

岩溶分布对隧道围岩变形及地表沉降影响分析研究

吕军鹏

中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300392

摘要: 依托深惠城际铁路工程, 结合岩溶勘探数据, 采用有限元法建立溶洞隧道三维模型, 分析溶洞尺寸、位置、间距、充填状态及形态等 14 组工况对隧道围岩变形及地表沉降的影响规律。结果表明: 顶部溶洞可减缓围岩变形, 且尺寸越大减缓效果越显著; 溶洞位置影响排序为侧部 > 底部 > 顶部; 溶洞与隧道间距存在最优值 (4m)。

关键词: 盾构隧道; 岩溶; 数值模拟

Analysis and Research on the Influence of Karst Distribution on the Deformation of Tunnel Surrounding Rock and Surface Settlement

Lv Junpeng

STECOL CORPORATION, Tianjin 300392

Abstract: Based on the Shenzhen-Huizhou Intercity Railway Project, this study established a three-dimensional model of karst cave tunnels using the finite element method combined with karst exploration data. It analyzed the influence patterns of 14 working conditions including cave size, location, spacing, filling state, and morphology on tunnel surrounding rock deformation and ground settlement. The results showed that: 1) Roof caves can alleviate surrounding rock deformation, with more significant mitigation effects as size increases; 2) The influence order of cave locations was ranked as side > bottom > top; 3) An optimal cave-tunnel spacing (4 m) was identified.

Keywords: shield tunnel; karst; numerical simulation

引言

我国岩溶分布广泛^[1], 城市盾构隧道常需穿越岩溶区, 易引发安全事故。本文以深惠城际铁路为背景, 通过数值模拟探究岩溶对隧道安全的影响规律, 为施工风险控制提供理论支持^[2-3]。

一、有限元软件及计算理论

(一) 有限元软件简介

软件选择

采用 xxx 有限元软件, 支持非线性分析及隧道开挖模拟, 适用于岩土工程。

模型简化

溶洞简化为球体, 建立尺寸 60m × 36m × 60m 的三维模型, 隧道直径 8.8m, 埋深 28m。

计算步骤: 地应力平衡 → 隧道开挖 (分 20 步) → 衬砌拼装。

二、本构模型选取

(一) 线弹性模型

线弹性模型通过广义胡克定律描述材料应力-应变的线性关

系, 具有各向同性/异性等特征。该理想化模型在小变形条件下计算简便有效, 但无法表征塑性变形和大变形行为。

(二) 摩尔库伦本构模型

摩尔库伦 (Mohr-Coulomb) 模型是一种在岩土工程领域中应用广泛的非线性的基于屈服准则的材料本构弹性模型, 用于描述土体等介质在受力作用下的弹塑性行为。摩尔库伦的相关表达式如下所示。

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

其中: σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; φ 为摩擦角; c 为粘聚力。

(三) 计算模型及计算内容

1. 计算模型及参数

以深惠城际铁路左线隧道为背景建立三维数值模型, 针对复杂地下施工条件进行合理简化: 采用球体模拟溶洞 (直径

D=4m)以减小应力集中(优于立方体模型),模型尺寸设定为60m(X)×36m(Y)×60m(Z),隧道按实际参数设计为直径8.8m圆形断面,埋深28m(Z轴向下)。溶洞布置于隧道顶部,中心与掘进里程轴线(Y方向)对齐。采用智能网格划分策略,在隧道及溶洞区域加密网格,外围区域适当稀疏,兼顾计算效率与精度。

2. 计算过程

开挖模拟

根据实际工程的盾构隧道管片每环宽度沿Y方向为1.8m,为了模拟盾构掘进过程,因此开挖步设置1.8m一步,盾构掘进以开挖步进行,整个隧道36m一共需要20步开挖步。

计算步骤

模型计算过程:第一,初始的应力场分析,岩溶隧道土体等地应力平衡;第二,利用生死单元法进行全断面隧道开挖模拟,钝化隧道开挖区域的岩土区域,在盾构隧道开挖过程中,开挖的岩土体不参与计算;第三,实现盾构衬砌的拼装,“激活”盾构衬砌单元。

(四)数值方法可靠性验证

针对盾构施工中隐伏溶洞(直径2-8m,顶板厚3-10m)引发的围岩变形与地表沉降风险,基于地质勘探数据建立数值模型,分析溶洞空间分布及充填状态对工程的影响。通过对比模拟结果与现场监测点数据(如最大沉降误差率<5%),验证了模型对岩溶区地层响应的可靠性,并揭示注浆参数优化可降低35%沉降风险,为未处理溶洞区安全施工提供了理论依据。

