

高 谦 乔 兰 吴顺川 杨素珍 / 编 著

土木工程专业研究生系列教材

地下工程

系统分析与设计

DIXIAGONGCHENG
XITONGFENXIYUSHEJI

中国建材工业出版社

土木工程专业研究生系列教材

地下工程系统分析与设计

高 谦 乔 兰 吴顺川 杨素珍 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地下工程系统分析与设计/高谦等编著. —北京: 中国建材工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-80159-800-8

I. 地... II. 高... III. ①地下工程-系统分析 ②地下工程—建筑设计 IV. TU9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 137911 号

内 容 提 要

本书用系统的观点详细地论述了地下工程的设计理论与工程实践。本书分为五篇共 14 章。第一篇: 总论。简要地概述地下工程范畴、特点以及系统分析方法; 第二篇: 地下工程勘察与评价。论述地下工程所赋存的地质工程环境的勘察和岩体质量评价的方法、技术与经验; 第三篇: 稳定性分析与设计。论述地下工程的理论分析与数值计算方法, 地下工程设计原理, 并简要地介绍了国内外常见的数值分析软件; 第四篇: 地下工程施工与监测。概述了目前地下工程主要施工方法及监测技术; 第五篇: 地下工程研究与展望。简要介绍目前处于研究之中的地下工程可靠度分析方法与设计概念。

本书篇章之间既具有独立性, 又体现子系统之间的相互联系, 强调子系统对地下工程系统的作用与动态反馈过程, 使地下工程系统分析理念和思想贯穿于全书的篇章之中。使读者不仅学习和掌握地下工程的分析理论、设计方法与施工技术, 而且理解地下工程这一复杂工程系统的本质、特点以及系统分析理念在工程中应用的必然性和必要性。

本书是为土木工程专业的研究生编写, 可作为岩土工程、工程力学、采矿工程等专业的研究生教材, 也可作为高年级本科生以及从事铁路、水利、矿山和国防等工程的科研、设计、施工人员的参考书。

地下工程系统分析与设计

高 谦 乔 兰 吴顺川 杨素珍 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 17

字 数: 420 千字

版 次: 2005 年 2 月第一版

印 次: 2005 年 2 月第一次

定 价: 26.00 元

网上书店: www.ecool100.com

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386904

前 言

21 世纪是地下空间大发展的世纪。随着我国国民经济的发展和地下空间的开发和利用,必将需要更多具有创新思维和基础扎实的综合性工程技术人才。对于承担高素质人才培养的高等院校,不仅需要传授地下工程设计、分析理论与方法的基本知识,还应能够使学生理解地下工程设计的先进理念和科学思维方法。为了满足这一要求,作者编著了《地下工程系统分析与设计》这本教材,供大家参考。

本书作者在多年从事地下工程专业课程的教学和研究中体会到,地下工程远比地面工程复杂得多。工程设计与分析中所固有的信息不确定性、模糊性和知识的不完备性,使设计和分析人员面临更加艰难的抉择,也使设计方案与支护参数存在很多变数。随着我国大规模地下工程的建设、大跨度地下空间的开发,地下工程的分析与设计面临更大的挑战。面对新的挑战,需要学习和掌握现代设计理论与计算方法,需要不断总结教训和积累经验,需要研究和开发新的现场测试仪器和测试技术,但更重要的还应传授正确的工程概念、科学的思维方法和系统的分析理念。

在长期的学习和工作中,作者受益于很多老前辈的教诲,从众多富有创新观点和科学理念的专著中获得启发,在地下工程设计与分析中自觉或不自觉地运用系统分析的思想和方法,尤其对大型和复杂的地下工程,更是如此。在教学中,作者也试图将系统分析概念传授给学生,为此曾编写了教学讲义,并在教学过程中进行了两次修改,以适应不断更新的理论与计算技术,并充分体现现代支护设计思想。本书是在对讲义的几次修改基础上编撰而成的,主要体现以下指导思想:

(1) 综合论述目前国内外地下工程设计与分析的最新理论与技术,并介绍国内外的最新动态和设计理念;

(2) 本书作为研究生教材,在论述地下工程的设计理念与计算方法的基础上,更加注重地下工程概念的确立,使读者不仅能够进行地下工程的分析与计算,更重要的是确立地下工程设计的概念;

(3) 充分体现系统分析的观点和方法,在论述理论分析和数值计算时考虑工程的实用性,在介绍施工方法和现场测试时注重针对性,在总结工程经验时体现知识的系统性,并把系统分析的思想、工程的概念融入整个内容之中;

(4) 全书以地质工程、稳定性分析与设计、施工与监控三个系统作为主线,详细介绍地下工程设计、分析与施工中的综合分析的概念和动态反馈的原理。

本书虽经多次修改,但由于时间紧和水平所限,错误在所难免,尤其书中很多章节提出了自己的观点,如有错误或不妥之处,期望同行专家及阅读本书的读者提出批评意见和建议,以便在再版中得到改正和完善,作者表示衷心的感谢。

作者

土木工程专业研究生系列教材 编委会名单

主 编:王思敬 中国工程院院士、清华大学教授

副主编:高 谦 北京科技大学教授

编 委:(北京科技大学,按姓氏笔划排序)

