

黄云龙, 高斌, 周行, 等. 溶洞发育地层板式基础变形数值模拟及安全距离控制研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 147-158.

DOI: 10.11932/karst20250110

溶洞发育地层板式基础变形数值模拟 及安全距离控制研究

黄云龙¹, 高斌², 周行¹, 余喆¹, 何文²

(1. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司, 浙江 衢州 324000;

2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 溶洞发育地层对电力铁塔板式基础的安全性存在很大威胁。采用有限元软件, 模拟了剪切发展和荷载位移曲线, 揭示不同荷载组合、不同溶洞位置和不同溶洞大小下板式基础的变形机理和承载性能。选择最不利工况并结合实际工程, 分析溶洞尺寸、溶洞距离板式基础的水平和竖向距离对板式基础变形机制的影响。采用正常使用极限指标地基倾斜限制值为判据, 划定了溶洞发育地层板式基础破坏范围, 为板式基础在岩溶地层选址提供依据。该方法可为类似岩溶地层电力铁塔板式基础的选址以及溶洞的处置具有一定参考价值。

关键词: 溶洞; 地基基础; 倾斜; 数值模拟; 破坏机理

创新点: 采用有限元软件, 模拟剪切带发展和荷载位移曲线, 划定溶洞发育地层板式基础破坏范围, 为板式基础在岩溶地层选址提供依据。

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2025) 01-0147-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国岩溶地区分布广泛, 溶洞是岩溶地区常见的一种岩溶形态^[1-5]。溶洞在外部荷载的作用下极易发生坍塌, 造成地面构筑的损坏。随着我国经济的发展和乡村振兴的需要, 输电线路等基础设施不得不经岩溶发育地区。基础在溶洞发育地层的安全性是整个基础设施建设的中中之重。

岩溶地区地基具有复杂多变的特点, 目前能够直接应用于岩溶地区输电塔基建设的研究成果相对较少。在一般建筑物地基的建造中主要参照现行的GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》。然而却

无法直接应用于输电塔基础。因为输电塔基础有其自身的特点, 不管是常见基础形式还是其受力和变形机制都与一般的建筑物显著不同。而电力行业的技术规范DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规程》虽然对电力铁塔基础的型式和受力特点有所涉及, 但是却没有对岩溶地区输电塔基础的设计做出明确规定。因此, 亟需开展岩溶地区输电塔基的相关研究^[3, 6-11]。

目前, 关于岩溶地质^[12-14]、岩溶发育机理^[15-17]、岩溶塌陷机制^[18-19]等已经开展了许多研究并取得了一定的成果。在此基础上, 又陆续开展了岩溶地区溶洞对于上部构筑物的影响研究^[20-23]。然而, 许多研究

资助项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目 (5211QZ2000U6)

第一作者简介: 黄云龙(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事岩溶工程地质方面的科研工作。E-mail: 2522361210@qq.com。

通信作者: 高斌(1992—), 男, 博士, 主要从事岩溶工程地质与地质灾害防治科研工作。E-mail: gaobinsd@sjtu.edu.cn。

收稿日期: 2023-06-20

集中在溶洞地基稳定性的分析上,常把地基的失稳作为整个结构物破坏而失效的依据。输电塔架作为一种高耸结构,一般以倾斜度作为其失效的判断依据,《架空输电线路基础设计技术规程》将地基倾斜限制在 5‰ 作为塔基失效的判断标准。地基失稳时,输电塔地基的变形或许早已经超过它的限制的倾斜标准。

理论分析方法,如顶板厚跨比法、梁板抗剪强度估计安全厚度法、散体理论估计法和经验公式法等,在复杂的岩溶问题上显示出局限性,而数值计算方法却能形象地解决这一问题。郑金杯等^[10]利用数值模拟手段研究了塌陷区输电塔的稳定;刘自强等^[24]采用 ABAQUS 有限元数值模拟分析,研究了外荷载下节理裂隙对岩溶地基的影响,并且评价了岩溶地基稳定性。邓艺聪^[25]分别对岩溶场地上单桩、群桩和整体结构模型进行有限元分析,提出了一种检验高层建筑桩筏基础桩底串珠状溶洞顶板安全性方法。曾勇等^[26]以某桥梁工程为背景,建立了桩基-溶洞三维模型,分析不同荷载下桩侧溶洞关键尺寸对桥梁桩基桩顶位移和桩端反力的影响。但是对于输电塔基础^[27-30]这一特殊基础的研究还不足。

溶洞的存在增加了双大板基础变形的复杂性,其破坏模式和变形机制尚未清晰,在工程实践中没有针对性的防治措施^[31-32]。因此,采用 PLAXIS 2D 有限元软件建立溶洞发育地层电力铁塔板式基础数值模型,研究板式基础在不同荷载和溶洞位置情况下的破坏机理和承载性能,并以实际工程为研究背景,分析溶洞的相对位置、溶洞大小与埋深等关键因素对输电塔基础的变形影响规律。基于此,划定溶洞发育地层输电塔基施工安全区域。该方法可为类似岩溶地层中输电工程选线、板式基础的设计以及溶洞的处置提供参考。

1 数值模型

1.1 模型建立的基本假设

(1) 溶洞假设为空溶洞,忽略构造应力,并简化为圆形,发育位置为典型位置。

(2) 土体和岩体均采用摩尔库伦准则。地下水位位于溶洞以下,不对工程构成影响。

(3) 板式基础常常成对出现,将上部结构传下来

的荷载直接作用于基础之上,故不对上部结构进行建模。

1.2 板式基础数值模型

图 1 为板式基础的示意图,板式基础常见的尺寸如下: L_1 为 2.7 m, L_2 为 0.65 m, L_3 为 0.25 m, L 为 3.9 m, S 为 1.2 m, B 为 5.4 m。

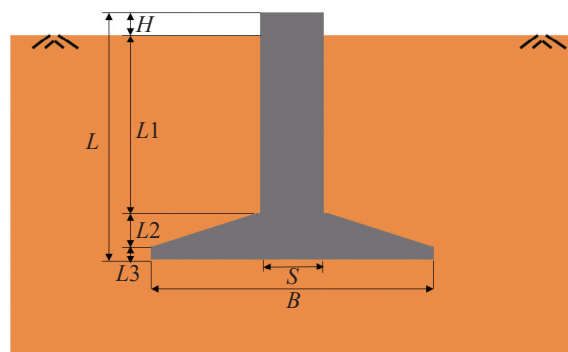


图 1 板式基础

Fig. 1 Slab foundation

采用有限元软件 PLAXIS 建立模型(图 2),两个基础中心之间的距离为 7.36 m,距离边界 35.1 m,约为基础宽度的 7 倍,以消除边界距离的影响。模型两边约束水平位移,底部采用固定边界,模型顶部采用自由边界。板式基础上荷载情况为同时受压或者一边受拉一边受压。溶洞分为三个位置即位于两板基础中间,位于右侧板底部,位于右侧板右下方。

