

文章编号:1671-8879(2013)06-0068-06

大跨径跨海斜拉桥组合梁桥面板剪力滞效应

戚冬艳¹, 于东民², 李文华², 柳建设¹, 郭红军¹

(1. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068;

2. 中交第一公路勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要:为进一步深化现有的叠合梁剪力滞效应研究理论,以期优化现有的工程设计,通过建立全桥和节段空间有限元模型,分析了某大跨径跨海斜拉桥混凝土桥面板的剪力滞后效应。通过对双工字型钢主梁混凝土桥面板组合梁建立全桥模型,对跨中、塔根、主跨 1/4 位置等不同部位的应力值进行对比,得出了有效宽度系数分布规律;通过建立节段有限元模型,对不同施工阶段、不同索力、不同汽车工况下有效宽度系数进行分析。研究表明:不同桥跨断面处的剪力滞后效应影响不同,跨中截面桥面板剪力滞后效应明显大于塔根处截面;施工阶段的剪力滞效应小,通过修正初等梁理论计算结果即可满足工程要求;索力和汽车荷载对剪力滞效应的影响比较小。研究结论对叠合梁有一定的普遍适用性,为同类桥梁的设计提供参考。

关键词:桥梁工程;有效宽度系数;桥面板;剪力滞;汽车荷载

中图分类号:U448.67

文献标志码:A

Shear lag effect of composite beam panel of sea-crossing cable-stayed bridge with large span

QI Dong-yan¹, YU Dong-min², LI Wen-hua², LIU Jian-she¹, GUO Hong-jun¹

(1. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: For further deepening the research of the existing theory on composite beam shear lag effect so as to optimize the existing engineering design, the shear lag effect of a sea-crossing concrete bridge panel was analyzed through the establishment of the whole bridge and segment space finite element model. By establishing the whole model of double I shaped steel girder and concrete panel composite beam bridge, the stress values of different sections such as the midspan, tower root and 1/4 mainspan were compared and the distribution of effective width coefficients was found out. By establishing segment space finite element model, effective width coefficients in different construction conditions, different cable forces or different vehicle loads were analyzed. The results show that different sections have different influences on shear lag effect, for example, the shear lag effect of the midspan section is bigger than the tower root section. The shear lag effect of construction stage is small, which could be modified from elementary beam theoretic calculation results to meet the engineering requirements. The influence of the cable force and vehicle load on shear lag effect is not great. The conclusion of the study has a certain universal applicability for composite beam, which can provide reference for the design of similar bridges. 3 tabs, 8 figs, 11 refs.

Key words: bridge engineering; effective width coefficient; bridge panel; shear lag; loading

收稿日期:2011-10-15

作者简介:戚冬艳(1979-),女,河南淮阳人,工程师,E-mail:25374748@qq.com。

0 引言

1923 年 Karman 在对宽翼缘的 T 梁探讨翼缘有效宽度问题时,就设计了剪力滞效应的研究。T 梁在受弯时,翼缘在横向力与偏心的边缘剪力流作用下,将产生剪切扭转变形,使其不再符合 Euler—Bernoulli 假定。宽翼缘因这部分变形的存在,而使远离梁肋的翼缘不参与承弯工作,也即受压翼缘上的压应力随着离梁肋的距离增加而减小,这个现象就称为“剪力滞后”,称剪力滞效应^[1]。在实际工程中,通常用有效宽度和有效宽度系数等参数来考虑剪力滞效应。现代组合梁斜拉桥的理论提出可以追溯到 20 世纪 80 年代的德国著名桥梁专家 Leonhardt 教授。1982 年他在领导设计美国 Sunshine skyway 大桥时提出钢-混凝土叠合梁斜拉桥的投标方案和推荐的施工方法^[2]。在此竞标方案中体现了充分利用材料特性、施工方便、综合效益高等特点,奠定了现代钢-混凝土叠合梁斜拉桥的基础。组合梁斜拉桥通过剪力连接件将作用在钢主梁上的斜拉索锚固力传递到混凝土桥面板上,从而使得混凝土桥面板中的应力主要集中在钢主梁两侧有限的宽度范围内。上述现象说明组合梁斜拉桥的桥面板存在严重的剪力滞效应。中国公路桥涵的相关规范规定组合梁混凝土板桥有效宽度不得超过承托两侧各 6 倍混凝土板厚^[3-4]。国外规范对有效宽度的规定也各有不同^[5-7]。实践发现,若完全按照规范设计会

