

文章编号:1673-2049(2010)04-0031-08

公路桥梁交通荷载研究现状及展望

王 涛,韩万水,黄平明

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:阐述了各国公路交通调查研究进展状况,综述了公路桥梁交通荷载调查分析与仿真模拟研究现状,总结了对桥梁结构分析影响较大的车重、轴重、车速、车距、车道及车辆行驶的横向位置等交通荷载参数的研究现状和目前仍存在的问题;最后对未来公路桥梁交通荷载调查与仿真模拟的研究方向进行了展望。

关键词:公路桥梁;交通荷载;移动荷载;横向分布;仿真模拟

中图分类号:U441.2 **文献标志码:**A

Research Status and Prospect on Traffic Loading for Highway Bridge

WANG Tao, HAN Wan-shui, HUANG Ping-ming

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University,
Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The research progressing of highway traffic survey at home and abroad was expounded, and the existed research status of investigation statistics and simulation for random traffic loading on the highway bridges was summarized. The detailed review mostly focused on the existed research status of several key parameters influencing bridge structure analysis, such as vehicle weight, axle weight, vehicle speed, vehicle distance, traffic lane and transverse location. Furthermore, the existed problems at present were summed up. Finally, research directions of highway traffic loading investigation and simulation in the future were prospected.

Key words: highway bridge; traffic loading; moving load; transverse distribution; simulation

0 引言

交通车辆荷载是公路桥梁所承受的主要可变荷载,对其进行调查是确定桥梁设计荷载、桥梁时变可靠性分析、既有桥梁剩余寿命预测以及极限承载力计算等研究的重要基础^[1]。

随着中国经济快速增长,交通事业蓬勃发展,公路总里程以及高等级公路比例都显著提高。同时随着汽车工业和交通运输行业的迅速发展,公路交通流量不断大幅增长,车辆行驶速度明显提高,重型车

辆大量涌现,使得车辆荷载较以往发生了很大的变化,严重威胁着公路桥梁的运行安全,因此越来越明显的车桥耦合振动问题、结构疲劳问题、桥梁剩余服役期内的承载能力评估逐渐引起了重视。但在以往的研究过程中,通常是在假定车流是确定的前提下进行的,忽略了车流的随机特性,因此依据假定车流前提下得出的结论会与基于实测数据得出的结论产生不小的偏差。对于桥梁的疲劳研究来说,用接近真实情况的车流荷载谱作为疲劳荷载谱可以得出更加有意义的结论,这就需要对公路桥梁上的实际交

收稿日期:2010-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50808018);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC30);

长安大学基础研究支持计划专项基金项目(09Q08)

作者简介:王 涛(1978-),男,山西榆次人,讲师,工学博士,E-mail:wt_luck@163.com。

通车辆荷载进行详尽调查。

以往交通荷载调查多是在交通工程专业的研究领域,主要是对公路交通运营状况进行调查,为交通量预测、交通建设与规划和经济评价提供依据。目前,常用的调查方法有人工调查方法、半自动调查方法和全自动调查方法,这些调查方法各有优缺点,但都不能得到全面适用于公路桥梁结构分析的交通荷载特性参数。交通工程专业的交通荷载调查主要侧重于交通的流量、密度、构成比重、平均速度、起讫点等特性参数的调查,而对桥梁结构受力影响较大的参数如车辆横向位置、即时速度及车重参数的调查不足。

1 公路交通调查研究现状

学术界对于公路交通的调查研究在交通规划领域得到了极大的成功,其研究的目的主要是对公路交通的整体规划及对交通流量的整体控制,研究方法及其成果可为公路桥梁交通荷载的研究提供很好的借鉴。

美国进行大规模的全国性交通荷载调查工作^[2]是在 20 世纪 60 年代开始的,之前都是由各州自行开展内容相对单一的交通调查和建库工作。1961 年 4 月,美国开展了第 1 次全国性的交通特征及其影响变量的调查,之后于 1969 年和 1977 年分别进行了第 2 次和第 3 次全国性的交通抽样调查和有关数据建库工作。从这以后,美国全国性的个人交通调查才真正进入一个按照一定周期(一般为 5~6 年)开展的规范化阶段。1983、1990、1995、2001、2006 年,美国又分别进行了第 4 次、第 5 次、第 6 次、第 7 次和第 8 次全国性的交通抽样调查和有关数据建库工作。目前美国各州每年都会公开发布本年度的公路交通调查情况统计公报,主要内容为路段的年平均日交通量、交通量的时间变化系数以及交通观测站的分布,用户可以从当地运输管理部门或互联网上免费获取^[3]。日本的交通调查也已经形成一个稳定的体系^[4],基本调查周期为每隔 5 年一次,无论是种类、内容或是范围都极为丰富,值得中国学习和借鉴,其中公路交通调查是由主要公路的道路状况调查、不同车型(8 种)不同时间段(12、24 h)断面交通量的交通量调查和主要公路区间的行车速度调查 3 个部分组成。欧盟各国也为公路行车安全进行了相应调查研究,制定了相关的制度,建立了完善的交通调查体系。德国各州每年也有公开发行的交通统计数据出版物,主要应用于引导公众

出行、噪声控制、车辆检测等^[5]。

中国公路交通调查工作开始于 1979 年,根据交通部(79)交公路字 837 号文件的要求,交通部公路管理部门在中国各省、市、自治区先后建立了各自的公路交通情况调查系统,并于 1979 年 10 月起正式对国道和其他干线公路的交通运行状况进行调查^[6],但是对高速公路交通调查所做的工作还少之又少。

根据 2008 年颁布的《国家高速公路网交通量调查观测站点布局规划》,到 2012 年中国将初步建立国家高速公路交通量调查与信息服务体系架构,所有已通车路段将初步具备监测路网运行质量、为社会提供出行服务信息的能力;到 2020 年全面完成国家高速公路交通量调查与信息服务体系,具备为行业、为社会提供全面、准确的信息服务的的能力。

中国交通状况调查工作在开展之初,主要进行了交通量观测、车速观测和 4 类公路交通量比重观测。目前,为满足公路建设的不同需求,在做好这 3 项调查工作的基础上,轴载调查、车辆起讫点调查、通行能力调查、交通事故调查、行车密度调查、车时距调查、交通延误调查、客货运量调查、高峰小时流率调查、省界进出口公路车流量调查等也普遍开展起来。但由于调查设备及手段比较落后,使得调查数据利用率较低,很难发挥其应有的利用价值。

综上所述,中国公路交通调查方面与发达国家相比,无论是在采集手段,还是在数据利用方面都存在一定的差距,还没有形成一套较好的管理体系,特别是中国在高速公路网交通量调查技术体系方面的研究工作才刚刚开展,无法满足社会各行业的需求。

2 公路桥梁交通荷载研究现状

公路桥梁交通荷载的研究始于公路桥梁疲劳荷载谱的研究。国外在 20 世纪 70 年代就开始了致力于公路桥梁荷载谱的研究,其中英国的成就较为突出,并取得了重要的研究成果^[7]——于 1978 年成功地制定出用于钢桥疲劳设计的车辆荷载谱,美国、日本等国也结合自己的国情,开展了公路桥梁车辆荷载谱的研究工作。

中国对铁路桥梁的车辆荷载研究工作开展的较多,就中国公路和城市公路桥梁而言,始于 1997 年童乐为等^[8]对城市公路桥梁荷载谱的研究,起步较晚,成果较少,还没有较为全面、适用的随机车辆荷载谱。

公路交通荷载包括车型、车重、轴重、车速、车辆

横向行驶位置、车时距、车间距等参数,且这些参数都具有较强的随机性,各国学者对这些交通荷载要素都进行了相应的调查研究。

2.1 车重、轴重

到目前为止,各国许多学者仍将交通荷载研究重点放在对车重、轴重参数的调查统计及相关研究上。对交通荷载车重参数的调查方法主要有:①通过查阅车型手册资料获得车重;②通过收费站称重系统获得车重;③通过移动称重系统(WIM)获得车重;④利用移动荷载识别技术间接获得车重。

第1种方法只能从手册资料中预估某车型的车重、轴重,误差较大。第2种方法虽然称重误差并不大,但是做不到即时称重,也就是很难和现场过桥车辆进行对应,只能大致对某车型的车重参数进行统计分析,目前中国交通荷载调查大多采用此种方法。第3种方法在欧美已经使用了相当长一段时间,在中国使用时间较短,目前该方法已成为交通荷载调查的主要方法。该方法虽然能做到现场采集车重数据,但需要过往的车辆限速通过,影响了正常交通秩序,而且由于WIM设备昂贵,部分设备需要预先埋设,目前只有在一些重要的监测路段才会使用。Nowak等^[9-11]、Cremona^[12]、Miao^[13]、Gindy^[14]、O'Connor等^[15]和中国“公路车辆荷载研究课题组”^[16]分别利用移动称重系统采集了大量的车重、轴重数据,并做了相关研究。Nowak、Cremona和Gindy分别利用WIM采集的称重数据进行外推预测长期内的荷载效应最大值的研究;文献^[13]、^[15]、^[16]分别利用WIM称重数据进行荷载标准值的研究。第4种方法是针对第3种方法的不足而产生的,早在20世纪后期许多学者就进行了由桥梁动响应间接识别移动车辆荷载的研究。经各国学者多年的研究,移动荷载识别理论已产生了很多识别方法,其中较常用的方法包括第一解析法(IM I)^[17]、第二解析法(IM II)^[18]、时域法(TDM)^[19]、频域法(FTDM)^[20]、有限元法(FEM)^[21]以及拟合函数逼近法^[22]等。这些识别方法在一定条件下能有效地识别移动荷载并能得到较好的结果,但是这些方法都存在着不同程度的局限性:第一解析法的识别精度对轴跨比和噪声过于敏感;第二解析法虽然克服了轴跨比的影响,但受噪声影响仍然较大(小噪声对其影响不大);时域法虽然能解决前2种方法的不足,但计算量大,比较耗时;频域法仅适用于荷载移动速度较大的情况,进行低速移动荷载识别时该方法不理想。

此外,各国学者还针对超载现象作了大量的调查研究工作。Fu等^[23]根据美国纽约州部分超载现象严重的交通要道车流统计资料,建立了包括超载车辆的活载模型,这种荷载模型可以用于评估包括超载情况下公路桥梁结构的可靠性。梅刚等^[24]对110国道现状车载实测数据进行统计分析,结果发现由超载货车与普通汽车组成的车流规律呈2个正态分布的加权和形成的双峰分布,由此归纳了随机车流在一般运行和密集运行状态下的统计规律,提出描述公路桥梁的车辆荷载概率模型——滤过复合更新过程模型及后续使用期内车辆荷载评估值的取法。郭彤等^[25]通过对京沪高速公路车辆运行状况的实测和统计分析发现,实测的车辆荷载呈现出多峰分布的特性,利用极值型Ⅰ分布函数和正态分布函数的加权和拟合得到了由轻型车辆、普通车辆和重型(含超载)车辆所组成的多峰车辆荷载的概率分布函数;通过滤过复合Poisson过程和滤过复合Weibull过程分别对一般运行状态和密集运行状态下的车辆荷载过程进行了模拟。

2.2 车速

在公路桥梁设计中,交通荷载的车速参数对结构的影响还是较为明显的,车速大,结构受到的冲击力和碾压压力大,路面也容易破损,因此车速调查是必要的。车速调查一般采用的观测方法是在某个已知固定距离路段的首尾各设一人,两端同时记录车型、车号,并记录车辆通过该点的时间,算出通过观测路段所需要的时间,因观测路段距离一定,利用速度公式计算出车辆通过该观测路段的速度。该方法缺点较多,采集的车速结果是该段的平均车速,而非某点的即时车速,因此误差较大,还费时费力。另一种采集车速的方法是采用测速仪采集过往车辆的即时速度。

早在20世纪初至20世纪40年代美国先后进行了3批大规模的实桥测试^[26-27],首次提出了“冲击系数”、“临界速度”的概念,初步研究了车速对桥梁结构的影响。Waarts等^[28]对交通流的平均车速进行统计,提出了一个包括自由流、阻塞流和静止流3种运行状态的随机交通流模型。周小谔^[29]以现场交通状况调查为基础,获得了个别时段构成车辆荷载流各参数的数据,其中包括车速参数,并采用概率统计方法分析了车速样本的分布规律以及统计特征,建立了车速模拟的数学模型。韩万水等^[30]在交通荷载观测及统计分析的基础上,获得车速的代表性数据,对记录的车速样本进行统计,在此基础上

建立了车速模型。

2.3 车间距

车间距是指同向连续行驶的 2 辆车的车头通过道路某一断面时的间隔,是道路交通荷载流的一个重要特征参数。在交通荷载调查中常用到的参数是车间距和车时距。正常车流中,车间距不是一成不变的,而是随时间和车辆行驶速度变化而变化的。从统计学角度看,车间距分布均存在一定的分布规律,即使这种规律不能具体明确阐明。一般的作法是选择一种简单的分布函数,如负指数分布函数、移位负指数分布函数等,再利用已有的观测数据进行拟合标定,从而确定车间距的分布规律。

各国很多学者对车距的规律性进行分析研究,提出了一些分析模型。文献[28]对交通荷载的车间距也进行了统计分析,建立了自由流、阻塞流和静止流 3 种不同运行状态的随机交通流模型。文献[16]通过在 4 条国道上设点实地观测公路车流数据,分析了时间间隔以及车间距的分布类型和统计参数,将车辆运行状态划分为一般运行状态和密集运行状态。罗霞等^[31-32]采用实地测定和计算机模拟手段,得到了车头时距阈值与速度关系、不同跟车序列最小车间距、车间距与随机度关系和车间距与流量关系。方健红等^[33]研究了高速公路车流运行系统所需的车辆到达模型和车辆运行模型,对车辆运行模型中的跟驶模型作了推导,并利用 Visual Basic 语言实现了高速公路车流运行的动态实时模拟。王硕^[34]对收集的上海典型桥梁实桥交通流量观测及车辆荷载资料(包括车间距和车重测量样本数据)进行统计分析,在此基础上,利用 Monte Carlo 数值模拟方法模拟荷载流,建立实桥交通荷载模型,用于结构可靠性评估。冯兆祥等^[35]对江阴长江大桥实际行驶车辆进行概率统计分析,采用分段多项式曲线拟合方法得到了货车和客车的随机车重概率近似表达式,通过 Poission 法建立了车辆随机间距的数学模型。

2.4 车道、横向位置

交通车辆荷载行驶于公路上的横向位置不同,其对道路及桥梁结构造成的受力影响也不同。在正常车流情况下,结构横断面上各点所受到的轴载作用次数是不一样的,仅为通过该断面轴载作用次数的一部分。目前对车辆荷载横向分布问题还不够重视,使用的路面设计规范中,横向分布系数的取值都是沿袭以前版本设计规范的参考值。

国外很早就开展了对于车辆荷载横向分布的研

究。美国于 1982 年至 1983 年在 6 个州作了 129 次统计,波特兰水泥协会(PCA)根据其统计数据确定了设计车道货车比例曲线图,地沥青协会(AI)将方向系数和车道系数组合起来确定设计车道总货车交通量的百分数。AASHTO 也在其设计指南中提出横向分布系数的建议值^[36]。前联邦德国通过研究认为,在交通量计算中,车辆横向分布系数取 0.465。前苏联考虑了交通量沿车道宽度分布的特点,在规范中规定单车道、双车道、三车道和四车道道路采用不同的横向分布系数^[37]。中国的设计规范也沿袭了前苏联的设计模式。

考虑到近年来公路上车辆的机动性能和行驶方式较以往存在较大差异,所以有必要重新审视公路上行驶的车辆荷载横向分布情况,以期正确反映现阶段公路交通荷载横向分布的实际情况,为设计提供相应的参考。目前这方面的研究工作做的较少。

Getachew^[38]利用车辆荷载横向分布测量仪器 Metor 在一座典型桥址处收集了车辆横向分布数据用于车辆横向分布统计分析。中国在该方面也做出了一些研究,上海市政工程研究所曾对市区不同宽度和横断面的路段进行了观测,并用 20 cm 间距对车辆轮迹的横向分布作了统计。东南大学在台州调查了刚性路面上交通量横向分布状况,提出了车辆横向分布系数值。黄立葵等^[39]通过对高速公路行驶车辆的实地观测,得到了典型高速公路上各种车型的实际横向分布系数值和车辆荷载横向分布特征。周志坚等^[40]对城市道路进行交通调查,分析了不同功能城市道路上不同车道的车型分布规律。

3 未来发展方向

从各国近 40 年来对公路桥梁交通荷载的研究过程来看,大致可分为 2 个阶段,即早期的疲劳荷载谱研究阶段与现在的随机车流模型研究阶段,这期间得出了大量的有益结论,如车流及车重服从的随机函数分布规律等。但无论是早期还是现在对随机车流的研究过多地依赖车型、车重、车距及车速不变性的基本假定,在对公路桥梁车流的研究过程中,并未考虑车流的随机特性对疲劳荷载谱及随机车流模型的影响,文献[41]曾对车流、车型及车重的随机特性进行了深入的研究,得到了较为理想的随机车流模型,但该随机车流模型仍未考虑车速及车间距的随机特性。

通过对比研究各国公路桥梁交通荷载研究现状发现,尽管各国对公路桥梁交通荷载开展了一定的

调查研究^[42-45],但是以下4个基础问题还亟待进行深入研究。

3.1 高速公路交通荷载调查

新中国成立以来,中国开展过2次较为系统的实际交通荷载调查,第1次实际交通荷载调查是在20世纪60年代开展的,主要针对中小跨径桥涵结构,成为制定“八五”规范的主要依据,第2次交通荷载调查是20世纪90年代在4条国道设置观测点,也成为中国现行桥梁设计规范的主要依据。随着交通运输行业及汽车工业的蓬勃发展,高速公路已经成为交通运输的主要支柱,而20世纪90年代的车辆荷载特征也已不能完全代表目前的高速公路车辆荷载特征。在高速公路交通荷载调查方面,目前所做的研究仅是依据高速公路收费站收集得到的车重资料进行统计分析,这对于了解高速公路总体交通荷载的车重特征有所帮助,但无法得到其他要素特征,对于确定高速公路交通荷载意义不大,因此亟待开展高速公路交通荷载调查研究。

3.2 交通荷载要素调查

公路桥梁交通荷载流是一个各要素都随时空变化的随机系统,到目前为止,各国对交通荷载的调查研究还没有做到对各要素进行全面调查。如中国交通荷载调查做的较全面的“公路车辆荷载研究课题组”,对多条国道和高速公路上的交通荷载的流量、车重、车间距等参数进行大量的调查,取得大量的样本数据,但是其仅调查了主要行车道的白天时段车流数据,没有对所有车道的车流以及夜晚的车流状况进行调研。目前许多重型货运车辆采用昼伏夜出的行车方式,因此进行夜间的交通荷载调查也尤为重要。

由此可以看出,急需一种简单易行的全面观测交通荷载特性参数的调查方法,对桥梁结构受力影响较大的参数如各车型车流量、车道、车重、车辆荷载横向位置、即时速度及车距进行较为详尽的调查统计,才能建立完善的交通荷载样本数据库。

3.3 移动荷载识别方法的应用

以往交通荷载车重参数多是通过收费站称重设备获得,而WIM设备也较为昂贵,需要埋设在公路上,为得到精确车重结果,需要限定过往车辆的通过速度,这样必将影响到实际交通荷载其他要素的采集。在这种情况下,许多学者进行了由桥梁动响应间接识别移动车辆荷载的研究。经过多年的研究,移动荷载识别理论已经有了很多识别方法,但是这些方法还处于理论研究阶段,多是采用简化的车辆

模型,与实际工程相结合的工作还较少。这些移动荷载识别理论存在以下3个共性问题:①均是以识别车轮与桥面相互接触力时程为目标,因此,输入参数众多,包括详细的车辆类型、车辆参数、车辆在桥面的横向位置、车速、路面粗糙度等,但是这些参数的精确选取本身就很困难,因此识别精度就很难保障;②测点部位多,需要在桥跨多个关键部位布置测试仪器;③采用的车桥模型与实际的车桥相差甚远,车辆荷载识别只能做到三轴车,桥梁模型多是以理想化的单梁模型来模拟桥梁结构,难以考虑桥梁结构扭转、横向弯曲振动和车辆横向位置等复杂因素,梁格法桥梁模型移动荷载识别方法仍处于初步探索阶段。由此可见,这些方法均存在不同程度的局限性,不宜进行数据量庞大的交通荷载识别,因此,要将这些移动荷载识别理论直接应用于大批量的移动荷载识别中还需要进一步的研究和深化。

3.4 交通荷载全要素随机的仿真模拟

公路桥梁车辆荷载具有较强的随机性,而前10年各国交通荷载调查与模拟研究还多是依赖于车型、车重、车距及车速不变性的基本假定,构造静态的交通荷载流。近年来,各国学者开始重视交通荷载参数的随机性影响,对交通荷载流组成的一些重要参数的随机性进行了研究,取得一些成果,提出了个别参数的随机数学模型,但还很少做到交通荷载全要素都具有随机性的仿真模拟,更没有编制出能够真实模拟交通荷载随机车流的仿真模拟程序。在交通荷载各要素调查统计分析的基础上,编制交通荷载仿真模拟程序,生成一个各要素都随机且较为接近实际车流的仿真模型,这将为桥梁结构的各种分析研究提供很大的帮助。

4 结 语

公路交通车辆荷载是桥梁结构分析计算需考虑的主要荷载。在桥梁结构分析计算时,尤其在进行结构疲劳分析和时变可靠性分析时,选用的交通车辆荷载接近真实情况与否对分析计算结果的准确性有很大影响。若能建立一个适用于桥梁结构分析研究的交通荷载调查体系,全面得到桥梁结构分析所需要的各交通荷载特性参数,并对各参数进行详尽的统计分析,在此基础上,生成交通荷载仿真模拟车流用于桥梁结构各种相关分析研究,不仅能使计算结果更加贴近工程实际,还能很好地提高计算结果的精度,继而使得研究的结论能更好地对工程实践进行正确指导,因此,该研究工作将具有重大而深远

的意义。目前,交通荷载的调查研究在一些发达国家已较为成熟,建立了较为全面的调查体系。但在中国这方面的研究还处于相对落后的状态,尤其对于高速公路的交通荷载调查基本属于空白。中国交通部门已经注意到高速公路交通荷载调查的重要性,颁布了《国家高速公路网交通量调查观测站点布局规划》,将建立完善的国家高速公路交通量调查与信息服务体系。相信在未来几年,为建立适合公路桥梁荷载分析的交通荷载谱而进行实地交通荷载各要素的调查统计研究将会得到越来越多的重视。

参考文献:

References:

- [1] 王 涛. 高速公路桥梁交通荷载调查分析及仿真模拟[D]. 西安:长安大学,2010.
WANG Tao. Investigation Statistics and Simulation for Random Traffic Loading of Expressway Bridge[D]. Xi'an:Chang'an University,2010.
- [2] 周江评. 美国国家公共交通规划基础数据调查及其数据库[J]. 城市交通,2004,2(4):23-28.
ZHOU Jiang-ping. Survey and Datasets of Nationwide Public Transportation Planning Basic Data in U. S. [J]. Urban Transport of China,2004,2(4):23-28.
- [3] The Maine Department of Transportation. Traffic Volume Counts 2005 Annual Report[R]. Augusta: the Maine Department of Transportation,2006.
- [4] 刘军民. 日本的交通调查[J]. 交通与运输,2000(2):32-34.
LIU Jun-min. Traffic Survey of Japan[J]. Traffic & Transportation,2000(2):32-34.
- [5] 中华人民共和国交通部. 中德交流技术交流及交流工作座谈会[R]. 北京:中华人民共和国交通部,2002.
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technology Exchange and Work Forum on Traffic Investigation Between China and German[R]. Beijing:Ministry of Communications of the People's Republic of China,2002.
- [6] 王建军,严宝杰. 交通调查与分析[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
WANG Jian-jun, YAN Bao-jie. Traffic Survey and Analysis[M]. Beijing:China Communications Press,2004.
- [7] BS 5400-10: 1980, Steel, Concrete and Composite Bridges. Code of Practice for Fatigue[S].
- [8] 童乐为,沈祖炎,陈忠延. 城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J]. 土木工程学报,1997,30(5):20-27.
TONG Le-wei, SHEN Zu-yan, CHEN Zhong-yan. Fatigue Load Spectrum for Urban Road Bridges[J]. China Civil Engineering Journal,1997,30(5):20-27.
- [9] NOWAK A S. Live Load Model for Highway Bridges[J]. Structural Safety,1993,13(1/2):53-66.
- [10] NOWAK A S, NASSIF H, DEFRAIN L. Effect of Truck Loads on Bridges[J]. Journal of Transportation Engineering,1993,119(6):853-867.
- [11] NOWAK A S, FERRAND D M. Truck Load Models for Bridges [C]//BLANDFORD G E. Structures 2004—Building on the Past; Securing the Future. Nashville:ASCE,2004:1-10.
- [12] CREMONA C. Optimal Extrapolation of Traffic Load Effects[J]. Structural Safety,2001,23(1):31-46.
- [13] MIAO T J. Bridge Live Load Models with Special Reference to Hong Kong[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University,2001.
- [14] GINDY M. Development of a Reliability Based Deflection Limit State for Steel Girder Bridges[D]. New Brunswick: The State University of New Jersey,2004.
- [15] O'CONNOR A, O'BRIEN E J. Traffic Load Modeling and Factors Influencing the Accuracy of Predicted Extremes[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2005,32(1):270-278.
- [16] 李扬海,鲍卫刚,郭修武,等. 公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M]. 北京:人民交通出版社,1997.
LI Yang-hai, BAO Wei-gang, GUO Xiu-wu, et al. Structural Reliability for Highway Bridges and Probability-based Limit State Design[M]. Beijing: China Communications Press,1997.
- [17] O'CONNOR C, CHAN T H T. Dynamic Wheel Loads from Bridge Strains[J]. Journal of Structural Engineering,1988,114(8):1703-1723.
- [18] CHAN T H T, LAW S S, YUNG T H. An Interpretive Method for Moving Force Identification[J]. Journal of Sound and Vibration,1999,219(3):503-524.
- [19] LAW S S, CHAN T H T. Moving Force Identification; a Time Domain Method[J]. Journal of Sound and Vibration,1997,201(1):1-22.
- [20] LAW S S, CHAN T H T, ZENG Q H. Moving Force Identification; a Frequency and Time Domains Analysis[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control,1999,12(3):394-401.
- [21] LIN Y H, TRETHEWEY M W. Finite Element Analysis of Elastic Beams Subjected to Moving Dynamic Loads[J]. Journal of Sound and Vibration,1990,136(2):323-342.

- [22] 袁向荣,卜建清,满红高,等.移动荷载识别的函数逼近法[J].振动与冲击,2000,19(1):58-60,70.
YUAN Xiang-rong, BU Jian-qing, MAN Hong-gao, et al. Function Approaching Method in Moving Load Identification[J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(1): 58-60, 70.
- [23] FU G K, HAG-ELSAFI O. Vehicular Overloads: Load Model, Bridge Safety, and Permit Checking[J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(1): 49-57.
- [24] 梅刚,秦权,林道锦.公路桥梁车辆荷载的双峰分布概率模型[J].清华大学学报:自然科学版,2003,43(10):1394-1396,1404.
MEI Gang, QIN Quan, LIN Dao-jin. Bi-modal Probabilistic Model of Highway and Bridge Vehicle Loads[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(10): 1394-1396, 1404.
- [25] 郭彤,李爱群,赵大亮.用于公路桥梁可靠性评估的车辆荷载多峰分布概率模型[J].东南大学学报:自然科学版,2008,38(5):763-766.
GUO Tong, LI Ai-qun, ZHAO Da-liang. Multiple-peaked Probabilistic Vehicle Load Model for Highway Bridge Reliability Assessment[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(5): 763-766.
- [26] 铁摩辛柯 S. 工程中的振动问题[M]. 胡人礼,译.北京:人民铁道出版社,1978.
TIMOSHENKO S. Vibration Problems in Engineering[M]. Translated by HU Ren-li. Beijing: China Railway Publishing House, 1978.
- [27] 何度心.列车动载[J].地震工程与工程振动,1988,8(4):78-98.
HE Du-xin. Dynamic Loading of Driving Train on Bridges[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(4): 78-98.
- [28] WAARTS P H, VROUWENVELDER A A. Description of Vehicular Load on Bridge[R]. New York: TNO, 1991.
- [29] 周小猷.三塔悬索桥中塔鞍座主缆抗滑安全概率评价[D].上海:同济大学,2008.
ZHOU Xiao-yi. Probability Assessment for Slip Resistance of Main Cables on Middle Tower Saddles for a Three-tower Suspension Bridge[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [30] 韩万水,陈艾荣.随机车流下的风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[J].土木工程学报,2008,41(9):97-102.
HAN Wan-shui, CHEN Ai-rong. Three-dimensional Coupling Vibration of Wind-vehicle-bridge Systems Under Random Traffic Flow[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(9): 97-102.
- [31] 罗霞,杜进有,陈应文.混合车流交通流特性分析[J].西南交通大学学报,2000,35(3):297-300.
LUO Xia, DU Jin-you, CHEN Ying-wen. Analyses on Multi-traffic Flow's Characteristics[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(3): 297-300.
- [32] 罗霞,杜进有,霍娅敏.车头间距分布规律的研究[J].西南交通大学学报,2001,36(2):113-116.
LUO Xia, DU Jin-you, HUO Ya-min. Study on the Distribution Patterns of Time Headway of Vehicles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(2): 113-116.
- [33] 方健红,方旭华.用VB实现车流运行系统的仿真[J].浙江交通职业技术学院学报,2004,5(1):20-23.
FANG Jian-hong, FANG Xu-hua. The Simulation of Vehicles Circulation System by Visual Basic[J]. Journal of Zhejiang Vocational and Technical Institute of Transportation, 2004, 5(1): 20-23.
- [34] 王硕.桥梁运营荷载状况研究[D].上海:同济大学,2007.
WANG Shuo. Study on Load Condition for In-service Bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [35] 冯兆祥,张磊,吴冲.泰州长江大桥钢塔疲劳计算随机车辆荷载模拟[J].公路交通科技,2008,25(12):127-131.
FENG Zhao-xiang, ZHANG Lei, WU Chong. Simulation of Random Vehicle Load for Fatigue Calculation of Steel Pylon of Taizhou Yangtze River Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(12): 127-131.
- [36] 黄仰贤.路面分析与设计[M].余定选,齐诚,译.北京:人民交通出版社,1998.
HUANG Yang-xian. Pavement Analysis and Design[M]. Translated by YU Ding-xuan, QI Cheng. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [37] 邓学钧,黄晓明.路面设计原理与方法[M].北京:人民交通出版社,2001.
DENG Xue-jun, HUANG Xiao-ming. Principles and Methods of Pavement Design[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [38] GETACHEW A. Traffic Load Effects on Bridges: Statistical Analysis of Collected and Monte Carlo Simulated Vehicle Data[D]. Stockholm: Stockholm University, 2003.
- [39] 黄立葵,贾璐,万剑平,等.高速公路车辆横向分布特征[J].中南公路工程,2005,30(1):73-76.
HUANG Li-kui, JIA Lu, WAN Jian-ping, et al. Tra-

- verse Distribution Characteristics of Vehicles on Free-ways[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(1):73-76.
- [40] 周志坚,徐行军. 不同功能城市道路的车辆横向分布特征[J]. 交通标准化, 2008(8):150-153.
- ZHOU Zhi-jian, XU Xing-jun. Transverse Distribution Characteristics of Vehicles in Different Function Urban Road [J]. Communications Standardization, 2008(8):150-153.
- [41] 王春生. 铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估[D]. 上海:同济大学, 2003.
- WANG Chun-sheng. Assessment of Remaining Fatigue Life and Service Safety for Riveted Steel Bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [42] 刘 华,叶见曙,俞 博,等. 桥梁荷载横向分布系数计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(1):62-66.
- LIU Hua, YE Jian-shu, YU Bo, et al. Calculation Method of Transversal Distribution Factor for Bridge Load[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(1):62-66.
- [43] 王 达,刘 扬,黄平明. 随机车流作用下双曲拱桥车-桥耦合振动研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6):67-73.
- WANG Da, LIU Yang, HUANG Ping-ming. Research on Vehicle-bridge Coupled Vibration for Two-way Curved Arch Bridge Under Random Traffic Flow[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6):67-73.
- [44] 袁 明,余钱华,颜东煌. 基于车-桥系统耦合振动理论的大跨 PC 连续刚构桥冲击系数研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1):72-76, 120.
- YUAN Ming, YU Qian-hua, YAN Dong-huang. Research on Impact Coefficient for PC Continuous Rigid Frame Bridges with Long-span Under Theory of Vehicle-bridge System Coupling Vibration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1):72-76, 120.
- [45] 任伟平,李小珍,李 俊,等. 公轨两用钢桁桥轨道横梁与整体节点连接头的疲劳荷载[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1):79-84.
- REN Wei-ping, LI Xiao-zhen, LI Jun, et al. Fatigue Load of Welded Connections Between Rail Across Beams and Integral Joints of Combined Steel Truss Bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1):79-84.

《土木工程学报》2011 年征订通知

《土木工程学报》是中华人民共和国住房和城乡建设部主管,中国土木工程学会主办的土木工程类综合性学术期刊,以土木工程界中高级工程技术人员为主要读者对象;主要报道结构工程、土力学及基础工程、隧道及地下工程、公路桥梁工程等在科研、设计、施工等方面的重要成果及发展状况,重视刊登结合工程实践的论著,并报道行业综述、科技信息和动态,促进各国土木工程界的学术交流。

《土木工程学报》创刊于 1954 年 3 月,现为美国《工程索引》(Ei)收录期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊);被中国科学引文数据库、中国期刊网、中国学术期刊(光盘版)全文数据库等收录。

《土木工程学报》为月刊,大 16 开本,每期定价 25 元,全年共 300 元;国内外公开发行,国内邮发代号:2-582,国外发行代号:M288。《土木工程学报》2011 年征订工作已经开始,欢迎各界有关单位及个人订阅。

地 址:北京市三里河路 9 号建设部内 电 话:(010)58934211 网 址:www.cces.net.cn
邮 编:100835 传 真:(010)58933912 E-mail:tumuxuebao@263.net