

DOI: 10.11779/CJGE201411001

不同条件下桩侧阻力端阻力性状及侧阻力分布 概化与应用

刘金砺, 秋仁东, 邱明兵, 高文生

(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘 要: 根据 24 组 51 根桩竖向静载试验的侧阻力端阻力测试结果分析表明, 桩侧土层性质与分布、桩长径比、后注浆效应是影响侧阻性状与分布的主要因素。软土中的桩其侧阻发挥正常, 分布模式不受长径比影响; 碎石土、砂土侧阻在桩顶以下约 $5d$ 深度范围呈现应变软化, 随深度增加逐渐演变为应变硬化导致桩身下部侧阻发挥滞后或发挥值显著降低, 侧阻分布模式异化; 土愈硬、长径比愈大, 侧阻分布模式异化愈明显; 后注浆对侧阻的增强与分布模式的影响, 碎石土、砂土远甚于其它类土。工作荷载下的侧阻分布模式可概化为正梯形、倒梯形、橄榄形、灯笼形、蒜头形、峰谷形六种模式。端阻比随侧阻增强, 随长径比增大而降低, 随荷载水平提高呈非线性增长, 给出了工作荷载下端阻比经验参考值。将每种侧阻概化模式分解为桩长 l 、 kl 的矩形、三角形分布侧阻单元, 据此可查表确定供沉降计算的 Mindlin 解附加应力系数。计算结果表明, 除正梯形和蒜头形分布外, 其附加应力积分值按 Geddes 正梯形分布假定计算附加应力比实测侧阻概化分布大 15%~74%, 侧阻分布重心愈高差异愈大。

关键词: 桩侧阻力; 桩端阻力; 分布模式; 概化; 附加应力

中文分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-1953-18

作者简介: 刘金砺 (1933 -), 男, 湖南益阳人, 研究员, 博士生导师, 从事岩土工程研究与开发工作。E-mail: qiurend@163.com。

Behaviors of shaft resistance and tip resistance of piles under different conditions and conceptualization and application of distribution of shaft resistance

LIU Jin-li, QIU Ren-dong, QIU Ming-bing, GAO Wen-sheng

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: According to the analysis of the results of the vertical static load tests on shaft resistance and tip resistance of 51 piles in 24 groups, the soil properties and vertical distribution, ratio of length to diameter of piles and post-grouting effect are the main factors affecting the characteristics and distribution of the shaft resistance. In soft soils, the shaft resistance of piles plays a normal function, and its distribution pattern is not affected by the ratio of length to diameter. In gravel and sand, the shaft resistance below ground about $5d$ depth exhibits strain softening and gradually evolves into strain hardening, which leads to the result that it lags or decreases significantly with the increasing depth. The harder the soils, or the larger the ratio of length to diameter, the more obvious the dissimilation of distribution pattern of the shaft resistance. The effect of post-grouting reinforcement on the shaft resistance of piles in the gravel and sand is far higher than that in other soils. The distribution modes of shaft resistance under working loads can be conceptualized into six types: trapezoid shape, inverted trapezoid shape, olive shape, lantern shape, garlic shape, peak and valley shape. The tip resistance ratio decreases with the increasing shaft resistance and the increasing ratio of length to diameter, and it increases nonlinearly with the increasing head loads. The values of the tip resistance ratio under working loads are given. Each conceptual mode for the shaft resistance is decomposed into rectangular and triangular distribution units associated with the pile length l and kl . Then the additional stress coefficient of Mindlin solution for settlement can be determined according to the above results. The calculated results show that except regular trapezoid shape and garlic shape distributions of shaft resistance, the integral value of the additional stress using the Geddes mode is about 15%~74% larger than that of the conceptualization shape. The higher the center of gravity of the shaft resistance, the greater the differences between the Geddes mode and the measured.

Key words: shaft resistance; tip resistance; distribution mode;

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAJ07B01)

收稿日期: 2014-04-08

conceptualization; additional stress

0 引言

采用 Mindlin 解计算桩基沉降时, 现行规范规定按 Geddes 正梯形侧阻力分布假定计算侧阻产生的附加应力, 工程应用实践也通常如此。究其原因有二: 一是进行单桩静载试验测定侧阻分布的工作投入大, 时间长, 仅限于少数重点工程实施; 二是侧阻分布实测曲线多数形态复杂, 难以直接用于 Mindlin-Geddes 公式的附加应力计算。由此导致符合桩基应力变形状态的 Mindlin 解在桩基沉降计算中难以推广应用, 或应用不当而收不到应有的效果。文献[1]在利用侧阻测试曲线计算 Mindlin 解附加应力方面进行了有益的探讨。

笔者收集了国内有关论文和试验报告中 24 组 51 根试桩的侧阻、端阻、沉降测试和相关场地地质资料。这些试验资料涵盖沿海、内陆地区多种土质地层中的桩, 桩型以灌注桩、后注浆灌注桩为主, 含少量 PHC 预制桩, 其长径比为 12~89。对各试验桩的侧阻、端阻性状进行了分析, 将工作荷载下的侧阻分布模式进行了归类概化, 对端阻比与相应参数的经验关系进行了整理分析, 将每种侧阻分布概化模式划分为 2~3 个正三角形、矩形单元, 据此可据文献[2]查表确定其沉降计算的地基附加应力系数, 将不同侧阻分布概化模式的实测案例与 Geddes 正梯形分布假定的附加应力进行了对比分析。

1 桩侧阻力分布模式概化

1.1 概化方法

鉴于桩基沉降计算对应于桩基工作荷载, 因此取单桩承载力特征值即 1/2 极限荷载 $R_a=Q_u/2$ 下侧阻分布模式进行概化。其概化原则是“避繁就简, 作用等效”, 即将繁杂的侧阻实测曲线概化为外形相似的折线, 该折线多边形的拐点坐标按实测侧阻、端阻比、桩顶荷载确定, 使概化折线多边形包络图与实测侧阻曲线包络图的重心相近、面积相等, 由此实现二者的地基附加应力场相近。

为统一判定桩侧桩端土层性质的软硬强弱程度将其划分为以下 6 类:

- (1) 极软土: 淤泥, f_{ak} (地基承载力特征值) <40 kPa 的黏性土、粉土、流塑黄土。
- (2) 软土: 淤泥质土, $40\text{ kPa} \leq f_{ak} < 90\text{ kPa}$ 的黏性土、粉土、软塑黄土。
- (3) 较软土: 稍密细、粉砂, $90\text{ kPa} \leq f_{ak} < 150\text{ kPa}$ 的黏性土、粉土、可塑黄土。
- (4) 较硬土: 稍密碎石土, 稍密砾、粗、中砂, 中密细、粉砂, $150\text{ kPa} \leq f_{ak} < 250\text{ kPa}$ 的黏性土、粉土、硬塑黄土。

(5) 硬土: 中密碎石土, 中密砾、粗、中砂, 密实细、粉砂, $250\text{ kPa} \leq f_{ak} < 400\text{ kPa}$ 的黏性土、粉土, 强风化软质岩, 坚硬老黄土。

(6) 坚硬土: 密实碎石土, 密实砾、粗、中砂, $f_{ak} \geq 400\text{ kPa}$ 的黏性土, 强风化硬质岩, 中风化软质岩。

对于后注浆灌注桩, 考虑其注浆加固效应, 将黏性土、粉土的分类等级按上述自然状态上调一个等级; 对于砂土、碎石土上调二个等级。

1.2 侧阻沿桩身分布概化模式

根据统计, 将侧阻力沿桩身分布分为 6 种。概化模式如图 1 所示, 下文将结合具体案例详细分析说明。

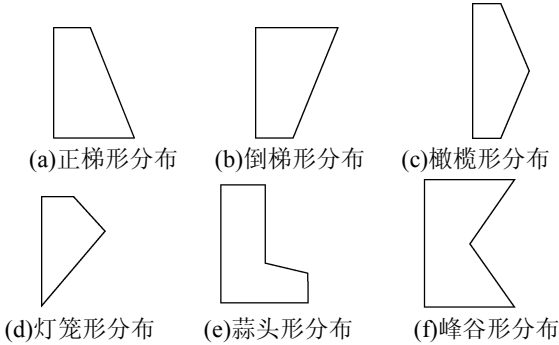


图 1 侧阻力沿桩身分布概化模式示意图

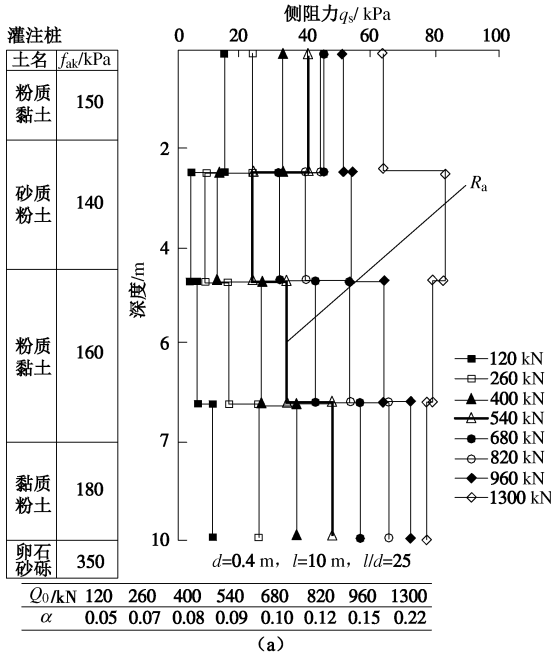
Fig. 1 Conceptualized mode of shaft resistance along pile

(1) 正梯形分布

形成条件: 除硬土、坚硬土中的中长桩 ($30 < l/d \leq 60$) 和长桩 ($l/d > 60$) 外, 桩侧土层自上而下逐渐增强。

案例:

a) 短桩 (长径比 $l/d \leq 30$): 桩侧自上而下由较硬土层逐渐增强至硬土层 (见图 2), 或由硬土层增强至坚硬土层 (见图 3)。



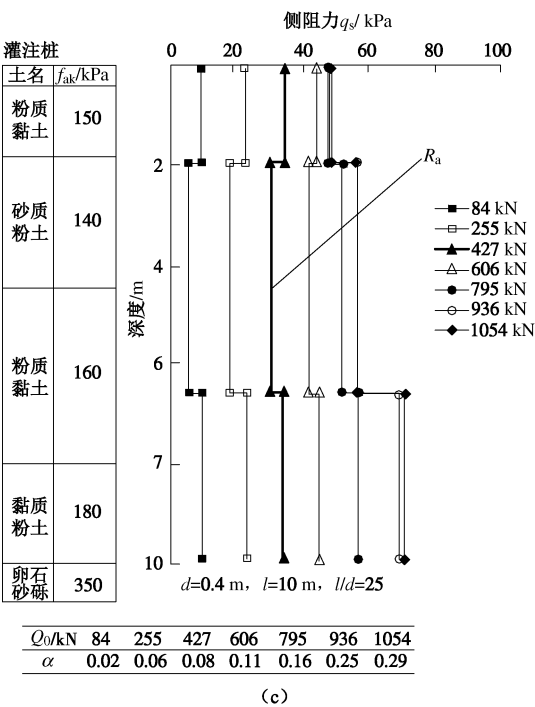
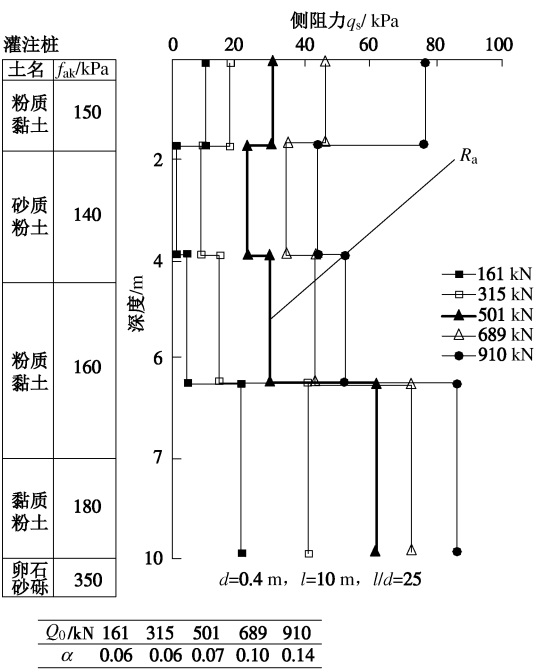


图 2 北京某试验场地单桩静载试验侧阻分布、端阻比^[3] (R_a 为单桩承载力特征值, α 为端阻比, α =总端阻 Q_p /桩顶荷载 Q)

