

预制桩的设计与施工

〔瑞典〕本格特B.布隆著

曾应斌 译
铁天石

中 国 铁 道 出 版 社

1986年·北京

作者的话

本书最初是为斯德哥尔摩皇家工学院大学生所写的一部教科书，由于它主要地概括了瑞典迄今为止（1978年）在使用打入预制混凝土桩方面的设计和施工方法，也引起了其它从事桩基工作者（如咨询者和承包商）的兴趣。因此，巴尔干的桩基专家伯格特格内瓦尔（Bengt Gråvare）建议我将此书译成英文，介绍给更多的读者。由于翻译水平所限，加上徒手制图而降低了本书的价值，在此深表歉意。

林娜温列尔隆德（Lena Wennerlund）夫人打印了这份手稿，在此深表感谢。

伯格特B.布隆

（Bengt B. Broms）

于瑞典斯德哥尔摩

1978年5月

内 容 简 介

本书系统而重点地介绍了打入桩的设计、施工和质量控制方法。对钢筋混凝土桩、组合桩、木桩、钢管以及群桩、护坡桩、路堤桩、斜桩、抗拔桩、射水桩、灌筑桩等作了详尽的介绍。

书中还阐述了桩的特殊问题，如负摩擦力、打桩所引起的土壤隆起和桩的侧向位移等。

本书可供建筑、铁路、交通及海洋等工程部门的设计和施工技术人员阅读。亦可作为高等院校师生参考使用。

Precast Piling Practice
Bengt B. Broms
THOMAS TELFORD,
LONDON, 1981

*

预制桩的设计与施工

〔瑞典〕本格特B.布隆著

曾应斌 铁天石 译

中国铁道出版社出版

责任编辑 翁大厚 封面设计 翟 达

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：850×1168毫米 1/32 印张：5.1875 字数：134千

1986年3月 第1版 第1次印刷

印数：0001—6,000册 定价1.20元

译 者 的 话

本书较为系统而全面地介绍了瑞典及北欧各国在本世纪以来桩基础的应用和发展情况。阐述了桩基的工作原理、桩与土的相互作用、桩基荷载的传递机理、预制钢筋混凝土桩的设计与施工、灌注大直径桩的施工与应用,以及质量控制和检验方法等各个方面的当代水平。特别是作者提出取用岩石的无侧限极限抗压强度来确定大直径嵌岩桩的承载能力这一点,对于我国正在兴起的高层建筑物和重大构筑物在使用嵌岩桩的设计方面,具有很大的经济意义。此外,本书还提供了一些成功和失败的桩基工程实例、以及怎样结合工程特点进行处理的办法也是十分宝贵的。

本书原稿在交付排版之前,承中国铁道出版社工务工程编辑室邀请徐晓初同志作了仔细校核,特此致谢。

由于译者水平所限,译文中不当或错误之处,在所难免。敬请惠予指正。

曾应斌 铁天石

1984年7月

目 录

第一章 绪言	1
桩的分类	1
打桩对土性质的改变	3
桩基土壤的调查	6
第二章 桩的类型和打桩方法	10
木 桩	10
组合桩	12
混凝土桩	13
钢 桩	23
第三章 打桩和打桩设备	26
桩 锤	26
桩 垫	27
送 桩	28
接 桩	29
入岩桩靴	39
第四章 桩的设计	33
概 述	33
瑞典建筑法规 (SBN1975)	33
运输和起吊时的应力	34
打桩时的应力	35
桩的压屈	41
初始弯曲的桩的承载力	42
桩型的选择	46
桩正直度的确定	53
第五章 轴向受荷桩的承载力	54
极限承载力的计算	54
传统的打桩公式	55

