

文章编号:1673-2049(2015)04-0073-07

# 重载交通条件下装配式 RC 板桥抗裂性分析

赵士良<sup>1</sup>, 韩万水<sup>2</sup>, 鲁永飞<sup>1</sup>, 刘相儒<sup>3</sup>, 闫利<sup>1</sup>, 王向荣<sup>1</sup>

(1. 石家庄市三环路管理处, 河北 石家庄 050051; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;  
3. 河北冀通路桥建设有限公司第二分公司, 河北 石家庄 050051)

**摘要:**为研究重载交通条件下 RC 板桥的抗裂性能,以煤运干线宣大高速公路某大桥所采集的动态称重(WIM)数据为基础,提取出 883 个特重车荷载工况,借助自主研发的三维动力可视化分析软件 BDANS 计算特重车荷载工况作用下 RC 板桥的正弯矩效应,并按照现行桥梁规范的裂缝宽度计算方法计算每个特重车工况作用下 RC 板桥跨中截面的裂缝宽度。结果表明:RC 板桥跨中截面的裂缝宽度均介于 0.1~0.2 mm 之间,未超越现行桥梁规范所规定的最大裂缝宽度,但该类型裂缝的存在将为混凝土碳化、钢筋的电化学腐蚀提供有利的发生环境;为保证结构的正常使用并延长其服役期,应对已有裂缝进行修复处理并对公路桥梁车辆荷载进行限载研究。

**关键词:**桥梁工程;装配式 RC 板桥;重载交通;抗裂性分析;裂缝宽度

**中图分类号:**U441.2 **文献标志码:**A

## Crack Resistance Analysis on Prefabricated RC Slab Bridge Under Heavy Traffic

ZHAO Shi-liang<sup>1</sup>, HAN Wan-shui<sup>2</sup>, LU Yong-fei<sup>1</sup>, LIU Xiang-ru<sup>3</sup>,  
YAN Li<sup>1</sup>, WANG Xiang-rong<sup>1</sup>

(1. Management Office of Shijiazhuang 3rd Ring Road, Shijiazhuang 050051, Hebei, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. The Second Company of Hebei Jitong Road & Bridge Construction Co., Ltd, Shijiazhuang 050051, Hebei, China)

**Abstract:** In order to study the crack resistance of RC slab bridge under heavy traffic, 883 extra-heavy truck cases were extracted from the Xuanda highway Weigh-in-motion (WIM) data, which was used for coal transportation. The sagging moment effect of RC slab bridge under the extra-heavy truck cases was calculated by self-developed three-dimensional analysis software BDANS. Furthermore, the crack widths of mid-span section of RC slab bridge were achieved according to the realizing method which was listed in current bridge standard. The results show that the crack width of mid-span section of RC slab bridge caused by extra-heavy truck is within the scope of 0.1-0.2 mm and it does not exceed the maximum crack width of the relevant provisions. While the existing of these cracks will provide an ideal circumstance for the carbonation of concrete and electrochemical corrosion of the rebar. In order to ensure the serviceability and extend the service period of structures, some preliminary repairs for the cracks and study on vehicle load limitation of highway bridges should be done.

**Key words:** bridge engineering; prefabricated RC slab bridge; heavy traffic; crack resistance anal-

收稿日期:2015-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51278064)

作者简介:赵士良(1973-),男,河北辛集人,高级工程师,E-mail:zhaoshiliang1973@126.com。

ysis; crack width

## 0 引言

装配式 RC 板桥在中国的建设量大面广,在河北与湖北两省,板桥建设数量均已超过桥涵总量的 70%<sup>[1-2]</sup>,然而混凝土是由骨料、气体、水分等组成的多相非匀质混合材料,结构建设阶段产生的粘结微裂缝在外部环境变化及荷载作用下继续开展将形成宏观裂缝(宽度大于 0.05 mm)<sup>[3]</sup>,宏观裂缝的存在使结构产生渗漏,加速混凝土碳化并降低了混凝土抵抗各种侵蚀性介质的能力,据调查近 70%的预制空心板桥梁使用寿命未超越 20 年<sup>[4]</sup>。

