

组合钢板梁的弯扭稳定设计

张春雷^{1,3}, 魏明光^{1,3}, 林友强^{2,3}

[1. 上海市政预制技术开发有限公司, 上海市 200092; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092;
3. 上海高性能组合结构桥梁工程技术研究中心, 上海市 200092]

摘要: 为了合理进行组合钢板梁弯扭稳定设计, 分析了大横梁组合梁、小横梁组合梁、无中横梁组合梁3种组合钢板梁的弯扭稳定性特点, 介绍了一种基于欧洲规范并与我国现行设计规范相协调的弯扭稳定简化设计方法, 并通过2个设计示例进行了演示。所介绍的方法将弯扭稳定问题简化为压杆稳定问题, 具有概念清晰、设计操作方便、适应多种结构形式和荷载布置等特点, 有助于在组合钢板梁设计中合理配置主梁和横向构件, 实现良好的安全性、经济性。

关键词: 组合梁; 组合钢板梁; 整体稳定; 弯扭稳定; 设计方法

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0109-05

Design of Lateral-torsional Stability of Composite Steel-plate Girder

ZHANG Chunlei^{1,3}, WEI Mingguang^{1,3}, LIN Youqiang^{2,3}

[1. Shanghai Municipal Precast Technology Development Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of High Performance Composite Bridges, Shanghai 200092, China]

Abstract: In order to rationally design the lateral-torsional stability of composite steel-plate girders, the characteristics of the lateral-torsional stability of three kinds of composite steel-plate girders such as large crossbeam composite girder, small crossbeam composite girder and non-middle crossbeam composite girder are analyzed. A simplified design method of lateral-torsional stability based on the Eurocode and in accordance with the current design code in China is introduced. Two design examples are used to illustrate the simplified design method. The method simplifies the lateral-torsional stability problem to the stability of a pressure bar. This method has the characteristics of clear concept, convenient design and operation, and suitable for a variety of structural forms and load layout, and is helpful to rationally arrange the main girders and transverse members in the design of composite steel-plate girders to achieve the good safety and economy.

Keywords: composite girder; composite steel-plate girder; integral stability; lateral-torsional stability; design method

0 引言

组合钢板梁是由钢板梁(通常采用工字形截面)和混凝土桥面板通过剪力连接件结合形成的共同受力的受弯桥梁构件。组合钢板梁结构简洁、施工便捷,在桥梁工程中应用广泛。随着组合梁技术的进步,组合钢板梁由早期的多纵梁、多横梁以及密集加劲形式,经过大幅简化后,形成了以双主梁或少主梁为主、加劲构件大幅减少的结构形式,展现出很好的经济性,其适用跨度范围不断双向拓展,在20~150 m的跨度范围都有很强的竞争力^[1]。组合钢板梁作为

受弯构件,其侧向抗弯刚度和抗扭刚度较小,当受压钢翼缘不受约束或受到很少的约束时,存在整体失稳的可能,往往需要设置横向辅助构件来提高其整体稳定性。有效进行整体稳定设计,合理配置主梁和横向构件,对组合钢板梁桥的安全性、经济性都有重要意义。

受弯构件在丧失整体稳定时,只有弯扭失稳一种形式^[2]。弯扭失稳表现为受压翼缘侧向弯曲,也被称作侧向失稳。关于组合梁整体稳定的设计计算方法,目前已有大量研究。陈世鸣^[3]将连续组合梁负弯矩区的侧向稳定等效为弹性地基上的压杆稳定问题,分析了变轴力分布对压杆稳定解的影响,探讨了连续组合梁侧向失稳实用设计方法。蒋丽忠等^[4]针对组合梁整体失稳建立了2种失稳模型,采用能

