

城市立交匝道的车-桥耦合振动响应分析

The Response Analysis of Vehicle-Bridge Coupled Vibration for City Overpass Ramp

胡文军¹, 王培森^{2,3}, 韩小舟²

(1. 山东建筑大学交通工程学院, 济南 250101;

2. 山东建筑大学土木工程学院, 济南 250101; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

HU Wen-jun¹, WANG Pei-sen^{2,3}, HAN Xiao-zhou²

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. School of Civil Engineering,

Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

【摘要】依托工程实例,建立匝道车-桥耦合系统振动分析的数值仿真模型。利用大型通用软件 ANSYS 建立桥梁的动力模型,进行匝道的结构动力特性分析。通过对作用于匝道的车辆荷载进行具体分析,并依据车-桥耦合振动理论建立三维车桥计算模型,考虑双轴车辆的轴距、行车速度、车-桥质量比对桥梁振动响应的影响,针对不同车型、不同的自振频率,导致不同的激励频率。分析表明,采用双轴车辆模型研究车-桥耦合系统的振动更安全、可靠,能真实、有效地分析车耦桥合系统间的振动,反映耦合系统振动的实际情况,揭示车-桥耦合系统振动的实质。

【Abstract】Based on project, set up the numerical simulation model of coupling vibration analysis of ramp vehicle-bridge system. Using the large general software ANSYS to establish the dynamic model of the bridge, analyze the dynamic characteristics of ramp structure. Through the specific analysis of the vehicle load acting on ramp, set up three-dimensional calculation model of vehicle-bridge coupling vibration, considering the influence of biaxial vehicles wheelbase, driving speed, quality ratio of the vehicle and bridge on the bridge vibration response, and according to different models having different natural frequencies, it will lead to different excitation frequency. The above analysis shows that adopting biaxial vehicle model to study the vibration of vehicle-bridge is more safely and more reliably. It can reflect the actual situation of coupling vibration system, and reveal the essence of the vibration of vehicle-bridge coupling system.

【关键词】匝道; 车-桥耦合振动; 结构动力特性分析; 响应分析

【Keywords】ramp; vehicle-bridge coupled vibration; structure dynamic characteristics analysis; response analysis

【中图分类号】U441.3

【文献标志码】A

【文章编号】1007-9467(2018)01-0091-04

【DOI】10.13616/j.cnki.gcjsysj.2018.01.027

1 引言

桥梁结构的振动,与车辆动荷载的作用及荷载作用输入的多寡密切相关,尤其是桥梁结构自身的固有频率与输入作用的频率的比值,即共振程度的影响^[1]。随着匝道桥梁上车荷载的日益增大,以及匝道曲线线形的特殊性,结构日趋轻薄,因此需要更多地关注曲线匝道桥梁上由于车辆动荷载产

【基金项目】国家自然科学基金青年基金项目(51408339);山东省住房城乡建设科技计划项目(2017-K2-003);山东省高校科技计划项目(ZG05)

【作者简介】胡文军(1982~),女,山东临清人,讲师,从事道路桥梁设计与研究。

生的竖向振动问题,依托济南某互通式立交匝道,对匝道桥的竖向振动问题进行研究。

2 工程概况

某立交位于济南市城区,已成为济南西部进出的交通枢纽。该立交为半苜蓿叶半定向4层互通式立交。其中匝道桥为整体现浇预应力混凝土箱梁桥和钢筋混凝土箱梁桥。匝道桥标准段桥宽为10m,箱梁均采用大悬臂式单箱单室断面,横向施加预应力。匝道桥采用单柱式墩。平面曲线半径为120m。

现选用其中的某匝道桥预应力混凝土连续箱梁桥进行研究。该桥为三跨一联,跨度为25+29.5+25=79.5m,2个中墩采

用梁墩固结的刚构形式,两个边墩上设置偏心支座。主梁为倒展翅箱梁,单箱单室结构,箱顶全宽 10m,箱梁底宽 6m,悬臂板长 2m,设单向 2%横坡。主梁高 2.0m。主梁标准截面尺寸如下:顶板厚 0.25m,底板厚 0.25m,腹板厚 0.4m,横梁厚 0.6m。主梁设纵、横向预应力钢筋,其标准强度 $R^b_y=1860\text{MPa}$,直径 $\phi 15.24\text{mm}$ 高强度低松弛钢绞线。主墩、主梁采用 C50 混凝土。匝道箱梁断面见图 1。

