

基于桥梁结构安全可靠性的车辆载重限值研究

朱 荣

(上海同济检测技术有限公司, 上海市 200092)

摘 要: 针对运营阶段桥梁汽车荷载限载管理问题,开展基于安全可靠性的车辆载重限值分析方法研究。通过实测车辆荷载数据统计,分析现阶段载重车辆类型及其荷载分布特征。根据车型比例、车辆超载情况,以及各车型轴组配置对结构响应的影响,建立桥梁限载的典型车型谱系。以可靠性理论为基础,从结构安全角度,提出基于可靠度反问题的车辆载重限值分析方法和计算步骤。

关键词: 桥梁结构;重型车辆;汽车限载;可靠性

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)06-0253-05

0 引言

桥梁的运营维护活动是形成对评估结果的管理对策。除了必要的加固维修以外,对不满足当前交通状况的桥梁进行适当的限载也是必要的管养手段。

欧美国家对桥梁通行汽车荷载限值问题的研究起步较早,并制定了符合其本国国情的车辆载重规制。其中,以美国的公路桥梁车辆载重标准体系最为完善。其基于应力超限率法,分别提出了 FBF B、TTI 和 TRB 等公式^[1-2]作为美国评估规范中法定车辆荷载(Legal Loads)和限定车辆荷载(Posting Loads)的理论依据。

我国的车辆载重标准最早是 1982 年开展的“交通运输技术政策研究”。根据当时路网的技术状况,从 1989 年实施的《公路工程技术标准》规定了单轴重 10 t 的限值标准,并作为我国公路、桥梁设计的轴载标准和限载依据沿用至今。

经历 30 多年的发展,虽然超重运输现象严峻,但公路桥梁等基础设施条件有了明显改善。目前的道路超载认定却不能准确地为桥梁的限载取值提供可靠的依据,也不利于合理地提升公路桥梁服务水平。为此,国内学者在超载桥梁安全性分析和限载方法等方面开展了相关的研究^[3-4],虽取得了一定的研究成果,但也存在一些不足之处:(1)未能提供桥梁结构安全的限载分析指标,合理的安全指标是构建桥梁限载分析的重要前提;(2)并没有提出比较完善

的限载分析理论,为在役桥梁安全管养提供合理的理论依据;(3)未能形成典型限载车型谱系,为桥梁限载管理提供现实依据。

现通过对实测车辆数据的统计,分析现阶段货车类型及其荷载分布特征,根据各载重车辆的超载情况和对桥梁结构的影响确定桥梁限载的典型车型。然后,以结构可靠性理论为基础,对基于桥梁安全运营的车辆载重限值分析方法进行研究,明确计算基本步骤。最后,通过算例,介绍本文提出的在役桥梁限载分析的实施过程。该项研究从桥梁结构安全运营的角度建立了车辆限载取值的方法,为重载交通下的桥梁管养提供理论依据。

1 车辆荷载调查及典型限载车型谱系

1.1 运营阶段车辆荷载特性

车辆荷载特性包含车重、轴重和轴距在内的描述车辆基本信息参数,是桥梁汽车荷载分析的重要参数,由一些典型车型构成。参考我国汽车制造行业标准,常见的货运车型大致可以划分为 10 种型式,按轴数分类主要包括二轴、三轴、四轴、五轴和六轴等五种类型^[5]。通过对车辆荷载数据进行的统计,可充分了解当前路线上的主力车型,各车型构成情况见表 1 所列。

可以看出:绝大多数的货车以二轴和六轴车为主,两者总和接近所有货车总量的 3/4,其中二轴货车占 48.9%,六轴车占 23.7%;三、四轴车代表车型包括自卸车和仓栅式载货车,占比不大,分别为 10.5%和 12.5%;五轴车所占比例最小,仅为 4.4%,代表车型为装载能力较小的拖挂车,主要用于重量较轻的货

