岩溶桩基充填体稳定性协同监测技术研究

刘 雍[1,2], 李齐波[1,2]

(1. 中赣核生态环境集团(江西)有限公司,江西 南昌 330000;
2. 中赣核建设工程(江西)有限公司,江西 九江 332000)

摘要:针对岩溶地区冲孔灌注桩穿越大型溶洞时,混凝土灌注过程中溶洞充填体易发生失稳破坏,而常规监测手段滞后、难以直接捕捉内部力学响应的问题,设计并应用了一套基于压力-变形协同响应的实时监测预警系统。该系统集成了阵列式位移计、振弦式土压力传感器、智能采集模块及自动化预警平台,通过5G通信实现毫秒级数据同步采集与传输。工程应用表明,该系统能准确捕捉充填体在失稳瞬间的侧向压力骤降与水平位移突增的协同特征,实现了对充填体稳定性的判别。该技术将岩溶区桩基施工监测从传统的人工经验判断转向数据智能驱动,为施工风险控制提供了可靠的技术支撑。

关键词:岩溶桩;充填体稳定性;协同监测;压力-变形;实时预警

中图分类号:U455 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-0373(2026)02-0073-06

0 引言

岩溶地貌在中国分布广泛,约占国土面积的1/3,主要集中在西南、华南等地区。随着“交通强国”战略的深入推进,高速公路、高速铁路及城市轨道交通等基础设施建设的规模持续扩大,越来越多的桥梁桩基工程不得不穿越地质条件复杂的岩溶发育区[1-3]。根据《国家综合立体交通网规划纲要》,至2035年中国将构建起现代化、高质量的综合立体交通网络,桥梁作为跨越江河、峡谷与城市空间的关键枢纽,其建设需求将持续增长。在此背景下,岩溶地区桩基工程面临的地质挑战日益凸显。

岩溶地区的典型特征是地下溶洞发育、形态不规则、充填物性质多变,且常伴有活跃的地下水系。当桥梁桩基采用冲击成孔工艺施工时,冲锤在强烈动荷载作用下极易击穿溶洞顶板,导致泥浆急剧渗漏。施工现场通常采用“片石-黏土-水泥”回填法进行处理,即在漏浆后投入一定比例的混合料,通过冲锤反复冲挤,在溶洞空腔内形成竖向“梯形”的充填体护壁,以保证成孔作业的继续[4-6]。然而,在后续的水下混凝土灌注阶段,持续灌注的混凝土与孔内泥浆共同作用,在充填体上产生不断增大的复合侧向压力。当该侧向压力超过充填体的承载能力时,充填体结构将发生失稳破坏,引发一系列连锁工程问题,如混凝土沿裂隙通道大量流失,造成桩身夹泥、断桩等质量缺陷;混凝土液面急剧下降引起钢筋笼扭曲变形甚至整体上浮;严重时还可能诱发孔口周边地面沉降或塌陷,直接威胁施工安全[7-9]。这类质量问题具有隐蔽性强、修复难度大、后果不可逆的特点,已成为制约岩溶地区桩基工程整体质量与施工安全的关键控制环节。

目前,针对岩溶地区桩基施工的风险控制,国内外学者已开展了大量研究。在岩溶塌陷机理方面,高旭等[10]通过物理模型试验与数值模拟揭示了冲击液化作为砂漏型岩溶塌陷的主控机制;熊志涛等[11]通过对冲孔桩施工过程中裂隙岩溶含水层水位、水压力等多参数协同监测,揭示了施工引发的坍塌机理。在溶洞处理技术方面,冯忠居等[12]研究了不同溶洞处治措施对桩基承载特性的影响;老国健等[7]提出通过控制泥浆密度与冲程来降低施工冲击振动影响。在桩基监测技术方面,孙红林等[3]开发了基于超声相控阵的桩端岩溶三维探测技术;姚正斐[13]将分布式光纤传感技术应用于岩溶区灌注桩检测,验证了其在

收稿日期:2026-03-22 **责任编辑**:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20260053
作者简介:刘雍(1985—),男,高级工程师,研究方向为市政工程。E-mail:coolliugg@163.com
刘雍,李齐波.岩溶桩基充填体稳定性协同监测技术研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):73-78.

