



某结构桩基础持力层优化设计

石中明

(福州市规划设计研究院集团有限公司, 福建 福州 350108)

摘要: 桩基础的承载能力与桩周的土层及桩端下的持力层有很大关系, 其中持力层的选用直接影响到桩的长度。选用合理的持力层对节约工程造价及减少环境影响具有一定意义。本文以某医院综合楼工程为例, 对灌注桩在不同持力层下的承载能力及经济性进行分析比较。结果表明: 灌注桩利用后注浆技术可以提高单桩承载能力, 减少桩长, 从而达到节约工程造价, 减少碳排放的目的。本文成果可为类似工程提供一定的参考。

关键词: 桩基持力层; 优化设计; 灌注桩; 后注浆技术; 卵石土层; 碳排放

中图分类号: TU473.1⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)07-0051-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.07.092

Optimizing design on bearing layer of pile foundation of a structure

SHI Zhongming

(Fuzhou Planning & Design Research Institute Group Co., Ltd., Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: The bearing capacity of pile foundation is closely related to the soil layer around the pile and the bearing layer under the pile end, and the selection on the bearing layer directly affects the length of the pile. The selection of a reasonable bearing layer is of certain significance to save the project cost and reduce the environmental impact. A hospital complex building project is taken as an example to analyze and compare the bearing capacity and economy of cast-in-place piles under different bearing layers. The results show that the post-grouting technology can improve the bearing capacity of a single pile and reduce the pile length, so as to save the project cost and reduce carbon emissions. The results can provide some reference for similar projects.

Key words: pile foundation bearing layer; optimizing design; cast-in-place piles; post-grouting technology; gravel layer; carbon emissions

当高层建筑基底无法承受其上部荷载时, 通过桩基础将上部荷载传递给更深岩层, 该岩层即为持力层, 以满足上部结构对承载力与变形的要求。若持力层埋置较深, 对工程造价及工期影响较大, 也将消耗更多的混凝土方量, 造成更多的CO₂排放, 不符合当前节能减排的要求。建筑碳排放存在于建材生产、建筑施工、后期运维的全生命周期内。根据《中国建筑能耗研究报告(2020)》^[1], 在2018年全国建筑碳排放总量中, 建材生产阶段的碳排放占比最大, 占全国碳排放

总量的28.3%, 建筑运行阶段约占21.9%, 施工过程约占1.0%。

建筑领域所用建材主要包括混凝土、钢筋、钢材等, 其中搅拌混凝土所用的水泥在我国建材行业各领域中CO₂排放占比最大, 达到83%^[2]。为减少碳排放, 在结构设计过程中, 应合理选用上部结构体系、基础形式、基础持力层等, 在满足结构安全耐久的前提下, 减少对混凝土的使用方量。本文以某框架剪力墙结构桩基础设计为例, 通过利用灌注桩后注浆技术对灌注桩桩基持力层

收稿日期: 2023-12-18

作者简介: 石中明(1977—), 男, 高级工程师, 从事建筑结构设计工作。

进行优化,从而达到减少碳排放的目的。

1 灌注桩后注浆技术

1.1 灌注桩优缺点

目前,民用建筑桩基础主要是以现场成孔、现场安装浇捣的灌注桩以及工厂预制、现场静力压入的预制桩为主。受现场地质条件的限制,以静压施工方式的预制桩存在沉桩困难的情况。灌注桩对地质的适应性较强,能够施工至岩层,可提供较高的承载力。但对非嵌岩桩,因灌注桩成孔过程中对土层的扰动、桩底沉渣以及成孔所需的泥浆对桩侧摩阻力发挥的影响,极大地降低了灌注桩的单桩承载力。桩端持力层同样为卵石层,预应力管桩由于其对桩底土层的扰动小,根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的规定,其极限端阻力标准值可达 10 000 kPa,而对泥浆护壁冲钻孔桩, JGJ 94—2008 规定的极限端阻力标准值仅约为 3 000 kPa,桩端阻力减少较大。

