

BAOPO DIZHEN
GONGCHENG JIEGOU DONGLI FENXI

爆破地震 工程结构动力分析

钱胜国 陈玲玲 吴新霞 张文煊 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

爆破地震 工程结构动力分析

钱胜国 陈玲玲 吴新霞 张文煊 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

动力分析法获得的爆破地震结构动力响应参数,是评价工程安全度较可信的指标。本书简述了爆破地震效应的基本概念、爆破地震动波的形态特性及爆破地震结构动力分析模型;介绍了反应谱理论的基本概念及爆破地震反应谱的计算方法;详述了动力分析的振型分解反应谱法及时程法。本书中提出的以地震动速度、位移激励的动力平衡方程来求解地震动响应的新方法,适合于计算爆破地震结构动力响应。

本书可供从事爆破工程的设计和科研人员参考,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

爆破地震工程结构动力分析/钱胜国等编著. —北京:
中国水利水电出版社, 2006

ISBN 7-5084-3973-2

I. 爆... II. 钱... III. 爆破—振动—结构动力分
析 IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 086269 号

书 名	爆破地震工程结构动力分析
作 者	钱胜国 陈玲玲 吴新霞 张文焯 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 9.25 印张 219 千字
版 次	2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	24.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

爆破技术在国民经济各个领域的广泛应用，对爆破地震安全评价的可信度要求越来越高。长期以来，采用的以静力理论为基础的单一参数作为爆破安全判据的评价分析方法，已远不能满足安全评价的要求，其主要问题是脱离了结构的固有动力特性和爆破地震波的频率特性。爆破地震结构振动响应是典型的结构动力学问题，为使爆破地震效应安全评价更加科学合理，只有用结构动力学理论方法才可能得到正确的结果。

《爆破地震结构动力分析》是目前国内首部系统研究爆破地震结构动力响应计算理论与分析方法的著作。作者率先提出的以速度、位移激励的动力平衡方程，求解爆破地震结构动力响应的振型叠加反应谱法和时程法，更适合于采用振动速度作为评价标准的爆破地震结构动力计算，有助于推进爆破地震构筑物响应研究的发展。

中国工程院院士

冯叔瑜

2006年7月

前言

爆破技术的应用已深入人类开发自然的各个领域。在我国，工程爆破规模已达到装药万吨级的水平。众所周知，在实施工程爆破时会产生强烈的地面震动，这种震动对建筑结构的影响和危害是备受关注的，因此在进行爆破之前必须对爆破点周围建筑物的安全性作出准确的估计，以便采取必要的防护措施，避免地震动的危害。这是工程爆破设计或制定爆破方案的一项重要研究课题。由于爆破地震问题的复杂性，长期以来，对工程结构动力分析基本上是采用单一地面振动参数评定法，主要是采用振动速度峰值作为控制指标。这种单一地面运动参数与经验统计为基准的经验性判断依据相比，虽然简便，但存在很大的局限性，它的最大缺点是没有考虑结构自身的固有动力特性、材料性能和地基岩土性质以及边界条件，也没有与爆破地震波频率特性相联系。近年来，这一问题引起了爆破界的重视，逐步意识到时间因素对动力作用效应的影响不可忽视，在制定新的安全控制标准时，除了振幅外，另加入了频率的因素。尽管这种作法还不完备，但毕竟已向前迈出了重要的一步。

要真正解决爆破地震结构动力效应安全评价问题还有很多工作要做。根据天然地震结构动力作用安全评价的思路，必须以结构动力学理论为基础，依据爆破地震动自身的特点，正确地确定结构的动力响应、变形、动应力、振动参数量值及其分布特征，这是评价安全性的基础。获得这些结构动力反应的计算分析方法，主要有静力法、拟静力法、反应谱法和时程法。

以上所述爆破单一参数安全判据的作法，实质上就是静力法，这种方法虽然简单，但不符合实际情况，现已不采用了。

拟静力法是一种简化动力法，又称底部剪力法。它把结构用单自由度体系模拟，其基本周期和质量与原结构相同，不考虑高阶振型的影响，这种方法计算简单，天然地震抗震规范中常采用这种方法。由于爆破作用的高阶振型不可忽视，因此如果要采用这种方法应慎重。

