

桥梁船撞 研究与工程应用



RESEARCH AND APPLICATION
OF BRIDGE SHIP IMPACT

王君杰 王福敏 赵君黎 金允龙 主编



人民交通出版社
China Communications Press

桥梁船撞研究与工程应用

Research and Engineering Application of Bridges
against Vessel Impact

王君杰 王福敏 赵君黎 金允龙 主编



人民交通出版社

内 容 提 要

本书为全国桥梁船撞学术研讨会论文集,共编录论文61篇,包括桥梁船撞理念、理论方法、数值模拟与试验、开发应用与监测预警5篇内容。本书既反映了近年来我国科技人员就桥梁船撞技术在工程应用中提出的一些热点和难点问题,对此开展相应科学研究和技术攻关所取得的新成果,又吸纳了一大批桥梁船撞技术工程应用实例及其成功经验,内容丰富,实用性强。

本书可供公路、铁路、水利、航运、船舶等部门从事设计、科研、施工、监理的管理和技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁船撞研究与工程应用/王君杰等主编. —北京:
人民交通出版社,2011.5

ISBN 978-7-114-09067-7

I. ①桥… II. ①王… III. ①桥—船舶碰撞—研究
IV. ①U447

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第073352号

书 名:桥梁船撞研究与工程应用

著 者:王君杰 王福敏 赵君黎 金允龙

责任编辑:吴有铭 李 农 夏 迎 栗光华 丁 遥

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)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店、交通书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:36.5

字 数:870千

版 次:2011年5月 第1版

印 次:2011年5月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09067-7

定 价:148.00元

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

《桥梁船撞研究与工程应用》

编审委员会

主任委员:赵之忠

副主任委员:章勇武

委员:(以姓氏笔画为序)

王克海 刘孝辉 刘明俊 孙利民

庄卫林 安永日 张长青 李 军

李卫民 杨渡军 汪 宏 邵长宇

陈艾荣 尚军年 罗 强 钟 宁

唐光武 徐国平 耿 波 顾永宁

黄福伟 韩道均

主 编:王君杰 王福敏 赵君黎 金允龙

序 言

当前,跨江河桥梁的大量修建和通航船舶的规模化,加上桥区环境的改变,导致船桥碰撞事故时有发生。近年来发生的广东九江大桥、宁波金塘大桥等船撞事故,引起了社会各界的高度重视。船撞桥事故不但威胁船舶的通行安全,还严重影响桥梁的运营安全,造成了巨大的生命和财产损失。交通运输部西部交通建设科技项目管理中心分别于2006年和2007年先后对两项桥梁船撞科技项目进行了立项,以此为背景,特于2011年5月在重庆市组织召开全国桥梁船撞学术研讨会。

本次研讨会共收到论文74篇,经编审委员会的审阅,共有61篇论文被选入本论文集。通过对每一篇论文进行细细品读,我们获得了不少新的技术信息和有益的启迪。本次入选论文的特点是:在总结国内外近几十年的桥梁船撞研究的基础上,指出了今后桥梁船撞研究的新理念及发展方向,详细介绍了桥梁船撞设计的理论及方法,并以实际工程为背景,对桥梁的防撞设计与预警监控进行了较为深入的研究和论述。设计理念方面,基于性能的工程结构设计正逐渐被各国的工程界所接受,近20年来,结构抗震工程领域逐渐形成了基于性能的设计理论,桥梁的船撞性能设计尚处于起步阶段。设计方法方面,过去我国对桥梁船撞设计主要采用的拟静力设计方法,但由于桥梁船撞问题是继桥梁抗风抗震之后又一个重要的动力学问题,因此发展桥梁的船撞动力学设计方法将是今后的一个主流趋势和研究热点。风险管理方面,桥梁的船撞风险评估和应对措施一直是桥梁设计和管理部门比较关心和重视的一个问题。本书在上述方面都进行了大量的探索和研究工作,并汇集了丰富的工程应用实例以及新的防撞和预警措施,这些都极大地推动了我国桥梁船撞研究的发展。今后,希望能定期开展学术研讨会,从而达到提高桥梁船撞技术水平的目的。

在此,感谢每一位论文作者和论文编审的辛勤劳动,大家所提供的所有选题到位、内容丰富、简明实用的论文是本次学术研讨会成功的基础!

祝愿本次全国桥梁船撞学术研讨会圆满成功!

