

文章编号:1673-2049(2015)02-0058-07

# 后压浆钻孔灌注桩承载力分析与试验研究

邓祥辉<sup>1,2</sup>, 张永杰<sup>2</sup>, 房海勃<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710032)

**摘要:**针对后压浆钻孔灌注桩承载力难以准确确定的现状,提出基于现场试验的改进计算公式。采用平行对比法对某工程项目的普通钻孔灌注桩和后压浆钻孔灌注桩进行承载力现场测试,并结合单桩承载力理论分析,提出后压浆单桩承载力计算改进公式。结果表明:在条件相似的情况下进行测试时,采用后压浆技术可大幅提高单桩承载力,减小沉降量;采用改进公式计算的单桩承载力与现场测试结果相差较小,说明提出的公式是比较合理的;所确定的后压浆钻孔灌注桩承载力计算公式对类似工程具有重要的参考意义。

**关键词:**后压浆钻孔灌注桩;普通钻孔灌注桩;理论分析;现场测试;承载力

**中图分类号:**TU753.3 **文献标志码:**A

## Bearing Capacity Analysis and Experiment Research on Post-grouting Bored Piles

DENG Xiang-hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-jie<sup>2</sup>, FANG Hai-bo<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, Shaanxi, China)

**Abstract:** Aimed at the bearing capacity of post-grouting bored pile determined uneasily, the improved calculation formula was proposed based on the field test result. The parallel comparison method was adopted in some project. Vertical bearing capacities of the ordinary bored pile and post-grouting bored pile were tested, and the bearing capacity of a single pile was analyzed theoretically. On this basis, the improved calculation formula of post-grouting bored single pile was proposed. The results show that the bearing capacity and subsidence for the single pile can be improved efficiently using the post-grouting techniques for bored piles in the similar condition. At the same time, the errors of computation and field test result are small when vertical bearing capacity of post-grouting bored pile is calculated by the improved formula, so the proposed formula is reasonable. The determined calculation formula of bearing capacity of post-grouting bored pile can provide the experience for the similar projects.

**Key words:** post-grouting bored pile; ordinary bored pile; theoretical analysis; field test; bearing capacity

## 0 引言

近年来,随着深基础工程的快速发展,钻孔灌注

桩以适应范围广、承载力大、振动小等优点得到工程界的广泛应用<sup>[1-2]</sup>。在桩基础设计时,通常需要选择承载力较好的持力层。很多情况下,由于持力层埋

收稿日期:2014-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(50579092);陕西省教育厅科技计划项目(2010JK599)

作者简介:邓祥辉(1976-),男,四川德阳人,西安工业大学副教授,工学博士,博士后,E-mail:dh\_gl@163.com。

藏较深而桩长都较长,一般为20~30 m,有的地区甚至超过40 m。因此,在桩基础施工中,桩身长度过长不仅大幅影响工程造价,而且会增加施工难度和延长工期。同时,普通钻孔灌注桩在施工过程中难免会产生孔底沉渣、孔壁泥皮等缺陷,致使单位桩长承载效率下降。在这种情况下,人们开始改进技术以满足工程需要<sup>[3-4]</sup>。

钻孔灌注桩后压浆技术是在钻孔灌注桩基础上改进而来的,其做法是在灌注桩成桩后,通过在桩身内预设注浆导管,对桩端、桩侧进行注浆,使桩端、桩侧土体得到加固,从而提高单桩承载力,减少桩体沉降<sup>[5]</sup>。灌注桩后压浆技术兴起于20世纪80年代后期,90年代中期中国在突破了后压浆技术中预置注浆阀管的设计和安装技术后,后压浆技术才开始推广和应用<sup>[6]</sup>。目前,对后压浆技术的研究主要集中在后压浆钻孔灌注桩的力学性能参数、桩端阻力、桩侧摩阻力等方面<sup>[7-12]</sup>。在应用上,后压浆技术也逐渐开始应用于不同地质情况的工程中<sup>[13-15]</sup>。然而,后压浆技术的理论发展一直落后于后压浆技术的应用,虽然规范和现有成果在这方面做了很多工作,但对于一些特殊土(如黄土、软土等),已有成果的适用性还需进一步改进和深入研究。在工程现场采取的试验方法以复式对比法为主,这种方法的不足之处在于:对同一桩基先进行承载力测试,然后进行压浆再测试,容易导致压浆后桩基承载力测试结果与实际偏差较大<sup>[16-19]</sup>。虽然平行对比法应用条件严格,但不存在上述缺陷。因此,本文采用更符合实际情况的平行对比法对某工程进行现场试验研究。同时,在总结和分析前人成果的基础上,提出适用于本工程的后压浆单桩承载力计算公式,并把计算结果与现场测试结果进行对比。

