

DOI: 10.11779/CJGE201701018

长短桩复合地基工程事故原因分析与预防措施

林志强^{1, 2}, 黄伟达^{1, 2}, 姜彦彬³, 钟贵荣^{1, 2}

(1. 福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350025; 2. 福建省绿色建筑技术重点实验室, 福建 福州 350025;

3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 依托某水泥砂浆长短桩复合地基处理工程质量事故实例, 开展现场调查及地基变形监测工作。根据在柔性基础下长短桩复合地基荷载传递机理, 对工程质量事故的原因进行分析, 找出工程质量事故的主要原因并提出避免类似工程质量事故的预防措施。分析结果表明, 由于在大面积堆土荷载作用下桩周软土固结沉降, 将主要产生两种地基处理失效模式: 如果桩端悬浮在软土层中, 桩端将发生向下刺入变形, 桩周软土发生塑性变形或塑性破坏, 地基处理失效; 如果桩端落在硬土层上, 桩体将先发生破坏, 然后桩周软土破坏, 地基处理失效; 在大面积堆土荷载作用下桩周软土固结沉降且桩端悬浮在软土层中是本工程质量事故产生的根本原因。研究成果可为类似地基处理工程的设计人员及相关理论研究提供借鉴。

关键词: 长短桩复合地基; 工程质量事故; 原因分析; 荷载传递机理; 柔性基础

中图分类号: TU27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2017)01 - 0185 - 07

作者简介: 林志强(1986 -), 男, 福建漳州人, 硕士, 工程师, 主要从事软土地基处理、边坡工程及基坑工程等方面的设计、施工、研究工作。E-mail: zhiqiang_lin@126.com。

Analysis and precautionary measures of engineering accidents of composite foundations with long and short piles

LIN Zhi-qiang^{1, 2}, HUANG Wei-da^{1, 2}, JIANG Yan-bin³, ZHONG Gui-rong^{1, 2}

(1. Fujian Academy of Building Research, Fuzhou 350025, China; 2. Fujian Key Laboratory of Green Building Technology, Fuzhou 350025, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on an engineering qualitative accident instance of composite foundation with long and short piles, the field investigation and foundation deformation monitoring are conducted. The causes of engineering qualitative accident are analyzed according to the load transfer mechanism of composite foundations with long and short piles under flexible foundation. The causes of engineering qualitative accident are found, and the relevant precautionary measures are proposed. The analysis results show that there are two different failure modes in the improved ground foundation because of the soil consolidation and settlement due to the large-area loading. If the pile tip is suspended in the soft soil layer, it will penetrate into soft soil at the first failure stage, then plastic failure will occur in the soft soil among piles, as a result, the foundation treatment may fail. If the pile tip is embedded into the hardpan layer, the pile body will firstly be destroyed and then the soft soil among piles will be destroyed. The primary cause of the above engineering qualitative accident is the consolidation settlement of the soil around piles under large-area loading and the pile tip suspending in the soft soil layer. The research results may provide reference for similar engineering and associated theoretical researches.

Key words: composite foundation with long and short piles; engineering qualitative accident; cause analysis; load transfer mechanism; flexible foundation

0 引言

长短桩复合地基近年来在工业与民用建筑、高速公路、高速铁路等领域的工程应用实例越来越多, 许多学者开展了大量有益的探索^[1-2]。根据基础刚度不同, 可分为柔性基础下和刚性基础下的长短桩复合地基; 根据长桩、短桩的刚度不同, 又可分为刚性长短

桩复合地基和刚性桩、柔性桩组合的长短桩复合地基。不同类型长短桩复合地基, 其工作机理有些差异^[3]。总的来说, 考虑到上部荷载产生地基附加应力随深度

基金项目: 福建省科技计划项目(2014Y0016); 福建省建设科技研究开发项目(2012K15)

收稿日期: 2015 - 11 - 06

衰减, 采用变刚度的地基处理方法^[4], 即长短桩复合地基; 长桩的主要工作机理: 将上部荷载通过桩体传递至深层地基, 提高地基承载力, 减少压缩变形; 短桩的主要工作机理: 根据桩端是否落在较好土层, 可分为两种情况, 目的是提高软土层地基承载力, 减少一定的压缩变形^[1, 5-6]。

