

桥梁抗震

QIAO LIANG KANG ZHEN

● 范立础 编著



同济大学出版社

桥梁抗震

范立础 编著

同济大学出版社

责任编辑 司徒妙龄
封面设计 刘 燕

桥梁抗震

范立础 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

望亭电厂印刷厂印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 20.25 字数: 510 千字

1997 年 11 月第 1 版 1997 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 定价: 30.00 元

ISBN7-5608-1752-1/TU·225

内 容 提 要

本书主要论述桥梁抗震设计原理以及各种桥梁结构在地震作用下线性与非线性反应的分析 and 计算方法,其中,侧重点在非线形分析。在我国,目前的工程结构抗震规范大多以“反应谱理论”为基础,对结构抗震计算作了若干规定。实际上,桥梁结构的地震反应情况极为复杂,而规范条文也只在一定范围内适用,因而,国内外对复杂或特殊的桥梁结构,例如橡胶支座的梁式桥、桁架拱桥、斜拉桥、悬索桥等,必须进行“动态时程分析”。本书主要介绍作者近年来在该领域内的研究成果,并结合我国的实际示例介绍抗震原理及其分析计算方法。

本书还讨论桥梁抗震延性要求、桥梁抗震措施以及结构与支座等减震、隔震系统的研究现状,包括“结构控制”研究的进展。

本书可供从事抗震工程的设计、研究人员参考,亦可作为高等院校土建专业、桥梁专业研究生以及高年级学生的教学参考用书。

序 言

地震是困扰人类的一大自然灾害,减轻因地震造成的生命财产损失的途径主要是工程抗震。第二次世界大战结束后的半个世纪以来,随着科学技术和工程建设的突飞猛进,地震工程的理论和实践得到了很大的发展,人们已经能够对高度复杂的结构体系运用电子计算机作出非线性弹塑性地震反应理论分析,并以大型模拟地震振动台的试验作为辅助和检验,从而建立起比较能够反映实际的工程抗震设计方法。由此,许多对抗震安全度要求很高的建筑物,如超高层建筑、核电站、大跨桥梁等,得以兴建并蓬勃发展,其中有不少工程已经受了地震的考验。应当说,进步和成就是很大的。

然而,就在最近的二十余年,全球发生的许多大地震,仍然造成大量严重的工程破坏和惨重的生命财产损失,例如1976年的我国唐山地震,1994年的美国诺斯雷奇地震,1995年的日本阪神地震。其中,要特别指出的是桥梁的震害,不仅是因为它的破坏严重,更重要的是它的破坏切断了震区通道,使救灾工作难于进行或大大延缓,造成本来可以挽救的损失。虽然,面对巨大的自然破坏力,人为的工程难于确保万无一失。但是,对工程的破坏现象的研究表明,许多震害还是可以避免的,它给予人们丰富的教训和启示,以开展有关的研究工作和改进工程抗震设计方法。

有鉴于此,本人于唐山地震后和同济大学几位同事一起,从事地震工程的研究,范立础教授在桥梁抗震研究方面工作了多年,继我之后积极组织和培养新生力量,多方面开展理论联系实际的研究,做了许多大桥的抗震分析和设计,积累了不少新成果和新经验,把它编印出版,正好填补在桥梁抗震方面亟需这种专著的空缺,以供这方面的研究生和研究与设计人员阅读和参考,这必将有助于促进桥梁抗震工程的科学技术和设计方法的发展,最终减轻桥梁震害,很值得欢迎。

李國豪

1996年9月

前 言

自唐山地震后,同济大学名誉校长、中国科学院院士、中国工程院院士李国豪教授领导他的学科班子开展了工程抗震的研究。1977年,他在同济大学主讲“桥梁抗震分析”之后,在80年代初出版了专著《工程结构抗震动力学》,主要论述工程结构(房屋、桥梁)在地震地面运动作用下反应的分析方法;随后又组织了桥梁抗震理论(曲梁、斜拉桥、梁桥非线性抗震)研究,并参与了铁路工程抗震设计规范的项目研究、公路工程抗震设计规范的项目研究和编写工作。从而开始了对拱桥抗震实用计算方法和橡胶支座减震、隔震性能的研究以及大跨度桥梁空间非线性地震反应分析研究。

90年代初,经国家有关部门审批,在同济大学成立了土木工程防灾国家重点实验室,在桥梁抗震研究发展过程中,成立了桥梁抗震学科组,现为桥梁抗震研究室。近十年来,我国桥梁建设突飞猛进,大跨度斜拉桥、悬索桥、拱桥、梁桥、城市高速干道的高架桥、各种复杂的立交工程遍地开花。我国是多地震国家,迫切需要对这些桥梁的抗震性能开展系列研究。因而,从90年代开始,我们逐一对各种类型桥梁的抗震设计展开了系列研究。至今承担了20余座大桥以及城市高架桥、立交桥的抗震分析研究任务,其中著名的有主跨1385m的悬索桥——江阴长江公路大桥;主跨602m的复合斜拉桥——上海杨浦大桥;主跨390m的预应力混凝土桁架拱桥——贵州省江界河桥;主跨270m的预应力连续刚构桥——广东虎门辅航道桥;城市高速干道高架桥——上海市内环线工程;大型互通式立交桥——上海市成都路延安路立交工程等。

