第 33 卷　第 4 期　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　Vol. 33　No. 4
2020 年 12 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Dec. 2020

移动荷载作用下两跨钢-混组合连续梁桥面铺装动力响应

严战友，　王旭蕊，　李向国，　赵晓林

(石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄　050043)

摘要:为研究移动荷载作用下两跨钢-混组合连续梁桥面铺装系统响应,基于有限元软件 ABAQUS 建立两跨钢-混组合连续梁模型,桥面铺装采用线弹性本构关系,对桥面铺装层施加竖向均布移动载荷,荷载采用 Fortran 编写的子程序 DLOAD 实现,分析不同跨数、不同速度、不同载重、不同剪力钉布置和不同轴数等参数作用下,两跨钢-混组合连续梁铺装层的挠度、应力和冲击系数等动力响应。结果表明:在竖向移动荷载作用下两跨钢-混组合连续梁第二跨竖向挠度较大,随着车速的增加先增大后减小,随载重的增加而增大,并随车辆轴数的增加而增大;竖向应力在车速较高时有较大值,并随载重的增加而增大;在横向应力上,铺装层主要承受压应力,而剪力钉和主纵梁主要承受拉应力;在纵向应力上,桥梁各层主要承受压应力;剪力钉的布置对纵桥向剪应力的提高有显著作用;冲击系数随速度的提高变大并趋向稳定,随载重的增加而先减小后增大。

关键词:移动荷载;两跨钢-混组合连续梁;桥面铺装;动力响应

中图分类号: U441.3　**文献标志码**: A　**文章编号**: 2095-0373(2020)04-0001-09

0　引言

钢-混组合连续梁桥由于具有良好的力学特性和便于施工、清洁环保等优势而得到广泛应用。随着交通运输业的发展,人们对车辆的速度、载重量和舒适度等提出了更高要求。而在桥梁成桥运营中,桥梁结构普遍出现车辙、开裂、推移和拥包等破坏现象,这与车辆-桥梁耦合作用的影响密切相关。

国内外专家学者对车-桥耦合系统进行了许多理论和试验分析,得出相应力学规律。其中,国内代表性的研究有:郑仰坤等[1]针对不同跨径比的两跨连续梁利用 Midas 有限元分析软件和 DASP 设备分别对连续梁进行模态分析,得出不同跨径比下连续梁固有频率的变化规律并与模态分析试验结果进行对比;谭红霞等[2]基于不同载重与速度对简支梁桥竖向挠度作出针对性研究;杜铁军[3]从线弹性角度分析移动荷载作用下钢筋混凝土简支梁桥桥面铺装层的竖向挠度、应力、应变和剪应力等变化规律;朱劲松等[4]采用不同参数对汽车荷载作用下三跨连续拱梁组合桥的冲击系数进行分析;剪力钉受力十分复杂,刘沐宇等[5]考虑有轨电车钢-混组合曲线梁桥在不同工况下剪力钉顺桥向和横桥向剪力,作出受力分析;史双涛等[6]利用有限元软件 Midas 计算分析移动荷载作用下混凝土简支梁在车辆荷载作用下的位移和弯矩时程曲线;叶强[7]利用有限元软件 ANSYS 和 UM 建立车-桥耦合振动模型,分析车辆质量对简支梁桥冲击系数的影响,从而得出冲击系数随车重的增加而整体增加的趋势;肖祥等[8]开展了移动荷载作用下桥梁结构桥索-桥耦合随车速变化的振动规律的分析研究;冀伟等[9]采用有限元软件 ANSYS 建立钢筋-混凝土两跨组合连续梁空间有限元模型,其中在有限元建模时在主纵梁上双排布置剪力钉,施加满跨均布荷

收稿日期:2019-08-08　**责任编辑**:车轩玉　DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190127

基金项目:国家自然科学基金(111172183);中央引导地方科技发展专项(18242219G)

作者简介:严战友(1972—),男,博士,副教授,研究方向为路面动力学。E-mail:yanzhanyou@163.com

严战友,王旭蕊,李向国,等.移动荷载作用下两跨钢-混组合连续梁桥面铺装动力响应[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(4):1-9.

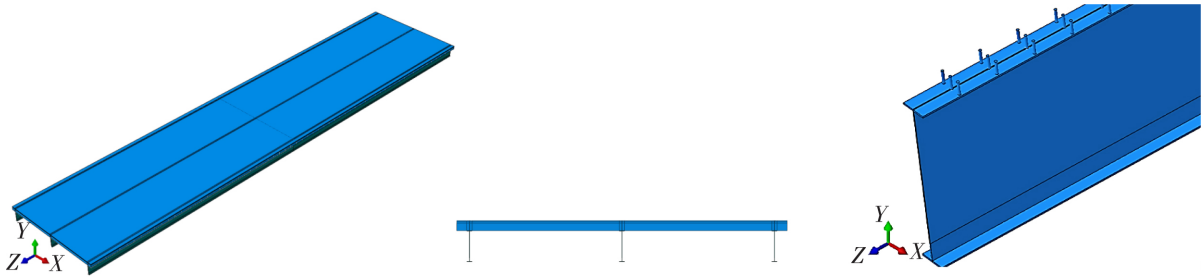
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

