

高层建筑沉降特征的有限差分分析

王 林

(河北建设勘察研究院有限公司, 石家庄 050031)

摘 要: 通过对桩基础高层建筑沉降特征的数值模拟分析, 讨论了利用 pile 单元模拟桩基础时, 不同阻尼类型、不同节点联结方式、不同法向弹簧应力下建筑的沉降规律和桩轴力变化情况, 得到一种利用 pile 单元模拟桩基础时建筑沉降的数值分析方法, 为桩基础建筑的数值分析提供参考。

关键词: 桩基础; 沉降特征; 桩轴力; pile 单元

作者简介: 王林(1975—), 男, 吉林通化人, 工程师, 从事岩土工程勘察与数值计算研究。

0 引 言

桩基础是高层建筑地基处理方法中常用的方法, 利用桩基础可以增大地基承载能力, 改善地基基础和结构的受力情况, 合理进行内力分配, 减少地基沉降和不均匀沉降。前人已经对桩基础开展了很多研究, 文献[1]研究了长短桩组合下桩受力, 桩与土的相互作用, 不同刚度的桩与土的承载力分担比; 文献[2]研究了荷载、桩长、地土弹性模量和筏厚等对均匀等长布桩桩筏基础工作性状的影响。文献[3]探讨了初始应力场及桩顶荷载大小、倾角变化对桩身内弯矩与轴力分布的影响曲线, 并且得出了荷载不变倾角增大时, 中桩桩顶的弯矩逐渐增加, 边桩的弯矩则逐渐减小; 荷载倾角不变荷载增加时, 承台下各基桩的弯矩变化规律则随荷载倾角的不同而变化的结论。文献[4]通过桩基础地基下的土-土、桩-桩、桩-土、单桩、群桩的力学性状分析, 提出进行变刚度设计的思想。这些研究都促进了桩基理论的完善和发展。

本文用 pile 单元模拟建筑基桩, 通过设置阻尼类型、桩-土节点联结类型、桩法向弹簧三个方面参数的不同组合, 考察建筑沉降规律分布变化

和桩轴力变化情况, 并与实际沉降观测资料对比, 找到用 pile 结构单元模拟计算桩基础建筑沉降的方法, 为桩基础建筑沉降模拟计算提供了参考。

1 工程概况

1.1 建筑设计及基础

某高层建筑为旧城改造区, 地上建筑 26 层, 地下室 2 层, 碟式建筑, 基础埋深 -4.85 m, 底板厚 1 m, 下铺设 0.20 m 素混凝土垫层。采用混凝土灌注桩基础, 基桩长 18.45~17.65 m, 桩底标高 -23.5 m, 桩径 0.8 m, 共计 55 根。设计单层荷载 15 kPa, 基底平均压力 420 kPa。

1.2 工程地质条件

该高层建筑位于太行山冲洪积山前平原, 地层状况较好, 上部是城市生活杂填土, 向下为均匀的黄土状粉土、粉黏土层, 再向下为中密的粉砂、细砂层, 最下面是密实的卵石、中砂层。地下水埋藏较深, 一般在 -40 m 左右, 并且呈逐年下降的趋势, 建筑地基不必考虑地下水影响。该建筑以第九层密实卵石层为桩端持力层, 具体土层分布情况如表 1 所示。

表 1 地层分布

土层	层底标高 (m)	层厚(m)	重度 (N/m ³)	压缩模量 E _{s+2} (MPa)	泊松比	φ(°)	C(kPa)
1-1 杂填土	-1	1	1 900	11.5	0.31	17	30.3
1 黄土状粉黏	-3	3	1 910	8.1	0.3	32	22.9
2 黄土状粉土	-5	2	1 900	9.6	0.3	20	26.1
3 黄土状粉黏	-8	3	1 880	10	0.3	18	21.4
4 黄土状粉土	-9	1	1 970	15.1	0.3	20.0	26.1
5 粉细砂	-12	4	1 960	26.7	0.28	0.0	40
6 粉土	-16	4	1 950	11.6	0.31	15.7	27
7 粉黏	-19	3	1 960	7	0.33	12.7	50.9
8 细砂	-20	2	1 960	36.7	0.28	0.0	40
9 卵石	-24	4	2 100	50	0.25	0.0	55
10 中砂	-26	2	1 960	40	0.33	0.0	38
11 卵石	-28	2	1 980	14.9	0.25	0.0	55
12 粉黏	-30	2	2 100	17.2	0.33	12.7	50.9
13 中砂	-40	10	2 000	50	0.25	0.0	38

