

浅谈合成结构——波形钢腹板箱梁桥的设计

刘剑萍¹,正司明夫²,小林 宽³

(1. 日本东方建设株式会社,大阪市 530-0012;2. 日本东方建设株式会社,东京都 102-0093;
3. 日本阪神高速道路公团,神戸市 651-1421)

摘要: 目前,混凝土和钢的合成结构桥梁在日本以及欧美得到了广泛的运用。这类桥梁的特点在于它综合利用了混凝土材料与钢材料各自的特长。主要以日本关西地区阪神高速公路段中正在建设的4跨连续预应力混凝土波形钢腹板箱梁桥为例,介绍这种新型合成桥梁的设计构思和设计方法。

关键词: 波形钢腹板;预应力混凝土;箱形梁;桥梁设计

中图分类号: U448.216;U442.5

文献标识码: A

文章编号: 1671-7767(2002)03-0005-04

1 前言

20世纪80年代初,法国首次设计和建造了以波形钢腹板代替普通的混凝土箱梁桥腹板的新型合成构造桥梁(科尼亚克桥)。这种合成桥梁能够大幅度减轻主梁的自重,从而减轻基础以及下部结构的承载。另外,波形钢板具有极强的抗剪切、抗压曲能力,作为混凝土箱梁桥的腹板,在充分满足腹板力学性能的同时,还能够省去腹板处配置钢筋、设置模板等作业量,提高作业效率。而且,波形钢板纵向伸缩自由的特点使得其纵向刚度可以忽略不计。这样,在施加预应力时,由于波形钢板几乎不对预应力产生抵抗,可以大大提高对混凝土截面的预应力导入效果。综上所述,这种合成桥梁在减少施工量,缩短工期,降低成本,提高效益等方面具有很大的优势。1993年起,日本将这一技术引进至国内的桥梁建设中,并加以推广和开发。目前,日本大力鼓励国内的主要高速公路设计者采用这种新型合成桥梁。本文将日本关西地区阪神高速公路段中正在建设的4跨连续预应力混凝土波形钢腹板箱梁桥——中野高架桥为例,介绍这种新型合成桥梁的设计构思和设计方法。

2 工程概要

中野高架桥采用箱梁与桥墩分离、墩顶设支座的结构形式。全桥的立面布置见图1。 A_1 和 P_4 的桥台两端设有伸缩缝,中间采取连续梁的构造。道路中心线上的桥梁跨度布置为:(48.0+70.5+81.5+50.8)m。

2.1 技术标准

- (1) 设计活载:B活载(日本道路规范);
- (2) 设计行车速度:60 km/h;
- (3) 横截面布置:总宽9.25 m(有效宽度8.45 m);
- (4) 平面曲线: $R=440$ m。

2.2 主梁结构

主梁采用单箱单室波形钢腹板箱形梁和体内、体外预应力体系。支点梁高4.0~4.6 m,跨中梁高2.0~2.2 m,梁高按二次抛物线变化。波形钢腹板采用抗拉强度490 MPa、抗剪强度205 MPa的耐腐蚀钢材,波长1.2 m,波高200 mm,钢板厚度9~19 mm。为了提高整个结构的横向抗变形能力,主梁除支点及体外预应力转向部设有隔墙外,还在纵向不同位置加设了隔墙。主梁截面与波形钢腹板的一般构造见图2。

