第 33 卷 第 1 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 33 No. 1
2020 年 3 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Mar. 2020

部分填充混凝土钢桁梁桥车激响应分析

李延强， 刘得运

(石家庄铁道大学 工程力学系，河北 石家庄 050043)

摘要：以天津海河部分填充混凝土钢桁梁桥为研究对象，采用 ANSYS 有限元软件，建立了桥梁和汽车有限元模型，利用生死单元技术实现了车桥耦合振动的数值仿真，采用 Newmark-β 法求解其动力响应。在此基础上，分析探讨不同桥面等级和车速等因素对部分填充混凝土钢桁梁桥动力响应的影响。结果表明：部分填充混凝土能有效增大钢桁梁桥的竖向刚度，提高桥梁承载力；桥面等级对部分填充混凝土钢桁梁桥车激响应影响较大，等级越低，动力响应增幅越大；提高车速并不能大幅降低部分填充混凝土钢桁梁桥的动力响应。

关键词：部分填充混凝土；钢桁梁；车桥耦合振动；桥面平整度

中图分类号：U441.3 **文献标志码**：A **文章编号**：2095-0373(2020)01-0007-07

近年来，随着交通事业和桥梁结构的发展，关于车桥耦合振动问题的研究受到广泛关注[1-2]。郭文华等[3]采用直接积分法研究了二期恒载对大跨度斜拉桥车桥耦合振动的影响。Wang et al[4]计算、分析、比较了半车模型的试验和理论计算结果，证明了将半车模型用于模拟真实的车桥耦合作用是可以满足精度要求的。桂水荣等[5]发现二分之一车模型更能体现车桥耦合振动的真实性。桥面平整度被认为是引起车桥耦合振动的主要激励，分析车桥耦合振动问题必须考虑桥面平整度的影响[6]。刘寅华等[7]发现用三角级数法模拟轨道不平顺具有通用性好，模拟精度高的特点。

部分填充混凝土钢管结构作为一种新型的结构形式，得到了实际应用，目前对该类桥梁的研究主要集中在静力和动力特性分析[8-9]等方面，有关其车桥耦合振动研究的文献未见报道。本文基于车桥耦合振动理论，以天津滨海某部分填充混凝土钢桁梁桥为研究对象，应用 ANSYS 分析软件，分别建立了车辆和桥梁的有限元分析模型，利用生死单元技术实现了车桥耦合振动问题的数值模拟，并利用 Newmark-β 法求解部分填充混凝土钢桁梁桥的车激响应。在此基础上系统地分析了桥面平整度、车速等因素对部分填充混凝土组合钢桁梁桥车激振动响应的影响。

1 车桥耦合振动数值仿真

1.1 理论基础

当车辆通过桥梁时，车轮和桥面的接触位置不断发生变化，使得桥梁与车辆运动方程组成为一个时变系数的二阶线性微分方程组

$$\begin{cases} \boldsymbol{M}_v\ddot{\boldsymbol{Z}}_v+\boldsymbol{C}_v\dot{\boldsymbol{Z}}_v+\boldsymbol{K}_v\boldsymbol{Z}_v=\boldsymbol{G}_v+\boldsymbol{F}_v \\ \boldsymbol{M}_b\ddot{\boldsymbol{Y}}_b+\boldsymbol{C}_b\dot{\boldsymbol{Y}}_b+\boldsymbol{K}_b\boldsymbol{Y}_b=\boldsymbol{F}_b \end{cases} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{M}_v$、$\boldsymbol{C}_v$、$\boldsymbol{K}_v$ 分别表示车辆模型的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵，$\boldsymbol{Z}_v$、$\dot{\boldsymbol{Z}}_v$、$\ddot{\boldsymbol{Z}}_v$ 分别为车辆的位移向量、速度向量和加速度向量，$\boldsymbol{G}_v$ 为车辆的重力荷载向量，$\boldsymbol{F}_v$ 为车辆的瞬时激振力向量。$\boldsymbol{M}_b$、$\boldsymbol{C}_b$、$\boldsymbol{K}_b$ 分别表示部分填充混凝土钢桁梁桥的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵，$\boldsymbol{Y}_b$、$\dot{\boldsymbol{Y}}_b$、$\ddot{\boldsymbol{Y}}_b$ 分别为桥梁节点的位移向量、速度向量和加速度向量，F_b 为作用于桥梁节点上的激振力向量，与 F_v 互为作用力与反作用力。

