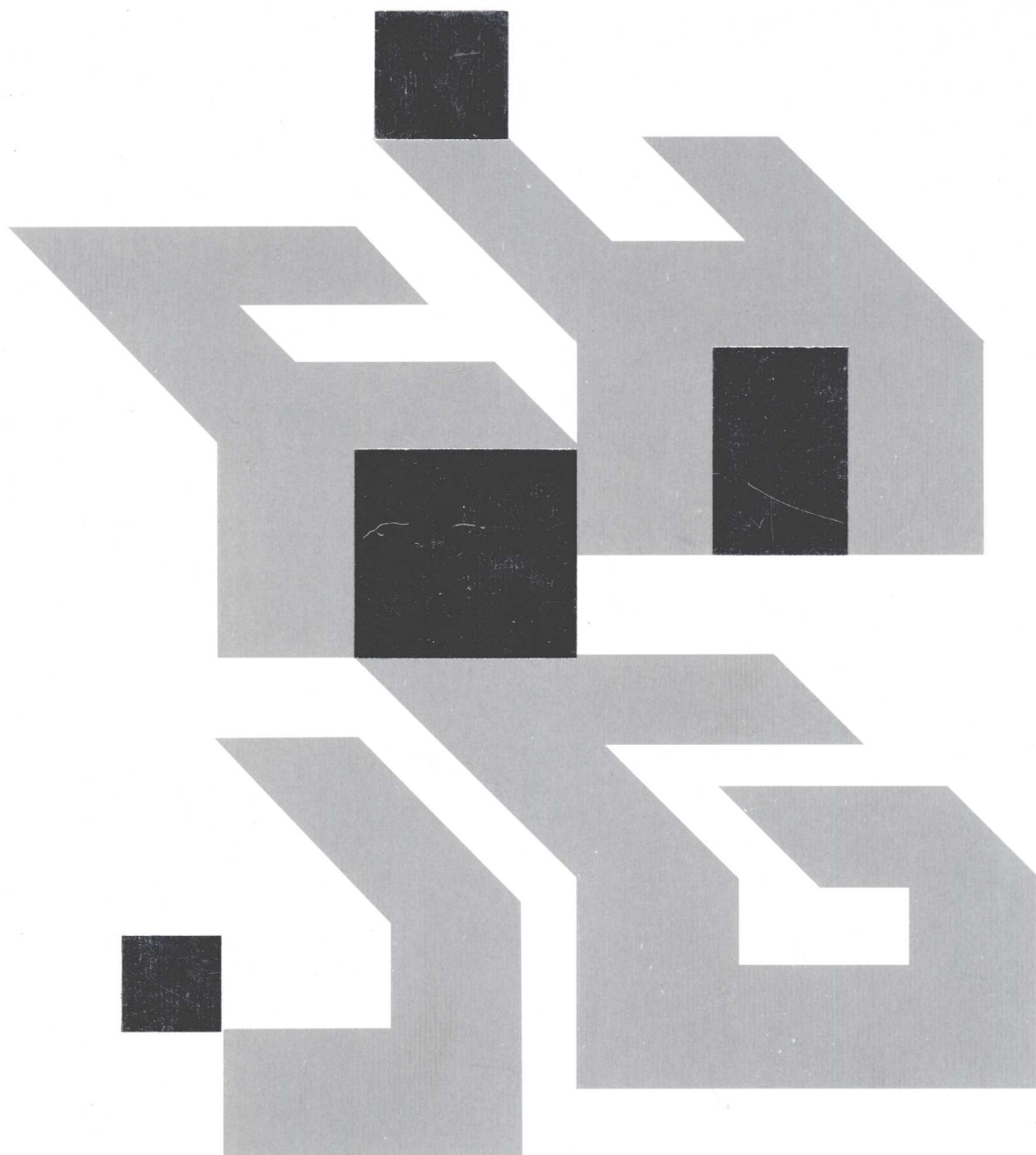


CALCULATION THEORY FOR ADVANCED PROTECTIVE STRUCTURES

高等防护结构计算理论

钱七虎 王明洋 著

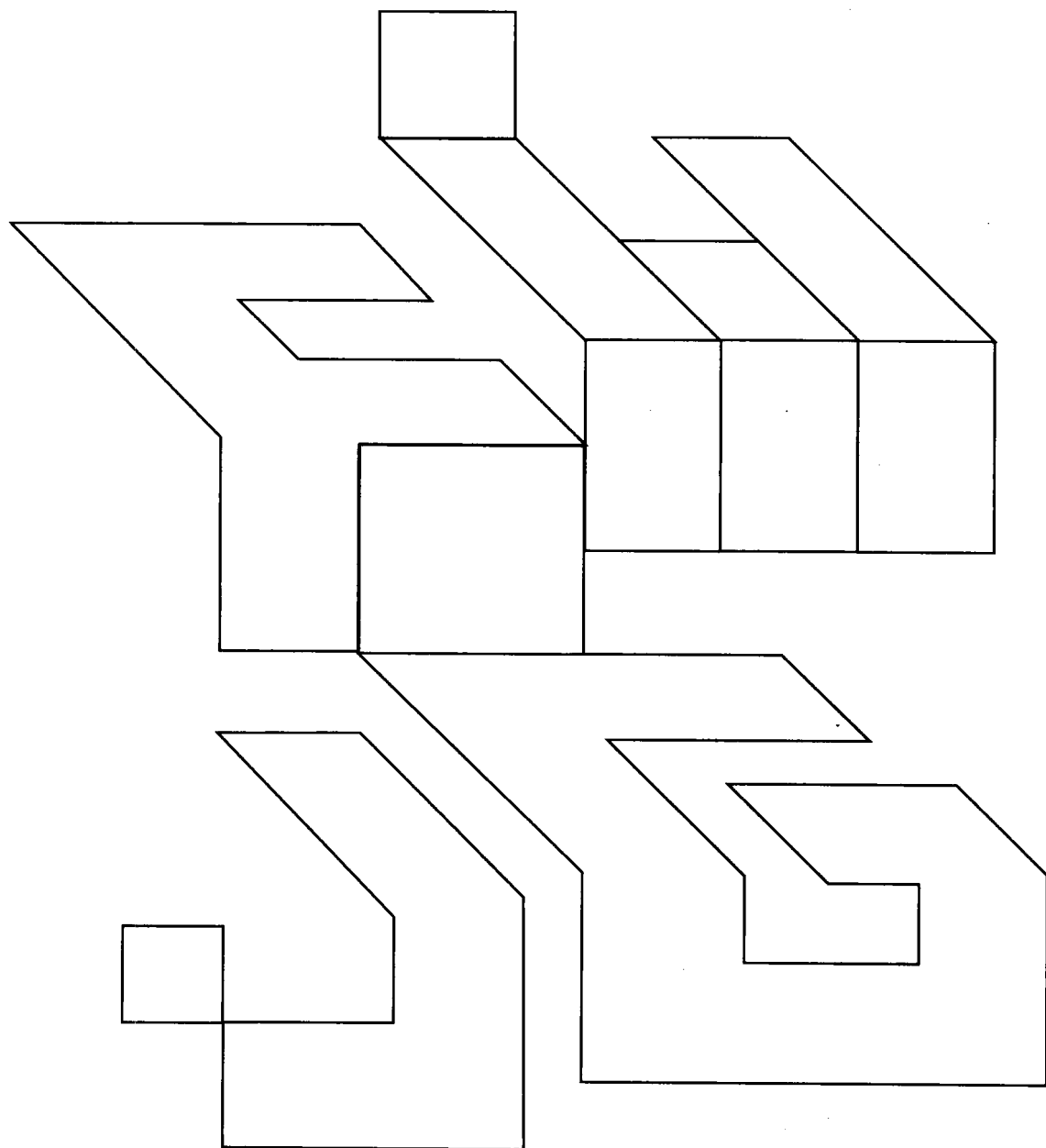
凤凰出版传媒集团
江苏科学技术出版社



高等防护结构计算理论

钱七虎 王明洋 著

凤凰出版传媒集团
江苏科学技术出版社



图书在版编目(CIP)数据

高等防护结构计算理论 / 钱七虎, 王明洋著. —南京: 江苏科学技术出版社, 2009. 10
ISBN 978-7-5345-6747-6

I. 高… II. 钱… III. 防护结构—结构计算 IV. TU352.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 092816 号

高等防护结构计算理论

著 者 钱七虎 王明洋

责任编辑 刘屹立 宋 平

责任校对 郝慧华

责任监制 曹叶平

出版发行 江苏科学技术出版社(南京市湖南路 1 号 A 楼, 邮编: 210009)

网 址 <http://www.pspress.cn>

集团地址 凤凰出版传媒集团(南京市湖南路 1 号 A 楼, 邮编: 210009)

集团网址 凤凰出版传媒网 <http://www.ppm.cn>

经 销 江苏省新华发行集团有限公司

照 排 南京展望文化发展有限公司

印 刷 南京通达彩印有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 32

插 页 4

字 数 770 000

版 次 2009 年 10 月第 1 版

印 次 2009 年 10 月第 1 次印刷

标准书号 ISBN 978-7-5345-6747-6

定 价 120.00 元(精)

图书如有印装质量问题, 可随时向我社出版科调换。

致 读 者

社会主义的根本任务是发展生产力，而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代，科学技术的进步已成为经济发展、社会进步和国家富强的决定因素，也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步、推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策，进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科教兴省”的决定，江苏科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、江苏省委宣传部、江苏省科学技术厅（原江苏省科学技术委员会）、江苏省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下，经江苏省人民政府批准，由江苏省科学技术厅、凤凰出版传媒集团（原江苏省出版总社）和江苏科学技术出版社共同筹集，于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”，用于资助自然科学范围内符合条件的优秀科技著作的出版。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的持续运作，能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件，并通过出版工作这一平台，落实“科教兴省”战略，充分发挥科学技术作为第一生产力的作用，为建设更高水平的全面小康社会、为江苏的“两个率先”宏伟目标早日实现，促进科技出版事业的发展，促进经济社会的进步与繁荣做出贡献。建立出版基金是社会主义出版工作在改革发展中新的发展机制和新的模式，期待得到各方面的热情扶持，更希望通过多种途径不断扩大。我们也将实践中不断总结经验，使基金工作逐步完善，让更多优秀科技著作的出版能得到基金的支持和帮助。

