

城市高架桥抗震设计关键技术与结构体系分析

梁朝阳 袁野*

雄安城市规划设计研究院有限公司, 河北 保定 071700

[摘要]城市交通的重要基础设施城市高架桥,其抗震性能直接影响地震灾害中的交通安全与救援效率,要分析高架桥在不同地质条件和结构形式下的受力行为需结合地震作用下的动力特性,并且探讨支座设计、墩柱刚度分布、隔震减震技术在结构体系中的协同作用,提出基于性能的抗震设计理念以优化结构布置并提高整体抗震韧性和恢复力,采用典型案例研究的方式验证关键技术在实际工程中的适用性与有效性,从而为高架桥抗震设计提供技术支持。

[关键词]城市高架桥;抗震设计;结构体系;隔震技术;性能化设计

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18349

中图分类号: U448.28

文献标识码: A

Key Technologies and Structural System Analysis for Seismic Design of Urban Elevated Bridges

LIANG Chaoyang, YUAN Ye*

Xiong'an Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071700, China

Abstract: Urban elevated bridges are important infrastructure for urban transportation, and their seismic performance directly affects traffic safety and rescue efficiency in earthquake disasters. In order to analyze the stress behavior of elevated bridges under different geological conditions and structural forms, it is necessary to combine the dynamic characteristics under earthquake action, and explore the synergistic effect of bearing design, pier column stiffness distribution, and seismic isolation and reduction technology in the structural system. A performance-based seismic design concept is proposed to optimize structural layout and improve overall seismic resilience and recovery. The applicability and effectiveness of key technologies in practical engineering are verified through typical case studies, providing technical support for seismic design of elevated bridges.

Keywords: urban elevated bridge; seismic design; structural system; seismic isolation technology; performance based design

引言

城市化进程加快,高架桥在缓解交通压力方面有着不可替代的作用,不过地震灾害频频发生,严重威胁着城市基础设施,像高架桥这种长线型结构,其抗震性能越来越受关注,结构遭到破坏不但影响交通运行,还可能堵住救援通道,让灾后损失更严重,探索高架桥在地震下的响应机制,研究更安全可靠的结构体系和设计方法,这对提升城市抗震韧性很关键。

1 城市高架桥抗震设计的必要性与挑战

城市高架桥是重要的交通枢纽,其抗震能力与城市运行和安全息息相关,分析其抗震设计的必要性和挑战有助于提升结构可靠性与防灾能力。

1.1 城市交通体系中的高架桥重要地位

城市化快速推进使交通需求日益增长,高架桥因占地少、通行效率高而被当作缓解城市交通压力的重要手段,在城市主干道、立交枢纽、快速通道等地常是交通“主动

脉”,不仅承载大量车辆通行,紧急时还得保障通行和疏散,其结构布局集中、长且跨度大,一旦被破坏,不但会造成区域性交通瘫痪,生命救援和城市秩序恢复都会受到影响,高架桥在城市交通体系里不可替代,其抗震安全性影响灾后交通功能可用性,是城市抗震韧性建设的关键。

1.2 地震灾害对高架桥结构的威胁

高架桥是延展性强、连续性高的线性结构,地震等地质灾害来袭时其受力模式复杂、破坏形式多样,典型地震案例显示震害常集中在墩柱破坏、梁体落跨、支座失效等方面,某个局部构件一旦失效可能引发连锁反应,致使整体结构失稳甚至倒塌,城市地质条件复杂,软土层、断层带和不均匀地基等因素使地震效应的不确定性进一步加大,高架桥大多位于城市核心区域,建筑密集、人流车流多,抗震性能不足会直接危及人民生命财产安全、严重干扰灾后抢险与物资运输,地震活动日趋频繁且强度增大,提升高架桥结构的抗震能力刻不容缓。