李国豪教授经常指导我们研究工作的方向,强调理论联系实际,结合工程抗震学科的生产实践和科学试验,发展与提高学科领域的科学技术知识,为减轻地震给人民、社会带来的危害作贡献。近年来,我们又深入开展了桥梁抗震延性、桥梁减震、隔震技术和结构控制等研究项目。

土木工程防灾国家重点实验室桥梁抗震学科还很年轻,从事工程抗震研究工作仅十余年,虽然在研究工作中取得了一些成果,但尚属肤浅。在李国豪教授的鼓励鞭策下,我室同事们分工执笔编写了《桥梁抗震》一书,该书由我负责第一章、第九章、编后语和全书的定稿修订工作,由胡世德负责第五、第六、第七、第八章,袁万城负责第四章,并与刘庆华共同负责第十、第十一章,王君杰负责第二、第三章,王君杰、刘庆华、潘永仁还负责整理工作。我衷心感谢我的同事们和博士后研究人员的通力合作,感谢同济大学领导和出版社的大力支持,使这本书在同济大学建校90周年之际出版,献给我的老师与母校。

由于业务水平所限,书中如有错误与不足之处,恳切希望专家和读者批评指正。

范立础
1996年9月

目 录

第一章 桥梁抗震概论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 桥梁结构的震害	(4)
1.3 桥梁抗震计算的地震力理论及抗震设计方法的演变	(22)
第二章 桥梁结构抗震动力学基础	(33)
2.1 概 述	(33)
2.2 桥梁振动的有限元分析方法	(33)
2.3 桥梁结构的振动阻尼	(42)
2.4 地震动作用下结构运动方程	(45)
2.5 线性振动方程求解的振型叠加方法	(48)
2.6 线性振动方程求解的数值积分法	(51)
第三章 桥梁地震反应分析的反应谱方法	(57)
3.1 概 述	(57)
3.2 地震反应谱	(58)
3.3 大跨度桥梁的反应谱方法	(63)
3.4 非弹性反应谱	(66)
3.5 桥梁按弹性反应谱理论的简化计算方法	(70)
第四章 桥梁结构空间非线性地震反应时程分析方法	(76)
4.1 概 述	(76)
4.2 桥梁非线性因素的主要来源	(76)
4.3 缆索单元的非线性刚度矩阵	(77)
4.4 考虑大变形的塔、梁、柱单元的切线刚度矩阵	(78)
4.5 空间混凝土梁弹塑性单元	(80)
4.6 空间支座或伸缩缝连接单元	(84)
4.7 动坐标法考虑大位移对结构刚度的影响	(89)
4.8 桩土结构相互作用模型及地基土层非线性	(91)
4.9 地震作用下桥梁结构地震反应及行波效应	(94)
4.10 运动方程的数值解法	(97)

第五章 大跨度桥梁地震反应分析	(106)
5.1 设计概率水准的确定	(106)
5.2 桥址区地震危险性分析	(108)
5.3 桥梁结构地震反应分析方法	(108)
5.4 地震荷载的组合	(114)
第六章 大跨度斜拉桥地震反应分析	(117)
6.1 动力计算模式	(117)
6.2 动力特性	(123)
6.3 斜拉桥地震反应分析	(142)
第七章 大跨度悬索桥地震反应分析	(155)
7.1 动力计算模式	(156)
7.2 动力特性	(156)
7.3 悬索桥基频的近似计算公式	(164)
7.4 悬索桥地震反应分析	(165)
第八章 大跨度拱、梁结构地震反应分析	(176)
8.1 大跨度拱桥的动力特性	(176)
8.2 大跨度拱桥的地震反应分析	(186)
8.3 预应力混凝土连续-刚构桥地震反应分析	(194)
第九章 城市高架桥与立交桥地震反应分析	(205)
9.1 橡胶支座减震、隔震性能	(206)
9.2 高架桥非线性地震反应分析	(215)
9.3 立交桥非线性地震反应分析	(226)
9.4 上海成都路延安路立交桥结构的试验研究	(232)
第十章 桥梁延性抗震设计	(240)
10.1 引言	(240)
10.2 延性的初步介绍	(241)
10.3 破坏准则	(247)
10.4 延性抗震设计方法简介	(250)
10.5 单调荷载作用下钢筋混凝土墩柱延性的计算方法	(259)
10.6 约束混凝土墩柱延性的解析分析	(264)
10.7 反复周期荷载作用下结构延性的实验研究	(273)

第十一章 桥梁减震、隔震和结构控制	(281)
11.1 引言	(281)
11.2 结构被动控制(隔震、减震)	(282)
11.3 结构主动控制	(303)
11.4 混合控制系统	(305)
后 记	(308)

第一章 桥梁抗震概论

1.1 引言

我国是世界上的多地震国家之一。图 1.1.1 所示为我国地震活动带分布示意图(包括 1966~1976 年八大地震位置),它大致可划分为六个地震活动区:① 台湾及其附近海域;② 喜马拉雅山脉地震活动区;③ 南北地震带;④ 天山地震活动区;⑤ 华北地震活动区;⑥ 东南沿海地震活动区。从 1966 年至 1976 年,我国大陆发生的八大地震均具有强度大、频度高、震源浅的特点。从地质构造上看,都是断裂剧烈活动的地区。近十年来,我国地震活动较为频繁,因而,城市抗震防灾尤为重要。

