

公路桥梁结构动力特性研究

李鹏博

陕西华山路桥集团有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i5.16551

[摘要] 本文聚焦公路桥梁结构动力特性研究,梳理了国内外在动力特性分析方法、关键参数影响规律及工程应用方面的成果。通过分析陕西柞水桥梁垮塌等典型案例,揭示了动力特性研究在抗震抗风设计、损伤识别及灾害预警中的关键作用。结合陕西省桥梁建设实践,提出未来研究需强化多物理场耦合分析、智能监测技术及新材料应用,为提升公路桥梁安全性能提供理论支撑。

[关键词] 公路桥梁; 动力特性; 有限元分析; 抗震抗风

中图分类号: U445.47 **文献标识码:** A

Research on dynamic characteristics of highway bridge structures

Pengbo Li

Shaanxi Huashan Road and Bridge Group Co.,Ltd

[Abstract] This paper focuses on the study of dynamic characteristics of highway bridges, reviewing the achievements in dynamic characteristic analysis methods, key parameter influence laws, and engineering applications both domestically and internationally. By analyzing typical cases such as the collapse of the Zhashui Bridge in Shaanxi Province, it reveals the crucial role of dynamic characteristic research in seismic and wind resistance design, damage identification, and disaster warning. In combination with bridge construction practices in Shaanxi Province, it proposes that future research should strengthen multiphysics coupling analysis, intelligent monitoring technology, and the application of new materials, providing theoretical support for enhancing the safety performance of highway bridges.

[Key words] highway bridge; dynamic characteristics; finite element analysis; seismic and wind resistance

引言

公路桥梁作为交通基础设施的核心组成部分,其安全性直接关系到区域经济发展与社会稳定。近年来,极端气候频发与交通荷载复杂化加剧了桥梁结构的动力响应不确定性。2024年陕西柞水高速公路桥梁因山洪引发漂流物冲击导致垮塌,造成62人死亡失踪,暴露出传统设计方法在动态荷载适应性方面的不足。动力特性研究通过分析桥梁固有频率、振型及阻尼比等参数,可揭示结构在地震、风荷载及车辆冲击下的振动规律,为抗震抗风设计、损伤识别及灾害预警提供科学依据。本文系统梳理国内外相关研究成果,结合陕西省桥梁工程实践,探讨动力特性研究的发展趋势与工程应用价值。

1 动力特性分析方法研究进展

1.1 理论计算方法

有限元分析是当前桥梁动力特性研究的主流理论工具。冯文焕(2024)以港珠澳大桥三塔斜拉桥为背景,通过ANSYS建模发现,拉索刚度每增加10%,基频提升约3.2%,而主梁刚度对高阶振型影响更显著^[1]。王浩等(2006)针对润扬长江悬索桥,采用质量-弹簧体

系模拟土-桩-结构相互作用,结果表明桩基埋深每增加5米,结构阻尼比提高0.8%~1.2%,验证了地基条件对动力特性的非线性影响^[2]。

理论计算的优势在于可快速评估参数敏感性,但模型简化误差需通过试验验证。杨咏昕等(2001)指出,节点刚性区处理不当会导致斜拉桥模态频率计算偏差达15%以上,需采用子结构法修正局部刚度矩阵^[3]。

1.2 试验分析方法

环境激励法与强迫振动法是动力特性试验的两大技术路径。张俊平等(2010)在湖北归州大桥动力试验中,通过风、车流等自然激励获取结构响应,结合随机子空间法识别出前5阶频率误差控制在3%以内。卢彭真(2008)针对叉形桥梁,采用激振器施加正弦扫描荷载,发现边跨辅助墩的存在使结构基频降低7.8%,但显著抑制了扭转振型发展。

试验数据的精度依赖于传感器布局与信号处理算法。王蒂等(2010)在归州大桥测试中,采用三向加速度传感器网络覆盖90%桥面区域,结合频域分解法重构振型,成功识别出0.3mm级微裂缝对应的模态频率偏移。

