

上海地区桩基侧摩阻力与端阻力取值的研究

王卫东¹, 吴江斌¹, 王向军¹, 赵春风², 王建华³

(1. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

摘要:上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08—11—1999)中预制桩、灌注桩极限桩侧摩阻力标准值与极限端阻力标准值的取值完全引用上海89版规范。但自20世纪90年代以来,桩基工程在上海地区得到了迅猛的发展,工程实践中桩基荷载试验值与99版规范计算值差异较大的情况时有发生,因此结合近年来的工程实测资料对99版规范桩基承载力取值进行研究具有重要的工程意义。为此收集了17个工程共计50根桩身大部分位于淤泥质土中且桩端支承于第⑤层相对较软土层的预制桩和22个工程共计66根分别以⑦,⑧,和⑨3层土为持力层的钻孔灌注桩的实测资料,对99版规范桩基承载力取值进行了研究。首先,采用统计分析和有限元数值分析两种方法对收集样本进行了分析,以综合确定预制桩和灌注桩的桩端阻力和桩侧摩阻力取值。其次,按照调整后的承载力取值,对各统计样本进行了回代计算,通过比较表明依据调整后的承载力取值的计算结果具有较高的保证率。

关键词: 桩侧摩阻力; 桩端阻力; 统计分析; 数值分析; 回代计算

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-0024-08

作者简介: 王卫东(1969-),男,辽宁人,工学博士,教授级高级工程师,一级注册结构工程师,从事高层建筑地基基础、地下工程、深基坑工程的设计与研究。E-mail: weidong_wang@ecadi.com。

Values of side and tip resistances of piles in Shanghai area

WANG Wei-dong¹, WU Jiang-bin¹, WANG Xiang-jun¹, ZHAO Chun-feng², WANG Jian-hua³

(1. East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The values of side and tip resistances of precast and cast-in-place piles of Shanghai 1999 foundation design code (Code-99) completely follow the values of Code-89. However, since the 1990s, pile engineering has had a rapid development in Shanghai area. Many practical projects show that the measured results of the ultimate bearing capacity are different from the computed results by Code-99. So, it is necessary and meaningful to study the values of the side and tip resistances of piles in Shanghai area based on the measured samples. The collected samples contain 50 precast piles from 17 projects, which are mostly located in soft soil and take the layer ⑤ as the bearing stratum, and 66 cast-in-place piles from 22 projects, which take the layers ⑦, ⑧ and ⑨ as the bearing strata. Firstly, the method of statistical analysis and the finite element method are used to determine the values of side and tip resistances. Secondly, according to the determined values, all samples are back substituted, and the comparisons between the results of the back substitution and the measured results show that the amendment values are reasonable.

Key words: side resistance; tip resistance; statistical analysis; FEM; back substitution

0 引言

桩基承载力的计算是一个古老而常新的课题,长期以来一直是学术界研究的热点,也是工程设计人员关注的焦点之一。随着研究手段的越来越多样化,如,室内模型试验、现场足尺荷载试验、有限元数值模拟分析、离心机模型试验等各类研究方法的使用,当前

桩基理论与工程实践均取得了较大的发展^[1-2]。桩基承载力计算方法也是多种多样,为认识桩基的承载机理提供了翔实的理论基础。但就广大工程设计人员来说,更希望使用一种既具有相当可靠度而又简单明了的计算方法。当前诸多规范^[3-4]所推荐的经验参数法即是这

样的一种方法, 其为根据土层名称、埋藏深度及性质, 查表得到桩周土的极限摩阻力和桩端土的极限端阻力 (下文简称承载力表), 以此由地基土支承力估算单桩承载力的方法。该方法概念清晰, 计算公式简便, 参数物理意义明确, 便于工程师理解和应用, 为各类桩基工程的单桩承载力估算带来极大的方便, 具有较广的应用范围。经验参数法的关键是需通过大量现场载荷试验资料得到具有一定可靠性和较大适用性的各桩型极限侧摩阻力和极限端阻力。但由于我国不同地区的土层条件差异较大, 各地区应当长期积累本地区的各类桩基实测资料, 以不断完善本地区的桩基承载力取值, 使桩基承载力计算结果具有更高的准确度和保证率。

上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08—11—1999) 中承载力表取值完全引用上海 89 版规范。而上海 89 版规范中预制桩承载力表取值则是根据 88 根预制桩的极限载荷试验资料采用统计法求得。上海 89 版规范灌注桩的极限侧摩阻力与端阻力主要以上海 75 版规范为基础并进行了校核与修订, 方法如下: 89 版通过 17 根灌注桩试桩资料, 根据 75 版规范列表的灌注桩极限侧摩阻力与端阻力的上限值、下限值分别计算灌注桩的极限承载力并与试验值进行校核验算, 以此对 75 版规范中灌注桩极限侧摩阻力与端阻力进行调整。而 75 版规范中灌注桩极限侧摩阻力与端阻力则主要根据预制桩的统计数据进行一定的折减得到。