载,在考虑钢梁与混凝土板之间的滑移效应及组合梁剪切变形影响的基础上,对两跨钢-混凝土组合连续梁挠度作出分析。国外代表性的研究有:Jiang Xin et al[10]基于现场试验和有限元分析研究了 FRP 桥面系统在移动荷载作用下的动力学行为;Yao Bo et al[11]通过将车轮荷载模拟为动载,采用有限元法和力学指标研究了 6 种路面系统在移动荷载作用下的动力响应,并与静态试验结果进行了比较,得出了最优结构;Nassif et al[12]通过测量桥梁动力响应和对应的车辆荷载,得出冲击系数与载重之间的关系。综上所述,大多数专家学者对桥面铺装仅仅研究了竖向挠度、应力或者冲击系数等单一方面的受力特性,而没有综合考虑结构的动力响应,缺少对动力响应问题的系统性分析。并且,较多学者对简支梁桥、三跨连续梁桥和斜拉桥等计算分析较多,而对于两跨钢-混组合连续梁桥桥面铺装的受力分析尚待补充。此外,桥面铺装层动力响应受不同速度和不同载重影响的研究较广泛,而对于不同跨数、不同剪力钉布置和不同轴数等因素共同作用下动力响应的综合研究不充分。

采用有限元分析软件 ABAQUS 建立两跨钢-混组合连续梁有限元模型,对桥面铺装层施加竖向移动荷载,采用线弹性的本构关系求解桥面铺装层在不同跨数、不同速度、不同载重、不同剪力钉布置和不同轴数等参数作用下挠度、应力和冲击系数等变化规律,更加完整地考虑了结构的输入-输出动态响应,对两跨钢-混组合连续梁桥的设计具有参考意义。

1 两跨钢-混组合连续梁有限元模型

在 ABAQUS 有限元软件中建立钢-混组合连续梁桥(含桥面铺装结构层)有限元模型,见图 1。桥面铺装结构简化为 3 层:沥青上面层(AC-13C)、沥青下面层(SUP-25)、C50 混凝土,为防止水泥混凝土移动,在水泥混凝土与钢梁之间设置剪力钉。



(a)连续梁整体模型 (b)连续梁横断面 (c)剪力钉布置

图 1 两跨钢-混组合连续梁(桥面铺装结构)有限元模型

钢-混组合连续梁桥分为两跨 60 m,每跨 30 m,宽度 13 m,桥梁纵向由 3 片工字钢主纵梁组成,工字钢纵梁高 1.224 m,主梁间距 6 m。选用 C3D8R 八节点实体单元对钢-混组合连续梁桥有限元模型进行网格划分,为保证计算结果的精确性,移动荷载经过位置网格加密[13-14]。

纵梁采用 Q345D 钢,材料为均质、各向同性的线弹性材料,桥面铺装层间完全连续,桥面铺装层具体参数见表 1。

表 1 桥面铺装结构材料参数表[15]

铺装层结构	厚度/mm	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
上面层(AC-13C)	40	1 159	0.3	2 300
下面层(SUP-25)	60	1 592	0.3	2 300
水泥混凝土层	300	295 000	0.2	2 400
纵梁顶板	12	210 000	0.3	7 800
纵梁底板	12	210 000	0.3	7 800

利用有限元法将两跨钢-混组合连续梁桥进行离散,桥梁振动方程

$$[M]\ddot{\boldsymbol{Y}}+[C]\dot{\boldsymbol{Y}}+[K]\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{F} \tag{1}$$

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

式中，$[M]$、$[C]$、$[K]$分别为质量、阻尼、弹性刚度矩阵；$\ddot{Y}$、$\dot{Y}$、Y 分别为加速度、速度、位移等向量；F 为载荷向量。

求解钢混组合桥动力方程时，阻尼矩阵采用瑞利阻尼假设。

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K] \tag{2}$$

式中，α、β 为阻尼系数，采用经验公式确定

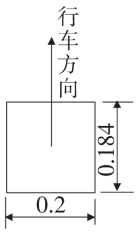
$$\alpha=\frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2-\xi_2\omega_1)}{\omega_2^2-\omega_1^2} \tag{3}$$

$$\beta=\frac{2(\xi_2\omega_2-\xi_1\omega_1)}{\omega_2^2-\omega_1^2} \tag{4}$$

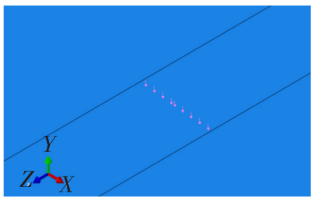
式中，ω_1、ω_2 为两跨钢-混组合连续梁前两阶固有频率；ξ_1、ξ_2 为前两阶振型阻尼比。

2　移动均布荷载在有限元模型中的实现

利用有限元软件 ABAQUS 建模，采用单轮组单轴载，轮胎接地形状简化为矩形[16]，即荷载作用区长度为 0.184 m，宽度为 0.2 m，见图 2(a)，轮胎接地压强为 0.7 MPa。将行车荷载简化为竖向荷载并通过调用 Fortran 语言编写的子程序 DLOAD 来实现移动荷载的施加，见图 2(b)。