1.2 灌注桩后注浆加固原理

后注浆技术是针对灌注桩上述缺点而发展起来的,并列入建筑业 10 项新技术^[3]。后注浆技术有利于减少桩长、提高单桩承载能力、减少沉降、节约工程造价,既满足了上部结构对基础安全性的要求,也达到了节材的效果;同时,在处理人工挖孔桩端下软弱夹层也有成功案例^[4]。

钢筋笼上预先埋置一定数量的注浆管,待混凝土浇筑后,采用高压的方式利用注浆管将水泥浆液注入桩底或桩侧。通过对桩侧泥皮进行替换、加固,增加桩侧的摩阻力。通过高压注浆将桩端以下一定范围内的土层劈裂、渗透、挤密和胶结,加固桩端土层,形成类似扩大头的固结体,从而增加桩端受力面积,提高承载能力,减少沉降。于志强等^[5]根据 Vesic 球孔扩张理论,提出了扩大头桩端承载力的计算公式,并根据不同土层注浆后的侧阻力及端阻力增强系数,估算注浆后的单桩承载力。桩底为卵石或砾石时后注浆增强系数最大,表明在该土层采用后注浆对提高单桩承载力效果最为明显。但卵石层孔隙比较大,注浆液在高压喷射下容易通过孔隙传递至远离桩端的位置,从而不能在桩端形成积聚,难以形成扩大头的效果,无法有效提

高单桩承载力。因此,在工程实践中应间歇性注浆,控制注浆流量,调整浆液水灰比,并通过试注浆,合理确定各项施工工艺参数。

2 工程实例

2.1 工程概况

某医院综合楼总用地面积为 11 408.96 m²,总建筑面积约为 48 253.56 m²。其中地上部分十五层总建筑面积为 37 158.33 m²,地下局部二层总建筑面积为 11 095.23 m²。项目所在位置设防烈度为 7 度,设计基本加速度为 0.15g,设计分组为二组,场地土类别为 III 类,为重点设防类建筑。结构采用框架剪力墙结构体系,框架与剪力墙抗震等级均为一级。整体结构的计算模型如图 1 所示。

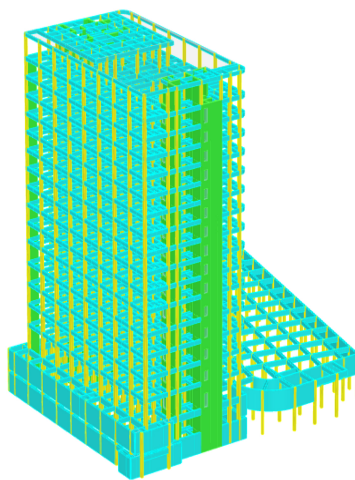


图 1 结构整体模型

拟建场地主要为人工新近填土层、第四系冲淤积层,下卧燕山晚期的花岗岩风化带。根据地勘钻孔揭示的各岩土从上而下分布:1)素填土,层厚为 0.8~3.8 m;2)粉质黏土,层厚为 0.5~1.2 m;3)淤泥,层厚为 11.8~23.5 m;4)中砂,层厚为 0.6~12.3 m;5)卵石,层厚为 6.5~17.8 m;6)中砂,层厚为 1.0~10.6 m;7)卵石,层厚为 3.1~9.3 m;8)残积砂质黏性土,层厚为 1.5~12.9 m;9)全风化花岗岩,层厚为 1.9~19.5 m;10)砂土状强风化花岗岩,层厚为 1.4~22.3 m;11)碎块状强风化花岗岩,层厚为 5.2~8.6 m;12)中风化花岗岩,层顶埋深在 70.2~77.3 m。各土层主要桩基设计计算指标建议值如表 1 所示。

