

桥梁抗震设计与施工管理研究

赵明月

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074

[摘要] 桥梁是交通运输的生命线, 在桥梁遭受地震影响破坏之后, 第一时间能够保障救援人员及时进入灾区进行抢救工作, 同时也可以保护人们的生命和财产安全不受太大损失。文章针对桥梁工程中的抗震设计施工管理进行了全面的研究, 在对各种桥梁结构类型抗震性能的基础上, 着重介绍了如何选择结构体系以及相应的构造设计、采用不同的减隔震装置、怎样做好基础的设计与计算分析等问题, 在此基础上又提出了桥梁施工过程中应该注意的一些抗震管理措施, 最后讨论了如何做到设计与施工相结合的方式达到桥梁结构抗震的目标。结论表明, 把抗震理念融入桥梁结构的设计和施工当中才是最科学的做法。

[关键词] 桥梁工程; 抗震设计; 施工管理; 减隔震装置; 协同优化

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19531

中图分类号: U442.5+5

文献标识码: A

Research on Seismic Design and Construction Management of Bridges

ZHAO Mingyue

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: Bridges are the lifeline of transportation. After a bridge is damaged by an earthquake, it can ensure that rescue personnel enter the disaster area in a timely manner for rescue work, while also protecting people's lives and property safety from significant losses. The article conducts a comprehensive study on seismic design and construction management in bridge engineering. Based on the seismic performance of various types of bridge structures, it focuses on how to choose structural systems and corresponding structural designs, adopt different seismic isolation devices, and how to do a good job in foundation design and calculation analysis. On this basis, some seismic management measures that should be paid attention to during bridge construction are also proposed. Finally, it discusses how to achieve the goal of seismic resistance of bridge structures by combining design and construction. The conclusion indicates that integrating seismic concepts into the design and construction of bridge structures is the most scientific approach.

Keywords: bridge engineering; seismic design; construction management; seismic isolation device; collaborative optimization

引言

中国位于环太平洋地震带和欧亚大陆地震带上两大断裂带之间的交接处。地震发生频繁、震级大、范围广; 随着道路交通建设的迅猛发展, 桥梁占到整个公路路网以及铁路网的比例越来越大, 而且有很多是跨越峡谷、大河的较大跨径的特殊结构桥。历史上发生的几次大地震中桥梁建筑物毁坏严重, 不但造成严重的直接经济损失, 而且阻碍了震后救灾的生命通道, 引发更多的衍生灾害, 所以提高桥梁的抗震能力是目前桥梁学科需要解决的重要课题之一。近年来学者在不同的结构形式上不断研究提高桥梁抗震性能的技术手段, 比如对于仅有板式橡胶支座的双柱式桥梁, 提出了增设可更换形状优化复合金属阻尼器的新型支座连接体系, 在保证桥梁墩台不受严重的损害的同

时减少了主梁横桥向落梁的可能性; 桥梁的抗震性能不仅依赖于方案质量的好坏, 施工阶段的质量把控也起着至关重要的影响作用——再优秀的方案如果不能得到有效的执行, 那么即使再好也只能是徒有其表。因此本文以整个流程为出发点, 全面研究桥梁抗震技术及相关施工管理措施。

1 桥梁结构类型及抗震特点

不同类型桥梁的动力特性和抗震性能有很大的不同。梁桥受力主要表现为弯矩作用, 桥梁墩顶位移和墩底弯矩为主要控制因素, 而连续梁桥的整体性比简支梁桥好得多; 拱桥主要承受压力作用, 其平面内的刚度很大但是其立面的抗震性能较差, 因此拱桥上部设立柱以及横向联系需要特别注意, 而斜拉桥和悬索桥都是柔性的大跨结构, 振动周期较长, 可以避免地震波的卓越频率的影响, 但是塔梁

索之间的相互作用较大。对于大跨度双塔空间缆索面自锚式悬索桥来说,合理的抗震限制措施就是纵向桥向塔梁之间采用弹性限制,墩梁之间无任何限制;横向桥向塔梁之间没有任何限制,墩梁之间采用弹性限制,竖向支撑对地震反应影响较小。刚构桥墩梁固结,整体性强,但是比较敏感于温差及基础沉降。掌握不同类型桥梁结构抗震薄弱部位,是下一步进行针对性设计、施工管理的基础。