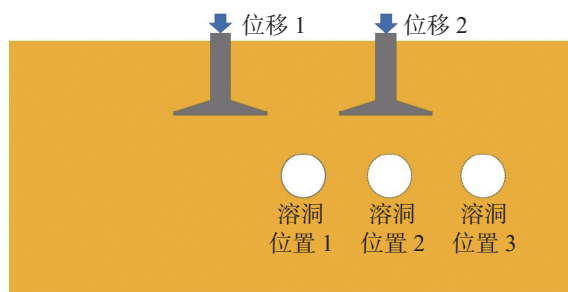


图 2 板式基础溶洞发育地层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the development strata of karst caves for slab foundations

整个模型的建模过程如图所示,第一步,进行地应力场的自重应力平衡;第二步,模拟溶洞的形成后的应力场;第三步,模拟基础施工后形成的应力场;第四步,外部荷载的施加。每个过程形成的应力场如图 3。灰岩均采用摩尔-库伦模型,混凝土采用线弹性模型,模型参数如表 1。采用三角形网格划分,并在基础和溶洞附近进行了加密。

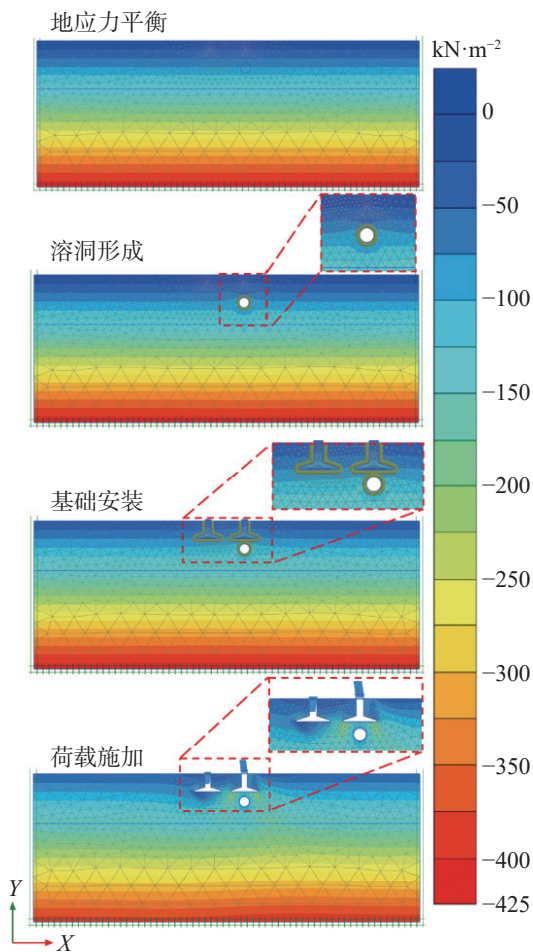


图 3 建模流程
Fig. 3 Modeling process

表 1 岩溶地层板式基础材料参数

材料	容重 /kN·m ⁻³	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /°	压缩模量 /MPa	泊松比
石灰岩	22	1 500	40	1 300	0.35
混凝土	25	\	\	30 000	0.2

2 溶洞地层的板式基础破坏机理及承载特性

板式基础溶洞地层破坏机理主要是受溶洞位置和两侧不同拉压荷载的影响,发展出不同的剪切带,使板式基础出现不同的破坏模式和不同的承载特性。

图 4 显示了板式基础在无溶洞地层的剪应变分布。当两基础同时受到压荷载时,剪切变形主要发生在两基础的两侧,成圆弧条带分布。两基础中间未发生较大的剪切变形。当施加荷载为一侧基础受拉,一侧基础受压时,剪切机制较为复杂,多条剪切带出现,除了两基础两侧出现剪切带之外,剪切带集

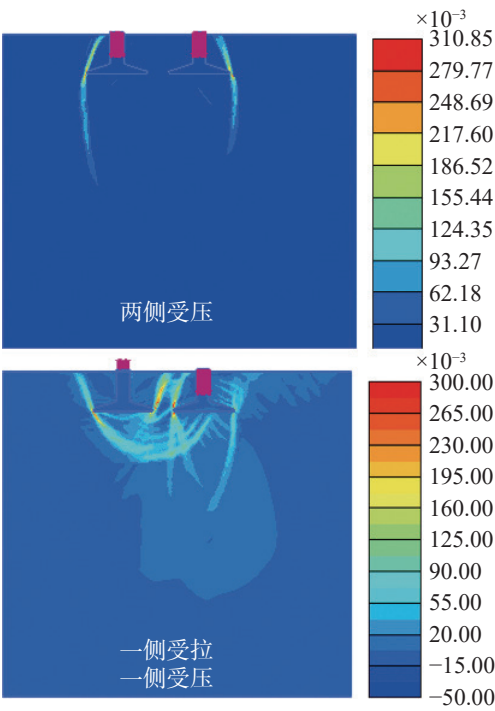


图 4 板式基础无溶洞剪应变分布
Fig. 4 Shear strain distribution of slab foundations with no presence of karst caves

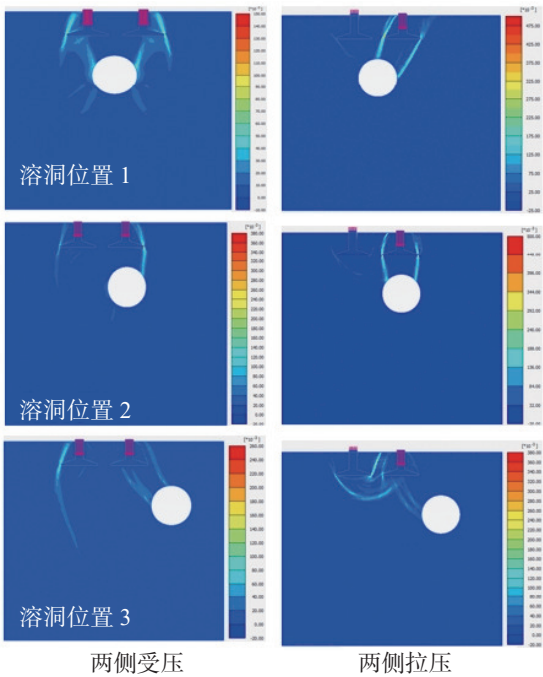


图 5 板式基础溶洞地层剪应变分布
Fig. 5 Shear strain distribution in the development strata of karst caves for slab foundations

中在两基础之间。
图 5 显示了板式基础在溶洞地层的剪应变分布。从图中可以看出,相比于图 4 无溶洞的情况,剪切破

坏的发展受到溶洞的影响较为明显。无论是压压组合还是拉压组合,剪切应变都会从距离溶洞近的受压侧基础向溶洞贯通,溶洞和基础之间形成弧形剪切带。溶洞位置相同时,压压组合和拉压组合剪切带形成的机制是不同的,受压侧的剪切带会比受拉侧发展的更深,受拉侧形成的剪切带多发生在受拉基础的下方浅部。因此相比压压组合形成向纵深发展的剪切带,拉压组合会产生数条相互交叉的剪切带。当荷载形式相同时,溶洞位置的不同也会对板基础的变形机制产生重要影响。对称荷载条件和几何会产生对称的剪应变分布。而溶洞位置在向右移动时,剪切带也会随着移动向溶洞延伸。在溶洞和距离它较近的受压侧基础之间容易产生大的剪切带。

图6和图7分别展示了溶洞地层中两基础受压组合下的荷载-位移曲线。随着荷载的增大,基础的沉降不断增加。不管是受压组合还是拉压组合,溶

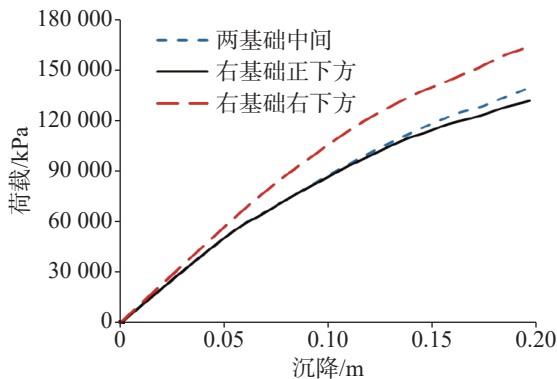


图6 溶洞位置不同两基础受压组合

Fig. 6 Compressed combination of two foundation based on different karst cave locations

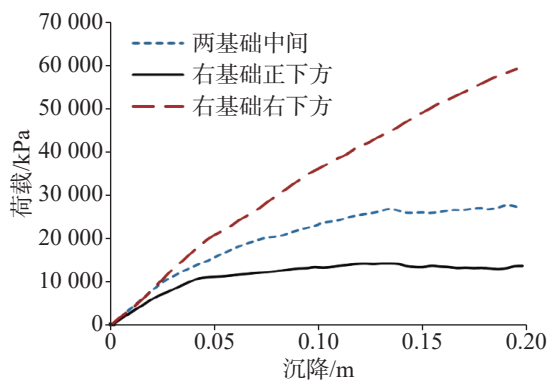


图7 溶洞位置不同两基础拉压组合

Fig. 7 Tension-compression combination of two foundations based on different karst cave locations

洞位于右基础正下方时承载力最小,溶洞位于右基础右下方时承载力最大。拉压组合下溶洞位置对基础承载力的影响较大。溶洞地层两基础受压组合相比拉压组合,溶洞位置对承载力的影响较小。根据基础承载力的大小,将拉压组合下溶洞位于受压侧基础的正下方确定为最不利工况。

图8显示了不同 D/B 下剪应变的分布,其中 D 为溶洞直径, B 为板的宽度。从图中可以看出,不同的 D/B 下剪切应变的发展机制是不同的。在 $D/B=1.11$ 和 0.74 时,剪切带主要沿着基础的外侧成弧形向溶洞发展,且溶洞下方无明显剪切带。在 $D/B=0.37$ 和 0.19 时,溶洞直径和板基础宽度比减小,剪切带除了沿着基础的外侧成弧形外还会在溶洞附近形成“X”状分布。为进一步阐述不同 D/B 下板基础的承载规律,将不同 D/B 下的荷载-位移曲线绘制于图9中。一般来说浅基础位移达到其宽

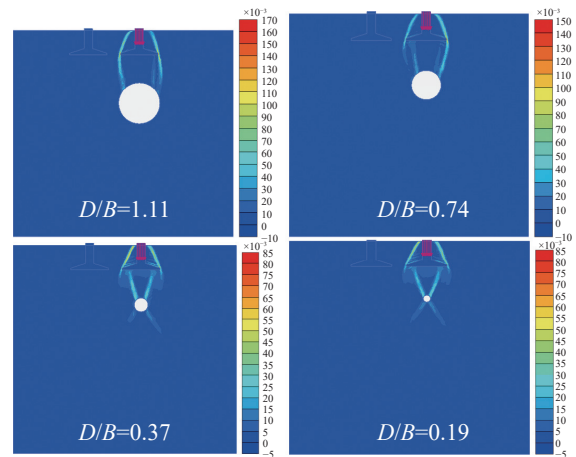


图8 不同 D/B 下剪应变分布图

Fig. 8 Distribution of shear strain under different ratios of diameter to width

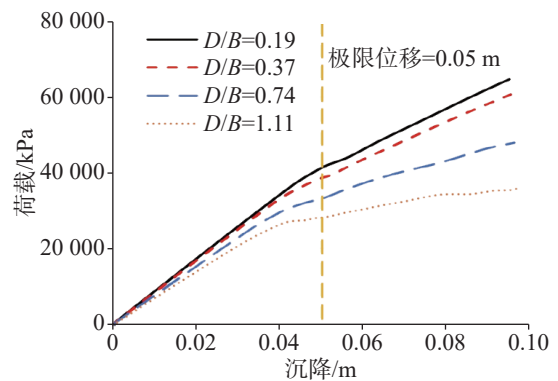


图9 不同 D/B 下荷载位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves under different ratios of diameter to width

度的1%时,被视为破坏。因此取0.056 m的沉降处为基础承载力。可以看出,随着D/B的增大,承载力逐渐减小,故使板的宽度尽可能大于溶洞直径。

3 不利工况下溶洞对基础变形破坏特征影响

3.1 溶洞距基础底部距离的影响

当溶洞位于基础受压侧的正下方时,整个基础处于最不利的状态。图10显示了溶洞半径 $R=1.5$ m,溶洞距离基础中心的水平距离 $L=0$ m下,溶洞中心距离基础底部距离 H 对基础位移的影响,可以看出,随着溶洞距离基础底部距离的增大,整个基础的位移逐步减少。溶洞距离基础底部超过8 m以后,对于基础的影响就明显减少了。原因是此时溶洞已经进入到了石灰岩地层中,而灰岩相较于上部的黏土地层具有更大的强度。而当溶洞发育在黏土层中会对基础位移产生较大的影响。

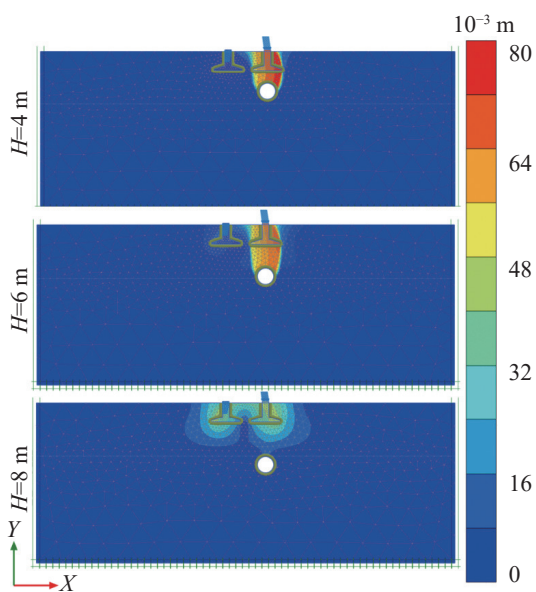


图10 溶洞距基础底部距离的影响

Fig. 10 Influence of distance from the cave to the bottom of the foundation

图11显示了 $R=1.5$ m, $L=0$ m下溶洞距基础底部距离变化时整个塑性区的发展情况。可以看出, $H=4$ m和6 m时,基础附近发生了较大范围的塑性区,而且塑性区多发生于两个基础之间以及受压基础一侧。塑性区一直向下发展,直到贯通溶洞。此时,整个基础偏于危险。 $H=8$ m时,塑性区的发育范围较小,只有在容易发生应力集中的区域发生了塑

