

工 程 测 试 技 术 丛 书

土中应力波及其量测

骆文海 编著

黄浩华 审校

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 5 年 · 北 京

工 程 测 试 技 术 丛 书

土中应力波及其量测

骆文海 编著

黄浩华 审校

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 5 年 · 北 京

内 容 简 介

本书主要论述了在动荷载作用下,土中应力波的特性及其量测。

书中详述了波的基本原理;波在土中的传播特性;土中动应力量测原理及误差分析;压电式、变磁阻式土压量测仪的构造原理;以及射线法、频谱法在应力波分析中的应用。最后还列举了土中应力波的观测实例。

本书可供从事建筑,地震及其它有关专业的科研工作者、工程测试人员参考使用。

工程测试技术丛书

土中应力波及其量测

骆文海 编著

黄浩华 审校

中国铁道出版社出版

责任编辑 翁大厚 封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 $\frac{1}{32}$ 印张: 8.75 字数: 198千

1985年7月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—4,000册 定价: 1.55元

前 言

应力波在土中的传播特性及其量测方法在铁路、交通、建工、国防部门及地震、爆破等领域中都有广泛的应用。在动荷载作用下，实际工程中的土工结构即处在动应力的作用之中。因此，土中动应力的量测和分析是了解土工结构应力状态的重要途径。

随着波动理论在国内外工程中应用的越来越广泛以及各种新量测技术和分析方法的不断发展，人们已把土中应力波的量测和分析方法的研究和应用提到一个新的水平。作者在这个基础上根据有关资料，同时加上自己在实际工作中的粗浅体会，写成此书。

全书分成两部分。第一、二、三及七章为理论部分，所介绍的内容属于基础知识，且着重阐明其物理概念，使读者易于理解以满足量测和分析时的需要。第四、五、六及八章为实用部分，包括土中应力波量测和分析的具体方法及工程应用实例。所介绍的内容，力求说清楚它的基本思路，具体步骤及使用场合等问题，期望对读者有所裨益。

限于作者水平，书中缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

本书在编写过程中承蒙袁祖荫同志提出许多宝贵意见，又承出版社请中国科学院工程力学研究所黄浩华同志审校。在此，作者表示衷心的感谢。

作 者

一九八四年七月

常用符号表

本表仅列出全书常用符号。局部范围使用的符号详见有关章节。

- A ——运算放大器的开环增益、振幅；
- a ——振幅；
- B ——混合物的体积弹性模量、土压计厚度的一半；
- B_m ——磁场的磁通密度；
- B_s ——固体颗粒的体积弹性模量；
- B^w ——水体积压缩模量；
- C ——电容、阻尼系数、介质弹塑性波速度；
- C_c ——临界阻尼系数；
- C_E ——压缩波速度；
- C_L ——柱波速度；
- C_p ——定压比热；
- C_s ——剪切波速度；
- C_v ——定容比热；
- C^v ——土中孔隙介质的波传播速度；
- C^w ——波在水中的传播速度；
- D ——土压计的直径；
- D^s ——土中矿物骨架的侧限模量；
- d_{11} ——晶体压电常数、土压计膜片的直径；
- E ——杨氏模量、能量；
- E_e ——土压计的变形模量；
- E'_e ——土压计材料的杨氏模量；

• II •

E_s ——土的变形模量;

E'_s ——土的杨氏模量;

e ——孔隙比或自然对数的底;

F_x, F_y, F_z ——分别为 x 、 y 、 z 轴方向上弹性体的实体力;

f ——频率;

f_x, f_y, f_z ——分别为弹性体在 x 、 y 、 z 轴上所产生的惯性力的加速度;

G ——剪切模量;

G_s ——土颗粒的比重;

g ——重力加速度;

H ——土压计的厚度;

I ——振子可动部分的惯性矩、冲量;

i ——电流;

K ——体积弹性常数;

K_a ——空气恒压比热与恒体积比热之比;

k ——波数、刚度;

L ——电感;

l_c ——磁导体内磁力线平均长度;

l_g ——磁导体内磁力线气隙长度;

m ——质量;

n ——孔隙度;

P ——压力、纵波;

p ——声波压力;

p_a ——空气压力;

