

岩溶地区桩基选型浅谈

郑伟国，谢毓才，薛绪标

(深圳市建筑设计研究总院, 广东 深圳 518031)

摘要: 针对岩溶地区不良地质作用较发育, 地质条件复杂, 且长期以来一直未能找到成熟有效的、适应岩溶地基的桩基类型及施工方法的情况, 概括了岩溶地区桩基应用现状, 通过深圳龙岗爱地花园二期和盛龙花园二期桩基设计的工程实践, 探讨岩溶地区桩基选型, 提出若干建议。爱地花园二期针对溶岩埋藏较深的情况, 利用黏土对预制桩承载力的时效性, 采用预应力管桩作为摩擦桩, 不触及基岩, 从而避开不良地质的影响; 盛龙花园二期针对溶岩埋藏较浅的情况, 采用预应力管桩作为端承群桩形成桩筏, 从而分散了不良地质带来的工程风险。

关键词: 溶岩地区; 基础设计; 预应力管桩; 桩筏基础

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0404-04

作者简介: 郑伟国(1964-), 博士, 高级工程师, 一级注册结构工程师, 从事建筑结构设计工作。E-mail: strzheng@21cn.com。

Selection of pile foundations in karst areas

ZHENG Wei-guo, XIE Yu-cai, XUE Xu-biao

(Shenzhen General Institute of Architectural Design and Research, Shenzhen 518031, China)

Abstract: Aiming at the case that there have been no efficient and mature pile foundations and corresponding construction methods for karst areas with poor and complex geological conditions for long time, the state-of-the-art of pile foundations applied in karst areas is summarized, and the selection of piles is discussed. A number of recommendations are proposed based on the practical engineering experience from the design and installation of the pile foundations in Aidi Garden Phase II and Shenglong Garden Phase II in Longgang of Shenzhen. Particularly, Aidi Garden Phase II, constructed in deep karst area, exploits the aging effect of clay for supporting precast piles. It adopts the prestressed concrete pipes as friction piles, which do not touch the karst and thus eliminate its adverse impact. On the other hand, Shenglong Garden Phase II is constructed in shallow karst area, where the prestressed concrete pipes are employed as end-bearing pile groups to form piled raft, dispersing the risk of unfavorable geology.

Key words: karst area; foundation design; prestressed concrete tube pile; piled raft foundation

0 引言

溶岩指可溶性基岩, 包括石灰岩、大理石等易溶解的岩层, 受流水溶蚀, 有时再加上沉淀作用而形成的地貌, 旧称喀斯特地貌, 源于前南斯拉夫的一个地名。溶岩形成的时代久远, 存在相当大的复杂性, 其地质构造一般有以下特点: 地质浅部石牙、溶沟、溶洞等岩溶裂隙发育, 基岩面起伏大, 缺失残积层、全风化、强风化、中风化等风化程度较高的过渡性岩土层, 微风化岩层直接上覆较软土层, 或形成双层和多层溶洞、洞内充填软土, 岩溶地质往往有强透水性。

我国可溶岩分布面积达 $3.65 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积的 1/3, 是世界上溶岩最发达的国家之一^[1]。随着经济的发展, 岩溶地区也新建大量的高层建筑, 提出

合理、经济的桩基选型方法就有了重大的技术价值和经济意义。

长期以来, 在建设岩溶地区的高层建筑中, 未能顺利地解决好桩基选型问题, 也未能找出一种成熟有效的桩基类型及施工方法, 根本的原因是缺乏一套完整的应对复杂地质的整体思路。面对复杂地质条件如何应对, 是“避开风险”, 是“分散风险”, 还是“消除风险的根源”, 没有一个清楚的认识, 这归根结底是一个方法论的问题。笔者有时也作为专家参加一些工程的桩基研讨会, 感受到人们的思维严重地被经验和传统束缚着, 任何与之不符的设想都很难被接受。庆

