

隧道拱部隐伏溶洞下地铁隧道施工地层响应分析*

黄 松

(贵阳市公共交通投资运营集团有限公司, 550081, 贵阳)

摘 要 [目的] 在城市地铁隧道工程中, 常会遇到隧道拱部浅埋隐伏溶洞的情况, 因此有必要对隧道拱部隐伏溶洞工况下的地铁隧道施工地层响应进行研究。[方法] 采用室内模型试验对隧道开挖过程进行模拟, 通过分析监测隧道施工过程中的地层围岩变形、土压力释放、初支拱架内力及地面沉降规律, 研究隧道施工对岩溶地层的扰动影响。[结果及结论] IV级围岩下, 当开挖隧道跨度为 6.52 m、隧道拱部溶洞直径为 4 m、溶洞底与隧道顶部净距为 2 m 时, 隧道机械开挖下, 隧道拱部隐伏溶洞围岩能够保持稳定, 不会发生围岩失稳破坏。拱顶溶腔工况下, 隧道拱顶处的围岩土压力变化量明显小于无溶腔工况下的围岩土压力变化量, 其最终量值为无溶腔时的 53.8%。拱部隐伏溶腔的存在会增大地面沉降范围, 开挖隧道顶部正上方处的地面沉降峰值是无溶腔工况下的 1.73 倍。隧道拱顶发育溶腔时, 拱架拱顶处的轴力值为无溶腔工况下的 120.3%, 拱顶处弯矩值为无溶腔工况下的 53.3%。

关键词 地铁隧道; 隐伏溶洞; 施工地层响应

中图分类号 U451.5; U231.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.12.033

Strata Response Analysis of Subway Tunnel Construction Under Hidden Karst Caves in the Tunnel Arch

HUANG Song

(Guiyang Public Transport Investment and Operation Group Co., Ltd., 550081, Guiyang, China)

Abstract [Objective] In urban subway tunnel projects, it is common to encounter shallow-buried hidden karst caves in the tunnel arch. Therefore, it is necessary to study the strata response of subway tunnel construction under such condition. [Method] The indoor model test is used to simulate the tunnel excavation process. By analyzing and monitoring the deformation of surrounding rock, release of soil pressure, internal force of primary support arch and ground settlement laws during tunnel construction, the disturbance effect of tunnel construction on karst strata is studied. [Result & Conclusion] Under Grade IV surrounding rock, when the excavation tunnel span is

6.52 m, the tunnel arch cave diameter is 4 m, and the net distance from cave bottom to metro tunnel top is 2 m, the surrounding rock of the hidden cave in the tunnel arch could maintain stability under mechanical excavation of the tunnel, with no surrounding rock instability and damage. Under the condition with vault cavity, the change amount of surrounding rock soil pressure at the tunnel vault is significantly smaller than that under the condition without cavity, and the final value of surrounding rock soil pressure in the former condition is 53.8% of that in the latter condition. The existence of hidden cavity in the arch will increase the range of ground settlement, and the peak ground settlement value directly above the top of the excavation tunnel is 1.73 times that under the condition without cavity. When the tunnel vault develops cavity, the axial force value at the arch vault is 120.3% of that under the condition without cavity, and the bending moment value at the vault is 53.3% of that under the condition without cavity.

Key words subway tunnel; hidden karst cave; construction strata response

城市地铁隧道工程中所遇岩溶地质现象较山岭地区有较为明显的差异, 主要表现为岩溶腔体埋深浅、基岩上覆土层薄、岩溶在岩土交界面处发育强烈等典型特点。城市地铁隧道的选线往往避开浅表覆盖土层而选择从基岩中穿越, 当隧道开挖轮廓线距离基岩面较近时, 上覆岩土层及岩土交界面岩溶腔体对施工扰动的敏感性强。此外, 城市浅表地层下常有较为复杂的市政管线, 隧道穿越繁华地段时地面常有较为密集的建筑(构)筑物, 从施工地面沉降控制角度来说, 城市环境岩溶区的地铁隧道施工面临更大的挑战。

目前, 已有较多学者采用数值模拟及模型试验等方法开展了相关研究。在模型试验方面, 文献[1]通过模型试验, 以郑万高速铁路典型岩溶隧道为例, 研究了岩溶管道发育位置、管道尺寸及管道内水头高度对衬砌内力的影响。文献[2]以广东省

* 国家自然科学基金项目(51991394)

岩溶地区运营公路隧道工程为例,通过室内模型试验,研究了溶洞大小、节理倾角、强降雨条件下的衬砌受力特性。文献[3]分析了盾构施工期间,隐伏岩溶对地基稳定性的影响,同时依托工程典型地层条件,采用数值模拟方法,分析了溶洞位置、大小及溶洞形状对岩溶区地基稳定性的影响。在数值模拟方面,文献[4]采用 FLAC 3D 软件研究了在既有地铁隧道情况下,岩溶区溶洞对新修地铁隧道稳定性的影响。文献[5]以峨眉山—汉源高速公路庙子坪隧道和廖山隧道为例,采用 FLAC 3D 软件,分析不同工况下隐伏溶洞对隧道稳定性的影响,并提出了适用于峨眉山—汉源高速公路的排水处置综合体系。