收稿日期: 2023-12-07

作者简介: 张春雷(1980—),男,博士,正高级工程师,从事桥梁设计工作。

量法对组合梁负弯矩区的侧向稳定性进行探讨,给出了组合梁在弹性受力阶段临界弯矩的计算公式。欧洲规范 EC4(Eurocode 4)采用倒U形框架法,将混凝土板对腹板的约束等效为扭转约束,以此来计算组合梁负弯矩区的整体稳定性。该方法也被我国《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)采用。上述理论公式或规范,均基于一定的截面形式、荷载布置、约束条件假定,实际桥梁计算时往往不符合公式假定条件,使得这些公式难以应用。因此,组合梁桥设计研究中常采用有限元方法计算整体稳定,用板壳和实体单元建立全桥有限元模型,进行弹性稳定或弹塑性极限承载力计算^[5-7]。然而,由于全桥建模和计算工作量大,弹性稳定计算得到的稳定系数影响因素多且无法直接纳入设计规范体系,该方法不适合用作常规设计手段。

欧洲规范 EC3(Eurocode 3)、*Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes*^[8]等文献提出了一种简化的整体稳定计算方法。该方法把复杂的弯扭稳定问题简化为杆件稳定问题,且能适应不同的结构形式、荷载布置,在桥梁设计中具有良好的实用性。本文在分析组合钢板梁结构形式和弯扭失稳特点的基础上,结合我国现行设计规范体系要求,介绍了弯扭稳定简化设计方法,并按简化设计方法对2种典型组合钢板梁给出了设计示例。

1 组合钢板梁弯扭稳定问题分析

1.1 弯扭失稳的力学特征

组合梁出现弯扭失稳的原因,是当钢翼缘受压时,受压翼缘和相邻的一部分腹板犹如轴心压杆一样,随着压应力增大其刚度下降,当刚度下降到一定程度后,即不能保持原有的平衡位形而出现侧向弯曲^[2]。受压翼缘的侧向弯曲受到梁受拉部分的牵制,使梁同时呈现扭转变形。梁的弯扭稳定承载力与梁的截面形式、弯矩分布、荷载作用部位、约束条件等有关。对组合梁弯扭稳定影响较大的约束条件包括支承位置的扭转约束、混凝土桥面板对钢主梁侧向变形和扭转的约束、横梁对主梁扭转的约束。组合钢板梁中,主梁间距、混凝土桥面板厚度、横梁间距和刚度等参数的变化,将对主梁形成不同的约束效果,从而对主梁的弯扭稳定承载力产生不同的影响。

1.2 组合钢板梁的结构形式

组合钢板梁主梁之间通过钢横梁和混凝土桥面

板连接,通常在支点处设置刚度较大的支点横梁。组合钢板梁的标准横断面,根据非支点处横梁设置方式,可分为大横梁、小横梁和无中横梁形式,如图1所示。“大横梁”是指钢横梁与桥面板连接并支撑桥面板,两者结合共同受力;“小横梁”是指横梁与桥面板不连接、不支撑桥面板。大横梁组合梁多采用双主梁形式;小横梁组合梁根据桥宽大小采用双主梁或多主梁形式;无中横梁组合梁多采用多主梁形式。不同形式的组合钢板梁,主梁所受的横向约束不同,弯扭稳定性能也不同。

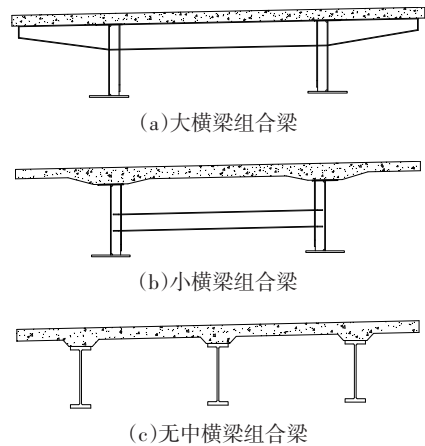


图1 计算模型简图

1.3 组合钢板梁的弯扭稳定

组合钢板梁中,与混凝土桥面板结合的钢翼缘侧向变形受桥面板的约束,不会发生侧向弯曲。未与桥面板结合的钢翼缘,当其受压时可能发生侧向弯曲并引发弯扭失稳。组合钢板梁理论上可能的弯扭失稳包括施工阶段钢梁弯扭失稳、成桥阶段连续梁负弯矩区弯扭失稳,根据结构形式的不同其具体表现也有所不同。

