

 华夏英才基金学术文库

沉降计算理论及工程实例

陈祥福 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据高层和超高层建筑深基础的特点和要求,在国内外专家研究基础上,结合著者的设计和施工经验,全面研究了与地基沉降有关的问题,并给出著者若干研究成果,内容包括地基土的本构关系,地基应力计算和变形分析,群桩效应和超长桩性质,国内外各种沉降计算方法,新的中国国家地基基础规范和大量的工程(如上海金茂大厦、青岛中银大厦等)实测数据及分析结果。书中首次考虑深基坑支护结构作用对超高层建筑箱(筏)基础、摩擦桩箱(筏)基础、端承桩(筏)基础等三类基础沉降的影响,并提出其相应的计算方法。首次提出空间变刚度群桩等沉降设计方法,斜地层台阶分层总和法,砂土地基上的箱基综合影响系数法等重要创新结果。采用样条函数来分析结构、基础、地基的共同作用。书末提出了沉降计算研究展望、进一步研究的课题和建议。

本书可供建筑工程、土木工程和水利工程等科技人员、高等院校有关专业的师生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

沉降计算理论及工程实例/陈祥福著. —北京:科学出版社,2005
ISBN 7-03-014714-6

I. 沉… II. 陈… III. ①地基-沉降分析法②地基-沉降(土建)-工程施工 IV. ①TU 433②TU 753

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 129616 号

责任编辑:童安齐 徐一帆/ 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉/ 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 3 月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1—2 500 字数:450 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

销售部电话 010- 62136131 编辑部电话 010- 62138978- 8002

The Theory and Building Cases of Settlement Computation

Chen Xiangfu

This book presents the theory and building cases of settlement computation, especially, the settlement theory of deep foundation on super tall buildings.

Settlement analysis for deep foundations supporting super tall buildings ($> 150\text{m}$ high) is an important on-going problem, which is expected to be resolved progressively with the development of high rise buildings. Based on the characteristics and demands of deep foundations of super tall buildings, this book studies various settlement related issues including soil constitutive model, analysis and calculation of soil stress and strain, effects of group piles, characteristics of long piles, various national and international methods of settlement analysis, the new national soil and foundation codes, and a large amount of field settlement data. Innovatively, the book first describes the effects of deep excavation support structure on settlement of box foundations, frictional-pile raft foundations and end-bearing-pile raft foundations, and then presents its calculation method. The book also presents three innovative methods including a method of settlement calculation for groups piles of different lengths, a stepped layer summation method of settlement calculation for sloping strata, and a comprehensive factored method of settlement calculation for box foundations founded on sand.

Based on the measured settlements of five super tall buildings supported on deep foundations, the book analyses the settlement data measured for the Qingdao Bank of China building. The analysis results show that the settlements calculated using the finite element method and several other methods agree fairly well with the measured data. Through trial calculations and comparisons, the book presents several key study results; for example, the empirical settlement factor for the highly weathered granite in Qingdao is found to be 0.2 and the depth factor for settlement calculation is found to be 0.4. Based on both a study of the measured foundation settlements of four tall buildings (Shanghai Jinmao Building, Shanghai Senmao Building, Shenzhen Saige Building and Guangdong International Building) and a spline function analysis of structural-foundation-soil interaction, the book also presents more than a dozen useful results which can be used as an important guide for foundation design and construction. Finally, some observations and suggestions are made about the future research directions that the analysis of deep foundation settlement may take.

前 言

地基沉降计算是整个地基基础工程中的三大难题之一,至今还没有完全解决。同样,超高层建筑深基础沉降计算也还有没有完全解决的难题。由于沉降实测数据缺乏,研究成果寥寥,更没有系统的研究成果和专著。本书在国内外专家学者几十年研究成果基础上,结合作者三十多年的设计和施工经验,根据超高层建筑深基础的特点和要求,将理论计算结合工程实例全面研究了与地基沉降有关的问题,并给出著者若干研究成果。本书内容包括地基土的本构关系,地基应力计算和变形分析,群桩效应和超长桩特性,国内外各种沉降计算方法。书中重点研究超高层建筑深基础的沉降计算理论和工程实例,并在中国国家地基基础规范和收集整理的工程实测数据研究基础上,首次考虑深基坑支护结构作用对超高层建筑箱(筏)基础、摩擦桩+箱(筏)基础、端承桩+箱(筏)基础等三类深基础沉降的影响,提出了其相应的计算方法;通过对超长桩控制沉降好的突出特性和短桩、中长桩承受荷载能力好的性质研究,首次提出空间变刚度群桩等沉降设计新方法,这是桩基设计的历史性突破,同时提出斜地层台阶分层总和法,砂土地基上的箱基综合影响系数法等创新结果。

本书收集了国内五幢和国外一幢超高层建筑深基础沉降实测数据并进行了深入研究与分析,重点研究了青岛中银大厦(中国建筑北京设计研究院设计)的沉降实测数据,应用有限元法和多种方法分别计算其沉降,理论分析与实测值比较接近。经多次试算和比较研究后,得到若干重要成果,如青岛强风化花岗岩地区的沉降经验系数为 0.2,沉降计算深度调整系数为 0.4;对上海金茂大厦、上海森茂大厦、深圳赛格大厦和广东国际大厦等基础沉降数据研究分析后,也得到若干十分有用的结果,这些结果对设计与施工有重要的指导意义。

本书是理论研究与实际应用的学术专著,又是以科研、设计与施工相结合,并以典型工程沉降实测数据分析研究为基础的技术经验总结。

全书共十章。第一章为绪论,主要介绍国内外超高层建筑和深基础的发展,国内外沉降研究进展。第二章主要介绍六个实用沉降计算地基本构模型和计算参数的选择。第三章主要介绍沉降计算中的力学问题,即地基应力分析的平面问题与空间问题、基础底面的接触压力与接触问题、非均质与各向异性地基中的应力分析。第四章主要介绍地基的变形理论,即地基的压缩特性、地基最终沉降计算、弹性力学的计算方法、初始和固结沉降计算、软土次固结沉降计算、砂土地基固结沉降计算、饱和土变形理论方法、地基沉降的有限元解。第五章主要介绍超高层建筑箱(筏)基础沉降计算方法,即国内外沉降简化计算方法、国家规范计算法,著者首次提出的考虑深基坑支护结构作用的超高层建筑箱(筏)基础沉降计算方法,以及青岛中银大厦(中国人自行设计的最高建筑,世界上采用箱基的最高建筑)箱基沉降有限元法计算、考虑支护结构作用的沉降计算公式、箱基沉降计算的综合影响系数法、层状地基样条函数法、沉降计算地区经验系数、五年多实测沉降数据研究与分析结果。由于该工程由作者主持设计,沉降数据完整,分析结果很有参考价值,同时给

出广东国际大厦岩石地基沉降实测数据研究与分析结果。第六章主要介绍超长桩受力特性和沉降计算方法,即单桩与群桩的沉降计算、沉降计算经验公式和简化计算方法,特别研究了超长桩和短桩的特性。第七章主要介绍作者发明的空间变刚度群桩等沉降设计新方法,这是桩基设计的历史性突破,书中还给出设计原理、设计方法和各种设计方案,根据连续化假设,给出沉降计算中的综合模量计算方法。第八章主要对上海金茂大厦和上海森茂大厦“地下墙+ 超长摩擦桩+ 箱基”的沉降观测数据的研究和分析,发现沉降量界规律(即大于 50m 以上的长桩基础,其沉降量为 60~ 100mm),得到若干有用的结论,分析了考虑地下墙支护与承重作用的沉降计算方法。同时采用样条函数子域法分析结构-基础-地基的共同作用、桩与土共同作用、桩与桩共同作用。该法计算的伦敦土桩与桩影响系数同桩距与桩径比曲线比 Poulos 教授弹性积分曲线更接近于实例结果。第九章主要以深圳赛格大厦(岩石地基)的沉降数据研究结果为基础,分析了超高层建筑“地下墙+ 端承桩+ 箱基”联合基础与岩石地基的沉降计算方法。第十章概括本书的主要创新成果和十多项分析研究结论,给出沉降计算理论展望和工程实践需要进一步研究的课题与建议。

本书的顺利出版,作者首先要十分感谢华夏英才基金会的关心和资助,感谢中共中央统战部及其六局、国务院国资委及其群工部、建设部及其科技司、中国建筑工程总公司和同济大学领导的关怀和培养,感谢著者的博士生导师侯学渊教授的指导和教育,感谢著者工作单位中国建筑工程总公司,以及中国建筑北京设计研究院全体同志的支持和帮助。

与此同时,作者十分感谢书稿评审专家:王思敬院士、黄熙龄院士、刘建航院士、许烈烈教授、何广乾教授、张耀宗教授、袁明武教授、陶龙光教授、陈进教授、沈保汉教授、杨敏教授、刘国彬教授、徐伟教授、王建华教授、朱合华教授、汤永净博士和刘波博士等提出宝贵的修改意见和建议,作者采纳了他们的意见,使沉降计算理论体系更加完整,对工程设计与施工更具指导意义。

在本书写作过程中,始终得到曾肇河教授、毛志兵教授、章旭昌教授、周正茂博士、杨炳蓉高级工程师、卓发成硕士、陶利兵硕士、王泽辉硕士、张忠坤博士和汪敏博士等大力帮助和支持,借此机会向他们表示衷心地感谢。

由于工程建设不断发展,实践经验与时俱增,计算技术日臻完善,测试设备更加先进,虽然沉降理论十分复杂,作者深信在老一辈科学家指导下,与国外学者一道,共同努力,完全可以加速解决沉降计算理论问题。

