

# 特重车荷载下装配式PC板桥荷载效应分析

韩万水<sup>1</sup>, 赵士良<sup>2</sup>, 李彦伟<sup>3</sup>, 赵付安<sup>4</sup>, 刘立斌<sup>4</sup>, 袁阳光<sup>1</sup>, 刘相儒<sup>4</sup>

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 石家庄市三环路管理处, 石家庄 050051
3. 石家庄市交通运输局, 石家庄 050051
4. 河北冀通路桥建设有限公司, 石家庄 050051

**摘要** 为研究特重车荷载作用下PC板桥的荷载效应,以河北省宣大高速公路WIM数据为基础,共提取出883个特重车荷载工况,使用“随机车流-桥梁耦合振动分析系统”计算各工况作用下PC板桥各片板的最不利正弯矩效应及PC板桥的最大正弯矩效应。通过对PC板桥横向各片板最不利正弯矩效应的统计分析研究其横向受力性能,通过最大正弯矩效应与设计荷载效应的对比,分析PC板桥的特重车正弯矩效应超限情况。结果发现:由于特重车在桥面鲜明的分布特点,PC板桥1#板的最不利正弯矩效应极值最大,而5#板最不利正弯矩效应的均值最大,在特重车荷载作用下,PC板桥正弯矩效应超限情况普遍,且部分工况最大正弯矩效应已超越设计荷载效应的1.8倍,随着跨径的增加,PC板桥正弯矩效应的超限工况数量、超限程度呈现下降趋势,但降幅并不明显。

**关键词** 桥梁工程;装配式PC板桥;特重车荷载;横向受力分析;超限情况分析

截止2013年底,中国高速公路总里程已达到10.44万公里,逐渐形成以高速公路为主体的陆上通道运输,并在2012年间完成货物周转任务318.9亿吨<sup>[1]</sup>。然而在公路运输承担越来越多运输任务的同时,公路管养部门与运输业者在货运利益方面的博弈逐渐形成了超载运输普遍存在的危险局面<sup>[2]</sup>。在中国已建成的71.53万座公路桥梁中,中小跨径桥梁、尤其是PC板桥具有明显的数量优势,然而该结构在服役期间病害较多,据统计,中国近70%的空心板桥梁使用寿命仅为20年<sup>[3]</sup>。研究超载车辆作用下PC板桥的响应特征,对于该类结构的管理与养护具有很强的指导意义。

马亚丽等<sup>[4]</sup>、赵卓等<sup>[5]</sup>分别基于单板受力及破坏试验对PC板桥结构进行了承载力评定及受力分析;刘海洋<sup>[6]</sup>对PC板桥的荷载试验进行了有限元模拟;康省祯<sup>[6]</sup>通过破坏试验研究了PC板桥结构的破坏机理;刘家奎<sup>[7]</sup>分析了预应力空心板桥纵向裂缝的成因;杨继新<sup>[8]</sup>对空心板桥的铰缝受力性能进行了研究。以上学者从不同的角度对PC板桥进行了研究,但重载交通条件下PC板桥的响应特点及对设计荷载效应的超限情况仍无从得知。

本文基于河北省宣大高速长达18个月的动态称重(WIM)数据提取出883个特重车荷载工况,并使用“随机车流-桥梁耦合振动分析系统(BDANS)”计算4座典型空心板桥的特重车荷载效应;通过对PC板桥各片板最不利正弯矩效应的统计,分析结构的横向受力性能;通过将各工况所对应最大正弯矩效应与设计荷载效应的对比,分析PC板桥特重车荷载效应的超限情况。

## 1 基于WIM数据的特重车荷载工况提取

根据已有研究成果<sup>[9]</sup>,将货运车辆按照车货总重划分为轻车、重车和特重车。其划分标准:轻车车货质量 $< 20$  t;重车车货质量 $\geq 20$  t,  $< 80$  t;特重车车货质量 $\geq 80$  t。特重车荷载工况定义:至少包含一辆特重车的行驶在桥面的一组车辆荷载。

河北省宣大高速是山西省煤炭外运的主要地面通道,该线路重车比例可达到25%,并可观测到数量可观的特重车。宣大高速某大桥安装的WIM设备记录了2011年1月—2012年6月长达18个月的交通流数据。以该部分数据为基础,提

收稿日期:2015-04-07;修回日期:2015-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51278064)

作者简介:韩万水,教授,研究方向为风-汽车-桥梁耦合振动等,电子信箱:hws@gl.chd.edu.cn;袁阳光(通信作者),博士研究生,研究方向为车辆荷载,电子信箱:yuangy31@163.com