王金安 王德胜 纪洪广 乔 兰 李长洪 李建平
吴顺川 宋卫东 宋 波 牟在根 明世祥 高永涛
龚 敏 璩世杰

河 海 大 学 张发明

湖 南 大 学 苏永华

北 方 工 业 大 学 孙世国

河 南 工 业 大 学 韩 阳

华北水利水电学院 万林海

山东建筑工程学院 薛守义

目 录

第一篇 总 论

1 绪论	1
1.1 地下工程的范畴	1
1.2 地下工程开发前景	1
1.3 地下工程的特点	3
1.4 地下工程概念进展	4
1.5 地下工程设计理论与发展	6
1.6 地下工程设计研究课题	10
1.7 本书的指导思想与特点	12
2 地下工程系统分析与设计概念	14
2.1 概述	14
2.2 地下工程系统分析概念与原理	14
2.3 地下工程系统设计方法	17

第二篇 地质工程勘察与评价系统

3 原岩应力分布规律与预测	23
3.1 原岩应力场的构成	23
3.2 地壳浅部原岩应力的变化规律	25
3.3 确定原岩应力的方法	27
3.4 工程设计选用原岩应力值的综合分析与决策	31
4 地下工程岩体分类与参数预测	34
4.1 岩体分类在工程中的作用	34
4.2 工程岩体分类方法与特点	35
4.3 地下工程围岩分类	43
4.4 岩体质量评价与力学参数预测	52

第三篇 稳定性分析与设计系统

5 地下工程计算模式与设计准则·····	62
5.1 地下工程计算模式·····	62
5.2 地下工程设计判断准则·····	65
6 锚喷支护经验类比与设计原则·····	67
6.1 开挖无支护围岩的稳定性判断·····	67
6.2 锚固设计应遵循的原则·····	70
7 地下工程结构设计理论与方法·····	80
7.1 作用在衬砌上的荷载·····	80
7.2 围岩压力分类·····	82
7.3 围岩松动压力的计算·····	84
7.4 围岩弹性抗力·····	88
7.5 隧道衬砌结构设计法·····	89
7.6 锚喷支护结构设计法·····	93
8 块体失稳与局部支护理论与设计·····	111
8.1 岩体结构面和极点的赤平投影·····	111
8.2 岩体结构面实体比例投影·····	115
8.3 块体理论简介·····	121
8.4 坚硬节理岩体中的隧道支护设计·····	129
9 弹性完整岩体中的隧洞设计·····	133
9.1 圆形洞室围岩应力与变形线弹性分析·····	133
9.2 非圆形洞室围岩弹性应力·····	136
9.3 洞室围岩弹性分析破坏识别与支护设计·····	139
9.4 无衬砌洞室的最佳形状·····	141
10 围岩弹塑性分析与锚喷支护设计·····	144
10.1 概述·····	144
10.2 围岩弹塑性分析·····	145
10.3 轴对称条件下锚喷支护计算·····	153
10.4 轴对称条件下锚喷支护计算的图解方法·····	160
10.5 特软地层中锚喷支护的解析计算·····	162
10.6 非轴对称情况下锚喷支护的解析计算与设计·····	165

11 地下工程数值方法与分析软件	169
11.1 工程数值分析方法分类与比较	169
11.2 有限差分法(FDM)及程序简介	171
11.3 有限元法(FEM)及程序简介	176
11.4 边界单元法(BEM)程序简介	187
11.5 离散单元法(DEM)程序简介	188

第四篇 地下工程施工与监控系统

12 地下工程施工方法	190
12.1 概述	190
12.2 新奥地利隧道施工法	192
12.3 传统的矿山法	198
12.4 其他施工方法	201
12.5 辅助施工措施	203
12.6 掘进机隧道施工	208
12.7 盾构法	210
13 地下工程现场监控设计	218
13.1 概述	218
13.2 监控设计的目的、内容和手段	218
13.3 位移量测原理与方法	221
13.4 现场量测设计	229
13.5 量测数据的整理与分析	232
13.6 施工监控及量测数据的分析与应用	234

第五篇 地下工程研究与展望

14 地下工程可靠度分析与设计	239
14.1 概述	239
14.2 地下结构可靠度基本理论	240
14.3 单一破坏模式的可靠度计算方法	245
14.4 系统的可靠度模型与计算方法	251
14.5 地下工程锚喷支护结构可靠度设计	256
附录 赤平投影网	260
参考文献	262

第一篇 总 论

1 绪 论

21 世纪是一个充满希望与活力、再创人类奇迹的世纪。对于从事地下工程领域学习和研究的人员来说,既是一种机遇,也面临巨大挑战。我们应以崭新的姿态,饱满的热情和高度的责任感投入到新世纪地下空间的开发和利用的行动中,并以创新的思维和敏锐的洞察力,学习和研究适应于本世纪地下工程的设计理论、分析方法和施工技术,从而满足国内外地下工程建设快速发展的迫切需求。