(a)矩形荷载作用区示意图(单位：m)



(b)荷载施加方式

图 2　移动均布荷载作用示意图

3　模态分析

假设连续梁每跨具有均匀分布的质量和刚度，由艾勒尔-柏努利(Euler-Bernoulli)梁理论，两相邻等跨连续梁第 s 跨的第 n 阶阵型函数可表示为

$$\varphi_{ns}(x)=A_{ns}\sin\alpha_{ns}x+B_{ns}\cos\alpha_{ns}x+C_{ns}\sinh\alpha_{ns}x+D_{ns}\cosh\alpha_{ns}x \tag{5}$$

对应的第 n 阶固有频率为

$$\omega_n=\alpha_n^2\sqrt{\frac{EI}{m}}=\frac{1}{l^2}(\pi^2,3.927^2,4\pi^2,7.069^2,9\pi^2,10.210^2,\cdots)\sqrt{\frac{EI}{m}} \tag{6}$$

式中，E 为弹性模量；I 为惯性矩；m 为质量。

采用 Lanczos 方法计算该桥梁的前三阶固有频率，并与精确解相比较，结果见表 2。

表 2　固有频率表

阶数	计算值/Hz	精确解值/Hz	误差百分比/%
一阶	0.366 7	0.368 5	4.9
二阶	0.571 6	0.576 3	8.2
三阶	1.403 3	1.474 0	5.0

由表 2 可以看出：有限元法计算的固有频率值与理论精确解值存在一定误差，相对误差不大于 10%，在误差允许范围内。因此，利用此有限元模型的结果进行分析计算是较为真实可靠的。

4　两跨钢-混组合连续梁桥各层的动力响应

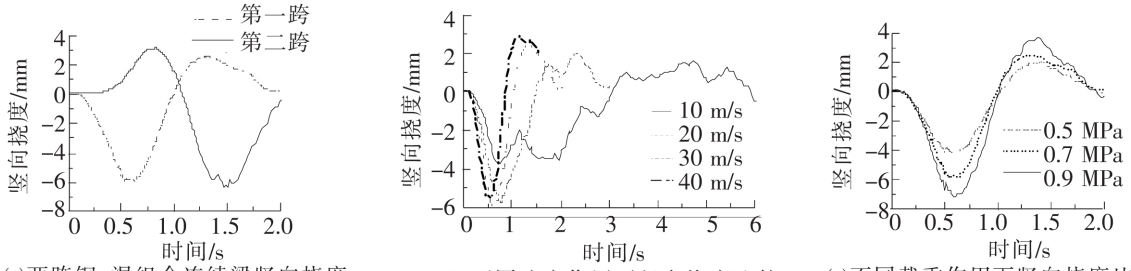
依据上述有限元模型，计算分析移动荷载作用下连续梁桥第一跨跨中上面层位移、应力和冲击系数

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

等动力响应,讨论移动荷载的速度、载重以及剪力钉布置和轴数等对连续梁桥动力响应的影响。

4.1 桥面铺装层各跨竖向挠度分析

图3给出了速度为30 m/s时两跨钢-混组合连续梁跨中上面层的竖向挠度曲线,并分析移动荷载分别以不同速度、不同载重通过桥面时,两跨连续梁桥第一跨跨中竖向挠度的变化趋势。



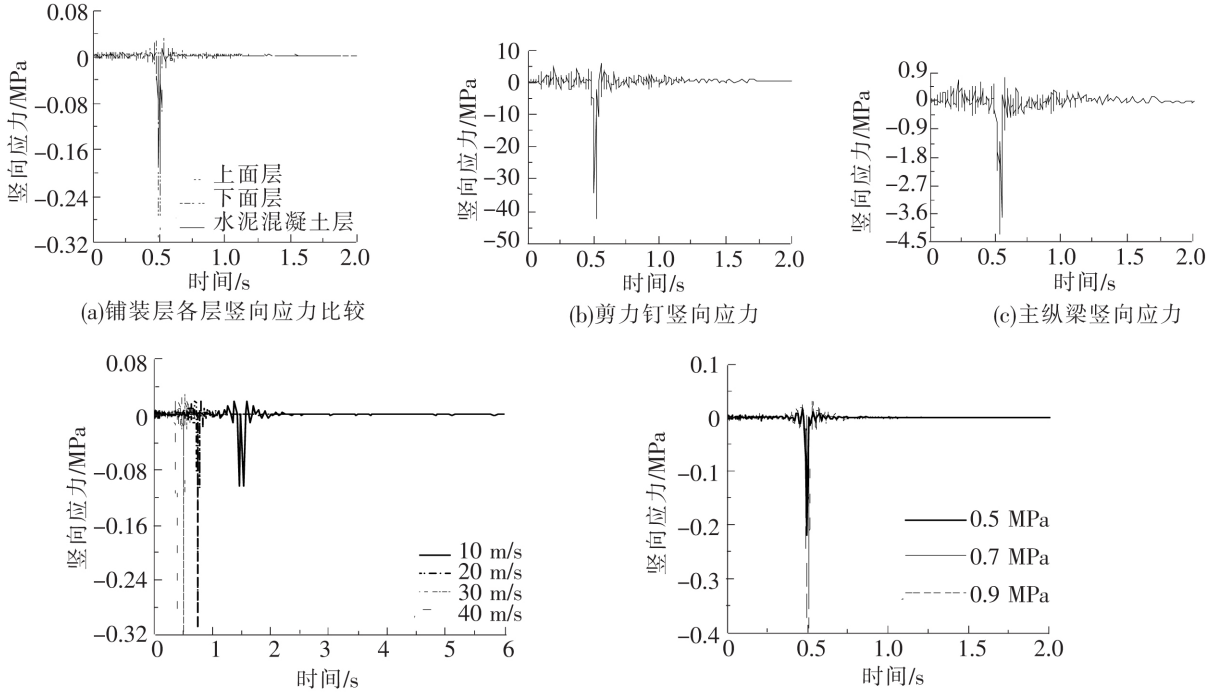
(a)两跨钢-混组合连续梁竖向挠度 (b)不同速度作用下竖向挠度比较 (c)不同载重作用下竖向挠度比较

