

桥梁桩基础分析和设计

胡人礼 编著

中国铁道出版社

1987年·北京

前 言

桩基础是一种古老的基础型式，但随着科学技术的进步，不断得到了发展，今天，它已成为我国铁路桥梁的主要基础类型之一。为了比较系统地介绍当前我国铁路桥梁桩基础的分析方法和设计方法，以及近年来国内外对桩基础分析和设计的研究成果，编者在1976年编写出版的《桥梁桩基设计》一书的基础上，参考国内外有关文献，结合个人工作和学习中的点滴心得和体会，编写了这本《桥梁桩基础分析和设计》，以供初学者参考。

全书共分十一章。在这些章节中，除详细地介绍了目前我国铁路桥梁桩基础分析方法和设计方法外，还包括有下列几个方面的内容：

1. 介绍了桩基础在我国铁路桥梁中应用的历史概况，以便读者能简要地了解我国铁路桥梁桩基础的发展和已取得的成就，以及有待进一步研究的问题。

2. 介绍了近几年我国铁路部门对基桩轴向承载力求算方法的研究和改进情况；介绍了静力触探在确定打入桩轴向承载力方面的应用；还介绍了当前国际上认为很有发展前途并且也已在我国开始用于确定打入桩轴向承载力的应力波理论。

3. 对于承受侧向荷载的单桩分析，除介绍了采用幂级数求解桩身弹性曲线方程进行桩身分析的方法外，还介绍了这种桩的有限差分分析方法和有限单元分析方法，以及考虑桩侧土抗力与桩身侧移之间呈非线性关系时桩身分析的方法；介绍了目前一些国家用以考虑桩侧土抗力与桩身侧移之间呈非线性关系时确定桩侧土抗力的“ $p-x$ 法”（这里 p 代表桩侧土抗力， x 代表桩身侧移，而国外通常以 y 代表桩身侧移，所以国外称这种方法为“ $p-y$ 法”）。

4. 对于群桩的分析，还介绍了有限差分分析法和有限单元分析法。

5. 对于单桩屈曲临界荷载的求算，介绍了有限单元分析方法。

6. 介绍了地震地区、黄土地区、软土地区、冻土地区和岩溶地区桩基础的设计方法。

7. 介绍了近几年国内外有关桩设计的经验。

8. 在各章中介绍了国外对该章中有关方面的发展和研究概况。

本书为了能在桩基础设计中积极推广我国新的法定计量单位的同时，兼顾到目前新的法定计量单位的推广尚处于开始阶段这一现实情况，采取了法定计量单位与长期以来人们所熟悉的习用工程重力计量单位互相对照的方式进行编写，这样便于读者了解这两种计量单位在桩基础设计中的换算关系，从而加速法定计量单位的推广。本书正文中，凡一个量（或量值）的后面以带有括号的形式同时列有两种计量单位，或一个公式的后面又以括号形式列出时，其中括号前面者系用于法定计量单位制，括号里面者则系用于习用工程重力计量单位制。除特别注明者外，如果在一个量（或量值）的后面仅列有一种计量单位，则表明该量（或量值）的法定计量单位与习用工程重力单位是相同的。然而，为了便于广大读者在现阶段设计工作中参考，本书所列的计算例题均采用习用工程重力计量单位。倘若读者在计算时需要采用法定计量单位，可以参照书中例题里的计算方法，按附录八进行对照换算。

编 者 1984年

内 容 简 介

本书除介绍了当前我国桥梁桩基础的分析方法和设计方法外，并补充了国内外最新有关理论分析和研究成果。内容包括：单桩轴向承载力按静力法、动力法（内含应力波理论）计算及触探测试法等；承受侧向荷载的单桩的分析，除介绍幂级数分析法外，还引入了差分分析方法和有限元分析方法；关于群桩分析及桩的沉降分析；专门讨论了地震区、软土、黄土、多年冻土、岩溶地区等特殊地质条件下的桩基础设计问题。本书理论分析与设计应用并重，内容较新。可供桥梁基础工程设计和大专院校有关专业教学参考。

桥梁桩基础分析和设计

胡人礼 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 施以仁

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米1/16 印张：26.75 插页：3 字数：667千

1987年5月 第1版 第1次印刷

印数：平装0,001—2,500册 定价：平装5.05元
精装0,001—2,500册 定价：精装6.50元

目 录

第一章 我国铁路桥梁桩基础发展概况	1
第一节 桩基础在我国铁路桥梁中应用简介	1
一、预制桩基础	1
二、钻、挖孔灌注桩基础	2
三、爆扩桩	2
第二节 我国铁路桥梁桩基础设计和试验方法的发展	2
一、按土阻力考虑的单桩轴向承载力之确定	2
二、单桩侧面土的横向抗力的确定	4
三、群桩的分析	4
四、桩基础的试验	5
第三节 我国铁路桥梁桩基础设计、试验的有关规范、规则的演变	6
第二章 桩基础的形式和构造	7
第一节 桩基础的形式	7
第二节 桩基础的构造	9
一、桩基础承台座板的设置	9
二、桩基础中桩的布置	11
三、桩与承台座板的联结及桩的最小入土深度	12
第三章 单桩轴向承载力按土阻力的确定	14
第一节 单桩承受轴向荷载时的工作性能	14
第二节 单桩轴向容许承载力按静力法的求算	17
一、关于1975年《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》和1980年的《铁路桥梁钻、挖孔灌注桩基础设计、施工及试验规则》所规定确定单桩轴向容许承载力的方法	17
二、对1975年《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》和1980年《铁路桥梁钻、挖孔灌注桩基础设计、施工及试验规则》中确定单桩容许承载力方法的修订	26
三、摩擦单桩轴向承载力按静载试验的确定	29
第三节 摩擦单桩轴向承载力按动力法的求算	34
一、我国铁路桥梁桩基础工程中常用的打桩公式	35
二、采用应力波理论分析打桩时桩的受力状态和确定单桩承载力	37
第四节 摩擦单桩轴向承载力藉触探测试法的确定	60
一、静力触探法	60
二、动力触探法	66
第五节 桩基础中一根桩的轴向承载力和桩基础竖向承载力的确定	71
第六节 爆扩桩的轴向承载力的求算	76