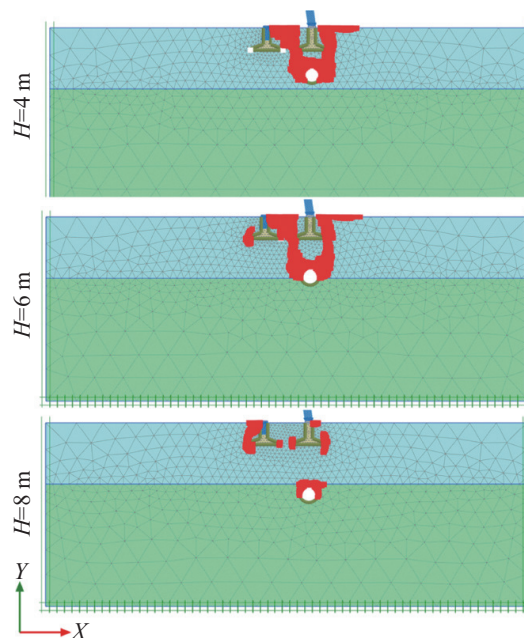


图11 不利工况下溶洞距基础底部距离变化塑性区发展

Fig. 11 Development of plastic zone with change in distance from the cave to the bottom of the foundation under adverse conditions

性变形。整个基础和塔架还是偏于安全的。

3.2 溶洞半径的影响

溶洞的大小直接决定整个基础的安全性,因此溶洞半径大小对于基础的影响十分重要。从图12中可以看出,随着溶洞半径从0.5 m到1.5 m,整个基

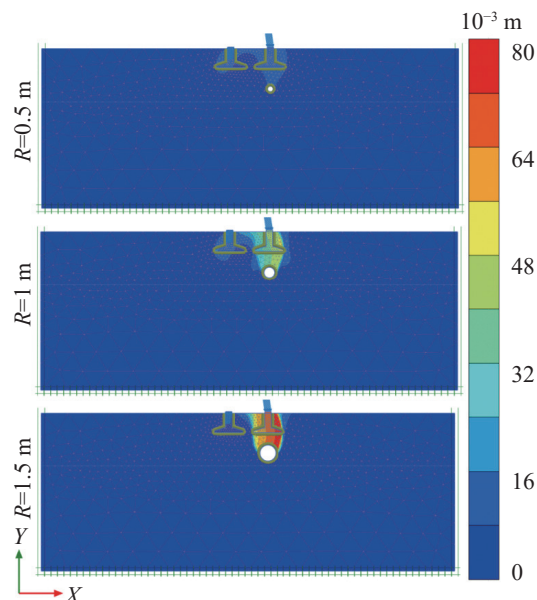


图12 不利工况下溶洞半径对基础位移的影响

Fig. 12 Influence of cave radius on foundation displacement under adverse conditions

础,尤其受压侧的位移存在着明显增大的过程。大的位移基本发生在受压侧基础和溶洞之间并向着溶洞发展。当溶洞半径过大时,可能就会发生较大位移而使基础失效破坏。

图 13 显示了 $H=4\text{ m}$, $L=0\text{ m}$ 下溶洞半径变化时塑性区的发展情况。从图中可以看出,随着溶洞半径的增大,塑性区的影响范围不断扩大。 $R=0.5\text{ m}$ 时,塑性区的范围仅限于受拉基础的左侧和受压基础的右侧。 $R=1\text{ m}$ 和 1.5 m 时,塑性区的范围明显增大,尤其是两个基础之间出现了贯通溶洞的塑性区,此时基础偏于不稳定。

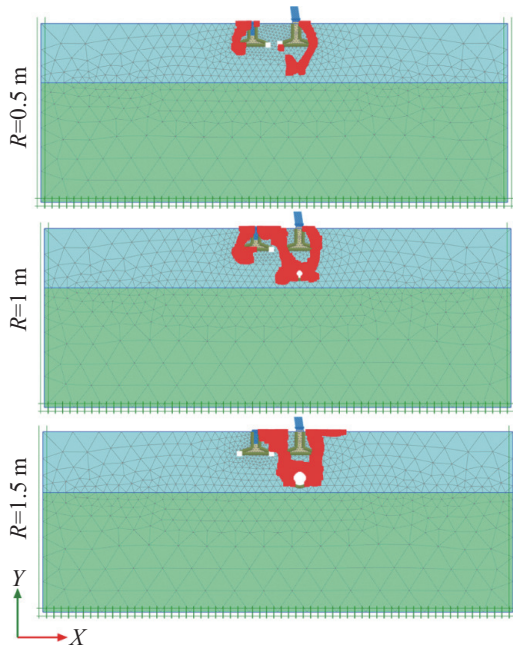


图 13 不利工况下溶洞半径对基础塑性区发展影响

Fig. 13 Influence of cave radius on the development of foundation plastic zone under adverse conditions

3.3 溶洞距离基础水平距离的影响

溶洞距离基础的水平距离 L 也是需要考虑的重要因素之一。如图 14 所示, $H=4\text{ m}$, $R=1\text{ m}$ 下,当溶洞远离基础底部的过程中,基础的位移发生明显的减少,而且变形机制发生明显的改变,位移的弧形发展更加明显,位移量却是减少的。当溶洞离开完全基础底部时,基础的位移明显减少。可见,溶洞发育的位置对基础的整个变形机制起主导作用。

图 15 显示了 $H=4\text{ m}$, $R=1\text{ m}$ 下溶洞距离基础底部变化过程中塑性区的发展情况。两个基础之间的塑性区的发展明显不同。当溶洞位于基础的底部,

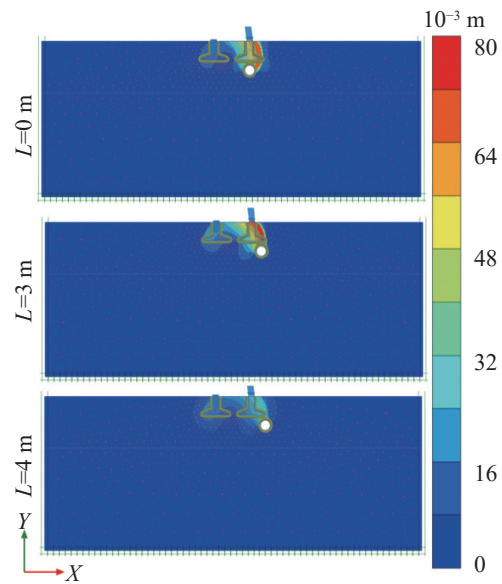


图 14 不利工况下溶洞距离基础水平距离对基础变形的影响

Fig. 14 Influence of the horizontal distance from the cave to foundation on the deformation of the foundation under adverse conditions

