

超高层建筑桩筏基础筏板弯矩时变效应分析*

赵昕^{1,2}, 袁聚云^{3,4}, 刘射洪^{3,4}

(1 同济大学建筑工程系, 上海 200092; 2 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092;
3 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 4 同济大学岩土及地下工程教育部重点
实验室, 上海 200092)

[摘要] 在超高层建筑结构与地基基础共同作用过程中,材料、结构及荷载均是时变的。结合工程实例,从地基沉降的时变性规律及上部结构的时变性规律出发,采用以时间切片的形式考虑时变效应的分析方法,通过 PLAXIS 和 ETABS 软件分析超高层建筑地基-基础-上部结构共同作用体系的时变性对桩筏基础筏板弯矩的影响。分析结果表明,对于高 500m 以上的超高层建筑,这种影响在工程允许范围之内,即传统计算方法的一次加载分析就能满足筏板弯矩的计算精度要求。

[关键词] 超高层建筑; 时变性沉降; 施工过程; 共同作用; 筏板弯矩

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2016)02-0065-06

Time-dependent raft bending moment analysis for pile-raft foundation of super tall buildings

Zhao Xin^{1,2}, Yuan Juyun^{3,4}, Liu Shehong^{3,4}

(1 Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2 Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3 Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4 Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the interaction process between superstructure and foundation for super tall buildings, materials, structures and loads are all time-dependent. Combined with engineering project and based on the time-dependent features of settlement and superstructure, time-slicing analysis approach was used to consider the time-dependent effects. Influence of time-dependent of integrated system of super tall building ground-foundation-superstructure on raft bending moment of pile-raft foundation was carried out by software PLAXIS, ETABS. The analysis results show that the bending moment differences in super tall buildings raft caused by the time-dependent effect are within permissible range of engineering practice for the super tall buildings over 500m. The once-loading analysis in traditional calculation method can meet the calculation accuracy requirements of the raft bending moment.

Keywords: super tall building; time-dependent settlement; construction sequence; interaction; raft bending moment

0 引言

随着超高层建筑的大量兴建及计算机技术的迅速发展,对考虑时间效应的地基-基础-上部结构共同作用的研究也有了较大进展,并越来越受到工程界的重视。1975年,Wood和Larnach^[1]采用一维Terzaghi固结模型,用有限差分方法进行了地基-基础-上部结构共同作用分析,并首次在分析中考虑了时间效应的影响。1982年,Narayanan和Beskos^[2]首次在地基-基础-上部结构共同作用分析中考虑了地基流变的影响。此后,许多学者^[3-5]对考虑地基固结作用、考虑地基流变特性的地基-基础-上部结构共同作用进行了大量研究。在上述研究基础上,陈锦剑、王建华等^[6,7]综合考虑地基固结和地基流变特性的耦合效应,对考虑时间效应的地基-基础-上部结构共同作用理论及参数进行了深入研究。

对于地基-基础-上部结构共同作用体系的研

究,目前主要采用有限元、边界元及混合元等数值计算方法和离心机试验、振动台试验等模型试验方法,研究对象多为高度较低、形式较简单的结构,研究内容主要侧重于地震作用下的动力特性研究^[8,9]。同时,也有很多学者试图通过结构动力学、土动力学等理论来阐释地基-基础-上部结构共同作用体系的受力变形机理,以研究三者的相互影响。

但是,上述研究不是局限于只考虑地基沉降的时变性规律,就是局限于只考虑上部结构的时变性规律,且研究对象涉及超高层建筑的较少,没有对超高层建筑地基-基础-上部结构共同作用体系进行完整、系统的时变作用耦合效应分析。因此,积极研究

*上海市优秀技术带头人计划(14XD1423900),上海市科技攻关计划(09dz1207704)。

作者简介:赵昕,博士,高级工程师,硕士研究生导师,Email: 22zx@tjadri.com。

探讨地基-基础-上部结构共同作用体系的时间效应对桩筏基础和上部结构内力的影响,对合理分析设计超高层建筑和节约工程造价具有重要意义。

本文从地基沉降的时变性规律及上部结构的时变性规律出发,采用以时间切片的形式考虑时变效应的分析方法,重点研究探讨超高层建筑地基-基础-上部结构共同作用体系的时变性对桩筏基础筏板弯矩的影响。