重庆市交通委员会副主任



2011年4月

目 录

船撞理念篇

桥梁船撞性态设计理论框架	王君杰 范立础 付 涛 王福敏 赵君黎(3)
三峡库区跨江桥梁的船撞风险	王福敏 耿 波(37)
风险事件下桥梁设计的一般方法与过程	陈艾荣(51)
《公路桥梁抗撞防撞设计指南》编制简介	赵君黎 李 雪 邢薇薇(58)
桥梁防撞设施及其最新发展	陈国虞(64)

理论方法篇

船桥碰撞的数值分析方法	顾永宁(75)
桥梁船撞风险评估理论体系及软件系统	耿 波 韩道均(83)
基于三级设防思想的船撞设计方法研究	韩道均 邵俊虎 耿 波(100)
基于性能的公路桥梁结构抗船撞设计理论框架	赵君黎 李文杰 冯 莛(109)
千厮门嘉陵江大桥船撞设防标准研究	尚军年 耿 波(115)
考虑荷载历时的船撞桥倒塌概率研究	郑 丹 陈明栋(126)
浅谈内河通航桥梁桥墩防撞设计	魏东海 施卫东 张兆民(132)
特大桥桥墩防撞加固设计探讨	郭文华 杨建亚(140)
非通航孔桥墩设防船舶撞击力计算	江火养 徐宏光 席 进 王君杰(146)
船舶撞桥概率的估算方法	王君杰 王 伟(151)
偏航船舶撞击桥墩概率估计的修正 Kunz 模型	王君杰 王 伟(167)
基于数值模拟的船侧撞击桥墩碰撞力估算公式研究	唐 勇 金允龙(175)
桥区船舶交通观测及统计分析	屠海洋(184)
长大型桥梁船撞安全风险概率评估方法	冯清海(191)
概率相关等效静力船撞荷载	卜令涛 王君杰 金允龙 唐 勇(196)
动力荷载解析概率模型	卜令涛 王君杰 张 龙(208)
基于统计分析的撞击力—时间和撞击力—撞深概率模型	王君杰 卜令涛 金允龙 唐 勇(217)
驳船对桥梁冲击的简化静力荷载	曹聪慧 王君杰 耿 波(230)

驳船对桥梁冲击的简化动力荷载	王君杰	曹聪慧	张 龙(238)
“桥梁防撞设计规定”的研究			陈国虞(253)
桥梁结构防船撞分析的探讨	高 军	许 健	杨允表(260)

数值模拟与试验篇

钢箱计算失效应变的冲击试验研究	李 军	王君杰	孟德巍(271)
桥梁防撞设施物理模型试验研究	高家镛	张甫杰	马雪泉(279)
静态轴向荷载作用下泡沫金属铝填充圆钢管平均压溃力及吸能	张君健	王君杰	屈亚军(289)
船舶上部结构撞击力研究	姜金辉	夏 雪	金允龙(298)
驳船有限元模型简化程度对计算精度的影响	张 龙	曹聪慧	王君杰(304)
粉房湾长江大桥船撞数值模拟分析			汪 宏(315)
千厮门大桥数值模拟分析	应 立	汪 宏	耿 波(321)
影响桥梁船撞力的主要因素的数值模拟研究			颜海泉(327)
船桥撞击力非线性数值模拟与试验对比研究	姜河蓉	张小雅	高家镛(335)
船舶撞击群桩式防撞墩的数值模拟研究	姜河蓉	黄伟忠	金允龙(341)
跨海桥梁承台和防撞设施波浪力的数值预报	魏 琳	姜金辉	金允龙(347)
桥墩防船撞拦截体系防撞性能有限元仿真研究	姜金辉	伏耀华	金允龙(357)