Fig. 2 Distribution curves of shaft resistance and tip resistance ratio using static load tests on piles in Beijing

b) 中长桩 ($30 < l/d \leq 60$), 桩侧土层自上而下由较硬土层逐渐增强至硬土层, 如图 4, 5 所示。

c) 长桩 ($l/d > 60$), 桩侧土层自上而下由软土层逐渐增强至较软土、较硬土或硬土, 如图 6, 7 所示。

(2) 倒梯形分布

形成条件: 短桩 ($l/d \leq 30$) 或中长桩 ($30 < l/d \leq 60$), 土层自上而下逐渐由强变弱。

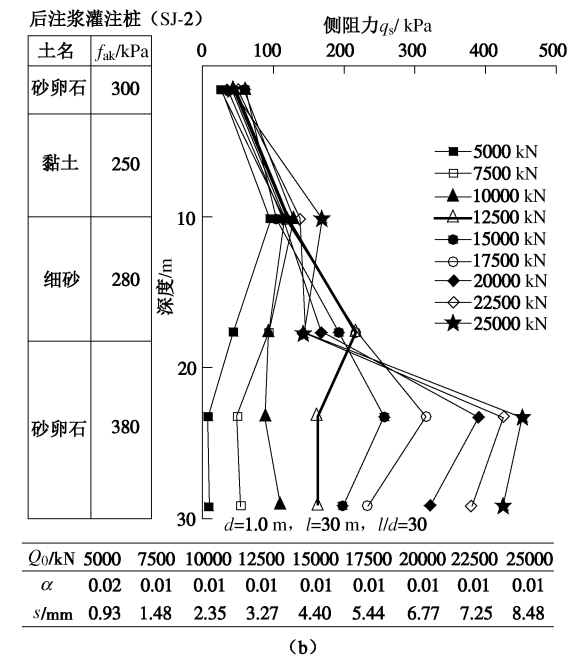
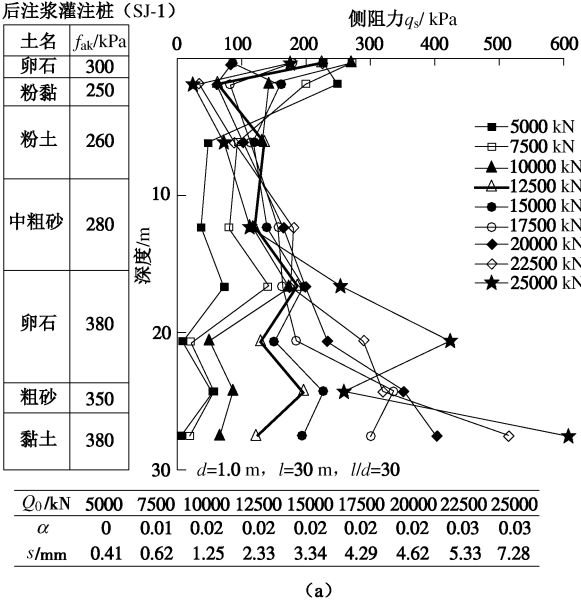
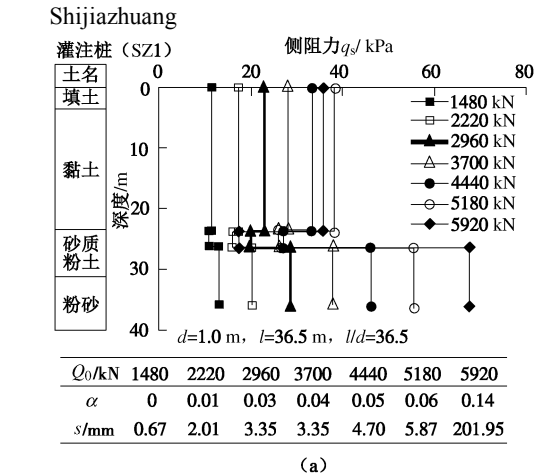


图 3 石家庄开元环球中心单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[4]

Fig. 3 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in



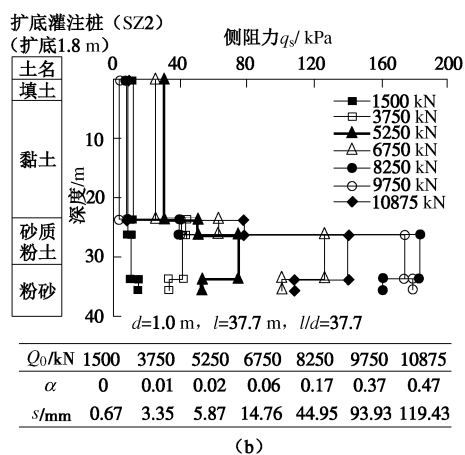


图4 上海松江某工程单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[5]

Fig. 4 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Shanghai

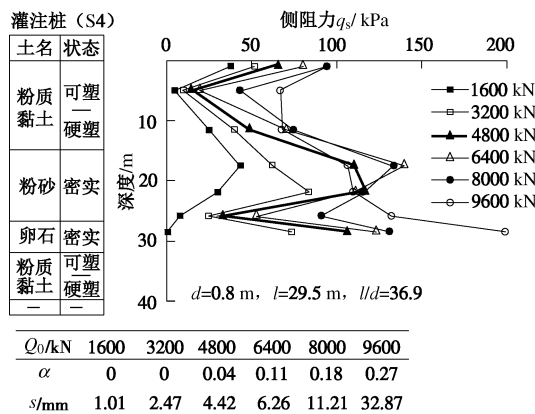


图5 工人日报社轮转机房单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[6]

Fig. 5 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on pile in Beijing

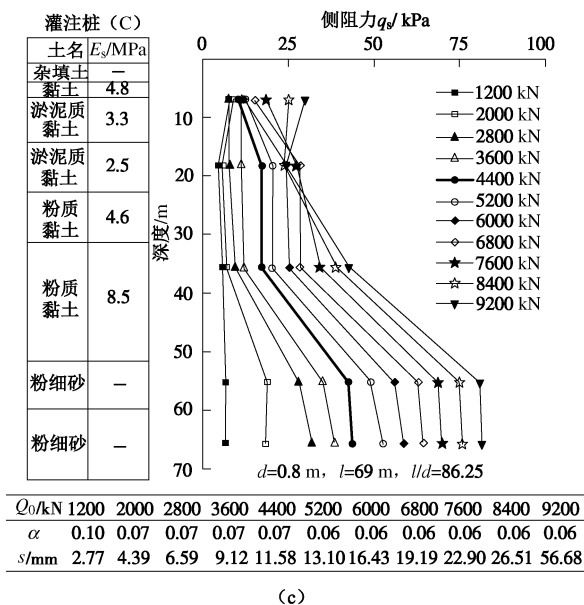
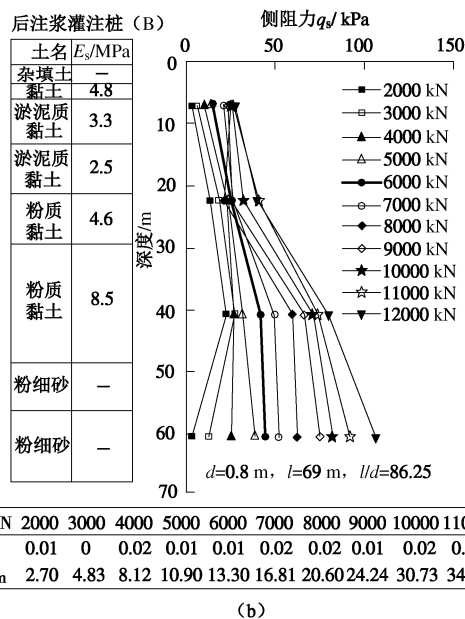
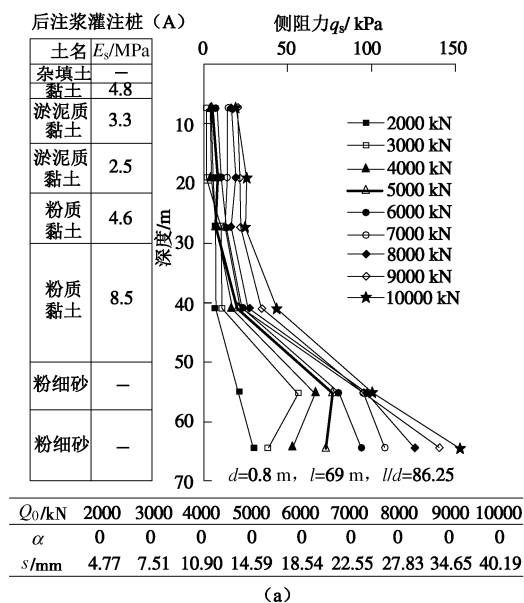
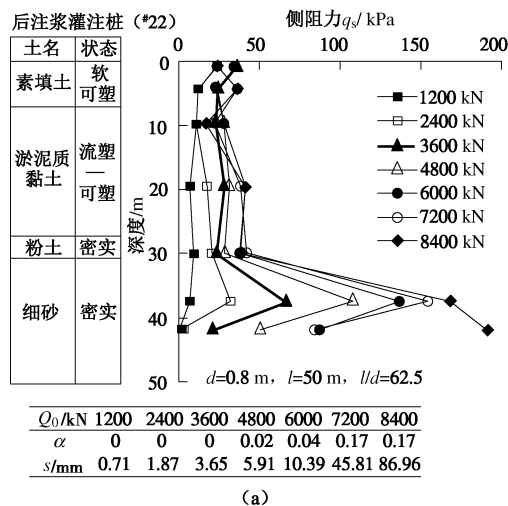


图6 上海江山大厦单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[7]

Fig. 6 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Shanghai



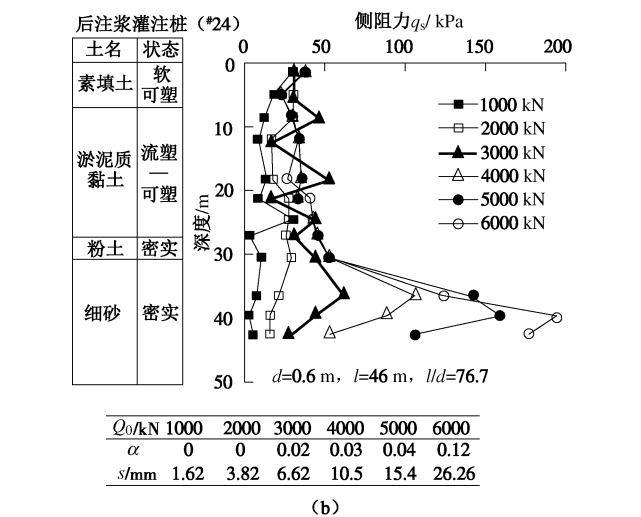


图 7 天津保税区国际贸易大厦单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[8]

Fig. 7 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Tianjin

案例:

长径比 $l/d=37, 40, 43$, 顶部为较硬黏性土层, 其下为粉黏、粉土、粉砂交互土层, 普通灌注桩, 桩端持力层为粉黏, 如图 8 所示。

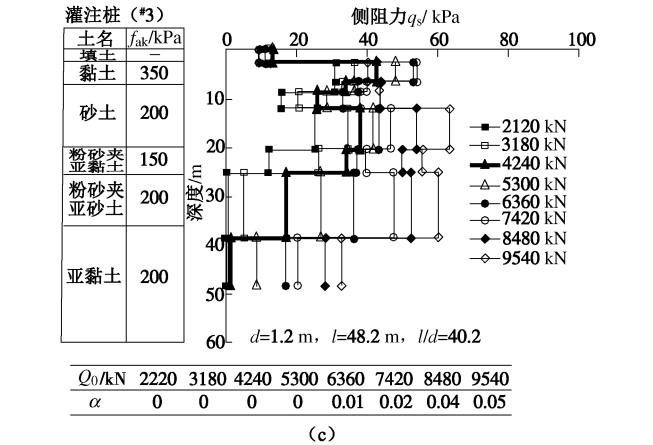
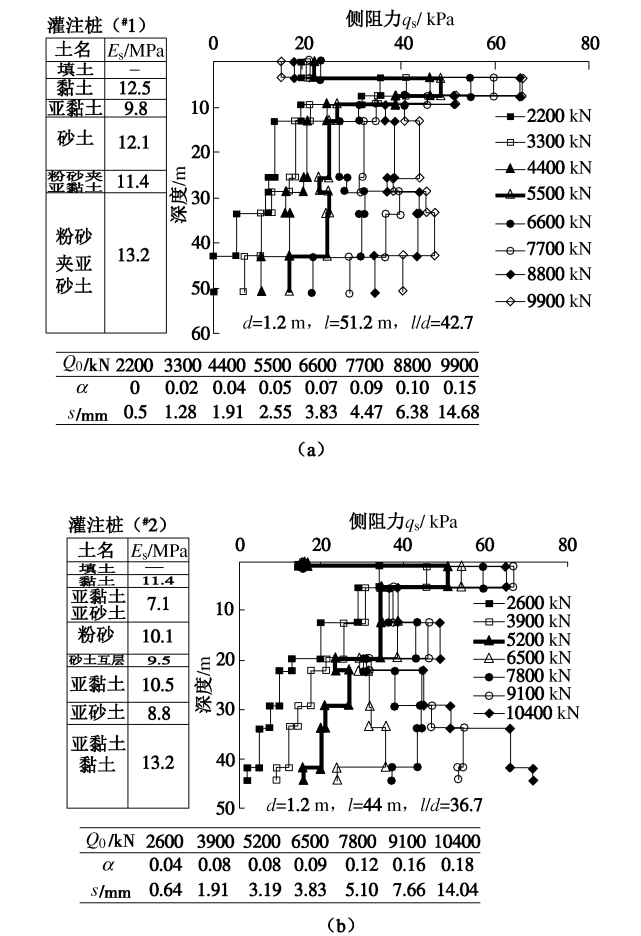