P_e ——量测压力与实际压力之差;

Q ——电荷、电感线圈的品质因素;

R ——电阻;

ΔR ——磁阻；

S ——距离、横截面积、土的饱和度、横波；

Se ——单元土体孔隙中水的体积；

SH ——横波的水平分量；

SV ——横波的垂直分量；

T ——波动的周期、绝对温度；

t ——时间、土压计膜片的厚度；

U ——冲击波速度、群速度；

u ——质点的运动速度；

u_i ——位移在 i 轴上的分量、土中孔隙气相的初始压力；

V ——电压、单元土体积；

V_a ——单元土体中的空气体积；

V_h ——离地面 h 深处某一时刻的质点速度；

V_{hm} ——离地面 h 深处质点的最大速度；

V_P ——纵波速度；

V_S ——横波速度；

V_v ——单元土体中孔隙总体积；

v_{aw} ——波在气水混合物中的速度；

v_{mix} ——波在混合物中的速度；

W ——线圈的匝数；

w ——含水量；

y ——振动位移；

ε ——应变、压电晶片的介电常数；

ε_a ——轴向应变；

ε_{ij} ——与 j 轴垂直的平面内产生的 i 轴方向的应变；

α ——波的入射角；

β ——波的折射角；

目 录

第一章 应力波的理论基础	1
第一节 弹性波动现象.....	1
第二节 弹性波的状态方程.....	16
第三节 体波和表面波.....	23
第四节 冲击波理论.....	34
第二章 土中应力波	42
第一节 土的一般特性.....	43
第二节 应力波在土中的传播速度.....	50
第三节 土中一维压缩波基本参量分析.....	55
第三章 饱和土中的应力波	71
第一节 波在饱和介质中传播的基本概念.....	71
第二节 饱和土中的应力波.....	77
第三节 一维应力波通过饱和土时的速度.....	84
第四章 土中应力波的量测	93
第一节 工程动态量测概论.....	93
第二节 土中静应力的量测.....	121
第三节 普通土动应力的量测.....	130
第四节 饱和土动应力的量测.....	151
第五章 压电式测压传感器	155
第一节 压电式测压计的工作原理.....	155
第二节 压电测压系统.....	162
第三节 压电式土压计实例.....	179
第六章 变磁阻式土压计	183

第一节	变磁阻式土压计工作原理·····	183
第二节	膜片及铁芯材料的选用·····	185
第三节	变磁阻式土压计参数的设计与计算·····	190
第四节	变磁阻测压系统·····	197
第七章	土中应力波的分析 and 数据处理·····	203
第一节	应力波形特点及判读方法·····	203
第二节	应力波的理论分析方法·····	215
第三节	冲击应力波的频谱分析·····	229
第八章	土中应力波实验观测·····	239
第一节	土中动力参数的测定·····	239
第二节	土层密度的弹性波勘查法·····	252
附 录	常用单位换算表·····	262
主要参考资料·····		267

第一章 应力波的理论基础

第一节 弹性波动现象

一、概 述

物体在弹性介质中发生机械振动时，由于介质各点之间存在弹性联系，一点振动时，相邻各点将被带动而依次振动起来。这样，物体的振动就在介质中传播出去。这种振动在弹性介质中的传播就形成了波动。产生波动的振动体称之为波源。传播波动的物体则称为介质。

例如，把石块投入平静的水中，可以看到水面上一圈一圈向外扩展的水面波；音叉振动时，可以听到振动在空气中传播形成的声波；用炸药开山筑路时，可以感觉到由于炸药爆炸引起的岩石振动在地层中传播形成的地震波。

波动只是振动在介质中的传播过程。在波动过程中，介质中的各点只在自己的平衡位置附近振动而并没有随波前进。例如，投石入水形成水面波时，可以看到波峰波谷高低起伏交替变化地向外传播。我们看定某一个波峰（或波谷），则可以看到这个波峰（或波谷）以一定的速度在前进，这个速度就是波速。如果抛一片树叶在水面上，可以看到树叶随着水面波浪的推动，差不多只是在原地附近运动，并没有随波浪一起前进。

由于振动的介质不同，产生的波也不同。一般情况下，弹性波动在流体中的传播谓之声波；弹性波动在固体中的传播谓之弹性波。

弹性波有各种不同的分类方法。按波源振动的 时间 历程的性质可分为周期波和非周期波。属于周期波的有如正弦波，矩形波，锯齿波等等。而爆炸冲击波及随机波等属非周期波。图 1—1 即为周期波的例子。

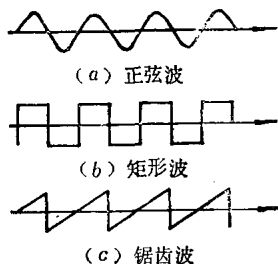


图 1—1 周期波的例子

若按波源形状及波动在介质中传播的形状来分类，则可分成球面波、柱面波和平面波。图 1—2 (a) 是表示无限介质中点

波源膨胀、收缩所引起的波动向四面八方扩散的球面波。图 1—2 (b) 是无限长线状波动源向四周成柱状扩散的波，称柱面波。图 1—2 (c) 表示在无限伸展的平板状波源所产生的、以平面状传播的平面波。

然而，无论是球面波或柱面波，当距离波源非常远时，其波面近似平面，一般可看作平面波。这样的一些弹性波，尽管可按波动时间的变化或空间的变化来区分，但是波的性质是不会变的。

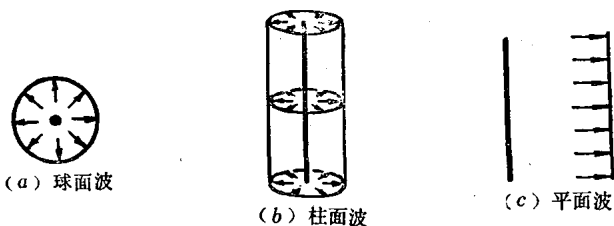


图 1—2 波的分类

二、弹性波的特性参数

介质内的点波源，设其振动表示为：

$$y = A \sin \omega t \quad (1-1)$$

式中 A —— 振动的幅值；

ω —— 振动角频率；

y —— 振动的位移。

当振动由波源向四面八方传播时，距波源距离 s 的一点位移可表示为：

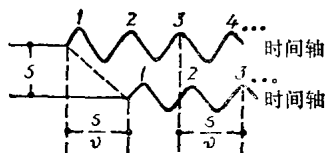


图 1-3 正弦波的相位差

$$y = A \sin \omega(t - s/v) \quad (1-2)$$

(1-2) 式仍为正弦波方程，只不过距波源为 s 处的位移和波源处的位移在时间上存在着 s/v 的相位差（见图1-3）。式 (1-2) 经变换后可得到：

$$\begin{aligned} y &= A \sin \frac{2\pi}{T}(t - s/v) = A \sin 2\pi(t/T - s/\lambda) \\ &= A \sin(\omega t - ks) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式 (1-2) 和式 (1-3) 中所用符号的物理意义如下：

A (波动的振幅) —— 表示质点振动的振幅 (长度单位)；

T (波动的周期) —— 表示质点的振动周期 (时间单位)；

v (波传播速度) —— 单位时间内波通过介质的距离 (长度/时间)；

λ (波长) —— 一周期时间内波通过介质的距离 (长度单位)；

f (频率) = $1/T$ (次/单位时间)；

ω (角频率) = $2\pi/T$ (1/时间)；

k (波数) = $2\pi/\lambda$ (1/长度)。

上面各量之间的关系如下：

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} = \frac{2\pi v}{\omega} = \frac{2\pi}{k} \quad (1-4)$$

波动有如下三要素:

(一) 波的相位

它表示介质内相距某一距离的两点正弦振动的相角差。两点相距越远, 它们之间的相位差越大。由于正弦波每隔 2π 个弧度的相位差便重复一次, 所以相位相差 2π 的两个振动是相同的。