中国知网 https://www.cnki.net

揭示桩身荷载传递机制方面的有效性。

然而,现有研究多聚焦于成孔阶段的塌陷防治与成桩后的承载力检测,对于混凝土灌注过程中溶洞充填体的动态稳定性监测,尤其是对充填体内部应力场与位移场演化规律的直接量测,研究相对薄弱。在工程实践中,大多数监测手段仍局限于对混凝土浇筑量、导管埋深、孔口浆液回流等表观参数的宏观观测,无法感知充填体结构内部的应力重分布、变形累积等关键力学状态,对发生在孔壁中深部的挤压变形、渐进式缩颈等隐蔽性问题响应严重滞后,导致施工控制仍停留在"经验主导、事后处置"的被动阶段[14]。

为突破这一技术瓶颈,依托九江市高铁站至庐山索道连接线工程,针对匝道桥桩基施工中穿越大溶洞的工况,设计了一套基于压力-变形协同响应的实时监测预警系统。该系统通过集成阵列式位移计、振弦式土压力传感器及自动化预警平台,实现了对溶洞充填体侧向压力与水平位移的同步、连续、实时监测。旨在通过捕捉充填体失稳瞬间"压力骤降"与"位移突增"的协同响应特征,建立充填体稳定性的精准判别方法,为岩溶区桩基施工提供一种从"感知"到"预警"的智能化解决方案,推动施工监测从依赖"人工经验判断"向"数据智能驱动"的模式转变。

1 充填体失稳机理

1.1 充填体受力模式与失稳类型

在冲击成孔阶段,为处理溶洞漏浆问题,现场常采用片石、黏土和水泥进行反复回填冲挤,在溶洞空腔内形成竖向"梯形"的充填体护壁[7]。进入水下混凝土灌注阶段后,充填体所受的侧向压力由原始单一的泥浆压力,逐渐演变为上部泥浆与下部混凝土共同作用的复合压力,如图1所示。

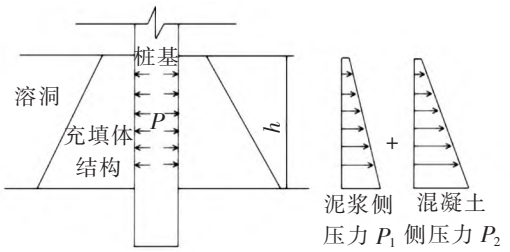


图1 充填体受侧压示意图

基于现场事故分析与理论归纳,充填体结构在复合侧压力作用下的失稳破坏主要存在2种模式:

(1)侧压-挤泌失稳。当侧向荷载超过充填体结构的抗剪强度时,压力骤降幅度≥30%,水平位移速率≥20 mm/min,伴随混凝土超灌量>15%设计方量。

(2)冲切-贯入失稳。冲锤反复冲击使溶洞顶板形成贯通裂隙,在混凝土高压下,裂隙与原有结构面贯通,诱发突发性失稳。溶洞顶板裂隙贯通,压力瞬时骤降≥50%,位移突增≥100 mm,出现突发性漏浆。

1.2 协同监测思路

上述2种失稳模式虽然在表现形式上有所差异,但其本质均为充填体在超限侧压力作用下发生结构性破坏,并伴随内部应力释放与宏观变形的产生。因此,监测的核心思路在于通过捕捉充填体侧向压力骤降与水平位移突增的协同响应特征,实现对失稳发生时刻与位置的精确判断。当监测到的侧向压力在短时间内快速下降即压力释放,同时相应深度的水平位移出现异常增大,这一"压力-变形"的协同突变信号,即构成了充填体失稳的可靠前兆。

