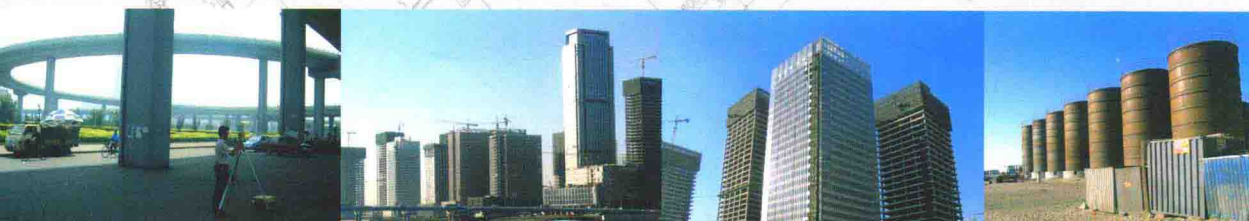


滨海软土地区建筑物沉降性状 与控制方法研究

王存贵 姜忻良 主编

- 根据不同建筑类型、结构体系、基础类型、地基处理方法等，结合实测数据建立了庞大的数据库。
- 依据统计数据，建立了软土地区建筑物沉降实测数据统计计算与分析软件。
- 以建筑物的实测沉降数据为边界条件修正、拟合了建筑物的实际沉降曲面方程。
- 基于实测值的沉降计算方法，对相应桩基沉降公式加以修正，提出修正系数，进行了分析验证。

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS



滨海软土地地区建筑物沉降性状 与控制方法研究

王存贵 姜忻良 主编

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书在分析了天津滨海软土地基大量的不同基础类型、不同长宽比建筑物的沉降数据的基础上,确定了模拟计算的曲面方程,对地基不均匀沉降对框架结构与剪力墙结构的影响进行了系统的反分析研究,并给出了计算实例。

本书共分9章,内容包括:绪论、正分析和反分析的有限元模拟、正分析模型建立与不同长宽比建筑物的沉降数据分析及曲面方程确定、不同基础类型建筑物的沉降数据分析及曲面方程确定、地基不均匀沉降对框架结构影响的反分析研究、地基不均匀沉降对剪力墙结构影响的反分析研究、剪力墙简化结构二元件模型、剪力墙简化结构反分析研究、天津滨海软土地区桩基实例分析。

本书可供建筑结构工程、岩土工程等相关部門的工程技术人员和研究人员使用,也可供高等院校建筑结构工程、岩土工程和相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

滨海软土地区建筑物沉降性状与控制方法研究 / 王存贵, 姜忻良主编; 张立敏等编. — 天津: 天津大学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5618-5497-6

I. ①滨… II. ①王… ②姜… ③张… III. ①海滨 - 软土 - 建筑物 - 沉降 - 控制方法 IV. ①TU196

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 304473 号

出版发行 天津大学出版社
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 廊坊市海涛印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 9.75
字 数 240 千
版 次 2016 年 1 月第 1 版
印 次 2016 年 1 月第 1 次
定 价 48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

滨海软土地基承载能力较低,地基土的复杂性及差异性大,另外由于桩基计算理论的不成熟以及对基础沉降的过高要求,往往理论设计计算的沉降值与实际沉降值有一定的差距,有时甚至是较大的差距。由于缺乏对设计者具有良好指导和参考作用的建筑物沉降性状研究成果,如何合理经济地使建筑物的实际沉降值控制在国家规范和软土地区标准规定的允许范围内,是困扰设计者的一个问题。因此,往往会发生两个方面的问题:一是设计保守,加大地基基础设计的安全系数,这样增大了建设投资,造成不必要的浪费;二是迫于建设方的压力,或因设计单位及设计人员对滨海新区的地质条件了解不足,导致设计过程中安全系数取值过小或土性参数取值不当,而造成建筑物的沉降值超出规范或标准的允许范围或产生较大的不均匀沉降,前者影响建筑物的正常使用功能,后者会因建筑物的过度倾斜导致结构开裂,甚至造成结构破坏,从而影响建筑的正常使用,不论拆除重建还是进行纠偏处理、地基补强和上部结构加固,均会增加建设投资,带来较大的经济损失和不良的社会影响。