反应谱法又称反应谱理论，也称振型分解反应谱法，它是考虑地面运动特性和结构物动力特性的动力分析法。基于弹性体系的假设，将振动按振型分解，求出各阶振型分量后，用一定方法进行组合。计算一个振型分量，相当于计算一个单自由度体系的振动。各种周期的单自由度体系的地震动反应是采用反应谱进行计算的。所谓反应谱，即各种周期的单自由度体系在一定的地震地面运动作用下的反应与周期的关系，通常用反应谱曲线来表示。求解实际结构的地震动反应的主要工作量在于确定反应谱曲线和计算结构的动力特性，求得各振型自振周期后，各振型的反应分量可以借助反应谱曲线查出，计算也大为简化。反应谱法求解结构地震动响应，反应谱相当于地震动作用的输入，对于确定的结构物，它是获得准确结构地震反应的基础。天然地震通常用地震加速度记录算出，通过多条记录用统计平均求得抗震设计的标准反应谱曲线。爆破地震地面运动由于爆源浅，能量较小，振动频率高，振幅大，持续时间短等特点，通常都习惯采用振动速度评价爆破地震效应，这与天然地震采用地面运动加速度来进行地震动效应分析与评价有很大差异。为了用数值分析法求解爆破地震动力响应的标准反应谱曲线，需专门安排加速度测定地震动加速度时程线。欲确定标准反应谱曲线，但由于不易获得大量加速度时程曲线，故很难实现。从理论上讲，可以将速度记录转换为加速度时程曲线，但这往往带来较大误差。因此，本书作者提出采用以速度、位移激励的动力平衡方程，来描述爆破地震动的作用，这样可以较方便地利用大量实测记录速度时程曲线，计算出速度反应谱，用速度谱计算爆破地震反应，为结构动力响应计算提供了一种新的且更适合爆破地震动力响应的计算方法。书中详细推导了用速度、位移激励方程求算反应谱的计算方法，并给出了爆破地震速度反应谱的计算程序递推算式和计算实例。

时程法也称直接动力法，是一种地震动反应数值仿真，是真正意义上的动力法，适合线弹性体系，也适合于非线性体系。本专著阐述了常规的以加速度激励的地震动动力响应时程分析，更详细推导了以速度、位移激励的动力平衡方程的直接积分算法。为利用爆破地震动速度时程曲线计算结构动力时程响应，提供了数值仿真分析的理论根据。

全书分8章。第1章主要简述了爆破地震与爆破地震波的主要特征，并提出了人工生成爆破地震波的方法。第2章简要论述了结构动力学简化质点模型

及其各种工程结构的简化模型实例，可供实际计算参考。第3章概述了动力有限元的基本概念，有限元方法是现代结构动力响应计算的一种重要方法，掌握有关基本知识，对开展动力计算是很有必要的。第4章论述了地震反应谱理论以及确定爆破地震反应谱的方法，特别介绍了本书作者推导的关于用速度、位移激励的动力平衡方程，求算反应谱的方法，并给出相应的计算程序递推算式。第5章论述了爆破地震动结构动力分析的加速度反应谱和速度反应谱方法。第6章介绍了以加速度激励的动力平衡方程的时程法和本书推介的以速度位移激励的动力平衡方程的时程法。第7章针对爆破地震动的特点，阐述了爆破地震结构动力反应计算时应注意的几个问题。第8章通过一个实例的计算与实测结果对比，对上述方法的实用性进行了评价。

本书由长江工程技术工司钱胜国、陈玲玲、吴新霞、张文煊编著，在编写的过程中，得到了长江科学院、水利部岩土力学与工程重点实验室诸多同仁的帮助，特此致谢。

由于作者水平和时间有限，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2006年3月

目 录

序

前言

1	爆破地震及地震波的基本概念	1
1.1	爆破地震	1
1.2	爆破地震动波	3
1.3	爆破地震波的人工合成方法	12
2	工程结构爆破振动分析的简化模型	15
2.1	概述	15
2.2	常用的简化力学模型	15
2.3	常见水工建筑物工程结构振动分析的简化力学模型	16
2.4	房屋和框架结构以及高层建筑的力学模型	21
3	结构振动分析的有限元法概述	24
3.1	有限元法基本概念	24
3.2	单元概念	24
3.3	单元刚度分析	27
3.4	整体刚度矩阵	32
3.5	质量矩阵	33
3.6	阻尼矩阵	36
3.7	外荷载的处理	37
3.8	边界的处理	38
3.9	结构动力平衡方程的建立和求解	39
3.10	几种结构的有限元离散模型	39
4	爆破地震动反应谱	44
4.1	反应谱理论基础	44
4.2	多摆仪测定反应谱	48
4.3	地震动加速度激励的动力平衡方程计算反应谱	49
4.4	地震动速度位移激励的动力平衡方程计算反应谱	51
4.5	爆破地震动反应谱的特征及类型	54
5	爆破地震工程结构物动力分析反应谱法	62
5.1	地面运动加速度激励构筑物动力响应的振型分解反应谱方法	62

