

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.009

均布荷载作用下变截面波形钢腹板组合箱梁 剪应力的分布与计算

冀 伟, 魏 源, 罗 奎

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为研究变截面波形钢腹板组合箱梁在均布荷载作用下的剪应力分布规律, 运用铁木辛柯经典材料力学理论、微元体的受力平衡及剪应力互等定理, 推导了均布荷载作用下处于弹性阶段变截面波形钢腹板组合箱梁的剪应力计算公式。揭示了变截面波形钢腹板组合箱梁在均布荷载作用下剪应力在梁截面高度方向的分布规律, 并与 ANSYS 三维有限元分析结果进行了比对, 结果吻合良好, 表明推导的剪应力计算公式具有较高的精度。

关键词: 变截面; 波形钢腹板组合箱梁; 剪应力; 均布荷载

中图分类号: U448.21⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)01—0054—07

Distribution and Calculation of Shear Stress of Non-prismatic Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs with Uniform Load

Ji Wei, Wei Yuan, Luo Kui

(College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to study the distribution and calculation of non-prismatic composite box girders with corrugated steel web with uniformly distributed load, using the classical mechanics theory of Timoshenko, the equilibrium condition of force of micro element and the theorem of conjugate shearing stress, the calculation formula of shear stress calculation of non-prismatic composite box girders with corrugated steel web at the elastic stage with uniform load is derived. The distribution of shear stress along the section height of non-prismatic composite box girders with corrugated steel web with uniform load is revealed. At the same time, compared with the results of finite element analysis. The results matches well, which shows that the calculation formula has a high accuracy.

Keywords: non-prismatic; composite box girder with corrugated steel webs; shear stress; uniform load

波形钢腹板组合箱梁是用波形钢腹板取代了传统混凝土箱梁腹板的一种钢-混组合结构, 它充分利用了钢材的抗拉性能与混凝土的抗压性能, 以充分发挥材料各自的优点^[1], 显著改善该组合结构的力学性能并且提高了经济型, 大大降低了桥梁上部结构的自重^[2], 使得桥梁的跨越能力达到了一个新的水平, 这种结构的桥梁具有许多优点, 包括避免了传统混凝土腹板宜开裂的弊端、提高了预应力效率、力学性能突出、结构简单、外形美观、施工方便、经济效益显著^[3-9]等, 由于波形钢腹板的褶皱效应, 其腹

板几乎不抵抗轴向力^[10]。自从波形钢腹板 PC 组合箱梁出现, 许多国家修建了这种类型的桥梁, 1986 年法国建成了世界上第一座组合箱梁桥——Cognac 高架桥, 日本于 1993 年修建了日本首座波形钢腹板 PC 简支箱梁桥——新开桥, 近年来, 随着制造工艺、施工技术和波形钢腹板 PC 组合箱梁设计理论的逐渐成熟, 波形钢腹板箱梁桥在现代大跨度桥梁中具有显著的竞争力, 考虑到经济和技术的合理性, 梁一般采用变截面梁。

收稿日期: 2018-07-30

修稿日期: 2018-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51708269, 51868039); 中国博士后科学基金 (2018M643766); 甘肃省自然科学基金资助项目 (18JR3RA115); 兰州交通大学优秀平台资助 (201601)

作者简介: 冀 伟 (1982—), 男, 山西阳泉人, 博士, 副教授, 主要从事组合箱梁桥设计理论研究工作。E-mail: jiwei1668@163.com

