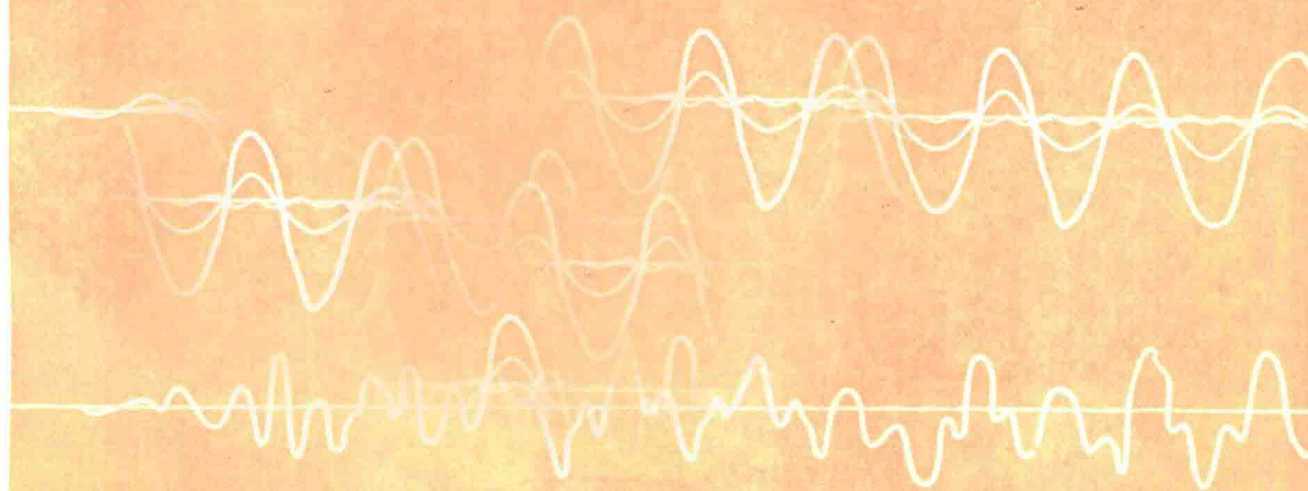


地震反应分析及实例

〔日〕土木学会 编



地震出版社

地震反应分析及实例

〔日〕土木学会 编

路秉杰 曲则生 孙吉乾 译

郭 博 孙伟东 常宝琦 校

地震出版社

1983

内 容 提 要

本书共由两部分组成。第一部分(基础编)论述了地震反应分析及动态抗震设计所用的基本概念、基础方法和基础理论。其中包括振动论、地基振动特征、地震荷载、理想化结构体系、反应分析方法、材料动态特性等内容。第二部分(应用编)从实际设计工作出发,并通过大量的具体实例讨论了桥梁、堤坝、土工和港湾结构、电力设备、市政工程施工、高炉及地下管道等结构。还论述了地震反应观测方法和分析实例。

本书的初译稿先由郭博校改,然后分别由孙伟东校订应用编(第二部分),常宝琦校订基础编(第一部分)。蒋志贤对初译稿也作过修改。

本书可供从事抗震建筑设计的研究人员、工程技术人员以及大专院校有关专业师生在工作及教学中参考。

地震応答解析と実例

土木学会 编

技報堂 昭和48年

地震反应分析及实例

〔日〕土木学会 编

路秉杰 曲则生 孙吉乾 译

郭 博 孙伟东 常宝琦 校

*

地震出版社出版

北京复兴路63号

北京朝阳区展望印刷厂印刷

北京新华书店发行所发行

各地新华书店经售

*

787×1092 1/32 30印张 700千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷

印 数 0001—3200

统一书号: 13180·141 定价: 4.60元

序 言

目前, 建筑物抗震设计大多仍然沿用把地震作为静力现象处理的烈度法。其原因可能是, 虽然地震造成的地基或建筑物破坏无疑是一种动力现象, 但是除特别简化了的情况以外, 把地震作为动力问题来处理是非常困难的, 而且对强震振动本身还了解得不很清楚; 结构物及地震的动态性质还有很多未知的问题, 以及利用烈度法按过去的规模和材料对建筑物进行抗震设计在实用上也没有太大的差错。这些可能就是烈度法还能延续使用的原因。

第二次世界大战以后不久, 在日本开始应用电子计算机。随着计算技术的进步, 使建筑物的地震反应分析变得容易进行; 地震观测仪器也逐渐完备, 并取得了一些地基和建筑物的实测地震记录; 对地震现象的认识逐渐变得明确起来; 与进行人工地震和大型振动台模型实验的同时, 对于建筑材料、土等的动力性质开始有些了解, 因此, 目前已逐步具备把地震动进行动态处理的基本条件。从每年举行的地震工程研究会议上发表的地震反应分析论文数目的增多, 专家及其他实际工作者参加人数也在增多的情况来看, 虽然分析方法仍处于发展的初期, 并且还存在很多问题, 但是, 作为一种科学的设计、分析、计算方法已有一定基础。况且, 超高层建筑、大跨度桥梁空前发展, 使许多大型新的结构抗震设计都远远超出了烈度法的范围, 同时烈度法本身也还要再向前发展。采用新的设计理论和新的分析、计算方法进行抗震设计, 乃是必然的趋势。