收稿日期:2021-02-22

作者简介:朱荣(1984—),男,工学博士,工程师,从事桥梁施工控制与监测评估工作。

表1 车型分类及车型组成特性一览表

车型 编号	示意图	车型 比例 /%	轴数	轴型 比例 /%
T-1		48.9	2	48.9
T-2		8.5	3	10.5
T-3		2.0		
T-4		10.4	4	12.5
T-5		2.1		
T-6		4.2		
T-7		0.1	5	4.4
T-8		0.1		
T-9		14.0	6	23.7
T-10		9.7		

表2 车重和车辆超载情况一览表

车型 编号	车重/t			超载情况 /%		
	均值	标准差	最大值	超载 车比例	平均 超载率	最大 超载率
T-1	12.3	5.6	49.8	9.3	17.0	149
T-2	20.0	7.7	73.2	11.6	13.9	144
T-3	22.6	9.5	78.2	15.5	32.1	161
T-4	31.1	12.0	93.4	25.1	15.4	134
T-5	24.8	11.0	98.9	11.4	17.5	147
T-6	37.8	17.0	124.4	27.8	18.3	149
T-7	32.4	14.9	80.9	14.0	18.6	62
T-8	30.8	16.2	100.8	13.1	26.4	102
T-9	47.5	20.1	172.6	40.6	21.6	214
T-10	46.1	17.7	135.2	38.2	14.8	146

比例较大,且超载问题严重,是重型货车中需重点关注的车型;对于中型载重车,需重点关注四轴的T-4和三轴的T-3车型;虽然两轴车整体车重水平不高,但由于轴数较少,分担到单轴的重量较大,对于小跨径桥梁,过重的轴载也会带来极大的安全隐患,因此,二轴货车也需要考虑。

1.2 典型限载车型谱系

典型限载车型是桥梁限载分析的前提基础,表1所列代表了目前公路通行的大部分车型,由于车型类别较多,用于桥梁限载分析是相当繁琐的。为此,需要进行简化,提炼出一组最具代表性的车型,以此形成桥梁限载的车型谱系。

目前,车辆限载标准的普遍做法是根据轴型车辆(轴数)限制车重。现参考这种限载方式,具体方法如下:

首先,将表1中的10类车按轴数进行归类,对具有相同轴数的车辆,综合考虑其数量比例、车重及超载情况和对结构荷载效应等因素,确定一种最具代表性的车型作为限载模型车辆。

例如,四轴车有T-4和T-5两种车型,其荷载特性的比较见表3所列。从表3可以看出,T-4车型在数量上五倍于T-5,平均车重与超载车比例均大于T-5;而在平均超载率和最大超载率上,T-5略大10%左右。

对比两种车型在相同车重下的简支梁跨中弯矩和支点剪力效应,如图1所示。从图1可以看出,在相同车重下,车型T-4通过桥梁产生的荷载效应大

物运输。

各车型的车重和超载情况的统计见表2所列,超载车辆的认定基于目前国内的治超标准^[6],车辆超载率按照式(1)计算:

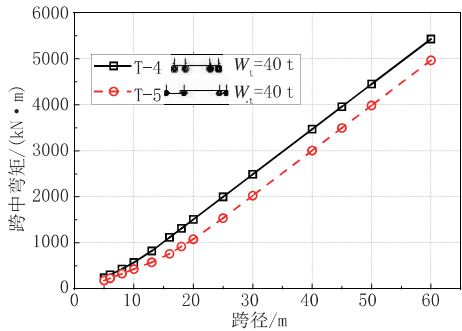
$$\text{超载率} = \frac{\text{车重} - \text{治超标准重}}{\text{治超标准重}} \quad (1)$$

