

岩溶强发育地区桩基础设计与施工偏差的分析与优化探讨

彭 阳

中冶建工集团有限公司, 重庆 400084

[摘要]岩溶强发育地区地基基础受场地实际地质情况影响较大,实际地质情况复杂多变。而业主方前期往往对此类场地的超前钻探重视不够,单桩探孔偏少造成地质资料失真;而桩基础设计时又往往直接简便,采用单一粗犷的设计方案进行桩基础设计。从而在基础施工阶段,出现现场实际情况与设计不符,造成大量设计变更和费用超预算的问题。本文以某实际项目为案例,进行岩溶强发育地区桩基础设计与施工偏差的分析探讨,从理论概念的合理性、从实际施工的可执行性、从精细化设计后的经济性角度进行论述,为类似地质条件项目的桩基础勘察设计施工提供思路,更好提高项目效益。

[关键词]岩溶强发育;桩基础;超前钻探;设计优化;效益

DOI: 10.33142/ec.v9i10.20516

中图分类号: U419.1

文献标识码: A

Analysis and Optimization of Deviation in Pile Foundation Design and Construction in Areas with Strong Karst Development

PENG Yang

China Metallurgical Construction Engineering Group Co., Ltd., Chongqing, 400084, China

Abstract: The foundation of areas with strong karst development is greatly affected by the actual geological conditions of the site, which are complex and varied. However, in the early stages, the owners often did not pay enough attention to advanced drilling in such sites, resulting in a shortage of single pile boreholes and distorted geological data; And pile foundation design is often straightforward and simple, using a single rough design scheme for pile foundation design. As a result, during the basic construction phase, there may be discrepancies between the actual site and the design, leading to a large number of design changes and cost overruns. This article takes a practical project as a case study to analyze and explore the design and construction deviations of pile foundations in areas with strong karst development. It discusses the rationality of theoretical concepts, the feasibility of actual construction, and the economic benefits of refined design, providing ideas for the survey, design, and construction of pile foundations in similar geological conditions projects and better improving project efficiency.

Keywords: strong development of karst; pile foundation; advanced drilling; design optimization; benefits

引言

岩溶强发育地区的典型特征是溶隙、溶槽、漏斗多、石芽密布,基岩面起伏大,溶洞发育,岩体完整性差,变异性大。在国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011的6.2章中有比较具体的量化指标。在实际工程中,通过少量地质勘察的单点孔位形成的柱状图难以真实地反映实际的地层情况。桩基础设计时,由于基岩面的起伏变化大,桩基础设计往往采用较为粗犷的简单统一的计算模式,使得实际施工时,现场实际与设计文件存在较大差异,导致设计变更或者基础造价增加。从技术上讲,往往造成了桩基承载力的过高从而形成承载力的浪费;从施工实施上讲,桩的超长造成的缩径、跨孔、清底不干

净等潜在质量和安全风险;从经济上讲也造成了费用超预算的风险。

采用合理的超前钻探方案和优化设计,二者紧密结合,可以有效地避免设计上、施工上、经济上的潜在风险,真正地做到在方案的阶段就极大程度地避免实施阶段的潜在风险,让勘察设计真正地起到指导和带头作用,让勘察设计真正地为项目的效益服务。特别是在EPC总承包工程日益发展的今天,优化的勘察设计方案为项目效益服务的需要和重要性不言而喻。

1 项目概况

某项目,位于重庆市丰都县,处于岩溶强发育地区。项目总用地面积101997.9m²,总建筑面积为140784.94m²,

拟建 29 栋住宅含底部商业，以及配套的垃圾收集点、公厕、环卫工休息站等配套设施房屋。房屋结构类型为部分框支剪力墙结构。

本论文以其中的 B5 号楼为例，B5 号住宅楼建筑层数 8 层，B5 号楼共布置桩基 46 根，原设计均为嵌岩桩，以采用中风化灰岩作为持力层。

2 基本设计条件

2.1 地层结构

(1) 素填土^[1] (Q_4^{ml})：灰色、黄褐色，主要为粘性土及灰岩碎块组成，粒径一般为 10~350mm 之间，最大可达 450mm，含量约 18~34%，松散-稍密，稍湿，为随意性堆填，回填年限约 1 年以上。

(2) 红粘土 (Q_4^{dl+el})：褐黄色、褐灰色，软塑~可塑，致密状。稍具光泽，干强度中等，韧性中等，无地震反应。该层在大部分钻孔中均有分布，厚度在 0.3~20.40m 之间变化。