(1)大横梁组合梁的弯扭稳定。大横梁组合梁中,横梁间距通常为4 m。横梁要满足桥面系横向受力要求,刚度较大。因此,大横梁组合梁具有较好的弯扭稳定性,弯扭稳定一般不控制设计。大横梁组合梁通常采用先架设钢梁再施工桥面板的施工步骤,在施工阶段钢梁梁格由于横梁刚度大,具有较好的稳定性,一般不需额外增加支撑。

(2)小横梁组合梁的弯扭稳定。小横梁组合梁中,横梁间距通常为6~8 m。小横梁不直接承受桥面荷载,其主要作用即是对钢主梁提供横向连接,保持施工阶段和成桥阶段主梁的稳定性。小横梁组合梁通常也采用先架设钢梁再施工桥面板的施工步骤。在施工阶段,钢主梁和横梁组成的梁格承受混凝土

板的重量和施工荷载,钢主梁的正弯矩区和负弯矩区都有可能发生弯扭失稳。在成桥阶段,主梁负弯矩区可能发生弯扭失稳。小横梁组合梁中,施工阶段和成桥阶段都应重视主梁弯扭稳定设计,按弯扭稳定要求设置合理的横梁间距和刚度。如果施工阶段横梁设置需求比成桥阶段增加较多,可在施工阶段采用临时支撑来解决主梁弯扭稳定问题。

(3)无中横梁组合梁的弯扭稳定。无中横梁组合梁中,主梁通过支点横梁和桥面板提供的横向连接来保持弯扭稳定。受主梁弯扭稳定的控制,无中横梁组合梁的跨度和主梁间距都受到一定的限制,通常跨度不大于40 m、主梁间距不大于3 m。无中横梁组合梁的施工多采用“预制组合梁”的方式,部分厚度或全部厚度的桥面板与钢梁结合形成整跨组合梁后进行吊装。预制组合梁承受正弯矩时,具有较高的承载力和弯扭稳定性,以简支状态架设时,一般不需要临时支撑。也有无中横梁组合梁采用先架设钢梁再施工桥面板的施工步骤,此时为了保持施工过程中钢梁的弯扭稳定,需要设置临时横向连接。

2 组合钢板梁弯扭稳定简化设计方法

2.1 计算图式

参考 *Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes*^[8],将组合钢板梁钢翼缘当作承受轴向力的杆件,杆件所受的侧向约束,在支点处模拟为刚性支承,在跨间模拟为弹性支承。组合梁弯扭稳定问题被简化为压杆稳定问题,计算图式见图2。