2 协同监测系统设计与布设

2.1 系统组成

构建的协同监测系统主要由以下4部分组成:①阵列式位移计测量精度±1 mm,分辨率0.1 mm,量程0~500 mm,满足溶洞充填体大变形监测需求,用于监测溶洞充填体沿桩孔深度方向的水平位移变化;②振弦式土压力传感器测量精度0.1% F.S.,分辨率0.001 MPa,量程0~3.0 MPa,适配灌注阶段侧向压力动态变化范围,用于监测充填体所受侧向压力的动态变化;③智能数据采集模块,负责多通道传感器信号的汇集、调理与模数转换;④自动化监测预警平台,基于云端服务器,实现数据存储、分析、可视化展示及分级预警。系统通过5G通信技术实现数据毫秒级传输,采集终端内置边缘计算模块,可实时生成时程曲线等多维可视化结果。

中国知网 https://www.cnki.net

2.2　监测原理

振弦式土压力盒基于弦振动频率与所受压力的物理关系工作。当外部压力作用于承压膜时,膜片变形转换为振弦的轴向张力增量,导致其固有振动频率改变。通过测量频率,即可根据标定公式计算出实时压力值。该传感器输出为频率信号,抗干扰能力强,适合长期监测。

阵列式位移计内部集成了高精度 MEMS 加速度计阵列。各测点通过感知与重力方向的夹角变化,利用空间向量合成原理,可实时解算出每个测点的三维位移增量。多个测点串联形成分布式测链,从而获取监测断面沿深度的连续水平位移曲线。

2.3　现场布设方案

以九江市高铁站至庐山索道连接线工程 S3 匝道桥桩基为例,具体布设方案如图 2 所示。

结合地质勘察报告,选取存在串珠状溶洞且洞高较大的 S3-2-0、X3-5b-0 桩作为监测对象,工程地质剖面图如图 3 所示。

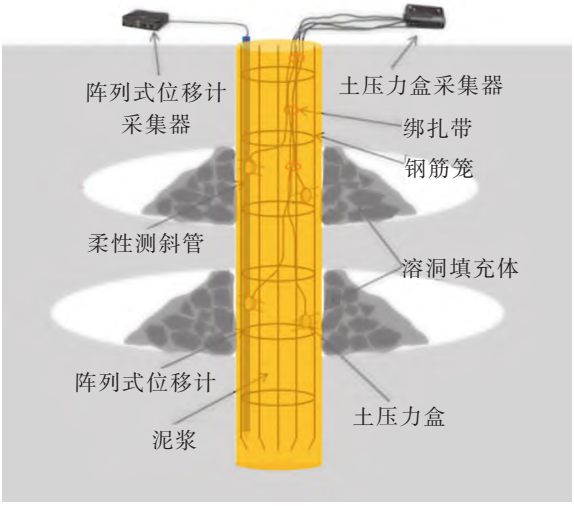


图 2　“压力-变形”协同监测方案示意图

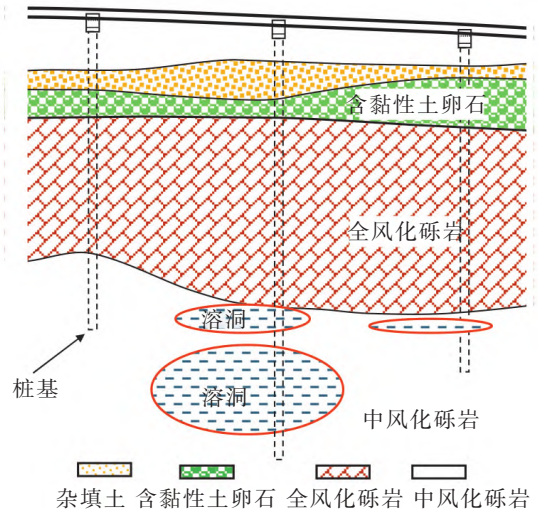


图 3　工程地质剖面图

在钢筋笼上对应溶洞充填体区域的多个深度断面,沿钢筋笼周向按垂直对称的圆形阵列布设土压力盒。例如 S3-2-0 桩在 -41.6、-42.2、-47.4、-48.0 m 处布设,X3-5b-0 桩在 -42.0、-44.0、-46.0、-46.5 m处布设,以捕捉同一断面不同方向及不同深度断面的压力分布与传递规律。

