

打桩对建筑物影响的测试分析*

董建国 胡中雄 陈冠发 钱宇平

(同济大学地下建筑与工程系, 上海)

一、前言

上海地基属软弱地基, 故在上海建造高层建筑多采用桩基。在密集建筑群中, 打桩对邻近建筑物的影响日益引起人们的注意, 为了了解打桩对土体和邻近建筑物的影响, 我们在华东电管局调度大楼进行打桩监测。通过对打桩引起的土体和邻近建筑物的竖向变形、土体的水平位移、邻近建筑物的裂缝开展以及钢管桩土塞长度和各根桩锤击数的变化的分析, 可得到一些有价值的结论。

二、工程概况和地质资料

华东电管局调度大楼共24层, 由华东建筑设计院设计, 见图1。上部结构采用框筒结构, 筒的尺寸为 9×9 m, 地下室为一层, 埋深3.3 m, 平面尺寸为 27×27 m的缺角菱形, 建筑物高100.5 m, 局部高125.5 m。主楼旁有辅助建筑物。

基础采用筏基加桩基, 筏基厚1.5 m。为了减少打桩对邻近建筑物的影响, 主楼桩基采用钢管桩, 钢管桩尺寸 $L \times d \times t = 52.7 \text{ m} \times 609.6 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$, 共打桩187根, 桩距2.1 m, 2.2 m, 2.4 m不等。

土的主要物理力学性质指标见表1。

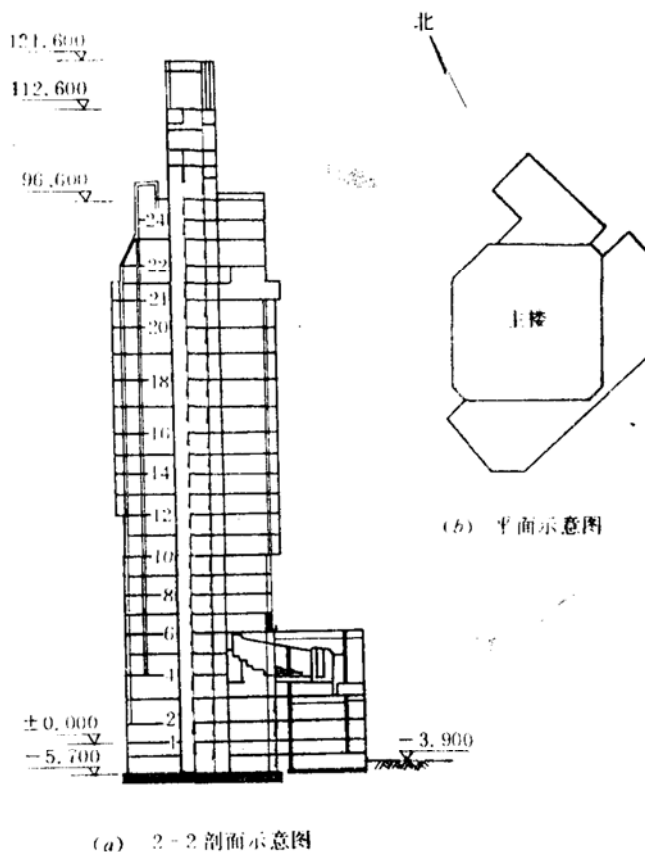


图1 建筑物平面剖面图

* 参加本工程测试的还有蔡伟铭、周建敏。

表1 土的主要物理力学性质

层次	土层及描述	上层厚度 (m)	含水量 $w(\%)$	容重 γ (kN/m^3)	孔隙比 e	压缩系数 a_{1-2} (kPa) $^{-1}$	压缩模量 E_{1-2} (kPa)	内摩擦角 ϕ ($^\circ$)	内聚力 c (kPa)
1	褐黄粘土	0.2—1.8	37.1	18.1	1.031	0.00061	3169	15.75	8.8
2	灰淤质亚粘土	0.9—1.9	42.2	17.7	1.157	0.00075	2680	14.5	8.8
2.1	灰亚砂土	1.3—2.2	34.8	18.4	0.936	0.00033	5730	26.75	5.9
3	灰淤质粘土	4.0—8.2	48.5	17.1	1.347	0.00106	2070	9.25	9.8
4	灰粘土	2.0—6.5	38.2	17.8	1.092	0.00067	2940	8.25	14.7
5	灰亚粘土	2.4—2.6	33.4	18.0	0.983	0.00045	$\frac{4240}{E_{2-3}=6290}$	17.5	10.8
6	灰粘土	6.5—8.6	32.3	18.0	0.981	0.00043	$\frac{4460}{E_{3-4}=7520}$	15.25	19.6
7	灰亚砂土	4.2—6.3	26.2	18.8	0.775	0.00019	$\frac{8940}{E_{3-4}=18090}$	26.25	7.8
8	灰亚粘土	9.2—9.7	29.3	18.9	0.829	0.00028	$\frac{6240}{E_{3-4}=7720}$	23.25	10.8
9	灰绿亚粘土	2.4—2.5	23.1	20.2	0.625	0.00016	9750	23.5	35.3
10	灰亚砂土	3.0—4.1	31.0	18.7	0.852	0.00013	13520	27.25	4.9
11	灰细砂	4.4—4.7	29.4	18.7	0.816	0.00012	14400	27.75	7.8