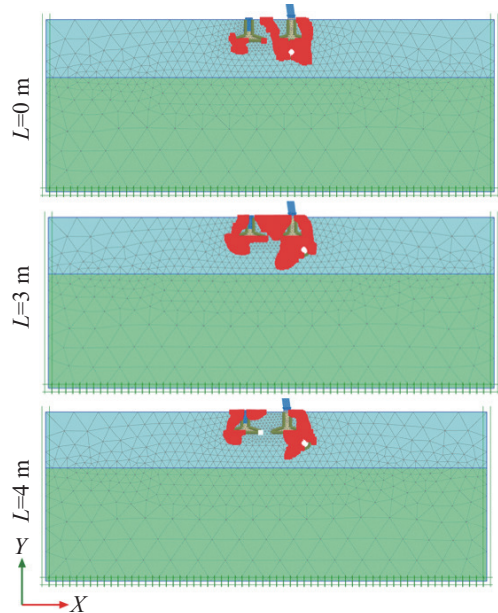


图 15 不利工况下溶洞距离基础水平距离对基础塑性区的影响

Fig. 15 Influence of the horizontal distance from the cave to the foundation on the plastic zone of foundation under adverse conditions

两个基础之间发生明显的塑性区。而随着溶洞向左的移动,离开基础的底部后,两个基础之间的塑性区消失。更需要关注的是基础底脚与溶洞之间的土体范围。



图 16 钻孔岩溶揭露

Fig. 16 Karst exposure of boreholes

4 溶洞地层板基础安全范围及工程应用

4.1 地质概况

某架空线路工程新建线路 5.7 km, 新建铁塔 34 基, 完成基础浇筑 8 基, 约 23 基处因地质原因(有大量溶洞)未施工(图 16 和图 17)。浅部地层主要为第四系坡残积、冲洪积地层, 以粉质黏土为主; 粉质

黏土呈灰黄色, 湿, 可塑, 干强度中等, 韧性中等, 重度 $\gamma=19.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。下部多为石灰岩以中等风化、强风化为主。整个地层内分布有大小不等的溶洞, 尤其以土-岩交界面处最为集中。整个线路地下水位线较低, 不考虑地下水的影响。本输电线路基础大多选用板式基础, 塔型选用 1A3-JC4 塔型。

4.2 基础失效判断依据

建筑物的使用性能越来越受到人们的关注, 输电塔架属于高耸建筑, 超过一定倾斜度, 会影响其正常使用。输电塔基础在拉压的作用下, 会发生地基的不均匀沉降, 从而发生基础的倾斜。溶洞发育侧的基础受到压力, 另一侧基础受到拉力, 在两者的作用下形成类似弯矩的作用力, 使得在受拉基础的左上和右上部出现滑动面, 同时受压侧基础的左右侧和下部形成向溶洞发育贯通的滑裂面。而整个输电塔在这种作用下会发生明显的倾斜旋转, 从而造成输电塔的失效。因此, 主要依据《架空输电线路基础设计技术规程》中的规定, 以地基的倾斜度为 5‰为主要依据。

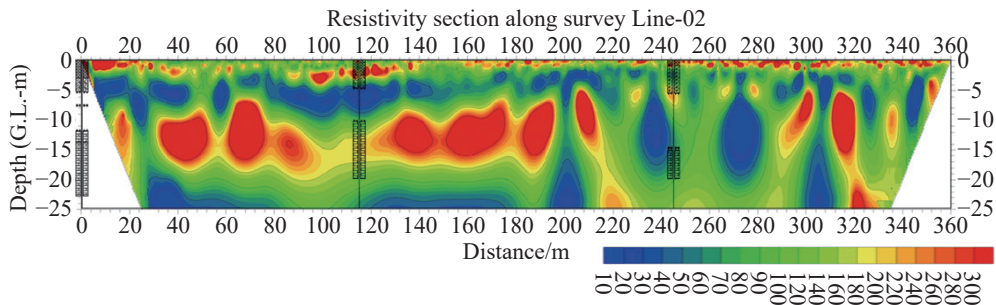


图 17 钻探和电法揭露溶洞对照图

Fig. 17 Comparison of the karst cave revealed by drilling and electrical method

4.3 溶洞地层板基础安全距离控制

输电线路穿越岩溶地区时, 在线路选址规划时应优先选择直线以节约成本。而在岩溶地区施工, 遭遇溶洞时, 尽量选用避让的原则, 避让时遵循线路总长度最短的原则, 因此, 需要进行输电塔与溶洞的安全距离定量研究。考虑整个基础最不利的情况, 受拉和受压的基础位于同一平面上, 通过大量的数值计算来分别确定不同溶洞半径下基础距离溶洞水平和竖直的安全距离。输电塔的倾斜定义为两侧基础的沉降之差与基础间距的比值。图 18 展示了不同溶洞半径下基础倾斜随溶洞距离基础底部竖向距

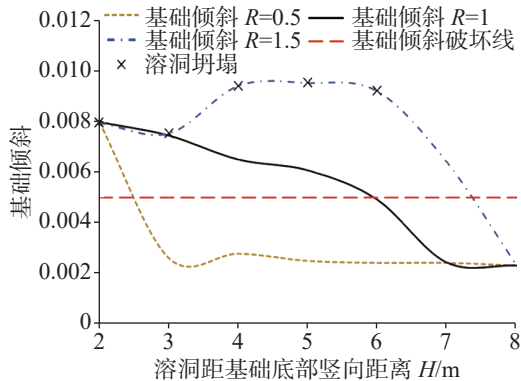


图 18 溶洞半径和距离对基础倾斜的影响

Fig. 18 Influence of cave radius and distance on foundation inclination

离的变化情况。红色的虚线为基础倾斜破坏线。可以看出,随着溶洞距离基础底部竖向距离的增大,基础的倾斜逐步减小。当 $R=0.5\text{ m}$ 时,只有在溶洞距离基础底部小于 3 m 时才发生了破坏。当 H 大于 4 m 时,半径 0.5 m 的溶洞对于基础基本不会产生任影响。 $R=1\text{ m}$ 时,溶洞距离基础底部小于 6 m 时发生了破坏,可将安全距离划定为 6 m 。当 $R=1.5\text{ m}$ 时,溶洞距离基础底部达到 8 m 以上才能够保证基础的安全。随着溶洞半径的增大,安全距离也必须增大才能够保证基础倾斜在控制范围内。

图 19 显示了溶洞距离基础底部竖向距离对于溶洞顶部位移的影响。随着溶洞距离基础底部竖向距离的增加,溶洞顶部位移也在逐渐减小,当溶洞距离基础底部距离达到 8 m 时,基础基本不对溶洞的变形产生影响。而溶洞的半径越大,其自稳能力也就越差, $R=1.5\text{ m}$ 的溶洞在基础施工的作用下甚至发生了坍塌。因此在岩溶地区施工时要进行相应的安全控制。

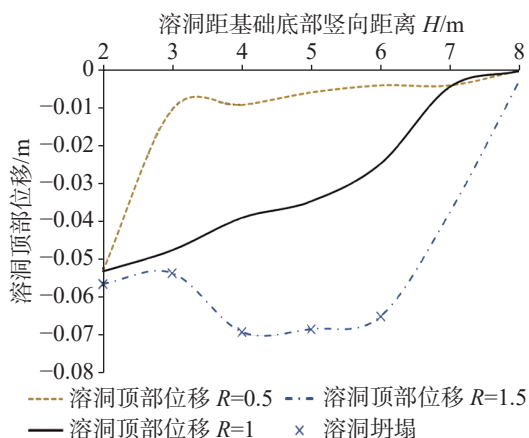


图 19 溶洞半径和距离对溶洞顶部位移的影响

Fig. 19 Influence of karst cave radius and distance on the displacement of cave top