式 (1-2) 和式 (1-3) 所表示的相位差分别为:

$$\omega s/v, 2\pi s/vT, 2\pi s/\lambda, ks。$$

(二) 波阵面

介质内波位相相同点的轨迹称波阵面, 如图 1-4 所示。波的最前面点之间的关系通常满足这一条件。正如前面已经介绍, 波阵面可区分为球面波、柱面波和平面波。

(三) 波 线

它以波阵面的外法线表示。通常以矢量形式表示波的行进方向 (见图 1-4)。



图 1-4 波阵面和波线

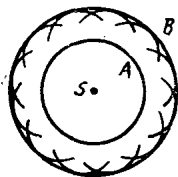


图 1-5 惠更斯原理说明图

三、波 的 性 质

(一) 惠更斯 (Huygens) 原理

无限均匀介质内一点 S 发出的波, 无论在那一方向都以

相同速度传播，成了以 S 为中心的球面扩散形状。如图 1—5 所示，时刻 t_0 时之波阵面设为 A ，经过某一段时间后，波阵面 A 仍以球面状扩散成波阵面 B 。

可以这样来解释这种波动过程：

波源 S 所产生的波面 A 上可认为有无数的质点在振动，这些点可认为分别与 S 一样是波动源。波面 B 是球面 A 上无数新波源产生的波互相重叠所产生的。我们把那些用眼睛看不到的组成波面 B 的波称为子波。惠更斯就是用这原理解释波动的传播过程的，因此，人们称之为惠更斯原理。

(二) 波阵面的绘制

如图 1—6 所示。设从 S 点发出的波，在时刻 t_0 形成的波阵面为 A ，今求经 Δt 时间后的波阵面。若波的速度为 v ，则按照惠更斯原理，在 A 阵面各点上以 $v \cdot \Delta t$ 为半径作球面，求所有球面的包络线便得出新的波阵面 B 。这是由于所求的包络球面半径是 A 球面半径 R 加上 $v \cdot \Delta t$ ，故所求的球面 B 即以 S 为中心，半径为 $R + v \cdot \Delta t$ 的球面。

按照同样的方法，平面波、柱面波的波阵面也很易作出。图 1—7 是平面波的一例。

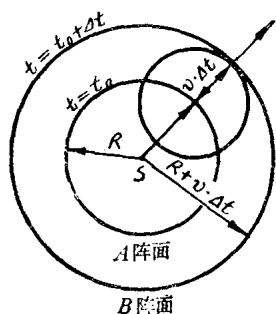


图 1—6 波阵面的绘制方法

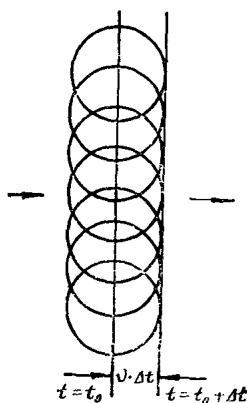


图 1—7 平面波绘制一例

(三) 波的反射

如图 1—8, 设由 S 发出的波在刚壁平面 LL 上反射, 波到达 LL 面瞬间的波面 A 与 LL 面接触点为 O , 这时的 O 点成为新的波源在 LL 面的 (I) 侧传播。从此刻开始, 波面的其他部分依次到达壁面 LL , 从而形成新的波源, 并在 (I) 侧上以新的波阵面 B' 传播, 此波称为反射波。

从图 1—8 中可以看出, 假如刚壁面不存在, S 波源发出的波会在 (II) 区继续形成波阵面 B , 这时波阵面 B 与反射波阵面 B' 成了对于刚壁面的对称球面。因而, 与 LL 相对的 (II) 侧的 S' 点为 S 点的对称点。此时的 S' 即可认为是 B' 波阵面的波源。

与波面垂直的直线, 即表示波进行方向的直线, 叫做波的射线。图 1—8 中的 ST 即为入射波的一条射线。 $S'T'$ 为反射波的一条射线。由图可以证明波的入射角等于反射角。

