

MCE
13

土木工程专业研究生系列教材

桥梁结构地震响应 与抗震性能分析

柳春光 编著

Master of Civil Engineering

土木工程专业研究生系列教材

桥梁结构地震响应与抗震性能分析

柳春光 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构地震响应与抗震性能分析/柳春光编著. —北京:中国建筑工业出版社,2009
(土木工程专业研究生系列教材)
ISBN 978-7-112-11111-4

I. 桥… II. 柳… III. 桥梁结构—抗震设计—研究
IV. U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 112331 号

本书以桥梁结构地震可靠性和抗震性能分析为研究内容,对桥梁结构的抗震设计原理、震害特点、地震可靠性分析方法、抗震性能分析方法等进行了阐述。并且以实例形式详细介绍了桥梁结构地震可靠性分析方法、可靠性计算过程、弹塑性地震响应和桥梁结构抗震性能分析方法,将抗震分析理论和工程应用结合起来。该书具有很强先进性和实用性。

本书可为从事土木、建筑专业的工程技术人员,高等学校的学生以及研究生等参考。

* * *

责任编辑 常 燕

本书的出版得到了大连市人民政府的资助。

土木工程专业研究生系列教材
桥梁结构地震响应与抗震性能分析
柳春光 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
广州友间文化有限公司制版
广州佳达彩印有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:15 $\frac{3}{4}$ 字数:383千字

2009年10月第1版 2009年10月第一次印刷

定价:32.00元

ISBN 978-7-112-11111-4
(18354)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

2008年5月12日发生在我国四川省汶川的8.0级特大地震,造成近7万人死亡,37万人受伤,直接经济损失达上千亿元人民币。这次地震损失如此惨重的原因,除了地震震级大、震源浅以外,还有一个非常重要的原因就是:汶川地处山区,地形复杂、交通不便,地震又造成道路、桥梁等生命线工程的严重毁损,给震后的救援工作带来巨大的困难,以致造成生命和财产的更大损失。由此可见,桥梁是生命线工程中的关键部分,在地震发生后的紧急救援和抗震救灾、灾后重建中有着极其重要的地位。桥梁震害及其带来的次生灾害均给桥梁抗震设计以深刻的启示和新的思考。

桥梁结构抗震问题涉及到的基本内容十分广泛,目前,桥梁结构抗震问题方面的书籍已经较多,但涉及桥梁结构地震可靠性和抗震性能方面的书籍还较少,为此,本书结合汶川地震给桥梁结构抗震分析带来的新思考,希望以桥梁结构地震可靠性和抗震性能分析作为本书的主要内容进行阐述和总结,并加以桥梁结构实例作详细分析与说明。这是编写本书的初衷,同时希望能提供一本桥梁结构地震响应分析和抗震性能研究的参考书。

本书根据编写目的对桥梁结构的抗震设计基本原理、线弹性地震响应、弹塑性地震响应、桥梁结构地震可靠性、智能算法在桥梁结构地震可靠性分析中的应用以及桥梁抗震性能等方面进行了讨论。并根据实际的连续梁桥、刚构桥、斜拉桥等算例进行了详细分析和介绍。

本书结合国内外桥梁结构抗震研究的最新进展,力求把目前这方面的最新研究成果编入在内,为此,本书侧重于桥梁结构的地震可靠性分析和抗震性能分析等方面的研究问题,做到全面、系统地介绍桥梁结构的抗震问题、震害特点、地震可靠性以及抗震性能等研究内容。但由于篇幅的关系,对于有些问题不能进行详细的推导,在此只是作了简单的介绍。本书共分15章,第1章介绍了桥梁结构抗震设计方法以及设计原则,分析了地震对桥梁结构的影响和地震中桥梁的破坏特点,讨论了桥梁结构的抗震分析方法的发展和变化。第2章对地震波的传播理论以及场地地震响应计算理论作了基础性的介绍,并阐述了一种简单的大型桥梁结构系统地震动参数的分析方法。第3章介绍了单自由度系统的振动问题的基本理论。第4章介绍了多自由度系统的振动问题的基本理论。第5章介绍了运动微分方程的基本解法。以Newmark β 法、Wilson θ 法为主,详细介绍了地震响应的直接积分方法。第6章介绍了地震反应谱理论、反应谱求法、振型分解法以及基于反应谱理论的地震力计算方法等问题,并进行了论述和详细分析。第7章针对梁桥结构,介绍了桥梁结构地震可靠性分析以及已建桥梁结构系统加固优化方法。第8章介绍了遗传算法的基本原理、分析步骤、执行策略以及收敛性等问题,将遗传算法引入到桥梁结构地震可靠性分析中。第9章介绍了桥梁结构抗震可靠性的反应谱分析方法,分别阐述了一致地震激励结构的反应谱分析方法和非一致地震激励时结构抗震可靠性的反应谱分析方法。第10章介绍了结构抗震性能评价