1.3 当前抗震设计面临的关键难点

现行规范虽已对桥梁抗震设计有基本要求,但高架桥具体应用时仍有不少难题,因其结构体系多样,像单柱式、门式、连续梁、多跨联通这些,它们对地震作用的响应差别很大,一套标准难以完全适用,并且设计时精准评估地震动参数、结构动力特性不容易,多向地震耦合作用和结构非线性行为的模拟还不够,而且抗震的关键构件如支座、墩台与基础系统协同设计有不足,一些工程不太重视隔震、减震技术,实际抗震能力达不到预期,旧桥改造时原结构资料缺失、荷载标准有变化、施工技术受限制,这让抗震提升更难,突破关键技术瓶颈,让性能化、系统化抗震设计理念落地,是当前高架桥抗震设计急需解决的核心问题。

2 高架桥地震响应特性与影响因素分析

高架桥在地震作用下响应特性及其影响因素被了解是开展科学合理抗震设计的基础,对桥梁抗震性能的提升有着重要的指导意义。

2.1 地震荷载作用下的结构响应特点

高架桥自身结构形式和地震动特征与它在地震作用下的响应密切相关,由于高架桥线性延展特征明显,地震中桥梁各部分所受动能不均匀,相位差、周期差及耦合振动现象常出现,使得结构有扭转、摆动等复杂响应,并且墩柱、支座和桥梁连接部位会集中地震荷载引起的结构变形,容易成为薄弱环节,产生塑性铰或局部失稳,纵向地震作用下,连续梁桥梁体可能滑移或落梁,横向地震往往对桥墩和桥台造成较大水平冲击,桥梁周期接近地震主频时易共振,结构响应会被显著放大,要准确预测高架桥动力特性,结合地震动特征分析其响应机制,这是精准抗震设计的前提。

2.2 地质与场地条件对响应的影响

高架桥的地震响应被其所处地质环境决定性地影响着,复杂地质条件像软弱土层、填土地基和断层带,地震时容易放大地震波能量、引发强烈地面运动,使得基础沉降、侧移,结构甚至不均匀变形,并且场地类型对地震动输入特征有直接影响,硬质地基较稳定,软土层场地则易引发长周期振动,拉长结构响应时间,增加受力持续性,场地地形变化如斜坡、河谷、高填方等或许也会形成反射波与聚焦效应,局部放大地震烈度,在实际设计里要是忽略地质和场地差异性,结构抗震能力评估往往就会失真,详细的地质勘查和地震动参数分析得开展起来,结合区域地震风险特征,这是高架桥抗震设计科学性提高的重要保障。

2.3 结构参数变化对响应的敏感性

高架桥地震响应对结构几何布置和构件参数变化很

敏感,跨径越大的桥梁结构越柔性,地震中越易发生大位移且墩柱高度、刚度分布不均会使结构扭转和局部失稳,桥面连续性和支座类型决定结构整体响应模式,铰接结构虽减小地震力传递但易落梁且连续梁桥有一定冗余度,不过其能量耗散能力要求更高,再次,伸缩缝、支座、限位装置等附属构造在地震中的性能直接影响结构响应,若设计不足或老化失效的话结构易受力失衡,还有,结构质量分布和阻尼比也关键影响响应特性,设计与建模时,要充分考虑各类参数变化范围和不确定性,多工况、多参数分析来提高抗震设计的鲁棒性和适应性。

3 抗震关键技术在高架桥设计中的应用

关键技术合理应用能提升高架桥抗震性能且抗震措施系统化整合有助于构建韧性和安全性更佳的桥梁结构体系。

3.1 支座抗震设计的技术路径

上部结构和下部墩台靠支座这一重要构件来连接,在地震作用下支座承担能量传递和变形调节的双重功能。要有效控制结构响应并防止梁体滑移、落梁等灾害性破坏就少不了合理的支座设计。抗震球型支座、减震橡胶支座、弹性滑动支座等常用抗震支座具备变形适应性和能量耗散能力。支座设计时考虑到地震动方向性、结构变位需求、温度变化影响才能保证强震作用下有足够的承载力和位移容许度。限位装置的配置对防止结构过度位移非常关键,要和支座系统协同设计才能形成多道防线。高架桥结构要安全稳定,对不同地震工况进行响应分析并优化支座类型和布置形式是关键环节。

