

溶洞对异型基坑稳定性影响规律分析

曲伟枫 谢佳 张有铭

中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司, 辽宁 大连 116033

[摘要]在岩溶地区进行基坑开挖时, 溶洞的存在会对基坑稳定性构成显著影响, 异形深基坑建设工程受这种情况的影响更为复杂。为了探究异型深基坑建设过程中溶洞对工程稳定性的影响, 本文依托大连金州金牌教育园项目, 综合运用 Rhino7 与 FLAC3D 工具, 通过模拟异型深基坑开挖过程, 得到了溶洞不同位置、不同大小条件下基坑开挖过程中底部隆起、侧壁倾斜等数据, 并基于此分析得到溶洞属性对异型深基坑开挖稳定性影响规律。研究结果表明, 溶洞处于基坑被动区时, 溶洞-基坑之间的距离 L 与溶洞直径 D 之间的极限比值为 3, 即 $L/D \leq 3$ 时, 在基坑施工前对溶洞进行处理是必要的。溶洞处于基坑过渡区时, 需满足 $L/D > 2$; 溶洞处于基坑主动区时, 需满足 $L/D > 1.5$ 。基于数值分析结果, 充分考虑溶洞的影响程度, 设计了所依托工程异型深基坑施工方案。项目方依据该方案对大连市金州金牌教育园工程的异型深基坑周围若干溶洞进行了填充加固处理, 处理后基坑的侧壁与底部的水平、竖向位移值均得到有效控制, 验证了本文研究结果的有效性。

[关键词]异型深基坑; 溶洞; 数值模拟; 稳定性分析

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15381

中图分类号: TU458.4

文献标识码: A

Analysis of the Influence of Karst Caves on the Stability of Irregular Foundation Pits

QU Weifeng, XIE Jia, ZHANG Youming

China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group 1st Engineering Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116033, China

Abstract: When excavating foundation pits in karst areas, the presence of karst caves can have a significant impact on the stability of the pit, and the construction of irregular deep foundation pits is more complex affected by this situation. In order to explore the impact of karst caves on the stability of irregular deep foundation pit construction, this article relies on the Dalian Jinzhou Gold Medal Education Park project and comprehensively uses Rhino7 and FLAC3D tools to simulate the excavation process of irregular deep foundation pits. Data such as bottom uplift and sidewall inclination during excavation under different positions and sizes of karst caves were obtained, and based on this analysis, the influence of karst cave properties on the stability of irregular deep foundation pit excavation was obtained. The research results indicate that when the karst cave is in the passive zone of the foundation pit, the maximum ratio between the distance L between the karst cave and the foundation pit and the diameter D of the karst cave is 3, that is, when $L/D \leq 3$, it is necessary to treat the karst cave before the construction of the foundation pit. When the karst cave is located in the transition zone of the foundation pit, it needs to meet the requirement of $L/D > 2$; When the karst cave is in the active zone of the foundation pit, it needs to meet $L/D > 1.5$. Based on numerical analysis results and taking into account the degree of influence of karst caves, a construction plan for the irregular deep foundation pit of the supported project was designed. The project team carried out filling and reinforcement treatment on several karst caves around the irregular deep foundation pit of Jinzhou Gold Medal Education Park project in Dalian based on this plan. After treatment, the horizontal and vertical displacement values of the side walls and bottom of the foundation pit were effectively controlled, which verified the effectiveness of the research results in this paper.

Keywords: irregular deep foundation pits; karst caves; numerical simulation; stability analysis

引言

随着我国城市化进程的加速, 城市建设日新月异, 对土地资源的需求也日益增长。然而, 城市中心用地紧张与日益增长的建设需求之间的矛盾日益凸显。因此, 进行地下空间的设计与施工对于提高土地资源利用效率、保障城市建设的顺利进行具有重要意义。对于基坑稳定性的研究, 不仅关乎到施工安全和工程质量, 更直接影响到城市建设和发展的顺利进行。对于基坑稳定性的研究有助于预防基坑坍塌等安全事故的发生, 通过深入分析和研究可以提出有效的管理建议和处理措施, 从而确保基坑施工的安全和稳定。