5.2	地面运动位移和速度激励结构动力响应计算的反应谱方法	75
6	爆破工程结构动力分析时程法	87
6.1	地面运动加速度激励结构动力响应的时程分析法	87
6.2	地面运动位移和速度激励结构动力反应的时程分析法	103
7	爆破工程结构动力响应分析中的几个问题	117
7.1	应力波对结构作用两种效应的分析	117
7.2	爆破地震地面运动诱发的地面建筑物动力响应的几个问题	118
7.3	爆破地震行波作用于工程结构的振动响应问题	119
7.4	激波冲击作用于结构的动力响应问题	121
8	爆破地震结构振动响应计算实例.....	129
8.1	计算的基本条件及参数	129
8.2	计算模型	130
8.3	动力特性计算	130
8.4	动力反应计算	132
	参考文献	137

爆破地震及地震波的基本概念

1.1 爆破地震

爆破地震的震源，是爆源，它与天然地震源发震原理不一样。爆破是由于炸药的化学能迅速释放，从而破碎、挤压张拉、扭剪被爆体的过程。以爆源为中心向外按介质的变形特征分为非弹性变形区和弹性变形区。弹性变形区是爆破地震动传播的区域。研究表明，爆源的性质及影响爆破能量转化为弹性变形波动的因素对爆破地震特性与传播规律有重要影响，由于爆源区瞬变过程非常复杂，目前尚不能对爆源的物理过程进行精确的数学描述。长期的爆破作业实践与试验研究表明，影响爆破地震动的主要因素可归纳为以下几个方面：

- (1) 爆破的爆炸能量大小，通常用装药量表示。
- (2) 爆破的类型，包括瞬时爆破或延时爆破，埋入填塞型爆破或裸露爆破。
- (3) 爆破几何参数，如炮孔间排距、孔径、抵抗线大小、临空面状况。
- (4) 岩石性质及地质状况。

1.1.1 岩体性质对爆破地震动的影响

20 世纪 60 年代 Kisslinger、Bateker、Mcevilly 通过在一系列不同的天然介质场地上的化爆研究，得出爆源岩性对爆破地震波影响的一般性结论是：密度大、脆性刚硬介质的最大振幅比松散介质的小；在刚硬介质中胀缩波（P 波）衰减较小，在各种介质中表面波衰减没有明显差别；刚硬介质中 P 波与瑞利波波幅比软介质的；刚性介质中的 S 波比 P 波和瑞利波的波幅大，但在节点（线）上剪切波很小，甚至为零。

振波频率与爆区岩石性质有关，文献 [24] 列出的试验结果表明，如表 1-1 所示：岩石介质愈硬，地震动波动频率愈高；介质愈软，地震动震波频率愈低。

表 1-1 不同介质的爆破地震动频率与波速

波类型	介 质 类 型					
	黏 土		砂 土		石 灰 岩	
	波速 (m/s)	频率 (Hz)	波速 (m/s)	频率 (Hz)	波速 (m/s)	频率 (Hz)
直达 P 波	305	25	1188	30	4265	50
折射 P 波	—	—	2498	40	—	—
直达 S 波	—	—	7920	40	2407	80~100
折射 S 波	—	50	1706	—	—	—
瑞利波	179~210	6~10	914~1310	12~20	2102	25
直达瑞利波	350	10~12	1400	20	—	—
勒夫波	204~259	5~10	1096~1610	15	—	—

由表 1-1 可见, 坚硬岩的频率在 25~100Hz, 密实砂的频率在 12~40Hz, 中硬土的频率在 5~25Hz, 个别可达 50Hz。对于工程爆破, 大都是在坚硬岩石中爆破, 故其激发的地震波频率较高, 主频率在 20~30Hz, 这些频率成分系振幅高的面波。

1.1.2 爆破装药耦合特征及其对地震波动的影响

爆炸装药与岩体的耦合可定义为两种: 一种为几何耦合, 用装药直径与炮孔直径之比的百分率表示, 炮孔填满则为 100% 耦合; 另一种是阻抗耦合, 用炸药特征阻抗与岩石介质特征阻抗之比表示, 即阻抗耦合度与岩石特征阻抗可用式 (1-1) 表示为

$$\text{阻抗耦合度} = \text{炸药特征阻抗} / \text{岩石特征阻抗} = \rho_{\text{药}} C_{\text{爆}} / (\rho_{\text{岩}} V_p) \quad (1-1)$$

