

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250105001

文章编号: 1674-599X(2025)01-0020-10

引用格式: 林智伟, 杨涛, 庾格基. 桥梁倒塌成因与抗倒塌性能提升路径综述[J]. 交通科学与工程, 2025, 41(1): 20-29.

Citation: LIN Zhiwei, YANG Tao, YU Geji. Causes of bridge collapse and approaches to improve anti-collapse performance: a review[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 20-29.

桥梁倒塌成因与抗倒塌性能提升路径综述

林智伟¹, 杨涛^{1,2,3}, 庾格基¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘 要: 桥梁倒塌事故时有发生, 通常会造成严重的人员伤亡和财产损失。我国桥梁众多, 剖析导致桥梁倒塌的主要诱因, 并结合桥梁防灾技术的研究进展探究桥梁抗倒塌的技术路径具有重要意义。首先, 基于国内外桥梁倒塌案例, 对桥梁倒塌的原因进行了总结和分类, 分析表明设计缺陷、施工工艺不合理、在役期间维养不当等都有可能造成桥梁倒塌, 而船舶撞击、爆炸、火灾、地震等突发事件或自然灾害也严重威胁着桥梁安全。随后, 从上部结构破坏和下部结构破坏两个层面探究了桥梁倒塌风险的防控路径。由上部结构破坏引发的桥梁倒塌案例可知, 不同形式的桥梁在倒塌前呈现出了特有的受力特征: 梁桥的倒塌通常与超限荷载或侵蚀环境等因素引起的结构局部损伤累积有关; 拱桥的倒塌通常与结构局部损伤、拱圈的稳定性等因素有关; 悬索桥受主缆腐蚀、疲劳损伤等因素影响较大; 斜拉桥拉索断裂或锚固区损坏易导致桥梁坍塌。此外, 地基沉降、基础冲刷及撞击引起的桥梁下部结构破坏也极易造成桥梁局部或整体倒塌。最后, 结合桥梁防灾技术的研究进展, 归纳了若干提高桥梁抗倒塌能力的技术措施, 包括设置阻尼系统、采用摇摆自复位桥墩、设置限位与防落梁系统等。研究内容有助于全面认识桥梁的倒塌行为, 并为桥梁结构的抗倒塌设计提供借鉴。

关键词: 桥梁倒塌; 倒塌成因; 倒塌行为; 倒塌破坏; 抗倒塌措施; 综述

中图分类号: U447

文献标志码: A

Causes of bridge collapse and approaches to improve anti-collapse performance: a review

LIN Zhiwei¹, YANG Tao^{1,2,3}, YU Geji¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-Cycle Safety for Composite Structures, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Bridge collapses occasionally happen and lead to serious casualties and property losses. As there are amounts of bridges in China, it is of great significance to analyze the primary causes of bridge collapse and explore the technical approaches to prevent collapse based on research progress in disaster prevention technology of bridges. The causes of bridge collapse were summarized and categorized according to both Chinese and international cases. The analysis indicates that issues like design flaws, irrational construction processes, and inadequate in-service maintenance may result in the bridge collapse, while such emergencies as ship impact, explosion, fire, earthquake, or natural disasters also seriously threaten the safety of bridges. The risk prevention and control approaches to bridge collapse

收稿日期: 2025-01-05

基金项目: 广西科技重大专项项目(AA23023034); 国家自然科学基金资助项目(52378141)

通信作者: 杨涛(1979—), 男, 教授, 主要从事钢-混凝土组合结构抗灾变行为方面的研究工作。E-mail: yangt@gxu.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

were then discussed from the perspectives of damages to both the superstructure and the substructure. From the collapse cases involving damage to the superstructure, it is found that different types of bridges exhibit unique stress characteristics before collapse. Specifically, the collapse of girder bridges is often linked to the accumulation of localized structural damage due to overloading or environmental erosion; the collapse of arch bridges is typically associated with localized damage and the stability of the arch ring; suspension bridges are significantly affected by corrosion of the main cables and fatigue damage; fractures in tension cables or damage to the anchorage zones in cable-stayed bridges can lead to collapse. Additionally, damage to the substructure caused by foundation settlement, scour, or impact can easily give rise to either localized or total collapse of the bridge. Finally, based on the progress in bridge disaster prevention technologies, several technical measures were summarized for improving the anti-collapse performance of bridges, including damping systems, self-resetting swinging abutments, and limiting and anti-falling girder systems. These findings contribute to a comprehensive understanding of bridge collapse behavior and provide valuable insights for the design of anti-collapse bridge structures.

Key words: bridge collapse; collapse cause; collapse behavior; collapse damage; anti-collapse measures; review

桥梁作为交通运输系统的关键组成部分,在保障社会生活的正常运转方面发挥着不可替代的作用。截至2023年末,中国共有公路桥梁107.93万座,桥梁建设质量和养护水平不断提高^[1]。但由于桥梁数量众多,各种因素引起的桥梁倒塌事故时有发生,造成了生命财产的巨大损失,严重影响着人们正常的生活秩序^[2-3],例如:2009年,湖南省株洲市红旗路高架桥坍塌,现场24辆车被损毁,9人死亡;2021年,湖北省鄂州市大广高速花湖互通匝道桥梁侧翻,造成4死8伤。鉴于桥梁倒塌的严重后果,对桥梁倒塌的原因以及抗倒塌措施进行总结分析具有重要意义。针对这一问题,本文对国内外桥梁倒塌案例进行了总结,探究了导致桥梁倒塌的主要因素以及倒塌灾变前桥梁结构的受力状态和倒塌破坏特点;结合桥梁抗灾变技术的研究进展,总结了提升桥梁抗倒塌能力的技术路径。本文内容可为桥梁工程的抗倒塌设计提供参考,对于提升桥梁结构在设计、施工和运维期间的可靠性具有借鉴意义。

1 桥梁倒塌诱因分析

1.1 设计缺陷与施工控制问题

设计缺陷是桥梁倒塌的主要原因之一,主要体现在设计过程中对结构行为、材料性能、环境荷载或施工方法的错误预判^[4-5]。1907年,加拿大

Quebec大桥在施工过程中倒塌^[6],分析表明该事故主要是由桥梁主跨悬臂结构设计不合理、过高估计钢材承载能力导致的。2007年,美国35号州际公路西线密西西比河大桥在设计中缺乏必要的冗余度,运营期间也未充分预估金属疲劳的不利影响,最终导致桥梁倒塌^[7]。2011年,印度尼西亚 Kutai-Kartanegara大桥在设计中未充分考虑连接部位的应力集中问题,导致支撑缆绳断裂并引发桥梁倒塌^[8],如图1所示。下部结构的设计缺陷同样可能导致桥梁的倒塌破坏^[9-10]。2005年,美国利罗伊赛尔蒙桥在设计时对地基承载力考虑不足,造成桥梁结构不均匀沉降,并最终导致桥梁倒塌。2018年,由于横隔板和横梁承载力设计不足,哥伦比亚 Chirajara大桥B桥塔在施工过程中发生了结构失稳和完全倒塌^[11],如图2所示。



图1 Kutai-Kartanegara大桥倒塌事故^[12]

Fig. 1 Collapse of the Kutai-Kartanegara Bridge^[12]

图2 Chirajara大桥倒塌事故^[13]Fig. 2 Collapse of the Chirajara Bridge^[13]

施工工艺不合理或者人员的违规操作是导致桥梁倒塌的另一关键诱因。1996年,坪乳公路白桥坑大桥在施工过程中未对施工支架进行结构设计和计算,导致支架系统整体破坏进而引发结构坍塌^[14]。2005年,贵州省遵义市务川县珍珠大桥在施工过程中由于使用了不符合质量要求的施工器材且违规进行施工作业,施工拱架发生倒塌^[15]。2014年,广东省高州市某石拱桥在施工时未按规范要求处理拱架基础,所用搭设结构和立柱连接接头不符合标准导致拱架逐步失去稳定,最终石拱桥发生坍塌。2020年,天津市南环临港铁路桥梁在整桥换枕作业时未按照规定操作,而是将钢轨和道砟堆放在桥梁两侧及人行道上,导致荷载分布不均,最终引发桥梁横向失稳、坍塌^[16]。可见,规范的施工管理和正确合理的施工工艺对于避免桥梁在施工阶段倒塌具有重要意义。

1.2 运营与养护不当

2019年,台湾省宜兰县南方澳跨海大桥发生倒塌,如图3所示。事后分析表明,该桥缺失合理的养护管理,下锚头及附近吊杆被雨水锈蚀导致承载力不足,最终引起结构崩塌。此外,随着交通量的持续增长,特别是货运车辆的持续增多,桥梁因超载、超限运输而失效的风险日益增加^[17-18]。2015年,由于桥面上同时行驶4辆重型货车(实际总载质量约100 t),广东省粤赣高速河源城南出口匝道桥失稳倒塌,如图4所示。2019年,无锡市312国道锡港路上跨桥侧翻,事故发生时2辆重型平板半挂车严重超载且间距较近,超载荷载过于集中所产生的偏心效应导致梁体与墩柱之间发生滑动和转动,最终引发支座失效、梁体侧向滑移和倾覆。由此可见,管理和养护不善将显著提升桥梁工程的倒塌风险。

图3 南方澳跨海大桥倒塌事故^[19]Fig. 3 Collapse of the Nanfang'ao Sea-Crossing Bridge^[19]图4 粤赣高速河源城南出口匝道桥倒塌事故^[20]Fig. 4 Collapse of ramp bridge at south exit of Heyuan City on Yuegan Expressway^[20]

1.3 突发事件

船舶撞击等突发事件同样严重威胁着桥梁的安全。桥墩和支座是桥梁承载荷载的关键结构,一旦遭遇车辆或船舶撞击,这些支撑构件可能失效或被破坏,进而导致桥梁丧失承载能力而倒塌^[21-22]。2024年,一艘集装箱船撞击广东省沥心沙大桥桥墩,导致桥墩被破坏并引发桥面坍塌,造成人员伤亡和经济损失^[23],如图5所示;同年,建成于1977年的美国 Francis Scott Key 大桥桥墩在遭受船舶撞击后桥面垮塌,导致多人落水,并造成施工人员伤亡^[24],如图6所示。此外,船舶撞击还可能产生偏心荷载、桥梁关键部位变形或局部失稳,最终造成整体结构失效^[25]。1980年,在美国佛罗里达州阳光高架桥事故中,货船撞击桥梁后产生了巨大的冲击力,导致桥面断裂并垮塌^[26];2001年,在美国得克萨斯州伊莎贝拉皇后大桥撞击事故中,拖船所拖带的驳船在失控后撞击桥体导致桥拱塌陷,从而引发桥梁大范围垮塌。上述一系列由船舶撞击导致的倒塌事故凸显了对桥梁主要承重结构进行防撞设计的必要性。

图5 沥心沙大桥倒塌事故^[27]Fig. 5 Collapse of Lixinsha Bridge^[27]图6 Francis Scott Key 大桥倒塌事故^[27]Fig. 6 Collapse of Francis Scott Key Bridge^[27]

爆炸通常会直接损坏桥梁构件并引发结构倒塌。2013年,在中国连霍高速义昌大桥爆炸事故中,载有烟花爆竹的货车发生爆炸导致桥梁下部3根“T”形梁发生冲切破坏,进而导致约80 m长的桥面发生垮塌^[28];2022年,在俄罗斯克里米亚大桥的爆炸事故中,一辆卡车在公路段爆炸导致铁路桥上7节油罐列车起火,并使公路桥部分路面坍塌^[29]。火灾产生的高温则会严重削弱桥梁承载构件和桥面材料的强度,迅速降低结构的稳定性,进而导致结构大范围失效^[30]。2021年,意大利罗马台伯河工业桥发生火灾,高温不仅破坏了桥梁的主结构,还波及了煤气管道和电缆系统,最终导致桥梁支撑结构严重变形并引发桥体部分倒塌;2023年,在美国费城附近的95号州际公路立交桥火灾中,运输汽油的油罐车燃烧造成桥梁钢结构损伤,并导致桥梁部分倒塌^[31]。木质桥梁面临的火灾损毁风险更大。福建省建瓯市步月桥是以木质材料为主的桥梁,于2019年在火灾中被完全损毁;福建屏南县万安桥曾是中国最长木拱廊桥,在2022年的火灾中被烧毁。因此,评估潜在的爆炸和火灾风险并采取合理的防控措施将有助于桥梁结构倒塌风险的防控。

1.4 自然灾害

地震是最常见的自然灾害,地震可能造成桥梁

结构产生过大变形或支座失效,最终引发桥梁倒塌。1995年,日本阪神地震共导致318座桥梁倒塌,其中阪神高速上Fukae处的18跨桥梁全部倾覆^[32],其主要原因是中部纵向钢筋锚固长度过短,箍筋间距过大,桥墩中部纵筋出现了弯曲裂缝^[33]。地震引起的山体滑坡、泥石流等灾害也是桥梁倒塌的主要诱因^[34],2013年中国汉旺牛鼻子大桥垮塌和2014年罗羌湾大桥局部垮塌事件均与此类地震次生灾害有关。飓风、台风等大气运动具有突发性、复杂性和强破坏性^[35],极易引发桥梁结构的损毁,如1940年美国Tacoma海峡大桥由于风振作用而倒塌^[36]。长期或极端天气条件下的水流冲刷作用同样使桥梁面临着巨大的倒塌风险。例如:四川省眉山市岷江大桥在长期的水流冲刷下基底裸露严重,最终在2018年发生了桥面移位、落梁和桥墩倾覆事故^[37];2019年,福建省南平市局部降雨引发洪水,洪水的巨大波流冲击力和托浮力导致武夷山麻坊桥倒塌。

2 桥梁倒塌案例分析

2.1 上部结构破坏引发的桥梁倒塌

1) 梁桥。梁桥的上部结构主要由主梁、横梁及附属构件等组成,其失效通常始于局部裂纹或损伤。1994年,韩国汉江圣水大桥发生坍塌^[38],分析表明该桥在设计时未充分考虑交通量的远期发展,结构设计冗余度不足;在施工中,悬臂梁与悬跨梁铰接竖杆焊缝未完全熔透且过渡段坡度超过设计指标,显著削弱了疲劳强度;长期超载使用加剧了桥梁损伤,水汽和化学侵蚀则进一步导致混凝土和钢筋性能退化,最终结构局部失稳并演化为整体坍塌。悬臂梁桥上部结构的失效通常与悬臂端的受力状况密切相关,当悬臂端承受的荷载过大或者根部截面强度因施工缺陷或耐久性问题而被削弱时,悬臂梁桥可能出现严重的灾变。2004年,辽宁省盘锦市田庄台大桥北端桥面板垮塌,该事故由超限车辆的长期反复作用与严重超载车辆的瞬时冲击共同引发:在长期使用过程中,频繁通过的超限车辆导致桥梁内部预应力系统受损,结构承载能力逐渐降低;在超载车辆的动态荷载作用下,桥梁第9孔悬臂端的预应力筋首先发生脆性断裂,悬臂结构快速过载引发桥面板整体坍塌。

2) 拱桥。拱桥分为圬工拱桥、钢拱桥、钢管混凝土拱桥等,不同类型的拱桥具有各自独特的失效

模式。① 圯工拱桥的失效通常与砌块和砂浆之间的界面强度有关;多跨拱桥的连续坍塌事故则主要由某一跨内关键结构部件的局部失效引发。1982年,HEYMAN分析了圯工拱桥在极限荷载下的破坏模式,指出砌体拱桥的破坏主要是由主拱圈在抵抗内力与外部荷载时丧失平衡导致的^[39]。2007年,湖南省凤凰县沱江大桥的倒塌与主拱圈砌筑材料强度未达设计要求以及运营期间的局部累积损伤有关^[40],如图7所示。② 钢拱桥的倒塌机制通常包括平面内失效、平面外失效和空间失效三类^[41]。1983年,YABUKI等^[42]研究了钢拱桥平面外刚度不足对极限受力行为的影响,发现当竖向荷载增加时,钢拱桥会出现较大的平面外位移进而导致结构坍塌。2003年,CHENG等^[43]研究了大跨度钢拱桥在恒载和风荷载作用下的破坏模式,指出当风荷载较小时,随着平面内荷载的增加,结构会出现较大的平面内位移和较小的平面外位移,并导致平面内坍塌;施加较大风荷载则会导致平面内、外位移同时增大,从而引发空间坍塌。③ 近年来,钢管混凝土拱桥在平南三桥、天峨龙滩大桥等大跨度桥梁工程中得到了成功应用。钢管混凝土拱桥具有强度高、受力合理等特点,但施工风险高,有必要对其抗倒塌措施开展专门的研究^[44]。

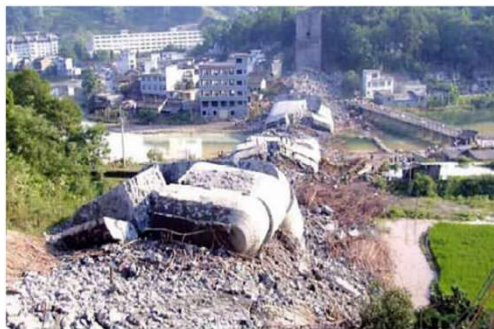


图7 沱江大桥倒塌事故^[41]

Fig. 7 Collapse of Tuojiang Bridge^[41]

3) 悬索桥。悬索桥的倒塌通常与主缆的腐蚀、疲劳损伤、拉索失衡、风荷载等因素有关。悬索桥的核心承载部分是主缆,故其承载能力的下降将直接影响桥梁的整体安全。2018年,缅甸 Myaung Mya 大桥因主缆与吊索的严重腐蚀等问题垮塌^[45],如图8所示。2022年,印度默丘河悬索桥在长期运营过程中,由于维护管理不善,主缆内部钢丝锈蚀严重,且在更换桥面铝板时未充分考虑主缆的承载能力导致部分钢丝断裂,桥面在自质量及剩余活载的作用下迅速失稳垮塌。



图8 Myaung Mya 大桥倒塌事故^[45]

Fig. 8 Collapse of Myaung Mya Bridge^[45]

4) 斜拉桥。斜拉桥上部结构由主梁、桥塔和斜拉索等组成,主要通过主梁承受交通荷载,拉索将主梁荷载传递至桥塔,并通过桥塔将荷载传递至地基。拉索作为桥梁关键受力构件,其断裂与长期腐蚀、疲劳裂纹扩展或瞬时超载等因素密切相关^[46]。一旦拉索断裂,荷载重新分布到其他拉索和主梁上,可能引发连锁反应,最终导致上部结构整体失效。2014年,湖南省郴州市赤石大桥在施工过程中,塔端电焊作业引起的火灾导致9根斜拉索断裂,使梁端下挠2 m。该事故虽未引发桥梁坍塌,但凸显了拉索对保持斜拉桥结构稳定性的重要性。此外,主梁结构损伤所导致的桥梁结构承载能力丧失也可能引发斜拉桥坍塌。2018年,意大利热那亚莫兰迪大桥倒塌事故是斜拉桥倒塌的典型案列。该桥始建于20世纪60年代,采用多跨斜拉结构,由支架和斜拉索共同承重。由于地处近海,环境腐蚀导致该桥主梁钢筋的腐蚀度达到68%,外侧部件钢筋的腐蚀度更是高达85%,导致主梁承载力大幅下降,最终在密集交通流量的共同作用下该桥梁坍塌。

2.2 下部结构破坏引发的桥梁倒塌

2.2.1 地基沉降与基础冲刷

地基沉降和基础冲刷都是桥梁下部结构失效的常见诱因,两者共同影响着桥梁结构的安全。2018年,云南省某悬索桥主塔基础在遭受强水流的严重冲刷后失稳,塔柱发生倾斜^[47]。塔柱倾斜导致主缆索力重新分布,进而造成桥面不均匀受力,最终导致桥梁整体坍塌。拱桥由于其独特的结构形式,对地基沉降和基础冲刷尤为敏感。广东省河源市东江大桥位于东江流域,地质条件复杂,软土层和砂层等不稳定地质结构导致地基沉降。同时,东江水流的冲刷作用严重侵蚀了桥墩基础,掏空了周围土体,导致桥墩发生倾斜和不均匀沉降,最终超限沉降引发该桥拱轴线变形和拱圈结构破坏,造成

桥梁坍塌^[48]。2021年,江苏省丹阳市老黄埭桥受水流冲刷,其基础周围土层流失,基础埋置深度减小并失去侧向支撑,桥墩失稳最终桥体断裂。2021年,越南金瓯省横跨 Cai Doi Vam 河的某桥梁的桥墩逐渐下沉、倾斜并出现裂缝,最终基础与桥墩分离,桥梁倒塌^[49],如图9所示。可见,控制地基沉降并减小水流对基础的冲刷有助于降低桥梁倒塌风险。



图9 越南某大桥倒塌事故^[49]

Fig. 9 Collapse of a bridge in Vietnam^[49]

2.2.2 船舶与落石撞击

船舶撞击极易导致桥梁下部结构失效,主要发生在船舶航行密集的水域或受漂流物影响的区域。1975年,坦克尔号油轮撞击美国佛罗里达阳光大桥,严重破坏了桥墩结构,引发桥梁坍塌,导致严重损失^[26]。1980年,一艘船舶偏离航线并高速撞向瑞典阿罗姆拱桥端部^[50],撞击产生的巨大惯性超出桥梁端部结构的设计承载能力,导致拱桥端部关键结构变形,桥梁关键部位失稳,桥面坍塌。2007年,广东省九江大桥遭受运砂船碰撞,桥墩被破坏并引发部分桥体垮塌^[51]。此外,桥梁基础也可能因山坡落石的冲击而被破坏。2023年,恩广高速达万段6号大桥桥墩遭落石撞击而损毁,导致部分桥面坍塌^[52],如图10所示。上述事故凸显了结合大型航运环境对桥梁设置多层防护系统(如防撞墩、水上护栏)的必要性。



图10 恩广高速达万段6号大桥倒塌事故^[52]

Fig. 10 Collapse of Bridge No. 6 on Dawan section of Enguang Expressway^[52]

3 桥梁抗倒塌性能的提升措施

3.1 地震作用下桥梁倒塌风险控制

3.1.1 设置阻尼系统

设置阻尼器可以有效减小地震作用下桥梁结构的位移和加速度响应,提高桥梁在地震中的稳定性,降低倒塌风险。常见的阻尼器有摩擦摆隔震器、金属阻尼器、黏弹性阻尼器、液体黏滞阻尼器、磁流变阻尼器等类型^[53]。摩擦摆隔震器通过隔离地震能量,使桥梁在地震中保持弹性变形,减小地震对主体结构的影响。例如:美国密西西比河上 I-40 大桥在用摩擦摆隔震器支座加固后可抵御新马德里断层上的7级地震^[54]。金属阻尼器主要是通过金属材料的塑性变形进行耗能来避免桥梁倒塌的^[55]。黏弹性阻尼器则通过其能量耗散特性将机械能转化为热能,以减小承载构件的内力和变形,提高结构的安全性和耐久性^[56]。液体黏滞阻尼器是依靠液体的黏滞特性来耗能的,当桥梁振动致使活塞在缸体内往复运动时,黏滞液体分子之间及活塞与缸体之间的摩擦均会产生阻尼力^[57]。磁流变阻尼器则是一种利用磁流变液体的磁流变效应制成的可调阻尼装置^[58],可通过精确的智能控制系统与桥梁监测设备的联动,实现阻尼力的最优分配。

3.1.2 采用摇摆自复位桥墩

摇摆自复位桥墩通过放松桥墩底部与承台的约束使桥墩在强震作用下发生摇摆,并利用结构的自质量和预应力筋提供的恢复力使结构恢复至原位。按结构构造特点与自复位实现方式的不同可将此类桥墩分为三类:内置无黏结预应力型、外置自复位耗能装置型和扩底提离摇摆型。内置无黏结预应力型桥墩依靠布置于桥墩内部的无黏结预应力实现自复位功能,通常另外附加耗能装置^[59]。外置自复位耗能装置型桥墩集耗能与自复位功能于一体,能够耗散地震能量并为桥墩提供恢复力。该装置通常外置,主要由耗能元件和复位元件组成,其中复位元件通常由形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)等材料制作而成^[60]。扩底提离摇摆型桥墩利用结构自质量提供自恢复力,并通过提离和摇摆运动来耗散能量。在地震作用下,桥墩底部的扩大部分允许桥墩在水平力的作用下提离地面并发生摇摆,其通过延长结构的自振周期来减小地震响应,从而降低结构的倒塌风险。

3.1.3 设置限位器与防落梁系统

桥梁限位器被广泛应用于地震高发区的桥梁工程中,其通过限制结构的纵、横向位移,有效提升桥梁在地震中的稳定性和抗震性能。限位器通常设置在支座附近,由钢筋混凝土或钢制构件组成,能够承受地震产生的较大水平力。限位器的设计需考虑地震烈度、桥梁类型和位移容许度,并通过合理分配刚度来保护桥梁结构并避免由此引起新的破坏。防落梁系统通过设置耗能型防落装置、限位挡块和锚固装置等来限制梁体与墩台间的相对位移,确保梁体不脱落,从而保障桥梁结构的连续性和稳定性。

3.2 设置桥梁防撞设施

桥墩防护设施通过分散外部荷载来达到增强桥墩抗冲击能力的目的。美国 AASHTO 规范提出了 5 种常用防船撞措施^[61]:① 护舷式防撞设施。该设施通过设置可控变形吸能装置或弹性体材料(如木材、橡胶、混凝土和钢等)来耗散撞击能量,具有设计灵活、适用范围广的特点。② 防撞岛。该措施通过堆积砂石形成缓冲区域,减缓失控船只的直接冲击,并将剩余冲击力分散到安全区域内,保护桥墩主体结构。③ 系船柱式防撞设施。该设施在大直径重力桩中填充混凝土、砂石或其他松散材料,通过撞击后的桩体位移来消散能量,在水域复杂的航道区域应用广泛。④ 桩支承式防撞设施。该设施在桥墩周围设置刚性单桩或桩群承台,通过桩体将冲击能量分散至基础土体中,可附着于桥墩外部或独立设置。⑤ 漂浮防撞设施。该设施通过高强度拉索的变形吸能与偏航引导,将撞击能量分散并改变失控船只的路径,特别适用于深水区域桥墩的防护。此外,中国《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)^[62]按照防撞设施与桥墩的位置关系对结构性防撞措施进行了细化,将其分为一体式、附着式和独立式三类,并规定了具体设计方法及选用原则。采用上述桥梁防撞设施可有效减小极端冲击条件下桥墩的局部失效概率,降低结构整体倒塌风险。

3.3 桥梁倒塌灾变的智能防控

2024 年 7 月,丹宁高速水阳段严坪村 2 号桥因突发山洪而局部垮塌,并造成 25 辆车坠河及 62 人遇难或失联的严重后果。同年 8 月,在雅康高速公路康定至泸定段 1 号隧道至 2 号隧道处,因突遇山洪泥石流隧间桥垮塌,由于事故发生在凌晨,隧道内昏暗且未有预警,车辆相继掉坠造成 5 人失联。

这些事故表明对桥梁在运维期间的状态进行全天候智能监测和预警具有重要意义。物联网技术可以通过传感器布设与无线通信技术,实时采集和传输桥梁健康数据,实现对桥梁的动态监测、故障诊断和风险预警自动化,从而有效减轻桥梁倒塌破坏所带来的后果。例如:钱江四桥、深圳西部通道、昂船洲大桥和苏通大桥等在桥梁施工阶段将特定类型的传感器(例如腐蚀传感器和光纤传感器)嵌入结构中以实施长效监测^[63]。这些技术能够及时发现桥梁结构中的潜在缺陷和安全隐患,为后续维修加固决策提供依据,有助于实现预防桥梁倒塌以及在桥梁倒塌后实时预警的目标。

4 结 语

本文对国内外桥梁的倒塌事故进行了总结和分析,结果表明设计和施工缺陷、运营和养护不当、自然灾害等均是桥梁倒塌的主要诱因;结合具体桥梁倒塌案例,探讨了不同类型桥梁结构在倒塌灾变过程中的初始破坏位置和破坏特征;基于现有桥梁防灾技术的研究进展,探讨了桥梁结构抗倒塌性能的提升路径。

本文的内容对于全面认识桥梁倒塌行为、提升桥梁结构的抗倒塌性能具有参考和借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2023 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2024-06-18) [2024-12-29]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202406/content_6957901.htm.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transport industry in 2023 [EB/OL]. (2024-06-18) [2024-12-29]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202406/content_6957901.htm.
- [2] MALERBA P G. Bridge vulnerabilities and collapses: the Italian experience [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2024, 20(7-8): 976-1001. DOI: 10.1080/15732479.2023.2277362.
- [3] BOAKYE J, GUIDOTTI R, GARDONI P, et al. The role of transportation infrastructure on the impact of natural hazards on communities [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 219: 108184. DOI: 10.1016/j.res.2021.108184.
- [4] ABDELHAMID T S, EVERETT J G. Identifying root causes of construction accidents [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2000, 126(1): 52-60. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2000)126:1

- (52).
- [5] MITROPOULOS P, ABDELHAMID T S, HOWELL G A. Systems model of construction accident causation[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2005, 131(7): 816-825. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:7(816).
- [6] PEARSON C, DELATTE N. Collapse of the Quebec bridge, 1907[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(1): 84-91. DOI: 10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:1(84).
- [7] HAO S. I-35W bridge collapse[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(5): 608-614. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000090.
- [8] KAWAI Y, SIRINGORINGO D, FUJINO Y. Failure analysis of the hanger clamps of the Kutai-Kartanegara Bridge from the fracture mechanics viewpoint[J]. Journal of JSCE, 2014, 2(1): 1-6. DOI: 10.2208/journalofjsce.2.1_1.
- [9] SCHEER J. Failed bridges: case studies, causes and consequences[M]. Berlin: John Wiley & Sons, 2010.
- [10] DIAZ E E M, MORENO F N, MOHAMMADI J. Investigation of common causes of bridge collapse in Colombia[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2009, 14(4): 194-200. DOI: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000006.
- [11] PUJOL, KREGER, MONICAL, et al. Investigation of the collapse of the Chirajara Bridge[J]. Concrete International, 2006, 41: 29-37.
- [12] NGHIA N T, SAMEC V. Cable-stay bridges: investigation of cable rupture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 4(5): 270-279. DOI: 10.17265/2328-2142/2016.05.006.
- [13] 搜狐网. 在建大桥突然垮塌, 另一半遭爆破拆除, 原因何在?[EB/OL]. (2018-07-19)[2024-12-29]. https://www.sohu.com/a/242256737_689822.
Sohu. com. A bridge under construction suddenly collapsed, and the other half was demolished by blasting. What was the cause?[EB/OL]. (2018-07-19)[2024-12-29]. https://www.sohu.com/a/242256737_689822.
- [14] 吴地球. 架塌桥垮原因何在: 韶关市白桥坑大桥坍塌事故调查[J]. 劳动保护, 1997(10): 34-36.
WU Diqiu. What were the reasons for the collapse of the bridge? Investigation on the collapse accident of Baiqiaokeng Bridge in Shaoguan City[J]. Labour Protection, 1997(10): 34-36.
- [15] 卢啸, 陆新征, 叶列平, 等. 钢筋混凝土拱桥构件重要性评价及超载导致倒塌破坏模拟[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(3): 26-30. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-0871.2010.03.006.
LU Xiao, LU Xinzhen, YE Lieping, et al. Component importance evaluation and overload-induced collapse simulation for reinforced concrete arch bridge[J]. Computer Aided Engineering, 2010, 19(3): 26-30. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0871.2010.03.006.
- [16] 柴德涛. 加强铁路营业线施工人身安全管理对策研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(12): 194-197.
CHAI Detao. Research on countermeasures for strengthening personal safety management in construction of railway business line[J]. Railway Construction Technology, 2023(12): 194-197.
- [17] FU G K, HAG-ELSAFI O. Vehicular overloads: load model, bridge safety, and permit checking[J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(1): 49-57. DOI: 10.1061/(asce)1084-0702(2000)5:1(49).
- [18] WANG Y L, TIAN J, ZHENG D, et al. A failure analysis of the long-term overturning stability of concrete continuous single-column pier bridges considering creep and overloaded vehicles[J]. Buildings, 2024, 14(7): 1987. DOI: 10.3390/buildings14071987.
- [19] 《城市与减灾》编辑部. 图片新闻[J]. 城市与减灾, 2019(5): 2-3.
Editorial Department of City and Disaster Reduction. Photo news[J]. City and Disaster Reduction, 2019(5): 2-3.
- [20] 赵少杰, 唐细彪, 任伟新. 桥梁事故的统计特征分析及安全风险防控原则[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(5): 59-64.
ZHAO Shaojie, TANG Xibiao, REN Weixin. The statistical characteristics analysis of bridge accidents and prevention principle of security risk[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(5): 59-64.
- [21] PENG Y, HARIK I E, DAVIDSON M T. Multi-barge flotilla impact forces on bridges[R]. Lexington: Kentucky Transportation Center, 2008.
- [22] 刘意, 王国华, 李年航, 等. 桥墩防撞等级评估方法及其应用[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 88-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.013.
LIU Yi, WANG Guohua, LI Nianhang, et al. Assessment method and application of anti-collision grade of bridge pier[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 88-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.013.
- [23] 田怀念. 广州沥心沙大桥复合防撞装置抗撞性能分析[J]. 桥梁建设, 2023, 53(5): 66-73. DOI: 10.20051/j. issn. 1003-4722.2023.05.009.
TIAN Huainian. Analysis of collision protection performance of composite anti-collision devices for Lixinsha Bridge in Guangzhou[J]. Bridge Construction, 2023, 53(5): 66-73. DOI: 10.20051/j. issn. 1003-4722.2023.05.009.
- [24] SHUKLA R, PABBISETTY S K, JAYANTHI S, et al. Evaluating the damage of collapsed bridges using remote sensing technologies. Case study: Baltimore's Francis Scott Key Bridge[J]. Building Engineering, 2024, 2(2): 1811. DOI: 10.59400/be.v2i2.1811.
- [25] GHOLIPOUR G, ZHANG C W, MOUSAVI A A. Nonlinear numerical analysis and progressive damage assessment of a cable-stayed bridge pier subjected to ship collision[J]. Marine Structures, 2020, 69: 102662.

- DOI:10.1016/j.marstruc.2019.102662.
- [26] CHANDRA V, SZECSEI G. Sunshine skyway bridge ship impact design of low level approaches [J]. PCI Journal, 1988, 33 (4) : 96-123. DOI: 10.15554/pci.07011988.96.123.
- [27] ZHANG W Z, PAN J, SANCHEZ J C, et al. Review on the protective technologies of bridge against vessel collision [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 201: 112013. DOI:10.1016/j.tws.2024.112013.
- [28] MA L L, WU H, FANG Q. Damage mode and dynamic response of RC girder bridge under explosions [J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112676. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112676.
- [29] TANG D N, HUANG M S. The sustainable development of bridges in China: collapse cause analysis, existing management dilemmas and potential solutions [J]. Buildings, 2024, 14 (2) : 419. DOI: 10.3390/buildings14020419.
- [30] ASTANEH-ASL A, NOBLE C R, SON J, et al. Fire protection of steel bridges and the case of the MacArthur Maze fire collapse [C]//TCLEE 2009. Oakland: American Society of Civil Engineers, 2009: 1-12. DOI: 10.1061/41050(357)69.
- [31] KODUR V K R, GIL A M, NASER M Z. Fire-induced collapse of an I-95 overpass in Philadelphia: causes, collapse mechanism, and mitigation strategies [J]. Engineering Structures, 2024, 303: 117578. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117578.
- [32] MYLONAKIS G, SYNGROS C. The collapse of Fukae (Hanshin Expressway) bridge, Kobe, 1995: the role of soil and soil-structure interaction[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. New York: [s.n.], 2004.
- [33] 唐伟健, 王东升, 张鹏飏, 等. 桥梁震害的历史回顾(上)[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(4): 70-80. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.04.70.tangwj.008.
TANG Weijian, WANG Dongsheng, ZHANG Pengyang, et al. A review of the seismic damage history of bridges (I) [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41 (4) : 70-80. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.04.70.tangwj.008.
- [34] 康孝先. 4.14玉树地震对桥梁的损伤和应急处治 [J]. 交通科学与工程, 2010, 26(2): 42-47.
KANG Xiaoxian. Damage and emergency treatments for bridges in 4.14 Yushu Earthquake [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(2): 42-47.
- [35] ROBERTSON I N, RIGGS H R, YIM S C, et al. Lessons from Hurricane Katrina storm surge on bridges and buildings [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2007, 133(6): 463-483. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(2007)133:6(463).
- [36] GREEN D, UNRUH W G. The failure of the Tacoma Bridge: a physical model [J]. American Journal of Physics, 2006, 74(8): 706-716. DOI:10.1119/1.2201854.
- [37] 彭卫兵, 沈佳栋, 唐翔, 等. 近期典型桥梁事故回顾、分析与启示[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 132-144. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.12.014.
PENG Weibing, SHEN Jiadong, TANG Xiang, et al. Review, analysis, and insights on recent typical bridge accidents [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (12) : 132-144. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.12.014.
- [38] KWON K, CHOI Y, KONG J S. Development of maintenance systems for bridge members [M]//Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems. London: CRC Press, 2023: 477-484. DOI: 10.1201/9781003323020-56.
- [39] HONG J H, CHIEW Y M, LU J Y, et al. Houfeng Bridge failure in Taiwan region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138 (2) : 186-198. DOI: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000430.
- [40] 国家安全生产监督管理总局监管二司. 凤凰大桥坍塌原因详解[J]. 劳动保护, 2008(3): 27-29.
The Second Department of Supervision, State Administration of Work Safety. Detailed explanation of the collapse of the Fenghuang Bridge [J]. Labour Protection, 2008(3): 27-29.
- [41] DENG L, WANG W, YU Y. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30 (2) : 04015005. DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000731.
- [42] YABUKI T, VINNAKOTA S, KURANISHI S. Lateral load effect on load carrying capacity of steel arch bridge structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109 (10) : 2434-2449. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1983)109:10(2434).
- [43] CHENG J, JIANG J J, XIAO R C, et al. Ultimate load carrying capacity of the Lu Pu steel arch bridge under static wind loads [J]. Computers & Structures, 2003, 81 (2) : 61-73. DOI:10.1016/S0045-7949(02)00433-9.
- [44] GUI C Z, LIN W W, HUANG Z W, et al. A decision-making algorithm for concrete-filled steel tubular arch bridge maintenance based on structural health monitoring [J]. Materials, 2022, 15 (19) : 6920. DOI: 10.3390/ma15196920.
- [45] HEGEIR O, MIZUTANI T, MATSUMOTO K, et al. The cause estimation of damages in Pathein suspension bridge based on vibration measurements [J]. Proceedings, 2018, 2(8): 379. DOI: 10.3390/ICEM18-05209.
- [46] WOLFF M, STAROSSEK U. Cable loss and progressive collapse in cable-stayed bridges [J]. Bridge Structures, 2009, 5(1): 17-28. DOI:10.1080/15732480902775615.
- [47] XIONG W, CAI C S, ZHANG R Z, et al. Review of hydraulic bridge failures: historical statistic analysis, failure modes, and prediction methods [J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28 (4) : 03123001. DOI:

- 10.1061/jbenf2.beeng-5763.
- [48] SUN J P, ZHANG J J, HUANG W F, et al. Investigation and finite element simulation analysis on collapse accident of Heyuan Dongjiang Bridge [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115: 104655. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104655.
- [49] 搜狐网. 越南投资707亿建286米大桥, 剪彩前突然倒塌, 这究竟是怎么回事?[EB/OL]. (2022-04-27)[2024-12-29]. https://www.sohu.com/a/541712491_120602866. Sohu. com. Vietnam invested 70.7 billion (in local currency) to build a 286-meter-long bridge, which suddenly collapsed before the ribbon-cutting ceremony. What exactly happened? [EB/OL]. (2022-04-27)[2024-12-29]. https://www.sohu.com/a/541712491_120602866.
- [50] 关少荣. 瑞典阿罗姆拱桥因船舶撞击而坠落[J]. 铁道科技动态, 1981(13): 6. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.1981.13.002.
- GUAN Shaorong. The arch bridge in Arrom, Sweden, fell due to ship collision[J]. China Railway, 1981(13): 6. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.1981.13.002.
- [51] XU F Y, ZHANG M J, WANG L, et al. Recent highway bridge collapses in China: review and discussion [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(5): 04016030. DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000884.
- [52] 四川新闻网. 恩广高速达万段桥梁坍塌情况通报: 周边山体突发崩塌, 巨石冲毁桥梁墩柱[EB/OL]. (2023-07-06)[2024-12-29]. <https://news.qq.com/rain/a/20230706A06FFM00>.
- NEWSSC.org. Report on the collapse of a bridge on the Dawan section of the Enguang Expressway: a sudden collapse of surrounding mountain sides caused boulders to destroy the bridge piers[EB/OL]. (2023-07-06)[2024-12-29]. <https://news.qq.com/rain/a/20230706A06FFM00>.
- [53] 张煜敏, 代建波, 翁光远. 梁桥HDR支座的优化配置及抗震效能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(2): 50-58. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2019.02.007.
- ZHANG Yumin, DAI Jianbo, WENG Guangyuan. Research on optimal allocation and isolation effect of high-damping rubber bearing on highway bridges [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(2): 50-58. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2019.02.007.
- [54] 周云, 龚健. 摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻(II): 摩擦摆隔震结构的性能分析及摩擦摆隔震技术的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 1-19. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2010.04.014.
- ZHOU Yun, GONG Jian. State of the art and prospect of the research and application of friction pendulum isolation technology (II): performance analysis of friction pendulum isolated structures and applications of friction pendulum isolation technology [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4): 1-19. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2010.04.014.
- [55] DENG K L, PAN P, SU Y K, et al. Development of an energy dissipation restrainer for bridges using a steel shear panel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 83-95. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.03.009.
- [56] 彭国威, 陶忠, 徐荣荣, 等. 新型雀替式黏弹性阻尼器试验与力学性能分析[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(5): 210-217. DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0520.
- PENG Guowei, TAO Zhong, XU Rongrong, et al. Experimental and mechanical performance analysis of novel sparrow brace type viscoelastic dampers [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(5): 210-217. DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0520.
- [57] GUO A X, LI H. Pounding reduction of highway bridges with pounding effect by using magnetorheological dampers under earthquake excitations [J]. Advances in Structural Engineering, 2008, 11(3): 305-322. DOI: 10.1260/136943308785082562.
- [58] IMADUDDIN F, MAZLAN S A, ZAMZURI H. A design and modelling review of rotary magnetorheological damper [J]. Materials & Design, 2013, 51: 575-591. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.042.
- [59] 石岩, 钟正午, 秦洪果, 等. 装配铅挤压阻尼器的摇摆-自复位双柱墩抗震性能及设计方法[J]. 工程力学, 2021, 38(8): 166-177, 203. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0575.
- SHI Yan, ZHONG Zhengwu, QIN Hongguo, et al. Seismic performance and corresponding design method of rocking self-centering bridge bents equipped with lead-extrusion dampers [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(8): 166-177, 203. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0575.
- [60] 邵舒. 带SMA杆自复位桥墩抗震性能分析[J]. 公路, 2019, 64(10): 82-88.
- SHAO Shu. Seismic behavior analysis of self-centering pier with SMA bars [J]. Highway, 2019, 64(10): 82-88.
- [61] LIU B D, YANG S Z, LI W L, et al. Damping dissipation properties of rubberized concrete and its application in anti-collision of bridge piers [J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117286. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117286.
- [62] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗撞设计规范: JTG/T 3360-02—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for collision design of highway bridges: JTG/T 3360-02—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [63] KO J M, NI Y Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges [J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1715-1725. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.02.021.

(责任编辑:石月珍)