然而, 近年来地基处理工程事故屡见不鲜, 特别是复合地基稳定性、沉降偏大等问题十分突出^[7-10]。不同类型复合地基的形成条件、荷载传递机理各异且较为复杂, 相关课题仍有待进一步深入研究^[3]。在很多情况下, 复合地基设计是地基处理成败的关键^[5]。

依托某水泥砂浆长短桩复合地基工程质量事故实例, 根据在大面积路堤荷载作用下复合地基荷载传递机理, 分析了工程质量事故的原因, 找出导致工程事故发生的主要原因, 并提出对应的预防措施。研究成果可为类似地基处理工程的设计人员提供借鉴, 进一步丰富复合地基相关理论研究内容。

1 工程概述

1.1 工程概况

某中心大楼建于沿海冲淤积平原地貌场地, 设置一层地下室, 冲孔灌注桩基础, 持力层为中风化凝灰熔岩。原场地大部分为鱼塘, 水深约 0.9 m, 鱼塘底高程约 0.1 m。场地分三期回填砂土, 一期场地局部回填砂土, 回填地面高程约 2.5 m, 回填时间 2009 年; 二期场地大面积回填砂土, 整平高程 2.5 m, 回填时间 2012 年; 三期场地再次大面积回填砂土至设计高程 5.3 m, 回填时间 2015 年 2 月—2015 年 5 月, 地面结构施工时间 2015 年 5 月。

由于场地地基存在深厚软土层, 在填砂土荷载作用下, 将引起较大地基变形, 造成地面开裂或地下管线破坏, 需进行软土地基处理, 设计采用长螺旋压灌

水泥砂浆长短桩复合地基处理方案。地面结构施工结束仅 15 d 后, 中心大楼南侧地下室区域与地基处理区域交界处地面出现一条通长裂缝及下沉等现象, 严重影响广场地面正常使用及美观。

1.2 地质概况

场地主要岩土层分布自上而下依次为: ①素填土: 灰黄, 松散, 湿, 成分主要为砂及黏性土; ②淤泥质土: 深灰色, 巨厚, 饱和, 流塑, 含腐植质, 天然含水率约 50%; ③黏土: 灰黄色, 饱和, 可塑, 黏性较强; ④淤泥: 深灰色, 饱和, 流塑, 含腐植质, 天然含水率约 60%; ⑤卵石: 浅黄、浅灰色, 中密状态, 饱和; ⑥残积黏性土: 灰白、褐黄色, 可塑, 很湿, 为凝灰熔岩风化残积形成; 往下地层为不同风化程度凝灰熔岩。由于回填砂土是大面积新近堆载的, 场地深厚软土尚未完成固结沉降。场地岩土工程地质勘察与报告出具时间为 2011 年, 各岩土层设计计算参数详见表 1。

1.3 设计概况

地基处理方案采用长螺旋压灌水泥砂浆长短桩复合地基, 属于刚性长短桩复合地基, 设置中砂褥垫层+两道土工格栅加筋垫层, 分层水夯三期回填砂土。

以中心大楼南侧 4—4 剖面为例, 平面位置见图 3, 水泥砂浆长桩设计要求: 桩长 28.5 m, 桩间距 3.6 m, 桩径 0.5 m, 桩顶高程 2.5 m, 梅花型布置, 强度等级为 M7.5, 桩端进入⑥残积黏性土层 ≥ 0.5 m; 水泥砂浆短桩设计要求: 桩长 16.5 m, 桩间距 3.6 m, 桩径 0.5 m, 桩顶高程 2.5 m, 梅花型布置, 强度等级为 M7.5, 桩端进入③黏土层 ≥ 0.5 m。

填方边坡采用三级放坡形式, 各级坡高约 1 m, 坡率为 1:1.5, 平台宽度为 3 m。2014 年 5 月出具设计图纸, 结合工程实际情况, 南侧 4—4 剖面典型示意见图 1。

表 1 各岩土层计算参数

Table 1 Parameters of soil layers

层号	岩土层名称	含水率 w/%	孔隙比 e	重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	压缩模量 E_{sl-2}/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$	固结系数 $(10^{-3}\cdot cm^2\cdot s^{-1})$	承载力特征值 f_{ak}/kPa	桩侧摩阻力极限值 q_{sik}/kPa
①	填砂土	—	—	18.00	5.00	1.00	24.00	—	60	20
②	淤泥质土	50	1.27	16.95	2.21	12.55 (9.23)	7.87 (0.3)	2.243	60	20
③	黏土	33	0.91	18.78	4.75	36.21	15.93	2.642	150	30
④	淤泥	60	1.51	16.20	1.90	11.54	7.15	2.641	55	12
⑤	卵石	—	—	21.00	—	—	—	—	600	120
⑥	残积黏性土	29	0.84	18.53	15.30	26.88	18.61	4.771	230	60
⑦	强风化凝灰岩	—	—	21.00	—	—	—	—	600	90