2 数值模拟

采用有限差分程序对高层建筑沉降特征进行模拟分析,考察建筑沉降特征与参数之间的关系以及桩轴力的变化情况,并与实测资料对比,总结数值模拟计算方法。

2.1 计算范围和单元划分

根据基础设计资料及模拟计算要求,计算范围取为长 14 m×宽 15 m×深 46 m。

依据地层分布和基础情况,并考虑一定的计算精度要求,计算模型划分为 74 256 个实体单元,80 028 个实体单元节点(见图 1)。

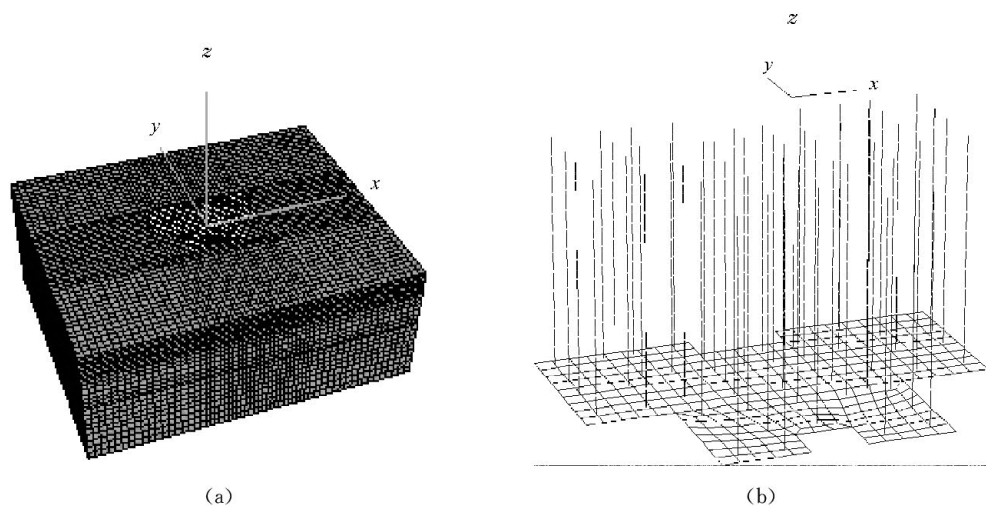


图 1 数值模型

2.2 模型参数及边界条件

(1) 基础参数

根据资料,基础底板及素混凝土垫层采用相应的混凝土参数,具体如下:基础重度为

2 400 N/m³,混凝土弹性模量为 32.5 GPa,泊松比为 0.2;素混凝土垫层重度为 2 400 N/m³,混凝土弹性模量为 25.5 GPa,泊松比为 0.2。

(2) 边界条件

根据实际情况及计算要求,选用的位移边界条件为:模型上表面即地表面为自由边界,其余各外表面均约束法线方向位移。底面采用固定支座边界,四面均采用可动滚轴支座边界。

(3) 本构模型

根据地层情况,土体采用实体单元,摩尔-库仑弹塑性本构模型;基础底板和混凝土垫层采用实体单元,弹性本构模型;基桩选用 pile 结构单元,弹性本构模型。

地下水埋藏较深,不会对地基基础产生影响,所以计算中不用考虑地下水作用。

2.3 模拟计算步骤

在数值计算中,按照土层的应力发展过程和施工情况进行模拟分析。

(1) 初始平衡过程。首先求得自重应力作用下的初始地应力场。

(2) 基坑开挖回弹过程。实际工程是分步开挖,并且留有一定的土层人工开挖,计算中采用一次开挖办法,并固定基坑侧壁水平位移,采用土体回弹模量进行计算,求得基坑开挖后的地层应力场、位移场。