陈祥福

2004 年 11 月 9 日于北京

目 录

前 言

第一章 绪论	1
1.1 超高层建筑发展和深基础工程的对策	1
1.1.1 国外超高层建筑发展和启示	1
1.1.2 我国高层建筑深基础发展及对策	7
1.2 基础沉降计算是地基基础工程中的三大难题之一	8
1.3 超高层建筑深基础沉降研究进展和问题	9
1.3.1 国内外地基沉降计算研究进展	10
1.3.2 超高层建筑箱形基础沉降计算研究进展	11
1.3.3 超高层建筑桩箱(筏)基础沉降研究进展	13
1.3.4 杨敏等沉降控制设计桩基的方法	16
1.3.5 超高层建筑与地基基础共同作用中的沉降研究进展	16
1.3.6 超高层建筑深基础沉降计算的数值法研究进展	18
1.3.7 超高层建筑深基础沉降计算中存在的主要问题和展望	18
1.4 本书研究工作简介	19
第二章 超高层建筑深基础沉降计算中软土地基实用模型和计算参数选择	22
2.1 文克尔地基模型	22
2.2 弹性半空间地基模型	23
2.3 分层地基模型	27
2.4 双参数弹性地基模型	28
2.4.1 Filonenko-Borodich 双参数模型	28
2.4.2 Hetenyi 双参数模型	29
2.4.3 Pasternak 双参数弹性模型	29
2.5 层向各向同性体模型	30
2.6 非线性弹性模型	31
2.7 基床系数的确定	33
2.7.1 按静荷载试验结果确定	33
2.7.2 根据土的变形模量和泊松比推算	34
2.7.3 由压缩试验结果确定	34
2.7.4 由经验确定	35
2.8 土的泊松比和变形模量的确定	36
2.8.1 土泊松比的确定	36
2.8.2 土的变形模量的确定	36
2.9 本章小结	39

第三章 超高层建筑深基础沉降研究中的力学问题	40
3.1 地基自重应力和附加应力	40
3.1.1 地基自重应力	40
3.1.2 附加应力	41
3.2 基础底面的接触压力和接触问题	41
3.2.1 接触压力的分布	41
3.2.2 接触压力的简化计算	41
3.2.3 弹性地基与刚性基础的接触问题	43
3.3 地基应力分布的平面问题	59
3.3.1 垂直线荷载作用下的地基土中应力(Flamant 解)	59
3.3.2 均布条形荷载作用下的地基土中应力	60
3.3.3 三角形分布的条形垂直荷载作用下的地基土中应力	62
3.4 地基应力分布的空间问题	64
3.4.1 荷载作用于地基表面时的应力分布	64
3.4.2 半无限弹性体体内一般受力问题	71
3.4.3 桩基应力分布的简化计算	77
3.5 非均质与各向异性地基土中的应力分布	84
3.5.1 刚性基底上有限弹性层表面受力问题	84
3.5.2 双层半无限体表面上一圆面积内作用着均布垂直压力 P	88
3.5.3 三层半无限体表面上一圆面积内作用着均布垂直压力 P	92
3.5.4 变形模量随深度增加而增大的地基	97
3.5.5 各向异性地基	97
3.6 本章小结	98
附录一 弹性力学基本方程	98
附录二 半无限体边界面上一般受力问题	101
第四章 超高层建筑深基础地基变形理论分析	108
4.1 土的压缩特性和力学指标	108
4.1.1 土的压缩性概念	108
4.1.2 压缩曲线和压缩性指标	109
4.1.3 土的变形模量	111
4.1.4 土的弹性变形和残余变形	113
4.1.5 土的天然压密状态和前期固结压力	113
4.1.6 地基应力与应变关系	114
4.1.7 弹性模量	114
4.1.8 土的侧压力系数和泊松比	114
4.2 基础最终沉降量计算的概念	116
4.3 地基变形计算的弹性力学方法	124
4.3.1 柔性荷载下的地基变形计算	124
4.3.2 刚性基础的沉降	125

4.3.3	刚性基础的倾斜	125
4.4	初始沉降量的计算	126
4.4.1	初始沉降实用计算	126
4.4.2	计算参数取值问题	128
4.4.3	塑性区开展较大时初始沉降的修正	128
4.5	固结沉降量的计算	129
4.5.1	分层总和法	129
4.5.2	中国规范推荐的分层总和法沉降计算公式	129
4.5.3	根据前(先)固结压力计算固结沉降量	130
4.5.4	考虑侧向变形的固结沉降量的计算	132
4.6	黏土地基的次固结沉降计算方法	133
4.7	砂土地基的固结沉降计算	134
4.8	饱和土地基变形理论方程	136
4.8.1	Biot 固结方程	136
4.8.2	Terzaghi-Rendulic 固结方程	139
4.8.3	Terzaghi 固结方程的求解	139
4.8.4	Biot 固结方程的解	142
4.9	地基变形的实用数值分析(有限元法)	149
4.10	本章小结	154
第五章	超高层建筑箱(筏)形基础沉降计算方法和实例研究	155
5.1	超高层建筑箱形基础沉降计算要考虑的几个问题	156
5.1.1	地基补偿性及其箱形基础沉降有关问题	156
5.1.2	深基坑开挖应力与应变状态	157
5.1.3	深基坑开挖回弹与再压缩问题	158
5.1.4	箱基下地基压缩层深度计算	160
5.1.5	高层建筑箱形基础刚度对地基变形的影响问题	161
5.2	未考虑深基坑支护结构作用超高层建筑箱形基础沉降计算	162
5.2.1	规范法计算	162
5.2.2	修正的分层综合法	163
5.2.3	叶果罗夫法计算箱基沉降	164
5.2.4	日本法计算初始沉降	166
5.3	考虑深基坑支护结构作用的超高层建筑箱(筏)基础沉降计算	167
5.3.1	超高层建筑箱基础特点	167
5.3.2	考虑支护结构作用的计算简图	168
5.3.3	沉降计算地基模型及层状地基样条子域法分析	170
5.3.4	考虑深基坑支护结构作用的超高层建筑箱基沉降计算方法	178
5.4	青岛中银大厦箱基沉降有限元计算	182
5.4.1	工程简况	182
5.4.2	工程地质概况	184

5.4.3	基坑支护结构	184
5.4.4	青岛中银大厦箱基沉降计算的有限元法	184
5.5	考虑支护结构作用青岛中银大厦箱基沉降计算和经验系数	189
5.5.1	采用“上段单向压缩+下段分层总和法”计算箱基沉降	189
5.5.2	采用“上段地基规范法+下段箱基规范法”计算箱基沉降	189
5.5.3	采用“上段和下段”地基基础规范分层总和法计算箱基沉降	190
5.5.4	青岛地区沉降经验系数 ψ_s 计算	190
5.5.5	采用作者综合系数法计算箱基沉降	190
5.6	青岛中银大厦箱基实测沉降结果和分析	191
5.6.1	实测数据	191
5.6.2	实测数据分析	199
5.6.3	实测结果与计算结果分析	199
5.7	广东国际大厦岩石地基沉降分析	199
5.7.1	工程概况	199
5.7.2	工程地质条件	200
5.7.3	基础沉降实测结果分析	201
5.8	本章小结	202
附表 沉降量观测计算表		
第六章	超长桩基础沉降计算方法研究	205
6.1	单桩沉降	205
6.1.1	弹性理论法计算单桩沉降	205
6.1.2	荷载传设法	207
6.1.3	剪切位移法计算单桩沉降	208
6.1.4	我国路桥规范简化法计算单桩沉降	209
6.2	群桩基础沉降计算	209
6.2.1	超长群桩沉降计算的实体基础法	209
6.2.2	JGJ94-94 桩基规范法	214
6.2.3	复合桩基法	215
6.3	单桩沉降计算的经验和简化算法	219
6.3.1	经验方法	219
6.3.2	简化方法	220
6.4	“GB50007-2002”中关于桩基础最终沉降量的计算	222
6.5	桩基变形允许值	225
6.6	超长钻孔灌注桩特性和沉降研究	225
6.7	群桩在竖向荷载作用下的受力机理研究	229
6.7.1	群桩的荷载传递特性	230
6.7.2	群桩地基的变形分析	231
6.8	本章小结	231

附表 桩端注浆、桩侧及桩端注浆和未注浆的超长桩比较表	232
第七章 空间变刚度等沉降群桩设计新方法	233
7.1 群桩分析和实测数据中的一般规律和应用依据	233
7.2 群桩基础设计方法进展	239
7.3 空间变刚度群桩等沉降设计新方法及方案	243
7.3.1 空间变刚度群桩基础的设计条件	243
7.3.2 空间变刚度群桩等沉降设计理论	243
7.3.3 空间变刚度群桩等沉降的设计方法	247
7.3.4 空间变刚度群桩等沉降设计方案	247
7.4 空间变刚度群桩沉降计算	253
7.4.1 按规范分层总和法计算	253
7.4.2 桩土“综合刚度”计算	253
7.5 本章小结	257
第八章 超高层建筑地下墙与摩擦桩箱(筏)基础沉降分析和实例研究	258
8.1 地下墙仅作深基坑支护结构时桩箱(筏)基础沉降计算方法	260
8.2 地下墙既是支护结构又是地下室外墙的桩箱基础沉降计算方法	260
8.3 考虑地下墙对桩箱(筏)基作用时的沉降计算有限元子结构法	260
8.4 超高层建筑结构-地基-基础共同作用	261
8.4.1 计算简图	262
8.4.2 建立上部结构的刚度方程	262
8.4.3 建立基础的刚度方程	263
8.4.4 建立地基的刚度方程	264
8.4.5 建立耦合体系的总刚度方程	267
8.5 桩-土共同作用分析	267
8.5.1 侧向受荷单桩与土体相互作用的分析方法	268
8.5.2 轴向受荷桩与土相互作用的分析方法	272
8.6 桩-桩共同作用分析	274
8.6.1 单桩分析	274
8.6.2 地基分析	275
8.6.3 桩与桩相互作用	277
8.6.4 算例	277
8.7 上海森茂大厦桩筏基础沉降实测数据及分析结论	278
8.7.1 工程概况	278
8.7.2 工程地质条件	280
8.7.3 上海森茂大厦基础沉降实测数据和结论	280
8.8 上海金茂大厦的实测沉降值及分析	285
8.8.1 工程概况	285
8.8.2 工程地质概况	286
8.8.3 桩基持力层确定	287

8.8.4	试桩结果及分析	289
8.8.5	实测沉降值	290
8.9	本章小结	291
第九章	超高层建筑“地下墙-端承桩箱(筏)”联合基础和岩石地基沉降分析及实例研究	292
9.1	超高层建筑深基础端承桩沉降计算	292
9.2	深圳赛格大厦基础沉降分析	292
9.2.1	工程概况	293
9.2.2	工程地质条件	295
9.2.3	深基坑组合支护结构	295
9.2.4	全逆筑法工艺程序	295
9.2.5	赛格大厦基础实测沉降数据	297
9.2.6	赛格大厦基础沉降数据分析和结论	298
9.3	本章小结	299
第十章	沉降计算研究展望和建议	300
参考文献		303