上海 89 版规范颁布近 20 a 来, 桩基工程在上海地区得到了迅猛的发展与应用, 也积累了众多各类桩型的实测资料, 对上海软土地区桩基的承载特性也有了更深入的认识, 而上海 99 版规范承载力表的使用也逐步显现出一些不合时宜的地方, 因此对上海 99 版规范中桩基承载力取值进行研究显得非常必要, 且当前也具备了对预制桩和灌注桩侧摩阻力和端阻力取值进行修订的基础和条件。

1 技术路线

21 世纪以来, 上海进入了大规模城市地下空间开发的新阶段, 在地下工程领域积累了较多工程经验也面临一些新的技术问题, 各方都有对上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08—11—1999) 进行完善的需求和愿望, 为此上海地基规范 2010 版修订组开展了 30 多个专题研究, 调查总结了近 10 a 来上海地区工程实践经验和科研成果, 涵盖了建筑、市政、港口、水利工程等的基础设计。其中对上海 99 版规范中桩侧摩阻力和桩端阻力取值的研究是 2010 版上海地基规范修订的主要内容之一。

本次规范修订对预制桩、灌注桩侧摩阻力和端阻

力取值进行研究所采用的技术路线如下: 首先, 尽可能多的收集上海地区预制桩与灌注桩的工程实测案例, 并且确保各基桩的土层及桩型参数等信息较为完整。其次, 将收集到的预制桩、灌注桩各工程案例作为统计样本, 采用与 c 、 φ 值强度指标相关联的多参数统计分析法, 建立极限侧摩阻力与抗剪强度指标的关系, 以确定各土层的摩阻力与端阻力取值。然后, 以工程案例实测数据为目标, 采用有限元数值分析方法, 进行了单桩受荷的模拟分析, 得到各土层的摩阻力与端阻力大小, 以校核统计分析结果取值。最后, 以两种分析方法的结果为基础综合确定预制桩和灌注桩的桩端阻力和桩侧摩阻力取值, 按照最终的承载力取值, 对各统计样本进行了回代计算, 得到了修订后的规范承载力取值的保证率。

2 预制桩

2.1 存在问题

近年来众多学者及工程人员等通过比较发现上海地区一些以第⑤层黏性土为持力层的桩基工程 (图 1) 的承载力实测值与规范计算值存在较大差异。如, 季沧江^[5]列举了一些桩基工程, 通过比较理论计算承载力极限值和实测极限承载力, 发现理论值和实测值的比值在 0.4~0.9, 并建议按照 99 版规范要求, 对于桩身大部分位于淤泥质土中且支承于第⑤层黏性土的预制桩, 单桩竖向承载力当采用地质勘探资料计算时, 宜取下限值并做适当折减, 折减系数约为 0.75~0.85。楼晓明等^[6]对比 5 个工程 14 根不同桩长的试桩成果, 发现同一场地的试桩, 因为桩长、持力层不同, 导致承载力有较大差异。并得出结论: 对于桩身大部分位于淤泥质土中且桩端支承于第⑤层土的预制桩, 实际单桩竖向承载力明显低于规范估算值, 其主要原因不是时间效应; 而是由动、静摩阻力的差异引起。

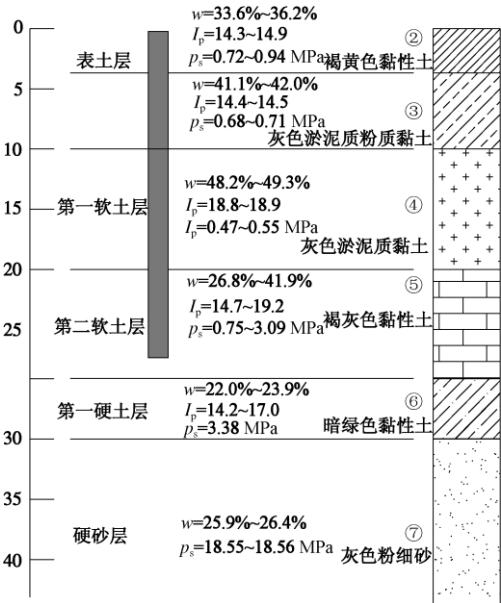


图 1 预制桩典型剖面

Fig. 1 Typical profile of precast piles in Shanghai area

虽然上海 99 版规范中预制桩承载力取值完全沿用上海 89 版规范的承载力表, 但 99 版规范修订时根据工程实践经验, 针对桩身大部分位于淤泥质土中且桩端支承于第⑤层土的预制桩作了一条补充说明, 即此类桩单桩承载力宜通过静载荷试验确定, 当采用承载力表数据计算时, 宜取表中下限值并做适当折减, 但没有给出具体的折减系数, 本次规范修订拟对第⑤层土的侧摩阻力及端阻力取值进行明确。

