

水工建筑物的

苏·C·I·舒尔曼著·杨显明等译

抗震计算



水工建筑物的抗震计算

[苏]С.Г.舒尔曼著

杨 显 明 等 译

水 利 出 版 社

内 容 提 要

本书阐述水中振动的建筑物(重力坝、轻型坝、进水塔、管桩等等)的抗震计算方法基础。分析了物理上的假设,探讨了原始方程的可能简化,介绍了计算方法及其实例。

本书供研究与设计水工建筑物的科学工作者与工程师,以及水工专业的大学生与研究生之用。

* * *

本书译者:杨显明(前言、第一章、第二章),楼申芬(第三章),傅信平(第四章),毛德勤(第五章),舒述君(第六章),雷鸣掇(第七章)。全书由杨显明总校;由李永谦(前言、第一章、第二章),陈久宇(第三章、第五章、第六章),夏维洪(第四章、第七章)审阅。本书最后请南京水利科学研究所沈珠江和张秉友同志对译文进行了校核。

С. Г. ПУЛЬМАН
РАСЧЕТЫ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
ВОДНОЙ СРЕДЫ
«ЭНЕРГИЯ» МОСКОВА 1976

水工建筑物的抗震计算

[苏] С. Г. 舒尔曼著

杨 显 明 等 译

*

水利出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 12 $\frac{3}{4}$ 印张 274千字
1980年11月第一版 1980年11月北京第一次印刷

印数 0001—3880册 定价 1.55元

书号 15047·4088

前 言

在地震活动区兴建水利工程，需要制订一些能确保水工建筑物结构的强度、可靠性和经济性的抗震计算方法。

水工建筑物与工业和民用建筑物相比，其抗震计算的特点是，必须考虑水介质的影响。水介质的存在，导致水工建筑物承压面上有一个静水动力以外的附加的动水压力，还会引起结构自振频率与振型的改变和产生附加的阻尼。这些对建筑物的应力-变形状态都会有严重影响。

在目前所应用的抗震动力理论范围内，水工建筑物的计算方法通常是基于同时研究结构动力方程和流体动力方程，即求解流体弹性问题。这个问题，非常复杂，而且形式多样。因为水工建筑物无论其结构形式，还是采用的建筑材料及工作条件，都是千差万别的（例如各种不同型式的混凝土坝、土坝、各类引水建筑物、隧洞、输水管、闸门等等）。若要解答这个问题，就须引用工程地震学、抗震理论、流体动力学的最新概念，解算流体弹性问题的各种方法，以及借助电子计算机来实现其解算的方法。解决这些问题会有不少困难，近二十年来，人们对解算这些问题的方法，以及考虑水介质影响的各种近似方法作了大量的研究。虽然在这方面已取得了一定的进展，但总的说来，水工建筑物的抗震动力理论离其完善地步还很远。

本书专门论述同水工建筑物及其构件的抗震计算有关的流体弹性的一些基本问题。本书对地震作用及建筑物的各种

抗震理论也作了概述，列出了结构物的动力学与流体动力学的基本方程组，探讨了建立各种图式途径及其求解的基本方法。此外，还研究水工建筑物及其构件同液体的动力相互作用；这些结构式构件可以减化成杆件、板、板系及圆柱形壳体，也就是说我们所阐述的方法，是针对下列结构物的，如混凝土重力坝、重力拱坝、支墩坝、各种防护墙、平板闸门、柱形水塔、壳体桩等等。本书分析了影响动水荷载数值及其分布的各种因素的作用，其中有地震振动性质、建筑物及水域的几何形态、水的压缩性、库底的声劲、建筑物的弹性柔度等等。全书内容均用计算例题阐述，这些例题是以初等的近似公式或以电算来完成的。十分重视线性谱理论（规范计算的基础）范围内水介质的影响。同时，还有许多重要研究成果，虽然与我们讨论的课题有关，但在下列名著中已有了充分详尽叙述，故本书不再罗列，仅作相应摘引。如И.И.高里琴布拉特、Н.А.尼古拉耶考、П.П.柯尔马奇、И.Г.拿毕特瓦里捷、М.Т.乌拉斯巴也夫等等的著作就是。至于液体与土坝的动力相互作用这一类问题，目前研究尚少，这类问题需要引用饱和土动力学方法以及其他一系列方法。因此本书也难以探讨。