第一章 绪 论

世界各国(包括中国)已进入现代城市化阶段,共同的问题是城市人口膨胀、住房困难、用地紧张、环境污染和交通堵塞等。尽管高层建筑或超高层建筑或多或少存在某些问题,但是它的兴建仍呈直线上升趋势,其发展不仅开创整个建筑业的新纪元,而且使人类必然要走向地上空间和地下空间。这种地上、地下的空间已成为宝贵的、越来越少的资源。超高层建筑的发展必然带动地基基础工程科学的研究、开发和利用。超高层建筑上部结构从计算、设计、模型试验、工程实测相对地下基础工程而言容易得多并已达到计算机化,完全能满足工程要求,而地基基础、岩土工程的研究进展、计算机化进程相对慢多了。其深基础沉降计算理论更加复杂,很多问题至今还没有弄清楚,短时间也可能弄不清楚,确实需要若干代人的艰苦努力才行。

1.1 超高层建筑发展和深基础工程的对策

高层建筑随着世界城市化的普及、社会生产力的提高、科学技术的进步和人们物质生活的需要而蓬勃发展,这不仅缓解了上述问题,而且开创了整个建筑业的新纪元;在人类必然走向地上和地下空间的同时,现代化城市必然进入高层建筑化阶段。

目前,高层建筑尽管在设计理论、建筑艺术、经济效益、环境影响及使用功能上,或多或少地存在某些问题和困难,人们对它的评价和认识不统一,但是世界范围内的高层建筑仍在不断发展。如新加坡的高层建筑已占城市房屋的 70% 以上。目前,世界各国修建最多的高层建筑是住宅、旅馆、商业大厦和办公楼,这些均不同程度地解决了人们住房困难的问题。可以说,高层建筑是历史的必然产物,而且还推动了建筑科学、建筑材料与设备的不断发展,改变了传统的建筑设计概念、计算理论和施工方法,逐步形成高层建筑独特的体系,特别是深基础工程。

1.1.1 国外超高层建筑发展和启示

众所周知,现代高层建筑是从 19 世纪 80 年代开始的。在 1885 年,美国芝加哥建成的家庭保险大楼被认为是世界第一幢现代高层建筑,仅为 10 层、55m 高。此后,随着社会经济的发展和科学技术的进步和人类物质文化生活的需要而不断发展,从其高度、造型、建筑功能、结构体系、抗震防灾和环境艺术等方面都有新的发展和突破。特别是在 20 世纪 50 年代以后,由于建筑经济和科学技术的飞速发展,极大地促进了高层建筑的发展,多姿多彩的高层建筑如雨后春笋般地矗立于世界各大城市。

为了进一步了解世界各国超高层建筑简况,现将各主要国家和地区最高建筑简介如下[这些建筑大部分是桩箱(筏)深基础]:

(1) 中国最高的是 88 层、420.5m 高的上海金茂大厦,桩箱基础,桩长达 80m 以上。目前正在施工的上海环球金融中心 492m 高(不含天线),将成为世界最高建筑。



图 1-1 中国台北 101 大楼

(2) 俄罗斯最高的建筑是莫斯科 42 层、210m 高的礼良季耶夫大楼。俄罗斯正筹划突破 400m 的高层建筑。

(3) 朝鲜最高的建筑是平壤 101 层、334m 高的柳京饭店,这是目前世界最高的钢筋混凝土结构建筑。

(4) 韩国最高的建筑是汉城 63 层、223m 高的朝鲜人办公大楼(Koreains Company Building),1986 年建成。

(5) 新加坡最高的建筑是 63 层、208m 高的侨联银行大楼(Overseas Union Bank),1968 年建成。

(6) 香港原最高的建筑是中国银行(China Bank),桩箱基础,72 层、368m 高,1988 年建成。已建成的香港中环广场 374.3m 是目前香港最高的建筑。

(7) 中国台湾省高雄市的高雄银行,85 层、370m 高,矩形板桩基础,1998 年建成。2003 年在中国台北已建成 101 层、508m“台北 101 大楼”(含天线高),这是目前世界最高建筑(图 1-1)。

(8) 日本东京都政府大楼,243m 高,是目前日本最高的建筑。

(9) 马来西亚最高(世界第二高)的建筑是石油双塔大厦,95 层、452m 高(包括桅杆 73m 高度),1996 年建成(图 1-2)。采用桩筏基础,最长的桩达 100m 以上。

(10) 波兰最高的建筑是华沙市 42 层、241m 高的 Palac Kultury Inauki 大厦,1955 年建成,保持欧洲最高达 35 年之久(到 1990 年)。

(11) 德国最高的建筑是法兰克福

60 层、256m 高的 Messe Turm 大楼,补偿式桩筏基础,中间桩长、边桩短,1990 年建成。

(12) 法国最高的建筑是巴黎 64 层、229m 的 Maine Montpamasse 大楼,1973 年建成。

(13) 英国最高的建筑是伦敦 60 层、189m 高的国民银行大厦。

(14) 南非约翰内斯堡 50 层、189m 的 Carlton Center 大楼,1973 年建成,是非洲最高的建筑。

(15) 澳大利亚最高的建筑是墨尔本 70 层、243m 高的 Rialto Center 大楼,1986 年建成。

(16) 墨西哥最高的建筑是 52 层、214m 高的 Petrolaos Maxicanos 大楼,1984 年建

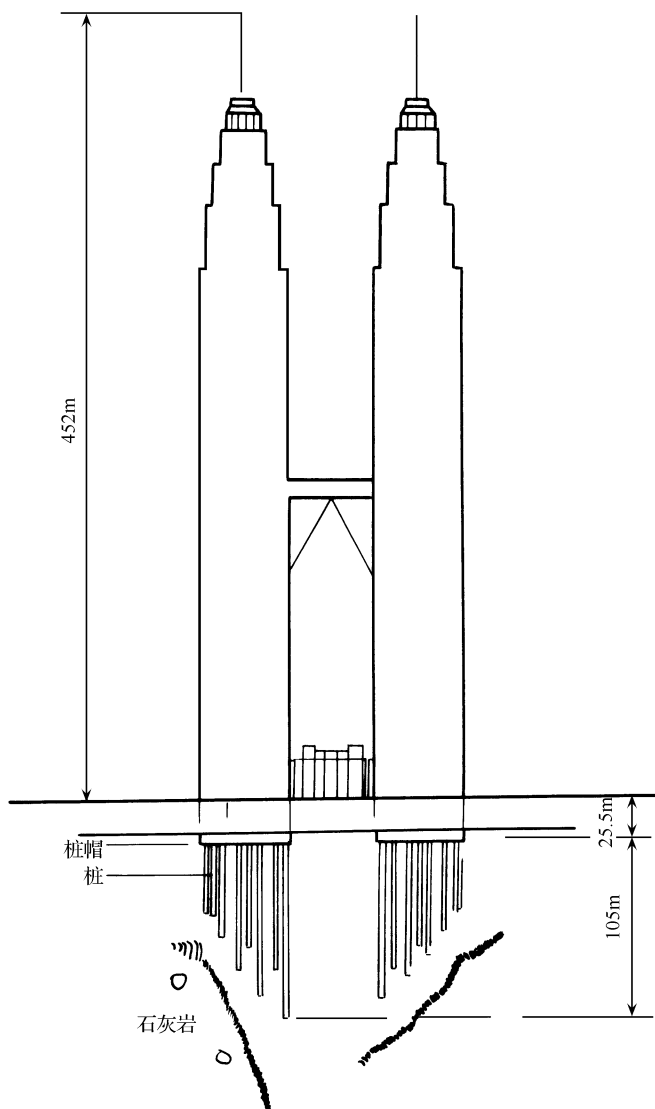


图 1-2 基础示意图

成,这是美洲最高的建筑。

(17) 哥伦比亚最高的建筑是波哥大 70 层、248m 高的马泽拉大厦,这是南美洲最高的建筑。

(18) 加拿大最高的建筑是多伦多 72 层、285m 高的 First Bank 大厦,1975 年建成。

(19) 委内瑞拉最高的建筑是 60 层、237m 高的首都办公楼,1985 年建成。

(20) 美国最高的建筑是芝加哥西尔斯大厦,110 层、443m 高(不包括天线杆),是世界公认不含天线桅杆最高建筑。

国外超高层建筑发展除了建筑功能、外观造型和结构体系不断创新和改进外,还有一个重要特点,就是建筑高度不断增高(图 1-3)和注重深基础工程。超高层建筑的高度和深基础工程的深度,实际上在一定程度上反映了一个国家的整体国力和科学技术的总体水

平(特别是建筑科学技术)。同时,每一幢著名超高层建筑也是历史的写照和时代的丰碑。自 1885 年世界第一幢现代高层建筑以后,经过 13 年(1898),其建筑高度才突破 100m 大关;又经过 11 年(1909)和 21 年(1930),分别突破 200m 和 300m 大关,开始超高层建筑的发展阶段。1931 年在美国纽约建成帝国大厦,102 层、381m 高,保持 41 年后(1972)在美国建成世界贸易中心 110 层、417m 高,突破 400m 大关,地下室深度已达 7 层。因此,专家预测:20 世纪初高层建筑高度可望突破 500m,到 50 年代可望突破 1000m 大关(如设计方案图 1-4 和图 1-5),世界高层建筑高度发展曲线(图 1-3)也证实上述预计。

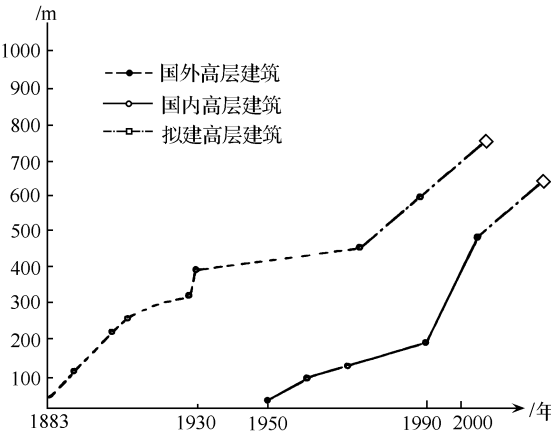


图 1-3 世界和中国高层建筑高度的发展曲线

国外高层建筑的发展特点给我们的主要启示如下:

(1) 40 层以上的超高层建筑,采用钢结构居多。对 100 幢高层建筑的分析表明:钢结构占 66%,钢筋混凝土结构占 18%,钢筋混凝土结构仅占 16%。超高层建筑钢结构体系可建的最多层数见图 1-6,基础中不少采用箱(筏)基础。

(2) 混凝土强度等级不断提高,如美国旧金山 1983 年建成的一幢高层建筑,柱子的混凝土强度达到 45.7MPa。高强钢筋也在这类工程中广泛应用。

(3) 在现浇钢筋混凝土结构高层建筑中,普遍采用了板柱体系,从而简化了大梁和楼板的施工工艺。在软土地基中,基础均采用桩基。在岩石地基上,采用箱形基础。由于重量重,其结构体系、层数、深基础都受到限制,见图 1-7。

(4) 地基与基础的处理技术复杂,采用深基础比较多,地下室至少 3 层以上。如世界贸易中心在大楼设地下室 7 层,其中 4 层是汽车库,可停 2000 辆小汽车,其余为商场和地下车站。

(5) 高层建筑的智能化、生态化和高层效应的研究越来越引起建筑师、结构工程师和有关专家的广泛重视同时更加注重建筑、环境和人的关系,包括岩土工程环境。

(6) 不仅十分注意地上空间的规划和与城市相协调,而且也十分重视地下空间的规划、开发和利用,并且立法规定:地下空间是一种宝贵资源。

(7) 国外超高层建筑深基础中,软土地区少、地震区少、岩石地基较多,但十分重视深基础的研究和测试工作,积累不少宝贵的数据。

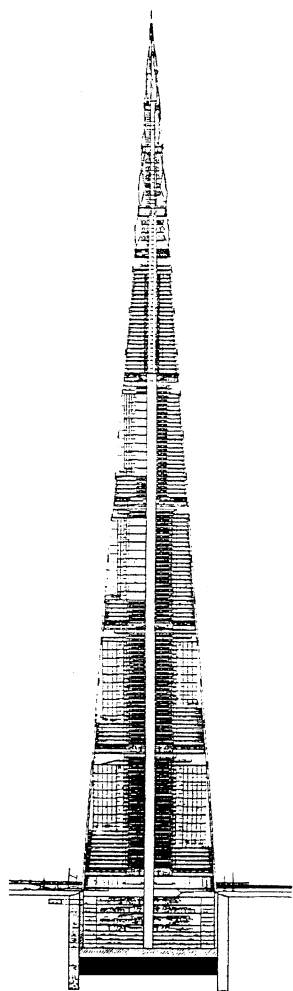


图 1-4 日本东京 Millennium Tower
设计方案(高 800m、底圆周 600m)

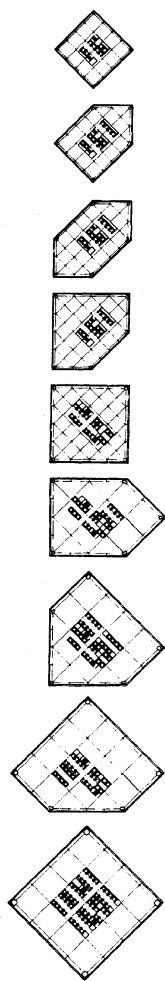
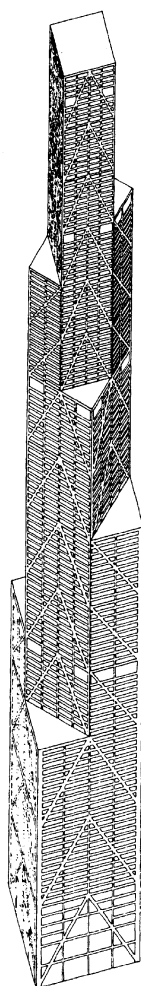


图 1-5 芝加哥 136 层菲尔克的方案，
等轴测图和各标准层平面

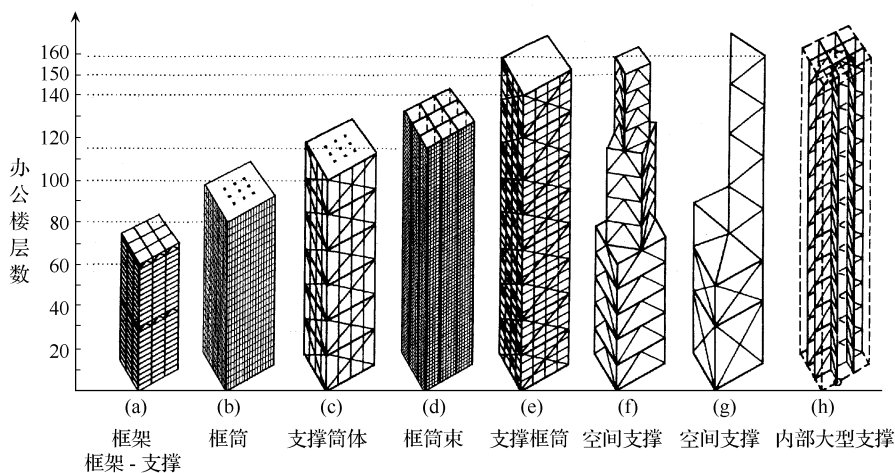


图 1-6 超高层钢结构体系的最多层数

表 1-1 高层钢结构的最大高度和基础埋深(m)

结构体系 \ 设防烈度	非抗震设计	抗震设防烈度		
		6 度、7 度	8 度	9 度
	基础埋深	基础埋深	基础埋深	基础埋深
框架-支撑(剪力墙)	240	200	180	-
	12	10	9	-
各类筒体	400	350	300	250
	20	17.5	15	12.5
钢框架-混凝土剪力墙 钢框架-混凝土芯筒	220	180	-	-
	11	9		
钢框筒-混凝土芯筒	220	220	150	-
	11	11	7.5	
框架-剪力墙	180	150	-	-
	9	7.5		
各类筒体	200	180	150	-
	10	9	7.5	

注:1)见我国《高层建筑钢结构设计与施工规程》和箱基规范。

2)箱(筏)基础埋深宜不少于 1/15 建筑高度,桩箱基础(不计桩长)可适当放宽(1/18~ 1/20),此表均按 1/20 建筑高度考虑。

3)若超高层建筑高度 500m,其桩箱基础埋深为 25m;若为 800m、1000m 高度,其埋深分别为 40m、50m。可见,深基础研究比地上结构方案更重要。

从国外高层建筑 100 多年的发展来看,高层建筑主要分布在北美和亚洲(图 1-7),以上这些特点和启示,是值得我们研究和借鉴的。我国人口众多、土地资源紧缺,尤其是大中城市用地更加紧张。改革开放以来,我国的城市化进程加快,用地、住房、交通成了大中城市的三大突出问题。要解决城市住房问题,出路何在?看来只有兴建更多更好和具中国特色的高层住宅和高层公寓,这给深基础工程发展带来更多的新机遇。

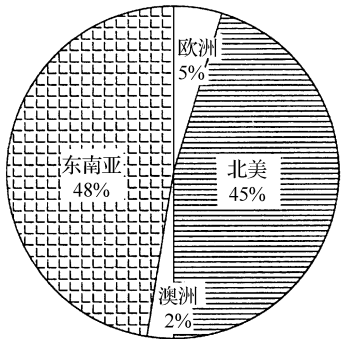


图 1-7 世界高层建筑分布

表 1-2 高层钢筋混凝土结构的最大高度和基础埋深(m)

结构体系		非抗震设计	抗震设防烈度			
			6 度	7 度	8 度	9 度
框架	现浇	60	60	55	45	25
	装配整体	50	50	35	25	—
框架-剪力墙	现浇	130	130	120	100	50
框架-筒体	装配整体		100	90	70	—
现浇剪力墙	剪力墙全到底	100	140	120	100	60
	底层部分框架	120	120	100	80	—
筒中筒或框筒束		180	180	150	120	70

注：1)深基础埋深为 1/15 建筑高度，桩基础可适当放宽(1/18~ 1/20)。

2)建筑高度< 200m，未列出具体埋深数字。若超高层建筑高度为 200m，则箱基埋深为 14m、桩箱基础为 11m ~ 10m；同样若高度为 300m 时，则埋深分别为 20m、17m~ 15m；若高度为 400m 时，则埋深分别为 26.6m、22m~ 20m。目前，国内还没有超过 30m 深超高层建筑基础，可见深基础工程的难度。

1.1.2 我国高层建筑深基础发展及对策

我国是高层建筑的真正“故乡”和“发源地”，古代高塔建筑，举世闻名，有着悠久历史，如河南嵩岳寺塔建于公元 524 年单筒结构，15 层，高度为 50m；河北定县料敌塔建于公元 1055 年，筒体结构，11 层，高度为 82m，已达美国 20 世纪末的水平；山西应县木塔建于 1056 年，木结构，9 层，高度为 60m，堪称世界木结构奇迹。这些古代高塔建筑不仅在建筑艺术上具有很高的水平，而且在结构体系、地基处理、木桩基础和施工技术上也具有很高的水平，并都经受了若干次大地震的考验。从 20 世纪初到新中国成立，我国高层建筑很少，大都是外国人设计的，如 1925 年上海建成 13 层的华懋公寓，高 57m；1934 年上海百老汇大厦为 21 层，高 76m；上海国际饭店为 24 层，高 85m，此外，广州也相继建成爱群大厦等。

1. 我国高层建筑的发展简况

我国自己设计和施工的高层建筑开始于 20 世纪 50 年代初期。以北京而言，解放初期建造了 8 层和平宾馆，1958~ 1959 年北京的十大建筑工程推动了高层建筑的发展。

到 20 世纪 60 年代中期，高层建筑有所发展，如 1968 年建成广州宾馆，总高度为 88m，是 60 年代我国最高的建筑。开始采用预制桩基础。

70 年代我国高层建筑发展较快，如 1977 年建成 33 层的广州白云宾馆，高度为 112.45m，是 70 年代我国最高的高层建筑。

80 年代以后，高层建筑发展迅速，其特点是数量大、层数多、造型复杂、分布地区广泛，不断应用新结构体系和深基础。北京的高层建筑的数量已占房屋总建筑面积的 52% 以上(见图 1-4)。北京的中央彩色电视中心，建筑高度达 112.7m，主楼 27 层，是我国 8 度地震区(按 9 度设防)中最高的建筑；我国第一家五星级旅馆——上海静安希尔顿饭店，塔楼 43 层，总高度 143.62m；上海展览中心北馆大楼，高度为 164.80m，是国际一流水平旅馆。这一时期，已大量采用钻孔灌注桩基础。