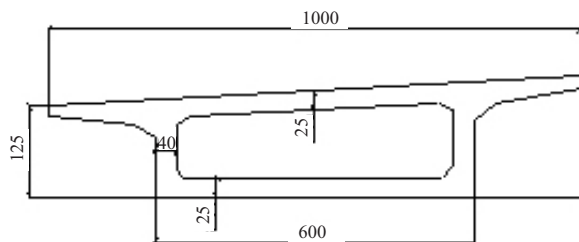


图 1 匝道箱梁断面

图 2 是该匝道桥在 ANSYS 中的三维实体模型图,全桥共划分 281 968 个节点,232 791 个单元。

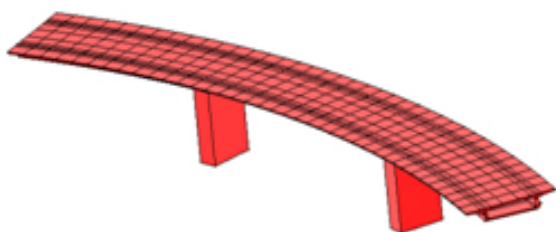


图 2 匝道桥三维实体模型

3 匝道结构的动力特性分析

1) 对该匝道桥采用三维实体单元进行离散,离散成 281968 个节点,232791 个单元。

2) 桥梁阻尼采用瑞利阻尼。

$$[c]=\alpha[M]+\beta[K]$$

式中 $[c]$ 为阻尼矩阵, $[M]$ 为质量矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, α 为与质量成比例的系数, β 为与刚度成比例的系数。

3) 桥梁端部采用板式橡胶支座,其计算模型为弹簧与阻尼器并联结构。采用弹簧阻尼单元进行模拟。

4 车 - 桥耦合系统的振动响应分析

桥梁结构的振动直接影响桥梁的使用与安。由于车辆荷载是一个具有质量的振动系统,且车辆荷载是移动的,在匝道桥上通过的时间是有限的,且由于荷载位置的不断移动,车 - 桥耦合系统的动力特性不断变化,所以,车 - 桥共振满足条件的时间较短^[2]。桥梁的车辆激励问题的特点与复杂性就在于

此。

4.1 车 - 桥耦合系统的系统模型

关于车辆振动研究,国内外学者已做了大量工作^[3~10]。计算中一般将车体简化成多刚体模型,近年来,已有学者将车体用有限元模型简化,用空间梁元模拟车体,具备了更加逼真的模拟车辆振动的基础,得出了以下结论:

1) 车速是影响车体振动的主要原因,当车体以不同速度通过假设的路面不平顺时,随着车速的增大,车辆弹簧垂向力逐渐减小,也就是说车轮对路面的垂向力也逐渐减小。

2) 路面不平顺也是影响车体振动的原因,在假定路面不平顺条件下,同一波长,波深约深,车体振动越剧烈。

车速与荷载对应关系见表 1。

表 1 行车车速与荷载

类型	荷载	车速/(km/h)		
		60	80	100
N_{12}	静荷载/N	36 250	36 250	36 250
平车	动荷载/N	3 129	2 316	2 110
C_{62}	静荷载/N	39 250	39 250	39 250
敞车	动荷载/N	2 900	2 119	1 908

注:表中的动荷载是指车辆车轴上弹簧支撑系统的弹簧力。

基于以上结论,将车辆的每个车轮等效为集中时变力,即一个常量力荷载和与随桥梁类型不同、车辆类型不同、车辆行驶速度不同而变化的荷载。

$$Q(t)=M_c g+K_c[z(t)-\sum_{n=1}^N q_n(t)\sin\frac{\pi nvt}{l}]$$

式中, $\frac{\pi nvt}{l}$ 为移动常量力的广义扰动频率; $\sum_{n=1}^N q_n(t)\sin\frac{\pi nvt}{l}$

为梁位移的振型级数。假设弹簧的变形 $z(t)=z\cdot\sin\frac{\pi nvt}{l}$, 为一个按照简谐波规律变化的位移荷载。则将该式简化为一个常量力与一个简谐力的组合:

$$Q(t)=M_c g+K_c\sin(\frac{\pi vt}{l}+\varphi)$$

式中, M_c 为车体质量, g 为重力加速度, z 为簧上质量的绝对位移,由中性位置算起, t 为某一时刻, v 为车辆通过桥梁时的速度, φ 为相位角, K_c 为汽车作用的动荷载系数,与桥梁的基频有关,按照《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)取用。

汽车与桥梁的耦合作用下的桥梁动力影响贡献近似采用一阶振型 $n=1$ 。

汽车荷载对桥面的离心力系数为:

$$C=\frac{V^2}{127R}$$

式中, V 为车辆速度 km/h ; R 为匝道曲线半径 m 。

这里采用两轴车辆空间模型, 每个车轮用一个集中时变力共 8 个集中时变力模拟车轮竖向及横向离心力荷载对桥梁进行外界激励加载, 每个车轮作用点恒载重 5t , 左右轮距 2.5m 。采用前后轴距 5m 和 3m 两种车型进行对比。

4.2 双轴车辆的轴距对桥梁振动响应的影响

考虑车辆轴距对桥梁振动响应的影响, 分析轴距分别为 5m 和 3m 时在不同车速下匝道桥的跨中挠度变化, 如图 3、图 4 所示。

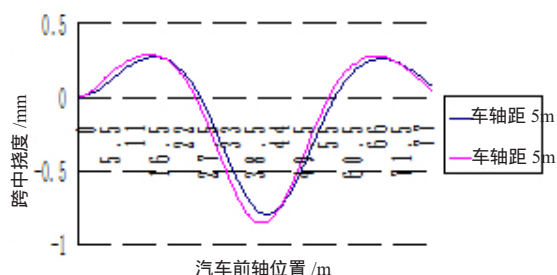


图 3 车速 30km/h 时跨中动挠度图

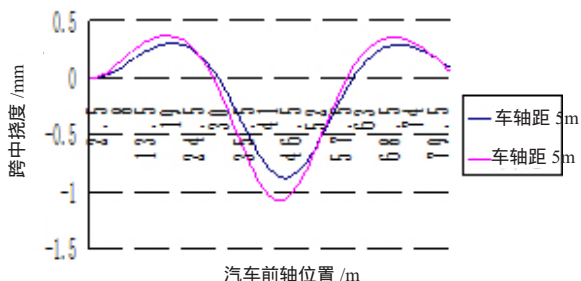


图 4 车速 60km/h 时跨中动挠度图

图 3~图 4 反映了车辆轴距对桥梁振动响应的影响。在给定车速下, 匝道桥的跨中挠度随轴距的增加而增大, 且挠度达到最大值的时间随轴距增加也发生提前; 而跨中挠度达到最大值后的位移却随轴距的增加而减小; 在车辆驶过匝道桥的后 $1/6$ 时间段内, 跨中挠度对轴距增大而增大。桥梁跨中挠度受轴距影响的交替变化, 反映了车辆轴距对桥梁振动响应影响的复杂性。

4.3 行车速度对桥梁振动响应的影响

考虑行车速度对桥梁振动响应的影响, 分析车速分别为 30km/h 、 40km/h 和 60km/h 时匝道桥跨中挠度的变化, 如图 5、图 6 所示。

图 5、图 6 表明: 当其他条件已定时, 随着行车速度增加, 匝道桥跨中挠度最大值的位置越靠后。导致出现这种现象的原因是: 车速较低时, 车辆荷载作用的时间相对较长, 使得桥梁结构变形有短暂恢复, 产生的挠度可以部分回弹, 从而降低了

桥梁的振动响应; 车速较高时, 车辆荷载作用时间相对短, 变形来不及恢复。

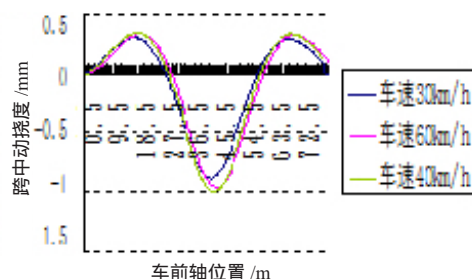


图 5 车轴距 5m 时行车荷载作用跨中挠度

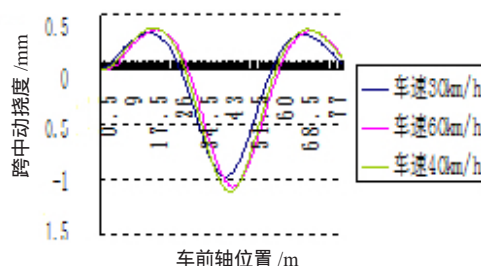


图 6 车轴距 3m 时行车荷载作用跨中挠度图

当车辆静止时, 静挠度为定值, 但车速增加导致动挠度增加, 意味着车辆荷载通过桥梁时对桥梁结构产生的竖向动力增大系数发生了变化, 即冲击系数增大了。行车速度直接影响车辆前后轴激励点处的耦合力、输入桥梁的瞬时功率流、及匝道桥跨中的振动速度、加速度, 且由图 5、图 6 可知车速在 40km/h 时产生影响最大, 原因是在此车速下, 路面平整度激励频率与车辆振动频率数值相近, 特别是与车辆后轴悬挂系统的固有频率相近, 所以导致车桥共振, 从而使车辆振动加剧。在车-桥耦合作用下, 车辆振动传递给匝道桥梁, 加剧了桥梁的振动, 导致车辆后轴激励点处的耦合力和车辆输入桥梁的瞬时功率流数值很大, 其影响远远超过了高车速的影响。

