

岩溶复杂地质条件灌注桩承载力自平衡测试研究

王鹏程 张斌斌 帅海乐

贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵州 贵阳 550006

摘要: 本文从桩基在溶蚀环境中的失稳机理入手, 剖析了由溶洞、裂隙、破碎带引发的持力层结构突变; 进而结合典型岩溶场地布设自平衡 0-cell 加载系统, 开展沉降响应实测与分区承载能力分析; 在此基础上, 基于有限元反演重构桩-土参数场, 并提出结构扰动参与度量化指标, 以评估空腔对测试数据非线性误差的实际影响。最终, 本文提出若干岩溶地区桩基设计参数修正建议, 包括桩长调整、布桩间距优化、桩型强化与参数回代机制, 力求实现“实测—设计—优化”多维联动路径。

关键词: 岩溶地基; 灌注桩; 自平衡法; 有限元反演; 承载力优化

DOI: 10.63887/jad.2025.1.4.10

引言

在复杂地质环境下, 基础工程面临的不确定性远不止于材料非均匀性或加载条件变化, 更根植于其深层结构所固有的非连续性与空间离散性。岩溶地质便是这一类型中最具代表性的典型, 其内部广泛发育的溶洞、裂隙与软弱夹层不仅破坏了承载层的完整性, 更在力的传递过程中引发局部应力集中、传力路径偏折以及接触面的失稳突变。尽管现行规范对地基承载力的判断已有成熟计算框架, 但在岩溶条件下, 这些方法往往失去其理论假设的适用前提: 持力层不再均匀连续, 桩端接触不再可靠刚性, 桩侧摩阻也呈现非对称性演化。在此背景下, 自平衡测试法因其内部加载、结构闭合、分区识别的特点, 显示出在岩溶桩基测试中的适应潜力。然而, 该方法本身在复杂结构场中是否仍具判别有效性? 其反应结果是否真实反映力学行为? 如何建立数据与设计之间的可靠映射? 这一系列问题仍缺乏系统性研究。为回应这些关键科学问题, 本文从理论剖析、实测验证到模型反演, 试图构建一套适用于岩溶场地的桩基承载力识别与优化设计方法体系。

1 岩溶复杂地质条件下桩基工程的受力失稳机理分析

1.1 岩溶发育结构对地基持力层完整性的破坏机

制

岩溶地貌作为一种溶蚀作用主导的地质构造形态, 其下伏岩层在长期水动力作用下形成了空腔、裂隙、崩塌堆积体等一系列非规则结构。这种地质背景直接导致地基持力层不再具有连续、均质的空间结构特征。尤其是在承载层中存在大型溶洞或厚层破碎带时, 传统意义上的“持力层底界面”常呈现多点突变、接触断裂甚至失稳坍塌等复杂现象。

在此种地质环境中, 灌注桩桩端可能处于半接触、软弱夹层悬空或顶板支撑力不足的状态, 使得设计荷载无法稳定传递至深层岩体, 形成所谓的“假持力现象”。与此同时, 持力层中结构性空腔的存在也极易诱发应力集中与局部失稳, 导致桩体竖向变形速率异常, 进而产生难以预测的沉降行为。由此可见, 岩溶地基中持力结构的完整性受到系统性削弱, 是引发灌注桩承载性能不稳定的根本原因之一^[1]。

1.2 桩基受力路径在岩溶环境中的扭曲演化

在均质地基条件下, 灌注桩的荷载传递路径通常可简化为: 上部荷载经桩身垂直传递, 沿桩侧与桩端同步释放至周边土体或基岩。然而在岩溶复杂环境中, 由于地基结构的不连续性与应力响应的不对称性, 桩基荷载传递机制呈现出高度非线性演化特征。

具体而言, 当桩身穿越溶蚀裂隙发育区或端部触及不稳定空腔时, 原本均匀的传力路径会被强制扭曲

或中断，表现为局部桩侧摩阻增幅、端部应力释放能力下降，甚至出现桩体中部产生剪切变形的应力倒挂现象。在更极端情形下，桩端与空腔顶板接触不牢，可能导致上部荷载反向回传至桩侧中上段，引发桩体上浮或承载路径内迁的严重失衡状态。

因此，在岩溶环境下，桩基的受力模式不再服从于理想线性假设，而是经历了“扰动—偏移—非对称释放”三个连续演化阶段。这种路径性的畸变不仅打破了承载力计算中的参数边界条件，也对试验识别与结构安全判定构成实质性挑战。

1.3 传统测试法在岩溶条件下的失效类型剖析

在灌注桩设计与验收环节中，常规承载力测试方法主要包括静载荷试验、高应变动测法与低应变反射波法等。这些方法在均质地基条件下具备较高的适用性和重复精度。然而当应用于岩溶地质场地时，其结果稳定性与技术有效性却呈现显著下降趋势，主要体现在以下三个方面：

首先，静载试验依赖于桩顶加载与地面反力体系

的构建，在空腔发育区，试验平台可能形成非对称刚度支撑，导致加载过程中桩身水平偏移或反力传递失衡，试验曲线失真严重。其次，高应变法基于应力波在桩体中的传播特性提取反射波幅与相位信息，而岩溶环境中地层界面突变频繁，极易引起信号叠加、波形折返与响应错位，最终干扰极限承载力的准确判读。第三，低应变法虽适用于完整性判别，但其对桩端空腔、破碎带等结构性缺陷的分辨能力极为有限，往往不能提供反映桩-土力学状态的有效信息^[2]。

2 自平衡测试方法在岩溶地基中的试验设计与工程实测

2.1 工程背景与岩溶地质结构识别

试验工程位于贵州省典型岩溶强发育区。勘探数据显示，地层自上而下依次为第四系粘土层（厚约 5.3 m）、残积物混合层（约 4.2 m），其下为中风化灰岩。岩溶结构主要集中在桩基深度 14.7~23.4 m 区间，典型特征如表 1 所示：

表 1 典型特征

层位	岩性	溶蚀结构	空腔分布特征	岩体完整性等级
14.7 - 17.2 m	中风化灰岩	节理裂隙发育	局部裂隙拓宽为 0.2~0.6 m 缝洞	Ⅲ类
18.0 - 21.3 m	中等灰岩	存在两个不规则空腔	单侧顶板厚度 <1.5 m	Ⅳ类
>23.5 m	结构致密岩层	无显著溶蚀特征	基本连续	Ⅱ类

从结构分布上可见，桩端以下存在多源干扰界面，若测试布设未精准规避空腔或溶蚀弱面，极易导致加载路径中断、反力释放异常或沉降曲线非线性畸变。因此，O-cell 布设与加载区划定，必须以“避开非稳定结构 + 构建双稳定传力路径”为核心技术逻辑。

2.2 O-cell 系统布设逻辑与分区加载路径设计

本次试验灌注桩设计桩长为 26.5 m，桩径 1.2 m。依据上述岩溶结构分析，采用以下布设策略：

O-cell 加载位置：选取距桩顶 20.2 m 深度处（即避开顶板厚度不足区），确保下加载段穿越稳定岩层；

上加载区识别目标：提取桩侧摩阻与浅层扰动响应；

下加载区识别目标：评估桩端岩体承载能力与局部变形特性。

此布设方案在岩溶条件下的技术优势为：避开空腔上覆顶板形成的反力泄露区；上加载区集中沉降量较小，便于提取分段摩阻数据；下加载区在结构致密岩层中形成近似封闭加载域，便于端阻判断。

2.3 实测响应分析与承载性能识别

试验采用加载—保载—继续加载模式，单级荷载控制在 500 kN，每级保载不少于 40 min，直到曲线明显拐点出现为止。沉降数据经多通道数字采集仪记录，并实时纠偏处理^[3]。

图 1 展示上下加载区的沉降—荷载关系：

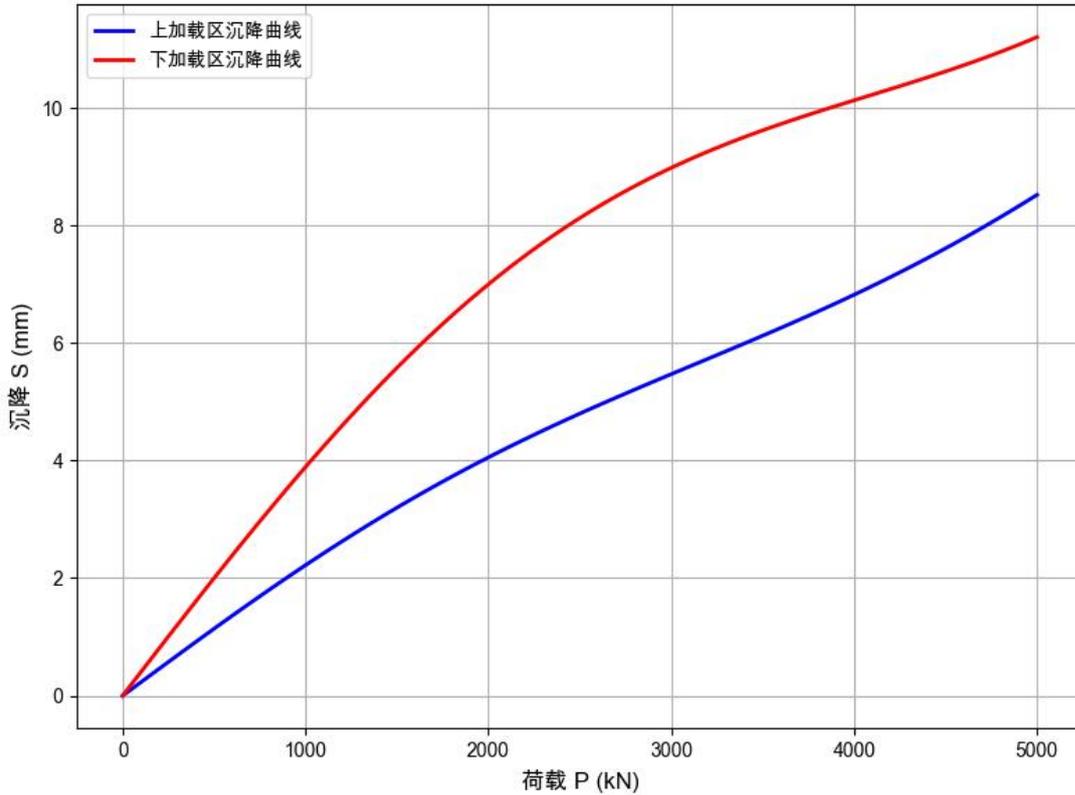


图 1 上加载区与下加载区沉降曲线对比图

由图可知：上加载区响应曲线斜率较小，至总荷载 4800 kN 时仍未出现塑性变形，说明桩侧摩阻未达到极限状态；下加载区在第七级加载（4200–4700 kN）出现曲线斜率急剧变化，进入非线性加速沉降区，结合位移速率分析法判断极限承载力约为 4650~4850 kN；

沉降速率稳定性判据满足《岩土工程基桩检测技术规范》（JGJ 106）中“荷载增量下沉降增量超过前一级 1.25 倍”的承载极限条件。

进一步对上下加载区分区能量耗散率进行分析，得到如下公式模型：

$$E_s = \int_0^P S(P) dP$$

其中：

E_s 为加载过程耗散能量（kN·mm）

$S(P)$ 为荷载 P 对应的沉降量（mm）

上加载区累计耗能约为 15.2×10^3 kN·mm，下加载区为 31.8×10^3 kN·mm，表明下加载段的力学响应更具集中性与临界判别价值。

3 实测数据驱动下的理论反演与承载性能提升路径

3.1 岩溶结构对测试响应机制的干扰效应定量分析

在第二章实测沉降—荷载曲线中，我们发现下加载区曲线在高荷载段（约 $P=3400\sim 4800$ kN）呈现出非线性波动。这种非对称、突变式的响应，很可能并非桩体本身材料非线性所致，而更可能由岩溶结构的空腔参与、接触界面错动等因素引起。因此，有必要对这一波动进行定量刻画，以建立扰动识别机制。

为此，本文引入扰动响应参与度指标 δ_w ，其定义如下：

$$\delta_w = \frac{\int_{P_1}^{P_2} |S_d(P) - S_b(P)| dP}{\int_0^{P_{max}} S_b(P) dP}$$

其中：

$S_d(P)$ ：实测沉降曲线；

$S_b(P)$ ：理论线性基线曲线；

P_1, P_2 ：曲线偏离区段；

δ_w ：代表扰动结构在总能耗中的相对参与程度。

以 $P=3200\sim 4700$ kN 为积分区间，结合数值积分处理，计算得：

$$\delta_w = \frac{5246.1 \text{ kN}\cdot\text{mm}}{23178.3 \text{ kN}\cdot\text{mm}} \approx 22.6\%$$

这一数值表明，在峰值承载前，接近四分之一的总能耗被结构扰动吸收，若不加以识别，势必造成桩端承载能力的误判。

3.2 有限元反演建模与桩-土参数重构

为进一步验证岩溶扰动对桩基系统刚度与力传路径的影响机制，本研究构建二维轴对称有限元模型，基于实测数据开展反演分析。模型构建基于以下原则：

桩身建模：混凝土弹性模量为 31 GPa，泊松比 0.2，桩径 1.2 m，桩长 26.5 m；

地层划分：依据地质钻探，分为粘性土、破碎岩带、完整灰岩三层；

接触界面：采用摩阻滑移模型，设置非线性接触刚度；

加载方式：在 20.2 m 深度处模拟 O-cell 内部加载，设置等幅逐级加载。

反演目标是拟合实测沉降曲线，采用遗传算法搜索最优参数组合。得到以下关键结果（如表 2）：

表 2 关键数据分析

参数项	初始估值	反演结果	相对修正率
桩侧摩阻力 q_s	62 kPa	85 kPa	↑ 37.1%
桩端极限阻力 q_b	1180 kPa	940 kPa	↓ 20.3%
岩体弹模 E_r	4.2 GPa	3.6 GPa	↓ 14.3%
接触刚度 K_c	90 MN/m ³	72 MN/m ³	↓ 20.0%

如图 2 所示为反演前后参数对比图：

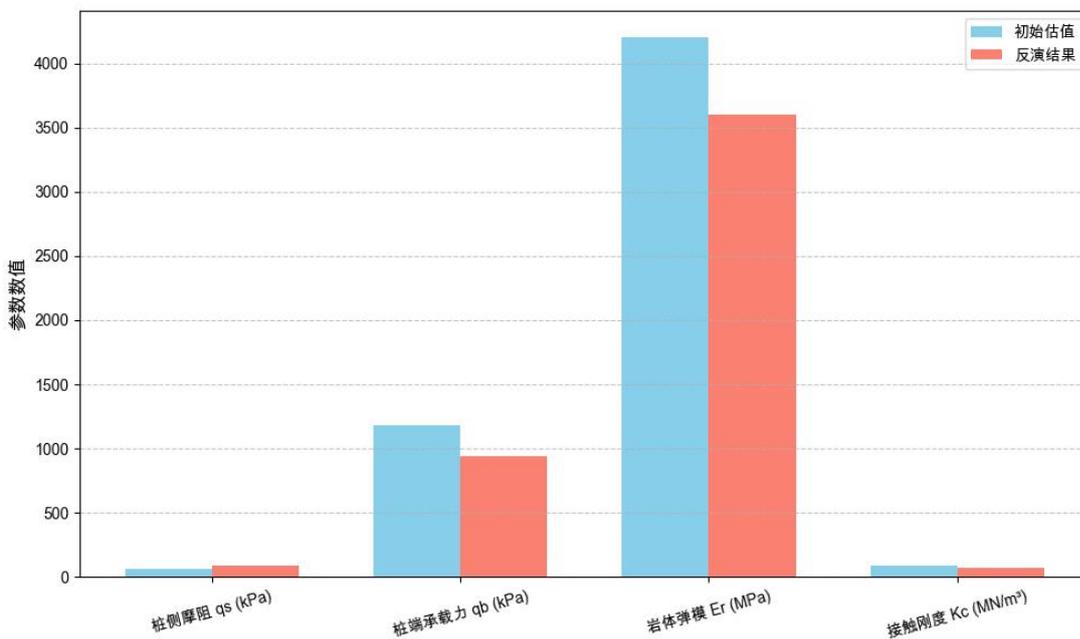


图 2 有限元反演前后关键桩-土参数对比图

可见，桩侧摩阻出现较大提升，表明破碎岩带虽扰动强，但因界面粗糙仍可形成强耦合；而桩端阻力及接触刚度显著下降，验证了桩端接触区空腔参与使得力学响应下移并削弱稳定性^[4]。

3.3 测试成果对桩基设计策略的优化反馈

3.3.1 桩长调整：构建下加载区力学连续性

从实测数据可见，原桩长设计仅使桩端埋置于完整岩层约 2.8 m，然而反演结果指出桩端接触刚度与极

限阻力均出现 20%以上下降,表明当前嵌岩深度无法有效穿越扰动带。岩溶地区地下结构呈现明显的“空—夹—实”非均质分布,尤其在桩端下方若存在薄弱夹层或空腔顶板,极易造成反力转移的不稳定路径。

因此,建议将设计桩长适度加深至不小于 29.5 m,使其下加载作用区充分穿透扰动结构,确保与完整岩体形成力学连续界面。该措施可有效提高桩端位移控制能力,并降低因顶板坍塌或接触断裂导致的突变沉降风险。

3.3.2 布桩间距优化:抑制群桩干扰放大效应

在原布置方案中,相邻桩距控制在 2.5D (D 为桩径),这一参数在常规地基条件下可满足经济性与协同性的双重要求。但岩溶环境下,桩端受力面存在显著离散性,部分桩体可能未能获得等效端阻支持,形成局部“软桩”现象。而群桩间荷载分布的不均与位移反应的非同步性,往往在相对密集布桩情况下被进一步放大。

故建议对布桩间距进行适度增距调整,取 3.0D 以上为宜,特别是在判明区域性空腔走向一致时,应采取偏离布桩中心交叉带的策略,以减小干扰带重叠区范围,提高群桩协同效应的稳定性与预测可靠性^[5]。

3.3.3 桩型升级策略:增强桩端扰动适应力

在典型溶蚀区域,桩端接触界面往往呈非对称凹陷状态,形成“假嵌岩”或“伪刚底”结构,从而导致受力路径转移不确定、极限承载能力显著下降。单一形式的直桩难以在此类复杂环境中稳定发挥作用,需引入增强型桩端结构形式。

建议在设计中引入“扩底+压浆+加锚”三位一体的组合桩型结构:通过底部扩径提高承载面,压浆形成致密浆体补强空腔或裂隙带,并设置竖向锚杆加强端部抗拔力和结构联结性。这一组合方案在已有岩溶区工程实践中表现出良好的位移控制效果,桩端承载提

升率可达 35%以上,具备显著的结构补偿潜力。

3.3.4 参数回代机制:构建“实测—反演—设计”一体化闭环路径

传统桩基设计过程中,设计参数多基于区域经验值和规范推荐数据,缺乏对特定工点地质微环境的针对性响应。而自平衡试验所得数据作为“现场级”高精度输入,可有效识别局部地质扰动、刚度突变与桩-土作用变化。

为此,建议建立参数回代机制,即以实测数据为基准,通过有限元模型反演出更具现场代表性的地基参数,并将其回馈至结构设计环节,用于修正桩长、桩径、入岩深度、施工工艺等关键参数,实现“实测—建模—设计—再验证”的正反馈闭环体系。如能在岩溶桩基设计中常态化该机制,将显著提升设计精度与工程安全裕度。

结语

岩溶环境下桩基力学响应的不确定性,不仅挑战了传统设计范式的适用边界,也暴露出现有测试理论在结构非连续场中的脆弱性。本研究以自平衡加载法为切入点,实证了其在复杂地质介质中识别非对称受力路径的潜力,并首次尝试以扰动参与度为量化指标,将现场曲线波动与结构性缺陷建立可计算的联系,从而为设计修正提供可追溯依据。更进一步,通过反演模拟实现从实测数据向结构参数的逻辑闭合,不仅赋予试验以建模价值,也为设计提供精准反馈机制。这一路径的确立,意味着岩溶区桩基工程有望从“规范约束型经验设计”迈向“结构扰动感知型精细控制”阶段。未来,基于数据驱动的多场耦合模拟、面向群桩协同的反演扩展以及结构智能预测模型的引入,将成为推动岩溶地区桩基工程走向高可靠性与高适应性设计的关键方向。

参考文献

- [1] 张良. 建筑地基混凝土偏斜灌注桩承载力分析及防控加固措施研究[J]. 建筑机械, 2025, (06): 219-225+231.
- [2] 高晓光. 临海富水粉砂地质钻孔灌注桩桩基承载力研究[J]. 四川建筑, 2025, 45(02): 97-100.
- [3] 何健保, 杨帆, 张文涛. 破碎~较破碎岩石地基钻孔灌注桩承载力参数取值方法分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(04): 146-148.

[4] 杨涛. 高速公路桥梁大直径钻孔灌注桩承载力自平衡检测方法[J]. 建材发展导向, 2025, 23(08): 16-18.

[5] 尹瑞龙, 尚艳坤, 陈运涛, 等. 嵌岩灌注桩竖向承载力不同计算方法分析[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(05): 73-79.

作者简介: 王鹏程(1993-), 男, 穿青人, 贵州毕节人, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 岩土工程。本文系中建四局重点研发项目(CSCEC4B-2020-KT-49)