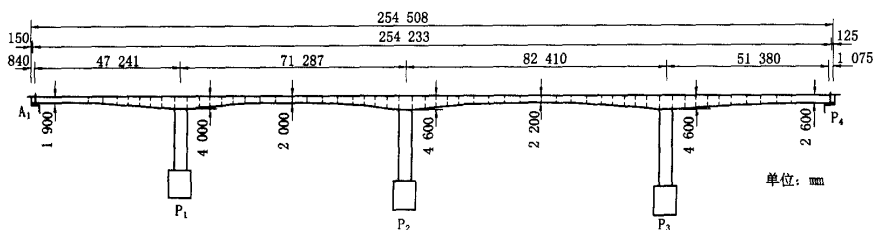


图1 中野高架桥立面布置示意

收稿日期:2002-04-29

作者简介:刘剑萍(1969-),男,1991年毕业于同济大学材料工程系,工学学士,1998年毕业于日本国立广岛大学构造工程系,工学硕士。

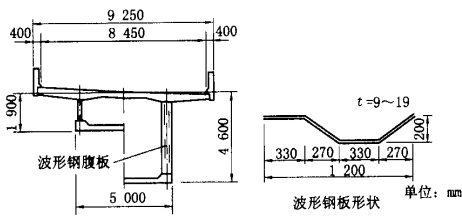


图2 主梁截面和波形钢腹板的一般构造

梁体采用悬臂浇注法施工,0号节段长12 m,在墩架上现浇;其余节段长分别为3.6 m和4.8 m,均在挂篮上悬臂浇注,最后在各个跨中合龙。

2.3 结构计算

主桥纵向计算主要包括悬臂施工,体系转换等施工阶段的计算和使用阶段的计算。施工阶段主要计算荷载为:自重、预应力、混凝土不同龄期的收缩和徐变、施工荷载等。使用阶段则考虑了汽车荷载、冲击荷载、风荷载、温度荷载等作用 and 影响。其中温度计算考虑了结构体系升降温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,主梁温度差 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等。另外,在设计体内、体外预应力时,将体内预应力设计成能够满足恒载的承载能力,体外预应力只担负活荷载的承载。这样,即使在长期运营后,体外钢索出现磨损与断裂时,也可以在夜间停止车辆通行后更换体外钢索,以延长桥梁的使用寿命。

在主桥纵向计算中,主要考虑以下几方面:

(1) 抗弯截面模量

由于波形钢板在纵向自由伸缩的特征,对纵向力几乎不产生抵抗作用。因此在考虑断面系数和计算抗弯截面模量时,可以忽略波形腹板这一部分,只考虑混凝土顶板和底板所构成的几何截面。而由弯矩引起的截面上的应力分布仍按照平截面假定原理进行计算。

(2) 截面抗扭刚度

关于波形钢腹板箱梁桥截面的抗扭刚度的计算,目前还没有明确的定论。各国设计者研究和总结出了许多计算方法。本桥采用了下式(由日本工程师上平等人提出)的计算方法,并且在施工中以及建成后对此进行了实验论证。

$$J_t = \frac{4A_m^2}{\left[\frac{h_1}{n_s t_1 (1+a)} + \frac{b_1}{t_2 (1-a)} + \frac{h_1}{n_s t_3 (1+a)} + \frac{b_1}{t_4 (1-a)} \right]} \quad (1)$$

$$\alpha = 0.400 \frac{h_1}{b_1} - 0.060 \geq 0$$

式中, J_t 为抗扭刚度; A_m 为箱梁的截面积; b_1 为箱体的宽度; h_1 为波形钢腹板的高度; n_s 为钢材与混凝土剪切弹性模量的比值; t 为构件的厚度; α 为修正系数。

(3) 结构横向抗变形能力

与混凝土箱梁桥相比,波形钢腹板箱梁桥在横向较易产生变形。因此,提高结构的横向抗变形能力是一个非常重要的课题。本桥采用有限元法对此问题进行解析,得出在适当位置设置隔墙以保证结构的横向抗变形能力,有限元法解析模型见图3。

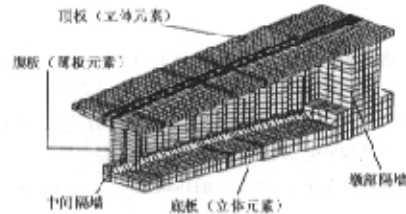


图3 有限元法解析模型

2.4 波形钢腹板的设计

2.4.1 剪应力的计算

波形钢腹板主要承受剪力。本桥在设计时本着安全设计的原则,假定结构所有的剪力都由波形钢腹板承受,而忽略混凝土顶板与底板对剪力的抵抗作用,以此计算出波形钢腹板所需的最小厚度。同时本桥为平面半径 $R = 440\text{ m}$ 的曲线桥,结构在承受弯矩的同时也承受扭矩。因此,在计算波形钢腹板的剪应力时,必须考虑弯矩和扭矩同时作用时产生的弯曲剪应力和扭转剪应力。

2.4.2 合成应力的计算

波形钢腹板不仅承受上述所说的剪应力,同时也承受横向弯矩所引起的弯曲应力。因此,必须对波形钢腹板的合成应力进行计算。本桥用下式对波形钢腹板的合成应力进行了验证:

$$\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_a} \right)^2 + \left(\frac{\tau_b}{\tau_a} \right)^2 \leq 1.2 \quad (2)$$

式中, σ_b 为拉应力; σ_a 为抗拉强度; τ_b 为剪应力; τ_a 为抗剪强度;1.2为安全系数。

2.4.3 压曲强度的计算

波形钢腹板的压曲破坏主要有3种形式。

(1) 局部压曲破坏

波形钢腹板的某一个波段部分出现的压曲破坏现象见图4(a)。本桥波形钢腹板的局部压曲强度按下式进行计算:

$$\tau_{cr}^L = \frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 K \quad (3)$$

式中, τ_{cr}^L 为局部压曲强度, E 为钢材弹性模量; ν 为钢材的泊松比; t 为钢材的厚度; b 为腹板的高度; K 为压曲系数, $K = 5.34 + 4.00(b/a)^2$ (当 $a/b \geq 1$ 时)或 $K =$