为了促进以地震反应分析法为核心的动态抗震设计法的建立, 本书介绍了一些有代表性的实例, 以作为从事实际工作的人员参考。为了编写此书, 在地震工程委员会内设置了编写小组, 负责筹划调整、选定撰写人等工作。

本书基础篇介绍了反应分析的基本理论及一般问题, 在应用篇内通俗地介绍了各种结构的地震反应分析实例, 最后对地震观测实例作了介绍。由于分析实例是集中了各部门各自采用的分析方法, 难免有内容重复、用词不统一之处。但是, 本书对于了解各种结构的反应分析现状, 仍不失为一本分析方法的重要参考书。

虽然这些分析方法还包括计算时所需要的质量、弹簧系数、阻尼等数值的确定以及地震波或地震反应谱分析精度和结构极限强度的确定等很多问题, 但本书不可能把设计上的探讨以及伴随调查研究的不断进展而取得的成果都包罗进来, 只是希望使它成为一个阶梯, 以便能用来研究出适用的新型反应分析方法, 并应用于设计上。

值本书出版之际, 仅向辛勤工作的本书编写委员会委员长久保庆三郎博士及热情执笔的各位委员以及学会事务局的有关同事们表示恳切的谢意!

土木学会地震工程委员会

委员长、工学博士 岡本舜三

1973年(昭和48年)1月

土木学会地震工程委员会编辑委员会成员

委员长 久保庆三郎*

委员 石原研而* 栗林荣一 小寺重郎 后藤尚男* 樱井彰雄
田村浩一 田村重四郎* 中川義徳 野口俊郎 马场恭平
林 聪

《地震反应分析及实例》各章执笔者

第一部分 基础篇

- 第一章 田村浩一 (国铁)
- 第二章 樱井彰雄 (电力中央研究所)
- 第三章 小林芳正 (国铁) 藤原俊郎 (国铁)
- 第四章 片山恒雄 (东京大学) 土田肇 (运输省)
- 第五章 栗林荣一 (建设省)
- 第六章 栗林荣一 (建设省)
- 第七章 石原研而 (东京大学) 小寺重郎 (八千代桥工程设计处)
西野文雄 (东京大学) 渡边启行 (电力中央研究所)
- 第八章 久保庆三郎 (东京大学)

第二部分 应用篇

- 第九章 荒川直士 (日本道路公团) 饭田裕 (建设省) 岩崎敏男 (建设省)
小山田欣裕 (北海道厅) 栗林荣一 (建设省) 辻胜成 (建设省)
寺内常晃 (首都高速道路公团) 西山启伸 (首都高速道路公团)
- 第十章 马场恭平 (电源开发) 渡辻启行 (电力中央研究所)
- 第十一章 岩崎敏男 (建设省) 大植英亮 (国铁) 田村浩一 (国铁)
- 第十二章 荒井秀夫 (运输省) 土田肇 (运输省) 林聪 (运输省)
山下生比古 (运输省)
- 第十三章 石原寿 (四国电力) 大松泽恭一 (东京电力) 佐藤畅彦 (东京大学)
野口俊郎 (东京电力) 渡边健 (东京电力)
- 第十四章 石井健容 (东京都) 草野一人 (国铁) 辻胜成 (建设省)
仓井孝昌 (国铁) 竹中正颖 (横浜市) 田村浩一 (国铁)
中川义徳 (东京都)
- 第十五章 洪忠熹 (武藤构造力学研究所) 樱井彰雄 (电力中央研究所) 水田宗昭 (新日本制铁)
- 第十六章 岩崎敏男 (建设省) 栗林荣一 (建设省) 土田肇 (运输省)

(注有(*)的为校阅者)

目 录

第一部分 基 础 编

第一章 概 论	(1)
1.1 前 言	(1)
1.2 静态分析法和动态分析法	(1)
1.2.1 静态分析法	(1)
1.2.2 地震反应分析	(4)
1.2.3 修正烈度法	(4)
1.3 加速度反应和位移反应	(6)
第二章 振动论	(8)
2.1 基本知识	(8)
2.1.1 振动的基本知识	(8)
2.1.2 信号分析	(10)
2.1.3 振动方程式的建立	(13)
2.2 振动论	(16)
2.2.1 地震仪原理 (单自由度体系振动)	(16)
2.2.2 耦合振动	(22)
2.2.3 多自由度体系振动	(24)
2.2.4 模拟	(28)
2.2.5 梁的横向振动	(30)
2.3 波动论	(36)
2.3.1 弦振动	(36)
2.3.2 流体的振动	(41)
2.3.3 弹性体内的波动	(43)
2.3.4 地震时给排水管道中的动水压	(47)
第三章 地基振动的特性	(51)
3.1 地震波	(51)
3.1.1 地震动的波相	(51)
3.1.2 P 波和 S 波	(52)
3.1.3 弹性波的反射和折射 (透射)	(52)
3.1.4 表面波	(54)
3.1.5 两地点之间的相位差	(55)
3.2 地基的地震反应和卓越周期	(56)
3.2.1 地基基岩和地震波	(56)