针对 RC 结构在服役期间存在的各种问题,Djerbi 等<sup>[5]</sup>研究了裂缝表面氯离子侧向扩散与裂缝宽度的相关性<sup>[5]</sup>;Rodriguez 等<sup>[6]</sup>通过稳态自然扩散试验证明:当裂缝开展到一定程度时,混凝土裂缝截面处氯离子侧向侵蚀深度比竖向侵蚀深度大得多,裂缝处的氯离子将进行二维扩散,丁嵬<sup>[7]</sup>对 RC 结构的裂缝宽度计算方法进行了研究;周林仁等<sup>[8]</sup>通过建立 RC 结构裂缝损伤状态模型发现,混凝土初次开裂对结构影响最大,已有裂缝的张开、闭合对结构影响相对较小;陈红梅<sup>[9]</sup>根据 RC 结构裂缝宽度对其进行了病害等级的划分并给出了相应的处理措施;陆春华<sup>[10]</sup>以 RC 受弯构件为研究对象,分析了荷载性裂缝对混凝土水分子、氯离子渗透性能的影响;阮林旺<sup>[4]</sup>探讨了高速公路预制空心板结构性裂缝的产生机理。总的说来,各国学者对混凝土结构抗裂性能的研究更多集中在有害介质的微观侵蚀机理方面,而当下重载交通情况的普遍存在对混凝土结构开裂的宏观影响尚无人问津。

裂缝根据其产生原因分为荷载性裂缝及非荷载性裂缝,与后者不同的是,荷载性裂缝由于其作用机理明确,具有明确的裂缝宽度计算公式。本文以荷载性裂缝为主要研究对象,首先基于煤运干线河北省宣大高速公路的动态称重(Weigh-in-motion, WIM)数据提取出特重车(货车总质量大于 80 t<sup>[11]</sup>)过桥行驶工况,并对重载交通的特征进行分析;其次,使用 ANSYS 12.0 建立 RC 板桥梁格法有限元模型并计算其车辆荷载效应设计值;然后以随机车流-车桥梁分析系统(Bridge Dynamic Analysis System, BDANS)为计算平台<sup>[12]</sup>,调用已经提取的特重车工况,得到在各特重车工况作用下 RC 板桥跨中截面的最大正弯矩效应;最后根据现行桥梁规范所

给定的裂缝宽度计算方法计算每个特重车工况所对应的裂缝宽度,通过对计算结果的统计、分析,得到重载交通条件下混凝土桥梁裂缝宽度的总体情况,并就开裂现状对结构的影响进行简要分析。

## 1 特重车工况提取以及重载交通特征分析

河北省宣大高速公路是一条山区重载高速公路,作为晋煤外运的主要通道,该路段重车比例可达到 25%,根据宣大高速公路某桥头安装的动态称重设备所采集的交通流数据,共提取到 883 个适用于中小跨径桥梁的特重车荷载工况<sup>[13]</sup>,根据各工况中车辆组成信息对其进行分类,如表 1 所示,其中,  $m$  为车重。

表 1 特重车工况分类

Tab. 1 Classification of Extra-heavy Truck Cases

工况	数量	比例/%
特重车	844	95.58
1 辆特重车+1 辆轻车	24	2.72
1 辆特重车+1 辆重车	12	1.36
其他	3	0.34

注:特重车  $m \geq 80$  t;重车  $20$  t  $\leq m < 80$  t;轻车  $m < 20$  t。

图 1 为宣大高速公路特重车的车重分布统计结果。由图 1 可知,特重车的平均车重为 93.2 t,最大车重已经达到 145.6 t。

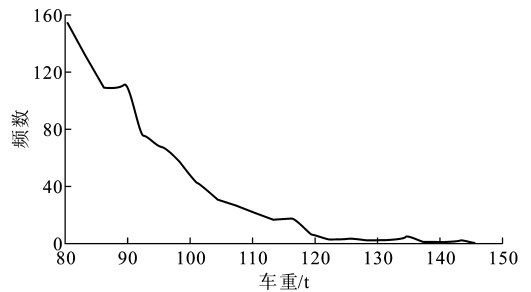


图 1 特重车车重分布

Fig. 1 Weight Distribution of Extra-heavy Truck

WIM 系统可以采集到每辆车在桥面的行驶位置,特重车在行车道、超车道的分布比例如图 2 所示。由图 2 可见,83.6%的特重车均沿行车道行驶,这主要是由于特重车重大、速度慢,若特重车长时间行驶于超车道,当跟驰车辆达到一定数量时,在其后方、侧向出现的排队车辆将形成“移动瓶颈”<sup>[14]</sup>,影响高速公路的通行能力。

基于以上分析可知,重载交通具有以下鲜明特

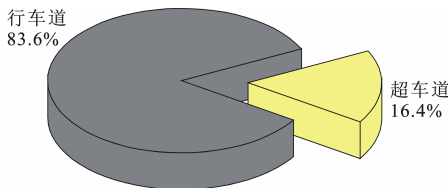


图 2 特重车行驶车道分布

Fig. 2 Driving Lane Distribution of Extra-heavy Truck

征:①对于 RC 板桥等中小桥梁,车辆荷载效应以单车效应为主;②单车车重较大,对于本文的研究,特重车单车车重均大于 80 t,且其平均水平也已达 93.2 t;③特重车由于其自身的行驶特性,主要沿行车道行驶。

## 2 RC 板桥有限元模型的建立

RC 板桥在跨径不超过 10 m 的小跨径桥梁中应用最为广泛。为加快桥梁建设进度,交通运输部于 2008 年颁布了《中华人民共和国交通行业公路桥梁通用图》<sup>[15]</sup>,其中 RC 板桥跨径分别为 6,8,10 m,《中华人民共和国交通行业公路桥梁通用图》的颁布虽加快了桥梁的建设进度,但设计者通常没有因地制宜地对设计方案做出调整,使得桥梁在正常服役期间出现了不同程度的病害。本文通过计算 6,8,10 m 空心 RC 板桥在重载交通条件下的裂缝宽度分析其抗裂性能,首先需要建立 RC 板桥的有限元模型。

### 2.1 RC 板桥结构概况

《中华人民共和国交通行业公路桥梁通用图》中 RC 板桥均采用双向四车道布置,左右幅分离,桥面总宽 24.5 m,单幅桥面净宽 10.75 m。图 3 为 8 m RC 板桥典型横断面布置。

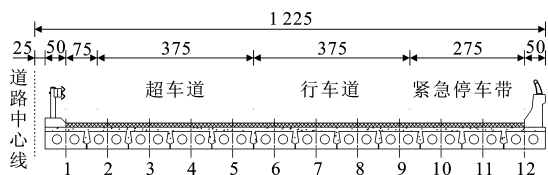


图 3 8 m RC 板桥典型横断面布置(单位:cm)

Fig. 3 Typical Transverse Section Layout of 8 m RC Slab Bridge (Unit:cm)

由图 3 可知,RC 板桥在横桥向由 12 片预制空心板装配而成,每 2 片空心板之间使用现浇混凝土填缝,单板宽度约 1.0 m。图 4 为 6,8,10 m RC 板桥单板截面信息。由图 4 可见,空心板单板的净宽均为 99 cm,随着跨径的增加,RC 板桥单板高度由 32 cm 增加至 50 cm,普通钢筋用量也随跨径增加而

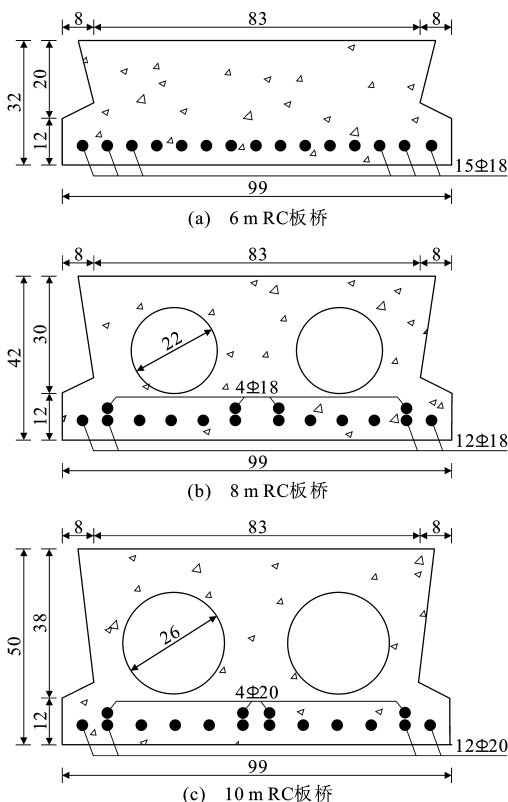


图 4 RC 板桥单板截面信息(单位:cm)

Fig. 4 Cross Section Information of RC Slab Bridge (Unit:cm)

明显提高。

### 2.2 模型的建立及车辆荷载效应设计值计算

以《桥梁上部构造性能》<sup>[16]</sup>为理论基础,使用 ANSYS 12.0 建立 RC 板桥梁格法有限元模型。图 5 为 8 m RC 板桥梁格法有限元模型。梁单元类型为 Beam4,全桥共 362 个单元和 374 个节点。在建立 RC 板桥有限元模型时,根据 RC 板桥混凝土铰缝在实际中的作用机理,通过耦合铰缝处相邻节点的平动自由度和释放转动自由度模拟 2 片空心板之间的铰缝连接。

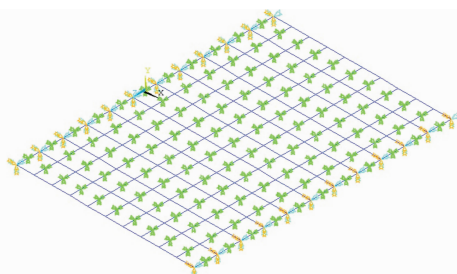


图 5 8 m RC 板桥梁格法模型

Fig. 5 Grillage Model of 8 m RC Slab Bridge

《公路钢筋桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2004)<sup>[17]</sup>规定:设计车辆荷载为均布荷载与集中力

的形式,均布荷载大小为  $10.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,集中力大小根据桥梁计算跨径进行现行内插,当计算跨径小于或等于  $5 \text{ m}$  时,集中力大小为  $180 \text{ kN}$ ,当计算跨径大于或等于  $50 \text{ m}$  时,集中力大小为  $360 \text{ kN}$ ,根据 RC 板桥桥面净宽确定其设计车道数为 3 个,最后根据横向最不利加载原则进行加载,可得到 RC 板桥的车辆荷载效应设计值。表 2 为不计入冲击效应的 RC 板桥正弯矩  $M$ 、剪力  $Q$ 、位移  $D$  效应设计值。

表 2 RC 板桥汽车荷载效应设计值

Tab. 2 Design Values of Vehicle Load  
Effect for RC Slab Bridge

跨径/m	$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$Q/\text{kN}$	$D/\text{mm}$
6	92.73	81.86	1.394
8	127.60	85.14	1.853
10	166.21	88.22	2.570

### 3 基于 BDANS 的特重车荷载效应计算

对于以受弯为主的梁式结构,其受力裂缝以正弯矩效应在跨中所引起的弯曲裂缝为主。为得到特重车荷载作用下 RC 板桥的弯曲裂缝宽度,首先须计算每个特重车工况作用下 RC 板桥跨中截面的最大正弯矩效应。

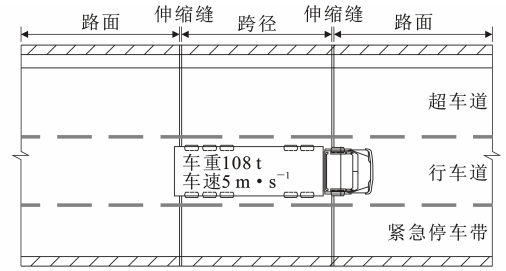
BDANS 中的移动荷载分析模块与 ANSYS 具有无缝接口,将已建立的 ANSYS 有限元模型导入 BDANS 并调用已经提取的特重车荷载工况,可实现各工况过桥可视化分析并计算出桥梁关键截面的内力响应。图 6 为一个典型的特重车单车经过  $8 \text{ m}$  RC 空心板桥的过桥场景及行车道主梁跨中正弯矩效应时程曲线。可见,在已知每个特重车工况车辆行驶信息的前提下,可由 BDANS 计算出该工况所对应的最大正弯矩效应,即受力最不利板桥正弯矩效应时程曲线的峰值。各工况作用下 RC 板桥最大正弯矩效应计算结果如图 7 所示。

由图 7 可知:3 座 RC 板桥最大正弯矩效应对设计值的工况超限率分别为  $50.8\%$ 、 $55.6\%$ 、 $40\%$ ,最大正弯矩效应的极值分别达到了正弯矩效应设计值的  $2.07$ 、 $2.10$ 、 $1.94$  倍,在重载交通条件下 RC 板桥正弯矩效应超限严重且较为普遍。

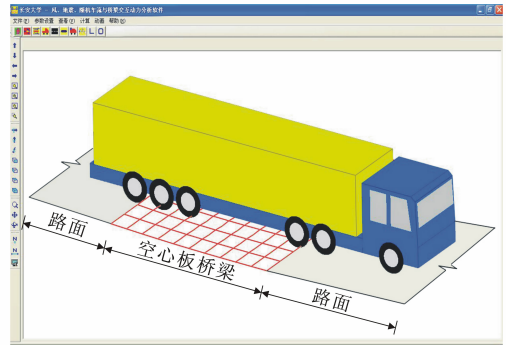
## 4 RC 板桥裂缝宽度计算

### 4.1 RC 结构裂缝宽度计算方法

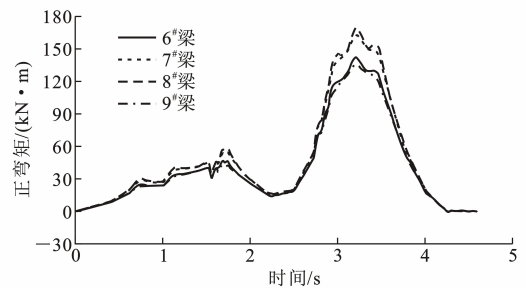
RC 结构在服役期间均是带裂缝工作,图 8 为研究人员在现场所观测到的 RC 板桥梁体所存在的



(a) 特重车工况桥面交通流信息



(b) BDANS 可视化分析结果



(c) 行车道各梁正弯矩效应时程曲线

图 6 典型特重车工况分析

Fig. 6 Analyses of Typical Extra-heavy Truck Cases

混凝土开裂情况。

现行桥梁规范给出了 RC 结构受力裂缝的计算方法及不同环境下的最大裂缝容许宽度<sup>[18]</sup>。最大裂缝宽度  $W_{fk}$  的计算公式为

$$W_{fk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \frac{30+d}{0.28+10\rho} \quad (1)$$

式中:  $C_1$  为钢筋表面形状系数,对于带肋钢筋  $C_1 = 1.0$ ;  $C_2$  为作用长期效应的影响系数,  $C_2 = 1 + 0.5N_1/N_s$ ,  $N_1, N_s$  分别为按照作用长期效应组合、作用短期效应组合计算的弯矩值;  $C_3$  为与构件受力性质有关的系数,对于受弯构件  $C_3 = 1.0$ ;  $\sigma_{ss}$  为钢筋应力,  $\sigma_{ss} = M_s / (0.87A_s h_0)$ ,  $M_s$  为正弯矩效应的短期组合值,  $h_0$  为截面的有效高度,  $A_s$  为受拉钢筋面积;  $E_s$  为钢筋的弹性模量,对于 HRB335 钢筋,  $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ ;  $d$  为受拉钢筋直径;  $\rho$  为纵向受拉钢筋的配筋率。

### 4.2 特重车工况裂缝宽度计算

简支空心板桥在进行正弯矩效应短期组合时,

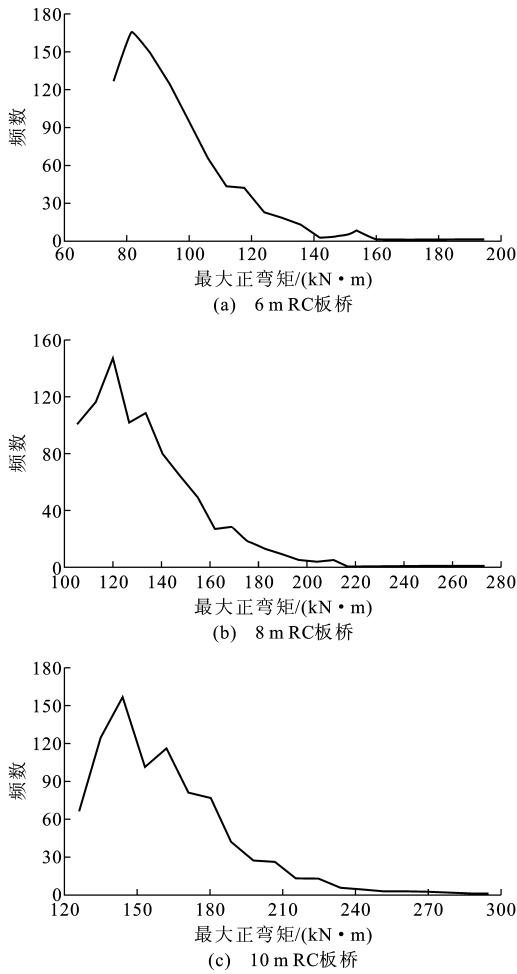


图7 特重车工况最大正弯矩效应

Fig. 7 Maximum Sagging Moment Effects of Extra-heavy Truck Cases

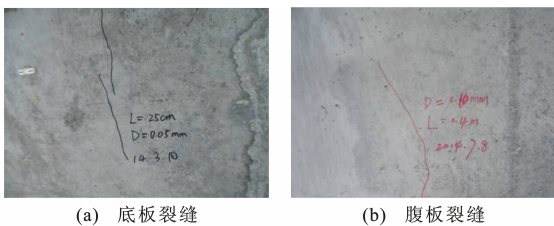


图8 RC板桥现场裂缝观测记录

Fig. 8 Observational Record of Cracks in RC Slab Bridge

除车辆荷载效应外还应考虑结构自重及温度效应,其中温度效应包括结构整体升温 and 降温、梁截面温度 2 个部分,即

$$M_s = M_{Gk} + 0.7M_i + 0.8M_t \quad (2)$$

式中: $M_{Gk}$ 、 $M_i$  分别为结构自重及温度变化所引起的正弯矩效应; $M_i$  为第  $i$  个特重车工况作用下简支空心板桥的最大正弯矩效应。

根据建立的梁格法有限元模型提取的正弯矩效应  $M_{Gk}$ 、 $M_i$  如表 3 所示。

表3 RC板桥正弯矩效应

Tab. 3 Sagging Moment Effect of RC Slab Bridge

跨径/m	6	8	10
$M_{Gk}/(kN \cdot m)$	52.04	100.02	168.60
$M_i/(kN \cdot m)$	19.36	13.23	14.23

根据式(2)对正弯矩效应进行短期组合并代入式(1),计算得到各工况作用下空心板桥受力最不利板跨中截面的最大弯曲裂缝宽度,结果的统计分布如图 9 所示。裂缝宽度的最小值、平均值、最大值可全面反映 RC 板桥在重载交通条件下关键截面的裂缝开展水平,三者随跨径的变化趋势见图 10。

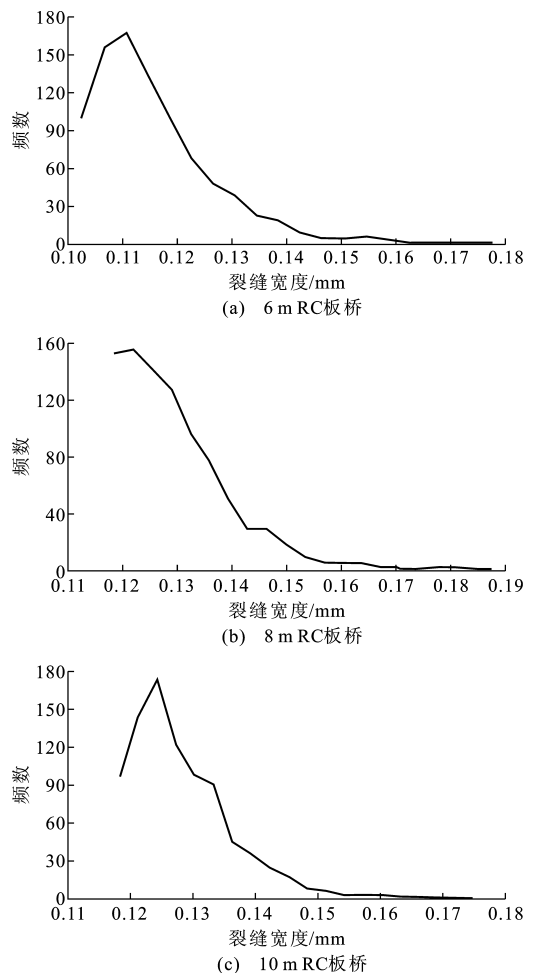


图9 RC板桥跨中截面最大裂缝宽度

Fig. 9 Maximum Crack Widths of Mid-span Section of RC Slab Bridges

由图 9,10 可知:RC 板桥在各工况作用下的裂缝宽度均介于 0.1~0.2 mm 之间;弯曲裂缝宽度最大值、平均值、最小值并没有随跨径的增加而单调上升,8 m RC 空心板桥的裂缝开展情况较 6,10 m RC 空心板桥更为明显。

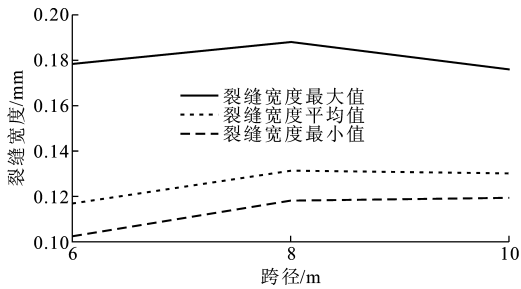


图10 裂缝宽度统计指标随跨径变化趋势

Fig. 10 Changing Trend of Statistical Index of Crack Width with Span

## 5 RC板桥开裂状态对结构的影响

重载交通条件下RC板桥的弯曲裂缝宽度均介于0.1~0.2 mm之间,该类裂缝对结构刚度的削弱及对结构外观的影响有限<sup>[9]</sup>,并不足以引起使用者的恐慌,但会对结构的耐久性带来不利影响。

根据对宣大高速公路空心板桥实际开裂情况的调研,结构在重载车辆的长期作用下已经在跨中部位形成了规律性较强的弯曲变形裂缝,结构的强度与刚度已有明显下降,以K238+927通道及K221+810通道为例,结构行车道、超车道各片板的跨中位置均出现了明显的弯曲裂缝,裂缝宽度为0.05~0.20 mm不等<sup>[19]</sup>。

Aldea等<sup>[20]</sup>的研究结果表明:混凝土的氯离子渗透系数在裂缝宽度小于0.08 mm时会随宽度的增加而增大,但增加幅度较小,当裂缝宽度超过0.08 mm以后,氯离子的渗透系数会快速增大,裂缝宽度为0.2 mm时,氯离子扩散系数可达到未开裂混凝土的近15倍。同时Djerbi等<sup>[5]</sup>的研究结果也表明:当裂缝宽度超过0.08 mm以后,氯离子在裂缝处的扩散相当于在自由溶液中的扩散,此时裂缝表面所积累的氯离子与侵蚀面几乎相同,氯离子将沿裂缝的竖向、侧向发生二维扩散。

此外,日本长达20年的RC结构裂缝宽度与钢筋锈蚀程度试验的中期检查结果显示:在裂缝宽度介于0.1~0.2 mm的结构中,钢筋发生锈蚀的结构数量占总量的70%,并且51%结构的钢筋存在严重锈蚀问题<sup>[21]</sup>。所以,尽管裂缝宽度计算结果并未超越现行桥梁规范所确定的最大值,但其对应的开裂状态可以为氯离子、水分子的渗透开辟一条阻力小、路径短的通道,加速混凝土碳化及钢筋电化学腐蚀的进程,而混凝土的碳化及钢筋的腐蚀将诱使RC板桥底板纵向裂缝等的产生,使混凝土结构的开裂

陷入恶性循环。

## 6 结语

(1)基于长期监测的公路桥梁WIM数据提取出特重车荷载工况,借助BDANS计算出各工况作用下RC板桥跨中截面的最大正弯矩效应,并与恒载效应、温度效应等进行正常使用极限状态的短期组合,得到在重载交通条件下RC板桥受力最不利板的弯曲裂缝开展情况。

(2)通过对计算结果的统计分析发现,裂缝宽度分布在0.1~0.2 mm的范围内,且8 m RC板桥的开裂情况较6,10 m RC板桥更为明显。裂缝宽度虽未超过现行桥梁规范所规定的最大裂缝宽度0.2 mm,但这类受力裂缝的存在将为氯离子、水分的渗透开辟一条阻力小、路径短的通道,加速了混凝土的碳化及钢筋的电化学腐蚀,使混凝土结构陷入加速开裂的恶性循环。

(3)针对重载交通条件下RC板桥的裂缝开展情况,为保证结构的正常使用并延长其服役期限,首先应使用水泥砂浆等对结构的裂缝进行表面修补,其次针对当前公路运输现状对车辆荷载进行限载研究,以期有效延长混凝土结构的服役期限。

### 参考文献:

### References:

- [1] 项贻强,邢 骋,邵林海,等. 横向加固空心板梁桥荷载横向分布计算方法与试验研究[J]. 中国公路学报, 2013,26(2):63-68,76.  
XIANG Yi-qiang, XING Cheng, SHAO Lin-hai, et al. Calculating Method and Experimental Research on Lateral Load Distribution of Transversely Strengthened Hollow Slab Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013,26(2):63-68,76.
- [2] 单成林. 综合施加预应力法加固钢筋混凝土板桥理论及试验[J]. 中国公路学报, 2013,26(1):67-73.  
SHAN Cheng-lin. Theory and Experiment of Reinforced Concrete Slab Bridges Reinforced by Comprehensive Method of Post-tensioned and Pre-tensioned Prestressing [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013,26(1):67-73.
- [3] 余学芳. 混凝土结构裂缝的有限元模拟[D]. 杭州:浙江大学, 2012.  
YU Xue-fang. Finite Element Simulation of Cracks in Concrete Structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [4] 阮林旺. 高速公路预制空心板结构性裂缝机理探讨

- [D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- RUAN Lin-wang. The Mechanism of Highway Precast Hollow with Structural Cracks [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2013.
- [5] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of Traversing Crack on Chloride Diffusion into Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(6):877-883.
- [6] RODRIGUEZ O G, HOOTON R D. Influence of Cracks on Chloride Ingress into Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(2):120-126.
- [7] 丁 巍. 钢筋混凝土结构裂缝宽度计算方法研究 [D]. 天津:天津大学,2007.
- DING Wei. The Study on Crack Width Calculation Methods of Reinforced Concrete Structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [8] 周林仁, 欧进萍. 钢筋混凝土结构裂缝损伤状态模型建模方法与分析 [J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(3):399-405.
- ZHOU Lin-ren, OU Jin-ping. Modeling Method and Analyses for State Model of Reinforced Concrete Structure with Crack Damage [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(3):399-405.
- [9] 陈红梅. 钢筋混凝土桥梁病害分析及其维修加固 [D]. 大连:大连理工大学,2011.
- CHEN Hong-mei. The Diseases Analysis and Maintenance and Strengthening of Reinforced Concrete Bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [10] 陆春华. 钢筋混凝土受弯构件开裂性能及耐久性研究 [D]. 杭州:浙江大学,2011.
- LU Chun-hua. Flexural and Durability Performance of RC Members with Cracks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [11] 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 Wan-shui, YAN Jun-yuan, WU Jun, et al. Extra-heavy Truck Load Features and Bridge Dynamic Response Based on Long-term Traffic Monitoring Record [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2):54-61.
- [12] 韩万水, 李彦伟, 乔 磊, 等. 基于车-桥耦合振动理论的移动荷载识别 [J]. 中国公路学报, 2013, 26(1):74-86.
- HAN Wan-shui, LI Yan-wei, QIAO Lei, et al. Moving Load Identification Based on Vehicle-bridge Coupling Vibration Theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1):74-86.
- [13] 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 Jian-feng. Research on Normal Vehicle Load and Extra-heavy Truck Load of Multi-regional Highway Bridges [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [14] GAZIS D C, HERMAN R. The Moving and "Phantom" Bottlenecks [J]. Transportation Science, 1992, 26(3):223-229.
- [15] 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梁通用图 [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]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [16] 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]. Translated by GUO Wen-hui. Beijing: China Communications Press, 1982.
- [17] JTG D60—2004, 公路钢筋桥涵设计通用规范 [S].
- JTG D60—2004, General Code for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [18] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
- JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].
- [19] 贾 刚. 宣大高速公路小桥涵病害调查、分析与处治 [D]. 天津:河北工业大学,2003.
- JIA Gang. The Investigation, Analysis of Shortage Existing in Small Bridge over Stream on the Highway and the Measures [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2003.
- [20] ALDEA C M, SHAH S P, KARR A. Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3):181-187.
- [21] 王有志, 王广洋, 任 峰, 等. 桥梁的可靠性评估与加固 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.
- WANG You-zhi, WANG Guang-yang, REN Feng, et al. Bridge Reliability Assessment and Reinforcement [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002.