已有研究大多集中于岩溶自身发育形式及特征、地铁隧道施工扰动下的地面环境响应,以及隧道穿越岩溶区施工处置技术等方面的研究,对于城市浅埋岩溶的研究较少。鉴于此,本文以贵阳城市地质及城市岩溶典型发育特征为例,在隧道拱部发育有隐伏溶洞条件下,采用模型试验方法对地铁隧道施工地层围岩扰动及地面环境响应进行分析。本文研究可为同类型工程施工提供经验与借鉴。

1 模型试验研究

1.1 相似关系

试验将几何相似比为 20、重度相似比为 1,以及量纲为一的量(泊松比、应变、内摩擦角)相似比为 1 作为基础相似比。通过相似理论,求得应变 ε 相似比为 1,应力 σ 、黏聚力 c 、弹性模量 E 相似比均为 20。

1.2 工程原型及相似材料

1.2.1 试验原型隧道

贵阳轨道交通 3 号线一期工程矿山法隧道区间多采用单洞单线型式,以单线 IV 型为例,隧道跨度为 6.520 m,高度为 7.068 m,采用复合式衬砌结构。其中,初期支护(以下简称“初支”)喷射混凝土采用 C25 早强混凝土,全环厚为 26 cm,钢架采用 I18a 钢架全环设置,间距为 0.8 m。隧道横断面及初支设计示意图如图 1 所示。

1.2.2 围岩

实际工程中,隧址围岩以 IV 级为主,IV 级围岩物理力学参数按照相关规范取值,并根据相似关系得到模型的物理力学参数范围,其原型值及模型值取值范围如表 1 所示。

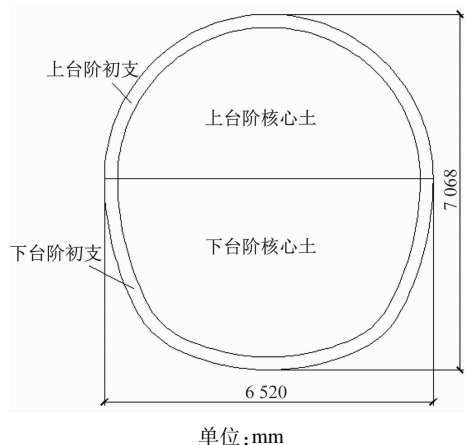


图 1 隧道横断面及初支设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel cross-section and primary support design

表 1 IV 级围岩物理力学参数原型值及模型值取值范围

Tab. 1 Range of prototype and model values for grade IV surrounding rock physical and mechanical parameters

| IV 级围岩 | 黏聚力/ MPa | 内摩擦角/ (°) | 弹性模量/ GPa | 重度/ (kN/m ³) |
|--------|---------------|--------------|---------------|-----------------------------|
| 原型值 | 0.200 ~ 0.700 | 27 ~ 39 | 1.300 ~ 6.000 | 20 ~ 23 |
| 模型值 | 0.010 ~ 0.035 | 27 ~ 39 | 0.065 ~ 0.300 | 20 ~ 23 |

采用模型土模拟围岩,其物理参数通过土工试验获得,根据测试结果调节模型土的材料配比,直到满足试验所需的物理参数值。模型土的配制以河砂为基材,添加一定比例的粉煤灰、机油及石英砂等。粉煤灰与机油、松香配合可调节模型土的黏聚力和内摩擦角,石英砂用于控制模型土的强度和弹性模量。经试验测试,IV 级围岩相似材料配比(质量比)为石英砂:河砂:粉煤灰:机油:松香 = 1:1:0.75:0.28:0.15。根据上述材料配比进行拌和,得到的模型土体物理力学参数的原型值和模型值如表 2 所示。

表 2 模型土体物理力学参数原型值和模型值

Tab. 2 Prototype and model values of model soil physical and mechanical parameters

| 模型土体 | 黏聚力/ MPa | 内摩擦角/ (°) | 弹性模量/ GPa | 重度/ (kN/m ³) |
|------|-------------|--------------|--------------|-----------------------------|
| 原型值 | 0.520 | 31 | 3.60 | 22 |
| 模型值 | 0.026 | 31 | 0.18 | 22 |

1.2.3 钢拱架

IV 级围岩段隧道初支钢拱架采用 I18a 钢架全

环设置,间距为 1.0 m。由弹性模量及基本几何相似比导出原型与模型等效抗弯刚度的相似关系,通过相似比计算可知,I18a 型工字钢采用 7 mm×3 mm 的铝条来模拟。原型和模型的钢拱架参数如表 3 所示。

表 3 原型和模型的钢拱架参数

Tab.3 Steel arch parameters for the prototype and the model

| 项目 | 弹性模量/GPa | 惯性矩/cm ⁴ | 面积/cm ² |
|-------------|----------|------------------------|--------------------|
| 原型(I18a 钢架) | 210 | 1 669 | 30.756 |
| 模型(铝条) | 70 | 15.57×10^{-4} | 0.210 |