式中: $\rho_{\text{药}}$ 为炸药装填密度; $\rho_{\text{岩}}$ 为岩石密度; $C_{\text{爆}}$ 为炸药爆轰速度, m/s; V_p 为岩石压缩波传播速度, m/s。

试验研究结果表明: 爆破时产生的岩石动应变值与几何耦合的 1.5 次方成正比, 可见完全几何耦合 (100%) 时的岩石动应变最大; 同样, 当岩石与装填炸药的特征阻抗相等时, 爆破产生的岩石动应变值也为最大。

1.1.3 岩土地形特征对地震波动的影响

地震波传播与岩土性质及地形状况有关, 对由爆破源向外传播的地震波的振幅频谱特性产生重要影响。松软土层高频率振幅小, 低频率振幅较大, 而坚硬岩体低频率振幅小, 高频率振幅较大。坚硬岩土波传播速度快, 松软土则传播速度慢。土壤覆盖层厚度对土层中传播的波的频率也有明显影响, 通常场地土层的卓越周期 T_p (也可用卓越频率 f_p) 与土层厚度 H 以及剪切波速有如下关系:

$$T_p = \frac{4H}{V_s}$$

式中: T_p 为土层卓越周期, s; H 为土层覆盖厚度, m; V_s 为土层剪切波速, m/s。

爆破激振频率与上式计算的频率 $f_p = 1/T_p$ 一致时, 将产生共振, 振幅值会被放大。

地形的变化, 对地震波的传播和振幅频率会发生影响, 一般的规律是突出小山包顶部的振幅比较大, 往低洼地的方向振幅则减小。对爆心很远的大装药爆破, 如硐室大爆破, 与规模及影响范围小的爆破相比, 地形影响程度会有一定差别, 前者更接近天然地震的情形。这时坡脚的振动振幅值一般会小于坡顶部的振幅。

1.1.4 爆破装药量对地震效应的影响

爆破装药量, 是爆破对地层扰动强烈程度及其影响范围大小的最基本因素之一。爆破地震地面振动速度峰值 (V) 与爆破炸药量 (Q) 之间常用下述关系描述:

$$V = K (Q^{1/3}/R)^\alpha \quad (1-2)$$

式中: V 为爆破地震地面振动速度峰值; R 为爆心距, m; Q 为爆破炸药量, kg; K 为系数; α 为与岩石性质等有关的调整系数。

$(Q^{1/3}/R)^\alpha$ 通常称为比例距离, 由式 (1-2) 可见, 当岩石炸药性质相同, $(Q^{1/3}/R)$ 相等, 振速值相同。式 (1-2) 还表明, 药量一定时, 振速随距离 R 的增加而减小, 这叫做振动衰减。衰减的快慢与系数 α 有关, α 与岩土性质有关。

假设有一地基长度为 40m 的建筑物, 在距其一端 10m 远处实施爆破 (见图 1-1), 爆破装药量 1kg, 按公式 $V = K(Q^{1/3}/R)^{\alpha}$ 计算 (α 取 1.0, K 取 150), 得 $V_{10} = 15.0\text{cm/s}$, 而另一端距爆源 50m, 按上式计算, $V_{50} = 3.0\text{cm/s}$ 。近端振速为远端振速的 5 倍。又有另一爆心 2, 装药量为 1000kg, 近爆心端距离 100m, 远爆心端距离为 140m, 显然按上述振速公式计算, 近爆心端振速亦为 15.0cm/s , 而远爆心端振速则为 10.7cm/s , 近端振速仅为远端的 1.4 倍。由此可以看出, 虽然两种爆破地震动都符合同一衰减规律, 但是对于实际构筑物的作用有明显差别, 即两种不同爆心在地基上, 除近爆心端的振速相同外, 其他爆心距离处的振速均不相同。图 1-2 所示上述两种爆破沿地基振速的分布可以清楚地说明两种爆破诱发同一结构的振动反应显然不会相同。因此, 在评价构筑物的爆破地震效应时, 应特别注意这一点。

