

文章编号:1673-9469(2025)04-0070-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.010

变速车辆作用下弯梁桥爬移分析

刘焕举¹,张荣¹,刘宁^{1,2}

(1.河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2.又石大学 科学技术学院,韩国 全州 565-701)

摘要:为探究变速车辆对弯梁桥爬移的影响,以典型匝道桥为例,分析车辆因素对弯梁桥爬移现象的影响。采用有限元软件 ANSYS 建立主梁实体模型和双线性弹簧支座模型,形成弯桥整体有限元模型。将该模型与 MIDAS/Civil 模型进行对比,以验证计算模型的有效性。随后将移动车辆转化为叠加时变径向离心力的竖向荷载,并基于形函数编制荷载文件等效作用于弯梁桥模型。最后进行弯桥爬移的车辆因素分析,分析车辆入桥初速度、车辆加(减)速度、车重等因素对弯梁桥爬移的影响。结果表明,弯梁桥关键截面横向位移随着径向作用力位置的靠近和远离呈先增大后减小的趋势;车辆入桥初速度越大、车重越大,主梁横向位移、跨中截面竖向位移、外侧支座竖向反力及内外侧支座横向反力越大;车辆入桥初速度增大,内侧支座竖向反力减小;车辆减速度(绝对值)越大,主梁横向位移越小,对跨中截面竖向位移及支座反力无影响;车辆入桥初速度及车重是影响弯梁桥爬移的主要因素,车辆减速度变化为次要因素。

关键词:弯梁桥;有限元;变速;移动荷载;爬移

中图分类号:U441

文献标识码:A

Climbing Analysis of Curved Girder Bridge Under the Action of Variable Speed Vehicle

LIU Huanju¹, ZHANG Rong¹, LIU Ning^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. School of Science and Technology, Woosuk University, Jeonju 565-701, Korea)

Abstract: To investigate the impact of variable-speed vehicles on the creep of curved girder bridges, a typical ramp bridge was selected as a case study to analyze the influence of vehicle-related factors on this phenomenon. A finite element model of the curved bridge was developed using ANSYS, incorporating a solid main girder model and bilinear spring bearings. The validity of the computational model was verified through comparison with a MIDAS/Civil model. Moving vehicle loads were equivalently transformed into vertical loads superimposed with time-varying radial centrifugal forces. These loads were applied to the curved bridge model using shape functions to generate load files. Subsequently, vehicle-related factors affecting lateral displacement—including initial entry speed, acceleration/deceleration, and vehicle weight—were systematically analyzed. Results indicate that the lateral displacement at key bridge sections initially increases and then decreases as the radial force approaches and moves away from the key sections. Higher initial vehicle entry speeds and greater vehicle weights lead to increased lateral displacement of the main girder, vertical displacement at mid-span sections, vertical reaction forces of outer bearings, and transverse reaction forces of both inner and outer bearings. Conversely, higher initial entry speeds reduce vertical reaction forces of inner bearings. Larger deceleration magnitudes (absolute values) reduce lateral displacement but exhibit negligible effects on mid-span vertical displacement and

收稿日期:2022-09-27

基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目青年拔尖人才项目(BJ2020012);国家自然科学基金资助项目(51908178);陕西省自然科学基金资助项目(2020JM-230)

第一作者:刘焕举(1987—),男,山东冠县人,博士,副教授,从事风-车-桥耦合振动方面的研究。

bearing reactions. Vehicle entry speed and weight are identified as primary influencing factors for lateral displacement, while deceleration plays a secondary role.

Key words: curved beam bridge; finite element; deceleration; moving load; creep

弯梁爬移是多荷载共同作用下弯桥的常见现象,易引发支座脱空、抗震挡块开裂等病害^[1-2]。桥上行驶车辆对弯桥有多向作用,同时耦合汽车荷载的动态性和时变性,这使得车致弯桥爬移问题复杂难解。当高速车辆驶入弯桥时,由于行车方向视距骤减,车辆在桥头易发生急剧变速。由于车辆在桥头变速,弯梁桥受到径向力随之发生变化,这是车致弯桥爬移现象的一个重要原因。因此,开展车辆桥头变速仿真和桥头变速车辆荷载作用下的车致弯桥爬移分析十分必要。

当前,弯梁桥在车辆荷载作用下的爬移研究多采用匀速或小半径弯桥超临界车速模型^[3-4],忽略了实际交通中车辆的变速行为,与真实工程背景存在偏差。因此,变速车辆动态荷载对弯桥爬移的影响机理研究逐渐深入。在车辆过弯的速度决策研究中,徐进等^[5]在对螺旋匝道桥的汽车运行特征和驾驶行为模式的研究中表明,车辆行驶速度与螺旋匝道桥半径之间有较高的相关性,车辆在合流之前有明显的减速行为。Vadeby^[6]在对山区高速公路的弯道事故分析中表明,车辆过弯时,过低的车速与过高的车速都极易导致交通事故的发生。在变速车辆荷载下弯桥振动的研究中,Yang等^[7]在推导验证弯梁桥多向控制方程的基础上,分析车速及制动加速度对弯桥的影响,得出车辆低速行驶可有效抑制跨中位移的峰值。Li等^[8]基于某五跨弯梁桥研究得出:当重型车辆减速度增大时,第3跨竖向挠度和转角的车辆动载对桥梁冲击效应系数(Impact Factor, IM)降低,而横向挠度IM显著上升。邓露等^[9]将一典型三轴中车模型作用于桥梁研究,得出:汽车制动时,桥梁的动力响应及冲击系数明显大于车辆匀速行驶的

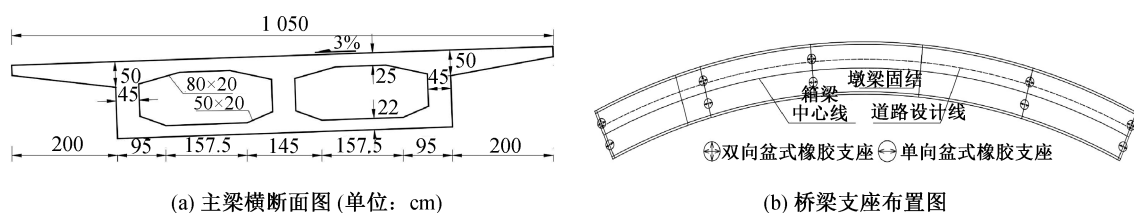
情况。陈水生等^[10]研究发现,车辆制动时,弯梁桥主梁动力响应显著高于匀速行驶的工况。以上研究多关注车辆在桥中变速对弯桥的影响,未考虑车辆入桥阶段时的动态荷载响应。桥头支座横向抗滑移能力薄弱,车辆入弯急剧减速极易造成支座累计滑移量超标。因此对桥头变速荷载特征的弯梁桥爬移精细化分析十分必要。

本文以一座五跨连续弯梁桥为背景桥梁,建立 ANSYS 有限元实体模型和双线性弹簧支座模型,按照《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391—2019)规范确定支座的竖向及横向刚度,并对比弯桥实体模型和 MIDAS/Civil 模型,验证模型的有效性。然后将车辆进行荷载化,编制荷载文件并动态加载,最后分析不同因素下弯梁桥主梁各截面横向位移及支座反力变化规律,为弯梁桥防爬移研究提供一定参考。

1 背景桥梁

以某互通立交桥 E 匝道桥的第二联作为背景桥梁,该联匝道桥为 5 m×25 m 等高预应力混凝土单箱双室箱梁桥,曲率半径为 150 m,梁高 1.5 m,单箱双面截面尺寸如图 1(a)所示。桥梁支座布置情况如下:中间跨均为 GPZ(2009) 6.0 盆式橡胶支座,两侧边跨采用 GPZ(2009) 3.0 盆式橡胶支座,桥梁外侧均为双向支座,内侧均为单向支座,桥面超高 3%。该桥支座布置如图 1(b)所示。

为方便下文描述各关键截面,做出如下规定:从左到右依次为第 1 跨至第 5 跨,共 5 跨;其中,第 1 跨左支点截面为 1#截面,第 1 跨跨中截面为 2#截面,从左到右共设定 11 个截面。



(a) 主梁横断面图(单位: cm)

(b) 桥梁支座布置图

图 1 桥梁横断面及支座布置

Fig. 1 Bridge cross section and bearing arrangement

2 弯梁桥有限元模型

采用 SOLID65 单元建立该联匝道桥主梁实体模型并进行网格划分,主梁纵桥向单元长度划分为 0.5 m。材料选用 C50 混凝土,其弹性模量为 3.45×10^4 MPa,泊松比为 0.2,质量密度为 $2\ 600$ kg/m³。桥梁盆式橡胶支座采用弹簧单元模拟,形成双线性恢复力模型^[11],COMBIN14 单元考虑纵向拉压,横向采用两个垂直的 COMBIN40 单元。这两个单元不相交的节点进行完全约束,相交节点约束转动自由度。通过改变弹簧单元的 KEYOPT 选项来改变单元作用方向,弹簧支座的简化模型如图 2 所示。