1.2.4 喷射混凝土

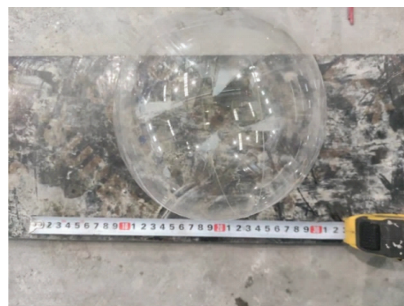
区间隧道采用 C25 喷射混凝土,其物理力学参数按 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》取值,轴心抗压强度设计值为 25 MPa,弹性模量为 28 GPa。调研相关文献确定水、石膏按质量比 1:1.5~1:1.6 混合,取 30 min 后的力学指标试验值,单轴抗压强度可达 1.11 MPa,对应原型值为 22.20 MPa;弹性模量为 1.27 GPa,对应原型值为 25.40 GPa。模型试验中,按上述比例混合水和石膏,并人工喷涂于开挖隧道的土壁来模拟初支。

1.2.5 溶腔模拟

可溶岩中存在由化学及物理作用在岩层中产生的形态各异的腔体,其发育形态复杂且规律性较弱,现有的探测技术(如地质钻孔及各种地球物理探测方法)较难准确地测量出其实际形状和大小,只能大致对岩溶发育位置及规模作出较为粗糙的判断。隧道工程领域中,常以各种材料的充气气囊模拟具备一定规模的岩溶腔体^[6-7],也有文献研究以石蜡为材料^[8],通过预埋石蜡模型与预留管道,填埋模型试验土后将加热融化的石蜡通过预留孔道流出,以此在土体中形成溶洞。

本文所研究的溶腔直径为 4 m,拱顶埋深为 18 m,根据试验相似比换算得到的模型试验溶腔直径为 20 cm,溶洞底部与隧道顶部净距为 2 m。试验使用透明充气气囊模拟溶腔,用橡胶管连接气囊与充气泵,待气囊充气到试验所需大小后做好密封处理,随后将气囊置于 2 m 深的水下,检查气囊承压强度及密封性。经反复检测,所用模拟方法其强度及密封性均能满足试验要求。考虑到土中气囊受力与水中的差异性,经模型土压缩模量计算可知,在上覆土压力作用下,气囊理论最大横向变形小于

5 mm,其试验误差基本可以忽略。充气气囊及其在地层中形成的溶腔照片如图 2 所示。



a) 预埋充气气囊



b) 模型围岩中形成的溶洞

图 2 充气气囊及其在地层中形成的溶腔照片

Fig.2 Photos of the inflated air bag and the cavity it formed in the stratum

1.3 试验装置及测试

1.3.1 隧道开挖模型试验箱

在由格构式钢板制作的模型箱内进行试验。为测量洞周位移,在模型箱的两侧开有若干孔洞,位移传导杆通过孔洞与磁力表座固定于孔洞周围的数显千分表连接。试验模型箱长为 2.0 m,宽为 0.5 m,高为 2.0 m。隧道洞室横截面宽度为 0.326 m,高度为 0.354 m,隧道长度为 0.500 m。隧道开挖试验模型箱照片如图 3 所示。

1.3.2 量测项目

试验中,采用 7 mm×3 mm 铝条预制成特定的形状来模拟钢拱架。在铝条相应位置处的两侧粘贴应变片来量测铝条应变,围岩土压力采用精度为 0.1 kPa 的土压力盒量测,土压力盒沿隧道环向布置 8 个。应变片及土压力盒布置位置示意图如图 4 所示。应变片粘贴在钢拱架内外两侧,进行初支时,随着钢拱架一起被喷射混凝土包裹。

隧道洞周位移包括拱顶沉降和水平收敛,由位



图 3 隧道开挖试验模型箱照片

Fig. 3 Photo of the tunnel excavation test model box

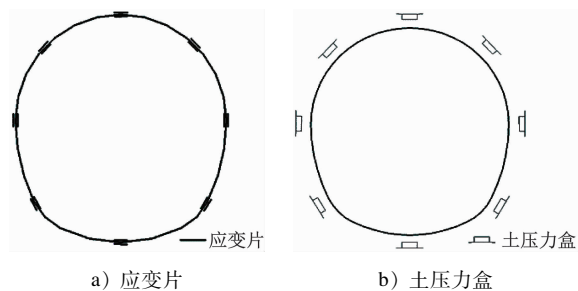


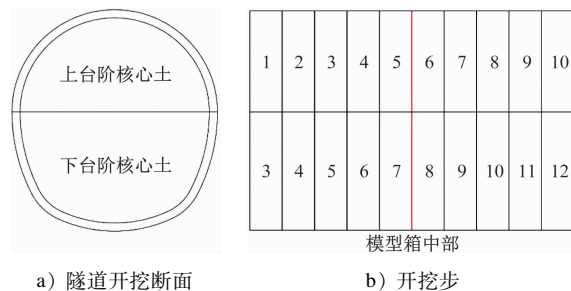
图 4 应变片及土压力盒布置示意图

Fig. 4 Layout diagrams of strain gauges and soil pressure boxes

移传导杆传至地面及模型箱侧面进行测量,测量仪器采用数显千分表,精度为 0.001 mm。将磁力表座固定于模型箱侧边,并将不锈钢垫片置于数显千分表探头下,用以测量地面沉降值。