1 地基-基础-上部结构共同作用分析方法

1.1 有限单元法

桩筏基础以其良好的承载、调平、减小差异沉降等特性成为软土地区高层、超高层建筑的一种主要基础形式。其分析理论也经历了三个阶段:第一阶段为考虑静力平衡的简化分析方法;第二阶段为考虑地基基础共同作用的分析方法;第三阶段为考虑上部结构与地基基础共同作用的分析方法^[10]。随着计算机技术的发展,使得有限单元法逐渐成为进行地基-基础-上部结构共同作用分析的最有效的方法。

目前在对采用桩筏基础的超高层建筑进行地基-基础-上部结构共同作用分析时,一般采用有限单元法将上部结构(含地下室)、筏板基础、桩土三者进行整体建模。同时,为减少节点数量,使求解方便,常将桩土对筏板的作用等效为作用在桩顶处的竖向点弹簧(图1)。

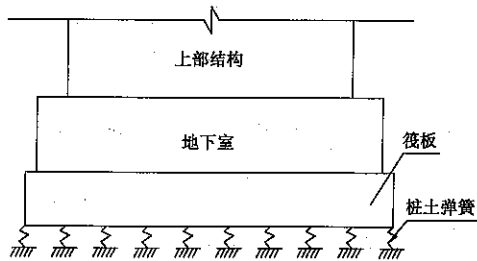


图1 桩土弹簧单元示意图

地基-基础-上部结构共同作用研究中的基本单元为桩土弹簧,其刚度可按照预估平均沉降量计算方法、群桩中单桩 $P-S$ 曲线法、静载试验 $Q-S$ 曲线法、变基床系数迭代法或经验方法确定^[11]。

1.2 时变效应分析方法

地基-基础-上部结构共同作用体系的时变作用是相互耦合的,其计算是一个相互迭代,直至收敛的复杂过程。该问题主要涉及三部分内容,即地基基础沉降变形的时变性规律、上部结构的时变性规律和共同作用理论。地基基础沉降变形的时变性包括施工阶段沉降变形的时变性和工后长期沉降变形的时变性;上部结构的时变性是指施工过程及工后生

命周期内结构刚度、强度、内力及变形的变化;共同作用理论是联系地基基础沉降变形时变性与上部结构的时变性的桥梁。

地基-基础-上部结构共同作用时变效应分析方法可以考虑地基沉降和上部结构的时变性耦合效应,同时通过整体建模分析,可以较为方便地计算各工况下上部结构、基础和地基的内力,从而提高设计水平。采用该方法计算时,为节约计算时间,常需减少上部结构施工模拟加载次数,即对结构的几何形态、刚度及竖向荷载的时变性进行简化处理。同时,该方法仅部分考虑了上部结构的时变性,并未考虑水平荷载及温度作用等的时变性。对于地基沉降的时变性,该方法以时间切片的形式将时变沉降换算为不同时间节点的桩土弹簧刚度,再反映到上部结构模型中,然后进行地基-基础-上部结构的共同作用分析,如图2所示,图中 $[K_1], [K_2], \dots$ 等表示不同时间节点的桩土弹簧刚度矩阵。

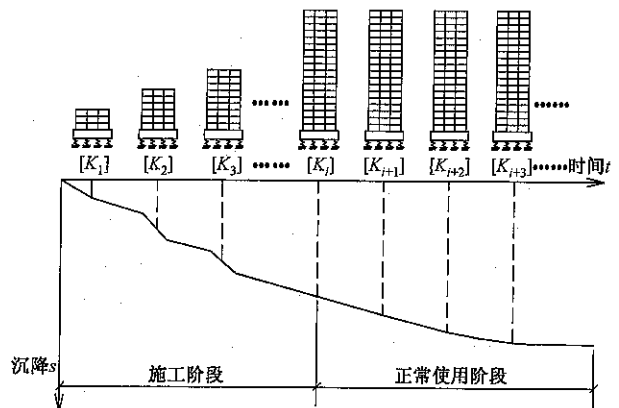


图2 地基-基础-上部结构共同作用时变效应分析方法示意图

2 工程算例

2.1 工程概况

本文分析所采用的工程算例为上海中心大厦。上海中心大厦位于上海浦东新区陆家嘴金融中心区,与金茂大厦、环球金融中心共同组成一组呈三角的“品”字形关系的建筑群。上海中心大厦为多功能摩天大楼,主要用途为办公、酒店、商业和观光等公共设施。上海中心大厦塔楼高632m(结构高度为581m),共124层。塔楼平面布置呈圆形,上下中心对齐并逐渐收缩。塔楼的外层幕墙形状近似尖角削圆了的等边三角形。从建筑的底部一直扭转到顶部,每层扭转约为 1° ,总扭转角度约为 120° 。

