

前 摇 摇 言

本书系统地阐述了桩基工程的分析和设计方法,介绍了国内外有关桩基工程的最新发展及一些工程实例。本书是在教学和科研实践中形成的,曾作为研究生教材和本科高年级选修课教材多次使用过。书中反映了作者近 10 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《港口工程桩基规范》、《固定式平台入级与建造规范》、《干船坞设计规范》和《高桩码头设计与施工规范》,有的研究成果是作者及其 10 年以来指导的 10 名研究生共同完成的,也有教研室李启新和王福元等同志多年辛勤协助和通力合作完成的。作者 1984 年出版了《桩基工程》一书,深受工程单位欢迎,并于 1985 年再次重印。1986 年退休后又完成了南京热电厂直径 100m、高约 10m 浓缩池的纠偏任务;长江江阴大桥塔墩基础直径 10m 大直径灌注桩试桩及承载力的研究任务;长江三峡水利枢纽杨家湾港区的高桩码头评审和码头的试验研究任务;福澄、广靖、淮江、徐连等高速公路桥梁桩基的审查任务;沪宁高速公路拓宽工程昆山段疏桩基础的试验研究任务;东海、南海海军有关桩基工程的咨询任务;1988 年又参编了建筑工业出版社出版的《实用桩基工程手册》,1989 年参编了人民交通出版社出版的《交通土建软土地基工程手册》。退休后近 10 年来的上述工程实践和研究工作,以及本书其他作者的大量研究工作,为本书的再版提供了新的内容。本书相对 1984 年版章节内容,除根据新的研究成果和新的规范有新的补充外,又根据生产需要,增加了抗滑桩、疏桩基础、柔性靠船桩与土工合成材料在桩基工程上的应用等四章。所以本书在《桩基工程》的基础上现改名为《实用桩基工程》。

本书第七、第八章由长沙理工大学韩理安教授编写,第九章由河海大学鲁子爱教授编写;第十四章由重庆交通学院何光睿教授编写,第十二章由广东省交通集团研发中心周春儿教授级高工编写,第十三章由东南大学谢耀峰教授编写,其余十章由作者完成。本书第一稿时承蒙武汉大学冯国栋教授、重庆交通学院吴恒立教授、交通部第三航务工程勘察设计院王炳煌教授级高工等在审查书稿时提出了不少宝贵意见,在此一并表示感谢!本书编写得到了江苏省“十五”期间高等学校重点学科建设“港口海岸及近海工程”学科的资助。

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
河海大学交通学院海洋学院
1998 年 2 月于南京

目 录

| | |
|---------------------------------|---|
| 第一章 绪论..... | 员 |
| 第一节 桩基的特性和适用条件..... | 员 |
| 第二节 桩基的类型及其发展..... | 圆 |
| 第三节 桩基工程学科在我国的发展简况..... | 缘 |
| 参考文献..... | 苑 |
| 第二章 垂直荷载作用下桩和桩基的性状及承载力..... | 愿 |
| 第一节 单桩轴向抗压的工作性状..... | 愿 |
| 第二节 单桩轴向抗压承载力的确定 | 愿 |
| 第三节 桩的刚性系数 | 愿 |
| 参考文献 | 愿 |
| 第三章 垂直荷载作用下群桩的工作性状 | 愿 |
| 第一节 群桩的特性和破坏模式 | 愿 |
| 第二节 群桩按非整体破坏的计算 | 愿 |
| 第三节 桩—土共同作用的性状与复合基础承载力的计算 | 愿 |
| 参考文献 | 愿 |
| 第四章 抗拔桩 | 苑 |
| 第一节 概述 | 苑 |
| 第二节 等截面桩的抗拔承载力 | 苑 |
| 第三节 扩底桩的抗拔承载力 | 苑 |
| 参考文献 | 苑 |
| 第五章 桩的负摩擦力 | 源 |
| 第一节 负摩擦力的概念及其产生条件 | 源 |
| 第二节 负摩擦力的分布及中性点 | 源 |
| 第三节 负摩擦力及下拉荷载的确定 | 源 |
| 第四节 群桩的负摩擦力 | 源 |
| 第五节 消除负摩擦力的措施 | 源 |
| 参考文献 | 源 |
| 第六章 水平荷载作用下单桩的工作性状和承载力 | 源 |
| 第一节 概述 | 源 |
| 第二节 极限地基反力法 | 源 |
| 第三节 弹性地基反力法 | 源 |
| 第四节 孺曲线法 | 源 |
| 参考文献 | 源 |
| 第七章 水平荷载作用下群桩的工作性状和承载力 | 源 |
| 第一节 水平荷载作用下群桩的工作性状与破坏机理 | 源 |

| | |
|----------------------------------|---|
| 摇第二节摇水平荷载的群桩效率 | 页 |
| 摇第三节摇群桩的水平地基系数 | 页 |
| 摇第四节摇群桩的曲线法 | 页 |
| 摇参考文献 | 页 |
| 第八章摇桩的设计与施工要点 | 页 |
| 摇第一节摇桩型的选择和桩的设置 | 页 |
| 摇第二节摇钢筋混凝土预制桩的强度计算要点和压屈稳定性 | 页 |
| 摇第三节摇钢筋混凝土预制桩的构造..... | 页 |
| 摇第四节摇灌注桩的计算原则和构造..... | 页 |
| 摇第五节摇桩基施工中的若干问题..... | 页 |
| 摇第六节摇灌注桩桩基施工中的若干问题..... | 页 |
| 摇第七节摇人工挖孔桩..... | 页 |
| 摇参考文献..... | 页 |
| 第九章摇波动方程在桩基工程中的应用..... | 页 |
| 摇第一节摇应力波理论基础..... | 页 |
| 摇第二节摇(瑞利)波动方程法 | 页 |
| 摇第三节摇(福斯)波动方程法 | 页 |
| 摇参考文献..... | 页 |
| 第十章摇桩和桩基的动力分析..... | 页 |
| 摇第一节摇地震区桩基的抗震设计..... | 页 |
| 摇第二节摇震动引起的软粘土的触变现象及其对工程的影响..... | 页 |
| 摇参考文献..... | 页 |
| 第十一章摇抗滑桩..... | 页 |
| 摇第一节摇概述..... | 页 |
| 摇第二节摇港工地基规范法..... | 页 |
| 摇第三节摇桩的绕流阻力法..... | 页 |
| 摇第四节摇防治路基滑坡常用的悬臂桩法..... | 页 |
| 摇参考文献..... | 页 |
| 第十二章摇疏桩基础的设计与计算..... | 页 |
| 摇第一节摇概述..... | 页 |
| 摇第二节摇控沉疏桩基础的设计与计算..... | 页 |
| 摇第三节摇协力疏桩基础的设计与计算..... | 页 |
| 摇参考文献..... | 页 |
| 第十三章摇柔性靠船桩的设计与计算..... | 页 |
| 摇第一节摇柔性靠船桩(墩)的布置与构造 | 页 |
| 摇第二节摇柔性靠船桩(墩)的设计与计算 | 页 |
| 摇参考文献..... | 页 |
| 第十四章摇土工合成材料在桩基工程中的应用..... | 页 |
| 摇第一节摇土工合成材料简述..... | 页 |
| 摇第二节摇桩承台加筋垫层结构..... | 页 |

| | |
|---|----|
| 插第三节插桩—膜堤组合结构..... | 图例 |
| 插参考文献..... | 图例 |
| 第十五章插桩的荷载试验..... | 图例 |
| 插第一节插桩的轴向抗压静载试验..... | 图例 |
| 插第二节插桩基础复合地基荷载试验要点..... | 图例 |
| 插第三节插桩的水平静载试验..... | 图例 |
| 插第四节插桩的动力检测简介..... | 图例 |
| 插参考文献..... | 图例 |
| 第十六章插工程实例..... | 图例 |
| 插实例 图例武汉红钢城码头预应力混凝土大管桩承载力的确定 | 图例 |
| 插实例 图例某桥双柱式桥墩钻孔灌注桩基础的桩长及桩身弯矩和水平位移的验算 | 图例 |
| 插实例 图例江阴长江大桥北塔桥墩钻孔灌注桩基础单桩抗压承载力的推求 | 图例 |
| 插实例 图例根据双桥探头静力触探资料确定混凝土预制桩抗压承载力 | 图例 |
| 插实例 图例上海港某试桩竖向抗压承载力的分析比较 | 图例 |
| 插实例 图例水平试桩的桩身最大弯矩及泥面位移计算值与试验实测值的计算与比较 | 图例 |
| 插实例 图例某铁路路基边坡抗滑桩的设计验算 | 图例 |
| 插实例 图例路堤下管桩复合地基沉降量计算 | 图例 |

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。桩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,都可以有很大的变化,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形式。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 1-1-1)及贮罐的桩基础(图 1-1-2);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 1-1-3);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 1-1-4)和(图 1-1-5);四是承受上述几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 1-1-6)和桩基码头(图 1-1-7),以及上拔和水平荷载组合的电视塔桩基础(图 1-1-8)及锚桩(图 1-1-9)。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 40 年来,除了作为地下结构物时采用沉井或沉箱基础外,其它情况已日益为不同形式的桩基础所代替。如图 1-1-10~图 1-1-11 及图 1-1-12,桩在泥面以下仅作为支承上部结构的深基础,基础一桩一土是相互作用,共同工作的。而图 1-1-13~图 1-1-14 桩除作为深基础外,还是土面以上结构物的重要组成部分,能够承受压、拉及水平力等外荷载,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。

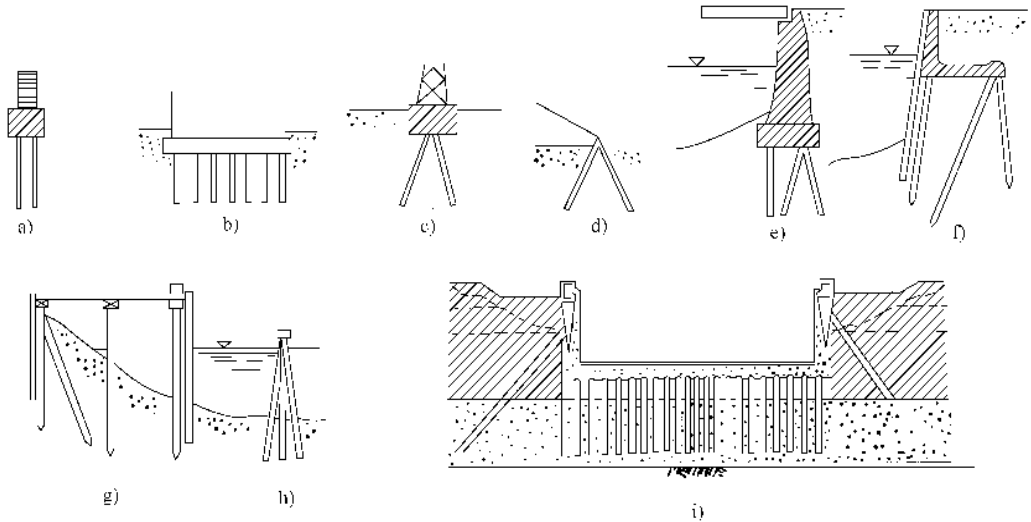


图 1-1-12 桩基的应用实例

1-1-1 房屋基础, 1-1-2 贮罐基础, 1-1-3 电视塔基础, 1-1-4 锚桩, 1-1-5 栈桥, 1-1-6 桥台, 1-1-7 码头, 1-1-8 栈桥, 1-1-9 簇桩, 1-1-10 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，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水平荷载，需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之水工建筑物底板或面板时；

⑥在地区震区，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 摇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，如早在我国汉朝时桥梁建筑中就采用过。1911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，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或低潮水位处，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 15%。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 10%。为了确保桩基质量，对于 1 级工程以及位于侵蚀性水中 and 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。20 世纪 70 年代末，丰台桥梁厂生产了壁厚为 200mm，管径为 300mm 的预应力混凝土离心管桩，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 300mm 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 600mm 和 800mm 大直径后张法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、深圳赤湾港等工程,用钢量仅为钢管桩的 1/3~1/5,成本仅为钢管桩的 1/4~1/5,取得较明显的经济效益。

建筑工程和高速公路近十多年来广泛应用一种新型的先张法预应力混凝土管桩。广东地区 20 世纪 60 年代就开始应用,华东地区 20 世纪 70 年代才逐渐推广应用。按照国家标准《先张法预应力混凝土管桩》(GB 13147-1999)的规定,管桩按混凝土强度等级分为预应力混凝土管桩(Ⅲ型)、预应力高强混凝土管桩(Ⅳ型)。管桩外径分为 160mm、180mm、200mm、220mm、240mm、260mm、280mm 和 300mm 等规格,按管桩的抗弯性能或混凝土有效预压应力值分为粤型、粤月型、月型和悦型,其中粤型最小,悦型最大。对于一般的建筑工程,采用粤型或粤月型即可。管桩的规格众多,配桩极为方便,因此近年来,在工业与民用建筑和高速公路等建设领域发展极为迅猛。

(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 U 形或工字形的钢桩,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移动;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 U 形钢桩,在打桩过程中容易产生纵向压屈而破损。

钢桩一般包括钢管桩、U 形或工字形的钢桩以及箱形截面的钢桩等,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 U 形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 U 形钢桩的优点:下部利用 U 形钢桩贯入能力强的特点,可以打入砾石层、风化岩层或其它硬土层;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 1-1-1 所示,可分为等截面柱形桩和楔形桩(或称锥形桩)。前者是常用的形式;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柱使用,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,对减少液化有一定的作用,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 1-1-2 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 U 形或工字形。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,可采用矩形桩。为减少水流、波浪对桩的作用力,宜采用圆形或多角形断面桩。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形式。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 10% 以上。自 1976 年以来,这种桩在挽津地区的工民建基础中应用广泛。

四、按桩尖形式分类

如图 1-1-3 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,桩尖形式有闭口的、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,或做成半封闭式桩尖,在北仑、陈山码头和援外工程中已成功加以应用。

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要的深度,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。但打桩振动和噪声对邻近工程或环境有影响。桩也可以用重力将之压入土中,称为静力压力桩,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。按置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,黏孔扩底灌注桩,沉管灌注桩等。成孔后,再在孔内放入钢筋笼,用混凝土浇筑桩身。它的特点是施工设备简单,操作方便,降沉管灌注桩外,均无振动、噪声,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,灌注桩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、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底灌注桩。

六、按桩的受力条件分类

据桩的功能和受力条件,桩可分为抗压桩、抗拔桩和横向受荷的抗弯性。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,又有源

