

56.259083

中国科学院工程力学研究所

地震工程研究报告集

第 二 集

科学出版社

中国科学院工程力学研究所

地震工程研究报告集

第 二 集

編輯委員會

刘恢先(主任編輯)

胡聿賢 王孝信

科学出版社

1965

內 容 簡 介

本文集共有 21 篇文章，討論了建筑物設計規範中地震荷載的計算方法，提出了系統的意見；報導了關於地震力統計理論、彈塑性體系地震力、結構抗震性能、材料動力性能、動力光彈性試驗技術的一些研究成果以及關於我國近年發生的兩次地震的調查。

中國科學院工程力學研究所 地震工程研究報告集

第 二 集

*

科學出版社出版

北京朝陽門內大街 117 號

北京市書刊出版業營業許可證出字第 061 號

中國科學院印刷廠印刷

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

*

1965 年 7 月第 一 版 開本：787×1092 1/16

1965 年 7 月第一次印刷 印張：19 插圖：2

印數：0001—3,000 字數：436,000

統一書號：15031·180

本社書號：3217·15—1

定價：[科七] 2.70 元

序 言

地震工程研究报告集是中国科学院工程力学研究所的研究论文集刊之一。第一集已于1962年9月出版,本集为第二集。应当向讀者說明的是,第一集出版时,我們研究所的名称是土木建筑研究所,从1963年5月开始才改称为工程力学研究所。

本文集包括21篇文章,其中絕大部分是在1962—1963年期间进行的工作。根据文章的性质,我們把它归納为六个部分。

第一部分是為工程設計寻找一个計算地震荷载的合理方法所进行的工作。我国地震区很广闊,那里的工程建設正在日益扩大,因此我們面临着制訂一个地震区建筑物設計规范的任务。在这里,我們对于规范中地震荷载的計算方法提出了系統的意見和必要的論証。我們的工作归納起来就是:根据反应譜理論,拟訂地震烈度的定量指标,从而建議一个統一的、并能适应各类結構的特点和設計传统的地震荷载計算方法。

第二部分是有关地震力理論的工作。在第一集里,我們曾經发表对地震力統計理論的初步研究,并且指出弹塑性体系的結構反应是抗震理論进一步发展的方向之一。这一集介紹了我所在統計理論上的某些进展以及关于弹塑性体系地震力的开端性工作。在統計理論方面,論証了由于結構的滤波作用,可以从結構物的脉动分析中求得結構的自振頻率、振型和阻尼;对非平稳随机振动提供了一个近似計算方法,考虑了振动过程的非平稳性和譜密度的形状。在弹塑性結構方面,研究了单質点体系的位移和能量反应譜;进行了砖墙承重房屋模型破損阶段的振动試驗,观察到頻率随振幅降低与阻尼随振幅增长的情况。

第三部分是关于結構抗震性能的研究。所研究的对象都是我国工程建設中遇到的問題,其共同点是如何确定結構的自振特性。我們所采用的方法主要是模型实验和实际測量。这些資料可供設計者参考。

第四部分是关于我国最近发生的两次地震的調查資料。由于地震不常发生,这种資料是可貴的,我們准备今后在本文集內不断发表这种資料。

第五部分是关于混凝土动力性能的試驗研究。混凝土是現代建筑的主要工程材料,但关于它的动力性能的研究还很少,本文是我所对此問題的初步工作。

第六部分介紹了关于动力光弹性技术的研究。我們企图以动力光弹性方法作为观察結構动应力的工具之一,初步的研究只能定性地說明一些問題,但从发展上看这个工具还有一定的前途。

以上是本文集的內容的簡單介紹,和第一集比起来,增辟了几个方面的研究。地震工程涉及的面很广,包括地面运动、結構理論、工程措施、宏观調查、观测仪器、材料性能、土壤力学等等方面。随着我們的研究工作的进展,本文集所报导的內容亦将逐渐扩大到各个方面。

我們熱誠地歡迎讀者對我們的工作進行討論和批評，特此在文集的後面開辟討論欄，本集登載了兩篇來稿，希望讀者今後多多投稿。

編輯委員會

劉恢先

胡聿賢

王孝信

1963年10月

通用符号

(一) 弹性力学及结构力学符号

坐标: $x, y, z; \xi, \eta, \zeta; r, \theta, z$.

位移: u, v, w .

法线: N 或 n .

切线: T 或 t .

方向余弦: l, m, n .

长、高、宽、厚: l, h, b, t .

截面面积: F .

面积: Q, S .

体积: V .

惯性矩: J, I .

单位容重: ρ .

密度: ρ/g .

应力: σ, τ .

应变: ε, γ .

弹性模量: E, G .

泊桑比: ν .

拉梅常数: G, λ .

力: F .

荷载: $P, p; Q, q$.

剪力: S (或 Q).

弯矩: M .

质量: m, M .

重量: w, W .

功: W .

能量: E .

位能: Π (或 U).

动能: K (或 T).

能量耗散系数: D (或 D).

刚度: $k, K; c, C$.

函数: Φ, ϕ, χ .

系数: $\alpha, \beta, \gamma; a, b, c, d$.

常数: c, K .

