

钢-混组合简支梁桥冲击系数试验与理论研究

蒋成强

(中国铁路设计集团有限公司, 天津市 300308)

摘要: 钢梁桥在我国高速公路建设中已获得一定应用, 结构上通常采用钢箱梁/工字钢与混凝土桥面板组合形式。因该类桥型发展较晚, 其设计必须考虑的冲击系数取值尚无合适依据。为此, 针对延崇高速某钢-混组合工字简支梁桥进行了脉动试验和跑车试验, 同时利用 ABAQUS 有限元软件建立了车桥耦合振动分析模型并用实桥试验验证了其正确性。在此基础上, 建立了钢-混组合箱梁桥、钢-混组合工字梁桥、预应力混凝土(小)箱梁桥和预应力混凝土 T 梁桥共 4 座具有相同跨径、相同设计荷载和相近桥宽的简支梁桥模型, 通过车桥耦合振动分析, 对比了不同路面不平度和车速参数对 4 座简支梁桥冲击系数的影响, 同时与我国规范给出的与频率相关的冲击系数进行了比较。研究表明: 预应力混凝土 T 梁桥表现出较大的冲击系数, 而其余 3 座简支梁桥的冲击系数具有较好的一致性; 在较高等级路面不平度下, 采用现行规范计算钢-混组合简支梁桥的冲击系数合适。

关键词: 钢-混组合简支梁桥; 冲击系数; 动载试验; 车桥耦合振动; 数值模拟

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)08-0225-07

0 引言

近年来在政策推动下, 我国钢梁桥建设取得了较快发展。这些钢梁桥多以钢箱或工字钢为下翼缘, 组合钢筋混凝土桥面板上翼缘的主梁结构形式为主。该类桥型在我国发展较晚, 其设计必须考虑的冲击系数仍采用现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)(以下简称《规范》)中的公式计算。而《规范》中的计算公式是通过多座不同跨径的钢筋混凝土梁桥, 以(竖向)自振频率统计分析而来, 是否适用于钢-混组合梁桥尚未可知。

对于冲击系数的研究主要有两类方法, 一是现场跑车试验, 所得结果相对准确和可靠^[1]; 二是利用车桥耦合振动分析方法^[2], 该方法相对于前者在经济和时间上存在便利。Deng 等^[3]研究了混凝土桥梁的冲击系数, 分析了桥梁跨径、车速和路面不平度的影响, 并对其分布和计算公式进行了讨论。Fafard 等^[4]通过建立车桥耦合振动模型, 计算了 1 座预应力混凝土梁桥在不同车速和路面不平度条件下的冲击系数, 发现通过位移反应计算得到的值往往小于通过应变反应计算的值。Huang 等^[5]对 6 座多跨连续钢桥

进行了车桥耦合振动理论研究, 比较了计算冲击系数与美国 AASHTO 规范^[6]的差异。Li 等^[7]对 1 座钢筋混凝土梁桥的冲击系数进行了研究, 发现其与车速存在正相关关系; 当路面不平度较差时, 采用 AASHTO 规范的冲击系数往往是不安全的。

由此, 本文依托某高速钢-混组合工字简支梁桥工程, 在进行“脉动”和“跑车”试验基础上, 基于 ABAQUS 软件建立了车桥耦合振动分析模型。再建立了 4 座相同 40 m 跨径、公路-I 级设计荷载的简支梁桥模型, 分别为钢-混组合箱梁桥(简称 SCCB40)、钢-混工字组合梁桥(简称 SCCI40)、预应力混凝土 T 梁桥(简称 T40)和预应力混凝土箱梁桥(简称 B40), 利用数值模拟手段, 研究了不同路面不平度和车速下 4 座桥梁的冲击系数变化趋势, 同时分析了利用《规范》计算钢-混组合简支梁桥冲击系数的可行性。

1 钢-混组合工字简支梁桥试验

1.1 工程概况

钢-混组合工字简支梁桥实景照见图 1。

该桥位于河北延崇高速公路, 跨径为 30 m, 桥面横坡为双向 2%。上部结构采用工字钢主梁-钢筋混凝土桥面板组合截面, 下部结构采用 U 形台和钻孔灌注桩基础。

收稿日期: 2024-01-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778206)

