

引用本文:王成成,张莎莎,杨晓华,等.桥梁桩基下伏充填溶洞顶板安全厚度计算[J].建筑科学与工程学报,2025,42(4):177-186.
WANG Chengcheng, ZHANG Shasha, YANG Xiaohua, et al. Calculation of safety thickness of underlying filling karst cave roof of bridge pile foundation [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 177-186.

DOI:10.19815/j.jace.2023.05063

桥梁桩基下伏充填溶洞顶板安全厚度计算

王成成,张莎莎,杨晓华,李吉富

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:当山区桥梁桩基存在下伏溶洞时,桩基应当与溶洞保持一定的安全厚度,以保证桩基和桥梁的稳定性。结合理论分析与数值试验对桩基下伏溶洞顶板安全厚度进行计算,将溶洞顶板分别简化为固支梁、简支梁和悬臂梁,基于结构力学理论推导出不同模型的充填溶洞顶板安全厚度计算公式;采用FLAC3D软件与正交试验设计方法,分析了围岩水平、溶洞跨度、高跨比、桩径、嵌岩深度对顶板安全厚度的影响规律及其显著性,建立了桥梁桩基下伏溶洞顶板最小安全厚度预测模型。结果表明:桩基下伏溶洞顶板安全厚度与围岩水平、溶洞跨度成正比,与高跨比成反比,随着嵌岩深度的增大呈现先增加后减小的趋势,随桩径的变化影响并不明显;整体影响程度从大到小依次为溶洞跨度、嵌岩深度、围岩水平、桩径、高跨比,各因子权重分别为0.679、0.140、0.044、0.018、0.011;工程实例检验结果表明,采用理论分析预测安全厚度与数值分析结果基本吻合,基于力学模型预测的安全厚度较为保守,两个工程实例的数值模拟预测安全厚度相比力学模型预测结果分别降低1.47 m与0.59 m,且数值分析方法在应用于不同地质情况时切实可行,具有一定的准确性和代表性。

关键词:下伏溶洞;安全厚度;桥梁桩基;正交试验;多元回归分析

中图分类号:TU921

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)04-0177-10

Calculation of safety thickness of underlying filling karst cave roof of bridge pile foundation

WANG Chengcheng, ZHANG Shasha, YANG Xiaohua, LI Jifu

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: When the pile foundation of bridges in mountainous areas has underlying karst cave, the pile foundation should maintain a certain safe thickness with the karst cave to ensure the stability of the pile foundation and bridge. Combined with theoretical analysis and numerical test, the safety thickness of underlying karst cave roof of pile foundation was calculated, and the karst cave roof was simplified into solid supported beam, simple supported beam and cantilever beam respectively. By using FLAC3D software and orthogonal experimental design method, the influence rules and significance of surrounding rock level, karst cave span, height-to-span ratio, pile diameter and rock-socketing depth on roof safety thickness were analyzed, and the prediction model of minimum safe roof thickness of underlying karst cave of bridge pile foundation was

established. The results show that the safety thickness of underlying karst cave roof of pile foundation is directly proportional to the level of surrounding rock and karst cave span, and inversely proportional to the height-to-span ratio. With the increase of rock-socking depth, the safety thickness of karst cave roof increases first and then decreases, and the influence of pile diameter is not obvious. The overall influence degree from large to small is karst cave span, rock-socking depth, surrounding rock level, pile diameter, height-to-span ratio, and the weight of each factor are 0.679, 0.140, 0.044, 0.018, 0.011, respectively. The test results of engineering cases show that the safety thickness predicted by theoretical analysis is basically consistent with the results of numerical analysis, and the prediction of safety thickness based on mechanical model is conservative, and compared with the mechanical model prediction result, the prediction of safety thickness of two engineering examples by numerical simulation test is reduced by 1.47 m and 0.59 m, respectively. Moreover, the numerical analysis method is feasible when applied to different geological conditions and has certain accuracy and representativeness.

Key words: underlying karst cave; safety thickness; bridge pile foundation; orthogonal test; multiple regression analysis

Author resume: ZHANG Shasha (1982-), female, PhD, associate professor, E-mail: zss_lx@126.com.

0 引言

岩溶是一种常见的工程地质灾害,岩溶水动力特性、发育的隐蔽性及发育过程的累进性等因素会对工程建设和运营带来严重影响。桩基础因具有沉降小、承载能力强等优点被广泛应用于岩溶地区的工程建设中^[1-3]。然而,溶洞地区工程的稳定性主要取决于顶板岩层的安全厚度。因此,研究山区桥梁桩基下伏溶洞顶板的最小安全厚度对于实际工程建设至关重要^[4-6]。

针对桥梁桩基下伏溶洞顶板最小安全厚度问题,国内外许多学者开展了大量的研究,主要采用定性分析、半定量分析和定量分析三种方法^[7-8]。定性分析是基于工程资料与实践经验等主观因素,但由于缺乏可量化的数据往往不够准确和可靠,目前研究以半定量分析和定量分析为主。半定量分析基于理论基础,经过研究人员的实践和摸索日益完善。张永杰等^[9]将桩基下伏溶洞简化为抛物线拱、固支梁、圆拱与固支双向板等模型,发现岩石抗拉强度及溶洞形状对溶洞顶板稳定性影响尤为重要。Jiang等^[10-12]在前人研究基础上进行结构优化,得到了考虑溶洞顶板突变失稳、边缘支撑及地震耦合作用的顶板最小安全厚度的计算方法。马郎等^[13]建立桩基-顶板-溶洞相互作用力学模型,并通过强度折减法获得溶洞顶板安全厚度。汪华斌等^[14]引入Hoek-Brown准则评价岩溶稳定性,建立了不同简