远在 3000 多年前,我国就有关于地震的记载,到明、清两代,关于地震的记载和地震灾害的描述就更为详尽。公元 605~617 年,隋代著名工匠李春所建的赵州桥位于多地震地区,虽经多次地震,依然完好无损。1966 年邢台地震(M7.2)时,震中离桥位不到 40km,赵州桥又一次经受了地震的考验。这表明历代劳动人民在与地震自然灾害斗争的过程中,已积累了不少的抗震经验。

近代,随着社会发展,人口逐渐发展聚集于城市,目前全世界的半数人口集中在不到 0.7% 的陆地面积中,达 1000 万以上人口的城市到本世纪末将增至 25 个。世界上多次破坏性地震都集中在城市,如 1906 年美国旧金山大地震(M8.3)、1923 年日本关东大地震(M8.2)、1960 年智利南部大地震(M8.5)、1964 年美国阿拉斯加大地震(M8.4)、1968 年日本十胜冲大地震(M8.0)、1976 年中国唐山大地震(M7.8)、1989 年美国洛马·普里埃塔地震(M7.0)、1994 年美国诺斯雷奇地震(M6.7)、1995 年日本阪神大地震(M7.2)。这些城市在地震中均遭到严重甚至是毁灭性的破坏,经济损失惨重。地震灾害不仅是因其巨大能量造成大量地面构筑物和各种设施的破坏与倒塌;而且随着城市现代化与经济高度发展,次生灾害中因交通及其他设施的毁坏造成间接的经济损失也十分巨大。图 1.1.2 所示为 1960 年以来大地震所造成的经济损失,反映出平均经济损失每十年几乎翻一番,个别的地震灾害的经济损失更是巨大(图中还不包括 1995 年 1 月 17 日的日本阪神地震,它的总损失为 1000 亿美元)。

如文献[4]指出:我国唐山地震,城市人口 150 万,在遭遇 M7.8 地震的袭击下,整个城市毁于一瞬间,人员死亡近 24 万,经济损失超过 100 亿人民币。但是,1985 年智利拥有 100 余万的整个帕莱索市遭受同样强度的地震,却只有 150 人死亡,不到一周,城市功能恢复原状。如日本,政治、经济、文化、教育、国际、贸易中心的首都——东京在吸取 1923 年关东大地震的教训后,在建设中十分注意城市抗震设防,要求能抗御 8 级大地震。因而在 1986 年东京遭受 6.2 级地震时,一座千万以上人口的城市仅死亡 2 人,城市几乎未遭损坏。1988 年 12 月 7 日,前苏联的阿美尼亚共和国遭受一次 M6.8 地震的袭击,位于震中的斯皮塔克(Spitak)全城毁灭,距震中 40km 的列宁纳坎(Leminaken)市约有 80% 的建筑物毁坏,更远的基洛伐克(Kirovaken)市也有将近一半的建筑物倒塌或严重破坏,死亡总人数为 4~5 万人。

