

多层采空区影响下隧道内力变化的数值研究

刘俊佳

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市200092]

摘要:针对具体工程案例,建立了隧道下穿2层、上覆1层的采空区数值模型,得到了隧道开挖后隧道变形、衬砌结构内力及地层变化的规律,探究了多层采空区对隧道的叠加效应。结果表明:隧道上下的采空区对隧道变形的影响规律不同;多层采空区的存在大大增加了支护结构的截面偏心距,从而降低了结构的承载能力;有无采空区时隧道周围的地层变形特征差异显著。

关键词:多层采空区;公路隧道;收敛位移;衬砌内力

中图分类号:U451

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2022)09-0244-04

0 引言

随着我国隧道建设的不断发展,在施工设计时将越来越多地面临采空区这一不良地质。采空区的存在会导致隧道衬砌变形、冒顶塌方、漏水、路基不均匀沉降等问题^[1],给施工和运营带来巨大的危害。目前对于隧道采空区的研究成果有煤层倾角的影响^[2],采空区距离的影响^[3]等,主要研究方法有理论推导^[4]、模型试验^[5]和数值研究^[6]。但对于隧道穿越多层采空区的研究还少有涉及,尤其对于隧道上下同时存在多层采空区时,对隧道的叠加影响效应研究还不足。本文基于数值软件来探究多层采空区对隧道收敛变形、衬砌内力的综合影响,并对注浆加固效果进行分析。

1 工程概况

太原某山体隧道位于构造剥蚀中低山区,地形复杂,沟壑纵横。山体海拔高度在800~1 000 m之间,山体岩性为石炭系上统太原组中风化砂岩、中风化页岩,节理裂隙发育,岩体破碎。隧道净宽12.12 m,净高6.79 m;隧道某段拟穿越多层采空区段,隧道顶板埋深70 m左右,属于深埋隧道。采空区有3层,2号采空区位于隧道顶板上部9 m处,厚度约3 m;6号采空区位于隧道底板下部12 m处,厚度2 m;8号(9号)采空区位于隧道底板下部33.5 m处,厚度6 m。采空区走向与隧道走向斜交,采空区倾角约5°。煤层回采率40%,剩余孔隙率50%。

收稿日期:2022-01-04

作者简介:刘俊佳(1996—),男,硕士,工程师,从事市政结构设计专业技术工作。

采空区与隧道的空间位置关系见图1。

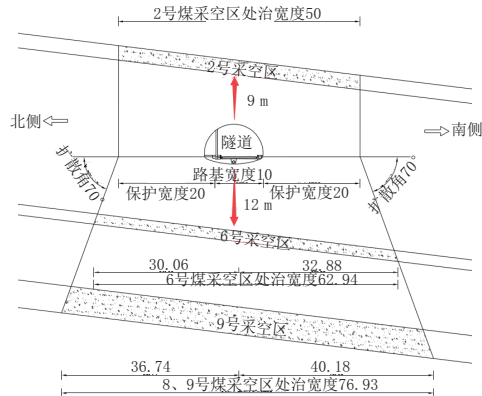


图1 采空区与隧道的空间位置关系(单位:m)

2号和6号采空区与隧道的垂直距离均小于1倍洞径,根据《采空区公路设计与施工技术细则》(JTG-TD31-03—2017)第5.5.6条,应对隧道围岩进行加固处理;按照6.2.2条可计算各采空区的处理宽度应分别为50 m、63 m和77 m。拟采用地表注浆(2号采空区)和隧道内注浆(6号和8号采空区)对采空区进行注浆治理,注浆材料由水、水泥、粉煤灰及外加剂组成,在注浆范围边缘设帷幕孔以防止浆液流失。帷幕孔径为150 mm,注浆孔采用 $\phi 50$ mm的钢管。

采空区的顶底板为砂岩,透水性好。采空区内部地层松散,渗透系数按0.25 cm/s考虑。根据地基处理手册^[7]表9-12,可通过插值预估,得出浆液的扩散半径约为10 m,因此注浆钻孔间距为6~10 m。注浆压力控制在1.5~2.0 MPa。

不同渗透系数所对应的注浆扩散半径见表1。

根据相关工程经验,采空区上部约5 m范围内为冒落带,20 m范围内为裂隙带,因此隧道大致处于2号和6号采空区导致的裂隙带中。由于2层叠加扰动

表 1 注浆扩散半径

渗透系数 / (cm·s ⁻¹)	1.000	0.100	0.010	0.001
扩散半径 / m	40.00	4.00	0.40	0.04

效应,围岩可能出现冒落掉块,要对围岩进行加固,并对空洞进行回填处理。对隧道裂缝围岩,采用中空注浆导管进行加固,注浆压力控制在 0.6 MPa 左右。加固时,在隧道顶部空洞处设置护拱,以提高衬砌抗弯刚度;侧墙空洞处则进行混凝土或片石回填,以减少侧墙地层压力。结合地勘 TSP 探测技术,隧道衬砌加固设计图见图 2。

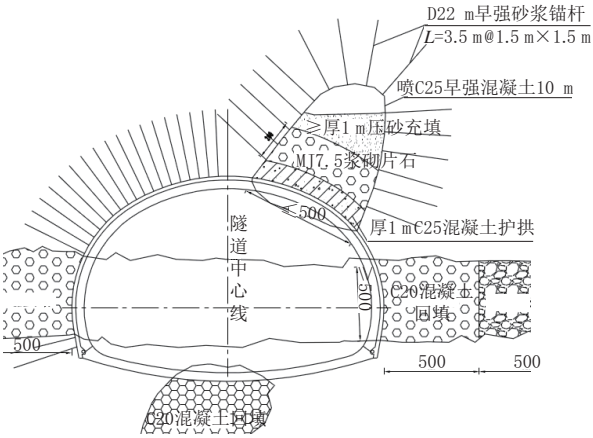


图 2 隧道衬砌加固设计图

由于空间位置关系复杂,隧道内力及场地稳定性难以有效预测。根据《采空区公路设计与施工技术细则》第 4.3.6 条,可采用数值模拟方法对隧道或桥梁等重要构筑物穿越多层采空区进行稳定性评价。本项目采用 Midas/GTS 岩土有限元软件来探究多层采空区影响下隧道围岩的变形特征、隧道衬砌的收敛位移和附加内力,并由此对隧道支护结构设计和采空区处治措施提供结果参考和反馈。

2 反演预测方法及模型建立

2.1 模型简介

模型长 340 m,宽 224 m,隧道围岩统一取 V 级围岩,除煤层外不再分层;煤层有 3 层,倾角 5°,自上而下分别为 2 号、6 号、8 号煤层(见图 3)。底部固定模型的水平和竖直运动,两侧固定模型的水平位移,划分单元类型为混合网格单元。煤层中部为隧道路基的影响范围,单独划分网格。

2.2 计算参数及计算工况

计算模型中,地层统一采用 V 级围岩参数,隧道初支和二衬均利用梁单元模拟。初支梁单元截面形状为工 20a 工字钢,弹性模量和密度均取钢材参数,

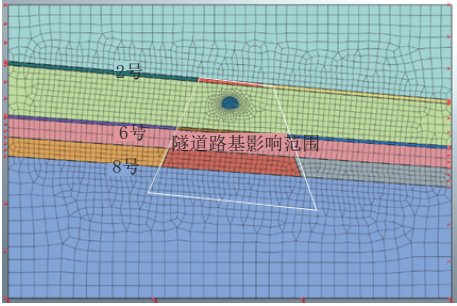


图 3 计算模型

间距为 0.75 m;二衬梁单元截面形状为 0.55 m × 1 m 的实体矩形,材料为 C30 混凝土。施工阶段模拟分初步支护和二次衬砌 2 步,分别激活 H 型梁和矩形梁,由于围岩等级为 V 级,二衬施加完成后,钝化初支,将初支结构视作稳定围岩的一部分(将二衬附近土体单元参数提高),二衬 100% 受力。采空区地层由煤矸石和垮落的顶板碎石充填而成,是空隙较大的松散堆积物,因此可以将采空区等效成地层。

计算模型的主要计算参数见表 2。

表 2 计算模型主要计算参数

材料名称	重度 / (kN·m ⁻³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	弹性模量 / MPa
V 级围岩	25	40	27	400
V 级围岩 2 (初支强化部分)	26	60	27	500
初支	78			2.06 × 10 ⁵
二衬	26			3 × 10 ⁴
采空区	6	0	20	3
注浆材料	18	120	18	800

计算工况分 3 种:(1)无采空区情况;(2)存在 3 层采空区情况;(3)注浆治理后情况。模拟注浆时,将隧道路基影响范围内的地层属性改变成注浆材料单元。

2.3 结果分析

2.3.1 收敛位移

隧道衬砌结构(二衬)的位移监测点见图 4,隧道(二衬)的最大变形见图 5。

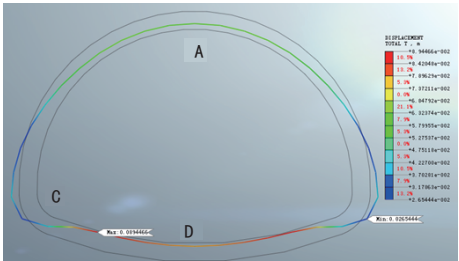


图 4 隧道衬砌结构(二衬)的位移监测点

无采空区时,对于本隧道项目,初步支护结构(工字钢)的拱顶(A 点)下沉量为 8.91 cm,拱脚水平

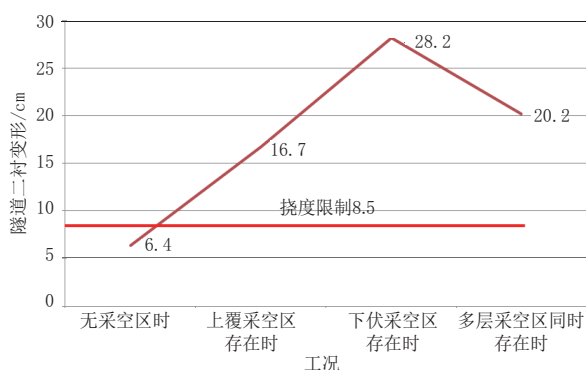


图5 隧道(二衬)的最大变形

收敛位移(C点)为3.99 cm。二衬结构拱顶(A点)下沉量为6.40 cm,拱底(D点)隆起量为7.95 cm,拱脚(C点)水平收敛值为3.93 cm。两侧对称变形。

当隧道上方的2号采空区存在时,隧道呈偏压变形,隧道左侧采空区距隧道顶部稍远,松动围岩荷载较右侧大,因此左侧变形也较大,隧道主要发生向下的位移,变形量约为16.7 cm。

当下伏采空区6号和8号存在时,隧道开挖后,A点竖直向下的位移为28.2 cm,C点的竖直位移为2.5 cm,仰拱中心相对拱顶隆起量为25.5 cm。这说明隧道开挖后,下伏采空区与隧道之间的岩层由于缺乏地层竖向的位移限制而导致隧道底部发生隆起。

多层采空区同时存在时,隧道整体下沉,偏压变形和底部隆起现象消失,这是上下采空区叠加影响的结果。

根据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)第9.2.15条,受弯构件的变形允许值取 $l/400$ (l 为二衬的总长度)。可见无采空区存在时,隧道衬砌的位移能满足要求;上部采空区存在时,拱顶位移变为2.5倍;下部采空区存在时,变为4.5倍。

2.3.2 衬砌内力

分别取拱顶、拱墙、拱脚作为A、B、C 3个衬砌内力监测点,D点为仰拱中心处的内力监测点。无采空区时,初支结构A、B、C 3个点的弯矩分别为 $-3.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $-19.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $-138 \text{ kN}\cdot\text{m}$,弯矩对称分布;轴力分别为 1737 kN 、 2889 kN 、 3392 kN 。C点拱脚处为初支结构弯矩和轴力的最大值处。二次衬砌A、B、C各点的弯矩分别为 $-37 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $42 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $-174 \text{ kN}\cdot\text{m}$,轴力分别为 -2263 kN 、 -4128 kN 、 -4317 kN 。初支与二衬结构弯矩在A点拱顶处的差异最大,比值接近1:10;在C点拱脚处差异最小,比值接近4:5。初支与二衬各点的轴力比值较为接近,为1:1.4。

当采空区存在时,支护结构的弯矩急剧增大,尤

其是拱顶和拱底的弯矩增加倍数较大。初支结构的拱顶弯矩增加最大,为正常情况的17倍,二衬结构的仰拱中心处弯矩为正常情况的8.7倍。支护结构轴力则出现不同程度的减小,最大减小量为正常情况下的0.5倍。注浆治理后,采空区缝隙被填充和胶结,松动岩土压力大大减少,因此支护结构的内力都明显减少,均小于无采空区时深埋隧道的内力值。

多层采空区同时存在时,弯矩较正常情况明显增大,轴力却减小,由此可知采空区松动的岩体压力使得衬砌的偏心距增大。无采空区时,初支结构测点的偏心距分别为2.1 mm、6.8 mm、40.7 mm;存在采空区时,分别为47 mm、23.5 mm、309.2 mm。偏心距增加最大的为测点C拱脚处,为正常情况的22倍,这将大大降低初支结构(钢拱架)承载力。注浆治理后,初支结构的偏心距分别为1.3 mm、1.3 mm、18.9 mm,均小于无采空区时衬砌结构的偏心距。

不同工况下初支结构偏心距的变化见图6,衬砌结构偏心距的变化见图7。

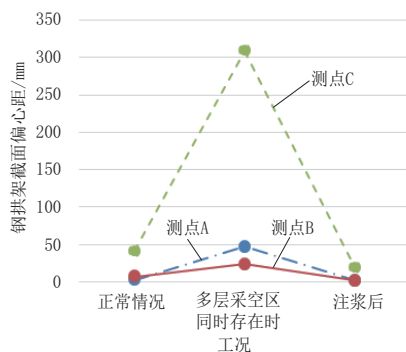


图6 不同工况下初支结构偏心距的变化

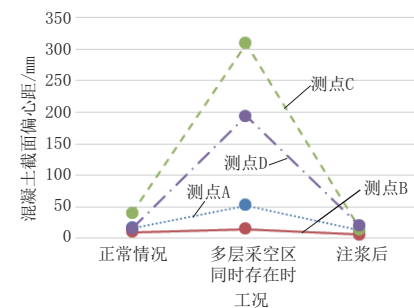


图7 不同工况下衬砌结构偏心距的变化

2.4 地层变形

无采空区时,2号采空区所在地层呈盆状沉降形态,沉降中心沉降量为4.5 cm;下部地层受开挖卸荷影响向上隆起,位移分别为3.4 cm、2.0 cm。多层采空区同时存在时,隧道开挖后岩体地应力重新分配,导致各采空区地层均呈现盆状沉降,最大地层沉降量20 cm,最大为无采空区时地层变形的10倍,且离隧道越远的地层沉降越小。隧道整体下沉的沉

降量为 20 cm。注浆治理后 2 号采空区沉降中心的沉降量为 4.3 cm, 下伏采空区地层的位移量分别为 3.4 cm 和 1.9 cm。由此说明, 注浆加固能够有效地减少地层变形, 从而减轻对隧道路基的破坏(见图 8)。

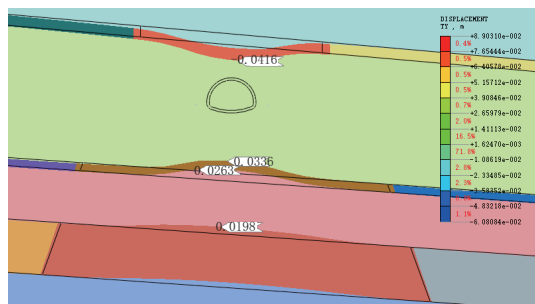


图 8 地层变形特征(单位:m)

3 结 语

(1)上覆倾斜采空区在隧道上部产生不均匀的围岩松动压力,使得隧道衬砌发生偏压变形,距上覆采空区较远一侧的衬砌变形较大;下伏采空区的存在使隧道底部的岩层缺失竖向的地层约束,从而导致仰拱发生隆起;多层采空区同时存在时,隧道衬砌结构各点的变形趋于一致,发生整体下沉,下沉量约为正常情况的 4 倍。

(2)多层采空区使得隧道衬砌弯矩急剧增加,最大为正常情况的 17 倍,轴力则出现不同程度的减

少,最大减少为原来的 0.5 倍。存在多层采空区时,隧道衬砌结构的截面偏心距最大为正常情况的 22 倍。因此存在采空区时,要防止因初支结构钢拱架截面偏心距增大导致的整体失稳。注浆治理后,隧道衬砌结构的偏心距均小于正常情况。

(3)正常情况下,隧道开挖后,隧道上部的地层呈盆状沉降,下部地层由于隧道开挖卸荷而发生向上隆起。存在多层采空区时,隧道及周围围岩由于扰动作用而发生整体下沉。注浆治理后,地层的变形模式与变形量与无采空区时较为接近,为存在采空区时位移量的 1/10。

参考文献:

- [1] 李晓红,姜德义,刘春,等.公路隧道穿越采空区治理技术研究[J].岩土力学,2005,26(6):911-914.
- [2] 方勇,符亚鹏,周超月,等.公路隧道下穿双层采空区开挖过程模型试验[J].岩石力学与工程学报,2014,33(11):2248-2253.
- [3] 杨志浩,方勇,周超月,等.双层采空区隧道开挖围岩稳定性数值模拟[J].铁道标准设计,2015,55(3):98-100.
- [4] 廖沛源,郑国强,袁松.采空区地层变形产生的隧道附加荷载及变形容许值计算与分析[J].现代隧道技术,2013,55(3):73-76.
- [5] 崔戈,方勇,徐晨.公路隧道下穿 3 层采空区施工模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(2):258-263.
- [6] 韩宪军,朱昌星,孟小欢.下伏采空区隧道变形稳定性与治理数值分析[J].广西大学学报(自然科学版),2016,41(1):42-45.
- [7] 龚晓南.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com