3.2.2	层状地基中波的重复反射	(57)
3.2.3	层状地基的地震反应	(60)
3.2.4	卓越周期	(62)
3.3	地基的各种系数	(63)
3.3.1	地基的弹性波速度	(63)
3.3.2	地基的刚度和阻尼常数变化的相关性	(64)
第四章	地震荷载	(68)
4.1	强震记录	(68)
4.1.1	概论	(68)
4.1.2	强震观测	(68)
4.1.3	强震仪	(69)
4.1.4	强震记录	(69)
4.1.5	强震记录的数字化及校正	(72)
4.2	反应谱	(72)
4.2.1	概论	(72)
4.2.2	地震反应谱实例	(73)
4.2.3	平均地震反应谱	(74)
4.2.4	地震反应谱的计算	(77)
4.3	模拟地震动	(79)
4.3.1	模拟地震动的意义	(79)
4.3.2	无频率特性的模拟地震动	(79)
4.3.3	有频率特性的模拟地震动	(80)
4.3.4	强度随时间而变化的模拟地震动	(82)
4.3.5	模拟地震动的强度	(83)
4.3.6	小结	(84)
第五章	理想化结构体系	(87)
5.1	概况	(87)
5.2	弹性结构体系的理想化	(87)
5.3	弹塑性结构的理想化	(88)
5.4	弹性地基上的结构体系	(88)
5.4.1	对理想化的各种限制	(88)
5.4.2	矩阵结构分析的基本定理	(89)
5.4.3	弹性地基上刚体单元的刚度矩阵	(90)
5.4.4	弹性地基上梁单元的刚度矩阵	(92)
5.4.5	承受轴向压力的梁单元的刚度矩阵	(94)
5.4.6	变截面梁单元的刚度矩阵	(95)
5.4.7	承受弯扭的梁单元的刚度矩阵	(96)
第六章	地震反应分析方法	(98)
6.1	概况	(98)
6.1.1	地震反应分析的早期成就	(98)
6.1.2	本世纪50年代的成就	(99)

6.1.3	地震反应分析的现状	(99)
6.1.4	地震动特性	(100)
6.2	结构地震反应分析法的种类	(122)
6.2.1	分析法的分类	(122)
6.2.2	六种分析法的特点	(123)
6.3	应用反应谱曲线的地震反应分析法	(124)
6.3.1	线性单自由度体系	(124)
6.3.2	非线性单自由度体系	(124)
6.3.3	线性多自由度体系	(125)
6.4	利用地震波形的地震反应分析法	(126)
6.4.1	线性多自由度体系	(126)
6.4.2	非线性单自由度体系	(129)
6.4.3	非线性多自由度体系	(131)
第七章	结构材料和土的动态特性	(133)
7.1	钢材	(133)
7.2	混凝土	(137)
7.3	钢筋混凝土	(146)
7.4	土	(149)
7.4.1	影响土动态特性的各因素	(149)
7.4.2	测定方法的选择	(150)
7.4.3	运用波动和振动的测定	(151)
7.4.4	根据反复荷载的测定	(157)
第八章	分析结果的评价	(166)
8.1	破坏标准和安全程度	(166)
8.2	误差评价	(167)
8.3	安全度的评价	(168)
8.4	动态分析的实用性	(168)

第二部分 应 用 编

第九章	桥 梁	(170)
9.1	概 况	(170)
9.2	高墩桥梁的地震反应分析	(170)
9.2.1	高墩桥梁振动时力学模型的一个实例	(170)
9.2.2	米山大桥的地震反应分析	(173)
9.2.3	底泽桥固有振动分析计算和实验	(175)
9.2.4	其它可供参考的实例	(178)
9.3	桩基桥梁	(180)
9.3.1	根据反应谱所作的昭和大桥地震反应分析	(180)
9.3.2	根据八千代桥的反应谱曲线所作的振动反应分析	(190)

9.3.3 考察	(193)
9.4 悬臂式预应力混凝土桥	(194)
9.4.1 天草联络公路4号桥	(194)
9.4.2 其它可供参考的实例	(210)
9.5 悬索桥	(211)
9.5.1 大跨度悬索桥及其抗震设计	(211)
9.5.2 本州四国联络桥地震反应分析	(211)
9.5.3 关门公路桥的地震反应分析	(215)
9.5.4 其它可供参考的实例	(227)
9.6 互通式立体交叉桥	(239)
9.6.1 概 况	(239)
9.6.2 分析方法	(240)
9.6.3 振动体系	(240)
9.6.4 应用反应谱曲线的分析结果	(240)
9.6.5 应用地震波形的分析结果	(246)
9.7 桥的非线性反应	(247)
9.7.1 非线性要素	(247)
9.7.2 落合桥的非线性反应	(248)
9.7.3 其它可供参考的实例	(254)
第十章 堤 坝	(256)
10.1 前言	(256)
10.2 混凝土坝	(257)
10.2.1 概况	(257)
10.2.2 混凝土重力坝	(258)
10.2.3 空心重力坝	(258)
10.2.4 拱坝	(258)
10.3 土石坝	(274)
10.3.1 土石坝动态分析方法概况	(274)
10.3.2 松村的剪切振动解〔22〕	(275)
10.3.3 偏微分方程式的数值解	(276)
10.3.4 有限单元法的数值解: 其一 (振型迭加法)	(287)
10.3.5 有限单元法的数值解 (直接法)	(302)
10.3.6 对 β -格式〔46,47〕和初期值解的稳定性〔48〕	(312)
第十一章 土工结构	(321)
11.1 概况	(321)
11.2 填方	(321)
11.2.1 概况	(321)
11.2.2 模型化及计算方法	(322)
11.2.3 计算实例	(325)
11.2.4 检验	(325)

11.3	挡水坝的抗震性能和地震反应分析〔附有明海挡水坝 (规划设计)的抗震性能调查〕	(326)
11.3.1	前言	(326)
11.3.2	以往的地震调查	(327)
11.3.3	脉冲振动调查	(327)
11.3.4	地震动的观测调查	(327)
11.3.5	历次震害实例调查	(328)
11.3.6	坝体模型振动实验	(328)
11.3.7	坝体在地震时的变形研究	(328)
11.3.8	结论	(330)
第十二章	港湾结构	(333)
12.1	直钢桩栈桥	(333)
12.1.1	前言	(333)
12.1.2	结构概况	(333)
12.1.3	振动模型	(335)
12.1.4	地震反应	(337)
12.1.5	抗震性能的评价	(340)
12.2	墩柱式栈桥	(341)
12.2.1	前言	(341)
12.2.2	结构概况	(342)
12.2.3	设计烈度	(342)
12.2.4	振动实验和地震反应观测	(343)
12.2.5	分析的考察	(344)
12.2.6	结语	(347)
12.3	板桩驳岸	(347)
第十三章	电力设备	(350)
13.1	电机设备的抗震设计	(350)
13.1.1	基本原则	(350)
13.1.2	地震波模拟	(350)
13.1.3	反应计算举例	(352)
13.1.4	从动态观点来看基础的设计与施工	(354)
13.1.5	500千瓦级电机设备的抗震设计	(355)
13.2	原子能发电站的抗震设计	(355)
13.2.1	基本原则	(355)
13.2.2	建筑物及构筑物的地震荷载	(357)
13.2.3	动态分析举例	(357)
13.2.4	应力计算和容许应力	(359)
13.3	原子能发电站的排气筒	(360)
13.3.1	目的	(360)
13.3.2	排气筒概况	(360)
13.3.3	计算方法	(363)

13.3.4	模型化	(360)
13.3.5	振动方程式	(360)
13.3.6	地震波的选择	(361)
13.3.7	结 果	(362)
13.3.8	与静态烈度和风荷载的比较	(362)
13.3.9	结 论	(362)
13.4	35000立方米液化气柜基础的抗震性能	(363)
13.4.1	概况和假定	(363)
13.4.2	模型化及理论计算公式	(364)
13.4.3	模型实验	(366)
13.4.4	气柜基础地震反应分析及其结果	(367)
13.5	油罐基础的抗震性能	(369)
13.5.1	概 况	(369)
13.5.2	新西条发电站油罐所在地的地基状态	(369)
13.5.3	地震输入的计算	(370)
13.5.4	地基加固	(370)
13.5.5	地基液化的评价方法和计算实例	(371)
13.5.6	结 语	(375)
第十四章	市政工程设计	(377)
14.1	地下构筑物	(377)
14.1.1	前 言	(377)
14.1.2	分析的理论	(378)
14.1.3	程 序	(381)
14.1.4	模型和各种系数	(381)
14.1.5	计算结果	(385)
14.1.6	各种分析结果的比较	(386)
14.2	高架水塔(羽村调压水塔)	(389)
14.2.1	羽村调压水塔的概况和力学模型	(389)
14.2.2	分 析	(390)
14.3	塔形水箱动态分析实例(小雀调压水箱)	(396)
14.3.1	设置水箱的目的	(396)
14.3.2	结 构	(396)
14.3.3	动态分析	(397)
14.3.4	反应计算结果的研究	(401)
第十五章	其他构筑物	(405)
15.1	建筑物的地震反应分析和实例	(405)
15.1.1	前 言	(405)
15.1.2	建筑物抗震分析的现状	(405)
15.1.3	动态抗震分析概述	(409)
15.1.4	动态抗震设计之一例	(412)
15.2	高炉抗震设计之一例	(417)

15.2.1	高炉结构特征.....	(417)
15.2.2	抗震结构分析的基本方法.....	(420)
15.2.3	抗震结构分析系统.....	(422)
15.3	地下管线.....	(423)
15.3.1	地下管线的抗震问题.....	(423)
15.3.2	通过松代地震进行地下管线地震时工作状态的观测.....	(423)
15.3.3	根据地震波传播分析地下管线在地震时的工作状态	(424)
15.3.4	从地震时土的应变看地下管线的抗震性能.....	(429)
第十六章	地震反应观测	(431)
16.1	地震反应观测的目的和方法	(431)
16.1.1	目 的.....	(431)
16.1.2	观测方法和分析.....	(432)
16.2	桥梁的地震反应观测实例.....	(433)
16.2.1	落合桥.....	(433)
16.2.2	新葛饰桥.....	(440)
16.2.3	其它供参考的实例.....	(449)
16.3	堤坝地震反应观测实例.....	(452)
16.3.1	山王海大坝.....	(452)
16.3.2	喜撰山大坝.....	(454)
16.3.3	对其它堤坝的观测.....	(457)
16.4	港湾结构的地震反应观测实例	(457)
16.4.1	千鸟町横栈桥.....	(457)
16.4.2	其它观测实例.....	(461)
16.5	深埋隧道的地震反应观测实例	(462)
16.5.1	京叶线羽田(多摩川)隧道.....	(462)
16.5.2	其它观测实例.....	(463)

第一部分 基础编

第一章 概 论

1.1 前 言

日本位于环太平洋地震带上, 历史上有过许多地震, 在将来, 全国各地也仍然有遭遇各种不同程度地震的可能。对土木构筑物中的桥梁、堤坝、港湾码头、电力设施来说, 一旦交付使用之后, 就要求它们能承受住预料到的各种荷载、土压、水压、风压、地震等自然条件和环境的变化和破坏, 在其使用期内完成其作用。如一旦发生不能使用或倒塌等事故, 会给当地和邻区造成严重的生命财产损失。因此, 上述设施都是很重要的构筑物。

因此, 在建设前要进行调查研究。在设计时, 要考虑现场的各种条件以及未来的环境变化, 选定既符合现场条件又经济合理的结构型式。但在结构物安全性的研究中, 抗震研究占有很大的比重, 即使在抗震工程已有很大进展的今天, 各种结构的抗震性仍然是许多未解决的重要问题之一。

地震时, 地基发生冲击性或振动性的摇晃, 建筑物就受到其影响而振动起来, 随着变形的增大或强度的降低, 可导致破坏。另外, 地基由于受到地震动和构筑物作用产生变形, 或者由于荷载的影响使变形增大以致破坏。这时, 结构本身即使是完整的, 没有破坏, 也将发生倾斜、倾复等震害而影响正常的使用。

例如, 根据金井清的报告^[1], 松代地震时记录到了周期0.1秒、500伽和周期0.4秒、200伽的加速度值, 其它类型的建筑物均有破坏。可是, 木结构房屋却没有破坏。此种现象用只考虑加速度影响的烈度法是不能解释的。由地震造成的建筑物的振动和破坏, 可以说是地震动、地基、结构特性、构件以及基础强度等各种条件相互影响共同作用的结果。

过去惯用的烈度法, 是把这些复杂现象进行适当的简化处理, 把地震的影响用设计烈度来表示, 并以此作为计算准则。这种方法, 对于惯用的旧有材料和结构类型来说, 还是合适的。但这毕竟是不够合理的一种方法。假使再把这种观点应用于大型建筑或新材料、新型式的建筑结构上, 由于荷载、计算方法、容许应力、结构稳定等各种问题超出了旧有经验的范围, 就需要进行更符合实际情况的探讨。

1.2 静态分析法和动态分析法

1.2.1 静态分析法

土木建筑的抗震规程, 由于吸取了关东地震和其他地震的经验, 自1923年以来, 逐步形成了把地震的影响作为静力特征来考虑的方法。1931年, 土木学会在《钢筋混凝土标准规

范》中，以水平烈度取0.2、竖直烈度取0.1为标准，此时的标准容许应力还规定可增加50%。

在桥梁、堤坝、港湾码头等现行抗震规程中，参考了河角广博士的烈度预测值^[2]，并根据与建造地点的地震特点、地基土的软硬、结构的重要性等，相应地分别由主管单位对设计烈度作了更详细的划分，除对地震时的地基强度、特性等阐述得略为详细外，在计算方法、容许应力等设计方法和设计标准上，与1925年的规定相比，没有太大的差别。

从振动论的观点看来，对静态分析法可说明如下。设有一幢刚性建筑物固定在地基上，如该地基以水平加速度 α_h 作水平运动，则建筑物也将和地基一起发生运动。

根据达伦贝尔（D'Alembert）原理，如建筑物的质量为 m ，则惯性力就等于 $-m\alpha_h$ 的静水平力。如建筑物重量 $W = mg$ （ g 为重力加速度），则水平烈度 K_h 可表示如下：

$$K_h = \frac{m\alpha_h}{W} = \frac{\alpha_h}{g}$$

因此，作用在建筑物上的外力就可以用惯性力和重力的合力来表示，其大小 R 以及与竖直线之间的夹角 ϕ_h ，可用下式求得（图1.2.1）：

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{(mg)^2 + (m\alpha_h)^2} = mg \sqrt{1 + K_h^2} = W \sqrt{1 + K_h^2} \\ \phi_h &= \tan^{-1} \frac{\alpha_h}{g} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.1)$$

同样，当同时要考虑竖直地震加速度 α_v 时，如竖直烈度取 $K_v = \alpha_v/g$ ，则合力 R 及合力与竖直线之间的夹角 ϕ 可用下式求得（图1.2.2）：

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{(mg \mp m\alpha_v)^2 + (m\alpha_h)^2} = W \sqrt{(1 \mp K_v)^2 + K_h^2} \\ \phi &= \tan^{-1} \frac{K_h}{1 \mp K_v} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.2)$$

当 K_v 朝下时，式中取正号； K_v 朝上时，取负号。

综上所述，静态分析法就是将建筑物的自重乘以水平烈度系数来确定水平方向地震力的大小，并令其均匀地作用在结构各个部分上，以研究结构应力和稳定性的方法。因此，抗震计算自然就变成了根据结构正常水平面在地震时向危险方向倾斜的一个 ϕ 角，来计算在其上作用的折算重力 $W \sqrt{(1 \mp K_v)^2 + K_h^2}$ 。物部博士计算地震土压的公式就采用了这种方式。

但是，如果结构是刚性的，在基础上也有转动时，加速度分布愈向上振幅愈大，呈一倒三角形，或者随着细长结构产生弯曲变形的同时，由于结构离开平衡位置的变形，再加上地基的位移，因此，沿高度方向上的加速度分布也不是相同的。这些都超出了烈度法的范畴。

试举图1.2.3所表示的实例来说明。设由于地震而使结构产生静力倾覆的条件为合力超

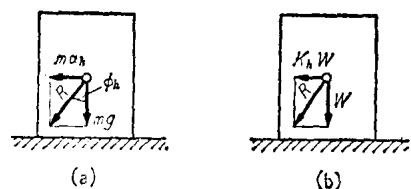


图1.2.1 水平力和重量的合成

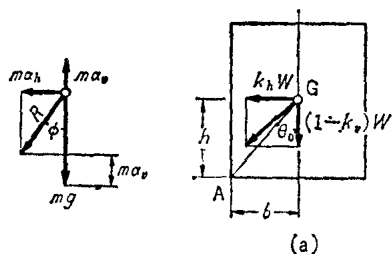


图1.2.2 水平、竖直加速度和重量

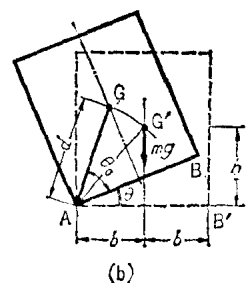


图1.2.3 物体的倾覆

过支点 A 以外时, 根据 $\tan\theta_0 \leq \tan\phi$, 倾覆条件可以用 $b/h \leq K_h/1-K_v$ 给出。这是研究是否可能发生倾覆的问题, 而倾覆条件与物体尺寸无关, 这和物体尺寸越大越难倾覆的直观认识是不一致的。尺寸的影响也可以根据能量计算或下述振动计算方法^[3]求得。

在图1.2.3 (b) 的长方体中, 当重心 G 获得水平初速度 v_0 时, 在没有其他力的作用下, 如果 A 点和物体的底面处于静止状态, 则绕 A 点的转动方程式为:

$$I_A \frac{d^2\theta}{dt^2} + mgdc\cos(\theta_0 + \theta) = 0, \quad (1.2.3)$$

设 $d\theta/dt = 0$ 时的时刻为 t_0 , 则

$$\theta_{\max} = \cot\theta_0 + \cosh\lambda t_0 \left\{ \frac{\tau_0}{\lambda h} \tanh\lambda t_0 - \cot\theta_0 \right\},$$

式中 $\lambda^2 = \frac{3g}{4b} \sin\theta_0 \cdot \cos\theta_0$ 。

作为倾覆条件, 当 $d\theta/dt = 0$ 即 θ 达到 $\theta_{\max}$ 时, 通过重心的竖直线超出 A 点外侧的条件为

$$\theta_{\max} \geq \left(\frac{\pi}{2} \right) - \theta_0.$$

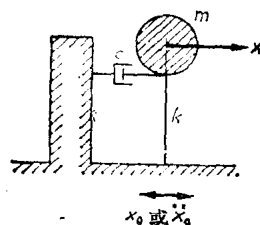
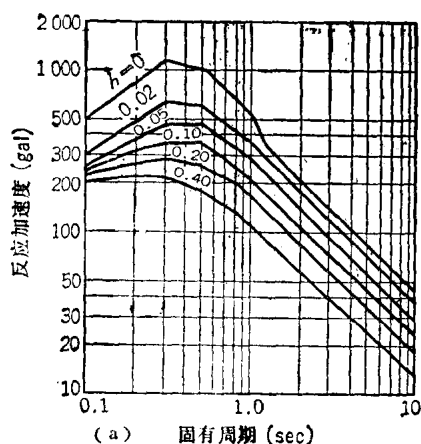
由此可得下式:

$$\frac{v_0}{\sqrt{b}} \geq \frac{3.13}{2} \sin\theta_0 \sqrt{3 \tan\theta_0 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \left\{ 2 \cot\theta_0 - \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \right\}} \quad (1.2.4)$$

例如, 当 $v_0 = 1$ 米/秒时, 长方体不倾覆的极限尺寸可从上式求出。由此可知, 重心虽高, 但宽度大的物体不易倾覆。上述计算是在极简单很特殊的情况下进行的, 虽然这并不满足地震时的倾覆条件, 但与静力计算相比可能更接近于实际情况。

θ_0	50°	60°	70°	80°	85°	
$2b(m)$	0.57	0.63	0.83	1.62	3.14	

再举一个不能忽视动态影响的例子。图1.2.4 (a) 表示日本建设省土木研究所提出的加速度反应谱^[4]。它表示图1.2.4 (b) 中单质点体系受到最大加速度为200伽的地面振动时作用于质点上的加速度。由图可知, 与此体系的固有周期和阻尼系数相对应的加速度反应变成



(b)

图1.2.4 反应谱之一例

(a) 加速度反应谱 ($\ddot{x}_{\max} = 200$ 伽), (b) 单质点体系模型

为“山”形。从烈度法的观点看，地面震动和建筑结构的加速度为 200 伽，这只在固有周期极短、刚度极大时才适用。

但是，在应用反应谱时，考虑到强震时地基及结构的振动可能进入到非线性阶段、反应值降低、阻尼值增大等等，因此，当固有周期在 0.2 秒以下时，往往认为可以应用烈度法而没有太大的误差。

上述的静态烈度法是从经验中直接得出的。此方法除了有某种程度的合理性和可靠性之外，还由于计算简便，所以我们认为在今后对于普通规模的结构仍能使用。

1.2.2 地震反应分析

超出静态烈度法适用范围的细长结构，例如吊桥、大跨度桥梁、高桥墩、钢桩栈桥、拱坝等，曾经根据其重要程度，对其抗震性能进行过动态分析，并通过振动实验、地震观测进行过研究。此种调查研究经验积累了许多，其成果在各个方面均可看到。

在地震反应分析中，地震动、结构和周围地基弹簧特性以及阻尼作用的确定是影响反应值的最重要因素。作为地面振动，从各地地震记录平均值的包络线来看，除了使用日本建设省土木研究所和豪斯纳 (Housner) [5] 求出的平均反应谱，以及根据建造地点的强震记录或在类似地基上的强震记录，或根据地表记录推算出来的基岩中的地震波形（再把这个波形换算成场地地基中的波形）以外，还往往使用在世界上具有代表性的强震记录，即埃尔森特罗 (1940, 南北分量) 的记录。由于反应值除了受加速度、位移等影响外，还受波形的强烈影响，因此选择波形时要特别当心。一般，除了用确定不规则过程的各个常数而求得的不规则振动的波形以外，也有用其他理想正弦波形作为地震波形的。

弹簧特性一般采取线性的，特殊情况下也有采取非线性或弹塑性的。阻尼值则根据类似结构的振动实验和地震观测等选取偏于安全的数值。

现在，一般使用的分析方法大体上可分为两大类：使用平均反应谱或个别地震反应谱的方法，以及把地震波形作为输入直接解出振动方程的数值解而求得反应值的方法。反应谱分析方法是把结构模型（多自由度体系）分解成固有振动体系而分别求出其反应值，再将其结果合成而求得最大反应值的一种方法。如果求得了固有值，就能很容易地求得稳定解。通常多采用弹性振动分析，如果需要，也可以采用弹塑性反应分析。直接积分法虽然适用于弹性振动和弹塑性振动，并且具有可以得到每一时刻反应值的特点，但是，在弯曲剪切振动等较复杂的振动体系中，由于计算精度的关系，所得的解有时是不稳定的。