随着现代化城市人口的大量聚集和经济的高度发展,城市防灾问题更为突出。特别是

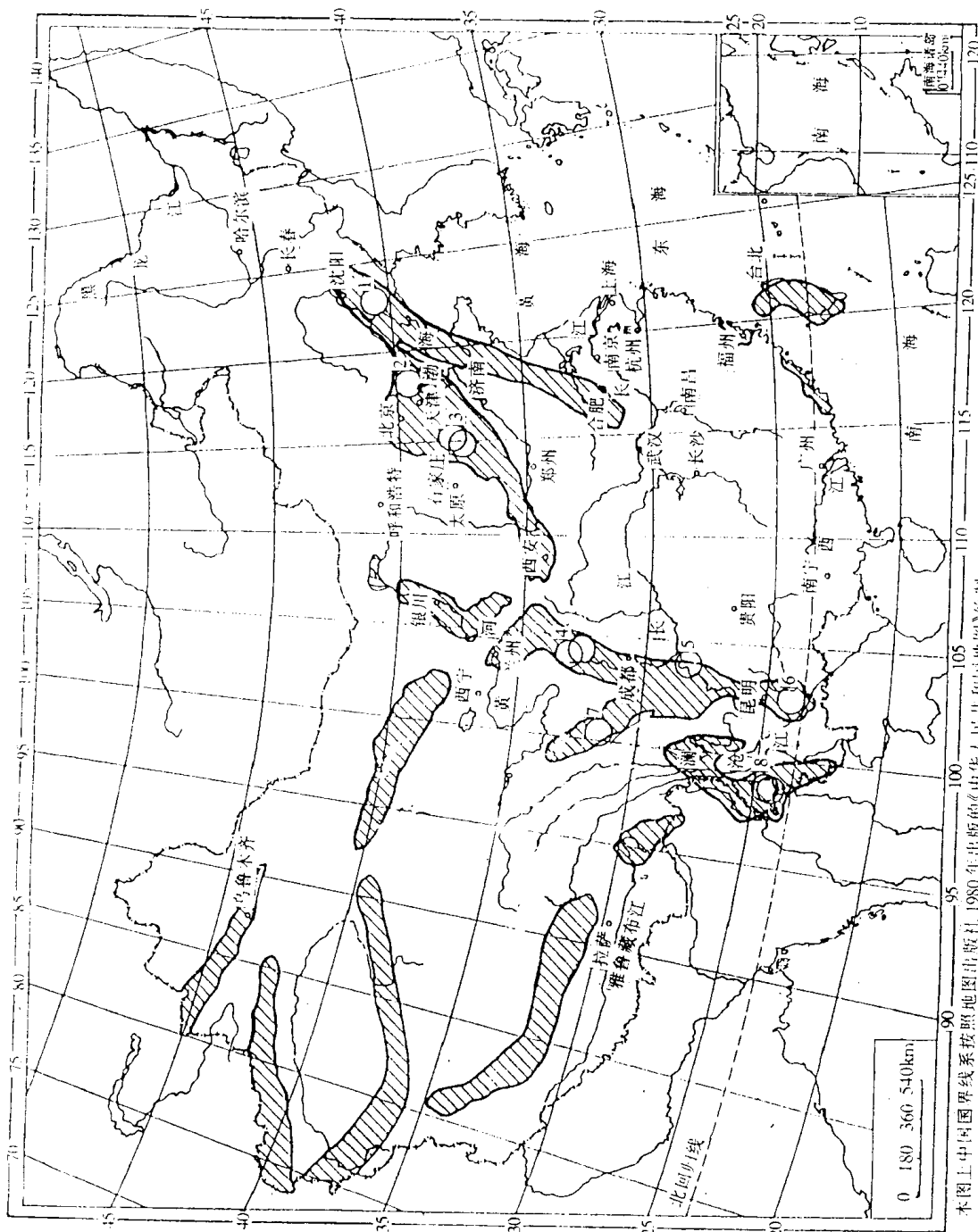


图 1.1.1 我国地震活动带分布示意图

- 1—海城地震(1975, M7.3); 2—唐山地震(1976, M7.8); 3—邢台地震(1966, M6.8); 4—松潘地震(1976, M7.2);
- 5—昭通地震(1974, M7.1); 6—通海地震(1970, M7.7); 7—炉霍地震(1973, M7.9); 8—龙陵地震(1976, M7.4)

