

## 考虑溶洞空间形态的岩溶路基顶板稳定性分析

李子丰, 张永杰, 黄金鑫, 罗志敏

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对湖南省某高速公路岩溶路基工程, 考虑溶洞的空间形态, 将路面荷载与上覆土层作用下岩溶路基顶板分别简化成圆拱与抛物线拱, 采用 ABAQUS 对其稳定性进行分析。计算两种简化分析模型不同矢高对应的溶洞顶板最小安全厚度, 结果显示, 顶板形态为抛物线拱时, 不同矢高对应的溶洞顶板最小安全厚度最大相差 500%, 顶板形态为圆拱时相差 114%, 两种形态溶洞顶板的最小安全厚度差值均随矢高的增大而增大, 并在矢高为跨度的一半时达到最大, 圆拱所需最小安全厚度为抛物线拱的 2.8 倍左右, 溶洞顶板的矢高与形态对顶板安全厚度的影响大。分析溶洞跨度、上覆土层厚度对溶洞顶板最小安全厚度的影响及溶洞跨度、上覆土层厚度、石灰岩抗剪强度参数对溶洞顶板极限承载力的影响, 结果表明, 溶洞顶板所需最小安全厚度随溶洞跨度与上覆土层高度的增大而增大; 顶板厚度一定时, 随着溶洞跨度、上覆土层厚度的增大, 顶板极限承载力降低; 石灰岩抗剪强度参数较小时, 矢高的变化对顶板极限承载力的影响较明显。

**关键词:** 公路; 岩溶路基; 溶洞形态; 安全厚度; 极限承载力

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)03-0066-07

在岩溶地区修建高速公路, 路基处理不当可能产生不均匀沉降或坍塌等工程问题。溶洞具有一定的空间形态, 如何考虑溶洞空间形态合理评价岩溶路基顶板稳定性是确保高速公路工程建设与运营安全的关键。常通过半定量的结构力学分析、有限元分析和室内模型试验研究岩溶区工程的可行性。在结构力学分析方面, 陈明晓采用厚跨比法分析了岩溶覆盖层塌陷的原因<sup>[1]</sup>; 赵明华、柏华军等利用抗冲切理论, 提出了抗剪与抗拉两种破坏模式下溶洞顶板安全厚度计算公式<sup>[2-3]</sup>; 刘之葵等利用格里菲斯强度理论计算岩石地基下伏溶洞的应力状态, 进而评价溶洞的稳定性<sup>[4]</sup>; 张永杰等采用结构力学分析理论, 对考虑溶洞空间形态的岩溶桩基顶板稳定性进行了分析<sup>[5]</sup>。在数值分析方面, 黎斌等利用三维有限单元法和格里菲斯强度理论得到了不同设计荷载对应的单桩与溶洞距离的临界值计算公式<sup>[6]</sup>; 阳军生等采用有限单元法确定了圆形基础下伏溶洞顶板的极限承载力<sup>[7]</sup>; 何忠明等利用有限元软件对岩溶路基的填筑过程进行模拟, 获得了溶洞顶板厚度与极限填筑高度之间的关系<sup>[8]</sup>; 程晔等建立了基桩下伏溶洞顶板稳定性评价的强度折减有限元分析方法<sup>[9]</sup>。在室内模型试验方面, 赵明华、张慧乐、黄明等分别考虑不同溶洞形态, 对荷载作用下岩溶桩基

的破坏模式与影响因素进行了分析<sup>[10-12]</sup>。上述研究促进了岩溶区道路工程建设, 但对考虑溶洞空间形态的岩溶路基顶板稳定性的数值分析尚未开展研究。本文以湖南省某高速公路岩溶路基工程为背景, 考虑溶洞的空间形态, 将路面荷载与上覆土层作用下岩溶路基顶板简化成圆拱与抛物线拱, 采用数值分析方法对其稳定性进行分析。

## 1 工程概况

湖南省某高速公路岩溶路基下伏溶洞高度、宽度、跨度分别为 6.0 m、6.0 m、12.0 m, 溶洞顶部呈曲面状, 矢高约 2.0 m, 顶板最薄处约 2.8 m, 上覆土层厚度与路基填土高度均为 6.0 m, 路面宽 20.0 m, 填方边坡按 1:1.5 放坡。石灰岩的抗压强度为 42 MPa, 抗拉强度为 3.5 MPa。各土层的物理力学参数见表 1。

表 1 岩土材料参数

地层	厚度/ m	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	变形模 量/MPa	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)
填土	6	1 800.0	10.5	10	11
黏土	6	1 800.0	16.0	25	13
石灰岩	2	2 600.6	19 000.0	100	40