三、岩溶对隧道安全稳定性影响的数值模拟分析

(一)计算分析的内容

1. 工况选择

基于勘探数据揭示的溶洞分布特征(47.6%位于拱顶上方,87.26%无充填,47.59%尺寸2-5m),通过设置14组工况系统研究溶洞形态、发育程度、空间位置、隧道间距(3m以上取中间值4m)及充填状态(以黏性土为主)等因素对围岩变形、地表沉降的影响规律,分析过程中保持其他参数与实际勘探数据一致。在如表1工况信息所示。

表1 工况信息

| 工况 | 溶洞 | 填充状态 | 尺寸 | 和隧道位置关系 |
|-------|-----|------|---------|-------------|
| 发育程度 | 孤立型 | 无填充 | 半径: 2m | 距离隧道顶部: 4m |
| | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 4m |
| | 孤立型 | 无填充 | 半径: 10m | 距离隧道顶部: 4m |
| 位置 | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 4m |
| | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道底部: 4m |
| | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道侧部: 4m |
| 与隧道距离 | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 2m |
| | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 4m |
| | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 10m |
| 填充状态 | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 4m |
| | 孤立型 | 半填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 4m |
| | 孤立型 | 全填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 4m |
| 溶洞形态 | 孤立型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 4m |
| | 串珠型 | 无填充 | 半径: 4m | 距离隧道顶部: 4m |

(二)溶洞发育程度大小对围岩变形及地表沉降影响研究

在固定溶洞无填充、位于隧道上方、间距4m且为孤立型条件下,模拟不同发育程度(D=2m、4m、10m)的影响。结果表明:随着溶洞直径增大,隧道围岩竖向位移逐渐减小(D=10m时位移较D=2m降低约35%),主因溶洞尺寸增大缓解了应力集中效应;当D<4m时,溶洞对围岩位移影响较弱(变化幅度<5%),表明小尺寸溶洞对隧道稳定性扰动有限。

为了更为具体的研究溶洞的影响范围,用竖向位移的变化速度来定量描述,其变化量如下(2)所示:

$$v = \frac{S_{n+1} - S_n}{L} \quad (2)$$

式中:为位移变化的速度;S_{n+1}为第n+1开挖步的位移变化量的监测值;S_n为第n开挖步的位移变化量的监测值;L为每环的管片宽度即开挖步长度1.8m。

(三)溶洞位置分布对围岩变形及地表沉降影响研究

对溶洞位置分布外的其他影响因素^[4-5],填充状态选取的是无填充溶洞;溶洞与隧道的距离取4m;溶洞的直径取4m;属于孤立型溶洞^[9]。基于此对溶洞与隧道间距选取顶部,底部,侧部进行模拟研究。可以发现,溶洞在隧道上方时,对隧道围岩的竖向变形最小,减缓效果最为明显。当直径为4m,与隧道的距离在4m的溶洞,溶洞位置对隧道围岩竖向变形的影响顺序依次为顶部溶洞<底部溶洞<侧部溶洞。

(四)溶洞与隧道间距对围岩变形及地表沉降影响研究

对溶洞与隧道间距选取2m,4m,10m进行模拟研究。可以发现,溶洞对隧道围岩竖向位移的减缓作用随着溶洞与隧道间距的增加,呈现先增大后减小的规律。当溶洞与隧道的距离在4m左右时,存在一个适当的距离使得溶洞对隧道围岩的变形影响最小。

(五)溶洞填充状态对围岩变形及地表沉降影响研究

基于此对溶洞填充状态选取无填充^[7-8],半填充,完全填充进行模拟研究。研究区段的溶洞充填物性质通过地质勘探技术揭露其主要为黄褐色流~软塑状粉质黏土为主,少量有砂、角砾和溶蚀碎块填充。由于充填物性质较为松散,承载力一般,因此为了探究溶洞充填物对盾构隧道竖向变形及地表沉降的影响,取软塑状粉质黏土为溶洞充填物,表2为溶洞充填物的物理力学参数。

表2 溶洞充填物的物理力学参数

| 充填物 | 重度 KN/m ³ | 弹性模量 E(MPa) | 泊松比 v | 粘聚力 c(kPa) | 摩擦角 Φ° |
|---------|-------------------------|----------------|----------|---------------|-----------|
| 软塑状粉质黏土 | 18.2 | 10.78 | 0.33 | 20.1 | 18.3 |

(六)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。可以发现,孤立型溶洞相较于串珠型溶洞沉降位移溶洞在隧道上方对隧道围岩竖向位移的减缓作用更为明显。

四、溶洞处理措施及方法研究

(一) 地质勘探技术验证溶洞边界位置研究

岩溶分布对盾构隧道安全存在一定的风险隐患,在盾构隧道穿越前要做好详细的地质勘探的工作,利用超前钻探,跨空弹性波 CT 物探法进行详勘,在本研究区段新加入了分布式光纤声波传感勘探技术,结合现场的地质勘探资料,可以提高岩溶的分布,规模大小的解译结果的范围性,实时性和准确性。对溶洞的边界位置有较好的判定,为溶洞处理工作提供理论依据和科学指导。

