

文章编号: 1007-6069(2017)04-0122-07

跨海桥梁抗震设计研究发展综述

陈宝魁¹, 王东升², 石岩³, 文明¹

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 国内外特别是我国近些年跨海桥梁建设发展迅速, 鉴于 1995 年日本 Kobe 地震中存在跨海桥梁损伤的案例, 如东神户大桥和明石海峡大桥(地震时未完工), 因此跨海桥梁的地震安全问题显得尤为重要。目前, 桥梁抗震问题的研究与总结主要集中于陆上桥梁, 针对跨海桥梁的抗震设计方法与研究相对较少。归纳了世界范围内经受过地震考验的跨海桥梁的震害表现, 通过分析国内外不同历史时期几座典型跨海桥梁的抗震设计和减隔震技术的应用, 总结了跨海桥梁抗震技术的发展与主要成果。

关键词: 跨海桥梁; 抗震设计; 减隔震技术; 地震安全; 震害

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Advancement in research on seismic design of sea-crossing bridge

CHEN Baokui¹, WANG Dongsheng², SHI Yan³, WEN Ming¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The sea-crossing bridge has been developed rapidly during the past decades. However, seismic damages of the sea-crossing bridge have been reported frequently, such as the damages of the Higashi Kobe Bridge and Akashi Kaikyo Bridge (under construction during the earthquake) in Kobe earthquake in Japan in 1995. Therefore, it is of great importance to focus on its seismic safety. At present, the research and summarization of the seismic problems of the bridge are mainly concentrated on bridges on land, and the seismic design method and research for the offshore bridges are relatively limited. The seismic damages of the sea-crossing bridges all over the world have been summarized in this article. This study concludes the state of the earthquake resistance technology of sea-crossing bridges, based on seismic design and application of seismic mitigation and isolation technique for some typical sea-crossing bridges during different periods of history in the world.

Key words: sea-crossing bridge; seismic design; seismic mitigation and isolation technique; seismic safety; earthquake damage

引言

我国海岸线的总长约为 1.8 万公里, 位居世界第四, 且东南沿海地区经济发展迅速、城市规模与人口数

收稿日期: 2017-02-23; 修订日期: 2017-08-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB013605); 国家自然科学基金项目(51478074); 江西省青年科学基金项目(20171BAB216045); 江西省教育厅科学技术研究项目(60221)

作者简介: 陈宝魁(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事建筑及桥梁抗震研究. E-mail: baokui-2000@163.com

通讯作者: 王东升(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事桥梁抗震研究. E-mail: dswang@hebut.edu.cn

量庞大,因此对跨海交通的需求迫切。修建跨海桥梁不但可以改善交通状况,而且对社会的经济发展与城市的战略布局等都起到关键作用。近年来,我国跨海桥梁的建设发展迅速,初步统计,目前在建与已建成的跨海桥梁已有 50 余座,其中包括世界全桥最长的港珠澳大桥。我国近海处于环太平洋地震带,历史上台湾海峡、渤海海峡和琼州海峡等多有强震发生。以往震害表明:地震中跨海桥梁的破坏很可能会阻碍震后救援,造成国民生活和生产恢复的不便;同时桥梁修复或拆除重建将带来巨额的投资损失。例如奥克兰海湾大桥 (Oakland Bay Bridge) 在 1989 年美国 Loma Prieta 地震中发生了落梁如图 1 所示,原因是支承的钢支座的宽度较窄,造成 San Francisco 通往 East Bay 的交通瘫痪了数周之久,为震后城市的恢复带来了不便,也被认为是地震造成较大经济损失的原因之一^[1]。