图3 两跨钢-混组合连续梁竖向挠度比较

由图3可以看出:(1)在移动速度为30 m/s作用下,连续梁第一跨、第二跨跨中上面层竖向挠度最大值分别为6.02 mm、6.41 mm。第二跨竖向挠度较大,相差0.39 mm。(2)观察两跨跨中的竖向挠度图形可知,桥梁各跨跨中位置竖向挠度最大值分别出现在0.6 s和1.5 s时刻,不一定精确地出现在跨中位置(对应时刻应为0.5 s和1.5 s),而是在跨中左右位置上。(3)在移动荷载作用下,连续梁第一跨竖向挠度变化比较复杂,其中,当移动荷载速度从10 m/s增至20 m/s、30 m/s、40 m/s时,其竖向最大挠度分别为3.76 mm、5.80 mm、6.02 mm、5.55 mm。以上数据说明,当移动荷载速度从10 m/s增至30 m/s时,连续梁竖向挠度有一定程度增加;当移动荷载速度从30 m/s增至40 m/s时,连续梁竖向挠度减小。此外,当移动荷载速度越低,竖向动挠度随时间波动越明显。(4)随着载重由0.5 MPa分别增加至0.7 MPa、0.9 MPa时,载重分别提高了40%和29%。跨中竖向挠度随载重的增加而增加,分别为4.34 mm、6.02 mm、7.24 mm,分别提高了39%和20%,这与载重的增加总体上呈线性变化。

