

# 港口水工建筑物 的抗震

〔苏联〕

教授科学技术博士

И. И. 库尔马奇

人民交通出版社

# 港口水工建筑物的抗震

〔苏联〕教授、科学技术博士

И.И. 库尔马奇著

范加仑、邱驹、连竞 译

宫维圣、林皋 校

人 民 交 通 出 版 社

## 港口水工建筑物的抗震

[苏联]教授、科学技术博士

И.П.库尔马奇著

范加仑、邱驹、连竞 译

宫维圣、林皋 校

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

宣化印刷厂印刷

开本: 850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张: 9.625 字数: 218 千

1981年12月 第1版

1981年12月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—1,750册 定价: 1.80元

## 内 容 提 要

本书是论述港口水工建筑物抗震特性的一本专著。书中收集了许多国家港口水工建筑物地震震害的实例，分析了各种类型港口水工建筑物在地震作用下的动力反应，并提出了合理选择抗震结构型式的建议。最后，还列举了一些港口水工建筑物的抗震计算实例。本书可作为大专院校港口工程专业教学参考书，并可供从事港口专业建设工程的科研、设计和施工人员参考。

本书由范加仑、邱驹、连竞合译，由宫维圣、林皋校。

# 前 言

在苏联广大地区，其中包括很长地段的海岸线和河流流域都存在着地震活动。地球的地震活动是经常发生的，并且给人类带来巨大的损害。这些破坏性活动一直持续到今天。近年来发生的许多地震已证明了这一点。

很久以前，实践就已提出，要制定地震区建筑物的设计方法问题，在这些设计方法中要考虑到相应的各种地震因素的影响。许多国家的学者都在进行这些问题的研究。在计算、设计以及创造若干抗震结构等方面都取得了重大成果。苏联学者在发展抗震工程的理论与实践等方面做出了很大贡献。

显然，现阶段对工业与民用房屋和建筑物的抗震问题已进行了足够满意的研究。但是，关于水工建筑物的抗震性科学研究，无论是研究的范围或是所取得的成果，规模都很小。这些研究工作在近二、三十年内进展得非常快。

无论在苏联国内或国外，关于水工建筑物抗震研究工作的主要部分是讨论大坝方面的问题，因为大坝是水电站枢纽的最重要的建筑部分。但是，关于水运工程水工建筑物（海港与河港水工建筑物，水力枢纽过船建筑物等）抗震性问题的书籍则极为稀少。个别论文和工作报告散见在很多国家的各种刊物上，但没有系统地整理，看法也是各式各样。甚至连港口水工建筑物基本结构型式的抗震性问题的总结工作也没有做过。

运输工程水工建筑需要大量的投资。为此，要求有根据的计算方法，合乎经济的结构以及在强度、稳定性和耐久性等方面有合适的指标。与工业和民用建筑不同，水工建筑物抗震性研究要和建筑物周围水体的动力作用的研究联系起来。

在一般非地震条件下，港口水工建筑物的组成和结构，以及它们的设计与计算问题在很多著作中有了叙述。读者对上述这些问题在任何程度上都是熟悉的。因此，本书对这些问题不作研究分析，只是从地震作用下水工建筑物工作情况和保证它们的抗震性的观点出发，部分地提到这些问题。本书对人所共知的工程建筑物抗震原则的论据也不作叙述。这些原则在专门文献中可以查阅到。

在书中所研究的是桩基和重力式水工建筑物抗震性问题。这些水工建筑物是水运工程枢纽（港口码头和防波堤建筑物等）中的基本结构型式。这些研究结果的应用将更广泛些，因为上面提到的建筑物结构型式，也同样包括在水电站、土壤改良、卫生工程以及其它建筑物总体之中。

应当指出，对地震的破坏性作用，既不允许估计不足，也不允许估计过高。这两种情况都会导致经济上的失算：第一种情况，将要求大量投资来修复建筑物；第二种情况，在建造建筑物时要求增加大量的投资。对苏联国内和国外抗震建筑经验的研究和分析地震时水工建筑物的震害情况，都表明：通过下列措施有可能较大幅度地降低建筑费用。这就是选择合适的建筑物结构型式，使其质量和刚度有合理的分配；选择建筑材料以及抗震条件较为有利的建筑场地等。

