

Research on seismic design optimization strategies for railway bridge and tunnel structures along the earthquake zone

Yi Wen Wenjie Deng Mengzhou He Jingqi Huang Yi Yan

Chengdu Chengtiedian Project Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610081, China

Abstract

This paper focuses on seismic design optimization strategies for railway bridge and tunnel structures in earthquake-prone zones. First, it elaborates on the importance of seismic design for these structures and analyzes the destructive patterns and impacts of earthquakes. Subsequently, it delves into existing challenges in current seismic design from perspectives including design philosophy, structural selection, seismic calculation methods, and construction measures. The paper then proposes targeted optimization strategies, such as applying performance-based seismic design concepts, rational structural selection and layout, improved seismic calculation methods, enhanced construction measures, and consideration of new materials and technologies. These efforts aim to provide theoretical support for seismic design of railway bridge and tunnel structures in earthquake-prone zones, enhance their seismic resistance capabilities, and ensure the safety and smooth operation of railway transportation.

Keywords

earthquake-prone zones; railway bridge and tunnel structures; seismic design; optimization strategies

地震带铁路桥隧结构抗震设计优化策略研究

文翼 邓文杰 何孟舟 黄靖淇 晏屹

成都成铁工程项目管理有限公司, 中国 · 四川 成都 610081

摘 要

本文聚焦于地震带铁路桥隧结构的抗震设计优化策略。首先阐述了地震带铁路桥隧结构抗震设计的重要性, 分析了地震对铁路桥隧结构的破坏形式及影响。接着从设计理念、结构选型、抗震计算方法、构造措施等方面深入探讨了现有抗震设计存在的问题。然后针对性地提出了一系列优化策略, 包括基于性能的抗震设计理念应用、合理结构选型与布置、改进抗震计算方法、完善构造措施以及考虑新材料与新技术应用等。旨在为地震带铁路桥隧结构的抗震设计提供理论支持, 提高其抗震能力, 保障铁路运输的安全与畅通。

关键词

地震带; 铁路桥隧结构; 抗震设计; 优化策略

1 引言

铁路作为国家重要的基础设施和交通运输方式, 在经济发展和社会生活中发挥着不可替代的作用。它承担着大量的客货运输任务, 连接着各个地区, 促进了区域间的经济交流和合作。然而, 地震带地区由于地震活动频繁, 对铁路桥隧结构的安全构成了严重威胁。铁路桥隧结构一旦在地震中遭受破坏, 不仅会导致铁路运输中断, 影响正常的经济活动和人民生活, 还可能引发次生灾害, 造成更大的人员伤亡和财产损失。因此, 开展地震带铁路桥隧结构抗震设计优化策略研究具有重要的现实意义, 是保障铁路运输安全、降低地

震灾害损失、促进铁路建设可持续发展的关键。

2 地震带铁路桥隧结构抗震设计的重要性

2.1 保障铁路运输安全

铁路桥隧结构是铁路线路的重要组成部分, 其安全性直接关系到铁路运输的安全。在地震带地区, 地震可能使桥隧结构出现裂缝、变形、倒塌等破坏。桥梁的上部结构可能因地震作用发生移位或落梁, 导致列车脱轨; 隧道的衬砌可能开裂, 影响列车的通行安全。通过合理的抗震设计, 可以提高桥隧结构的抗震能力, 减少地震破坏的可能性, 从而保障铁路运输的安全, 确保旅客和货物的安全运输。

2.2 降低地震灾害损失

地震是一种破坏性极强的自然灾害, 地震对铁路桥隧结构的破坏会导致铁路运输中断, 给国家和人民带来巨大的

【作者简介】文翼 (2000-), 男, 中国四川江油人, 本科, 从事土木工程 (铁路、桥梁、隧道等) 研究。

经济损失。一方面，铁路运输的中断会影响工业生产、商业贸易等活动的正常进行，造成直接的经济损失；另一方面，修复受损的桥隧结构需要投入大量的人力、物力和财力，增加了灾后重建的难度和成本。优化抗震设计可以使桥隧结构在地震中保持良好的使用功能，减少修复时间和费用，降低地震灾害造成的损失。

2.3 促进铁路建设可持续发展

随着铁路建设的不断发展，越来越多的铁路线路穿越地震带地区。合理的抗震设计是铁路建设可持续发展的重要保障。通过优化抗震设计策略，可以提高铁路桥隧结构的耐久性和可靠性，延长其使用寿命，减少后期维护成本。同时，良好的抗震性能可以增强公众对铁路运输的信心，促进铁路运输的发展，实现铁路建设的经济、社会和环境效益的统一。

3 地震对铁路桥隧结构的破坏形式及影响

3.1 桥梁结构的破坏形式及影响

3.1.1 上部结构破坏

地震可能导致桥梁上部结构出现梁体移位、落梁等破坏形式。梁体移位会使桥梁的线形发生改变，影响列车的行驶平稳性；落梁则会使桥梁失去承载能力，导致列车坠落，造成严重的人员伤亡和财产损失。

3.1.2 下部结构破坏

下部结构破坏主要包括桥墩折断、基础失效等。桥墩是桥梁的主要承重构件，在地震作用下，桥墩可能因承受过大的水平力和弯矩而发生折断。基础失效则可能是由于地震引起地基土的液化、沉降或滑移等原因导致的。下部结构的破坏会直接影响桥梁的整体稳定性，使桥梁无法正常使用^[5]。

3.1.3 支座破坏

支座是连接桥梁上部结构和下部结构的重要部件，其作用是将上部结构的荷载传递到下部结构，并允许上部结构在温度变化、列车荷载等因素作用下产生一定的变形。地震可能导致支座损坏、脱空等，使上部结构与下部结构之间的连接失效，导致结构受力不合理，进而引发其他部位的破坏。

3.2 隧道结构的破坏形式及影响

3.2.1 洞口破坏

隧道洞口是地震作用下容易发生破坏的部位。地震可能导致洞口边坡失稳，发生塌方，堵塞隧道进出口。洞口破坏不仅会影响列车的正常通行，还会给隧道的抢修带来困难。

3.2.2 衬砌开裂

地震作用会使隧道衬砌承受较大的动荷载，导致衬砌出现裂缝。衬砌开裂会降低隧道的防水性能，使地下水渗入隧道内部，影响隧道的使用功能。同时，裂缝的发展还可能导致衬砌结构的强度和稳定性降低，进一步影响列车的安全运行。

3.2.3 围岩失稳

地震可能引发隧道围岩的失稳，如围岩的松动、滑移等。围岩失稳会使隧道的支护结构承受更大的压力，导致支护结

构破坏，进而引发隧道整体塌陷。隧道整体塌陷是一种极其严重的破坏形式，会造成巨大的经济损失和人员伤亡，且修复难度极大。

4 现有抗震设计存在的问题

4.1 设计理念方面

4.1.1 传统设计理念局限

传统的抗震设计理念主要以保障结构在地震作用下的安全性为目标，侧重于结构的强度和刚度设计。这种设计理念认为，只要结构的强度和刚度足够大，就能够抵抗地震作用。然而，在实际地震中，结构往往进入非线性状态，传统的抗震设计理念难以准确评估结构的实际抗震性能。

4.1.2 缺乏性能目标细化

传统的抗震设计没有明确区分不同重要性结构的性能目标。对于铁路桥隧结构，不同的结构在铁路运输中具有不同的重要性，如大型桥梁和关键隧道的重要性要高于一般的小桥和短隧道。但在现有设计中，往往采用相同的设计标准和性能目标，没有根据结构的重要性进行细化，导致一些重要结构的抗震性能不能满足实际需求。

4.2 结构选型方面

4.2.1 忽视抗震性能

在铁路桥隧结构选型时，有时过于注重结构的经济性和施工便利性，而忽视了结构的抗震性能。一些结构形式在地震作用下容易出现薄弱环节，导致结构破坏。

4.2.2 缺乏综合考量

结构选型时没有充分考虑地震带的地质条件、地震动特性等因素。不同的地震带具有不同的地质特征和地震动参数，如软土地区的地震动放大效应明显，对结构的抗震要求更高。如果在结构选型时没有考虑这些因素，可能导致结构在地震中的抗震性能不佳。

4.3 抗震计算方法方面

4.3.1 弹性理论局限

现有的抗震计算方法大多基于弹性理论，对于结构在非线性状态下的抗震性能分析不够准确。在地震作用下，结构往往进入非线性阶段，此时结构的刚度和强度会发生变化，弹性理论无法准确反映结构的实际受力情况。

4.3.2 地震动参数简化

抗震计算中考虑的地震作用和结构模型与实际情况存在一定差异。地震动是一个复杂的随机过程，具有不确定性，而现有计算中通常采用简化的地震动参数，如采用单一的地震动波或反应谱进行计算，不能充分考虑地震动的随机性和复杂性。同时，结构模型的简化也可能导致计算结果不准确，如忽略结构的非线性特性、土-结构相互作用等因素。

4.4 构造措施方面

4.4.1 细节处理不足

一些铁路桥隧结构的构造措施不完善，如钢筋的锚固长度不足、箍筋配置不合理等。这些细节问题在地震作用下可能引发结构的局部破坏，进而影响结构的整体抗震性能。

4.4.2 缺乏针对性措施

对于不同类型的地震破坏,缺乏针对性的构造措施。例如,对于隧道洞口的地震塌方问题,没有专门的构造措施来加强洞口边坡的稳定性;对于桥梁支座的地震破坏,没有有效的防脱空和减震措施。

5 地震带铁路桥隧结构抗震设计优化策略

5.1 应用基于性能的抗震设计理念

5.1.1 确定性能目标

基于性能的抗震设计理念是一种综合考虑结构在不同地震水平下的性能要求的抗震设计方法。该理念根据结构的使用功能和重要性,确定不同的性能目标,如“小震不坏、中震可修、大震不倒”。对于重要的铁路桥隧结构,如跨越大型河流或山谷的大桥、位于交通枢纽的隧道等,在大震作用下可以允许结构出现一定程度的损坏,但要确保结构不倒塌,保障人员生命安全;对于一般重要的结构,在中震作用下应能够快速修复,恢复使用功能^[1]。

5.1.2 选择设计参数

根据性能目标选择合适的设计参数和构造措施。例如,对于要求较高抗震性能的结构,可以采用更高的混凝土强度等级、更大的钢筋配筋率等设计参数;同时,合理设置结构的变形缝、伸缩缝等构造措施,提高结构的变形能力和耗能能力。通过基于性能的抗震设计,可以使结构在不同地震水平下满足预期的性能要求,提高结构的抗震可靠性和经济性。

5.2 合理进行结构选型与布置

5.2.1 桥梁结构选型

在选择桥梁结构形式时,应充分考虑地震作用的影响。对于地震带地区的桥梁,宜采用延性较好的结构形式,如连续梁桥、刚构桥等。这些结构形式在地震作用下能够通过塑性变形消耗地震能量,提高结构的抗震能力^[2]。同时,应合理选择桥墩形式,避免采用容易发生剪切破坏的桥墩形式,如矩形截面桥墩,可采用圆形或方形带配筋的桥墩,提高桥墩的延性和抗剪能力。

5.2.2 隧道结构选型

隧道结构应尽量选择地质条件较好的地段进行修建,减少围岩的不稳定性对隧道结构的影响。在隧道洞口段,应采取加强措施,如设置明洞、延长洞口缓冲结构等,提高洞口段的抗震能力。隧道衬砌结构应采用合理的断面形式和厚度,保证衬砌结构的强度和刚度。

5.2.3 结构布置优化

在铁路桥隧结构布置时,应尽量使结构的刚度和质量分布均匀,避免出现明显的薄弱环节。对于桥梁结构,应合理设置伸缩缝和支座,减少地震作用下结构的内力集中。

5.3 改进抗震计算方法

5.3.1 考虑非线性因素

在抗震计算中,应充分考虑结构的非线性特性,采用非线性分析方法,如静力弹塑性分析(Pushover分析)和动力弹塑性时程分析等,准确评估结构在地震作用下的非线性

响应。通过非线性分析,可以了解结构在地震作用下的破坏机制和薄弱环节,为抗震设计提供依据。

5.3.2 考虑地震动的随机性

地震动具有随机性,不同的地震波对结构的影响差异较大。在抗震计算中,应采用多条地震波进行动力时程分析,考虑地震动的随机性,提高计算结果的可靠性。同时,应根据地震带的地震危险性分析结果,合理确定地震动的参数,如峰值加速度、反应谱等^[3]。

5.4 完善构造措施

5.4.1 钢筋锚固与连接

在铁路桥隧结构中,应确保钢筋的锚固长度满足规范要求,保证钢筋与混凝土之间的粘结性能。对于钢筋的连接,应采用可靠的连接方式,如机械连接或焊接,避免在地震作用下出现钢筋连接失效的问题。

5.4.2 箍筋配置

合理配置箍筋可以提高结构的抗剪能力和延性。在桥墩和隧道衬砌等结构中,应根据结构的受力特点和抗震要求,合理确定箍筋的直径、间距和加密区长度。加密区箍筋应能够有效地约束混凝土,提高混凝土的抗压强度和变形能力。

5.4.3 节点构造

结构节点是地震作用下容易发生破坏的部位,应加强节点的构造设计。对于桥梁结构,应保证梁柱节点的连接可靠,避免出现节点破坏导致结构整体失效。可以采用增加节点钢筋配置、设置节点加强板等措施提高节点的抗震性能。对于隧道结构,应加强衬砌节点处的钢筋连接和混凝土浇筑质量,提高节点的抗震性能^[4]。

6 结语

地震带铁路桥隧结构抗震设计复杂且重要。本文分析了地震对其的破坏形式及影响,指出当前抗震设计在设计理念、结构选型等方面存在的问题,并提出基于性能的抗震设计理念应用、合理选型与布置等优化策略,以提高其抗震能力,保障铁路安全畅通。今后设计应总结经验,完善理论方法,合理选策略,加强地震监测预警系统建设。同时,要关注新材料和新技术研发应用,融入抗震设计,推动其水平不断提高。

参考文献

- [1] 陈克坚,韩国庆,许敏.铁路混凝土桥梁抗震设计理论与试验研究[M].西南交通大学出版社:202103.273.
- [2] 蒋韩华.铁路桥梁抗震设计思路分析[J].江苏科技信息,2021,38(31):39-41.
- [3] 张韬.地震作用下高速铁路桥隧搭接结构损伤效应研究[D].中南林业科技大学,2019.
- [4] 黄尚.高速铁路桥梁基于性能的抗震设计方法研究[D].中南大学,2011.
- [5] 陆中功.铁路桥梁下部结构抗震设计优化研究[J].中国铁路,2018,(06):51-55.