



跨越——中国大型桥梁建设工程技术总结丛书
多塔连跨悬索结构及工程示范



Seismic Design of Multi-pylon Multi-span
Suspension Bridge

多塔连跨悬索桥 抗震与减震设计

李建中 彭天波 编著
吉林 周良 邓育林



人民交通出版社
China Communications Press

跨越——中国大型桥梁建设工程技术总结丛书
多塔连跨悬索结构及工程示范

Seismic Design of Multi-pylon Multi-span Suspension Bridge
多塔连跨悬索桥抗震与减震设计

李建中 彭天波 吉林 周良 邓育林 编著



人民交通出版社

内 容 提 要

我国是目前世界上主跨超千米悬索桥最多的国家。随着悬索桥主跨跨度的增大,多塔悬索桥应运而生。泰州长江公路大桥为三塔两跨悬索桥,是世界上首座大跨度多塔悬索桥。本书以泰州长江公路大桥为背景,介绍多塔悬索桥抗震设计理论,旨在促进特殊桥梁抗震设计水平的提高,以保证作为生命线工程的大跨度桥梁在地震灾害下的安全性。

本书可供从事桥梁设计、科研、施工的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

多塔连跨悬索桥抗震与减震设计 / 李建中等编著

— 北京 : 人民交通出版社, 2013. 6

(多塔连跨悬索结构及工程示范)

ISBN 978-7-114-10698-9

I. ①多… II. ①李… III. ①悬索桥 - 防震设计
IV. ①U448. 252. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121023 号

跨越——中国大型桥梁建设工程技术总结丛书

多塔连跨悬索结构及工程示范

书 名: 多塔连跨悬索桥抗震与减震设计

著 者: 李建中 彭天波 吉 林 周 良 邓育林

责任编辑: 周 宇

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.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 7

字 数: 163 千

版 次: 2013 年 6 月 第 1 版

印 次: 2013 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10698-9

定 价: 25.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



前 言

随着经济的快速发展,我国正进行世界最大规模的交通基础设施建设,一大批大型跨江、跨河和跨海大桥正在建设和规划中。而悬索桥以其优美的造型和宏伟的规模,常被人们冠以“桥梁皇后”的美誉,在大跨度桥梁设计中,特别是单跨为千米以上的桥梁设计中,有着绝对的竞争优势。目前,我国已建或在建的主跨超千米悬索桥共 8 座,是世界上主跨超千米悬索桥最多的国家。

到目前为止,已建成的大跨度悬索桥都是传统两塔悬索桥,随着悬索桥主跨跨度的增大,主缆、主塔、锚碇的工程规模迅速增加,主缆拉力、锚碇的负载迅速增大,使传统两塔悬索桥设计变得十分困难,制约了传统两塔悬索桥向更大跨度发展。为了克服传统两塔悬索桥的弱点,多塔悬索桥方案应运而生。泰州长江公路大桥位于长江江苏境内泰州段,其结构形式为三塔两跨悬索桥,是世界上首座大跨度多塔悬索桥,也必将成为现代多塔悬索桥的首创,为国内在新桥式工程实践上处于世界领先地位提供历史性契机。

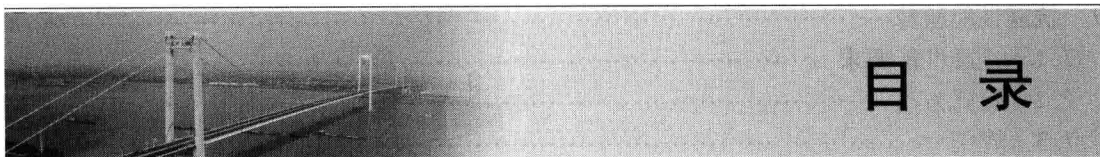
地震历来是严重危害人类的一大自然灾害。近 30 年来,多次破坏性地震的发生,造成了非常惨重的生命、财产损失。这些地震灾害的共同特点是:由于桥梁工程遭到严重破坏,切断了震区交通生命线,造成救灾工作的巨大困难,使次生灾害加重,导致了巨大的经济损失。大跨度桥梁工程在我国国民经济建设中,具有十分重要的地位和作用。保证作为生命线工程的大跨度桥梁在地震作用下的安全性,其经济效益和社会效益不言而喻,对保障人民生命、财产的安全,保证震后救灾工作的顺利进行,减少次生灾害也有着十分重要的意义。然而,大跨度多塔悬索桥这一全新结构形式,抗震设计尚无现成规范可循,属于特殊桥梁范围。

本书以泰州长江公路大桥为背景,介绍多塔悬索桥抗震设计理论,旨在促进特殊桥梁抗震设计水平的提高。

本书由同济大学李建中、彭天波,江苏泰州大桥有限公司吉林,上海市城市建设设计研究总院周良,武汉理工大学邓育林共同编写,李建中主编。

由于我们水平所限,编写时间比较紧迫,书中难免有不妥或疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者
2013 年 1 月于上海



