

文章编号:1001-7372(2020)01-0069-10

中小跨径公路混凝土简支梁桥冲击系数研究及建议取值

邓 露^{*1,2}, 陈雅仙¹, 韩万水³, 王 维¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为弥补中国现行桥梁规范中计算动力冲击系数时考虑因素单一的不足,对冲击系数的影响因素进行研究,并提出更合理的冲击系数建议值。首先,根据中国桥梁通用图集建立 13 座不同截面形式和不同跨径的常见中小跨径公路混凝土简支梁桥的有限元模型,结合能表征中国设计车辆荷载动力特性的三维车辆数值模型,建立车桥耦合振动分析系统。然后,基于车桥耦合振动分析系统,研究桥梁基频、桥面不平度、车速和车质量等因素对动力冲击系数的影响,并与中国现行桥梁设计规范中的动力冲击系数取值进行对比分析。最后,提出冲击系数的建议值,并与世界各国桥梁规范中的冲击系数取值进行对比,讨论建议值的合理性。结果表明:桥面不平度是影响冲击系数的重要因素,在桥面好的情况下,冲击系数均在 0.1 以下,低于规范中规定的冲击系数,而桥面很差时,冲击系数可达 0.5,远大于中国现行规范中的冲击系数设计值,因此,定期对桥面进行维护能有效减小车辆对桥梁的冲击效应;质量轻的车辆引起更大的冲击系数,但由于车辆总质量轻,其导致的总荷载效应仍然较小,而重车虽然引起的冲击系数较小,但由于其导致的总荷载效应较大,更易对桥面造成损伤,因此,限制超载尤为重要。

关键词:桥梁工程;中小跨径桥梁;数值模拟;车桥耦合振动;冲击系数;桥面不平度

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A

Studying Impact Factors for Short-and Medium-span Simply Supported Concrete Highway Bridges and Its Suggested Values

DENG Lu^{*1,2}, CHEN Ya-xian¹, HAN Wan-shui³, WANG Wei¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Currently, only a single factor affecting the impact factor (IM) in calculations is considered in bridge design code in China. To compensate for this drawback, in this study, the factors that affect the IM were investigated and more reasonable IMs were proposed. First, the finite element models of 13 short-and medium-span simply supported concrete highway bridges with different cross-sections and spans were built based on a general atlas of bridges in China. A three-dimensional (3D) vehicle model that can represent the dynamic property of vehicle design load was adopted for vehicle loading. A 3D vehicle-bridge coupled system was then developed.

收稿日期:2018-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51478176);湖南省杰出青年科学基金项目(14JJ1014)

* 作者简介:邓 露(1984-),男,湖南双峰人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:denglu@hnu.edu.cn.

With this system, the effect of four important factors—the fundamental frequency of the bridge, road surface condition (RSC), vehicle speed, and vehicle weight—on the IM were investigated. The IMs obtained from numerical simulations were compared with the IMs specified in the bridge design code. Based on the numerical results, the suggested IM values were proposed and compared with the IMs specified in the bridge design code of countries globally. In addition, the rationality of the proposed IMs was discussed. The results demonstrated the following: the RSC has a significant effect on the IM. The IM is less than 0.1 when the RSC is in a good state. However, the IM can reach 0.5, which is much greater than the IM specified in the bridge design code, when the RSC is in a very poor state. Therefore, regular maintenance of the deck can effectively reduce the impact of the vehicle on the bridge. Lighter vehicles tend to generate greater IM values, but the overall loading effect caused by light vehicles remains small. Although the IM caused by heavy vehicles is small, the overall loading effect caused by heavy vehicles is greater, which causes greater damage to the bridge deck. Therefore, limiting overload is particularly important.

Keywords: bridge engineering; short-and medium-span bridges; numerical simulation; vehicle-bridge coupling vibration; impact factor; deck roughness

Received 26 Sept. 2018

Funding: National Natural Science Foundation of China (51478176); Excellent Youth Foundation of Hunan Scientific Committee (14JJ1014)

* Corresponding author. *E-mail address:* denglu@hnu.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.01.007>

0 引言

移动车辆荷载引起的桥梁振动一直是桥梁界关注的重要问题之一。由于桥面不平整等因素的影响,行驶的车辆会对桥梁产生动力冲击效应,增大桥梁的动力响应。桥梁设计中这种冲击效应通常用动力冲击系数(IM)来表征。IM是桥梁设计和评估中的重要参数。然而,车辆和桥梁的振动受多个因素的影响,相互作用机理非常复杂,因而准确地评估动力冲击系数并非易事。很多学者针对车辆荷载作用下桥梁的动力响应进行了研究,然而在该问题的一些认识上尚未达成共识^[1-4]。

研究公路桥梁动力冲击系数的方法主要有现场试验和数值模拟。现场试验是准确获取冲击系数最可靠的方法。20世纪50年代开始,北美及澳洲等进行了较大规模的现场试验,为其规范中冲击系数的取值提供了依据^[2]。然而,现场试验存在成本高、影响交通等缺点。随着计算机运行能力的不断提高和商业有限元软件的日臻成熟,基于复杂的三维车辆和桥梁模型,国内外许多学者利用数值模拟研究了桥梁跨径和基频、桥梁类型、桥面不平整度、车质量和车速等多个因素对冲击系数的影响,研究成果

对车桥振动的科研和工程实践具有重要的指导意义^[5-8]。值得注意的是,目前国际上大多数相关研究通常基于Wang等^[9]提出的三轴车模型和Harris等^[10]、O'Brien等^[11]提出的五轴车模型。Wang等^[9]提出的三轴车模型源于美国AASHTO桥梁设计规范中的HS20-44卡车,Harris等^[10]提出的五轴车模型则基于一种典型的欧洲卡车,而O'Brien等^[11]提出的五轴车模型的参数取值则是以大量欧洲卡车的统计数据为依据。中国公路车辆荷载与欧美国家存在较大的区别,因此这些车辆动力学模型不一定能很好地代表中国车辆荷载的实际情况。