当沉降量和沉降差较大时,上部结构会产生很大的附加内力和附加变形,从而影响上部结构的正常使用功能和极限承载能力。因此,如何经济合理且安全地做好结构分析与设计工作,研究地基不均匀沉降对上部结构影响的反分析理论正日益受到国内外业界的高度重视。本书对上部结构与基础进行反分析研究,同时采用现有建筑物的实际沉降来进行反分析研究,以系统地分析地基不均匀沉降对上部结构的影响,为上部结构的设计调整提供依据。

本书以由建筑物长宽比、桩长和筏板厚度确定的反映沉降趋势的二次项系数为基础,以建筑物的实测沉降数据为边界条件修正,拟合建筑物的实际沉降曲面方程。在考虑结构—基础—地基相互作用的情况下,采用 ANSYS 有限元分析软件对地基进行不均匀沉降分析,并考虑了由相邻

建筑物引起的附加沉降,得到了建筑物所引起的周边地基的沉降曲面。再以上部框架结构、桩基础、天津滨海新区典型软土地基为分析对象,分析地基不均匀沉降、沉降差、筏板厚度、相邻建筑物等对上部结构的影响,分析上部结构的附加轴力、附加剪力、附加弯矩等的变化规律,为系统地分析沉降对框架结构的影响提供依据;以上部剪力墙结构、桩基础、天津滨海新区典型软土地基为分析对象,分析相同的沉降工况、不同的基础刚度等对上部结构的影响,分析上部结构的附加轴力、附加剪力、附加弯矩等的变化规律,为系统地分析沉降对剪力墙结构的影响提供依据。然后以弹簧二元件模型为基础,提出一个更适用于实际工程平面布置的修改后的弹簧二元件模型,并根据常见的3种剪力墙形式——无翼缘的单肢剪力墙、有翼缘的单肢剪力墙、联肢剪力墙,分别用弹簧二元件模型与壳单元模型建立 ANSYS 有限元模型,进行计算结果的比较以查看修改的弹簧二元件模型和壳单元模型的计算误差。最后以天津市滨海新区一实际工程为例,计算了桩长、桩径的改变对沉降理论计算值的影响,为天津滨海软土地基的桩基的优化设计提供参考。

本书由王存贵、姜忻良主编,参加编写工作的有张立敏、张新民、段前忠、刘义猛、黄利明、吕月红、于杰大等。由于编者水平有限,对书中可能存在的不足和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者
2016年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究不均匀沉降对上部结构影响的意义	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 群桩沉降计算方法的研究现状	2
1.2.2 反分析理论的研究现状	3
第 2 章 正分析和反分析的有限元模拟	5
2.1 有限元法基本原理	5
2.1.1 有限元法概述	5
2.1.2 有限元分析基本步骤	5
2.2 有限元分析中相关参数的确定	8
2.2.1 单元类型确定	8
2.2.2 上部结构的线弹性本构模型	10
2.2.3 土体的弹塑性本构模型	11
2.2.4 牛顿-拉普森方法	12
2.2.5 桩土接触问题	13
第 3 章 正分析模型建立与不同长宽比建筑物的沉降数据分析及曲面方程确定	14
3.1 正分析模型的建立	14
3.1.1 模型的介绍	14
3.1.2 正分析 ANSYS 有限元模型的建立	15
3.2 不同长宽比的建筑物的沉降数据分析及曲面方程确定	16
3.2.1 建筑物长宽比为 3~4 的沉降数据分析及曲面方程确定	16
3.2.2 建筑物长宽比为 1~2 的沉降数据分析及曲面方程确定	25
3.2.3 建筑物长宽比为 2~3 的沉降数据分析及曲面方程确定	30
3.2.4 建筑物长宽比大于 4 的沉降数据分析及曲面方程确定	34
3.2.5 荷载对沉降曲面方程的影响	39
3.2.6 实际沉降曲面方程的确定	40
3.3 本章小结	42
第 4 章 不同基础类型建筑物的沉降数据分析及曲面方程确定	45
4.1 正分析模型的建立	45