方法,阐述了基于性能的抗震设计的理论框架以及 pushover 方法的分析原理。第 11 章介绍了桥梁结构的非线性地震响应及抗震性能分析方法,阐述了桥梁结构的非线性分析模型以及桥梁结构的地震响应分析方法,并通过实例加以说明。第 12 章介绍了改进的适应谱 Pushover 方法,讨论了高阶振型对桥梁抗震性能的影响问题,提出了基于改进的适应谱 Pushover 方法的桥梁抗震性能评价方法,并通过实例加以说明。第 13 章介绍了基于位移的适应谱 Pushover 方法,并提出了基于位移的适应谱 Pushover 方法的梁桥抗震性能评价方法。第 14 章以斜拉桥为例,介绍了斜拉桥的静力弹塑性分析以及基于屈服后位移模式修正的 DASPA 法,提出了斜拉桥非线性地震响应分析与性能评价方法。第 15 章通过算例阐述了基于日本抗震规范桥梁结构抗震性能设计方法,希望能对我国抗震设计有新的启示。

本书提供了一本全面、系统、学习桥梁结构地震可靠性和抗震性能分析等研究内容的参考书,通过理论基础知识和实际算例相结合的方式,可为从事土木、建筑专业的工程技术人员,高等学校的学生以及研究生服务。

由于时间的限制以及作者的学识有限,书中疏漏和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

感谢被引用文献的作者们,感谢国家自然科学基金的资助,感谢大连市学术著作出版基金的资助,感谢中国建筑工业出版社的支持。

柳春光

2008 年 12 月于大连理工大学

目 录

第 1 章 桥梁结构抗震概述	1
1.1 引言	1
1.2 桥梁结构的构造及特点	2
1.3 桥梁结构类型	3
1.4 桥梁结构震害	4
1.5 桥梁结构抗震设计方法	9
1.6 桥梁结构的抗震设计特点	12
1.7 桥梁结构的抗震设计原则	13
第 2 章 场地地震危险性评价	15
2.1 引言	15
2.2 地震及地震波	15
2.3 地震动的确定方法	18
2.4 设定地震	18
2.5 场地地震动参数的确定	19
第 3 章 单自由度系统的振动	24
3.1 引言	24
3.2 运动方程	24
3.3 自由振动	25
3.4 强迫振动	27
3.5 阻尼比测取原理	31
第 4 章 多自由度系统的振动	36
4.1 运动方程的建立	36
4.2 自由振动	38
4.3 强迫振动	41
第 5 章 运动微分方程的基本解法	44
5.1 引言	44
5.2 傅式变换法	44
5.3 振型叠加法	48
5.4 逐步积分法	50
5.5 桥梁结构有限元分析的基本单元	52
5.6 桥梁结构的振动频率与振型	57

5.7	桥梁结构的振动阻尼	59
第6章	地震反应谱理论	61
6.1	地震反应谱	61
6.2	振型参与系数	64
6.3	振型组合	65
6.4	反应谱求法	66
6.5	设计反应谱	68
6.6	拟反应谱、三联反应谱和标准反应谱	68
6.7	基于反应谱理论的地震力计算	69
6.8	基于我国规范桥梁抗震设计方法	69
第7章	梁桥结构地震可靠性分析	74
7.1	引言	74
7.2	结构可靠性分析方法	75
7.3	桥墩构件可靠性分析	87
7.4	算例分析	88
7.5	桥梁上部结构可靠性分析	89
7.6	梁桥结构系统可靠性分析	97
7.7	算例分析	98
7.8	已建桥梁结构系统加固优化方法研究	98
第8章	遗传算法在桥梁结构可靠性分析中的应用	102
8.1	遗传算法简介	102
8.2	遗传算法的基本原理	103
8.3	遗传算法步骤	104
8.4	遗传算法执行策略	105
8.5	遗传算法的收敛性	106
8.6	遗传算法在结构可靠性分析中的应用	107
8.7	算例分析	108
第9章	桥梁结构抗震可靠性的反应谱分析	110
9.1	一致地震激励结构的反应谱分析	110
9.2	非一致地震激励时结构抗震可靠性的反应谱分析	112
9.3	基于反应谱理论的结构抗震可靠度分析方法	120
9.4	算例分析	121
第10章	结构抗震性能评价方法	123
10.1	引言	123
10.2	基于性能的抗震设计的理论框架	123
10.3	Pushover 方法的分析原理	126
10.4	能力谱方法	128
10.5	位移影响系数法	130

10.6	地震需求谱的建立	130
第 11 章	桥梁结构的非线性地震响应及抗震性能分析	138
11.1	引言	138
11.2	桥梁结构非线性有限元模型	138
11.3	桥梁结构的非线性分析模型的建立	147
11.4	钢筋混凝土结构非线性地震响应的时程分析	150
11.5	桥梁结构的 Pushover 分析	151
第 12 章	基于改进的适应谱 Pushover 方法的桥梁抗震性能评价	159
12.1	引言	159
12.2	改进的适应谱 Pushover 方法	159
12.3	算例分析	162
12.4	高阶振型对桥梁抗震性能的影响	167
第 13 章	基于位移的适应谱 Pushover 方法的梁桥抗震性能评价	172
13.1	引言	172
13.2	基于位移的适应谱 Pushover 方法	173
13.3	梁桥算例分析	174
第 14 章	斜拉桥非线性地震响应分析与性能评价	184
14.1	引言	184
14.2	斜拉桥的工程概况和计算模型	185
14.3	斜拉桥的静力弹塑性分析	191
14.4	基于屈服后位移模式修正的 DASPA 法	195
第 15 章	基于日本抗震规范的桥梁结构抗震性能设计方法	198
15.1	中、日抗震设计规范的比较分析	198
15.2	算例 1 基于日本抗震规范单墩柱的 Pushover 抗震分析	204
15.3	算例 2 基于日本抗震规范桥梁全体系 Pushover 抗震分析	227
参考文献	238