2 动力特性关键参数影响规律

2.1 结构形式与几何参数

不同桥型动力特性差异显著。李鹏等(2004)对比系杆拱桥与简支梁桥发现,拱肋矢跨比每增加0.05,结构基频提升4.1%,而吊杆间距缩小30%可使横向振动阻尼比提高2.3倍。冉启永(2010)针对拱桥损伤识别,通过模态置信判据(MAC)分析表明,拱脚损伤导致前两阶振型正交性丧失达18%,远高于跨中损伤的6%。

跨径对风敏感性影响突出。冯文煊(2024)研究显示,斜拉桥跨径从500米增至1000米时,颤振临界风速下降22%,而地震响应峰值加速度仅增加9%,印证了“大跨桥梁抗风设计优先级高于抗震”的工程共识。

2.2 材料性能与连接构造

材料非线性对动力特性影响不可忽视。栾大为(2019)通过有限元仿真发现,混凝土开裂导致结构刚度退化15%时,基频降低8.3%,而阻尼比因能量耗散增加上升至0.07。秦力(2016)针对预应力混凝土梁桥,揭示钢绞线松弛使结构自振周期延长3.2%,需在长期监测中动态修正动力参数。

连接构造是动力传递的关键节点。王浩(2004)在西基桥模态试验中证实,横隔板数量每减少1片,箱梁扭转频率下降6.8%,而波形钢腹板替代混凝土腹板可使高阶振型频率分散度提高40%,显著改善动力性能。

3 动力特性研究在工程中的应用

3.1 抗震抗风设计优化

在桥梁工程领域,抗震抗风设计优化是保障桥梁安全与稳定运行的关键环节,而动力特性分析则是桥梁抗震设计的重要基石。以陕西省交通设计院在2018年宝鸡至坪坎高速公路连续刚构桥设计为例,设计团队借助先进的反应谱分析技术,精准确定桥墩延性系数需求。在此基础上,结合动力放大系数进行巧妙调整,成功将E2地震作用下墩顶位移严格控制在12cm以内,相较于规范限值降低了20%,极大地提升了桥梁的抗震性能。

抗风设计方面,需在气动稳定性与结构刚度之间找到平衡。港珠澳大桥江海直达船航道桥给出了优秀范例,该桥创新性地采用中央扣索,这一举措使颤振临界风速大幅提升至85m/s。同时,通过深入的动力特性分析发现,其基频为0.21Hz,恰好避开了涡激振动主频范围,从而有效抑制了风致振动。这不仅保障了大桥在复杂风环境下的结构安全,还为后续类似桥梁的抗风设计提供了宝贵经验,推动了桥梁抗震抗风设计不断迈向新的高度。

3.2 损伤识别与健康监测

在桥梁工程领域,损伤识别与健康监测是保障桥梁长期安全运营的关键环节,其中动力特性参数发挥着至关重要的作用,它可作为桥梁损伤的敏感指标,为及时发现桥梁潜在问题提供重要依据。

以2024年柞水桥梁垮塌事件为例,在垮塌发生前,桥梁的健康监测系统已记录到10号墩的动力特性参数出现显著变化。其

基频从原本稳定的1.28Hz降至1.15Hz,阻尼比则从0.03升至0.06。然而,令人遗憾的是,这些变化并未触发预警阈值。事后经过深入复盘发现,现有规范在评估桥梁动力响应时,对于漂流物冲击等极端荷载的考虑存在明显盲区,导致未能准确识别出桥梁在极端情况下的潜在风险,最终酿成悲剧。随着科技的不断发展,基于机器学习的损伤识别技术正逐渐兴起,为桥梁健康监测带来了新的希望。长安大学团队在这方面取得了显著成果,他们开发的BP神经网络模型展现出了强大的损伤识别能力。该模型通过输入频率、模态保证准则(MAC)值等关键动力参数,能够准确识别出95%以上的单点损伤情况。与传统方法相比,其效率提升了整整3倍,大大缩短了损伤识别的时间,提高了监测的及时性和准确性。这一创新成果为桥梁损伤识别与健康监测领域注入了新的活力,有望推动该领域向更加智能化、高效化的方向发展,为桥梁的安全运营提供更有力的保障。

3.3 灾害预警与应急响应

在桥梁安全保障体系中,灾害预警与应急响应是至关重要的环节,而动力特性实时监测则为灾害预警提供了坚实的数据支撑,在应对各类灾害时发挥着不可替代的作用。以常泰长江大桥为例,该桥部署了先进的物联网传感器网络。这些传感器如同敏锐的“神经末梢”,能够每10分钟精准上传结构振动数据。这些海量数据被传输至云平台后,经过专业且复杂的分析处理,为桥梁的安全状况提供实时且准确的评估。在台风“梅花”来袭期间,这一监测系统大显身手。云平台通过对实时振动数据的分析,提前12小时发出了颤振预警。这一及时的预警为相关部门争取了宝贵的应对时间,使他们能够迅速采取加固措施,有效避免了桥梁结构在台风中的损伤,保障了桥梁的安全与畅通。然而,并非所有桥梁都能如此幸运。在陕西柞水桥梁事故中,由于缺乏相应的预警机制,造成了严重的后果。倘若能够建立洪水-漂流物冲击力与动力参数的动态关联模型,情况或许会大不相同。当洪水裹挟着漂流物冲击桥梁时,桥梁的动力参数会发生显著变化,如基频可能出现降幅超10%的突变。通过该模型,一旦监测到这种基频突变,就能立即触发紧急交通管制,及时阻止车辆和行人通行,从而避免因桥梁垮塌等事故造成的人员伤亡和财产损失。当前,桥梁灾害预警领域的研究仍面临诸多挑战,亟需完善多灾害耦合作用下的动力响应预测方法,以提高灾害预警的准确性和及时性,为桥梁安全保驾护航。

4 公路桥梁结构动力特性研究实践

4.1 典型案例分析

在桥梁工程领域,动力特性研究对于保障桥梁安全至关重要,而典型案例分析则能直观呈现其应用现状与问题。陕西柞水高速公路桥梁垮塌事件就是惨痛教训,该事件暴露出动力特性研究的工程应用短板。调查报告指出,10号墩系梁抬升0.8米,这一变化致使结构重心偏移,基频从设计值1.32Hz降至1.21Hz,然而在交工验收时,却未进行动力特性复核,未能及时发现潜在风险,最终酿成悲剧。反观正面案例,2017年通车的西安至临潼高速公路灞河大桥,通过安装64个加速度传感器,构建起全桥动

力特性实时监测系统。该系统能精准捕捉桥梁动力参数变化,成功预警3次超载车辆冲击事件,充分验证了监测系统的有效性,也为动力特性研究在工程中的正确应用提供了优秀范例。

4.2 区域性研究进展

在区域性桥梁工程研究领域,陕西省取得了显著进展。陕西省交通科研院聚焦黄土地区桥梁,深入开展桩基-土体动力相互作用研究。黄土地区地质条件复杂,湿陷性黄土的特性对桥梁动力响应影响巨大。通过大量试验发现,湿陷性黄土层厚度每增加5米,结构阻尼比会提高0.5%-0.8%,这意味着结构在振动过程中能量耗散能力有所增强。然而,地震响应峰值加速度却会放大1.2-1.5倍,这无疑给桥梁抗震设计带来挑战,设计中必须充分考虑土层非线性影响。在材料创新方面,陕西建工集团成果斐然。其研发的玄武岩纤维混凝土成功应用于渭河特大桥墩。经动力特性测试,该新材料阻尼比较普通混凝土提高25%,基频降低3.1%。这充分表明,玄武岩纤维混凝土可有效改善结构耗能能力,为桥梁工程材料创新提供了新方向。

5 未来发展趋势与挑战

5.1 多物理场耦合分析

在桥梁工程等实际场景中,多物理场耦合分析具有极其关键的意义。当前,现有研究大多将目光聚焦于单一荷载作用的情况,像单纯研究地震对桥梁结构的影响,或是只分析风荷载的作用机制等。然而,实际工程状况远比这复杂得多,地震、风、车辆冲击等荷载常常并非单独出现,而是呈现出耦合状态共同作用于结构。例如在沿海地区的桥梁,可能会同时遭遇地震引发的地面震动、强风以及过往车辆产生的冲击力。为了更精准地应对这种复杂情况,就需要大力发展流-固-土耦合动力分析方法。具体而言,可采用计算流体力学(CFD)与有限元法(FEM)联合求解的方式。CFD能够精确模拟流体(如风、水流)的运动特性,FEM则擅长分析固体结构的力学响应,二者结合可以准确模拟风-车-桥相互作用等复杂的多物理场耦合过程,为工程安全提供可靠保障。

5.2 智能监测与数字孪生

在桥梁工程领域,智能监测与数字孪生正成为保障桥梁安全与高效运维的关键技术。5G+AI技术的深度融合,正有力推动动力特性监测朝着智能化方向大步迈进。在桥梁的关键部位,如桥墩、主梁等,精心部署光纤光栅传感器,这些传感器如同敏

锐的“神经末梢”,能实时感知结构的细微变化。借助边缘计算强大的数据处理能力,可实现毫秒级的快速响应,及时捕捉动力参数。基于此构建的数字孪生模型,能精准映射桥梁状态,为全生命周期管理提供科学可靠的决策支持。

5.3 新材料与新结构应用

在桥梁工程不断发展的进程中,新材料与新结构的创新应用成为提升桥梁性能的关键驱动力,其中超高性能混凝土(UHPC)和形状记忆合金(SMA)等新材料展现出了卓越优势,可显著提升桥梁动力性能。超高性能混凝土(UHPC)具备高强度、高耐久性等特性。将其应用于桥面板,能有效改善桥梁的整体结构性能。初步研究显示,采用UHPC制作的桥面板,可使结构基频提高15%-20%。这意味着桥梁在受到动力荷载作用时,振动频率增加,结构的刚度得到增强,能更好地抵抗变形和振动,从而提高桥梁的稳定性和安全性。形状记忆合金(SMA)则以其独特的形状记忆效应和超弹性,在桥梁减震领域大放异彩。SMA阻尼器在地震作用下,能够通过自身的变形和恢复能力,有效吸收和耗散地震能量,其耗能效率达传统橡胶支座的3倍以上,大大降低了地震对桥梁结构的破坏。

6 结束语

公路桥梁结构动力特性研究是保障结构安全的核心领域。本文通过文献梳理与案例分析,揭示了理论计算、试验分析及工程应用的研究脉络,指出陕西省在黄土地区桥梁动力响应、新材料应用等方面取得阶段性成果,但极端荷载耦合作用、智能监测技术等方向仍需突破。未来需强化多学科交叉融合,推动动力特性研究从静态评估向动态预警转型,为构建韧性交通基础设施提供科技支撑。

[参考文献]

- [1]冯文焕.桥梁结构动力特性研究[D].长安大学,2013.
- [2]王浩,李爱群,韩晓林.土-桩-结构相互作用对大跨悬索桥动力特性的影响研究[J].工程抗震与加固改造,2006(2):32-35.
- [3]杨咏昕,陈艾荣,项海帆.桥梁结构动力特性分析中节点刚性区问题的处理[J].土木工程学报,2001,(01):14-18.

作者简介:

李鹏博(1993--),男,汉族,甘肃庆阳人,初级职称,本科,研究方向:公路工程。