引用格式:韩万水,赵士良,李彦伟,等.特重车荷载下装配式PC板桥荷载效应分析[J].科技导报,2016,34(2):277-281;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.047

取适用于小跨径桥梁的特重车荷载工况<sup>[10]</sup>。

根据表1对特重车荷载工况信息的统计分析发现:844个工况均为一辆特重车过桥;进一步分析特重车的行驶位置发现,83.6%的特重车均行驶于行车道,仅有16.4%的特重车沿超车道行驶。可见,单车行车道效应是小跨径空心板桥特重车荷载效应的鲜明特征。图1为一个典型特重车工况的桥面交通流信息组成。

表1 特重车荷载工况信息

Tab. 1 Information of extra-heavy truck scenarios

类型	数量	比例/%	合计
1特重车	844	95.50	883
1特重车+1轻车	24	2.72	
1特重车+1重车	12	1.36	
其他	3	0.34	

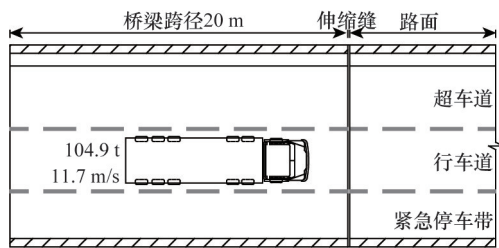


图1 典型特重车荷载工况A

Fig. 1 Typical extra-heavy truck scenario A

## 2 PC板桥模型建立及正弯矩效应设计值计算

交通运输部于2008年颁布了《桥梁上部结构通用图》<sup>[11]</sup>,其中整体式路基、后张法PC板桥共有4种典型跨径:10、13、16和20 m。PC板桥均为双向4车道,路基总宽24.5 m,左右幅分离,单幅桥面净宽10.75 m,在横桥向由9片预制空心板装配而成,每片预制空心板板宽1.25 m,并采用现浇混凝土灌缝。PC 20 m板桥的典型横断面布置如图2所示。

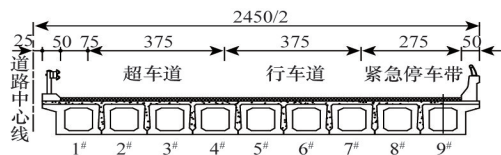


图2 PC 20 m板桥跨中典型横断面(单位:cm)

Fig. 2 Mid-span cross section of PC 20 m slab bridge (unit: cm)

根据梁格法理论<sup>[12]</sup>,使用ANSYS12.0建立PC板桥上部结构的梁格法有限元模型,梁单元类型为beam4,全桥共316个单元,325个节点。在建立PC板桥有限元模型时,根据混凝土铰缝在实际中的工作机理,通过耦合铰缝处相邻节点的平动自由度、释放转动自由度模拟两片空心板之间的铰缝连接。PC 20 m板桥的梁格法有限元模型如图3所示。

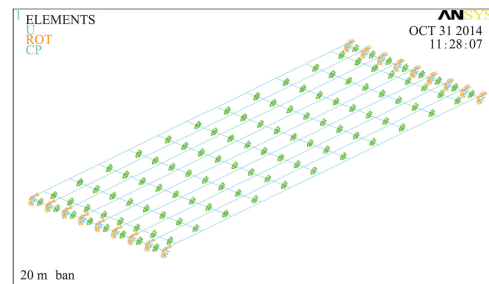


图3 PC 20 m板桥梁格法有限元模型

Fig. 3 Grillage model of PC 20 m slab bridge

由PC板桥桥面净宽确定其设计车道数为3个,依据横向最不利加载原则进行加载,得到PC板桥的设计汽车荷载效应。由于PC板桥在服役期间以受弯为主,本文主要分析目标为特重车作用下PC板桥的正弯矩效应,图4为4座空心板桥不计入冲击效应时边板(1#板、9#板)与中板正弯矩效应设计值的计算结果。由于PC板桥边板与中板截面形式的差异,故在此分别计算了边板与中板的设计汽车荷载效应。由图4可知,边板正弯矩的设计荷载效应略大于中板。

