

# 溶洞形态特征对隧道围岩变形及地表沉降影响

郭平

中电建南方建设投资有限公司, 广东 深圳 518055

**摘要：** 探究溶洞对盾构隧道安全影响是保证盾构隧道施工安全的重要条件。文章依托于深惠城际铁路工程，采用 ABAQUS 建立的溶洞隧道三维有限元模型，结合现场监测数据，验证模型的可靠性，并通过溶洞隧道三维有限元模型探究溶洞形态特征对隧道围岩变形及地表沉降规律。研究表明，溶洞隧道三维有限元模型和现场监测数据误差值最大控制在 11.38%；串珠型溶洞相对于孤立型溶洞对隧道围岩变形及地表沉降变形影响更大。

**关键词：** 溶洞特征；盾构隧道；ABAQUS；有限元模型

## The Influence Of Karst Cave Morphology On Tunnel Surrounding Rock Deformation And Surface Settlement

Guo Ping

Powerchina Southern Investment Co.,Ltd, Shenzhen, Guangdong 518055

**Abstract：** Exploring the impact of karst caves on the safety of shield tunnels is an important condition for ensuring the safety of shield tunnel construction. The article is based on the Shenzhen Huizhou intercity railway project, using ABAQUS to establish a three-dimensional finite element model of karst tunnels. Combined with on-site monitoring data, the reliability of the model is verified, and the three-dimensional finite element model of karst tunnels is used to explore the influence of karst tunnel morphology characteristics on tunnel surrounding rock deformation and surface settlement laws. Research has shown that the maximum error value between the three-dimensional finite element model of karst tunnels and on-site monitoring data is controlled within 11.38%; The bead shaped karst cave has a greater impact on the deformation of tunnel surrounding rock and surface settlement deformation compared to the isolated karst cave.

**Key words：** cave characteristics; shield tunneling; ABAQUS; finite element model

### 一、引言

我国是世界上岩溶分布面积最大的国家，出露碳酸盐岩占国土面积13%。盾构隧道在穿越城市地段过程中可能会遭遇岩溶发育，会对盾构掘进造成较大阻碍，处理不当可能会导致盾构机“栽头”、隧道突水突泥、地面塌陷等安全事故，造成较大的经济损失和人员伤亡<sup>[1]</sup>。目前深圳市轨道交通运营里程304.3km，在建里程219.269km。未来10~15年时间深圳有大量的轨道交通建设项目<sup>[2]</sup>。基于此，国内外学者展开了大量研究<sup>[3~4]</sup>。史世雍等<sup>[5]</sup>依托于夏家庙隧道实际工程建立隧道溶洞模型，研究顶部溶洞对隧道围岩稳定性的影响；莫阳春等<sup>[6]</sup>依托达成高速铁路宝石岩隧道建立有限元模型，探究不同溶洞尺寸对隧道稳定性的影响；李元海等<sup>[7]</sup>针对大瑶山隧道岩溶突水问题，建立有限元模型，研究溶洞与隧道间距、溶洞充填状态、溶洞注浆对隧道围岩稳定性影响；李鸿博等<sup>[8]</sup>依托大连地铁5号线跨海隧道，分析在复杂地质条件下盾构隧道双层衬砌的优势及对应的防排水方案，提出了盾构穿越岩溶发育地段的处治措施；李术才等<sup>[9]</sup>依托齐岳山隧道工程，建立溶洞数值模型，研究多种工况下盾构施工突水灾害的演变过程；Wang W等<sup>[10]</sup>建立数值模型，研究在上覆砂岩和下伏石灰岩的地质条件下，溶洞的高跨比、填充状态及跨度对岩溶安全

的影响。

目前国内外研究大多是针对孤立型溶洞对隧道安全进行分析，对串珠形溶洞研究较少，因此本研究依托于深惠城际铁路工程，采用 ABAQUS 建立溶洞隧道三维有限元模型，通过和现场监测数据对比验证模型的可靠性，并通过孤立型溶洞和串珠型溶洞的模拟结果值分析两种溶洞形态特征下对隧道围岩及地表沉降变形影响。

### 二、工程概况

深惠城际铁路穿越深圳，东莞及惠州，是粤港澳大湾区城际铁路网的重要组成部分，正线长度58.860km。盾构穿越深圳龙岗区域岩溶发育强烈：工程区内有大量岩溶发育，溶洞大部分分布在隧道上方，其中252个钻孔为可溶岩钻孔，有145个孔揭露到溶洞，见洞隙率57.5%，总线岩溶率7.47%；

### 三、监测方案

本章依托深惠城际铁路工程为背景，针对左线隧道建立三维模型，由于地下施工情况复杂，为了提高数值模型的模拟效率，

\* 作者简介：姓名：郭平，性别：男，出生日期：1976年3月，籍贯（陕西商州），学历：本科，职称：高级工程师，民族：汉，从事的研究方向或工作领域：轨道交通。

在溶洞分布和隧道的位置关系存在明显特征条件下,对模型进行了相应的简化。根据前人研究的文献可以知道溶洞采用球体对数值模拟的结果影响较小,可以减小应力集中。建立的部分岩溶隧道三维有限元模型如图1所示,建立XYZ长60m,宽36m,高60m的模型。网格划分在靠近隧道和溶洞区域密集,四周稀疏,减少计算力的同时,保证模型的计算精度。隧道尺寸与实际工程保持一致,直径为8.8m的圆形,埋深为28m(本模型Z方向向下为正方向),在开挖隧道的顶部建立溶洞,溶洞中心位置建立在Y方向段面掘进里程中心。

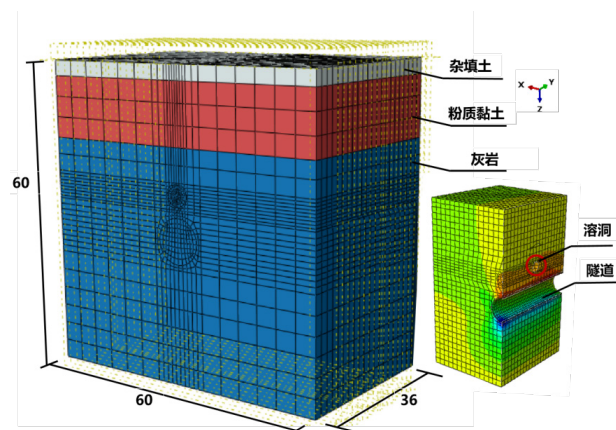
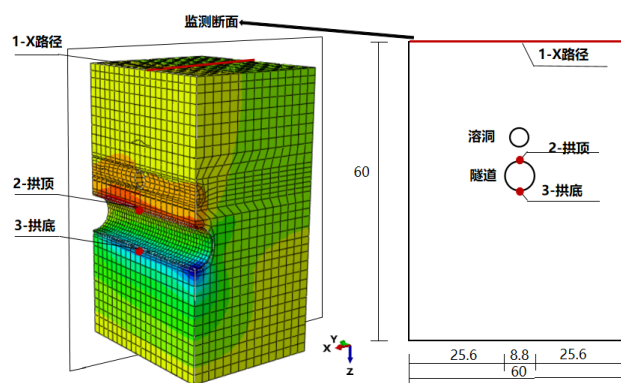


图1 岩溶隧道三维有限元模型(单位:m)

建立的岩溶隧道三维模型中,岩溶中心分布在盾构掘进方向(Y方向)的中点,为了研究该工程地质情况下,浅层盾构隧道掘进过程中岩溶区域溶洞对隧道围岩变形及地表沉降的影响规律,而溶洞对围岩变形及地表沉降变形的影响较为显著,因此将监测点布置在Y=18的断面上,在该断面上布设3个监测点如图2所示,1-沿X方向断面的地表路径,2-拱顶,3-拱底,监测在盾构隧道开挖过程中竖向位移的变化情况。

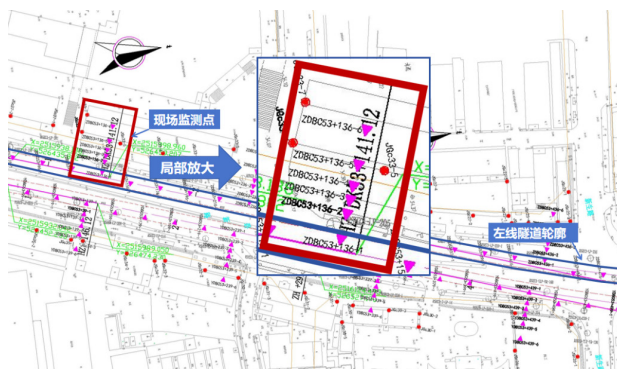


> 图2 监测点布置图

#### 四、数值方法可靠性验证

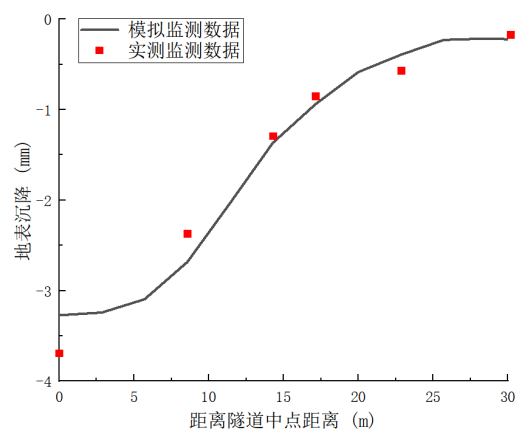
本节依托深惠城际铁路工程为背景, 监测研究段盾构穿越岩溶发育区域, 遭遇典型的岩溶等不良地质问题, 未造成大的工程地质事故。本研究结合地质勘探的岩溶发育信息建立数值模型, 模拟结果所探讨的溶洞对隧道围岩变形及地表沉降的影响, 通过现场的监测数据和数值模拟的结果进行对比分析, 可以验证模型的适用性、精确性和可靠性。如果模型的计算结果与实际观测结

果一致,可以认为模型具有较高的合理性;如果存在较大的差异,需要对模型进行修正或重新构建,以使其更加符合实际情况。本研究通过监测区段左线隧道上方部分监测点的地表沉降数据来分析研究,选取的监测点 ZDBC136-1~6如图3工程平面图所示。ZDBC表示左线地表沉降。



> 图3 沉降监测点布置平面图

随隧道开挖完成后数值模拟结果取监测路径沿 X 方向 ( $X=0\sim 30\text{m}$ ,  $Y=18\text{m}$ ) 断面盾构掘进时的地表沉降值, 对应现场监测位于左线隧道上方的点 ZDBC336-1、ZDBC336-2、ZDBC336-3、ZDBC336-4、ZDBC336-5、ZDBC336-6 的地表沉降值, 通过二者数据结果比较分析。由于本研究建立的数值模型 Z 方向以竖向方向向下为正方向, 因此为了和现场监测数据对比更为直观, 得到模拟的竖向方向的数据结果都进行负号换算, 如图 4 所示, 对应的是盾构掘进完成后的地表沉降变形。模拟结果在地表距离隧道中心处沿 X 方向的沉降最大, 为  $-3.27\text{mm}$ , 现场监测在地表距离隧道中心处沿 X 的沉降最大, 为  $-3.69\text{mm}$ 。模拟结果和现场监测数据地表沉降最大值沉降均在  $-3\sim -4\text{mm}$  范围内, 变形趋势基本一致, 其中最大误差为  $11.38\%$ , 符合规范允许的安全范围。因此, 由上述结果说明建立的模型能较好的反映实际盾构工程地层位移情况。



> 图4 现场监测和模拟结果对比图

## 五、溶洞形态特征对围岩变形及地表沉降影响研究

对溶洞形态外的其他影响因素, 填充状态选取的是无填充溶洞; 溶洞位于隧道上方; 孤立型溶洞与隧道的距离取4m, 溶洞的直径取4m; 串珠型取两个相同直径为4m的溶洞, 第一个溶洞与

隧道的距离取4m，第二个溶洞距离第一个溶洞垂直方向上1m。基于此对溶洞形态选取孤立型，串珠型进行模拟研究。开挖后的围岩竖向方向位移云图如图5所示。可以发现，串珠型溶洞相较于孤立型溶洞对围岩竖向位移的影响更为显著。

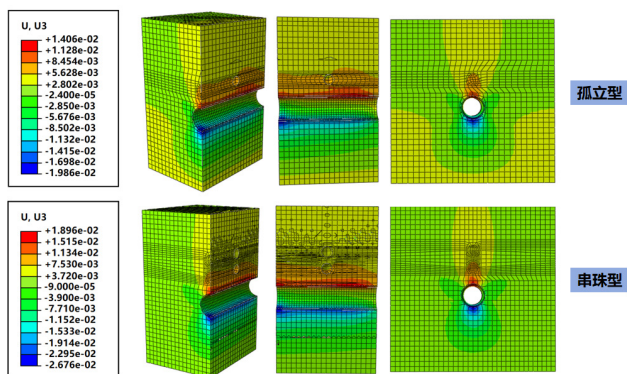


图5 不同溶洞形态隧道围岩竖向位移云图

盾构隧道开挖会破坏土体整体结构，地表会产生沉降，隧道拱顶会发生下沉，拱底产生底鼓等变形，为了进一步分析不同形态的溶洞对隧道变形的影响，监测点2和3处隧道围岩变形随盾构掘进的变化值如图6所示。由图可知，串珠型溶洞对隧道围岩变形的作用远大于孤立型，串珠型溶洞的存在，导致应力集中作用更加明显，其减小围岩的整体性及刚度的作用覆盖了顶部溶洞的屏蔽作用，因此会加剧围岩的收敛变形。监测点处，溶洞形态由孤立型变为串珠型时，拱顶沉降最大值由13.12mm增大到17.93mm，拱底隆起最大值由18.67mm增大到25.31mm。隧道围岩变形的最终变化值如图7所示，通过孤立型，串珠型不同形态的溶洞对竖向位移的变化幅度比较计算，可以发现串珠型溶洞相对于孤立型溶洞的拱顶沉降变形增大了36.61%，拱底隆起变形的变化量增大了35.56%。因此，通过隧道围岩竖向位移数据的变化分析，可以表明当溶洞在隧道上方时，孤立型的溶洞对竖向位移变形的减缓作用贡献更大。

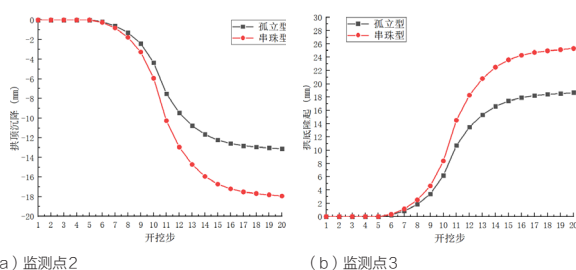


图6 不同溶洞形态隧道监测点竖向位移图

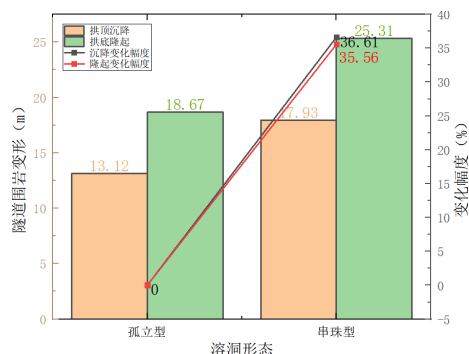


图7 不同溶洞形态隧道围岩监测点位移最终变化值

为分析溶洞不同形态对地表沉降的影响规律，研究汇总了监测路径1不同位置对地表沉降的影响，如图8所示，由图可知，地表沉降呈现典型的非线性槽型特征。溶洞为孤立型时，地表沉降最大值为-2.85mm；溶洞直径为串珠型时，地表沉降最大值为-3.74mm。通过串珠型，孤立型不同形态的溶洞竖向位移的变化幅度计算，可以发现串珠型溶洞相对于孤立型溶洞的地表沉降变形量减小了23.79%。当溶洞形态为串珠型时，地表沉降最为显著，溶洞为孤立型时，对地表沉降减缓作用贡献较大。

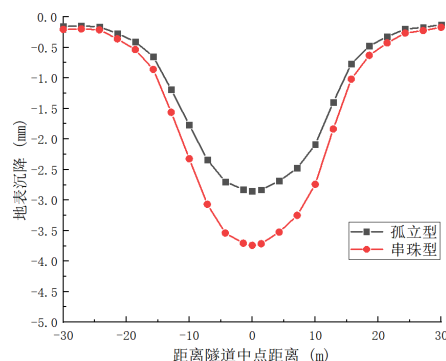


图8 监测路径1-不同形态溶洞对地表沉降影响

## 六、结语

文章依托于深惠城际铁路工程，利用 ABAQUS 建立溶洞隧道三维模型，探究溶洞对隧道围岩及地表沉降影响。

1. 基于 ABAQUS 的隧道三维模型的地表沉降数据和现场实测数据误差控制在 12% 以内，符合规范允许的安全范围。
2. 溶洞发育形态为串珠状时，相对于孤立型溶洞其地表沉降增大 23.79%，拱顶沉降增大了 15.96%，拱底隆起增大了 14.73%。对隧道围岩收敛及地表沉降变形量的作用效果，串珠型溶洞 > 孤立型溶洞。

## 参考文献

- [1] 钱七虎. 隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向 [J]. 隧道建设, 2017,37(03): 251-263.
- [2] WANG X, WANG S, PENG X, et al. Equivalent numerical simulation method and application in karst-induced collapse of overlying sandy stratum [J]. Engineering Failure Analysis, 2022,137: 106280.
- [3] 郭明, 吴杰, 周轮. 顶部隐伏溶洞对隧道围岩变形特征影响分析——以齐岳山高速公路隧道为例 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023.
- [4] 史世雍, 梅世龙, 杨志刚. 隧道顶部溶洞对围岩稳定性的影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2005(05): 698-702.
- [5] 莫阳春, 周晓军. 岩溶隧道施工围岩变形动态监测与仿真分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S2): 3816-3821.
- [6] 李元海, 杨苏, 喻军, 等. 大型溶洞对隧道开挖稳定性的影响分析 [J]. 现代隧道技术, 2016,53(04): 52-60.
- [7] 李鸿博, 贾峰, 李靖, 等. 大连地铁5号线跨海隧道设计关键技术 [J]. 岩土力学, 2017,38(S1): 395-401.
- [8] 李术才, 潘东, 许振浩, 等. 承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验 [J]. 岩土力学, 2018,39(09): 3164-3173.
- [9] WANG, GAO, LIU, et al. Analysis on the safe distance between shield tunnel through sand stratum and underlying karst cave [J]. Geosystem Engineering, 2019,22(2): 81-90.