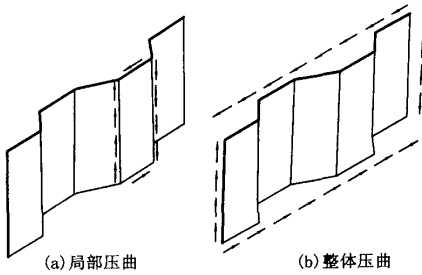


图4 压曲示意

$4.00 + 5.34(b/a)^2$ (当 $a/b \leq 1$ 时), a 为波长。

(2) 整体压曲破坏

波形钢腹板的整体出现的压曲破坏现象见图 4(b)。本桥用下式对波形钢腹板的整体压曲强度进行了计算：

$$\tau_{cr}^G = 36\beta \frac{(EI_y)^{1/4} (EI_x)^{3/4}}{b^2 t} \quad (4)$$

式中, τ_{cr}^G 为整体压曲强度; β 为波形钢板两端的固定度系数; E 为钢材弹性模量; I_y 为 y 轴的惯性矩; I_x 为 x 轴的惯性矩; t 为钢材的厚度; b 为腹板的高度。

(3) 混合压曲破坏

上述两种形式相互同时出现的破坏现象。本桥用下式对波形钢腹板的混合压曲强度进行了计算：

$$\tau_{cr} = \tau_{cr}^L \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{\tau_{cr}^L}{\tau_{cr}^G} \right)^4} \right)^{1/4} \quad (5)$$

式中, τ_{cr} 为混合压曲强度; τ_{cr}^L 为局部压曲强度; τ_{cr}^G 为整体压曲强度。

3 波形钢腹板同混凝土顶板、底板的接合方式

波形钢腹板同混凝土顶板、底板的接合部直接关系到整个桥梁的承载, 是设计此类桥梁中非常关键的环节。接合部的设计必须考虑到钢材和混凝土材料两者之间发生的水平剪切力能否得到有效控制, 以确保桥梁运营时, 两种不同材料之间不会产生相对位移。

本桥在综合许多研究成果的基础上, 独自开发了一种新的接合方式。图 5 为本桥波形钢腹板同混凝土顶板的接合方式。在波形钢腹板的上部焊接一块高 150 mm 的倒 T 形钢, 在倒 T 形钢两侧每隔 125 mm 焊接 $\phi 19$ 的钢销, 同时在倒 T 形钢上方开设 $\phi 60$ 的孔, 孔中贯穿 D25 的螺纹钢筋。

在这种接合方式中, $\phi 19$ 钢销和 D25 贯穿钢筋可以抵抗水平剪切力, 阻止波形钢腹板与混凝土顶板发生相对位移。同时充填在 $\phi 60$ 孔中的混凝土也可视为一种混凝土销, 同样也能抵抗一部分水平剪切力。另外, $\phi 19$ 钢销还能承受作用在横桥向的弯矩。

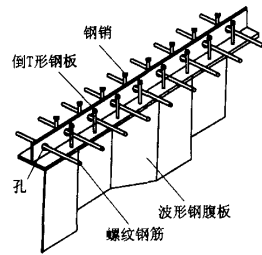


图5 波形钢腹板同混凝土顶板的接合方式

图 6 为波形钢腹板同混凝土底板的接合方式。本桥采取了将波形钢腹板的下部 200 mm 埋设在混凝土底板内的接合方式。同时在埋设部分的波形钢板上凿 $\phi 60$ 的孔, 将 D25 的钢筋贯穿于孔内。另外还在埋设波形钢腹板的下部纵向焊接 2 根接合钢棒。

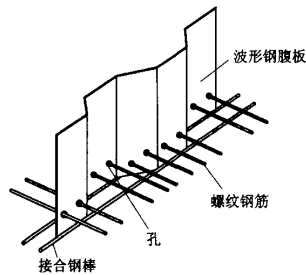


图6 波形钢腹板同混凝土底板的接合方式

在这种接合方式中, 埋在混凝土底板内的波形钢板的斜向部分、在纵向焊接的接合钢棒及 D25 贯穿钢筋都可以抵抗水平剪切力, 阻止腹板与底板发生相对位移。和波形钢腹板同混凝土顶板部的接合方式一样, 充填在 $\phi 60$ 孔中的混凝土也可视为一种混凝土销, 同样也能承担一部分水平剪切力。