(二) 地震工程学符号

频率: f .

圆频率: $\omega; \omega'$ (有阻尼).

周期: $T; T'$ (有阻尼).

时间: t, τ .

阻尼系数: μ .

阻尼比: ε .

对数衰减率: λ .

位移反应: δ .

速度反应: v .

加速度反应: a .

位移反应谱: $\Delta(T)$.

速度反应谱: $V(T)$.

加速度反应谱: $A(T)$.

振型次序: j .

质点次序: i .

广义坐标: q .

振型参与系数: η, γ .

振型函数: $U, V, W; X, Y, Z$.

频率谱: $A(\omega)$.

相角: θ, ϕ .

(三) 概率论符号

概率: $P\{ \}$.

平均数: $\bar{ } , M$.

离散: $\overline{ }^2, D$.

标准差(均方差): σ .

相关函数: B, R .

功率谱(谱密度): $S(\omega)$.

传递函数: Φ .

(四) 上指标与下指标

对坐标的微分: $'$.

对时间的微分: $\cdot$.

地面: g 或 0 .

初始: 0 .

外国地理名称译名原名对照表

译名	原名	译名	原名
土卡姆克里	Tucumcari	阿信兹	Athens
马德	Mad	阿萨姆	Assam
马霍林湾	Mahoning Ck.	俄克拉何马	Oklahoma
韦尔农	Vernon	俄勒冈	Oregon
丹博维察	Dimbovitz	南达科塔	South Dakota
内华达	Nevada	威林顿城	Wellington City
尤里卡	Eureka	洛杉矶	Los Angeles
贝登	Badin	科罗拉多	Colorado
贝斯利赫姆	Bethlehem	耶烈万	Ереван
加利福尼亚	California	爱达荷	Idaho
北卡罗来纳	North Carolina	爱麦特	Emmett
圣他巴巴拉	Santa Barbara	哥伦比亚	Columbia
圣马特欧	San Mateo	哥伦比亚瀑布	Columbia Falls
圣他弗列兹	Santa Ynez	埃耳森特罗	El Centro
圣安德雷斯	San Andreas	夏安	Cheyenne
圣地亚哥	Santiago	宾夕法尼亚	Pennsylvania
圣达金	San Toaquin	库利城	Coulee City
圣格布利尔	San Gabriel	格兰德	Grande
布尔伦	Bullrun	海华西	Hiwassee
弗雷兹诺	Fresno	郎比奇	Long Beach
田纳西	Tennessee	得克萨斯	Texas
亚利桑那	Arizona	博兹门	Bozeman
亚美利加瀑布	American Falls	斯内克	Snak
亚特金	Yadkin	斯多尼湾	E. F. Stoney Ck.
华盛顿	Washington	普季特海峡	Puget Sound
吉尔伯特维尔	Gilbertsville	费恩特罗	Ferndale
夸察夸耳科斯	Coatzacoalcos	塔夫特	Taft
米苏里	Missouri	塔纳钦诺	Talachuno
西雅图	Seattle	奥兰	Orland
伯克利	Berkeley	奥克兰	Oakland
克里米亚	Крым	奥林匹亚	Olympia
克林契	Clinch	奥斯丁	Austin
杜商	Душань	新墨西哥	New Mexico
芒特港	Puerto Montt	雷丁	Redding
麦尔菲	Murphy	雷德	Red
佩埃特	Payette	福勒特赫得	S. F. Flathead
孟菲斯	Memphis	蒙塔那	Montana
帕萨迪纳	Pasadena	赫勒纳	Helena
拉斯佛加斯	Las Vegas	诺克思维耳	Knoxville
肯塔基	Kentucky	霍利斯特	Hollister
阿什哈巴德	Ашхабад	霍特-斯普拉斯	Hot Springs
阿耳土斯	Altus	萨克拉门托	Sacramento
阿拉巴马	Alabama		

目 录

序言·····	編輯委员会 (iii)
通用符号·····	(vii)
外国地理名称譯名原名对照表·····	(viii)

(一) 关于設計规范的研究

关于設計规范中地震荷載計算方法的若干观点和建議·····	刘恢先 (1)
在地震作用下結構反应振型組合的合理方法* ·····	胡聿賢、周錫元 (18)
土质条件对建筑物所受地震荷載的影响·····	周錫元 (27)
地震反应譜的高頻失真及其校正方法·····	王前信、廖振鵬 (44)
关于地面运动最大加速度与加速度反应譜的若干資料·····	陈达生 (53)
各国混凝土坝抗震設計情况簡介·····	罗学海 (85)
重力坝的自振特性与地震荷載分析·····	张雪亮、朱 葳 (97)

(二) 地震力理論

建筑物脉动的 Fourier 譜分析* ·····	胡聿賢、尹之潛、王志勇 (120)
弹性体系非平稳地震反应的近似計算方法* ·····	周錫元、胡聿賢、陈达生 (133)
弹塑性反应譜* ·····	王前信、李 荷、杜瑞明、廖振鵬 (141)
地震作用下建筑結構的非弹性振动及能量分析* ·····	王前信、廖振鵬 (155)
砖墙承重房屋模型破損阶段振动試驗(一)* ···尹之潛、彭克中、张大名、黄龙生 (169)	