三、监测和施工措施

为了减少打桩对土体及邻近建筑的影响,设计单位为本工程布置了袋装砂井,袋装砂井直径7cm,井距1.5m,见图2。

邻近建筑、拟建建筑以及变形观测点的平面布置见图3。

我们密切注意打桩对混合结构的五层仓库和独立柱基的五层民房的影响,因为这些建筑物均为浅基础,在这些建筑物上布置石膏饼,用来观察裂缝开展情况。从而了解打桩速率和震动对建筑物的影响,并用来控制打桩施工进度。为了减少打桩对民房和仓库的影响,采用背向这些建筑物的打桩流程,并控制打桩速率。打桩流程图见图4。

除此以外,还作了如下测试:①工地周围地面和邻近建筑物的垂直位移;②拟建建筑物西侧和北侧地面的水平位移;③打钢管桩引起土体的扰动;④打钢管桩土塞长度的变化规律;⑤打钢管桩对周围建筑物的危害程度。

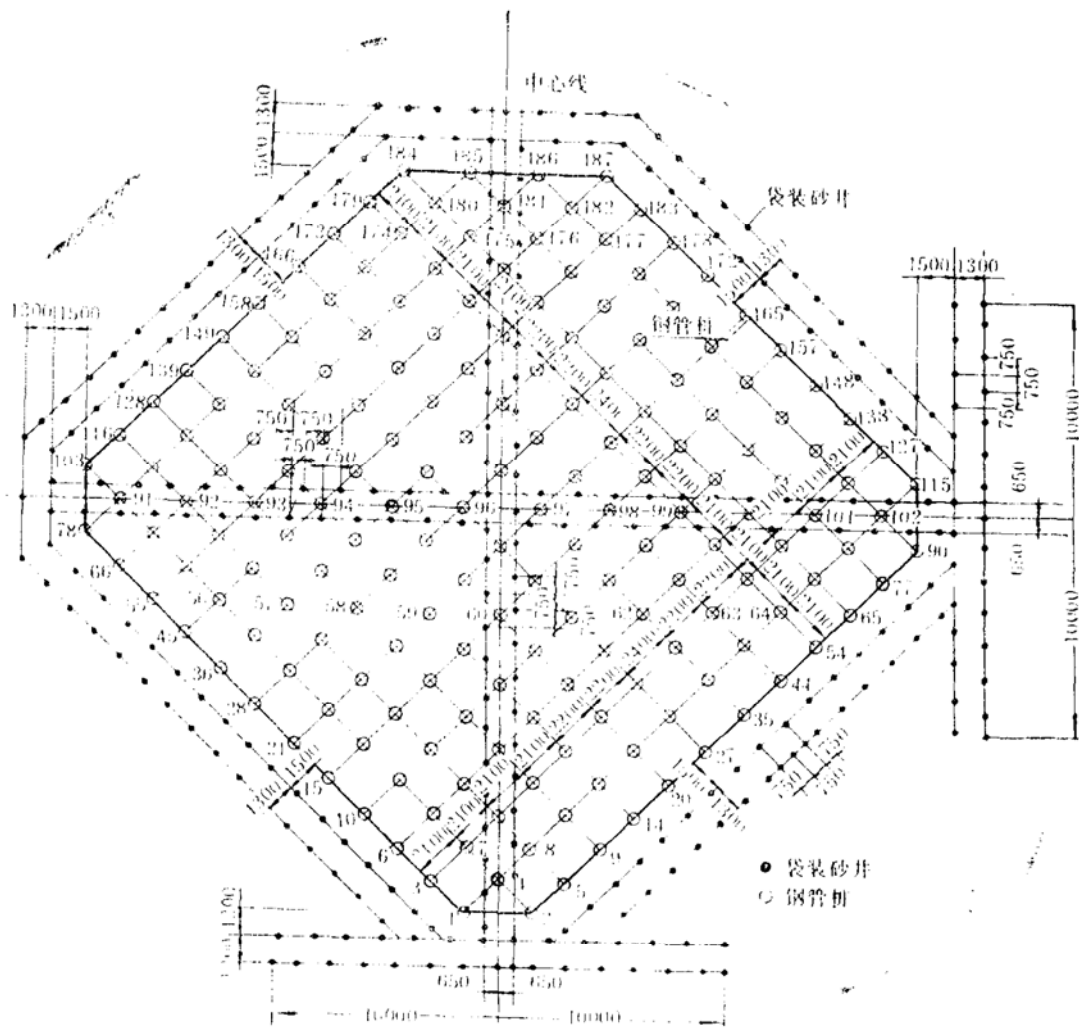


图2 桩位编号及袋装砂井布置图

四、实测结果与分析

(一)打钢管桩引起的土体扰动

图5表示入土深度为51—52m时已打入桩根数和平均锤击数的关系。由此可见,开始时打桩对桩底土的扰动是很大的,但在打入一定数量的桩后,打桩对土体扰动的影响就趋于平稳了。

