

郭辉, 牟云贞, 仇文岗, 等. 复杂岩溶地区的钢护筒群承载机理数值模拟研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 136-146.

DOI: 10.11932/karst2024y012

复杂岩溶地区的钢护筒群承载机理数值模拟研究

郭辉¹, 牟云贞², 仇文岗³, 陈斐², 张艳梅³, 王硕³, 林思成³

(1. 江西省港口集团, 江西九江 330008; 2. 长江重庆航道工程局, 重庆 400011; 3. 重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 岩溶区桩基施工过程中, 隐伏溶洞空间分布的不确定性导致施工过程风险性提高, 尤其是搭设钢护筒时, 结构荷载超过钢护筒侧摩阻力, 可导致钢护筒下沉对施工工作面带来安全风险。文章以江西九江银沙湾复杂岩溶区桩基施工工程为例, 模拟研究了岩溶区钢护筒群的承载特性。结果表明: 整个施工区域岩溶非常发育, 溶洞占比为 76.2%, 溶洞的最大高度为 17.3 m, 且存在大溶洞串洞现象。按照大溶洞区空间分布特点, 钢护筒群下沉模式分为三种, 三角形区钢护筒群下沉、矩形区钢护筒群下沉和单排型钢护筒群下沉。提出预设指定位移来反分析钢护筒群下沉过程的模拟方法, 模拟结果显示, 隐伏大溶洞区施工方式应该按照外侧优先成桩, 内侧选点成桩方式进行。

关键词: 岩溶区; 钢护筒; 承载特性; 数值模拟; 失效分析

创新点: 模拟复杂岩溶区钢护筒施工的过程, 提出预设指定位移反分析受力的钢护筒群承载特性和下沉模式, 优化现场施工流程, 有效降低施工风险。

中图分类号: U656.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2025) 01-0136-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

溶洞是地下水在岩石中流动和侵蚀形成的, 其内部结构复杂、不规则, 并且地下水的作用会使溶洞中的岩层不稳定, 导致地下结构的不连续, 稳定性差, 对桩基或浅基础力学性能产生不利影响^[1-6]。在这种地质条件下, 桩基施工需要采用特殊的工程技术措施, 以保证施工的安全和工程质量。溶洞地区地下岩层结构复杂, 地下水流动侵蚀, 容易引起地质灾害, 给桩基施工带来很大的不确定性或风险^[7]。钢护筒作为桩基施工中常用的保护桩身的设备, 其失效可能导致桩身的沉降或崩塌, 给施工带来巨大的安全风险和经济损失^[8]。一种主要的失效原因是钢护筒所承受的侧向摩阻力不足以支撑周围地层的荷载^[9]。在桥梁桩基施

工中, 不良的岩溶地质条件常需要埋设一定深度的钢护筒来承担部分荷载, 钢护筒下沉或者变形常常会导致施工周期拖延、成桩质量差, 甚至会造成工作面塌陷, 给施工单位带来生命财产损失^[10]。因此, 对于钢护筒的承载机理研究具有重要意义。

在复杂岩溶区桩基施工中, 常常遇到强发育岩溶区, 溶洞高度较大(溶洞高度大于 3 m), 一般采用钢护筒跟进法进行施工^[11-12]。钢护筒跟进施工技术一般包括施工准备、挖掘机开孔、冲击钻机就位、钻孔护筒跟进、多次钻进、成孔和清空^[13-14]。钢护筒跟进法适用于多种地质条件, 包括软土、淤泥、沙土、岩溶地质等。在强发育的岩溶区, 常规施工方法进行桩基施工可能导致工作面塌陷。例如武广客运专线临湘特大桥区地层岩溶裂隙非常发育, 见洞率超

资助项目: 长江重庆航道工程局科技项目(H20230330); 四川省交通运输科技项目(2018-ZL-01)

第一作者简介: 郭辉(1988-)男, 工程师, 主要从事公路水运工程施工项目管理。E-mail: 804071291@qq.com。

通信作者: 仇文岗(1983-)男, 教授, 博士, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn。

收稿日期: 2023-07-04

过80%,复杂的岩溶地质条件导致施工场地常发生地面沉陷问题^[15]。目前,钢护筒施工工艺方法得到了广泛改进,鲍庆伟等^[16]采用了基岩面以上先下放钢护筒后钻进的方法施工,基岩面以下先钻进成孔后下放钢护筒的方法解决了龙岩大桥区地层岩溶强烈发育,施工难度大的问题。邵文勇等^[17]针对富水岩溶区域桥梁桩基施工,提出了采用管节式钢护筒的施工工艺,有效地封堵了桩基施工过程中触及的溶洞,大大降低了施工成本。冯忠居等^[18]通过数值模拟手段分析了回填法和钢护筒跟进法两种不同处治措施对桩基承载特性的影响,指出溶洞高度大于10 m时需要考虑不同处置措施对承载力的影响。尽管许多研究学者针对岩溶区钢护筒的施工工艺和对桩基承载性能影响进行了研究,但对于强发育岩溶区钢护筒侧摩阻力不足导致工作面沉陷的问题涉及较少。

本文以江西九江银沙湾在建码头为例,采用了超前钻探和管波成像探测的方式对隐伏溶洞进行了勘探。钻孔见洞率83.4%,整体溶洞比较发育,超大型溶洞的高度超过17 m,填充类型主要为全填充型,填充物主要为软塑状黏性土夹溶蚀的灰岩碎块,少量为角砾混黏性土或圆砾石。基于以上地质概况,根据钻孔数据建立三维地质模型,对隐伏大溶洞群可能导致的钢护筒群下沉风险进行分类,通过预设指定位移研究溶洞区上部钢护筒的承载性能,对承载力较大的钢护筒优先成桩,从而为整个溶洞区的成桩流程进行优化。

1 工程地质概况

1.1 地理和地貌条件

拟建码头区位于江西九江银沙湾,本次桩基工程共计完成625根桩施工(图1)。由于复杂的岩溶地质条件,施工主要采用了钢护筒跟进法,焊接钢平台进行桩基施工。工程区的河堤为斜坡地形,整个河堤较直,岸坡坡度较陡,水蚀作用明显,风浪较大。目前海岸相对稳定,陆面高程在11.26~20.67 m,地面坡度平缓。银沙湾码头伸入长江50~150 m,长江地面高程为-13.78~5.00 m。大部分区域以平缓倾角向河床倾斜,码头区域整体落地坡度较陡。引桥区西侧位于晨光码头东侧。护岸绿地宽100~150 m,有灌木和人工种植的桦树,有不同宽度的不连续抛石带保护堤岸。晨光码头建有石坡,其余区域为人工填埋或天然岸坡。桥墩南侧为防洪堤,防洪堤高程为20.50~21.60 m,防洪堤宽4.8~8.4 m。场地大致呈长方形,北临长江,南临沿江路,西临晨光码头,东临红光码头。周边区域较为开阔,基本为绿地或植被。

1.2 岩层岩性

工程场地覆盖层主要为填土、粉质黏土、粉细砂,据本次钻探揭露,场地地层主要由现代人工填土层(Q_4^{ml})、第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})和下伏石炭系晚世壶天组灰岩(C_2h)组成。按岩性及工程特性,自上而下分六大层。由于本次陆域堆场区有些地层码