开发应用篇

上海长江大桥主桥墩防撞钢吊箱设计与施工	唐 启	周玉娟	曾 健	曲洪春	荀东亮	钟永新(367)
重庆万州长江公路大桥弧形水上升降式防撞装置初步研究	余 葵	胥润生	李晓飏	吴 俊	倪志辉	唐 亮(375)
青岛海湾大桥基础防撞设施设计	王君杰	王 麒				卜令涛(381)
苏通大桥防撞设计介绍	张喜刚	袁 洪				孔海霞 季卫红(389)
重庆万州长江大桥防撞方案研究				耿 波	王福敏	王君杰(396)
黄花园嘉陵江大桥船桥碰撞有限元计算模型的选择分析						吴永固(403)
重庆菜园坝长江大桥边墩防撞方案研究	张 茜					汪 宏(409)
重庆黄花园嘉陵江大桥主墩防撞方案研究	张 茜	张长青		耿 波		李 军(417)
粉房湾长江大桥船撞代表船型研究		尚军年		耿 波		汪 宏(424)
重庆菜园坝及黄花园大桥柔性防撞套箱制造技术研究	刘 洋	周齐姝				张瑾佳(433)
新型消能防船撞钢套箱的设计	张君健	王君杰				屈亚军(441)
钢质套箱在桥梁防撞设施中的开发与应用						赵振宇(448)
G93 合江长江二桥船舶撞击作用力研究				田 波		蒋劲松(454)
G93 合江长江二桥船舶撞击风险评估				田 波		蒋劲松(461)
一种新型 FRP 桥墩防撞浮箱结构	张锡祥	王智祥	巫祖烈	王家林		杜柏松(467)
桥墩防撞方案选择与设计	丁庆荣	宋官宝	陈志军	陈 雯		任 勇(477)

杭州湾大桥防撞钢浮体制造技术	施卫建	杨元录(482)
柔性防撞装置阻尼辐元结构优化	葛胜锦 彭泽友 赵振宇 熊治华	王 伟(489)
既有实腹式连续石拱桥船撞安全性评价	宁夏元	(495)
山区河流中桥梁设防难点及应对方案研究	陈明栋	习倩倩(503)
太平湖大桥船撞风险分析及防撞设计	席 进	王诗青(515)

监测预警篇

桥梁结构安全监测与预警	孙利民 淡丹辉 闵志华	聂功武(525)
航道桥梁主动防船撞预警系统研究	淡丹辉 肖 刚 闫兴非 王君杰	孙利民(537)
桥梁防船撞预控技术研究综述	刘明俊 徐言民	刘佳仑(546)
九江大桥防船撞视频监控预警系统	孙利民	闵志华(555)
船桥碰撞监控预警综述	赵 凯	闵志华(565)

船撞理念篇

桥梁船撞性态设计理论框架

王君杰¹ 范立础¹ 付涛¹ 王福敏² 赵君黎³

- (1. 同济大学桥梁工程系 上海 200092;
2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 重庆 400067;
3. 中交公路规划设计院有限公司 北京 100088)

摘要:本文对工程结构性能设计理论的概念进行了简要的介绍,讨论了建立桥梁船撞性能设计理论需要解决的关键方法问题,在此基础上提出了实现桥梁船撞性能设计的三个技术途径,建立了桥梁船撞设计的基本框架。

关键词:桥梁船撞性能设计 船撞危险性 船撞易损性 船撞危害性 船撞全寿命优化

Theoretical framework of performance-based design for vessel-bridge collision

Wang Junjie¹ Fan Lichu¹ Fu Tao¹ Wang Fumin² Zhao Junli³

- (1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092;
2. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co. Ltd, Chongqing, 400067;
3. CCCC Highway Consultants Co. Ltd, Beijing, 100088)

Abstract: This paper briefly introduces the concept of performance design theory for civil engineering structures. Some key issues of performance-based design for vessel-bridge collision are discussed and three technological approaches are proposed to realize the performance-based design. Thus theoretical framework of performance-based design for vessel-bridge collision is established.

Keywords: performance-based design for vessel-bridge collision; vessel collision hazard analysis; vessel collision fragility; vessel collision risk analysis; LCC optimal design

1 桥梁船撞性能设计的概念

1.1 工程结构基于性能设计的一般概念

虽然基于性能的设计方法还远没有发展成熟,但在全球范围内经过 10 余年的高强度研讨,其基本轮廓已渐渐明晰。1999 年美国结构工程学会(SEI, Structural Engineering Institute)和美国土木工程师协会(ASCE, American Society of Civil Engineers)召开的结构会议上,SEI的

项目支持:交通部西部科技项目资助,编号:200731882234;交通部行业联合科技攻关项目资助,编号:2008353344340。

作者简介:王君杰(1962—),教授,博士,从事桥梁抗震与船撞研究,E-mail:jjqxu@tongji.edu.cn。

技术活动分部执行委员会同意成立一个新的技术委员会来定义“一个土木工程设施的性能”。这个委员会完成了一份研究报告,其要点由 Aktan 等人^[1]于 2007 年发表。工程结构系统及设计、建造、养护与运营管理之间的关系见图 1。合理的状况是将工程结构系统及设计、建造、养护与运营管理作为一个整体进行考虑,体现全寿命。

