

引用本文:张晓华,王旭,周亚龙,等. 桩底复合式后注浆灌注桩的竖向承载特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 206-215.
ZHANG Xiaohua, WANG Xu, ZHOU Yalong, et al. Study on vertical bearing characteristics of composite post grouting cast-in-place pile at pile bottom[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 206-215.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11035

桩底复合式后注浆灌注桩的竖向承载特性研究

张晓华¹, 王旭^{1,2}, 周亚龙¹, 张延杰¹, 蒋代军¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为减小沉降、固化沉渣、提高灌注桩承载力,提出一种灌注桩桩底复合式后注浆工艺,利用安装在桩底的钢板胶囊通过胶囊内外(开-闭-开式)的复合式注浆方式加固桩端周围土体。基于西凌井公路大桥工程进行灌注桩后注浆及静载试验,研究在后注浆过程中注浆压力、注浆量、桩顶位移的实时响应规律,探究桩底复合式后注浆桩的承载特性。利用 ABAQUS 软件对该工程桩底复合式后注浆灌注桩的承载特性进行数值模拟,并探讨注浆量及注浆体强度对承载力的影响。结果表明:桩底开-闭-开式交替注浆的3次注浆量均达到设计值,稳定时段的注浆压力平均在4.4 MPa左右,桩顶位移累计抬升1.01 mm;复合式后注浆桩比常规桩的极限承载力提高1.9倍左右,同时在桩端以上 $2.5d$ (d 为桩半径)左右的范围内,复合式后注浆桩侧摩阻力明显增大,平均侧阻达到189.7 kPa,侧阻增强系数为3.45,侧摩阻力呈“R”形分布;随着注浆量及注浆体强度的增大,起初桩基承载力增长较快,在扩大头半径约为2.5倍的桩半径,弹性模量约为50倍的地基土弹性模量之后,承载力增长幅度较小。

关键词:灌注桩;桩底后注浆;数值模拟;承载特性;荷载传递;注浆压力;球形扩张理论

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)05-0206-10

Study on vertical bearing characteristics of composite post grouting cast-in-place pile at pile bottom

ZHANG Xiaohua¹, WANG Xu^{1,2}, ZHOU Yalong¹, ZHANG Yanjie¹, JIANG Daijun¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In order to reduce settlement, solidify sediment and improve the bearing capacity of cast-in-place pile, a composite post grouting process at the pile bottom of cast-in-place pile was put out. The steel plate capsule installed at the bottom of pile was used to strengthen the soil around the pile end through the composite grouting method inside and outside the capsule (open-close-open). Based on the post grouting and static load test of cast-in-place pile in Xilingjing highway bridge project, the real-time response law of grouting pressure, grouting volume and pile top displacement in the process of post grouting was studied, and the bearing characteristics

收稿日期: 2021-11-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208294); 山西省交通运输厅交通建设科技项目(2021-2-01)

通信作者: 王旭(1965-), 男, 工学博士, 教授, E-mail: publicwang@163.com.

of composite post grouting pile at pile bottom were explored. The bearing characteristics of the composite post grouting cast-in-place pile at the pile bottom of the project were numerically simulated by ABAQUS software, and the effects of grouting volume and grouting strength on the bearing capacity were discussed. The results show that the three grouting volumes of open-close-open alternate grouting at pile bottom all reach the design value, the average grouting pressure in the stable period is about 4.4 MPa, and the cumulative displacement of the pile top is raised by 1.01 mm. The ultimate bearing capacity of composite post grouting pile is about 1.9 times higher than that of conventional pile. At the same time, in the range of about $2.5d$ (d is pile radius) above the pile end, the side friction of composite post grouting pile increases obviously, the average side resistance reaches 189.7 kPa, the side resistance enhancement coefficient is 3.45, and the side friction presents an “R” distribution. With the increase of grouting volume and grouting strength, the bearing capacity of pile foundation increases rapidly. After the diameter of pile end enlarged head is about 2.5 times of pile diameter and the elastic modulus of pile end enlarged head is about 50 times of that of foundation soil, the bearing capacity increases slightly.

Key words: cast-in-place pile; post grouting at pile bottom; numerical simulation; bearing characteristics; load transfer; grouting pressure; spherical expansion theory

0 引言

钻孔灌注桩钻孔时钻头对周围地层的扰动和成孔后的应力释放效应会在桩侧与桩底周围形成松软扰动土层(虚土),同时泥浆会形成桩周泥皮和桩端沉渣,导致桩阻抗不能得到有效发挥,桩的极限承载力不能达到理想状态。研究表明^[1-5],运用桩端后注浆的方式对钻孔灌注桩进行处理可以改善桩的边界条件,扩大桩的支承面积,提高桩的承载能力。

刘金砺等^[6]和张忠苗等^[7]系统地阐述了钻孔灌注桩桩底后注浆的承载机理及其施工工艺;王志辉等^[8]和何剑^[9]对桩底注浆与未注浆的灌注桩进行了现场实测分析,研究了后注浆对灌注桩沉降变形、桩端及桩侧阻力发挥性状的影响;吴兴序等^[10]和王旭等^[11]对压力灌浆法、桩底柔性灌浆腔装置及其相关注浆工艺进行了一系列的研究,得出了很多可用于实际工程的成果。在后注浆灌注桩的数值模拟研究方面,安爱军等^[12]通过数值模拟对比分析了桩侧注浆与未注浆以及桩侧注浆浆液上返高度等对承载力和沉降的影响;黄敏等^[13]利用有限元分析方法研究了桩底压力注浆产生的渗透力在桩端浆球区域以外土体中引起的应力分布;康琦等^[14]研究了桩端土与桩侧土刚度比、桩长径比、注浆体高度与注浆体直径比等与荷载传递率之间的关系;胡庆立等^[15]对桩底闭式注浆的全过程进行了模拟,分析了桩端土体、注浆压力、储浆腔高度等对后注浆桩承载性能的影响。在以上的研究中,桩端后注浆都只是采用了单一的

