

土-结构动力相互作用

[瑞士] J.P.瓦尔夫 著

吴世明 唐有职 译

陈龙珠 陈云敏 校

曾国熙 童翊湘 校



地震出版社

1989

土-结构动力相互作用

[瑞士] J.P.瓦尔夫 著

吴世明 唐有职

陈龙珠 陈云敏 译

曾国熙 童翊湘 校

地震出版社

1989

Dynamic Soil-Structure Interaction

John P. Wolf

Prentice-Hall 1985

土-结构动力相互作用

(瑞士) J. P. 瓦尔夫 著

吴世明 唐有职 译

陈龙珠 陈云敏

曾国熙 童翊湘 校

责任编辑: 蒋乃芳

责任校对: 李 珏

北京出版社 出版

北京复兴路63号

朝阳展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 - - 117625印张 312千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数 0001-2000

ISBN 7-5028-0150-2/TU · 6

(541) 定价: 6.50元

译 序

土-结构动力相互作用是土动力学与结构动力学新近发展起来的交叉学科，随着工程建设的发展，特别是核电站工程的发展，这门学科在今后将有较大的进展。

在地震荷载作用下，由于土的存在，自由场的地表运动会区别于下卧基岩面的运动；另一方面，由于结构的存在又会影响基础底面的运动，这一复杂相互作用过程，无法以简单地附加一静力矩或静横向剪力来代替，简单的传统处理方法有时会造成经济上较大的浪费，由于它的盲目性，有时结果并不安全。因此，对于某些重要的构筑物作精辟的土-结构动力相互作用分析是必要的。目前，计算机的广泛应用为我们提供了可靠的方便手段。对于大多数构筑物，虽然不能逐个进行繁复的分析计算，但对一些典型工程作必要分析和归纳，对一般工程将有重要的指导意义。

本书作者J.P.瓦尔夫对于波在土中的传播，边界无法求解土-结构动力相互作用方面有很深的造诣。科学研究成果丰硕，发表了许多有深远影响的论文著作，这本《土-结构动力相互作用》是这个领域内各项科研成果的汇总和应用，对我国在这个领域内的科学研究和工程应用可望起积极的推动作用。

由于篇幅所限，本书在翻译过程中删去了每一章后面的小结和思考题。正如原作者所述，它们是本书重要的组成部分，有助

于读者对内容的理解。译者希望今后能有机会以单独的小册子与读者见面。

译者感谢美国F.E.小理查特教授（及时地）提供原版书，感谢地震出版社对出版这本译著所给予的大力支持。

由于时间仓促、水平有限，不足之处请读者指正。

吴世明

于浙江大学

前 言

对建在基岩上的结构作地震分析时，基础所经受的运动基本上与结构建造之前基岩上同一点的运动相同，这样，计算可只限于受激励的结构本身。如果结构建在软弱场地上，对于相同的入射地震波，因为以下两个原因，分析需作重要的修正，其一，结构建造之前的自由场运动受到很大影响；其二，建在土中的结构动力体系与基础固定的结构有很大的不同。结构将与周围土发生相互作用，导致基底的地震动进一步改变。本书的土-结构相互作用分析论述了自由场反应和实际相互作用。土-结构相互作用对于除地震以外的其它荷载情况也是重要的（如转动机械的不平衡质量所引起的振动）。

人们已认识到土-结构相互作用影响的重要性，对此通常不应忽视。日常结构设计时，假设基础固定，然后增设一些抗震措施以减小等效静侧向作用力，但对于重要构筑物的设计，特别是核电站，需要作复杂的分析，这些分析以最新研究成果为基础，有的甚至到现在还未彻底解决。正因为如此，土-结构动力相互作用分析在某些方面仍存有争议。

本书介绍了自由场反应和实际相互作用的统一分析方法，这个基于波传播的严密分析步骤需应用已为熟知的结构分析直接刚度法和新近发展起来的边界元法。本书还介绍了大量参数分析的结果，可直接应用于分析。书中提供的工程实例是应用这些方法的示范。另外，还介绍一些简单的近似方法；不论它们的精度如何，这些近似方法抓住土-结构相互作用的基本要领，在开始复杂的分析计算之前，可先用来确定一些关键的参量。

在土-结构动力相互作用领域内的许多方面已取得了进展，

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 土-结构相互作用分析的 目的.....	(1)
§ 1.2 设计(地震)荷载的类型.....	(2)
§ 1.3 土-结构相互作用的 影响.....	(3)
§ 1.4 线性假设.....	(7)
§ 1.5 涉及问题的种类.....	(8)
§ 1.6 直接法和子结构法.....	(9)
§ 1.7 本书的内容安排.....	(11)
第二章 离散体系动力学 概 论	(12)
§ 2.1 时域中的运动方程.....	(12)
§ 2.2 振型幅值变换.....	(12)
§ 2.3 谐振运动方程.....	(13)
§ 2.4 对应原理.....	(14)
§ 2.5 离散富里埃变换.....	(15)
§ 2.6 复反应法.....	(16)
第三章 基本运动方程	(18)
§ 3.1 总位移方程.....	(18)
§ 3.1.1 柔性基础.....	(18)
§ 3.1.2 刚性基础.....	(23)
§ 3.1.3 特殊基础.....	(26)
§ 3.2 刚体运动相互作用和惯性相互作用.....	(27)
§ 3.2.1 柔性基础.....	(27)
§ 3.2.2 刚性基础.....	(30)
§ 3.3 作用荷载及其特性.....	(33)
§ 3.3.1 转动机械.....	(33)
§ 3.3.2 冲击荷载.....	(34)

§ 3.3.3	地震荷载	(35)
§ 3.4	引导性例题	(39)
§ 3.4.1	问题的提出	(39)
§ 3.4.2	耦合体系的运动方程	(42)
§ 3.4.3	等效单自由度体系	(44)
§ 3.4.4	无量纲参数	(47)
§ 3.4.5	参数分析	(48)
第四章	结构模拟	(52)
§ 4.1	概述	(52)
§ 4.1.1	荷载的频率成分和空间分布	(52)
§ 4.1.2	子体系的解耦	(54)
§ 4.2	地震荷载的空间分布	(55)
§ 4.2.1	自由场运动	(55)
§ 4.2.2	带刚性基础时明置结构的刚体运动	(56)
§ 4.2.3	带刚性基础时埋置结构的刚体运动	(58)
§ 4.2.4	带柔性基础时结构的刚体运动	(59)
§ 4.2.5	轴对称结构	(59)
§ 4.2.6	实例	(62)
§ 4.3	直接离散	(65)
§ 4.3.1	有限元模型	(65)
§ 4.3.2	冲击荷载下的模型	(67)
§ 4.3.3	受地震荷载作用的双曲冷却塔	(71)
§ 4.3.4	地震荷载下的核反应堆结构	(73)
§ 4.3.5	地震荷载下的剪切型框架	(76)
§ 4.3.6	以广义位移为基础的模型	(77)
§ 4.4	动力自由度的缩减	(78)
§ 4.4.1	转换后的运动方程	(78)
§ 4.4.2	伴随静力凝聚的质量集中	(80)
§ 4.4.3	子结构振型合成法	(81)
第五章	波的传播原理	(85)
§ 5.1	一维波动方程	(85)

§ 5.1.1	研究波传播的意义	(85)
§ 5.1.2	问题的提出	(85)
§ 5.1.3	运动方程	(86)
§ 5.1.4	波的类型	(88)
§ 5.1.5	有限长杆的动力刚度矩阵	(89)
§ 5.1.6	无限长杆的动力刚度系数	(92)
§ 5.1.7	能量传递速率	(94)
§ 5.1.8	材料阻尼	(95)
§ 5.1.9	有限长杆的动力刚度系数收敛于无限长杆的动力刚度系数	(99)
§ 5.1.10	自由场反应	(102)
§ 5.1.11	场地的动力刚度系数	(103)
§ 5.2	直角坐标系中的三维波动方程	(103)
§ 5.2.1	以体积应变和旋转应变表达的运动方程	(104)
§ 5.2.2	P 波	(107)
§ 5.2.3	S 波	(108)
§ 5.2.4	材料阻尼	(110)
§ 5.2.5	总运动	(111)
§ 5.3	平面外运动的动力刚度矩阵	(112)
§ 5.3.1	波的类型	(112)
§ 5.3.2	土层和半空间的转换矩阵和动力刚度矩阵	(113)
§ 5.3.3	几种特例	(115)
§ 5.3.4	受荷载作用的土层	(116)
§ 5.3.5	能量传递速率	(118)
§ 5.4	平面内运动的动力刚度矩阵	(119)
§ 5.4.1	波的类型	(119)
§ 5.4.2	土层和半空间的转换矩阵和动力刚度矩阵	(122)
§ 5.4.3	几种特例	(126)
§ 5.4.4	受荷载作用的土层	(128)
§ 5.4.5	能量传递速率	(131)
§ 5.5	圆柱坐标系中的三维波动方程	(132)

§ 5.5.1	用体积应变和旋转应变表示的运动方程	(132)
§ 5.5.2	用周向富里埃级数和径向贝塞尔函数表达的解	(136)
§ 5.5.3	动力刚度矩阵	(142)
第六章	自由场反应	(143)
§ 6.1	问题的提出	(143)
§ 6.1.1	确定地震环境的三个因素	(143)
§ 6.1.2	控制点的位置	(144)
§ 6.2	放大、频散和衰减	(145)
§ 6.2.1	场地的动力刚度矩阵	(146)
§ 6.2.2	体波的场地放大效应	(147)
§ 6.2.3	表面波	(149)
§ 6.2.4	放大效应	(151)
§ 6.2.5	视速度和衰减系数	(151)
§ 6.3	半空间	(153)
§ 6.3.1	入射SH波	(153)
§ 6.3.2	入射P波	(154)
§ 6.3.3	入射SV波	(158)
§ 6.3.4	瑞利波	(157)
§ 6.3.5	位移、应力与深度的关系	(159)
§ 6.4	半空间上的单一土层	(160)
§ 6.4.1	SH波	(161)
§ 6.4.2	洛夫波	(164)
§ 6.4.3	变量的物理意义	(166)
§ 6.4.4	P波和SV波	(163)
§ 6.4.5	瑞利波	(169)
§ 6.5	平面外运动的参数分析	(170)
§ 6.5.1	研究对象	(170)
§ 6.5.2	垂直入射SH波	(171)
§ 6.5.3	斜入射SH波	(172)
§ 6.5.4	洛夫波	(174)
§ 6.6	平面内运动的参数分析	(132)

§ 6.6.1	研究对象	(182)
§ 6.6.2	垂直入射SV波和P波	(183)
§ 6.6.3	斜入射P波和SV波	(184)
§ 6.6.4	瑞利波	(192)
§ 6.7	软弱场地	(200)
§ 6.7.1	场地和控制运动概述	(200)
§ 6.7.2	垂直入射和斜入射SH波	(202)
§ 6.7.3	垂直入射和斜入射P波与SV波	(203)
§ 6.7.4	洛夫波	(205)
§ 6.7.5	瑞利波	(207)
§ 6.7.6	平面内位移、应力与深度的关系	(209)
§ 6.7.7	散射运动	(213)
§ 6.8	岩石场地	(213)
§ 6.8.1	场地与控制运动概述	(213)
§ 6.8.2	洛夫波	(214)
§ 6.8.3	瑞利波	(215)
§ 6.8.4	波型选择	(216)
§ 6.8.5	散射运动	(218)
第七章	土的模拟	(219)
§ 7.1	一般原理	(219)
§ 7.1.1	土的动力刚度矩阵	(219)
§ 7.1.2	基本边界	(221)
§ 7.1.3	局部边界	(221)
§ 7.1.4	协调边界	(225)
§ 7.1.5	Sommerfeld 辐射条件	(225)
§ 7.1.6	解析解的利用	(228)
§ 7.2	明置基础的动力刚度系数	(228)
§ 7.2.1	加权残数公式	(228)
§ 7.2.2	二维情况下的格林影响函数	(231)
§ 7.2.3	轴对称情况下的格林影响函数	(234)
§ 7.2.4	单元尺寸和数值积分	(239)

§ 7.2.5 无量纲弹簧系数和阻尼系数	(240)
§ 7.3 二维刚性基座 (条形基础)	(240)
§ 7.4 三维刚性基座 (圆形基础)	(245)
§ 7.4.1 动力刚度系数	(246)
§ 7.4.2 二维模型与三维模型的关系	(250)
§ 7.4.3 散射运动	(251)
§ 7.5 埋置基础的动力刚度系数	(253)
§ 7.5.1 边界元法的重要性	(253)
§ 7.5.2 阐明边界元法基本概念的例子	(254)
§ 7.5.3 利用边界元法计算土域的动力刚度系数	(260)
§ 7.5.4 格林影响函数	(264)
§ 7.5.5 桩基	(263)
§ 7.6 埋置矩形基础	(270)
§ 7.6.1 研究范围	(270)
§ 7.6.2 格林影响函数	(271)
§ 7.6.3 一组完整的结果	(272)
§ 7.6.4 体系 e 及 f 的动力刚度系数的性质	(272)
§ 7.6.5 体系 g 的参数分析	(275)
§ 7.6.6 自由场体系 f 的参数分析	(277)
§ 7.7 毗邻基础的动力刚度系数	(279)
第八章 运动方程的其它形式	(283)
§ 8.1 结构-土总体系的直接分析法	(283)
§ 8.1.1 时域中的运动方程	(283)
§ 8.1.2 频域中的运动方程	(285)
§ 8.2 带柔性基础的子结构分析	(287)
§ 8.2.1 以总位移表示的基本运动方程	(287)
§ 8.2.2 相对于自由场运动的基础反应运动	(289)
§ 8.2.3 自由场输入运动的准静态传递	(291)
§ 8.2.4 基础反应运动的准静态传递	(294)
§ 8.2.5 固定基础结构的振型幅值变换	(295)
§ 8.3 带刚性基础的子结构分析	(298)

§ 8.3.1	以总位移表示的基本运动方程	(298)
§ 8.3.2	相对于散射运动的基础反应运动	(299)
§ 8.3.3	散射运动的准静态传递	(300)
§ 8.3.4	基础反应运动的准静态传递	(301)
§ 8.3.5	固定基础结构的振型幅值变换	(302)
§ 8.4	时域中的近似公式	(303)
§ 8.4.1	以总位移表示的基本运动方程	(303)
§ 8.4.2	基础反应运动的准静态传递	(304)
§ 8.4.3	总体系的振型幅值变换	(304)
§ 8.4.4	固定基础结构的振型幅值变换	(305)
§ 8.5	线性土体 (远场) 条件下结构 的非线性分析	(307)
§ 8.5.1	非线性的类型	(307)
§ 8.5.2	应用卷积导出时域中的运动方程	(307)
§ 8.5.3	刚度矩阵的变换	(309)
§ 8.5.4	截面积按指数函数增大的杆件	(310)
§ 8.5.5	位于半空间上和土层上的圆盘	(313)
第九章	工程应用	(315)
§ 9.1	相互作用影响的计算	(315)
§ 9.1.1	无量纲参数	(315)
§ 9.1.2	等效单自由度体系	(316)
§ 9.1.3	土层深度	(317)
§ 9.1.4	基础质量	(319)
§ 9.1.5	桥梁结构	(319)
§ 9.1.6	第二振型	(320)
§ 9.2	水平传播波的影响	(321)
§ 9.2.1	研究的结构	(323)
§ 9.2.2	斜入射 SH 波	(324)
§ 9.2.3	斜入射 P 波和 SV 波	(327)
§ 9.2.4	瑞利波	(331)
§ 9.3	实例	(334)

§ 9.3.1	反应堆建筑、反应堆辅助室和燃料处理室之间通过 土的耦合	(334)
§ 9.3.2	桩-土-桩相互作用	(335)
§ 9.3.3	受水平传播波作用的双曲冷却塔	(34 ²)
§ 9.3.4	在水平传播波作用下具有隔震支座的核岛	(344)
§ 9.4	结论要点	(349)
§ 9.4.1	合理考虑因素	(349)
§ 9.4.2	模拟问题	(350)
§ 9.4.3	记录的现场特性	(351)
参考文献		(355)

第一章 绪 论

§ 1.1 土-结构相互作用分析的目的

结构动力学研究的是确定在动荷载下结构应力和位移的计算方法。由于结构尺寸是有限的，故能较容易地确定一个具有有限自由度的振型，列出对应离散结构的运动方程，并用已有的一些成熟方法即可求得它们的解。但是，结构与周围的土之间通常会产生相互作用，因此，单独分析结构是不够的。在许多情况下（如地震），动荷载是作用在结构周围的土上的，这就说明必须对土加以模拟。土是一种半无限介质，属无界域。对于静荷载，可以引入虚边界这一概念，它处于离结构足够远的地方，荷载对它的影响在实用上可忽略不计。于是，土变成了有限域，可以用对结构的类似方法对土加以模拟。这样一来，就能直接对由结构和土组成的整个离散体系进行分析。但是，这种方法不适用于动荷载的情况，因为这个虚拟边界会将由振动结构所传出的波反射到已离散的土中而不让它们透过边界传至无穷远。因此，需要对无界基础介质作适当的模拟，这正是土动力学与结构动力学的不同之处。

土-结构相互作用分析的基本对象如图 1.1 所示，

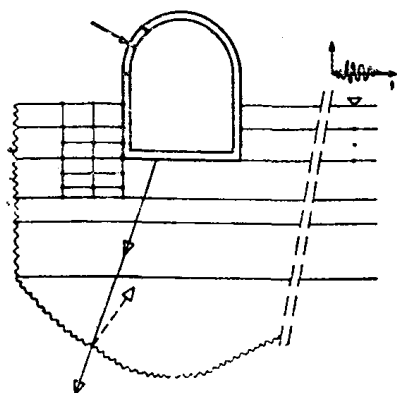


图 1.1 土-结构相互作用分析的基本对象

它表示一个层状土中的埋置结构受一个随时间变化的荷载作用。计算结构和土的动力反应时，考虑了模型边界上波能量的向外辐射。图中示意性地表示了结构和土域的离散模型，由层状半空间表示的半无限土域能反映出能量的损失情况。

§ 1.2 设计（地震）荷载的类型

直接作用在结构上随时间而变化的荷载有多种：由建筑内部转动机械所产生的周期荷载、冲击荷载〔如飞机撞击一个核电站（虽然发生这种事件的可能性很小，但它还是控制核电站的设计）〕，爆炸荷载等等。看来地震激励是最重要的荷载，分析起来也一定最复杂，它主要作用在土上。

地震由位于断层上的一定体积的岩石突然释放能量而产生，震源通常离场地很远，并且在相当深处。即使地震发生机制和地震波传播到场地的路径资料非常清楚（实际上并非如此），要详细地模拟它仍然是不可能的，因为与结构相比，整个区域的尺寸实在太太。总而言之，所包含的许多不确定因素使得分析整个地震震源问题显得没有什么意义。

当今的地震工程科学水平只允许考虑当地的场地条件对地震输入运动的影响。通常的分析步骤可概括如下，决定位于自由场（在建造建筑物之前未经开挖的场地）表面控制点的地震动（如随时间变化的加速度），如图 1.1。为了做到这一点，就要评价这一区域的震害情况，由结构工程师或有关部门确定可以接受的概率。这一概率反映在结构整个使用年限内超出设计地震的程度，概率大小取决于结构的种类。对于一个有潜在灾害的结构，如核电站，这个概率值要选得很小；对于那些在地震时仍须完全正常使用的结构（如医院或消防队），这个概率能取稍大一点的值。但在具体设计中还需要能表征地震动的最重要参数（如地面峰值加速度）。其它参数，如地震持续时间和频率成分，大多由

工程地震工作者根据这个地区以往的地震凭经验加以确定。做这些工作时，须粗略地考虑震源机制、传播路径、当地的地质条件和场地的土质条件。以上各点均是在土-结构相互作用实际分析之前进行的，从中定出所选控制点的设计地震动。最大不确定的因素就产生在此初始阶段。人们不得不作一些相当任意但具有广泛影响的假设。但是，讨论地震工程中这些非常重要的问题已超出本书的研究范围。

为分析土-结构相互作用，就得有一个从所要分析的场地或至少是从类似场地的观测记录中导出的设计地震动。从一点的这个控制运动出发，可以计算整个自由场的地震动（即时、空的变化）。在讨论场地地震反应时会明显看出，只有对控制点的波型作相当任意而又能为人接受的假设后，才能做到这一点。这些受上述工程地震工作者观点影响的假设会影响控制点以外自由场反应的振幅和频率成分，但所有的解都与当地土质条件相适应。例如，假设地表控制点的运动由竖向传播的波所引起，则自由场运动随深度的变化就可由计算得到（图 1.1）。在这种情况下，水平方向的运动是均匀的。除了影响自由场地震反应外，当地的土质条件也影响土-结构体系的实际相互作用。土的开挖和结构的建造会改变土的动力体系，结构在埋设的界面上与土发生相互作用会改变自由场的地震动。在分析土-结构相互作用前，作用在结构上的地震动是未知的。总之，分析地震激励下土-结构相互作用包括两个不同的方面：第一，确定场地的自由场反应；第二，计算在地震环境下自由场上建有结构后地震动的改变和实际相互作用。在以后的章节里大多考虑地震作用，而直接作用在结构上的荷载将作为特殊情况来考虑。

§ 1.3 土-结构相互作用的影响

为说明土-结构相互作用的主要特征，现将建在基岩上和埋