## 1 后压浆技术作用机理与单桩承载力分析

### 1.1 后压浆技术作用机理

钻孔灌注桩后压浆技术是以增强桩端阻力和桩侧摩阻力为目的的一种施工技术,其作用机理主要有以下4个方面:

(1)固结作用。在具有一定渗透性的砂土、碎石土、黄土和粉质粘性土中,水泥浆液在一定的压力下,通过注浆管深入桩底和桩侧,与周围土体形成一个结构紧密、强度较高的结石体<sup>[19]</sup>。有效增大了桩端面积,提高了桩端承载力;同时,在桩侧一定范围形成远大于原桩直径的结合体,大幅增加了桩侧摩

阻力,从而达到提高单桩承载力的效果。

(2)胶结泥皮作用。钻孔灌注桩成桩时,由于施工工艺影响,桩、土间存在着一层结构松散、强度较低的泥皮,极大降低了桩侧摩阻力。后压浆技术通过浆液的渗入,破坏了原有的泥皮结构,把土层、泥皮以及桩结构固接在一起,极大提高了桩侧摩阻力<sup>[20]</sup>。

(3)充填挤密作用。水泥浆液在注浆压力的作用下,沿桩、土界面上下运动,填充孔隙,并产生一定的挤密作用,提高了桩侧摩阻力<sup>[21-22]</sup>。

(4)劈裂加筋作用。当注浆压力超过土体抗剪极限时,会使土体裂开而产生劈裂效应,浆液在土中沿裂隙渗入,形成网状结石,对土体起到加筋作用。

通过以上4种作用,使桩端体积大幅增加、桩侧与土层结合更加紧密,从而大幅提高了钻孔灌注桩的承载力。

### 1.2 后压浆单桩承载力

目前,后压浆钻孔桩承载力分析方法主要分为2种:①按压浆后变化的桩径,进行单桩承载力计算的方法;②在传统钻孔灌注桩承载力计算公式基础上,通过经验系数来调整计算的方法<sup>[23-24]</sup>。本文在分析前人已有成果的基础上,考虑压浆后的桩径可与现场试验结合,能较准确确定桩径,因此采用第1种分析方法。

后压浆钻孔灌注桩的单桩竖向承载力由上部未压浆段极限侧摩阻力、桩端压浆上返段侧摩阻力以及桩端压浆后的极限端阻力3个部分组成<sup>[25]</sup>,其计算公式为

$$Q_u = Q_{su1} + Q_{su2} + Q_p \quad (1)$$

压浆后,桩底部桩径发生变化,式(1)可变为

$$Q_u = \pi d \sum_{i=1}^n h_i f_i + \pi(d+r) \cdot \sum_{i=1}^n h_i f_i + \pi(R+r) f_p \quad (2)$$

式中: $Q_u$ 为压浆后单桩竖向承载力; $Q_{su1}$ 为桩一般段侧摩阻力; $Q_{su2}$ 为桩端压浆上返段侧摩阻力; $Q_p$ 为桩端压浆后的极限端阻力; $d$ 为压浆前钻孔灌注桩直径; $r$ 为压浆后桩底半径; $R$ 为压浆前钻孔灌注桩半径; $h_i$ 为桩侧第*i*层土的厚度; $f_i$ 为桩侧第*i*层土极限侧摩阻力标准值; $f_p$ 为压浆后桩端阻力标准值。