幸的是, 笔者有机会作为专业设计负责人, 通过深圳龙岗的爱地花园二期和盛龙花园二期的桩基工程, 实践了一些新设想, 取得了理想的效果。文献[2]是笔者 2006 年在深圳市建筑设计研究总院参加学术工作交流活动的即性发言, 本文是在该文基础上的进一步拓展研究。

1 岩溶地区桩基应用现状

龙岗中心城片区, 普遍呈岩溶地貌, 是典型的岩溶地区。盛龙花园的建设方曾对盛龙花园周边的桩基工程进行过调查, 该地区有溶岩地质条件的桩基工程在桩型的选择时都有较大反复, 主要案例有:

(1) “东方明珠城” 距盛龙花园约 200 m, 与盛龙花园隔龙岗河相望, 距龙岗河 15 m, 共 7 栋塔楼, 最高的塔楼 32 层。桩基础总数的 2/3 为冲孔桩, 1/3 为人工挖孔桩, 桩基础总施工工期 7 个月。挖孔桩施工曾引起邻近道路沉降。

(2) “龙园印象” 距盛龙花园约 600 m, 共 5 栋 18 层的塔楼。工程先采用锤击预应力管桩, 因断桩严重, 改为人工挖孔桩, 又因地下水太丰富, 最后全部改用冲孔桩。桩基础总施工工期 6 个月。

(3) “君悦龙庭” 共 14 栋 28 层塔楼。地质条件与盛龙花园非常类似, 塔楼范围全部采用冲孔灌注桩, 在开工前做了详细的地质勘察工作, 超前钻探见溶洞率 27% 左右, 但在完成桩基施工后的抽芯检测中仍然发现桩底有溶洞, 钻芯检查范围从 10% 扩大到 30%, 还是不合格, 钻芯检测与超前钻探的吻合率小于 90%, 最后必须进行普检 (100% 基桩钻芯检测)。该项目用了约三年时间才完成桩基的检测和整改工作。

文献[3]介绍佛山南海区的一个工程实例, 描述溶洞处理的难度和局部采用预应力管桩的诸多问题。还有大量的文献 (超过 300 篇) 探讨、介绍岩溶地质中灌注桩的施工处理, 可见岩溶地区桩施工的艰难程度。

岩溶地区主要使用的桩型有: 钻(冲)孔灌注桩、人工挖孔桩、预应力管桩及预制桩、夯实桩、CFG 桩及复合地基。综合笔者收集的大量资料, 各种桩型的应用主要有以下情况:

(1) 钻(冲)孔桩是在岩溶地区高层建筑中应用最为广泛的一种桩型。尽管冲(钻)孔桩费用高, 对场地环境污染较大, 但几乎所有的地勘报告在相比之下都建议采用这种桩型。钻(冲)孔桩存在的问题是孔底清渣困难, 发育的溶洞对冲桩施工带来困难, 也会造成漏浆、漏水、卡钻(锤)、掉钻(锤)、埋钻(锤)、塌孔、偏孔等现象。

(2) 挖孔桩是在基岩埋深较浅和地下水不丰富

时的一种选择。岩溶地质一般存在软夹层和较丰富的地下水, 大面积降水也会对邻近建筑物、管网和道路造成不良影响, 易出现涌水、涌砂、掉入土洞等现象, 所以除基岩浅埋的情况外, 通常也不建议采用人工挖孔桩。在溶岩浅埋地区的工程中, 冲(钻)孔桩与挖孔桩相结合是较常见的一种做法。

(3) 由于岩面高低不平, 预制桩或预应力管桩在施工中易产生滑桩、断桩, 也无法穿过夹层或孤石, 除岩溶不发育和地下有淤泥、土洞、流砂、地下溶洞连通暗河的情况, 通常建议不宜采用。