第七节 国外对桩的轴向承载力按土阻力的求算简介.....76

一、桩的轴向承载力的求算.....76

二、打入桩承载力藉打桩公式的确定.....81

三、打入桩的承载力藉应力波理论的确定.....83

四、桩的承载力藉触探法的确定.....84

第四章 承受侧向荷载的单桩的分析.....86

第一节 单桩承受侧向荷载时的工作性能.....86

第二节 承受侧向荷载（包括横向力和力矩）的单桩采用地基系数进行分析的幂级数法.....90

一、等截面桩.....90

二、变截面桩.....112

第三节 承受侧向荷载（包括横向力和力矩）的单桩采用地基系数进行分析的有限差分法.....119

第四节 承受侧向荷载（包括横向力和力矩）的单桩采用地基系数进行分析的有限单元法.....127

第五节 桩的水平荷载试验.....136

第六节 国外承受侧向荷载的桩的分析方法简介.....136

一、国外对承受侧向荷载的桩的研究概况.....136

二、安盖尔斯基方法存在的问题.....140

三、桩侧土抗力的 $p-x$ 法的简介.....147

第五章 桩基础的分析.....162

第一节 桩基础受力时的工作性能.....162

第二节 桩基础内力分析的地基系数法.....165

一、平面分析法.....165

二、空间分析法.....201

第三节 桩基础内力分析有限单元法.....217

一、基本公式.....217

二、桩基础中第 i 根桩桩顶的矩阵 A 、 B 、 S 的推求.....218

第四节 国外桩基础分析研究简介.....227

第六章 单桩沉降和群桩沉降的分析.....231

第一节 概 述.....231

第二节 沉降量的计算.....231

一、单桩的沉降计算.....231

二、群桩的沉降计算.....233

第七章 特殊地区桩基础设计.....236

第一节 地震区桩基础设计.....236

一、地震区桩基础的计算.....236

二、求算地震力时采用的计算图式.....238

三、地震力的计算.....239

四、土的液化.....251

五、软弱粘性土的触变现象·····	253
六、地震区置于岩层上的桩基础·····	254
七、日本公路桥梁抗震设计中砂类土液化判断及地基竖向承载力和土抗力地基系数的折减方法简介·····	254
第二节 软弱土层中桩身负摩擦力的确定·····	255
第三节 黄土地区桩基础设计·····	257
一、黄土的特性·····	257
二、桩基础设计·····	258
第四节 多年冻土地区桩基础设计·····	260
一、多年冻土的特性及其桩基础的类型·····	260
二、多年冻土地区桩基础的计算·····	261
第五节 岩溶地区桩基础设计·····	263
一、岩溶地基的特征·····	263
二、桩基础的设计·····	263
第八章 桩的屈曲·····	266
第一节 概 述·····	266
第二节 桩的屈曲分析和其屈曲临界荷载的求算·····	266
第九章 桩的构造·····	276
第一节 预 制 桩·····	276
第二节 钻、挖孔灌注桩·····	281
第三节 扩 底 桩·····	283
第十章 外荷载作用下桩身材料强度和抗裂性的检算·····	287
第一节 外荷载作用下木桩和普通钢筋混凝土桩桩身强度的检算·····	287
一、按稳定性检算·····	287
二、按材料强度检算·····	288
第二节 普通钢筋混凝土桩的抗裂性检算·····	310
第三节 外荷载作用下先张法预应力混凝土管桩强度的检算·····	312
一、按稳定性检算·····	312
二、按材料强度检算·····	313
三、压弯情况下的抗裂弯矩·····	316
第十一章 预制桩在存放、吊运和吊立时桩身强度的检算及沉桩过程中桩身的受力分析·····	318
第一节 预制桩存放、吊运和吊立支点位置, 支点反力及桩身弯矩的确定·····	318
第二节 预制桩存放、吊运和吊立时桩身强度的检算·····	321
第三节 预制桩沉桩过程中的受力分析·····	327
第四节 国外预制桩的生产情况简介·····	329
附 录·····	330
一、岩石和土的工程分类及其工程性质的划分·····	330
二、影响函数值·····	335
三、系数 A_x 、 B_x 、 A_φ 、 B_φ 、 A_M 、 B_M 、 A_O 、 B_O 、 A_σ 、 B_σ ·····	338

四、系数 A_δ 、 B_δ 、 C_δ	348
五、系数 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3	349
六、系数 C_I 、 D_I 、 C_{II} 、 D_{II} 、 C_{III} 、 D_{III} 、 C_{IV} 、 D_{IV} 、 C_V 、 D_V 、 C_{VI} 、 D_{VI}	356
七、桩基础底面以下下卧土层压应力的检算	368
八、法定计量单位制与习用工程重力单位制的名称和符号	370
九、桩基础计算例题	372
十、变截面墩身任一点处有单位水平力或力矩作用时，该点及墩身其它任一点 处水平位移和转角的近似计算方法之一	395
十一、变截面墩身任一点处有单位水平力或力矩作用时，该点及墩身其它任一 点处水平位移和转角的近似计算方法之二	400
十二、丰台桥梁厂生产的预应力离心混凝土管桩桩节	407
十三、桩基础设计中有关的混凝土和钢筋资料	409
十四、外荷载作用下普通钢筋混凝土管桩、实心圆桩及预应力混凝土管桩强度 检算例题	412
十五、圆形桩大偏心受压强度检算系数 A 、 B 曲线图	插页

第一章 我国铁路桥梁桩基础发展概况

第一节 桩基础在我国铁路桥梁中应用简介

早在古代,我国劳动人民就已采用桩作为桥梁的基础。随着生产的发展,桩基础的设计和施工也不断得到改进。1950年以前,我国铁路桥梁采用的桩基础多为木桩,虽然那时已经采用了钢筋混凝土桩和钢桩,但是其数量比较少,桩的制造工艺和施工质量也不太高。三十年代建于浙赣铁路上的钱塘江大桥采用过木桩和钢筋混凝土桩基础;本世纪初京广铁路上建造的郑州黄河大桥(老桥)采用过铸钢管桩基础。1950年以后,特别是自六十年代广泛采用钻、挖孔灌注桩以来,我国铁路桥梁基础的设计理论、制造工艺和施工方法有了比较快的发展,桩基础逐渐成为铁路桥梁常用的基础类型。就桩基础的设计理论来说,从1950年以前粗糙的计算方法发展成了一套比较系统、合理的计算方法,并纳入了规范。就桩的型式来说,从整根式桩发展成了拼接式的钢筋混凝土管桩和预应力混凝土管桩。再就桩的施工方法来说,从使用已久的预制打入桩发展出了钻、挖孔灌注桩。另外,施工机具也有了很大的改进,施工速度有很大的提高。这些新发展为我国铁路桥梁建设史增添了光彩。

