

桩端后注浆钻孔灌注桩承载特性及影响因素分析

Analysis of Bearing Characteristics and Influencing Factors of Post Grouting Bored Pile at Pile End

吴冬健¹, 叶若豪², 张 浩²

(1. 江苏省岩土工程公司, 江苏 南京 210019; 2 江苏省南京工程高等职业学校, 江苏 南京 211135)

摘 要: 钻孔灌注桩为研究桩端后注浆承载特性及影响因素, 依托某钻孔灌注桩桥梁基础工程, 通过现场单桩静载荷试验分析了桩的沉降特性以及轴力和侧摩阻力分布规律, 并基于有限元方法分析了不同注浆量和注浆体强度对桩端后注浆灌注桩承载力的影响, 结果表明: 桩轴力随深度的增大而逐渐减小, 随着施加荷载的逐渐增大, 桩端荷载承担比例不断增大; 桩侧摩阻力大致呈现“R”型分布, 试桩下半部分的侧摩阻力明显增大, 桩端后注浆工艺在桩端附近产生了侧阻强化效应; 随着桩端扩大头半径和弹性模量的增大, 桩的承载力和承载力提高比均不断增大, 当桩端扩大头半径小于 1 m 或桩端扩大头弹性模量小于 2000 MPa 时, 承载力提高比增幅较大; 随着桩长的增大, 普通灌注桩和桩端后注浆灌注桩的承载力和沉降值均呈现不断增大的趋势, 且桩长越短, 后压浆工艺对灌注桩承载力的提高比例越大。

关键词: 钻孔灌注桩; 后注浆; 承载力; 数值模拟

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0073-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.015

WU Dongjian¹, YE Ruohao², ZHANG Hao²

(1. Jiangsu Geotechnical Engineering Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

2. Jiangsu Province Nanjing Engineering Vocational College, Nanjing 211135, China)

Abstract: In order to study the bearing characteristics and influencing factors of post grouting bored pile at the pile end, this article relies on a bridge foundation project using a composite post grouting technology at the pile end. Through on-site single pile static load tests, the settlement characteristics of the pile, as well as the distribution of axial force and lateral friction resistance, were analyzed. Based on the finite element method, the influence of different grouting amounts and grouting body strength on the bearing capacity of post grouting bored pile at the pile end was analyzed. The following conclusion is drawn: The axial force of the pile gradually decreases with the increase of depth, and the proportion of pile end load bearing continuously increases with the gradual increase of applied load. The lateral friction resistance of the pile roughly presents an “R” distribution, and the lateral friction resistance in the lower part of the test pile significantly increases. The post grouting process at the pile end has produced a strengthening effect on the lateral resistance near the pile end. As the radius and elastic modulus of the pile end expand, the bearing capacity and bearing capacity improvement ratio of the pile continue to increase. When the radius of the pile end expand is less than 1 m or the elastic modulus of the pile end expand is less than 2 000 MPa, the bearing capacity improvement ratio increases significantly. As the pile length increases, the bearing capacity and settlement values of ordinary cast-in-place piles and post grouting cast-in-place piles at the pile end show a continuous increasing trend, and the shorter the pile length,

作者简介: 吴冬健 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程施工、勘察等。

收稿日期: 2023-08-10

岩土力学

the greater the proportion of improvement in the bearing capacity of cast – in – place piles by post grouting technology.

Keywords: bored pile; post grouting at the pile end; bearing characteristics; numerical calculation

0 引言

我国国土广阔，具有复杂的地理环境和工程地质条件，在高速公路工程建设过程中往往会遇到各种不同的岩土工程问题，如地基承载力不足。在不良地基区域修建高速公路，需对不良地基进行加固处理，以提高其地基承载力，混凝土灌注桩因具有加固效果好、适用性广、经济效益明显等优势，在高速公路的地基加固工程中广泛使用，其中混凝土灌注桩的后注浆工艺使得灌注桩端承力和侧摩阻力得到明显提升，桩基的沉降明显减小^[1]。