由于 $Q_{su2}$ 和 $Q_p$ 的大小与压浆后桩底半径的大小直接相关,因此,首先要确定压浆后桩底半径,其与压浆加固区土体体积的关系为

$$V_1 = 3\pi r^3 / 4 \quad (3)$$

式中: $V_1$  为压浆加固区土体体积。

压浆后加固区土体体积  $V_1$  与采用后压浆技术时注入水泥砂浆量直接相关,水泥用量与  $V_1$  的关系公式为

$$M_c = nV_1\rho_c/[1+C(\rho_c/\rho_w)] \tag{4}$$

式中: $M_c$  为压浆时的水泥用量; $n$  为浆液注入系数; $C$  为水灰比; $\rho_c$  为水泥密度; $\rho_w$  为水的密度。

通过上述公式,结合现场试验的情况,可确定  $M_c, h_i$  等相关参数,进而分析得出后压浆钻孔灌注桩的单桩竖向承载力。

2 工程概况

2.1 工程平面布置

西安某工程为高层住宅楼,南邻建东街,北临咸宁路,西临太乙路;地下 1 层,地上 30 层,钢筋混凝土框架剪力墙结构,主体总高度为 99.600 m;总建筑面积约为 27 300 m<sup>2</sup>,地下室面积为 1 070 m<sup>2</sup>。A3-5 楼建筑面积、结构类型与 A1-13 楼相同,地质情况类似。A1-13 楼采用后压浆钻孔灌注桩,A3-5 楼采用普通钻孔灌注桩。基坑开挖深度为-7.000 m,基坑安全等级为二级。工程的平面布置如图 1 所示。

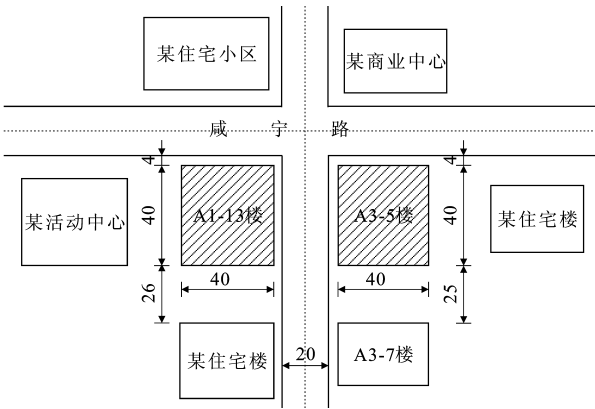


图 1 工程平面布置(单位:m)

Fig.1 Plane of Project (Unit:m)

2.2 工程地质条件

A1-13 楼与 A3-5 楼建筑场地地貌均属黄土梁洼地貌,场地位于古迹岭黄土梁南侧与兴庆池洼相近地段。地层结构中均含 3~4 层处于软塑-流塑状态、厚度为 20 m 左右的黄土和饱和黄土。软粘土在桩顶以下,厚度为 11~14.1 m。

场地水位埋藏较浅,在地表以下 8.1~9.5 m,年变化幅度约为 2.0 m。A1-13 楼与 A3-5 楼建筑场地地基土力学参数如表 1 所示。

表 1 A3-5 楼与 A1-13 楼地基土力学参数

Tab.1 Mechanics Parameters of Foundation Soil of A3-5 Floor and A1-13 Floor

土层编号	土层名称	天然含水量/%	天然重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	干重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	土层厚度/m	孔隙比	内摩擦角/(°)	粘聚力/kN
①	黄土	29.3	17.2	13.3	4.0	1.003	28.0	14.0
②	古土壤	28.3	18.4	14.4	3.0	0.851	26.0	18.0
③	黄土	30.2	18.6	14.3	8.0	0.862	32.0	20.0
④	黄土	26.6	19.1	18.6	5.0	0.767	30.0	24.0
⑤	古土壤	26.0	19.2	19.1	8.0	0.743	27.0	19.0
⑥	粉质粘土	23.8	19.4	19.2	7.0	0.697	30.0	23.0
⑦	粉质粘土	25.0	19.5	19.4	13.0	0.720	31.0	28.0

