# 隧道侧部溶洞形态对安全距离影响分析*

付庆
（中铁十八局集团有限公司，天津 300222）

**摘要：** 桑植隧道穿越灰岩地质时在隧道侧方常出现溶洞空腔，为保证隧道施工和后期运营安全，采用有限元软件构建三维数值模型，模拟隧道侧部出现溶洞且溶洞具有不同形态对隧道与溶洞间安全距离的影响。结果显示，隧道与溶洞间安全距离与溶洞跨度成正比，且和隧道埋深近似为线性递增关系，但溶洞高跨比对安全距离的影响较复杂，与溶洞形态存在密切关系。

**关键词：** 隧道；溶洞；安全距离；高跨比；埋深

**中图分类号：**U458.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－2668(2021)02－0129－03

隧道穿越灰岩地质时经常遭遇大小及方向各异的溶洞，发育复杂的溶洞给隧道修建和后期运营带来极高风险，最简单、最有效的方法就是确保溶洞和隧道间保持足够的安全距离。赵明阶等运用有限元软件分析了不同跨度溶洞与隧道的不同空间分布对围岩稳定性的影响；王勇等基于弹塑性理论和数值模拟方法，分析了隧道底部溶洞顶板安全厚度的影响因素，利用多元线性回归方法得出了安全厚度预测模型；刘悟辉等采用 FLAC 软件分析了路基和溶洞在汽车荷载作用下产生的塑性变形；Chen W. Z. 等通过数值模拟及实地测量，推导了评价大型地下洞室开挖稳定性的蠕变－损伤耦合模型；李奎采用 ANSYS 软件研究了开挖过程中隧道围岩位移和应力变化规律；曹茜、宋建禹采用有限元软件建立了溶洞与隧道的安全距离预测模型；邱新旺通过有限元软件分析了影响溶洞和隧道安全距离的因素，建立了溶洞位于马蹄形隧道底部、顶部和侧部位置时安全距离预测函数；李集等建立了岩溶隧道防突岩层安全距离估算公式。溶洞与隧道间岩体安全距离的影响因素较多，且由于岩溶发育特征复杂，研究结果的推广受到局限，针对具体工程必须具体研究。该文以黔张常铁路 QZCZQ－I 标段桑植隧道施工为例，采用 ADINA 软件建立三维数值模型，模拟隧道侧部存在球形隐伏溶洞及其不同形态对隧道和溶洞间安全距离的影响，为施工措施制定提供借鉴。

## 1 工程概况

桑植隧道设计见图 1。该隧道为双线隧道，起于上洞街乡二户溪村，与二户溪 2 号中桥常德端台尾相接，自东向西横穿利福塔镇，与郭家台特大桥黔

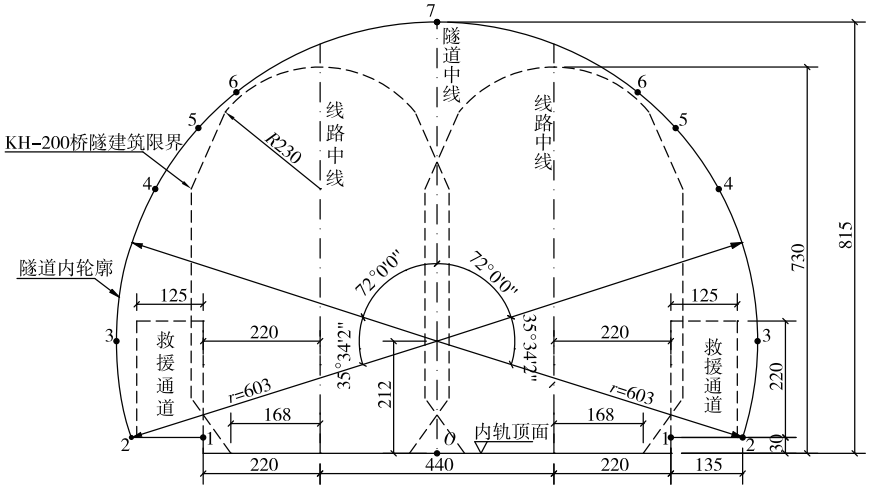


**图 1 桑植隧道断面图**（单位：cm）

* **基金项目：** 国家自然科学基金项目(51908065)；中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(16－C27)