作者简介: 蒋成强(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。



图1 钢-混组合工字简支梁桥实景照

仅对该简支梁桥从延庆到崇礼方向的右幅桥进行试验。右幅桥具有4片工字钢梁,从中央分隔带开始依次编号为1#、2#、3#、4#。桥梁右幅桥面全宽13 m(包含到中央分隔带,图中未给出),车道净宽为11.75 m。工字钢梁中心线处梁高为1.65 m,梁片间距3.4 m。工字钢梁的顶板厚度为25 mm;底板为变厚度钢板,厚度为25~40 mm;腹板为变厚度钢板,厚度为12~14 mm。图2为钢-混组合工字简支梁桥横断面图。

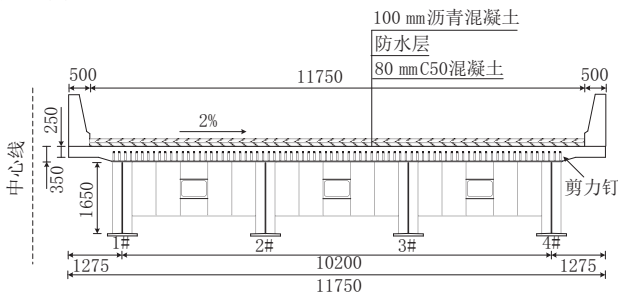


图2 钢-混组合工字简支梁桥横断面图(单位:mm)

工字钢梁采用Q345qD型钢,桥面板为C50混凝土,两者通过剪力钉连接。

1.2 脉动试验及结果

通过脉动试验,可获得试验桥跨结构的自振特性。通过在桥梁上安装加速度传感器,记录桥梁的加速度响应,并运用快速傅里叶变换(FFT)计算采集的加速度数据,可得到桥梁的频率信息,也可以计算桥梁的阻尼比。

脉动试验共设置6个测点(AC1~AC6),分别位于跨中和1/4跨位置,如图3所示。

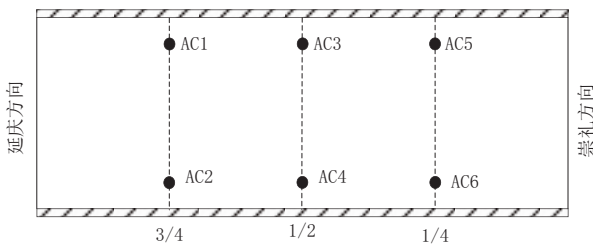
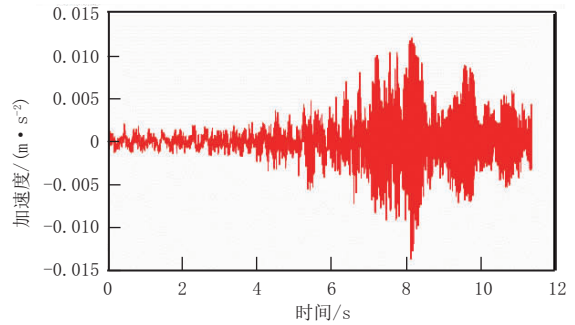
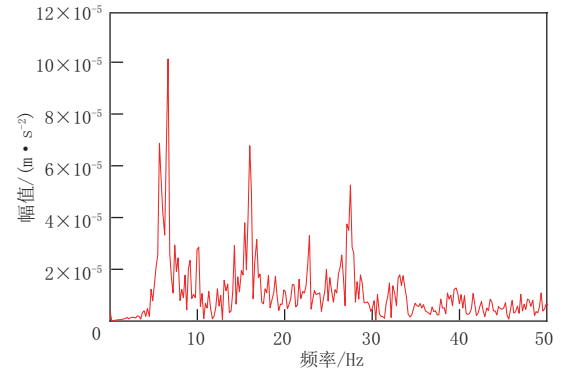


