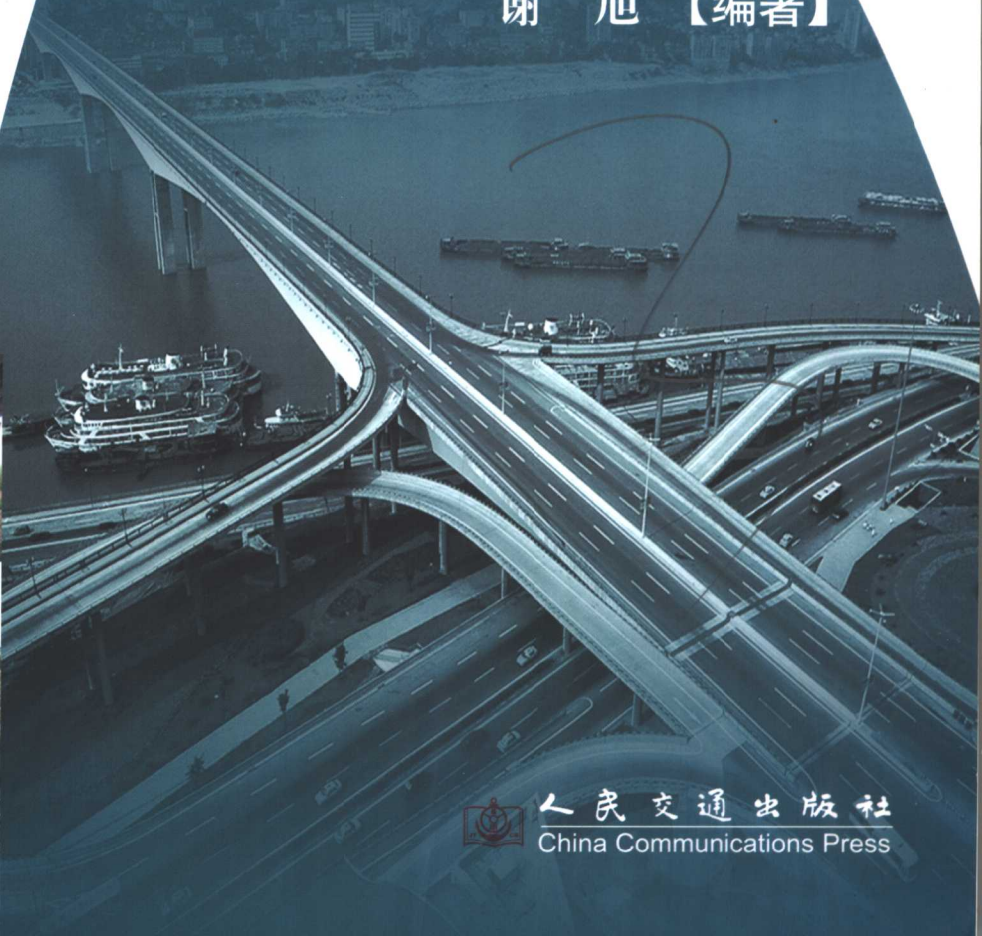


Seismic response and earthquake
resistant design of bridges

桥梁结构地震响应分析 与抗震设计

谢旭【编著】



人民交通出版社
China Communications Press

Seismic response and earthquake
resistant design of bridges

桥梁结构地震响应 分析与抗震设计

谢 旭 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以钢筋混凝土桥梁结构的弹塑性地震响应计算理论和结构安全验算方法为主,对桥梁结构的抗震设计原理、线弹性地震响应以及弹塑性响应计算方法、场地运动和土与结构相互作用、减隔震设计原理等进行了阐述。并且以实例形式详细介绍了桥梁弹塑性地震响应的计算过程和结构抗震安全的验算方法,将设计理论和工程应用结合起来。该书具有很强的先进性和实用性。

本书可供路桥专业设计技术人员或科研人员等参考使用,同时可供高校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构地震响应分析与抗震设计/谢旭编著. —北京:人民交通出版社,2005.10
ISBN 7-114-05807-1

