

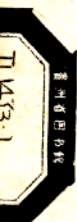
建筑情报资料

第 8012 号

1980 年 7 月

打桩过程中桩顶受力的分析

四川省建筑科学研究所编印



打桩过程中桩顶受力的分析

提 要

为了解决打桩过程中经常出现的桩头被打坏的问题，有必要弄清楚桩顶力主要受哪些因素的影响，并求出桩顶最大应力值。

本文通过对工具桩和工程桩的波动方程分析，着重讨论了打桩过程中静土阻力对桩顶最大应力的影响问题，提出一种看法：即认为在锤击能量足以将桩打入的前提下，可以用 L. L. Lowery 等学者的细长弹性桩的锤击应力方程式分析桩顶受力，和计算桩顶最大应力，而无须动用电子计算机。文中还用工具桩和工程桩的实测资料对分析成果进行了检验。

引 言

钢筋混凝土桩在施打过程中，经常出现桩头混凝土被打坏的情况。桩头一旦被破坏，打桩工程就不能正常进行，也难以准确测定桩的贯入度。所以早就需要解决桩顶受力的实际分析问题。这个问题直到 1960 年史密斯 (E. A. L. Smith) 提出一种应用波动方程的差分解借助电子计算机的方法进行打桩分析才首次获得解决。但共，截至目前为止，使用电子计算机求解还不能认为是一种简便和价廉的求解方法，最好能够应用比较简单的公式人工求算桩顶应力。本文的目的是探索在什么情况下可以直接应用 L. L. Lowery 等学者根据古典的一维波动方程导出的细长弹性桩的锤击应力公式计算桩顶应力。

古典的一维波动方程为：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

式中: c —— 应力波之速 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

E —— 杆身材料的弹性模量

t —— 时间

ρ —— 杆的质点密度

u —— x 方向上杆身某点的纵向位移

I. I. Lowery 等导出的细长弹性杆之顶端最大压应力的近似公式为:

情况 I: ($n < p$)

$$\sigma_{0 \max} = - \frac{KV}{A \sqrt{p^2 - n^2}} e^{-nt} \sin(t \sqrt{p^2 - n^2}) \quad (1)$$

t 由下式决定:

$$\operatorname{tg}(t \sqrt{p^2 - n^2}) = \frac{\sqrt{p^2 - n^2}}{n}$$

情况 II: ($n = p$)

$$\sigma_{0 \max} = \left[\frac{KV}{nA} - \frac{W}{A} \right] e^{-nt} \quad (2)$$

$$t = 1/n$$

情况 III: ($n > p$)

$$\sigma_{0 \max} = - \frac{KV}{A \sqrt{n^2 - p^2}} e^{-nt} \sinh(t \sqrt{n^2 - p^2}) \quad (3)$$

t 由下式确定:

$$\operatorname{tanh}(t \sqrt{n^2 - p^2}) = \frac{\sqrt{n^2 - p^2}}{n}$$

式中: $n = \frac{K}{2A} \sqrt{\frac{g}{EY}}$; $p = \sqrt{\frac{KG}{W}}$

W ——锤心重量 (公斤)

V ——锤心撞击速度 (厘米/秒) $V = \sqrt{2gh}$

K ——锤垫弹簧常数 (公斤/厘米) $K = A_c E_c / l_c$

t ——时间

A ——板的横截面积 (平方厘米)

E ——板的弹性模量 (公斤/厘米²)

γ ——板的容重 (公斤/厘米³)

β ——重力加速度 (980厘米/秒²)

h ——锤的自由落距 (厘米)

A_c ——锤垫横截面积 (厘米²)

l_c ——锤垫厚度 (厘米)

E_c ——锤垫弹性模量 (公斤/厘米²)