根据我国近几十年隧道与地下工程理论、施工技术的发展情况来看,应该说,业已取得了令人瞩目的成就。但也应看到,当前我国隧道与地下工程设计水平、施工组织管理水平和世界发达国家相比还有很大的差距。

针对目前国内外迅速发展的地下工程技术,作为未来地下工程设计、分析、研究和管理的高级技术人员,不仅应学习和掌握现有的理论知识和工程经验,而且更应当了解国内外最新研究成果、发展动态,追赶世界发展水平。因此,本书为地下工程领域的读者,提供既能快速掌握现有的工程设计理论与生产经验,又能了解目前地下工程发展的最新研究动向,洞察未来的发展趋势。它将有助于激发读者学习岩土工程的兴趣和投入地下工程建设的热情,更为读者开展技术创新、勇于攀登技术高峰奠定基础,为新世纪地下空间的开发和利用,造就一批思维敏锐、基础扎实和善于创新的工程技术人才。

1.1 地下工程的范畴

地下工程是土木工程的一个重要分支。按其工程的几何形状,可划分为隧道工程和硐室工程。隧道工程是指结构长度尺寸远大于断面尺寸(最大跨度或高度)的结构,通常包括铁路隧道、公路隧道、煤炭运输巷道、矿山采场进路、水工引水涵洞、人防地下通道等。硐室工程一般是指长跨比较接近(一般小于 10)的地下结构,如地铁车站、地下商场、水电站地下厂房、地下储气库、地下储水库、地下储热库、地下核废料储藏库、地下影剧院、地下展览馆、地下试验室、地下餐旅馆、地下停车场以及矿山检修洞室、变电站和破碎洞室等。显然,从计算力学模型考虑,隧道工程可近似处理为平面应变问题,而硐室工程一般属于三维计算力学模型的范畴。

1.2 地下工程开发前景

由于世界范围内能源及其他原材料的短缺,尤其是基于环境保护的需要,近年来,世界许多国家日益重视地下空间的开发和利用。国际上提出一种普遍接受的观点:认为 19 世纪是“桥”的世纪,20 世纪是“高层建筑”的世纪,那么,21 世纪将是人类开发和利用“地下空间”的世纪^[1]。

21 世纪人类面临人口、粮食、资源和环境的四大挑战。可持续发展作为国策的提出,摆在

每个学科和产业面前,谁违背了可持续发展的国策,谁就会被淘汰。土木工程也应顺应潮流而检讨自己,大量的土建工程拔地而起,人们要进入城市,大量的交通设施、房屋要建造,我们每天都可以看到大片良田被钢筋混凝土所取代,并且无法再生。居住、交通、环境的矛盾日益突出,能否把地面沃土多留点给农业和环境,把地下岩土多开发点给道路交通、工厂和仓库,从而使地下空间成为人类在地球上作为安全舒适生活的第二空间,这是地下空间开发和利用的关键。

国际上已把 21 世纪作为人类开发利用地下空间的世纪,世界各国也都作为国策去努力。日本提出要利用地下空间,把国土扩大数倍。我国已开始大规模的隧道与地下工程的开发与建设。正在开发和即将开发的主要地下工程有:

1. 铁路、公路长大隧道的建设

我国正在建设中的穿越秦岭山脉,打通包头—西安—安康—重庆—北海的西部大通道。由于该通道将穿山越岭,必然面临众多长大隧道工程,其中秦岭终南山特长公路隧道最长达 18.41km。

2. 已经建成通车的西安—安康线、正在建设的西安至南京复线铁路、神朔(神木—朔州)线、宝兰(宝鸡—兰州)复线、渝怀(重庆—怀化)线铁路的相继开工,都已出现或必将大量出现的隧道群和长隧道。

3. 西部大开发,计划在近 5~10 年内完成连接西部地区的丹东到拉萨、青岛到银川等 8 条国道主干线的建设,打通滇藏、川藏、成都到樟木等 8 条省际间主要公路通道。这些都会涌现出一些长隧道和隧道群。

4. 地下海底隧道^[2]

分别于 1987 年和 1996 年通车的日本青函(青森—函馆)隧道(53.85km)和英吉利海峡隧道(50.5km)、丹麦大海峡隧道(8.0km)和香港的西区隧道(2.0km),已经引起世界各国的关注。目前,许多国家正在进行海峡隧道的研究和筹建,如白令海峡(俄罗斯—美国)隧道、直布罗陀海峡隧道(西班牙—摩洛哥)、连接意大利本土和西西里岛的墨西拿海峡隧道等。

21 世纪,我国学者也在为修建横穿台湾海峡连接大陆与台湾的海底隧道和横穿琼州海峡连接大陆与海南岛的海底隧道做积极筹划和可行性研究。1998 年 11 月 25~27 日海峡两岸有关单位联合在厦门召开了“台湾海峡隧道学术论证研讨会”,探索和研究台湾海峡隧道工程的有关技术问题。

此外,国内有关单位正在组织研究横穿渤海海峡,连接辽东半岛与山东半岛的海峡通道—南桥和北隧通道;连接上海—崇明岛—南通的长江口越江通道—桥隧结合通道,以及横跨胶州湾连接青岛市区与黄岛开发区的青黄通道等工程。