江端台尾相接，全长 5 058.25 m。该隧道穿越可溶性地层，横穿的山脉岩层总体沿 N－S 走向，岩性复杂多变，裂隙发育强烈，植物覆盖率高，地势陡峭，工程差异极大，岩溶、岩溶水发育强烈，地质复杂。孔隙水主要存在于以腐殖质和少量碎石为主的河谷地段，基岩裂隙水主要赋存于隧洞进口及洞身附近，赋水量主要受地质构造制约，受降雨影响较小。

## 2 分析模型的建立

隧道开挖一般会对 3～5 倍开挖跨度范围内围岩产生较大扰动，由此选择计算模型的尺寸为纵向（$X$ 方向）70 m、横向（$Y$ 方向）90 m、竖向（$Z$ 方向）90 m（见图 2）。

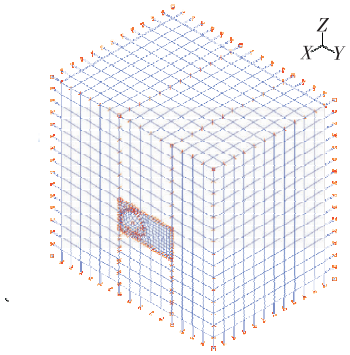


**图 2 隧道侧部溶洞三维有限元模型**

隧道沿 $X$ 方向，底部中线位于纵向 45 m、竖向 40 m 处，隧道围岩简化为均质弹塑性材料，计算采用摩尔－库伦屈服准则，其物理力学参数按表 1 设定。将溶洞简化为球体或椭球体，溶洞中心位于模型纵向的中部，每循环进尺 3 m，模型上部边界为应力边界，埋深对围岩稳定性的影响通过施加上覆岩体的自重力进行模拟，重力加速度为 9.8 N/kg。

**表 1 围岩的力学参数**

| 项目 | 参数值 |
|---|---|
| 重度 $\gamma$/(kN·m$^{-3}$) | 23 |
| 弹性模量/GPa | 4 |
| 泊松比 | 0.32 |
| 内摩擦角/(°) | 35 |
| 黏聚力/MPa | 0.5 |

## 3 溶洞形态对安全距离的影响

### 3.1 溶洞跨度对安全距离的影响

假定隧道埋深为 70 m，模拟溶洞跨度（直径）从 6 m 按 2 m 递增至 16 m 时对隧道和溶洞间安全距离的影响，结果见图 3。

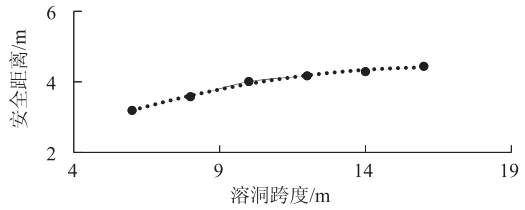


**图 3 溶洞跨度对隧道和溶洞间安全距离的影响**

由图 3 可知：溶洞跨度从 6 m 增加至 16 m 时，隧道和溶洞间安全距离逐渐增加，增加幅度分别为 12.9%、12%、4%、2.9%和 3.5%，增加幅度减缓，总的增幅为 40%。

### 3.2 隧道埋深对安全距离的影响

假定隧道跨度（直径）为 10 m，研究隧道埋深从 50 m 按照 25 m 递增至 150 m 时及隧道埋深 200 m 对隧道和溶洞间安全距离的影响，结果见图 4。