化力学模型下的溶洞顶板安全厚度以及冲切、剪切破坏下安全厚度计算公式。

对于顶板安全厚度,传统的解析方法难以求解且工作量较大,因此数值模拟在顶板安全厚度计算中应用越来越广泛。王勇等^[15]采用有限元结合向量机方法建立了溶洞顶板安全厚度智能预测模型,并分析岩体参数的影响,认为黏聚力和内摩擦角影响最大,泊松比、容重和埋深次之。赵明华等^[16]提出考虑嵌岩桩桩端侧阻的溶洞顶板安全厚度计算方法,并建立数值模型证明结果吻合较好。张敏思等^[17]采用K. B. 鲁别涅依他公式和RFPA数值模拟软件分别计算了采空区顶板安全厚度,证明后者具有更好的适用性。此外,张华伟等^[18-21]分析了顶板长度、顶板厚度、溶洞高度、桩径、溶洞尺寸等因素对桩基稳定性的影响。上述研究深入探讨了溶洞顶板安全厚度计算问题,但现有研究大多假定溶洞为无充填溶洞且顶板完整,针对充填溶洞顶板存在裂隙的研究较少。

针对以上问题,本文基于结构力学理论推导出考虑溶洞充填物及裂隙作用的不同简化力学模型下溶洞顶板安全厚度计算公式,同时采用FLAC3D软件结合正交试验分析了围岩水平、溶洞洞跨、高跨比、桩径和嵌岩深度对顶板安全厚度的影响,最后通过多元线性回归法建立了桩基下伏溶洞顶板最小安全厚度预测模型,使溶洞顶板厚度计算更加准确合理。

1 溶洞顶板厚度力学模型

桩基下伏溶洞顶板安全厚度主要通过固支梁、板梁、坍落拱结构计算,当溶洞顶板完整,将顶板简化为受力梁,验算抗弯、抗剪强度得出最小安全厚度,本文在此基础上考虑了溶洞充填物及裂隙作用对安全厚度计算的影响。

根据溶洞顶板及桩基受力情况进行合理简化,在分析中做如下假设:

(1)溶洞顶板完整且应力沿长度方向分布均匀,溶洞与桩基间岩层完整呈水平产状,为各向同性的连续弹性体,不考虑桩基与顶板岩层之间的成拱效应。

(2)桩端荷载在顶板岩层均匀分布,桩端荷载简化为均布荷载作用在顶板上,且桩端荷载为静荷载,一次性施加。

(3)嵌岩桩采用端承桩,忽略桩和周围土体之间的侧摩阻力。

(4)溶洞顶板岩层自重、上覆土层自重及岩溶水压力均简化为均布荷载作用在顶板上,计算中不考虑水的渗透作用。

1.1 固支梁模型

桩基下方发育充水溶洞时,溶洞顶板完整且无裂隙,则溶洞顶板在各种作用下的简化力学模型如图1所示,岩层顶板上作用荷载主要有:岩层自重 $\gamma(S+h)$ 、上覆土层自重 $\gamma_1 h_1$ 、桩底作用面均布荷载 q 、均布水压力 p 。

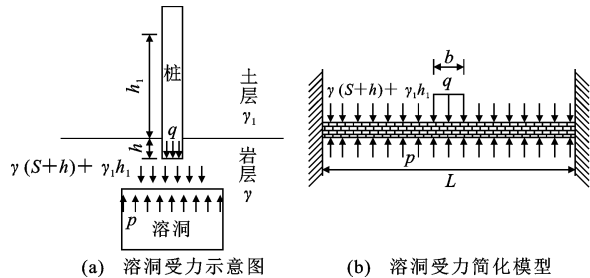


图1 溶洞顶板固支梁模型

Fig. 1 Karst cave roof solid support beam model

依据结构力学理论,固支梁在各种作用下最大弯矩 M 和最大剪力 Q 的计算公式分别为

$$M = \frac{1}{12}(\gamma S + P)BL^2 + \frac{qB(3bL^2 - b^3)}{24L} \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{2}B[(\gamma S + P)L + qb] \quad (2)$$

式中: γ 为溶洞顶板重度; B 为顶板计算宽度; S 为顶板计算厚度,即溶洞顶板安全厚度; L 为溶洞跨

度; q 为桩端均布荷载; b 为荷载计算宽度; P 为溶洞上覆土层、岩层与水压力的均布合力, $P = \gamma h + \gamma_1 h_1 - p$,其中 γ_1 为上覆土层加权平均重度, h 为桩嵌岩深度, h_1 为桩入土层深度, p 为溶洞均布水压力。

求得最大弯矩 M 和最大剪力 Q 后,依据抗弯公式及抗剪公式推导出溶洞顶板安全厚度,如公式(3)、(4)所示。

$$S_{11} \geq \frac{\gamma L^2 + \sqrt{\gamma^2 L^4 + 8P[\sigma]L^2 + \frac{4q[\sigma](3bL^2 - b^3)}{L}}}{4[\sigma]} \quad (3)$$

$$S_{12} \geq \frac{3(LP + qb)}{4[\tau] - 3\gamma L} \quad (4)$$

式中: σ 为岩体的抗弯强度; τ 为岩体的抗剪强度; S_{11} 、 S_{12} 分别为溶洞顶板简化为固支梁模型时依据抗弯、抗剪计算所得安全厚度。

考虑到桩基实际施工过程中存在开挖扰动及岩溶水渗流等会对顶板安全厚度产生影响,对简化条件下的安全厚度通过安全储备系数 n ($n = 1.1 \sim 1.4$)进行修正,得到式(5)和式(6)。

$$S_{11} \geq n \frac{\gamma L^2 + \sqrt{\gamma^2 L^4 + 8P[\sigma]L^2 + \frac{4q[\sigma](3bL^2 - b^3)}{L}}}{4[\sigma]} \quad (5)$$

