

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.08.006

承托设置对波形钢腹板箱梁桥面板横向内力的影响

赵品¹, 荣学亮¹, 叶见曙²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 制作了两片单箱双室波形钢腹板试验梁, 分为桥面板加承托和不加承托。以室内试验、有限元分析结合理论推导来探讨混凝土桥面板承托的设置对波形钢腹板箱梁桥面板横向受力的影响。通过静力试验, 对试验梁桥面板的受力特点和箱梁变形进行了观测和分析。将两片梁的相关试验数据进行对比, 并结合有限元分析结果、理论分析结果, 得出结论如下: 承托的设置对箱梁的结构性能是有一定影响的。桥面板承托的设置增强了箱梁的抗弯、抗扭刚度, 减少扭转剪应力和畸变应力, 加大了桥面板支点刚度, 力线过渡比较均匀, 减小次内力; 使得箱梁挠度较不加承托时同一工况下的相应值均有一定程度的减小, 约为15%。承托的设置对桥面板的有效分布宽度影响很小, 加承托与不加承托的单向板的有效分布宽度误差仅为5%; 但是承托的设置对波形钢腹板箱梁桥面板的横向内力存在一定影响, 综合试验结果和力学分析结果, 加设承托与否对桥面板横向受力的影响一致, 且影响值均在10%以上。总之, 对于波形钢腹板箱梁而言, 从自身构造上来讲波形钢腹板与承托这两类因素均会对桥面板横向受力产生一定影响, 不可忽略。

关键词: 桥梁工程; 有效分布宽度; 面板; 承托; 波形钢腹板箱梁桥; 横向内力

中图分类号: U448.213

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)08-0041-07

Influence of Support Setting on Transverse Internal Force in Deck of Box Girder Bridge with Corrugated Steel Webs

ZHAO Pin¹, RONG Xue-liang¹, YE Jian-shu²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Two single-box double-cell test girders with corrugated webs, which are divided into the deck with and without support, are made. The influence of setting of concrete bridge deck support on the transverse stress of box girder with corrugated steel webs is discussed through indoor experiment, finite element analysis and theoretical derivation. The mechanical characteristics of the deck of test girder bridge and the deformation of the box girder are observed and analyzed through static test. The relevant test data of the 2 girders are compared. According to the results of finite element analysis and theoretical analysis, it is concluded that (1) The support setting has a certain influence on the structural performance of the box girder. The setting of deck support enhances the flexural stiffness and torsional stiffness of the box girder, reduces the torsional shear stress and the distortion stress of the box girder, it increases the fulcrum stiffness of the deck with uniform force line transition, and reduces the secondary internal force. Therefore, the deflection of the box girder is reduced to a certain extent (about 15%) compared with the corresponding value under the same working condition without support. (2) The support setting has little influence on the effective distribution

收稿日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508348); 河北省自然科学基金项目(E2017210191, E2017210183); 河北省教育厅科技项目(QN2015134); 河北省大型结构健康诊断与控制实验室(KLLSHMC1913)

作者简介: 赵品(1982-), 女, 河北石家庄人, 博士. (zhaopin1115@126.com)

width of the bridge deck, and the error of the effective distribution width between the one-way boards with and without support is only 5%. However, the support setting has a certain influence on the transverse internal force of the deck of the box girder bridge with corrugated steel webs. Combining the test result and the mechanical analysis result, whether setting support or not has the same influence on the transverse internal force of the bridge deck, and the influence value is more than 10%. In short, for the box girder with corrugated steel webs, both corrugated steel webs and support will have certain influence on the transverse internal force of the bridge deck, and they cannot be ignored.

Key words: bridge engineering; box girder bridge with corrugated steel webs; deck; support; effective distribution width; transverse internal force

0 引言

当组合梁的混凝土翼板采用普通钢筋混凝土板时,为了提高组合梁的正截面抗弯承载能力及节约钢材,可设置混凝土承托^[1]。承托的设置对箱梁的结构性能是有一定影响的,不仅可以提高截面的抗弯、扭刚度,减少扭转剪应力和畸变应力;同时可使桥面板支点刚度加大,力线过渡比较均匀,减小次内力^[2]。