图3 加速度传感器布设

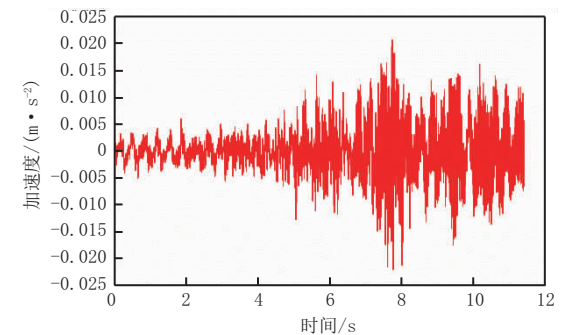
加速度传感器记录到的桥梁振动和傅里叶谱如图4所示。



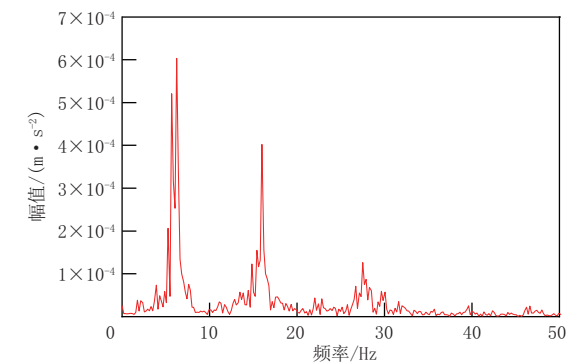
(a)第1组加速度数据



(b)第1组频率数据



(c)第2组加速度数据



(d)第2组频率数据

图4 桥梁脉动试验采集和计算数据

识别出来的钢-混工字组合简支梁桥的前3阶(竖向)自振频率分别为5.66、16.02、27.35 Hz(见表1)。

1.3 跑车试验及结果

试验通过挠度仪记录车辆运行下桥梁的挠度,以加速度传感器记录桥梁的竖向加速度。在测试过程中,挠度仪的目标靶点分别位于桥梁跨中和端点

表1 桥梁频率和阻尼比

阶数	第1组		第2组		第3组	
	频率 / Hz	阻尼比 / %	频率 / Hz	阻尼比 / %	频率 / Hz	阻尼比 / %
1	5.66		5.66		5.66	
2	16.02	2.25	16.02	2.17	16.02	2.21
3	27.15		27.54		27.35	

支座处,并在桥梁 5/8 跨和 3/4 跨处靠近护栏位置安装了 2 个目标靶点。

本文所有试验均采用同一车型(为加快试验速度),现场共 4 辆加载车,分别标记为 C1、C2、C3 和 C4。试验前对每辆车进行称重并编号,车辆编号和总重见表 2。试验车辆的轴距见图 5。

表2 试验车辆编号和总重

编号	吨位 / t	总重 / kN	前轴重 / kN	单后轴重 / kN
C1(车牌:95455)	31.68	310.5	62.10	124.20
C2(车牌:94829)	32.18	315.4	63.08	126.16
C3(车牌:98450)	32.74	320.9	64.18	128.36
C4(车牌:98620)	31.66	310.3	62.06	124.12

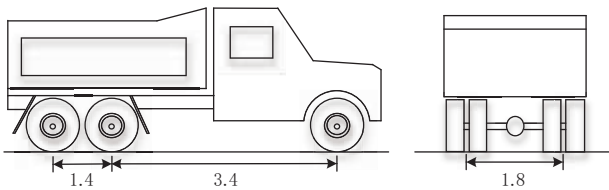


图5 加载汽车轴距(单位:m)

跑车试验共进行 4 组,分别按照 20 km/h(C1 车)、30 km/h(C2 车)、40 km/h(C3 车)和 50 km/h(C4 车)车速进行,车沿桥梁中心线行驶(不考虑偏载)。在以往试验中,对于简支梁桥的挠度研究主要集中于跨中,因此提取了跨中目标靶点的动挠度反应。跑车试验跨中位移见图 6。

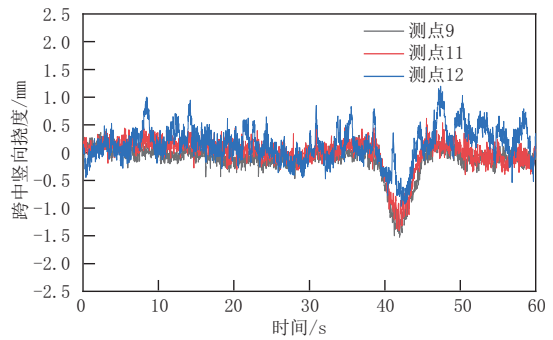
由图 6 可知,桥梁跨中的竖向挠度数值并不完全相同,这与试验车辆的参数且每次试验行驶路径会发生轻微的偏差有关。但每次试验跨中的振动情况几乎一致,可以证明试验完成度较高。