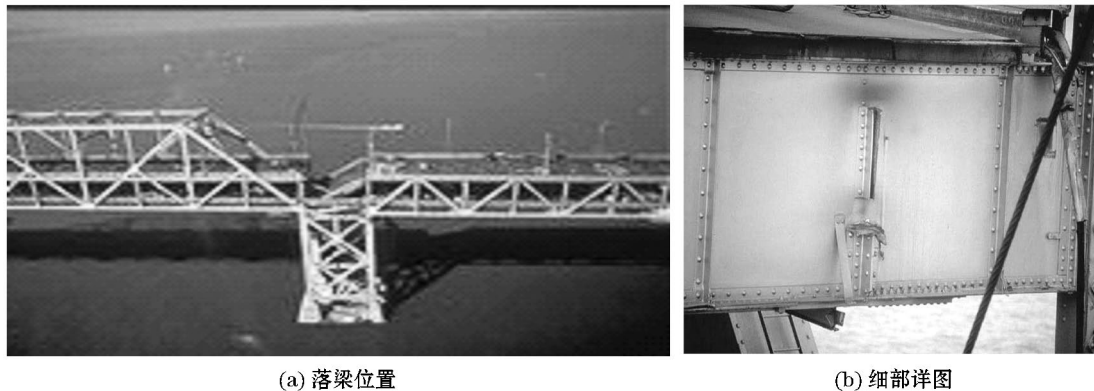


图 1 奥克兰海湾大桥在 1989 年洛马普列塔地震中发生落梁^[2]

Fig. 1 Girder falling of Oakland Bay Bridge in 1989 Loma Prieta earthquake

跨海桥梁的抗震设计最初借鉴桥梁延性抗震设计理论,从 90 年代初引入减隔震设计理念,至目前以液体粘滞阻尼器为主要耗能装置的各类减震约束体系被相继提出,并在工程中较多应用,逐步构建成大跨度桥梁基于性能的抗震设计框架^[3-4]。跨海桥梁服役期长达百年(港珠澳大桥设计寿命 120 a),除地震外还要面对强风、车辆(流)超载和海洋腐蚀环境等恶劣荷载工况,其运营及耐久性能要求较高,总结及探讨针对跨海桥梁特点的抗震结构体系与抗震设计方法具有较高研究意义。

从多次大震中跨海桥梁的震害表现出发,通过综述几座典型跨海桥梁的抗震设计方法与抗震理念,总结国内外跨海桥梁抗震设计与研究的经验,探讨目前更合理的桥梁体系与抗震技术。

1 跨海桥梁工程震害

相对于陆上桥梁而言,世界范围内跨海桥梁的基数仍然较少,但仍存在相关震害案例,除提到的 1989 年美国 Loma Prieta 地震中横跨旧金山圣弗朗西斯科海湾的奥克兰海湾大桥的震害外,1995 年日本 Kobe 地震中有几座跨海桥梁也发生了不同程度的破坏。Kobe 地震的震级为 7.2 级,震源深度 20 km,地震造成了 6 千余人死亡或失踪。由于 Kobe 地震发生在规模较大的海港城市,因而有几座跨海桥梁经受了地震的考验,如西宫港大桥,其引桥段在地震中发生落梁如图 2 所示。震后分析认为该桥被破坏的原因在于对梁端位移的考虑不足,桥墩支座支撑面设计过窄,而主桥与引桥在地震中产生较大的相对位移并发生碰撞,导致支座以及连接限位构件的失效而产生落梁;另外一个可能的原因是临海的场地发生了液化及侧向流动,以致桥墩有较大倾斜^[5]。

位于日本神戸市和淡路岛之间主跨达到 1 990m 的悬索桥-明石海峡大桥(Akashi Kaikyo Bridge)^[6],同样在 Kobe 地震中受到波及,地震时断层从该桥跨穿过。Kobe 地震发生时该桥尚未完工,但桥塔已经就位,缆索的架设也已完成。该桥总体未发生严重破坏,主要震害表现为南岸(淡路岛侧)的岸墩(沉箱基础)和锚锭发生轻微位移,纵桥向约为 0.8 ~ 1.0 m,侧向滑移约 1.3 ~ 1.4 m。地震使该桥的跨度增加了 1 m,由原来的 1 990 m 变为 1 991 m。