(3) 红粘土夹碎石 (Q_4^{dl+el})：褐黄色、褐灰色，主要由红粘土与灰岩碎石块组成，少部分地带含粉细砂，稍湿~湿，粘土呈可塑状，稍具光泽，干强度中等，韧性中等，无地震反应，粘土含量约占全重的 80%~90%，碎石块呈棱角状，粒径约 8~30mm，含量约占全重的 10%~20%。该层在大部分钻孔中均有分布，厚度 0.40~26.90m 之间变化。

(4) 灰岩 (T_1d)：灰色、灰白色，主要由碳酸盐矿物组成，偶见方解石，中厚层状构造，隐晶结构，裂隙较发育，多呈闭合状，局部见小溶洞及溶蚀现象。强风化带岩石较破碎，岩芯呈碎块~短柱状；中等风化带岩石坚硬，岩体较完整，岩芯呈短-长柱状，节长一般 6~20cm，为场区主要岩层，在场地内均有揭露，厚度在本次勘察中未钻穿。

2.2 桩基础设计参数

嵌岩桩基础，以中等风灰岩作为持力层，饱和单轴抗压强度 33.10Mpa，天然单轴抗压强度 40.34Mpa。红粘土极限侧阻力 q_{sik} 取 40kPa；红粘土夹碎石极限侧阻力 q_{sik} 取 150kPa；端阻力取 2000kPa；

2.3 桩基超前钻探

本项目桩基进行了一桩一孔的超前钻探，从实际情况来看，一桩一孔很难反应桩底实际情况，建议参照贵州地区标准进行一桩多孔的超前钻探，方能准确把握桩底持力层情况。

3 原桩基设计

3.1 桩设计方案

原设计对于所有桩均采用嵌岩桩，根据其计算公式，设计未考虑上部土层的侧摩阻力。采用的桩型为直径 800mm 和 1000mm 的大直径桩。嵌入中风化基岩要求大于 0.5m，考虑嵌岩段综合效应系数，按照基本构造规定嵌入中风化基岩 0.5m。直径 800mm 桩，单桩承载力特征值 5032KN，直径 1000mm 桩，单桩承载力特征值 7862KN。

表 3 各桩设计承载力特征值

桩号	桩径 (mm)	嵌岩要求 (m)	单桩承载力特征值
1#~12#	1000	≥ 0.5	7862KN
13#~17#	800	≥ 0.5	5032KN
18#	1000	≥ 0.5	7862KN
19#~23#	800	≥ 0.5	5032KN
24#~46#	1000	≥ 0.5	7862KN

3.2 原设计桩预算工程量及预算费用

根据原设计桩长进行桩整体工程量计算，桩径 1000mm 总桩长为 545.7m；桩径 800mm 总桩长为 164.5m。计算可得总桩体积为 511m³，以单方造价 2000 元计算，桩基造价在 102.2 万元。

4 现场桩基施工情况

4.1 实际桩长与原设计桩长对比

通过现场实际施工桩长的数据与设计桩长的对比会发现，整栋楼各桩均存在不同程度的桩长偏差。用 3.2 节相同的计算方式进行工程量和造价计算，可以得到：桩径 1000mm 总桩长为 836.29m；桩径 800mm 总桩长为 251.73m。计算可得总桩体积为 782.95m³，以单方造价 2000 元计算，桩基造价在 156.6 万元。而此笔费用还没有考虑处理超长桩施工中不利情况的措施费用^[2]。

通过以上计算可知，实际总桩长超出设计桩长的比例为 53.1%；实际费用超过预算费用的比例为 (156.6-102.2)/102.2=53.2%，超过的数值为 54.4 万元；单根桩超过设计桩长的比例为 19.25%~133.76%；所有桩中实际超过设计桩长达到 50%以上的桩就有 24 根，达到总桩数的 52%。

从数据上看，相对值偏差太大，说明设计与施工偏差太大。

4.2 实际与设计存在较大差异的原因分析

为什么会出现如此大的偏差？通过场地周边的调查以及道路开挖的断面来进行分析，可以从以下图片来反映一些问题。



图1 岩溶及岩体破碎情况调查图

图片中溶槽较为明显,填充物为红黏土夹碎石,破碎岩体裂隙间隔近,裂隙发育,岩石成薄~中厚层状,岩体被切割成块状,为破碎岩体。超前钻探时,若钻孔进入破碎岩体中,由于钻孔孔径小,可以取出来连续完整的岩芯,也可能误判为完整岩体。当基岩面陡时,钻探单孔进入了完整基岩,而桩却会出现只有一半进入完整基岩的情况,也会产生误判。所以,在岩溶强烈发育地段,建议应当参照贵州地方规范^[3]的规定,增加桩中心及周边布孔,方能控制整个桩底的情况。

结合各方面情况进行分析,出现偏差的原因主要有以下几点:

(1)地质情况复杂,岩性变化大、岩体完整性差、基岩面陡,导致勘察单点孔位揭露情况与旋挖钻机大直径桩施工揭露情况不一致。

(2)超前钻探孔偏少。超前钻探仅在桩心位置进行钻探,无法完全揭露桩位处岩层的实际情况,特别是对于岩溶强发育地区。

(3)统一采用嵌岩桩基础模式进行设计,未进行针对性的基础设计分析,经济性偏差,带来后期实施与设计偏差。针对该类场地应当因地制宜,精心分析。

(4)未真正做到“信息化施工、动态法设计”。当现场出现此类情况较多时,施工单位应立即反馈相关信息,勘察设计单位应根据实际情况进行勘察和设计方案的调整。

4.3 桩超长带来的问题

现场桩基施工过程中碰到的主要问题有以下:

(1) 垮孔

现场实际施工时,桩长大多都达到了20m以上,施工时旋挖出来的岩土体很破碎,施工过程中,垮孔经常发生。现场采用的处理措施为回灌C15素混凝土,凝固后

再进行钻孔,如此一来,基础费用明显增加。

(2) 刚性角

有些桩距离较近,在5m左右,桩底标高相差达到10m左右,不满足刚性角的要求,需要加长有些桩以满足刚性角要求。

(3) 桩底持力层的进一步检验及处理

由于桩实际长度有些已经超过了超前钻的钻孔深度,从而对于现在实际桩底以下的不良地质情况无法判定,需要再次进行超前钻探检测桩底以下的不良地质。

5 超前钻探方案及设计优化

5.1 理论支撑

5.1.1 原超前钻探及设计的缺陷

原超前钻探的缺陷:针对岩溶强发育地区,一桩一孔的超前钻探是不够的,应参照贵州规范,应至少进行一桩两孔,两孔均应布置在桩边;三孔则应在桩心和桩侧两边进行布孔。

原设计的缺陷有两点:一是没有考虑和计算桩侧摩阻力;二是没有针对每个桩或每一类型的桩进行精细化的设计方案比较。

5.1.2 桩端岩土层承载能力的发挥

桩侧土先于桩端岩土发挥作用,是桩最基本的受力模式^[4]。抛开特殊情况(如桩侧全为液化土、自重固结未完成的土)不论,桩都是桩侧阻力先发挥作用,承载能力不够再由桩端阻力发挥作用,二者所占比重不同而已。无论是纯摩擦桩、纯端承桩、端承摩擦桩或者摩擦端承桩,都是根据比重不同而进行的人为划分。

通过中冶建工集团有限公司《不均匀碎石土桩基设计技术研究与经济性分析》课题^[5]的研究结果,我们也可以得到相应的一些实验结果。该课题结论显示上部和下部土

层侧摩阻力的发挥是一个异步的过程。上部土层的侧摩阻力先于下部土层发挥作用；随着荷载增大，上部土层的侧摩阻力逐渐趋于稳定，而下部土层的侧摩阻力逐渐发挥。当桩顶荷载加到一定值，桩端阻力才开始发挥作用。由此可见在桩顶荷载不大的情况下，桩端阻力根本就没有发挥或发挥很小。

5.2 基于实际桩长计算的桩承载力

实际桩长均是按照嵌岩桩进行施工，进行承载力计算时，我们按照嵌岩桩和端承摩擦桩模式分别进行计算，看桩的实际承载能力能达到多少。

从理论上分析，按照嵌岩桩计算出来的桩承载力肯定远远高于设计承载能力，因为原设计没有考虑桩侧阻力，而超长桩侧阻力就已经很大很大了，端阻力基本不发挥了，这是承载能力极大的浪费。而按照《桩基规范》5.3.6 条摩擦端承桩计算出来的桩承载力若高于桩顶荷载，说明桩可以减小；若桩承载力低于桩顶荷载要求，就设置多桩，计算单桩承载力和桩长。

通过以上计算，进行一些统计可以得出：端承摩擦桩计算模式下，桩承载能力大于 1.2 倍桩顶荷载的桩有 27 根，占总桩数的 58%；桩承载能力大于 2.0 倍桩顶荷载的桩有 15 根，占总桩数的 33%。也就是说，有 27 根桩是可以进行优化的，其中至少有 15 根桩是可以进行极大的优化的。

5.3 桩优化设计方案

优化的思路也比较简单，为了进行对比，还是采取原桩的桩径进行计算。根据桩顶荷载要求，考虑相应不利情况对桩顶荷载乘以 1.2 放大系数即可以得到桩需求的承载能力，对单桩承载能力进行分类划档，分为 1500kN、2500kN、3000kN。需求承载能力除以单桩承载能力，得到的数值取整。

通过以上计算可以得到：桩径 1000mm 总桩长为 606m；桩径 800mm 总桩长为 122m。计算可得总桩体积为 537m³，以单方造价 2000 元计算，桩基造价在 107.4 万元，比实际桩长的 156.6 万元节省 49.2 万元。

优化后的方案，全部采用端承摩擦桩形式，以厚层的红黏土夹碎石土层作为桩基持力层。将以上优化后的桩进行布桩，带入软件进行承载力、承台验算、沉降计算等，对于局部不满足的桩进行调整，可以得到桩的最终施工图纸。

该方案的优点主要表现在以下几个方面：

(1) 从理论上讲是可行的，采用端承摩擦桩，计算模式是合理且符合桩实际受力情况的；

(2) 避免了嵌岩桩为了取到完整岩芯而不断超挖的情况，节省造价和工期；

(3) 桩长最长 16m，施工中不利情况相对较少，节省桩垮孔处理费用和工期；

(4) 承载力采用桩基静载试验，有试验数据支撑，结果更加可靠。

5.4 该优化方向在执行中存在的问题

要实现此种优化方案，需要建设单位、勘察单位和设计单位一起协作方能实现。现阶段，在执行中存在的问题如下：

(1) 建设单位对地基基础的勘察设计缺乏相应的专业知识，对地基勘察的重视不够，本文中的案例，建设单位为了省钱，在超前钻探阶段要求只布一个钻孔，很难揭露桩位下部的岩溶情况，会导致勘察数据偏少，判断不准，从而给后期的设计和施工带来潜在隐患。

(2) 对于红黏土层夹碎石，本身是岩溶地区常见的土层，其原岩的结构已经改变，该土层严格讲是属于强化岩层的一种，承载能力是较好的，但是对该土层相应的研究不充分，对于其能否作为持力层，不同勘察设计单位和勘察人员有不同的认识。这还是需要经验和数据的积累。对于本文所述的多层建筑，将该层作为持力层是合理可行的。

(3) 由于市场的原因，设计单位优化设计的热情不高，此种设计方案要根据每桩的地质资料做详细的分析，然后进行方案试算，试算后还要进行相应的调整，工作量较大。而采用嵌岩桩模式，且不考虑侧摩阻力，简洁明了又安全，是一种“理想”的基础方案。

(4) 从规范层面，国家规范未对岩溶强发育区域的基础勘察作出比较明确和量化的规定，所以在执行层面，不同的地区不同的单位执行方式不同。超前钻探的孔数及布置方案在国家规范层面是空白，仅在贵州地表上有相应的体现。这就导致具体实施过程中建设单位以省钱为目的而不接受一桩二孔或三孔方案，从而导致原始资料的缺失，影响后期的一系列工作。

6 结论及建议

6.1 结论

(1) 在岩溶强发育地区，进行细致可靠的桩基超前钻探是必要的，是会为整个项目带来费用、进度、质量的巨大效益的。根据可靠的超前钻探成果进行桩基优化设计是保证项目不超预算、实现项目目标的重要环节，需要进行严格把关。

(2) 超前钻探方案可参照贵州地标规范执行超前钻探方案布置。

(3) 针对岩溶强发育地区，桩基形式需要慎重选择，

不能简单以嵌岩桩模式来以偏概全,应根据地质情况仔细分析。以红黏土夹碎石层或破碎岩体做持力层,采用端承摩擦桩是可行的。

6.2 建议

(1) 建议岩溶强发育地区采用更为有效的地质勘察手段,以较准确把握岩溶发育情况,及早根据情况选择合适的地基基础形式。

(2) 建议对于岩溶强发育地区的基础设计,能够做到因地制宜,根据精确的地质资料做出详细适宜的设计资料,以便更好地指导施工,提高项目效益。

[参考文献]

[1]黄启超,胡利,刘海,等.岩溶强发育地区某高层建筑基础

设计与处理[J].广东土木与建筑,2026,33(7):70-73.

[2]江林,王群.岩溶强烈发育地区桥梁桩基础的勘察和设计分析[J].黑龙江交通科技,2020,43(11):100-102.

[3]张小帅.强发育岩溶地区建筑桩基础全套管全回转施工及效果评价[J].江西建材,2025(1):298-300.

[4]陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.

[5]中冶建工集团有限公司.不均匀碎石土桩基设计技术研究及经济性分析[S].重庆:中冶建工集团有限公司,2020.

作者简介:彭阳(1989—),男,汉族,重庆沙坪坝区人,高级工程师,本科,毕业于中国地质大学(武汉)勘查技术与工程专业,现从事岩土工程勘察设计工作。