参考文献的附录，不能认为是完整全面的，它只包括与所研究题目有关的一些主要著作。

本书供研究水工建筑物抗震问题的工程师及科学工作者，以及有关专业的大学生及研究生之用。

工学硕士В.Ф.伊凡尼谢夫在本稿付印前提了意见与建议，作者对此表示感谢。

作者

目 录

前 言

第一章 建筑物抗震计算基础	1
1-1 地震作用概述	1
1-2 抗震的基础理论	5
1-3 从静力理论计算水介质影响	17
1-4 单质量体系的振动	20
1-5 有限个自由度体系	31
1-6 具有分布参数的体系	38
1-7 关于液体中结构物地震振动问题的一般提法	46
1-8 韦斯脱伽特问题及其推广	52
第二章 流体力学方程及结构动力学方程	64
2-1 引言	64
2-2 基本的流体动力学方程	66
2-3 表面波	71
2-4 液体压缩性的作用	76
2-5 卡门近似法	88
2-6 结构动力学基本方程	95
2-7 流体弹性方程组	104
第三章 解流体弹性问题的基本方法	107
3-1 引言	107
3-2 付里叶级数法	112
3-3 关于在空中和液体中自振振型等同性的假定	114
3-4 布勃诺夫-加辽金方法	125

3-5	积分方程法	133
3-6	流体弹性问题的有限差分法	148
第四章 作用在刚性建筑物上的地震水压力		151
4-1	引言	151
4-2	作为刚性整体的矩形水域的振动	157
4-3	矩形水域的墙和底的振动	173
4-4	水域深度变化的近似计算(平面问题)	198
4-5	各种几何外形水域的振动	209
4-6	用有限差分法解平面问题	233
4-7	最简单的非稳恒问题	250
第五章 板和板式结构的振动		261
5-1	引言	261
5-2	直立墙板的自振	262
5-3	直立墙的强迫振动	279
5-4	重力坝地震振动的近似理论	288
5-5	弹性墙的非稳恒振动	311
5-6	平板支墩坝振动的基本频率	324
5-7	板式结构系统振动问题的计算实例	330
第六章 圆柱形壳体的振动		335
6-1	问题的提出	335
6-2	圆柱形杆件的弯曲振动	342
6-3	圆柱形壳体的振动	353
6-4	液体对圆柱形重力拱坝振动基本频率的影响	362
第七章 与液体相互作用的建筑物抗震性		
概率理论基础		368
7-1	问题的提出	368
7-2	刚性贮液池的随机振动	374
7-3	单质量体系振动	376
7-4	具有分布参数的系统	379
参考文献		384

第一章

建筑物抗震计算基础

1-1 地震作用概述

地震时建筑物的应力-变形状态及其强度和可靠性，是同地基的运动性质、建筑物的结构形式及其惯性、刚度与阻尼的特性有关。

建筑物抗震计算的最重要参数是加速度、位移及地基的振动周期。但要给定这些参数是相当困难的，因为地表上土的地震振动是复杂的，无规律的。上中某一点的振动同许多而且很难估算的因素有关，例如地震机理、地震能量、震源距与地震深度、谱组成和辐射方向、地震波通过的某段地壳的成分与结构、该点的土质条件等等。

