

Study on the Mechanical Behavior of a New Type of Thin-Walled Steel Tube-Steel Plate Composite Web

Zhi-Hui Chen

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan
Email: chenzh_luckdog@163.com

Received: Nov. 27th, 2019; accepted: Dec. 11th, 2019; published: Dec. 18th, 2019

Abstract

In contrast with corrugated steel webs, a new type of thin-walled steel tube-steel plate composite webs is proposed in the paper. The theoretical analysis shows that prestressing, shrinkage, creep, and temperature changes in concrete flanges have little effect on the thin-walled steel tube-steel plate composite webs which are also exhibited in corrugated steel webs, due to the reduction of stiffness result from deformation of steel tube. Meanwhile, the composite steel web with thin-walled steel tube-steel plate composite web is simple in construction, which avoids the complex spatial curve weld and pressing of corrugated steel plate, and thus there should be a reduction in the difficulty and cost of construction. The comparative analysis also shows that the composite web has the same steel consumed index as that of corrugated steel webs based on the same stiffness index. This paper preliminarily proves that this new type of thin-walled steel tube-steel plate composite steel web is reasonable and economical.

Keywords

Steel and Concrete Composite Bridges, Corrugated Steel Webs, Thin-Walled Steel Tube-Steel Plate Composite Web, Longitudinal Stiffness

一种新型薄壁钢管-钢板组合式钢腹板力学行为研究

陈志辉

中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都
Email: chenzh_luckdog@163.com

收稿日期: 2019年11月27日; 录用日期: 2019年12月11日; 发布日期: 2019年12月18日

摘要

不同于波形钢腹板, 本文提供了一种新型的薄壁钢管-钢板组合式钢腹板。理论分析表明, 通过钢管的变形可以降低此类钢腹板的纵向综合刚度, 以达到波形钢腹板相同的效果, 即降低钢腹板对钢-混组合箱梁桥中混凝土顶底板的约束作用, 减小混凝土顶底板预应力、收缩、徐变以及温度作用的影响。与此同时, 薄壁钢管-钢板组合式钢腹板构造简单, 避免了复杂的空间曲线焊缝和波形钢板的压制, 可以有效降低腹板的加工难度和成本。对比分析还表明, 薄壁钢管-钢板组合式钢腹板在相同刚度指标下, 用钢量指标与波形钢腹板相当。本文初步证明这种新型的薄壁钢管-钢板组合式钢腹板具有一定的合理性和经济性。

关键词

钢-混组合桥, 波形钢腹板, 薄壁钢管-钢板组合式钢腹板, 纵向刚度

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

平直钢腹板 PC 组合箱梁桥因钢腹板平面内刚度大, 导致混凝土顶底板在纵向预应力和收缩徐变作用下受到较大的约束, 降低了纵向预应力的效率; 同时导致钢腹板承受较大的纵向轴压力, 影响其屈曲稳定性。为此, 1975 年法国的 Campenon Bernard 公司提出了以波形钢腹板代替平直钢腹板的构想, 并于 1986 年建造了世界上第一座波形钢腹板 PC 组合箱梁桥—Cognac 桥[1]。这类桥梁最主要的特点是利用了波形钢腹板的褶皱效应, 减小了钢腹板的纵向刚度及其对混凝土顶底板的约束作用, 从而极大地提高了纵向预应力的效率, 而钢腹板的折叠形状又提高了腹板的剪切屈曲强度[2] [3] [4], 与此同时, 还解决了传统混凝土腹板开裂的问题, 且具有造型美观、结构轻盈等特点, 具有较高的桥梁美学价值。所以一经提出, 便迅速得到了世界各国桥梁工程界的认可, 形成了一种新型的、结构受力更合理并独具一格的钢-混凝土组合桥结构—波形钢腹板 PC 组合箱梁桥。

