

高等学校试用教材

ZHUANGJI GONGCHENG

桩 基 工 程

(港口及航道工程专业用)

杨克己 韩理安 编著

人民交通出版社

中的若干问题。

五、桩的动力分析，包括波动方程在桩基工程中的应用；地震区桩基的设计；动载作用下软粘土的触变性质。

六、桩的荷载试验，包括轴向荷载试验和水平荷载试验的试验方法、测试技术、资料分析和承载力的确定；桩的静力触探和动测检验方法简介。特别对静载试验的资料分析和承载力确定中的疑难问题重点进行了分析和阐述。

本书第一、第二、第五、第六章由杨克己编写，第三、第四章由韩理安编写，全书由杨克己统稿。本书承蒙武汉水利电力学院冯国栋教授主审；交通部第三航务工程勘察设计院王炳煌高工审查了第一、第二、第四、第六章；重庆交通学院吴恒立教授对第二、第三章也提出了不少宝贵意见，在此一并表示感谢。

在桩基这一学科领域中，文献资料是十分丰富的，但由于受篇幅和字数的限制，也限于作者的水平，内容的取舍和论述不一定合适。不妥之处，尚请有关专家和读者指教。

作者 杨克己

韩理安

1991年6月

(京)新登字091号

内 容 提 要

本书系统地阐述了桩基工程的分析方法和设计方法,简要介绍了作者十多年来在桩基研究中取得的部分成果。本书除作为港口及航道工程、土木工程和海洋工程专业的本科生和研究生的教材外,也可供工程技术人员和科研人员阅读参考。

高等学校试用教材

桩 基 工 程

(港口及航道工程专业用)

杨克己 韩理安 编著

插图设计: 陈 竟 正文设计: 乔文平 责任校对: 张 梅

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.875 字数: 211 千

1992年12月 第1版

1992年12月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—4140册 定价: 2.70 元

ISBN 7-114-01363-9

U · 00897

前 言

本书系统地阐述了桩基工程的分析和设计方法，介绍了国内外有关的最新发展以及一些工程实例。本书除作为港口及航道工程、土木工程和海洋工程专业的本科生和研究生教材外，也可供工程和科研人员参考。

本书是在教学和科研中形成的，曾作为研究生教材和本科高年级选修课教材多次使用过。书中反映了第一作者近十年来结合生产实际承担国家科研任务而获得的一些最新研究成果，其中有的成果已纳入《港工桩基规范》、《固定式海上平台入级与建造规范》、《干船坞设计规范》和《冶金工业建设灌注桩基础勘察设计与施工验收规程》；也反映了第二作者在推力桩群桩效率系数方面的研究成果。

本书的主要内容有：

一、桩基的适用条件；桩和桩基的类型和发展。

二、轴向荷载作用下桩的性状和承载力，包括打入桩、灌注桩和大管桩的破坏机理和承载力；抗拔桩的破坏机理和承载力；群桩的破坏机理、群桩效应和基础一桩一土的工作性状；桩的刚性系数(包括单桩和群桩)；桩的负摩擦力的确定及减小负摩擦力的措施；桩基的安全系数与可靠度分析。

三、水平力作用下桩的性状和承载力，包括极限地基反力法(包括砂土和粘土)；分析弹性长桩的张氏法、 m 法、综合刚度原理和双参数法以及适用于线性、非线性、静载、循环荷载和成层土的 $P-Y$ 曲线法；水平力作用下群桩的性状、承载力和 $P-Y$ 曲线。

四、桩的设计和施工，包括桩型的选择和桩的设置；预制打入钢筋混凝土桩、钢桩和灌注桩等的计算要点和构造；桩基施工

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 桩基的特性和适用条件	(1)
第二节 桩和桩基的类型及其发展	(3)
第三节 桩基工程学科在我国的发展简况	(9)
参考文献	(12)
第二章 轴向荷载作用下桩和桩基的性状和承载力	(13)
第一节 抗压单桩	(13)
第二节 抗压群桩	(30)
第三节 抗拔桩	(43)
第四节 桩的负摩擦力	(48)
第五节 桩的刚性系数	(52)
第六节 桩基的安全系数与可靠度分析	(57)
参考文献	(73)
第三章 水平荷载作用下桩和桩基的性状和承载力	(78)
第一节 概述	(78)
第二节 极限地基反力法	(83)
第三节 弹性地基反力法	(90)
第四节 P—Y 曲线法	(113)
第五节 水平力作用下群桩的性状	(130)
第六节 水平力作用下群桩计算	(144)
参考文献	(151)
第四章 桩的设计和施工要点	(154)
第一节 桩型的选择和桩的设置	(154)
第二节 钢筋混凝土预制桩的强度计算要点和压屈 稳定性	(158)