3 桩基础设计方案

A3-5 楼桩基采用  $\phi 700$  普通钻孔灌注桩,桩基持力层设在层⑥粉质粘土,桩长 32 m,混凝土保护层为 50 mm。桩顶标高为-6.35 m,总桩数 216 根,单桩极限承载力标准值要求为 6 200 kN,桩位布置如图 2 所示。工程桩施工前进行了试桩,设计要求锚桩桩身混凝土强度等级为 C45,试桩桩身混凝土强度等级为 C55,一般工程桩为 C35。A1-13 楼桩基采用  $\phi 600$  后压浆钻孔灌注桩,桩基持力层设在层⑤古土壤,桩长 25 m,混凝土保护层厚度为 50 mm,桩顶标高为-6.35 m,总桩数 196 根,单桩极

限承载力要求为 7 000 kN,桩位布置如图 3 所示。后压浆工程桩为 C45,试桩桩身混凝土强度等级为 C55,水泥强度等级不小于 42.5 普通硅酸盐水泥。

4 试验结果分析

目前,对比压浆桩和非压浆桩的静载试验方法有 2 种:一种是复式对比法;另一种是平行对比法。由于在实际工程施工时,采用复式对比法往往能节省费用,因而应用较多。然而采用复式对比法在测试过程中是对同一根桩先后进行常规静载试验和压浆后静载试验,由于先后对同一桩基进行了 2 次加载测试,测试得到的后压浆桩基承载力存在很大的

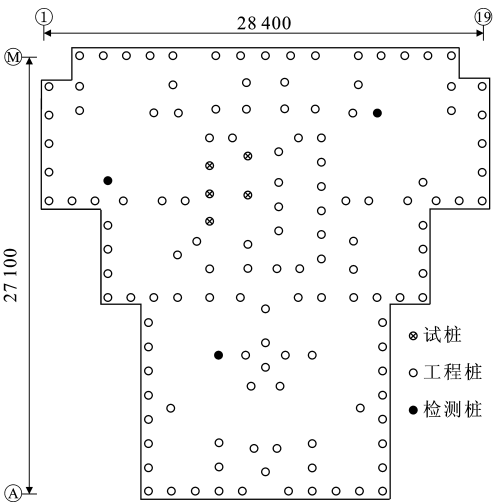


图 2 A3-5 楼桩位平面布置 (单位:mm)  
Fig. 2 Plane Position of Bored Piles of A3-5 Floor (Unit:mm)

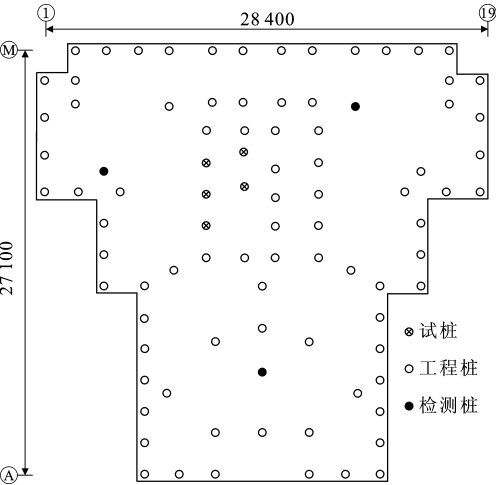


图 3 A1-13 楼桩位平面布置 (单位:mm)  
Fig. 3 Plane Position of Bored Piles of A1-13 Floor (Unit:mm)

不确定性<sup>[17]</sup>。因此,为了更真实反映桩基的承载力,采用与实际施工方法更为一致的平行对比法来确定压浆后的单桩承载力。

4.1 试验对比

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),A3-5 楼采用普通钻孔灌注桩,则单桩静载试验桩数为 3 根。在普通钻孔灌注桩静载试验中,试桩为 G1,G2,G3。根据试验过程和测试结果,绘制试桩 G1,G2,G3 的荷载-位移(Q-S)关系曲线,如图 4 所示。

同样,根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),A1-13 楼的后压浆钻孔灌注桩试验桩有效桩长为 25 m,试桩也为 3 根,后压浆钻孔灌注桩破桩后的效果如图 5 所示。

