

上海地区的基础工程

俞调梅 著

同济大学出版社

上海地区的基础工程

FOUNDATION ENGINEERING IN SHANGHAI

WITH SPECIAL REFERENCE TO PILES

马彦士奖章论文, 1985年7月1日

Rupert H. Myers Medal Lecture, July 1, 1985

俞调梅著

by Yu Tiao-Mei

同济大学出版社

TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书系作者承澳大利亚新南威尔斯大学授予1985年马彦士奖章时所作的报告。集作者数十年工程经验,着重介绍上海软土的工程性质、早期的和近代的基础工程实践:桩和桩基础的承载力、沉降、桩的承载力随时间增长以及设计中的经济问题等。书中还介绍了在软土天然地基上油罐基础的设计经验,由于详细考虑了土性指标取值和地层的特点,加强施工监测,因而节省了造价,并使试水预压期缩短。

本书初稿完成后,曾寄国内外十余位权威人士征求意见,并作了大量修改。本书适用于中外从事岩土工程教学、科研和工程技术方面的专家阅读和参考。全书分中文和英文两部分。

责任编辑 胡中雄

封面设计 王肖生

上海地区的基础工程

俞调梅 著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

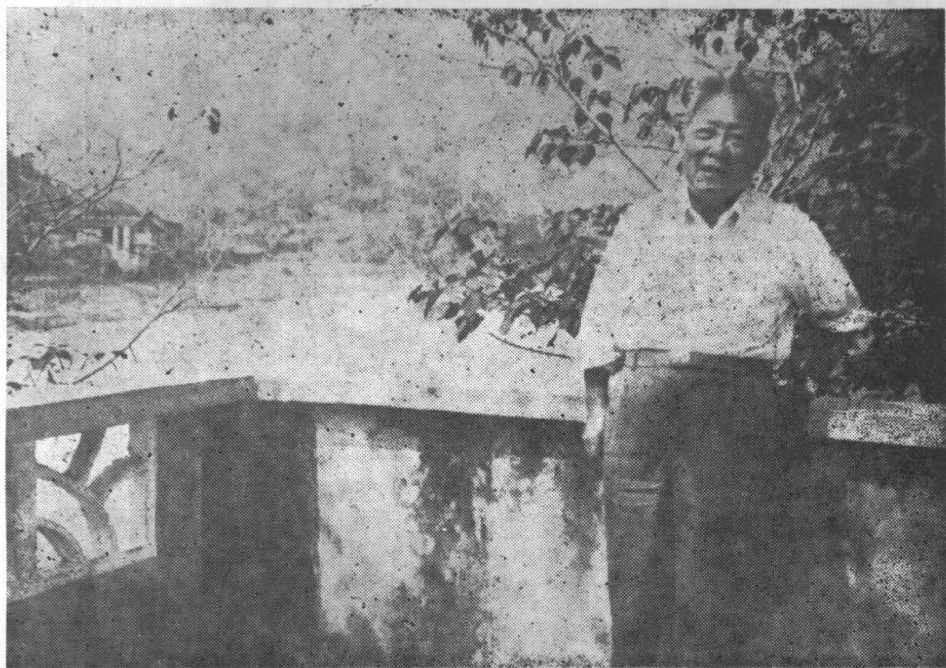
同济大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 8 字数: 204 千字

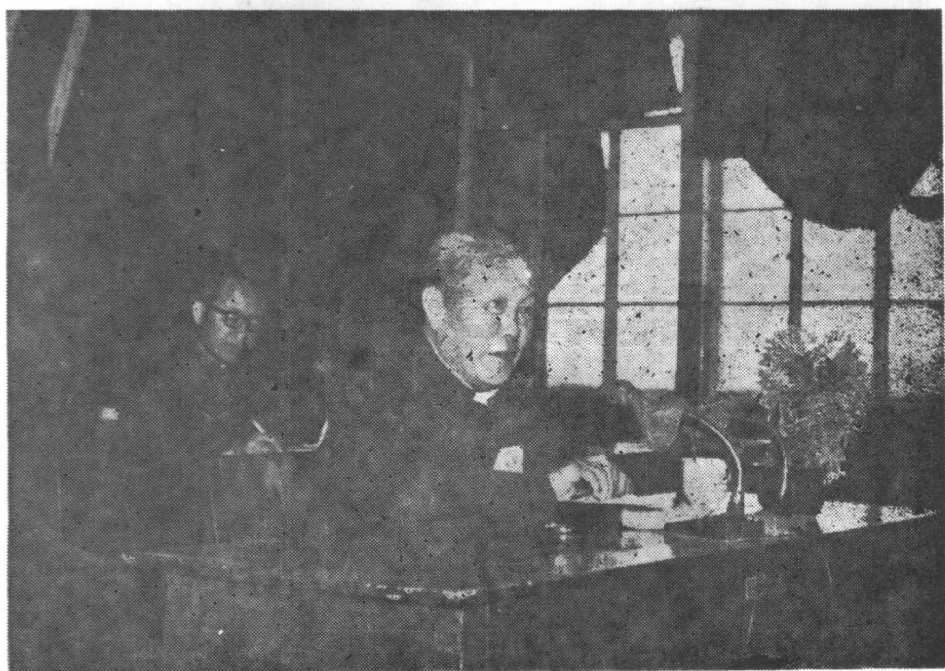
1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数: 1—1200 定价: 12.50 元