柔性测斜管与钢筋笼采用上下端刚性固定、中段自由悬空布设,上端与钢筋笼顶焊接固定,下端与钢筋笼底绑扎锁紧,溶洞区段(-40.6～-49.0 m)不绑扎以保证自由变形;测斜管外部套设 PVC 保护套管,避免下放钢筋笼时摩擦破损,确保传感器安全与监测灵敏度。

3　现场应用与效果分析

3.1　失稳案例(S3-2-0 桩)监测结果

S3-2-0 桩设计孔深 56.37 m,在灌注过程中出现了典型的充填体失稳现象。图 4、图 5 分别展示了该桩灌注过程中 -48.0 m 深度处的压力变化曲线及纵向位移变化曲线。

在使用土压力分析充填体失稳特性时,要进行数据可靠性验证,灌注前 -48.0 m 深度处实测初始泥浆压力为 0.630 MPa,而根据泥浆重度12.4 kN/m³ 计算的理论压力值为 0.595 MPa,两者相对误差仅 5.88%,验证了压力监测数据的可靠性。

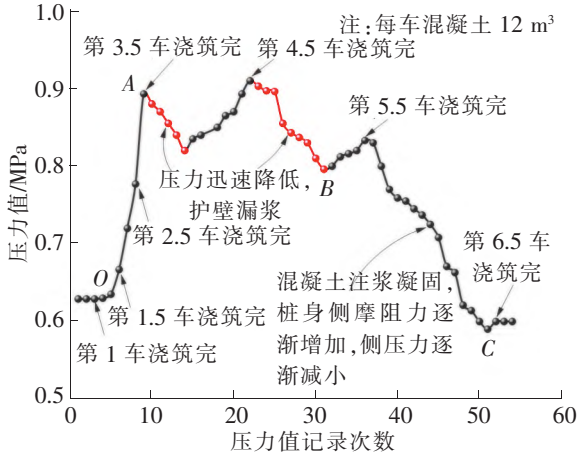


图 4　S3-2-0 桩混凝土灌注过程失稳状态压力变化曲线

中国知网　https://www.cnki.net

如图 4 所示,压力-位移协同响应,随着混凝土灌注,压力持续上升。在灌注至第 4.5 车后,压力达到峰值 0.9 MPa 后迅速下降,此时水平位移累计变形量超过 200 mm,且位移曲线呈径向“鼓肚”形态,如图 5 所示,在 -44.0 m 处变形速率瞬时达45 mm/min。表明充填体结构在 -44.0 m 处附近被冲切破坏,混凝土浆液迅速渗漏。压力与位移信号的同步突变,清晰地揭示了充填体失稳的发生时刻、发生位置与失稳程度。

随着混凝土浇筑面的持续抬升并远离底部土压力盒,由图 4 可知,第 5.5 车浇筑后,并未出现侧向压力值增加,反之呈现规律性衰减现象,并最终收敛至稳定值 0.614 MPa。这一变化过程与混凝土初凝阶段的材料特性演化直接相关,随着水泥水化反应的不断进行,混凝土逐渐凝固,桩-土接触面逐渐形成具有结构效应的侧摩阻力体系,该体系开始有效分担外部荷载,促使侧向应力场重新分布,进而整个系统向新的静力平衡状态过渡;第 6.5 车混凝土浇筑完成后,压力监测值保持稳定,维持在 0.614 MPa 左右。这表明桩身混凝土结构已初步形成整体性,具备一定的早期强度,能够有效承担上部荷载,阻碍了荷载进一步向测点区域的竖向传递。

