

Analysis on Pile Shaft Friction Resistance of Ultra-Long Bored Piles

Jianguang Li

AVIC Geotechnical Engineering Institute Co., Ltd., Beijing
Email: lijiangang10@126.com

Received: Dec. 25th, 2014; accepted: Jan. 15th, 2015; published: Jan. 22nd, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the analysis on the results of test piles of typical projects, characteristics of pile shaft friction resistance are summarized for ultra-long bored piles. Pile shaft friction resistance mainly depends on shear strength index (c , φ), effective overlying pressure, and pile-soil relative movement. Effective overlying pressure and pile-soil relative movement are should not be neglected to pile shaft friction resistance.

Keywords

Ultra-Long Bored Pile, Static Load Test, Pile Shaft Friction Resistance

超长钻孔灌注桩桩侧摩阻力发挥特征分析

李建光

中航勘察设计研究院有限公司, 北京
Email: lijiangang10@126.com

收稿日期: 2014年12月25日; 录用日期: 2015年1月15日; 发布日期: 2015年1月22日

摘要

本文在分析典型工程超长钻孔灌注桩试桩成果基础上, 总结超长钻孔灌注桩桩侧摩阻力的发挥特征, 并

提出桩侧摩阻力的发挥取决于桩侧土体的抗剪强度指标 (c, φ) 、有效上覆压力及桩土间相对位移四个主要因素，其中桩侧土体的有效上覆压力及桩土间相对位移是影响超长桩桩侧摩阻力发挥不可忽视的因素。

关键词

超长钻孔灌注桩，静载试验，桩侧摩阻力

1. 引言

近些年来，国内超高层建筑迅速崛起，在北京、上海、天津、温州等地超高层建筑中超长钻孔灌注桩被广泛应用，大量的超长钻孔灌注桩试桩成果被发表[1]-[3]，这些成果较一致的认为：

(1) 一定荷载作用下超长桩的桩顶变形主要由桩身的压缩组成，超长桩基础的沉降变形必须考虑桩身的压缩变形。

(2) 桩端阻力对桩的总承载力贡献较小，超长桩的承载力以侧阻力为主。

(3) 桩端沉渣对桩端承载力的发挥影响明显。

上述这些珍贵的试桩成果，为今后超长钻孔灌注桩的设计提供了很多值得借鉴的经验。

国内外对桩侧摩阻力和桩端阻力这一课题已有多年的研究，解决的方法基本上有两类：一类是通过原位测试手段探查土层的物理参数，与试桩资料对比，建立经验公式或修正曲线，来确定桩侧摩阻力和桩端阻力；另一类方法是通过桩静载试验实测桩侧摩阻力和桩端阻力。但有关理论研究的文献很少。

本文就是在分析典型工程超长钻孔灌注桩试桩成果基础上，总结超长钻孔灌注桩桩侧摩阻力的发挥特征，进而为桩侧摩阻力的选取提供依据。

2. 桩侧摩阻力的发挥特征

本文选取具有代表性的上海中心大厦试验桩的试验成果[1]进行深入分析，对其桩侧摩阻力的发挥特征进行总结。由于篇幅限制，其他文献提供的试验桩试验成果[2] [3]只做简单介绍。

2.1. 上海中心大厦[1]

上海中心大厦位于上海浦东陆家嘴金融中心区，大厦塔楼采用巨型空间框架-核心筒-外伸臂结构体系，塔楼地上 121 层，结构顶面高度 575 m，建筑塔顶高度 632 m，地下 5 层，基础埋深约 31 米，底板厚 6 m。

场地地貌属滨海平面地貌类型，场地 274.8 m 深度范围内为第四纪覆盖层，主要有饱和黏性土、粉性土、砂土组成，一般具有成层分布特点。

(1) 试桩参数

本文选取采用国内常用的桩侧桩端联合后注浆工艺的 SYZA01、SYZA02 试验桩成果进行分析，图表 1 所示。其他试验桩成果详见原文[1]