3.2 隔震与减震技术的融合应用

抗震理念发展起来后,隔震与减震技术就成为提升桥梁抗震能力的重要手段,在桥梁结构里设置如叠层橡胶支座、铅芯支座之类的隔震层的隔震技术能有效减少地震能量传递、延长结构自振周期从而减小地震反应,靠黏滞阻尼器、屈曲约束支撑(BRB)、摩擦阻尼器等构件的减震技术通过耗散地震能量、控制结构变形来提升抗震性能,高架桥设计时这两种技术常一起使用,在主墩设置隔震支座、在梁体或者墩柱之间配置阻尼器以使隔震减震协同工作,该技术在控制位移、降低内力、延缓结构失效方面效果明显,在地震烈度高、软土层分布广的地方尤其适用,隔震和减震技术融合不仅能改善结构地震响应,还能提高桥梁的可恢复性和服务连续性。

3.3 抗震构造细节设计的重要性

高架桥性能得以保障除了靠总体结构体系和关键构件外,构造细节的抗震设计也是基础,伸缩缝、限位装置、

桥墩与盖梁连接、墩台配筋以及基础锚固等部位都被细节设计覆盖,地震中任何一处薄弱环节都可能引发灾害,伸缩缝得满足结构在地震位移下的变形需求,防止剪切破坏和开裂,限位装置要有足够强度和延性,防止梁体偏移超限,墩柱配筋设计要符合延性要求,避免地震时出现脆性破坏,基础设计要加强桩基与土体相互作用分析,提高抗拔、抗滑能力,细部构造在整体结构里占比不大,但其设计水平却直接关系到桥梁整体的抗震韧性和失效模式,构造细节抗震能力的强化,是高架桥系统性安全保障不可或缺的一环。

4 高架桥结构体系的抗震优化策略

高架桥结构体系的优化设计处于提升整体抗震能力的核心地位,通过系统布局调整与构造协同能提高结构韧性和地震适应性以保障桥梁安全运行。

4.1 合理选择结构体系形式

高架桥的结构体系形式对其地震表现有着决定性影响,不同体系的受力路径与破坏机制不同,像连续梁桥、刚构桥、悬臂组合桥等体系在地震作用下变形能力和能量耗散特性各异,连续体系构造连续且内力能重新分布,抗震性能较好,适用于中等烈度地震区,而分离式桥梁施工和变形控制方便,但强震时易落梁或连接失效,要根据地震烈度、桥址地质条件和功能需求优先选择适应性强的结构体系,结构布置以简洁、对称为宜,避免复杂连接和不均匀刚度分布以减少地震时的扭转效应和应力集中,并且要注重结构整体性和局部构件性能协调,通过连续性设计提高结构冗余度以提升极端工况下的韧性和稳定性,合理选择结构形式是抗震优化的首要前提。

4.2 强弱构件协同设计原则

在抗震体系里,结构构件得形成明确的“强-弱”层级关系,即采用强基础、强连接、弱耗能构件的组合方式,让地震能量在能控制的地方集中耗散,桥墩作为主要耗能单元,其配筋和截面设计要符合塑性发展要求,而连接节点、盖梁和基础要有足够强度,不能提前坏掉,并且支座和限位装置要遵循“可动但不失控”原则,允许结构有必要变形的控制其不发生灾难性位移,再者,使用屈服型构件(像屈服约束支撑)可人为设置破坏机制以达成结构“以小保大”的设计目的,构件间功能分工、强弱搭配,这既增强了结构抗震韧性,也为地震后的结构检测和修复创造了有利条件。

4.3 抗震设计与施工一体化推进

高架桥抗震的优化不能只在设计阶段体现,施工全过程也得贯穿,才能让“设计-施工-运维”一体化落地,设

计环节要充分顾及施工的可行性以保证抗震构造在现场能有效施行,像支座和隔震层的设置要方便后期更换和维护且复杂节点要用模块化预制技术来保证质量和连接精度,施工阶段要严格把控关键节点的质量验收且配筋、锚固、焊接等工艺要达到设计标准以免因施工有偏差使抗震性能变弱,施工单位要依据施工进度制定动态调整方案让每一道工序和抗震功能协调起来,运维环节要建立地震后快速检测机制和结构健康监测系统以实时了解桥梁响应状态从而灾后能精准评估和快速反应,设计和施工协同起来就能提升抗震体系整体的可靠性,进一步保障高架桥在地震中的安全和可持续运行,给未来智慧桥梁建设打下技术基础。

