

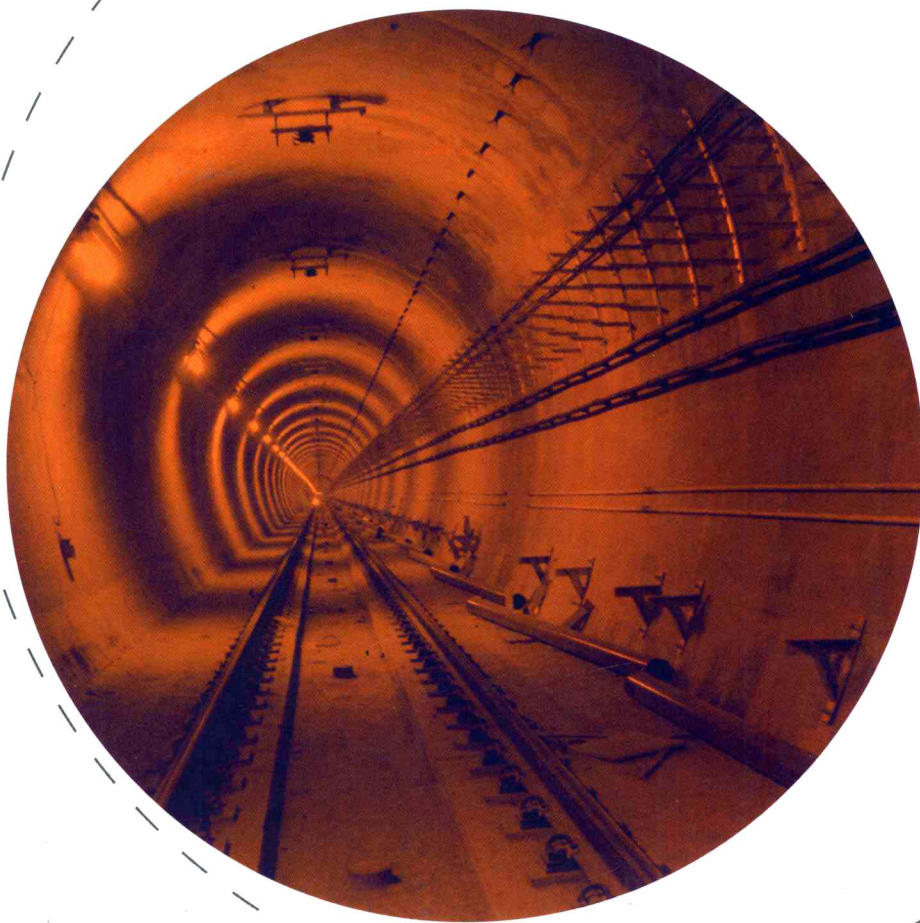


北京市高等教育精品教材立项项目

地下工程系统分析与设计

DIXIA GONGCHENG XITONG FENXI YU SHEJI

高谦
施建俊
李远
余伟健
编著



中国建材工业出版社

地下工程系统分析与设计

高 谦 施建俊 李 远 余伟健 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. —2版.
—北京:中国建材工业出版社,2011.5
ISBN 978-7-80227-912-4

I. ①地… II. ①高… III. ①地下工程—系统分析—高等学校—教材②地下工程—建筑设计—高等学校—教材
IV. ①TU9

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第035471号

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了地下工程规划、工程设计、稳定性分析以及施工与监测等方面的技术、理论与方法,并配备课程设计。本书共分为8章。第1章地下工程研究与进展,简要地概述了地下工程的范畴、特点、系统分析方法与地下工程研究的发展和课题;第2章为地下工程系统规划与空间设计,详细地介绍了各类地下工程的总体规划、空间布局以及结构设计等方面的内容;第3章是地下工程勘探勘察与地质评价,紧紧围绕着地下工程所赋存的地应力环境和岩土体介质的特点,简要地介绍地下工程勘探与勘察技术、方法以及岩体质量评价与参数预测;第4章至第6章是地下工程设计与稳定性分析的主要理论与方法。论述了地下工程的设计理论与支护技术,重点介绍锚喷技术在地下工程支护设计中的应用与实践;第7章为地下工程施工与监控技术,全面概述了地下工程现代施工工艺以及监控技术;第8章为课程设计。