## 2 岩溶路基数值模拟

### 2.1 岩溶路基数值模型

利用 ABAQUS 有限元软件对岩溶路基进行数值模拟,模型长 60 m、宽 40 m、高 30 m。根据溶洞空间形态分别建立溶洞顶板不同形态岩溶路基模型。该溶洞处于路堤正下方的地基中,除溶洞顶板分别概化为不同矢高的曲面外,溶洞其他面简化为矩形平面,溶洞跨度为 12 m,高度为 6 m,宽度为 6 m,溶洞拱顶曲面曲线分别为抛物线拱和圆拱,矢高为 1~6 m。两种顶板形态的溶洞模型分别见图 1、图 2。

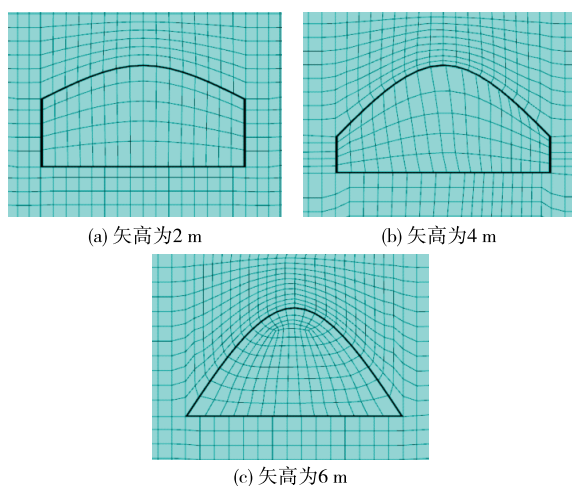


图 1 抛物线拱顶板模型横向剖面图

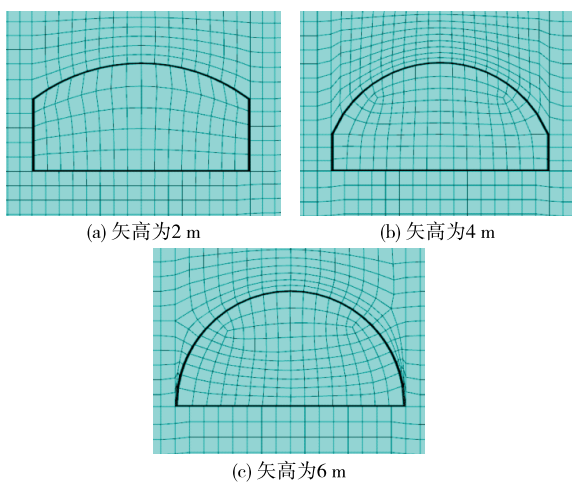


图 2 圆拱顶板模型横向剖面图

岩土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型,模型网格单元采用 C3D8 单元,共划分为 30 384 个单元。模型底部节点设置全固定约束,即  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0$ ;模型四周设置水平方向约束,即  $x=0$ ,  $y=0$ ;顶部为自由边界,不设置约束。模型网格划

分见图 3。

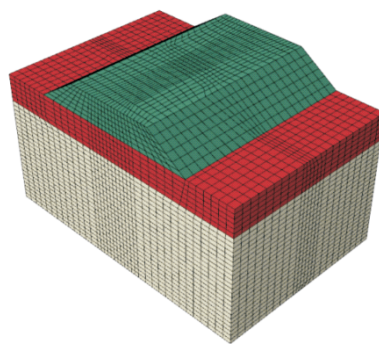


图 3 岩溶路基模型网格图

### 2.2 数值计算结果分析

溶洞顶板厚度 3 m、矢高 1 m 时,溶洞顶板形态为抛物线拱、圆拱时路基横向剖面的最大主应力分别见图 4、图 5。从图 4、图 5 可以看出:溶洞顶板厚度为 3 m、矢高为 1 m 时,抛物线拱与圆拱断面形状相似,压应力主要集中在溶洞顶板上方,顶板的应力状态沿竖直方向从压应力向拉应力转变,拉应力主要集中在溶洞拱顶、底部及靠近溶洞的四周;拉应力在溶洞拱顶上方即顶板的下部达到最大值,溶洞顶板上拉应力由顶板中心点沿着跨度方向向两边逐渐减小,两种顶板模型的拉应力最大值大致相同,且均小于石灰岩的抗拉强度,说明顶板处于安全状态。

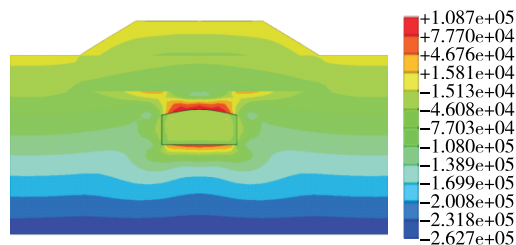


图 4 抛物线拱矢高为 1 m 时路基最大主应力云图(单位:Pa)