目前波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的设计及施工技术已发展相当成熟, 尤其在日本进行了大量的工程建设实践, 其已建和在建的此类桥梁已超过 300 座。而自 1998 年起, 我国东南大学、同济大学、长安大学、西南交通大学、哈尔滨工业大学、福州大学、西安市市政设计研究院、河南省交通规划勘察设计院等科研院所开启了对波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的研究、设计与建造工作。在 2005 年, 我国建成了国内第一座波形钢腹板 PC 组合箱梁桥—江苏淮安长征桥[5], 并在随后的十几年内又相继建造了郟城黄河公路大桥、桃花峪黄河大桥、深圳南山大桥、郑州朝阳沟大桥等超过百余座极具代表性的波形钢腹板 PC 组合箱梁桥。从建成第一座波形钢腹板 PC 组合箱梁桥至今十余年时间内, 这类桥梁在我国的发展速度之快在桥梁工程建设领域实属罕见, 究其原因在于这类桥梁具有结构轻盈、造型优美、受力合理、抗震性能好等突出的优点, 才成为了我国近年来大力推广发展的新型桥梁结构形式, 并逐步制定和规范相关的技术标准[6] [7]。

波形钢腹板利用凹凸波形在偏心轴向力作用下存在的弯曲变形远大于轴向压缩变形和剪切变形的特点, 减小了钢腹板的纵向水平刚度, 同时折叠成型的波形钢腹板又具有了较大的面外刚度, 改善了腹板

的面外屈曲性能，节省了腹板加劲肋的布置。理论分析表明，波形钢腹板存在的弯曲变形，使其纵向刚度减小至一般的平直钢板的几分之一，以至于可以完全忽略不计[8]。因此，在现有的一些技术规程中[6]，都假定波形钢腹板不承受轴向力，纵向弯曲时忽略波形钢腹板的纵向弯曲作用，弯矩仅由混凝土顶、底板的桁架作用承担。

但是，波形钢腹板利用突出的波折形减小其纵向刚度的同时，也导致其剪切刚度的降低，既有的研究表明，波形钢腹板的等效剪切模量近似由下式确定[9]：

$$G_{eq} = \frac{(b_w + d_w)G_s}{(b_w + d_w/\cos\alpha)} \quad (1)$$

式中： G_s 为材料的剪切模量； b_w 和 d_w 分别为波形钢腹板的平直长度和斜段水平投影长度； α 是腹板斜段与平直段之间的夹角。

从式(1)可知，由于波折形状的存在，显著降低了腹板的剪切刚度，导致腹板在剪力作用下发生不可忽略的剪切变形，进而导致梁体的变形增大，既有的一些研究表明[10] [11]，波形钢腹板剪切变形导致波形钢腹板 PC 梁的变形增大可达到 10%~40%。因此，此类桥梁在对于梁体变形有严格限制要求的轨道交通等领域应用时，将显著增加梁体高度，对波形钢腹板 PC 箱梁桥所具有的经济性和桥梁美学性造成一定程度的影响，尤其在大跨度桥梁中的应用时，这种影响更加显著，甚至随着梁高的增加，利用波形腹板达到提高剪切屈曲强度的作用也将被抵消。这样，在工程实践时因波形钢腹板的剪切屈曲稳定性问题突出，又不得不采取相应的措施。

其次，如图 1 所示，目前波形钢腹板大多采用模压法或冲压法冷成型加工制作，需要用到专用的模压或冲压设备，制作成本高，这是制约该类桥梁加工效率和经济性的主要因素。

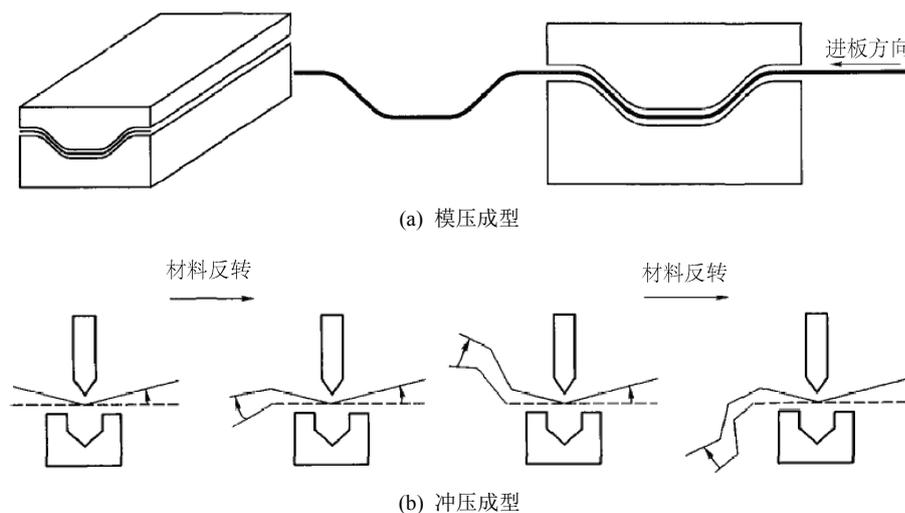


Figure 1. Cold forming of corrugated steel webs
图 1. 波形钢腹板冷成型[12]

此外，波形钢腹板在面外形成连续变化的折线后，还将增加腹板接长以及腹板与翼缘板的焊接施工难度，同时折线间形成大量的隐蔽折角易积留杂物，增加钢腹板自身的防腐和养护难度。而在大跨度变高梁的应用中，波形钢腹板的下缘随梁高曲线变化形成更加复杂的空间曲线，这样使得腹板的剪裁、腹板与下翼缘的焊接作业更加复杂，而在承受动活载的桥梁中，这些焊缝的质量和疲劳性能控制又至关重要，无疑会极大地提高施工难度和施工成本。因此，在现有的一些工程实践中，为了尽量规避此类工程难度，

在跨度不大于 60 m 时, 波形钢腹板 PC 箱梁桥通常都做成等高梁, 对其美观性和工程材料用量均有影响。

考虑到现有的波形钢腹板具有这些技术缺点或难点, 本文拟提出一种新型钢管-钢板组合式钢腹板可作为现有波形钢腹板的替代形式。其主要特点是: 首先, 利用常用的钢管和钢板简单焊接组合, 可以显著降低施工制作难度, 具有良好的经济性和可操作性; 其次, 利用钢管在纵向力作用下的屈曲变形可达到波形钢腹板所具有的纵向刚度小、有效提高纵向预应力效率的目的; 最后, 与波形钢腹板相比, 此类组合式腹板的钢管兼具钢板的加劲作用, 可以提高钢板的剪切屈曲强度和稳定性。文章基于基本力学理论分析了钢管-钢板组合式钢腹板的力学行为, 表明这类腹板用于钢-混组合桥的合理性和经济性。

2. 钢管-钢板组合式腹板技术方案

如图 2 所示, 本文提出的薄壁钢管 - 钢板组合式腹板是由一系列薄壁钢管和平直钢板按照一定间距对接焊接后串联而成。该构造方案焊接接长焊缝、腹板与翼缘板的焊缝都是简单的对接焊缝或直角焊缝, 可以明显降低焊接施工的难度, 而选用的钢板和钢管都可以是标准的成熟制品, 可以省去专用设备的模压或冲压流程, 降低加工制作成本。这里所采用的薄壁钢管可以是圆形、方形等各种不同形式的轧制品, 达到不同的折叠效果, 体现灵活的美观性。

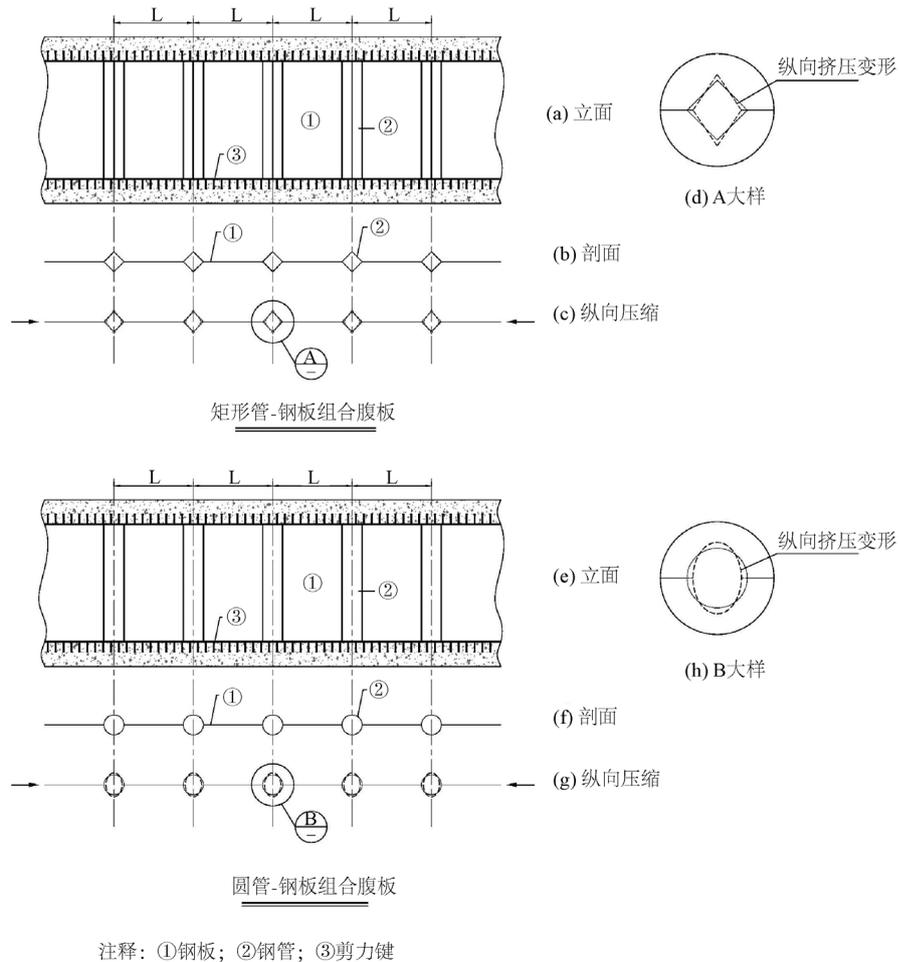


Figure 2. Structure Chart of tube-steel plate composite web

图 2. 钢管-钢腹板组合构造图

图 2 中所示, 在原平直钢腹板中按照一定间距插入一定数量的薄壁钢管, 在垂直于管壁的纵向力作用

下，薄壁钢管会产生屈曲变形(图 1(d)和图 1(h))，使得整个串联后的组合式钢腹板纵向刚度降低，从而达到减小钢腹板对组合箱梁桥混凝土顶底板的约束作用，降低顶底板混凝土部分的收缩徐变及温度作用对腹板的影响，提高纵向预应力效率的目的。

另外，在该类组合式腹板中设置的薄壁钢管还可以对平钢板起着加劲的作用，省去了加劲肋的布置以提高了钢板的剪切屈曲强度和稳定性。

3. 技术可行性分析

3.1. 纵向刚度

根据结构力学知识，可以理论分析不同类型钢腹板的纵向刚度。取长度 L 、高度 H 相同的不同腹板为研究对象，分析钢板厚度均为 t 时的纵向受压特性，这里假定钢管直径为 d ，壁厚为 δ 。不同类别的钢腹板的计算示意图如图 3 所示。

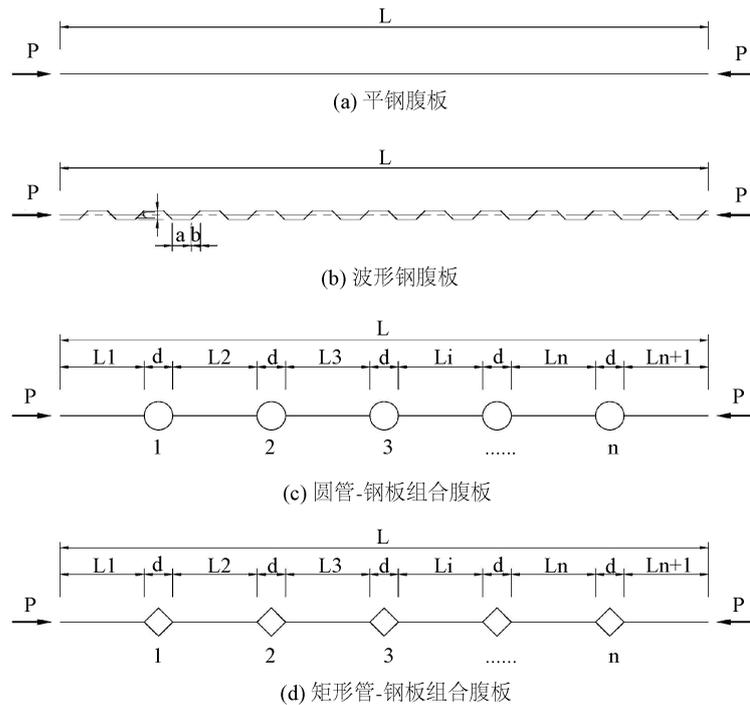


Figure 3. Simplified calculation models of steel webs

图 3. 钢腹板简化计算模型

1) 平钢腹板

将平钢腹板作为对比的参照对象，可知一段长度为 L 的钢腹板的纵向压缩刚度为：

$$K_a = \frac{E_s H t}{L} \tag{2}$$

式中： E_s 为钢板的弹性模量， L 、 H 和 t 分别为研究的钢腹板的长度、高度和腹板厚度。

2) 波形钢腹板

对于波形钢腹板可以选取一个标准单元进行分析[8]，在纵向力作用下单元波形钢腹板的受力及弯矩如图 4 所示。

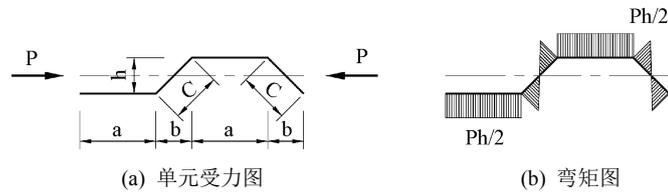


Figure 4. Force diagram and moment diagram of corrugated steel web element

图 4. 单元波形钢腹板受力及弯矩图

相对于弯曲变形而言，钢板的轴向和剪切变形较小，为简化，这里忽略不计。可以得到一个标准单元的波形钢腹板在纵向作用力下的纵向变形为：

$$\Delta_{b1} = \frac{(6a + 2c)Ph^2}{E_s Ht^3} \tag{3}$$

一段长度为 L 的波形钢腹板近似含有 $L/2(a+b)$ 个标准单元的波形钢腹板节段，相互之间为串联关系，串联后的钢腹板总体变形为：

$$\Delta_b = \frac{PLh^2}{E_s Ht^3} \cdot \frac{3a+c}{a+b} \tag{4}$$

那么长度为 L 的波形钢腹板的纵向受压刚度为：

$$K_b = \frac{P}{\Delta_b} = \frac{(a+b)E_s Ht^3}{(3a+c)Lh^2} \tag{5}$$

与平钢腹板的刚度比为：

$$n_{ab} = \frac{K_b}{K_a} = \frac{(a+b)t^2}{(3a+c)h^2} \tag{6}$$

3) 薄壁圆管 - 钢板组合腹板

如图 3(c)所示，此类组合腹板由 n 个圆管和 $n+1$ 块钢板串联而成，在纵向力作用下组合钢腹板的总变形分为两部分，第一部分为钢板的纵向压缩变形，第二部分为钢管受对称力作用下的挤压变形。其中 $n+1$ 块串联钢板的变形为：

$$\Delta_1 = \frac{P \sum L_i}{E_s Ht} = \frac{P(L - nd)}{E_s Ht} \tag{7}$$

圆管在对称集中力作用下的轴力偏离理想拱轴线，伴随轴向变形的还有弯曲变形和剪切变形，根据对称性可以分析得到圆管的弯矩图如图 5 所示。

那么由集中力引起的单个圆管的纵向挤压总变形可以由下式计算确定：

$$\Delta_{2c} = \sum \int \left(\frac{N\bar{N}_1}{E_s A} + \frac{M\bar{M}_1}{E_s I} + \frac{kQ\bar{Q}_1}{G_s A} \right) ds \tag{8}$$

式中： N 、 M 、 Q 分别为对称力对 P 引起的圆管沿管壁的轴力、弯矩和剪力； \bar{N}_1 、 \bar{M}_1 、 \bar{Q}_1 分别为单位力对引起的圆管沿管壁的轴力、弯矩和剪力。薄壁钢管的横截面可简化视为矩形截面， $k=1.2$ ， $A=H\delta$ ， $I=H\delta^3/12$ ，对于薄壁钢管， I 是 A 的高阶小量，钢管的变形以弯曲变形为主，这里为了简化，忽略轴向变形和剪切变形，将不会对计算结果造成量级变化的影响，则 n 个串联圆管的变形为：

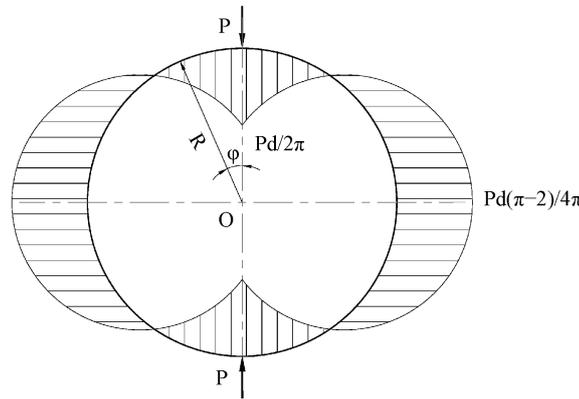


Figure 5. Bending moment diagram of tube
图 5. 钢管弯矩图

$$\Delta_{2c} = \sum_{i=1}^n \int \frac{M\overline{M}_1}{E_s I} ds = \frac{6nPd^3}{E_s H\delta^3} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{\sin \varphi}{2} \right) d\varphi = \frac{3(\pi^2 - 8)nPd^3}{8\pi E_s H\delta^3} \quad (9)$$

薄壁圆管-钢板组合腹板总变形为:

$$\Delta_c = \Delta_1 + \Delta_{2c} = \frac{PL}{E_s Ht} \left[1 - \frac{nd}{L} + \frac{3(\pi^2 - 8)ntd^3}{8\pi\delta^3 L} \right] \quad (10)$$

薄壁圆管-钢板组合腹板纵向受压刚度和与传统平钢腹板的刚度比分别为:

$$K_c = \frac{P}{\Delta_c} = \frac{E_s Ht}{L} \cdot \frac{8\pi(L - nd)\delta^3 + 3(\pi^2 - 8)ntd^3}{8\pi L\delta^3} \quad (11)$$

$$n_{ac} = \frac{K_c}{K_a} = \frac{8\pi L\delta^3}{8\pi(L - nd)\delta^3 + 3(\pi^2 - 8)ntd^3} \quad (12)$$

4) 薄壁方管 - 钢板组合腹板

类似于圆管,对对称性分析后可以得到方管在对称集中力对作用下的弯矩图如图 6 所示。图 3(d)所示,此类组合钢腹板同样有一系列钢管和钢板串联而成,变形同样分为两部分,其中 $n+1$ 块串联钢板的变形由式(7)确定,忽略轴向和剪切变形后, n 个串联方管的变形为:

$$\Delta_{2d} = \sum_{i=1}^n \int \frac{M\overline{M}_1}{E_s I} ds = \frac{\sqrt{2}nPd^3}{8E_s H\delta^3} \quad (13)$$

与钢板串联后的总变形为:

$$\Delta_d = \Delta_1 + \Delta_{2d} = \frac{PL}{E_s Ht} \left(\frac{L - nd}{L} + \frac{\sqrt{2}ntd^3}{8L\delta^3} \right) \quad (14)$$

薄壁方管 - 钢板组合腹板纵向受压刚度和与传统平钢腹板的刚度比分别为:

$$K_d = \frac{P}{\Delta_d} = \frac{E_s Ht}{L} \cdot \frac{8L\delta^3}{8(L - nd)\delta^3 + \sqrt{2}ntd^3} \quad (15)$$

$$n_{ad} = \frac{K_d}{K_a} = \frac{8L\delta^3}{8(L - nd)\delta^3 + \sqrt{2}ntd^3} \quad (16)$$

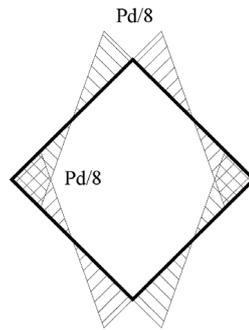


Figure 6. Bending moment diagram of square tube

图 6. 方管弯矩图

取长度 $L = 30\text{ m}$ 的钢腹板进行对比计算，钢板厚度 $t = 16\text{ mm}$ ，波形钢腹板分别采用 JT/T 748 规范中的 1200 型和 1600 型两种类型；这里对比时，钢管 - 钢板组合腹板的钢管采用符合国家标准的轧制钢管，如：在 $L = 30\text{ m}$ 范围内设置 $n = 14$ 个直径 $d = 500\text{ mm}$ ，壁厚 $\delta = 8\text{ mm}$ 的钢管(间隔 $L_i \approx 1.48\text{ m}$)，或 $n = 14$ 个 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的矩形方管(间隔 $L_i \approx 1.47\text{ m}$)。计算得到不同类型钢腹板与相同长度的传统平钢腹板的纵向刚度之比如表 1 所示。

Table 1. Longitudinal stiffness ratios of steel webs

表 1. 不同钢腹板纵向刚度比

钢腹板类型	刚度比 n
平钢腹板	1
1200 型波形钢腹板	1/345
1600 型波形钢腹板	1/406
薄壁圆管-钢板组合腹板	1/408
薄壁方管-钢板组合腹板	1/468