2 桥梁抗震设计关键技术

2.1 结构体系选型与抗震性能分析

桥梁结构体系的选择是抗震设计的开始部分,设计人员必须综合分析震动强度,场地类型,桥梁跨度以及使用功能等因素,在梁式、拱式、斜拉桥、悬索桥、刚构桥等多种体系间做出合理的选择。对于一般跨径桥梁应选用墩梁固结或者连续体系以增强其整体性及冗余性,从而达到预防简支梁桥在强烈地震作用下由于支座破损造成落梁的目的。对于处在抗震设防烈度为八度(峰值加速度为0.3g)区域内的桥梁设计,要使用具有较大阻尼比的隔震支座、减震装置对结构的动力响应进行分析、支座选取、节点构造设计等都有一定的要求^[1]。抗震性能评估必须依据桥梁规则选择方式,规则桥梁可以使用反应谱法,而对于非规则桥梁(曲桥、大跨桥等类型)就需要借助有限元数值仿真来进行非线性的动力时程分析,在经过反复计算后保证达到小震、中震、大震三个水平弹塑性状态下的要求,即分别满足弹性、可修复以及不倒塌的功能需求。

2.2 抗震构造设计要点

抗震构造措施是保证桥梁延性的必要条件。在桥墩结构方面,适当的配置钢筋可以使结构变形达到塑性之后仍然保留一定的强度。依据《建筑与市政工程抗震通用规范》GB55002-2021 要求,在7度及以上的地震烈度区的城市桥梁墩柱潜在塑性较区的箍筋需要加密布置,加密区范围是从最大组合弯矩所在截面开始算起,长度不得低于在弯矩作用方向上的墩柱截面边长,如果墩柱的高度与弯矩作用方向的截面边长之比小于2.5,则柱加密区的范围应该选取为墩柱的全长,加密区箍筋直径不应小于10mm,间距不要大于100mm或者6倍纵筋直径或者墩柱的弯曲方向截面边长的1/4。螺旋箍筋连结部位须用对焊,矩形箍筋要有135°弯钩并且伸入到核心混凝土内的长度不能小于6倍箍筋直径,此等均关系着塑性较区域的约束程度。防落梁装置如纵梁挡块或者是拉索式装置等可以有效的抑制梁部过大的位移,它的设计强度要足以抵抗梁部惯性力;盖梁与墩柱相接处要增加附加钢筋予以固定,以防止出现剪切破坏等现象。

2.3 支座与减隔震装置设计

支座是传载力的主要元件,是减隔震措施使用最多的地方。而板式橡胶支座结构简洁,价格低廉,但是耗能较小;铅芯橡胶支座运用铅芯屈服耗能,等效阻尼比可到15%~30%左右;高阻尼橡胶支座绿色环保,耗能性能很好;摩擦摆支座利用单摆机理延长自振周期,通过球面滑动耗散能量,自恢复性能良好。高阻尼橡胶支座以天然橡胶为基础,加入不同种类的附加材料制成,保持原有的天然橡胶支座优越的力学特性的同时还拥有良好的阻尼特性和在地震中能够有效地吸收地震能量。摩擦摆隔震支座利用了单摆原理拉长结构自振周期,用球面接触摩擦滑动耗能,用柔性连接减小传到上部结构的侧向力及水平振动。研究指出,在软土地基中使用摩擦摆支座比橡胶支座有更好的减震效果10%~20%,而基于性能设计的各向异性摩擦摆支座的横向位移比各向同性摩擦摆支座要少大约20%,可以大幅度降低发生大震时的落梁隐患,对高烈度地区桥梁来说,使用摩擦摆式支座可以大大减少地震动输入,使得下部结构的钢筋更合理。以下对比不同类型支座性能,见表1。

表1 不同减隔震支座类型性能对比

支座类型	等效阻尼比	水平刚度	自复位能力	适用场景	主要优点	主要局限
板式橡胶支座	<5%	低	一般	中小跨径梁桥	结构简单、造价经济	耗能能力有限、位移控制弱
高阻尼橡胶支座	10%~15%	中	较好	各类常规桥梁	环保、阻尼性能好	大位移下性能衰减
铅芯橡胶支座	15%~30%	中高	较好	各类桥梁	滞回饱满、耗能能力强	铅芯存在环境风险
摩擦摆支座	10%~20%	可变	良好	大跨径、高烈度区	位移适应大、自复位性能优	成本较高、摩擦材料要求高

