

刘恢先地震工程学 论文选集

国家地震局工程力学研究所 编

地震出版社

地震科学联合基金资助

刘恢先地震工程学位论文选集

国家地震局工程力学研究所 编

地震出版社

1994

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

本书是我国地震工程学的奠基人刘恢先教授数十年科研成果的精华。全书共选入论著 36 篇,内容涉及地震力理论、地震烈度、地震区划、震害经验、抗震规范以及地震工程的发展等六个方面。书中还选入刘恢先教授的诗作 27 首。这些论文和诗篇反映出作者在科学研究中的远见卓识和为人处世的高尚品格。

本书可供地震工程方面的科研人员和工程技术人员使用,亦可供有关高等院校师生参考。

刘恢先地震工程学位论文选集 国家地震局工程力学研究所 编

责任编辑:王 伟 蒋乃芳

责任校对:王花芝

*

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路 9 号

北京市丰台区丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 26 印张 1 插页 656 千字

1994 年 7 月第一版 1994 年 7 月第一次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-5028-1109-5/P·673

(1502) 定价:45 元

刘恢先教授生平简介

刘恢先（1912—1992）江西省莲花县人，中国科学院学部委员，著名地震工程学家，中国共产党党员。1933年毕业于唐山交通大学，1937年获美国康奈尔大学博士学位，曾任西南新建铁路工程师，浙江大学和西南联大教授。抗战胜利后再度赴美，任工程师和大学教授。解放后回国，任清华大学教授，1952年起调任中国科学院工程力学研究所（原名土木建筑研究所）所长，1984年起任名誉所长。他曾任中国灾害防御协会会长，中国地震工程联合会理事长，中国地震学会副理事长，中国地震学会地震工程专业委员会主任委员，第二、三届全国政协委员，第四、五、六、七届全国人大代表，黑龙江省人大常委会副主任，黑龙江省政协第四、六届副主席，九三学社中央常委及黑龙江省委主任委员。

刘恢先教授是我国地震工程学的奠基人和开拓者。他亲手创建了我国第一个地震工程研究机构，领导完成了许多重要工程的抗震研究任务，并在60年代初领导开展了核反应堆结构力学的研究。他曾领导并直接参与了我国第一、第二个抗震规范草案的编制，并在第二个抗震规范草案中提出了“结构系数”、“地震系数”、“动力系数”，区分地震惯性力与地基失效这两种效应和针对四种不同场地土采用四种不同的标准反应谱等概念。他更新了地震烈度的概念，领导制订了《中国地震烈度表（1980）》。他在地震力理论方面进行了深入的研究，提出了确定三维结构对于三向地面运动的反应的方法。在我国，他最早提出“小震不裂，大震不倒”的设计思想。他曾编写全国科学规划中有关地震工程部分，主编《唐山大地震震害》一书，受到国内外学术界的高度评价。并任地震工程学术刊物《地震工程与工程振动》的主编，创办了灾害学理论刊物《自然灾害学报》并任编委会主任委员，还担任《中国科学》、《科学通报》以及国际学术刊物的编委。他在促进中国和美国、日本等许多国家在地震工程学术方面的合作关系作出了极大贡献，多次率团出国访问和讲学，主持国际双边和多边学术讨论会。他培养了多名博士生、硕士生以及高、中级科技人员。他著有论文数十篇，内容涉及结构力学和地震工程两部分。

序

本书收集刘恢先教授关于地震工程学的论文 36 篇，内容涉及地震力理论、地震烈度、地震区划、震害经验、抗震规范以及地震工程的发展等六个方面。这些论文具有独创性，对国民经济建设具有实用价值，对抗震防灾工作具有指导意义，反映了刘恢先教授在科学研究中的远见卓识，是地震工程学文献中的珍品。

刘恢先教授是中国地震工程学的奠基人和开拓者。他治学严谨，勤耕不辍，四十年如一日，为创建和发展国家地震局工程力学研究所，为开拓与发展中国的地震工程研究事业作出了杰出的贡献。一年前，癌症夺去了恢先同志的生命，我为一位杰出科学家的长逝和为一位挚友的永别而感到无比沉痛。

我与恢先认识于烽火漫天的抗日战争年代，五十多年来相知极深。恢先同志热爱祖国，胸怀坦荡，治学勤奋严谨，生活平易近人。论文集中所附的诗作，不仅显示了他在文学方面的修养，也表现出他为人处世的高尚品格。他的科学论文和诗作对于后人是很有教益的。

当《刘恢先地震工程学论文选集》付梓之际，我写这简短的序言，以表达对挚友的深切怀念。

钱金明
1993.10.