以应力波理论为根据的打桩公式	60
桩的荷载试验	61
用静力方法计算桩的极限承载力	68
根据静力触探试验计算承载力	81
根据动力触探试验计算桩的极限承载力	85
第六章 侧向受荷的桩	89
侧向挠度	89
侧向受荷桩的极限强度	93
第七章 斜桩、承受斜向力的桩和抗拔桩	103
斜 桩	103
桩的抗拔阻力	104
第八章 桩 群	106
桩群的性状	106
粘土中的桩群	106
非粘性土中的摩擦桩	122
端承桩桩群	127
第九章 几个特殊问题	135
负摩擦力	135
路 堤 桩	141
护 坡 桩	142
在粘土中打桩所引起的土壤隆起和侧向位移	145
在砂中打桩引起的沉降	147
打桩时桩的侧向位移	150
射水沉桩	154
第十章 控制方法	155
打 入 桩	155
灌 注 桩	156
参考资料	

第一章 绪 言

桩 的 分 类

在不采用桩基就不能直接建筑的可压缩性软土地基上，采用桩基的目的在于增加其承载力，并减少其沉降。桩主要承受轴向压力，但也有很多桩用作锚固桩（如在码头，飞机库上），或承受很大侧向荷载（如海岸构筑物）的例子。

近20年来，由于研制出具有很大承载力的各种新型桩和各类新型制桩方法，因而可以在土质条件很差的地区里建造和修筑多层建筑物、重型工业厂房、码头，并能在深水区建造钻探石油和生产石油的平台。在英国（伦敦）和美国（芝加哥）广泛采用钻孔灌注桩，而在北欧和荷兰则以预制混凝土桩为主。

就桩的受力性能而论，一般可分为摩擦桩和端承桩两大类。在非粘性土（砂或砾石）中的摩擦桩，外加荷载主要是通过沿桩身表面的摩擦力传递给周围的土，但桩端也承受大部分荷载。在粘性土（粘土）中的摩擦桩，桩上的全部荷载几乎都是通过沿桩身表面而摩擦力传递给周围的土，

仅有很小一部分荷载传至桩端。桩端打入具有很大承载力的地层的端承桩，外加荷载主要是通过桩端传递给周围的土。

在非粘性土中的摩擦桩，其桩端反力一般都很低，通常均小于桩总承载能力的5%到10%在非粘性土中摩

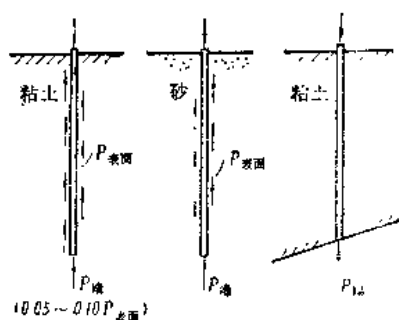


图 1 就承载力划分的各种桩型

擦桩的表面摩擦阻力主要随土的相对密度和桩的形状面变化。若为短桩，它可能低于桩总承载力的50%。打入非粘性土中的摩擦桩与穿过砂层打到岩石层上或冰碛土层上的端承桩之间是没有明显区别的。

当桩用于挡土墙、桥台或锚墩时，它也承受很大的拉力或侧向荷载，这种拉桩的极限强度完全取决于沿桩表面的摩擦力。

排土桩，少量排土桩和不排土桩之间是常常有区别的后排土桩（主要有预制混凝土桩、木桩和封端的钢桩），在打桩时或侧向移动时桩周围土体均被压缩后由于桩周围土壤性质往往发生很大变化，因而不能用室内试验数据或野外调查资料对桩的极限承载力或沉降量直接进行计算，在一般情况下，需要考虑非粘性土在打桩时会被挤实，粘性土则要考虑由于土壤重塑面产生剪力强度的降低。少量排土桩在打桩时对桩周围土壤的强度和变形特性的改变都不明显，一般都能应用野外和室内试验资料去直接计算桩的极限承载力和沉降量，例如对II型钢桩和桩端不封闭的管桩就可以这样做。不排土桩所挖掘的土壤体积与桩身体积相当，如螺旋钻孔或钻孔桩以及钻掘沉箱等。