收稿日期：2018-10-25 责任编辑：车轩玉 DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20181025001
基金项目：河北省自然科学基金(E2016210066)
作者简介：李延强(1973—)：男，教授，博士，主要从事大跨桥梁结构损伤识别研究。E-mail：Yanleeq1973@163.com
李延强，刘得运. 部分填充混凝土钢桁梁桥车激响应分析[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2020，33(1)：7-13.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在车桥耦合振动分析中,假定车轮与桥面始终接触,则车辆的车轮位移和桥面接触处相同,并考虑到与桥面接触点处的桥面平整度 $r(x)$,则车轮在接触处的竖向位移联系方程为

$$z_{vi}=r(x)_i+y_{bi} \tag{2}$$

式中,y_{bi} 为第 i 个车轮接触处桥面的竖向位移;$r(x)_i$ 为第 i 个车轮处的桥面平整度;z_{vi} 为第 i 个车轮接触处车轮的竖向位移。

车辆的瞬时激振力

$$F_v=(k_{t1}\Delta_1+c_{t1}\Delta_2,k_{t2}\Delta_2+c_{t2}\Delta_2,0,0)^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中,Δ_i、Δ_i 分别为第 i 个车轮处的相对竖向位移与竖向速度,其表达式为

$$\Delta_i=z_i-z_{vi}\quad \dot{\Delta}_i=\dot{z}_i-\dot{z}_{vi}\quad (i=1,2) \tag{4}$$

作用在桥梁节点处的激振力与车辆的瞬时激振力大小相等,方向相反,因此

$$F_v=-F_b \tag{5}$$

将式(2)~式(5)代入到式(1),采用 Newmark-β 法求解可得车桥耦合振动系统的动力响应。

1.2 数值分析方法

基于 ANSYS 的车桥耦合振动数值分析的具体方法、步骤及分析流程如图 1 所示。

(1)建立桥梁空间有限元模型,并根据桥面板单元长度以及车辆模型长度,建立适当数目的车辆模型,并在车轮和桥面接触位置进行位移耦合。

(2)利用 Matlab 软件生成桥面平整度样本,根据车桥耦合振动中的相互作用力关系,依据式(3)计算由于桥面平整度引起的车桥耦合相互作用力,在车轮和桥面接触位置进行相互作用力耦合。

(3)根据车辆行驶速度,利用 APDL 语言进行车辆模型的杀死和激活以及相互作用力的添加,利用 ANSYS 软件提供的 Newmark-β 直接积分法进行数值求解,得到桥梁结构瞬时动力响应。