目 录

第一部分 地震力理论

论地震力	(3)
工业与民用建筑地震荷载的计算	(23)
挡水坝地震荷载	(41)

第二部分 地震烈度

地震烈度工程标准研究提纲	(59)
烈度标准与烈度革命	(81)
修订我国地震烈度表的一个建议方案	(87)
关于地震烈度及其工程应用问题	(100)
《中国地震烈度表 (1980)》说明书	(111)
Physical Measure of Earthquake Intensity Studied by Statistical Discrimination ...	(127)
用统计判别研究地震烈度的物理尺度	(140)
地面运动特征和地震的破坏性	(147)

第三部分 地震区划

对我国第三代地震烈度区划编图的初步设想	(155)
附件:编制我国第三代地震烈度区划图技术方案	(157)
在“新的中国地震区划工作会议”上的发言	(162)
On the Seismic Zoning Map of China	(164)
关于中国的地震区划图	(170)
地震危险度智能辅助评估系统 SHES	(175)
场地地震危险度智能辅助评估系统的新进展	(181)

第四部分 震害经验

新潟地震的经验教训	(191)
从邢台地震看地震预防的研究	(193)
从海城地震谈几个抗震问题	(200)
海城地震概况	(208)
Behaviour of Brick Masonry Buildings During Destructive Earthquakes	(218)
砖砌体房屋在破坏性地震中的性能	(231)
《唐山大地震震害》序言	(240)
Lessons Learned from the 1976 Tangshan Earthquake	(243)
1976 年唐山地震的经验教训	(253)

第五部分 抗震规范

关于编制我国地震区建筑物设计规范的一些意见	(261)
关于设计规范中地震荷载计算方法的若干观点和建议	(266)
关于在抗震设计规范中应用烈度概念的意见	(282)

第六部分 地震工程的发展

抗地震结构研究工作在中国的发展	(289)
当前抗震理论的几个基本问题	(296)
地震工程学的发展趋势	(298)
关于抗震工作的若干意见	(311)
从第七届世界地震工程会议看地震工程学的最新进展	(323)
Several Aspects of Earthquake Engineering in China	(325)
中国地震工程的几个方面	(336)
1984 年《全国地震工程会议论文选集》序言	(343)
Some Thoughts on Earthquake Hazard Mitigation in China	(345)
减轻我国地震灾害的一些设想	(359)
地震工程学科在中国的发展——回顾与前瞻	(367)
The Sole Course of Mitigating Earthquake Risk	(373)
减轻地震危害的唯一途径	(383)
《中国工程抗震研究四十年》序	(389)
多学科联合协作,综合进行灾害防御研究	(390)

第七部分 诗 选

武汉长江三桥会议	(397)
周恩来总理逝世周年纪念(一), (二)	(397)
游南京	(398)
宁杭道上	(398)
庆三中全会胜利召开	(398)
庆科学院工作会议	(398)
游杭州,寄姬伯连同志	(399)
毛主席逝世周年纪念	(399)
国庆逢大源	(399)
震后唐山	(400)
再诵叶帅《攻关》诗(一), (二)	(400)
春节寄大源	(400)
蒙哈科协祝贺从事研究工作五十年	(401)
贺日本地震工程代表团访华成功	(401)
贺《东北地震研究》创刊	(401)

哈尔滨解放四十周年	(401)
返故乡	(401)
祝贺日本大崎研究所与中国工程力学研究所签订长期合作协议	(402)
贺 G.W. Housner 教授八十寿辰	(402)
哈尔滨科技报嘱笔	(402)
寄大源	(402)
重阳老人节	(403)
春节有感	(403)
寄大源	(403)
有感	(403)
寄令希	(404)
庆祝《中国地震年鉴》出版十年	(404)
后记	(405)

