

#### (上接第 26 页)

- [2] 周云娣. 地铁客流特征分析与运营措施的优化[J]. 中国水运(下半月),2018,18(7): 40.  
ZHOU Yundi. Analysis of subway passenger flow characteristics and optimization of operation measures[J]. China Water Trans-

port, 2018, 18(7): 40.

- [3] MCDONALD G C. Ridge regression[J]. WIREs Computational Statistics,2009,1(1): 93.

(收稿日期:2020-11-30)