$$S_{12} \geq n \frac{3(LP + qb)}{4[\tau] - 3\gamma L} \quad (6)$$

1.2 简支梁模型

当溶洞顶板完整、跨端存在裂隙时,顶板可简化为简支梁,在桩端荷载、水压力及自重作用下的力学模型如图2所示,跨端最大弯矩和最大剪力的计算公式分别为

$$M = B \left[\frac{1}{8}(\gamma S + P)L^2 + \frac{1}{8}qb^2 + \frac{1}{4}qb(L - b) \right] \quad (7)$$

$$Q = \frac{1}{2}B[(\gamma S + P)L + qb] \quad (8)$$

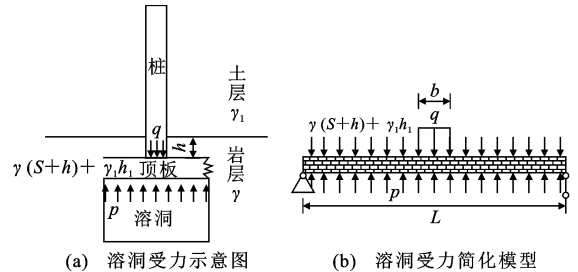


图2 溶洞顶板简支梁模型

Fig. 2 Karst cave roof simple supported beam model

根据抗弯、抗剪验算可分别得出溶洞顶板安全厚度计算公式,如公式(9)、(10)所示。

$$S_{21} \geq n \frac{3\gamma L^2 + \sqrt{9\gamma^2 L^4 + 16[\sigma][3PL^2 + 3qb^2 + 6qb(L-b)]}}{8[\sigma]} \quad (9)$$

$$S_{22} \geq n \frac{3(LP + qb)}{4[\tau] - 3\gamma L} \quad (10)$$

式中: S_{21} 、 S_{22} 分别为溶洞顶板简化为简支梁模型时依据抗弯、抗剪计算所得安全厚度。

1.3 悬臂梁模型

当溶洞顶板完整、跨中存在裂隙时,顶板可简化为悬臂梁,在桩端荷载、水压力及自重作用下的力学模型如图 3 所示,跨端最大弯矩和最大剪力的计算公式分别为

$$M = B \left[\frac{1}{2} (\gamma S + P) L'^2 + \frac{1}{2} qb^2 + qb(L' - b) \right] \quad (11)$$

$$Q = B [(\gamma S + P) L' + qb] \quad (12)$$

式中: L' 为溶洞跨度的一半。

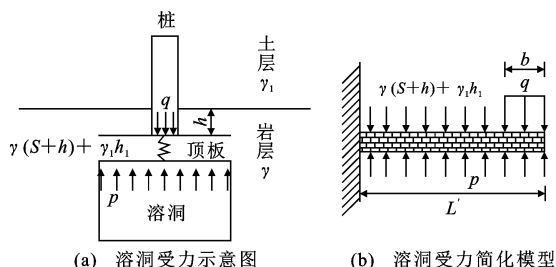


图 3 溶洞顶板悬臂梁模型

Fig. 3 Karst cave roof cantilever beam model

根据抗弯、抗剪验算可分别得出溶洞顶板安全厚度计算公式,如公式(13)、(14)所示。

$$S_{31} \geq n \frac{3\gamma L'^2 + \sqrt{9\gamma^2 L'^4 + 4[\sigma][3PL'^2 + 3qb^2 + 6qb(L' - b)]}}{2[\sigma]} \quad (13)$$

$$S_{32} \geq n \frac{3(LP + qb)}{2[\tau] - 3\gamma L} \quad (14)$$

式中: S_{31} 、 S_{32} 分别为溶洞顶板简化为悬臂梁模型时依据抗弯、抗剪计算所得安全厚度。

2 数值计算建模及正交试验方案

前文根据结构力学推导出最小安全厚度的理论公式,为确定安全厚度提供了理论依据,但理论计算模型较为简单,仅仅考虑弹性破坏阶段,没有考虑溶洞处的围岩水平及顶板边缘岩体的围压作用,也不能反映围岩变形、应力以及塑性破坏区的发展情况,从而难以获得通用的安全厚度关系表达式,需要开展数值模拟试验加以完善。

2.1 模型概况

蛤蟆滩大桥位于山西省左权县境内,桥位地处清漳河谷,地形平坦,全长 182 m,最大高程 1 086 m,桥址区地层主要以卵石、粉质黏土和石灰岩组成,岩溶发育,岩体结构完整。地下水主要为松散孔隙水,地下水埋深 1.4 m。以蛤蟆滩大桥 0 号桥台为例,建立桩基下伏溶洞 FLAC3D 计算模型,研究下伏溶洞与桥梁桩基间的顶板最小安全厚度。

依据工程实际情况,设计桩长 15 m,桩径 1.2 m。溶洞简化为一长方体,模型承受荷载及桩基布局呈对称分布,取实际结构的 1/4 进行数值模拟分析。模型上部为自由边界,前、后、左、右以及底部施加位移边界约束,考虑到边界效应的影响,模型的长度(x 向)取 50 m,高度(z 向)取 40 m,轴线(y 向)取 30 m,采用“切割模型法”建立桩-土接触面,桩基与下伏溶洞的地质结构模型如图 4 所示。

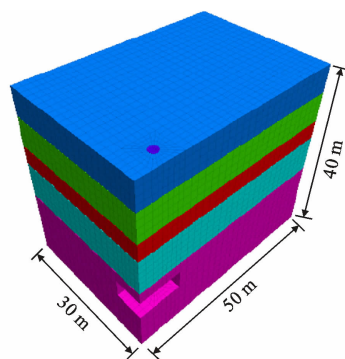


图 4 桩基下伏溶洞计算模型

Fig. 4 Calculation model of underlying karst cave of pile foundation

2.2 参数指标选取

为更真实地反映桩基与下伏溶洞、地层土体之间的相互作用,建模过程中进行了地层的模拟。根据现场钻孔取样进行试验,结合工程手册,得出各土层物理力学参数(表 1),各土层均采用摩尔-库伦本构模型。桩基为钢筋混凝土材料,采用弹性模型,物理力学参数如表 2 所示。

