

公路桥梁长加载区间的多车道车辆荷载概念模型

阮 欣, 周军勇, 石雪飞, 周可攀

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 高速公路多车道荷载及其响应的差异一直是桥梁设计与研究关注的重点, 目前的多车道荷载模型对这种差异表述不合理, 特别是长加载区间效应。选取 2009~2013 年实测的 2 车道和 4 车道 28 d 自由通行的 WIM(Weigh-in-motion)数据, 研究车辆的车道选择和荷载的空间分布特性, 分析长加载区间的多车道荷载响应, 提出了考虑多车道荷载模型的新思路, 并校核了该概念模型的系数取值。研究表明, 应选用至少 3 周以上数据进行车辆及荷载分析才具有统计意义, 多车道中各分车道的车辆及荷载分布具有显著差异, 我国规范基于车道荷载同分布的假定不成立。车道荷载分位值差别显著, 而最大值却大致相同, 说明多车道荷载模型无法兼顾不同加载区间的修正要求。长加载区间上分车道荷载响应之间的比值趋于稳定数量关系, 表明各车道不仅不能达到相同水平极值, 且不能同时达到。推荐的多车道概念模型能科学考虑长加载区间上分车道及总车道响应极值的关系, 更具工程意义, 校核的系数表明推荐模型合理可用。

关键词: 多车道; 车辆荷载模型; 横向折减系数; 荷载空间分布

中图分类号: U441.2

文献标志码: A

Conceptual Traffic Load Model for Multi-lane Highway Bridges with Long Loading Length

RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei, ZHOU Kepan

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Differences in vehicle load and its response on multi-lane highway bridges were crucial to bridge design and related researches. These differences, especially the load effects with long loading length, were poorly illustrated by the current multi-lane traffic load models. The 28-day free flow weigh in motion(WIM) data on a two-lane highway and a four-lane highway were offered. The data were obtained from the year 2009 to 2013. Based on the data, characteristics in the vehicle lane selection and spatial load distribution were

studied. Multi-lane load response with long loading length was analyzed. A new multi-lane load model was proposed, based on which model coefficients values were calibrated. The results suggest that statistical stability of the vehicle and load analysis can only be ensured with a data length over 3 weeks. Vehicle and load distribution in each lane was of significant difference, indicating that the equal distribution assumption of vehicle lane load in current Chinese code was in need of modification. Variation of the vehicle load was substantial while the maximum load values were of not much difference, which suggests that the current multi-lane load model can no longer satisfy the modification requirements raised by varied loading lengths. The load response ratios of different lanes with long loading length roughly remained as constants, indicating that extreme load responses in different lanes were different and would not appear simultaneously. The recommended conceptual multi-lane load model provided a reasonable and scientific elaboration on the relationship of extreme load responses among different lanes and all lanes with long loading length. The model proved to be reasonable and of more engineering application value by the coefficient calibration.

Key words: multi-lane; traffic load model; lateral reduction coefficient; spatial load distribution

多车道设计的公路中, 各个车道的交通组成、荷载特性等显著不同, 对道路及桥梁的设计也提出了不同的要求, 这一问题在高速公路中尤其突出^[1-2]。目前桥梁设计规范中, 解决这一问题的主要方法是在一个基本的单车道荷载模型基础上, 利用多车道修正系数进行调整^[3-9]。对此, 国内外主流的规范和方法主要可归纳为三种, 见表 1。① 方法 1: 基于重车相遇概率的折减系数方法, 以美国 ASSHTO LRFD-2010 为代表^[4-5]。它主要考虑到中小跨径桥梁中, 单

收稿日期: 2014-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(51108338; 51478337)

第一作者: 阮 欣(1977—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为桥梁工程。E-mail: ruanxin@tongji.edu.cn

通讯作者: 周军勇(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁工程。E-mail: zhoulunyong_fly@163.com

个车道的车辆荷载响应极值主要由单个重车荷载控制,多车道荷载不能简单将单车道荷载按倍数提高(这将大大高估荷载水平),还应考虑多车道中重车的相遇概率,折减系数也主要根据这个相遇概率确定.美国规范中,考虑到单车道公路在实际中很少,因此规定 2 车道的多车道系数为 1.0,单车道在此基础上提高(取 1.20),而当车道数大于 2 时,则进行折减.② 方法 2:基于车道荷载独立同分布假定的折减系数^[6-8]方法,由 Jaeger 和 Bakht 提出^[6-7],该方法基础是假定车重近似服从正态分布规律,车道间荷载分布相互独立.在此基础上,可以仅考虑多车道同时

出现最不利荷载的概率计算折减系数,该方法在加拿大和我国现行规范得到应用^[8].③ 方法 3:基于不同车道间交通组成荷载差异性的修正系数^[9]方法,美国 ASCE 针对大跨桥梁荷载模型的指南^[9]和欧洲规范 2004 采用了这种方法,它主要考虑不同车道间交通组成差异较大,而对各车道荷载模型取值不同,例如 ASCE 指南中将产生最大效应的车道采用全荷载,产生第二大效应的采用 0.7 倍全荷载,其余车道则采用 0.4 倍全荷载;但系数取值的理论基础没有明确表述.

表 1 各国规范荷载模型的多车道等效系数

Tab.1 Multi-lane equivalent coefficients of traffic load model in different national design codes

横桥向车道数		1	2	3	4	5	6	7	8
方法 1	美国 ASSHTO LRFD-2010	车列、均布	1.20	1.00	0.85	0.65	0.65	0.65	0.65
	加拿大 OHBDC-2006	车列、均布	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.55	0.55
方法 2	澳大利亚 AS5100.7-2004	车列、均布	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.55	0.55
	中国 JTG D60-2004	车列、均布	1.00	1.00	0.78	0.67	0.60	0.55	0.50
方法 3	美国 ASCE-1981	车列、均布	1.00	0.85	0.70	0.63	0.58	0.55	0.53
	英国 BS5400-1978	车列、均布	1.00	1.00	0.78	0.67	0.60	0.56	0.52
	欧洲:EUROCODE-2004	车列	1.00	0.83	0.67	0.50	0.40	0.33	0.29
		均布	1.00	0.64	0.52	0.46	0.42	0.40	0.38
		均布	1.00	0.64	0.52	0.46	0.42	0.40	0.37

近几年我国公路的交通量、交通组成及其荷载特性都发生很大变化^[10];与此同时,采集的实际运营车辆荷载数据得到大量丰富,已有很多研究开始关注和讨论折减模型的准确性、精确性,以及这些等效方法的合理性^[3,11-13].主要的问题反映在^[12-15]:单一的折减系数是否能反应各车道间实际存在的荷载响应差异;加载长度不同时,控制车辆荷载响应极值的参数显著不同,目前的折减模型是否能考虑这些差异.

短加载区间上,结构效应影响线范围内能够布置的车辆数有限,响应极值大都由重车荷载控制,且多车道的荷载响应受相遇重车的荷载吨位及相遇概率确定,因此现有的方法 1 能够表达短加载区间的多车道问题,只是系数的取值需根据具体地址校正.长加载区间上,能布置的车辆多,荷载响应受加载范围内的平均荷载水平控制,此时多车道的荷载响应问题显著差别于短加载区间,分车道荷载响应之间的关系、简化的多车道系数等问题均需重新研究.

因此,本文重点关注长加载区间的多车道问题,以 2009~2013 年间实测的广东省佛开高速 2 车道(2009)和 4 车道(2013)28 d 自由通行的 WIM 数据为基础,这条高速建于 1996 年,运营 10 年以上,具有代表性.为了最大程度降低因为数据测试区域不同而带来的影响,两组数据系同一地址的佛开高速

前后经过改扩建测得. WIM 数据包含了车辆的车重、轴重、轴距、车速及车队的时距、交通量等完整信息,基于对上述参数的统计分析,本文对各个车道车型分布、荷载及响应进行了细致研究,并在此基础上,尝试提出一个用于长加载区间的多车道车辆荷载概念模型.为了便于理解,将后续文中用到的各车道名称标识说明如图 1 所示.

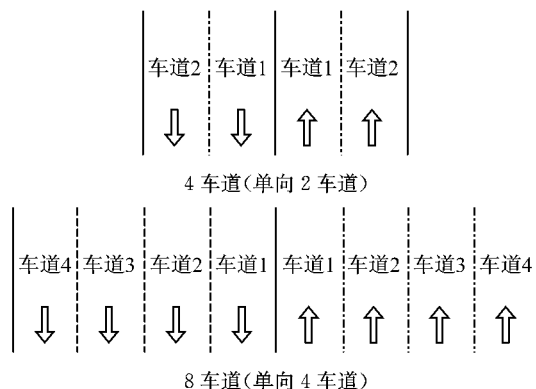


图 1 多车道高速公路中各车道的名称标注

Fig.1 Lane labels for multi-lane highway

1 车道选择特性

研究各个车道之间荷载的差异性,首先应关注行驶在各个车道上车型分布的差异.高速公路中,交

通法规对车道选择有很大影响,但也无法完全规范车辆的车道选择特性.以下将基于 WIM 的统计数据对这个问题进行讨论.

考虑到车道的选择具有高度随机性,这里首先基于累计概率,研究确定一个能够稳定反应这一随机性的统计时间区间.图 2a 统计了累计 1—28 d,2 车道高速路中 4 轴、5 轴和 6 轴及以上车辆选择车道 2 的概率;图 2b 统计了累计 1—28 d,4 车道高速路中 4 轴车和 6 轴及以上车辆选择车道 3、4 的概率.图中可见,各车型的车道选择概率(“车道选择概率”即累计天数 Nd ,选择该车道的车辆数占该类型车辆数的百分率)随累计天数变化具有一定差异,但随着数据量的增加,当累计天数达到 21 d 以后,车道选择概率趋于稳定,其他车道中各车型选择概率体现了类似规律.这一结论与其他研究中选用约 3 周时间的车辆荷载数据进行荷载模型研究的结论吻合^[16-17].因此,后续研究中将以 28 d WIM 数据为基础进行分析.

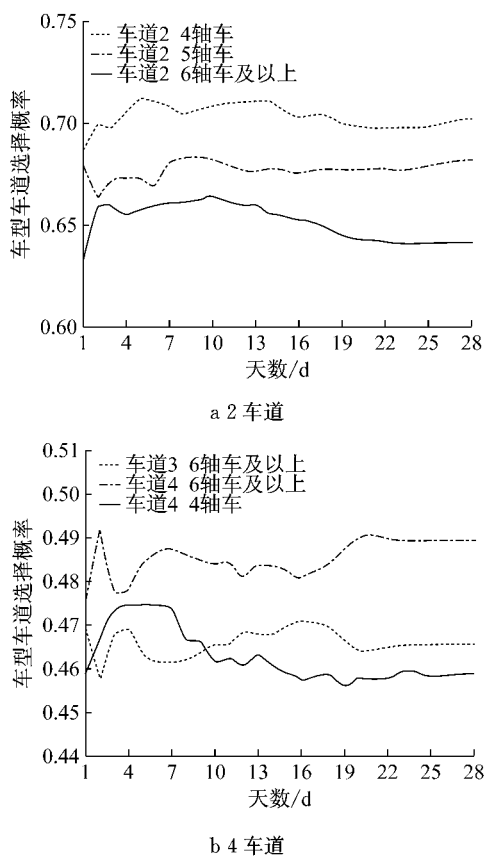


图 2 多车道中各车型对车道选择概率随累计时长的变化规律

Fig.2 Change regulation of time-dependent probability regarding lane selection of different vehicle types

表 2 统计了两组数据中,各车道上不同轴型车

辆数量在总体车辆数量中所占比例,反应了车型车道选择的倾向性.表中可见,各种轴型对不同车道的选择概率差别很大,且随着车道数量的增加,差异性愈加明显.2 车道中多轴车(3 轴及以上)选择车道 2 的概率是车道 1 两倍左右,而 2 轴车选择车道 1 是车道 2 的两倍;4 车道中多轴车基本不进入车道 1,且对外侧两车道的选择概率均等,2 轴车则主要分布在内侧 2 车道,选择车道 1 和 2 概率等同.这些车道选择特性将对各车道的荷载分布产生重要影响.

表 2 车辆的车道选择倾向性比较

Tab.2 Comparison of vehicle lane selection tendency

							%
车型分类		2 轴车	3 轴车	4 轴车	5 轴车	6 轴及以上	总和
2 车道	车道 1	58.13	1.69	1.14	0.74	1.46	63.16
	车道 2	26.99	2.97	2.69	1.59	2.60	36.84
	总和	85.12	4.66	3.83	2.33	4.06	100.00
4 车道	车道 1	32.16	0	0	0	0	32.16
	车道 2	30.76	0.16	0.14	0.03	0.21	31.30
	车道 3	17.75	0.97	1.35	0.33	2.11	22.51
	车道 4	9.21	0.98	1.26	0.37	2.21	14.03
	总和	89.88	2.11	2.75	0.73	4.53	100.00

2 车道荷载的空间分布

图 3 是 2 车道和 4 车道中各车道的车重累积概率分布.由图可见,车道选择的倾向性直接影响了车辆荷载的空间分布特性:在同一累积概率水平下,随车道数量的增加,荷载的横向差异愈加显著.累计概率的极限值代表了车道荷载的最大值.2 车道中车道 1 和车道 2 出现最大值的吨位水平相当,分别为 90 d 和 90.4 t;4 车道中,除车道 1(43.42)外,车道 2,3,4 的最大值吨位(101.8,109.1,94.1)相近,说明多车道的荷载分布虽不同但最大荷载水平大致相当.累积概率的分位值代表了车道的平均荷载水平,例如累积概率 95%时,2 车道中车道 1 和车道 2 荷载吨位的分位值分别为 21.1 t 和 52.5 t,4 车道中车道 1—4 的荷载吨位分别为 1.92,15.3,48.2 和 55.9 t,各车道的平均荷载水平差异非常大,这也说明方法 2 中的各车道荷载同分布的假定并不成立.

上述差异对不同加载长度的影响是不同的,小加载跨径受极端重车荷载控制,各车道的荷载最大值相当,说明短加载区间的多车道荷载模型修正应不大;长加载跨径受加载区间内的荷载平均水平控制,这个与分位值荷载水平紧密相关,多车道的荷载分位值相差很大,说明长加载区间的多车道荷载模

型需考虑车道差异性进行修正,不能简单地合并极值。这些统计也说明,目前我国规范中基于断面的车道交通量及荷载分布统计,并假定车道荷载同分布的研究思路^[9],无法同时描述中小跨径和大跨径的多车道荷载特性。

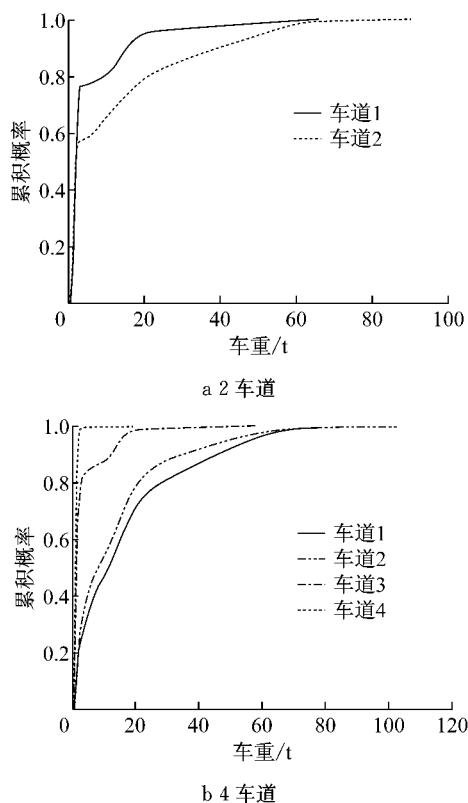


图 3 多车道车重累积概率分布及区间分布

Fig. 3 The cumulative probability and interval distribution of vehicle load on multi-lane highway

3 长加载区间的结构响应

车道荷载之间的差异也将对结构响应产生影响。利用前述实测 WIM 数据,还原完整车辆及车流信息得到自然车队(根据测取的轴重、轴距、车速及车头时距等信息组成的车队,其中包含了非超载车辆和管理部门所关心的超载车辆的影响),将自然车队对不同加载长度(从 5 m~1000 m)虚拟简支梁桥的跨中弯矩效应进行影响线加载,然后关注荷载响应累积概率分布的尾部走势,这个尾部数据是决定极值外推的关键^[16-17]。图 4 给出了 2 车道和 4 车道高速公路中,各车道荷载响应的 0.98 分位值($R_{\text{lane}-0.98}$)随跨径的变化情况,并且将这些分位值对相应加载跨径的总车道荷载响应的 0.98 分位值($R_{\text{total}-0.98}$)进行比值处理。

由图 4 可知,这一比值在 200 m 跨径以下波动

较大,且波动的幅度随跨径增加大幅降低;当加载区间大于 200 m 后,比值基本趋于平稳,波动幅度随跨径有小幅降低。这是由于加载区间较短(小跨径)时结构效应受重车加载等状况控制,受到高吨位重车随机出现的影响,荷载响应极值出现波动;当加载跨径增大后,荷载极值主要受加载范围内的平均荷载控制,单个重车的随机影响程度减弱,响应也趋于稳定;这点与各车道分布的车型趋于稳定的规律也是一致的。这些规律也说明针对短加载区间和长加载区间应采用不同的修正方法,目前的多车道修正模型思路很难同时涵盖不同加载区间的修正要求。

如图 4 所示,对于长加载跨径,各车道荷载响应分位值有显著差别,且分车道间相对比值趋于稳定,说明各车道不能同时达到相同水平的极值,在考虑单车道标准荷载模型的基础上,各车道还需计入车道修正系数。此外,各车道响应分位值比值的数学和远大于 1,这是由于总体荷载响应极值并不伴随多车道同时出现极值的情况,不能简单相加,需要概率折减。

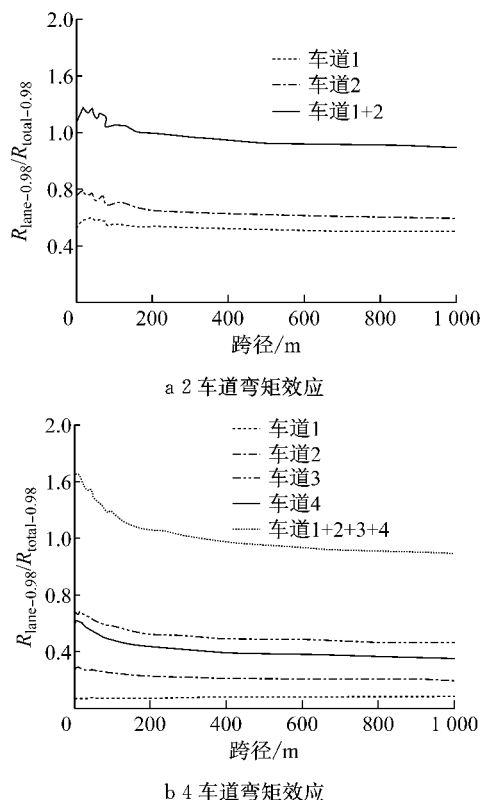


图 4 多车道简支桥车道荷载响应随跨径变化规律

Fig. 4 Vehicle load responses of multi-lane simply supported bridges with different spans

4 多车道概念模型

根据分析说明:目前的高速公路中,各车道间车型分布、车辆荷载、荷载响应等存在较大差异,各车

道间荷载分布及其响应不满足同分布假定,各车道荷载极值不同,且不能同时达到极值,各车道荷载极值之间的差异与车道数量有关。

基于上述考虑,提出以下多车道车辆荷载概念模型:首先从方便工程师理解和使用的角度,确定一个基本的标准车道荷载模型(包含荷载形式、荷载取值和加载方式);然后,考虑不同车道上出现极值的水平不同的问题,对其余车道确定车道修正系数;最后,用车道组合系数考虑各车道同时达到极值的概率折减。需要注意的是,基本的标准车道荷载模型需要在实测车辆数据和结构响应的基础上研究而来,且需要考虑各种车辆行驶状况^[12,14],一般建议取产生最大荷载响应的车道作为标准荷载模型,研究重点关注车道间荷载模型关系(包含车道修正系数和多车道组合系数等),将其定义为多车道概念荷载模型。具体的对于长加载区间的多车道概念模型形式为

$$Q_k = \phi_n \times q_k = \eta_n \times [(\gamma_1 + \cdots + \gamma_i + \cdots \gamma_n) \times q_k], i = 1 \sim n$$

式中: γ_i 为车道修正系数,车道数为 n 时,车道 i 对标准车道荷载模型的修正系数,主要考虑各车道出现荷载响应极值的大小不同; η_n 为车道组合系数, n 个车道的组合折减系数,考虑多车道中各车道同时

出现最不利荷载的概率折减; ϕ_n 为多车道荷载模型等效修正系数, n 车道对标准单车道荷载模型的修正系数; q_k 为标准单车道荷载模型取值,可根据常规方法确定,如以区域内车辆荷载和桥梁形式,考虑各种车辆行驶工况下荷载响应极值外推确定^[12,14],建议以产生最大荷载响应的车道确定。 Q_k 为多车道荷载模型的形式等效取值,不具有一般意义,结构分析中应根据计算需求(如偏载分析)施加车道荷载。

推荐的多车道荷载模型综合考虑了长加载区间上,车道荷载响应之间的物理关系和简化荷载模型的形式,是方法2和方法3的一般形式。以4车道为例,如若假定车道荷载之间满足独立同分布关系,则车道修正系数 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 1$,多车道组合系数取 η_4 ,退化为方法2模型,如图5a。如若认为车道荷载之间具有差异性,且不考虑多车道同时出现最不利荷载的折减,则退化为方法3模型,如图5b。

注意到,推荐模型的车道修正系数和多车道组合系数并不是车道相关系数的概念,而是基于研究确定的系数简化表达,如能基于车道间相关系数的数理研究确定多车道系数,这对于多车道荷载模型建立也将是一种重要的参考方法,但需考虑车道间荷载的高度随机性。

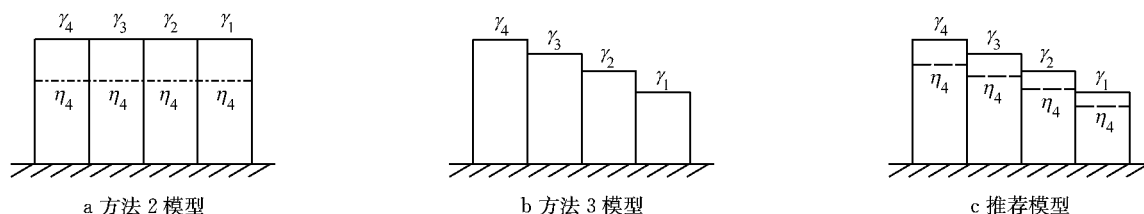


图5 不同方法的4车道荷载模型示意图

Fig.5 Four-lane traffic load models based on different approaches

根据本文推荐的多车道概念模型,基于长加载区间2车道和4车道各车道荷载响应的计算结果(图4),对2车道和4车道中的车道修正系数、多车道组合系数进行校核如表3。其中,2车道的单车道荷载模型应以车道2荷载极值响应为基础,4车道应以车道3荷载极值响应为基础;车道修正系数和多车道组合系数通过下述方法确定,以图4a为例,车道2修正系数为1.0,车道1修正系数则根据其车道响应0.98分位值与车道2的荷载响应0.98分位值比值取定(0.8),车道组合系数根据多车道总体荷载响应0.98分位值(1.0)与车道1+2荷载响应分位值(1.176)的比值取定。表中校核的系数验证了推荐模型的合理性。

表3 推荐多车道概念模型的系数校核

Tab.3 Coefficient calibration for recommended multi-lane traffic load model

多车道类型	2车道		4车道			
	车道1	车道2	车道1	车道2	车道3	车道4
车道修正系数	0.8	1.0	0.2	0.5	1.0	0.9
车道组合系数	0.85		0.82			
等效修正系数	1.53		2.13			

5 结论

(1)数据表明,统计时长达到21 d后车型的车道选择概率趋于稳定;车道数量的增加,车型的车道选择差异性更大,各轴型车辆对分车道的选择概率具

有一定数量关系,车辆的这种车道选择特性是荷载空间分布的根由。

(2)多车道荷载的分位值具有显著差异,但最大值水平则大致相同。分位值与最大值的不同特性,说明多车道荷载模型无法涵盖不同加载区间的修正要求,也说明我国现有规范在车道荷载独立同分布理论下建立的多车道修正系数,对于长加载跨径不合适。

(3)长加载跨径的多车道荷载响应,各车道荷载响应特征值比值趋于稳定的数量关系,说明多车道中各车道不仅不能达到相同水平的荷载极值,且不能同时达到极值。

(4)推荐的多车道概念模型,包含了车道修正系数和车道组合系数,能反映长加载区间各车道荷载响应极值不同及同时出现最不利响应极值的概率折减,最后基于 2 车道和 4 车道的统计结果校核了上述系数,表明推荐模型具有合理性和参考意义。

参考文献:

- [1] Garber N, Hoel L. Traffic and highway engineering [M]. Washington D C: Cengage Learning, 2014.
- [2] Barceló J. Models, traffic models, simulation, and traffic simulation [M]. New York: Springer, 2010.
- [3] Fu G, Liu L, Bowman M D. Multiple presence factor for truck load on highway bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 18(3): 240.
- [4] Nowak A S. Live load model for highway bridges [J]. Structural Safety, 1993, 13(1): 53.
- [5] Kulicki J M, Prucz Z, Clancy C M, *et al.* Updating the calibration report for AASHTO LRFD Code [R]. Washington D C: National Cooperative Highway Research Program, 2007.
- [6] Bakht B, Jaeger L G. Bridge evaluation for multipresence of vehicles[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(3): 603.
- [7] Bakht B, Jaeger L G. Simplified methods of bridge analysis for the third edition of OHBDC [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19(4): 551.
- [8] 鲍卫刚, 李杨海, 张士铎, 等. 公路桥梁车辆荷载纵横折减系数研究[J]. 中国公路学报, 1995, 8(1): 80.
BAO Weigang, LI Yanghai, ZHANG Shiduo, *et al.* Research on the reduction coefficients of traffic loading laterally and longitudinally on bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(1): 80.
- [9] Buckland P G. Recommended design loads for bridges [J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(7): 1161.
- [10] 阮欣, 周军勇, 石雪飞. 随机车流作用下多塔斜拉桥总体荷载响应特性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42 (1): 25.
RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei. Overall vehicle load response characteristic of multi-span cable-stayed bridge under stochastic traffic flow [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42 (1): 25.
- [11] Gindy M, Nassif H. Multiple presence statistics for bridge live load based on weigh-in-motion data [J]. Transportation Research Record, 2007, 2028: 125.
- [12] Nowak A S, Lutomirska M, Sheikh Ibrahim F I. The development of live load for long span bridges [J]. Bridge Structures—Assessment, Design & Construction, 2010, 6(1): 73.
- [13] 周军勇. 大跨径多塔缆索承重桥汽车荷载模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
ZHOU Junyong. Traffic load model for long span multi-pylon cable supported bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [14] 阮欣, 周军勇, 石雪飞. 中法高速公路车流及荷载特性对比 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(9): 1392.
RUAN Xin, ZHOU Junyong, SHI Xuefei. Comparison on highway traffic flow and load properties of China and France [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41 (9): 1392.
- [15] RUAN Xin, ZHOU Junyong, YIN Zhiyi. Concepts of developing traffic load model for multi-span cable supported bridges[C]// Sustainable Development of Critical Infrastructure. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University & American Society of Civil Engineers, 2014: 132-140.
- [16] O'Connor A, O'Brien E J. Traffic load modelling and factors influencing the accuracy of predicted extremes [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(1): 270.
- [17] O'Brien E J, Enright B, Getachew A. Importance of the tail in truck weight modeling for bridge assessment [J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(2): 210.