2 车桥耦合振动分析模型与验证

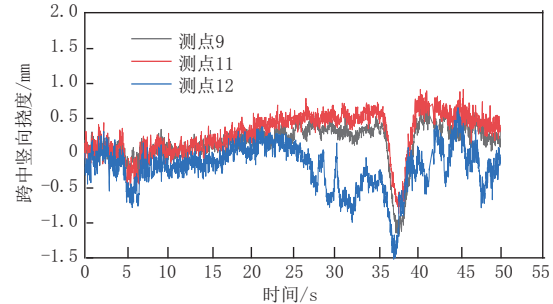
2.1 车桥耦合振动分析模型

2.1.1 桥梁模型

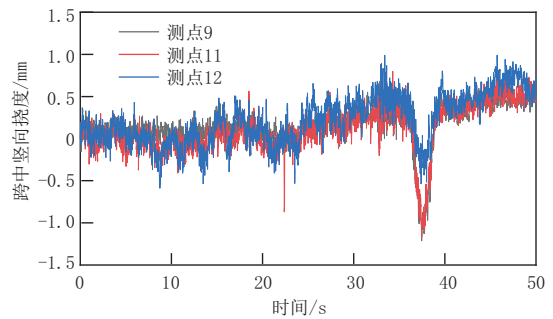
在进行实桥试验的同时,应对桥梁进行精细化建模计算。本文采用 ABAQUS 有限元软件建立试验桥模型。桥面铺装层、混凝土桥面板、沥青混凝土铺装层、钢主梁、横隔梁等部件均采用壳单元以提高有



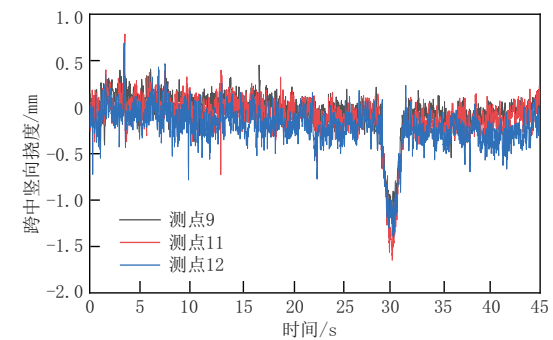
(a) 20 km/h 桥梁跨中



(b) 30 km/h 桥梁跨中



(c) 40 km/h 桥梁跨中



(d) 50 km/h 桥梁跨中

图6 跑车试验跨中位移

限元计算速度。为了更好地模拟实际情况,在该桥梁模型前后建立了引桥,引桥的数据不计入模拟数据中,仅是为了更好地模拟实际物理条件,并采用实体单元建模。钢主梁和混凝土桥面板采用 MPC 梁约束以模拟剪力钉的剪力作用^[8-9],其余构件之间均采用绑定连接(见图 7)。由于车辆质量远远小于桥梁质量,因此桥墩的竖向振动影响可以忽略不计,即本次模拟仅对桥梁的上部结构建立模型。桥梁上部结构模型参数见表 3。

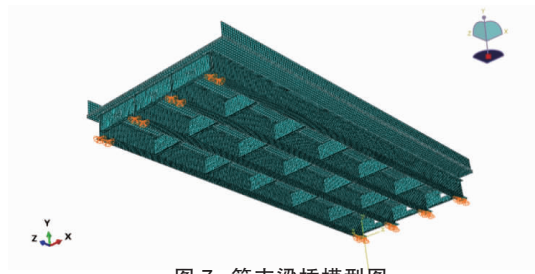


图7 简支梁桥模型图

表3 桥梁上部结构模型材料参数

桥梁部件	材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / Pa	泊松比 μ
桥面板、 下层铺装层	C50 混凝土	2 500	3.45×10^{10}	0.20
横隔板、 工字梁	Q345qD 钢材	7 850	2.06×10^{11}	0.30
上层铺装层	沥青混凝土	2 460	1.4×10^9	0.35

边界条件按照简支梁约束方式添加至钢梁底板,其中桥梁的边界约束如图8所示。

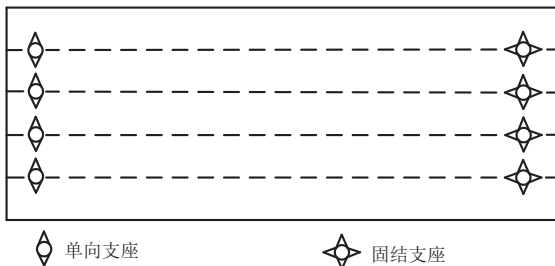


图8 简支梁支座布置

2.1.2 车辆模型

本文对车辆进行了简化处理,车辆模型选用合适单元建立简化的有限元模型。图9为三轴卡车的ABAQUS空间有限元模型。与传统车辆模型不同的是,该模型将车体质量和车轴质量集中于一点,对节点赋予节点质量和惯性,并施加重力荷载。用不可变形的刚性梁单元建立空间刚性骨架,将车体质点固结于刚性梁节点上来模拟刚性车体。图9中的刚性轮用以模拟车桥接触^[10];连接车体与车轮、车轮与刚性轮的简化弹簧-阻尼系统用2点间的 Springs/Dashpots(弹簧/阻尼器)连接单元实现。车辆模型参数见表4。后续对于冲击系数的研究均采用该车辆模型参数。