注: 1. “—”表示无; 2. 括号内数据为不固结不排水剪强度指标, 其余采用直剪固结快剪强度指标。

由图1易发现, 长桩、短桩桩端均未按设计要求进入持力层。主要原因: 由于场地软土层厚度变化大, 设计未明确施工时必须根据软土层厚度变化进行“变桩长”设置, 而仅给出“等桩长”剖面示意图; 施工人员根据设计提供的“等桩长”剖面图进行水泥砂浆桩设置。事故发生后, 经过工程相关资料复核发现, 南侧4—4剖面大部分长桩、短桩桩端悬浮在软土层中, 未进入设计要求持力层。

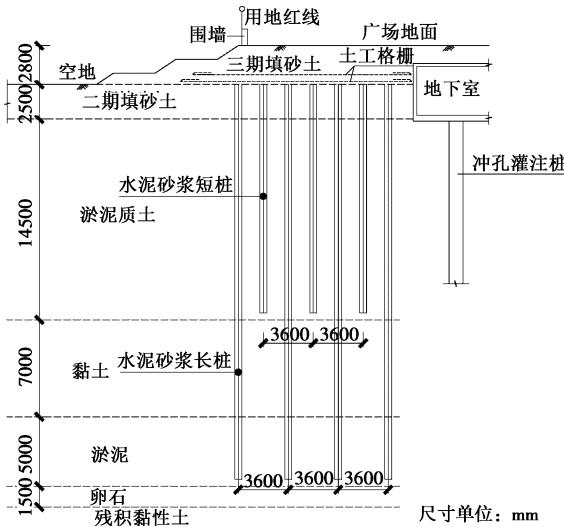


图1 南侧4—4剖面示意图

Fig. 1 Sketch map of 4—4 profile

1.4 施工概况

水泥砂浆桩施工时间2014年6月—2015年1月, 土工格栅铺设及三期回填砂土作业时间2015年2月—2015年5月。水泥砂浆桩、土工格栅铺设、三期回填砂土工程检验批施工质量验收均合格。检测单位分别进行桩基低应变法检测、单桩竖向抗压静载试验、复合地基载荷试验, 检测结果均符合设计要求, 其中单桩竖向抗压承载力特征值不小于250 kPa, 复合地基承载力特征值不小于100 kPa, 桩身完整性好。各项指标均合格后, 方进入下一道工序施工。

1.5 现场调查

在2015年6月5日进行了现场踏勘, 场地现状如下:

中心大楼南侧的地下室墙体与其外侧软基处理部分交界处地面有一条通长主裂缝, 裂缝两侧上下错开, 最大高差约40 mm, 最大裂缝宽度约30 mm, 见图2; 软基处理区域地面可见明显下沉, 最大地面下沉量达60 mm左右; 现场沉降监测表明, 监测时间段为2015年7月13日—2015年9月11日, 最大沉降量约32 mm, 最大日平均沉降量约0.54 mm/d, 地面沉降变形尚未收敛。南侧地基处理区域地面发现其他多条次裂缝, 走向大致均与主裂缝平行。

中心大楼东侧、南侧地面开裂严重, 其中南侧更严重; 西侧、北侧地面暂未见明显裂缝或下沉等情况。



图2 地面裂缝宽度与高差

Fig. 2 Width and height differences of surface crack

2 事故原因分析

2.1 长短桩复合地基沉降量复核

(1) 计算方法一

根据现行《建筑地基处理技术规范》^[11]JGJ 79—2012、《建筑地基基础设计技术规范》^[12]GB 50007—2011有关规定进行南侧4—4剖面沉降量复核, 计算参数见表1、图1, 计算结果如下。

经计算, 长桩单桩承载力特征值 $R_{ak}=409$ kN, 短桩单桩承载力特征值 $R_{ap}=208$ kN, 长短桩复合地基承载力特征值 $f_{spk}=142$ kPa, 仅由长桩处理形成复合地基承载力特征值 $f_{spk1}=115$ kPa。