第一部分 地震力理论

论 地 震 力¹

一、绪 言

对于建筑物来说，地震的作用是一种外加的强迫运动，不同于一般的荷载，一般所谓“地震力”，在物理意义上是地震时建筑物自身的惯性力；在实际设计中，则可以理解为一种能够反映地震影响的等效荷载，根据这样的荷载设计出来的建筑物就能够抗御地震，不致遭受严重的损害。因此，地震力决定于它所产生的效果，决定于建筑物所受地震的影响。并不是所有荷载都是这样的，一般的荷载可以不问其效果如何，独立地加以确定。譬如，屋顶上的雪荷载就只决定于当地的气候，并不决定于它对建筑物的影响。这是地震力和一般荷载的不同点，也就是研究地震力所应着重考虑的关键。

研究地震对于建筑物的影响有两种方法：一种是总结经验的方法，就是在地震发生时或发生后对建筑物所受影响进行细致的调查和观察，从大量事实中去寻找规律。一种是理论和实验的方法，就是从问题的各个方面，进行反复的理论分析和实验观测。这两种方法应当是相辅而行、不可偏废的。最初人们采用的方法主要是总结经验的方法；关于地震对建筑物的影响的理论分析和实验观测，是在近 30 年来才开展起来。在此时期，工程地震学逐渐形成一门学科，这门学科是从两方面进行研究的：

- (1) 地震时地面是如何运动的？建筑物的基底在地震时可能遭受到怎样的强迫运动？
- (2) 在给定的地面运动之下，建筑物的反应如何？

第一个命题是属于地震特征的范畴，第二个命题是属于结构性能的范畴。虽然这两个命题之间不是完全没有联系，但是它们一向是被分别研究着的。30 年来的研究有些什么主要成就呢？概括地说，有下列几点：①用精密的地震仪测得了强地震和人工爆炸时地面运动的位移和加速度，使结构分析有了依据；②对各类建筑物进行了大量的振动测验，获得了关于建筑物动力性能的知识；③建立了抗地震结构动力分析的理论基础，发展了计算技术和模型试验，并在实际设计中开始应用动力分析的方法；④在近代发生的大地震中，取得了现代建筑抗御地震的经验；⑤对于地基土质与建筑物抗震性的关系进行了探索，按照工程地质、水文地质的条件进行地震烈度小区域划分的工作已有初步的结果。

随着这些知识的积累，地震力的理论逐渐由最简单的形式发展成为较完整的体系。但是所有理论都只考虑地面运动的水平分量，竖向分量的作用一向是被忽略的。一切理论又都是以弹性体系为基础，对于建筑物在地震作用下的非线性振动，还只有初步的研究，没有成熟的结果。

作者根据自己所接触的文献将地震力的理论分为四种：①所谓“静力理论”；②用简单数学函数模拟地面运动的理论；③以实际地面运动为根据的理论；④把地面运动当作随机脉冲的理论。