一、预制桩基础

五十年代初期,我国森林区铁路桥梁采用了一些木桩基础。肖穿铁路(原杭甬铁路)的桥梁修复工程和1954—1956年该铁路新建工程中采用了直径为22~30cm、长度为13~24m的木桩;另外,该铁路某箱涵采用了直径为22cm和24cm的木桩基础。1973—1974年平齐铁路一座低高度钢筋混凝土梁桥采用了直径为20cm、长度为10m的木桩。京广、石太、宝成等铁路上的一些大桥也采用过木桩。但是,总的来说,木桩在我国铁路桥梁中用得还是比较少,木桩逐渐为钢筋混凝土桩和预应力混凝土桩所取代。至于钢桩,我国铁路桥梁中用得就更少了。1974—1976年金山铁路(上海附近)建造跨越黄浦江的铁路、公路两用大桥的正桥中,三座高桩承台桥墩采用了长度为46m、直径为1.2m的钢管桩。

在我国铁路桥梁中应用最多的是钢筋混凝土桩。武汉长江大桥组成部分的几座跨线桥采用了30cm×30cm钢筋混凝土方桩。陇海铁路上的桥梁采用了35cm×35cm的钢筋混凝土方桩和40cm×40cm的钢筋混凝土正八角形桩。京广铁路上的桥梁采用过25cm×25cm的小截面钢筋混凝土方桩。我国南方有一条专用铁路采用过50cm×50cm普通钢筋混凝土空心方桩。每根桩分上、下节,上节长10m,下节长8m;上、下节采用钢制法兰盘藉螺栓联结。桩内用充气胶囊制成直径为27cm的空心孔。桩身采用12根5号螺纹钢作为主钢筋。桩身混凝土为400号者。

在五十年代和六十年代中,普通钢筋混凝土管桩使用比较普遍。当时丰台桥梁厂采用离心机大量生产了这种管桩,其外径为400mm和550mm两种,桩壁厚度为80mm。另外,大桥工程局南京桥梁厂也生产了这种管桩,桩径为550mm。如武汉长江大桥、肖穿铁路余姚江大桥和奉化江大桥、南京长江大桥、南同浦陇海联络线潼关黄河大桥……等桥梁大量采用了直径为550mm的普通钢筋混凝土管桩。京广铁路第二线滹沱河大桥、包兰铁路三盛公黄河

大桥……等桥梁大量采用了直径为 400mm 的普通钢筋混凝土管桩。南京长江大桥的引桥也采用了一部分直径为 400mm 的普通钢筋混凝土管桩。

由于普通钢筋混凝土管桩的抗裂能力不太高,尤其在沉桩过程中,桩身防止横向裂缝的能力稍差,丰台桥梁厂于 1966 年开始研制了先张法预应力离心混凝土管桩,并于 1970 年正式投入成批生产,其桩径与普通钢筋混凝土管桩相同,仍为 400mm 和 550mm 两种,桩壁厚度仍为 80mm。这种管桩逐渐取代了普通钢筋混凝土管桩。七十年代末,该厂又研制生产了壁厚为 90mm、直径为 400mm 的预应力离心混凝土管桩和壁厚为 100mm、直径为 550mm 的预应力离心混凝土管桩。京山、石德……等铁路线上的桥梁采用了丰台桥梁厂生产的预应力混凝土管桩。风陵渡黄河大桥也采用了这种管桩。

二、钻、挖孔灌注桩基础

钻孔灌注桩和挖孔灌注桩具有施工机具简便、技术简单、适用性较广等优点,往往用以代替打入桩基础和沉井基础。从 1965 年起我国铁路桥梁开始采用钻、挖孔灌注桩基础。这一年,西南铁路建设部门在成昆铁路进行了冲击成孔钻孔灌注桩试验,并将钻孔灌注桩用作该铁路上的桥梁基础。同年,通让铁路上也采用了钻孔灌注桩基础。随后,京原、焦枝、襄渝、枝柳、京广、沙通、双怀、太岚……等铁路的桥梁以及津浦铁路济南黄河大桥(新桥)、九江长江大桥采用了钻孔灌注桩基础。我国已采用的钻孔灌注桩直径一般为 1.0~1.5m,长度多为 20~30m。成昆铁路采用过直径达 3.0m 的冲击钻孔灌注桩,桩长有达 44m 者。挖孔灌注桩在我国铁路桥梁中应用也较广。成昆、襄渝、枝柳、焦枝、京原……等铁路采用了不少挖孔灌注桩。挖孔灌注桩的截面一般为方形的或矩形的,边宽不小于 1.2m,桩长多为 10~20m。我国铁路桥梁采用的钻、挖孔灌注桩几乎均为竖直者,虽然曾经进行过钻孔斜桩的工艺试验,但是未能推广应用。枝柳铁路和湘黔铁路采用过穿过石灰岩区域古河槽地带多层溶洞支立于溶洞底面上的钻孔灌注桩。

近二十年来,钻、挖孔灌注桩为我国铁路桥梁建设发挥了很大的作用。

三、爆扩桩

桩的承载力应从桩身材料强度和桩周土阻力两个方面来确定,一般摩擦桩的承载力往往由土的阻力所控制。为了提高由桩周土阻力所确定的桩的承载力,五十年代我国铁路桥梁采用了以爆破法将桩底土扩大压密,然后填充混凝土的桩底爆扩桩,简称爆扩桩。

最初,铁道部大桥工程局在武昌和汉阳两地砂质粘土和紧密粘土中做了 17 根爆扩桩的桩底爆扩试验,后来又在京广复线某大桥砂土地基内进行了 7 根爆扩桩的试验,并在这些试验资料的基础上,将爆扩桩用于该桥高桩承台中,其桩入土深度约为 14~16m。