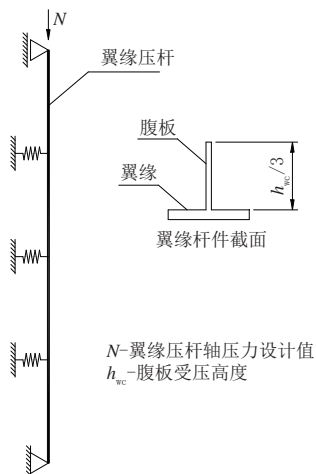


图2 计算图式

计算图式中相关参数的取值和说明如下。

(1)翼缘杆件截面。翼缘杆件截面取为钢翼缘和相邻部分腹板组成的T形截面。T形截面中腹板高度取为组合梁腹板受压部分高度的1/3。

(2)弹性约束刚度。翼缘杆件所受的弹性约束,

由桥面板、横梁、腹板和竖向加劲组成的框架结构提供。组合梁纵向按弹性约束的间距截取得到横向框架,可通过有限元计算得到横向框架对受压翼缘的侧向约束刚度。对于大横梁或小横梁组合梁,弹性约束的间距取为横梁间距,横梁处的竖向加劲和主梁腹板组成框架竖杆,框架竖杆中主梁腹板取有效宽度(加劲两侧各 $15 \cdot \varepsilon \cdot t_w$,见图3)。对于无中横梁组合梁,弹性约束由腹板面外刚度提供,是连续的,可按适当的间距离散得到横向框架,横向框架中的竖杆为腹板,取结构全宽。图3以小横梁组合梁为例介绍约束刚度计算简图,在各翼缘压杆形心处同时施加水平力 F ,计算得到相应侧向位移 δ ,即可得到各翼缘压杆所受的弹性约束刚度 $K = F/\delta$ 。施加水平力时,对相邻主梁的翼缘应考虑方向相同和方向相反两种情况,取两种情况计算刚度的较小值作为弹性约束刚度。

(3)翼缘杆件轴力。翼缘杆件的轴力等于杆件形心处的应力乘以杆件面积。翼缘杆件轴力随组合梁弯矩沿纵向变化,是变轴力杆件,可能某些部位受压、某些部位受拉。采用有限元方法计算时,可通过在节点施加荷载实现轴力变化。

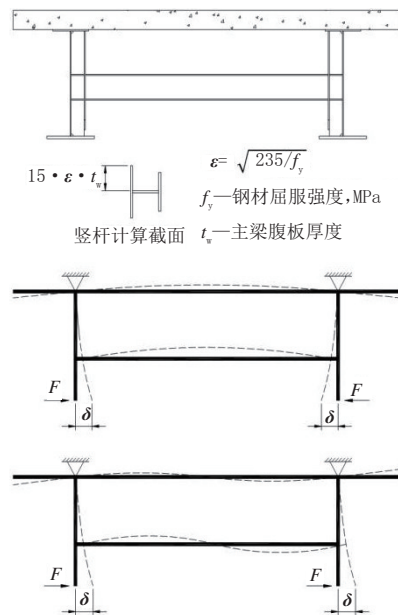


图3 横向框架弹性约束刚度计算简图

2.2 弯扭稳定性检算

组合钢板梁的弯扭稳定性,即简化后的翼缘杆件稳定性,可按下列步骤检算。

(1)按上述计算图式,采用有限元方法进行弹性稳定计算,得到1阶稳定系数 α_{crit} 。

(2)计算屈曲荷载 N_{cr} :

$$N_{cr} = \alpha_{crit} \cdot N_{max} \quad (1)$$

式中: N_{max} 为弹性稳定计算模型中翼缘杆件的最大轴压力。

(3)计算整体稳定系数 χ_{LT} 。参考《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》第7.3.2条的规定,计算过程如下:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{f_y \cdot A_f / N_{cr}} \quad (2)$$

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (3)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{且} \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (4)$$

上述式中: f_y 为钢材屈服强度; A_f 为翼缘杆件的截面积; $\bar{\lambda}_{LT}$ 为换算长细比,当 $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0.2$ 时, $\chi_{LT} = 1.0$; α_{LT} 为缺陷系数,按《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》中的表7.3.2-1、表7.3.2-2取值。

(4)弯扭稳定性检算。组合梁的弯扭稳定性应符合:

$$N_d \leq \chi_{LT} \cdot f_d \cdot A_f \quad (5)$$

式中: N_d 为翼缘杆件最大轴压力设计值; f_d 为钢材强度设计值。

2.3 弯扭稳定简化设计方法的特点

弯扭稳定简化设计方法有以下特点:

(1)概念清晰,设计操作方便。将复杂的受弯构件弯扭稳定问题分解成横向框架弹性约束刚度计算和变轴力杆件弹性稳定计算,计算较为方便。计算过程反映了弯扭稳定的力学原理,能直观地体现主梁刚度、横梁刚度和间距等参数对弯扭稳定的影响,便于设计过程中的调整、比选,实现合理的结构布置。