上述波形钢腹板同混凝土顶板、底板的接合方式, 在大阪工业大学的实物模型实验中得到了充分论证, 采用此接合方式的本桥, 在施工阶段也未出现任何问题。

4 静载试验

目前本桥竣工在即, 为了验证设计方法的正确性, 确保桥梁投入使用后的安全, 在竣工前特地用满载的大型卡车进行了静载试验。

4.1 加载方法

试验采用 4 辆 250 kN 大型卡车进行加载, 加载位置选择在有最大跨径的 $P_2 - P_3$ 跨处。加载方式为跨中对称加载和偏向加载 2 种方式, 见图 7。测定对象分别为波形钢腹板的剪应力、偏载产生的扭矩所引起的扭转剪应力、结构横向变形的程度及混凝土顶板和底板的纵向应力。将以上的实测值同设计值以及用有限元法得

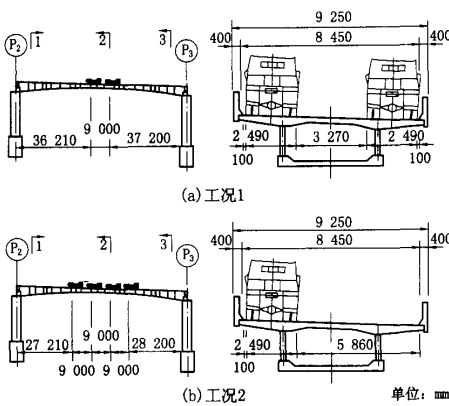


图7 静载试验的加载方法

出的解析值进行比较分析,判断本桥结构设计是否合理。

4.2 试验结果与分析

图8所示为两种加载工况下的波形钢腹板产生的剪应力分布图。从试验结果可以发现,实测值和有限元法解析值(图中简称FEM值)非常吻合,而设计值却略微偏大。这是由于设计时假设所有的剪力都由波形钢腹板承受而实际上混凝土顶板和底板也同时承受了部分剪力所导致的结果。因此,可以认为这样的设计方法是安全可行的。另外,偏向加载时由于扭矩的作用,左右两侧的腹板产生的剪应力也分别不同。通过计算发

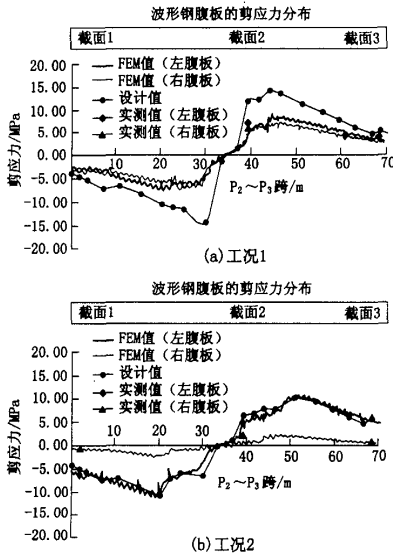


图8 波形钢腹板的剪应力分布

现,采用式(1)得到的设计值和试验值也非常吻合。同时,由于纵向加设了隔墙,横向变形也得到了很好的控制。

在第一种加载方式下也分别测定了混凝土顶板和底板的纵向应力,见图9。实测值与设计值、有限元法解析值都非常一致,说明在纵向计算抗弯截面模量时,忽略波形钢腹板而只考虑混凝土所构成的几何截面的设计方法是正确可行的。

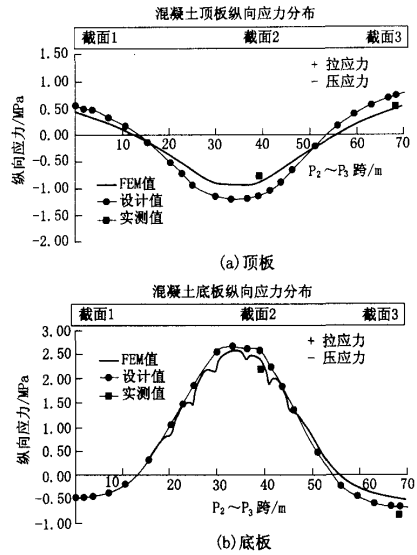


图9 混凝土顶、底板的纵向应力分布(工况1)

5 结语

合成结构桥梁的设计与建设在中国起步较晚,尤其是本文介绍的波形钢腹板箱梁桥在中国还是空白。法、德、日等国已相继建设了数座此种类型的桥梁,施工技术也日臻完善。除了悬臂浇注法,还推出了支梁法、顶推法等施工技术。这种类型的合成桥梁由于具备缩短工期、降低成本、提高效益等多项优点,相信在未来的桥梁建设中会得到大力的推广和应用。希望本文的介绍能推动该类桥型在中国的发展。

参考文献:

[1] 上平.关于波形钢腹板预应力箱梁桥的剪切与扭转的研究.日本预应力混凝土协会,1998.
 [2] 波形钢腹板预应力箱梁桥的设计指南.日本合成构造研究会,1998.