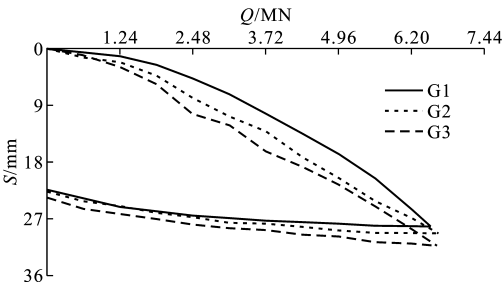


图 4 试桩 G1,G2,G3 的 Q-S 曲线  
Fig. 4 Q-S Curves of Testing Piles G1, G2, G3



图 5 后压浆灌注桩破桩后的效果  
Fig. 5 Effect of Post-grouting Bored Piles After Broken

对 A1-13 楼后压浆灌注桩进行单桩抗压静载试验,测试桩的相关参数和单桩承载力特征值如表 2 所示。根据静承载力试验过程和测试结果,绘制试桩 S1,S2,S3 的 Q-S 关系曲线,如图 6~8 所示。

表 2 试桩承载力特征值试验结果

Tab. 2 Experiment Results of Bearing Capacity Eigenvalues of Testing Piles

试桩编号	试桩类型	持力层编号	桩径/mm	有效桩长/m	承载力特征值/kN
G1	普通钻孔桩	⑥	700	32	6 510
G2	普通钻孔桩	⑥	700	32	6 670
G3	普通钻孔桩	⑥	700	32	6 660
S1	后压浆钻孔桩	⑤	600	25	7 750
S2	后压浆钻孔桩	⑤	600	25	7 730
S3	后压浆钻孔桩	⑤	600	25	7 440

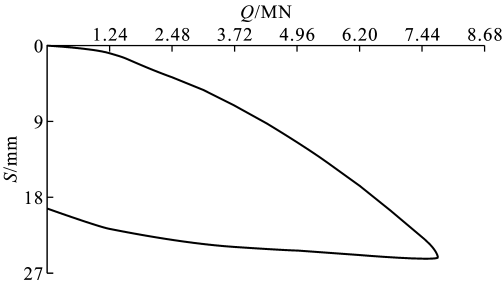


图 6 试桩 S1 的 Q-S 曲线  
Fig. 6 Q-S Curve of Testing Pile S1

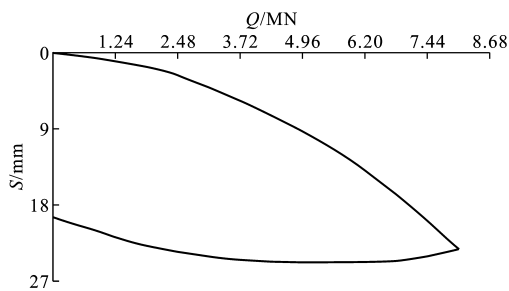


图 7 试桩 S2 的 Q-S 曲线  
Fig. 7 Q-S Curve of Testing Pile S2

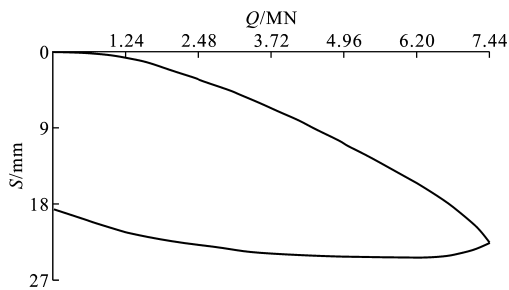


图 8 试桩 S3 的 Q-S 曲线  
Fig. 8 Q-S Curve of Testing Pile S3

对 2 种试桩的 Q-S 曲线进行分析,可以看出:

(1)对比图 4 和图 6~8 可见,在静载试验初始加载阶段,当荷载小于 2 000 kN 时,采用后压浆技术(S1,S2,S3 试桩)和未采用后压浆技术(G1,G2,G3 试桩)的荷载-位移曲线变化幅度不大,基本重合,2 组试桩的沉降量不超过 3 mm。