在岩溶发育密集的区域进行深基坑的开挖工作时, 由于对隐伏的溶洞处置不当, 常常容易触发岩溶溶洞塌陷、支护结构形变等灾害性事件, 严重影响了基坑安全性和施工进度。因此, 对溶洞的妥善处理不仅直接关系到工程建设的进度与成本, 更对保障施工安全具有至关重要的影响。目前国内在岩溶区溶洞对异型深基坑稳定性的影响方面研究较少, 因此对岩溶区溶洞对异型基坑稳定性影响规律进行分析。

很多学者对于基坑稳定性方面做了相关研究。魏艺坚^[1]通过 Midas GTS NX 软件进行了基坑支护体系的仿真、计算和分析, 深入探讨了岩溶区深基坑支护结构的稳定性影

响问题,总结出各种因素对深基坑支护桩稳定性的影响规律;刘锦辉^[2]则运用 Midas GTS NX 有限元分析软件建立了隐蔽双溶洞基坑开挖的数值计算模型,以研究双溶洞对基坑开挖稳定性的影响;姚业健^[3]结合三维有限元数值模拟分析和现场实测数据,深入探讨土洞相对位置对基坑稳定性的影响程度,并比较不同土洞位置对支护桩稳定性的影响变化规律,他发现土洞对过渡区基坑支护桩体的最大位移和地表沉降的影响最为显著,其次为被动区和主动区;堵紫薇采用 MIDAS 软件模拟溶洞对基坑开挖的影响,在考虑基坑半盖挖施工过程的前提下,选择基坑作为研究对象进行溶洞处理前后的数值分析,模拟结果与实测结果的变形规律相符;唐磊采用有限元方法分析不同尺寸与分布特征溶洞条件下岩溶地层基坑的失稳机理,研究溶洞群与基坑稳定性之间的联系,优化设计并确保地层基坑工程的安全施工;郝志强等学者使用三维有限元模型研究了溶洞对地铁车站基坑开挖稳定性的影响,通过模拟不同溶洞位置和尺寸下的开挖,揭示了溶洞因素对基坑及支护稳定性的作用规律。李俊洋则通过探讨岩溶水处理方法、溶洞注浆施工工艺流程,研究了复杂溶洞条件下深基坑工程施工工艺和溶洞处理工艺;李芳宝结合实际工程案例探讨了地铁基坑设计及施工中遇到的溶洞产生的地质灾害,介绍了某基坑溶洞处理措施和具体施工过程,以及对施工过程中基坑稳定性的保障措施。

国外学者对于基坑稳定性方面也做了相关研究。Monika Mitew-Czajewska 研究了深基坑开挖对周边地面和既有结构的影响及位移值,对现有地铁结构垂直位移的现场测量进行了实验数据的描述和分析,提出基坑附近的结构位移取决于它们相对于基坑的位置。Jin Xu 等人提出了一种计算基坑稳定性的创新数值计算方法,基于边坡稳定性分析和土压力计算方程的上限分析,考虑了不同位置的溶洞工况,在预测边坡滑动面范围的同时,可以更准确地计算出所需的最小支撑力的 X Zhang 等人基于岩溶地区基坑工程的稳定性问题,从理论研究、模型检验和数值分析等方面研究了岩溶地区基坑工程的稳定性,探讨了支护形式对岩溶地区基坑工程稳定性分析的影响,总结了岩溶区基坑工程稳定性的主要影响因素。

本文主要针对大连金州金牌教育园项目异型深基坑周围溶洞对其稳定性的影响进行研究。通过建立模型、模拟开挖过程,通过不同监测点提取出的基底隆起、侧壁倾斜位移值变化情况,绘制趋势图分析影响规律,对异型深基坑的稳定性进行了探讨,总结了不同位置、直径溶洞对基坑的影响规律。

2 工程概况

金州金牌教育园总占地面积约 10.9 万 m², 总建筑面积约 9.9 万 m²。基坑总深度 18m, 其中一级基坑深 10m, 二级基坑深 8m, 基坑宽度 40m、长度 82m, 如图 1 所示。主要围护结构采用钢支撑支护体系, 距离地表 10m 内的大