5 典型工程案例分析与技术应用验证

典型高架桥工程的抗震设计与应用案例可验证关键技术的有效性并总结经验做法,给后续桥梁抗震优化提供实践参考。

5.1 北京四环路高架桥隔震改造

北京四环路作为城市核心交通环线,其高架桥系统背负着巨大车流压力,2008年,北京市政工程设计研究总院对其四环路高架桥的数段进行隔震改造,用铅芯橡胶支座(LRB)换掉原来的刚性支座,由于铅芯橡胶支座能提供初始刚度且能量耗散能力也不错,从而让桥梁自振周期有效延长,改造后,桥梁结构的地震响应降低了大概40%,桥墩剪力减少了约35%,整体抗震性能显著提升,还配套增设限位装置以避免梁体在地震时过度位移,确保结构完整,这个项目是我国早期大规模高架桥隔震改造的示范工程,技术应用成熟且运行稳定。

5.2 台北捷运南港线高架段抗震设计

台北捷运南港线高架段所穿越之处地震活动频繁,其抗震设计烈度达0.4g,这一高架段采用“强墩弱梁”结构体系,并且像阻尼器、屈服约束支撑(BRB)这类减震装置被广泛应用,墩柱底部被设计成可控塑性铰区,靠限位钢筋以及横向箍筋加密来实现延性耗能,从而强震之下结构不会发生脆性破坏,关键连接节点用钢管混凝土嵌套结构以提高剪切承载力,通过三维非线性动力分析进行结构多工况模拟,结果显示地震最大位移控制在200mm以内,满足安全使用要求,这一工程验证了多项抗震关键技术复杂城市环境中的实际效果。

5.3 成都东三环高架桥智能监测系统应用

成都东三环高架桥这一西南地区典型的快速通道全长大概18公里,建成之后给它配置了包含高灵敏度

加速度计、倾斜传感器以及无线数据采集终端的地震响应实时监测系统,该系统能够实时采集桥梁在地震作用下的响应并远程分析,还具备震后自动报警和快速评估功能,2022年四川泸定发生6.8级地震时这座桥的监测系统成功记录下地震动全过程数据,分析结果显示结构最大加速度没超过0.12g且各节点位移比设计限值低得多、结构完好无损,这说明智能化监测技术对桥梁抗震有很重要的辅助价值且给震后决策提供了科学依据。

6 结语

城市交通的核心载体城市高架桥直接影响城市运行的连续性与公共安全的抗震性能,通过系统分析高架桥地震响应特性、结构体系选择、关键抗震技术及典型工程实践可知,提升桥梁抗震能力的关键在于科学结构设计、合理技术应用以及完善施工与运维体系,以后要持续推进性能化设计理念、强化地震模拟与响应评估并融合智能监测与快速响应机制,构建多层次多维度抗震防护体系,以全面提升高架桥在地震灾害中的适应性与韧性,给城市交通

安全有力支撑。

【参考文献】

- [1]廖鑫,刘楠.城市高架桥抗震设计中的关键问题[J].住宅与房地产,2017(3):259.
- [2]王凯华.考虑城市复杂桥梁节点的交通系统抗震韧性功能损失分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [3]韩振.城市轨道交通桥梁工程设计的安全风险分析与对策[D].南京:东南大学,2020.
- [4]张海莹.基于三重摩擦摆支座的城市高架桥梁隔震性能研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020.
- [5]王培晓.地震高烈度区高架桥结构选型及受力特点分析[J].城市道桥与防洪,2022(1):50-53.

作者简介:梁朝阳(1992.10—),男,汉族,毕业院校:西安建筑科技大学;现就职单位:雄安城市规划设计研究院有限公司;*通讯作者:袁野(1994.7—),男,汉族,毕业院校:西南交通大学,现就职单位:雄安城市规划设计研究院有限公司。