1.4 具体开挖步骤

模型试验台阶法开挖控制过程示意图如图 5 所示。整个开挖过程共分 12 步进行,对开挖进尺进行严格控制。开挖步 1~2 只开挖上台阶核心土,开挖步 3~10 中每一步先进行上台阶开挖再进行下台阶开挖,开挖步 11~12 只开挖下台阶核心土。开挖步 5 结束后,上台阶开挖至模型箱中部。开挖步 7 结束后,下台阶开挖至模型箱中部。



a) 隧道开挖断面

b) 开挖步

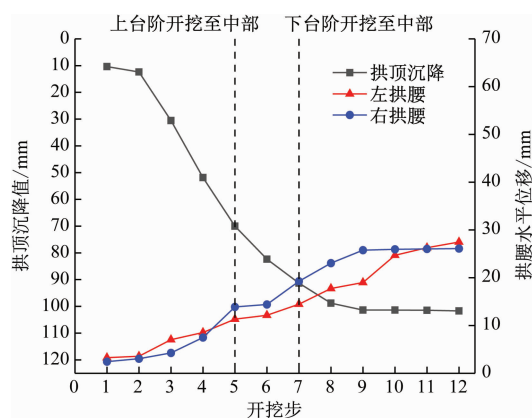
图 5 台阶法开挖控制过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the step method excavation control process

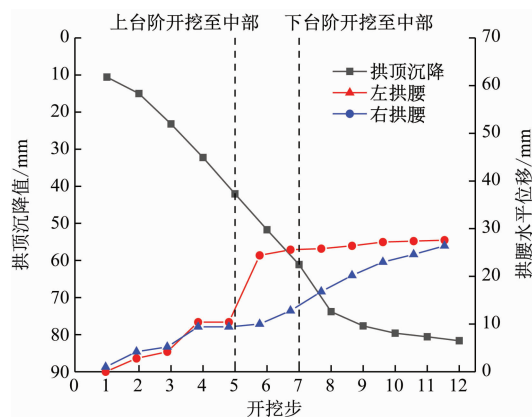
2 试验结果分析

2.1 隧道洞周围岩位移

地中位移元件埋设位置距离隧道开挖轮廓线 2 cm,对应工程原型为 40 cm。通过监测开挖过程围岩的位移情况,评价隧道拱部发育有岩溶空腔时,隧道开挖对隧道洞周围岩的扰动影响。无溶腔和拱顶溶腔工况下,隧道洞周围岩位移随开挖步的变化情况如图 6 所示。



a) 无溶腔



b) 拱顶溶腔

注:拱腰水平位移以朝向隧道中心线为正。

图 6 无溶腔和拱顶溶腔工况下隧道洞周围岩位移随开挖步的变化情况

Fig. 6 Changes in tunnel hole surrounding rock displacement with excavation steps under no cavity and vault cavity working conditions

随着隧道掌子面的推进,监测断面拱顶围岩监测点发生竖向沉降,拱腰出现收敛变形,开挖掌子面远离监测断面后各监测点位移逐渐趋于平稳。一般来说,隧道围岩的最终位移(全位移量)包括了掌子面到达前的围岩位移(先行位移)、掌子面通过时的围岩位移(初始位移)和掌子面通过后的围岩

位移(量测位移)。工程中的容许值是针对全位移值而言的,但实际工程中对于全位移值的监测比较困难,而模型试验则相对容易实现。

隧道拱顶围岩的最终沉降值分别为 101.8 mm、81.6 mm。相比于无溶腔工况,拱顶溶腔工况下,拱顶围岩的最终位移更小,其为无溶腔工况时的 80.3%。两种工况下,隧道拱腰处的位移值差异不大。从各阶段沉降值来看,拱顶溶腔工况下,拱顶围岩的先行位移、初始位移均有所减小,而掌子面通过监测面后的量测位移有增大的趋势。

由此可知,地层中岩溶腔体的发育改变了原始地应力场,可能会导致溶腔周边围岩介质松弛,在一定程度上释放了溶腔周边围岩的原始地应力。当隧道施工近接岩溶腔体时,处于开挖隧道与溶腔之间的围岩朝向洞内的变形在一定程度上会有所减小。

2.2 隧道洞周围岩土压力释放情况

试验中,土压力盒元件埋设位置距离隧道开挖轮廓线 2 cm,对应工程原型为 40 cm。通过监测开挖过程中的隧道围岩土压力变化情况,评价隧道拱部发育有岩溶空腔时,隧道开挖对隧道围岩的扰动影响。无溶腔和拱顶溶腔工况下,隧道洞周围岩土压力随开挖步的变化情况如图 7 所示。