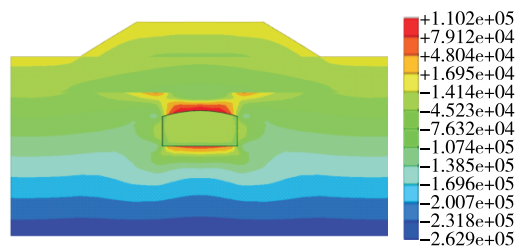


图 5 圆拱矢高为 1 m 时路基最大主应力云图(单位:Pa)

抛物线拱溶洞顶板矢高 2 m 情况下,溶洞顶板高 3.0 m、1.8 m 时岩溶路基纵向剖面的塑性区演变过程分别见图 6、图 7。从图 6、图 7 可以看出:抛物线拱溶洞顶板高 3.0 m、矢高 2 m 时,塑性区首先出

现在溶洞顶板的两侧,随着路基荷载的不断作用,塑性区开始向上发展,等效塑性应变值不断增大,直至路基荷载作用完毕,塑性区不再发展。在荷载作用过程中,塑性区没有扩展至顶板上方与土层接触,说明顶板处于安全稳定状态。抛物线拱溶洞顶板高

1.8 m、矢高 2 m 时,岩溶路基塑性区演变过程与顶板高度为 3 m、矢高 2 m 时类似,路基荷载出现后,溶洞上方开始产生塑性变形,并不断向上发展,延伸至顶板上方,直至与上方土层塑性区贯通,溶洞坍塌导致岩溶路基破坏。

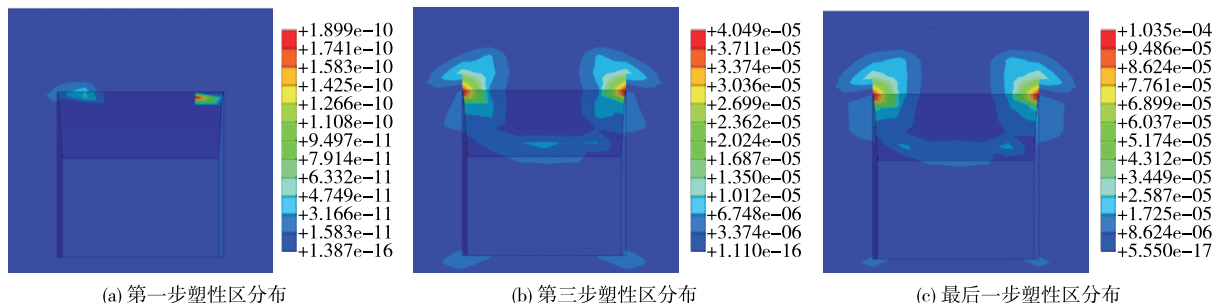


图 6 顶板高度 3.0 m、矢高 2 m 时抛物线拱溶洞岩层塑性区演变过程(单位:Pa)

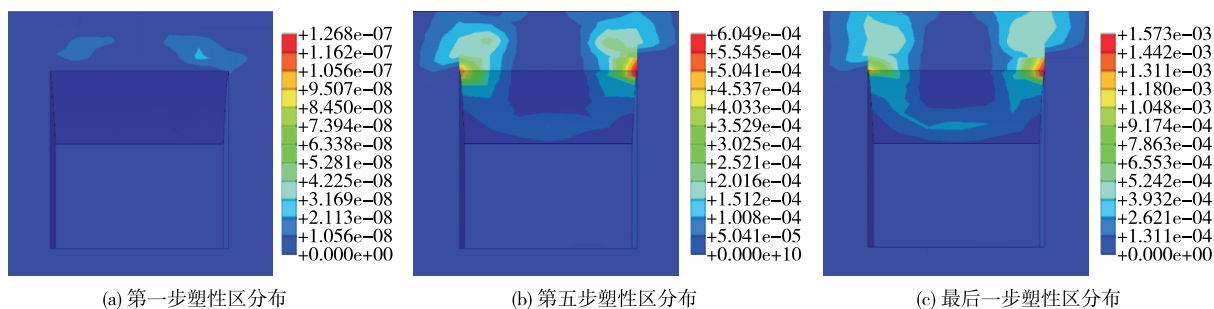


图 7 顶板高度 1.8 m、矢高 2 m 时抛物线拱溶洞岩层塑性区演变过程(单位:Pa)