第 1 章 桥梁结构抗震概述

1.1 引言

地震是一种自然现象,全世界每年要发生很多次,绝大多数地震对生命安全和工程建设并无危害,能够形成灾难的,全世界每年平均发生十几次。我国是地震多发国家之一,有 40% 以上的国土属于超过 VII 度的地震烈度区。20 世纪以来,我国平均每三年发生两次 7 级以上地震,其中有几次酿成重灾。如 1976 年发生在我国河北省唐山市里氏 7.8 级大地震,造成近 20 万人死亡,16 万人受伤,唐山市遭到毁灭性破坏。1999 年 9 月 21 日在我国台湾省集集镇发生的台湾本岛有记录的最强烈地震(M7.6 级),造成 2400 多人死亡和 10000 多人受伤,各类建筑物倒塌近万间,另约 7000 幢建筑物受到严重损伤。公路桥梁包括那些遵照抗震设计要求建造的桥梁,也遭到严重破坏,根据台湾省公路部门的统计,地震直接造成至少 9 座桥梁严重破坏,这其中包括 3 座正在施工的桥梁。另外由于断层破裂,导致 5 座桥梁倒塌,7 座桥梁受到中等程度破坏。2008 年 5 月 12 日发生在四川汶川的大地震(震级 M8.0 级),造成的损失远比唐山大地震还要严重,地震导致近 7 万人死亡,37 万人受伤,直接经济损失达上千亿元人民币。这次地震损失如此惨重的原因,除了地震震级大、震源浅以外,还有一个非常重要的原因就是:汶川地处山区,地形复杂、交通不便,地震又造成道路、桥梁等生命线工程的严重损毁,给震后的救援工作带来巨大的困难,以致造成生命和财产的更大损失。

桥梁结构是生命线工程系统中的关键部分,在地震发生后的紧急救援和抗震救灾、灾后重建中有着极其重要的地位。近年来,桥梁震害及其带来的次生灾害均给桥梁抗震设计以深刻的启示和新的思考。为此,桥梁结构地震可靠性和抗震性能问题将成为人们关注的焦点。

桥梁结构抗震是基于总结和验证灾害基础上发展起来的一门学科。长期以来,人们为了从地震威胁中解脱出来,从过去的灾害中不断总结经验、分析原因、吸取教训,制定有效的抗震设防措施,以达到减轻地震损失的目的。可以说,桥梁结构抗震设计理论和技术的发展都是以沉痛的灾害教训为代价的,新的结构抗震设计标准和设计理念的确立都经历了灾后的反思、验证、总结和提高的过程。

桥梁结构抗震设计理论经历了静力弹性设计、动力弹性设计方法以后,动力弹塑性设计方法的有效性已经得到广泛的认同,延性设计、减隔震结构等结构抗震设计方法已在各国的抗震设计规范中得到不同程度的应用,我国桥梁抗震设计规范也正朝着弹性设计、弹塑性设计方法并存的方向发展,因此仅了解和掌握弹性设计理论已不能满足工程结构抗震设计的需要,弹塑性地震响应设计方法在桥梁结构抗震设计中的重要性越来越显著。

桥梁结构形式多种多样,其按功能分为人行桥、公路桥、铁路桥、高架桥、立交桥、管道

桥、运河桥、高架水渠桥等；按材料分为木桥、石桥、钢桥、钢筋混凝土桥等；按结构形式分为浮桥、吊桥、梁式桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥、刚构桥等。

1.2 桥梁结构的构造及特点

桥梁结构一般分为上部结构和下部结构。其上部结构分为桥身(梁、拱、缆、索)、桥面和必要的连接构件；下部结构分为桥墩、桥台、支座和基础。图 1.1 为一个桥梁结构的示意简图。

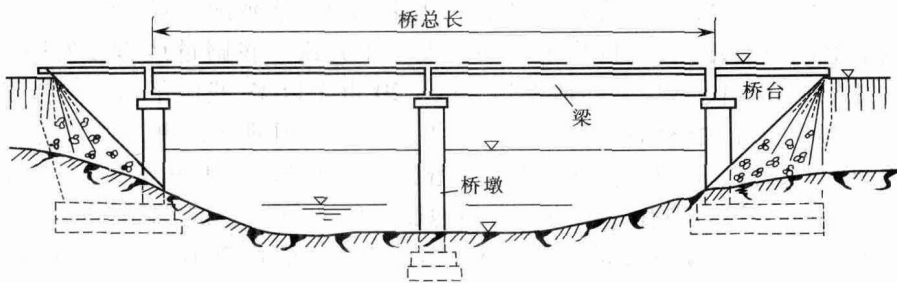


图 1.1 桥梁结构示意图

桥墩是支承桥身的承重构件,它要承受竖向的恒载(车辆行人的活荷载和竖向地震作用),水平方向荷载(车辆制动力、风和水平地震作用)。桥墩坐落在基础上,基础对桥梁的稳定有关键作用。桥梁的基础一般有以下形式:

(1) 浅基础,如果地基是岩石或坚实的土层,一般就直接将桥墩坐落在地基上,为减少压强,将基础适当扩大,所以也叫扩大基础。

(2) 桩基础,当水比较深,覆盖软土层厚,用得比较多的是桩基础,与房屋建筑的桩基础相同,一般用群桩,桩顶建承台将群桩连为整体。

(3) 管柱钻孔桩基础,先将多个一定直径的管柱打到基岩,然后在管内钻孔,灌入混凝土,完成后用钢板桩将全部管柱围成围堰,灌注承台,形成基础与墩身一体的下部结构。

(4) 沉井基础,常用于上部软,而深部坚实的地基。如果把沉井的底节封盖,加压输气作成工作室,则为沉箱。

(5) 地下连续墙,它也是特殊的灌注桩,只是钻孔是方形的,连在一起可成为各种形状连续墙。

(6) 深水设置基础,将基础在岸上预制好,清理整平地基后,用浮运沉井或大型浮吊在深水中安装,适合水深、潮急、现场施工困难的地方,如海峡深水桥,海洋平台等。

桥身构件按不同结构形式有不同的类型,一般的为梁、拱和桥面组成,桥身横梁受竖向力后上部受压,下部受拉,是承受车辆行人荷载的主要构件。但桥身不是直接架在桥墩上,中间有支座。支座的作用首先是适应由于热胀冷缩或受力产生的桥梁上部结构的变形,其次是要固定梁的位置,而隔震支座可以吸收地震能量,减少上部结构振动,因此在国内外的很多桥梁中得以应用。桥梁支座一般可分为活动支座和固定支座。活动支座允许梁伸缩和

转动变形,而固定支座允许转动但不许伸缩。支座的形式很多,有钢支座、板式和盆式橡胶支座、球面支座等。

1.3 桥梁结构类型

桥梁结构一般分为以下几种结构形式:

梁桥,它是运用最广泛的桥梁结构。梁桥的桥身是用各种梁作为承载结构,按照截面形式,可分为实腹梁和桁架梁,实腹梁又分板梁和箱梁,当桥跨度大要求梁增大高度时,可节省材料。实心梁逐渐演变为工字梁等空心梁,然后把梁的横截面做成薄壁箱形,既节约材料、重量,又保证承载力。图 1.2 为桁架式梁桥的示意图。

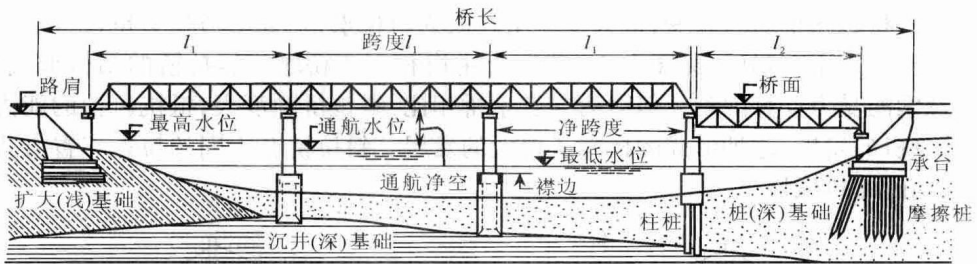


图 1.2 桁架式梁桥的示意图

拱式桥,它是古老又年轻的桥梁形式,按桥身相对拱肋的位置,可分为上承式、中承式和下承式。弯曲的拱肋承受压力,将压力传到支座,拱的支座要同时承受竖向压力和横向推力,因此对基础和地基的要求高。如果在用系杆将两个拱脚连接,作用在拱脚的水平推力就由拉杆承受,它可减轻对地基的荷载作用。石拱桥结构示意图见图 1.3。

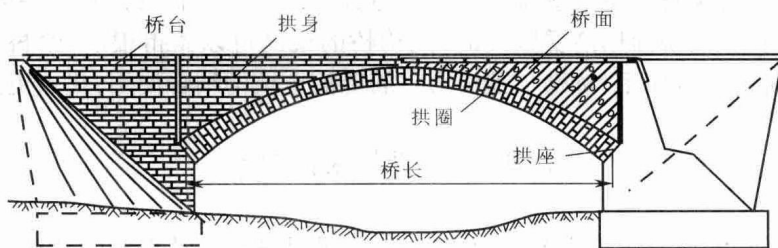


图 1.3 石拱桥结构示意图

悬索桥,它是一种最适合大跨度的桥梁形式,见图 1.4。桥身一般是刚度较大的刚性梁(又称加劲梁),用吊索悬挂在大缆上。大缆用高强度、冷拔加工的镀锌钢丝,分成几十甚至上百股,每股又包含几十或上百根钢丝,所以一根大缆有几千或几万根钢丝。大缆由主塔支撑,大缆的另一头固定在两岸的锚碇上,因此锚碇受到竖向和水平的拉力。悬索桥的大缆几何形状由荷载控制,对大跨度桥,自重(恒载)占绝大比例,桥上的活荷载不会改变桥身形状,即重力刚度,因此只要加大大缆的尺寸、主塔、锚碇,悬索桥可以跨度更大。但悬索桥的吊索