(2)与现行规范体系相协调。简化设计方法与《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》弯扭稳定计算规定均来源于欧洲规范。两者相比,公式形式一致,简化设计方法用翼缘压杆的轴力检算替代了规范中的主梁弯矩检算。简化设计方法给出了明确的弯扭稳定判别公式,比直接用弹性稳定系数判别结构稳定性更加准确。

(3)适应多种结构形式和荷载布置。简化设计方法能灵活地模拟结构形式和内力分布,适用于各类组合钢板梁结构。对主梁变截面、横梁不等间距、不等刚度等情况都能很好地进行模拟。简化设计方法除了应用于成桥阶段,在施工阶段也能应用。

3 组合钢板梁弯扭稳定设计示例

3.1 小横梁组合梁

某小横梁连续组合梁桥,跨径组合为34.5 m+2×

36 m+3×42 m+2×36 m+34.5 m。采用双主梁小横梁结构,梁宽12.45 m,梁高2.1 m,主梁间距7 m,横梁间距6 m。连续梁中支点部位采用Q420qD钢材,其余部位采用Q345qD钢材。42 m跨支点附近小横梁处横断面见图4。检算42 m跨主梁支点处受最大负弯矩时的弯扭稳定性。简化计算模型和计算结果见图5。

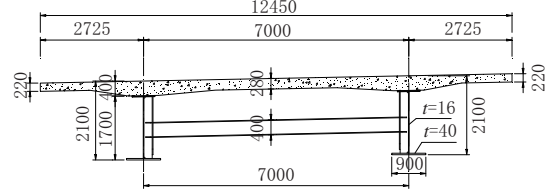


图4 小横梁组合梁横断面(单位:mm)

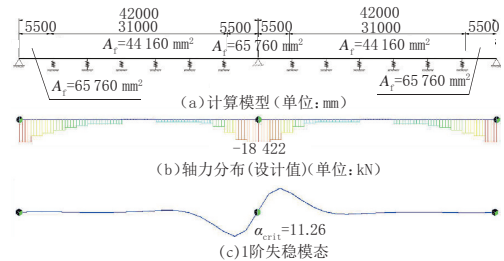


图5 小横梁组合梁弯扭稳定简化计算模型和计算结果

(1)侧向弹性约束刚度计算。横梁位置的横向框架结构由混凝土桥面板、主梁腹板和竖向加劲、钢横梁组成。本桥弹性约束刚度计算结果为37 037 kN/m。

(2)翼缘杆件屈曲荷载计算。建立受支点固定支承和横梁处弹性支承的翼缘压杆模型,模拟中支点负弯矩最大时翼缘杆件实际轴力分布。计算模型和计算结果见图5。计算得到1阶稳定系数为11.26,施加的中支点处翼缘杆件最大轴压力(设计值)为18 422 kN,则翼缘杆件屈曲荷载 $N_{cr} = 11.26 \times 18 422 = 2.07 \times 10^5$ kN。

(3)弯扭稳定性检算。主要中间参数计算结果为: $\alpha_{LT} = 0.49$, $\bar{\lambda}_{LT} = 0.335$, $\Phi_{LT} = 0.589$, $\chi_{LT} = 0.931$ 。翼缘杆件轴压力设计值 $N_d = 18 422$ kN, $\chi_{LT} \cdot f_d \cdot A_f = 0.931 \times 325 \times 65 760 = 19 897 \times 10^3$ N。显然, $N_d < \chi_{LT} \cdot f_d \cdot A_f$,弯扭稳定性满足要求。

3.2 无中横梁型钢组合梁

某无中横梁连续组合梁桥,主梁采用热轧重型H型钢和混凝土桥面板结合形成的预制组合梁,跨径组合为3×32 m+2×28 m+28.4 m。桥宽8.5 m,梁高约1.5 m,主梁间距2.8 m,采用Q355D钢材。32 m跨支点附近横断面见图6。对受力不利的32 m跨边梁,检算其支点处受最大负弯矩时的弯扭稳定性。简化计算模型和计算结果见图7。