2.3 稳定性评判标准

溶洞稳定性评价的前提是当下部溶洞存在时,上部顶板能否满足工程要求。顶板破坏与否可根据模型计算出的塑性区面积分布大小进行评判,本文以桩基与下伏溶洞间塑性区是否贯通作为溶洞稳定性评判标准。

建立初始应力场并施加水压力,求解完成后位移清零,进而施加桩荷载,待计算完成后查看模型桩基与下伏溶洞塑性区是否贯通,若塑性区未贯通,认

表 1 各土层的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
卵石 1	2 150	40.00	66.67	100	0.25	1.0	45
粉质黏土	1 960	5.56	16.67	15	0.35	20.0	18
卵石 2	2 370	55.28	83.95	136	0.23	2.2	32
强风化石灰岩	2 500	1 150.00	2 500.00	3 000	0.30	1 500.0	27
中风化石灰岩	2 700	4 850.00	2 500.00	6 400	0.28	2 660.0	40

表 2 桩基物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of pile foundation

参数	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	抗压强度/MPa
数值	2 500	25 000	0.2	13 900	10 400	50

为顶板厚度为安全厚度;若塑性区贯通,则认为顶板厚度为非安全厚度,模型已失稳。通过不断调整溶洞顶板的厚度,最终确定能够满足工程作用要求的最小厚度。桩基下伏溶洞塑性区分布如图 5 所示,图中灰色长条为桩基。

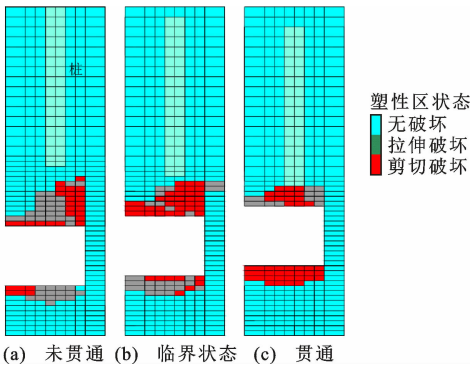


图 5 桩基下伏溶洞塑性区分布

Fig. 5 Distribution of plastic zone of underlying karst cave of pile foundation

2.4 正交试验方案

影响溶洞顶板稳定性的因素众多,结合桥梁桩基下伏溶洞实际工况,选取围岩水平 A 、溶洞跨度 D 、高跨比 R_0 、桩径 d 、桩嵌岩深度 H 这 5 个因素作为主要影响因素,通过正交试验方法研究各影响因素对顶板安全厚度的影响程度。各影响因素水平如

表 3 所示。

3 正交试验结果及分析

根据 5 个影响因素及对应水平设计正交试验方案,进行 25 组试验,得出桩基与下伏溶洞间的最小安全厚度,试验结果如表 4 所示。

对试验结果进行极差分析和方差分析,进一步评估试验数据的可靠性和有效性。

3.1 极差分析

顶板安全厚度极差结果如表 5 所示,其中 K_i 是各因素在水平为 i 时的试验结果之和, k_i 为对应 K_i 的平均值。

根据极差计算结果,得到各因素对溶洞顶板稳定性的影响程度由大到小依次为溶洞洞跨、围岩水平、嵌岩深度、桩径、高跨比,采用 SPSS 软件逐步回归得到各因子权重分别为 0.679、0.140、0.044、0.018、0.011。

各因素对顶板最小安全厚度的影响程度和变化趋势如图 6 所示。随着围岩水平值增大,安全厚度不断增大。围岩水平反映了岩石的整体物理力学特性,围岩水平越差,表明弹性模量、黏聚力及内摩擦角越小,相同工况下塑性破坏区增大,容易发生失稳破坏,因此桩基与溶洞间的安全厚度较大。

表 3 各影响因素水平值

Table 3 Level values of each impact factor

围岩参数					影响因素			
密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	溶洞跨度 D /m	高跨比 R_0	桩径 d /m	嵌岩深度 H /m
2 900	8.4	0.26	3.06	45	2	0.50	0.8	1.0
2 800	7.4	0.27	2.86	42	4	0.75	1.0	1.5
2 700	6.4	0.28	2.66	40	6	1.00	1.2	2.0
2 600	5.4	0.29	2.46	38	8	1.25	1.4	2.5
2 500	4.4	0.30	2.26	35	10	1.50	1.6	3.0

表 4 正交试验方案及结果

Table 4 Orthogonal test protocol and results						
试验 编号	围岩水 平 A	溶洞跨 度 D/m	高跨 比 R ₀	桩径 d/m	嵌岩深 度 H/m	安全厚 度 S/m
1	5	2	0.50	0.8	1.0	2.6
2	5	4	0.75	1.0	1.5	2.8
3	5	6	1.00	1.2	2.0	4.4
4	5	8	1.25	1.4	2.5	5.6
5	5	10	1.50	1.6	3.0	6.0
6	4	2	0.75	1.2	2.5	2.8
7	4	4	1.00	1.4	3.0	4.0
8	4	6	1.25	1.6	1.0	3.8
9	4	8	1.50	0.8	1.5	3.6
10	4	10	0.50	1.0	2.0	5.6
11	3	2	1.00	1.6	1.5	1.6
12	3	4	1.25	0.8	2.0	2.8
13	3	6	1.50	1.0	2.5	3.4
14	3	8	0.50	1.2	3.0	5.0
15	3	10	0.75	1.4	1.0	5.6
16	2	2	1.25	1.0	3.0	2.2
17	2	4	1.50	1.2	1.0	2.8
18	2	6	0.50	1.4	1.5	3.8
19	2	8	0.75	1.6	2.0	4.4
20	2	10	1.00	0.8	2.5	4.6
21	1	2	1.50	1.4	2.0	2.0
22	1	4	0.50	1.6	2.5	3.2
23	1	6	0.75	0.8	3.0	3.8
24	1	8	1.00	1.0	1.0	4.0
25	1	10	1.25	1.2	1.5	3.6