¹ 本文原载《土木工程学报》第5卷，第2期，1958年。

本文试图对这四种理论进行总结和评论，以供进一步研究的参考。

二、关于几种地震力理论的评述

1. 静力理论

所谓静力理论就是假定地震时，建筑物各部分承受一个均匀的、不变的水平加速度，这一加速度所产生的惯性力就是地震力，在设计中当作一种静荷载考虑。其结果，地震力就成为与结构重量成比例的一种水平荷载。这个理论最初是日本大森房吉^[1]所提出，并且从1923年东京大地震的经验得出这样的结论：凡按0.1g加速度设计的建筑可以经得起像那次那样强烈的地震。在美国，工程师们也用同样的方法来总结地震调查中所获得的经验。因此在很长一段时间，这条经验成为抗地震设计的准则，在各国都很通行。工程师们还把风力和地震力相提并论，认为两者的作用一致，建筑物如能抗御风力便能抗御地震力^[2]。静力理论的进一步发展，是假定地震力和结构重量的比例随其高度变化。显而易见，静力理论的缺点是很多的。首先，它完全缺乏动力学的观点，没有考虑地震力与结构动力性能的关联，简单地假定建筑物各部承受均匀的加速度；实际上，这个假定只能当建筑物为绝对刚体时才能实现。即使建筑物为刚体，它对倾覆的稳定性仍然与地面运动的周期有关，而不单纯决定于加速度。比如美国皮特河桥（Pit River Bridge）的桥墩^[3]，高达360英尺^①，如果按照0.1g的加速度来设计，几乎不可能满足工程上的要求，但当考虑到桥墩在倾倒之前，使它倾倒的惯性力就已经改变方向这一事实，工程师就认定没有必要按0.1g的加速度设计。日本建筑规范所规定的地震系数很高，产生了倾覆作用过大、在设计中无法考虑的矛盾，因而不得不任意地减半计算。

静力理论的另一缺点在于采用的加速度只能是纯粹的经验数据，在此时此地取得的数据无法应用到彼时彼地。在东京大地震取得的经验只能用在那时东京的建筑。我们不难想象，那时的设计所采用的安全系数一定很大，计算一定很粗糙，非主要构件（如间壁等）所增强的抗震能力未必考虑。当我们的计算日益精细，安全系数日益减小，如果仍按同样的加速度数据进行设计，就未见得能承受同样强烈的地震。不用说，建筑形式和土壤特性都会使加速度数据发生很大的变化。

虽然静力理论的缺点是显著的，但是迄今还有人赞成它，认为这是从许多次地震总结出来的经验，有一定的根据，不能随便抛弃，尤其在低层建筑中，静力理论基本上可以适用^[4]。迄今大多数国家（包括对地震进行了长期研究的日本）的建筑规范还是采用静力理论。但是不论如何，旧的静力理论已经过时了，当人们对于结构动力行为的规律已经逐渐掌握的时候，放弃不符合客观实际的静力理论是很自然的。

2. 用简单数学函数模拟地面运动的理论

地震的作用既然在实质上是一种强加于结构之上的运动，那么精确的计算就必须以地震时地面运动的规律为根据。但是实际的地面运动非但是十分复杂而且是无法预测的，因此用一种简单的周期运动来模拟地震运动就成为简易可行的方法。日本学者曾经假定地面运动为谐和振动，做了许多结构的动力分析工作^[2, 5]。除了简谐运动不足以描绘实际的地

① 1英尺 = 30.48厘米，下同。

震运动以外,已往这些工作的最大缺点是只研究结构振动的稳定状态,而实际上在地震过程中结构的振动是处于过渡状态。К.С.Завриев^[6]也曾经把地面运动当作简谐运动来研究,但是他进一步考虑了结构的过渡振动。

近年 И.Л.Корчинский^[7]从地震记录的观察假定地面的振动为若干周期不同的衰减正弦函数的叠加,即

$$\sum_i c_i e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_i t$$

又假定建筑物为一有阻尼的竖立杆件,从而计算建筑物的过渡振动,通过一系列的简化,他把地震力最后写成下式:

$$S_i = K_c \sum_{j=1}^n \eta_{ji} \beta_j Q_i \quad (1)$$

式中 S_i 代表结构上 i 点所受地震力; K_c 为地震系数,代表着地震烈度; β_j 为动力系数, η_{ji} 为振型系数,均决定于结构的动力性能; Q_i 为集中于 i 点的重量。

И.Л.Корчинский 的方法对地震力的计算有所推进,但是其中仍然存在着很难克服的缺点。首先是关于地面运动的一些参数(包括各振动分量的振幅、衰减系数、振动频率以及相位差)如何确定的问题。在他的文章里没有提到各分量的振幅和相位差如何确定;衰减系数则是采取地震记录图上的平均衰减系数。这样取得的衰减系数至多只能代表全部振幅的衰减率,而不能代表各个分量的衰减率。其次,虽然他假定地面运动为许多个衰减正弦分量的叠加,但他在随后的计算中,实际上只考虑了其中一个分量,其余分量的影响,简单地归纳为动力系数的折半计算。由于上述简化,И.Л.Корчинский 理论的准确性就大大地降低了。同时,这个理论的正确性也缺乏严格的验证,没有和根据实际地面运动的计算结果作比较。苏联最近的地震区建筑规范采用了 И.Л.Корчинский 的理论,其中地震系数 K_c 系采用苏联现行地震烈度表中所规定的最大地面加速度与重力加速度的比值。

