

同一建筑刚性桩与柔性桩沉降差过大事故处理

张乾青^{1,2}, 张忠苗^{1,2*}, 叶强³

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058;
3. 温州市建筑设计研究院, 浙江 温州 325003)

摘要:以同一建筑刚性桩与柔性桩沉降差过大的事故为例,详细分析了单层粮库刚柔两种桩基础沉降差过大的原因,并提出了具体加固方案。分析表明,对位于淤泥层较厚场地的单层粮库来说,不能采用刚性桩位于较好持力层而柔性桩位于淤泥层的设计方法。对于同一建筑刚性桩与柔性桩基础沉降差过大的事故,可采用钻孔灌注桩加梁板筏式基础的加固方案。这种加固方案可显著减小粮库地面沉降和粮库主体结构部分与粮库地面沉降差。

关键词:刚性桩; 柔性桩; 沉降差; 加固

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0373-06

作者简介:张乾青(1983-),男,山东济宁人,博士研究生,主要从事桩基础的研究工作。E-mail: zjuzqq@163.com。

Accident treatment of large differential settlement between rigid and flexible piles in the same building

ZHANG Qian-qing^{1,2}, ZHANG Zhong-miao^{1,2}, YE Qiang³

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Wenzhou Building Design and Research Institute, Wenzhou 325003, China)

Abstract: The accident caused by large differential settlement between rigid and flexible piles in a grain bin is analyzed. A reinforcement scheme is proposed. The analyses show that in the site with a large depth of silt, the rigid and flexible piles should be embedded into the stiff bearing stratum with the same depth, and the rigid and flexible piles are not supposed to be drilled into the stiff bearing stratum and silt, respectively. It is concluded that bored piles and beam-slab raft foundations can be used to treat the accident of large differential settlement between rigid and flexible pile foundations. This reinforcement scheme can significantly reduce the settlement of ground and the differential settlement between ground and main body structure of the grain bin.

Key words: rigid pile; flexible pile; differential settlement; solidification

0 引言

随着经济的发展和社会的需求,高层和超高层建筑不断涌现。目前,我国拥有高492 m的上海环球金融中心,高632 m的上海中心大厦和高约597 m的天津117大厦正在建造中,我国土木工作者积累了高层和超高层设计和建设的成功经验。然而,低层建筑、单层厂房、粮食仓库等建筑因其上部荷载较小,结构简单往往不能引起设计和施工人员的足够重视,反而引发了一些工程事故,继而又积累了一些处理桩基事故的成功经验^[1-3]。本文选取同一建筑采用刚柔不同桩基础而引起两种不同桩型沉降差过大的典型案例,详细分析了单层粮库刚柔两种桩沉降不协调的原因,并提出了具体解决方法。笔者希望此工程案例能引起广

大土木工作者的注意,在设计和施工过程中避免此类事件再次发生。

1 工程概况和场地地质条件

温州某粮食储备仓库共有6幢,粮库屋面为人字梁结构,屋架部分的有效高度为6.8 m,设计储粮高度为6.5 m,实际储粮部分的地面面积为12.26 m×30.52 m,单幢粮库设计总仓储为331万斤,室内地面设计堆粮荷载约为35.75 kPa。

该场地位于温州软土地区,场地各土层的物理力

收稿日期: 2011-08-04

*通讯作者

学参数见表 1。粮库的主体结构部分基础设计采用预应力管桩双桩承台梁式基础，预应力管桩直径为 400

表 1 场地各土层的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil strata

土层名称	厚度/m	含水率/%	重度 (kN m ⁻³)	压缩模量/MPa	地基承载力特征值/kPa	钻孔灌注桩	
						侧阻力特征值/kPa	端阻力特征值/kPa
粉质黏土	1.6~2.5	28.3	18.8	5	90	18	
淤泥	未打穿, 最大勘探厚度为 12.5~19.4	68	15.2	1.24	50	5.5	
黏土夹粉砂		43.5*	17.3*	2.74*	80*	13*	
砾砂					350*	42*	1500*