第二节 我国铁路桥梁桩基础设计和试验方法的发展

一、按土阻力考虑的单桩轴向承载力之确定

过去,按土阻力考虑单桩轴向承载力之确定方法,可分为采用承载力静载公式计算、进行现场承载力的静载试验和采用承载力动力公式计算三大类。1950 年以前,确定打入桩单桩承载力的静载公式很不统一,这些公式的选用多随具体设计人而异。所用的承载力动力公式,有工程新闻公式、太沙基公式……等。另外,还有根据经验对不同桩型(不同材料、不同桩径和不同桩长),不同土类粗略估计承载力的。

五十年代初期,铁路桥梁打入桩的承载力一般不作较细的计算,而是按从苏联翻译过来

于1950年和1951年先后颁布的我国《铁路桥涵设计规程》确定单桩的容许承载力。后来广泛采用当时认为比较满意的巴塔列夫经验计算公式来确定由土阻力而定的单桩承载力。该公式假定桩侧土的极限摩擦力自地面至深度2m处为三角形变化, 2m以下则为常数, 其公式形式为:

$$[P] = \frac{1}{m} f U (l - 1) + A [\sigma_0 + K \gamma (l - 2)]$$

式中 $[P]$ 为桩的容许承载力 (tf); m 为安全系数 (永久性桥梁, 采用 $m=2$); f 为桩侧土的极限摩阻力 (以 tf/m² 计, 当桩下沉于多层不同特征的土中时, f 按各土层的深度加权计算); U 为桩身周长 (m); l 为桩的入土深度 (m); A 为桩底支承面积 (m²); σ_0 为桩底土的容许承载力 (tf/m²); K 为随土的类别而定的系数 (对于砂土采用 2.5, 对于粘质砂土和砂质粘土为 2.0, 对于粘土为 1.5); γ 为土的容重 (tf/m³)。到了六十年代的初期, 打入桩的承载力广泛按下列公式求算:

$$[P] = \frac{1}{2} [U \sum l_i f_i + A \sigma]$$

式中 $[P]$ 为桩的容许承载力 (tf); U 为桩身周长 (m); l_i 为桩穿过的各土层厚度 (m); A 为各土层内桩身平均截面积 (m²); f_i 和 σ 分别为桩侧各土层与桩身之间的极限摩阻力和桩底极限承载力。

1950年以后我国铁路桥梁采用的动力公式主要有格尔塞万诺夫 (H. M. Герсеванов) 公式和海利 (A. Hiley) 公式。

六十年代中期, 我国西南铁路建设指挥部、铁道部第四设计院和北京铁路局开展了钻、挖孔灌注摩擦桩单桩承载力求算的研究, 制定了桩侧土的极限摩阻力和桩底承载力等有关参数以及钻、挖孔灌注桩单桩承载力的计算公式。至于支立于基岩上的钻、挖孔灌注桩桩底面承载力, 当时普遍采用铁道部大桥工程局和铁道科学研究院于1962年发表的“山洞公式”。所谓山洞公式是根据铁道部大桥工程局在武汉长江大桥桥头山洞内利用洞壁作为支承对武汉附近红砂岩试块进行抗压试验结果所提出计算柱桩底面岩石地基支承力的公式。山洞公式的形式为:

$$[P] = \frac{1}{24} \pi d^2 R \left(\frac{\sigma_h}{R} + 1.2 \frac{h}{d} \right)$$

式中 $[P]$ 为桩的容许承载力 (tf); d 为桩底嵌入岩石内的设计直径 (m); R 为岩石的极限抗压强度 (tf/m²); h 为桩底嵌入岩石内的深度 (m); $\frac{\sigma_h}{R}$ 为深入压力 σ_h 与 R 之比, 按下式计算:

$$\frac{\sigma_h}{R} = 5 R^{-0.108} d^{-0.267} \times 3.8 R^{-0.424 \times \frac{h}{d}}$$

这里的 R 以 kgf/cm² 计。由于试验资料不多, 加上山洞公式中采取了指数的指数形式, 使用时容易发生错误, 因此山洞公式逐渐不为人们所使用。

1971—1972年, 铁道部制订新的铁路桥涵设计规范时, 在收集一些苏联新的打入桩试验资料和我国有关资料的基础上, 对过去打入桩桩周极限摩阻力和桩底处地基土的极限承载力曲线图作了修改。同时, 铁道部第二设计院和西南交通大学在收集国内已有钻、挖孔灌注桩

轴向承载力试验资料的基础上进行分析,提出了支立于非岩石地基上钻、挖孔灌注桩单桩轴向承载力的计算公式,列入了1975年颁布的《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》中。至于支承于基岩上的钻孔灌注桩,经研究采用了大桥工程局所制订支立于基岩上的管柱轴向承载力的公式。由于考虑到钻孔灌注桩直接在岩层上进行钻孔和清底,而管柱系在管柱内进行钻岩和清底,钻孔灌注桩的钻孔条件不如管柱那样好,因此对钻孔灌注桩采取了较管柱要低一些的钻岩孔底承载力参数和孔侧承载力参数。这些计算方法得到了广泛的应用。

1980年以后,遵照国家建委和铁道部关于修订设计规范的要求,铁道科学研究院铁建所和西南交通大学于1981年根据打入桩承载力的静载试验分析提出了求算打入桩承载力的桩侧极限摩阻力表和桩底极限承载力表,还根据桩的静载试验分析与静力触探结果的对比提出了直接由静力触探资料确定打入桩容许承载力的公式。同年,第二设计院和西南交通大学对1975年所颁布《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》中支立于非岩石地基上的钻、挖孔灌注桩桩侧极限摩阻力和桩底支承力的值作了修订,并对其折减系数作了修改,该项折减系数由原来仅随土质和清底好坏确定修改成除与土质和清底好坏有关外还与入土深度有关,现已列入1986年开始施行的《铁路桥涵设计规范》(TBJ2-85)。

二、单桩侧面土的横向抗力的确定

1950年以前,桩基础设计中一般假定作用于承台座板上的水平外力由斜桩承受,因此桥梁墩台桩基础多设置斜桩,这样对于施工来说比较麻烦。1950年以后,对承台座板底面置于地面或局部冲刷线以下一定深度的桩基础(人们称这种桩基础为低桩承台),假定作用于承台座板上的水平外力由承台侧面土的被动土压力抵抗,而桩只承受作用于承台座板上的竖向外力和力矩所产生的轴向力。对于承台座板底面置于地面或局部冲刷线以上或座板底面入土深度较浅的桩基础(人们称这种桩基础为高桩承台),假定水平外力全部由桩侧的土抗力来抵抗,并根据苏联安格尔斯基(Д. В. Ангерский)提出的假定,假设地面至桩身第一个侧移零点之间土抗力按二次抛物线变化,第一个侧移零点以下土抗力的地基系数为常数。根据这种假定求得单桩桩身弹性曲线微分方程,求解方程后分析桩身内力。虽然采用这种分析方法减少了需要设置斜桩的情况,但是该方法却存在不少问题。

六十年代桥梁桩基础广泛采用钻、挖孔灌注桩之后,由于钻孔斜桩难以成孔,加上钻、挖孔灌注桩的直径一般比打入桩要大,因此,要求人们进一步合理地考虑桩侧土的横向抗力,改进单桩承受横向力的计算方法。我国铁路部门进行了这方面的研究,参考国外资料,采取桩侧土抗力的地基系数随深度成直线增长的规律,用幂级数求解了桩身弹性曲线微分方程*,得出了与国外许多国家所广泛采用的相同的计算系数。1965年前后,成昆铁路和京原铁路桥梁桩基础中开始采用了这种方法。当时由于缺乏我国自己的试验资料,桩侧土抗力地基系数随土质变化的比例系数(m 值)主要采用苏联有关文献中的数值。七十年代初在制定1975年颁布的《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》时,上述承受横向力单桩的分析方法被列入了该规范,铁道部第二设计院和西南交通大学根据国内试验资料分析提出了我国自己的 m 值表。1986年开端施行的《铁路桥涵设计规范》(TBJ2-85)亦作出了类似规定。

三、群桩的分析

五十年代初及以前,对于承台座板置于地面或局部冲刷线以下的桩基础,通常按下面公

* 国内采用幂级数解桩身弹性曲线微分方程最早介绍于铁路标准设计通讯,1965年第1、3期,胡人礼《桥梁墩台深埋弹性基础的计算》。

式求算其中每一根桩所承受的轴向力：

$$P_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2}$$

式中 N 为作用于承台座板底面的竖向力； M_x 和 M_y 为对承台座板底面处桩基础主轴的力矩； x_i 和 y_i 为自桩基础主轴至任一根桩的距离； n 为桩数。另外，还有采取按扩大基础求得座板底面处土的应力图形体积进行等分，在每一等分应力体积的重心处设置一根桩的设计方法*。对于承台座板底面置于地面或局部冲刷线以上以及座板底面入土较浅的桩基础，首先按桩与座板联结情况以及桩身尺寸和桩周土的情况根据经验假定桩的上、下端为铰结或固结采取等代桩长藉结构力学进行分析，求出每一根桩桩顶承受的轴向力、横向力和力矩。然后对每一根桩按前面所说假定地面至桩身第一个侧移零点之间桩的侧向土抗力按二次抛物线变化，而第一个侧移零点以下侧向土抗力的地基系数为常数考虑桩侧土抗力，进行桩身任一截面中的弯矩、剪力和位移的计算。

七十年代初，根据国内外桩基础的研究成果，结合桩身侧面和承台座板侧面土抗力随深度成直线增长的考虑，对承台座板置于地面或局部冲刷线以下和以上的桩基础分析采取了统一的方法，使桩基础分析得到了进一步的改进。这种方法列入了1975年颁布的《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》和1986年开始施行的《铁路桥涵设计规范》(TBJ2-85) 中。

四、桩基础的试验

桩基础的试验主要包括单桩轴向承载力的静载试验、单桩水平承载力的静载试验和群桩水平承载力的静载试验。我国有一些铁路桥梁桩基础通过桩的承载力的静载试验改进了设计，如肖穿铁路一部分桥梁桩基础通过静载试验改进了设计。又如南京长江大桥的引桥于1960—1961年间进行过普通钢筋混凝土管桩承载力的静载试验。京原铁路永定河大桥进行钻孔灌注桩的承载力静载试验后，全桥缩短桩长约400m。但是，七十年代以前，铁路桥梁桩基础中桩的承载力的试验仅限于单桩轴向承载力的静载试验，而试验方法往往不完全一致。1975年颁布的《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》在总结我国建国以来的经验基础之上，参考国外有关资料，除对桩的轴向承载力静载试验作了统一的规定外，并增加了单桩水平承载力静载试验的规定，但是其中单桩轴向承载力的静载试验只限于慢速加载法。1980年铁道部颁布的《铁路桥梁钻、挖孔灌注桩基础设计，施工及试验规则》对单桩的轴向承载力静载试验增加了快速加载法和群桩水平承载力静载试验，从而使桩和桩基础承载力的试验方法日趋合理。

在铁路桥梁桩基础的打入桩承载力方面，还采用了以冲击法进行桩的承载力的验证。这种方法纳入了1975年的《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》中。

这里要特别提出的是，铁道科学研究院铁建所、西北研究所、铁道部第一勘测设计院、黑龙江省低温建筑研究所以及中国人民解放军有关部队于1974年至1978年之间，在青藏高原选择了冻土特征和地质条件具有代表性的五道梁和清水河各建立了一个桩基础的试验场，进行了多年冻土地区桩基础的试验。试验中对钻孔打入桩、钻孔插入桩和钻孔灌注桩进行了轴向承载力静载试验和水平荷载试验，先后发表了多篇试验研究报告，为我国多年冻土地区桩基础设计提供了经验，积累了有益的资料。

六十年代和七十年代，我国铁路部门还进行过板式承台座板的受力试验。如1967年铁道

* 见《铁路桥梁桩基设计》，铁道部第三设计院桥隧处编，人民铁道出版社1962年出版。

科学研究院西南研究所和西南铁路建设部门进行过板式承台座板的光弹模型试验。七十年代后期,大桥工程局与西南交通大学合作又进行了这种试验。这是一项对于改进桩基础承台座板设计很有意义的科学研究。由于桩基础承台座板的受力比较复杂,有许多问题还有待今后进一步研究。

第三节 我国铁路桥梁桩基础设计、试验的有关 规范、规则的演变

1950年以前,桩和桩基础的设计和试验没有统一的方法,更无统一的法规。1950年以后,随着我国铁路建设的蓬勃发展,要求人们不断地去研究和总结经验,制订出铁路桥梁桩基础设计、试验规范和规则,用以指导铁路桥梁的建设。前面已经提到,五十年代和六十年代初期我国有关铁路桥梁桩基础设计和试验的规范是采用从苏联翻译过来的规范,即我国于1950年颁布的《铁路桥涵设计规程(初稿)》、1951年颁布的《铁路桥涵设计规程》以及1959年颁布的《铁路桥涵设计规范》。六十年代中期,我国铁路设计和科研部门开始了桩和桩基础设计、施工和试验的研究。1966年,西南铁路建设指挥部在这些研究的基础上制订出了《铁路桥梁钻、挖孔灌注桩基础设计要点》和《铁路桥梁钻、挖孔灌注桩静载试验工作细则》。七十年代我国铁路桥梁设计、科研和教学人员在自己研究成果的基础上,吸收国外有益的经验又制订了一套桩及桩基础设计和试验的系统方法,纳入了1975年颁布的《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》(试行)中。

1976年,铁道部根据铁路建设的需要,指定大桥工程局负责主持制订了《铁路桥梁钻、挖孔灌注桩基础设计,施工及试验规则》。该规则经铁道部批准,于1980年1月1日起试行。它总结了多年来的研究成果和实践经验,是我国第一本铁路桥梁桩基设计、施工和试验的专门性规范。

1980年,根据国家建委和铁道部要求,铁路设计、科研和教学单位对1975年颁发的《铁道工程技术规范》的第二篇《桥涵》(试行)进行了修订,为使用方便将设计部分和施工部分分开,分别改名为《铁路桥涵设计规范》(TBJ2-85)和《铁路桥涵施工规则》,关于桩的试验部分将列于施工规则中。

1980年铁道部首次颁布了《静力触探使用技术暂行规定》,该规范对静力触探确定打入桩的容许承载力作了具体的规定。

三十多年来,铁路桥梁桩基础设计、施工和试验的发展,是我国铁路桥梁建设中取得优异成绩的一个方面。但是由于桩和桩基础受力复杂,还有许多问题等待我们去进一步研究解决。

第二章 桩基础的形式和构造

第一节 桩基础的形式

桥梁墩台的桩基础通常多由承台座板和群桩组成（图2-1），承台座板用于联结桩顶，将外荷载传给各桩，并可校正桥墩台身的设计位置与群桩施工位置之间的偏差。

根据承台座板底面设置标高的不同，桥梁桩基础可分为低桩桩基础与高桩桩基础两种。当承台座板底面位于地面以下或局部冲刷线以下的桩基础是为低桩桩基础，通常称为低桩承台（图2-2，a）；反之，承台座板底面位于地面以上或局部冲刷线以上的桩基础是为高桩桩基础，通常称为高桩承台（图2-2，b）。这两种桩基础在承受外力和土对桩基础的抗力作用上，没有什么根本的不同，只不过在构造上有所区别。低桩承台与高桩承台的选择，应根据桩基础受力的大小和河床地质、水流、流冰、通航、施工等条件综合确定。一般对于季节性河流或冲刷深度较小的河床，大多采用低桩承台。对于常年有水，且水位较高，施工时不易排水或河床冲刷较深，则多采用高桩承台。

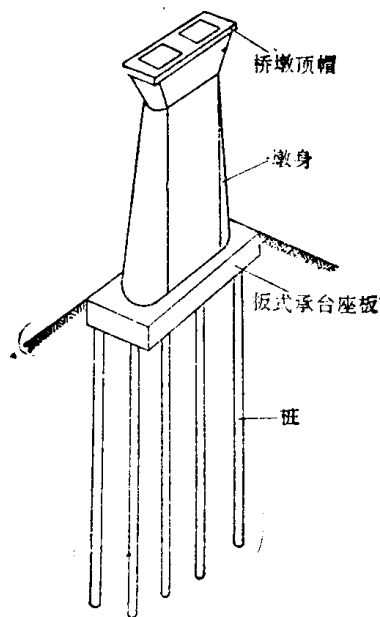


图 2-1

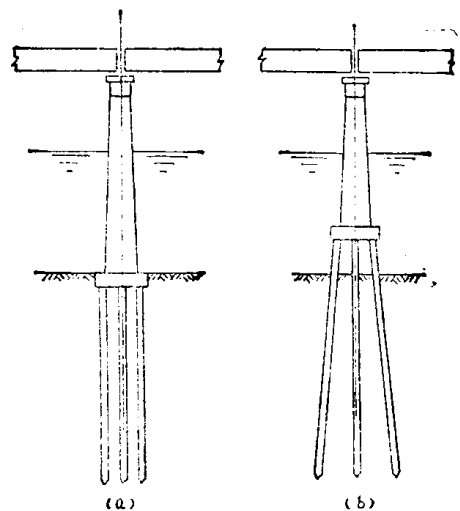


图 2-2

从桩基础的对称性来看，桩基础有对称式桩基础与非对称式桩基础之分。所谓“对称性”系指桩的平面布置、桩的斜度、桩的长度（包括全长、入土长度和露出地面以上的自由长度）以及桩径和桩身材料等之对称性。对称性与承台座板的结构形式没有关系，也就是说，对称式桩基础的座板可能是非对称的（图2-3，b），因为承受外荷载的是桩，而不是座板，座板仅起传递外荷载的作用。

从沉桩方法来看，我国铁路桥梁采用的桩基础主要有打入（或震动下沉）预制桩的桩基

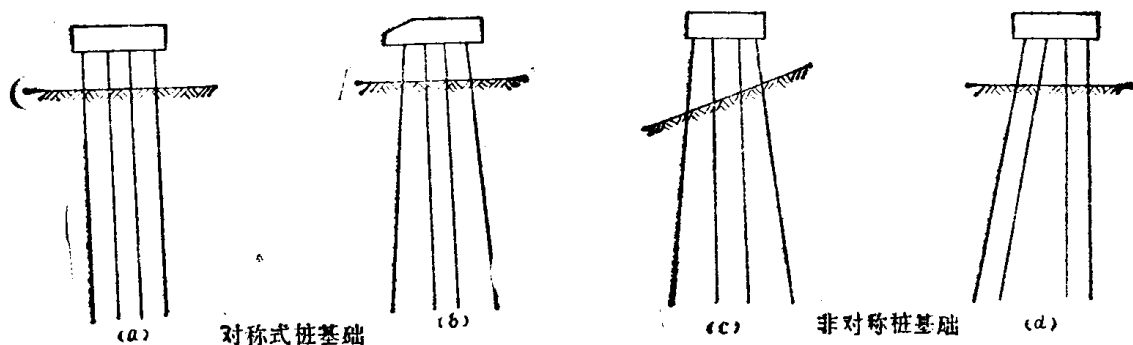


图 2-3

基础和就地钻（挖）孔灌注混凝土桩的桩基础两大类*。前者是藉锤击法或震动法将预制桩（钢筋混凝土桩、预应力混凝土桩、木桩、钢桩）下沉至设计位置，通常惯称采用这种方法下沉的桩所构成的桩基础为打入桩桩基础或震动下沉桩桩基础。而后者是藉机具或人工在现场进行钻孔或挖孔，然后在孔内放置钢筋笼，灌注混凝土，形成基桩，通常惯称这种桩所构成的桩基础为钻孔灌注桩基础或挖孔灌注桩基础。位于黄土和多年冻土地区的桥梁桩基础，除了采用钻孔或挖孔灌注桩外，还有采取先钻孔，然后将预制桩打入或插入钻孔内所构成的桩基础。我国南方沿海地区还对预制桩采用压桩沉桩方法进行施工。通常，打入桩用于中密、稍松砂类土和塑性粘土中；震动下沉桩用于砂类土、粘性土和砂夹卵石土层中。钻、挖孔灌注

桩可用于各类土层和岩层上，但是钻孔灌注桩用于软土、淤泥和可能发生流沙的土层中时，应先作施工工艺试验。挖孔灌注桩一般用于无地下水或少量地下水的土层内。

为了提高基桩的承载力，有时在预制管桩桩底采取爆破方法，使桩尖扩大，以增大桩底的支承面积，这种基桩通常称为桩底爆扩桩，或简称爆扩桩（图2-4）。爆扩桩可用于砂类土、砂粘土、粘砂土、硬塑粘性土及

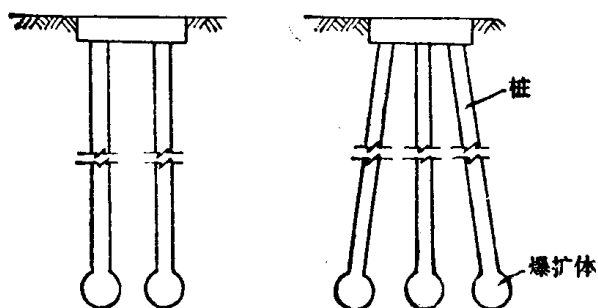


图 2-4

砂夹卵石土中。对于钻、挖孔灌注桩，也可采取扩大桩底来提高桩的承载力。

一般来说，当作用于承台底面处的水平外力和外力矩不大或桩的自由长度（即位于地面以上的桩身长度）不长，或桩身直径较大时，可考虑采用竖直桩桩基础；反之最好采用带有斜桩的桩基础。目前，由于施工工艺的限制，我国铁路桥梁钻、挖孔灌注桩桩基础均采用竖直桩基础，随着施工工艺和施工机具的提高和改进，将可采用带有斜桩或其他形式的桩基础**。

从桩的排列数目来看，桥梁墩台桩基础有单排排架式桩基础（图2-5，a）和多排桩桩基础（图2-5，b）之分，通常单排排架式桩基础多用于桥跨较小或桥高稍矮的情况下。当桥跨较大或桥高较高的情况下，则多采用多排桩桩基础。

* 对于冻土地区桩基础来说又有钻孔-打入桩桩基础、钻孔插入桩桩基础和钻孔灌注桩桩基础之分。

** 我国建工部门已开始研究采用多节扩孔灌注桩，它是一种沿桩身进行多处扩孔的钻孔灌注桩。

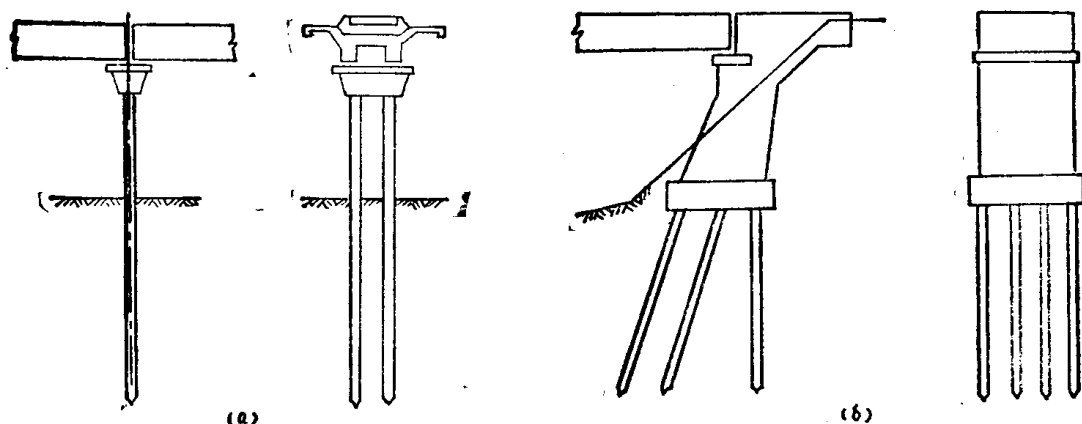


图 2-5

无论是低桩承台还是高桩承台，根据桩与土之间摩阻力的作用及桩底土阻力的作用，基桩又有摩擦桩与柱桩之分*。前一种桩的桩底（或称桩尖）位于较软土层内，其轴向荷载由桩侧土摩阻力和桩底土的阻力共同来支承，而桩侧摩阻力起主要作用；后一种桩的桩底支立于坚硬土层（岩层）上，桩的轴向荷载可认为全部由桩底土来支承。