目前,各国桥梁规范在IM的计算和取值上存在较大的差异。日本1996年版公路协会颁发的公路桥梁规范定义IM为桥梁跨径的函数。美国2017年版AASHTO桥梁设计规范中IM的取值根据极限状态和构件类型而定,一般构件在强度极限状态和疲劳极限状态分析中采用的IM取值分别为0.33和0.15。加拿大1991年版公路桥梁设计规范中规定IM的取值与车轴数相关。英国2006年版BS5400桥梁规范采用的IM取值都是0.25。澳大利亚2004年版AS5100桥梁设计规范规定IM的取值根据车辆荷载配置而定。中国现行规范《公路桥

涵设计通用规范》(JTJ D60—2015)(以下简称 15 规范)规定 IM 是关于桥梁基频的函数,对其他一些情况,比如局部加载也做了规定。15 规范中关于动力冲击系数的计算公式是基于吉林省交通科学研究所对 7 座不同跨径的桥梁测试收集的 6 600 多个实测数据通过统计回归分析获得的^[12]。从上述对比可知,由于各国的桥梁设计荷载标准、交通状况以及工程安全储备等存在差异,不同国家的桥梁规范对 IM 的规定各不相同。

中国现行桥梁设计规范中仅将冲击系数定义为桥梁基频的函数,并未体现一些重要的影响因素对冲击系数的变化规律,而这些因素具有较强的不确定性,从而使得实测冲击系数与规范取值存在一定的差异^[13]。施尚伟等^[13]通过 66 座桥梁的 IM 样本数据发现,实测冲击系数大多在 89 规范与 04 规范设计值之间。殷新锋等^[14]测出超出规范设计值的 IM。也有学者通过实测冲击系数回归分析得出中国现行规范取值过于保守的结论^[15-16]。李炜明等^[17]定义了桥面不平顺谱放大系数,研究表明车速及桥面平整度等级对车-桥系统放大效应影响显著。规范中规定的冲击系数计算公式和取值并不能准确地描述桥梁实际的冲击系数,需综合考虑各因素的影响^[13,17]。

为了研究各个因素对冲击系数的影响并提出适合中国实际情况的冲击系数,根据中国《公路桥梁结构上部构造系列通用设计图》(2010 年版)建立 13 座标准跨径的桥梁模型,采用能代表中国设计车辆荷载的三维车辆数值模型,考虑到桥梁基频、桥面平整度、车质量、车速是影响车桥耦合振动强度的重要因素^[3-4],基于车桥耦合振动分析模型研究这些因素对冲击系数的影响规律。最后,提出中国中小跨径公路混凝土简支梁桥 IM 的建议值,并通过与其他各国规范中的 IM 取值对比,讨论其合理性。

1 数值模拟

1.1 桥梁模型和基频

基于中国 2010 年版公路桥梁通用图集选取 13 座代表性的中小跨径预应力混凝土简支梁桥,包括 5 座板梁桥、5 座 T 梁桥和 3 座小箱梁桥,桥梁的截面形式如图 1 所示,桥梁的基本参数如表 1 所示。利用有限元软件 ANSYS 中的 Solid 185 单元建立了桥梁的三维有限元模型。考虑了厚度为 10 cm 的沥青混凝土铺装层,以节点耦合的方式与桥面板连接。由于已有研究表明预应力对 IM 影响不大^[18],

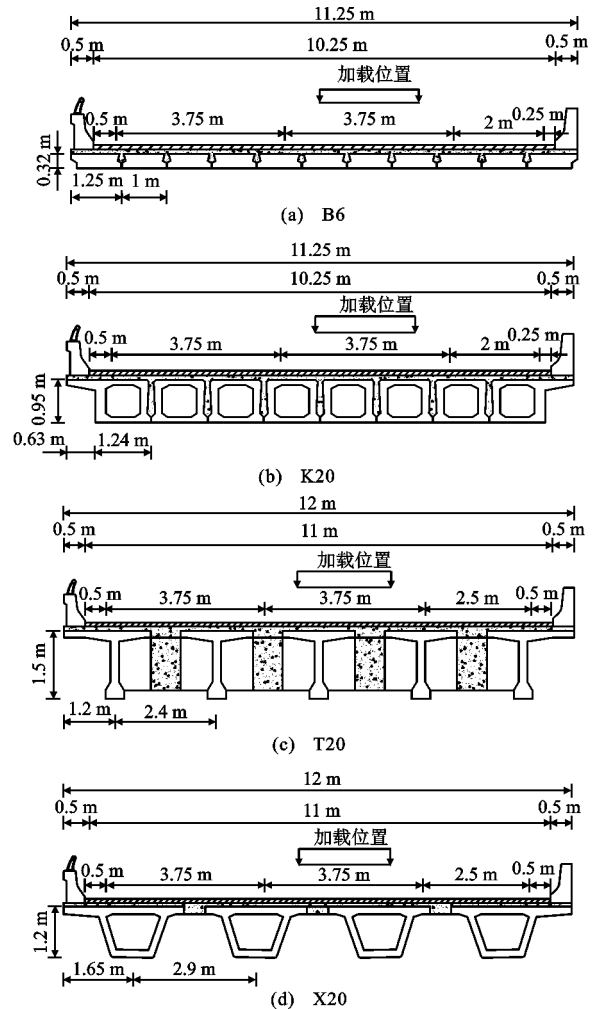


图 1 桥梁横截面和车辆加载位置

Fig. 1 Cross Sections of Bridges and Loading Positions of Vehicle

表 1 桥梁基本参数

Table 1 Basic Parameters of Bridges Under Consideration

编号	跨径/m	基频/Hz	截面类型	梁高/m	IM 设计值
B6	6	17.18	板梁	0.32	0.45
K10	10	11.62	空心板	0.60	0.42
K13	13	8.05	空心板	0.70	0.35
K16	16	6.10	空心板	0.80	0.30
K20	20	4.60	空心板	0.95	0.25
T20	20	5.87	T 梁	1.50	0.30
T25	25	4.43	T 梁	1.70	0.25
T30	30	3.73	T 梁	2.00	0.22
T35	35	3.21	T 梁	2.30	0.19
T40	40	2.95	T 梁	2.50	0.18
X20	20	5.11	箱梁	1.20	0.27
X30	30	3.17	箱梁	1.60	0.19
X40	40	2.34	箱梁	2.00	0.13

故本文桥梁建模过程中未考虑预应力。桥梁模型一端约束了竖向、纵向和横向 3 个方向的自由度,另一

端约束了竖向和横向 2 个方向的自由度。以跨径为 20 m 的 T 梁桥为例,所建立的有限元模型如图 2 所示。基于模态分析得到了各桥梁的基频。根据 15 规范计算得到各桥梁的动力冲击系数取值,如表 1 所示。

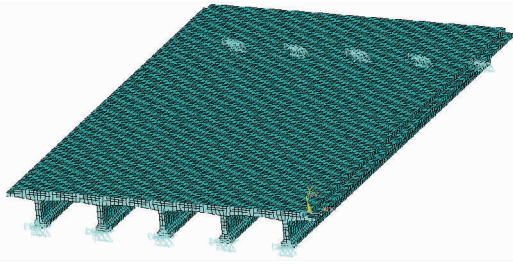


图 2 T20 桥梁有限元模型

Fig. 2 Finite Element Model for Bridge T20

1.2 车辆模型

车辆模型采用文献[19]中能代表中国设计车辆

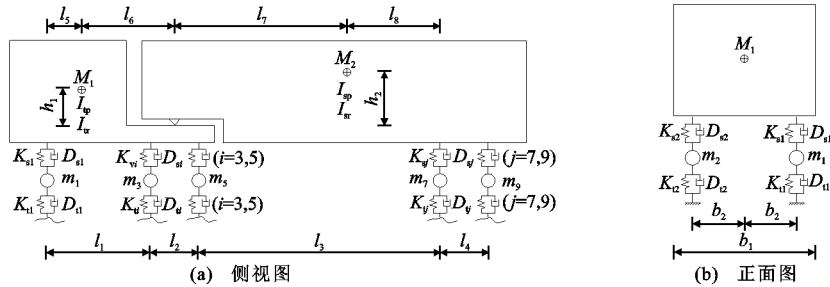


图 3 车辆模型示意

Fig. 3 Illustration of Vehicle Model

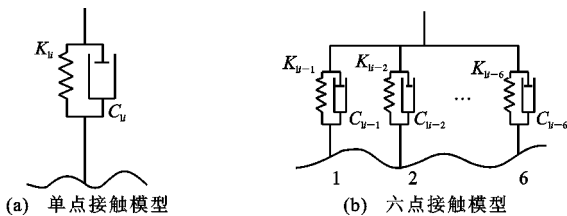


图 4 车轮与桥面的接触模型

Fig. 4 Single-point and Multi-point Contact Models

1.3 桥面不平整度

桥面不平整度是引起车桥振动的主要激励。国际标准化组织(ISO)将桥面不平整度划分为 5 个等级,即“很好”“好”“一般”“差”“很差”[21]。在数值模拟中,桥面不平整度的生成通常被假定为均值为 0 的高斯随机过程,可通过功率谱密度函数的傅里叶逆变换生成[22]。桥面不平整度的表达式为

$$r(x) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2\varphi(n_k)} \Delta n \cos(2\pi n_k x + \theta_k) \quad (1)$$

式中: θ_k 为从 $0 \sim 2\pi$ 均匀分布的随机相位角; $\varphi(n_k)$ 为桥面不平整度功率谱函数; n_k 为波的个数; Δn 为空间频率采样间距。

荷载和实际卡车动力特性的具有 15 个自由度的五轴车辆模型,如图 3 所示。该车辆模型为目前国际上常用的质量-弹簧-阻尼模型。车轮与桥面的接触则采用多点接触模型。为方便观看,图 3 中车轮与地面的接触并没有画成多点接触模型。图 3 中车辆模型各参数基于中国大量的卡车统计参数通过分析计算确定,车辆模型的合理性已进行了验证[19]。车辆模型的详细参数如表 2 所示。

在数值模拟中,车轮与桥面之间的相互作用通常被假定为单点接触相互作用[图 4(a)]。然而,研究表明单点接触模型虽然简单,但可能高估了车辆荷载对桥梁的动力效应,而采用车轮与桥面多点接触模型能更准确地反映车轮与桥面接触的真实情况[20]。基于参数研究,文献[20]指出六点接触模型具有很好的准确性和稳定性。因此,本文采用车轮-桥面六点接触模型,模型如图 4(b)所示。

ISO-8608 中规定功率谱函数表达式为

$$\varphi(n) = \varphi(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-2} \quad n_1 < n < n_2 \quad (2)$$

式中: n 为空间频率; n_0 为 $(1/2)\pi$ 的间断频率; $\varphi(n_0)$ 为桥面不平整度系数,与桥面状况有关; n_1 和 n_2 分别为截止频率的上、下限。

为消除桥面不平整度生成过程的随机性对计算结果的影响,在每种桥面等级下,生成 20 个随机桥面,并进行车桥耦合振动数值模拟,然后取这 20 次运算结果的平均值作为冲击系数的计算值。不同等级下桥面不平整度的示意如图 5 所示。

1.4 车桥耦合动力响应求解理论

将车辆-桥梁视为 2 个振动子系统,通过接触点的位移协调条件与相互作用力的关系,建立耦合振动系统的动力学方程,即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b \\ \mathbf{M}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{a}}_b \\ \ddot{\mathbf{a}}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b + \mathbf{C}_{b-b} & \mathbf{C}_{b-v} \\ \mathbf{C}_{v-b} & \mathbf{C}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{a}}_b \\ \dot{\mathbf{a}}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_{b-b} & \mathbf{K}_{b-v} \\ \mathbf{K}_{v-b} & \mathbf{K}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_b \\ \mathbf{d}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_b \\ \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_G \end{bmatrix} \quad (3)$$

表 2 中国典型五轴车模型参数

Table 2 The Parameters of Chinese Vehicle Model

模型	参数	取值
车体 1	质量 M_1/kg	2 276.5
	俯仰转动惯量 $I_{1p}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	20 196
	侧倾转动惯量 $I_{1r}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 189.2
车体 2	质量 M_2/kg	45 246
	俯仰转动惯量 $I_{2p}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	285 990
	侧倾转动惯量 $I_{2r}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	43 512
一轴	悬挂质量 $m_1, m_2/\text{kg}$	700
	悬架刚度 $K_{s1}, K_{s2}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	300
	悬架阻尼 $D_{s1}, D_{s2}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	10
	轮胎刚度 $K_{t1}, K_{t2}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 500
	轮胎阻尼 $D_{t1}, D_{t2}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3
二轴、三轴	悬挂质量 $m_3 \sim m_6/\text{kg}$	1 000
	悬架刚度 $K_{s3} \sim K_{s6}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 000
	悬架阻尼 $D_{s3} \sim D_{s6}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	53
	轮胎刚度 $K_{t3} \sim K_{t6}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	3 000
	轮胎阻尼 $D_{t3} \sim D_{t6}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3
四轴、五轴	悬挂质量 $m_7 \sim m_{10}/\text{kg}$	800
	悬架刚度 $K_{s7} \sim K_{s10}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 250
	悬架阻尼 $D_{s7} \sim D_{s10}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	53
	轮胎刚度 $K_{t7} \sim K_{t10}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	3 000
	轮胎阻尼 $D_{t7} \sim D_{t10}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3
几何尺寸	l_1/m	3.0
	l_2/m	1.4
	l_3/m	7.0
	l_4/m	1.4
	l_5/m	1.0
	l_6/m	2.7
	l_7/m	4.5
	l_8/m	3.2
	b_1/m	2.5
	b_2/m	0.9

$K_{b-b}, K_{b-v}, K_{v-b}, F_b$ 和 F_v 分别为由车-桥接触力引起的与时间相关的变量。

该动力学方程及具体求解过程详见文献[6]。桥梁-车辆模型的准确性和可靠性对冲击系数的结果影响显著,该耦合系统分析程序精度已在文献[5]中通过与实桥试验数据对比得到验证。

2 工况设置及 IM 计算

2.1 计算工况

为研究桥梁基频、桥面不平整度、车速、车质量对 IM 的影响规律,本文考虑了跨径和截面形式不同的 13 座钢筋混凝土简支梁桥,考虑了国际标准化组织(ISO)规定的 5 种桥面不平整度,考虑了 15~105 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内等间距的 7 种速度。表 3 总结了主要工况的参数及其范围。

表 3 数值模拟工况的参数及范围

Table 3 Parameters in Numerical Simulations

参数	范围		
	板梁桥	T 梁桥	箱梁桥
标准跨径/m	6,10, 13,16,20	20,25, 30,35,40	20,30,40
桥面不平整度	很好、好、一般、差、很差		
重车车型	55 t 典型五轴车		
车速/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	15,30,45,60,75,90,105		

2.2 IM 计算

冲击系数通常被定义为移动车辆荷载引起的桥梁结构响应的增量与静响应的比值,IM 的计算值 C_{IM} 计算式为

$$C_{IM} = \frac{R_{dyn} - R_{sta}}{R_{sta}} \quad (4)$$

式中: R_{dyn} 和 R_{sta} 分别为车辆荷载对桥梁结构产生的竖向最大动、静响应。

规范中没有明确规定采用何种桥梁响应进行动力冲击系数计算,本文采用应变计算动力冲击系数。加载位置如图 1 所示,为单车沿着行车道中心线行驶的车辆位置,取跨中底部静响应最大的梁计算 IM。一般情况下,多车同时作用工况下的冲击系数较单个车辆作用工况下的冲击系数小。然而,考虑到在中小跨径桥梁上这个差别并不十分明显[5],且基于保守的考虑,本文采用了单个车辆作用下的冲击系数作为代表进行分析。

3 结果分析

3.1 不同参数对 IM 的影响

在中国公路桥梁的实际养护和管理水平条件

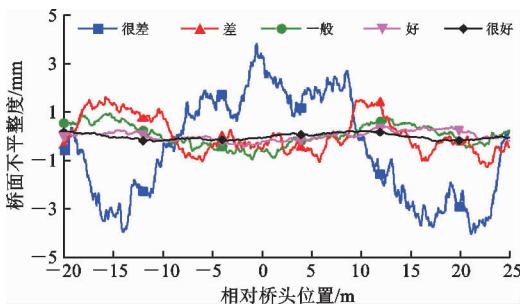


图 5 桥面不平整度曲线

Fig. 5 Deck Roughness Curves

式中: $M_b, C_b, K_b, M_v, C_v, K_v$ 分别为桥梁和车辆系统的质量、阻尼、刚度矩阵; d_b, d_v 分别表示桥梁和车辆的位移矢量; F_G 为车辆重力矢量; $C_{b-b}, C_{b-v}, C_{v-b}$,

下,桥面有较长时间处于“很好”到“一般”的水平^[23]。因此,本文在研究各个参数(桥面不平整度除外)对IM的影响时,桥面不平整度等级均选取ISO中的“一般”状态,在保证较好的代表性的同时兼顾一定的保守性。由于实际状况下车速具有很强的随机性,且不同工况下最不利车速也不相同,为避免IM过于保守,既有文献一般选取不同车速下IM的平均值进行研究^[6,24],因此本文在研究其他参数对IM的影响时IM的取值为7种不同车速下IM的平均值。

3.1.1 桥梁基频的影响

IM随桥梁基频的变化规律如图6所示。作为对比,根据15规范计算的各桥梁的IM取值也显示

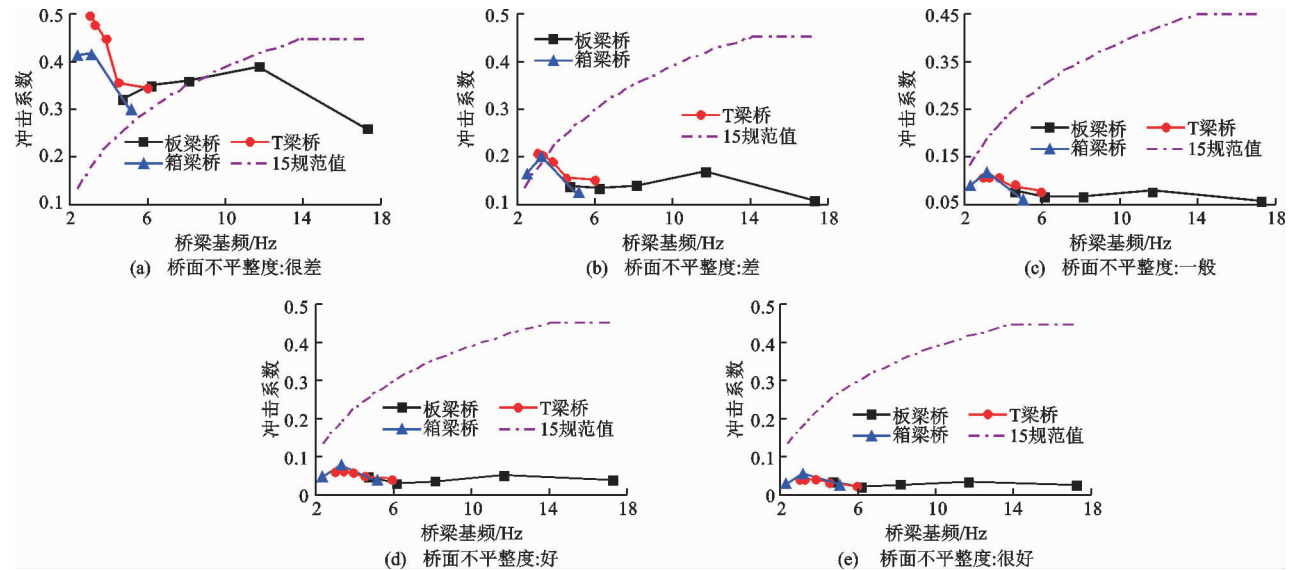


图6 桥面不平整度对IM的影响

Fig. 6 Influence of Deck Roughness on IM

表4 所采取车辆模型的模态信息

Table 4 Modal Information of Adopted Vehicle

模态阶	频率/Hz	振型
1	1.29	拖车侧倾
2	1.88	拖车弹跳
3	2.36	车头俯仰
4	3.04	拖车俯仰
5	5.33	车头侧倾
6	8.14	一轴弹跳
7	8.15	一轴侧倾
8	10.07	二、三轴反方向侧倾
9	10.08	二、三轴反方向弹跳
10	10.18	二、三轴同方向弹跳
11	10.71	二、三轴同方向侧倾
12	11.60	四、五轴反方向侧倾
13	11.60	四、五轴反方向弹跳
14	11.63	四、五轴同方向侧倾
15	11.73	四、五轴同方向弹跳

在图6中。由图6可知,当桥梁基频处于3 Hz和12 Hz附近时对应的IM较大。这是因为当桥梁基频为2.95 Hz和11.62 Hz时,分别接近车辆的第4阶(3.04 Hz)俯仰振动频率和第15阶车轴弹跳振动频率(11.73 Hz),如表4所示。此时,车辆和桥梁之间产生了共振效应。其他研究也获得了类似的规律^[25-26]。加拿大1979版桥梁规范(OHBC-1979)规定当桥梁基频为2.5~4.5 Hz时,即接近卡车的竖向振动频率时,IM需适当放大。此外,从图6和表4可以发现,尽管跨径为20 m的箱梁桥的基频(5.11 Hz)接近车辆的第5阶车头侧倾振动频率(5.33 Hz),但由于车头侧倾对桥梁竖向振动的影响很小,故对IM影响不大。

3.1.2 桥面不平整度的影响

图6也显示了桥面不平整度对IM的影响规律。从图6可以看出,桥面不平整度对桥梁的IM影响很大,IM随桥面不平整度的劣化而增加。当桥面处于“很好”和“好”的状态时,桥梁的IM均在0.1以下,而当桥面处于“很差”的状态时,大多数桥梁的IM都大于规范中规定的IM,跨径为40 m的T梁桥的IM甚至高达0.5。因此,定期对桥面进行维护避免桥面进入“差”的状态可以有效减小车辆荷载对桥梁的冲击效应。

3.1.3 车速的影响

选取3种不同截面形式的桥梁研究车速对IM的影响规律,结果如图7所示。可以看出,车速对IM的影响规律很难预测,因为IM并不一定随车速的增加而单调增加或降低^[6]。而且,对于不同的桥

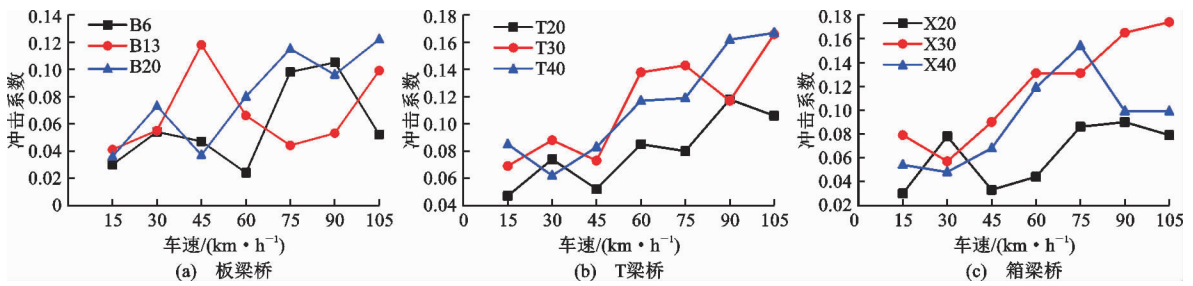


图 7 车速对 IM 的影响

Fig. 7 Influence of Vehicle Speed on IM

梁,使 IM 取最大值的车速也不同。从图 7 还可看出,车速是影响 IM 的主要因素之一。在仅车速不同,其他工况相同的情况下,不同车速产生的 IM 也有较大差别。

3.1.4 车质量的影响

为研究车质量对 IM 的影响,在只改变车辆总质量的情况下,以跨径为 20 m 的板梁桥、T 梁桥和箱梁桥为例,分别计算了车质量为设计车质量 1/3 和 2/3 时桥梁的 IM,计算结果如表 5 所示。可以看出,轻车引起更大的 IM,文献[27]也获得了类似的规律。但由于轻车的静载效应很小,桥梁的实际应力水平并不高。

表 5 不同车质量情况下的 IM 值

Table 5 IM Values Under Different Vehicle Weights

车质量/t	不同桥梁 IM 值		
	B20	T20	X20
55.00	0.08	0.08	0.06
36.67	0.11	0.14	0.10
18.33	0.19	0.27	0.18

3.2 考虑多因素影响的 IM 建议值

3.2.1 IM 建议值

目前国际上已有较多国家的桥梁设计或评估规范采用明确的 IM 值而非某个影响参数(如桥梁跨径或基频)的函数表达式,比如美国、英国、澳大利亚等。这种做法虽然在某些情况下可能偏于保守,但其优点也非常明显:①简单便于使用;②考虑了多个因素的影响并把其包含在内。本文拟采用同样的方式提出 IM 建议值。

从上述分析可知,IM 受桥梁基频、桥面不平整度、车速和车质量等因素的综合影响。为提出能更合理考虑这些因素影响的 IM,基于上述计算结果,考虑到公路管理部门通常会定期维护桥面,桥面等级出现“很差”的情况在现实中并不常见^[23],采用概率与数理统计的方法对所选取的 13 座桥梁在“很好”到“差”这 4 种桥面状态下生成的 7 280 个冲击

系数(13 座桥梁×7 种速度×4 种桥面状况×20 次重复)进行数据处理:将同一等级桥面状况下的 20 次重复模拟的冲击系数取平均值,得到 364 个冲击系数平均值进行分析。将这 364 个冲击系数平均值进行拟合优度检验,发现 IM 服从极值 I 型分布,如图 8 所示,与其他文献中 IM 的分布类型一致^[5,12]。364 个冲击系数平均值的统计参数如表 6 所示。

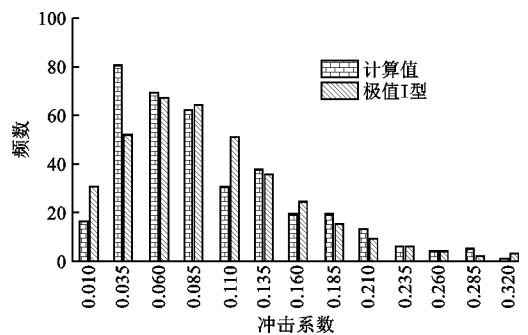


图 8 IM 计算值与极值 I 型分布直方图对比

Fig. 8 Histogram Comparison Between Calculated Value of IMs and Extreme-I Type Distribution

表 6 桥梁 IMs 的统计参数

Table 6 Statistical Parameters of IMs of Bridges

IM 均值 μ	标准差 σ
0.054	0.049

实践中通常取保证率为 95% 的参数统计值作为参数的建议值。本文根据 Easyfit 软件拟合得出概率密度函数,该概率密度函数对应于 95% 保证率的 IM 建议取值为 0.20。值得指出的是,此建议值是基于以上各种典型工况下的冲击系数,并综合考虑了桥梁基频、桥面不平整度、车速等重要因素的影响获得的,因此具有较好的代表性。

3.2.2 与各国规范取值对比

根据中国桥面的维护和管理水平,很难出现桥面等级为“很差”的情况^[23]。以桥面等级为“差”的情况为例,IM 建议值与 13 座桥梁的冲击系数的对比如图 9 所示。从图 9 可以看出,IM 的建议值几

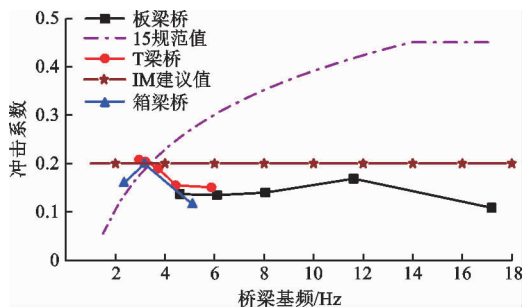


图9 IM计算结果与建议值对比

Fig. 9 Comparison of Calculated Results and Suggested Values of IM

乎能够包括本文中考虑的基频为2~17 Hz的全部桥梁的冲击系数。与中国15规范对比,建议值能更准确地反映多因素综合影响下车辆对桥梁的冲击效应。从图9还可看出,中国15规范中IM的取值过于保守。事实上,也有文献通过实测冲击系数回归分析得出中国04规范中IM取值偏高(04规范中IM设计值同15规范)^[15-16]。另外,O'Brien等^[11]对5座跨径为7.5~45 m的桥梁在5,50,75,1 000年回归周期内的动力效应进行预测,发现在桥面为“很好”和“好”的状态下,IM均不超过0.05,远低于各国规范的取值。

美国2017年版AASHTO规范^[28]规定IM的取值为0.33,大于本文提出的IM建议值。这是由于中国的设计车辆荷载(55 t)比美国的设计车辆荷载(32 t)大。为此,本文计算了T20桥梁分别在美国和中国设计车辆荷载作用下的IM,计算结果如表7所示。从表7可看出,设计车辆荷载是IM产生差异的重要原因。而且,美国AASHTO规范^[28]表明现场试验中获得的大部分公路桥梁的冲击系数不超过0.25。考虑到由车辆荷载和车道荷载规定的活载组合代表的超规车辆对桥梁产生的荷载效应可以达到设计车辆引起的荷载效应的4/3,故美国规范中在设计车辆的基础上把IM的取值定为0.33。而中国不考虑车辆荷载与车道荷载的效应组合,因此,本文提出的IM建议值比美国规范中规定的IM小。为了考虑车质量的影响,将美国设计车辆的总质量改为55 t后计算T20桥梁的IM,计算结果如表7所示。从表7可以看出,在车辆总质量同为55 t的情况下,中国设计车辆荷载作用下的IM略大于美国,这是由于中国设计车辆的总轴距(12.8 m)比美国设计车辆的总轴距(8.53 m)大,荷载分布相对分散,导致车辆荷载作用下桥梁的静响应更小。

表7 不同车辆荷载作用下的IM值

Table 7 IM Values Under Different Vehicle Loads

桥面不平整度	不同车辆荷载作用下的IM值		
	美国32 t 三轴车	美国55 t 三轴车	中国55 t 五轴车
很差	0.47	0.22	0.35
差	0.19	0.10	0.15
一般	0.09	0.05	0.08
好	0.05	0.04	0.04
很好	0.03	0.03	0.02

此外,英国规范(BSI2006)规定IM取值为0.25;加拿大规范(OHBDC—1991)规定当车轮轴数大于3时,IM取值也为0.25;澳大利亚规范中的IM根据车辆荷载而定,对于移动荷载,IM取值0.3。各国规范中IM取值存在一定的差异,这与各国设计车辆荷载的形式和大小、桥梁结构形式等有关,但限于篇幅,本文仅考虑简支梁桥的IM。

4 结语

中国现行规范2015规范将动力冲击系数表示为桥梁基频的函数,考虑因素单一。基于代表中国桥梁设计规范中设计车辆荷载的三维车辆模型和多座典型简支梁桥模型,利用车桥耦合振动数值模拟,研究了桥梁基频、桥面不平整度、车速和车质量等因素对冲击系数的影响规律。基于计算结果,提出了能考虑各主要因素影响的冲击系数建议值,并与其他国家桥梁规范进行了对比与讨论。基于本文研究,得出如下结论:

(1)桥面不平整度对冲击系数的影响很大。随着桥面等级的劣化,冲击系数的值大幅增加。因此,定期对桥面进行维护能有效减小车辆对桥梁的冲击效应。

(2)冲击系数随车质量的增大而减小。在桥面等级差的情况下,轻车能引起较大的冲击系数,但此时总的荷载效应仍然较小。而重车虽然引起的冲击系数较小,但导致的总荷载效应较大,对桥面造成的损伤更大,因此,限制超载尤为重要。

(3)中国现行规范中冲击系数设计值偏于保守,当冲击系数建议值为0.20时能更准确地反映多因素综合影响下车辆对桥梁的冲击效应。

(4)本文的结论是基于中小跨径简支梁桥和五轴车辆模型的数值模拟获得的。然而,中国桥梁结构和车辆类型多样,车辆荷载变异性也较大。尽管本文基于设计规范和研究经验考虑了大量典型工

况,但尚不能全面覆盖现实中的所有情形。因此,后续还需进一步针对这些因素进行研究和探讨。

参考文献:

References:

- [1] 李小珍,张黎明,张洁.公路桥梁与车辆耦合振动研究现状与发展趋势[J].工程力学,2008,25(3):230-240.
LI Xiao-zhen, ZHANG Li-ming, ZHANG Jie. State-of-the-art Review and Trend of Studies on Coupling Vibration for Vehicle and Highway Bridge System [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (3): 230-240.
- [2] PAULTRE P, CHAALLAL O, PROULX J. Bridge Dynamics and Dynamic Amplification Factors — A Review of Analytical and Experimental Findings [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19 (2): 260-278.
- [3] DENG L, YU Y, ZOU Q L, et al. State-of-the-art Review of Dynamic Impact Factors of Highway Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 20 (5): 04014080.
- [4] 邓露,王维.公路桥梁动力冲击系数研究进展[J].动力学与控制学报,2016,14(4):289-300.
DENG Lu, WANG Wei. Research Progress on Dynamic Impact Factors of Highway Bridges [J]. Journal of Dynamics and Control, 2016, 14 (4): 289-300.
- [5] DENG L, CAI C S. Development of Dynamic Impact Factor for Performance Evaluation of Existing Multi-Girder Concrete Bridges [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (1): 21-31.
- [6] 邓露,何维,王芳.不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J].振动与冲击,2015,34(14):70-75.
DENG Lu, HE Wei, WANG Fang. Dynamic Impact Factors for Simply Supported Bridges with Different Cross-section Types [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34 (14): 70-75.
- [7] HUANG D, WANG T L, SHAHAWY M. Impact Analysis of Continuous Multigirder Bridges Due to Moving Vehicles [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118 (12): 3427-3443.
- [8] LIN B H, YANG Y B, LIAO S S. Impact Formulas for Vehicles Moving over Simple and Continuous Beams [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121 (11): 1644-1650.
- [9] WANG T, HUANG D, SHAHAWY M. Dynamic Response of Multigirder Bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118 (8): 2222-2238.
- [10] HARRIS N K, O'BRIEN E J, GONZALEZ A. Reduction of Bridge Dynamic Amplification Through Adjustment of Vehicle Suspension Damping [J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 302 (3): 471-485.
- [11] O'BRIEN E J, CANTERO D, ENRIGHT B, et al. Characteristic Dynamic Increment for Extreme Traffic Loading Events on Short and Medium Span Highway Bridges [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (12): 3827-3835.
- [12] 李玉良,孙福申,李晓红.公路桥梁冲击系数随机变量的概率分布及冲击系数谱[J].公路,1996(9):1-6.
LI Yu-liang, SUN Fu-shen, LI Xiao-hong. Probability Distribution and Impact Factor Spectrum of Random Variables for Impact Factor of Highway Bridge [J]. Highway, 1996 (9): 1-6.
- [13] 施尚伟,赵剑,舒绍云.梁桥冲击系数实测值与规范取值差异分析[J].世界桥梁,2010(2):79-82.
SHI Shang-wei, ZHAO Jian, SHU Shao-yun. Analysis of Difference Between Measured Value and Code Specified Value for Impact Coefficient of Girder Bridge [J]. World Bridges, 2010 (2): 79-82.
- [14] 殷新锋,刘扬,彭晖,等.路面破损的桥梁在车辆作用下冲击系数分析[J].振动工程学报,2013,26(4):531-538.
YIN Xin-feng, LIU Yang, PENG Hui, et al. Impact Factors of a Bridge With Poor Road Roughness Under Moving Vehicular Loads [J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26 (4): 531-538.
- [15] 吴海军,张炎,张浩,等.刚架拱桥冲击系数探讨[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2013,32(增1):860-863.
WU Hai-jun, ZHANG Yan, ZHANG Hao, et al. Impact Coefficients of Rigid-frame Arch Bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2013, 32 (S1): 860-863.
- [16] 陈洪彬,谭平荣,赵国虎.公路桥梁冲击系数适应性研究[J].公路,2014(8):259-262.
CHEN Hong-bin, TAN Ping-rong, ZHAO Guo-hu. Study on Adaptability of Highway Bridge Impact Factor [J]. Highway, 2014 (8): 259-262.
- [17] 李炜明,朱宏平,张俊兵,等.车-桥系统在路面随机谱激励下放大效应的归类分析[J].中国公路学报,2010,23(5):58-63,83.
LI Wei-ming, ZHU Hong-ping, ZHANG Jun-bing, et al. Amplification Effect Classification Analysis on Vehicle-bridge System Under Road Surface Random

- Excitation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (5): 58-63, 83.
- [18] ZHONG H, YANG M, GAO Z. Dynamic Responses of Prestressed Bridge and Vehicle Through Bridge-Vehicle Interaction Analysis [J]. Engineering Structures, 2015, 87: 116-125.
- [19] 邓露, 段林利, 何维, 等. 中国公路车-桥耦合振动车辆模型研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(7): 92-100.
- DENG Lu, DUAN Lin-li, HE Wei, et al. Study on Vehicle Model for Vehicle-bridge Coupling Vibration of Highway Bridges in China [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (7): 92-100.
- [20] DENG L, CAO R, WANG W, et al. A Multi-point Tire Model for Studying Bridge-vehicle Coupled Vibration [J]. International Journal of Structural Stability & Dynamics, 2016, 16 (8): 1550047.
- [21] ISO 8068; 1995, Mechanical Vibration-road Surface Profiles-reporting of Measured Data [S].
- [22] HUANG D, WANG T L. Impact Analysis of Cable-Stayed Bridges [J]. Computers & Structures, 1992, 43 (5): 897-908.
- [23] 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 (2): 05014011.
- [24] 彭大文, 洪锦祥, 郭爱民, 等. 整体式桥台桥梁的动力试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 59-63.
- PENG Da-wen, HONG Jin-xiang, GUO Ai-min, et al. Dynamic Field-test of Integral Abutment Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17 (4): 59-63.
- [25] 周勇军, 赵煜, 贺全海, 等. 刚构-连续组合桥梁冲击系数多因素灵敏度分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 97-101.
- ZHOU Yong-jun, ZHAO Yu, HE Quan-hai, et al. Muti-parameters Sensitivity Analysis of Impact Factors for Rigid-continuous Combined Bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (3): 97-101.
- [26] LI H, WEKEZER J, KWASNIEWSKI L. Dynamic Response of a Highway Bridge Subjected to Moving Vehicles [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13 (5): 439-448.
- [27] 韩万水, 闫君媛, 武隽, 等. 基于长期监测的特重车流作用下桥梁动态放大系数研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(2): 222-232.
- HAN Wan-shui, YAN Jun-yuan, WU Jun, et al. Analysis of Bridge Dynamic Amplification Factors Under Extra-heavy Truck Scenarios Based on Long-term Monitoring Data [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27 (2): 222-232.
- [28] AASHTO LRFD 2017, Bridge Design Specifications [S].
- [21] 张琰, 张丙印, 李广信, 等. 压实黏土拉压组合三轴试验和扩展邓肯张模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 999-1004.
- ZHANG Yan, ZHANG Bing-yin, LI Guang-xin, et al. Combined Tension-compression Triaxial Tests and Extended Duncan-Chang Model of Compacted Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (7): 999-1004.
- [22] 王元战, 李新国, 陈楠楠. 挡土墙主动土压力分布与侧压力系数[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1019-1022.
- WANG Yuan-zhan, LI Xin-guo, CHEN Nan-nan. Active Earth Pressure on a Retaining Wall and Lateral Coefficient of Earth Pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (7): 1019-1022.

(上接第 61 页)

- [19] 曹雄, 陈奕柏, 柯才桐. 刚性挡土墙后粘性土土压力研究[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2013, 31(2): 155-161.
- CAO Xiong, CHEN Yi-bai, KE Cai-tong. Earth Pressure of Cohesive Soil Acting on Rigid Retaining Wall [J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2013, 31 (2): 155-161.
- [20] 岳祖润, 彭胤宗, 张师德. 压实黏性填土挡土墙土压力离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 90-96.
- YUE Zu-run, PENG Yin-zong, ZHANG Shi-de. Centrifugal Model Test of Earth Pressure on Compacted Clay Retaining Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14 (6): 90-96.