### 3 顶板安全厚度的确定

#### 3.1 溶洞顶板矢高与形态对顶板安全厚度的影响

根据岩溶区路基塌陷破坏原理,以溶洞顶板与上覆土层塑性区贯通视为岩溶路基破坏的标准,计算不同顶板矢高时岩溶路基顶板最小安全厚度,结果见图 8。

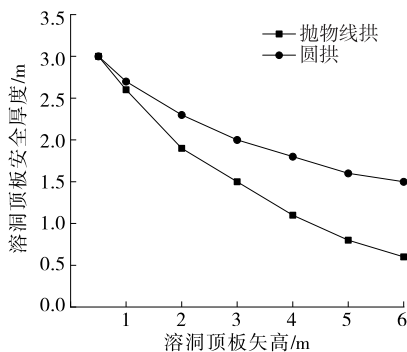


图 8 溶洞顶板安全厚度与矢高的关系

从图 8 可以看出:在其他因素不变的情况下,矢高较小(小于 1)时,顶板形态为圆拱和抛物线拱时顶板断面形状相似,所需顶板最小安全厚度差别不

大;随着矢高的增大,顶板所需安全厚度减小。顶板形态为抛物线拱时,不同矢高对应的顶板最小安全厚度最大相差 500%,顶板形态为圆拱时相差 114%。随着矢高的增大,两种形态顶板的最小安全厚度差值增大,在矢高为 6 m 时达到最大值 0.9 m,圆拱所需最小安全厚度为抛物拱的 2.8 倍左右。顶板的安全厚度受溶洞空间形态的影响明显。

#### 3.2 上覆土层厚度对顶板安全厚度的影响

设上覆土层厚度分别为 6 m、12 m,分析上覆土层厚度对溶洞顶板最小安全厚度的影响,计算结果见图 9。

从图 9 可以看出:顶板形态为抛物线拱时,上覆土层高度 6 m 时矢高—安全厚度曲线的斜率约为  $-0.433$ ,土层高度 12 m 时曲线斜率约为  $-0.431$ ,两种土层高度时顶板安全厚度的变化规律相差不大;顶板形态为圆拱时,土层高度 6 m 时曲线斜率约为  $-0.268$ ,土层高度 12 m 时曲线斜率约为  $-0.306$ 。上覆土层厚度为定值时,在矢高的影响下,抛物线拱顶板最小安全厚度的变化比圆拱顶板更明显。随着顶板上覆土层厚度的增大,两种形态

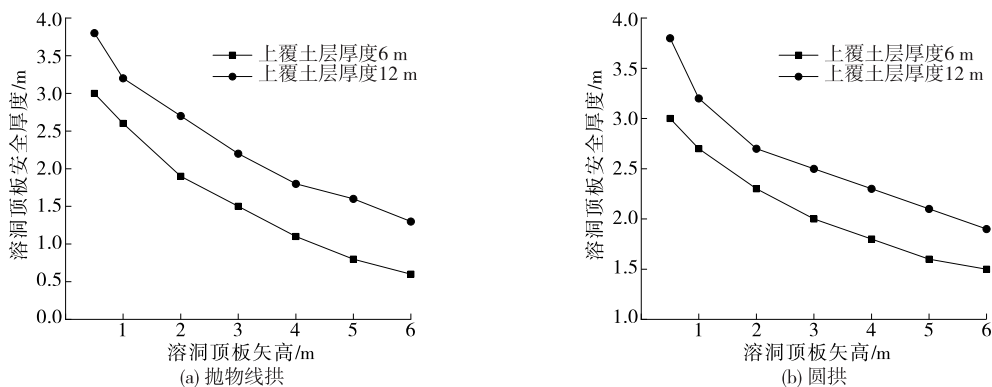


图9 上覆土层厚度对溶洞顶板安全厚度的影响

溶洞顶板所需安全厚度逐渐增大,对于抛物线拱顶板,两种土层厚度所需顶板最小安全厚度的差值随矢高的变化不大,差值为 0.8 m 左右;对于圆拱顶板,矢高为 0.5 m 时,两种土层厚度所需顶板最小安全厚度的差值最大,达 0.8 m,矢高增大时减小至