(2)随着桩顶荷载的增加,当桩顶荷载大于 2 480 kN 时,后压浆灌注桩和普通桩的沉降量变化幅度逐渐增加。

(3)当桩顶荷载大于 3 720 kN 时,普通桩的沉降曲线斜率更大,表明普通桩沉降量增幅明显大于后压浆灌注桩。同时,普通桩的累计沉降量也明显大于后压浆灌注桩。

(4)随着荷载的增加,普通钻孔灌注桩首先达到极限承载力,3 根试桩极限承载力分别为 6 510,6 670,6 660 kN,试桩 G1,G2,G3 的沉降量分别为  $u_{G1}=28.9$  mm,  $u_{G2}=29.1$  mm,  $u_{G3}=31.2$  mm。当

荷载达到 7 750 kN 时,3 根后压浆试桩先后达到极限承载力,其承载力分别为 7 750,7 730,7 440 kN,试桩 S1,S2,S3 的沉降量分别为  $u_{S1}=24.8$  mm,  $u_{S2}=23.1$  mm,  $u_{S3}=22.6$  mm。

通过试桩 S1,S2,S3 的单桩静载力试验曲线可见,各桩均未加载至破坏,荷载试验曲线明显缓于普通钻孔灌注桩,且呈缓变形态,无陡降段出现。从后压浆钻孔灌注桩与普通钻孔灌注桩的试验过程和测试结果可见:

(1)后压浆钻孔灌注测试桩平均沉降量为 23.5 mm,普通钻孔灌注测试桩平均沉降量为 29.3 mm,采用后压浆技术沉降量可减少 19.8%。考虑到普通钻孔灌注桩有效桩长为 32 m,而后压浆灌注桩仅为 25 m,因此从沉降量看,采用后压浆技术可大幅减少桩基沉降,更有利于工程安全和节省工程造价。

(2)根据静载试验结果,后压浆钻孔灌注桩抗压承载力平均值为 7 640 kN,而普通钻孔灌注桩抗压承载力平均值为 6 613 kN,采用后压浆技术单桩承载力提高 15.5%,后压浆钻孔灌注桩单桩承载力显著提高。

上述分析从沉降量和极限承载力 2 个方面对 2 种试桩进行了对比分析。普通钻孔灌注桩桩长 32 m,桩径为 700 mm,持力层为粉质粘土;后压浆钻孔灌注桩桩长为 25 m,桩径为 600 mm,持力层为古土壤。显然,桩长和桩径 2 项条件在提高单桩承载力方面更有利于普通钻孔灌注桩。为了更全面比较 2 种桩型,采用单桩承载力效率进行比较。根据试验结果,对 A3-5 楼和 A1-13 楼的桩基承载力效率进行了计算,结果如表 3 所示。从计算结果来看,采用后压浆技术的单桩承载力效率为 1 077.6 kN·m<sup>-3</sup>,而采用普通钻孔灌注桩的单桩承载力效率为 537.6 kN·m<sup>-3</sup>,采用后压浆技术的单桩承载力效率是普通钻孔灌注桩的 200.4%。即使考虑到后压浆的折算混凝土方量,后压浆钻孔灌注桩单桩承载力效率也远大于普通桩。因此,采用后压浆技术的效果是非常显著的。

表 3 普通钻孔灌注桩与后压浆钻孔灌注桩承载力效率比较

Tab. 3 Comparison of Bearing Capacity Efficiency Between Ordinary Bored Pile and Post-grouting Bored Pile						
楼号	桩类型	桩径/mm	有效桩长/m	单桩混凝土方量/m <sup>3</sup>	平均极限承载力/kN	承载力效率/(kN·m <sup>-3</sup> )
A3-5	普通钻孔灌注桩	700	32	12.4	6 613.0	537.6
A1-13	后压浆钻孔灌注桩	600	25	7.6	7 640.0	1 077.6