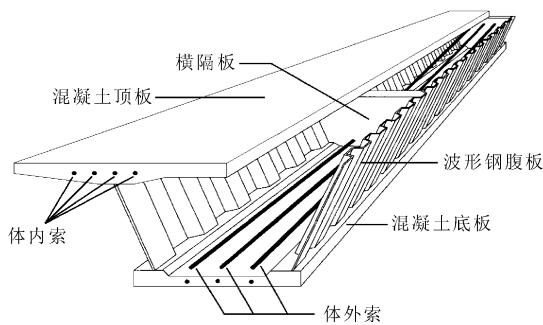


图 1 典型构造示意图

现有文献中,国内外许多学者对波形钢腹板钢-混组合梁桥的剪应力等性能进行了研究:Hasanein 等^[11]研究了波形钢腹板的临界剪切屈曲应力。Wang S 等^[12]研究了波形钢腹板组合梁的抗剪强度、剪切刚度和破坏模式。Qiao P 等^[13]基于手风琴效应研究了不同尺寸参数对扭转变形应力的影响。乔朋等^[14]研究了单箱多室波形钢腹板组合箱梁的腹板剪应力,提出单箱多室波形钢腹板组合箱梁的钢腹板剪应力计算应包括弯曲剪应力、扭转剪应力以及局部畸变产生的剪应力。李杰等^[15]考虑变截面效应,研究了变截面波形钢腹板组合箱梁腹板剪应力的实用计算方法,提出了变截面梁的梁高和底板厚度的变化对剪应力有较大影响。邓文琴等^[16]以某单箱五室波形钢腹板组合梁斜拉桥为研究对象,分析了施工阶段应力叠加作用下各腹板的剪应力分布和剪力分配比例。武海鹏等^[17]考虑梁高、底板厚度的变化,推导了钢腹板剪应力计算公式及剪力传递效率,得出变截面波形钢腹板梁中的剪应力除了由截面剪力 Q 引起外,还包括有截面弯矩 M 和轴力 N 引起的附加剪应力以及剪力传递效率与所选取的截面位置、荷载作用方式和大小有关。周茂定等^[18]运用比拟杆法,推导了波形钢腹板简支梁在荷载作用下的正应力计算公式。

从国内外的研究可以看到许多学者对剪切屈曲应力研究较多,并且通过实验的方法和有限元方法对剪应力的分布通常趋向于定性分析,但对变截面梁的剪应力研究还是相对匮乏,然而变截面梁作为一种最为经济的结构形式在大跨度桥梁中得到了广泛的应用。由于变截面的影响,变截面梁的剪应力计算公式和分布规律与等截面有所不同。因此,对这一问题的研究不仅具有理论意义,而且具有实践价值。本文对均布荷载作用下变截面波形钢腹板组合箱梁剪应力计算公式进行了推导,并对混凝土顶、底板和波形钢腹板中剪应力的分布规律进行了分

析,本文的研究成果能为类似波形钢腹板连续箱梁剪应力分布与计算研究提供参考依据。

1 剪应力公式推导

(1) 基本假定

① 波形钢腹板梁与混凝土板截面在变形前后分别符合平截面假定。

② 波形钢腹板梁与混凝土板均为各项同性的弹性体,即应力-应变关系为线性关系,可应用叠加原理求解,混凝土在整个受力阶段未开裂。

③ 组合梁的竖向纤维无挤压,不考虑混凝土翼板的掀起,假定组合波形钢腹板梁与混凝土两者的挠曲位移完全相等,不考虑组合梁的横向变形,忽略波形钢腹板梁与混凝土板间的剪切滑移。

④ 在小变形条件下材料变形应服从 Hooke 定律。

⑤ 组合梁截面应力拉伸为正、压缩为负,弯矩以梁底受拉为正,受压为负。

(2) 变截面波形钢腹板剪应力分析

某一波形钢腹板组合箱梁典型截面如图 2 所示,设波形钢腹板顶板宽度 b_1 、顶板厚度 t_1 和底板宽度 b_2 保持不变;在长度方向高度 h 、底板厚度 t_2 、重心轴到顶板表面的距离 z_c 是变化的。

取一微段为研究对象,平面直角坐标系原点 O 取在顶板的上表面处, M 、 N 、 Q 和 q 分别为作用在截面上的弯矩、轴力、剪力和均布荷载,图 3(a) 中两端横截面重心连线的水平倾角为 θ ,梁底的倾角为 φ ,变截面微段受力如图 2 所示,其中 b_1 为顶板宽度, b_2 为底板宽度, t_1 为顶板厚度, t_2 为底板厚度, z_c 为微段上梁顶到重心轴的距离, z 为任意位置距梁顶的距离, h 为梁高。

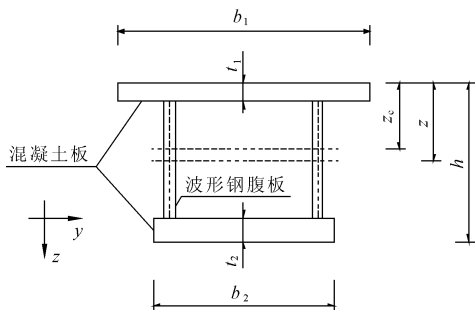


图 2 波形钢腹板箱梁的截面示意图

由力矩平衡条件,可得:

$$\frac{dM}{dx} = Q + N \tan \theta \quad (1)$$

由假定 ①,根据材料力学公式可得微段横截面上距梁顶距离为 z 处的正应力表达式为:

$$\sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{M}{I}(z_c - z) \quad (2)$$