显然，本书是港口水工建筑物抗震问题的第一本综合专著。

# 目 录

前 言	1
第一章 关于抗震建筑的若干基本概念和港口水工建筑物的 结构型式	1
§1-1 概述	1
§1-2 在地震作用下建筑物计算标准的基本原理	8
§1-3 桩式水工建筑物的基本结构型式	14
§1-4 重力式水工建筑物的基本结构型式	21
第二章 港湾和沿岸的地震现象、海啸	31
§2-1 港湾沿岸地震	31
§2-2 海啸现象	37
§2-3 某些计算原理	48
§2-4 海啸对海洋水工建筑物的作用	58
§2-5 抗海啸措施	66
第三章 地震区港口水工建筑物的破坏、损坏及其构造	75
§3-1 桩式建筑物	75
§3-2 重力式建筑物	96
§3-3 若干特种结构的建筑物及一些总的评述	115
第四章 弹性活动地基上桩式建筑物动力学的主要问题	123
§4-1 问题的提出	123
§4-2 刚体振动的地震方程（空间问题）	128
§4-3 无阻尼自由振动	133
§4-4 考虑阻尼的自由振动	140
§4-5 地震作用时的强迫振动	147
§4-6 刚性桩台建筑物的静力计算	151

§4-7	单桩和柔性墙由于端部运动引起的内力.....	161
<b>第五章</b>	<b>弹性活动地基上重力式建筑物的动力学基本问题</b> .....	<b>172</b>
§5-1	重力式建筑物的地震振动方程(空间问题).....	172
§5-2	无阻尼自由振动.....	178
§5-3	有阻尼自由振动.....	183
§5-4	地震作用下的强迫振动.....	187
§5-5	补充和重力式建筑物现场观测成果.....	191
<b>第六章</b>	<b>水的动力作用</b> .....	<b>199</b>
§6-1	底端固接顶端铰接的弹性桩和墙.....	199
§6-2	两端固接的弹性桩和墙.....	209
§6-3	柔性单桩和墙上的水的动力作用计算实例.....	214
§6-4	补充建议.....	222
§6-5	对刚性迎水面建筑物实际应用的建议.....	228
<b>第七章</b>	<b>桩式建筑物的实用计算及保证其抗震性的措施</b> .....	<b>235</b>
§7-1	桩式建筑物计算的几个问题.....	235
§7-2	桩式建筑物抗震性的实用计算.....	240
§7-3	地基的鉴别.....	249
§7-4	对建筑物和结构抗震性的要求及抗震措施.....	254
§7-5	某些建筑物和结构的抗震性能.....	261
<b>第八章</b>	<b>重力式建筑物的实用计算问题及保证抗震性措施</b> .....	<b>267</b>
§8-1	有关重力式建筑物计算的几个问题.....	267
§8-2	重力式建筑物抗震性的实用计算.....	271
§8-3	算例.....	278
§8-4	某些建筑物和结构的抗震性.....	291
	<b>参考文献(略)</b> .....	<b>300</b>



# 第一章 关于抗震建筑的若干基本概念和 港口水工建筑物的结构型式

## §1-1 概 述

地球这个行星看不到地震静止的现象。每年，仪器记录达百万次地震。在一年过程中约10,000次地震被人们所感觉。它们的大多数是小地震，但是，按照引用的苏联国内外文献的综合材料，其中约1300次是6级或6级<sup>①</sup>以上的地震。一年中有很多次地震会引起较大的破坏，但其中只有几次造成严重的后果。还需要指出，约2/3的地球表面是被水复盖，以及由于特殊的当地特点，有部分地震未被记录下来。

在地球地震图上划分出一系列主要和次要的地震带。两个主要的非常活动的地震带——太平洋地震带和地中海—横贯亚洲的地震带占据了最首要的地位〔95〕。有时候，把后者分为两个单独的主要地震带——地中海地震带和横贯亚洲地震带。除了上述以外，还划出次要的地震带：北极——大西洋地震带（通常也称北极地震带或大西洋地震带），印度地震带等。上述地震带基本包括了各大陆沿洋沿海的地带。

太平洋地震带实际上形成一个环，它基本上涉及与太平洋相连的大陆沿岸地带（亚洲的东部沿岸，南北美洲的西部沿岸）。其中，也包括了苏联远东地区的大部分海岸（堪察加，千岛群岛，科曼多尔群岛等）。地中海——横贯亚洲地震带包括地中海与黑海区域、里海南部，进而横越亚洲大陆的领土。北极——大

