

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.110



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



复杂岩溶区桩基钻探的溶洞梯度角判别与可靠性分析

牟云贞¹, 张勇¹, 仇文岗², 黄乐源¹, 刘志伟¹, 张彝溢¹, 肖鹏³, 储亮⁴

(1. 长江重庆航道工程局, 重庆 400011; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 3. 重庆铁路投资集团有限公司, 重庆 400020; 4. 重庆城投基础设施建设有限公司, 重庆 400015)

摘要:在岩体地下工程施工中,常面临溶洞、断层等复杂地质条件,给桩基施工带来巨大挑战。为研究复杂岩溶地质条件下桩基钻孔数据的准确性,以江西省九江市银沙湾岩溶区桩基工程为依托,基于全场地钻孔数据,提出溶洞梯度角的空间特征概念,并采用 JC 法对钻孔数据开展可靠度分析。结果表明:该岩溶桩基施工场地钻孔见溶洞率超过 50%,岩溶发育程度极高。针对溶洞梯度角的 4 种空间分布模式,优先筛选出溶洞信息识别准确性较高的钻孔数据;利用 JC 法对准确性较低的数据开展可靠度分析后发现,以小、中、大型溶洞深度为参考计算的梯度角均服从正态分布,且钻孔对溶洞特征的识别准确度随着溶洞深度的增大而显著提高。最后,在控制补钻率的前提下提出数据筛选与优化策略,经定量指标对比验证,将补钻率控制在 5% 左右能显著提升钻探结果的可靠性。

关键词:岩溶;桩基;梯度角;JC 方法;超前钻探

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)04-0080-09

Gradient angle identification of karst caves and reliability analysis for pile foundation drilling in complex karst areas

MOU Yunzhen¹, ZHANG Yong¹, ZHANG Wengang², HUANG Leyuan¹,
LIU Zhiwei¹, ZHANG Benyi¹, XIAO Peng³, CHU Liang⁴

(1. Chongqing Yangtze River Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400011, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. Chongqing Railway Investment Group Co., Ltd., Chongqing 400020, P. R. China; 4. Chongqing Urban Investment Infrastructure Construction Co., Ltd., Chongqing 400015, P. R. China)

Abstract: In the construction of underground rock engineering, complex geological conditions are commonly encountered, especially special conditions such as karst caves and faults, which bring great challenges to pile

收稿日期:2024-08-31

基金项目:长江重庆航道工程局科技项目(H20230330);重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2022NSCQ-LZX0001);大足石刻研究院科研委托项目(GF-2000-0203)

作者简介:牟云贞(1977-),男,主要从事岩土工程研究,E-mail:1009899861@qq.com。

仇文岗(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zhangwg@cqu.edu.cn。

Received: 2024-08-31

Foundation items: Chongqing Yangtze River Waterway Engineering Bureau Science and Technology Project (No. H20230330); Chongqing Natural Science Foundation Innovation and Development Joint Fund (No. CSTB2022NSCQ-LZX0001); Dazu Rock Carving Research Institute Commissioned Project (No. GF-2000-0203).

Author brief: MOU Yunzhen (1977-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 1009899861@qq.com.

ZHANG Wengang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

foundation construction. To study the accuracy of pile foundation drilling data under complex karst geology, this paper takes the pile foundation project in Yinshawan Karst Area, Jiujiang, Jiangxi as the engineering background, and summarizes the spatial characteristics of cave gradient angles based on the drilling data of the whole site, and uses the JC method to analyze the reliability of drilling data. The results show that the cave occurrence rate of the boreholes in this karst pile foundation construction site exceeds 50%, and the karst is extremely developed. According to the four spatial distribution modes of cave gradient angle, the drilling data with higher accuracy of karst cave information are preferentially selected. The JC method is used to analyze the reliability of the data with lower accuracy, and it is found that the gradient angles calculated by taking small, medium and large cave depths as reference values all follow a normal distribution, and the accuracy of identifying cave characteristics via boreholes increases significantly with the increase of cave depth. Finally, to control the supplementary drilling rate, a data screening and optimization strategy is proposed. Through the comparison of quantitative indicators, it is verified that controlling the supplementary drilling rate at about 5% can significantly improve the reliability of drilling results.

Keywords: karst; pile foundation; gradient angle; JC method; advance drilling

桩基工程在现代土木工程中占据重要地位,其安全性和可靠性直接影响整体建筑结构的稳定性。作为桩基施工前地质勘察的重要手段,钻孔勘探能有效识别和规避施工风险^[1-3]。然而,由于地质条件具有复杂性与不确定性,钻探结果的可靠性问题亟待解决^[4-5]。基于此,科学评估与提升钻探结果的可靠性已成为该领域的研究重点。

当前,岩溶场地勘察手段多种多样,但对勘察数据准确性的合理评估仍面临许多挑战。刘动等^[6]采用模型因子法对跨孔CT岩溶识别精度进行了统计分析,证实溶洞高度预测模型因子服从韦布尔分布。杨长辉^[7]综合运用低应变反射法与钻孔取芯法对桩基进行检测,有效保障了数据参数的准确性与可靠性。Su等^[8]提出一种基于综合权重的岩溶物探评价方法,得到了由电阻率层析成像、地脉动测量和井间电阻率层析成像构成的最佳物探方案。尽管岩溶勘察手段较为丰富,但钻孔取芯法仍是获取岩溶数据最为直接有效的方法。

此外,许多学者针对岩溶场地溶洞的空间分布特征和统计信息展开了大量研究工作。吴高桥等^[9]结合随机场理论与Karhunen-Loeve理论,分析了溶洞埋深、水平偏移距离等地层溶洞特征对基础极限承载力及失效概率的影响。Wu等^[10]基于极限分析上界定理与可靠度理论,探讨了溶洞直径、隧道埋深及相隔净空距离的耦合关系对溶洞周围土体稳

定性的影响。张岩等^[11]提出了隐伏溶洞水平与垂直方向结构表征方法,实现了隐伏溶洞的全方位量化表征。张炳晖等^[12]基于高斯过程二元分类模型,提出了溶洞规模的预测方法,通过样本学习建立了溶洞规模与其影响因素间复杂的非线性映射关系。尽管现有研究在岩溶勘察方法、溶洞空间分布特征及其对工程影响分析等方面已取得较多成果,但针对岩溶地质条件下钻探数据准确性的研究仍极为匮乏。

依托江西省九江市银沙湾码头工程,对桩基施工区域开展全场钻探工作。结合钻孔资料,提出溶洞梯度角的空间特征概念,采用JC法对钻探结果进行可靠度分析,旨在探索并提升复杂岩溶地质条件下桩基钻孔数据的准确性。

1 超前钻探结果分析

勘探场地位于江西省九江市湖口县境内,地处长江九江至安庆段右岸,航行里程上距武汉约300 km,下距吴淞口约730 km,陆域地貌单元属河漫滩与河床地貌。所建工程为银沙湾水上桩基码头(如图1所示),该码头拟采用高桩梁板结构,主要包括码头平台、引桥、变电所及附属设施等。

1.1 溶洞发育规模与统计

前期钻孔勘探结果表明,拟建场地岩土类型主要为第四系素填土、粉质黏土、砂层、块石层及卵石层,下伏石炭系晚世壶天组基岩(C2h)。场区地层

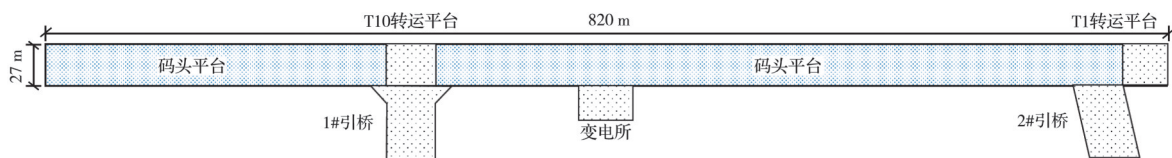


图1 码头钢平台平面布置图

Fig. 1 Layout plan of the wharf steel platform

岩土种类较多、工程性质变化显著,岩溶发育强烈。

为了统计分析含溶洞钻孔的数量及空间分布,基于全部钻孔数据,采用溶洞高度特征分类法对溶洞进行划分。当前,溶洞高度的分类标准尚不统一,其中高度小于 3 m 的溶洞普遍被认定为小溶洞,而中型与大型溶洞的分界值尚无定论。因此,结合相关研究成果选择 10 m 作为中型溶洞与大型溶洞的分界高度^[13],具体分类依据如下:

小型溶洞。单个溶洞高度小于 3 m;或多个溶洞,洞间间距大于 3 m。

中型溶洞。单个溶洞高度大于 3 m 且不大于 10 m;或多个溶洞间距较小,累计高度大于 3 m。

大型溶洞。单个溶洞高度大于 10 m;或多个间距较小的溶洞,累计高度大于 10 m。

按溶洞高度划分溶洞规模,整个银沙湾码头的溶洞数量如下:

1#引桥整体呈 T 字形,共有 70 根桩基,其中 34 根桩基下部有溶洞:26 根下部存在小型溶洞,8 根下部存在中型溶洞,最大溶洞深度达 8 m。

2#引桥整体近似呈矩形,共有 50 根桩基,其中 32 根桩基下部有溶洞:27 根下部存在小型溶洞,4 根

下部存在中型溶洞,1 根下部存在大型溶洞,最大溶洞深度达 10.3 m。

T10 转运平台呈矩形,共有 30 根桩基,其中 23 根桩基下部有溶洞:3 根下部存在小型溶洞,10 根下部存在中型溶洞,10 根下部存在大型溶洞,最大溶洞深度达 14.3 m。

T1 转运平台呈矩形,共有 30 根桩基,全部桩基下部均存在溶洞:25 根下部存在小型溶洞,5 根下部存在中型溶洞,最大溶洞深度达 6.5 m。

变电所呈矩形,共有 20 根桩基,其中 4 根桩基下部有溶洞:3 根下部存在小型溶洞,1 根下部存在中型溶洞,最大溶洞深度达 4.8 m。

整个码头平台呈矩形结构,共有 425 根桩基,其中 303 根桩基下部有溶洞:231 根下部存在小型溶洞,57 根下部存在中型溶洞,15 根下部存在大型溶洞,最大溶洞深度达 8.1 m。

如图 2 所示,整个码头平台桩基下部见洞率超过 50%。按照上述溶洞高度特征分类法统计得出,场地内中、小型溶洞占比为 93.88%,表明该码头桩基施工场地溶洞极为发育,小、中、大型溶洞在层中的空间分布极为复杂。

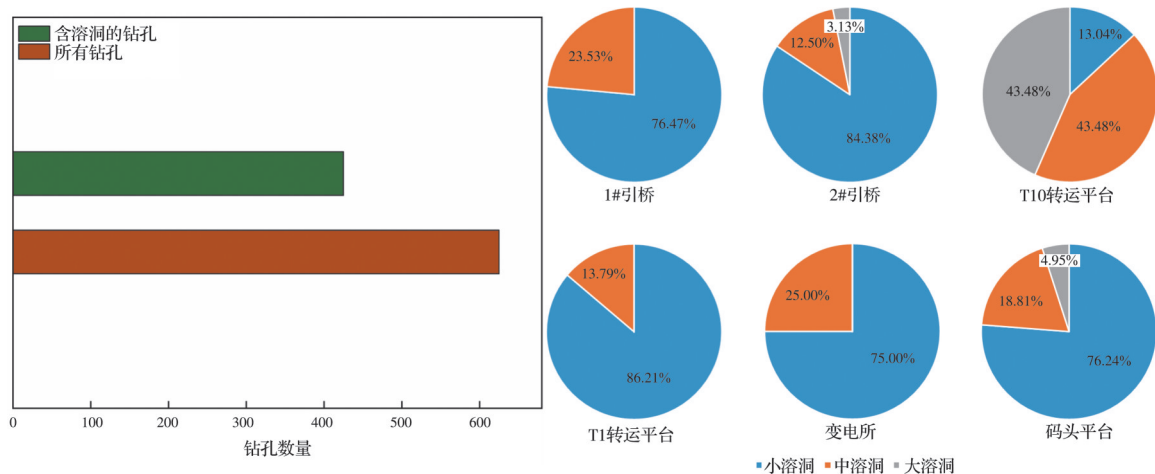


图 2 溶洞发育规模及分布特征

Fig. 2 Development scale and distribution characteristics of karst caves

1.2 梯度角判别与数据筛选

由于钻探数据较多,钻探过程中个别桩位可能出现溶洞实际深度、类型与预期不符的情况,如钻探时揭露为小型溶洞而实际施工时却发现为大型溶洞。因此,需提出筛选方法,将准确度较好的钻孔数据排除,再对剩余溶洞数据进行可靠度分析。

为此,提出溶洞梯度角的概念。如图 3 所示,溶洞梯度角定义为溶洞深度变化率与水平距离的比值,可理解为钻探过程中每前进一段水平距离的溶洞深度变化值。其计算式为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta h}{\Delta x}\right) \quad (1)$$

式中: Δh 为溶洞深度变化值; Δx 为水平距离变化值。计算梯度角时,采用行列各 3 个钻孔组成的局部数据群计算目标钻孔的溶洞深度变化值。梯度角反映钻探揭露的溶洞特征与实际溶洞的差异。溶洞梯度角越大,溶洞深度变化越快,误判的可能性越高。

通过钻探数据发现,地层岩溶发育区内,溶洞顶部基本处于同一地层,因此在计算梯度角时,可认为溶洞顶部均处在同一水平面。如图 3 所示,确

定溶洞梯度角的两个参数,共分为 4 种情况。

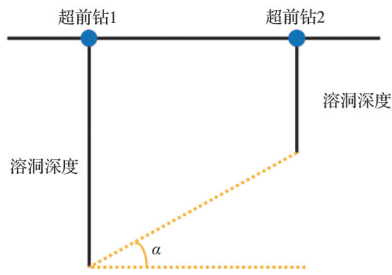


图 3 梯度角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gradient angle

情况 1: 如图 4(a)所示,在 3 行 3 列的钻孔数据范围内,5 号点位溶洞深度为局部最大值,其余 8 个点位的溶洞深度均小于该点位。因此,将 5 号点位的溶洞深度变化值作为其余 8 个点位的统一参考值,各点位与 5 号点位的水平距离即为 Δx 。

情况 2: 如图 4(b)所示,2 号、7 号点位的溶洞深度减少量均小于局部溶洞深度最大值点位的 25% (即计算其梯度角小于 15°)。因此,可认为 2 号、3 号点位属于同一溶洞,7 号、8 号点位属于同一个溶洞。同时,5 号点位附近存在两个不同溶洞,其梯度角计算应选取两个溶洞深度的较大值。

情况 3: 如图 4(c)所示,5 号点位周边 4 个相邻点位不存在溶洞,溶洞深度均为 0;而次相邻的 1 号点位溶洞深度不为 0。因此,可认为 1 号点位对应溶洞为独立溶洞,无需计算其梯度角,仅统计相邻点位的梯度角并取最大值。

情况 4: 如图 4(d)所示,2 号、3 号、6 号、7 号、8 号点位的溶洞深度变化值均小于局部溶洞深度最大值的 25%,可认为上述点位属于同一溶洞群。因此,分别计算 1 号、4 号、9 号点位的梯度角,并取其最大值。

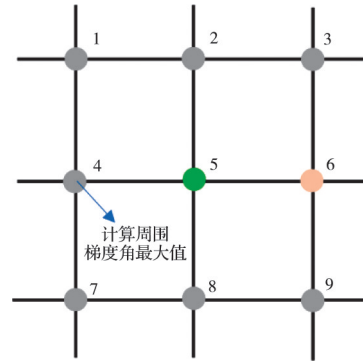
通过分析以上 4 种梯度角计算工况可知,溶洞梯度角越大,溶洞深度的降幅越明显,存在未发现的溶洞或低估实际溶洞深度的可能性也越大。

由于部分溶洞周边不存在溶洞或计算梯度角过小,因此需依据梯度角筛除准确度较高的钻孔数据。筛除超前钻探数据中梯度角小于 10° 的溶洞,对其余探明溶洞开展可靠度分析。其中,将以小型溶洞深度局部最大值为参考点计算的梯度角定义为 A 类型,以中型溶洞深度局部最大值为参考点计算的梯度角定义为 B 类型,以大型溶洞深度局部最大值为参考点计算的梯度角定义为 C 类型。

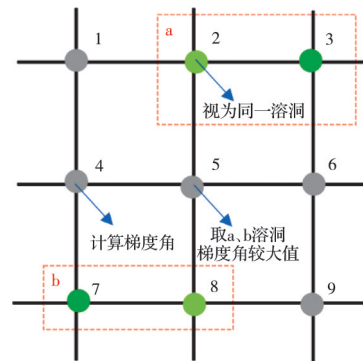
2 桩基超前钻探可靠度分析

2.1 JC 可靠度分析方法

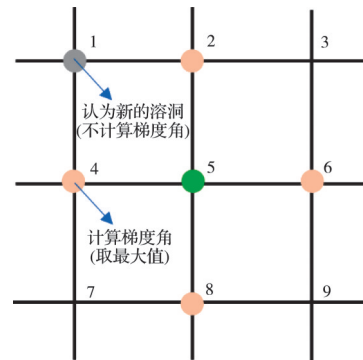
桩基钻探可靠度的计算方法包括:一次二阶矩



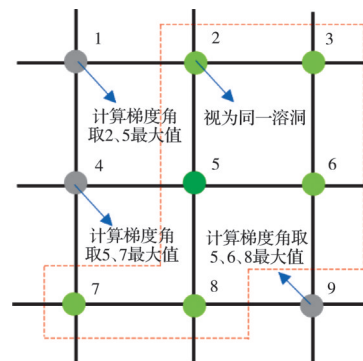
(a) 情况 1



(b) 情况 2



(c) 情况 3



(d) 情况 4

● 溶洞深度局部最大值 ● 溶洞深度非零点 ● 溶洞深度为 0

图 4 梯度角计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of gradient angle calculation

中心点法^[14]、改进一次二阶矩法^[15]、JC 法^[16]及蒙特卡罗法(Monte Carlo)^[17]等。一次二阶矩中心点法(简称一次二阶矩法)利用随机变量的平均值(一阶矩)

与标准差(二阶矩)计算结构可靠度。该方法计算简单,可导出解析表达式,能直接建立可靠指标 E 与随机变量统计参数的对应关系。但该方法仅适用于随机变量的概率分布为正态分布或对数分布,若随机变量的概率分布为非正态分布或非对数分布,结构可靠度的计算结果与实际存在较大偏差。改进一次二阶矩法以一次二阶矩中心点法为基础,考虑了随机变量非正态分布特征与极限状态函数的非线性影响,通过引入修正因子,有效提高可靠性分析精度。但该类方法计算复杂度较高,需要更多的统计信息与计算资源。蒙特卡洛法属于计算机模拟方法,通过试验、观测取得随机变量的大量子样,以子样分布近似表征随机变量母体分布,进而利用子样估算待估参数。该方法适用于随机变量概率分布已知的情况,缺点是计算样本量较大、精度易受样本数量制约,需要消耗大量计算资源。

作为结合统计学与概率论的工程可靠性分析方法,近年来 JC 法^[18]在土木工程领域得到广泛应用。该方法通过分析随机变量的联合概率分布,能较为精确地评估工程结构的可靠性。将 JC 法引入桩基超前钻探结果的分析中,可为可靠性评估提供新视角与技术途径,进而有效提升桩基设计与施工的科学性及安全性。当然,此类分布的准确性通常依赖历史数据与经验参数,若钻探或土体特性数据有限或存在误差,将会造成分析结果出现偏差与不确定性。

将 JC 法作为码头平台钻孔可靠度分析方法。针对该工程场地溶洞发育的钻孔数据,采用 JC 法构建极限状态方程,以描述结构由安全状态转变为失效状态的临界条件。极限状态方程可表述为

$$g(\theta) = \theta_{\text{crit}} - \theta \quad (2)$$

式中: θ_{crit} 为溶洞梯度角的临界值,即当溶洞梯度角达到临界值时,溶洞探测的可靠性降至不可接受水平。 θ 为实际计算得到的溶洞梯度角。当 $g(\theta) \geq 0$ 时,钻探可靠性处于可接受范围;当 $g(\theta) < 0$ 时,则表示存在未探测到的溶洞或低估实际溶洞深度的情况。

在 JC 法中,溶洞梯度角 θ 被视为随机变量。为开展可靠性分析,需确定其概率分布类型(如正态分布)及统计参数(均值 μ_θ 和标准差 σ_θ)。这些参数可通过实地钻探数据与历史数据估算得到。可靠度指数 β 作为系统安全的量化指标,反映实际溶洞梯度角与临界梯度角之间的差异程度。功能函数均值 μ_g 的计算式为

$$\mu_g = \theta_{\text{crit}} - \mu_\theta \quad (3)$$

式中: μ_θ 为溶洞梯度角的均值。在此基础上,进一步计算功能函数的方差。

$$\sigma_g = \sigma_\theta \quad (4)$$

由于 $g(\theta)$ 是 θ 的线性函数,功能函数的标准差等于溶洞梯度角的标准差。据此可计算可靠度指标

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\theta_{\text{crit}} - \mu_\theta}{\sigma_\theta} \quad (5)$$

β 值越大,表示探测结果越可靠; β 值越小,表示探测结果越不可靠。在此基础上计算失效概率,用以表征探测过程中未能准确揭露溶洞深度的发生概率,其计算方法为

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

式中: Φ 为标准正态分布的累积分布函数。 P_f 值越大,探测结果不准确的概率越高。

2.2 梯度角概况

为便于确定临界梯度角,将梯度角中值作为溶洞梯度角的临界值。中值是常用统计量,不易受极端值影响;因此,在数据分布较为分散或缺乏明确参考时,中值法是可靠的估算方法。按照不同溶洞类型分别计算梯度角中值,结果如表 1 所示。开展可靠性分析前,需确定梯度角的概率分布(如正态分布)及对应的统计参数(均值 μ_θ 和标准差 σ_θ)。正态分布拟合结果表明,C 类溶洞梯度角分布更为分散,数据离散性更强;而 A 类溶洞梯度角分布则相对集中。

表 1 溶洞梯度角中值统计

Table 1 Statistics of median values of cave gradient angles

类型	数量	中值/(°)	正态分布	
			均值 μ_θ /(°)	标准差 σ_θ /(°)
A	13	18.90	19.27	5.73
B	82	30.98	30.84	7.93
C	43	54.30	52.61	13.83

假设不同规模溶洞类型的梯度角服从正态分布,计算其均值 μ_θ 与标准差 σ_θ 两项统计参数。采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验,判定梯度角样本数据是否符合正态分布^[19]。K-S 检验的基本思想为:对比样本经验分布函数与假设的理论正态分布函数之间的差异程度。首先构造基于样本数据的经验分布函数,定义为

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(X_i \leq x) \quad (7)$$

式中: n 为样本数量; x 为不同溶洞的梯度角; $I(X_i \leq x)$ 为指示函数,用以判断样本数据 X_i 是否小于或等于 x ,如果 $X_i \leq x$,则 $I(X_i \leq x) = 1$,反之为 0。检验梯度角样本是否符合正态分布时,将理论分布函数

$F(x)$ 设定为正态累积分布函数(CDF),并结合已知的均值 μ_θ 和标准差 σ_θ 进行计算。

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu_\theta}{\sigma_\theta}\right) \quad (8)$$

继而计算经验分布函数 $F_n(x)$ 与理论分布函数 $F(x)$ 之间的最大差异 D_n 。

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (9)$$

显著性水平取 $\alpha = 0.05$, 为学界普遍接受的假设检验标准,结合样本量 n 可确定相应的临界值 $D_{\alpha,n}$ 。如果 $D_n > D_{\alpha,n}$, 则拒绝原假设(即数据不服从正态分布);如果 $D_n \leq D_{\alpha,n}$, 则接受原假设(即数据服从正态分布)。

2.3 可靠度计算结果

基于假定的数据分布模型计算得到^[20]理论分位数,作为与实际数据分位数进行对比的基准。如图 5 所示,红色直线为参照线,数据点越接近直线,表明实际数据越符合理论分布;数据点越偏离直线,表明实际数据与理论分布的差异越大。由图 5 可知,各样本点基本分布在 45° 红色直线附近,表明样本分位数与理论分位数高度相近。虽然部分区间少数数据存在小幅偏离,但整体变化趋势仍接近 45° 参照直线,表明该组样本数据整体符合正态分布假设。图 6 所示为以不同类型溶洞深度局部最大值为参考点的梯度角数值分布特征。分析可知,3 类溶洞对应的梯度角分布均服从正态分布。

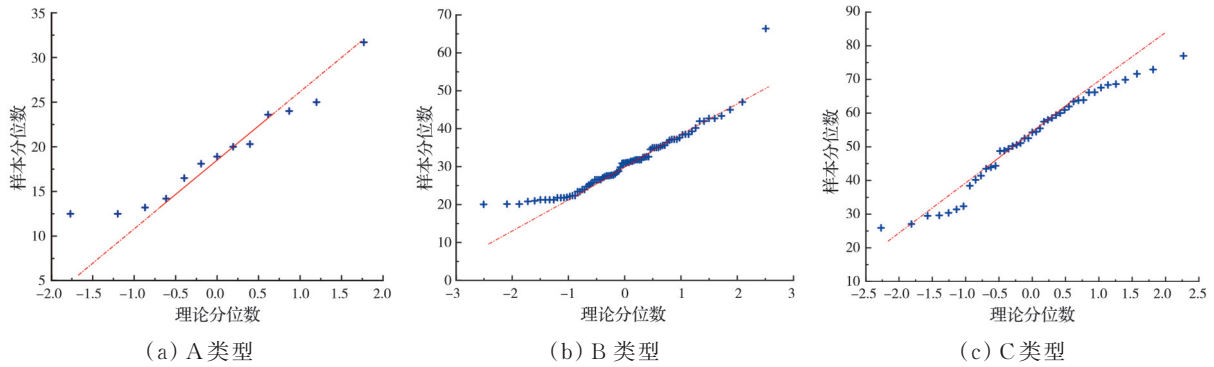


图 5 溶洞梯度角与正态分布分位数的对比

Fig. 5 Comparison of cave gradient angles and normal distribution quantiles

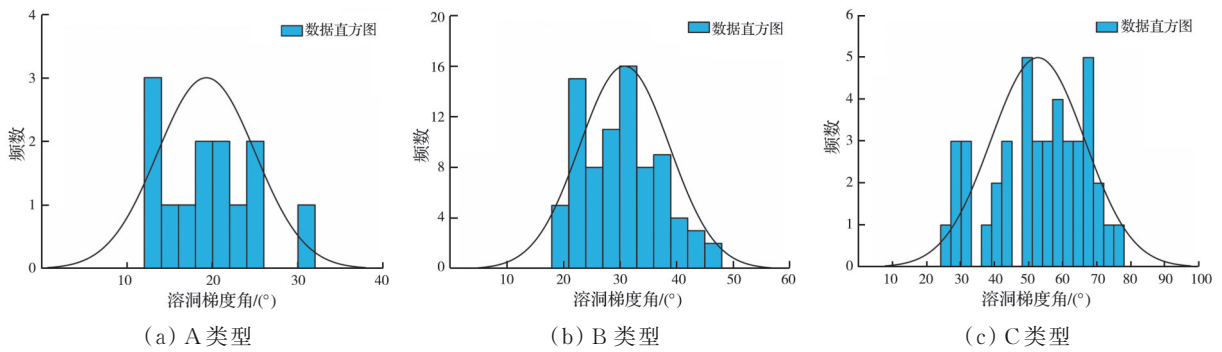


图 6 溶洞梯度角和正态分布图

Fig.6 Diagram of karst cave gradient angles and normal distribution

图 7 所示为以 3 类溶洞深度局部最大值为参考点的梯度角变化规律。由图 7 可见,分别以小型、中型、大型溶洞深度为参考值,对应的可靠度指标依次为 $-0.065, 0.018, 0.122$ 。随着溶洞深度参考值的增大,可靠度指标呈逐步上升趋势,表明以大型溶洞深度为参考值计算的梯度角所对应的钻孔数据准确性更高。

分别以小型、中型、大型溶洞深度作为参考值时,所得失效概率 P_f 依次为 $0.526, 0.493, 0.451$ 。该变化规律表明,随着溶洞深度参考值的增大,从

小型溶洞至大型溶洞,钻孔数据对溶洞特征的识别与反映能力持续提升,整体监测精度与可靠性显著提高。说明超前钻探数据识别大型溶洞特征的能力明显更强,原因可能为大型溶洞几何特征更显著、可探测性更好,进而提升了溶洞深度探测结果的准确性。

2.4 补钻数据筛选

超前钻孔施工中,常规补钻率通常控制在 $5\% \sim 10\%$ 。该范围既能确保对地下地质条件的有效探明,又可避免过度施工造成资源浪费。因此,

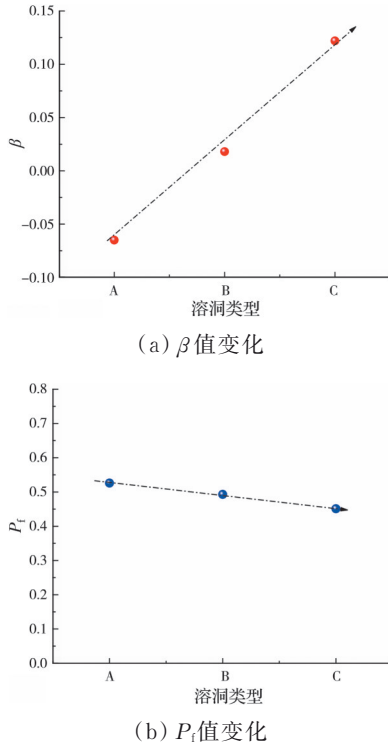


图 7 溶洞钻探准确性评估

Fig. 7 Accuracy assessment of karst cave drilling

提出一种基于随机抽样与多次迭代优化的方法,在将补钻率控制在 5%(钻孔数据量缩减至 95%)的前提下,提高可靠度指数 β 并降低失效概率 P_f 。

具体而言,从原始数据集中随机筛选 95% 的数据,计算其均值与标准差,以此评估数据对可靠度的影响。随后基于多个随机抽样结果,对比各次筛选后的 β 值和 P_f ,筛选出能显著提升可靠度的最优数据子集。通过迭代优化,最终确定能够有效提高 β 值、降低 P_f 的最佳数据组合。被剔除的 5% 数据对应区域标记为需进一步勘探与补钻的范围,以充分评估和管控这些区域存在的潜在风险。

为遍历所有筛选后的数据,保证最小失效概率,对不同规模溶洞的梯度角数据开展 10 000 次随机筛选。图 8 所示为数据筛选后的样本直方图与概率密度曲线。由图 6、图 8 可知,溶洞梯度角的正态分布趋势更为显著,说明筛除需重新钻孔的数据点能有效提升梯度角分布的匹配性。

图 9 为基于原始钻孔数据与筛选后数据计算的失效概率对比。经数据筛选,以小型溶洞深度为参考值时,失效概率 P_f 由 0.526 降低至 0.476;以中型溶洞深度为参考值时, P_f 由 0.493 降低至 0.450;以大型溶洞深度为参考值时, P_f 由 0.451 降低至 0.433。结果表明,在满足超前钻探既定补钻率的前提下,该方法不仅能有效识别需重新钻孔的点,还显著提升了整体钻探预测的准确性。

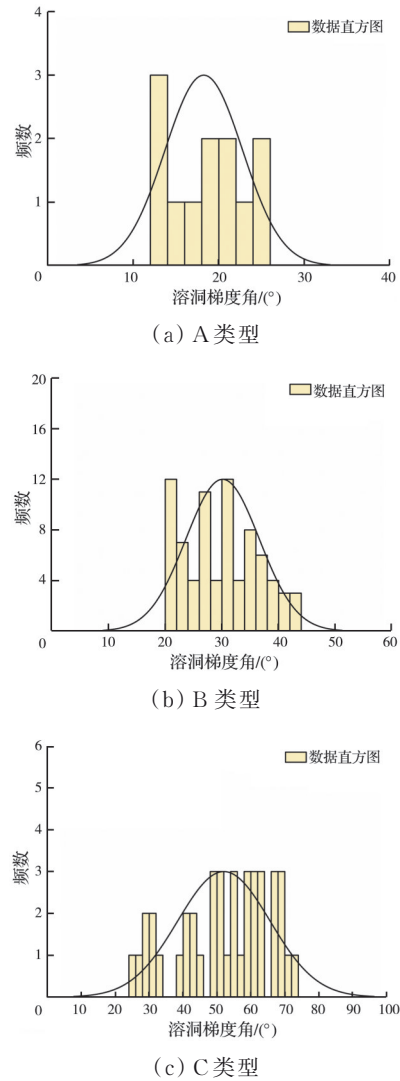


图 8 溶洞梯度角和正态分布图

Fig. 8 Diagram of karst cave gradient angles and normal distribution

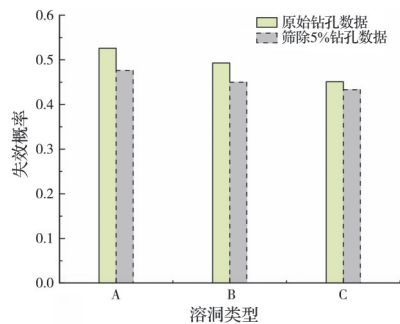


图 9 溶洞钻探准确性评估

Fig. 9 Accuracy assessment of karst cave drilling

3 结论

依托银沙湾桩基项目,基于钻孔数据,结合溶洞梯度角的空间特征,采用 JC 法对超前钻探结果开展可靠度分析,并提出一系列优化策略。主要结论如下:

1) 通过引入溶洞梯度角这一关键参数,提出一

种判别准则,用于筛选准确性较高的钻孔数据。该方法显著降低了钻探过程中的误判风险,提升了整体数据分析的精准度。经对比分析,筛选后的钻孔数据在可靠性分析中表现出更高的一致性,验证了梯度角判别准则在实际应用中的有效性。

2)对筛选后的数据开展可靠性分析时,采用JC法对不同规模溶洞的失效概率进行定量对比。研究发现,随着溶洞规模的增大,钻探数据的可靠性显著提升,失效概率逐渐降低。该结果验证了JC法对岩溶地质条件下钻孔数据分析的适用性。

3)在补钻率控制为5%的前提下,提出数据筛选优化策略。通过随机抽样与多次迭代优化对比数据筛选前后的定量指标,结果表明,优化后的数据能显著提升钻探结果的可靠性,并有效降低失效概率。该优化策略可在不增加补钻成本的前提下筛选出可靠度更高的最优数据子集。

参考文献

- [1] 石振明,刘璠,彭铭,等. 钻孔灌注桩桩底溶洞声呐探测方法及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 177-186.
Shi Z M, Liu L, Peng M, et al. A sonar detection technology for Karst cavities under bored piles and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 177-186. (in Chinese)
- [2] 吴远斌,刘之葵,殷仁朝,等. 湖南怀化盆地岩溶发育特征与分布规律[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 759-772, 807.
Wu Y B, Liu Z K, Yin R C, et al. Karst development characteristics and distribution law in Huaihua basin, Hunan Province[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 759-772, 807. (in Chinese)
- [3] 曹进海,叶胜林,肖代胜,等. 岩溶强发育及超厚回填土地层钻孔灌注桩施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1): 17-22, 54.
Cao J H, Ye S L, Xiao D S, et al. Construction technology of bored pile in Karst strong development and super thick backfill soil layer[J]. Construction Technology, 2024, 53(1): 17-22, 54. (in Chinese)
- [4] 刘动,林沛元,陈贤颖,等. 深圳岩溶空间发育规律统计分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1899-1912.
Liu D, Lin P Y, Chen X Y, et al. Statistical analysis of Karst spatial distribution in Shenzhen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1899-1912. (in Chinese)
- [5] 袁永才,李术才,李利平,等. 岩溶隧道施工过程中大型溶洞的综合预报及治理方案研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(2): 192-197.
Yuan Y C, Li S C, Li L P, et al. Comprehensive geological prediction and a relevant treatment scheme for a large Karst cave in tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2): 192-197. (in Chinese)
- [6] 刘动,林沛元,李伟科,等. 跨孔CT岩溶识别方法准确性的统计学评价[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 822-834, 926.
Liu D, Lin P Y, Li W K, et al. Statistical evaluation of accuracy of cross-hole CT method in identifying Karst caves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(3): 822-834, 926. (in Chinese)
- [7] 杨长辉. 桩基检测中低应变反射法与钻孔取芯法运用研究[J]. 中国建筑金属结构, 2022(9): 58-60.
Yang C H. Study on the application of low strain reflection method and drilling coring method in pile foundation detection[J]. China Construction Metal Structure, 2022 (9): 58-60. (in Chinese)
- [8] Su M X, Li C C, Xue Y G, et al. Engineering application of fuzzy evaluation based on comprehensive weight in the selection of geophysical prospecting methods[J]. Earth Science Informatics, 2022, 15(1): 105-123.
- [9] 吴高桥,聂建国. 考虑地层空间变异性的岩溶区基础可靠度分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(7): 45-53.
Wu G Q, Nie J G. Reliability analysis of footings lying on karst area considering spatial variability of stratum [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 45-53. (in Chinese)
- [10] Wu B, Sun W T, Cai G W, et al. Reliability analysis of shallow-buried tunnel construction adjacent to karst cave [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 145: 104673.
- [11] 张岩,汪进超,刘厚成,等. 基于定向声波扫描的钻孔围岩隐伏溶洞表征与分析方法[J]. 岩土力学, 2024, 45(5): 1435-1445.
Zhang Y, Wang J C, Liu H C, et al. Characterization and analysis method of hidden karst caves in borehole surrounding rock based on directional acoustic scanning technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1435-1445. (in Chinese)
- [12] 张炳晖,张研,王伟,等. 基于高斯过程二元分类模型的溶洞规模预测方法[J]. 中国岩溶, 2020, 39(2): 259-263.
Zhang B H, Zhang Y, Wang W, et al. A prediction method of karst cave scale based on the binary classification model of the Gaussian process[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(2): 259-263. (in Chinese)
- [13] 颜波,卢辉. 岩溶地段桩基施工溶洞决策表法处理研究及应用[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(12): 5-8.
Yan B, Lu H. Research and application of decision table method in pile foundation construction of karst area[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26

- (12): 5-8. (in Chinese)
- [14] 徐铭阳, 刘林江. 可靠度理论及一次二阶矩法概述[J]. 山西建筑, 2016, 42(8): 67-68.
Xu M Y, Liu L J. Illustration on reliability theory and first-order second-moment method[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(8): 67-68. (in Chinese)
- [15] 吴雪莉, 姜进, 张乐民, 等. 改进的一次二阶矩法在隧道可靠度中的应用[J]. 工业建筑, 2008, 38(增刊 1): 694-697.
Wu X L, Jiang J, Zhang L M, et al. Application of the improved first order second moment method(fosm) in tunnel reliability[J]. Industrial Construction, 2008, 38 (Sup 1): 694-697. (in Chinese)
- [16] 杨上清, 蒋玉川, 帅培建. 基于ANSYS和JC法的高土石坝动力可靠度稳定性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(3): 130-133.
Yang S Q, Jiang Y C, Shuai P J. Stability analysis of dynamic reliability of high earth-rock dams based on ANSYS and JC method[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(3): 130-133. (in Chinese)
- [17] 吴炫. 基于蒙特卡洛法的滑坡稳定性分析及加固设计研究[J]. 交通世界, 2021(30): 140-141.
Wu X. Study on stability analysis and reinforcement design of landslide based on Monte Carlo method[J]. TranspoWorld, 2021(30): 140-141. (in Chinese)
- [18] 蔡红超, 潘健. 基于JC法的砂土液化判别方法[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(2): 306-310, 320.
Cai H C, Pan J. Liquefaction assessment method based on JC method and its application[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(2): 306-310, 320. (in Chinese)
- [19] 李远耀, 殷坤龙, 柴波, 等. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1419-1424, 1429.
Li Y Y, Yin K L, Chai B, et al. Study on statistical rule of shear strength parameters of soil in landslide zone in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1419-1424, 1429. (in Chinese)
- [20] 马莲净, 赵宝峰. 基于对数正态分布的井下疏放水钻孔水量分析[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 140-146, 153.
Ma L J, Zhao B F. Water yield analysis of underground drainage boreholes on the basis of logarithmic normal distribution[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47 (3): 140-146, 153. (in Chinese)

(编辑 朱备)