(60) mm, 其有效桩长约为 26 m, 设计要求管桩单桩竖向抗压承载力特征值为 400 kN, 单幢粮库主体结构部分共布置预应力管桩 60 根(具体布置方式可参见 4.2 节中的图 5)。粮库室内堆粮地面设计采用水泥搅拌桩进行加固, 水泥搅拌桩设计桩径为 500 mm, 设计有效桩长≥10 m, 水泥掺入量为 15%。设计要求水泥搅拌桩 90 d 龄期的无侧限抗压强度为 1.5 MPa, 复合地基承载力特征值为 100 kPa。开挖结果显示, 实际施工过程中, 水泥搅拌桩顶上覆盖有厚约 1.65 m 的杂填土, 杂填土上为厚约 10 cm 的素混凝土层, 素混凝土上直接堆放粮食。单桩粮库的布桩型式和场地地质条件如图 1 所示。

需要说明的是, 勘探单位提供的本工程地质剖面图显示, 在 6 个粮食储备仓库场地上勘探深度都不足(勘探孔深 15.0~20.2 m), 没有一个勘探孔打穿淤泥层, 这显然是不合理的。图 2 中淤泥的厚度是参照相邻工地的数据得到的, 而表 1 中带*的参数也是相邻工地土层的参数。

搅拌桩基础) 储粮后出现了过大的沉降(见图 2), 最大约为 40 cm 且沉降还有不断增大的趋势, 已严重影响了粮库的正常使用。但采用预应力管桩的粮库主体结构部分基础沉降很小, 粮库的外立面基本完好, 采用刚性预应力管桩基础的主体结构与采用柔性水泥桩基础的室内地面沉降差过大。同时对还未储粮的#6 仓库现场观测发现, #6 空粮库室内地面出现了不同程度的沉降裂缝, 粮库地面混凝土横梁被拉裂, 见图 3。

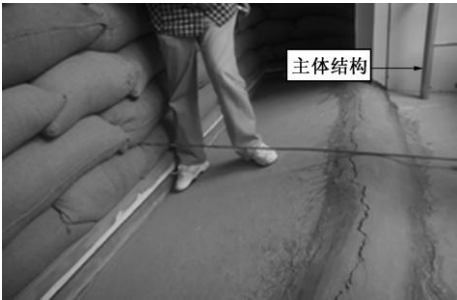


图 2 粮库储粮后的地面沉降

Fig. 2 Settlement of ground of grain bin after storing grain

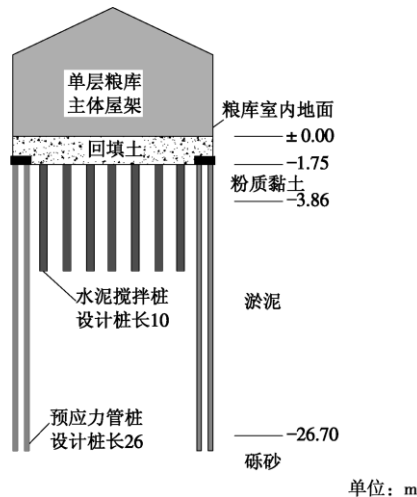


图 1 单幢粮库的桩基础

Fig. 1 Pile foundation of single grain bin

2 粮库室内地面沉降观测

6 幢仓库中的#6 粮食仓库为空仓库, #1~#5 粮库均储有粮食。2010 年 1 月份发现粮库仓储地面(水泥

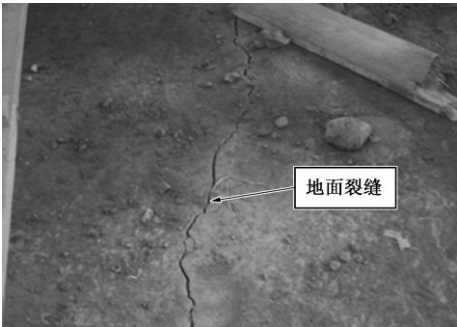


图 3 未储粮粮库的地面沉降

Fig. 3 Settlement of ground of grain bin before storing grain

为弄清储粮地面的具体沉降情况，有必要对储粮地面进行现场实测。为配合测量，建设单位对#4 粮库的粮食进行了腾空。笔者利用水准仪对腾空后的#4 粮食仓库地面进行了详细的沉降观测。观测时共在#4 粮食仓库地面上设置沉降观测点 54 个，以东面门口地梁作为基准点来测试各个沉降观测点的相对沉降，测得的相对沉降结果见图 4。