5. 开发利用城市地下空间是实施城市可持续发展的重要途径

纵观当今世界,发达国家的城市已把对城市地下空间的开发和利用作为解决城市人口、环境和资源三大危机的重要措施和医治“城市综合症”实施城市可持续发展的重要途径。向地下要土地、要空间已成为城市发展的历史必然,较之宇宙城市、海洋城市更为现实。

发达国家解决城市交通难的主要措施是发展高效率的地下有轨公共交通,形成四通八达的地铁交通网。我国各主要大中城市都在积极筹划和发展地铁交通。因此,地铁的建设将是我国 21 世纪城市地下空间开发的重点,除已开通的北京、上海、天津的地铁外,正在兴建的有北京三号线、上海二号线、广州一号线。此外,国家已经批准和正在筹建地铁的城市有深圳、南京、重庆、青岛等 20 多个城市,预计 21 世纪初至中叶将是我国大规模建设地铁的年代。

6. 南水北调工程的上马,将会出现很多输水隧道

调水工程在我国已有若干工程实例,如引滦入津、引大入秦、引黄入晋等工程。调水工程翻山越岭,必须打通隧道。如引滦入津修建的若干座穿山输水隧道;引大入秦修建的盘道岭隧道长 10 多公里;引黄入晋工程也修建了 21km 长的隧道。

7. 深部高应力下资源的开采与地下工程

我国已探明的煤炭资源总量占世界总量的 11.1%,在今后相当长的历史时期内,仍需保证煤炭的高产稳产。我国煤炭资源埋深在 1000m 以下的为 2.95 万亿吨,占煤炭资源总量的 53%。目前,煤矿开采深度以每年 8~12m 的速度增加,东部矿井正以每年 10~25m 的速度发展,预计未来的 20 年内,很多煤矿将进入到 1000~1500m 的深度。此外,我国部分有色金属矿山也已进入采深超过 1000m 的深部开采阶段。

深部矿床资源的开采,必然给地下工程的建设带来一系列问题,如地下工程的稳定性、冲击地压、岩爆以及高温、高压和高孔隙压力等。

1.3 地下工程的特点

地下工程是在岩石或土体中开挖构筑的结构,与地面工程相比,地下工程在很多方面具有完全不同的特点,主要表现在以下几个方面:

1. 工程受力特点不同

(1) 地面工程是先有结构,后有荷载

地面工程结构是经过工程施工,形成结构后,承受自重、风、雪以及其他静力或动力荷载。因此,这类工程是先有结构,后承担荷载。

(2) 地下工程是先有荷载,后有结构

地下工程是在处于自然状态下的岩土地质体内开挖的,因此,在工程开挖之前就存在着应力环境(地应力)。所以,地下工程是先有荷载,后形成结构。

2. 工程材料特性的不确定性

地面工程材料多为人工材料:如钢筋混凝土、钢材、黏土砖等;这些材料虽然在力学与变形性质等方面也存在变异性,但是,与岩土体材料相比,不仅变异性要小得多,而且,人们可以加以控制和改变。地下工程材料所涉及的材料,除了支护材料性质可控制外,其工程围岩均属于难以预测和控制的地质体。

由于地质体是经历了漫长的地质构造运动的产物,因此,地质体不仅包含大量的断层、节理、夹层等不连续介质,而且还存在着较大程度的不确定性,其不确定性主要体现在空间分布和随时间的变化。

(1) 空间上的不确定性

对于地下工程围岩,不同位置围岩的地质条件(岩性、断层、节理、地下水条件、地应力等)都存在着差异。这就是地下工程地质条件和力学特性的空间不确定性。因此,人们通过有限的地质勘查、取样试验,很难全面掌握整个工程岩体的地质条件和力学特性,仅仅是对整个工程岩体的特性进行抽样分析、研究。

(2) 时间上的不确定性

即使对于同一地点,在不同的历史时期,其地应力、力学特性等也发生变化。这就是时间上的不确定性。尤其开挖后的工程岩体特性除随时间的变化外,更重要的还与开挖方式、支护形式和施工时间与工艺密切相关。这常常是一个十分复杂的变化过程。

3. 工程荷载的不确定性

对于地面结构,所受到的荷载比较明显。尽管某些荷载也存在随机性(如风载、雪载、地震荷载等),但是,其荷载量值和变异性与地下工程相比相对较小。

对于地下工程,工程围岩的地质体不仅会对支护结构产生荷载,同时它又是一种承载体。因此,不仅作用到支护结构上的荷载难以估计,而且,此荷载又是随着支护类型、支护时间与施工工艺的变化而变化。所以,对于地下工程的计算与设计,一般难以准确地确定作用到结构上的荷载类型、量值。