图 8 常州某输电工程单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[9-10]

Fig. 8 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Changzhou

(3) 橄榄形分布

形成条件: 中长桩 ($30 < l/d \leq 60$) 或长桩 ($l/d > 60$), 桩侧为较软、较硬的砂土、粉土与黏性土交互层, 上部土层相对软弱, 下部土层侧阻因桩身压缩而发挥滞后, 随深度递减。

案例:

a) 长径比 $l/d=50$, 桩侧中、上部为黄土, 下部为硬塑黏性土, 如图 9 所示。

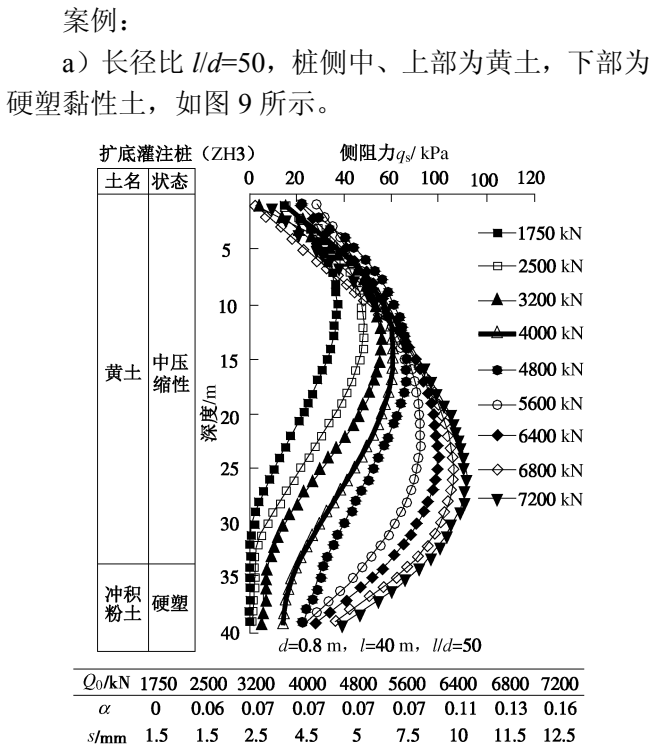


图 9 宁夏自重湿陷性黄土单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[11]

Fig. 9 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles at loess field in Ningxia

b) 长径比 $l/d=60 \sim 80$, 桩侧自上而下由软土、

较软土过渡为较硬黏性土、粉土、砂土交互层，如图 10~14 所示。

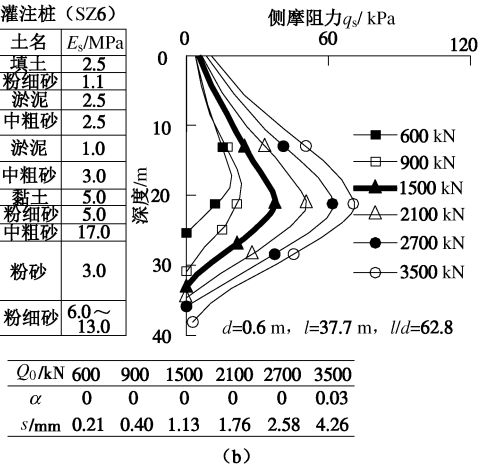
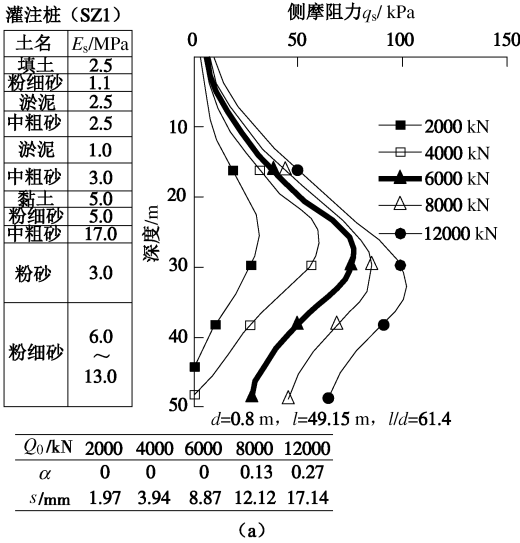


图 10 广西某电厂软土地单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[12]

Fig. 10 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Guangxi

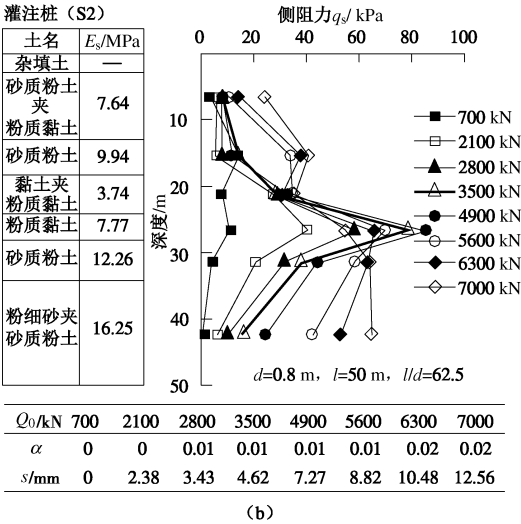
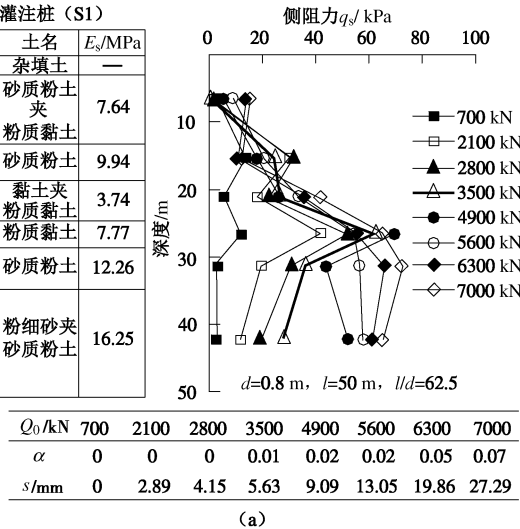


图 11 上海久事大厦单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[13]

Fig. 11 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Shanghai

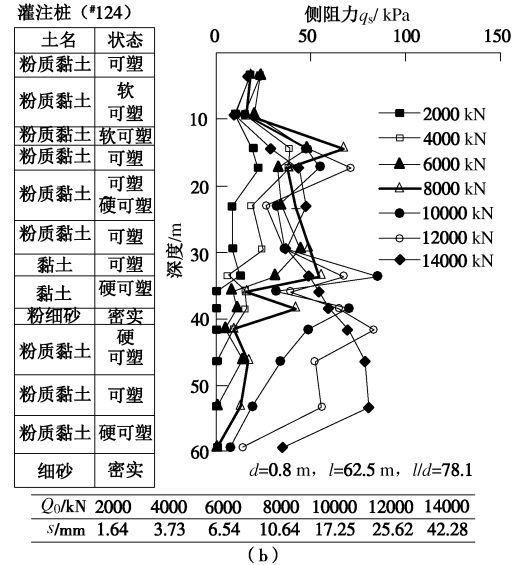
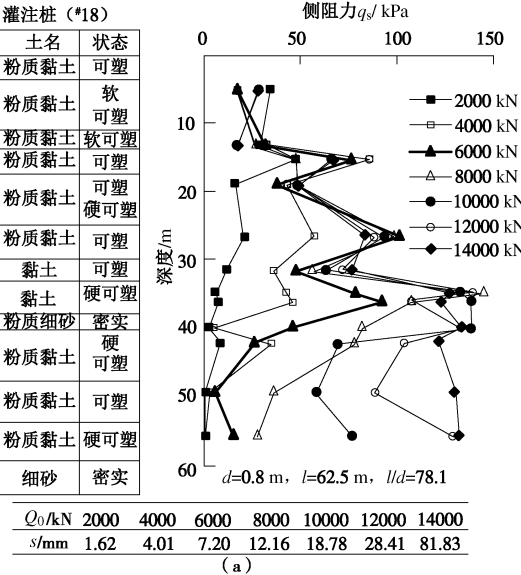


图 12 天津紫花园公寓单桩静载试验侧阻分布、桩顶沉降^[14]

Fig. 12 Distribution curves of shaft resistance and pile top settlement using static load tests on piles in Tianjin

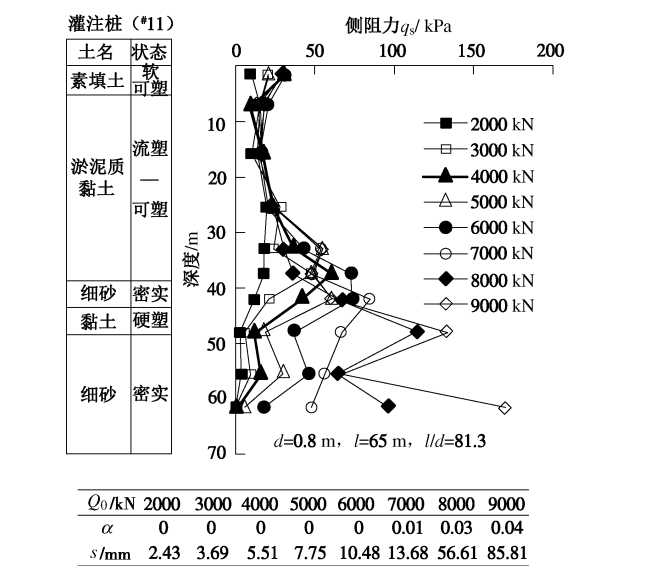


图 13 天津港保税区单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[8]

Fig. 13 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Tianjin

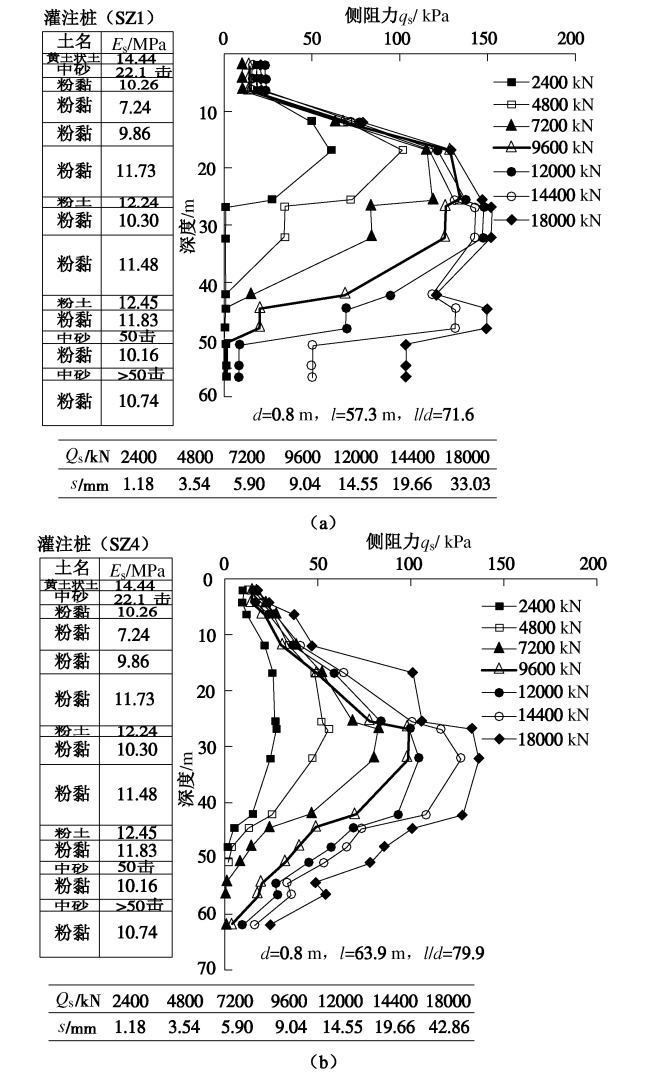


图 14 西安高新区黄土地基中单桩静载试验侧阻分布、桩顶沉降^[15]