В.Н.Расмуссен^[8]认为地震时真正的共振现象不可能发生,因此地震作用和单个正弦波的作用十分相似。他建议以单个正弦波的谱曲线作为抗震设计的根据,调整其中参数来适当地地震的特征。这种过分的简化是很难反映地面运动的全部特征的。

С.В.Медведев^[16]曾经用函数

$$\beta_0 e^{-\alpha_1 t^2} \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t e^{\alpha_2 t^2}\right)$$

来模拟地面运动,他认为可以获得近似的谱曲线。以谱曲线为比较的基础来寻找能够代替实际地震的简单曲线是一个可行的方法。

3. 以实际地面运动为根据的理论

按照实际的地面运动来计算建筑物的反应是较理想的方法,困难在于实际地面运动的杂乱无章,不易进行数学分析。这个困难最初是由 М.Бiot 解决的。他提出了“地震谱曲线”的概念^[9, 10]。所谓“谱曲线”就是单质点弹性体系对于实际地面运动的最大反应(可以用加速度、速度或位移的形式表示)和体系的自振周期的函数关系,用曲线表示出来(图1)。复杂的结构可以简化为若干振型的叠加,每个振型又可以转化为一个单质点体系来考虑。这样,任何结构对于地震的反应都可以当作若干单质点体系的反应的叠加。由于实际地面运动的不规则,用数学分析方法来求解谱曲线是困难的,必须借助于计算工具。

M.Biot 本人发明了扭摆模拟方法^[11]，画出了美国 1938 年海伦那地震的加速度谱曲线。他建议在搜集了许多地震谱曲线之后，可以采用这许多曲线的共同包线为设计的根据；在当时，他并建议采用海伦那型的谱曲线作为标准谱曲线，在设计中应用。在他的计算中，忽略了阻尼的影响。此后，谱曲线计算方法日益完备，发展了数值计算（包括数值电子计算机）^[12—15]、图解^[16]和电路模拟^[17—19]等方法。

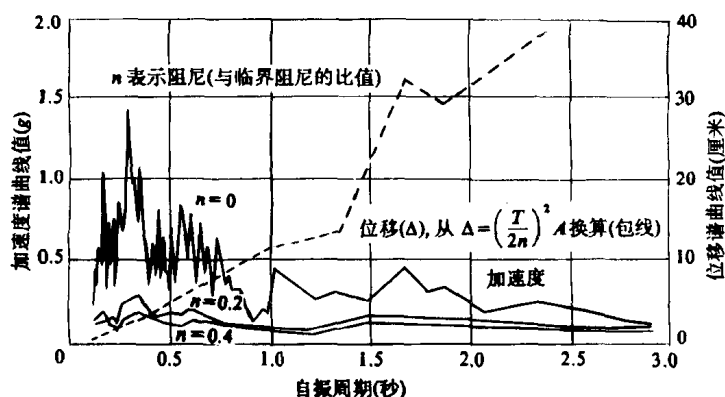


图 1(a) 加速度谱曲线^[22](Vernon, California, March 10, 1933, S 82° E)

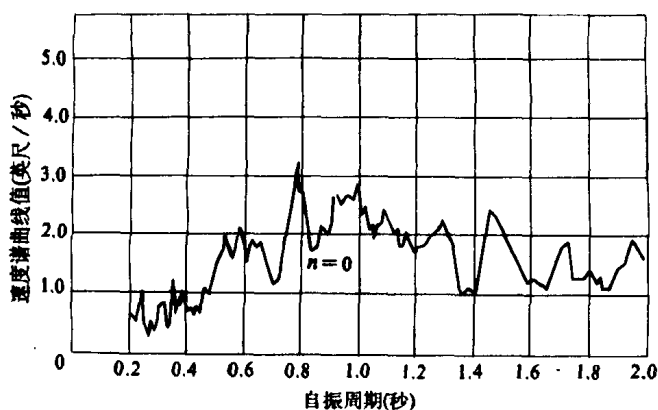


图 1(b) 速度谱曲线^[24](Vernon, California, March 10, 1933, S 82° E)

谱曲线的完整概念虽然形成于 M.Biot，但在此之前，末广恭二^[20]为了直接测量地面运动的卓越周期，曾经设计了一种地振动分解器，由许多不同周期的摆所构成。地震时，反应最大的摆的周期便是卓越周期。这个概念在实质上是和谱曲线一致的，这样测出来的卓越周期应相当于位移谱曲线最高峰的周期。

美国现行的关于地震荷载的规定^[21]是以 M.Biot 的理论为根据而拟定的，这个规定主要包括下列几点：

- (1) 将建筑物转化为几个单质点体系的叠加，每一单质点体系代表一个振型。
- (2) 将每一单质点体系的基底剪力写成侧力系数和质点重量的乘积。侧力系数则根据体系的自振周期取自标准加速度谱曲线，但根据当地地震经验选定侧力系数的上下限。

(3) 将基底剪力按照振型的特性分布于建筑全高作为地震力。

G.W.Housner 及其合作者发展了 M.Biot 的理论, 他用电路模拟的方法, 计算了差不多所有美国主要地震的谱曲线^[22], 并且考虑了阻尼的影响, 最后得到了新的结论。主要结论如下:

(1) 阻尼对于强地震谱曲线的影响非常之大, 很小的阻尼 (0.02 临界阻尼) 就可以减小谱曲线值一半以上, 并可以削平谱曲线上的许多峰点, 使之成为一条十分平坦的曲线 (图 1a)^[22]。但是对于人工爆破所产生的地面运动, 阻尼的影响则不那么显著^[23]。

在这里还应当指出, M.J.Murphy^[19]用电模拟方法获得的谱曲线却有些不同; 在有阻尼的谱曲线上, 仍然出现明显的高峰。他们的差异可能是由于所用地震记录的不同, 或者是计算上的误差。

(2) 速度谱曲线比其他谱曲线更有规律, 当结构的周期大于地面运动的周期时, 速度谱曲线趋近于常数^[24, 25]。他建议以包括阻尼影响的速度谱曲线为设计的依据, 并提供了过去地震的平均速度谱曲线^[26]和速度谱曲线的近似公式^[27]。

(3) 在地震时输入振动体系的能量和速度谱曲线值有直接关系, 约等于 $\frac{1}{2}MS_v^2$ (M 为振动体系的质量, S_v 为速度谱曲线最大值), 因此就可能从能量输入与能量散失的观点来进行结构设计。他建议利用材料塑性变形来吸收输入的能量, 并作出了高耸建筑物的设计实例^[26, 27]。

虽然 G. W. Housner 作了无可怀疑的贡献, 但是他的某些论点还是值得商榷的, 在本文中将要提到这些论点。

苏联学者也独立地发展了谱曲线的方法。A. Г. Назаров^[28]应用“折算加速度”来直接计算结构应力的包线。所谓“折算加速度”, 即是在这样的常加速度之下, 振动体系所产生的最大位移与在实际地震情形时相等, 其意义与加速度谱曲线值完全一致。A. Г. Назаров 的理论的另一特点是接受了 E. C. Сорокин 关于结构内阻尼的假设^[29]。他设计了一种直接在地震时测出位移谱曲线的多摆仪, 而且应用这种仪器获得了实际地震和人工地震的记录。应当指出, 当结构为无阻尼弹性体系时, 谱曲线不是平滑的曲线而是跳动得非常剧烈, 几乎包含着无数相差悬殊的峰点和谷点 (图 1), 因此很难有那样多的摆, 能够使无阻尼谱曲线的许多峰点都被记录下来。但当结构有阻尼时, 峰点一般被削平, 这个问题便不发生了。