(3) 施做基础底板及基桩。基础底板采用实体单元,基桩采用 pile 结构单元。

(4) 施加建筑荷载。考虑建筑施工过程,共分4级加载,第一级荷载值为150 kPa,第二级荷载值为50 kPa,第三、四级荷载值均为100 kPa,共施加荷载400 kPa。其中,第一级加载使用再压缩模量

计算,其他级别荷载加载时,分别使用相应荷载级别下的岩土压缩模量。

(5) 计算求解,设置计算结束条件为最大不平衡力变化率 $<1.0e^{-5}$,求解建筑最后沉降。

2.4 计算说明

桩基础通过两种方式传递轴向载荷到地基土:沿桩轴向的表面摩擦力(桩侧阻力)和桩端阻力。利用 pile 结构单元可以很好地模拟这两种力学行为,pile 结构单元与实体模型单元节点之间通过耦合弹簧实现相互作用。桩侧阻力通过剪切弹簧产生的剪切应力来反映,桩端阻力通过修改桩端节点属性,添加耦合弹簧来实现。桩端阻力的模拟可以根据桩设计值直接给定桩端截面积和弹簧屈服应力,模拟桩侧阻力则比较复杂,需要通过试算和经验。

3 计算参数分析

为考察计算参数变化对建筑沉降规律的影响,进行了三组对比计算,分别采用不同阻尼类型、不同节点联结方式和不同法向弹簧应力设置。同时考察桩轴力变化。

3.1 不同阻尼类型对建筑沉降和桩受力的影响

设置计算参数使只有阻尼类型不同,考察阻尼类型对建筑沉降特征和桩受力的影响。如表2、图2((c)、(d)、(e)、(f)图中纵坐标为桩深度m,横坐标为力kPa)所示。

表2 不同参数组合计算参数及结果

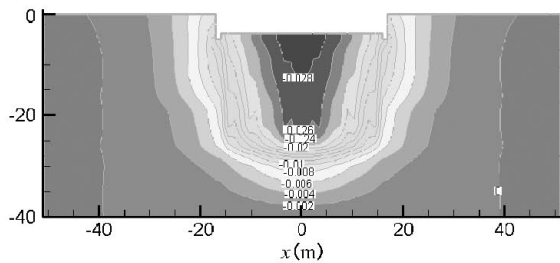
参数	Sc _{oh} (×10 ⁶)	sf _{ric} (°)	K (×10 ¹²)	联结方式	阻尼类型	法向弹簧	S _{max} (m)	沉降百分比	实际沉降 (m)
对比1	1	30	2	自由	局部	无	0.029 3	13.8	0.066 1
对比2	1	30	2	自由	混合	无	0.029 0	13.8	
对比3	3.2	20	4.5	自由	混合	无	0.078 2	67.9	
对比4	3.2	20	4.5	刚性	混合	无	0.052 4	47.7	
对比5	6	10	4.5	刚性	混合	无	0.070 4	64.3	
对比6	6	10	4.5	刚性	混合	有	0.069 3	63.5	

从沉降等值线图中可以看出,改变 pile 单元的阻尼类型对建筑沉降数值影响很小,几乎没有变化。在沉降分布规律方面,加固区域沉降占总沉降的百分比变化也不大,沉降曲线只有很小的变化。