2.2 车桥耦合振动模型验证

2.2.1 桥梁自振特性对比

将桥梁有限元模型前3阶竖向自振频率值与脉动试验实测值进行对比,结果见表5。由表5可知,两者的平均误差为6.14%,说明两者较为吻合,由此可验证有限元模拟的桥梁质量、刚度和边界条件与实际情况相近。

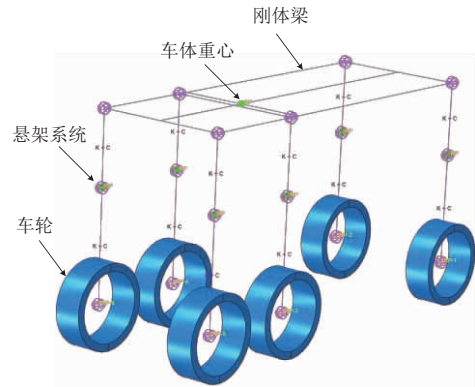


图9 车辆模型

表4 车辆模型参数

参数	数值
车体质量 m_v / kg	30 000
车体仰俯转动惯量 $I_v / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	40 000
车体侧翻转动惯量 $I_r / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	10 000
前轴车轮刚度系数 $k_{11}, k_{12} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	2 400
中后轴车轮刚度系数 $k_{13}, k_{14}, k_{15}, k_{16} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	4 800
前轴车轮阻尼系数 $c_{11}, c_{12} / (\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	6.0
中后轴车轮阻尼系数 $c_{13}, c_{14}, c_{15}, c_{16} / (\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	12.0
前轴悬架弹簧刚度系数 $k_{s1}, k_{s2} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 200
中后轴悬架弹簧刚度系数 $k_{s3}, k_{s4}, k_{s5}, k_{s6} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	2 400
前轴车轮阻尼系数 $c_{s1}, c_{s2} / (\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	5.0
中后轴悬架阻尼系数 $c_{s3}, c_{s4}, c_{s5}, c_{s6} / (\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	10.0
前轴到车体质心的距离 a_1 / m	3.36
中轴到车体质心的距离 a_2 / m	0.14
中轴到后轴之间的距离 a_3 / m	1.40
左右轮距离 B / m	1.80

表5 桥梁前3阶竖向频率模拟值与实测值的对比

阶数	实测值 / Hz	模拟值 / Hz	相对误差 / %	平均误差 / %
1	5.66	5.31	6.18	
2	16.02	16.17	0.91	6.14
3	27.15	24.08	11.31	

2.2.2 动载试验对比

在ABAQUS有限元模型中,计算了车辆以20 km/h驶过时桥梁跨中的竖向挠度,并与试验数据进行对比,结果见图10。

由图10可知,模拟与试验的跨中位移反应较为一致,表明本文建模及车桥耦合振动分析是正确的,可用来讨论不同车辆工况对桥梁动态响应的影响。

由图10可知,桥梁跨中竖向挠度的模拟数据与试验数据拟合良好,表明本文采用的计算方法是正

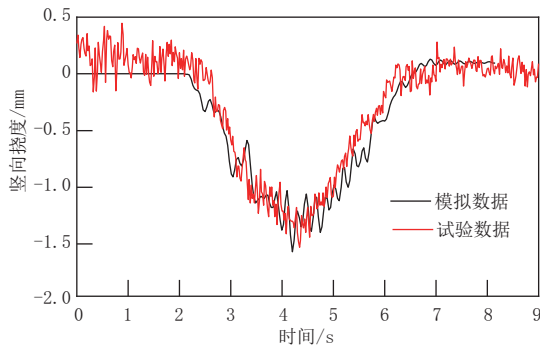


图 10 桥梁跨中竖向挠度模拟数据与试验数据对比

确的,可以用于有限元模拟。接下来将采用车桥耦合振动模型来分析不同参数对桥梁动态响应的影响。

3 钢 - 混组合简支梁桥冲击系数研究

3.1 桥梁模型

建立了 4 类跨径均为 40 m 的简支梁桥有限元模型,分别为钢 - 混组合箱梁桥(SCCB40)、钢 - 混组合工字梁桥(SCCI40)、预应力混凝土小箱梁桥(B40)和预应力混凝土 T 梁桥(T40)。它们均取自实际工程,设计荷载均为公路 -I 级。这 4 座桥梁梁高分别为 1.7、2.4、2.0、2.5 m;桥面宽度分别为 13、12.25、12、12 m;桥面铺装皆为 100 mm 沥青混凝土铺装层。表 7 列出了 4 座简支梁桥的基本参数,它们的跨中横断面如图 11 所示。