4.1.1	模型的介绍	45
4.1.2	有限元模型的建立	46
4.2	箱形基础的沉降数据分析及曲面方程确定	47
4.2.1	不同高度箱基沉降曲面方程模式	47
4.2.2	上部结构采用不同长宽比时箱基沉降曲面方程模式	50
4.3	筏形基础的沉降数据分析及曲面方程确定	52
4.3.1	筏形基础尺寸确定	52
4.3.2	不同厚度筏基沉降曲面模式	52
4.3.3	上部结构采用不同长宽比时筏基沉降曲面方程模式	55
4.4	建筑周边地基的沉降曲面方程	57
4.4.1	筏形基础建筑周边地基的沉降曲面方程模式	57
4.4.2	箱形基础建筑周边地基的沉降曲面方程模式	59
4.5	本章小结	61
第5章	地基不均匀沉降对框架结构影响的反分析研究	63
5.1	实际地基不均匀沉降对上部结构影响的反分析研究	63
5.2	对比不同实际沉降差对上部结构影响的反分析研究	67
5.3	对比不同筏板厚度对上部结构影响的反分析研究	69
5.4	相邻建筑对地基不均匀沉降的影响及反分析研究	72
5.5	本章小结	76
第6章	地基不均匀沉降对剪力墙结构影响的反分析研究	77
6.1	箱形地基不均匀沉降对上部结构影响的反分析研究	77
6.1.1	箱形基础地基最终的沉降曲面方程	77
6.1.2	不同高度的箱基不均匀沉降对上部结构的反分析研究	78
6.2	筏形基础不均匀沉降对上部结构影响的反分析研究	83
6.2.1	筏形基础地基最终的沉降曲面方程	83
6.2.2	不同厚度的筏基不均匀沉降对上部结构的反分析研究	83
6.3	不同沉降差对上部结构影响的反分析研究	89
6.3.1	底层柱内力比较	91
6.3.2	剪力墙内力	94
6.4	本章小结	96
第7章	剪力墙简化结构二元件模型	97
7.1	二元件模型介绍	97
7.2	修改后的二元件模型介绍	98
7.3	弹性阶段的简单算例比较	99

7.3.1 无翼缘的单肢剪力墙	99
7.3.2 有翼缘的单肢剪力墙	101
7.3.3 联肢剪力墙	103
7.4 本章小结	106
第8章 剪力墙简化结构反分析研究	107
8.1 ANSYS 有限元模型的建立	107
8.1.1 弹簧单元刚度计算	107
8.1.2 基本假定	108
8.1.3 整体有限元模型规划	109
8.2 不均匀沉降的反分析	110
8.2.1 沉降曲面方程确定	110
8.2.2 沉降数据分析	111
8.3 工况三——建筑物在风荷载作用下的内力和变形	117
8.4 工况一、工况二、工况三的计算结果对比	122
8.5 本章小结	124
第9章 天津滨海软土地区桩基实例分析	126
9.1 工程实例计算分析	127
9.1.1 减小桩长	127
9.1.2 减小桩径	135
9.2 分析结论	142
参考文献	143

第1章 绪 论

1.1 研究不均匀沉降对上部结构影响的意义

随着现代经济持续、高速的发展,土建工程日益增多,难度不断增加,可利用的空间越来越少,人们不得不在不良地基(如软土地区等)上修建建筑物。天津滨海地区属于典型的软土地区。在现代高层建筑中,桩基应用非常普遍。群桩沉降计算一直是桩基设计理论中的一大难题,其受到土的类别与性质、成桩工艺、荷载水平、群桩几何尺寸(桩间距、桩长、桩数、桩径、桩基宽度与桩长比值等)、承台设置及承台一桩一土相互作用等的影响而变得比平板基础和单桩复杂。目前,群桩沉降计算的方法主要有剪切位移法、荷载传递法、有限元法、变分法、非线性计算的近似混合法等,但是由于桩基计算理论的不成熟,加上地基土的复杂性和差异性以及对基础沉降的过高要求,至今没有一种能精确计算群桩沉降量的方法,桩基实际沉降量和计算沉降量间往往有一定的差距。而在设计阶段,为了考虑这一最终可能并未达到的沉降量,在结构设计处理手段和设备管道连接以及施工措施方面都相应采取一些特殊措施。这些并非必要的措施不仅加大了施工难度,延长了施工周期,而且增加了工程造价。因此,通过大量实际工程的计算,结合实测沉降,分析常用沉降计算方法在天津滨海软土地区应用的不足和合理之处,对桩基初步设计及桩基理论的深入研究具有实际工程指导意义。