计算表明，与波形钢腹板类似，薄壁钢管 - 钢板组合腹板同样可以减小腹板的纵向刚度，达到减小钢腹板对混凝土顶底板的约束作用、提高纵向预应力效率的目的。

3.2. 经济性

与现有的波形钢腹板相比，在相同刚度指标条件下，薄壁钢管 - 钢板组合式腹板的钢材用量指标相当，如表 2 所示。所不同的是，薄壁钢管 - 钢板组合式腹板不仅能显著降低钢腹板剪裁和焊接的施工难度，而且所采用的钢管可以是现有成熟的轧制制品，市场推广度高，可以避免采用专用设备进行钢板的模压或冲压制作，其加工成本也将显著降低。

Table 2. Comparison of economic indexes of steel webs

表 2. 不同钢腹板经济性指标对比

钢腹板类型	用钢量(kg/m)	用钢量/刚度指标
1200 型波形钢腹板	137.6	0.399
1600 型波形钢腹板	134.3	0.331
薄壁圆管 - 钢板组合腹板	141.6	0.347
薄壁方管 - 钢板组合腹板	137.5	0.294

4. 结论与建议

本文对提出的新型钢管-钢板组合式钢腹板进行了力学的理论分析。理论分析表明,在纵向力作用下,钢管发生压屈变形,使得整个串联后的组合式钢腹板纵向刚度降低,采用常用的国家标准规格的钢管,整个薄壁钢管-钢板组合腹板的纵向刚度可与目前常用的波形钢腹板相当。因此可以预见,在应用于钢-混组合桥时,由于腹板具有较小的纵向刚度,可以达到减小腹板对混凝土顶底板的约束作用,从而提高纵向预应力效率,降低混凝土收缩、徐变及温度作用对钢腹板的影响的目的。

另外,在具有相同刚度指标时,薄壁钢管-钢板组合腹板与波形钢腹板的用钢量指标相当,具有较好的经济性。与此同时,由于薄壁钢管-钢板组合腹板构造简单,不需要专用设备的压制加工,避免了复杂的空间曲线焊缝和剪裁,可以显著降低施工制作的难度,进一步降低施工成本。综上,表明这类腹板用于钢-混组合桥的合理性和经济性,是一种值得进一步研究的结构形式。

为进一步促进薄壁钢管-钢板组合腹板的应用和发展,建议对此类钢腹板的剪切刚度、屈曲强度等做进一步的理论和试验研究,以便为其工程应用提供坚实的理论依据。

参考文献

- [1] Cheyrezy, M. and Combault, J. (1996) Composite Bridges with Corrugated Steel Webs-Achievements and Prospects. Symposium, Mixed Structures Including New Materials, Brussels. *LABSE Reports*, **60**, 479-484.
- [2] Gil, H., Lee, S., Lee, J., *et al.* (2005) Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs for Bridges. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **11s**, 473-480. <https://doi.org/10.3141/trr.11s.5u2h106065984433>
- [3] Elgaaly, M., Hamilton, R.W. and Seshadri, A. (1996) Shears Strength of Beams with Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering*, **122**, 390-378. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:4\(390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(390))
- [4] 聂建国, 朱力, 唐亮. 波形钢腹板的抗剪强度[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 97-109.
- [5] 徐强, 万水. 波形钢腹板 PC 组合箱梁桥设计与应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [6] DB 44/T 1393-2014 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥设计与施工规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [7] DB41 T643-2010 公路波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [8] 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.
- [9] Johnson, R.P., Ma, F. and Cafolla, J. (1997) Corrugated Webs in Plate Girders for Bridges. *Processing of International Civil Engineering Structures & Buildings*, **122**, 157-164. <https://doi.org/10.1680/istbu.1997.29305>
- [10] Khalid, Y.A., Chan, C.L., Sahari, B.B. and Hamouda, A.M.S. (2004) Bending Behavior of Corrugated Web Beams. *Journal of Materials Processing Technology*, **150**, 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.042>
- [11] Elgaaly, M., Seshadri, A. and Hamilton, R.W. (1997) Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering*, **123**, 772-782. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:6\(772\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:6(772))
- [12] JT/T 784-2010 组合结构桥梁用波形钢腹板[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.