ISBN 7-5608-0400-4/TU·55



作者近影



作者作学术报告



目 录

前言	2
1. 上海地区软土的工程性质	3
1.1 上海的浅层土概述	3
1.2 早期的工程实践与试验研究	5
2. 上海地区桩基的经验	7
2.1 概说	7
2.2 要不要打桩? 短桩还是长桩?	13
2.3 单桩承载力的确定	16
2.4 桩基础沉降的计算	19
2.5 承受水平荷载的桩	21
2.6 软粘土中打入桩承载力随时间增长的问题	22
2.7 关于将来发展的几个问题	24
3. 油罐基础	27
3.1 概说	27
3.2 水平方向的渗透系数和固结系数	28
3.3 软粘土由于固结的强度增长	30
3.4 几个设计方案的比较	32
4. 结束语	34
4.1 关于岩土工程的实践	34
4.2 回顾与展望	35
结论	39
志谢	40
讨论	40
参考文献	44
关于马彦士奖章	47
后记	47
图版的说明	48

前 言^[注1]

上海的基础，特别是桩基础，从本世纪30年代起就引起了国际上的重视[32*,89][注2]。介绍上海基础工程的经验，对于工程界会有帮助。本文的编写，受到了美国芝加哥基础工程报道[61*]的启发；参考了过去60年的有关文献资料，以及上海及类似软土地区的工程经验。本文仅是初步的尝试，希望将来能够有更全面的、更好的报道写出来。

【注1】 这是本文英文稿的中译本，但详略稍有不同。中文本末尾的参考文献编号与英文本同，但仅将通行的中文文献及外文文献中译本列出；其余加星号(*)者须参阅英文本末尾的参考文献。

【注2】 方括号内的数字为参考文献的序号，下同。

1. 上海地区软土的工程性质

1.1 上海的浅层土概述

上海地区的土是厚 150—400 m 的第四纪沉积，是在反复的寒冷与温暖气候中，海侵与海退作用下，由河流、湖泊与海洋营力相互作用下形成的。在地质文献中，把地表面下约 100m 厚的土层称为“浅层土”，这在工程上具有重要意义。浅层土可分为 8 层，见表 1。

表 1. 上海地区的浅层土 [26]

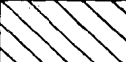
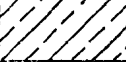
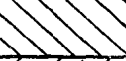
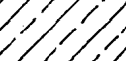
地质年代	地质成因	层次	图例	厚度	说明	基础工程中的应用
全新世 (Q ₄)	河口三角洲 冲积沉积	1		一般 < 3 m	填土	
		2		2-3 m	表土硬壳层	低层房屋的天然地基
	浅海沉积	3		5-10m 3-12m	淤泥质亚粘土， 亚砂土 有时为粉细砂	粉细砂可作为 短桩持力层
		4		3-10m	淤泥质粘土	
	滨海-浅海 沼泽沉积 滨海-河相 冲积沉积	5		5-15m	灰色亚粘土	
上更新世	湖成沉积	6		一般 3 m	暗绿色硬粘土， 有时缺失	中长桩的持力层
	河相沉积	7		5-15m	极细砂，细砂	长桩的持力层
	浅海沉积	8		20-30m	灰色亚粘	

表 1 中 8 个土层的性质，简述如下。

第 1 层——填土；在市区主要为建筑垃圾，郊区为耕种层，黄浦江边为吹填土。

第 2 层——表土硬壳层。褐黄色无机粘土，低到中等塑性，中等压缩性；有铁锰结核。低层房屋的浅基础持力层。

第 3 层——灰色亚粘土。中等塑性，高压缩性。含有云母片及腐烂植物根。有时为暗河的灰色极细砂与粉土沉积所代替，宽 2—5km。短桩支承在这一砂土层上，可以有很高的承载力。

第4层——灰色淤泥质粘土。中等塑性，高压塑性，具有少量植物根及粉细砂薄层。房屋浅基础下的压缩层。

第5层——灰色亚粘土。低到中等塑性，有一些钙结核。在第6层缺失的地方，这层土具有低塑性，有时夹有粉细砂薄层。

第6层——暗绿色无机硬粘土层。低到中等塑性，有氧化铁条纹。更新世末期海退时的湖成沉积；曾经是古地面。超压密，桩基的持力层。有时缺失（由于古地面被冲蚀）。

第7层——细到极细砂。黄或青灰色；中等密度。重型结构物桩基的持力层。

第8层——亚粘土，夹有砂层。桩基础下的压缩层。

表1中列出各土层的沉积环境不同，与海侵及海退有关。可以分为两个主要土层，以暗绿色硬粘土层（表1的*6层）为标志层。这个标志层（*6）的孢子花粉微化石中，主要是木料和草科植物，包括耐冷的柏木及冷杉，以及耐旱的草本植物。由此可以推断，这个*6层是最后一次第四纪寒冷期（苏州河寒冷期）的沉积，是上海地区的全新世与更新世沉积的分界面。当更新世末的海退时，这个*6层是东海大陆架的一部分，包括东海大陆架的古地面。那时的东海大陆架是在不同地方被水道冲蚀了的，这就是*6层有时缺失的原因。在标志层（*6）以上的土层，都是全新世海侵时的沉积，包括浅海沉积及长江三角洲沉积[101,114]。根据第四纪气候变化，古地理环境，以及C¹⁴与孢子花粉古生物学研究，有理由可以相信，从沉积环境与沉积年代来说，上海的浅层土与东海大陆架的土之间，是存在着“血缘”关系的[26*]；这就不来详细讨论了。