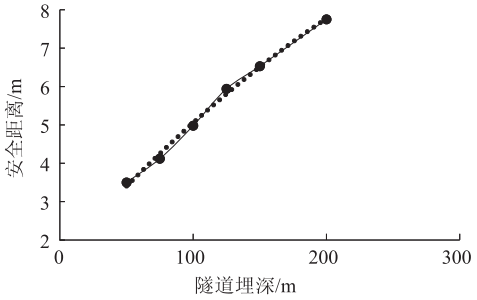


**图 4 隧道埋深对隧道和溶洞间安全距离的影响**

由图 4 可知：隧道和溶洞间安全距离与隧道埋深近似成直线递增关系，直线斜率约为 2.8%；随着埋深按照 50%的幅度增加，安全距离以约 19%的幅度递增。

### 3.3 溶洞高跨比对安全距离的影响

三维模型中椭球形溶洞的大小由 $X$、$Y$、$Z$ 三轴半径决定，分别为 $a$、$b$、$c$（见图 5）。

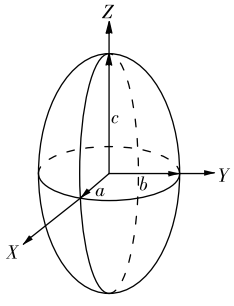


**图 5 椭球形溶洞尺寸示意图**

在隧道埋深为 70 m 的条件下，假定溶洞体积不变，高跨比按照椭球在 $X$、$Y$ 和 $Z$ 方向尺寸的不同变化分为 3 种工况，研究溶洞高跨比对隧道和溶洞间安全距离的影响。工况 1 为椭球在 $Y$ 方向半

径固定,通过 $Z$ 和 $X$ 方向的尺寸比实现高跨比变化;工况 2 为椭球在 $X$ 方向半径固定,通过 $Z$ 和 $Y$ 方向的尺寸比实现高跨比变化;工况 3 为椭球在 $X$ 和 $Y$ 方向尺寸相同,高跨比通过 $Z$ 与 $X$ 或 $Y$ 方向的尺寸比变化来体现。

**3.3.1** 工况 1 下溶洞高跨比对安全距离的影响

$Y$ 方向尺寸不变,设 $Z$ 与 $X$ 方向的尺寸比为 $R_1$,$R_1$从 0.5 以 0.5 增幅递增至 3,不同高跨比对应的隧道和溶洞间安全距离见图 6。

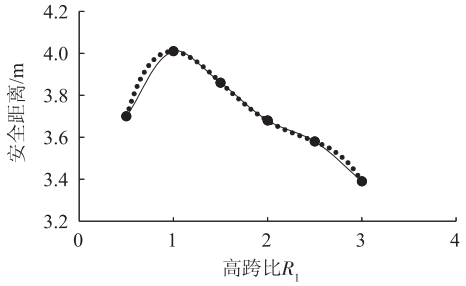


**图 6　高跨比 $R_1$ 与隧道和溶洞间安全距离的关系**

由图 6 可知:工况 1 下,高跨比为 1 时所需安全距离最大,即椭球在 $XZ$ 平面投影为圆形时对应的安全距离最大;无论高跨比是增大还是减小,对应的安全距离均减小。高跨比大于 1 时,安全距离与高跨比基本成线性递减关系。

**3.3.2** 工况 2 下溶洞高跨比对安全距离的影响

$X$ 方向尺寸不变,设 $Z$ 与 $Y$ 方向的尺寸比为 $R_2$,其变化与 $R_1$ 相同,不同高跨比对应的隧道和溶洞间安全距离见图 7。

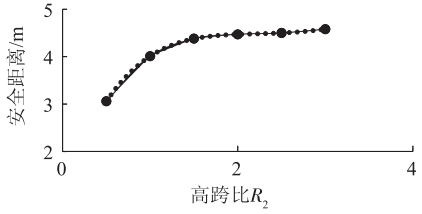


**图 7　高跨比 $R_2$ 与隧道和溶洞间安全距离的关系**

由图 7 可知:工况 2 下安全距离随着高跨比的增大而增加,并最终趋向于定值。说明溶洞在隧道纵向和横向的发育程度对安全距离的影响规律不同,纵向高跨比增加对安全距离的影响大于横向高跨比增加对安全距离的影响。

**3.3.3** 工况 3 下溶洞高跨比对安全距离的影响

$X$ 和 $Y$ 方向尺寸相等(溶洞跨度,见表 2),高跨比以 $Z$ 和 $X$ 或 $Y$ 方向的尺寸比来体现,设为 $R_3$,其变化与 $R_1$ 和 $R_2$ 相同,不同高跨比对应的隧道和溶洞间安全距离见图 8。

**表 2　高跨比 $R_3$ 与隧道和溶洞间安全距离的关系**

| 溶洞跨度/m | 溶洞高跨比 $R_3$ | 安全距离/m |
|---|---|---|
| 20.00 | 0.5 | 3.80 |
| 10.00 | 1.0 | 4.01 |
| 6.67 | 1.5 | 4.26 |
| 5.00 | 2.0 | 4.02 |
| 4.00 | 2.5 | 3.78 |
| 3.33 | 3.0 | 3.74 |

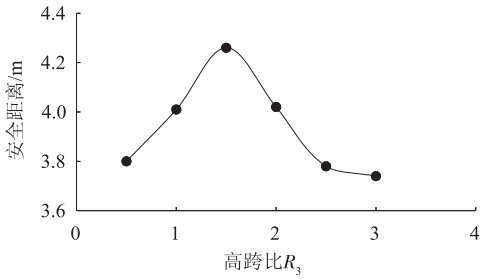


**图 8　高跨比 $R_3$ 与隧道和溶洞间安全距离的关系**

由图 8 可知:工况 3 下,高跨比 $R_3$ 与隧道和溶洞间安全距离关系的变化趋势与工况 1 基本一致,安全距离随着高跨比的增加呈现先增大后减小的趋势。与工况 1 不同的是,工况 3 下安全距离最大值对应的高跨比为 1.5,而非高跨比 1(椭球体变成球体)时的安全距离。高跨比大于 2.5 时,安全距离基本不增大,趋向于定值。

## 4　结论

(1) 隐伏溶洞位于隧道侧部时,隧道与溶洞间安全距离与溶洞跨度成正比关系,但增幅逐渐减小。

(2) 溶洞跨度固定时,隧道埋深与隧道与溶洞间安全距离表现为近似直线递增关系。

(3) 隧道正右侧等体积溶洞形态对隧道与溶洞间安全距离的影响主要体现在溶洞在隧道纵断面的投影面积、溶洞侧腔岩体支撑能力及顶部岩体成拱能力上,溶洞的高跨比 $R_2$ 对安全距离的影响最大,$R_1$ 次之,$R_3$ 最小,即溶洞在隧道纵断面的投影面积越大,所需安全距离越大;投影面积不变,球形溶腔所需安全距离最大。

**参考文献:**

[1] 赵明阶,敖建华,刘绪华.岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):213－213.

[2] 王勇,孙彩红.岩溶隧道溶洞顶板安全厚度预测模型

(下转第 136 页)

由图 8 可知：4 种支护方案下，上台阶开挖对拱顶沉降和水平收敛变形都有较大影响，拱顶沉降及水平收敛变形速率最大值出现在上台阶支护阶段，隧道上台阶开挖后应尽快布设支护结构。

综上，方案二的总体变形最小，其优化效果最好；方案三通过改变锚杆布设角度，达到了控制变形的目的。方案三最优。

## 4 结论

（1）毛洞开挖时全断面法产生的变形较大，设置支护时台阶法开挖产生的变形较大；毛洞开挖时产生的变形均大于有支护开挖时产生的变形。采用支护结构可控制围岩变形。

（2）4 种开挖工况下均呈现拱顶沉降左侧大于右侧、仰拱隆起右侧大于左侧的非对称变形特征，毛洞开挖工况下非对称变形特征更明显；拱顶与仰拱变形较大处的连线与层理面接近于垂直。

（3）优化左侧锚杆长度、锚杆环距能控制围岩变形；改变左侧锚杆的布设角度，将锚杆垂直于层理面布置能较好地控制围岩变形，且便于施工和节约造价，是一种经济、可靠的支护方案。

**参考文献：**

[1] 谭鑫，傅鹤林，陈琛，等.层状岩体中隧道稳定性数值分析[J].铁道科学与工程学报，2016，13(6)：1108－1113.

[2] 吴迪，陈子全，甘林卫，等.高地应力深埋层状围岩隧道非对称变形受力机制研究[J].隧道建设(中英文)，2018，38(11)：1813－1821.

[3] 唐锐，安俊吉，向龙，等.层状岩体对公路隧道围岩稳定性的影响分析[J].现代隧道技术，2019，56(增刊 2)：216－224.

[4] 陈子全，何川，吴迪，等.高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究[J].西南交通大学学报，2018，53(6)：1237－1244.

[5] 温建永.层状岩体隧道病害机理分析及整治措施研究[J].铁道科学与工程学报，2017，14(5)：1024－1028.

[6] 马腾飞，李树忱，李术才，等.不同倾角多层节理深部岩体开挖变形破坏规律模型试验研究[J].岩土力学，2016，37(10)：2899－2908.

[7] 沙鹏，伍法权，李响，等.高地应力条件下层状地层隧道围岩挤压变形与支护受力特征[J].岩土力学，2015，36(5)：1407－1414.

[8] 邓斌，饶和根，廖卫平，等.软岩隧道支护结构优化研究[J].铁道科学与工程学报，2017，14(10)：2203－2213.

[9] 戴永浩，陈卫忠，田洪铭，等.大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J].岩石力学与工程学报，2015，34(增刊 2)：4149－4156.

[10] 郭小龙，谭忠盛，李磊，等.高地应力陡倾层状软岩隧道变形破坏机理分析[J].土木工程学报，2017，50(增刊 2)：38－44.

[11] 韩昌瑞，白世伟，王玉朋，等.层状岩体深埋长隧道锚杆支护优化设计[J].岩土力学，2016，37(增刊 1)：409－414.

[12] 刘涛，石建，胡斌，等.软质破碎围岩段隧道施工方法数值分析比选[J].水电能源科学，2011，29(7)：84－88.

[13] 方坚宇，王其海，邓麟勇.穿过滑坡的隧道变形与受力数值模拟分析[J].公路与汽运，2011(3)：176－181.

[14] 刘锦欣.层状围岩隧道开挖稳定性及锚杆非对称支护方式研究[D].北京：北京交通大学，2018.

[15] 杜晓磊.层状围岩隧道稳定性及锚杆支护优化设计[D].天津：河北工业大学，2015.

收稿日期：2020－07－13

(上接第 131 页)

[J].隧道建设，2005，25(增刊 1)：7－10.

[3] 刘悟辉，刘伟.溶洞对路基稳定性影响分析：以常张高速公路 K122＋200 路基为例[J].中国岩溶，2006(4)：81－85.

[4] CHEN W Z，ZHU W S，SHAO J F.Damage coupled time-dependent model of a jointed rock mass and application to large underground cavern excavation[J].International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences，2004，41(4)：669－677.

[5] 李奎.隧道岩溶围岩力学特性的初步研究[D].成都：西南交通大学，2005.

[6] 曹茜.岩溶隧道与溶洞的安全距离研究[D].北京：北京交通大学，2010.

[7] 宋建禹.隐伏溶洞与山岭隧道间安全距离预测及其稳定性研究[D].重庆：重庆交通大学，2012.

[8] 邱新旺.溶洞与隧道间岩层安全距离研究[D].南宁：广西大学，2012.

[9] 李集，卢浩，夏沅谱.岩溶隧道防突安全厚度研究综述及估算方法探讨[J].隧道建设，2014(9)：862－872.

[10] 邓衍，刘辉，刘耀坤，等.安平隧道顶端溶洞对其围岩稳定性的影响[J].交通科学与工程，2020，36(1)：82－86.

收稿日期：2020－12－04