

波形钢腹板 PC 组合箱梁纯扭作用下 抗扭承载力计算模型

丁勇*, 江克斌, 周寅智, 杨建奎

(解放军理工大学 野战工程学院, 南京 210007)

摘要:以扭转理论和固定角软化桁架模型为基础, 推导了纯扭作用下波形钢腹板 PC 组合箱梁的抗扭承载力计算模型。该模型针对组合箱梁极限状态时, 波形钢腹板处于屈服和未屈服状态两种情况, 分别建立了剪应变连续与剪力流连续方程, 模型同时考虑了不同位置预应力筋对抗扭承载力的不同作用。通过四根试验梁抗扭承载力理论计算结果与试验数据的对比分析, 结果表明本文提出的计算模型不仅能够有效的计算抗扭承载力, 还能计算出混凝土开裂后的扭矩—扭率曲线。

关键词:波形钢腹板; 承载力; 纯扭; 固定角软化桁架模型; 扭矩—扭率曲线

中图分类号: TU398+.9 **文献标志码:** A doi:10.7511/jslx201301023

1 引言

波形钢腹板 PC 组合箱梁因腹板抗剪强度高、预应力效率好及自身重量轻等优点已逐渐应用于结构工程、桥梁工程等土木建筑领域^[1,2]。该类结构的最早工程应用是在 1986 年法国修建的 Cognac 桥上^[3], 随后学者们对其进行了广泛的研究, 这些研究大部分集中于抗弯和抗剪性能方面^[4-9]。1986 年, Briassoulis^[4]把波形钢腹板当成正交异性钢板来处理, 推导了其弯曲刚度和抗剪刚度。Elgaaly 等^[5,6]通过试验和有限元的方法对其抗弯性能进行了研究。波形钢腹板的抗剪屈曲模式和屈曲强度计算公式到目前为止已有大量的研究文献^[7,8]。相对于抗弯性能和抗剪性能而言, 波形钢腹板 PC 组合箱梁的抗扭性能研究得还不是很多。李宏江对波形钢腹板箱梁的扭转与畸变进行过分析^[9], 周绪红通过试验方法对波形钢腹板 PC 箱梁的扭转性能作过研究^[10], 但是他们的研究工作都仅限于弹性范围内。随着科学技术和计算理论的发展, 极限状态法被广泛的应用于设计计算中, 这就要求对结构的极限承载力有更多的研究。Mo 在 2000 年对波形钢腹板 PC 组合箱梁纯扭作用下的抗扭承载力进行过理论分析和试验研究^[11,12]。

正如文献[13]所指出的那样, M_o 在理论分析中不合理地将截面刚性转动假设等价于波形钢腹板与混凝土翼板的剪应变相等。实际上, 由截面刚性转动并不能直接得出波形钢腹板剪应变与混凝土翼板剪应变相等的结论。针对于此, 文献[13]基于截面剪力流连续条件(即波形钢腹板断面上的剪力流与混凝土顶、底板断面上的剪力流相等), 推导了组合箱梁的抗扭承载力计算模型。但是, 根据文献[13]的观点, M_o 试验中当腹板厚度较薄时($t_w = 1.5 \text{ mm}$)组合箱梁的极限扭矩远大于波形钢腹板的屈服扭矩(前者约为后者的 1.5 倍)这一试验现象^[11]并不能得到很好的解释。当波形钢腹板屈服后, 其剪应力将大致维持在屈服应力水平不变, 从而导致由剪应力乘以厚度得到的剪力流也将维持不变。如果按照文献[13]的观点, 认为波形钢腹板断面上的剪力流与混凝土顶、底板断面上的剪力流相等, 则混凝土顶、底板断面上的剪力流也将维持不变。那么组合箱梁为什么在截面剪力流不增加的情况下还能继续承载呢? 对此问题, 文献[13]并未给出合理的解释。

2 已有分析方法及其不足

(1) M_o 方法

文献[13]对 M_o 方法进行了比较全面、细致的分析, 对其不合理的地方作了一定的修正。限于篇幅, 在此本文不再重述。

收稿日期: 2011-10-14; 修改稿收到日期: 2012-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金(51178458)资助项目.