4. 破坏模式的不确定性

工程的数值分析与计算的主要目的在于为工程设计提供评价结构破坏或失稳的安全指标(如安全系数、可靠性指标等)。这种指标的计算是建立在结构的破坏模式基础之上的。

对于地面工程,其破坏模式一般较容易确定,在结构力学和土力学中已经了解诸如强度破坏、变形破坏、旋转失稳等破坏模式。

对于地下工程,其破坏模式一般难以确定,它不仅取决于岩土体结构、地应力环境、地下水条件,而且还与支护结构类型、支护时间与施工工艺密切相关。

5. 地下工程信息的不完备性

地质力学与变形特性的描述或定量评价取决于所获取信息的数量与质量。然而,对于地下工程只是获得局部的有限工作面或露头获取。因此,所获取的信息是有限的、不充分的,且可能存在错误资料或信息。这就是地下工程信息的不完备性。

6. 地下工程信息的模糊性

地下工程围岩的力学与变形特征的描述对地下工程设计与分析是重要的。但影响岩体工程特性的材料与参数多数是定性的,但节理特征、充填物性质以及岩性的描述等,又都具有模糊性。

1.4 地下工程概念进展

随着人们对岩土体性态的认识,以及工程地质学、水文学、岩土力学、支护型式、支护作用原理、工程设计理论与设计方法等新成就的逐步形成与发展,作为岩土工程的一个重要工程分支,地下工程同样经历了三个不同的工程概念认识、设计理念与指导思想的发展^[3]。

1.4.1 结构工程概念

结构工程概念来源于建筑工程,其基本特征是荷载—结构模式。也就是说,把地下工程围岩内潜在的不稳定岩体视为作用在结构上的荷载,把支护视为承受荷载的结构,然后利用结构力学理论与方法,计算结构的内力 and 位移,由此判断地下结构的稳定。

正是基于结构工程的概念与设计理念,地下工程的设计与分析主要集中在荷载的确定和提高结构本身的承载能力上。如假设不同的塌落形状和范围,计算作用在结构上的荷载,提出了诸如塌落拱理论、普氏理论、岩柱理论、太沙基等计算理论;从提高结构的承载能力考虑,主张采用诸如混凝土、钢筋混凝土或砌石等刚性结构。即使在喷射混凝土、锚杆支护技术的广泛应用过程中,人们仍沿用结构—荷载结构工程之理念,提出诸如悬吊理论、组合梁或组合拱理论,用来解释锚杆支护的力学作用和用于地下工程的支护设计。

新奥法(NATM)自20世纪50年代问世以来,在地下工程界引起了强烈反响。主要发明人拉伯塞维兹教授将新奥法定为隧道建筑的概念而不是构筑方法。应当承认,新奥法在地下

工程构筑史中是有功绩的,它不仅对锚喷支护作用的解释在概念上有较大进步,而且强调正确的施工步骤、现场观测信息的反馈作用等观点,在一定程度上部分地体现了系统分析中的动态与反馈思想的分析理念。但我们应当看到,新奥法不仅在概念上,而且在理论上,都没有真正建立在现代岩体力学的基础上,没有彻底摆脱传统的结构工程的概念,即荷载—结构模式,只是使之变为“荷载—部分围岩+支护”模式。这种模式主要体现在新奥法的承载环概念上。新奥法用特征曲线说明了支护对围岩应力的影响,说明了要适当选择支护时机,才能节省支护抗力。但是,它没有进一步说明,应力调整如何使围岩趋于稳定,却引入了“承载环”概念,把围岩的稳定归结为承载环承载的结果。由此可见,悬吊理论、组合拱理论、新奥法的承载环概念等,都没有摆脱荷载—结构模式,应该属于结构工程概念范畴。

1.4.2 岩土工程概念

岩体工程概念是以现代岩石力学理论、数值计算方法以及支护作用理论等为基本依据。它的基本特征是,充分发挥围岩的自稳能力,防围岩破坏于未然。支护和适时、合理的施工步骤,主要作用是控制岩体变形与位移,以改善岩体应力状态,提高岩体自身强度,使岩体与支护共同达到新的平衡与稳定,以获得最佳的效果。

岩土工程概念是在推广新奥法,尤其是在锚喷支护技术的广泛应用过程中逐步形成和发展的。围绕推广应用中出现两个主要问题:锚喷支护作用原理与适应性以及如何进行工程测试设计,展开了岩土工程数值分析、模型试验以及在软弱破碎不良岩层构筑大跨度地下结构的工程实践与现场试验研究。

岩土工程概念的提出与深化,是随着数值分析方法(有限单元法、离散单元法等)的发展而发展的,它不仅为定量研究围岩变形破坏机理,损伤演化过程,支护作用机理以及支护参数的优化提供了强有力的工具,而且还大大地促进了复杂条件下的大跨度地下工程建设。因此,可以说,岩土工程概念不仅突破了“荷载—结构模式”,而且从理论上定量解释了围岩应力传递、结构与围岩相互作用和动态过程,从而为地下工程失稳预测和可靠度分析奠定了理论基础。尤其,位移反分析法的提出和应用,将现场位移观测与数值分析方法的巧妙结合,在设计理念上体现了信息反馈的系统分析思想;同时,在设计方法上,首次实践了真正意义上的信息反馈与工程应用。

