

# 论建筑桥梁工程地震伤害的成因及防震方案

向星宇<sup>1</sup> 张力文<sup>2</sup>

1. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400074

2. 重庆市弘禹水利咨询有限公司, 重庆 401120

**[摘要]** 桥梁是现代交通系统中不可或缺的重要组成部分, 它承载着连接不同地区、支撑运输网络的重大责任。随着地震灾害频繁发生, 桥梁的抗震能力已成为建设工程中的关键研究领域。地震造成的损失不仅限于人员伤亡, 还会严重影响社会经济活动, 尤其是交通中断造成的影响。为了有效降低桥梁在地震中的破坏程度, 提高桥梁的抗震能力, 相关设计和技术得到了迅速发展。如今, 随着抗震理论及技术的不断革新, 桥梁的抗震设计已不再仅仅依赖传统的被动防御, 而是融入了更多主动防护手段。近年来, 诸如减震支座、冗余设计等技术的应用, 显著增强了桥梁的抗震性能。本研究旨在探讨不同桥梁类型及施工环境下的抗震设计方案, 分析相关技术对提升桥梁抗震能力的具体作用, 为桥梁工程的抗震设计提供理论依据与实践指导。

**[关键词]** 桥梁震害; 抗震设计; 减隔震技术; 能量耗散; 地基稳定性

DOI: 10.33142/ect.v3i4.16095

中图分类号: TU352

文献标识码: A

## Discussion on the Causes of Earthquake Damage in Building and Bridge Engineering and Seismic Prevention Plans

XIANG Xingyu<sup>1</sup>, ZHANG Liwen<sup>2</sup>

1. Chongqing Jianzhu College, Chongqing, 400074, China

2. Chongqing Hongyu Water Conservancy Consulting Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

**Abstract:** Bridges are an indispensable and important component of modern transportation systems, carrying the significant responsibility of connecting different regions and supporting transportation networks. With the frequent occurrence of earthquake disasters, the seismic resistance of bridges has become a key research area in construction projects. The losses caused by earthquakes are not limited to casualties, but also seriously affect social and economic activities, especially the impact caused by traffic interruptions. In order to effectively reduce the degree of damage to bridges during earthquakes and improve their seismic resistance, relevant designs and technologies have been rapidly developed. Nowadays, with the continuous innovation of seismic theory and technology, the seismic design of bridges no longer relies solely on traditional passive defense, but incorporates more active protection measures. In recent years, the application of technologies such as shock-absorbing bearings and redundant design has significantly enhanced the seismic performance of bridges. The purpose of this study is to explore seismic design schemes for different types of bridges and construction environments, analyze the specific role of relevant technologies in improving the seismic resistance of bridges, and provide theoretical basis and practical guidance for seismic design of bridge engineering.

**Keywords:** bridge damage; seismic design; seismic isolation technology; energy dissipation; foundation stability

### 引言

地震被认为是自然灾害中最具破坏力的灾难之一, 其对桥梁等建筑设施的威胁尤为严重。桥梁作为重要的交通枢纽, 承担着关键的功能, 其抗震性能的优劣直接影响着交通运输的安全与城市的正常运转。在过去的多个地震灾区, 桥梁的损毁不仅造成了巨大的经济损失, 还导致了交通网络的严重中断。近年来, 地震发生频率逐渐增加, 这种破坏性对桥梁的影响尤为显著, 特别是那些在设计时未能充分考虑抗震能力的桥梁。此类桥梁在地震中极易发生变形、裂缝甚至倒塌, 严重影响灾后恢复。尤其是对于位于高地震风险区的桥梁, 抗震设计显得尤为关键。随着科技的进步, 学术界和工程实践者已提出了多个创新的桥梁抗震设计方法, 包括新型材料、结构形式和技术的引入。这些进展不仅提升了桥梁的抗震能力, 也使得桥梁设计更加高效与安全。

### 1 桥梁震害的主要表现形式

#### 1.1 上部结构损毁

地震动荷载对桥梁上部结构的破坏具有显著的动力学特征。梁式桥梁在水平地震波作用下, 主梁与盖梁间的相对位移易超出构造设计容许范围, 引发梁端撞击或滑移倾覆。以1995年阪神地震为例, 位于神户港岛线的高架桥群中, 多跨简支T梁因横向限位装置失效, 相邻梁体产生超过300mm的相位差位移, 最终形成多米诺式连续倾覆。拱桥的破坏则呈现空间力学特性, 2008年汶川地震中, 某跨径120m的钢筋混凝土箱型拱桥因拱脚截面抗弯刚度不足, 在P波竖向冲击下发生混凝土保护层爆裂, 钢筋裸露屈曲, 最终导致拱轴线扭曲变形。值得注意的是, 斜拉桥与悬索桥等柔性体系虽具有较好变形适应能力, 但1994年美国北岭地震中, 文森特·托马斯大桥斜拉索锚固区仍出现应力集中导致的钢

构件疲劳裂纹，揭示了复杂结构体系抗震的薄弱环节。

## 1.2 支座系统失效

支座的动力响应特性直接决定地震能量在上部结构与下部结构间的分配模式。铅芯橡胶支座作为典型隔震装置，其失效往往源于芯材与橡胶层的界面剥离。2011年新西兰基督城地震中，曼彻斯特街立交桥的LRB支座在经历多次强余震后，铅芯出现熔断现象，橡胶层发生45°对角线撕裂，导致梁体产生累计位移达220mm。盆式支座的破坏机制则具有明显脆性特征，2016年意大利中部地震中，某连续梁桥的盆式支座因不锈钢板与聚四氟乙烯板的摩擦系数突变，导致滑动面产生局部熔焊，完全丧失位移释放功能。

## 1.3 下部结构断裂

桥墩柱的破坏模式与配筋构造、轴压比等参数密切相关。2016年意大利阿马特里切地震中，A24高速公路某双柱式桥墩因纵筋搭接长度不足，在弯剪复合作用下形成贯通性斜裂缝，混凝土保护层呈鳞片状剥落，最终引发墩顶位移角超过3%的不可逆损伤<sup>[1]</sup>。独柱墩结构在强震中的表现尤为脆弱，1999年台湾集集地震中，名竹大桥的圆形独柱墩因箍筋间距过大，在水平地震力作用下发生典型的“灯笼状”破坏，纵筋向外鼓曲达150mm。此外，基础与墩柱连接部位的破坏具有隐蔽性特征，2004年新潟地震中，信浓川铁路桥的扩大基础因地基液化产生不均匀沉降，导致墩柱根部出现环向裂缝并伴随混凝土压碎。

## 1.4 地基位移与沉降

场地效应对桥梁震害的放大作用在冲积平原区域尤为显著。1964年日本新潟地震期间，信浓川下游冲积层发生大规模液化，导致多座桥梁产生超过2m的差异沉降，桥墩呈现“醉汉式”倾斜。2011年东日本大地震中，仙台港区域因海沟型地震引发长周期地震动，深厚软土层产生水平向永久位移，某三跨连续梁桥的桩基础受地层运动牵引，导致承台与桩身连接处出现45°剪切裂缝<sup>[2]</sup>。特殊地质条件下的震害更具复杂性，2008年汶川地震中，位于龙门山断裂带的百花大桥受逆冲断层影响，桥台基础发生垂直错动达2.3m，引发引桥与主桥衔接段完全脱离。

## 2 桥梁震害的原因分析

### 2.1 桥梁结构设计缺陷

由于地壳的持续运动，梁式桥梁的盖梁宽度偏窄，导致上部结构的节点与落梁之间不断发生摩擦与碰撞，从而引发损坏。而拱式桥梁则主要表现为拱上与拱腹部分受到破坏，尤其是拱脚和拱顶处出现裂缝，进一步可能导致整个拱形结构发生变形。

### 2.2 抗震设计不足

在桥梁建设过程中，如果未充分考虑抗震设计要求，支座可能会遭受严重损害。当桥梁遭遇强烈地震时，支座需要承受更高的要求。由于支座连接部位设计不当或材料不符合标准等缺陷，可能导致支座发生剧烈变形，甚至出现螺栓弹出、支座压断或活动部位脱落等现象，从而使桥梁在地震力传递过程中发生严重损坏。

### 2.3 桥梁下部结构缺陷

有时桥梁下部结构的损坏是由于底部设计存在缺陷，导致无法有效承载桥梁自重和传递的地震力，从而发生形变或裂纹，最终导致桥梁整体破坏。

### 2.4 不稳固的地基

在松软的河边土地上建造桥梁，尤其是地基不稳时，地震力可能导致桥梁发生位移，出现向河岸滑动的现象，甚至使桥台向河心方向移动，这种情况的后果极为严重。

## 3 桥梁抗震设计的基本原则

桥梁在遭遇地震时，可能会因突发性的剧烈振动而遭受严重破坏，尤其是当抗震能力不足时，局部结构的损伤往往会进一步加剧，甚至引发整体垮塌。为了确保桥梁在地震中的稳定性和安全性，科学合理的抗震设计显得尤为关键。在设计过程中，不仅要增强桥梁抵御地震荷载的能力，还需兼顾其在受力状态下的合理变形，以减少结构因地震作用产生的损坏。抗震设计应当遵循若干基本原则，以保证桥梁在复杂地质条件下具备良好的抗震性能。

### 3.1 整体抗震体系的协同作用

桥梁结构的抗震能力，取决于各构件之间的协调作用以及整体受力体系的合理性。若桥梁不同部分的刚度分布不均匀，地震荷载作用下极易导致局部受力失衡，使部分结构出现应力集中或破坏，从而影响整体稳定性。为确保桥梁在震动环境下保持良好的受力状态，设计时需优化构件刚度分配，使地震能量沿合理路径传递并有效耗散。

对于大跨径桥梁，刚性桥墩与柔性梁体的组合设计有助于提高抗震能力。这种结构形式能够有效减少地震时的冲击荷载，并增强桥梁整体稳定性。例如，东京湾跨海大桥在结构设计时，采用刚性桥墩与柔性梁体相结合的方式，使塑性铰在墩柱部位形成，从而在地震作用下吸收能量，减少对桥梁主体结构的破坏程度。同时，在桥梁支座部位设置滑动支撑，可有效调节相对位移，进一步提升抗震性能，使其在强震环境中具备更好的稳定性。

### 3.2 延性设计及能量消耗机制

桥梁抗震设计中，延性是衡量结构抗震能力的重要指标之一。若桥梁结构缺乏足够的延展性，在强震作用下极易出现脆性破坏，从而导致严重的工程灾害。为了降低震害风险，抗震设计时应充分考虑结构的延性，使其在地震发生时能够发生可控的塑性变形，从而吸收并耗散地震能量，以减小对桥梁结构的冲击。

桥墩作为桥梁的重要承重构件，其抗震性能直接决定了桥梁整体的稳定性。优化桥墩的配筋方式，选用高强度钢筋或纤维增强混凝土材料，可有效提升塑性变形能力，提高抗震性能。箍筋布置若不足，延性表现将受到明显限制，在强烈地震作用下易发生剪切破坏，最终可能影响桥梁结构的整体安全性。通过合理的延性设计，不仅可有效降低局部损伤程度，也能在震后保持桥梁的整体受力稳定性，提高抗震能力。

### 3.3 多重抗震防护措施

单一抗震措施难以确保桥梁在强震中的安全性，因此，

采用多层次的抗震保护策略十分必要。通过建立多道防线,在局部结构受损的情况下,仍可维持桥梁的整体稳定性,从而降低灾难性后果发生的概率。桥梁自身的抗震性能是基础保障,通过合理的结构优化,可有效降低地震荷载对主梁、桥墩等关键构件的影响。在连续梁桥的抗震设计中,针对桥墩与梁体连接方式进行优化,可降低地震荷载集中带来的不利影响<sup>[3]</sup>。隔震装置的应用,是削弱地震能量传递的一种有效方法,如高阻尼橡胶支座、摩擦摆隔震支座及各类阻尼器,均可在地震发生时降低桥梁结构的振动幅度。此外,为防止梁体因支座损坏而发生坠落,设置防落梁装置与抗拉链系统,可使桥梁即便在关键部位损坏的情况下仍保持整体稳定,避免灾害扩大。

### 3.4 场地条件适应性与地基稳定性

桥梁抗震能力的发挥,与其所在区域的地质条件密切相关。如果地基不够稳固,在地震过程中可能出现沉降、滑移或液化等现象,从而对桥梁的稳定性造成极大影响。因此,在抗震设计时,需要结合场地的地质条件选择合适的桥梁结构,并对地基的承载能力进行针对性处理,以降低地震作用带来的安全隐患。若桥梁建于软土地基之上,而未采取相应的加固措施,地震时可能因地基液化使桥墩丧失必要的支撑能力,最终导致结构破坏。为了增强地基抗震能力,可采用深层搅拌桩、CFG桩、高压喷射灌浆等地基处理技术,以提高承载能力,减少地震引发的不均匀沉降。例如,关东大地震后,为提高桥梁基础的抗震性能,采用了挡土墙加固和垫层增强措施,使桥梁整体稳定性显著提升。在地震活动频繁的区域,结合深桩基础与抗拔桩的设计,可有效降低地基变形风险,为桥梁提供更加稳固的支撑体系。

## 4 桥梁工程防震技术方案

### 4.1 结构优化与冗余设计

结构优化与冗余设计的应用,对桥梁抗震能力的提升发挥了显著作用。通过优化结构布置,荷载可以更加均匀地分配到各个构件,避免了局部应力的集中,从而有效减少了局部破坏的风险。冗余设计则进一步增强了桥梁的安全性,即使部分构件出现失效,桥梁整体的承载能力仍能得到保障,从而避免了结构的全面崩塌。以旧金山-奥克兰海湾大桥为例,其抗震改造工程采用了全桥连续钢箱梁结构。这种设计减少了桥梁在地震中的位移需求,同时提升了整体结构刚度,从而增强了桥梁的稳定性。对于悬索桥等桥型,在抗震设计中增加抗震钢索或辅助承重构件,可进一步改善抗震性能,确保桥梁在强震中的稳定性。

### 4.2 减隔震技术应用

减隔震技术逐渐成为现代桥梁抗震设计的核心手段之一。在设计过程中,通过配置隔震支座与阻尼器,可以有效控制地震能量的传递,从而减少桥梁结构的震动响应。摩擦摆隔震支座(FPS)作为一种先进的隔震设备,在大型桥梁的抗震设计中得到广泛应用。该设备通过滑动摩擦机制来消耗地震能量,从而显著减小桥梁的水平位移。黏滞阻尼器的加入有助于减少震动幅度,从而进一步提高桥

梁的抗震能力。例如,墨西拿海峡大桥采用的三级隔震系统,包括摩擦摆支座、橡胶隔震支座及黏滞阻尼器,这一设计确保了桥梁在多种震级下都能维持较高的安全性。

### 4.3 下部结构加固与基础处理

在抗震设计中,桥梁下部结构的稳定性至关重要。因此,桥墩与基础的加固措施需要在设计阶段得到充分重视。通过外包钢板或应用碳纤维复合材料,能够有效提高桥墩的抗弯能力,并增强结构的延性,从而使桥梁能够更好地应对地震带来的变形要求。同时,桩基加固、地基改良以及抗液化处理等措施,有效地降低了地震作用下的地基失稳风险,确保了桥梁基础的稳定性,为整体结构提供了更强的抗震保障。

### 4.4 高性能材料与智能监测系统

随着工程材料技术的不断进步,越来越多的高性能材料被应用于桥梁抗震设计中,进一步提高了结构的抗震能力。超高性能混凝土(UHPC)因其出色的抗压强度及延展性,在桥梁结构中得到广泛应用。高强度钢筋的使用,显著提高了桥梁在地震作用下的塑性变形能力,减少了震害的发生概率。同时,智能监测系统的引入使得桥梁在地震过程中的震动响应能够实时被监测。通过对监测数据进行分析与处理,能够提前发现潜在的结构损伤,从而及时采取修复或加固措施,减少震害的影响,提升桥梁的长期使用性能和安全性。

## 5 结语

随着全球城市化进程的加速,桥梁在各类基础设施中的重要性日益凸显。然而,桥梁在地震灾害中的表现直接关系到其安全性和可持续性。为应对地震引发的风险,桥梁的抗震设计已成为土木工程研究中的一项核心议题。通过对当前桥梁抗震设计原则及技术方案的深入探讨,本文分析了如何通过结构优化、冗余设计、减隔震技术等多种手段来增强桥梁的抗震能力。结合国内外多个抗震设计案例的研究,本文进一步表明高性能材料与智能监测技术在提高桥梁抗震性能方面具有重要作用。随着相关技术的不断进步,抗震设计的理念已从单一的结构加固转向多层次的防护与智能化设计。未来,随着抗震技术的进一步创新与发展,桥梁将在应对地震灾害方面发挥更加显著的作用,为全球基础设施的稳定性与安全性提供坚实保障。

### [参考文献]

[1] 匡文飞. 门式墩—桥梁—轨道—接触网系统地震易损性分析[D]. 长沙:中南大学,2023.

[2] 冯佳. 桥梁工程中地震韧性的评估和优化[J]. 工程技术研究,2023,8(22):187-189.

[3] 罗承轶. 桥梁工程中隔震支座对地震响应影响的实验研究[J]. 交通建设与管理,2024(4):84-86.

作者简介:向星宇(1997.2—),毕业院校:中南大学,所学专业:土木工程,就职单位职务:专任教师,当前就职单位名称:重庆建筑工程职业学院;张力文(1997.7—),毕业院校:大连理工大学,所学专业:土木建筑,当前就职单位名称:重庆市弘禹水利咨询有限公司,就职单位职务:纪检委员,职称级别:助理工程师。