本书章节内容的编排既具有相对的独立性又互为联系,构成一个整体系统,重点突出系统工程分析方法和设计理念,强调系统分析方法在地下工程中应用的重要性,使读者既掌握地下工程设计、分析方法和施工技术,又充分理解地下工程这一复杂工程系统的内在本质、工程特点以及系统工程应用的必然性和重要性。

本书是土木工程专业《地下工程》专业必修课的教材,也可作为土木工程专业的研究生教材也是从事铁路、水利、矿山以及国防等工程的科研、设计和施工人员重要的参考资料。

地下工程系统分析与设计

高 谦 施建俊 李 远 余伟健 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:23.5

字 数:580千字

版 次:2011年5月第1版

印 次:2011年5月第1次

书 号:ISBN 978-7-80227-912-4

定 价:45.00元

本社网址:www.jecbs.com.cn

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)88386906

第1版前言

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,必将需要更多的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学校,不仅需要传授地下工程设计与分析理论与方法的基本知识,还应能够使读者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《地下工程系统分析与设计》这本教材,供大家参考。

本书作者在从事多年的地下工程专业课程的教学和研究工作中体会到,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必将面临更大的挑战。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,需要研究和开发现场测试仪器和测试技术,但更重要的还应培养正确的工程概念、科学的思维方法和系统分析理念。

在长期的学习和工作中,作者受益于很多老前辈的教诲,从众多的富有创新观点和科学理念的专著中获得启发,理解地下工程设计与分析中自觉或不自觉地应用和采用系统分析的思想和方法,尤其对大型和复杂的地下工程,更充分体现系统分析理念和技术。在教学中也试图将系统分析概念传授给学生。为此曾在为讲授此课程编写了教学讲义,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的基础上编著而成的,在此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)考虑到研究生教材,既论述地下工程的设计理论与计算方法,又注重地下工程概念的建立,使读者不仅能够进行地下工程的分析与计算,而且更重要是建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考虑工程的实用性,在介绍施工方法和现场测试注重针对性,在总结工程经验体现知识的系统性,并用系统分析的思想,将工程的概念融入整个的内容之中;

(4)全书以地质工程、稳定性分析与设计和施工与监测三个系统作为主线,详细介绍地下工程设计、分析与施工中的综合分析的概念与动态反馈的原理。

虽然经过多次修改,但由于时间紧和编著者水平所限,本书所存在的错误在所难免。尤其书中很多章节提出了自己的观点,定有错误或不妥之处,期望同行专家及阅读本书的读者提出批评意见和建议,以便在下次修改中得到改正和完善,作者表示衷心的感谢。

作者

2004年春节于北京

第2版前言

2005年2月出版的系列教材《地下工程系统分析与设计》,在我校和兄弟院校的教学中获得好评,获得了2006年冶金系统优秀教材二等奖。随着我国加大铁路、公路和基础工程的建设,人们面临越来越多的岩土工程问题。尤其大跨度、复杂地质条件下的地下空间开发和利用,使得岩土工程得到快速发展,亟待培养与之相适应的高素质技术人才。因此,土木工程专业课也越来越受到高等院校的重视。《地下工程》作为土木工程专业的主干课程之一,在各高校土木工程专业课的教学中得到逐渐加强。我校在2010版土木工程专业课的修订中,将《地下工程》由选修课指定为必修课,增加课堂学时与课程设计。为此编写与之相适应的教材,是提高教学质量重要途径之一。因此,为满足《地下工程》专业的教学需求,并兼顾课程设计,在北京高等教育精品教材建设项目的资助下,对《地下工程系统分析与设计》进行全面修订,由此建设北京高等教育精品教材,也为创建国家级和北京市级精品课程奠定基础。

本次修订在保留原教材特色的基础上,在以下几个方面作了重大调整、补充和修改:

1. 考虑地下工程涉及众多不确定性因素,仍将地下工程的地质勘察、工程设计与施工视为系统工程,在教材修订中更突出系统分析的思想、方法和理念在工程中的应用;
2. 鉴于未来地下工程建设逐步向深部发展以及锚固技术的应用,本次修订明确地下结构工程和地下围岩工程这两类工程概念,在分析工程的特点和特性的基础上,详细论述各自的计算理论、设计方法与施工技术。
3. 增加了各类地下工程的规划与设计内容,提高读者对地下空间的理解和兴趣;
4. 减少原教材中理论性较强的部分章节,突出了地下工程设计施工中的实用技术;
5. 增加地下工程在地质勘察、稳定性分析、工程设计、施工工艺与监测技术等方面的最新研究进展,提供具有潜力或感兴趣的读者自学或选修内容。
6. 每章增加适当数量的思考题,便于教师课堂检查、读者课后自查,提高教学质量。

