

编号：F76009

桩基础

地基教研室编译

同济大学科学技术情报组编印

1976.4



毛主席语录

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

凡属我们今天用得着的东西，都应该吸收。但是一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

前 言

遵照毛主席“古为今用，洋为中用”的指示，我们编译了“桩基础”这份资料。该文原载于 Hans F. Winterkorn 及方晓杨主编的《基础工程手册》（1975）的第十九章。对于原书的错误或不清楚之处，我们在翻译时作了详细校对，进行了修改和补充；对于比较重要的问题，或存在疑间的，在“译注”或全文末尾的“补充说明”中予以说明。

由于我们水平较低，工作不够细致，必然还存在很多错误，仅供参考。

目 录

桩 基 础

§ 1	桩的定义及分类 - - - - -	1
§ 2	单桩的工作性能 - - - - -	5
1.	土与桩的相互作用 - - - - -	5
2.	单桩在竖荷载下的工作性能；关于荷载传递的分析 - - -	22
3.	单桩在竖荷载下的承载力 - - - - -	41
	荷载试验——单根竖桩的承载力公式——单桩的沉降	
4.	承受侧向荷载的桩 - - - - -	66
	概说——侧向荷载下的桩的弯曲——关于竖桩在倾斜荷载下， 以及斜桩在竖直或倾斜荷载下的工作性能	
§ 3	群桩的承载力 - - - - -	77
	概说——群桩模型试验的结果——群桩沉降计算的理论公式	
§ 4	桩的动力学 - - - - -	85
	打桩公式——打桩对于相邻建筑物的影响——关于波动公式—— 关于震动沉桩——打桩引起的振动及其效应	
§ 5	桩基础的设计 - - - - -	94
1.	作用在桩和桩基础上的荷载及其效应 - - - - -	94
	作用在桩轴方向的力——与桩轴正交的力（侧向力）——预制 桩在堆放和吊运时的应力——打桩应力	
2.	设计原则；桩型的选择 - - - - -	97

3. 桩群内各桩的受力 - - - - -	100
参考文献 - - - - -	104
补充说明(一) 关于力的单位“牛顿”及其它 - - - - -	110
补充说明(二) 整体剪切破坏、局部剪切破坏及刺入剪切破坏(关于图 7 的解释) - - - - -	111
补充说明(三) 桩端地基土的破坏机理(关于图 4.9 的解释) - - - - -	114
补充说明(四) 关于“弗朗基”桩 - - - - -	117

桩 基 础

§ 1 桩的定义及分类

桩是竖直或微倾斜的基础构件，它的横截面尺寸比长度小得多。桩是设置在土中的，以承受上部结构的荷载，传递到下卧土层。桩的长度及制作方法，以及桩的工作方式等可以有很大的变化；因此桩很容易适应于不同的情况和要求。

桩的施工及其应用，近年来有了很快的发展：今天，可以认为不同型式的桩是最广泛采用的深基础。桩的应用日益推广的另一原因是：桩与深、浅基础比较，是更能适应于机械化施工的；而劳动力不足以及经济上的考虑，使机械化成为迫切的需要。在过去二十年中，沉井和沉箱基础越来越少用，越来越被不同型式的桩所代替。今天，只有当沉井、沉箱的墙成为永久式围护结构时（亦即把沉井、沉箱作为地下结构物时），才采用沉井、沉箱。与此同时，“槽壁法”（或者叫“地下连续墙”）进入了深基础的领域；这就是通过比较长而薄的构件，把荷载传递到下卧土层，这也类似于桩的作用。

从国际会议中关于桩基础的许多论文（图1），以及关于桩基础的各个方面的其它文件，可以看到桩基础的重要性随着时间而增长；在最近几年内，在一些专题论文及科学技术发展水平报告中提出了有关的报导。

这个现代的、快速发展中的基础工程方法，同时也是一种最古老的方法。在人类有历史记载以前，就已经在地基土条件不利的河谷及洪积地区采用了这种基础工程方法；在许多不同文化时期的初期，都可以找到桩基的房屋。为了这个目的，成长的松树是很好的材料。从古老的桩开始，发

图1 土力学会议的关于桩的论文按专题分布的情况

展成为现代桩基的不同体系：差不多对于每一种基础体系，就有一个相应的桩的体系。

桩工经历了很长的历史过程，不但是在人类历史的几千年中，而且也是在科学技术发展的时代中，也是在建立了土力学这门学科的年代中。过去的桩，长度为30~50呎，直径约为1呎；但是今天的大型桩的长度达200~250呎，直径为10~15呎。施工方法经历了很快的变化和演进；过去采用的木桩和人工操作的落锤，被复杂的机械和专门化的方法所代替了。