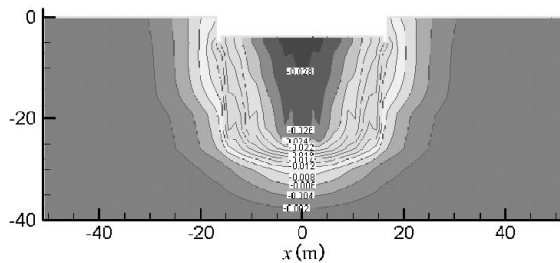
对比计算2中桩的最大轴力为6103 kN,基

础沉降为0.029 0 m,与对比计算1相比,桩轴力分布变化不大,但是桩剪切弹簧应力分布变化较大,混合阻尼时桩剪切应力曲线出现了两次明显的变向。

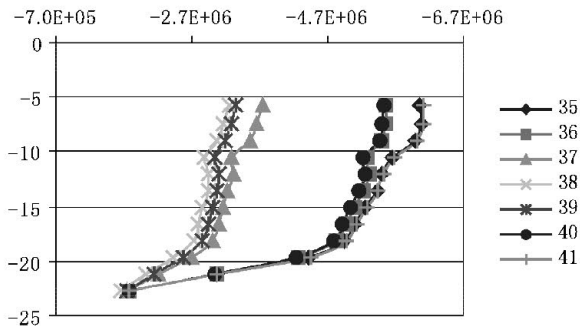
考虑计算精度要求,建议依据 flac3D 手册说明,使用混合阻尼。



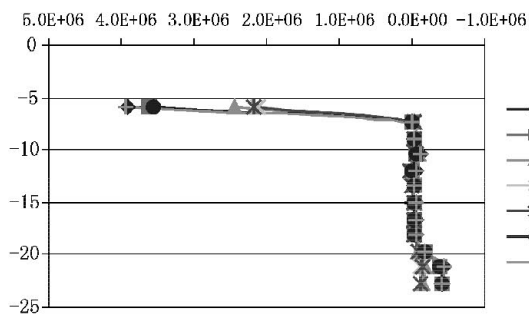
(a) 对比 1 纵向沉降等值线图



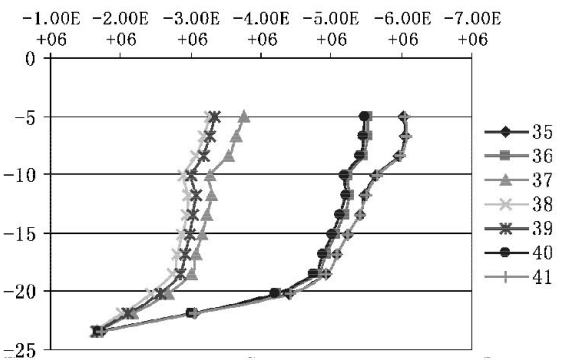
(b) 对比 2 纵向沉降等值线图



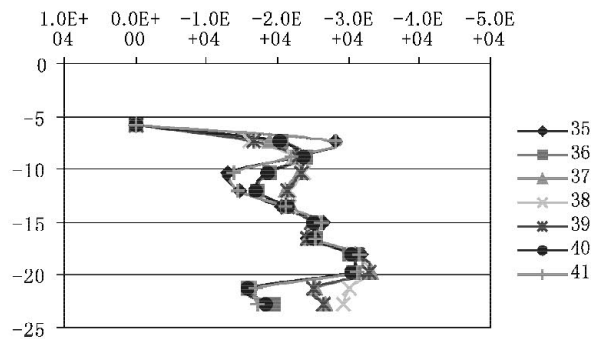
(c) 对比 1 桩轴力曲线图



(d) 对比 1 剪切弹簧应力曲线图



(e) 对比 2 桩轴力曲线图



(f) 对比 2 剪切弹簧应力曲线图

图 2 不同阻尼类型计算结果图

3.2 不同桩-土联结方式对建筑沉降及桩受力的影响

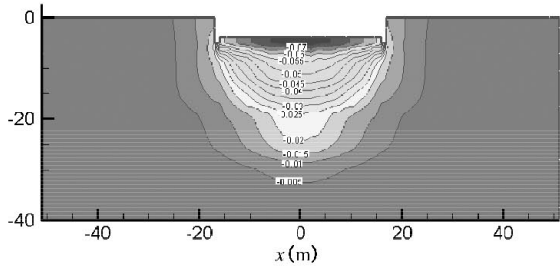
设置计算参数使只有桩-土联结方式不同,考察桩-土节点联结方式对建筑沉降特征和桩受力的影响。假设破坏发生在桩-土接触面,剪切弹簧参数取小于岩土参数的值。如表 2、图 3((c)、(d)、(e)、(f)图中纵坐标为桩深度 m,横坐标为力 kPa)所示。

从沉降等值线图中可以看出,桩顶节点与土实体单元网格节点的接触属性变化时对计算结果影响很大。如果桩-土是刚性联结,则筏基最大沉降可以减小 33.0%(由 0.078 2 m 减小至 0.052 4 m),说明桩基础分担的荷载显著提高,建筑荷载传递到地基深处,加固区域沉降减小。同时沉降等值