承托对箱梁受力的影响已有一定研究:我国公路桥规中提到的与梁肋整体连接的板,计算弯矩时其计算跨径可取为两肋间的净距加板厚,但不大于两肋中心之间的距离。即在桥规的规定中已经考虑了承托构造对桥面板内力计算的影响,但是仅为简便计算规定。文献[3-4]针对考虑隅角点承托刚性影响的薄壁直线/曲线箱梁进行了空间计算分析,将箱梁板件视为板梁,隅角处承托视为梁元,提出了考虑承托刚性影响薄壁直线/曲线箱梁空间计算的板梁有限单元法。但是仅采用了电算方法,尚未采用试验方法进行验证。

对于波形钢腹板箱梁桥面板而言,从自身构造上来讲波形钢腹板与承托这两类因素均会对桥面板横向受力产生一定影响^[5-6]。波形钢腹板箱梁的腹板受力特性不同于混凝土腹板,基于上述因素,承托的设置将会对桥面板的横向内力产生怎样的影响。本研究将在此基础上以室内试验、有限元分析结合理论推导来探讨混凝土桥面板承托的设置对桥面板受力的影响。

1 波形钢腹板箱梁模型试验

分别制作了2片单箱双室波形钢腹板试验梁,分为桥面板不加承托和加承托。将两片梁的相关试验数据进行对比,研究承托设置对波形钢腹板箱梁桥面板横向内力的影响。

1.1 试验梁

试验梁总长3 500 mm,计算跨径3 300 mm,不加承托和加承托的试验梁跨中断面见图1(a)~(b)。顶、底板宽分别为1 800, 1 400 mm,顶、底板厚度分别为80, 70 mm,其中80 mm为顶板不考虑承托的厚度。

波形钢腹板采用Q235C钢板,厚度为2.0 mm,折叠角度37.0°,波高24 mm,波长144 mm。钢腹板与混凝土顶板、底板的连接采用在钢腹板上下端插入穿透钢筋与混凝土顶板、底板的构造钢筋绑扎在一起构成整体。

承托的尺寸如图1(c)~(d)所示,无论边腹板还是中腹板处的承托高度均为40 mm。梁高为450 mm,与不加承托的试验梁高相等。承托的截面尺寸有以下规定:混凝土承托的高度不应大于混凝土翼板厚度的1.5倍;承托外形轮廓应在由连接件根部起的45°线界限以外^[1]。试验梁的承托尺寸符合要求。

试验梁的加工在实验室完成,按照设计的图纸,试验梁的制作过程如图2所示。

(1) 首先搭设底板的模板,在底板模板内布置钢筋。(2) 根据钢腹板的位置将其定位,并绑扎端横隔板处的钢筋。(3) 浇注底板混凝土。(4) 待底板混凝土干燥之后搭设顶板、横隔板处的模板,并绑扎顶板钢筋和抗剪连接件处钢筋。(5) 浇注顶板和横隔板处混凝土;由于翼缘较宽,混凝土用量较大,为避免翼缘板的模板损坏,在翼缘底部及端部布设相应木板做支撑。