Fig. 14 Distribution curves of shaft resistance and pile top settlement using static load tests on piles at loess field in Xi'an

(4) 灯笼形分布

形成条件：中长桩 ($30 < l/d \leq 60$)，长桩 ($l/d > 60$)，桩侧土为较硬至坚硬碎石土、砂土、黏性土交互层，下部土层侧阻因桩身压缩而无法发挥，后注浆者侧阻分布异化更显著。

案例：

a) $l/d=42 \sim 48$ ，后注浆灌注桩：桩侧为硬黏性土、中粗砾砂、卵石层交互层，如图 15~17 所示。

b) $l/d=50, 57$ ，桩侧顶部为极软土，以下为较硬中砂和黏性土交互层，如图 18 所示。

c) $l/d=80$ ，后注浆灌注桩，桩侧为黏性土、密实粉土、粉细砂交互层，如图 19 所示。

d) $l/d=67, 79$ ，PHC 管桩或 RC 方桩，顶部为填土，以下为较硬、硬黏土、粉质黏土互层，如图 20 所示。

e) $l/d=63$ ，后注浆灌注桩，顶部为较软黏性土，中下部为密实粉细砂、粉土交互层，桩端进入密实粉砂夹中、粗砂层，如图 21 所示。

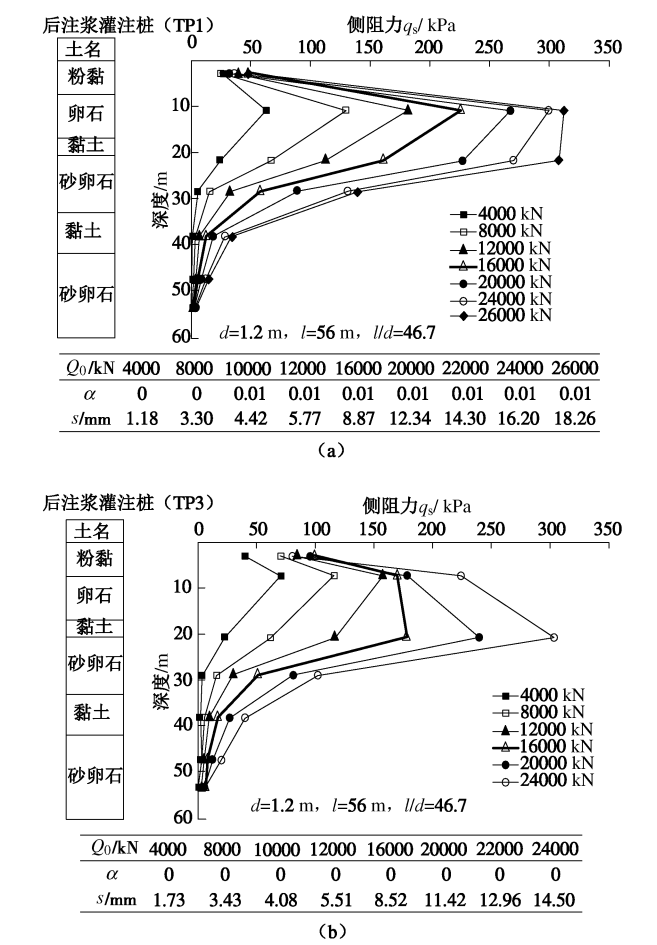
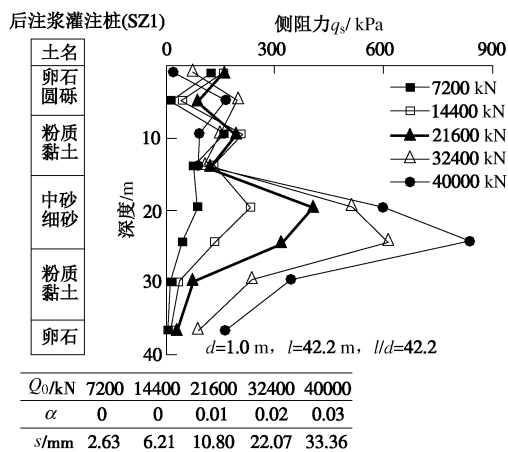
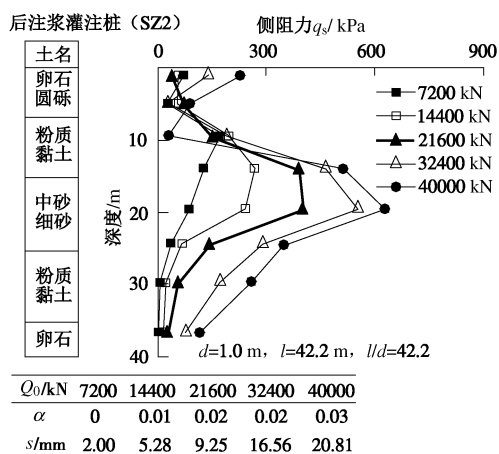


图 15 北京国贸三期单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[16]

Fig. 15 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Beijing



(a)



(b)

图 16 北京中国尊单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[17]

Fig. 16 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Beijing

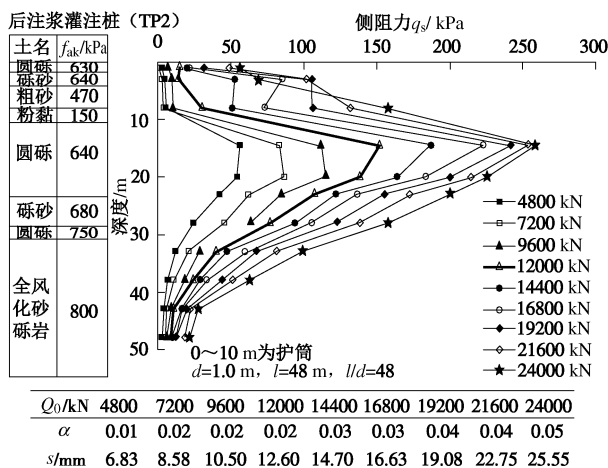
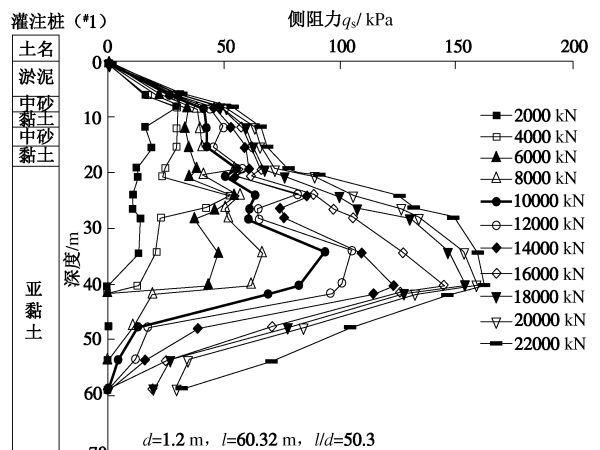
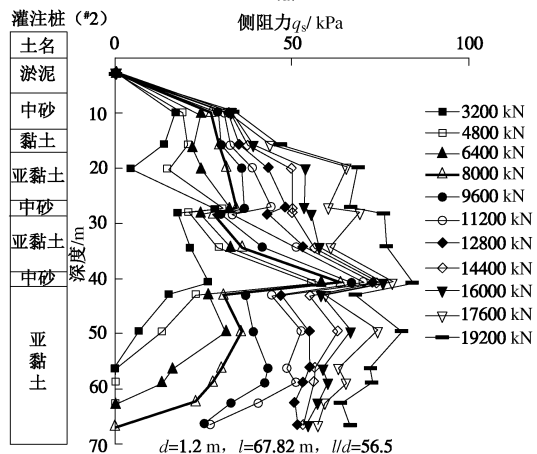
图 17 沈阳恒隆市府广场单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[18]

Fig. 17 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Shenyang



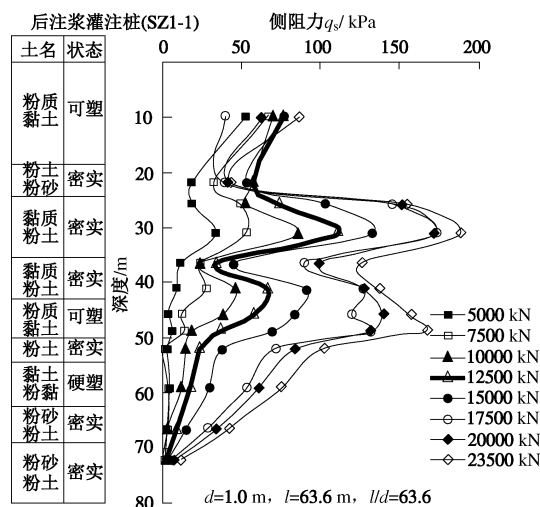
(a)



(b)

图 18 湛江海湾大桥单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[19]

Fig. 18 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Zhanjiang



(a)

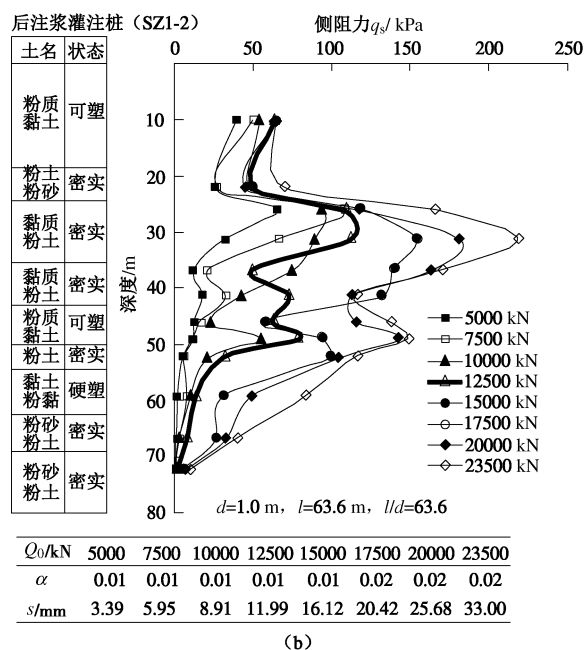
图 19 天津津塔单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[20]

Fig. 19 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Tianjin

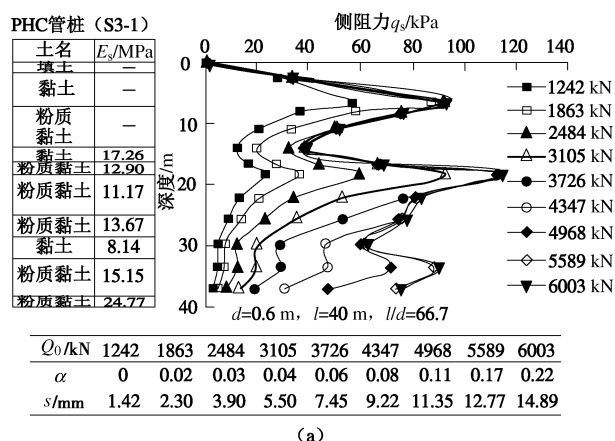


图 20 广西某电厂 PHC 管桩和预置方桩单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[21]

Fig. 20 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Guangxi

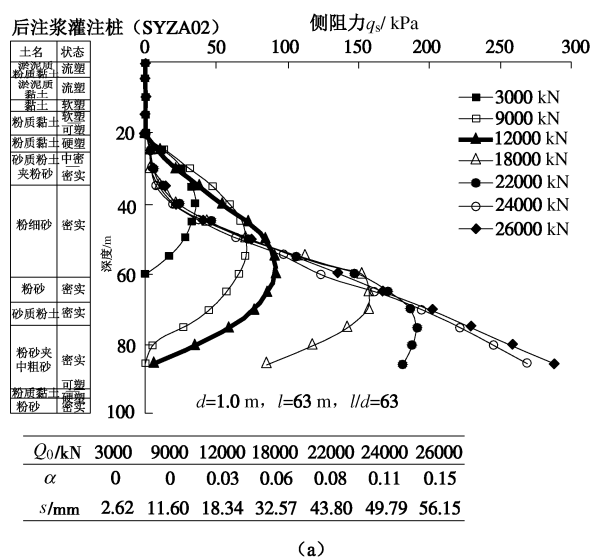


图 21 上海中心大厦单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[22-23]