式中: A 为微段横截面面积; I 为微段横截面惯性矩。

规定式(1)、式(2)中底板受拉则弯矩为正,反之为负;如果剪力使微段有顺时针转动的趋势,则剪力 Q 为正,反之为负;如果微段处于压缩状态,则轴力 N 为正,反之为负;如果水平轴 x 沿顺时针旋转向中心线则 θ 为正,反之则为负。

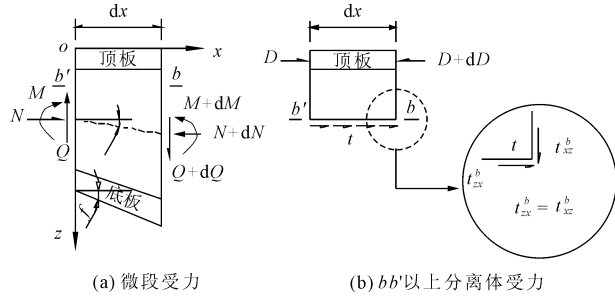


图 3 微段受力简图

为计算横截面上任意一点 b 处的剪应力 τ , 取图 3(b) 所示的分离体作为研究对象, 由 x 方向受力平衡可得:

$$\tau = \frac{1}{b(z)} \left(\frac{dD}{dx} \right) \quad (3)$$

式中: $b(z)$ 为计算点处的横截面宽度; D 为计算点处以上部分所受的水平合力。

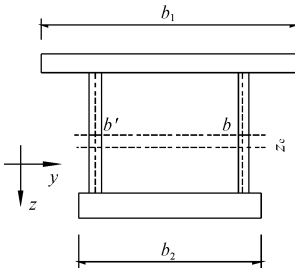


图 4 分离体截面

水平合力 D 作用于顶板上, 其表达式为:

$$D = \int_0^{z_b} \sigma_z b(z) dz \quad (4)$$

将公式(2)带入公式(4)得以下表达式:

$$D = \int_0^{z_b} \sigma_z b(z) dz = \frac{N}{A} A_b + \frac{M}{I} \int_0^{z_b} (z_c - z) b(z) dz \quad (5)$$

式中: A_a 为计算点以上部分的横截面面积; z_b 为梁顶到计算点之间的距离。

对公式(5)进行整理得:

$$\int_0^{z_b} (z_c - z) b(z) dz = z_c \int_0^{z_b} \sigma_z b(z) dz - \int_0^{z_b} z b(z) dz = z_c A_b - c A_b = S_b \quad (6)$$

式中: c 为面积 A_b 的重心到梁顶的距离, $c \leq z_c$; S_b 为面积 A_b 对重心轴的静面距。

将公式(6)代入公式(5)得:

$$D = \frac{N}{A} A_b + \frac{M}{I} S_b \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(3)中, 结合偏微分方程, 公式(1)和公式(7)中的轴向力 N 假定为常量。

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{b} \frac{dD}{dx} = \frac{1}{b} \left[\frac{d\left(\frac{A_b N}{A}\right)}{dx} + \frac{d\left(\frac{M S_b}{I}\right)}{dx} \right] = \\ &= \frac{1}{b} \left\{ N \left[\frac{A \frac{dA_b}{dx} - A_b \frac{dA}{dx}}{A^2} \right] + \frac{I \frac{d(M S_b)}{dx} - M S_b \frac{dI}{dx}}{I^2} \right\} = \\ &= \frac{1}{b} \left[\frac{N}{A} \frac{dA_b}{dx} - \frac{N A_b}{A^2} \frac{dA}{dx} + \frac{1}{I} S_b (Q + N \tan \theta) + \right. \\ &= \frac{1}{I} M \frac{dS_b}{I^2} - \frac{M S_b}{I^2} \frac{dI}{dx} \left. \right] = \frac{Q S_b}{I b} + \frac{N}{b} \left(\frac{S_b \tan \theta}{I} + \right. \\ &= \left. \frac{1}{A} \frac{dA_b}{dx} - \frac{A_b}{A^2} \right) + \frac{M}{I b} \left(\frac{dS_b}{dx} - \frac{S_b}{I} \frac{dI}{dx} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