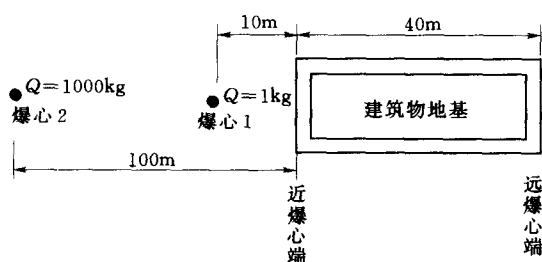


图 1-1 两种距离实施爆破

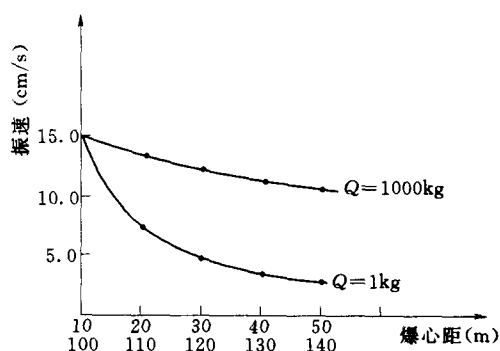


图 1-2 两种相似爆破沿地基振速的分布

1.1.5 爆破类型对爆破地震的影响

通常可将一次爆破分为瞬时爆破和延时爆破两种类型。瞬时爆破是指一次爆破的所有装药在同一时间起爆, 爆破能量集中, 动态作用持续时间短暂。延时爆破是指各药包不在同一时间起爆, 而是通过毫秒延时雷管分段起爆, 这时爆炸能量分散, 振动持续时间增长。如果爆炸总装药量相同, 两者对构筑物的作用的差别是: 前者是强振幅, 但振动次数很少; 后者是低振幅, 多次反复振动。在评价构筑物的振动效应时, 应同时注意到振动强度与振动持续时间这两个因素的影响。

1.2 爆破地震动波

1.2.1 波的一般性质

由于爆炸能量的作用, 爆源岩体受强烈挤压拉伸, 扭剪产生动态变形, 远离爆源之后, 这种动变形处于弹性状态, 以弹性波形式向四周传播。岩土固相介质中传播的弹性波有体波 (Body wave) 和面波 (Surface wave) 两大类。体波又区分为纵波 (Longitudinal wave) 和横波 (Transverse wave), 即 P 波和 S 波。面波又区分为瑞利波 (Rayleigh wave) 和勒夫波 (Love wave) 两种。

(1) 纵波。纵波, 是体波的一种, 又称 P 波, 即初波 (Primary wave) 之意。这种波的介质质点呈压缩——拉伸变形往复移动, 质点往复位移的方向与其向远处传播的方向是



一致的，由于介质呈压缩和拉伸交替变动形成质点振动，因此纵波也称为膨胀波或压缩波。除此之外，纵波根据其特征还有其他的名称，如由于介质的反复伸缩而呈现疏密状态，所以纵波又称为疏密波；又因为纵波的变形无扭转动，故纵波亦称无旋波；还由于它传播快，最先到达，是初至的波，因此纵波也称为初波。

这种波在地层中传播是很复杂的，为了便于理解传播的机理，可以先讨论完全弹性介质的一维问题。假设有一根等截面的实心棒，长度远大于截面尺度，在截面一端突然施加均布力，截面上会产生压应力 σ ，棒端截面有压缩变形，其变形沿杆长度方向，向另一端传播，即压应力向另一端面传播。假设其传播速度为 C_P ，经过时间 t 的传播距离为 $C_P t$ ，长度 $C_P t$ 的一段杆受到压缩，其后压缩变形逐渐向传播方向拓展，在很小的时段内显然压缩区扩展的长度为 $C_P \Delta t$ ，其压缩量根据应力应变关系可得

$$\Delta u = \frac{\sigma}{E} C_P \Delta t \quad (1-3)$$

式中： E 为弹性模量，相应的质点速度 v 可由式 (1-3) 求出为

$$v = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{\sigma C_P}{E} \quad (1-4)$$

这时这段杆的动量即为

$$\Delta M = A \rho C_P \Delta t \cdot v = A \rho C_P \Delta t \cdot \frac{\sigma C_P}{E} \quad (1-5)$$

式中： A 为杆截面面积； ρ 为质量密度。

在 Δt 时段内，压缩变形扩展段受到的冲量为

$$\Delta I = A \sigma \Delta t \quad (1-6)$$

冲量与动量相等，即 $\Delta I = \Delta M$ ，于是传播速度求出为

$$C_P = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1-7)$$

波动在上述杆中传播的状况，可以建立一维波的运动微分方程来进行描述。假设杆端受到截面垂直动荷载，杆的变形也完全与力的方向一致，杆的变形与杆的轴线平形，杆的截面在变形时保持为平面。杆的质点位移运动示于图 1-3 中，设杆件沿轴向的质点位移为 u ，它是坐标 x 和时间 t 的函数。根据杆中脱离体 dx 两端的受力差与对应这一脱离体 dx 段运动产生的惯性力相等的原理及应力应变关系 $\sigma = E\epsilon$ ，可得出运动微分方程式为

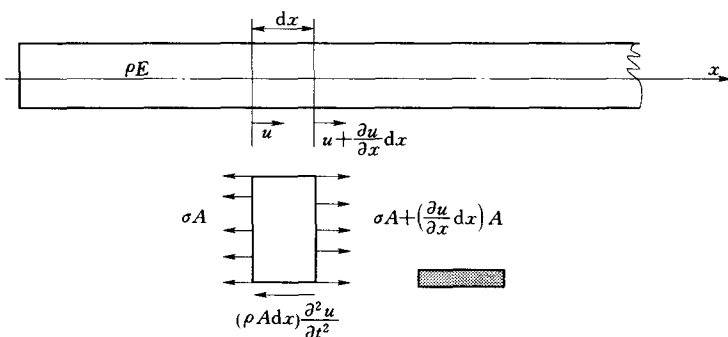


图 1-3 杆质点脱离体位移运动示意图



$$C_P^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1-8)$$

含有 $(x - C_P t)$ 或 $(x + C_P t)$ 的任一函数都是这个方程的解。它的通解可表示为

$$u = f(x + C_P t) + f_1(x - C_P t) \quad (1-9)$$

$f_1(x - C_P t)$ 代表沿 x 方向传播的波, 而 $f(x + C_P t)$ 代表向相反方向传播的波, 通解代表两个波, 沿 x 轴以方程式 (1-7) 所表示的速度 C_P 向两个相反方向运动。可以证明正弦波形

$$u = A_0 \sin \frac{2\pi(x + C_P t)}{l} + A_0 \sin \frac{2\pi(x - C_P t)}{l}$$

和余弦波形

$$u = A_0 \cos \frac{2\pi(x + C_P t)}{l} + A_0 \cos \frac{2\pi(x - C_P t)}{l}$$

都是方程的解。式中: A_0 为振幅; l 为波长; C_P 为纵波波速。

根据式 (1-4) 与式 (1-7) 可得出质点速度 v 与应力 σ 的关系为

$$\sigma = \sqrt{E\rho} \cdot v = \rho C_P v \quad (1-10)$$

进行变换可得

$$\sigma = E \frac{v}{C_P} \quad (1-11)$$

式 (1-10) 说明纵波应力与弹性质点传播速度以及质量密度成正比, 而式 (1-11) 说明纵波应力与弹性质点振速以及波传播速度的比值成正比, 比例常数就是材料弹性模量 E 。由线弹性的应力应变关系又表明 v/C_P 是波中的动应变。这一极限值与杆的材料力学性质有关。两端自由的杆件, 当一端受冲击作用时, 杆产生压缩波沿 x 轴向另一端运动, 当压缩波到达另一端面时, 波产生反射, 形成膨胀波, 向 x 轴相反方向传播, 用安装在压杆上的传感器, 可以测定出这一波的传播过程和波的方向形态的变化, 如图 1-4 所示。

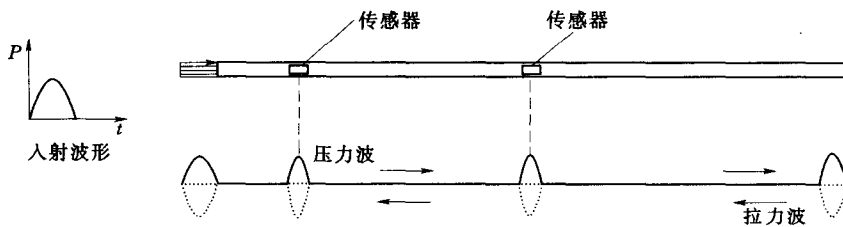


图 1-4 杆中应力波传播

在无限弹性介质中传播的纵波, 对于点爆破严格说应该是球面波, 但远离爆源后, 也可近似按平面波处理。它和一维波方法相类似, 可以同样建立运动平衡方程, 不同的是波速与介质的泊松比有关。

$$C_P = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1-12)$$

在无空间弹性介质中的波, 利用位移表示的微分方程, 再加上惯性力, 即可得

$$\left. \begin{aligned} (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + GD^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + GD^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + GD^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中: e 为体积膨胀率, $e = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$; D^2 为算子, $D^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; λ 为拉梅常

数, $\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$ 。

对于压缩波纵波, 这里不产生畸变或旋转, 方程式 (1-13) 就变成

$$\left. \begin{aligned} (\lambda + 2G)D^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\ (\lambda + 2G)D^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\ (\lambda + 2G)D^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

这就是膨胀波的方程。

(2) 横波。横波是体波的一种, 因为它次于 P 波到达, 所以称为次波或 S 波; 因其质点位移往复运动的方向与波传播的方向垂直, 而称为横波。由于这种波能引起介质的畸变, 但并无体积变化, 故又有剪切波、畸变波、切变波 (Shear wave) 之称。

介质质点在水平方向产生往复剪切移动的 S 波称为 SH 波, 如在竖直方向产生往复剪切移动的 S 波称为 SV 波。

如同无限弹性介质的纵波, 当远离爆心时, 横波也可作为平面波处理。假设所有质点的运动都垂直于波传播的方向, 波是畸变波。设波沿 x 轴方向传播, y 轴与 z 轴向位移 $v = w = 0$, 只有位移 u 是 x 与 t 的函数。这时由方程式 (1-13) 可得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1-15)$$

C_s 是畸变波传播的速度, 它由式 (1-16) 确定

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (1-16)$$

方程形式与前述方程相同。只是波传播速度比纵波传播速度小。

$$C_s = C_p \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1+\mu)}} \quad (1-17)$$

假设泊松比 $\mu = 0.40$, 则代入式 (1-17) 得 $C_s = 0.408C_p$, 显然横波波速比纵波波速小很多, 通常在地表层纵横波传播接近这一比值。

以上所述的两种波 (纵波及横波) 都是固体介质中的体波。

(3) 瑞利波 (Rayleigh wave)。这种波是一种在固体介质表面传播的波, 它是由于 P 波在地层中经多次折射在表层形成的。这种波使介质的质点在波传播的方向平行的竖直平面内运动。其轨道为向震源逆进的椭圆, 竖直向和纵向有位移, 横向无位移。它的传播速

度 C_R 比剪切波 S 的波速 C_S 小, 如果泊松比 $\mu=0.5$, 则 $C_R=0.96C_S$ 。瑞利波的一个特点是在半无限体表面振幅大, 向深部则迅速衰减, 另一个特点是沿传播方向的衰减较慢, 可以传播得很远。

(4) 勒夫波 (Love wave)。这种波也是一种面波, 只在半无限体内有低速表层的情况才存在的一种波, 波动的质点运动方向是水平的, 与波传播方向成直角。在表层中, x 轴和 z 轴方向的位移 u 和 w 均为零, 只有 y 方向上的位移 v 沿 x 轴传播 (图 1-5)。

勒夫波是 SH 波在低速表层内多次反射形成的。其波速 C_L 介于表层的 C_S 和基底硬层 C'_S 之间, 近似可取两者平均值或两者中的一个值。这种波有在沿深度方向衰减快而在传播方向衰减较慢的特点。

这里还要指出一点, 在震源附近一般不会产生面波, 只有在离开震源一定距离才形成面波, 这个距离可确定如下: ① P 波形成的瑞利波距离震源应大于

于 $\frac{C_R}{\sqrt{C_P^2 - C_R^2}}h$; ② S 波形成的勒夫波距离震源应大于 $\frac{C_R}{\sqrt{C_P^2 - C_R^2}}h$; 其中 h 为震源距地面深度。

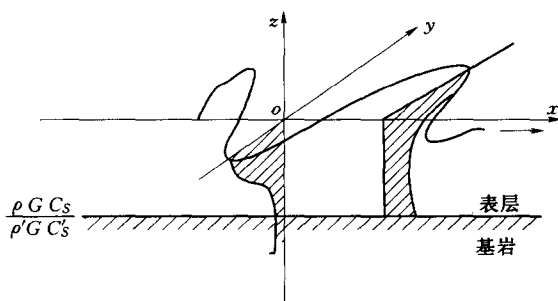


图 1-5 面波

1.2.2 爆破地震波的过程

岩土工程爆破产生的地震波的形态、振幅、频谱构成及持续时间等特征, 均与爆破实施的方案、爆破区的岩性、传播区的地层以及测点处的场地特性有关。由于影响因素很多, 要精确地从波形上判断这些关系是很困难的, 但是如果从这些影响因素了解波的形态类型, 对评价波动作用的性质是有意义的。

(1) 震源深度对爆破地震波的影响。爆破震源深度比较浅 (相对天然地震震源), 一般很接近地面, 这对地面波的形态与类型, 有明显影响。

体波类型的波在爆震区的范围很小, 接近爆源, 按条件①、②估计, 爆深 20m 时, 爆心距 60~70m 地面以远出现面波, 形成较明显的水平方向传播的 SV 波, 同时形成 P 波和 SH 波。

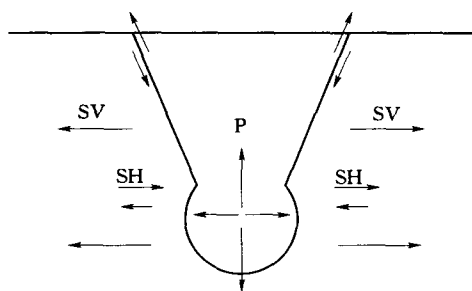


图 1-6 抛掷爆破地震波类型形成示意图

工程爆破由于爆心向上抛掷, 形成抛掷漏斗, 产生较强的竖直向剪切, 而形成 SV 波, 并向四周水平向传播, 地面产生较强的竖直运动, 同时向四周挤压, 产生水平剪切运动, 形成 SH 波, 并沿地面平行平面纵向传播, 如图 1-6 所示。

因此爆破源近区的地面竖向运动的振动加速度、振动速度等均比水平运动的大。爆心愈接近地面, SV 波愈明显, SH 波则较弱。在地



面上爆炸时,强冲击使地层垂向运动,质点竖向剪切运动就非常强烈,P波向深部传播较两侧传播强,接近地面时就较弱了,因此,水平向振幅比竖向振幅明显要小。

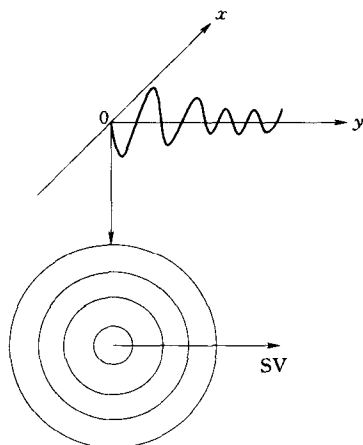


图 1-7 SV波质点运动
与传播方向

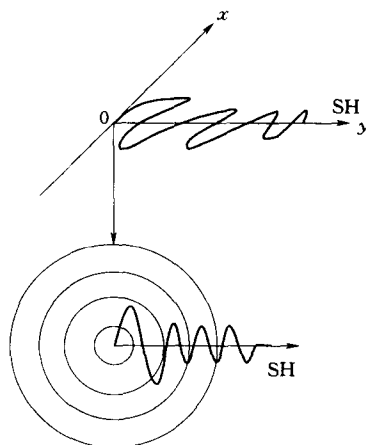


图 1-8 SH波质点运动
与传播方向

爆破形成体波,传播达到一定范围,由于P波反射后在表层形成面波——瑞利波,它的质点运动仍为竖向振动。SH波形成勒夫波是有条件的,必须有低速的表层才能形成,它的传播方向与质点振动方向和SH波相同。如果形成了勒夫波,则有可能加强水平振幅,否则水平振幅还会受到削弱。当传播到比较远的场区时,由于体波衰减较快,面波衰减较慢,竖直振动的波比水平向的波的衰减要快,随着传播距离的增加,水平向振幅会逐渐比竖直向的大,因此一般爆破地震动波的远区场地水平向振幅与竖直向振幅比大于1.0,但是一般在振幅对环境有较大影响或危害的范围内,往往还是竖直向振幅大于水平向振幅,竖直向振幅一般为水平向振幅的1.2~1.5倍。这需要根据具体场地和比例距等加以确定。

(2) 爆破地震动波时间过程的形态特征。爆破诱发的地震动波形特征与爆破装药当量、爆破方案、爆破区岩性和传播途径的地质地形条件、测定点的爆心距及岩层性质等因素有关。由于通常的工程爆破往往不是单个药包爆炸,所以情况就更加复杂,为了说明爆破地震波的形态特征与影响它的主要因素爆距的关系,先就单孔爆破情况来讨论。

近爆源区的地震波,波形初始峰值达到最高,而且随时间衰减较快,振动次数较少。因为距离近,P波虽然传播快,但是S波几乎会与其同时到达。波形一般特征如图1-9(a)所示,如果用外包线给它包络起来,即连接各峰点的曲线形态上像前沿上升时间很短的单脉冲指数衰减型,正负振幅不对称[见图1-10(b)]。这种振波的垂直振动主要由P波和SV波构成,而水平向振动波则主要由P波和SH波构成。

这里需要说明:当测点在爆破弹塑性区时,爆破振动波在零线两侧是一种非对称振动的波,而且几乎是单脉冲形式,很接近冲击响应的形态,几乎没有等振幅段,如图1-11所示。这种情况不是弹性振动波。

当波传播到一定距离,P波与S波已能够明显区分的时候,这时先出现低振幅,振幅