地震时建筑物的扰动影响十分复杂，这就成了建筑物抗震计算方法发展途径上的主要困难。

研究现有的强烈地震的加速度曲线图，尽管每次记录没有规律性而只具有个别性质，还是可以发现地基上土振动过程的某些特点[参考文献47]：

地震振动过程乃是一种振幅与周期均为变量的非周期性振动（两个相邻的零值加速度之间时间间隔的一倍，称为周期）；

振动过程总的持续时间约为10~40秒，震级及震中距越大，持续时间就越长；

在加速度曲线图的开始阶段，振幅较小，周期较短，在

中间阶段，振幅最大，在结束阶段，周期较长；

在记录上偏差（振幅）的数目很大，通常超过100；

振动周期的基本范围为0.10~1.50秒，卓越周期在0.2~0.8秒范围内。

加速度的两个水平分量通常相差不大，垂直分量通常较水平分量小30~40%，尽管也曾遇见过垂直振动十分强烈的地震例子。

可以大致认为，在 $0.10 \leq T \leq 0.50$ 秒周期范围内，加速度并不随周期变化而改变。当 $T > 0.50$ 秒，加速度将随周期增大而减小，而振动速度则改变很小。因此，表1-1MSK-64地震烈度表中（该表是把当地的地震烈度与土的最大速度及加速度联系起来），对于 $0.10 \leq T \leq 0.50$ 秒周期，则给出加速度；而对于 $0.5 \leq T \leq 20$ 秒，则给出振动速度。

表 1-1 当不同烈度的地震时振动的特征值
(MSK-64地震烈度表) [参考文献47]

烈 度 (度)	W_0 (厘米/秒 ²)	v (厘米/秒)	x_0 (毫米)
5	12~25	1~2	0.5~1.0
6	25~50	2.1~4	1.1~2.0
7	50~100	4.1~8	2.1~4.0
8	100~200	8.1~16	4.1~8.0
9	200~400	16.1~32	8.1~16.0
10	400~800	32.1~64	16.1~32.0

地基的加速度被采用来作为建筑物抗震计算的地震基本特征。这一特征值以地震系数 k_e 的形式表示，也就是某个设计计算的地基地震加速度 W_0 与自由落体加速度 g 的比值，即：

$$k_c = W_0 / g \quad (1-1)$$

在现行规范 СНиП III-A.12-69 [参考文献80] 中, 对抗震工程具有实际意义的烈度为 7~9 度范围内, 所采用的设计地震系数 k_c 与设计计算的地震烈度 (以度计) 的关系列于表 1-2。

表 1-2 地 震 系 数 值 k_c

设计计算的地震烈度(度)	7	8	9
地 震 系 数 值 k_c	0.025	0.05	0.10

同时, 根据规范 [参考文献80] 列于表内的设计地震烈度 (度), 可以与基本烈度, 也就是与地震区划图所确定的地区烈度不一致。例如, 对特别重要的房屋或建筑物, 设计地震烈度要比施工地点的原来地震烈度有所提高; 对于大多数种类的房屋和建筑物, 则可以相同; 而对于不太重要的建筑物, 也可以降低。鉴于承压的水工建筑物具有特殊的重要性及其运行的特点, 现行规范 [参考文献81] 规定, 在地震荷载公式中引入相应的系数 (见 § 1-2)。

必须注意, MSK-64 地震烈度表给出的最大加速度与规范中所采用的彼此差别很大。出现这种差别的原因: 规范中按惯例保存的 k_c 值, 相应于过去静力法计算时被认为是不同烈度地震的加速度。这种加速度相应于周期 $T = 0.1$ 秒以上的振动, 当时已认为是最大的加速度。然而当强烈地震时, 真正的最大加速度属于周期 $T = 0.1 \sim 0.5$ 秒, 大大超过 $k_c g$ 值 (达 2~4 倍) [参考文献47]。按动力法计算时, 用动力系数 β_i 作改正值引入加速度值 $k_c g \beta_i$ [参考文献65]。同时, 采

