

# 桥梁设计中抗震性能评价与优化研究

赵庆缘

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430070

**[摘要]** 桥梁是交通运输生命线工程的重要节点, 桥梁的抗震能力决定了震后的及时救援以及对当地经济的影响程度。文章针对桥梁结构抗震性能评估及优化等问题, 建立了多层次的评价标准, 在研究桥梁主构件在地震作用下的力学行为的基础上提出以性能为目标的参数调整方案, 并研究减隔震装置的综合应用, 通过比较反应谱法和时程分析法得出三维反应谱法更适用的情况是在抗震设防烈度高于7度的情况下, 不适宜采用PHC桩; 设置减隔震支座可以使桥梁的自振频率增大阻尼增加, 降低地震水平力21%~27%。文章的研究成果可以应用于桥梁抗震设计之中作为参考。

**[关键词]** 桥梁抗震; 性能评价; 参数优化

DOI: 10.33142/ec.v9i4.19459

中图分类号: U442.55

文献标识码: A

## Research on Seismic Performance Evaluation and Optimization in Bridge Design

ZHAO Qingyuan

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430070, China

**Abstract:** Bridges are important nodes in transportation lifeline projects, and their seismic resistance determines timely rescue after earthquakes and the degree of impact on the local economy. The article establishes a multi-level evaluation standard for the seismic performance evaluation and optimization of bridge structures. Based on the study of the mechanical behavior of bridge main components under earthquake action, a parameter adjustment scheme with performance as the objective is proposed, and the comprehensive application of seismic isolation devices is studied. By comparing the response spectrum method and time history analysis method, it is found that the three-dimensional response spectrum method is more suitable when the seismic fortification intensity is higher than 7 degrees, and PHC piles are not suitable; Setting up seismic isolation bearings can increase the natural frequency of the bridge, increase damping, and reduce seismic horizontal forces by 21%–27%. The research results of the article can be applied as a reference for seismic design of bridges.

**Keywords:** bridge seismic resistance; performance evaluation; parameter optimization

### 引言

地震是一种突变型灾难, 它对桥梁造成的破坏以及倾倒会造成严重的断路情况, 会给灾后的救援以及恢复造成很大影响。近些年来发生的几次严重的国内外地震事件使桥梁抗震设计存在的许多缺陷暴露出来, 加强桥梁的抗震能力也是目前工程界急需解决的问题, 在基于抗震性能的设计理念逐渐作为工程抗震领域最重要的课题的背景下, 桥梁抗震设计也由原来的强调结构的安全性逐渐转变为注重结构的抗震性能, 这就需要工程师们不仅要考虑到桥梁在受到地震影响之后的稳定性和耐久度, 还要兼顾到桥梁的修复能力及全生命周期成本效益等各方面因素。此外, 减隔震技术的应用也为提高桥梁抗震性能带来了新方法。本文基于桥梁抗震设计的实际, 围绕着评价方式, 响应计

算, 参数选择, 减隔震集成四个方面进行研究, 以期能够形成完整的抗震性能评估及改进体系, 从而对工程建设起到一定的指导作用。

### 1 桥梁抗震性能多维度评价体系

#### 1.1 基于反应谱与动力时程的评价方法

反应谱法和动力时程分析法是两种基本的桥梁抗震性能评估方法。反应谱法是以地震反应谱作为输入, 把地震效应模拟成静力加载的形式计算简单可靠, 适合规则桥梁的设计; 动力时程分析法则直接将地震加速度时程作为输入量, 使用逐次积分的方式求解动力方程, 能够考虑材料非线性和几何非线性的复杂变形以及支座滑移等情况, 适用于大跨径和不规则桥梁。工程实例表明: 横向地震反应谱法和人工波时程分析结果相差不大, 但天然波的结

果由于选取波的不同而不同;纵向地震反应谱法和人工波时程分析结果相差不大。三维反应谱法适用性强,在地震烈度大于 7 度的情况下桩基础不宜采用 PHC 桩;两种方法对比如表 1 所示。

