

文章编号:1673-2049(2017)03-0112-07

大跨变截面波形钢腹板箱梁横向受力分析

李立峰,任虹昌,周 聪,周 延

(湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室,湖南 长沙 410082)

摘要:为研究大跨变截面波形钢腹板预应力混凝土(PC)组合箱梁顶板在车轮局部荷载作用下的横向受力问题,结合2座桥例,分别建立全桥实体有限元模型;选择纵向3个典型截面,建立与之匹配和考虑有效分布宽度的平面框架模型;依据实体模型中顶板控制截面的横向应力影响线进行空间实体模型和平面框架模型的横向最不利加载,获得控制截面的最大横向拉应力及其沿纵向的变化规律,并对比了2种模型的计算结果。结果表明:对于顶板悬臂根部截面和腹板内侧截面,框架法与实体有限元法计算结果吻合良好;对于顶板跨中截面,腹板间距较大时,框架法的计算值偏于保守,设计中需对框架法的计算值进行适当折减;随着加载位置由跨中向支点移动,顶板跨中截面的横向应力峰值逐渐减小,悬臂根部截面和腹板内侧截面的横向应力峰值有增大趋势;有无横隔板对桥面板的横向受力影响很小,顶板跨中截面的横向应力值随波形钢腹板线刚度的增加线性减小。

关键词:桥梁工程;横向受力;有限元法;桥面板;钢腹板

中图分类号:TU311

文献标志码:A

Analysis on Transverse Force of Large Span Variable Cross-section Box Girder with Corrugated Steel Webs

LI Li-feng, REN Hong-chang, ZHOU Cong, ZHOU Yan

(Key Laboratory of Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University,
Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to study the transverse force of the roof of large span variable cross-section prestressed concrete (PC) composite box girder with corrugated steel webs under the local load of wheel, combined with two bridge examples, the solid finite element models of the two whole bridges were established. Three longitudinal typical cross sections were selected, the matched plane frame models considering the effective distribution width were established. According to the influence lines of transverse stress of the roof control sections in the solid finite element models, the transverse most unfavorable loadings of the spatial entity model and the plane frame model were applied. The maximum transverse tensile stress of control sections and the variation law along the longitudinal direction were obtained, and the calculation results of the two models were compared. The results show that the frame method is in good agreement with the solid finite element method for root sections of roof cantilever plates and inner sections of webs. While for mid-span sections of roofs, the calculated results of frame method are conservative when the web space is larger, and the calculated results of the frame method should be properly reduced in design. With the moving of load position from mid-span to support, the peak transverse stresses

收稿日期:2016-11-15

基金项目:交通运输部建设科技项目(2013 318 798 320);湖南省交通厅科技项目(201123,201219);陕西省交通厅科技项目(12-21K)

作者简介:李立峰(1971-),男,湖南沅江人,教授,工学博士,E-mail:lilifeng@hnu.edu.cn。

of mid-span sections of roof decrease gradually, while the peak transverse stresses of root sections of cantilever plates and inner sections of webs have a tendency to increase. The diaphragms have little impact on the transverse force of the bridge deck. The transverse stress values of mid-span sections of roofs decrease linearly with the increase of line stiffness of corrugated steel webs.

Key words: bridge engineering; transverse force; finite element method; bridge deck; steel web

0 引 言

波形钢腹板预应力混凝土(PC)组合箱梁采用波形钢板取代传统混凝土腹板,具有受力明确、轻型美观和避免腹板开裂等优点,随着跨径增大(超过 80~100 m),其技术经济优势越加明显。近年来,大跨径波形钢腹板箱梁的建设步伐十分迅速,郾城黄河大桥、深圳南山大桥、桃花峪跨大堤桥、珠海前山河大桥等数十座大跨径桥梁先后建成。随着跨径的增大,其顶板跨距和翼缘板长度日趋增大,而腹板由于采用了抗弯和抗扭刚度相对较小的波形钢腹板^[1],局部车辆作用下引起的横向挠曲和畸变将会使组合箱梁的横向受力问题更加突出。

目前,分析混凝土箱梁横向受力的方法较成熟,有影响面法、平面框架法^[2]、有限元法^[3-4]、折板位移法^[5]等,但对大跨径波形钢腹板箱梁桥面板的横向受力研究非常少。袁卓亚等^[6-7]以弹性薄板理论为基础,推导了波形钢腹板箱梁箱形框架和翼缘板横向内力计算公式;赵品等^[8-9]基于框架分析法的基本原理,建立了能够反映横向框架作用和箱梁畸变效应的计算模型,进行了模型试验和有限元分析,结果表明波形钢腹板与混凝土顶板的线刚度比是影响桥面板横向内力的重要因素;程宏伟^[10]系统研究了宽幅单箱单室、单箱多室波形钢腹板组合箱梁桥的横向内力分布规律,提出了一种有效分布宽度的修正方法,并给出了计算公式及表格。以上研究大多是对等截面波形钢腹板箱梁在单点集中力荷载下的横向内力进行分析,且理论解对于实际工程应用较复杂。

本文在以上研究基础上,结合 2 座大跨变截面波形钢腹板 PC 组合箱梁桥,分别建立全桥实体有限元模型和平面框架模型,研究顶板控制截面的最大横向拉应力及其沿纵向的变化规律,并对比 2 种模型的计算结果,提出具体分析建议。

1 工程背景

为了实现分析的普遍性,本文选用 2 座具有不同截面布置的大跨径波形钢腹板组合箱梁进行分析,桥例 1 为单箱单室变截面连续箱梁桥,跨径布置

为 90 m+160 m+90 m,支点与跨中梁高 h 分别为 9.5 m 和 4 m,梁高及底板厚度按 1.8 次抛物线变化,中跨内设置 6 道横隔板,顶、底板宽度分别为 15.75 m 和 9 m,立面与横断面如图 1,2 所示。主梁采用 C60 混凝土,腹板采用 1600 型波形钢板和 Q345C 钢材,厚度在 12~25 mm 之间变化。

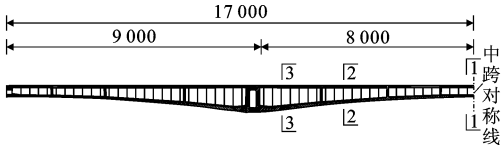


图 1 桥例 1 立面 (单位:cm)

Fig. 1 Elevation of Bridge Example 1 (Unit:cm)

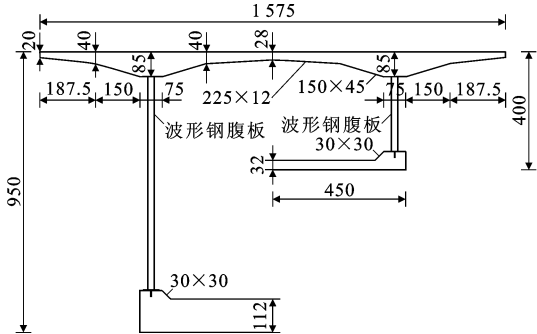


图 2 桥例 1 横断面 (单位:cm)

Fig. 2 Cross Section of Bridge Example 1 (Unit:cm)

桥例 2 为单箱双室变截面连续箱梁桥,跨径布置为 78 m+130 m+78 m,支点与跨中梁高分别为 7.5 m 和 3.5 m,梁高及底板厚度按二次抛物线变化,中跨内设置 4 道横隔板,顶、底板宽度分别为 19.25 m 和 12.5 m,立面与横断面如图 3,4 所示。主梁采用 C55 混凝土,腹板采用 1600 型波形钢板和 Q345C 钢材,厚度在 14~24 mm 之间变化。

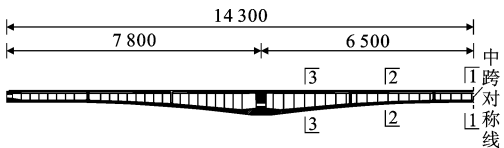


图 3 桥例 2 立面 (单位:cm)

Fig. 3 Elevation of Bridge Example 2 (Unit:cm)

2 研究技术路线

本文以 2 座大跨变截面波形钢腹板 PC 组合箱

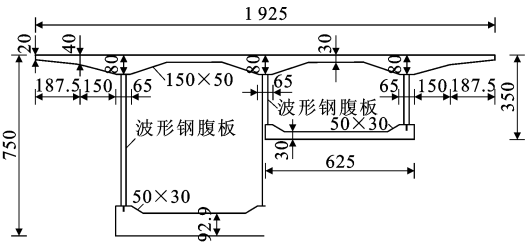


图 4 桥例 2 横断面 (单位:cm)

Fig. 4 Cross Section of Bridge Example 2 (Unit:cm)

梁桥为依托,分别建立全桥实体有限元模型;选择纵向 3 个典型截面,结合波形钢腹板的力学特性,依据框架分析法的基本原理,建立与之匹配和考虑有效分布宽度的平面框架模型。研究技术路线见图 5。

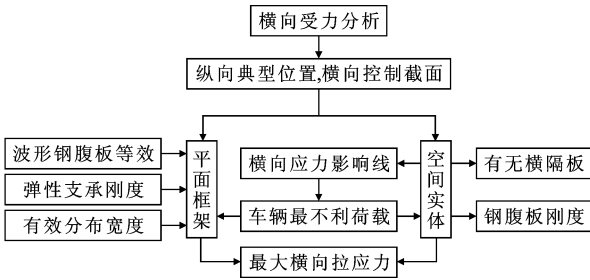


图 5 研究技术路线

Fig. 5 Research Technical Route

依据实体模型中顶板控制截面的横向应力影响线进行空间实体模型和平面框架模型的横向最不利加载,获得控制截面的最大横向拉应力,并对比 2 种模型的计算结果。同时结合实体有限元模型,进一步讨论横隔板与钢腹板刚度对横向受力的影响。

3 分析模型

3.1 空间实体模型

采用通用软件 ANSYS 建立依托工程的空间实体有限元模型,混凝土部分采用八节点实体单元 Solid65 来模拟,波形钢腹板采用四节点板壳单元 Shell181 来模拟,为了保证 2 种自由度不同的单元连接,两者之间采用 MPC184 单元过渡。为了保证分析精度,顶、底板及波形钢腹板均采用映射网格来划分,而横隔板采用自由网格划分,空间实体模型(未显示波形钢腹板)如图 6 所示。

3.2 平面框架模型

采用桥梁软件建立箱梁的横向框架模型,波形钢腹板通过工字形截面来等效模拟,平面框架模型如图 7 所示。桥面板横向受力有效分布宽度按现行公路桥规^[11]计算。

3.2.1 波形钢腹板模拟

平面框架模型中,单位波长的波形钢腹板截面

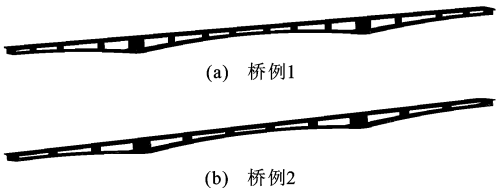


图 6 空间实体模型

Fig. 6 Spatial Entity Models



图 7 平面框架模型

Fig. 7 Plane Frame Models

如图 8(a)所示,可以等效为图 8(b)所示的工字形截面。图 8 中, a_w 为直板段或斜板段宽度, b_w 为斜板段的投影宽度, d_w 为波高, t_w 为波形钢腹板厚度, θ 为斜板段与桥梁纵向的夹角, t_d 为等效工字形截面的腹板厚度, $t_d = 2t_w / \sin(\theta)$ 。这样其惯性矩 I_y 可表示为

$$I_y = \frac{1}{6} a_w t_w^3 + 2 a_w t_w \left(\frac{d_w}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} t_d^3 d_w$$

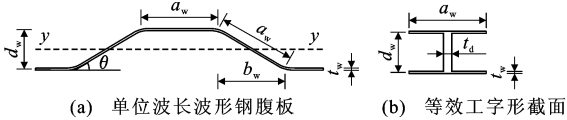


图 8 波形钢腹板模拟

Fig. 8 Simulation of Corrugated Steel Web

3.2.2 框架竖向和横向弹性支承刚度

全桥实体模型中,在计算断面处分别在竖向和横向施加单位荷载,求得该断面处沿竖向和横向的位移,其倒数即为竖向和横向的总弹性支承刚度。竖向弹性支承刚度可按腹板数目进行平均分配,横向弹性支承刚度可按顶、底板平面内的抗弯刚度进行分配^[12-13]。

3.3 分析位置选取

3.3.1 纵桥向位置选取

由于相邻横隔板间的桥面板横向受力较为不利^[14],同时考虑到纵桥向每个截面的支撑刚度不同和腹板对顶板的约束刚度也不同,故沿纵桥向选取 3 个典型截面 1-1,2-2,3-3 进行横向受力分析,如图 1,3 所示,截面参数见表 1。

3.3.2 横向位置选取

车轮作用下箱梁顶板的受力主要为如图 9 中所示的典型位置 a, b, c, d ,因此选择这几个位置所在截面作为控制截面进行横向受力分析。

表 1 横向受力分析典型截面参数

Tab. 1 Typical Section Parameters of Transverse Force Analysis

截面编号	桥例 1				桥例 2			
	梁高度/m	腹板高度/m	底板厚度/mm	腹板厚度/mm	梁高度/m	腹板高度/m	底板厚度/mm	腹板厚度/mm
1-1	4.000	2.530	0.320	12	3.500	2.100	0.300	14
2-2	5.994	4.205	0.639	22	4.123	2.614	0.409	20
3-3	8.230	6.083	0.997	25	5.993	4.157	0.736	24

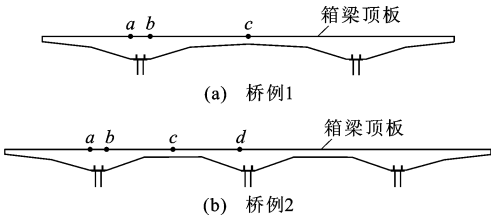


图 9 箱梁顶板控制截面位置

Fig. 9 Control Section Position of Box Girder Roof

3.4 荷载施加

车辆仅考虑后轴作用(2×140 kN),横向布置按照控制截面的横向应力影响线进行最不利加载。平面框架模型中考虑车辆后轴作用下桥面板的有效分布宽度后以集中力的形式施加后轴作用,悬臂板上加载时考虑防撞护栏的宽度为 0.5 m。空间实体模型中为避免集中力作用时引起的应力集中,采用 0.1 m×0.1 m 均布荷载施加车轮作用。

3.5 网格划分

最不利加载时,顶板跨中截面 c 处应力梯度较高,需布置较密的网格。为确定合理的网格划分尺寸,采用桥例 1 中截面 1-1 建立 20 m 简支梁模型,提取最不利加载时截面 c 下缘的最大横向拉应力作比较,如表 2 所示,其中比值为对应网格与网格 5 提取应力之比。可见采用网格 3 已达到较高精度,因此全桥模型建立采用网格 3 的网格尺寸和划分方式,网格宽度采用 0.1 m,顶板跨中划分为 5 层。

表 2 不同网格划分的应力比较

Tab. 2 Stress Comparison of Different Mesh Generation

网格编号	网格宽度/m	跨中层数	应力/MPa	比值
1	0.10	3	3.310	0.966
2	0.10	4	3.358	0.980
3	0.10	5	3.395	0.990
4	0.10	6	3.417	0.997
5	0.05	7	3.428	1.000

4 横向受力分析结果

4.1 桥面板应力包络

以跨中截面 1-1 为例,通过单个车轮不同横向位置的加载,可得空间实体模型中顶板的横向应力

影响线,控制截面 a,b,d 上缘及 c 下缘的横向应力影响线如图 10 所示,其中拉为正,压为负。为便于后文比较,图 10 中也给出了框架模型考虑有效分布宽度后截面 c 下缘的横向应力影响线。依据横向应力影响线进行最不利加载,冲击系数与多车道折减均不考虑,得到空间实体模型中桥面板上、下缘横向拉应力包络,如图 11 所示。显然,桥面板上缘横向拉应力包络分布较均匀,桥面板下缘在横向跨中位置处有最大横向拉应力。

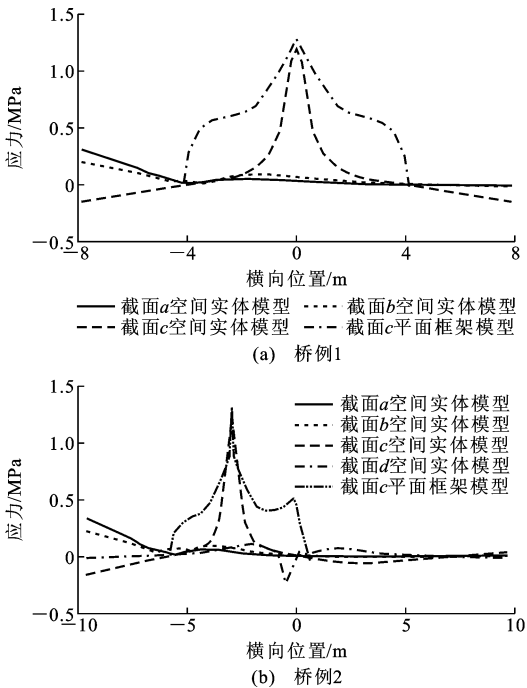


图 10 横向应力影响线

Fig. 10 Influence Line of Transverse Stress

4.2 控制截面分析结果

4.2.1 截面 a

车辆后轴位于悬臂板端部时,截面 a 上缘将产生最大横向拉应力,框架法与实体有限元法的计算值如表 3 所示。有效分布宽度按公路桥规^[11]公式计算,取车轮中心点的计算值。

由表 3 可知:悬臂板端部加载时,平面框架模型中截面 a 上缘横向拉应力不随纵向位置的不同而改变;空间实体模型中,由于不同位置处翼缘板的受约

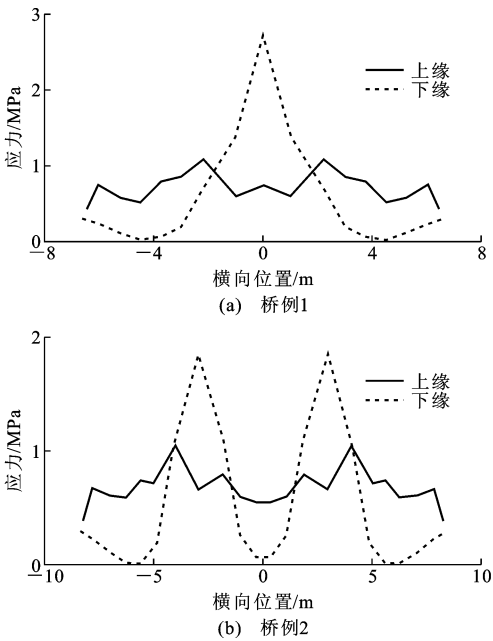


图 11 桥面板横向拉应力包络

Fig. 11 Transverse Tensile Stress Envelope of Bridge Deck

表 3 截面 a 上缘横向拉应力

Tab. 3 Transverse Tensile Stress on Upper Edge of Section a

截面 编号	桥例 1			桥例 2		
	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_1/σ_2	σ_3 /MPa	σ_4 /MPa	σ_3/σ_4
1-1	0.572	0.518	1.104	0.660	0.586	1.126
2-2	0.572	0.492	1.163	0.660	0.590	1.119
3-3	0.572	0.553	1.034	0.660	0.605	1.091

注： σ_1, σ_2 分别为框架法和实体有限元法计算的桥例 1 横向拉应力； σ_3, σ_4 分别为框架法和实体有限元法计算的桥例 2 横向拉应力。

束程度不同,截面 a 上缘横向拉应力有所改变;框架法的计算值略大于实体有限元值,偏于安全。

4.2.2 截面 b

车辆后轴在悬臂板端部与顶板同时加载时,截面 b 上缘将产生最大横向拉应力,框架法与实体有限元法的计算值如表 4 所示。

表 4 截面 b 上缘横向拉应力

Tab. 4 Transverse Tensile Stress on Upper Edge of Section b

截面 编号	桥例 1			桥例 2		
	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_1/σ_2	σ_3 /MPa	σ_4 /MPa	σ_3/σ_4
1-1	0.665	0.794	0.838	0.666	0.743	0.896
2-2	0.684	0.834	0.820	0.650	0.753	0.863
3-3	0.721	0.838	0.860	0.687	0.785	0.875

由表 4 可知,框架法的计算值略小于实体有限元值,为实体有限元值的 80%~90%。实体有限元值随跨中向支点位置的移动逐渐增大,因此,随着加载位置向支点的移动截面 b 受力更不利。

4.2.3 截面 c

依据横向应力影响线进行最不利加载,可得截面 c 下缘最大横向拉应力,框架法与实体有限元法的计算值如表 5 所示。

表 5 截面 c 下缘横向拉应力

Tab. 5 Transverse Tensile Stress on Lower Edge of Section c

截面 编号	桥例 1			桥例 2		
	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_1/σ_2	σ_3 /MPa	σ_4 /MPa	σ_3/σ_4
1-1	4.976	2.719	1.830	2.773	1.849	1.500
2-2	4.688	2.715	1.727	2.459	1.819	1.352
3-3	5.259	2.665	1.973	2.386	1.797	1.328

由表 5 可知,桥例 1 框架法计算值为实体有限元值的 1.7 倍~2 倍,偏于保守;桥例 2 框架法计算值为实体有限元值的 1.3 倍~1.5 倍,偏于安全;实体有限元值随跨中向支点位置的移动逐渐减小,表明跨中顶板受力最不利。

由于箱梁畸变产生的横向弯曲是反对称的,其对应的横向弯矩也是反对称的,因此,截面 c 对应的畸变横向应力几乎为 0。由图 10 中截面 c 下缘的横向应力影响线不难看出,最不利加载时位于顶板跨中的车轮对截面 c 的横向应力贡献最大,其他车轮所对应的影响线值很小,故其贡献很小;框架模型是基于有效分布宽度进行横向受力分析的,且其影响线与实体模型有所差异,导致采用框架法的计算值偏于保守。桥例 1,2 的腹板间距分别为 8.25, 5.925 m,桥例 1 与桥例 2 相比,其框架模型与实体模型的截面 c 下缘横向应力影响线差异更加明显,故框架法计算值更趋保守。因此,腹板间距较大时,设计中需对框架法计算值进行适当折减。

4.2.4 截面 d

对于单箱双室截面,桥例 2 车辆后轴在左、右室顶板同时加载时,截面 d 上缘将产生最大横向拉应力,框架法与实体有限元法的计算值如表 6 所示。

表 6 截面 d 上缘横向拉应力

Tab. 6 Transverse Tensile Stress on Upper Edge of Section d

截面编号	σ_3 /MPa	σ_4 /MPa	σ_3/σ_4
1-1	0.622	0.548	1.135
2-2	0.649	0.597	1.087
3-3	0.732	0.647	1.131

由表 6 可知:框架法的计算值略大于实体有限元值,偏于安全;实体有限元值随跨中向支点位置的移动逐渐增大,表明随着加载位置向支点的移动截面 d 受力更不利。桥例 2 最不利加载时,截面 d 上缘最大横向拉应力略小于截面 b 上缘最大横向拉应力,表明截面 b 相对于截面 d 受力更不利。

4.3 横隔板对横向受力的影响

为研究横隔板对桥面板横向受力的影响,从空间实体模型中删除跨内相应的横隔板单元后,重新计算各控制截面的最大横向拉应力,进而得到有无横隔板情况下横向拉应力比值(表 7)。

表 7 无横隔板时横向拉应力

Tab. 7 Transverse Tensile Stress Without Diaphragm								
参数	截面编号	桥例 1 截面编号			桥例 2 截面编号			
		a	b	c	a	b	c	d
应力/MPa	1-1	0.522	0.771	2.948	0.590	0.722	1.920	0.537
	2-2	0.496	0.814	2.936	0.593	0.735	1.870	0.590
	3-3	0.555	0.833	2.798	0.606	0.780	1.820	0.646
应力比值	1-1	1.008	0.971	1.084	1.007	0.972	1.038	0.980
	2-2	1.008	0.976	1.081	1.005	0.976	1.028	0.988
	3-3	1.004	0.994	1.050	1.002	0.994	1.013	0.998

由表 7 可知,与有横隔板相比无横隔板时截面 a 横向拉应力增大不到 1%,截面 b 横向拉应力减小不到 3%,截面 c 横向拉应力增大不到 9%,截面 d 横向拉应力减小不超 2%。总体来说,有无横隔板对横向拉应力影响很小。随着加载位置向支点移动,控制截面的应力变化逐渐减小;截面 3-3 由于支点横隔板的影响,其应力与其他截面相比变化较小。

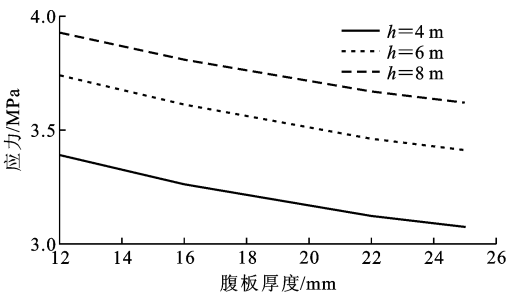
4.4 腹板刚度对横向受力的影响

为研究腹板刚度对桥面板横向受力的影响,以桥例 1 中截面 1-1 为基础,保持顶、底板尺寸不变,变化梁高为 4,6,8 m,腹板厚度为 12,16,22,25 mm,共 12 组截面形式分别建立长度 20 m 简支梁模型,提取最不利加载时截面 c 下缘最大横向拉应力作比较分析,结果如图 12 所示。

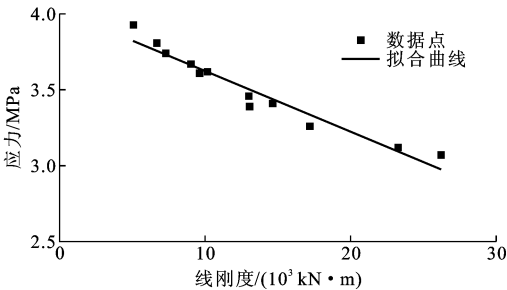
由图 12(a)可知:随着腹板厚度增加,截面 c 下缘横向拉应力逐渐减小;随着梁高增加,截面 c 下缘横向拉应力逐渐增大。由于腹板厚度及梁高变化引起腹板刚度变化,为进一步探究腹板刚度对横向受力的影响,定义腹板线刚度 $i=EI/l$, E , I , l 分别为钢腹板弹性模量、单位波长波形钢腹板惯性矩和钢腹板高度。12 组截面形式腹板的线刚度对应的横向拉应力如图 12(b)所示,可以看出截面 c 下缘最大横向拉应力随腹板线刚度基本呈直线变化,随着波形钢腹板线刚度的增加,顶板跨中截面的横向应力值逐渐减小。

5 结 语

(1)对于悬臂根部截面及腹板内侧截面,框架法的计算值与实体有限元值接近,满足精度要求;对于顶板跨中截面,腹板间距较大时,框架法的计算值偏



(a) 不同腹板厚度及梁高条件下截面c下缘的横向拉应力



(b) 截面c下缘横向拉应力随腹板线刚度的变化

图 12 腹板刚度对横向受力的影响

Fig. 12 Influence of Web Stiffness on Transverse Force

于保守,设计中需对框架法的计算值进行适当折减。

(2)随着加载位置由跨中向支点移动,顶板跨中截面横向应力峰值逐渐减小,悬臂根部截面和腹板内侧截面横向应力峰值有增大趋势。

(3)有无横隔板对桥面板横向受力影响很小,顶板跨中截面横向应力值随波形钢腹板线刚度的增加而线性减小。

参考文献:

References:

[1] 陈宜言. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
CHEN Yi-yan. Design and Construction of Prestressed Concrete Bridge with Corrugated Steel Webs [M]. Beijing:China Communications Press,2009.

[2] 郭金琼,房贞政,郑 振. 箱形梁设计理论[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,2008.
GUO Jin-qiong, FANG Zhen-zheng, ZHENG Zhen. Design Theory of Box Girder [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press,2008.

[3] 方 志,张志田. 钢筋混凝土箱梁横向受力有效分布宽度的试验研究[J]. 中国公路学报,2001,14(1):35-38.
FANG Zhi,ZHANG Zhi-tian. Research on the Effective Distribution Width of Transverse Force of Reinforced Concrete Box Beam[J]. China Journal of Highway and Transport,2001,14(1):35-38.

[4] 方 志,张志田. 钢筋混凝土变截面箱梁横向受力有

- 效分布宽度分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2003,30(6):82-85.
- FANG Zhi,ZHANG Zhi-tian. The Effective Distribution Width of the Transverse Internal Force in R-C Box Girders with Varied Section[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences,2003,30(6):82-85.
- [5] 程翔云. 双室箱梁横向内力计算的有效宽度[J]. 湖南大学学报:自然科学版,1986,13(1):30-35.
- CHENG Xiang-yun. Effective Width in Calculation of Transverse Internal Forces of Box Girders with Twin-cells[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences,1986,13(1):30-35.
- [6] 袁卓亚,李立峰,刘清,等. 波形钢腹板组合箱梁横向内力分析及试验研究[J]. 中国公路学报,2015,28(11):73-81.
- YUAN Zhuo-ya,LI Li-feng,LIU Qing,et al. Analysis and Experimental Study of Transverse Internal Force in Composite Box-girder with Corrugated Steel Webs[J]. China Journal of Highway and Transport,2015,28(11):73-81.
- [7] 刘清. 波形钢腹板组合箱梁横向内力理论及试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.
- LIU Qing. Theoretical and Experimental Study on the Transverse Internal Force of the Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs[D]. Changsha: Hunan University,2009.
- [8] 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.
- [9] 贾慧娟,戴航,张建东. 波形钢腹板组合梁桥横向受力研究[J]. 工程力学,2014,31(12):76-82.
- JIA Hui-juan,DAI Hang,ZHANG Jian-dong. Research on Transverse Internal Forces in Box-girder Bridges with Corrugated Steel Webs[J]. Engineering Mechanics,2014,31(12):76-82.
- [10] 程宏伟. 宽幅波形钢腹板组合箱梁桥横向受力研究[J]. 西安:长安大学,2015.
- CHENG Hong-wei. Research on Transverse Internal Force of Wide Girder Bridge with Corrugated Steel Webs[J]. Xi'an:Chang'an University,2015.
- [11] 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].
- [12] 郑震,郭金琼. 箱形梁桥横向内力计算的计算机方法[J]. 福州大学学报:自然科学版,1995,23(1):60-66.
- ZHENG Zhen,GUO Jin-qiong. A Computer Method of Calculating the Transversal Internal Force in Box Girder Bridge[J]. Journal of Fuzhou University:Natural Science,1995,23(1):60-66.
- [13] 苏巨峰. 多箱室连续梁桥横向受力分析研究[D]. 西安:长安大学,2013.
- SU Ju-feng. Research of Transverse Effect of Multi-box Continuous Girder[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [14] 张华南,韩昀,万水. 多室波形钢腹板 PC 组合箱梁横向受力研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(4):652-657.
- ZHANG Hua-nan,HAN Yun,WAN Shui. Mechanic Characteristics of Multi-cell Box Girder with Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University:Natural Science,2009,28(4):652-657.