

甘肃省建筑科学研究技术資料

甘科(74)—57—5—1

自重湿陷性黄土地区 混凝土灌注桩基础的試驗研究

单桩的垂直与水平荷載試驗

建筑科学研究所
甘肃省第一工程局 第一工程公司
第四工程公司

一九七四年十月

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。

一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

目 录

前 言

一、工程地质概况.....	(1)
二、单桩垂直承载力的试验研究.....	(2)
(一) 垂直荷载试验.....	(2)
(二) 成果分析及讨论.....	(5)
1, 根据 P—S 曲线确定单桩允许承载力.....	(5)
2, 自重湿陷性黄土地区灌注桩垂直承载力的确定.....	(6)
3, 桩周土体浸水饱和后桩的纵向弯曲问题.....	(7)
三、单桩水平承载力的试验研究.....	(8)
(一) 水平荷载试验.....	(8)
(二) 成果分析及讨论.....	(14)
1, 桩周土体浸水饱和后单桩的允许水平承载力.....	(14)
2, 浸水对桩基水平承载力的影响.....	(14)
3, 横向承载力与桩径的关系.....	(14)
4, 应用弹性理论求解桩身内力的可能性.....	(14)
5, 基床系数的选取.....	(15)
四、体会及存在问题.....	(16)
参考资料.....	(18)
附图.....	(18)
附表.....	(19)

前 言

兰州地区处于Ⅱ、Ⅲ级自重湿陷性黄土地带，往往由于设计、施工、使用等各种原因，使建筑（构筑）物在使用过程（甚至在施工过程中），地基局部浸水，产生了基础不均匀沉降而出现严重事故，危害甚大。

近几年我局广大工人和技术人员在生产斗争中，初步摸索使用了穿透湿陷性黄土层的混凝土灌注桩基础，使建筑（构筑）物座落在深处卵石层上，根除了自重湿陷性黄土地基的隐患。

目前，混凝土灌注桩已被应用于民用建筑、单层及多层工业厂房、各种类型的构筑物以及动力设备基础中。据不完全统计，仅兰州地区使用混凝土井桩基础的建筑面积不下于二十万平方米。

随着灌注桩基础的应用，在设计和施工方面均提出了不少的问题。其中一些是灌注桩基础共同存在的，一些则是自重湿陷性黄土地区的灌注桩所特有的。例如：自重湿陷性黄土浸水饱和后，灌注桩横向承载力怎样？桩周土体饱和后在垂直荷载作用下桩的稳定性怎样？灌注桩垂直承载力如何确定等。为了满足生产之急需，寻求适合于自重湿陷性黄土地区地基处理的可靠方法，在批林批孔运动普及、深入、持久开展的大好形势下，在甘肃省一局科研所党委的正确领导下，承省标准设计办公室的大力支持，由一局科研所与一局一公司、四公司共同组成了三结合的灌注桩试验小组。小组成员以毛泽东思想为指针，以批林批孔运动为动力，狠批修正主义科研路线的流毒，在我所筹建过程中，克服了人力不足、材料及测试设备缺少的困难，发扬了自力更生、艰苦奋斗的革命精神，结合具体工程于一九七四年四月至八月进行了浸水与不浸水条件下桩的垂直及水平荷载试验。为交流经验，更好地向兄弟单位学习，我们将这次试验成果整理出来。不妥与错误之处敬请批评指正。

一、工程地质概况

试验场地位于兰州机件配制厂某车间西北，南侧靠近黄河高级阶地前缘脚下，北侧临近大冲沟。地形平坦，向冲沟倾斜。基土属第四纪晚更新世（Q3）黄土和卵石，自上而下可分述为：

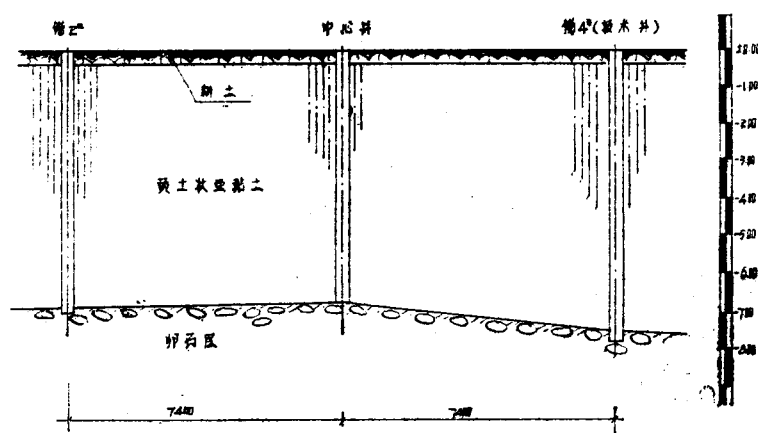
1, 耕土。稍湿, 有较多植物根, 腐植质, 厚度 $0.2^0 \sim 0.5^0$ 米。

2, 黄土状亚粘土。浅黄至褐黄色, 稍湿, 稍密, 可塑, 多大孔隙, 孔径一般为 $0.2^0 \sim 0.6^0$ 毫米, 最大达1.00毫米, 间有虫孔。 2.5^0 米以上多植物根, 间有腐植质, 小碳粒, 偶见贝壳。 2.5^0 米以下, 多丝状钙质结核, 含有缠结仁和完整的蜗牛壳, 夹细砂、小砾石, 呈中密可塑状态, 底部有亚砂土薄层, 具有层理构造。