Kobe 地震中还有另外一座斜拉桥—东神戸大桥(Higashi Kobe bridge)同样遭受了地震的考验。该桥为双索面斜拉桥,主跨 485 m,全长 885 m,主梁为钢桁架梁,约建成于 1991 年。该桥采用了漂浮体系,纵桥向

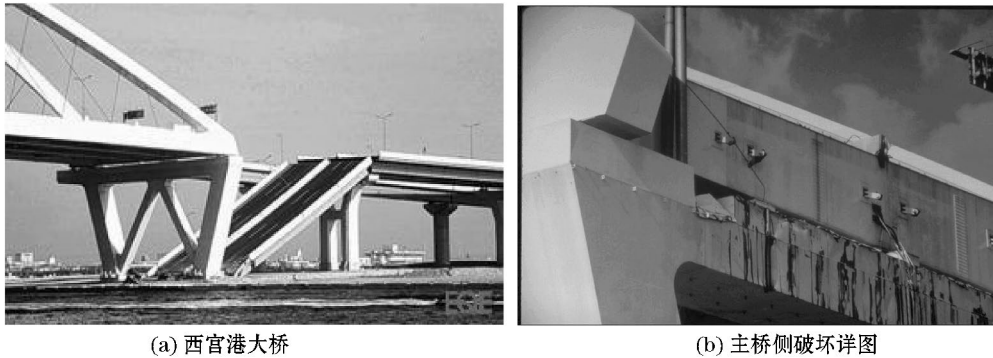


图2 西宫港大桥在1995年Kobe地震中发生落梁

Fig. 2 Girder falling of Nishinomiya kou Bridge in 1995 Kobe earthquake

的周期达到4.4 s,可以使地震力降低到日本桥梁抗震设计标准的1/3。该桥在过渡墩处采用了粘滞阻尼器。桥梁的破坏主要发生在一侧的过渡墩,强大的地震力使钢支座受拉(静力时亦受拉)后破坏,梁端上抬约0.4 m。同时较大的纵桥向位移使粘滞阻尼器的连接锚栓脱落如图3所示。该桥安装了强震仪器,震后分析认为该桥的破坏主要由基础和周围土层的液化所致,最先破坏点处可能是横向地震力超过了抗风装置(wind shoes)的强度^[7]。

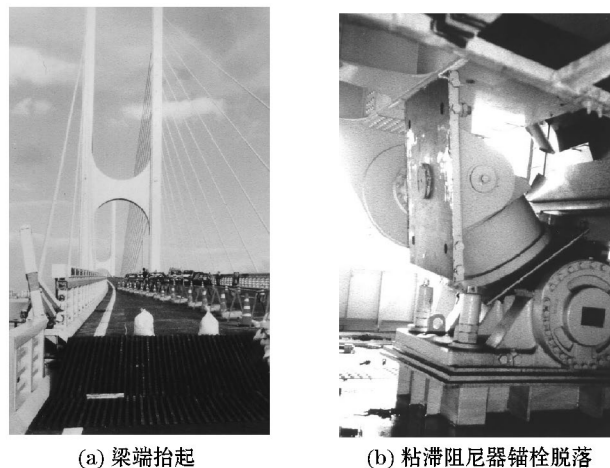


图3 东神户大桥在1995年Kobe地震中破坏

Fig. 3 Damage of Higashi Kobe Bridge in 1995 Kobe earthquake

2011年东日本(3.11)大地震,震中位于日本东北部近海海域,震级为里氏9.0级,震源深度为海底10 km。地震引发的海啸影响了日本沿岸大部分地区,经统计,此次地震引发的海啸以及地震作用损坏了300多座桥梁^[8],其中:一些近海桥梁震害比较严重。除部分近海桥梁被海啸直接冲毁外,地震本身对桥梁也造成了一定程度的破坏。如位于日本日立市的朝日高架桥(Asahi Viaduct),分别由4跨和7跨的两部分刚构桥组成,桥墩与桥台上部分别安装了2个和3个铅芯橡胶支座。在东日本大地震中,桥台的1个支座被撕裂,另外一些支座与侧向金属约束块发生碰撞,但阻止了支座的进一步变形^[9]。朝日高架桥的支座损坏如图4所示。