开式注浆或闭式注浆(内设胶囊压力腔)且在数值模拟中将其注浆效果假设成球体或圆柱体。两种注浆方式都各有其优劣势,在桩底开式注浆中浆液由注浆导管直接注入各类砂、土、碎石层中,通过浆液的压力劈裂最大范围地加固了桩端土体,改善了土层的物理化学性质,但由于浆液的劈裂路径及其渗透区域难以掌控,浆液压力和用量不确定,从而导致了注浆效果的不稳定性和盲目性,使得单桩承载力波动性大。桩端的闭式注浆在成桩后通过注浆管向桩底的钢板胶囊压力注浆,胶囊随之膨胀,并对桩端底部地层进行挤密压密,最终形成扩大头。然而,闭式注浆无法固化桩端土且对于使用泥浆护壁的钻孔灌注桩,该技术存在钢筋笼下放难度较大,泥浆向上排除困难,孔底沉渣容易超标,二次清孔困难等不足。综上,单一的注浆方式在面对复杂的地层情况时已不能通过减小桩长、桩径和减小桩基沉降变形,有效达到提高经济效益和工程质量的目的。

鉴于此,本文基于开式与闭式注浆各自的优势并克服其不足提出了一种桩底复合式后注浆技术,通过桩端压密注浆及前后交替进行的桩底开式注浆,在消除桩端虚土“软垫效应”的同时,极大地提高持力层的承载力。以太原西北二环西陵井枢纽桥址开展的桩底复合式后压浆灌注桩现场试验为背景,建立有限元数值计算模型,对注浆的全过程及胶囊中注浆的压密作用进行了模拟并分析了桩底复合式后注浆灌注桩的承载特性。

1 桩底复合式后注浆技术

桩底复合式后注浆技术是利用灌注桩的自重及其负摩阻力做反力,对桩底周围地层进行高压复合式注浆加固。注浆装置细部构造如图 1(a)所示,通过中空钢板及环形挡板形成环形约束结构,其下安装柔性胶囊,2 根开放式注浆管与环形挡板内安装有单向阀的环形导管相连接形成胶囊外的开放式注浆体系;2 根封闭式注浆管(可兼做声测管)穿过环形钢板与胶囊内的环形导管相连接形成胶囊内的封闭式注浆体系,通过开-闭-开式的复合式注浆方式胶结固化地基土。

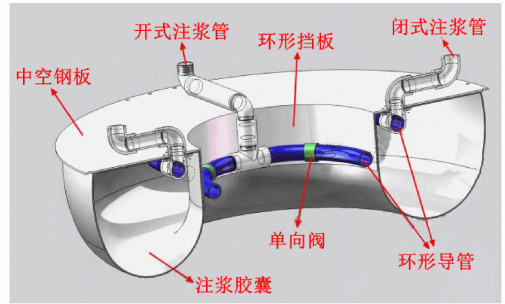
在后注浆过程中,首先利用穿过胶囊中间孔的注浆管对周围地层进行渗透、劈裂、压密作用并存的胶囊外开放式注浆,胶囊实物如图 1(b)所示。其中的渗透注浆主要是针对扩大头周围的砂、卵石等透水层,因为水泥浆的密度和压力远远大于透水层中的孔隙水密度和压力,水泥浆将砂、卵石地层中的自由水挤走,水被水泥浆置换,通过水泥浆使砂、卵石地层发生胶结,整体强度大幅度提高。劈裂注浆主要是针对扩大头周围的黏性土层,劈裂注浆在黏性土中形成树枝状的水泥浆结石浆脉,坚硬的结石浆脉使土层的整体强度得到提高。随着注浆压力和注浆量的增大,浆液会上返加固桩侧土,在桩端以上一定范围内提高桩侧摩阻力。胶囊内的闭式注浆主要是通过注浆管向桩底的中空胶囊内压力注浆,胶囊随之膨胀,并对桩端底部地层进行挤密压密,最终形成扩大头。最后通过胶囊外注浆管的开式注浆对胶囊膨胀后形成的中空部分进行补浆,同时进一步压密桩端地层。桩底复合式后注浆的最大特点是将注浆的劈裂、渗透和压密 3 种作用形式集中在桩底共同发挥作用,并通过桩底环形钢板胶囊的约束作用有效地实现了注浆的“三定”原则,即对所注浆液的“定域、定量、定压力”实现了有效的控制和约束。

2 桩底复合式后注浆灌注桩现场试验及有限元模型

2.1 现场试验

2.1.1 试桩参数及地质概况

本试桩试验依托太原西北二环高速公路义望至凌井店段工程,采用桩底复合式后压浆技术的试桩桩位选择太原西北二环西陵井枢纽主线 2 号桥址。本文共进行 2 根试桩的现场试验,主要选取地层分布及注浆效果较好的 SZ1 柱进行数值模拟及相关