基坑为一级基坑, 10~18m 的局部深基坑为二级基坑。一级基坑设两道钢支撑, 二级基坑设两道钢支撑。该项目工程区域地质松软, 基坑开挖过程中可能造成周围土体坍塌, 扰动地下隐伏溶洞导致溶洞坍塌等风险; 岩溶发育不均匀导致岩溶潜水分布不均匀, 地下水压力变化或水位升高可能造成岩溶区溶洞的扰动与失稳, 对工程建设造成了极大风险; 经综合评价场地为强发育岩溶场地, 可能存在岩溶塌陷的地质灾害问题。因此有必要对岩溶区溶洞进行处理, 保证施工安全、避免事故发生。



图 1 现场基坑情况

3 数值模拟

3.1 数值模拟步骤

利用 Rhino7 软件进行岩土体模型的建立。绘制出模型, 分别在一级基坑左主动区、一级基坑左过渡区、一级基坑被动区、二级基坑左主动区、二级基坑被动区相应位置设置 5 个与基坑边界距离不同的溶洞。用犀牛 7 的网格划分功能进行划分网格后, 使用 griddle 插件进一步细分网格。利用 griddle 插件将文件导出至 FLAC^{3D}。在 FLAC^{3D} 软件中设置基坑侧壁及底部的监测点, 输入命令流模拟基坑开挖过程, 然后导出监测点监测到的侧壁倾斜与基底隆起位移变化值并提取出 3 个区域侧壁倾斜与基底隆起位移值的最大值, 绘图观察规律。流程图如图 2 所示。

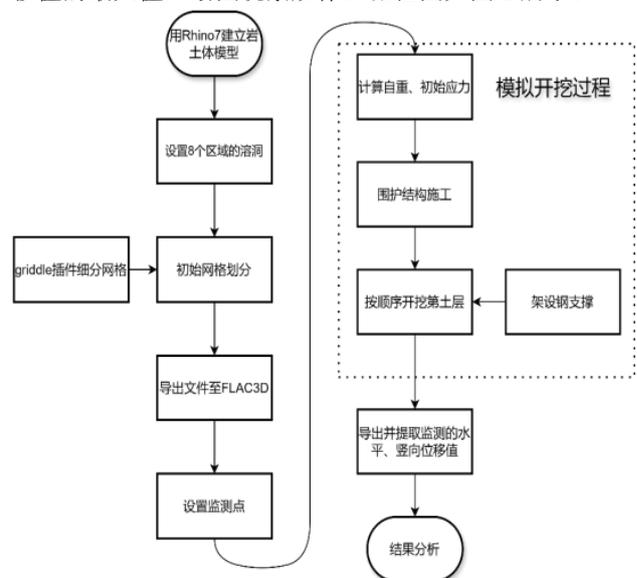


图 2 模拟流程

3.2 模拟方案

基坑模型长度 81m，宽度 40m，深度 18m。岩土体模型两侧取 3 倍基坑宽度，高度取 3 倍基坑深度，整个模型的长度为 190m，宽度为 120m，高度为 54m，如图 3 所示。

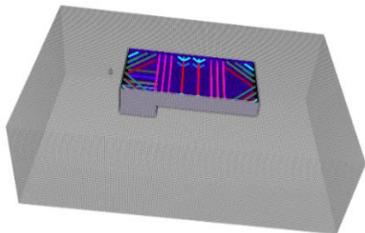


图 3 岩土体模型示意图

溶洞的存在对基坑的稳定性有着显著的影响，考虑在基坑开挖时在其被动区、主动区、过渡区三个可能区域的溶洞，这些区域的划分基于基坑开挖过程中土体应力状态的变化，不同区域的溶洞对基坑稳定性的影响机制可能有所不同。为研究这些影响，将溶洞简化为圆形且内部无填充，溶洞直径设为 $D=2、3、4\text{m}$ ，溶洞与基坑侧壁或基坑底的距离为 $L=3\text{m}、6\text{m}、9\text{m}、12\text{m}、15\text{m}$ ，溶洞位置如图 4 所示。