2.4 基础与下部结构抗震设计

基础及下部结构地震的安全直接影响整个桥梁的可靠性。地震时桩-地相互作用繁杂,桩侧土体力学性质劣化以及桩体弯矩变形相联系导致了基础的动力反应是非线性的。结构设计一般遵循“能力保护”的设计理念,即保证基础和墩台的承载能力大于墩台塑性较区所处的最大内力值,把塑性变形集中发生在预先设想的墩台位置上,保护基础免受脆性破坏。对于桩基础要考虑到其在液化土层上的影响,有可能需要增大桩长或者采取措施如增加直径,加强钢筋等方式来应对^[2]。研究发现,在氯盐腐蚀、砂土液化复合效应下,基础液化,氯盐腐蚀都使得桥墩产

生更大的反应性,墩顶最大位移角增大 1 倍以上,桩体受损长度也相应增大,所以沿海和滨海地区桥梁的设计要重视这个问题的影响。承台与墩身交接处需要提高配筋度防止发生剪切破坏现象,对软场地宜采取深基础或者地基加固措施改良持力层。

2.5 抗震设计计算方法与软件应用

目前应用最为广泛的为反应谱法以及时程分析法。其中反应谱法运算速度快,适合于规则桥梁的初步设计及一般验算,但是属于线弹性方法,不能反映出结构一旦发生塑性之后的非线性反应情况;时程分析法通过输入地震波信号进行逐次积分,能够很好地表现出结构由弹性到塑性的全过程响应,是对复杂桥梁抗震分析的首选方案;使用 MIDAS 软件可以绘制出桥梁的有限元模型,在此分别用反应谱法以及时程分析法对桥梁的抗震情况进行分析,计算结果显示所建结构的抗震能力符合相关设计标准的要求,但是对于重要的大型桥梁还需要做增量动态分析(IDA)来判断桥梁在不同烈度地震下的垮塌余量大小。另外,静力弹塑性推覆试验(Pushover)可以用来检验桥墩的延性性能。Midas Civil、ANSYS、ABAQUS 等主流的通用有限元程序开发有专用的针对减隔震装置的非线性单元库、地震波选择工具,大大提高了计算的速度和准确性。

3 桥梁施工抗震管理措施

桥梁施工阶段的抗震管理是连接设计图纸和实物结果之间的纽带,它的重要性丝毫不逊色于设计工作,在墩台及盖梁浇筑时一定要严格按照图纸进行现场审核批准的抗震构造图纸,尤其在塑性铰区域箍筋的大小及间距还有绑扎方式都不能有丝毫差错,混凝土要分层振捣密实,不能有任何蜂窝、蜂窝之类的病害出现,否则局部不密实的地方会使塑性铰生成后墩台的变位能力大打折扣;针对设置了减隔震装置的桥梁支座安装尤为重要,即支座中心线与设计位置的允许偏差不应超过规范规定的限值,还有就是预埋锚固螺栓的埋深以及锚固情况也必须逐套检查。抗震设防烈度为 8 度及以上的地区桥梁需要采取高强度阻尼隔震支座以及减震装置,对结构的动力响应分析、支座的选择、节点的设计要求都非常高。另外在施工期间桥梁主体结构还没有完全形成的状态之下,也会产生一些特殊时期的地震危险,比如主梁悬臂浇筑过程中的挂篮系统、高墩施工过程中脚手架、模板支撑体系等临时搭建的建筑,一旦发生地震,就会造成施工设备损坏,甚至出现局部结构倒塌现象。对于高烈度地区的特大型桥梁项目要制定专门的施工期地震应急预案,确定预警、疏散、应急加固以

及检查评估等方面的步骤,并且要定期开展相关的演练工作。工程施工管理团队还需要为抗震构造隐蔽工程建立影像资料档案,在以后检查、维护过程中方便回溯,保证每一项抗震重要环节都有可追溯的质量记录。