4.4 车-桥质量比对桥梁振动响应的影响

考虑车、桥质量比对桥梁振动响应的影响, 分析车质量分别为 20t 、 40t 时匝道桥跨中挠度的变化, 如图 7、图 8 所示。

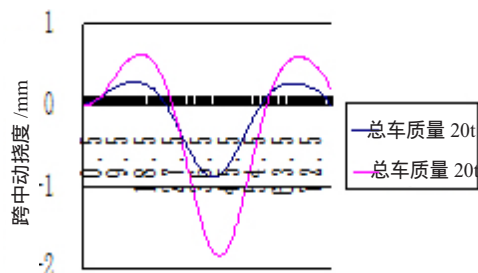


图 7 车轴距 5m 时行车荷载作用跨中挠度图

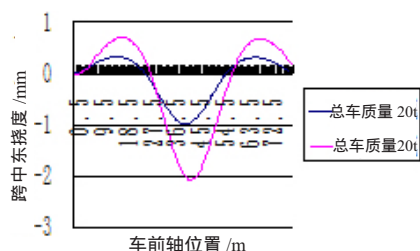


图 8 车轴距 3m 时行车荷载作用跨中挠度图

从图 7、图 8 可以看出,车、桥质量比对桥梁的跨中动挠度影响较大。随着车、桥质量比的升高为原先的 2 倍,桥梁的跨中动挠度显著变大。高车、桥质量比的桥梁跨中位移是低车、桥质量比桥梁跨中位移的 2.1 倍,并且桥梁跨中位移到达最大值的位置往后移。这是因为随着车辆质量的加大,车、桥耦合系统的惯性变大,其响应速度变慢。所以,高车、桥质量比时车、桥之间的实际耦合力并不小,在车桥耦合系统振动分析中应注意这一点。

5 结语

通过对作用于匝道的车辆荷载进行具体分析,并依据车桥耦合振动理论进行三维车桥计算模型的建立,针对不同车型有不同自振频率,导致不同的激励频率。分析表明:采用双轴车辆模型研究三维匝道实体桥梁振动模型和车桥耦合系统的振动合理、有效,对车桥耦合系统间的振动分析真实、有效,能够反映耦合系统振动的实际情况,揭示车桥耦合系统振动的实质。

【参考文献】

【1】郑大为.桥梁检测中的振动分析及应用[D].沈阳:辽宁工程技术大

(上接第 90 页)

5 结语

施工单位应高度重视水利工程施工中出现的生态环境问题,深刻认识这些问题将会给我们赖以生存的生态环境带来的危害。在端正态度的基础上,采用科学合理的方法修复并重建被破坏的生态环境,即可采用生态学、系统学等专业学科,利用最基本的原理和相关力学进行调控和设计,从而使得环境污染得到改善,水利工程施工生态化,提高生态系统的生产力,实现生态效益、工程效益和社会效益等多赢的局面,最终保证水利工程能够保质保量的顺利完工。最重要的是加强水利工程设计上的控制,在设计中严格遵守设计原则,并结合生态理念,对优势进行保持,对劣势加以整改,实现真正的生态

学,2007.

【2】韩兴,等.高速铁路大跨度钢管混凝土拱桥车桥耦合振动仿真分析[J].铁道标准设计,2016,60(4):36-39.

【3】李慧乐,等.基于车桥耦合动力分析的桥梁动应力计算方法[J].中国铁道科学,2015,36(1):68-73.

【4】王凌波,马印平,蒋培文,等.不同体系斜拉桥车桥耦合共振效研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(10):1369-1373.

【5】崔圣爱,等.南广高速铁路郁江大桥车桥耦合振动仿真分析[J].西南交通大学学报,2011,46(3):385-390.

【6】王凌波,马印平,蒋培文,等.连续钢构体系车桥耦合振动敏感性参数研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(8):901-906.

【7】晏路曼.公路曲线梁桥在移动荷载作用下车桥耦合振动响应研究[D].上海:华东交通大学,2008.

【8】李娅娜.车桥耦合振动的有限元分析研究[D].大连:大连铁道学院,2001.

【9】殷新锋,等.基于面接触的车桥耦合振动研究[J].振动工程学报,2012,25(3):244-252.

【10】张敏.大跨度铁路钢桁架拱桥车-桥耦合振动分析[J].桥梁建设,2012,40(6):14-19.

【收稿日期】2017-10-09

水利工程,将我国的水利工程推向一个新的发展阶段。

【参考文献】

【1】赵洪霞.关于现代生态水利设计的几点研究[J].黑龙江科技信息,2008(7):16.

【2】符长青.有关现代化水利设计的几点研究[J].智能建筑与城市信息,2012(7):24.

【3】伍彬.有关现代化生态水利设计方面的几点思考[J].大众科技,2013(3):31.

【收稿日期】2017-07-31