待混凝土浇注完毕后进行了养护。由于时值冬季,温度较低,在试验梁的顶板上覆盖薄毯将有助于提高混凝土养护的温度。

根据试验目的,需在混凝土顶、底板钢筋及钢腹板上粘贴相应的应变片,所以在试验梁的施工过程中应根据施工进度准时布设。

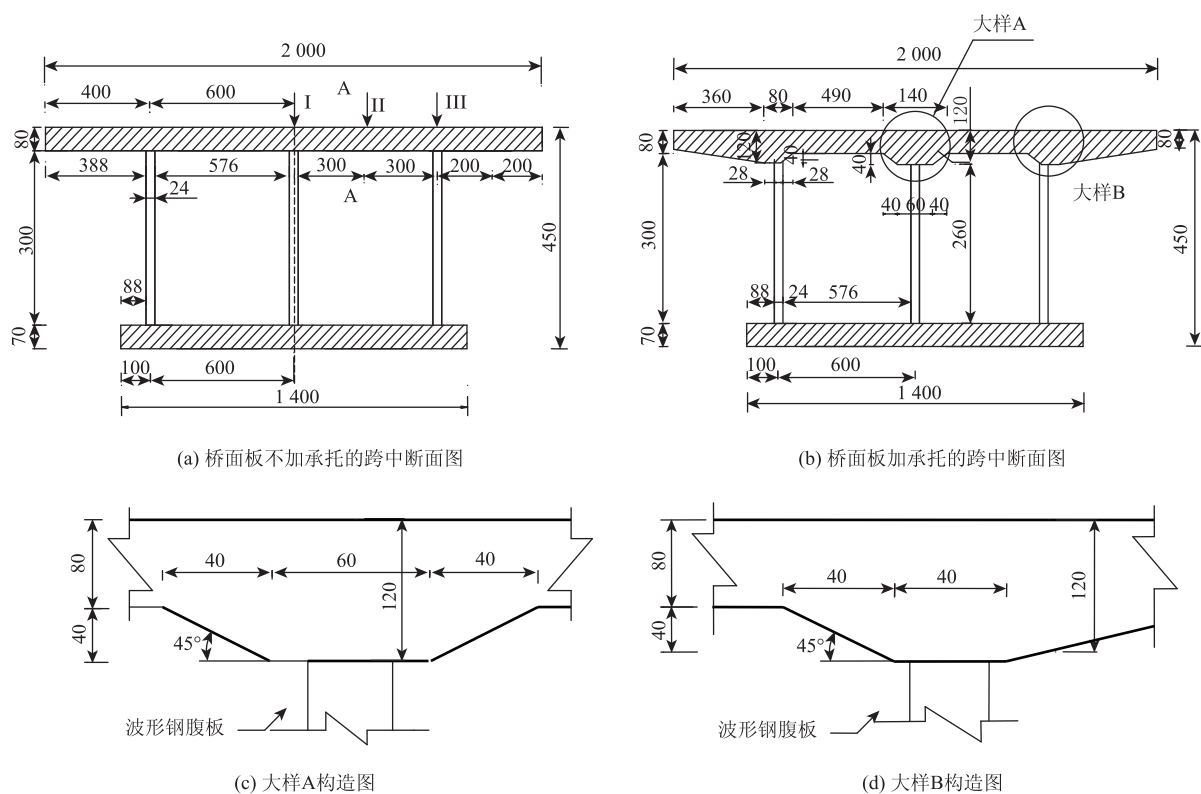


Fig. 1 Dimensions of cross-section and detail drawing of support (unit: mm)

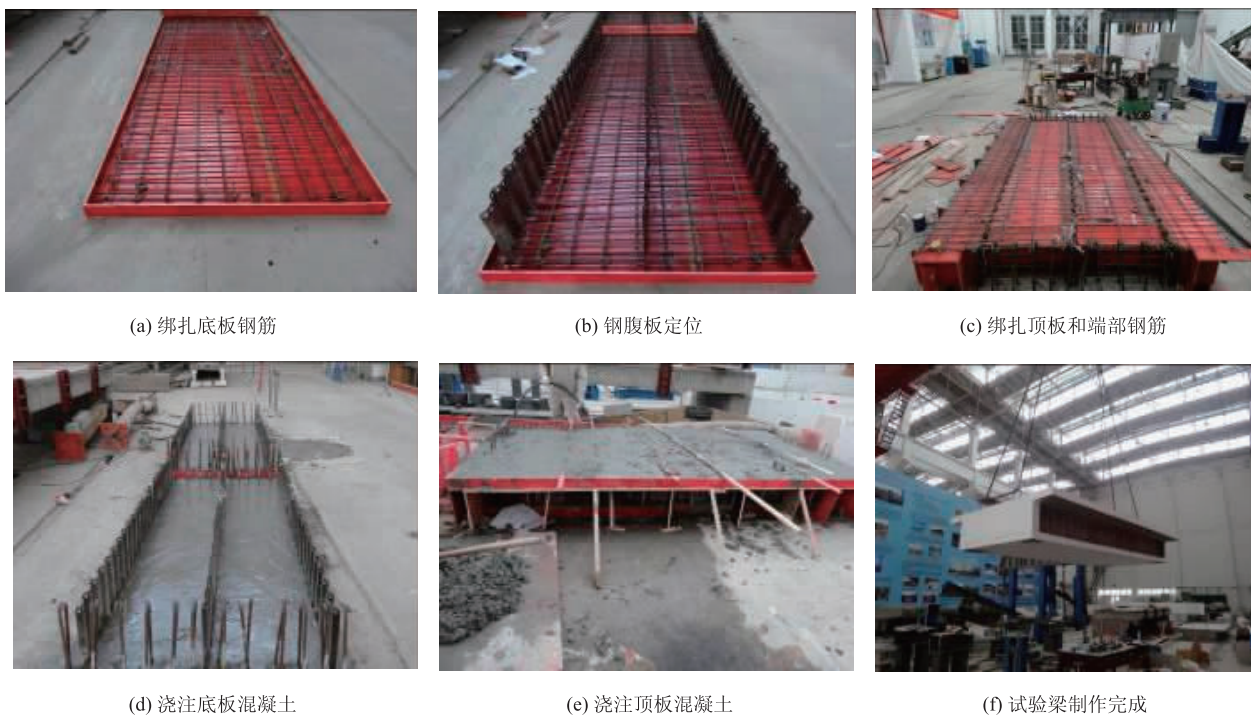


Fig. 2 Production process of test girder

为验证承托的设置对于混凝土桥面板横向内力及其有效分布宽度的影响, 横向加载工况的分类为

中腹板处加载 (工况 I)、A-A 截面加载即边腹板、中腹板间的桥面板跨中位置加载 (工况 II)、边腹板

处加载(工况Ⅲ)3种工况,加载的最大吨位分别为40, 25, 20 kN,各分级加载值均为5 kN。加载工况见图1(a)。

为测得箱梁的横向内力分布曲线,分别在箱梁边腹板、中腹板间的桥面板横向跨中位置、悬臂长度的1/2位置、悬臂翼缘端部及腹板与顶板相交部位下由跨中向支座沿纵向每隔20 cm 布置应变片,见图3。在试验梁的支点和跨中布置有竖向位移计。采用TDS静态应变读数仪读取应变,东华静态应变读数仪读取位移^[7]。

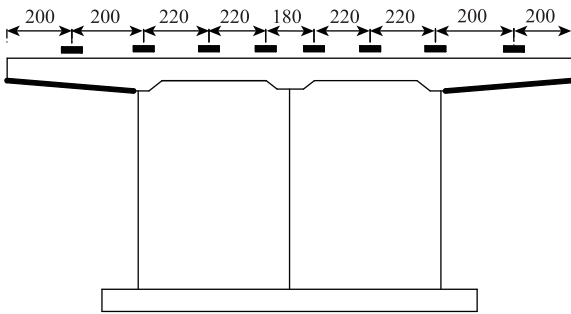


图3 应变片布置 (单位: mm)

Fig. 3 Layout of strain gauges (unit: mm)

1.2 承托对于波形钢腹板箱梁桥面板受力的影响

本节就加承托、不加承托的相应结果进行比较,以此检测承托设置对桥面板横向内力的影响。以下将加承托与不加承托的试验结果进行比较,试验结果分为箱梁挠度和桥面板横向内力两项。

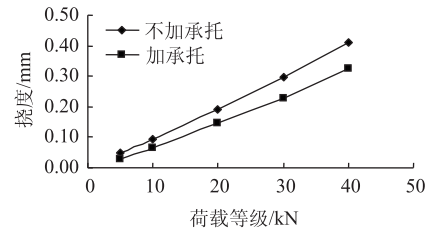
(1) 承托对箱梁挠度的影响

由图4可知3种工况下挠度值与荷载值呈线性比例关系,挠度值随着荷载值的增大而线性增大;加承托时的箱梁挠度较不加承托时的相应值均有一定程度的减小。进而由表1可知3种工况下对应于最大加载值作用下的挠度值,加承托时较不加承托时分别减少了14.6%, 12.4%, 14.6%, 上述差值大都接近15%。

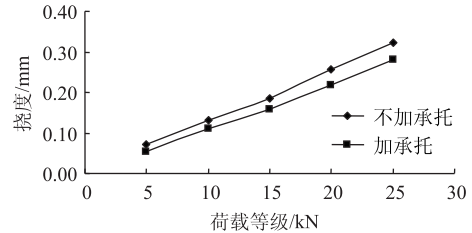
(2) 承托对桥面板横向内力的影响

从图5可知桥面板加承托、不加承托的箱梁跨中断面桥面板横向应力分布规律相同,只是前者较后者的数值有一定程度的减小。以中腹板处加载为例,其中腹板位置处的横向应力值分别减少13.3%, 10.2%。

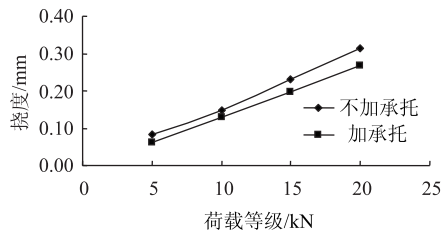
可见由于试验梁桥面板设置了承托,使其抗弯刚度增大,降低了箱梁的挠度,同时也降低了桥面板横向应力值。



(a) 中腹板处加载



(b) A-A截面加载



(c) 边腹板处加载

图4 跨中断面加载时跨中断面箱梁挠度的对比

Fig. 4 Comparison of deflections of box girder at mid-span when mid-span is under loading

表1 箱梁挠度对比

Tab. 1 Comparison of deflections of box girder

加载方式	加载工况		差值/%
	不加承托/mm	加承托/mm	
中腹板处加载	0.410	0.350	14.6
A-A 截面加载	0.322	0.282	12.4
边腹板处加载	0.313	0.267	14.6

2 加设承托的混凝土桥面板有效分布宽度及横向内力计算研究

2.1 加设承托的混凝土板有效分布宽度研究

将上述不加承托和加承托试验梁中单室箱梁桥面板的横断面尺寸作为板的短跨方向尺寸,则图6(a)~(b)中的 $l_b = 570$ mm, $h = 80$ mm, $\gamma h = \lambda l_b = 40$ mm。长跨方向 l_a 取为2 m,则 $l_a/l_b > 2$,满足单向板的要求^[8]。

以加承托和不加承托的混凝土简支板为对象,分别将荷载置于图6(c)所示位置,分为工况Ⅰ、工况Ⅱ、工况Ⅲ,3种工况采用同一均布荷载值 $p = P/(a \times b) = 250$ kN/m;其中 a , b 分别为试验中千

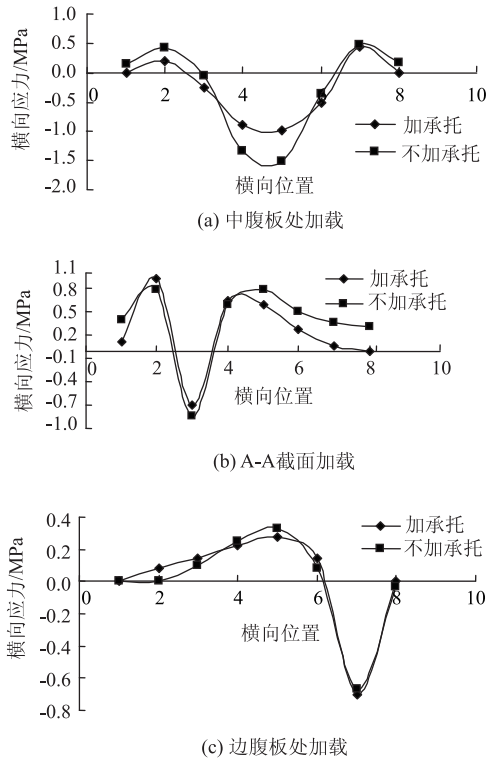


图5 跨中位置的横向应力值对比

Fig. 5 Comparison of lateral stresses at mid-span

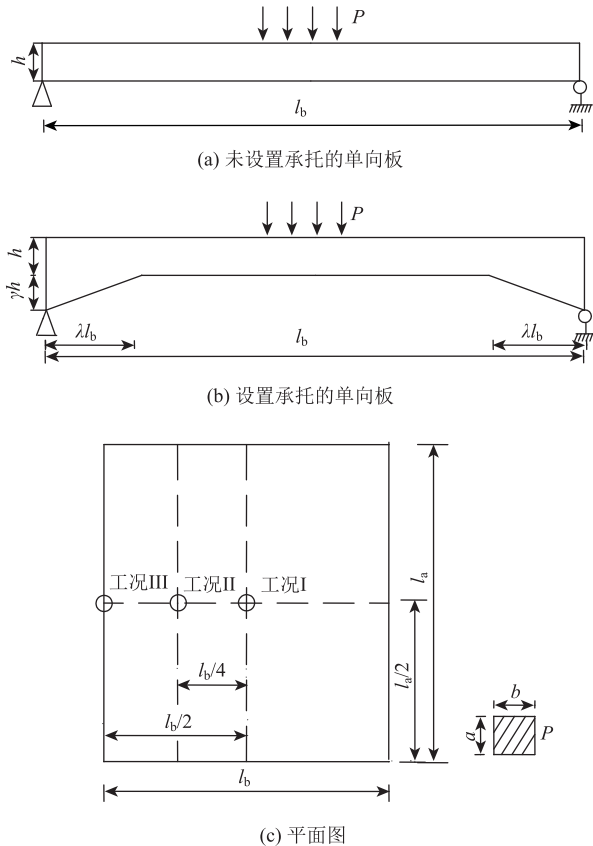


图6 桥面板示意图

Fig. 6 Schematic diagram of bridge deck

斤顶作用下的条形钢板平面尺寸 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。采用有限元法对板的有效分布宽度进行计算,有限元模型中混凝土板采用实体单元 Solid95 模拟,在单向板的支座处约束 UX, UY, UZ , 这 3 个方向的线位移,其中横向为 X 轴,竖向为 Y 轴,纵向为 Z 轴^[9],结果见表 2。

表2 有效分布宽度值 (单位: m)

Tab. 2 Effective distributed widths (unit: m)

加载位置	单向板		
	不加承托	加承托	差值/%
板跨中	1.18	1.12	5.1
靠近板的支撑处	1.31	1.23	6.1
在板的支撑处	0.98	0.93	5.1

通过上述分析可知加设承托与否对板的有效分布宽度影响很小,加承托与不加承托的单向板在上述 3 种加载位置下的有效分布宽度差值仅为 5%。

2.2 加设承托的混凝土桥面板横向内力计算研究^[10]

承托设置的影响参数即变截面杆件的形常数及载常数^[10-12]已有大量的表格可查,其充分考虑了承托尺寸对桥面板横向内力值的影响。结构力学方法未考虑扭转、畸变等的影响^[13],但是为了分析承托设置对箱梁桥面板横向内力的影响,仅以结构力学^[14]方法作为近似方法。

本节将基于上述理论及数据资料,比较试验梁承托设置与否对箱梁桥面板横向内力值的影响。以加承托的试验梁在偏载下的横向内力求解为对象,采用结构力学中的刚架模型,见图 7。试验梁中单室桥面板的承托设置见图 8,图中 a, b 为承托的两端。

(1) 形常数及载常数

AB 跨: $a = 0.07, b = 0.12; r_a = 0.5, r_b = 0.5$ 。

根据以上数据,查文献 [11] 附录得:

$$C_{AB} = C_{BA} = 0.559, F_A = F_B = 0.1353。$$

$$S_{AB} = S_{BA} = 4.98 \cdot \frac{E_{\text{混}} I_{\text{混}}}{L_{AB}}。 \quad (1)$$

则固端力矩:

$$m_{AB} = -m_{BA} = -F_A PL = -2029.1 (\text{N} \cdot \text{m})。 \quad (2)$$

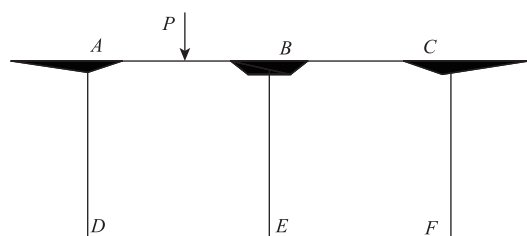
BC 跨: (无荷载作用)

$$m_{BC} = m_{CB} = 0。 \quad (3)$$

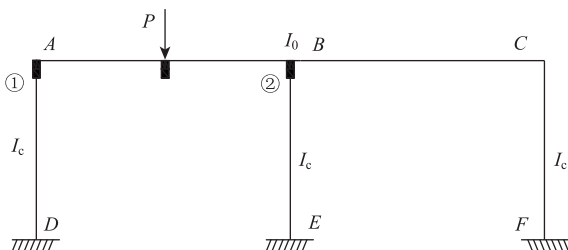
AD 跨: 按上端有承托,下端无承托计算。

$a = 0.0, b = 0.1; r_a = 0.0, r_b = 1.0$ 。

$$C_{AD} = C_{DA} = 0.493, S_{AD} = 5.14 \cdot \frac{E_{\text{钢}} I_{\text{波}}}{L_{AD}}。 \quad (4)$$



(a) 桥面板的承托布置示意图



(b) 刚架计算模型

图7 计算模型

Fig. 7 Calculation model

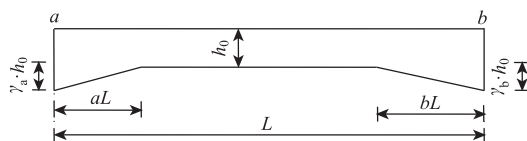


图8 承托设置及符号标示

Fig. 8 Support setting and symbols

BE跨:

$$a = 0.154, C_{BE} = 0.477, S_{BE} = 23.59 \cdot E_{\text{钢}} I_{\text{波}} \quad (5)$$

(2) 分配系数

设AB跨线刚度 $E_{\text{混}} I_{\text{混}} / L_{AD} = 1$, 则各杆转动刚度相对值为:

$$S_{AB} = S_{BA} = S_{BC} = S_{CB} = 4.98, \quad (6)$$

$$S_{CF} = S_{AD} = 59.04 \cdot \frac{I_{\text{波}}}{I_{\text{混}}}, \quad (7)$$

$$S_{BE} = 101.6 \cdot \frac{I_{\text{波}}}{I_{\text{混}}}, \quad (8)$$

其中:

$$I_{\text{混}} = 4.444 \times 10^{-5} \text{ m}^3, I_{\text{波}} = 2.581 \times 10^{-8} \text{ m}^3.$$

分配系数求得如下:

$$\mu_{BC} = \mu_{BA} = 0.479, \mu_{BE} = 0.041,$$

$$\mu_{AB} = \mu_{CB} = 0.953, \mu_{AD} = \mu_{CF} = 0.047,$$

式中, r_a, r_b 为梁两端A与B的腋深度之比; L_{AB} 为AB跨长度; C_{AB}, C_{BA} 为梁两端A与B的传递系数; S_{AB}, S_{BA} 为梁两端A与B的转动刚度相对值; F_A, F_B 为梁两端A与B的固定端力矩系数; $E_{\text{混}}, E_{\text{钢}}, I_{\text{混}},$

$I_{\text{波}}$ 分别为混凝土、波形钢腹板的弹性模量及其各自的横向抗弯惯性矩^[15-16], 其中 $I_{\text{混}}$ 指的是未加承托部分的混凝土桥面板横向抗弯惯性矩。

上述参数求出之后, 按照结构力学中的力矩分配法^[17-18] 计算得出的结果见表3, 同时将不加承托的相应结果示于表3。

表3 单箱双室箱梁桥面板的横向内力值 (单位: kN·m)

Tab. 3 Transverse internal forces in deck of single-box double-cell girder bridge (unit: kN·m)

位置	横向应力值		
	不加承托	加承托	差值/%
承托①	1.29	1.14	11.6
荷载处	1.36	1.22	10.3
承托②	1.30	1.16	10.8

由表3可知加承托与不加承托时的桥面板横向内力值大约相差10%, 可见承托的设置对桥面板横向内力值存在一定的影响, 不可忽略。

由于计算模型的差异, 采用结构力学方法计算的结果与实际箱梁模型结果存在一定差异。但是综合试验结果和力学分析结果, 加设承托与否对桥面板受力的影响一致, 且影响值均在10%以上。

3 结论

(1) 由于桥面板承托的设置增强了箱梁的抗弯刚度, 其箱梁挠度、桥面板横向应力值较不加承托时同一工况下的相应值均有一定程度的减小, 可见承托的施加对波形钢腹板箱梁桥面板的受力是有一定影响的。

(2) 针对承托的设置对桥面板有效分布宽度及横向内力的影响, 得出以下结论。

① 承托的设置对板的有效分布宽度影响很小, 加承托与不加承托的单向板在文中所述3种加载工况下的有效分布宽度误差均约为5%。

② 承托的设置对波形钢腹板箱梁桥面板的受力存在一定影响, 约为10%。

(3) 对于波形钢腹板箱梁而言, 从自身构造上来讲波形钢腹板与承托这两类因素均会对桥面板横向受力产生一定影响, 不可忽略。

参考文献:

References:

- [1] 朱聘儒. 钢-混凝土组合梁设计原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
ZHU Pin-ru. Design Principle of Steel-concrete Composite Girder [M]. Beijing: China Communications Press,

- 2006.
- [2] 范立础. 桥梁工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
FAN Li-chu. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [3] 王荣辉, 周建春. 考虑隅角点承托刚性影响薄壁曲线箱梁的空间计算分析 [J]. 土木工程学报, 2002, 35 (6): 66-72.
WANG Rong-hui, ZHOU Jian-chun. Spatial Analysis of Curved Thin-walled Box Girder Considering the Stiffness Effects of Box Corner [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35 (6): 66-72.
- [4] 邱波, 王荣辉, 刘光栋. 考虑隅角点承托刚性影响薄壁箱梁的空间计算分析 [J]. 中国公路学报, 2003, 16 (1): 50-53.
QIU Bo, WANG Rong-hui, LIU Guang-dong. Spatial Computational Analysis of Considering Rigidity of Box Corner Reinforcement Part for Thin-walled Box Girder [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16 (1): 50-53.
- [5] 钟新谷, 舒小娟, 张昊宇. 预应力混凝土箱梁横向框架效应有限元分析 [J]. 计算力学学报, 2013, 30 (4): 549-533.
ZHONG Xin-gu, SHU Xiao-juan, ZHANG Hao-yu. Finite Element Analysis on Transversal Frame-effect of Prestressed Concrete Box-girder Bridge [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30 (4): 549-533.
- [6] 赵品, 叶见曙. 波形钢腹板箱梁桥面板横向内力计算的框架分析法 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42 (5): 940-944.
ZHAO Pin, YE Jian-shu. Frame Analysis Method of Transverse Internal Force in Bridge Deck of Box Girders with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42 (5): 940-944.
- [7] 李立峰, 侯立超, 孙君翠. 波形钢腹板抗剪性能的研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42 (11): 56-63.
LI Li-feng, HOU Li-chao, SUN Jun-cui. Research on Shear Mechanical Property of Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2015, 42 (11): 56-63.
- [8] JOHNSON R P, CAFOLLA J. Corrugated Webs in Plate Girders for Bridges [J]. Structures and Buildings, 1997, 122 (2): 157-164.
- [9] 姚玲森. 桥梁工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
YAO Ling-sen. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [10] 方志, 郑辉, 刘双阳. 基于塑性分析的钢筋混凝土箱梁悬臂板横向受力有效分布宽度 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (3): 35-41.
FANG Zhi, ZHENG Hui, LIU Shuang-yang. Plastic Analysis of the Lateral Effective Width of Cantilever Slabs of Reinforced Concrete Box-girders [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (3): 35-41.
- [11] 蔡方荫. 变截面刚构分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1962.
CAI Fang-yin. Analysis on Variable Sectional Rigid Frame [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1962.
- [12] 清华大学建筑工程系. 结构力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1974.
Architectural Engineering Department of Tsinghua University. Structural Mechanics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1974.
- [13] ELGAALY M, SESHADRI A. Girders with Corrugated Webs under Partial Compressive Edge Loading [J]. Journal of the Structural Engineering, 1997, 123 (6): 783-791.
- [14] 赵品, 荣学亮, 叶见曙. 波形钢腹板箱梁桥面板横向内力计算方法研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2019, 47 (4): 467-474.
ZHAO Pin, RONG Xue-liang, YE Jian-shu. Calculation Method of Transverse Internal Force in Bridge Deck of Box Girder with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2019, 47 (4): 467-474.
- [15] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
GUO Jin-qiong, FANG Zhen-zheng, ZHENG Zhen. Design Theory of Box Girder [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [16] 方志, 郑辉, 刘双阳. 基于塑性分析的钢筋混凝土箱梁悬臂板横向受力有效分布宽度 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (3): 35-41.
FANG Zhi, ZHENG Hui, LIU Shuang-yang. Plastic Analysis of the Lateral Effective Width of Cantilever Slabs of Reinforced Concrete Box-girders [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (3): 35-41.
- [17] 赵品, 荣学亮, 叶见曙. 波形钢腹板组合箱梁横向受力有效分布宽度研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43 (7): 105-110.
ZHAO Pin, RONG Xue-liang, YE Jian-shu. Research on the Lateral Effective Width of Composite Box-girders with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2016, 43 (7): 105-110.
- [18] 赵品, 叶见曙. 波形钢腹板单箱多室箱梁横向受力分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39 (6): 1109-1115.
ZHAO Pin, YE Jian-shu. Transverse Force Study of Single Box Multi-chamber with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39 (6): 1109-1115.