图 20 显示了溶洞距离基础水平距离 L 对于基础倾斜的影响。可以看出,基础倾斜对于溶洞距离基础水平距离是敏感的。当 L 小于 3 m 时,基础倾斜超过了基础倾斜破坏线。因此应该控制基础距离溶洞的距离在 3 m 以外。

图 21 为溶洞地层上输电塔基础设计图,主要为输电塔的布置位置和溶洞处理提供参考和依据。此图的绘制方法为首先确定溶洞半径的大小,然后计算最不利位置即溶洞位于受压侧输电塔基础的正下方时的输电塔倾斜破坏情况,依次计算 $H=2\text{ m}$, 3 m ,

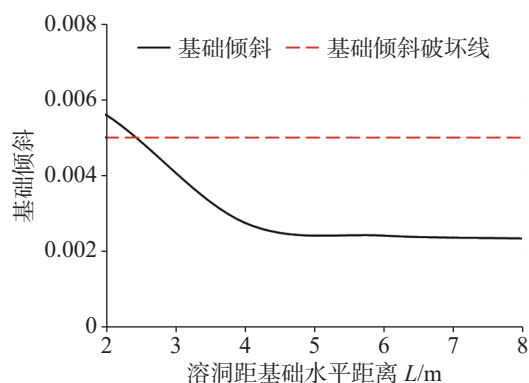


图 20 溶洞距离基础水平距离对基础倾斜的影响

Fig. 20 Influence of the horizontal distance from the cave to foundation on the inclination of the foundation

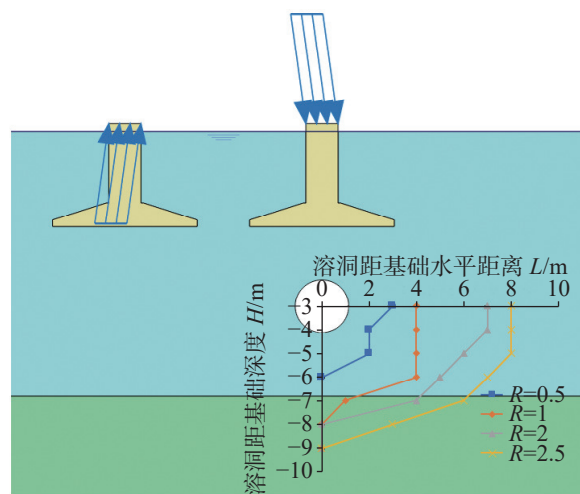


图 21 溶洞地层输电塔板基础安全区域

Fig. 21 Safety area of transmission tower foundations in the development strata of karst caves

4 m , 5 m , 6 m ...直至找到输电塔架安全的点。依据此方法在平面上找到所有的临界破坏点,将其连接围成基础位置破坏区。不同系列的曲线展示的是不同大小的溶洞的安全线,比如, $R=0.5\text{ m}$ 时,当溶洞位于竖向 0 至 -6 m ,水平 0 至 3 m 和蓝色折线所围成的区域内时,输电塔会发生倾斜破坏。因此应该避开此区域修建输电塔。同理, $R=1\text{ m}$, 2 m 和 2.5 m 也都相应地围成各自的区域。可以看出,随着溶洞半径的增大,其可影响的输电塔基础的破坏区域也在增大,需要不断扩大输电塔与溶洞的距离才能保证输电塔架的正常使用。当输电塔修建在这些区域之外时,可以避免溶洞对输电塔的影响。在一条线上的溶洞已经勘探明确时,借助此设计图来确定输电塔的建设位置,从而降低线路成本和溶洞处理的成本。类似工程可参照此设计方法进行设计,划定相

应的安全距离范围。

5 结 论

通过有限元数值模拟揭示了不同荷载情况、溶洞尺寸、溶洞距离基础底部竖向和水平距离对于板式基础破坏机制和承载性能的影响。划定了溶洞地层基础安全距离,为岩溶地区基础经济快速选址提供了参考。主要得出以下结论:

(1)溶洞的位置、大小、基础所受荷载类型都会对地基基础的剪切带发展和破坏机理产生重要影响,使板式基础出现不同的破坏模式和不同的承载特性,确定了最不利情况为溶洞发育在受压基础正下方。

(2)溶洞发育地层基础承载力随着 D/B 的减小而增大, $D/B>1$ 时继续增大板式基础宽度对基础承载力增大作用不明显。

(3)溶洞半径越大,距离基础越近对输电塔架倾斜的影响越显著。但溶洞对输电塔架的影响局限于一定范围内。

(4)根据数值结果提出了溶洞发育地层输电塔基安全布置图,划定了板式基础安全区域,为线路选址提供参考。

参考文献

- [1] 张乾青, 乔胜石, 邢宇铖, 张凯, 崔伟, 王志远, 陈迪杨. 穿越无充填溶洞时单桩承载特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(7): 186-196.
ZHANG Qianqing, QIAO Shengshi, XING Yucheng, ZHANG Kai, CUI Wei, WANG Zhiyuan, CHEN Diyang. Study on bearing characteristics of single pile crossing unfilled karst cave[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 186-196.
- [2] 陈慧芸, 冯忠居, 蔡杰, 夏承明, 董建松. 串珠状溶洞影响下桩基竖向承载特性离心试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(6): 83-93.
CHEN Huiyun, FENG Zhongju, CAI Jie, XIA Chengming, DONG Jiansong. Centrifugal test on vertical bearing characteristics of pile foundation affected by beaded caverns[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(6): 83-93.
- [3] 周雷靖, 余国兆, 林伟斌. 电厂溶洞地基处理关键技术和疑难问题分析[J]. 南方能源建设, 2022, 9(Suppl.1): 69-75.
ZHOU Leijing, YU Guozhao, LIN Weibin. Key technology and difficult problem analysis of karst cave treatment in power plant project[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(Suppl.1): 69-75.
- [4] 赵少忠, 黄鑫, 许振浩, 李明海. 齐岳山隧道岩溶发育特征与溶洞处治技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(7): 1289-1299.
ZHAO Shaozhong, HUANG Xin, XU Zhenhao, LI Minghai. Development characteristics and treatment techniques of karst caves in Qiyueshan tunnel[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(7): 1289-1299.
- [5] 雷勇, 李鹏甲, 刘泽宇, 李金朝, 胡伟, 陈俐光, 刘运思. 岩溶区穿越溶洞桩基极限承载力及破坏模式试验研究[J]. 应用力学学报, 2023, 40(6): 1343-1353.
LEI Yong, LI Pengjia, LIU Zeyu, LI Jinzhao, HU Wei, CHEN Liguang, LIU Yunsu. Experimental study on ultimate bearing capacity and failure mode of pile foundation crossing karst caves in karst areas[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(6): 1343-1353.
- [6] Zheng Jinbei, Zhang Hu, Liu Baoqiang, Liu Gao, Fan Youping, Hua Shuai, Jiang Daixing. Research on pile foundation of transmission tower stability analysis based on numerical simulation in karst areas[J]. Advanced Materials Research, 2012, 594-597: 316-319.
- [7] 许新刚, 刘厚健. 地质雷达在高电压等级输电线路勘察中的应用[J]. 电力勘测设计, 2008(4): 18-21.
XU Xingang, LIU Houjian. Application of ground penetrating radar in high voltage transmission line's geologic investigation[J]. Electric Power Survey and Design, 2008(4): 18-21.
- [8] 刘小东, 彭斌, 黄河, 柳建新. 地质雷达在溪洛渡—浙西±800kV特高压直流输电线路工程塔基勘察中的应用[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 722-729.
LIU Xiaodong, PENG Bin, HUANG He, LIU Jianxin. Application of ground penetrating radar to tower pad investigation of ±800 kV DC power transmission project from Xiluodu to Zhexi[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 722-729.
- [9] 许腾晖, 门春树. 对某工程岩溶发育特征及基础选型分析[J]. 城市勘测, 2022(3): 206-208.
XU Tenghui, MEN Chunshu. Analysis on karst development characteristics and foundation selection of a project[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2022(3): 206-208.
- [10] 郑金杯, 刘高, 沈虹, 樊友平, 滑帅, 蒋代兴. 广东岩溶塌陷区输电线路塔基稳定性评估方法及数值模拟研究[J]. 电力建设, 2012, 33(12): 44-47.
ZHENG Jinbei, LIU Gao, SHEN Hong, FAN Youping, HUA Shuai, JIANG Daixing. Stability evaluation methods and numerical simulation study of transmission tower foundation in Guangdong karst collapse areas[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(12): 44-47.
- [11] 江兆云, 曾德森. 输电线路岩溶地区勘探方法及地基稳定性分析[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(2): 162-165.
JIANG Zhaoyun, ZENG Desen. Foundation bed stability analysis and exploration methods of transmission line in karst area[J]. Resources Environment and Engineering, 2010, 24(2): 162-165.

