

伸缩缝变化参数对简支梁桥 - 连续梁桥车致动力响应影响实测研究

顾瑞海^{1*}, 褚 锋¹, 王洪国¹, 李 理¹, 李 进², 许维炳^{3#}

¹山东高速建设管理集团有限公司, 山东 济南

²中铁建设集团有限公司, 北京

³北京工业大学城市建设学部, 北京

收稿日期: 2024年4月3日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

摘 要

本文通过现场实测探究了伸缩缝参数对简支梁桥、连续梁桥车致动力响应的影响。实测结果表明, 伸缩缝变化参数对车致桥梁动力响应显著, 车辆过缝会造成车辆对桥梁局部冲击作用增大, 且该局部冲击作用随测点与伸缩缝距离的减小而增加。伸缩缝高差(横梁两侧、中横梁与边横梁间)会增大车辆对简支梁桥、连续梁桥梁端的车辆冲击作用。

关键词

车桥耦合振动, 伸缩缝, 现场实测, 简支梁桥, 连续梁桥

Field Testing on Vehicle-Bridge Coupling Dynamic Response of a Simply Supported Beam Bridge and a Continuous Beam Bridge Considering Variation of Expansion Joint's Parameters

Ruihai Gu^{1*}, Feng Chu¹, Hongguo Wang¹, Li Li¹, Jin Li², Weibing Xu^{3#}

¹Shandong Hi-Speed Construction Management Group Co., Ltd., Jinan Shandong

²China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing

³Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 顾瑞海, 褚锋, 王洪国, 李理, 李进, 许维炳. 伸缩缝变化参数对简支梁桥-连续梁桥车致动力响应影响实测研究[J]. 土木工程, 2024, 13(4): 566-575. DOI: 10.12677/hjce.2024.134061

Abstract

This study investigated the vehicle-bridge coupling dynamic response of a simply supported beam bridge and a continuous beam bridge considering the impact of expansion joint's parameters through field testing. The results show that the parameters variation of expansion joint has significant effect on the vehicle-bridge coupling dynamic response. The local impact response of the bridge induced by vehicle will increase when the vehicle passes through the expansion joint. Moreover, the peak value of the above local impact effect will decrease with the increase of the distance between the testing point and the expansion joint. In addition, the height difference between the two side beams or between the side beam and the center beam of the expansion joint will increase the impact effect of the vehicle on the simply supported beam bridge and the continuous beam bridge.

Keywords

Vehicle-Bridge Coupling Vibration, Expansion Joint, Field Testing, Simply Supported Beam Bridge, Continuous Beam Bridge

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桥梁伸缩装置(以下简称伸缩缝)作为桥梁上部结构间、桥梁上部结构与道路间的重要连接构件,直接承受车辆荷载的冲击作用,是实现桥梁正常跨越能力的重要连接构件。桥梁的静动力响应、行车安全性和舒适性受伸缩缝变化参数的影响显著,伸缩缝变化参数会引起车-桥耦合振动规律的改变,考虑伸缩缝参数影响的桥梁静动力响应研究已成为伸缩缝研究的重点。但由于伸缩缝的刚度、质量远小于桥梁上部结构的刚度、质量,伸缩缝病害主要影响伸缩缝构件的静力响应,而对桥梁静力响应的影响不明显。而伸缩缝造价较低、可更换,因此国内外学者多针对考虑伸缩缝病害影响的车、桥、车-桥耦合动力响应展开了研究。

Paola 等[1]基于车-缝有限元数值分析模型,研究了伸缩缝在重载交通作用下的车致动力响应规律,并开展了伸缩缝损伤评估研究。结果表明桥头搭板、伸缩缝和桥面不平整易导致车辆冲击作用增大、伸缩缝构件应力较大、伸缩缝局部开裂等病害发生。Deng [2]等基于三维车辆分析模型,研究了伸缩缝损伤条件下预应力混凝土箱梁桥桥面板的车致动力响应规律,结果表明伸缩缝损伤会导致桥面板和伸缩缝的车辆冲击作用加剧,但大跨径桥梁整体冲击作用受伸缩缝损伤影响不显著。为使车-缝-桥耦合动力响应的模拟更符合实际情况,Ding 等[3]提出一种能考虑伸缩缝阻尼效应和竖向支撑刚度的质量-弹簧-阻尼非耦合模型,进而对伸缩缝中横梁数量,缝宽等参数对车-桥耦合振动的参数影响规律进行了研究。谢旭等[4]分别采用实测和车桥耦合振动算法对比了不同车速行驶的车辆通过伸缩缝和桥跨结构时结构振动响应的区别。结果表明,车辆过缝产生的冲击加速度响应远大于车辆通过桥跨时的结构振动;且冲击引起的振动具有距离衰减特性。此外,部分学者开展了伸缩缝参数(包括缝宽,路面-桥头搭接构造及其