二期填砂土未经修正的地基承载力特征值 $f_{ak}=60$ kPa, 长短桩复合地基加固土层压缩模量提高系数 $\zeta=f_{spk}/f_{ak}=2.37$, 仅长桩复合地基加固土层压缩模量提高系数 $\zeta_1=f_{spk1}/f_{ak}=1.92$ 。

设计考虑桩间新近二期回填砂土的荷载作用, 计算时所用桩顶高程为1.0 m, 计算复合地基沉降时填砂土荷载高度取4.3 m。填砂土重度取18 kN/m³, 则附加荷载 $p_0=78$ kPa。根据《建筑地基基础设计技术规范》GB 50007—2011取沉降计算经验系数 $\psi_s=0.862$, 复合地基沉降量 S 按下式计算:

$$S = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) = 124 \text{ mm.}$$

(2) 计算方法二

根据现行《复合地基技术规范》^[13]GB50783—2012、《建筑地基基础设计技术规范》^[12]GB50007—2011有关规定进行沉降复核, 计算参数见表1、图1, 计算结果如下。

长短桩的置换率 $m_1=m_2=3.03\%$, 水泥砂浆桩桩体压缩模量 $E_p=400$ MPa, 则长短桩淤泥质土层复合压缩模量 $E_{sp1}=26$ MPa, 仅长桩黏土层、淤泥层复合压缩模量 $E_{sp2}=17$ MPa、 $E_{sp3}=14$ MPa。

填砂荷载高度仍取4.3 m, 重度取18 kN/m³, 则附加荷载 $p_0=78$ kPa, 沉降计算经验系数取1.2, 复合

地基沉降量 S 按下式计算:

$$S = \psi_p \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} l_i = 121 \text{ mm}.$$

按照规范的计算结果看, 复合地基沉降量较小, 设计也考虑二期填砂层的荷载作用, 而实际在地面结构施工结束仅 15 d 后地基沉降已达 40 mm, 裂缝宽度达 30 mm, 且仍呈不收敛趋势, 理论与实际存在不符。经计算, 填方边坡整体稳定安全系数达 2.0, 基本认为边坡处于稳定状态, 不存在边坡滑动的可能。

需要说明的是, 二期回填砂土大面积新近堆填的, 软土层深厚, 场地尚未完成固结沉降, 简单的提高复合地基沉降计算时上覆堆载高度, 忽视尚未完成固结沉降软土层对复合地基荷载传递机理的影响, 这种处理方法过于粗糙。

综上初步判断, 在大面积堆土荷载作用下, 桩周软土固结沉降, 引起桩侧摩阻力减小甚至出现负摩阻力, 又由于桩端未到达设计要求持力层, 桩端土质条件差, 导致地基处理失效, 造成地面开裂、沉降。

2.2 桩周软土固结沉降和桩端土层对刚性桩复合地基的影响分析

(1) 桩周软土固结沉降的影响

欠固结软黏土对采用深层搅拌桩、高压旋喷桩、刚性桩的复合地基有影响, 因此, 应查明软黏土的超固结比^[13]。近几年, 已见到由于地下水位下降或欠固结土引起地基沉降对复合地基的影响的报道^[14], 应引起工程各方特别是设计人员的重视。

桩周软土固结沉降对刚性桩复合地基的影响机理如下: 当桩间土沉降大于刚性桩的沉降时, 桩侧产生负摩阻力, 可能加大桩端向下刺入变形或引起桩体破坏, 造成复合地基失效。

中性点的确定与桩基础类似, 即桩间土沉降与刚性桩沉降相等所在的位置, 主要与桩周土的压缩性和变形条件、土层分布及桩的刚度等多种因素有关^[15]。

(2) 桩端土层的影响

当桩端落在相对好土层上时, 土层提供的端阻力大, 有效减少桩端向下刺入变形, 有利于提高复合地基承载力和减小复合地基沉降。当桩端悬浮在软土层中时, 土层提供的端阻力较小, 桩端刺入变形可能较大, 对复合地基沉降控制不利。