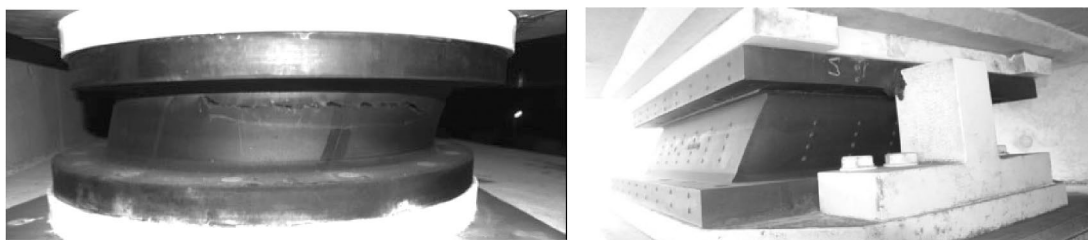


图4 朝日高架桥在2011年东日本大地震中铅芯橡胶支座破坏^[9]

Fig. 4 Damage of lead rubber bearings of Asahi Viaduct in 2011 Great East Japan earthquake

2 跨海桥梁结构抗震研究进展

Priestley 等^[10]在其桥梁抗震专著中指出:“大跨度桥梁抗震具有非共性,其抗震研究一般做特殊专题研究”。跨海大桥的抗震问题也应采用“一事一议”的分析模式。以国内外几座大型跨海桥梁为例,对不同历史时期跨海桥梁抗震设计的特点与面临的问题进行简要综述,由此也可窥见跨海桥梁抗震研究的迅猛发展及最新技术与设计理念。

(1) 日本本州 - 四国联络桥

日本本州 - 四国联络桥(濑户大桥)历时 10 a 建成于 1988 年,横跨濑户内海,将日本四大岛屿(本州、九州、北海道和四国)连结在一起,实现了当地人们多年来拥有跨海交通的夙愿,是世界桥梁史上的一座丰碑。该桥全长 37.3 km,海面部分 13.1 km,由 3 座悬索桥、2 座斜拉桥和 1 座桁架桥组成,是当时世界第 1 长桥。其中:最长的悬索桥跨度达到 1 100 m,桥塔高 194 m。该桥位于地震多发地区,为了充分调研,早在 20 世纪 70 年代就开始相关研究特别是抗震方面的探讨,其中:首先考虑的就是桥梁基础的抗震设计。濑户大桥 3 座大跨度悬索桥均采用巨大的刚性基础,几何尺寸重点考虑抗震性能要求,并兼顾风荷载、潮流和船舶撞击等因素。该桥的抗震分析采用了当时先进的分析手段,将地震荷载以水平向加速度输入基岩中,并提出以弹簧代替地基的二维基础模型,该桥的设计与分析是桥梁抗震史上的一次创举。为了减小桥塔以及整个桥身结构的振动反应,在桥塔上设置了一系列的减震装置,其中:包括传统的滑块式装置、当时先进的粘性缓冲器和动力吸收器等^[11]。

(2) 美国旧金山大桥

美国旧金山的金门大桥,建成于 1937 年,全长 2 737 m,是世界最著名与最壮丽的桥梁之一。该桥是横跨金门海峡南北向的一座悬索桥,巨大的桥塔高达 342 m,水上部分高 227 m,连接 2 桥塔顶端两根钢索的直径均为 92.4 cm,重达 24 500 t。由于 1906 年旧金山地震的圣安德烈断层就位于金门大桥以西 11.31 km 处,该桥的设计地震荷载以具有 1 000 ~ 2 000 a 重现期的最大地震为考虑对象。因此,金门大桥在设计之初便对桥梁的抗震性能进行了重点考虑,并在建成后进行过多次改造和加固。