由图 7 可知:随着隧道的开挖,隧道洞周围岩土压力逐渐减小;在第 9 步开挖步后,隧道洞周围岩土压力的减小速率逐渐放缓并趋于平稳。从单一工况下洞周不同位置的监测值来看,拱顶处的围岩压力变化量最大,左、右拱肩次之,而拱脚、拱底处的围岩压力变化较小。拱顶溶腔工况下,隧道拱顶处的围岩土压力变化量明显小于无溶腔工况下的围岩土压力变化量,其最终值为无溶腔工况下的 53.8%。

综上所述,隧道拱部隐伏腔体的存在影响了溶腔周边一定范围内围岩的开挖土压力释放量。在开挖时,拱部溶腔工况下,邻近隧道的拱顶及左、右拱肩测点处监测到的土压力减小值明显低于无溶腔工况下的监测土压力减小值,拱腰及拱底侧影响则不显著。

2.3 地面沉降

浅埋隧道施工对地面环境有较大影响,当浅表地层发育有溶洞、土洞时,其地层应力场分布较无溶洞时有较大的差别,隧道施工扰动下的地层、地面响应也有所差别。为研究浅表地层中发育有岩

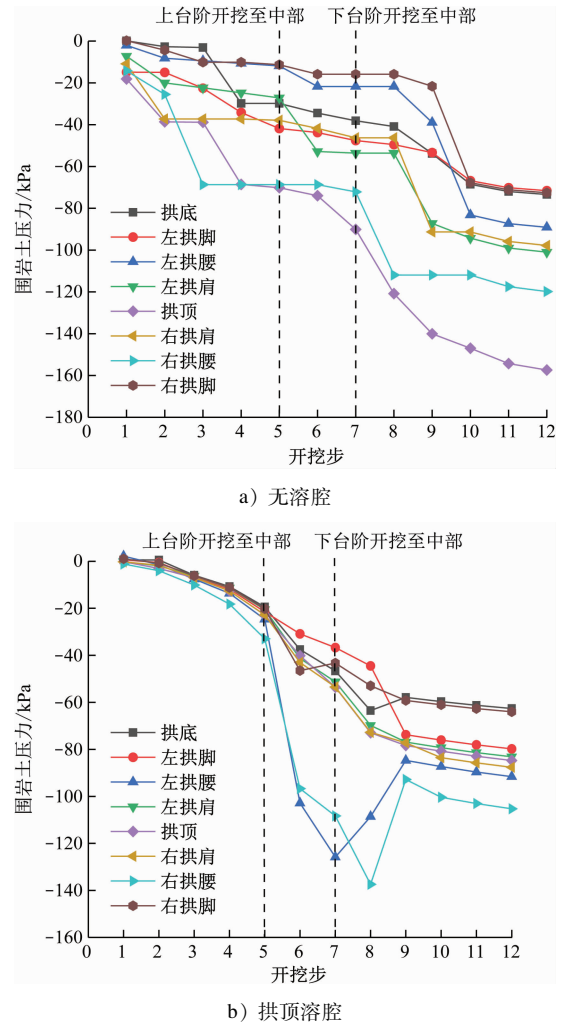


图 7 无溶腔和拱顶溶腔工况下隧道洞周围岩土压力随开挖步的变化情况

Fig. 7 Changes in soil pressure of the tunnel hole surrounding rock with excavation steps under no cavity and vault cavity working conditions

溶时隧道开挖对地面环境的影响规律及特点,试验中在溶腔中线垂直地面处布置横向监测断面,记录隧道开挖过程中的地面沉降变化规律。无溶腔和拱顶溶腔工况中,不同开挖步下的监测断面竖向位移如图 8 所示。

模型试验中对半侧地面沉降进行了监测。随着隧道的开挖进程,各监测点沉降值不断增大。地面沉降曲线整体呈现出“地中大、边侧小”的现象,即靠近地中的监测点各开挖步沉降值差异大,两侧监测点沉降值差异逐渐减小。从曲线形态来看,无溶腔和拱顶溶腔工况下,地面监测断面的最终沉降曲线均大致符合半 U 形。