从公式 (1)、(2)、(3) 可见, 在给定的锤——板组合下, 存在着确定的板顶最大压应力值, 此值仅与锤、板的几何尺寸和物理力学参数有关, 而与土阻力无关。

为了弄清楚这些公式的应用范围, 需要了解打桩过程中静阻力对板顶受力的影响。

对实际地基土中板顶受力的分析

为了解打桩时静土阻力对板顶受力的影响, 曾对一根工具桩 (专用试桩) 和某工程的一根钢筋混凝土板, 应用史密斯对波动方程 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + R$ (R ——反映桩身土阻力的参数项) 的差分方程解, 借助电子计算机, 进行了板顶受力的分析。

工具桩由 8 截外径 114 毫米, 壁厚 10 毫米的钢管, 外加一圈锥形桩尖组成。钢管与钢管、钢管与桩尖之间, 用梯形螺纹联接 (接头很紧, 试后拆卸桩身时, 未发觉有松动), 其中 5 截钢管

的内壁贴有受力和温度补偿电阻片各4片，每截钢管各自构成一个测力传感田。桩顶上再设置一个测力传感田，并用法兰盘与桩顶相联，由于法兰盘既能传递压力，又能传递拉力，所以此传感田实际上和桩构成一整体，此整体全长322厘米。工具指示尺图和计算图示见图1。

工具指示尺用参数：

锤重 $W(1) = 0.30$ 吨。

落高 $FALL = 100, 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30$ 厘米。

锤效率系数 $EFF = 0.95$

弹簧常数

$$SP(1) = \frac{1}{\frac{1}{SP(1)} + \frac{1}{K}} = 220.68 \text{ 吨/厘米}$$

$$SP(2) = SP(3) = \dots = SP(9) = 2133.26 \text{ 吨/厘米}$$

桩顶处 $W(2) = 0.01909$ 吨

$$W(3) = W(4) = \dots = W(9) = 0.0096 \text{ 吨}$$

$$W(10) = 0.0096 + 0.005 = 0.0146 \text{ 吨}$$

最大弹性变形：桩底土 $PQ = 0.18$ 厘米，桩侧土 $SQ = 0.18$ 厘米（根据工具桩的静载荷试验资料取值。）

阻尼系数：桩底土 $PJ = 0.45$ 秒/米，桩侧土 $SJ = 0.15$ 秒/米（参考有关资料取值）。

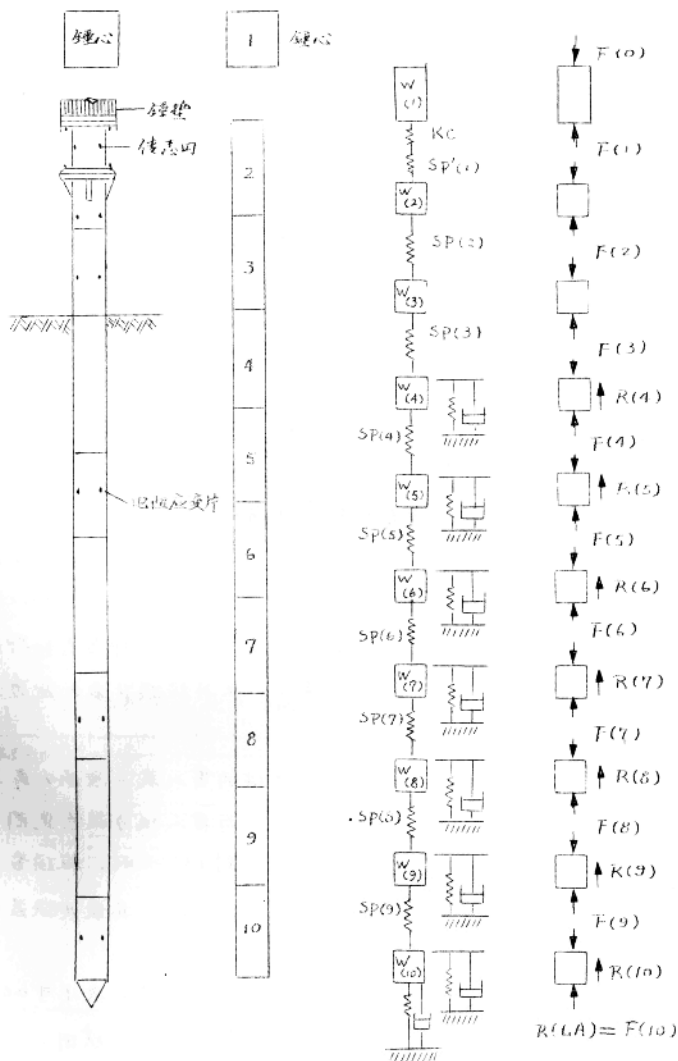
桩头土阻力占总土阻力 $RUTOT$ 的百分比 $PER = 0.40$ （根据工具桩的静载荷试验资料取值）。

测筒深嵌土桩，截面为 30×30 厘米，长5米（包括桩头，桩头长0.42米）。

实际中行桩分成7段，计算用参数如下：

锤重 $W(1) = 1.22$ 吨，传感田及桩帽重 $W(2) = 0.14$ 吨。

落高 $FALL = 70, 80, 90$ 厘米。



(A) 工以梳示总图 (B) 单元划分 (C) 计算图式 (D) 受力
图 1

桩锤效率系数 $EFF = 0.90$

弹簧常数

$$SP(1) = 120 \text{ 吨/厘米}$$

$$SP(2) = SP(3) = \dots = SP(7) = 4259.54 \text{ 吨/厘米。}$$

桩段重

$$W(3) = W(4) = \dots = W(7) = 0.147 \text{ 吨}$$

$$W(8) = \text{桩段连接偏差} = 0.17 \text{ 吨。}$$

最大弹性变形：桩底土 $PQ = 0.254$ 厘米，桩侧土 $SQ = 0.254$ 厘米。

阻尼系数：同工具桩。

桩底土阻力占总土阻力的百分比 $PER = 0.60$ 。

试验结果表明：当锤击能量足以将桩打入——表现在桩的贯入度大于某一数值时，随着静阻力的增加，桩顶最大压应力（电标中是以内力 $F_{MAX(1)}$ 表示）的增势相当小。工具桩与总土阻力由 4 吨增加到 26 吨时， $F_{MAX(1)}$ 的增长还不到 1%，如以近似公式计算值代替电标值，其最大误差为 5%，几种桩高和静阻力情况下，工具桩顶 P 最大压力见表 1。工具桩顶 P 最大压力与总土阻力的相关曲线见图 2。

几种桩高和静阻力情况下，工具桩的贯入度（厘米/击）见表 2。工具桩打入时承载力（静阻力）与贯入阻力关系见图 3。

钢筋混凝土桩当静阻力由 20 吨增加到 130 吨时，桩顶最大压力仅增大 3%，如以近似公式计算代替电标值，其最大误差仅为 2.6%。见表 3、图 4。

从表 3、图 4 可见，当静阻力大于 130 吨贯入度小于 0.0568 厘米/击时，桩顶最大压力即以较大的幅度增长。从图 5 打桩反应曲线（桩打入时静阻力——贯入阻力关系）可见，当贯入度减低到 0.0568 厘米/击以后，贯入度的进一步减低——贯入阻力的

几种桩高和静阻力情况下二头桩顶中最大压力值(吨)

表 1

静阻力 桩高 (厘米)	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	近似 公式计 标值
100	46.101	46.164	46.195	46.226	46.256	46.288	46.325	46.363	46.401	46.438	46.482	46.25
60	35.768	35.754	35.776	35.799	35.822	35.845	35.871	35.898	35.926	35.954	35.982	34.77
55	34.157	34.230	34.252	34.274	34.296	34.318	34.342	34.368	34.394	34.420	34.447	32.81
50	32.586	32.637	32.658	32.678	32.699	32.719	32.742	32.767	32.792	32.816	32.841	31.29
45	30.223	30.262	30.281	31.000	31.020	31.039	31.060	31.083	31.107	31.130	31.153	29.68
40	29.154	29.190	29.208	29.226	29.244	29.263	29.282	29.304	29.326	29.347	29.369	27.98
35	27.271	27.304	27.321	27.338	27.355	27.371	27.386	27.409	27.429	27.450	27.470	26.18
30	25.248	25.278	25.294	25.309	25.324	25.340	25.355	25.374	25.392	25.411	25.430	24.23

桩顶最大压力 $F_{MAX}(1)$ (吨)

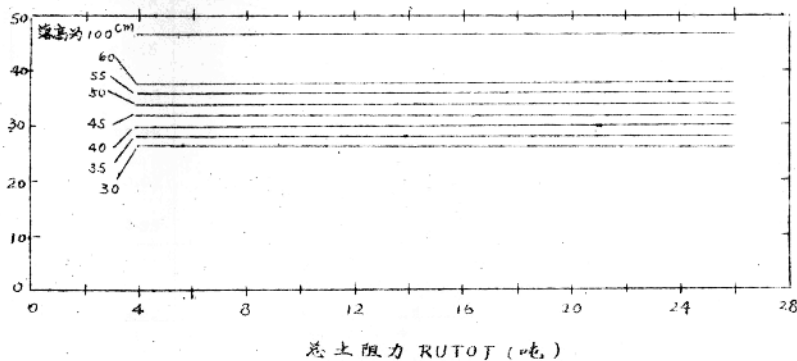


图 2 桩顶最大压力与总土阻力关系

几种卷高和静阻力情况下工具杆的贯入度(厘米/击)

表 2

卷高 (厘米) \ 静阻力 (吨)	4	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
100	2.4583	1.7276	1.3660	1.1793	1.0153	0.8764	0.7624	0.6702	0.5916	0.5257	0.4714
60	2.2651	1.1302	0.9128	0.7978	0.6979	0.5978	0.4841	0.4014	0.3363	0.2826	0.2398
55	2.0936	1.0463	0.8464	0.6995	0.5859	0.4903	0.4121	0.3469	0.2923	0.2496	0.2156
50	1.9386	0.9604	0.7765	0.6394	0.5322	0.4412	0.3722	0.3170	0.2687	0.2271	0.1920
45	1.7839	0.8764	0.7030	0.5783	0.4765	0.3904	0.3267	0.2893	0.2527	0.2220	0.1920
40	1.6164	0.7938	0.6284	0.5147	0.4185	0.3378	0.2871	0.2460	0.2148	0.1851	0.1569
35	1.4406	0.7161	0.5524	0.4481	0.3579	0.2859	0.2400	0.2044	0.1745	0.1459	0.1188
30	1.2514	0.6112	0.4763	0.3779	0.2942	0.2343	0.1919	0.1603	0.1315	0.1042	0.0784

静打 > 静阻力 (吨)

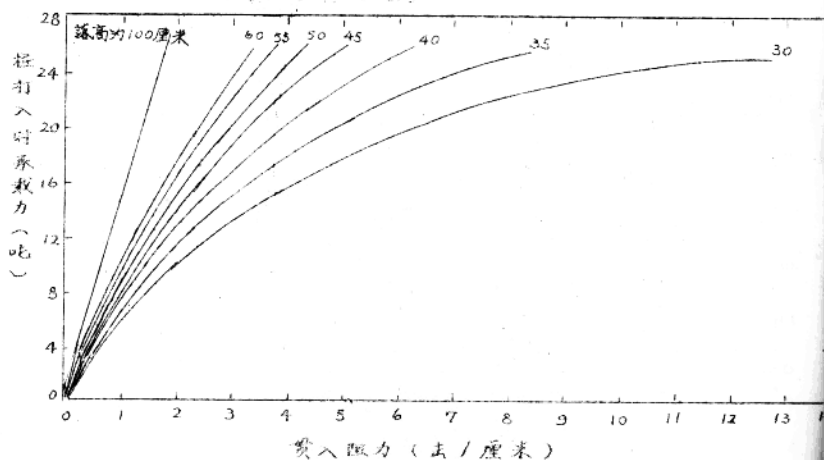


图 3 不同卷高下的反应曲线

几种落高和持阻力情况下钢筋混凝土桩顶
下的最大压力(吨)及贯入度(厘米/击)