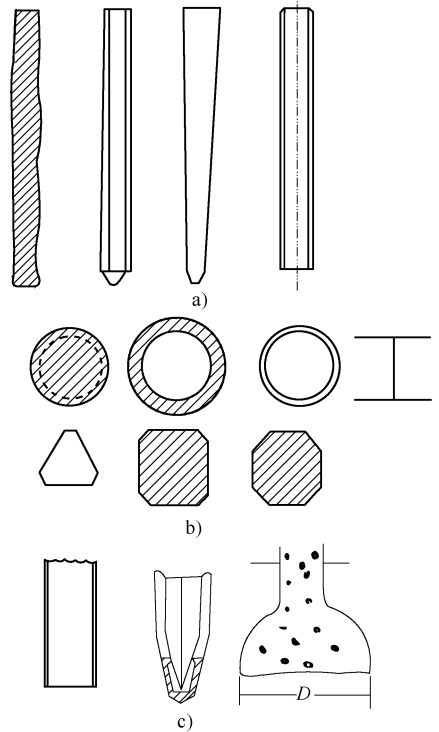


图 5-1 各种桩身桩尖及桩的截面形式
 各种桩身形式 圆形桩的截面形式 槽桩尖形式

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、按承台位置对桩基分类

如图 1-10 所示,按承台相对位置分类,桩基可分为低桩承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 1-10a),桩在地基中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—桩—土是共同作用的,是桩—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上(图 1-10b),如高桩码头和高桩墩台。桩基的桩身一部分沉入土中,起深基础作用,一部分外露在地面以上,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。

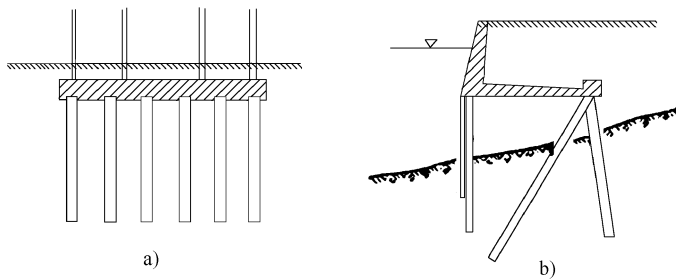


图 1-10 按承台相对位置分类的桩基
a) 低桩承台 b) 高桩承台

第三节 摇桩基工程学科在我国的发展简况

一、桩形

公元前 221 年到公元 220 年的汉朝,我们的祖先在桥梁建设上就有使用木桩基础的记载。到宋朝,桩基技术已逐渐成熟,上海的龙华塔和山西太原的晋祠圣母殿,都采用了桩基础。1853 年河南黄县利用打井锥县钻孔,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,桩形多样化,直径向大型化发展,桥梁和高层建筑已用到直径为 1.0m 和 1.5m 的灌注桩。就打入桩来说,我国 20 世纪 70 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,桩形也多样化,有管桩、方桩、三角桩、锥形桩和上部为钢筋混凝土、下部为匀形钢桩的组合桩。就桩的长度来说,有整根预制的,也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 1.0m 和直径 1.5m 的后张法预应力大管桩,应用于码头和海洋工程。近十多年来,在华南和华东地区,在建筑工程和高速公路建设中广泛用一种新型的先张法预应力混凝土管桩,管桩的规格多,应用极为方便。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 20世纪 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(匀质弹性地基)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端、裕溪口、马鞍山、镇江等地建造了许多码头,这些工程中的桩基承载力大都通过静荷载的试桩来确定。20世纪 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 1954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。1985年,工民建灌注桩基础设计与施工规程,在我国首次出现;1989年,工民建又出了专业性的建筑桩基技术规范。1993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,在国内第一次把单桥探头静力触探引入到地基规范。1994年铁道部颁布了《静力触探使用技术暂行规定》,建议用双桥静力触探估算打入桩的极限承载力。至于抗拔单桩承载力方面,1983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,并放了规范。对桩的轴向承载力的安全系数,近年来在对桩的轴向承载力进行可靠度分析的基础上,在 1993年,《港口工程桩基规范(试行)》的修定稿已采用了以分项系数表达的概率极限状态设计法。

三、单桩的水平承载力

20世纪 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。20世纪 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。20世纪 70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,铁路和公路桥梁首次采用了皂法、悦法,港工桩基规范也采用了皂法和张友龄法。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拟合到较近似的程度而不能全部符合。20世纪 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。20世纪 70年代美国石油协会广泛采用 $\frac{1}{2}$ 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 $\frac{1}{2}$ 曲线,20世纪 80年代我国也对 $\frac{1}{2}$ 曲线进行了研究,并引入到海上桩基工程的设计。 $\frac{1}{2}$ 曲线法保证了桩土之间的变形协调,适宜于线性与非线性、静载与循环荷载,避免了现行单一参数法的缺陷。只要土工指标取值可靠,在不做试桩的情况下,均可获得与桩的实际受力相近的成果,已引入港口桩基规范(1993)。

四、群桩基础的分析

1950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夫斯—拉巴尔(悦法)等公式未考虑土质和桩长影响的缺陷,成果已引入港工桩基规范。该方法也引入我国海上平台入级与建造规范(1993)。

20世纪 80年代对于桩筏基础,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 解决了桩土复合基础和控沉疏桩基础的设计问题 成果已被引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》,并在深厚软基路堤高速公路拼接工程中推广应用。

猿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不均匀性及群桩情况下桩的效率系数和桩的 孕再曲线的修正方法 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 成果已放入港工桩基规范(员猿猿)。

五、桩基检测技术

圆世纪 愿年代以来 我国桩基检测技术 特别是桩基动测技术得到了飞速发展。从国内外桩基检测实践看 利用理论与实践均渐趋成熟的动测技术势在必行。圆年建设部的《建筑桩基检测技术规范》就弥补了这一缺陷。

过去桩身质量检测只能采用钻孔取芯法 但只能抽查少量的桩 且工期长 费用高 小直径桩不能使用等缺点。对打入桩 常用打桩贯入度进行分析 由贯入度有无异常现象来判断桩身是否断裂。近 员年来 对桩的检测方法有了较大的发展 如小应变的机械阻抗法中的稳态法、桩基参数动测法、共振法和水电效应法 高应变的锤击贯入法、打桩分析仪(孕再)法。作为桩的承载和检验 一般采用静力法试桩。但在某些地区 如已掌握足够静、动试验对比资料及建筑经验时 也可采用动力法试验。低应变的检测方法一般用于检测桩身结构完整性 高应变的检测方法除了用于检测桩身结构完整性外 还可用于检测桩的承载力时参考。

参考文献

- 员 猿 杨克己、韩理安编著 圆桩基工程 圆北京 :人民交通出版社 员猿猿
- 圆 猿 《桩基工程手册》编写委员会 圆桩基工程手册 圆北京 :中国建筑工业出版社 员猿猿
- 猿 猿 胡人礼编著 圆桥梁桩基础分析和设计 圆北京 :中国铁道出版社 员猿猿
- 源 猿 史佩栋主编 圆实用桩基工程手册 圆北京 :中国建筑工业出版社 员猿猿
- 缘 猿 刁 援 援 援 温特科恩、方晓阳 圆基础工程手册 圆钱鸿缙、叶书麟等译校 圆北京 :中国建筑工业出版社 员猿猿
- 远 猿 交通部桩基工程规范编写组 圆桩基工程规范(员猿猿—员猿猿)编制说明 员猿猿
- 苑 猿 交通部第三航务工程勘察设计院 圆港口工程桩基规范(员猿猿—员猿猿)北京 :人民交通出版社 员猿猿
- 愿 猿 中华人民共和国国家标准 圆先张法预应力混凝土管桩(员猿猿—员猿猿)
- 怨 猿 中华人民共和国行业标准 圆建筑桩基检测技术规范(员猿猿—员猿猿)北京 :建筑工业出版社 , 圆猿猿

第二章 垂直荷载作用下桩和桩基的性状及承载力

第一节 单桩轴向抗压的工作性状

一、桩的荷载传递机理

在轴向压力作用下,桩身将发生轴向弹性压缩,同时桩顶荷载通过桩身传到桩底,桩底下土层也将发生压缩,这两部分之和就是桩顶的轴向位移。但置于土中的桩与其侧面土紧密接触,桩相对于土向下位移,产生土对桩向上作用的桩侧摩阻力。桩顶荷载沿桩身向下传递过程中,必须不断克服这种摩阻力,这样桩身截面轴向力就随着深度逐渐减小,传至桩底截面的轴向力就等于桩顶荷载减去全部桩侧摩阻力,它与桩底支承反力即桩端阻力的大小相等,方向相反。通过桩侧摩阻力和桩端阻力,桩将荷载传给土体。

因此,可以认为土对桩的支承力是由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成,桩的极限承载力(或称桩的极限荷载)就等于桩侧摩阻力极限值与桩端阻力极限值之和。但两者并不同时发生,因为它们的发挥程度与桩土间的变形性状有关,各自达到极限值时所需要的位移量并不相同。试验表明,只要桩与土之间有微小的相对位移,沿着桩身就会发生荷载传递,产生桩侧摩阻力,且在不太大的相对位移值(粘性土约为 $0.5 \sim 1.0$ 厘米,砂性土为 $0.2 \sim 0.5$ 厘米,或桩径的 $1/100 \sim 1/50$)时,桩侧摩阻力即可充分发挥到极限值;桩端阻力的发挥所需的位移值与桩底下土层的性质有很大关系,对于坚硬土层及岩层,端阻力占桩支承力的全部或绝大部分,这就是端承桩;对置于一一般土层上的摩擦桩,桩端阻力要发挥到极限值,则要比桩侧阻力达到极限值的位移大得多,一般可达桩径的 $1/10 \sim 1/5$ 。通常是桩侧阻力先充分发挥出来,然后桩端阻力才逐渐发挥,直至达到极限值。确定桩的承载力时,应考虑这一特点,并应注意长桩因桩身弹性压缩较大的影响。例如,对于支承在基岩上的长桩,当桩身穿过有一定强度的较厚土层时,有相当部分的荷载通过桩身传递给侧向土层,确定桩承载力时可适当考虑桩侧摩阻力,如不计则偏于安全;对于桩长很大的摩擦桩,也因桩身压缩变形大,桩端阻力尚未达到极限值,桩顶位移就可能已超过使用要求所容许的范围,且传递到桩底的荷载很微小,故确定桩的承载力时,不应取极限桩端阻力或取值过大。

通过室内外实验可知,桩侧阻力和桩端阻力并不随桩的入土深度增加而呈直线性增大;当桩的入土深度超过一定值后,阻力并不随深度增加而增大,这就是桩侧阻力或桩端阻力的深度效应。

二、桩的破坏模式

在轴向受压荷载作用下,单桩有下述几种典型破坏模式(图 2-1-1) :

第一种情况,当桩底支承在很坚硬的地层上,桩侧为软土层,且其抗剪强度很低时,桩在轴

向受压荷载作用下,如同一根压杆似地出现纵向挠曲破坏(图 圆 圆 圆);其荷载—沉降曲线(图 圆 圆 圆)呈现明确的破坏荷载,这时桩的承载力取决于桩身的材料强度。

第二种情况,当桩材具有足够强度的桩穿过抗剪强度较低的土层,达到或沉入强度较高的土层时,桩在轴向受压荷载作用下,桩底土体能形成滑动面,出现整体剪切破坏(图 圆 圆 圆),因为持力层以上的软土层不能阻止滑动土楔的形成;在图 圆 圆 圆上可找出明确的破坏荷载。此时桩的承载力主要取决于桩底土层的支承力,桩侧摩阻力起的作用很小。

第三种情况,当桩材具有足够强度,桩入土深较大,桩周土层抗剪强度较均匀时,桩在轴向受压荷载作用下,将会出现刺入式破坏(图 圆 圆 圆)。根据荷载大小和土质的不同,在图 圆 圆 圆上没有明显的转折点。此时桩所受的荷载由桩侧摩阻力和桩底阻力共同承担。

第四种情况,当桩底端处的土层比较软弱,桩上的荷载主要由摩擦力承担,端阻力不起作用(图 圆 圆 圆);在图 圆 圆 圆上,有竖直向的切线,表明摩擦力已充分发挥。

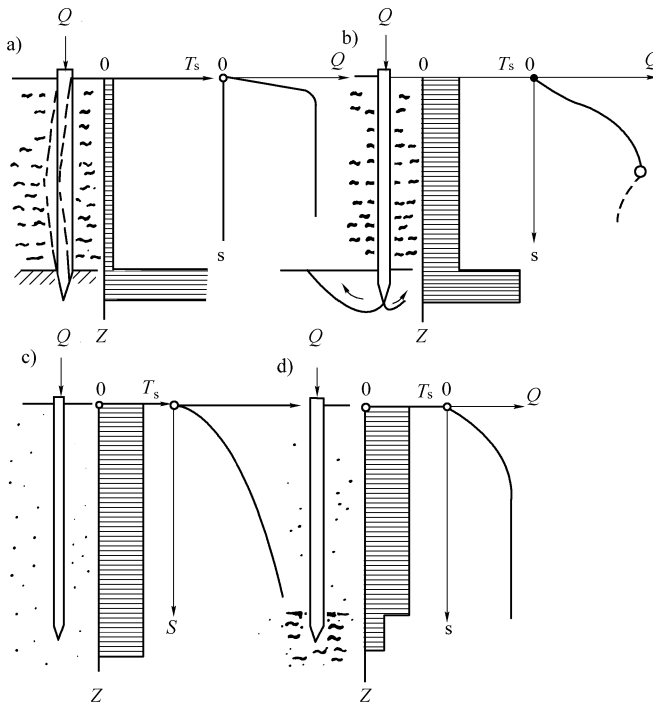


图 圆 圆 圆 土的强度对桩破坏模式的影响

圆 圆 圆 桩身压曲破坏;圆 圆 圆 桩底剪切破坏的端承桩;圆 圆 圆 桩的刺入破坏;圆 圆 圆 摩擦力已充分发挥的摩擦桩

三、桩的荷载与沉降的关系

桩顶荷载 Q 由桩侧阻力 Q_s 与桩端阻力 Q_b 共同承担,而桩顶沉降量(或竖向变形量) s 由桩身变形 s_p 和桩端地基引起的变形 s_b 两部分组成。 s_p 是桩身材料受力后的压缩变形,它与桩身的弹性模量、桩长和桩的截面尺寸等因素有关。在一般的容许荷载以内,可不考虑钢筋混凝土材料塑性影响,把桩的弹性模量随荷载的加大而降低的因素略去,桩身的弹性变形 s_p 与外荷 Q 的关系符合胡克定律,变形是线性的。桩受力后,首先桩侧上部产生摩阻力,其图 圆 圆 圆 曲线表现为斜率很小的直线段;当桩继续加荷,则桩侧摩阻力继续向桩身下部发展,待全桩

长的桩侧摩阻力均已充分发挥, 桩的 $Q-S$ 曲线便出现第一拐点, 该拐点称为荷载的弹性界限。拐点之前的变形近似线性, 一般认为属于弹性变形阶段。

桩端地基的变形 较明显地表现为弹性、弹塑性和塑性破坏三个阶段, 它与桩端土的性质、传到桩端的荷载和桩的入土深度有关, 其变形随荷载的增加, 从弹塑性变形阶段发展到塑性破坏阶段。当桩端阻力达到极限时, $Q-S$ 曲线上出现第二拐点, 该拐点对应的荷载称为桩的极限荷载, 或称桩的极限承载力。第一拐点以后的变形都是非线性的, 其 $Q-S$ 曲线 (以上海某厂试桩的 $Q-S$ 曲线 (图 4.2.1) 为例证) 一般可分为三段: 第一段为 OA 段, 呈直线或近似于直线, 沉降 S 与荷载 Q 呈线性关系; 第二段为 AB 段, 呈缓变曲线, 沉降 S 与荷载 Q 为非线性关系; 第三段为 BC 段, 接近于竖直线, 表明沉降急剧增加, 以致变形不能稳定。第一、二段的分界点即为第一拐点, 第二、三段的分界点即为第二拐点。当第一拐点与第二拐点很接近时, 往往是桩侧阻力为主的摩擦桩; 当桩端持力层为强度很高的硬粘土或密实砂层等情况时, 桩端阻力占较大比例, $Q-S$ 曲线找不到明显的拐点, 不出现第三段 BC 而使 AB 段延长。桩群 (特别是低桩台群桩) 基础就具有这种性质, $Q-S$ 曲线没有明显拐点。

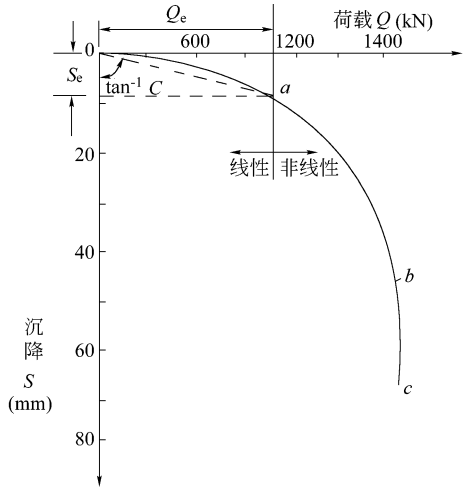


图 4.2.1 单桩的 $Q-S$ 曲线

第二节 摇单桩轴向抗压承载力的确定

一、静荷载试桩确定单桩轴向抗压承载力

静荷载试桩或称静力试桩, 是在现场对原型桩或在实际施工中做试验, 求桩的承载力。由于试桩条件与桩的实际受力情况较为一致, 所求的单桩承载力比较可靠, 因此《港工桩基础规范》规定单桩承载力应首先根据静荷载试验确定。当遇下列情形之一时, 也可不进行桩的静载试验。

- 1) 当附近工程有试桩资料, 且沉桩工艺相同, 地质条件相近时;
- 2) 重要工程中的附属建筑物;
- 3) 桩数较少的重要建筑物, 并经技术论证;
- 4) 小港口中的建筑物。

当进行静荷载试桩时, 单桩轴向抗压承载力设计值应按下列公式计算:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (4.2.1)$$

式中: R_d ——单桩轴向抗压承载力设计值 (kN);

R_k ——单桩轴向抗压极限承载力标准值 (kN), 当试桩数量 $n \geq 3$ 时, 且各桩抗压极限承载力最大值与最小值之比小于等于 1.5 时, 应取其平均值作为单桩抗压极限承载力标准值; 其比值大于 1.5 时, 应经分析论证后确定; 《欧洲地基基础规范》取

其最小值作为单桩抗压极限承载力标准值；

$\gamma_{\text{桩}}$ ——单桩轴向抗压承载力分项系数，一般取 1.1，当地质情况复杂或永久作用占比较重大时，取 1.2

二、经验公式计算单桩轴向抗压承载力

当无试桩条件或在初步设计阶段或上述可不进行试桩的四个条件之一时，可用下列经验公式计算单桩轴向抗压承载力。

(一)打入式钢筋混凝土单桩轴向抗压设计承载力

打入桩的沉桩过程中使桩侧和桩端土挤密，产生挤土效应，愈深处桩侧土的挤密程度就愈大，桩侧摩阻力和桩端阻力均随桩的入土深度而变。桩上的荷载是由桩周表面摩阻力和桩端阻力承担的，《港口工程桩基规范》(GB 11983-1988)建议按下式计算单桩轴向抗压设计承载力 $R_{\text{桩}}$ ：

$$R_{\text{桩}} = \frac{1}{\gamma_{\text{桩}}} (\sum_{i=1}^n \lambda_{\text{桩}} \omega_i + \lambda_{\text{端}} A_{\text{端}}) \quad (11.2.1)$$

式中 $\gamma_{\text{桩}}$ ——单桩轴向抗压承载力分项系数，一般取 1.1，当地质条件复杂或永久作用占比较重大时， $\gamma_{\text{桩}}$ 可取 1.2；

ω_i ——桩身截面周长 (m)；

$\lambda_{\text{桩}}$ ——单桩第 i 层土的极限摩阻力标准值 (kPa)，如无当地经验时，对打入式钢筋混凝土挤土桩可按表 11.2.1 采用；

$\lambda_{\text{端}}$ ——桩身穿过 n 土层的长度 (m)；

$\lambda_{\text{端}}$ ——单桩极限端阻力标准值，对打入式钢筋混凝土挤土桩可按表 11.2.1 采用；

$A_{\text{端}}$ ——桩身截面积 (m²)。

(二)钻(挖)孔灌注桩的单桩轴向抗压设计承载力

桥涵设计规范建议按下式计算钻(挖)孔灌注桩单桩容许承载力 $[R]$ ：

$$[R] = \frac{1}{\gamma_{\text{桩}}} (\sum_{i=1}^n \lambda_{\text{桩}} \omega_i + \lambda_{\text{端}} A_{\text{端}}) [\sigma] A \quad (11.2.2)$$