2.2 载荷试验资料样本

根据 2010 版规范修订参加单位提供的试桩资料汇总, 得到 88 个工程的近 295 预制桩试桩资料 (其中管桩 24 个工程共 94 根, 方桩 64 个工程共 201 根)。经各方分析和讨论, 为求统计信息的完善和准确, 最终采用 17 个工程共计 50 根试桩单桩极限承载力试验资料作为本次规范修订的统计样本。对于同一场地, 相同尺寸的多个试桩的不同承载力, 取平均值作为一个统计样本。所采用的试桩截面尺寸范围为 200~400 mm, 桩长范围为 12~25 m, 持力层主要是⑤₁和⑤₃层。关于 50 根桩的详细信息可参见文献[7]。

2.3 统计分析方法

基于统计样本, 本次规范修订采用了与 c, φ 值强度指标相关联的多参数统计分析法, 建立各样本极限侧摩阻力与抗剪强度指标的关系^[8], 见式 (1), 以关系公式中各土层相关系数作为未知数进行统计分析, 采用最小二乘法进行方程求解以得到各土层的极限摩阻力大小。

$$f_s = b \cdot c + F \sigma_i^a \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

式中 c, φ 为固结快剪指标; σ_i 为第 i 层土的平均有效上覆压力; a, b 为经验系数, 由试算确定; F_i 为第 i 层桩侧极限摩阻力标准值的经验系数。

桩侧摩阻力的统计分析涉及到桩端阻力的扣除问题, 由于缺乏实测资料, 在统计分析中采用了如下 3 种方法来计算并扣除极限端阻力, 以了解不同极限端阻力的扣除方法下极限侧摩阻力的统计分析结果之间的差异: ①方法 1, 端阻力取上海 99 版规范表列预制桩极限端阻力标准值的下限值; ②方法 2, 端阻力取上述规范极限端阻力下限值的 0.8 倍; ③方法 3, 端阻力取上述规范极限端阻力下限值的 0.5 倍。3 种端阻力扣除方法下各土层极限摩阻力的统计分析结果与规范下限值的比较如表 1 示。

从表 1 可以看出, 方法 1、方法 2 统计结果更为接近, 采用方法 1、方法 2 确定桩端阻力时, 建议第④层淤泥质黏土, 第⑤或⑤₁、⑤₃层黏性土按 99 版规范表列预制桩极限侧摩阻力下限打 9 折取值, 其它土

层取下限值。采用方法 3 确定桩端阻力时, 建议各土层极限侧摩阻力取 99 版规范表列预制桩极限侧摩阻力下限。按上述建议对样本进行计算, 并将计算值与实测值进行比较, 通过比较表明方法 2 和方法 3 的计算值保证率相同 (计算值小于实测值的样本比例), 皆为 76.5%, 且比方法 1 的保证率更高 (64.5%)。

表 1 预制桩各土层摩阻力平均值的统计分析结果

Table 1 Results of statistical analysis of soil friction of precast piles

土层 编号	土层名称	桩侧阻力/kPa			
		方法 1	方法 2	方法 3	99 版规范 下限
② ₃	灰色砂质粉土	22.5	29.5	30.5	30
③ ₁	灰色淤泥质粉质黏土	13.7	14.9	16.5	15
③ ₂	灰色砂质粉土、粉砂	17.9	20.4	21.4	30
④	灰色淤泥质黏土	15.7	16.0	18.1	15
⑤ ₁	灰色黏性土	44.4	40.4	41.6	45

2.4 数值分析方法

近年来有限元数值分析方法在工程界得到了广泛的应用, 并且随着本构模型的不断改进, 其计算结果也得到越来越广泛的认可。本次规范修订中, 也设置了专题研究, 基于收集到的桩基静载荷试验样本, 采用数值分析方法对试验样本进行模拟。

建立桩的轴对称有限元模型, 土体采用理想弹塑性本构、桩土接触界面采用理想弹塑性库仑摩擦模型。从统计分析的样本中选取了 7 个工程的 22 根桩进行模拟分析。数值分析先以基本计算参数进行分析, 得到桩顶荷载-位移 ($Q-s$) 曲线, 将其与载荷试验实测 $Q-s$ 曲线进行比较。以试验得到的 $Q-s$ 曲线为拟合目标, 通过对土体和桩土界面相关的计算参数的调整, 使得计算结果与试验 $Q-s$ 曲线拟合接近, 在此基础上分析桩身轴力、侧摩阻力及端阻力。

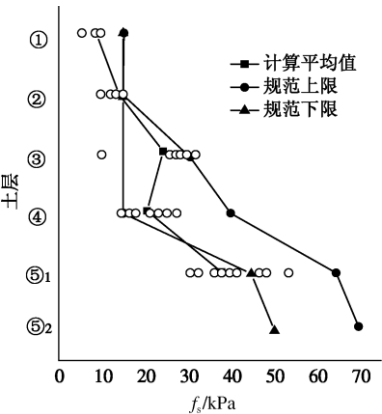


图 2 桩侧摩阻力 FEM 计算结果与规范建议限值的比较

Fig. 2 Comparison of side friction between FEM results and values suggested by code