目前，国内外学者对混凝土灌注桩承载特性的研究已有了较多的成果。胡涛等^[2]建立了适用于黄河流域下游地区的注浆压力计算公式，对 T/CECS G: D67 – 01—2018《公路桥梁灌注桩后注浆技术规程》中的注浆压力计算公式进行优化，得到了注浆阻力经验系数和黏聚力修正系数的范围；王润泽等^[3]依托某实际项目中的 2 根混凝土灌注桩静载试验，通过对比未压浆桩和压浆桩的实测结果，分析了后压浆技术对灌注桩承载特性的影响；刘春龙等^[4]依托伊拉克某典型工点，开展了混凝土灌注桩现场原位单桩静载试验、水平静载试验和抗拔试验，分析桩径和后注浆对承载特性的影响；王卫国等^[5]依托某桥梁工程的两根大直径组合压浆灌注桩的自平衡静载试验，研究了组合压浆前后施工效应和桩端沉渣对钻孔灌注桩桩侧阻力弱化效应的影响；周霄等^[6]依托湖北观音寺长江大桥实际工程，开展了混凝土灌注桩现场自平衡静载试验，对

压浆灌注桩的承载性能进行了研究；林志豪等^[7]对某软土地区的 4 根后注浆灌注桩进行了破坏性静载试验，对桩端桩侧复式注浆与仅桩底注浆两种灌注桩的承载性状进行了研究；江小兵等^[8]基于有限元数值方法对某软土地场的单桩载荷试验进行数值模拟，分析了桩侧摩阻力的分布情况和桩基极限承载力；吴问兵^[9]依托孟加拉国帕德玛大桥实际工程，其桩基类型均为钻孔灌注桩，对分别采用传统膨润土泥浆、改良 PHP 膨润土泥浆和化学泥浆的试验桩进行静载试验，提出桩基承载力的参考标准；王茂凯^[10]基于某大桥主墩下部桩基的有限元计算结果，对不同荷载作用下不同桩长的桩端阻力、桩侧摩阻力分布和桩基沉降等进行分析。

依托某采用桩端复合式后注浆工艺的钻孔灌注桩桥梁基础工程，通过现场单桩静载荷试验分析桩的沉降特性以及轴力和侧摩阻力分布规律，利用有限元软件建模，分析不同注浆量、注浆体强度和桩长对桩端后注浆灌注桩承载力的影响。

1 桩端后注浆灌注桩静载荷试验

1.1 工程概况

某软土地区高速公路桥梁基础工程，为满足承载力和沉降的要求，桥梁基础采用钻孔灌注桩，同时应用了桩端复合式后注浆施工工艺，通过对试桩进行现场静载荷试验检验注浆及承载力效果。灌注桩桩径为 80.0 cm，桩长 15.0 m，桩端持力层为粉土地层，土质均匀，稍有黏性，压缩性中等，试桩场地土的力学参数见表 1。

表 1 试桩场地土力学参数
Table 1 Soil mechanical parameters of the pile testing site

地层名称	层厚/m	重度 / (kN · m ⁻³)	天然含水率 / %	压缩模量 / MPa	泊松比	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / °	极限侧摩阻力标准值/kPa	承载力基本容许值/kPa
①粉土 -1	8.4	16.2	13.1	10.5	0.44	13.0	25.5	30.0	150.0
②卵石土 -1	4.4	20.0	7.8	35.0	0.15		42.0	140.0	450.0
③粉土 -2	5.3	18.2	16.8	20.0	0.36	14.0	26.6	55.0	220.0
④卵石土 -2	11.9	20.0	7.8	35.0	0.15		42.0	140.0	450.0