4.2 桥面铺装层各跨竖向应力分析

图4给出了桥面各铺装层竖向应力变化曲线。



(a)铺装层各层竖向应力比较 (b)剪力钉竖向应力 (c)主纵梁竖向应力

(d)不同速度作用下竖向应力比较 (e)不同载重作用下竖向应力比较

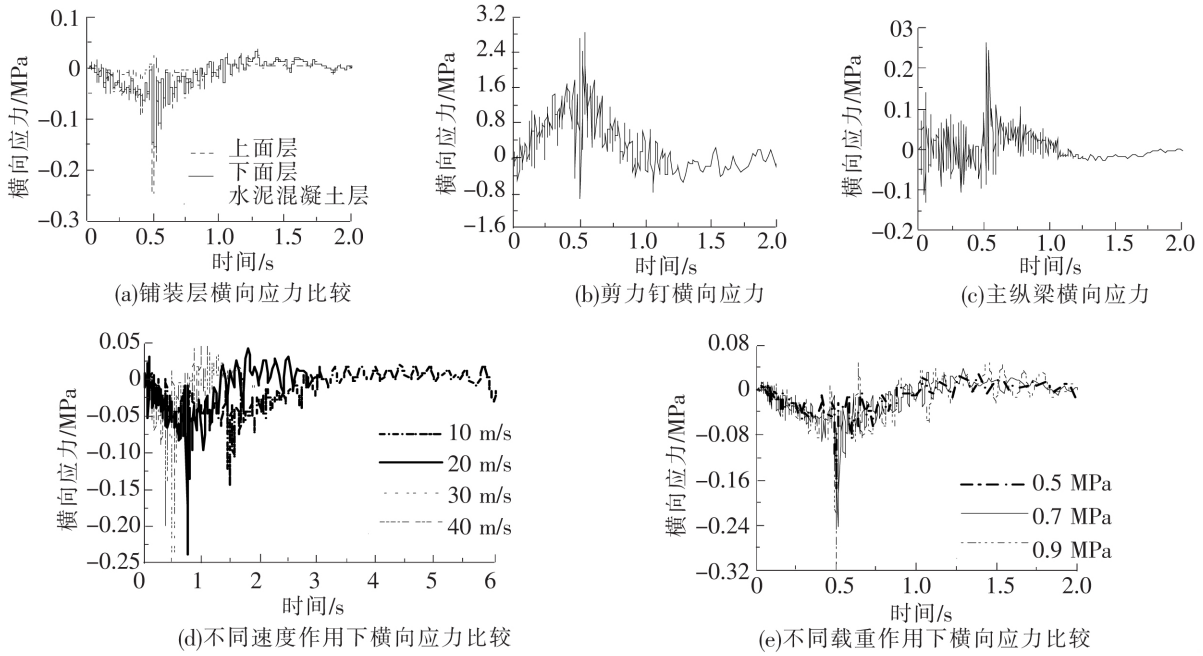
图4 两跨钢-混组合连续梁竖向应力比较

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

由图 4 可以看出：(1)在竖向应力方面，两跨钢-混组合连续梁桥面铺装层主要承受压应力，上面层、下面层和水泥混凝土层的最大压应力分别为 0.32 MPa、0.28 MPa、0.19 MPa，各层最大压应力相差 0.04 MPa、0.09 MPa。可见移动荷载作用下路面结构的垂直动应力随深度的增加而减小。(2)在竖向应力方面，剪力钉主要承受压应力，其最大压应力为 43.07 MPa。与路面结构上面层、下面层和水泥混凝土层相比，剪力钉的竖向最大压应力远远大于其上各层。第一跨主纵梁主要承受压应力，最大压应力为 4.29 MPa。剪力钉在水泥混凝土层协助承受压应力效果明显。主纵梁最大压应力值较剪力钉最大压应力值降低了 10%。(3)当在 10 m/s 时，最大竖向压应力为 0.10 MPa；当速度在 20～40 m/s 范围内最大竖向压应力值均在 0.3 MPa 左右。可见低速移动荷载作用下对桥面铺装层竖向应力很小，但在中速和高速移动荷载作用下，桥面铺装层会出现较大竖向压应力，其最大竖向压应力约为低速状态的 3 倍。并且，当移动荷载接近和离开作用位置时，铺装层内出现较小拉应力。(4)随着载重由 0.5 MPa 分别增加至 0.7 MPa、0.9 MPa 时，载重分别提高了 40%和 29%，连续梁桥跨中竖向压应力和竖向拉应力均变大，其中，竖向压应力变化幅度较大，其最大值分别为 0.22 MPa、0.32 MPa、0.40 MPa，提高了 45%和 25%，这与载重的增加大致呈线性变化。

4.3　桥面铺装层各跨横向应力分析

图 5 给出了桥面各铺装层横向应力变化曲线。



(a)铺装层横向应力比较　(b)剪力钉横向应力　(c)主纵梁横向应力

(d)不同速度作用下横向应力比较　(e)不同载重作用下横向应力比较

图 5　两跨钢-混组合连续梁横向应力比较

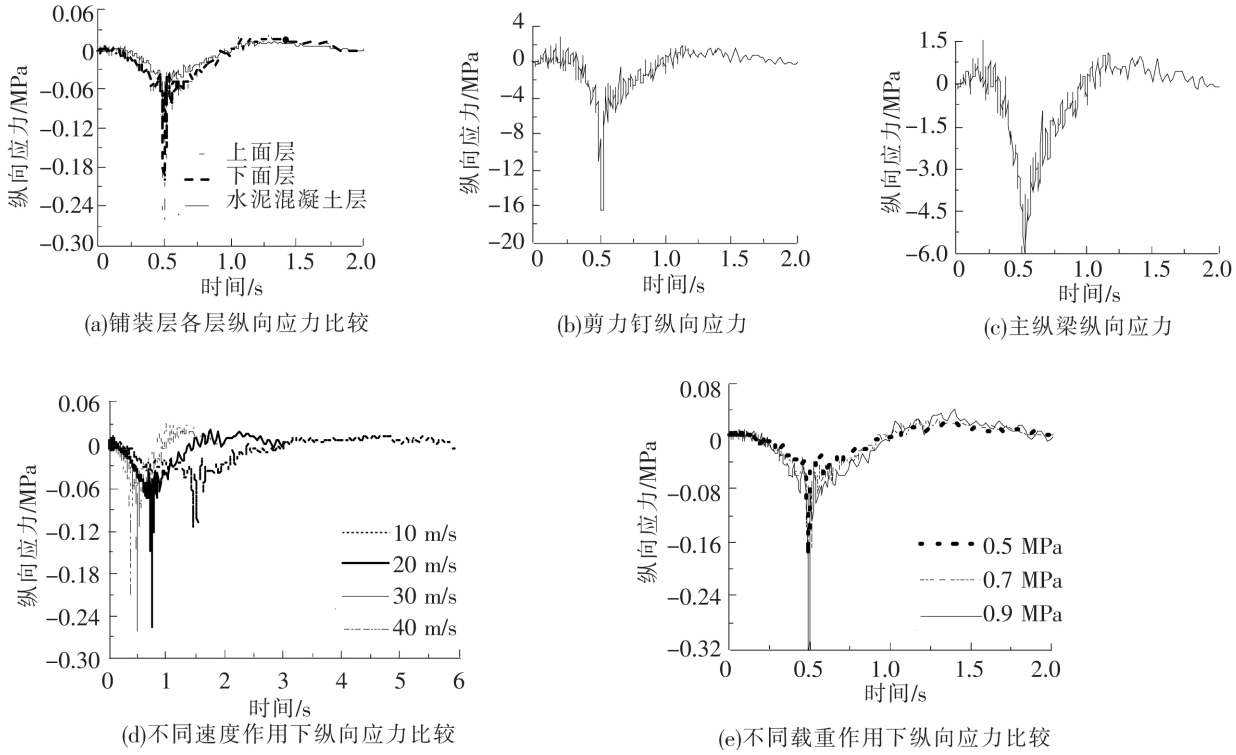
由图 5 可以看出：(1)在横向应力方面，两跨钢-混组合连续梁桥面铺装层主要承受压应力，各层最大压应力相差不大。其中，上面层、下面层和水泥混凝土层的最大压应力分别为 0.24 MPa、0.16 MPa、0.038 MPa。由此可见，加入剪力钉大幅减小了水泥混凝土层所受横向应力。(2)剪力钉既承受拉应力又承受压应力。其中，最大拉应力为 2.87 MPa；最大压应力为 0.90 MPa。可见，剪力钉主要承受拉应力，最大拉应力值为最大压应力值的 3.19 倍。(3)在横向应力方面，主纵梁既承受拉应力又承受压应力。其中，最大拉应力为 0.26 MPa；最大压应力为 0.13 MPa。可见，主纵梁主要承受拉应力，其最大拉应力值为最大压应力值的 2 倍。(4)当在低速状态 10 m/s 时横向应力较小，为 0.15 MPa；当速度在 20～30 m/s 范围内，横向应力呈现出随速度的提高有较小增长；当速度为 40 m/s 时，横向应力显现出降低的趋势。整体上来看当移动荷载处于中高速状态时，所受横向压应力(约 0.24 MPa)较低速状态时提高了 60%；当移动荷载处于超速状态时，所受横向压应力(0.2 MPa)较低速状态时提高了