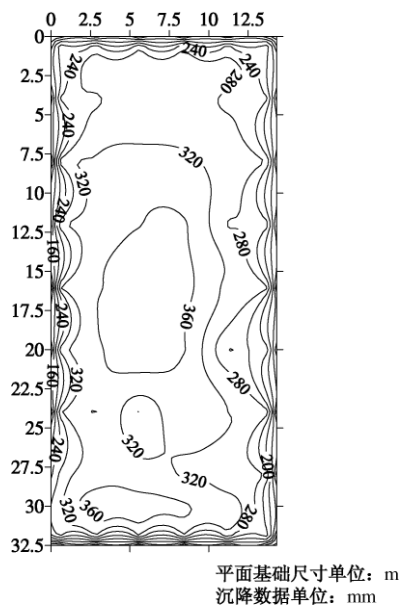


图 4 #4 粮库卸载后地面沉降等值线图

Fig. 4 Contours of settlement after grain unloaded from grain bin No. 4

从图 4 可以看出，#4 粮库粮食卸载后地面沉降最大值出现在粮库的中心位置，沉降呈“锅底形”。北面至室内地面中心点的沉降差约为 350 mm，其倾斜率约为 2.15%；西面至室内地面中心点的沉降差约为 360 mm，其倾斜率约为 5.05 %。测试结果表明#4 粮库的累计中心沉降量和倾斜值均超过了设计和使用要求。需要说明的是，图 4 中的沉降数据是粮食卸载后（地面会产生回弹）的实测沉降数据，粮食堆满时的室内地面实际沉降值肯定要比图 4 中数据大。#1~#5 粮库储粮后室内地面沉降情况也与#4 粮库类似，同时#6 空粮库室内地面也发现了自重固结引起的沉降裂缝，这说明 6 幢粮库均属于建筑桩基事故，且这 6 幢粮食仓库均不能正常使用，如果继续使用有可能会出现储粮地面整体滑移破坏而导致整幢粮库倾覆，必须采取有效措施进行加固处理。

3 两种桩基础沉降差过大原因分析

为了弄清该粮库刚性桩与柔性桩基础沉降差过大

的原因，有必要从多个方面进行详细分析。

3.1 粮库室内水泥搅拌桩取芯检测结果

经水泥搅拌桩处理后的粮库室内地面沉降过大，有必要对水泥搅拌桩的桩长和桩身质量进行检测。为此，甲方委托第三方对#6 空粮库地面下 7 根水泥搅拌桩进行了钻探取芯检验。水泥搅拌桩取芯结果见表 2。

表 2 水泥搅拌桩钻芯检测结果

Table 2 Core drilling test results of cement mixing piles

桩号	抗压试验的芯样取样深度/m	芯样无侧限抗压强度/MPa	钻探取芯得到的实际有效桩长/m
1	2.0~2.2	0.92	3.6
2	1.9~2.1	0.51	3.3
3	2.75~2.9	4.72	4.7
4	2.5~2.7	2.31	4.2
5	1.8~1.96	1.59	4.1
6	1.32~1.5	7.63	4.3
7	1.7~1.85	1.77	3.2

钻探取芯检测结果表明，水泥搅拌桩桩长的严重不足，水泥石强度的参差不齐。7 根水泥搅拌桩实际桩长只有 3.2~4.7 m，均未达到设计要求的 10 m 有效桩长。水泥石芯样的抗压强度为 0.51~7.63 MPa，实测强度差异很大，且有两根桩的芯样无侧限抗压强度未达到 1.5 MPa。

3.2 粮库室内水泥搅拌桩复合地基静载试验结果

甲方委托第三方对#6 空粮库地面 3 个不同的地点进行了复合地基平板载荷试验。试验结果显示，2 个地点的复合地基承载力特征值约为 110 kPa，满足复合地基承载力特征值为 100 kPa 的设计要求。1 个地点的复合地基承载力特征值约为 90 kPa，略低于复合地基承载力特征值为 100 kPa 的设计要求。

3.3 粮库室内地面沉降理论计算

笔者根据浙江省标准建筑地基基础设计规范（DB 33/1001—2003）^[5]对陶山粮库地面沉降进行了理论计算。计算中取设计地面堆粮荷载为 35.75 kPa，搅拌桩上的回填土和素混凝土垫层厚度按照#6 粮库的开挖结果取为 1.75 m，即回填土的荷载约为 35.0 kPa。计算分为 4 种情况，取水泥搅拌桩总桩数为 226 根（实际施工水泥搅拌桩桩数）和 244 根（设计水泥搅拌桩桩数）分别计算。同时沉降计算时又分设计 10 m 长水泥搅拌桩和实际约 4 m 水泥搅拌桩（根据钻探取芯结果取值）两种情况分别进行计算，计算结果见表 3。需要说明的是，表 3 中回填土计算时考虑了设计地面堆粮荷载引起的压缩沉降但没有考虑回填土对水泥搅拌桩的负摩阻力和回填土自重作用下的固结沉降（回填土参数不足）。由于 6 幢粮库场地勘探孔勘探深度不足（最大勘探深度约 20 m），没有 20 m 以下土层的物

理力学参数，故计算水泥搅拌桩桩端下沉降时只考虑 现有勘探深度范围内桩端下淤泥层的压缩量。其桩端

表 3 不同情况下的室内地面沉降计算值

Table 3 Calculated settlement of ground in different cases

基础型式	荷载/kPa	工 况	总桩数 /根	理论最大沉降值/mm			
				地面回填 土沉降	搅拌桩复合土 层的沉降	桩端下卧层 沉降	累计沉 降
10 m 长水泥搅 拌桩复合地基	设计地面堆载+回填土荷载 (35.75+35) kPa	工况 1	226	19.7	44.7	237.5	301.9
4 m 长水泥搅 拌桩复合地基	设计地面堆载+回填土荷载 (35.75+35) kPa	工况 2	244	19.7	41.8	237.5	299.0
10 m 长水泥搅 拌桩复合地基	设计地面堆载+回填土荷载 (35.75+35) kPa	工况 3	226	19.7	17.0	338.7	375.4
4 m 长水泥搅 拌桩复合地基	设计地面堆载+回填土荷载 (35.75+35) kPa	工况 4	244	19.7	16.0	338.7	374.4

沉降计算结果会比按照相关规范确定的桩端下压缩层范围内压缩量的计算结果要小。

从表 3 中可以看出：

（1）在堆粮和回填土荷载作用下，设计 10 m 长水泥搅拌桩室内地面理论沉降计算值约为 299.0 mm（设计 244 根水泥搅拌桩）和 301.9 mm（实际施工 226 根水泥搅拌桩），因水泥搅拌桩的下卧层为淤泥，其压缩量大。

（2）在堆粮和回填土荷载作用下，4 m 长水泥搅拌桩室内地面理论沉降计算值达 374.4 mm（设计 244 根水泥搅拌桩）和 375.4 mm（实际施工 226 根水泥搅拌桩），这说明桩长缩短后更严重地加大了室内地面的累计沉降量。同时，由于实际水泥搅拌桩取芯结果桩长为 3.2~4.7 m 不等，且桩身强度为 0.51~7.63 MPa 参差不齐，更加严重地导致了粮库室内地面的不均匀沉降。

（3）表 3 中的计算结果只是按浙江省标准建筑地基基础设计规范（DB 33/1001-2003）进行的理论沉降计算结果且粮库桩端下土的压缩变形计算时只考虑勘探深度内淤泥层的压缩，它与实际沉降会有一定的误差。粮库室内地面理论沉降计算值只能作为分析参考。

（4）粮库主体结构采用 26 m 的刚性预应力管桩桩基础沉降很小，现场观测沉降不足 1 mm。因此，表 3 中的沉降计算数据可近似看成是同一粮库刚性预应力管桩与柔性水泥搅拌桩沉降差。

3.4 粮库室内地面过大沉降原因分析

本工程粮库室内地面过大沉降原因总结如下：

（1）由于本工程粮库所在场地具有深厚淤泥层，设计粮库室内地面下水泥搅拌桩的有效桩长只有 10 m，柔性搅拌桩桩长不足导致下卧淤泥层的压缩沉降过大；而粮库主体结构采用 26 m 的刚性预应力管桩桩基础沉降很小（现场观测沉降不足 1 mm），导致同一粮库主体结构刚性基础与室内仓储地面柔性基础差异沉降过大。该设计方法欠合理。