4 桥梁抗震设计与施工的协同优化

4.1 设计施工信息传递与反馈机制

传统方式上设计与施工之间有信息壁垒,设计人员注重的是力学特性及是否满足规范,而施工单位则看重的是模板拼接、钢筋绑扎等实际操作可行性。两者之间缺少沟通桥梁致使一些设计意图无法落实或施工出现的问题不能得到及时处理。因此建立良好的信息交流途径是非常必要的。建立一个统一的数据来源模型协作平台,实现桥梁大体结构的整体装配及协同设计分析作业,可以大大提高复杂桥梁结构的设计工作效率和质量。在重要部位施工之前,设计单位要对施工单位做好详细的工艺讲解,着重阐述一下塑性铰区段、节点核心部分以及防落梁措施的具体设计理念及施工要点。施工单位进行施工过程中记录的实际施工参数(钢筋定位误差值、混凝土浇筑环境温度等),应及时向设计单位进行通报,以便核查最初方案的动力响应计算结果是否还有效,如需要对之后的施工步骤或者局部结构尺寸作出一定的改正,防止由于延误造成的质量问题的发生。

4.2 基于可施工性的抗震方案优化策略

可实施性是指方案能以较低造价,在一定的时间、质量的要求下,在现场顺利进行施工的可能性大小;改进思路不是为了降低抗震要求,在满足结构抗震要求的基础上增强方案与施工条件相匹配的程度。对于高墩桥,如果需要墩身全部部位加密箍筋,则钢筋量很大,费用很高,并且会使得混凝土浇筑及振捣工作很难开展,正确的处理方式应该是采用延性设计理念只在墩底预计发生塑性变形区域加密箍筋,其他部分按构造最小配箍率配置就可以了。基于 BIM 模型对不同的设计方案进行力学分析,进行多种方案的施工模拟,对比施工可行性和经济性进行优化,可以使得方案由“想法”转变为“可施工”的质变^[3],对于安装减隔震支座的桥梁,设计时要留足空间来符合地震位移的要求,但是不能影响到施工临时支撑以及模板调整的操作空间。复杂的节点可以采取分节预制,现场组装的方式代替,在保证节点抗震的情况下又提升了施工的安全等级及效率。

4.3 BIM 技术在抗震设计施工协同中的应用探讨

而建筑信息模型技术给桥梁抗震设计-施工协同带来了一种新的技术方式。传统的二维图表达抗震构造细节不

够直观且不全面, BIM 借助三维模型可以直观看到钢筋空间位置、塑性铰区域加密范围、减隔震装置位置等,使施工者有明确的空间认识,降低误判和返工率,采用 BIM 建模对桥梁进行震动分析可以获得桥梁预施工数据,即墩梁顺桥向抗震距离和墩梁横桥向抗震距离等参数,保证抗震距离达到相对位移的目标值,提高设计方案的质量和施工的准确度。在项目施工现场管理方面,运用云计算、信息化 BIM、物联网以及智能传感器等多种前沿信息技术,研发一系列环境感知设备及数字管理系统,可以实现重要施工阶段的有效管理,及时了解结构受力状况,实施风险预警功能^[4]。在铜陵长江三桥大型桥梁建设项目上,已经成功使用该类系统提高工程建设质量和保障工程建设安全,同时为后续桥梁保养维护奠定良好基础模型基础信息。虽然 BIM 全生命周期的应用还存在信息标准化、一体化集成等问题存在,但是它确实给设计阶段同施工过程的紧密配合带来了希望。

5 结语

桥梁抗震性能提升是一个涉及设计、施工、运营维护整个生命周期的过程。文章从桥梁结构形式本身具备的抗震性能入手,对结构体系的选择、构造设计、隔震消能装

置的选择、基础的设计与计算分析等相关关键技术进行总结归纳,针对施工期间的抗震管控方法进行分析讨论,并研究设计与施工之间的协调关系。结论认为好的抗震设计方案是保证桥梁结构的安全前提,在此基础上合理的精细化施工管理则是将抗震设计方案变为实际结构的过程关键环节。将来,伴随着材料科技、计算力学及信息技术的发展,桥梁抗震将在新型材料的研发、智能监测以及全生命周期虚拟仿真等方面有更大的实质性的进展,在保障交通基础设施数字化转型中发挥更大的作用。

【参考文献】

- [1]刘亭玉,谢永康,钟鸣.大跨度桥梁抗震特点及施工技术分析[J].大众标准化,2022(9):48-50.
- [2]邢志达.公路桥梁抗震设计优化研究[J].交通世界,2024(10):150-152.
- [3]顾海浩.桥梁抗震设计要点及减隔震技术的应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023(29):146-148.
- [4]黄柯娴.桥梁结构抗震设计与设防方法分析[J].运输经理世界,2022(25):67-69.

作者简介:赵明月(1991—),男,汉族,吉林梨树,白城师范学院本科,从事桥梁设计。