对比两种工况下的地面沉降值,无溶腔工况和

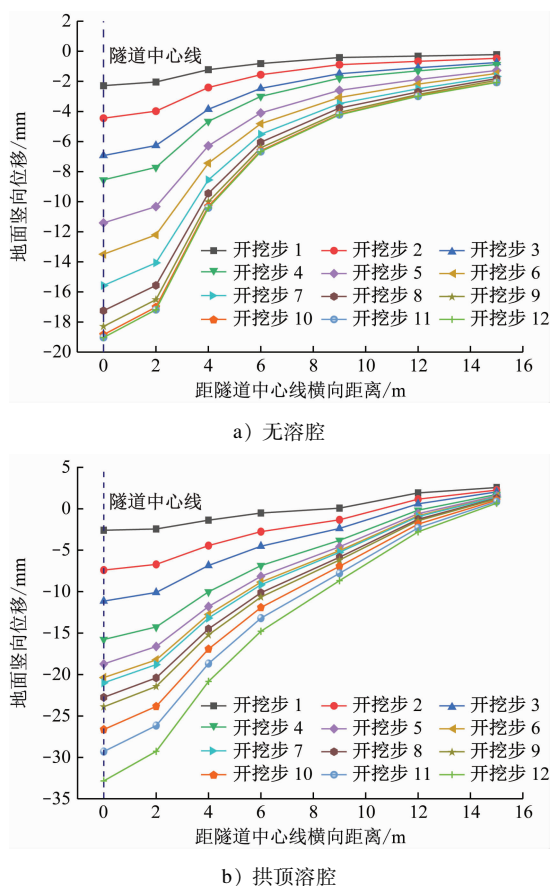


图 8 无溶腔和拱顶溶腔工况中不同开挖步下的监测断面竖向位移

Fig. 8 Vertical displacement of the monitored section under different excavation steps in conditions of no cavity and vault cavity

拱顶溶腔工况下的拱顶地面最终沉降分别为 19.0 mm 和 32.8 mm,拱顶溶腔工况下的拱顶最终地面沉降明显有所增大,其沉降量为无溶腔工况的 1.73 倍。从曲线形态来看,拱顶溶腔工况下的沉降槽宽度明显大于无溶腔工况下的沉降槽宽度,说明拱顶处隐伏溶腔的存在会加大隧道施工后的地面沉降范围。

2.4 拱架最终内力

隧道开挖后,由于核心土的流失,隧道开挖轮廓线在一定范围内的围岩土会向洞内发生挤出变形,隧道初支能够及时抵抗围岩的进一步变形,洞周围岩土压力直接作用于初支结构上。对于联合支护方式,在抵抗围岩变形时,型钢拱架承受了围岩传递给支护结构的较大部分的压力,因此型钢的受力情况在一定程度上表征了初支结构的受力状况,间接反映了作用于初支结构的围岩压力,对于评价初支结构的安全性及围岩的扰动情况有较大

的意义。本次模型试验对初支拱架 8 个位置进行了支护后的应变监测,并将应变值换算为工程原型的内力值,以便于分析拱架的受力特征。隧道初支后的拱架内力如图 9 所示。

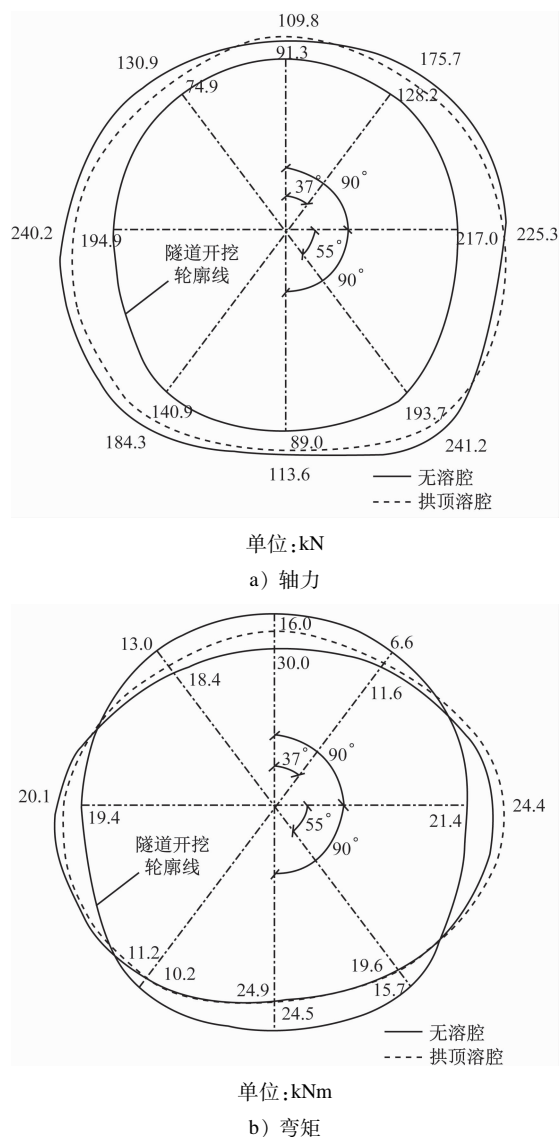


图 9 隧道初支后的拱架内力

Fig. 9 Internal force of the frame arch after initial tunnel support

隧道初支后,拱架轴力表现为全环受压,拱顶处与拱底处的轴力较小,而左、右拱腰处的轴力较大。拱架弯矩表现为拱顶,左、右拱肩及拱底,左、右拱脚处内侧受拉,左、右拱腰处外侧受拉。拱顶溶腔工况下,拱架拱顶处的轴力为无溶腔工况时的 120.3%,拱顶处的弯矩值为无溶腔工况时的 53.3%。由此可知,隧道拱部侧的隐伏溶腔对隧道开挖后的初支受力有一定程度的影响。