此层厚度 $6.0^0 \sim 8.4^0$ 米, 向冲沟方向过渡, 土层渐有减薄(见图一)。

3, 卵石。卵石含量占70~80%, 卵石排列紧密呈节点连接, 上部2米左右, 充填物以亚粘土为主, 以下主要由细砾石、砂充填。卵石粒径一般为5—10厘米, 最大达50

图-1 地层剖面图



厘米以上, 成份以花岗岩、石英岩为主。卵石呈杂色, 分选性较差, 磨圆度良好, 稍湿, 中密。此层为桩基的持力层。

黄土的物理力学性质列于附表一。由附表一可知: 该层黄土状亚粘土, 湿陷敏感性, 属Ⅲ级自重湿陷性黄土。 2 公斤/平方厘米压力下的相对湿陷系数为 $0.039 \sim 0.109$, 假定湿陷量 36.1^0 厘米。自重湿陷系数为 $0.007 \sim 0.088$, 自重湿陷量(计算自然地面— 1.50 米以下全部土层) 26.13 厘米。压缩性较高, 压缩系数(a_{1-2})为 $0.014 \sim 0.179$ 平方厘米/公斤。地基强度 1.80 公斤/平方厘米。

二、单桩垂直承载力的试验研究

(一) 垂直荷载试验

我们对四根直径 300 mm的试桩做了垂直荷载试验。其中两根是在桩周土体浸水饱和后进行的。

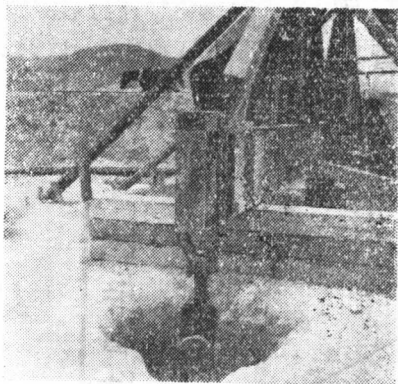
试桩平面布置见图—2, 试桩构造见附图—1。

试验时, 试桩上放千斤顶, 千斤顶上架设钢横梁, 钢横梁的两端通过锚具以锚桩受

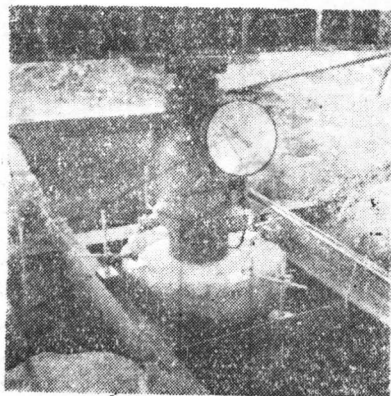
拉主筋锚拉，形成完整的加荷载力系统。锚具见照片—1。

试验采用了50^T手动油压千斤顶压力由油压表控制。

试桩顶部表面设四个测点。试桩沉降变形用百分表量测，量测装置见照片—2。为消除浸水引起地表沉陷等对量测的影响，百分表支架固定在不受试桩沉降和外界影响的钢横梁上。

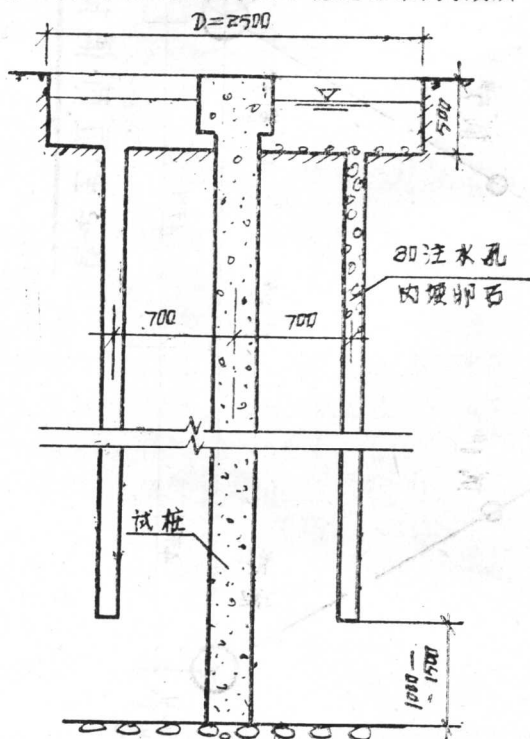


照片—1



照片—2

试验时分级加荷。沉降变形稳定标准为：最后一小时的平均沉降值不大于0.05mm。



图—3

为加快浸水速度、控制浸水方向，试桩浸水前首先开挖浸水坑，然后在坑底部沿桩四周开挖四至六个注水孔。详见图—3。浸水前后土体含水量、饱和度见附表—2。表中浸水后土体含水量是在停止浸水三天后（试验已结束）测定的，故以试验时之含水量相比，表中数值偏低，可认为试验是在土体接近饱和的状态下进行的。