(a) 注浆装置细部构造



(b) 胶囊实物

图 1 钢板胶囊

Fig. 1 Steel plate capsule

分析。SZ1 桩长 15 m, 桩径 0.8 m, 桩端持力层为粉土(Q_2^{pl}), 试桩采用旋挖钻成孔, 混凝土灌注成桩, 桩身为 C40 混凝土, 桩头为 C50 混凝土。通过在钢筋笼主筋上布设与主筋规格相匹配的振弦式钢筋应力计来测试桩基轴力沿深度的分布规律。采用桩底复合式后注浆技术对桩基进行后注浆, 试验场地土的力学参数见表 1, 试桩地质及钢筋计布设见图 2。

2.1.2 桩底复合式后注浆及静载试验

在进行桩底复合式后注浆的过程中,对注浆量、注浆压力、桩顶位移动态响应的控制是后注浆桩基质量的保证。注浆压力的大小及其稳定程度直接反映了持力层可灌性的好坏,较高的注浆压力会把地层薄弱的空隙进一步劈裂,通过泥浆的填充起到加筋作用,同时还能使一些微细孔隙张开,提高持力层可灌性,改善土层的密度、强度、不透水性,从而形成复合地基,提高承载力,但注浆压力过大又容易产生跑浆和冒浆,因此对压力的把控来说前期地层勘探和以往的注浆经验至关重要。注浆量的确定是另一个重要的因素,通常来说在其他条件不变的情况下,注浆量越大,注浆效果越好,但较大的注浆量及注浆压力势必会导致桩顶抬升位移较大,因此在不破坏桩侧土强度发挥的前提下,在一个合理的范围内研究三者之间的相对稳定对桩底复合式后注浆技术意义重大。SZ1 注浆量、注浆压力、桩顶位移监测曲线如图 3 所示。

由图 3 可以明显看出:桩底复合式后注浆的开-闭-开式 3 次注浆首次开式注浆总时间为 1.4 h,注

表 1 现场试桩土层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil layer of field test pile

土层编号	土层类型	层厚/m	泊松比	天然含水量/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	剪胀角/(°)	极限侧摩阻力标准值/kPa	承载力基本容许值/kPa
1	粉土	8.4	0.44	13.1	13.0	25.5	16.2	10.5	0.1	30	150
2	卵石土	4.4	0.15	7.8		42.0	20.0	35.0	0.1	140	450
3	粉土	5.5	0.36	16.8	14.0	26.6	18.2	20.0	0.1	55	220

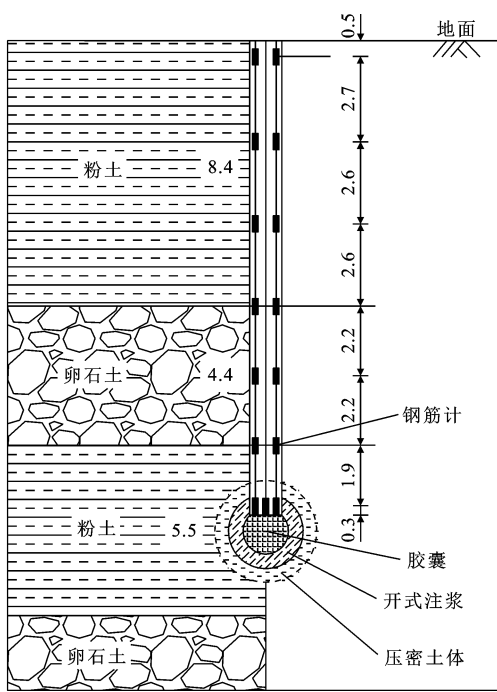


图 2 SZ1 地层及钢筋计分布 (单位:m)
Fig. 2 SZ1 stratum and reinforcement gauge distribution (unit:m)

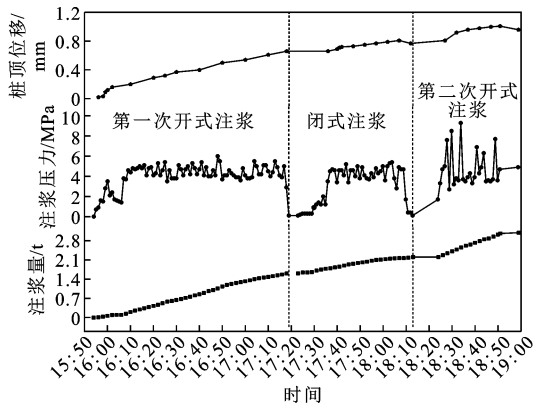


图 3 注浆量、注浆压力、桩顶位移监测曲线
Fig. 3 Monitoring curves of grouting volume, grouting pressure and pile top displacement

浆量为 1.60 t,最大注浆压力为 6.0 MPa,稳定平均注浆压力为 4.6 MPa,桩顶抬升 0.66 mm;闭式注浆总时间为 0.9 h,注浆量为 0.53 t,最大注浆压力为 5.4 MPa,稳定平均注浆压力为 4.1 MPa,桩顶抬

升 0.13 mm;第二次开式注浆总时间为 0.9 h,注浆量为 0.96 t,最大注浆压力为 9.3 MPa,桩顶抬升 0.22 mm,后注浆整个过程共注浆 3.09 t,桩顶累计抬升 1.01 mm。由图 3 中的注浆压力曲线可以得到:在第一次开式注浆及闭式注浆中,注浆压力有相对稳定的压力时段,但到第二次开式注浆时压力波动幅度较大且没有相对稳定的时间段,这是因为在第一次开式注浆劈裂、渗透、压密效应的交替作用下,地基土局部软弱裂隙被填充挤密,孔隙的充满度比较高,再通过胶囊内进行的闭式注浆进一步压密桩端土体,使局部地基土强度大幅度提高;在第二次开式注浆中浆液通过劈裂寻找新的路径就需要很大的注浆压力,在劈裂的一瞬间压力迅速下降,吞浆量激增,这种情况正如第二次开式注浆的注浆压力段和注浆量段所示。在整个注浆过程中,桩顶位移缓慢增大,只有在开-闭-开式的交替间歇期间随着注浆压力的消散,桩顶位移有微小回落,在此间歇时段注浆量保持不变。