这批获得江苏省金陵科技著作出版基金资助的科技著作，还得到了参加项目评审工作的专家、学者的大力支持。对他们的辛勤工作，在此一并表示衷心感谢！

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

前言

防护结构设计的目的是抵抗武器弹药的爆炸效应和弹头的侵彻效应,以及抵抗事故型偶然爆炸效应和撞击效应。爆炸荷载和侵彻及撞击荷载的共同特点是作用强度大和作用时间短,为瞬息或短时强动载。它们作用的特点之一是除了对结构产生整体作用外,还对结构产生局部破坏。简要概述防护结构在爆炸和冲击作用下的基本特点和近年来在该领域的理论最新成果构成了第1章内容。

防护结构材料,无论是钢筋或混凝土,都具有应变速率特性,即在快速动力加载下,其变形和破坏特性与静力加载下有很大的不同,特别是其破坏强度有很大的提高,为了发挥其潜力,需要对材料的动力特性进行深入研究;防护结构的设计中常常只考虑抵抗一次性的爆炸荷载或撞击和侵彻效应,只要求不引起其内部的人员伤亡和设备损害,所以防护结构设计计算允许产生很大的塑性变形和一定的局部破坏,因此,钢筋混凝土结构动力设计计算的最重要的问题之一是根据结构的使用特点和要求拟定其极限状态,从而确定结构极限变形的标准。上述内容构成了第2章。

长期以来,侵彻爆炸效应的计算都是基于能量法的原理和总结试验经验所建立的试验公式进行的。近年来,冲击爆炸效应的理论有了很大的改观,表现在基于“短波”和“弱波”理论的侵彻和爆炸效应计算理论有了明显的进步。本章的侵彻效应计算理论,能够用以初步解释试验公式中各种试验系数的物理机理。上述内容构成了第3章。

目前考虑瞬时和短时强动载作用下钢筋混凝土结构变形特点的计算方法,在某种程度上已基本满足设计需要。但是其应用实践表明,根据计算确定的承载能力在大多数情况下明显低于建筑结构真实动力试验得出的实际值。究其原因,主要是在计算时将建筑物分解成独立的结构构件后,仅对每一种构件进行动力计算,而没有考虑建筑物结构构件间的相互作用。在设计时既考虑上部构件的弹性和塑性,又进一步研究配置在下部的结构和土基础的变形性和结构支承的柔性对上部构件的影响,构成了第4章内容。

抵抗事故型爆炸荷载与抵抗武器作用的防护结构动荷载不同,作为主要设计荷载,其平时作用的静荷载已引起结构很大的变形并产生裂缝,因此在设计计算时,不能忽略不计,故设计时假定静荷载仅引起结构的弹性变形,而动荷载只产生结构的塑性变形。静荷载作用

下弹性变形的计算原理和方法为大家所熟悉,事故型爆炸动荷载下塑性变形计算的原理、方法和计算公式与第4章所述的武器弹头爆炸动荷载的计算基本相同,故在本书中对此不再重述。本书仅研究事故型撞击作用下结构的计算原理。事故型撞击对结构作用分成局部作用和整体作用,冲击局部作用在冲击区引起局部变形和破坏,局部变形通常发生在结构整体变形之前或其初始阶段,冲击整体作用与结构的整体变形相联系。利用在局部作用时发生的接触规律可以建立冲击的局部作用和整体作用之间的联系。撞击效应中局部破坏作用的计算,由于包含了复杂的波动过程,精确的理论计算十分困难,因此计算局部破坏的震塌和贯穿一直采用试验公式。近年来,对于核反应堆的钢筋混凝土防护壳,拟定了考虑纵、横向钢筋影响的贯穿厚度的实用计算方法。上述内容构成了第5章。

近年来,常规化爆武器爆炸效应已成为防护结构防护的重点,化爆效应区别于核爆效应的一个主要点是其压力作用时间的短暂,如果定义核爆荷载为短时动荷载,则可定义化爆荷载为瞬时动荷载。瞬时动荷载作用下结构响应的特点是结构反弹严重以及结构易产生剪切破坏。因此,瞬时动荷载作用下结构动剪力的分析和确定就显得特别重要,该内容的研究构成了第6章。

如前所述,防护结构的实际承载能力总是高于按目前计算理论所分析确定的值,另一个主要原因在于在瞬时或短时动荷载作用下,钢筋混凝土梁、板结构中出现的面力效应,这种面力使构件的抗弯强度提高,从而提高了结构的承载力。研究结构抗力达到峰值强度后的面力效应及应变软化段影响下的结构静力和动力的计算,构成了第7章。

结构的爆炸试验表明钢筋混凝土结构除了常见的弯曲破坏之外,还发生直剪破坏和弯剪破坏。为了研究破坏模式上的差异,必须进行爆炸荷载作用下结构破坏形态的精细数值分析或数值模拟。在精细数值分析中,首先要研究结构材料的应变速率效应。爆炸波直接作用下结构计算理论的另一个重要发展就是在材料本构关系中考虑结构材料应变速率效应下的结构动力分析。考虑材料应变速率效应时的结构动力计算有两种途径:一种是在工程实用计算和设计中,假定在强动荷载作用时,结构材料的应力-应变关系仍然服从线性关系,不考虑应变速率的影响,考虑的仅是相应于某一应变速率下材料极限强度的改变,即动力极限强度(动极限应力),这种途径和模式已在第2章中进行介绍;另一种途径是在动力计算时,应变速率进入结构材料的本构关系,本书就是考虑应变速率效应进入材料本构关系后结构变形和破坏的数值模拟。其次,为了分析研究破坏模式,必须抛弃建立在工程弯曲破坏理论上的平面假设,而采用 Timoshenko 梁理论和 Mindlin 板理论,即考



虑剪切变形和转动惯性影响。最后,在数值分析中还要进行裂缝的处理和模拟以及结构软化段问题的处理。以上内容构成了本书的第8章。

岩土中爆炸波作用下浅埋结构的计算近年来有了长足的进步,“三系数法”已摒弃不用。除了各种离散化方法以外,美国的防护工程文献中关于爆炸应力波作用下土与结构相互作用的工程实用计算,开始主要采用的是“拱效应”计算,稍后在一维波相互作用原理基础上建立了结构顶板上的动压力计算方法,但是此时没有考虑在相互作用过程中地表卸载的影响、结构变形的影响,以及土中结构上复土与地基土波阻抗不同的影响,美国的上述计算理论是在前苏联相互作用理论建立之后。前苏联在防护工程文献中,较早地运用一维波理论来研究土与结构的相互作用问题,给出了考虑结构变形影响、结构沉陷影响以及地表卸载影响下的相互作用系数曲线,我国则以著者所带领的研究群体,深入研究了在复土层中的由结构卸载以及地表卸载引起的各种卸载波的发生和发展,并将相互作用理论推广到层状地基以及包括成层式结构等多种常用结构形式。该理论解释了试验中发现的作用在土中浅埋结构上的荷载在不深不浅处为最大的现象。上述内容构成了第9章。

对于三相饱和土来说,试验表明,其含气量对于爆炸波在三相饱和土中传播时衰减的影响,以及对于作用在土中结构上的荷载大小具有显著影响。因此,在本书中,突出了在三相理论的基础上,含气量对于爆炸波在自由场传播以及障碍物和结构相互作用影响的研究。上述内容构成了第10章。

由于爆炸效应引起的岩土介质的自由场运动与地下结构的相互作用,使得地下工程发生强烈震动,从而导致了地下结构内人员受伤与设备受损。因此,预测地下结构爆炸冲击震动的大小以及采取相应的抗震、隔震措施,对地下工程完成预定的功能十分必要。这构成了第11、12章内容。

本书由钱七虎编写第1章和第9章,钱七虎、王明洋编写前言和第5章,王明洋编写第2、3、4章,方秦编写第6、8章,郭志昆编写第7章,赵跃堂编写第10章,严东晋编写第11、12章。全书最后由钱七虎修改、补充和定稿。

本书从结构计算理论发展的角度,重点介绍了著者认为对当前防护结构计算以及对未来防护工程计算发展将起较大影响的新理论研究成果。限于水平以及时间的仓促,定有很多缺点和错误,敬请批评指正。

著者

2009年6月

目录

第1章 绪论

- 002 1.1 防护工程和对防护工程的破坏武器简介
- 003 1.2 武器的侵彻与爆炸效应
- 003 1.3 事故型的偶然爆炸效应和偶然撞击效应
- 004 1.4 防护结构和防护结构材料
- 004 1.5 防护结构的计算特点
- 005 1.6 防护结构计算理论发展及本书内容简述

第2章 钢筋混凝土材料的变形与强度准则

- 008 2.1 材料的变形性质
- 008 2.1.1 钢筋的本构模型
- 010 2.1.2 钢筋的动力特性
- 012 2.1.3 混凝土的本构模型
- 015 2.1.4 混凝土的动力特性
- 019 2.2 钢筋与混凝土的粘结力
- 021 2.3 结构极限状态类型及设计标准
- 021 2.3.1 极限状态类型
- 021 2.3.2 确定性设计准则
- 024 本章参考文献

第3章 结构抗侵彻局部作用计算

- 026 3.1 弹体对结构侵彻局部作用的宏观现象
- 032 3.2 混凝土中侵彻局部变形与破坏特点
- 033 3.2.1 广义剪切情况
- 034 3.2.2 广义压缩情况
- 039 3.3 半无限介质中侵彻计算方法
- 039 3.3.1 介质侵彻破碎区运动学关系
- 040 3.3.2 弹体表面阻抗分析
- 044 3.3.3 弹形系数及垂直侵彻深度计算
- 048 3.4 半无限介质中斜侵彻计算方法
- 048 3.4.1 基本概念与基本假设
- 049 3.4.2 不对称模型描述

- 050 3.4.3 弹体阻力计算
- 057 3.4.4 侵彻深度计算
- 059 3.5 半无限分层介质中的侵彻计算方法
- 060 3.5.1 第一层介质侵彻深度计算
- 060 3.5.2 第二层介质侵彻深度计算
- 061 3.6 钢筋混凝土贯穿系数的计算
- 066 本章参考文献