(3) 桩周软土固结沉降和桩端土层的共同影响

a) 当桩周软土固结沉降且桩端悬浮在软土层时, 对刚性桩复合地基的影响机理如下。

在上覆填土荷载作用下, 桩土荷载开始按一定的分担比例进行分配, 荷载分担比与基础刚度、褥垫层、桩间土的性质、桩长、桩体刚度、复合地基置换率等有关^[16]。

由于桩长范围内桩周软土固结沉降, 桩土相对位移量减小, 桩侧摩阻力减小, 单桩竖向承载力降低。当桩间土沉降大于刚性桩的沉降或桩间土相对刚性桩有向下的位移趋势时, 桩侧产生负摩阻力。进一步, 当单桩承载力不足时, 由于桩端悬浮在软土层, 桩端较容易发生向下刺入变形, 桩土荷载分担比减小。进一步, 当桩间土荷载过大时, 超过桩间土地基承载力, 先发生土体塑性变形或塑性破坏, 桩间土发生竖向位移和水平位移, 桩土荷载分担比逐步增大。

随着桩周软土继续发生固结沉降, 单桩竖向承载力降低, 当桩土荷载分担比增大一定程度时, 桩端又发生向下的刺入变形。上述如此多次循环反复调整, 直至形成新的平衡为止, 最终因地基沉降过大, 复合地基处理失效。

b) 当桩周软土固结沉降且桩端落在硬土层时, 对刚性桩复合地基的影响机理如下。

与工况①不同, 当桩端落在相对好土层时, 端阻力较大, 限制了桩端向下刺入变形。随着地基不断发生固结沉降, 桩侧产生负摩阻力, 中性点不断下移, 桩体应力不断增大。同时, 随桩周软土的固结沉降, 桩周土地表下沉, 桩土荷载分担比不断增大, 直至桩身材料发生强度破坏, 然后桩间土破坏, 复合地基处理失效。

2.3 回填砂土荷载作用下的固结度估算

(1) 一期填砂土荷载作用下固结度的计算

地基软土层厚度按 28 m 考虑, 固结时间按 5 a 考虑, 软土层的排水条件按双面排水考虑, 排水面分别位于填砂层底面、卵石层顶面, 软土层固结系数 C_v 取 $2.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ (即 $C_v = 8.2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{a}$), 则地基处理前固结时间因素 T_v 计算如下: $T_v = \frac{tC_v}{H^2} = 0.21$ 。

查固结度 - 时间因素 ($U_t - T_t$) 关系曲线得到对应固结度 $U = 0.55$, 即在地基处理前, 在一期填砂土层荷载作用下, 软土层已完成固结沉降约 55%。

(2) 二期填砂土荷载作用下固结度的计算

地基软土层厚度按 28 m 考虑, 固结时间按 2 a 考虑, 软土层的排水条件按双面排水考虑, 排水面分别位于一期填砂层底面、卵石层顶面, 软土层固结系数 C_v 取 $2.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ (即 $C_v = 8.2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{a}$), 则地基处理前固结时间因素 T_v 计算如下: $T_v = \frac{tC_v}{H^2} = 0.08$ 。

查固结度 - 时间因素 ($U_t - T_t$) 关系曲线得到对应固结度 $U = 0.3$, 即在地基处理前, 在二期填砂土层荷载作用下, 软土层已完成固结沉降约 30%。

以上计算说明, 在大面积填砂土荷载作用下沉降固结 2 a, 软土层已完成固结沉降仅约 30%, 必须考

虑固结沉降对复合地基的影响；即使沉降固结时间已有 5 a，软土层已完成固结沉降仅约 55%，仍需要考虑固结沉降对复合地基的影响。

2.4 对应的预防措施

不同于在正常使用的复合地基中加固桩体向上刺入褥垫层产生的负摩阻力，复合地基中桩侧负摩阻力对地基处理效果影响较大^[14]。设计单位必须认真评估桩周软土固结沉降对复合地基的影响，采取一定的预防措施，具体如下。

(1) 深厚的桩周软土固结沉降速率很慢, 可采取预设排水板、砂井等措施, 或采用刚性桩与散体材料桩组合的长短桩复合地基方案, 加快地基排水固结, 消除地基固结沉降对刚性桩复合地基的影响。

(2) 设计要求桩端进入相对较好土层不少于 0.5m，并给出了地基处理剖面具体设计桩长。施工单位按图纸施工，但根据施工记录表明，施工单位仅按地基处理剖面图所示“等桩长”进行施工。结合地勘资料复核表明，桩端大部分未到达设计要求相对较好土层，影响地基处理效果。

考虑到地层起伏较大及地基处理施工过程中一些不确定因素，建议设计要求刚性桩桩端嵌入相对较好的土层不应少于1.0 m，并根据地层变化情况给出施工桩长立面展示图，确保桩端嵌入设计要求的持力层。

(3) 注意到, 地基处理施工及上覆填砂土堆载过程中未进行完整地基变形监测, 不能及时了解实际地基变形情况, 也是造成本次工程事故的重要原因之一。建议地基处理施工及上覆填土堆载过程中必须进行地基变形监测工作, 验证地基处理效果, 做到防范于未然。

3 现场地基变形监测分析

3.1 地基变形监测

为了解地基的变形情况，分析工程事故的原因，对软基进行地面沉降、土体深层水平位移、地表水平位移观测。监测时间段为 2015 年 7 月 13 日—2015 年 9 月 11 日，共进行 5 次地基变形监测，每约 14 d 监测一次。现场监测平面布置见图 3，阴影区域为地基处理区域。

3.2 结果分析

(1) 地面沉降分析

经统计, 南侧 3—3 剖面、南侧 4—4 剖面、东侧 5—5 剖面、北侧 6—6 剖面及地下室区域地面平均沉降量如图 4 所示。由图 4 可见, 各区域地面平均沉降量大小为: 南侧 4—4 剖面>南侧 3—3 剖面>东侧 5—5 剖面>北侧 6—6 剖面>地下室区域, 其中南侧 4—4 剖面

面、南侧 3—3 剖面、东侧 5—5 剖面地面沉降呈不收敛趋势，北侧 6—6 剖面、地下室区域呈收敛趋势。南侧 4—4 剖面在监测时间段内，最大平均地面沉降量约 32 mm，日平均变化速率为 0.53 mm/d。

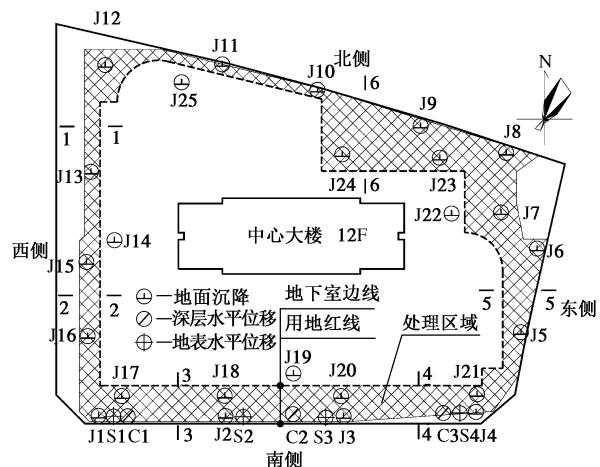


图 3 地基变形监测平面布置图

Fig. 3 Floor plan of foundation deformation monitoring

查阅地勘资料、设计图纸、施工记录等相关资料，南侧 3—3 剖面、南侧 4—4 剖面、东侧 5—5 剖面、北侧 6—6 剖面的桩周软土的固结沉降时间与桩端土层情况对应关系如下。

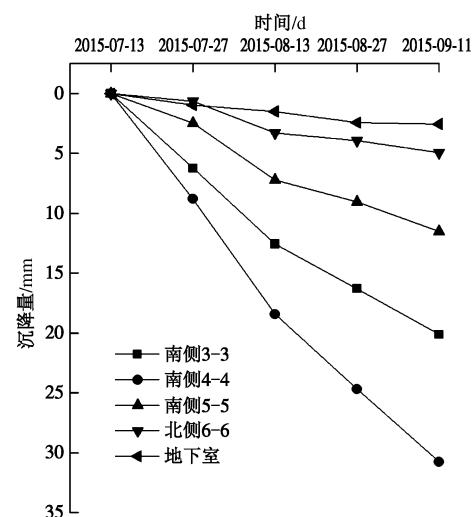


图 4 不同部位平均沉降量

Fig. 4 Average settlements at different positions

a) 南侧 3—3 剖面: 回填一期砂土层, 厚约 2.5 m, 回填时间约 2009 年, 已固结沉降时间 5 a; 长桩桩长 29.0 m, 桩端土层为淤泥层或卵石层, 基本没有嵌入相对较好土层; 短桩桩长 14.0 m, 桩端土层为黏土层, 嵌入深度约 0.3~0.8 m。