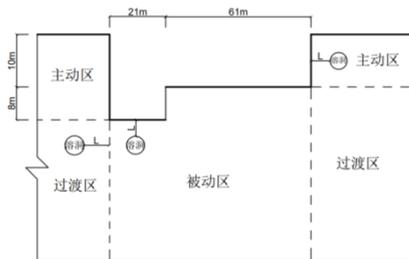


图 4 溶洞位置示意图

3.3 模拟结果分析

溶洞处于一级基坑左主动区时，由图 5 和图 6 可知，溶洞在保持溶洞与基坑底部间距恒定的条件下，溶洞直径与基底隆起位移值之间呈现出正相关关系，随着溶洞直径的增大，基底隆起位移值也相应增大。当溶洞直径保持不变时，随着溶洞与基坑底部间距的增大，基底隆起位移值逐渐减小。直径为 2m 的溶洞，间距增加对位移影响不大，趋近于无溶洞状态。

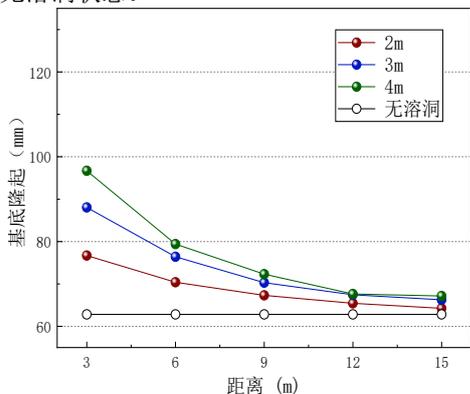


图 5 基底隆起位移变化规律

相同间距时，溶洞与基坑侧壁距离不超过 6m 时，溶洞直径越大侧壁倾斜位移值越小，溶洞与基坑侧壁距离大于 6m 时，溶洞直径越大侧壁倾斜位移值越大；相同溶洞直径时，溶洞与基坑侧壁距离越大侧壁倾斜位移值越大。溶洞直径为 2m 时，随着溶洞与基坑侧壁的距离增加，侧壁倾斜的位移值变化不明显。溶洞直径为 3m、4m 时，随着溶洞与基坑侧壁的距离增加，侧壁倾斜的位移值不断增加，最后趋于稳定。其中溶洞与基坑侧壁距离 6m 之前位移值变化明显，6m 之后侧壁倾斜位移值变化逐渐变缓。

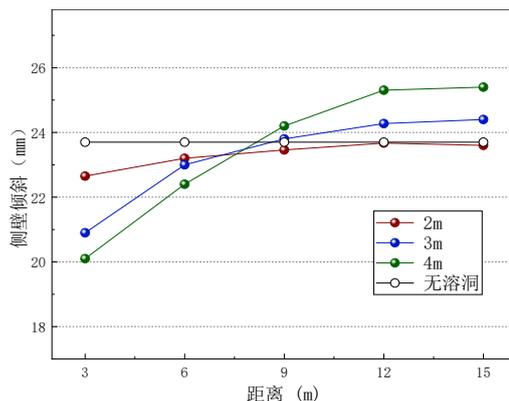


图 6 侧壁倾斜移变化规律

溶洞处于一级基坑被动区时，由图 7 和图 8 可知，溶洞与基坑底部之间的距离相同时，溶洞直径越大，基底隆起位移值越大；直径一定时，溶洞与基坑底部之间的距离越大基底隆起位移量越小。溶洞直径为 2m 时，随着溶洞与基坑底部距离的增加，基底隆起位移值变化不明显并接近无溶洞时的基底隆起位移值。溶洞直径为 3m、4m 时规律同上，其中分别在 9m、12m 之前基底隆起位移值变化明显，分别在 9m、12m 之后随着距离增加变化逐渐放缓，最后趋近于无溶洞时的基底隆起位移值。

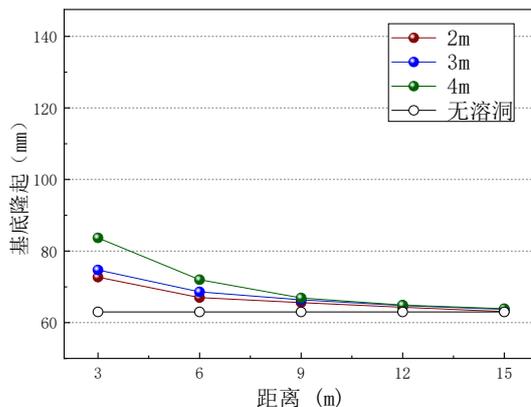


图 7 基底隆起位移变化规律

溶洞与基坑底部距离一定的情况下，溶洞直径越大侧壁最大水平位移值越大。溶洞直径为 2m 时，随着溶洞与基坑底部距离的增加，水平位移变化不明显，接近无溶洞

时的侧壁倾斜位移值。当溶洞直径为 3m、4m 时，随着溶洞与基坑底部距离的增加，侧壁水平位移变化明显且没有特定规律，溶洞与基坑底部间距 9m 之后基坑侧壁水平位移大致趋于稳定。