造成浪费,因此需要通过模型试验或有限元计算得到合理的有效宽度系数用于设计。为此,本文以某大跨径跨海斜拉桥为工程背景,利用 Ansys 通用有限元计算软件,通过建立全桥和节段两种有限元空间模型,对组合梁斜拉桥桥面板的剪力滞效应进行了研究,为组合梁斜拉桥设计提供参考^[8]。

1 工程背景

某大跨径跨海斜拉桥采用双塔双索面组合梁斜拉桥,跨径组成为 135 m+300 m+135 m,桥梁全长 570 m,采用半漂浮结构支撑体系。本桥采用扇形索面体系,全桥共设斜拉索 48 对,标准节段索距在主梁上为 11.5 m,边跨密索区索距 6.0 m,如图 1 所示。

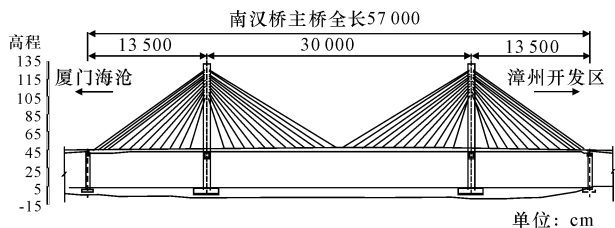


图 1 某大跨径跨海斜拉桥立面布置

Fig. 1 Elevation layout of sea-crossing cable-stayed bridge

主梁采用双工字型钢主梁(高 2.8 m)与混凝土板(厚 28 cm)共同受力的组合梁,两者之间通过剪力钉实现共同受力,如图 2 所示。双工字型钢主梁横向中心间距为 34.0 m,混凝土桥面板板厚均为 28 cm。主梁全宽 40 m (含检修道、导流板)。桥面行车道设计为双向 6 车道。

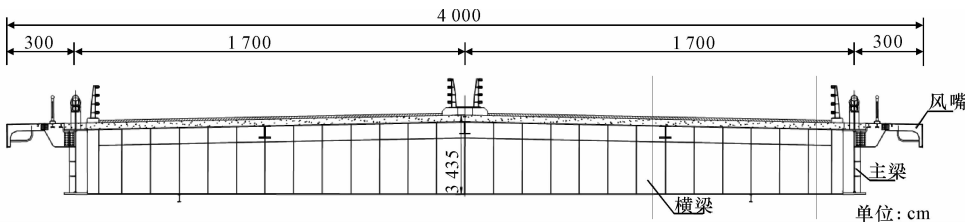


图 2 某大跨径跨海斜拉桥标准断面

Fig. 2 Standard section of one sea-crossing cable-stayed bridge

2 全桥空间有限元分析

2.1 全桥有限元分析模型

根据某大跨径跨海斜拉桥结构特征,将斜拉索简化为具有初始张拉力的桁架单元;钢主梁、钢横梁以及主塔采用空间杆单元模拟,可以方便地模拟主梁变截面区段;混凝土桥面板采用四节点板壳单元模拟。建立完成后的梁—板壳空间有限元模型如下页图 3 所示。

为简化模型,有限元模型建立过程中作了如下近似处理:①除采用 Ernst 公式对拉索进行模量修

正,考虑柔性索非线性效应外,不考虑主梁及索塔非线性效应;②忽略主梁与混凝土板滑移效应,混凝土板桥单元通过与主梁单元采用节点耦合连接;③由文献[9]可知预应力作用对剪力滞后效应的影响很小,故分析过程中忽略预应力的影响;④忽略材料非线性影响,钢梁、拉索及混凝土均采用理想线弹性材料,各种材料特征见下页表 1。