作者简介: 丁勇* (1985-), 男, 博士生

(E-mail: pla_yong@163.com).

(2) Nie 方法

文献[13]基于截面剪力流连续条件,推导了组合箱梁的抗扭承载力计算模型,下面对其主要观点作一简要介绍并加以分析。在计算抗扭承载力时,文献[13]主要用到以下三个方程:

$$T = 2A_0q, A_0 = b(h - t_{de}) \quad (1, 2)$$

$$q = \tau_{ti} t_{de} = \tau_w t_w \quad (3)$$

式中各符号意义参见文献[13]。

当波形钢腹板屈服后, τ_w 将维持 τ_y 的数值不变, t_w 是常数, 这样 q 也将维持常数不变; 从式(1~3)可以看出, 由于 b, h 为截面常数, 因此如果想使 T 不断增大, 则 t_{de} 必须不断减小, 这显然与随着外扭矩的不断增大, 剪力流区域是不断扩大的客观现象不太相符。

虽然文献[13]的计算模型能够比较准确的预测极限扭矩(计算值与试验值之比为 1.010, 标准差为 0.043), 但其计算得到的扭矩—扭率曲线却与试验曲线有较大差别^[13], 试验曲线呈现的是不断缓慢上升的一种趋势, 而文献[13]中得出的曲线趋势是较早的达到极限扭矩之后一直保持不变。这主要是因为文献[13]中, 当波形钢腹板屈服后, 仍然按截面剪力流连续条件处理造成的。

3 抗扭机理

实际上, 由波形钢腹板屈服后组合箱梁还能继续承载的客观试验现象^[11], 可以合理地推断出混凝土顶、底板是还能继续承载的, 因此, 顶、底板内将单独产生部分闭合的剪力流, 而组合箱梁截面上的剪力流将不再连续, 即波形钢腹板断面上的剪力流不再等于混凝土顶、底板断面上的剪力流。所谓部分闭合是指面板内侧的剪力流只被外侧的部分剪力流闭合, 因为外侧剪力流还有一部分是用来闭合波形钢腹板上的剪力流的, 如图 1(b) 所示。

由于波形钢腹板组合箱梁是由波形钢板和混凝土两种不同材料组成, 其抗扭机理比全钢筋混凝土箱梁要复杂得多。在受到外扭矩作用时, 波形钢腹板 PC 组合箱梁是由混凝土顶、底板和波形钢腹板共同抵抗外扭矩的, 因此在受力过程中可能出现以下两种情况: (1) 在混凝土顶、底板达到极限承载力之前, 波形钢腹板一直处于弹性范围内; (2) 在混凝土顶、底板达到极限承载力之前, 波形钢腹板已经屈服。因此, 本文认为组合箱梁截面连续条件应根据波形钢腹板所处应力状态来决定, 而不能单一的假定为剪应变或剪力流连续。

在波形钢腹板屈服之前, 组合箱梁由混凝土顶、底板和波形钢腹板共同分担外扭矩, 因此组合箱梁截面上剪力流连续, 如图 1(a) 所示; 当波形钢腹板屈服后, 其剪应力只能保持在屈服应力水平, 而混凝土顶、底板还能继续承载, 因此组合箱梁截面上剪力流不再连续, 这时在顶、底板内将单独产生部分闭合的剪力流, 如图 1(b) 所示; 同时由于波形钢腹板能够发生塑性变形, 这时波形钢腹板剪应变将与混凝土顶、底板剪应变相等, 因此可以运用截面剪应变连续条件。在理论计算模型中必须对波形钢腹板的应力状态进行判定。