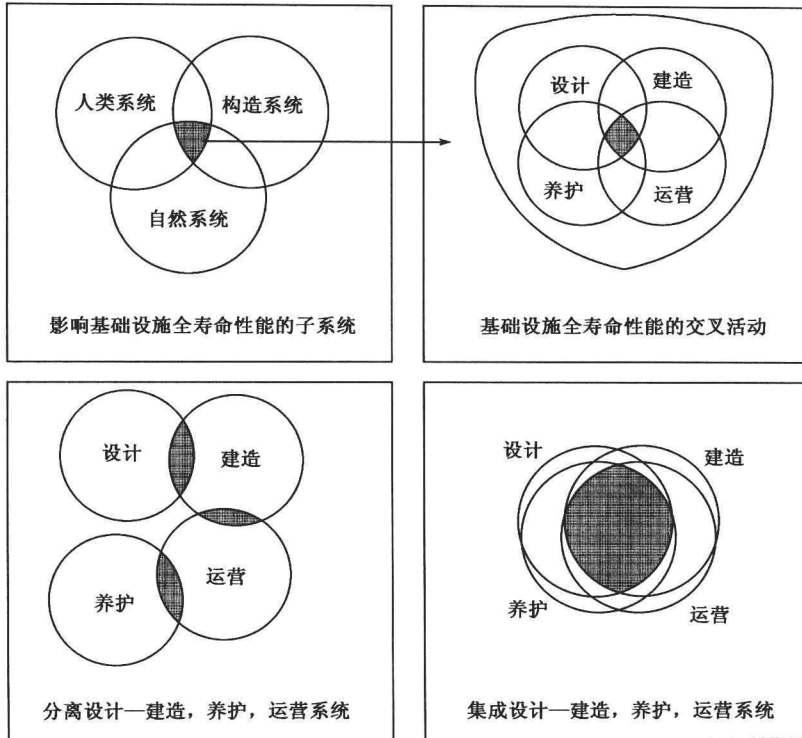


图 1 工程结构系统及设计、建造、养护与运营管理(Aktan,2007)

Aktan 等人完成的报告中,区分了基于性能的设计和基于性能的评估,其中将基于性能的设计分解为 12 个步骤^[1-2]:

(1) 进行可行性和效用评价:业主、社会影响,相关的政策和法律问题,项目投资,环境影响研究,业主投入资金,美学专业顾问,可持续性,全寿命期费用及投资。

(2) 进行工程的概念设计和施工规划,施工、检测、养护可行性和影响研究,以及按合同交货选项评价。

(3) 进行区域和工程场地研究、地质调查及需求分析。

(4) 与业主一起制定定性的性能准则,提出适用的指南、标准、规范及过去的经验,将其转变为定量的指标、相应的检验方法及保证书。

(5) 进行初步设计,同时为针对所有关键设计极限状态优化结构的全寿命期性能建立定性的多目标约束函数,包括施工可行性、运营、安全、检查和维护因素,以及相应的财务机制等。

(6) 进行性能和初步设计可靠性评价,开展方案分析与选择最佳方案,并由同行专家确认,以求得该设计阶段优化多目标约束函数的最好解。

(7) 进行最后施工图设计和施工过程设计,落实合同执行方法。

(8)采用直观推断、分析、试验、基于保证书及相互组合的方式进行设计检验。

(9)综合机械、电力和通信系统进行制造及架设施工。

(10)通过结构识别,文件记录和归档施工状态下的系统特性;基于健康监测原理启动寿命期检测和维护程序。设计者与施工者应参加检测和维护程序的制定并参与识别监测的关键健康指标。

(11)利用健康监测程序的优点综合运营和维护管理。

(12)修复、翻新、更新、保留或退役;注意到废物利用和在循环的回报。

正如 Aktan 等人说明的,上述各个步骤中的具体细节对于不同类型的结构可能是不同的,但具有普遍性的内容是共同的。这 12 个步骤显示了基于描述性条文进行设计和基于性能设计的差别。

根据图 1 和从 Aktan 等人描述的基于性能设计的 12 个步骤,可以分析出基于性能工程结构设计在设计理论与方法方面的以下几个主要特征:

(1)将工程的规划、设计、施工、检测、养护、拆除作为一个有机联系的系统工程进行考虑,在全寿命期内强调各阶段之间的联系和相互影响。

(2)在满足社会最低要求的前提下,明确由多方(主要是业主和设计方)共同确定工程结构的性能要求和量化指标,并以法律文件的形式进行明确。

(3)在设计的技术要求中,必须建立明确的全寿命期内各阶段多目标极限状态函数,包括经济与财务方面的约束函数,并采用多种方法进行方案的优化,达成全寿命期内的最优设计方案。

(4)基于健康监测原理启动寿命期检测和维护程序。设计者与施工者应参加检测和维护程序的制定并参与识别监测的关键健康指标。利用健康监测程序的优点综合运营和维护管理。

(5)工程结构全寿命期内各方面的性能要求等应以适当的具有约束力的技术文件和法律文件的形式予以确认。

概要来说,基于性能的工程结构设计就是在全寿命期内,综合考虑设计、施工、检测、养护、拆除各阶段的多目标的性能要求,寻找最优的解决方案。

从现状来看,基于性能设计理论与方法研究的主要推动力来自于地震工程领域,已经进行了近 20 年的深入的讨论,并在工程抗风、抗火领域,相关的研究也在逐渐展开。在这些抗灾领域,从技术层面观察,基于性能抗灾设计的特点是在全寿命内采用风险分析方法,明确量化的设防目标、进行工程结构的抗灾优化设计。

1.2 桥梁船撞性能设计概念与主要技术方面

根据 1.1 节中关于工程结构基于性能设计的一般概念,桥梁结构船撞性能设计可以描述为:在寿命周期内,综合考虑设计、施工、检测、养护、拆除各阶段的多目标的性能要求,寻求保障桥梁船撞安全的最优的解决方案。

技术上,桥梁船撞性能设计主要解决五个方面问题,即:

(1)桥梁船撞设防标准与船撞性能水平。

(2)桥梁船撞危险性分析。

(3)桥梁船撞易损性分析。

- (4) 桥梁船撞危害性分析。
 - (5) 寿命周期内桥梁船撞多目标优化设计。
- 这五方面问题将在以下各节中分别进行叙述。

2 桥梁船撞设防标准与船撞性能水平

2.1 航道桥梁承担的社会功能分类

桥梁遭受船舶撞击后,可能造成桥梁破坏、船舶损失、人员伤亡、财产损失和间接经济损失,对航道桥梁进行船撞设防分类是为了反映船撞桥梁事件对社会影响的程度以及桥梁、航道在交通网络中的作用等因素。

AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》将桥梁分为两个船撞设防类别^[3],即重要桥梁和一般桥梁。AASHTO 规范划分桥梁重要性的原则有二:第一个原则是桥梁是否连接了社会安全和应急救援设施或组织,如民防、警察、消防部门及公共卫生机构等,能为这些应急结构提供关键运输路线的桥梁划分为重要桥梁。第二个原则是桥梁是否在战略公路网中处于关键连接点位置,作为关键连接的桥梁划分为重要桥梁。

拥有高流量机动车交通并为学校、活动场所、电力站、水处理厂等设施提供道路的桥梁要求不经历或经历较小的损坏,应划分为重要桥梁。战略公路网是对提供“在和平和战争时期对人员及设备的调动具有连续性、紧急功能的防御通道”功能的道路的一种特定名称。战略公路网包括路线(长距离运输)和连接设施(将单个设施连接到路线上)。战略公路网路线包括所有的州际公路以及与重要军事设施、工业和资源相连接的设施,包括:

- (1) 军事基地和供给站以及国家警卫设施。
- (2) 医院、药品供给中心和紧急补给站。
- (3) 主要航空港。
- (4) 国防工业以及逻辑上易于转化为此类工业的设施。
- (5) 精炼厂、燃料库、配销中心。
- (6) 主要铁路枢纽站、铁路端点、港区、卡车货运站。
- (7) 主要堤坝处的主要电力设施和水电中心。
- (8) 主要通信中心。
- (9) 国家认为重要的国防观察点或用于抵御自然灾害或无法预见的突发事件的其他设施。

在防灾领域,建筑与桥梁结构的抗震分类进行了较多的研究。2008 年颁布的《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)^[4]中将建筑工程应分为以下四个抗震设防类别:

(1) 特殊设防类:指使用上有特殊设施,涉及国家公共安全的重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果,需要进行特殊设防的建筑。简称甲类。