第三节	钢筋混凝土预制桩的构造	(169)
第四节	钢桩的计算原则、构造和防腐	(173)
第五节	灌注桩的计算原则和构造	(179)
第六节	桩基施工中的若干问题	(181)
	参考文献	(192)
第五章	桩的动力分析	(194)
第一节	波动方程在桩基工程中的应用	(194)
第二节	地震区桩基的设计	(207)
第三节	动载作用下软粘土的触变性质及其对工程的影 响	(212)
	参考文献	(212)
第六章	桩的荷载试验	(214)
第一节	桩的轴向静载试验	(214)
第二节	桩的水平静载试验	(235)
第三节	桩的静力触探和动测检验方法简介	(241)
	参考文献	(245)

第一章 绪 论

第一节 桩基的特性和适用条件

桩用作基础的竖直或斜的柱形构件。它的断面尺寸比长度小得多。它的作用在于穿过软弱的土层，把上部结构的荷载传递到更坚硬或更密实的土层或岩基上。桩的长度与设置方法以及桩的工作方式，都可以有很大变化，因此它很容易适应基础工程的不同情况和要求；在深水软基上，它几乎是基础的主要型式。与浅基础相比，桩变形小，承载力高，更适合机械化施工。

桩有多种功能，一是承受轴向荷载的抗压作用，如应用于房屋的桩基础（图1-1-1a）及贮罐的桩基础（图1-1-1b）；二是承受轴向荷载的抗拔作用，如应用于干船坞底板的桩基础（图1-1-1i）；三是承受水平荷载的抗弯作用，如应用于栈桥前的靠船和系船簇桩（图1-1-1g）和（图1-1-1h）；四是承受上述两种荷载叠加的组合荷载，如垂直和水平荷载组合的桩基桥台（图1-1-1e）和桩基码头（图1-1-1f）以及上拔和水平荷载组合的电视塔桩基础（图1-1-1c）及锚桩（图1-1-1d）。如仅利用桩的某一功能，例如它的抗压作用，则就会限制桩基础的适用范围；这时，重要建筑物的基础也可采用沉井或沉箱等刚性深基础，而不一定采用桩基础。桩基础可以借助群桩穿过水体将荷载传到地基中去，避免（或减少）进行水下工程，简化施工，缩短工期，改善劳动条件，因而近30年来，除了作为地下结构物时而采用沉井或沉箱基础外，其他情况已日益为不同型式的桩基础所代替。如图1-1-1a）~1-1-1e）及图1-1-1i），桩在泥面以下仅作为支承上部结构的深基础，基础—桩—土是相互作用，共同工作的。而图1-1-1f）~图1-1-1h）桩除作为深基础外，还是泥面以

上结构物的重要组成构件，能够承受压、拉及水平力等外荷，抵抗结构物的变形，这是桩基在水工建筑中应用的又一特点

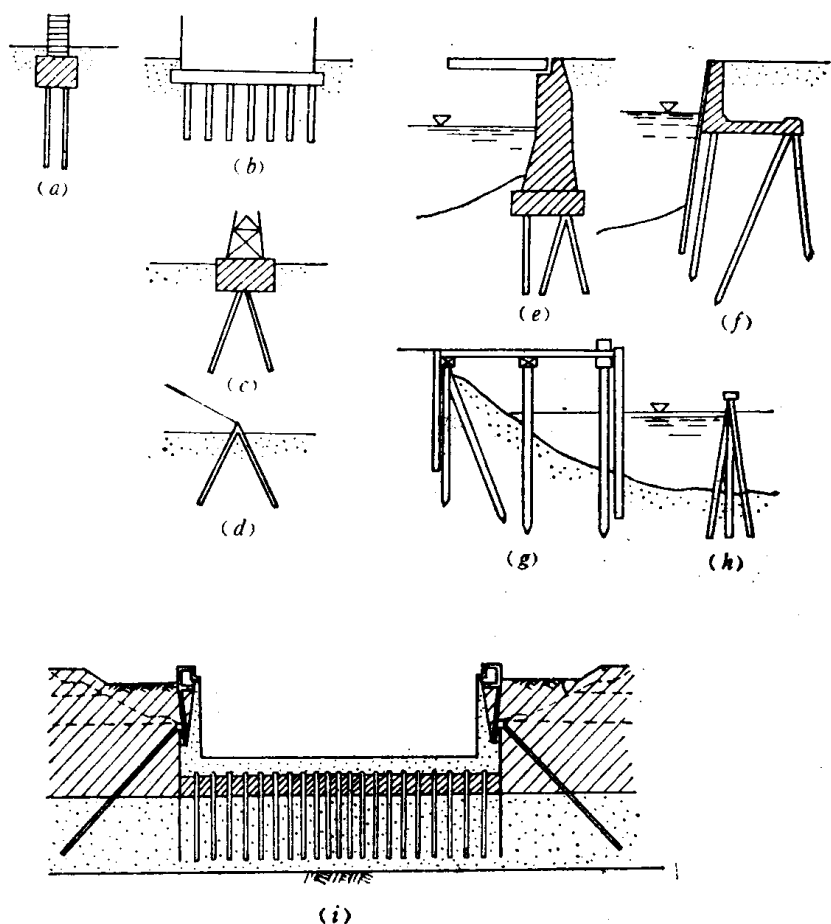


图1-1-1 桩的应用实例

a)房屋基础；b)贮罐基础；c)电视塔基础；d)锚桩；e)桥台；f)码头；g)栈桥；h)簇桩；i)干船坞

桩基适用于下述情况：

1. 当荷载较大，地基上部土层软弱，适宜的地基持力层埋藏较深，采用浅基础或进行地基处理在技术上和经济上都不合理时；

2.当水流冲刷力较大,河岸或海岸不稳定,位于基础或结构物下面的土层有可能被侵蚀、冲刷时;

3.当地基计算沉降过大或结构物对不均匀沉降敏感时;

4.当软基上的建筑物承受较大的水平荷载,需要减少建筑物的水平位移和倾斜时;

5.当有水的浮托力或波浪的上托力作用于软基上土工建筑物的底板或面板时;

6.在地震地区,当采用浅基础不能满足抗震要求时;

7.当施工水位或地下水位较高,采用其它深基础施工不便或经济上不合理时。

但是,当软土的覆盖层很薄,岩层较高,桩的入土深度不能满足稳定要求时,则不宜采用桩基。

第二节 桩和桩基的类型及其发展

桩可按桩身材料、桩身和截面的形状、桩的施工方法和桩的受力条件等进行分类。

一、按桩身材料分类

(一)木桩

木桩适用于当地盛产木材,无吃木虫,长期处于水位以下的桩基础。采用木桩作基础的历史悠久,如早在我国汉朝在桥梁建筑中就采用过。1950年以前,我国铁路桥梁和桩基船坞中采用的桩基础多为木桩,近代除临时性工程,一般多被钢筋混凝土桩所代替。采用木桩最经济的形式是用未经修整的圆木,当打下时,粗端在上面。由于木桩在水位以上部分易受腐蚀,通常木桩只打到最低地下水位或低潮位处,桩顶浇在混凝土桩帽中或套在预制钢筋混凝土桩中。木桩一般要经防腐剂处理。

(二)钢筋混凝土和预应力混凝土桩

一般指预制的打入桩,它强度高,耐久性好,不易被腐蚀。

预应力混凝土桩还可减少打桩过程中出现的裂缝。按其是否配箍筋的情况又可分为配箍筋的钢筋混凝土和预应力混凝土方桩和管桩，不配箍筋、纵向配预应力钢筋的混凝土方桩。前者是适用于各种建筑物基础的通用桩型，能承受轴向拉、压荷载，水平荷载及弯矩；后者一般只用在工业和民用建筑物基础中，并在不考虑基础的上拔力和水平地震力时才采用，在港口及桥梁等水工建筑中一般不宜采用，但它比前者可节省钢材40%。港口中用得最多的是方形空心预应力混凝土桩，它比实心桩可节省混凝土20%。为了确保桩基质量，对于Ⅰ、Ⅱ级工程以及位于侵蚀性水中 和受冻地区的工程，港口工程桩基规范规定应采用预应力混凝土桩；对一些次要工程，允许采用钢筋混凝土桩。70年代末，丰台桥梁厂生产了壁厚为90、100mm，管径为400、550mm的预应力离心混凝土管桩，这是我国桥梁建设中普遍采用的一种桩型。近年来，随着国际航运事业的发展，船舶吨位不断增大，港口建设逐渐向外海深水发展。沿用的60×60cm钢筋混凝土方桩已不能适应。如采用大直径钢管桩，不但耗用大量的钢材和外汇，还有易锈蚀和使用年限短等缺点。因而在“六五”和“七五”期间，我国研制了管径为1200mm和1000mm大直径预应力混凝土管桩以取代钢筋混凝土方桩和钢管桩，且已应用于连云港、北仑电厂、镇海石化算山码头、乍浦港和武汉红钢城码头等工程，用钢量仅为钢管桩的1/6~1/8，成本仅为钢管桩的1/2~1/3，取得了较明显的经济效益。

(三)钢桩

钢桩比钢筋混凝土桩成本高，用钢量大，但强度高，能承受较大水平力，易于加工和搬运，能打入坚硬的持力层；采用H型或工字型的钢桩时，能提供较大的表面摩阻力，挤土体积小，避免地面隆起或土向桩的侧面挤动；当持力层标高发生变化时，很容易把钢桩切短或加长。但在海水中钢桩易被腐蚀，对H型钢桩，在打桩过程中容易产生纵向压曲而破损。

钢桩一般包括钢管桩、H型或工字型的钢桩以及箱型截面的

一钢桩等，并以钢管桩为最常用。

(四)组合桩

近年来在福建沿海建港中，采用了一种下部为H型钢桩而上部为钢筋混凝土方桩的组合桩。它吸收了混凝土方桩和H型钢桩的优点：下部利用H型钢桩贯入能力强的特点，可以打入砾石层、风化岩层或其他硬土层；上部为钢筋混凝土桩，其刚度大，对海水又有抗侵蚀作用。

二、按桩身形状分类

如图1-2-1a)所示，可分为等截面柱形桩和楔形桩（或称锥形桩）。前者是常用的型式；后者一般适用于桩尖以上为较密实的土层，而桩尖支持于软弱土层的地基，只能当作受压的摩擦桩使用，不适用于新填土、膨胀土、永冻土及湿陷性黄土，其摩擦面及单位摩阻力均大于竖直的柱形桩，可增加竖向正应力，对减小液化有一定的作用，多用于房屋建筑，而在水下的港工建筑则很少采用。

三、按桩的截面分类

如图1-2-1b)所示，桩可分为圆形、多角形（八角形和六角形）、方形、矩形、三角形和H型或工字形。港口工程中常用方形桩。当水平外力的方向一定，且该方向桩的断面需要加强时，可采用矩形。为减少水流、波浪对桩的作用力，宜采用圆形或多角形断面。圆形的管桩，其管腔可以是空心的，也可以全部灌注混凝土，或上部灌注混凝土、下部灌砂；可以是钢筋混凝土管桩，也可以是钢管桩。方桩是预制钢筋混凝土打入桩中最常用的一种型式。三角形桩也是预制钢筋混凝土打入桩。它与方形桩和圆形桩相比，具有材料省，自重轻，周长及惯性矩均较大的优点，单桩承载力与等长度等周长的方桩相近，而造价却可节省20%以上；自1963年以来，这种桩在天津地区的工、民建基础中应用广泛。

四、按桩尖形式分类

如图1-2-1c)所示,可分为锥形的、扩头的和平底的。桩尖为锥形的一般用于打入桩;桩尖为扩头的一般用于钻孔灌注桩,适用于上层土质软弱,下层土质密实的情况,混凝土用量少,抗压抗拔承载力高;平底桩对钻孔灌注桩和打入桩均可应用。对于钢管桩,桩尖型式有闭口的、开口的和半闭口的三种。闭口的桩沉桩时会产生挤土作用,桩侧摩阻力较开口的有所提高,但沉桩困难;开口的则反之,沉桩容易,能贯入硬土层,挤土作用小,施工方便,桩位易控制但桩侧摩阻力较闭口的有所降低。为了解决上述矛盾,可综合两者的优点,在开口桩桩尖或桩中设置纵向隔板或横向隔板,或作成半封闭式桩尖,这在我国北仑、陈山和援外工程中已成功地加以应用。

五、按施工方法分类

(一)沉入桩

包括打入桩、静力压入桩和振动沉入桩。打入桩通过锤击(或以高压射水辅助)将各种预先制好的桩打入地基内所需达到的深度,这是港口和近海工程中最广泛采用的桩基施工方法,可用于粘性土和砂性土地基,但打桩振动和噪音对邻近工程或环境有影响。桩也可以用重力将之压入土中,称为静力压入桩,这种施工方法避免了锤击的振动影响,适用于软基上邻近建筑物较多,不容许有强烈振动的情况。按设桩时对土的影响来看,沉入桩属于排土型的桩。

(二)灌注桩

灌注桩属非排土型桩,施工方法是先在地基形成桩孔,然后在孔内制桩。按现有成孔工艺可划分为钻、挖、冲孔灌注桩;钻孔扩底灌注桩;沉管灌注桩等。成孔后,再在孔内放入钢筋笼,用混凝土浇注桩身。它的特点是施工设备简单,操作方便,除沉管灌注桩外,均无震动、噪音,能穿过硬层,对持力层地形高低

起伏的适应性强，钢材省，如只承受垂直荷载时，钢筋笼可以缩短（约为入土深度的 $\frac{1}{3}$ ），造价较低；但对淤泥及可能发生流沙或有承压水的地基，施工较困难。按施工工艺，又分有泥浆护壁作业的，如潜水钻孔灌注桩、冲击钻孔灌注桩和回旋钻孔灌注桩；无护壁作业的，如螺旋钻孔灌注桩、机动洛阳铲挖孔灌注桩；沉管护壁作业的，如锤击沉管灌注桩、振动沉管灌注桩和振动冲击沉管灌注桩；爆扩成孔作业的，如爆扩灌注桩和钻孔扩底灌注桩。

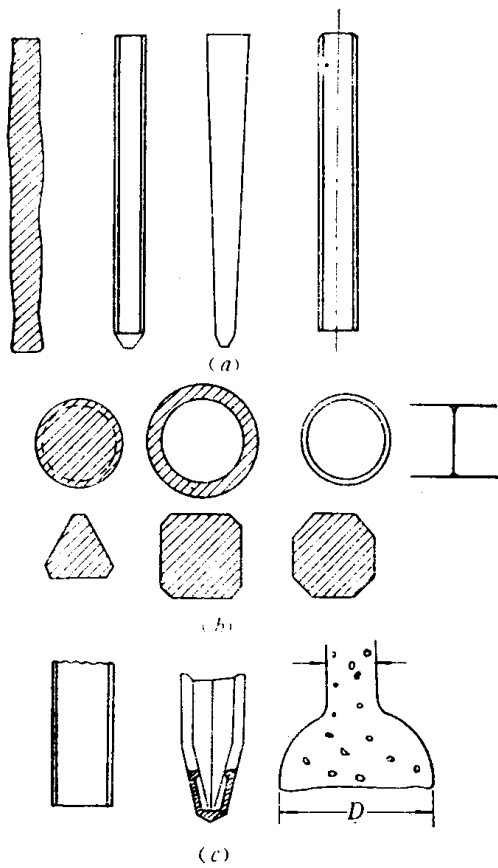


图1-2-1 桩身桩尖及桩的截面形式
 a) 桩身形式；b) 桩的截面形式；c) 桩尖形式

六、按桩的受力条件分类

据上节所述的桩的功能，桩可分为抗压桩、抗拔桩和横向受荷的抗弯桩。在抗压桩中，按桩把外荷传给地基的方式又可分为摩擦桩、端承桩、摩擦端承桩或端承摩擦桩。摩擦桩是指软土层较厚，桩只打入一定深度而未达到硬土层的桩，桩上荷载主要靠桩侧与土之间的摩阻力来支承，采用摩擦桩的建筑物有可能产生较大沉降。端承桩又称柱桩，是指桩穿过软弱土层支承于硬土层或岩层上的桩，因桩周软土的摩阻力很小，以及桩的竖向变形也很小，桩侧摩阻力不能充分发挥出来，计算时可以忽略其作用，桩上的荷载主要靠桩尖端阻力来承受。但实际工程中，最常见的桩是摩擦端承桩或端承摩擦桩，或叫半支承半摩擦桩，它既有桩身摩阻力，又有桩尖端阻力。两者比较，以谁为主，取决于地基土的分层及其物理力学性质，桩的尺寸和施工方法以及总荷载的大小等因素。抗拔桩是指在受荷过程中以抗拔的拉力为控制荷载的桩。受横向荷载的抗弯桩，是指受荷过程以横向荷载为控制荷载的桩。

七、按承台位置对桩基的分类

如图1-2-2所示，按承台相对位置分类，桩基可分为低桩承

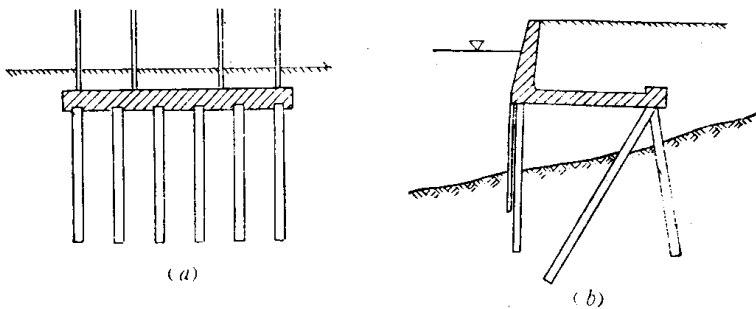


图1-2-2 按桩台相对位置分类的桩基

a)低桩承台；b)高桩承台

台桩基和高桩承台桩基。前者的承台底面位于地面或地面以下（图1-2-2a），桩在地基中仅作为支承上部结构的深基础，如干船坞和高层建筑中的桩基础，承台一桩一土是共同作用的，是桩一浅基的复合基础。一般情况下由于桩土共同承担外荷，不但提高了地基承载力，而且还可减少承台的沉降。后者的承台底面位于地面以上（图1-2-2b），如高桩码头和高桩墩台。桩基一部分桩身沉入土中，起深基础作用，一部分桩身外露在地面以上，有自由高度，作为结构物受力构件的重要组成部分，参加整个建筑物的工作，以抵抗结构物的变形。

第三节 桩基工程学科在我国的发展简况

一、桩 型

公元前206年到公元200年的汉朝，我们的祖先在桥梁建设上就有使用过木桩基础的悠久历史。1959年河南黄县利用打井锥具钻孔，创造了钻孔灌注桩。后来，随着社会主义建设的发展，又根据地质条件和施工工艺，发展了钻、挖、冲孔灌注桩和爆扩桩，桩型多样化，直径向大型化发展，桥梁和高层建筑已用到直径为3.0m和3.2m的灌注桩。就打入桩来说，我国30年代建造的钱塘江大桥，就采用过木桩和钢筋混凝土桩基础，桩型也多样化，有管桩、方桩、三角桩、锥形桩、上部为钢筋混凝土，下部为H型钢桩的组合桩；就桩的长度来说，有整根预制的，有分段预制拼接而成的。为了解决钢管桩用钢量大、易锈蚀和造价高的缺点，在“六五”和“七五”期间，又研制了直径1.2m和直径1.0m的后张法预应力大管桩，应用于码头和海洋工程。在我国，打入桩与灌注桩的应用同时并举，一般陆上的桩基工程，如工业与民用建筑和桥梁工程以灌注桩为主，海上或内河港口工程和固定式海上平台的桩基工程以打入桩为主。