对于预应力筋, 文献[11, 13]都是按以下方式考虑的: 在施加外扭矩初期, 预应力筋主要是起到给混凝土和普通钢筋提供预压应力的作用; 当“混凝土消压后”, 预应力筋就相当于普通钢筋的作用了。这种处理方式并没有考虑预应力筋的位置效应。实际上, 对于处于核心区域(或横隔板内)的预应力筋, 在混凝土消压后, 对抵抗外扭矩就不再有任何贡献了(或者说贡献非常小), 因此混凝土消压后, 本文将不再把其当成普通纵筋考虑, 而处于混凝土顶、底板区域内的预应力筋在混凝土消压后, 仍将起到普通纵向钢筋的作用。

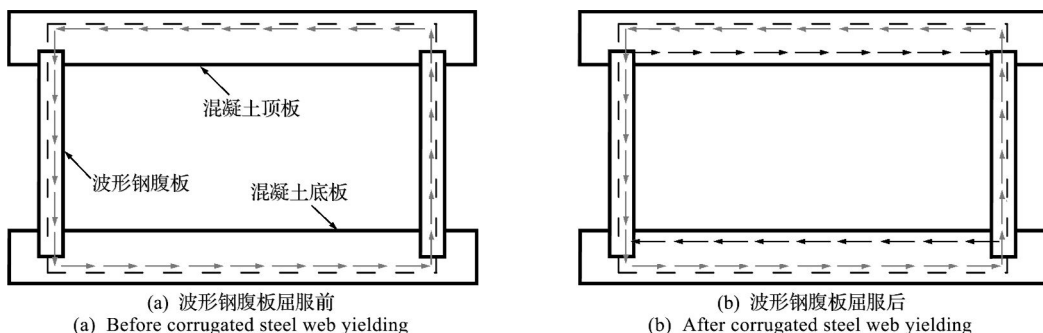


图 1 截面上剪应力分布示意图
Fig. 1 Distribution of shear stress on cross section

组合箱梁可以看作是由波形钢腹板和混凝土顶底板共同抵抗外扭矩,波形钢腹板抵抗的外扭矩可根据腹板剪应力相对方便的计算得出;混凝土顶底板抵抗的外扭矩部分在混凝土开裂后实际上是由混凝土、纵向钢筋及横向钢筋共同组成的空间桁架抵抗的,因此,这部分的外扭矩可以根据文献[14]基于固定角软化桁架模型提出的抗扭强度计算公式进行计算。而波形钢腹板和顶底板之间则根据扭转理论、剪力流或剪应变连续条件建立平衡方程,以下将给出详细的推导过程。

4 计算模型推导

在进行推导之前,有必要作如下几点假定。

(1) 组合箱梁截面外形轮廓在横截面平面内保持不变(不排斥在出平面方向的翘曲),即所谓的刚周边假定。

(2) 波形钢腹板与上、下混凝土翼缘连接良好,不会发生相对滑移或剪切破坏。

(3) 忽略波形钢腹板的纵向刚度,认为其完全不抵抗轴向力作用。

(4) 波形钢腹板具有足够的屈曲强度,不会发生任何形式的屈曲破坏。

(5) 波形钢腹板材料为理想弹塑性材料。

4.1 力的平衡方程

根据自由扭转理论,截面上外扭矩可以表达为

$$T = \oint \tau(s) \delta(s) \rho(s) ds = q \times \Omega \quad (4)$$

式中 T 为外扭矩, q 为截面上剪力流, Ω 为剪力流中心线围成面积的两倍。为了使式(8)表述的物理概念更明确,将其作如下变形:

$$\begin{aligned} T &= q \times \Omega = q \times (\Omega_f + \Omega_w) \\ &= q \times \Omega_f + q \times \Omega_w = T_f + T_w \end{aligned} \quad (5)$$

