

# 钢混组合曲线梁桥混凝土桥面板应力 空间分布特性

郭增伟,陈汉林,李龙景,杨建喜

(重庆交通大学土木工程学院,重庆 400074)

**摘要** 目的 研究不同荷载形式下钢混组合梁桥混凝土板应力分布特性. 方法 以大涧沟大桥为工程背景,采用实体有限元模型分析施工过程对混凝土板剪力滞效应的影响,探讨汽车荷载作用下混凝土桥面板剪力滞-轮载局部综合效应和偏载效应. 结果 考虑施工过程后组合梁桥控制截面的剪力滞系数均有不同程度的增大,且支点截面的剪力滞系数增幅更大;受弯扭耦合效应影响,组合梁桥活载剪力滞效应将更为显著,剪力滞-轮载局部综合影响系数甚至超过2.0,支点截面处桥面板剪力滞-轮载局部效应大于跨中截面,且边跨的剪力滞-轮载局部综合效应明显大于中跨. 结论 剔除剪力滞-轮载局部效应后,控制截面的偏载系数仍可能超过1.2,大于设计中采用的经验系数1.15,且越靠近中跨汽车活载的偏载效应愈发显著,建议设计中应予以充分考虑.

**关键词** 组合梁桥;施工过程;汽车荷载;剪力滞效应;偏载效应

中图分类号 TU997;U441.3

文献标志码 A

## Stress Distribution Characteristics of Concrete Slabs of Steel-concrete Composite Girder Bridges

GUO Zengwei, CHEN Hanlin, LI Longjing, YANG Jianxi

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China, 400074)

**Abstract:** In order to study the stress distribution characteristics of concrete slab of steel-concrete composite girder bridge under different load forms. Methods taking the Dajiangou bridge as the engineering background, the influence of the construction process on the shear lag effect of concrete slab was analyzed by solid finite element model, and the local comprehensive effect and partial load effect of the shear lag-wheel load of concrete slab under the action of vehicle load were discussed. Results after considering the construction process, the shear lag coefficient of the control

收稿日期:2019-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51878106,51478072);国家重点研发计划项目(2017YFC0806001);重庆市技术创新与应用示范专项社会民生类重点研发项目(cstc2018jscx-mszdX0084);重庆市科技创新领军人才项目(CSTCKJCLJRC17);桥梁结构抗震技术交通行业重点实验室开放基金联合资助项目(201501)

作者简介:郭增伟(1985—),男,副教授,博士,主要从事桥梁振动及控制、长期性能等方面研究.

section of the composite beam bridge increases to different degrees, and the shear lag coefficient of the fulcrum section increases greatly. Under the influence of bending-torsion coupling effect, the live load shear lag effect of composite girder bridges will be more significant, the local comprehensive influence coefficient of shear lag-wheel load even exceeds 2.0, the local effect of shear lag-wheel load on the bridge deck at the fulcrum section is greater than the mid-span section, and the local effect of shear lag-wheel load on the side span is significantly greater than the middle span. Conclusion after eliminating the local effect of shear lag-wheel load, the eccentric coefficient of the control section may still exceed 1.2, which is greater than the empirical coefficient 1.15 adopted in the design. Moreover, the partial load effect is more significant when the vehicle is closer to the middle span. Therefore, it is suggested that it should be fully considered in the design.

**Key words:** composite girder bridge; construction process; vehicle load; shear lag effect; eccentric load effect

随着国家现代化进程的发展,道路交通系统也变得越来越复杂,桥梁跨径越来越大,传统的混凝土箱梁自重过大的局限性逐渐显露出来<sup>[1-4]</sup>,钢混组合梁桥不仅可以减轻结构自重,还能充分利用混凝土和钢这两种材料的优势,可以最大程度利用混凝土抗压性以及钢材抗拉性<sup>[5-7]</sup>,同时可以很好地规避混凝土抗裂性差以及钢材容易受压屈曲的缺陷,因此主要应用于跨度较大的多跨桥梁中,符合我国桥梁建设发展方向。但是组合梁受力复杂,剪力滞效应以及活载偏载效应突出<sup>[8-11]</sup>,目前国内外众多学者针对于箱梁的剪力滞效应以及偏载效应开展了大量研究,张元海等<sup>[12]</sup>提出了剪力滞翘曲应力的简便计算公式,利用能量变分法建立了剪力滞控制微分方程,并对两跨连续箱梁模型进行应力计算,研究表明剪力滞效应使该箱梁在集中荷载和均布荷载作用下的跨中挠度分别增大17%和16%;李坤<sup>[13]</sup>运用有限元软件研究了大悬臂连续梁桥在不同荷载工况下的剪力滞特性,结果表明大悬臂箱梁结构的剪力滞特点和普通箱梁存在较大差别,与规范取值相比,大悬臂箱梁桥的有效翼缘宽度总体偏小;蔺鹏臻<sup>[14]</sup>利用能量变分原理,结合预应力等效荷载法,分析箱梁在直线、折线和曲线预应力布束方式下的剪力滞效应,发现连续箱梁在预应力筋偏心锚固的梁端、折线布束的折角处和中支点等部位均会产生较大的

剪力滞效应,由剪力滞效应产生的附加弯矩进一步增大了梁体的偏心距。在偏载效应研究方面,陈国强<sup>[15]</sup>利用有限元软件并结合杭州某工程实例计算结构在汽车荷载作用下时的偏载系数,并对比分析实体有限元法和其他简化偏载增大系数算法的计算结果,研究发现宽箱梁的偏载效应明显,采用传统的经验值是偏不安全的,有必要进行详细的分析计算。沈炯伟等<sup>[16]</sup>以宽幅脊骨梁矮塔斜拉桥为背景,采用ANSYS建立全桥实体模型,对活载的偏载效应进行分析,得到了不同车道数加载时结构偏载系数,并在此基础上提出了基于多车道数的偏载效应修正方法。

目前研究多集中在混凝土宽箱梁剪力滞效应及偏载效应的研究,而针对钢混组合梁桥的剪力滞效应以及活载的偏载效应的研究成果相对较少。基于此,笔者以宁夏大润沟大桥作为工程背景,利用ANSYS建立了桥梁三维实体有限元模型,研究施工过程对恒载剪力滞的影响,分析车辆荷载偏心布置时混凝土板的剪力滞效应和偏载效应,研究成果可为以后同类桥梁结构的设计提供参考。

## 1 工程背景及有限元模型简介

大润沟大桥是一座跨径布置为 $5 \times 30 \text{ m} + 5 \times 30 \text{ m}$ 的连续弯梁桥,桥平面位于半径 $R = 400 \text{ m}$ 的右偏圆曲线上,桥面横坡为单向4%,桥宽为11 m。上部结构采用钢混

组合梁,钢梁采用中心间距 5.8 m 的 Q345D 双工字钢,两片工字型纵梁间设置有间距为 5 m 横梁,标准间距为 5 m,采用焊接 H 形截面,桥面板采用厚度 28 cm、长度 4.66 m,宽度 2.43 m 的 C50 预制钢筋混凝土板,剪力钉采用  $\Phi 22$  mm 圆柱头焊钉,焊接布置在钢主梁及横梁顶部;各分块预制混凝土板吊装

就位后,在工地现场浇筑横向湿接缝、纵向湿接缝,使桥面板、剪力钉与钢纵梁形成组合体系,标准横断面如图 1 所示.具体施工过程主要为四步:①钢梁顶推施工形成连续钢梁;②预制桥面板安装;③浇筑横纵湿接缝形成连续钢混组合梁;④进行桥面铺装.

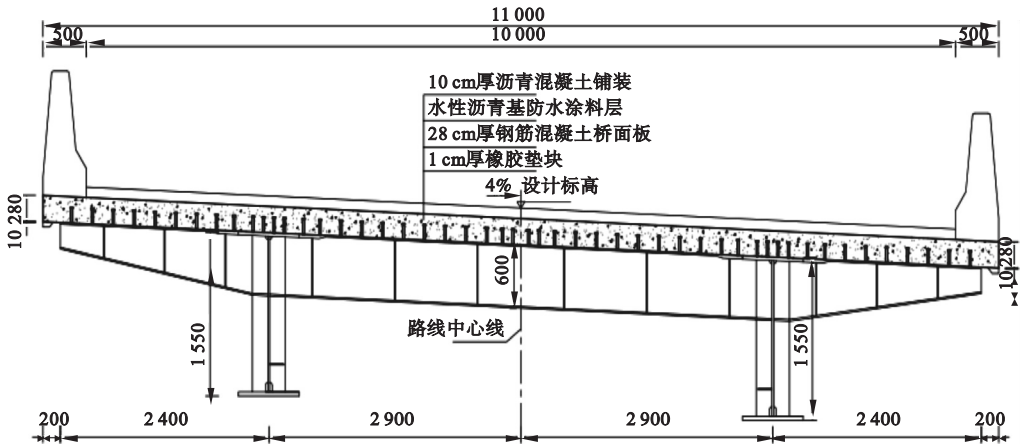


图 1 标准横断面(非支点横梁位置)

Fig. 1 Standard cross section(non-fulcrum beam position)

为了更为准确地分析混凝土桥面板弯曲应力的空间分布特征,建立以弯桥的圆心作为原点,以横桥方向作为 X 轴,顺桥方向作为 Y 轴,竖向作为 Z 轴的柱坐标系,选取一联五跨钢-混组合连续梁建立 ANSYS 实体有限元模型,分别使用 SOLID65、SHELL43 单元模拟混凝土桥面板和钢主梁,剪力钉则采用 COMBIN39 弹簧单元模拟,考虑 COMBIN39 仅能描述某一方向受力状态,在模型中同时设置沿 X 和 Y 方向 COMBIN39 单元以描述剪力钉在承受荷载作用时在横桥向和顺桥向的受力行为;定义 COMBIN39 单元时,需将钢主梁、横梁以及挑臂的节点与混凝土桥面板节点连接起来,并使用自由度耦合命令耦合钢梁和混凝土桥面板对应节点 Z 方向位移.达到模拟剪力钉的实际受力行为,整个桥梁模型共划分 613 416 个节点,491 878 个单元,对于滑动支座约束主梁底板相应位置处节点的竖向和横向自由度,对于固定支座则约束主梁底板相应位置处节点的竖

向、横向和顺桥向自由度.为保证计算精度,整个模型采用映射网格划分,网格尺寸为 0.12 mm(见图 2).在建立全桥有限元模型后,通过定义 ANSYS 中荷载步内的信息实现桥梁施工过程的模拟,即在每个荷载步内通过 EKILL 和 EALIVE 命令“杀死”和“激活”各施工阶段所对应单元,在设置相应边界条件后完成该荷载步(施工阶段)的求解,而后定义下一施工阶段内所对应单元和边界条件并完成求解.根据设计施工工序,模型中共划分为四个施工阶段进行模拟:①钢梁一次落架形成连续钢梁;②预制桥面板安装;③浇筑湿接缝;④施加二期恒载.

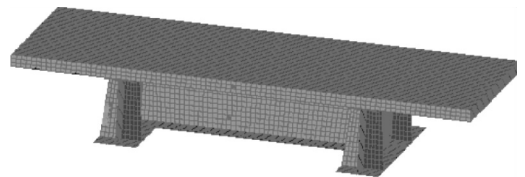


图 2 大涧沟大桥全桥模型单元划分图

Fig. 2 Mesh of Dajiangou bridge

## 2 模型正确性验证

为检验 ANSYS 精细化空间分析模型的正确性,采用 Midas/Civil 建立有限元模型,总体坐标系以横桥向为 X 轴,竖向为 Z 轴,顺桥向为 Y 轴;各单元局部坐标系以单元轴向为 1 轴(从 I 节点指向 J 节点),3 轴保持水平且垂直于 1 轴,2 轴按右手螺旋准则确定,钢梁、桥面板、湿接缝、均采用空间三维梁单元进行模拟,剪力钉采用弹性连接中的刚性连接模拟,通过桥面板节点和两侧钢梁的节点之间建立刚性连接,针对不同施工阶段下的钢梁、桥面板应力进行 ANSYS 和 Midas/Civil 计算结果对比分析.需要说明的是,由于 ANSYS 模型中模拟的加劲肋结构,而 Midas/Civil 梁单元模型无法准确模拟加劲肋,故以附加自重的形式进行模拟.图 3、图 4 分别给出了 ANSYS 和 Midas/Civil 模拟的大涧沟大桥第一施工阶段(钢主梁施工)下,钢梁顶、底缘腹板中心线处的应力沿顺桥向的分布规律.从图中可知,两者计算结果吻合度较高.

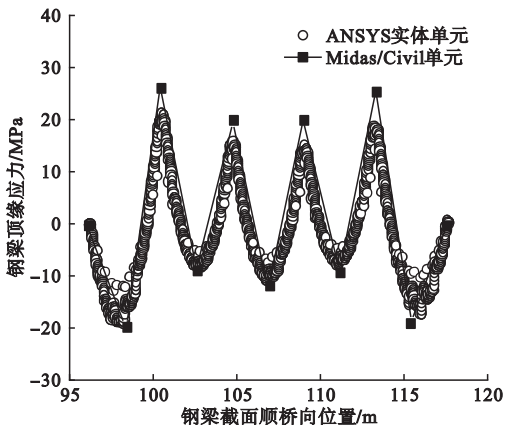


图 3 钢主梁顶缘应力分布图

Fig. 3 Stress distribution diagram of the top edge of steel beam

浇筑湿接缝后形成连续钢板组合梁,随后施加二期荷载,两种计算模型均能较好地模拟出湿接缝处顶缘的应力水平,故对比第四阶段湿接缝顶缘应力能相互验证两种模型

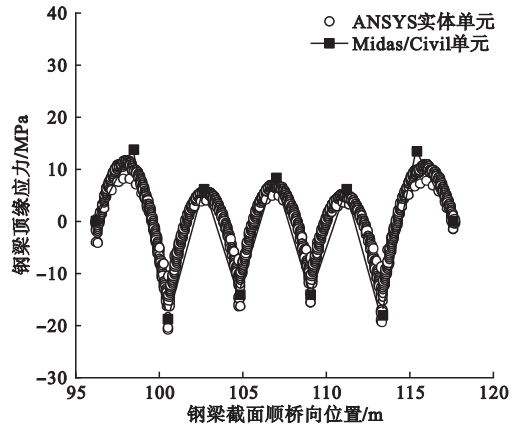


图 4 钢主梁底缘应力分布图

Fig. 4 Stress distribution diagram of the bottom edge of steel beam

的合理性.表 1 给出了第四施工阶段(施加二期荷载)湿接缝处顶缘的应力.从表中可以看出两者相差较小,最大误差为 10.0%,进一步验证了本模型的正确性.

表 1 混凝土板上缘应力

Table 1 Concrete top edge stress

支点	ANSYS	Midas	相对误差/%
	模拟应力结果/MPa	模拟应力结果/MPa	
1-2 跨	1.82	1.75	4.0
2-3 跨	1.76	1.60	10.0
3-4 跨	1.72	1.60	7.5
4-5 跨	1.86	1.80	3.4

## 3 施工过程对混凝土板恒载剪力滞效应的影响

为了探讨施工过程对混凝土板恒载剪力滞效应的影响,图 5 和图 6 分别给出了模拟施工过程与否时连续梁跨中和支点截面混凝土桥面板弯曲正应力的横向分布.从图中可以发现:受弯桥“弯扭耦合”效应<sup>[17-19]</sup>的影响,混凝土桥面板弯曲正应力呈现“外侧大内侧小”的不对称分布的特点;考虑施工过程后,支点截面混凝土桥面板内弯曲正应力水平显著减小,而跨中截面混凝土桥面板弯曲应力则略有增大,表明桥梁恒载内力是伴

随着构件施工过程中逐渐累积的过程,施工过程模拟的正确与否是结构恒载内力准确计算的前提;另外,无论是跨中截面还是支点截面,桥面板内部恒载弯曲正应力均呈现出

“靠近钢纵梁处应力大,远离钢纵梁处应力小”的不均匀分布的特征,这即是组合梁的剪力滞效应,且施工过程的模拟与否也会对组合梁剪力滞效应产生较大的影响。

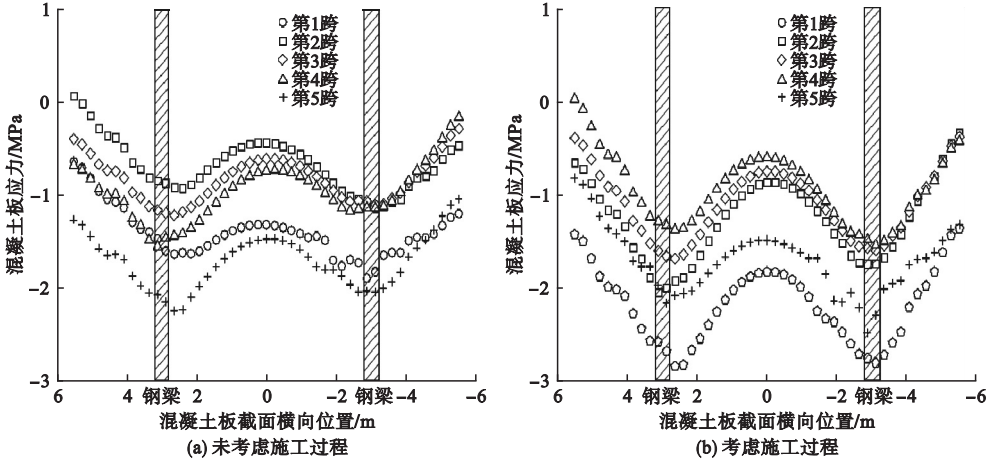


图5 各跨跨中处混凝土板恒载弯曲正应力分布

Fig. 5 Distribution of normal bending stress of concrete slabs under constant load in the middle of each span

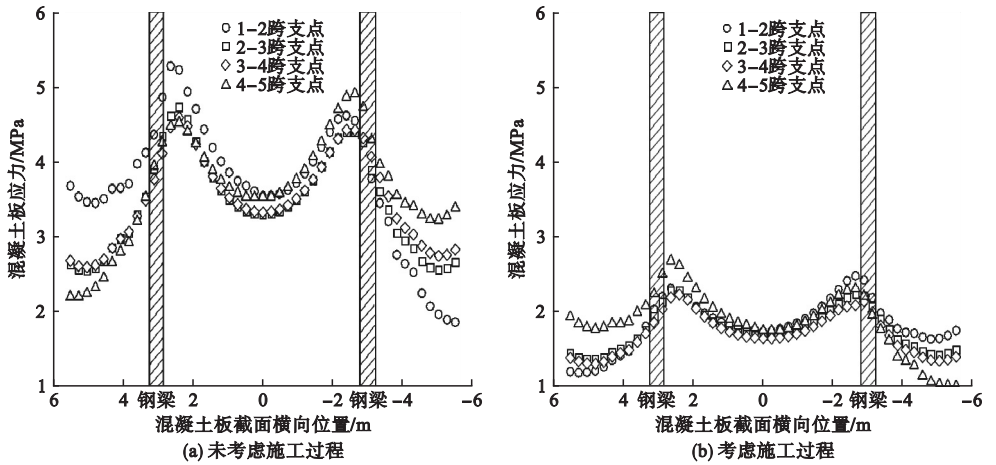


图6 各跨支座处混凝土恒载板弯曲正应力分布

Fig. 6 The distribution of normal bending stress of concrete slabs under constant load in the fulcrum of each span

为定量评价弯曲正应力沿宽箱梁翼缘的不均匀分布情况,可按照式(1)求解最大剪力滞系数 $\lambda$ <sup>[20]</sup>:

$$\lambda = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为同一高度处弯曲正应力的平均值; $\sigma_{\max}$ 为同一高度处弯曲正应力的绝对值最大值。

表2给出了施工过程模拟与否条件下5跨连续梁各控制截面恒载剪力滞系数的对

比,从表中可以看出:考虑施工过程后各控制截面的剪力滞系数均有不同程度的增大,且支点截面的剪力滞系数增幅更大,原因在于考虑桥面板施工过程后,现浇湿接缝连接的是“变形后的预制板”,作为“连续结构”存在的桥面板仅承受湿接缝浇筑后才施加的二期恒载,支点截面处桥面板平均应力水平的降低导致该处剪力滞系数的增幅明显。

表2 5跨连续梁桥各控制截面恒载剪力滞系数

Table 2 Constant load shear lag coefficient of each control section of a 5-span continuous beam bridge

计算工况	跨中截面剪力滞系数					支点截面剪力滞系数			
	第1跨	第2跨	第3跨	第4跨	第5跨	1-2跨	2-3跨	3-4跨	5-6跨
考虑施工过程	1.30	1.60	1.52	1.64	1.44	1.35	1.30	1.35	1.44
不考虑施工过程	1.34	1.59	1.43	1.50	1.25	1.31	1.25	1.23	1.29

### 4 车辆偏心荷载下混凝土板的偏载系数

车辆偏心加载所导致的混凝土桥面板正应力的不均匀分布是局部轮载应力集中效应、剪力滞效应和荷载偏心加载共同导致的,在评价汽车偏载效应时需剔除剪力滞效应和局部轮载应力集中效应的影响,为区分剪力滞效应和偏载效应,分别使用式(2)和式(3)定义桥面板弯曲应力的偏载系数  $p_\sigma$  和剪力滞-轮载局部效应综合影响系数  $\lambda_\sigma$ ,偏载系数  $p_\sigma$  可以定义为在偏心荷载作用下梁体某种效应(弯矩、剪力、应力等)的最大值与正载作用效应最大值之比,剪力滞-轮载局部效应综合影响系数  $\lambda_\sigma$  则定义为在对称荷载作用下,某截面内混凝土桥面板最大正应力与平均正应力的比值<sup>[20]</sup>.

$$P_\sigma = \sigma_{\max}^p / \sigma_{\max}^c \quad (2)$$

$$\lambda_\sigma = \sigma_{\max}^p / \bar{\sigma}^c \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{\max}^c$  表示汽车对称加载下某截面内混

凝土桥面板最大正应力;  $\sigma_{\max}^p$  表示汽车偏心加载下某截面内混凝土桥面板最大正应力;  $\bar{\sigma}^c$  表示汽车对称加载下某截面内混凝土桥面板平均正应力.

ANSYS 中无法在模型中按影响线或影响面布置车道荷载,故使用由 55t 重车组成的车队模拟车道荷载的设计值效应,车辆间距和布置方案按照控制截面活载设计值效应相等的原则确定,为讨论汽车的偏载效应,按照图 7 所示的加载位置分别计算对称布载和横向偏心布载两种方案下桥面板应力分布情况,结果见图 8.

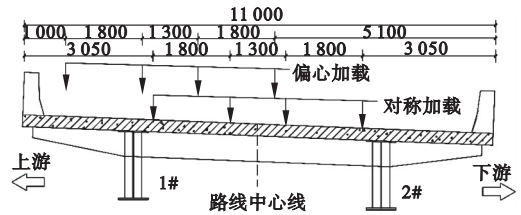


图7 偏载横桥向车辆布置图

Fig. 7 Eccentric load vehicle layout in the cross-bridge direction

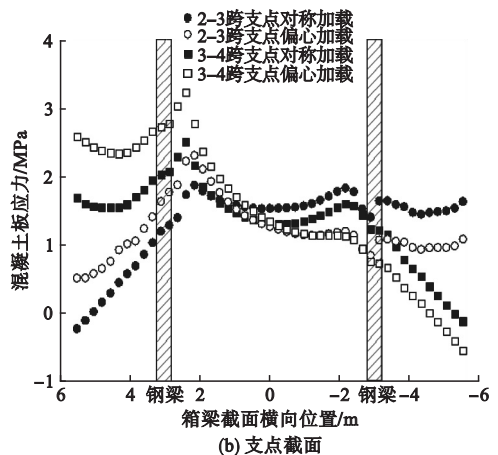
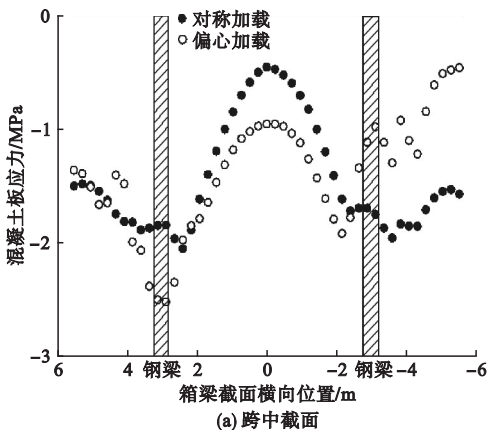


图8 第3跨各控制截面混凝土板弯曲正应力横向分布

Fig. 8 Lateral distribution of bending normal stress of concrete slabs with 3rd spans

从图8可以看出,汽车对称布置的条件下控制截面桥面板内应力呈现出明显的剪力滞后现象和弯扭耦合现象,且支点截面的弯扭耦合效应更为显著;相比于对称布载,偏心加载条件下混凝土桥面板内应力分布更不均匀,且峰值应力明显高于对称加载工况。

为定量评价各控制截面桥面板的汽车活载应力空间分布特征,表3、表4分别给出了各控制截面处混凝土桥面板的偏载系数和剪力滞-轮载局部效应综合影响系数。从表中可以看出:受弯扭耦合效应的影响,组合梁截面受扭转和弯曲剪应力的综合影响,活载剪力滞效应将更为显著,5跨连续梁桥算例的剪力滞-轮载局部综合影响系数甚至超过2.0,而《钢混组合梁桥设计规范》(GB50917—2013)和《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中关于组合梁桥面板有效宽度的取值并未区分弯桥和直桥、恒载和活载,钢混组合弯梁桥设计中应有所关注;支点截面处桥面板剪力滞-轮载局部效应综合影响系数明显大于跨中截面,且边跨的剪力-轮载局部综合效应明显大于中跨,究其原因在于支点截面的剪力明显大于跨中截面,而薄壁截面翼板的剪力滞效应是翼板内水平剪应力所导致的,由此造成支点截面处混凝土板剪力滞-轮载局部效应大于跨中截面;剔除剪力滞-轮载局部效应后,控制截面的偏载系数仍可能超过1.2,且越靠近中跨汽车活载的偏载效应愈发显著,建议设计中应予以充分考虑。

表3 汽车偏心加载时跨中截面应力影响系数

Table 3 Influence coefficient of mid-span stress in eccentric loading of vehicle

跨中截面位置	$\lambda_{\sigma}$	$p_{\sigma}$
第1跨	2.29	1.06
第2跨	1.67	1.20
第3跨	1.44	1.23
第4跨	1.57	1.27
第5跨	2.58	1.04

表4 汽车偏心加载时支点截面应力影响系数

Table 4 Influence coefficient of stress on fulcrum section under eccentric loading

支点截面位置	$\lambda_{\sigma}$	$p_{\sigma}$
1-2跨	2.62	1.03
2-3跨	1.40	1.25
3-4跨	1.82	1.29
4-5跨	2.62	1.05

## 5 结论

(1)考虑施工过程后各控制截面的剪力滞系数均有不同程度的增大,且支点截面的剪力滞系数增幅更大。

(2)受弯桥弯扭耦合效应的影响,组合梁桥活载剪力滞效应将更为显著,剪力滞-轮载局部综合影响系数甚至超过2.0,支点截面处桥面板剪力滞-轮载局部效应大于跨中截面,且边跨的剪力-轮载局部综合效应明显大于中跨。

(3)剔除剪力滞-轮载局部效应后,控制截面的偏载系数仍可能超过1.2,大于设计中采用的经验系数1.15,且越靠近中跨汽车活载的偏载效应愈发显著,建议设计中应予以充分考虑。

## 参考文献

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
(NIE Jianguo. Steel-concrete composite bridge [M]. Beijing: China Communication Press, 2011.)
- [2] 黄育凡, 江越胜, 吴庆雄, 等. 钢混组合梁半整体桥设计与施工[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 693-699.  
(HUANG Yufan, JIANG Yuesheng, WU Qingxiong, et al. Design and construction of steel-concrete composite bridge with semi-integral abutments[J]. Journal of Fuzhou university (natural science edition), 2018, 46(5): 693-699.)
- [3] 满建琳. 钢-混凝土组合曲线连续箱梁桥静力性能与应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.  
(MAN Jianlin. Research on static performance and application of steel-concrete composite continuous curved box girder bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,

2013. )
- [ 4 ] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 110-122.  
(NIE Jianguo, TAO Muxuan, WU Lili, et al. Advances of research on steel-concrete composite bridges[J]. China civil engineering journal, 2012, 45(6): 110-122. )
- [ 5 ] LOU Tiejiong, KARAVASILIS T. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams [J]. Engineering structures, 2019, 190(1): 116-127.
- [ 6 ] SHAO X, WANG H, ZHAO H, et al. Experimental study on multicantilever prestressed composite beams with corrugated steel webs [J]. Journal of structural engineering, 2010, 136(9): 1098-1110.
- [ 7 ] ODOBINAK J, VICAN J, BUJNAK J. Verification of composite steel-concrete bridge behavior [J]. Procedia engineering, 2013, 65: 440-446.
- [ 8 ] PAPASTERGIOU D, LEBET J P. Design and experimental verification of an innovative steel-concrete composite beam [J]. Constructional steel research, 2014, 93: 9-19.
- [ 9 ] NUR Y, FRANCISCO D B. Comparative analysis of cast-in-place post-tensioned and steel-concrete composite bridge bent caps [J]. Journal of modern transportation, 2017, 25(3): 194-204.
- [ 10 ] 马驰,刘世忠. 波形钢腹板PC组合箱梁剪滞剪切效应的动力特性分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(12): 145-152.  
(MA Chi, LIU Shizhong. Dynamic behavior analysis of shear lag effect of pc composite box girder with corrugated steel webs [J]. Journal of the China railway society, 2018, 40(12): 145-152. )
- [ 11 ] 李兴民. 施工过程对箱梁剪力滞效应影响分析[J]. 桥梁建设, 2013, 43(1): 30-34.  
(LI Xingmin. Analysis of influences of construction processes on shear lag effect of concrete box girders [J]. Bridge construction, 2013, 43(1): 30-34. )
- [ 12 ] 张元海,林丽霞. 薄壁箱梁剪力滞效应分析的初参数法[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 205-211.  
(ZHANG Yuanhai, LIN Lixia. Initial parameter method for analyzing shear lag effect of thin-walled box girders [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(8): 205-211. )
- [ 13 ] 李坤. 大悬臂箱梁桥剪力滞有限元分析及光弹实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
(LI Kun. Finite element analysis and photoelastic experimental research of shear lag in large cantilever box girder bridge [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. )
- [ 14 ] 蔺鹏臻,方炜彬,杨子江,等. 预应力作用下箱梁桥的剪力滞效应研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 102-107.  
(LIN Pengzhen, FANG Weibin, YANG Zijiang, et al. Shear lag effect analysis of box girder bridge under prestressing effect [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(5): 102-107. )
- [ 15 ] 陈国强. 连续宽箱梁的偏载增大系数的讨论[J]. 公路交通科技, 2013, 30(7): 66-71.  
(CHEN Guoqiang. Discussion on eccentric load enhancement coefficient of concentric wide box girder [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2013, 30(7): 66-71. )
- [ 16 ] 沈炯伟,杨沈红. 宽幅脊梁梁矮塔斜拉桥活载偏载效应[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(2): 108-112.  
(SHEN Jiongwei, YANG Shenhong. Eccentric load effect of live load on the low pylon cable-stayed bridge with wide spine beam [J]. Journal of civil engineering and management, 2012, 29(2): 108-112. )
- [ 17 ] BASHER M, SHANMUGAM N E, KHALIM A R. Horizontally curved composite plate girders with trapezoidally corrugated webs [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(6): 947-956.
- [ 18 ] FATEMI S J, MOHAMED M S, SHEIKH A H. Load distribution for composite steel-concrete horizontally curved box girder bridge [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 116: 19-28.
- [ 19 ] GUPTA T, KUMAR M. Flexural response of skew-curved concrete box-girder bridges [J]. Engineering structures, 2018, 163(15): 358-372.
- [ 20 ] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2013.  
(XIANG Haifan. Advanced theory of bridge structures [M]. 2th ed. Beijing: China Communication Press, 2013. )

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)