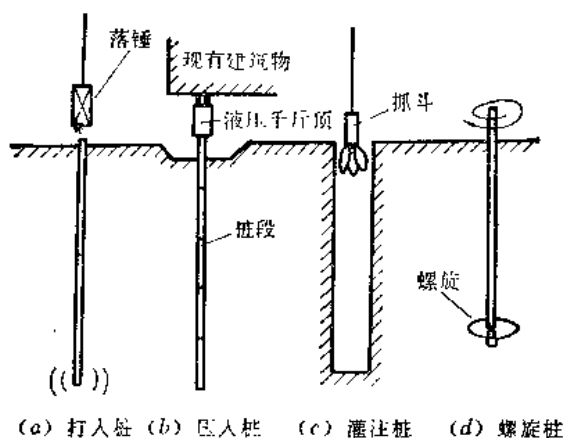


图2 按施工方法划分的桩型

就施工方法而论，桩也可以分为打入桩，压入桩，灌注桩和

螺旋桩 几种。在瑞典一般都用落锤、柴油锤、蒸汽锤或气锤*来打预制钢筋混凝土桩，最近也用振动锤来打混凝土桩。压入桩则用液压千斤顶压入。灌注桩则先掘好桩孔而后灌注混凝土。在软粘土中，为稳孔护壁。一般都需要套管或使用泥浆钻进。将桩拧入土中也是完全可能的（见图2）。螺旋桩一般都比其它类型的桩更为昂贵，因此现在很少应用。桩也可根据制桩的材料将其分为混凝土桩，钢桩和木桩。

打桩对土性质的改变

桩在设置或打入期间，桩周围的土被扰动。图3表示在粘性土中摩擦桩周围土壤扰动的情况。打桩期间在桩端下形成一土楔，它随桩而下并将土往旁边挤。量测表明，桩周围相当于桩径距离内的土壤被扰动，见图4。打桩时，紧接在桩周的粘土的抗剪强度下降。降低后的抗剪强度与完全重塑后土壤的抗剪强度相近似。通常距桩一个桩径后土的抗剪强度的降低就很小了。在高灵敏度的粘性土中（超灵敏粘土），抗剪强度的降低可能很大，有时会导致重塑的粘土沿桩周溢出地面。在某些情况下甚至需要用锤压住木桩以防止桩身上浮。一般等15到20分钟后，由于剪力强度的增长，才可以将桩身保持在土中。在挪威这是一个主要的问题，因为那里的粘土普遍都是具有高灵敏度和“快速性”的。

重塑粘土的抗剪强度和桩的承载能力都随时间而增长。经测定在打桩后1到6个月，桩周围的粘土一般都已恢复到它原来的抗剪强度。由于桩身材料渗透性的不同，粘土抗剪强度增加的速度对于木桩一般都比混凝土桩更为迅速。打桩中断时，如更换桩垫中的衬垫，就会出现这种强度增长的现象，往往需要3到5击才能激发该桩下沉。

图5所示为桩打入五年半以后，两根木桩之间地面以下6.8m深的地点土的抗剪强度和含水量的变化情况。这些桩打穿含有一薄层粉砂粉质粘土层，在研究的位置上，桩的直径均为30cm。

* 指压缩空气锤——译者注

由图可见，沿桩身表面往外 15cm，相当于桩的半个直径距离内粘土的含水量有所降低。两桩之间土的含水量稍有增加。图 5 也

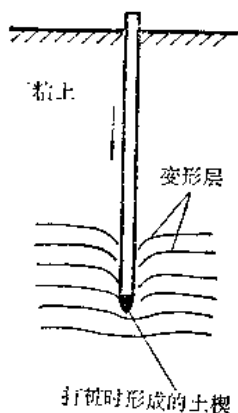


图 3 打入粘土中桩周围土体的变形

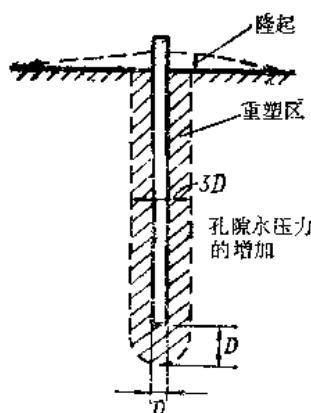


图 4 打入粘土中摩擦桩周围土体的扰动

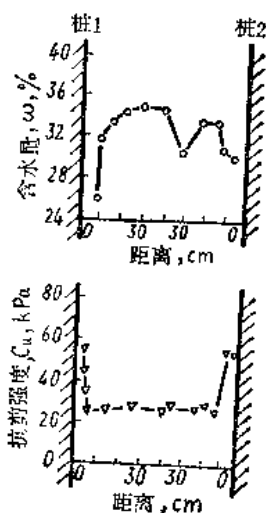


图 5 打桩五年半之后两根木桩之间 6.8m 深处土的含水量和抗剪强度的变化情况 (根据 Stred, 1967)