b) 南侧 4—4 剖面: 回填二期砂土层, 厚约 2.5 m, 回填时间约 2012 年, 已固结沉降时间 3 a; 长桩桩长

28.5 m, 桩端土层为淤泥层, 未嵌入相对较好土层; 短桩桩长 14.5 m, 桩端土层大部分为淤泥质土层, 未嵌入相对较好土层。

c) 东侧 5—5 剖面: 回填一期砂土层, 厚约 2.5 m, 回填时间约 2009 年, 已固结沉降时间 5 a; 长桩桩长 28.5 m, 桩端土层为淤泥层或卵石层, 局部未嵌入相对较好土层; 短桩桩长 14.5 m, 桩端土层为淤泥质土层, 未嵌入相对较好土层。

d) 北侧 6—6 剖面: 回填一期砂土层, 厚约 2.5 m, 回填时间 2009 年, 已固结沉降时间 5 a; 长桩桩长 24.5 m, 桩端土层为含碎石粉质黏土, 嵌入深度为 0.5~1 m; 短桩桩长 13.0 m, 桩端土层为黏土层, 嵌入深度约 1.5 m。

根据上述回填砂土时间及桩端土层情况, 再结合现场沉降监测结果, 容易得到如下结论: 回填砂土时间越早, 桩端土层土质条件越好, 相对较好土层的嵌入深度越大, 地面沉降越小。同时结论也佐证了上述关于桩周软土固结沉降与桩端土层对刚性桩复合地基的影响分析。

(2) 深层土体水平位移分析

在中心大楼南侧边坡顶埋设了测斜孔, C2 孔观测点平面布置见图 3。土体深层水平位移变化情况见图 5, 最大水平位移量为 22.10 mm, 日平均变化速率为 0.38 mm/d, 水平位移变化速率与地面沉降速率较为接近。从图 5 中水平位移变化趋势, 土体深层水平位移尚未收敛。

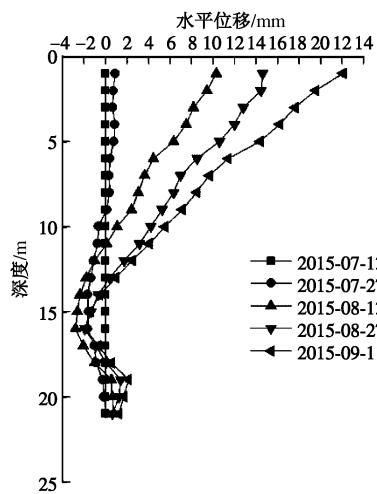


图 5 C2 孔各时段土体深层水平位移

Fig. 5 Horizontal displacements of soil at different time

土体深层水平位移最大深度约 18 m, 与淤泥质土层最大深度基本一致。说明在上覆填砂土荷载作用下, 淤泥质土层发生了塑性变形甚至塑性破坏, 产生土体深层水平位移, 加速地面沉降。土体深层水平位移观测结果再次佐证了上述关于桩周软土固结沉降与桩端

土层对刚性桩复合地基的影响分析。

4 结论与预防措施

通过现场调查、地基变形监测、复合地基计算分析及分析荷载传递机理, 对某刚性长短桩复合地基工程质量事故的原因进行分析, 得到如下结论及对应的预防措施:

(1) 在大面积堆土荷载作用下桩周软土固结沉降且桩端悬浮在软土层中是本工程质量事故产生的根本原因。

(2) 由于在大面积堆土荷载作用下桩周软土固结沉降, 将主要产生如下两种地基处理失效模式: 如果桩端悬浮在软土层, 桩端发生向下刺入变形, 桩周软土先发生塑性变形或塑性破坏, 地基处理失效; 如果桩端落在硬土层, 桩体可能先发生破坏, 然后桩周软土破坏, 地基处理失效。

(3) 当桩周软土尚未完成固结沉降, 预计地基处理结束后仍有较大的固结沉降时, 设计人员不可忽视桩侧负摩阻力对刚性桩复合地基的影响。建议可采取场地堆土前预设塑料排水板、砂井, 加快软基排水固结, 待填土地基沉降基本稳定后方可成桩, 或刚性桩与散体材料桩组合的长短桩复合地基等措施。

(4) 考虑到岩土层起伏较大及地基处理施工过程中一些不确定因素, 建议设计要求桩端嵌入相对较好土层不少于 1.0 m, 并根据岩土层起伏变化情况给出施工桩长立面展示图, 确保桩端嵌入设计要求的持力层。

(5) 建议地基处理施工及上覆填土堆载过程中必须进行地基变形观测工作, 检验地基处理效果, 做到防范于未然。

参考文献:

- [1] 邓超, 龚晓南. 长短桩复合地基在高层建筑中的应用[J]. 建筑施工, 2003, 25(1): 18~20. (DENG Chao, GONG Xiao-nan. Application of long-short-pile composite foundation to high-rise building [J]. Building Construction, 2003, 25(1): 18~20. (in Chinese))
- [2] 娄炎, 何宁, 娄斌. 长短桩复合地基在加固桥头深厚软基中的应用[J]. 施工技术, 2009, 38(10): 90~93. (LOU Yan, HE Ning, LOU Bin. Application of long-short piles composite foundation in strengthening deep soft ground at the end of bridge[J]. Construction Technology, 2009, 38(10): 90~93. (in Chinese))
- [3] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007(1): 1~13. (GONG Xiao-nan. Generalized composite foundation theory and engineering application[J]. Chinese Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2007(1): 1~13. (in Chinese))

- Journal of Geotechnical Engineering, 2007(1): 1 - 13. (in Chinese))
- [4] 娄炎, 何宁, 娄斌. 长短桩复合地基中的土拱效应及分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 77 - 80. (LOU Yan, HE Ning, LOU Bin. Analysis of soil arching of composite foundations with long and short piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 77 - 80. (in Chinese))
- [5] 马骥, 张东刚, 张震, 等. 长短桩复合地基设计计算[J]. 岩土工程技术, 2001(2): 86 - 91. (MA Ji, ZHANG Dong-gang, ZHANG Zhen, et al. Design of the composite foundation with long-short piles[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2001(2): 86 - 91. (in Chinese))
- [6] 葛忻声, 龚晓南, 张先明. 长短桩复合地基有限元分析及设计计算方法探讨[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 91 - 96. (GE Xin-sheng, GONG Xiao-nan, ZHANG Xian-ming. FEM analysis and design of long-short-pile composite foundation[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 91 - 96. (in Chinese))
- [7] 曹卫平, 陈云敏. 台华高速公路路堤失稳原因分析与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1504 - 1510. (CAO Wei-ping, CHEN Yun-min. Analysis of sliding failure mechanism and treatment for taihua highway embankment slope over soft soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1504 - 1510. (in Chinese))
- [8] 杨启安. 某载体桩复合地基的工程质量事故分析和处理[J]. 工业建筑, 2009(9): 130 - 134. (YANG Qi-an. Analysis and treatment of the accident to a composite foundation using ram-compacted piles with bearing base[J]. Industrial Construction, 2009(9): 130 - 134. (in Chinese))
- [9] 张忠苗, 张乾青, 王华强. 浙江某工业园区强夯法处理地基的事故分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(增刊 1): 3217 - 3223. (ZHANG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing, WANG Hua-qiang. Accident analysis of dynamic compaction in ground improvement of an industrial park in zhejiang province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(S1): 3217 - 3223. (in Chinese))
- [10] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127 - 146. (ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127 - 146. (in Chinese))
- [11] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 2012. (JGJ 79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. 2012. (in Chinese))
- [12] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [13] GB/T 50783—2012 复合地基技术规范[S]. 2012. (GB/T 50783—2012 Technical code for composite foundation[S]. 2012. (in Chinese))
- [14] 夏力农, 苗云东, 廖常斌. 地基土沉降对复合地基影响的三维数值模拟[J]. 岩土力学, 2012(4): 1217 - 1222. (XIA Li-nong, MIAO Yun-dong, LIAO Chang-bin. Three-dimensional numerical simulation of influences of ground subsidence on composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(4): 1217 - 1222. (in Chinese))
- [15] 周景星. 基础工程[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2007. (ZHOU Jing-xing. Foundation engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Tsing Hua University Press, 2007. (in Chinese))
- [16] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (GONG Xiao-nan. Theory of composite foundation and engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 南京嘉兆仪器设备有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司
后插 1 重庆地质仪器厂
后插 2 西安力创材料检测技术有限公司