

高层建筑结构桩基础设计策略研究

文 / 刘振兴 上海霍普建筑规划设计有限公司

摘要: 文章以某高层酒店及商业项目为研究对象, 在分析场地工程地质和上部结构特点的基础上, 从桩型选择、持力层确定、单桩竖向承载力分析、沉降控制、水平受荷能力等方面, 系统阐述了桩基础设计要点。在此基础上提出了包括桩型优选、嵌岩桩优化布置、桩筏功能优化、施工工艺优化、桩承台连接优化等策略, 为合理设计大直径预应力管桩基础提供了参考, 优化设计成果获得了良好的工程应用效果。

关键词: 高层建筑; 结构桩基础; 设计优化策略

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.100

引言

随着城市建设的不断发展, 高层建筑日益增多, 地下空间开发利用也愈加普遍, 对地基基础提出了更高的要求。桩基础凭借其较高的承载力水平、良好的抗震性能以及较强的适应性, 在高层建筑尤其是软土地基中得到广泛应用。但桩型选择、桩端持力层确定、桩土相互作用机理、沉降变形控制等设计难题依然制约着桩基工程的技术进步。设计人员需要根据建设条件和环境特点因地制宜地开展优化设计, 最大限度发挥桩基的受力性能, 既满足规范要求, 又实现投资效益最大化。

一、工程概述

(一) 工程简介

拟建项目为湖州富盛房地产有限公司开发的皇家花园东区(湖州 ZD-22-1-B 地块)高层酒店及商业配套, 位于浙江湖州, 总建筑面积达 3 万平方米, 包含商业、酒店等多种业态。建筑主体最高达 44.3 米, 地上 13 层, 地下 1 层。对地基基础提出了较高要求。项目所在区域地价较高, 工期紧张, 对项目的经济性和工期也提出了挑战。

(二) 工程地质概况

拟建场地地貌属于湖沼积平原区, 第四纪覆盖层厚度大于 50 米, 场地地势开阔、平坦, 不存在滑坡、崩塌、泥石流等不良地质作用。场地地势略有起伏。本场地存在软弱土(③层粉质粘土层), 层厚 0.60 ~ 4.50 米, 具压缩性高, 灵敏度较高, 强度低等特性, 从上至下分别为: ①-1 层杂填土、②层粉土、③层粉质粘土粘土、④-1 层粘土, ⑤-1 层粘土, ⑥层粉土夹粉质粘土, ⑦-1 粉土区域地质构造隶属华东平原沉积区中的长江三角洲徐缓沉降区, 新构造运动不明显, 地震活动微弱, 无活动断裂穿越, 抗震设防烈度为 6 度, 区域稳定性较好。地下水类型有上层滞水, 水位和水量受大气降水影响较大, 整体地下水对混凝土结构具有微腐蚀性(见图 1)。综合分析, 场地内地层分布较为复杂, 软土较厚, 局部可液化土层, 且富水性中等, 施工难度较大。

(三) 工程桩基础设计概况

针对项目的建设条件和功能需求, 结合场地的工程地质特点, 该项目采用桩基础形式, 并进行了优化设计。桩型拟采用先张法预应力高强混凝土管桩, 桩径

500mm ~ 600mm, 桩长 49m。桩端持力层选择采用预应力管桩以⑦-1 粉土及以下土层作桩端持力层, 以确定沉桩可行性, 单桩竖向抗压承载力标准值 2600kN 左右。基础形式为桩下承台, 局部采用桩筏基础, 承台平面尺寸不小于桩径的 3 倍。为控制沉降, 部分桩端设计嵌入基岩。针对施工场地狭小的特点, 该工程优先选用静压法沉桩。桩基施工拟分区分步进行, 待相邻区桩基施工完成并达到设计强度后再进行土方开挖, 桩基施工与基坑开挖交替进行。

二、桩基础设计要点分析

(一) 桩型选择

该工程场地地质条件复杂, 上覆软土层厚度大, 对桩基施工难度和桩型选择提出了较高要求。考虑到工程的安全性和经济性, 预制桩和灌注桩是两种备选的桩型。预制桩具有施工周期短、桩身质量易控制等优点, 但在软土层中沉桩阻力大, 容易出现桩位偏差。而灌注桩能够克服沉桩困难, 但施工周期长, 桩身质量控制难度大^[1]。权衡两种桩型的优缺点, 并结合工程实际情况, 该工程拟采用预应力高强混凝土管桩。预应力管桩兼具预制桩的高承载力和灌注桩的适应性, 桩身混凝土强度等级高, 且管壁厚度大, 能够适应软土地基条件下的施工要求。在桩型直径和长度的选择上, 还需要综合考虑上部结构荷载特点、桩端持力层埋深等因素, 经过反复的技术经济比较来确定最优的桩型参数。

