

基于地基 - 基础 - 上部结构共同作用分析的 长短 PHC 管桩基础处理

尹 骥，魏建华

(上海岩土工程勘察设计研究院有限公司，上海 200070)

摘要：探讨了采用地基 - 基础 - 上部结构共同作用分析的方法，分析长短 PHC 管桩基础的工作性能。该方法以变刚度调平理论^[1]及地基 - 基础 - 上部结构共同作用理论^[2]为基础，以瑞士开发的高性能岩土工程数值分析软件 zsoil.pc v2010 x64 版本为求解工具，提出了基于上述理论和工具处理长短 PHC 管桩基础的方法。还介绍了 3 个基于上述理论处理长短 PHC 管桩基础的工程实例，均取得了较好的处理效果。

关键词：地基 - 基础 - 上部结构共同作用；长短桩；PHC 管桩；数值分析；有限元法

中图分类号：TU473.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-4548(2011)S2-0265-06

作者简介：尹 骥(1980-)，男，上海人，工学博士，主要从事岩土工程领域的设计、咨询和研究。E-mail: geofem@126.com。

Treatment of foundation based on long-short PHC Piles soil-foundation-superstructure interaction analysis

YIN Ji, WEI Jian-hua

(Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: The soil-foundation-superstructure interaction analysis method is employed to analyze the performances of the foundation with long-short PHC piles. This method is based on the theories of adjusted foundation rigidity design for reducing differential settlement^[1] and soil-foundation-superstructure interaction analysis^[2]. High performance geotechnical software zsoil.pc v2010 x64 is employed to solve such problems. The approach to the treatment of foundation with long-short PHC piles based on the above theories is proposed. Three projects of treatment of the foundation with long-short PHC piles are also introduced. Satisfactory treatment effect is obtained.

Key words: soil-foundation-superstructure interaction; long-short pile; PHC pile; numerical analysis; FEM

0 引言

近年来随着大量工程的建设，PHC 管桩因其单位价格承载力高、质量可靠、施工速度快等优势在工业、民用建筑中大量使用。随着 PHC 管桩设计、施工经验的积累，以前被视使用“禁区”的土 - 岩结合地层、碎石分布地层等 PHC 管桩沉桩施工难度较大的地区也逐渐开始采用 PHC 管桩作为高层建筑的基础。然而在上述地区 PHC 管桩施工过程中也确实存在一些问题，例如由于作为持力层的基岩面起伏较大，造成管桩桩长相差较大；管桩难以穿透碎石夹层或者薄层，桩端未达到设计标高。另外，有时候由于建设单位在 PHC 施工完毕之后变更建筑方案，增加了建筑物高度或者移动了主楼的位置而不得不追加承载力更高、桩

长更长的工程桩，这也是另外一类较常见的桩基处理中的长短桩问题。

1 长短 PHC 管桩基础存在的问题

在 PHC 管桩施工过程中遇到的长短桩问题主要表现为群桩基础承载力和刚度不均匀的特点。由于工程桩的欠送，有效桩长的减短导致侧壁摩阻力减少，对于摩擦型桩或者端承 - 摩擦型桩，实际短桩基承载力可能达不到设计要求。这样就造成了长短桩承载力的差异以及群桩基础承载力的不均匀。桩基的刚度主要为桩土接触刚度，即桩侧壁 - 土体摩擦接触刚度和

桩端 - 土体压缩刚度以及桩体自身的刚度。桩侧壁 - 土体摩擦接触刚度可视作一系列切向弹簧的刚度串联之和, 桩越长, 参与组合的切向弹簧越多, 则桩土接触刚度越大。桩端 - 土体压缩刚度主要取决于持力层的刚度, 持力层土体土性越好, 则刚度越大。桩体自身刚度取决于桩身材料和桩长, 一般混凝土的模量相差并不大, 因此桩长越长其自身的线刚度越小。实际桩基的刚度为以上诸方面的综合表现。由于地层起伏的随机性, 桩基的刚度分布也具有相应的随机性和不均匀性。

2 长短 PHC 桩基础的处理

2.1 长短 PHC 管桩分析的理论基础

刘金砾^[1]介绍的变刚度调平概念设计中提出“从改变地基、桩土刚度分布入手, 以改变基础的反力分布和沉降分布模式, 从而改善基础和结构的受力性状”。具体方法可通过调整不同区域的桩长和桩间距来实现基础的“变刚度”。上述方法是一种设计人员有意识的、主动的“变刚度”方法。而施工过程中遇到的长短桩问题, 实际上是被动的“变刚度”问题。同为“变刚度问题”, 其理论基础相通。

董建国等^[2]系统介绍了地基 - 基础 - 上部结构共同作用的分析方法。该方法的核心是不能将“地基、基础、上部结构”三部分割裂、单独考虑, 三部分共同作用的效果要大于其分别作用之和。

2.2 长短 PHC 管桩分析的数值方法

赵锡宏 (1997) 推荐采用“子结构”方法分析地基 - 基础 - 上部结构共同作用, 将上部结构作为“子结构”, 考虑其对基础的“柔性约束”。在当时计算机处理规模受限的条件下, 可避免生成巨大的总刚矩阵。而且该方法将桩体和地基土考虑成“弹簧”, 未能考虑桩土耦合作用, 过于简化。随着计算机软件、硬件技术的高速发展, 特别是64位操作系统理论上可支持无限量内存, 现在将地基、基础、上部结构整合在一个模型内进行分析已经成为可能。瑞士联邦理工大学开发的zsoil.pc v2010 x64位版本 (以下简称程序) 配合双CPU (8核)、24G内存工作站已经基本实现大规模三维地基 - 基础 - 上部结构共同作用分析。

岩土工程数值分析中土体模型的选用及其参数确定是最重要的内容。对于黏性土、砂性土、残积土、全风化岩等具有一定孔隙的土体可选用能较为全面反映土体特性的小应变硬化土模型 (HSS) 模拟; 而强风化岩、中风化岩等可采用理想弹塑性莫尔 - 库伦模型模拟。土层参数的确定除参考勘察报告提供的“土层物理力学性质表”之外, 应尽可能参考原位测试的结果, 如静力触探、标贯、动力触探、波速试验等数

据, 并根据当地经验或者《工程地质手册》相关经验公式换算为强度、变形指标, 互相印证, 然后再用于数值分析。

地层在空间分布上的变异是导致施工过程中长短桩产生的主要原因之一。分析时可采用程序中内置的三维地质钻孔差值技术, 通过数量不多的地质钻孔, 计算土体的空间分布。

图1为某项目桩基持力层的空间分布。

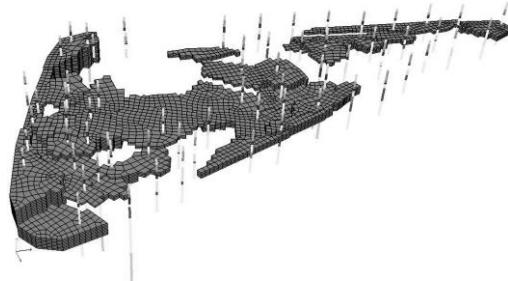


图1 土层空间分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of soil

工程桩采用 zsoil.pc v2010 x64 位版本中内置的 pile 单元模拟。该单元由 beam 单元及桩侧接触、桩端接触整合而成, 如图 2 所示。

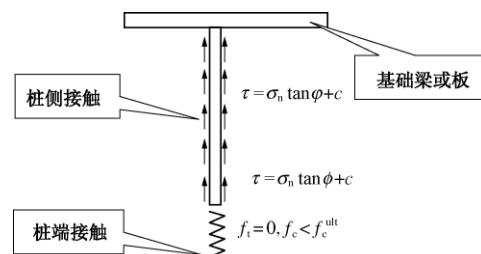


图2 桩单元模型

Fig. 2 Model of pile element

桩土接触模型采用理想弹塑性模型, 可模拟桩土接触强度随着深度 (围压) 增加而增加的特性, 如需要与规范统一, 桩土摩擦强度为恒定值, 仅需设置接触面材料 $\varphi' = 0$ 即可实现。另外, 程序还提供桩顶与基础梁或者筏板的连接选项, 可根据实际条件释放3个平移自由度和3个转动自由度中的任意数目, 即可控制完全铰接、部分铰接、完全固接等条件。筏板与工程桩连接示意图如图3所示。

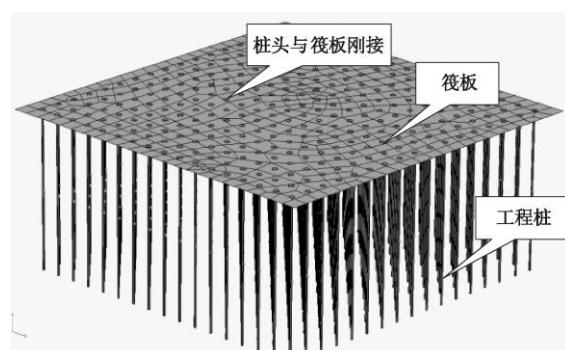


图 3 筏板与工程桩连接示意图

Fig. 3 Connection of raft and piles

筏板基础和上部结构的墙、板采用程序内置的可考虑剪切变形的无厚度one-layer shell单元模拟或者与实体单元类似的有厚度2-layer shell单元模拟。基础梁和上部结构的框架梁可采用beam单元模拟。shell和beam单元采用高级复合结构单元材料(层叠模型),即混凝土和钢筋分别采用理想弹塑性材料模拟,指定相应的材料抗压强度和抗拉强度。采用该模型后可考虑梁、板结构的弯矩-轴力耦合效应、塑性铰效应。

2.3 长短 PHC 管桩处理的方法

处理施工过程中遇到的长短PHC管桩问题,首先应获得真实可靠的桩基施工记录,如每一根桩的长度数据及其平面分布情况,如果采用静压法施工,则应获取每根桩的终压值,锤击桩的话则应获取相应阶段的贯入度。其次,应通过静载试验或者高应变试验确定不同桩长的桩基承载力,采用小应变检测短桩的完整性指标。如短桩承载力不够,则应采取相应的加强措施,如承载力与设计值相差较多可补打同规格PHC管桩,如承载力相差不多,且对施工进度要求较高,可采用小直径钢管桩或者方桩补强。最后,应进行地基-基础上部结构共同作用分析,确定长短桩地基沉降绝对值和倾斜值是否符合规范要求。如局部沉降绝对值或者倾斜值超过规范要求,则应通在薄弱区域补强,从而使得建筑物变形满足规范要求。

在进行地基-基础-上部结构共同分析之前,首先应研究勘察报告,判断是否由于地层的原因导致施工期间产生长短桩。其次,应收集结构设计相关资料,例如PKPM荷载文件(传至基础顶面)、上部结构图纸、桩位布置图等。再次,应获得完整的桩基施工记录。在上述资料完备的前提下方可进行计算工作。

3 工程实例

3.1 某土-岩结合地层中 PHC 管桩的处理

某剪力墙结构,地上33层,地下一层,送桩深度约为7.15 m。工程桩采用PHC500AB(125)管桩,配D型开口桩靴(按照国标管桩图集选用),共352根。采用静压法施工,桩长根据持力层起伏情况在10.0~15.0 m左右,单桩承载力标准值为4000 kN。鉴于持力层强风化闪长岩岩面标高起伏较大,要求压桩终压力为4600 kN。

根据勘察报告,建筑物所在场地桩基设计参数如表1所示。典型工程地质剖面如图4所示。

在zsoil.pc v2010中建立地基-基础-上部结构共同作用分析模型,如图5所示;并采用三维地层钻孔差

值技术模拟地层的空间不均匀分布,桩端与持力层的空间关系如图6所示,桩长采用桩基施工记录实际打设桩长。有限元分析结果如图7,8所示。

表 1 桩基设计参数

Table 1 Parameters for pile design

地层名称	预应力管桩		钻孔灌注桩		
	q_{sk} /kPa	q_{pk} /kPa	q_{sk} /kPa	q_{pk} /kPa	f_k /MPa
②黄土状粉质黏土	35		33		
② ₁ 碎石	120		115		
③粉质黏土	52		50		
④黏土	80		78		
④ ₁ 碎石	150		145		
⑤残积土	67		65		
⑥强风化闪长岩	140	8000	135	3000	
⑦中风化闪长岩					12.0

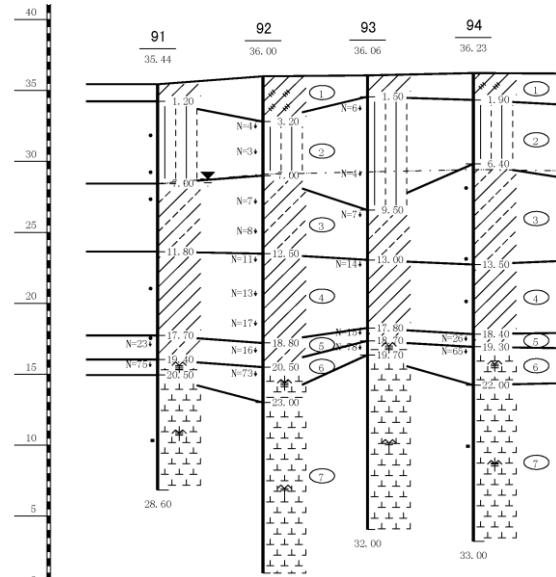


图 4 典型工程地质剖面

Fig. 4 Typical geological profile

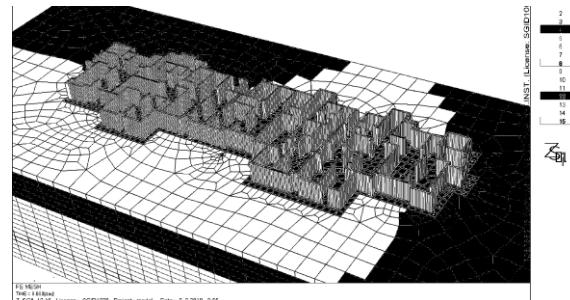


图 5 地基-基础-上部结构有限元计算模型

Fig. 5 FEM model of soil-foundation-superstructure

分析结果表明:沉降最大值未发生在建筑物形心处;建筑物的最终沉降量最大值约为11.6 cm(不考虑沉降经验系数的修正),倾斜量小于1.0‰,沉降量及

倾斜值均满足规范的要求；桩基受力不均匀，受力最小桩约为最大桩的50%；边桩承受的竖向荷载约为1400~1700 kN左右，电梯井处单桩承受的工作荷载约为2000 kN。

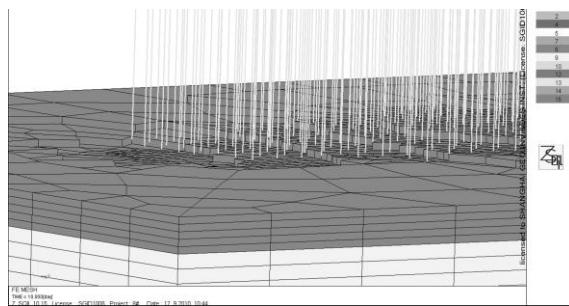


图 6 桩基与持力层（强风化层）的关系

Fig. 6 Relationship between pile toe and bearing layer (weathered layer)

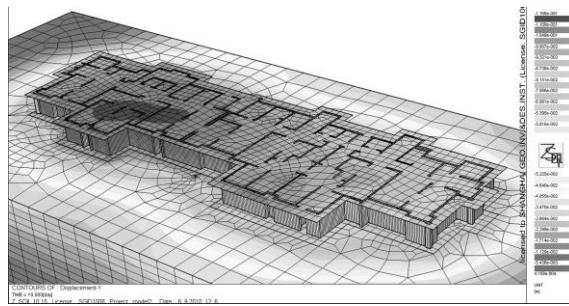


图 7 建筑物沉降云图

Fig. 7 Contour map of settlement of building

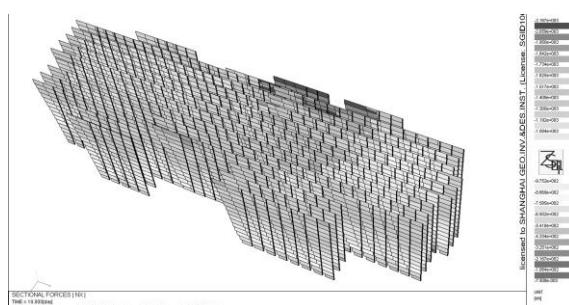


图 8 桩身轴力分布

Fig. 8 Axial force of piles

3.2 某碎石夹层地层施工过程中长短 PHC 管桩的处理

某综合体地下工程桩基采用PHC 500 B (125) 管桩，有效桩长为30.0 m (15.0 m+15.0 m)，共594根。由于沉桩需穿透⑦2层细砂、⑧层卵石土形成的透镜体或者夹层，有274根管桩欠送(桩端标高高于设计标高)长度2.0~7.0 m。场地典型工程地质剖面如图9所示，桩基工程设计参数如表2所示。

在zsoil.pc v2010中建立地基-基础-上部结构共同作用分析模型，如图10所示；并采用三维地层钻孔

差值技术模拟地层的空间不均匀分布，桩端与持力层的空间关系如图11所示，桩长采用桩基施工记录实际打设桩长。有限元分析结果如图12，13所示。

表 2 桩基设计参数

Table 2 Parameters for pile design

土层名称	预制桩		钻孔灌注桩	
	q_{sk} /kPa	q_{pk} /kPa	q_{sk} /kPa	q_{pk} /kPa
②粉质黏土	55		50	
③粉土	50		45	
④粉质黏土	45		40	
⑤ ₁ 粉质黏土	65		60	
⑤粉质黏土	65		60	
⑤ ₃ 黏土	80		75	
⑤ ₂ 中砂	70	5000	65	
⑥黏土	85	3500	80	1100
⑥ ₁ 粉质黏土	75	2700	70	1000
⑦粉质黏土	75	2700	70	1100
⑦ ₁ 黏土	85	4000	80	1100
⑦ ₂ 细砂	70	4500	65	1200
⑧ ₁ 中砂	75	7000	70	1600
⑧卵石土	170	10000	150	2200
⑧ ₂ 粉质黏土			75	1200

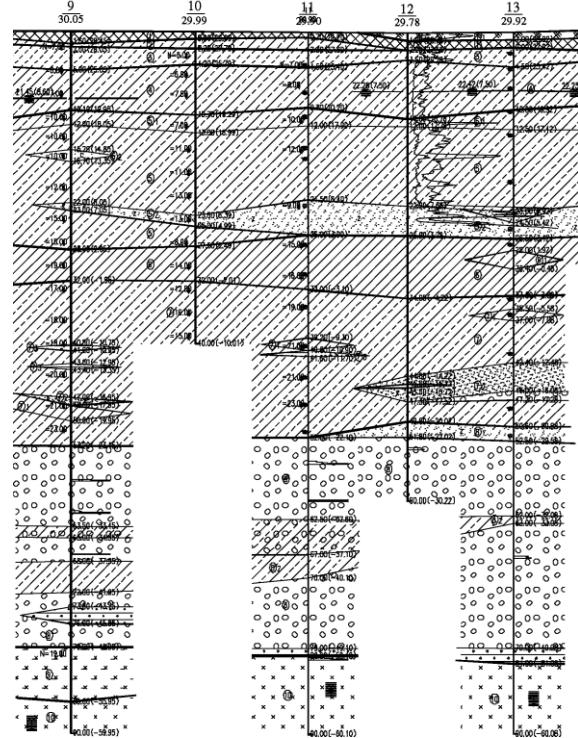


图 9 典型工程地质剖面

Fig. 9 Typical geological profile

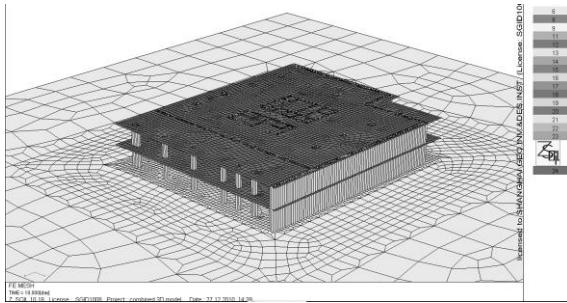


图 10 地基 - 基础 - 上部结构有限元计算模型

Fig. 10 FEM model of soil-foundation-superstructure

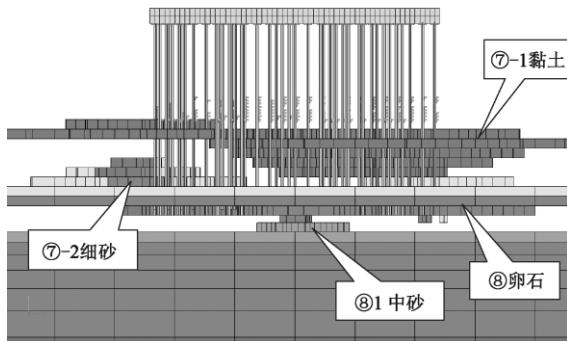


图 11 桩基与持力层的关系

Fig. 11 Relationship between pile toe and bearing layer

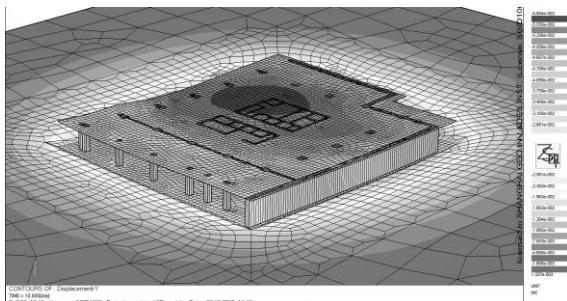


图 12 建筑物沉降云图

Fig. 12 Contour map of settlement of buildings

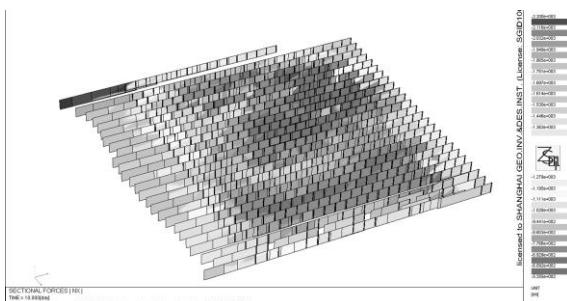


图 13 桩身轴力分布

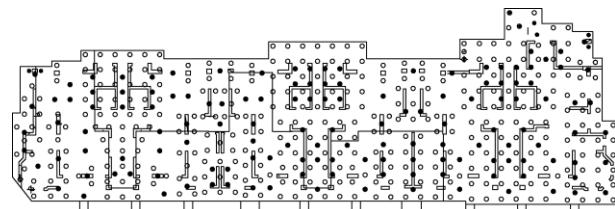
Fig. 13 Axial force of piles

分析结果表明: 沉降最大值未发生在建筑物形心处; 最大沉降5.85 cm(核心筒处), 最小沉降约为2.90 cm(南侧筏板边), 最大差异沉降约为2.95 cm, 倾斜量小于1.0%, 沉降量及倾斜值均满足规范的要求; 桩

基受力不均匀, 桩基的桩顶反力为520~2200 kN, 平均值约为950 kN。

3.3 某项目结构增层长短 PHC 管桩的处理

某商业区两栋高层建筑(#8, #9), 剪力墙结构, 地上均设33层, 地下设2层。原先结构设计单位采用PHC500A-100和PHC400A-95型桩, 桩长分别约为35, 24 m。工程桩已经先期施工完毕, 但由于建筑和结构设计变更, 建筑物总荷载增加, 须对桩基础加强, 建筑物楼下共补打约250根35 m长的PHC500AB-125管桩, 变更后的桩位图(#8楼为例)如图14所示, 长短桩竖向剖面如图15所示。



- 原先设计且已经施工的PHC管桩
- 变更设计后追加的桩

图 14 补桩后的最终桩位图 (#8 楼)

Fig. 14 Layout of final piles (#8 building)

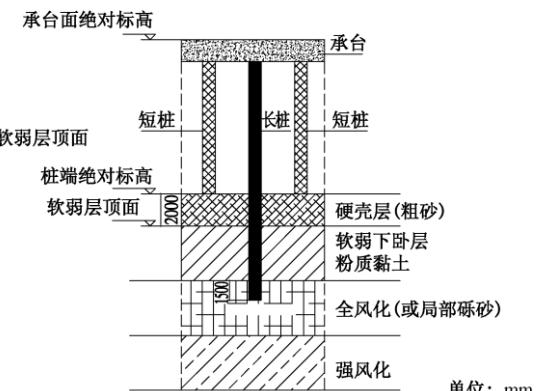


图 15 长、短桩持力层示意图

Fig. 15 Bearing layer with long-short piles

土层参数、地质剖面等信息参见文[3]。在zsoil.pc v2009中建立地基 - 基础 - 上部结构共同作用分析模型, 如图16和图17所示; 有限元分析结果如图18所示。