(4) 在溶岩地区夯实桩和复合地基也较为常用, 多层建筑采用夯实桩和深层搅拌法复合地基, 高层建筑采用 CFG 桩法, 但是由于承载力小而受到制约。

2 爱地花园二期桩基选型

爱地花园位于深圳龙岗区龙平大道与爱心路交叉处。一期为多层住宅, 基础采用夯实桩。二期为 7 栋 18 层塔式住宅, 有一层地下室, 框架剪力墙结构。总建筑面积大约 15~16 万 m², 地下室 2 万 m²。地质报告揭示: 60 个钻孔中除 4 个未明外, 有 56 个探明微风化大理岩, 岩面起伏大, 埋深 18~38 m; 上覆粉质黏土和含砾粉质黏土。所在场地存在大量溶洞, 成串珠状, 溶洞能见率 53.6%, 线岩溶率 16.6%。在揭露溶洞的钻孔中, 溶洞规模大小不一, 溶洞顶板最厚为 2.90 m, 最薄仅为 0.10 m, 最大洞高 11.80 m, 最小为 0.10 m, 溶洞大部分充填软塑或含砾粉质黏土, 大部分孔漏水、漏浆, 表明与外界有水力联系或溶洞之间相互连通。地质报告建议桩基采用冲(钻)孔灌注桩, 以完整微风化大理岩为桩端持力层。为避免桩端置于微薄的溶岩顶板上, 建议进行超前钻探。

在设计开始前, 桩基研讨会的专家们建议采用 CFG 桩法。但由于该场地浅部土层中不均匀分布有碎石和块石, 且土层黏性强、强度较高, 采用该方法施工时, 局部可能会沉管困难, 也可能造成地面隆起。

在对地质条件作出评估后, 认为应充分利用上覆土层黏性, 决定采用 D400 的预应力管桩, 不触及基岩面, 为纯摩擦桩, 可更好发挥桩、土及底板的共同作用。采用地质报告提供的桩基设计参数确定单桩承载力特征值为 650 kN, 总桩数 5000 多根。施工中采用复压来了解本场地黏土对桩承载力的时效性^[4], 确定合适的桩长和沉桩压力, 经过试压, 确定终压值为 1100 kN, 最小桩长不小于 8 m, 在达到承载力的前提下, 控制桩长, 既保证工程质量又降低成本。

爱地花园现已完工, 各项指标已满足质检部门的要求。该设计方法为龙岗岩溶地区首例, 此举初步估

算节省超过 1000 万元投资，大大缩短了施工工期，并为龙岗岩溶地区的基础处理提供了另一方式。

预应力管桩的应用已遍及全国，已从用锤击沉桩法为主发展到以静力压入为主^[5]。从工程经验中，可以归纳出：①砂性土层沉桩困难，静力压桩需超压；②在黏性土层中压桩，由于黏土的时效性，极限承载力要比压桩力大许多。由于不同土层的侧阻和端阻差异性很大，有时桩侧、端阻的经验参数与实际相差甚远，使承载力的确定上偏于保守。静压机械的发展提供了更广泛的手段，可随时了解桩的沉降和承载力，从而能在降低成本上做得更好。由于对土体恢复后的桩侧摩阻力还了解不足，爱地花园中的桩基设计仍偏于保守，桩径可采用 D500 或更大，桩长可取得更长一些，单桩承载力可取得更大，这样承台可以做得更小，经济性更好。

在江浙和中原等地区，基岩埋藏很深，都是摩擦桩。在广东地区，人们在观念上一直有桩端要进入持力层的概念，在岩溶地区使用预应力管桩仅仅对此作出了一点修正，也就是桩可以是桩侧摩阻为主的，持力层并不一定是最主要的。采用静压、定期往复试压等一系列施工手段和程序不仅可在可溶性基岩地区应用预应力管桩，更可以作为一种比 CFG 桩法更深层的复合地基手段，其实就是刚性桩复合地基。