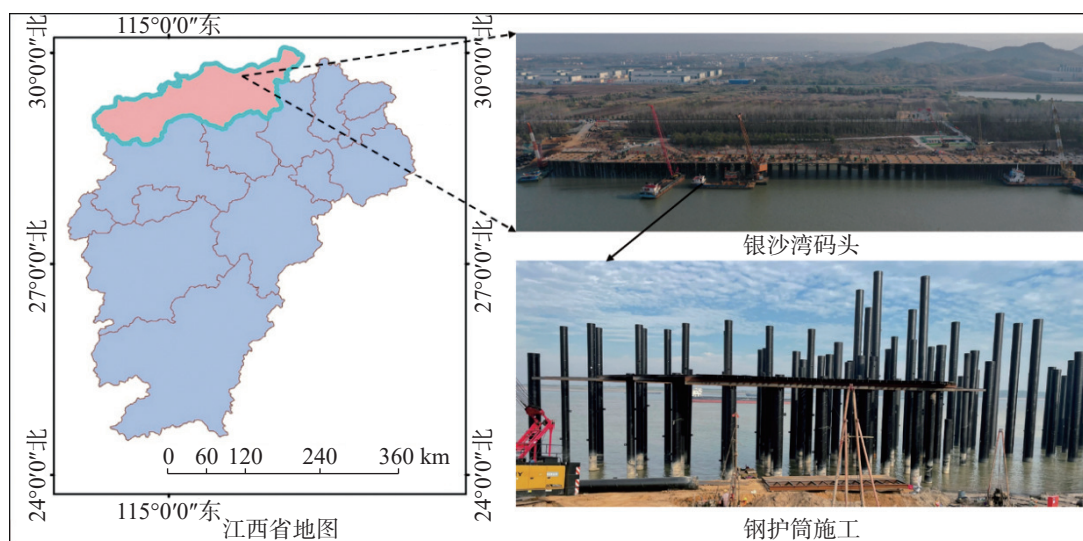


图1 银沙湾码头平面布置图

Fig. 1 Layout of Yinshawan Wharf

头及引桥区未揭示,为保持堆场区、引桥区及码头区的一致性,引桥及码头区部分地层缺失,故地层编号存在不连续性,依次划分为①-1 素填土(Q_4^{ml})、②-2 粉质黏土(Q_4^{al+pl})、②-3~②-5 粉细砂(Q_4^{al+pl})、②-6 块石(Q_4^{al+pl})、③角砾混黏性土(Q_4^{al+pl})、⑤卵石(Q_4^{al+pl})、⑥-1 灰岩(C_2h)、⑥-2 溶洞。

1.2.1 现代人工填土层 (Q_4^{ml})

现代人工充填土层(Q_4^{ml})以灰褐色和黄褐色为主,结构松散,局部密集。填料主要为粉质黏土、细砂、砾石,含少量角砾岩,粒度为 2~70 mm,形状呈棱角状。

1.2.2 第四系全新统冲洪积层 (Q_4^{al+pl})

第四系全新统冲洪积层主要包括②-2 粉质黏土(Q_4^{al+pl})、②-3 粉细砂(Q_4^{al+pl})、②-4 粉细砂(Q_4^{al+pl})、②-5 粉细砂(Q_4^{al+pl})、②-6 块石(Q_4^{al+pl})、③角砾混黏性土(Q_4^{al+pl})、⑤卵石(Q_4^{al+pl})。

1.2.3 石炭系壶天组 (C_2h)

该地层主要包括⑥-1 中风化灰岩和⑥-2 溶洞,该风化层埋深不均,其岩面起伏极大,层位相对稳定,连续性较好,工程性质好,可作为建筑物桩基持力层。溶洞充填物主要为流塑—软塑状黏性土夹溶蚀的灰岩碎块,少量角砾混黏性土或圆砾,密度多为松散或中密状态,该层分布不均匀且无规则。

拟建场地及其附近无活动性断裂,勘察也未发现有断裂痕迹。场地不存在滑坡、崩塌、泥石流、采空区等不良地质作用。区域构造属地壳稳定区域,地震活动水平属中偏低,拟建场地稳定。

1.3 上部平台结构荷载信息

图 2 所示,整个钢护筒上部结构焊接牛腿,牛腿上部搭设横梁,横梁上部铺设钢板。由于将上部钢平台作为刚体,因此需要把钢平台上部荷载以及钢平台自重均转化为均布面荷载,系船柱传递的荷载简化为点荷载^[19]。钢平台面荷载统计如表 1,整个平台荷载包括恒载和活载,其中恒载包括各类结构的自身重量,取值均按照设计规范进行处理。活载主要为施工荷载、机械荷载和水流荷载。施工荷载包括施工人员及设备荷载等,按 $2\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 进行取值。钻机荷载考虑冲击系数,取值为 1.3,机械自重 10 t,钻头重 5 t,考虑最多三台钻机同时施工,转化为面

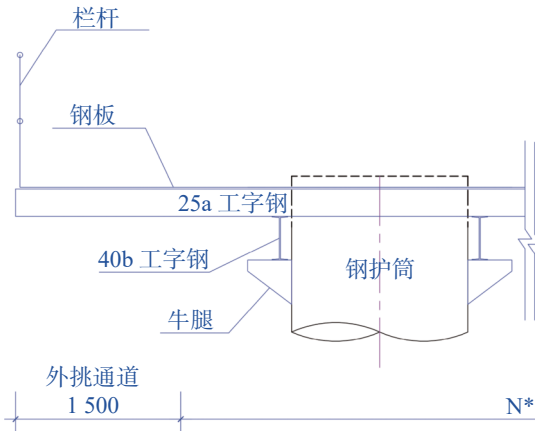


图 2 施工平台布置示意图

Fig. 2 Layout of construction platform

表 1 钢平台面荷载统计表

Table 1 Statistics of steel platform surface load

		面荷载/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$
恒载	荷载类型	
	钢面板自重	0.69
	横梁自重	0.38
	纵梁自重	0.64
	栏杆自重	0.06
	钢管柱及钢横撑自重	20.50
活载	钢横撑自重	1.27
	施工荷载	2.00
	机械荷载	1.65
	水流荷载	1.17

荷载为 $1.65\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。依据《港口工程荷载规范》(JTS144-1-2010)^[20],水流荷载为面荷载,取值为 $1.17\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,作用在钢护筒侧面。

2 复杂岩溶区施工风险分析

2.1 复杂岩溶区地质概况

前期施工勘测发现银沙湾下存在较多溶洞,且溶洞具有一定规模,因此在施工进行阶段,采取了钻孔和管波成像探测结合的方式进行一桩一探。本次共计施工完成 625 根桩,根据钻探结果显示,成桩区地层见洞率为 76.2%。整体溶洞数量较多,且部分区域溶洞规模较大。根据溶洞的高度可将溶洞分为超大型、大型、中型及小型溶洞。超大型溶洞高度大于 8 m,大型溶洞高度在 5~8 m 之间,中型溶洞高度在 1~5 m 之间,小型溶洞高度在 0.1~1.0 m 之间。中型以上溶洞占比为 45%(图 3),表明整个地层的溶洞存在较多中大型溶洞,溶洞空间分布的不确定性极