I. 桥... II. 谢... III. 桥梁结构-抗震设计-IV. U442.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第119788号

书 名:桥梁结构地震响应分析与抗震设计

著 者:谢 旭

责任编辑:师 云

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京凯通印刷厂

开 本:787×980 1/16

印 张:21.25

字 数:348千

版 次:2006年1月第1版

印 次:2006年1月第1次印刷

书 号:ISBN 7-114-05807-1

印 数:0001~3500册

定 价:44.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

作者在日本工作期间参与了一些桥梁抗震设计和科研工作,在这期间日本刚经历过阪神大地震,抗震安全成为桥梁设计中最重要内容之一,弹塑性地震响应分析和减隔震设计在整个工作中占相当大的比例。2002年到浙江大学工作后,希望能把过去工作中获得的设计经验用理论的形式作一总结,编写出一本关于桥梁地震响应分析和抗震设计的参考书。

桥梁抗震设计所涉及到的基本内容十分广泛,本书根据编写目的选择了钢筋混凝土结构弹塑性地震响应计算方法作为主要内容,对桥梁结构的抗震设计基本原理、线弹性地震响应以及弹塑性地震响应计算方法、场地运动和土与结构相互作用、减隔震设计原理等进行了讨论。为更进一步的应用,对常见连续梁桥、刚构桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥的弹塑性地震响应计算原理和设计方法,今后拟通过计算实例进行详细介绍。

本书中各章节的内容安排如下:

第一章在介绍钢筋混凝土桥墩破坏形式的基础上,分析了地震对桥梁结构的影响和近几年地震中的桥梁破坏特点,讨论桥梁结构抗震设计方法的发展和变化。

第二章对地震机理、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。

第三章介绍桥梁结构的线弹性地震响应分析方法,阐述单自由度结构和多自由度体系线性振动分析的基本理论,对抗震设计中经常遇到的反应谱理论、振型分解法等进行了论述,特别是对阻尼计算实用方法的基本原理作了详细的分析。

第四章以 Newmark β 法、Wilson θ 法为主,介绍了地震响应的直接积分法。

第五章中讨论了频域内振动响应的数据处理方法,对傅立叶变换的基本原理、快速傅立叶变换以及应用进行了介绍。

第六章以斜拉桥为例,介绍了复杂结构的弹性地震响应计算方法,并讨论了不同阻尼理论对结构地震响应计算结果的影响。

第七章以钢筋混凝土结构为主,介绍了弹塑性地震响应分析的履历模型以及计算方法,讨论了钢筋混凝土结构非线性分析基本原理以及滞回曲线计算模型。

第八章介绍了常用的弹塑性地震响应近似算法。

第九章研究了纤维模型计算理论,提出适用性广的桥梁结构空间弹塑性地震响应分析方法。

第十章作为桥梁结构按延性设计的基本过程,介绍了弹塑性地震响应分析的计算模型建立方法、计算过程以及安全性评价方法,并通过实例加以说明。

第十一章以土与结构之间的相互作用计算原理为主,对弹性地基上的刚性基础振动、相互作用计算方法和土动力学特性等作了基础性介绍。

第十二章介绍了减隔震设计原理,并通过实例说明减隔震设计方法。

本书在编写过程中,得到了宁波大学黄剑源教授的鼓励和支持。多年来,黄剑源教授无论在专业知识还是工作、生活方面,都给予了很多指导和帮助,在本书出版之前阅读了原稿,纠正了不少错误,借此机会谨向黄剑源教授深表衷心感谢。另外,感谢浙江大学博士研究生陈衡治和布占宇同学在本书编写中所给予的帮助。

在编写过程中作者曾有意识地想把国内的最新研究成果反映进去,由于受到工作经历的影响,对国内的研究现状缺乏了解,在参考文献中没有体现出这一初衷。在书稿交付之前,收到重庆交通科研设计院唐光武研究员寄来的《公路桥梁抗震设计规范》(征求意见稿)后,对书稿的内容作了一些补充,介绍了国内桥梁抗震设计方法的一些研究成就,以弥补这方面的不足。

感谢人民交通出版社沈鸿雁同志在出版过程中提供了许多便利和帮助。

由于作者水平有限,书中难免有不少错误和不妥之处,恳请批评指正。

作者 谢旭
浙江大学建工学院
(兼)浙江大学宁波理工学院
2005年10月

目 录

第 1 章 桥梁结构地震破坏形式和抗震设计法的变化 ·····	1
1.1 概述	1
1.2 地震对桥梁结构的影响	2
1.3 桥梁结构的地震破坏形式	3
1.4 最近主要地震中桥梁破坏的经验教训	9
1.5 桥梁抗震设计方法的变化	15
1.6 结构地震响应分析方法	17
参考文献	17
第 2 章 地震现象以及地震波在层状场地中的传播特性 ···	19
2.1 概述	19
2.2 地震发生机理及地震活动区	19
2.3 地震强度和地震烈度	21
2.4 地震波的基本特性和波的种类	26
2.5 地震波积分计算	31
2.6 弹性波的传播和场地运动	35
2.7 层状场地的增幅特性	47
参考文献	48
第 3 章 桥梁结构的线性地震响应分析 ·····	50
3.1 概要	50
3.2 单自由度体系的运动方程和线性振动响应	50
3.3 地震反应谱	61
3.4 振动能量转换关系	66
3.5 多自由度结构的振动方程	70
3.6 杆系结构的单元刚度矩阵和质量矩阵	73
3.7 多自由度体系的地震运动方程	92
3.8 多自由度体系的结构动力特性计算	94
3.9 多自由度结构的线性地震响应计算方法	97
3.10 非比例阻尼结构的振动分析	101
3.11 振型阻尼的实用计算方法	105

参考文献	107
第 4 章 桥梁结构线性振动响应分析的直接积分法	108
4.1 概述	108
4.2 Newmark β 法	109
4.3 wilson θ 法	117
4.4 Nigam-Jennings 法	120
4.5 直接积分法的补充说明	121
参考文献	122
第 5 章 傅立叶分析及其在结构地震响应分析中的应用	123
5.1 概要	123
5.2 傅立叶级数和傅立叶变换	123
5.3 傅立叶变换	126
5.4 离散点的傅立叶变换	130
5.5 快速傅立叶变换	134
5.6 频率响应分析	136
5.7 地震波拟合	137
5.8 成层场地的卓越周期实测和地震响应分析	139
参考文献	142
第 6 章 桥梁结构线弹性地震响应分析实例	143
6.1 概要	143
6.2 结构计算条件以及计算模型	143
6.3 结构的振动特性	145
6.4 结构的振型阻尼	147
6.5 结构地震响应分析	147
参考文献	152
第 7 章 桥梁结构弹塑性地震响应分析	153
7.1 概述	153
7.2 钢筋混凝土柱在反复荷载下的变形特性	154
7.3 单调荷载作用下的钢筋混凝土柱弯曲变形	155
7.4 反复荷载作用下的滞回曲线计算模型	172
7.5 弹塑性梁单元的刚度方程	184
7.6 弹塑性地震响应计算	188
参考文献	191
第 8 章 桥梁结构弹塑性地震响应的近似算法	193
8.1 概要	193

8.2	等效线性化计算方法	193
8.3	能量一定和位移一定原则	204
8.4	弹塑性反应谱法	208
8.5	能量平衡算法	209
	参考文献	210
第 9 章 基于纤维模型的桥梁结构弹塑性地震响应分析		
	212
9.1	概要	212
9.2	基于纤维模型的空间梁单元刚度方程	212
9.3	单元运动方程	219
9.4	反复荷载作用下的材料应力-应变关系	220
9.5	纤维模型的弹塑性地震响应计算	228
	参考文献	231
第 10 章 高架桥非线性地震响应分析以及抗震性能评价		232
10.1	概要	232
10.2	结构计算模型	232
10.3	用能量一定或位移一定原则推算结构的最大地震响应	241
10.4	Pushover 法	244
10.5	结构抗震安全性判断	246
10.6	桥梁性能设计概念	248
10.7	高架桥弹塑性地震响应分析算例	250
	参考文献	263
第 11 章 土与结构相互作用分析基础		265
11.1	概要	265
11.2	弹性地基上刚性基础的振动	266
11.3	地基动力刚性的实用计算方法	273
11.4	土与结构动力相互作用对结构地震响应的影响及其计算方法	279
11.5	地震波输入和边界处理方法	284
11.6	土的非线性动力计算模型	288
11.7	等效线性化方法计算场地的地震运动	292
	参考文献	293
第 12 章 减隔震桥梁设计的基本原理和方法		295
12.1	概要	295

12.2	减隔震设计的基本原理	296
12.3	减隔震支座的基本力学特性	297
12.4	叠层橡胶支座的力学计算模型	302
12.5	叠层橡胶支座的安全验算	309
12.6	叠层橡胶支座的设计框图	312
12.7	其它形式的减隔震支座	313
12.8	算例	322
	参考文献	330

第 1 章

桥梁结构地震破坏形式和 抗震设计法的变化

1.1 概 述

桥梁作为重要的社会基础设施,具有投资大、公共性强、维护管理困难的特点。桥梁同时又是抗震防灾、危机管理系统的一个重要组成部分,提高桥梁的抗震性能是减轻地震损失、加强区域安全的基本措施之一。特别是随着我国交通建设事业的迅速发展,桥梁无论在数量上还是延伸长度上都在快速增长,城市高架桥已经成为大中城市的主要交通动脉,高速公路、铁路在国民经济和居民日常生活活动中发挥着重要的作用,地震中桥梁设施的损坏、倒塌所带来的影响常常超过了桥梁因改建或维修所需要的巨额财政支出,提高桥梁的抗震能力是我国公路交通建设中所面临的重大课题。

工程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,达到减轻地震损失的目的。可以说,近一个世纪以来,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,同时,地震如同震动台试验,能检验抗震设计理论是否有效,促进抗震设计理论的发展。

我国是一个多地震国家,人民的生命和财产长期受到地震灾害的威胁。仅1976年的唐山地震(震级M7.8级)就造成24万居民死亡,这在近代的地震历史中是十分罕见的大灾难。当时,我国的社会基本设施建设还比较落后,桥梁的数量、规模均十分有限,使用中的桥梁又以简支梁桥、拱桥为主,地震破坏所带来的影响远不及房屋建筑大。在唐山地震中有18座桥梁倒塌、20座桥梁发生严重破损和34座桥梁出现中等程度的损伤,桥梁破坏的

主要形式是落梁、地基失效、支座破坏、桥墩断裂、梁间碰撞等。受到唐山地震灾害的教训以后,抗震设计开始在我国桥梁工程建设中得到重视,高等院校、科研单位相继开展了桥梁抗震的研究工作,取得了长足的进步,制定了相应的桥梁抗震设计规范,为提高桥梁抗震性能起到积极的作用。

桥梁抗震设计理论经历了静力弹性设计法、动力弹性法以后,动力弹塑性设计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。

1.2 地震对桥梁结构的影响

结构物受到的地震影响主要有两种形式:一种是场地运动引起的结构物振动,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荷载施加在结构物上,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结构的安全性。

图 1.1 表示地震波从震源到结构物的传播过程示意图。如图所示,结构物受到的地震运动是由震源发生的地震波经过地壳传到地下深层基岩,再从基岩传至表面土层的场地,建筑在地基上的结构物随场地运动发生振动和变形。刚性结构的地震响应取决于场地的运动,而柔性结构的地震响应除了随同场地的振动外,还将产生相对于地基的振动。因此,结构受到的地震惯性力影响不但与场地运动特性有关,而且还与结构物本身的动力特性(如振动周期、阻尼等)有关。

按图 1.1 的地震波传播途径,地震波从震源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、粘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,研究结构地震响应时,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、土质条件的影响。

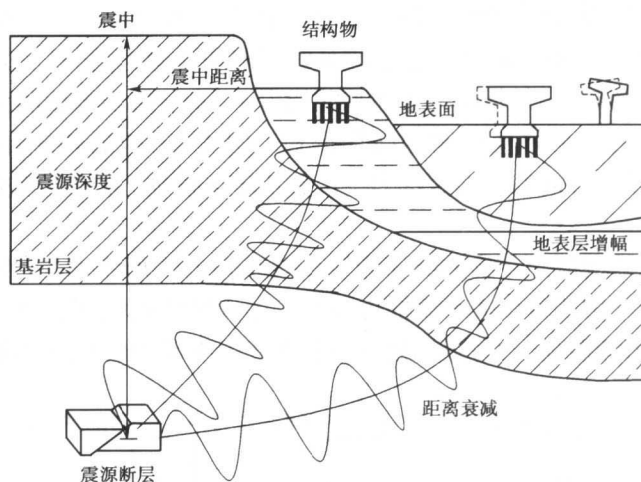


图 1.1 地震波传播途径示意图

第二种地震影响是因为纵向延伸比较长的桥梁结构,各桥墩(台)所在的位置、地质条件往往很不相同,支点之间受到的地震运动很难一致,地震中发生相对位移引起的影响。特别是跨越断层地带、液化地基的桥梁,场地相对位移是发生落梁破坏、支座切断、梁和墩(台)的结构损伤等地震破坏的主要原因。与第一类影响相比,场地相对位移对桥梁结构的影响更难预防、抗震设计更加困难,目前相关的研究活动还处于初始阶段。

1.3 桥梁结构的地震破坏形式

1.3.1 钢筋混凝土桥墩在水平反复荷载作用下的破坏形式

在地震荷载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。

所谓弯曲破坏,是指结构的弯曲承载能力 P_b 低于剪切破坏的承载能力 P_s , 结构强度由抗弯性能起控制的破坏形式。图 1.2a) 表示桥墩发生弯曲破坏的形态。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,产生比较大的回转变形,损伤开始到最终破坏之

间的变形幅度很大,具有比较好的变形能力。

所谓弯剪破坏,是指结构由于弯曲损伤引起剪切强度下降,最终以剪切破坏的形式达到极限状态。与弯曲破坏相比,弯剪破坏的变形能力相对较差,从损伤到破坏之间的变形能力十分有限,是一种脆性破坏。在破坏形态上同时包含弯曲裂缝和剪切裂缝,破坏时以剪切裂缝为主[图 1.2b)]。

所谓剪切破坏,是指结构弯曲承载能力 P_b 高于剪切承载能力 P_s , 结构的强度完全由剪切强度控制的破坏形式。图 1.2c)为剪切破坏的破坏形态,破坏时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。

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。

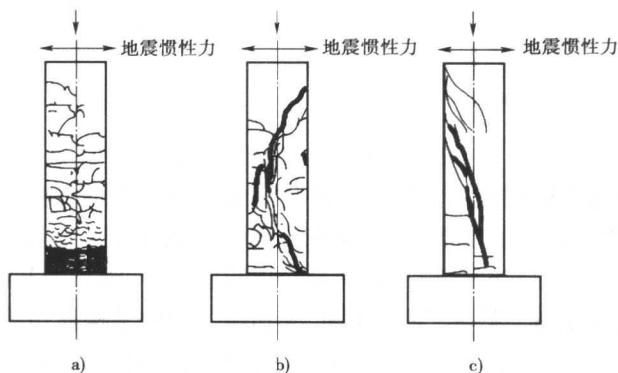


图 1.2 钢筋混凝土构件的地震破坏形式
a) 弯曲破坏; b) 弯剪破坏; c) 剪切破坏

1.3.2 桥梁结构地震破坏的主要形式

根据桥梁过去的地震破坏情况,除了如液化、断层等因地基失效引起的破坏以外,混凝土桥梁最常见的破坏有以下四种形式。

(1) 弯曲破坏 如图 1.3 所示,结构在水平地震荷载作用下由于过大的弯曲变形导致混凝土保护层脱落、钢筋压屈和内部混凝土压碎、崩裂,结构失去承载能力。整个破坏过程可以用以下四个阶段来描述:

- ① 当弯矩达到开裂强度时,截面出现水平弯曲裂缝,如图 1.3a)所示;
- ② 随着裂缝的发展和荷载强度的提高,受拉侧的纵筋达到屈服强度,如图 1.3b)所示;

③随着变形量的增大,混凝土保护层脱落、塑性铰范围扩大,如图1.3c)所示;

④钢筋压屈(或拉断)和内部混凝土压碎、崩裂,如图1.3d)所示;

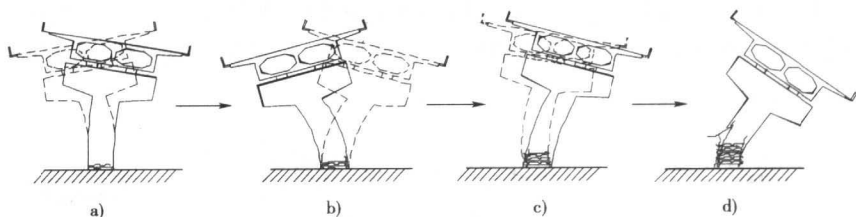


图 1.3 桥墩的弯曲破坏过程

如前所述,钢筋混凝土结构弯曲破坏时具有比较良好的变形能力,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荷载的强度,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1.4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,两者在地震中均维持支撑上部结构的机能,没有发生桥梁倒塌破坏。

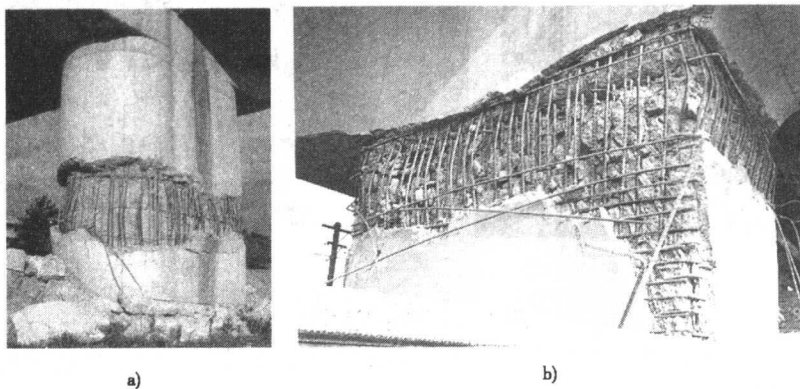


图 1.4 桥墩弯曲破坏实例

(2)剪切破坏(弯剪破坏) 如图1.5所示,在水平地震荷载作用下,当结构受到的剪切力超过截面剪切强度时发生剪切破坏,整个破坏过程可以用以下四个阶段来描述:

①截面弯矩达到开裂强度时,截面出现水平弯曲裂缝,如图1.5a)所示;

②随着裂缝的发展和荷载强度的提高,柱内出现斜方向的剪切裂缝,如图1.5b)所示;

③局部剪切裂缝增大,箍筋屈服导致剪切裂缝进一步增长,如图 1.5c) 所示;

④发生脆性的剪切破坏,如图 1.5d) 所示。

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 1.6 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能力。

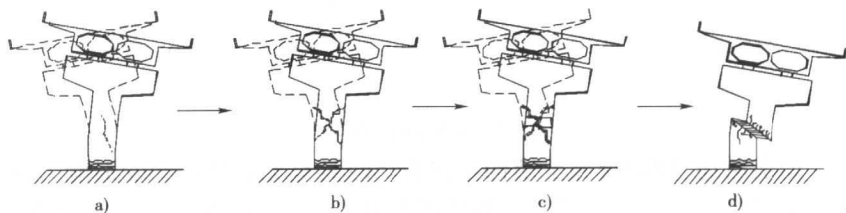


图 1.5 桥墩的剪切破坏过程

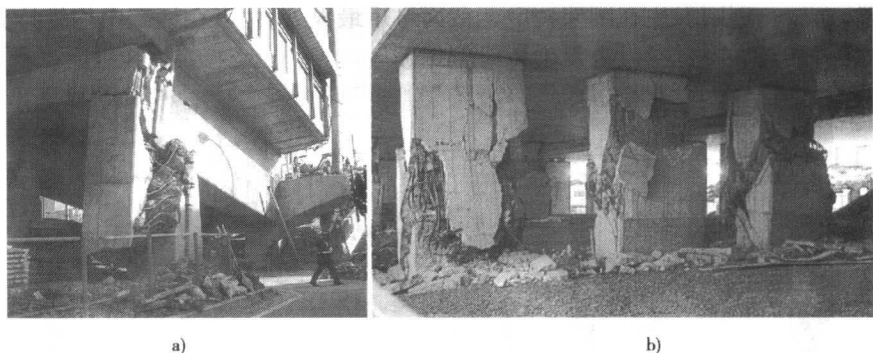


图 1.6 桥墩剪切破坏实例

(3)落梁破坏 当梁体的水平位移超过梁端支撑长度时发生落梁破坏。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,发生在桥墩之间地震相对位移过大、梁的支撑长度不够、支座破坏、梁间地震碰撞等情况。图 1.7 为日本兵库县南部地震中西宫大桥和阪神高速公路桥梁发生的落梁破坏以及破坏机理,其中西宫大桥主要由于软弱地基中不同墩间相对位移过大引起支座破损,最终导致落梁破坏,而阪神高速公路高架桥的落梁破坏则由于其中的一个支座损坏后梁间追尾碰撞所引起。

(4)支座损伤 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损伤、破坏。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荷载传到桥墩,避免桥墩发生破坏。图 1.8 为支座地震破坏的实例。

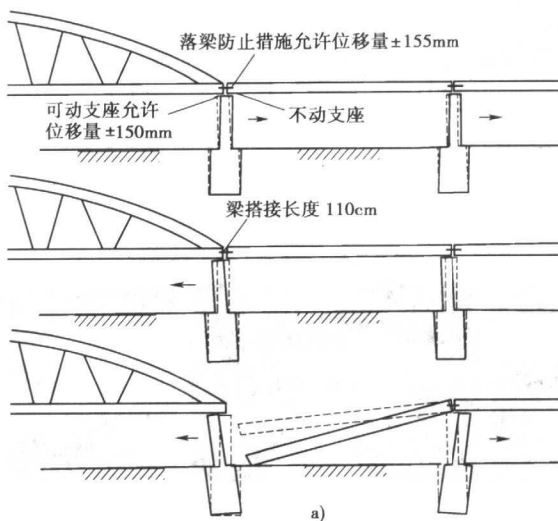


图 1-7

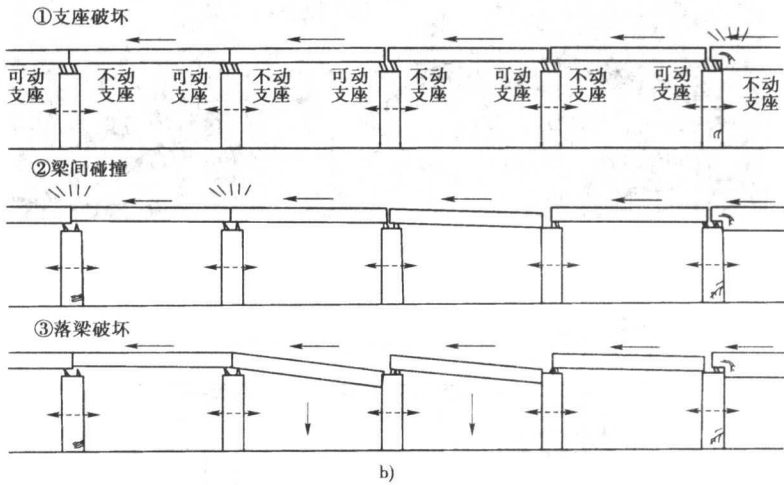
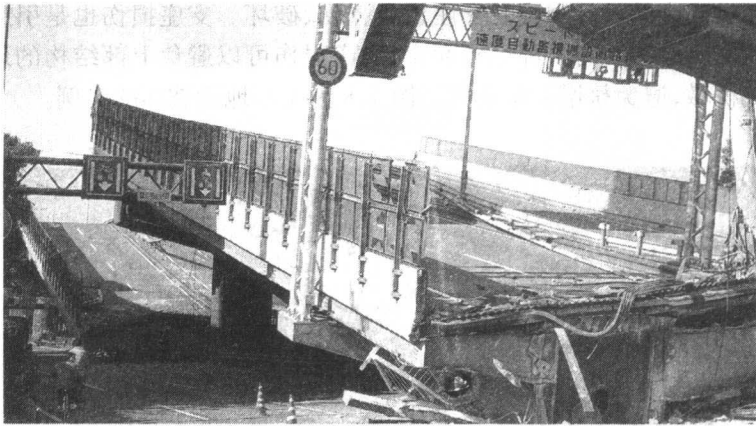


图 1.7 落梁破坏实例

a)西宫大桥;b)阪神高速公路桥梁

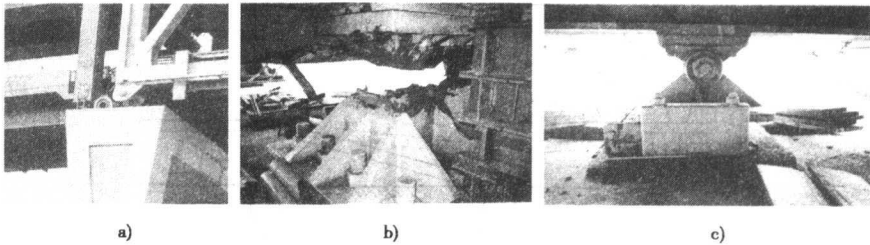


图 1.8 支座损伤实例