彼此平行,容易在风荷载作用下振动变形,如 1940 年当时居世界第三跨度的美国的塔科马海峡悬索桥在 8 级大风作用下剧烈扭曲振动而坠毁。

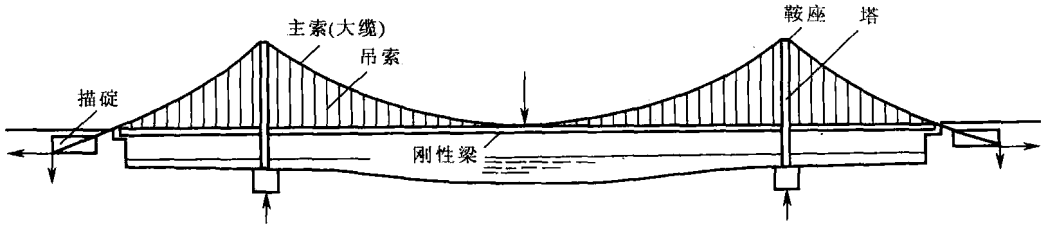


图 1.4 悬索桥示意图

斜拉桥,将悬索桥适当改变,把大缆和吊索改为斜拉索,它也由塔柱支持,最边上的拉索仍拉在桥身上,用不着锚碇,见图 1.5。实际上主塔相当于桥墩。斜拉桥的结构形式起源很早,分析拉索的受力计算困难。但因为与悬索桥相比,斜拉桥刚度大,抵抗风振的能力强,所以随着计算机的发展,这种形成的桥有了很大的发展。斜拉桥有不同的拉索布置方式,可以显示出不同的建筑风格。

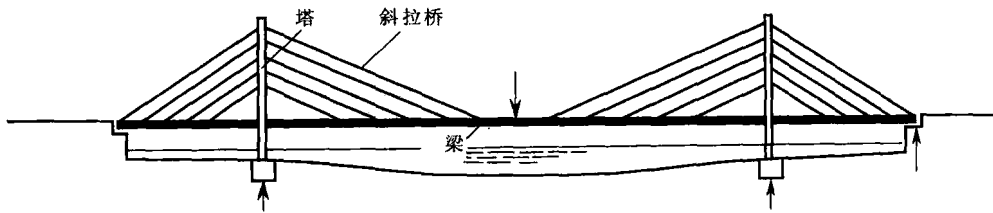


图 1.5 斜拉桥示意图

刚构桥,它是将梁身和桥墩或桥台连为一体,形成刚架,兼有梁桥和拱桥的特点,外形轻巧美观,节省材料。当桥面标高受限制时,刚构桥的梁高可以做得很小,给桥下留出净空高度,所以立交、跨线桥常使用,特别与预应力钢筋混凝土结构结合使用,优点更为突出。

1.4 桥梁结构震害

桥梁结构受到的地震影响主要有两种形式:一种是场地运动引起的桥梁结构振动,另一种是场地相对位移产生的强制变形。前者是以惯性力的形式将地震作用施加在桥梁结构上,而后者则是支点强制变形产生的超静定内力或过大的相对变形影响桥梁结构的地震安全性。

地震波从震源到地表面的传播过程中,从大的方面可划分为两个阶段:第一阶段是从震源传到地下基岩,第二阶段是从地下基岩传至地表面的建筑物。在第一阶段的地震波传播中,波形的变化主要表现为振幅的衰减。根据机理,振幅衰减包括几何衰减、黏性衰减和能量辐射衰减三个部分。由于在这一阶段中地震波的周期特性变化比较小,波形改变是以振幅衰减为主,因此也称之为距离衰减。地震波在第二阶段的传播中需要穿过地表面的土层,

由于土层之间存在分界面,波在土层之间发生折射和反射后传到地表面。地面的地震波周期和振幅特性与基岩位置的地震波相比有比较明显的差异,这种差异与地表面土层结构和地质条件密切相关。根据地震波传播的这种特点,桥梁结构的地震响应分析,除了必须考虑震源发生的地震规模外,还需要考虑地震波的传播距离和表面土层结构,土质条件等因素的影响。

一般桥梁结构的各桥墩(墩台)所在的位置,由于地质条件往往很不相同,质点之间受到地震运动很难一致,所以在地震中将会发生相对位移引起的破坏现象。特别是跨越断层地带、液化地基的桥梁,桥梁相对位移将会导致落梁破坏、支座切断、梁和墩(台)的结构损伤等地震破坏现象。

在地震作用下,桥梁受到不同程度的破坏,轻者桥台、桥墩倾斜或开裂、支座锚栓剪断或拉长,重者桥台、桥墩滑移,落梁,倒塌。由于公路桥梁荷载一般比铁路桥梁小,故其基础常较浅,震害一般较重。人们通过调查总结发现,除了如液化、断层等地基失效引起的破坏以外,钢筋混凝土桥梁主要的破坏形式为桥墩柱的破坏。

桥墩柱的破坏是地震中桥梁破坏的主要形式。桥墩的破坏现象主要有桥墩的倒塌、断裂和严重倾斜;对于钢筋混凝土桥墩,其破坏现象还包括桥墩轻微开裂、保护层混凝土剥落和纵向钢筋屈曲等。

在地震作用下钢筋混凝土桥墩发生三种有代表性的破坏类型,分别称为弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏。由于上部结构一般具有较高的抗震性能和承载力,而抗震设计主要是面向桥墩,因此设计方面的缺陷、施工质量的优劣均体现在桥墩的抗震性能上。桥墩的破坏主要原因可以概括为以下三个方面:(1)在20世纪70年代之前桥梁结构的设计方法基本上是弹性设计方法,只采用弹性设计而对延性考虑得不够的桥墩,一旦超过屈服则无法利用塑性耗能来抗震,强度会急剧下降而使桥墩破坏,另外由于主筋的切断位置不当也可造成强度下降引起桥墩破坏。(2)墩身剪切破坏。根据 Priestley 等的试验研究,钢筋混凝土桥墩的剪切强度主要由沿斜裂缝方向混凝土骨料的咬合作用、横向钢筋及轴力共同提供。现有钢筋混凝土桥梁中横向钢筋含量一般较小,而且连接性能较差,因此桥墩抗剪强度有限,尤其是短粗的桥墩更容易遭受剪切破坏。桥墩的剪切破坏主要发生在盖梁与桥墩的连接处,桥墩中部及桥墩与承台的连接处。(3)桥墩与盖梁的节点剪切破坏。一般发生在多柱式桥墩及外伸式墩柱框架的节点,由于盖梁、主梁、柱子主筋锚固不足或者是节点外横向钢筋含量太小,无法有效传递地震力而发生破坏。

由于钢筋混凝土结构的破坏形式影响结构的变形能力,延性比较差的结构在地震中因构件失去承载能力容易发生倒塌性破坏,修复比较困难。因此,脆性的剪切破坏、弯剪破坏是结构在地震中不希望出现的破坏形式。

1.4.1 桥墩弯曲破坏

弯曲破坏,是指结构的弯曲承载能力低于剪切破坏的承载能力,结构承载力由抗弯性能起控制作用的破坏形式。在水平反复荷载作用下,由于构件的截面弯曲抵抗能力低,在损伤截面内形成塑性铰,产生较大的回转变形,从损伤开始到最终破坏变形幅度变化很大,也就是说具有比较大的变形能力。在损伤发生以后,由于塑性变形吸收地震能量和刚度下降能够减轻地震作用的强度,因此,这种形式的破坏通常可以避免桥梁在地震中发生倒塌破坏。

图 1.6 为弯曲破坏的实例,其中前一例损伤发生在桥墩中间纵向钢筋截断位置,而后一例则发生在刚架桥墩变截面弯矩最大处。两者在地震中均能保持支撑上部结构的机能,没有发生桥梁倒塌破坏。

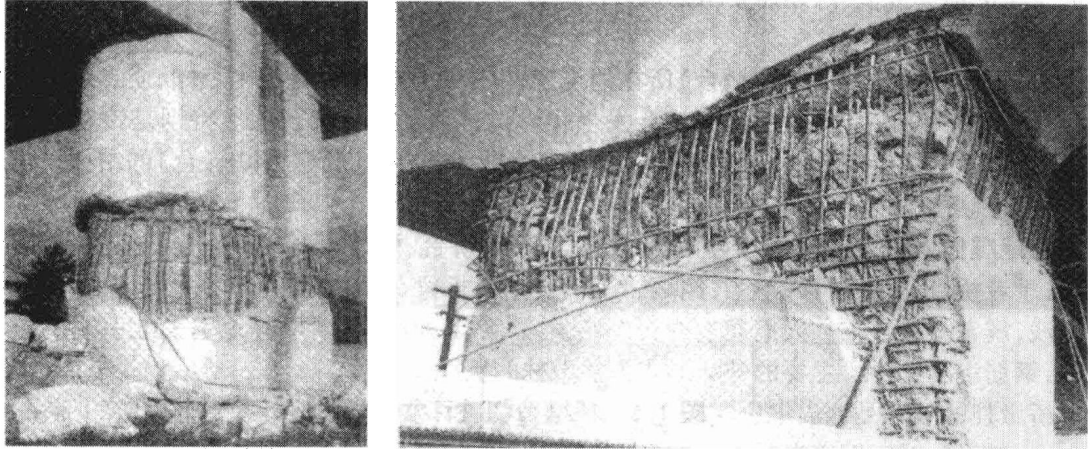


图 1.6 桥墩弯曲破坏实例

1.4.2 桥墩剪切破坏

剪切破坏,是指结构弯曲承载力高于剪切承载能力,结构的承载力完全由剪切强度控制的破坏形式。剪切破坏的破坏形态以斜方向的剪切裂缝为主。剪切破坏也是一种脆性破坏,塑性变形能力很差。地震时,剪切破坏是桥梁遭受致命性破坏的重要原因,这种形式的破坏比较多见。图 1.7 为发生剪切破坏的一些实例,梁桥因桥墩剪切破坏而失去了承载力。由于剪切破坏的脆性和突然性,在设计新的桥梁或加固设计中都需要特别注意避免剪切破坏的发生。

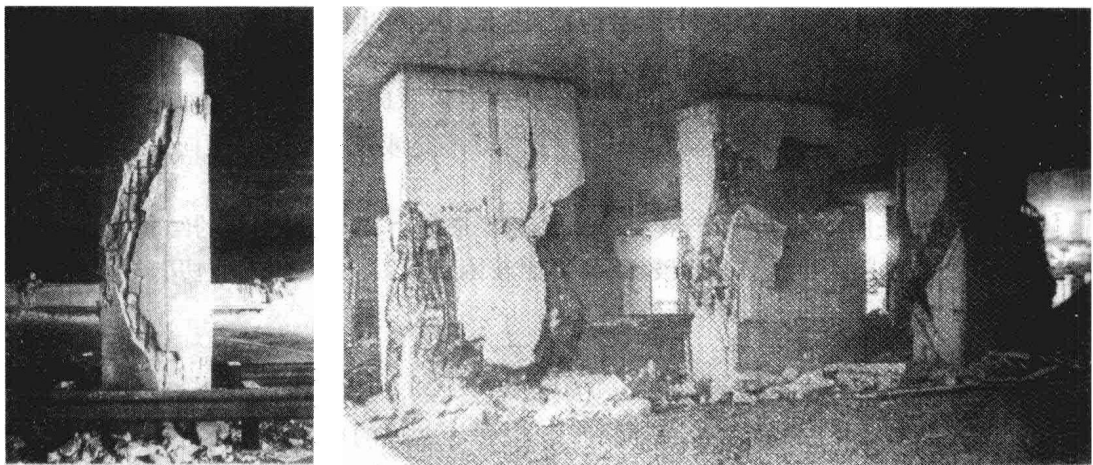


图 1.7 桥墩剪切破坏实例

1.4.3 落梁破坏

无约束活动节点处的位移过大使得桥跨在纵向的相对位移超出支座长度而引起的桥梁破坏,称之为落梁破坏。落梁破坏的例子很多,这种破坏在高墩柱的多跨连续梁中尤其容易发生。落梁破坏的主要原因是由于梁与桥墩(台)的相对位移过大,支座丧失约束能力后引起的破坏形式,如发生在桥墩之间的地震相对位移过大、梁的支撑长度不够、支座破坏、梁间地震碰撞等情况。图 1.8(a)为 1951 年 Kobe 地震中 Wangan 高速公路上 Nishinomiya - ko 拱桥东连接跨的落梁破坏;图 1.8(b)为 2008 年 5 月 12 日汶川大地震中的落梁破坏。

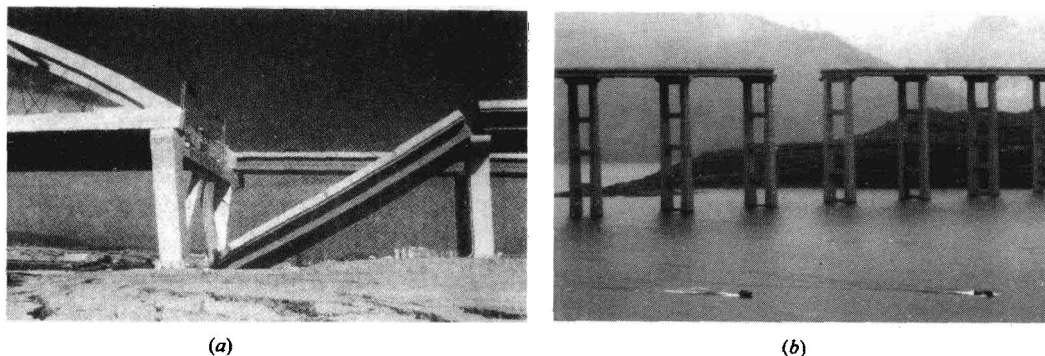


图 1.8 桥梁结构落梁破坏实例

1.4.4 桥台、桥墩滑移

当桥梁跨过河流时,桥台均建于坡岸上,桥墩也常在河岸缓坡上,当地基或边坡含有软弱土层(如可液化的砂层)时,在强地震动作用下边坡易产生滑坡,从而带动桥台、桥墩向河心滑移,引起桥台、桥墩断裂、倾斜、沉陷,甚至倒塌。对于桥台而言,背后填土在地震时产生的土动压力会使桥台滑移或倾斜,破坏翼墙或使填土下沉。这种震害多见于冲积平原河流上的桥梁。一般桥墩在地震时会产生倾倒或剪切破坏(图 1.9、图 1.10),桥墩东倒西歪(图 1.11)。震动也使桥发生纵向(图 1.12)或横向位移,造成桥身错位或塌落。桥台是桥梁两侧岸边的支撑部分,一般是在岸边的原土或填土上用钢筋混凝土修建三角形或矩形的支台,因为桥台的路基高且三面临空,振动大,桥台和下面的土刚度不同,有相互作用,土体本身在地震中会产生液化、震陷等破坏,所以桥台是桥梁抵抗地震作用的薄弱部分。桥台常见的破坏是桥台或填土处开裂(图 1.13),当受到振动或场地液化影响,填土还会产生滑移、塌落等破坏现象(图 1.14)。

1.4.5 支座破坏

桥梁支座破坏是上部结构中最常见的一种破坏形式。上部结构的地震惯性力通过支座传到下部结构,当传递荷载超过支座的设计强度时支座发生合在一起。支座损伤也是引起落梁破坏的主要原因,对下部结构而言,支座损伤可以避免上部结构的地震作用传到桥墩,避免桥墩发生破坏。

桥梁支座破坏的原因有两种,即地基失效和结构振动。不论是哪一种破坏原因,桥梁支座处都受到很大的剪力或变形,当剪力超过锚栓强度,锚栓既被剪断或拉长;当变位超过活动支座的容许值,桥即倾斜或支座落位(图 1.15、图 1.16)。据统计,1976 年 7 月 28 日唐山

地震时仅铁路桥, 支座锚栓被剪断者至少有 19 座。



图 1.9 桥墩破坏(神户地震,1995)

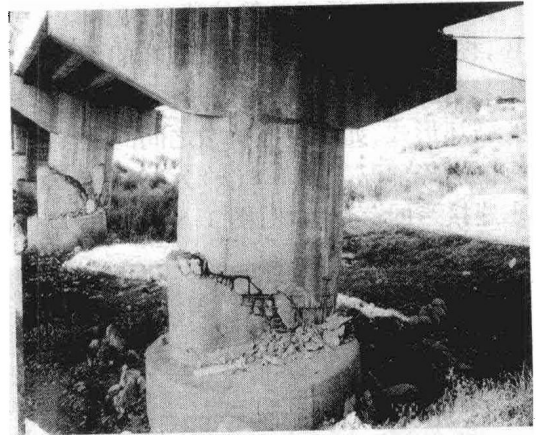


图 1.10 短桥墩剪断(台湾集集大地震,1999)



图 1.11 桥墩滑移(唐山大地震,1976)



图 1.12 桥身纵向滑移落梁(神户地震,1996)



图 1.13 桥台附近填土开裂(丽江地震,1996)

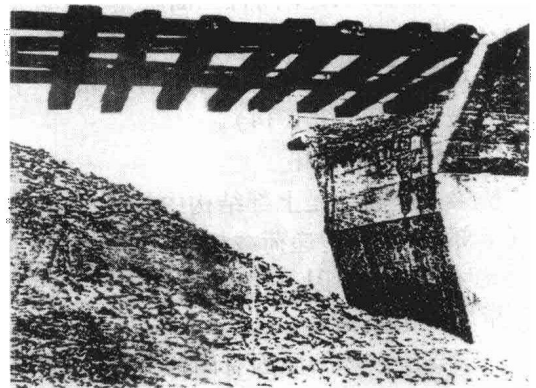


图 1.14 桥台后的路基塌落(唐山大地震,1976)

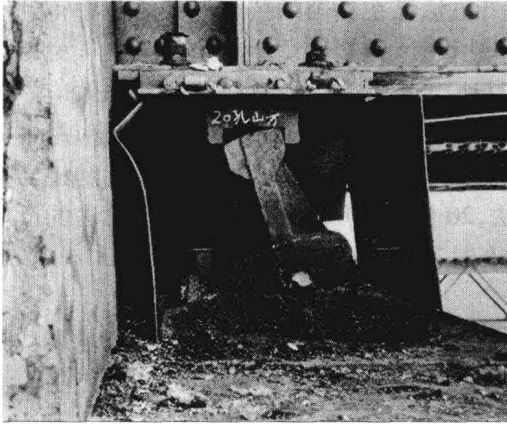


图 1.15 桥支座撞坏(唐山大地震,1976)

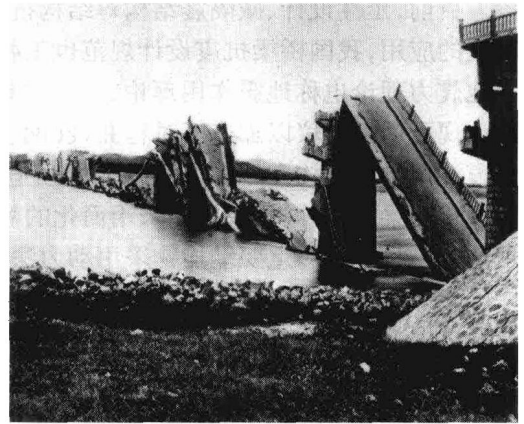


图 1.16 滦河桥塌落(唐山大地震,1976)

1.4.6 承台及桩基的破坏

通常情况下承台强度较大、体积大而破坏较轻,然而桩基的破坏则较常见,尤其是在地面以下1~2倍桩径范围内。由于桩可相对自由运动,承受较大弯矩,因此,对于高桩承台,桩基破坏更为严重,而且由于桩基的柔性会使桥墩的屈服位移增大而使结构的延性变差导致桥墩与上部结构的破坏现象。

高架桥破坏是近年城市地震破坏的引人注目的现象。高架桥的特点是桥墩随地形或跨越需要而高低不等,大多有弯曲、细长的引桥,多层跨越,空间构形十分复杂。这样的复杂空间受力状态在设计阶段很难考虑周全,特别是当某一跨先破坏,受力状态将发生变化,因此高架桥的地震震害十分特别,地震反应分析也非常复杂。

1.4.7 桥梁结构震害教训

总结桥梁结构震害教训,尤其是最近十年来的桥梁震害教训,有以下一些新的启示:

(1) 桥梁抗震设防采用性能设计原则比较合理。即在考虑工程造价、结构遭遇地震作用水平、紧急情况下维持交通能力的必要性以及结构的耐久性和修复费用等因素下,决定桥梁的重要性及其在遭遇不同水准的地震作用下允许的损坏程度(性能),据此进行桥梁的抗震设计;

(2) 桥梁抗震设计应同时考虑强度和延性,尤其注重提高桥梁结构整体和钢筋混凝土桥墩的延性能力;

(3) 重视采用减隔震的设计技术,以提高桥梁的抗震性能;

(4) 对复杂桥梁(如斜弯桥、高墩桥梁或桥墩刚度变化很大的桥梁),强调进行空间动力时程分析的必要性;

(5) 重视桥梁支座的作用及其设计,同时开发更有效的防止落梁装置。

1.5 桥梁结构抗震设计方法

桥梁结构的抗震计算的地震力理论经历了静力法、反应谱理论和动态时程分析法三个