钢 - 混组合箱梁桥(SCCB40)和钢 - 混组合工字梁桥(SCCI40)的主梁及各受力构件钢材均采用 Q345qD 钢,预制桥面板采用 C50 混凝土。预应力混凝土小箱梁桥和预应力混凝土 T 梁主梁结构均采用 C50 混凝土,现浇层也采用 C50 混凝土。4 座简支梁桥桥面铺装层皆采用沥青混凝土。表 6 列出了本文简支梁桥有限元模型的材料参数。

运用 ABAQUS 建立 4 座简支梁桥上部结构的三维有限元模型。采用实体单元模拟小箱梁和 T 梁的主梁,壳单元模拟桥面铺装层、预制混凝土桥面板和钢主梁。实体单元类型选择 C3D8R 单元(八节点六面体线性减缩积分单元);壳单元类型选择 S4R 单元(四节点四边形线性减缩积分单元)。为了避免应力集中,边界约束条件施加在主梁底部与实际支座位置的接触面上。通过对 U1、U2、U3 这 3 个约束方向的选择,实现对固定支座、单向活动支座和双向活动支座的模拟。

4 座简支梁桥的有限元模型见图 12。

获取 4 座简支梁桥成桥状态下竖向前 2 阶自振频率,见表 7。利用 ABAQUS 获取 4 座简支梁桥的竖

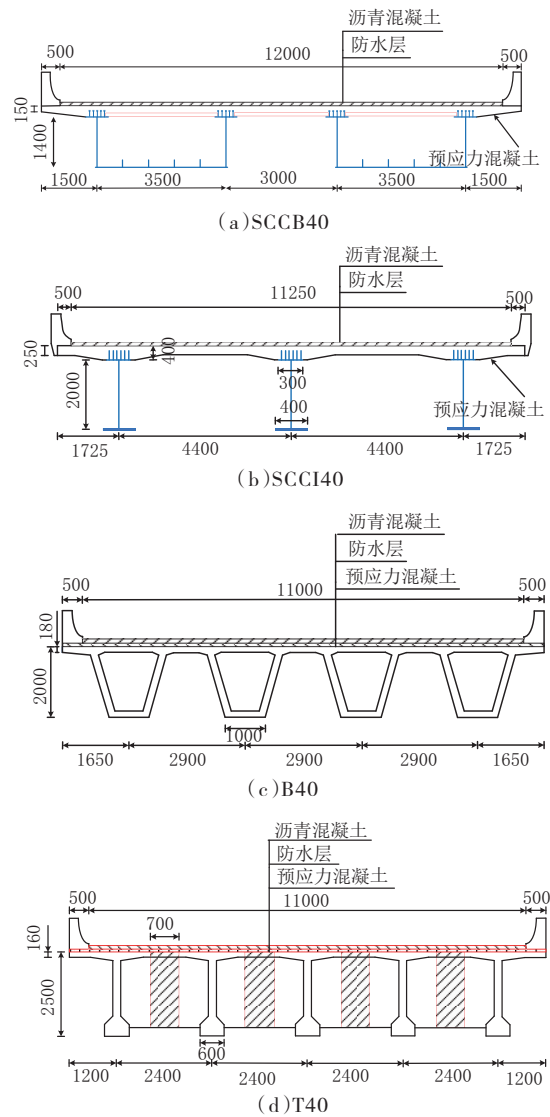


图 11 4 座桥梁横截面(单位:mm)

表 6 简支梁桥有限元模型材料参数

参数	C50 混凝土	Q345qD 钢材	沥青混凝土
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600	7 850	2 400
弹性模量 E / MPa	3.45×10^4	2.06×10^5	1.4×10^3
泊松比 μ	0.20	0.31	0.35
阻尼比 / %	5	2	5

