

软土地区后压浆灌注桩单桩承载力 综合估算法研究

贺占海, 张志强, 王杰亭, 陈向平, 高承成, 胡朝彬, 齐旭锋, 张长斌
(天津华勘基础工程检测有限公司, 天津 300170)

摘要: 灌注桩后压浆工艺能够提高桩的承载能力、减少变形, 在国内得到广泛应用。但由于后压浆施工隐蔽性大, 在许多工程应用中出现了问题。大量实践表明, 相同条件下单桩承载力往往存在较大差异, 简单套用桩基规范计算单桩承载力, 多数情况计算值明显高于静载试验结果, 给工程建设带来较大安全隐患。本文提出的单桩承载力综合估算法, 从多方面分析, 引入承载力增幅 γ 、承载力增强系数 β 、综合影响因子 λ , 涵盖各影响因素, 计算公式简单易懂, 方法便捷可行。经过多个工程实例的应用验证, 结果贴近实际, 安全可靠, 应用效果良好。

关键词: 软土地区; 后压浆工艺; 钻孔灌注桩; 单桩承载力; 综合估算法; 承载力增强系数; 综合影响因子
中图分类号: TU473.1; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0154-07

Comprehensive estimation research on the bearing capacity of post-grouting single bored pile in soft soil areas

HE Zhanhai, ZHANG Zhiqiang, WANG Jieting, CHEN Xiangping,
GAO Chengcheng, HU Chaobin, QI Xufeng, ZHANG Changbin
(Tianjin Huakan Foundation Engineering Testing Co., Ltd., Tianjin 300170, China)

Abstract: The post-grouting process of bored piles has been widely used in China because it can improve the bearing capacity and reduce deformation. However, due to the large concealment of post-grouting construction, problems have occurred in many engineering applications. A large number of practices show that the bearing capacity of a single bored pile under the same condition often shows quite differences. Simply calculation according to the pile foundation specification will make the calculated value significantly higher than the static load test results, which brings great safety hazards to the construction project. The comprehensive estimation method proposed in this paper analyzed from several aspects, bringing in the increase amplitude of bearing capacity γ , the bearing capacity enhancement coefficient β , and the comprehensive impact factor λ , covering the influence of various factors. The calculation formula is simple and easy to understand and the method is convenient and feasible. Moreover, the results are close to the actual after the application verification with high safety reliability, and good application effect.

Key words: soft soil areas; post-grouting process; bored piles; bearing capacity of single pile; comprehensive estimation method; bearing capacity enhancement coefficient; comprehensive impact factor

0 引言

灌注桩后压浆工艺因通过较低的施工成本投入, 有效提高桩的承载能力、减少变形, 在国内外得

到广泛应用^[1-3]。虽然后压浆技术已经有了大量研究^[4-5], 但相关规范标准还不完善, 许多从业人员对后压浆工艺缺乏足够的认识, 存在不切实际提高承

收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2025-02-06 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.020

第一作者: 贺占海, 男, 满族, 1970年生, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 建筑与土木工程专业, 硕士, 长期从事岩土工程勘察、施工与检测工作, 天津市河东区广瑞西路67号, Tjhc_jc@163.com。

引用格式: 贺占海, 张志强, 王杰亭, 等. 软土地区后压浆灌注桩单桩承载力综合估算法研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 154-160.

HE Zhanhai, ZHANG Zhiqiang, WANG Jieting, et al. Comprehensive estimation research on the bearing capacity of post-grouting single bored pile in soft soil areas[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 154-160.

承载力要求的情况,加上后压浆施工隐蔽性大,部分地区建筑市场管理混乱不规范,工程出现问题的情况比较常见,对注浆后依据工程情况计算单桩承载力的研究涉及较少。关于灌注桩后压浆设计、施工要求及单桩承载力计算等,多采用行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[6],显然其中单桩承载力计算公式(5.3.10)适合于设计阶段的承载力预估,而用于工后单桩承载力计算则应符合规范关于后压浆技术实施的条件。实际上有研究表明,即便后压浆施工符合规范规定,公式(5.3.10)更适用于非软土地区,而用于软土地区则误差较大^[7]。在工程应用中,由于种种原因,施工出现偏差造成同一场地条件下单桩承载力差异显著的情况十分普遍^[8-9]。此时,如何准确计算各桩压浆后的单桩承载力值具有十分重要的实际意义和研究价值。

1 承载力影响因素

与非后压浆灌注桩相比,后压浆工艺对单桩承载力的影响大致可归纳为客观因素、施工因素、控制因素3个方面。后两者在实际工程中起着非常重要的作用,严格管控和规范化施工能够准确反映承载力随客观条件变化的规律特征,较大程度上决定了后压浆灌注桩承载力的提高效能。

1.1 客观因素

主要包括桩身尺寸、土质条件等。桩身尺寸通常由承载力要求和持力层埋深所决定。桩径增大,桩长增加,单桩承载力提高,短桩注浆后承载力的提高程度比长桩显著^[10]。与其它因素相比,桩身尺寸对后压浆效果的敏感程度最低^[11]。土质条件是影响后压浆效果的重要因素,总体上粗粒土中注浆效果好于细粒土,软土地区注浆效果不如非软土地区。不同土层中后压浆灌注桩单桩承载力增幅由低到高的次序为淤泥质土、黏土、粉质黏土、粉土、粉细砂、中砂、粗砂、卵砾石。

1.2 施工因素

主要包括施工方法、浆液水灰比、注浆量、注浆压力等,对单桩承载力具有决定性影响。鉴于后压浆工艺特点与应用差异,不同工程应根据设计要求及类似工程经验,通过试桩试注浆来选择有效施工方法,再结合试验结果进行适当调整。采用桩端后注浆方式,单桩承载力的增加主要来自于桩端阻力和桩端以上1/4桩长范围内侧阻力的提高;采用桩

端桩侧联合注浆,桩侧注浆点多、注浆量大,承载力增幅高^[12]。通常联合注浆的顺序是先桩侧后桩端,桩侧注浆宜自上而下逐段进行。

浆液水灰比决定了浆液的流动性,是影响后压浆效果的重要因素。水灰比过大(极端情况为高压注清水)不仅破坏土的原状结构,软化土的强度,而且破坏面广,影响范围大,会起到降低承载力的反作用。而过小水灰比会使浆液流动性变差,可注性降低,同样影响注浆效果,而且容易堵塞注浆通道,引起注浆压力攀升。而注浆量是后压浆设计和施工的主控因素,应根据桩端桩侧土层性质、桩身尺寸、承载力增幅、施工技术方法、桩端沉渣控制程度等综合确定。规范JGJ 94—2008按式(1)估算理论注浆量^[6]:

$$G_c = \alpha_p d + \alpha_s n d \quad (1)$$

式中: α_p 、 α_s ——分别为桩端和桩侧注浆量经验系数, $\alpha_p = 1.5 \sim 1.8$, $\alpha_s = 0.5 \sim 0.7$,对于卵砾石、中粗砂取较高值; n ——桩侧注浆断面数; d ——桩径,m; G_c ——注浆量,以水泥质量计,t。

注浆压力则与土层埋深、渗透性能、注浆顺序、注浆节奏等因素有关。较高的注浆压力能使被加固体中的细微孔隙张大,有助于提高可注性,还会克服土体阻力,产生劈裂效应,对土体起到加筋作用,亦能挤出浆液中多余的水分,有助于提升结合体的强度,但过高的注浆压力可能使桩端注浆时桩上抬悬空,桩侧注浆时跑冒浆现象严重。桩端注浆控制压力可以按式(2)估算^[13]:

$$P_p \leq \gamma_p L + \frac{4}{d} \sum \xi_i q_{si} l_i \quad (2)$$

式中: P_p ——桩端注浆压力控制值,kPa; γ_p ——桩身钢筋混凝土平均容重, kN/m^3 ; L ——桩长,m; d ——桩径,m; ξ_i ——桩侧第*i*层土的抗拔系数,砂土取0.5~0.7,黏性土或粉土取0.7~0.8(桩的长径比<20时取小值); q_{si} ——桩侧第*i*层土的侧摩阻力标准值,kPa; l_i 为桩侧第*i*层土的厚度,m。

桩侧压浆的注浆压力一般较低,因注浆点位深度不同,注浆压力也不一样,理论上注浆压力应大于注浆点处的土层压力,才能起到克服阻力实现加固泥皮和桩侧土的作用,即:

$$P_s > \sum \gamma_i l_i \quad (3)$$

式中: P_s ——桩侧注浆压力,kPa; γ_i ——桩侧各层土的容重, kN/m^3 ,地下水位以下取饱和容重。注浆压

力的控制以不造成桩顶大量跑冒浆为准。

1.3 控制因素

主要指对灌注桩成孔成桩与后压浆施工整个过程的监督管控,全面的管控还应包括合理的施工费用与正当的工期要求。充分竞争的市场环境下,一味追求低价和工期的结果,只能是牺牲质量、简化程序,透支安全储备,如果管控不严,必然难以实现理想的施工效果。

2 综合估算法简介

在实际工程中,施工因素与控制因素影响客观条件的发挥程度,达到理想压浆效果会受客观条件限制,达不到效果则多为人为因素影响。假设后压浆施工前的单桩承载力依据勘察资料计算,结果是准确可靠的,那么依据大量工程实践经验的总结,压浆后的单桩承载力可按式(4)估算^[14]:

$$Q_u = (1 + \gamma) Q_{uk} = (1 + \lambda\beta) (u \sum q_{s,k} l_i + q_{pk} A_p) \quad (4)$$

式中: γ ——承载力增幅; λ ——包含施工与控制因素的综合影响因子,反映了客观条件的发挥程度; β ——承载力增强系数,反映了客观条件对承载力提升的制约程度; Q_{uk} ——压浆前的单桩竖向抗压极限承载力标准值,kN;其他参数见规范JGJ 94—2008式(5.3.10)。

2.1 承载力增幅 γ

许多工程采用试桩试注浆,目的正是为确定具体工况下的合理 γ 值,在工程桩施工时保持同一工艺方法,即可满足单桩承载力要求。这是非常科学的做法,把复杂问题综合到一个承载力增幅上,当前大量关于后压浆提高承载力的研究也是对此展开的。但在实际应用中,往往存在以下情况导致工程桩的承载力增幅与试桩试注浆时明显不同:

(1)地层情况复杂,土的物理力学性质差异大,试桩试注浆不具代表性。

(2)工程桩的桩身尺寸、持力层情况或者承载力要求等与试桩发生变化。

(3)工程桩施工时变换施工单位或监理单位(非个别现象)。

(4)重视程度不同:试桩时各方重视,施工单位认真对待;工程桩时管控放松,施工人员思想懈怠甚至偷懒耍滑。

(5)运作方式不同:试桩试注浆在工程前期进

行,往往由建设单位直接委托,价格合理,施工方比较积极;工程桩则多包含在总承包工程中,或者经过转包施工,价格较低,施工积极因素少。

此时若仍采用与试桩试注浆相同的承载力增幅,或者对未进行试桩试注浆的工程沿用其它相近土质条件的试验结果,往往会出现承载力不及预期甚至严重不足的情况。因此在估算单桩承载力时,除了考虑桩身尺寸、土层性质等客观因素外,不能忽略施工因素与控制因素的影响。

2.2 承载力增强系数 β

通过对大量工程案例的整理分析,当采用桩端注浆方式时,根据桩端不同土质情况,承载力增强系数按建议取值(略)。采用桩端桩侧联合注浆时,按式(5)计算承载力增强系数:

$$\beta = \left(1 + \frac{G_s}{G_q} \right) \beta_q \quad (5)$$

式中: β_q ——桩端承载力增强系数, G_s 、 G_q ——分别为桩侧和桩端实际注浆量,若无法获得实际注浆量时,可以按式(1)估算,即 $G_s = \alpha_s n d$, $G_q = \alpha_p d$ 。

2.3 综合影响因子 λ

考虑到后压浆工程的施工效果与过程管控密切相关,首先对后压浆工程进行分类(见表1),然后综合各施工因素影响,依据注浆量、注浆压力等,按建议取值(略)。

当无施工记录,或者注浆参数明显不准确时, λ 可按表1简易取值。注浆参数失真意味着施工与控

表1 后压浆工程类别划分

Table 1 Classification of post-grouting engineering categories

工程类别	情况描述	λ 简易取值
I类	严格管控、认真盯防;施工队伍的施工能力强,技术水平高,经验丰富	0.8~1.0
II类	管控较严,盯防一般;施工队伍的施工能力与技术水平一般,有经验	0.4~0.8
III类	无人管控,施工靠自觉;施工队伍的施工能力与技术水平不高,经验少	0.0~0.4

注:(1)施工队伍指实施具体施工作业队伍,而非总包单位;施工能力、经验和技术水平包含发现并改正设计不合理因素、改善技术方法、异常情况处理等。(2)类别划分按自下而上(先低后高)顺序,当过程管控与施工情况分属两个相邻类别时,以过程管控因素划分为主;当过程管控与施工情况相差两个类别时,按中间类别划分。(3)市场低价竞争,正常施工处于微利或不赢利状态的,划分的类别再降低一级。

制因素影响了客观条件的发挥,必然带来单桩承载力的差异,除应对个别桩进行必要的静载试验外,还应对大部分工程桩的单桩承载力进行验算,降低整体承载力要求。

正常情况下,承载力增强系数按建议取值是安全可靠的,在实际工程中可根据试注浆情况与静载试验结果进行调整。仅当工程桩与试桩试注浆时的桩身尺寸、承载力要求、地层土质情况、施工单位、技术方法等均保持一致,且施工过程严格管控时,试桩试注浆确定的承载力增幅方可用于工程桩。如果客观条件未变,为了考虑施工与控制因素的影响,可以根据试桩试注浆试验结果,按式(4)推算承载力增强系数 $\beta = Q_u/Q_{uk} - 1$ (试桩可 $\lambda=1$),再按上述方法确定综合影响因子 λ ,来估算工程桩的单桩承载力。

按以上方法计算压浆后的单桩承载力简称为综合估算法,适用条件为:(1)软土地区,勘察资料详实准确;(2)成孔成桩质量有保证,单桩承载力不因此受影响;(3)浆液水灰比正常合理,不存在高压注清水或稀浆情况。

3 工程实例验证

某滨海项目采用桩端桩侧联合注浆,桩侧注浆位置分别在桩顶以下10、20 m处,桩端注浆管数量两根,单桩竖向抗压极限承载力标准值6900 kN。静载试验桩数量5根,注浆施工记录见表2,设计注浆量为2.8 t。静载试验前采用低应变法对各试验桩进行完整性检测,除发现S4桩与其它桩相比,桩底同相反射非常清晰(图1)外,其他未见异常,试桩抗压静载试验结果见表3。根据设计要求,静载试验桩均加长至地表,考虑送桩段的侧摩阻力影响,试验最大加载值为7400 kN。

表2 试桩注浆施工记录

Table 2 Grouting construction record for test piles

桩号	注浆管安设深度/m	浆液水灰比	冲破压力/MPa	终止压力/MPa	水泥用量/t	注浆流量/(L·min ⁻¹)
S1	35.01	0.55	2.9	2.7	3.0	75
S2	35.23	0.55	3.5	2.5	2.8	75
S3	34.99	0.55	3.6	2.7	2.8	75
S4	35.28	0.55	3.2	2.5	2.9	75
S5	35.21	0.55	4.0	2.5	3.0	75

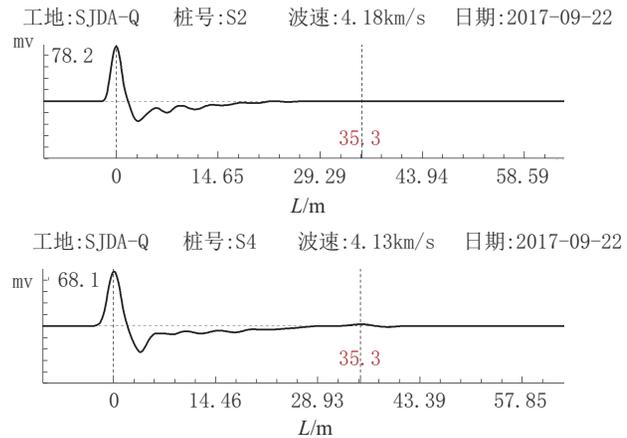


图1 试桩静载试验前低应变测试曲线

Fig.1 Low strain curve before static load test

表3 试桩抗压静载试验结果统计

Table 3 Compressive static load test results of testing piles

试桩桩号	成桩至桩长/m	最大试桩注间隔/d	最大试验荷载/kN	最终沉降量/mm	单桩抗压极限承载力/kN	桩端至粉砂层距离/m
S1	35.3	25	7400	54.35	6660	0.3
S2	35.3	5	6660	47.58	5920	0.6
S3	35.3	6	7400	29.34	<7400	0.0
S4	35.3	11	①4440 ②5920	60.91 62.87	3700 4440	1.0
S5	35.2	10	7400	30.71	<7400	进入0.3

根据静载试验结果,60%试验桩的承载力不满足设计要求,S4桩的极限承载力只有3700 kN,而施工记录除无法分清桩侧、桩端注浆量外并无异常。经过甲方、监理和设计三方研究,为进一步摸清情况,在3根不合格桩附近进行补充勘察,30 d后对S4桩再做静载试验,在邻近S4桩的三个承台各施工1根相同类型试桩,检测手段包括单桩静载试验、桩身内力测试、成孔检测与声波透射法检测。

根据补充勘察数据,粉砂持力层顶板起伏较大,桩底到持力层距离各有不同(参见表3),按不计端承计算S4桩的极限承载力为4370 kN,而两次静载试验结果分别为3700、4440 kN(间隔40 d)。因此可以判定,S4桩的沉渣较厚,端阻力基本丧失,注浆未起到应有作用。

本工程前期有试桩试注浆试验,但桩型参数、持力层情况、承载力要求等均发生变化。桩端承载力增强系数 β_q 按一般情况取值,再按式(5)计算承

承载力增强系数 β ,其中桩侧与桩端注浆量按式(1)估算, $G_s=0.9T, G_q=1.3T$,桩侧桩端注浆量比为0.69。根据勘察资料,计算各试桩注浆前的单桩抗压极限承载力标准值 Q_{uk} ,再按式(4)计算 $\lambda=1$ 时的单桩极限承载力值,结果见表4。对各桩极限承载力实测值与计算值进行比较,桩端到达或进入粉砂

持力层的S3、S5桩与距离持力层较近的S1桩,后压浆效果达到预期(尽管S1未满足设计要求),按式(4)反推综合影响因子 $\lambda < 1$;S2桩端距持力层顶板0.6 m,后压浆效果未达预期,反推 $\lambda=0.8$;S4桩端距持力层顶板1.0 m,按式(4)反推 $\lambda=0$ (注浆无效)。

表4 试桩单桩承载力计算过程及结果比较

Table 4 Estimation process and results comparison of single pile bearing capacity of testing piles

桩号	桩长/m	桩端土层性质	桩端至粉砂持力层顶板距/m	无后压浆单桩极限承载力 Q_{uk}/kN	桩端承载力增强系数 β_q	总承载力增强系数 β	$\lambda=1$ 时单桩极限承载力/kN	实测单桩极限承载力/kN	实测极限承载力对反推综合影响因子 λ	按式(4)反推综合影响因子 λ	λ 简易取值计算单桩极限承载力/kN	按桩基规范计算单桩极限承载力/kN
S1	35.3	③粉质黏土	0.3	4950	0.16	0.27	6287	6660	32.48	>1	5485	8115
S2	35.3	③粉质黏土	0.6	4850	0.16	0.27	6160	5920	28.40	0.8	5374	7952
S3	35.3	④粉砂	0.0	5090	0.30	0.51	7686	<7400	29.34	1	6128	8833
S4	35.3	③粉质黏土	1.0	4370	0.16	0.27	5550	4440	10.54	0	4842	7780
S5	35.2	④粉砂	-0.3	5050	0.30	0.51	7626	<7400	30.71	1	6080	8764

注:③粉质黏土可塑,含有机质、贝壳碎片,夹粉土薄层;④粉砂密实,含云母,夹粉土薄层。

综合本工程其它情况,桩基施工为某局低价中标,转包给个体队伍,目的是为后续工程总承包考虑。甲方人员无专业知识,试桩试注浆后更换了监理单位。现场管控虽然表面要求严,但盯防时紧时松,施工不稳定,记录不及时。按表1划分后压浆工程类别为Ⅱ类,考虑价格因素、过程管控与施工组合情况, λ 简易取值为0.4,各试桩按式(4)计算单桩极限承载力值详见表4。同时为便于分析比较,按JGJ 94—2008式(5.3.10)计算各桩极限承载力值亦列入表4。可以看出, λ 简易取值计算的单桩极限承载力总体上是安全可靠的,而按桩基规范计算数值与实际偏差较大。如果考虑到5根试桩均为事前知晓、特意施工至地表的静载试验桩,大部分工程桩情况很可能不如试桩,那么在估算工程桩的单桩极

限承载力时,还应降低 λ 取值,以用于设计承载力复核。本工程最终经设计单位复核后未补桩,只在调整建筑结构和增强整体刚度上作了改进。

经历5根试桩的静载试验后,S4桩邻近承台3根新增试桩的施工受到各方高度重视,注浆量与设计值之比 α 为1.39~1.54(注浆记录见表5),计算承载力增强系数 $\beta=0.32\sim 0.35$,各桩极限承载力估算值为6980~7120 kN(见表6),而静载试验结果均<7400 kN,按式(4)反算 $\lambda=1.58\sim 1.72$,表明超常规的后压浆施工与严格管控,突破了客观条件的限制使单桩承载力得到跃升。结合桩身内力测试结果,大剂量的高压注浆使端阻力和侧阻力显著提高,在第二桩侧注浆点至桩底间形成几乎连续的摩阻力高值区域(见图2)。

表5 新增试桩后注浆施工记录

Table 5 Post-grouting record of added test piles

桩号	注浆管安设深度/m	浆液水灰比	冲破压力/MPa	终止压力/MPa	水泥用量/t	注浆流量/(L·min ⁻¹)
SZ1	35.3	0.6	侧2.0、2.4,底2.5、2.1	侧4.0、4.0,底4.2、4.0	侧0.85、0.8,底1.15、1.1	75
SZ2	35.2	0.6	侧2.0、2.3,底2.5、2.7	侧4.1、4.2,底4.2、4.0	侧0.85、0.75,底1.15、1.15	75
SZ3	35.3	0.6	侧2.2、2.3,底2.5、2.6	侧4.0、4.1,底4.1、4.2	侧0.8、0.8,底1.15、1.55	75

通过本工程可以看出,施工因素与过程管控对承载力增幅的影响不容忽视。相同客观条件下,施

工与管控不利能够抑制客观条件的发挥,严格管控与卖力施工也可以超越客观条件限制,大幅提升承

表 6 新增试桩单桩承载力计算过程及结果比较

Table 6 Estimation process and results comparison of bearing capacity of added test piles

桩号	桩长/ m	桩端至粉砂 持力层顶板 距离/m	成桩至注浆 间隔时间/d	无后压浆单桩 极限承载力 Q_{uk}/kN	总承载力增 强系数 β	注浆量比 α	按式(4)计算 单桩极限承 载力/kN	按式(4)反推 综合影响因子 λ
SZ1	35.3	1.0	8	4770	0.35	1.39	7090	1.58(1.1 α)
SZ2	35.2	1.2	7	4740	0.34	1.39	6980	1.65(1.2 α)
SZ3	35.3	1.0	6	4770	0.32	1.54	7120	1.72(1.1 α)

注:桩端土层为粉质黏土,理论控制注浆压力为 7.0 MPa,桩端承载力增强系数 β_q 为 0.2,实测单桩极限承载力 ≤ 7400 。

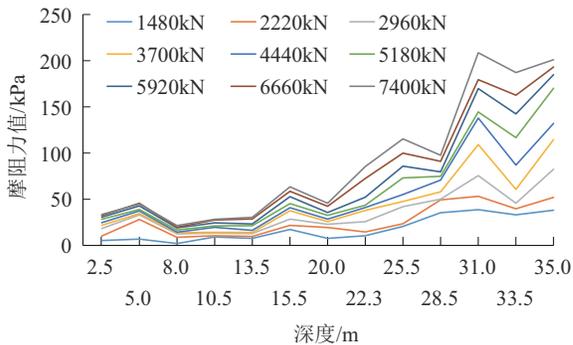


图 2 桩身内力测试结果——分级载荷下各层土
摩阻力分布

Fig.2 Pile internal force test results: Distribution of
friction resistance in each soil layer

载能力。正常情况下,工程设计还应以客观条件为基础,提出合理的承载力要求,不能指望施工单位以搞科研的方式超越客观限制,能够不影响客观条件发挥就相当不错了。

由于篇幅所限,不能列举更多工程实例和详细取值标准,图 3 为近期多项工程采用综合估算法计算单桩承载力值与静载试验结果比较情况,可以看出计算结果贴近实际。

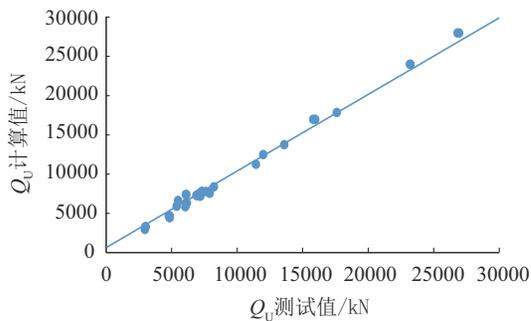


图 3 综合估算法单桩极限承载力计算值与实测值比较

Fig.3 The value of the ultimate bearing capacity of
a single pile using the comprehensive estimation
method vs. the actual measured value

4 结论

单桩承载力综合估算法是通过大量沿海软土地区工程实例的统计分析,经试验→调整→再试验→再调整反复比较验证的,具有以下特点:

(1)综合估算法属于工后单桩承载力估算方法,需要尽可能掌握工程项目的土质情况、设计参数、施工因素、控制因素等各方面的详细信息;

(2)计算结果多从小于实测值方向接近实测值,承载力越大安全可靠程度越高;

(3)使用规范公式对软土地区,尤其是存在施工问题时,计算的单桩承载力值误差较大,结果不安全,而综合估算法适用于软土地区大多数土层情况,结果可靠性不因土质变化而降低;

(4)综合估算法不仅可用于估算单桩承载力,也可判断注浆记录的准确性,甚至可以校验静载试验结果的可靠性。

采用综合估算法计算单桩承载力, β 与 λ 的取值至关重要,为尽量避免人为因素影响,应摸清各方面详细情况,按方法依次顺序选取。本估算法还需在更多工程应用中不断补充和完善,其计算结果的误差来源主要包括:

(1)勘察资料与实际的偏差,包括土层分布、性质、摩阻力值等;

(2)工程信息与施工情况掌握的全面程度, β 与 λ 取值的人为影响;

(3)注浆施工记录的准确程度,设计注浆量与注浆压力的合理性;

(4)方法本身的统计误差与不同土质条件下桩端桩侧后压浆作用的复杂程度。

灌注桩采用后压浆工艺提高单桩承载力是受多因素影响的复杂工程,必须以客观条件为基础,设计合理桩身尺寸、注浆方式与承载力增幅,经严格管控与规范化施工,才能达到满足承载力要求目的。

参考文献(References):

- [1] 许小俊. 钻孔灌注桩后注浆技术在高层住宅楼基础施工中的应用[J]. 工程技术研究, 2024, 9(11): 96-98.
XU Xiaojun. The application of bored pile post grouting technology in the foundation construction of high-rise residential building[J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9(11): 96-98.
- [2] 陈洪胜. 软土地区钻孔灌注桩后注浆技术在工程中的应用[J]. 安徽建筑, 2018, 24(5): 190-192.
CHEN Hongsheng. The application of post grouting technology for bored piles in soft soil areas in engineering[J]. Anhui Architecture, 2018, 24(5): 190-192.
- [3] 黄玉辉, 丁伟, 赵晓磊, 等. 后压浆技术在孟加拉国灌注桩施工中的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(5): 119-124.
HUANG Yuhui, DING Wei, ZHAO Xiaolei, et al. Application of the post grouting process in Bangladesh bored pile construction [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 119-124.
- [4] 胡朝彬, 宋冠樟, 片磊, 等. 灌注桩后注浆技术应用研究及承载力影响分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(7): 100-105.
HU Zhaobin, SONG Guanzhang, PIAN Lei, et al. Post grouting technology and its influence on the bearing capacity of bored piles [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7): 100-105.
- [5] 孙凤玲, 刘焕存, 刘涛. 武汉某摩擦型灌注桩后注浆单桩竖向承载力试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(5): 63-66, 70.
SUN Fengling, LIU Huancun, LIU Tao. Experimental study on vertical compressive bearing capacity of single pile with post grouting technology in Wuhan [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(5): 63-66, 70.
- [6] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [7] 焦文秀. 泥浆护壁成孔灌注桩后注浆技术正确应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(7): 87-89.
JIAO Wenxiu. Study on proper application of post-grouting technology for holing cast-in-place pile with slurry retaining [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(7): 87-89.
- [8] 张忠苗. 灌注桩后压浆技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
ZHANG Zhongmiao. Post Grouting Technology and Engineering Application of Cast-in-place Piles [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [9] 胡云鑫, 张时斌, 袁江川. 后压浆技术国内研究现状分析[J]. 北方交通, 2018(8): 22-25.
HU Yunxin, ZHANG Shibin, YUAN Jiangchuan. Analysis on the research status of post-grouting technology in China [J]. Northern Communications, 2018(8): 22-25.
- [10] 张忠苗, 邹健, 刘俊伟, 等. 桩端后注浆浆液上返高度的理论研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2535-2540.
ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian, LIU Junwei, et al. Theoretical study of climbing height of grout in pile-bottom base grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2535-2540.
- [11] 徐松, 徐学连, 邵权, 等. 改进的敏感性分析方法在桩端注浆效果评价中的应用[J]. 施工技术, 2015, 44(10): 127-130.
XU Song, XU Xuelian, SHAO Quan, et al. Application of improved sensitivity analysis in evaluation of pile-end grouting [J]. Construction Technology, 2015, 44(10): 127-130.
- [12] 周杰刚, 周洋, 罗亚明, 等. 灌注桩复式注浆技术对单桩承载力的影响[J]. 建筑施工, 2018, 40(6): 857-858, 870.
ZHOU Jiegang, ZHOU Yang, LUO Yaming, et al. Effect of dual grouting technology for bored pile on single pile bearing capacity [J]. Building Construction, 2018, 40(6): 857-858, 870.
- [13] 吴志敏, 徐爱民, 吴庆勇. 桩端后压浆施工技术及应用[J]. 低温建筑技术, 2006(6): 115-117.
WU Zhimin, XU Aimin, WU Qingyong. Construction technology and application of behind grouting way for cast-in-place piles [J]. Low Temperature Building Technology, 2006(6): 115-117.
- [14] 贺占海, 胡朝彬, 高承成, 等. 软土地区后注浆灌注桩单桩承载力估算方法: CN202011217092.0 [P]. 2020-11-05.
HE Zhanhai, HU Chaobin, GAO Chengcheng, et al. Estimation method for single pile bearing capacity of post grouting injection pile in soft soil areas: CN202011217092.0 [P]. 2020-11-05.

(编辑 王文)