

JIANZHU SHIGONG
KEJI CHUANGXIN JI YINGYONG

建筑施工 科技创新及应用

张希黔 主编

中国建筑工业出版社

建筑施工科技创新及应用

张希黔 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑施工科技创新及应用/张希黔主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2009
ISBN 978-7-112-10904-3

I. 建... II. 张... III. 建筑工程—工程施
工—施工技术—技术革新 IV. TU74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 052522 号

近几年来,本书作者依托中建总公司施工技术专业委员会、重庆大学现代施工技术研究所,服务建筑企业,以典型工程项目为背景,在有关建筑企业和院校的共同努力下,取得了一批创新、集成的科技成果,对这些成果进行全面总结、分析、整理,成为本书的主体内容,包括建筑基坑支护和地基基础工程施工、建筑结构工程施工、基于特殊功能需要的建筑工程施工技术、复杂结构定位测控技术、建筑节能、环保与生态建设、房屋建筑混凝土结构施工工期安全控制技术以及现代信息技术在建筑施工中的应用,涵盖了建筑工程主要技术领域。

本书可作为从事土木工程专业的设计、施工等方面科研人员、工程技术人员,以及大专院校师生的参考书。

*

责任编辑:郇锁林

责任设计:赵明霞

责任校对:刘 钰 关 健

建筑施工科技创新及应用

张希黔 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:32¼ 字数:805千字

2009年4月第一版 2009年4月第一次印刷

印数:1—3000册 定价:80.00元

ISBN 978-7-112-10904-3

(18145)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

党的十七大报告把“提高自主创新能力，建设创新型国家”作为国家发展战略的核心，强调“要坚持走中国特色自主创新道路，把增强自主创新能力贯彻到现代化建设各个方面”。建筑施工是一门把科学技术成果应用于实践的学科，具有很强的综合性和实践性。就工程建设而言，其创新主要包括集成创新和引进消化再创新，更主要是在实践中应用，并取得明显效益。

近几年来，依托中建总公司施工技术专业委员会、重庆大学现代施工技术研究所，服务建筑企业，以典型工程项目为背景，在有关建筑企业和院校的共同努力下，取得了一批创新、集成的科技成果，这些成果主要有：“长沙卷烟厂联合工房工程综合施工技术”、“重庆大学主楼高层建筑 GPS 测控技术”、“东莞玉兰大剧院工程建设成套技术”、“佛山市中医院医疗综合大楼工程建设关键技术”、“基于高质量控制的普通公共建筑工程施工关键技术”、“基于防微振与高洁净度控制的 12 英寸 90 纳米芯片厂工程建设关键技术”、“特大型超高超限钢筋混凝土工程施工工期安全控制及质量控制施工关键技术”、“基于生态建设的沪灞商务中心建筑工程关键技术”、“深圳市中心区双侧紧邻运营地铁特大型超深基坑变形控制关键技术”等。这些成果已通过省部级科技成果鉴定，部分已经取得了省部级科技进步奖。

为了更好地推动建筑业科技创新工作，提升行业水平，及时组织人员对上述成果进行全面总结、分析，作为本书的主体内容。全书共分为七章：

1. 建筑基坑支护和地基基础工程施工

主要包括：城市中心区特大型超深基坑变形控制关键技术；悬臂双排桩深基坑支护新体系施工技术；深基坑逆作法施工技术；多层次超大面积钢筋混凝土地面无缝施工技术。

2. 建筑结构工程施工

主要包括：倾斜钢结构、超大悬臂钢结构工程施工变形测控技术；超高层建筑主体结构施工技术；基于全过程控制的预拌混凝土长墙结构裂缝控制技术；特细砂高性能混凝土超高泵送施工关键技术。

3. 基于特殊功能需要的建筑施工技术

主要包括：芯片厂高洁净度控制关键技术；芯片厂防微振关键技术；大剧院声学模拟试验及声学设计与施工技术。

4. 复杂结构定位测控技术

主要包括：高层建筑 GPS 测控技术；特大型复杂连体建筑工程主轴线相关性测量控制技术；螺旋体结构空间坐标精确定位控制技术。

5. 建筑节能、环保与生态建设

主要包括：夏热冬冷地区外墙外保温系统施工技术；渭河平原沿河地带基于 CFD 技

术的生态建设关键技术；绿色施工综合技术。

6. 房屋建筑混凝土结构施工期安全控制技术

7. 现代信息技术在建筑施工中的应用

主要包括：虚拟现实施工技术；结构仿真技术；其他虚拟技术的开发和应用实践。

本书是企业、院校科研院所联合的成果，是集体智慧的结晶。参与编写的主要人员有：华建民、林琳、刘光云、刘星、罗琳、王伯成、张爱莉、周敬、陈景辉。

上述科技创新项目开发得到中建总公司系统毛志兵、肖绪文、张琨、王宏、黄刚、彭明祥、陈旅平、何穆、顾晴霞、蒋立红、喻国斌、唐鹏、赵元畴、秦裕民、谭青、旷庆华等同志的大力支持，在此表示衷心的感谢。