上海中心大厦塔楼抗侧力体系为巨型框架-伸臂-核心筒结构。其中,首层核心筒平面尺寸为 $30\text{m} \times 30\text{m}$,底层外框架中心距核心筒20m。底层剪力

墙厚 1.2m,巨柱截面尺寸为 5.3m × 3.7m。塔楼沿竖向共分为 8 个区段和 1 个观光层,在每个区段的顶部均设置有设备层和避难层,在 8 个设备层布置 6 道两层高的外伸臂桁架和 8 道箱形空间环带桁架,6 道伸臂桁架分别位于结构的 2,4,5,6,7,8 区。塔楼模型如图 3 所示。

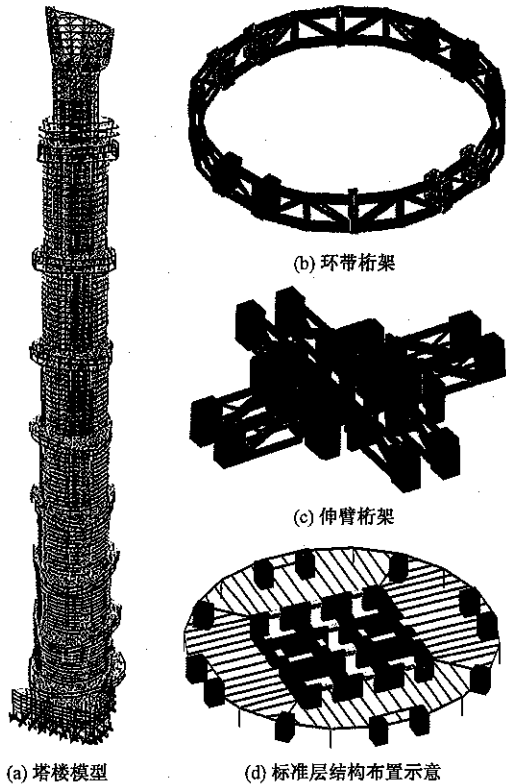


图 3 塔楼模型示意图

上海中心大厦地处 7 度抗震设防烈度区,场地类别为 IV 类。该项目整个基底面积约为 3.0 万 m²,总建筑面积约为 52 万 m²,其中地上建筑面积约为 38 万 m²。整个场地下设 5 层地下室,基础埋深约为 30m,塔楼下筏板厚度为 6m,筏板面积为 8 945m²。本工程桩基采用钻孔灌注桩(后注浆),混凝土强度等级为 C50,持力层取 ⑨₂₁ 层粉砂,桩总数 955 根,桩径 1m,相邻桩距 3m,采用空间变刚度布桩。根据布桩方式不同,整个塔楼筏板可分为 4 个区域:核心区(A 区)、巨柱区(C 区)、扩展区(B 区)、外围区(D 区);其中 A,C 区采用梅花布桩,B,D 区采用矩形布桩(图 4)。A 区桩的有效桩长为 56m,单桩承载力特征值为 11 000kN;B,C,D 区桩的有效桩长为 52m,单桩承载力特征值为 11 000kN。同时,为增强核心筒、巨柱等上部结构构件与基础筏板的连接,从而更为有效地利用上部结构刚度对筏板内力的有利影响,在核心筒与巨柱之间以及巨柱周边设置多片翼墙,如图 4 所示。

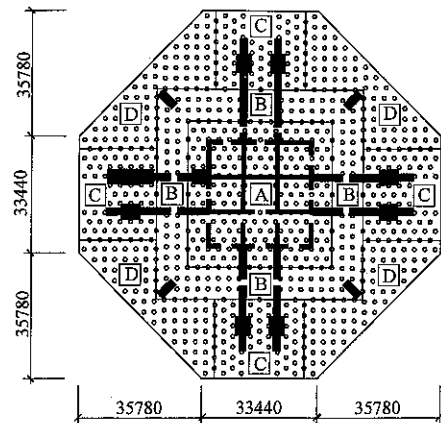


图 4 塔楼筏板桩位布置图

2.2 分析工况

在超高层建筑桩筏基础时变效应分析中,主要影响因素包括施工过程、筏板混凝土收缩徐变和桩土弹簧刚度取值等^[12,13]。为便于分析,本算例取 3 种工况进行计算,如表 1 所示,其中,桩土弹簧刚度恒定值是假定其在整个施工过程及正常使用阶段均不变,实为一种简化方法;而桩土弹簧刚度时变值是以时间切片的形式分阶段计算得到不同的桩土弹簧刚度值,其更接近实际情况。

分析工况 表 1

工况	工况 1	工况 2	工况 3
施工过程	不考虑	考虑	考虑
筏板混凝土收缩徐变	不考虑	不考虑	不考虑
桩土弹簧刚度	恒定值	恒定值	时变值
备注	常规共同作用计算方法,一步加载工况	设计施工工况	考虑时变效应分析方法,实际施工工况

本文主要采用 PLAXIS 软件来分析地基沉降,而采用 ETABS 软件来分析上部结构及筏板的内力。

2.3 桩土弹簧刚度取值

2.3.1 桩土弹簧刚度恒定值

本算例中桩土弹簧刚度恒定值需根据地区经验及专家意见等综合确定,如表 2 所示。

桩土弹簧刚度恒定值/(kN/mm) 表 2

取值方法	A 区	C 区	B 区	D 区
参考金茂大厦取值	85 ~ 105	85 ~ 105	85 ~ 105	85 ~ 105
设计单位前期建议值	81.9	117.0	94.5	135.0
设计单位最终建议值	97.5	152.1	112.5	175.5
专家建议值	70 ~ 85	70 ~ 90	80 ~ 95	85 ~ 100
综合确定取值	80	80	90	100

2.3.2 桩土弹簧刚度时变值

本算例中桩土弹簧刚度时变值通过采用地基-上部结构共同作用时变效应分析方法计算得到,并进行均匀化处理,以避免应力集中现象发生。

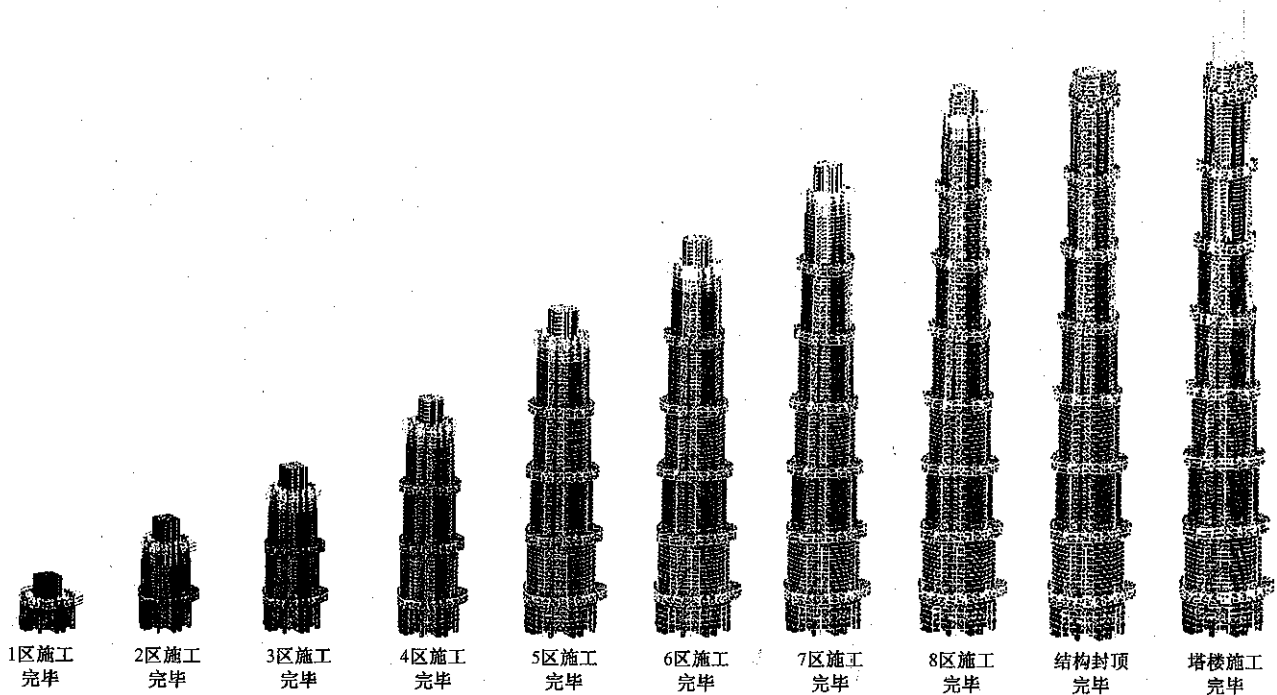


图5 塔楼施工模拟加载

计算时,上部结构施工模拟加载设置10步(图5),每区设置为一个施工步,即1~8区施工完毕分别为1~8施工步,结构封顶完毕、塔楼施工完毕分别为9,10施工步。施工模拟加载阶段及竣工后正常使用阶段均考虑土体固结及流变。

经计算,桩土弹簧刚度时变值取值如表3所示,其变化趋势如图6所示,其中11,12施工步分别为塔楼竣工后3年、塔楼沉降稳定。从图6可以看出,在3施工模拟加载步时,桩土弹簧刚度增大。分析沉降数据得知,该阶段由于地基停止降水,水浮力增大;同时,裙房逆作法开始施工,裙房基坑逐渐开挖,导致塔楼范围地基回弹,沉降减小,从而使桩土弹簧刚度增大。除此之外的其他阶段,弹簧刚度时变曲线趋势平缓,最终沉降稳定时,各区域弹簧刚度趋于相等。

2.4 筏板弯矩分析

根据表1中的3种工况进行筏板弯矩分析,以探讨超高层建筑地基-基础-上部结构共同作用体系的时变性对桩筏基础筏板弯矩的影响。

为便于分析,选取如图7所示的3个截面位置。筏板1-1截面、2-2截面、3-3截面的弯矩变化图和各工况的筏板弯矩对比图分别如图8,9所示,其中,筏板位置0对应图7中3个筏板截面的中心;3个截面在各工况的最大弯矩对比比如表4所示。值得注意的是,筏板截面的弯矩值为截面单位宽度范围内的弯矩大小。

桩土弹簧刚度时变值/(kN/mm)

表3

施工阶段	A区	C区	B区	D区
1区施工完毕	50.2	67.4	69.6	114.5
2区施工完毕	75.0	93.0	86.7	129.6
3区施工完毕	604.6	795.1	675.9	1 004.4
4区施工完毕	79.4	107.9	87.3	127.5
5区施工完毕	83.1	107.8	89.2	120.5
6区施工完毕	84.6	95.8	89.2	101.7
7区施工完毕	85.0	95.7	88.7	98.8
8区施工完毕	84.7	94.8	87.8	96.1
结构封顶完毕	83.4	92.6	86.1	93.5
塔楼施工完毕	83.8	93.3	86.6	93.9
竣工后3年	56.9	57.5	56.8	57.5
沉降稳定	52.9	52.9	52.6	52.8

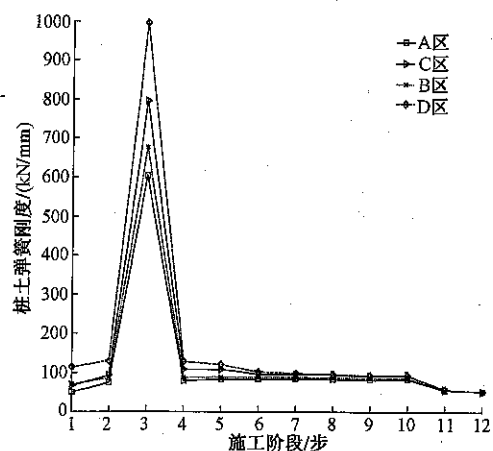


图6 各区域桩土弹簧刚度变化图

从图8可以看到,随着施工进度的进展,筏板弯矩逐渐增大,当塔楼竣工时,筏板弯矩达到最终弯矩

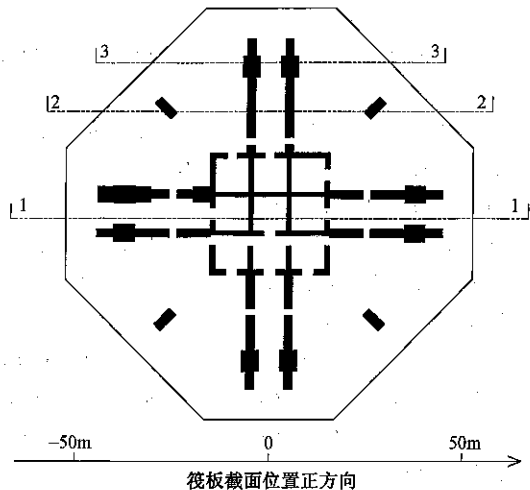


图 7 筏板截面位置

的 90% 以上,这里最终弯矩指的是沉降稳定时的筏板弯矩,因为此后筏板弯矩基本无变化。另外,通过 3 个截面的弯矩对比可以看到,在筏板不同区域,弯矩大小和变化幅度均不相同:一般来说,核心筒区域和巨柱区域的弯矩较大,且巨柱区域的弯矩大于核心筒区域的弯矩;同时,核心筒区域的弯矩变化幅度较大,而巨柱区域的弯矩变化幅度较小。

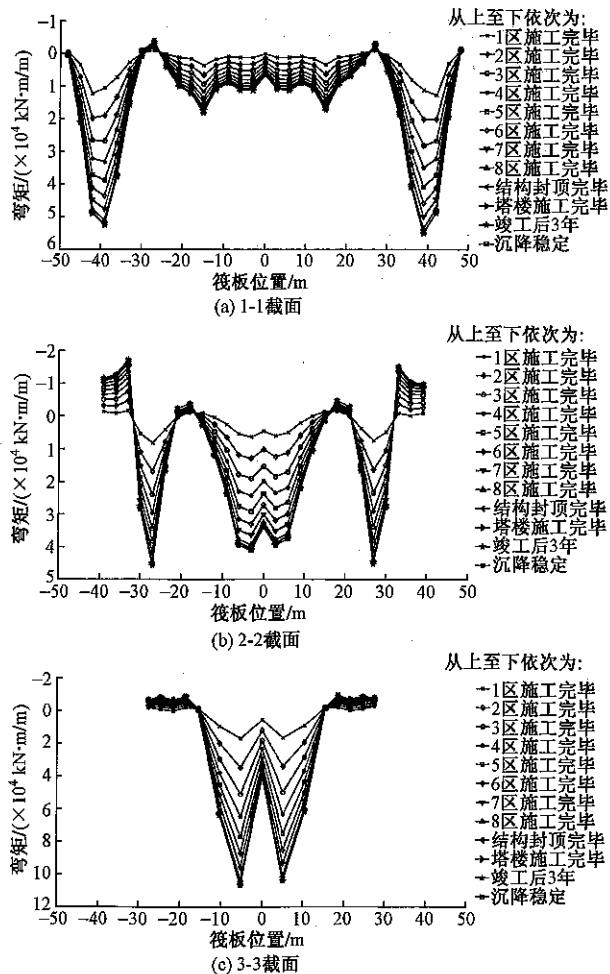


图 8 各截面筏板弯矩变化图

3 个截面最大弯矩对比/(kN·m/m) 表 4

截面	最大弯矩及其所占比例	工况 1	工况 2	工况 3		
				塔楼施工完毕	竣工后 3 年	沉降稳定
1-1	最大弯矩	54 875	54 790	55 103	54 906	54 906
	所占比例/%	100.0	99.8	100.4	100.1	100.1
2-2	最大弯矩	45 048	45 105	45 664	45 192	45 192
	所占比例/%	100.0	100.1	101.4	100.3	100.3
3-3	最大弯矩	113 182	113 229	106 603	106 879	106 879
	所占比例/%	100.0	100.0	94.2	94.4	94.4

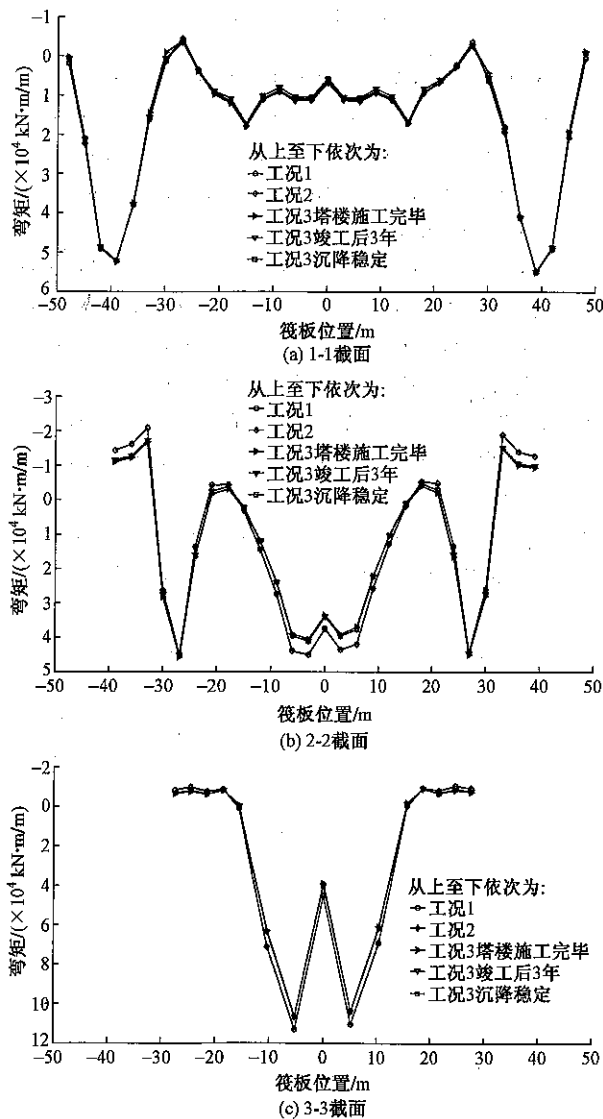


图 9 各工况筏板弯矩对比图

从图 9 和表 4 可以看到,3 种工况的筏板弯矩差异不大,最大弯矩差异均小于 5%,满足工程精度要求。因此,设计时可以认为在整个施工过程中桩土弹簧刚度保持不变,即一步加载分析就能满足筏板弯矩的计算精度要求。

3 结论

(1) 地基-基础-上部结构共同作用时变效应分析方法可以考虑地基沉降和上部结构的时变性耦合

效应,同时通过整体建模分析,可以较为方便地计算各工况下上部结构、基础和地基的内力,从而提高设计水平。

(2)随着施工进度,筏板弯矩逐渐增大,且在筏板不同区域,弯矩大小和变化幅度均不相同。

(3)桩土弹簧的时变性对筏板弯矩影响较小,可忽略不计。设计时可以认为,在整个施工过程中,桩土弹簧刚度值保持不变,只需对其赋一次值即可。

参 考 文 献

- [1] WOOD L A, LARNACH W J. The interactive behavior of a soil-structure system and its effect on settlements [C] // Symposium on Recent Development in the Analysis of Soil Behavior and Their Application to Geotechnical Structures. Kensington, 1975: 75-87.
- [2] NARAVANAN G V, BESKOS D E. Numerical operational methods for time-dependent linear problem [J]. International Journal for Numerical Methods Engineering, 1982, 18(12): 1829-1854.
- [3] 宰金珉,宰金璋.高层建筑基础分析与设计——土与结构物共同作用的理论与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [4] 程泽海,凌道盛,陈云敏.桩筏基础在竖向荷载作用下的时间效应[J].土木工程学报,2004,37(2):73-77.
- [5] 陈云敏,程泽海,凌道盛.考虑固结过程的桩-土-筏三维相互作用分析[J].岩土工程学报,2004,26(5):584-588.
- [6] 陈锦剑,王建华,裴捷.考虑地基固结和流变的上部结构与地基基础共同作用的理论研究与参数分析[J].建筑结构学报,2001,22(5):79-84.
- [7] 王建华,陈锦剑,裴捷.考虑固结与流变的层状粘弹性地基与上部结构的共同作用[J].建筑结构学报,2002,23(4):59-64.
- [8] DUTTA S C, ROY R. A critical review on idealization and modeling for interaction among soil-foundation-structure system[J]. Computers and Structures, 2002, 80(20): 1579-1594.
- [9] KAUSEL E. Early history of soil-structure interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(9): 822-832.
- [10] 钱力航.高层建筑箱形与筏形基础的设计计算[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [11] 雷小虎,巢斯.竖向荷载作用下地基弹簧刚度对超高层建筑柱筏基础筏板的影响[J].结构工程师,2011,27(1):55-60.
- [12] 崔勇.收缩徐变对桩筏基础的影响计算分析[D].上海:同济大学,2013.
- [13] 李鑫.超高层建筑施工分析中的关键问题研究[D].上海:同济大学,2014.