<sup>①</sup> 译者注：本书中多处震级与烈度的概念含混不清，故此处1300次6级地震的数字不可靠。

西洋地震带，其中包括勒拿河口，更进而通过斯匹次卑尔根群岛，冰岛，然后沿着大西洋山脉向南穿过赤道。印度地震带造成东非和南亚海岸很长地段的地震。

大多数地震是由于地壳中的构造过程引起的——构造地震。在地壳中，大量的应力慢慢地聚集，一旦应力“释放”，则会产生物质运动。少数地震是由于火山爆发过程造成——火山地震，或是地下孔洞中岩体坍塌，地面上斜坡岩崩——塌陷或是岩崩地震。

烈度为6~9度的地震活跃地区约占苏联领土的20%。这些地区包括广大的大洋和沿海岸边，湖泊和河流区域。在苏联法规中〔108〕列举苏联领土地震区划图，和地震区居民点地震烈度表。

在二十世纪前半期，在苏联领土上曾经记录下约3750次大地震：其中在克里米亚——55次，在高加索（外高加索除外）——150次，在堪察加——351次，在普里贝加里——315次等〔27〕。但是由仪器记录下来的所有地震，其中也包括小的地震有上述数字几十倍之多。千岛群岛——堪察加地震带在现代是最活跃的。

苏联领土各个海岸地段的地震区划分图见图1-1(远东海岸)，图1-2(黑海)和图1-3(里海)。远东、黑海和里海的很长海岸带是地震活跃区。地震活跃区还包括许多河、湖流域和岛屿。例

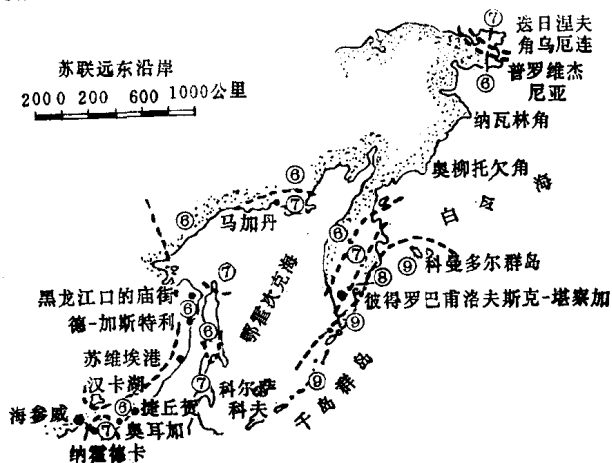


图1-1 苏联远东海岸地震区划分图

如，堪察加半岛和贝加尔湖沿岸地段为8度和9度地震区，伊塞克湖为9度地震区，千岛群岛和科曼多尔群岛为9度地震区等。

在海、湖和河流沿岸有许多国民经济上的重要港口。在新旧各港口以及沿岸许多地点修建了许多水运工程水工建筑物。仅仅已得到经济开发的苏联远东海岸，就花费了大量的建筑投资。这些建筑应该考虑地震因素。对工程师和水工技术人员，必须具有有关工程地震方面的知识，以及与抗震计算有关的专门的建筑物动力学问题的知识。

与水工建筑物设计和施工有关的所有问题，甚至在一般非地震条件下，也是远远没有足够的研究。在决定波浪作用力，土压力，软基稳定性等问题时，采用了许多假定。所以即在现代，在世界各国的港口建设实践中，还发生水工建筑物的损坏，甚至毁坏。