SYZA01、SYZA02 试验桩布置及后注浆位置详见图 1。

(2) Q-s 曲线

SYZA01、SYZA02 试验桩 Q-s 曲线详见图 2、图 3。SYZA01、SYZA02 试验桩桩身轴力分布曲线详见图 4、图 5。

(3) 桩身轴力测试

SYZA01、SYZA02 试验桩桩身轴力分布曲线详见图 4、图 5。

(4) 桩侧摩阻力

Table 1. General situation of test piles
表 1. 试桩概况表

试桩编号	桩径(mm)	桩长(m)	有效桩长(m)	试桩类型
SYZA01	1000	88	63	桩侧桩端联合后注浆
SYZA02	1000	88	63	桩侧桩端联合后注浆
SYZB01	1000	88	63	桩端后注浆
SYZC01	1000	88	63	常规灌注桩

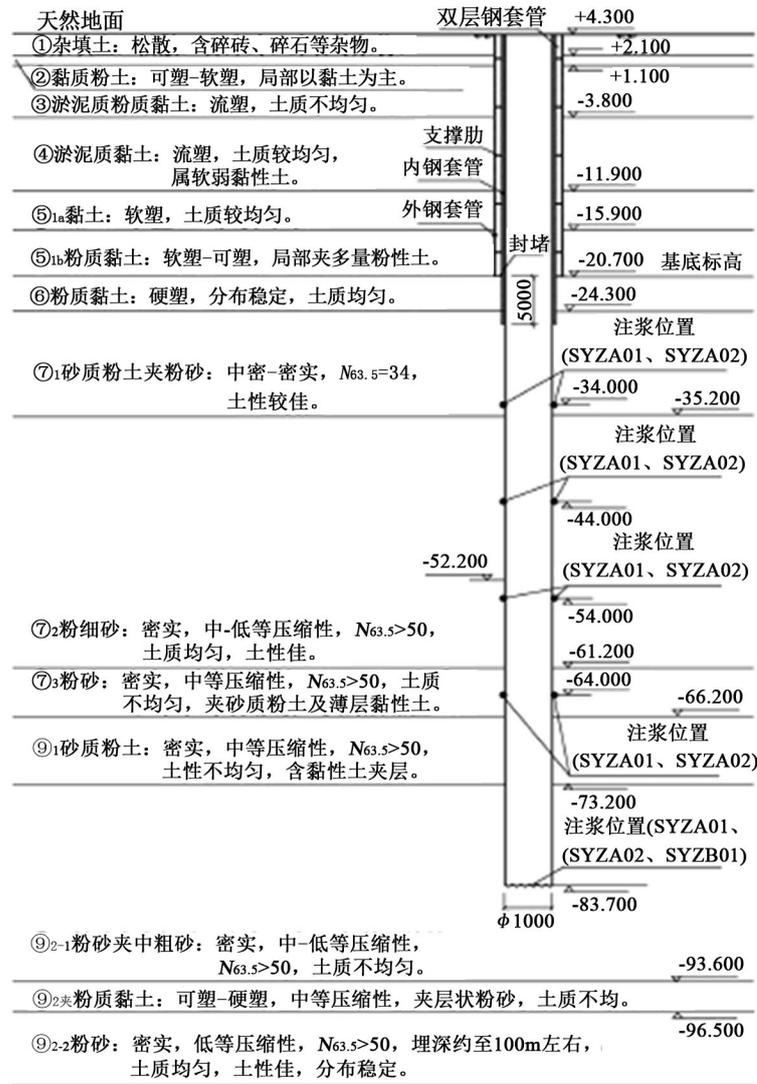


Figure 1. Profile of soil layers and test pile (including post-grouting location)

图 1. 土层及试桩剖面图(含后注浆位置)

SYZA01、SYZA02 试验桩不同桩顶荷载下桩侧摩阻力随深度变化曲线详见图 6、图 7。SYZA01、SYZA02 试验桩不同埋深处桩侧摩阻力与桩土相对位移关系曲线详见图 8、图 9。

王卫东等人对上海中心大厦试验桩试验结果进行了详细的分析研究, 得出关于桩侧摩阻力问题的如下 3 点结论:

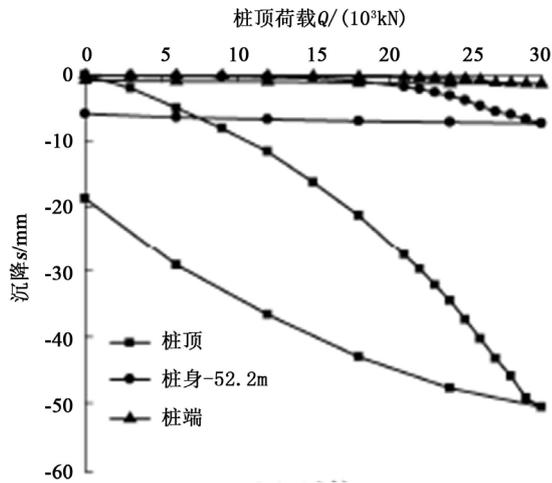


Figure 2. Q-s curves of No. SYZA01 test pile
图 2. SYZA01 试验桩 Q-s 曲线

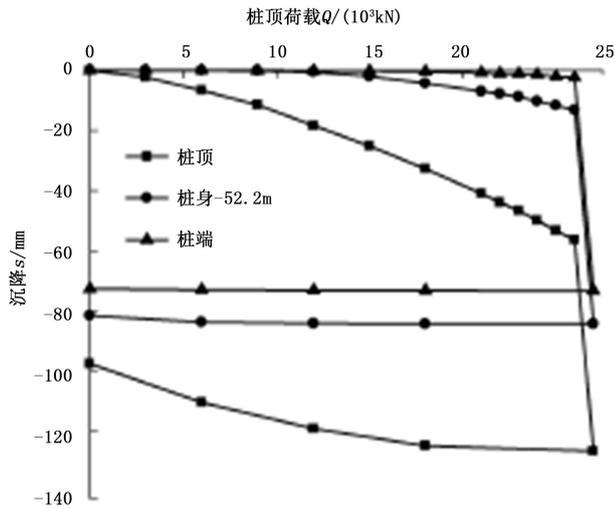


Figure 3. Q-s curves of No. SYZA02 test pile
图 3. SYZA02 试验桩 Q-s 曲线

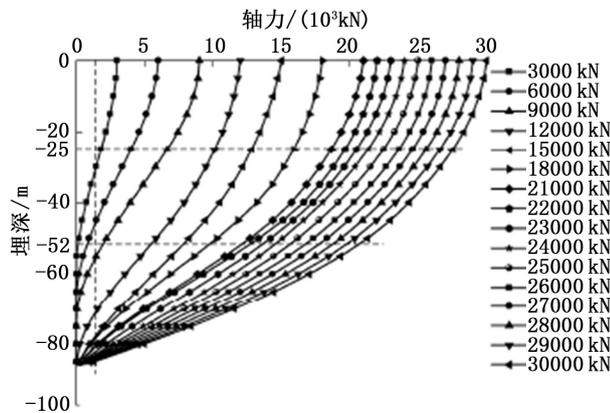


Figure 4. Distribution curves of axial force of No. SYZA01 test pile
图 4. SYZA01 试验桩桩身轴力分布曲线

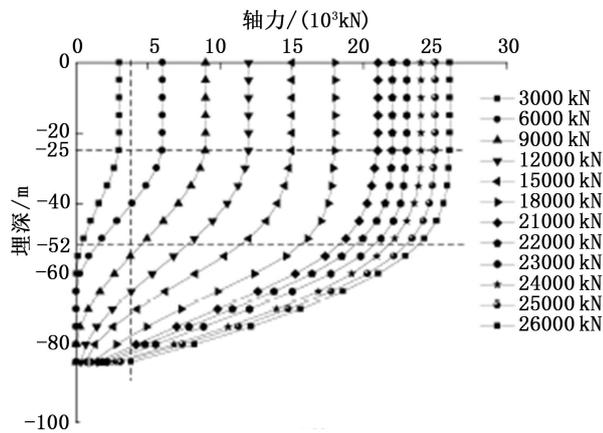


Figure 5. Distribution curves of axial force of No. SYZA02 test pile

图 5. SYZA02 试验桩桩身轴力分布曲线

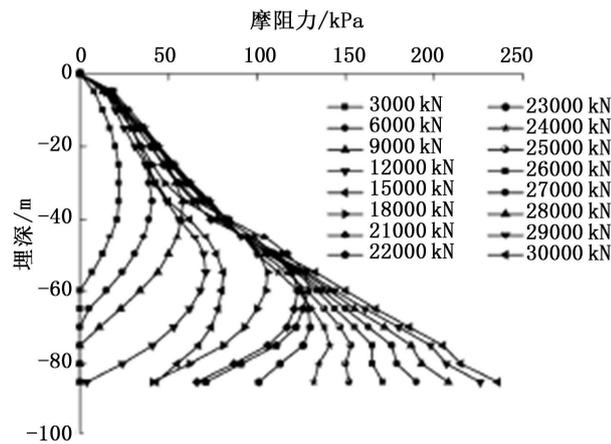


Figure 6. The change curves of pile shaft friction with depth of No. SYZA01 test pile

图 6. SYZA01 试验桩桩侧摩阻力随深度变化曲线

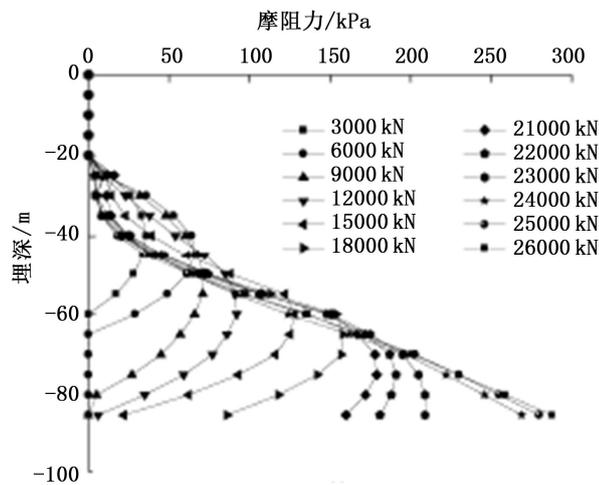


Figure 7. The change curves of pile shaft friction with depth of No. SYZA02 test pile

图 7. SYZA02 试验桩桩侧摩阻力随深度变化曲线

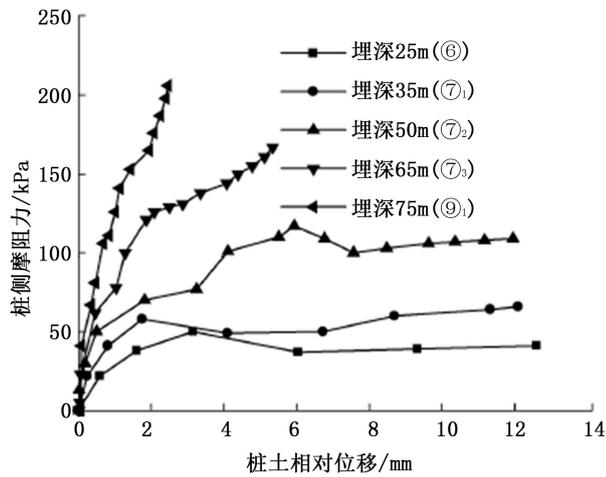


Figure 8. Curves of pile shaft friction versus pile-soil relative movement at different depths of No. SYZA01 test pile
图 8. SYZA01 试验桩桩侧摩阻力 - 桩土相对位移关系曲线

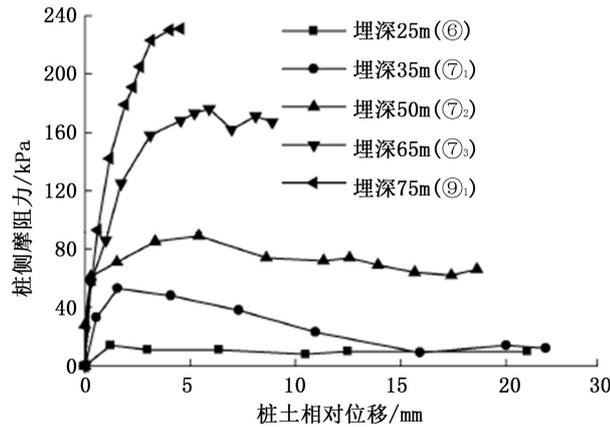


Figure 9. Curves of pile shaft friction versus pile-soil relative movement at different depths of No. SYZA02 test pile
图 9. SYZA02 试验桩桩侧摩阻力 - 桩土相对位移关系曲线

(1) 桩侧摩阻力沿桩长的发挥具有异步性，荷载水平较小时，桩侧摩阻力分布曲线呈单峰状，随荷载水平增加，桩侧摩阻力分布曲线经历峰值不断增大下移、桩端附近逐渐展开的变化过程；桩体上部分侧摩阻力发挥至极限后，出现不同程度软化现象。

(2) 桩侧摩阻力充分发挥所需桩土相对位移受后注浆工艺影响，实测结果显示在有效桩长范围内埋深较浅的黏性土层中桩侧摩阻力充分发挥所需桩土相对位移小于 5 mm，较深的砂性土中小于 10 mm；桩侧摩阻力软化出现在桩土相对位移超过极限位移之后，埋深较浅的黏性土中由于桩土相对位移大软化较为显著。

(3) 与规范取值相比，第⑥层土实测桩侧摩阻力极限值不足规范取值下限的 50%，残余值仅为规范取值下限的 20%，第⑦₁层土实测桩侧摩阻力接近规范取值下限，但软化严重，该土层以下实测桩侧摩阻力均大于规范取值上限，其中⑨₁、⑨₂₋₁土层中，实测值达到规范取值上限的 2 倍以上。因此在大直径超长后注浆灌注桩承载力计算时，应充分考虑有效桩长范围内浅部土层的侧摩阻力软化和注浆后深部土层侧摩阻力增强效应。

2.2. 其他典型工程[2] [3]

邹东升等人对北京 CBD 地区超高层建筑的试验桩试验成果进行了深入的分析总结[2]。北京 CBD 地区 CCTV 新址 TP-A1 试验桩桩侧卵石⑤层(后注浆)、粉质黏土⑥层及细砂⑨层桩(后注浆)摩阻力与桩土相对位移关系曲线详见图 10、图 11。

CCTV 新址 TP-A1 试验桩粉质黏土⑥层桩侧摩阻力表现出加工软化特性。卵石⑤层及细砂⑨层桩侧摩阻力表现出加工强化特性。埋深较大的砂土⑨层的桩侧阻力在同等桩土相对变形情况下较⑤层增长快, 显示出桩侧阻力发挥存在深度效应, 围压大有利于桩侧阻力的发挥。

孙宏伟等人对天津 117 大厦超长试验桩的试桩成果进行了分析, 发现桩侧上部土层表现为软化特征, 桩侧下部土层表现出强化特征, 桩端处桩侧阻力非常小。

张忠苗等人对温州世贸中心 323 m 超高层超长试验桩的试桩成果[3]进行了分析, 发现桩侧上部土层在达到极限侧阻时, 随着荷载的增加, 其值反而会有所降低, 分析其原因是在达到极限摩阻力后上部土体结构产生了滑移破坏, 导致侧阻软化。桩端附近桩土相对位移较小, 其土层摩阻力并没有得到充分发挥。

3. 模型建立与分析

3.1. 模型概化

依据上述典型工程超长单桩静载试验的分析成果, 桩与桩间土之间相对位移 δ 与桩侧摩阻力 q_{sik} 之间的关系可概化为图 12。

在图 12 中: A_1 、 A_2 、 A_n 为不同深度土层桩侧极限摩阻力, S_1 、 S_2 、 S_n 为桩侧极限摩阻力发挥时的桩 - 土之间的相对位移极限值 δ_u , B_1 、 B_2 、 B_n 为桩侧残余摩阻力。

在桩与土之间无泥皮或泥皮很薄的情况下, 桩侧摩阻力取决于桩周土层的抗剪强度, 符合摩尔-库伦屈服准则[4], 详见图 13。有关摩尔-库伦屈服准则描述详见文献 4。

在图 13 中, c 、 φ 为桩侧土层抗剪强度指标, c' 、 φ' 为桩侧土层残余抗剪强度指标, σ 为垂直剪切面应力。

依据超长单桩静载试验的分析成果, 桩与桩间土之间相对位移 δ 总体变化可概化为图 14。图 14 中忽略了由于桩侧个别土层压缩模量较小, 引起局部变形较大的现象。