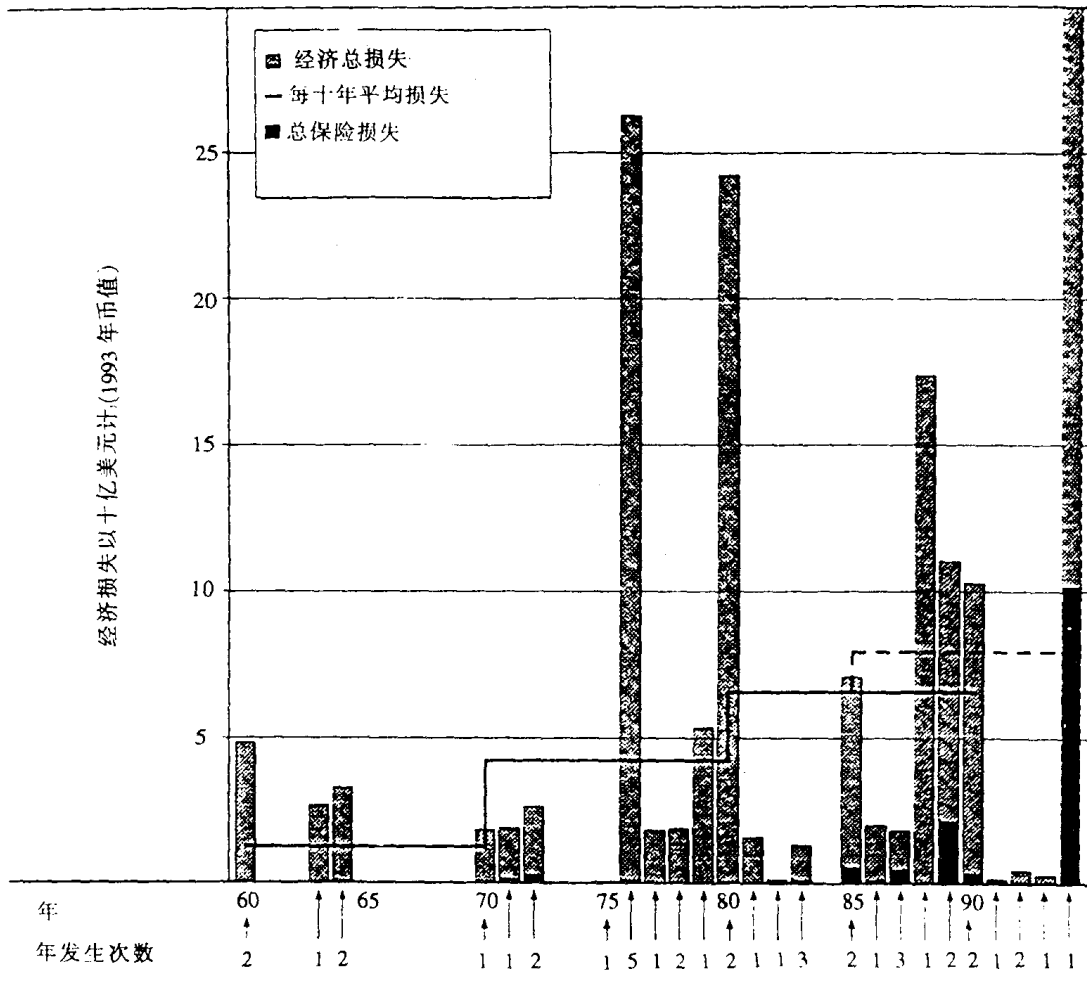


图 1.1.2 1960 年以来的重大地震灾害损失

90 年代开展“国际减灾十年”活动以来,各发达国家十分重视。我国虽处于发展中国家,经济实力尚不雄厚,但对城市的防灾减灾还是相当重视。

在城市防灾减灾的研究中,重要的一环是生命线工程的防灾减灾研究,其中特别是交通线上的枢纽工程——桥梁。近 20 年,由于地震震害的教训,使各国学者对桥梁抗震十分重视,开展了广泛研究。从 1971 年美国圣费南多(San Fernando)地震,仅 6.6 级就显示出生命线工程破坏的严重后果;接着 1989 年美国洛马·普里埃塔(Loma Prieta)地震,为 7.0 级,桥梁破坏的后果再次告诫人们,现代城市交通网络中断的危害性;1994 年诺斯雷奇(Northridge)地震,亦仅 6.7 级,同样造成洛杉矶市高速公路上多座桥梁崩塌,严重的交通中断造成巨大的经济损失;最近的日本阪神地震,6.9 级,也仅是一个中等强度的地震,却造成大量高速公路及高速铁路桥隧的毁坏,使经济遭受巨大损失。如都以当时的币值为准,这四次中等强度的地震导致城市经济总损失(以美元计)分别为:10,70,200,1000 亿元。

1.2 桥梁结构的震害

桥梁工程为生命线工程之一,而生命线工程(一般指城市供水、供电、供气、电信、交通等基础设施)的破坏造成震后救灾工作的巨大困难,使次生灾害加重。特别是对现代化城市,将影响其生产的运转,导致巨大的经济损失。调查与分析桥梁的震害及其产生的原因是建立正确的抗震设计方法、采取有效抗震措施的科学依据。

以我国为例,20世纪以来,大约平均每三年发生两次七级以上地震,而两次地震中几乎就有一次酿成重灾。特别是从1966年至1976年期间,发生了十多次七级以上的大地震,大多在东经98°以东的人口稠密地区。其中唐山地震(M7.8)发生在现代城市地区,不但地震震害严重,更因生命线工程遭受破坏,次生灾害加重了震情,一次死亡约24万人,损失极为惨重。

正因为历史上发生的大地震(7~8级)所带来的巨大生命财产损失,促使人们去研究和了解这种特殊的自然灾害,探讨减轻震害的对策和方法。至60年代,世界性的地震工程研究与结构抗震理论研究已取得较大进展,大多数国家根据本国国情,制定了相应的结构抗震设防原则与抗震设计规范。我国在60年代初已有了“地震区建筑设计规范”(草案),1971年颁发了铁路工程抗震设计规范,1977年颁发了公路工程抗震设计规范。1976年唐山地震给桥梁带来巨大的震害推动了桥梁抗震研究工作的迅速开展,并对铁路工程抗震设计规范、公路工程抗震设计规范作了修改,并于80年代末公布。但是,应注意到,1971年圣费南多地震(M6.6)、1989年美国洛马·普里埃塔地震(M7.0)、1994年诺斯雷奇地震(M6.7)以及1995年日本阪神地震(M7.2),均为中等强度的地震,桥梁破坏却十分严重。这已普遍引起全世界地震工作者的关注,并纷纷对过去相关的抗震规范予以反省,对结构的抗震设防标准与抗震设计原则提出一系列新的观点。本节简要介绍以上各次地震中的桥梁震害情况。

1.2.1 1971年圣费南多地震

美国圣费南多地震发生在1971年2月9日上午6时07分,震级为M6.7。震中位置在北纬34°24.0',西经118°23.7',震源深度约为13km。图1.2.1所示为该地震位置及烈度分布。对近代结构震后修复与结构抗震设计的研究而言,这是一次非常重要的地震。地震震级虽不高,位于极震区(MM烈度Ⅷ至Ⅺ度)发生了很大的地面变形和强烈的地面运动,导致高层结构、桥梁倒塌以及生命线工程的毁坏。死亡64人,经济总损失近10亿美元(1971年币值)。

虽然此次地震是中等强度的,但从被破坏的桥梁结构的严重灾情观察,估计地面加速度值相当高。最大记录是在靠近桥台附近的石脊上得到的,地面水平加速度峰值(PGA)为1.26g,垂直加速度峰值达0.72g,这数值大于以前任何记录,也可能是由于地面破裂的局部影响所引起的。在毁坏的五座高速公路桥址场地,判断其地面加速度峰值约为0.60g,接近那次地震作用的上限。

在桥梁震害中,最大的经验教训是两座互通式立交工程严重倒塌毁坏。一是金州(Golden State)高速干道5与州际干道210的立交枢纽;另一是金州高速干道与州际高速公路14号的立交枢纽。图1.2.2所示为上下跨立交的梁部结构毁坏倒塌的情况。

