



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书（一期）

Design Guidelines for Super Long-span
Bridges under Multiple Hazards

多灾害作用下特大跨径桥梁 结构设计指南

张喜刚 陈艾荣 刘高 马军海 田雨 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书（一期）

Design Guidelines for Super Long-span
Bridges under Multiple Hazards

多灾害作用下特大跨径桥梁 结构设计指南

张喜刚 陈艾荣 刘高 马军海 田雨 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

图书在版编目(CIP)数据

多灾害作用下特大跨径桥梁结构设计指南 / 张喜刚
等编著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.9

ISBN 978-7-114-14903-0

I. ①多… II. ①张… III. ①长跨桥—桥梁结构—结构设计—指南 IV. ①U448.432-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 161207 号

“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书(一期)

书 名: 多灾害作用下特大跨径桥梁结构设计指南

著 者: 张喜刚 陈艾荣 刘 高 马军海 田 雨

责任编辑: 周 宇 丁 遥 周佳楠

责任校对: 刘 芹

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京雅昌艺术印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13.75

字 数: 352 千

版 次: 2018 年 10 月 第 1 版

印 次: 2018 年 10 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14903-0

定 价: 95.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

内 容 提 要

本指南在近年来我国大跨径桥梁防灾减灾设计经验、工程建设实践的基础上,系统总结和深入提炼交通运输重大科技专项项目“多灾害作用下特大跨径桥梁适宜结构体系、关键结构与原型设计研究”的相关成果,将基于性能、风险和全寿命设计的核心思想和理念引入多灾害作用下特大跨径桥梁设计过程,形成了多灾害作用下特大跨径桥梁结构设计指南。本指南是我国在多灾害作用下特大跨径桥梁设计方法方面的最新研究成果,填补了国内外在该方面的空白。本指南具备很好的可操作性,将对今后我国复杂条件下的特大跨径桥梁建设起到重要的指导作用。

本指南包括总则,术语与符号,设计原则、方法与过程,材料,作用,桥梁总体设计,主要结构设计,结构计算分析,多灾害作用下结构性能评价与设计对策以及指南用词说明共 10 章内容。

本指南主要供桥梁设计人员使用,亦可供桥梁科研及桥梁专业师生参考使用。

Abstract

Based on the design experience and construction practice of disaster prevention of long-span bridges in recent years of China, this book summarizes and refines in-depth the relevant results of transportation special major science and technology project “Research on Suitable Structural System, Key Structure and Prototype Design about Super Long-span Bridge under Multiple Hazards”, introduces the core idea and concept based on the performance, risk and whole life design into the design process of super long-span bridges, and forms a design guidelines for super long-span bridges under multiple hazards. This book introduces our original achievements in the design method of super long-span bridges under multiple hazards, which has filled the gap both at home and abroad. This book has maneuverability, which will play an important role in guiding the construction of super long-span bridges under complex conditions in China.

This book includes 10 chapters, which are general provisions, terms and symbols, design principle, method and process of design, materials, actions, overall design of the bridge, design of main structures, structural calculation and analysis, evaluation and design of structure performance under multiple hazards and wording explanation. This book is mainly used by bridge designers, and also can be used for reference by teachers and students engaging in bridge research.

交通运输科技丛书编审委员会

(委员排名不分先后)

顾 问：陈 健 周 伟 成 平 姜明宝

主 任：庞 松

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委 员：石宝林 张劲泉 赵之忠 关昌余 张华庆

郑健龙 沙爱民 唐伯明 孙玉清 费维军

王 炜 孙立军 蒋树屏 韩 敏 张喜刚

吴 澎 刘怀汉 汪双杰 廖朝华 金 凌

李爱民 曹 迪 田俊峰 苏叔科 严云福

序

科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求。这是党中央综合分析国内外大势、立足我国发展全局提出的重大战略目标和战略部署,为加快推进我国科技创新指明了战略方向。

科技创新为我国交通运输事业发展提供了不竭的动力。交通运输部党组坚决贯彻落实中央战略部署,将科技创新摆在交通运输现代化建设全局的突出位置,坚持面向需求、面向世界、面向未来,把智慧交通建设作为主战场,深入实施创新驱动发展战略,以科技创新引领交通运输的全面创新。通过全行业广大科研工作者长期不懈的努力,交通运输科技创新取得了重大进展与突出成效,在黄金水道能力提升、跨海集群工程建设、沥青路面新材料、智能化水面溢油处置、饱和潜水成套技术等方面取得了一系列具有国际领先水平的重大成果,培养了一批高素质的科技创新人才,支撑了行业持续快速发展。同时,通过科技示范工程、科技成果推广计划、专项行动计划、科技成果推广目录等,推广应用了千余项科研成果,有力促进了科研向现实生产力转化。组织出版“交通运输建设科技丛书”,是推进科技成果公开、加强科技成果推广应用的一项重要举措。“十二五”期间,该丛书共出版72册,全部列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,其中12册获得国家出版基金支

持,6册获中华优秀出版物奖图书提名奖,行业影响力和社会知名度不断扩大,逐渐成为交通运输高端学术交流和科技成果公开的重要平台。

“十三五”时期,交通运输改革发展任务更加艰巨繁重,政策制定、基础设施建设、运输管理等领域更加迫切需要科技创新提供有力支撑。为适应形势变化的需要,在以往工作的基础上,我们将组织出版“交通运输科技丛书”,其覆盖内容由建设技术扩展到交通运输科学技术各领域,汇集交通运输行业高水平的学术专著,及时集中展示交通运输重大科技成果,将对提升交通运输决策管理水平、促进高层次学术交流、技术传播和专业人才培养发挥积极作用。

当前,全党全国各族人民正在为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦而团结奋斗。交通运输肩负着经济社会发展先行官的政治使命和重大任务,并力争在第二个百年目标实现之前建成世界交通强国,我们迫切需要以科技创新推动转型升级。创新的事业呼唤创新的人才。希望广大科技工作者牢牢抓住科技创新的重要历史机遇,紧密结合交通运输发展的中心任务,锐意进取、锐意创新,以科技创新的丰硕成果为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通贡献新的更大的力量!

杨治堯

2016年6月24日

前 言

跨越江河海峡或崇山峻岭的特大跨径桥梁面临的灾害种类多、频率高、强度大,且由于其重要性突出、维修加固难度大、缺乏替代线路等多种原因,一旦结构损伤或破坏往往会造成严重后果。因此,只满足结构基本功能、从单一灾害层面上寻求结构安全的传统设计方法难以有效支撑多灾害环境下特大跨径桥梁的合理设计。

针对特大跨径桥梁面临的多灾害作用,面向未来我国特大跨径桥梁建设需求,本指南在近年来我国大跨径桥梁防灾减灾设计经验、工程建设和运营养护实践的基础上,系统总结和深入提炼交通运输重大科技专项项目“多灾害作用下特大跨径桥梁适宜结构体系、关键结构与原型设计研究”的研究成果,将基于性能设计、风险评估、全寿命设计的核心思想和理念引入多灾害作用下特大跨径桥梁设计过程,填补了多灾害作用下特大跨径桥梁设计的空白。本指南具备很好的可操作性,将对未来特大跨径桥梁建设起到重要的指导作用。

本指南包括总则,术语与符号,设计原则、方法与过程,材料,设计作用,桥梁总体设计,主要结构设计,结构计算分析,多灾害作用下结构性能评价与设计对策以及本指南用词说明共 10 章内容。在条文组织方面,本指南全面采用性能设计的基本格式要求组织指南条文,条文编写以明确设计要求和设计过程为主,对具体参数尽量不进行强制性的规定。在编写体例方面,本指南采用了指南正文和条文说明相结合的方式,以方便工程师阅读和理解。本指南除给出多灾害作用下特大跨径桥梁设计的条文和条文说明外,还以本指南为指导,开展了地震、强风、巨浪、船撞、火灾、爆炸等单一灾害及其可能的灾害组合作用下琼州海峡跨海大桥方案的性能分析、评价与优化设计,为多灾害作用下特大跨径桥梁建设提供了重要参考,体现了本设计指南良好的应用效果和推广前景。

在本指南编写过程中,吴宏波、马如进、吴文明、刘天成、陈上有、过超、付佰勇、

王昆鹏、徐源庆、唐亮、高原、李冲等也参加了部分内容的编写工作,在此一并致谢!

多灾害作用下特大跨径桥梁设计理论和方法的研究是一项长期工作,设计指南也需相应不断研究完善。限于研究时间和精力,有偏颇或不足之处,请不吝指正!

A handwritten signature in black ink, appearing to be '王昆鹏' (Wang Kunpeng), written in a cursive style.

2018年7月

目 录

1	总则	1
2	术语与符号	4
2.1	术语	4
2.2	符号	5
3	设计原则、方法与过程	7
3.1	一般原则	7
3.2	总体设计过程	9
3.3	灾害分析	15
3.4	性能设计	18
3.5	风险评价	28
3.6	对策与措施设计	31
3.7	成本分析	33
4	材料	36
4.1	一般原则	36
4.2	混凝土、钢筋及预应力筋	36
4.3	缆索材料	36
4.4	结构用钢材	40
4.5	焊接材料	42
4.6	锚头铸体材料	43
5	作用	44
5.1	一般原则	44
5.2	作用分类	45
5.3	永久作用	48
5.4	可变作用	48

5.5	施工作用	51
5.6	灾害作用	51
5.7	作用组合	55
6	桥梁总体设计	60
6.1	一般规定	60
6.2	总体布置	61
6.3	结构及构件寿命给定	64
6.4	结构体系	65
6.5	主梁设计	80
6.6	索塔设计	81
6.7	缆索系统设计	82
6.8	锚碇和桥墩设计	85
6.9	基础设计	86
7	主要结构设计	89
7.1	主梁结构设计	89
7.2	索塔结构设计	95
7.3	缆索结构设计	106
7.4	锚碇结构设计	109
7.5	大型基础设计	115
7.6	约束体系附加装置设计	119
7.7	巡检系统及附属设施设计	123
8	结构计算分析	125
8.1	一般规定	125
8.2	总体静力计算	125
8.3	主梁结构计算	128
8.4	索塔结构计算	129
8.5	缆索结构计算	130
8.6	锚碇结构计算	132
8.7	基础结构计算	139
8.8	动力特性计算	146
9	多灾害作用下结构性能评价与设计对策	148
9.1	一般原则	148
9.2	地震作用下结构性能评价与设计对策	150

9.3	强风作用下结构性能评价与设计对策	156
9.4	船撞作用下结构性能评价与设计对策	161
9.5	火灾作用下结构性能评价与设计对策	167
9.6	爆炸作用下结构性能评价与设计对策	174
9.7	风-浪-流耦合作用下结构性能评价与设计对策	179
9.8	风-雨组合作用下缆索结构性能评价与设计对策	184
10	指南用词说明	191
	参考文献	192

1 总 则

1.0.1 为规范和指导多灾害作用下特大跨径桥梁的设计,使特大跨径桥梁在多灾害作用下的性能得到满足并实现综合性能最优,特编写本指南。

条文说明

特大跨径桥梁是重要的基础设施,其设计理论和方法与常规桥梁有显著不同。首先,特大跨径桥梁结构性能的特殊性使得一般规范和设计指南难以覆盖,目前世界各国的设计规范均未覆盖特大跨径桥梁;其次,目前规范中采用的设计理论和方法,难以描述特大跨径桥梁设计过程中的多灾害作用,现有的设计参数和指标难以满足其设计的要求。因此,研究桥梁设计理论的前沿发展情况,探索新的设计理论并用于多灾害作用下特大跨径桥梁的设计,是建立和完善特大跨径桥梁设计方法与标准体系的重要基础性工作。根据交通运输重大科技专项项目“多灾害作用下特大跨径桥梁适宜结构体系、关键结构与原型设计研究”(以下简称“项目”)中多灾害作用下特大跨径桥梁性能设计方法、适宜结构体系、关键结构等方面的相关研究成果,编写本指南。

1.0.2 特大跨径桥梁的设计过程应全面考虑包含灾害组合场景在内的所有可能的灾害场景的综合需求。

条文说明

对桥梁设计来说,“多灾害”有两层含义:一是多种单一灾害,比如在设计中统筹考虑地震、强风、船撞等多种单一灾害作用;二是多种灾害的组合,比如考虑强风和巨浪这两种灾害伴随发生而形成的一种灾害组合场景。因此,多灾害作用下的桥梁设计应依据桥址环境综合考虑所有可能的灾害场景,每种灾害场景既可以由单一灾害构成也可以由灾害组合构成。多灾害作用下特大跨径桥梁的设计,应合理考虑灾害组合场景的设计需求,在不过分增加成本的基础上得到性能满意的设计方案,还需进一步平衡不同灾害场景的设计需求和减灾对策,取得所有灾害场景下综合性能最优的设计方案。

1.0.3 对特大跨径桥梁,应针对多灾害作用,采用基于性能、风险、全寿命的设计理念进行结构设计。

条文说明

基于性能的设计通过将业主、使用者和社会的需求转化为技术体系的个性化性能要求,建立并优化结构方案以实现这些要求,并最终通过分析、计算和评价,验证桥梁确实能够实现这些要求。基于风险的设计是通过引入风险指标并基于风险准则进行决策和优化的设计方法,能够考虑灾害的风险本质,并从对结构造成影响的角度提供多种灾害场景相互比较的合理途径。全寿命设计将设计决策的时间域拓展到结构的整个寿命期,并基于寿命期总成本比选最优设计方案。针对多灾害作用下特大跨径桥梁设计的特点和应考虑的关键问题,本指南综合基于性能设计方法、风险评估和全寿命设计方法的核心思想和理念,形成一套完整的适用于多灾害作用下特大跨径桥梁设计的方法与过程。

1.0.4 本指南可供考虑多灾害作用的千米级双塔或多塔斜拉桥、3 000m 级悬索桥和斜拉-悬索协作桥等特大跨径桥梁设计参考使用。

条文说明

桥梁往往通过缆索承重的形式来实现特大跨径的需求。目前,世界上已建成的最大跨径斜拉桥为俄罗斯岛跨海大桥,其主跨跨径为 1 104m;规划建设的意大利墨西拿海峡大桥为主跨 3 300m 的悬索桥。综合考虑各方面的技术成熟性和项目研究的前沿性,确定本指南适用范围为千米级双塔或多塔斜拉桥、3 000m 级悬索桥和斜拉-悬索协作桥。

1.0.5 特大跨径桥梁的设计使用年限不得低于 100 年,考虑其重要性显著高于常规桥梁,建议其设计使用寿命为 120 ~ 150 年。

条文说明

《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)规定,重要中桥、大桥、特大桥的设计使用年限为 100 年。但本指南适用的特大跨径桥梁具有更大的跨径,建设成本及对经济、社会的影响都进一步提高,因此可考虑进一步提高其设计使用寿命,结合目前技术条件下的工程实践经验,建议其设计使用寿命为 120 ~ 150 年。

1.0.6 特大跨径桥梁设计应积极稳妥地推广和应用经过验证的新技术、新材料和新工艺。

1.0.7 特大跨径桥梁的设计建造应更加注重造型景观和生态环保的要求。

1.0.8 本指南为推荐性和指导性指南,指南中有关条文和规定的使用应以满足现行国家、行业和地方相关法律、法规、标准、规范和规程为前提。

条文说明

本指南的编写借鉴了现有规范的成熟成果,在此基础上融入了性能、风险和全寿命的设计理念,提出了较为前沿的设计方法。但基于目前的技术状况,设计的实现过程还需要参考、借用一部分现有规范的成果,指南的应用也必须以满足现有的法律、法规、标准、规范和规程为前提。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 桥梁灾害

桥梁寿命期内发生的超出桥梁结构及相关设施承受能力并造成损失的事件,包括但不限于地震、强风、巨浪、风暴潮、海啸、洪水、暴雨、冲刷、环境侵蚀等自然灾害,以及船撞、火灾、爆炸等人为或事故灾害。

2.1.2 桥梁多灾害

包含灾害组合场景的所有可能的灾害场景的集合。

2.1.3 性能

结构、构件或体系在一定作用下结构呈现出的行为或状态。

2.1.4 性能指标

描述结构性能的可量化的参数。

2.1.5 性能水平

结构性能的离散化分级。

2.1.6 性能目标

每个设计作用水平下结构或构件所要求达到或满足的性能水平。

2.1.7 性能标准

给定的荷载等级及其对应的结构性能要求的统一体。

2.1.8 基于性能的设计

针对设计荷载和作用,开展性能指标确定、性能标准决策、性能水平验证等工作,在充分考虑个体结构特殊需求的基础上,基于目前的技术状况,以满足性能标准为目标的设计过程,其核心是通过性能标准实现对单体结构特殊设计要求的优化满足。

2.1.9 桥梁风险事态

与桥梁结构相关、在桥梁寿命期各个过程中出现、对相关利益团体的某种既定目标造成影响的不确定事态。

2.1.10 桥梁风险

潜在的桥梁风险事态转化为现实损失的概率及其后果的综合度量。

2.1.11 风险概率

风险损失现实发生可能性的数学描述。

2.1.12 风险损失

桥梁在风险事态中所受的结构损伤、人员伤亡、服务水平下降等直接影响以及交通受阻、声誉受损、环境破坏等间接影响,而形成的各种价值的缺损或灭失。

2.1.13 基于风险的桥梁设计

系统引入风险思想,合理考虑桥梁寿命期中的不确定因素及其影响,基于风险指标进行性能评价和设计优化的桥梁设计过程。

2.1.14 桥梁寿命期

桥梁从规划、设计、施工、管养直至拆除的整个过程。

2.1.15 桥梁设计使用寿命

设计人员根据桥梁设计需求综合确定的桥梁目标使用年限。

2.1.16 桥梁实际使用寿命

桥梁建成后,在预定的使用与维护条件下,所有性能均能满足原定要求的实际年限。

2.1.17 寿命期成本

在桥梁整个寿命期内所发生的一切与桥梁的规划、设计、建设、维护、管理、拆除、风险等相关的财务成本、物质损失、人员伤亡、环境影响的总和。

2.1.18 桥梁全寿命设计

从桥梁结构规划、设计、建设、运营、管理和养护以及拆除的各个环节来寻求恰当方法和措施以满足桥梁结构寿命期的总体性能(使用性能、经济性、人文、生态等)最优的设计过程。

2.2 符号

C : 阻尼系数;

C_1 : 冲击波的传递速度;

C_2 : 热空气的传播速度;

DWT: 船舶吨位;

$[f_a]$: 地基承载力容许值;

f_d : 主缆钢丝的抗拉强度设计值;

IM_k : 第 k 个灾害场景灾害强度的年最大值;

PGA: 地震动峰值加速度;

P_0 : 峰值压力;

\dot{Q} : 火灾热释放速率;