3 盛龙花园二期桩基选型

盛龙花园位于深圳龙岗区龙翔大道东北侧，二期为 14 栋 17~30 层塔楼，局部 2~4 层裙楼，设一层地下室，总建筑面积 248869.02 m²。地质报告揭示场地岩溶较发育，分布有大小、形状不等的溶洞，充填软塑状黏性土；地下水丰富，基岩埋藏大多在 10 m 以内。

扩初设计开始前，建设方多次组织专家讨论桩基选型。参考专家意见，原扩初设计采用以微风化岩为端承的挖孔和冲孔相结合的大直径桩，桩端入岩深度 0.5 m，超前钻探的收钻标准是微风化岩连续大于 6 m。超前钻探的见溶洞率 36.2%，其中 40% 左右为 2~5 个溶洞呈串珠状，最大洞高 14.7 m，普遍洞高 1~3 m。上覆土层厚薄不均，岩面起伏很大、倾斜陡峭。

建设方进行的试桩施工表明，机械冲孔桩和人工挖孔桩不适合该场地的地质环境：

(1) 冲孔桩试桩两根，存在以下问题：①成孔质量不稳定；②地下溶洞贯通，浇注时混凝土大量流失的风险很大；③岩面倾斜陡峭，冲孔入岩深度难判断；④溶洞分布密集，桩端下的抽芯检测合格率无法保证。

(2) 人工挖孔桩试桩 30 根，大部分在深度 1~4

m 的砂层范围内涌水量很大，有流砂现象，进度缓慢，每天进深 0.5 m。试桩进行了 20 d 后，出现了以下问题：①施工抽水量大，桩护壁脱节；②桩护壁出现了沉降，沉降达 2~3 cm；③大部分桩底涌水量逐渐增大，无法降水；④桩护壁的混凝土浇注因受地下水流动的影响，质量得不到保证。

2007 年 5 月，深圳市建筑设计研究总院接手该项目二期施工图的设计工作，将原来的冲（挖）孔桩改为低承载力的预应力管桩加筏板。为检验设计，现场进行了大量的试桩。根据试桩情况，控制爆桩率，桩基设计及施工方案确定为：

(1) 静压管桩采用 PHC-ABΦ 500，单桩竖向承载力特征值为 550 kN，带十字形有尖角桩靴，压桩的终压值按 9 MPa（压力 1440 kN）控制，大于 2.5 倍单桩竖向承载力特征值 R_a (1375 kN)。

(2) 解决废桩的办法是在废桩位置两边（或两侧）补压两根桩，补桩的位置不影响其它桩的位置，补桩的压桩终压值不低于正常控制值的 50% (720 kN)。

(3) 桩身质量不作要求，以静载检测合格为最终验收标准；但要求监测桩顶标高，对上浮的管桩复压。

施工中慢慢摸索出比较有效的施工工艺，如采取轻压、缓压，隔天复压等方法。局部基岩埋深很浅，桩长过短时，用墩代替；局部基岩露出基坑面，无法压桩时，用墩和厚筏板代替。在传统的桩型无法顺利施工的情况下，在众多质疑中首次成功地在浅埋溶岩地区采用高强预应力混凝土管桩桩筏基础，使工程得以顺利完成，并取得良好效果。盛龙花园二期已入住，沉降观测显示，最大沉降量为 9.37 mm。该工程采用预应力管桩桩筏基础是成功的。

需要指出的是，由于是群桩，桩筏中单桩的安全系数取 2 是偏于保守的，有必要研究桩筏中单桩的安全系数，安全系数的降低将有较大的经济意义。

文献[4]介绍了盛龙花园二期桩基设计的更详细的情况。

4 岩溶地区桩基选型建议

通过上述二个工程实践，提出以下建议：

(1) 在较复杂的岩溶地区选择桩基，可先考虑有无办法避开复杂地质环境，其次考虑能否分散载荷到溶岩上，最后才是选择“一桩一柱”的桩型。

(2) 当上覆土层是足够深和能提供高桩侧摩阻力的黏土层时，可选择合适的单桩承载力和桩径，采用摩擦桩，不触及基岩，从而避开岩溶。当采用预制桩时，为了解黏土时效性的强弱，得到较准确的沉桩