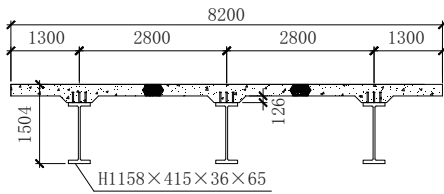


图6 无中横梁型钢组合梁横断面(单位:mm)

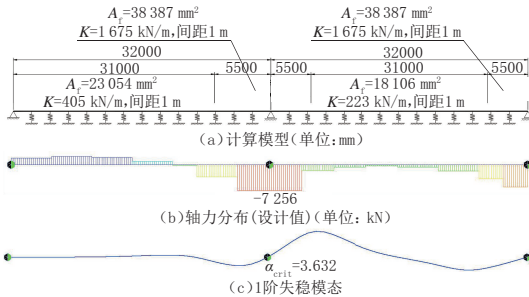


图7 无中横梁型钢组合梁弯扭稳定简化计算模型和计算结果

(1)侧向弹性约束刚度计算。将组合梁沿纵向离散成间距1 m的横向框架结构。横向框架由混凝土桥面板和型钢腹板组成。本桥型钢腹板厚度有36、22、18 mm 3种,对应的弹性约束刚度分别为1 675、405、223 kN/m。

(2)翼缘杆件屈曲荷载计算。建立受支点固定支承和跨间弹性支承的翼缘杆件模型,模拟中支点负弯矩最大时翼缘杆件实际轴力分布。计算模型和结果见图7。计算得到1阶稳定系数为3.632,施加的中支点处翼缘杆件最大轴压力(设计值)为7 256 kN,则翼缘杆件屈曲荷载 $N_{cr} = 3.632 \times 7\,256 = 26\,354$ kN。

(3)弯扭稳定性检算。主要中间参数计算结果为: $\alpha_{LT} = 0.34$, $\bar{\lambda}_{LT} = 0.719$, $\Phi_{LT} = 0.847$, $\chi_{LT} = 0.773$ 。

翼缘杆件轴压力设计值 $N_d = 7\,256$ kN, $\chi_{LT} \cdot f_d \cdot A_f = 0.773 \times 255 \times 38\,387 = 7\,567 \times 10^3$ N。显然, $N_d < \chi_{LT} \cdot f_d \cdot A_f$,弯扭稳定性满足要求。

4 结 语

本文分析了大横梁组合梁、小横梁组合梁、无中横梁组合梁3种组合钢板梁的弯扭稳定性特点,介绍了一种将弯扭稳定问题简化为压杆稳定问题的简化设计方法,并通过2个设计示例进行了演示。弯扭稳定简化设计方法概念清晰、设计操作方便、与现行规范体系相协调,能适应多种结构形式和荷载布置,便于设计应用,有助于在组合钢板梁设计中合理配置主梁和横向构件,实现良好的安全性、经济性。

参考文献:

- [1] 邵长宇. 组合结构桥梁的发展与应用前景[J]. 城市道桥与防洪, 2016(9): 11-15.
- [2] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [3] 陈世鸣. 连续组合梁侧向失稳的弹性地基压杆稳定解[J]. 工业建筑, 1997(2): 30-33.
- [4] 蒋丽忠, 李兴. 钢-混凝土组合梁侧向稳定承载力[J]. 铁道科学与工程学报, 2006(6): 14-18.
- [5] 苏庆田, 胡一鸣, 徐晨, 等. 整体预制钢-混凝土组合梁桥合理结构研究[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(2): 93-100.
- [6] 龚翔箭. 中小跨径钢板组合梁桥成桥过程稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [7] 景东. 工字型组合梁荷载分配特性及横向稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [8] VAYAS I, ILIOPOULOS A. Design of steel-concrete composite bridges to Eurocodes[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