为了解决基础工程中的问题，通常在下列情况下采用桩基：

- (a) 当具有可靠承载力的土层存在于较大的深度时；
- (b) 直接在结构物下面的土层有可能被侵蚀、冲刷时；
- (c) 当上部结构把很重的集中荷载传递给基础时；
- (d) 当上部结构传递下来的是非常大的竖直向以及（或者）水平向的荷载时；
- (e) 当结构物对于不均沉降非常敏感时；
- (f) 当结构物在水岸线外面时；
- (g) 当地下水位很高时。

在有些情况下，桩的效用仅在于改善桩周围的土的性质，而不是由桩来直接承担结构物的荷载。

桩的应用的例子，见图2。

桩的上端，即与上部结构连接的部分，称为桩头或桩顶；下端叫桩尖、桩端或桩脚；中部叫桩杆或桩身。桩杆可以是柱形或锥形的；截面可以是圆形、六角形、方形、三角形或工字形（H形）的，可以是光面的或带有槽缝的；桩端可以是尖端或者是扩大桩脚，如此等等（见图3）。

图4说明桩怎样把荷载传给地基土。图4a表示一根竖直的桩支承着竖向荷载。当桩还没有承受外荷载时，作用在桩杆表面上的是水平向的土压力；随着桩上的竖荷载的增大，将产生摩擦力，以及附着力。这些元素力的总和，就是总的表面摩阻力，或简称摩阻力。作用在桩端的反力主要是竖直向的，这就是桩端阻力。所以桩的承载力包括两部分，即摩阻力与桩端阻力；两者之比取决于地基土的分层及其

图 2 桩的应用的例子

图 3 桩的截面、桩尖与
扩大桩脚的不同形式

图 4 桩的荷载传给地基土的不同形式。(a)桩端阻力及表面摩阻力；(b)桩周围的土的侧向抵抗力；(c)只有摩阻力作用着；(d)负摩擦力。

物理力学性指标，桩的尺寸，桩的设置方法，以及总荷载的大小。可以有如下的情况，上部的土层很弱，抗剪强度可略去不计，而下部的土层可能很强；这时，桩的位移很小，因此作用在桩杆表面的剪切力（摩阻力）不能发挥出来。

假如在桩上作用着水平力以及（或者）弯矩，那末作用在桩上的应力将是不对称的，桩杆将承受弯矩（图4 b）。图4 c的桩承受着拔出力；作用在桩杆上的法向力（侧压力）与图4 c的情况相同，但摩擦力和附着力的方向与前者相反。图4 d表示，桩周围的上部土层处于固结、压缩的过程中，因此有向下的力（负摩擦力）作用在桩上。

桩的应用，通常表现为桩群的形式。最简单的桩群包括两根或三根桩（例如系船桩，也叫系船桩）；在这种简单的桩群内，每一根桩都是只承受轴向力。较大的桩群由一系列的竖桩组成；桩顶由桩承台（简称桩台）连结起来，或者由梁的格排连结起来。承台或格排可能是在周围地面以上，也可能是在地面以下（图5）。这种桩群总是超静定结构系统；桩群内各根桩的受力与位移和变形有关。

桩或者是预制的，或者是就地灌注的；前者可以是木、钢筋混凝土或钢桩，后者为有或无钢筋的混凝土桩。它们可以是预应力的，或者是后张法预应力的。桩的设置方法如下：

(1) 把预制桩沉入土中，同时排挤了桩所穿过的土。沉入土中的方法可以是打入、震入、压入或旋转进入土中。

(2) 把预制桩沉入土中，但并不排挤桩所穿过的土。可以先挖成桩孔，把桩放进桩孔中；也可以在桩的下端用水冲法形成桩孔。

(3) 用打入法形成一个孔洞（可以有套管或者没有套管），同时排挤孔洞穿过的土；然后用混凝土填入，可以有或者没有钢筋；可以在灌注混凝土的同时把套管拔出来，也可以把套管留在土中。

图5 桩的承台埋在地面以下，或者高出地面以上——高桩承台及低桩承台

(4) 挖成一个孔洞，也可以是有或者没有套管的；再把混凝土填入孔洞内。

在个别情况下，可以把以上几种方法结合起来使用；常用的施工程序示于图 6。施工方法对于桩的承载力和沉降有重要的影响；因为：作用在桩杆表面上的法向应力，在很大程度上取决于桩的设置过程中是把土排挤了，还是把土挖出来了。

图 6 桩的几种设置方法

§ 2 单桩的工作性能

1. 土与桩的相互作用

为了设计一个安全而经济的桩基，必须分析桩与土的相互作用，阐明破坏的模式，并估算在静荷载、使用荷载及其它荷载的作用下，由于土的变形而发生的沉降。设计应当符合于下列要求：

- (a) 对于破坏应当有足够的安全度。安全系数的大小，取决于结构物的重要性，以及破坏带来的经济损失的大小；也取决于地基土及水的方面的资料，结构性能及荷载系统方面的资料的可靠程度。
- (b) 应当使沉降适应于上部结构的正常使用，以免损害上部结构的效率。

