

桩基施工过程中溶洞处理方法及管理策略

周 磊

江苏省地质矿产局第五地质大队 江苏徐州 221000

【摘要】桩基础在施工的过程中，有可能会遇到削弱桩基承载力的溶洞等不良地质环境。为了有效保障桩基施工在面对溶洞缺陷地质境况下的承载能力，本次探究将在梳理总结国内外有关研究的基础上，基于熟悉和掌握桩基施工过程中溶洞处理方法理论、明晰桩基施工过程中溶洞处理措施策略，继而凭借具体的案例分析，就桩基施工过程中的溶洞处理方法及管理策略向广大同行者们提供一点参考。

【关键词】桩基施工；溶洞处理；方法理论；管理策略；案例分析

引言

围绕桩基施工面临的溶洞等不良地质环境，依托于国内外的有关研究，为桩基施工过程中的溶洞处置寻找科学依据。而后凭借单层溶洞型桩基承载机理和多层溶洞型桩基承载机理掌握可靠式溶腔的处置技术措施策略，以此为案例分析提供理论支撑，也为有关理论和技术策略的应用推广提供借鉴。

1 国内外有关研究综述

桩基施工过程中溶洞的处理方法及其管理策略研究，一直是桩基础科学研究领域的热点，国际、国内也相继出现了许多较为前卫的研究成果。

在国外，Sweeting首先以桩基施工阶段溶洞及其周边区域的水体渗流作用影响作为研究侧重点，指出渗流水将会加大岩溶区桩基施工区域塌陷的概率，因此需要在整个施工阶段采取有效措施降低地下水位、旨在规避渗流水对于桩基施工的不利影响。^[1]Jiang则是以岩溶地区的桩基顶板为研究对象，提出了溶洞桩基顶板受力平衡的概念，并建立了基于受力承载极限境况下的溶洞桩基顶板模型，研究结论为：只要能够保障溶洞桩基顶板的受力平衡，便能够有效保障桩基的承载效能。^[2]

在国内，桩基施工阶段的溶洞处理，主要聚焦于溶洞的技术处置层面。陈飞等人以注浆灌塞岩溶区溶洞为技术策略措施路线，通过勘察桩基施工范围内的溶洞位置、溶洞大小以及溶洞承载特征，透过灌注填充砂浆的形式，增强桩基于溶洞位置的承载性能，使用注浆法的技术关键在于确认注浆配合比、注浆压力和注浆量。^[3]刘晨等依托于XRD衍射图谱分析法，测试桩基施工阶段溶洞区域的速凝填充料速凝度和填充度，并统计分析得出有利于桩基承载效能的最佳填充度约为105%，这对于有效掌握溶洞的灌塞填充

程度提供了有效范例。^[4]

借助上述国内外的有关研究，将为此次探究桩基施工过程中的溶洞处理方法及其管理策略提供一系列科学的理论依据和支撑。

2 桩基施工过程中溶洞处理方法理论

关于桩基施工过程中的溶洞处理方法理论，主要包含单层溶洞型桩基承载机理和多层溶洞型桩基承载机理。

2.1 单层或多层溶洞型桩基轴向压屈失稳模型

单层或多层溶洞型桩基轴向压屈失稳模型示意图如图1所示。在图1中，单层或多层溶洞型桩基的施工阶段桩顶为自由端、施工桩底为嵌固端，整个桩基的施工总长度为 L （单位为m）， H_0 表示桩基在施工阶段露出地面的自由端长度（单位为m）， H_1 表示溶洞桩基顶板以上部位扣除坍塌拱高度之后剩余的岩体层厚度（单位为m）， H_2 表示坍塌拱高度（单位为m）， H 表示溶洞的最大净高度（单位为m）， P 表示桩基施工阶段均布于桩基自由端顶部的轴向侧阻力（单位为MPa）， q 表示桩基施工阶段均布于桩基顶板以上并扣

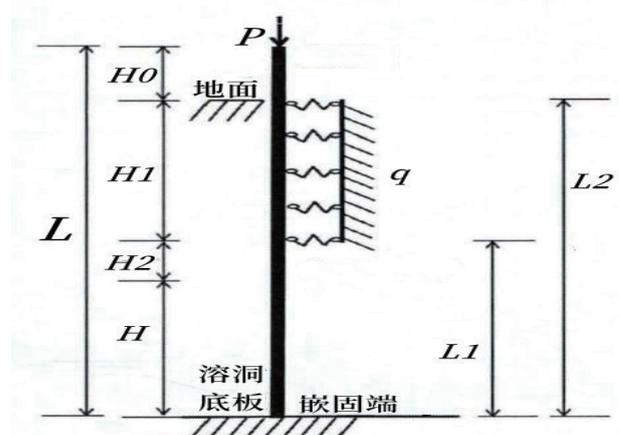


图1 单层或多层溶洞型桩基轴向压屈失稳模型示意图

除坍塌拱高度之后剩余岩体层范围内的桩侧土抗力荷载（单位为MPa），此外 $L_1=H+H_2$ ， $L_2=H_1+H_2+H$ 。

2.2 单层和多层溶洞型桩基承载机理

根据前文所述的国内外有关研究文献可得到单层和多层溶洞型桩基轴向压屈失稳模型处于临界破坏状态下的极限屈服应力平衡状态计算式分别如式1和式2所示。

$$Q_1 \geq P+q = \frac{\xi_s f_{rk} \pi d H_0 \sin \phi_1 + \xi_p f_{rk} \frac{\pi}{4} d^2 H_1 \cos \phi_2 + \xi_r f_{rk} \frac{\pi}{4} d^2 H_2}{\left(\xi_s + \frac{\xi_p}{\xi_r}\right) \times H} \quad (式1)$$