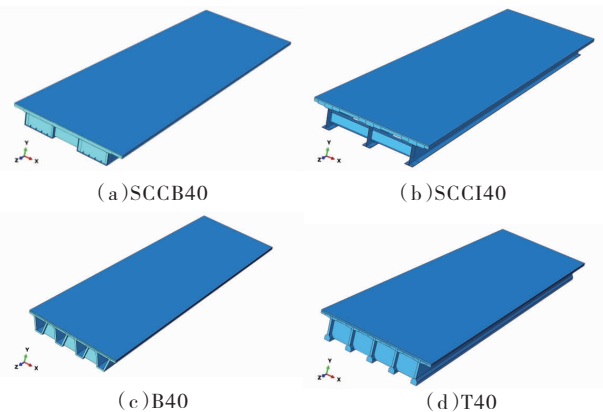


图 12 简支梁桥有限元模型

向1阶弯曲振型,见图13。

表7 桥梁模型自振频率

单位:Hz

阶次	SCCB40	SCCI40	B40	T40
1	2.31	2.70	2.37	3.04
2	6.49	2.85	5.66	3.64

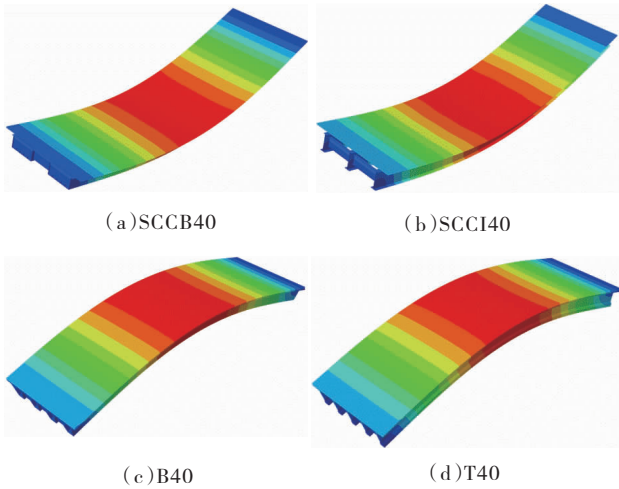


图13 简支梁桥竖向1阶弯曲振型

3.2 冲击系数影响因素研究

本文以跨中最大动位移与静位移之比来定义冲击系数^[11-13]。因路面不平度具有随机性的特点,计算中取10种路面不平度下模拟车桥耦合振动分析结果的平均值作为冲击系数的最终取值。

车辆行驶速度和路面不平度是影响桥梁冲击系数的重要因素。首先计算4座简支梁桥在不同行车速度(20~100 km/h)、A级和B级路面不平度下的冲击系数,结果如图14所示。

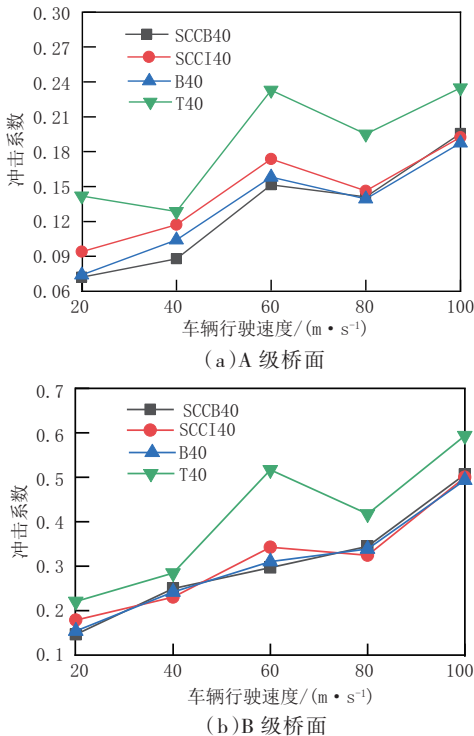


图14 车速对冲击系数的影响

由图14可知,4座简支梁桥在A级、B级2种路面不平度下,其冲击系数不一定随车速的增加而单调增大,但均有随着车速增加而波动上升的趋势,峰值均出现在速度为100 km/h时。现有研究对简支梁桥冲击系数受行车速度的影响大小尚无统一论,某些研究发现冲击系数随着车速的增加而增大^[14];也有研究表明车速对冲击系数的影响难以预测,冲击系数不一定随着车速的增加而单调增大或减小^[3];另有研究表明冲击系数随着车速的增加呈现波动分布的规律^[15]。本文的模拟结果符合这些认知,具备可信性。