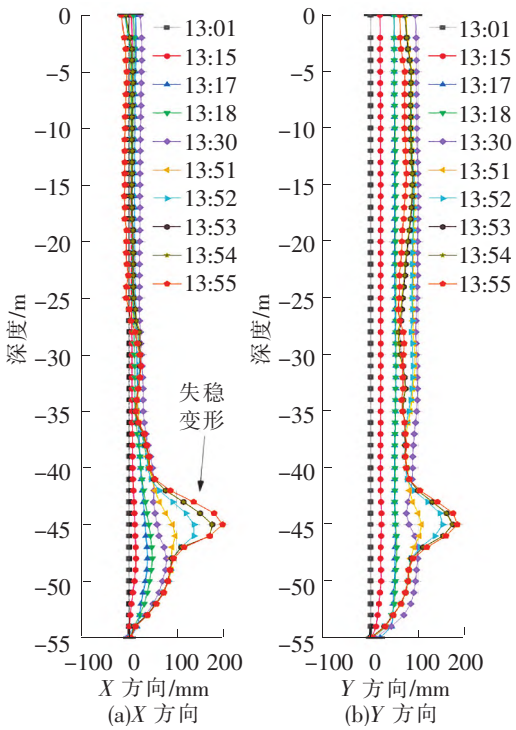


图 5 S3-2-0 桩混凝土灌注过程失稳状态位移变化曲线

通过对 S3-2-0 桩进行浇筑全过程监测,清晰揭示了复杂岩溶地质条件下的冲孔桩基施工溶洞区充填体破坏机理与动态失稳过程,基于侧向位移速率与压力波动特征的协同响应,为预判充填体失稳征兆提供了关键依据。