表 1 土层桩基设计计算指标 kPa

土层名称	冲(钻)孔灌注桩		预制桩	
	极限侧阻力	极限端阻力	极限侧阻力	极限端阻力
素填土	22	—	25	—
粉质黏土	35	—	40	—
淤泥	12	—	15	—
中砂	55	—	60	—
卵石	120	2 500	150	8 500
中砂	55	—	—	—
卵石	120	2 500	—	—
残积砂质黏性土	55	—	—	—
全风化花岗岩	100	—	—	—
砂土状强风化花岗岩	120	2 500	—	—
碎块状强风化花岗岩	150	5 500	—	—
中风化花岗岩	180	11 000	—	—

主楼部分地质典型剖面如图 2 所示，其中 ZK6、ZK7 为钻孔点编号。基于医院综合楼的特点，上部结构荷载较大，需要较高的单桩承载力。岩层埋置深度较深，基本超过 65 m，假设以岩层为持力层，其桩长较长、施工周期较长，不能满足项目对经济及工期的要求。第⑤层卵石层埋置深度较浅，层厚较为均匀，约为 13~15 m，若不采用后注浆技术，其所能提供的承载力很有限，不能满足上部结构对桩基础的需要。通过综合比较，拟采用两种不同桩径(直径分别为 800、1 000 mm)，并利用灌注桩后注浆的技术来提高单桩的承载力。

2.2 灌注桩后注浆设计

沿不同桩径的灌注桩钢筋笼圆周对称布置两根注浆导管，另在桩底以上 7 m 位置设置 1 个桩侧注浆阀，在桩身单独设置 1 根竖向注浆管，并在出浆位置设置环型注浆管。注浆管为镀锌钢管，直径为 2.5 cm，随钢筋笼沉放到底，出浆口采用具有逆止功能的注浆阀。采用单向逆止阀门，浆液在浇筑桩身混凝土时不会倒流至注浆管内堵塞注浆管，注浆完成后也不会回流，保证后注浆达到预期效果。

采用侧阻力及端阻力增强系数法体现后注浆效果，具体如式(1)所示。

$$Q_{uk} = u \sum q_{skj} l_j + u \sum \beta_{sj} q_{skj} l_{gj} + \beta_p q_{pk} A_p \tag{1}$$

式中： Q_{uk} 为后注浆灌注桩单桩极限承载力，kN； u 为桩身周长，m； q_{skj} 为桩侧第*j*层土极限侧阻力

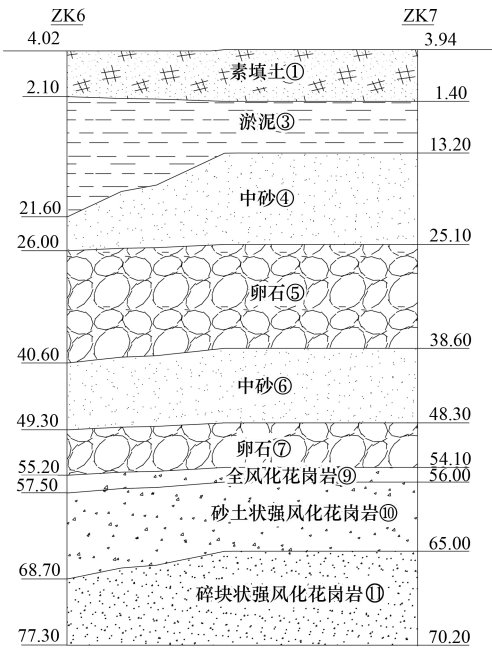


图 2 主楼部分典型地质剖面 m

标准值，kPa； q_{pk} 为极限桩端阻力标准值，kPa； l_j 为桩周第*j*层土的厚度，m； l_{gj} 为后注浆竖向增强段内第*j*层土厚度，m； A_p 为桩端面积，m²； β_{si} ， β_p 分别为后注浆侧阻力、端阻力增强系数，卵石层端阻力增强系数可取 3.2~4.0，侧阻力增强系数可取 2.4~3.0，折减后取值分别为 2.56~3.2、1.92~2.56，即灌注桩桩端及桩侧阻力均可以提高约 2.0 倍。根据项目实际， β_p 取值为 2.8， β_{si} 取值为 2.0。

JGJ 94—2008 对浆液配比、终止注浆压力、

流量、注浆量等重要参数做了详细规定，其中注浆量可按式(2)计算。

$$G_c = a_p d + a_s n d \tag{2}$$

式中： G_c 为注浆量，以水泥质量计，t； a_p 、 a_s 分别为桩端、桩侧注浆量经验系数； n 为桩侧注浆断面数； d 为桩基设计直径，m。

根据上述参数，估算注浆量：当桩径为 800 mm 时，桩底注浆水泥用量不小于 1.6 t/桩，桩侧注浆水泥用量不小于 0.6 t/桩；当桩径为 1 000 mm 时，桩底注浆水泥用量不小于 2.0 t/桩，桩侧注浆水泥用量不小于 0.7 t/桩。浆液的水灰比为 0.5~0.6，注浆采用低压慢注，注浆压力控制范围为 2~6 MPa。

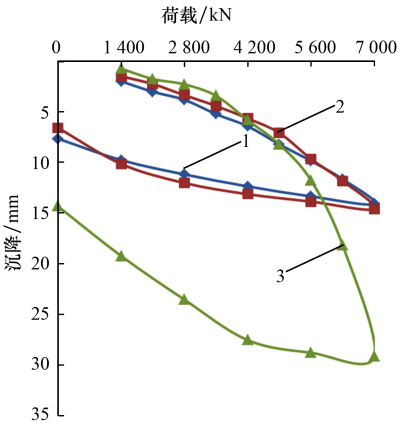
2.3 承载力及经济性比较分析

根据 JGJ 94—2008 估算两种桩径的嵌岩桩及注浆前后的单桩承载力，结果如表 2 所示。其中嵌岩桩的单桩承载力由桩身强度承载力控制，桩身混凝土强度等级采用 C35，注浆采用桩端及桩侧复合注浆的方式，持力层为第⑤层卵石层时，进入持力层深度为 7 m，平均有效桩长约为 23 m。

表 2 单桩承载力计算值

桩径/mm	嵌岩桩/kN	第⑤层卵石层	
		非注浆/kN	注浆/kN
800	4 350	1 900	3 800
1 000	6 800	2 450	5 100

由表 2 可知：持力层为卵石时，因其桩长较短、端阻力较小，两种桩型计算所得承载力均较小。通过后注浆可提高单桩承载力，基本达到桩身强度控制的承载力。



对两种桩径各选取 3 根注浆后的灌注桩进行静载荷试验，试验桩的 $Q-S$ 曲线(Q 为荷载，kN； S 为沉降量，mm)如图 3 所示，试验桩最大沉降量及残余变形量如表 3 所示。

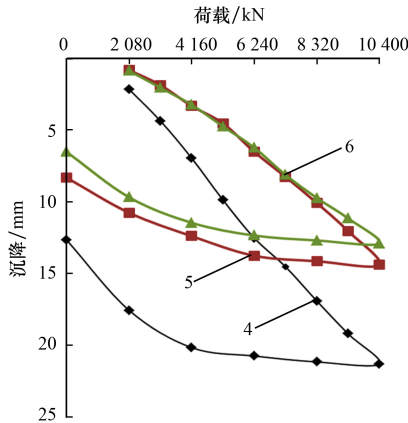
表 3 试验桩沉降量 mm

桩径	试验桩号	最大沉降量	残余变形量
800	1	14.09	7.65
	2	14.59	6.59
	3	29.15	14.33
1 000	1	21.31	12.65
	2	14.40	8.31
	3	12.91	6.51

由图 3、表 3 可知：单桩的总沉降量及承载力均满足设计要求，即桩径为 800 mm 的单桩极限承载力达到 7 000 kN，桩径为 1 000 mm 的单桩极限承载力达到 10 400 kN。相比持力层为岩层，选用卵石层作为持力层时平均桩长减少约 33 m。工程桩径为 800 mm 的桩数为 254 根，桩径为 1 000 mm 的桩数为 137 根。以每立方米造价 1 600 元，注浆按每 t 为 1 250 元计算，每种桩型产生的造价比较如表 4 所示。由表 4 可知：选用持力层为第⑤层卵石层并采用后注浆对节约造价产生较为明显的作用。

表 4 不同桩型造价比较

桩径/mm	持力层为碎块状岩层/(元·桩 ⁻¹)	持力层为第⑤层卵石层并采用后注浆/(元·桩 ⁻¹)	减少造价/(元·桩 ⁻¹)
800	45 037	21 497	23 540
1 000	70 371	32 277	38 094



直径/mm：(a) 800；(b) 1 000

灌注桩编号：1—800—1；2—800—2；3—800—3；4—1000—1；5—1000—2；6—1000—3。

图 3 试验桩 $Q-S$ 曲线

根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019),C30 混凝土的碳排放因子为 $295\text{ kg CO}_2\text{ e/m}^3$, 估算每种桩型减少的碳排放量, 结果如表 5 所示。由表 5 可知: 两种桩型减少碳排放量共计 1.04 万吨。通过持力层的优化, 减少桩的长度, 不仅缩短了施工周期, 节约了工程造价, 同时也减少 CO_2 的排放, 符合绿色建筑的要求。

表 5 不同桩型减少的碳排放量

桩径/mm	混凝土方量/ m^3	碳排放量/t
800	21 056	6 212
1 000	14 196	4 188

3 结 语

高层结构在我国城市建筑中占比较大, 且单体碳排放强度高。工程设计、施工时应根据项目特点, 合理选择结构体系、结构材料、基础形式等, 以达到碳减排的目的。灌注桩后注浆技术在卵石层中对提高单桩承载能力效果较为明显, 能够到达缩短桩长, 减少造价, 缩短施工工期, 减

少碳排放的目的, 具有良好的经济价值与社会环境效益。

参考文献:

[1] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告(2020 年)[EB/OL]. (2020-11-1)[2021-01-04]. <https://www.cabee.org/site/content/24020.html>.

[2] 朱王科,张凯峰,童小根,等. “双碳”目标下建材行业减排路径[J]. 商品混凝土,2023(3):31-37.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于做好《建筑业 10 项新技术(2017 版)》推广应用的通 知 [EB/OL]. (2017-10-25)[2017-11-14]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengce-filelib/201711/20171114_233938.html.

[4] 邓顺勇,毛宗原. 后注浆处理人工挖孔桩端下软弱夹层工程实例[J]. 工程建设,2022,54(8):67-72.

[5] 于志强,王锡朝,张庆海. 钻孔桩桩底灌浆压密机理及设计原则[J]. 石家庄铁道学院学报,1999,12(2): 27-30.

(上接第 15 页)

材与 4 束 $\varnothing 15.2\text{ mm}$ 钢筋锚索能达到相近的支护效果。

(3) 开挖坡脚并浸水后, 锚杆受力突增; 当继续进行坡顶浸水之后, 锚杆受力明显增加且变化速率大。整个锚杆受力特性与钢筋锚杆基本一致。

参考文献:

[1] 王海刚,白晓宇,张明义,等. 玄武岩纤维增强聚合物锚杆在岩土锚固中的研究进展[J]. 复合材料科学与工程,2020(8):113-122.

[2] 李东东. 玄武岩纤维复合筋(BFRP)与再生混凝土粘结性能试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.

[3] 王钧,郭大鹏,马跃. 玄武岩纤维混凝土与钢筋粘结锚固性能试验与分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2015,32(1):81-88.

[4] 王梦尧. 短切玄武岩纤维表面改性及其对水泥基材料性能的影响[D]. 北京:北京建筑大学,2020.

[5] 杜志刚,陶亚文,高富强,等. 玄武岩纤维筋的力学特性与破坏模式试验研究[J]. 矿产勘查,2023,14(2): 304-309.

[6] 华云涛,尹世平,王璐晨. 玄武岩纤维筋海水海砂混凝土染承载性能及使用性能影响因素研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(2):166-177.