0.5 m 左右。

### 3.3 溶洞跨度对顶板安全厚度的影响

设溶洞跨度分别为 12 m、16 m、20 m,分析溶洞跨度对溶洞顶板最小安全厚度的影响,计算结果见图 10。

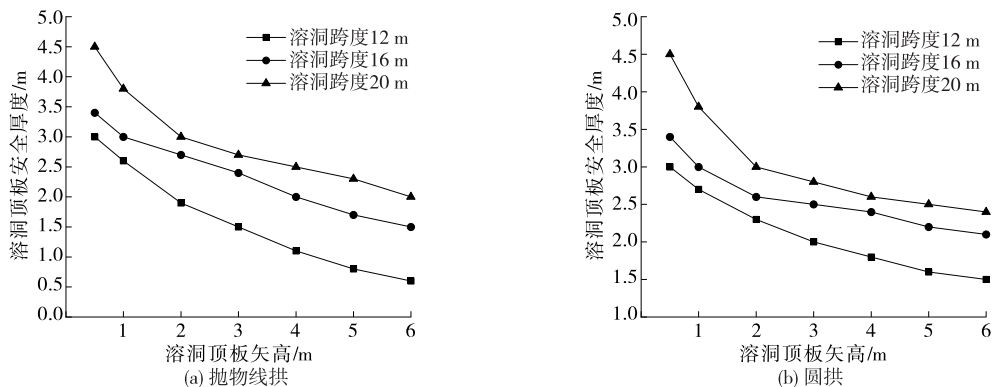


图10 溶洞跨度对溶洞顶板安全厚度的影响

从图 10 可以看出:随着溶洞跨度的增大,两种形态溶洞顶板所需安全厚度增大,变化规律相似。顶板形态为抛物线拱时,矢高从 2 m 增大到 6 m 的过程中,溶洞跨度 12 m 与 16 m 所需安全厚度的平均差值为 0.88 m,溶洞跨度 16 m 与 20 m 所需安全厚度的平均差值为 0.44 m;顶板形态为圆拱时,矢高从 2 m 增大到 6 m 的过程中,溶洞跨度 12 m 与 16 m 所需安全厚度的平均差值为 0.52 m,溶洞跨度 16 m 与 20 m 所需安全厚度的平均差值为 0.3 m。矢高较大(大于 2)的情况下,溶洞跨度较小(12 m)时,溶洞跨度增大对顶板安全厚度的影响较明显;溶洞跨度较大(16 m)时,溶洞跨度增大对顶板安全厚度的影响逐渐减弱。顶板形态为抛物线拱时,溶洞跨度 12 m、16 m、20 m 对应的矢高—安全厚度曲线的斜率分别为-0.33、-0.31、-0.24;顶板形态为圆拱时,曲线斜率分别为-0.20、-0.15、-0.13。溶洞

跨度增大,顶板安全厚度随矢高的变化逐渐减缓。

综上,溶洞的空间形态、上覆土层厚度及溶洞顶板矢高是影响岩溶路基顶板稳定性的关键因素,对岩溶区进行详细的地质勘察,探明溶洞的空间形态及与路基的相对位置关系对道路工程的设计和施工非常重要。

## 4 溶洞顶板极限承载力的单因素分析

以溶洞跨度 12 m,溶洞顶板厚度 3 m,上覆土层厚度 6 m,石灰岩黏聚力 100 kPa,内摩擦角  $40^\circ$  为模型基础参数,按照单一变量原则,通过改变溶洞的跨度、上覆土层厚度与石灰岩的抗剪强度,分析其对溶洞顶板极限承载力的影响。

