

钢筋混凝土桥梁抗震性能及加固技术

高佳威

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051

[摘要]钢筋混凝土桥是交通运输生命线的重要环节之一, 它的抗震能力直接影响着地震发生之后紧急救援、事后恢复重建的能力。文章首先对钢筋混凝土桥梁抗震性能基本概念进行概述, 在此基础上分别从材料性能、结构设计和构造三个方面对钢筋混凝土桥梁抗震能力产生影响的因素进行探讨, 在总结典型震害案例的基础上, 对桥梁墩身、节点、支座和基础四个部分的主要损坏情况及原因进行了分类汇总; 最后综述目前工程中常用的抗震加固措施主要有加强构件强度、优化结构体系、加强基础抗震性能及采用减隔震装置等方式, 并对其适用性进行了简要说明。最后, 对未来抗震设计理念与加固技术的发展方向进行了展望。

[关键词]钢筋混凝土桥梁; 抗震性能; 震害机理

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19661

中图分类号: U442.5+5

文献标识码: A

Seismic Performance and Reinforcement Technology of Reinforced Concrete Bridges

GAO Jiawei

Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430051, China

Abstract: Reinforced concrete bridges are one of the important links in the lifeline of transportation, and their seismic resistance directly affects their ability to provide emergency rescue and reconstruction after an earthquake occurs. The article first provides an overview of the basic concepts of seismic performance of reinforced concrete bridges. Based on this, the factors that affect the seismic performance of reinforced concrete bridges are discussed from three aspects: material performance, structural design, and construction. On the basis of summarizing typical earthquake damage cases, the main damage situations and causes of the bridge pier body, nodes, bearings, and foundation are classified and summarized; Finally, the commonly used seismic reinforcement measures in engineering include strengthening the strength of components, optimizing structural systems, enhancing the seismic performance of foundations, and using seismic isolation devices. The applicability of these measures is briefly explained. Finally, the development direction of future seismic design concepts and reinforcement technologies was discussed.

Keywords: reinforced concrete bridge; seismic performance; seismic damage mechanism

引言

钢筋混凝土由于具备较好的可塑性和持久性以及较经济的价格而被普遍应用于中小跨径桥梁结构当中, 在服役期间会受到材料劣质化、外界环境腐蚀及规范迭代升级以及增加交通负荷等多种原因的影响导致桥梁的抗震能力大幅下降。据统计, 我国绝大多数建成于上世纪 80—90 年代的钢筋混凝土桥梁的设计抗震等级偏低, 存在着缺乏延性和箍筋数量不够等问题, 所以对现有桥梁开展抗震评价和加固十分必要。本文意在全面整理钢筋混凝土桥梁抗震性能的相关理论知识及分析其灾变原因, 总结现有几种典型的抗震加固方法并进行对比评价, 希望能够给相关的研究及工作带来借鉴作用。

1 钢筋混凝土桥梁抗震性能概述

钢筋混凝土桥梁抗震能力就是桥梁结构在受到地震影响的时候可以保持自身的整体性和稳定性而不会出现整体性的垮塌或者失去使用价值的一种性能表现; 钢筋混凝土桥梁抗震能力主要包括强度、延性和耗能能力三个方面, 其中强度是指结构或者部件抵抗地震作用力的能力, 这是结构在弹性范围内可靠性的前提条件, 但是只靠强度去抵抗一次大的地震是不太现实的; 延性指的是结构或者构件在开始出现屈服之后还可以继续维持其承载力并且不会出现大幅度降低的现象下的非弹性变形的过程; 而延性设计思想的应用, 使得结构可以在承受强震的情况下进入到塑性工作范围, 在塑性较部位产生一定的变形来吸收

掉一部分的能量损失,进而使结构不会因为一次性过大的能量冲击而导致突然断裂的现象发生。耗能能力就是结构受反复的地震荷载影响下吸取以及消耗能量的能力,和构件的滞回线有直接关系。

当前桥梁抗震设计理念已经不是以前简单的“强抗震”,而是发展了以性能为基础的“延性抗震”甚至是“韧性抗震”。^[1]而基于性能的设计思想就是希望桥梁结构在未来不同强度等级的地震发生时,可以满足事先设定并明确的目标性能的需求,比如“小震不坏、中震可修、大震不倒”。这就需要设计人员理解桥梁结构的非线性特性以及能够找出结构中的那些可能会出现塑性铰的区域,进而通过对配筋及构造方面进行精心设计,使其具有良好的延性和耗能能力,对于钢筋混凝土桥梁来说,桥墩即为重要的抗侧力结构构件,该部位的塑性铰部分决定了整个桥梁的抗震情况。