表 1 反应谱法与动力时程分析法对比

对比维度	反应谱法	动力时程分析法
输入形式	设计反应谱曲线	地震加速度时程
适用桥型	规则桥梁	不规则、大跨度、复杂桥梁
非线性考虑	仅等效线性化	可考虑材料/几何非线性
计算效率	高	低
结果输出	峰值响应	响应全过程时程
规范定位	常规设计首选	重要桥梁或罕遇地震验算

在具体的应用过程中,两种计算方式往往是并用的:用反应谱法来进行初步的设计和校核,在此基础上再采用时程分析法来对重要工况进行检查,对于比较重要的桥梁来说应该要选择不少于三组天然波以及一组人工波来做时程分析,取包络线来作为设计的参考标准。

### 1.2 基于性能化设计的评价方法

基于性能的设计理念是目前工程抗震设计领域的主流方法,主要指的是结构在不同烈度地震作用下应具有明确且可预见的性能表现。现在基于性能的抗震设计已经成为整个工程领域中的一个主要热点话题,在土木建筑行业 and 桥梁工程行业都有很大的热度。由于地面运动的不确定性较大以及桥梁结构组成的几何形状以及材料都是随机性的,所以桥梁结构的地震反应和抗震能力也具备随机性,所以在对桥梁结构进行基于性能的设计的时候就应以概率的方法为依据进行研究。基于性能的设计理念主要包括三个方面:即性能等级的划分,性能标准的要求与性能检验方式的选择。性能标准一般分为正常使用、减震抗灾、生存保证、避免坍塌四个层次,分别有不同位移角限制以及损伤程度指标;而性能指标则要依照桥梁重要性等级以及所设地震烈度共同选择。在第二代基于性能的结构抗震设计理念下,通过分析结构的性能水平、震后可恢复性和持续性的能力等,可以做到对结构抗震性能进行全方位的评定。该理念的发展把结构的抗震性能的评判由原来仅凭强度计算转变为包括功能衰减程度、修理所需要的时间长短以及整个建筑使用寿命期间的成本等各种因素在内的全方位考量。性能化评价的实现途径一般采用以位移控制的设计方式:以目标位移作为设计开始,再利用能力谱法或者 Pushover 来计算结构需要的抗力大小以及延性要求,在最后再用非线性时程分析检验是否达到了性能要求;对

重要的桥梁还需要做概率地震需求分析和易损性计算,给出在不同的地震烈度等级下失效的概率大小。

## 2 桥梁关键构件抗震响应分析

桥梁的重要部件主要是桥墩、支座、基础以及主梁,在这些重要部件抗震响应特性及其相互影响也是重点。而桥墩作为主要的受力部分之一,它本身的抗震性能决定了整个桥梁的安全水平;在地震的作用下桥墩会受到弯、剪、轴三者的共同作用,出现的破坏类型有弯曲型破坏、剪切型破坏以及弯剪型破坏。通过延性的抗震设计可以使得桥墩产生塑性铰,从而达到通过塑性铰区来吸收能量的效果,要求构件要有足够的变形和耗能能力。经过试验发现圆柱体桥墩的延展性与箍筋的设置有很大的相关性,合理地配置箍筋能有效地约束核心混凝土,进而提升极限压应变。支座则是主梁跟桥墩之间的一个重要传递力的部位。板式橡胶支座靠剪切变形提供水平柔度,在水平位移上有水平位移能力有限,在强烈地震中会发生滑移现象;盆式支座抗压强度高,而水平刚度大,传力效果好;铅芯橡胶支座和摩擦摆支座利用引入的阻尼作用,达到柔性支撑和耗能的双重目的。对近海桥梁的研究发现板式橡胶支座和桥墩的地震需求和抗震能力有较强的相关度,利用构件相关性绘制得到的二维易损性曲线能更好地进行抗震性能评估。基础包含桩-土相互作用,在地震作用下桩身弯矩的最大值一般分布在桩顶以及土层交界处。规范规定桩基应满足能力保护的设计理念,保证桥墩开始进入塑性变形时桩基仍然处于弹性状态。桥梁的类型不同,其抗震性能特点也不一样:简支梁桥各墩同步受力,反应大小与墩高、刚度有关,连续刚构桥整体性好但是对于变形和沉降较为敏感,斜拉桥、悬索桥属于柔性结构,自振周期较长,高阶的振动模式比较重要。