第4章 结构抗爆炸整体作用计算

- 068 4.1 概述
- 068 4.1.1 现状
- 069 4.1.2 结构动力分析引言
- 071 4.1.3 结构转化为有限自由度体系计算的方法
- 072 4.2 位于变形支承系上单自由度体系的计算
- 073 4.2.1 一般任意抗力体系
- 075 4.2.2 理想弹性抗力体系
- 078 4.2.3 线性强化弹塑性体系
- 080 4.2.4 刚塑性抗力体系
- 081 4.3 钢筋混凝土简支梁抗爆炸的动力计算
- 081 4.3.1 弹性阶段计算
- 088 4.3.2 塑性阶段计算
- 092 4.4 动支座钢筋混凝土梁抗爆炸的动力计算
- 092 4.4.1 动支座梁的计算模型
- 093 4.4.2 弹性阶段计算
- 098 4.4.3 塑性阶段计算
- 100 4.4.4 动反力的计算
- 101 4.4.5 算例及分析
- 107 4.5 钢筋混凝土梁系结构的动力计算
- 107 4.5.1 双构件计算方法
- 114 4.5.2 归结为动支座的计算方法
- 118 4.5.3 动力特性分析
- 122 4.6 动支座杆系结构的数值计算
- 122 4.6.1 拱式结构的计算模型
- 130 4.6.2 数值计算程序
- 133 4.6.3 动支座对梁结构的影响
- 136 4.6.4 动支座对拱结构的影响
- 142 4.6.5 钢筋混凝土结构程序的编制方法
- 145 4.6.6 算例及分析
- 149 本章参考文献

第5章 事故型冲击荷载作用下结构计算研究

- 152 5.1 引言



152	5.1.1	建筑工程和交通运输工程领域中发生事故型冲击的情况及其特征量值
152	5.1.2	冲击的概念、冲击荷载的特点和分类
153	5.2	事故型冲击作用下钢筋混凝土结构变形与破坏特性的试验研究
153	5.2.1	钢筋混凝土结构的局部破坏
154	5.2.2	钢筋混凝土梁的变形与破坏
157	5.2.3	钢筋混凝土柱的变形破坏试验研究
157	5.2.4	事故型冲击作用下板、壳的变形破坏特性
160	5.3	事故型冲击对结构的局部破坏计算
160	5.3.1	事故型冲击作用下冲击体对梁、板的侵彻破坏
161	5.3.2	事故型冲击作用下冲击体对板、壳的震塌和贯穿计算
163	5.3.3	事故型冲击作用下核反应堆钢筋混凝土防护壳防止冲切塞块震离的计算
166	5.4	事故型冲击作用下钢筋混凝土梁的整体动力响应计算
167	5.4.1	基于工程弯曲理论的拟弹性阶段计算
169	5.4.2	梁双刚片模型的塑性阶段动力计算
171	5.4.3	梁五刚片模型的塑性阶段动力计算
178	5.5	事故型冲击作用下钢筋混凝土柱的动力计算
180	5.6	事故型冲击作用下钢筋混凝土板的整体动力响应计算
180	5.6.1	冲击的局部破坏计算
180	5.6.2	弹性阶段计算
185	5.6.3	塑性阶段计算
189		本章参考文献

第6章 脉冲荷载作用下结构的动剪力分析方法

192	6.1	脉冲荷载作用下结构响应的特点
192	6.1.1	抗爆结构一般动力分析方法简介
193	6.1.2	脉冲荷载作用下结构响应的特点
196	6.2	梁板结构构件动剪力分析方法
196	6.2.1	梁的动剪力解析分析方法
215	6.2.2	板的动剪力解析分析方法
218	6.2.3	梁板动剪力 Biggs 简化分析方法
223	6.2.4	梁板动剪力解析方法计算结果与 Biggs 简化方法的对比分析
228	6.3	抗爆结构动剪力的实用分析方法
228	6.3.1	爆炸荷载作用下动剪力的计算
233	6.3.2	结构构件延性对动剪力的影响
240		本章参考文献

第7章 抗爆混凝土结构的面力效应

242	7.1	混凝土结构中的面力及其效应
242	7.1.1	结构中的面力
242	7.1.2	面力产生的条件
243	7.1.3	关于面力及其效应研究的回顾
247	7.2	考虑面力效应结构的抗力模型

247	7.2.1	概述
247	7.2.2	基本假定
248	7.2.3	基本方程
252	7.2.4	考虑面力的抗力模型
253	7.3	考虑面力效应钢筋混凝土结构的静力分析
253	7.3.1	基本方程和求解方法
254	7.3.2	应变空间中材料的本构关系模型
261	7.3.3	带有下降段的结构抗力曲线求解方法
266	7.4	考虑面力效应钢筋混凝土结构的动力响应
266	7.4.1	基本方程及其求解方法
268	7.4.2	算例
270		本章参考文献

第8章 爆炸冲击作用下结构应变速率效应 与破坏形态的数值分析方法

273	8.1	分层 Timoshenko 梁非线性动力有限元分析方法
273	8.1.1	应变速率型工程材料本构模型
277	8.1.2	Timoshenko 梁的基本理论
280	8.1.3	Timoshenko 梁有限元分析方法
284	8.1.4	典型算例
296	8.2	钢筋混凝土结构二维非线性动力有限元分析方法
296	8.2.1	二维受力状态下混凝土的本构关系
302	8.2.2	二维非线性动力有限元基本理论
305	8.2.3	材料和结构软化问题的处理
306	8.2.4	典型算例
311		本章参考文献

第9章 非饱和土中平面压缩波与 结构的相互作用

315	9.1	平面压缩波在障碍物上的正反射
316	9.2	无限深软土地基上刚性结构上的动荷载
316	9.2.1	突加恒定冲击波作用下刚性结构上的相互作用压力
323	9.2.2	突加线性衰减冲击波作用下刚性结构上的相互作用压力和动荷载
330	9.2.3	侧壁剪力对土中浅埋刚性结构动力反应的影响
349	9.3	双层介质地基上土中浅埋封闭矩形刚性结构的动荷载
349	9.3.1	结构底板反力的近似表达式
350	9.3.2	加载条件下结构运动微分方程及其解
352	9.3.3	卸载条件下作用在顶、底板上的相互作用动压力与动荷载
359	9.4	条形基础上土中浅埋敞开式矩形刚性结构的动荷载
360	9.5	突加线性衰减冲击波作用下成层式结构的动荷载
361	9.5.1	体系运动微分方程组的建立
364	9.5.2	用拉普拉斯(Laplace)积分变换法求解联立微分方程组



368	9.5.3	相互作用动压力、附加惯性荷载及结构计算动荷载
373	9.5.4	关于计算结果的几点分析讨论
378	9.5.5	成层式支撑结构的设计动荷载
379	9.5.6	成层式结构计算实例
382	9.6	基岩上的土中浅埋结构的动力计算
382	9.6.1	基本假设与基本方程
385	9.6.2	复土层中应力波的发展
387	9.6.3	结构运动的微分方程及其积分
389	9.6.4	数值计算的方法与结果
392	9.6.5	计算结果的分析
393	9.6.6	本方法的几点说明
394	9.7	核爆条件下浅埋结构刚柔计算选择的判别准则
394	9.7.1	浅埋框架结构三种计算模型的计算公式
401	9.7.2	刚柔模式的选取准则
403		本章参考文献

第 10 章 饱和土中介质与结构的相互作用

405	10.1	问题的提出
405	10.2	饱和土介质物理特性
405	10.2.1	饱和土的组成
406	10.2.2	饱和土三相指标的描述
408	10.2.3	饱和土中气体存在的方式
409	10.2.4	饱和土中气体对压缩性的影响
410	10.3	饱和土中爆炸波与障碍物相互作用的试验现象
410	10.3.1	平面爆炸波在固定障碍物上的反射规律
411	10.3.2	平面爆炸波在可动障碍物上的反射规律
412	10.4	爆炸波作用下饱和土动力模型研究
412	10.4.1	饱和土波传播宏观试验研究规律
412	10.4.2	饱和土本构关系描述
415	10.4.3	基本运动方程
417	10.4.4	数值分析过程中强间断问题的处理
419	10.4.5	理论计算与试验对比分析
420	10.5	饱和土中平面爆炸波与可动障碍物的相互作用
420	10.5.1	介质简化模型
421	10.5.2	爆炸波在可动刚壁上的反射
426	10.6	平面波作用下饱和土中结构上的荷载
426	10.6.1	饱和土中浅埋结构上的荷载
428	10.6.2	结构地基存在下卧层时对波在可动刚体上反射规律的影响
429		本章参考文献

第 11 章 爆炸冲击震动与仪器设备隔震

432	11.1	概述
433	11.2	爆炸冲击震动及参数计算

- 433 11.2.1 爆炸冲击震动基本概念
- 437 11.2.2 爆炸冲击震动参数计算
- 445 11.2.3 爆炸地震动强度的宏观表征及核查
- 448 11.3 浮放设备的失稳与抛离
- 448 11.3.1 浮放设备倾倒失稳分析
- 450 11.3.2 浮放设备抛离分析
- 452 11.4 固定仪器设备的失效与损伤
- 453 11.5 仪器设备的隔震标准
- 453 11.5.1 抛离失稳标准
- 453 11.5.2 最大加速度标准
- 453 11.5.3 冲击响应谱标准
- 459 本章参考文献

第 12 章 人员隔震及隔震系统分析

- 461 12.1 概况
- 462 12.2 人体动力学模型及响应
- 463 12.2.1 立姿模型及频响特性
- 463 12.2.2 坐姿模型及频响特性
- 464 12.2.3 人体抛离近似分析
- 468 12.3 人员爆炸冲击震动容许值
- 468 12.3.1 最大加速度法
- 469 12.3.2 实验曲线法
- 470 12.3.3 振动剂量法
- 471 12.3.4 振动剂量法在爆炸冲击震动中的应用
- 473 12.3.5 人员隔震标准
- 474 12.4 单层线性隔震系统的性能
- 475 12.4.1 线性阻尼隔震系统
- 477 12.4.2 粘性阻尼缓冲系统
- 478 12.5 双层线性隔震系统的性能
- 478 12.5.1 双层线性隔震系统的运动方程
- 479 12.5.2 类型 I 冲击震动作用下系统的响应
- 482 12.5.3 类型 II 冲击震动作用下系统的响应
- 484 12.6 线性隔震系统的可靠性
- 485 12.6.1 线性隔震系统的响应
- 486 12.6.2 两因素影响可靠性分析
- 488 12.6.3 三因素影响可靠性分析
- 490 12.7 隔震系统的非线性耦合振动
- 491 12.7.1 单层隔震系统的耦合振动方程
- 493 12.7.2 隔震系统的耦合振动响应
- 496 本章参考文献

第 1 章

绪 论

1.1 防护工程和对防护工程的破坏武器简介

防护工程历来是国家综合防御力量的重要组成部分。和平时期,它是国防力量的基础之一,具有较强的威慑作用,能参与遏制和延缓战争的爆发。对于处于劣势武器装备的一方,工程防护是使用最广泛和最有效的防护手段,也是整个防护系统中最重要的组成部分。在民用和工业建筑领域,为了防护事故型偶然爆炸效应和偶然撞击效应引起的破坏,也需要设计和构筑相应的防护结构。

对防护工程的破坏武器传统上主要包括炮弹、炸弹等常规武器以及原子弹、氢弹等核武器。现代高技术武器对防护工程构成了严重威胁:信息技术的不断发展使现代侦察手段更为先进,防护工程的隐蔽和伪装受到挑战;精确制导武器的命中精度不断提高,钻地武器日益发展,对防护工程的毁伤能力大为提高;新概念武器的发展对防护工程内的通信、指挥控制及内部设备产生新的威胁。破坏武器的发展历来推动着防护工程技术的发展,高技术武器的发展也必然促进现代防护工程的发展,这是客观的辩证的发展规律。

海湾战争、北约空袭南联盟战争以及伊拉克战争等近期几场高技术局部战争的实践表明:精心设计的防护工程在高技术局部战争中仍然具有极为重要的作用。

高技术武器中对防护工程威胁最大的是精确制导武器和钻地武器。对防护工程杀伤破坏的主要精确制导武器包括制导炸弹、战术空地导弹、战术巡航导弹、战术地地弹道导弹。其中使用最多的是制导炸弹。制导炸弹又称“灵巧炸弹”,按制导方式可分为激光制导、红外制导、电视制导,以及新型的全球定位系统(GPS)制导和惯性制导系统(INS)加装毫米波雷达末制导的炸弹。

钻地武器即钻地弹,是携带钻地弹头(侵彻战斗部)、能钻入目标深层引爆的弹药,它包括带有侵彻战斗部的巡航导弹(空射、舰射、陆射)、航空炸弹、制导炸弹、空地导弹、地地导弹等武器,可用以对机场跑道、地面加固目标、地下加固目标进行破坏。侵彻战斗部由内侵彻头、高爆炸药和引信组成,内侵彻头一般为高强度钢或重金属合金材料,引信通常为延时引信或智能引信。弹头装有控制、导引构件以实现精确打击。

按侵彻战斗部,可把钻地弹分为动能侵彻型钻地弹和复合弹头型钻地弹。动能侵彻型钻地弹依靠弹体飞行动能侵彻到目标深层爆炸以毁伤目标。复合弹头型钻地弹的复合弹头系统包括一个或多个安装在前部的空心弹药(预侵弹头)和后面的侵彻弹丸(又称随进战斗部或主侵彻战斗部),由弹头上的延时或智能引信引爆主侵彻战斗部的装药毁伤目标。

核武器利用重原子核链式裂变反应或轻原子核聚变反应,瞬间释放出巨大的能量,具有大规模杀伤毁伤效应或专门的毁伤作用。核爆炸的威力是以能量等效的梯恩梯重量来计算,称为 TNT 当量。核武器有空中爆炸、地面爆炸、触地爆炸和钻地爆炸等方式。“9·11”事件后,美国明确要求研制威力相对较小的、专门化的低当量核武器,以达成核武器实用化。美国发展低当量核武器的一个重要目的是有效摧毁地下指挥中心等深埋坚固防护工程,其具体目标是研制出爆炸当量在千吨级 TNT,可侵彻混凝土或坚硬岩石 18 m 以上的钻地核弹。钻地核弹对地下目标的毁伤作用,要比同样当量的核弹在触地爆时爆炸威力大数十倍。

对于防护工程,常规武器的毁伤破坏作用,包括炮弹、炸弹和导弹,是其战斗部(又称弹



头)高速冲击目标产生的侵彻效应和其内含的高爆炸药爆炸产生的爆炸效应。而核爆炸的毁伤破坏作用在空中爆炸、地面爆炸时主要是其空气冲击波及其感生的岩石、土壤中的应力波,在触地爆或钻地爆时主要是其核装药爆炸后所形成的直接地冲击。在工业和民用建筑领域,防护工程主要是用以抵抗事故型的偶然爆炸效应和事故型的偶然撞击效应。

1.2 武器的侵彻与爆炸效应

包括精确制导武器在内的炮弹、炸弹弹头,其运动速度一般达到每秒数百米,甚至千米以上,因此具有巨大的动能,在命中防护工程的防护结构后,都要侵入到结构中去。弹头的动能一方面消耗在弹壳的变形上,另一方面消耗在靶体材料,包括土壤、岩石等防护材料以及混凝土、钢筋混凝土等防护结构材料的变形和破坏上,同时产生热量。岩土和混凝土材料在弹着点附近发生分离和破碎,形成比弹头直径稍大的空洞,在空洞附近的材料中则产生裂缝。上述效应称为侵彻,形成的空洞称为侵彻漏斗坑。当靶材厚度不大时,弹头冲击则可能在正面形成变形、破坏的同时,在目标冲击点下方的背面发生开裂和材料的剥离和飞散,这种现象称为震塌。一般来说,弹头的高速动能主要被上述发生在弹着点附近的材料变形和破坏作用消耗掉,故称为侵彻局部作用,较小部分的能量则传输给防护结构的整体系统。

带有炸药的炮弹、炸弹在弹头侵入后发生爆炸,理想的引爆时间是在达到最大侵彻深度后发生爆炸。爆炸的局部破坏现象与侵彻局部破坏现象十分相似:在爆炸点附近,岩土等防护层材料以及混凝土等防护结构材料由于极大的爆炸应力产生分离和破碎,形成空洞,称为爆炸漏斗坑或爆炸空腔,在漏斗坑或空腔外的较大范围内材料开裂;在爆炸点下方目标背面材料开裂、剥离和飞散,形成爆炸震塌。爆炸的部分能量传输给结构的整体系统,形成结构的整体振动,产生弯曲或剪切变形甚至破坏。

1.3 事故型的偶然爆炸效应和偶然撞击效应

事故型的偶然爆炸效应是指瓦斯和易燃混合气体爆炸、粉尘爆炸、蒸汽锅炉爆炸、各种储气罐和储油罐的爆炸等。爆炸中爆轰产生的爆炸波以冲击波的形式在介质中传播,冲击波波阵面处介质的压力、密度和温度有一个突跃的改变,爆炸效应主要是以具有很高的压力的爆炸波作用在防护结构上,称为爆炸荷载。爆炸荷载的特点是其压力随时间变化,其基本参数是最大压力、升压时间和超压的持续时间。

事故型的偶然撞击效应发生在各种建设工程领域,包括核反应堆防护壳需要考虑空难事故中飞机的坠落,其坠落重量可达数十吨乃至上百吨,其撞击速度可达 $250\sim 300\text{ m/s}$;工业建筑中偶然爆炸事故以后上层结构破坏后构件飞散和坠落的撞击,飞散速度可达 100 m/s ,坠落速度可达 $15\sim 20\text{ m/s}$;海岸和河岸水工结构的平台下部以及桥梁的桥墩可遭遇到舰、船的撞击,其重量可达数十吨,速度可达 30 m/s ;其他还包括装配式建筑结构中装配过程中偶然的构件撞击等。上述撞击效应区别于武器侵彻效应的是撞击速度一般为中、低速,个别可达到高速,但也小于 300 m/s 。

1.4 防护结构和防护结构材料

防护工程依靠其结构材料和外围的岩土介质来抵抗杀伤兵器的破坏作用。防护工程依其结构(称为防护结构)埋设的深度分为地上结构、浅埋结构和深埋结构。

地上结构直接经受炮弹、炸弹的侵彻与爆炸作用以及核爆炸的空气冲击波作用。对于核爆炸产生的光辐射和早期核辐射作用,还必须进行核算,对前者要保证结构材料不致因温度过高而影响强度,对后者要保证足够的岩土防护层和结构厚度以防止内部人员受到辐射伤害。

浅埋结构包括防护结构表面与地面齐平的和埋入地表下几十厘米或几米的情况,它除经受炮弹、炸弹的侵彻与爆炸作用外,还经受核爆炸的直接空气冲击波(对齐地表结构顶面)或感生的地冲击作用(对地表下结构)。

深埋结构位于地下十米以上乃至几十米甚至几百米的岩、土层中。深埋防护工程的主体一般不直接经受炮弹、炸弹的侵彻与爆炸作用。核爆炸的空气冲击波对它也不构成威胁。但是其出入口的头部和颈部,由于外围岩土防护层不够,它经受的兵器的破坏作用如同地上结构或浅埋结构一样。为了破坏深埋结构,一般采用触地爆或钻地爆,而对于深埋于岩体中的防护结构主体,常规的钻地弹一般也无法破坏它,只能依靠正在研制中的钻地核弹,此时深埋防护结构将经受核爆炸的直接地冲击。

防护结构的材料主要采用高强度等级的混凝土和钢筋混凝土(包括柔性钢筋和劲性钢筋)以及块石砌体,由于钻地弹能深入普通钢筋混凝土 6 m 以上,所以正在研究极高强度等级的各种高性能混凝土,例如无骨料大掺量钢纤维并掺入特殊添加剂的 RPC 混凝土等,以形成阻止弹头侵彻的防护层,称为遮弹层,位于经受爆炸动载作用的防护支承结构之上。

由于全方位多波段战场侦察手段的突飞猛进,防护工程被发现的概率大为提高;由于精确制导武器的不断完善,防护工程被命中的精度已达到惊人程度;由于钻地武器的出现,对防护结构的破坏威力达到相当高度。于是,单纯依赖传统的土木工程结构的手段很难完成防护目标。近年来,工程防护必须走多学科综合集成的系统手段,已基本成为防护工程界的共识。限于篇幅,本书仍限于土木工程防护结构的范畴。

1.5 防护结构的计算特点

防护结构设计的目的抵抗武器弹药的爆炸效应和弹头的侵彻效应,以及抵抗事故型偶然爆炸效应和撞击效应。爆炸荷载和侵彻及撞击荷载的共同特点是作用强度大和作用时间短,为瞬息强动载或短时强动载。撞击和侵彻荷载的特点是除了对结构产生整体作用外,还对结构产生局部破坏。由于该共同特点,结构在爆炸和撞击荷载作用下变形速率大,比静荷载作用下的变形速率大几个数量级,因此必须考虑材料的应变速率效应,即考虑材料的动力强度的提高。

抵抗武器作用的防护结构,其设计抗力高,即结构设计用以抵抗的动荷载较静荷载其量值高很多,平时作用的静荷载(如覆土荷载、自重荷载等)引起结构的变形很小,不足以使结