目 录

1 引言	1
2 基于性能的多塔悬索桥抗震设防水平与性能要求	4
2.1 概述	4
2.2 抗震设防水平与性能目标	5
2.3 多塔悬索桥抗震设防水平与性能要求	11
3 多塔悬索桥动力模型与动力分析方法	13
3.1 概述	13
3.2 多塔悬索桥有限元模型的建立	13
3.3 抗震分析方法	24
3.4 多塔悬索桥动力分析实例	30
4 多塔悬索桥地震反应特点	39
4.1 概述	39
4.2 多塔悬索桥地震反应的总体特点	39
4.3 非一致地震输入下的多塔悬索桥地震反应特性	48
5 主桥和引桥相互耦联及碰撞效应	57
5.1 概述	57
5.2 计算模型	57
5.3 行波效应对大跨度多塔悬索桥主、引桥相对位移的影响	58
5.4 一致激励主桥与引桥间的碰撞效应研究	61
5.5 行波作用下碰撞效应研究	67
5.6 伸缩缝处引桥梁体搭接长度及防落梁措施设计的建议	71
6 三塔两跨悬索桥合理减震体系	76
6.1 塔梁间采用纵向弹性连接的合理参数	76
6.2 塔梁间同时采用黏滞阻尼器和弹性连接	84

6.3 中央扣对结构地震反应的影响	88
7 抗震性能验算	90
7.1 抗震性能要求	90
7.2 验算方法	90
7.3 算例	93
参考文献	104
索引	106



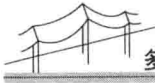
1 引 言

随着经济的快速发展,我国正进行世界最大规模的交通基础设施建设,一大批大型跨江、跨河和跨海大桥正在建设和规划中。而悬索桥以其优美的造型和宏伟的规模,常被人们冠以“桥梁皇后”的美誉,在大跨度桥梁设计中,特别是单跨为千米以上的桥梁设计中,有着绝对的竞争优势。我国自 20 世纪 90 年代以来,悬索桥的发展举世瞩目:1995 年,主跨 452m 的广东汕头海湾大桥竣工,被誉为中国第一座大跨度现代悬索桥,其主跨位居预应力混凝土加劲梁悬索桥世界第一;1996 年,主跨 900m 的西陵长江大桥竣工,是国内自主设计的第一座全焊接钢箱加劲梁悬索桥;1997 年,主跨 450m 的重庆丰都长江大桥竣工,是我国第一座大跨度钢桁梁悬索桥;1999 年,主跨 1 385m 的江苏江阴长江大桥竣工,采用钢箱加劲梁,建成时位列世界第四,目前位列世界第五;2005 年,主跨 1 490m 的江苏润扬长江大桥南汉大桥竣工,现位列世界第四;2010 年,舟山西堠门大桥,主跨 1 650m,建成后位列世界第二。目前,国内外已建及在建的主跨超千米悬索桥如表 1.1 所示。我国已建及在建的主跨超千米悬索桥共 8 座,是世界上主跨超千米悬索桥最多的国家。

国内外已建及在建的主跨超千米悬索桥

表 1.1

序号	桥 名	完工年份	国 家	跨径(m)	主塔数量
1	明石海峡大桥	1998	日本	1 991	两塔
2	舟山西堠门大桥	2010	中国	1 650	两塔
3	大海带桥	1998	丹麦	1 624	两塔
4	润扬长江公路大桥	2005	中国	1 490	两塔
5	亨伯尔桥	1981	英国	1 410	两塔
6	江阴长江公路大桥	1999	中国	1 385	两塔
7	香港青马大桥	1997	中国	1 377	两塔
8	维拉扎诺桥	1964	美国	1 298	两塔
9	旧金山金门大桥	1937	美国	1 280	两塔
10	武汉阳逻长江大桥	2007	中国	1 280	两塔
11	霍加库斯滕桥	1997	瑞典	1 210	两塔
12	麦金奈克桥	1958	美国	1 158	两塔
13	广州珠江黄埔大桥	2008	中国	1 108	两塔
14	南备赞濑户大桥	1988	日本	1 100	两塔



续上表

序号	桥名	完工年份	国家	跨径(m)	主塔数量
15	博斯普鲁斯二桥	1988	土耳其	1 090	两塔
16	贵州坝陵河大桥	2009	中国	1 088	两塔
17	博斯普鲁斯一桥	1973	土耳其	1 074	两塔
18	纽约华盛顿桥	1931	美国	1 066	两塔
19	来岛第三大桥	1999	日本	1 030	两塔
20	来岛第二大桥	1999	日本	1 020	两塔
21	塔古斯桥	1964	葡萄牙	1 013	两塔
22	福斯公路桥	1964	英国	1 006	两塔
23	泰州长江公路大桥	在建	中国	2 × 1 080	三塔