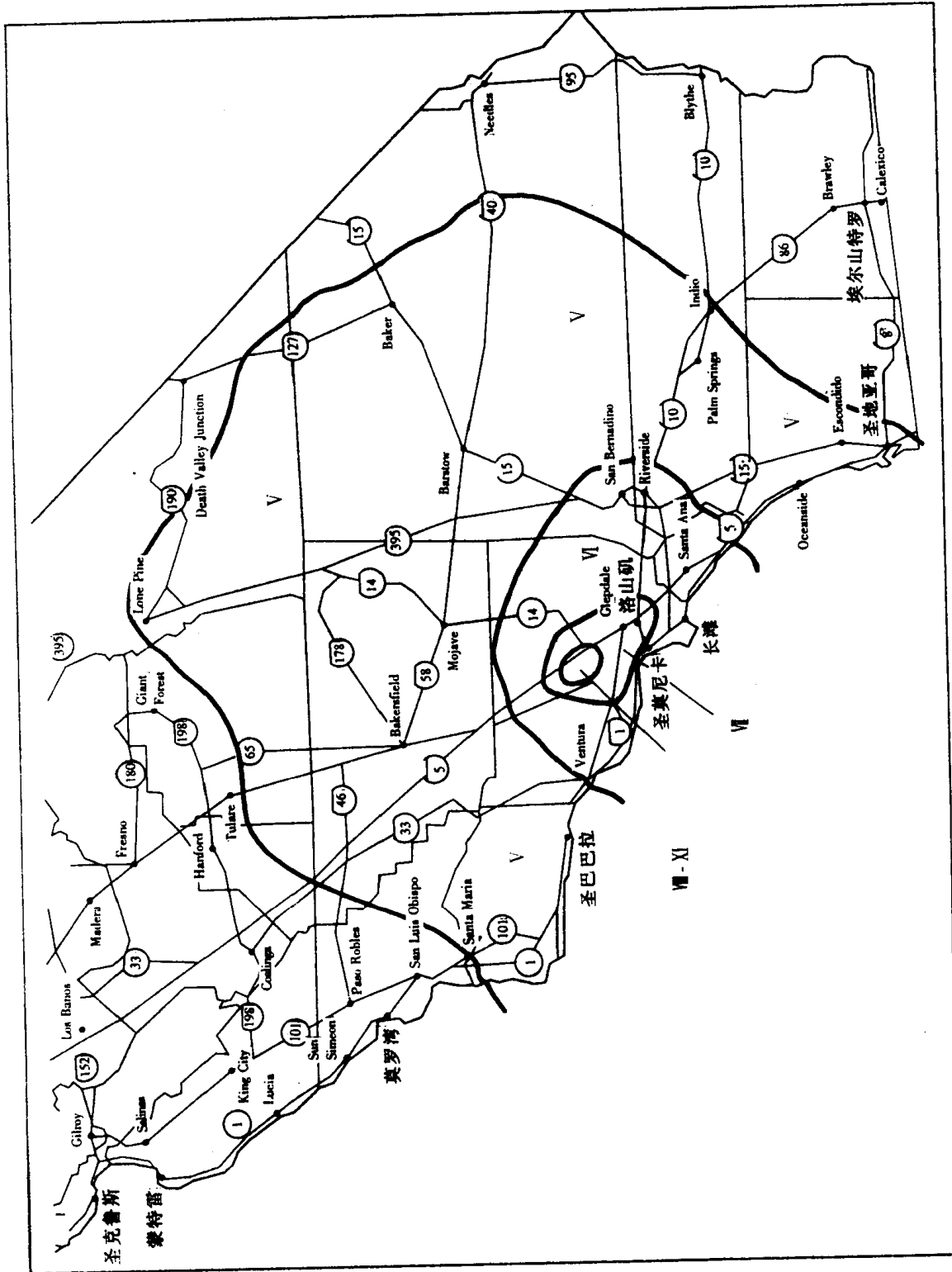


图 1.2.1 1971 年圣费南多地震位置(图上罗马数字表示修正的麦卡利烈度)