### 4.1 溶洞跨度对溶洞顶板极限承载力的影响

建立以溶洞跨度为单一变量的 3 个模型,溶洞跨度分别取 8 m、12 m、16 m,控制其他参数不变,



分别计算溶洞顶板为抛物线拱、圆拱时不同矢高下

溶洞顶板的极限承载力,计算结果见图 11。

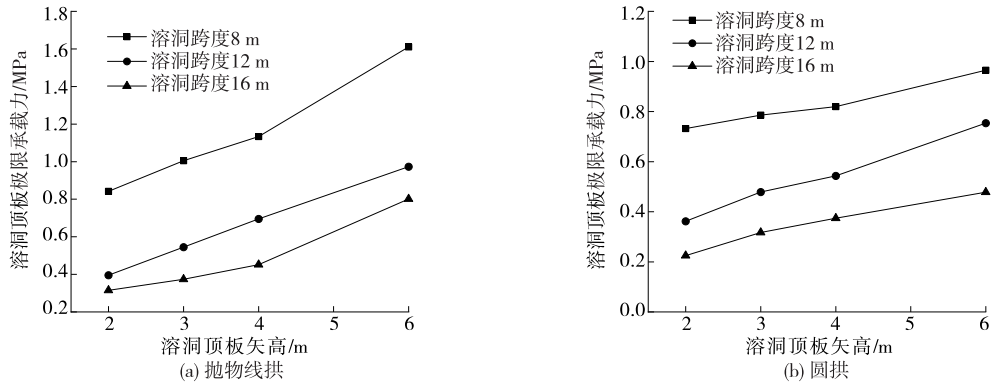


图 11 溶洞跨度对溶洞顶板极限承载力的影响

从图 11 可以看出:1) 溶洞顶板厚度一定时,随着溶洞跨度的增大,两种形态溶洞顶板的极限承载力都逐渐减小。以抛物线拱为例,矢高为 2 m 时,溶洞跨度从 8 m 增大到 16 m,顶板的极限承载力分别减小 446 kPa、81 kPa,跨度从 8 m 增大到 12 m 时极限承载力的下降幅度比跨度从 12 m 增大到 16 m 时的下降幅度大 451%;矢高为 6 m 时,溶洞跨度从 8 m 增大到 16 m,顶板的极限承载力分别减小 638 kPa、172 kPa,跨度从 8 m 增大到 12 m 时极限承载力的下降幅度比跨度从 12 m 增大到 16 m 时的下降幅度大 271%,跨度从 8 m 增大到 12 m 时极限承载力的下降速率较大,从 12 m 增大到 16 m 时下降速率较小。溶洞跨度与溶洞顶板极限承载力之间不是线性关系,溶洞跨度较小时,溶洞顶板极限承载力的下降速率随溶洞跨度变化较大;溶洞跨度较大时,溶洞顶板极限承载力的下降速率随溶洞跨度变化较小。2) 溶洞顶板矢高的变化对顶板极限承载力的影响较明显。以抛物线拱为例,溶洞跨度为 8 m 时,矢高为 2 m 时顶板极限承载力为 0.842 MPa,矢高为 6 m 时顶板极限承载力为 1.611 MPa,增大

91%;溶洞跨度为 12 m 时,矢高为 2 m 时顶板极限承载力为 0.396 MPa,矢高为 6 m 时顶板极限承载力为 0.973 MPa,增大 146%;溶洞跨度为 16 m 时,矢高为 2 m 时顶板极限承载力为 0.315 MPa,矢高为 6 m 时顶板极限承载力为 0.801 MPa,增大 154%。圆拱模型对应的增大幅度分别为 32%、108%、112%。顶板矢高增大,顶板极限承载力增大明显,增大速率随着跨度的增大而增大。

#### 4.2 上覆土层厚度对顶板极限承载力的影响

建立以上覆土层厚度为单一变量的 3 个模型,土层厚度分别取 3 m、6 m、12 m,控制其他参数不变,分别计算溶洞顶板为抛物线拱、圆拱时不同矢高下溶洞顶板的极限承载力,计算结果见图 12。

从图 12 可以看出:溶洞顶板厚度为 3 m 时,上覆土层厚度增大,两种形态溶洞顶板的极限承载力都明显减小;矢高增大,两种溶洞顶板的极限承载力明显增大。土层厚度为 3 m、6 m、12 m 的抛物线拱顶板,矢高从 2 m 增大到 6 m 时极限承载力差值分别为 0.714 MPa、0.577 MPa、0.573 MPa,比矢高为 2 m 时分别增大 142%、145%、162%;土层厚度为

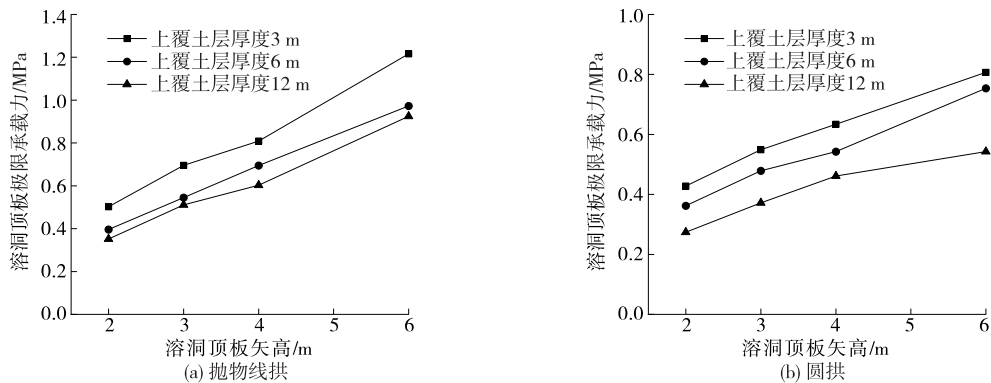


图 12 上覆土层厚度对溶洞顶板极限承载力的影响

3 m、6 m、12 m 的圆拱顶板,矢高从 2 m 增大到 6 m 时极限承载力差值分别为 0.379 MPa、0.392 MPa、0.269 MPa,比矢高为 2 m 时分别增大 88%、108%、98%。上覆土层厚度较小时,对于存在于较薄地层中的溶洞,上覆土层的自质量起控制作用,路基荷载基础上附加应力小于土体自质量,在上覆土层厚度增大的情况下溶洞顶板极限承载力不增反减。