- [12] 刘泽坤. 复杂岩溶地质条件下厂房地基基础设计[J]. 煤炭工程, 2022, 54(4): 22-26.
LIU Zekun. Design of powerhouse foundation under complex karst geological conditions[J]. Coal Engineering, 2022, 54(4): 22-26.
- [13] 柳柳, 王俊. 广花盆地东北部岩溶地质特征及对城际铁路隧道影响分析[J]. 铁道勘察, 2022, 48(4): 72-78.
LIU Liu, WANG Jun. Characteristics of karst in the northeast Guanghua basin and analysis of its influence on intercity railway tunnels[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(4): 72-78.
- [14] 肖雄, 毛土明. 湖南省岩溶地质条件下高层建筑基础设计研究与实践[J]. 建筑结构, 2022, 52(Suppl.1): 2321-2324.
XIAO Xiong, MAO Tuming. Research and practice on foundation design of high-rise buildings under karst geological conditions in Hunan Province[J]. Building Structure, 2022, 52(Suppl.1): 2321-2324.
- [15] 黎志豪, 许光泉, 余世滔, 高加林, 张海涛. 淮南舜耕山岩溶塌陷发育特征及形成机理研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 418-426.
LI Zhihao, XU Guangquan, YU Shitao, GAO Jialin, ZHANG Haitao. Study on the development characteristics and formation mechanism of karst collapse development in Shungeng mountain, Huainan City[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 418-426.
- [16] 谢小荣, 苏定立, 李翔, 胡贺松. 基于综合勘察分析的工程建设场地岩溶发育机理及场地稳定性研究[J]. 广州建筑, 2021, 49(6): 3-7.
XIE Xiaorong, SU Dingli, LI Xiang, HU Hesong. Karst development mechanism and site stability of engineering construction site based on comprehensive investigation analysis[J]. Guangzhou Architecture, 2021, 49(6): 3-7.
- [17] 尹欧, 杨帆, 彭祖武, 向锋. 长沙市煤炭坝地区岩溶发育机理及空间分布规律研究[J]. 资源环境与工程, 2021, 35(2): 216-220.
YIN Ou, YANG Fan, PENG Zuwu, XIANG Feng. Study on karst development mechanism and spatial distribution law in Meitanba area of Changsha[J]. Resources Environment and Engineering, 2021, 35(2): 216-220.
- [18] 左文喆, 董军义, 刘善军, 张淑娟, 费书民. 唐山市北部山区岩溶塌陷机制初探[J]. 工程勘察, 2008(8): 29-32.
ZUO Wenzhe, DONG Junyi, LIU Shanjun, ZHANG Shujuan, FEI Shumin. Mechanism of karst collapse in the hilly area of northwestern Tangshan[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(8): 29-32.
- [19] 魏风华. 唐山市岩溶塌陷机制分析[J]. 地质与勘探, 2006, 42(2): 86-89.
WEI Fenghua. Study in the mechanism of karst collapse in Tangshan City[J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(2): 86-89.
- [20] 张永兵, 唐滢, 梁星云, 陈攀. 土弹性模量对土—结构共同作用体系影响分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 1139-1144.
ZHANG Yongbing, TANG Ying, LIANG Xingyun, CHEN Zhi. Impact of soil elastic modulus on soil-structure interaction[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(4): 1139-1144.
- [21] 岳鹏飞, 蒋大园. 岩溶地区高层建筑桩基设计探讨[J]. 工程建设, 2020, 52(12): 53-56.
YUE Pengfei, JIANG Dayuan. Discussion on pile foundation design of high-rise buildings in karst area[J]. Engineering Construction, 2020, 52(12): 53-56.
- [22] 何世茂, 鹿磊, 胡艳玲. 岩溶地区基础选型分析和工程应用[J]. 建筑结构, 2022, 52(Suppl.1): 2368-2372.
HE Shimao, LU Lei, HU Yanling. Analysis and engineering application of foundation selection in karst areas[J]. Building Structure, 2022, 52(Suppl.1): 2368-2372.
- [23] 张建同, 陈顺军, 刘素梅, 林鲁生, 徐礼华. 隐伏岩溶条件下的上部结构-基础-地基共同作用数值模拟分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 792-798.
ZHANG Jiantong, CHEN Shunjun, LIU Sumei, LIN Lusheng, XU Lihua. Numerical simulation analysis of interaction of superstructure-foundation-pile foundation under hidden karst condition[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(5): 792-798.
- [24] 刘自强, 马洪生, 牟云娟. 节理裂隙发育岩溶地基数值模拟稳定性分析[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 100-110.
LIU Ziqiang, MA Hongsheng, MOU Yunjuan. Numerical simulation analysis and evaluation of stability of the karst foundation with developed joints and fissures[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(1): 100-110.
- [25] 邓艺聪. 岩溶地区高层建筑桩筏基础溶洞安全性评价方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
DENG Yicong. Research on safety evaluation method of piled-raft foundation of tall buildings in karst region[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [26] 曾勇, 单海东, 贺焱, 龚雷, 秦张越. 桩侧溶洞对桥梁桩基沉降和桩端受力影响分析[J]. 路基工程, 2022(3): 146-150.
ZENG Yong, SHAN Haidong, HE Yi, GONG Lei, QIN Zhangyue. Influence of karst cave at pile side on settlement of bridge pile foundation and force of pile end[J]. Subgrade Engineering, 2022(3): 146-150.
- [27] 林湘, 陈相宇, 韦锦呈. 盾构隧道侧穿高压电塔的影响及保护研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(Suppl.1): 426-433.
LIN Xiang, CHEN Xiangyu, WEI Jincheng. Research on the influence and protection of shield tunnel through high voltage tower[J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59(Suppl.1): 426-433.
- [28] 翁佳明, 邓志健. 某 110 kV 电塔基础加固及纠偏工程施工方法[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(4): 77-80.
WENG Jiaming, DENG Zhijian. Construction method for foundation reinforcement and deviation rectification of a 110 kV power tower [J]. Guangdong Architecture & Civil Engineering, 2021, 28(4): 77-80.
- [29] 谢瑾荣. 下穿隧道盾构施工对高压电塔影响的安全性评价[J].