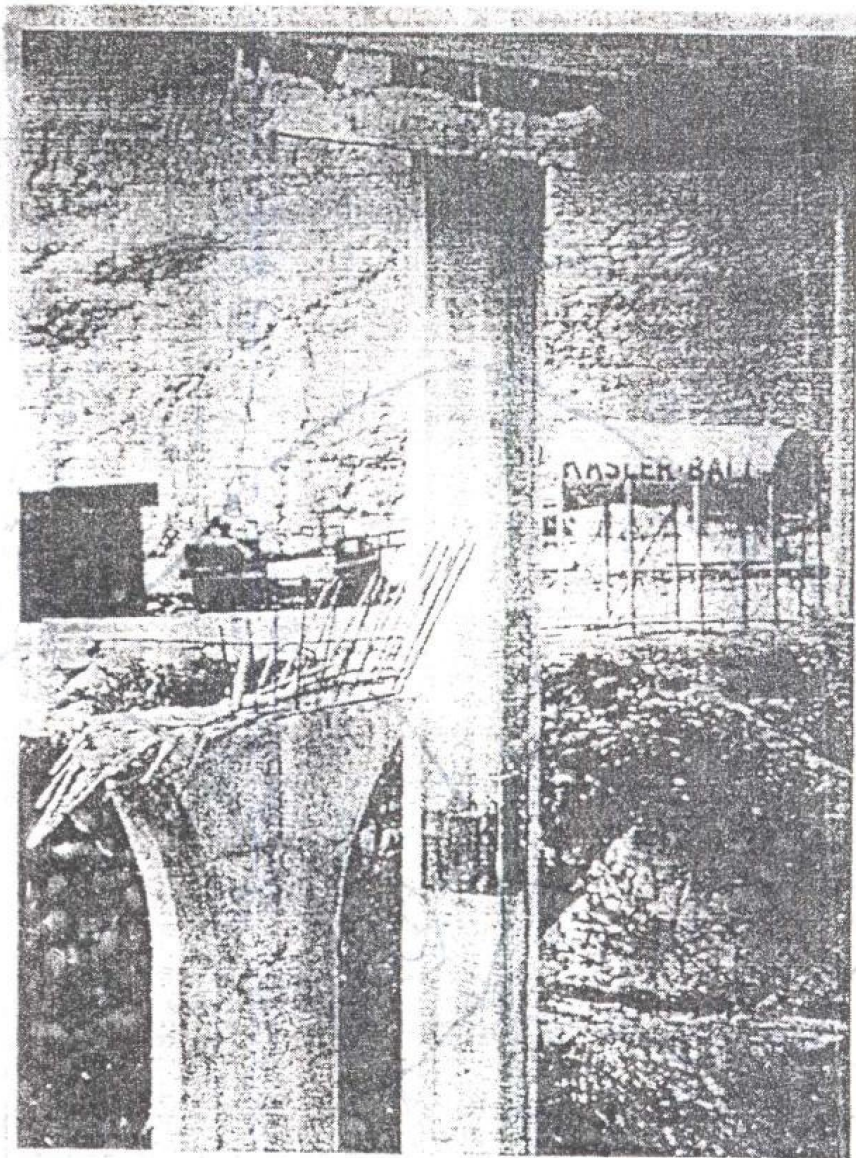


图 1.2.2 金州高速干道和 14 号州际公路立交处上跨交叉落梁倒塌

分析上下跨立交工程倒塌的主要外因可能是：①台墩间、墩柱间的过大的相对地面位移；②强烈的水平加速度与垂直加速度导致上部结构较大的振动。结构本身内因：在使用逐跨建造法中，设计了过窄的支承面，包括梁墩间、梁与梁的牛腿连接处。其次，钢筋混凝土墩柱单纯从强度考虑，没有配置足够的箍筋，导致结构延性较差。较高的墩柱大多弯曲破坏。较矮的墩柱大多是剪切破坏。这两种情况，横向箍筋的明显不足是导致毁坏的主要内因。对于桥梁结构如何适应较大的地面相对位移，这必须加强结构延性以及反复循环下的变形能力。

如以往地震中的桥梁震害早已指出的一样，结构间的支承连接常常是结构稳定的保证。连接破坏引起结构塌落毁坏已是屡见不鲜的惨重教训。

1971 年的圣费南多地震对美国桥梁抗震设计规程的研究与发展是一个主要转折点，经过十年的研究工作，1981 年出版了《桥梁抗震设计指南》，又经过十年的应用与修改，于 1992

年,桥梁抗震规程正式收入了美国各州公路运输工作者协会(AASHTO)编辑的美国《公路桥梁标准规范》,俗称 AASHTO 规范。这次地震震害,迫使人们从单一强度抗震原则转入结构强度与延性抗震双原则的研究,并进一步开展结构减、隔震的研究。随后又提出结构振动控制(Structural Vibration Control)研究。

1.2.2 1976 年唐山地震

我国唐山地震发生在 1976 年 7 月 28 日北京时间凌晨 3 时 42 分,震级为里氏 7.8 级,震中位置在市区东南部,震源深约 11km,有明显的地震断裂带贯通全市。图 1.2.3 所示为唐山 7.8 级地震烈度分布。从图中可见市区大部分陷入地震烈度高达 XI 度的极震区,结构物普遍倒塌,所剩无几,震害极为严重,为世界地震史上所罕见。此次地震死亡人数约 24 万,重伤约 16 万,经济总损失约在百亿人民币以上。其重要的内因是唐山市对地震没有设防,结构物都未经过抗震设计,以致在强烈地震作用下酿成大灾,这是一个极为惨重的教训。

在 XI 度及 X 度区内,公路、铁路桥梁普遍倒塌或严重破坏;在 X 度区,桥梁破坏较重;在 VIII 度区,多数桥梁受到不同程度的损坏,少数破坏,个别倒塌;在 VII 度区,少数桥梁遭到严重破坏,部分桥梁中等破坏或轻微损坏。

在 VII 至 XI 度区内的 130 座大、中型钢筋混凝土梁式桥的震害,据统计倒塌 18 座,占 13.6%;严重破坏 20 座,占 15.36%;中等破坏 34 座,占 26.15%;轻微损坏 25 座,占 19.23%;完好或基本完好 33 座,占 25.38%。这倒塌的 18 座桥中,有 15 座主要是由于不同程度的岸坡滑移、地基失效等原因造成的。其余三座主要是由于桥墩断裂、支座破坏、梁体碰撞、相邻墩发生过大相对位移所造成的。图 1.2.4 为唐山市滦县滦河大桥的震害。该桥为一座 35 孔简支梁桥(总长 789m)。主震后,大桥已遭受损坏,但尚能慢行通车。当日下午发生 7.1 级余震时,全桥震毁,其中 23 孔落梁,部分墩身全部倒塌,梁体最大错位在 0.5m 以上。大桥震毁的原因是多种因素的组合,如摆动支座倾倒,梁体过大错位与碰撞,桥墩损伤积累等。在未落梁的桥孔,梁体也都已搁在墩帽边上,岌岌可危。