2.2 分析结果

利用 Ansys 直接求解器进行静力计算,得到有限元模型在恒载作用下的计算结果。某大跨径跨海

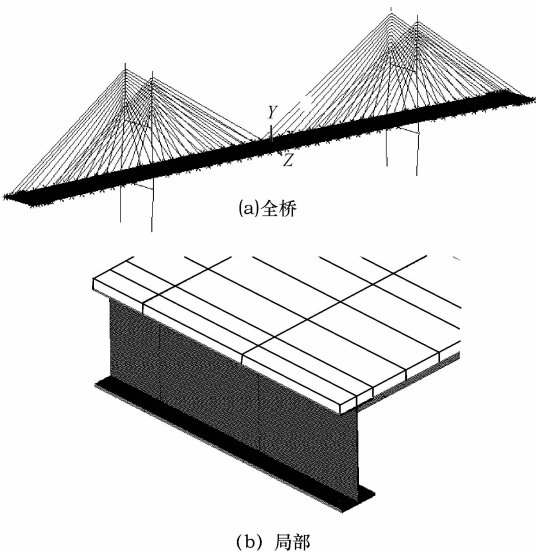


图 3 某大跨径跨海斜拉桥空间有限元模型

Fig. 3 3D FE model of sea-crossing cable-stayed bridge

斜拉桥混凝土桥面板横桥向各点正应力值及有效宽度系数计算结果见下页表 2,其中跨中截面出现拉应力是由于没有考虑预应力作用产生的。

表 1 材料特征

Tab. 1 Material characteristics

编号	材料	弹性模量 $E/(N \cdot m^{-2})$	泊松 比 μ	密度 $\rho/$ $(kg \cdot m^{-3})$	单元类型
1	索塔	3.45×10^{10}	0.20	2 600	Beam4
2	钢主梁(Q370)	2.08×10^{11}	0.30	7 850	Beam188
3	钢横梁(Q345)	2.08×10^{11}	0.30	7 850	Beam188
4	桥面板(C60)	3.65×10^{10}	0.20	2 600	Shell63
5	斜拉索(C60)	等效模量	0.25	等效密度	Link10

图 4 给出了某大跨径跨海斜拉桥混凝土桥面板沿横桥向的正应力分布曲线。

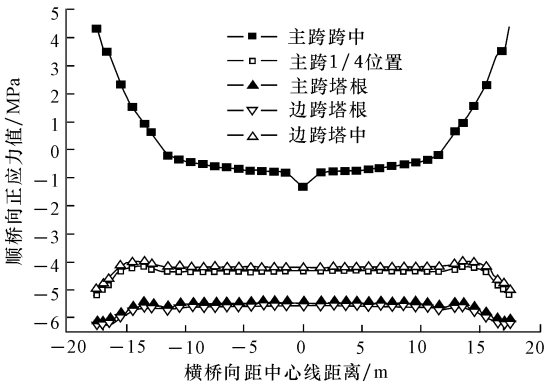


图 4 某大跨径跨海斜拉桥空间有限元模型

Fig. 4 3D FE model of sea-crossing cable-stayed bridge

通过对图 4 的观察得如下结果。

(1)组合梁斜拉桥在恒载作用下,沿桥纵向位置不同的主梁截面剪力滞后程度不同。跨中截面桥面

板剪力滞后效应明显大于塔根处截面。这是由于斜拉索锚固于主梁桥面两侧钢主梁上,受局部应力影响,拉索轴力引起混凝土桥面板内应力横桥向分布不均匀。随着应力扩散不断积累,远离拉索锚固点截面混凝土板内应力分布逐渐趋于均匀。

(2)斜拉桥混凝土桥面板应力分布剪力滞后效应明显,一般以正剪力滞为主,主跨跨中截面处存在负剪力滞,这是由于主跨跨中截面混凝土板在索力作用下产生拉应力所致。

剪力滞后效应的另一种概念形式称为有效宽度,前者反映了正应力的不均匀分布,后者则表示正应力均匀分布的等效宽度。本文采用以下公式对混凝土板有效宽度及有限宽度系数进行计算^[10-11]

$$b_e = \frac{\int \sigma_{cm} dx}{\sigma_{max}}$$
$$\eta = \frac{b_e}{b} \tag{1}$$

式中: b_e 为混凝土板有效宽度; b 为混凝土板实际宽度; σ_{cm} 为混凝土桥面板中正应力; σ_{max} 为混凝土桥面板中最大正应力; η 为混凝土桥面板有效宽度系数。

本桥空间有限元模型计算得到的恒载作用下各控制截面半幅桥面板正应力值见下页表 2。

3 节段有限元模型分析

3.1 节段分析模型

建立节段分析模型以利于细致研究某大跨径跨海斜拉桥主梁在压弯状态下的工作状态,沿主梁纵向截取 3 跨索距主梁节段,建立节段有限元模型,如图 5 所示。桥面混凝土板采用 8 节点实体单元模拟,钢主梁、钢横梁以及加劲肋板采用 4 节点板壳单元模拟。材料特性取值与全桥模型相同。节段模型忽略桥面横坡及小纵梁,在钢主梁拉索吊点处采用多点弹性支承,并作用水平力模拟斜拉索索力作用。成桥状态的边界条件按定向支承考虑,左右两端均约束纵向位移及转角;在施工状态,主梁右端约束纵

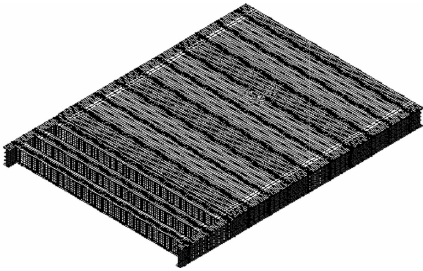


图 5 某大跨径跨海斜拉桥节段有限元模型

Fig. 5 Segment FE model of sea-crossing cable-stayed bridge

表 2 恒载作用下各控制截面半幅桥面板正应力值

Tab. 2 Positives stress of each control section of half-panel under dead load

项目位置		主跨跨中	主跨 1/4	主跨塔根	边跨塔根	边跨跨中
X/m	17.500	4.313 75	−5.213 05	−6.136 20	−6.201 60	−5.004 75
	17.000	3.471 65	−5.002 45	−6.201 05	−6.265 80	−4.786 00
	16.500	3.466 50	−4.865 40	−6.111 55	−6.178 50	−4.644 85
	15.500	2.304 40	−4.359 25	−5.880 30	−5.946 40	−4.135 35
	14.500	1.499 35	−4.227 55	−5.672 70	−5.738 65	−4.010 80
	13.500	0.937 28	−4.188 35	−5.539 70	−5.605 10	−3.982 00
	12.875	0.628 35	−4.292 30	−5.585 45	−5.650 30	−4.090 10
	11.500	−0.216 10	−4.371 15	−5.627 20	−5.690 75	−4.185 15
	10.500	−0.392 03	−4.365 30	−5.563 15	−5.625 65	−4.188 40
	9.500	−0.458 26	−4.360 45	−5.527 85	−5.589 15	−4.192 15
	8.500	−0.541 87	−4.356 40	−5.505 00	−5.56515	−4.195 80
	7.500	−0.610 91	−4.352 70	−5.491 10	−5.550 10	−4.199 10
	6.500	−0.666 93	−4.349 40	−5.482 75	−5.540 70	−4.201 90
	5.500	−0.710 91	−4.346 35	−5.478 25	−5.535 15	−4.204 15
	4.500	−0.744 56	−4.343 65	−5.476 55	−5.532 50	−4.205 95
	3.500	−0.769 47	−4.341 25	−5.477 20	−5.532 25	−4.207 25
	2.500	−0.779 32	−4.339 35	−5.480 20	−5.534 50	−4.208 10
	1.500	−0.805 55	−4.338 10	−5.485 80	−5.539 55	−4.208 75
	0	−1.349 50	−4.338 50	−5.506 45	−5.559 65	−4.210 10
有效宽度系数 η		0.256	0.873	0.936	0.937	0.874

向位移及转角,左侧除弹性支承外释放所有自由度,以模拟悬臂端。在桥面板各车道位置作用等效竖向分布荷载模拟汽车荷载^[9]。

3.2 索力对剪力滞效应的影响

通过在斜拉索的主梁锚固处作用不同的水平力研究索力大小对混凝土桥面板剪力滞效应的影响。图 6 给出了成桥和施工状态下有效宽度系数随索力变化曲线,图 7 给出了成桥和施工状态下有效宽度系数随索力变化百分比。

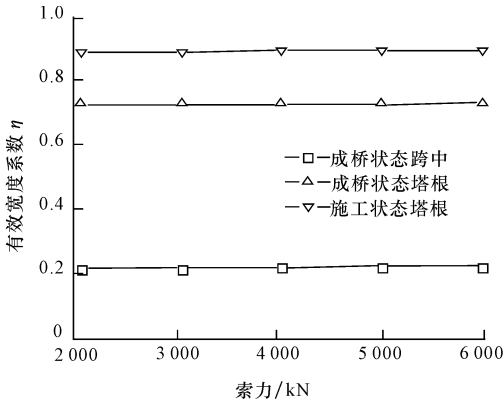


图 6 有效宽度系数随索力变化曲线

Fig. 6 Cable force-effective width coefficient curve

通过对图 7 的观察发现施工状态的剪力滞效应要比成桥状态下的剪力滞效应小,这是由于悬臂端可以自由变形,有利于应力的重分配,从而使得混凝土板纵桥向正应力分布的更加均匀所致。同时图

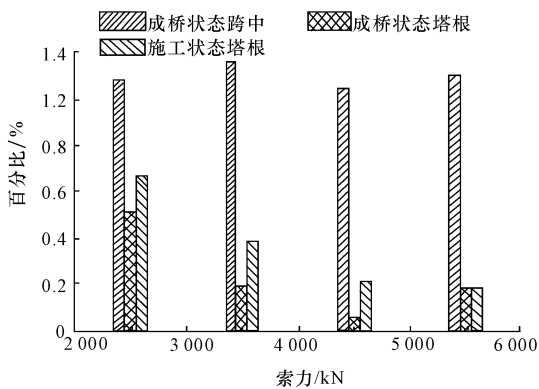


图 7 有效宽度系数随索力变化百分比

Fig. 7 Cable force-change percentage of effective width coefficient 6 中曲线也映证了上一节得出的结论,即跨中的剪力滞效应要大于塔根的。

通过对图 7 的观察发现,有效宽度系数随索力变化不大(小于 1.2%)。跨中的有效宽度系数随索力的变化百分比要大于塔根处的,即跨中的有效宽度系数受索力的影响更加敏感。同时可以发现,随着索力的增大,塔根处的有效宽度系数变化百分比不断减小。尤其对于施工状态,这一现象表现的更加明显。

3.3 汽车荷载对剪力滞效应的影响

本节对 5 种不同的汽车荷载分布情况(见下页表 3)研究,讨论了汽车荷载对混凝土桥面板剪力滞效应的影响。下页图 8 给出了各工况下混凝土桥面板的有效宽度系数以及他们之间的比较结果。

表 3 汽车荷载布置工况
Tab. 3 Loading arrangement condition

工况号	概况描述	图示
工况 1	无车辆荷载	
工况 2	全幅满布车辆荷载	
工况 3	半幅满布车辆荷载	
工况 4	两边车道布置车辆荷载	
工况 5	中间车道布置车辆荷载	

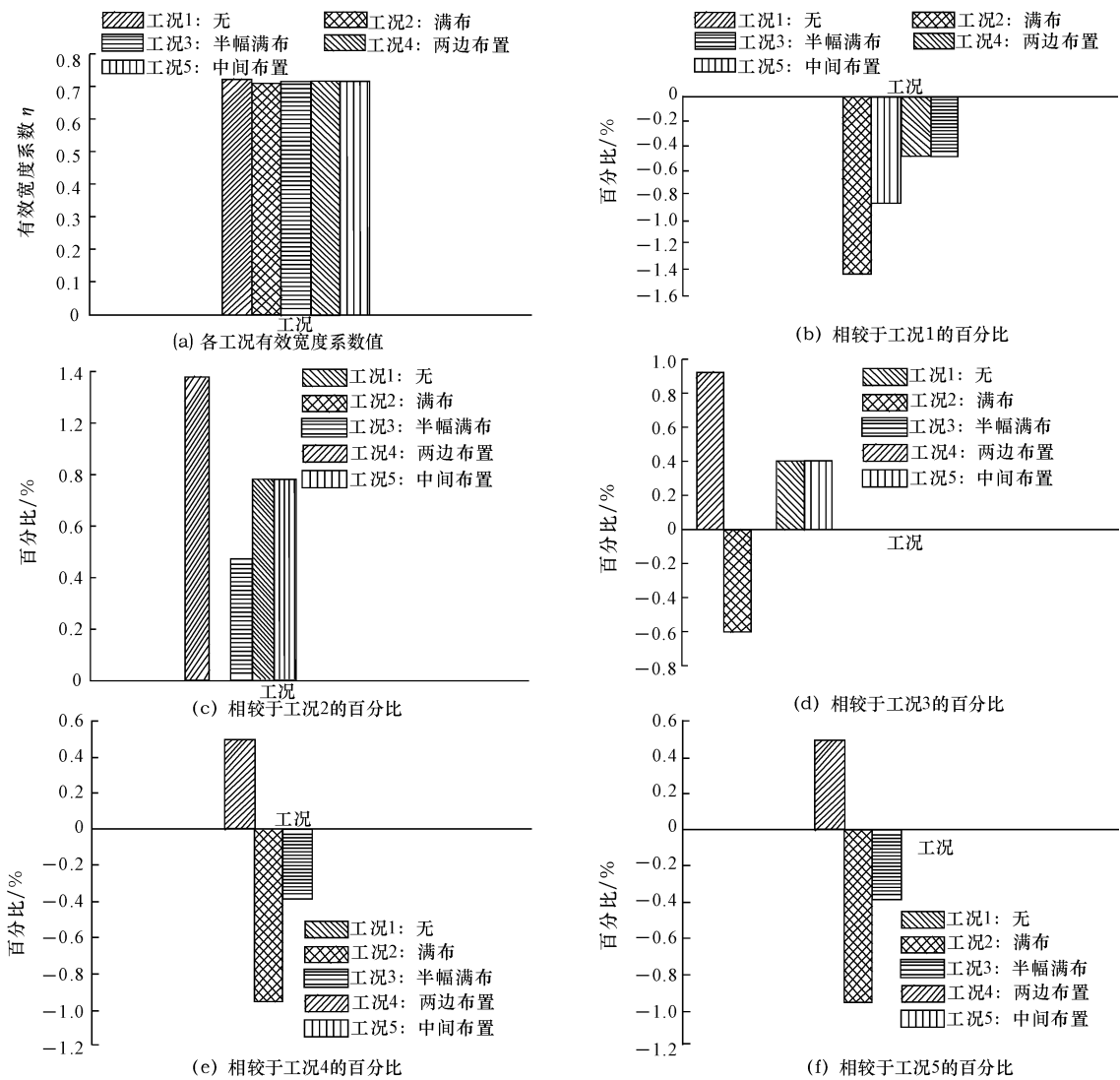


图 8 工况有效宽度系数及其比较结果

Fig. 8 Effective width coefficients under different conditions and comparison results

由图8可知,汽车荷载对宽度有效系数起到减小的作用,但影响是有限的。而且,通过对各工况下的有效宽度系数比较可以发现,汽车荷载满布情况下宽度有效系数减小最明显。

4 结 语

(1)组合梁斜拉桥在恒载作用下,沿桥纵向不同位置的主梁截面剪力滞后程度不同。跨中截面桥面板剪力滞后效应明显大于塔根处截面。这是由于斜拉索锚固于主梁桥面两侧钢主梁上,受局部应力影响,拉索轴力引起混凝土桥面板内应力横桥向分布不均匀。随着应力扩散不断积累,远离拉索锚固点截面混凝土板内应力分布逐渐趋于均匀。

(2)斜拉桥混凝土桥面板应力分布剪力滞后效应明显,一般以正剪力滞为主,主跨跨中截面处存在负剪力滞,这是由于主孔跨中截面混凝土板在索力作用下产生拉应力所致。

(3)施工状态的剪力滞效应要比成桥状态下的剪力滞效应小,通过对初等梁理论进行修正即可满足工程要求;跨中的有效宽度系数受索力的影响更加敏感。施工状态下,随着索力的增大,塔根处的有效宽度系数变化幅度显著减小。

(4)汽车荷载对宽度有效系数起到减小的作用,但影响不大。通过对各工况下的有效宽度系数比较可以发现,汽车荷载满布情况下有效宽度系数减小最显著。

(5)随着桥梁设计与施工技术的进步,桥梁跨径逐步加大,叠合梁的使用也逐渐普遍,文中研究了不同断面位置、不同工况下的组合梁剪力滞效应,以期优化补充现有的工程设计理论,可为同类桥梁的设计提供参考。

参考文献:

References:

- [1] Karman T V. Fest schrift august fopple[M]. Berlin: Julius Springer, 1923.
- [2] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社, 1994.
LIN Yuan-pei. Cable-stayed bridge[M]. Beijing: Chi-

na Communications Press, 1994. (in Chinese)

- [3] JTJ D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
JTJ D62—2004, Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridge and culverts[S]. (in Chinese)
- [4] JTJ 025—86, 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S].
JTJ 025—86, Specifications for design of steel structure and timber structure of highway bridges and culverts[S]. (in Chinese)
- [5] AASHTO LRFD, Bridge design specifications [S].
- [6] BS 5400-1:1988, Steel concrete and composite bridges, general statement[S].
- [7] BS EN 1994-2:2005 Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures, general rules and rules for bridges[S].
- [8] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
WANG Xu-cheng, SHAO Min. Basic principles of the finite element method and numerical methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [9] 聂建国, 李法维, 樊健生. 组合梁斜拉桥桥面有效宽度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(增2): 718-724.
NIE Jian-guo, LI Fa-wei, FAN Jian-sheng. Analysis of effective width of deck of composite cable-stayed bridge[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(S2): 718-724. (in Chinese)
- [10] 张士铎, 邓小华, 王文州. 箱型薄壁梁剪力滞效应[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
ZHANG Shi-duo, DENG Xiao-hua, WANG Wen-zhou. Shear lag effect of thin-walled box beams[M]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese)
- [11] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
XIANG Hai-fan. Advanced theory of bridge structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)