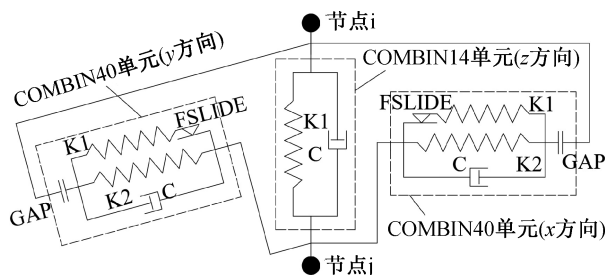


图2 弹簧支座简化模型

Fig. 2 Simplified model of spring support

支座竖向刚度 SD_z 可根据国家现行规范《公路桥梁盆式支座》(JT/T 391—2019) 中规定,支座在竖向设计荷载作用下,竖向压缩变形不大于支座总高度的 2% 进行计算。

$$SD_z = R/0.02h \quad (1)$$

式中: R 为支座竖向设计荷载, kN; h 为支座总高度, m。

支座切向刚度 SD_x 及 SD_y 可根据盆式橡胶支座不锈钢板与聚四氟乙烯板之间的摩擦滑动,按式(2)进行计算。

$$F_{\max} = \mu R \quad (2)$$

$$SD_x = SD_y = F_{\max}/x \quad (3)$$

式中: μ 为摩擦系数,常温下活动支座设计摩擦系数(加硅脂润滑)不大于 0.03,本文取 0.03; x 为盆

式橡胶支座剪切滑移量,一般为 3~5 mm,本文取 3 mm。

对于单向盆式橡胶支座,在可滑动方向,切向刚度值按式(2)和式(3)进行计算;不可滑动方向切向刚度设为 $+\infty$ (计算时采用 1×10^7 数量级)。当盆式橡胶支座发生滑动时,滑动方向切向刚度为 0。

支座刚度通过实常数赋予对应弹簧单元,支座刚度参数如表 1 所示。支座建立完成后,将弹簧支座上部节点与支座垫块底部节点刚性约束,下部节点约束三个平动自由度及绕纵向的转动自由度。在墩梁固结处,将主梁节点自由度全部约束。最终生成如图 3 所示桥梁有限元模型。

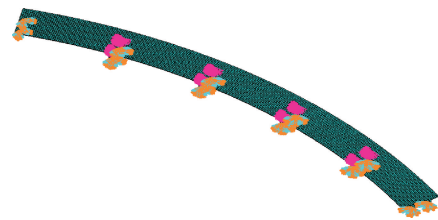


图3 弯梁桥有限元模型

Fig. 3 Bridge finite element model

为进一步验证上述有限元模型有效性,建立该联匝道桥 MIDAS/Civil 单梁模型。其中,截面参数和主梁材料参数均保持不变,边界条件采用弹性连接和一般支承进行模拟,支座刚度取值同表 1。支座上部节点与主梁节点刚性连接,支座下部节点固结。模型建立完成后,计算 MIDAS/Civil 模型和 ANSYS 模型仅在重力荷载作用下主梁各截面竖向挠度值和支座反力值,并进行模型有效性对比分析,对比结果如图 4 所示。

由图 4(a) 可知,两模型关键截面竖向挠度极大值均位于 2# 截面和 10# 截面,极大值分别为 9.1、8.2 mm。各关键截面竖向挠度数值相近,数量级相同,且数值差异值均在 1×10^{-3} 级,数值差异在允许范围内。由图 4(b) 可知,两模型竖向支座

表 1 支座刚度参数

Tab. 1 Table of bearing stiffness parameter

支座型号	支座高度/m	抗压刚度/(kN·m ⁻¹)	横桥向剪切刚度/(kN·m ⁻¹)		纵桥向剪切刚度/(kN·m ⁻¹)		极限水平滑动力/kN
			初始	屈服	初始	屈服	
GPZ(2009)3.0DX	0.125	1.20×10^5	1.00×10^7	—	4.50×10^4	0	90
GPZ(2009)3.0SX	0.120	1.25×10^5	4.50×10^4	0	4.50×10^4	0	90
GPZ(2009)6.0DX	0.165	1.82×10^5	1.00×10^7	—	6.00×10^4	0	180
GPZ(2009)6.0SX	0.150	2.00×10^5	6.00×10^4	0	6.00×10^4	0	180