## 3 桥梁抗震设计参数优化方法

### 3.1 基于性能化设计的参数优化

参数优化是提高桥梁抗震能力的关键技术措施。其目的是在保证性能的前提下寻找最佳的设计参数的选择方案。以性能化设计为基础的参数优化的逻辑如下:首先是确定桥梁抗震性能的目标及具体的表现形式指标,再就是构建设计变量与性能指标的关系模型,在此基础上利用优化的方法来找到符合限制条件的各种参数的取值组合方式。性能化的参数优化与传统的参数优化的不同点在于它注重的是全局性的调整各个指标的关系,而不仅仅是单个指标优化所得到的局部最优解。桥墩截面尺寸、配筋率、箍筋间距等参数都与结构的承载力、刚度以及延性有着密切的联系。截面半径的增大可以增强结构的抗弯刚度及承

载力,但也加大了地震惯性力的影响;纵向钢筋配筋率的提高增强了结构的抗弯能力,但是过高的配筋会导致脆性的破坏形式;箍筋加密会增强核心混凝土的约束作用以及延展性能,但是又增加了建筑材料的成本以及施工难度。利用圆形单柱桥墩截面半径、纵向配筋率及横向箍筋配筋率作为设计变量,以结构初始材料的造价和地震强度需求能力比为目标函数,结合多目标遗传优化算法同反应谱分析法,就可以构建规则钢筋混凝土圆形单柱桥墩多目标抗震优化设计的一般思路。

### 3.2 结构参数多目标优化方法

桥梁抗震设计包含安全性、经济性和可恢复性等相互矛盾的目标,需要通过多目标规划的方法来进行求解。单目标规划得出唯一的最优解,而多目标规划得到的是帕累托前沿解集,设计师可以根据工程需要从这个集合中选出最后的设计方案来。基于偏好序的交互式多目标综合优化决策方法已经被应用到梁式桥梁全寿命抗震设计上。以单柱桥墩为例,以全寿命成本最小化为目标之一,同时以强度安全性和结构的变形可靠性最优化为目标,加入位移延性有关的经济偏好和安全偏好的因素,实现在多目标优化的基础上融合工程经验的目的。智能计算技术对参数选择有很大帮助:遗传算子能解决离散型以及连续型变量交叉的问题;粒子群算法快速收敛、参数少;模拟退火法能够跳出局部最优。实现方法如下:创建参数化的有限元模型,设定变量的上限下限值,设置目标函数及边界条件,进行迭代求解,挑选出帕累托解。

## 4 减隔震技术集成与优化设计

### 4.1 减隔震技术原理与装置分类

减隔震技术也是提高桥梁抗震能力的一种方法,主要原理是在桥梁上部结构同下部结构间安装柔性装置,以延长结构自振周期而避开地震能量峰值区以及增加阻尼耗能方式消耗地震输入能量。从能量的观点来看,地震给结构传输的能量总量是一定的,减隔震设计的关键就是通过周期变长减少地震力输入及通过阻尼耗散减小结构反应,此原理使减隔震桥梁在遭受强烈地震时保持较小的弹性变形,控制主要部件不进入塑性阶段,从而保证震后复原性。通过采用多振型反应谱法与时程分析法对装配式市政桥梁减隔震设计进行研究可知,设置减隔震支座可以有效地增加桥梁自振周期和增大阻尼来缓解地震对桥梁造成的不利影响。减隔震支座较之普通的板式橡胶支座可减少地震产生的水平力达21%~27%。常用的几类减隔震装置包括有橡胶类支座、摩擦类支座以及金属耗能装置等。铅芯橡胶支座是在天然橡胶里夹带少量铅条作为填充物,利

用铅的可塑性消耗能量的方式达到稳定的阻尼效果,具有柔性支撑以及耗能双重作用;高阻尼橡胶支座则是采用特殊的配方橡胶来实现内部阻尼的作用,其结构简单,可靠度高。摩擦摆支座采用球面滚动方式达到自复位效果,承载力较大,位移量大,适用大跨径桥梁及重载环境;金属屈服型阻尼器是通过金属构件发生塑性变形消耗能量,既可以单独放置也可以设置在支座上。