他参数)变化对车-桥耦合动力响应的影响分析,主要包括伸缩缝及桥梁局部构件的车致动力响应(桥梁吊杆、铰接缝、桥面铺装等) [3]-[17]。然而,现阶段考虑伸缩缝参数影响的车-桥耦合动力响应分析仍处于探索阶段,现有的伸缩缝力学模型参数不全,不能有效地描述伸缩缝的实际工作状态;车-缝-桥耦合动力响应参数影响规律分析仍停留在个别参数影响分析阶段;伸缩缝变化参数对桥梁车致动力响应的影响规律亟待揭示。

为明晰伸缩缝典型变化参数对车-桥耦合动力响应实际影响,并为开展伸缩缝变化参数对车-桥耦合动力响应规律分析提供基础数据,本文以简支 T 梁桥和小箱梁连续梁桥为研究对象,开展了考虑典型伸缩缝变化参数影响的车致桥梁动力响应现场试验研究,对比了考虑伸缩缝变化参数影响的简支梁桥和连续梁桥车致动力响应的异同。

2. 考虑伸缩缝参数影响的简支梁桥车致动力响应现场实测

2.1. 桥梁概况

试验选取的简支 T 梁桥位于江苏省淮安市境内,设计荷载等级为公路-I 级。桥梁跨径布置为 14.11 m + 14.13 m + 14.11 m,全宽 24 m,桥面净宽 21.5 m,桥墩为多柱墩。每跨 T 梁桥由七片单梁通过横隔板连接而成,如图 1 所示。为了能够准确的描述现场试验的相关测点位置,将七片单梁由外到内分别编号为 1-7 号梁。

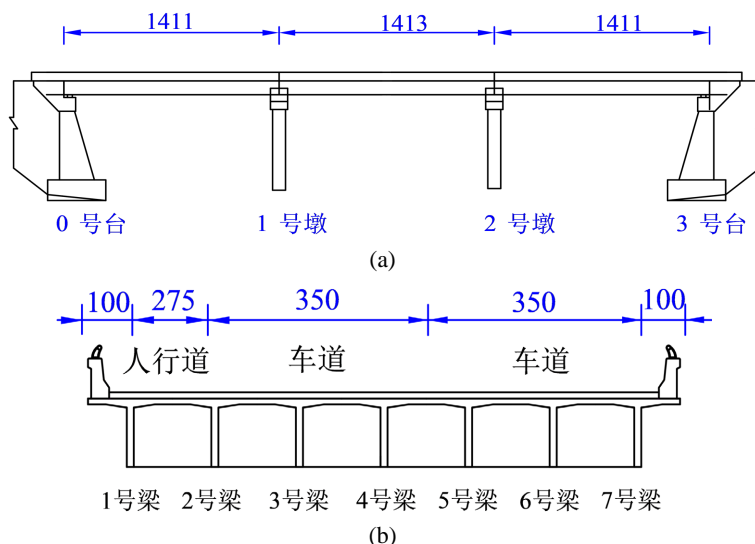


Figure 1. Layout of bridge (unit: cm). (a) Elevation of bridge; (b) Elevation of bridge
图 1. 桥梁总体布置图(单位: cm)。(a) 桥梁立面图; (b) 主梁横截面图

2.2. 典型参数实测

该桥伸缩缝采用橡胶式伸缩缝。经现场调查,发现可能影响车辆过缝冲击作用的伸缩缝参数变化主要有锚固区局部不平整度(局部破损),伸缩缝两侧横梁高差(约 5 mm),伸缩缝缝宽(约为 30 mm)等,如图 2 所示。

该桥桥面存在局部的凹凸不平等病害,经现场实测确定桥面不平整度等级为“一般”。横隔板连接处的存在局部开裂,但经现场测试(荷载试验)横向连接刚度仍满足设计要求;未发现支座支撑刚度明显下降、支座脱空等。



Figure 2. Typical parameters of expansion joint. (a) Local unevenness of anchorage area of expansion joint; (b) Height difference between beams at both sides of expansion joint

图 2. 伸缩缝典型参数。(a) 伸缩缝锚固区局部不平整；(b) 伸缩缝两侧横梁高差

2.3. 典型参数影响实测分析

经上分析可知，本节研究对象——简支梁桥现场实测的典型参数为伸缩缝两侧的高差 5 mm，伸缩缝缝宽 30 mm，桥面平整度等级——一般。为明晰该桥典型伸缩缝参数对简支梁桥车致冲击响应的影响，开展了跑车试验研究。试验选取了常见三轴车(如图 3)，1#车重为 18 t，2#车重 30 t，车辆主要参数见表 1。

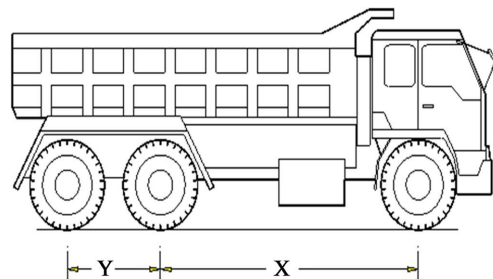


Figure 3. Loading vehicle

图 3. 加载车辆示意图

Table 1. Parameters of test loaded vehicle

表 1. 试验车辆参数表

序号	轴间距(m)		总重 KN
	X	Y	
1#车	3.7	1.3	180
2#车	3.7	1.3	300

选择具有典型伸缩缝参数(缝宽 30 mm，两侧边横梁高差 5 mm)的边跨作为试验对象，对主梁关键截面的竖向位移时程曲线进行测试，并根据《公路桥梁荷载试验规程》[18]计算不同测点的冲击系数。动位移测点分别布置于小桩号梁端、1/4 跨、1/2 跨、3/4 跨、大桩号梁端；测点横向均布置与既定行车道正下方的主梁下部(4 号梁)，如图 4 所示，现场测试如图 5 所示。

按照设定的行车道，1#车、2#车分别以 10~50 km/h 速度匀速驶过试验桥跨，各测点典型的竖向位移时程曲线如图 6 所示。各测点位移冲击系数见表 2、表 3，各测点位移冲击系数随车速的变化规律如图 7 所示。

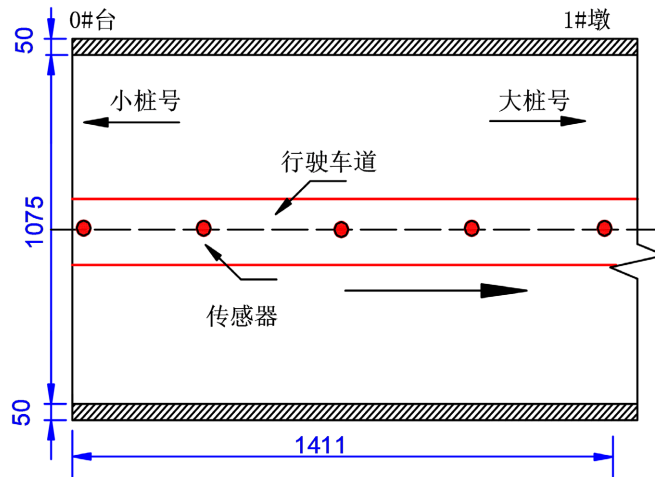


Figure 4. Arrangement of sensor measuring points (unit: cm)

图 4. 传感器测点布置(单位: cm)



(a)



(b)

Figure 5. Test site. (a) IMC dynamic data acquisition system; (b) Displacement sensor

图 5. 试验现场。(a) IMC 动力数据采集系统; (b) 位移传感器

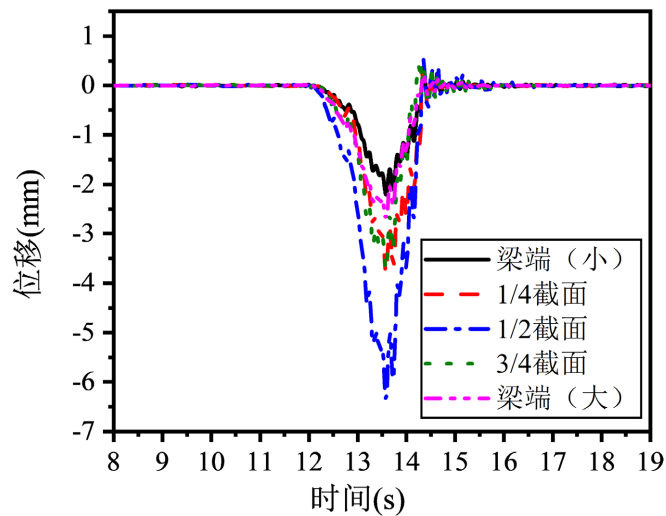


Figure 6. Displacement time history curve (vehicle No. 2# with 40 km/h)

图 6. 位移时程曲线(2#车 40 km/h)

Table 2. IFs of key sections (test vehicle 1#)
表 2. 关键截面冲击系数(1#车)

测点	车速(km/h)				
	10	20	30	40	50
梁端(小桩号)	1.070	1.170	1.280	1.215	1.152
1/4 跨截面	1.114	1.183	1.326	1.310	1.146
1/2 跨截面	1.076	1.175	1.220	1.193	1.116
3/4 跨截面	1.121	1.209	1.199	1.170	1.113
梁端(大桩号)	1.058	1.155	1.117	1.138	1.110

Table 3. IFs of key sections (test vehicle 2#)
表 3. 关键截面冲击系数(2#车)

测点	车速(km/h)				
	10	20	30	40	50
梁端(小桩号)	1.123	1.169	1.077	1.134	1.100
1/4 跨截面	1.193	1.243	1.079	1.118	1.112
1/2 跨截面	1.091	1.151	1.070	1.090	1.071
3/4 跨截面	1.058	1.088	1.038	1.097	1.079
梁端(大桩号)	1.023	1.050	1.037	1.074	1.052

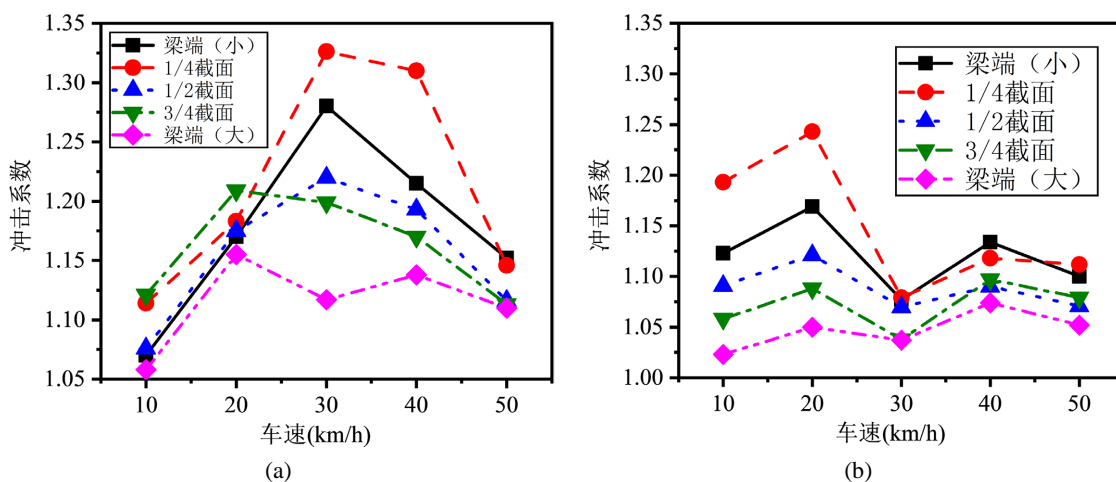


Figure 7. Curve of impact factor of each measuring point changing with vehicle speed. (a) IFs of test vehicle 1; (b) IFs of test vehicle 2

图 7. 各测点冲击系数随车速变化曲线。(a) 1#车桥梁冲击系数；(b) 2#车桥梁冲击系数

由表 2、图 7(a)可知, 在 1#车(18 t)作用下, 各测点冲击作用随车速增大呈先增大后减小的趋势, 在车速 30 km/h 测点的冲击系数达最大值, 小桩号梁端、1/4 跨、1/2 跨、3/4 跨、大桩号梁端测点冲击系数最大值分别为 1.228、1.326、1.192、1.170、1.138。车辆对各测点的冲击作用随测点与梁端(伸缩缝)距离的增大呈先增大后减小的趋势。靠近伸缩缝附近的梁端受车辆过缝的影响更大, 小桩号梁端(伸缩缝附近)

冲击系数较 1/2 跨测点大 4.92%，1/4 跨测点较跨中截面测点冲击系数大 8.69%。需要指出的是由于本节研究对象的跨径较小，伸缩缝参数对桥梁各截面测点冲击系数的影响范围较大。

由表 3、图 7(b)可知，在 2#车(30 t)作用下，各测点冲击系数随车速增大呈先增大后减小，并伴有多峰值的规律。重车对桥梁的冲击作用受车速影响更大。在车速 20 km/h 测点冲击系数达最大值，各关键测点冲击系数分别为 1.169、1.243、1.121、1.088、1.050。与 1#车过缝对各测点冲击系数影响规律一致，车辆过缝对临近伸缩缝的测点冲击作用增大，而对远处测点的冲击作用影响较小。小桩号梁端(伸缩缝附近)冲击系数较 1/2 跨截面测点大 4.28%，1/4 跨截面测点较跨中截面测点冲击系数大 10.88%。与 1#车相比，2#车(重车)对简支梁桥的冲击作用(冲击系数)更小，但考虑车重影响后，重车虽然引起的冲击系数稍小(与重车静荷载相比)，但是桥梁的受力却更为不利。

3. 考虑伸缩缝参数影响的连续梁桥车致动力响应实测

3.1. 桥梁概况

试验选取连续梁桥位于山东枣木高速，设计荷载等级为公路-I 级。该桥为四梁式箱形截面预应力混凝土连续梁桥，全长为 3×30 m，桥面总宽为 12.75 m，支座处设置横隔板。

该桥为新建桥梁，桥梁整体技术状况较好，路面平整度良好。该桥采用 GQF-MZL160 双缝式模数式伸缩缝，伸缩缝存在不均匀收缩变形，在伸缩缝端部尤为明显，如图 8 所示。



Figure 8. Diseases of expansion joint
图 8. 伸缩缝病害

3.2. 典型参数实测

为明晰该类型桥梁典型病害对桥梁结构动力响应的影响，开展了现场行车试验研究，主要对主梁竖向动位移进行测试，试验车辆采用常见三轴车，车辆总重 30 t。竖向动位移测点分别布置在测试跨梁端、1/4 跨、1/2 跨，采用激光位移计记录各测点的竖向动位移，如图 9 所示。



Figure 9. Field test chart
图 9. 现场测试图

采用特制板模拟伸缩缝中横梁与边横梁之间的高差，如图 10 所示。高差工况设置 3 mm、17 mm、35 mm，车速为 10 km/h、30 km/h、60 km/h。



Figure 10. Simulation of height difference of expansion joint

图 10. 伸缩缝高差模拟

3.3. 典型参数影响实测分析

关键截面典型位移时程曲线如图 11 所示。根据相关规范对计算各个测点的位移冲击系数，汇总至表 4，其变化规律如图 12 所示。

由表 4、图 12 可知，在试验车(30 t)作用下，梁端测点冲击系数随车速呈先减小后增大的趋势，1/4 跨测点冲击系数随伸缩缝中横梁高差的增大呈增大趋势，1/2 跨测点冲击系数随伸缩缝横梁高差变化规律不明显。主梁梁端车辆冲击作用受伸缩缝中横梁高差变化的影响最为显著，随着测点与伸缩缝间距离的增大，车辆冲击作用的变化减小。在车速 60 km/h 时，车辆造成的测试跨冲击系数达最大值。此时，当伸缩缝中横梁与边横梁高差为 35 mm 时，梁端、1/4 跨、1/2 跨测点冲击系数分别为 1.460、1.118、1.079，较高差为 0 mm 时，相应测点的冲击系数增幅分别为 32.73%、4.50%和 2.10%。

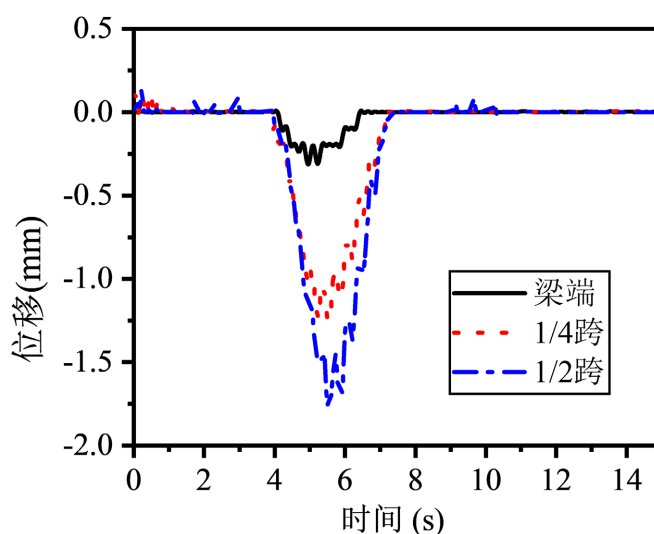


Figure 11. Vertical displacement time history curve

图 11. 竖向位移时程曲线(30 km/h 高差 17 mm)

Table 4. IFs of key sections
表 4. 关键截面冲击系数

测点	10 km/h			30 km/h			60 km/h		
	0 mm	17 mm	35 mm	0 mm	17 mm	35 mm	0 mm	17 mm	35 mm
梁端	1.070	1.177	1.445	1.060	1.169	1.426	1.100	1.210	1.460
1/4 跨	1.050	1.071	1.092	1.066	1.086	1.111	1.070	1.094	1.118
1/2 跨	1.050	1.040	1.040	1.060	1.070	1.060	1.057	1.079	1.079

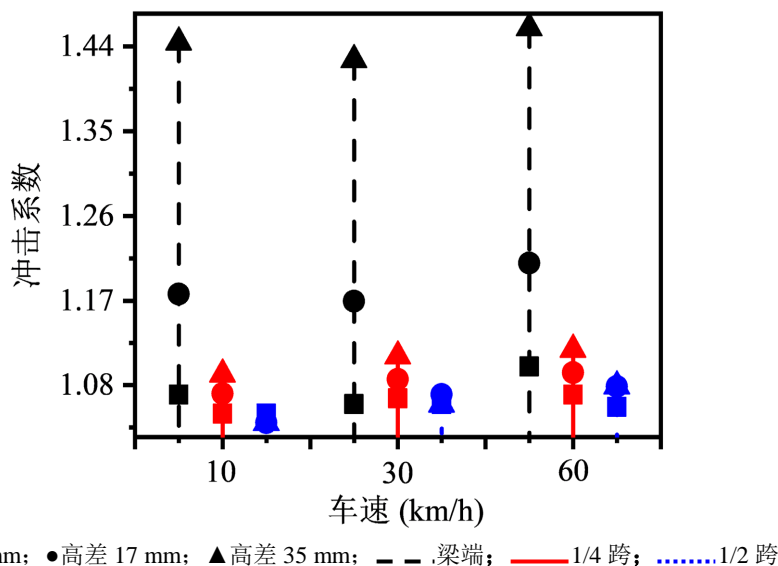


Figure 12. IFs of measuring point for test span

图 12. 试验跨测点冲击系数

4. 简支梁桥-连续梁桥车致动力响应伸缩缝参数影响对比分析

对于不同桥型，车速对各测点冲击作用的影响不同。对于简支梁桥，各测点冲击作用随车速增加先增大后减小；而对于连续梁桥，梁端测点冲击系数随车速增加呈先减小后增大的趋势，1/4 跨、1/2 测点冲击系数随车速的增大呈增大趋势。测点与伸缩缝的距离越大，测点冲击系数受伸缩缝变化参数影响越小。

连续梁桥主梁各测点冲击系数随伸缩缝中横梁高差增大而增大，且伸缩缝中横梁高差对主梁梁端测点冲击影响最为显著。

5. 结论

本文首先对某典型简支 T 梁桥进行了调查，开展了典型伸缩缝、支座参数条件下简支梁桥车致动力响应实测；进而以某连续梁桥为研究对象，通过现场实测探究了伸缩缝中横梁与边横梁高差对连续梁桥车致动力响应的影响。结果表明：

(1) 典型伸缩缝变化参数(橡胶式伸缩缝边横梁间高差 5 mm)、车重(30 t)条件下，简支 T 梁桥车致(方向为小桩号至大桩号)梁端(小桩号)、1/4 跨、1/2 跨、3/4 跨、梁端(大桩号)冲击系数的最大值分别为 1.169、1.243、1.121、1.088、1.050。伸缩缝变化参数对简支梁桥关键测点车致冲击系数的影响与测点到伸缩缝的距离有关。测点与伸缩缝的距离越大，测点冲击系数受伸缩缝变化参数影响越小。梁端(小桩号)、1/4

跨测点的冲击系数较 1/2 跨测点的冲击系数分别大 4.28%、10.88%。与重车相比,较轻试验车(18 t)对简支梁桥的冲击作用更为明显(冲击系数更大),但重车诱发的桥梁内力、变形变化值更大。

(2) 典型伸缩缝变化参数(模数式伸缩缝高差 0~35 mm)、车重(30t)条件下,连续梁桥主梁各测点冲击系数随伸缩缝中横梁高差增大而增大,且伸缩缝中横梁高差对梁端测点冲击系数的影响更为显著。当试验车速为 60 km/h、高差为 35 mm 时,梁端、1/4 跨、1/2 跨测点冲击系数的最大值分别为 1.460、1.118、1.079,梁端冲击系数较 1/2 跨冲击系数大 35.31%;与新建桥梁(高差为 0 mm)相比,主梁相应测点的冲击系数分别增大 32.73%、4.50%、2.10%。

参考文献

- [1] Di Mascio, P., Loprencipe, G., Moretti, L., *et al.* (2017) Bridge Expansion Joint in Road Transition Curve: Effects Assessment on Heavy Vehicles. *Applied Sciences*, **7**, Article 599. <https://doi.org/10.3390/app7060599>
- [2] Deng, L., Yan, W. and Zhu, Q. (2016) Vehicle Impact on the Deck Slab of Concrete Box-Girder Bridges Due to Damaged Expansion Joints. *Journal of Bridge Engineering*, **21**, 06015006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000796](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000796)
- [3] Ding, Y., Zhang, W. and Au, F. (2016) Effect of Dynamic Impact at Modular Bridge Expansion Joints on Bridge Design. *Engineering Structures*, **127**, 645-662. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.007>
- [4] 谢旭, 吴冬雁, 王建峰, 等. 伸缩缝车辆冲击引起的钢箱梁桥振动特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1923-1930.
- [5] Broquet, C., Bailey, S., Fafard, M., *et al.* (2004) Dynamic Behavior of Deck Slabs of Concrete Road Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, **9**, 137-146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2004\)9:2\(137\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2004)9:2(137))
- [6] 张洪亮, 胡长顺, 高江平. 路桥过渡段容许台阶高度确定的参数影响[J]. 公路交通科技, 2005(3): 42-46.
- [7] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J]. 土木工程学报, 2007(9): 65-77.
- [8] 单景松, 黄晓明, 廖公云. 移动荷载下路面结构应力响应分析[J]. 公路交通科技, 2007(1): 10-13.
- [9] 钱振东, 刘云, 黄卫. 考虑不平度的桥面铺装动响应分析[J]. 土木工程学报, 2007(4): 49-53.
- [10] 徐勋倩. 大跨径钢桥面铺装层车辆动响应影响因素分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 85-90.
- [11] Yang, J.R. and Li, J.Z. (2010) Local Dynamic Response in Deck Slab of a Concrete Box Girder Bridge. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, **42**, 58-63.
- [12] 丁勇, 黄奇, 谢旭, 等. 载重汽车桥梁伸缩缝跳车动力荷载计算方法与影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 98-107.
- [13] 臧继成. 重载交通水泥混凝土特大桥桥面铺装受力分析及关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [14] 张梦秋. 移动荷载作用下水泥混凝土路面力学响应及接缝传荷能力分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [15] 韩海波. 车-桥耦合作用下空心板桥较缝的破坏研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [16] 黄大强. 高寒地区沥青路面温度与荷载耦合动力行为[D]: [硕士学位论文]. 长春: 西南交通大学, 2016.
- [17] 蒋欣. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计分析[J]. 城市道桥与防洪, 2017(6): 132-133.
- [18] JTG/T J21-01—2015. 公路桥梁荷载试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.