不同不平度等级、不同桥型下冲击系数随速度增大的变化趋势是不同的。桥面不平度为A级时,4座桥梁在速度为80 km/h时均会出现冲击系数突变,显著小于60 km和100 km时;桥面不平度为B级时,仅有SCCI40和T40的冲击系数在80 km/h时发生突变。桥面不平度为A级、车速从20 km/h增加到60 km/h时,除T40的冲击系数在40 km/h时发生突变之外,另外3座桥的冲击系数均随着速度的增加而增加。

由本文所讨论的钢-混组合简支梁桥冲击系数问题可以看到,预应力混凝土T简支梁桥表现出了较大的冲击系数,随着车速和桥面不平度的变化显得“特立独行”;而SCCB40、SCCI40与B40的冲击系数比较一致,B40的冲击系数介于SCCB40与SCCI40之间,但彼此差别极小。

3.3 冲击系数与频率关系

《规范》将冲击系数定义为桥梁结构基频的函数,当基频 f 为1.5~14 Hz时,冲击系数是按对数增长的单调函数^[16]。由表7可知,4座简支梁桥按桥梁基频从小到大为SCCB40、B40、SCCI40和T40,频率分别为2.31、2.37、2.70、3.04 Hz。计算简支梁桥在2种桥面不平度下的冲击系数,并绘出冲击系数及其规范值随着桥梁基频从小到大变化的曲线,如图15所示。

由图15可见,当桥面不平度为A级时,采用车桥耦合振动方法计算的简支梁桥冲击系数与按《规范》确定的数值变化规律相同,大小也较为接近,均随着基频的增大而增大。桥面不平度等级为B级时,采用车桥耦合振动方法计算的冲击系数则明显大于规范值。这说明在桥面不平度为A级时,冲击系数的规范值是适用于钢-混组合简支梁桥的。

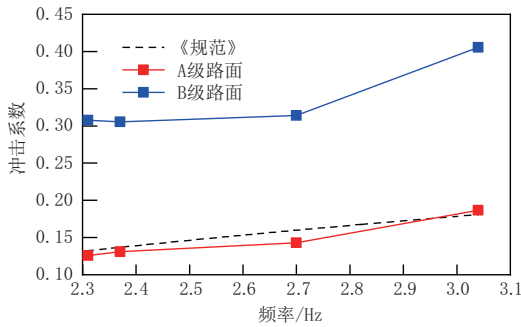


图 15 桥梁冲击系数与桥梁基频(竖向)

4 结 语

(1)随着车速的增加,简支梁桥的冲击系数都呈现波动上升的趋势,其中预应力混凝土简支 T 梁桥表现出较大的冲击系数值,而其余 3 类桥型较为一致。

(2)在路面不平度为 A 级时,从平均角度看,可以利用现行规范公式计算钢-混组合简支梁桥冲击系数,但仍需结合更多的现场试验和数值分析工作,对钢-混组合简支梁桥冲击系数问题深入研究。

参考文献:

[1] 周中涛,王东升,王荣霞,等.基于车-桥耦合振动的钢-混组合工字梁桥动力冲击系数研究[J].地震工程与工程振动,2022,42(5): 127-137.

[2] 施颖,田清勇,宋一凡,等.基于 ANSYS 的公路桥梁车桥耦合振动响应数值分析方法[J].公路,2010(3): 66-70.

[3] 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.

[4] FAFARD M, LAFLAMME M, SAVARD M, et al. Dynamic analysis

of existing continuous bridge[J].Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(1): 28-37.

[5] 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.

[6] AASHTO, Standard specifications for highway bridges[S].

[7] 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.

[8] SAMAAAN M S. Dynamic and static analyses of continuous curved composite multiple-box girder bridges[D]. Ontario: University of Windsor, 2004.

[9] SAMAAAN M, KENNEDY J B, SENNAH K. Impact factors for curved continuous composite multiple-box girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(1): 80-88.

[10] LU X, KIM C W, CHANG K C. Finite element analysis framework for dynamic vehicle-bridge interaction system based on ABAQUS[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(3): 2050034.

[11] 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(3): 230-240.

[12] 盛国刚,彭献,李传习.连续梁桥与车辆耦合振动系统冲击系数的研究 [J].桥梁建设,2003(6): 5-7.

[13] 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.

[14] CHANG D, LEE H. Impact factors for simple-span highway girder bridges[J].Journal of Structural Engineering, 1994, 120(3): 704-715.

[15] DENG L, HE W, SHAO Y. Dynamic impact factors for shear and bending moment of simply supported and continuous concrete girder bridges[J].Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(11): 04015005.

[16] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com