C. B. Медведев^[16]把位移谱曲线和地震烈度联系起来, 制成一种测定烈度的球面单摆仪。摆的自振周期和阻尼都采用最能代表普通建筑物基本振型的数值。这样, 摆对地震的反应就代表一般建筑物的反应, 因而成为烈度的标志。对于某一结定的建筑物, 他将摆的反应乘上一个周期函数和一个阻尼函数; 显然这两个函数的积就具有谱曲线的含义。

从上面所述发展情况看来, 按照地面运动的实际情形来进行结构的抗地震计算是世界各国的趋势, 而且在理论上似乎已经相当完备。但是在实际应用上仍然存在着困难, 主要是这个方法需要强地震记录, 而这种记录不容易取得。再则已有的谱曲线不能完全代表未来的地震, 一地的谱曲线也不一定能够直接用到其他地点。因此要在所有地震区积累许多谱曲线而得出一条包线, 不是短时期的事情。

4. 把地面运动当作随机脉冲的理论

用概率理论来寻求结构反应的数学期望值(mathematical expectation)是近年来发展的一个方法, 最早是 G.W.Housner 提出的^[24]。他认为强地震记录没有什么共同之点, 如果有的话, 那就是他们的随机性, 他把这种随机性的来源, 归之于地震加速度在方向、大小和时间三方面的缺乏规律和难以预测。由此出发, 他把地面运动当作许多个相同的脉冲所组成, 这些脉冲在时间坐标上的分布是随机的, 出现的概率密度是相等的。根据这样的地面运动算出的速度谱曲线期望值为一常数。为了证明这一点, 他求出十个实际地震的速度谱曲线的平均曲线, 果然这条平均曲线接近于一条水平直线, 但当周期很小时, 这条直线逐渐下降, 趋向于零。因此他断言地面运动可以作为随机分布的许多加速度脉冲来考虑, 并否认地震有卓越周期存在。为了证实这种假设的合理性, 他进一步在地震发生的机理中去寻找根据^[30]。他认为地震的发生是由于地层裂缝处剪应力的断续释放, 每次应力的释放都放出一对正负号加速度脉冲, 地震加速度图便是这些脉冲的随机组合 (经过反射、折射)。在这里, 他忽略了由于地震波引起的地面自由振动。

L.E.Goodman, E.Rosenblueth, N.W.Newmark^[31]将 G.W.Housner 的理论作了一些改进, 不再那样简单地假定地面运动为相同的脉冲组成, 而更细致地作了下列假设:

(1) 地面运动为一系列脉冲组成, 脉冲的符号和大小都是随机分布, 但由于地震最终会停止, 故脉冲的总和应等于零。

(2) 结构的反应等于结构对于各个脉冲的反应的总和, 但任一脉冲的影响比起全部反应来是微小的。因此根据概率原理, 结构的反应属于正态分布, 又因为结构反应可正可负, 故平均值为零。

(3) 结构反应绝对值的数学期望, 可以用来作为设计的指标。

根据上列假设, 结构反应绝对值的数学期望可以导出为:

$$E|x| = \left\{ \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E(\sum u_i^2)}{t} \int_0^t [\varphi(t-\tau)]^2 d\tau \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中 $E(\sum u_i^2)$ 代表脉冲平方的总和的数学期望, 决定于地震特征, 可以用作烈度的标志; $\varphi(t-\tau)$ 为结构反应的影响函数, 等于集中的单位脉冲所引起的结构位移, 可以按不同脉冲形状加以修正。

设计者的任务就是要求出 $E|x|$ 的最大值, 然后按此值换算应力, 进行设计。

E.Rosenblueth 还采取了另一途径来寻求结构反应的期望值^[32]。他把结构的反应拆成两个正交的分量, 并以这两个分量为平面坐标: 这样, 结构反应就成为在此平面上从原点作出的矢量。当地震加速度作随机变化时, 矢量的尖端便在此平面上作随机徘徊 (random walk)。他求得了结构反应的概率分布以及它的数学期望, 并考虑了地震加速度的变化。