90年代以后,在北京、上海、广州、深圳、武汉、厦门、重庆、成都、西安、沈阳、大连、哈尔滨等大城市兴建了若干著名超高层建筑,使我国超高层建筑的总体水平提高很多,同国外的差距越来越小,甚至有的处于领先地位。

2. 基本对策

今后我国的高层建筑必然会大量兴建和可持续发展,但一定要结合中国国情和适应我国经济、科技发展水平,在研究上部结构新体系同时,更加注重深基础工程研究和工程经验积累。因此,我国高层建筑和深基础工程可持续发展的对策如下:

(1) 深基础不仅制约建筑高度而且在工程质量和安全中占首位,十分重要,投资比例也较高,是整个结构中的 $1/4 \sim 1/3$ 。要注重地下连续墙、桩基础、深基础支护结构的发展。

(2) 在不断改进和发展新的结构体系(如巨型结构、成束筒结构,应力蒙皮结构、悬挂结构、带有转换层和刚性水平构件的结构、减振阻尼结构和防震结构等)的同时,要加大深基础工程研究的投入,组织相关专业专家结合工程项目,认真研究,加强实测工作和统计分析,从理论和实践的结合上作出成果。

(3) 在大量发展钢筋混凝土高层建筑的同时,要积极研究高层钢结构、型钢混凝土、钢-混凝土组合结构和钢管混凝土结构。

(4) 加强高层建筑结构和深基础分析中的非线性、非确定性问题研究,进行动力分析和模拟试验,保证结构的稳定性、安全度和可靠性。

(5) 加强高层建筑结构和深基础优化设计的理论研究和应用开发工作。在结构断面尺寸优化的基础上,更逐步研究给定结构和深基础拓扑优化。重点要开发适用的软件,使之发挥经济效益。

(6) 加强高层建筑结构和岩土工程专家系统和人工智能研究,研制 CAD 系统,建立全国和全世界高层建筑结构(包括深基础)的数据库、知识库,集所有专家经验之大成,使高层建筑的投资决策、可行性分析、方案选择和结构设计更加科学和合理。目前,大多停留在理论研究上,应面向工程建设、开发出应用软件,使之发挥作用。

(7) 加强数值计算方法的研究,如有限元、有限条、加权残值法、样条函数法、边界元和各种半解析-半离散的方法等。要建立更加精细的数学-力学模型、开发高精度的单元,不断提高计算精度。

(8) 深基础工程中有很多东西还没有全弄清楚。如岩土本构关系和超深土的物理力学性能,地基应力、基础沉降和稳定性,深基础和超深地下室逆作法,地基-基础-上部结构共同作用,地震动力分析,非确定性分析,数值计算,地下空间利用,基础工程模拟仿真, CAD 和专家系统等。应该投入更多的人力、物力和财力进行岩土力学、岩土工程和深基础研究,其结果必将获得很大的经济效益。超高层建筑深基础中的沉降计算还远没有到完全解决。重点研究两个问题:其一是上部结构、基础、地基共同工作和共同作用;其二是加强沉降实测数据和计算参数的测试工作。

1.2 基础沉降计算是地基基础工程中的三大难题之一

基础沉降计算从来就是地基基础工程中三大难题之一。百年甚至几百年来,很多专

家、学者都对此作出过贡献,至今还没有完全解决。“万丈高楼从地起,上天容易入地难”,深基础中不少问题弄不清,未知因素、不确定因素很多。地下工程确实比地上工程困难。超高层建筑深基础沉降计算也同样远没有完全解决。目前解决此问题的方法有以下途径。

1. 解析法

以弹性理论为基础,假定地基是线弹性的连续体,在半无限体表面和半无限体内作用各种荷载时,可以得到地基应力计算公式(第三章)和地基变形分析(第四章)的解析解。由于弹性力学受初边界条件限制,只有很少的情况下可以得到精确解析解。而地基土的物理力学性质、本构关系十分复杂,又很难满足弹性力学的要求。所以沉降计算的各种解析解同工程实测值差别较大,有时差好几倍。

2. 数值计算法

由于计算机技术发展以后,以有限元为代表的数值分析方法发展很快。其特点是可以模拟地基的一些非线性、非连续、非弹性性质,处理各种不同的边界条件,利用可靠软件很快可以计算得到各种荷载作用下,各种边界条件的应力场和位移场。但是其基础理论还是弹性理论。其地基沉降计算结果往往不尽如人意,同工程实测值还是有相当的差异。

3. 半解析-半数值法

有限元进一步发展以后,出现有限条法、无限元法、边界元法、加权残数法、样条函数法。对于半无限地基沉降计算,边界元法与有限元法结合很有生命力。近来,把解析与数值分析结合起来得到无限元,再与有限元法或边界元法耦合,模拟半无限地基沉降计算,可以考虑土的非线性、非连续、非弹性性质,模拟各种不同的边界条件。一些高精度的单元研制后,把无限元和有限元法耦合起来即可以计算平面问题,亦可推广应用复杂的空间问题。采用这些方法有时也能得到满意的计算结果。计算方法虽然很好,但也受计算参数限制。

4. 半理论-半经验方法

这种地基沉降计算的半理论-半经验方法(或称经验法、简化法等)仍以解析法为基础,根据工程实测沉降数据研究,统计分析出经验系数或经验公式来。其沉降计算结果肯定比较接近实测值。国内外的“规范”编制大多采用这个方法。我国地基基础规范中,有关沉降计算也是采用这种方法。

从以上分析可以看出,地基变形或基础沉降计算涉及若干学科,并与地质条件、土的物理力学性质和工程密切相关,至今还没有很好的方法,使其计算理论值与沉降实测结果一致或十分接近。因此,以上第三、第四个方法就显得十分重要,也是目前工程上常用的有效方法。

1.3 超高层建筑深基础沉降研究进展和问题

一般建筑物地基的变形包括:①初始沉降-饱和黏土地基在不排水、体积恒定状态下,

受荷载作用后,地基土剪应变引起的侧向变形引起的沉降;②固结沉降-饱和黏性土地基中超静水压力的逐步消散(不排水-排水状态)地基土的结构产生压缩变形和剪应变引起的沉降;③次压缩(或次固结)沉降——饱和黏性土地基在恒定的有效应力作用下,地基土的结构蠕变引起的沉降。上海、天津等软土地区,其地基变形就属于此种情况。对无黏性的饱和砂土地基,由于透水性强,在施工过程中不会产生超静水压力(超孔隙水压力),因此其沉降主要表现为初始沉降,土的压缩过程在短时间内完成。一般建筑物的施工结束后,其沉降可达80%以上,竣工一年左右,其沉降即趋稳定不变。如青岛、深圳等强风化花岗岩地区,其地基变形就属于此种情况。另外,尚有地震作用、动荷载、地下水位变化、地基土含水量变化、土体结构的物理化学作用(如有机分解等),附近工程施工等,都有可能导致地基新的沉降。一般研究都是指建筑荷载作用(自重应力和附加应力)下引起的地基竖向变形或位移,这里主要研究超高层建筑深基础的沉降问题。

1.3.1 国内外地基沉降计算研究进展

由于地基沉降问题十分重要,至今还没有完全解决。近几十年来,国内外专家对此十分重视和感兴趣,提出了若干计算方法。这些方法都与实际情况有一定差距。这里归纳起来简介如下:

(1) 半理论-半经验沉降计算方法(修正的分层总和法)。

这个方法的最大特点是从若干实际工程中积累沉降实测数据,进行统计分析确定理论计算值与实测值之间的经验系数。这个经验系数具有综合性、可靠性和实用性,进而具有地区性。这样此方法更加符合各地区的实际,又可解决工程设计问题。我国的规范就是采用上述原则,确定计算方法。

(2) 考虑应力历史的地基沉降方法。

天然地基土在地质历史上已有前期固结压力。1936年,Casagrande用室内试验得到这种前期固结压力,并同现场有效压力相比较,把黏性土分为正常固结土、超固结土和次固结土三类,对这三类地基土采用不同的沉降计算方法。

(3) 应力路径法计算地基沉降。

我国黄文熙教授提出在一维计算结果基础上乘以大于1的系数(三向应力沉降计算)。1957年,Skempton和Bjerrum主张在一维计算结果基础上,当地基为欠固结土时乘以小于1的系数。1967年,Lambe提出应力路径法,该法的计算程序为:

计算某点的自重应力,并根据弹性理论计算附加压力引起的竖向和水平应力;进行三轴试验,土样先在自重应力下固结,然后加上附加应力。量取在附加应力作用下固结前(即尚未排水)及固结后竖向应变;用量得的两种应变分别计算地基的初始沉降及固结沉降。

(4) 由变形特征进行沉降计算。

在荷载作用下,地基土发生初始沉降、固结沉降和次固结沉降。在计算初始沉降时,一般采用弹性力学方法,计算参数采用不排水的初始切线弹性模量和不排水的泊松比。由于地基可以产生塑性变形区域,建议对初始沉降(弹性)除以大于1的系数。固结沉降计算方法较多,但其计算结果差别并不大。次固结沉降由于在主固结沉降时已开始,并有剪切蠕变和压缩蠕变,很难分开。

(5) 采用有限元法计算沉降。

由于解析法计算地基沉降误差较大,而且很难考虑复杂边界条件、初始条件,也很难或不可能考虑地基土的非线性、非连续性和不确定性。采用有限差分法、有限元法应该说可能解决十分复杂条件下的地基沉降计算。如可能计算弹塑性问题、黏塑性问题,可以模拟分期加荷作用情况(施工过程模拟),可以计算任何时期的固结沉降和最终沉降。现在,由于有限元的发展,研究出各种应用单元和高精度单元(详见龙驭球的专著),这给地基沉降计算带来了生机。边界元法和有限元法的耦合,以及其他数值算法(如半数法-半解析法、加权残数法、无限元法、样条函数法、有限条法等)的发展,也给地基沉降计算带来方便和生机。但是,所有这些方法,都有一个共同困难:计算参数如何确定问题。往往由于计算参数选择不当,使地基沉降计算结果常出现非常大或非常小的情况。我们在青岛中银大厦箱基沉降有限元计算时,就曾出现只有 3~ 5mm 的沉降计算结果,实测沉降值为此值的十多倍。与此同时,还有一个沉降计算结果的分析和判断问题。