(三) 結構动力特性

高炉結構的动力特性* ·····	徐祥文、卢书輝、陆干文 (182)
鍋炉构架的动力特性·····	卢书輝、徐祥文、彭克中 (193)
烟囱的自振特性·····	彭克中、黄龙生 (200)
重力坝自振頻率的近似計算·····	王前信、李 立、王孝信 (215)
重力坝自振特性的試驗研究* ·····	罗学海、江近仁 (225)

(四) 地震調查

甘谷地震建筑物受害情况調查报告·····	呂敏申 (237)
灵武、吳忠地震建筑物受害情况調查报告·····	呂敏申 (246)

(五) 材料动力性能

混凝土在高速荷載下的力学性能* ·····	王承春 (259)
-----------------------	-----------

(六) 实 驗 技 术

重力坝基本振型应力分布的动力光弹性分析*李 立 (271)

(七) 討 論

关于“弹性系統在平稳和平稳化地面运动下的反应”一文的討論 { 金家和 (287)
胡聿賢、周錫元

注：帶有*号的报告曾在 1962 年“建筑物抗震問題学术會議”上宣讀。

关于設計规范中地震荷載計算方法的若干观点和建議

刘 恢 先

提 要

地震荷載的計算是抗震設計的重要环节,但各国現行設計规范中的規定差异很大并与近代科学研究成就缺乏紧密联系。本文建議根据地面运动的觀測資料拟訂地震烈度的定量指标,然后按地震反应譜理論計算地震荷載,提出了关于拟定設計规范的具体意見。

建筑物抗震設計的重要經驗之一是在設計中考虑一定的水平荷載,以增強建筑物抵抗側力的能力。这条經驗屢試不爽。近年有一个生动的例子,就是在 1960 年 5 月 21 日智利大地震时,有一座現代化的炼鋼厂恰好位于震中区,經受了烈度約为 9 度的地震,但損失非常輕微(約为投資的 0.5%),只停止生产 5 天^[1]。究其原因,主要是在設計中考虑了較大的水平地震荷載,采用的地震力系数达 0.15—0.40。看来,在建筑物的設計中应当考虑地震荷載是无可怀疑的了,目前的問題是地震荷載应当如何合理地进行計算?采取多么大的数值?对于这个問題,各国設計规范的規定以及科学家和工程师的意見是頗有分歧的。我国由于建設規模的日益扩大,面临着一个制訂地震区建筑物設計规范的任务,在规范中采用怎样的計算地震荷載的方法,是迫切需要作出抉择的問題。本文闡明作者及其合作者对此的观点和建議。

一、計算地震荷載的理論基础

文献上关于地震荷載的理論不外下列数种^[2]:

a) 假定結構为剛体,承受均匀的与地面相同的加速度,忽略結構本身的振動,其結果是不問結構的动力特性如何,籠統地采用一个不变的地震荷載系数。这是最初的理論,一般称为靜力方法。

b) 采用某种以定函数表达的运动作为与地震等效的运动,然后根据这种等效运动来計算地震荷載。

c) 以单質点弹性体系在实际地震过程中的反应为基础来进行結構反应的分析,此即所謂反应譜理論。

d) 根据地震記錄的統計特征,运用随机过程原理来推求結構反应的統計特征作为設計数据,可称之为統計理論。

e) 按照輸入結構的能量进行設計,保証結構在吸收輸入能量的情形下不致破坏,即所謂極限設計,亦可称之为能量理論。

靜力方法可說是过时了的方法,主要的缺点是抹杀了結構动力特性对于地震荷載的影响,忽視刚性結構与柔性結構在地震时反应不同的客观事实。等效运动的方法是迂迴的途径,因为等效运动归根結底要从实际地震記錄中去找,徒然多了一道折算的手續。

統計理論和能量理論雖然是很前途的理論，但目前的研究還很不足，尚未成熟。毫無疑問，作為設計規範的根據，反應譜理論是目前唯一合理的選擇。這個理論首先要求從現有的地震記錄中尋找有代表意義的標準反應譜；其次要求了解結構的自振特性，包括周期、振型、阻尼等；再次要求解決各個結構振型的反應的求解以及各個振型的組合問題。這些問題，現在都已有大量的研究資料，可以較圓滿地獲得解決。事實上，在現代振動學中，對於一切無規律的、隨機性的振源都是用反應譜、頻率譜、功率譜或者其它能夠反映振源統計特徵的方法來處理分析的。這是由於隨機性振源不可能用任何定函數來表達其過程，而只能用某種統計量來描繪它的特徵。一般說，處理的方法有二：一種方法是首先求出輸入函數的統計特徵，然後通過振動方程來求解輸出函數的統計特徵；另一種方法是對輸入函數不作任何處理，直接求輸出函數的統計特徵。顯然，目前所謂統計理論屬於前者，而反應譜理論則屬於後者，這兩種理論應當是殊途同歸。標準反應譜一般是許多次地震的反應譜的包綫或平均曲綫，標誌着結構物最可能的最大反應，因此它是一種輸出函數的統計量。