上述科技创新项目开发还得到了许溶烈外籍院士、徐正忠教授、叶可明院士、刘树屯大师、王铁梦教授、冯乃谦教授、黄声享教授、李世其教授、范士凯大师、王家阳总经理、李奇逊总工、戴启园总经理的帮助与指导，特向他们表示衷心的感谢。

本书的出版得到中国建筑工业出版社的大力支持，在此深表谢意。

建筑施工科技创新原创工作难度大，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

张希黔

2009年3月

目 录

1 建筑基坑支护和地基基础工程施工	1
1.1 城市中心区特大型超深基坑变形控制关键技术	2
1.1.1 问题的提出	2
1.1.2 创新与关键技术	4
1.1.3 工程应用实例	24
1.2 悬臂双排桩深基坑支护新体系施工技术	51
1.2.1 问题的提出	51
1.2.2 创新与关键技术	52
1.2.3 工程应用实例	69
1.3 深基坑逆作法施工技术	76
1.3.1 问题的提出	76
1.3.2 创新与关键技术	77
1.3.3 工程应用实例	81
1.4 多层面超大面积钢筋混凝土地面无缝施工技术	91
1.4.1 问题的提出	91
1.4.2 创新与关键技术	94
1.4.3 工程应用实例	132
2 建筑结构工程施工	157
2.1 倾斜钢结构、超大悬臂钢结构工程施工变形测控技术	158
2.1.1 问题的提出	158
2.1.2 关键技术与创新	160
2.1.3 工程应用与实例	172
2.2 超高层建筑主体结构施工技术	190
2.2.1 问题的提出	190
2.2.2 工程应用实例	191
2.3 基于全过程控制的预拌混凝土长墙结构裂缝控制技术	200
2.3.1 问题的提出	200
2.3.2 创新与关键技术	201
2.3.3 工程应用实例	215
2.4 特细砂高性能混凝土超高泵送施工关键技术	237
2.4.1 问题的提出	237
2.4.2 创新与关键技术	238

2.4.3 工程应用实例	238
3 基于特殊功能需要的建筑工程施工技术	245
3.1 12英寸90纳米芯片厂高洁净度控制集成技术	246
3.1.1 问题的提出	246
3.1.2 基本原理	247
3.1.3 12英寸90纳米芯片厂高洁净度控制关键技术	252
3.2 芯片厂防微振关键技术	266
3.2.1 问题的提出	266
3.2.2 创新与关键技术	267
3.2.3 工程应用实例	267
3.3 大剧院声学模拟试验及声学设计与施工技术	280
3.3.1 问题的提出	280
3.3.2 创新与关键技术	281
3.3.3 工程应用实例	281
4 复杂结构定位测控技术	303
4.1 高层建筑 GPS 测控技术	304
4.1.1 GPS 技术简介	304
4.1.2 GPS 卫星定位基本原理	306
4.1.3 基于 GPS 的高层建筑施工定位技术研究	307
4.1.4 GPS 测量方案的确定	308
4.1.5 高层建筑施工 GPS 定位的技术设计	310
4.1.6 高层建筑施工 GPS 定位的外业实施	311
4.1.7 高层建筑施工 GPS 定位的数据处理	314
4.1.8 基于 GPS 的高层建筑环境激励动态特性研究	316
4.1.9 工程应用实例	318
4.2 螺旋体结构空间坐标精确定位控制技术	329
4.2.1 问题的提出	329
4.2.2 空间坐标精确定位控制技术	330
4.2.3 工程应用实例	333
4.2.4 总结	345
4.3 特大型复杂连体建筑工程主轴线相关性测量控制技术	345
4.3.1 问题的提出	345
4.3.2 建筑物主轴线相关性控制技术	346
4.3.3 建筑物主轴线相关性控制技术在中新城上城工程中的应用	349
4.3.4 实施效果	353
5 建筑节能、环保与生态建设	355
5.1 夏热冬冷地区外墙外保温系统施工技术	356
5.1.1 问题的提出	356