用表 1-2 列出的设计值 k_0 ，就相应于按计算（容许）应力估算建筑物的抗震稳定性，而表 1-1 内 MSK-64 地震烈度表给出的最大加速度，在类似加速度曲线图计算时，利用来按极限状态估算建筑物的抗震稳定性。

地震烈度、卓越振动周期及振动过程的其他特征，在很大程度上同土的种类有关。现有资料表明，软土的地震加速度比岩土的大，饱和土也会导致加速度增大（这对水工建筑物特别重要）。现行规范内列出了地震烈度（度）与土类的关系（表 1-3）。

表 1-3 地震烈度（度）的变化（根据工程-地质资料）[参考文献 81]

土的分类 (按地震性质)	地 基 条 件	区域地震烈度的订正值 (度)		
		7	8	9
I	坚硬岩石和半石质地层，特别密实的大块碎石类土	6	7	8
II	硬粘土和硬亚粘土，大块碎石类土，砾石土和粗砂土	7	8	9
III	软的、塑性的粘土和亚粘土，中砂和细砂	8	9	9

规范[参考文献 80, 81]没有反映出卓越振动周期与土类之间的关系。地基的卓越振动周期，如果可以划分的话，则石质土的往往较软土要小，在 $T = 0.2 \sim 0.4$ 秒范围内。

在地震学著作中，对地震的作用均有较详细的阐述（例如[参考文献 1, 47, 48, 69]）。

关于地震作用所需的知识的范围，显然与采用的建筑物抗震计算方法密切相关。假如从静力理论出发，则取得地震系数 k_0 值就够了。如果按照某种简单的规律如调和规律研究

地基振动时，就必须给出 k_0 值和卓越振动周期 T 。按谱曲线（抗震的线性谱理论）计算时，除了 k_0 值，还须得出加速度谱，也即线性振子的最大加速度及其自振周期与衰减参数之间的关系（动力系数的谱曲线）。假如要获得建筑物的所谓真实的加速度曲线图，那就必须拥有类似条件下得到的强地震的记录等等。

对于建筑物来说，计算地震作用，实质上就是：1）确定地震荷载（惯性的、流体动力学的等等）以及相应的应力；2）核验抗震条件，也即将应力与荷载特殊组合的设计应力进行比较，以及相应地核验稳定性。本书主要阐述如何确定地震的动水荷载。

1-2 抗震的基础理论

制定出与液体相互作用着的建筑物的抗震计算方法，是同建筑物抗震理论目前的水平有着密切联系。众所周知，用经典的结构动力学的通用方法来解抗震问题所遇到的主要困难，在于不易给定扰动作用。如前所述，强烈地震时建筑物地基的振动运动，具有杂乱的无规律的特性，它与大量很难估算的因素有关。各种简化的地基运动规律，往往同实际的地震曲线图和加速度曲线图颇有出入，况且，目前地震仪测出的强烈地震记录，数量十分有限。这种状况，给抗震理论的发展及其目前的水平，造成一定的影响[参考文献65]。

建筑物遭受地震作用的计算方法，在其发展的最初阶段，起主要作用的是所谓抗震静力理论。它在本世纪初产生于日本（详见大森和伊野的著作），一直盛行到五十年代中叶。据这种理论，结构的弹性变形不予考虑，而其振动仅取

决于与地基一起的刚性运动。显然，这种情况下，建筑物各点的加速度，等于地基的加速度，而水平方向的地震惯性力，沿高度的分布与质量分布类似。作用在质量 m 上并看作是静力的最大值为：

$$S = mW_0 = k_0 g m = k_0 Q \quad (1-2)$$

式中 $W_0 = k_0 g$ ——建筑物地基的最大计算加速度。

这类计算方法对绝对刚性建筑物（其弹性位移与地基位移相比，微小得可以忽略不计），是近乎正确的。同时必须指出，即使是绝对刚性的建筑物，例如重力坝，如果地震振动的卓越频率与建筑物振动的基本频率相接近（即在共振条件下），其弹性位移也会有相当的值。对于高耸的和柔性的建筑物，静力理论在原则上是不可能给出满意成果的，这一点在许多强烈地震时已得到证实。

只有根据动力理论，才能得到地震作用时建筑物的应力-变形状态的可靠知识。首先朝这方向从事研究的是日本学者物部，他于1920年研究了单自由度体系，在地基为振子调和（正弦）运动时，不考虑内摩擦（保守的线性），其方程为：

$$m\ddot{y} + ry = -m\ddot{Y}_0(t) \quad (1-3)$$

的解，其中

$$\ddot{Y}_0(t) = -W_0 \sin \omega t \quad (1-4)$$

如果忽略不计，由于能量消散而迅速衰减的自由振动，则具有下列形式：

$$y(t) = \frac{W_0}{\omega_0^2} \frac{1}{1 - \omega^2/\omega_0^2} \sin \omega t = \frac{W_0}{\omega_0^2} \frac{\sin \omega t}{1 - T_0^2/T^2} \quad (1-5)$$

式中 $\omega_0 = (r/m)^{\frac{1}{2}}$ ——体系的自振频率； $T_0 = 2\pi/\omega_0$ 。

考虑到质量 m 的平移和弹性位移，地震的惯性荷载等于：

$$S = -m(\ddot{Y}_0 + \ddot{y}) \quad (1-6)$$

把 $\ddot{Y}_0$ 及 $\ddot{y}$ 代入这表达式后，可得到最大值：

$$S = k_c g m \frac{1}{1 - T_0^2/T^2} = k_c g m \beta, \quad (1-7)$$

$$\beta = \frac{1}{1 - T_0^2/T^2}$$

式中 β 值考虑了体系的动力性质，称为动力系数。

因此，公式 (1-7) 的 S 值与静力理论的 S 值不同之处在于因子。

考虑内摩擦（例如，按索洛金假说），则动力系数的表达式为：

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + \gamma^2}} \quad (1-8)$$

式中 γ —— 衰减参数。

K.C. 查符雷也夫 (1927年) 对上述方法曾作了很大发展。他考虑了地震的初始阶段，给出地基的运动为：

$$Y_0(t) = A \cos \omega t \quad (1-9)$$

结果得到动力系数表达式：

$$\beta = \frac{2}{1 - T_0^2/T^2} \quad (1-10)$$

由此得出：考虑自由振动将使地震荷载较公式 (1-7) 的增大一倍。

以公式 (1-4) 或 (1-9) 的规律表示地基的运动，这是地震时土的振动的最粗略的图式，然而这样来研究无疑是有益的。因为可以使我们的详细分析作用于建筑物上任何足够复杂过程的各种调和分量的效应，这种复杂过程以付里叶级数

或积分的形式表示之。以机率方法解抗震理论问题时，也需要知道建筑物对调和作用的反应（传递函数）（详见第七章）。

在动力法发展的初始阶段，计算柔性建筑物（高大的房屋、烟囱等等）时，实际上仅局限于将研究单质体系振动得到的动力系数 β ，应用到静力理论的公式中去。

除上述最简单的调和规律，还研究土的运动的其他简化方式：作用于建筑物地基的加速度脉冲（A.Γ.纳查洛夫称之为“地震脉冲”[参考文献65]）、衰减正弦曲线、衰减正弦曲线之和等等[参考文献38, 65, 87]，这就使我们可以确定出建筑物对一系列特征作用的反应。但是，那时候动力理论主要缺点是，对地震时土运动规律的表征既复杂又不可靠，这就导致了发展出另一种动力法，称之为线性谱法或谱曲线计算法。

这种方法的基本内容，M.比奥在1933年曾作过说明，就是并不把建筑物的地震振动过程表征为地基运动的函数（即最后结果看成是时间的函数），而是按振动过程的个别分量（振型），确定出振动过程的参数（加速度、速度、位移）的最大值。这些数值可借助于对动力特征值（自振周期和能量消散指数），不同时的单自由度振动体系（线性振子）性状的分析来予以确定，为了取得这种知识，通常采用以往地震的记录，结果得到所谓谱曲线。后者将地震加速度的、速度的和振子位移的最大值，同其自振周期与能量消散指数联结一起。借助这种曲线，不必表征地基的运动，就可以确定出复杂振动体系中最大地震应力。根据以下理由，得出线性谱法的计算公式。

十分清楚，在另值初始条件及考虑内摩擦（例如按索洛

金假设) 情况下, 线性振子的地震振动方程的通解具有下列形式:

$$y(t) = -\frac{1}{\omega_0} \int_0^t \ddot{Y}_0(\tau) \exp \left[-\frac{\gamma}{2} (t-\tau) \omega_0 \right] \sin \omega_0 (t-\tau) d\tau \quad (1-11)$$

体系的地震荷载等于:

$$S(t) = -m(\ddot{Y}_0 + \ddot{y}) = -mW(t, \gamma, T_0) \quad (1-12)$$

式中 $W(t, \gamma, T_0)$ ——线性振子(具有特征值 T_0 及 γ) 的地震加速度:

$$W(t, \gamma, T_0) = \frac{2\pi}{T_0} \int_0^t \ddot{Y}_0(\tau) \exp \left[-\frac{\gamma\pi}{T_0} (t-\tau) \right] \sin \frac{2\pi}{T_0} (t-\tau) d\tau \quad (1-13)$$

最大地震荷载:

$$S = \max S(t) = m \max [W(t, \gamma, T_0)] = mC_w(T_0) \quad (1-14)$$

式中 C_w ——根据仪器观测资料整编得出的加速度谱:

$$C_w = \max [W(t, \gamma, T_0)]$$

加速度谱 $C_w(T)$, 可以下列形式表示:

$$C_w = (T_0) k_c g \beta(T_0) \quad (1-15)$$

式中 $\beta(T_0)$ ——反映加速度谱性质的动力系数。

图1-1介绍规范 CHHII 所采用的 [参考文献80] 动力系数的谱曲线 $\beta(T_0)$ 。通过解析, 曲线的不同线段以表达式来表示:

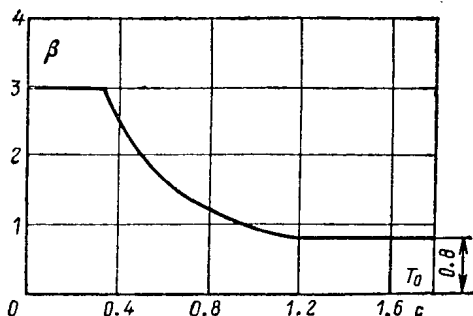


图 1-1 动力系数的谱曲线 $\beta_i(T_i)$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 3.0, \quad T \leq 0.33 C; \\ \beta &= 1/T, \quad 0.33 < T < 1.25 C; \\ \beta &= 0.8, \quad T \geq 1.25 C \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

同样方式，建立相应的位移谱与速度谱：

$$C_y = \max[y(t, T, \gamma)], \quad C_v = \max[v(t, T, \gamma)]$$

显然，加速度谱、速度谱与位移谱之间的关系为：

$$C_w = \frac{2\pi}{T} C_v = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 C_y$$

对具有几个自由度的体系，相应于第 i 振型的第 k 质量的位移，将由下式给出（详见 § 1-5）：

$$y_{ik}(t) = -X_{ik} \frac{D_i}{\omega_i} \int_0^t \ddot{Y}(\tau) \exp \left[-\frac{\gamma}{2} \omega_i (t - \tau) \right] \sin \omega_i (t - \tau) d\tau \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1-17)$$

式中 X_{ik} ——第 i 自振振型；