各國房屋建築的設計規範有逐漸採用反應譜理論的趨勢，例如美國^[3]、蘇聯^[4]、羅馬尼亞^[5]的規範相繼引用了反應譜理論，儘管它們採用的譜值很不一致。現在也還有很多國家的規範仍然採用靜力方法，籠統地規定一個地震荷載係數。對於水工建築和橋梁建築，各國的規範就更守舊一些，都還是採用地震荷載係數的方法^{[4][6][7]}。不過一般都考慮到由於結構的振動，上部的加速度較大，因而採用了隨高度變化的地震荷載係數。是否由於水工建築和橋梁建築的特性與房屋建築有很大差異以致反應譜理論不再適用呢？我們認為不是的，目前三類建築規範的差異主要是由於編者不一，傳統各異。蘇聯地震區建築規範雖然包括了三類建築，但各列一章，計算地震荷載的方法沒有共同之點；這也是由於三章的編者不一，各自保留了自己的傳統。我們認為這種現象並不是完全合理的，**主張在反應譜理論的基礎上把三種規範統一起來，制訂一個統一的計算地震荷載的方法。**

反應譜理論有三個基本假定：第一，假定結構地基相當於剛性平面，各點的運動完全一致；第二，假定地面的運動過程可以用強震觀測儀器的記錄來表示；第三，假定結構是彈性的。只要這三個假定能夠成立，反應譜理論是可靠的。就第一個假定來說，當結構的尺寸遠遠小於地震波的波長時，一般是可以成立的。只有對於尺寸特大的結構（例如高大的擋水壩），這個假定值得懷疑，但究竟有多大的誤差，現在也還沒有資料可以給以確切的說明。第二個假定是必須承認的，因為目前沒有比強震記錄更為可靠的資料來說明地面運動過程的規律。當然強震記錄有許多可疑之處，例如由於儀器的缺點所導致的失真、儀器所在的建築物及其周圍的建築物的振動對儀器記錄的影響等等。儀器失真的影響只限於反應譜的高頻部分，而且可以校正，根據本文集王前信、廖振鵬的研究^[8]，這種影響還不致改變反應譜的峯值。第三個假定可說是實際結構的第一次近似的模型，可能對水工建築物較為切合，因為水工建築物一般不容許發生裂縫；對房屋建築和橋梁建築，這個假定反而偏於安全，因為在地震時，一般的這兩類建築是容許發生一些非致命的局部損傷的。由此可見，很難說反應譜理論適用於房屋建築而不適用於水工建築和橋梁建築。更為重要的是，以上三個假定是現有一切關於地震荷載理論的出發點，並非反應譜理論所獨有；離開這些假定，理論工作就無從下手，所以在目前我們還找不到基於更合理的假定、更優於反應譜的理論。

目前不贊成反应譜理論应用于水工建筑的意見主要来自两方面：

一方面的意見是来自理論上的考虑，認為反应譜理論不可靠。例如苏联 И. Г. Напетваридзе^[9] 举出四个理由：第一，強震記錄不可靠，有失真問題；第二，反应譜要在阻尼比大于 20% 时才会有平滑的曲綫，而实际結構沒有这样大的阻尼；第三，反应譜的峯点位置和震中距有关系，因此不容易标准化；第四，从反应譜算出的地震荷載与結構物实际情况毫无共同之处。这些理由是否站得住呢？讓我們来分析一下。第一个理由不足以否定反应譜理論，在前面已經作了解释。第二个理由是不存在的，因为事实上只要結構有很小的阻尼(2% 以上)反应譜的包綫就基本上成为一条有明显規律性的曲綫，尽管它有少数几个峯点；而且坝的阻尼并不小，一般在 5% 左右。第三个理由并不妨碍反应譜的标准化，因为对強震反应譜而言，震中距不是主要的影响因素，主要的影响因素是地震烈度和地質条件。而且未来地震的震中将在何处，也不能預先作出估計，除非在特殊情形下，考虑震中距的影响事实上是办不到的。再者，标准反应譜是統計量，不是对那一次地震而言，所以也沒有必要区分震中距离来拟訂标准。第四个理由缺乏根据。最近在美国一座大楼上測得各层楼板对同一次地震的加速度反应；根据反应譜理論从地面加速度推算各层楼板的加速度反应，其結果与实际測量所得者很接近^[10]，此例可以說明反应譜理論在一定程度上是可靠的。反过来看一看 Напетваридзе 所提供的办法是怎样的呢？他非但同样沒有考虑震中距的影响，而且完全凭着主觀設想，用简单的余弦函数来表示所謂原生地震运动和次生地震运动，申称这样的表示式比強震仪器記錄来得更为可靠，这是很难令人信服的。此外，他一方面認為強震記錄不可靠，而另一方面却选择一条从某一次地震的記錄积分得来的地面位移时程曲綫来証明他的理論是合乎客观实际的；这显然是自相矛盾的。

还有一种意見，認為現有的強震記錄仪器大都是安設在房屋建筑的基层，所以这种記錄只能应用于房屋建筑而不能引用到水工建筑。在我們看来，強震地面运动的特征主要决定于地震烈度和地質条件，取得記錄的所在不应有很大的影响。目前在水工建筑上取得的強震記錄虽然为数不多，但仅有的几次在混凝土坝址取得的記錄表明，無論地面加速度的量級或反应譜的性狀都和在房屋建筑上取得的結果沒有明显的差异。

