

下伏溶洞对地下开挖稳定性影响的数值模拟研究

李凌宜^{1*} 周宇² 吴森迪³

1 北京市政路桥股份有限公司, 北京 100000

2 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000

3 浙江有色建设工程有限公司, 浙江 绍兴 312000

[摘要]随着国家交通建设的飞速发展, 铁路、公路等线状工程中的隧道将不可避免地要穿越岩溶区等。为了保障施工的安全及高效, 探究溶洞的影响至关重要。文中运用有限差分软件FLAC3D 6.0, 根据由高精度地面CT扫描技术所获得的真实地层结构及溶洞特征, 建立了含溶洞地层的三维数值分析模型, 采用分段开挖工艺, 研究了下伏溶洞对隧道稳定性的影响, 实现了对失稳灾害的精准预报。数值模拟结果表明: 溶洞的存在对附近地层的变形有着明显的影响, 越接近初始开挖区域, 其变形量相应也越大, 最大沉降变形约为72 mm, 最大隆起变形约为64 mm。同时当开挖靠近溶洞断面时, 隧道拱顶、拱底受力表现为受拉, 并出现大范围拉伸塑性区。所开展工作为含溶洞地层的安全高效开挖提供了重要理论支撑。

[关键词]隧道; 溶洞; 数值模拟; 变形

DOI: 10.33142/aem.v4i12.7555

中图分类号: TD745+.21

文献标识码: A

Numerical Simulation Study on the Influence of Underground Karst Cave on the Stability of Underground Excavation

LI Lingyi^{1*}, ZHOU Yu², WU Sendi³

1 Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., Beijing, 100000, China

2 School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang, 312000, China

3 Zhejiang Nonferrous Construction Engineering Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang, 312000, China

Abstract: With the rapid development of national transportation construction, tunnels in railway, highway and other linear projects will inevitably cross karst areas. In order to ensure the safety and efficiency of construction, it is essential to explore the impact of karst caves. The finite difference software FLAC3D 6.0. Based on the real stratum structure and karst cave characteristics obtained by high-precision ground CT scanning technology, a three-dimensional numerical analysis model of karst cave formation is established. The influence of underlying karst cave on tunnel stability is studied by using the segmented excavation technology, and the accurate prediction of instability disasters is realized. The numerical simulation results show that the existence of karst caves has a significant impact on the deformation of the nearby strata. The closer the initial excavation area is, the larger the deformation is correspondingly. The maximum settlement deformation is about 72 mm, and the maximum uplift deformation is about 64 mm. At the same time, when the excavation is close to the karst cave section, the stress on the tunnel arch top and arch bottom is tensile, and there is a large range of tensile plastic zone. The work carried out provides important theoretical support for safe and efficient excavation of strata containing karst caves.

Keywords: tunnel; limestone cave; numerical simulation; deformation

引言

随着中国道路交通网的不断延伸、拓展, 施工建设过程中遇到的地质情况愈发复杂。据不完全统计, 截止2021年底, 中国已建、在建、规划中的超过10 km的长隧道总数42座^[1]。这就意味着在施工过程中, 不可避免地将穿越含溶洞地层(如溶洞区等), 当在上述区域进行隧道开挖施工, 易诱发突水、涌泥、坍塌等地质灾害, 给施工人员的生命财产带来巨大损失。

为了保障含溶洞区域施工安全, 国内学者开展了大量的数值模拟研究, 用以揭示溶洞对周边地层的影响, 同时为溶洞治理提供有效的方案。马中伟^[2]通过分析溶洞周边

区域关键点应力分布、位移等信息, 总结了溶洞在工程载荷作用下的沉降变形分布特征和破坏机制。方平^[3]将现场监测与数值模拟相结合, 根据溶洞周边岩体的受力及塑性失效形式, 确认了需重点监测和处理的区域。李元海等^[4]研究了溶洞对隧道围岩稳定性的影响规律, 得出溶洞与隧道的影响间距范围为0~1倍洞径, 同时确认了注浆加固法对改善溶洞围压应力状态的优异特性。谢书萌^[5]利用数值模拟手段, 探究了溶洞顶板厚度、顶板跨度、溶洞高度和顶板围岩类别对桩基承载力的影响规律, 发现以上变量对承载力的影响都存在阈值, 即当超过该阈值后, 影响显著下降。杨小芳等^[6]发现, 巷道掘进前方的溶洞会改变