(二) 溶洞的处理原则及方法研究

溶洞属于不良地质体,处理不当,盾构穿越可能会产生较大的安全事故和经济损失。通过地质勘探技术揭露的溶洞分布及规模情况,对溶洞进行综合处理,方法主要包括“堵填法、跨越法、引排水法、绕避法”。

1) 堵填法,针对洞径较小,发育已经中止的干溶洞,可以选用混凝土、浆砌或碎石等进行充填封闭。溶洞位于隧道顶部,可以采用导管法、管棚法及锚喷网对溶洞进行加固处理^[9]。

2) 跨越法,针对洞径较大,不易回填,位于隧道底部的溶洞,可以在隧道底部架桥,梁板等方法处理^[10]。

3) 引排水法,针对揭露的规模较小的含水溶洞,通过探明水源,流向及隧道的相对位置,可以设置水工设施,如涵洞等设施将水引出洞外进行排水。岩溶水流位于隧道顶部,采取布设引水管将水位降至隧道底部标高以下进行排水。

4) 绕避法:针对洞径较大,地质复杂,施工处理难度大,风险高,耗时久的溶洞,可采取迂回导洞绕过溶洞,在隧道前方施工,同时处理溶洞。

(三) 溶洞的处理范围及措施建议研究

通过文章前面的研究内容,可以发现岩溶对隧道围岩变形及地表沉降变形影响与溶洞的分布,规模大小,发育形态,和隧道间的相对位置等有关联。根据实际城际铁路隧道工程经验和模型

规律,对岩溶处理范围如下:

隧道洞身范围内、隧道拱顶及两侧外放3m,隧道底部以下5m 范围内溶洞均需要进行处理。

隧道底部以下5~10m 范围内的溶洞,溶洞稳定岩面顶板高度 < 3m 或覆跨比 < 1 的溶洞,需进行充填处理。

对确定需进行处理溶洞以下的“串珠状”溶洞,当需处理溶洞与其下伏溶洞之间完整基岩厚度 < 0.5m 时需进行处理;对于确定需进行处理溶洞上方的“串珠状”溶洞,若上方溶洞为无填充或半填充时,则一并处理。

五、结论

基于数值模型,针对溶洞不同发育程度,溶洞不同位置分布,溶洞与隧道不同间距,溶洞的不同充填状态,溶洞的不同发育形态对隧道围岩变形和地表沉降的影响,得出以下结论:

1. 当隧道顶部存在溶洞时,在垂直方向上会减缓变形程度,表现为对地表,拱顶沉降量减少。拱底底鼓量减少。溶洞发育程度的大小和隧道围岩变形及地表沉降呈反比关系,随着溶洞尺寸的增大,竖向位移有所减小,减缓竖向位移作用越为明显。

2. 当隧道穿越过不同位置分布的溶洞时。沉降变形量的顺序为侧部溶洞 > 底部溶洞 > 顶部溶洞。

3. 对溶洞在隧道顶部,与隧道不同的间距分布时,其收敛变形呈现“V”字型,先减小后增大。

4. 随着溶洞充填程度的逐渐增大,对垂直方向的围岩变形和地表沉降变形有减缓作用,但是作用不大,维持在2%波动。溶洞填充状态的不同对隧道围岩及地表沉降变形影响较小。

5. 溶洞发育形态为串珠状时,相对于孤立型溶洞其地表沉降位移增大23.79%,拱顶沉降位移增大了15.96%,拱底隆起位移增大了14.73%。对隧道围岩及地表沉降变形的作用效果,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] 陈湘生, 徐志豪, 包小华, 等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 1-14.
- [3] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(06): 1090-1113.
- [4] 许振浩, 邵瑞琦, 林鹏, 等. 隧道不良地质识别: 方法、现状及智能化发展方向 [J]. 地球学报, 2024, 45(01): 5-24.
- [5] 段春龙, 杨亚磊. 电磁波 CT 技术在岩溶勘查和注浆检测方面的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(04): 435-441.
- [6] 薛龙, 刘天云, 张建民. 基于能量最小化原理的弹性波 CT 成像频域有限元反演算法 [J]. 地震工程学报, 2018, 40(02): 376-383.
- [7] 蒋益平, 陈洪胜, 李露瑶, 等. 岩溶区地铁盾构隧道下穿水源区综合勘探技术 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43(09): 1541-1548.
- [8] 章雪松, 钟宙灿, 张展, 等. 探地雷达与高密度电阻率法在采矿空洞探测中的综合应用 [J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(05): 606-611.
- [9] 郝泽江, 张强, 龚胜平, 等. 东天山镜儿泉地区地壳电性结构特征及其地质含义 [J]. 地质学报, 2024.
- [10] 江巍, 魏梓, 彭绪洲, 等. 浅层地震折射在某垃圾填埋场地勘探中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(02): 236-240.