$$Q_2 \geq P+q = \frac{\xi_s f_{rk} \pi d H_0 \sin \phi_1 + \xi_p f_{rk} \frac{\pi}{4} d^2 H_1 \cos \phi_2 + \xi_r f_{rk} \frac{\pi}{4} d^2 H_2}{\left(\xi_s + \frac{\xi_p}{\xi_r}\right) \times H} \quad (式2)$$

在式1和式2中， Q_1 表示单层溶洞型桩基处于临界失稳状态时的极限屈服应力（单位为MPa）； Q_2 表示多层溶洞型桩基处于临界失稳状态时的极限屈服应力（单位为MPa）； P 表示桩基施工阶段均布于桩基自由端顶部的轴向侧阻力（单位为MPa）； q 表示桩基施工阶段均布于桩基顶板以上并扣除坍塌拱高度之后剩余岩体层范围内的桩侧土抗力荷载（单位为MPa）； ξ_s 表示施工期间桩基础位于嵌岩段的侧阻力系数； ξ_p 表示施工期间桩基础位于自由端的侧阻力系数； ξ_r 表示施工期间桩基础位于自由端和嵌岩段的综合阻力系数； ξ_s 、 ξ_p 和 ξ_r 表一般由实验室经过试验测定； f_{rk} 表示施工期间桩基础受到的单轴抗压强度（单位为MPa）； d 表示桩基础的直径（单位为m）； ϕ_1 表示施工期间桩基础露出地面部分自由端的平均倾斜角度（单位为°）； ϕ_2 表示施工期间桩基顶板以上并扣除坍塌拱高度之后剩余岩体层中岩体的空隙角（单位为°）。

对于单层或多层溶洞型桩基施工而言，只有在整个施工阶段，通过一定的技术措施和管理策略，始终保持单层溶洞型桩基或多层溶洞型桩基能够分别维持式1、式2所示的力学条件，便能保障桩基的施工质量与安全。

3 桩基施工过程中溶洞处理措施策略

根据对于国内外有关研究的梳理总结，以及长期从事桩基施工溶洞技术处置的有关经验来看，岩溶地区桩基施工的溶洞处理措施策略，主要应该包含以下四个层面

表1 案例工程项目桩基设计技术方案参数

主筋型号	主筋直径 (mm)	主筋数量	箍筋型号	箍筋间距 (mm)	混凝土型号	保护层厚度 (mm)	H0 (m)	H1 (m)	H2 (m)	H (m)
HRB400	22	12	HRB300	150	C35	50	0.8	2.5	1	4.5

的内容：

一是根据工程项目桩基础的设计方案以及建设区域的实际情况，使用超声波波速测试法，检测得出桩基施工区域范围内有无溶洞存在，若存在溶洞，则锁定和标记出溶洞的具体位置；

二是在锁定确认溶洞的分布区域和具体位置之后，使用XRD衍射图谱分析法，进一步确认每个溶洞的形状、体积以及最大净空高度；

三是在桩基础混凝土浇筑施工完成后，再利用灌塞填筑法，使用钻孔灌注导管精确对每个溶洞进行水泥砂浆灌注填塞，在此期间的技术关键则是确认灌注填塞砂浆的最佳配合比、

灌注填塞砂浆的最佳注浆压力以及最佳注浆容量；

四是利用ANSYS有限元建模计算分析软件，对于前述处理措施策略开展建模运算分析，验证有关处理措施策略是否能够满足式1和式2所示的力学条件。

一般情况下，能够满足式1和式2所示的力学条件，才表示技术处理措施策略是可靠的、有效的。

4 案例分析

位于我国江苏省内的某建筑工程项目，其修建范围地处岩溶区域，因此设计方案中的基础为桩基础。据现场实际勘察，桩基础施工区域范围内的岩体层多为中风化砂质岩，其岩体层重度平均值为 19.38KN/m^3 ，粘聚力平均值为 4.07MPa ，内摩擦角平均值为 11.3° ，压缩模量平均值为 4.63MPa ，超固结影响系数平均值为 1.63 ，水平反力系数平均值为 0.33 ，水平变形系数平均值为 0.31 ，另根据土力学试验得出岩体层的嵌岩段侧阻力系数 $\xi_s=1.58$ 、自由端的侧阻力系数 $\xi_p=1.32$ 、自由端和嵌岩段的综合阻力系数 $\xi_r=1.41$ 。

