

地基与基础译文集

5

桩 基 础

中国建筑工业出版社

地基与基础译文集

5

桩 基 础

《地基与基础译文集》 编委会

中国建筑工业出版社

本集共编入论文20篇,选译自欧洲、亚洲与美国的几次国际会议和年会的会议录以及美、法、瑞士、苏联等国出版的一些专业杂志、专著、法规等。

主要内容有桩基础承载力和沉降的计算、抗拔桩的表面摩擦力与极限抗拔承载力、桩的受力与荷载传递机理、桩的非破损检验、应力波传播法与透视度法等的应用、地下开采区桩基础的设计与计算、苏联最新桩基础设计法规等。

本书可供建筑、交通、铁道、水利等土建技术人员参考。

《地基与基础译文集》编委会名单(按姓氏笔划排列)

王钟琦	刘颖	胡定
俞调梅	秦宝玖	贾永昌
唐念慈	曾国熙	潘千里

地基与基础译文集

5

桩基础

《地基与基础译文集》编委会

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 13 字数: 316 千字

1982年4月第一版 1982年4月第一次印刷

印数: 1—6,400册 定价: 1.75元

统一书号: 15040·4164

出 版 说 明

我国地基与基础工程技术，解放以来有了较大的发展，取得了一些可喜的成就，但是整个说来技术水平还是比较低的，仍是建筑工程中的一个薄弱环节，还不能适应四个现代化的要求。无论是工程地质勘察、地基土的测试技术与评价、基础工程的设计与施工、地基处理、土力学与岩体力学理论等，跟国外先进技术相比，许多方面仍有差距。为了改变这种状况，努力提高我们的科学技术水平，要继续坚持独立自主、自力更生的方针，要学习国外先进技术。为了给大家提供学习参考资料，我们特组织出版《地基与基础译文集》丛书。

译文集按专题分册出版。

本集为桩基础专辑。论文译自欧洲、亚洲、美国的几次国际土力学及基础工程学术会议和年会的会议录以及美、法、瑞士、苏联等国出版的土力学杂志、专著和规程。主要包括桩基础承载力的计算与确定、桩的受力及荷载传递的机理、桩的无破损检验、苏联桩基础设计的新规程等。介绍了各国的一些最新研究成果，反映了国际土力学理论及桩基础技术的概况，以供我国建筑、交通、铁道、水利等土建技术人员学习参考。

参加本集选编工作的有同济大学俞调梅教授、南京工学院唐念慈教授、中国建筑科学研究院情报所潘千里同志等。本集译文均由唐念慈教授校阅。

目 录

[加拿大]G.G.Meyerhof 桩基础的承载力和沉降	1
[英国]T.K.Chaplin 对《桩基础的承载力和沉降》一文讨论之一	23
[法国]J.Biarez等 对《桩基础的承载力和沉降》一文讨论之二	25
[加拿大]G.G.Meyerhof 《桩基础的承载力和沉降》一文讨论的结束语	27
[罗马尼亚]M.Boian等 用静力触探评价预制桩的承载力	29
[挪威]N.Janbu 摩擦桩的静承载力	34
[捷克斯洛伐克]J.Feda 桩的表面摩擦力	45
[波兰]A.Teichman 抗拔桩的表面摩擦力	51
[法国]Tran-Vo-Nhiem 抗拔桩的极限抗拔承载力	55
[美国]A.S.Vesic 桩与土体系中的荷载传递	60
[美国]L.Reese 关于钻孔桩在轴向荷载下的性状的试验研究	80
[马来西亚]Chin Fung Kee 用斜率-倒数推算桩的极限荷载	89
[瑞典]B.Broms等 因沉降引起桩承结构物的破坏	100
[意大利]A.Garassino等 在砂和正常固结粘土中承受水平荷载桩的土的模量	105
[苏联]H.C. Метелюк等 地下开采区的桩基计算	113
[美国]J.Steinbach等 应力波传播法检验墩基	125
[瑞士]O.Sörensen 钢筋混凝土桩质量检查	137
[法国]J.Carracilli 采用透视度法的桩的无破损检验	142
[英国]A.G.Davis等 桩的非破坏性振动试验	149
苏联建筑法规第Ⅱ篇第17章 桩基础	165
第1节 总则	166
第2节 桩的类型	169
第3节 勘察要求	169
第4节 计算基本规定	170
第5节 桩、管桩及柱桩按承载力进行计算	173
第6节 按野外试验结果确定桩及管桩的承载力	182
第7节 桩基础及其地基按变形计算	186
第8节 桩基础设计	187
第9节 湿陷性土中的桩基础设计特点	188
第10节 膨胀土中的桩基础设计特点	190
第11节 地下开采区桩基础的设计特点	192
第12节 地震区桩基础的设计特点	195
第13节 架空输电线路杆塔桩基础的设计特点	196
第14节 低层农业房屋桩基础的设计特点	198
附 录 桩、管桩及柱桩在垂直及水平荷载和弯矩共同作用下的计算	200

桩基础的承载力和沉降

〔加拿大〕 G.G.Meyerhof

前 言

我要向美国土木工程师学会表示感谢，他们给我很高的荣誉，邀请我来作太沙基纪念讲座报告。太沙基1925年发表了他的经典著作《土力学》，创建了土木工程学的一门崭新的分枝学科以来，至今已整整50年了。在他的这本著作中，有一章专门谈到打入桩的承载力，并详细论述了桩附近的土的变形及孔隙水压力、桩的静态和动态承载力和桩的沉降。因此，在这个时候从太沙基原著的角度来评述关于估算桩基础的承载力和沉降的一些新近的概念，看来是恰当的。虽然这两个课题包含着基础工程中的一些最困难的问题，但对于桩的性能的理解已取得了很大的进步，这在前一次太沙基纪念讲座关于海洋结构深桩设计的报告^[53]中已作了说明。

因为桩基础承载力和沉降不但取决于土的性质和桩的尺寸与布置，而且还与桩的设置方法及其它因素有关，所以估算桩在荷载下的性能时对于每一种桩型都要有各自的处理方法。因此，本文仅介绍在桩的材料不发生结构破坏的条件下，几种常用型式的桩基础在轴向静荷载下的作用的一般原理。还要假定，已经根据对结构与荷载的考虑、地基条件、预估的工作性能以及施工的经济性等因素，选择了桩基作为最合适的基础型式。

估算桩的承载力和沉降时所需要的查明天然沉积特性的勘察方法，以及测定土的物理力学性质的试验方法，通常与其它基础类型相似。然而，因为桩的性能在很大程度上取决于局部的地基土的条件，所以利用有关的现场试验，特别是无粘性土中用静力或动力触探的试验，以及细粒粘性土中用十字板剪力仪和孔隙水压力仪的试验，这将有利于桩基础的设计与施工。而且，对于桩基上的大型结构，为了充实这种资料，还可以仔细地进行旁压仪试验，以及进行大直径钻孔内的荷载板试验来确定土的原位初始应力、强度及变形特性。除此以外，应在预先（设置）的一些桩上进行载荷试验，以便对所估计的单桩在荷载下的性能进行校核；对于打入无粘性土中的桩，可以找到载荷试验的结果与打桩公式、动力分析方法之间的相关关系，而得出一些施工上的控制。

由于桩的设置会改变桩附近土体的初始应力、强度和变形性质，因此，决定桩基础的承载力和沉降的土的性质，可能会与原来的条件有很大的差异。由于基础施工时及完工后土与桩之间的复杂的相互作用，这就使得单桩与桩群在荷载下的性能，只能根据土工试验以及从桩的载荷试验结果得出的半经验分析方法，作粗略的估计。在以下几节中，我们将对砂土和粘土包括非均质土中的打入桩和钻孔桩主要来自野外观测的经验资料以及一些理论上的探讨，进行评述。

一、砂土中桩的承载力

桩打入砂土时桩周围几倍桩径的距离内的土被挤密。通过对单根打入桩周围的砂土密度变化的现场观测资料的分析,获得了打桩对于砂土的挤密程度和预加应力的大小,及它们对这种桩的端阻力和侧摩阻力的影响的一些知识^[59]。对于打入桩周围砂土的变形以及作用于桩身和桩端处的相应的土压力也己能根据简化的假设作出大概的估算^[44、87、97]。

上述工作以及在半经验的基础上预估这种打入桩的极限承载力的其它的尝试都指出了,在匀质砂土中桩的端阻力和平均侧摩阻力都将随着入土深度而增加。但是大比例尺的试验及野外观测表明^[39、40、86、95],这个理论关系只有当桩端在某一临界深度以上时才适用。在临界深度以下时,在匀质砂土中桩的端阻力及平均侧摩阻力实际上保持为常量,这是由于土的压缩性、土粒被压碎、土拱作用以及其它因素的影响。因为对于临界深度以下的桩的性状还没有满意的分析方法,所以现阶段必须采用经验方法,这将在以下几节中说明。

1. 桩端阻力

匀质土中的单桩极限承载力 Q_u ,可表达为桩端阻力 Q_p 与侧摩阻力 Q_s 之和,或:

$$Q_u = Q_p + Q_s = q_p A_p + f_s A_s \quad (1)$$

式中: q_p = 桩端(截面面积为 A_p)的单位承载力; f_s = 桩身(表面面积为 A_s)的单位侧摩阻力平均值。而匀质砂土中的桩端单位阻力极限值可用下式表示:

$$q_p = p_o N_q < q_t \quad (2)$$

式中: p_o = 桩端处的有效覆盖压力; N_q = 对于覆盖压力的承载力系数; q_t = 当 $D/B \geq D_c/B$ 时的桩端单位阻力的极限值,其中 B = 桩的宽度; D = 桩的入土深度; D_c = 桩入土的临界深度。

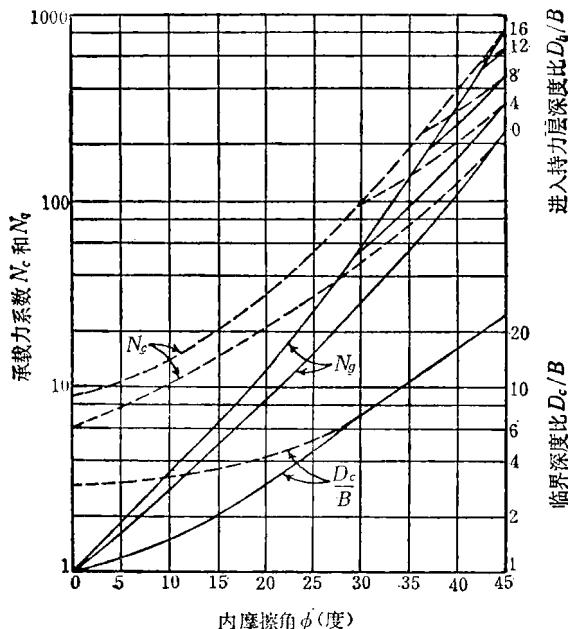


图 1 打入桩的承载力系数和临界深度比

图 1 表示圆形或方形打入桩的承载力系数 N_q 与持力层内的不同深度比 D_o/B 以及打桩前的内摩擦角 ϕ 之间的半经验关系^[16、60]。可以看出,系数 N_q 大致上随着 D_o/B 按线性关系增大,而在深度比 D_o/B 约为临界深度比 D_c/B 的一半时 N_q 达到最大值,在这以后常规的承载力理论就不适用了^[40]。图 1 还表示临界深度比 D_c/B 的大概数值^[23];原型桩的临界深度比主要取决于土的内摩擦角和压缩性,以及地下水条件。

图 2 表示在匀质砂土中,由静力圆锥贯入阻力的极限值 q_o 推得的单位桩端阻力极限值 q_t 的经验数值^[61]。 q_t 和 ϕ 的关系大约为:

$$q_i = 0.5 N_q \tan \phi \quad (3)$$

式中： N_q —短桩的承载力系数； q_i 的单位为 tsf（吨/英尺²）（等于 100 千牛顿/米²，即 100 kN/m²）。 q_i 值将是相应于破坏时桩端附近的竖向有效应力极限值，其变化范围从松砂的 0.25 吨/英尺²（25 千牛顿/米²）到密砂的 0.5 吨/英尺²（50 千牛顿/米²）；在比临界深度更深之处， q_i 值实际上与有效覆盖压力及地下水条件无关。

N_q 和 q_i 值虽然主要取决于土的内摩擦角 ϕ ，但它们还受土的压缩性、桩的设置方法和其它因素的影响。这样，当 ϕ 角的初始值为某一给定数值时，钻孔桩的桩端单位阻力仅为打入桩的 1/3 到 1/2^[22, 39, 95]，而以很大的冲击能打入的端部扩大的桩的桩端单位阻力约可达等截面打入桩的两倍^[59]。曾对少数锥形打入桩的资料分析表明 N_q 及 q_i 值受桩的锥度影响不甚明显^[36, 74]。

如果打入匀质土中的桩超过临界深度，或者如果桩穿过压缩性土而进入厚的持力层，而持力层位于该层的临界深度以下时，那就不能按常规的承载力理论从系数 N_q 来估算桩端单位阻力。相应的桩端单位阻力极限值 q_p 实际上与桩端处的覆盖压力无关，而是取决于 q_i 值。这是从桩的载荷试验结果的分析中表明的；这样的分析大致上为砂土中位于临界深度以上的短桩的半经验的承载力系数 N_q 提供了论证，但不适用于长度超过 15~20 倍桩径的桩（图 3）。

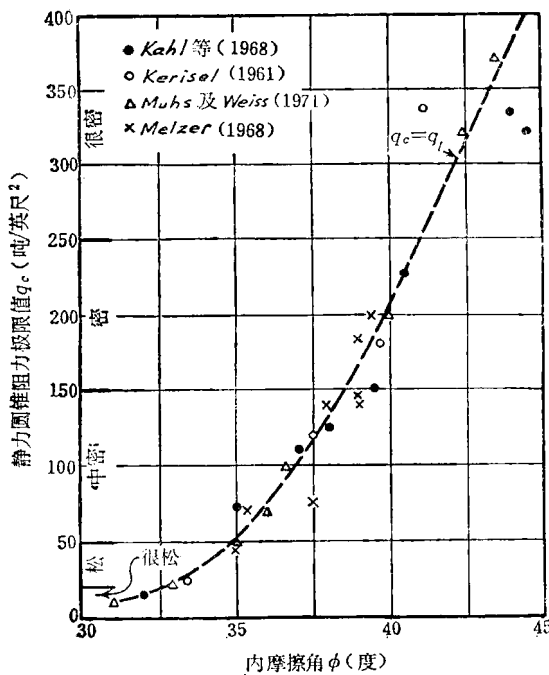
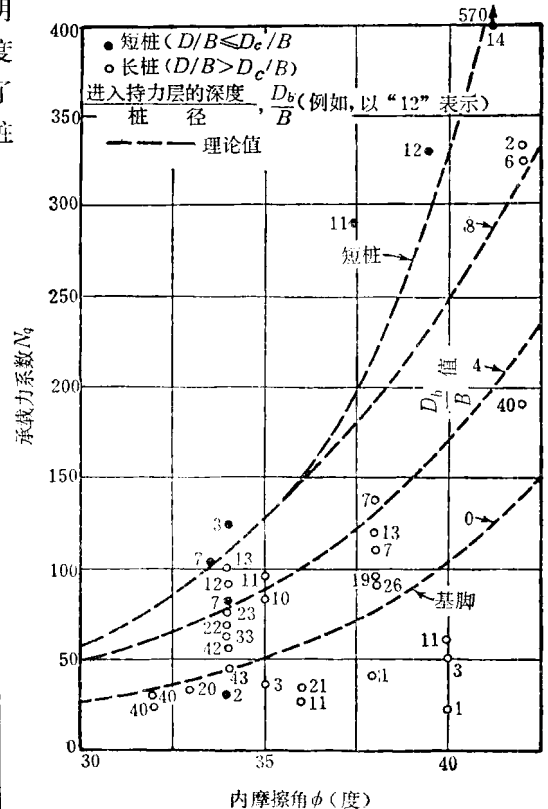


图 2 砂土中的静力圆锥阻力极限值与内摩擦角的关系 (1 吨/英尺² = 95.8 千牛顿/米²)



参 考 资 料

- | | |
|----------------------|------------------------|
| Bishop 等(1943) | Mansur 及 Kaufman(1956) |
| Darragh 及 Bell(1969) | Mansur 及 Hunter(1970) |
| Eide(1956) | Meyerhof(1953) |
| Kerisel(1964) | Tavenas(1971) |
| Koizumi(1971) | Vesic(1967) |
| Mansur 及 Focht(1953) | |

图 3 砂土中打入桩的承载力系数

对于打入砂土的长桩，或穿过软土层打入坚实砂土层的长桩，从桩的载荷试验结果按砂的给定的内摩擦角初始值 ϕ 推算求得的 N_q 值的变化范围很大。而且，推算求得的 N_q 值随着桩端处覆盖压力的增大而很快地减小，有时甚至比圆形单独浅基础的 N_q 值还要小得多，而这是不可能的（见图 3）。另一方面，若按极限值 q_t 来分析同上的长桩试验结果，那末，象前面说明的那样，若桩端进入砂土持力层内的深度 D_b 至少为桩径的 10 倍时，则 q_p 的经验值较好地符合于前面提到的 q_t 和 ϕ 的关系^[56,58]（见图 4）。松砂的 q_t 值稍大于相应的静力圆锥阻力值，这是由于打桩对土的挤实作用较大。

若桩进入持力层的深度小于 $10B$ 时，可按式约略估算 q_t 值：

$$q_p = q_0 + \frac{(q_t - q_0)D_b}{10B} \leq q_t \quad (4)$$

或者，保守一点，取：

$$q_p = \frac{q_t D_b}{10B} \leq q_t \quad (5)$$

式中： q_0 = 上覆软土层的桩端单位阻力极限值； q_t = 下面坚实土层（持力层）的桩端单位阻力极限值（见图 5）。后一个关系式也示于图 4，这是为了与进入持力层深度不大的试桩结果作比较。不均匀土层中的桩的承载力的其它情况，将在下一节中论述。

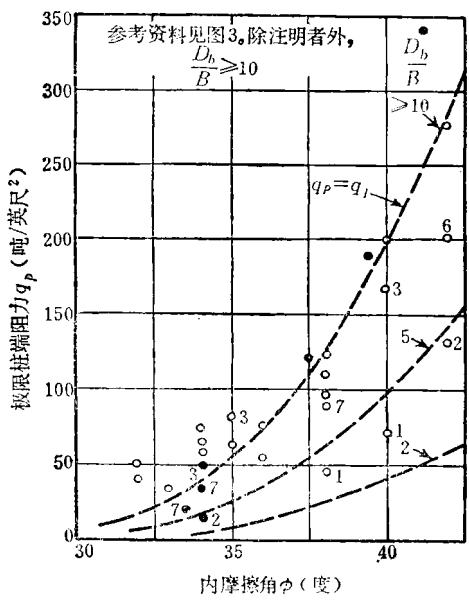


图 4 砂土中打入桩的极限桩端阻力

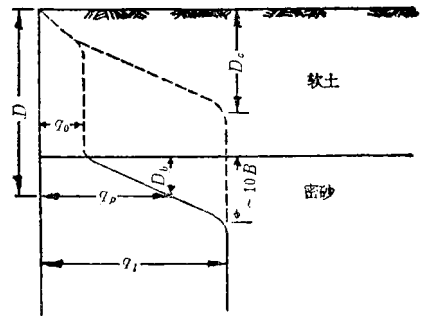


图 5 桩端极限阻力与进入软土下砂层的深度之间的关系

2. 侧摩阻力

匀质砂土中，公式（1）中的极限单位侧摩阻力平均值 f_s 可用下式表达：

$$f_s = K_s \bar{p}_0 \tan \delta \leq f_t \quad (6)$$

式中： K_s = 桩身的土压力系数平均值； $\bar{p}_0$ = 沿桩身有效覆盖压力平均值； δ = 表面摩擦角； $f_t = D/B \geq D_c/B$ 时的平均单位侧摩阻力的极限值，这个临界深度比值（ D_c/B ）约等于桩端单位阻力的相应的临界深度比值。根据砂土的内摩擦角 ϕ 及桩的设置方法来估算侧摩阻力，特别是估算土压力系数 K_s 值，这要比估算桩端阻力更困难些。因为，侧摩阻力不仅与上述一些因素有关，而且也取决于土的压缩性、以静止土压力系数 K_0 表示的土中

原始水平应力，以及桩的尺寸和外形等因素^[87]。单位侧摩阻力极限值 f_s 虽然可以用下面将提到的从贯入试验结果作初步约略的估算，但是可靠的 K_s 及 f_s 值只能从给定场地的桩的载荷试验结果反算得到。

对于打入砂土中具有量测元件的桩的载荷试验的分析说明了^[96]，桩杆的局部位置上的单位侧摩阻力极限值 f_{s0} ，只在桩的上部随着深度而增加到最大值，然后减小，直到桩端处减小到最小值； f_{s0} 的平均值用 f_s 表示。因此，在桩身局部位置上的相应的土压力系数 K_{s0} ，系随着深度而减小，从接近于桩顶处为最大值，这时 K_{s0} 可接近于被动土压力系数，至接近桩端处而减小到小于初始静止土压力系数 K_0 的这样一个最小值^[42]；极限值 K_{s0} 的平均值用 K_s 表示。对于一般地匀质的正常压密的砂土中位于临界深度以上的短桩的现有少数载荷试验结果进行分析，说明了对于给定的初始内摩擦角 ϕ 值， K_s 值的离散性很大，其变化范围是：对于钻孔桩或松砂中的压入桩， K_s 值的下限约等于 K_0 值，而对于密砂中的打入桩，由于剪胀性效应及其它因素， K_s 值可达前者的四倍或更大（见图6）。

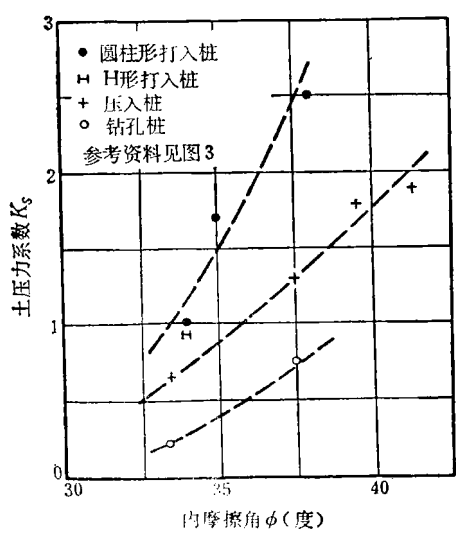


图 6 砂土中位于临界深度以上的桩身的土压力系数

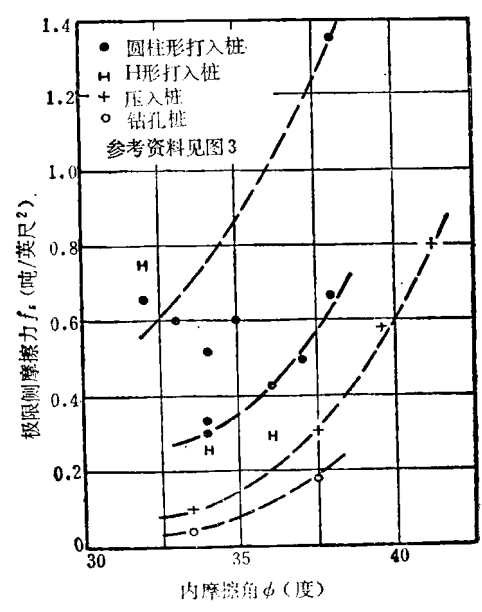


图 7 砂土中桩的侧摩阻力极限值

如前所述，以 K_s 为根据的常用的桩身承载力理论，不能应用到长度大于15~20倍桩径的桩，因为相应的 f_s 值实际上将与沿着桩身的平均覆盖压力无关，而将以 f_s 值表示。这已经从打入砂土的长桩或穿过软土到达一坚实砂层的长桩的载荷试验结果的分析中说明了；因在这种情况下砂土的 K_s 推算值随着覆盖压力增大而迅速减少到小于 K_0 ，而这是不可能的。可是，即使是 $f_{s0}=f_s$ 这个极限值与砂土内摩擦角 ϕ 之间的经验关系也表示有很大的变化幅度，即从钻孔桩和压入正常压密砂土中的桩的下限值，到打入超压密砂土中的桩的上限值（图7）。在设置桩的过程中会把上覆土层部分地拖带到下卧土层^[91]，这个现象也可以解释在不均匀土层中从试桩结果推算的单位侧摩阻力所存在的一些离散情况。

正象可以料想到的那样，单位侧摩阻力极限值是随被排挤的土的体积而增大的，因此

钻孔桩或排挤土体积较小的打入桩（例如H形桩）其平均侧摩阻力小于排挤土体积较大的桩。此外，若排挤土体积相同时，锥形打入桩的平均侧摩阻力大于圆柱形桩；锥形桩的锥度超过桩的入土深度的1%时，它的 f_s 值大致为相应的圆柱形桩的 f_s 值的1.5倍^{〔36,67,71,74〕}。

3. 从贯入试验估算

砂土内摩擦角 ϕ 的较小的变化，对位于临界深度以上的短桩的 K_s 和 N_q 值有很大的影响，对长桩的相应的 f_s 和 q_p 值也同样有影响。因此，一般倾向于利用触探试验的地下勘探结果直接估算桩端阻力和侧摩阻力，这时要采用已经过现场测试检验的偏于保守的半经验方法。

静力触探锥头是个模型桩，把它压入匀质的无粘性土中时，可以把它的贯入阻力和用类似方法设置的原型桩建立关系。然而，把桩打入分层的无粘性土中时，只能用半经验方法从静力锥头阻力和摩阻力（即套筒局部摩阻力——译者）来估算桩端阻力和侧摩阻力极限值^{〔3,21,37〕}。而且，当桩端在持力层内的临界深度以上时，则单位桩端阻力必须根据静力锥头阻力极限值 q_c ，按照持力层内的埋置深度比 D_b/B 进行折减。在这种情况下，曾建议^{〔58〕}可近似地采用下式：

$$q_p = \frac{q_c D_b}{10B} \leq q_i \quad (7)$$

这一公式已为打入无软弱下卧层而较厚的坚实的无粘性土层中的一些桩的载荷试验的分析所证实（见图5）。

圆柱形打入桩的侧摩阻力极限值，大致上等于静力触探器的局部摩擦套筒的单位摩阻力 f_o 。已经发现，砂土中的局部摩阻比 f_o/q_c 大致上是在0.5%~2%之间^{〔4〕}，而圆柱形打入桩的相应的 f_s/q_p 大致上是0.5%~1%（见图4及图7）。在无粘性土中，对于钻孔桩大约可按适用于打入桩的静力锥头阻力和摩阻力的1/3~1/2作为初步估算值^{〔22,39,59〕}。

对于具有给定粒径特性的无粘性土，根据静力和动力触探阻力间的经验关系，以及桩的载荷试验的分析，还可以用动力圆锥触探阻力及标准贯入阻力初步估算这类土中打入桩的极限端阻力和侧摩阻力，并且考虑到桩端埋入深度比和其它一些因素予以修正^{〔58〕}。故打入砂层深度为 D_b 的桩的单位端阻力极限值（以吨/英尺²计，折合100千牛顿/米²），建议可大致按下式计算：

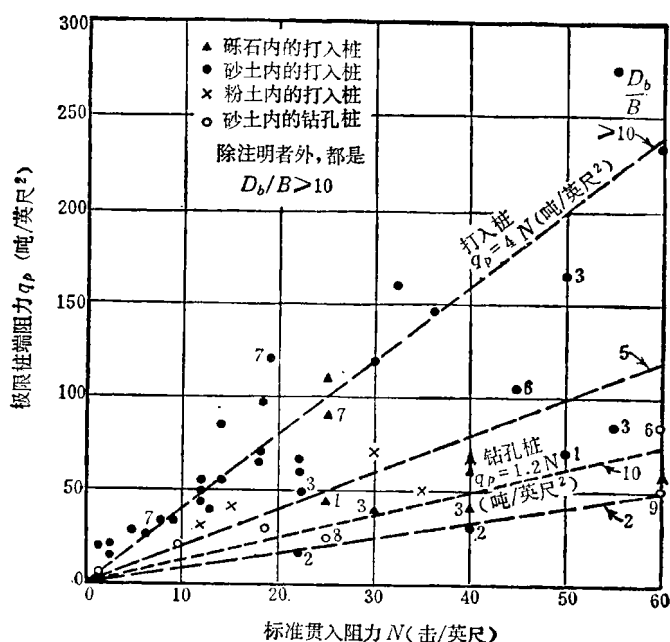
$$q_p = \frac{0.4ND_b}{B} \leq 4N \quad (8)$$

式中 N = 桩端附近处土的平均标准贯入阻力，以每英尺的击数计（即每0.3米的击数）。另外，打入的排土桩的平均侧摩阻力极限值以吨/英尺²计（即100千牛顿/米²），建议可大致按下式计算：

$$f_s = \frac{\bar{N}}{50} \quad (9)$$

式中： $\bar{N}$ = 桩的入土深度范围内，以每英尺的击数计（即击/0.3米）的平均标准贯入阻力。对于排土量较小的桩，例如H形桩，建议保守地取上式数值的一半。公式（8）中 q_p 的上限值 and 公式（9）的 f_s 值，分别表示极限值 q_i 和 f_o 。

为了校核以上建议的砂土中打入桩的极限端阻力和平均侧摩阻力与标准贯入阻力记录之间的相互关系，分析了一些桩的载荷试验结果。发现除当桩端处覆盖压力较大时 q_p/N 比减小外，桩端单位阻力的观测值与式（8）的计算值是相当符合的（图8）。如把相应



参 考 资 料

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| Gregersen等(1973) | Shibate等(1973) |
| Matich及Stermac(1971) | Thorburn及Mac Vicar(1971) |
| Mc Cammon及Golder(1970) | Touma及Reese(1974) |
| Meigh(1971) | Woodward等(1961) |
| Nunes及Vargas(1953) | 还有一些参考资料见图3 |

图 8 无粘性土中标准贯入阻力与桩端极限阻力之间的经验关系 (1吨/英尺² = 95.8千牛顿/米²; 1击/英尺 = 1击/0.3米)

于有效覆盖压力为1吨/英尺² (100千牛顿/米²) 的 N 值作为标准, 而对靠近桩端处的 N 值按照用于浅基础的方法^[72] 经验地予以修正, 则桩端阻力的估算将会有所改进, 那就应当采用这样的修正 N 值。粗砂及砾石层中的少数试桩结果也证实了式 (8); 而对于打入非塑性的粉土中的桩, 大致上取

$$q_p = 3N \quad (10)$$

为上限值, 单位为吨/英尺² (100千牛顿/米²), 获得了较好的符合; 这个 q_p 值采用上面提到的覆盖压力修正后, 即接近于以前所建议的相互关系^[39]。

打入无粘性土中的桩的极限单位侧摩阻力的观测平均值一般均超过式 (9) 给出的数值, 而式 (9) 对于 H 形桩也能提供合适的估算值, 因此对这种桩不需要作进一步的折减 (图 9)。在某一给定的 N 平均值, 单位侧摩阻力观测值可能会有一些离散现象, 这可以归因于前面所说到的上覆土层局部地被拖下去, 以及砂土的应力历史有所不同, 而这些情况只是部分地反映在所测得的标准贯入阻力中^[61]。另一方面, 在某一给定的 N 平均值, 看来土的覆盖压力和粒径特性对于 f_s 值并没有重要的影响 (图 9)。然而, 对于锥度超过 1% 的打入桩, 如前所述, 可取用公式 (9) 所给出的单位侧摩阻力约 1.5 倍。

无粘性土中钻孔桩的单位端阻力极限值和平均侧摩阻力均比打入桩的要小; 作为初步估算, 可取桩端阻力大约为式 (8) 及式 (10) 给出的相应数值的 1/3, 取侧摩阻力大约

为式（9）给出的数值的1/2（图8及图9）。用很大的冲击能打下去的端部扩大的桩，其桩端极限阻力大约可达式（8）及式（10）所给出的数值的两倍^[59]。

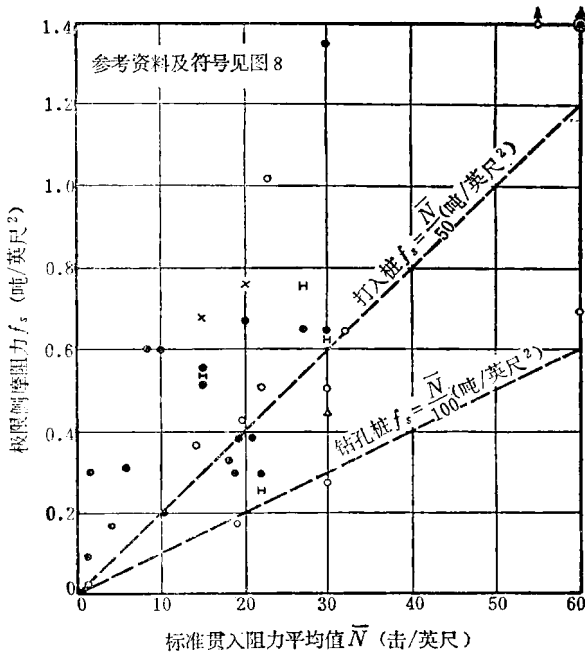


图9 无粘性土中桩的极限侧摩阻力与标准贯入阻力之间的经验关系

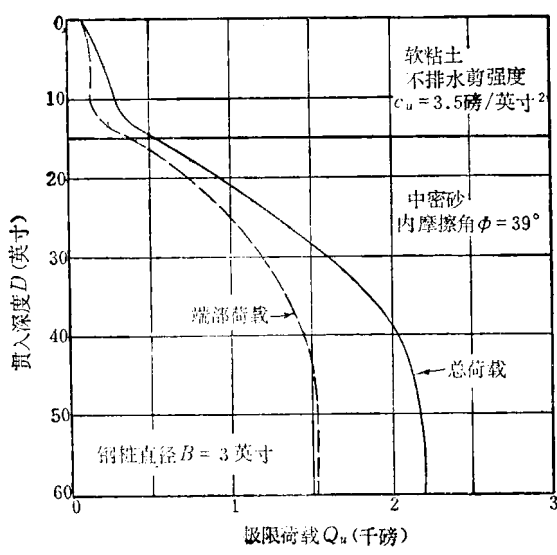


图10 穿过粘土层进入砂层的模型桩的承载力 (1kip=1千磅=4.45千牛顿; 1英寸=25.4毫米)

4. 不均匀土层

如前所述，长度超过约15~20倍桩径的长桩穿过软土层进入厚的坚实的无粘性土层时，在持力层内的桩端单位阻力极限值大致上随着桩端进入该层的埋深比 D_b/B 而呈线性增大，如式（4）及（5）所示。而且，当在持力层中位于临界深度比（约等于10）以下时，桩端阻力实际上保持常量，即等于该土层的极限值 q_i （图5）。假如桩端附近的无粘性土持力层的性质有变化时，则应采用相应的局部破坏区范围，即从桩端以上4倍桩径到桩端下一个桩径范围内的平均值来估算桩端阻力^[59]。穿过软粘土进入砂层的桩^[76]或穿过松砂进入密砂层的桩^[93,95]的大尺寸试验都证实了上述建议（图10）。还发现，可以从各个无粘性土层的平均土性指标得出 f_s 的极限值，并且直接取这样的 f_s 值作为各土层的极限单位侧摩阻力平均值的大致估算值。

假如桩端在具有软弱下卧层的较薄的坚定砂层中，那末，持力层内的桩端单位阻力极限值可能被桩端冲剪进入软弱下卧层的阻力所控制（图11）。关于进入具有粘土下卧层的砂层中的桩，理论及观测都说明了^[35,62]，桩端阻力将随着桩端以下砂层厚度的减小而递减，递减率与砂层内埋置深度比 D_b/B 较小时的情况相似。这已经为具有软粘土或松砂下卧层的密砂中进入不同深度的大比例尺试验和模型试验所证实^[76,93]（图12）。因此，当桩进入坚实的无粘性土层的下半部，而自桩端至软弱下卧层的厚度为 H ，并小于临界厚度（约10B）时，则桩端极限单位阻力可用与式（4）相似的一个公式约略估算，即：

$$q_p = q_0 + \frac{(q_1 - q_0)H}{10B} \leq q_1 \quad (11)$$

式中： q_0 和 q_1 分别为下卧软土层和上覆坚实土层内的桩端极限单位阻力（图11）。在坚实土层的上部，桩端极限阻力可按式（4）计算。把非均质土中的桩的载荷试验结果与静力触探试验对比，作相应的评价^[23]也支持上述方法。每一个无粘性土层中的极限单位侧摩阻力的平均值，大致可以用前面讲到的方法，从各该层的极限值 f_1 进行估算。

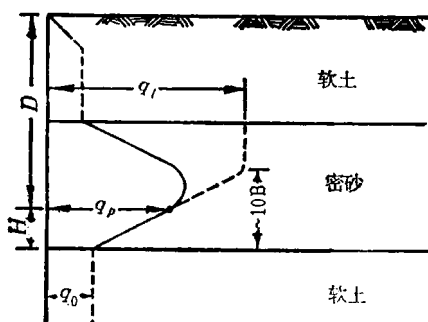


图 11 桩端极限承载力与桩进入具有软弱下卧层的薄砂层内的深度之间的关系

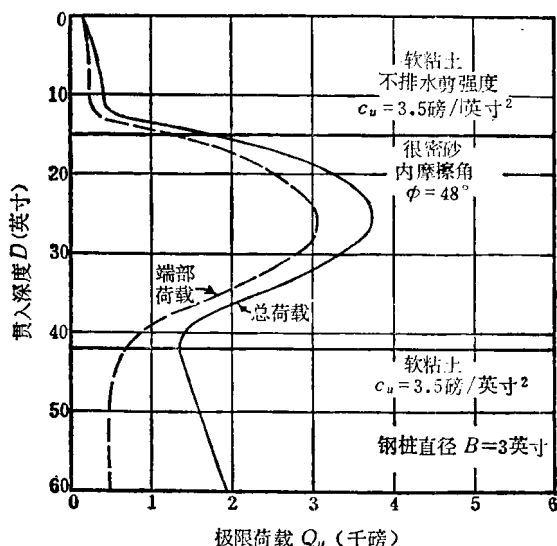


图 12 进入覆盖在软粘土层上的薄层砂中的模型桩的承载力

5. 桩群的承载力

用上述方法之一估算了单桩的极限荷载之后，还要评价桩群的承载力。现有少数试压到破坏的砂土中原型桩群的荷载试验，以及大量的模型试验的结果说明了，当打入桩的中心距约为2~4倍桩径时，桩群的极限荷载大于单桩极限荷载之总和^[59]。桩群承载力的增大，系由于各桩周围的土的挤密区重叠，故主要是增大了侧摩阻力，这在桩间距较小的情况下可能表现为等代墩基础的剪切破坏；但是，即使在桩间距较小时，桩端阻力实际上不受群桩作用的影响^[95]。因此，在没有下卧软层的砂层中桩群的极限荷载，一般应取为单桩承载力之和。

然而，砂土中钻孔桩群的极限荷载却小于单桩承载力的总和，这是由于靠近桩的土体中各个互相重叠的剪切区未被挤密。从理论上讲，当桩间距约为3倍桩径时，各个单桩桩端剪切区的相互干扰，将导致单桩的极限桩端阻力减小约一半，侧摩阻力当然也要减小一些。这样的承载力的减小，已为一些钻孔桩群的载荷试验所证实^[73]。因此可以建议，在没有下卧软层的砂土中钻孔桩群的极限承载力，在常用桩距情况下，应取为单桩承载力总和的2/3。

如果桩群位于厚度有限的坚实持力层中，而持力层下面存在着软土层时，那末，桩群极限荷载应按上述的单桩承载力的总和，或按由桩群及桩间土体组成的等代墩基础从坚实土层到下卧软层的整体冲剪破坏计算，在两者中取小值^[20,62]。

二、粘土中桩的承载力

桩打入饱和粘土中, 桩周围的土被排挤, 土被重塑的范围约可达一个桩径的距离, 在桩周围的粘土中的强烈扰动区内, 由于较大的打桩应力而引起的孔隙水压力相当快地消散。靠近打入桩的粘土固结之后, 与离开桩一些距离处的粘土比较, 或者与打桩前的粘土比较, 可能会有较高的抗剪强度及较低的含水量。但是, 在非常灵敏的粘土中或者在超固结的硬粘土中, 最终的抗剪强度或桩上的附着力可能要比原状土低些。打入饱和粘土的桩的承载力随着时间而增长的关系, 取决于土的性质、桩的尺寸和其它因素^[87]。

钻孔灌注桩周围的粘土通常多少会受到一些扰动, 而且由于灌注桩身混凝土的影响在距离桩身约 1 英寸 (25 毫米) 范围内, 粘土可能软化得很厉害。这种桩上的载荷试验表明^[64], 其承载力随时间增长并不明显; 这是因为在制桩时施工应力比较小, 桩身周围被软化了的粘土固结得非常缓慢。非饱和粘土中桩的性能要比饱和土中更为复杂。地区性经验表明, 根据具有内聚力与摩擦力的材料在给定饱和度及给定应力水平下, 得出的抗剪强度参数进行承载力分析, 与一些桩的载荷试验结果颇为符合^[25, 68]。

1. 桩端阻力

仍按前面提到的关于砂土中的桩的同样假定, 并采用式 (1) 来估算桩的极限承载力, 那末, 匀质粘性土中的桩端单位阻力极限值可用下式表示:

$$q_p = cN_c + p_0 N_q \leq q_m \quad (12)$$

式中: c = 靠近桩端处土的单位内聚力平均值; N_c = 相应于内聚力的承载力系数; q_m = 临界深度以下的桩端单位阻力极限值; 其余符号说明同前。图 1 表示圆形或方形打入桩在不同的深度比 D_0/B 值时的半经验承载力系数 N_c 值^[16, 60], 以及相应的临界深度比 D_0/B 的大概数值。对于某一给定的 φ 值, N_c 值取决于上述的 N_q 的同样的因素; 但是提供 q_m 的净值的经验数据, 主要还只限于饱和粘土。

在不排水条件下的匀质饱和粘土中, 理论及观测说明了, 临界深度以下的 N_c 值随着粘土的灵敏度和变形特性而变化, 从很灵敏的、脆性的、正常压密土中约等于 5^[45, 75], 到非灵敏性的、硬的、超压密粘土中约等于 10^[56, 81]; 但在打入桩及钻孔桩的承载力估算中常取 $N_c = 9$ 。此外, 以上的 N_c 值^① 是以靠近桩端处的土体采用粘土的大试样仔细地进行不排水三轴压缩试验测得的初始不排水内聚力为依据。除此以外, 桩的设置带来的扰动主要是影响初始的桩端阻力, 而粘土后来的固结作用一般将使桩的承载力超过根据基础施工结束时不排水剪指标求得的数值。

2. 侧摩阻力

在匀质饱和粘土中, 式 (1) 中的极限单位侧摩阻力平均值 f_0 或等效的极限桩身附着力 c_u , 通常用下式表示:

$$c_u = \alpha c_u \quad (13)$$

式中: c_u = 在桩的埋置长度范围内不扰动粘土的不排水剪强度平均值; α = 附着力的经验系数, 即不排水剪强度平均值 c_u 的折减系数。系数 α 取决于粘土的性质与强度, 桩的尺寸

① 这里是指“5”与“10”。——译者注

与桩的设置方法, 时间效应, 以及其它因素。 α 值的变化范围很大, 并随抗剪强度的增大而迅速减小。打入桩 α 值的变化范围, 大致从软粘土等于 1, 到硬粘土等于 0.5 或更小些; 而钻孔桩的 α 值在硬粘土中约为 0.5^[82, 90, 91, 103]。这些 α 值表示最大的附着力 c_u 约为 1 吨/英尺² (100 千牛顿/米²) ; 这表明桩身附着力常为粘土的排水剪强度所控制。

因此, 刚打入土中的桩身附着力, 很接近于重塑粘土的不排水剪强度^[27, 39, 56]。但在以后的阶段, 特别是在基础施工结束时, 桩身阻力则为桩身附近的重塑粘土的有效排水剪强度参数 c 、 ϕ 值所控制。这时, 匀质粘土中相应的有效单位侧摩阻力 f_s 可取为:

$$f_s = c + K_s \bar{p}_0 \tan \phi \leq c_u \quad (14)$$

式中符号的意义与式 (6) 同。式 (14) 假定在桩的设置与加荷以后某些时候, 土中的超孔隙水压力与有效覆盖压力相比可忽略不计。现场观测资料的分析说明了, 打入饱和软粘土的单桩桩身处的超孔隙水压力在开始时可达 $5c_u \sim 7c_u$ 左右, 这接近于作用于桩身的初始水平向施工应力^[43]。大约在一个月或几个月之后, 亦即一般对粘土中的桩进行载荷试验的时候, 这种孔隙水压力基本上已经消散^[18]。此外, 在桩上加荷到破坏时引起的桩杆处的初始孔隙水压力的变化范围看来大约仅为 $0.2c_u \sim 0.5c_u$ 。

因此可以作出结论, 即饱和粘土中桩的侧摩阻力极限值大约可按重塑粘土的排水剪强度估算, 此时内聚力可取为零。据此, 可把式 (14) 写成下式:

$$f_s = \beta \bar{p} \leq c_u \quad (15)$$

式中 β = 侧摩阻力系数, 而且

$$\beta = K_s \cdot \tan \phi \quad (16)$$

对于打入粘土的有量测元件的桩的载荷试验资料的分析^[96], 支持以上论点, 这里发现局部的极限单位侧摩阻力 f_s 沿着大部分桩身大致上是随深度或随有效覆盖压力而成正比例增大。

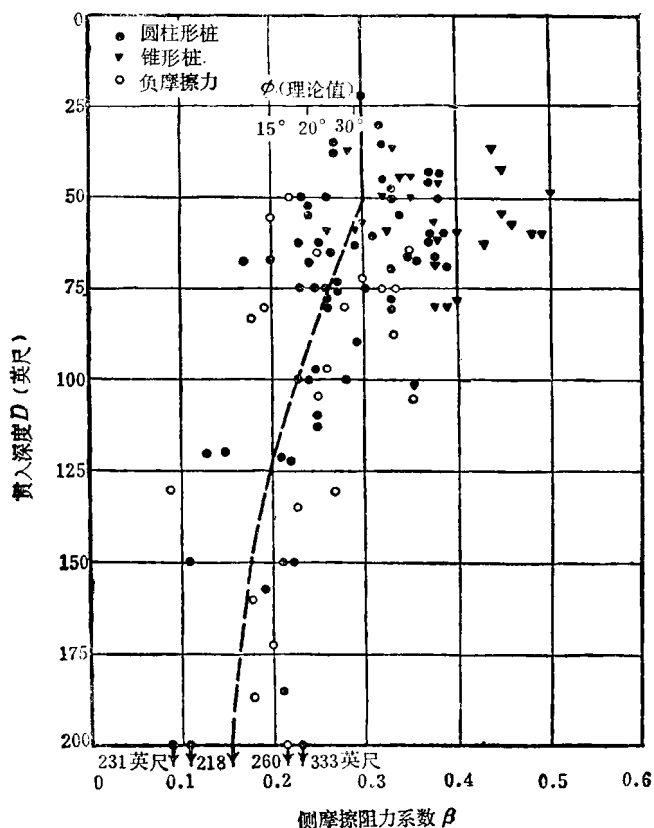
对于钻孔桩以及饱和软粘土中的打入桩, 作用在桩身上的极限的土压力系数 K_s [式 (16)], 可以预料接近于静止土压力系数 K_0 值^[14, 17, 27, 87, 105], 这与以前在松砂中发现的情况一样。对于这种情况及匀质的正常压密粘土, 当静止土压力系数约为 $K_0 = 1 - \sin \phi$ 时, 侧摩阻力系数 β 可表示为:

$$\beta = (1 - \sin \phi) \tan \phi \quad (17)$$

在粘土的代表性的 ϕ 值范围内, β 值理论上将在 0.2~0.3 之间。对于打入软粘土和中等粘土中的桩的侧摩阻力的分析表明, 系数 β 随桩长而减小, 它的变化范围是从短桩约为 0.25~0.5, 到很长的桩约为 0.1~0.25 (见图 13)。 β 值随桩长而减小, 这可作如下的解释: 即由于长桩的桩身压缩, 使得最大侧摩阻力逐渐地发挥, 这时桩身处的粘土的有效内摩擦角可能接近于残余值, 大约等于 ϕ 角峰值的一半。

β 的经验值还表明打入桩的 K_s 稍大于 K_0 , 锥形桩尤其如此。因此, 对于打入软粘土及中等粘土中的桩, 若入土深度不超过 50 英尺 (15 米) 左右, 在初步估算中侧摩阻系数 β 可取 0.3 左右^[14]。对于较长的桩, β 值应予减小; 当入土深度超过 200 英尺 (60 米) 左右时, β 值应减小到 0.15 左右, 如图 13 所示。因为桩的锥度对桩身附着力一般没有显著影响, 所以在初步估算中对于软粘土及中等粘土可取与圆柱形桩或 H 形桩相同的 β 值。

打桩后, 由于粘土重新固结而引起一些土层向下的拖力亦即产生负摩擦力, 这种作用, 对于摩擦桩一般是无关紧要的, 但对端承桩可能有较大的影响。假如桩穿过在固结过



参 考 资 料

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| Begemann(1969) | Fellenius(1972) |
| Blessey(1970) | Garlanger(1972) |
| Bjerrum等(1969) | Garneau(1974) |
| Bozozuk(1972) | Mansur及Focht(1953) |
| Bozozuk及Labrecque(1969) | McCammon及Golder(1970) |
| Burland(1973) | McCammon(1974) |
| Darragh及Bell(1969) | Peck(1958) |
| Eide等(1961) | Tomlinson(1957) |
| Endo等(1969) | Walker及Darvall(1973) |
| Fellenius(1955) | Vork等(1975) |

图 13 软粘土和中等粘土中打入桩的正摩阻力系数和负摩阻力系数 (1 英尺=0.305 米)

程中的软粘土或粉土, 则负摩擦力可按土的不排水剪强度粗略估算[式(13)], 这时对于外表未经涂料处理的桩, α 值的范围约为 0.5 到大于 1^[98]。但是, 因为长期负摩擦力是由粘土的排水剪强度控制的, 所以作用在桩身上的极限负摩擦力应根据式 (15) ~ 式 (17) 估算。穿过匀质粘土的具有量测元件的桩的量测资料证实了, 局部的单位负摩擦力 f_s 大致上随深度成直线增大^[9, 12, 28, 30]。

因此, 可以用式 (15), 根据桩的载荷试验来确定未经涂料处理的桩身上部的极限负摩擦力系数 β 与桩在软粘土及中等粘土中的埋入长度之间的关系 (图 13)。发现这个系数也随桩长的增大而减小, 有时小于正摩阻力的相应的系数。这种差别有一些可以由桩设置