到目前为止,已建成的大跨度悬索桥都是传统两塔悬索桥,随着悬索桥主跨跨径的增大,主缆、主塔、锚碇的工程规模迅速增加,主缆拉力、锚碇的负载迅速增大,使传统两塔悬索桥设计变得十分困难,制约了传统两塔悬索桥向更大跨度发展。以前,在需要连续大跨布置时,多采用两座或3座悬索桥联袂布置的方式,中间共用锚碇,如美国的旧金山—奥克兰海湾大桥和日本南、北备赞濑户大桥均为两座不同跨径的两塔悬索桥相连^[1],如图1.1和图1.2所示。由于这种布置方法至少增加了一个锚碇及其基础,而在深水区或航行繁忙水域设置尺寸庞大的锚碇基础,或者在可能出现河床演变的水域设锚碇及锚碇基础,是这种桥式方案的一大缺陷。因此,为了克服传统两塔悬索桥的弱点,多塔悬索桥方案应运而生。

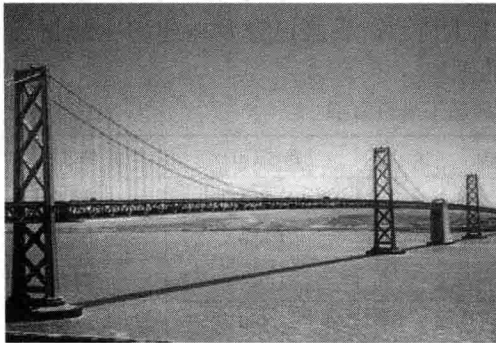


图 1.1 美国旧金山—奥克兰海湾大桥



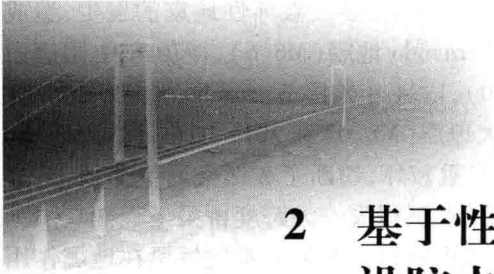
图 1.2 日本南、北备赞濑户大桥

从目前掌握的文献看,国外已建成多塔悬索桥的工程实例还只限于中大跨度悬索桥,如位于法国中部的 Chateauneuf 桥(49.15m + 3 × 59.50m + 49.15m)、Chatillon 桥(92m + 2 × 76m + 92m)、日本小鸣门桥(主跨 2 × 160m)以及莫桑比克的 Save 河桥(110m + 3 × 210m + 110m),而智利 Chacao 桥在经过多年研究后仍未开工建设。本书以泰州长江公路大桥为背景,介绍多塔悬索桥抗震设计理论。泰州长江公路大桥位于长江江苏境内泰州段,其结构形式为三塔两跨悬索桥(390m + 2 × 1 080m + 390m),为世界上首座大跨度多塔悬索桥,也必将成为现代多塔悬索桥的首创,为国内在新桥式工程实践上处于世界领先地位提供历史性契机。



地震历来是严重危害人类的一大自然灾害。近 30 年来,多次破坏性地震的发生,造成了非常惨重的生命财产损失。如 1971 年美国 San Fernando 地震(M6.6),1976 年中国唐山大地震(M7.8),1989 年美国 Loma Prieta 地震(M7.0),1994 年美国 Northridge 地震(M6.7),1995 年日本阪神大地震(M7.2),2008 年中国汶川大地震(M8.0)和 2011 年东日本大地震。这几次地震灾害的共同特点是:由于桥梁工程遭到严重破坏,切断了震区交通生命线,造成救灾工作的巨大困难,使次生灾害加重,导致了巨大的经济损失。大跨度桥梁工程在我国国民经济建设中,具有十分重要的地位和作用,保证作为生命线工程的大跨度桥梁在地震作用下的安全性,其经济效益和社会效益不言而喻,对保障人民生命财产的安全,保证震后救灾工作的顺利进行,减少次生灾害也有着十分重要的意义。

然而,我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)^[2]也仅仅是对大跨度桥的抗震设计给出了设计原则。美国 CALTRANS 规范^[3]和 AASHTO 规范^[4]也明确规定仅适用跨径小于 150m 的普通钢梁、混凝土梁和箱梁桥。日本《道路示方书·同解说 V 耐震设计篇》^[5]仅适用于跨径 200m 以下的桥梁。欧洲规范 EuroCode Part 8^[6]虽然对跨径没有限制,但明确规定不适用于悬索桥。由此可见,大跨度多塔悬索桥这一全新结构形式,抗震设计尚无现成规范可循,属于特殊桥梁范围。因此,本书以泰州长江公路大桥为背景,介绍多塔悬索桥抗震设计理论,旨在促进特殊桥梁抗震设计水平的提高。