Fig. 21 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Shanghai

(5) 蒜头形分布

形成条件：不限长径比，桩侧上、中部为软土、较软土，下部突变为硬土或坚硬土。

案例：

a) 短桩, $l/d=12\sim 15$, 桩侧上、中部为较软饱和黄土状土, 下部突变为稍密卵石, 如图 22 所示。

b) 长桩, $l/d=77$, 上、中部为极软土、软土, 下部突变为密实粉土, 如图 23 所示。

c) 长桩, $l/d=61\sim 63$, 后注浆灌注桩, 上、中部为极软土、软土, 下部突变为卵石层, 如图 24 所示。

(6) 峰谷形分布

形成条件：中长桩和长桩，桩侧上、下部为较硬

土、硬土（或为因沉桩挤土而增强的碎石土、砂土），中部为软土。

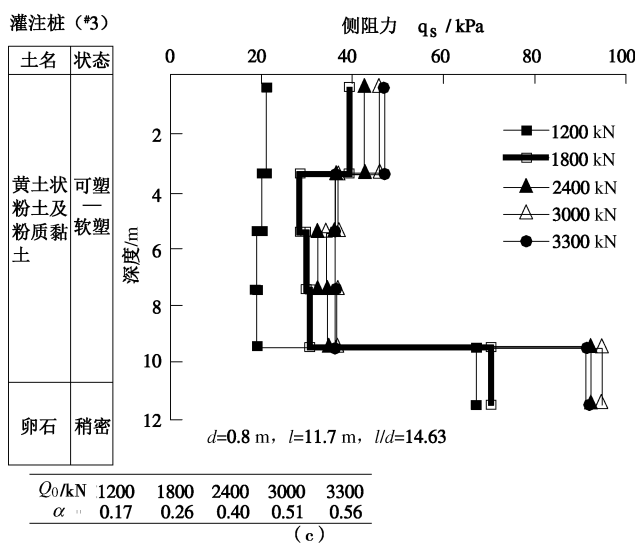
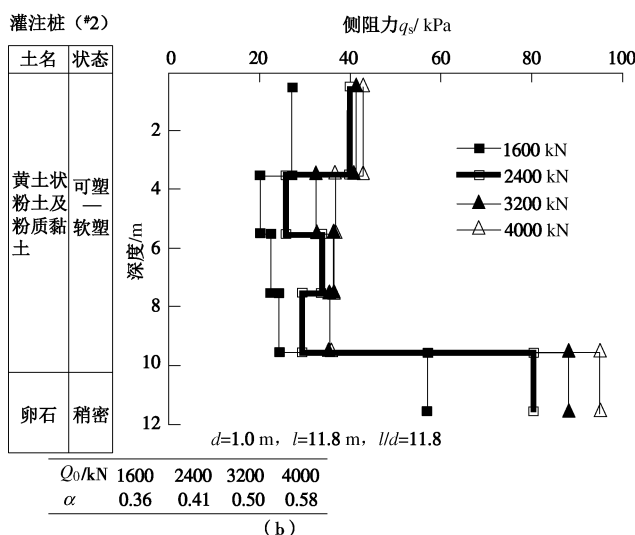
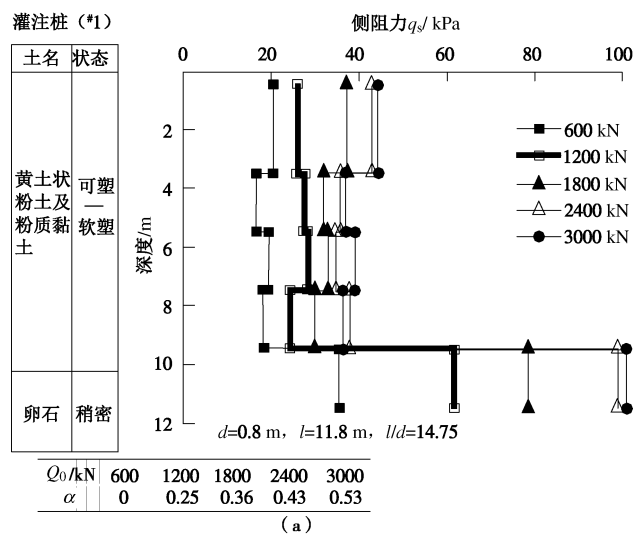


图 22 兰州永登饱和黄土场地单桩静载试验侧阻分布、端阻比^[24]

Fig. 22 Distribution curves of shaft resistance and tip resistance ratio using static load tests on piles in Lanzhou

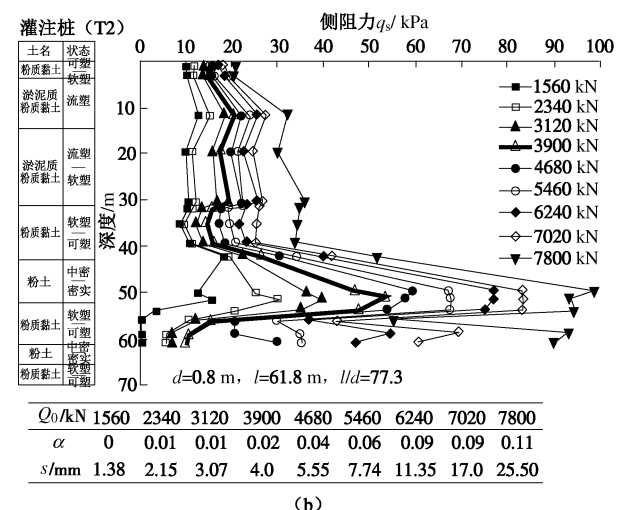
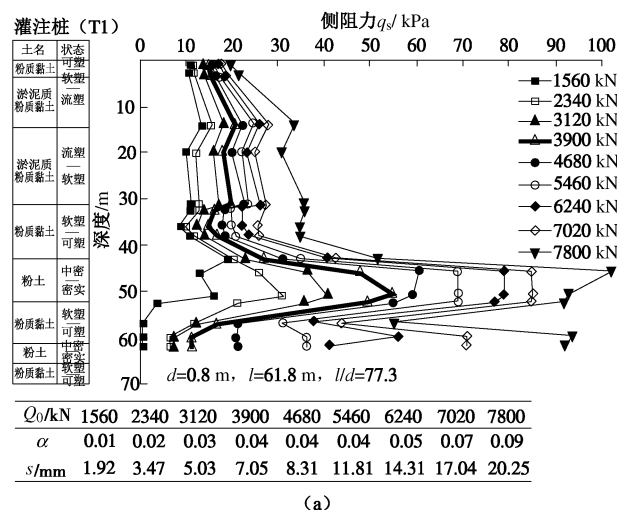
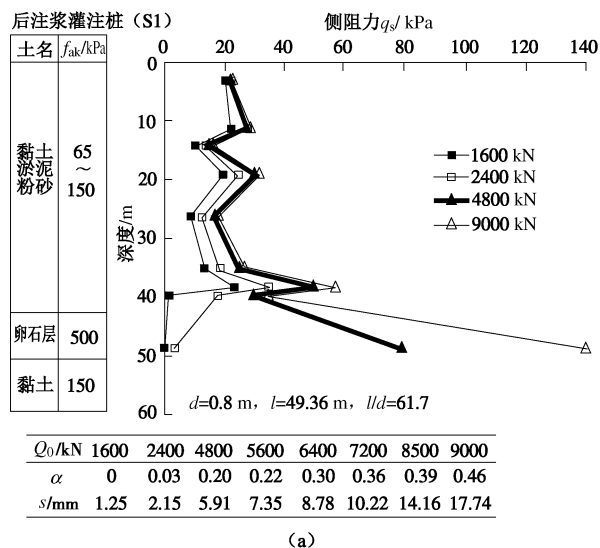


图 23 杭州湾北岸某发电厂软土地单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[25]

Fig. 23 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using static load tests on piles in Hangzhou



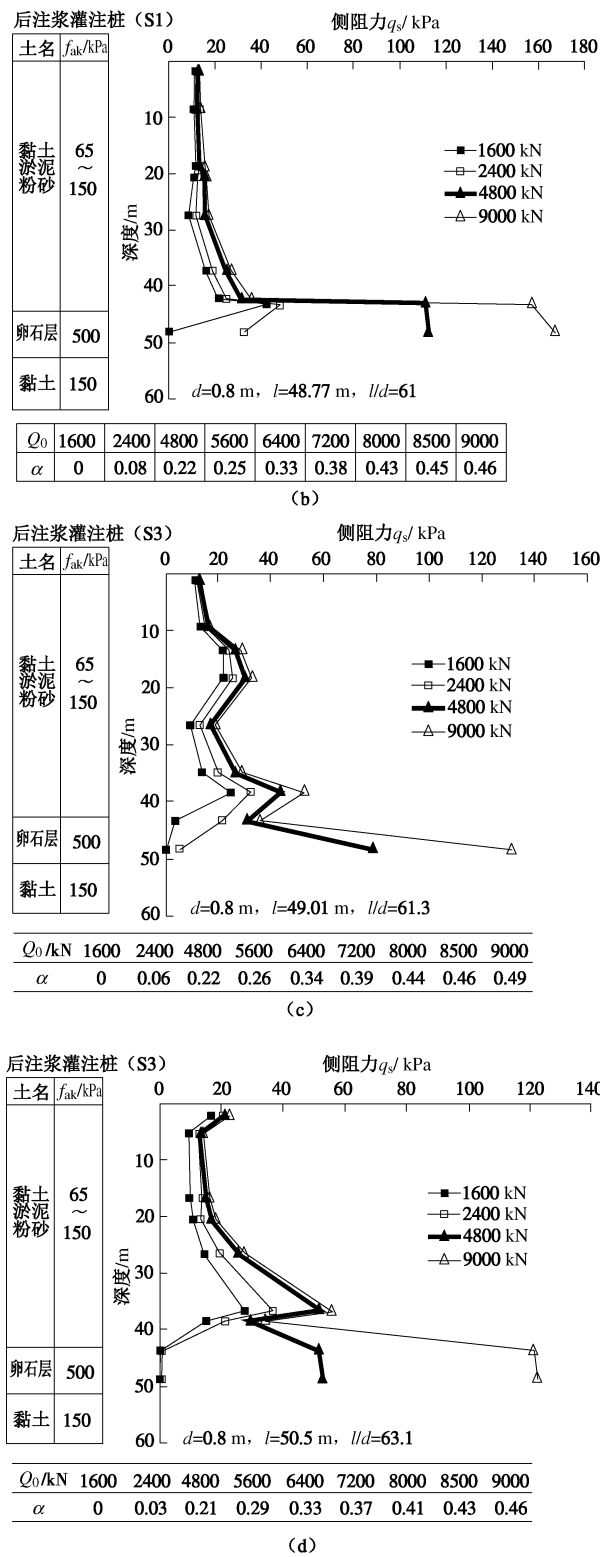


图 24 温州鹿城广场单桩静载试验侧阻分布、端阻比^[26]

Fig. 24 Distribution curves of shaft resistance and tip resistance ratio using static load tests on piles in Wenzhou

案例: $l/d=80, 86$, PHC 管桩, 桩侧上部为稍密中砂, 其中下部为流塑淤泥质土, 厚度达 $1/2$ 桩长, 其下部为粉黏、粉土较软土层, 桩端进入中密碎石土, 沉桩挤土对稍密中砂、中密圆砾的挤土加密效应明显, 如图 25。

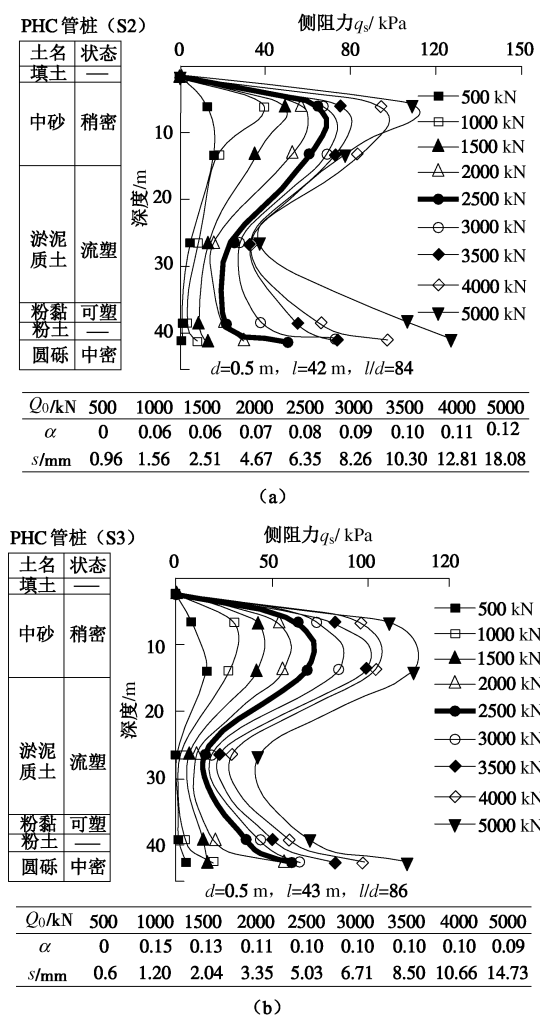


图 25 福建某文体中心单桩静载试验侧阻分布、端阻比、桩顶沉降^[27]

Fig. 25 Distribution curves of shaft resistance, tip resistance ratio and pile top settlement using a static load tests on piles in Fujian