式中 Ω_f 和 Ω_w 分别表示由顶、底板剪力流中心线围成面积的两倍和由腹板剪力流中心线围成面积的两倍, T_f 表示由混凝土顶、底板承担的扭矩, T_w 表示由波形钢腹板承担的扭矩。

$$\Omega_f = W \times (H - t_d) \quad (6)$$

式中 t_d 为剪力流有效厚度。

(1) 当波形钢腹板处于弹性状态时

根据截面上剪力流连续的条件,可得

$$\tau_{lt} t_d = \tau_w t_w \quad (7)$$

式中 τ_w 为波形钢腹板剪应力, t_w 为波形钢腹板厚度。

(2) 当波形钢腹板处于屈服状态时

$$\tau_w = \tau_y, \gamma_w = \gamma_{lt} \quad (9)$$

对于波形钢腹板PC组合箱梁来说,有

$$\theta' = \frac{1}{\Omega} [2\gamma_{lt} W + 2\gamma_w (H - t_d)] \quad (10)$$

式中 θ' 为扭率, γ_w 为波形钢腹板剪切应变。

扭转引起混凝土压杆的弯曲,弯曲曲率为

$$\varphi = \theta' \sin 2\alpha_2, t_d = \varepsilon_{2s} / \varphi = 2\varepsilon_2 / \varphi \quad (11, 12)$$

式中 φ 为弯曲曲率, ε_{2s} 为最外层混凝土压应变。

4.2 应力、应变协调方程

由于本文的推导是基于固定角-软化桁架模型的基础进行的,因此应力、应变协调方程及相关坐标系与固定角-软化桁架模型中的相似,限于篇幅,本文在此不详细列出这些方程式,具体可以参见文献[14]中的相关方程。

4.3 材料本构方程

在模型计算过程中,主要需要用到六种本构关系,包括受压混凝土、受拉混凝土、受剪混凝土、普通钢筋、预应力筋和波形钢腹板的本构关系。这些本构方程分别采用文献[15-19]中的研究结果,限于篇幅,本文也不将这些方程式一一单独列出,详细可参见相关文献。

4.4 截面相关参数之间的关系方程

这些参数主要包括配筋率 ρ_l 、 ρ_{ps} 、 ρ_t , 剪力流有效厚度 t_d , 剪力流区域围成的面积 Ω 。这些参数之间的关系式为

$$\rho_l = A_l / P_0 t_d, \rho_t = A_l / s t_d \quad (13a, 13b)$$

$$\rho_{ps} = A_{ps}^* / P_0 t_d, P_0 = 2W \quad (13c, 13d)$$

$$\Omega = 2 \times W \times (H - t_d) \quad (13e)$$

式中 A_l 为处于顶、底板剪力流区域内的纵筋总截面面积, A_l 为箍筋单肢截面面积, s 为箍筋间距, A_{ps}^* 为处于顶、底板区域内的预应力筋总截面面积, P_0 为顶、底板剪力流中心线长度。

4.5 模型求解

目前,该类模型一般都是采用“试错法”进行求解,虽然该方法求解效率不是很高,但相对于复杂的有限元计算来说,其简便程度及计算速度优势还是相当明显的。另外,由于模型求解算法不是本文的研究重点,因此本文也采用“试错法”进行求解。

本文模型与文献[14]基于固定角-软化桁架模型的PC箱梁抗扭承载力计算模型的求解过程相似,也需要事先取定一序列的 ε_2 值;所不同的

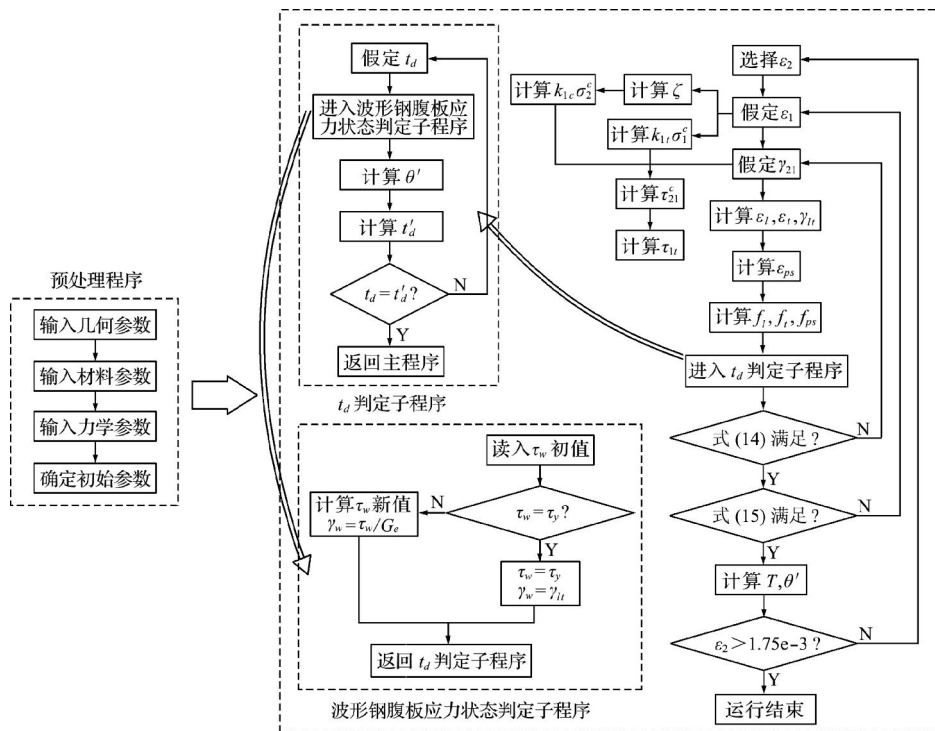


图2 求解流程示意图
Fig. 2 Flow chart of solution

是本文模型增加了判定波形钢腹板应力状态的子程序模块。为了帮助求解的收敛速度,将 $\sigma_1 = \sigma_r = 0$, $\alpha_2 = 45^\circ$ 代入应力协调方程,并稍加整理后可得

$$\rho_l f_l - \rho_t f_t = -2\tau_{21}^c - \rho_{ps} f_{ps} \quad (14)$$

$$\rho_l f_l + \rho_t f_t = -(\sigma_2^c + \sigma_1^c + \rho_{ps} f_{ps}) \quad (15)$$

如图2所示为本文模型求解流程图,程序中有关符号的意义详见文献[14]。

5 算例

为验证以上理论模型的有效性,采用文献[11]中的4根纯扭往复作用的波形钢腹板PC组合箱梁为计算对象。极限扭矩的计算值与试验值见表1。由表1可知,本文推导的计算模型和文献[11,13]提出的模型一样能够准确的计算出波形钢腹板组合箱梁的极限抗扭承载力。由本文计算的极限扭率比试验值要相对大一些,这是因为在本文的分析中把波形钢腹板当成了理想弹塑性材料,而实际中的钢材在达到屈服点后还存在强化现象。

如图3所示为N5、H8试件的扭矩-扭率骨架曲线图,从图3可以看出,由本文模型计算的骨架曲线与试验得出的曲线在整体趋势上吻合较好,都是呈现出不断缓慢上升的规律,在极限点处,两者差异非常小。在加载的前期阶段,两者差异相对较大,这主要是因为理论模型中假设的是混凝土已开