1989 年 Loma Prieta 地震后,对该桥抗震性能进行重新评估,结果表明:当发生震中距较近的里氏 7 级及以上地震时,该桥易遭受破坏。因此,1990 年后决定对该桥进行全面的抗震加固与翻新,主要包括:(1)在刚性桁架梁与桥塔间设置粘滞阻尼器;(2)选用新型韧性更高的延性杆替换原有 1/4 的主跨上横联;(3)通过在桥塔基部隔墙板的中央增加竖向加劲肋以防止桥塔钢板的屈曲变形;(4)插入施加了预应力的 PC 粗钢筋以加固桥塔基础,以减小地震中可能出现的裂缝,及弥补抗震能力不足;(5)对主缆及其鞍座、风阀和钢桥面板等均进行了抗震加固。此次抗震加固分析建立了考虑多支点激励的三维有限元非线性时程分析有限元模型,分析中不但考虑了材料“应力硬化”效应,还考虑了诸多非线性性能^[12]。此外,该项工程投入大量资金进行大比例结构试验以检验抗震设计结果。金门大桥此次的抗震加固工程规模浩大、并投入了巨额资金,使用了诸多当时最先进的工程技术手段,为今后大型桥梁的抗震加固提供了重要的参考,推动了大型跨海桥梁抗震加固技术的发展。

(3) 里奥 - 安托里恩大桥

横跨希腊柯林斯海湾的里奥 - 安托里恩大桥(Rion - Antirion Bridge)是一座多塔斜拉桥,主桥采用 5 跨连续结构(286 m + 560 m + 560 m + 560 m + 286 m),全长 2 252 m,于 2004 年竣工,是当时世界上跨度最大的斜拉桥。

里奥 - 安托里恩大桥位于一处极易发生强地震的活动断层附近,过去 50 a 内科林斯海湾发生过 3 次超过里氏 6.5 级的地震。此外,海湾水层较深(65 m 左右),需深水施工,并且海床表面覆盖深厚的软弱冲积土层,因此该桥的抗震设计难度极大。由于工程所在位置海底表面距基岩的深度超过 500 m,桥塔基础的设计最终选择了加

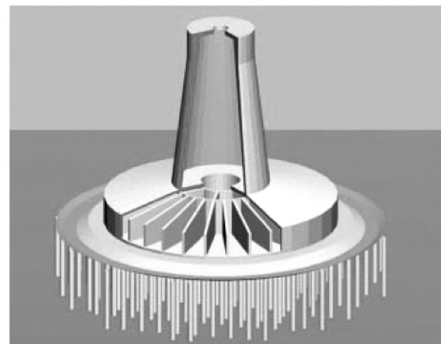


图 5 里奥 - 安托里恩大桥地基加固^[13]

Fig. 5 Strengthening foundation of Rion - Antirion Bridge

固海床表层土的浅基础方案。加固表层土创新地使用了被称为“夹杂体”(Inclusion)的技术,即在主塔基础下密集的打入直径2 m、长20~30 m的空心钢管,在加固后地基上的主塔基础直径达到90 m,如图5所示。这种技术类似于群桩基础,但该方法的优点在于基础与地基分离,两者间可以有竖向或横向的相对位移^[13]。

为了满足严格的抗震设计需求,该桥建立了全桥阻尼系统,其中:包括了液体粘滞阻尼器与熔断“保险丝”约束设备(Fuse Restrainer)。并对使用的粘滞阻尼器设备进行了全尺寸的室内性能试验。桥塔和基础所设置的分离滑移垫层以及在主桥(斜拉桥)加装的液体粘滞阻尼器使该桥可抵御水平和竖向各2 m的断层运动位移,并能承受强烈的地震动作用(0.48 g,2 000 a重现期)^[14]。

(4) 旧金山-奥克兰海湾大桥东段新桥

原旧金山-奥克兰海湾大桥东段主桥在1989年Loma Prieta地震中发生落梁,损害情况比较严重,后经当地政府决定在旧桥旁修建一座新桥。奥克兰海湾大桥东段新桥在2013年建成通车,分别由高架桥部分和一座单塔双跨非对称的自锚式悬索桥组成。该悬索桥主跨385 m,桥塔另一侧后跨度180 m,设计使用寿命为150 a。

海湾大桥东段新桥距离可能发生里氏7.5级地震的Hayward断层仅12 km,距离可能发生8.1级地震的San Andreas断层25 km,因此该桥的抗震设防要求很高,需要按照2个设防标准进行设计:其一是功能性评价地震,以100 a重现期为标准,要求一次大震后,结构破坏状态不应超过可修复性破坏的极限,应只发生最小程度的破坏,控制在混凝土保护层开裂、加固构件屈服、钢筋有限屈服的范围内,并保证震后可通行;其二是安全性评价地震,以1 500 a地震重现期为标准。为了满足上述要求,该桥被设计为有限延性结构(limited-ductility structure)^[15]。

海湾大桥东段新桥的独塔塔底和两侧桥墩墩底的场地条件相差较大,桥墩基础使用了斜桩的群桩基础。此外,桥梁的抗震分析输入了6组精选的3向地震波,每个断层各选3组具有代表性的地震波^[16]。应用ADINA通用有限元软件,计算了涉及3种形式的抗震分析:时程分析(考虑桩-土相互作用)、Push-over分析和局部精细化分析。通过大量的数值计算,以保证该桥的抗震设计满足设防标准与抗震目标。

为了满足抗震设计要求,作为主跨抗震系统的一部分,在该桥主塔4根塔柱间设置了起到“保险丝”作用的钢剪切连杆(Steel shear link),可以在重现期1 500 a的大震中率先屈服耗能,以避免桥塔发生塑性破坏^[17],见图6。国内谢文等^[18]对采用剪切板连接的双柱式辅助墩进行了试验研究,讨论该耗能减震方式在大跨桥梁上应用的可能性;试验及理论研究表明:剪切板不仅可以提高桥墩的刚度,还能有效减小地震损伤,起到耗能减震的作用。

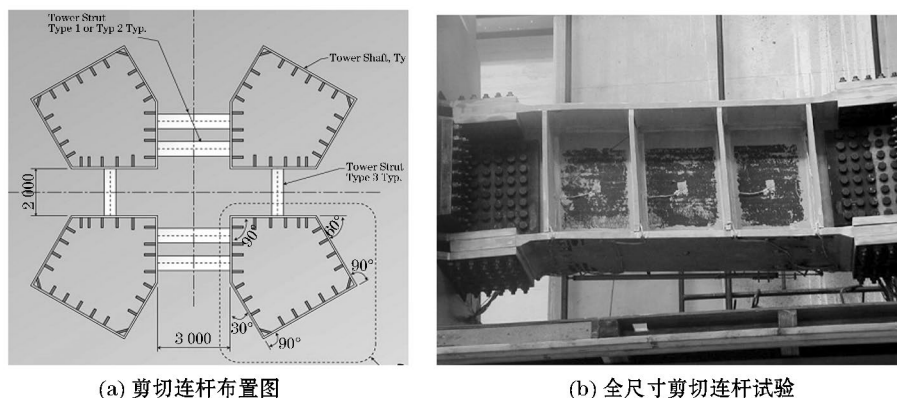


图6 新海湾大桥塔柱间钢剪切连杆^[19]

Fig. 6 Steel shear link between towers of New Bay Bridge

(5) 港珠澳大桥

港珠澳大桥是我国一座近期建设的跨海桥梁,连接了香港、澳门和广东省珠海市。港珠澳大桥是包括“桥、岛和隧”在内的超大型集群工程,全长49.97 km,其中桥梁主体工程全长约22.9 km,包括3座通航桥及非通航桥。该桥处于珠江口伶仃洋海域,抗震设防水准高,地质条件变化大,桥梁所在位置覆盖层较厚(表面普遍存在较厚的淤泥软土层)。3座通航桥中跨径最大的青州航道桥为全长1 150 m,主跨458 m的双塔斜拉桥。以该桥为例,施工中采用了多项新材料、新技术和新工艺^[20]。抗震设计与以往跨海(江)桥梁相比,又呈现出新的特点,即设防标准上考虑了三水准设防,即工作状态(120 a重现期)、极限状态(1200 a重

现期)和结构完整性状态(2 400 a 重现期),桥梁设计预期寿命 120 a。以往国内通常采用两水准设防,抗震设防标准多为 50 a 超越概率 10% 验算强度(重现期 475 a),50a 超越概率 2~3%(重现期约 2 500 a)验算位移或变形,而桥梁设计预期寿命多为 100 a。

青州航道桥支承类型属于漂浮体系,为了改善地震作用下内力和位移反应,减小伸缩装置、支座等的位移量和动力磨损,在桥塔与桥墩位置均布置了包括竖、纵和横 3 向的约束体系。桥塔处设置具有横向水平承载力要求的竖向支座;纵桥向自由,仅设置静力限位功能的阻尼装置和粘滞阻尼器,并在主梁两侧设置横向支座;辅助墩、过渡墩位置均设置竖向支座和纵向粘滞阻尼器^[21]。

综上所述,跨海桥梁抗震设计的研究方法经历了延性设计理念和减隔震设计体系的发展,目前正逐步向“损伤可控及自复位体系(Resilience-based design)”过渡^[22]。

3 结论

(1) 我国近些年跨海桥梁的建设正快速发展,考虑到我国大部分跨海桥梁处于环太平洋地震带,桥梁工程的抗震能力不可忽视。

(2) 近年一些位于强地震区或临近甚至跨过断层的跨海桥梁,如希腊里奥-安托里恩大桥和美国新海湾大桥,在其抗震设计中已引入了“耗能减震”、“基础滑移”、“保险丝构件”和“损伤控制”等创新的设计理念。