桩顶以下 C_1 ~ C_2 段: 桩土相对位移 δ 大于桩 - 土相对位移极限值 δ_u , 桩侧残余摩阻力发挥, 表现出软化特征。

桩顶以下 C_2 ~ C_4 段: 桩土相对位移 δ 大于 0 mm 小于桩土相对位移极限值 δ_u , 桩侧摩阻力数值位于 0~极限摩阻力之间, 其大小与土层的抗剪强度指标、有效上覆压力及桩土相对位移有关。如果部分土层经后注浆处理, 该土层的抗剪强度指标提高的非常大, 一般荷载状况下, 很难达到桩侧极限摩阻力, 更难以进入桩侧残余摩阻力, 因此表现出一种强化特征。

其中 C_3 ~ C_4 段桩土相对位移 δ 随着桩顶荷载加载的增加逐渐增加, 桩侧摩阻力也相应增大。如果桩端附近桩土相对位移非常小, 桩侧摩阻力就不能得到充分发挥。

由以上分析可以得出桩侧摩阻力 q_{sik} 主要与桩侧土体抗剪强度(c 、 φ)、有效上覆压力(σ)及桩土相对位移(δ)有关。可用如下函数表达:

$$q_{sik} = f(c, \varphi, \sigma, \delta) \quad (1)$$

3.2. 桩土间相对位移

上海中心 SYZA01 黏性土侧阻充分发挥所需的桩土极限相对位移约为 2~6 mm, 进入残余强度约为

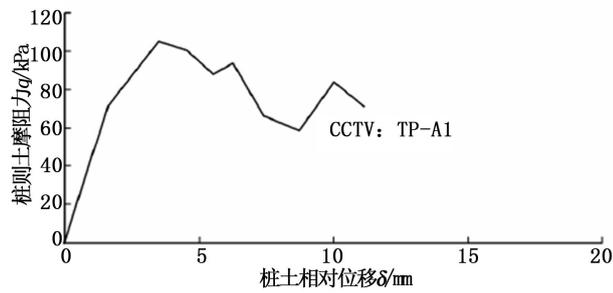


Figure 10. Curves of pile shaft friction versus pile-soil relative movement (silty clay ⑥)

图 10. 桩侧摩阻力 - 桩土相对位移关系曲线(粉质黏土⑥层)

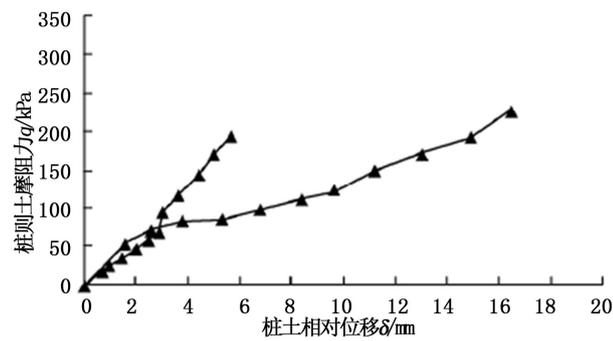


Figure 11. Curves of pile shaft friction versus pile-soil relative movement (pebble ⑤, fine sand ⑨)

图 11. 桩侧摩阻力 - 桩土相对位移关系曲线(卵石⑤层、细砂⑨层)

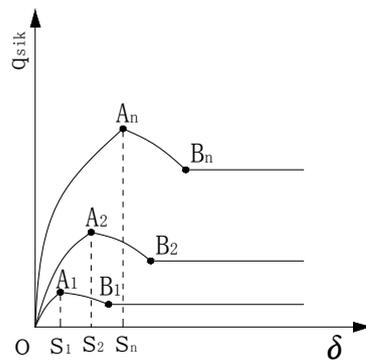


Figure 12. Curves of pile shaft friction versus pile-soil relative movement at different depths

图 12. 桩侧摩阻力 q_{sik} - 桩土相对位移 δ 关系曲线

6~8 mm。上海中心 SYZA02 黏性土侧阻充分发挥所需的桩土极限相对位移约为 2~5 mm，进入残余强度约为 3~15 mm [1]。

CCTV 新址中 TP-A1 黏性土侧阻充分发挥所需的桩土极限相对位移约为 4 mm，进入残余强度约为 9 mm。经后注浆的砂类土、圆砾及卵石土未观测到侧阻充分发挥所需的桩土极限相对位移[2]。

温州世贸中心 323 m 超高层黏性土侧阻充分发挥所需的桩土极限相对位移约为 17~20 mm，淤泥质土侧阻充分发挥所需的桩土极限相对位移约为 13~15 mm [3]。

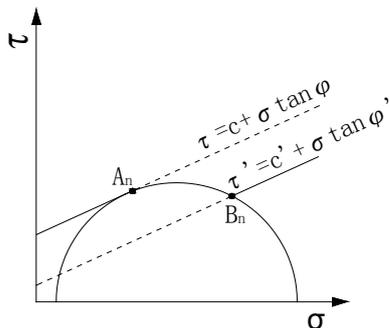


Figure 13. Mohr-Coulomb yield criterion of pile shaft friction
图 13. 桩侧摩阻力摩尔-库伦屈服准则($q_{sik} = \tau$)

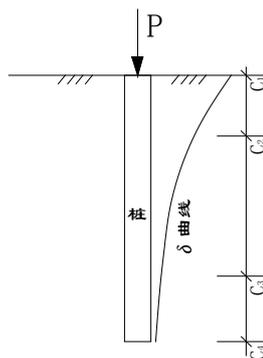


Figure 14. Curves of pile-soil relative movement
图 14. 桩土相对位移 δ 曲线

陈希哲指出桩侧极限摩阻力与所在的深度、土的种类和性质、成桩方法等许多因素有关。但是，桩侧摩阻力 q_{sik} 达到极限值所需的桩土相对滑移极限值 δ_u 则基本上与土的种类和性质有关，而与桩径大小无关，根据试验资料约为 4~6 mm (黏性土)或 6~10 mm(砂类土) [5]。

史佩栋指出桩侧摩阻力只要桩土间有不太大的相对位移就能得到充分的发挥，具体数量目前认识尚不能有一致的意见，但一般认为粘性土为 4~6 mm，砂性土为 6~10 mm。对大直径的钻孔灌注桩，如果孔壁呈凹凸形，发挥侧摩阻力需要的极限位移较大，可达 20 mm 以上，甚至 40 mm，约为桩径的 2.2%，如果孔壁平直光滑，发挥侧摩阻力需要的极限位移较小，小至只有 3~4 mm [6]。

由以上收集的数据分析，桩侧黏性土、粉土、砂类土发挥极限侧摩阻力需要的极限位移在 20 mm 以内。孔壁呈凹凸形，发挥侧摩阻力需要较大的极限位移。经过后注浆处理的土层，发挥极限侧摩阻力需要的桩土间极限位移会非常大。

3.3. 土层埋置深度对桩侧摩阻力影响

很多国际规范一般认为桩侧摩阻力不仅与桩 - 土之间的黏聚力和摩擦角有关，而且与考虑深度的有效上覆压力有密切关系。

BRAJA 提出的经验公式[7]如下：

(1) 砂层桩侧摩阻力

$$f = k\sigma'_0 \tan \delta' \quad (2)$$

当桩入土深度达某一临界深度 (L') 后，砂层桩侧摩阻力就不随深度增加了。

$$L' \approx (15 \sim 20) D \quad (3)$$

(2) 黏性土层桩侧摩阻力
正常固结土

$$f = (1 - \sin \phi'_R) \tan \phi'_R \sigma'_0 \quad (4)$$

超固结土

$$f = (1 - \sin \phi'_R) \tan \phi'_R \sqrt{OCR} \sigma'_0 \quad (5)$$

上述公式参 RO 数意义详见原文[7]。当桩侧土层埋深较大时，有效上覆压力对桩侧摩阻力的影响可能大于土层自身抗剪强度指标的影响。而建筑桩基规范[8]提供的桩的极限侧阻力标准值没有考虑土层埋深的影响。

3.4. 桩侧摩阻力实测值与规范取值的对比

上海中心大厦 SYZA02、SYZB01 试验桩桩侧摩阻力实测值与规范取值的对比[1]详见表 2。

北京 CBD 地区 CCTV 新址桩长 33 m 试验桩桩侧摩阻力实测值与规范取值的对比[2]详见表 3。

通过实测数据和上述分析，在桩顶附近(图 14, C₁~C₂段)桩侧摩阻力比建筑桩基规范经验参数小，出现了所谓“软化现象”，桩的中下部(图 14, C₂~C₄段)出现比建筑桩基规范经验参数大，出现了所谓“强化现象”。

3.5. 单桩静载试验与工程实际工况的区别

以上模型的建立与分析都是基于单桩静载试验成果基础上的，由于实际工程中涉及到桩、桩间土及筏板等相互协调变形问题，桩与桩间土之间相对位移变得比单桩静载试验工况更加复杂，因此，实际工程桩的承载力发挥与单桩静载试验结果会有差异，桩基设计是应慎重选取单桩静载试验提供的参数。

Table 2. Measured pile shaft frictions and friction ranges in specifications of Shanghai Center Tower
表 2. 上海中心大厦桩侧阻力实测值与规范取值

土层序号	实测摩阻力极限值(kPa)		实测摩阻力残余值(kPa)		规范取值范围(kPa)
	SYZA02	SYZB01	SYZA02	SYZB01	
⑥	20.2	24.9	4.3	8.8	50~60
⑦ ₁	49.4	45.8	9.4	32.7	50~75
⑦ ₂	96.1	135.3	87.2	135.3	55~80
⑨ ₁	224.8	201.8	224.8	192.0	70~90
⑨ ₂₋₁	267.4	212.1	267.4	167.8	70~90

注：表中土层描述详见图 1。

Table 3. Measured pile shaft frictions and friction ranges in specifications of Beijing CCTV Tower
表 3. 北京 CCTV 新址桩侧阻力实测值与规范取值

土层岩性	状态	极限桩侧阻力 q_{sik} (kPa)	
		实测值	规范参考值
卵石⑤	密实	>300(国贸)	140~170
细砂⑤ ₁ 层	中密 - 密实	>200	64~86
粉质黏土⑥层	可塑 - 硬塑	26~60	68~84
细砂⑨层	中密 - 密实	>200	64~86

4. 结论及建议

通过本文的分析, 得出以下结论及建议:

- (1) 桩侧摩阻力 q_{sik} 主要与桩侧土体抗剪强度指标(c, φ)、有效上覆压力(σ)及桩土相对位移(δ)有关。
- (2) 桩侧土体的有效上覆压力及桩土间相对位移对超长桩桩侧摩阻力的发挥是不可忽视的因素。
- (3) 实际工程桩的承载力发挥与单桩静载试验桩工况有差异, 建议桩基设计时应慎重选取单桩静载试验提供的参数。
- (4) 建筑桩基技术规范(JGJ94-2008)提供的桩的极限侧阻力标准值没有主要考虑土层埋深的影响, 建议在勘察报告中提供桩侧摩阻力时应适当考虑土层埋深的影响。
- (5) 桩侧摩阻力的发挥还涉及桩侧土层的固结程度、剪胀、剪缩等复杂的力学问题, 本文研究的内容还有进一步探讨的必要。

参考文献 (References)

- [1] 王卫东, 李永辉, 吴江斌 (2011) 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究. *岩土工程学报*, **12**, 1817-1826.
- [2] 邹东峰 (2013) 北京超长灌注桩单桩承载特性研究. *岩土工程学报*, **增 1**, 388-392.
- [3] 张忠苗, 贺静漪, 张乾青, 等 (2010) 温州 323 m 超高层超长单桩与群桩基础实测沉降分析. *岩土工程学报*, **3**, 330-337.
- [4] 屈智炯 (1987) 土的塑形力学. 成都科技大学出版社, 成都, 124-128.
- [5] 陈希哲 (2011) 土力学地基基础. 清华大学出版社, 北京, 312-313.
- [6] 史佩栋 (2008) 实用桩基工程手册. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [7] Das, B.M. (2011) *Principles of foundation engineering*. GENGAGE Learning, USA, 568-579.
- [8] JGJ94-2008 建筑桩基技术规范. 中国建筑工业出版社, 北京, 2008.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