1.4.3 地质工程概念

地质工程术语是 R·E·古德曼在 1974 年首先使用的。孙广忠教授在 1984 年提出了地质工程命题,并给出了一个定义:地质工程是以地质介质作为建筑材料,以地质体作为工程结构,以地质环境作为建筑环境构筑起来的一种特殊工程。广义地说,地质工程又可称为大地改造工程。由此可见,地质工程概念不仅体现岩体材料性质、岩体结构效应对地下工程稳定性的作用,而且更强调它们受地质环境的影响,由此体现地下工程系统的观点与理念。

地质工程的发展可划分三个阶段:地质材料性质测试与发展;岩体结构概念的提出与岩体结构效应的研究及以地质改造与控制;地质灾害及地质灾害防治、施工地质超前预报为特征的地质工程研究阶段。

第一阶段,是对不同于建筑材料的地质体进行力学与变形特性的研究;第二阶段,认识到地质不连续面的结构效应,并强调“岩体结构效应”受地质环境的影响,在此体现了整体性与相关性的系统分析理念;第三阶段,提出了以超前地质预报和超前地质改造为核心的地质控制设

计和施工方法,全面体现系统分析的整体性、相关性、动态性和有序性原理。应该说,地质工程概念的提出与发展是以体现地下工程系统设计分析的设计理念为基础,它不同于结构工程概念和岩土工程概念,使得人们对地下工程设计理论上升到了一个新的高度。

1.5 地下工程设计理论与发展

1.5.1 概述

地下工程设计包括两个方面:其一,几何尺寸与断面形状设计;其二,开挖与支护设计。前者设计主要是根据地下工程类型和使用要求来确定的,后者则是以地下工程稳定性为目标所采用的施工工艺、支护类型与参数。

地下工程的设计理论和方法经历了一个发展过程。最早(19世纪初期)的地下工程多以砖石材料作为衬砌,采用木支撑和断面分部开挖的施工方法。可以推断,当时隧道衬砌的设计是仿照拱桥进行的,其特点是只考虑衬砌承受围岩的主动荷载而未考虑围岩对衬砌变形的约束和由此产生的抗力,因此,衬砌厚度偏大。其后,不同学者和工程师们在设计隧道衬砌时采用不同的假设来计算围岩对衬砌变形所产生的抗力,其中,温克尔(Winkler)局部变形理论得到了广泛的应用。与此同时,将衬砌和围岩视作连续介质模型进行分析的方法也得到了发展。20世纪50年代以来,喷射混凝土和锚杆被广泛用做初期支护,人们逐渐认识到,这种支护能在保证围岩稳定的同时,允许其有一定程度的变形,使围岩内部应力得到调整从而发挥其自承作用。因此,可以将内层衬砌的厚度减小很多。

20世纪60年代中期,随着计算机内存、计算速度的快速发展与提高,以及岩土本构模型的进展,地下工程分析与设计进入了以有限元法为代表的数值分析时代。近年来数值分析有了新的进展,无限元、边界元、离散元、DDA、流形元以及描述地质结构面的节理单元的发展和运用,大大促进了数值分析方法在地下工程中的应用。尤其是建立在数值分析方法基础上的位移反分析方法的提出,又将数值分析方法的应用提高到了更高层次。

1.5.2 地下工程设计程序

对于一项地下开挖工程的设计,究竟应从何处着手?要通过哪些步骤才能完成设计?图1.1说明了设计过程中最主要的步骤^[4]。

不论是哪一项地下开挖工程,设计的基本目标均须充分利用岩土体本身作为支护的主要结构材料。因此,要求在施工过程中尽量避免破坏围岩,并尽可能减少混凝土或金属支护的用量。当围岩处于未扰动状态、并承受压应力时,大多数坚硬岩石的强度远比混凝土高,且许多岩石与钢的强度属于同一数量级。因此,用并不比岩石更为合适的材料去替换岩石的做法是不可取的。

不同的地下工程,对工程位置选择的限制存在较大区别,如铁路、公路隧道位置的选择和优化,直接影响工程投资、运营成本和经济效益等;而矿山地下工程是针对特定矿床开采所开挖的地下工程,所以,其位置的选择余地较小。由于不同工程类型对其稳定性的要求也不同。因此,在支护选型和支护强度上也应有不同的考虑。

设计目标究竟能实现到何种程度,完全取决于现场的地质条件 and 设计人员对这些条件了解的程度、地质条件的正确评价以及用于工程设计的能力。因此,正确评价地质特性是进行合理设计的一个先决条件。一旦根据地质评价,确认了将可能出现的稳定性问题后,即可按图

1.1 所示的设计程序中的各项具体的步骤进行工作。设计应采取的步骤,应根据预计工程的危险程度、开挖工程类别、以及实际条件和经济条件等因素实施。

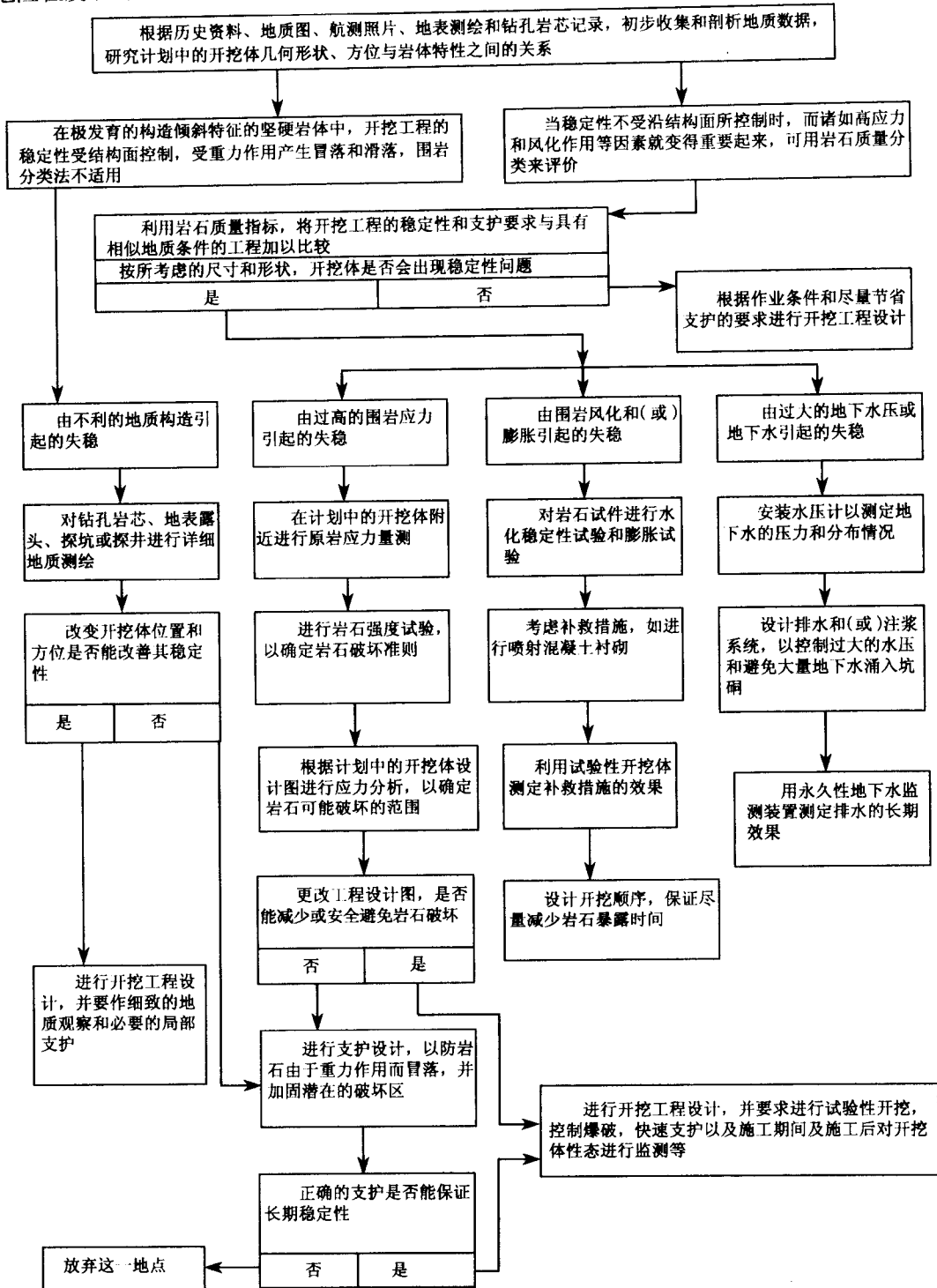


图 1.1 地下工程开挖设计程序

在图 1.1 所示的设计程序中,考虑了地下工程失稳的四种主要原因:

1. 由不利的地质构造而产生的失稳。这往往出现在含有断层和节理的坚硬岩体中,而且该处的几组结构面倾角都比较陡。改变开挖体的位置或方向有时能提高其稳定性,但一般仍需采用相当数量的支护。只要在设计支护系统时考虑到这类地质构造特征,那么,采用金属锚杆和锚索来支护这类岩体就特别有效。

2. 由过高的围岩应力所引起的岩体屈服失稳。这类情况常出现于坚硬岩石中,当进行深部开采或在浅部修建超大型的开挖工程时都会出现这种情况。在陡峭山区或在异常软弱的岩层中开挖隧道均可能遇到异常的应力条件,也会因应力引起屈服失稳问题。改变开挖体的形状和调整它与其他开挖体的相对位置有助于解决这类问题,但还可能需适当的支护。

3. 由围岩风化和(或)遇到膨胀引起的失稳。这种情况一般出现在比较差的围岩中,但也有时也出现在很坚硬的围岩中的孤立夹层之内。保护暴露岩石使之免受严重的湿度变化的影响,一般是能在这种场合下使用的最为有效的补救措施。

4. 由过大的地下水压或地下水引起的失稳。这种情况几乎在所有各类岩体中都会遇到。但是只有伴随上述的某种失稳情况一起出现时,地下水的影响一般才会达到很严重的程度。通常注浆改变水流方向和减小水压是最有效的补救措施。

就某一典型工程而言,可能同时出现上述的两种或两种以上的失稳情况,而且失稳模式相互影响,互为依赖。这样,传统的设计理论与计算方法就很难决定采用哪种设计方法比较合理。此时,设计者的工程经验和正确判断将起到重要作用。随着系统分析与可靠度理论研究的深入,试图为这些问题的解决提供了一条新的途径。

1.5.3 地下工程设计模型

地下工程设计模型是进行地下工程设计与分析的基础。国际隧道协会(ITA)于 1978 年曾成立结构设计模型研究组(Working Group on Structural Design Models),其任务在于汇集和交流各会员国所采用的结构设计模型。该工作组于 1981 年提出了工作报告^[5],总结出各会员国对四种不同类型的隧道,所采用的不同结构设计模型(表 1.1)。

表 1.1 隧道结构设计模型

国 家	盾构开挖软土隧道	锚喷、钢拱支护软土隧道	中硬岩质深埋隧道	明挖施工框架结构
澳大利亚	弹性介质中全支承圆环; Muir Wood 法、Curtis 法; 或假定隧道变形	初期支护: Proctor-white 法; 二次支护: 弹性介质中全支承圆环; Muir Wood 法、Curtis 法; 或假定隧道变形	初期支护: Proctor-white 法; 二次支护: 弹性介质中全支承圆环; Muir Wood 法、Curtis 法; 或假定隧道变形	箱形框架弯矩分配法
奥地利	弹性地基圆环	弹性地基圆环; FEM; 收敛约束法	经验方法	弹性地基框架
德国	覆盖 < 2D; 顶部无支承弹性地基圆环; 覆盖 > 3D; 全支承弹性地基圆环; FEM	覆盖 < 2D; 顶部无支承弹性地基圆环; 覆盖 > 3D; 全支承弹性地基圆环; FEM	全支承弹性地基圆环; FEM; 连续介质或收敛—约束法	弹性地基框架(底压力分布简化)
法国	弹性地基圆环; FEM	FEM; 作用-反作用模型; 经验法	连续介质模型; 收敛—约束法; 经验法	—
日本	局部支承圆环	局部支承弹性地基圆环; 经验法加测试; FEM	弹性地基框架; FEM; 特征曲线法	弹性地基框架; FEM

续表

国 家	盾构开挖软土隧道	锚喷、钢拱支护软土隧道	中硬岩质深埋隧道	明挖施工框架结构
中 国	弹性地基圆环;经验法	初期支护:FEM;收敛约束法; 二次支护:弹性地基圆环	初期支护:经验法; 永久支护:作用-反作用模型;大型 洞室:FEM	箱形框架弯矩分配法
瑞 士	—	作用-反作用模型	FEM;经验法;有时用收敛约束法	—
英 国	弹性地基圆环;Muir Wood 法	收敛—约束法;经验法	FEM;经验法;收敛—约束法	矩形框架
美 国	弹性地基圆环	—	弹性地基圆环;Proctor-white 法;FEM;锚杆按经验	弹性地基连续框架
瑞 典			通常为经验法;有时作用-反作用 法;连续介质模型;收敛约束法	
比 利 时	Schulze-Duddek 法			刚 架

从表 1.1 可见,目前国内外采用的隧道结构设计模型可归纳为四种类型:

1. 工程经验类比法 (Empirical Method)

经验类比法是建立在现有工程的基础上。类比设计可分为直接类比和间接类比。

(1)直接类比法。就是将拟建工程的类型、跨度、地质条件、使用要求以及运营环境与现有条件类似或相近的工程进行比较,由此给出相应的开挖支护工艺与参数。

(2)间接类比法。该法是以工程围岩分类作为类比的桥梁给出设计依据。

2. 收敛—约束法 (Convergence—Confinement Method)

收敛—约束法是以量测的围岩收敛作为监控和设计依据,因此,该法又称监控量测法。

3. 荷载—结构模型法或结构力学法 (Structural Mechanics Method)

该法采用建筑结构的计算模型,计算地下结构在荷载作用下的内力和位移,由此评价地下结构的稳定性,并以此作为调整与设计结构参数的依据。由于计算方法多采用结构力学,故称为结构力学法。这类方法包括弹性地基框架、弹性地基圆环(全部支承或部分支承)等。

4. 理论分析法 (Theoretical Analysis Method)

理论分析法通常是将岩土体介质视为具有粘弹塑性的连续介质,并根据平衡方程、几何方程、物理方程建立地下结构的偏微分方程(组),求解该偏微分方程(组),并使其满足边界条件,从而获得地下工程的应力和位移值。

目前,理论分析包括解析分析和数值分析两种方法。解析分析又分为封闭解法和近似解法两种。由于解析分析法求解能力有限,逐步被数值分析法所替代。数值分析法以有限元法(Finite Element Method, FEM)为主,另外还有有限差分法、边界单元法以及求解不连续介质的离散单元法、DDA 和流形元法等。

1.5.4 地下工程设计方法比较

如上所述,目前,地下工程设计理论与方法主要可归纳为四类方法:工程经验类比法、收敛约束法(监控量测法)、荷载—结构模型法或结构力学法和理论分析法。每一种设计方法都有其优缺点,针对具体工程情况,选择一种或多种设计分析方法,进行对比分析和综合决策是必要的。表 1.2 给出了现行设计方法的评价。