式中 $\lambda_{\text{桩}}$ ——桩周各土层的极限桩侧摩阻力，按表 11.2.1 及表 11.2.2 采用；

$\lambda_{\text{端}}$ ——桩端阻力折减系数，其表 11.2.1 及表 11.2.2 采用；

ω_i ——桩身穿过 i 土层的长度 (m)；

$A_{\text{端}}$ ——桩底堆面积 (m²)，用设计直径(钻头直径)计算；当采用换浆法施工(即成孔后，钻头在孔底继续旋转换浆)时，则按成孔直径计算；

ω ——桩身截面周长 (m)，按成孔桩径计算。当无试验资料时，成孔直径比设计直径(即钻头直径)增大下列数值：旋转锥增大 10%；冲击锤增大 15%；冲抓锥增大 15%~20%；

$[\sigma]$ ——桩底地基土的容许承载力 (kPa)，按表 11.2.3 及 11.2.4 采用；深度修正系数 η 按表 11.2.3 及表 11.2.4 采用。

$\sigma_{\text{桩}}$ ——铁路桥涵规范为地基土的基本承载力，公路桥涵规范为地基土的容许承载力，表 11.2.3 和 11.2.4 列出了岩石、碎石类土、砂类土、 e_{c} 、 e_{p} 冲、洪积粘性土的基本承载力或容许承载力，二规范数值基本相同。

预制混凝土挤土桩侧极限摩阻力标准值 f_{sk} (kPa)

表 6.2.1

| 土的名称 | 土的状态 | 土层层深摇度摇(皂) | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 园-圆 | 圆-源 | 源-远 | 远-愿 | 愿-苑 | 苑-猿 | 猿-员 | 员-远 | 远-怨 | 怨-圆 | 圆-苑 | 苑-猿 | 猿-猿 |
| 淤泥 | 陷跃苑 员猿怨猿-圆源 | 圆-源 | 源-远 | 远-愿 | 愿-苑 | 苑-猿 | 猿-员 | — | — | — | — | — | — | — |
| 粘土 陷跃苑 | 陷跃苑 园猿怨猿 \leq 员猿 | 源-苑 | 苑-怨 | 怨-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 |
| 粉质粘土 员猿怨猿 \leq 员猿 亚粘土 | 陷跃苑 园猿怨猿 \leq 员猿 | 怨-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 | 圆-圆 |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 |
| 粉土 园猿怨猿 \leq 员猿 | 园猿怨猿 \leq 员猿 | 圆-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 |
| | 园猿怨猿 \leq 园猿 | 缘-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 |
| 粉砂 中密 细砂 | 稍密 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 | 猿-猿 |
| | 中密 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 | 源-源 |
| | 密实 | 缘-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 | 远-远 |
| 中粗砂 | 晕跃圆 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | 苑-苑 | |

摇摇注 园—土的塑性指数 怨—土的液性指数 晕—标准贯入击数 猿—土的天然孔隙比。

园

预制混凝土挤土桩桩端极限阻力标准值 表 10.2.1

表 10.2.1

| 土的名称 | 土的状态 | 土摇层摇深摇度摇(皂) | | | | | | |
|--------------------------|------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 缘-员园 | 员园-员缘 | 员缘-圆园 | 圆园-圆缘 | 圆缘-猿园 | 猿园-猿缘 | 猿缘-源园 |
| 粘土 层跃层 | 园缘缘缘缘缘≤员园 | 员园-猿园 | 猿园-缘园 | 缘园-苑园 | 苑园-怨园 | 怨园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘缘 | 猿园-缘园 | 缘园-苑园 | 苑园-怨园 | 怨园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘 | 缘园-苑园 | 苑园-怨园 | 怨园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘缘 | 苑园-怨园 | 怨园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 |
| 粉质粘土 员缘缘缘缘缘≤员园 亚粘土 | 园缘缘缘缘缘≤员园 | 圆园-缘园 | 缘园-苑园 | 苑园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘缘 | 源园-苑园 | 苑园-怨园 | 怨园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘 | 远园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘缘 | 愿园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 |
| 粉土 缘缘缘缘缘缘≤员园 | 园缘缘缘缘缘≤员园 | 远园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘缘 | 愿园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 |
| | 园缘缘缘缘缘≤园缘缘 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 |
| 粉土 细砂 | 稍密 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 |
| | 中密 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 | 员园园-员缘园 | 员缘园-员园园 |
| | 密实 | 圆园园-猿园园 | 猿园园-猿缘园 | 猿缘园-源园园 | 源园园-源缘园 | 源缘园-源园园 | 源园园-源缘园 | 源缘园-源园园 |
| 中粗砂 | 晕跃园 | 圆园园-猿园园 | 猿园园-猿缘园 | 猿缘园-源园园 | 源园园-源缘园 | 源缘园-源园园 | 源园园-源缘园 | 源缘园-源园园 |