压力, 使单桩承载力最大化, 设计前应进行试桩。

(3)如基岩埋藏较浅或上覆土层无法提供有效的桩侧阻力, 只能按端承桩设计桩基时, 就应该考虑分散上部结构的荷载减少溶洞塌陷的风险, 采用低承载力的群桩加局部或整体筏板的做法。同样, 采用预制桩时, 也要通过试桩来取得在合适废桩率下的合适沉桩力, 以确定单桩承载力。

(4) 在溶岩浅埋、地下水又不丰富时, 可选择挖孔桩, 但应做好超前钻探, 探明下卧溶洞的分布, 承载力不能取大, 应充分考虑桩基局部失效的可能性。

(5) 岩溶地区地下水一般较丰富, 如采用灌注桩较难保证桩身质量, 应优先考虑采用预制桩和预应力管桩, 且预应力管桩的抗折能力远胜于一般的预制桩。

(6)《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)第 8.5.5 条规定“嵌岩灌注桩桩端以下三倍桩径范围内应无软弱夹层、断裂破碎带和洞穴分布; 并应在桩底应力扩散范围内无岩体临空面^[6]。”岩溶地区地质复杂, 岩面高低变化极大, 且溶洞内多有填充物, 尚无可靠的物探办法能充分探明地下岩溶的分布以规避桩底存在溶洞的风险。应慎用一柱一桩, 避免激化矛盾。

在目前市场经济的背景下, 任何工程新技术的成功主要取决于建设方的态度趋向。在这里, 感谢深圳市爱地实业有限公司的彭国敏董事长和深圳市东部开发(集团)有限公司的薛振睿总工, 有了他们的大力支持, 才使得笔者有机会去实践酝酿已久的设计。

参考文献:

- [1] 刘之葵, 梁金城, 朱寿增, 等. 溶岩区含溶洞岩石稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 629 - 633. (LIU Zhi-kuai, LIANG Jing-cheng, ZHU Shou-zeng, et al. Stability analysis of rock foundation with cane in karst area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 629 - 633. (in Chinese))

- [2] 郑伟国, 谢毓才. 可溶性基岩地区桩基选型浅谈[R]// 深圳市建筑设计研究总院学术工作交流活动发言汇编. 2006: 35 - 36. (ZHENG Wei-guo, XIE Yu-cai. Discussion on the selection of piles in soluble bedrock areas[R]// The Compile of Statements of General Institute Academic Work Communication Movement. Shenzhen: Shenzhen General Institute of Architecture Design and Research, 2006: 35 - 36. (in Chinese))
- [3] 张伟, 严力军, 刘俊. 复杂地质条件下超长地下室基础设计探讨[J]. 建筑结构, 2009, 39(增刊 1): 752 - 756. (ZHANG Wei, YAN Li-jun, LIU Jun. Discussion on foundation design of super-long basement under complicated karst geological conditions[J]. Building Structure, 2009, 39(S1): 752 - 756. (in Chinese))
- [4] 薛绪标, 郑伟国, 周力红, 等. 深圳龙岗盛龙花园二期桩基设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(增刊 1): 1261 - 1264. (XUE Xu-biao, ZHENG Wei-guo, ZHOU Li-hong, et al. Pile foundation design of Shenglong Garden Phase II in Longgang of Shenzhen[J]. Building Structure, 2010, 41(S1): 1261 - 1264. (in Chinese))
- [5] 张明义. 静力压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004. (ZHANG Ming-yi. Research and application on the static penetration of piles[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [6] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50007—2002 Code for building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))

(本文责编 明经平)