事实上,软土的压缩沉降量大,地基稳定性差,地基承载能力较低,在软土地基上建造高层建筑,沉降量和沉降差往往也很大,在上部结构会产生很大的附加内力和附加变形,从而影响上部结构的正常使用功能和极限承载能力。因此,如何经济合理且安全地做好结构分析与设计的工作,研究地基不均匀沉降对上部结构影响的反分析理论正日益受到国内外业界的高度重视。

地基不均匀沉降已经成为引起建筑物破坏的主要原因之一。20世纪50年代,斯肯普顿(Skempton)和麦克唐纳(D. H. MacDonald)总结了98幢天然地基房屋的观察资料,这些房屋建于1860—1952年,其中40幢由于不均匀沉降的缘故,发生了不同程度的损坏,其损坏率接近41%。在天津、上海等软土地区,由于城市的快速发展,急需建造大量的高层建筑,研究地基的不均匀沉降对上部结构的影响是建筑设计和加固改造过程中急需解决的问题。

对上部结构与基础进行反分析研究,采用现有建筑物的实际沉降来进行反分析研究,以系统地分析地基不均匀沉降对上部结构的影响,找出上部结构的危险部位,为上部结构的设计调整提供依据。考虑基础刚度对反分析研究的影响,能够合理地设计基础,减少地基沉降和基础内力,降低基础造价。考虑沉降差对反分析研究的影响,能够合理地控制建筑物沉降差,减少上部结构的附加内力和附加变形。因此,分析地基不均匀沉降对上部结构影响的反分析研究具有很重要的意义,可以为纠偏设计及结构加固提供可靠的依据。而一般情况下,实际工程的实测点较少且大多分布在建筑物周围,无法满足地基不均匀沉降对上部结构影响的反分析研究的要求,需先进行正分析确定地基不均匀沉降的规律。

另一方面,不同基础和不同结构形式条件下地基不均匀沉降对上部结构的影响有所不同,因此有必要对框架结构和框剪结构及不同的基础形式等分别进行反分析研究。在通用计算软件 ANSYS 中,建模计算分析框架结构比较简单,而若用壳单元模拟剪力墙结构进行计算分析,由于计算量大而不适用于大型工程的宏观计算,本书以二元件模型为基础提出了修改后的二元件模型。通过三种常见剪力墙形式的算例,与壳单元模型计算结果比较,结果表明修改后的二元件模型具有较好的计算精度,可用于高层剪力墙结构的宏观分析。

1.2 研究现状

1.2.1 群桩沉降计算方法的研究现状

群桩的受力和变形特性要求考虑桩—土—桩及桩—筏板之间的相互影响,国内外对群桩的工作性能进行了广泛的研究,从一般的弹性分析进入非线性分析,同时还有桩周土的固结效应、基础埋深的影响及上下部结构与地基土的相互作用等。影响群桩受力性能的因素很多,因此要寻求一种方法把这些因素都考虑进去是很困难的。目前,常用的群桩沉降计算方法有等代实体深基础法、沉降比法、分条叠加法、弹性理论法、荷载—沉降曲线法、边界元法等。

等代实体深基础法是所有群桩沉降计算方法中最简单的一种,它是将群桩基础看作一个实体,不考虑桩土间的相互作用。用布辛奈斯克(Boussinesq)解计算桩端平面下各点的附加应力,然后用单层压缩分层总和法计算桩端下地基土的沉降。计算桩端平面处的应力时可以考虑应力的扩散,也可以不考虑。刘金砺根据模型试验对等效作用面的位置和压缩层的厚度做了修正,减小了桩端平面下压缩层的厚度,使群桩基础沉降减小,更接近实际。董建国等在上述方法的基础上对上海规范做了改进,根据基础所受的附加荷载和基础外围抗力的大小而采取不同的计算方法。胡德

贵等用剪切变形法计算桩身压缩,用等代实体深基础法计算桩端平面下的压缩量,假设筏板为刚性,计算时假设各桩的沉降相等且都等于筏板沉降,计算后乘以与桩有关的影响系数来反映对桩的影响。

沉降比法是根据单桩的沉降曲线来求群桩沉降的一种方法,沉降比 R_s 等于群桩的平均沉降和单桩在群桩各桩平均荷载下的沉降的比值。刘金砺对这种方法也做了修改,Poulos 建议对于 16 根以上的方形和矩形排列群桩, R_s 与桩数 n 的平方根应呈线性关系,所以可以外插求得桩数较多群桩的沉降比。

分条叠加法是将桩筏基础分解成若干桩—条基系统,依照弹性理论方法求解桩—条基系统,然后将桩—条基解相叠加来求得群桩的沉降量。这种方法不需要使用计算机,但此法仅限于求解沉降值,桩身和筏板的内力都无法得到,而且得到的沉降值与实测值相差较大。这种方法在实际中的应用较少。

沿桩身桩—土滑动的分析表明,对于长细比大于 20 的正常桩,在荷载达到破坏荷载的 50% ~ 70% 以前,其荷载—沉降曲线基本上是线性的,预估这些桩在工作荷载下的沉降时,用弹性分析就足够了。Poulos 描述了在这种情况下绘制荷载—沉降曲线的简化方法:利用弹性解,首先考虑黏土中桩的荷载—瞬时沉降曲线或砂土中桩的荷载—总沉降曲线,再考虑黏土中的固结沉降,但这种情况在桩数较少的情况下才成立。

有限元和边界元耦合的方法是由 Hain 提出的。这种方法得到的结果和实测值比较接近。Hain 和 Lee 应用此方法,成功地预测了两个桩筏体系的荷载和沉降分布。刘前曦等应用此方法,在平面内划分筏板,土层内力采用 Geddes 弹性解和 Boussinesq 解,采用分层总和法,根据力的平衡和位移协调可以求解相应的位移和内力。刘金砺根据实验模型对这种方法做了修正,首先指出桩的变形范围比 Mindlin 理论解小,为 $(4 \sim 10)D$,而不是 Mindlin 解的 $50D$ 。

有限元法是处理复杂结构最常用的方法,其在群桩基础沉降中也得到了广泛的应用,但是由于刚度矩阵过于庞大,计算起来很困难。宰金珉等还考虑了上部结构对基础刚度的贡献,借用结构分析中的子结构法,使计算中考虑的因素更加全面。

1.2.2 反分析理论的研究现状

反分析研究大多应用于岩土工程中,20 世纪 70 年代初,国外学者 Kavanagh 首先用有限元法成功地对线弹性问题的力学参数进行了反演,随后 Sakurai 将反分析技术实用化。Kirsten 提出了量测变形反分析法。Jurina 和 Cividini 先后将反分析技术推广到非均匀介质问题中,使其可应用于非均匀介质。Sakurai 对各向异性非均质和多介质岩体材料的力学参数进行了反演研究。Gioda 等则利用水室法测得的土体位移,求解 Mohr-Coulomb 型弹塑性的黏聚力和内摩擦角及初始应力。Asaoka 提出了反

算软土地基固结系数的方法。1974年,Iding等将优化方法引入反分析问题中,提出了优化反分析方法。Cividini等用优化反分析方法,对地基中软弱夹层的材料参数进行反演,并确定出软弱层位置。Gioda等采用多种优化技术反求岩体的弹性力学参数,进一步发展了岩土工程领域的优化反演理论。

在国内,20世纪80年代初,郭怀志等提出了确定岩体初始地应力场的回归分析法,后来又发展了采用位移量测值的位移回归分析法。杨林德、冯紫良等将地应力分为构造应力和自重应力,用有限元法计算自重应力场的围岩位移,进一步反算岩体的构造应力。杨志法等提出了一种新的位移反分析方法——图谱法,利用事先建立的图谱反演围岩地应力分量及弹性模量,并进一步发展了位移联图反演方法,随后又采用黄金分割法进行弹塑性参数的反演。近年来,不少学者对基坑开挖的反分析也进行了研究,杨敏等采用杆系有限元法对土体水平基床系数 m 进行了位移反分析,赵振寰采用单纯形法对土体弹性模量进行了反演,朱志伟采用复合形法对土体弹性模量进行了反演,朱合华采用Simplex法对土体弹性模量进行了基坑开挖动态反演。随着科学技术的进步,更多的研究将会深入到这一领域。

第2章 正分析和反分析的有限元模拟

2.1 有限元法基本原理

2.1.1 有限元法概述

有限元法(Finite Element Analysis, FEA)是随着电子计算机的发展而发展起来的一种很有效的数值计算方法。1960年,R. W. Clough在一篇论文中首次使用“有限元法”这个词。在国外,20世纪70年代初有限元法的基本理论已基本成熟,商业有限元分析软件开始陆续出现。使用有限元法求解有几个突出的优点:(1)可以求解非线性问题;(2)易于处理非均质材料、各向异性材料;(3)适用于各种复杂的边界条件。

ANSYS是由美国ANSYS公司开发的大型通用有限元分析软件。ANSYS公司自1970年成立以来,在其创始人John Swanson教授的领导下,不断吸取世界最先进的计算方法和技术,引领着世界有限元软件的发展。ANSYS以其先进、可靠、开放等特点,被全球工业界认可。ANSYS具有功能强大的结构分析(线性静力分析、非线性静力分析、线性动力分析、非线性动力分析)能力,能很好地将前处理模块(Preprocessor)、计算模块(Solution)和后处理模块(Postprocessor)三大模块集成在一起,具有直观性和便捷性,大大提高了其分析问题和解决问题的效率。

2.1.2 有限元分析基本步骤

本书采用的是位移有限元法,基本步骤如下。

1. 离散和选择单元类型

结构的离散化是将被分析的结构用选定的单元划分为有限单元体,把单元的一些指定点作为单元的节点,以单元的集合来代替原结构。具体工作:将结构用选定单元进行离散;建立坐标系;对单元和节点进行合理编号。

2. 选择位移函数

位移函数的确定是有限元法分析的关键。在对单元进行特性分析时,必须对单元中的位移分布做合理假设,常将单元中任一点的位移用节点位移与坐标函数来表示,该坐标函数称为位移函数,位移函数常采用多项式形式。

主要工作是建立矩阵方程:

$$u_e = N\delta_e \quad (2-1)$$

式中 u_e ——单元中任一点的位移列阵;

N ——形函数矩阵;

δ_e ——单元的节点位移列阵。

3. 定义应变位移和应力应变关系,推导单元刚度矩阵

(1) 利用几何方程将单元中任一点的应变用待定的节点位移来表示,即建立如下矩阵方程:

$$\varepsilon = Lu_e = LN\delta_e = B\delta_e \quad (2-2)$$

式中 ε ——单元中任一点的应变列阵;

L ——微分算子;

B ——形变矩阵。

(2) 利用物理方程将单元中任一点的应力用特定的节点位移来表示,即建立如下矩阵方程:

$$\sigma = D\varepsilon = DB\delta_e = S\delta_e \quad (2-3)$$

式中 σ ——单元中任一点的应力列阵;

D ——与单元材料相关的弹性矩阵;

S ——应力矩阵。

(3) 利用虚位移或最小势能原理或加权残余法建立单元刚度方程:

$$K_e\delta_e = V_e + P_{eq}^e \quad (2-4)$$

式中 $K_e = \int_{V_e} B^T DB dV$ ——单元刚度矩阵;

V_e ——单元节点力列阵;

P_{eq}^e ——单元等效荷载列阵,与作用于单元上的外荷载相关。

4. 组装单元方程得出总体方程并引进边界条件

对单元进行组装,建立结构的刚度方程:

$$K\delta = P \quad (2-5)$$

式中 K ——整体刚度矩阵;

δ ——整体位移列阵;

P ——综合等效节点荷载列阵。

5. 支承约束条件的引入

为了最后完成结构与地基支座拼装,引入支承约束条件,需将式(2-5)进行修改。为了清晰起见,将节点全部位移 δ ,按是否有约束重新分类,用 δ_r 表示不受约束的自由节点位移,用 δ_R 表示对应有约束的节点位移,即有

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_R \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

相应把节点力列阵也分为两块

$$P = \begin{bmatrix} P_r \\ P_R \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