表 5 顶板安全厚度极差

Table 5 Roof safety thickness extreme difference					
影响 因素	围岩水 平 A	溶洞跨 度 D/m	高跨比 R ₀	桩径 d/m	嵌岩深 度 H/m
K ₁	21.40	11.20	20.20	17.40	18.80
K ₂	19.80	15.60	19.40	18.00	15.40
K ₃	18.40	19.20	18.60	18.60	19.20
K ₄	17.80	22.60	18.00	21.00	19.60
K ₅	16.60	25.40	17.80	19.00	21.00
k ₁	4.28	2.24	4.04	3.48	3.76
k ₂	3.96	3.12	3.88	3.60	3.08
k ₃	3.68	3.84	3.72	3.72	3.84
k ₄	3.56	4.52	3.60	4.20	3.92
k ₅	3.32	5.08	3.56	3.80	4.20
极差 R	0.96	2.84	0.48	0.72	1.12

随着溶洞跨度的增大,顶板安全厚度呈现增加趋势,但安全厚度增加幅度减小,逐渐收敛;洞跨越大,桩基施工对溶洞的扰动就越大,导致应力影响范围扩大,塑性破坏区范围也随之增大。

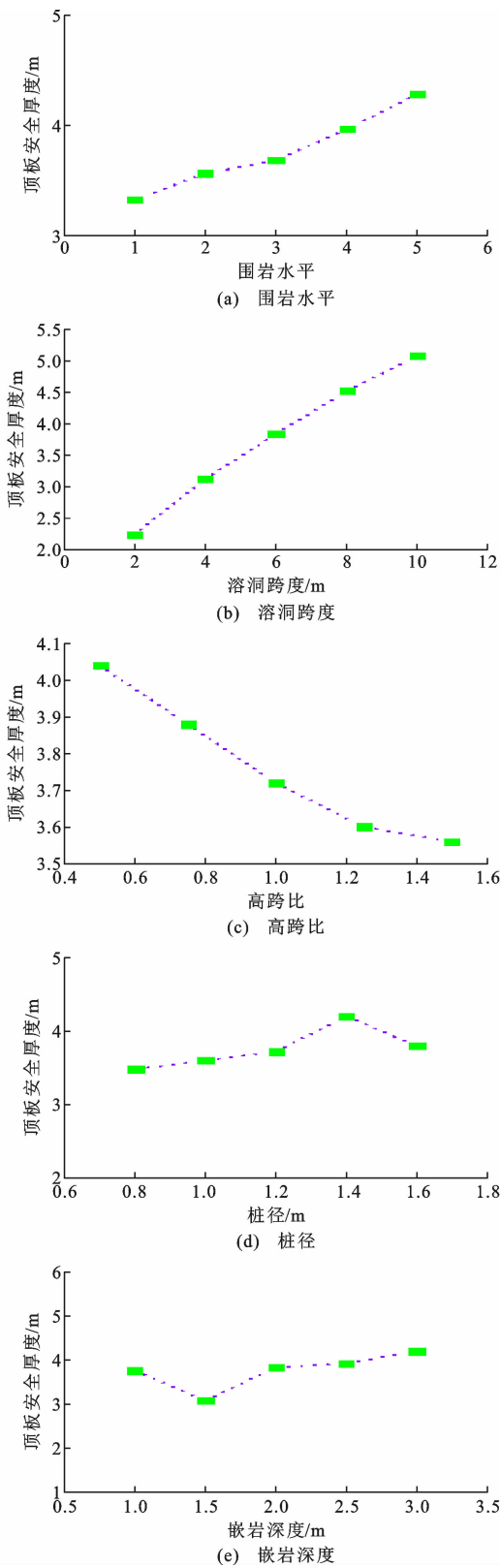


图 6 顶板安全厚度随各影响因素的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of roof safety thickness with each influence factor

对于高跨比,顶板安全厚度随着高跨比的增加呈现减小的趋势。当高跨比较小时,溶洞的形状平

而薄,所受荷载主要由溶洞顶部承担,应力较为集中,容易发生破坏。当高跨比较大时,溶洞近似于细条状,上部荷载主要由溶洞洞壁承担,应力扩散,因此顶板安全厚度减小。

当桩径变化时,顶板安全厚度变化趋势并不明显,表明桩径对桩基下伏溶洞顶板安全厚度影响有限。当嵌岩深度增加时,顶板安全厚度逐渐减小;随着嵌岩深度进一步增加,安全厚度又逐渐增加,呈现出近似抛物线的关系,因此最小安全厚度存在一个较为适宜的深度值,约为 1.5 m。

3.2 方差分析

极差分析仅能给出各因子对顶板安全厚度的影响程度,并不能准确判断各因子是否显著,因此采用方差分析统计检验 F 值的大小,估算各因子误差,确定各因子的显著性。方差分析结果如表 6 所示。

表 6 顶板安全厚度方差

Table 6 Roof safety thickness variance

差异源	SS	df	MS	F 检验值	显著性
A	2.752	4	0.688	7.818	较强
D	25.232	4	6.308	71.682	较强
R ₀	0.800	4	0.200	2.273	较弱
d	1.504	4	0.376	4.273	较弱
H	3.440	4	0.860	9.773	较强
误差	0.352	4	0.088		

注:SS 为离差平方和;df 为自由度;MS 为均方差。

从表 6 可以看出,方差分析结果与实际情况较为吻合,5 个因子的均方值均大于误差项的均方值,因此均不能列入误差,在进行多元回归分析时均应考虑。 F_A 、 F_D 、 F_R 、 F_d 、 F_H 分别为围岩水平、溶洞跨度、高跨比、桩径、嵌岩深度的 F 检验值。临界值 $F_{0.01}(4,4)=15.977$, $F_{0.05}(4,4)=6.388$, $F_R < F_d < F_{0.05}(4,4)$,因此高跨比与桩径对顶板安全厚度没有显著影响。 $F_{0.05}(4,4) < F_A < F_H < F_{0.01}(4,4) < F_D$,对于 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,溶洞跨度、围岩水平及嵌岩深度对顶板安全厚度有显著影响。

4 桩基与溶洞安全厚度预测模型

根据上述分析计算所得顶板安全厚度,从各影响因素的显著性出发,初步进行一元回归分析,将围岩水平 A、溶洞跨度 D、高跨比 R_0 、桩径 d、桩嵌岩深度 H 作为自变量,顶板安全厚度 S 作为因变量,采用 SPSS 软件进行拟合并计算相关系数,建立顶板最小安全厚度与各影响因子之间的统计关系。

顶板最小安全厚度 S 与围岩水平 A 的关系为

$$S(A)=3.116e^{0.062A} \quad R=0.992 \quad (15)$$

顶板最小安全厚度 S 与溶洞洞跨 D 的关系为

$$S(D)=1.784\ln(D)+0.876 \quad R=0.988 \quad (16)$$

顶板最小安全厚度 S 与高跨比 R_0 的关系为

$$S(R_0)=\frac{0.375}{R_0}+3.332 \quad R=0.983 \quad (17)$$

顶板最小安全厚度 S 与桩径尺寸 d 的关系为

$$S(d)=0.64d+3.016 \quad R=0.715 \quad (18)$$

顶板最小安全厚度 S 与嵌岩深度 H 的关系为

$$S(H)=0.356H^2-1.076H+4.312 \quad R=0.768 \quad (19)$$

基于上述一元方程,进行多元回归,得到桩基下伏溶洞顶板最小厚度预测模型。假设 S 与 $S(A)$ 、 $S(D)$ 、 $S(R_0)$ 、 $S(d)$ 、 $S(H)$ 存在如下线性关系

$$S=\beta_0+\beta_1S(A)+\beta_2S(D)+\beta_3S(R_0)+\beta_4S(d)+\beta_5S(H) \quad (20)$$

式中: β_i 为待定系数。

采用 SPSS 软件对表 5 中数据进行多元线性回归分析,得到桩基下伏溶洞顶板最小安全厚度预测公式,如式(21)所示。

$$S=3.109e^{0.062A}+1.747\ln(D)+\frac{0.369}{R_0}+0.62d+0.352H^2-1.065H-3.511 \quad (21)$$

由于溶洞稳定性影响因素众多,假定岩体为均匀介质,忽略了地下水渗流等影响,实际工程情况则更为复杂,因此考虑一定的安全储备,从而得到顶板最小安全厚度的最终表达式为

$$S=N[3.109e^{0.062A}+1.747\ln(D)+\frac{0.369}{R_0}+0.62d+0.352H^2-1.065H-3.511] \quad (22)$$

式中: N 为安全储备系数,取值范围为 1.1~1.4; D 取值范围为 5~20 m; A 取值范围为 1~5,围岩参数具体见表 3; R_0 取值范围为 0.5~1.5; d 取值范围为 0.8~1.6 m; H 取值范围为 1~3 m。

多元回归公式 S 的相关系数 $R=0.953$,表明变量之间具有较高的相关性。

5 模型验证

5.1 工程实例 1

根据钻孔揭露,蛤蟆滩大桥 0 号桥台的 0-3# 桩基下方发育溶洞,溶洞洞跨 6 m,溶洞水压 $p=0.15$ MPa,高跨比为 0.5。桩基可看作圆柱体,桩长 15 m,桩径 1.2 m,嵌岩深度 1 m,下伏基岩以中风化石灰岩为主,围岩等级为Ⅲ级。上覆土层加权平均重度为 $20\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,岩体重度为 $27.3\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,内摩擦角为 41° ,黏聚力为 2.56 MPa,弹性模量为 6.4

GPa,泊松比为 0.29。根据《工程地质手册》^[22],石灰岩抗压强度取 27 MPa,抗弯强度取 2.7 MPa,抗剪强度取 2.25 MPa;桩端荷载采用反算法得到 $q=4$ MPa。安全修正系数取 $N=1.1$ 。

将上述参数代入公式(22),得出基于数值分析预测的顶板最小安全厚度 S_1 为

$$S_1=N[3.109e^{0.062A}+1.747\ln(D)+\frac{0.369}{R_0}+0.62d+0.352H^2-1.065H-3.511]=4.54\text{ m}\quad (23)$$

采用抗弯、抗剪验算得到的力学模型预测安全厚度如表 7 所示。

表 7 工程实例 1 顶板安全厚度

Table 7 Roof safety thickness of engineering example 1		
梁类型	抗弯安全厚度/m	抗剪安全厚度/m
固支梁	3.53	2.51
简支梁	4.71	2.51
悬臂梁	6.01	4.37

根据地勘报告,溶洞顶板实际厚度为 2.8 m,小于顶板预测安全厚度,因此桥梁桩基是不稳定的。实际工程资料表明,桥梁桩基浇筑完成后,在 0# 桥台后期质量检验过程中发现漏浆现象,存在桥梁安全隐患。采用注浆法处理完成后,从跨孔 CT 剖面图(图 7)可以看到,该剖面注浆部位电磁波吸收系数均匀稳定,层析图像颜色变化较小,岩土层界面明显,推断该剖面没有空洞异常,岩体完整性好,治理效果较好。