- 土工基础, 2020, 34(2): 89-93.
- XIE Jinrong. Safety evaluation of the impact of shielded tunneling construction on an electricity tower foundation[J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(2): 89-93.
- [30] 彭学军, 吴春勇, 杨杰. 桥梁桩基施工对其邻近电塔基础的影响分析[J]. 公路, 2017, 62(7): 146-150.
- [31] 秦忠诚, 李晓禾, 门懋进, 高彪. 电塔桩基受采动及风荷载共同影响下的变形特征研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 181-186.
- QIN Zhongcheng, LI Xiaohe, MEN Maojin, GAO Biao. Study on deformation characteristics of pile foundation of electric tower under the combined influence of mining and wind load[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 181-186.
- [32] 林权威. 隧道施工对既有高压电塔的影响研究[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 48-57.
- LIN Quanwei. Influence of tunnel construction on existing high-voltage power transmission tower[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 48-57.

Numerical simulation of deformation in the development strata of karst caves for slab foundations and the control of safe distance

HUANG Yunlong¹, GAO Bin², ZHOU Hang¹, YU Zhe¹, HE Wen²

(1. Quzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., LTD, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

2. Civil Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Karst areas are widely distributed throughout China, and karst caves are a common karst form in these regions. As China's economy continues to develop and the demand for rural revitalization intensifies, infrastructure, such as transmission lines, often has to traverse karst areas. In the entire process of infrastructure construction, ensuring the safety of foundations in karst strata is of utmost importance. The existence of karst caves significantly increases the complexity of the deformation of slab foundations. Unfortunately, the failure modes and deformation mechanisms of these foundations in such environments remain unclear. This lack of understanding makes it extremely difficult to propose targeted prevention and control measures in engineering practice. To address this issue, finite element software PLAXIS 2D is employed to establish a numerical model of the slab foundation of electric power towers in karst strata. This model is used to simulate the development of shear bands and load-displacement curves, thereby elucidating the failure mechanisms and conducting analysis on bearing characteristics of slab foundations in karst strata.

Against the backdrop of real-world projects, finite element software is utilized to determine the most adverse simulation working conditions. Key factors including relative locations, sizes, and burial depths of karst caves, have been studied to determine their influence on the deformation of transmission tower foundations. Through this research, the deformation mechanism and bearing performance of slab foundations under various load combinations, different locations of karst cave, and varying sizes of karst caves have been examined. Based on the criterion—the limit value of foundation inclination in the serviceability limit state—the failure range of slab foundations in karst strata was delineated. This delineation may provide a crucial basis for the site selection of slab foundations in karst strata. The study results show that the locations, sizes, and load types of karst caves significantly influence the development of shear bands and the failure mechanisms of foundation soil. Affected by the locations of karst caves and the varying tension and compression loads on both sides, slab foundations exhibit diverse failure modes and bearing characteristics. Whether it involves a compression-compression combination or a tension-compression combination, the shear strain will pass from the compressed side of the foundation close to the karst cave into the karst cave. This may result in the formation of an arc-shaped shear band between the karst cave and the foundation. The most unfavorable situation occurs when a karst cave is developed directly beneath a compressed foundation. In terms of the bearing capacity of the foundation in karst strata, this capacity increases as the ratio of diameter (D) to width (B) decreases. Therefore, in practical engineering, the width of the slab should be maximized relative to the diameter of the karst cave. When the ratio D/B exceeds 1, further increase of the width of the slab foundation does not significantly enhance the bearing capacity of the foundation. Additionally, the larger the radius of the karst cave and the closer it is

to the foundation, the more pronounced the impact on the inclination of the transmission tower. However, it is important to note that the influence of karst caves on transmission towers is limited to a specific range. Based on the numerical results, a safety design diagram of transmission tower foundations in karst strata is proposed, delineating the safety area of slab foundations. This design diagram aids to determine the construction locations of transmission towers, which can help reduce both line costs and expenses related to karst cave treatment, providing valuable reference for line site selection. This method can provide significant guidance for the site selection of slab foundations of electric power towers in similar karst strata and the management of karst caves.

For the site selection of slab foundations for electric power towers, engineers can utilize the analysis results generated by this method to comprehensively consider various factors and select the most appropriate construction location. This approach can effectively minimize the risk of foundation deformation and enhance the stability and safety of electric power towers. At the same time, this method also helps to plan and design foundation structures in advance, allowing for better adaptation to the special geological conditions of karst strata. This approach also minimize uncertainties and difficulties during subsequent construction phrases. In terms of the management of karst caves, this method provides a basis for formulating scientific and reasonable treatment plans. According to the influence of karst caves on the inclination of transmission towers and the relationship between foundation bearing capacity and parameters related to karst caves, targeted measures such as filling and reinforcement can be implemented. In addition, by delineating the failure range of slab foundations in karst strata, the areas requiring focused attention and treatment can be identified more clearly, thereby enhancing the efficiency and effectiveness of karst cave treatment.

Key words karst cave, foundation, incline, numerical simulation, failure mechanism

(编辑 张玲)

中国地质灾害防治情况

据中国自然资源公报, 2024 年, 全国共发生地质灾害 5 719 起, 其中滑坡 3 316 起、崩塌 1 579 起、泥石流 727 起、地面塌陷 97 起, 造成 187 人死亡、10 人失踪、49 人受伤, 直接经济损失 25.39 亿元。与上年同期相比, 地质灾害发生数量、造成的死亡失踪人数和直接经济损失分别增长 55.9%、155.8% 和 85.9%。与前五年同期平均值相比, 地质灾害发生数量和造成的死亡失踪人数分别增加 1.7%、55.1%, 造成的直接经济损失减少 8.3%。全年成功避免地质灾

害 622 起, 涉及可能伤亡人员 10 235 人, 避免直接经济损失 7.25 亿元, 同比分别增长 45.7%、95.0% 和 43.6%。全力支撑汛期地质灾害风险防御, 有效支撑云南镇雄“1·22”特大滑坡、广东韶关、福建龙岩、湖南资兴特大暴雨等重大灾害防御响应, 高效处置湖南衡阳南岳区滑坡等多起灾情险情。全国各级自然资源主管部门共计派出专家及技术人员 59.3 万余人次, 排查巡查隐患点 229.6 万余处(重复计数), 紧急处置各类地质灾害险情或隐患 13 616 处。