裂,而在实际试验中,加载初期混凝土并没有充分开裂。

文献[11]中Mo方法的局限性主要体现在处理钢腹较厚时的情况;而文献[13]中Nie方法的局限性则主要体现在处理钢腹板较薄时的情况。为了更好的说明问题,以文献[11]中N5试验梁为基础,分别考虑两组工况。第一组为钢腹板较厚的工况,厚度分别为4.0 mm、4.5 mm和5.0 mm三种情况;第二组为钢腹板较薄的工况,厚度分别为0.5 mm、0.75 mm和1.0 mm。如图4所示是分别按Mo方法和按本文计算模型结果对比图。从图4可以看出,按Mo方法,在波形钢腹板大于4 mm后,波形钢腹板PC组合箱梁的极限抗扭强度仍然随着腹板厚度的增加而增加,这显然和客观事实是不相符的;而按本文的计算方法,则当波形钢腹板厚度增大到一定值后,组合箱梁的极限抗扭强度基本维持在一个常值,这与客观事实更相符。如图5所示是分别按Nie方法和本文计算模型结果的对比图。图5中的水平线代表的是N5试验梁顶板和底板按照板式构件计算的抗扭强度之和。该值是根据文献[20]建议的板式构件极限扭矩计算公式计算所得的。该水平线代表的意义是:即使波形钢腹板组合箱梁没有钢腹板,其抗扭强度也不应低于顶板和底板所能承受的极限扭矩,换句话说也就

表 1 理论计算值与试验值比较

Tab.1 Comparison of experimental and theoretical values

试件	扭率/deg./m			扭矩/kN·m						
	θ'_{test}	θ'_{c3}	$\theta'_{c3}/\theta'_{test}$	T_{test}	T_{c1}	T_{c2}	T_{c3}	T_{c1}/T_{test}	T_{c2}/T_{test}	T_{c3}/T_{test}
H8	2.227	3.49	1.567	242.74	243.93	235.34	246.59	1.005	0.97	1.016
H5	2.509	3.53	1.407	226.93	237.4	234.84	241.53	1.046	1.035	1.064
N8	2.29	2.86	1.249	234.95	229.21	229.51	216.63	0.976	0.977	0.922
N5	2.024	2.95	1.458	216.63	221.91	229.1	228.12	1.024	1.058	1.053
均值			1.42					1.013	1.01	1.014
标准差			0.132					0.03	0.043	0.065

注: T_{c1} 代表按文献[11]方法的计算值, T_{c2} 代表按文献[13]方法的计算值, T_{c3} 代表按本文方法的计算值。

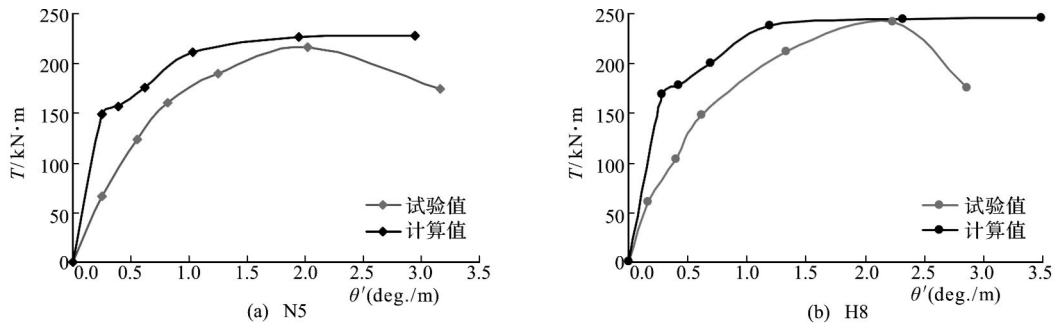


图 3 扭矩-扭率骨架曲线图

Fig. 3 Torque-twist curve

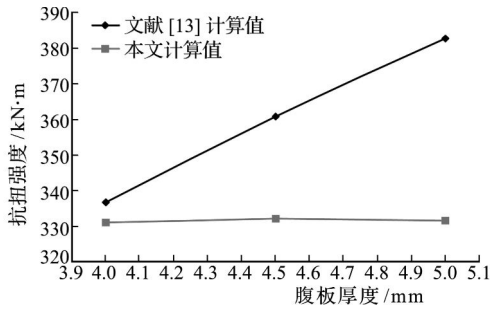


图 4 腹板较厚时对比图

Fig. 4 Comparison of calculated values at thicker web

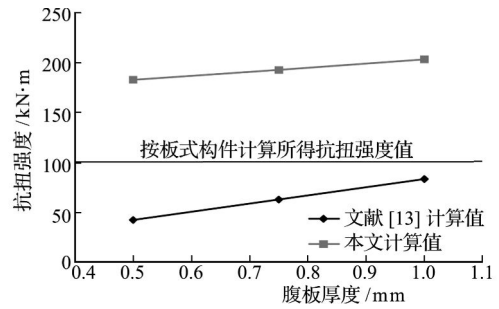


图 5 腹板较薄时对比图

Fig. 5 Comparison of calculated values at thinner web

是,组合箱梁的抗扭强度应该是高于该水平线以上的。从图 5 中可以看出,在腹板较薄时,由 Nie 方法计算的极限扭矩比本文方法计算值要小得多,且处于图中水平线以下,这显然与客观事实不太相符。

6 结 论

本文通过理论分析,揭示了文献[11,13]计算模型存在的局限性。根据腹板厚度较薄时($t_w=1.5$ mm)组合箱梁的极限扭矩远大于波形钢腹板屈服扭矩(前者约为后者的 1.5 倍)的试验现象,提出了在组合箱梁顶底板的内部将产生剪力流循环作用的观点。同时,针对波形钢腹板处于屈服和未屈服状态两种情况,分别建立了剪应变连续与剪力流连续方程。推导了以固定角-软化桁架模型为基础,同时考虑了不同位置预应力筋对抗扭承载力的不同作用效应。

本文模型的准确性得到了 4 根模型梁在纯扭往复作用下试验数据的验证,并能很好的解释当钢

腹板非常薄或非常厚两种比较极端情况下的现象。当然,本文的理论分析还需更多的试验研究来进一步的验证。

参考文献(References):

[1] 宋建永,张树仁,王 彤,等. 波纹钢腹板体外预应力组合梁弯曲性能分析及试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37 (11): 50-55. (SONG Jian-yong, ZHANG Shu-ren, WANG Tong, et al. A theoretical analysis and experimental study of the flexural behavior of externally prestressed composite beam with corrugated steel webs [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(11): 50-55. (in Chinese))

[2] 李立峰,刘志才,王 芳. 波形钢腹板 PC 组合箱梁抗弯承载力的理论与试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26 (7): 89-96. (LI Li-feng, LIU Zhi-cai, WANG Fang. Theoretical and experimental research on the flexural behavior of external prestressed composite beam with corrugated webs [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(7): 89-96. (in Chinese))