(3) 跨海桥梁除需要考虑地震灾害外,还需面对强风和海水腐蚀等复杂海洋环境得影响,综合地考虑针对跨海桥梁特点的抗震设计是目前所面临的主要问题。

(4) 跨海桥梁抗震设计经历了延性体系和减隔震体系的发展,目前正向损伤可控及自复位体系等方向探索与应用。

参考文献

- [1] HOUSNER G W. Competing against time: report to Governor George Deukmejian from the Governor's Board of inquiry on the Loma Prieta earthquake [M]. George W. Housner Chairman. Governor's Office of Planning and Research, Sacramento, CA, May, 1990: 681-711.
- [2] PENZIEN J T, HIEL C C. The race to seismic safety: protecting california's transportation system [M]. Submitted to the Director, California Department of Transportation, 2003: 613-615.
- [3] 叶爱君, 范立础. 大型桥梁工程的抗震设防标准探讨 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 8-12.
YE Aijun, FAN Lichu. Discussion on earthquake resistance level of large bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(2): 8-12. (in Chinese)
- [4] LI J. Recent advances in seismic design for long span bridges in China [C]. Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago Chile, 2017.
- [5] WILSON J C. Repair of new long-span bridges damaged by the 1995 Kobe earthquake [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2003, 17(4): 196-205.
- [6] KITAGAWA M. Technology of the Akashi Kaikyo bridge [J]. Structural Control and Health Monitoring. 2004, 11(2): 75-90.
- [7] TODOR G, FUMIO Y, HIROSHI I, et al. Response analysis of the Higashi-Kobe Bridge and surrounding soil in the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27(6): 557-576.
- [8] 张广锋, 任伟新, 陈亮, 等. 东日本大地震中抗震加固后的公路桥的震害特点 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(S1): 239-244.
ZHANG Guangfeng, REN Weixin, CHEN Liang, et al. Seismic damage of retrofitted highway bridges in the 2011 Great East Japan Earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 239-244. (in Chinese)
- [9] TAKAHASHI Y. Damage of rubber bearings and damages of bridges in 2011 Great East Japan Earthquake [C]. Proceedings of the international symposium on engineering lessons learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, 2012: 1333-1342.
- [10] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, CALVI G M. Seismic Design and Retrofit of Bridges [M]. John Wiley & Sons, 1996.
- [11] FORSBERG T. Multi-span suspension bridges [J]. International Journal of Steel Structures, 2001, 1(1): 63-73.
- [12] GHAFAR A, AHMED M, ROBERT H S. Ambient vibration studies of golden gate bridge: II. Pier-Tower Structure [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(4): 483-499.
- [13] PECKER A. Design and Construction of the Rion Antirion Bridge [C]. Proceedings of the Conference on Geotechnical Engineering for Transportation Projects, Geo-Trans, ASCE Geoinstitute, Los Angeles, 2004: 1-25.
- [14] COMBAULT J, PECKER A, TEYSSANDIER J R. Rion-Antirion bridge, Greece - concept, design, and construction [J]. Structural Engineering

- International, 2005, 15(1): 22 – 27.
- [15] CHOU C C, UANG C M, Seible F. Experimental evaluation of compressive behavior of orthotropic steel plates for the New San Francisco-Oakland bay bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11(11): 140 – 150.
- [16] LAM I P, LAW H, KAPUSKAR M. Design for the New Sanfrancisco-Oakland Bay Bridge East span, soil-structure interaction problems [J]. ASCE Geotechnical Special Publication. 2004, 1: 295 – 304.
- [17] VADER T S, MCDANIEL C C. Influence of dampers on seismic response of cable-supported bridge towers [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2007, 12(3): 373 – 379.
- [18] 谢文, 孙利民. 采用新型辅助墩的超大跨斜拉桥顺桥向损伤控制新体系研究 [J]. *土木工程学报*, 2014, 47(S2): 28 – 34.
XIE Wen, SUN Limin. Studies on controlling structural systems of super long-span cable-stayed bridge by novel supporting pier in longitudinal direction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(S2): 28 – 34. (in Chinese)
- [19] NADER M, MARONEY B. The New San Francisco-Oakland bay bridge [C]. *Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession*, ASCE, 2013: 588 – 598.
- [20] 刘明虎, 孟凡超, 李国亮. 港珠澳大桥青州航道桥工程特点及关键技术 [J]. *桥梁建设*, 2013, 43(4): 87 – 93.
LIU Minghu, MENG Fanchao, LI Guoliang. Engineering Characteristics and Key Techniques of Qingzhou Ship Channel Bridge of Hong Kong – Zhuhai-Macao Bridge [J]. *Bridge Construction*, 2013, 43(4): 87 – 93. (in Chinese)
- [21] 刘明虎, 李贞新, 李国亮. 港珠澳大桥青州航道桥结构约束体系研究与设计 [J]. *桥梁建设*, 2013, 43(6): 76 – 81.
LIU Minghu, LI Zhenxin, LI Guoliang. Study and Design of Structural Restraint Systems for Qingzhou Ship Channel Bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. *Bridge Construction*, 2013, 43(6): 76 – 81. (in Chinese)
- [22] MAHIN S. Resilience by design: a structural engineering perspective [C]. *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago Chile, 2017.