4.2 后压浆单桩承载力计算

在施工过程中,单桩后压浆量一般在 2 400 kg 左右,因此,根据式(3)可计算出压浆后桩底半径  $r$

为 1.23 m,这与现场试验测试的结果也比较吻合。同时,在现场施工中,水泥浆液沿桩周土软弱界面上返,有些位置超过 12 m,根据测试情况取均值为 10

m. 根据相关规范和文献[26],返浆段桩侧摩阻力取值为 15.0~16.5 kPa,可计算变径后的桩侧摩阻力。同时,根据相关规范和文献[23],[26]取压浆后桩端单位摩阻力  $f_p = 870$  kPa,可计算出桩端压浆后的极限桩端摩阻力。最后,通过计算,压浆后的单桩承载力为 7 617.7 kN,计算结果与实测结果比较接近,说明本文的计算方法是比较合理的。

## 5 结 语

(1)根据现场测试结果,在相同情况下,采用后压浆技术的钻孔灌注桩承载力明显优于普通钻孔灌注桩,其单桩承载力效率远大于普通钻孔灌注桩。同时,后压浆试桩的沉降量比普通桩的沉降量降低 19.8%。因此,采用后压浆技术优势明显。

(2)在已有成果的基础上,提出了适合本工程的后压浆钻孔灌注桩承载力计算公式,采用提出的公式计算单桩承载力与实测结果比较吻合,说明提出的计算公式是比较合理的,对类似工程具有一定的指导意义。考虑到本文的计算方法是根据本文试验总结出来的,对黄土地区的适用性参考意义相对更大一些,而在砂土、碎石土等明显与黄土差异较大的土层,应用时还需通过现场试验来确定。

## 参考文献:

## References:

- [1] BRUCE D A. Enhancing the Performance of Large Diameter Piles by Grouting[J]. Grouting Engineering, 1986, 19(4): 9-15.
- [2] STOCKER M F. The Influence of Post-grouting on the Load-bearing Capacity of Bored Piles[C]//Elsevier. Proceedings of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Helsinki: Elsevier, 1983: 35-38.
- [3] ERIKSSON M, STILLE H, ANDERSSON J. Numerical Calculations for Prediction of Grout Spread with Account for Filtration and Varying Aperture [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 353-364.
- [4] FLEMING W G K. The Improvement of Pile Performance by Base Grouting[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering, 1993, 97(2): 88-93.
- [5] 吴永红,李文春,翁鹿年. 桩基础理论与技术若干进展与问题探讨[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(4): 163-167, 183.

Advance and Some Problems of Pile Foundation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(4): 163-167, 183.

- [6] 吴春秋,肖大平,吴俊. 灌注桩后压浆技术的工程实践及理论研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2008, 41(增1): 117-122.
- WU Chun-qiu, XIAO Da-ping, WU Jun. Engineering Application and Theoretical Research on Post Grouting for Cast-in-situ Piles[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(S1): 117-122.
- [7] 高文生. 后压浆灌注桩单桩模型试验的研究[J]. 建筑科学, 1998, 14(5): 23-26, 36.
- GAO Wen-sheng. Study on Model Testing of Single Post-grouting Slurry Drilled Pile [J]. Building Science, 1998, 14(5): 23-26, 36.
- [8] 石坚,李敏. 后压浆灌注桩工程特性的试验研究[J]. 铁道建筑, 2006(12): 73-75.
- SHI Jian, LI Min. Study on Engineering Characteristic of Post-grouting Bored Piles [J]. Railway Engineering, 2006(12): 73-75.
- [9] 王东红,谢星,郑建国,等. 黄土地区后压浆钻孔灌注桩工程性状研究[J]. 工程勘察, 2005(2): 4-7, 21.
- WANG Dong-hong, XIE Xing, ZHENG Jian-guo, et al. Study on Engineering Behaviors of Post-grouting Bored Piles in Loess Area [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005(2): 4-7, 21.
- [10] 宋建,于志华,刘炎炎. 钻孔灌注桩桩端后注浆承载力性能数值分析[J]. 施工技术, 2012, 41(360): 92-94.
- SONG Jian, YU Zhi-hua, LIU Yan-yan. Numerical Analysis on Load-carrying Properties of Post-grouting Technology of Bored Pile [J]. Construction Technology, 2012, 41(360): 92-94.
- [11] 李莲秀,吴盛伟,苏英平. 桩端后压浆灌注桩承载力的可靠性研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(1): 70-72.
- LI Lian-xiu, WU Sheng-wei, SU Ying-ping. Study on Reliability of Bearing Capacity of Pile-end Post-grouting Bored Pile [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(1): 70-72.
- [12] 田旭亮. 惠山站房钻孔灌注桩承载力分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(7): 55-58.
- TIAN Xu-liang. Analysis on Bearing Capacity of Bored Pile in Huishan Station [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(7): 55-58.
- [13] 刘焰. 后压浆灌注桩在黄土地区的工程应用[J]. 建筑结构, 2007, 37(10): 85-87.
- LIU Yan. Application and Investigation of Post Cast-