(二)钢管桩土塞问题

管径为609.6mm的钢管桩打入时何时形成土塞,这是人们关心的问题。我们观察了四根钢管桩在打入过程中不同入土深度的土塞长度变化,结果表明:即使在很小锤击力作用下,土塞仍存在;桩入土深度愈深,则土塞愈长。统计了四根桩16个数据点,发现钢管桩总入土深度 L 和土塞长度 a 存在线性关系(见图6),即

$$a = -3.581 + 0.749L \quad (\text{相关系数 } r = 0.982) \quad (1)$$

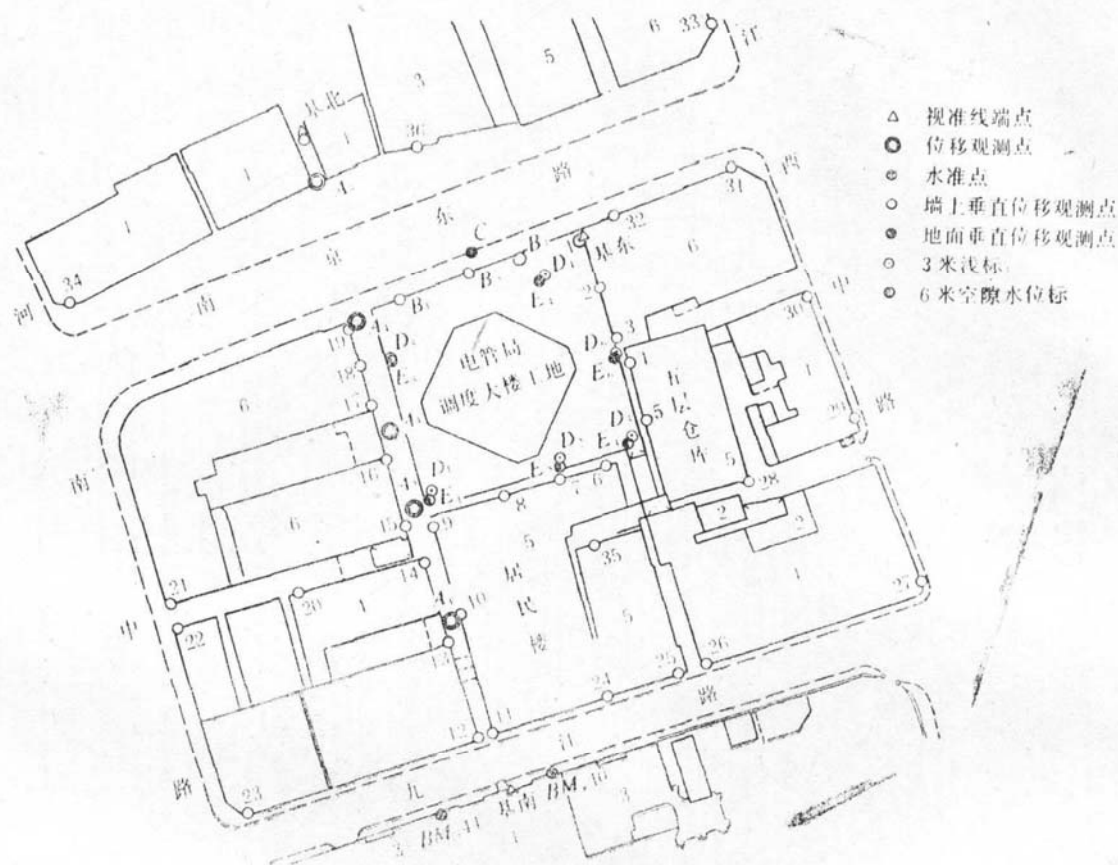


图3 邻近建筑物平面位置及变形观测点的平面布置图

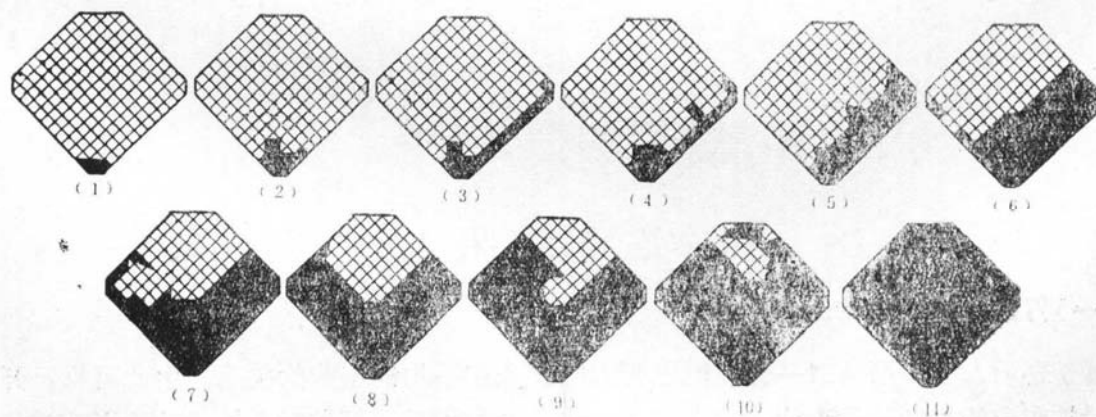


图4 打桩流程图

显然, 在 $L = 5\text{ m}$ 以内(约 4.8 m 以内)土塞为零是不合理的。此关系式可用来预估打钢管桩时土体体积的置换量。

图7表示钢管桩打入数和土塞长度 a 的关系。从图中可见, 基本上符合正态分布。由于第109号桩的土塞长度只有 29 m , 根据量测值取舍的 $3S_x$ 判据^[1] (S_x 为均方差), $\bar{a} - 3S_x = 30.512\text{ m} > 29\text{ m}$, 故被舍弃, 这样, 图中171根桩的土塞长度的平均值为 37.93 m ($S_x = 2.368\text{ m}$), 平均值的可能误差为 0.12 m 。平均土塞长度 $\bar{a} = 37.93 \pm 0.12\text{ m}$ 。