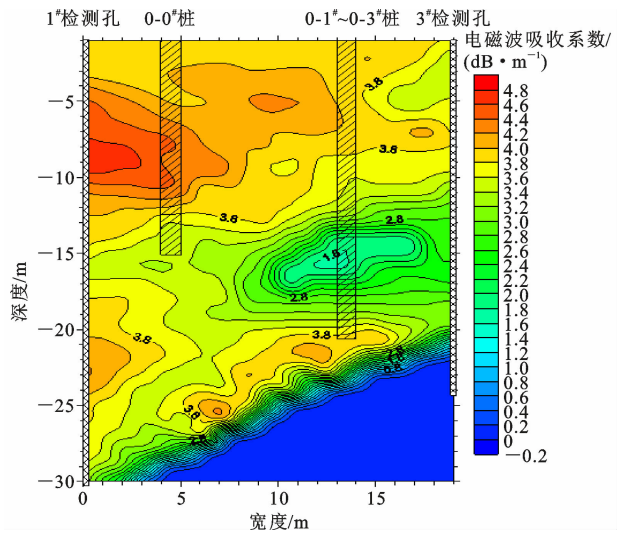


图 7 1#~3# 检测孔跨孔 CT 剖面图

Fig. 7 Cross-hole CT profile of inspection holes 1#-3#

5.2 工程实例 2

牧童寺互通——左权桐峪至河北涉县界公路新建桥梁在 K0+436.5~K0+468.5 内有一段溶洞位

于桥梁桩基下方,钻孔 MBK0+313 揭露溶洞直径 3 m,溶洞水压 $p=0.12$ MPa,高跨比为 1,桩径为 1 m,嵌岩深度为 1 m,下伏基岩以中风化灰岩为主,围岩等级为Ⅳ级。上覆土层加权平均重度为 21 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$,岩体重度为 26.5 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$,岩石抗压强度为 24 MPa,抗弯强度为 2.4 MPa,抗剪强度为 2 MPa,内摩擦角为 38° ,黏聚力为 2.5 MPa,弹性模量为 22 GPa,泊松比为 0.24,桩端荷载 $q=3.75$ MPa。

将上述参数代入公式(22),得出基于数值分析预测的顶板最小安全厚度 S_2 为

$$S_2=N[3.109e^{0.062A}+1.747\ln(D)+\frac{0.369}{R_0}+0.62d+0.352H^2-1.065H-3.511]=2.93\text{ m}\quad (24)$$

采用抗弯、抗剪验算得到的力学模型预测安全厚度如表 8 所示。

表 8 工程实例 2 顶板安全厚度

Table 8 Roof safety thickness of engineering example 2		
梁类型	抗弯安全厚度/m	抗剪安全厚度/m
固支梁	2.17	1.88
简支梁	2.53	1.88
悬臂梁	3.52	3.47

根据工程勘察资料,溶洞顶板实际厚度为 4.2 m,大于顶板最小安全厚度,因此桥梁桩基是安全的。最终桥面施工顺利完成,且溶孔并没有对桥面结构产生严重的冲击,该工程已竣工验收,表明安全厚度的模型计算结果合理可信,对实际的桥面下伏溶孔顶板安全厚度的测算具有一定的参考价值。

上述工程实例检验结果表明,基于力学模型预测安全厚度与数值分析结果基本吻合,且数值分析方法在应用于不同地质情况时切实可行,具有一定的准确性和代表性。基于力学模型预测安全厚度时,固支梁最稳定,简支梁次之,悬臂梁容易失稳,因此工程勘察中应特别注意裂隙以及裂隙位置对溶洞顶板安全厚度的影响;另外,基于力学模型的安全厚度较为保守,基于数值模拟试验得到的安全厚度相比于力学模型的预测安全厚度分别降低 1.47 m 与 0.59 m。

在工程应用中,当围岩与溶洞的边界条件和性能指标等难以完全查清时,应优先采用理论公式计算。在此基础上,应根据顶板有无裂隙和裂隙分布位置采用相应的公式,当理论公式很难直接求解或无法求解时,可通过拟合公式计算溶洞顶板安全厚度。最后,实际工程允许时,将理论分析与数值分析相结合有利于对该问题的整体把握。

6 结 语

(1)将桩基下伏溶洞顶板简化为固支梁板、简支梁板、悬臂梁板,基于结构力学理论推导得到了考虑溶洞充填物及岩体裂隙作用的桩基下伏溶洞顶板最小安全厚度计算公式。

(2)溶洞顶板最小安全厚度与围岩水平、溶洞跨度成正比,与高跨比成反比,随着嵌岩深度的增大,最小安全厚度呈现先增加后减小的趋势,随桩径的变化并不明显。整体影响程度从大到小依次为溶洞跨度、嵌岩深度、围岩水平、桩径、高跨比,各因子权重分别为0.679、0.140、0.044、0.018、0.011,并建立了桩基下伏溶洞顶板最小安全厚度预测模型。

(3)工程实例检验结果表明,基于力学模型预测安全厚度与数值分析结果基本吻合,且数值分析方法在应用于不同地质情况时切实可行,具有一定的准确性和代表性。

(4)基于力学模型预测安全厚度时,固支梁较稳定,简支梁次之,悬臂梁容易失稳,因此工程勘察中应特别注意裂隙以及裂隙位置对溶洞顶板安全厚度的影响;另外,基于力学模型预测的安全厚度较为保守,数值模拟试验的预测安全厚度分别降低1.47 m与0.59 m。

(5)由于理论公式推导中假定溶洞顶板岩层比较完整,强度较高,没有考虑顶板岩体破碎为块状和碎块状情况,实际工程应用中可根据地质勘查工况适当提高安全储备。

参考文献:

References:

- [1] 汪 婧. 基于上限分析原理的岩溶桩基破坏模式与极限承载力计算[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2207-2214.

WANG Jing. Failure mode and ultimate bearing capacity of karst pile foundation based on upper-bound theorem[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2207-2214.

- [2] 杨晓华,李爱明,李吉富. 山区既有公路桥梁桩基下伏溶洞处治技术[J]. 公路, 2020, 65(10): 100-106.