(6) 地基沉降计算的综合法。

近年来,由于地基应力-应变模型的研究、计算参数测定方法的研究、计算方法的研究发展很快,实测沉降数据积累越来越多、经验也越来越丰富。很多学者和工程界都已按综合法的思路做过研究和应用,这给我们一个重要启示并明确提出:利用实测沉降数据同计算机用多种方法计算出多种沉降结果,进行比较、分析和综合,最后确定地基沉降的预估值,提供给结构工程师作设计。这就是地基沉降计算的综合法。实践证明,该法在计算机普遍应用后已有强大的生命力。

(7) 地基沉降计算的参数测试技术研究。

至今,应该说地基沉降计算远远没有解决,其中难点之一就是计算参数的测试问题。现在重点研究原位测试方法和测试设备的研究。

1.3.2 超高层建筑箱形基础沉降计算研究进展

一般箱基的刚度大、协调不均匀沉降的能力强、抗震性能好,因此得到广泛应用。箱形基础的沉降研究除了研究其地基自重应力变形、回弹再压缩变形、恒定荷载作用的变形等以外,还研究上部结构、基础和地基的共同工作、共同作用,研究测试设备和方法。与此同时,也进行地基计算模型和计算参数的研究。超高层建筑的箱形基础工程在国外应用较多、在国内应用很少,在国内,建筑高度超过 100m 的箱形基础只有十多栋,超过 200m 的只有两栋(青岛中银大厦、广东国际大厦)。国外超过 200m 建筑高度采用箱(筏)基础的较多,尽量避免采用桩基础。因此,国内的箱形沉降研究进展大多是中高层建筑,主要以两本国家标准为主线介绍。国外以沉降计算方法为重点介绍。

1. 国内箱基沉降研究进展

20 世纪 70 年代,我国箱形和筏形基础的沉降问题在 8~ 12 层建筑(高度 60m 以内)中已取得很多成果,如箱形地基压缩深度分析(软土地基压缩层深度为箱基宽度的 1.5 倍左右、第四纪黏土为一倍左右、沙类土为 0.6~ 0.8 倍左右)和计算方法等。这当中,中国建筑科学研究院在 1974 年组织同济大学、商业部设计院、上海民用建筑设计院、北京市勘察院等作了不少箱基测试工作,把理论研究的一些成果与测试数据结合,编写了箱基规范

(JGJ6-80)。后来,考虑箱形基础的补偿性、地基回弹后再压缩性、基坑开挖以后的应力重分布等,提出分层总和法等地基变形计算方法(包括弹性力学计算方法、数值法和经验法)。箱基沉降计算中,集中于基坑底的回弹再压缩量研究和计算方法,并写进高层建筑箱形与筏形基础技术规范(JGJ6-99)。同时,进行了大量的箱基沉降实测工作和共同作用分析,得到若干有用的结论。由此可见,我国的这两本基础规范,基本上可以反映其沉降计算方法和研究进展。国外的箱筏基础研究比较早,超高层建筑应用也比较早。如1971年建成的美国休斯顿壳体广场大厦,地上52层,高218m,地下室4层,筏基埋深18.3m,筏板厚为2.52m,实测基坑底中心的回弹量为10.2~15.2cm,边为2.5~5.0cm,筏基的平均沉降为12.45cm,差异沉降很小。国内也注意箱基沉降的测试,如中国青岛中银大厦,1996年结构封顶,地上54层,高245.8m,4层地下室,箱基埋深19.3m,基础底板厚为2.5m,其最大沉降7.4cm,沉降差仅2cm多。近年来,中国建筑科学研究院黄熙龄、北京勘察院张在明、上海民用建筑设计院黄绍民、同济大学杨敏、董建国、马忠政、刘羲前、赵锡宏等,都对建筑的上部结构、箱基础、地基的共同作用和沉降计算作了很多工作,得到若干有指导意义的成果。如在上海粉沙层,采用布氏和明氏方法计算应力,其箱基的沉降计算值与实测值差别不大。采用非线性地基模型计算箱基沉降值与实测值比较接近,以及带裙房高层建筑基础的沉降差计算和控制。1985年,同济大学侯学渊关于软土地基性质和建筑补偿基础的研究,侯学渊和刘国彬关于软土基坑隆起变形的残余应力法计算,侯学渊和廖少明关于盾构隧道沉降的预估方法等,这些研究成果除了在箱(筏)基规范(JGJ6-99)有所体现外,还集中体现在中国国家建筑地基基础设计规范中(GB50007-2002)。

2. 国外箱(筏)基沉降计算方法研究进展

一般地基变形的计算是从1925年Terzaghi提出一维固结理论开始,主要应用弹性力学的方法来计算基础沉降问题。1943年, Terzaghi 出版了理论土力学;1934年, Frohlick 建立了地基沉降计算方法;前苏联学者关于弹性地基的梁板计算方法;1936年, Rendulic 在固结过程中总应力不变的假设下,把一维固结问题推广到三维情况;1941年, Biot 建立了严格的固结理论并于1956年又将其推广到动力问题。1957年, Trusdell 提出混合物理理论(把土体的固体颗粒和空隙流体分别作为研究对象,然后再合成土体),实质上与 Biot 固结理论没有实质上的区别,而且实际应用意义不大。与此同时提出各种地基沉降计算方法。对于黏性土地基,基础沉降分为初始、固结和次固结沉降;对于砂土地基,前两者已分不开而且砂土地基的弹性模量随深度增加而增加,应用弹性理论显然有一定误差。采用 $e\text{-lg}P$ 压缩曲线说明地基土受压历史(即前期固结压力)对沉降计算方法的影响,根据前期固结压力来计算沉降(按正常固结土、超固结土和次固结黏性土分别计算)。当黏性土地基的厚度大于基础的宽度时,地基的侧向变形对固结沉降影响较大,考虑一个侧向影响修正系数,使单项压缩结果更接近实际。按弹性力学方法计算沉降后,再考虑地基塑性开展区的影响,采用有限元法可以校正计算结果(Appolonia, 1971)。1948年, Terzaghi 等提出砂土地基沉降计算方法,后来经过若干学者研究,提出若干方法,但都认为不可靠。1970年, Sckmertmann 提出一个半经验的计算砂土地基沉降的公式,实际工程检验,比较符合实际。采用分层总和法可以考虑成层地基的情况。

以上这些沉降计算方法,都可以用应力路径来归纳和总结(工程施工前、施工期间和

完工后地基内部的应力和应变的变化情况),但仍要用弹性力学来计算土体的应力增量。

对于箱基沉降计算而言,由于基础埋深较深、共同作用和支护结构的侧向约束作用,其沉降计算方法与上述一般地基变形计算方法有区别,更加复杂,可以说还没有完全解决。如地基补偿性利用问题、地下水浮力问题、基坑开挖卸载后的地基回弹和再压缩问题、支护结构的作用问题、基坑开挖后土中的应力和应变问题以及上部结构、箱基和地基共同作用问题等都没有完全解决,因而箱形基础的沉降计算也没有完全解决。同一般地基沉降计算一样,箱形基础的沉降计算主要以最终沉降为主,大致分为四类:弹性理论法、间接计算法、半理论-半经验法和数值法。弹性理论法主要用于计算初始沉降,但计算结果与实测沉降值往往有较大出入。间接法又可分为:压缩仪法(Terzaghi, 1925)、Skempton-Bjerrum 法(1957)、应力路径法(Lambe, 1963)、状态边界法(Burland, 1969)等,这些方法都是用弹性理论来计算地基附加应力,而地基土的应力、应变关系用试验结果,应用比较广泛,其计算结果包括初始沉降和固结沉降。第三类半理论-半经验法包括各种修正的弹性理论法、修正的分层总和法,利用原位测试结果来推算实际沉降。数值法中主要是有限元法,可以适用于各边界条件和初始条件。边界单元法、样条函数法、有限差分法、加权残数法等,应用都有一定的局限性。所有数值法都是以弹性理论为基础,可以考虑非连续、非均质、非线性地基问题。对于黏性土地基,箱基沉降计算主要采用弹性理论法、分层总和法和规范法。对于砂性土地基,由于压缩和剪切变形同时发生,很快完成,很难分开,其弹性模量又随地基深度而增加,完全应用弹性力学来计算其沉降必有一定的误差。至今还没有很好的砂土地基变形计算方法。美国常用 Terzaghi 和 Peck 推荐的经验公式(用荷载试验),其计算误差很大。1970 年,Skempton 提出半经验公式,其计算误差不大。超高层建筑箱基一般都建在土质比较好的地基上,往往为砂土地基或强风化花岗岩地基,而且地基还比较均匀,采用修正的分层总和法计算的沉降值同实测值比较接近。当然也可以采用经验公式来计算,在第五章中,建议采用总修正系数的弹性力学解,这个总修正系数包括弹性模量的深度修正、地基侧向变形修正、地基回弹再压缩修正、支护结构侧限作用修正等。随着沉降实测数据的增多,这个总修正系数也越来越接近实际。超高层建筑箱基沉降影响最大的还是回弹再压缩变形和支护结构的侧限影响。前者,我国规范已给出具体计算方法,后者详见著者提出的计算方法。有限元法计算箱基沉降的文献很多,这里不再详述。

1.3.3 超高层建筑桩箱(筏)基础沉降研究进展

超高层建筑桩箱(筏)基础沉降研究,分为单桩沉降、群桩沉降和上部结构、基础、桩土共同作用研究。单桩的沉降计算是所有沉降计算的基础。在竖向荷载作用下,单桩沉降包括桩身的弹性压缩变形,桩端和桩端以下土体的压缩变形等三部分。目前单桩沉降的计算方法主要有:荷载传递分析计算方法、分层总和法、弹性理论计算法、剪切变形传递计算法、简化的经验方法。这些方法计算结果总有误差。一般工程设计都规定要进行试桩(试桩根数不少于 3 根),得到 $Q-s$ 曲线。应该说这是很可靠的基础数据。很多学者也研究单桩沉降与群桩沉降的关系,由于地基土的复杂性、可变性、地域性,很难找到一个统一的关系式,建议采用地区经验系数的办法,同一沉桩工艺的条件下,应该找到地区经验系数(单桩沉降与群桩沉降的关系)。这里群桩有两个特点:①群桩沉降计算值仅为计算沉降值的 0.2~0.9;②群桩的沉降为单桩沉降的几倍甚至几十倍。因此,国内外的学者首先注重群

桩沉降实测或模型试验工作。

1. 群桩沉降的实测和模型试验

(1) 1973 年, Blanchet、Tavenas 和 Garneaa 在桥墩下用四根摩擦桩作试验, 其实测结果为: 16m 桩长的桩身弹性压缩为 3mm; $3/4$ 桩长深度的桩侧摩阻力为负值即此深度范围内的沉降(4.2m 深为 30mm) 大于群桩顶的沉降(22mm), 桩端下沉 20mm, 而桩端下土层沉降仅为 10mm, 说明桩端发生刺入变形(沉降后 300 天); 长期实测的沉降(1600 天) 群桩顶为 18mm, 桩身侧摩阻力为正值, 桩端发生刺入变形, 桩间土发生剪切变形, 桩端以下土的压缩很小(仅 3mm)。这个实测结果有两条重要结论: ①摩擦桩群桩桩端以下黏性土的固结沉降很小; ②群桩的沉降最终由桩端的刺入变形和桩间土的剪切变形组成。这两条结论与传统的沉降计算方法矛盾。

(2) 1984 年, Butterfield 进行了群桩模型试验得到, 一个重要的成果: 沉降比(群桩沉降/单桩沉降) 同弹性力学计算值基本一致, 而且桩的长径比大于 30 以后, 其值趋于稳定值(但桩间距/桩径分别为 2.5, 5.0 时其值约为 3.8 和 4.2, 可取为 4)。

2. 群桩计算半理论-半经验法

群桩的沉降有桩身的弹性压缩、桩间土的压缩变形和剪切变形、桩端下沉(刺入变形) 和桩端以下土的压缩变形等四部分组成。不考虑“共同作用”, 群桩沉降主要有半理论-半经验计算方法、弹性力学方法、等效作用分层总和法、简化计算法等。1967 年, Terzaghi 和 Peck 提出假想实体深基础法; 1994 年, Tomlinson 认为黏性土群桩沉降包括初始沉降和固结沉降, 用弹性力学计算值作为计算的初始沉降, 而固结沉降用再压缩层深度范围中点的附加应力乘以压缩层深度, 再乘以地质影响系数、深度影响系数和室内试验得到土体体积压缩系数; 1982 年黄绍铭等提出的从单桩 Mindlin 应力解用影响图考虑群桩作用, 叠加计算出群桩桩以下的附加竖向应力, 再用分层总和法计算桩下土层的沉降; 加上桩身的压缩即为群桩的沉降。1994 年, 颁布的建筑桩基技术规范(JGJ94-94) 等效作用的分层总和法; 1999 年, 上海地基基础设计规范(DBJ08-11-89) 中规定的无扩散角的实体深基础法, 采用地基土在自重压力到自重压力加附加压力作用时的压缩模量, 用分层总和法计算实体深基础沉降, 乘以上海地区经验系数, 即得群桩沉降。还有不少的这种方法, 有的带有普遍性质, 有的带有地区经验性质。总的说来, 上海的地区性沉降计算方法比较接近实际。

3. Poulos 的弹性理论群桩沉降计算方法

澳大利亚 Poulos 于 1997 年在香港大学做了“Analysis and Design of Pile Foundation”的讲座, 在此把桩的沉降计算做了总结, 也把他的成果作了介绍。

Poulos 把桩的沉降计算方法分成三大类: ①基于经验计算方法; ②用简化的理论和土力学原理, 并易于手算, 这类方法又可分为两种: 基于线形理论和刚塑性理论的方法, 基于非线性理论和弹塑性理论的方法; ③基于各种强度理论和土力学原理的方法又分为三种, 即线性或刚塑性理论、简单的非线性模型、各种非线性本构模型。第二类用的图表常常可由第三类方法得到。

常用的沉降分析方法具体有: 荷载(τ - z) 传递法、简化的解析法、边界元法和有限元

法。按 Poulos 的观点,这些方法对于给定的土层数据,计算结果基本上一致。因此他采用边界单元法,但仍以弹性理论为基础。通过对边界单元法计算的结果的分析,可以得到如下几个重要结论:①桩的瞬时沉降一般大于 80%,是沉降的主要部分;②对细长桩,桩身压缩性的影响非常重要;③对细长桩,其沉降不会受到桩端持力层的太大影响;④在正常工作荷载下,桩的荷载~ 沉降特性近似为线性,可用弹性理论估算其沉降;⑤土体非线性对以端阻力为主的桩(如砂土中的桩、扩底桩、大直径钻孔桩等)的承载力的大小有重要影响。

计算参数的确定方法主要有:室内试验、现场荷载试验、室内或现场数据与经验相关公式计算分析确定。

Poulos 认为,当遇到如下几个问题时,就得考虑用计算机计算沉降:①当得到的解在有效的参数范围之外时;②当需要知道桩的荷载传递分布时;③当成层分布的土层的数据足够时;④当桩的截面为非均匀时;⑤当需要知道群桩的沉降和荷载分布式;⑥当探讨变形机理时;⑦当需要知道破坏为止的完整的荷载-沉降曲线时。

国外常用的群桩沉降的计算方法有相互作用因子法、沉降率法和等代筏或等代墩法。相互作用因子法是引入两根桩的相互作用因子 α ,即

$$\alpha = \frac{\text{邻近桩引起的附加沉降}}{\text{桩本身作用荷载引起的沉降}}$$

利用各种方法算出上述因子,最后沉降为

$$S = \rho \sum_j P_j \alpha_{ji}$$

式中: P_j ——第 j 桩顶所承受的荷载;

$\rho = E_s / E_s$ —— E_s 为桩中部土的弹性模量;

E_s ——桩端土的弹性模量;

ρ ——土体的非均匀性系数。

沉降率法是引入沉降率

$$R_s = \frac{\text{群桩平均沉降}}{\text{在平均荷载作用下单桩的沉降}}$$

群桩缩减因子

$$R_c = \frac{\text{群桩平均沉降}}{\text{在总荷载作用下单桩的沉降}} = \frac{\text{群桩刚度}}{n \times \text{单桩刚度}}$$

所以

$$R_s = n R_c$$

式中: n ——桩数。

群桩沉降为

$$S_c = R_s P_{av} S_1$$

式中: S_1 ——每单位荷载作用下单桩的沉降;

P_{av} ——桩受到的平均荷载。

R_s 近似可按下式计算(Randolph, 1979):

$$R_s = n^\omega$$

式中: ω 的理论值在 0.4~ 0.6 之间。在实际应用时,对于黏土中的摩擦群桩, $\omega = 0.5$;对于

砂土中的摩擦群桩, $\omega=0.33$ 。

4. 群桩沉降计算的简化方法

1953 年, Skempton 依据若干现场实测资料提出沉降比同群桩平面宽度的公式

$$R_s = S_c/S_i = (4B + 9)/(B + 12)^2$$

1959 年 Meyerhof 在砂土中打入方桩时, 建议一个沉降比与桩数、桩间距与桩径比的关系式; 1967 年, Vesic 依据砂土的模型试验建议沉降比为:

$$R_s = \sqrt{\frac{B'}{d}}$$

式中: B' ——群桩两边外排桩中心距;

d ——桩径;

1961 年, 苏联学者建议

$$R_s = B/b$$

式中: B, b ——群桩、单桩两边扩散后的桩底端边长。

1978 年, Sckmertman 提出砂土中群桩沉降的简化计算公式。

1.3.4 杨敏等沉降控制设计桩基的方法

杨敏等在总结大量的筏-桩-土相互作用计算成果和工程实践经验的基础上, 提出了一种简化的并能考虑桩、土、承台之间共同作用的沉降计算的实用公式。采用该公式不仅可以比较方便且合理地计算出桩筏基础的平均沉降、差异沉降和筏板整体弯矩, 而且还可以计算减少沉降桩基础(沉降控制复合桩基础)和柔性桩基础(如粉喷桩、水泥土搅拌桩等)的沉降。同时, 还发展了一种基于 Geddes 附加应力系数公式和荷载的“Cut-Off”方法为基础的桩-土-筏板(桩基承台)相互作用分析, 该分析考虑了承台以下局部地区土表面及桩承担的荷载可能达到极限承载力的情况, 以考虑桩筏基础地基土的理想弹塑性。

近年来, 沉降控制已成为上海等软土地区基础设计的主要因素, 上海市建委最近还专门下文要求对几乎所有建筑物的基础设计都要进行沉降计算, 因此他们还研制开发了桩基础沉降计算软件。国内还有黄绍铭、管自立等作了不少工作。

国外, 1973 年 Zeevaert 首先提出减少沉降桩的概念; 1977 年, Barland 等明确提出减少沉降桩; 1979 年, Hooper 等由有限元计算结果得出较大群桩基础中不需要很多桩(按现在设计标准设计的桩数可以减少), 并且增加桩数或减少桩数对最大沉降或沉降差影响不大; 1986 年, Cook 经过模型试验得到沉降与桩数的关系。以后, Mandolini、Viggian、Poulos、Horikoshi 等都对沉降控制设计做出贡献。

1.3.5 超高层建筑与地基基础共同作用中的沉降研究进展

超高层建筑与地基基础共同作用相对一般建筑而言更加重要, 目前由于数值法和计算技术发展很快, 而“共同作用”从理论研究、定性研究, 逐步到实际工程研究和定量研究, 逐步走向数字化。1953 年, G. G. Meyerhof 提出框架结构等效刚度的计算公式以考虑共同作用; 1956 年, S. Chamechi、H. Grosshof 相继研究单独基础上多层多跨度框架结构的共同作用; 1965 年, H. Sommer 提出一个考虑上部结构刚度计算基础沉降; 由于数值方

法(如有限元法、有限条法、边界元法等)和计算技术的发展,英国的 O. C. Zeinkeiwicz 和香港的 Y. K. Cheung 于 1965 年开始应用有限元法、有限条分法来研究地基基础的共同作用;1968 年, J. S. Przemieniecki 首先提出了子结构的有效分析方法,1971 年 M. J. Haddadin 首次应用子结构法研究地基基础与上部结构的共同作用的问题;1972 年 J. T. Christian 在高层建筑的规划与设计会议上阐述高层建筑与地基基础共同作用问题;此后,很多力学家、结构工程和岩土工程专家都参加“共同作用”的研究行列,如: I. K. Lee、 H. B. Harrison、 S. J. Hain、 W. J. Lamach、 L. A. Wood、 J. A. Hooper、 G. J. W. King、 V. S. Chandrasekhar, L. J. Wardle, R. A. Frazer 等。1977 年,在印度召开第一次“土与结构物共同作用”国际会议,论文反映了“共同作用”在当时的最高水平。在第十、十一届国际土力学和基础工程会议(1981,1985)和第三、四、五届国际土质力学的数值方法会议(1979,1982,1985)均有“土与结构物共同作用”议题。1980 年, H. G. Poulos 利用 R. D. Mindlin 解提出桩和地基土共同作用的弹性理论法,推动了桩土与上部结构、基础共同作用的深入研究,1981 年,他在第十届国际土力学及基础工程会上作了土与结构物共同作用的总报告,论述了土与结构物共同作用的发展和前景。1986 年, G. Price 等应用共同作用原理设计了一栋 11 层高层建筑桩筏基础。

在国内,从 1974 年起先后对京沪等地区的十栋高层建筑箱形基础与地基共同作用进行了现场测试,在理论上作了探索,积累了宝贵和难得的数据,为我国《高层建筑箱形基础设计和施工规程》(JGJ6-80)的编制提供依据。1981 年在上海同济大学召开了“高层建筑与地基基础共同作用学术交流会”,同济大学张问清等提出扩大子结构法计算高层结构刚度,北京勘察院张国霞等、中国建研院何颐华等、广西大学秦荣等、北京工业大学叶于政等相继对高层建筑和地基基础共同作用作了理论研究和实践。

1982 年到 1990 年我国第一、二、三届岩土力学解析与数值方法会议,1983 年到 1991 年我国第四、五、六届土力学和基础工程学术会议上都把“共同作用”作为重要议题。特别在 1993 年召开了第一届结构与介质相互作用学术会议,使“共同作用”在岩土工程中得到了很大的发展。1985 年董建国、路佳等首次把共同作用原理应用于高层建筑地基基础。1989 年,赵锡宏等提出“上海高层建筑桩筏与桩箱设计理论”;1992 年,董建国等对共同作用原理在设计上的应用提出建议。1989 年,杨敏对上部结构与桩筏基础共同作用作了深入的理论和实验研究;1991 年,黄绍铭、裴捷等提出减少沉降桩并在多层建筑中的应用。1991 年编制的国家《建筑桩基技术规范》强调要考虑承台、桩群、土之间的共同作用。

“共同作用”分析难度很大,现在已得到了一些定性的结论,可用于工程的概念设计,更重要的是加强基础研究和工程应用计算,给出“共同作用”的定量分析,更好地为工程实践服务。

以往研究“共同作用”时,忽略了一个工程上急需解决的重大问题,即是高层建筑与低层建筑之间、超高层建筑与群房之间、高层建筑与高层建筑之间共同工作、共同作用。特别是相互间的差异沉降分析,这既十分复杂和困难,又十分重要和紧迫(工程建设需要)。中国建筑科学研究院黄熙龄院士等作了开拓性研究工作并取得了重大成果,有的研究结论已写进国家“建筑地基基础设计规范”(GB50007-2002)。

目前,高层建筑箱(筏)基础与地基的相互作用最新研究成果如下:①上部结构刚度对基础的影响是有限的,特别是具有多层地下室的箱(筏)基础超高层建筑,由于地下室本身

的刚度很大,底板较厚,这种影响更有限;②计算参数选择和地基本构模型的确定对深基础的沉降计算影响很大,搞得不好,往往使计算结果失真;③超高层建筑箱筏基础总沉降中,明显有回弹和再压缩沉降;④超高层建筑箱筏基础大部分建在砂卵石层、强风化花岗岩地基上,其总沉降中,初始沉降所占比例较大,约 80% 以上;⑤超高层建筑与裙房或地下车库的差异沉降分析,具有重要的技术经济意义。

对于超高层建筑桩箱(筏)基础的共同作用研究中,定性分析还占主要成分。但不少定性研究成果对桩基的初步设计、概念设计十分有用。群桩和单桩的受力特性和沉降控制的一般规律在第七章将做详细介绍,这里重点是“共同作用”中有关沉降研究的成果,即:①桩基对减少沉降起重要的作用;②长桩的优点是控制沉降,短桩的优点是承担荷载;③桩土共同承担建筑物荷载,按规范设计的桩基,适当减少桩数,对沉降影响不大;④当桩的长细比(L/D) ≥ 60 时,对减少沉降不明显;⑤高层建筑桩箱筏基础与地基的共同作用对上部机构中的头几层有一定影响,特别是边角柱或外框筒结构影响较大,当然还有其他有关成果和设计的若干建议;⑥高低层建筑或高层与裙房桩箱筏基础沉降计算与分析,其结果是判断是否设沉降缝和后浇带问题(风险性较大)。如设后浇带,还要确定何时可以浇筑好后浇带。

1.3.6 超高层建筑深基础沉降计算的数值法研究进展

超高层建筑深基础沉降分析的数值方法,主要是有限元法和边界元法,应该说这两种方法耦合可以计算任何初始条件和边界条件下的深基础沉降问题。采用有限元分析单桩沉降的比较多,分析群桩的成果比较少,分析上部结构、桩箱筏基础与地基的共同作用的成果也不太多,1975 年, Ottavani 首先进行了三维群桩的有限元法分析;1977 年以后, Banerjee 等分别采用有限元法和边界元法作了群桩分析; Zeinkeiwicz 和 Cheung 以及合作者(杨敏等)采用有限元法、有限条分法分析地基基础问题,包括沉降问题;由于有限元子结构法发明后,对地基基础问题的研究更有利。另外,由于上述问题具有“空间三维性、无限域问题和不同结构体系”共同作用的三大难题,使得有限元和边界元法的应用出现一些困难。因此,现在发展较快是各种各样的半解析-半数值法(曹志远教授把它分为 7 大类,30 多种)。同济大学曹志远教授应用“半解析法”分析过桩土共同作用和群桩问题。目前,上述方法比较活跃的有半解析组合单元法、半解析边界单元法、无限元法与无限边界元法、分区耦合法。这些方法对解决上述“三大难题”不同程度上都有进展。另外,所有的数值法和计算机技术,可以模拟分析地基的非连续、非均质、非线性性质;可以分析其蠕变和固结问题;也可以模拟施工过程、逐步加载问题。但是这些方法和程序的理论基础还是弹性力学,地基模型和计算参数、边界条件和地质条件等很难把握,很难保证计算的真实性和计算误差。所以,超高层建筑桩箱(筏)基础沉降计算的实用化软件系统还有一段路要走。

综上所述,目前在超高层建筑桩箱(筏)基础和箱筏基础沉降计算的各种方法中,仍首推修正分层总和法。

1.3.7 超高层建筑深基础沉降计算中存在的主要问题和展望

基础沉降计算问题用一句话来概括就是:理论计算值和工程实测值结果有很大差值,

有时这个差值还很大,对于压缩性较大的地基,理论计算值偏小,反之偏大。由此可见,基础沉降计算还没有完全解决。目前其主要问题为:

(1) 深基坑基底附加应力计算时,由于基坑底回弹再压缩问题,而附加应力不再符合 $P_0 = P - \gamma_p D$, 其回弹再压缩系数在 0 到 1 之间,很难取得准确,因此附加压力很难取准;

(2) 地基土的物理力学性质中的有关计算参数很难取得正确和准确。如地基土的弹性模量、变形模量、压缩模量和泊松比等。

(3) 所有的沉降计算方法对地基沉降计算深度都作了不同的简单化处理(有限深度),这必然带来一定误差。

(4) 地基最终沉降量计算的几个主要方法都是以弹性力学为基础,并假设地基无限而且为连续线弹性体,没有考虑深基坑支护结构的侧限作用和对基坑底的回弹变形影响。而地基往往具有非连续、非均质、非线性性质,不采用数值方法是很难分析的。同时,我们采用弹性理论计算沉降时,是按半无限平面或空间体地基得到的解析解,而实际地基压缩层又按十分有限的深度计算。其计算结果必然偏大。

(5) 黏性土地基的沉降三过程(初始沉降、固结沉降和次固结沉降)可以明显区分出来,而砂土地基沉降的前两个过程很难区分开来,而且占总沉降的大部分。次固结沉降相对较小,也很难计算。

(6) 采用数值方法计算超高层建筑深基础沉降时,其主要问题是地基本构模型和计算参数的选择问题,以及怎样进行整体结构(包括桩箱(筏)、地基、上部结构)的总体三维分析问题。

(7) 基础沉降实测数据很少,而高层建筑和超高层建筑基础沉降实测数据更少、很难建立沉降数据库和专家系统。

(8) 计算参数的测试和有关设备问题。

总之,以上这些问题要在短时间内全部解决是不可能的,初步估计还需几十年时间解决其中一个或几个问题。但是随着实测沉降数据的不断增多,使地区经验系数更准确,使理论计算值的误差减少到允许的范围内。同时数值方法和计算机技术的不断发展,以及测试技术的提高,用计算机技术解决以上问题是有光明前景的。若把优化理论和优化技术引进地基沉降计算,也必将带来巨大的技术经济效益。

1.4 本书研究工作简介

超高层建筑深基础沉降研究是目前工程建设急需要解决的重要问题,而且该问题还没有完全解决。由于全世界超过 200m 的高层建筑有 100 多幢,大部分集中在美国和亚洲(图 1-7)其他分散在世界各地。我国超过 200m 的高层建筑只有 20 幢(详见第一章),分散在北京、上海、广州、深圳、青岛、武汉、南京和大连等大城市。因此对其深基础的理论研究和实测沉降数据研究较少。根据我国地质条件和结构体系,将目前应用的深基础分为三种情况:箱(筏)型、摩擦桩箱(筏)型和端承桩箱(筏)型基础。显然这同一般高层建筑、多层建筑有重要的区别,归纳起来主要有:①采用箱(筏)型基础的地基承载力 $f_k \geq 1000\text{kPa}$, 地基土土质较好,如砂卵石、风化花岗岩等;②超长桩箱(筏)型基础,桩长都大于 50m 以上;③有限压缩层岩石地基采用大直径挖孔端承桩箱(筏)型基础;④支护结构与地下室外墙