另一方面的意見来自設計經驗上的考虑，認為过去按地震荷載系数設計的水工結構是成功的，沒有出过很大事故，所以这种設計方法应当沿用下去。我們認為設計經驗是可貴的，但应当加以分析，取其合理部分，弃其不合理部分。有两种設計經驗：一种是真正的經驗，即所設計的建筑物經過了实际地震的严峻考驗，証明原設計是成功的或者是失敗的。在房屋建筑方面，这种經驗不少，因为的确有无数建筑经过大地震的考驗。即使如此，我們还不能由此断言，凡是成功的設計，当初采用的地震荷載便是正确的，因为建筑物的获得保存很可能是由于安全系数的保障；当設計方法变更，安全系数发生变化时，地震荷載就要随之調正，而不能机械地援用以往經驗。另一种設計經驗則仅仅是表面上的經驗，實質上是一种設計習慣；这就是，历来如此設計，而設計出来的建筑物从来沒有經過地震的考驗。現代水工建筑，特别是高坝的設計經驗接近于这种性質的經驗。世界上建造高坝的历史不过百年，在設計中考虑地震荷載的历史更短得很；坝的数目比起房屋来又是少得很，所以真正經歷过大地震考驗的高坝抗震設計是絕无少有的，倒是有过一些不利的例子，就是在地震烈度不高的情形下坝的上部发生裂縫^[11]，我国就有过这样的事例。如果回顾一下历史，可知坝的抗震設計經驗是取自房屋建筑的設計經驗的。日本很早就

屋設計中采用靜力法計算地震荷載，得到一條經驗，就是，凡是按地震荷載系數 0.1 設計的房子都可以經得住大地震的襲擊。以後美國人就把它這條經驗用到壩的設計中去了。由此看來，壩的抗震設計經驗只能算是一種設計上的傳統習慣，不是真正的經驗。沿用這種經驗而不吸取現代科學研究成果是危險的。

事實上現代的大壩工程的抗震設計一般都是經過專門研究來確定的，很少人沿用舊的靜力法了。意大利采用大的模型作破壞性振動試驗；日本用小的模型測定振型，基本上采用反應譜理論；我國也進行了不少關於壩的動力模型試驗和理論分析工作。可見在壩工設計中，采用動力學方法和反應譜理論也已經成為當前的趨向了。

以上所論無非說明反應譜理論是較成熟的理論，對於一切建築都是適用的，我們應當把它作為設計規範中計算地震荷載的基礎。

二、關於地基土質條件的影響的考慮

地基土質條件對於結構抗震性能有巨大影響，這是公認的事實；但是在設計中如何具體地考慮這種影響，卻是沒有解決的問題。宏觀調查資料表明在同一地區、同一地震的情形下，表現在軟弱地基上的烈度遠遠高於表現在堅硬地基上的。基於這種現象，蘇聯 C. B. Медведев^[12] 以代表土壤堅實度的密度和縱波速度為指標來調整設計中所考慮的地震烈度，並把這種調整名之為地震烈度的小區域劃分。蘇聯規範基本上採用了他的建議，並規定調整的幅度為 ± 1 度^[4]。與 Медведев 的意見相反，美國 G. W. Housner^[13] 根據強震觀測認為在同一地區、同一地震的情形下，土壤條件對地面加速度的影響不大；美國規範未對不同地基情況作任何考慮。日本規範鑑於在軟弱地基上柔性結構較刚性結構易受破壞而在堅硬地基上情形相反，因而將地基分為四級，根據不同地基等級和結構類型採用不同的地震力系數^[14]，其目的是使軟弱地基上的刚性結構的地震力減小而柔性結構的地震力增大。羅馬尼亞規範將地基分為五級，用意與日本規範相仿。由此可見各國規範考慮地基影響的方法很不一致，但趨勢有二：一為調整地震烈度；一為分別結構類型調整地震力系數。應當說，這兩種方法都未全面考慮地基土質條件的影響，都有很大的片面性。

地基土質條件對於建築物的抗震性能的影響是很複雜的，但分析起來，不外表現在三個方面：第一，表現在對地面運動的影響上。一般的規律是，軟弱地基與堅硬地基相較，在同一地震和同一震中距離時，前者的地面卓越周期較長、振幅較大、振動持續時間較長，但加速度相差不遠。第二，表現在對地基的穩定和變形的影響上。顯然，軟弱地基在振動的情形下容易產生不穩定狀態和不均勻沉陷，甚至會發生液化、滑動、開裂等嚴重現象，而堅硬地基則沒有這種危險。第三，表現在改變建築物的動力特性上。地基和上部結構是不可分割的整體，因此地基土質勢必影響結構的整體性能；軟弱地基就有增長周期、改變振型和增大阻尼的作用。以上幾方面的影響對於不同結構有不同效應；同一種影響因素對這一種結構為不利，對另一種結構可能為有利。不過對於地面上大部分建築物，尤其是對那些構造不良、質量不佳的建築物來說，綜合各種影響的效應，則可以斷言，軟弱地基與堅硬地基比較起來是不利的。地震烈度是描繪地面建築物所受震害總的圖畫的概念；不言而喻，它勢必為地面上為數眾多的不很堅固的建築物的表現所決定。所以在同一地震、同一地區，軟弱土壤上的烈度會比堅硬土壤上的烈度顯得高。但必須指出，這不等於說軟弱地基上的結構的地震荷載要比在堅硬地基上的大得多，因為地基土質條件的