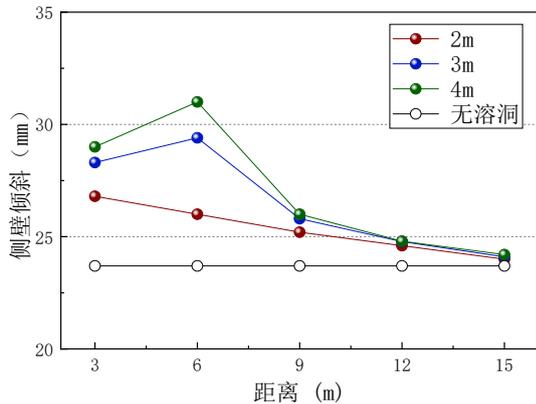


图 8 侧壁倾斜移变化规律

溶洞处于一级基坑左过渡区时，由图 9 和图 10 可知，溶洞与基坑距离不变时，随着溶洞直径的增大，基底隆起的位移值逐渐增加；溶洞直径一定时，溶洞与基坑间的距离越大，基底隆起位移值越小。溶洞直径为 2m、3m 时，随着溶洞与基坑的距离增加，基底隆起的位移值不断减小，最后趋于稳定并接近无溶洞时的基底隆起位移值。溶洞与基坑侧壁距离从 6m 开始基底隆起位移值变化缓慢，最后接近无溶洞时基坑底部隆起的位移值。溶洞直径为 4m 时规律大致同上，不同的是溶洞与基坑侧壁距离 9m 之前位移值变化明显，9m 之后基底隆起位移值变化缓慢，最后趋近于无溶洞时基坑底部隆起的位移值。

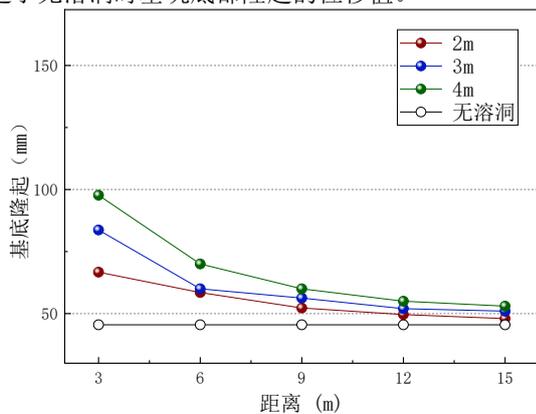


图 9 基底隆起位移变化规律

溶洞与基坑间距相同时，溶洞直径越大侧壁倾斜位移值越大；相同溶洞直径时，溶洞与基坑侧壁距离越大侧壁倾斜位移值越小。溶洞直径为 2m 时，随着溶洞与基坑侧壁的距离增加，侧壁倾斜的位移值变化不明显。溶洞直径为 3m、4m 时，水平位移值较无溶洞时基坑侧壁水平位移值明显。随着溶洞与基坑侧壁的距离增加，侧壁倾斜的位移值不断减小，最后趋于稳定。其中溶洞与基坑侧