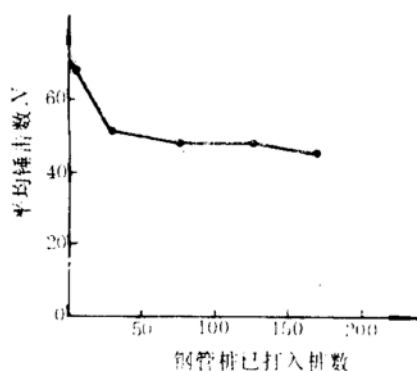


图5 已打入桩根数与平均锤击数的关系

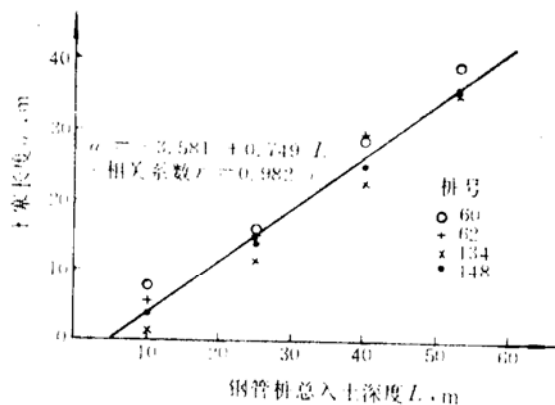


图6 钢管桩总入土深度与土塞长度的关系

我们知道,土塞越短,排土越多,侧向位移也越大,反之,则排土越少。从平均土塞长度 $\bar{a}$, 可以预估可能的平均排土量 $\bar{V} = 1014.928 \pm 6.558 \text{ m}^3$ 。由平均排土量可知最大排土量 $V_{\max} = 1021.486 \text{ m}^3$ 。

(三)打钢管桩引起的垂直位移

图8表示全部钢管桩打入后,各测点的实测垂直位移 S (向上隆起为“+”)和各测点至全部桩群形心的距离 A 的关系图。从图中可以看

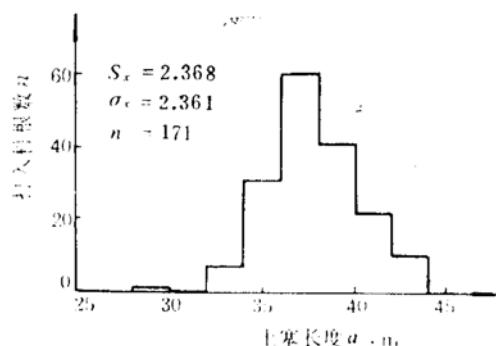


图7 钢管桩打入数与土塞长度的关系

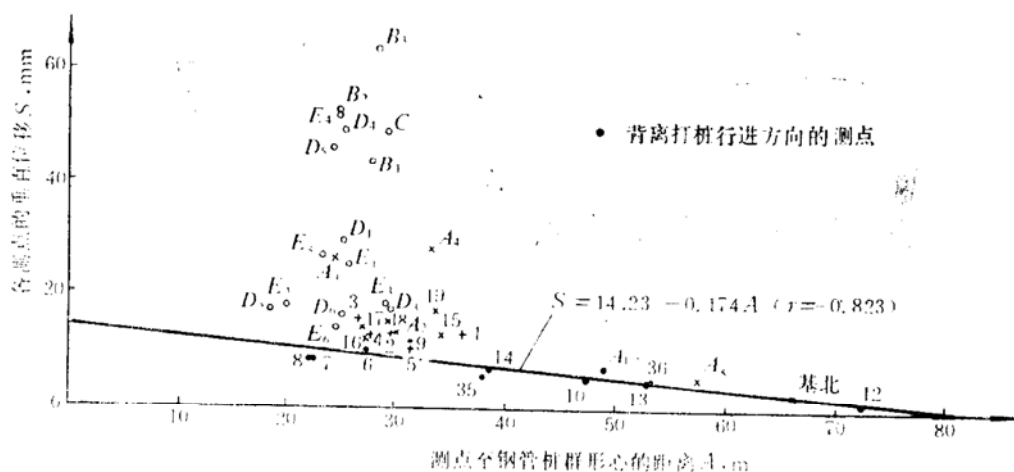


图8 测点垂直位移与测点至钢管桩群形心的距离的关系

到打桩路线、打桩行进方向、测点的设置位置是在建筑物上还是在空地上以及空地上的测点到建筑物的距离等均影响垂直位移的大小。但是,从该图中仍能找到一些规律,若测点至全部桩群形心的距离 A 相同,则空地上测点的垂直位移(向上隆起值)大于建筑物上测点的垂直位移;愈靠近建筑物,测点的垂直位移愈小。同时,从背向打桩方向的6, 7, 8, 9, 10,

12, 13, 14, 35, A_1 等10个测点可知, 垂直位移 S 和距离 A 成比例关系, 可表示为:

$$S = 14.23 - 0.174A \quad (\text{相关系数 } r = -0.823) \quad (2)$$

当 $S = 0$ 时, $A \approx 82\text{m}$, 上式表明离开打入桩群形心愈远, 垂直位移(向上隆起量)愈小; 在 $A \geq 82\text{m}$ 时, 垂直位移可以略去。

在测点至桩群形心距离相同的情况下, 空地的隆起量大, 约为30—40mm, 这主要是由于下述两个原因造成: ①这些测点向着打桩方向; ②因打入桩引起土体体积增加而产生的侧向位移, 使得向上的竖向应力变化与空地总的原始固结应力(土的自重应力)的差值远大于打桩产生的向上竖向应力变化与建筑物下地基的总的原始固结应力(土的自重应力和上部结构产生的附加应力之和)的差值, 所以空地的隆起量大。而有建筑物情况的地基总应力大, 对应的孔隙比的变化率就小, 所以向上隆起就小了。

图9表示竖向位移(向上隆起为“+”)和打入桩数的关系。可以看到, 随着打入桩数的增加,

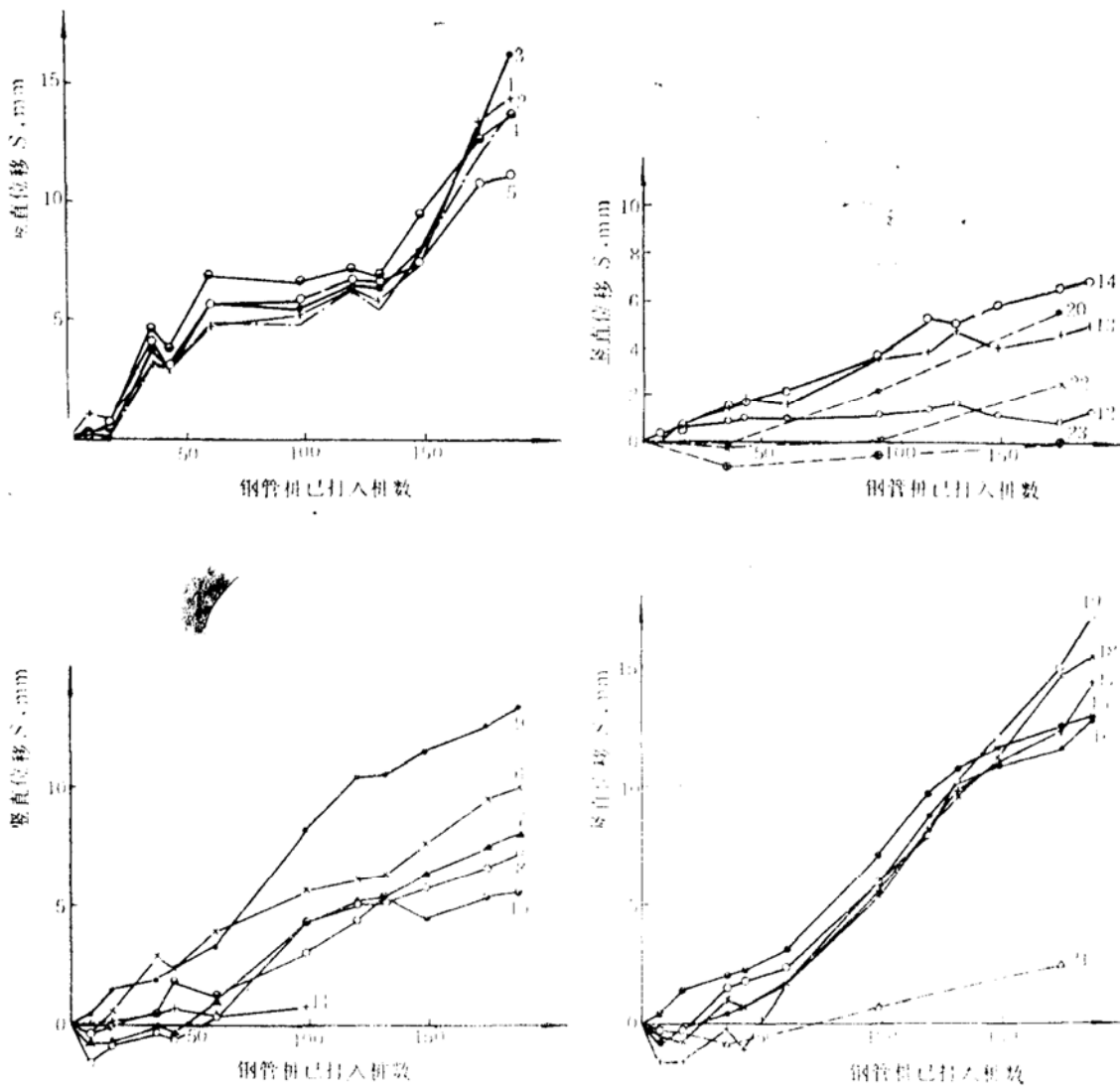


图9 建筑物上测点竖向位移与打入桩数的关系

除了离打桩区较远的23号测点($L=102\text{m}$)外,基本规律是打入桩数愈多,各测点的向上垂直位移愈大;还可看到,不同的打桩阶段,由于打桩次序、打桩行进方向、打桩速率以及打入桩的位置等不同都对地面和建筑物的垂直位移有影响,表2详细列出了各打桩阶段垂直位移的变化情况,从图表中可以看到:

1.打桩速率在4.5根/天或连续打桩在2天以内,打桩引起周围建筑物的最大隆起量只有1.3mm。

2.打桩速率超过6.5根/天或连续打桩超过4天,会使场地及周围建筑物全都隆起。连续打桩4天引起的最大隆起可达6.1mm,这样大的隆起量对建筑物是不利的。

3.打桩次序对邻近建筑物的隆起是有影响的。在打桩第Ⅵ阶段,打桩速率为6.3根/天,并连续打了6天,在靠近打桩区的西面和西南面建筑物各测点隆起量均大于3.2mm;而在东侧,由于已打入四排桩,土体侧向位移受到限制,所以,1,5测点最大隆起量小于0.5mm,在2,3,4测点,建筑物甚至下沉。可见,打桩次序对建筑物的竖向变形是有影响的。若在打桩区某部位有危险房屋,且不能降低打桩速率,可以从靠近这部位首先打桩,打桩行进方向背离这些建筑物,这样,可以减少这些房屋危险的发生,以降低修理费。

表2 各打桩阶段垂直位移的变化情况表

阶段 编号	打桩日期	打桩 天数	打桩 速率 (根/天)	最大隆起		隆起测点号	下沉测点号	说明
				(mm)	测点 号			
I	11月15—17日	3	2.7	1.1	1	1,2,3,4,5,9,11,15.	6,7,8,10, 16,17,18, 19.	11月18日 休息
II	11月19—20日	2	4.5	1	9	4,5,6,8,9,10,11,12,15,16	1,2,3,7, 17,18,19.	
III	11月21—24日	4	4.8	4.3	4	全部隆起		11月25日 休息
IV	11月26—28日	2	3.5	1.3	7	7,9,11,12,15,16,19	1,2,3,4, 5,6,17, 18.	11月27日 没有打桩
V	11月29日—12月1日	3	5.7	3	4	1,2,3,4,5,6,17>1.5mm 7,8,9,15,16,18,19.	10,11,12.	12月2日 休息
VI	12月3—8日	6	6.3	5	9	7,8,9,15,16,17,18,19>3.2mm 6,10>1.5mm 1,5,11,12<0.5mm	2,3,4.	12月9日 休息
VII	12月10—12日	3	7	2.9	18	9,15,16,17,18,19>2mm 1,2,10>1mm 3,4,5,6,7,8<1mm		
VIII	12月13—15日	2	6	2.3	19	10,12,13,15,16,17,18,19 6,7,8,9<0.2mm	1,2,3,4, 5,14.	12月14日 休息 12月16日 休息
IX	12月17—19日	3	5.7	2.6	4	1,2,3,4,5,6,7,8,9,14,15,16,17, 18,19.	10,13.	
X	12月20—23日	4	6.5	6.1	1	全部隆起 1,2,3,4,5>3.2mm		
XI	12月24—25日	2	6.5	3.3	3	全部隆起		

4. 间隔打桩天数对建筑物的向上竖向变形的增加有缓和作用。见表2第Ⅷ阶段, 因为14日休息一天, 即使打桩速率为6根/天, 最大隆起只有2.3mm, 且在6, 7, 8, 9四个测点只有0.2mm以内的隆起量, 在1, 2, 3, 4, 5, 测点且有下沉, 最大下沉量发生在第2测点, 为0.8mm, 这主要是再固结的结果, 当然还有已打入桩的限制作用的影响。

表3 连续打桩时间对最大隆起速率的影响

打桩阶段	Ⅲ	V	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X	XI
连续打桩时间	从第三天到第六天共4天	从第四天到第六天共3天	共6天	共3天	第四天	共3天	从第四天到第七天共4天	从第八天到第九天共2天
打桩速率(根/天)	4.8	5.7	6.3	7.0	6.0	5.7	6.5	6.5
最大隆起速率(mm/d)	1.08	1.00	0.83	0.97	1.15	0.87	1.53	1.65

表3列出了连续打桩时间对最大隆起速率的影响。可见, 尽管打桩速率均在每天6根左右, 如果连续打桩时间在6天以内, 对邻近建筑物的最大隆起速率约在每天1mm左右; 若连续打桩时间超过6天, 则最大隆起速率就要增大, 超过每天1.5mm。由此可知, 除控制打桩速率外, 控制连续打桩时间同样能减小对邻近建筑物的隆起量。

(四) 打钢管桩引起土体的水平位移

图10表示土体的水平位移与已打入桩数的关系。可见远离打桩区的水平位移小, 反之水平位移大, 且迎着打桩方向的土体水平位移更大。另外, 比较测点 B_2 和 A_3 , 虽然它们离桩群形心的距离差不多, B_2 测点的水平位移远远大于 A_3 测点的水平位移, $\angle B_2$ 为 $\angle A_3$ 的四倍, 可见空地的水平位移远大于紧靠建筑物的测点的水平位移。同时, 分析打桩过程的第Ⅷ阶段, 发现除 A_4 , A_5 两测点外, 其他各测点离开打桩区向外的水平位移都有明显的减小, 甚至出现向着打桩区的水平位移, 从打桩流程图可以看到, 已打入桩对土体水平位移也有明显限制的。

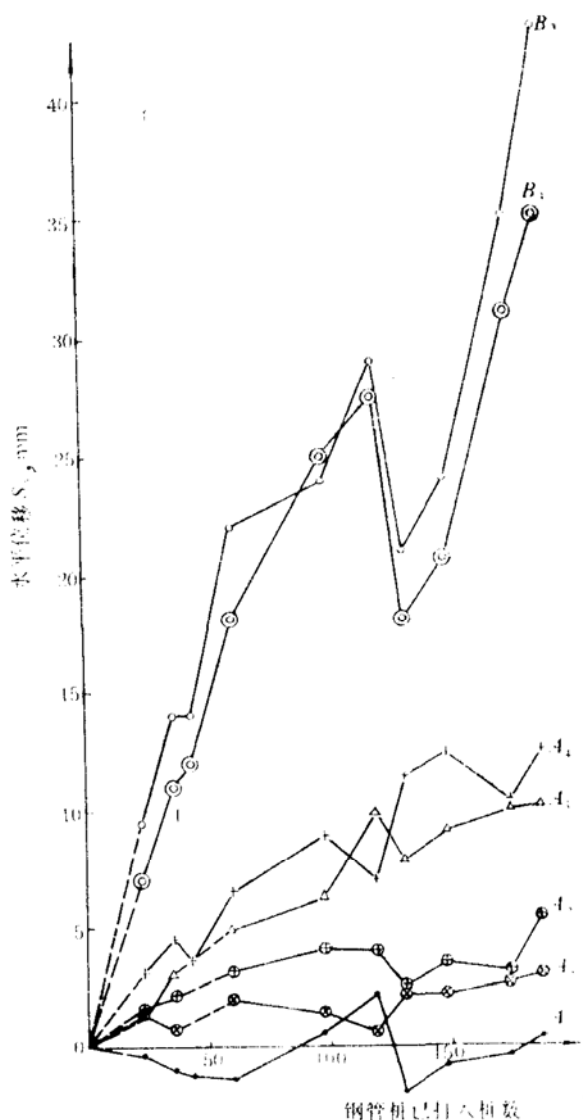


图10 土体水平位移与打入桩数的关系

(五) 实测体积增加的估计

由于空地测点和建筑物上测点向上垂直位移的明显不同, 我们根据各测点的位置和位移量, 把打桩区周围各测点的垂直位移分成三个区域, 估算打桩引起的实测体积的增加, 见表4。根据表4和打桩场地情况, 可粗略绘出如图11的垂直位移剖面图, 进而计算出因向上垂直位移而引起的土体体积增加量 $V_s = 287.23\text{m}^3$ 。

表4 打桩区空地各测点垂直位移的三区域的划分

距建筑物 (m)	测 点 号												平均垂 直位移 $\overline{S}(\text{mm})$	均方差 $S_x(\text{mm})$	测点 数 n
	垂 直 位 移 $S(\text{mm})$														
>6.5	B_1	B_2	E_3	C	D	E_4	D_5						51.4	6.55	7
	44.0	53.3	64.3	49.5	49.7	52.5	46.5								
[3.5,6.5]	D_1	E_1	A_3	A_4									27.4	2.26	4
	30.1	25.4	25.7	28.5											
[0,3.5)	D_2	E_2	D_3	E_3	D_6	E_6	A_2	1	2	3	4	5	14.3	2.79	21
	17.7	18.3	17.6	18.5	16.6	14.1	13.5	13.3	13.5	16.1	13.2	10.9			
	6	7	8	9	15	16	17	18	19						
	14.0	8.8	8.8	13.4	13.0	12.8	14.4	15.5	17.3						

注: E_5 因上面有堆料, 故未统计在>6.5m范围。

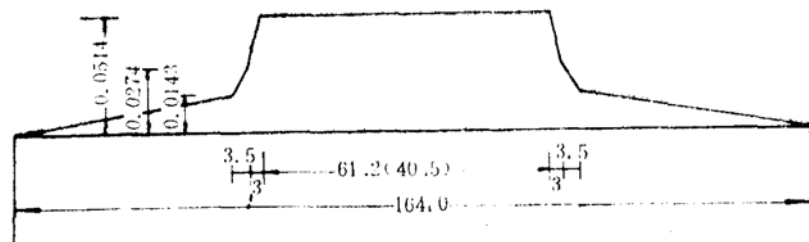


图11 钢管桩打完后, 垂直位移(向上隆起)剖面图

由水平位移来计算体积的增加有两种假定见图12。图12(a)认为桩尖没有水平位移, 图12(b)认为沿桩长水平位移和地面的水平位移相同。从而分别计算出打桩引起的水平位移使土体水平挤出量为 $V_A^a = 72.18\text{m}^3$, $V_A^b = 144.36\text{m}^3$ 。

这样, 打桩引起的总的实测体积增加量为

$$\begin{aligned} V^a &= V_s + V_A^a = 287.23 + 72.18 \\ &= 359.41\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V^b &= V_s + V_A^b = 287.23 + 144.36 \\ &= 431.59\text{m}^3 \end{aligned}$$

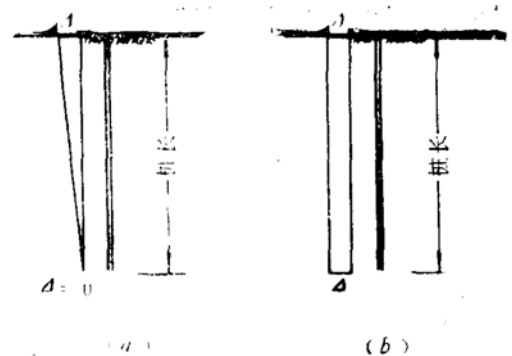


图12 沿桩长水平位移的假定

实测值与预估的最大排土量及平均排土量的比值分别为

$$\frac{V^a}{\bar{V}} = \frac{359.41}{1014.928} = 0.354; \quad \frac{V^a}{V_{\max}} = \frac{359.41}{1021.486} = 0.352$$

$$\frac{V^b}{\bar{V}} = \frac{431.59}{1014.928} = 0.425; \quad \frac{V^b}{V_{\max}} = \frac{431.59}{1021.486} = 0.423$$

实测的体积增加量约为预估的排土量的40%左右,可以推论,在打桩过程中,较大部分土体被挤压密了。

(六)打桩引起建筑物裂缝的分析

在原有裂缝处贴上石膏饼来观察危险建筑物的新老裂缝,若在石膏饼上出现比较严重的结构开裂,则要控制打桩速率甚至停止打桩。仓库及其烟囱、居民楼及老介福大楼的烟囱是这次裂缝观察的重点,在原有裂缝处均贴上石膏饼,并对烟囱作了保护,打桩结束,未见重大裂缝开展。但新裂缝仍在不断出现,特别是仓库西墙第四—第五砖柱间的石条基础梁,在12月3日出现断裂裂缝;在工地北面,南京路另一侧各商店的地下人防工程出现环向裂缝,严重渗水。总的来说,在打桩过程中均没有出现严重影响邻近建筑物结构安全的情况。

裂缝开展虽然在打桩前很难预估,但是,在打桩过程中若不断分析土体和建筑物的垂直位移和水平位移,研究同一房屋同一面墙上的垂直位移差和位移曲线的变化,则有些新裂缝开展的位置和方向仍是可以预估的。以仓库为例。图13表示测点4,5间的垂直位移的差异,可以看到首次出现较大垂直位移差是在12月2日,其值为1mm。结果在12月3日就发现在测点4,5之间,离测点5大约2m的地方,石条基础梁出现断裂裂缝,且裂缝的方向与根据测点4,5画出的挠曲线正交。那么,为什么只有1mm的垂直位移能引起裂缝呢?这主要因为仓库荷载引起的房屋挠曲线与打桩引起的挠曲线曲率一致,即是主拉应力叠加,原来仓库荷载较大,故打桩引起的附加拉应力超过石条的抗拉强度,这时裂缝就在主拉应力较大而梁截面较弱的测点5附近出现。当然,打桩振动也可能是使石条发生断裂的因素。

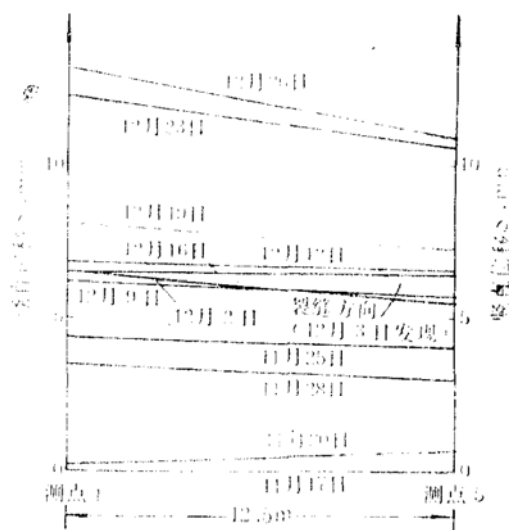


图13 测点4,5间的垂直位移差异图

五、结 语

1.随着打入桩根数的增加,打钢管桩对桩底土体扰动的影响也增大,在打入一定数量的桩后,这种影响趋于减小。

2.打钢管桩时,桩总的入土深度和土塞长度存在线性关系,本文提供的公式可用来预估打桩对土体体积的置换,并可用于该类钢管桩承载力的预估。

3.打钢管桩引起的位移与打桩路线、已打入桩排的限制、打桩速率以及有无建筑物等有关。空地的位移大于建筑物的位移；打入桩排越多，打桩对桩排另一侧的建筑物的垂直位移的影响越小。

4.背着建筑物打桩引起的建筑物上的垂直位移和测点到群桩形心距离成比例，由此可推测有建筑物时，打桩引起土体垂直位移的最远距离。

5.连续打桩超过6天、打桩速率超过6.5根/天的最大隆起量与连续打桩在6天以内、打桩速率在6.5根/天以内的最大隆起量比较，将增加50%。

6.打钢管桩引起的场地土体体积增加的实测值约为土体体积增加的预估值的40%左右。

7.通过裂缝观察可知，打桩对各邻近建筑物的裂缝影响尚未危及建筑物的结构安全，新裂缝的出现可通过分析危险建筑物的位移来预估。

本工程的监测工作及拟建建筑物有关资料的提供得到了华东电业管理局调度大楼筹建处，华东建筑设计院、上海基础工程公司及上海第四建筑工程公司的大力支持，谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] 张叔涵，测量误差理论，中国工业出版社，北京，1965年6月，第439—454页。