

桥梁抗震性能评估与设计改进研究

范依博

410328*****9691

摘要:桥梁抗震性能是确保桥梁在地震等自然灾害中安全运营的关键因素。本文探讨了桥梁抗震性能评估的方法与流程,分析了影响桥梁抗震性能的主要因素,并提出了设计改进的策略。通过理论分析和数值模拟,对桥梁的抗震性能进行了全面评估,并针对评估结果提出了相应的设计改进措施。本文旨在为桥梁抗震设计提供理论支持和实践指导,提高桥梁的抗震性能和安全性。

关键词:桥梁抗震性能;抗震评估;设计改进;数值模拟;抗震设计

DOI: 10.69979/3029-2727.25.11.021

引言

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分,在地震等自然灾害中承担着重要的生命线功能。桥梁的抗震性能直接关系到其在地震发生时的结构安全和使用功能。随着地震活动的频繁和桥梁建设规模的不断扩大,桥梁抗震性能的评估与设计改进已成为桥梁工程领域的重要研究课题。传统的桥梁抗震设计主要依据经验公式和规范要求,但随着计算机技术的发展和数值模拟方法的成熟,现代桥梁抗震性能评估与设计改进更加依赖于科学的理论分析和精确的数值模拟。本文将从桥梁抗震性能评估的方法与流程、影响因素、设计改进策略等方面进行探讨,为桥梁抗震设计提供参考。

1 桥梁抗震性能评估的方法与流程

1.1 抗震性能评估的理论基础

桥梁抗震性能评估的理论基础主要包括地震工程学、结构动力学和材料力学等学科。地震工程学提供了地震动的特性和地震作用的计算方法,涵盖地震波传播规律、场地类别划分对地震动的影响;结构动力学用于分析桥梁结构在地震作用下的动力响应,包括振动模态、共振特性及位移响应规律;材料力学则关注材料在地震作用下的应力应变关系和破坏准则,明确材料屈服、开裂及极限状态的判定标准。通过综合运用这些理论,可以对桥梁的抗震性能进行全面评估。

1.2 抗震性能评估的流程

桥梁抗震性能评估的流程通常包括以下几个步骤:首先,收集桥梁的基本信息,如结构形式、材料特性、施工图纸等,还需补充桥梁运营年限、既往维护记录及周边地质勘察数据;其次,确定地震动参数,包括地震

烈度、地震动加速度时程等,需结合桥梁所在区域的地震区划图及历史地震活动特征,选择具有代表性的地震动输入;然后,建立桥梁结构的数值模型,采用有限元方法进行计算,需考虑构件连接方式、边界约束条件及材料非线性特性;接着,进行抗震性能分析,计算桥梁结构在地震作用下的内力和变形,重点关注关键构件的应力状态与位移是否超出限值;最后,根据分析结果评估桥梁的抗震性能,判断其是否满足抗震设计要求,对不满足的部位提出初步优化方向。

1.3 抗震性能评估的数值模拟方法

数值模拟是桥梁抗震性能评估的重要手段。常用的数值模拟方法包括有限元方法、有限差分方法和离散元方法等。有限元方法通过将桥梁结构离散为有限个单元,建立结构的数值模型,能够精确模拟桥梁结构在地震作用下的动力响应,可细化至构件局部应力集中区域的分析;有限差分方法适用于处理连续介质的动力问题,能够有效模拟地震波在桥梁结构中的传播和反射,尤其适合分析桥梁基础与地基土的动力相互作用;离散元方法则适用于模拟颗粒状材料的动力行为,如桥梁基础中的土体,可还原地震作用下土体颗粒的运动轨迹与受力状态。

2 影响桥梁抗震性能的主要因素

2.1 桥梁结构形式

桥梁的结构形式对其抗震性能有显著影响。不同类型的桥梁结构在地震作用下的动力响应特性不同。例如,梁式桥、拱桥和斜拉桥等结构形式在地震作用下的内力分布和变形模式存在差异。梁式桥通常具有较好的抗震性能,但其在地震作用下可能会出现较大的横向位移,需通过设置限位装置控制位移量;拱桥的抗震性能较好,

但其拱脚部位在地震作用下可能会产生较大的应力集中,需通过加强拱脚配筋或设置柔性节点缓解应力;斜拉桥的抗震性能受索塔和主梁的刚度影响较大,需要特别关注索塔的抗震设计,可通过优化索塔截面形式或增设减震构件降低地震响应。

2.2 地震动特性

地震动的特性是影响桥梁抗震性能的重要因素。地震动的加速度、频率和持续时间等参数直接影响桥梁结构在地震作用下的动力响应。例如,高频率的地震动可能会引起桥梁结构的高频振动,导致局部构件的疲劳破坏,尤其对小跨度桥梁的连接部位影响显著;低频率的地震动则可能引起桥梁结构的整体变形,影响其整体稳定性,对大跨度桥梁的主梁与索塔连接节点威胁较大。

2.3 材料特性

桥梁结构材料的特性对其抗震性能也有重要影响。材料的强度、刚度和阻尼等参数决定了桥梁结构在地震作用下的应力应变关系和能量耗散能力。例如,高强度混凝土和钢材在地震作用下具有较高的承载能力,但其脆性较大,可能会出现脆性破坏,需通过添加纤维或采用复合配筋方式改善延性;而低强度、高延性的材料虽然承载能力较低,但其延性较好,能够通过变形耗散地震能量,减少结构损伤,适合用于地震高风险区域的桥梁关键构件。此外,材料的老化性能也会影响桥梁长期抗震性能,如混凝土碳化、钢材锈蚀会导致材料性能衰减,降低结构抗震能力。

3 桥梁抗震设计改进的策略

3.1 结构形式优化

结构形式优化是提升桥梁抗震性能的关键策略之一。通过科学选择桥梁结构类型与优化结构布局,能够改善桥梁在地震作用下的动力响应特征。比如,针对梁式桥,可采用连续梁或连续刚构结构,增加桥梁冗余度,借助多跨协同受力分散地震荷载,进而提升其抗震能力;对于拱桥,可优化拱的矢跨比与拱脚支座类型,将拱脚固定支座改造为半活动支座,缓解拱脚应力集中问题,同时调整拱轴线形态使受力更均匀,增强拱桥抗震性能;针对斜拉桥,可优化索塔与主梁的刚度匹配关系,通过增加主梁横向刚度或在索塔底部设置耗能构件,降低索塔的地震响应,提高斜拉桥的抗震水平。

3.2 抗震设计参数调整

调整抗震设计参数是提升桥梁抗震性能的有效方式。依据抗震性能评估结果,可对桥梁的抗震设计参数

进行合理调整,例如增大构件截面尺寸、提高材料强度等级、提升阻尼比等。以抗震性能不足的桥梁为例,针对支座、桥墩等关键构件,可通过增大截面尺寸提升其承载能力与刚度,同时优化截面配筋率避免局部应力超标;通过提高材料强度等级(如将C30混凝土升级为C40),增强桥梁结构的抗力,延缓材料屈服;通过在桥梁支座处设置橡胶阻尼垫或液体粘滞阻尼器提高阻尼比,增强桥梁结构的能量耗散能力,减少地震响应。

3.3 抗震加固措施

对于抗震性能未达标的既有桥梁,可采取抗震加固手段。抗震加固措施包含增强构件刚度、增设阻尼装置、采用隔震与耗能装置等。例如,在桥梁桥墩、桥台等关键部位增设钢支撑或混凝土剪力墙,构建抗侧力体系,增强构件刚度以提升桥梁抗震能力,同时需保证新增构件与原结构连接可靠;通过安装金属屈服耗能器、摩擦耗能器等阻尼或耗能装置,利用构件塑性变形或摩擦作用耗散地震能量,减少地震响应,且需根据桥梁振动特性选择适配的阻尼参数;采用铅芯橡胶隔震支座等隔震装置,将地震作用下桥梁上下部结构的刚性连接改为柔性连接,隔离地震动传递,降低地震对桥梁结构的影响。

4 桥梁抗震性能评估与设计改进的实践探索

4.1 数值模拟与实验验证

数值模拟是桥梁抗震性能评估与设计改进的重要工具,但其结果需通过实验验证保障准确性与可靠性。通过构建桥梁结构数值模型,采用有限元方法开展抗震性能分析,可获取桥梁结构在地震作用下的内力与变形分布,模型需涵盖材料非线性、几何非线性及边界非线性等关键要素。随后,通过振动台试验、拟静力试验等实验研究验证数值模拟结果:振动台试验可模拟不同地震波输入下桥梁的动态响应,拟静力试验能获取构件的滞回曲线与承载力变化规律。实验验证可发现数值模拟中模型假设不合理、边界条件不准确等问题,进而修正完善数值模拟模型(如调整材料本构参数、优化构件连接刚度)。

4.2 多学科协同设计

桥梁抗震性能评估与设计改进需综合运用多学科知识,地震工程学、结构动力学、材料力学、土力学等学科均在桥梁抗震设计中发挥重要作用。多学科协同设计可通过整合不同学科的知识与方法,搭建跨学科设计平台,实现桥梁抗震性能的全面优化。例如,地震工程学可提供地震动特性与地震作用计算方法,确定合理的

地震荷载输入；结构动力学可分析桥梁结构在地震作用下的动力响应，识别结构薄弱部位；材料力学可研究地震作用下材料的应力应变关系与破坏准则，指导材料选型与参数设计。

4.3 全生命周期抗震设计

桥梁抗震性能不仅影响建设阶段的安全性与可靠性，还关乎运营、维护阶段的性能，因此桥梁抗震设计需贯穿全生命周期，构建“设计-施工-运营-维护-退役”全阶段抗震管理体系。设计阶段需充分考虑桥梁抗震性能，结合区域地震风险等级选择合适的抗震设计措施，同时预留后期加固空间；施工阶段需严格把控施工质量（如确保钢筋绑扎精度、混凝土浇筑质量），保障抗震设计措施落实，通过施工监测验证结构实际参数与设计值的一致性；运营阶段需定期开展抗震性能评估，利用传感器实时监测结构振动、应力等参数，及时发现并处理构件裂缝、支座老化等潜在抗震隐患；维护阶段需依据抗震性能评估结果采取裂缝修补、支座更换等维护加固措施，延长结构抗震性能有效期；退役阶段需考虑地震作用下结构拆除的安全性，制定专项拆除方案。

5 桥梁抗震性能评估与设计改进的未来发展趋势

5.1 高性能材料的应用

随着材料科学技术的持续进步，高性能材料在桥梁抗震设计中的应用将愈发广泛。高性能材料具备高强度、高延性、高阻尼等特性，可显著提升桥梁结构抗震性能。例如，自修复混凝土等高性能混凝土能在裂缝产生后自动愈合，恢复结构承载力；碳纤维布、玻璃纤维筋等纤维增强复合材料具有轻质高强、耐腐蚀的特点，可用于加固桥梁构件或直接制作抗震关键部件；形状记忆合金拥有超弹性与形状记忆效应，在地震作用下可通过变形耗散能量，震后自动恢复原状，减少结构损伤。

5.2 智能抗震技术的发展

智能抗震技术是未来桥梁抗震设计的重要发展方向。该技术通过集成传感器、执行器与智能控制算法，构建自适应抗震系统，实现桥梁结构的实时监测与自适应抗震控制。例如，在桥梁结构中安装加速度传感器、应变传感器等组成的传感器网络，实时监测桥梁振动响应与损伤情况，数据经无线传输至控制中心实时分析；借助模糊控制、神经网络控制等智能控制算法，根据监测数据自动判断地震强度与结构响应状态，调整执行器动作（如控制阻尼器出力、调整隔震支座刚度），实现

桥梁结构的自适应抗震控制。此外，智能抗震技术还可结合数字孪生技术构建桥梁虚拟模型，实时映射实体结构状态，通过虚拟仿真预判结构抗震性能变化，提前制定应对策略。

5.3 抗震设计规范的更新与完善

随着地震工程学与桥梁抗震技术的不断发展，抗震设计规范需持续更新完善以适应工程实践需求与技术进步。规范更新完善需充分吸纳地震工程学最新研究成果（如新型地震动预测模型、结构抗震性能评估方法），结合高性能材料应用、智能抗震技术集成等桥梁抗震技术发展趋势，补充相应设计要求与计算方法；同时总结既往地震中桥梁破坏案例、成功抗震加固工程等实践经验，优化规范条文的实用性与可操作性。例如，依据对地震动特性的新认知更新地震动参数取值方法，增加不同场地类别下地震动放大系数的细化规定；结合桥梁抗震性能评估与设计改进实践经验，完善抗震设计措施与要求，补充大跨度桥梁、既有桥梁加固的专项设计条款。

6 总结

桥梁抗震性能评估与设计改进是确保桥梁在地震等自然灾害中安全运营的关键环节。通过抗震性能评估的方法与流程、影响因素分析和设计改进策略的研究，可以有效提高桥梁的抗震性能和安全性。数值模拟与实验验证、多学科协同设计和全生命周期抗震设计是桥梁抗震性能评估与设计改进的重要实践探索。未来，随着高性能材料的应用、智能抗震技术的发展和抗震设计规范的更新与完善，桥梁抗震性能评估与设计改进将朝着更加科学、智能和高效的方向发展。

参考文献

- [1]黎婷婷,杨根红.桥梁结构抗震性能评估与加固技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(36):80-82.
- [2]杨耀生,陈嘉伟,张舜.基于模糊层次分析法的既有公路桥梁抗震性能评估[J].建筑结构,2021,51(S2):581-585.
- [3]郭瑾.既有公路桥梁抗震排查评估实例分析[J].交通世界,2021,(32):136-137.
- [4]罗晓峰.独柱式城市高架桥抗震性能研究[M].化学工业出版社:201911:192.
- [5]魏猛.旧桥抗震性能评估实例分析[J].山东交通科技,2018,(03):130-133.