2 桩侧阻力性状特征与分布模式影响因素

2.1 侧阻力性状特征

(1) 桩侧顶部的碎石土、砂土侧阻呈现应变软化
位于桩侧顶部约 $5d$ 深度范围的碎石土、砂土的侧阻在较低荷载水平下率先达到峰值, 随后不增反降, 发挥值远低于中下部同类土层。见图 3 石家庄环球国际中心试桩, 顶部砂卵石侧阻仅为中下部相同土层的 $10\%\sim 30\%$; 又如图 16 中中国尊工程试桩, 顶部圆砾、卵石在工作荷载下的侧阻仅为中部中细砂层的 $1/4$; 图 17 中沈阳恒隆市府广场试桩, 顶部圆砾、砾砂层在工作荷载下的侧阻仅为中部的 $15\%\sim 20\%$ 。

位于桩顶部碎石土、砂土层侧阻出现应变软化的原因, 主要是该处上部临空, 桩侧围压小, 而这类土的桩侧阻力源于土的摩擦强度 ($\sigma \tan \varphi$), 受围压制约

明显。

(2) 桩身中部碎石土、砂土侧阻呈现应变硬化

图 15~17 所示试桩, 桩侧中部碎石土层的侧阻随深度增大而增长, $15d \sim 20d$ 深度处侧阻增至峰值, 工作荷载下其峰值可达到规范经验值的 3~5 倍, 峰值以下随深度递减。

图 18, 19, 21 所示砂土、粉土、黏性土交互层中的试桩, 位于中部的中砂、粉砂层也显示侧阻应变硬化, 与上述碎石土层相比, 硬化峰值位置下移至 $30d \sim 40d$, 工作荷载下的峰值超过规范经验值的 3 倍。

(3) 桩侧不同层位的黏性土侧阻不显示软化和硬化现象。由图 2, 4, 6, 8, 22 所示试验结果可清楚看出, 桩侧黏性土侧阻基本上可得到正常发挥, 没有出现软化和硬化现象。

2.2 侧阻分布影响因素

(1) 桩侧土层性质与分布

上述侧阻分布概化模式中有 4 种是由桩侧土层性质与分布影响所主导, 包括: 土层自上而下逐渐增强的正梯形分布; 土层自上而下逐渐减弱的倒梯形分布; 上、中部为软土, 下部突变为硬土的蒜头形分布; 上、下部为硬土, 中部为软土的峰谷形分布。以上 4 种侧阻分布模式统称为土层性质与分布主导型。其余 2 种侧阻分布模式则由土层性质与分布、长径比、后注浆效应综合影响所致, 包括较软、较硬土层中的中长桩或长桩的橄榄形分布; 具有应变硬化特性或经后注浆显著增强的碎石类土、砂土中的中长桩或长桩的灯笼形分布。统称二者为综合影响异化型分布。

(2) 桩的长径比

桩长径比的影响实为桩身的压缩效应, 即桩身压缩导致桩土相对位移随深度递减, 乃至趋零, 从而影响侧阻发挥。其影响大小与土层软硬密切相关。试验表明, 长径比愈大, 土层愈硬, 桩身压缩效应愈明显。对于长径比 $l/d \leq 30$ 的短桩, 极限荷载下上下土层侧阻均可得到正常发挥; 当桩侧以硬土、坚硬土为主时, 工作荷载下的下部侧阻的发挥率偏低 (如图 3)。但对于长径比 $l/d \leq 30$ 的桩确定侧阻分布模式而言, 忽略桩身压缩影响是可行的。

对于长径比 $l/d > 30$ 的中长桩、长桩, 桩身压缩对侧阻分布的影响程度随桩侧土层性质而异。当桩侧以软土、较软土为主, 下部为砂土或碎石土, 如图 6 中上海江山大厦、图 7 中天津保税区国贸大厦、图 24 温州鹿城广场试桩, 长径比分别为 86, 77, 61, 上下部侧阻发挥正常, 工作荷载下侧阻分布模式仍以土性、土层分布主导。但当桩侧以较硬土为主时, 桩身压缩导致下部土层侧阻发挥滞后, 工作荷载下侧阻呈橄榄形分布, 如图 9~14 ($l/d = 50 \sim 80$)。当桩侧为硬至坚

硬碎石土、砂土、黏性土互层时, 桩身压缩效应更趋明显, 下部土层侧阻在工作荷载下得不到发挥, 侧阻呈灯笼形分布, 如图 15~21 ($l/d = 47 \sim 79$)。

(3) 后注浆效应

后注浆不仅可加固桩端一定范围的土体, 且浆液沿桩土界面上扩, 促使桩土结合增强、桩侧土强度提高, 从而增强侧阻力并不同程度影响侧阻分布。后注浆对碎石土、砂土、粉土、黏性土侧阻的增强效应和侧阻分布模式的影响依次递减。对于桩侧以碎石土、砂土为主的情况, 由于后注浆导致其桩身中部侧阻增强十分显著, 促使侧阻分布重心上移, 如图 15~17。

3 桩端阻力性状特征与端阻比

3.1 端阻比随有关因素变化

(1) 桩长径比和荷载水平的影响

图 26 为 3 组短、中长、长桩各在同一土层中的端阻比 α ($\alpha = Q_p/Q$) 随荷载水平 Q/Q_u 的变化, 其总体特征是长径比越大, 端阻比越小; 端阻比随荷载水平提高呈非线性增长, 工作荷载下的端阻比约为极限荷载下的 $1/6 \sim 1/2$ 。

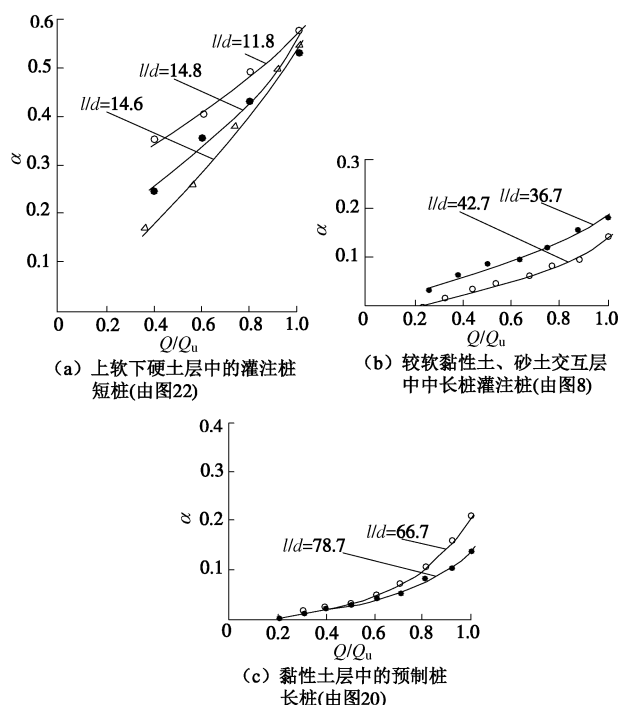


图 26 不同土层中端阻比 α 随长径比与荷载水平 Q/Q_u 的变化

Fig. 26 Variation of tip resistance ratio with proportion of top loads and length-diameter ratios of piles in different strata

(2) 桩侧土层性质的影响

表 1 列出短桩、中长桩、长桩各三组试验桩的桩端、桩侧土层特点及工作荷载下的平均侧阻和端阻比 α 的测试结果, 从该表可得到以下认识:

在桩端持力层为较硬、硬、坚硬土层条件下, 桩

表 1 地层土性对端阻比的影响实测

Table 1 Relationship between tip resistance ratios and soils around piles

桩型	组别	长径比 l/d	桩端持力层	桩侧土层	是否后 注浆	工作荷载下平 均侧阻 \bar{q}_{sa}/kPa	端阻比 α
短桩	图 3 (a)、(b)、(c)	30.0	砂卵石	砂卵石、细砂 黏性土夹层	是	163.0	0.015
	图 2 (a)、(b)、(c)	25.0	砂卵石	粉黏、砂质粉土夹层	否	39.0	0.08
	图 22 (a)、(b)、(c)	11.8~ 14.6	砂卵石	桩顶以下 4/5 桩长为软 土, 下部为卵石	否	36.9	0.30
中长 桩	图 16 (a)、(b)	42.2	卵石	卵石、粉黏、中细砂、 卵石互层	是	160.6	0.015
	图 17	48.0	全风化 砂砾岩	砾砂、粗砂、全风化砂 砾岩	是	78.0	0.02
	图 4 (a)、(b)	36.5	粉砂	黏土、粉土、砂质粉土、 粉砂	否	25.0	0.025
长桩	图 19 (a)、(b)	63.6	粉砂 粉土	密实粉土粉砂、硬塑粉 黏、粉土互层	是	62.0	0.01
	图 21 (a)、(b)	63.0	粉砂夹 中粗砂	硬塑粉黏、密实粉细砂、 砂质粉土、粉砂夹中粗 砂	是	58.8	0.045
	图 24 (a)、(b)、(c)、(d)	61.0~ 63.1	卵石	桩顶以下 4/5 桩长饱和 黏土、淤泥, 下部卵石	是	33.4	0.21

侧土层侧阻力大小是影响端阻比的主导因素, 即桩侧土越硬, 端阻比越小, 反之, 端阻比越大。如短桩组中桩端持力层均为砂卵石, 图 3 试桩, 工作荷载下侧阻平均值 \bar{q}_{sa} 达 163 kPa, 其工作荷载下端阻比 α 仅为 0.015; 而图 22 试桩, $\bar{q}_{sa}=36.9$ kPa, α 高达 0.30; 长桩组中图 24 试桩, $\bar{q}_{sa}=33.4$ kPa, α 达 0.21; 中长桩组中图 4 试桩的桩端持力层虽然不如图 16, 17 的桩端持力层, 但由于工作荷载下平均侧阻仅为 25 kPa, 其 α 反比后者高。

(3) 桩端持力层的影响

在桩侧土层、长径比相近的条件下, 桩端持力层的软硬程度对端阻比 α 有一定影响, 但其影响程度首先取决于桩侧土层性质, 当桩侧土层为较硬、硬、坚硬土层时, α 受桩端持力层性质影响不明显, 当桩侧土层为极软、软土层时, α 受桩端持力层性质影响敏感。如表 1 长桩组图 19, 24 试桩侧阻为较硬土层, 前者持力层为粉砂、粉土, 后者为粉砂夹中粗砂, 其相应端阻比 $\alpha=0.001, 0.045$; 又如长桩组图 24 试桩和图 23 试桩, 其桩侧均为软土, 桩端持力层前者为卵石, 后者为粉土, 其相应端阻比 $\alpha=0.21, 0.03$, 前者 α 显著大于后者。

3.2 端阻比经验参考值

根据上述端阻比测试结果分析表明, 端阻比受桩端持力层性质、桩长径比、平均侧阻力、荷载水平诸因素的综合影响而变化。对于计算沉降时采用的工作荷载下的端阻比 α 而言, 平均极限侧阻力 (这一参数可方便地根据勘察报告直接获取或由土的物理指标按《建筑桩基技术规范》中的经验参数表查得) 大小则

是主导影响因素, 由于侧阻的不同, 端阻比的变幅可达 10~20 倍, 桩端持力层性质和桩长径比对端阻比的影响变幅均在数倍以内。端阻比经验参考值列于表 2。

表 2 工作荷载下端阻比 α 参考值

Table 2 Reference values of tip resistance ratio under working

loads		平均极限侧阻力 \bar{q}_{su}/kPa			
桩端 持力层	桩长径比 l/d	50	100	200	300
较硬	$l/d \leq 30$	0.25	0.15	0.08	0.02
	$30 < l/d \leq 60$	0.2	0.1	0.05	0.01
	$l/d > 60$	0.1	0.05	0.02	0
硬	$l/d \leq 30$	0.3	0.2	0.1	0.03
	$30 < l/d \leq 60$	0.2	0.15	0.08	0.02
	$l/d > 60$	0.15	0.08	0.03	0.01
坚硬	$l/d \leq 30$	0.35	0.25	0.15	0.04
	$30 < l/d \leq 60$	0.25	0.2	0.1	0.03
	$l/d > 60$	0.2	0.1	0.05	0.02

注: 对于后注浆侧阻、端阻的增强系数按《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008 表 5.3.10 确定。

鉴于桩基沉降计算对象多为群桩, 因而端阻比取值宜考虑群桩效应。不同土层、不同桩距群桩试验表明, 群桩端阻比因群桩效应而增强^[28-30], 并随桩距减小, 其增强效应增大, 文献[31]建议端阻群桩效应系数取 1.2~1.7, 非黏性土取值高于黏性土。

4 按侧阻分布概化模式计算地基附加应力

4.1 侧阻分布概化模式分解及地基附加应力计算

将第一节所述 6 种侧阻概化模式图分解为沿全桩长 l 和桩端以上局部桩长 kl 分布的矩形、正三角形 4

种基本单元, 这样便可利用文献[2]提出的考虑桩径影响的矩形、正三角分布侧阻附加应力系数按 l/d , kl/d 查表 (如表 3) 计算附加应力。任一种侧阻分布概化模式由 2~3 个单元组成, 在桩顶附加荷载 Q 作用下桩端以下的地基竖向附加应力 σ_z 由端阻附加应力 $\sigma_{z,p}$ 、侧阻基本单元附加应力的代数和 $\sigma_{z,s}$ 组成, 现分别表示如下: 地基任一点竖向附加应力为

$$\sigma_z = \sigma_{z,p} + \sigma_{z,s}, \quad (1)$$

端阻附加应力

$$\begin{cases} \sigma_{z,p} = q_p K_p, \\ q_p = \frac{4\alpha Q}{\pi d^2}. \end{cases} \quad (2)$$

桩长 l 矩形分布侧阻附加应力为

$$\begin{cases} \sigma_{z,sr} = q_{sr} K_{sr}, \\ q_{sr} = \frac{\beta Q}{\pi dl}. \end{cases} \quad (3)$$

桩长 kl 矩形分布侧阻附加应力为

$$\begin{cases} \sigma'_{z,sr} = q'_{sr} K'_{sr}, \\ q'_{sr} = \frac{\beta Q}{\pi dkl}. \end{cases} \quad (4)$$

桩长 l 正三角形分布侧阻附加应力为

$$\begin{cases} \sigma_{z,st} = \bar{q}_{st} K_{st}, \\ \bar{q}_{st} = \frac{(1-\alpha-\beta)Q}{\pi dl}. \end{cases} \quad (5)$$

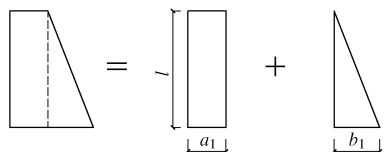
桩长 kl 正三角形分布侧阻附加应力为

$$\begin{cases} \sigma'_{z,st} = \bar{q}'_{st} K'_{st}, \\ \bar{q}'_{st} = \frac{(1-\alpha-\beta)Q}{\pi dkl}. \end{cases} \quad (6)$$

以上各式中, α 为总端阻与附加荷载 Q 之比; β 为矩形分布总侧阻与附加荷载 Q 之比; d 为桩径; l 为桩长; k 为侧阻局部分布长度与桩长之比; q_p , q_{sr} , \bar{q}_{st} 分别为端阻、 l 桩长的矩形分布侧阻、正三角分布平均侧阻; q'_{sr} , \bar{q}'_{st} 分别为 kl 桩长的矩形分布侧阻和正三角形分布平均侧阻; K_p , K_{sr} , K_{st} 分别为端阻附加应力系数、 l 桩长矩形分布侧阻附加应力系数和正三角形分布侧阻附加应力系数; K'_{sr} , K'_{st} 分别为 kl 桩长的矩形分布侧阻附加应力系数及正三角形分布侧阻附加应力系数。

6 种侧阻分布概化模式分解及相关参数的计算确定:

(1) 正梯形分布



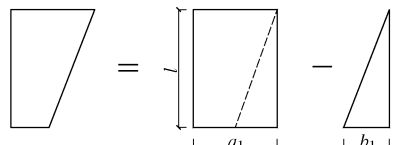
$$\sigma_{z,s} = q_{sr} K_{sr} + \bar{q}_{st} K_{st}, \quad (7)$$

$$q_{sr} = a_1, \quad (8)$$

$$\bar{q}_{st} = b_1/2 = (1-\alpha) Q/(\pi dl) - a_1. \quad (9)$$

式中, a_1 按桩顶 $2d$ 范围实测平均值确定。无实测值时, 可按勘察报告或参考桩基技术规范确定, 对于黏性土、粉土, $a_1 = \bar{q}_{su}/2$; 对于碎石土、砂土、粉土, $a_1 = \bar{q}_{su}/4$ (考虑软化效应); 其中 \bar{q}_{su} 为极限侧阻标准值。

(2) 倒梯形分布



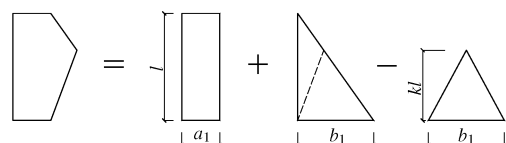
$$\sigma_{z,s} = q_{sr} K_{sr} - \bar{q}_{st} K_{st}, \quad (10)$$

$$q_{sr} = a_1, \quad (11)$$

$$\bar{q}_{st} = b_1/2 = a_1 - (1-\alpha) Q/(\pi dl), \quad (12)$$

式中, a_1 确定方法同 (1)。

(3) 橄榄形分布



$$\sigma_{z,s} = q_{sr} K_{sr} + \bar{q}_{st} K_{st} - \bar{q}'_{st} K'_{st}, \quad (13)$$

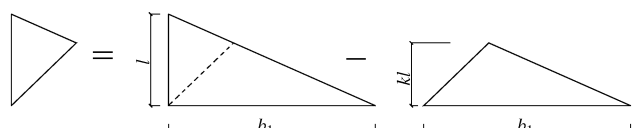
$$q_{sr} = a_1, \quad (14)$$

$$\bar{q}_{st} = b_1/2 = (1-\alpha) Q/[(1-k)\pi dl] - a_1/(1-k), \quad (15)$$

$$\bar{q}'_{st} = \bar{q}_{st}. \quad (16)$$

式中, a_1 确定方法同 (1), k 为中部侧阻力最大土层 $1/2$ 厚度处至桩端距离与桩长之比; 当桩侧土层上、下部对称分布时, $k=0.5$ 。

(4) 灯笼形分布



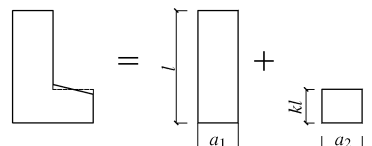
$$\sigma_{z,s} = \bar{q}_{st} K_{st} - q'_{st} K'_{st}, \quad (17)$$

$$\bar{q}_{st} = b_1/2 = (1-\alpha) Q/[(1-k)\pi dl], \quad (18)$$

$$\bar{q}'_{st} = \bar{q}_{st}. \quad (19)$$

式中, k 为桩身中上部侧阻力最大土层 $1/2$ 厚度处至桩端距离与桩长之比。

(5) 蒜头形分布



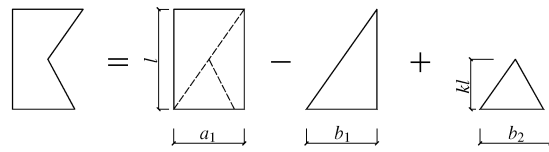
$$\sigma_{z,s} = q_{sr} K_{sr} + q'_{sr} K'_{sr}, \quad (20)$$

$$q_{sr} = a_1, \quad (21)$$

$$q'_{sr} = a_2 = (1-\alpha) Q/(k\pi dl) - a_1/k. \quad (22)$$

式中, k 为桩身下部硬、坚硬土层厚度与桩长之比。
 a_1 的确定方法同 (1)。

(6) 峰谷形分布



$$\sigma_{z,s} = q_{sr} K_{sr} - \bar{q}_{st} K_{st} + \bar{q}'_{st} K'_{st} \quad , \quad (23)$$

$$q_{sr} = a_1 \quad , \quad (24)$$

$$\bar{q}_{st} = b_1 / 2 = a_1 / 2 \quad , \quad (25)$$

$$\bar{q}'_{st} = b_2 / 2 = (1 - \alpha) Q / (k \pi d l) - a_1 / (2k) \quad , \quad (26)$$

式中, a_1 确定方法同 (1); b_2 按桩端以上 $2d$ 范围平均极限侧阻 \bar{q}_{su} 确定, $b_2 = \bar{q}_{su} / 2$; k 为软土夹层中部至桩端距离与桩长之比; 对于挤土预制桩应考虑对非密实砂、碎石土的挤土增强效应, 均应提高一个档次计算。

当上下部土层性质与厚度相近, 侧阻峰谷形可按上下部对称考虑, 即 $a_1 = b_1 = b_2$, 则

$$q_{sr} = \frac{4}{3} (1 - \alpha) Q / (\pi d l) \quad , \quad (27)$$

$$\bar{q}_{st} = \bar{q}'_{st} = \frac{2}{3} (1 - \alpha) Q / (\pi d l) \quad . \quad (28)$$

4.2 按侧阻分布概化模式与按 Geddes 正梯形分布假定计算的附加应力比较

对 6 种侧阻分布概化模式各以一试验桩为案例按考虑桩径影响的 Mindlin 解计算其地基附加应力, 并按 Geddes 正梯形分布假定计算各相应桩的地基附加应力。对桩中轴线桩端以下 $10d$ 深度范围由侧阻、端阻产生的附加应力分别积分、叠加。由于附加应力积

分值即表征沉降量的相对大小, 因而可据此评价不同侧阻概化模式对沉降的影响以及 Geddes 正梯形侧阻分布假定实际应用中存在的问题。由图 27 所示按 6 种侧阻概化模式与 Geddes 侧阻分布假定的附加应力积分值比较可得到如下认识。

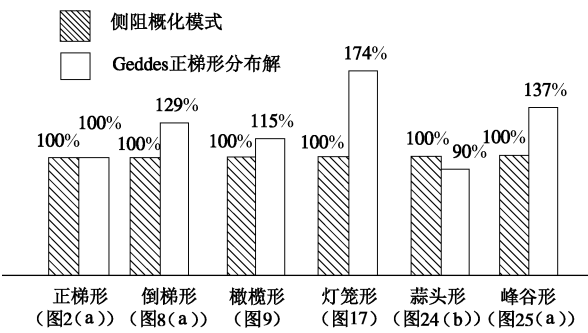


图 27 实测侧阻概化模式与 Geddes 正梯形侧阻模式单桩 Mindlin 附加应力积分值比较

Fig. 27 Comparison of integral values of Mindlin additional stress between Geddes' mode and authors' mode

按实测侧阻分布概化模式计算的地基附加应力沿深度积分值与 Geddes 正梯形分布假定相比较, 除正梯形、蒜头形概化分布外, 按 Geddes 正梯形分布假定的计算值偏大 15%~74%。其基本规律是: 实测侧阻概化分布重心愈靠桩身上部, 其产生的附加应力愈小, 与 Geddes 正梯形假定计算的附加应力的差异也愈大; 实测侧阻概化分布重心愈靠下, 其附加应力愈大, 如实测蒜头形概化分布的附加应力比 Geddes 正梯形假定计算值偏大约 10%。

表 3 端阻、矩形分布侧阻、正三角分布侧阻附加应力系数 K_p 、 K_{sr} 、 K_{st} (例) ($l/d=20$)

Table 3 Values of additional stress coefficient of tip resistance and different shaft resistance distribution types of piles ($l/d=20$)												
h/d ρ/d	K_p				K_{sr}				K_{st}			
	0	3	4	5	0	3	4	5	0	3	4	5
0	0.4999	0.0002	0.0002	0.0002	0.8826	0.1080	0.0851	0.0697	1.5350	0.1174	0.0858	0.0662
1	0.1218	0.0005	0.0003	0.0003	0.5305	0.1069	0.0844	0.0692	0.9020	0.1230	0.0898	0.0690
2	0.0371	0.0012	0.0006	0.0004	0.2991	0.1038	0.0829	0.0683	0.4758	0.1244	0.0922	0.0712
3	0.0172	0.0018	0.0010	0.0006	0.2032	0.0981	0.0800	0.0667	0.3056	0.1204	0.0918	0.0722
4	0.0099	0.0021	0.0012	0.0008	0.1525	0.0905	0.0758	0.0643	0.2192	0.1120	0.0888	0.0714
5	0.0064	0.0021	0.0014	0.0009	0.1214	0.0823	0.0709	0.0612	0.1680	0.1018	0.0838	0.0692
6	0.0045	0.0020	0.0014	0.0010	0.1003	0.0744	0.0657	0.0577	0.1346	0.0916	0.0778	0.0658
8	0.0026	0.0016	0.0013	0.0010	0.0737	0.0609	0.0557	0.0505	0.0940	0.0736	0.0656	0.0580
10	0.0017	0.0012	0.0011	0.0009	0.0576	0.0504	0.0472	0.0438	0.0708	0.0598	0.0550	0.0500
12	0.0012	0.0010	0.0009	0.0008	0.0468	0.0424	0.0403	0.0380	0.0558	0.0494	0.0464	0.0432
14	0.0009	0.0008	0.0007	0.0006	0.0391	0.0362	0.0348	0.0332	0.0456	0.0416	0.0396	0.0372
16	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0333	0.0313	0.0303	0.0291	0.0382	0.0354	0.0340	0.0324
18	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0288	0.0274	0.0266	0.0258	0.0326	0.0306	0.0296	0.0286
20	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0252	0.0242	0.0236	0.0230	0.0282	0.0268	0.0260	0.0252

5 结 论

基于不同土质地层中 24 组、51 根桩静载试验实测侧阻分布曲线和端阻比的分析, 以及对实测侧阻分布模式进行概化和附加应力计算比较, 得到以下 6 点结论。

(1) 桩侧土性质与分布、桩长径比、后注浆效应是影响侧阻性状与分布模式的主要因素; 近桩顶约 5d 深度范围的碎石土、砂土显示应变软化现象, 随着深度增加逐渐转变为应变硬化; 后注浆促使碎石土、砂土侧阻显著增强; 软土、较软土层中的桩其侧阻分布模式基本不受长径比影响; 硬土、坚硬土层中的中长桩、长桩, 其桩身压缩效应使下部土层侧阻发挥滞后乃至无法发挥, 从而导致侧阻分布异化, 重心上移。

(2) 端阻比随侧阻增强、随桩长径比增大而降低, 随荷载水平呈非线性增长, 给出了考虑桩端持力层性质、长径比、平均极限侧阻诸因素在工作荷载下的端阻比经验参考值。

(3) 将不同地质条件下不同长径比试验桩在工作荷载下的侧阻分布曲线按“避繁就简, 作用等效”的原则进行概化, 所谓作用等效就是概化折线包络图与实测曲线包络图外形相似、形心相近、等代面积与桩侧荷载相等。侧阻分布概化模式包含: 土层性质与分布主导型——正梯形、倒梯形、蒜头形、峰谷形以及综合影响异化型——橄榄形、灯笼形。

(4) 将不同侧阻分布概化模式分解为 2~3 个桩长为 l , kl 的矩形, 正三角形分布单元, 可根据考虑桩径因素的端阻、矩形分布侧阻、正三角分布侧阻的附加应力系数表确定供沉降计算的地基附加应力。

(5) 对上述 6 种侧阻分布概化模式以相应的实测案例进行 Mindlin 解附加应力计算并与传统的 Geddes 正梯形分布假定进行比较, 其沿桩轴线的附加应力积分值, 除正梯形、蒜头形概化模式外, Geddes 正梯形分布假定的计算值偏大 15%~74%, 侧阻分布重心愈高, 偏大幅度愈大。这说明采用符合实际的侧阻分布模式计算附加应力, 可显著提高桩基沉降计算的可靠性。

(6) 侧阻分布的概化可供侧阻测试结果分析利用参考, 对于无条件进行试桩侧阻测试的工程, 则可依据场地地质资料与 6 种概化模式形成条件对比分析, 判定侧阻分布概化模式和端阻比, 进而计算地基附加应力和沉降。侧阻的概化模式尚需收集更多的测试资料进行验证、补充、完善。

参考文献:

[1] 郑 刚, 张立明, 王 琦. 长桩桩侧摩阻力分布与地基附

加应力问题及对群桩沉降计算的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1649 - 1658. (ZHENG Gang, ZHANG Li-ming, WANG Qi. Distribution of shaft resistance of long piles and additional stress of foundation and their influences on settlement calculation of group piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1649 - 1658. (in Chinese))

[2] 邱明兵, 刘金砺, 秋仁东, 等. 基于 Mindlin 解的单桩竖向附加应力系数[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 130 - 137. (QIU Ming-bing, LIU Jin-li, QIU Ren-dong, et al. The additional stress coefficient research for the single pile based on Mindlin's stress solution theory under vertical load[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 130 - 137. (in Chinese))

[3] 韩 焯, 张乃瑞. 北京地区群桩基础荷载传递特性的现场测试研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 74 - 80. (HAN Xuan, ZHANG Nai-rui. In-situ tests on load transfer mechanism of group piled foundation in Beijing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 74 - 80. (in Chinese))

[4] 河北省建筑工程质量检测中心. 河北开元环球中心试验桩检测工程[R]. 石家庄: 河北省建筑工程质量检测中心, 2008. (Hebei Provincial Construction Engineering Quality Inspection Center. Bored piles test report of pile type test project for Hebei Kaiyuan International Center [R]. Shijiazhuang: Hebei Provincial Construction Engineering Quality Inspection Center, 2008. (in Chinese))

[5] 胡庆红, 谢新宇. 深长大直径扩底灌注桩承载性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 151 - 157. (HU Qing-hong, XIE Xin-yu. Experimental study on bearing capacity behavior of deep large diameter cast-in-place belled pile[J]. Journal of Building Structure, 2009, 30(4): 151 - 157. (in Chinese))

[6] 国家建筑工程质量监督检验中心. 工人日报社轮机房加层[R]. 北京: 国家建筑工程质量监督检验中心, 2000. (National Center for Quality Supervision and Test of Building Engineering. Bored piles test report of pile type test project for Daily Workers Engine Room Plus Layers[R]. Beijing: National Center for Quality Supervision and Tess of Building Engineering, 2000. (in Chinese))

[7] 交通部第三航务工程局科学研究所. 江山大厦桩基静荷试验报告[R]. 上海: 交通部第三航务工程局科学研究所, 1994. (Institute of The Third Navigation Engineering Bureau of the Ministry of Communications. [R]. Bored piles test

- report of pile type test project for Landscape Building[R]. Shanghai: Institute of The Third Navigation Engineering Bureau of the Ministry of Communications, 1994. (in Chinese))
- [8] 中国建筑科学研究院地基基础研究所. 天津港保税区国际贸易大厦桩基试验报告[R]. 北京: 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 1993. (Institute of Foundation Engineering of China Academy of Building Research. Bored piles test report of pile type test project for Tianjin Port Bonded Area International Trade Building[R]. Beijing: Institute of Foundation Engineering of China Academy of Building Research, 1993. (in Chinese))
- [9] 刘福天, 赵春风, 吴 杰, 等. 常州地区大直径钻孔灌注桩承载性状及尺寸效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(4): 858 - 864. (LIU Fu-tian, ZHAO Chun-feng, WU Jie, et al.. Experimental research on bearing behavior and size effect of large diameter bored cast-in-situ piles in Changzhou area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(4): 858 - 864. (in Chinese))
- [10] 赵春风, 鲁 嘉, 孙其超, 等. 大直径深长钻孔灌注桩分层荷载传递特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(5): 1020 - 1025. (ZHAO Chun-feng, LU Jia, SUN Qi-chao, et al.. Experimental study of load transmission property of large-diameter bored cast-in-situ deep and long pile in different soil layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(5): 1020 - 1025. (in Chinese))
- [11] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 338 - 345. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 338 - 345. (in Chinese))
- [12] 周代表. 软土地基超长桩工程性状分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 1): 87 - 90. (ZHOU Dai-biao. Research on over-length pile behavior in soft soil foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S1): 87 - 90. (in Chinese))
- [13] 上海市建筑科学研究院. 久事大厦混凝土灌注桩垂直静载试验报告[R]. 上海: 上海市建筑科学研究院, 1995. (Shanghai Research Institute of Building Science. Bored piles test report of pile type test project for Jiushi Mansion[R]. Shanghai: Shanghai Research Institute of Building Science, 1995. (in Chinese))
- [14] 中国建筑科学研究院地基基础研究所. 天津紫金花园公寓桩基试验报告[R]. 北京: 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 1993. (Institute of Foundation Engineering of China Academy of Building Research. Bored piles test report of pile type test project for Tianjin Zijin Garden[R]. Beijing: Institute of Foundation Engineering of China Academy of Building Research, 1993. (in Chinese))
- [15] 冯世进, 柯 瀚, 陈云敏, 等. 黄土地基中超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 110 - 114. (FENG Shi-jin, KE Han, CHEN Yun-min, et al. Experimental study on super-long bored pile in loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 110 - 114. (in Chinese))
- [16] 国家建筑工程质量监督检验中心. 国贸三期发展项目 A 期试桩工程[R]. 北京: 国家建筑工程质量监督检验中心, 2003. (National Center for Quality Supervision and Test of Building Engineering. Bored piles test report of pile type test project for China World Trade Center third phase A[R]. Beijing: National Center for Quality Supervision and Test of Building Engineering, 2003. (in Chinese))
- [17] 国家工业建筑物质量安全监督检验中心. 北京市 CBD 核心区 Z15 地块试验桩工程试验报告[R]. 北京: 国家工业建筑物质量安全监督检验中心, 2012. (National Test Center of Quality and Safety Supervision for Industrial Building and Superstructures. Bored piles test report of pile type test project for the core area of Beijing CBD Z15 block[R]. Beijing: National Test Center of Quality and Safety Supervision for Industrial Building and Superstructures, 2012. (in Chinese))
- [18] 辽宁省建筑设计研究院岩土工程公司. 沈阳恒隆市府广场桩基础试验检测工程[R]. 沈阳: 辽宁省建筑设计研究院岩土工程公司, 2008. (Liaoning Provincial Architectural Design & Research Institute of Geotechnical Engineering Company. Bored piles test report of pile type test project for Shenyang Heng Long Plaza[R]. Shenyang: Liaoning Provincial Architectural Design & Research Institute of Geotechnical Engineering Company, 2008. (in Chinese))
- [19] 王 陶, 马 晔. 超长钻孔桩竖向承载性状的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(7): 1053 - 1057. (WANG Tao, MA Ye. Study on over-length drilled pile bearing behavior under vertical load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(7): 1053 - 1057. (in Chinese))
- [20] 国家建筑工程质量监督检验中心. 天津津塔试验桩工程试验报告[R]. 北京: 国家建筑工程质量监督检验中心,

2007. (National Center for Quality Supervision and Test of Building Engineering. Bored piles test report of pile type test project for Global Financial Center of Tianjin[R]. Beijing: National Center for Quality Supervision and Test of Building Engineering, 2007. (in Chinese))
- [21] 张忠苗, 喻君, 张广兴, 等. PHC管桩和预制方桩受力性状试验对比分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 3059 - 3065. (ZHANG Zhong-miao, YU Jun, ZHANG Guang-xing, et al. Contrastive experimental analysis of bearing behaviors of PHC pile and precast square piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 3059 - 3065. (in Chinese))
- [22] 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司. 上海中心大厦桩型试验工程钻孔灌注桩检测报告[R]. 上海: 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 2008. (Shanghai Geotechnical Investigations and Design Institute Co Ltd. Bored piles test report of pile type test project for Shanghai Center Tower[R]. Shanghai: Shanghai Geotechnical Investigations and Design Institute Co Ltd, 2008. (in Chinese))
- [23] 王卫东, 李永辉, 吴江斌. 上海中心大厦大直径超长灌注桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1817 - 1826. (WANG Wei-dong, LI Yong-hui, WU Jiang-bin. Field loading tests on large-diameter and super-long piles of Shanghai Center Tower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1817 - 1826. (in Chinese))
- [24] 刘金砺. 桩基工程技术进展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 38 - 44. (LIU Jin-li. Pile foundation engineering progress[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 38 - 44. (in Chinese))
- [25] 刘金砺. 桩基工程技术进展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 164 - 169. (LIU Jin-li. Pile foundation engineering progress[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 164 - 169. (in Chinese))
- [26] 张忠苗, 张乾青. 后注浆抗压桩受力性状的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(3): 475 - 482. (ZHANG Zhong-miao, ZHANG QIAN Qing. Experimental study on mechanical properties of post-grouting compressive pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(3): 475 - 482. (in Chinese))
- [27] 施峰. PHC管桩荷载传递的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 95 - 99. (SHI Feng. Experimental research on load transfer mechanism of pretensioned high strength spun concrete piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 95 - 99. (in Chinese))
- [28] 刘金砺, 袁振隆. 粉土中钻孔群桩承台-桩-土的相互作用特性和承载力计算[J]. 岩土工程学报, 1987, **9**(6): 1 - 15. (LIU Jin-li, YUAN Zhen-long. Cap-pile-soil interaction of bored pile groups in silt and calculation on bearing capacity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **9**(6): 1 - 15. (in Chinese))
- [29] 刘金砺, 邱明兵. 软土中群桩承载变形特性与减沉复合疏桩基础设计计算[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(1): 51 - 55. (LIU Jin-li, QIU Ming-bing. Bearing capacity and deformation behaviour of pile groups in soft soil and design of composite foundation with settlement-reducing piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(1): 51 - 55. (in Chinese))
- [30] 秋仁东, 刘金砺, 高文生, 等. 长群桩基础承载力性状的大比例尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2233 - 2242. (QIU Ren-dong, LIU Jin-li, GAO Wen-sheng, et al. Large scale model test on load transfer mechanism of long piled group foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2233 - 2242. (in Chinese))
- [31] JGJ 94—94 建筑桩基技术规范[S]. 1994. (JGJ 94—94 Technical code for building pile foundation[S]. 1994. (in Chinese))