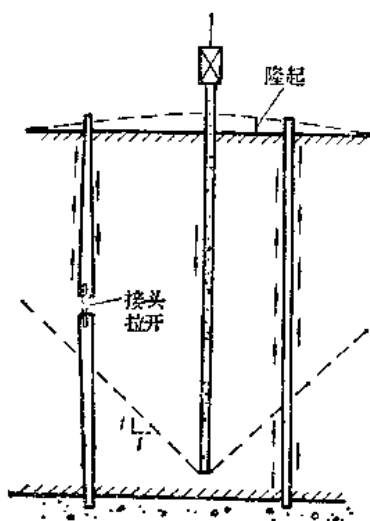


图 6 在粘性土中由于打桩引起的隆起

给出了落锥试验*的粘土的不排水抗剪强度。在桩周表面,由于含水量的减小而导致粘土抗剪强度增加高达100%以上。

桩身附近重新固结的粘土的抗剪强度一般都很高以致当桩拔出时会有一层粘土粘着在桩身上。在软粘土中,短期荷载作用下,桩的极限承载力一般是由离桩身表面一定距离的相对来讲未扰动的粘土中的剪强度来决定,而不取决于粘土与桩之间的粘着力。

在打桩期间,粘土中的孔隙水压力大大地增加。当粘土正常固结时,靠近桩周围土的孔隙水压力的变化一般是随抗剪强度(C_u)的增加而增加。孔隙水压力的增值一般可达 $5C_u$ 到 $7C_u$ 。靠近桩身周围总的最大孔隙水压力甚至可能超过土的总覆盖压力,因而降低了土壤的抗剪强度。(有许多因打桩而引起滑坡的例子。)在带状粘土中,孔隙水压力的增加能够波及到桩外数百米远。有人试图在打桩之前,把纸或胶质排水物贴到桩上,用以减小因打桩而引起的超孔隙水压力。试验资料表明,因打桩而引起的超孔隙水压力似可减少50%。

软粘土的平均抗剪强度由于打桩一般降低20~30%,还有降低50%的。打桩期间,超孔隙水压力局部地方可能很高,以致桩四周的土壤产生径向裂缝(水力裂缝),这些径向裂缝在打桩后对超孔隙水压力的消散起了很大的作用。这个水压力起初下降得很快,到裂缝闭合后就停止了。这种情况只有在剩余孔隙水压力与土中初始有效侧向压力相适应时才会出现。

在粘性土中打桩时,桩周围的地面将会隆起,沿桩四周隆起最大,距桩越远隆起越小。一般距桩10~15倍桩径处,隆起就已经很小,很不明显了。如图6所示,隆起可将邻近的桩提起,接头被拉开。尤其是支承在岩石上的端承桩,其端阻力因而将减

* 在斯堪的那维亚诸国,通常都用落锥试验来确定软粘土的不排水抗剪强度。试验是使用一个钢圆锥(重20、60、100或400g),把锥尖放在试验的土样表面上,凭自重自由地压入土中,然后量测钢圆锥贯入粘土中的贯入度。用此贯入度便可计算出软粘土的抗剪强度,因为钢圆锥的贯入度是与现场十字压板荷载试验所测得的不排水抗剪强度相对比,找出它们的相关关系。——原注