2 抗震性能影响因素

2.1 材料性能

材料自身的力学性能决定了钢筋混凝土桥梁抗震的能力,混凝土强度级别直接影响到截面的抗压承载力大小,但是它的脆性却是抗震的一个障碍,在地震作用下容易出现过大的裂缝。尽管高强度混凝土具有很大的承载能力,但是脆性很大,如果约束不够的话会发生脆性的压溃现象。所以在抗震设计时,重点就是依靠箍筋来约束混凝土受压的变形能力,增大其极限压应变值;而钢筋性能也非常重要。在使用于抗震构件的钢筋必须要有足够的屈服强度的同时也需要具有较好的延性,即屈强比较高,还要有足够的伸长率,使塑性区可以产生较大的塑性变形。而另一方面钢筋与混凝土之间的粘结性能也是决定整个结构性能的重要因素,在受到高应力反复加载的情况下,粘结滑移的程度会加大从而使构件丧失大部分的刚度及强度。

2.2 结构与构造

结构设计尤其是细部构造措施对于桥梁的抗震能力有着直接影响作用。墩柱的剪跨比决定了其破坏形式,低剪跨比(短柱)容易产生脆性的剪切破坏,而高剪跨比(长柱)更容易产生延性的弯曲破坏。抗震设计应当首先考虑延性弯曲破坏的形式,防止脆性剪切破坏的发生;箍筋设计是影响墩柱延性的主要构造措施之一,在可能的塑性铰区处加设箍筋,从而形成对抗核心区混凝土的有效约束,增大了其极限压应变值,在一定程度上可以防止纵筋受压屈曲,从而增加结构截面的抗剪承载能力。大量的震害分析发现箍筋配置不足是造成钢筋混凝土桥墩出现严重的破坏乃至倒塌的主要原因。另外,还有纵向钢筋的配筋率

及搭接位置、搭接长度,梁柱节点的设计方法等,都会对结构在地震的作用下所表现出来的整体性能产生影响。

3 常见震害形式与机理

3.1 墩柱破坏

墩柱是桥梁结构中承受地震作用最直接的构件,也是震害发生最多的地方。墩柱破坏的主要类型有:弯曲破坏、剪切破坏、弯剪破坏,其中弯曲破坏属于一种延性破坏,出现底部或者顶部塑性铰区混凝土压碎、剥落,纵筋压屈或者拉断的现象;虽然比较严重但是可以给整个结构提供明显的先兆,不会让桥梁瞬间倒下,剪切破坏是脆性破坏,表面产生斜裂缝并且迅速扩大,混凝土被剪碎,承载力急剧降低,破坏突然并且极具危险性;弯剪破坏是在弯曲裂缝发展的同时增加了剪切的作用,从而使裂缝更加明显,使承载力下降得更快。此外,在钢筋混凝土空心墩内,薄壁截面受压弯剪共同作用时较容易出现腹板的剪切裂缝乃至失稳,破坏形式更加多样;纵向钢筋焊接处如果处于塑性铰区并且在缺少可靠约束的情况下很容易产生由于粘结锚固破坏而导致的破坏形式等。不同剪跨比条件下桥墩破坏模式的统计分布如图1所示,可见低剪跨比桥墩发生脆性剪切破坏的比例显著偏高,进一步印证了控制剪跨比与加强箍筋约束的必要性。

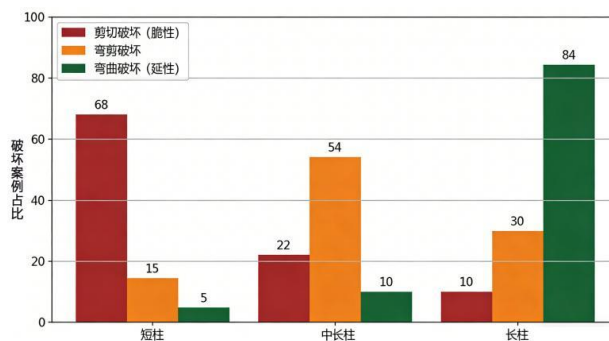


图1 不同剪跨比下钢筋混凝土桥墩破坏模式分布图

3.2 节点破坏

节点是传递内力的重要部位,节点核心区受力状况复杂,既有梁端、柱端传来的弯矩、剪力,还有轴力的作用^[2]。如果节点核心区的抗剪能力不够或者配筋不适当的话,很容易出现破坏。节点破坏的典型情况就是核心区斜面压坏、箍筋屈服乃至断裂,同时梁柱纵向钢筋在节点内锚固破坏等现象的发生都会造成整个结构体系失去整体性,造成结构坍塌。而预制装配桥梁节点连接部分的抗震性能更加脆弱,连接质量与耗能能力则是设计的重点问题所在。节点损坏的危害往往大于构件本身的破损,所以对于节点核心区的抗剪能力和加强节点的构造都有明确的要求。

3.3 支座失效

支座是上部结构与下部结构的联系处,在地震时承受着很大的水平力和竖向力。支座位移破坏形式有:支座本身的剪切破坏或拉裂情况,如滑板式橡胶支座的过量剪切变形及滑移、脱空等现象;支座联结件破坏情况,比如锚栓断裂或者螺栓松动甚至退出支座等;限位装置破坏,例如挡块被剪坏或移位等等。支座破坏将造成上部结构与下部结构之间失去约束,从而导致落梁或者全桥倒塌事故的发生,尤其是曲线梁和斜拉桥,在地震作用不对称的情况下支座破坏更加严重。另外,支座破坏也会造成结构传力途径改变,给墩台和基础带来不利影响的附加内力作用。

3.4 基础与地基问题

基础及地基损坏是致使桥梁整体失稳、倒塌的主要因素之一。基础损坏主要有如下几种情况:桩基础的弯矩或者剪切破坏,在桩顶至承台之间部位出现塑性铰破坏;承台冲切破坏或剪切破坏;扩大基础发生倾斜或滑移等现象;地基方面的问题:场地液化使桩基失去侧向阻力,使桩产生倾斜或折断;地震时发生的滑坡、崩塌直接撞击或覆盖了桥台和下部结构;地基不均匀下沉使得基础发生沉降的不同程度差异,从而使得桥涵结构产生附加应力等。场地液化是造成桥梁大面积损坏的常见病,液化后产生的侧向膨胀力会对桩基施加极大的水平作用力,形成不可逆转的永久性变形。所以,对桥梁场区地震地质环境做出确切判断就成为了桥梁抗震设计的基础。

4 抗震加固技术

4.1 增强构件承载力

该类方法主要是针对墩柱、节点等重要构件直接提升其承载能力和耗能能力。最常见的做法是增大截面法,就是在原来的墩柱外面浇筑一圈钢筋混凝土围套或者混凝土包箍,通过扩大截面积从而达到增强构件刚度以及承载力的目的。此法工艺简单成熟,但是会导致结构的自重以及刚度加大,有可能使地震作用增大,外包钢加固就是在墩柱或者梁体的外表层用粘贴或者缠绕的方式包裹上型钢,通过限制混凝土使其承载能力以及延性得到提高^[3]。这种方法对于提高延性的效果明显,工期较短,但是要注意对钢材的防锈处理。纤维增强复合材料加固技术是近来发展起来的一种新技术,它以碳纤维、玻璃纤维布或者板粘附在混凝土构件表面形成有效的约束层,可以大幅度提升混凝土的极限压应变及梁抗剪承载力,FRP材料有轻质、高强度、抗腐蚀的优点,适合用于约束混凝土柱,能够大幅改善约束混凝土柱的延性性能,另外对于钢筋锈蚀、粘结劣化等构件可以用更换混凝土的方法进行修补。

4.2 改善结构体系

这一种技术和直接加强单个构件的能力无关,而是采用调整整个结构整体受力情况或者传力路线的方式来进行抗震加固。添加剪力墙或支撑系统,就是在桥墩之间或是桥墩与盖梁之间设置钢筋混凝土剪力墙、钢支撑等,使部分横向地震力从原来的单独墩柱转移到剪力墙或支撑系统上,以此减轻墩柱的负担,这种做法可以增强结构的整体侧面刚度,但是要注意刚度的变化导致内力重新分配的问题。结构连接技术,比如把多个梁连接成一个整体或者是增加墩梁的相互联系等,能够防止桥梁下落,同时有利于提高整个结构的工作能力。另外一种方法是降低某些构件的约束力,比如应用“保险丝”的概念,在强地震发生的时候,允许一些首先屈服、耗能的构件,来保护主体结构不受损毁。

4.3 基础加固

基础加固是最为复杂也是最难的基础加固方法,但是却是保障整个建筑物安全最重要的部分,常规做法有以下几种:扩大基础法,就是在原有基础上加设新基础,通过加大受力面积增强地基的承载能力及抗倾覆能力;桩基加固法分为两种,一种是在原有桩基外侧增设新增钻孔灌注桩并增加承台同旧建筑物相联结以承受一定水平力以及垂直压力;另一种则为微型桩法,适用于狭窄空间的施工需求,提升基础的抗拔及抗水平推力性能,此外还可以通过注浆加固、强夯碎石桩等方法改善地基条件从而避免地基失稳的情况出现。另外,提高承台与桩头的连接强度也是一个有效的减少桩基在地震中出现脆性破坏的方法。

4.4 减隔震技术

减隔震技术是目前桥梁结构抗震加固中的前沿技术之一,以“柔克刚”的思想为其基本的思想,在结构上利用延长结构自振周期、加大阻尼的方法降低结构受地震作用的影响程度。该技术主要包括隔震与耗能两种类型,隔震技术是在结构上部结构与下部结构之间设置柔性隔震层,把结构的基本周期延长,使其脱离地震动的卓越周期,从而有效减少上部结构受到地震加速度的作用,常用的隔震装置有:铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座、摩擦摆式支座等。在桥梁加固工程中最广泛的为铅芯橡胶支座。铅芯橡胶支座的力学特性可通过滞回曲线加以表征见图2,曲线所包围的面积即为支座在一个加载循环中所消耗的地震能量,滞回环越饱满,表明支座的耗能能力越强。耗能体系即在梁柱节点及支座等重要位置布置有阻尼器,利用金属屈服变形、摩擦或者粘滞液体流动等方式消耗大量的地震能量,以保障主体结构的安全。减隔震技术的优

点是不仅适用新建桥梁而且还适用于现有桥梁的抗震加固，其加固的效果好，影响相对较小。

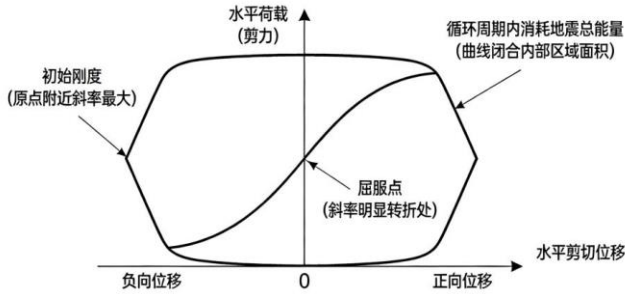


图2 铅芯橡胶支座典型滞回曲线示意图

5 结束语

钢筋混凝土结构桥梁的抗震性能是包含材料、构件、结构以至地基的基础的整体体系工程问题。其多样化的震害模式表明了抗震设计不仅要满足足够的强度指标，还要讲究延性和构造的要求，特别是塑性铰区的箍筋加强和节点核心区的合理配置是防止脆性破坏的重要因素。现有桥梁的抗震加固方法也由原先单纯的提高强度，转而综合利用构件加劲、体系优化、地基加固以及减隔震措施等一系列加固方法，将来随着新型材料、新技术的研发，基于

“韧性”的抗震设计理论将会更加完善，不但要研究好结构在地震发生时的安全度，还要研究清楚它震后能否快速修复及修复程度等。高端新型材料用于抗震加固会越来越多；智能检测与鉴定手段将与抗震加固方法紧密结合，在线对桥梁抗震能力做出实时监控并及时报警；对复杂环境下的桥梁抗震特性研究将会更加细致。不断加强对钢筋混凝土桥抗震原理的理解，开发出更多的加固技术手段，这对提高我国铁路公路等交通设施的抗震等级、保护人民群众的生命财产安全有着极其重要的现实指导意义。

[参考文献]

- [1]张茂刚.钢筋混凝土桥梁抗震性能及加固技术[J].大众标准化,2025(15):40-42.
 - [2]李玲.兴国至赣县高速公路桥梁结构抗震设计分析[J].交通世界,2022(33):117-119.
 - [3]韩多.既有山区高速公路桥梁抗震薄弱环节识别与加固策略研究[J].工程建设与设计,2025(16):99-101.
- 作者简介：高佳威（1995—）男，江西九江人，工程师。2016年6月毕业于西南交通大学土木工程专业，获学士学位，现主要从事桥梁设计工作。