#### 4.3 石灰岩抗剪强度对顶板极限承载力的影响

建立以石灰岩黏聚力为单一变量的 3 个模型,黏聚力分别取 100 kPa、150 kPa、200 kPa,控制其他参数不变,分别计算溶洞顶板为抛物线拱、圆拱时不同矢高下溶洞顶板的极限承载力,分析石灰岩黏聚

力对顶板极限承载力的影响,计算结果见图 13。从图 13 可以看出:顶板厚度一定时,随着石灰岩黏聚力的增大,两种形态溶洞顶板的极限承载力都增大。顶板形态为抛物线拱时,黏聚力为 100 kPa 时,矢高从 2 m 增大到 6 m,顶板极限承载力增大 246%;黏聚力为 150 kPa 时,矢高从 2 m 增大到 6 m,顶板极限承载力增大 193%;黏聚力为 200 kPa 时,矢高从 2 m 增大到 6 m,顶板极限承载力增大 172%。顶板形态为圆拱时,黏聚力为 100 kPa、150 kPa、200 kPa 时,矢高从 2 m 增大到 6 m,顶板极限承载力分别增加 208%、180%、165%。石灰岩黏聚力增大时,矢高的增大对顶板极限承载力的影响逐渐减小。

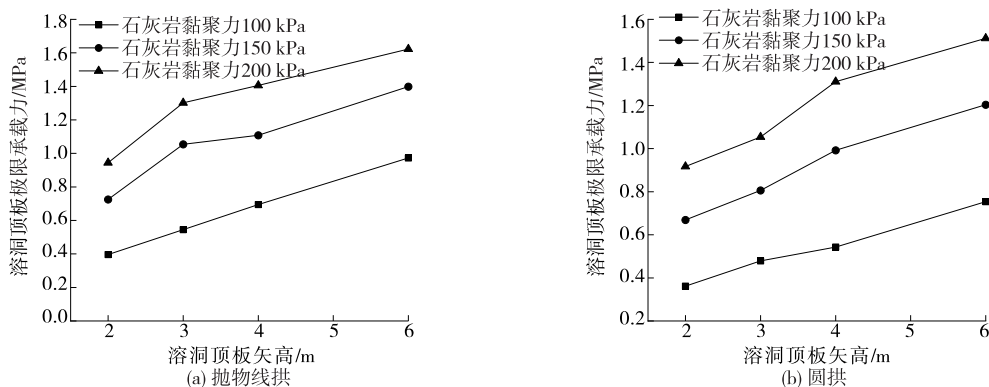


图 13 石灰岩黏聚力对溶洞顶板极限承载力的影响

建立以石灰岩内摩擦角为单一变量的 3 个模型,内摩擦角分别取 35°、40°、45°,控制其他参数不变,分别计算溶洞顶板为抛物线拱、圆拱时不同矢高下溶洞顶板的极限承载力,分析石灰岩内摩擦角对顶板极限承载力的影响,计算结果见图 14。从图 14 可以看出:顶板厚度一定时,随着石灰岩内摩擦角的增大,两种形态溶洞顶板的极限承载力都增大。顶板形态为抛物线拱时,内摩擦角为 35°时,矢高从 2 m 增大到 6 m,顶板极限承载力增大 250%;内摩擦角为 40°

时,矢高从 2 m 增大到 6 m,顶板极限承载力增大 246%;内摩擦角为 45°时,矢高从 2 m 增大到 6 m,顶板极限承载力增大 238%。顶板形态为圆拱时,内摩擦角为 35°、40°、45°时,矢高从 2 m 增大到 6 m,顶板极限承载力分别增大 212%、208%、204%。与黏聚力的影响规律相似,内摩擦角增大时,矢高的变化对顶板极限承载力的影响逐渐减小,相对而言,黏聚力的影响程度较大。在石灰岩抗剪强度参数较低时,矢高是研究顶板稳定性的重要因素之一。