3 监测数据对比分析

提取拱顶溶腔工况下,溶洞最上方的地面沉降数据,试验数据通过相似比为 20 进行换算,与现场监测数据进行对比,进一步验证模型试验的合理性。不同开挖步下,模型试验数据与现场监测数据地面沉降值对比如图 10 所示。

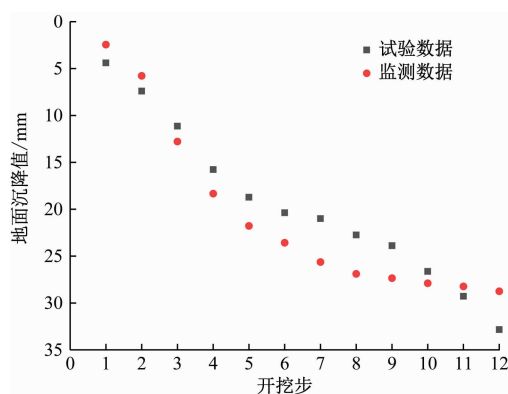


图 10 不同开挖步下模型试验数据与现场监测数据地面沉降值对比

Fig. 10 Comparison of ground settlement values between model test data and field monitoring data under different excavation steps

模型试验数据和现场监测数据地面沉降最大值分别为 32.8 mm 和 28.8 mm。各开挖步下,试验数据与监测数据相差范围为 0.59 ~ 4.63 mm,误差在可控范围内,较好地验证了所提模型试验的正确性。从整体来看,模型试验数据和现场监测数据的变化规律基本一致,试验数据与监测数据较为吻合,说明模型试验能较好地反映隧道开挖时的地面沉降情况。

4 结语

针对城市地铁隧道工程中浅埋岩溶地段常遇隧道拱部隐伏溶洞问题,采用模型试验方法,对隧道开挖过程中的围岩扰动影响规律进行研究,主要获得以下结论:

1) 拱顶溶腔工况下,其围岩最终沉降值为 81.6 mm,该值为无溶腔工况下围岩最终沉降值的 80.2%;两种工况下,隧道拱腰处的水平位移值差异不大。地层中岩溶腔体的发育能够改变原始地应力场,可能会导致溶腔周边围岩介质松弛。

2) 两种工况下,拱顶围岩最终土压力分别为 157.4 kPa 和 84.1 kPa。相比于无溶洞工况,隧道拱

部隐伏溶洞的存在将使隧道开挖时顶部围岩沉降减小,拱部、肩部围岩在隧道开挖过程中土压力释放量降低,初支后拱架顶部内力减小。模型试验中,这些监测量的减小说明溶腔周边一定范围内的围岩存在一定程度的应力松弛,实际工程中隧道的开挖采用大型机械会对围岩有更大的扰动,这种围岩的应力松弛会极大地影响围岩自身的稳定性,因此施工中确保隧道拱部溶腔与开挖隧道之间夹持岩体的稳定性对于隧道施工安全意义重大。

3) 以隐伏溶洞围岩在隧道开挖过程中不发生失稳为前提,对比两种工况下的地面沉降值,拱顶地面最终沉降值分别为 19.0 mm(无溶腔工况)、32.8 mm(拱顶溶腔工况)。溶腔处于开挖隧道顶部正上方时,其地面沉降峰值是无溶腔工况时的 1.73 倍。此外,拱部隐伏溶腔的存在还会增大地面沉降范围。

4) 拱架最终轴力表现为全环受压。两种工况下,拱架拱顶处的轴力值分别为 91.3 kN(无溶腔工况)、109.8 kN(拱顶溶腔工况),弯矩值分别为 30.0 kNm(无溶腔工况)、16.0 kNm(拱顶溶腔工况)。隐伏溶腔的存在对隧道开挖后的初支受力有一定程度的影响,相比于轴力影响,其弯矩影响相对更为显著。

参考文献

- [1] 谭信荣,樊浩博,宋玉香,等.管道型岩溶隧道衬砌结构受力特征试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(6):1847.
TAN Xinrong, FAN Haobo, SONG Yuxiang, et al. Experimental study on the mechanical characteristics of the lining structure of pipe-type karst tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1847.
- [2] 李晓刚,支华龙,彭帆,等.岩溶区运营公路隧道衬砌受力特性模型试验分析[J].公路,2018,63(5):296.
LI Xiaogang, ZHI Hualong, PENG Fan, et al. Experimental study on the model of lining stress characteristics of highway tunnel in karst area[J]. Highway, 2018, 63(5): 296.
- [3] 雷金山.广州地铁隐伏型岩溶地基稳定性分析及充填处理技术研究[D].长沙:中南大学,2014.
LEI Jinshan. Stability analysis and filling treatment technology of concealed karst foundation in Guangzhou metro[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [4] 赵宏国.顶部溶洞对新修地铁隧道的稳定性分析及施工处理技术研究[J].施工技术,2012,41(15):88.

(下转第 218 页)

由图 8 可知:阻尼比为 0.06 的橡胶土对车致振动的阻隔效果更为明显;当中心频率为 12.5 Hz 时,在测点 5-2 处的振动加速度级减小最大,降低了 1.2 dB,降幅为 1.3%。

4 结语

本文以雄安轨道交通 R1 线大里程明挖段区间隧道为例,针对明挖隧道回填土进行阻尼比设计,设置了橡胶土阻尼比为 0.04 和 0.06 两种工况,分析了列车荷载作用下,不同阻尼比回填土对隧道的隔振作用。主要获得以下几个结论:

1) 当橡胶土阻尼比为 0.04 时,最大可使地面振动加速度减小 6.2%,振动加速度级降低 1.1%。

2) 当橡胶土阻尼比为 0.06 时,最大可使地面振动加速度减小 11.4%,振动加速度级降低 1.3%。

3) 阻尼比为 0.06 的回填橡胶土对隧道整体的隔振效果优于阻尼比为 0.04 的回填橡胶土。在相同测点位置处,阻尼比为 0.06 的橡胶土对竖向振动加速度、振动加速度级的降幅总体大于阻尼比为 0.04 的橡胶土,最大降幅分别可达 5.2% 及 0.667%。

参考文献

- [1] 周志军,刘玉涛,李伟,等. 地铁钢弹簧浮置板轨道振动特性和减振效果研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 57.
ZHOU Zhijun, LIU Yutao, LI Wei, et al. Study on vibration characteristics and vibration reduction effect of steel spring floating slab track in metro[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(5): 57.
- [2] 高晓刚,王安斌,鞠龙华,等. 不同减振扣件的轨道结构横向振动测试与分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(1): 191.

(上接第 212 页)

- ZHAO Hongguo. Research on the influence of caves on the stability of new subway tunnels and construction technology[J]. Construction Technology, 2012, 41(15): 88.
- [5] 常洲,魏研博,冷浩,等. 隐伏充填型溶洞对隧道稳定性影响与防治技术[J]. 公路, 2022, 67(9): 439.
CHANG Zhou, WEI Yanbo, LENG Hao, et al. Influence of concealed filling karst cave on tunnel stability and its prevention technology[J]. Highway, 2022, 67(9): 439.
 - [6] 周超月. 富水岩溶地层大断面公路隧道开挖稳定性及失稳特征研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
ZHOU Chaoyue. Study on excavation stability and instability characteristics of large section highway tunnel in water-rich karst stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
 - [7] 潘东东,李术才,许振浩,等. 岩溶隧道承压隐伏溶洞突水模型试验与数值分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 828.

GAO Xiaogang, WANG Anbin, JU Longhua, et al. Testing and analysis of lateral vibration of metro tracks with different rail baseplates[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(1): 191.

- [3] 刘卫丰,张厚贵,孟磊,等. 北京地铁采用调频式钢轨减振器抑制钢轨振动的试验研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1): 105.
LIU Weifeng, ZHANG Hougai, MENG Lei, et al. A test of suppressing rail vibration by tuned rail damper for Beijing metro[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 105.
- [4] 朱宁,马龙祥. 不同型式地铁隔振沟墙隔振性能研究[J]. 工程与建设, 2018, 32(6): 799.
ZHU Ning, MA Longxiang. Study on the vibration isolation effects of metro vibration isolation barriers with different types[J]. Engineering and Construction, 2018, 32(6): 799.
- [5] 刘晶磊,张瑞恒,冯桂帅,等. 高速铁路混凝土排桩减隔振效果研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 302.
LIU Jinglei, ZHANG Ruiheng, FENG Guishuai, et al. The research on the vibration isolation effect about concrete pile in high speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 302.
- [6] 陈昆,贾霄,刘彬,等. 高速铁路空沟隔振措施隔振效果的有限元分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 575.
CHEN Kun, JIA Xiao, LIU Bin, et al. Finite element analysis of reducing the high-speed railway vibration effect on the environment using open trenches[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 575.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-10-19 出版日期:2024-12-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-10-19 Published:2024-12-10
· 第一作者:殷东昊,硕士研究生,2908931861@qq.com
通信作者:金浩,副研究员,jinhao@seu.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

PAN Dongdong, LI Shucai, XU Zhenhao, et al. Model tests and numerical analysis for water inrush caused by karst caves filled with confined water in tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 828.

- [8] 苏鹏,王海涛,祁可录,等. 岩溶区隧道盾构法施工的相似模型试验设计[J]. 公路, 2019, 64(7): 310.
SU Peng, WANG Haitao, QI Kelu, et al. Similar model test design for tunnel shield construction in karst area[J]. Highway, 2019, 64(7): 310.
- 收稿日期:2022-10-11 修回日期:2022-12-01 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-11 Revised:2022-12-01 Published:2024-12-10
· 通信作者:黄松,高级工程师,278176245@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license