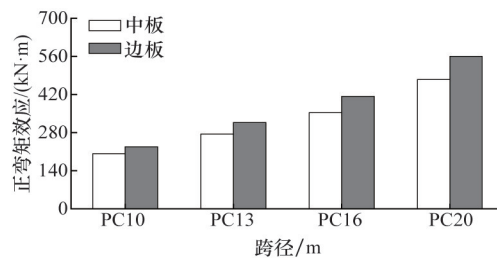


图4 PC板桥设计荷载正弯矩效应

Fig. 4 Sagging moment design value of PC slab bridges

## 3 特重车荷载工况正弯矩效应计算

利用“随机车流-桥梁-耦合振动分析系统”计算4座PC板桥在883个特重车荷载工况作用下的正弯矩响应。由于装配式PC板桥均为简支体系,故本文主要分析跨中截面的正弯矩效应。图5、图6给出了在其中一个典型工况A作用下,PC 20 m板桥的可视化分析界面及各片板跨中截面的正弯矩效应时程曲线。

由图6可知:在特重车荷载作用下,可由BDANS计算得到每片板跨中截面的正弯矩效应时程曲线;对任意一片空心板*i*,其时程曲线的峰值即在工况A作用下,板*i*的最不利正弯矩效应,而对于PC 20 m板桥来说,各片板最不利正弯矩效应的极值,即为工况A作用下PC 20 m板桥的最大正弯矩效应。

## 4 PC板桥横向受力分析

为便于标准化制作及机械化施工,PC板桥在横桥向由9片空心板预制装配而成,每片空心板板宽仅为1.25 m,相邻两片板之间通过混凝土铰缝连接,该连接方法相对于刚性连

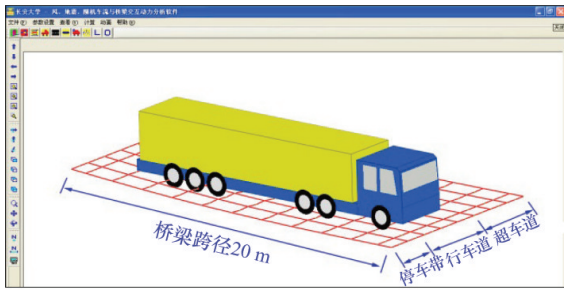


图5 工况A作用下PC 20 m板桥可视化分析

Fig. 5 Visualization analysis of PC 20 m slab bridge under scenario A

接较为薄弱,使得装配式PC板桥横向受力的不均匀性较装配式T梁桥、装配式箱梁桥等结构更为明显。本节基于特重车荷载效应的计算结果分析空心板桥横向受力性能,对于亚健康状态桥梁的管理、养护具有明显的指导意义。基于883个特重车荷载工况的荷载效应计算结果,对PC板桥各片板最不利正弯矩效应的极值、均值、标准差进行统计分析,其结果如图7所示。

由图7可知:1) 随着跨径的增加,PC板桥各片板跨中截面最不利正弯矩效应的极值、均值、标准差呈现出一致的变化规律;2) 由图7(a)可知,PC板桥1#板跨中截面最不利正弯矩效应的极值最大,其原因是16.4%的特重车沿超车道行驶,

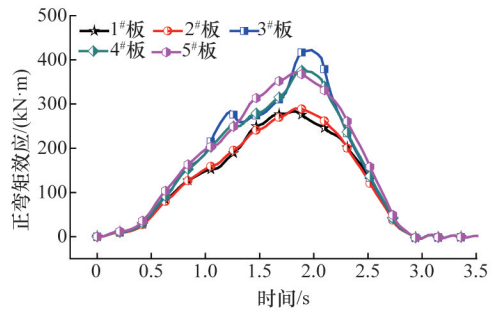


图6 工况A作用下各片板正弯矩时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of sagging moment for the slabs under scenario A

超车道处各片板响应较为明显,此外1#板截面较2#、3#、4#板截面的抗弯刚度略大,在变形协调条件下,1#板跨中截面的最不利正弯矩效应极值最大;3) 由图7(b)可知,PC板桥5#板跨中截面最不利正弯矩效应的均值最大,其原因是83.6%的特重车均沿行车道行驶;4) 由图7(c)可知,PC板桥1#板跨中截面的最不利正弯矩效应标准差最大,其次为超车道、行车道位置的各片板,4#板的最小,仍是由于特重车沿桥面行驶位置的不均匀性所致,由于4#板位于超车道与行车道的结合部,车辆行驶位置对其响应的影响不明显,故其跨中位置最不利正弯矩效应的标准差最小。

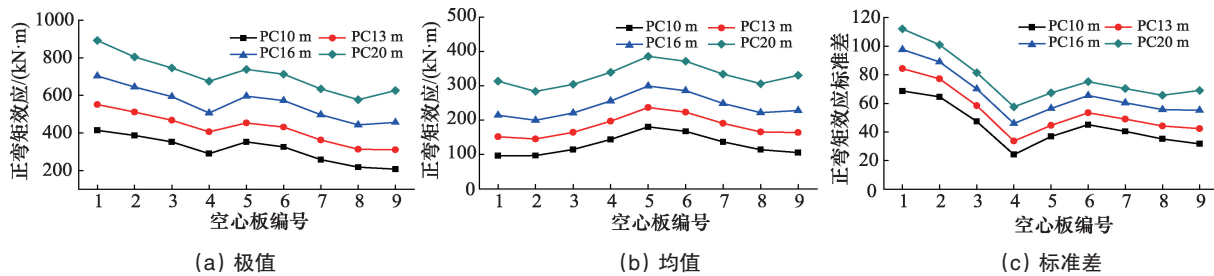


图7 PC板桥横向各片板受力分析

Fig. 7 Lateral performance analysis of each slab of PC slab bridges

由此可见:由于特重车鲜明的行驶特点及PC板桥自身结构特性,横向各片板对特重车荷载的响应特点鲜明。考虑到存在特重车沿超车道行驶的情形,且此时边板的响应最为明显,故在桥梁的设计阶段,应对边板给予足够的重视;此外,由于特重车主要沿行车道行驶,5#板的平均响应水平最高,故在新桥的建设阶段可对该位置的铰缝等构件增加构造措施,防止该位置过早地出现因荷载所引起的各种病害。

### 5 PC板桥特重车荷载效应超限情况分析

当PC板桥在某特重车工况作用下产生的最大正弯矩效应超越正弯矩效应设计值时,该工况即为超限工况。根据特重车荷载效应的计算结果可得到4座PC板桥在各特重车工况作用下的最大正弯矩效应,并对其分布进行优度拟合检

验,如图8所示,可见特重车荷载对PC板桥的最大正弯矩效应均服从极值I型分布。

在图8计算结果的基础上,首先通过将各工况所对应的最大正弯矩效应与设计荷载的正弯矩效应进行对比,得到特重车荷载对各PC板桥的超限工况数量及百分比,其次,计算各工况最大正弯矩效应与设计荷载正弯矩效应的比值,分别以超限工况数量、百分比及比值的统计指标对特重车荷载作用下PC板桥正弯矩效应超限的普遍性与超限程度进行量化分析。

各PC板桥超限工况的数量及百分比如图9所示,由图9可知:随着PC板桥跨径的增加,超限工况的数量、百分比明显下降,其中PC10 m板的超限情况最为普遍,超限工况数量已达到300个,占据工况总量的34.0%,而PC20 m板桥超限工况数量仅占据工况总量的14.5%。

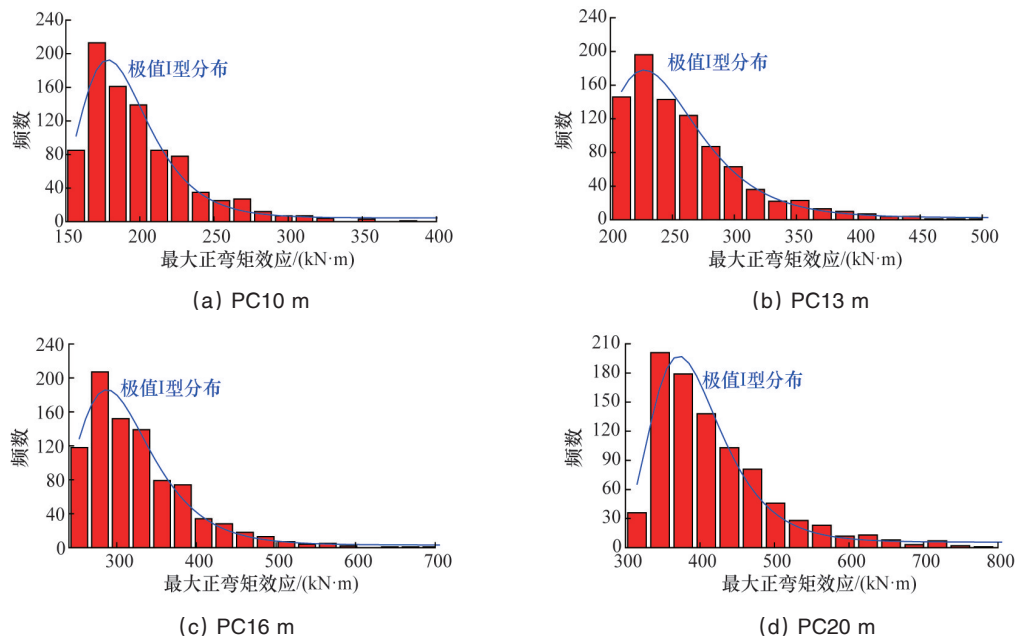


图8 最大正弯矩效应计算结果

Fig. 8 Results of maximum sagging moment

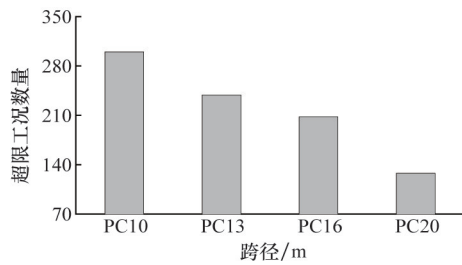


图9 正弯矩效应超限工况数量

Fig. 9 Number of overrun scenarios of sagging moment

最大正弯矩效应与设计荷载正弯矩效应比值的极值与均值分别反映了极端情况下特重车荷载对设计荷载效应的超越程度,以及特重车最大正弯矩效应的平均水平。图10为比值的极值与均值随跨径的变化规律。1)随着跨径的增加,比值的极值与均值近似以线性规律递减,但二者的下降趋势并不明显;2)极端状况下,特重车荷载对PC板桥的最大正弯矩效应均已超过设计荷载效应的1.8倍,其中PC10 m板桥的该项比值已达到1.92;3)PC板桥对特重车荷载的最大响应的平均水平均已接近设计荷载效应,其中PC10 m板桥的该项比值已达到0.98。

综合以上分析可以发现:在特重车荷载作用下,PC板桥最大正弯矩效应已普遍超越设计荷载效应且部分工况超限程度较为严重,极端状况下特重车工况的最大正弯矩效应可达到设计荷载效应的1.8倍以上,特重车荷载最大正弯矩效应的平均水平已接近设计荷载效应,而随着跨径的增加,PC板桥特重车正弯矩效应超限的普遍性与严重程度均呈现下降的趋势,主要由于设计汽车荷载水平随着跨径的增大具有更为明显的增幅,故在PC板桥设计、施工阶段,应进一步提

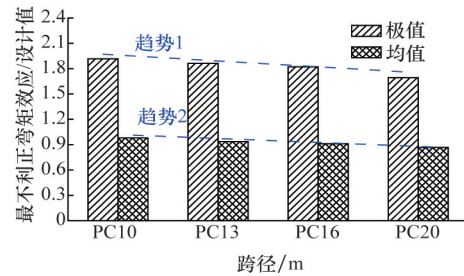


图10 最不利正弯矩效应/正弯矩效应设计值

Fig. 10 Ratio of the most unfavorable sagging moment to design value

升对小跨径桥梁的重视程度。

## 6 结论

1) 根据特重车荷载效应的计算结果,对PC板桥各片板最不利正弯矩效应的极值、均值、标准差进行统计,分析结构的横向受力性能,结果发现:由于特重车鲜明的行驶特点,1#板最不利正弯矩效应的极值最大,5#板最不利正弯矩效应的平均水平最高,而由于4#板位于超车道与行车道的结合部,其响应受车辆行驶位置影响最小,故其最不利正弯矩效应的离散程度最低。基于以上结果,应在PC板桥的设计阶段增加1#板的安全储备,并在5#板处进一步增设相关构造措施,以防止5#板局部构件过早进入亚健康状态。

2) 空心板桥梁在特重车荷载工况下的最大正弯矩效应不拒绝极值-I型分布;在特重车荷载作用下,PC板桥正弯矩效应超限情况普遍,且部分工况超限程度较为严重,但随着跨径的增加,上述情况得到逐渐缓解,所以,在PC板桥的设

计、施工阶段,应在现有设计荷载水平的基础之上,适当增加结构的安全储备,并进一步提升对小跨径桥梁的重视程度。

#### 参考文献(References)

- [1] 交通运输部综合规划司. 2012年公路水路交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2014-10-31]. <http://www.moc.gov.cn/zizhan/siju/guihuasi/>. Integrated Planning Division of Ministry of Transport. Transportation industry statistical bulletin of development of highway and waterway of 2012[EB/OL]. [2014-10-31]. <http://www.moc.gov.cn/zizhan/siju/guihuasi/>.
- [2] 杭文. 公路货运车辆载重规制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.  
Hang Wen. Vehicle weight regulation research of high-way bridge[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [3] 马亚丽, 王东威, 李光慧. 基于单板受力的预应力混凝土空心板桥承载力评定[J]. 公路交通科技, 2013, 30(6): 45-48.  
Ma Yali, Wang Dongwei, Li Guanghui. Evaluation of load-bearing capacity of pre-stressed concrete hollow slab based on single slab load bearing[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(6): 45-48.
- [4] 赵卓, 蒋晓东, 霍达. 基于破坏荷载试验的预应力混凝土空心板单板受力分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(5): 498-501.  
Zhao Zhuo, Jiang Xiaodong, Huo Da. Single slab bearing analysis of pre-stressed concrete hollow slab based on broken test[J]. Journal of Beijing of Technology, 2007, 33(5): 498-501.
- [5] 刘海洋. 预应力混凝土空心板荷载试验有限元模拟[D]. 天津: 天津大学, 2011.  
Liu Haiyang. Finite element simulation of pre-stressed concrete hollow slab load test[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [6] 康省桢. 混凝土空心板梁桥破坏机理试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.  
Kang Shengzhen. Experimental study on failure mechanism of pre-stressed concrete hollow slab beam bridge[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [7] 刘家奎. 预应力混凝土空心板纵向裂缝成因分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.  
Liu Jiakui. Analysis of longitudinal cracking for pre-stressed concrete hollow slab[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [8] 杨继新. 装配式空心板桥铰缝受力性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2009.  
Yang Jixin. Study on mechanical properties of fabricated hollow slab bridge hinge joints under the load [D]. Huhehaote Inner Mongolia University of Technology, 2009.
- [9] 韩万水, 闫君媛, 武隽, 等. 基于长期监测的特重车交通荷载特性及动态过桥分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 54-61.  
Han Wanshui, Yan Junyuan, Wu Jun, et al. Extra-heavy truck load features and bridge response based on long-term traffic monitoring record [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 54-61.
- [10] 赵建峰. 多地域公路桥梁常规车辆及特重车荷载研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.  
Zhao Jianfeng. Research on normal vehicle load and extra-heavy truck load of multi-regional highway bridges [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 中华人民共和国交通行业公路桥涵通用图[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Highway bridge general figure of transportation industry of the People's Republic of China[M]. Peking: China Communications Press, 2008.
- [12] 汉勃利 E C. 桥梁上部构造性能[M]. 郭文辉, 译. 北京: 人民交通出版社, 1982.  
Hambly E C. Bridge deck Behaviour[M]. Guo Wenhui, Trans. Beijing: China Communications Press, 1982.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTG D60-2004, 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D60-2004. General code for design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.

## Load effect analysis of PC slab bridges under extra-heavy trucks

HAN Wanshui<sup>1</sup>, ZHAO Shiliang<sup>2</sup>, LI Yanwei<sup>3</sup>, ZHAO Fu'an<sup>4</sup>, LIU Libin<sup>4</sup>, YUAN Yangguang<sup>1</sup>, LIU Xiangru<sup>4</sup>

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China

2. Management Office of Shijiazhuang 3rd Ring Road, Shijiazhuang 050051, China

3. Shijiazhuang Traffic Transport Bureau, Shijiazhuang 050051, China

4. Hebei Jitong Road & Bridge Construction Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China

**Abstract** For the purpose of studying the load effect of PC slab bridges under extra-heavy trucks, 883 extra-heavy truck scenarios were extracted based on WIM data from Xuanda highway in Hebei Province. The "bridge dynamic analysis system" was used to calculate the most unfavorable sagging moment of each slab and the maximum sagging moment effect of the bridge. The lateral performance of the slabs was investigated using statistics about the most unfavorable sagging moment of each slab. In addition, the overrun of sagging moment of PC slab bridges was analyzed based on comparison of the maximum sagging moment effect and design value. The results show that owing to the apparent distribution characteristics of extra-heavy trucks, the extreme unfavorable sagging moment of slab 1 was the highest, and the average unfavorable sagging moment of slab 5 was the highest. Under extra-heavy truck load, the overrun problem of sagging moment was universal. Besides, the maximum sagging moment of some scenarios was 1.8 times of the design value. Both the quantity of overrun scenarios and overrun level decreased slightly with the increase of bridge span.

**Keywords** bridge engineering; prefabricated PC slab bridge; extra-heavy truck load; lateral performance analysis; overrun analysis

(责任编辑 赵业玲)