现场静载试验采用慢速维持荷载法,共分 10 级加载,SZ1 的最大加载值为 6 400 kN。采用堆载法进行现场试验,如图 4 所示。根据 SZ1 的荷载-沉降(Q-S)曲线可知,SZ1 最终沉降量为 23.41 mm,卸载回弹后桩顶沉降量为 18.73 mm,最大回弹量为 4.68 mm,回弹率为 20.0%,Q-S 曲线呈现一条缓降曲线。



图 4 试桩静载试验
Fig. 4 Static load test of test pile

2.2 ABAQUS 有限元计算模型

2.2.1 模型建立及网格划分

建模时将桩土体系简化为三维轴对称问题,采用 1/4 的桩土有限元模型。考虑边界效应^[16], X 向和 Y 向取 20 倍的桩径, Z 向取 2 倍的桩长,桩端扩大头及其所处土层的有限元单元采用 C3D10 的四面体单元,其他采用 C3D8R 的六面体单元,网格划分自桩体到土体边界由密到疏。固定模型底面 X、Y、Z 三向的位移,其余四面约束 X 和 Y 各向的位移。模型中土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,桩体及桩端浆液结石体采用线弹性模型,桩土接触采用面对面接触,力学模型中主要定义了接触对的法向行为和切向行为,法向行为采用“硬接触”,切向行为采用摩擦模型。试桩及扩大头力学参数^[17-18]见表 2,其中 K1 为扩大头。桩周接触面力学参数见表 3。

表 2 试桩及扩大头力学参数

Table 2 Mechanical parameters of test pile and enlarged head

编号	桩径 D/m	桩长 L/m	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	重度 γ / (kN · m ⁻³)
SZ1	0.8	15	32.5	0.20	25
K1	1.9		2.0	0.35	21

表 3 桩周接触面力学参数

Table 3 Mechanical parameters of contact surface around pile

土层	层厚 H/m	弹性滑移 s/m	极限侧阻力 τ /kPa	摩擦因数 μ
粉土	0~8.4	0.015	75	0.31
卵石土	8.4~12.8	0.025	205	0.53
粉土	12.8~15.0	0.030	345	0.32

2.2.2 荷载施加及计算思路

(1)用 ODB 导入的方法进行模型的初始地应力平衡,当土体和桩体的应力在平衡前后的数量级不变,且其表面位移达到 1×10^{-4} mm 数量级时,认为初始地应力基本平衡。

(2)为了简化模型、易于计算,做出如下假设:桩端为粉土,现场使用的压浆料水灰比为 0.27,桩底首次开式注浆中浆液的压密作用占比较大,将桩端开式注浆的浆液形状简化为球形浆泡。

在桩端球形浆泡处用 Vesic 球形孔穴扩张理论分析桩底复合式后注浆中的首次开式注浆,其理论公式为

$$p_u = [q + c \cot(\varphi)] \frac{3[1 + \sin(\varphi)]}{3 - \sin(\varphi)} I_{rr} \frac{4 \sin(\varphi)}{3[1 + \sin(\varphi)]} - c \cot(\varphi) \quad (1)$$

$$I_r = \frac{E}{2(1 + \nu)[c + q \tan(\varphi)]} = \frac{G}{S_0} \quad (2)$$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} \quad (3)$$

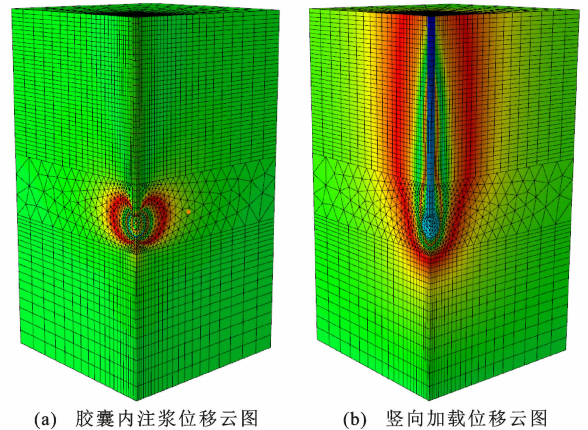
式中: p_u 为孔穴扩张压力值; q 为土体的原存应力; c 和 φ 为土的抗剪强度指标; I_r 为土体刚度指标; G 、 S_0 分别为土的剪切模量、抗剪刚度; I_{rr} 为修正的土体刚度指标; Δ 为塑性区平均体变。

由式(1)可得球形孔穴的作用压力值,孔穴的最终半径 R_u 通过式(4)确定。

$$R_u = \left[\frac{3}{4\pi} (1 - \alpha) V \right]^{1/3} \quad (4)$$

式中: α 为自然吸水率; V 为灌浆量体积。

(3)根据现场记录的首次开式注浆的注浆量,利用式(4)确定首次开式注浆形成的浆泡的半径,再由式(1)得到孔穴扩张压力值,将计算得到的孔穴扩张压力施加在 1/4 的球面上。之后进行浆泡内的闭式注浆(胶囊内注浆)及第二次开式注浆,将后两次现场记录的注浆量通过换算得到浆泡扩大的半径值[图 5(a)]。在 ABAQUS 软件中通过建立局部的球形坐标系对浆泡施加径向位移,模拟对地基土的压密效果,最后在设立的静载荷分析步中导入上述压密效果产生的应力场并分级施加桩顶竖向荷载[图 5(b)]。



(a) 胶囊内注浆位移云图

(b) 竖向加载位移云图

图 5 数值模拟位移云图

Fig. 5 Displacement cloud map of numerical simulation

2.2.3 模型验证

Q-S 曲线、桩身轴力与侧摩阻力模拟结果和实测结果对比分析如图 6 所示。由图 6(a)的 Q-S 曲线可以看出,在前九级荷载下沉降模拟值较实测值偏大,最后一级偏小,但从整体来看两者曲线基本吻合,模拟值变化符合现场实测规律;从图 6(b)、(c)最后一级荷载的轴力、侧摩阻力曲线规律分析来看,两者反映的规律一致,曲线数值较为接近。通过上

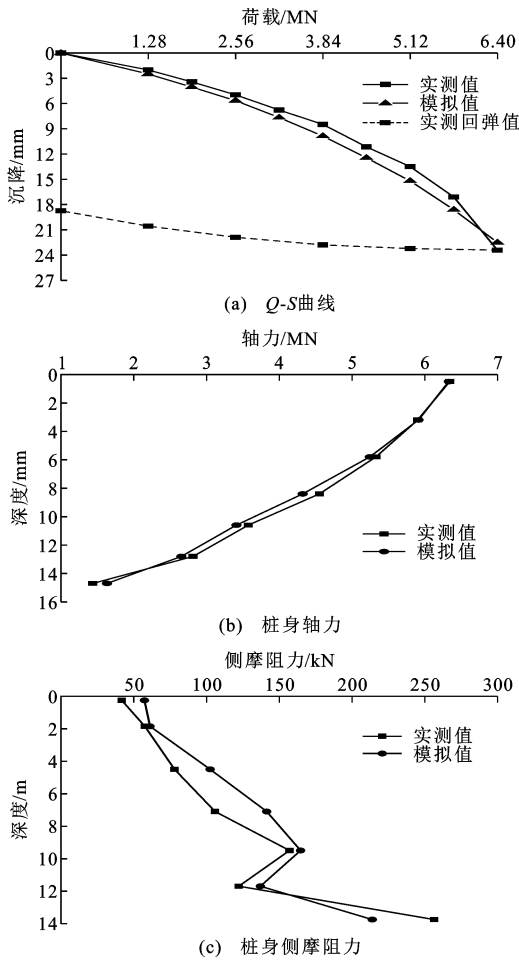


图 6 Q-S 曲线、桩身轴力与侧摩阻力模拟结果和实测结果对比分析

Fig. 6 Comparative analysis of Q-S curve, pile shaft axial force and side friction between simulated and measured results

述对比分析说明模型选取的参数及模拟过程较合理。

3 模拟结果与分析

3.1 常规桩、复合式后注浆桩的承载特性对比分析

由于现场试桩试验的条件限制,在现场未进行常规桩(未注浆桩)的静载试验,所以利用数值模拟的常规桩与现场实测的复合式后注浆桩进行了对比分析。通过规范^[19]计算可得常规桩与桩底后注浆桩基的极限承载力分别为 2 725、3 062 kN,都远小于复合式后注浆桩的极限承载力 6 400 kN。图 7 为常规桩与复合式后注浆桩的 Q-S 曲线;图 8 为常规桩与复合式后注浆桩的轴力传递规律;图 9 为常规桩与复合式后注浆桩的侧摩阻力分布规律。

由图 7 可以看出,常规桩在加载到 2 200 kN 时,Q-S 曲线出现明显的陡降,此时桩端进入刺入破

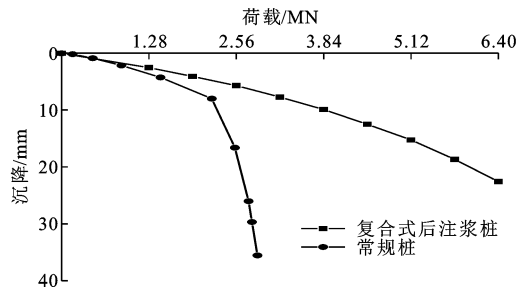


图 7 常规桩与复合式后注浆桩的 Q-S 曲线

Fig. 7 Q-S curves of conventional pile and composite

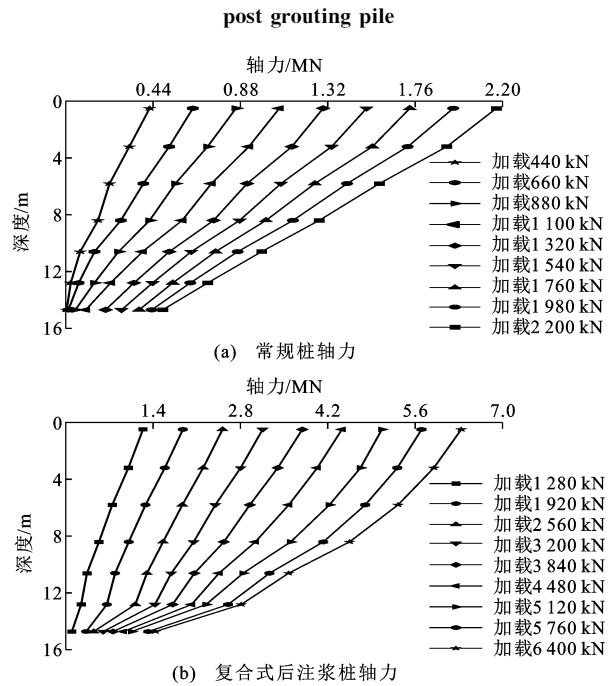


图 8 常规桩与复合式后注浆桩轴力传递规律

Fig. 8 Transmission law of axial force of conventional pile and composite post grouting pile

坏状态,试桩达到其极限承载力。对于复合式后注浆桩,在 2 200 kN 之后桩端注浆对土体的挤密和加固作用逐渐发挥,在荷载持续增大的情况下,沉降平缓增加,根据相关规范可以推断其极限承载力大于 6 400 kN,复合式后注浆桩的承载力相比常规桩提高了约 1.9 倍。

从图 8 可以看出,在桩长范围内,随着桩入土深度的增加轴力逐渐递减,桩在深度范围内所处土层不同,桩土相对位移不同,则轴力的递减量不同,即轴力图中每一段对应的曲线斜率不一样,斜率越小,轴力差越大,该段的侧摩阻力越大。在 12.8~14.7 m 范围内复合式后注浆桩的曲线斜率更小,该段的侧摩阻力更大。经计算,在最大荷载 6 400 kN 的作用下,SZ1 桩端的端阻增强系数为 5.37,桩端荷载承担比为 22%。

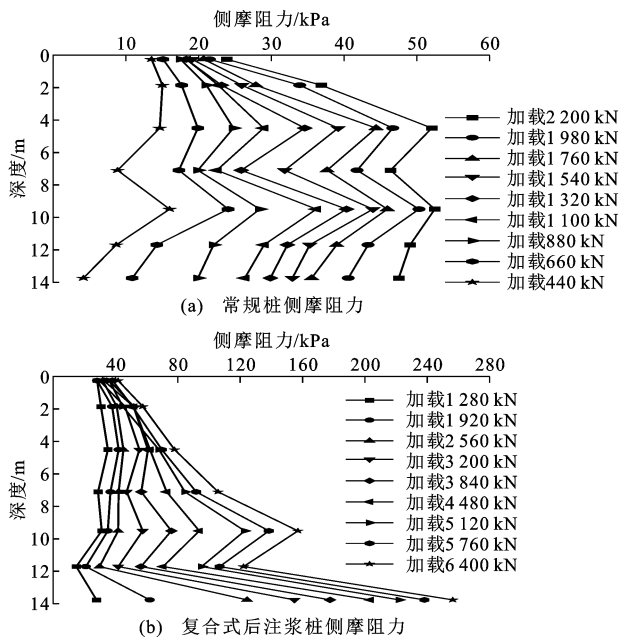


图9 常规桩与复合式后注浆桩的侧摩阻力分布规律

Fig. 9 Distribution law of side friction of conventional pile and composite post grouting pile

从图9可以看出,当常规桩和复合式后注浆桩达到各自的极限承载力时,常规桩桩身的平均侧摩阻力为44.0 kPa,复合式后注浆桩桩身的平均侧摩阻力为131.7 kPa,复合式后注浆桩较常规桩平均侧摩阻力提高约2倍。关于桩端后注浆对侧阻的增强效应,刘艳红等^[20]、董金荣^[21]认为桩端后注浆增强桩端土体强度不仅能够减小桩端沉降量,还能增强桩身总侧摩阻力,尤其是在桩端附近会发生侧阻强化效应。本文中结合两者的Q-S曲线可以看出:常规桩由于桩端持力层薄弱,当桩身侧摩阻力完全发挥后,在更大的桩顶荷载作用下桩端土体提前发生刺入破坏,致使桩很快达到其极限承载力;复合式后注浆桩由于桩端浆液胶结固化了地基土,同时由于扩大头的形成增大了承载面积,使得端阻和侧阻同时较好地发挥,改善了常规桩端阻、侧阻异步发挥的缺点,极大地提高了承载力。对比图9可知,复合式后注浆桩桩身下部12.8~14.7 m(约2.5d)范围内侧摩阻力明显增强,平均侧阻达到189.7 kPa,侧阻增强系数为3.45,侧摩阻力呈“R”形^[22]分布。从理论的角度阐释其原因有两个,其一是开式注浆使浆液沿桩周薄弱层上返,加固了桩端以上一定范围内的桩周土体;其二是按照Vesic球形孔穴扩张理论和梅耶霍夫理论^[23],桩端土体在胶囊腔注浆膨胀的作用下产生径向扩张和挤压,在扩大头周围形成塑性区,使桩底地层承载力提高,同时由于剪切滑动

面的形成和区域土体压应力和剪应力的传递使得桩端以上一定范围内的桩侧土挤密,增加了对桩壁的法向应力,从而使桩的侧摩阻力加大。

3.2 注浆量及注浆体强度对承载力的影响分析

桩端后注浆对桩基承载力的影响主要取决于注浆量及浆液结石体的性质,分析中以弹性模量的大小来表示注浆体的强度。在桩长15 m、桩径0.8 m、桩端扩大头的强度 $E_t=2$ GPa的情况下,通过改变闭式注浆量的大小(即施加不同的径向位移),对比了扩大头半径 R 分别为0.4、0.7、1.0、1.3、1.6 m时对承载力的影响,如图10、11所示。图11中 Q_t 为复合式后注浆桩的极限承载力, Q_c 为常规桩的极限承载力。扩大头各半径下的承载力极限值分别为2200、4501、6861、7680、8320 kN,对比常规桩($R=0.4$ m)承载力分别增大2.05倍、3.12倍、3.49倍、3.78倍,从拟合曲线可以看出桩端扩大头半径在0.7~1 m的范围内增大比例较大,1 m(即约2.5倍的桩半径)以上增大比例较小,扩大头半径的大小对承载力的提高幅度是一个逐渐趋于平缓的过程,只在一定的范围内占主导因素,之后主要由桩端土的性质决定。

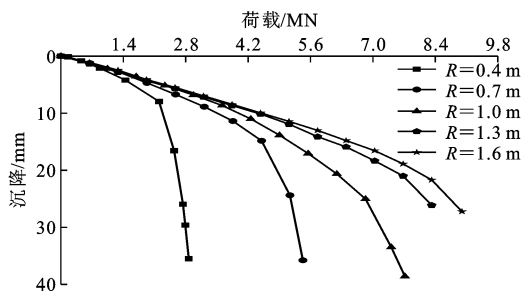


图10 不同扩大头半径下的Q-S曲线

Fig. 10 Q-S curve under different enlarged head radius

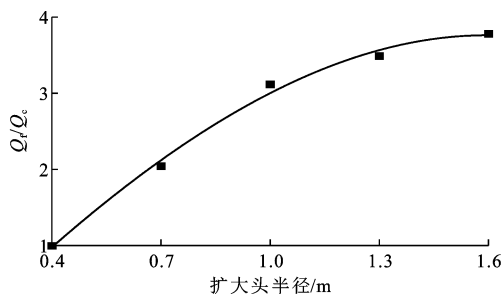


图11 承载力增大比例与R的关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between bearing capacity increase ratio and R

在桩长、桩径不变,桩端扩大头 $R=1$ m的情况下,分析注浆体强度对承载力的影响,不同注浆体强度下的Q-S曲线如图12所示。从图12可以看出,

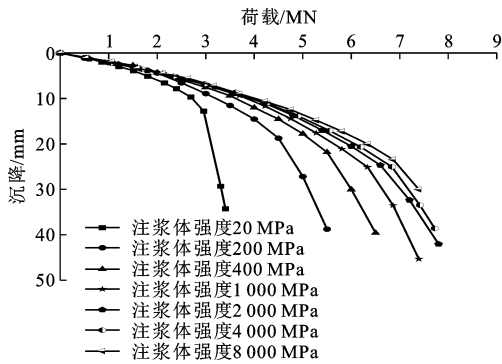


图 12 不同注浆体强度下的 $Q-S$ 曲线

Fig. 12 $Q-S$ curve under different grouting strength

各曲线在加载初期变化规律基本一致,在加载末期桩端扩大头的强度差异逐渐显现,极限承载力随注浆体强度增大而不断提高,但在同一沉降量下,随着注浆体强度的增大,桩的承载力增大比例在逐渐下降。 E_f 为复合式注浆桩扩大头的弹性模量, E_c 为桩端地基土的弹性模量,在不同扩大头半径下,分别取 E_f 为 E_c 的 1 倍、10 倍、20 倍、50 倍、100 倍、200 倍、400 倍,分析注浆体强度增大比例与承载力增大比例之间的关系,如图 13 所示。随着注浆体强度的增加,桩基承载力也在不断增大,在注浆体弹性模量约为 50 倍的地基土弹性模量之前,承载力增大比例较大,在其之后承载力提高幅度趋于平缓。

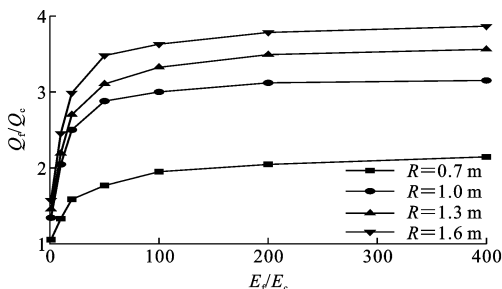


图 13 承载力增大比例与注浆体强度增大比例的关系曲线

Fig. 13 Relationship curve between bearing capacity increase ratio and grouting strength increase ratio

4 结语

(1) 桩端复合式后注浆技术综合了开式和闭式注浆效果的优势,同时便于清孔清渣,可以有效地处理桩底虚土。桩底开式和压密注浆方法的联合使用互相促进和增强了彼此之间的加固效果,使桩底的加固范围扩大,通过对注浆压力、注浆量、桩顶位移的监测和调整使复合式后注浆达到一个好的效果,对所注浆液的“定域、定量、定压力”实现了非常有效的控制和约束。

(2) 利用 ABAQUS 软件对现场试桩静载试验进行数值模拟,得到的计算结果与实测结果基本吻合,很好地反映了桩底复合式后注浆桩的荷载传递规律,表明模型建立方法及参数选取较合理。

(3) 复合式后注浆桩的极限承载力是常规桩的 2.9 倍左右,平均侧摩阻力是常规桩的 3 倍左右,同时由于桩端开闭式注浆的综合效应,使得桩端以上约 2.5d 高度范围内的土体挤密加固,平均侧阻达到 189.7 kPa,侧阻增强系数为 3.45,侧摩阻力增幅较大,使复合式后注浆桩整体的桩身侧摩阻力呈“R”形分布。

(4) 随着注浆量及注浆体强度的增大,复合式后注浆桩的承载力只在一定范围内提高较大,这个范围存在一个临界值,即扩大头的半径约为 2.5 倍的桩半径,强度约为 50 倍的地基土弹性模量,超过该临界值时,这两个因素对承载力提高的贡献值较小。

参考文献:

References:

- [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.
ZENG Zhijun, LIU Jianhua, ZHANG Ruikun, et al. Research on the pile-base post-grouting enhancement effect of bored pile[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 144-150.
- [2] 王秀哲,龚维明,薛国亚,等. 桩端后注浆技术的研究现状与发展[J]. 施工技术,2004,33(5):28-31.
WANG Xiuzhe, GONG Weiming, XUE Guoaya, et al. Current research status and development of the pile-end post-grouting technology[J]. Construction Technology, 2004, 33(5): 28-31.
- [3] 周红波. 桩侧泥皮和桩底沉渣对钻孔桩承载力影响的数值模拟[J]. 岩土力学,2007,28(5):956-960.
ZHOU Hongbo. Numerical simulation of effects of mud cake and bottom sediment on bearing capacity of bored pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 956-960.
- [4] BRUCE D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. Ground Engineering, 1986, 19(4): 9-15.
- [5] WAN Z H, DAI G L, GONG W M. Field and theoretical analysis of response of axially loaded grouted drilled shafts in extra-thick fine sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(3): 391-407.
- [6] 刘金砺,祝经成. 泥浆护壁灌注桩后注浆技术及其应用[J]. 建筑科学, 1996, 12(2): 13-18.

- LIU Jinli, ZHU Jingcheng. Technology and application of post-grouting for slurry drilling piles [J]. Building Science, 1996, 12(2): 13-18.
- [7] 张忠苗, 吴世明, 包 风. 钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 681-686.
- ZHANG Zhongmiao, WU Shiming, BAO Feng. Study of mechanism and application on bored pile end grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 681-686.
- [8] 王志辉, 戴国亮, 王 磊, 等. 黏性土层中后压浆桩承载性状的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增2): 194-198.
- WAN Zhihui, DAI Guoliang, WANG Lei, et al. Experimental study on bearing behaviors of post-grouting bored piles in cohesive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 194-198.
- [9] 何 剑. 后注浆钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 743-746.
- HE Jian. Experimental research on vertical bearing properties of base-grouting bored cast-in-place pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 743-746.
- [10] 吴兴序, 于志强, 王 旭. 压力灌浆法用于灌注桩的试验研究[J]. 西南交通大学学报, 1997, 32(4): 382-387.
- WU Xingxu, YU Zhiqiang, WANG Xu. Application of grouting method to cast in place piles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1997, 32(4): 382-387.
- [11] 王 旭, 吴兴序, 赵善锐. 黄土地区桩底压密灌浆提高灌注桩承载力的试验研究[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(1): 16-21.
- WANG Xu, WU Xingxu, ZHAO Shanrui. Experimental study on the compaction grouting of pile tip in loess region[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(1): 16-21.
- [12] 安爱军, 李 亮, 邹金锋, 等. 长钻孔灌注桩后注浆深度及数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(2): 53-58.
- AN Aijun, LI Liang, ZOU Jinfeng, et al. Numerical study on depth of post-grouting in-situ of length bored pile[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(2): 53-58.
- [13] 黄 敏, 张克绪, 张尔齐. 桩底灌浆在桩端周围土体中引起的应力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 433-435, 439.
- HUANG Min, ZHANG Kexu, ZHANG Erqi. Analysis of stress in soil mass around pile bottom induced by grouting[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(3): 433-435, 439.
- [14] 康 琦, 姚晓飞, 徐 岳. 桩端后压浆钻孔灌注桩荷载传递规律及主要影响因素分析[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 36-40.
- KANG Qi, YAO Xiaofei, XU Yue. Analysis of load transfer law and main influencing factors of post-grouting bored pile at pile end[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(5): 36-40.
- [15] 胡庆立, 张克绪. 桩底压浆桩在轴向荷载作用下的有限元分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002(1): 48-52.
- HU Qingli, ZHANG Kexu. Analysis of base-grouted pile under axial load[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002(1): 48-52.
- [16] 张亚国, 李镜培. 考虑地表边界效应的静压沉桩挤土位移解析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1195-1200, 1260.
- ZHANG Yaguo, LI Jingpei. Analysis of ground displacement caused by pile installation considering boundary effects [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(9): 1195-1200, 1260.
- [17] 李建军, 梁仁旺. 水泥石抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473-477.
- LI Jianjun, LIANG Renwang. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 473-477.
- [18] 李 昉. 试验分析掺砂量对水泥砂浆桩 Duncan-Chang 模型参数影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 645-650.
- LI Fang. Experimental analysis of the influence of sand content on the Duncan-Chang model parameters of cement mortar pile[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 645-650.
- [19] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [20] 刘红艳, 王志辉. 后压浆对超长钻孔灌注桩承载特征的影响研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(3): 91-96.
- LIU Hongyan, WAN Zhihui. Research on influence of post grouting on bearing capacity characteristics of super-long bored piles [J]. Industrial Construction, 2018, 48(3): 91-96.
- [21] 董金荣. 灌注桩侧阻力强化弱化效应研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 658-662.

- DONG Jinrong. Enhanced and weakened effect of skin friction of cast-in-situ piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 658-662.
- [22] 孟凡伟,蒋建平. 软土地区后注浆灌注桩侧阻力分布数值研究[J]. 燕山大学学报, 2020, 44(2): 173-181.
- MENG Fanwei, JIANG Jianping. Numerical study on distribution of lateral frictional resistance of post-grouting bored piles in soft soil area [J]. Journal of Yanshan University, 2020, 44(2): 173-181.
- [23] 张常光,晏青,吴礼舟,等. 非饱和土条形地基梅耶霍夫极限承载力统一解[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 252-261.
- ZHANG Changguang, YAN Qing, WU Lizhou, et al. Unified solution of Meyerhof's ultimate bearing capacity for strip foundation resting on unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 252-261.