

全部荷载一次施加地基沉降特征分析

陈学道

(煤炭工业部合肥煤矿设计研究院)

一、前言

作用于地基上的荷载通常是随建筑物的施工进度而逐渐增加的,因而地基变形的相当一部分已在施工过程中完成。施工过程中的地基变形特征及变形量大小除与土壤性质、荷载形态、基础型式、上部结构刚度、施工方法等有关外,基本上与各个加荷阶段的加荷速率有对应关系。已往地基基础方面的试验研究和设计方法,大都建立在工程数据实测和分级加荷模拟试验的基础上,加荷速率均较缓慢。国内外虽有在地基上堆料预压和充水预压加荷速度相对稍快的经验和地基沉降实测^[1~3],但多属于软土地基,并且经历加载和卸载所引起的压缩一回弹一再压缩的多层次变形过程,不能得出地基持续压缩变形规律。对于饱水粘性土地基在全部荷载一次施加后的变形发展过程更少实例经验,也缺研究资料,这是地基基础工程中有待填补的空白。

本文介绍一座采用预建整移施工的高层工业建筑地基沉降实测成果,分析了第四纪饱水粘性土地基的变形历时特征,提出几点意见,供加载期较短或一次满载情况下的高、重建(构)筑物地基基础设计时参考。本文所提供的实测数据尚属首例,对今后进行地基基础工程有关课题研究,也会有所裨益。

二、地基条件及工程特征

(一)地基条件

整个场地为第四纪冲积、洪积相沉积层,复盖厚度 256.3m。潜水位距地表 1m 左右。土层水平方向埋藏稳定。沿纵深方向层次变化比较频繁,常出现互层和薄夹层。地基受力层由粘土、亚粘土、轻亚粘土及薄层粉细砂组成,基本属粘性土。场地基本地震烈度为 7 度。各层土壤性质及主要试验参数列于表 1。

表1 各层土壤性质及主要试验参数

土层	土壤名称	土层描述	土层厚度 (m)	层底深度 (m)	主要物理力学指标					标准贯入击数		静力触探	
					w (%)	γ (g/cm ³)	e	I_P	I_L	a_{1-2} (cm ² /kg)	E_s (kg/cm ²)	深度 (m)	平均击数 (N63.5)
1	杂填土		2.10	2.10									
2	亚粘土	灰褐、可塑	1.65	3.75	24.7	1.95	0.742	15	0.28	0.046	37	3.65~3.70	13.4
3	亚粘土夹砂礓	砂礓含量20% 粒径2~15cm	1.05	4.80	24.0	1.96	0.721	14	0.29	0.033	50	4.65~4.80	21.0
4	粘土	可塑	1.10	5.90	26.9	1.98	0.754	20	0.29	0.024	62	5.70	14.8
5	轻亚粘土	稍有粘性	1.25	7.15	24.3	1.96	0.711	6	0.53	0.021	84	7.10	45.3
6	粘土	硬塑	2.25	9.40	24.2	1.98	0.735	20	0.25	0.021	95		
6 _a	轻亚粘土	饱和、软塑	1.00	10.40	27.6	1.94	0.783	9	0.96	0.012	125	9~10	67.8
7	粘土	可塑	0.65	11.05	27.8	1.99	0.760		0.41	0.031	57	11.1	18.0
8	轻亚粘土	饱和、流动	2.45	13.50	26.4	1.98	0.734	8	0.93	0.016	90	11~12	62.3
8 _a	粉砂	流塑、饱和中密	3.25	16.75	24.7	2.02	0.679			0.015	110	12~13 13~14 15~16	11.6 16.7 30.7
8	轻亚粘土	具粘性	0.55	17.30	26.4	1.96	0.734	8	0.93	0.016	90	16~17	9.7
9	亚粘土	可塑	2.50	19.80	24.7	2.00	0.689	12	0.41	0.026	48		
10	粘土	硬塑	2.00	21.80	23.9	2.01	0.685	18	0.15	0.028	59		
11	亚粘土	含少量结核	0.95	22.75	23.9	2.01	0.685		0.15	0.023	59		
12	轻亚粘土	可塑、饱和	1.50	24.25	24.6	2.01	0.656	8	0.71	0.023	70	22~24	18
13	粘土	硬塑	1.65	25.90	25.0	2.02	0.696	19	0.21	0.015	112		
14	轻亚粘土	具粘性	1.40	27.30	26.4	1.94	0.758	9	0.82	0.024	72		
15	粘土	灰褐、硬塑	0.75	28.05	25.0	2.02	0.696	19	0.21	0.015	112		
16 _a	轻亚粘土夹薄层粘土	软塑、中密	7.95	36.00	25.1	1.97	0.706	7	0.83	0.016	105		

注: ①表中各项参数均按文献(4)规定及有关计温单位得出; ②按SI单位换算关系如下: 1 kg/cm² = 9.81 × 10 kPa, 1 g/cm³ = 9.81 kN/m³.

(二) 工程特征

作为荷载一次施加于地基上的建筑物为一座钢筋混凝土剪力墙筒体结构, 高度63.1m, 平面尺寸 12.2×16.2 m。各个楼层上安装有多台振动能量较大的设备。先在设计位置以外的台座上建造成功, 再用多台液压设备将建筑物由台座上顶起并整体推移到基础上就位。基础为钢筋混凝土梁板式筏, 外包尺寸 22×26 m, 四角局部切除。基底埋于设计地面(表1中杂填土层顶面标高)下3.6m即原地面以下1.9m左右(原地面相当于杂填土层顶面以下1.7m处)。四周基础梁下打入93根长8.5m、截面 0.35×0.35 m的钢筋混凝土预制桩, 用于增强抗震稳定兼控制差异沉降, 基础的平、剖面见图1。

建筑物就位前的两个月作完基础工程。基础及复土作用于地基上的总压力为54.9kPa, 附加压力为17.7kPa。建筑物整体移动速度为4.6m/h, 自进入基础边缘起到完全就位止共经历4.5小时。整移时建筑物的重量为4043t(39648.3kN)。建筑物及基础作用于地基上的总压力为136.3kPa, 附加压力为99.0kPa。基础与上部结构之间用型钢、钢板搭焊并充填细石混凝土。建筑物就位后两个月以内, 由于室内填土及安装设备等, 使作用到地基上的附加压力增大34.3kPa。作用到地基上的总附加压力为133.4kPa。

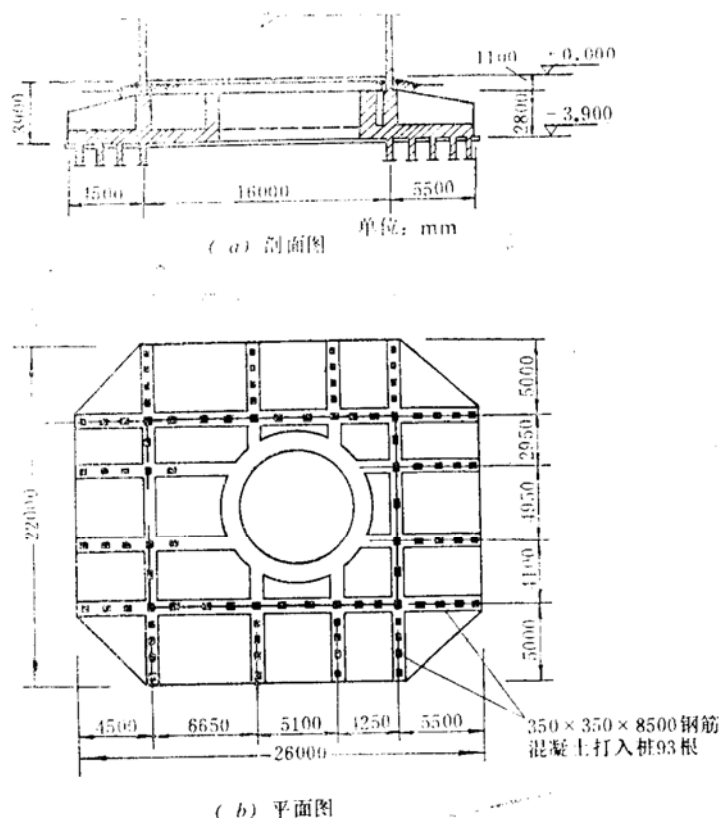


图1 基础平面剖面图

三、沉降实测数据整理

沉降观测点埋设于建筑物四角的墙壁及基础梁上。用S₁级精密水准仪按国家二等水准测

量要求进行观测。建筑物就位后的前6天每天观测1次；第7天至第19天，每3天观测1次；第20天至96天，每10天左右观测1次，此后每次观测间隔时间由半个月逐渐延长到3个月。观测天数689天，观测38次，共获得观测数据264个。

建筑物移入设计位置前，由于基础及复土的重量作用，地基下沉2 mm。从建筑物进入基础边缘到就位，地基又下沉2.48 mm(平均值)。最后1次测得的沉降量平均值为15.35 mm，倾斜率为0.046%。根据观测数据绘制的沉降与时间关系曲线见图2，沉降速率与时间关系曲线见图3，基础倾斜与时间关系曲线见图4。

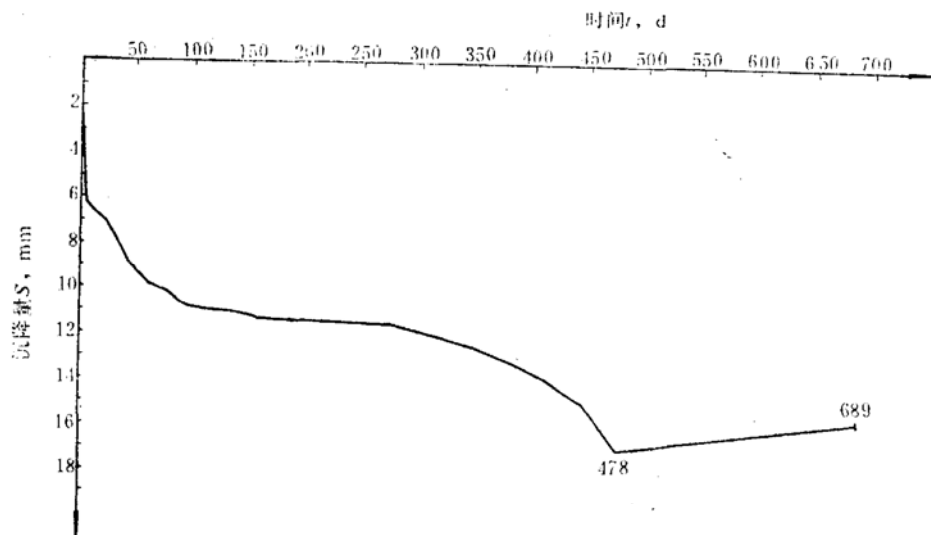


图2 沉降与时间关系曲线

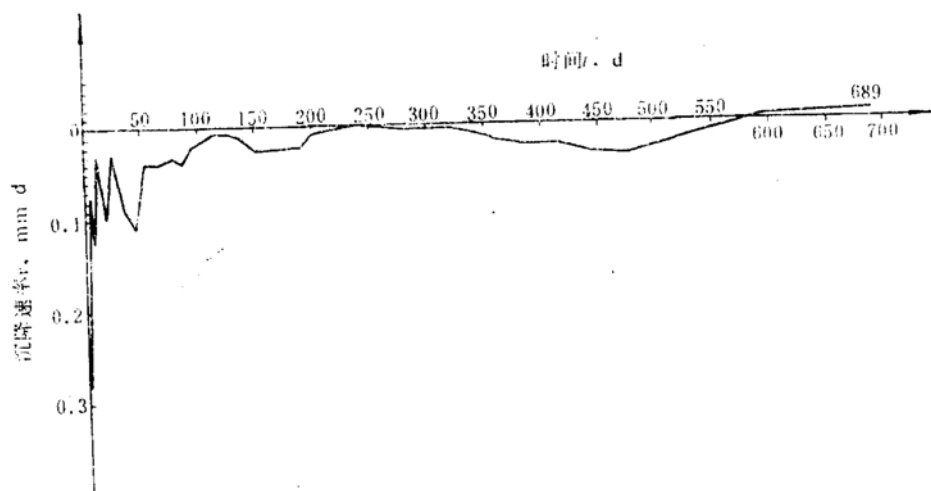


图3 沉降速率与时间关系曲线

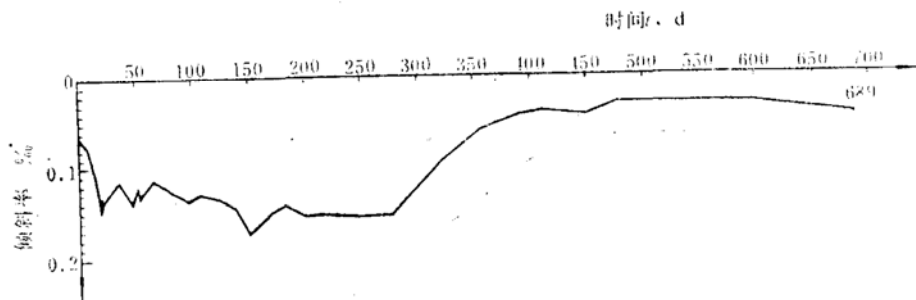


图4 基础倾斜与时间关系曲线

四、分析意见

(一)不同加荷速率对地基沉降的影响

一般就地施工的建筑物,作用于地基上的荷载是随施工进度而逐渐增加的,外载首先由水和土的骨架共同承受。由于加荷速度相当缓慢,土壤中孔隙水及孔隙水压力有较为充分的排出和消散时间,地基沉降便随荷载的缓慢增加而逐渐进行。沉降速率及沉降量大小主要取决于土壤的渗透固结能力。在全部荷载施加后还要延续一段时间才能完成全部沉降,延续时间的长短与土壤性质密切相关,往往相差十分悬殊。对于软土地基或饱水粘性土地基,如果加荷速率过大,由于地基侧向变形增大而使地基沉降量也随之增大,甚至出现严重的倾斜^[1,5,6]。我国设计规范^[4]认为,对于中压缩性粘性土地基在施工期间已完成最终沉降量的30~50%,对于高压压缩性粘性土地基在施工期间只完成最终沉降量的10~30%,完成最终沉降要经历几年或几十年时间。

本文介绍的工程实例(以下简称“本例”)在许多方面都与上述研究结论有不同程度差异。本例基底以下全部受压层深度内除距基底9.7m(基底标高相当于表1中杂填土层顶面以下3.6m)以下有一层厚度为3.25m的粉砂外,其余均属粘性土,只是塑性指数有所变化。如果以689天观测值中的最大值作为最终沉降量,则到达最终沉降的时间仅为478天(即加荷后16个月左右),此时沉降量的平均值也仅16.85mm。

建筑物从移进基础到就位的4.5小时内,地基平均下沉了2.48mm,为最终沉降量的15%。就位后的第7天沉降速率由0.87mm/d^①降到0.05mm/d,到达了通常以0.1mm/d作为界限的地基沉降基本稳定阶段,经历的天数很少,只占完成最终沉降量所经历天数的1.5%。但此时平均累计下沉量为6.4mm,占最终沉降量的38%,亦即还有很大比例的沉降量需要在基本稳定后的相对很长时间内继续完成。加荷后的第8天至第96天之间,沉降速率为0.02~0.08mm/d,随后沉降速率稍有降低,直到第478天发生最大沉降量之后,地基不再下沉并出现微量浮沉现象。第689天的平均累计沉降量减为15.35mm,相当于第478天最大沉降量的91%。这种地基沉降后期阶段出现微量浮沉现象,在同地区高、重建(构)筑物地基中也有例证,可能是饱和粘性土中孔隙水压力变化所引起的。

地基倾斜变形在前期就形成了相对固定值,在0.07~0.17‰之间变化,后期有所减小,降为0.04~0.05‰。

一般就地施工的建筑物地基经过施工阶段的缓慢加荷压缩再经过或长或短时间到达基本稳定阶段后,沉降速率将显著降低,而且此后所完成的沉降量也远远小于基本稳定时所完成的沉降量。例如,在与本工程地区土层条件类似的附近地基上,采用片筏基础的一些建(构)筑物,建成后约需2~4年方能达到沉降基本稳定阶段,累计沉降量为41.5~105mm。此后沉降速率很低,再经过两年左右的时间,只继续下沉2~7mm,约占总沉降量的4.6~7.1%。有一座钢筋混凝土圆筒仓采用了环形承台、长7m的钢筋混凝土预制打入桩基础,建成后约一年时间,基础下沉30.8mm,沉降差25.8mm,倾斜率为1.84‰,到达基本稳定阶段为1年半左右。这些情况与本文介绍的实例有较大差别。

从本例的沉降与时间关系曲线(图2)分析,虽然前期曲线非常陡直,但很难划分地基的弹

①计量单位中的小写正体英文字母d为“天”。

性变形和塑性变形阶段,也难鉴别主固结和次固结的界限。从后期出现的基础微量上浮现象判断,不会在受压层的全部深度内出现次固结过程,即土壤中的孔隙水仍然承受了一定的压力。上述分析表明,加荷速率特别是一次满载对地基变形发展过程有明显影响。

(二)辅助桩的参与作用

预制打入桩对土壤有挤密作用,能减小地基沉降。本例基础用桩量很少,设计时仅作为增强抗震稳定及约束差异沉降之用,没有计入桩的承载能力。桩尖伸入基底以下8.4m,落入8a层粉细砂层以上的8层轻亚粘土中(对应于表1累计深度12m左右)。桩的行与行之间距离为4.1~6.65m,同一行中桩距1.1~1.4m($3 \sim 4d$, d 为桩的边长),桩的长径比 $L/d = 24$,桩的横截面总面积与片筏基础底板面积之比为 $11.39/487.9 = 0.023$ 。沉桩用34.3kN柴油锤,落距2.2m,桩顶送入土中3m左右(为便于桩的贯入,打桩前将表1所列杂填土层上部厚约0.6m夹有块状硬物的部分挖去)。单桩沉桩总锤击数在82~619击之间,约半数以上桩的总锤击数少于300击。最后10击贯入度在3~45cm之间,半数以上桩的最后10击贯入度大于10cm。打桩参数波动范围较大的原因,除与沉桩先后顺序即相邻桩挤密效应有关之外,也与饱水粘性土地基性质变异有关。从多数桩的沉桩总锤击数及最后10击贯入度与当地类似条件的试桩资料比较来看,本例单桩承载力不高,各桩承载力总和与片筏承载力相比所占分量较小。但从地基沉降的全部过程分析,全部荷载一次作用后,桩的参与作用性能仍较明显。建筑物到达稳定沉降以后,沉降发展比较平缓,总沉降量很小,基础倾斜始终维持在微小的幅度内变化,与同一地区采用整体基础的类似建筑物相比,情况有显著改善。根据沉降过程及变形发展情况分析,加荷后一个短时期,相当一部分荷载作用于桩上,当沉降量增大后,土壤受到筏板的压密,加大了筏板与地基土壤之间的接触压力,桩上的荷载很大部分转由筏板下的土壤承担。桩筏协同作用的结果,使最终沉降量及倾斜减小,能在相对较短的期间内完成最终沉降。

关于桩筏的共同作用是个十分复杂的,这是当前地基基础工程研究中一个重要的课题,仅凭本文提供的数据进行判断,当然还远嫌不足。

(三)实测沉降与计算沉降的比较

许多文献都论及基础型式和基础复盖面积大小对地基变形有所影响。关于地基变形的计算,有的文献将宽度为10m及10m以上的基础称为大基础^[7],认为荷载增加对地基压缩层深度影响不大,而基础宽度的变化是影响地基压缩层深度的主要因素,亦即地基变形主要与基础宽度有关。按照文献[7]计算,本例地基压缩层深度为21m。取文献[7]建议的有关系数用分层总和法计算所得的沉降量为166mm;按土层初始条件下的孔隙比和相应附加压力下孔隙比的各土层厚度改变算得的沉降量为134mm,这些都与实测值相差过大。应作说明的是,由于目前尚无类似本例疏桩大筏基础的实用沉降计算方法,上述两种沉降量的计算都没有考虑93根预制桩的参与作用,这与实际情况当然有一定出入。尽管如此,仍然可以说明现有的地基变形计算方法并不能与全部荷载一次施加后的地基变形性状吻合。

五、结 语

全部荷载一次施加后地基变形特征与一般逐渐加载的地基变形特征有显著不同。全部荷

载一次施加后, 初期沉降速率极大, 经历不长时间就到达基本稳定, 此时实际沉降量仅占最终沉降量的很小部分, 随后还要经历相对较长的时间才能完成最终沉降。本例基本上为粘性土地基, 完成最终沉降虽用了16个月, 仍比一般逐渐加载情况下位于粘性土地基上的采用桩、筏基础建筑物完成最终沉降所需时间大大缩短, 地基的倾斜变形幅度也较小。

根据文献[7]建议的方法以及按照土壤孔隙比受压改变两种情况并忽略辅助桩的参与作用所算得的地基沉降值与实测值相比, 相差竟达8~10倍。这除了与土壤性质、基础型式、辅助桩参与作用等因素有关之外, 主要反映了一次满载对地基变形性状的显著影响。由于实际工程仅此一例, 且缺少类比资料, 因而还不能作为建立变形计算理论或经验公式依据。本文所提供的沉降实测数据和特征分析, 可供进一步研究此类工程地基课题时参考借鉴。

参 考 文 献

- [1] 申耀和英, 软土地基处理, 张文全译, 人民交通出版社, 1982年。
- [2] Aris C. Stamatopoulos and Panagiotis C. Kotzias, Settlement-Time Predictions in Preloading, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 6.
- [3] 斯科特, C. R. 土力学及地基工程, 钱家欢等译, 水利电力出版社, 1983年。
- [4] 工业与民用建筑地基基础设计规范, TJ7-74(试行), 中国建筑工业出版社, 1974年。
- [5] 马达成、陈坚峰, 深埋箱形基础的地基变形问题, *岩土工程学报*, 创刊号, 1979。
- [6] Hans F. Winterkorn, Hsai-Yang Fang, *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
- [7] 何颀华、季婉如, 大基础地基压缩层深度计算方法的研究, *建筑结构学报*, 1984年第1期。