表 3

落高为 70 厘米			落高为 80 厘米			落高为 90 厘米		
持阻力 (吨)	桩顶最 大压力 (吨)	贯入度 (厘米/ 击)	持阻力 (吨)	桩顶最 大压力 (吨)	贯入度 (厘米/ 击)	持阻力 (吨)	桩顶最 大压力 (吨)	贯入度 (厘米/ 击)
20	95.61	2.1169	20	100.07	2.3650	20	106.15	2.6012
40	95.91	1.0380	40	100.40	1.1736	40	106.50	1.3020
60	94.25	0.6410	60	100.77	0.7360	60	106.89	0.8269
70	94.43	0.5024	70	100.97	0.5886	70	107.11	0.6710
80	94.63	0.3837	80	101.19	0.4619	80	107.34	0.5371
90	94.85	0.2830	90	101.42	0.3527	90	107.60	0.4209
100	95.38	0.1383	100	102.02	0.1833	100	108.25	0.2352
130	96.21	0.0368	130	102.94	0.0887	130	109.28	0.1207
150	98.22	0.0034	150	105.17	0.0253	150	111.90	0.0490
170	100.98	0	170	108.06	0	170	114.71	0.0019
190	103.58	0	190	110.81	0	190	117.58	0
210	105.93	0	210	113.29	0	210	120.97	0
230	107.99	0	230	115.48	0	230	122.48	0
260	110.62	0	260	118.27	0	260	125.45	0
310	113.99	0	310	121.89	0	310	129.31	0
Lowery 近似公式 计算值	96.02			102.64			108.87	

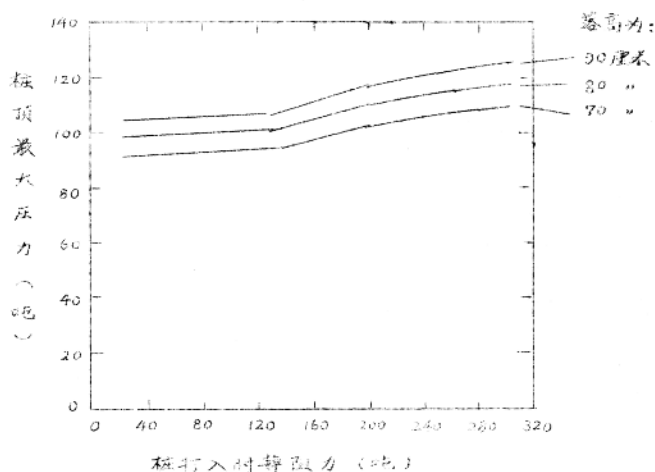


图4 钢筋混凝土桩顶端最大压力与桩打入时静阻力关系

增高，只能说明锤的能劣不足，而不表示桩承载力的继续提高。也就是说，在本例的桩——锤组合下，桩的承载力不能超过150吨。实际上，当桩的承载力为130吨时，用本例的锤重和落高施打，其施工效率已很低了，在打桩机械台班费用昂贵的情况下，这是很不经济的。所以，在打桩工程中，应根据桩和地基情况，选用有足够能劣的锤击设备。而在这种情况下，如上所述，桩顶最大压力主要取决于锤、桩的几何尺寸和物理力学参数。

下面进一步分析在锤击能劣足以将桩打入的情况下，总土阻力对桩顶最大压力值不产生显著影响的原因。为此，从计算机输出每个时间间隔的桩顶受力 $F(t)$ 。桩顶力 $F(t) = SP(t)[D_1 - D_2]$ ，同时，输出每个时间间隔的锤心位移 D_1 和桩顶位移 D_2 。 $F(t)$ 与时间 t 的相互关系曲线见图6。

D_1 、 D_2 时间 t 的相互关系曲线见图7。

原书缺页

原书缺页

由图 6·7 可见：

(1) 当其他参数固定不变时，锤击作用历时的长短决定于土阻力的大小。土阻力愈小，则锤击作用历时愈长。

(2) 应力（差分方程计标的是内力）——时间相关曲线中的第一峰值，是桩顶最大压应力。F(t) 从另开始，逐渐增大，达到其最大值 F_{MAX(t)} 所经历的时间相当短，此时间（以 t_{MAX} 表示）与土阻力的大小关系不明显，而与近似公式计标值接近。见表 4。

桩顶最大压应力值出现时间 t_{MAX} (毫秒) 表 4

总土阻力 (吨)	2	8	20	桩侧阻力为另
t _{MAX} (毫秒)	1.00 — 1.12	1.00 — 1.12	1.12 — 1.19	1.19
附注	电 标 值			近似公式 计标值

(3) 当 $t < t_{MAX}$ 时，尽管总土阻力不同，桩顶位移 D_2 和锤心位移 D_1 却基本上相等（表现在总阻力为 8、20 吨时，二者的 $D_1 - t$ 曲线基本上重合， $D_2 - t$ 曲线也基本上重合）。这个事实表明，在由 $t = 0$ 到 $t = t_{MAX}$ 这段控制的时间里，土阻力的作用还来不及发挥，所以桩顶受力基本上决定于给定的桩—锤组合。

(4) 当 $t > t_{MAX}$ ，总土阻力对 D_1 、 D_2 的影响逐渐增大。但由于在桩顶位移 D_2 因土阻力的增大而减小的同时，锤心位移 D_1 也在减小，所以其差值 $D_1 - D_2$ 不因总土阻力 R_{TOT} 的增大而出现大幅度的增长。因而 $F(t)$ ($F(t) = SP(t)$) ($C(t) = SP(t)$) ($[D_1 - D_2]$) 也不出现大幅度的增长。这是之所以在 $t > t_{MAX}$ 之后， $F(t)$ 不出现大于第一峰值的值的原由。

理论分析与实测结果的比较

(1) 所有实测的桩顶应力图形都可以证实第一峰值为最大应力值。

(2) 对工具头桩的实测结果表明，当桩锤的落高固定不变时，桩顶最大应力值不因入土深度的增加和桩尖土层的变化而呈现有规律的变化。见图8。图8中桩顶传志回实测（最大压力）值之所以在小幅度内有所变化，主要是由于锤击能量不大稳定的缘故。这是由两方面的原因造成的：

一是总锤击偏，二是桩锤的松动。桩锤是由一透钢板通过四根螺杆紧固而成，螺帽一有松动，锤击时钢板与钢板相互之间便产生相对位移而损耗一部分能量。试验过程中需要不时将螺帽拧紧。

(3) 几种落高下工具头桩顶与最大压应力的实测值与计算值基本接近，见图9。

(4) 对一组（3根）截面积为 30×30 厘米，长

8米的钢筋混泥土桩的实测结果表明，尽管各桩的静阻力不同，（表现在桩的贯入度不同）但是，在相同的锤（重2吨）和落高的打击下，各根桩顶与的最大压力值大体上接近。而且，3根桩的实测平均最大压力值与近似公式计算值仅相差5%，见表5。

16" 桩传志回实测受力值 (吨)