1.2 静载荷试验结果分析

为了检验桩端后注浆灌注桩的注浆及承载力效果，对试桩进行现场静载荷试验，试验依据 JGJ 106—2014

《建筑基桩检测技术规范》中对单桩静载荷试验的相关要求进行。单桩静载荷试验结果如图 1 所示。

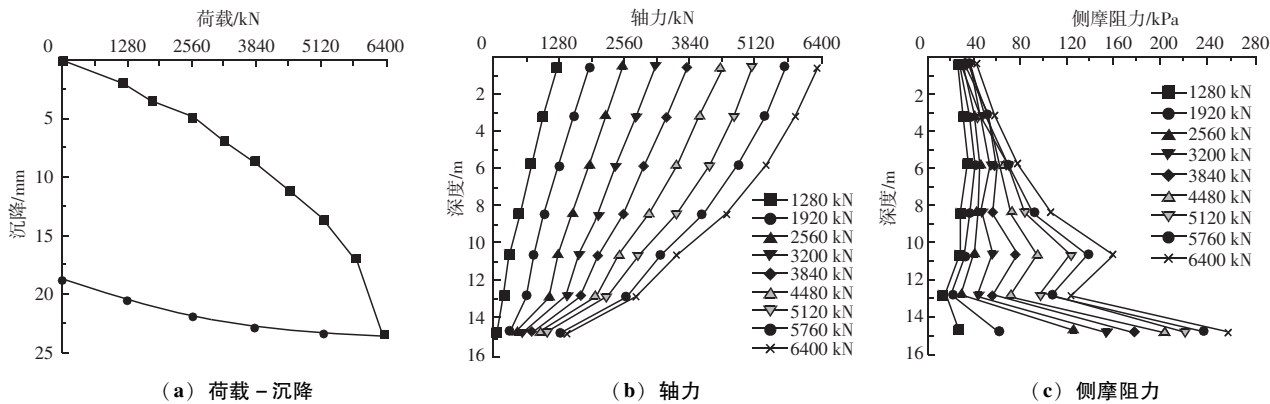


图1 单桩静载荷试验结果
Fig. 1 Single pile static load test results

如图1(a)所示,试桩桩端持力层为粉土,最大加载值为6400 kN,试桩最终沉降为23.62 mm,完全卸载回弹后试桩沉降值为18.69 mm,回弹率为20.87%。根据JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》计算,未采用后压浆技术的桩基承载力为2900 kN,采用后压浆技术灌注桩极限承载力试验值为未采用后压浆技术桩基承载力计算值的2.21倍,说明桩端复合式后注浆技术可显著提高桩基承载力。

如图1(b)所示,在桩注浆范围内,随着深度的逐渐增大,桩轴力逐渐减小,且桩轴力递减量与对应深度地层相关,即轴力分布图中每一深度范围内曲线斜率是发生变化的,斜率越小,则轴力变化值越大,说明该段桩侧摩阻力越大。当深度小于8 m时,不同监测断面之间桩轴力变化值较小;而当深度大于8 m时,桩轴力变化值明显增大,说明桩轴力主要由深度大于8 m的下部土层承担。随着荷载逐渐增大,桩端荷载承担比例呈现不断增大的趋势,由于试桩桩端持力层为粉土地层,在后注浆的情况下仍然较为软弱,在第一级荷载下其桩端荷载承担比例仅为7%,在第二级荷载下桩端荷载承担比例增大较快,增至17%,之后增大速率逐渐趋于平缓。

如图1(c)所示,试桩侧摩阻力大致呈现“R”形分布,试桩下半部分(约2.5倍桩径)的侧摩阻力明显增大,当荷载达到6400 kN时,桩端以上2.5倍桩径范围的侧摩阻力平均值达到了219.1 kPa,侧阻增强系数为3.45。桩端后注浆工艺增强了桩端持力层土体强度,不仅减小了桩端沉降量,增强了桩

身总侧摩阻力,还在桩端附近产生了侧阻强化效应,分析其原因为:桩端注浆后,浆液胶结固化作用提高了地基土的强度,同时注浆形成扩大头会增大桩端持力层对桩的承载面积,且浆液沿着桩周薄弱层上返,进一步加固了桩端以上一定范围内的土体,使得桩端承力和桩侧摩阻力较好地发挥作用,极大提高桩基承载力。

2 有限元数值模型建立

通过ABAQUS有限元软件对桩端后注浆灌注桩的承载特性进行数值模拟研究,建立计算模型可在保证其符合工程实际情况的基础上尽可能简化其计算,在建模时将桩土体系简化为轴对称问题,可仅建立1/4的桩土有限元模型进行计算分析。为减小由边界效应引起的计算误差,模型尺寸取为16 m×16 m×30 m(长×宽×高),模型自上而下厚度分别为8.4 m的粉土-1、4.4 m的卵石土-1、5.3 m的粉土-2和11.9 m的卵石土-2。灌注桩桩径为0.8 m,桩长15.0 m,模型如图2所示。

在设置模型的边界条件时,约束前后左右四个土体边界的法向位移,在模型底部设置水平和竖直约束。土体的本构模型采用摩尔-库仑弹塑性模型,参数取值见表1,桩体及桩端浆液结石体采用线弹性模型,力学参数取值见表2。桩体与土体之间为面-面接触模式,接触面的力学行为包括切向行为和法向行为两部分,法向行为采用“硬”接触,即仅当两个面之间紧密接触时产生法向力;切向行为摩擦模型,相关参数取值见表3。

岩土力学

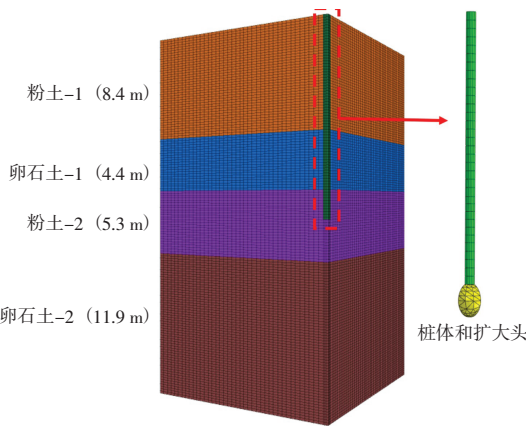


图2 数值模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of numerical model

表2 桩体及扩大头的力学参数取值

Table 2 Mechanical parameter values for pile body and enlarged head

直径/m	桩长/m	重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比
0.8	15.0	25.0	32.5	0.20
1.9		21.0	2.0	0.20

表3 桩-土接触面力学参数取值

Table 3 Mechanical parameter values of pile soil contact surface

地层	深度/m	摩擦系数	弹性滑移/m	极限侧摩阻力/kPa
①粉土-1	0~8.4	0.31	0.015	75.0
②卵石土-1	8.4~12.8	0.53	0.025	205.0
③粉土-2	12.8~15.0	0.32	0.030	345.0

通过对数值计算模拟结果和现场试验结果进行对比分析,得到模拟值和实测值对比的 $Q-S$ 曲线,如图3所示,可以看出数值计算与现场试验数据表现出很好的一致性,说明建立的数值模型和采用的计算参数具有合理性。

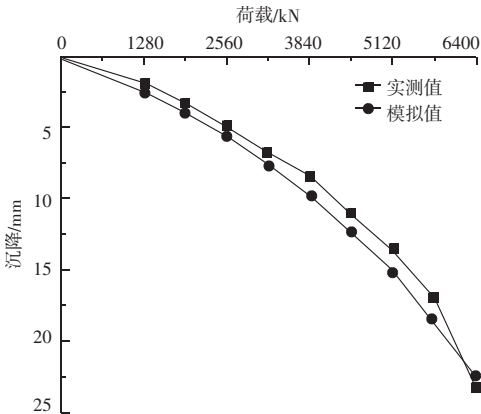


图3 数值计算与现场试验数据对比的荷载-沉降曲线

Fig. 3 Comparison of load settlement curve between numerical calculation and field test data

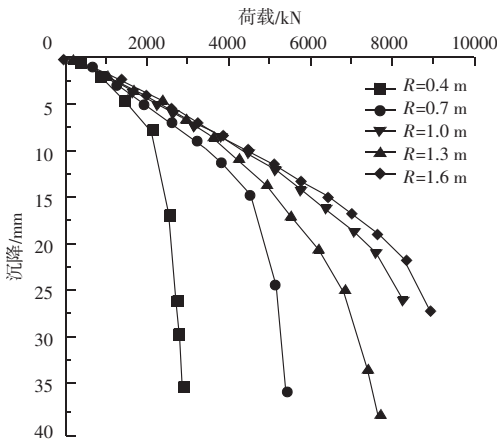
3 桩端后注浆灌注桩承载力影响因素分析

为研究桩端后注浆灌注桩承载力的影响因素,

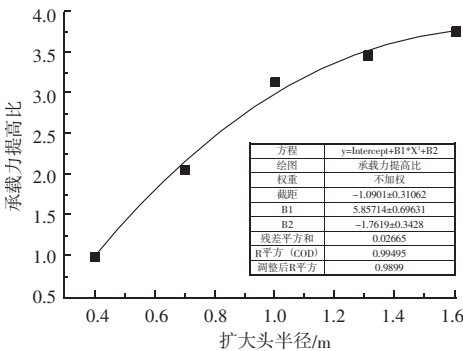
通过设计不同的计算工况,分析注浆量、注浆体强度和桩长对桩端后注浆灌注桩承载力的影响。

3.1 注浆量对桩端后注浆灌注桩承载力的影响

为了研究注浆量对承载力的影响,确定桩端扩大头的弹性模量为 2.0 GPa ,分别选取桩端扩大头半径为 0.4 、 0.7 、 1.0 、 1.3 和 1.6 m 进行计算,分析注浆量对桩端后注浆灌注桩承载力的影响,计算结果如图4所示。



(a) 荷载-沉降



(b) 承载力增大比

图4 不同桩端扩大头半径工况下的数值计算结果

Fig. 4 Numerical calculation results under different pile end expansion radius conditions

如图4所示,随着桩端扩大头半径的增大,灌注桩的承载力在不断增大,施加荷载时桩的沉降值增大速率在不断减小,即在承受相同荷载时,桩端扩大头半径越大,桩的沉降值越小,或者说在达到相同沉降值时,桩端扩大头半径越大,对应的荷载值也越大,如当桩的沉降值达到 25 mm 时,桩端扩大头半径 0.4 、 0.7 、 1.0 、 1.3 、 1.6 m 所对应的桩承受的荷载分别为 2727.2 、 5151.5 、 6767.6 、 8181.8 、 8686.8 kN 。本文定义承载力提高比为复合式后注浆

桩的极限承载力与常规桩 ($R = 0.4$, $E = 2.0$ GPa) 极限承载力的比值。桩端扩大头半径 0.4、0.7、1.0、1.3、1.6 m 所对应的极限承载力分别为 2 199.6、4 498.2、6 858.5、7 677.2、8 322.5 kN, 对应的承载力提高比分别为 1.00、2.05、3.12、3.49、3.78, 即承载力提高比随桩端扩大头半径增大而增大, 且当桩端扩大头半径小于 1 m 时, 承载力提高比随桩端扩大头半径增大的增大速率较快; 当桩端扩大头半径大于 1 m 时, 承载力提高比随桩端扩大头半径增大的增大速率明显减慢。

3.2 注浆体强度对桩端后注浆灌注桩承载力的影响

为了研究注浆体强度对承载力的影响, 确定桩端扩大头的半径为 1.0 m, 桩端持力层土体的压缩模量为 20.0 MPa, 分别选取桩端扩大头的弹性模量为 20.0、200.0、400.0、1 000.0、2 000.0、4 000.0 和 8 000.0 MPa 进行计算, 分析注浆体强度对承载力的影响, 计算结果如图 5 所示。随着桩端扩大头弹性模量的增大, 承载力也在不断增大, 施加荷载时桩的沉降值增大速率在不断减小, 即在承受相同荷载时, 桩端扩大头弹性模量越大, 桩的沉降值越小, 桩端扩大头弹性模量 20.0、200.0、400.0、1 000.0、2 000.0、4 000.0、8 000.0 MPa 所对应的极限承载力分别为 2 956.9、4 498.5、5 501.2、6 335.8、6 601.5、6 834.2、6 861.8 kN, 对应的承载力提高比分别为 1.34、2.05、2.50、2.88、3.00、3.11、3.12, 即承载力提高比随桩端扩大头弹性模量的增大而增大, 且当桩端扩大头弹性模量小于 2 000.0 MPa 时, 承载力提高比随桩端扩大头弹性模量增大的增

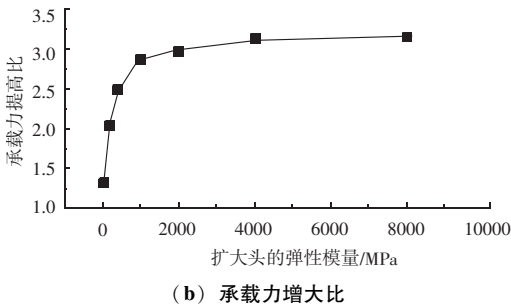
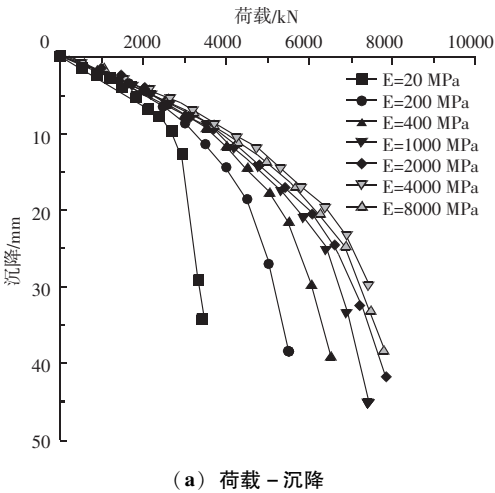


图 5 不同桩端扩大头弹性模量工况下的数值计算结果
Fig. 5 Numerical calculation results of elastic modulus under different pile end expansion conditions

大速率较快; 当桩端扩大头半径大于 2 000.0 MPa 时, 承载力提高比随桩端扩大头弹性模量增大的增大速率明显减慢。

3.3 桩长对桩端后注浆灌注桩承载力的影响

为了研究桩长对承载力的影响, 确定桩端扩大头半径为 1.0 m、弹性模量为 2.0 GPa、桩端持力层为粉土, 持力层土体的压缩模量为 20.0 MPa, 分别选取桩长为 15.0、20.0、25.0、30.0 和 35.0 m 进行计算, 分析桩长对承载力的影响, 计算结果如图 6。

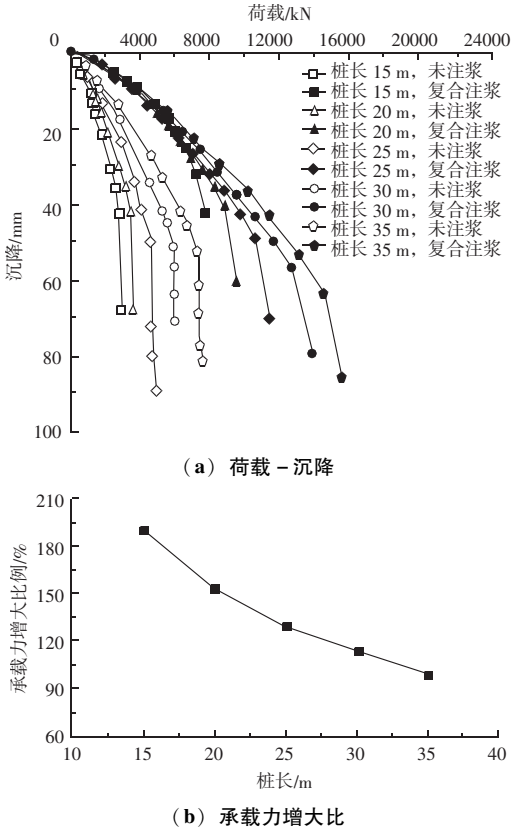


图 6 不同桩长工况下的数值计算结果
Fig. 6 Numerical calculation results under different pile length conditions

岩土力学

在桩长相同的情况下,承载力均明显大于普通灌注桩,随着桩长的增大,由于桩侧摩阻力和桩身压缩量的增大,普通灌注桩和桩端后注浆灌注桩的承载力和沉降值均呈现不断增大的趋势。桩长为 15.0、20.0、25.0、30.0、35.0 m 所对应的普通灌注桩的极限承载力分别为 2 200、3 500、4 600、5 900、7 300 kN,对应的桩端后注浆灌注桩的极限承载力分别为 6 400、8 860、10 550、12 670、14 650 kN,定义承载力增大比例为桩端后注浆灌注桩极限承载力与普通灌注桩极限承载力的差值与普通灌注桩极限承载力的比值,则当桩长由 15.0 m 增大至 35.0 m 时,承载力增大比例由 190% 逐渐减小至 101%,桩长越短,后压浆工艺对灌注桩承载力的提高比例越大。

4 结论

(1) 桩端复合式后注浆技术可显著提高桩基承载力,在桩注浆范围内,随着深度的逐渐增大,桩轴力逐渐减小,且桩轴力主要由深度大于 8 m 的下部土层承担,随着施加荷载的逐渐增大,桩端荷载承担比例呈现不断增大的趋势。

(2) 桩侧摩阻力大致呈现“R”形分布,试桩下半部分(约 2.5 倍桩径)的侧摩阻力明显增大,桩端后注浆工艺不仅增强了桩端持力层的土体强度,减小了桩端的沉降量,增强了桩身的总侧摩阻力,还在桩端附近产生了侧阻强化效应。

(3) 随着桩端扩大头半径的增大,桩的承载力也在不断增大。施加荷载时桩的沉降值增大速率在不断减小,承载力提高比不断增大,当桩端扩大头半径小于 1 m 时,承载力提高比增幅较大。

(4) 随着桩端扩大头弹性模量的增大,桩的承载力在不断增大。施加荷载时桩的沉降值增大速率

在不断减小,承载力提高比不断增大,当桩端扩大头弹性模量小于 2 000 MPa 时,承载力提高比增幅较大。

(5) 随着桩长的增大,普通灌注桩和桩端后注浆灌注桩的承载力和沉降值均呈现不断增大的趋势,当桩长由 15.0 m 增大至 35.0 m 时,承载力增大比例由 190% 逐渐减小至 101%,桩长越短,后压浆工艺对灌注桩承载力的提高比例越大。

参 考 文 献

- [1] 曾志军,刘建华,张瑞坤,等. 钻孔灌注桩桩端后注浆增强效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43 (1): 144-150.
- [2] 胡涛,万志辉,戴国亮,等. 饱和土中后注浆灌注桩的注浆压力回归分析及优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52 (5): 875-882.
- [3] 王润泽,赵航,熊朝亮,等. 长江下游粉砂土层中组合后压浆灌注桩承载特性研究[J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊1): 2631-2636.
- [4] 刘春龙,吕文军,张志强,等. 伊拉克某软土地层后压浆与试桩直径对承载形状影响试验[J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊1): 2637-2642.
- [5] 王卫国,胡涛,张奕彬,等. 桩端沉渣对后压浆钻孔灌注桩侧阻力影响的现场试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊1): 2669-2673.
- [6] 周霄,王铖铖,刘新华,等. 深厚卵石层后压浆灌注桩承载性能研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53 (增刊1): 31-37.
- [7] 林志豪,陈宏湛,陈仁伟,等. 滨海软基后注浆灌注桩承载性状现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (增刊2): 578-586.
- [8] 江小兵,侯学周,张浩博. 单桩荷载试验有限元数值模拟及其应用分析[J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊2): 2502-2509.
- [9] 吴问兵. 孟加拉国沉积层地质不同护壁泥浆对桩基承载力的影响研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51 (2): 8-13.
- [10] 王茂凯. 软土地区钻孔灌注桩桩长对竖向承载力的影响研究[J]. 公路, 2022, 67 (8): 255-259.