此外，还有以平均反应速度谱来求解地震波对结构的输入能量，根据能量理论来计算结构弹塑性反应值的豪斯纳法 [5]。根据统计求得地震波形，作为输入波形，计算结构位移、应力等超过一定数值的概率，根据此超过的概率值，可用统计方法求出结构安全度。这种方法正在试行。上述主要分析方法的分类及其特点见表 1.2.1。

1.2.3 修正烈度法

静态烈度法是有一定适用范围的，动态反应分析虽然是合理的方法，可是计算较繁杂，计算中所使用的各种常数的确定，计算结果的分析评价也还有许多问题。作为补充此两种方法之不足，可采用根据简化结构模型求出结构固有周期，并根据动态反应放大倍数来确定设计烈度的方法。这种方法相对于静态烈度法来说，叫做修正烈度法。除日本《本州、四国连络桥抗震设计指南》(1967) 已应用此法以外，在桥梁、建筑等的抗震设计中已经发展到实用阶段。

表1.2.1

地震反应分析方法的种类

振型	输入	弹簧特征	输入的种类	分析方法	特点
过渡振型	反应谱	线性	平均反应谱(例如豪斯纳, 日本土木工程研究所)或各次地震的反应谱	根据结构固有振动周期, 用振型分析求出地震反应放大倍数的方法	1) 经固有振动周期和振型的计算比较容易求得反应; 2) 制定和选择反应谱困难; 3) 由于平均反应谱不能反映原地震的特征, 有时是比较危险的
		非线性	用平均反应谱(例如: 豪斯纳, 日本土木工程研究所)	根据豪斯纳的输入贮存逸散能量理论	适用于单自由度固有周期比较长的结构
	地震波	线性	可以根据建造地点预测的地震波(强震记录或模拟地震动等)	求与各个时刻相应的结构各部的地震反应	1) 计算比较繁杂, 但各种现象容易掌握; 2) 选择制作地震波比较困难; 3) 可以应用振型分析
		非线性	同上	同上	1) 计算繁杂, 但掌握各种现象容易; 2) 同上
动	正弦波	线性	具有和结构自振周期相等的3—4种波的正弦波	按输入的正弦波形求反应放大倍数	1) 计算容易; 2) 选波是个问题
平稳振动	正弦波	线性	具有和结构自振周期相同的正弦波	求由于正弦波输入在稳定共振状态时的反应放大倍数	1) 计算最容易; 2) 当承受同样大小的加速度时, 要求有比较严格的计算条件

《本州、四国连络桥抗震设计指南》中的修正烈度法〔6〕, 只用来作吊桥初步设计。采取把吊桥分成悬索、主塔及下部结构三部分的设计方式, 根据上部结构和下部加速度、位移的连续性, 上部结构底部的加速度采用下部结构顶部的数值, 主塔基部的位移和旋转角则采用下部结构的数值。

例如, 当设计沉箱基础时, 假定沉箱具有上部结构、土及水等的附加质量, 并绕沉箱下边的中点作刚体摇摆振动, 从而求出其固有周期。从图 1.2.5 基本烈度反应曲线可得沉箱重心处的烈度反应。沉箱水平烈度的分布采用以底面为 0 的倒三角形。结构和地基的相对位移则可首先从假定结构振动为正弦振动的加速度反应求得, 然后乘以地基的弹簧常数, 求出地基反力。据此即可得出结构和地基的相对位移。基本烈度反应是在日本建设省土木工程研究所研究的平均反应谱的基础上, 再结合实际经验和研究而确定的。

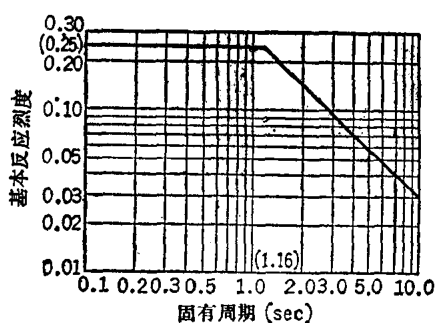


图1.2.5 沉箱基础的基本反应烈度
($\bar{z}_{max} = 200$ 伽)

日本道路公团制定的《设计要领》第5篇的说明〔7〕, 规定了下述结构形式的高墩台式桥梁在垂直桥轴方向上的烈度是按比例增加的:

1. 对象

上部结构: 桥跨约为50—80米的具有钢筋混凝土桥面板的连续钢桥。

下部结构: 桥墩高度在25米以上的混凝土实心结构(劲性钢筋混凝土或钢筋混凝土)。

2. 垂直桥梁轴方向的设计水平烈度增加的比例: