

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.005

钢桁腹式混凝土组合箱梁的结构性能分析

张 岩, 杨霞林, 冀 伟

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 以南京绕越公路江山桥为工程背景, 运用有限元软件 ANSYS 建立该钢桁腹式混凝土组合箱梁的有限元模型, 分析其腹杆的受力情况, 并据此计算腹杆轴力竖向分量对各分析截面的抗剪贡献, 然后研究荷载横向变位对组合箱梁剪力滞效应的影响, 最后推导出组合箱梁钢桁腹杆的纵向弹性模量计算公式并计算实桥腹杆纵向弹性模量, 判断钢桁腹杆的抗弯贡献。研究表明: 组合箱梁的钢桁腹杆主要承受轴力作用; 组合箱梁的截面剪力可近似认为由钢桁腹杆承担; 荷载横向变位对组合箱梁上翼板的剪力滞效应影响较大; 钢桁腹杆可认为不抵抗截面弯矩。

关键词: 桥梁工程; 结构性能; 钢桁腹式混凝土组合箱梁; 剪力滞效应

中图分类号: U443.35

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)04—0021—05

Analysis of Structural Performance of the Concrete Box Girder with Steel Truss Webs

ZHANG Yan, YANG Xialin, JI Wei

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: By taking Nanjing bypass highway Jiangshan bridge as the background of the project, we used the finite element software ANSYS to establish the finite element model of the concrete composite box girder with steel truss webs, and analyzed the force condition of its steel truss webs, calculated shear contribution of vertical component of axial force of the steel truss webs for each analysis section, studied the influence of transverse displacement of load on shear lag effect of the composite box girder, and deduced the formula for calculating longitudinal elastic modulus of the steel truss webs, finally the real bridge's longitudinal elastic modulus were calculated and the bending contribution of the steel truss webs was verified. The results are as follows: the steel truss webs of the composite box girder mainly bears axial force; the cross-section's shear force of the composite box girder can be considered as undertaking by the steel truss webs; the transverse deflection of the load has a great influence on the shear lag effect of the upper flange plate of the composite box girder; the steel truss webs can be considered not to resist cross-section's bending moment.

Keywords: bridge engineering; structural performance; concrete composite box girder with steel truss webs; shear lag effect

钢桁腹式混凝土组合箱梁是一种新型钢-混组合桥梁结构, 其结构形式如图 1 所示。钢桁腹式混凝土组合箱梁采用钢桁腹杆代替了传统的混凝土腹板, 混凝土翼板和钢桁腹杆通过节点构造相连接, 使之成为共同受力的结构体系。钢桁腹式混凝土组合箱梁结构具有结构自重轻、施工方便快捷、不存在混凝土腹板开裂等优点, 故该类桥型极具发展潜力。

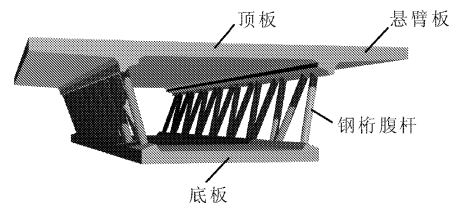


图 1 钢桁腹式混凝土组合箱梁的构造示意图

收稿日期: 2018-04-03

修稿日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51708269)

作者简介: 张 岩 (1994—), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为桥梁结构理论研究与有限元分析。E-mail: 437057220@qq.com

通讯作者: 杨霞林 (1970—), 女, 甘肃陇西人, 教授, 硕士生导师, 主要从事桥梁结构理论研究和有限元分析以及桥梁承载力评估研究及教学工作。E-mail: yxl06@163.com

钢桁腹式混凝土组合箱梁结构的研究和应用正处于起步阶段,国内外专家学者对其的研究主要有: Machacek Josef 等^[1]对钢桁腹式混凝土组合箱梁的剪力连接件进行了试验及理论研究。Jung K H 等^[2]对钢桁腹式混凝土组合箱梁的结构安全性和适用性进行了分析。雷聪^[3]对钢桁腹式混凝土组合箱梁的基本力学性能、剪力滞效应和偏载效应进行了初步研究。郑尚敏等^[4]建立了某钢桁腹式混凝土组合箱梁及与之相对应的波形钢腹板组合箱梁的有限元模型,对比分析了两类桥型的剪力滞效应。刘朵等^[5]利用空间有限元模型分析了钢桁腹式混凝土组合箱梁的剪力滞效应和有效宽度分布规律,并研究了顶底板厚度及钢管壁厚对其剪力滞效应的影响。端茂军等^[6-7]对钢桁腹式混凝土组合箱梁的新型 PBL-钢管节点进行了试验研究和非线性有限元仿真模拟。

目前,针对钢桁腹式混凝土组合箱梁结构性能的研究还比较少见,故本文运用有限元软件 ANSYS 建立了一座简支钢桁腹式混凝土组合箱梁的有限元模型,并以此为基础研究了组合箱梁的腹杆力学性能、抗剪性能和剪力滞效应;推导了组合箱梁的钢桁腹杆纵向弹性模量计算公式,并以此分析了组合箱梁的纵向刚度。

1 组合箱梁有限元模型的建立

本文以南京绕越公路江山桥^[8]为例,建立了简支钢桁腹式组合箱梁的有限元模型,其翼板和端部横梁采用实体单元进行模拟,钢桁腹杆采用梁单元进行模拟,不考虑腹杆与混凝土翼板的相对滑移,钢桁腹杆与混凝土板通过共节点的方式连接^[4,9],有限元模型如图 2 所示。简支组合箱梁的横向及纵向构造与尺寸见图 3 和图 4,翼板混凝土采用 C50 混凝土,弹性模量为 3.45×10^4 MPa,钢桁腹杆采用

Q345C 级钢管,为便于组合箱梁节点构造的大批量生产,腹杆规格均为 $\Phi 351 \times 16$,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,腹杆水平倾角为 67° 左右,节间距为 1.95 m。

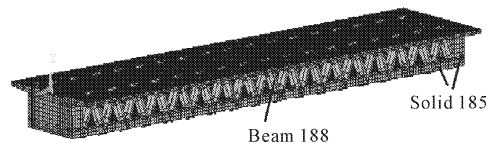


图 2 有限元模型

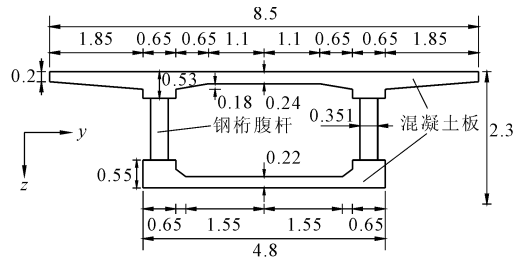


图 3 组合箱梁横截面尺寸示意图(单位:m)

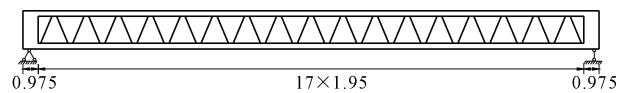


图 4 组合箱梁立面图(单位:m)

2 钢桁腹杆的力学性能分析

建立每根钢桁腹杆的局部坐标系,如图 5 所示。钢桁腹式混凝土组合箱梁受跨中集中荷载 ($P = 300$ kN) 和全桥均布荷载 ($q = 10.5$ kN/m)^[10] 作用下的腹杆受力情况见表 1。

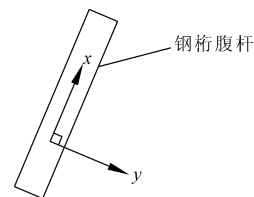


图 5 腹杆的局部坐标系

表 1 腹杆的受力情况

荷载类型	弯矩 $M_x/(kN \cdot m)$		弯矩 $M_y/(kN \cdot m)$		扭矩 $T/(kN \cdot m)$		剪力 Q_x/kN		剪力 Q_y/kN	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
跨中集中荷载	0.385	-0.385	3.929	-3.929	0.109	-0.109	3.036	-3.036	0.311	-0.311
全桥均布荷载	0.450	-0.455	2.908	-2.908	0.061	-0.061	3.166	-3.166	0.350	-0.350

3 组合箱梁的抗剪性能分析

为研究钢桁腹式混凝土组合箱梁的截面剪力能否视为仅由钢桁腹杆承担,本文将组合箱梁简化为

一简支支承的杆件结构,计算其各截面所承受的剪力,并与表 1 中各腹杆轴力的竖向分量进行对比,探讨钢桁腹式混凝土组合箱梁的钢桁腹杆的抗剪贡献,如图 6 所示。

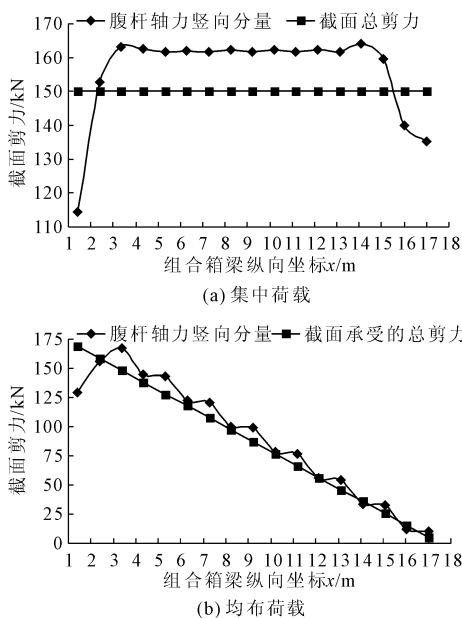


图 6 腹杆的抗剪贡献

钢桁腹式混凝土组合箱梁在承受竖向荷载作用时,其部分腹杆轴线竖向分量略微超过了截面承受的总剪力,这是由于杆件结构力学的内力计算基于“小变形”假定与实际情况不符造成的。根据文献[3]可知,组合箱梁在承受跨中集中荷载($P = 2\ 000\ \text{kN}$)和全桥均布荷载($q = 200\ \text{kN/m}$)作用时,其跨中处的挠度分别为 $13.46\ \text{mm}$ 和 $39.74\ \text{mm}$,小于组合箱梁计算跨径的 $1/600$ ^[11],由此可知利用杆系结构力学的方法计算组合箱梁的截面剪力具有较高精度,故利用本文的分析方法探讨钢桁腹式混凝土组合箱梁钢桁腹杆的抗剪贡献具有足够的信服力。

根据图 7 可知,承受竖向荷载的钢桁腹式混凝土组合箱梁,除支座和跨中位置,其余位置处钢桁腹杆的抗剪贡献率很大,很多位置超过了 100%。支座处钢桁腹杆抗剪贡献较小的原因是端部横梁承担了支座处大部分剪力;跨中处钢桁腹杆抗剪贡献较小的原因是跨中集中荷载直接作用于跨中,导致组合箱梁此处发生剪力突变,使得本文的计算结果失真。综上所述,钢桁腹杆的抗剪贡献很大,在钢桁腹式混凝土组合箱梁的设计计算中,可忽略混凝土翼板的抗剪能力,认为梁的剪力仅由钢桁腹杆承担,从而提高设计结构的安全性与可靠性。

4 荷载横向变位对组合箱梁剪力滞效应的影响

箱梁发生竖向挠曲变形时,由腹板传递给翼缘板的剪力流使翼缘板产生面内剪切变形,这种剪切变形进一步导致翼缘板在远离腹板处的纵向位移滞后于

靠近腹板处的纵向位移,从而使箱梁翼缘板不再满足平截面变形假定,这就是箱梁的剪力滞效应^[12]。

剪力滞效应的定量描述用剪力滞系数^[13]表示:

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

本文分别对受跨中集中荷载($P = 300\ \text{kN}$)和全桥均布荷载($q = 10.5\ \text{kN/m}$)作用的简支钢桁腹式混凝土组合箱梁的剪力滞效应进行分析,探讨荷载横向变位对组合箱梁上翼板的剪力滞效应的影响。图 7 为组合箱梁桥加载位置的示意图。

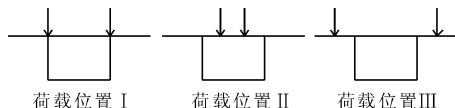


图 7 组合梁的加载位置

本文中腹杆轴线交于一点,在有限元建模时,对节点处采用生成刚性区域进行自由度耦合,同时未考虑节点的细部构造,为避免建模时的简化对本文研究的不利影响,选取横截面 $a(x = 8.725\ \text{m})$ 作为 $1/4$ 跨分析截面,横截面 $b(x = 16.525\ \text{m})$ 作为跨中分析截面,对组合箱梁的上翼板剪力滞效应进行分析,分析截面如图 8 所示。组合箱梁上翼板的剪力滞系数沿横向分布如图 9 和图 10 所示。

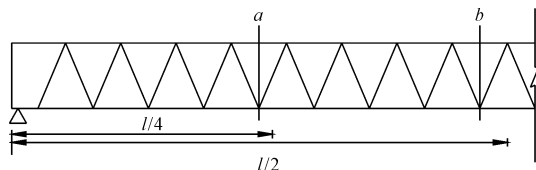


图 8 分析截面

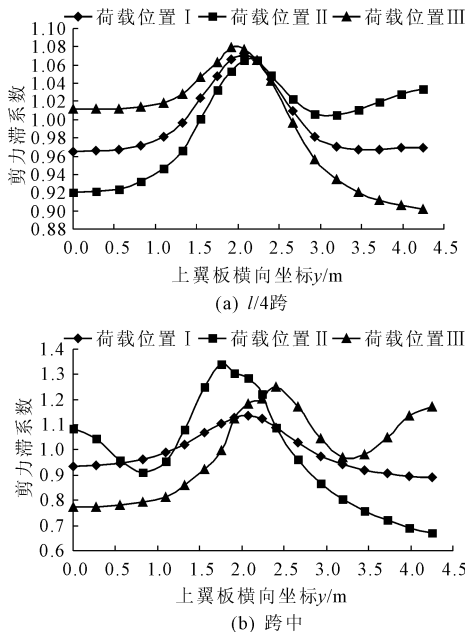


图 9 集中荷载

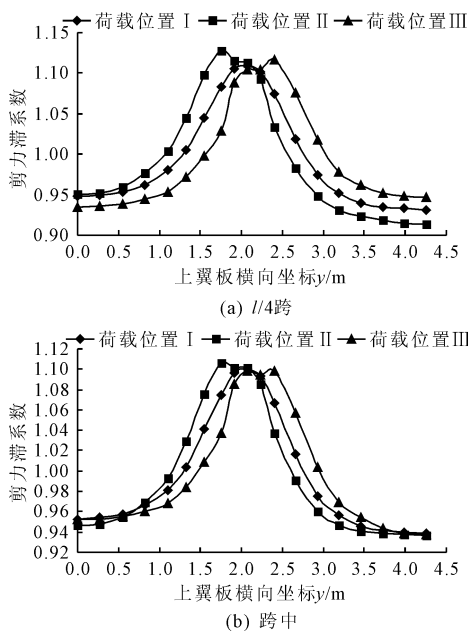


图 10 均布荷载

由图 9 可知,当钢桁腹式混凝土组合箱梁受跨中集中荷载作用时,荷载横向变位对其上翼板剪力滞效应的影响很大,且任意荷载横向变位下,跨中处上翼板的剪力滞效应均较 $l/4$ 跨处上翼板剪力滞效应明显,这是由于荷载直接作用于跨中造成的,跨中处剪力滞系数取最大值的位置向荷载直接作用处移动的趋势明显。当跨中集中荷载作用于荷载位置 I 时,即荷载作用于组合箱梁翼板承托处,上翼板剪力滞效应最不明显,原因是组合箱梁桥的承托构造限制了其纵向应变的发展,此时,组合箱梁悬臂板自由端处的剪力滞系数在 $l/4$ 跨处略大于其顶板中部,在跨中处略小于其顶板中部;当跨中集中荷载作用于荷载位置 II 时,即荷载作用于组合箱梁桥顶板,此时,组合箱悬臂板自由端处的剪力滞系数在 $l/4$ 跨处明显大于其顶板中部,在跨中处明显小于其顶板中部,且在荷载直接作用处剪力滞系数取得极小值;当跨中集中荷载作用于荷载位置 III 时,即荷载作用于组合箱梁桥悬臂板,此时,组合箱悬臂板自由端处的剪力滞系数在 $l/4$ 跨处明显小于其顶板中部,在跨中处明显大于其顶板中部,且在荷载直接作用处剪力滞系数取得极小值。

由图 10 可知,当钢桁腹式混凝土组合箱梁受全桥均布荷载作用时,荷载横向变位对钢桁腹式混凝土组合箱梁的上翼板剪力滞效应影响较小, $l/4$ 跨和跨中处剪力滞系数取最大值的位置有向荷载直接作用处移动的趋势。当跨中集中荷载作用于荷载位置 I 时,组合箱梁悬臂板自由端处的剪力滞系数在

$l/4$ 跨和跨中处均略小于其顶板中部;当跨中集中荷载作用于荷载位置 II 时,组合箱悬臂板自由端处的剪力滞系数在 $l/4$ 跨和跨中处均略大于其顶板中部;当跨中集中荷载作用于荷载位置 III 时,组合箱梁悬臂板自由端处的剪力滞系数在 $l/4$ 跨处略大于其顶板中部,在跨中处略小于其顶板中部。

5 组合箱梁的纵向刚度分析

5.1 图乘法计算钢桁腹杆的纵向变形

由于腹杆端点直接嵌固于混凝土翼板承托中,腹杆与混凝土板的连接处通过节点构造进行力的平顺传递,故可将钢桁腹杆近似视为连续的折线。任取一钢桁腹式混凝土组合箱梁的钢桁腹杆,取如图 11 所示两个弯矩零点之间的钢桁腹杆作为一个单元计算该单元的纵向变形 δ_1 ,假设钢桁腹杆的竖向高度为 h ,腹杆为空心圆形钢管,其内径为 d ,外径为 D ,且腹杆的钢材弹性模量为 E ,纵轴向力 P 作用下的 M_p 、 N_p 和 $P=1$ 作用下的 \bar{M} 、 \bar{N} 如图 12 所示。

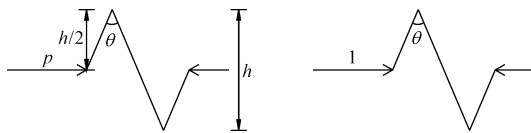


图 11 腹杆计算单元

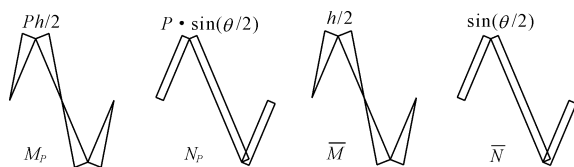


图 12 腹杆计算单元受力图

单元纵向变形 δ_1 为:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \sum \int \frac{MM_p}{EI} ds + \sum \int \frac{\bar{N}N_p}{EA_1} ds \\ &= \frac{Ph^3}{6EI \cos \frac{\theta}{2}} + \frac{2Ph \sin^2 \frac{\theta}{2}}{EA_1 \cos \frac{\theta}{2}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: I 为腹杆截面惯性矩; A_1 为腹杆截面面积。

5.2 钢桁腹式混凝土组合箱梁的等效梁

采用换算薄壁箱梁法,按剪切变形相等的原则对钢桁腹杆进行换算,将钢桁腹杆换算所得的薄壁钢板称为等效钢腹板或钢腹板^[14]。一根长为 d' 的斜腹杆,其杆的竖向高度与水平投影长度为 h 和 b ,将其换算成边长为 h 和 b 的钢腹板,则钢腹板的厚度 t' 为:

$$t' = \frac{E}{G} \times \frac{A_1 hb}{d'^3} \quad (3)$$

式中: E 为钢材的弹性模量; G 为钢材的剪切模量。

换算所得的等效钢腹板在纵向轴力 P 作用下的纵向变形 δ_2 可由下式求得:

$$\delta_2 = \frac{Pl}{EA_2} = \frac{2P \tan \frac{\theta}{2}}{Et'} \quad (4)$$

式中: l 为所取钢桁腹杆单元的纵向长度, $l = 2h \tan(\theta/2)$; A_2 为等效钢腹板的横截面积, $A_2 = ht'$ 。

5.3 钢桁腹杆的纵向弹性模量

钢桁腹杆的纵向弹性模量 E_f 与换算钢腹板的纵向弹性模量 E_0 比值等于 δ_2 与 δ_1 的比值^[15], 经运算化简后可得 E_f 与 E_0 的关系如下:

$$E_f = \frac{12IA_1 \sin \frac{\theta}{2}}{t[A_1 h^3 + 12I \sin^2(\frac{\theta}{2})]} E_0 \quad (5)$$

将算例中的参数代入公式(3)和公式(5), 可得:

$$t' = 3.09 \text{ mm} \quad (6)$$

$$E_f = 0.0984 E_0 \quad (7)$$

可知由规格为 D351 mm × 16 mm 钢管组成的钢桁腹杆的纵向弹性模量是厚度为 3.09 mm 钢腹板的 0.0984 倍。由于实际桥梁应用中钢桁腹杆的尺寸较小, 且计算可知钢桁腹杆的纵向弹性模量 E_f 较等效钢腹板的纵向弹性模量还要小一个数量级, 可见组合箱梁的钢桁腹杆的纵向弹性模量非常小, 即近似认为钢桁腹杆不抵抗截面弯矩, 组合箱梁截面的弯矩仅由混凝土翼板承担。

6 结论

(1) 钢桁腹式混凝土组合箱梁的钢桁腹杆主要承受轴力作用, 且与同一节点相连的两根腹杆拉、压交替。

(2) 钢桁腹式混凝土组合箱梁的截面剪力可近似认为仅由钢桁腹杆承担, 从而提高设计结构的安全性与可靠性。

(3) 当钢桁腹式混凝土组合箱梁承受跨中集中荷载作用时, 荷载横向变位对其上翼板的剪力滞效应影响明显; 当钢桁腹式混凝土组合箱梁承受全桥均布荷载作用时, 荷载横向变位对其上翼板的剪力

滞效应影响有限。

(4) 钢桁腹杆的纵向刚度非常小, 可近似认为不抵抗截面弯矩, 当计算钢桁腹式混凝土组合箱梁抗弯惯性矩时, 可只计混凝土翼板的作用。

参考文献:

- [1] Machacek Josef, Charvat Martin. Study on shear connection of bridge steel truss and concrete slab deck[J]. *Statyba*, 2016, 23(1): 105-112.
- [2] Jung K H, Yi J W, Kim J H J. Structure safety and serviceability evaluations of prestressed concrete hybrid bridge girders with corrugated or steel truss web members[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(12): 3866-3878.
- [3] 雷 聪. 钢桁腹组合梁桥力学性能分析[D]. 南京: 东南大学, 2015: 11-55.
- [4] 郑尚敏, 万 水. 钢桁腹组合梁剪力滞效应的有限元分析[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(11): 68-72.
- [5] 刘 朵, 张建东, 刘 钊. 钢桁腹预应力混凝土组合梁桥的剪滞效应[J]. *水利与建筑工程学报*, 2013, 11(6): 73-77.
- [6] 端茂军, 刘 钊, 张建东, 等. 钢桁腹-混凝土组合结构桥梁新型 PBL-钢管节点试验研究[J]. *东南大学学报*, 2016, 46(3): 572-577.
- [7] 端茂军, 刘 钊, 张建东, 等. 钢管腹杆-混凝土 K 形组合节点试验及仿真分析[J]. *桥梁建设*, 2017, 47(5): 47-52.
- [8] 刘 朵, 张建东, 阎卫国. 南京绕越公路江山桥的设计与施工[J]. *公路*, 2013, 58(12): 80-82.
- [9] 陈 维. 钢桁腹组合桥力学模型及其对比[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 15-41.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 59-60.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012: 94-96.
- [12] 张元海, 胡玉茹, 林丽霞. 基于修正翘曲位移模式的薄壁箱梁剪力滞效应分析[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(6): 44-50.
- [13] 项海帆, 范立础. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 14-19.
- [14] 王 彤, 谢 旭, 王 渊, 等. 桁腹式组合桁梁结构计算理论[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(4): 711-720.
- [15] 侯苏伟, 杨霞林, 杨丹丹. 波形钢腹板 PC 箱梁纵向刚度分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2008, 6(4): 139-140.