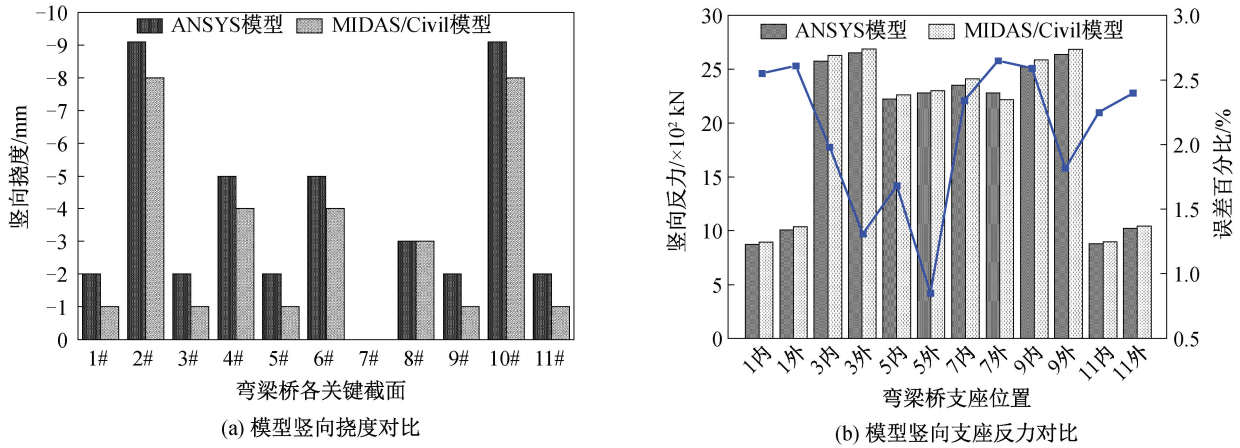


图 4 模型对比

Fig. 4 Model comparison

反力极大值均在 9#截面外侧支座,最小值均在 1#截面内侧支座,各截面支座反力值相近,数量级相同,模型支座反力值误差均小于 3%,数值差异在允许范围内。综上所述,两模型受力情况基本一致,ANSYS 有限元模型可作为变速车辆作用下弯梁桥爬移分析的基础模型。

3 变速车辆荷载作用下弯梁桥爬移影响分析

3.1 车辆荷载作用

本文选用轴数为 2,轴距为 1.8 m+4.8 m 的重型卡车^[12],以左右车道双排并行的方式通过弯梁桥,车辆布置情况如图 5 所示。由于该桥曲率半径为 150 m。车辆离心力可按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中离心系数 C 乘以车辆荷载(不计冲击力)标准值 P 进行计算。当计算多车道车辆离心力时,车辆荷载标准值应进行相应折减计算(本文匝道桥为双车道,折减系数为 1),离心系数可通过下式进行计算:

$$C = V^2 / 127R \quad (4)$$

式中: V 为车辆行驶速度, km/h; R 为桥梁曲率半径, m。

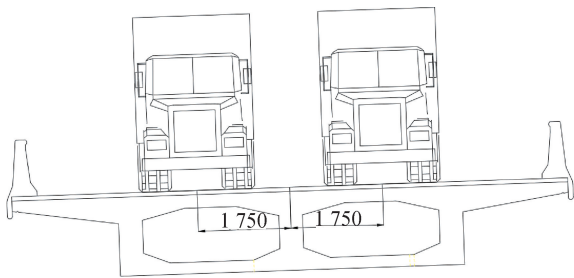


图 5 车辆布置情况(单位:mm)

Fig. 5 Vehicle layout case (unit:mm)

对桥梁模型进行加载时,需考虑车辆对桥梁结构的局部加载^[13]。将车重和车辆离心力分别等效在车轴位置,但由于车轴位置并不在模型节点处,因此,通过形函数将车轴作用点处集中荷载等效加载在其附近节点上^[14],如图 6 所示。

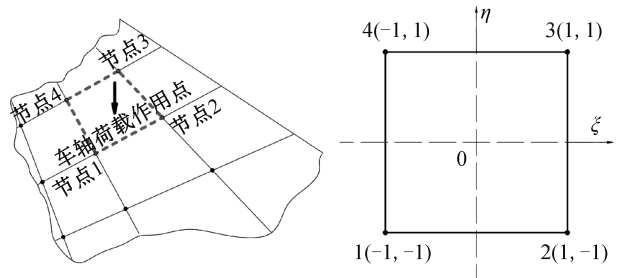


图 6 形函数荷载等效图示

Fig. 6 Shape function load equivalent diagram

$$N_1 = (1 - \xi_0)(1 - \eta_0) / 4 \quad (5)$$

$$N_2 = (1 + \xi_0)(1 - \eta_0) / 4 \quad (6)$$

$$N_3 = (1 + \xi_0)(1 + \eta_0) / 4 \quad (7)$$

$$N_4 = (1 - \xi_0)(1 + \eta_0) / 4 \quad (8)$$

该四边形内部任意一点位移和速度为

$$u_i = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \quad (9)$$

$$v_i = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 + N_4 v_4 \quad (10)$$

集中荷载 F 作用于该矩形内任意一点可等效为

$$F_i = N_i F (i = 1, 2, 3, 4) \quad (11)$$

式中, N_1, N_2, N_3, N_4 为形函数; ξ_0, η_0 为荷载作用点坐标; u_i 为四边形内部任意一点位移; u_1, u_2, u_3, u_4 分别为节点 1、节点 2、节点 3、节点 4 位移; v_i 为四边形内部任意一点竖向速度; v_1, v_2, v_3, v_4 分别为节点 1、节点 2、节点 3、节点 4 竖向速度; F_i 为节点 i 等效荷载。

车辆转化为竖向和径向等效节点荷载后,通过编制荷载文件对模型进行动态加载。

3.2 弯梁桥爬移影响分析

车辆进入弯桥前总是保持高速行驶,当进入弯桥后,出于弯道限速及安全因素考虑,驾驶员立即减速至一个较低的行驶速度,短时间内的速度变化将对弯桥爬移产生重要影响。因此,本文针对车辆进入弯道后的动态行为,结合车辆进入弯桥的初速度,行驶减速度及车重三个参数,分析不同车速变化对弯桥爬移作用的规律和影响机制。由于车辆减速过程在弯梁桥第1跨和第2跨基本完成,第1跨车辆速度变化更为明显。同时,车辆驶过第3跨时,车辆对第1跨的作用基本消失。故文中仅给出第1跨计算结果,车辆行驶位置为前4跨,其中正值表示朝弯桥曲线外侧的方向。

车辆分别以100、90、80、70、60 km/h的初速度驶入弯梁桥后,以恒定减速度 4 m/s^2 减速至40 km/h时,分析弯梁桥截面横向位移及支座反力随初速度的变化趋势,结果如图7所示。

由图7(a)(b)(c)可以看出车辆入桥初速度对弯梁桥横向位移有显著影响。弯梁桥各截面横向位移总体呈现出先减小后增大再减小的特征:车辆接近目标时,横向位移随着车辆径向作用力的增强逐渐变大;车辆驶离后,横向位移因支座约

束逐渐恢复,该特征同文献[15]的弯梁桥爬移规律较为吻合。截面横向位移随着车辆入桥初速度的增大而增大。这是由于车辆入桥时较大的初速度产生较大的离心力,直接放大了主梁的横向变形,当各车辆最终减速至相同速度时,各工况的横向位移趋于相同,表明速度差是引起横向位移差的主要原因。如图7(d)所示,2#截面竖向位移随车辆入桥速度增大呈微弱的递增趋势,表明速度差对弯桥竖向位移的影响较弱。由图7(e)可见,内侧支座竖向反力极大值随着入桥初速度的增大而减小,而外侧支座反力同步递增且始终大于内侧,这表明车辆入桥初速度的增加会加剧主梁向外侧偏移的过程。由图7(f)可以看出,随初速度增加,内侧支座横向反力增长幅度高于外侧支座。这是因为外侧的滑动支座横向约束能力远弱于内侧固定约束,导致弯桥爬移产生的横向荷载集中于内侧支座,使内侧支座更容易产生破坏。

图8为车辆以80 km/h初速度驶入弯梁桥后,在6、5、4、3、2 m/s^2 不同减速度工况下,弯梁桥典型横截面的横向位移演变及支座横向反力的分布特征。从图8可以看出,车辆行驶减速度影响桥梁截面横向位移的总体趋势,同车辆入桥初速度参数影响一致。车辆经过1#截面时横向位移变化不大,后续驶过2#至5#截面时横向位移呈现先增大后减小趋势,且在3#截面达到极大值时位移差异

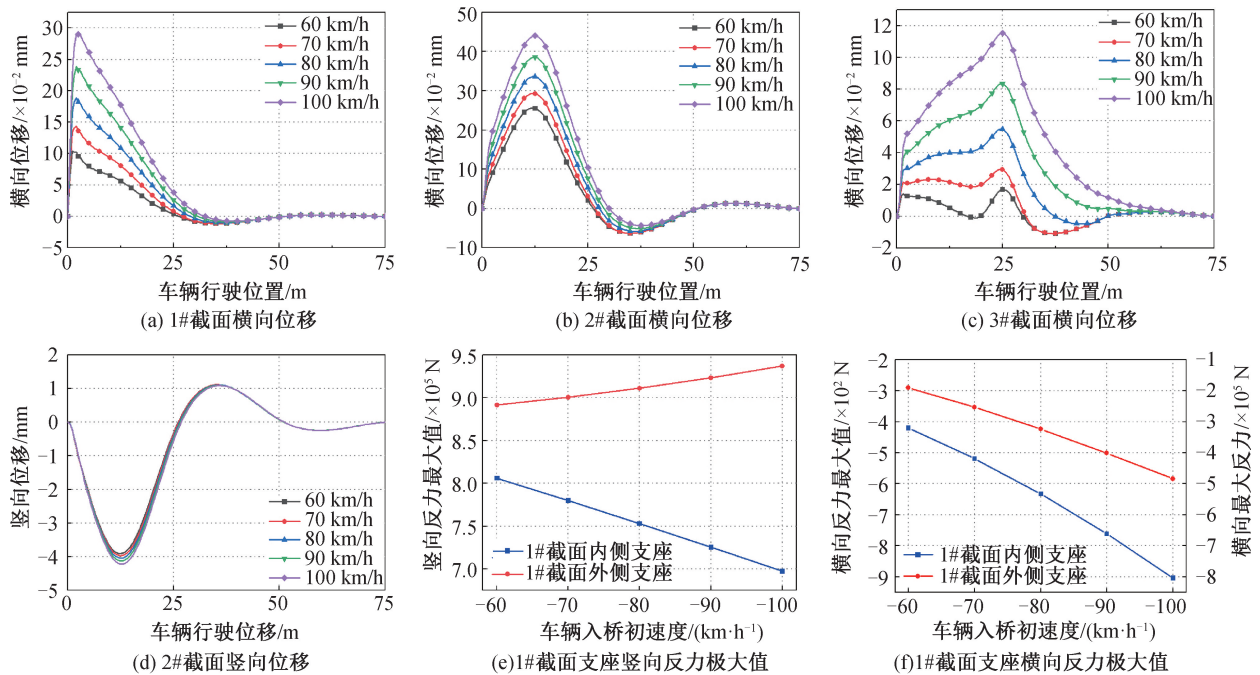


图7 入桥初速度对弯梁桥爬移影响

Fig. 7 Influence of initial speed of entering bridge on creep of curved girder bridge

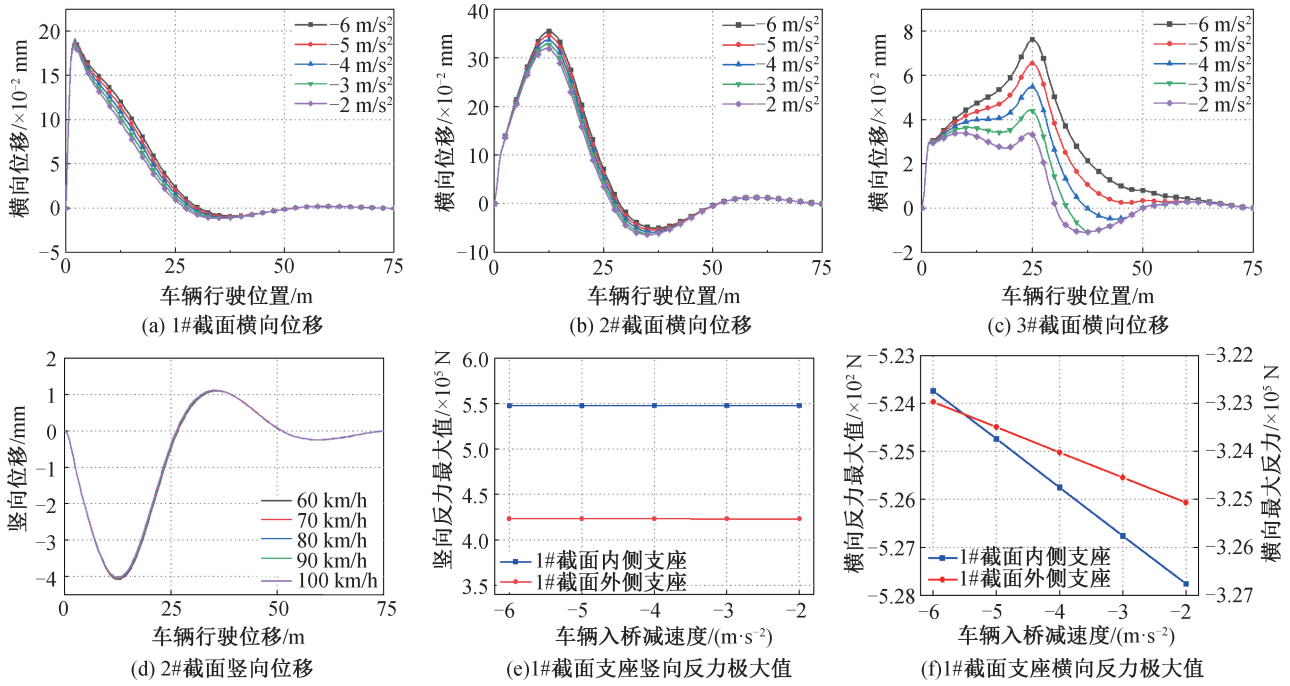


图 8 入桥减速度对弯梁桥爬移影响

Fig. 8 Influence of bridge entry deceleration on creep of curved beam bridge

明显。这是由于车辆减速过程中速度差变化,使得弯桥结构中跨区域的位移响应最为敏感。图 8 (e)(f)显示车辆减速度变化对 1#截面的支座反力极大值影响较小。

当车辆分别以不同的(100,90,80,70,60 km/h)初速度驶入弯梁桥后,以恒定减速度 4 m/s^2 减

速至 40 km/h 时,分析弯梁桥截面横向位移及支座反力随初速度的变化趋势,其结果如图 7 所示。

由图 9 可见,在入桥初速度及减速度相同的情况下,车辆越重对弯梁桥的横向爬移影响越大。车重越大,2#截面竖向位移越大。截面内外侧支座竖向反力极大值均随着车重的增大而增大,外

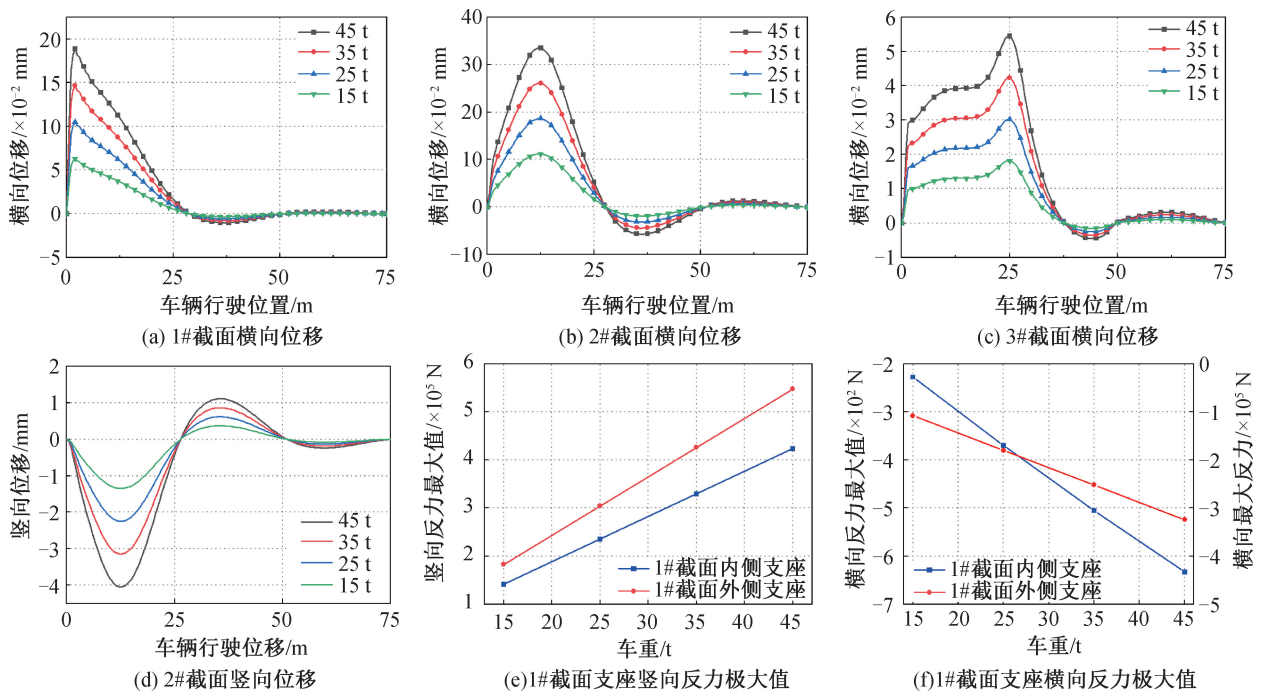


图 9 不同车重对弯梁桥爬移影响

Fig. 9 Influence of different vehicle weights on the creep of curved girder bridges

侧支座反力极大值增长趋势大于内侧支座。结合图 7(e)可见,在爬移发生时,内侧支座竖向反力会随着主梁横向位移的增大而减小。内外侧支座横向反力极大值均随着车重增大而增大,横向爬移较为明显。

4 结论

1) 弯梁桥爬移总体规律如下:各截面横向位移随着径向作用力的靠近而增大,随着径向作用力的离开而减小。车辆入桥初速度和车重对弯梁桥爬移影响较大,减速度对弯梁桥爬移影响较小。

2) 弯梁桥第 1 跨各截面横向位移随着车辆入桥初速度和车重的增大而增大,随着减速度(绝对值)的增大而减小;车辆入桥初速度和车重的增大会引起第 1 跨跨中竖向位移增大。

3) 当车辆入桥初速度增大时,弯桥内侧支座竖向反力极大值减小而外侧增大;减速度变化导致支座竖向及横向反力极大值略有变化,但影响程度有限;车重增加使支座竖向及横向反力极大值均增大。

参考文献:

- [1] 史方华,刘苗苗,余茂峰,等. 曲线梁桥爬移模式和典型案例研究[J]. 世界桥梁,2021,49(6):96-102.
SHI F H, LIU M M, YU M F. Lateral displacement patterns of curved bridge and typical cases study[J]. World Bridges, 2021,49(6):96-102.
- [2] LI S H, REN J Y. Analytical study on dynamic responses of a curved beam subjected to three-directional moving loads[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 58: 365-387.
- [3] 张兴洲. 汽车离心力作用下考虑支座摩擦滑移的弯梁桥侧向位移分析[D]. 西安:长安大学, 2018.
ZHANG X Z. Analysis of lateral displacement of curved girder bridge considering friction sliding of bearing under automobile centrifugal force[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [4] 张天宇. 混凝土连续弯梁桥横向爬移模型研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
ZHANG T Y. The finite element model research about lateral displacement of concrete continuous curved beam bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [5] 徐进,崔强,林伟,等. 螺旋匝道和螺旋桥的小客车行驶速度特征[J]. 中国公路学报,2019,32(7):158-171.
XU J, CUI Q, LIN W. Speed behavior of passenger cars on helical ramps and helical bridges[J]. China Journal of

Highway and Transport,2019,32(7):158-171.