数值分析法计算得到的样本的端阻比为 5.68%~

19.08%，约为原规范极限端阻力标准值下限值的 50%~60%。各土层侧摩阻力的数值分析计算结果与上海 99 版规范上下限值之间的关系如图 2 所示。

图 2 中可以看出，数值分析得到的各样本桩侧摩阻力的结果表明，第②、③层土的极限侧摩阻力平均值基本在规范限值范围内且略高于极限侧摩阻力的下限值，第④、⑤₁层土的极限侧摩阻力平均值接近甚至小于原规范极限侧摩阻力的下限值。

综上，数值分析表明对于预制桩的承载力估算，当桩侧摩阻力取上海 99 版规范下限值、桩端阻力取下限值的 0.5 倍进行计算时，计算值与实测值较接近，这与上文预制桩的统计分析方法 3 的结果也是一致的。

2.5 预制桩侧摩阻力与端阻力研究小结

通过上文统计分析和数值分析方法表明，对于桩身大部分位于淤泥质土中且桩端支承于第⑤层相对较软土层的预制桩，当采用上海 99 版规范表列数据估算承载力时，极限摩阻力取表列下限值，极限端阻力取表列下限值的 0.5 倍，其承载力计算值与实测值是较接近的。

上海 99 版规范中第⑤₁、⑤₃层土极限端阻力标准值取值分别为 1500~2500 kPa 和 1500~3000 kPa，与第⑥层黏性土的端阻力取值相当。但结合目前对土层极限端阻力与静力触探比贯入阻力 P_s 值关系的认识，第⑤层土的 P_s 普遍低于第⑥层土的 P_s 值，说明原规范第⑤层土极限端阻力取值偏高，且通过前文统计分析和数值分析表明需对第⑤层极限端阻力进行打折后其计算结果较合理，因此本次规范修订降低了第⑤₁、⑤₃层极限端阻力标准值取值，分别调整为 800~1200 kPa 和 1200~2000 kPa。

在对原规范表中第⑤层土的预制桩极端阻力标准值取值进行降低调整后，对于桩身大部分位于淤泥质土中且桩端支承于第⑤层相对较软土层的预制桩，当采用表列数据估算单桩承载力时，桩侧极限摩阻力与桩端极限端阻力取表列下限值。根据该取值方法对载荷试验样本进行了回代，计算结果如图 3，4 所示。

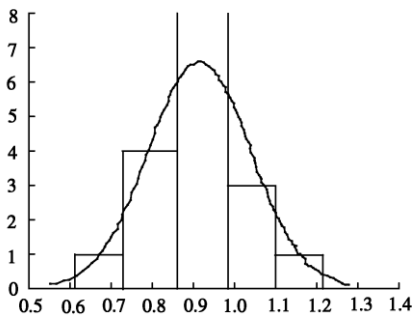


图 3 计算值/实测值结果直方图

Fig. 3 Histogram of computed results versus measured values

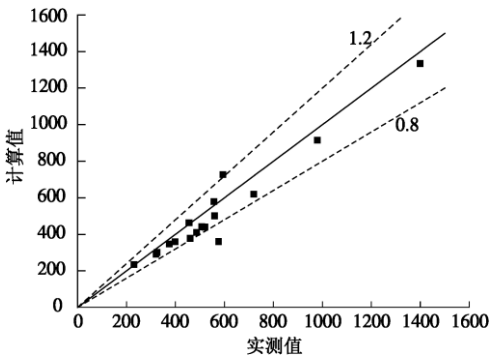


图 4 计算值与实测值比较散点图

Fig. 4 Scatter diagram of computed results and measured results

从图 3 可以看出，回代计算结果与实测值的比值呈正态分布，计算值与实测值的比值接近于 1.0 的样本约占总样本数的 50%。图 4 所示为 17 个样本回代计算值的分布区间，图上可以看出误差小于±20%的比例样本比例为 88.2%，其承载力计算结果的保证率为 76.5%。

3 钻孔灌注桩

3.1 存在问题

钻孔灌注桩由于其桩径和桩长选择限制性较小，易于穿透预制桩难以穿过的地层，且无挤土效应、无振动、低噪音等特点，尤其适用于周边环境复杂的市区地段，受到了上海建筑界的普遍青睐。当前上海地区灌注桩持力层以第⑦层粉细砂和第⑨₁层粉细砂夹黏性土层为主，如图 5 所示。

随着对灌注桩承载特性认识的越来越深入，也遇到了一些载荷试验结果与规范计算结果相差较大的案例。楼晓明等^[9]分析了钻孔灌注桩承载力异常的原因，认为，施工机具、成孔时间、护壁清孔方式、桩身结构完整性、地下障碍物及重复加载方式均对单桩承载力有重要影响。曾健等^[10]结合静载试验，根据桩土之间的相互作用，对钻孔灌注桩的极限承载力展开研究，给出了临界深度的计算公式，提出了钻孔灌注桩的极限承载力计算公式。程晔等^[11]对超长大直径钻孔灌注桩的承载力计算进行了研究，在对比分析各规范计算方法的基础上，结合几个重大工程实例的测试结果进行对照，证实目前规范计算方法不尽合理。

近年来钻孔灌注桩已取代预制桩成为高层建筑的首选桩型，且在桩径和桩长上都有较大发展，同时也积累了较多的工程经验与实测资料。上海 99 版规范中灌注桩的承载力取值并没有直接来源于灌注桩的实测资料，取值依据不是很充分，因而结合灌注桩的应用现状，收集不同持力层、桩长和桩径的灌注桩载荷试

验资料,对原规范灌注桩极限摩阻力与端阻力的取值进行调整,以给出更明确、合理的钻孔灌注桩的承载力参数具有十分重要的工程实际意义。

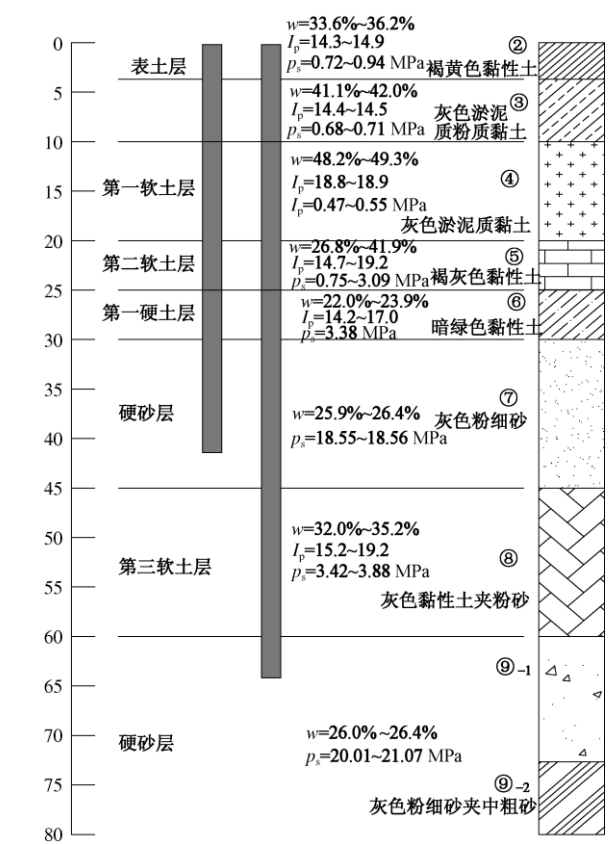


图 5 灌注桩典型剖面

Fig. 5 Typical profile of cast-in-place piles in Shanghai area

3.2 载荷试验资料样本

通过取舍共收集到土层及桩型参数信息较完全的 22 个工程共计 66 根钻孔灌注桩试桩的单桩极限载荷试验资料作为统计样本。样本桩径范围为 550~850 mm, 桩长范围为 30~78 m, 主要持力层为第⑦、⑧和⑨层。各样本实例详见文献[7]。

3.3 统计分析方法

统计分析仍采用与 c, φ 值强度指标相关联的多参数统计分析法,建立极限侧摩阻力标准值与抗剪强度指标的关系,以关系公式中各土层相关系数作为未知数进行统计分析。

在桩端阻力的扣除时,选用了有桩身轴力量测的 14 根试桩的实测端阻比(极限端阻力标准值与极限承载力标准值的比值),与黄强^[12]推算的端阻比以及按上海 99 版规范极限端阻力标准值中值、极限端阻力标准值中值的一半计算得到的端阻比进行了比较。分析表明:黄强法结果以及按极限端阻力标准值中值的一半确定端阻力的计算结果与实测值较接近,且离散小,因此,在统计分析时按极限端阻力标准值中值的一半确定端阻力,来分离出总极限侧摩阻力标准值的数值,

如表 2 所示。

表 2 灌注桩各土层摩阻力平均值的统计计算结果

Table 2 Results of statistical analysis of soil friction of precast

piles					
土层	经过该层统计样本数量	埋藏深度	f_s 均值	上海 99 规范 f_s 范围	
②2	6	2.0~12.6	24	15	30
②3	3	0.0~19.8	21	25	40
③1	13	3.8~9.1	37	15	25
③2	3	0.0~15.3	46	25	35
④	22	9.3~18.4	40	15	30
⑤1	22	16.4~27.7	55	35	45
⑤2	8	17.5~30.2	73	40	50
⑤3	5	22.0~52.0	77	40	50
⑥	19	25.6~32.6	30	50	60
⑦1	20	29.0~43.9	69	60	80
⑦2	10	35.0~56.0	68	70	90
⑧1	6	39.5~71.9	72	50	60
⑧2	2	54.0~72.0	70	55	70
⑨	3.0	66.5~78.7	63	70	100

从上表可以看出,根据统计分析结果,浅层软黏土(如,第③、④、⑤层土)的侧摩阻力统计值接近甚至超过上海 99 版规范上限;而深层砂性土(如,第⑦、⑨层土)的侧摩阻力统计值接近甚至低于规范下限。

3.4 数值分析方法

数值分析方法仍采用了与预制桩相同的计算模型和分析方法,选取了统计样本中 15 个工程的 41 根试桩(其中有轴力测试的桩 9 根)作为模拟对象。

数值分析各试桩承载力计算值与实测值的比较如图 6 所示,

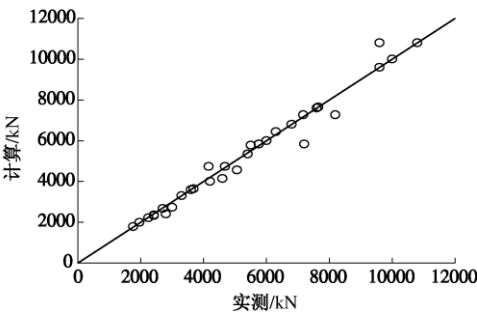


图 6 FEM 计算值与实测值比较图

Fig. 6 Comparison of ultimate bearing capacity of computed results versus measured values

从图 6 可以看出,有限元数值模拟计算结果与实测值是比较接近的。根据计算结果对各样本端阻力进行了分析,考虑到样本中存在不同桩端持力层的情况,为合理分析不同土层的端阻力大小,将不同持力层的试桩计算结果分别统计。统计结果表明:第⑦₁层的端

阻比平均值为 6.6%，端阻力的平均值为 666 kPa（规范限值为 1500~2000 kPa）；第⑦₂层的端阻比平均值为 4.6%，端阻力的平均值为 685 kPa（规范限值为 2000~3000 kPa）；第⑨₁层的端阻比平均值为 5.5%，端阻比平均值为 974 kPa（规范限值为 2500~3500 kPa）。由此可见，不同持力层的端阻力与端阻比均有较大差别，且均小于上海 99 版规范的建议值，仅相当于下限值的 40%~50%。

各样本有限元分析得到的各土层侧摩阻力分布情况与上海 99 版规范上下限值的比较如图 7 所示。图上可以看出，有限元计算得到的桩侧极限侧摩阻力呈如下规律：浅层黏性土的侧摩阻力接近甚至大于上限，而深层砂性土层则接近甚至小于下限。

综上通过灌注桩的有限元数值分析可得到如下两点认识：第⑦、⑧和⑨₃层土的端阻力取上海 99 版规范建议上下限中值的 0.5 倍较合适；上海 99 版规范中浅层黏性土的侧摩阻力取值偏小，而深层砂性土层的侧摩阻力取值偏大。

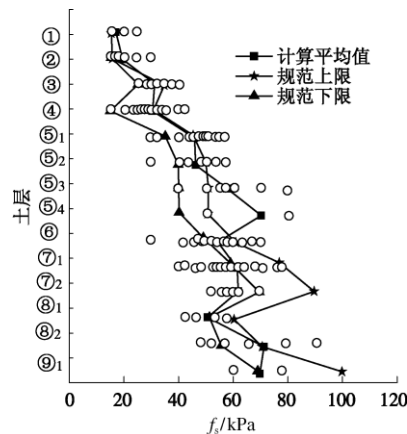


图 7 桩侧摩阻力 FEM 计算结果与规范建议限值的比较
Fig. 7 Comparison of side friction between FEM results and values suggested by code

3.5 灌注桩侧摩阻力与端阻力研究小结

综合统计分析方法及数值分析方法结论表明，第⑦、⑧和⑨几个主要桩端持力层的极限端阻力与 99 版规范列表中值的一半较接近；浅层黏性土的侧摩阻力较接近甚至大于 99 版规范上限，深层砂性土则接近甚至小于规范下限。根据以上结论，并结合 99 版规范的承载力取值，综合得到了钻孔灌注桩的侧摩阻力修正的建议值（表 3）。

由于灌注桩皆为长桩，端阻比较小，以侧摩阻力为主，通过分析表明，按原规范极限端阻力的 0.75，0.8，0.85，0.9 倍不同折扣方法计算得到的单桩承载力差异并不明显，其中按原规范极限桩端阻力 0.85 倍的计算值与实测值的比值平均值最接近 1.0 且略小于 1.0，这与灌注桩的统计分析结论是较一致的。因此，

本次规范修订对第⑤、⑦、⑧和⑨持力层极限端阻力基本按原规范表 0.85 倍取值，其它持力层大体不变，各土层端阻力具体取值详见表 4。本次进行桩端阻力调整的土层以砂层为主，对其进行折减也较符合灌注桩的施工工艺现状。

表 3 统计法、FEM 法及综合建议值

Table 3 Values of statistical analysis, FEM method and suggestions

土层	规范		统计法结果		FEM 法结果		综合建议值	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限	下限	上限
①	15	15	—	—	—	—	15	15
②	15	15	16	33	—	—	15	15
③	25	35	31	44	25	37	25	35
④	15	30	36	44	22	38	20	35
⑤ ₁	35	45	50	60	37	56	40	55
⑤ ₂	40	50	61	85	37	55	40	60
⑤ ₃	40	50	68	85	41	73	45	60
⑥	60	80	26	35	44	65	60	80
⑦ ₁	60	80	64	74	49	73	55	75
⑦ ₂	70	90	60	75	54	69	55	80
⑧ ₁	50	60	68	75	42	58	50	65
⑧ ₂	55	70	57	82	52	91	60	75
⑨ ₁	70	100	41	86	57	81	70	90

按承载力表 4 中灌注桩侧摩阻力和端阻力的最终建议取值，对 22 个工程进行了回代计算，计算结果如图 8，9 所示。

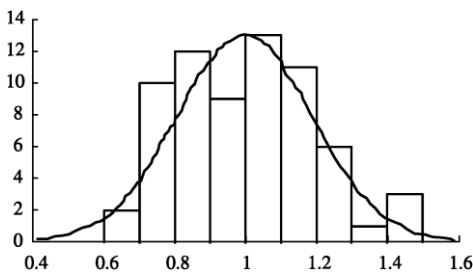


图 8 回代计算与实测值比较直方图
Fig. 8 Histogram of back substitution results versus measured values

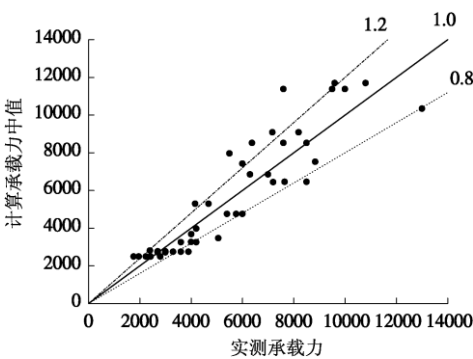


图 9 回代计算与实测值比较散点图
Fig. 8 Scatter diagram of back substitution results and measured results

从图 8，9 可看出，实测值基本上分布在中值计算的两侧，大致呈正态分布。实测值小于上限值回代

表 4 2010 版上海地基规范预制桩、灌注桩桩周土极限侧摩阻力标准值 f_s 与桩端极限端阻力标准值 f_p

Table 4 Values of side friction and tip friction of precast piles and cast-in-place piles of Shanghai 2010 foundation code

土层 编号	土 层 名 称	埋藏深 度/m	预 制 桩		灌 注 桩	
			f_s /kPa	f_p /kPa	f_s /kPa	f_p /kPa
②	褐黄色黏性土	0~4	15		15	
	灰色黏质粉土	4~15	20~40	500~1000	15~30	
	灰色砂质粉土	4~15	30~50	1000~2000	25~40	600~800
	灰色粉砂	4~15	40~60	2000~3000	30~45	700~900
③	灰色淤泥质粉质黏土	4~15	15~30	200~500	15~25	150~300
		4~15	15~30	200~500	15~25	150~300
		15~25	30~40	500~1000	25~35	250~350
	灰色砂质粉土、粉砂	4~15	35~55	1500~2500	30~45	800~1000
		15~23	35~55	1500~2500	30~45	800~1000
		23~32	45~65	2500~3500	35~55	1000~1200
④	灰色淤泥质黏土	4~20	15~40	200~800	15~30	150~250
		4~15	15~40	200~800	20~30	150~250
		15~35	40~55	800~2000	30~40	250~550
				800~1200		350~650
⑤或⑤ ₁	灰色黏性土	20~35	45~65	(1500~2500)	40~55 (35~45)	850~1250
⑤ ₂	灰色砂质粉土	20~35	50~70	2000~3500	40~60 (40~50)	(1000~1500)
⑤ ₃	灰色粉砂	20~35	70~100	4000~6000	55~75 (60~80)	1250~1700
	灰黑色黏性土	25~40	50~70	1200~2000 (1500~3000)	45~60 (40~50)	(1500~2000)
⑥	暗绿、褐黄色黏性土	22~26	60~80	1500~2500	50~60	450~750
		26~30	80~100	2000~3500	60~80	750~1000
⑦ ₁	草黄色砂质粉土、粉砂	30~45	70~100	4000~6000	55~75 (60~80)	1000~1200
⑦ ₂	灰色粉细砂	35~50	100~120	6000~8000	55~80 (70~90)	1250~1700 (2000~3000)
⑧ ₁	灰色粉质黏土夹粉砂	40~55	55~70	1800~2500 (2000~3000)	50~65 (50~60)	850~1250 (1000~1500)
⑧ ₂	灰色粉质黏土与粉砂互层	50~65	65~80	3000~4000	60~75 (55~70)	850~1700 (1500~2000)
⑨	灰色细、中、粗砂	70~100	110~120	8000~10000	70~90 (80~100)	2100~3000 (2500~3500)

注：(1) 本次修订对第③、第④层土进行了合并。加粗字体为修订后的取值；斜体字为 99 版规范中的取值。(2) 其余土层中，粗体+下划线的字体为修订后的取值；括号内数值为 99 版规范值。

计算值的样本有 16 个，占总样本的 72.7%；实测值大于下限值回代计算值的样本有 21 个，占总样本的 95.5%；实测值位于下限和上限值计算值之间的样本有 15 个，占总样本的 68.2%。因此，本次修订建议值的上下限之间的保证率为 68.2%。

4 结 论

本文详细介绍了上海 2010 版地基基础设计规范修订中关于预制桩、灌注桩桩侧摩阻力和桩端阻力取值的研究。

(1) 通过收集工程实例，采用统计分析和数值分析方法，对上海 99 版规范预制桩、灌注桩桩侧极限摩阻力和极限端阻力取值进行了研究，调整后的承载力取值如表 4 所示。

(2) 通过对桩身大部分位于淤泥质土中且桩端支承于第⑤层土的预制桩载荷试验资料的分析，将第⑤₁、⑤₃ 层的桩端阻力取值做了调整，按原规范端阻力

建议值的 0.5 倍取值。

(3) 通过对不同持力层、桩长和桩径的灌注桩载荷试验资料的分析，对原规范灌注桩极限摩阻力与端阻力的取值进行了调整，将第⑤、⑦、⑧和⑨持力层极限端阻力基本按原规范表 0.85 倍取值，其它持力层大体不变，对以上各土层不同埋深处的侧摩阻力取值也根据分析结果做了适当的调整。

参考文献：

[1] 张 雁, 刘金波. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (ZHANG Yan, LIU jin-bo. Manual of pile engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))

[2] 沈保汉. 桩基与深基坑支护技术进展[M]. 北京: 水利水电出版社, 2006. (SHEN Bao-han. Progress of pile engineering and deep excavation support technology[M]. Beijing: China Hydro Power Press, 2006. (in Chinese))

- [3] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [4] DGJ08—1999 上海市地基基础设计规范[S]. 1999. (DGJ08—1999 Foundation design code of Shanghai[S]. 1999. (in Chinese))
- [5] 季沧江. 上海地区混凝土预制桩承载力初探[J]. 建筑技术, 2003, **34**(3): 175 - 177. (JI Cang-jiang. Initially assessing of bearing capacity of precast concrete pile in Shanghai region[J]. Architecture Technology, 2003, **34**(3): 175 - 177. (in Chinese))
- [6] 楼晓明, 张 勇, 陈强化. 上海地区摩擦桩承载力偏低原因分析[J]. 土木工程学报, 2007, **40**: 36 - 40. (LOU Xiao-ming, ZHANG Yong, CHEN Qiang-hua. Analysis of the reason for the low bearing capacity of friction pile in Shanghai area[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**: 36 - 40. (in Chinese))
- [7] 上海《地基基础设计规范》修编. 承压桩承载力(专题 9)与抗拔桩承载力(专题 10)修订研究报告[R]. 2008. (Revision Office of Foundation Code Design of Shanghai Area. Research report of pile bearing capacity for press (Topic 9) and uplift (Topic 10) [R]. 2008. (in Chinese))
- [8] 楼晓明, 赵春风, 陈 广, 等. 用抗剪强度指标计算预制桩软黏土侧摩阻力的参数统计分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 354 - 359. (LOU Xiao-ming, ZHAO Chun-feng, CHEN Guang, et al. Statistical analysis of unit frictional force of precast piles in soft clay calculated by shear strength parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(2): 354 - 359. (in Chinese))
- [9] 楼晓明, 陈强华, 俞有炜, 等. 钻孔灌注桩承载力异常现象分析[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 547 - 551. (LOU Xiao-ming, CHEN Qiang-hua, YU You-wei, et al. Analysis of abnormal phenomena in ultimate bearing capacity of bored pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 547 - 551. (in Chinese))
- [10] 曾 健, 李之达, 张嵘峰, 等. 钻孔灌注桩极限承载力研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, **29**(6): 899 - 902. (ZENG Jian, LI Zhi-da, ZHANG Rong-feng, et al. Research on the limit bearing weight of the bored filling pile[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, **29**(6): 899 - 902. (in Chinese))
- [11] 程 晔, 龚维明, 戴国亮, 等. 超长直径钻孔灌注桩桩端承载力研究. 南京航空航天大学学报, 2007, **39**(3): 407 - 411. (CHENG Yue, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, et al. Bearing capacity of super-long and large-diameter bored pile tip[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, **39**(3): 407 - 411. (in Chinese))
- [12] 黄 强. 桩侧摩阻力计算的简单数学模型[J]. 岩土工程学报, 1986, **8**(5): 84 - 90. (HUANG Qiang. Simple mathematical model to calculate the side resistance of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **8**(5): 84 - 90. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)