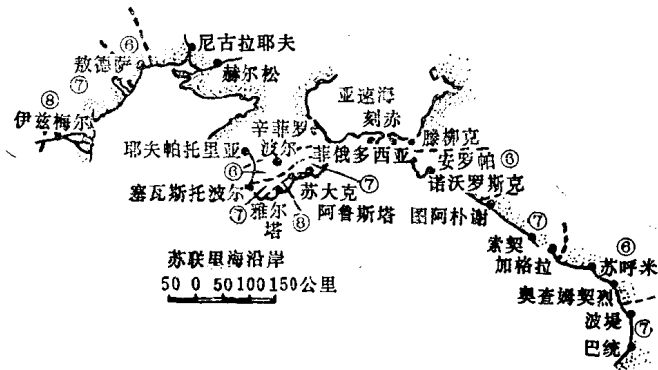


图1-2 苏联黑海沿岸地震区划分图

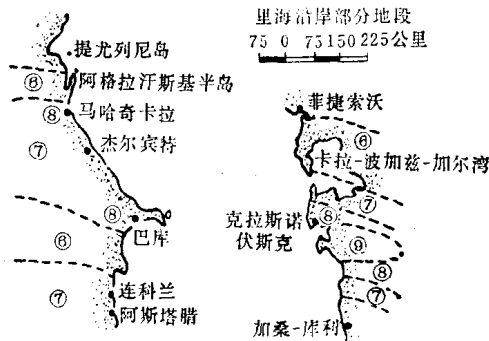


图1-3 里海沿岸地震区划分图

显然，与水工建筑物抗震有关的各种问题也远不是都研究过。例如，建筑物与土体的相互作用是相当复杂的。这种作用的过程是个动力问题，对它的研究还需要做大量工作，而且要作长期的探讨（刚性与柔性的，有锚与无锚的挡土墙跟回填土体和块石之间的相互作用；考虑土和水的作用时，结构振动频率的确定等）。

应该注意到，无论是苏联国内的还是国外的规范都规定有综合的措施，其中也包括计算方法；这些措施应该是只保证主要受力结构的抗震能力。在地震时，受力结构如能稳定，也就能保持整个建筑物的完好。这时候，可能发生：建筑物或其一部分有不大的剩余位移；若干部件有很大的塑性变形、裂缝，还有次要的受力构件受到损坏。这种做法，总的说来是合理的。显然，从经济理由出发，也不能要求在地震作用下建筑物完整无缺，且不谈技术上的困难。

在水工建筑物中，应该首先保证岸墙和桩框架等主要受力结构的完好性。至于次要构件的损坏（如码头铺面的破损，斜坡护面的位移，回填土的沉降），在地震后一段时间内可能造成使用建筑物的困难，但从总的说来并未使它不能使用。可以指出，譬如，在日本标准中立下一个基本原则，根据此原则在地震后来修复建筑物的费用，不应该超过初次投资的10%。

还应该注意一些情况。当设计烈度为7度和7度以上时，建筑物设计应该考虑地震的影响。很多海岸地带，还有湖泊，水库和河流沿岸具有6度的烈度。具有这种烈度的每一次单独的地震，对水工建筑物的主要受力结构不会造成严重的危险。但是不止一次的重复地震，虽然是低烈度，也能造成剩余变形的积累和建筑物的破坏。随后的水流作用（波压力、水流力、已变形地基的冲刷）同样也会促使建筑物的破坏。

所以对烈度6度的沿岸地带，当设计与建造水工建筑物时必须在一定程度上考虑到保证抗震性措施的一般要求。这些要求包括：选择抗震性能较好的建筑物结构型式、建筑材料，选择地质

条件较好的建筑场地。

地震时结构中的应力大小取决于地基运动的性质、建筑物的结构图式、建筑物中质量和刚度的分布以及建筑物的阻尼性质。下面介绍若干有关地基运动特性与参数的规定，这些规定在以后计算中将用到它。显然，对工程建筑物计算来讲，最重要的参数是地基的加速度、变位以及振动周期的大小。

一般来讲，地震时土基的运动是按照复杂的，而且至今对它还没有足够确切了解的规律进行的。通常，这些地基运动具有杂乱的性质，而且很难对这些运动提出一些肯定的分析表达式。也就是说，地基变位的性质是不稳定的随机过程（但在计算建筑物时，通常采用稳定的过程）。在强烈地震时，不论是振动的振幅还是周期都特别不稳定，直接邻近震中的地点更甚。

在抗震理论中，当进行建筑物的实际计算时，地基运动常常假定按正弦定律（物部）或是余弦定律〔34〕作不衰减的简谐振动；或是假定为衰减的简单周期运动的过程。在上述分析地基运动的基础上，有人建议〔43,44〕：当进行建筑物实际计算时，地基运动按照一种衰减的正弦规律振动，即：

$$x_0(t) = Ae^{-\epsilon t} \sin \omega_0 t,$$

式中： $A$ ——振幅； $\epsilon$ ——衰减系数；

$\omega_0$ ——地基振动频率，其值可在一定范围内变动（ $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ ， $T_0$ ——地基振动周期）；