(2) 重点设防类:指地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的生命线相关建筑,以及地震时可能导致大量人员伤亡等重大灾害后果,需要提高设防标准的建筑。简称乙类。

(3) 标准设防类:指大量的除(1)、(2)、(4)类以外按标准要求进行设防的建筑。简称丙类。

(4) 适度设防类:指使用上人员稀少且震损不致产生次生灾害,允许在一定条件下适度降

低要求的建筑。简称丁类。

2008年颁布的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)^[5]根据公路等级及桥梁的重要性和修复(抢修)的难易程度,将桥梁分为A类、B类、C类、D类四个抗震设防类别。

A类:指单跨跨径超过150m的特大桥;

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

C类:指A类、B类、D类以外的公路桥梁;

D类:指位于三、四级公路上的中桥、小桥。

欧洲统一规范^[6]将荷载作用后果的严重程度分为三个等级,分别为:轻微后果、中等后果和严重后果。结构按荷载作用后果的严重程度分为三个重要性等级。对于不同重要性等级的结构规定了相应的分析方法,其中一级结构设计时除非与EN 1991~EN 1999提到的整体性和稳定性相关,否则不需要考虑偶然荷载作用的影响,二级结构设计时依据结构所处状况采用静力模型作简单分析,三级结构设计时建议对特殊情况检查以确定需要采用风险分析的程度和采用精确分析方法(如动态分析、非线性模型和荷载结构的相互作用)的深度。

综合考虑以上关于桥梁功能分类的现有成果,建议在桥梁的船撞设计时将桥梁承担的社会功能划分为三个类别:

I类:为社会安全机构、消防结构、公共卫生机构、应急救援结构等应对紧急情况提供关键运输路线的桥梁;连接国家级枢纽交通和通信设施、资源和能源供应基地的桥梁;连接重要军事设施的桥梁。

II类:除I类、III类以外的桥梁。

III类:承担的车辆和人员交通量少且周围无关键安全和社会功能节点需要通过其进行连接的省级以下地区性桥梁。

2.2 航道桥梁船撞设防水准

桥梁船撞设防水准(Vessel Collision Hazard Level)是指在桥梁船撞设防中根据客观的船撞风险环境和既定的设防目标,并考虑具体的社会经济条件确定船舶撞击的强烈程度,可以是设计代表船舶、也可以是设防船撞力。

在桥梁船撞方面,国内外相关的研究几乎是空白,但在抗震领域则有较多的研究成果,表1列出了代表性的研究成果^[7-14]。

典型技术文献中设防地震水准

表 1

技术文献	抗震设防水准			
	L1	L2	L3	L4
EuroCode 8 ^[7]	95	475	—	—
GB 5011—2010 ^[8]	50	475	1 642 ~ 2 475	—
Vision 2000 ^[9]	43	72	475	970
ASCE ^[10]	72	225	475	2 475
ATC—40 ^[11-13]	72	475	970	—
ICC ^[14]	72	225	475	2 475

《建筑工程抗震性态设计通则》^[15]根据建筑的不同重要性类别采用了三级设防水准,见表2。

地震设防水准

表2

设防水准	甲类建筑	乙类建筑	丙类建筑
第1水准	50年超越概率22%	50年超越概率39%	50年超越概率63%
第2水准	50年超越概率3%	50年超越概率5%	50年超越概率10%
第3水准	50年超越概率1.3%	50年超越概率2.5%	50年超越概率5%

目前我国的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)的三个设防水准相当于《建筑工程抗震性态设计通则》中丙类建筑的设防水准,《建筑工程抗震性态设计通则(试用)》中甲类和乙类的建筑设防水准比《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中的有所提高,一定程度上体现了基于性能的抗震设计思想。

根据抗震领域在设防水准方面的研究成果,同时考虑到后续确定的桥梁船撞设防标准易于理解和不产生困扰,建议根据船舶撞击桥梁事件的重现期将桥梁船撞设防水准划分为四个等级,见表3。

桥梁船撞设防水平和对应的重现期

表3

桥梁船撞设防水准	重现期(年)	桥梁船撞设防水准	重现期(年)
L1	100	L3	950
L2	475	L4	2475

2.3 桥梁船撞性能水平划分

结构性能水平的划分应该根据结构类型和结构构件的破坏程度加以确定,美国加州结构工程师协会 Vision2000 委员会^[9]和美国应用技术理事会(ATC)^[11-13]将结构的性能水平划分为四个等级,见表4。

性能水平的划分和描述

表4

性能水平的划分		性能水平描述
Vision 2000	ATC	
功能正常	可以使用	主体结构和非结构构件没有严重损伤。建筑物可以正常居住和使用
可以使用	立即居住	主体结构无严重损伤,基本保持震前的强度和刚度;非结构构件安全,大多能维持正常功能。建筑物经简单维修后,可保证预定功能
生命安全	生命安全	主体结构构件严重破坏,刚度退化,但未达到倒塌的程度,非结构构件安全,但大多丧失功能。建筑物经维修后才能居住
接近倒塌	接近倒塌	主体结构和非结构构件破坏,结构强度和刚度基本退化,接近倒塌

SEAOC^[9]提出采用位移来定义结构的性能目标,见表5。谢礼立^[15]在其主编的《建筑工程抗震性态设计通则(试用)》中建议了5级性能水准,见表6。徐培福和戴国莹^[16]对于超高层建筑结构提出了5个性能等级的划分,见表7。ICC^[14]提出将建筑结构划分为四个等级,见表8。

SEAOC 五级性能水平划分

表 5

抗震性能水平	破坏状态	人员安全与使用功能	层间位移限值比
水平 1	基本完好	功能完整,可立即使用	<1/500
水平 2	轻微破坏	稍微修复即可使用	<1/200
水平 3	中等破坏	结构发生破坏,生命安全,需大修	<3/200
水平 4	严重破坏	接近倒塌,有限的生命安全,无法修复	<1/40
水平 5	基本倒塌	结构发生倒塌	>1/40

性能水平的划分和描述

表 6

性能水平的划分	性能水平描述
充分运行	建筑和设备的功能在地震或震后能继续保持,结构构件与非结构构件可能有轻微的破坏,但建筑结构完好
运行	建筑基本功能可继续保持,一些次要构件可能轻微破坏,但建筑结构基本完好
基本运行	建筑的基本功能不受影响,结构的关键和重要部位以及室内物品未遭破坏,结构可能损坏,但经一般的修理和无需修理仍可继续使用
生命安全	建筑的基本功能受到影响,主体结构有严重破坏但不影响承重,非结构部件可能坠落,但不至伤人,生命安全能够得到保障
接近倒塌	建筑的基本功能不复存在,主体结构有严重破坏,但不至倒塌

超限高层设计的结构性能水平

表 7

抗震性能水平	破坏状态	结构损坏与使用功能情况
水平 1a	完好	结构在地震后完好、无损伤,一般不需修理即可继续使用,人员不会因结构损伤造成伤害,可安全使用
水平 1b	基本完好	结构在地震后基本完好,仅个别构件有轻微裂缝,一般不需修理或稍加修理即可继续使用,人员不会因结构损伤造成伤害,可安全使用
水平 2	局部轻微破坏	地震后结构的薄弱部位和重要部位构件完好、无损伤,其他部位有部分选定的具有一定延性的构件出现明显裂缝,修理后可继续安全使用
水平 3	中等破坏	地震后结构的薄弱部位和重要部位构件轻微损坏,出现轻微裂缝,其他部位有部分选定的具有延性的构件发生中等损坏,出现明显裂缝,进入屈服阶段,需修理并采取一些安全措施方可继续使用
水平 4	严重破坏	结构在地震下发生中等程度的破坏,多数构件中等损坏,进入屈服阶段,有明显的裂缝,需采取安全措施,人员不能安全出入;经过修理、加固后方可继续使用
水平 5	不倒塌	结构在地震下发生明显损坏,多数构件中等损坏,多数构件中等损坏,进入屈服,有明显裂缝,部分构件严重损坏;整个结构不倒塌,也不发生局部倒塌,人员会受到伤害,但不危及生命

ICC 性能水平的划分和描述

表 8

性能水平的划分	性能水平描述
水平 1	无结构破坏,建筑和设施以安全地使用
水平 2	结构发生一定程度的破坏,可以修复,但短时间内无法居住
水平 3	结构基本构件发生严重破坏,但无大的脱落;修复是可能的;可能长时间无法居住
水平 4	结构发生实质性破坏,但是重要构件仍可以承受重力。技术上来说,修复是不可能的。建筑结构或设施不安全、重新使用可能导致倒塌