影响,不是完全表现在地震荷载的量值上的。由此可见,Медведев 以宏观调查资料为基础的小区域烈度划分方法用来描述地震时不同土壤上的建筑物的宏观破坏现象是恰当的,但是用于新建工程地震荷载的计算则是不恰当的。小区域烈度划分方法抹杀了新建工程的结构特性,忽视了不同结构在相同地基上有不同反应的客观事实;应用这个方法,不问结构性能如何,笼统地提高或降低设计烈度,成倍地增大或减小地震荷载,必将导致不够经济或不够安全的设计。另一方面,象日本规范那样单纯分别结构类型和不同地基土质条件调整地震力系数的方法也是不够全面的,因为如前所述,地基影响不是完全在地震荷载上反映出来的。例如软弱地基在地震时易于失效,提高地震荷载只能增强上部结构的抗震强度,对于防止地基失效并无很大作用。

那末地基土质条件对于建筑物抗震性的影响的全面考虑应当怎样在设计规范中体现呢?我们认为应当从下列几个方面来考虑:

(1) 避免在极不稳定的土壤上(如沼泽、流沙、新填土、悬岩绝壁、陡坡等)进行建设,特别是建设在高烈度地区的重要建筑尤其要注意这一点,因为在地震区不稳定土壤上建造建筑物,其后果如何还不是在目前的科学水平的基础上所能准确估计的。

(2) 根据地基土质和地震烈度对地基承载力进行调整,以保证建筑物在地震时不致因地基失效而破坏。地基失效的现象如果要以数量指标来表达,地基承载力是可以利用并为人所熟悉的一个概念。很明显软弱和不稳定土壤的承载力,会因地震而削减或丧失,而基岩与坚硬土层则否。根据工程经验与试验研究对各种土壤的承载力提出在地震时的调整系数是可能的。

(3) 根据地基和结构的特点采取适宜的抗震措施。有些抗震性不良的地基在本身或上部结构加固以后便有一定的抗震性。例如在软弱地基上采用筏型基础就可以大大地提高整个结构的抗震性。

(4) 根据不同地基情况和不同结构特性采用不同的地震荷载。**这是在地基不致失效的前提下保证结构抗震强度的措施**,必须在前述几方面的考虑贯彻以后才会有实际效果。

为了便利规范的拟订和设计者的考虑,应当对地基土壤进行等级划分。但地震工程学究竟是一门幼稚的、不精确的学科,对地基过细的分级没有实际意义。各国的规范一般是划分为三至五级,根据目前的科学水平,看来划分为下列四级是适宜的。

I 级地基: 稳定岩层;

II 级地基: 一般土壤,如砾石、砂土、天然黄土、密实粘性土等;

III 级地基: 松软土壤,如软粘土、松散砂土、浸湿黄土等;

IV 级地基: 异常松软土壤,如松厚填土、极软粘土等。

各级地基除了给以定性的描述以外,还可以用各种参数指标来帮助鉴别;诸如承载力、单位容重、卓越周期、冲积层厚度、波的传播速度等均可考虑引用为鉴别参数。我们将分别上列四级地基来考虑地震荷载的计算,具体方法在下节详细讨论。

三、地震烈度的定量指标

烈度是衡量地震强弱的概念。烈度的划分尺度各国不完全一致。美国、苏联以及许多其他国家都采用 12 度制的烈度表;日本则采用 8 度制。我国遵从大多数国家的习惯采用 12 度制。为了确定某一工程地点的地震活动性,世界各国大都采用地震区域划分的方法

法。例如美国划为 4 区,日本划为 3 区,新西兰划为 2 区。这些国家只是根据地震活动性的强弱将全国划为数区,采取不同的抗震设计标准,但并没有明确地指出每一地区的地震烈度。明确地按照烈度划分地震区和进行抗震设计则是苏联的方法。我国吸取苏联的经验亦按烈度进行工程设计,行之已久,成为我国的传统。

地震荷载是物理数量,按烈度计算地震荷载,理论烈度应有一个数量标准借以换算荷载。但是作为划分烈度的现行烈度表,都侧重于地震宏观现象的描述,缺乏定量的尺度。虽然远在 1888 年 Holden^[15] 提出的烈度表已有最大水平加速度的规定,1904 年 Cancani 烈度表^[16]又作了修改,但这些数据是从宏观调查资料推测出来的,并没有可靠的根据。数十年来,科学工作者不断努力,企图从仪器观测资料中寻找较为科学的定量尺度。截至现在,主要的成果表现在两方面:

(1) 地面最大加速度与地震烈度的关系;