壁分别距离 6m、9m 之前位移值变化明显，6m、9m 之后侧壁倾斜位移值变化逐渐变缓，最后接近无溶洞的侧壁倾斜位移量。

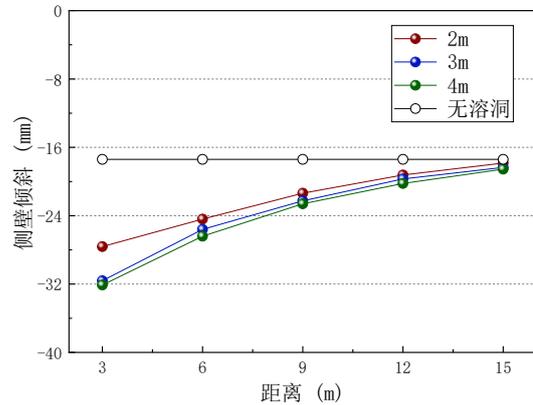


图 10 侧壁倾斜移变化规律

溶洞处于二级基坑左主动区时，由图 11 和图 12 可知保持间距不变，溶洞直径增加会导致基底隆起位移值增大。溶洞直径固定时，其与基坑侧壁的距离与基底隆起位移值呈负相关，即距离越远，位移值越小。对于直径为 2m 的溶洞，远离溶洞后，基底隆起位移值逐渐减小并趋于稳定，接近无溶洞状态。从 3m 距离起，位移值变化缓慢。对于直径 3m 和 4m 的溶洞，规律相似，但当溶洞与基坑侧壁距离小于 6m 时，位移值变化明显，超过 6m 后变化减缓，最终接近无溶洞时的位移值。这表明较大直径溶洞的影响范围更广。

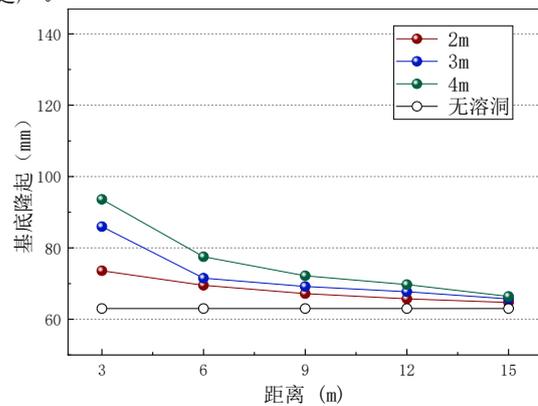
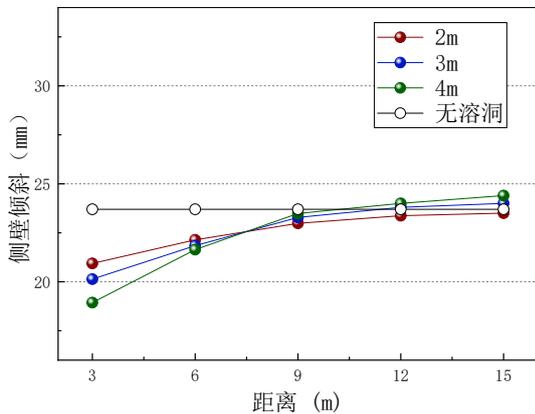
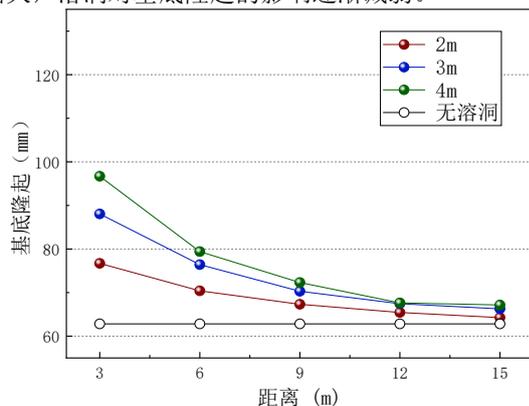


图 11 基底隆起位移变化规律

当溶洞与基坑底部的距离固定时，溶洞直径越大，基坑侧壁的最大水平位移值也越大。对于直径为 2m 的溶洞，其与基坑底部的距离对侧壁的水平位移影响不大，侧壁稳定性几乎不受影响。然而，当溶洞直径增加到 3m 和 4m 时，这种距离对侧壁水平位移的影响变得更加明显，且没有固定规律，受多种因素影响，使得预测和控制位移变得更加困难。不过，当溶洞与基坑底部的距离超过 9m 后，侧壁的水平位移将趋于稳定，表明溶洞的影响会随着距离的增加而减弱。

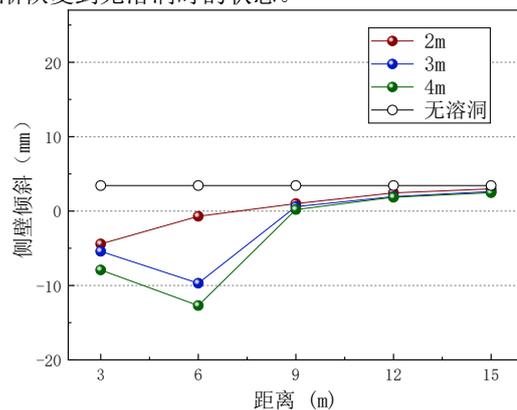

图 12 侧壁倾斜移变化规律

溶洞处于二级基坑被动区时，如图 13 和图 14 所示。在保持溶洞与基坑底部间距恒定的条件下，随着溶洞直径的增大，基底隆起位移值也相应增大。当溶洞直径保持不变时，随着溶洞与基坑底部间距的增大，基底隆起位移值逐渐减小。当溶洞直径为 2m 时，随着两者间距的增加，基底隆起位移值的变化并不显著，并逐渐接近无溶洞时的基底隆起位移值。对于溶洞直径为 3m 和 4m 的情况，可以观察到与溶洞直径为 2m 时类似的规律。然而在溶洞与基坑底部间距分别为 9m 和 12m 之前，基底隆起位移值的变化相对明显。当间距超过这些临界值后，基底隆起位移值的变化趋势明显放缓，并逐渐趋近于无溶洞时的基底隆起位移值。这一发现进一步证实了随着溶洞与基坑底部间距的增大，溶洞对基底隆起的影响逐渐减弱。


图 13 基底隆起位移变化规律

在溶洞与基坑底部距离保持不变的情况下，随着溶洞直径的增大，侧壁所承受的水平应力逐渐增强，导致侧壁最大水平位移值相应增大。当溶洞直径为 2m 时，观察到随着溶洞与基坑底部距离的增加，侧壁水平位移的变化并不显著。这一结果说明，在较小直径的溶洞中，溶洞与基坑底部间距对侧壁水平位移的影响相对较小，侧壁稳定性受溶洞位置变化的影响不明显。在这种情况下，侧壁水平位移值接近无溶洞时的状态，表明溶洞对侧壁的影响可以

忽略不计。当溶洞直径增大至 3m 和 4m 时，随着溶洞与基坑底部距离的增加，侧壁水平位移变化明显且没有呈现出特定的规律。这表明，在较大直径的溶洞中，溶洞与基坑底部间距对侧壁水平位移的影响更为显著，且这种影响关系可能受到多种因素的共同作用，如地质条件、基坑形状等。因此，在这种情况下，预测和控制侧壁水平位移变得更加困难。当溶洞与基坑底部间距超过 9m 后，基坑侧壁水平位移大致趋于稳定。这一发现表明，在超过一定距离后，溶洞对基坑侧壁水平位移的影响逐渐减弱，侧壁稳定性逐渐恢复到无溶洞时的状态。


图 14 侧壁倾斜移变化规律

4 结论

针对大连金州金牌教育园项目异型深基坑周围溶洞对其稳定性的影响进行研究，总结了溶洞的处理范围及原则，根据工程实例探究了填充处理溶洞对保证基坑稳定性的效果，得出了如下结论：

(1) 溶洞在基坑被动区时对基坑稳定性的影响最大，在过渡区与主动区时对基坑的影响依次减小。

(2) 溶洞在基坑被动区：当 $L/D \leq 3$ 时，需要对溶洞进行处理；当 $L/D > 3$ 时，溶洞可以不处理。溶洞在基坑过渡区：当 $L/D \leq 2$ 时，需要对溶洞进行处理；当 $L/D > 2$ 时，溶洞可以不处理。溶洞在基坑主动区：当 $L/D \leq 1.5$ 时，需要对溶洞进行处理；当 $L/D > 1.5$ 时，溶洞可以不处理。由于实际地质情况的复杂程度不同，还需要根据土质、岩溶水等情况进一步计算处理。

[参考文献]

- [1] 魏艺坚. 岩溶区深基坑支护方法及稳定性分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [2] 刘锦辉. 中风化灰岩隐伏溶洞深长基坑开挖稳定性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [3] 姚业健. 岩溶地区土洞对基坑稳定性影响研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.

作者简介：曲伟枫（1992—），男，工程师，主要从事山区高速公路建设施工技术方面的研究。