小，对这种桩进行复打是必要的。

非粘性土中桩的极限承载力在很大程度上取决于打桩后桩周围土壤的相对密度。在打桩期间，打好的桩的四周以及邻近桩周围土的相对密度随之增加。图 7 表示在相当于桩径 7~13 倍的距离内以及在桩端下面约 3~5 倍桩径范围内的土都给压实了。调查表明，松散砂和砾石的相对密度增长最大。

在粉质土壤中，桩的打入阻力可暂时高达规定打桩阻力的程度，而使打桩工作中断（即所谓的假凝现象），但数小时后又往往可将桩继续打入。打入阻力很高是由于打桩期间桩端周围粉土局部被压缩形成很高的孔隙水压力所引起的。高孔隙水压力可用增加桩锤重量和降低锤击速率的办法予以减小。

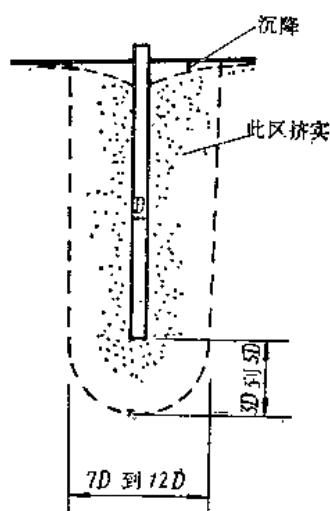


图 7 在非粘性土中打入桩周围土体的挤实

桩基土壤的调查

调查桩基土的目的是为了充分获得不同土层的深度和厚度以及强度和变形特征等资料。利用这些资料可以估算出不同桩型（打入桩和灌注桩）在各种深度、各种桩长情况下的极限承载力和沉降量；可以选择适当的打桩方法；可以估计出在打桩（打入桩）和挖掘（灌注桩）到要求深度期间可能遇到的各种困难；以及评定打桩期间是否有引起滑坡的危险。从土壤的调查中可以查明土的层次和各个不同土层的成份。这点在打桩深度范围内的土壤中确定是否会遇到漂石或碎石尤其重要。土壤调查对确定在施工区内地下是否有管道、电缆或阴沟；以及确定避免由于打桩可能毁坏邻近建筑物及其基础的安全距离等等都是十分重要的，并可以就此预计打桩可能引起的损坏。对施工现场地下水情况以及

地下水位降低的危险也应进行调查。

表面负摩擦力可使桩上的轴向荷载大大增加,从而使桩超载工作并加大其沉降量。对于承受较大的侧向荷载的桩来讲,靠近地表面以下相当于10倍桩径范围内土壤的强度和变形特征应加以注意。

打桩的挤实作用会影响单桩和桩群的承载力。由于土密实度的增加,其极限承载力比对应于原状土的初始相对密度的极限承载力要高。由于土的挤实,所以灌注桩的承载力要低于打入桩的极限承载力。

土的挤实程度以及相对密度的加大,一般都随桩群中桩数的增加而加大。所以当打进更多的桩以后,桩能打进的长度将逐渐减短,因此在桩群中应该先打位于中心区域的桩。

在承受很大水平荷载的桩群中,首先打主要用于承受侧向荷载的斜桩是有利的,因为这些斜桩的承载力比最后打入的桩的承载力要高。

就砂和砾石层中的摩擦桩而言,土的相对密度,不同土层的层次和厚度均可用重锤探测*,锤击探测和SPT试验测定。用取样来测定粒状土的组成(粒径的级配)往往很重要,因此需要取一些扰动的但又具有代表性的土样。贯入度试验应该作到桩基以下足以计算桩群沉降的深度。此外,法国广泛地应用的旁压仪试验,也许对于粉土、坚硬粘土和软质岩石具有特殊的价值。测定土中是否有漂石和碎石也很重要,因为漂石和碎石对打桩(打入桩)或挖孔桩(灌注桩)都不利。对于灌注桩来说,准确地了解地下水位及其未来可能涨落的情况是很重要的。只有这样,才能防止挖掘期间由于孔底隆起的失败。对于一些大型工程,为了选择适当的打桩深度,为了估计打桩期间可能遇到的各种困难,试

* 斯堪的那维亚各国广泛应用重锤探测法。它使用一个螺旋状锥头。贯入仪不是推入就是拧入土壤之中。它以每贯入20cm需要拧进半圈的数进行计算。非粘性土壤的相对密度按其贯入阻力小于5半圈/20cm,5~15半圈/20cm和大于15半圈/20cm分别订为疏松,中密和密实的三种。这个方法已经标准化了。

桩也许是必要的。为了确定桩基的极限承载力和在使用荷载下的沉降量,桩的荷载试验也许也是必须的。

软粘性土(粘土)中的摩擦桩,一般都需要作现场十字板试验,以确定打桩地区土的不排水抗剪强度和土的灵敏度。在软粘土中一般都用活塞取土器取样。一般都要确定土的含水量和阿太堡(Atterberg)界限(包括液限和塑限)。在瑞典通常都用与测定粘土液限,即所谓锥度液限,同样的落锥试验方法来测定土的抗剪强度,而锥度液限值与用卡萨格兰德(Casagrande)液限测定仪所测得的液限值几乎相等。因为一般固结粘土的抗剪强度随深度的增加而增大,因此在瑞典通常都尽可能的应用长桩是有利的。

对于摩擦桩群,土的取样和调查至少应进行到与桩群宽度相当的深度,以便计算桩群的沉降。软粘土的压缩系数一般都是用活塞取土器取出的未扰动土样进行固结试验确定。在瑞典一般用直径为50mm的标准活塞取土器。用压力计确定地下水位置与其涨落的情况,以及确定随深度变化的孔隙水压力分布状况同样是很重要的。

对端承桩来讲,岩石或坚硬的下卧层的深度是很重要的。在瑞典,这个深度一般都用锤击探测法确定。对有覆土的岩石进行探测往往需要进入基岩4~6m,以便精确地确定基岩位置及其表面倾斜程度。如果基岩倾斜度大于 60° ,通常就不可能将桩打进基岩。如果将桩打进基岩60~120mm,即桩靴直径($\phi 60\text{mm}$)的一到两倍的深度时,基岩(一般指花岗岩或片麻岩)的极限承载力通常都是足够的。重锤和锤击探测一般都可以很好地了解上面所讲的打桩土壤中若有漂石和碎石时将遇到的困难。

成层的土中,由于打桩所引起孔隙水压力很高亦可触发滑坡,1950年色特(Surte)地区的滑坡可能就是这种情况。灌注桩在灌注混凝土期间会形成很高的孔隙水压力,从而可能引起混凝土的流失。为了避免孔底隆起造成失败,挖掘工作有时必须在水下进行。有时需要对地下水的成份进行调查,以确定混凝土是

否会随时间的推移受到损坏。

灵敏度高的粘土中，当粘土处于重塑状态时，打桩期间紧靠桩周的粘土的抗剪强度会降低很多，平均降低值通常为粘土原始抗剪强度的20~30%。因此为了减少打桩期间产生滑坡的危险，许多情况下在开挖前打桩可能是有利的。

将桩打入粘土时，由于打桩，土被挤向旁边，常常使地表面隆起很高（ $> 0.5\text{ m}$ ）。当粘土处于如同地下水位以下那样的饱和状态时，土的隆起部分大约相当于打入桩的总体积。如果有的桩已被掀起，则往往要对这些桩进行复打。正如下文所述的那样，在打桩前清除桩位上的压实土塞或选择排土少的桩，如H型钢桩，则可减小土的隆起。

对邻近建筑物基础要进行调查，以确定打桩期间这些建筑物是否会受到损坏，这点也很重要。原有的裂缝要用照相记录下来，并用熟石膏浆填实。打桩前应设置沉降观测点，以便测定因打桩而引起的位移（隆起或沉降）。

在水中支承建筑物如桥墩的桩，侵蚀可能是个重要环节，因此可能要对侵蚀危险性进行研究。

第二章 桩的类型和打桩方法

在瑞典使用着好几种不同类型的桩。1950年以前曾普遍使用木桩，而今天则已主要使用预制混凝土桩。在瑞典，1974年中打的各类桩的总长度约为2,950,000 m，其中2,230,000m（占75%）是混凝土桩；630,000（占21%）是木桩；90,000 m（占3%）是钢桩（见图8）。1970年，荷兰打了大约6百万m混凝土桩，它占当年打桩总长度的85%。