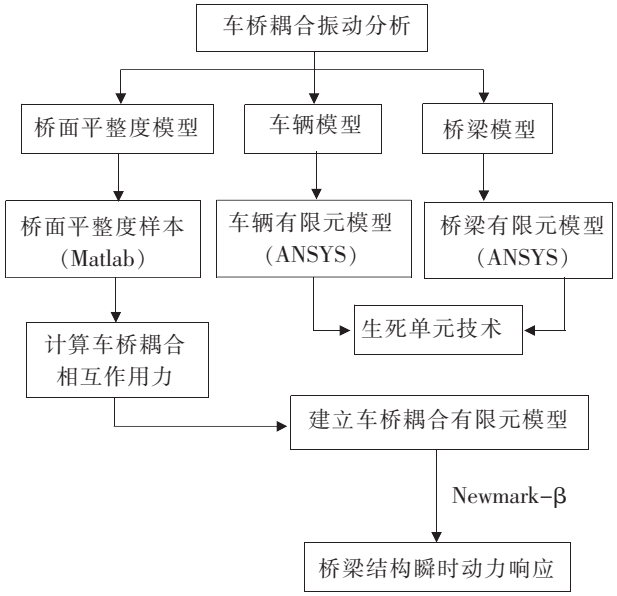

图 1 车桥耦合振动数值分析流程图

2 车桥耦合振动模型

2.1 工程概况

天津海河某部分填充混凝土组合钢桁梁桥,跨径布置为 95+140+95 m,主桁中墩处梁高 12 m,跨中截面高 3.5 m,边跨连接处墩高 3.0 m,桥面宽度 43 m。主桥平面布置如图 2 所示。

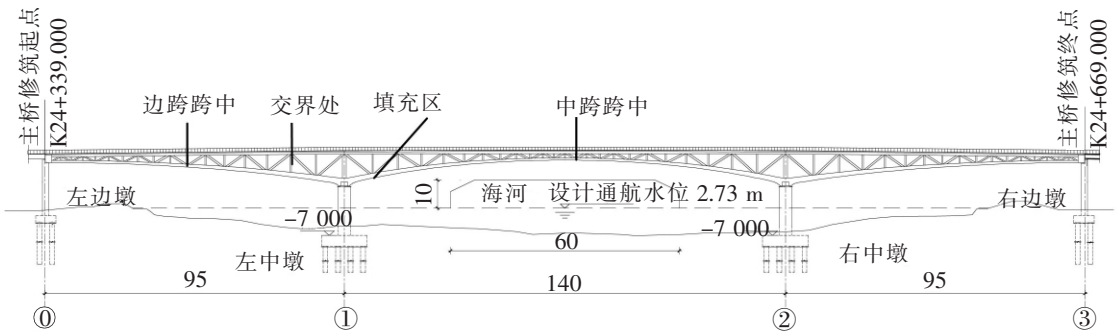

图 2 主桥平面布置图(单位:m)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

主桥采用钢桁架形式,分为上下 2 幅,每幅横向由 6 榀桁架组成,桁架横向中心间距为 3.56 m,上弦杆线型随道路纵断线型,下弦杆线型为悬链线,腹杆分为竖杆和斜杆,腹杆节点之间的间距随梁高变化。上弦杆、下弦杆均采用箱型截面,上弦杆为等高度,箱型截面为 800 mm×800 mm,下弦杆为变高度箱型截面,截面尺寸为 800 mm×800 mm～2 800 mm,钢材采用 Q345qD 钢。在中墩墩位线两侧各 17 m 范围内,下弦杆内灌注 C55 自密实混凝土,并通过焊钉进行连接。桥梁横向联系分为上横撑、下横撑和上下平纵联。

2.2　有限元模型

基于 ANSYS 建立有限元分析模型,其中钢桁梁构件(上弦杆、腹杆和下弦杆)以及桥墩均采用 BEAM189 梁单元模拟,桥面板采用 SHELL181 壳单元模拟,全桥有限元模型共 7 325 个节点,3 165 个梁单元,310 个壳单元。墩底视为固结。

车辆模型选取双轴汽车模型,不考虑车的横向摆动,将车体简化为只有竖向和俯仰 2 个自由度的质量块,悬架和轮胎简化为弹簧阻尼系统,其质量之和简化为只有竖向自由度的质量块,如图 3 所示。质量块采用 MASS21 单元模拟,而弹簧阻尼系统则采用 COMBIN14 单元模拟,因此 1 个车辆模型由 4 个弹簧单元和 3 个质量单元通过刚臂连接构成。车桥耦合有限元模型如图 4 所示。车辆具体参数见表 1。[10]

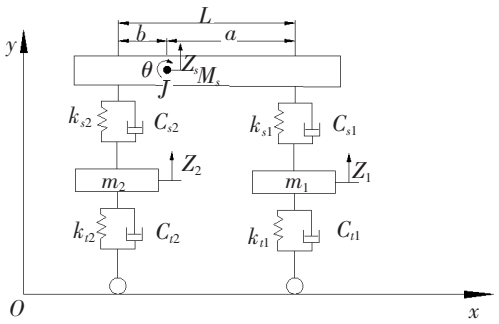

图 3　车辆模型示意图

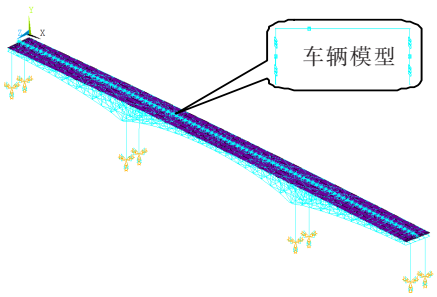

图 4　车桥耦合有限元模型

表 1　车辆模型参数表

质量		刚度		阻尼系数		与车身质心的距离	
变量	数值/kg	变量	数值/(N·m^{-1})	变量	数值/(N·s)·m^{-1})	变量	数值/m
m_1	480	k_{t1}	95e4	c_{t1}	0	a	2.652 4
m_2	945	k_{t2}	190e4	c_{t2}	0	b	0.972 6
M_s	32 025	k_{s1}	17e4	c_{s1}	7e3		
J	82 615.67	k_{s2}	48e4	c_{s2}	14e3		

2.3　桥面平整度模型

桥面平整度是满足零均值的平稳高斯随机过程,文献[7]证明了三角级数法建立的模拟模型,理论基础严密,算法稳定可靠,故采用三角级数法模拟桥面平整度。

$$r(x)=\sum_{k=1}^{N}\alpha_k\cos(2\pi\omega_k x+\phi_k) \tag{6}$$

式中,α_k 为余弦波的振幅,$\alpha_k^2=4S_r(\omega_k)\Delta\omega$,$S_r(\omega_k)$为能量功率谱密度函数,$\omega_k=\omega_1+(k+\frac{1}{2})\Delta\omega$,$k=1,2,\cdots,N$,$\Delta\omega=(\omega_u-\omega_i)/N$,$\omega_k$ 为空间截止频率上下限$[\omega_1,\omega_u]$之间的值,文中取 $\omega_1=0.01$cycle/m、$\omega_u=0.01$cycle/m;ϕ_k 为$[0,2\pi]$之间满足均匀分布的随机数;x 为桥面点的纵桥向坐标;N 为建立桥面不平度的总项数。

桥面平整度能量功率谱密度函数可由空间频率 ω_k 表示

$$S_r(\omega_k)=\begin{cases}\bar{\alpha}\omega_k^{-\beta} & \omega_1<\omega_k<\omega_u\\ 0 & \omega_k\geqslant\omega_u,\omega_u\leqslant\omega_1\end{cases} \tag{7}$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中,$\bar{\alpha}$ 为桥面平整度相关系数。通过不同的 $\bar{\alpha}$ 取值分别得到不同等级的桥面平整度曲线。桥面平整度参数取值如表 2 所示。根据以上过程利用 Matlab 软件分别模拟了 A、B、C、D 4 级桥面平整度曲线,限于篇幅,仅给出 A 级桥面的平整度曲线如图 5 所示。

表 2 桥面平整度参数取值

桥面等级	参考值	α
A	$\bar{\alpha}\leqslant$0.24E-6	0.12E-6
B	0.24E-6 $<\alpha\leqslant$1.0E-6	0.62E-6
C	1.0E-6 $<\alpha\leqslant$4.0 E-6	2.5E-6
D	4.0E-6 $<\alpha\leqslant$16.0E-6	10E-6

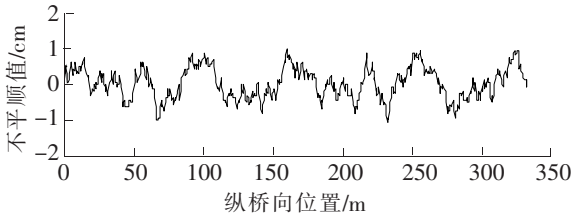

图 5 A 级桥面平整度曲线

3 数值仿真分析

为了探讨部分填充混凝土对钢桁梁桥车桥耦合振动的影响,分析比较桥面等级为 B 级,速度为 80 km/h 时,部分填充混凝土钢桁梁桥和普通钢桁梁桥的动力响应。如图 6 所示分别为 2 种钢桁梁桥中跨跨中竖向位移时程曲线,表 3 所示为 2 种钢桁梁桥部分位置的动位移增量和对应下弦杆的动轴力增量。其中竖向位移增量和轴力增量均是相对于在自重作用下的竖向位移和轴力而言。

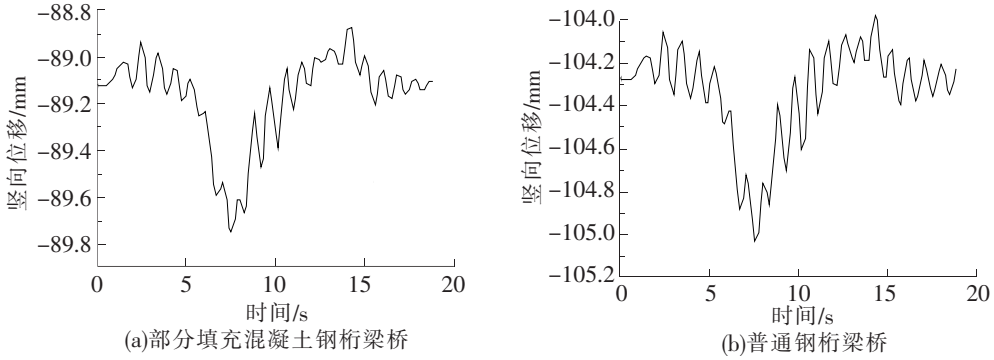

图 6 2 种钢桁梁桥中跨跨中竖向位移时程曲线

由图 6 可知,部分填充混凝土并没有改变中跨跨中处下弦杆的时程曲线形状,但竖向位移和振动幅值明显减小,说明部分填充混凝土能够有效提高钢桁梁桥的竖向刚度,可有效降低桥梁动力位移响应。

表 3 2 种钢桁梁桥部分下弦杆动力增量

动力参数	部分填充		无填充	
	动位移增量/mm	轴力增量/kN	动位移增量/mm	轴力增量/kN
边跨跨中	0.32	19.9	0.34	23.0
交界处	0.09	26.1	0.09	29.2
填充区	0.07	33.5	0.09	39.1
中跨跨中	0.86	40.1	1.06	46.0

由表 3 可知,部分填充混凝土后,下弦杆的轴力增量呈下降趋势,其中中跨跨中处的下弦杆轴力降幅最大。可见,部分填充混凝土能有效提高桥梁竖向刚度,降低钢桁梁桥的动力响应。

4 参数影响分析

为了准确全面分析部分填充混凝土对钢桁梁桥车桥耦合振动的影响,分别求解不同参数下部分填充混凝土钢桁梁桥和普通钢桁梁桥的动力响应,对比其下弦杆的竖向位移响应和轴力响应,总结在不同参数下 2 种钢桁梁桥车桥耦合振动的规律。选取的 2 个参数分别为桥面平整度和车辆速度。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4.1　桥面平整度

采用本文模拟方法模拟的 4 种桥面状况,计算时车速为 80 km/h。不同桥面等级下 2 种钢桁梁桥部分位置竖向位移增量如图 7 所示,不同桥面等级下 2 种钢桁梁桥部分下弦杆的轴力增量如表 4 所示。

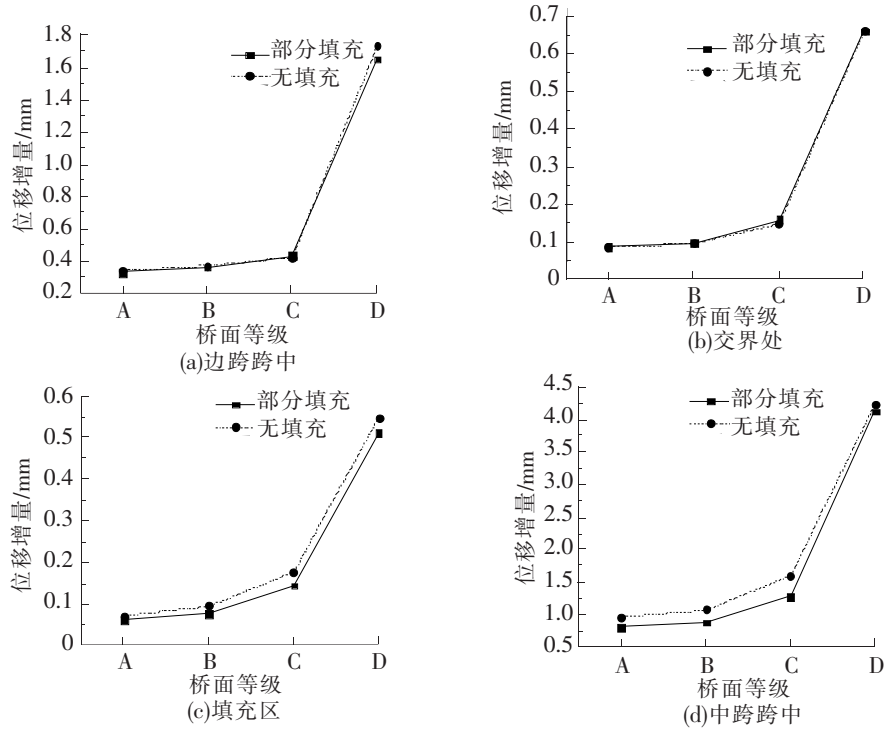

图 7　不同桥面等级时部分位置竖向位移增量

由图 7 可知,桥面平整度对 2 种钢桁梁桥竖向位移的影响基本一致,都是随着桥面等级的降低,竖向位移增量逐渐增加,且增幅越来越大。例如,D 级桥面时的竖向位移增量约是 C 级桥面时竖向位移增量的 4 倍,而 B 级桥面时的竖向位移增量只有 A 级桥面时竖向位移增量的 1.1 倍左右。部分填充混凝土后,填充区和中跨跨中的竖向位移增量有所减小,边跨跨中和交界处的竖向位移增量几乎无变化,说明部分填充混凝土对钢桁梁桥中跨部分的影响较大,对钢桁梁桥边跨部分的影响较小,这主要是因为中跨跨度大,部分填充引起结构刚度的改变对其影响较大所致。

表 4　不同桥面等级时部分下弦杆轴力增量　　kN

填充情况	位置	桥面等级			
		A	B	C	D
部分填充	边跨跨中	16.4	19.9	38.5	193.8
	交界处	22.6	26.1	40.4	96.6
	填充区	29.7	33.5	55.3	140.2
	中跨跨中	38.2	40.1	59.8	119.8
无填充	边跨跨中	18	23	42.2	209.7
	交界处	24.6	29.2	46.6	115.9
	填充区	32.5	39.1	66.6	176.6
	中跨跨中	43.2	46.0	54.0	128.8

由表 4 可知,随着桥面等级的降低,下弦杆轴力增量逐渐增加,且增幅越来越大。部分填充混凝土后,钢桁梁桥的下弦杆轴力增量均有所减小,且桥面等级越低,轴力增量的差值越大,其中填充区处的下弦杆轴力增量差值最大。综上,桥面平整度对部分填充混凝土钢桁梁桥的影响较大,随着桥面等级的降低,动力响应逐渐增加,且增幅越来越大。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.2 车辆速度

按照 40、60、80 和 100 km/h 4 种不同速度进行 2 种钢桁梁桥动力响应的分析,桥面等级采用 B 级。不同速度时 2 种钢桁梁桥部分位置竖向位移增量如图 8 所示,不同速度时 2 种钢桁梁桥下弦杆的轴力增量如表 5 所示。

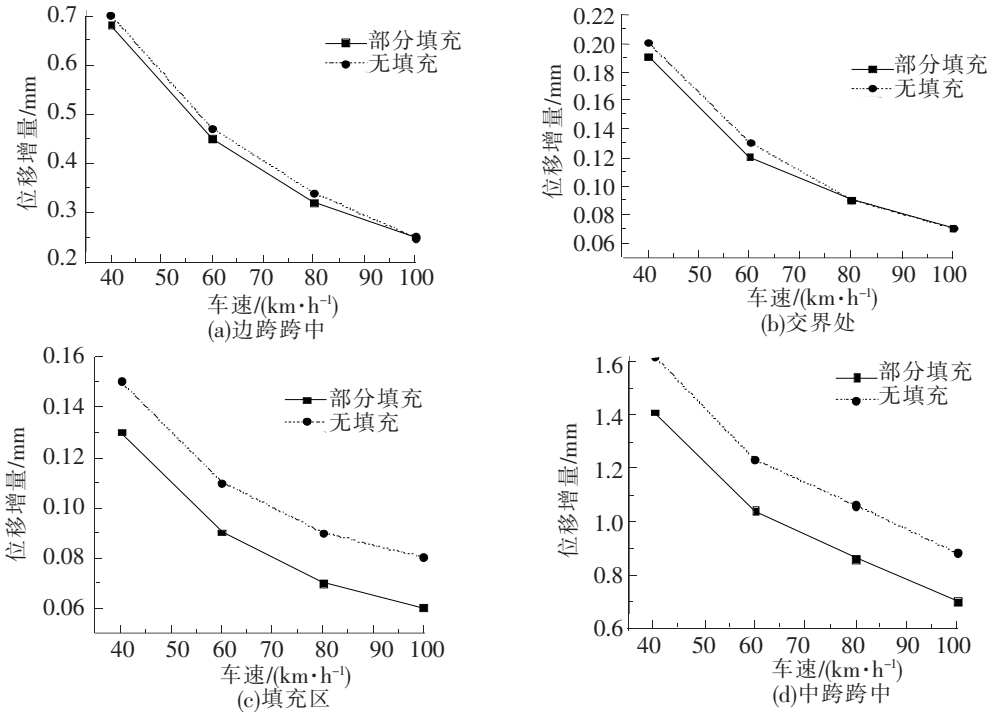

图 8 不同速度时关键弦杆竖向位移增量

由图 8 可知,2 种钢桁梁桥的竖向位移响应随着车速的增加而减小,且减幅越来越小。部分填充混凝土后,没有改变关键弦杆竖向位移响应和车速之间的变化趋势,只是在响应的数值上有所变化,填充区和中跨跨中的竖向位移增量明显减小,边跨跨中和交界处的竖向位移增量略有减小,其中中跨跨中处竖向位移增量的减幅最大,例如,车速为 40 km/h 时,中跨跨中处关键弦杆竖向位移增量的减幅为 0.21 mm。

表 5 不同速度时部分下弦杆轴力增量 kN

填充情况	位置	车速			
		40 km·h^{-1}	60 km·h^{-1}	80 km·h^{-1}	100 km·h^{-1}
部分填充	边跨跨中	32.4	23.3	19.9	16.5
	交界处	40.7	30.9	26.1	21.9
	填充区	56.2	41.6	33.5	27.5
	中跨跨中	65.7	47.1	40.1	33.3
无填充	边跨跨中	34.3	25.2	23	19.8
	交界处	43.6	33.1	29.2	24.7
	填充区	61	45.5	39.1	32.4
	中跨跨中	72.3	52.9	46	38.7

由表 5 可知,随着车速的增加,2 种钢桁梁桥的下弦杆的轴力响应均逐渐减小,且减幅越来越小。这是因为车速越大,车桥之间的相互作用力越大,但是力作用的时间却明显减小,相比于时间的减少,相互作用力的增量很小,所以车辆对钢桁梁桥同一位置的冲量逐渐减小。部分填充混凝土后,钢桁梁桥下弦杆轴力增量均有所减小,其中中跨跨中处下弦杆轴力增量的减幅最大。

由此可见,车速对部分填充混凝土钢桁梁桥的影响也很大,随着车速的增加,钢桁梁桥的动力响应逐渐减小,但减幅越来越小,所以较高的车速并不能大幅减小钢桁梁桥的动力响应。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5　结论

(1)部分填充混凝土能有效增加桥梁竖向刚度,减小下弦杆的动力响应,较普通钢桁梁桥有明显的优势,部分填充混凝土钢桁梁桥作为一种新桥型值得推广应用。

(2)桥面平整度对部分填充混凝土钢桁梁桥的影响较大,随着桥面等级的降低,动力响应逐渐增加,且增幅越来越大,为了保证桥梁的长期健康运营,应该注意桥梁运营状态中桥面的维护。

(3)随着车速的增加,部分填充混凝土钢桁梁桥的动力响应逐渐减小,但减幅越来越小,所以较高的车速并不能大幅减小部分填充混凝土钢桁梁桥的动力响应。

(4)本文车辆模型简化为 2D 模型,仅探讨了车速的影响,车辆偏心、车辆参数(质量、刚度、阻尼等)的影响以及车桥耦合侧向振动的影响尚需后续研究。

参　考　文　献

[1]Ettefagh M M, Behkamkia D, Pedrammehr S, et al. Reliability analysis of the bridge dynamic response in a stochastic vehicle-bridge interaction[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2014, 19(1):220-232.

[2]Wu S Q, Law S S. Dynamic analysis of bridge with non-Gaussian uncertainties under a moving vehicle[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2011, 26(2):281-293.

[3]郭文华,陈代海,李整. 二期恒载对大跨度斜拉桥车桥耦合振动的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 37(8):2423-2429.

[4]Wang T L, Shahawy M, Huang D Z. Dynamic response of highway trucks due to road surface roughness[J]. Computers & Structures, 1993, 49(6):1055-1067.

[5]桂水荣,陈水生,许士强. 移动荷载下简支梁桥 3 种车桥耦合模型研究[J]. 华东交通大学学报, 2007,24(1):35-39.

[6]唐意,陈燊. 桥梁车振伪随机桥面不平度模拟[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2003, 31(3):326-329.

[7]刘寅华,李芾,黄运华. 轨道不平顺数值模拟方法[J]. 交通运输工程学报, 2006(1):29-33.

[8]周叶飞,李晓坤,李延强. 部分填充混凝土组合钢桁梁桥静力分析[J]. 铁道建筑, 2016(4):9-12.

[9]叶卓棋,杨健,刘永健,等. 部分填充混凝土钢管结构桥梁研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2):96-101.

[10]唐意. 刚架拱桥车辆振动可视化仿真研究[D]. 福州: 福州大学, 2003.

Dynamic Analysis of Partially Concrete-filled Steel Truss Girder Bridge Under Vehicle Load

Li Yanqiang,　Liu Deyun

(Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the dynamic response of partially concrete-filled steel truss girder bridge under vehicle load, partially concrete-filled steel truss girder bridge in Tianjin Haihe was taken as a case, the finite element model of bridge and vehicle was established by using live and death technology in ANSYS and numerical emulation of vehicle-bridge coupling vibration was made. On the basis, the influences of different deck grade and vehicle speed on dynamic response of partially filled concrete steel truss bridge were analyzed and discussed. The results show that partially filled concrete can effectively increase the vertical stiffness of steel truss bridge and improve the bearing capacity of the bridge, and the grade of bridge deck has great influence on the vehicle-induced response of partially filled concrete steel truss bridge, the lower the grade, the greater the increase of dynamic response. Increasing vehicle speed does not significantly reduce the dynamic response of partially filled concrete steel truss bridge.

Key words: partially filled concrete; steel truss girder; vehicle-bridge coupled vibration; bridge level degree

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net