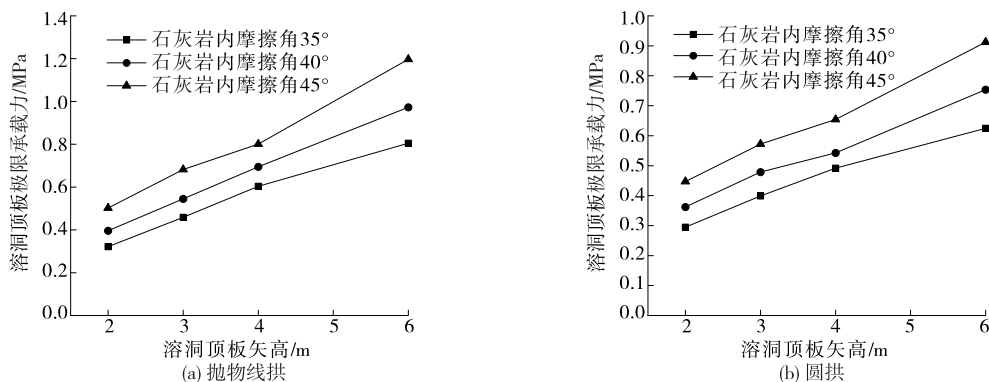


图 14 石灰岩内摩擦角对溶洞顶板极限承载力的影响

## 5 结论

(1) 溶洞顶板的矢高与形态对顶板安全厚度的影响显著。顶板形态为抛物线拱时,不同矢高对应的顶板最小安全厚度最大相差 500%;顶板形态为圆拱时相差 114%。在矢高相同的情况下,两种形态溶洞顶板的最小安全厚度差别巨大,圆拱所需最小安全厚度为抛物线拱的 2.8 倍左右。

(2) 溶洞顶板所需最小安全厚度随溶洞跨度与上覆土层厚度的增大而增大,实际工程中要尽量查明溶洞的空间形态与岩土体的土层参数,使评价结果更切合实际。

(3) 顶板厚度一定时,随着溶洞跨度、上覆土层厚度的增大,溶洞顶板极限承载力不同程度降低;石灰岩抗剪强度参数较低时,矢高的变化对顶板极限承载力的影响较明显。

### 参考文献:

- [1] 陈明晓.岩溶覆盖层塌陷的原因分析及其半定量预测[J].岩石力学与工程学报,2002,21(2):285—289.
- [2] 赵明华,陈昌富,曹文贵,等.嵌岩桩桩端岩层抗冲切安全厚度研究[J].湘潭矿业学院学报,2003,118(4):41—45.
- [3] 柏华军.考虑溶洞顶板自重时桩端持力岩层安全厚度计算方法[J].岩土力学,2016,37(10):2945—2952.

- [4] 刘之葵,梁金城,朱寿增,等.岩溶区含溶洞岩石地基稳定性分析[J].岩土工程学报,2003,25(5):629—633.
- [5] 张永杰,邓俊强,杨兴山,等.考虑溶洞空间形态的岩溶桩基稳定性分析方法[J].中国公路学报,2019,32(1):37—45.
- [6] 黎斌,范秋雁,秦凤荣.岩溶地区溶洞顶板稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):532—536.
- [7] 阳军生,张军,张起森,等.溶洞上方圆形基础地基极限承载力有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):296—301.
- [8] 何忠明,刘森峙,胡庆国,等.基于尖点突变理论的路堤填筑下伏溶洞顶板稳定性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(7):2456—2462.
- [9] 程晔,赵明华,曹文贵.基桩下溶洞顶板稳定性评价的强度折减有限元法[J].岩土工程学报,2005,27(1):38—41.
- [10] 赵明华,唐威力,肖尧,等.考虑厚跨比的基桩下伏溶洞顶板冲切特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(4):1159—1167.
- [11] 张慧乐,张智浩,王述红,等.岩溶区嵌岩桩的试验研究与分析[J].土木工程学报,2013,46(1):92—103.
- [12] 黄明,付俊杰,陈福全,等.桩端溶洞顶板的破坏特征试验与理论计算模型研究[J].工程力学,2018,35(10):172—182.

收稿日期:2022-05-09

\*\*\*\*\*

(上接第 65 页)

- [12] 黄英豪,陈永,朱洵,等.相变材料改良膨胀土冻融性能试验研究及微观机理分析[J].岩土工程学报,2021,43(11):1994—2002.
- [13] 吴燕开,苗盛瑶,李鑫,等.冻融循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究[J].工程地质学报,2021,29(3):851—861.
- [14] 宗佳敏,宋迎俊,鲁洋,等.冻融循环下废旧轮胎颗粒改性膨胀土无侧限抗压强度试验[J].长江科学院院报,2017,34(9):110—114.
- [15] 王东星,张子伟,王协群,等.干湿—冻融循环作用下水泥改性膨胀土的路用性能与微观机制[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):306—316.

- [16] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [17] 朱云长,璩继立,孙飞.氯化钙溶液浸泡下压实水泥改性膨胀土的膨胀特性[J].建筑科学,2019,35(1):51—56.
- [18] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [19] 曾平江.冻融作用下水泥改良盐渍土物理力学性质研究[J].公路与汽运,2020(4):75—78+84.

收稿日期:2022-01-19