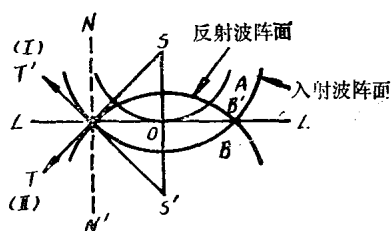


图 1—8 波的反射

从上面分析说明, 入射波与反射波为同一种类型的波, 它们的性质是相同的。

(四) 波的折射

为便于说明, 入射波假定为一平面波。如图 1—9, 当波从介质 I 进入介质 II、波阵面

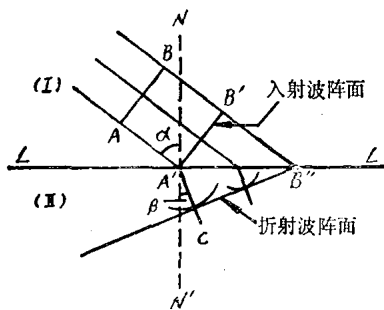


图 1—9 波的折射

A 到达分界面的 A' 时, A' 便成为新的波源并发出子波在介质 II 内传播。此时, 入射波面上的另一点到达 B' 。在这以后, 随着平面波的往前推进, $A'B'$ 波阵面依次进入分界面。当 B' 到达 B'' 时, 一系列的新子波波源从 A' 开始, 子波发生的时间顺次连续地排列下去。

今假定 B' 为与 A' 点同时推进的射线。 B' 到达 B'' 所需时间为:

$$t = \frac{d}{U_1} \sin \alpha$$

式中 U_1 为波在介质 I 中的速度, d 为 $A'B''$ 间的距离, α 为 $\angle NA'A$ 。当 A' 产生的子波在介质 II 内传播时, 其波面是以 A' 为中心、半径为 $R = U_2 \cdot t$ 的圆。从 B'' 向该圆引切线, 若 U_2 为介质 II 的波速, 切点为 C , 则

$$\angle N'A'C = \angle A'B''C$$

$$\text{令} \quad \angle N'A'C = \beta$$

$$\text{则} \quad \sin \beta = \frac{A'C}{d} = \frac{U_2 \cdot t}{d} = \frac{U_2}{U_1} \sin \alpha$$

由此得关系式:

$$\frac{\sin \beta}{U_2} = \frac{\sin \alpha}{U_1} \text{ 或 } \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{U_1}{U_2} \quad (1-5)$$

式中 α —— 波的入射角;

β —— 波的折射角;

U_2/U_1 —— 波的折射率。

式 (1-5) 称为波的“斯奈尔”折射定律

由于波长 λ 与波的周期 T 的关系为: $\lambda = UT$, 对一个振动系统来说, 周期是某一位置上的质点一次往复振动所需的时间, 是个定值, 不随位置而变, 而波速是因介质不同而变化的, 故介质 I 与介质 II 的波长 (分别为 λ_1 和 λ_2) 是不同

的。若

$$\lambda_1 = U_1 T, \lambda_2 = U_2 T$$

于是得 $U_1/U_2 = \lambda_1/\lambda_2$

(五) 波的绕射

波的绕射，又称衍射，是波动的一个重要性质。

让我们观察水面波通过障碍物时的几种情况。

图 1—10 (a) 是波遇到一个比波长大很多的屏障的情况；图 1—10 (b) 是波通过一个比波长大很多的缺口的情形。这时在屏障后面被波源和屏障两端的连线所分出的“影子”区域里几乎完全没有波到达，因而在这种情况下，波可以看作是直线传播的。如果屏障很小或缺口成为一个小孔，它们的大小和波长差不多（图 1—11）则波几乎可以到达屏障后面的任何地点。由此可知，当障碍物或孔的大小比波长大得多，波可以认为是沿直线传播的。如果障碍物或孔的大小可以与波长相比拟，波就不能认为是沿直线传播的，它可以绕过障碍物达到按直线传播时要成为“阴影”的地方，这种现象叫做波的绕射。

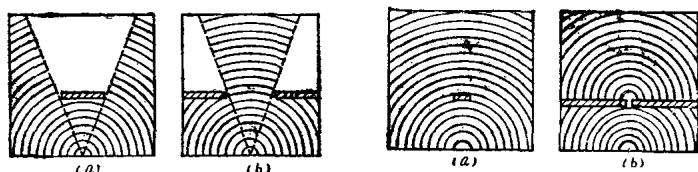


图 1—10 水面波通过大障碍物和缺口 图 1—11 小障碍物与小孔的绕射

从图 1—11 (b) 中看到，通过小孔后的水面波，同在小孔位置放一点波源发出的波形是一样的。它反映出波传播到小孔时，波前上的一点可以看作是新的波源，即发射“子波”的中心。当波通过一缝隙时，到达缝隙的波前上的各点