(2) 地震反应谱与地震烈度的关系。

这两方面的成果已经在不同程度上反映在各国的设计规范之中,但是各国规范在引用这些成果的时候总是和设计上的经验数据混淆在一起,并没有明确地指出烈度的定量指标。例如美国规范采用了加速度反应谱作为计算地震荷载的基础,但是非但没有指明谱值与烈度的关系,而且为了适应设计经验,将谱值取得极低,以致与实际观测资料相差很远。又如苏联规范以地震系数(其涵义为地面最大加速度与重力加速度之比)与烈度联系,但地震系数采取与古老的 Cancani 烈度表相一致的数值,并未吸取近代强震观测的成果。象这样混淆科学研究成果与设计经验是极为不利的,这样做在实质上是以设计经验为依归,不能真正吸取科学研究的成果。我们认为,正确的办法是分两步走:第一步,根据现代强震观测资料建立烈度的定量指标,据以进行地震荷载的理论计算;第二步,分析理论计算与设计经验的差异所在,吸收设计经验中的合理部分,对理论计算结果加以修正。随着强震观测工作的进展,我们可以不断修正烈度的定量指标;随着工程经验的积累,又可以不断改进理论计算方法以缩小理论与实际之间的差距。这样做既不片面信任观测资料,亦不盲目沿用设计经验,对于逐步深化我们的认识是十分有利的。为此,我们建议以下列两个无量纲的参数作为烈度的定量指标:

$$\text{地震系数, } k = \frac{\text{地面最大加速度, } a}{\text{重力加速度, } g}$$

$$\text{动力系数, } \beta = \frac{\text{单质点弹性结构在地震作用下的最大加速度反应, } A}{\text{地面最大加速度, } a}$$

关于烈度的定量指标,除了现行烈度表已经列入地面加速度指标以外,目前还有许多建议。例如, H. M. Westergaard^[17] 在很早就建议以地面最大速度为指标; C. B. Медведев^[12] 建议以对数衰减率为 0.5 的位移反应谱上对应于周期为 0.25 秒的谱值为指标,并已制造相应的烈度计; G. W. Housner^[18] 建议以速度反应谱在一定周期范围内所包含的面积为指标,也已制出相应的烈度计;统计理论的研究者则倾向于采取加速度的某种统计量为指标^[19]。究竟以何说为是,目前还难作结论。我们为什么建议以地震系数和动力系数为指标呢?理由有三:第一,关于这两个系数研究资料较多,可以得到比较可靠的数据;第二,影响地震荷载的主要因素,如地震烈度、地面运动过程的频率特征、结构的动力特性都可以通过它们得到反映;第三,应用反应谱理论,可以从这两个系数便利地换算地震荷

載,有利于工程設計。下面对这两个系数分別加以討論。

(1) 地震系数, k

我国缺乏強震觀測的資料,只能借助于国外的研究結果来确定地震系数,在本報告集中陈达生^[20]把一些有价值的資料汇集在一起,以供参考。表 1 引用了几个研究者的結果。表列第 1 至第 5 行的数值是从研究者所建議的地面水平加速度与烈度之間的关系的公式或曲綫得出的;他們的建議都是在分析了許多地震記錄的基础上提出的。尽管这些結果所根据的觀測資料不尽相同,但都反映一个共同規律,就是烈度每增一度,最大地面加速度大致地增大一倍,并远远高于 Cancani 烈度表上的数值。我們的建議采用了第 (1), (4), (5) 行的数值,因为这些数值几乎完全一致而且在研究者的本国已被承認。又根据美国的強震觀測資料,豎向与水平向的加速度的比值的變化范围很大,但其統計平均值約在 $1/2$ ^[20], 因此我們建議豎向地震系数取为水平向的 $1/2$ 。

表 1 地震系数, k

研 究 者		烈 度			
		7	8	9	10
(1)	Gutenberg & Richter ^[31]	0.07	0.15	0.32	
(2)	Neumann ^[22]	0.13	0.27	0.54	
(3)	Hershberger ^[28]	0.13	0.34	0.91	
(4)	Медведев ^[13]	0.05—0.10	0.10—0.20	0.20—0.40	
(5)	Housner ^[34]	0.06	0.13	0.27	
(6)	Cancani ^[16]	0.01—0.025	0.025—0.05	0.05—0.1	0.1—0.25
(7) 本文的建議	水 平 向	0.075	0.15	0.30	0.60
	豎 向	0.038	0.075	0.15	0.30

注: 第 (5) 行数值系对应于美国地震区域划分图上的第 1, 2, 3 区, 根据地震資料, 各区的最大烈度約为 7, 8, 9 度。

应当指出,所有研究者都沒有考虑地基土質条件的影响,因此其結果可說是在各种地基条件下的平均数。究竟地基土質对地面加速度的影响如何呢? 研究者的意見是分歧的, 周錫元^[25]作了一些分析,可供参考。就几个主要的研究者而言, Gutenberg^[26]认为加速度要随地基軟弱程度增大;金井清^[27]认为随之减小;而 Housner^[13] 則认为地基土質对地面加速度的影响不大。这可能是由于他們所根据的資料不同。Gutenberg 应用的記錄主要是弱震記錄;金井清的公式主要是从理論分析得来,但用了不多的地震記錄作校核,而 Housner 应用的資料是強震記錄。由于他們的研究都不够成熟,引用的資料的离散性都很大,我們不宜过早地作出結論。最值得注意的是 1957 年 3 月 22 日旧金山之震^[28]。那时在震中一側的五个地震台都收到了記錄,五台的震中距离相差不多但土質条件有的为岩石,有的为厚冲积层,各不相同。按加速度与震中距离的平方成反比的关系可将各台記錄的加速度換算到同一震中距离作比較。比較的結果,看不出土質条件的明显影响。根据以上分析,我們认为地基土質条件对地震系数的影响可以暂时不顾,等到有丰富的觀測資料和更多的論証时再作考虑。