二、单桩的轴向承载力

单桩轴向承载力的确定，50年代初期多采自苏联规范。由静力公式计算单桩承载力时，多采用巴塔列夫经验公式；用动力公式时，多采用格尔塞万诺夫（Н.М.Герсеванов）公式。解放后，我国在天津、连云港、上海、湛江、镇海以及长江中下游的杨泗庙、裕溪口、马鞍山、镇江等地建造许多码头，这些工程中的桩基承载力，大都通过静载荷的试桩来确定。70年代末，80年代初，我国制定了第一部港口工程桩基规范，规范中推荐的桩侧摩阻力和桩尖端阻力是根据120根钢筋混凝土打入桩试桩资料分析整理而得的。根据近年来桩基可靠度的分析核算，认为该规范桩基承载力的安全水准基本上是合理的。根据水上桩基工程受水文、气象等自然因素影响的特点，规范中第一次提出了应用快速维持荷载试验法进行试桩的规定。1990年冶金工业建设灌注桩基础设计与施工规程，对桩侧摩阻力和端阻力，在分析比较国内试桩的基础上，提出了建议值。1989年上海地基基础设计规范，根据该地区丰富的静力触探资料与静载试桩对比资料，在国内第一次把静力触探引入到地基规范。至于抗拔单桩承载力方面，1985年，在制定我国干船坞设计规范时，对抗拔桩的破坏机理、承载力和桩的优化入土深度都一一进行了研究，并放入规范。对桩的轴向承载力的安全系数，在近年来对桩的轴向承载力进行可靠度分析的基础上，在国内首次采用了分项安全系数。

三、单桩的水平承载力

50年代以前，建筑物的水平力一般由斜桩来承受，直桩不考虑水平力的作用。50年代以后，考虑了土的抗力，但是多采用苏联安格尔斯基的方法。60年代以后，由于采用了钻孔灌注桩，因桩多为竖直的，考虑桩的水平承载力势在必行，铁路和公路桥梁首先采用了 m 法、 C 法，港工桩基规范也采用了 m 法和张友龄法。但上述方法均为单一参数法，对桩在地面处的挠度、转角和

桩身弯矩及其所在位置与试桩实测值只能凑合到较近似的程度而不能全部符合。80年代吴恒立教授提出了综合刚度原理的双参数法,改进了上述各法的缺陷和不足,但必须要有试桩资料。70年代美国石油协会广泛采用 P - Y 曲线来设计海上平台的桩基,挪威在海上平台的桩基设计中也采用了 P - Y 曲线;80年代我国也对 P - Y 曲线进行了研究,并引入到海上桩基工程的设计。 P - Y 曲线法保证了桩土之间的变形协调,适用于线性与非线性,静载与循环荷载,避免了现行单一参数法的缺陷,只要有土工指标,在不作试桩的情况下,均可获得与桩的实际受力相近的成果。

四、群桩基础的分析

1.对竖向荷载作用下群桩基础的设计,我国工民建及桥梁墩台都采用实体深基础的整体剪切破坏法,承载力采用太沙基的群桩底面积上端阻力与周边上摩阻力之和;苏联和德国等国采用将群桩底面积扩大来计算其承载力。而港口码头是高桩承台,桩距大,以刺入破坏为主,我国港工桩基规范推导了高桩式群桩承载力的计算公式,弥补了沿用多年的康浮司—拉巴尔(Converse—Labarre)等公式未考虑土质和桩长影响的缺陷。该方法已放入我国海上平台入级与建造规范(1983年)。

2.对于桩筏基础,已系统地研究了桩—土—基础共同作用的性状、承载力和设计的优化尺度问题,解决了复合基础的设计问题,成果已被放入有色金属工业总公司和冶金部的《冶金工业建设灌注桩基础勘察设计及施工验收规范》。

3.对水平力作用下群桩的性状也进行了研究,重点研究了在水平力作用方向上各桩受力分配的不均匀性及群桩情况下桩的效率系数和桩的 P - Y 曲线的修正方法,研究结果与桩群的现场观测比较符合,这对受水平力作用的灌注桩的设计有较大的经济价值。