

# 桥梁抗震设计与抗震加固措施分析

## ——以山区公路为例

王志贤

甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司

**摘要:** 本文将山区公路为例, 浅析桥梁抗震设计及抗震加固的具体措施, 明确山区桥梁抗震设计工作的要点和难点, 并在此基础上提出科学合理的抗震加固措施及方案, 以确保山区公路桥梁结构的安全性、稳定性以及可靠的耐久性, 同时, 通过科学合理的加固措施规避因地震灾害所带来的各类问题, 有效降低桥梁倒塌的风险, 让山区公路桥梁以最可靠的状态服务于人们的日常出行, 为区域经济的发展提供保障。

**关键词:** 山区公路; 桥梁工程; 抗震设计; 加固措施

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.04.036

在交通强国政策的引领之下, 我国基础设施建取得了举世瞩目的成就, 公路桥梁作为生命线工程已经在我国各个区域内得到了全面覆盖, 也因此便利了人们的日常出行和生活, 推动了我国区域经济的飞速发展。因为受到地形地质等因素的影响, 要求在开展山区公路桥梁设计时充分关注山区公路桥梁抗震设计, 积极落实各项抗震构造措施及抗震加固措施, 以充分降低发生区域灾害时可能存在的桥梁倒塌风险, 让山区公路桥梁工程的使用寿命得以切实延长, 以充分保障人们日常出行的安全性。

### 一、桥梁震害的原因分析

对于不同的桥梁结构而言, 桥梁的组成部件以及传力途径均存在一定的差异, 一般可以将地震灾害导致的桥梁震害问题按照震害严重程度分成如下几种情况: 一, 桥梁结构发生落梁破坏, 造成致命伤害; 二, 桥梁构件产生较大损伤, 结构承载能力受到较严重的影响, 并有可能进一步引发落梁破坏, 危及生命安全; 三, 桥梁构件产生损伤, 使结构承载能力受到影响, 但若无余震或活载等的冲击影响, 桥梁结构可临时应急使用; 四, 短时间内可确保桥梁继续使用, 承载能力不出现明显降低; 五, 不出现影响结构承载能力的构件损伤。

上部结构常见的震害类型包括: 一, 落梁破坏, 破坏时桥梁墩柱发生较大变形, 引起上部主梁相互冲撞, 造成主梁发生较大的位移, 进而引发落梁; 二, 主梁屈曲, 对于主梁为钢结构的桥梁, 当下部结构出现损伤后, 由于基础沉降引起主梁出现屈曲破坏; 三, 梁端出现损伤, 包括端横梁损伤, 抗震连接件损坏, 梁端锚固钢筋周围破坏; 四, 其他损伤, 包括支座损伤, 因支座

移动引起的主梁损伤, 桥梁非主要构件的损伤等。

山区公路桥梁由于地形限制, 一般存在桥墩刚度差异较大的情况, 于是, 梁体破坏是地震作用下山区桥梁最严重破坏形式之一。主梁在地震中遭到破坏, 整个桥面将会出断裂或坍塌问题, 进而引发下部结构与支撑体系的破坏。一般而言, 山区公路纵坡较大, 桥梁震害可主要表现在两个方面: 一是累计位移引起梁板结构自身碰撞破坏; 二是桥梁支座发生剪切破坏从而改变结构体系发生桥墩破坏。其中, 位移震害可依照发生位移角度划分为横向位移震害、纵向位移震害、扭转位移震害等多种类型, 该破坏形式通常发生在桥梁端部以及伸缩缝位置处。

桥梁支座主要的功能是连接上下部结构, 约束梁端自由度并耗散一定的动力荷载能量。地震灾害来临时, 桥梁下部结构发生较大的位移, 由于支座存在约束刚度, 支座中将产生较大的约束剪力。如果约束剪力超过支座的极限屈服剪力, 将会出现支座的剪切破坏问题。支座震害问题出现的根本原因主要在于设计阶段没有根据桥址处实际的地震参数进行有限元仿真分析, 从而导致支座性能参数的选取与地震参数不匹配。在遭到瞬时较大的地震作用时, 支座受到剪切力影响而出现支座本身或连接螺栓破坏问题, 进而导致支座整体脱落。

下部结构常见的震害类型包括: 一, 墩柱混凝土保护层剥落, 进一步发展造成墩身内部混凝土破碎, 主筋出现屈曲或断裂, 最终引发桥梁整体倒塌; 二, 弯曲破坏, 墩柱弯矩较大部位首先出现水平裂缝, 引起墩身保护层混凝土剥落, 主筋发生屈曲破坏, 进而引起核心混凝土压溃; 三, 剪切破坏, 沿与墩柱轴线大致呈 $45^\circ$  夹角的方向出现斜裂缝, 进一步发展出现剪切错位, 最终导致桥墩无法支撑上部结构; 四, 基础损伤, 包括基础沉降, 出现残余水平位移, 桩身顶部出现弯曲裂缝等; 五, 桥梁自身具备一定的承载能力, 由于受到地震的影响, 桥梁结构以及材料将发生一系列特殊的形态变化, 从而导致结构承载能力降低或者失效, 致使桥梁整体出现不可逆的损伤<sup>[1]</sup>。

山区公路桥梁所处的地形地貌条件较为特殊, 墩台相对较高。在桥梁结构实际运营过程中, 墩台需要将桥跨上部结构的恒载以及活载传递给基础, 自身还要承受较大的水平剪力。在发生地震时容易出现墩身及系梁的剪切破坏或者塑性铰区破坏的问题。对于刚度较大的墩

台结构而言, 支座较容易发生剪切破坏, 如地震作用力逐步增大, 桥梁墩台将难以承受巨大剪切力而出现剪切破坏, 导致桥梁结构整体坍塌; 对于长细比较大的柔性墩台而言, 受地震作用影响, 桥墩的连接部位塑性较混凝土逐渐剥落或破坏, 实际承载力严重下降。

经过实际调查研究发现, 山区公路桥梁工程基础病害问题较为少见, 基础破坏现象多源于基础所处的地层结构特征。在遭到地震作用时, 由于基础所处地质条件欠佳, 土壤结构在长时间受到巨大竖向荷载的作用下容易出现砂土液化现象, 导致桥梁基础在受到地震作用时的整体承载力出现下降, 由于该类型基础破坏不易发现, 一旦发生将造成严重后果, 因此, 设计阶段应详细勘察, 精心设计。

## 二、山区公路桥梁抗震设计工作原则与方法

### (一) 山区桥梁抗震设计工作原则

通过对我国部分山区桥梁工程病害问题予以的细致勘测, 可以确定, 现阶段我国山区各等级公路桥梁之中桥墩基础结构抗震能力较差的问题频发, 若针对桥梁支座盖梁等多种结构实施全面系统的加固处理, 需要耗费大量的人力物力资源。与此同时, 所需耗费的加固施工时间相对较长, 且施工效率相对较低。在实施桥梁加固过程中, 车辆无法正常通行, 因此在一定程度上影响了交通的有序性和顺畅性。

基于此, 在实施山区桥梁抗震设计过程中, 要求充分遵循如下原则: 首先, 挑选出抗震性能相对较差的桥梁构件, 并实施针对性加固处理, 不断提升桥梁的抗震能力, 针对各类潜在的震害因素实施充分管控, 以实现对于桥梁结构的保驾护航, 打造更具经济性和更加合理的桥梁加固方案, 以充分解决桥梁抗震问题; 其次, 与山区桥梁工程实际结构布局相结合, 有选择性地系统进行桥梁加固方案拟定, 在正式开展桥梁加固工作前, 要求全面分析桥梁的实际使用情况并予以细致考量。

### (二) 山区公路桥梁工程抗震设计方法

随着山区公路桥梁工程建设规模日渐扩大, 国内研究学者对山区公路桥梁抗震设计理念与方式进行了不断优化, 并呈现出由强度控制逐步过渡到延性控制、位移控制、能量控制的转变态势。但由于山区公路桥梁工程专项抗震设计的研究工作起步较晚, 地震能量控制设计以及性能设计尚且处于理论成果阶段, 常见的抗震设计方式主要为静力设计、反应谱设计、时程设计等。

其中, 静力设计手段中的计算流程较为简单, 但在静力设计过程中没有充分考虑到公路桥梁工程在地震波作用下的变形与动力特征, 因此主要应用在桥台、挡土墙等刚性结构抗震设计环节; 反应谱设计方式, 是现阶段山区公路桥梁工程最为常见的设计手段之一。通过反应谱分析, 可以帮助设计人员更加清晰的掌握地震动态响应规律, 优化抗震设计方案参数。但在实际应用过程

中, 反应谱设计方式没有着重关注地震的随机性, 计算手段多数以线弹性理论为主, 无法直观展现出山区公路桥梁结构在地震作用下进入塑性屈服状态后的应力、应变情况; 时程分析法, 能够有效计算出山区公路桥梁结构受地震波影响下的结构内力、变形与加速度等参数数值, 并能够有效模拟出地震作用下桥梁工程下部结构与基础结构之间的相互作用情况, 大多应用在大跨度或结构较为复杂的山区公路桥梁工程抗震设计中。

因此, 从一定角度上来说, 山区公路桥梁工程抗震设计工作应当结合桥梁结构自身特征、工程所处地区地质条件与水文环境, 选择适宜的抗震设计手段。由于地震波具有随机性、复杂性等特征, 在结构抗震设计环节的假定条件经常会与实际情况不符, 导致抗震设计结果精准度不足, 因此设计环节不应过于关注设计参数的精准管控, 而是需要将更多时间与精力放置在抗震概念设计环节, 着重在抗震设计过程中使用位移性控制、延性控制理念。

## 三、山区公路桥梁工程抗震设计要点

### (一) 桥位及桥型的选择

对于山区公路桥梁工程而言, 由于施工现场环境过于复杂, 地势通常高低不等, 不同地势下的地理条件往往也会存在一定差异, 因此在开展桥位选择工作中, 应当在不影响路线总体设计的前提下尽量选择地质条件较好的位置建设桥梁, 避免将桥梁工程建设在地震发生后结构容易发生破坏的松动地基上, 尽可能在基岩或者坚硬碎石结构处建设桥梁。避开滑坡或者地震常发地带, 从根本上保障山区公路全面工程建设与后续运营期间的安全性。

桥梁选型设计也可以直接影响到山区公路桥梁工程整体抗震性能, 在桥型选择工作开展过程中, 应当切实满足工程建设要求, 选择具备较高抗震性能的桥型。如结构稳定的大跨度连续桥梁、伸缩缝较少或者隔震减震效果良好的新型钢桁架桥梁, 确保桥梁工程能够在满足山区基础交通建设成本管控要求的前提下, 选择更为先进的抗震桥型结构, 降低后续公路桥梁工程维护维修问题发生的概率。

### (二) 桥梁结构设计

山区桥梁工程结构设计时, 需要尽量选择对称式或者规则的桥梁结构, 采用合理方式降低结构自身重量, 避免地震作用使桥梁结构受到严重冲击力影响, 增强结构自身的稳定性。桥墩长细比应当尽量控制在适宜范围之内, 注重使用具备良好延性的工程材料, 从根本上提升桥梁结构整体的抗震能力, 降低结构脆性破坏问题发生概率。

### (三) 桥梁抗震设计注意事项

1. 为了避免地震中的落梁风险, 桥梁上部结构最好采用连续梁形式。结构支撑体系最好采用水平力分散的

多点支撑, 尽量避免单墩固定造成固定墩内力较大情况的发生。特别的, 对位于山区且桥墩较高的桥梁结构, 若桥台处地质条件较好, 尽量让桥台分担地震作用产生的水平力。

2. 对桥址位于软弱土质的滑坡地段及地基易液化的桥位, 尽量选取截面刚度较大的基础形式。另外, 尽可能采用多墩固定的支撑体系或刚构等超静定次数较高的结构形式, 从而优化结构受力, 确保桥梁结构整体稳定。

3. 对桥位地质条件较好, 结构固有周期较短的多跨连续桥梁结构, 尽量采用减隔震设计理念, 减小地震输入的能量, 控制地震产生的结构位移。

4. 对于局部构件损伤可能引发桥梁整体受损的结构体系, 必须限制该构件在地震中的损坏。

5. 严格区分延性构件和能力保护构件, 将二者组合成合理的结构体系。另外, 对几何非线性敏感的结构, 或因恒载发生大偏心受弯结构, 尽量不要用在地震作用下易出现失稳的结构体系中。

6. 对桥位地质条件变化显著或结构本身有显著变化的桥梁结构, 应深入对比分析结构的支撑形式, 合理拟定应采取简支约束或连续约束的形式。

#### 四、山区公路桥梁抗震加固处理措施

在山区公路桥梁之中运用针对性的抗震加固处理技术, 需要以避免桥梁垮塌为主要工作方向, 以实现对于桥梁结构的充分管控, 将其在地震灾害影响下的破坏程度控制在合理限度内。

1. 改变桥梁结构体系的加固方法, 防止落梁是确保桥梁结构安全最有效最重要的措施之一。如将既有桥梁的简支结构转换成连续结构, 不但会造成桥梁结构应力状况的改变, 而且还要管制交通, 承担巨大的经济负担。改变桥梁结构体系的加固方法能够有效解决上述问题。简单来说, 该方法就是减少桥梁伸缩缝, 实现形式一般有以下几种: 连接上部结构主梁法; 连接桥面板法; 连接端横梁法; 连接桥面铺装法。该方法要点在于将简支梁的支座用性能较稳定的弹性支座进行替换, 因此, 必须研究体系转换后结构的特征。通过增加主要构件截面、粘贴钢板方式提升桥梁结构抗震性能, 增强结构整体延性。值得注意的是, 构件加固时钢筋数量不宜设置过多, 避免出现超筋问题, 对混凝土结构造成严重不利影响。在梁板桥等桥梁结构中, 可以使用增加马蹄高度与宽度的方式扩大截面积。

桥梁加固工作需要在设计环节给予高度重视。结合公路桥梁工程结构特征以及具体抗震要求选择具备良好性能的抗震支座例如选择水平力分散型抗震支座以及高阻力抗震支座, 设置适宜的限位挡块等, 进而减小地震作用对桥梁结构整体造成的冲击, 降低落梁风险。

2. 桥墩抗震加固的目的一般为提高桥墩承载能力或改善桥墩延性。常用的加固措施有外包钢筋混凝土加固

法, 粘贴碳纤维布加固法, 粘贴钢板加固法。这些方法均是通过约束核心混凝土来提高结构延性, 或通过对加固材料的锚固提高结构承载能力。由于山区公路桥梁工程的桥墩较高, 更容易受到地震作用力影响。在桥墩抗震设计环节, 应采用合理方式提高桥墩延性。例如在墩台设计中采用钢混结构以及空心截面, 在横向墩柱之间设置系梁, 从而进一步提升结构整体性。结合墩台结构实际受力情况适当增加墩柱截面尺寸。在桩柱连接位置以及墩台端部位置处设置加密箍筋, 从根本上提升结构整体的延性与抗剪能力, 确保墩台结构能够在巨大的地震波作用下依然保持完整状态。桥台加固设计可以在梁板与挡块处设置弹性垫块, 减缓地震作用下的结构变形情况, 从根本上保证结构不发生剧烈碰撞。桥梁盖梁与桥墩、桥台连接处以及墩台与基础连接处的塑性铰位置均需要严格按照《公路桥梁抗震设计规范 JTG/T 2231-01-2020》对箍筋进行适宜的加密处理, 主筋确保满足锚固长度要求, 确保抗震设计方案能够为山区公路桥梁提供足够的安全储备。

3. 基础抗震加固的目的是提高基础承载能力或改善不良地质的影响。常用方法有扩大承台基础法, 补桩法, 地基置换法, 裂缝修补等。

4. 从通过耗散地震能量优化桥梁结构受力出发, 最有效的抗震加固措施就是用新型减隔震支座替换既有桥梁支座。但是, 该方法局限性较大, 不宜大面积推广。

5. 设置防落梁措施。常见的防落梁措施包括: 防落梁装置, 例如拉索支座、钢板连接件、钢绞线连接件、缆索连接件; 限位装置, 例如挡块、粘滞阻尼器; 确保梁端搭接长度; 当支座较高时, 设置防落差挡块。

在实际加固过程中, 要求有关工作人员充分关注地区地形地质条件, 结合其构成的差异和桥梁结构支撑体系的差异, 有针对性地采取相应的加固处理方案, 以充分展现山区公路桥梁抗震加固工作的技术优势, 降低因地震灾害所引发的各类损失。结合地震安全评价报告, 明确工程抗震重要系数、地震特征周期, 对桥梁结构的振型及特征值展开全面分析, 判别抗震加固设计方案的适用性, 对设计方案进行不断优化及完善, 增强山区公路桥梁工程整体抗震效果。

#### 五、结语

综上所述, 针对山区公路实施桥梁抗震设计, 要求与桥梁结构自身的实际构成相结合, 充分关注桥梁结构所处的地理环境, 以明确最为合理的桥梁抗震设计工作方法, 让山区公路桥梁抗震设计的有效性和合理性得到充分保障。通过积极有效的桥梁工程针对性加固处理方案, 让桥梁工程结构的质量和稳定性得到充分保障。

#### 参考文献

[1] 尹永杰. 山区公路桥梁抗震设计与抗震加固措施研究[J]. 工程建设与设计, 2020(17): 113-115.