桩的破坏模式主要取决于桩周围的土的抗剪强度，以及桩的类型。

在讨论这个问题之前，首先要谈到 Vesic (1967) 关于扩大基脚的一个重要论点。他把砂土中基脚的破坏分为三种情况：(I) 整体的剪切破坏——具有明显形成的剪切破坏面，并有明确的破坏荷载。(II) 局部的剪切破坏——这时，为了使塑性平衡状态扩展到滑动土体的外缘而需要的侧向压缩，大于基脚沉降时产生的侧向压缩。(III) 刺入破坏——这时会出现侧向压缩，但剪应力还不够大，没有把土的抗剪强度发挥出来。

图 7 给出了这三种破坏模式的示意图，并给出了出现某一种破坏模式的条件；这些条件是土的相对密度 (D_r) 及基础的相对埋置深度 (D/b)。由此得出结论，认为对于深基础，特别是对于桩来说，在通常的深基础和桩的尺寸的条件下将出现刺入破坏；即使是没有摩阻力时，也是这样。这说明了，为什么一般地不能给出明确的破坏荷载数值。

图 7 浅基础和深基础的不同破坏模式的条件。
I — 整体剪切破坏；II — 局部剪切破坏
III — 刺入破坏。

译注：关于图 7 的三种破坏模式，可参考

全文末尾的〈补充说明〉(二)

从以上论点出发，可以按图 8 的几个简图来说明桩的不同的破坏模式。图中给出了桩周围土层及桩端持力层的抗剪强度 (τ_s) 的相对值，以及常规的荷载—沉降曲线。

第(1)种情况——打入土中的木或钢筋混凝土桩，桩端支承在很硬的地层（岩石）上。桩杆周围的土太软弱，对于桩杆没有约束压力或侧向抵抗力；桩的破坏好象一个同样材料的细长柱子在压缩荷载下的破坏那样：柱子经受了一些弹性压缩之后，就出现纵向压曲。因此在

图中可以看到一个明确的破坏荷载。

第(2)种情况——这是桩的应用的典型情况，也是最适宜的情况：桩穿过抗剪强度较低的土层，然后达到或者进入一个高强度的土层。假如在桩端以下没有较软弱土层，那么，当荷载 P 增加时将出现整体剪切破坏，因为桩端以上的软弱土层不能阻止滑动土楔的形成。桩杆表面摩阻力的作用是很小的；因为：由于下面的高强度土层，不可能出现大的沉降；因此，桩杆表面的剪切力被发挥出来的程度是有限的。荷载—沉降曲线类似于密实土上的浅基础。

图8 土的强度对于桩的破坏模式的影响。(1)桩的压曲，出现在桩周围的很软弱土层中；(2)在坚硬土层中的整体剪切破坏；(3)土层强度均匀的情况；(4)桩端处的土层较弱，表面摩阻力起着主要的作用；(5)拔桩时的表面摩阻力。

第(3)种情况——桩杆周围的土的抗剪强度相当均匀；因此很可能出现刺入破坏。在荷载—沉降曲线上没有竖直向的切线，没有明确的破坏荷载。桩上的荷载由桩端阻力及表面摩阻力共同支承。

第(4)种情况——在这种情况下一般不会采用桩，因为端处的土层比较软弱。桩上的荷载由摩阻力支承，桩端阻力不起作用。在荷载—沉降曲线上，有竖直向的切线，这就是摩阻力完全发挥出来时的荷载。

第(5)种情况——在桩上作用着拔出荷载。因为桩端荷载等于零，所以这与第(4)种情况相似，但将出现地面隆起。

关于第(3)种情况，对于限界荷载的定义须另行考虑，因为荷载—沉降曲线上没有竖直向的切线。为此，要选择某种标准来得出限界荷载，要求这时的沉降仍然适应于上部结构的性能。图9的曲线b表示一种通常采用的方法，就是：用两条直线来代替荷载—沉降曲线，把它们的交点作为限界荷载，还有一个方法是：在接近破坏荷载时，卸去荷载；把卸荷后沉降继续增加到最大值时的这一点，作为限界荷载（图9的曲线c）。

图9 破坏的模式；破坏荷载的标准。(a)真的破坏；(b)未达到真的破坏，要增加荷载才能使桩继续沉入土中；(c)分析模型桩试验成果时通常认可的方法。

图10 Plantema
得出的桩的载荷试验
曲线

- (a) 按真值作图；
- (b) 按半对数作图。

图 11 Van der Veen 建议的求
破坏荷载的方法

Van der Veen(1953)建议一个方法。假定可以用如下的公式来表示荷载—沉降关系曲线：

$$P_p = P_{max}(1 - e^{-\alpha y})$$

式中：系数 α 反映曲线的形状。假如这个公式成立的话，那末沉降 y 与 $\lg(1 - \frac{P_p}{P_{max}})$ 的关系将是一条直线。Van der Veen 引用了 Plantema 报导的曲线，作为例子；图 10 表示按真值作出的曲线，以及在半对数纸上作出的曲线。后者看来是由两条直线组成的。这就说明了上述公式是能够成立的；但在达到某一荷载后，系数从 α_1 转变到 α_2 。因此，可以按如下的方法来推求极限荷载 P_{max} 的数值：

假定几个不同的 P_{max} 值，作出 $\lg(1 - \frac{P_p}{P_{max}})$ 与桩端沉降 y 的关系曲线（图 11）；若在这一组曲线中，有某一条曲线看来既象是一条直线，又象是由两条直线组成时，就把相应的荷载作为 P_{max} 值（这里， $P_{max} = 140$ 吨）。

译注：(1)图 1 0 左边的曲线，是根据桩端荷载 (P_p) 及桩端沉降 (y) 以及桩的极限荷载 (P_{max}) 的许多量测数据，由此得出的平均曲线；同样也可以作出右边的半对数纸上的曲线。(2)图 1 1 的方法要求具备桩端荷载 (P_p) 及桩端沉降 (y) 的数据，而这是在一般试桩条件下不容易取得的；因此，我国习惯上用桩顶沉降及桩上的总荷载作图（以代替图 1 1 的 y 及 P_p ），由此求得 P_{max} 。见魏汝龙《论试桩资料分析中的几个问题》（《中国土木工程学会第一届土力学及基础工程学术会议论文选集》，1964 年，第 323-332 页）。

用前述方法之一把预制桩沉入地基土中，或者在土中制作就地浇筑的混凝土柱（桩），这必然要使周围土中的应力状态发生变化。对于不同的施工方法，这种应力变化是不同的，而这将大大地影响桩的承载力。在打桩之前，未经扰动的“半空间”（地基土）中的应力状态主要是静止土压力（图 1 2 a；见 Winterkorn 等《基础工程手册》第五章《侧向土压力》）。若在设置桩的过程中把周围的土向外排挤了，这就将使作用在桩杆上的土压力增大，并产生桩杆上的表面摩阻力（图 1 2 b）。关于沿着桩杆的土中应力分布，存在着两种不同的观点；看来两者都是成立的。第一种观点适用于比值 l/d 在某一范围内时（ $l/d < 10 \sim 15$ ）；这时应力随着深度而很快地增大。第二种观点是，对于较长的桩（ $l/d \approx 20$ ），应力不是这样地继续增长，而是增长得慢一些；当 $l/d \geq 40$ 时，增长率成为常量。对于打入、震入、压入的以及其它形式的桩，应力分布是不相同的。如果首先挖一个孔洞，土将是向着孔洞而移动；因此，水平向应力将有所降低，见图

1 2 d。

以上的应力分布图形可以联系到相应的地基土位移的情况，即图 1 2 右边的 Δs 。

因为桩杆上表面摩阻力大小将影响到桩的承载力，所以对这种应力的大小应当有所理解。建议可用如下的近似规则（图 1 3）：

图 12 桩周围的应力状态及变形

- (a) 静止土压力状态；
- (b) 打入土中的柱形桩，侧向位移为常量；
- (c) 打入土中的锥形桩；
- (d) 钻孔桩——土向内位移，应力减小。

图 13 关于沿着桩杆的应力分布的假设
—— 建议的近似规则

情况 (b_1) : 中等的相对深度 ($l/d < 15$) :

$$\sigma_x = K_p z \gamma \quad (1)$$

式中: K_p —— 二维的 (平面课题的) 被动土压力系数。

情况 (b_2) : 较大的相对深度 ($l/d > 15$) : 应力曲线的初始切线相应于轴对称被动土压力的情况 (即 K_p) ; 接着是一段过渡曲线; 最后是随着深度而按直线比例增加, 相应于静止土压力的情况 (即 K_0)。

情况 (b_3) : 是一条曲线 (通常是抛物线) ; 在相对深度 $l/d = 20$ 处的切线, 平行于主动土压力分布曲线 (即 K_a)。

Hirst(1970) 汇集了已经发表的侧向土压力系数的数值 (表 1) ; 他着重指出了, 这些参数的数值受到许多因素的影响, 例如桩的类型, 桩的设置方法、荷载的种类、土的灵敏度等等。设计时, 若不能明确地论证某些系数数值是合适时, 就不能随便采用。

可以肯定, 桩杆周围的这种应力分布, 并不属于破坏状态。

应当着重指出, 这些建议只能是粗略的近似值, 因为以静止土压力状态为起点的应力变化, 在很大程度上取决于一些次要的施工细节。