2 基于性能的多塔悬索桥抗震设防水平与性能要求

2.1 概述

最近 10 余年,地球上频繁发生的地震对桥梁抗震设计理论产生了巨大的影响。历次大地震的震害教训使得各国政府越来越重视桥梁抗震问题,最近几年来,通过对桥梁震害的认识,国外桥梁抗震设计规范和设计方法不断改进,多级抗震设防、能力设计原则已被许多国家的桥梁抗震设计规范所采用。

在桥梁结构的寿命期内,破坏性地震一般不会经常发生。要所设计的桥梁结构能抵御这种极端的地震而不发生破坏,在技术上是是可以实现的,但这样做极不经济而且不必要。因此,抗震设计的思想经多年的演变逐步形成一种共识,经抗震设计的绝大多数桥梁结构在遇到破坏性地震时,容许其出现一定的破坏,但震后可修复。多年来的震害经验也表明,对大多数经过抗震设计的桥梁结构,其震害可以控制在一定范围内,并且能有效地减少生命和经济损失。

近些年来,现代化大城市地震震害的最显著特点是地震灾害经济损失异常之大,如 1989 年美国加利福尼亚州 Loma Prieta 地震、1994 年美国加利福尼亚州 Northridge 地震、1995 年日本兵库县南部地震、1999 年土耳其地震和中国台湾集集地震、2008 年中国汶川大地震和 2011 年东日本大地震。在这些地震中,由于桥梁工程遭受严重破坏,切断了震区交通生命线,造成救灾工作的巨大困难,是造成惨重经济损失的主要原因之一。各国学者对过去长期视为正确的抗震设计思想进行反思,认识到过去的抗震设计只以生命安全和防止结构破坏为目标是远远不够的。基于对上述问题的深刻反思,美国学者于 20 世纪 90 年代初提出了基于性能的抗震设计思想(Performance - based Seismic Design)^[7],并在政府的资助下启动了许多相关的研究项目,随后受到各国学者的广泛关注。目前,美国、日本、新西兰等国家都把基于性能的抗震设计理论作为改进抗震设计方法、完善抗震设计规范的重要研究课题^[8]。我国于 2004 年颁布了《建筑工程抗震性态设计通则》(CECS 160—2004)^[9],这是一本自愿采用的试用标准,主要适用于工业与民用建筑和部分构筑物基于性能的抗震设计。我国 2008 年出版的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)也引进了基于性能的抗震设计思想。基于性能的抗震设计理论,针对不同的结构特点和性能要求,综合考虑和应用设计参数、结构体系、构造措施和减震装置,来保障桥梁结构在各级地震水平作用下的抗震性能。

同传统的抗震设计相比,基于性能的抗震设计思想主要有以下特点:



(1) 结构抗震性能的可控制性。在基于性能的抗震设计中,在设计初始就明确结构的性能目标,结构的性能目标与结构的损伤状态直接联系起来,通过设计,使结构在地震作用下的反应能够达到预先确定的性能目标,因而,结构的抗震性能是可以预测和控制的。

(2) 性能目标的多级性。即在不同的地震设防水准下,结构应满足不同等级的性能要求;对重要的结构,其性能目标要高于一般结构。

(3) 性能目标的可选性。在基于性能的抗震设计中,根据结构的用途及业主、使用者等的特殊要求,由工程师同业主、使用者共同研究制订结构的合理性能目标。

2.2 抗震设防水平与性能目标

桥梁抗震设防水平是衡量结构抗震要求高低的尺度,主要由结构设计地震动参数及相应结构的性能目标所确定。桥梁工程抗震设防水平的确定主要包含两个方面的内容:根据桥梁结构的重要性程度选择桥址场地地震作用水平;确定结构相应的性能目标要求。目前,地震作用水平一般都用场地超越概率或地震重现期来描述(如 50 年 10% 超越概率水平地震动);而性能目标则主要是指在设防地震作用下要求结构达到的性能目标,性能目标主要与结构损伤状态有关,如要求结构不损伤,可发生局部可修复损伤,但不影响紧急救援车辆通行或可发生严重损伤但不倒塌等的性能要求。

2.2.1 建筑结构

在基于性能的抗震设计理论中,在设计初始就要求明确结构的性能水平。结构的性能水平与结构的损伤状态直接相关,需要解决结构的性能水平与结构的损伤状态的关系。

1995 年,加利福尼亚州结构工程师协会(SEAOC)正式出版了《基于性能结构抗震》指南(Vision2000)^[7]。在 Vision2000 中,明确提出了结构的性能水平与损伤状态,如表 2.1 所示。表 2.2 给出了相应于性能水平的地震设防水平的重现期;图 2.1 为 Vision2000 定义的结构性能水平与地震设防水平的关系。

结构性能水平与损伤状态

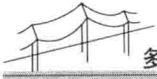
表 2.1

结构性能水平	结构损伤情况
等级 1,完全正常使用	结构基本不发生损伤,结构功能完整,震后不需修复,可立即使用
等级 2,正常使用	结构轻微损伤,震后可立即使用,稍加维修即可长期使用
等级 3,生命安全	结构中等损伤,震后需要进行大量维修后,可使用
等级 4,接近倒塌	结构严重损伤,震后无法修复,接近倒塌
等级 5,结构倒塌	倒塌

Vision2000 定义的地震设防水平的重现期

表 2.2

设防水平	重现期(年)	超越概率
水平 I	43	30 年 50%
水平 II	72	50 年 50%
水平 III	475	50 年 10%
水平 IV	970	50 年 5% 或 100 年 10%
水平 V	2 475	50 年 2%



在图 2.1 中,3 条斜线分别代表 3 个可供选择的抗震性能目标,自右至左分别为:基本性能目标、提高目标 1 和提高目标 2。对于一般建筑物,可选择基本性能目标;对于重要建筑物(如医院),一般选择提高目标 1;对于一旦损坏会产生严重后果的建筑物(如水电站、核电站等),一般应选择提高目标 2。越高的性能目标意味着越高的工程造价。

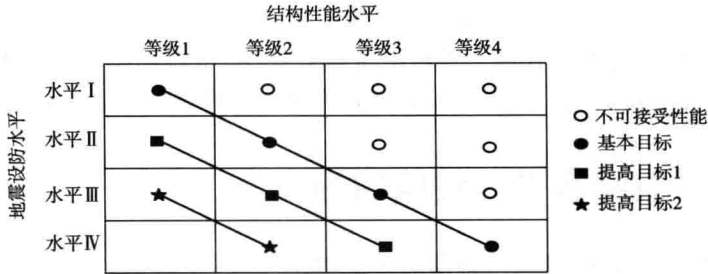


图 2.1 结构性能水平与地震设防水平的关系

Vision2000 虽然给出了建筑结构基于性能设计的基本思想和方法,但没有给出结构损伤与性能水平的定量描述。

2.2.2 常规桥梁

1989 年,美国 Loma Prieta 地震后,美国 Caltrans 开展了加利福尼亚州桥梁抗震设计准则和设计程序评估的研究项目。在该项目的研究报告(ATC-18)^[10]中提出了两个地震设防水平:一个是安全评估地震,为用概率方法衡量的具有 1 000 ~ 2 000 年重现期的地震;另一个是功能评估地震,相应的重现期为 72 ~ 250 年。根据 Caltrans 的定义,重要桥梁在功能评估地震作用下只允许发生极小的损伤,而在安全评估地震作用下允许发生可修复的破坏,通过二级地震设防水平进行直接设计,实现其性能目标。ATC-18 建议的两水平设计准则概括如表 2.3 所示。

ATC-18 建议的结构性能水平与地震设防水平

表 2.3

地震设防水平	性能水平	
	普通桥梁	重要桥梁
功能评估地震	服务水平—即时	服务水平—即时
	损伤水平—可修复的损伤	损伤水平—最小损伤
安全评估地震	服务水平—有限的	服务水平—即时
	损伤水平—重大损伤	损伤水平—可修复的损伤

服务水平—即时:正常的交通几乎在地震后立刻得以恢复。
 服务水平—有限的:地震后数天内可恢复部分交通(可能发生车道减少,紧急交通管制),全部交通功能应在震后数日内恢复。
 最小损伤:桥梁结构基本上只发生弹性变形。
 可修复性损伤:损伤可修复,但有一定的封闭交通的风险。
 重大损伤:极小的倒塌风险,但需要封闭交通以进行维修。
 重要桥梁:下列之一者称为重要桥梁:
 1. 对保证二次生命安全有重要意义的桥梁(如通向急救设施的桥梁);
 2. 修复将导致重要经济影响的桥梁;
 3. 列入当地紧急计划的桥梁



结合 ATC - 18 两水平设计准则,通过大量研究,美国 Caltrans 给出了桥梁结构损伤水平的定量描述,如表 2.4 所示。

桥梁结构损伤水平定量描述

表 2.4

损伤水平 \ 类别	应 变		延 性	
	混凝土	钢筋	曲率延性	位移延性
重大损伤	ε_{cu}	ε_{sh}	8 ~ 10	4 ~ 6
可修复性破坏	0.005 或 $2\varepsilon_{cu}/3$	0.08 或 $2\varepsilon_{sh}/3$	4 ~ 6	2 ~ 4
最小破坏	0.004	0.03 或 $1.5\varepsilon_y$	2 ~ 4	1 ~ 2

注: ε_{sh} 为钢筋极限拉应变; ε_{cu} 为混凝土极限压应变; ε_y 为钢筋屈服应变。

由以上可以看出,基于性能的抗震设计思想是一种基于投资和效益平衡的多级抗震设防思想,即要求在不同水准的地震作用下,所设计的结构满足各种预定的性能目标要求,而具体性能要求则根据结构的重要性、用途或业主要求确定。

我国 2008 年出版的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)也采用了基于性能的两水平地震设防,根据路线等级及桥梁的重要性和修复(抢险)的难易程度,将公路桥梁分为 A、B、C、D 4 个抗震设防类别。

A 类:主跨径超过 150m 的特大桥(不含引桥);

B 类:高速公路和一级公路上除 A 类以外的桥梁及二级公路上的大桥、特大桥等;

C 类:除 A、B、D 类以外的公路桥梁;

D 类:位于三、四级公路上的中桥、小桥。

公路桥梁采用二级抗震设防,即要求进行 E1 和 E2 两个水平地震作用下抗震设防和抗震设计。相应于 E1 和 E2 地震作用,公路桥梁的性能要求与损伤状态如表 2.5 所示。

E1 和 E2 地震作用下各类桥梁的性能要求与损伤状态

表 2.5

桥梁抗震设防类别	设 防 水 平	
	E1 地震作用	E2 地震作用
A 类	一般不受损坏或不需修复可继续使用	可发生局部轻微损伤,不需修复或经简单修复可继续使用
B 类	一般不受损坏或不需修复可继续使用	应保证不致倒塌或产生严重结构损伤,经临时加固后可供维持应急交通使用
C 类	一般不受损坏或不需修复可继续使用	应保证不致倒塌或产生严重结构损伤,经临时加固后可供维持应急交通使用
D 类	一般不受损坏或不需修复可继续使用	—

2.2.3 大跨度桥梁

大跨度桥梁一般投资巨大,其修建一般关系到整个地区的经济社会发展。当大跨度桥梁所在地区发生地震时,如果桥梁结构遭到严重破坏,不可避免地会切断震区的交通生命线,从而造成救灾工作的巨大困难,使次生灾害加重,从而产生更大的经济损失。在大跨度桥梁抗震设防和性能目标方面,各国一般都根据桥梁结构的具体特点确定地震设防水平和相应的性能目标。



范立础院士在 20 世纪 90 年代,结合南浦大桥、杨浦大桥等一批国家重大工程的建设,建立了两水平设防、两阶段设计的大跨度桥梁抗震设计方法;近年来,在总结了 50 多座大跨度桥梁抗震研究成果的基础上,范立础院士进一步提出了基于寿命期与性能的大跨度桥梁抗震设计方法,完善了大跨度桥梁抗震设计理论与方法。基于寿命期与性能的大跨度桥梁抗震设计方法,是基于工程寿命期内结构各构件的重要性、可修性、可换性和地震破坏后的修复(抢修)难易程度而对不同构件采取不同抗震设防水平和性能要求的抗震设计方法与技术。表 2.6 为我国几座典型大跨度悬索桥地震设防水平及性能目标。

典型大跨度悬索桥地震设防水平及性能目标

表 2.6

桥 梁	地震设防水平	结构性能目标
润扬长江公路大桥	E1:重现期 475 年 (50 年超越概率 10%)	结构处于弹性工作状态,基本无损伤、震后不需修复即可正常通车
	E2:重现期 2 450 年 (50 年超越概率 2%)	变形在容许范围
虎门大桥	E1:重现期 475 年 (50 年超越概率 10%)	结构处于弹性工作状态,基本无损伤、震后不需修复即可正常通车
	E2:重现期 2 450 年 (50 年超越概率 2%)	变形在容许范围
江阴长江公路大桥	E1:重现期 475 年 (50 年超越概率 10%)	结构处于弹性工作状态,基本无损伤、震后不需修复即可正常通车
	E2:重现期 1 675 年 (50 年超越概率 3%)	变形在容许范围
舟山西堠门大桥	E1:重现期 1 000 年 (100 年超越概率 10%)	结构处于弹性工作状态,基本无损伤、震后不需修复即可正常通车
	E2:重现期 2 450 年 (100 年超越概率 4%)	主塔、辅助墩、过渡墩、桥梁基础允许出现不需修复的轻微损伤
泰州长江公路大桥	E1:重现期 1 000 年 (100 年超越概率 10%)	结构处于弹性工作状态,基本无损伤、震后不需修复即可正常通车
	E2:重现期 2 450 年 (100 年超越概率 4%)	主塔、辅助墩、过渡墩、桥梁基础允许出现不需修复的轻微损伤

国外大跨度桥梁的抗震设计一般采用两水平设防。本节以三座典型的大跨度桥梁为例,探讨大跨度桥梁的合理性能目标。

1) 美国塔科马新桥的抗震性能目标

在美国塔科马新桥(New Tacoma Narrows Bridge)的抗震设计^[11]中,采用加利福尼亚州运输署抗震设计规范中(CALTRANS SDC)中定义的两个设防水平:功能性评价地震水平(functional evaluation earthquake)和安全性地震水平(safety evaluation earthquake)。根据这座跨径布置为 366m+854m+427m 的悬索桥的地质情况及统一的概率性危害性地震分析方法,可以得到两个地震设防水平相应的重现期分别为 100 年和 2 000 年。根据加利福尼亚州运输署建立的结构损伤破坏状态与桥梁结构构件破坏现象以及功能性评价标准之间的关系



(表 2.7),设计单位确定了该桥在两个地震设防水平下的性能目标,见表 2.8。

结构损伤破坏形式与桥梁结构构件破坏现象的关系

表 2.7

损伤状态	宏观破坏现象以及桥梁结构功能性评价标准
无损伤(no damage)	代表结构构件的能力满足 AASHTO 荷载规范中的名义能力需求
微小损伤 (minimal damage)	意味着震后混凝土发生微小的非弹性变形,只有微小裂缝
	基础的永久性位移也是允许的,只要基础应变不超过限制,这些都不影响桥梁的正常使用
可修复损伤 (repairable damage)	允许混凝土发生开裂,钢筋可以屈服,允许少量的混凝土剥落,钢结构允许局部屈服; 损伤的内容必须是受到限制的,这样才能确保结构在不需要替换钢筋或者结构构件的情况下恢复到震前的情况; 总体而言,修复和替换工作不得中断交通
严重损伤 (significant damage)	混凝土构件开裂并大面积剥落,钢筋屈服;需要中断交通来修复少量结构构件的变形;要满足通行必须替换部分结构构件。在基础和其他构件中出现了永久性位移

塔科马悬索桥的性能目标

表 2.8

抗震设防水准	结构构件	结构性能目标	具体准则
P1:100年重现期 100年超越概率63%	结构各构件	无损伤	钢筋混凝土最大应力均不小于名义屈服应力;塔顶不出现残余位移
P2:2000年重现期 100年超越概率5%	桥塔沉井	轻微损伤	混凝土应变不大于0.004,钢筋应变不大于0.015
	沉井以上的桥塔部分	可修复的损伤	约束混凝土应变达到极限应变的75%,纵向钢筋达到极限应变的55%,约束钢筋达到其极限应变的40%;同时,塔顶横桥向残余位移相对于沉井顶应小于610mm(2ft),相对于沉井底小于914mm(3ft);而塔顶纵桥向残余位移相对于沉井顶应小于305mm(1ft),相对于沉井底应小于610mm(2ft)
	锚碇块	无损伤	
	加劲桁架	无损伤	
	次要加劲桁架	可修复的损伤	
	支座	可修复的损伤	
	伸缩缝	严重损伤	
缆索体系等结构构件	无损伤		

2) 美国奥克兰海湾新桥的抗震性能目标

由于在 1989 年 Loma Prieta 地震中 Okland 海湾桥发生了部分垮塌事故,美国决定修建一座预期寿命为 150 年的 San Francisco-Oakland Bay Bridge (SFOBB) East span 作为 Okland 海湾桥的替代品。这座桥梁的主航道部分是主跨 385m 的自锚式悬索桥。由于地处加利福尼亚州 Oakland 地区,周围有 Hayward 断层和 San Andreas 断层,因而抗震工作受到了美国加利福尼亚州公路运输署的重视。在该署的带领下,一个由地质工程师、地震学家、岩土工程师、结构工程师所组成的地震安全评价小组,对这一地区的地震地质情况进行了地震危险性



分析,提出了两个设防水平[即功能性的评价地震水平(FEE)和安全性地震水平(SEE)]下的地震动重现期应分别取为92年和2000年^[12]。在这两个地震设防水平下,结构相应的性能目标详见表2.9。

SFOBB 桥的抗震性能目标

表 2.9

概率水平	功能性评价	总体性能目标	各构件性能目标
P1: 92年重现期 (100年超越概率65%)	震后不经修复保持完全通行能力	整体只发生轻微损伤	大部分结构构件保持弹性性能;少部分构件允许进入塑性;伸缩缝允许破坏;混凝土允许发生微小裂缝;没有显著的残余位移
P2: 2000年重现期 (100年超越概率5%)	震后不经修复保持完全通行能力	整体发生可修复损伤	上部结构和塔身允许发生轻微损伤;辅助墩柱和塔身的剪力连接键允许发生可修复损伤(墩柱钢筋屈服,最外层混凝土剥落);承台桩基允许发生轻微损伤;允许发生不影响桥梁正常通行的残余位移;伸缩缝的破坏可以通过搭接钢板完成交通通行
		结构体系设计成整体有限延性,同时要确保SEE下稳定的地震反应	对桥塔等有限延性构件有进一步要求:在侧向荷载作用下,构件应该有明确的塑性耗能机制;塑性只能发生在墩、主塔连接构件;对于设计成完全延性构件的构造细节和比例要符合ATC-32的要求

3) 希腊里奥—安托里恩大桥的抗震性能目标

希腊著名的里奥—安托里恩大桥(Rion - Antirion Bridge)^[13]是世界著名的大跨度斜拉桥,桥梁的减震设计既别出心裁,又因地制宜,成为桥梁减震设计的典范。这座全长2252m的多塔斜拉桥,跨径布置为286m + 560m + 560m + 560m + 286m,连接伯罗奔尼撒半岛(Peloponnese)和希腊本土。由于此半岛与希腊本土之间的断层活动,这座桥梁的基础必须要能提供水平和竖向2m左右的位移,因而这座桥梁的基础采用分离式的桩和承台设计,其实质上是扩大式原盘基础坐落在内填钢管桩的改良地基上。值得注意的是,这座桥梁在施加了各种减震措施后,桥梁各构件仍具有明确的抗震性能目标,如表2.10所示。

Rion - Antirion Bridge 的抗震性能目标

表 2.10

概率水平	功能性评价	总体性能目标	各重要构件性能目标
P1: 350年重现期(100年超越概率25%)	震后不经修复保持完全通行能力	整体只发生轻微损伤	采用飘浮体系,主梁与主塔纵向相对位移小于2.5m
P2: 2000年重现期(100年超越概率5%)	震后不经修复保持完全通行能力	结构损伤只允许发生在预先安排的塑性耗能构件,且只能发生可维修的损伤	主塔塔身允许出现塑性区域;主梁与主塔纵向相对位移应小于5m;基础沿各方向与填土之间允许发生2m的相对位移;主塔和主梁在横桥向采用金属联系杆和阻尼器相连,金属联系杆(10000kN承载力)允许断裂,液压非弹性阻尼器(3500kN承载力)允许发生3.5m的塔梁位移



比较国内外大跨度桥梁的抗震设计可以看出,目前针对国内外大跨度桥梁的抗震性能目标已达成以下共识:

(1)大跨度桥梁的设计寿命期一般为 100 ~ 150 年,要确保大桥在设计寿命期内完成正常的使用功能要求,首先必须要有明确的功能性要求,大跨度桥梁由于其重要性,在第二水平地震动作用下,桥梁必须具有震后不经修复也能保证完全的通行能力。

(2)对于第一个地震设防水平,尽管我国的第一地震设防水平的超越概率(100 年 10%)明显低于国外(最低 100 年 25%),但两者的要求基本是接近的,即结构整体最多允许进入轻微损伤状态。而对于结构抗震的主要功能性构件——主塔必须保持弹性工作状态。

(3)对于第二个地震设防水平,目前首先是将大跨度桥梁分成两种体系:一是常规的没有减震措施的大跨度桥梁体系,二是有特殊减震措施的大跨度桥梁体系。对于常规大跨度桥梁,应保证主塔的损伤状态在可修复损伤的状态下,主塔无论是钢筋混凝土结构还是钢结构,都应对构成结构的材料提出明确的应变要求,同时还应当保证主梁与墩柱的相对位移。而对于有特殊减震措施的体系,要对这些特殊的减震措施的性能目标进行理论分析和试验研究,而后对这种减震装置的允许变形能力和可换性提出明确的性能要求。

综上所述,大跨度桥梁的损伤目标是满足桥梁整体的通行能力而制定的,以构件性能目标为落脚点的,综合考虑局部构件和特殊连接装置的变形能力及其可换性的综合评定体系。

2.3 多塔悬索桥抗震设防水平与性能要求

多塔悬索桥工程由引桥、主桥组成,桥梁结构由上部结构(梁体、桥面)、墩台、桥塔、基础以及连接上下部结构的连接构件(如支座)等组成。组成桥梁的各部分构件的性能、重要性各不相同。桥梁基础是非常重要的部件,一旦在地震作用下发生损伤和损坏,不但很难检查和修复,更谈不上替换;但引桥、边墩、辅助墩在地震作用下,只要控制其损伤程度,震后是可以修复的,桥梁的支座和一些连接装置在震后可以替换。根据组成多塔悬索桥各部分重要性、可修性和可换性分析,多塔悬索桥各构件的分类见表 2.11。

多塔悬索桥结构构件类型划分

表 2.11

重要构件	可修构件	可换构件
主塔、锚碇、基础、主梁、主缆	桥墩	伸缩缝

在对多塔悬索桥的重要性、可修性、可换性和可检性进行分析,对结构地震易损性和地震破坏风险研究,针对结构寿命期各部分的重要性、可修性、可换性、可检性以及地震破坏后桥梁结构的修复(抢修)的难易程度研究的基础上,首次系统地提出基于寿命期与性能的大跨度桥梁抗震设计理论,明确提出了四水平地震作用和相应的三级性能目标。

四水平地震作用分别为:

- (1)主桥地震水平 I:地震重现期为 950 年。
- (2)主桥地震水平 II:地震重现期为 2 450 年。
- (3)引桥地震水平 I:地震重现期为 475 年。
- (4)引桥地震水平 II:地震重现期为 1 650 年。

三级性能目标分别为: