

基于抗震设计的道路桥梁结构分析与优化

陆少波

柳州市市政设计科学研究院有限公司

摘要：道路桥梁结构的抗震设计是确保桥梁在地震中能够安全运行的重要方面。基于抗震设计理论与原则，研究了道路桥梁结构的抗震设计基础。首先，明确了抗震设计的安全性和合理性原则，强调了结构的抗震能力和地震作用计算的重要性。其次，提出了预防性原则，包括合理的结构配置和构造细节设计，以增加结构的韧性和耐久性。同时，强调了综合性原则，需要综合考虑桥梁结构的各个方面，确保结构在地震中均匀分布和传递地震作用。可行性原则中指出了抗震设计需要考虑实际施工和经济条件。重点介绍了道路桥梁结构的分析方法，包括静力分析和动力分析等，以及地震作用和影响因素。在抗震分析方面，论文讨论了地震地质调查和地震动参数确定的重要性，以及桥梁结构的地震响应分析和抗震性能评估。最后，提出了道路桥梁结构抗震设计优化方法，包括结构参数和材料的优化选择。通过研究结论，可以为道路桥梁结构的抗震设计提供理论基础和实用指导，进一步提高桥梁的抗震能力和安全性。

关键词：抗震设计；道路桥梁；结构分析；优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.10.066

引言

在地震频繁的地区，道路桥梁结构的抗震设计至关重要。抗震设计的目标是确保桥梁在地震中能够保持安全，减少倒塌和严重损坏的风险。为此，需要进行结构分析和优化，以提高桥梁的抗震能力和整体性能。通过科学合理的分析方法和优化措施，作为设计工作人员，能够设计出更安全可靠的道路桥梁结构，为社会交通提供可靠的支撑。

一、道路桥梁结构抗震设计基础

（一）抗震设计理论与原则

（1）安全性：抗震设计的首要原则是确保桥梁在地震时能够保持安全。这意味着桥梁结构应具备足够的抗震能力，能够承受地震力所带来的振动和应力，避免倒塌和严重损坏，保护过往车辆和行人的安全^[1]。（2）合理性：抗震设计需要合理地确定结构的抗震设计参数，包括抗震设防烈度、地震作用计算和抗震设计地震力等。这些参数的选择应基于准确的地震活动性评估和结构性能需求，以确保设计的合理性和有效性。（3）预防性：抗震设计应具备预防性，即在设计过程中应充分考虑可能出现的地震影响，并采取相应的措施来提高结构的抗震能力。这包括合理的结构配置、材料选择、构造细节设计等，以减轻地震力的影响并增加结构的韧

性和耐久性。（4）综合性：抗震设计需要综合考虑桥梁结构的各个方面，包括桥墩、桥面、支座、墩-梁连接等。整体结构应协调一致，强度和刚度的分布应满足力学和抗震要求，确保结构能够在地震中均匀分布和传递地震作用。（5）可行性：抗震设计需要考虑实际的施工和经济条件。设计应基于可行的建造技术和经济可行性，确保设计方案的可实施性和经济效益。

（二）地震作用及其影响因素

地震作用是由地震波所引起的地面振动力。地震波传播到结构物上时，会引起结构物发生振动和应力变形，从而对结构物产生影响。地震作用的大小取决于地震的强度、频率和方向等因素。第一，地震的强度是衡量地震作用大小的重要因素。地震的强度通常用地震烈度来表示，烈度越高表示地震的强度越大，对结构物的作用也就越强烈。因此，在道路桥梁的抗震设计中，需要根据所在地区的地震活动性评估，合理选择适应的抗震设防烈度。第二，地震的频率特性对地震作用也具有重要影响^[2]。地震波具有不同的频率成分，而结构物的自振频率与地震波频率的匹配程度会影响地震作用的放大或减小。在设计中，需要考虑结构的自振频率和地震波频率的匹配，以避免共振现象的发生，从而减小地震作用的影响。下表1以超高建筑、桥梁、住宅、地下隧道和水坝为例，对自振频率、地震波频率等参数进行统计。

表1 比较结构的自振频率和地震波频率的匹配情况

结构类型	自振频率	地震波频率	匹配情况
超高建筑	1 Hz	0.5 Hz	不匹配
桥梁	2 Hz	2 Hz	完全匹配
住宅建筑	3 Hz	4 Hz	不匹配
地下隧道	5 Hz	5 Hz	完全匹配
水坝	0.5 Hz	1 Hz	不匹配

在设计中，通过分析结构的自振频率和地震波的频率特性来评估匹配情况，以避免共振现象的发生。如果结构的自振频率与地震波频率相近，会增加结构的震动幅度，可能导致结构的破坏。因此，在设计中需要采取相应的措施，如调整结构的刚度或采用减震装置，以减小地震作用的影响。

第三，地震的方向性也是地震作用的一个重要因素。地震波具有传播方向，不同方向的地震波对结构物的作用也会不同。在抗震设计中，需要考虑不同方向地震波的作用，合理选择结构的抗震设计参数，确保结构在多个方向上都具备足够的抗震能力。

二、基于抗震设计的道路桥梁结构分析方法

（一）桥梁结构基本原理和力学模型

基于抗震设计的道路桥梁结构分析方法旨在评估结构在地震中的抗震性能，并确定其是否符合设计要求并进行必要的优化。这种分析方法包括静力分析和动力分析两种方法。静力分析方法基于结构力学原理和数学模型，考虑结构的几何形状、材料性质和荷载作用等因素，计算和分析结构在地震力作用下的静态响应。它适用于刚性和弹性结构，可评估结构的静态稳定性和承载能力，为抗震设计提供参考。动力分析方法基于结构动力学理论，将结构视为具有质量和刚度的动力系统，通过求解动力方程，分析结构在地震作用下的动态响应。模态分析和时程分析是常用的动力分析方法，它们通过考虑结构的固有振型和地震波的时间历程和频谱特性，评估结构的共振情况和动力特性，更真实地反映结构的行为。桥梁结构的基本原理和力学模型则提供了理论基础和数学模型，通过建立梁、柱、墩、悬索等构件的数学模型，考虑结构的几何形状、材料性质和支座方式等因素，进行应力分析和变形分析，计算和预测结构的响应和行为。综上所述，基于抗震设计的道路桥梁结构分析方法通过静力分析和动力分析评估结构的抗震性能，而桥梁结构的基本原理和力学模型提供了理论基础和数学模型，用于分析和计算结构的响应和行为^[3]。

（二）结构静力分析方法

基于抗震设计的道路桥梁结构分析方法旨在评估结构在地震中的抗震性能，其中结构静力分析方法是其中一种常用的方法。结构静力分析方法基于结构力学的基本原理，通过建立结构的数学模型，考虑结构的几何形状、材料性质和荷载作用等因素，计算和分析结构在地震力作用下的静态响应。

在进行结构静力分析时，首先需要确定结构的几何形状和材料性质，并将其抽象为一个力学模型。常见的结构静力分析模型包括刚性梁模型、弹性梁模型、弹性板模型等。这些模型考虑了结构的几何形状、材料的线性弹性特性，以及结构的支座和连接方式等因素。结构静力分析需要考虑作用在结构上的荷载，包括静荷载、动荷载和地震荷载。对于地震荷载的分析，可以采用静力等效法或等效静力法来估算地震力。这些方法将地震力等效为静态力，然后应用静力分析原理计算结构的响应。通过进行结构静力分析，可以得到结构在地震作用下的静态位移、内力和应力等信息^[4]。这些结果可以用于评估结构的稳定性和承载能力，以及结构中各个构件的安全性。同时，结构静力分析还可以用于优化结构设计，通过调整结构的几何形状、材料参数和支座位置等，使得结构在地震中具备更好的抗震性能。结合以上论述，结构静力分析方法是基于抗震设计的道路桥梁结构分析方法中的重要组成部分。它通过建立结构的数学

模型，考虑结构的几何形状、材料性质和荷载作用等因素，计算和分析结构在地震力作用下的静态响应，以评估结构的抗震性能和进行结构设计优化。

（三）动力分析方法

基于抗震设计的道路桥梁结构分析方法旨在评估结构在地震中的抗震性能，其中结构静力分析方法是其中一种常用的方法。结构静力分析方法基于结构力学的基本原理，通过建立结构的数学模型，考虑结构的几何形状、材料性质和荷载作用等因素，计算和分析结构在地震力作用下的静态响应。

在进行结构静力分析时，首先需要确定结构的几何形状和材料性质，并将其抽象为一个力学模型。常见的结构静力分析模型包括刚性梁模型、弹性梁模型、弹性板模型等。这些模型考虑了结构的几何形状、材料的线性弹性特性，以及结构的支座和连接方式等因素。结构静力分析需要考虑作用在结构上的荷载，包括静荷载、动荷载和地震荷载。对于地震荷载的分析，可以采用静力等效法或等效静力法来估算地震力。这些方法将地震力等效为静态力，然后应用静力分析原理计算结构的响应。通过进行结构静力分析，可以得到结构在地震作用下的静态位移、内力和应力等信息。这些结果可以用于评估结构的稳定性和承载能力，以及结构中各个构件的安全性。

（四）参数选取和边界条件设定

在基于抗震设计的道路桥梁结构分析中，参数选取和边界条件设定是非常关键的步骤。正确选择合适的参数和边界条件可以确保分析结果的准确性和可靠性。下面以具体参数为例，说明参数选取和边界条件设定的重要性。

（1）结构材料参数：在进行结构分析时，需要准确地定义结构的材料参数，如混凝土的抗压强度、钢筋的屈服强度等。这些参数直接影响结构的受力性能和承载能力。选择适当的材料参数是保证分析结果准确性的基础。（2）地震参数：地震参数的选取涉及抗震设防烈度和地震作用计算。抗震设防烈度是根据特定地区的地震活动性评估得出的，它反映了地震的强度和频率特性。地震作用计算包括确定地震波参数，如加速度、速度、位移等。准确选择地震参数可以反映实际地震对桥梁结构的影响。（3）荷载参数：荷载参数的选取包括静态荷载和动态荷载。静态荷载包括自重、车辆荷载、行人荷载等，它们是结构设计的基础负荷。动态荷载考虑了运动车辆和风等因素引起的动态作用，是抗震设计中重要的考虑因素。正确选择荷载参数可以准确评估结构的受力性能和稳定性。（4）边界条件：边界条件是指结构与外部环境的约束关系，如支座约束、墩-梁连接等。合理设置边界条件可以反映结构的实际受力情况。例如，考虑到墩-梁连接的非线性特性，可以采用弹簧约束模型来模拟实际连接的刚度和耗能特性。

在具体分析中,根据具体的道路桥梁结构类型和设计的要求,需要根据相关规范和实际情况选择合适的参数和边界条件。参数选取和边界条件设定的合理性对于分析结果的准确性和可靠性具有重要影响,因此需要进行仔细的考虑和综合分析。

三、道路桥梁结构的抗震设计优化措施

(一) 地震地质环境的调查

道路桥梁结构的抗震设计优化措施是为了提高结构的抗震能力和减轻地震作用对结构的影响。地震地质环境的调查是抗震设计的重要前提,它包括以下内容:

(1) 地质构造调查:地质构造调查主要是对桥梁所在地区的地质构造进行详细研究和分析。这包括确定地震断裂带、地震活动性、地震活动性等级等。地质构造的研究可以帮助确定地震发生的可能性和地震断裂对桥梁结构的影响程度。(2) 地层调查:这包括确定地层的类型、厚度、强度特性等。地层的研究可以帮助评估地震波在不同地层中的传播特性,进而影响结构的抗震反应。(3) 通过分析历史地震事件的规模、强度、频率等,可以获得地震发生的概率和强度信息,为抗震设计提供依据。(4) 地震动参数确定:地震动参数是指描述地震波特性的参数,包括地震波的加速度、速度、位移等。通过参考地震记录和地震观测数据,结合地质环境调查结果,可以确定适当的地震动参数。这些参数将用于抗震设计中的地震作用计算和结构反应分析。

(二) 桥梁结构的地震响应分析

桥梁结构的地震响应分析是为了评估在地震作用下桥梁结构的动态反应,并确定其抗震性能。这种分析可以提供对结构在地震中的位移、速度、加速度以及内力、应力等的预测。地震响应分析的基本步骤包括以下几个方面:

(1) 地震动输入:首先,需要确定用于分析的地震动输入,即地震波。地震波可以通过记录的地震观测数据或合成的人工地震波来表示。根据地震地质调查和地震动参数的确定,选择适当的地震波,并将其应用于地震响应分析。(2) 结构建模:在进行地震响应分析前,需要将桥梁结构进行建模。建模过程中,将结构划分为节点和单元,确定各节点的坐标和连杆的连接关系,以及材料和截面特性等。合理的结构模型能够准确反映实际结构的几何形状和力学性能。(3) 边界条件设定:在进行地震响应分析时,需要为结构设置适当的边界条件。这包括支座的约束、固定端的限制以及可能的附加约束条件等。正确设置边界条件能够模拟结构的实际约束情况,以便获得准确的地震响应结果^[5]。(4) 结果评估:完成地震响应分析后,可以评估结构的动态响应,包括位移、速度、加速度、内力和应力等。这些结果可以与抗震设计要求和规范进行比较,以评估结构的抗震性能,并确定是否需要进行结构的优化设计。

(三) 结构形式与材料的优化选择

(1) 结构形式优化:选择合适的结构形式是抗震设计的重要考虑因素。常见的桥梁结构形式包括梁桥、拱桥、斜拉桥等。优化结构形式可以考虑以下几个方面:首先,选择合适的桥梁形式,以满足设计要求和预期使用条件。其次,合理布置桥墩和桥面板,以提高整体刚度和耐震能力。此外,优化结构配置,如增加横向支撑、设置抗震隔震装置等,可以改善结构的抗震性能。(2) 材料的优化选择:材料的选择对于桥梁结构的抗震设计至关重要。在抗震设计中,常用的材料包括混凝土、钢材、预应力材料等。优化材料的选择可以从以下几个方面考虑:首先,选择具有良好抗震性能的材料,如高性能混凝土、高强度钢材等,以提高结构的抗震能力。其次,合理使用预应力材料,通过预应力张拉,提高结构的刚度和稳定性。此外,对于现有桥梁,可以采取加固措施,如碳纤维增强材料等,以提高结构的承载能力和抗震性能。(3) 结构的几何形状优化:通过优化结构的几何形状,可以提高桥梁的抗震性能。例如,合理设置桥梁的几何参数,如跨径、高度、支距等,以提高结构的刚度和耐震性能。此外,采用曲线形状的桥梁,如曲线梁或斜拉桥,可以减小结构对地震作用的敏感性,并提供更好的抗震性能。(4) 结构的耐久性优化:抗震设计也应考虑结构的耐久性。通过合理的材料选择、适当的防腐措施和维护计划,可以延长桥梁结构的使用寿命,并确保其长期抗震性能。

四、结束语

综上所述,基于抗震设计的道路桥梁结构分析与优化是确保桥梁在地震作用下安全可靠的关键步骤。通过科学合理的分析方法和优化措施,设计人员能够设计出更加抗震能力强、性能优越的道路桥梁结构,为交通运输提供更安全、高效的基础设施。

参考文献

- [1] 王成江. 浅析预制装配式桥梁抗震设计及抗震措施[J]. 价值工程, 2022, 41(13): 44-46.
- [2] 陈光明, 陆奕辰, 谢攀, 滕锦光, 余涛, 向宇, 成形, 李召兵, 胡福南, 刘伟楠. FRP-混凝土-钢双壁空心桥墩分析及设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(02): 12-38.
- [3] 韩强, 董慧慧, 王利辉, 杜修力. 基于可更换构件的可恢复功能桥梁防震结构研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(09): 215-230.
- [4] 王志贤. 桥梁工程抗震设计要点[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(15): 27-29.
- [5] 张慧. 桥梁结构抗震设计与设防措施[J]. 四川水泥, 2021, (05): 262-263.

作者简介: 陆少波(1989.07-), 男, 汉, 广西桂林人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 道路桥梁方向。