概率的方法虽然还在发展而且有一定的前途, 但是作者认为距离实用的阶段还很远, 主要有下面几个问题需要解决:

(1) 最根本的问题, 地震脉冲能否当作随机分布处理, 还没有经过深入的研究。作者以为把地震脉冲当作随机分布看待在一定程度上是抹杀了地震观测已经揭露的关于强地震的一些规律。比如, 地面卓越周期的存在是地震学者数十年观测的结果, 就未可轻率地加

以否定。即使从 G.W.Housner 本人画出的许多谱曲线来看,在同一地点、不同地震的加速度谱曲线上出现的高峰周期是很相近的;这也是有主要周期存在的一种证明。

(2) G.W.Housner 及其他作者所提供的证据是不足的。他们所引为最有力的证据有二:第一,实际地震和随机分布的脉冲的速度谱曲线很相似;当振动体系的自振周期大于脉冲的持续长度时,两者都趋近于一常数,在它们的平均值的上下跳动。第二, G.W.Housner 引用了 10 个实际地震的速度谱曲线,它们的平均曲线非常接近于一条平滑的水平直线。

上述两个证据都不是很有力的。关于第一个证据,作者认为可以作如下解释:过渡阶段的振动可以拆成自由振动和强迫振动两部分。当单质点体系的自振周期增大时,就强迫振动而言,质点趋近于空中固定点;因此质点的加速度趋近于零,最大相对位移和相对速度(对地面而言)则都趋近与地面的最大位移和速度相等,而与自振周期无关。就自由振动而言,相对位移随自振周期的增大而增大,而相对速度则保持在一常数,与自振周期无关;加速度则随自振周期的增大而趋近于零。所以当体系的自振周期增大时,不论地面加速度的变化规律如何(不必是随机分布),速度谱曲线均趋近于一常数;位移谱曲线随自振周期的增大而增大;加速度谱曲线则趋近于零(图 1)。由此可见,速度谱曲线趋近常数这一现象与其归之于地震脉冲的随机分布,毋宁说是任何速度谱曲线的规律^①。

关于第二个证据,作者认为这也是一般的规律,并非随机分布的脉冲所独有。拿任何 10 条具有大致相同的规律但很不规则的曲线,平均起来都会得到较为平滑的曲线。由于所有速度谱曲线都有趋近于水平直线的特征,所以这一特征在 10 条速度谱曲线的平均曲线上更为显著。还应当指出, G.W.Housner 所引用的 10 个地震记录的地点分散在美国西部广大地区而且是不同地震的记录;由于震源和传播介质的变化,就无怪乎它们表现一定的随机特征。但是我们不能满足于采用一个广大地区的平均现象来作为结构设计的依据;相反地,我们还企图用小区域划分的方法来寻求每一城镇甚至每一建筑工地的地震特征。因此完全不反映地区特征的平均谱曲线是有缺陷的。

(3) G.W.Housner 的理论仅仅在定性上是合理的。如果我们只求定性上的合理的话,我们还可以采用更简单的假定,譬如假定地面运动为简谐运动。在定量方面,按照 G.W.Housner 的理论,结构的反应应当与脉冲次数的平方根成比例。如果这一论点能够成立的话,那么结构反应应当随地震持续时间而增大,但事实上并非如此。所以要使随机脉冲的理论能够成立,进一步的、定量的论证是必要的。

(4) 概率的方法必须建立在大量数据之上才有实际意义,而强地震记录在目前还很稀少,将来的积累也很慢,这就给这个方法带来很大困难。

① 这一论点也可以用简谐运动来证明。设地面加速度为 $\ddot{x}_0 = a_0 \sin \frac{2\pi}{T_0} t$, 体系自振周期为 T , 则相对速度为

$$\dot{x} = \frac{a_0 T_0 T^2}{2\pi(T^2 - T_0^2)} \left(\cos \frac{2\pi}{T_0} t - \cos \frac{2\pi}{T} t \right)$$

当 $T \gg T_0$, 最大 $\dot{x} \approx \frac{T_0}{2\pi} a_0$, 不随 T 变化。