岩体的剪切滑移破裂现象,主要使该滑移程度减弱;另一方面,由于溶洞的存在,掘进面与溶洞之间的围岩压力更大,使巷道掘进面位移呈突变式增长。李海港^[7]研究了大型球形溶洞对隧道周围岩变形的影响,得出球形溶洞的主要影响区域范围为1.5倍洞室半径,随着隧道掘进工作的进行,球形溶洞与隧道的叠加应力集中效应也随之发生改变,造成拱顶和拱肩的变形增大。李萍等^[8]研究了溶洞距基岩面距离、溶洞直径、跨度和填充率对隧道管片变形的影响规律,表明溶洞距基岩面的距离和溶洞填充率越大、溶洞直径和跨度越小,隧道管片的变形越小。Wang等结合二分法和数值模拟,揭示了岩溶洞跨度、高跨比和充填度和安全顶板厚度的关系,得出溶洞跨度的影响最显着,其次是溶洞充填程度,溶洞高跨比的影响最弱。李剑波等^[9]采用有限元软件对高速公路隧道穿过煤矿采空区时二者的相互影响问题进行深入分析,得出隧道施工对采空区顶板应力分布有较大影响,但对整体稳定性影响不大。符亚鹏等^[10]研究了倾角对下伏薄煤层采空区公路隧道施工的影响,得出当倾角减小,洞周位移、隧道拱顶轴力均增大,塑性区范围缩小,对隧道开挖稳定性影响不利的结论。

本文以绍兴市城市轨道交通1号线阳鉴段隧道为工程背景,针对实际工程中遇到的含溶洞地层,采用有限差分法软件Flac3D研究溶洞对周边土体的应力分布、位移特征和塑性区大小的影响规律,旨在分析和评价在溶洞区段施工过程中的土体稳定性,并为类似涉及到的含溶洞地层地下开挖工程提供参考。

1 工程概况

绍兴地铁1号线中的鉴湖镇站~芳泉站段下伏基岩为灰岩,属可溶岩类,沿线场地上覆第四系覆盖层厚度约15.0~25.5m,故本场地岩溶属覆盖型岩溶,岩石中局部岩溶发育。因而,探究下伏溶洞对隧道开挖施工的安全至关重要。本文所模拟地层自地表至持力层,主要为素填土、粉质粘土、含碎石粉质粘土和中风化灰岩(图1)。场地空洞大小不一,空洞高度0.3~8.0m不等,空洞中多充填流塑状粘土、粘土夹碎石等。空洞充填堆积物一般具有高压缩性、低承载力等特点,工程力学性质差。

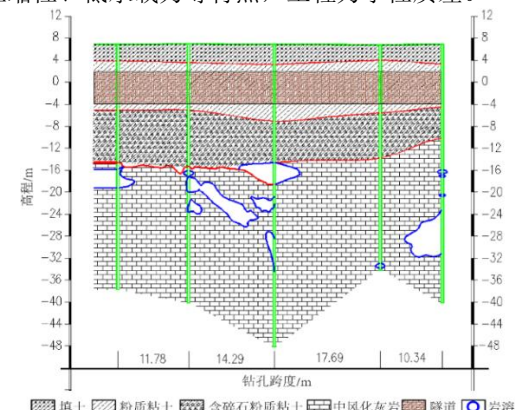


图1 隧道截面图 (由钻孔 SX1S18XD04 至 SX1S18XD44)

2 地层特征

2.1 力学参数

为测得各土层的力学性能,参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)的要求,对现场取来的土样进行一维压缩试验。发现中间范围内土层的压缩模量平均值为8.53 MPa,明显大于表层5.0m以内的压缩模量2.87 MPa以及20m以下的压缩模量(平均4.15 MPa)。为进一步获得弹性模量等参数,开展了三轴固结快剪试验,控制有效围压为参考应力100 kPa,确定了如表1所示的物理力学参数。

表1 岩土体物理力学性质指标

	密度 (kg/m ³)	压缩模量 (MPa)	泊松比	体积模量 (MPa)	内聚力 (KPa)	内摩擦角 (°)
填土	1800	4.63	0.42	27.4	32	16.9
粉质粘土	1887	5.63	0.43	38.3	26.13	16
含碎石粉质粘土	1950	5.28	0.41	27.6	36.5	18.1
中风化灰岩	2500	38.45	0.3	83.3	100	30

2.2 溶洞形状特征

为获得地下溶洞的真实形状特征,本文使用的仪器为北京同度工程物探技术有限公司生产的TDS/TD-Sparker系列电火花震源、地震信号检波器以及配套的光纤触发器。震源激发装置最高可存储至40KJ的能量,工作电源为AC 220±10 V,频带为50~1500 Hz,光纤触发同步误差小于100微秒。地震CT技术测试时采用单发多收采集方式,在地震CT勘探中以一个钻孔为激发孔,另一个孔为接收孔。单发多收采集方式就是在采集时在激发孔内一0点激发地震波,在接收孔内等间距的多点同时进行接收。一个激发点完成后,震源向上移动相同的间距,再次进行激发,直至整个激发孔上点都完成,组成一个密集交叉的网格。通过迭代反演获得速度分布,绘制二维的波速图像,通过对图像的分析来研究两孔之间测线上一定深度的岩体中岩溶发育情况。图2所示为典型断面2-5在地震CT法下的反演结果。可以发现,断面可以分为三个区域。

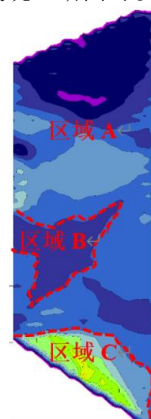


图2 地震CT测试断面2-5反演结果

(1) 区域A: 该区域电阻率小于100 欧姆×米,波

速小于 1500m/s，结合钻探结果判断，此处为粘土。

(2) 区域 B：该区域电阻率小于 50 欧姆×米，波速小于 2000m/s，结合钻探结果判断，此处为岩溶。

(3) 区域 C：该区域电阻率大于 200 欧姆×米，波速大于 3000m/s，综合判断此处为基岩。

根据地震 CT 技术扫描所获得的局部溶洞形状结果如表 2 所示，可以看到洞高小于 2 m 的溶洞占比最多，其次是 2~5 m 的，高于 5 m 的溶洞数量较少。

表 2 溶洞高度参数

溶洞类型	个数
洞高小于 2m	33
洞高 2~5m	77
洞高 5~10m	6
洞高大于 10m	3

3 三维数值模拟

3.1 模型参数选择

为快速分析隧道掘进过程中溶洞的影响规律，以实际地层条件及施工条件为基础，在保证计算精度的前提下，提出以下几点假设：

(1) 将溶洞简化为球状洞室；

(2) 当隧道左右两侧岩土体距离超过其半径 5 倍后，边界影响可忽略不计；

(3) 忽略地下水的影响；

(4) 岩土体均质、连续且各向同性，不同岩土层间平整。

根据以上假设及地质剖面图，将三维模型整体划分为四层，分别为素填土、粉质粘土、含碎石粉质粘土和中风化灰岩，其中素填土厚度为 3.89 m，粉质粘土为 8.11 m，含碎石粉质粘土为 13.5 m，中风化灰岩为 34.5 m。

模型中岩土体选用 Mohr-Coulomb 本构模型，同时在前、后、左、右、底面添加法向约束。根据现场地勘报告及室内试验，确定岩土体基本物理力学参数，见表 3。

表 3 FLAC3D 计算模型中岩土体物理力学性质指标

	密度 (kg/m ³)	压缩模量 (MPa)	泊松 比	体积模量 (MPa)	内聚力 (KPa)	内摩擦 角(°)
填土	1800	4.63	0.42	27.4	32	16.9
粉质粘土	1887	5.63	0.43	38.3	26.13	16
含碎石粉 质粘土	1950	5.28	0.41	27.6	36.5	18.1
中风化灰 岩	2500	38.45	0.3	83.3	100	30

对于溶洞的模拟，根据地勘报告，溶洞所属区域距离隧道底板 1.5~7 m，大型溶洞中直径 5~6 m 的占比最大，同时考虑到无填充溶洞的稳定性最差，因而，在数值模拟中，将溶洞置于隧道底板 1.5 m 处，溶洞直径定为 6 m，溶洞设为无填充状态（图 3）。

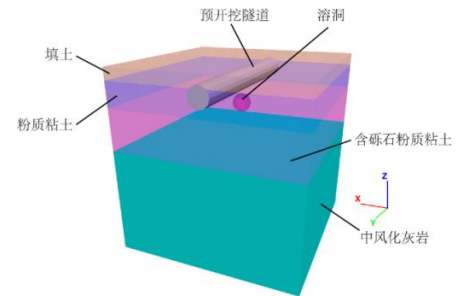


图 3 三维数值模型

3.2 施工工艺

模型计算停止条件为当隧道开挖至 Y=60 m 时，每次开挖距离为 2 m，待开挖稳定后，完成本次开挖进程，再次开挖后续地层。

4 模拟结果与分析

图 4 展示了监测点位移曲线随开挖距离的变化过程，三个监测点分别为竖直球体轴线与隧道拱底和拱侧及地表的交点位置。可以发现，随着开挖的进行，拱顶发生沉降变形，最大沉降约为 60 mm；地表也发生了沉降变形，变形量比之拱顶小，最大沉降量约为 48 mm。拱侧发生回弹变形，最大变形量约为 12 mm。变形在开挖至 30 m，即接近溶洞位置后急速增加，随后在 45 m 附近出现收敛稳定，这是因为当隧道开挖至该区域时，洞周围土体进入塑性状态，导致塑性变形急剧增加。

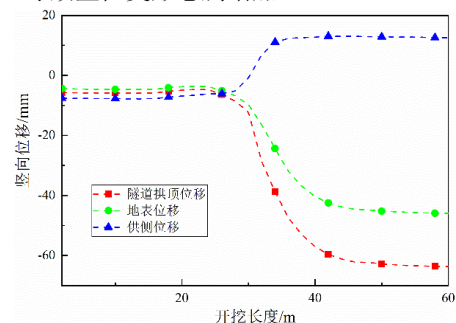


图 4 隧道开挖过程中土体沉降量变化

为进一步分析含溶洞地层开挖隧道过程中周围岩土体的受力与变形情况，分别沿隧道轴心竖直纵向和拱顶水平横向截取断面，获取应力、位移和塑性区。为便于对比，以下应力和位移云图均分别采用相同的取值范围。

图 5 和图 6 分别反映了隧道开挖过程中，两个断面竖向位移的演化规律。可以发现，隧道顶部的墙体由于开挖整体表现为沉降状态，而隧道底部呈现隆起状态，随着隧道开挖工作的进行，沉降和隆起的区域显增大。同时，越接近初始开挖区域，其变形量相应也越大，最大沉降变形约为 72 mm，最大隆起变形约为 64 mm。另一方面，由于溶洞的存在，由溶洞和隧道开挖产生的形变行为发生叠加，导致溶洞附近土体的变形更为复杂，产生了明显的应变异常区域。综上，溶洞的存在对附近土体的变形有着明显的影响。

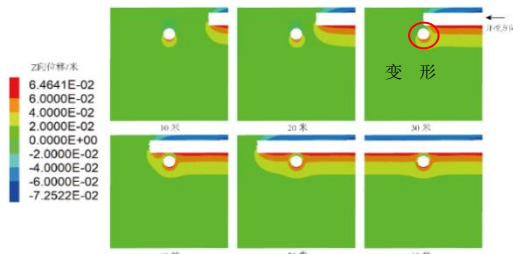


图5 隧道开挖过程中纵向竖直位移

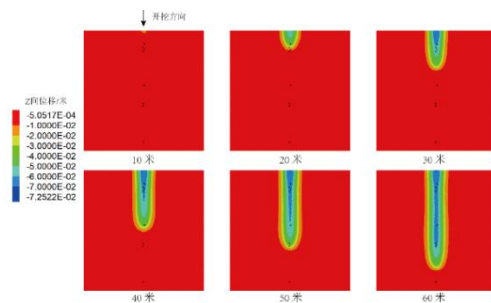


图6 隧道开挖过程中横向竖直位移

图7反映了隧道开挖过程中,纵向断面最大主应力的演化规律。可以看出隧道拱顶和拱底都出现拉应力集中,其中拱顶产生的拉应力集中受拱顶沉降控制,拱底的受其隆起控制,施工中应注意该断面位置的支护和监测。除此之外,由于溶洞周边存在明显的变形差异,导致溶洞周边的土体也呈现出明显的拉应力集中状态。

图8为隧道拱顶和拱底监测点的应力演化过程,其中突变点(70000 时步附近)为开挖至溶洞附近的时刻。可以发现,当开挖超过溶洞后,土体应力得到了释放。同时,拱底应力的变化程度大于拱顶。

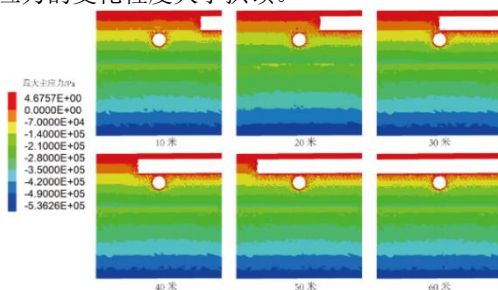


图7 隧道开挖过程中纵向断面最大主应力分布

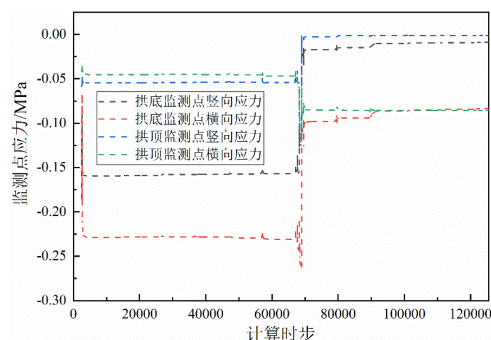


图8 监测点横向及竖向应力演化

图9和图10分别反映了隧道开挖过程中,两个断面塑性区的演化过程,其中,绿色代表弹性区,红色代表拉伸塑性区,蓝色代表剪切塑性区。可以看出当开挖至10 m时,无论在隧道和溶洞洞周均未出现塑性区。当开挖至20 m后,主要在开挖面出现小范围的塑性区。随着开挖进一步推进,在隧道开挖区域出现较为明显的塑性区,同时在溶洞洞周主要产生了拉伸塑性区。当继续开挖至溶洞附近,此时塑性区达到峰值,在靠近溶洞的隧道拱顶和拱底出现了大量的塑性区,给隧道开挖带来了安全隐患。随着开挖的继续,由于应力释放及远离溶洞,靠近溶洞的塑性区逐渐减少,但由于隧道初始开挖区域拱顶的沉降变形不断加剧,导致该区域拉伸塑性区增多。整体而言,隧道因受溶洞影响出现较大范围的塑性区,因此,需要对溶洞进行一定程度的处理,如注浆等操作。

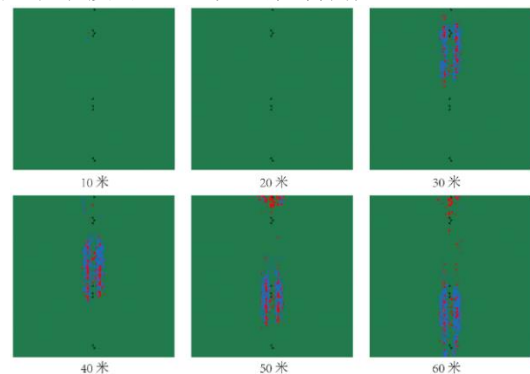


图9 隧道开挖过程中纵向塑性区分布(绿色为弹性区,红色为拉伸塑性区,蓝色为剪切塑性区)

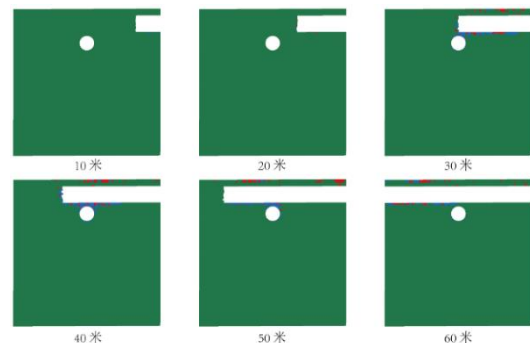


图10 隧道开挖过程中横向塑性区分布

5 结论

本文开展了关于地下溶洞对隧道开挖过程影响的研究,所得结论对途经岩溶地区的交通工程具有理论指导意义,具体结论如下:

(1) 根据高精度地面 CT 扫描技术,所研究段,洞高小于 2 m 的溶洞占比最多,其次是 2~5 m 的,高于 5 m 的溶洞数量较少。

(2) 在隧道开挖过程中,当与溶洞相接近时,拱顶与拱底的土体变形显著增大,监测点最大沉降变形量达到 72 mm 以上,最大隆起变形量达到 60 mm 以上,因此需要

进行支护处理。

(3) 当开挖靠近溶洞断面时, 隧道拱顶、拱底受力表现为受拉, 并出现大范围拉伸塑性区, 施工中应加强该位置的支护和监测, 同时需对溶洞进行处理(如注浆), 以提高隧道施工的安全稳定性。

希望本文的研究方法和研究成果能给岩溶隧道施工安全提供一定的借鉴和参考。

参考文献

- [1] 秦峰, 王少飞, 肖博, 等. 截至 2021 年底中国 10 km 以上特长公路隧道统计 [J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(6): 1111-1116.
- [2] 马中伟. 基于 FLAC 3D 的溶洞顶板稳定性分析 [J]. 水利科技与经济, 2018, 24(12): 22-31.
- [3] 方平. 侧部既有溶洞隧道围岩稳定性分析 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(2): 241-243.
- [4] 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(4): 52-60.
- [5] 谢书萌. 基于有限差分法的下伏岩溶对桩基承载特性的影响 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(4): 77-81.
- [6] 杨小芳, 林志斌, 王革学. 前伏承压溶洞对巷道围岩稳定性影响分析 [J]. 煤矿安全, 2017, 48(9): 222-225.
- [7] 李海港, 车轮, 武艳勤. 隧道与前方大型溶洞应力集中叠加效应 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 282-289.
- [8] 李萍, 李威, 文武双, 等. 下伏溶洞对穿越上砂下黏地层隧道管片变形影响分析 [J]. 施工技术, 2018, 47(24): 29-33.
- [9] 李剑波, 李婕. 公路隧道穿越采空区稳定性分析与处治技术研究 [J]. 湖南交通科技, 2007(3): 114-116.
- [10] 符亚鹏, 方勇, 崔戈, 等. 小规模下伏薄煤层采空区倾角对隧道开挖稳定性的影响研究 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53(4): 70-76.

作者简介: 李凌宜(1979-), 女, 硕士, 高级工程师, 北京市政路桥股份有限公司工程总承包二部技术质量部部长, 主要从事道路、桥梁、轨道交通施工技术与管理工