- ing Techniques for Bored Piles in Loess Area[J]. Building Structure, 2007, 37(10): 85-87.
- [14] 闫永茂, 庞军辉. 某工程灌注桩复式注浆施工技术[J]. 施工技术, 2010, 39(1): 78-80.
- YAN Yong-mao, PANG Jun-hui. Construction Technology of Double Grouting for Bored Piles in Some Project[J]. Construction Technology, 2010, 39(1): 78-80.
- [15] 陈永辉, 王新泉. 公路软土地基处理中 Y 型沉管灌注桩异形特性研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 19-25.
- CHEN Yong-hui, WANG Xin-quan. Research on Abnormity Characteristic of Y-shaped Tube-sinking Cast-in-situ Pile in Highway Soft Ground[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 19-25.
- [16] ZHANG Q Q, ZHANG Z M. Field Performance of Long Bored Piles Within Piled Rafts[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2010, 163(6): 293-305.
- [17] 黄生根, 张晓炜, 曹 辉. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 251-254.
- HUANG Sheng-gen, ZHANG Xiao-wei, CAO Hui. Mechanism Study on Bored Cast-in-place Piles with Post-grouting Technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 251-254.
- [18] 曾学武, 胡雪钦. 混凝土灌注桩施工质量控制与缺陷处理[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(12): 101-103.
- ZENG Xue-wu, HU Xue-qin. Quality Control and Defect Treatment in Construction of Bored Concrete Pile[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(12): 101-103.
- [19] 宋金刚. 公路桥梁钻孔灌注桩的施工质量控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(6): 63-64.
- SONG Jin-gang. Quality Control of Construction of Bored Pile for Highway Bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(6): 63-64.
- [20] 冯忠居, 任文峰, 李 晋. 后压浆技术对桩基承载力的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 35-38.
- FENG Zhong-ju, REN Wen-feng, LI Jin. Bearing Capacity of Post-grouting Pile Foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(3): 35-38.
- [21] 王端端, 贾 力, 李国旗. 后压浆桩基础的承载力试验对比分析[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 38-41.
- WANG Duan-duan, JIA Li, LI Guo-qi. Comparative Analysis on Bearing Capacity Test of Post-grouting Pile Foundation[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 38-41.
- [22] 柯 洪, 吴 翔, 王继华, 等. 天津厚地层超长钻孔灌注桩单桩承载特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2821-2826.
- KE Hong, WU Xiang, WANG Ji-hua, et al. Research on Vertical Bearing Capacity of Single Super-long Bored Pile in Thick Stratum of Tianjin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2821-2826.
- [23] 马天抒, 龚维明, 戴国亮. 黄土地区后压浆钻孔灌注桩承载力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增 2): 362-366.
- MA Tian-shu, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang. Test Research on Bearing Capacity Character of Post-grouting Piles in Loess Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 362-366.
- [24] 陶兴文. 上海地区钻孔灌注桩后压浆技术的设计与施工[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2001(4): 35-38.
- TAO Xing-wen. Design and Construction of Post Casting Techniques for Bored Piles in Shanghai[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2001(4): 35-38.
- [25] 郭 琦, 李春轩, 刘慧林. 应用后压浆技术的钻孔灌注桩承载力计算方法[J]. 水运工程, 2010(3): 63-67.
- GUO Qi, LI Chun-xuan, LIU Hui-lin. Calculation Method of Bearing Capacity for Cast-in-situ Pile with Post-grouting Technique[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(3): 63-67.
- [26] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
- JGJ 94—2008, Technical Code for Building Pile Foundation[S].