1—4[#] 试桩各级荷载下的沉降量见附表3，各桩的沉降曲线见图—4。

2[#] 试桩由于未座落在卵石层上（据开挖试桩观测，桩底约有5cm厚虚土），反映在P—S曲线上，在垂直荷载15~25^T区段，出现了明显的

陡坡。为了减小虚土对试桩沉降的影响，将25^T之后的P—S曲线向荷载为15^T的曲线对

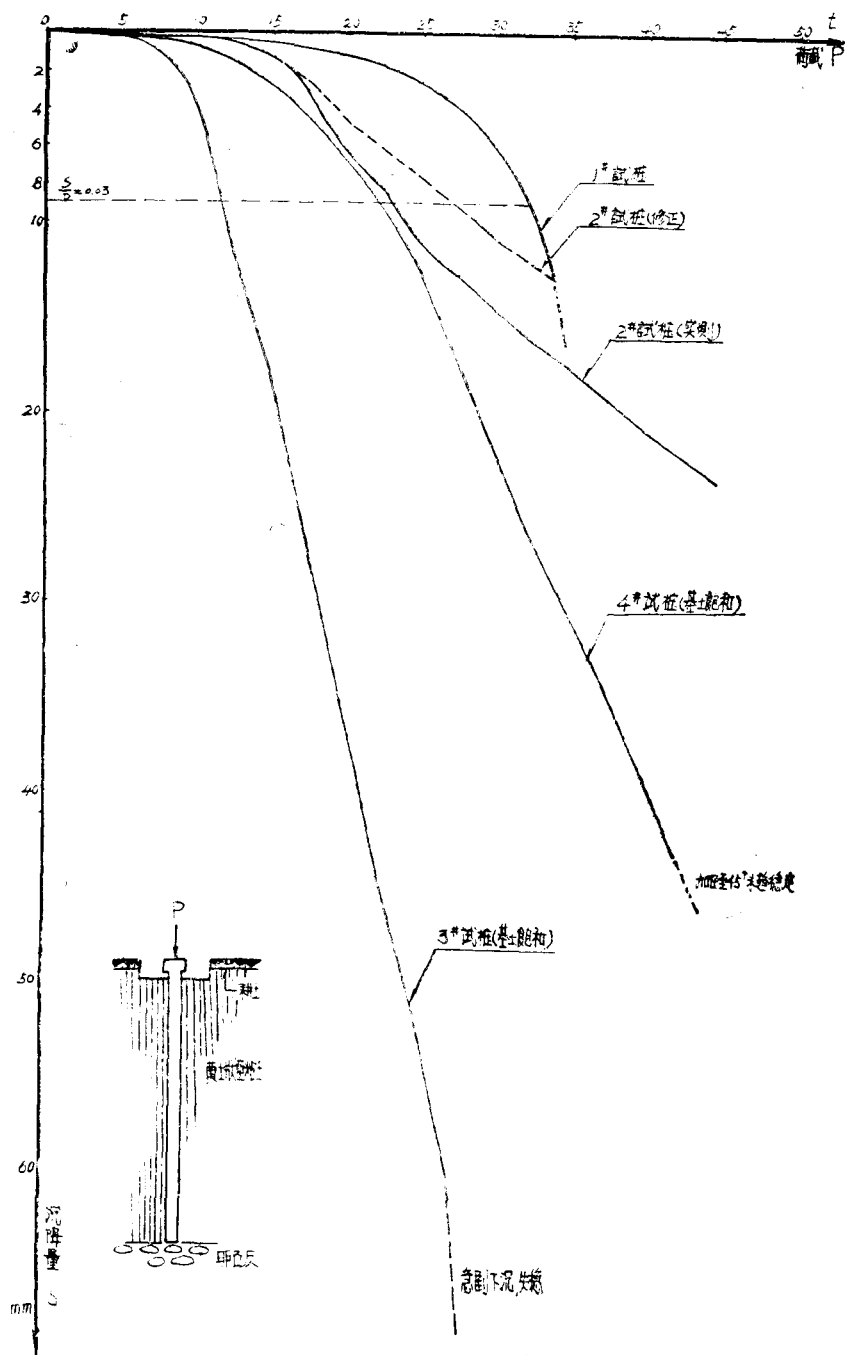


图4 垂直荷载试验 P-S 曲线

应点作了平移（用虚线表示），以后之分析以修正后之曲线为准。

（二）成果分析及讨论

1. 根据 P-S 曲线确定单桩允许承载力

由附表 3 及图—4 可知：除 2* 试桩未达破坏状态外，其他试桩均达破坏状态。所谓破坏状态是以下述情况的出现为标准的：①当桩发生剧烈的或不停滞的下沉时（如桩 3*）。②在某级荷载作用下，桩的沉降量超过前级荷载作用沉降量的五倍时（如桩 1*）。③在某级荷载作用下，二十四小时内桩之沉降未趋稳定时（如桩 4*）。总的看，周围基土处于天然湿度状态的试桩，破坏荷载较高，自 35T 至超过 50T。浸水饱和状态的试桩，破坏荷载较低，自 32.5T 至 45T，显然是由于土体浸水后摩阻力减低之故。

目前，根据 P—S 曲线确定单桩允许承载力的方法很多，但采用方法不同，允许承载力相差较大。本着既保证上部结构物的安全又充分发挥灌注桩承载能力的原则，我们是如下确定的：