从表2各车型的车重和超载情况分析看,六轴车的两种车型T-9和T-10,以及五轴的T-6超载车

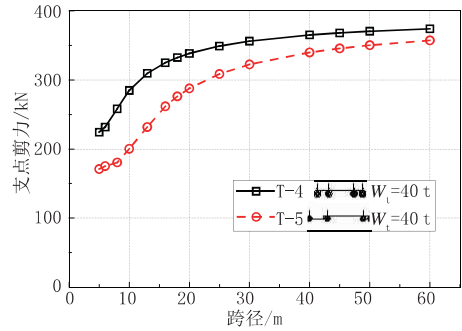
表 3 四轴车 T-4、T-5 车辆荷载特性比较一览表

车型	车辆数	平均车重	超载车比例	平均超载率	最大超载率
T-4/T-5	5 : 1	1.3 : 1	2.2 : 1	1 : 1.14	1 : 1.08

于 T-5, 说明四轴车中 T-4 轴重和轴距配置对结构受力不利。综上分析, 选择车型 T-4 为四轴车的限载模型车辆。



(a) 跨中弯矩



(b) 支点剪力

图 1 T-4、T-5 简支梁效应比较图(车重 $W_t=40\text{ t}$)

其次, 确定各代表限载车型的轴距、轴重与总重的分配关系。轴距根据表 1 统计结果获得; 轴重分配比例利用实测数据中的总重和轴重数据通过线性回归分析法确定。以 T-4 车型为例, 图 2 为该车型轴重与车重关系的线性回归图。

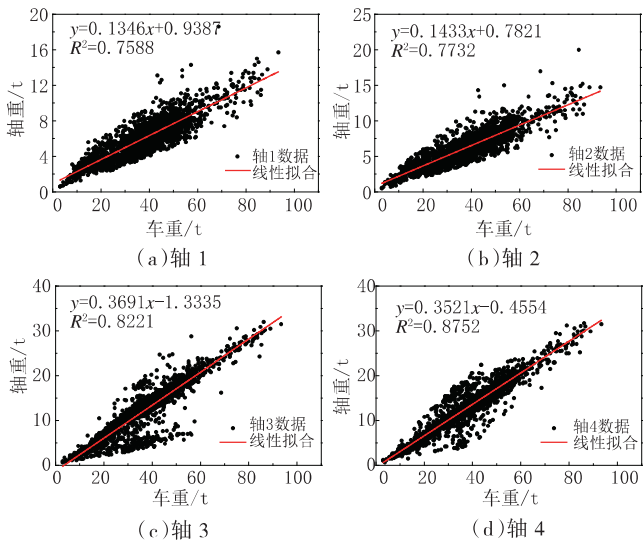


图 2 T-4 车型车重与轴重的关系图

从图 2 可以看出, 轴重线性回归拟合的可决系数 R^2 在 0.75 以上, 说明轴重与总重比例关系与线性函数评价之间的相关性较好。最终, 得到四轴车型的轴重分配比例为 0.14 : 0.16 : 0.35 : 0.35。

最后, 按照与设计荷载效应等效的原则确定每类模型车辆的标准额定车重。选取公路 -I 级汽车荷载作用下, 中小跨径桥梁跨中弯矩或支点剪力效应标准值为等效的荷载效应, 计算公式为:

$$W_Q = \frac{M_D}{M_u} \quad (2)$$

式中: W_Q 为模型车辆额定车重; M_D 为公路 -I 级汽车荷载作用下的荷载效应标准值; M_u 为模型车辆在单位车重下的荷载效应。

根据上述方法, 将表 1 轴数相同的各类车型进行合并, 重新定义成 5 个车型类别组成的限载车辆谱系, 如表 4 所列。为了使模型车辆的荷载参数简洁和应用上的方便, 车辆轴重取 5kN 的整数倍, 轴距取 0.1 m 的整数倍。

表 4 限载模型车辆额定荷载谱系一览表

模型车编号	轴数	图示(轴重:kN, 轴距:m)	总重 W_Q /kN
M-2	2		350
M-3	3		390
M-4	4		440
M-5	5		520
M-6	6		550

2 基于安全可靠性的车辆载重限值分析方法

2.1 载重限值的可靠性分析方法

结构的可靠性反映的是结构的承载能力与荷载效应间大小的随机比较, 用概率的方法来描述结构完成预定功能的能力。对于既有桥梁的汽车限载分析, 是根据预设的目标可靠度和已知的结构承载能力和恒载效应反算出允许通行的最大汽车荷载效应, 属于可靠性反问题的范畴^[7]。

所谓可靠性反问题, 可以看作是在指定可靠指标的前提下, 求解极限状态方程中影响结构的随机变量统计参数, 这些统计参数通常包括随机变量的均值或标准差。

对于给定的目标可靠指标 β_T 和极限状态方程

$G(x)=0, X=(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, \xi)$ 是由若干个服从任意分布且相互独立的随机变量, $U=(u_1, u_2, \dots, u_{n-1}, u_\xi)$ 为通过当量正态化后的标准正态分布变量, 其中 ξ 为待求的随机变量。可靠性反问题可描述成为求解随机变量 ξ 的参数(均值 μ_ξ 或标准差 σ_ξ), 使满足:

$$\begin{cases} \min(U^T U) = \beta_T^2 \\ G(U) = g(x_i, \xi) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

用JC法进行可靠度分析时, 可靠指标定义为标准正态空间内坐标原点到极限状态曲面的最短距离, 将极限状态功能函数在 U^* (验算点)进行Taylor级数展开, 近似地取一阶项, 为:

$$Z = G(u_1^*, u_2^*, \dots, u_{n-1}^*, u_\xi^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial G}{\partial u_i} (u_i - u_i^*) = 0 \quad (4)$$

由于设计验算点在极限状态曲面上, 因而有 $g=(u_1^*, u_2^*, \dots, u_{n-1}^*, u_\theta^*)=0$, 则可靠指标表示为:

$$\beta = \mu_z / \sigma_z = \left(- \sum_{i=1}^n \frac{\partial G}{\partial u_i} \bigg|_{u^*} u_i^* \right) / \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G}{\partial u_i} \bigg|_{u^*} \right)^2} \quad (5)$$

验算点 u^* 的诸坐标 u_i^* 表达式为:

$$u_i^* = \beta \cos \theta u_i \quad (6)$$

其中, $\cos \theta u_i$ 为法线 OU^* 对坐标向量的方向余弦:

$$\cos \theta u_i = \left(- \frac{\partial G}{\partial u_i} \bigg|_{u^*} \right) / \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G}{\partial u_i} \bigg|_{u^*} \right)^2} \quad (7)$$

给定 U 和 ξ 的初始值 $U_{(0)}$ 和 ξ_0 , 设 ξ 为待求参数, 将极限状态方程在初值 ξ_0 处进行Taylor展开, 仅保留一次项:

$$G(u, \bar{\xi}) = G(U_0, \xi_0) + \frac{\partial G(U_0, \xi_0)}{\partial \xi} (\bar{\xi} - \xi_0) \quad (8)$$

$$\bar{\xi} = \xi_0 - \frac{G(U_0, \xi_0)}{(\partial G(U_0, \xi) / \partial \xi) \big|_{\xi_0}} \quad (9)$$

由上述公式求得一个新的向量 $U_{(i)}$, 同时满足 $U_{(i)}^T U_{(i)} = \beta_T^2$, 继而得到新的 ξ 值, 重复式(8)和式(9)的计算过程, 直至 U 和 ξ 全部收敛。

参照可靠性反问题的求解方法, 车辆限载取值的计算步骤总结如下:

(1)确定结构构件限载分析的抗力 R 和恒载效应 S_G 的概率分布和统计参数、汽车效应 S_Q 的概率分布类型、变异系数 δ_Q 与平均值系数 K_Q , 并给定目标可靠指标 β_T ;

(2)将抗力及荷载效应随机变量进行当量正态化, 转换为标准正态空间下的随机变量;

(3)在规定的组合效应组合下, 建立极限状态方程, 按照上述单参数可靠性反问题的计算方法, 求解

出汽车效应平均值 μ_Q ;

(4)由公式 $S_Q = \mu_Q / K_Q$ 求得汽车效应标准值 $S_{QK, P}$, 最后, 根据 $S_{QK, P}$ 确定各限载车型的车重限值 W_P 。

一般认为, 车辆的轴重与总重保持一定的比例关系不变, 即典型限载模型车辆的荷载效应与其车重成线性关系。基于这一假定, 已知典型限载模型车辆的荷载效应 S_Q , 即公路-I级荷载标准值效应, 引入限载系数 $\xi_q = S_{QK, P} / S_Q$, 通行车辆的限载值 W_P 按下式进行计算:

$$W_P = \xi_q W_Q = \frac{S_{QK, P}}{S_Q} \quad (10)$$

3.2 在役桥梁的车重限值分析方法

与在役桥梁评估相似, 车辆限载分析应体现运营桥梁的“在役性”特征, 即要体现桥梁的自身技术状况, 还需考虑管理者对桥梁的管养需求。管养需求一方面反映结构在运营中必须满足的使用性能要求, 同时又符合管理者对运营风险的承受能力, 并受投资效益的制约。就安全和经济两方面而言, 管养需求可表征为可靠指标的合理选取。

可靠指标的大小反映结构失效风险水平。在现行设计规范中, 可靠指标一般在2.0~5.0范围内进行取值, 以满足不同失效后果和安全措施成本的结构构件功能要求。就限载取值而言, 可以预计, 较大的可靠指标, 使车辆的限载取值小, 结构的运营风险减小, 维护费用降低, 线路运输经济效益降低; 反之, 车辆的限载取值大, 虽增加经济效益, 但增加结构的失效概率、增加维护费用。

实际上, 在役桥梁车辆限载主要是保证结构运营的安全性问题, 因而, 可靠指标取用可与结构设计或安全性评估要求相一致。对已运营一段时间的在役桥梁, 根据自身结构的技术状况, 和特定的交通荷载环境, 设置不同的目标可靠指标。因此, 现建议:

对于技术状况良好, 且能满足当前交通通行需求的桥梁, 从结构耐久性和减少维护成本上考虑, 宜维持设计的可靠指标。

对于技术状况较差, 不能满足当前通行要求的桥梁, 在保障运营安全前提下, 适当降低结构使用要求, 使运输经济效益最大化, 建议在设计可靠指标上减1.0。

对于特定桥梁车辆限载分析步骤总结如下:

(1)确定限载分析的效应模式, 如抗弯、抗剪等。

(2)在规定的组合效应组合下, 建立极限状态方程, 并给定限载目标可靠指标 β_T 。

(3)通过对结构的检测和计算分析,确定结构在当前状况下的承载力 R_{nd} , 抗力 R 和恒载效应 S_G 的概率分布和统计参数, 活载效应 S_Q 的概率分布、变异系数 δ_{S_Q} 与平均值系数 K_{S_Q} 。

(4)利用可靠性反问题的计算方法,求解出满足目标可靠指标 β_T 的活载效应平均值 μ_{S_Q} , 由公式 $S_{QK}=\mu_{S_Q}/K_{S_Q}$ 求得汽车效应标准值 S_{QK} ,最后,根据 S_{QK} 确定各限载车型的车重限值 W_{LV} 。

4 算例分析

某 16 m 钢筋混凝土简支 T 梁, 横向布置 5 片 T 梁, 计算跨径 15.5 m, 设计荷载等级为公路 -I 级。主梁采用 C30 混凝土, 纵向主筋采用 HRB335 级钢筋。桥梁的横向断面构造如图 3 所示。

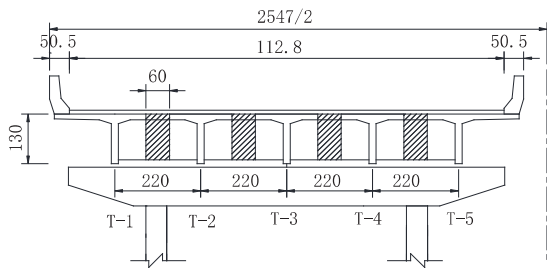


图 3 16 m T 梁跨中横断面图(单位:cm)

选择跨中截面正弯矩为控制效应, 抗力和效应的概率模型及参数可以根据检测结果经计算得到, 计算方法可参考相关文献^[8, 9], 本文不再赘述。抗力和效应的概率模型和统计参数见表 5 所列。

分别按照设计要求的目标可靠指标 $\beta_T=4.7$ 和降低结构使用要求 $\beta_T'=3.7$ 进行限载。计算得到各片梁满足限载可靠指标的汽车荷载效应标准值 $S_{QK,P}$, 见表 6 所列。

从表 6 数据可以看出, 边梁 T-1 的状况最为不利, 根据设计汽车荷载效应标准值 S_Q (见表 5), 计算

表 6 限载汽车效应计算表

限载可靠指标	参数类型	T 梁编号				
		T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
$\beta_T=4.7$	效应平均值 $\mu_{S_{Q,P}}$	1 098	1 108	901	1 150	1 161
	效应标准值 $S_{QK,P}$	1 445	1 458	1 186	1 514	1 528
	限载系数 ξ_i	1.13	1.61	2.01	1.67	1.20
$\beta_T=3.7$	效应平均值 $\mu_{S_{Q,P}}$	1 475	1 483	1 256	1 538	1 557
	效应标准值 $S_{QK,P}$	1 940	1 951	1 652	2 024	2 049
	限载系数 ξ_i	1.52	2.16	2.80	2.24	1.60

得到最小限载系数 ξ_i 分别为 1.13 和 1.52, 由此确定车型的车重限值见表 7 所列。对于六轴拖挂车, 允许的最大车重分布为 620 kN 和 835 kN。

表 7 16 m 简支 T 梁车重限值表

限载可靠指标	限载系数	车重限值 /kN				
		M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
设计 $\beta_T=4.7$	$\xi_{4.7}=1.13$	400	440	500	585	620
评估 $\beta_T=3.7$	$\xi_{3.7}=1.52$	530	590	670	790	835

4 结 论

从桥梁结构安全运营的角度, 利用可靠度反问题的求解方法, 提出了桥梁限载分析及限载车辆荷载模型。主要的研究结论如下:

(1)通过实测的车辆荷载数据统计, 分析了载重车辆组成及车重与轴重分布特征。根据车型比例、车辆超载情况, 以及轴组配置等因素对结构响应的影响, 按轴型分类建立了桥梁限载分析的典型车型谱系。

表 5 抗力和效应统计参数表

效应类型	分布类型	参数类型	T 梁编号				
			T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
抗力	对数正态分布	均值 μ_{Rd} /kN·m	4671	4 729	4 812	4 890	4 840
		变异系数 δ_{Rd}	0.126 3	0.125 3	0.124 3	0.118 4	0.118 5
		标准值 R_k /kN·m	3 656	3 589	3 673	3 695	3 813
恒载	正态分布	均值 μ_{SG} /kN·m	750	677	677	677	750
		变异系数 δ_{SG}	0.043 1	0.043 1	0.043 1	0.043 1	0.043 1
		标准值 S_{Gk} /kN·m	739	667	667	667	739
活载	极值 I 型分布	变异系数 δ_{SQ}	0.151 5	0.151 5	0.151 5	0.151 5	0.151 5
		平均值系数 K_Q	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
公路 -I 级汽车效应标准值 S_Q /kN·m			1 278	904	590	904	1 278

(下转第 281 页)

青的低温 PG 分级提升约 1 个等级,说明胶粉对胶粉复合 SBS 改性沥青的低温性能贡献很大。

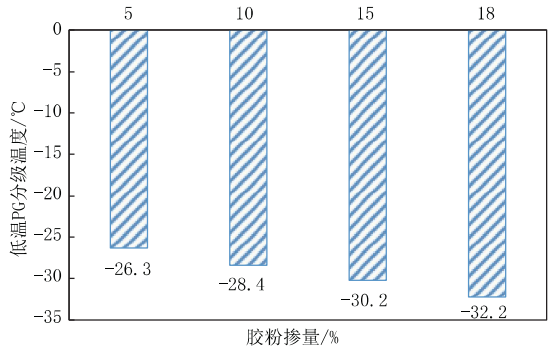


图 4 不同掺量胶粉复合 SBS 改性沥青的低温 PG 分级结果

3 结 语

(1)随着胶粉掺量的增加,橡胶改性沥青的弯曲蠕变劲度模量 S 值逐渐下降,蠕变速率 m 值逐渐增加,沥青逐渐变软,低温变形以及应力消散能力逐渐提升,低温性能逐渐提升。当胶粉掺量达到 18%时,橡胶改性沥青低温 PG 分级提升 1 个等级。

(2)对于胶粉复合 SBS 改性沥青,SBS 加入后,其弯曲蠕变劲度模量 S 值稍有提高,然而蠕变速率 m

值也增加,说明 SBS 的加入使得沥青变硬的同时,也提升了其低温变形以及应力消散能力。

(3)对于胶粉复合 2% SBS 改性沥青,当胶粉掺量从 5%增加至 18%时,其低温弯曲蠕变劲度模量 S 降低约 50%,沥青的低温 PG 分级可提升约 1 个等级。

参考文献:

[1] 张晓亮,陈华鑫,张奔,等.不同来源橡胶粉对橡胶沥青性能影响[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):1-8.

[2] 余波,施晓强,陈钊,等.废旧橡胶粉掺量对橡胶沥青高低温及疲劳性能影响研究[J].石油沥青,2015,29(2):30-33.

[3] 李波,王静,曹贵,等.废旧胶粉特性对橡胶沥青高温性能的影响机理[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(2):347-355.

[4] 黄卫东,高川,李昆.橡胶沥青混合料疲劳性能影响因素研究[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(12):1608-1604.

[5] 黄明,汪翔,黄卫东.橡胶沥青混合料疲劳性能的自愈合影响因素分析[J].中国公路学报,2013,26(4):16-22,35.

[6] 陈子建.橡胶沥青低温性能研究[J].公路,2010(6):185-187.

[7] 孙雪伟,唐颂,王建军,等.橡胶沥青低温延度影响因素研究与分析[J].中外公路,2010,30(5):310-313.

[8] 胡苗,弥海晨,郭平.SBS 复合改性橡胶沥青试验研究[J].石油沥青,2014,28(6):20-23.

(上接第 257 页)

(2)基于可靠度反问题的求解方法提出了桥梁限载分析方法,引入限载系数表示限载车重与设计汽车荷载之间的关系,并建立了在役桥梁安全运营的车辆限载分析步骤。

(3)通过算例,介绍了本文提出的在役桥梁限载分析的实施过程。结果表明,本文提出的车辆载重限值的取值方法能够很好地体现结构可靠性思想,对桥梁限载决策的制定更具有科学的指导意义。

参考文献:

[1] James R W, Noel J S, Furr H L, et al. Proposed new truck weight limit formula [J]. Journal of Structural Engineering. 1986, 112(7): 1589-1604.

[2] Ghosn M. Legal Truck Loads and AASHTO Legal Loads for Posting

[J]. Nchrp Report. 2007.

[3] 王硕.桥梁运营荷载状况研究[D].上海:同济大学,2007.

[4] 宗雪梅,胡大琳,高军.桥梁超重荷载与限载标准的确定[J].长安大学学报(自然科学版). 2008, 28(001): 60-65.

[5] Han W, Wu J, Cai C S, et al. Characteristics and Dynamic Impact of Overloaded Extra Heavy Trucks on Typical Highway Bridges [J]. JOURNAL OF BRIDGE ENGINEERING. 2015, 20(050140112).

[6] 中华人民共和国交通部,中华人民共和国公安部.关于在全国开展车辆超限超载治理工作的实施方案[Z]. 2004.

[7] Hong L, Foschi R O. An inverse reliability method and its application[J]. Structural Safety. 1998, 20(3): 257-270.

[8] 聂瑞锋.在役 RC 简支梁桥结构当前状态体系可靠性关键问题研究[D].上海:同济大学,2015.

[9] 赵国藩,曹居易,张宽权.工程结构可靠度[M].北京:科学出版社,2011.