由于桥梁基础严重破坏导致桥梁倒塌,往往在震后难以修复使用。如我国公路桥中广泛采用灌注桩,由于配筋率低,桩身弯曲破坏大多在地面以下 1~3m 处。石砌或混凝土桥墩墩身震害大多从施工接缝处的轻微裂缝开始,继而扩展至四周造成剪断面破坏,进而导致墩身移位或断落,呈现矮粗桥墩剪切型破坏的典型例子。钢筋混凝土桥墩常出现受压区混凝土崩溃,钢筋裸露屈曲,从而导致变形过大而破坏。钢筋混凝土较高柔的桥墩破坏型式一般都为弯曲型的。

唐山地震中,位于 VIII 度区的许多单孔石拱桥和双曲拱桥,在地基良好的条件下,即使是延性很差的圬工拱桥,也都具有良好的抗震能力,大多基本完好或仅有轻微损伤。但地基较差条件下的单孔拱桥和采用柔性桩墩的多孔连拱桥,震害较严重,主要表现为拱上建筑腹拱破坏,拱圈在拱脚、拱顶产生破损裂缝,拱圈整个隆起变形,甚至倒塌。图 1.2.5 所示为宁河县小薄庄桥的震害。该桥位于 IX 度区,为 10 孔 22m,矢跨比 $f/L = 1/7$,墩高 9m 的空腹式双曲拱和双柱式柔性桥墩的连孔拱桥。震后,9 孔落拱,交通中断。从落拱的纵向移位观察,该桥第 10 孔拱可能首先倒塌,引起连锁效应相继落拱。该桥柔性桥墩较高,纵向刚度较小,柱体与台帽未加强连接,其震害特点是支承拱脚的墩帽与柱体大多产生断裂。

所调查的 32 座拱桥的震害,其中倒塌六座,占 18.75%;严重破坏两座,占 6.25%;中等

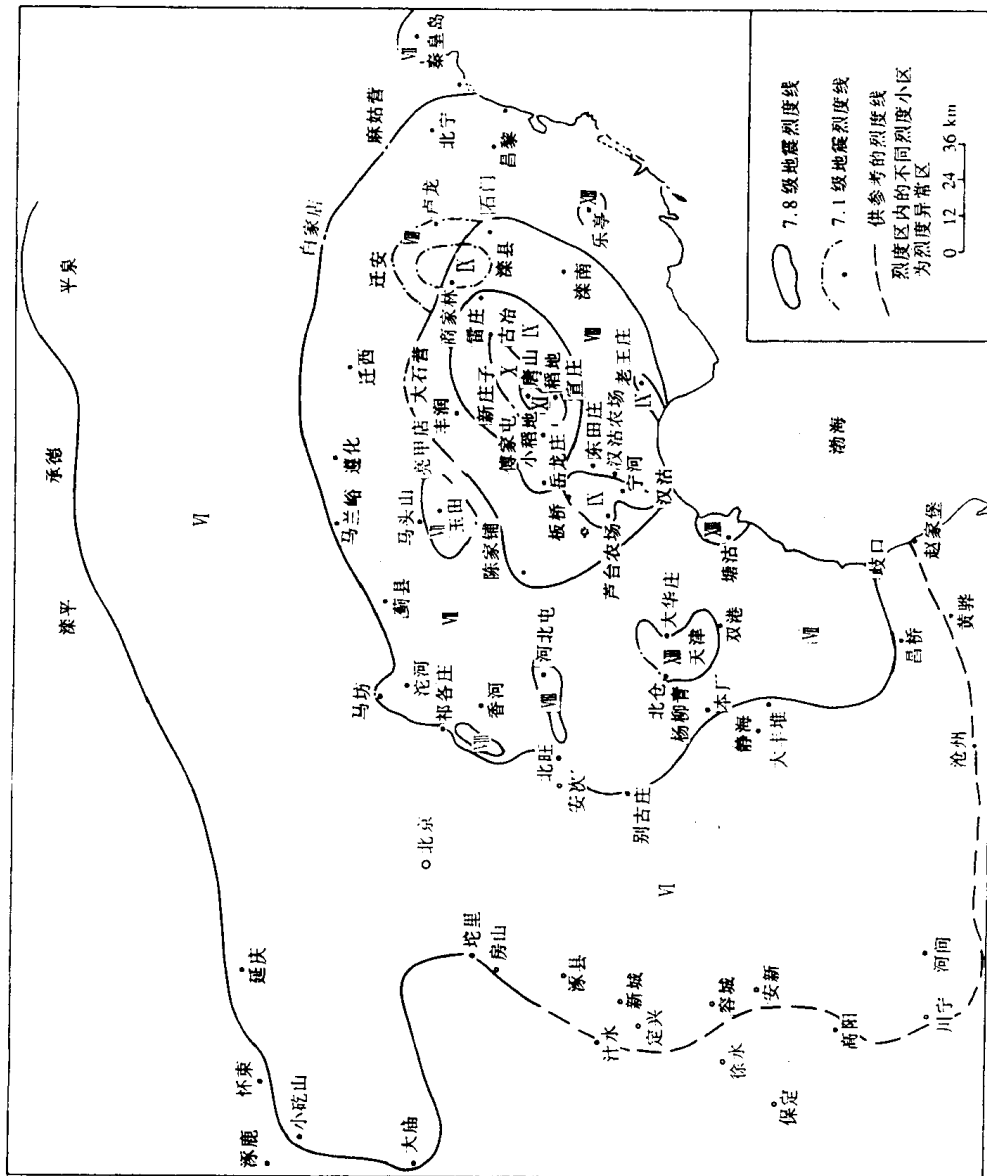


图 1.2.3 唐山 7.8 级地震烈度分布