- [6] VADEBY A. Traffic safety effects of new speed limits in Sweden[J]. Accident Analysis and Prevention,2018,114:34-39.
- [7] YANG Y B, WU C M, YAU J D. Dynamic response of a horizontally curved beam subjected to vertical and horizontal moving loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 242(3): 519-537.
- [8] LI S H, REN J Y. Investigation on three-directional dynamic interaction between a heavy-duty vehicle and a curved bridge[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(5): 721-738.
- [9] 邓露,王芳. 汽车制动作用下预应力混凝土简支梁桥的动力响应及冲击系数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(9):52-58.
DENG L, WANG F. Study of the dynamic responses and impact factors of simply-supported prestressed concrete girder bridges due to vehicle braking [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2015, 42(9):52-58.
- [10] 陈水生,罗浩,桂水荣. 曲线连续梁桥在车辆制动作用下的动力响应[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2020,42(2):95-106.
CHEN S S, LUO H, GUI S R. Dynamic response of curved continuous girder bridge under vehicle braking [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English), 2020,42(2):95-106.
- [11] 李秋英,刘丽丽,董宏伟. 基础隔震异形柱框架结构的参数优化[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010,27(3):5-8.
LI Q Y, LIU L L, DONG H W. Optimizing parameters of the base isolated frame structure with reinforced concrete special shaped column[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2010, 27(3):5-8.
- [12] 刘焕举,武隽,刘宁,等. 精细微观车流-桥梁耦合系统构建及伸缩缝纵向变形分析[J]. 中国公路学报, 2021,34(12):115-128.
LIU H J, WU J, LIU N, et al. Construction of fine microscopic vehicle-bridge coupling system and analysis of longitudinal deformation of the expansion joint[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(12):115-128.
- [13] 闫保民,李松辉. 中美公路桥梁规范设计汽车荷载对比[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2016,33(1):53-56.
YAN B M, LI S H. Study of vehicle load between China and America in bridge design specification [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016,33(1):53-56.

(下转第 90 页)

- example of Luhutai faults in Yinchuan Graben [J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(1): 256-268.
- [12] 胥博文, 刘志龙, 张敏, 等. MT法在石嘴山市地热资源勘查中的利用[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 32(5): 46-52.
- XU B W, LIU Z L, ZHANG M, et al. Application of magnetotelluric in geothermal resources exploration in Shizuishan [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 32(5): 46-52.
- [13] 汪琪, 赵志鹏, 尹秉喜, 等. 电磁测深MT法在平原深部地热调查中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2016, 13(6): 782-787.
- WANG Q, ZHAO Z P, YIN B X, et al. The application of Magnetotelluric Sounding (MT) method to deep geothermal investigation in plain [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2016, 13(6): 782-787.
- [14] 高亮, 陈海波, 李向宝, 等. 综合电磁法在银川盆地地热资源勘查中的应用[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 27(3): 62-66.
- GAO L, CHEN H B, LI X B, et al. Application of integrated electromagnetic methods in exploration of geothermal resource in Yinchuan Basin [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 27(3): 62-66.
- [15] 刘少光, 徐正玉, 谢石文. 参考道技术在大地电磁测深数据处理中的应用效果分析[J]. *科技视界*, 2015(8): 128-129.
- LIU S G, XU Z Y, XIE S W. Analysis on the application effect of remote reference technique in Magnetotelluric sounding data processing [J]. *Science & Technology Vision*, 2015(8): 128-129.
- [16] 胡祥云, 林武乐, 杨文采, 等. 克拉通岩石圈电性结构研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020(50): 128-129.
- HU X Y, LIN W L, YANG W C, et al. A review on developments in the electrical structure of craton lithosphere [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020(50): 128-129.
- [17] 赵红格, 刘池洋, 王锋, 等. 贺兰山隆升时限及其演化[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007(37): 185-192.
- ZHAO H G, LIU C Y, WANG F, et al. Uplift time constraints and evolution of Helan Mountain [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007(37): 185-192.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第76页)
- [14] 黄云, 张清华, 卜一之, 等. 港珠澳大桥正交异性钢桥面板纵肋现场接头疲劳特性[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(12): 34-43+59.
- HUANG Y, ZHANG Q H, BU Y Z, et al. Fatigue properties on field splice joints of longitudinal ribs in orthotropic steel bridge decks of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(12): 34-43+59.
- [15] 焦驰宇, 刘陆宇, 龙佩恒, 等. 城市曲线梁桥爬移现象及解决措施研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(S1): 177-183.
- JIAO C Y, LIU L Y, LONG P H, et al. Study on "creeping" phenomenon of curved continuous girder bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(S1): 177-183.
- (责任编辑 周雪梅)