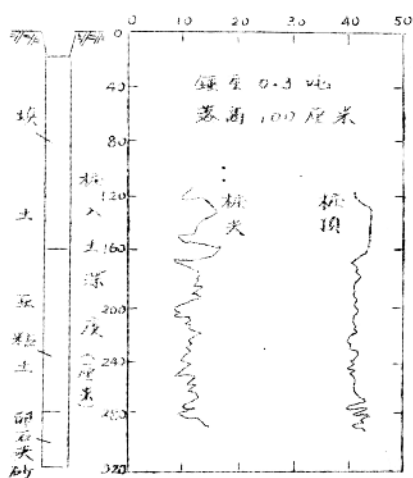


图8 工具桩顶部和桩尖
受力实测值

表 5

22# 桩			24# 桩			26# 桩			平均实 测桩顶 最大压 力值	近似 公式 计称 值	计称值 平均 实测值 误差限
桩 高 (厘米)	实测 桩顶 最大 压力 (吨)	实测 贯 入度 (毫米)	桩 高 (厘米)	实测 桩顶 最大 压力 (吨)	实测 贯 入度 (毫米)	桩 高 (厘米)	实测 桩顶 最大 压力 (吨)	实测 贯 入度 (毫米)	(吨)	(吨)	
30	103	1.66	30	105	1.94	30	104	3.71	104.0	105.1	1.01
40	116	1.80	40	122	2.45	40	115	—	117.7	121.3	1.03
50	130	2.06	50	131	4.13	50	128	4.98	129.7	135.6	1.05
60	145	3.16	60	151	6.28	60	144	7.11	146.7	148.6	1.01
70	155	3.38	70	160	8.07	70	154	8.70	156.3	160.5	1.03
80	169	4.99	80	166	10.18	80	159	10.41	164.7	171.6	1.04

利用近似计称公式分析锤击与落高对桩顶最大应力的影响

如前节所述，电称分析和实测资料都已表明，在锤击能量足以将桩打入的前提下，可以利用未考虑桩身土阻力作用的近似计称公式来计称桩顶最大应力。近似计称公式的计称结果

与考虑了桩身土阻力作用的波动方程与分析结果或实测的桩顶最大应力值之间的误差不超过 5%。所以，可以利用近似计称

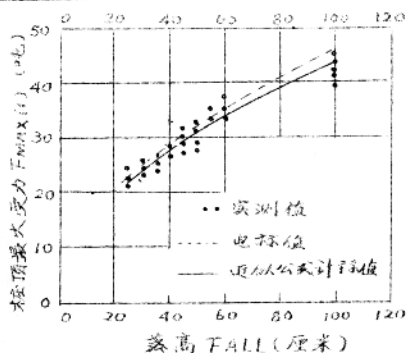


图 9 不同落高下二尖桩之顶最大压力的计称与实测值

公式分析锤重与落高对桩顶最大应力的影响。

从近似公式(1)或(3)可以看出,桩顶最大应力与锤击速度 V 成正比,由于 $V = \sqrt{2gh}$,所以与落高的平方根成正比。最大应力值也随锤重的增加而增加,但锤重的影响不如落高那样严重。由表6可见,锤重增加一倍(由1吨增至2吨)时,桩顶最大应力增长20%。如果锤重不变,而落高增加1倍时,则最大应力将为原来的 $\sqrt{2}$ 倍,即增长41%。所以,打桩工程中宜采用重锤、低落高。

桩顶最大压力随锤重的变化

表 6

锤重 W (吨)	落高 H (米)	桩顶最大 压力 F (吨)	$\frac{Fw=39.6}{F}$	附 注
2	1	191.80	1.00	
1.6	1	181.43	1.06	桩截面为30×30厘米 锤垫弹簧常数 K 为400吨/厘米压缩量
1.2	1	168.01	1.14	
1	1	159.52	1.20	

锤击能量为2吨·米时不同锤重、落高组合下的桩顶最大压力

表 7

锤重(吨)	落高(米)	桩顶最大压力 (吨)	附 注
2	1	191.80	锤垫弹簧常数为400吨/厘米压缩量 桩截面为30×30厘米
1.6	1.25	202.84	
1.2	1.67	217.11	
1	2	225.64	