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

30%。同时,当移动荷载接近和离开作用位置时,铺装层内出现了较小拉应力,且横向拉应力随着车速提高略有增大。(5)随着载重由0.5 MPa分别增加至0.7 MPa、0.9 MPa时,载重分别提高了40%和29%,跨中横向压应力和横向拉应力均变大。其中,横向压应力变化幅度较大,其最大值分别为0.18 MPa、0.24 MPa、0.31 MPa,提高了33%和29%,这与载重的增加大致呈线性变化。

4.4 桥面铺装层各跨纵向应力分析

图6给出了桥面各铺装层纵向应力变化曲线。



(a)铺装层各层纵向应力比较 (b)剪力钉纵向应力 (c)主纵梁纵向应力

(d)不同速度作用下纵向应力比较 (e)不同载重作用下纵向应力比较

图6 两跨钢-混组合连续梁纵向应力比较

由图6可以看出:(1)在纵向应力方面,两跨钢-混组合连续梁桥面铺装层主要承受压应力,面层最大压应力相差不大,而水泥混凝土层纵向应力明显减小。其中,上面层、下面层和水泥混凝土层的最大压应力分别为0.26 MPa、0.20 MPa、0.099 MPa。剪力钉主要承受压应力,最大压应力为16.42 MPa。由此可见,加入剪力钉大幅减小了水泥混凝土层所受纵向应力。主纵梁主要承受压应力,最大压应力为6.05 MPa。(2)在10~20 m/s速度范围内,最大纵向压应力随车速的提高而增大;在20~30 m/s速度范围内,最大纵向压应力随车速的提高无显著变化;在30~40 m/s速度范围内,最大纵向压应力随车速的提高呈现出减小的趋势。(3)随着载重由0.5 MPa分别增加至0.7 MPa、0.9 MPa时,载重分别提高了40%和29%,跨中纵向压应力和纵向拉应力均变大,其中,纵向压应力变化幅度较大,其最大值分别为0.18 MPa、0.26 MPa、0.33 MPa,提高了44%和27%,这与载重的增加大致呈线性变化。

4.5 桥面铺装层冲击系数分析

冲击系数反映了动力荷载对桥梁结构的动力作用。表3和表4给出了桥面各铺装层冲击系数变化趋势。

汽车荷载的冲击系数可表示为

$$\eta=\frac{Y_{d\max}}{Y_{j\max}} \tag{7}$$

式中,$Y_{j\max}$为在汽车过桥时测得的效应时间历程曲线上,最大静力效应处量取的最大静力效应值;$Y_{d\max}$为在效应时间历程曲线上最大静力效应处量取的最大动挠度值。

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

其中，静挠度值由动挠度图形采用三次多项式[17]拟合而得。

表 3　不同速度下桥梁第一跨跨中竖向最大动挠度、静挠度和冲击系数表

速度/(m·s^{-1})	最大动挠度/mm	最大静挠度/mm	冲击系数
10	3.76	2.97	0.27
20	5.80	4.35	0.33
30	6.02	4.39	0.37
40	5.55	4.12	0.35

由表 3 可以看出：移动荷载作用下，冲击系数随速度的提高有变大并且逐渐稳定的趋势。移动荷载速度越低，竖向动挠度随时间波动越明显。

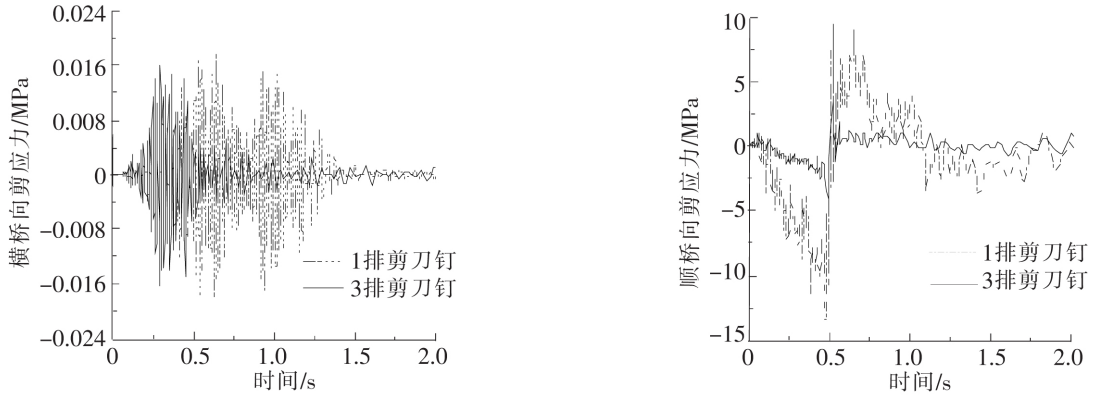
表 4　不同载重下桥梁第一跨跨中竖向最大动挠度、静挠度和冲击系数表

载重/MPa	最大动挠度/mm	最大静挠度/mm	冲击系数
0.5	4.34	2.82	0.54
0.7	6.02	4.39	0.37
0.9	7.25	4.66	0.56

由表 4 可以看出：随着载重的增加，冲击系数显示为先减小后增大的趋势，甚至超过了一般情况下汽车引起的冲击系数。在一定载重范围内，虽然冲击系数随载重的增大而有所降低，但这 3 种情况下载重为 0.9 MPa 时的冲击系数最大。

4.6　不同剪力钉布置时连续梁桥的动力响应分析

分析移动荷载速度为 30 m/s、载重为 0.7 MPa，以每根主纵梁上不同剪力钉布置情况下通过桥面时，两跨连续梁桥第一跨跨中剪力钉的横桥向剪应力和顺桥向剪应力的动力响应以及各响应最大值的变化趋势，结果见图 7。



(a)不同剪力钉布置时横桥向剪应力　　(b)不同剪力钉布置时顺桥向剪应力

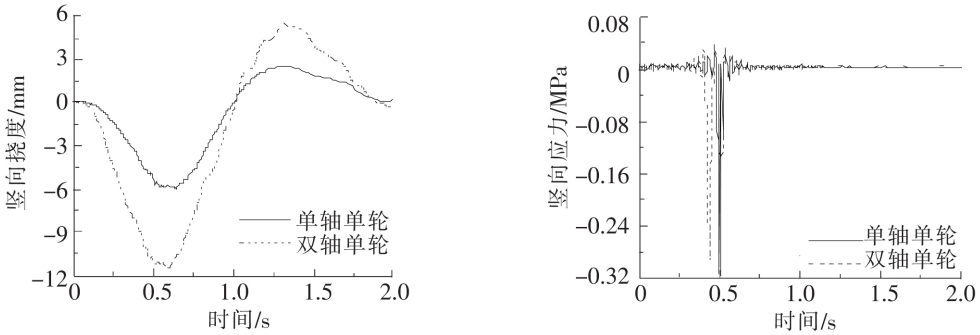
图 7　不同剪力钉布置时各桥向剪应力

由图 7 可以看出：(1) 随着剪力钉由 1 排增加至 3 排时，横桥向剪应力均为 0.02 MPa，增加剪力钉对横桥向剪力几乎没有影响。(2) 随着剪力钉由 1 排增加至 3 排时，顺桥向剪应力最大值分别为 13.80 MPa 和 5.15 MPa，最大顺桥向剪应力减小了 37%。

4.7　不同轴数时连续梁桥的动力响应分析

为分析车辆轴数对桥面铺装层的影响，将移动荷载设为单轴单轮和双轴单轮对比，结果见图 8。

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



(a)不同轴数时竖向挠度比较 (b)不同轴数时竖向应力比较

图8 不同轴数作用下桥面动力响应

由图8可以看出:(1)车辆轴数对两跨连续梁竖向挠度影响较大,其中当车辆为单轴单轮时,连续梁第一跨竖向挠度为6.02 mm;当车辆为双轴单轮时,连续梁第一跨竖向挠度为11.52 mm,其竖向挠度增加了91.36%。(2)车辆轴数对两跨连续梁竖向应力影响不大,当车辆为单轴单轮时,连续梁第一跨竖向应力为0.32 MPa;当车辆为双轴单轮时,连续梁第一跨竖向应力为0.30 MPa,相差0.02 MPa。

5 结论

通过建立两跨钢-混组合连续梁有限元模型,可以获得移动荷载作用下铺装系统的动力响应。结果表明:

(1)在移动荷载作用下,两跨钢-混组合连续梁竖向挠度有一定差距,其中第二跨竖向挠度较大;随着车速的增加,两跨钢-混连续梁桥竖向挠度先增大后减小,在车速为30 m/s时有最大值;竖向挠度的最大值随载重增长关系接近于线性;竖向挠度的最大值随车辆轴数的增加而增加。