其中, P_r 是对应自由节点的那部分节点荷载列阵; P_R 是对应有约束节点的节点力, P_R 应该包含支座反力 R 与该处对应的综合节点荷载 P_{cr} , 即

$$P_R = R + P_{cr} \quad (2-8)$$

合并式(2-7)及式(2-8), 即有

$$P = \begin{bmatrix} P_r \\ R + P_{cr} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

将式(2-5)按式(2-6)及式(2-9)分块, 对应的 K 即可分为

$$K = \begin{bmatrix} K_{rr} & K_{rR} \\ K_{Rr} & K_{RR} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

将式(2-6)、式(2-9)及式(2-10)代入式(2-5)中并展开, 可得

$$\left. \begin{aligned} P_r &= K_{rr}\delta_r + K_{rR}\delta_R \\ R + P_{cr} &= K_{Rr}\delta_r + K_{RR}\delta_R \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

6. 节点位移、支座反力与杆件内力解答

讨论式(2-11), 可以分别得到正分析和反分析两种情况。

(1) 正分析时, 结构无支座沉陷, 仅承受荷载, 即 $\delta_R = 0$, 由式(2-11)得

$$\left. \begin{aligned} P_r &= K_{rr}\delta_r \\ R &= -P_{cr} + K_{Rr}\delta_r \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$

其中, K_{rr} 是经过修改后的缩减的总刚度矩阵, 是非奇异矩阵, 称为最终的结构刚度矩阵, 从而可以解出自由节点位移

$$\delta_r = K_{rr}^{-1} P_r \quad (2-13)$$

(2) 反分析时, 结构仅发生支座位移 U_R , 而无荷载作用, 此时 $P_r = 0$, $P_{cr} = 0$, 由式(2-11)得

$$\left. \begin{aligned} 0 &= K_{rr}\delta_r + K_{rR}\delta_R \\ R &= K_{Rr}\delta_r + K_{RR}\delta_R \end{aligned} \right\} \quad (2-14)$$

于是, 可得

$$\delta_r = -K_{rr}^{-1} K_{rR} U_R \quad (2-15)$$

有了全部节点位移以后, 各单元的端部力可按下列公式求得。值得注意的是, 端部力是用单元局部坐标系表示的, 并考虑坐标系转换, 有

$$S^{(i)} = K^{(i)} \lambda_T^{(i)} \delta^{(i)} \quad (2-16)$$

式中 $S^{(i)}$ ——第 (i) 号单元的固端力;

$\lambda_T^{(i)}$ ——第 (i) 号单元的坐标转换矩阵;

$K^{(i)}$ ——第 (i) 号单元的刚度矩阵。

7. 解释结果

最后的目标是解释和分析用于应力应变分析过程的结果。在进行设计和分析时,要确定结构中位移最大和应力最大的位置。

2.2 有限元分析中相关参数的确定

2.2.1 单元类型确定

为了较好地模拟建筑物构件,本书采用 BEAM4 单元模拟梁、柱和桩, SHELL63 单元模拟楼板和筏板基础, SOLID45 单元模拟地基土。

1. SHELL63 单元

SHELL63 单元适合模拟线性、弯曲及适当厚度的壳体结构。单元中每个节点都具有 6 个自由度:沿 x 、 y 和 z 方向的平动自由度以及绕 x 、 y 和 z 轴的转动自由度。对于平面外的运动,用张量组的混合内插法(a mixed interpolation of tensorial components)。单元具有塑性、蠕变、应力刚化、大变形和大应变等特性。SHELL63 单元的几何模型如图 2-1 所示。

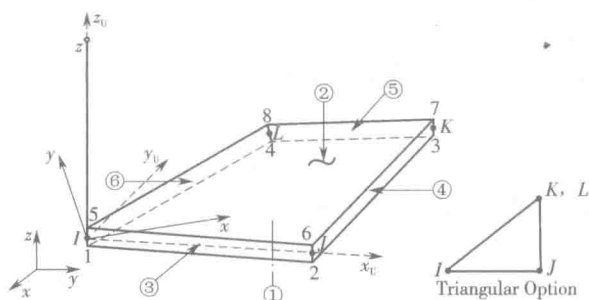


图 2-1 SHELL63 单元的几何模型图

x_u —没有定义单元坐标系时的 x 轴;

x —定义了单元坐标系时的 x 轴

2. BEAM4 单元

BEAM4 是 3-D 弹性梁单元,是具有拉、压、扭转和弯曲能力的单轴单元,每个节点有 6 个自由度,即节点沿 x 、 y 、 z 方向的位移自由度和绕 x 、 y 、 z 轴转动的旋转自由度,还包括应力刚化和大变形能力。在大变形分析中,可以使用连续的切向刚度矩阵选项。BEAM4 单元具有应力强化、大变形和单元生死的特性。BEAM4 单元的几何模型如图 2-2 所示。