衰减值取  $\epsilon T_0 \cong 0.10$ ；

加速度为

$$\ddot{x}_0(t) \cong -A\omega_0^2 e^{-\epsilon t} \sin \omega_0 t$$

值得注意的还有关于地基运动规律的著名建议，其形式为：

$$x_0(t) = Ate^{-\epsilon t} \sin \omega_0 t$$

这个公式较好地表达了初始时刻的运动（当  $t=0$  时，位移与速度均为零）。在抗震结构方面有名的一位苏联专家 И.Г.纳别特瓦利译〔74,75〕认为：在面波情况下土体运动的阻尼实际上可

以不予考虑，并认为这个运动可按稳定的简谐振动进行。对在深层波作用下的土体次生运动建议：

$$x_0(t) = A(\cos \omega_0 t - 1) + A_1,$$

$$\ddot{x}_0(t) = -A\omega_0^2 \cos \omega_0 t.$$

在面波作用下的运动为：

$$\ddot{x}_0(t) = B_0 \cos \omega_0 t$$

这里没有提到在一些专门文献中被研究过的一些建议：如关于采用由实测的地震加速度曲线所化引的某些地震加速度谱曲线，作为计算曲线的建议；地震随机理论和地震仪测理论等建议。

特别需要指出下列一些情况。当地震时，建筑物基底下地基的不同质点，其运动是不一样的。甚至当“规则的”平面地震波通过时，地基中各质点的运动也在或多或少程度上有相位差存在。但是，当求解作用在建筑物上地震荷载的绝大多数问题时，通常认为基底下地基的所有质点的运动，在每一个给定的瞬间是相同的。这等于说，地基中地震波的长度远远大于计算平面上基底平面的尺寸。采用这个假定，一方面可简化解题时数学计算，另一方面是因为在大多数情况下，对建筑物来讲，“长”波比“短”波更危险。

可以引用在文献中得到公认的地震面波在土中传播速度的下列平均值：

在岩基（花岗岩、石灰岩、砂岩等）中， $C=2.0\sim 6.0$ 公里/秒，甚至更大些。

在半岩基和大颗粒地基（泥灰岩、碎石、砾石等）中， $C=1.0\sim 2.5$ 公里/秒；

在砂土和粘性土地基（砾砂、粗砂、细砂、粘土、亚粘土、亚砂土）中， $C=0.5\sim 1.6$ 公里/秒；

在软土地基（淤泥、填土等）中， $C=0.2\sim 0.5$ 公里/秒。

传播速度  $C$ （公里/秒）与波长  $L$ （公里）的关系式为：

$$L = CT_0$$

式中： $T_0$ ——地基振动周期。

当计算水工建筑物时，基本上采用  $T_0 \cong 1.0$  秒。于是在砂土和粘性土地基中，地震波的最小波长为 0.5 公里（四分之一波长为 125 米）。大多数的港工建筑物的横向尺度往往在 25 米以内。当周期值较小时，相应地也减小了波长  $L$ 。由上所述可见，在计算横向截面时，对基底下地基中土质点为同步运动的假定，在大多数情况下实际上是可以接受的。

地震时，地基振动参数值取决于地震力的大小、土的类别、地质层理的形式与间隔等。地基加速度值是用来进行建筑物抗震计算的最合适（尽管还不是充分的）的标准之一。在苏联“建筑法规”中所列的各种地震系数值  $K_c$ ，也就是给出了各类地基《综合的》计算加速度值  $W_0$ ，因为它们之间存在的关系式为：

$$K_c = \frac{W_0}{g}, \quad (W_0 = K_c g),$$

式中： $g$ ——重力加速度。

在文献〔67〕中，对地震烈度为 5 度到 8 度的振动周期与加速度值的大量实测记录所作分析表明：地基的运动是以变化的振幅和频率进行的。振动周期基本上在  $T_0 = (0.10 \sim 1.50)$  秒范围内，而个别瞬间某个实际加速度值则可能大大超过与  $K_c$  相对应的加速度值。所做的结论是：当  $0.10 \leq T_0 \leq 0.5$  秒时，可以近似地认为对应每个设计烈度其加速度是个定值。当  $T_0 > 0.5$  秒时，加速度随周期的增大而减小。

应当指出，在地球的个别地区发生毁灭性地震时，曾观测到的最大加速度值为  $0.5g$  左右。1891 年和 1923 年日本发生破坏性地震时，曾在软土地基上记录下最大加速度接近或超过  $0.25g$ （1923 年地震时，东京的不同地区的加速度随着土壤条件不同曾达到  $1.0 \sim 2.5$  米/秒<sup>2</sup>；在日本平均每年发生 5 次加速度约  $0.2g$  的地震）。在坚实地基情况下，加速度显著地减小。