(二) 桩端持力层选择

桩端持力层的选择是桩基设计的关键一环。该工程场地内第四系覆盖层厚度超过 50 米, 软土发育, 如何合理选择桩端持力层成为设计的难点。若桩端持力层选择过浅, 桩长偏短, 可能无法保证单桩竖向承载力满足设计要求。若桩端持力层选择过深, 虽然单桩承载力有所提高, 但桩长增加导致施工难度和工程造价大幅提高。通过对场地内地层分布和土体物理力学性质的分析, 初步选择⑦-1 粉土层作为桩端持力层。该层土体具有较高的强度和较小的压缩性, 桩端阻力特征值可达 800kPa 以上。为进一步论证桩端持力层选择的可行性和经济性, 有必要对单桩竖向承载力进行估算和验算, 并结合静载试验结果进行修正。同时, 考虑桩端持力层埋深存在一定的横向变化, 在后续施工图设计阶段还需要进行桩长优化, 以实现桩端持力层选择与单桩承载力的最佳匹配。

（三）单桩竖向承载力分析

桩基础的竖向承载力主要由桩侧和桩端土体提供，是保障桩基安全性的前提。预应力管桩的单桩极限竖向承载力一般采用静力学公式法进行计算，考虑桩身结构强度对承载力的影响。由于各地层土体物理力学性质差异较大，有必要对桩侧阻力特征值和桩端阻力特征值分别选取，尤其是桩端持力层的选取对单桩承载力的影响更为显著^[2]。针对软土地基桩基工程，单桩竖向抗压承载力往往难以通过理论计算准确获得，通过对比理论计算值与静载试验值，分析两者的差异性，并对影响因素开展分析。最终可通过静载试验修正理论计算方法中的关键参数，提高单桩竖向极限承载力计算的准确性，并合理确定极限承载力标准值，从而为优化桩径和桩长参数提供重要的技术支撑。

（四）沉降控制分析

对于桩筏基础，沉降主要由桩端持力层土体压缩引起。由于高层建筑竖向荷载大，而且桩端土体埋深较大，即使采用桩端持力层，沉降量仍可能超出规范或设计要求。为实现地基沉降的有效控制，亟需在桩端持力层的基础上采取进一步的沉降减小措施。一种可行的做法是在桩端持力层下方的基岩面适当选择一定数量的桩端嵌岩，通过对桩端土体及下卧基岩的压缩系数、压缩模量等进行分析，结合有限元数值模拟，估算在不同桩端嵌岩深度和嵌岩桩数量组合条件下的地基沉降量^[3]。通过对比沉降量估算值与控制目标值，优选出嵌岩桩布置方案，一般要求嵌岩桩嵌入基岩的深度不少于1~1.5米，且嵌岩桩的数量不宜少于总桩数的1/4，以保证沉降控制的可靠性。此外，还应通过静载试验检验嵌岩桩沉降性能，校核沉降估算结果，如图1所示。

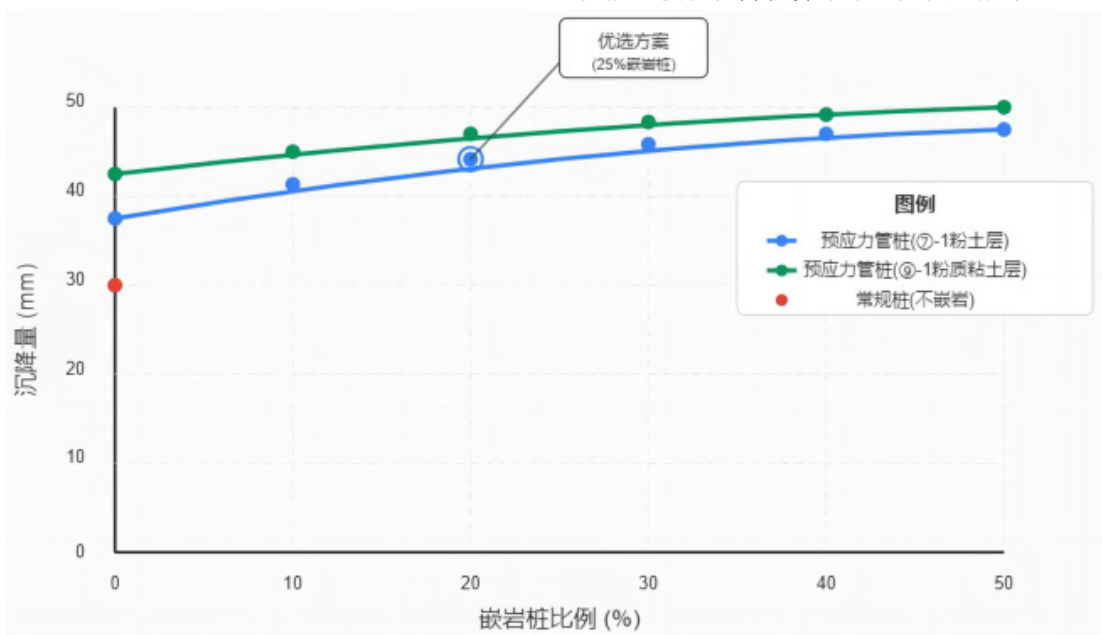


图1 不同桩基方案的预计沉降量比较图

（五）水平受荷能力分析

地震或风荷载作用下，桩筏基础除竖向荷载外，还需要承担一定的水平荷载。桩基的水平受荷能力直接关系到上部结构的侧向位移和受力，需要给予足够的重视^[4]。该工程采用p-y曲线法对桩的水平承载力进行分析，该方法能够较为准确地描述桩土之间的非线性相互作用。通过p-y曲线法建立桩土计算模型，考虑不同桩径和桩长组合工况下，分析桩顶位移随水平荷载的变化规律。在满足抗滑稳定性要求的前提下，结合桩筏竖向承载力校核，优选桩径与桩长参数。还需要考虑桩筏之间的水平荷载分配，既不能因桩间距过大而削弱桩的水平约束作用，也不能因桩间距过小而造成桩筏刚度过大、配筋过于密集。通过对比不同桩间距和筏板配筋方案下的位移、内力计算结果，优化出既满足承载力要求又具有较好经济性的桩筏参数组合，以实现桩基水平受荷能力的最优化设计。

三、桩基础优化设计策略

（一）桩型优选

该工程所处场地地质条件复杂，不同区域的上部结

构特点和桩基施工条件也存在较大差异。在确保桩基安全可靠的前提下，最大限度降低工程造价，项目采取了分区采用不同桩型的优化设计策略，不同桩型及桩端持力层方案比较如表1所示。通过对建筑平面布置、高度和荷载等级的分析，将整个场地划分为重要区、一般区和近基坑区等不同分区。对于地下室、高层塔楼等重要区域，上部结构竖向荷载大且变形控制要求高，因此优先选用桩径600mm的大直径预应力高强混凝土管桩，以获得更高的单桩竖向承载力和刚度。而对于多层裙房等一般区域，考虑到荷载相对较小，桩径可适当减小至500mm，在满足使用功能的同时降低了材料用量。针对邻近基坑开挖的区域，还需重点考虑桩基施工带来的附加影响，宜采用桩径较大、桩间距较密的布桩方式，并通过加强基坑支护和监测控制等措施，确保桩基施工安全。分区采用不同桩型的优化设计思路，最终使得该工程桩基工程量比常规设计减少10%以上，节约了工程造价，也为类似工程提供了很好的设计借鉴。

表 1 不同桩型及桩端持力层方案比较表

桩型方案	桩径 (mm)	桩长 (m)	桩端持力层	单桩承载力标准值 (kN)	优点	缺点
预应力高强混凝土管桩	600	49	⑦ -1 粉土层	2600	施工周期短、桩身质量易控制、承载力高	软土层中沉桩阻力大、桩位易偏差
预应力高强混凝土管桩	500	35	⑤ -1 粘土层	1800	经济性好、适用于较轻荷载	承载力相对较低
钻孔灌注桩	800	51	⑨ -1 粉质粘土层	3500	克服沉桩困难、适应性强	施工周期长、桩身质量控制难度大
嵌岩桩	600	55	基岩	3800	沉降控制优良、承载力高	成本高、施工难度大

(二) 桩端持力层优化布置

该项目重点针对桩端持力层的优化布置进行了设计。设计首先根据沉降控制需求，对工程场地进行分区。将高层塔楼、裙房交界处等沉降控制要求较高的区域划为重点控制区，在该区域内将桩端持力层选为⑦-1粉土层，平均桩长达35m左右，以获得更可靠的桩端阻力，从而有效控制沉降。同时，通过优化桩端持力层埋深与桩径的搭配，既保证桩端持力层具有足够的强度和刚度，又避免盲目增加桩长而导致工程量过大。针对沉降控制要求相对较低的区域，本着满足使用要求的前提下减少工程造价的原则，将桩端持力层适当上移至⑥粉土夹粉质粘土层，平均桩长降至25m左右。此外，考虑到桩端持力层顶面标高的起伏变化，在具体实施阶段还采取了动态设计理念，根据钻探揭露情况对局部桩位的桩端持力层埋深进行微调，从而达到因地制宜、精细化管控的目的。在对工程沉降观测数据进行分析后发现，通过合理优化桩端持力层布置方案，尽管未采用嵌岩桩，但最终的沉降量仍满足规范要求，且沉降均匀性明显提高，取得了良好的工程应用效果。

(三) 桩筏功能优化

为充分发挥桩筏各自的受力特点，该项目对桩筏基础进行了功能优化设计。通过在有限元模型中合理模拟桩土相互作用，分析了不同桩筏刚度比条件下的桩筏竖向荷载分担规律。在此基础上，通过参数分析确定了桩筏分担系数的合理取值范围。设计确定塔楼区桩筏竖向荷载分担比例为7:3，裙房区放宽至6:4。在明确桩筏分担比例的前提下，可针对筏板的承载力进行校核分析，并对桩间距和筏板配筋进行优化。对于塔楼顶板区等大跨度筏板，适当加密桩间距可减小筏板跨度，但同时会引起桩数量增加。为在确保承载力的同时兼顾经济性，设计对不同方案进行了多轮迭代优化，最终将塔楼区桩间距确定为6倍桩径，顶板区筏板双向配筋率提高20%。而对于裙房区，桩间距则放宽至8倍桩径，筏板配筋率维持常规水平。通过整体考虑桩筏受力性能，并结合上部结构布置灵活调整桩筏参数，既满足了地基承载力和变形要求，又节约了材料用量。

(四) 桩基施工优化

针对该工程场地狭小、地层条件复杂、周边环境敏感等特点，项目在前期设计阶段就高度重视施工方案优化。通过比选，最终确定采用静压振动复合沉桩工艺。静压振动沉桩能够克服单一静压或振动沉桩的不足，既能保证桩侧土体的压实效果，又能有效控制施工噪音和桩位偏差。在施工组织优化方面，项目综合考虑了基坑开挖和地下室施工的工序衔接，将整个场地划分为若干个施工作业区，并结合主体结构施工计划，合理安排桩基分区分批施工^[5]。待相邻区桩基施工完成并达到设计强度后，即可进行基坑开挖，从而实现桩基施工与基坑

开挖的交替推进，减少工期。考虑到预制桩施工易出现桩位偏差和桩头损伤等质量问题，施工过程中严格控制桩机就位和垂直度，并在桩机就位后采用经纬仪复核桩位偏差，及时调整。同时通过低应变法对全部桩基进行桩身完整性检测，发现问题及时处理。在采取一系列施工优化措施后，静压桩施工效率达到日进尺40m以上，施工噪音控制在65分贝以下，累计偏桩率和桩身缺陷率分别控制在2%和1%以内，质量和进度均满足设计要求。

(五) 桩承台联结优化

桩承台作为桩基与上部结构之间传递荷载的关键构件，其连接方式会直接影响整个结构体系的受力性能。特别是在地震荷载等水平力作用下，桩、承台与上部结构之间的可靠连接显得尤为重要。因此，该工程对桩承台的联结方式进行了针对性优化。设计采用钢筋混凝土承台，并在桩顶设置高度不小于1m的钢筋笼，钢筋笼外插入桩身中心，内锚固于承台板内，且伸入承台板上部结构不小于0.8m，通过可靠的钢筋连续锚固，强化了桩身与承台的整体性，提高了桩筏体系的整体刚度，加强了桩承台在水平荷载作用下的协同工作能力。在其他构造细节方面，承台截面尽量简化设计，规则化布置。塔吊附着段等大型集中荷载区，采用方形或八角形实体承台，避免了应力集中，配筋更加便捷高效。在地下室顶板处，桩与板柱的连接采取二次浇筑法，先浇筑桩和板，再浇筑柱，确保了施工期桩的露筋顺直，也避免了桩柱偏心问题。在提高桩筏基础整体性能的同时，优化连接构造也大大降低了施工难度，节省了工期。

结语

综上所述，高层建筑桩基设计应遵循因地制宜、合理优化的原则，根据工程特点和现场条件，在充分论证设计参数的基础上，采用多种优化策略提升桩基工程性能。研究成果对于指导类似工程桩基设计，确保地基基础安全性、使用性和经济性等具有重要的工程应用价值。未来还需在动力响应特性、复杂环境影响、施工过程数值模拟等方面深化研究，为高层建筑桩基工程提供更加科学合理的设计施工方案。

参考文献

[1] 鲁微伟. 高层建筑结构桩基础与抗震性设计分析[J]. 科技视界, 2012(34): 1.
 [2] 陈胜. 建筑结构中桩基础设计分析[J]. 工程技术(文摘版), 2016(9): 38-38.
 [3] 张昊翔. 建筑结构设计中的桩基设计要点研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2021(9): 2.
 [4] 郑重, 姜苗苗. 高层建筑结构桩基础研究[J]. 房地产导刊, 2013(17): 366-366.
 [5] 牛春晖, 陈方. 高层建筑结构桩基础设计探讨[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, (20): 40-41.