3. SOLID45 单元

SOLID45 单元用于构造三维实体结构。单元通过 8 个节点来定义,每个节点有三个沿 x 、 y 、 z 方向平移的自由度。可用于模拟正交各向异性材料的固体结构,各向

(If node K is omitted and $\theta=0^\circ$, the element y axis is parallel to the global X - Y Plane.)

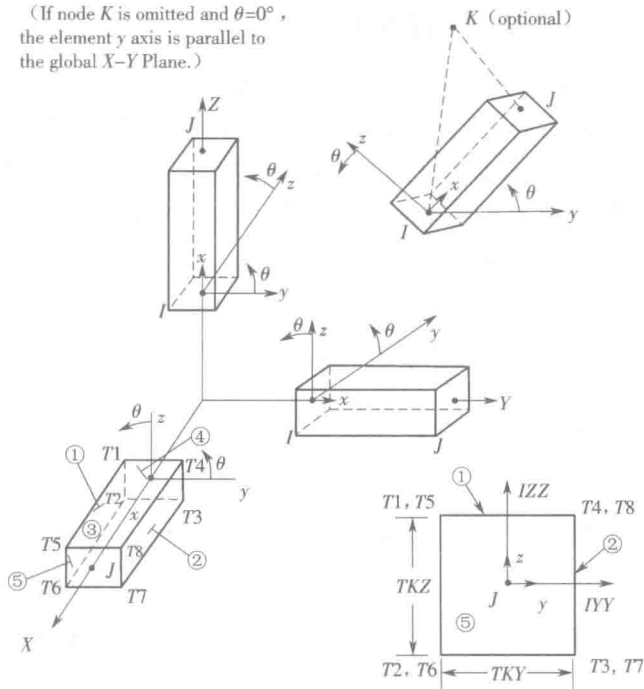


图 2-2 BEAM4 单元的几何模型图

异性材料方向对应于单元坐标系方向。SOLID45 单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力。SOLID45 单元的几何模型如图 2-3 所示。

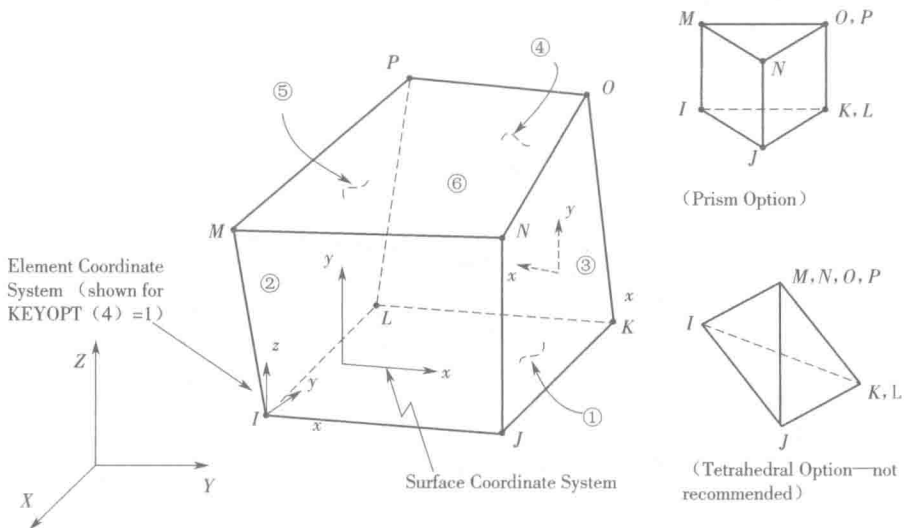


图 2-3 SOLID45 单元的几何模型图