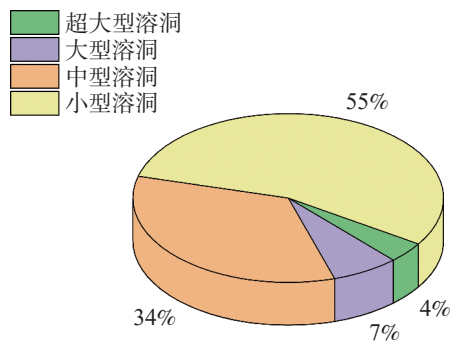


图 3 不同类型大小溶洞占比

Fig. 3 Proportions of karst caves with different sizes

易导致施工出现安全问题。当前施工方式主要是在成桩区打入钢护筒，然后搭建上部工作平台。由于部分岩溶区的溶洞高度较大且存在串洞情况，上部结构荷载过高可能导致钢护筒的侧摩阻力无法承受巨大荷载，从而出现钢护筒下沉、工作面塌陷等，产生巨大施工危害。

2.2 钢护筒群下沉风险分析

本次选取了复杂的隐伏大溶洞区的地层对钢护筒下沉风险进行分类评估。如图 4 所示，桩的横向间距为 9 m，纵向间距为 6 m。A1、B1、C1、A5、B5、C5 均已浇筑成桩，隐伏大溶洞位于中间未成桩的区域。由于隐伏大溶洞的存在，中间注浆形成的桩可能会面临塌孔、漏浆等事故，在灌注成桩前需要打入钢护筒，依靠刚护筒的侧摩阻力支撑上部结构荷载，因此有必要对桩基上部结构进行计算。当中间桩基础仅依靠钢护筒的侧摩阻力时，上部钢板结构在两端 A1、B1、C1、A5、B5、C5 上进行支撑。考虑到中间不同钢护筒的侧摩阻力破坏情况，需要对整个结构进行模拟，找出最不利的钢护筒群下沉组合。研究区域的地下溶洞多为双层溶洞，第二层溶洞高度一般大于 16 m。

根据实际大溶洞区的空间分布，按照隐伏大溶洞群可能导致的钢护筒群下沉的风险进行分类，主要分成了 3 种，包括三角形区钢护筒群下沉、矩形区钢护筒群下沉和单排型钢护筒群下沉(图 5)。单排型钢护筒群下沉风险模式为钢护筒 A2、A3、A4 失效，矩形区钢护筒群下沉风险模式为钢护筒 A2、A3、B2、B3 失效，三角形区钢护筒群下沉风险模式为钢护筒 A2、B2、C2、A3、B3、A4 失效。依据失效钢护筒下方对应的溶洞规模，在三种钢护筒下沉模式中，三角区钢护筒群下沉所带来的危害最大，其次是矩形区钢护筒群下沉和单排型钢护筒群。分别采用模拟钢护筒群下沉，通过指定失效钢护筒群下沉位移，可以反分析其他未失效结构群体的承载性能，从而对整个钢护筒群的成桩顺序进行优化。

3 钢护筒群下沉数值模拟

3.1 模型建立

本次数值模拟所采用的数值模拟软件为 PLAXIS，建立数值模型所需的钻孔数据来自隐伏大溶洞群区的超前钻探数据^[21-22]。针对隐伏大溶洞群，选取了重点区域构建模型，共计选取 15 组钻孔数据，钻孔点沿着钢平台长度方向分为 3 行，沿着钢平台宽度方向分为 5 列。其中最外侧两列已经成桩，内侧三列钢护筒下存在超大溶洞群，且部分溶洞为串洞。两侧灌注桩和中间钢护筒群都是采用嵌入式梁单元进行模拟，该单元内置了土与结构的接触界面，因此不用额外设置接触单元，具体设置参数见表 2 和表 3。考虑超大溶洞群的存在影响，将地层底部溶洞建立为整体空壳结构，上部插入钢护筒(图 6)。整体地层主要为土体，部分细粉砂接近土体属性，因此

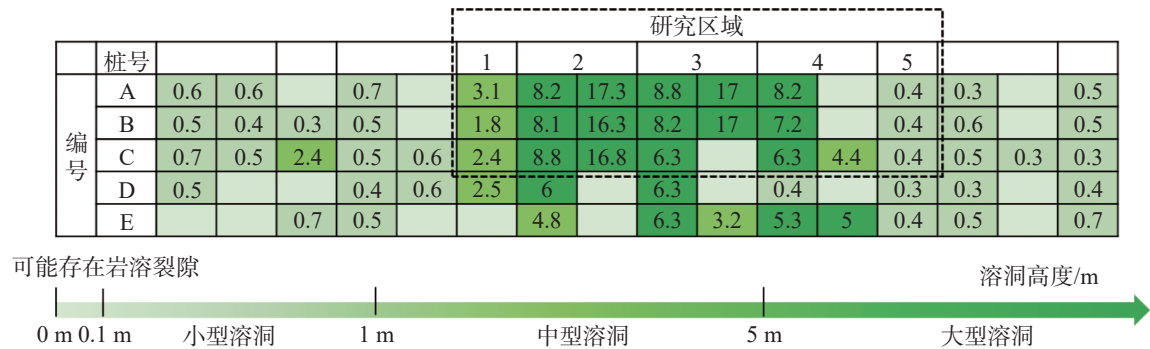


图 4 隐伏大溶洞空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of large covered karst caves

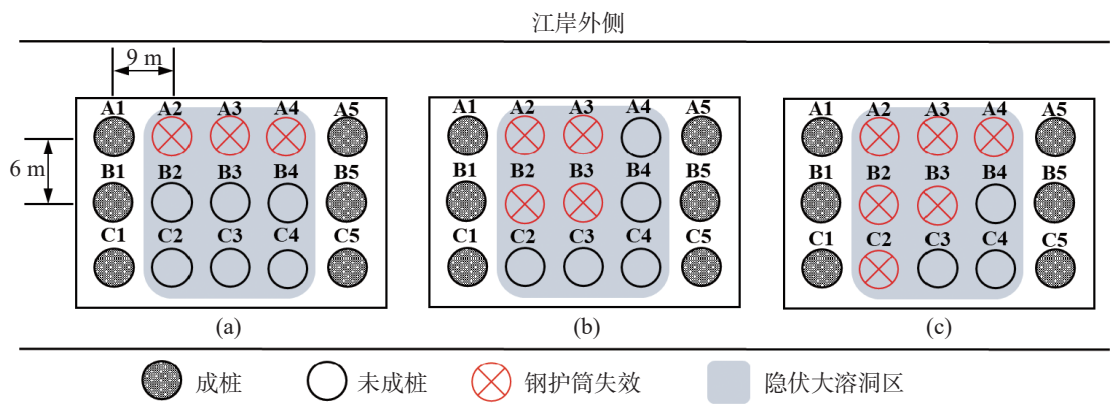


图5 钢护筒群下沉风险分类

注: (a) 单排型钢护筒群失效, (b) 矩形区钢护筒群失效, (c) 三角形区钢护筒群失效。

Fig. 5 Classification of sinking risk of steel casing groups

Note: (a) Failure of single-row steel casing group; (b) Failure of rectangular steel casing group; (c) Failure of triangle steel casing group.

表 2 岩土材料参数

Table 2 Geotechnical material parameters

	重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 $E_{50}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$	黏聚力 $C/\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$	摩擦角 $\Phi/^{\circ}$
抛石	22.0	1.00×10^5	27.5	45
粉质黏土	18.8	6.37×10^3	19.0	11
粉细砂1	19.0	1.17×10^4	3.0	21
粉细砂2	20.0	1.56×10^4	0	28
粉细砂3	20.0	2.21×10^4	0	31
灰岩	21.8	1.00×10^5	2.5×10^4	60

本次模拟土体的材料模型采用了土体硬化, 钢护筒与钢板结构的材料模型为线弹性^[23-25]。

3.2 单排钢护筒群下沉

图 7 所示, 不考虑已经成桩的点 A1、B1、C1、A5、B5 和 C5, 当钢护筒 A2, A3 和 A4 发生下沉时, 轴力最大点位于 A4 处, 纵向弯矩最大点位于 A2 和 A4 处, 横向弯矩最大点位于 A2 和 A4 处。图 8 显示了钢护筒 A2, A3 和 A4 同步下沉时地层产生不均匀

表 3 梁与钢护筒参数

Table 3 Beam and steel casing parameters

	重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 $E_{50}/\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	截面面积/ m^2	惯性矩 I_2/m^4	极限侧摩阻力标准值/ kN	极限端阻力标准值/ kN
梁	78.5	2×10^{11}	9.5×10^{-3}	7.19×10^{-6}	\	\
钢护筒	78.5	2×10^{11}	5.0×10^{-3}	2.01×10^{-6}	70~350	\
混凝土桩	25.0	3×10^{10}	1.65	2.17×10^{-1}	100~600	4500

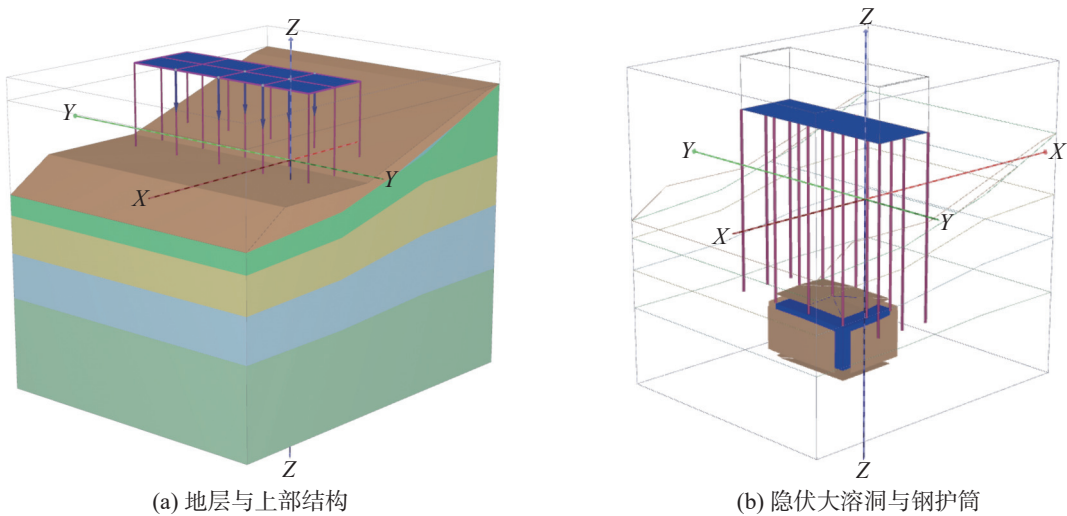


图6 数值模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the numerical model

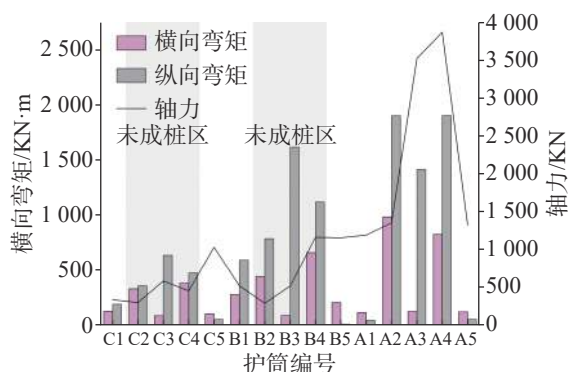


图7 承载力计算结果

Fig. 7 Calculation result of bearing capacity

位移沉降情况, 钢护筒 A3 处的沉降位移最大, 位移向四周逐渐减小。对两侧成桩的区域, 不需要提供非常大的弯矩和轴力, 其中成桩点 A5 所承担的轴力最大, 轴力为 1 331 kN, 不超过设计值 1 500 kN, 此类钢护筒群下沉模式不会导致成桩区承载力过高, 超过桩基设计承载力。

对于未下沉的钢护筒群, 主要受力点位于钢护筒 B3 和钢护筒 B4 处, 其中 B3 处需要提供足够大的纵向弯矩, 纵向弯矩值为 1 620 kN·m。钢护筒 B4 既需要提供足够大的弯矩, 最大弯矩值为 664.6 kN·m, 也需要提供较大的轴力。综合按照受力大小的顺序, 需要优先考虑对钢护筒 B3 和钢护筒 B4 处优先灌注

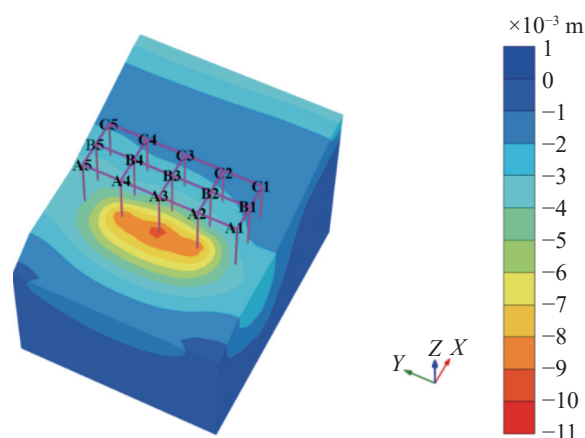


图8 沉降位移云图

Fig. 8 Cloud map of settlement displacement

成桩(图9)。在单排型钢护筒群失效情况下, 优先成桩点可以补充足够承载力, 从而降低岩溶区塌陷所带来的工作面塌陷的风险。

3.3 矩形区钢护筒群下沉

图10所示, 不考虑已经成桩的点 A1、B1、C1、A5、B5 和 C5, 由于隐伏大溶洞的影响, 当结构上部荷载增大导致钢护筒 A2、A3、B2 和 B3 下沉时, 其主要的轴向受力点均来自下沉的 4 根钢护筒, 横向弯矩最大值位于钢护筒 B2 区域, 其次是钢护筒 A2

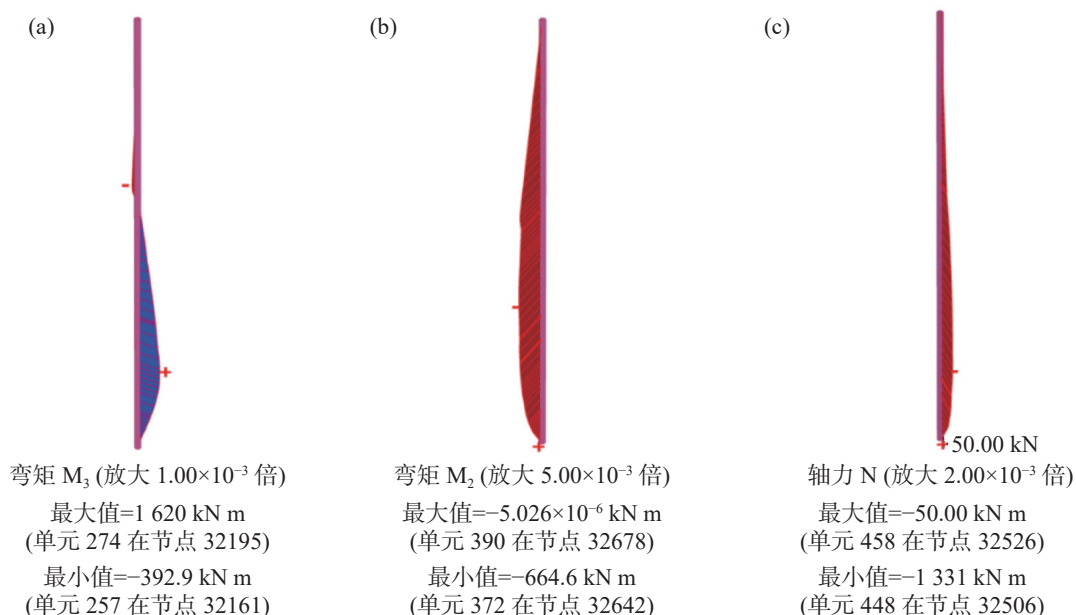


图9 未成桩区弯矩与轴力最大值点

注: (a) 纵向弯矩点: 钢护筒 B3; (b) 横向弯矩点: 钢护筒 B4; (c) 轴力点: 钢护筒 B4。

Fig. 9 Maximum point of bending moment and axial force in the unfurmed pile area

Note: (a) Point of longitudinal bending moment point: steel casing B3; (b) Point of transverse bending moment point: steel casing B4; (c) Point of axial force: steel casing B4.

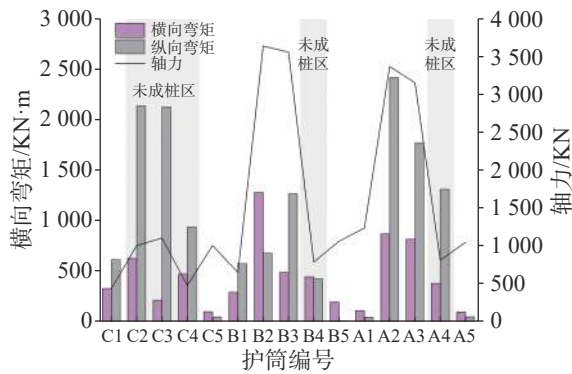


图 10 承载力计算结果

Fig. 10 Calculation result of bearing capacity

和 A3。纵向弯矩最大值处位于钢护筒 A2 区域。对两侧成桩的区域,不需要提供非常大的弯矩和轴力,成桩点 A1 所承担的轴力最大,轴力为 1 252 kN,不超过设计值 1 500 kN,因此此类钢护筒群下沉模式不会导致成桩区承载力过高,超过桩基设计承载力。图 11 显示了钢护筒 A2、A3、B2 和 B3 下沉时地层产生不均匀位移沉降,钢护筒群下沉区域位移最大,位移向四周逐渐减小。

对于未下沉的钢护筒群,钢护筒 C2、C3 和 A4 处主要承受纵向弯矩,不需提供较大的轴力,其中最大横向弯矩为 637.8 kN·m,最大纵向弯矩为 2 144

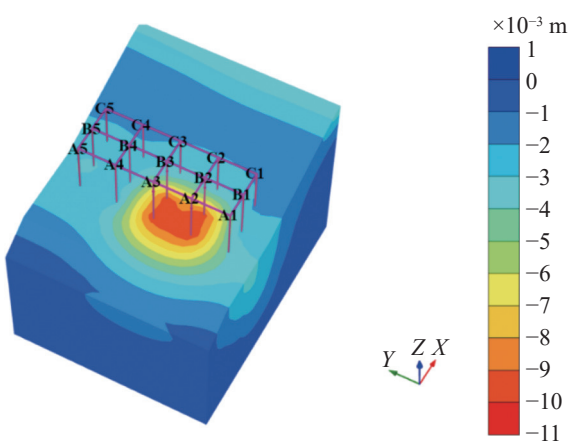


图 11 沉降位移云图

Fig. 11 Cloud map of settlement displacement

kN·m,均位于 C2 处。因此,在施工时,需要考虑对钢护筒 C2、C3 和 A4 处优先成桩,当结构荷载超过钢护筒侧摩阻力时,保证钢护筒 C2、C3 和 A4 成桩能够承受足够的纵向弯矩(图 12)。在矩形钢护筒群失效情况下,优先成桩点可以补充足够承载力,从而降低岩溶区塌陷所带来的工作面塌陷的风险。

3.4 三角形区钢护筒群下沉

图 13 所示,不考虑已经成桩的点 A1、B1、C1、A5、B5 和 C5,当钢护筒 A2、A3、A4、B2、B3 和 C2

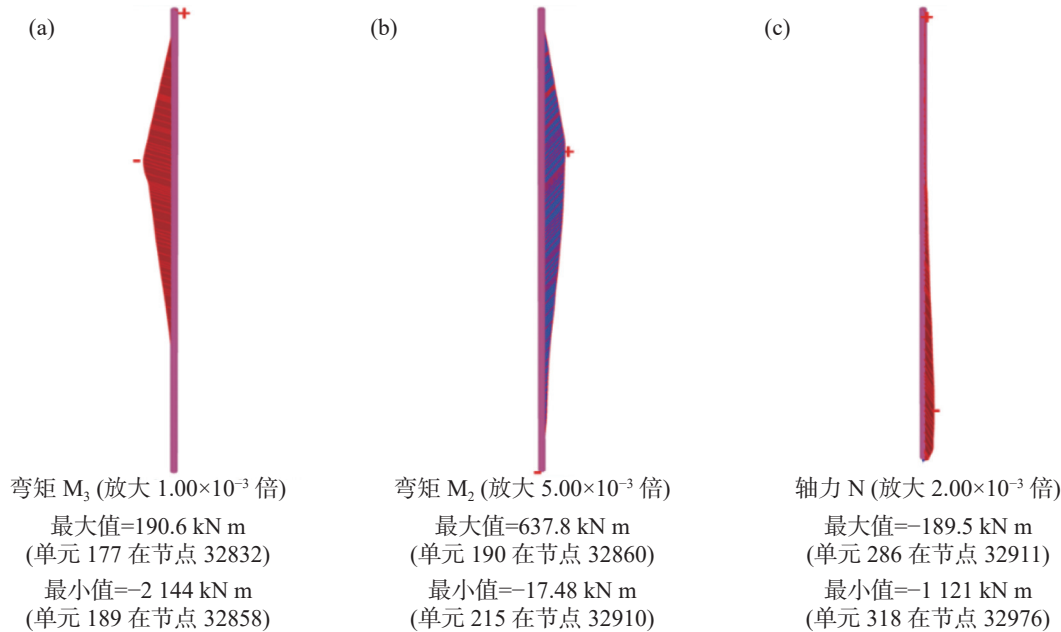


图 12 未成桩区弯矩与轴力最大值点

注: (a) 纵向弯矩点: 钢护筒 C2; (b) 横向弯矩点: 钢护筒 C2; (c) 轴力点: 钢护筒 C3。

Fig. 12 Maximum point of bending moment and axial force in the unformed pile area

Note: (a) Point of longitudinal bending moment: steel casing C2; (b) Point of transverse bending moment point: steel casing C2; (c) Point of axial force point: steel casing C3.

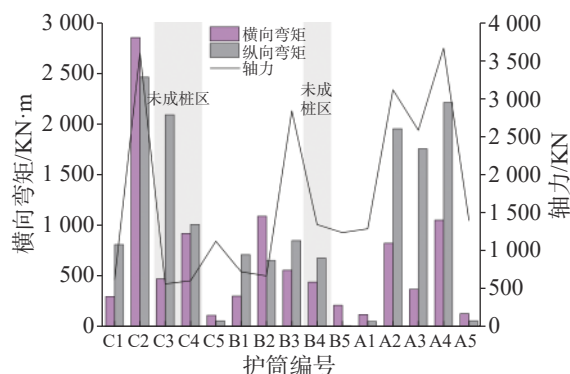


图 13 承载力计算结果

Fig. 13 Calculation results of bearing capacity

下沉时, 整个钢护筒结构的纵向弯矩承受点主要来自于靠近江侧的三根钢护筒 A2、A3、A4, 横向弯矩最大值来自于钢护筒 B2, 而最大轴力点为钢护筒 C2。对两侧成桩的区域, 不需要提供非常大的弯矩和轴力, 其中成桩点 A1 所承担的轴力最大, 轴力为 1 402 kN, 不超过设计值 1 500 kN, 因此此类钢护筒群下沉模式不会导致成桩区承载力过高, 超过桩基设计承载力。图 14 显示了钢护筒 A2、A3、A4、B2、B3 和 C2 下沉时地层产生不均匀位移沉降情况, 钢护筒群下沉区域位移最大, 位移向四周逐渐减小。

当钢护筒的侧摩阻力不足以支撑上部结构荷载

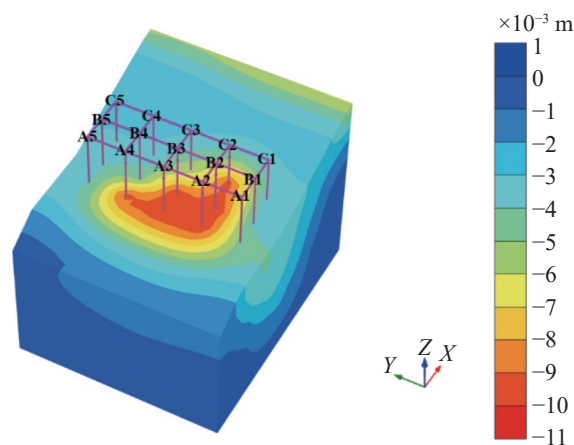


图 14 沉降位移云图

Fig. 14 Settlement displacement cloud map

而发生下沉时, 除自身受的承载力外, 整体上已经成桩的区域不需要提供较多的弯矩和轴力。其中, 未下沉的钢护筒只有 C3 的所承受的纵向弯矩较大, 最大值为 2 090 kN·m, 钢护筒 C4 所承受的横向弯矩较大, 最大值为 922.2 kN·m。因此, 在施工时可以优先保证钢护筒 C3 优先灌注成桩, 这样在考虑隐伏大溶洞下 6 根钢护筒集体下沉时, 能够优先保证 C3 能够提供足够大的弯矩, 从而保证整个未成桩的区域能够不发生塌陷(图 15)。

综合以上三种模拟工况进行分析, 依照钢护筒

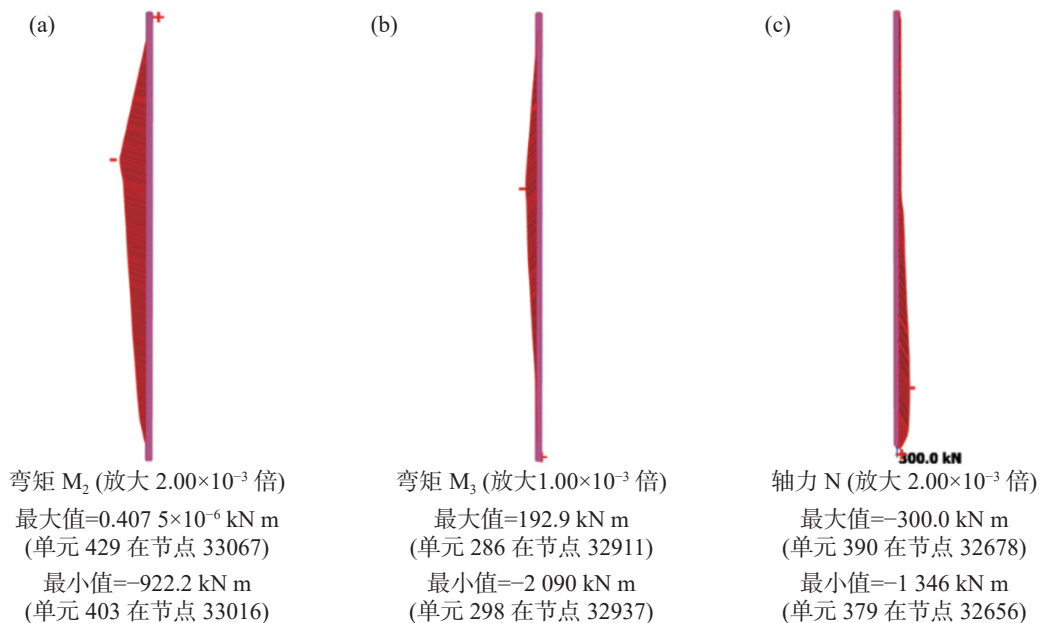


图 15 未成桩区弯矩与轴力最大值点

注: (a) 纵向弯矩点: 钢护筒 C3; (b) 横向弯矩点: 钢护筒 C4; (c) 轴力点: 钢护筒 B4。

Fig. 15 Maximum points of bending moment and axial force in the unfurmed pile area

Note: (a) Point of longitudinal bending moment: steel casing C3; (b) Point of transverse bending moment: steel casing C4; (c) Point of axial force : steel casing B4.

下沉风险的等级进行分类,依次分别为三角区钢护筒下沉、矩形区钢护筒下沉和单排型钢护筒下沉。因此,按照此风险等级和承载力大小进行桩基施工流程优化,灌注成桩顺序依次为 C3-C2-A4-B3-B4-B2,这样可以很大程度上使上部结构荷载不超过钢护筒的侧摩阻力极限值,同时保证施工的安全性。

4 结 论

以江西九江银沙湾在建码头为例,通过数值模拟软件 PLAXIS 建立隐伏大溶洞区的三维地质模型,对不同风险模式下的钢护筒群承载机理进行了数值模拟研究,主要结论如下:

(1)根据溶洞高度进行了溶洞大小分类,超大型溶洞高度大于 8 m,大型溶洞在 5~8 m 之间,中型溶洞在 1~5 m 之间,小型溶洞在 0.1~1.0 m 之间。中型以上溶洞占比为 45%,整个施工区域岩溶非常发育,隐伏大溶洞区的最大高度到达 17.3 m。

(2)按照大溶洞群的高度及空间分布,将钢护筒群下沉类型主要分成了三角区钢护筒群下沉、矩形区钢护筒群下沉和单排型钢护筒群下沉 3 种。

(3)提出了预设指定位移来反分析整个岩溶发育区上层的钢护筒下沉过程的评价方法。该方法能够根据钢护筒群下沉风险类型,合理分析整个岩溶区受力状况。钢护筒 C3 为主要受力点,按照下沉风险和承载力进行成桩流程优化,灌注成桩顺序依次为 C3-C2-A4-B3-B4-B2。

参考文献

- [1] 向成恩. 岩溶地质桥梁钻孔灌注桩施工技术分析[J]. 交通世界, 2021(20): 158-159.
- [2] Guo F, Jiang G, Yuan D, Polk J. Evolution of major environmental geological problems in karst areas of Southwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69: 2427-2435.
- [3] 徐青旺. 岩溶地区桥梁桩基施工技术优化研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(12): 64-68.
XU Qingwang. Study on the Construction Technology Optimization of Bridge Pile Foundation in Karst Area[J]. *Railway Construction Technology*, 2017(12): 64-68.
- [4] 覃振洲, 向晖, 袁本哲. 复杂喀斯特地层桥梁桩基钢护筒跟进法施工常见问题与处治措施: 以贵州省为例[J]. 工程技术研究, 2022, 7(12): 29-31.
QIN Zhenzhou, XIANG Hui, YUAN Benzhe. Common Problems and Treatment Measures for Construction of Bridge Pile Foundation with Steel Casing Follow-up Method in Complex Karst Strata-Taking Guizhou Province as an Example [J]. *Journal of Engineering and Technology Research*, 2019, 7(12): 29-31.
- [5] Zhou H, Zheng G, He X, Zhang T, Yang X. Bearing capacity of strip footings on c-φ soils with square voids[J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13: 747-755.
- [6] Zhou H, Zheng G, Yin X, Jia R, Yang X. The bearing capacity and failure mechanism of a vertically loaded strip footing placed on the top of slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 94: 12-21.
- [7] 黑晓丹, 张满彪, 孙海峰, 王斌, 张勤生, 朱权秀, 朱武权, 吕树方. 岩溶地区桩基础设计研究及工程问题分析[J]. 建筑科学, 2023, 39(3): 165-173.
HEI Xiaodan, ZHANG Manbiao, SUN Haifeng, WANG Bin, ZHANG Qinsheng, ZHU Quanxiu, ZHU Wuquan, LYU Shufang. Research on the design of pile foundation and analysis of engineering problems in a karst area[J]. *Building Science*, 2023, 39(3): 165-173.
- [8] 石振明, 沈丹伟, 彭铭, 林杰豹. 岩溶地区桩基施工溶洞处理技术: 以吉安永和大桥桩基施工为例[J]. 工程地质学报, 2015, 23(6): 1160-1167.
SHI Zhenming, SHEN Danyi, PENG Ming, LIN Jiebao. Karst Cave Disposing Technology For Pile Foundation Construction, Illustrated With-Yonghe Bridge In Ji'an[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(6): 1160-1167.
- [9] 陈铁, 陈劲松, 杨果林, 俞昀. 岩溶发育地区摩擦失效嵌岩桩施工过程病害处治技术[J]. 施工技术, 2018, 47(S1): 1280-1284.
CHEN Tie, CHEN Jinsong, YANG Guolin, YU Yun. Fighting Failure Treatment Techniques for Rock inlaid Pile Construction in Karst Area[J]. *Construction Technology*, 2018, 47(S1): 1280-1284.
- [10] 赵俊逸, 谭文杰, 杨果林, 葛云龙. 长沙景观桥梁桩基隔离钢护筒变形及施工工艺研究[J]. 施工技术, 2019, 48(5): 15-18.
ZHAO Junyi, TAN Wenjie, YANG Guolin, GE Yunlong. Study on Deformation and Treatment of the Isolated Steel Casing for the Pile Foundation of Some Landscape Bridge in Changsha[J]. *Construction Technology*, 2019, 48(5): 15-18.
- [11] 郑博. 岩溶地区房建工程建设中的基础施工核心技术[J]. 四川建材, 2023, 49(4): 89-91.
- [12] 李贵, 张健. 岩溶地区钻孔灌注桩施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2021(2): 173-175.
Li Gui, Zhang Jian. Study on Construction Technology of Bored Pile in Karst Area[J]. *Engineering Construction and Design*, 2021(2): 173-175.
- [13] 钟运志. 岩溶地质条件下的桩基钢护筒跟进法施工技术[J]. 交通世界, 2021(13): 101-102.
- [14] 毕诗堃. 铁路复杂岩溶地区钻孔灌注桩全护筒跟进技术应用[J]. 西部交通科技, 2021(2): 119-121, 180.
- [15] 黄龙飞, 常再青, 赵西锋. 岩溶地区桩基施工技术[J]. 铁道工程学报, 2007(S1): 90-93.
HUANG Longfei, CHANG Zaiqing, ZHAO Xifeng. Pile founda-

- tion construction technology in karst area[J]. *Journal of Railway Engineering*, 2007(S1): 90-93.
- [16] 鲍庆伟, 高杰, 张书良, 梁岩, 陈全兴. 复杂岩溶地区超大径超长桩旋挖钻入岩施工技术[J]. *世界桥梁*, 2017, 45(4): 41-45. BAO Qingwei, GAOJie, ZHANG Shuliang, LIANG Yan, CHEN Quanxing. Construction technology of ultra-large diameter and ultra-long pile drilling into rock in complex karst area[J]. *World Bridge*, 2017, 45(4): 41-45.
- [17] 邵文勇, 沈世成. 管节式钢护筒在桩基穿越富水岩溶施工中的应用[J]. *公路*, 2017, 62(2): 99-101.
- [18] 冯忠居, 徐博熙, 陈慧芸, 夏承明, 蔡杰. 不同溶洞处治措施对桩基承载特性的影响研究[J/OL]. *建筑科学与工程学报*: 1-8, 2023-10-18]. FENG Zhongju, XU Boxi, CHEN Huiyun, XIA Chengming, CAI Jie. Study on the Influence of Different Treatment Measures for Karst Caves on Bearing Characteristics of Pile Foundation [J/OL]. *Journal of Building Science and Engineering*: 1-8[2023-10-18].
- [19] 刘建国, 汪承志, 潘时蕴. 大直径钢护筒、钢横撑与钢筋混凝土桩基联合受力的节点力学性状研究[J]. *水运工程*, 2013(483): 132-137. LIU Jianguo, WANG Chengzhi, PAN Shiyun. Study on joint Mechanical Properties of large-diameter steel shell, steel cross brace and reinforced concrete pile foundation under joint stress[J]. *Water Transport Engineering*, 2013(483): 132-137.
- [20] JTS 144-1-2010, 港口工程荷载规范[S].
- [21] 韦建昌, 邵羽, 梁铭, 崔少磊, 蓝日彦, 黄彬华. 超前水平钻探在岩溶隧道地质预报中的应用研究[J]. *中外公路*, 2020, 40(3): 220-226. WEI Jianchang, SHAO Yu, LIANG Ming, CUI Shaolei, LAN Riyan, HUANG Binhua. Application of Advance Horizontal Drilling in Geological Prediction in Karst Tunnels[J]. *China and Foreign Highway*, 2020, 40(3): 220-226.
- [22] 闫小兵, 周永胜. 快速钻探技术在岩溶隧道超前预报中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2008(1): 89-94. YAN Xiaobing, ZHOU Yongsheng. Application of rapid drilling technology in karst tunnel advance prediction[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2008(1): 89-94.
- [23] Singh, A P, T Bhandari, R Ayothiraman, K Seshagiri Rao. Numerical Analysis of Rock-Socketed Piles under Combined Vertical-Lateral Loading[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 191: 776-784.
- [24] 邱维衍. 某覆盖型岩溶地质条件下多元复合地基处理[J]. *福建建筑*, 2017(232): 57-60. QIU Weiyan. Multicomponent composite foundation treatment under a covered karst geological condition[J]. *Fujian Architecture*, 2017(232): 57-60.
- [25] 邓尚强. 串珠状溶洞地层中桥桩受力性状的数值模拟[J]. *路基工程*, 2015(182): 112-114, 132. DENG Shangqiang. Numerical simulation of load behavior of bridge piles in beaded karst cave formation[J]. *Roadbed Engineering*, 2015(182): 112-114, 132.

Numerical simulation of bearing mechanism of steel casing group in complex karst area

GUO Hui¹, MOU Yunzhen², ZHANG Wengang³, CHEN Fei², ZHANG Yanmei³, WANG Shuo³, LIN Sicheng³

(1. Jiangxi Port Group, Jiujiang, Jiangxi 330008, China; 2. Yangtze River Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400011, China;

3. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract The construction of pile foundations in karst areas presents unique challenges due to the unpredictable spatial distribution of underground cavities, which may significantly increase the associated risk of such projects. Karst topography is characterized by the presence of soluble rocks, such as limestone, which have been gradually dissolved by groundwater, resulting in the formation of crevices and caves. This geological feature poses significant difficulties for engineers, as the unpredictability of these subsurface formations can lead to complications during construction, especially when steel casings are installed for pile foundations. In karst areas, the risk to the construction process tends to be exacerbated by the possibility of encountering covered caves.

When steel casings are built, the structural load may exceed the side friction of the casings, potentially causing them to sink. This situation escalates the construction risks, making the project more complex and challenging. The project for pile foundation construction in the complex karst area of Yinshawan, Jiujiang, Jiangxi (hereinafter referred to as the Yinshawan Project), exemplifies such challenges associated with this type of environment. This area is highly karstic, with caves constituting 76.2% of the karst topography and the largest cave reaching a height of 17.3 m. These characteristics require an improved approach to steel casing construction to prevent sinking and collapse.

To solve these issues, this study introduces a three-dimensional numerical model that incorporates the presence of

caves, informed by preliminary drilling data and exploration conditions specific to the Yinshawan Project. This model is a critical tool for understanding the subsidence behavior of steel casings in karst areas. This study classifies subsidence patterns into three distinct categories: single-row steel casing groups, triangular steel casing groups, and rectangular steel casing groups. It examines the mechanics of steel casing subsidence in areas affected by karst development. The method involves simulating specified displacements to retroactively analyze the sinking process of steel casing groups.

Through numerical simulations, this study examined the load-bearing characteristics of steel casing groups in various sinking modes. The findings reveal that the sinking modes differed significantly in terms of the maximum longitudinal and transverse bending moments experienced by the casings. For instance, in the single-row steel casing group, the maximum longitudinal bending moment was found to be 1,620 kN·m, while the maximum transverse bending moment was 664.6 kN·m. In the sinking mode of the steel casing group within the rectangular area, the maximum transverse bending moment in the non-sinking steel casing was 637.8 kN·m, and the maximum longitudinal bending moment was 2,144 kN·m; both of these values were found in the same steel casing. In the sinking mode of the triangular steel casing group, the maximum longitudinal bending moment in the non-sinking steel casing was 2,090 kN·m, and the maximum transverse bending moment was 922.2 kN·m.

The study offers detailed analysis of each sinking mode, highlighting the stress characteristics and potential risks of subsidence. Given these risks and the specific stress characteristics identified through simulations, a construction method in areas with significant covered caves, such as the project site in Yinshawan, should be prioritized. This method should focus on peripheral piling while selectively placing piles in the interior. This study provides valuable insights into the field of geotechnical engineering, offering guidance for future projects in similarly challenging environments.

Key words karst area, steel casing, bearing characteristics, numerical simulation, failure analysis

(编辑 张玲)

(上接第 135 页)

concentrations of SO_4^{2-} and NO_3^- in water are high, the saturation index of calcite, calculated based on Ca^{2+} and HCO_3^- concentrations, may not accurately reflect the dissolution/crystallization state of calcite. Therefore, the simultaneous effects of various ions in water on calcite dissolution/crystallization should be considered, including ion effects, salt effects, and ion pair effects. (4) After soil vadose water or karst pipeline/fissure water is exposed to the surface, CO_2 in the water can complete the degassing process within a few hours. In the absence of a continuous input of soil CO_2 and aquatic photosynthetic plants, $p\text{CO}_2$ quickly reaches an equilibrium state and ceases to be the major factor controlling the dissolution/crystallization of calcite. The CO_2 degassing effect significantly increases the $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ value, with an increase of up to +10.98 ‰. This results in a substantial discrepancy between the actual and theoretical contributions of soil or atmospheric CO_2 to DIC.

Key words Yaji experimental site, carbonate rock dissolution, open atmospheric environment, $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon, CO_2 degassing

(编辑 杨杨)