[3] 江克斌,丁 勇. 波纹钢腹板组合箱梁桥力学性能研

- 究现状及发展[J]. 钢结构, 2010, **25**(140): 1-6. (JIANG Ke-bin, DING Yong. The status quo and development of research for composite box-girder with corrugated webs[J]. *Steel Construction*, 2010, **25**(140): 1-6. (in Chinese))
- [4] Demetres Briassoulis. Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets[J]. *Computers and Structures*, 1986, **23**(2): 129-138.
- [5] Mohamed Elgaaly, Anand Seshadri, Robert Hamilton. Bending strength of steel beams with corrugated webs[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, **123**(6): 772-782.
- [6] Mohamed Elgaaly, Anand Seshadri. Depicting the behavior of girders with corrugated webs up to failure using nonlinear finite element analysis[J]. *Advances in Engineering Software*, 1998, **29**(3-6): 195-208.
- [7] Robert G Driver, Hassan H Abbas, Richard Sause. Shear behavior of corrugated web bridge girders[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, **132**(2): 195-203.
- [8] Jongwon Yi, Heungbae Gil, Kwangsoo Youm, et al. Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs[J]. *Engineering Structures*, 2008, **30**: 1659-1666.
- [9] 李宏江, 叶见曙, 万水, 等. 波形腹板箱梁的扭转与畸变分析与试验研究[J]. 桥梁建设, 2003(6): 1-4. (LI Hong-jiang, YE Jian-shu, WAN Shui, et al. Analysis and experimental study of torsion and distortion of box girder with corrugated steel webs[J]. *Bridge Construction*, 2003(6): 1-4. (in Chinese))
- [10] 周绪红, 狄谨, 游金兰, 等. 波纹钢腹板预应力混凝土箱梁抗扭性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(Sup2): 150-155. (ZHOU Xu-hong, DI Jin, YOU Jin-lan, et al. Experimental research on torsional property of composite beam with corrugated steel webs[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, **39**(Sup2): 150-155. (in Chinese))
- [11] Mo Y L, Chyuan-Hwan Jeng, Chang Y S. Torsional behavior of prestressed concrete box-girder bridges with corrugated steel webs[J]. *ACI Structural Journal*, 2000, **97**(6): 849-859.
- [12] Mo Y L, Fan Y L. Torsional design of hybrid concrete box girders[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, **11**(3): 329-339.
- [13] 聂建国, 唐亮. 波形钢腹板 PC 组合箱梁纯扭性能的非线性分析[J]. 中国公路学报, 2007, **20**(5): 71-77. (NIE Jian-guo, TANG Liang. Nonlinear analysis of pure torsion property for prestressed concrete composite box girders with corrugated steel webs[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, **20**(5): 71-77. (in Chinese))
- [14] Jiang K B, Ding Y, Liu Y W, et al. Calculation for torsion strength of prestressed concrete beams based on fixed-angle softened truss model[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, **52-54**: 1032-1038.
- [15] Thomas T C Hsu, Y L Mo. Softening of concrete in torsional members-theory and tests[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1985, **82**(3): 290-303.
- [16] Wang J. Constitutive Relationships of Prestressed Concrete Membrane Elements [D]. University of Houston, 2006.
- [17] Chyuan-Hwan Jeng, Thomas T C, Hsu. A softened membrane model for torsion in reinforced concrete members[J]. *Engineering Structures*, 2009, **31**: 1944-1954.
- [18] Roonie R H Zhu, Thomas T C Hsu, Jung-Yoon Lee. Rational shear modulus for smeared-crack analysis of reinforced concrete[J]. *ACI Structural Journal*, 2001, **98**(4): 443-450.
- [19] Thomas T C Hsu, Y L Mo. Softening of concrete in torsional members-prestressed concrete[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1985, **82**(5): 603-615.
- [20] 聂建国, 唐亮, 朱林森. 钢筋混凝土板式构件抗扭机理分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(6): 760-764. (NIE Jian-guo, TANG Liang, ZHU Lin-sen. Analysis of reinforced concrete slabs subjected to pure torsion[J]. *Journal of Tsinghua University (Sci. & Tech.)*, 2006, **46**(6): 760-764. (in Chinese))

Analytical model for torsional strength of prestressed concrete box-girder with corrugated steel webs

DING Yong*, JIANG Ke-bin, ZHOU Yin-zhi, YANG Jian-kui

(Engineer Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract: An analytical model for torsional strength of prestressed concrete box-girder with corrugated steel webs under pure torsion was deduced based on torsion theory and Fixed-Angle Softened Truss Model. Either the shear flow remains constant or the shear strain stays equal between the web and flange depends on the state of the corrugated steel web is in unyielding or yielding when the hybrid box-girder is in ultimate state. The effect of locations of prestressed tendons to torsional strength of the hybrid box-girder was also taken into consideration. The analytical model proposed in this paper was validated by four specimens subjected to cyclic pure torque. The results show that not only the torsional strength but also the torque-twist curve can be obtained through the analytical model developed in this paper.

Key words: corrugated steel Webs; torsional strength; pure torsion; fixed-angle softened truss model; torque-twist curve