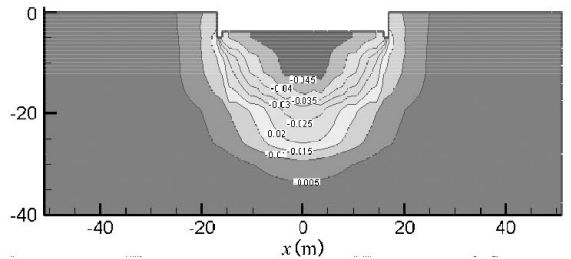
线也明显不同,桩-土自由联结时,桩基础承受荷载较小,桩间土分担了过多的载荷,使得加固区土体沉降过大,建筑总体沉降变大,桩基础失去使用意义。

在对比计算 3、对比计算 4 中假设桩-土接触面发生破坏,对比计算 4 中桩的最大轴力为 3 535 kN,基础沉降为 0.052 4 m;桩的最大轴力增大 102.9%(由 1 742 kN 增大至 3 535 kN)。

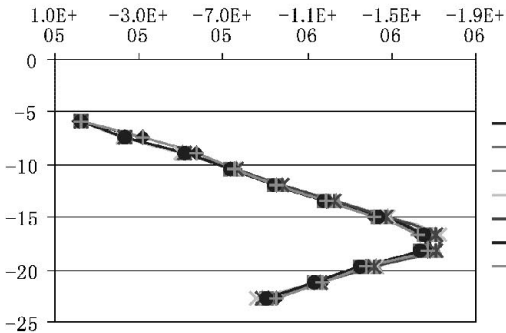
从桩的受力看,采用自由联结时,桩受负摩阻力区域较大,桩的承载力下降,筏基沉降增大,不利于基础承载能力的发挥。而采用刚性联结时桩负摩阻力区域减小,桩承受较大荷载,桩轴力增大,桩基加固区域受力减小,建筑沉降减小,桩充分发挥性能。