### 4.2 减隔震桥梁设计方法

减隔震桥梁的设计方式不同于一般抗震设计,差异在于设计思想、计算方法及校核项目三方面。在设计思想上,一般抗震设计依靠结构本身强度来抵御地震作用力而减隔震则是利用装置变形以达到“绕开”地震能量的作用;在计算方法上,由于减隔震桥梁是非线性的特点比较突出所以在对其进行检验时需要使用非线性时程分析或者等效线性化的方法来进行检验,而反应谱法只能作为参考依据;在验算项目上,除了基本的强度和变形检查之外还需要考虑减隔震装置的位移性能是否满足要求,装置的安全稳定性如何,还有就是对于上部结构相对于桥台的相对位移情况等。规范对减隔震桥梁的设计有明确规定:减隔震装置要有稳定可靠的力学性能及足够的变形能力;下部结构要按能力保护的原则设计,保证在减隔震装置有效发挥作用的情况下能维持其弹性状态;应检验罕遇地震作用下梁端位移不会造成桥梁失稳,墩梁之间的间隙可以满足抗震要求。通过某一城市公路独斜塔斜拉桥作为工程实例来构建空间有限元模型,分别使用反应谱分析法与动力时程分析法对大桥结构进行罕遇地震情况下的地震动反应分析,对比两者所得到的结果,表明利用动力时程分析法对大桥结构进行地震动分析更为保守合理。

### 4.3 减隔震效果评价与优化集成

减隔震效果评价是对减隔震设计是否科学的一次重要检测,检测项目有减震率、位移要求以及装置效能及震后可复原性等。减震率是最直接的一个检测标准,它是指安装好减隔震设备以后桥墩底部弯矩或剪力比未安装时降低的程度。经过研究证明,一个合理的减隔震系统能达到20%以上的减震率。位移需求验算是指支座变形以及梁端位移,在装置容许范围之内即可。装置效能评估则是从滞回曲线饱满程度、耗能量大小和残余变形三个方面来进行考量。震后可恢复性检验是最近几年来一个新的研究方向,主要是对结构损伤状况评定、修复需要的时间估计以及全寿命周期内的费用计算等几个方面来检验。某长江大桥抗震试验表明,通过对结构本身性质、地震输入方式以及结构响应的三方面展开系统的分析后得出,分别采用线性和非线性

性时程分析后发现,线性分析不适用于斜拉桥地震响应分析,因此主要采用了非线性分析。减隔震装置的合理集成要着重考虑装置选择、参数设置、体系配套这三个环节。装置的选择要基于桥梁跨径大小、墩身高度、地震区划等综合考虑;参数设定应以减震比最高、位移需求合理为目标;配套方面则是为了使减震装置和下部结构共同发挥作用而对装置所具备的刚度与下部结构之间的关系进行调节。

## 5 结语

本文以桥梁抗震性能评估与优化为主要研究对象,在评估方法、响应特征、参数调整以及消能减震集成等方面进行了系统的分析。研究表明反应谱法与时程分析法相辅相成,三维反应谱法适用性较强,基于性能的设计应基于概率的方法,需考虑地震动及结构特性随机的变化情况,在此基础上消能减震技术可降低地震水平力 21%~27%

或削减率达 21%~27%。未来的研究工作重点为地震后恢复能力评价以及人工智能辅助的最优设计、新型高性能消能减震设备的研发。

## [参考文献]

- [1]李亚,吴兵.梁系平面刚度偏心分布高桩平台结构地震响应[J].水运工程,2024(4):22-27.
- [2]任文静,邱大鹏,张智,等.考虑构件地震相关性的近海桥梁二维地震易损性分析[J].震灾防御技术,2024,19(1):96-107.
- [3]万程磊.广东某装配式市政桥梁减隔震设计分析[J].工程技术研究,2024,9(7):179-182.

作者简介:赵庆缘(1995.01—),男,达斡尔族,内蒙古呼伦贝尔人,重庆交通大学建筑与土木工程专业硕士,桥梁工程师,主要从事桥梁设计、桥梁无损检测工作。