5.1.2 创新与关键技术	362
5.1.3 工程应用实例	379
5.2 渭河平原沿河地带基于 CFD 技术的生态建设关键技术	381
5.2.1 问题的提出	381
5.2.2 基本原理与关键技术	384
5.2.3 西安浐灞商务中心工程生态建设关键技术	390
5.3 绿色建筑施工综合技术	410
5.3.1 问题的提出	410
5.3.2 创新及关键技术	413
5.3.3 工程应用实例	418
6 房屋建筑混凝土结构施工期安全控制技术	427
6.1 问题的提出	428
6.1.1 房屋建筑混凝土结构施工期受力特点分析	428
6.1.2 房屋建筑混凝土结构施工期安全控制研究现状	429
6.1.3 主要研究内容及技术路线	429
6.2 创新与关键技术	430
6.2.1 施工期混凝土结构安全分析控制模型的建立	430
6.2.2 施工期混凝土结构性能实测技术	437
6.2.3 施工期混凝土结构性能数值分析技术	438
6.3 工程应用实例	438
6.3.1 工程概况	438
6.3.2 施工期混凝土结构性能实测研究	439
6.3.3 施工期混凝土结构性能数值分析	444
7 现代信息技术在建筑施工中的应用	455
7.1 虚拟现实施工技术	456
7.1.1 问题的提出	456
7.1.2 创新与关键技术	458
7.1.3 工程应用实例	463
7.2 结构仿真技术	475
7.2.1 问题的提出	475
7.2.2 创新与关键技术	475
7.2.3 工程应用实例	476
7.3 其他虚拟技术的开发和应用实践	488
7.3.1 桅杆起重机构件及基座等的结构仿真	488
7.3.2 钢结构焊接应力、应变的三维有限元仿真	491
7.3.3 建筑外观与城市市场景虚拟漫游系统	494
后记	505

1 建筑基坑支护和地基 基础工程施工

1 建筑基坑支护和地基基础工程施工

1.1 城市中心区特大型超深基坑变形控制关键技术

1.1.1 问题的提出

我国大量的深基坑工程开始于 20 世纪 80 年代, 尤其近 10 年来, 伴随着超高层建筑的大量出现, 基坑工程不断朝着特大型超深方向发展。目前, 由于地铁建设的开发及城市用地的限制, 待建的城市中心区特大型超深基坑工程常常紧邻重要建筑或地铁结构等, 这种现象导致基坑变形受到周边环境的制约, 不仅限制了待建基坑工程支护体系的选型, 还要求基坑工程的变形控制要高于常规基坑工程。如何控制这类基坑的变形, 已成为目前我国工程界在基坑方面的重点研究方向。

为了避免因特大型超深基坑支护体系的施工而影响基坑工程周边的地下结构, 锚索支护体系的使用受到限制, 而“桩(墙)+内支撑”支护体系得到大量应用, 尤其以钢筋混凝土内支撑为主。在基坑开挖至内支撑拆除期间, 支护体系的支护桩(墙)结构与内支撑结构之间不断进行内力重分布, 影响超深基坑的变形。此外, 拆除城市中心区基坑工程的钢筋混凝土内支撑, 必须考虑进度、成本、环境、操作性等的影响。

城市中心区特大型超深基坑的变形控制, 已不能单一依靠设计方案, 制定基坑施工方法。需要结合基坑变形的特点和难点, 在基坑正式施工前, 先采用计算机技术模拟基坑开挖及拆撑期间的变形, 再优化设计, 进行施工, 通过全程监测, 与模拟结果比较, 利用信息化指导施工, 最后采用“切割+静爆”技术拆除钢筋混凝土内支撑, 确保这类基坑工程的变形控制和内支撑拆除。研究思路如图 1.1-1 所示。

1. 基坑变形控制的现状

基坑工程是集岩土工程和结构工程等专业于一体的系统工程, 是将挡土、支护、防水、降水、挖土、监测和信息化施工等作为一个系统。位于城市中心区的基坑, 周围遍布交通要道、已建建筑或管线等各种构筑物, 基坑的开挖不仅受到周边道路、建筑、管线等的限制, 施工过程还需要保护其周边道路、建筑、管线等的安全使用。城市中心区的基坑变形, 不仅涉及基坑自身的稳定和安全, 还影响其周边建筑和构筑物的运行和安全。因此, 必须严格控制城市中心区的基坑变形, 避免因基坑变形较大导致周边建筑和构筑物的连带变形超过其容许范围而造成安全隐患或使用不便。

目前, 基坑工程及其支护结构的施工技术还需要不断完善, 其支护体系的稳定和变形仍处于发展阶段。尤其是特大型超深基坑具有面积特大、深度超深的特点, 在基坑支护体系的稳定和变形方面, 比深基坑的要求更高。此外, 随着近年来我国城市地铁工程的迅速发展, 单线双向地铁即将遍布城市各处, 双线交叉的地铁交通枢纽也会出现在城市中心

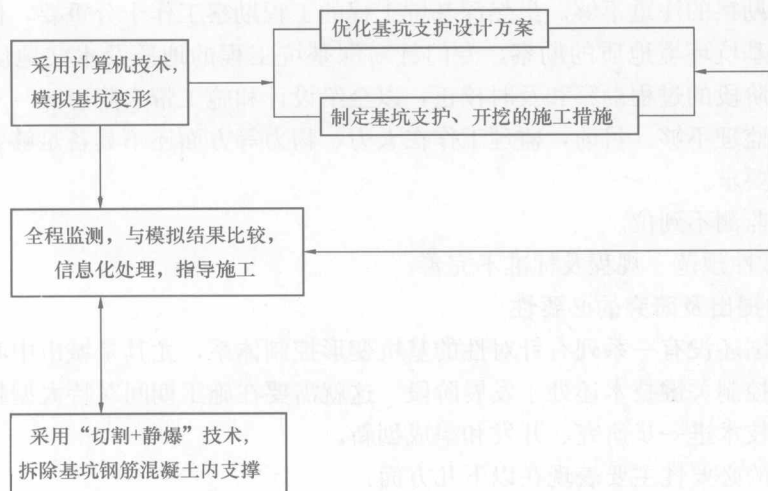


图 1.1-1 研究的思路

区。于是,伴随着城市地铁建设的发展以及特大型超深基坑的日益增多,城市中心区的特大型超深基坑会与地铁线相邻。由于营运地铁的特殊性,要求地铁两侧护壁的变形远小于一般建筑工程的基坑护壁变形。这就对紧邻营运地铁的特大型超深基坑变形,提出了极其严格的要求,尤其是基坑的双侧均紧邻营运地铁的情况。

当前,我国深基坑工程具有区域性强、个性强、综合性强、时空效应强、环境效应较强、工程量大、工期较紧、质量要求高、风险性较大等特点,其所面临的主要问题有:

(1) 深基坑技术需要快速发展并提高。深基坑工程具有大和深的特点,特别是特大型超深基坑工程体量大、挖深大、形式复杂的特点更为明显,其面临的防水措施、支护技术、施工工艺改进等问题,均有待进一步的研究与完善,以促进我国基坑工程的发展。

(2) 深基坑工程的设计质量偏低。基坑设计虽然由设计单位根据地勘资料完成,但由于地勘资料无法与工程原址的地质、水文等实际情况完全吻合,这就造成设计与实际不完全一致的情况存在,需要设计单位根据现场实际情况不断调整设计内容,才能进一步完善基坑的设计。但在基坑工程施工过程中,由于工程进度等各种原因,不能向设计单位提供完善的过程资料,因此,造成深基坑工程的设计质量偏低的现象。

(3) 深基坑工程缺乏足够的理论研究。目前,深基坑工程多是边开挖边实践边摸索,有时依靠经验进行判断施工,仍然处于半经验半理论的方法,缺乏成熟的技术和理论指导。

(4) 浪费较多。有的深基坑工程过于注重安全,为了避免事故发生,支护时不考虑墙的受力和变形,采用护壁全面支护,盲目增加安全系数,造成较大浪费。

(5) 施工混乱、管理不严。少数施工单位不具备相应的技术条件,人力、物力、技术、管理等要素不到位,甚至为了追求利润而降低安全度,造成现场施工混乱、管理不明。

(6) 质量检验不完善。深基坑工程的质量检验、验收方法还没有明确的规章制度详加说明,处于无章可循、逐步探索阶段,给深基坑工程的质量监督和质量管理工作带来困难。

(7) 工程勘察的注重不够。虽然深基坑工程的工程勘察工作十分重要,但许多勘察单位常常忽略对基坑环境地质的勘察,专门针对深基坑工程的地质及水文地质的勘察也不够,疏于施工阶段的过程勘察和及时校正,以至给设计和施工带来隐患。

(8) 过程监理不够。目前,监理工作在人力、物力等方面还不具备足够条件满足深基坑工程的施工要求。

(9) 随时监测不到位。

(10) 地域性规范、规程及标准不完善。

2. 课题的提出及研究的必要性

目前,我国还没有一系列有针对性的基坑变形控制体系,尤其是城市中心区特大型超深基坑的变形控制关键技术还处于发展阶段。这就需要在施工期间对特大型超深基坑工程变形控制关键技术进一步研究、开发和集成创新。

课题研究的必要性主要表现在以下几方面:

(1) 深基坑工程建设的需要

伴随着我国各城市中的高层建筑和超限超高层建筑不断涌现,特大型超深基坑工程也越来越多。深基坑工程的变形控制一直是工程界的难题,其支护及拆除技术是关注的重点。如果基坑超深,而又受到特定环境的限制,其变形要求就更严。

城市中心区特大型超深基坑的变形控制要严于一般的深基坑,也是深基坑工程发展的方向。研究这类基坑的变形控制技术,能帮助解决该工程深基坑施工过程的变形问题。

(2) 企业壮大的需要

施工企业在运行当中,会遇到一些施工难度大、甚至是以前没有处理过的技术难题。如果施工单位在面对这些困难时,不能迎难而上,仅停留在已有的技术水平上,那企业将裹足不前。因此,企业要壮大,就需要不断研究工程建设中遇到的难题,开发出具有企业自身特色的施工方法或关键技术,并成功应用在工程建设中。

(3) 城市发展的需要

我国各大城市的发展,带动深基坑工程迅速增多。如果不能很好解决城市中心区特大型超深基坑变形控制的难题,那在城市建设过程中修建特大型超深基坑工程,就会影响城市的整体规划,浪费土地资源,不利于可持续发展。

(4) 深基坑施工技术完善的需要

深基坑施工技术作为我国建筑业 10 项新技术之一,还处于继续发展、不断完善的过程。此外,地质条件的不确定及情况多变,加深了基坑变形控制的难度。深基坑变形控制技术是我国深基坑施工技术中最重要的一部分,城市中心区特大型超深基坑变形控制技术,是深基坑变形控制技术中的前沿技术,处于发展阶段,还存在较多问题需要逐步解决、形成体系。

1.1.2 创新与关键技术

文中讨论的城市中心区特大型超深基坑变形控制关键技术,是采用计算机技术模拟基坑开挖及拆撑期间的变形后,接着进行基坑支护设计的优化、施工和全程监测。在基坑工程的实施阶段,应针对基坑工程所处的周边环境及工程与水文地质条件,通过分析对比明

确在基坑工程全过程中,严格控制设计、施工与变形监测等环节。首先通过设计方案对比及优化确保支护方案的安全经济可行;其次,通过信息化施工技术保证变形控制措施的实施,检验变形控制的落实程度,尤其采用计算机模拟技术和内支撑拆除的“切割+静爆”技术,从基坑开挖和内支撑拆除等多工况上模拟基坑变形,动态地优化设计、施工、监测全过程,以及控制内支撑拆除对基坑变形的影响,指导该基坑工程的变形控制。

为了阐述明确,讨论时与工程实例(深圳星河发展中心工程)密切结合,以方便为其他类似工程提供参考。深圳星河发展中心基坑工程属于城市中心区特大型超深基坑,且两侧紧邻地铁线,工程具体特点见 1.1.3 条相关内容。

1. 城市中心区特大型超深基坑工程的计算机模拟技术

在工程实施前,利用计算机模拟技术,分析开挖及拆撑期间的基坑变形,使用信息化手段加强基坑工程实施与模拟分析的联系,指导变形控制的落实。利用计算机模拟技术,可以预测基坑支护结构(包括内支撑结构)和土体的应力应变趋势,对设计方案进行比较和优化;结合现场监测,细化工况,每一工况与实测结果对比,不仅能判定支护结构的安全性,还能根据模拟结果的趋势,预先估计基坑变形趋势,有效控制施工。

(1) 计算机模拟程序的选用

目前存在较多的基坑模拟程序,需要针对工程特点,选用合适的计算机程序,并进行合理的工况分析,才能发挥良好的模拟效果。

在研究特大型超深基坑开挖变形过程中,分析比较多个模拟方法,最终采用“三维快速拉格朗日差分分析方法”(Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D,简称 FLAC3D)。FLAC3D 是一个利用显式有限差分法为岩土工程提供精确有效分析的工具,可解决诸多有限元程序难以模拟的复杂工程问题,如分步开挖、大变形大应变、非线性及非稳定性(甚至大面积屈服、失稳或完全塌方),将支护结构与一定范围内的土体(长、宽、高)作为一个整体,并充分考虑基坑降水及其实际开挖施工的顺序,能够更好地模拟和反映支护结构的受力特征和变形、周围土体的位移、沉降及其相关关系。

与现行的数值方法相比,采用的数值模拟程序具有以下优点:

1) 求解过程中,采用迭代法求解,不需要存储较大的刚度矩阵,比有限元方法大大节省了内存。这一优点在三维分析中显得特别重要。

2) 在现行的 FLAC 程序中,采用了“混合离散化”(mixed discretization)技术,可以比有限元的数值积分更为精确和有效地模拟计算材料的塑性破坏(plastic collapse)和塑性流动(plastic flow)。

3) 采用显式差分求解,几乎可以在与求解线性应力—应变本构方程相同的时间内,求解任意的非线性应力—应变本构方程。因此,它与一般的差分分析方法相比大大节约了时间,提高了解决问题的速度。

4) 在 FLAC 中,所用的全是动力学方程(full dynamic equation),即使在求解静力学问题时也是如此。因此,它可以很好地分析和计算物理非稳定过程,这是一般的有限元方法所不能解决的。

(2) 模拟技术的计算原理

FLAC 是快速拉格朗日差分分析法,它是以命令驱动的程序,采用一种显式的时间步

长来求解代数方程。求解中使用了离散模型法、有限差分法和动态松弛法 3 种计算方法。

离散模型方法：连续介质被离散为若干互相连接的六面体单元，作用力均被集中在节点上；有限差分方法：变量关于空间和时间的一阶导数均用有限差分来近似；动态松弛方法：应用质点运动方程求解，通过阻尼使系统运动衰减至平衡状态。

1) 空间导数的有限差分近似

在 FLAC3D 中采用了混合离散方法，区域被划分为常应变六面体单元的集合体，而在计算过程中（图 1.1-3），程序内部又将每个六面体分为以六面体角点为角点的常应变四面体的集合体（图 1.1-2），变量均在四面体上进行计算，六面体单元的应力、应变取值为其内四面体的体积加权平均。

在四面体，节点编号为 1~4，第 n 面表示与节点 n 相对的面，设其内任一点的速率分量为 v_i ，则可由高斯公式得：

$$\int_V v_{ij} dV = \int_S v_i n_j dS \quad (1.1-1)$$

式中 V ——四面体的体积；

S ——四面体的外表面；

n_j ——外表面的单位法向向量分量。

对于常应变单元， v_i 为线性分布， n_j 在每个面上为常量，有：

$$v_{ij} = -\frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 v_i^l n_j^{(l)} S^{(l)} \quad (1.1-2)$$

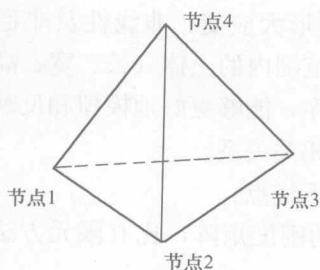


图 1.1-2 四面体

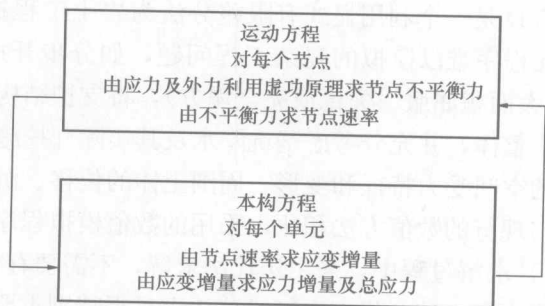


图 1.1-3 计算机模拟计算循环

2) 运动方程

FLAC3D 以节点为计算对象，将力和质量均集中在节点上，然后通过运动方程在时域内进行求解。节点运动方程可表示为如下形式：

$$\frac{\partial v_i^l}{\partial t} = \frac{F_i^l(t)}{m^l} \quad (1.1-3)$$

式中： $F_i^l(t)$ 为在 t 时刻 l 节点的在 i 方向的不平衡力分量，可由虚功原理导出； m^l 为 l 节点的集中质量，在分析静态问题时，采用虚拟质量以保证数值稳定，而在分析动态问题时则采用实际的集中质量。有：

$$v_i^l \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] = v_i^l \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \frac{F_i^l(t)}{m^l} \Delta t \quad (1.1-4)$$

对于应变、应力及节点不平衡力, FLAC3D 由速率来求某一时步的单元应变增量, 如下式:

$$\Delta e_i^j = \frac{1}{2} (v_i^j + v_j^i) \Delta t \quad (1.1-5)$$

式中速率可由式 (1.1-2) 近似得到。

有了应变增量, 即可由本构方程求出应力增量, 各时步的应力增量叠加即可得到总应力, 在大变形情况下, 还需根据本时步单元的转角对本时步前的总应力进行旋转修正。然后即可由虚功原理求出下一时步的节点不平衡力, 进入下一时步的计算, 其具体公式这里不再赘述。

3) 阻尼力

对于静态问题, FLAC3D 在式 (1.1-3) 的不平衡力中加入了非黏性阻尼, 以使系统的振动逐渐衰减直至达到平衡状态 (即不平衡力接近零)。此时式 (1.1-3) 变为:

$$\frac{\partial v_i^l}{\partial t} = \frac{F_i^l(t) + f_i^l(t)}{m^l} \quad (1.1-6)$$

阻尼力 $f_i^l(t)$ 为

$$f_i^l(t) = -\alpha |F_i^l(t)| \text{sign}(v_i^l) \quad (1.1-7)$$

式中 α —— 阻尼系数, 其默认值为 0.8。而

$$\text{sign}(y) = \begin{cases} +1 & y > 0 \\ -1 & y < 0 \\ 0 & y = 0 \end{cases} \quad (1.1-8)$$

式中, $\text{sign}()$ 为符号函数, 用于调整正负号时使用。

4) 计算循环

FLAC3D 的计算循环如图 1.1-3 所示。

(3) 计算机模拟的建模原则

为了建立模拟程序 FLAC3D 的计算模型, 必须进行以下工作:

- 1) 有限差分网格划分, 网格用于确定计算模型的几何形状;
- 2) 选择本构模型与材料性质参数, 本构模型和相关材料参数决定模型在荷载作用下的响应方式;

3) 确定模型的边界条件与初始条件, 边界条件和初始条件确定模型的原始状态, 即在求解问题受干扰 (开挖或加载) 前的状态或引入条件。

完成上述工作后进行计算, 可以获得模型的初始平衡状态 (即模拟开挖前的原始应力状态)。然后, 进行工程开挖或改变边界条件来进行工程的响应分析。在 FLAC3D 中, 求解所需要的计算步长、循环数量能够通过程序或用户加以控制, 主要取决计算的精度, 计算精度越高, 所需要的计算步长就越多。FLAC3D 程序的模拟过程如图 1.1-4 所示。

(4) 模拟工况的划分

特大型超深基坑的变形随施工进度而不断进行重分布, 考虑基坑周边环境的影响, 以位移、沉降或内力明显突变为模拟工序, 制定特大型超深基坑变形控制的模拟工况, 即

“基坑支撑一层并开挖一层（开挖第一层之前无支撑）为一工况，内支撑置换一层并拆除一层为一工况”，如图 1.1-5 和表 1.1-1 所示。

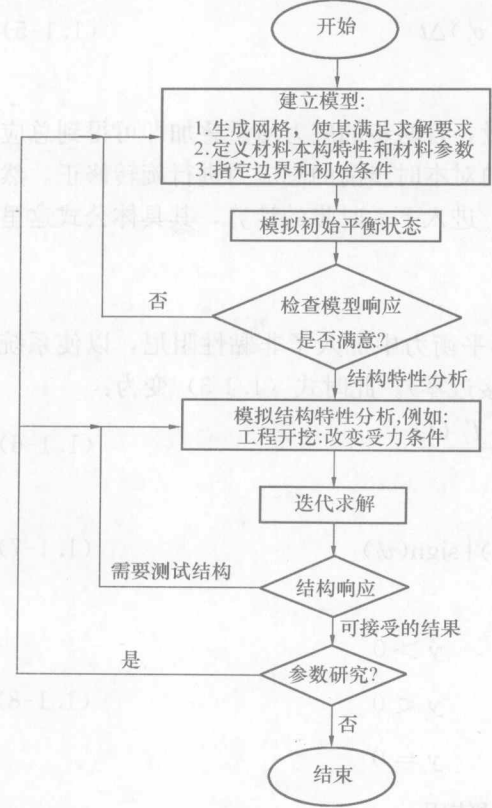


图 1.1-4 模拟的一般过程

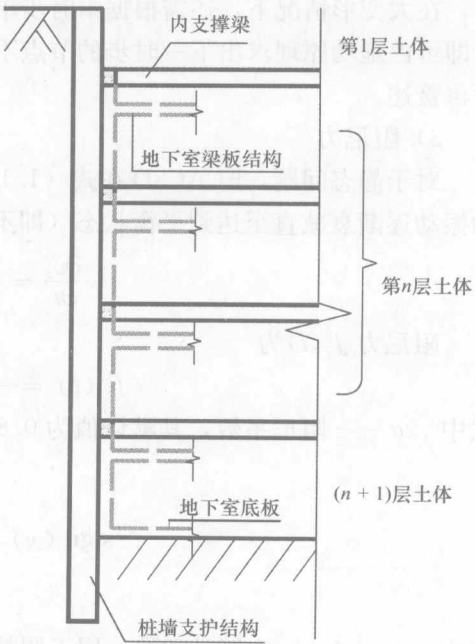


图 1.1-5 基坑支护体系的模拟模型

基坑支护体系使用期的模拟工况

表 1.1-1

施工阶段	顺序	工况	模拟内容
准备阶段	1	建立模型	建立模型，进行开挖前平衡运算，形成基坑开挖前的初始应力场
	2	位移归零	将第1步中重力引起的位移归零，只保留初始应力
基坑开挖	3	工况一	将基坑第一层的土体挖掉，形成开挖载荷，进行平衡计算，得到基坑开挖第一层后支护体系的应力场和位移场
	4	工况n	从上至下逐层设置第(n-1)层内支撑，将基坑第n层土体挖掉，形成开挖载荷，进行平衡计算，得到基坑开挖第n层后支护体系的应力场和位移场
说明：n为2~m（基坑开挖层数）			
钢筋混凝土内支撑拆除	5	工况m+1	地下室底板混凝土浇筑完成，其强度达到要求
	6	工况l	从下至上依次施工地下室负(n-1)层顶板，拆除第(n-1)层内支撑，得到第(n-1)层支撑拆除后支护体系的应力场和位移场
说明：l为(m+2)~2m，地下室层数=内支撑层数=基坑开挖层数m-1			

2. 城市中心区特大型超深基坑工程的支护设计

(1) 设计原则

1) 特大型超深基坑工程的支护设计,以“多种支护结构形式相结合,在安全、经济的前提下,实现基坑的小变形”为指导思想;

2) 结合基坑工程周边环境,力保双侧紧邻运营地铁的安全,并确保紧邻地铁口的基坑水平及竖向变形不超过 10mm,其他部位的变形在相关规定范围内;

3) 支护结构的选型必须在以小变形控制为基础,充分协调安全、经济、环保等方面,以及严防地下水的危害。

(2) 基坑安全等级及位移要求

城市中心区特大型超深基坑周边常有市政道路、高层建筑、地下管网等设施,复杂的周边环境要求基坑变形必须控制在非常小的范围内。

这类基坑工程安全等级为一级,基坑支护变形控制指标为:地铁出入口以外各处位移、沉降为 2cm,紧邻地铁口的基坑变形警戒值为:水平位移 1cm、竖向沉降 1cm。尤其当地铁出入口变形值连续 3d 达到 0.2mm/d 或总沉降量达到 5mm 时,必须进行注浆加固。

(3) 基坑支护设计方案的选择

深基坑工程中常用的支护结构可概括为桩锚(或墙锚)体系和桩(墙)+内支撑两大类,其特点见表 1.1-2。

深基坑工程支护方案的比较

表 1.1-2

支护类型	支 护 特 征	主要特点比较
(咬合) 桩锚 (或墙锚) 体系	基坑周边通过桩(或连续墙)挡土,桩内(或墙内)再通过锚索或锚杆将桩(或墙)与坑外土体拉结起来,抵抗土压力,达到变形控制的目的,可兼作止水设施	施工速度较快,支护结构对周边环境有一定影响,支护结构能作为永久结构或挡水结构使用
(咬合) 桩 (墙)+内支撑	基坑周边通过桩(或连续墙)挡土,并在基坑内施工内支撑结构,用于支撑基坑对边的支护桩(或墙),达到抵抗土压力,控制变形的目的,可兼作止水设施	工期较长,支护结构对周边环境的影响小,内支撑需要拆除,支护结构可作为挡水设施

深圳星河中心基坑工程属于特大型超深基坑,周边环境复杂,其支护体系因工程、水文地质条件及周边环境的影响,必须结合止水措施综合考虑。由于基坑开挖深度范围内仅有上层滞水及潜水,且水位在地面下 5~6m 左右,储水不甚丰富,设计采用基坑内外明排的方式进行。

基坑四周的支护设计:基坑东侧紧邻金中环商务大厦,为了避免破坏相邻建筑物的锚(杆)索结构,则基坑东侧不能采用锚索体系,为配合西侧地铁口的微小变形要求,设计采用双排咬合桩+内支撑结构;基坑西侧距运行中的地铁 4 号线仅 5m,且地铁 4 号出入口已在建筑红线范围之内,地铁口建筑基础位于基坑坑底以上,致使基坑西侧不能采用桩锚或墙锚支护体系,否则支护变形满足不了地铁变形控制要求,设计采用单排人工挖孔咬合桩及两排旋喷桩+内支撑结构;基坑南侧和基坑北侧为道路和建筑物,北侧虽紧邻地铁 1 号线及 5 号地铁出入口,但与基坑尚有一定距离,尤其在深度方向可以采用锚索,故本