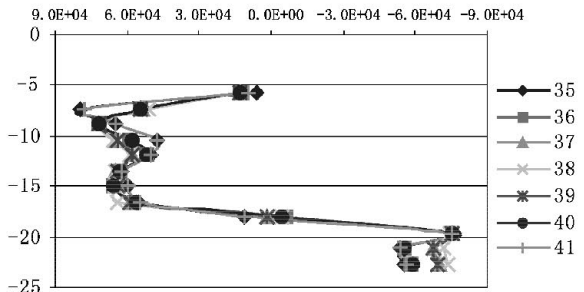
(a) 对比 3 纵向沉降等值线图



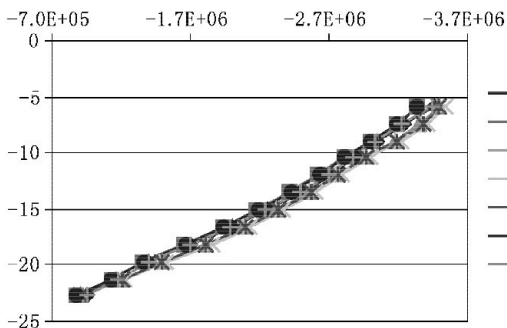
(b) 对比 4 纵向沉降等值线图



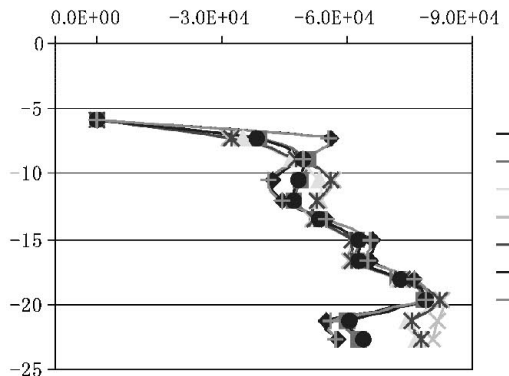
(c) 对比 3 桩轴力图



(d) 对比 3 剪切弹簧应力曲线图



(e) 对比 4 桩轴力图



(f) 对比 4 剪切弹簧应力曲线图

图 3 不同桩-土联结方式计算结果图

建议在 pile 单元模拟计算中使用刚性联结比较合适。

3.3 考察桩法向弹簧对建筑沉降和桩受力的影响

设置计算参数使只有法向弹簧参数不同,考察法向弹簧参数对建筑沉降特征和桩受力的影响。同时假设变形破坏发生在桩土接触面,设置参数使桩的最大轴力接近设计值,计算方法依据 pile 单元的力学行为。如表 2、图 4((c)、(d)、(e)(f)图中纵坐标为桩深度 m,横坐标为力 kPa)所示。

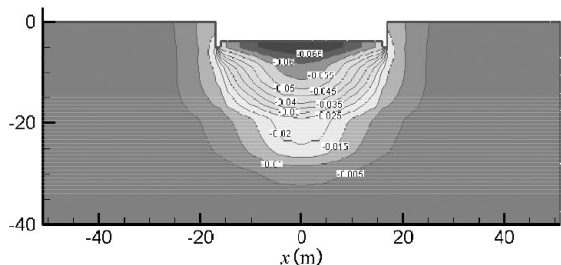
从建筑沉降等值线图可以看出,建筑沉降最大值由 0.070 4 m 减至 0.069 3 m,只是减少了 1.56%,变化数量和百分比都很小。同时沉降等

值线也没有发生明显变化,加固区域沉降占总沉降的百分比也变化不大。可见法向弹簧参数对沉降计算影响较小。

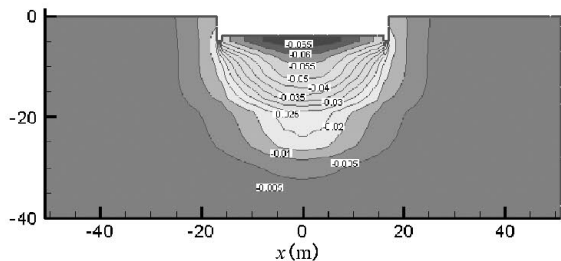
对比计算 5、对比计算 6 中将桩的最大轴力控制在接近桩轴力设计值,此时桩的最大轴力为 2 146 kN,基础沉降为 0.070 4 m。在计算 5 与计算 6 中,桩应力分布和受力状况基本没有变化。

计算中为使桩受力状况简化,加快计算收敛速度,建议略去法向弹簧。

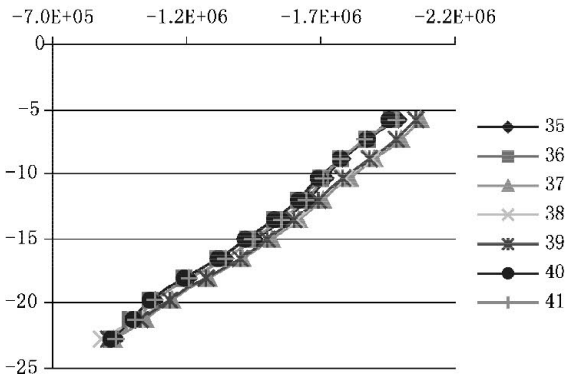
通过以上三种不同参数设置的对比计算,可以看出,在有限差分程序中使用 pile 结构单元模拟建筑桩基时,采用混合阻尼类型、桩与土体单元间使用刚性联结、忽略法向弹簧设置是比较合适的。



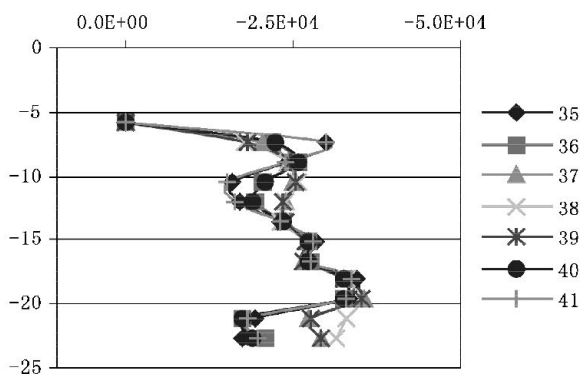
(a) 对比 5 纵向沉降等值线图



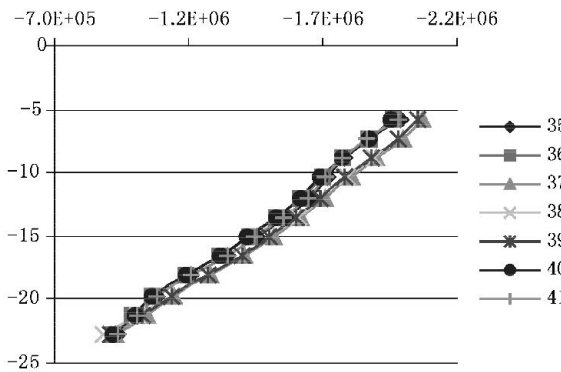
(b) 对比 6 纵向沉降等值线图



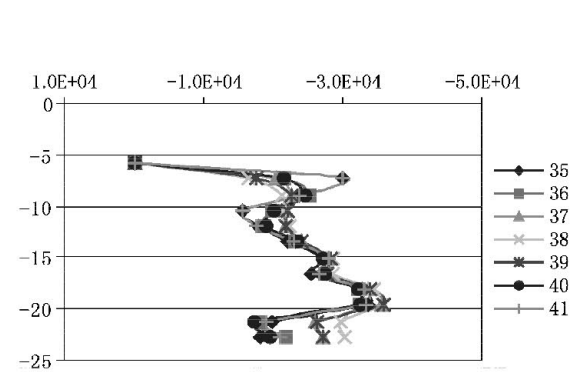
(c) 对比 5 桩轴力图



(d) 对比 5 剪切弹簧应力曲线图



(e) 对比 6 桩轴力图



(f) 对比 6 剪切弹簧应力曲线图

图 4 不同法向弹簧设置计算结果图

4 结论及讨论

利用有限差分程序中的 pile 结构单元模拟桩基础是比较复杂的过程,需要经验和试算相结合。从以上的数值模拟计算及对结果的分析中,可以看出:

(1) 从阻尼类型上看,混合阻尼和局部阻尼对结果影响不大,从计算原理上考虑建议采用混合阻尼。

(2) 从桩土节点联结类型上看,联结类型对结果影响很大,分析岩土体变形和受力原理,建议采用刚性联结比较合适。

(3) 从 pile 结构单元法向弹簧的影响上看,当单元结构法向弹簧参数是在 10^{12} 数量级上,对结

果的影响不是很大。

(4) 在使用混合阻尼类型、桩-土间采用刚性联结的情况下,若桩土变形破坏发生在桩土接触面上时,通过合理设置 pile 计算参数使得桩轴力接近桩承载力设计值,则得到的建筑沉降规律与实际沉降规律非常接近。

(5) 需要考虑桩土破坏发生的位置,是在桩土接触面还是在桩间土内部,这涉及计算参数的设定。文中计算的当桩轴力接近设计值时,建筑模拟计算沉降与实际沉降观测结果接近,是在假设破坏发生在桩土接触面条件下的,当岩土实际破坏发生在桩间土时是不是还有这样的结果值得研究。此外,计算中筏板与垫层都是实体单元,网格节点

自动联结,在桩单元与垫层单元之间新建联结,形成筏-垫层-桩的共同作用,而在桩土间通过建立联结形成桩土的相互作用,这样考虑筏-垫层-桩的协同作用和群桩作用是不是合适值得深入探讨。

参 考 文 献

- [1] 杨桦,杨敏.长短桩组合桩基础工作性状及工程设计问题研究[D].上海:同济大学,2006.
- [2] 刘前曦,侯学渊,章旭昌.均匀等长布桩桩筏基础工作性状研究[J].地下工程与隧道,1997(1):2~8.
- [3] 邹新军,赵明华,邬宝林.成层地基中倾斜受荷群桩的非线性有限元分析[J].中南大学学报:自然科学版,2006,37(14):820~825.
- [4] 刘金砺,迟铃泉.桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J].岩土工程学报,2000,22(2):151~157.