公式(8)即为均布荷载作用下任意变截面梁剪应力计算的一般公式, 可以看出变截面波形钢腹板箱梁剪应力由三部分组成: 剪力引起的剪应力、轴力引起的剪应力和弯矩引起的剪应力, 这三部分可简化为:

$$\tau = \tau_0 + \tau_N + \tau_M \quad (9)$$

式中: τ_0 为剪力引起的剪应力; τ_N 为轴力引起的剪应力; τ_M 为弯矩引起的剪应力。

(3) 截面几何参数的微分表达式

实际工程中波形钢腹板的厚度约为 10 mm, 由于折叠效应使得钢腹板的厚度对几何参数的计算影响很小, 所以横截面上的 A , I 和 z_c 可以写成:

$$A = b_1 t_1 + b_2 t_2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{12} b_1 t_1^3 + b_1 t_1 \left(z_c - \frac{t_1}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} b_2 t_2^3 + \\ &= b_2 t_2 \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right)^2 \quad (11) \end{aligned}$$

$$z_c = \frac{b_1 t_1 \frac{t_1}{2} + b_2 t_2 \left(h - \frac{t_2}{2} \right)}{A} \quad (12)$$

忽略波形钢腹板的影响, 假设顶板厚度不变, 则 A 的变化率为:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{d(b_1 t_1 + b_2 t_2)}{dx} = b_2 \frac{dt}{dx} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dx} &= \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{12} b_1 t_1^3 + b_1 t_1 \left(z_c - \frac{t_1}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} b_2 t_2^3 + \right. \\ &= \left. b_2 t_2 \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right)^2 \right] = \left[2 b_1 t_1 \left(z_c - \frac{t_1}{2} \right) - 2 b_2 t_2 \cdot \right. \end{aligned}$$

$$\left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right) \left] \frac{dz_c}{dx} + \left\{ 2b_2 \left[\frac{t_2^2}{4} + \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right)^2 - t_2 \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right) \right] \right\} \frac{dt}{dx} + \left[2b_2 t_2 \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right) \right] \frac{dh}{dx} \quad (14)$$

令:

$$k_1 = 2b_1 t_1 \left(z_c - \frac{t_1}{2} \right) - 2b_2 t_2 \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right) \quad (15)$$

$$k_2 = 2b_2 \left[\frac{t_2^2}{4} + \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right)^2 - t_2 \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right) \right] \quad (16)$$

$$k_3 = 2b_2 t_2 \left(h - z_c - \frac{t_2}{2} \right) \quad (17)$$

则式(14)可简化为:

$$\frac{dI}{dx} = k_1 \frac{dz_c}{dx} + k_2 \frac{dt}{dx} + k_3 \frac{dh}{dx} \quad (18)$$

计算阴影部分面积 A_b 与其静距 S_b 沿 x 轴的变化率时,须分以下三部分计算:

① 当剪应力计算点 b 位于顶板时 ($0 \leq z \leq t_1$)

$$A_b = b_1 z; \frac{dA_b}{dx} = 0; S_b = b_1 z \left(z_c - \frac{z}{2} \right); \frac{dS_{b1}}{dx} = b_1 z \frac{dz_c}{dx} \quad (19)$$

② 当剪应力计算点 b 位于腹板时 ($t_1 \leq z \leq h - t_2$)

$$A_b = b_1 z; \frac{dA_b}{dx} = 0; S_b = b_1 t_1 \left(z_c - \frac{t_1}{2} \right); \frac{dS_{b2}}{dx} = b_1 t_1 \frac{dz_c}{dx} \quad (20)$$

③ 当剪应力计算点 b 位于底板时 ($h - t_2 \leq z \leq h$)

$$A_b = b_1 t_1 + b_2 (z + t_2 - h); \frac{dA_b}{dx} = b_2 \left(\frac{dt}{dx} - \frac{dh}{dx} \right) \\ S_{b3} = b_1 t_1 \left(z_c - \frac{t_1}{2} \right) - b_2 (y + t_2 - h) \cdot \frac{h - t_2 + z - 2z_c}{2}$$

$$\frac{dS_{a3}}{dx} = [b_1 t_1 + b_2 (z + t_2 - h)] \frac{dz_c}{dx} + b_2 (h - t_2 - z_c) \left(\frac{dh}{dx} - \frac{dt}{dx} \right) \quad (21)$$

(4) 变截面梁剪应力特性分析

从推导结果可以得到,均布荷载 q 作用下变截面波形钢腹板梁剪应力由剪力 Q 、轴向力 N 和弯矩 M 引起,实际剪应力是三部分叠加产生,以下对其进行单独分析。

① 弯矩 M 引起的剪应力分析(见图 5(a))

将 τ_M 沿着截面高度进行面积分得:

$$\int_A \tau_M dA = \int_A \frac{M}{Ib} \left(\frac{dS}{dx} - \frac{S}{I} \frac{dI}{dx} \right) dA = \int_0^{t_1} \frac{M}{Ib_1} \left(\frac{dS_{b1}}{dx} - \frac{S_{b1}}{I} \frac{dI}{dx} \right) b_1 dy + \int_{t_1}^{h-t_2} \frac{M}{Ib_2} \left(\frac{dS_{b2}}{dx} - \frac{S_{b2}}{I} \frac{dI}{dx} \right) b_2 dy + \int_{h-t_2}^h \frac{M}{Ib_3} \left(\frac{dS_{b3}}{dx} - \frac{S_{b3}}{I} \frac{dI}{dx} \right) b_3 dy \quad (22)$$

将表达式(19)一式(21)代入式(22),整理可得:

$$\int_A \tau_M dA = \int_A \frac{M}{Ib} \left(\frac{dS}{dx} - \frac{S}{I} \frac{dI}{dx} \right) dA = 0 \quad (23)$$

由式(23)知由弯矩 M 单独作用下产生的附加剪应力沿截面高度的积分为零,即弯矩产生的附加剪应力对总的剪应力没有影响。

② 轴向力 N 引起的剪应力分析(见图 5(b))

将 τ_N 沿着截面高度进行面积分得:

$$\int_A \tau_N dA = \int_A \frac{N}{b} \left(\frac{S_b \tan \theta}{I} + \frac{1}{A} \frac{dA_b}{dx} - \frac{A_b}{A^2} \right) dA = \int_0^{t_1} \frac{N}{b_1} \left(\frac{S_{b1} \tan \theta}{I} + \frac{1}{A} \frac{dA_{b1}}{dx} - \frac{A_{b1}}{A^2} \right) b_1 dy + \int_{t_1}^{h-t_2} \frac{N}{b_2} \left(\frac{S_{b2} \tan \theta}{I} + \frac{1}{A} \frac{dA_{b2}}{dx} - \frac{A_{b2}}{A^2} \right) b_2 dy + \int_{h-t_2}^h \frac{N}{b_3} \left(\frac{S_{b3} \tan \theta}{I} + \frac{1}{A} \frac{dA_{b3}}{dx} - \frac{A_{b3}}{A^2} \right) b_3 dy \quad (24)$$

将表达式(19)一式(21)代入式(24),整理可得:

$$\int_A \tau_N dA = \int_A \frac{N}{b} \left(\frac{S_b \tan \theta}{I} + \frac{1}{A} \frac{dA_b}{dx} - \frac{A_b}{A^2} \right) dA = 0 \quad (25)$$

由式(25)知由轴力单独作用下产生的附加剪应力沿截面高度的积分为零,即说明轴力产生的附加剪应力对总的剪应力没有影响。

③ 剪力 Q 引起的剪应力分析(见图 5(c))

将 τ_Q 沿着截面高度进行面积分得:

$$\int_A \tau_Q dA = \int_A \frac{QS_b}{Ib} dA = \int_0^{t_1} \frac{QS_{a1}}{Ib_1} b_1 dy + \int_{t_1}^{h-t_2} \frac{QS_{a2}}{Ib_2} b_2 dy + \int_{h-t_2}^h \frac{QS_{a3}}{Ib_3} b_3 dy \quad (26)$$

将表达式(19)一式(21)代入式(26),整理可得:

$$\int_A \tau_Q dA = Q \quad (27)$$

由式(27)知剪力 Q 单独作用下剪应力沿截面高度的积分即为截面的剪力。

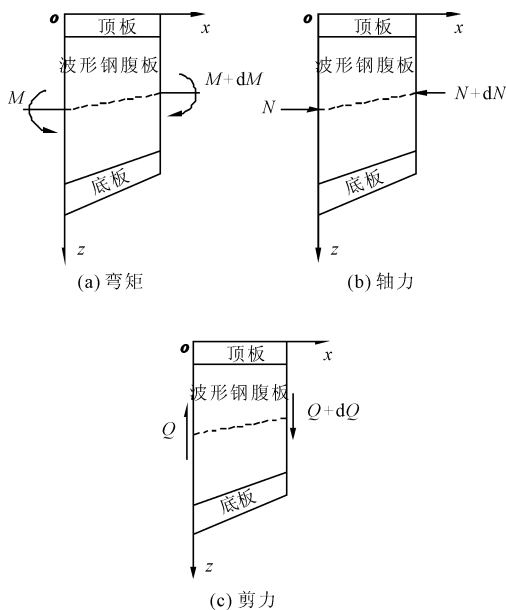


图 5 荷载单独作用下的典型梁端

2 变截面悬臂梁算例分析

(1) 悬臂梁参数。选取文献[19]中一变截面波形钢腹板组合悬臂梁为研究对象,跨径为 30 m,混凝土顶、底板宽度分别为 4 m 和 2 m,腹板厚度为 0.01 m,梁高从悬臂端部的 2 m 线性变化至悬臂根部的 4 m,顶板厚度为 0.3 m,底板厚度从悬臂端部的 0.3 m 按线性变化到悬臂根部的 0.5 m,顶板上作用有 $q = 300 \text{ kN/m}$ 的均布荷载,如图 6 所示,分别选择距悬臂端根部 1 m、10 m、20 m、29 m 处截面作为考察截面,依次标记为 1#—4# 号截面,如图 6 所示,材料参数见表 1。

表 1 材料参数表

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
顶底板混凝土	32.5	0.2	2500
波形钢腹板	210.0	0.3	7800

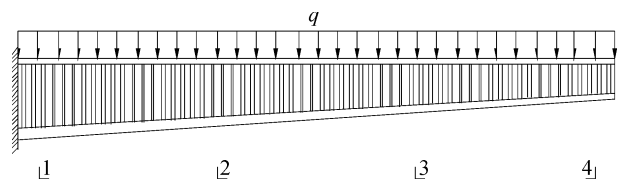


图 6 立面图

(2) 有限元模型的建立。采用大型有限元计算软件 ANSYS 15.0 建立上述变截面波形钢腹板组合梁的三维有限元模型,其中混凝土顶、底板采用实体单元 Solid 45 进行模拟,波形钢腹板采用壳单元 Shell 63 模拟,不考虑顶、底板与波形钢腹板间的层

间滑移效应,波形钢腹板与混凝土顶底板间的连接采用 MPC(多点约束方程)连接,该连接法可以不需要交接处的节点——对应就能将不连续、自由度不协调的单元网格连接起来^[20-21],使得建模工作量大大减小,建模时先在实体单元表面建立 Target 170 单元,再在壳单元一侧建立 Contact 175。悬臂梁根部约束梁体的竖向、纵向和横向 3 个方向的位移,有限元模型如图 9—图 11 所示。

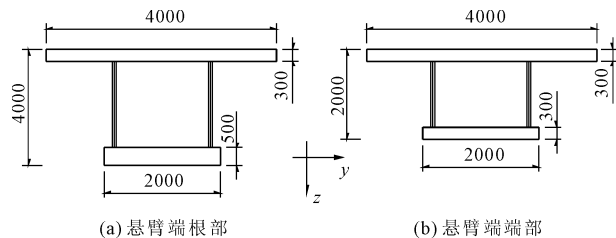


图 7 截面图(单位:mm)

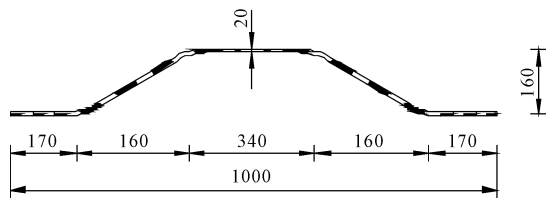


图 8 波形钢腹板的截面尺寸(单位:mm)

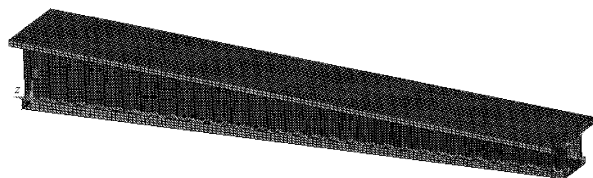


图 9 波形钢腹板组合箱梁空间有限元模型示意图

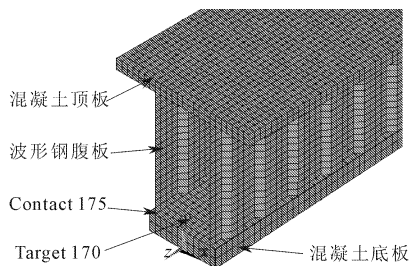


图 10 壳体—实体 MPC 约束

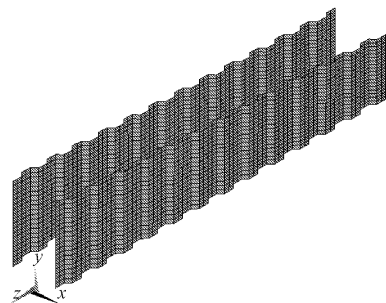


图 11 波形钢腹板有限元网格划分

3 有限元结果与解析计算结果对比

将推导的变截面波形钢腹板剪应力公式计算所得结果与 ANSYS 有限元值进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 各计算截面处波形钢腹板上的剪应力结果对比

截面号	剪应力/MPa		误差 (1② - ①1/①)/%
	公式①	有限元②	
1 #	3.130	2.90	7.35
2 #	2.230	2.13	4.48
3 #	1.170	1.15	1.71
4 #	0.132	0.13	1.52

由表 2 可知,本文公式计算所得的剪应力理论解与 ANSYS 三维有限元解吻合较好,说明了本文所推导的解析解的正确性,可以用于实际工程中变截面波形钢腹板组合箱梁剪应力的计算。

分析变截面波形钢腹板组合悬臂梁 1 #—4 # 截面的剪应力大小随箱梁截面到混凝土顶板上边缘

的距离的关系,变截面波形钢腹板组合箱梁的剪应力用本文公式求得的理论解与 ANSYS 三维有限元值吻合较好。在中性轴以上区域剪应力的变化规律先增大后趋于稳定,在中性轴以下先趋于不变后减小,中性轴以下的极值比中性轴以上的极值大。变截面波形钢腹板组合箱梁的剪应力的最大值出现在中性轴以下的某一点。

将 1 #—4 # 截面中性轴上下两侧的剪应力的极值进行对比,对比结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,变截面波形钢腹板组合悬臂梁 1 #—4 # 截面中性轴两侧的剪应力的理论解均大于 ANSYS 三维有限元值。剪应力最大值的理论解和 ANSYS 三维有限元值在悬臂梁的固定端最大,从固定端到自由端依次减小。理论解在 2 # 截面中性轴上下两侧剪应力极值的差值最大,达到了 1.75%; ANSYS 三维有限元值在 1 # 截面中性轴上下两侧剪应力极值的差值最大,达到了 8.39%。

表 3 中性轴上下两侧剪应力极值对比

截面编号	中性轴以上剪应力极值(理论解)/MPa	中性轴以下剪应力极值(理论解)/MPa	理论解增量/%	中性轴以上剪应力极值(ANSYS 三维有限元解)/MPa	中性轴以下剪应力极值(ANSYS 三维有限元解)/MPa	ANSYS 三维有限元解增量/%
1 #	3.170	3.220	1.55	2.730	2.980	8.39
2 #	2.250	2.290	1.75	2.170	2.180	0.46
3 #	1.190	2.210	1.65	1.170	1.180	0.85
4 #	0.133	0.134	0.75	0.131	0.132	0.76

4 结 论

(1) 本文推导的均布荷载作用下变截面波形钢腹板组合箱梁桥剪应力计算公式的正确性得到了 ANSYS 三维有限元数值的验证,说明本文所推导的变截面波形钢腹板组合箱梁的剪应力解析公式具有较高的精度,对于实际工程具有一定的参考价值。

(2) 由解析公式分析可知,弯矩和轴力引起的附加剪应力不影响合力的大小,但改变了变截面梁中截面剪应力沿梁高方向的分布。

(3) 变截面变截面波形钢腹板组合箱梁桥的最大剪应力并不在中性轴处,而在截面中性轴以下处。

(4) 通过研究变截面波形钢腹板组合箱梁沿桥跨度方向的剪应力分布,发现随着箱梁高度的减小剪应力值沿着跨度方向减小幅度变大,说明底板厚度从自由端向固定端变化的过程中参与的抗剪程度逐渐增大。

参考文献:

- [1] Gerard Taig, Gianluca Ranzi. Generalised Beam Theory (GBT) for composite beams with partial shear interaction [J]. Engineering Structures. 2015, 99:582-602.
- [2] 冀 伟,邓 露,刘世忠,等.变截面波形钢腹板 PC 箱梁桥的动力特性分析[J].铁道工程学报,2016,33(3): 60-64.
- [3] 轰建国,朱 力,唐 亮.波形钢腹板的抗剪强度[J].土木工程学报,2013,46(6):97-108.
- [4] 李 杰,武海鹏,陈 淮.变截面波形钢腹板组合箱梁腹板剪应力实用计算方法研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(1):80-86.
- [5] 吕 伟,王捷江.波形钢腹板箱梁的抗剪性能研究[J].建筑技术开发,2017,44(4):97-98.
- [6] 崔景岩.波形钢腹板剪力分担比例有限元分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(4):203-205.
- [7] 陈立生,叶智勇,赵国强,等.单箱多室波形钢腹板组合箱梁斜拉桥抗剪特性研究[J].桥梁建设,2017,47(2): 48-53.
- [8] 贾韶丽,高仕赵,王明斌,等.波形钢腹板 PC 组合箱梁

- 中钢腹板的抗剪设计方法[J]. 公路工程, 2015, 40(5): 96-100, 123.
- [9] 李立峰, 侯立超, 孙君翠. 波形钢腹板抗剪性能的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(11): 56-63.
- [10] 冀伟, 刘世忠, 蔺鹏臻. 波形钢腹板组合箱梁振动频率分析与试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5): 102-107.
- [11] Hassanein M F, Kharoob O F. Shear buckling behavior of tapered bridge girders with steel corrugated webs[J]. Engineering Structures, 2014, 74: 157-169.
- [12] Wang S, He J, Liu Y, et al. Shear capacity of a novel joint between corrugated steel web and concrete lower slab[J]. Construction & Building Materials, 2018, 163: 360-375.
- [13] Qiao P, Di J, Qin F J. Warping Torsional and Distortional Stress of Compositd Box Girder with Corrugated Steel Webs[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(6): 1-13.
- [14] 乔朋, 狄谨, 秦凤江. 单箱多室波形钢腹板组合箱梁的腹板剪应力分析[J]. 工程力学, 2017, 34(7): 97-107.
- [15] 李杰, 武海鹏, 陈淮. 波形钢腹板变截面连续体系梁桥钢腹板承剪分析[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 79-84.
- [16] 邓文琴, 张建东, 刘朵, 等. 悬臂施工期波形钢腹板斜拉桥腹板剪力分配规律研究[J]. 世界桥梁, 2018, 46(2): 47-51.
- [17] 武海鹏, 李杰, 陈淮. 变截面波形钢腹板组合箱梁剪应力及剪力传递效率分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 83-87.
- [18] 周茂定, 刘世忠, 杨子江. 波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应的比拟杆法求解[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(4): 41-44.
- [19] 周满. 变截面波形钢腹板组合梁桥的剪切变形及剪切屈曲研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [20] 伍彦斌, 黄方林. 多尺度有限元建模与分析的部分混合单元法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 110-114.
- [21] 谢元丕, 冯刚. ANSYS 三维实体单元与板壳单元的组合建模研究[J]. 机械设计, 2009, 26(4): 5-7.

(上接第 53 页)

- [2] 李海波, 肖克强, 刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2385-2394.
- [3] 刘丽萍, 王思长. 地震作用下高边坡稳定性验算及监测分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(1): 60-64.
- [4] 杨长卫, 张建经, 周德培. SV 波作用下岩质边坡地震稳定性的时频分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 483-491.
- [5] 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 696-702.
- [6] 苏德斌, 王浩. 不同锚杆类型加固二元结构边坡的地震响应规律对比研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 40-47.
- [7] 王举, 杨风威, 唐旭. 地震荷载作用下含节理岩质边坡的破坏机理[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(5): 171-177.
- [8] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2977-2983.
- [9] 王宇, 贾洪彪, 赵轩, 等. 地震作用下均质土坡动力特性的振动台试验研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(1): 100-106.
- [10] 言志信, 张森, 张学东, 等. 顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 3522-3528.
- [11] 言志信, 张刘平, 曹小红, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及变形机制研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 54-58.
- [12] 滕光亮, 陈永明, 石玉成, 等. 地震作用下节理岩质边坡稳定性影响因素研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 119-125.
- [13] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 2847-2854.
- [14] 王泉伟, 杜朋召, 张涛, 等. 地震作用下节理岩质边坡的动力稳定性分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 63-67.
- [15] 王海云, 谢礼立. 近断层强地震动的特点[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2070-2072.
- [16] 宋健, 高广运. 近断层速度脉冲地震动对边坡滑移的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 317-326.
- [17] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 173-180.
- [18] Baker J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.