桩基础不仅是一般地区铁路桥梁的重要基础形式，而且是地震区、软土地区、湿陷性黄土地区以及多年冻土地区铁路桥梁的重要基础形式。经验认为，一般来说，在上述后面几种地区采用桩基础，与别的基础相比，桩基础不仅可以保证桥梁具有较高的强度和较好的稳定性，而且工程造价也比较低廉。由于这些地区的地基情况与一般地区不同，其桩基础的设计和施工具有与一般地区桩基础不同的特点。本书大部分介绍一般地区桩基础的分析设计，在第七章介绍这些特殊地区桩基础的设计。

第二节 桩基础的构造

一、桩基础承台座板的设置

（一）桩基础承台座板底面标高的确定

关于桩基础承台座板底面标高的决定原则，前面已简单地提到过，但是如何具体地去确定，则有必要作进一步的介绍。总的来说，桩基础承台座板底面标高的确定，应考虑到桩基础受力的大小和施工的难易程度。通常，当作用于桩基础上的水平外力和力矩较大，或桩侧的土较差时，为了缩短桩的长度和减小桩身的弯矩和剪力，将承台座板底面标高降低；反之，可将承台座板底面标高抬高。在没有流冰和不通航的有水河流上，为了便于施工和节省墩台身圬工，往往将座板底面置于施工水位以上。对于航运繁忙的河流，为避免船只和排筏直接撞击基桩，以及为避免流冰撞击基桩，应将承台座板底面适当降低或在座板四周安装伸至通航水位或流冰水位以下一定深度的钢筋混凝土围板；对于有强烈流冰的河流，为避免流冰撞坏基桩，应将座板底面置于最低流冰时冰层底面以下不少于0.25m处。当承台座板底面

* 国外有的根据土的阻力作用将桩划分为：摩擦桩、支承-摩擦桩、柱桩三种，前两种实际上是我们所说的摩擦桩。只不过他们所说的摩擦桩是指由于桩底处土的承载力极小，桩的轴向荷载全部由桩侧土的摩阻力来支承的桩；所谓支承-摩擦桩是指桩所承受的轴向荷载由桩底土的阻力和桩侧土的摩阻力共同支承的桩；最后一种也就是我们所说的柱桩。

置于可冻胀的土中时，为了避免因土冻胀对座板底面产生向上的顶托力，以致使基桩拉断，座板底面应位于冻结线以下不少于0.25m；当座板底面置于砂夹卵石、粗砂和中砂上时，通常可不考虑此项要求。

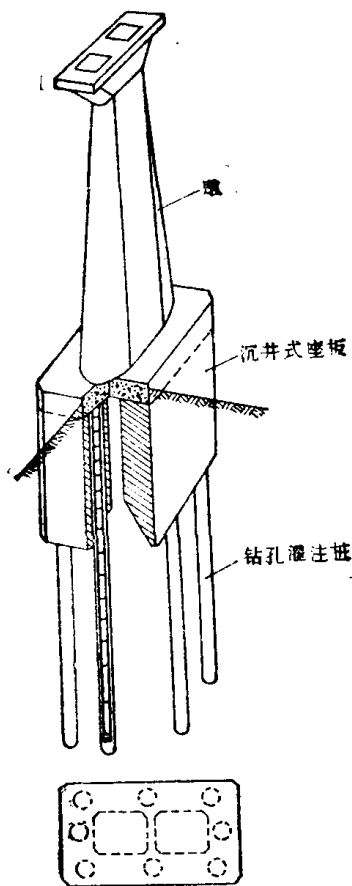


图 2-6

对于座板底面高出最高结冰水位的高桩承台，采用管桩时，为了避免冰冻对管桩的影响，应将管桩受到冰冻影响的范围填充混凝土（其下可以填充砂）。

对于采用木桩的桩基础，其座板底面的标高应考虑使木桩顶面低于最低地下水位或最低地面水位以下至少0.5m，以防由于水位变化致使木桩腐烂。

（二）桩基础承台座板形式和尺寸的确定以及使用材料的选择

承台座板的平面形式和尺寸应根据墩台身的平面形式和尺寸以及基桩的平面布置来确定。通常座板多采用板式者，如图 2-1 所示。但是近十多年来，我国西南和中南地区成功地采用了沉井式承台座板，如图 2-6 所示。这种座板为一井壁中预留有桩孔的沉井，当沉井沉至设计标高后，在井壁预留桩孔内进行钻孔，接着置放桩身钢筋笼和灌注桩身混凝土。这种沉井式座板的优点是：①桩基础可在洪水期间进行施工。在洪水到来之前，先下沉沉井，并钻少数几根桩的桩孔，且灌注其混凝土，以固定沉井的位置，然后在洪水期间进行其它基桩的钻孔和灌注混凝土等工作。②采用沉井作为座板可以降低座板底面的标高，减小桩长，对基桩受力情况有利。③对沉井井壁预留孔处进行桩身钻孔时，沉井井壁可起护筒作用。④沉井的顶面可供作在水中灌注桩身混凝土的工作台。

板式座板的厚度不宜小于 1.5m，通常采用 1.5~3m，视桩基础受力情况而定；沉井式座板的高度应根据设计要求而定。

座板在最高流冰水位与最低结冰水位时冰的底面之间不宜设置台阶，因为台阶的凸角易被流冰撞坏。如果水流挟带的泥砂颗粒会磨损桩身时，应考虑采取适当的防护措施。

承台座板多采用 150~250 号钢筋混凝土，主要根据基桩受力的大小来选定。

（三）桩基础承台座板的构造

铁路桥梁实体式墩台的桩基础采用刚性承台座板。所谓刚性承台座板是指座板本身的材料变形远远小于座板的刚体侧移和转角，也远远小于桩的位移和转角。对于这种座板，一般看作具有无穷大的刚度。

承台座板的受力比较复杂，它与普通的板或梁相比，有很大差别。目前对于承台座板的受力分析尚未得出准确而又简单的方法，虽然座板内力和应力的分析可藉有限单元法进行，但仍属于摸索阶段，这里不多作介绍。根据经验，铁路桥梁墩台桩基础的板式座板应于其底部处设置一层钢筋网，通常这种钢筋网在每一米宽度内（按顺桥轴和横桥轴方向分别考虑）设置 15~20cm² 的钢筋。当将桩顶主钢筋伸入座板内联结时，此项钢筋网在越过桩顶处不得