(2)移动荷载作用下路面结构的垂直动应力随深度的增加而减小;低速移动荷载作用下对桥面铺装层的竖向应力很小,但在中速和高速移动荷载作用下桥面铺装层会出现较大竖向应力,其最大竖向压应力约为低速状态的3倍;竖向压应力的最大值随载重增长关系接近于线性;车辆轴数的改变对竖向应力几乎没有影响。

(3)在横向应力上,铺装层主要承受压应力,而剪力钉和主纵梁主要承受拉应力;中高速状态时铺装层所受横向压应力较低速状态时提高了60%,超速状态情况下横向压应力较低速状态时提高了30%;横向应力的最大值随载重增长关系接近于线性。

(4)在纵向应力上,桥梁各层主要承受压应力;最大纵向压应力随车速的提高呈现出先增大后减小的趋势;纵向应力的最大值随载重增长关系接近于线性。

(5)冲击系数随速度的提高有变大并且趋向稳定的趋势;冲击系数在一定载重范围内显示为先减小后增大的趋势。

(6)剪力钉的布置对桥梁的抗剪能力有一定的提高,特别是在顺桥向方向可承受较大剪应力。

参 考 文 献

[1]郑仰坤,袁向荣. 不同跨径比的两跨连续梁的模态分析试验[J]. 噪声与振动控制,2014,34(4):148-152.

[2]谭红霞,李建男,黎略,等. 基于不同载重与车速的简支梁桥动力响应[J]. 吉首大学学报:自然科学版,2013,34(2):87-90.

[3]杜铁军. 钢筋混凝土箱梁桥桥面铺装有限元分析[D]. 大连:大连理工大学,2011.

[4]朱劲松,徐余锋. 基于车桥耦合的三跨连续拱梁组合桥冲击系数研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(4):959-967.

[5]刘沐宇,翟志雄,李倩,等. 有轨电车钢-混组合曲线梁桥剪力钉受力分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2019,43(1):1-5.

[6]史双涛,上官长城. 临时钢栈桥在车辆荷载作用下的动力响应[J]. 公路交通科技:应用技术版,2019,15(5):221-224.

[7]叶强. 车辆重量对简支梁桥冲击系数的影响分析[J]. 公路交通科技:应用技术版,2018,14(7):247-249.

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

[8]肖祥,薛浩,何雄君,等. 移动荷载作用下索-桥耦合振动分析研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2018,42(3):402-406.
[9]冀伟,孙斌,邓露,等. 多因素影响下钢-混连续组合梁的挠度计算分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2019,46(5):30-38.
[10]Jiang Xin, John Ma Zhongguo, Song Jing. Effect of shear stud connections on dynamic response of an FRP deck bridge under moving loads[J]. Journal of Bridge Engineering,2013,18(7):644-652.
[11]Yao Bo, Qian Zhendong. Analysis of dynamic responses of deck pavements for long-span steel box girder bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development:English Edition,2008,3(1):25-28.
[12]Nassif H H, Nowak A S. Dynamic load spectra for girder bridges [J]. Journal of Structural Engineering,1995,1476:69-83.
[13]杜翔. 车辆荷载作用下沥青混凝土桥面铺装层力学特性研究[D]. 西安:长安大学,2014.
[14]廖公云,黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京:东南大学出版社,2008.
[15]严明星,王金昌. ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2016.
[16]郭红兵,王宁,吕光印. 轮胎-沥青路面接触效应数值分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2011,32(1):34-37.
[17]王磊. 梁、连续梁、刚架静力及影响线的新解法[J]. 湖南大学学报,1983,10(2):58-73.

Dynamic Response of Bridge Deck Pavement of Two-Span Steel-Concrete Composite Continuous Beams Under Moving Loads

Yan Zhanyou,　Wang Xurui,　Li Xiangguo,　Zhao Xiaolin

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the response of the two-span steel-concrete composite continuous girder pavement system under moving loads, a two-span steel-hybrid composite continuous beam model was established based on the finite element software ABAQUS. The bridge deck pavement adopted the linear elastic constitutive relation to the bridge. The vertical paving moving load was applied to the pavement layer. The load was realized by the subroutine DLOAD written by Fortran. The two spans' dynamic response of deflection, stress and impact coefficient of steel-hybrid composite continuous beam pavement was analyzed under different parameters such as different spans, different speeds, different loads, different shear pin arrangements and different number of axes. The results show that the vertical deflection of the two-span steel-concrete composite continuous beam under the vertical moving load is larger, and increases first and then decreases with the increase of the vehicle speed, and increases with the increase of the load, and the vehicle The number of axes increases with the increase of the number of axles; the vertical stress has a larger value when the vehicle speed is higher, and increases with the increase of the load; in the lateral stress, the pavement layer mainly bears the compressive stress, while the shearing nail and the main longitudinal beam Mainly subjected to tensile stress; in the longitudinal stress, the layers of the bridge mainly bear the compressive stress; the arrangement of the shearing nail has a significant effect on the improvement of the shear stress of the longitudinal bridge; the impact coefficient has become larger and tends to be stable with the increase of the speed. The trend decreases first and then increases as the load increases.

Key words: moving load; two-span steel-concrete composite continuous beam model; deck pavement; dynamic response

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