4.1 案例项目桩基技术方案

桩基础施工区域的范围长度为 50m 、宽度为 30m ，每个桩基的中心间距为 5m ，共 60 根、桩基设计直径为 1.5m ，桩基编号分别依次为“桩基1”、“桩基2”、“桩基3”、...、“桩基58”、“桩基59”、“桩基60”，桩基础其它技术参数如表1所示，此外、施工期间桩基础露出地面部分自由端的平均倾斜角度 ϕ_1 控制值为 1.5° ，施工期间桩基顶板以上部位并扣除坍塌拱高度之后剩余岩体层中岩体的空

表2 案例项目桩基施工期间溶洞处置技术方案2有限元计算分析结果

溶洞编号	P值 (MPa)	q值 (MPa)	P+q值 (MPa)	Q1值 (MPa)	Q2值 (MPa)	Q1≥P+q	Q2≥P+q
1	34.5	41.3	75.8	76.2	-	符合	-
2	36.8	44.7	81.5	85.4	-	符合	-
3	33.7	40.5	74.2	75.6	-	符合	-
4	34.6	42.8	77.4	-	80.2	-	符合

隙角测定值 ϕ_2 为 12.7° 。

4.2 案例项目溶洞勘测分析

根据桩基设计技术方案在施工作业区域内，利用生石灰画出每个桩基的具体位置，而后利用XRD衍射图谱分析测试仪，检测每个桩基对应位置处，是否存在溶洞，并测定溶洞的尺寸参数。

经XRD衍射图谱分析测试仪测定，“桩基5”位置处存在溶洞（编号“溶洞1”），该溶洞为不规则形状、属单层溶洞、体积为10.43m³、最大净空高度为1.72m；“桩基17”位置处存在溶洞（编号“溶洞2”），该溶洞为不规则形状、属单层溶洞、体积为13.45m³、最大净空高度为1.75m；“桩基29”位置处存在溶洞（编号“溶洞3”），该溶洞为不规则形状、属单层溶洞、体积为20.52m³、最大净空高度为1.90m；“桩基41”位置处存在溶洞（编号“溶洞4”），该溶洞为不规则形状、属多层溶洞、体积为15.32m³、最大净空高度为2.55m。

4.3 案例项目技术管理策略

案例项目的施工技术人员，拟借助向溶洞内灌注填塞砂浆的形式，在桩基础灌注时同时对溶洞进行灌注填塞，并制定出了以下2个技术管理策略方案：

方案1：灌注填塞砂浆配合比（1m³砂浆中，普通硅酸盐水泥1745Kg、二级粉煤灰含量130Kg、水量150Kg、砂含量705Kg），灌注导管直径50mm，灌注压力控制为6m/s，灌注容量控制为溶洞体积的105%；

方案2：灌注填塞砂浆配合比（1m³砂浆中，普通硅酸盐水泥1750Kg、二级粉煤灰含量135Kg、水量155Kg、砂含量7105Kg），灌注导管直径50mm，灌注压力控制为8m/s，灌注容量控制为溶洞体积的110%；

4.4 案例项目技术管理策略验证

利用ANSYS有限元计算分析软件，分别依照案例项目建设施工区域的岩体层情况（重度平均值，粘聚力平均值，

内摩擦角平均值，压缩模量平均值，超固结影响系数平均值，水平反力系数平均值，水平变形系数平均值，嵌岩段侧阻力系数 ξ_s 、自由端侧阻力系数 ξ_p 、自由端和嵌岩段的综合阻力系数 ξ_r ）、表1所示桩基设计方案、“编号1”至“编号5”溶洞尺寸位置情况以及上文所述的技术管理策略（溶洞灌注填塞砂浆）开展建模运算分析，得出

技术管理策略方案1不满足式1和式2所示力学关系，技术管理策略方案2满足式1和式2所示力学关系，技术管理策略方案2境况下的具体计算结果如表2所示。

5 结语

基于国内外的有关研究，掌握单层和多层溶洞型桩基轴向压屈失稳模型以及单层和多层溶洞型桩基的承载机理。而后以XRD衍射图谱分析法探明溶洞的具体位置、尺寸、体积以及最大净空高度，编制溶洞灌注填塞砂浆技术管理策略方案，并使用ANSYS有限元计算分析软件建模运算验证技术管理策略方案的可行性，以此为广大同行业们就桩基基础施工期间的溶洞处理及管理提供一点技术实践参考。

参考文献：

- [1] Sweeting. Karst landforms. Columbia University Press (New York), 1973: 77-79
- [2] Jiang, C, Li X B, Zhou K P, et al. A new reliability analysis method of Karst roof under pile tip[J]. International Conference on Civil Engineering and Transportation (ICCET 2011), 133-136.
- [3] 陈飞, 黄晓琴. 注浆技术在岩溶地层钻孔灌注桩中的应用[J]. 工业建筑, 2008, 38(1): 891-893.
- [4] 刘晨, 龙世宗, 邹燕荣, 颜碧兰. 混凝土速凝剂促凝机理新探[J]. 建筑材料报, 2000, 3(2): 175-181.

作者简介：

周磊（1990.03-），男，汉，江苏省徐州市，本科，（现目前的职称）中级工程师，研究方向：桩基施工。