本教材编著者在多年地下工程专业课的教学和科研中深刻地认识到,地下工程远比地面工程复杂得多。地下工程专业课的教学不仅在于给读者传授知识,更重要的是使读者建立工程概念以及系统工程分析思想与理念。正如一篇评论性文章所概括的:“设计师的职责不在于精确计算,而在于正确判断”。正确判断不仅依赖于工程经验,更重要在于正确的指导思想和工程理念,这正是本教材始终突出的系统分析方法理念。

本书第1章、第3章和第4章由高谦编写,第2章、第6章由施建俊编写,第7章由李远编写,第5章由余伟健编写。全书由高谦统稿,施建俊、李远和余伟健编写第8章地下工程课程设计。

本次教材修订虽经过周密思考,并多次召开教材编写研讨会,广泛听取任课教师 and 学生的意见,但对于处在研究发展中的岩土工程学科,难免仁者见仁,智者见智。加之时间紧和编著者的水平所限,修订后的本教材仍难免存在错误和不足之处。本书增加的思考题仅仅是抛

目 录

1 地下工程研究与进展	(1)
1.1 地下工程范畴与分类	(1)
1.2 地下工程的优缺点	(2)
1.3 地下工程的特点	(3)
1.4 地下工程研究与进展	(4)
1.5 地下工程系统设计与分析方法	(6)
1.6 地下工程开发利用阶段	(15)
1.7 主要研究课题	(21)
1.8 本章小结	(23)
2 地下工程系统规划与空间设计	(25)
2.1 交通隧道	(25)
2.2 地下铁道	(33)
2.3 城市地下综合体	(51)
2.4 地下仓库	(65)
2.5 地下电站	(75)
3 地下工程勘探勘察与地质评价	(82)
3.1 工程地质资料获取技术	(82)
3.2 工程围岩质量评价及参数分析	(98)
3.3 地下工程原岩应力分布规律与预测	(131)
4 地下工程稳定性分析与结构设计	(146)
4.1 地下工程分析模式与设计准则	(146)
4.2 地下工程结构设计理论与方法	(151)
5 地下工程锚喷支护与可靠性评价	(185)
5.1 现代支护理论与结构类型	(185)
5.2 锚喷支护经验类比与设计原则	(187)
5.3 地下工程可靠性设计	(197)

6	围岩与支护系统应力分析与稳定性评价	(219)
6.1	完整围岩的弹性应力分析	(219)
6.2	地下工程高应力围岩弹塑性应力分析	(231)
7	地下工程施工与监控技术	(259)
7.1	新奥法与新意法施工技术	(259)
7.2	浅埋暗挖施工技术	(270)
7.3	掘进机与盾构施工技术	(290)
7.4	工程围岩稳定性监测与控制	(298)
8	地下工程课程设计	(320)
8.1	地铁车站工程设计	(320)
8.2	公路隧道支护课程设计	(333)
8.3	地下工程施工设计	(348)
	参考文献	(368)

1 地下工程研究与进展

21 世纪是一个充满希望与活力、再创人类奇迹的世纪。对于从事土木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。

从我国近几十年隧道与地下工程理论与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。但也应该看到,当前我国隧道与地下工程设计水平与施工组织管理水平与国际发达国家相比还有一定的差距。

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,本书将为地下工程领域的读者,提供能够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,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,为读者开展技术创新、勇于攀登技术高峰奠定基础,为在新世纪地下空间的开发和利用中造就一批思维敏锐、基础扎实和善于创新的工程技术人才。

1.1 地下工程范畴与分类

地下工程是指建造在岩石或土体中的建筑物、地下空间以及围岩工程等一系列建筑物的总称。广义地讲,地下工程包括在地下开挖形成的所有空间结构,但一般把矿井等地下构筑物排除,主要是在地下的工业、交通、民用和军事建筑物。地下工程有多种分类方法:

1. 按地下工程的功能分类

(1) 工业工程

包括各类地下工厂、车间、电站等。

(2) 交通工程

各种铁路和公路隧道、山岭与水底交通隧道,城市地下铁道。

(3) 民用工程

地下商业街、地下商场、地下车库、影剧院、展览馆、餐厅、体育馆以及一些公共建筑、人民防空工程。

(4) 仓储工程

各种地下贮库,包括油库、气库、液化气库、热库、冷库、档案库、物资库、放射性废物库等。

(5) 公用和服务性建筑

地下自来水厂、污水处理站、给排水管道、热力和电力管线、煤气管道、通信电缆管道等。

(6) 军用工程

各种野战工事、指挥所、通信枢纽、人员和武器掩蔽所、军火和物资库等。

2. 按地下工程的赋存环境及建造方式分类

(1) 岩体中的地下工程

岩石中的地下工程包括利用和改造的天然溶洞或废旧矿坑以及新开凿的人工洞等。在改造并利用天然石灰石岩溶洞方面,我国广西、云南、贵州、四川及湖南、湖北等省均积累了丰富的经验,节省了大量开挖岩石的费用和时间。

(2) 土体中的地下工程

根据建造方式,土中的地下建筑可分为单建式和附建式两种类型。单建式是指地下建筑独立建在土中,在地面以上没有其他建筑物。附建式是指各种建筑物的地下室部分。

3. 按地下工程设计与支护类型分类

按地下工程设计和支护类型可划分为地下结构工程和地下围岩工程两类。

(1) 地下结构工程

地下结构工程又称之为地下建筑结构,通常是在埋藏较浅或质量较差不能自稳的围岩开挖地下空间并构筑建筑结构,使结构承担围岩荷载。其结构分析设计与建造类似于地表的建筑结构。

(2) 地下围岩工程

当埋藏增加和围岩质量较好的地下工程,地下开挖工程的自稳性逐步提高,工程围岩仅需要部分支护或不需要支护就能保持工程的稳定。因此,工程围岩既是产生工程失稳的因素又是承载体。所以,对于这类工程的分析设计和支护与地下结构存在本质区别。

1.2 地下工程的优缺点

与地面建筑相比,地下工程具有如下优点:

1. 为人类的生产、生活及其他活动提供了广阔的空间

随着生产的发展、城市人口和范围的扩大,城市的地面建筑群林立,交通拥挤,公用和服务性建筑剧增,地皮价值不断提高。在这种情况下,地下便成为人类活动的良好空间。

2. 为某些生产工艺提供适宜的环境

对于建造在地下建筑最为有用的岩土特性是热稳定性和密闭性。这些特性对于要求恒温、恒湿、超净和防震环境的精密生产非常适宜。在地下比在地面上创造这样的环境容易和经济。不但造价低,而且节省运行费用。岩土的热稳定性使得地下建筑周围有一个比较稳定的温度场,这对于低温或高温状态下贮存物质非常有利。

3. 地下围岩工程具有明显的经济效益

地下结构工程增加了大量的岩土工程量,因此造价比同类地面建筑要高。但是对于地下围岩工程,由于围岩自稳性较高,围岩仅需要少量支护或不支护就能维持稳定,因此,一般地下围

岩工程比地面建筑更经济。例如,一些地下水电站、地下冷库的造价仅为地面的 $1/2 \sim 1/10$ 。一些石油、液化气等液体燃料,如果直接贮存在大容积不衬砌的地下硐罐中,不但造价比地面库低,且可节约大量的建筑材料。

4. 具有良好的防护性能

一定厚度的岩层和土层具有良好的防护能力,使处于其中的地下建筑可免遭或减轻空袭、炮轰、火灾、爆炸等造成的破坏。

但地下也存在一定的局限性或不良因素,主要有:

1. 施工条件困难,存在较大的不确定性因素

地下工程施工工作面少、地质条件复杂多变,常常面临诸如地下水、断层等不良地质条件的影响,使地下工程施工常常面临难以预料事故。不仅一般工期较长,造价较高,而且还受诸多的不确定性因素影响,工期难以控制。

2. 地下工程没有阳光、潮湿和闭塞

地下工程没有阳光、潮湿和闭塞,因此需要照明和通风,因此,增加了地下工程的使用成本。

这些局限性将随着生产力的提高和科学技术的进步逐渐得到克服,以使地下建筑得到更大规模和更加广泛的发展。

1.3 地下工程的特点

地下工程与地面工程相比,在工程施工工序、受力特性和失稳模式等方面具有完全本质区别,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,在工程开挖之前就存在构造应力环境(原岩应力),因此,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、砖、混凝土等,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,地质材料不仅包含大量的断层、节理、夹层等大量的不连续介质,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变

异性;因此,人们通过有限的地质勘察、取样试验,很难能够全面掌握整个工程岩体的地质特性和力学性质,而仅仅是对整个工程岩体的特性进行抽样分析、研究,由此预测其工程特性。

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、力学特性等也会发生变化。这就是时间上的不确定性。尤其开挖后的工程岩体特性随时间的变化,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还是较小的。

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,对于地下工程只是通过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。这就是信息的不完备性。

(6) 地下工程信息的模糊性

对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,如节理特征、充填物以及岩性等。

1.4 地下工程研究与进展

地下工程赋存于岩土介质的地质环境,因此,赋存环境中的初始应力分布、施工方法与工序、结构类型等因素均影响工程的稳定性。随着地下工程的埋深逐渐增加,以及工程地质、水文地质、岩土力学等学科的应用,作为岩土工程的一个重要工程分支,地下工程的概念以及设计理论与分析方法也得到发展。

1.4.1 地下工程设计概念发展

地下工程设计概念从最初的结构工程、岩土工程逐渐发展到地质工程。

1. 结构工程概念

当早期人们建造的地下工程埋深较浅,且受地表建筑结构设计理论的影响,因此,自然对于地下工程视为地下结构工程,从而采用(沿用)结构工程的分析方法和结构设计理念。

地下结构工程的设计理念是荷载-结构模式,即把地下工程围岩视为作用在结构上的荷载,把人工支护视为承受荷载的结构,采用结构力学方法,计算结构的内力和位移,由此进行地下结构的断面设计和安全分析。

基于结构工程的设计理念,地下工程分析关键在于确定围岩荷载以及支护结构的承载能力。针对不同埋深和地层条件,提出了诸如塌落拱理论、普氏理论、岩柱理论、太沙基等荷载计算理论;即使对于喷射混凝土、锚杆支护技术,某些研究者仍基于锚固支护形成的支护结构来解释锚固支护机理。诸如悬吊理论、组合梁或组合拱理论均为地下结构工程的设计理念。

根据地下工程结构概念进行工程设计,目前仍为诸多地下工程所应用。尤其对于浅埋和围岩破碎等不良岩体和土体中,地下结构工程设计方法仍然适用,加之人们在长期的设计中积累了丰富的工程经验,因此,地下建筑结构设计理论和方法目前仍占有一定地位。

2. 岩土工程概念

随着地下工程的埋深增加,围岩稳定性也有所提高,因此人们在地下工程设计和施工中逐渐认识到地下结构工程设计理念的局限性。尤其是埋深达到一定深度后,在开挖空间上覆围岩形成平衡拱,而拱外围岩无需支护能够自稳;对于较好围岩,开挖空间无需建造地下结构,采取喷锚网进行辅助维护或局部加固就能维持工程稳定,从而提出了岩土工程概念的地下工程设计理论与方法。

地下空间的岩土工程设计概念是以现代岩石力学理论、数值计算方法以及锚喷支护理论作为基本依据。其基本理念是:地下开挖空间的围岩具有荷载和承载结构的两重性。地下工程支护设计的指导思想是,维护围岩的质量和自稳性,使其荷载围岩转变为围岩结构,并充分发挥围岩的自承能力,而不是将围岩视为荷载,通过构筑地下建筑来承受围岩荷载。基于这一指导思想,根据地下岩体赋存条件,采取合理的开挖技术、密贴的支护形式和适时的施工工艺,控制岩体变形,改善围岩应力,提高岩体自身强度,使围岩与支护共同达到新的平衡与稳定,以获得最佳工程效果。

可见,岩土工程概念是在推广新奥法,尤其是锚喷支护技术的广泛应用过程中逐步形成,并随着理论分析数值方法的应用而进一步发展。基于岩土工程概念的设计理念,不是视围岩为荷载,而是地下结构体的一部分。这与地下结构工程的设计理念存在本质的区别。

目前对于地下工程(埋藏深度和围岩质量)达到某一赋存条件时,地下岩土工程的设计理念是合理的。然而,随着锚固技术的发展和广泛应用,对于浅部围岩甚至土中,人们也试图采用岩土工程的设计理念。并且借助于现有的理论和数值分析技术,开展不同条件下的围岩与支护的相互作用机理和支护参数的优化研究,为扩大岩土工程设计理论和方法提供理论依据。

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:地质工程是以地质体作为建筑材料,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土材料性质、岩体结构效应对地下工程稳定性的作用,更强调地下工程与所赋存的地质环境的关系,体现了地下工程系统的观点与理念。

综上所述,地下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“地质改造与控制的工程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分析的设计分析理念为基础,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。

1.4.2 地下工程设计方法发展

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而确定,而后者则是以地下工程稳定性为目标应采用的施工工艺、支护类型与参数。

地下工程设计理论和方法也经历了一个发展演变过程。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方法施工。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定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作初期支护,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、计算速度的快速提高与发展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,大大地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和进展,又将数值分析方法的应用提高到了更高层次。

1.5 地下工程系统设计与分析方法

地下工程源于工程实践,在长期的工程实践中,不断地总结经验和信息交流,由此形成半经验、半理论的设计方法,并用于生产实践。因此,在不同的历史时期,提出了针对具体工

程类型、适用于特定条件和基于某些假设的设计理论与计算方法。

随着世界人口的增加以及生存发展的需要,开发地下空间已经成为社会发展的必由之路。地下工程岩石力学的产生和发展,地下工程设计理论与计算技术也得到迅速发展。尤其是数值分析方法和计算机水平的迅速发展,使得数值分析方法应用于工程设计成为可能。然而,目前的现状是,理论分析与实际工程设计仍存在一条难以逾越的鸿沟,其根本原因归结于地下工程所固有的复杂性。几十年的研究与发展,使人们逐步认识到,完全依赖于传统的设计理论与计算方法,难以满意地解决地下工程设计与参数优化,某些研究转向系统工程的科学理论与方法的研究。尽管这种设计理论与方法还处于探索阶段,但是,它使人们已经看到:转变研究理念和分析方法,有可能使设计理论与计算结果应用于工程设计之中。

系统分析理论与方法并不是否定传统的设计理论与计算方法,而正是在传统设计理论与方法的基础上得以发展。事实上,现有的任何一种工程设计和分析方法在某种程度上都渗透着或体现出系统分析的概念和思想。所以,基于本书的指导思想,在本章,首先简要地说明系统分析的主要观点和系统原理;然后,以目前一些设计理论为例,解释当前设计理论中的系统观点和方法;最后,明确地下工程设计中的系统分析理念、模型和发展方向。

1.5.1 系统分析概念与原理

1. 系统的一般概念

系统概念来源于古代人类的社会实践。系统作为科学概念于20世纪20年代开始提出。系统具有以下特点:

系统是由两个以上的要素(部分、环节、单元)组成的整体,世界上的一切具体事物、现象、概念都构成系统。如岩体是由节理分割的岩块和节理组成的一个系统;节理面性质取决于节理产状、间距、长度、充填物类型与性质等,因此,它就构成了节理系统。

系统的各要素之间,要素和整体之间,以及整体与环境之间存在着一定的有机联系,从而在系统的内部和外部形成一定的结构和秩序。可以把环境看成是系统所从属的更大的系统。例如,地下工程是由围岩和支护两个子系统组成,围岩子系统是由岩块和结构面要素组成,支护是由锚杆、喷层和钢筋网(假设是锚喷支护结构)要素组成。不仅围岩与支护子系统之间存在着相互作用、相互依赖的联系,而且它们又从属于工程所赋存的地质环境(原岩应力环境、地下水环境和温度环境),因而,从围岩、支护到环境就构成了一个有序的地下工程这一“整体系统”。

系统和要素(或子系统)的区别是相对的。一个系统只有相对于构成它的要素而言才是系统,而相对于由它和其他事物构成的较大系统而言,则是一个要素(或称子系统);相应地,一个要素只有相对于构成它的要素而言,才是一个系统。这就显示出系统具有“层次性”和“等级性”。例如,在地下工程中,支护结构相对于每一根锚杆和喷层、钢筋网是系统,而锚杆、喷层和钢筋网是要素;支护结构相对于地下工程系统它就是要素(或子系统)。

系统的性质取决于要素结构。在一个动态系统中,结构的好坏直接由要素之间的协调作用体现出来。质量差的一些要素,如果协调得好,可能形成很好的结构,从而系统具有较

优的功能。反之亦然。例如,地下工程的稳定性不仅取决于围岩状态(围岩子系统)和锚喷支护参数(支护子系统),而且还取决于围岩和支护的相互协调作用的结果。这正是现代支护理论的重要思想之一。

每一具体系统都是存在于有限的时间和空间上(时空的有限性)。一般把一系统之外的所有其他事物或存在,称为该系统的环境。环境是系统存在与演化的必要条件。系统的整体性是在系统与环境的相互作用中体现出来的。系统和环境之间通常有物质、能量和信息的交换。因而,系统的环境适应性就是在一定范围内适应环境的变化,保持和恢复原有功能的能力。当所研究的是无组织的简单关系时,在一定的条件下可以忽略系统与环境之间的相互作用,将该系统看作封闭系统,否则,就是一个开放系统。

显然,如果采用系统观点来分析某一地下工程时,地下工程与所赋存的环境构成的系统就是一个开放系统,因为工程环境对地下工程的稳定和变形产生作用,而地下工程的变形也影响其环境(应力、地下水和稳定)。

实际上,赋存于地球上的每一项地下工程,它相对于太阳系是一个子系统,地下工程这一整体系统所处的环境就是太阳系。尽管地球的运转对地下工程的稳定也产生影响,但对于工程本身的相互作用可以忽略。因此,可以认为是一个封闭系统。

2. 系统工程原理与基本组成部分

系统工程原理是基础学科,它主要研究系统理论,为系统工程提供理论依据。自20世纪30年代贝塔朗菲从具体生物学入手,揭示出生物机体运动的整体性、相关性、有序性等而创立了一般系统论以来,经过后来的发展,归纳出如下原理:

(1) 整体性原理

整体性就是说任何事物或人并不是孤立地和单独存在的,而是有组织、有秩序的系统,在这个系统中才形成要素的本质。

(2) 相关性原理

相关性原理是指世界上一切事物、现象和过程之间的联系是客观存在的整体,一种事物离开了它和周围条件的相互作用联系和相互作用,就成为不可理解和毫无意义的东西。这就是说,事物总是存在于某种系统之中,也就是处于某种联系之中。因此,相关性原理要求把任一事物作为某个系统的一个要素来研究。

(3) 有序性原理

有序性原理是指系统的任何联系都是按照等级和层次进行的,都是秩序井然,有条不紊的。具体地说,任何一个系统都和周围环境组成一个较大的系统,因此,任何一个系统都是更高一级系统的一个要素(子系统)。同时,任何一个系统的要素本身,通常又是较低一级的系统。

(4) 动态性原理

动态是指状态与时间的相关性。动态性原理则是研究系统要素间的联系随时间的变化。

(5) 分解综合原理

分解是将具有比较密切结合关系的要素分组化。对系统来说是归纳出相对独立、层次不同的子系统。综合则是完成新系统的设计过程,即选择具有性能好、适用以致标准化了的

子系统,设计出它们之间的关系,形成具有更广泛价值的系统,以达到预定的目的。

(6) 创造思维原理

管理者的责任在于创造性的工作,工程师的天职在于创造性设计与施工。创造思维的基本原理有两条:其一是把陌生的事物看做熟悉的东西,用已有的知识加以辨别和解决。这是人们惯用的方法。从这条原理出发,不只是对新的事物给以旧的解释,也可能给予新的解释,从而创造出新的理论。其二是把熟悉的事物看做陌生的东西,用新的方法,新的原理加以研究,从而创造出新的理论,新的技术。这往往是人们忽略的原理。

(7) 验证性原理

人类的生产活动是最基本的实践活动,是决定其他一切活动的基础。一般地说,在处理系统问题时,当不能用数学解析式描述时,总是先提出假设,通过试验进行验证,通过试验对可能出现的故障进行分析判断,通过试验为执行者提供数据进行核实,以及通过试验为用户提供验收条件,甚至借助于试验数据,修正已有的理论。

(8) 反馈原理

反馈是输入经过处理后而将其结果(即输出)再送回到输入,并再输入发生影响的过程。从哲学的角度看,反馈架起了原因和结果的桥梁。因果关系的相互作用不是各有目的,而是为了完成一个共同的功能。同时,反馈使事物本身与周围环境处于动态的统一之中,构成了新陈代谢运动。

系统工程原理所研究的内容,决定系统工程的任务和性质,就其基本意义上讲,是寻求和建立解决工程问题的明确思想和有规律的解决问题的行动程序。这个明确的思想就是“系统工程观念”,有规律的解决问题的行动程序就是系统工程方法论。这两个组成部分是互相关联的,系统工程观念是建立在系统工程方法论的基础之上,而系统工程方法论又推动系统工程观念的发展,它们是各有侧重的两个部分。

(1) 系统工程观念

系统工程观念是对系统工程的最基本规律的认识,这些认识也被称为系统工程的公理,它们是研究工程的最根本最积极的部分。

(2) 系统工程方法论

所谓方法论,就一般意义来说,就是解决问题的辩证程序的总体。通过这样的程序把问题和可用的技术联系起来,求得问题的解。

系统工程方法论建立在系统工程观念的基础上。系统工程观念阐明了系统工程活动背景、任务和过程,也阐明了解决问题的总原则。系统工程方法论由以下7个基本逻辑程序构成:

- (1) 辨识环境;
- (2) 确立目标;
- (3) 价值度量;
- (4) 构成系统概念(系统综合);
- (5) 系统分析;
- (6) 开发求解方案;
- (7) 决策。

1.5.2 地下工程系统分析方法

1. 动态设计

动态设计理论与方法是以岩石力学作为理论基础,以现场监测信息作为反馈信息,并借助于工程经验和采用分部开挖与信息反馈的动态施工和设计的施工工艺,因此,动态设计方法虽然没有明确系统概念,但其方法本身已部分地体现了系统工程的设计思想。动态设计方法的循环过程如图 1.1 所示。

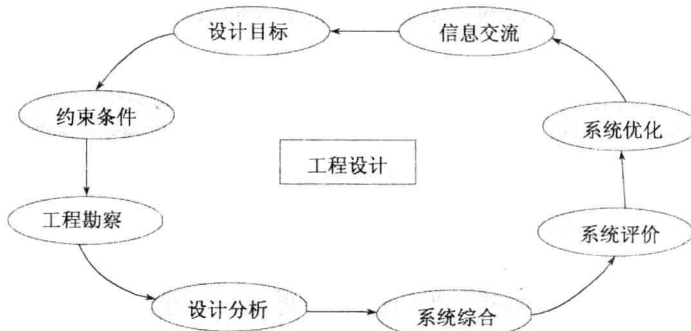


图 1.1 地下工程设计中的循环过程 (Bieniawski, 1984)

在图 1.1 所示的动态设计循环中,首先明确工程设计目标:对于地下工程设计就是工程费用最小和安全可靠;然后确定约束条件:在此就是工程的稳定性要求和变形约束条件,使其建造的工程满足安全使用。第三,进行工程地质勘察,获取必要的资料和信息。根据所获取的资料、信息,建立设计模型和进行设计分析。在此分析中,可能采取多种分析模型和分析方法,如经验模型、理论模型等。在设计分析的基础上,进行系统的综合,也就是根据不同的设计分析结果进行综合分析、对比研究,由此进行系统评价和参数优化,最后进行信息交流和反馈。这样,就完成了—个循环过程。如果由此获得的设计参数达到设计目标,就完成了此次工程设计,否则,进行下一次循环,直至达到设计目标。

2. 现代支护设计理论

现代支护理论源于新奥法施工以及锚喷支护技术。新奥法将设计与施工相结合,以现场监测作为反馈信息和调整开挖顺序、支护时机和支护参数,并提出设计和支护中应遵循的一些基本原则。新奥法引入我国后,不仅继承了新奥法的设计理念和基本原则,并采用岩石力学理论进行注释和发展,从而形成体现新奥法设计理念的现代支护理论。现代支护理论与传统支护理论之间的区别主要表现在以下几个方面:

(1)对围岩和围岩压力的认识。传统支护理论认为围岩压力由洞室塌落的围岩“松散岩石”造成的;而现代支护理论则认为围岩具有自承能力,围岩作用于支护上的压力不是松散压力,而是阻止围岩变形的形变压力。只有当围岩变形发展到极限值,才可能导致围岩松散,才可能出现松散地压。因此,现代支护理论的重要贡献是,围岩压力不仅取决于围岩结构类型,而且还与支护时间和支护强度密切相关,体现出系统要素之间的相互作用原理。

(2)围岩和支护间的相互关系。传统支护理论把围岩和支护分开考虑,围岩当作荷载,支护作为承载结构,属于“荷载-结构”体系;而现代支护理论则将围岩和支护作为一个统一