（2）施工单位偷工减料，水泥搅拌桩实际桩长远小于设计有效桩长且强度参差不齐，是造成粮库室内

地面沉降过大的一个重要原因。

（3）粮库水泥搅拌桩顶上实际回填有厚约 1.65 m 的回填土及厚约 0.1 m 的素混凝土垫层。现粮库中的粮食直接堆放在这层素混凝土垫层面上（原设计先分级堆载预压，待沉降稳定后再做永久性粮库地面）。回填土不仅加大了地面荷载，而且回填不密实带来了自身的固结沉降，同时也给水泥搅拌桩带来了负摩阻力，这都会加大粮库室内地面沉降。

（4）设计要求地面仓储粮食堆载要分级堆载预压，而在使用过程中采用一次性堆载，造成沉降速率加快。

4 两种桩沉降差过大事故加固方法

本工程加固方案设计中要考虑以下几个方面：

（1）主体结构的室内净高为 6.8 m，加固方案设计中要考虑施工机械的操作高度。

（2）粮库现室内仓储地面约有 0.1 m 厚的素砼和 1.65 m 厚的回填土，回填土中有大小不等的石块和泥土，要考虑施工机械的施工可行性。

（3）加固设计中要考虑今后粮库仓储地面加固后的沉降应与已建粮库主体结构基础的沉降协调问题。观测表明，采用长 26 m 预应力管桩的主体结构部分基础沉降很小且外立面基本完好，粮库主体结构部分现在是基本安全的，不需要加固（只需要局部内墙裂缝修补）。所以，主要加固室内仓储地面的过大沉降，为了变形协调，加固也采用刚性桩方案较好。

（4）由于粮食仓库勘探孔深度不够，所以施工图加固设计前必须进行补充勘探，勘探孔的深度要钻至好的土层。

4.1 加固方案的种类及选择

针对上述情况粮库室内地面加固方案无疑都要采用桩基础，具体有以下几个方案可供选择：

（1）补打旋喷桩的加固方案。优点是成本略低，但缺点是回填土要挖除或部分挖除。本场地有厚约 20 m 的淤泥土层，若施工桩长不够还是会带来仓储地面的过大沉降，同时由于旋喷桩属柔性桩，所以采用该方案加固，仓储地面沉降与主体结构基础的沉降协调

过太事故的原因,并提出了具体加固方案。分析表明,对于淤泥层厚度较厚的场地,采用刚柔复合桩基时,要特别注意刚性桩与柔性桩变形协调的问题。笔者认为在此类场地中采用刚柔桩复合桩基时两种桩型要选择同一较好的持力层,以使得两种桩型沉降协调。实际工程中可采用变桩径、变桩距的设计方法,不宜采用变桩长的设计思想。对于该工程中同一建筑刚性桩与柔性桩基础沉降差过大的事故,可采用钻孔灌注桩加梁板筏式基础的加固方案。该加固方案可保证粮库地面沉降较小且粮库主体结构部分与粮库地面沉降差较小。

参考文献:

- [1] 张忠苗,张乾青,刘俊伟,等. 软土地区预应力管桩偏位处理实例分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 975 - 980. (ZHNAG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing, LIU Jun-wei, et al. Treatment of sloping prestressed pipe piles in soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 975 - 980. (in Chinese))
- [2] 周青春,李海波,刘亚群. 用换填法及刚性桩复合地基基础处理桩基质量事故[J]. 岩土力学, 2003, **24**(5): 845 - 848. (ZHOU Qing-chun, LI Hai-bo, LIU Ya-qun. Treatment of pile foundation accident with replacement method and rigid composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(5): 845 - 848. (in Chinese))
- [3] 张忠苗,张乾青,贺静漪,等. 浙江某高层预应力管桩偏位和上浮处理实例分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2919 - 2924. (ZHNAG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing, HE Jing-yi, et al. Example analysis of sloping and floating upward prestressed pipe pile with treatment of a high-rise building in Zhejiang Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2919 - 2924. (in Chinese))
- [4] DB 33/1001—2003 建筑地基基础设计规范[S]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003. (DB 33/1001—2003 Technical code for building pile foundation[S]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008. (in Chinese))
- [5] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)