试桩 2* 在加荷过程中没有出现破坏荷载，并具有随沉降增大，承载能力继续提高的特点。而过大的沉降将影响上部结构的安全和正常使用。因此，在这种情况下，采用相对沉降 $S/D = 0.03$ 所对应的荷载作为单桩允许承载力。

试桩 1*、3*、4* 在加荷过程中出现了明显的破坏阶段，这时将破坏荷载的前一级荷载（极限荷载）除以 2 的安全系数所得之值与 $S/D = 0.03$ 时所对应之值比较，选取较小者作为单桩允许承载力。

由上，各试桩的单桩允许承载力：试桩 1* 为 15T，试桩 2* 为 27.25T，试桩 3* 为 11.75T，试桩 4* 为 22T。同一场区承载力差别较大是由于试验场区卵石层均一性较差及桩底接触状态不同所造成的。

2. 自重湿陷性黄土地区灌注桩垂直承载力的确定。

目前，国外常用的桩基垂直承载力的计算公式很多，虽然在形式上有所不同，但实质上是相似的。如日本建筑学会公式为：

桩的极限承载力：

$$R_u = 2\pi \gamma \lambda f + A_p g_d \quad (\text{单位: T})$$

$$g_d = \alpha C N_c + \beta \gamma_1 d N_r + \gamma_2 \lambda N_g \quad (T/m^2)$$

式中：

α 、 β ——与桩底形状有关的系数。

N_c 、 N_r 、 N_g ——与桩底土内摩擦角有关的系数。

C ——桩底土的凝聚力 (T/m^2)

γ_1 ——桩底土的容重 (T/m^3)

γ_2 ——桩底以上土的平均容重 (T/m^3)

λ ——桩的入土长度 (M)

A_p ——桩底横截面积 (M^2)

γ 、 d ——桩之半径、直径 (M)

f ——桩壁极限摩阻力 (T/m^2)

分析上式可看出：桩的垂直承载力由桩壁极限摩阻力和桩底反力两部份组成。而桩底反力则由剪切面上的粘聚力提供之反力、桩底剪切时破坏棱体土重所提供的反力、复盖土层施加于剪切面上的正应力所提供的反力三部份所组成。其中复盖土层施加于剪切

面上的正应力是与桩深成正比的，因而桩底部之承载力是随着桩埋深而增大的。

另外，国内外在分析大量试桩资料基础上，针对灌注桩及爆扩桩均提出了不少确定桩基垂直承载力的经验公式，分析这些经验公式也可看出：随着深度的增大，桩基的承载力是提高的。如我国1972年公路（或铁路）桥梁技术规范（讨论稿）中钻孔桩的允许承载力为：

$$[P] = \frac{1}{2} U \sum f_i \lambda_i + m_0 A [\sigma_0 + K_2 \gamma_2 (\lambda - 3)]$$

式中：

U —— 桩身截面周长 (M)

m_0 —— 考虑孔底淤泥影响的桩底支承力折减系数，对挖孔桩取 $m_0 = 1$

A —— 桩底支承面积 (M^2)

σ_0 —— 地基允许承载力 (T/M^2)

γ_2 —— 基底以上土的容重 (T/M^3)

K_2 —— 系数，对卵石取 6

对自重湿陷性黄土地区的灌注桩而言，由于目前仅仅处于开始研究阶段，还不能提出单桩垂直承载力的经验公式，但我们认为：由于桩周土体浸水饱和后正摩阻力值较小，桩的垂直承载力主要取决于桩底部的垂直承载力，且基底垂直承载力随深度加大而提高这点是应该肯定的。

目前在缺乏经验公式的情况下，我们初步认为：设计中可暂按天然地基规范中考虑深度修正的公式，对灌注桩基底垂直承载力进行估算。所得到的数值与实测结果是比较接近的。例如：据此我们这次试验场区的地基承载力可取 $100 \sim 110 T/M^2$ ，而由试桩3*所确定的为 $94 T/M^2$ ，由试桩4*所确定的为 $104 T/M^2$ （没有考虑桩身自重）。

为了能够尽快地建立起适合于自重湿陷性黄土地区灌注桩垂直承载力经验公式，这就要求在一切有条件进行试桩的现场，尤其是在重要的工业与民用建筑或使用桩数较多的现场，进行垂直荷载试验，以便积累资料。需要注意的是：第一、从理论上讲，大直径试桩与小直径试桩比较，地基单位面积承载力可能较高，因而试验中应注意摸索地基承载力与桩径关系的规律。第二、尽可能掌握桩基底部基土的物理力学性能指标。第三、注意研究黄土浸水饱和后正摩阻力的分布规律与具体数值。

3. 桩周土体浸水饱和后，桩的纵向弯曲问题。

当按桩柱本身材料强度确定单桩垂直承载力时，一般将桩视为压杆进行计算，而压杆则存在稳定问题。对埋在土体中的桩而言，尤以湿陷性黄土地区的桩，当桩周土体浸水饱和后要不要考虑纵向弯曲的问题呢？

我们首先从“如果出现丧失稳定的情况，则杆件的变形将发生质的变化，由原来的直线变形（轴向压缩）变为曲线变形（压、弯的联合作用）”这一基本概念出发，在桩的垂直荷载试验中，观测了桩顶对称布置的四个测点的变形发展情况，表一1所列为试桩4*在各级垂直荷载作用下，各测点之累积下沉量。由表可见：一直加荷至破坏荷载，各测点的沉降仍然基本上是均一的，其沉降量之最大差值仅 $1.18mm$ ，而且测点1、4

表—1 4* 桩各测点累积下沉量

荷 载 量 (T)	累 积 下 沉 量 (mm)			
	测 点 1	测 点 2	测 点 3	测 点 4
5.0	0.24	0.18	0.15	0.24
7.5	0.56	0.44	0.40	0.51
10.0	0.89	0.70	0.66	0.81
12.5	1.55	1.29	1.25	1.45
15.0	3.13	2.90	2.71	3.03
17.5	4.79	4.39	4.34	4.70
20.0	6.93	6.37	6.39	6.99
22.5	9.56	8.99	8.89	9.19
25.0	12.87	12.20	12.08	12.91
27.5	17.57	16.97	16.66	17.57
32.5	27.00	26.51	25.76	26.91
37.5	34.90	34.33	34.39	34.70
42.5	44.34	43.21	43.24	43.67
45..	47.82	46.64	46.64	47.14

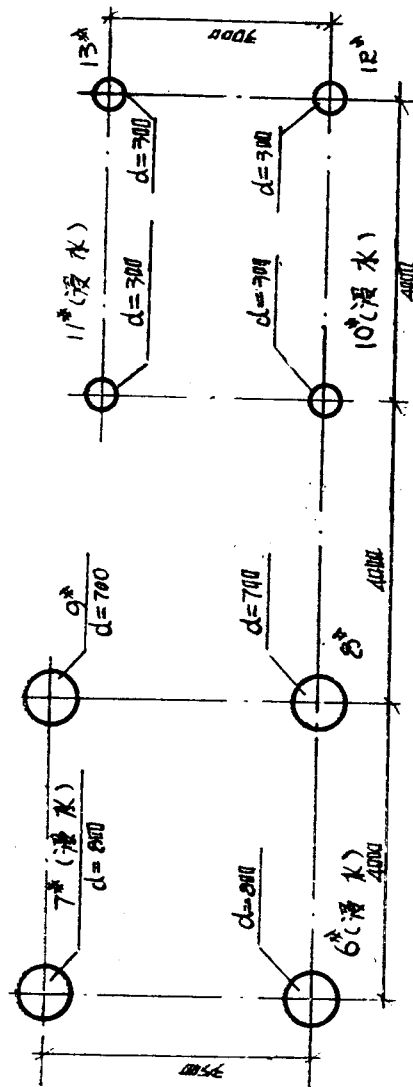
与测点 2、3 间之差值从开始加荷就存在,这可能是由于初始偏心、地基不均一等因素的影响。另外,试验结束后开挖桩身观测表明:桩垂直度基本保证,桩身无裂缝、弯曲等情况。再参考水平荷载试验中,桩周土体浸水饱和后,横向承载力较高的事实,可以认为:自重湿陷性黄土在浸水饱和后对桩的约束作用还是较大的。在地基承载力所允许的荷载范围内,当 $Q/D \leq 28.3$ (试桩 4*) 时,对不扩底的灌柱桩言之,可不考虑垂直荷载作用下的纵向弯曲问题。

三、单桩水平承载力的试验研究

(一) 水平荷载试验

我们对两根直径 700mm、两根直径 300mm 的混凝土桩做了未浸水条件下的水平荷载试验。对两根直径 800mm、两根直径 300mm 的桩在桩周土体浸水饱和后进行了试验。试桩平面布置见图—5。

2



注: 1. 桩 300[#] 为保证试桩本身强度, 桩身

配置一定数量的钢筋。

2. 桩深见水平荷载位移关系曲线

3. 桩座落在卵石层上。

竖-5 水平荷载试桩平面布置

试验时在两根试桩间放置千斤顶加荷设备（水平压力用油压表控制），两桩互做为支座同时进行测试。具布置见图—6及照片—3。

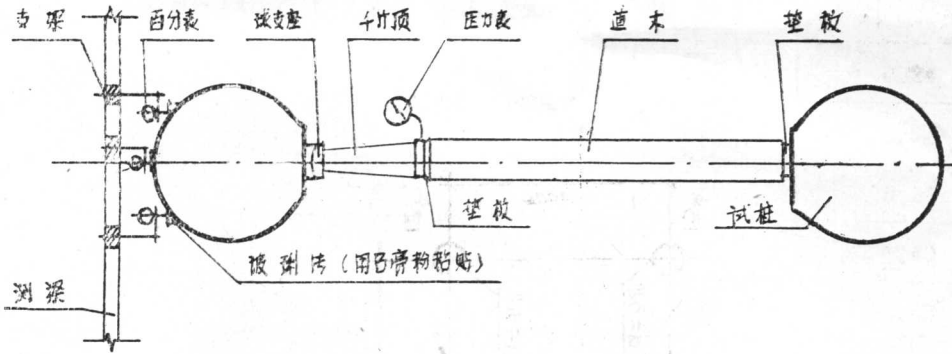


图-6 水平荷载试验装置



照片—3

试桩受力的一侧在试桩成型时局部浇捣成平面，以避免力的作用方向偏斜及混凝土因局部受压而破坏。

试验过程中桩的水平位移由直接顶在玻璃片上的百分表量测。为了消除由于着力点的偏心引起桩顶变形的误差，直径700mm及800mm试桩布置了三个测点，桩的水平位移采用加权平均值，300mm试桩对称布置了两个测点，桩的水平位移采用算术平均值。为了消除土壤变形使百分表架移动，安设表架的钢梁应固定在离桩较远的地方。

由于结构物基础所承受的横向荷载（主要是风力、吊车制动力等）往往是瞬时而反复出现的，所以试验中采用了循环加荷法。具体做法是：每次加荷等级为估算最大试验荷载的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{15}$ ，每级横向荷载施加后保持十分钟测读桩顶横向位移值，随即卸去所施加的该横向荷载，等十分钟测读桩顶横向位移回弹值，如此循环五次，即完成这级横向荷载的试验。然后接着施加下级荷载，直至估算的最大试验荷载为止。需指出的是：不同的荷载分级、每级荷载的反复次数以及每次测读的时间间隔等对水平承载力的最终数值都有一定影响，我们选用了通常的做法，以使所得到的结果具有比较的意义。

浸水试桩的浸水方法以及浸水后含水量及饱和度与垂直荷载试验试桩相同。

水平承载力试验结果可绘成水平荷载与位移关系曲线，见图7—10。

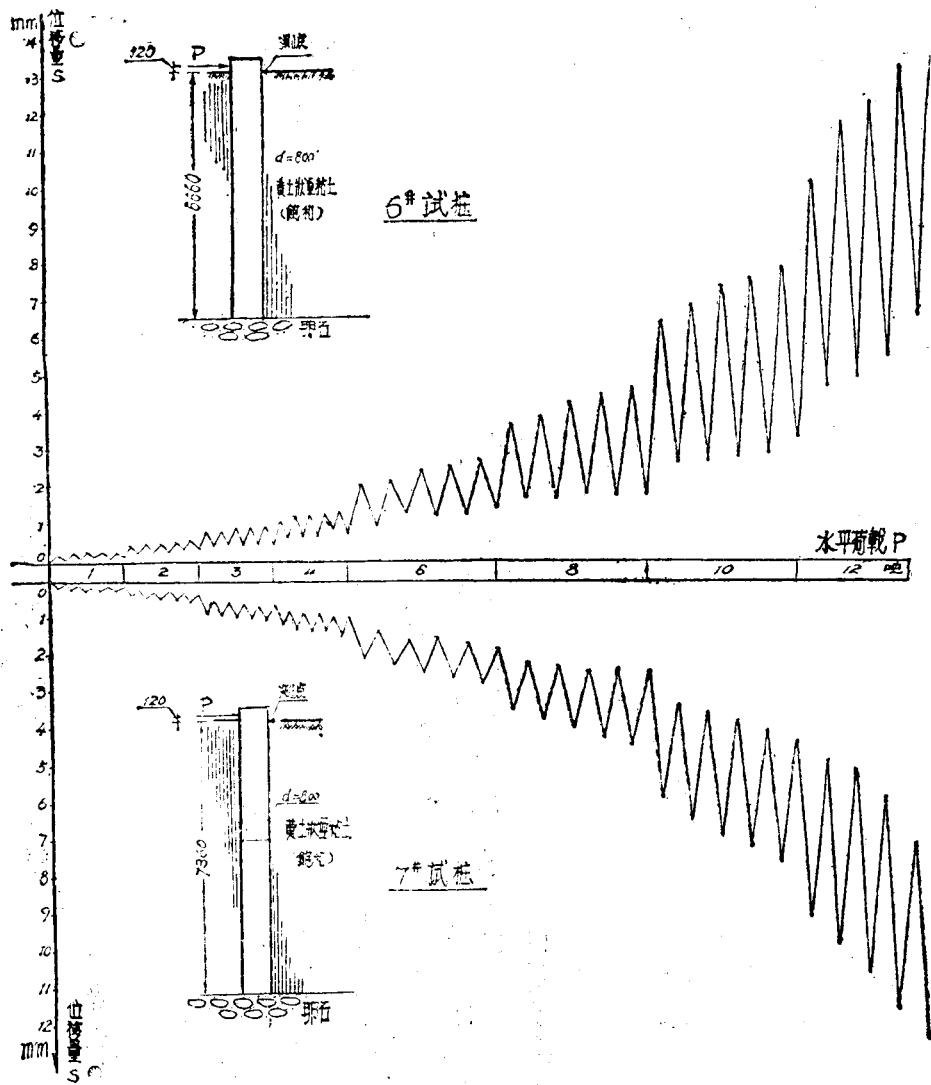


图-7 6#、7# 试桩水平荷载和位移曲线 (饱和土状态)

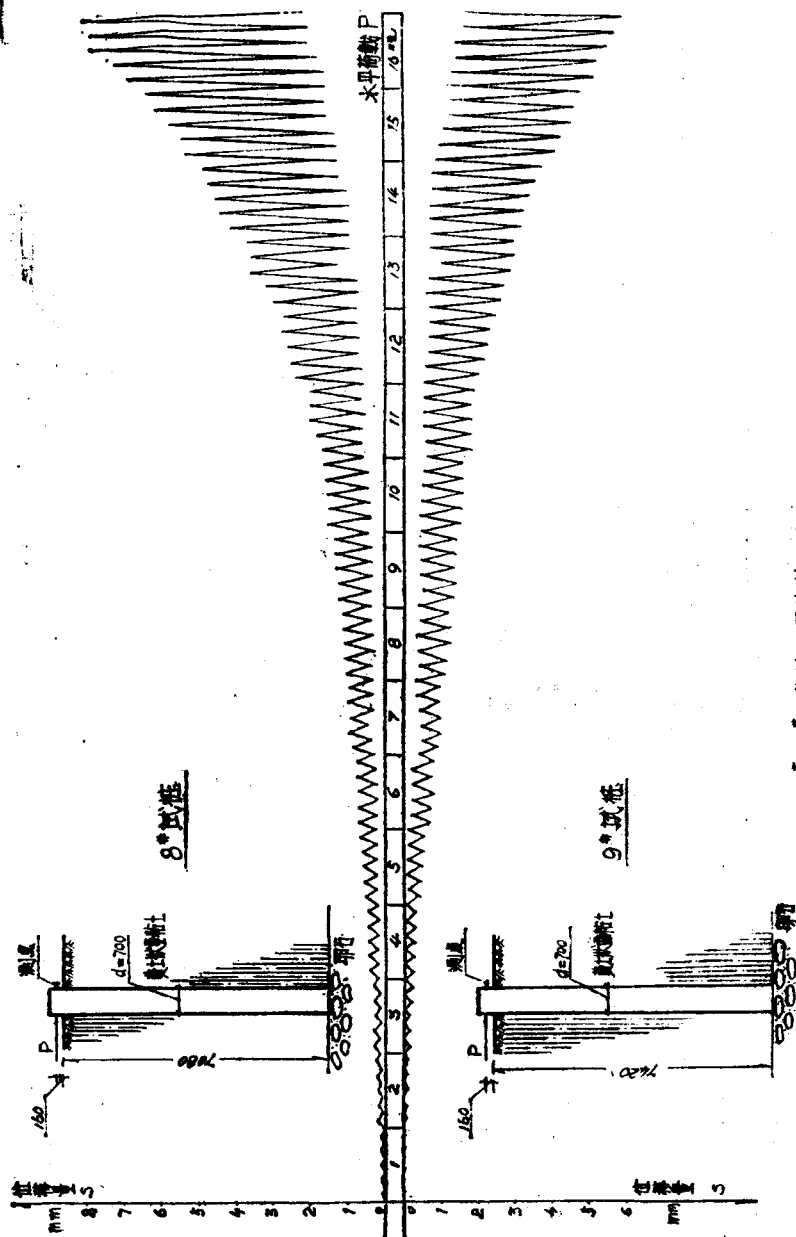


图 8、9 试桩水平荷载与位移曲线

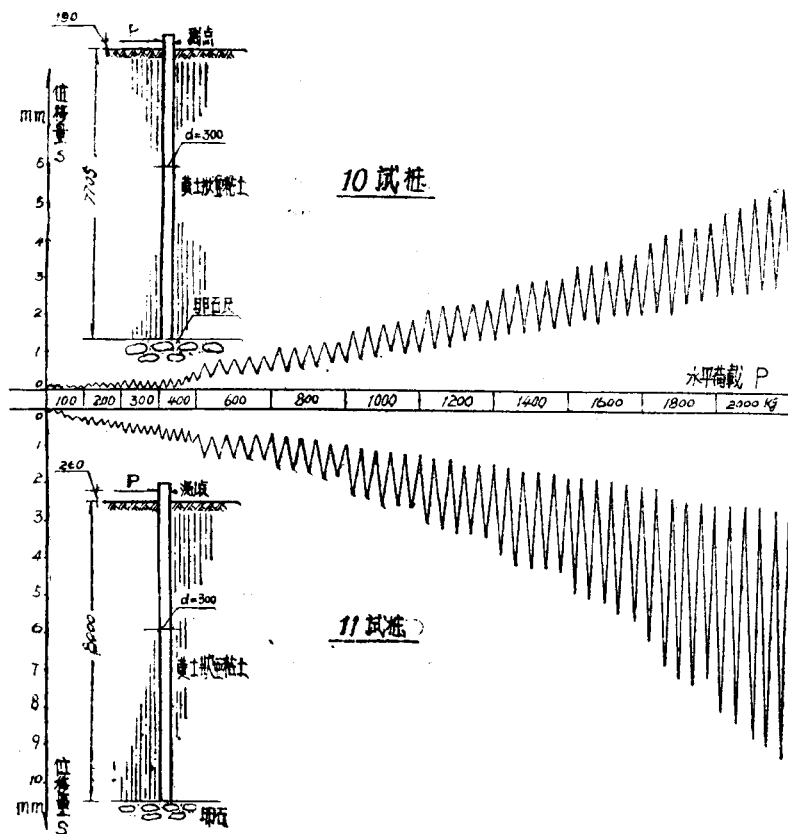


图-9 10[#] 11[#] 试桩水平荷载和位移曲线(同时:徐有达)

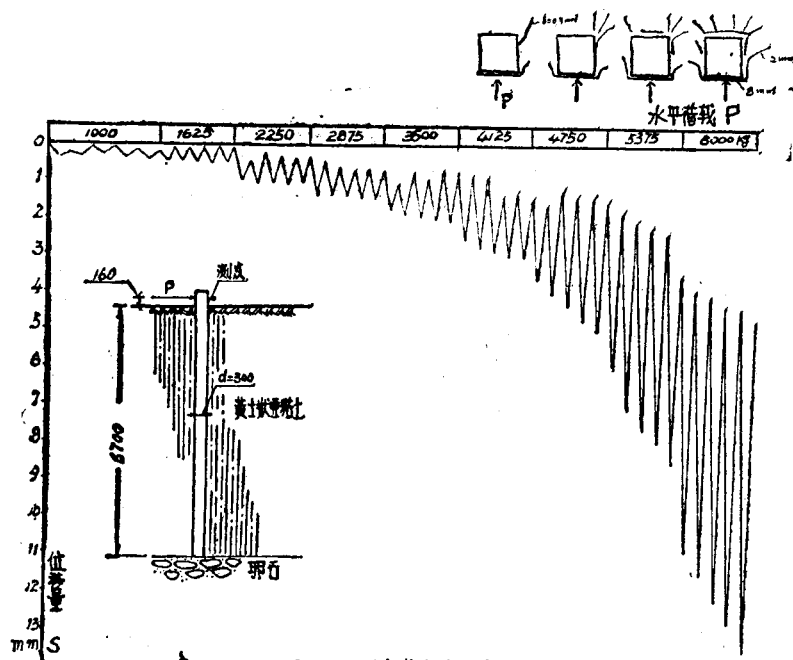


图-10 13[#] 试桩水平荷载试验和位移曲线

(二) 成果分析及讨论:

1. 桩周土体浸水饱和后单桩的允许水平承载力:

桩的允许水平承载力一般根据桩的允许水平位移值确定,即在水平荷载与位移关系曲线上取结构物允许水平位移值所对应的荷载为允许水平承载力。如试验中出现极限横向荷载时(所谓极限横向荷载即在该级荷载作用下,其五个横向位移值绘在荷载位移曲线上的连线呈向下弯曲状),将极限横向荷载除以安全系数即为允许承载力。据此,若桩顶的允许水平位移值取10mm(如结构物对水平位移另有要求应另行考虑),分析图一7、图一9可知:6*、7*桩(直径800mm)允许水平承载力可取为 10^T ,10*、11*桩(直径300mm)可取为 2^T 。由于试验条件所限,以上试验未能加荷至极限横向荷载,如以试验终止的下一级荷载作为极限荷载,即6*、7*及10*、11*试桩的极限横向荷载分别为 14^T 及 2.2^T ,将其除以1.5的安全系数,这样6*、7*及10*、11*试桩的允许水平承载力仍可取到 9.33^T 及 1.46^T 。不难看出那种认为自重湿陷性黄土浸水饱和后,桩在横向力作用下会失去整体稳定,产生突然破坏的看法是缺乏实践根据的。

需要说明的是:这次浸水的水平荷载试验是在周围土体接近饱和,湿陷基本完成后进行的,可能与土体湿陷过程中的承载力还有一定的区别。

2. 浸水对桩基水平承载力的影响:

自重湿陷性黄土在浸水过程中,由于颗粒接触点间盐类溶解,颗粒周围水膜增厚以及水对颗粒的润滑作用,破坏了黄土的大孔结构,引起了土体抗剪强度显著降低,浸水饱和后的横向承载力约为天然状态下横向承载力的一半左右(见图7~10)。

以桩基土体浸水达到饱和作为设计出发点,虽然导致灌注桩直径的加大,混凝土标号的提高以及配筋的增多,但考虑到在自重湿陷性黄土地区采用灌注桩的主要目的是为了消除建筑(构筑)物的湿陷事故,所以一般的讲应该以桩周土体浸水达到饱和做为设计出发点。但对某些为了提高地基垂直承载力,而浸水可能性又较小的建筑(构筑)物而言,采用灌注桩基础时可不考虑浸水对桩基横向承载力的影响。

3. 横向承载力与桩径的关系:

比较图一7与图一9可以看出:800mm桩的水平承载力约为300mm桩的五倍左右,但其直径比为2.67,面积比为7.11,刚度比为50.57。由此可见横向承载力与桩径的关系是比较复杂的。有待进一步研究。

4. 应用弹性理论求解桩身内力的可能性:

在横向荷载(水平力和弯矩)作用下如何求解桩身内力,这是灌注桩应用过程中必须首先解决的问题,由于问题的复杂性导致人们采用了各种方法。有人认为桩的刚度与周围土体相比可视为无穷大,所以在横向荷载作用下可不考虑桩本身的变形,桩只是围绕地面以下某个点在转动。很清楚,这种假定仅当灌注桩短而粗时,才与实际接近。有人认为桩在某一深度处土对桩形成嵌固,仅在确定嵌固深度时考虑周围土体的作用,而在进行力的分析时不考虑周围土体的作用,视桩如悬臂梁或两端固定的梁来计算。这种将桩与土体共同工作的整体人为割裂的作法在理论上是有缺陷的,并为许多实验表明与实际有较大的出入。