YANG Xiaohua, LI Aiming, LI Jifu. Treatment technology for underlying caves of pile foundation of highway bridges in mountainous areas[J]. Highway, 2020, 65(10): 100-106.

- [3] 赵明华,雷 勇,张 锐. 岩溶区桩基冲切破坏模式及安全厚度研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 524-530.

ZHAO Minghua, LEI Yong, ZHANG Rui. Study of

punching failure mode and safe thickness of pile foundation in karst region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 524-530.

- [4] 唐明裴,王如寒,宁平华. 基于双液高压旋喷注浆处理后桩基持力层安全厚度分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(1): 129-134.

TANG Mingpei, WANG Ruhan, NING Pinghua. Safety thickness analysis of pile foundation bearing stratum after high-pressure jet grouting of cement-water glass[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(1): 129-134.

- [5] 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.

BAI Huajun. A method for calculating the safety rock thickness of pile bearing strata with considering dead-weight of karst cave roof[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2945-2952.

- [6] 贺建清,喻畅英,肖 兰,等. 基于上限定理确定岩溶区桩端极限承载力及其下伏溶洞顶板安全厚度[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(2): 47-52.

HE Jianqing, YU Changying, XIAO Lan, et al. Determination of ultimate bearing capacity of pile tip and safety thickness of cave roofs under pile tip in karst area based on upper bound theorem[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(2): 47-52.

- [7] 赵瑞峰,赵跃平,王亨林,等. 溶洞顶板安全厚度估算[J]. 工业建筑, 2009, 39(增1): 800-803.

ZHAO Ruifeng, ZHAO Yueping, WANG Henglin, et al. Estimation of safe thickness of karst cave roof[J]. Industrial Construction, 2009, 39(S1): 800-803.

- [8] 张建华. 基于突变理论的岩溶区路基顶板安全厚度分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(3): 52-55.

ZHANG Jianhua. Analysis of cave roof safe thickness in karst region based on catastrophe theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2009, 6(3): 52-55.

- [9] 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.

ZHANG Yongjie, DENG Junqiang, YANG Xingshan, et al. Stability analysis method of pile foundation in karst area base on cavern spatial form[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(1): 37-45.

- [10] JIANG C, LIU L, WU J P. A new method determining safe thickness of karst cave roof under pile tip[J]. Journal of Central South University, 2014,

- 21(3): 1190-1196.
- [11] 梁冠亭,肖开乾,郑宏伟,等. 基于尖点突变理论的岩溶区嵌岩桩溶洞顶板安全厚度研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 67-72.
- LIANG Guanting, XIAO Kaiqian, ZHENG Hongwei, et al. A study of the safety thickness of cave roof under rock-socketed pile in karst area based on the cusp catastrophe theory[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5): 67-72.
- [12] 黄明,付俊杰,陈福全,等. 桩端荷载与地震耦合作用下溶洞顶板的破坏特征及安全厚度计算[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3154-3162.
- HUANG Ming, FU Junjie, CHEN Fuquan, et al. Damage characteristics of karst cave roof and its safety thickness calculation under the coupling effect of pile-tip load and seismic wave[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3154-3162.
- [13] 马郢,李松,朱佳,等. 确定嵌岩桩下伏溶洞顶板安全厚度的局部强度折减法[J]. 铁道建筑, 2017, 57(10): 109-112.
- MA Yun, LI Song, ZHU Jia, et al. Local strength reduction method for determining safe thickness of karst cave roof under rock socketed pile[J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(10): 109-112.
- [14] 汪华斌,刘志峰,赵文锋,等. 桥梁桩基荷载下溶洞顶板稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3655-3662.
- WANG Huabin, LIU Zhifeng, ZHAO Wenfeng, et al. Study on stability of karst cave roof under bridge pile foundation load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 3655-3662.
- [15] 王勇,乔春生,孙彩红,等. 基于 SVM 的溶洞顶板安全厚度智能预测模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 1000-1004.
- WANG Yong, QIAO Chunsheng, SUN Caihong, et al. Forecasting model of safe thickness for roof of karst cave tunnel based on support vector machines[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 1000-1004.
- [16] 赵明华,朱志仁,黄明华,等. 考虑基桩嵌岩段侧阻的岩溶区顶板安全厚度计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4201-4209.
- ZHAO Minghua, ZHU Zhiren, HUANG Minghua, et al. Study on thickness of safety for cave roofs suffered bending failure in karst areas[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4201-4209.
- [17] 张敏思,朱万成,侯召松,等. 空区顶板安全厚度和临界跨度确定的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 543-548.
- ZHANG Minsi, ZHU Wancheng, HOU Zhaosong, et al. Numerical simulation for determining the safe roof thickness and critical goaf span[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(4): 543-548.
- [18] 张华伟,谢妮,刘孔科,等. 高层建筑桩基荷载下溶洞顶板的安全厚度[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(32): 159-167.
- ZHANG Huawei, XIE Ni, LIU Kongke, et al. Safety thickness of cave roof under pile foundation of high-level building[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(32): 159-167.
- [19] 李俊杰. 广清高速桥梁桩基岩溶顶板安全厚度研究[J]. 路基工程, 2018(3): 171-175.
- LI Junjie. Study on safety thickness of karst roof in bridge pile foundation of Guangqing highway[J]. *Subgrade Engineering*, 2018(3): 171-175.
- [20] 谢书萌. 基于有限差分法的下伏岩溶对桩基承载特性的影响[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(4): 77-81.
- XIE Shumeng. Investigation on influence of underlying karst on bearing capacity of pile foundation by finite difference method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(4): 77-81.
- [21] WANG P S, DING H Y, ZHANG P Y. Influence of karst caves at pile side on the bearing capacity of super-long pile foundation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 4895735.
- [22] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Geological Engineering Handbook* Editorial Committee. *Geological engineering handbook*[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.