陆地上地震时，地基振动的卓越周期一般在  $T_0 = (0.2 \sim 0.8)$

秒范围内。例如，根据日本和美国的资料，对个别地震卓越周期是：(0.3~0.5)秒；(0.5~0.6)秒，甚至为(1.0~1.2)秒[44]。1923年日本地震时，曾记录下周期  $T_0$ ：在密实地基(0.3~0.5)秒；在冲积土地基(0.6~0.9)秒；还有周期  $T_0 = 1.33$ 秒，甚至达4.9秒；振幅达11厘米。根据威·阿·贝贺夫斯基，雅·克列斯科夫等人的总结材料，强震时实测的地基振幅：对密实的岩性土没有超过6毫米，对干的粘性土地基不超过25毫米，在淤泥质和填土地基不超过100毫米。

## §1-2 在地震作用下建筑物 计算标准的基本原理

不久以前，世界各国考虑地震作用下建筑物的实用计算方法，还仅仅按所谓“地震静力理论”的建议来进行(大森、物部、内藤等)。按此理论，地震时建筑物与地基的位移是相同的，并且两者有相同的加速度  $W_0$ 。这样，作用在建筑物上的地震惯性荷载  $S$  等于：

$$S = \frac{Q}{g} W_0 = K_c Q$$

式中： $Q$ ——计及有效荷载的建筑物(或其构件)重量。

因为这个式子没有反映地震现象的一些基本特征和结构特性，所以，后来在公式中引入修正系数  $\alpha$ ，这样，公式成为：

$$S = \alpha K_c Q$$

也可以说  $K_c$  值规定得更详细，对它采用的数值与所计算的建筑物结构、土壤条件以及其它因素有关。

建筑物抗震理论进一步发展是沿着动力计算方法的方向进行研究，该法比较全面和更好地反映地震时建筑物的实际工作状态(K.C.萨富里耶夫、A.Г.那扎罗夫、И.Л.科尔钦斯基、С.В.麦得维捷夫、И.Г.纳别特瓦利译、С.В.波辽柯夫、А.П.西尼津、М.Т.乌纳斯巴耶夫、D.浩斯奈、M.比奥、K.卡那依等著



作)。

目前用动力法确定地震荷载已在苏联、中国、罗马尼亚、美国、墨西哥、加拿大、委内瑞拉、智利等国列入抗震建筑规范，还有许多国家也加以采用。按照规范，用动力法确定地震荷载之后，下一步的建筑物强度与稳定性的计算是将上述荷载按已有的静力作用的假定进行。日本抗震工程标准中的计算原则仍然基于静力法。但规程允许采用其它方法，条件是降低计算结果的可靠性。

苏联建筑法规 (СНП II-A.12-62) 中[108]，有关民用的、公用的、工业的以及农业上的房屋与建筑物的地震荷载部分都是基于动力法。对道路的人工建筑物如桥梁等也按动力法计算。但在水工建筑物部分，对挡水坝之类实体建筑物地震荷载的确定则建议按静力理论公式计算。这说明了水工建筑物抗震研究的落后现象。这个现象正在克服中。

苏联建筑法规 (СНП II-A.12-69)[107]中新增加了有关岸边建筑物的条文，这些条文的计算方法如前仍然基于动力法。地震地区水工建筑物设计规范正在制订中。现代科研所取得的成果，使得我们能够制订出地震作用下各种水工建筑物的专门设计规程，以“指示”的形式[109]出现。该“指示”的计算原理基于动力法。一般情况下，港口水工建筑物在地震作用下受到的附加作用力有自重引起的地震惯性力，以及水和土的地震作用力。

下面我们将叙述在规范中[37、107、108、109]所采用的按一般动力方法确定地震惯性荷载的最基本原理。它们对理解本书以后各章是必要的。这些原理的证明参见有关专门文献。

对各类建筑物的动力计算图式是一根弹性悬臂竖杆，杆上有若干由建筑物各部分重量和有效荷载组成的集中折算重量  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、…… $Q_n$ (图1-4)。竖杆作微幅的水平振动。竖杆全长的各分段用若干折算刚度来表征，折算刚度取决于建筑物的构造。同时认为建筑物有一对称的垂直面，并且位于振动平面之内。竖杆在振动平面内无转动趋势。显然，悬臂杆计算图式在代表各种建筑