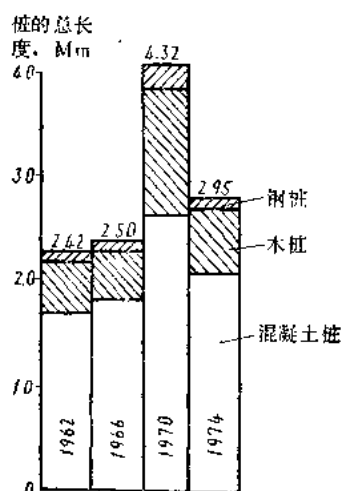


图8 瑞典于1962, 1966, 1970和1974年打桩的总长度

许多因素影响桩型的选择。重要的因素有：诸如桩支承的建筑物的特性和预期使用年限；外加荷载（如建筑物的总重量、静、活荷载的比例）的大小、分布和性质；包括现场的土质条件和地下水位波动情况以及建筑物所能容许的总沉降和沉降差等等。其它重要因素有：有效施工工期；可用的打桩设备；打桩期间对邻近建筑物损害的危险以及噪音等等。（承包单位的技能和经验也是很重要的，因为时间就是金钱。此外试桩和桩的荷载试验的费用也要考虑。）

木 桩

木桩在许多方面优于钢桩和混凝土桩，木桩易于按需要的长度加工并且易于搬运，一般都较其它种桩便宜。在瑞典当软弱压

缩粘土层厚度超过40到50mm时，在这种粘土中主要将木桩当作摩擦桩使用；在砂和砾石中，主要将木桩当作路堤桩和挤实桩使用。在密实的砂、砾石或漂冰碛土中，由于打木桩可能打坏，因而很少将它当作端承桩或摩擦桩使用。如果要把木桩打穿过密实的砂层或冰碛土层时，桩头或桩尖就可能劈裂（开花）。若要减少这些危险，就要增加锤重，降低落距或减少击数。

用瑞典北部的松木或冷杉制成的木桩，其直径平均每米增加8mm，而用瑞典南方或中部的松木或冷杉制成的木桩，其直径

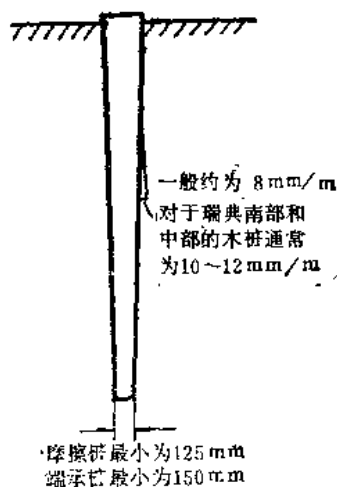


图9 木桩桩端最小的直径

每米大约增加10~12mm。在国外，各种类型的木材都在使用，诸如绿心美国松，杉木，落叶松，山毛榉，铁杉和橡树等。硬木的容许应力一般都比软木的高。通常，木桩桩端直径不得小于12.5cm；端承桩的桩端直径不得小于15cm（见图9）。在瑞典，整根木桩的最大长度一般为18m左右，但有时也可能获得大于18m的长木桩。按照瑞典道路部施工法规，当桩长超过18m时，桩端直径不得小于12.5cm；当桩长小于14m时，桩端直径不得小于15cm。土中含有碎石或漂石时，桩端直径不得小于15cm。

在桩端以上数厘米处，一般都设置钢箍（5×50mm）保护桩端。如果打桩穿过含有碎石或漂石的土层时，要用钢制桩靴保护桩端。

木桩应越直越好。根据瑞典建筑法规规定，在两点相距为3.0m的一段，桩中心线的最大容许偏差一般不超过这两点间距离（即3.0m）的1%。若是拼接桩，最大容许偏差仅为0.5%。除锚桩和承受拉力荷载的桩外，一般都不去皮。