表2列出上海的一些土性指标；表3及表4分别列出我国若干地方，以及全世界若干地方的土性指标。由此可见，上海地区的土还不是最软弱的土。

表2 上海的土的一些指标[26*]

土层(见表1)	含水量 <i>w</i> (%)	容重 <i>γ</i> (kN/m ³)	天然孔隙比 <i>e</i> ₀	液限 <i>w</i> _L	塑限 <i>w</i> _P	塑性指数 <i>I</i> _P	压缩系数 <i>a</i> ₁₋₂ (m ² /N)	压缩指数 <i>C</i> _c	不排水抗剪强度 (kPa)	
									三轴	十字板
2. 表土硬壳层	34-39	18-18.5	0.97-1.10	39-45	20-23	15-19	—	—	—	—
3. 灰色软粘土	48-51	16.7-17.3	1.36-1.47	40-46	21-25	18-27	(0.8-1.2) ×10 ⁻⁶	0.37-0.48	20-27	29-43
6. 暗绿色硬粘土	22-30	18.8-20.0	0.67-0.88	30-39	17-20	12-14	—	—	—	—
7. 极细砂、细砂	28-30	18.7-19.0	0.83-0.86	—	—	—	(0.08-0.13) ×10 ⁻⁶	—	—	—

表3 中国不同地方的土的一些指标[85]

地方	深度 (m)	含水量 <i>w</i> (%)	容重 <i>γ</i> (kN/m ³)	天然孔隙比 <i>e</i> ₀	液限 <i>w</i> _L	塑限 <i>w</i> _P	塑性指数 <i>I</i> _P	压缩系数 <i>a</i> ₁₋₂ (m ² /N)	无侧限抗压强度 <i>q</i> _u (kPa)
塘沽	8-17	47	17.7	1.31	42	20	22	0.97×10 ⁻⁶	—
上海	6-17	50	17.2	1.37	43	23	20	1.24×10 ⁻⁶	—
温州	1-35	63	16.2	1.79	53	23	30	1.93×10 ⁻⁶	—
福州	3-19	68	15.0	1.87	54	25	29	2.03×10 ⁻⁶	5-18
贵州:									
淤泥	<20	54-127	13-17	1.7-2.8	—	—	15-34	(1.2-4.2)×10 ⁻⁶	1-18
泥炭		140-264	12-15	1.6-5.9	—	—	26-73	(1.7-7.3)×10 ⁻⁶	

表4 国外若干地方的土的一些指标

说 明	含水量 w %	容重 γ (kN/m ³)	天然孔 隙比 e_0	液限 w_L	塑限 w_P	压缩指数 C_c	不排水抗 剪强度 c_u (kPa)	灵敏度 S_t	文献
软粘土 (芝加哥)	26	—	0.67	32	18	0.20	20	—	[104]
超灵敏粘土 (奥斯陆)	40	—	1.08	28	20	—	8	—	[104]
软粘土 (圣保罗)	—	—	1.17	92	60	0.42	—	—	[18*]
软粘土 (墨西哥)	50—300 20—400	— —	— —	— —	— —	— —	10—160 15—110	— —	[16*] [47*]
软粘土 (曼谷)	140	—	—	150	65	—	—	—	[5*]
海相粘土 (新加坡)	50—83	13—19	—	50—90	18—22	—	14—72	1—6	[71*]
Leda粘土 (渥太华)	28—50	17—20	—	20—45	18—24	—	38—96	7—32	[71*]

1.2 早期的工程实践与试验研究

关于上海及邻近地区的古代桩基础,还知道得很少,但有一些例子。在浙江省余姚的河姆渡,曾经有新石器时代的木桩在70年代挖掘出来了,保存在浙江博物馆。位于上海西南郊区的龙华塔,是公元977年重建的,支承在矩形木桩上,桩的厚度为13cm,宽度及长度不详。

上海在1843年辟为商埠,在“公共租界”修建房屋和桥梁的外国工程师,那时只能靠他们本国的经验。曾经有一些房屋基础的设计,在静重及“规范”活重下的天然地基容许承载力高达200kPa(20t/m²),但50多年来的经验已经证明,房屋(不包括油罐、土堤等)的天然地基容许承载力一般不应当超过80到100kPa;因此,那些房屋出现了非常大的沉降和不均匀沉降。

在本世纪初(可能是在1910年以后),在黄浦江岸边进行了地基的载荷试验、桩的载荷试验以及软粘土(“烂污泥”)摩擦力的大型剪力匣试验。从20年代后期起,前浚浦局的工程师,以及“公共租界”工部局工务处的工程师组织的“中国工程协会”成立了“基础工程研究委员会”。那时,已经有关于室内固结与剪切试验、野外静力触探试验以及房屋沉降观测记录的报告,见于1936年的第一次土力学与基础工程国际会议论文集[32*]。基础工程研究委员会的工作,在40年代由于日本侵华战争而停止了。

在30年代,已经注意到了抽吸地下水引起的地面沉降;这在1949年解放后加剧了,最大沉降达2m以上。目前已采取限制深井抽水及回灌的措施,使地面沉降得到了控制[79*,80*,85,97]。从图1所示上海市区承压含水层深度70m范围内的压缩层示意图,可以对水文地质条件怎样影响土层压缩与地面沉降的机理有一个大概的理解。

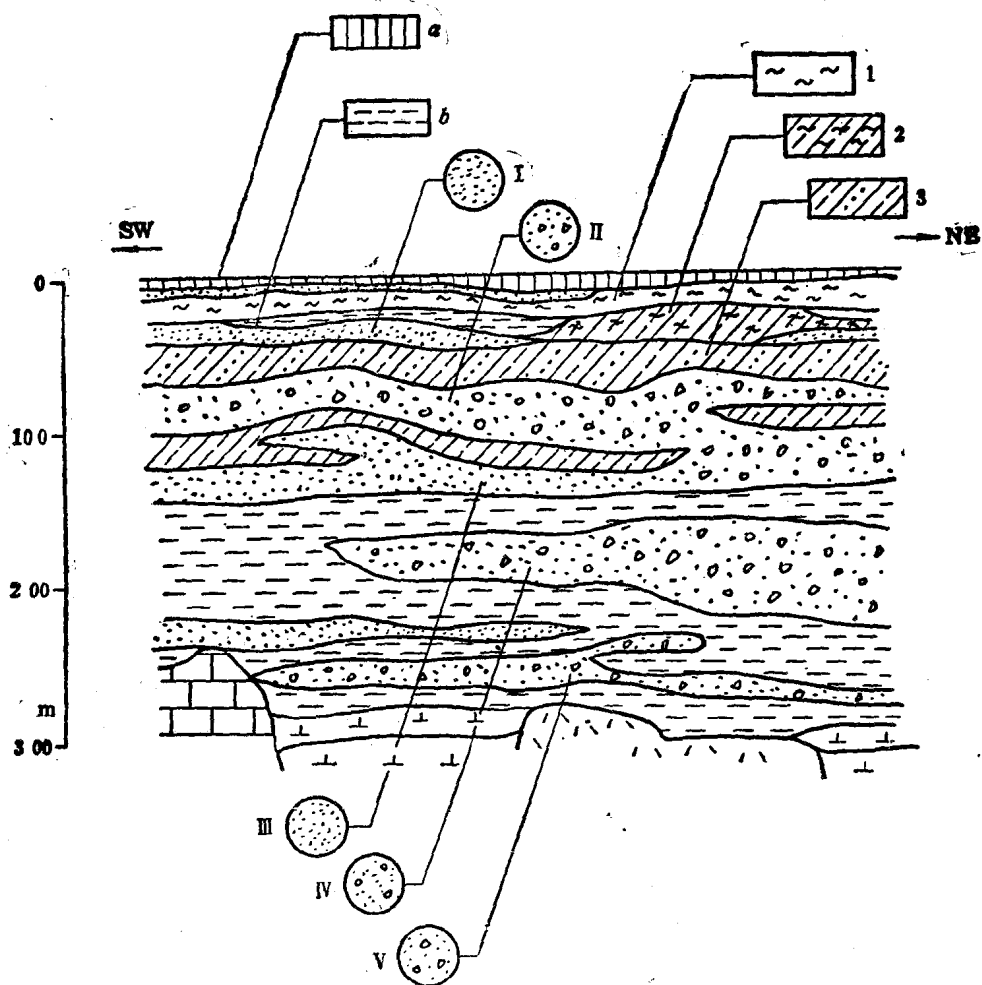


图1 上海市区含水层及压缩层示意图

a——表土硬壳层(表1的*2层);

b——暗绿色硬粘土层(表1的*6层);

1, 2, 3——深度70m范围内的第一、二、三压缩层; 开采地下水引起地面沉降, 主要是由于这几个压缩层;

I, II, III, IV, V——第一、二、三、四、五承压含水层; 早期主要是开采第二、三层, 后来开采第四、五层。

根据苏河源《抽、灌水作用下上海土层变形特征的探讨》(岩土工程学报, 创刊号, 1979年); 又见[85], 223页。

2. 上海地区桩基的经验

2.1 概说

在本世纪20年代初期,以及在这以前,上海地区所用的桩主要是几米长的木桩,通常是福建筒木,或者叫建松。这种短桩用于(a)处理局部的软弱地基,如暗浜等;(b)在矩形平面房屋的角上打下四根桩,因为意识到四角的地基应力较高,需要加固;(c)在贴近产权界线的偏心墙基础下打桩(图2)。即使在30、40年代,三、四层房屋总是采用桩基础的。

图3表示1923年重建的河南路桥的桩基[15*],5个基础采用了4种不同长度的木桩;设计计算中只有一个参数,即容许摩阻力为7.5kPa。

20年代及30年代基桩的一些例子示于表5。其中,(a)桩端阻力略去不计;(b)锥形及楔形桩的容许摩阻力较高(表5的*1及*4桩);(c)现场浇注桩的侧面很粗糙,因此容许摩阻力更高,但变化幅度很大(表5的*5、*6、*7、*8桩)。目前,认为这种设计方法是有问题的。

在20、30年代,曾经有如下的论点(可能是不正确的)。

(a)根据少数几根试桩的资料,提出了桩的摩擦面积(侧面积)愈大时摩阻力愈小的论点[34*],见图4。这大概是对于当时通用的短桩(桩长小于15m,或者在10m以下),是打进软土层的桩(表1的*3、*4层,也可能到达*5层),其稠度随着深度而有所减少。(b)为了最经济、最有效地设计桩基础,曾经有如下的建议[48],即:桩群的摩阻力应等于单桩摩阻力的总和;这是在不计单桩的端阻力,不计桩群底部承载力的前提下提出来的。

对于图6所示($m \cdot n$)的方形桩的桩群,要求:

$$(m \cdot n) \cdot (4b) \cdot L \cdot f_s = 2(A + B) \cdot L \cdot f_s$$

或

$$2m \cdot n \cdot b = A + B = (m-1)s + (n-1)s + 2b,$$

式中: L 为桩长, f_s 为容许摩阻力。这样,对于一个($n \cdot n$)的方形桩的桩群,将要求桩的间距 $s = (n+1)b$, b 为方形桩的边长;对于($n \cdot n$)的圆形桩的桩群,将要求间距为 $s = (n+1) \cdot (\pi/4) \cdot d$, d 为圆形桩的直径。这样大的间距,在设计中是不能接受的;但这一概念在当时不止一次被引用了,例如见[67]。

从20年代后期起,开始用长达30m的木桩,支承在较坚实土层上,一般是在暗绿色硬粘土层上(表1的*6层)。康益(A. Corrit)认为应当用这种较长的木桩,以及凡百卢桩(表5的*5、*6桩),或下部为木桩、上部为凡百卢桩的“组合桩”[17*];他也指出了,桩间距太密,会导致地基土的隆起与位移,使地基土破坏。马贤(H. F. Meyer)也主张用长的原木桩,他指出了:“承包商有时把木桩打到设计深度的一半,把上面的一段锯去;并欺骗粗心的监工,说是已经满意地把桩打下去了。但对于大直径的原木桩,这是不可能的,因为监工总是知道桩的大头直径的”[49*]。可是,作者知道有如下的例子,一座支承在长木

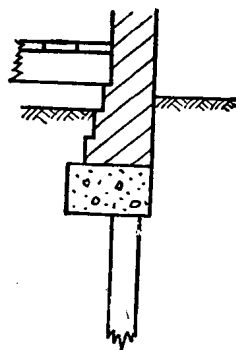


图2 在贴近产权界线的偏心墙基础下的短桩

桩上的13层大楼，建于20年代，沉降达1m以上，传说这是由于承包商把长木桩锯成两段，把大头的一段打入土中；但尚未能在工程杂志上找到这方面的报道。

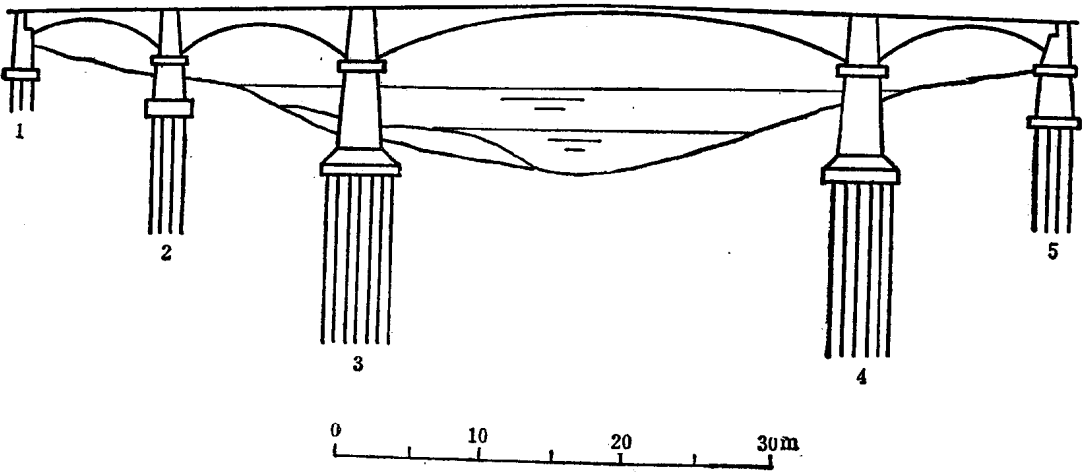


图3 1923年重建的河南路桥[15*]

	桩数	桩的截面(cm×cm)	桩长(m)	单桩承载力(kN)
1. 南桥台	87	30×10	3.7	22
2. 南岸墩	155	30×30	9.1	82
3. 南河墩	172	36×36	15.2	159
4. 北河墩	172	36×36	15.2	159
5. 北桥台	91	30×10	6.1	36

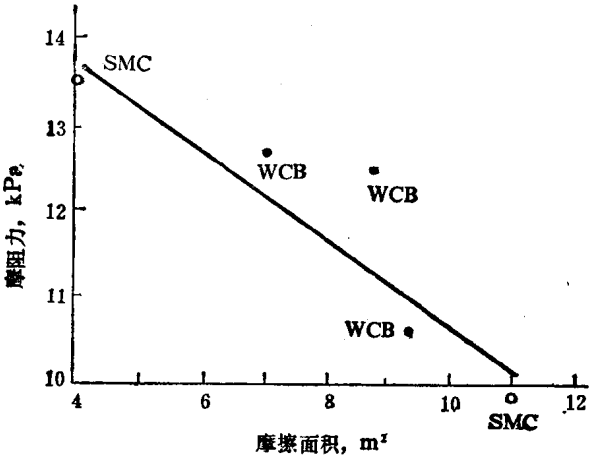


图4 桩的单位表面摩阻力随着摩擦面积增加而减小。根据前浚浦局的三根试桩(WCB)及“公共租界”工部局工务处的两根试桩(SMC)[34*]

表5 上海在20、30年代基桩的一些例子

次序	桩的截面尺寸(cm)	桩长(m)	容许荷载(kN)	容许表面摩阻力(kN/m ²) 端阻力不计	参考文献
筒木(原木)					
1	顶部直径=30 底端, 15	15	160	17	[56*]
方木					
2	方形 $b=30$	15	200	11	同上
3	矩形 30×15	15	153	11	同上
4	楔形(图5) 顶部 30×23 底端 30×7	15	210	15	同上
混凝土					
5	凡百卢桩* 平均直径=61	9.1	270	17	同上
6	同上 平均直径=45	15.6	514	23	[32*]的论文F-13.
7	弗朗基桩 平均直径=64	10.5	231	11.5	同上
8	同上, 平均直径=55	10.7	357	21	[32*]的论文I-3.

* 凡百卢桩(Vibro pile)是: 把带有钢筋混凝土桩靴的钢管打入土中, 放下钢筋笼, 在拔出钢管的同时浇注混凝土; 这样就形成了就地灌注的钢筋混凝土桩, 桩靴留在土中。

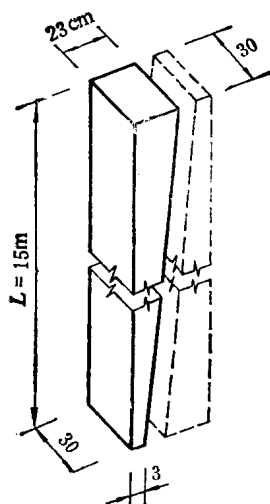


图5 楔形桩

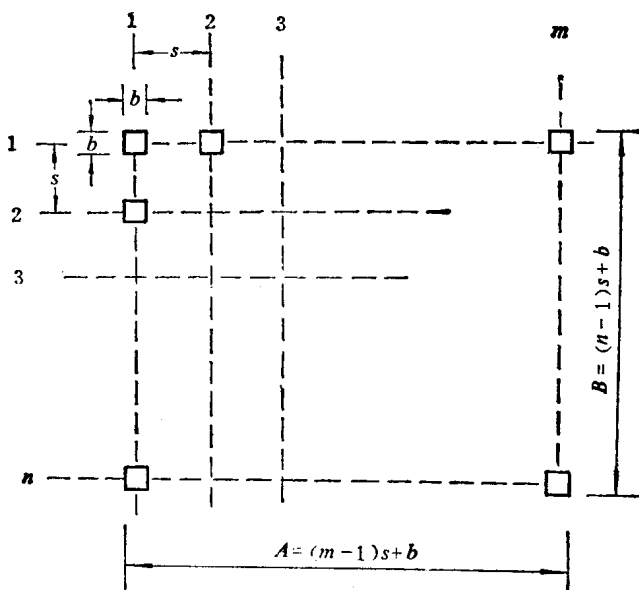


图6 建议的摩擦桩间距[48]。要求间距(s)满足如下条件:
 $2m \cdot n \cdot b = (m-1)s + (n-1)s + 2b$

另外,还有几种桩型曾在 20、30 年代试用过:(a) 具有薄铁皮管留在土中的雷蒙特桩(Raymond pile),这是用重型钢制芯棒连同套在芯棒外的薄铁皮管一起打入土中,达到要求的深度后,拔出芯棒,薄铁皮管留在土中,在管内浇混凝土成桩;(b) 武智桩(图 7),曾用于处理某棉纺厂的地基土;(c) Svagr 桩,即“组合桩”,见前。这些,见于文献[32*]的论文 I-4。

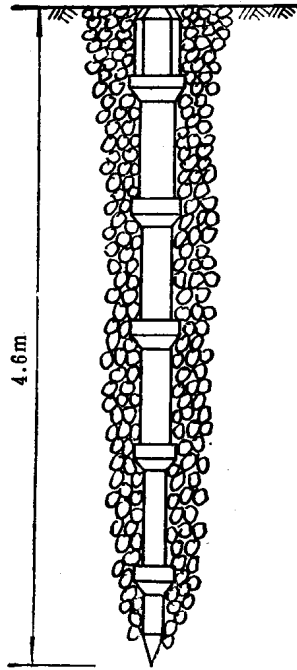


图 7 武智桩,根据[32*]的论文 I-4

说明:(1)这是一种预制钢筋混凝土桩,连同 0.8m^3 的碎石一起打入土中。在桩上加载 340kN ,十昼夜期间的沉降为 7.5mm 。(2)作者认为武智桩的作用与挤密砂桩(图 12,13)及现代广泛采用的碎石桩相似;这对于砂性土、建筑垃圾是适用的,对粘性土没有多少效益。

以上简单介绍了 20、30 年代的桩;下面举例说明解放后 30 几年来的桩,见表 6 及图 8。

表 6 是根据英文本的表 7 及图 7、图 8 重写的,有所精简。可以看出,从 50 年代起:(a)有了较好的勘探资料(见英文本的图 7);(b)木桩不再用了;(c)可利用浅砂层(表 1 的 *3 层)作为短桩的持力层,见表 6 的 *1 桩;(d)由于硬粘土层(表 1 的 *6 层)有时缺失,因此有一种倾向,要用更长的桩,达到砂层(表 1 的 *7 层),这在 60 年代是 40 几米长的钢筋混凝土桩,在 70 年代后期起是 60、70 米长的钢管桩;(d)从表 6 的末栏(f_s)来看,引进设计是很保守的。

关于就地灌注混凝土桩,过去较多采用的凡百卢桩(表 5 的 *5、*6 桩)由于“瓶颈”与“断桩”等事故,认为不容易保证质量,就逐渐被一次扩大的凡百卢桩(例如,见[9*])所代替,后来几乎全部被预制钢筋混凝土打入桩所代替了。在过去十几年中,钻孔灌注混凝土桩曾经成功地应用于厂房及桥梁基础;但承载力一般不高,极限摩阻力(f_s)的平均值仅约

20kPa, 有时仅达 15kPa (这可以与表 6 末栏的 f'_s 值比较)。但最近几年来有了不少改进; 图 8 表示一根具有量测元件的钻孔灌注混凝土桩的试桩结果[12*]。贝诺脱桩 (Benoto 桩, 见[41*]) 曾经试用过, 结果不够满意; 但目前已有不少改进。

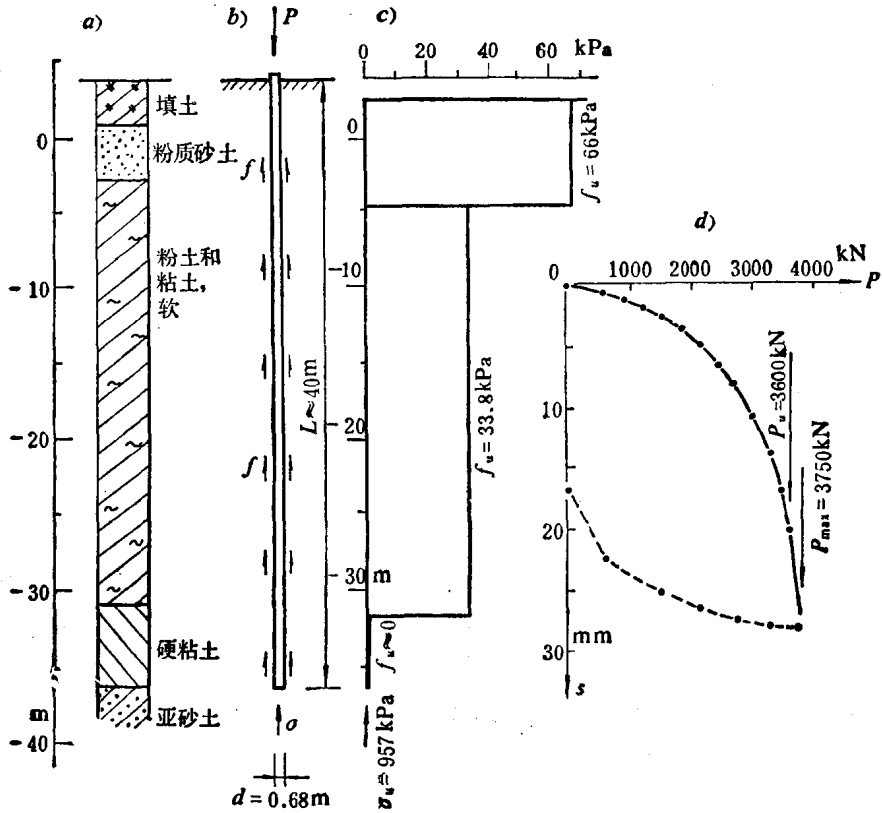


图 8 钻孔灌注混凝土桩的载荷试验 (有量测元件) [12*]

- a——土层
- b——桩的简图, 表示桩顶荷载(P)、摩阻力(f)及桩端阻力(σ);
- c——极限荷载($P_u=3600\text{kN}$)时的分段平均摩阻力(f_s)及端阻力(σ_s);
- d——试桩 P - s 曲线。

为了避免打桩可能引起邻近结构物的损坏,曾试用压桩法,这曾用于一个码头(图12)的修复工程;已有压桩的专著[90]。目前,一般认为在建筑物密集的场地,可以采用不排挤土的或低排挤土的桩,包括钻孔灌注混凝土桩、开口的钢管桩、H形钢桩等。另外,把钢筋混凝土桩打入预钻孔的方法也曾经试用了,这将在后面讨论。

在20年代(以及更早的时期)打桩都用落锤。后来用蒸汽锤,锤击部分的重量一般不超过7吨;但也曾用过0吨锤。50年代开始用杆式柴油打桩机;从70年起,用筒式柴油打桩机,锤击部分重量达7.2吨。

关于打桩公式,早期是用工程新闻公式(即威灵顿公式),在30年代曾用英国的海兰(Hiley)公式,在50年代曾用苏联常用的格尔斯伐诺夫公式。赛尔(Dörr)公式是过去曾在欧洲通用的一个“静力公式”,这在50年代也曾在上海试用。上述几个公式,见一些较老的专著中[22*,60]。上海的工程师早已认识到打桩公式都不可靠(除非是在“休息”后复打时,才可能有参考价值),也不相信赛尔公式。因此,至今还是要进行较多的载荷试验,以获得可靠的承载力数字,这就成为设计用经验规则的来源;这将在后面讨论。