(2) 动力系数, β

地震系数表示地震时的地面加速度,是地震烈度的直接函数;动力系数表示结构的加速度反应和地面加速度的相对比例,它和烈度没有明确的函数关系。可以预言,当其它条件不变,只有烈度变化时,动力系数将在一定数值范围内无规律地变化;为此,我们假定动力系数为不随烈度变化的数量。所以严格说,动力系数并非烈度的度量尺度,但由于它反映地面运动过程的特征,所以仍可作为烈度的定量指标之一。

从定义,可知动力系数是加速度反应谱的相对数值。现在根据强震水平加速度记录算出的加速度反应谱已经不少了。Housner^[29]和 Медведев^[12]进行了大量的计算,我国工程力学研究所利用电子计算机重复了他们的某些计算,Назаров^[30]并用多摆仪实地测得了一些反应谱。从这些资料可以找出加速度反应谱的特征如下:

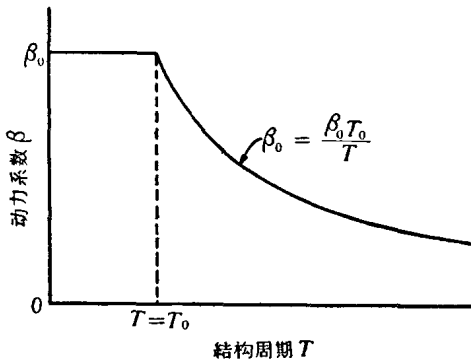
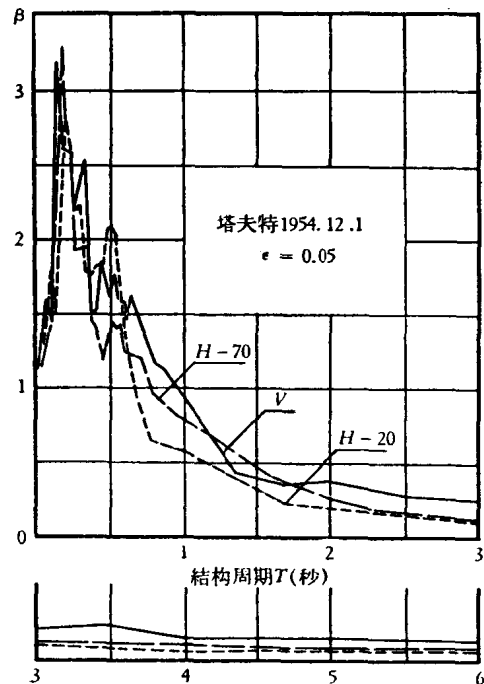
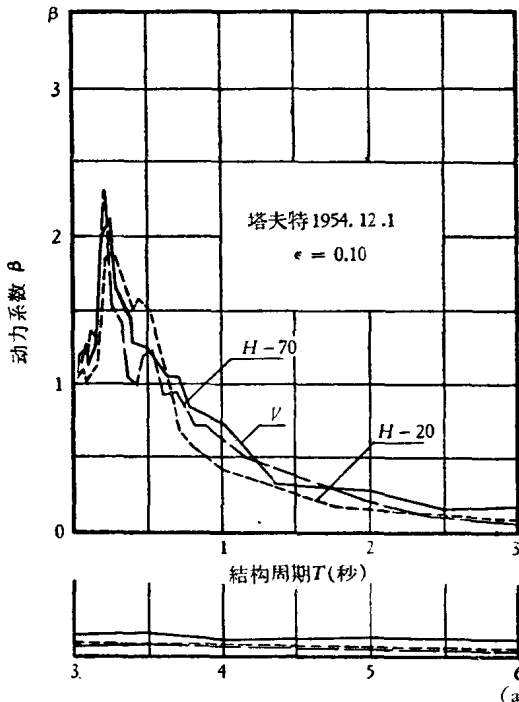


图1 动力系数

a) 无阻尼反应谱有许多峰点,峰值随结构周期的增大而减小;但有阻尼的反应谱则比较平滑,峰点较少,一般有一个主峰,过了主峰曲线就接近双曲线,与周期成反比递减。

b) 反应谱的主峰位置和峰顶锐度与地表的刚度有关^[25];地表土质愈软,主峰的位置愈向右(周期增长的方向)移动,峰顶也愈扁平。主峰位置与地表卓越周期大致相当。

c) 阻尼削减谱值的作用很大,但随着阻



V表示竖向分量, H-70表示水平分量,分量的方向与震中和仪器设置点的联线的交角为70°。

图2 竖向动力系数