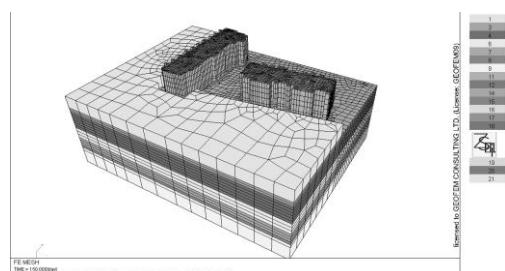


图 16 有限元分析模型

Fig. 16 FEM model

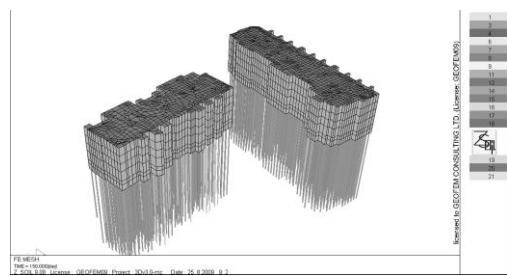


图 17 上部结构 - 桩基模型

Fig. 17 FEM model of superstructure-pile foundation

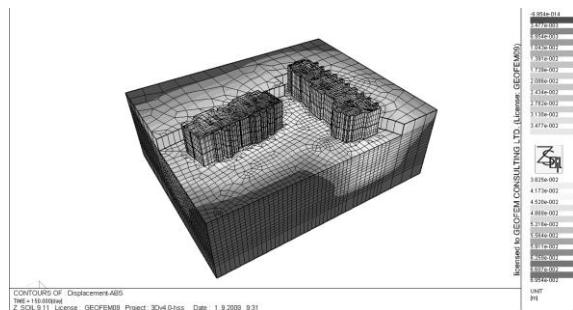


图 18 建筑物沉降云图

Fig. 18 Contour map of settlement of buildings

分析结果表明,最大沉降约为6.95 cm, 倾斜量小于1.0‰, 沉降量及倾斜值均满足GB50007—2002《建筑地基基础设计规范》的要求; 桩基受力不均匀, #8楼长桩平均约为2260 kN, 短桩平均值约为1140 kN, 长、短桩的平均荷载比约为1.98:1; #9楼长桩平均约为1990 kN, 短桩平均值约为1050kN, 长、短桩的平均荷载比约为1.90:1。

4 结 论

本文探讨了采用地基 - 基础 - 上部结构共同作用分析的方法, 计算和分析长 - 短PHC管桩基础的工作性能。该方法以变刚度调平理论^[1]及地基 - 基础 - 上部结构共同作用理论^[2]为基础, 以瑞士开发的高性能岩土工程数值分析软件zsoil.pc v2010 x64版本为求解工具。本文还提出了基于上述理论和工具的处理长短PHC管桩基础的方法。本文介绍的三个基于上述理论

处理长短PHC管桩基础的工程实例, 均取得了较好的处理效果。目前, 上述三个实例中涉及的建筑物均已交付使用, 沉降、倾斜等均满足规范要求。

本文所讨论的施工过程中的长短桩问题仅限于持力层起伏较大或有硬夹层等情况。由于密集施工PHC管桩而导致的“跳桩”和欠送其原因更加复杂, 本文介绍方法是否适用还有待进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 刘金砾. 高层建筑地基基础概念设计的思考[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 100 - 105. (LIU Jin-Li. Review and optimization of the conceptual design of foundations for high-rise buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 100 - 105. (in Chinese))
- [2] 董建国, 赵锡宏. 高层建筑设计丛书——高层建筑地基基础 - 共同作用理论实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. (DONG Jian-Guo, ZHAO Xi-Hong. Series of high-rise building design-theory and practice of soil-foundation interaction of high rise building[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 尹骥. 某高层长短桩地基 - 基础 - 上部结构共同作用分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊 2): 1568 - 1572. (YIN Ji. Analysis on co-action of upper structure and long-short pile foundation of a building[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1568 - 1572. (in Chinese))
- [4] 石金龙, 滕延京, 李志勇. 某烂尾楼建筑桩基性能评价[J]. 建筑科学, 2008, 24(1): 84 - 87. (SHI Jin-Long, TENG Yan-Jing, Li Zhi-Yong. The capability evaluation of pile foundation under the super-high building[J]. Building Science, 2008, 24(1): 84 - 87. (in Chinese))
- [5] ZIMMERMANN Th, TRUTY A. Z Soil. PC 2010 manual[R]. Lausanne: ZACE service Ltd. 2010.

(本文责编 孙振远)