最后要说明,在桩顶量测锤击力与加速度,运用应力波分析的动力方法,可以估计桩的承载力,并查明有缺陷的桩;这方面的工作已开始进行[88*,62*]。

表6 上海从50年代初期起的打入桩的一些例子⁽¹⁾

次序 ⁽¹⁾	截面尺寸 ⁽²⁾	桩长	桩端打入土层 ⁽³⁾	极限荷载 P_u ⁽⁴⁾	设计荷载 P_d	$f'_d = \frac{P_d}{\text{侧面积}}$
	(cm)	(m)		(kN)	(kN)	(kPa)
预制钢筋混凝土桩						
1	$b=30$	10—15	浅层细砂 ⁽³⁾	800—1500	按上海地基 规范[73], 取安全系数 约等于2	33—42
2	20	7—10	粉质粘土, 软	150—250		13—16
3	40—45	22—26	硬粘土	1000—1600		14—17
4	40—45	35—40	粘土及极细砂	3000—6000		27—42
5	45	27—29	硬粘土	2000—2500		21—24
6	45	31—34	细砂	4200		34—38
—	40	30	—	—	560 ⁽⁵⁾	12
钢管桩, 底端开口						
7	$d=112.2$	46(39) ⁽⁴⁾	细砂	10000	4300 ⁽⁶⁾	29
8	40.6	60—70	细砂	4500	1800	20—24
	60.96	60—70	细砂	6000	2400	18—21
	91.46	60—70	细砂	12500	4400	22—26
预应力钢筋混凝土管桩						
9	$d=55$	57—59	细砂	4000—4500	—	—
—	55	30	—	—	600	12

注: (1) 见英文本的表7。另见英文本的图7, 其中有: 桩穿过土层; 静力触探阻力(P_s); 桩入土每米的锤击数; 标准贯入击数(N)。又见英文本的图8: 载荷试验的 $P-s$ 曲线。

(2) b 为方桩的边长; d 为圆桩的直径。

(3) 见表1的*3层。

(4) 桩入土深度为39m。

(5) 引进设计。容许荷载(P_d)规定为极限荷载(P_u)的1/3或屈服荷载的1/2, 取小值。另外, 还要考虑负摩擦力以及群桩效率系数, 使 P_d 值更为降低; 这在表中所列 P_u 值中未予考虑。

(6) 由于射水沉桩, 使锤击沉桩的阻力降低, 见英文本的图7。

(7) f'_d 值是作为桩的经济指标(或效率指标)提出来的。由此可以看出: 打入硬粘土、砂层内的桩的 f'_d 值较高, 具有较高的经济(效率)指标; 引进设计的长桩 f'_d 值不高, 经济(效率)指标很低。

2.2 要不要打桩？短桩还是长桩？

对于软土地基，常常会提出要不要打桩，用短桩还是用长桩的问题。上海的工程师的看法在过去有过不少变化。下面，从四个方面作简短的介绍：(a) 从短桩到长桩；(b) 上海的地基规范[73]；(c) 箱式基础；(d) 挤密砂桩。

(a) 从短桩到长桩——在20年代，或者可能更早些，对地基有疑问时就打桩。那时的桩很短，一般不超过10—15 m。后来，认识到了用较长的桩到达硬土层（例如表1的*6层）的好处；在高层建筑和重型结构物下，通常就用长约30 m的桩。同时，也认识到在不少场合下可以把短桩省掉。

(b) 上海地基规范[73]——在50年代，在地基土的勘探、室内和现场土工试验、以及结构物使用情况调查研究等方面进行了不少工作。在这基础上，并参考外国经验[65*, 82]与规范[59]，制订了地基规范[73]。规范的内容有：确定天然地基的、桩的承载力的方法；估算基础沉降的方法；不同建筑物、结构物的容许沉降与沉降差；以及上海地区的工程地质图，其中列举不同地点的土性指标和容许地基承载力（限于不超过五、六层的民用房屋），以及地貌特征如暗浜等[10, 85]。

(c) 箱式基础——从50年代后期起，五、六层的民用建筑一般采用天然地基（不打桩）了；过去，三层房屋都是要打桩的。与此同时，也有一种倾向，就是为了表面上的（很可能是虚假的）经济效益而过多地提倡无桩基础，把上海过去采用桩基的经验都丢在一边。有一个例子是展览馆的箱式基础，最后一次观测沉降为160cm，推算最终沉降为170—180cm；见图9。

与上述箱式基础明显不同的，是70年代始采用的补偿式基础（浮箱式基础）的成功经验，例如图10及图11所示康乐大楼的基础[110, 111]。康乐大楼高38.8 m；箱式基础的平面尺寸为69.64×14.10 m²，高5.8 m，埋置深度为5.5 m；基底压力为 $p = 185 \text{ kPa}$ ，除去土的自重压力后的净压力为85 kPa。压力、沉降与时间关系曲线，见图10；注意沉降仅15 cm，还不到展览馆沉降160~180 cm（图9）的十分之一。

箱式基础的结构计算，过去是按弹性半空间体上刚性基础的假设计算的，例如通用的“链杆”法[113]。按此法计算，求得康乐大楼的箱式基础最大弯矩为：

$$M_{\max} = 0.015(p \cdot B)L^2 \quad (1)$$

见图11(b)；上式中： p 以kPa计， B 和 L 以m计； M 以kN·m计。但按实测基底压力（经过简化）计算求得的最大弯矩为：

$$M_{\max} = 0.0062(p \cdot B)L^2, \quad (2)$$

约为公式(1)的数值的40%，见图11(c)。这仅仅是很粗略的近似计算；但由此可以认识到，应当考虑土的非线性应力应变关系。关于上海地区的土的非线性应力应变关系，以及地基土与上部结构相互作用的研究，已经有了一些报告[111, 112]；这里不讨论了。