3.2 稳定案例(X3-5b-0 桩)监测结果

X3-5b-0 桩孔深 59.5 m,同样存在大型溶洞。但该桩在混凝土灌注过程中未发生失稳。图 6、图 7 显示了其监测结果。

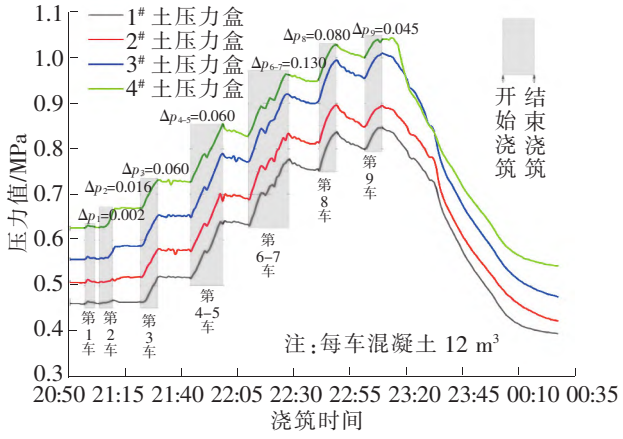


图 6 X3-5b-0 桩混凝土灌注过程稳定状态压力变化曲线

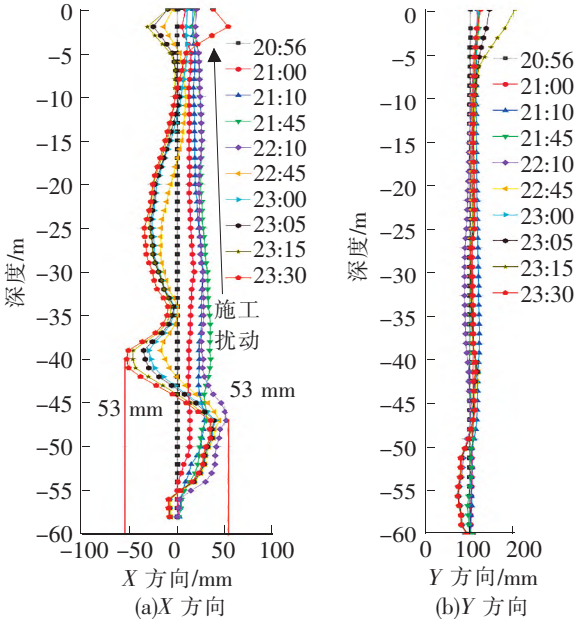


图 7 X3-5b-0 桩混凝土灌注过程稳定状态位移变化曲线

中国知网 https://www.cnki.net

整个灌注过程中,4 个深度压力盒的数据变化趋势一致且平缓,未出现压力骤降现象。

水平位移在整个灌注过程中较小,最大位移仅 53 mm,且无突变。这表明该桩溶洞区充填体具有良好的自稳能力,能够有效抵抗侧向压力。

与 S3-2-0 桩不同的是,X3-5b-0 桩压力值采集为自动化作业,对不同深度处的 4 个压力盒同步进行监测,而 S3-2-0 桩利用综合测试仪进行手动采值,自动化采集更为实时精准。图 6 所监测 1#～4# 压力盒压力变化趋势具有一致性,该过程与 S3-2-0 桩压径向鼓肚力变形最大的不同之处在于整个变化过程平缓,混凝土灌注结束后并未出现压力骤增现象,图 6 记录单车混凝土灌注完成前后压力变化差值 ΔP,且图 7 水平位移在整个灌注过程较小,最大位移只有 53 mm。结合压力及变形情况不难看出整个过程未出现突变信号,进一步表明该桩号溶洞区充填体具有较好的自稳性抵抗侧压力冲切。

此次监测进一步揭示溶洞区充填体在自稳状态下,混凝土液-固相变力学变化机理,当混凝土液面初始接触到土压力盒,处于流动状态下的混凝土液面升高使得压力线性增大,此时以液压状态为主。上提混凝土浇筑导管过程侧向压力显现轻微减小,但与 S3-2-0 桩有所不同,此过程混凝土进行固结转化,进入初凝阶段,侧压力系数 k 逐渐减小,进而充填体受力减小,该过程属于材料相变引起的力学响应而非出现充填体失稳问题。随着混凝土浇筑面的持续上升,监测压力并未出现相应增长,反而呈现微弱递增乃至下降趋势,且压力衰减速率显著提升 37%～42%。该现象表明桩体混凝土已形成具有完整承载能力的结构骨架,桩身弹性模量显著增大,荷载传递机制从流体压力传递转变为结构体系承重,致使传递至桩底土压力盒的有效侧向应力大幅衰减。

特别说明,为区分充填体失稳破坏与混凝土正常固结引发的压力衰减,本文建立压力衰减类型定量判别标准:当监测数据显示 1 min 内侧向压力下降≥0.2 MPa,且同步出现水平位移突增≥50 mm,并伴随现场漏浆现象时,判定为失稳型衰减,代表充填体发生结构性破坏;当监测数据显示压力呈缓慢下降趋势,衰减速率≤0.05 MPa/10 min,位移变化平稳无突变时,判定为固结型衰减,属于混凝土液-固相变过程中的正常力学响应。

3.3　协同系统优势总结

通过对比失稳与稳定 2 种工况下的监测数据,所构建的协同监测系统展现出显著优势:①实时性与同步性。通过 5G 通信与边缘计算,系统实现了压力与变形数据的毫秒级同步采集与分析,确保了“协同响应”的捕捉精度。②直接性与精准性。系统直接对充填体内部的应力与位移场进行量测,相较于传统的表观参数监测,能更早、更准确地识别失稳前兆。③可视化与可追溯。自动化预警平台实时生成时程曲线,为施工决策提供了直观、动态的数据支撑,实现了监测过程的全记录与可追溯。

4　结论

依托九江市高铁站至庐山索道连接线工程,针对岩溶地区冲孔灌注桩穿越大型溶洞时充填体易失稳、常规监测手段滞后的问题,开展了一套基于压力-变形协同监测的实时预警技术研究。通过系统设计、现场布设与工程验证,取得了以下主要成果:

(1)针对岩溶地区冲孔桩穿越大溶洞施工难题,设计并应用了一套基于压力-变形协同监测的实时预警系统。该系统集成阵列式位移计、振弦式土压力传感器及自动化平台,实现了对溶洞充填体内部力学状态的直接、实时、同步监测。

(2)通过失稳工况 S3-2-0 桩与稳定工况 X3-5b-0 桩的现场应用对比,验证了该系统能精准捕捉充填体失稳瞬间“压力骤降”与“位移突增”的协同响应特征,准确判别充填体的稳定性状态。

(3)该技术在典型工程案例中验证可行,为岩溶区桩基施工监测由人工经验判断向数据智能驱动转型提供了实践依据与技术参考,对保障成桩质量、优化施工工艺具有重要的工程实践价值。

参　考　文　献

[1]蒋小珍,冯涛,郑志文,等. 岩溶塌陷机理研究进展[J]. 中国岩溶,2023,42(3):517-527.

[2]唐孟雄,周浩钊,胡贺松,等. 穿越溶洞型桩基承载特性研究进展综述[J]. 科学技术与工程,2025,25(17):

中国知网　https://www.cnki.net

7040-7052.
[3]孙红林，张邦，刘铁华，等. 桩端岩溶三维超声成像方法及应用研究[J]. 铁道工程学报，2024，41(2)：26-32.
[4]石振明，沈丹祎，彭铭，等. 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.
[5]陈慧芸，冯忠居，白少奋，等. 桥梁桩基穿越溶洞的荷载传递机制试验研究[J]. 岩土力学，2023，44(5)：1405-1415.
[6]董建松，冯忠居，何静斌，等. 基于特大型岩溶空洞下桩基施工技术研究[J]. 公路，2022，67(4)：228-232.
[7]老国健，卢云. 城镇地区溶洞桩基施工塌陷及方案调整案例探析[J]. 建筑结构，2021，51(1)：137-142.
[8]马骁，蒋小珍，雷明堂，等. 桩基施工诱发岩溶塌陷的机理模式及防控措施[J]. 地下空间与工程学报，2023，19(2)：691-700.
[9]郑晓明，陈标典，潘峰，等. 武汉市江夏区武嘉高速桩基施工岩溶塌陷形成条件及机理研究[J]. 安全与环境工程，2019，26(2)：62-68.
[10]高旭，吴诗，晏鄂川，等. 冲击诱发砂漏型岩溶塌陷机理及防灾监测启示[J]. 工程地质学报，2025，33(1)：269-278.
[11]熊志涛，刘鹏瑞，杨涛，等. 江夏法泗岩溶塌陷区冲孔桩施工引发岩溶塌陷的成因机理[J]. 中国岩溶，2018，37(1)：120-129.
[12]冯忠居，徐博熙，陈慧芸，等. 不同溶洞处治措施对桩基承载特性的影响研究[J]. 建筑科学与工程学报，2024，41(4)：151-158.
[13]姚正斐. 分布式光纤传感技术在岩溶段桩基检测中的应用研究[J]. 铁道建筑技术，2022(1)：92-96.
[14]李珠君，刁焕新. 岩溶区旋挖钻孔灌注桩动态回填与实时预警体系研究及应用[J]. 价值工程，2025，44(34)：111-113.

Research on Collaborative Monitoring Technology for Backfill Stability of Karst Pile Foundations

LIU Yong[1,2], **LI Qibo**[1,2]

(1. Zhonggan Nuclear Ecological Environment Group (Jiangxi) Co. Ltd., Nanchang 330000, China;
2. Zhonggan Nuclear Construction Engineering (Jiangxi) Co. Ltd., Jiujiang 332000, China)

Abstract: To address the problem of instability and failure of the karst cave backfill during concrete pouring when bored cast-in-place piles pass through large karst caves in karst areas, as well as the lag of conventional monitoring methods and the difficulty of directly capturing internal mechanical responses, a real-time monitoring and early warning system based on pressure-deformation collaborative response was designed and applied. The system integrated array displacement meters, vibrating wire earth pressure cells, intelligent acquisition modules, and an automated early warning platform, achieving millisecond-level synchronized data acquisition and transmission through 5G communication. Engineering applications show that the system can accurately capture the collaborative characteristics of sudden lateral pressure drop and horizontal displacement surge at the moment of backfill instability, enabling precise identification of backfill stability status. This technology transforms pile foundation construction monitoring in karst areas from traditional manual experience-based judgment to data-driven intelligence, providing reliable technical support for construction risk control.

Key words: karst pile; backfill stability; collaborative monitoring; pressure-deformation; real-time early warning

中国知网 https://www.cnki.net