

SIMPLIFIED SERIES OF  
CIVIL ENGINEERING

清  
華  
大  
學

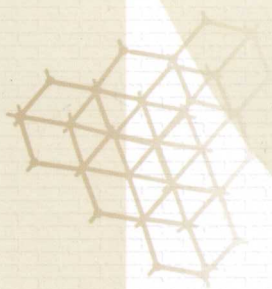
清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

方秦 柳锦春 编著

简明土木工程系列专辑

地下防护结构



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn  
知识产权出版社  
www.cnipr.com



系列名称

Simplified Series of Civil Engineering

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

方秦 柳锦春 编著

简明土木工程系列专辑

# 地下防护结构

中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn  
知识产权出版社  
www.cnipr.com



水利水电出版社·首版印刷  
大群水国中由京·路国编更发印寄或  
100028 北京市 黄城根 100028 (邮编)

清华大学土木工程系组编

## 简明土木工程系列专辑

### 编 委 会

名誉主编 陈肇元 袁 驹

主 编 崔京浩

副主编 石永久 宋二祥

编 委 (按汉语拼音排序)

陈永灿 胡和平 金 峰 李庆斌

刘洪玉 钱稼茹 王志浩 王忠静

武晓峰 辛克贵 阳 森 杨 强

余锡平 张建民 张建平

### 编 辑 办 公 室

主 任 阳 森

成 员 张宝林 彭天赦 张 冰 邹艳芳

# 总序

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术”。土木工程是一个专业覆盖面极广的一级学科。

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程（Military Engineering）而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，地下防护工程、航天发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

土木工程是国家的基础产业和支柱产业，是开发和吸纳我国劳动力资源的一个重要平台，由于它投入大、带动的行业多，对国民经济的消长具有举足轻重的作用。改革开放后，我国国民经济持续高涨，土建行业的贡献率达到 1/3；近年来，我国固定资产的投入接近甚至超过 GDP 总量的 50%，其中绝大多数都与土建行业有关。随着城市化的发展，这一趋势还将继续呈现增长的势头。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，呈现出勃勃生机。其中工程材料的变革和力学理论的发展起

着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖瓦灰砂石，而是由新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法武装起来的为众多领域和行业不可或缺的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

综上所述，土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编写一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

清华大学土木工程系是清华大学建校后成立最早的科系之一，历史悠久，实力也比较雄厚，有较强的社会影响和较广泛的社会联系，组编一套“简明土木工程系列专辑”，既是应尽的责任也是一份贡献，但面对土木工程这样一个覆盖面极广的一级学科，我们组编实际起两个作用：其一是组织工作，组织广大兄弟院校及设计施工部门的专家和学者们编写；其二是保证质量的作用，我们有一个较为完善的专家库，必要时请专家审阅、定稿。

简明土木工程系列专辑包括以下几层含义：简明，就是避免不必要的理论证明和繁琐的公式推导，采用简洁明快的表述方法，图文并茂，深入浅出，浅显易懂；系列，指不是一本书而是一套书，这套书力争囊括土木工程涵盖的各个次级学科和专业；专辑，就是以某个特定内容编辑成册的图书，每本书的内容可以是某种结构的分析与计算，某个设计施工方法，一种安装工艺流程，某种监测判定手段，一个特定的行业标准，等等，均可独立成册。

这套丛书不称其为“手册”而命名为“系列专辑”，原因之一是一些特定专题不易用手册的方法编写；原因之二是传统的手册往往“大而全”，书厚且涉及的技术领域多，而任何一个工程技术人员在某一个阶段所从事的具体工作又是针对性很强的，将几个专业甚至一个项目的某个阶段集中在一本“大而全”的手册势必造成携带、查阅上的不方便，加之图书的成本过高，编写机构臃肿，组织协调困难，出书及再版周期过长，以致很难反映现

代技术飞速发展、标准规范规程更新速度太快的现实。考虑到这些弊端，这套系列专辑采用小开本，在选题上尽量划分得细一些，视专业、行业、工种甚至流程的不同，能独立成册的绝不合二为一，每本书原则上只讨论一个专题，根据专题的性质和特点有的书名仍冠以“手册”两字。

这套系列专辑的编写严格贯彻“新颖性、实用性、科学性”三大原则。

新颖性，就是充分反映有关新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法，老的、过时的、已退出市场的一律不要。体现强劲的时代风貌。

实用性，就是避免不必要的说理和冗长的论述，尽可能从实用的角度用简洁的语言以及数据、表格、曲线图形来表述；深入浅出，让人一看就懂，一懂能用；不是手册，胜似手册。

科学性，就是编写内容均有出处，参考文献除国家标准、行业标准、地方标准必须列出以外，尚包括引用的论文、专著、手册及教科书。

这套系列专辑的读者对象是比较宽泛的，它包括大专院校师生，土木工程领域的管理、设计、施工人员，以及具有一定阅读能力的建筑工人。它既可作为土建技术人员随身携带及时查阅的手册，又可选作大专院校、高职高专的教材及专题性教辅材料。

崔京浩

2005年10月于清华园

崔京浩，男，山东淄博人。1960年清华大学土建系毕业，1964年清华大学结构力学研究生毕业，1986~1988年赴挪威皇家科学技术委员会做博士后，从事围岩应力分析的研究。先后发表论文150多篇，编著专业书4本，参加并组织编写巨著《中国土木工程指南》，任编辑办公室主任，并为该书撰写绪论；主持编写由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”和“简明土木工程系列专辑”，并任主编。曾任清华大学土木系副系主任，现为中国力学学会理事，《工程力学》学报主编，享受国务院特殊津贴。

# 前 言

防护工程自古以来就与战争相关，既是战时抵御外敌侵略和各种空袭，保障军队指挥控制的稳定与安全，以及保存有生力量、武器装备和人民生命财产的重要物质基础和防御手段；又是国家防御和威慑力量的重要组成部分，历来受到各国的重视。

以 20 世纪 90 年代初发生的海湾战争为代表的高技术局部战争表明，一场以高技术常规武器为先导、以信息化技术为核心的新军事变革正在世界范围内兴起。信息化战争条件下的高技术侦察监视、制导武器的精确打击、破坏威力巨大的钻地武器攻击以及实时的打击方式，使防护工程面临着严峻的威胁，也对防护结构计算理论和设计方法提出了极大的挑战。

防护工程是土木工程学科下的一个重要学科，面对核武器和常规武器等的严峻威胁，近年来也发生了深刻变化，一方面是核武器防护技术的逐步成熟，另一方面是常规武器防护技术取得了不少成果。

本书系统介绍了地下防护结构设计和计算的基本原理、一般原则与方法。重点阐述了地下防护结构的基本知识，武器作用效应与结构防护原则，空气冲击波，岩土中爆炸波，地下防护结构上的动载，地下防护结构动力分析，结构材料和构件的动力性能，地下防护结构设计的一般要求与步骤，防空地下室结构设计，以及防护门、门框墙等口部结构设计等内容。同时，针对当前大规模城市地下空间开发，重点介绍了结合民用建筑修建的防空地下室等地下防护结构。本书是在钱七虎院士、陈肇元院士等老一辈学者编著的教材基础上，纳入了作者近年来的教学科研成果，以及国内外最新的研究成果和动态而完成。

本书深入浅出，实用性强，既具有系统的理论知识，又包含

大量工程实用的计算与设计的图表曲线。

本书由方秦、柳锦春编写。由于编写时间仓促及编者水平有限，书中不当之处在所难免，恳请各位读者、同行批评指正。

**编 者**

2009年9月



# 目 录

总序

前言

第 1 章 绪论	1
第 1 节 防护工程与防护结构	1
第 2 节 地下防护结构面临的主要威胁	4
第 3 节 地下防护结构的抗力要求	7
第 4 节 地下防护结构类型	8
第 5 节 地下防护结构设计的原则	18
第 2 章 武器作用效应与结构防护原则	19
第 1 节 常规武器及其工程破坏效应	19
第 2 节 核武器及其工程破坏效应	26
第 3 节 地下结构防护原则	36
第 3 章 空气冲击波	39
第 1 节 概述	39
第 2 节 基本原理	45
第 3 节 空气冲击波的反射	50
第 4 节 核爆空气冲击波	55
第 5 节 化爆空气冲击波	61
第 6 节 空气冲击波在通道中传播	65
第 4 章 岩土中爆炸波	72
第 1 节 概述	72
第 2 节 一维平面波	74
第 3 节 核爆空气冲击波产生的土中压缩波	93
第 4 节 化爆产生的土中压缩波	107
第 5 章 地下防护结构上的动载	115

第 1 节	概述 / 115	
第 2 节	土与结构相互作用的基本理论 / 119	
第 3 节	核爆条件下土中结构上动载的计算分析 / 122	
第 4 节	化爆条件下土中结构上动载的计算分析 / 135	
<b>第 6 章</b>	<b>地下防护结构动力分析</b> .....	<b>159</b>
第 1 节	概述 / 159	
第 2 节	结构构件的等效单自由度分析方法 / 167	
第 3 节	等效静载法 / 202	
第 4 节	结构构件的动内力与动反力的确定 / 212	
<b>第 7 章</b>	<b>结构材料和构件的动力性能</b> .....	<b>228</b>
第 1 节	结构材料的动力性能 / 229	
第 2 节	钢筋混凝土受弯构件的动力性能 / 234	
第 3 节	钢筋混凝土受压构件的动力性能 / 244	
第 4 节	钢构件的动力性能 / 246	
第 5 节	钢筋混凝土叠合板的动力性能 / 248	
<b>第 8 章</b>	<b>地下防护结构设计的一般要求与步骤</b> .....	<b>253</b>
第 1 节	地下防护结构设计极限状态 / 253	
第 2 节	地下防护结构设计的特点 / 255	
第 3 节	地下防护结构设计的一般规定 / 259	
第 4 节	等效静载法设计步骤 / 261	
第 5 节	截面设计与构造要求 / 265	
第 6 节	地下防护结构设计步骤 / 268	
<b>第 9 章</b>	<b>防空地下室结构设计</b> .....	<b>270</b>
第 1 节	概述 / 270	
第 2 节	作用在结构上的荷载 / 275	
第 3 节	荷载组合 / 281	
第 4 节	内力分析及截面设计 / 284	
第 5 节	构造要求 / 289	
<b>第 10 章</b>	<b>防护门、门框墙等口部结构设计</b> .....	<b>294</b>
第 1 节	防护门设计 / 294	

第2节 门框墙设计/ 302

第3节 其他口部构件设计/ 309

参考文献..... 315

出版者的话

# 第1章 绪论

## 第1节 防护工程与防护结构

### 1.1 防护工程

防护工程是一类比较特殊、具有预定防护功能的工程构筑物，是防护建筑与结构以及为保证完成工程所担负的战时职能的其他系统（如通风空调、给排水、发供电、防毒、防辐射、防电磁脉冲、工程伪装及隔震等系统）的总称。通常，防护工程应能抵抗预定武器的杀伤破坏作用。

从服务对象来讲，防护工程可分为以下两大类：

(1) 为保障军队作战使用的防护工程，称为国防工程，又称为军事防护工程。例如，各类指挥通信工程、飞机洞库、潜（舰）艇洞库、导弹发射井、后方仓库洞库、阵地工程、人员掩蔽工程以及武器装备、物资掩蔽库等。国防工程根据重要性和用途可划分为若干等级。

(2) 用于城市防空袭的人民防空工程，简称为人防工程。例如，结合民用建筑修建的各类防空地下室等。人防工程按功能和用途分为五类，分别是人防指挥工程、医疗救护工程、人防专业队工程、人员掩蔽工程以及配套工程等。人防工程根据全国各省、自治区、直辖市和地区的战略地位、战备性质和功能用途等划分为若干等级。

大多数国防工程处于边防、海防或纵深要地，保密要求高，十分注重军事战备效益。人防工程则一般位于城市市区，大多数实现平战结合。许多国家历来高度重视人防工程建设，长期在人

口密集的城市修建人防工程，并将其作为和平时期的的一项重要任务。《中华人民共和国人民防空法》也明确规定：“人民防空实行长期准备、重点建设、平战结合的方针，贯彻与经济建设协调发展、与城市建设相结合的原则”。将城市建设特别是地下空间开发与人防建设结合起来的人防工程，不仅战时可用来掩蔽人员和物资等，平时还能为城市人民生活和经济建设服务，实现战备效益、社会效益和经济效益的统一。

从工程技术的角度而言，国防工程与人防工程在技术内容上是基本一致的。

显然，防护工程与民用建筑工程的根本区别在于它主要应用于军事，且随着战争的发展而发展。古今中外的战争史表明，防护工程是国防力量的重要组成部分，是国家生存与发展的安全保障。战时它是抵御外敌侵略和各种空袭，保障军队指挥控制的稳定与安全，以及保存有生力量、武器装备和人民生命财产的重要物质基础和防御手段。防护工程的规模和水平是国防实力和国防力量的重要体现。长期以来，防护工程在遏制外敌侵略、巩固国防和保障国家安全方面发挥了重要的作用，成为国家重要的威慑力量。在信息化战争条件下，随着武器装备的发展以及打击手段和方式的变化，防护工程的建设面临着诸多新的挑战，例如高技术侦察监视、高精度打击、深钻地攻击等威胁，需要不断发展新的防护技术，提高防护工程的建设水平，增强防护效能，以适应未来信息化战争的要求。

## 1.2 防护结构

防护结构是指能够抵抗预定杀伤武器破坏作用的工程结构，这是比较狭义的概念。在广义上，防护结构还泛指可能受到偶然性冲击和爆炸作用的结构物。由于地下工程防护效能要优于地面建筑，因此防护工程一般建于地下或半地下，此时防护工程结构又称为地下防护结构。

防护结构通常包括工程结构（简称为防护结构）和防护设备

与设施（防护门、防护密闭门、消波系统等）。防护工程结构与普通地下工程结构相比，在设计上要充分考虑武器的冲击、爆炸等效应的作用。

### 1.2.1 防护工程结构

根据部位和功能，防护工程结构可分解为口部与主体两大部分。主体是保障预定使用功能实现的核心部位。主体与地表面相连通的部分称为口部，主要供人员、车辆、武器装备与物资等进出使用以及通风、排烟等使用。口部与主体结构以及上方的覆盖层能抵抗预定武器的杀伤破坏作用并设有相应的防护设备。口部结构的主要组成部分是口部通道，包括门框墙、临空墙以及竖井等。大部分甚至全部的防护设备都设置在口部。口部的断面尺寸通常小于主体通道或房间的断面尺寸，但有时两者相同。

通常，为增强防护能力，防护工程一般位于地表以下，工程结构上方覆有土壤、岩石以及混凝土等其他覆盖材料。我们把结构上方覆盖的、能起到防护作用的岩石、土壤或其他覆盖材料称为防护层。防护层按成因分为人工防护层和自然防护层。结构施工后回填、人工设置的防护层称为人工防护层。施工过程中未被扰动或没有人工设置的防护层称为自然防护层。

### 1.2.2 防护设备与设施

防护工程口部往往会设置防护设备与设施，如防护门、防护密闭门、密闭门、活门以及消波系统等，主要用来阻挡冲击波、毒剂和放射性物质等从孔口进入主体，或限制泄漏进入工程内部的冲击波压力小于人员或设备的容许值。

能阻挡冲击波但不能阻挡毒剂等通过的门称为防护门；与之功能相反的门称为密闭门；两种功能均具备的门称为防护密闭门。

活门是防爆波活门的简称，是用于通风或排烟口的防冲击波设备。

一般防护工程多采用小型防护设备。小型防护设备已有定型产品，在设计中只需正确选用即可。一些特殊或大型防护设备，例如飞机洞库、舰艇洞库、后方仓库、导弹发射井的防护门或防

护盖板等则需专门设计。

防护结构是防护工程抵抗武器破坏效应和确保人员生存能力的主要依托。武器产生的侵彻爆炸效应直接或通过岩土等防护层介质作用到防护结构上，针对不同等级的防护工程，防护结构要分别依据设定的抗力等级进行计算与设计。防护结构计算与设计是防护工程建设的重要环节，了解和掌握武器破坏效应、爆炸冲击荷载确定、防护设计原理以及结构抗爆设计计算方法，是提高防护结构设计能力和水平的基础。

当然，防护工程的生存能力，不仅仅取决于防护结构的抗力，在很大程度上还与工程地域的防护配置、伪装措施、保密程度等密切相关。也就是说，防护结构抗力相同的工程，由于环境条件的不同，其生存概率可能有很大的差异。因此，在防护工程建设时，不能一味地追求防护结构的高抗力，单纯地依靠防护结构抗力来提高工程的生存能力并不是最有效和最经济的做法，而应当讲究各种条件的相互协调和匹配。

## 第 2 节 地下防护结构面临的主要威胁

地下防护结构面临的主要威胁有常规武器、核武器、生化武器以及其他偶然性冲击爆炸作用。

### 2.1 常规武器

20 世纪 50~80 年代初，防护工程界的研究目标主要是核武器的爆炸破坏效应及其防护，对炮航弹等常规武器的爆炸破坏效应研究不够重视。因为常规武器要达到预想的破坏效应必须要进入或靠近目标爆炸，这一点对非精确制导常规弹药来说很难做到。例如，在第二次世界大战中，美军向面积仅有  $20\text{km}^2$  的硫磺岛投掷航弹 10650t，实际上只破坏日军工事的  $1/5$ 。而核武器与常规武器就不一样，核武器有着巨大的摧毁能力，它不需要靠近目标爆炸。例如，广岛、长崎的原子弹爆炸使两座城市的大部

分瞬间变为一片废墟，对地下防护结构威胁同样巨大。但是，随着国际形势的变化以及军事高技术的发展，人们逐渐认识到由于核武器过于巨大的毁伤能力及其长期的生态环境效应，使它难以在战争中实际使用。核武器的主要作用是“威慑”，其实际使用受到战争目的的有限性等多种因素的限制。而高技术常规武器在现代战争中的地位和作用却不断提高，以其精确打击能力，既能最有效地打击重要目标，又能限制附带毁伤，特别适合于实现有限的战争目的，越来越受到各个国家的重视。20世纪90年代以来发生的几场高技术局部战争表明，未来的战争形式主要是运用大量的精确制导武器，在高技术侦察、电子战条件等信息化条件下，实施以空中打击为主要作战形式的核威胁条件下的高技术局部战争。

精确制导武器的应用，使空袭重要目标由面积轰炸发展为远距离精确攻击，提高了武器毁伤效能，对防护结构提出了更高的要求。据有关统计，第二次世界大战期间，大约需空投900枚炸弹才能摧毁一个重要目标。越南战争期间，美军摧毁一个重要目标，炸弹使用数量下降到300枚左右。海湾战争期间，美军大约平均2枚精确制导武器就摧毁一个重要目标。海湾战争中，多国部队使用的精确制导弹药仅占所投射弹药总量的8%，而摧毁的目标数占伊拉克被毁战略和战术目标总数的40%。科索沃战争中，以美国为首的“北约”部队使用了2万多枚炸弹和导弹，其中8000多枚属于精确制导弹药，占全部武器弹药的35%，摧毁的目标数量占“南联盟”被毁目标总数的74%。美军在阿富汗战争使用的1.2万枚炸弹中，有6700多枚是精确制导炸弹，占总数的56%。在伊拉克战争中，美军主要使用巡航导弹、激光制导炸弹、卫星制导的联合直接攻击弹药等精确制导弹药，精确制导弹药的比率达68%，是历次战争中最高的。在未来信息化战争中，精确制导武器将继续扮演重要角色。

此外，常规武器除了命中精度的大幅提高以外，其侵彻爆炸破坏能力也越来越强。例如，在海湾战争中首次使用的“地堡克



星” GBU—28 型激光制导钻地弹，可穿混凝土 6m，穿土 30m。因此，对于过去我们认为仅面临核武器等战略武器打击的防护结构，其遭受常规武器精确打击的可能性越来越大。高技术常规武器已成为防护结构面临的最现实的威胁。

## 2.2 核武器

在肯定高技术常规空袭是最现实威胁的同时，核武器的威胁也不能完全排除，毕竟世界上还存着庞大的核武器库，主要核国家仍把核武器作为其国家安全的基石，并继续进行新型核武器的研究。一些周边国家也在加速发展核武器，进行核武装。显然，在可以预见的阶段内，核威胁不能被完全排除。因此，防护结构要考虑到核武器的毁伤破坏作用。

## 2.3 生化武器

生化武器是化学武器和生物武器的统称。

毒剂弹通常称为化学武器。军用毒剂可分为神经性、糜烂性、全身中毒性、窒息性和刺激性等毒剂。化学武器具有杀伤威力大、中毒途径多、作用时间长、价格低廉及不破坏建筑物和武器装备等特点，是一种大规模杀伤性武器。随着科学技术的发展以及二元化学武器和“超毒性”毒剂的出现，化学武器在战场上仍具有重要地位。

生物武器又称为细菌武器。它由生物战剂和施放装置两部分组成。生物战剂包括致病微生物及其产生的毒素。生物武器的杀伤力是靠散布生物战剂，使人员、牲畜和农作物致病死亡，以达到大规模杀伤对方有生力量和扰乱、破坏其后方的目的。生物武器是一种战略武器，在特定条件下某些生物战剂也可用于战术目的。以武器相对重量比较，生物武器造成的伤亡率不亚于核武器。

生化武器虽然也能对防护工程内的有生力量造成伤害，但对防护结构的强度影响不大，防护结构对生化武器的防护方法主要是保障防毒密闭性能以及在口部采用防护密闭设备和设施。一般