

文章编号: 1002-0268 (2008) 09-0085-08

带波形钢腹板挑梁的钢-混凝土 组合脊骨梁设计计算方法

张 阳, 邵旭东

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 根据带波形钢腹板挑梁的钢-混凝土组合脊骨梁的小箱梁、大悬臂的结构特点, 提出了考虑偏载效应影响的组合脊骨梁正应力计算公式; 通过确定合理的抗弯极限状态, 并基于简化塑性理论, 推导出组合脊骨梁正、负弯矩截面的极限抗弯承载力计算公式和考虑混凝土翼板贡献的抗剪承载力计算公式; 同时提出了波形钢腹板组合挑梁荷载横向分布计算的修正刚接梁法以及受载挑梁荷载横向分布系数随载位沿挑梁纵向变化而呈三次曲线分布的假设, 并按照拟平截面假定, 推导了波形钢腹板组合挑梁的开裂弯矩和弹性抗弯承载力计算公式。在此基础上进行了相应的模型试验研究, 理论分析值和试验结果吻合良好, 说明本文的设计公式精度满足要求, 能够用于同类结构的设计计算。

关键词: 桥梁工程; 组合脊骨梁; 工程力学; 承载力; 荷载横向分布

中图分类号: U448.21⁺6

文献标识码: A

Calculation Method for Steel-concrete Composite Spine Girder Possessing Cantilevered Beams with Corrugated Steel Webs

ZHANG Yang, SHAO Xu-dong

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: According to the structural properties of the small box girder and large cantilever on the steel-concrete composite spine girder possessing long cantilevered beams with corrugated steel webs (SCCSG), the calculating formulas of normal stress considering the effect of eccentric loads were performed. Based on the simplified plastic theory, the calculating formulas on ultimate flexural resistance and shear strength considering contribution of concrete slabs in the positive and negative bending moment sections were derived by determination of the reasonable flexural limit state. Meanwhile, the modified rigid-jointed beam method for load lateral distribution of the composite bridge deck supported by paralleling long cantilevered beams with corrugated steel webs and the hypothesis that the load lateral distribution factor presents cubic curve along the longitudinal axis of composite cantilevered beam with the change of load acting point, were proposed. Then the calculating formulas on cracking moment and elastic bearing capacity of bending resistance of the composite cantilevered beams with corrugated steel webs were also investigated. On this basis, a series of tests were performed for a model beam. Comparison between theoretical solutions and model test results shows approximately satisfactory, which indicates that precision of the proposed calculating formulas can satisfy engineering requirement and can be used for design calculations of the same structure.

Key words: bridge engineering; composite spine girder; engineering mechanics; bearing capacity; load lateral distribution

收稿日期: 2007-07-03

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (02JJY3058)

作者简介: 张阳 (1971-), 男, 辽宁辽阳人, 副教授, 博士, 从事新型组合结构研究. (zhangbridge@163.com)

0 前言

钢-混凝土组合梁能充分利用材料, 具有设计上的优势。随着计算理论的日趋成熟和新型建筑材料的发展, 钢-混凝土组合梁正朝着新型化、轻型化和高强化的方向发展^[1-3]。带波形钢腹板挑梁的钢-混凝土组合脊骨梁 (SCCSG) 是一种小箱梁、大悬臂的新型组合结构, 在钢箱梁两侧沿纵向等间距对称伸出一对带波形钢腹板的大悬臂挑梁, 与混凝土板连接形成组合结构; 在桥面板中施加横向预应力, 来解决混凝土板承受横向弯矩而易于开裂的问题, 并利用波形钢腹板轴向刚度低的特性来减小横向预应力损失^[4,12]。组合脊骨梁结构具有截面效率高、整体受力性能好, 施工方便, 自重轻, 外形美观等优点, 非常适于城市桥梁的建设。

大悬臂组合脊骨梁作为新型结构, 规范上无相应的设计方法, 波形钢腹板组合挑梁的设计计算也少有文献涉及。将普通钢-混凝土组合梁的设计方法应用于组合脊骨梁上是否可行和安全、合理, 还有待研究。为此, 笔者结合组合脊骨梁自身的受力和构造特点, 提出一套组合脊骨梁的设计计算公式, 以便于指导工程实践。

1 有效宽度确定

1.1 混凝土板有效宽度

混凝土板有效宽度 b_e :

$$b_e = 2(b_{e1} + b_{e2}), \quad (1)$$

式中, b_{e1} 为 1/2 箱梁顶部混凝土板有效宽度, 规定: 钢箱顶板宽度 $2b_2 \leq L_0/5$ 时, $b_{e1} = b_2$; $2b_2 > L_0/5$ 时, $b_{e1} = L_0/5$; b_{e2} 为单侧悬臂混凝土翼板有效宽度, 可按《Eurocode No. 4》^[5] 规定的方法确定: $b_{e2} = \frac{L_0}{8} \leq b_3$ (b_3 为单侧混凝土翼板全宽); L_0 为结构零弯矩点间距离: 简支梁中 L_0 为单跨长, 多跨连续梁中 L_0 按图 1 的方法确定。

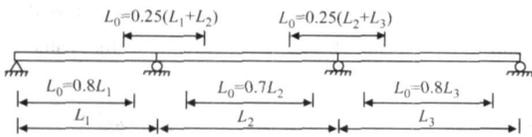


图 1 连续组合脊骨梁中 L_0 的取值

Fig 1 Calculation for L_0 of continuous SCCSG structure

1.2 钢箱底板有效宽度

组合脊骨梁钢箱梁底板有效宽度的选取: 当底板

宽度不超过 $L_0/5$ 时, 取全宽计算; 如果底板宽度超过 $L_0/5$, 则取 $L_0/5$ 作为其有效宽度^[6]。

2 正常使用状态下应力计算

组合脊骨梁在正常使用状态下的弹性承载力极限状态方程为:

$$\sigma_{\max} \leq [f_{id}], \sigma_{\max}^+ \leq [f_{ip}], \tau_{\max} \leq [f_{iv}] \quad (2)$$

式中, σ_{\max}^- 、 σ_{\max}^+ 、 τ_{\max} 为荷载效应设计值产生的最大压应力、最大拉应力和最大剪应力; f_{id} 、 f_{iv} 为设计抗压、抗剪强度, 其中混凝土设计抗剪强度 f_{cv} 取 $0.095 f_{cd}$ (设计抗压强度); f_{ip} 为折减抗拉强度, 其确定方法如下:

偏心荷载作用下, 大悬臂组合脊骨梁的扭转效应十分明显, 截面受拉区 (正弯矩截面中性轴以下部分、负弯矩截面中性轴以上部分) 材料的抗拉强度受到扭转附加剪应力的影响会有所降低, 应予以折减^[6], 即:

$$f_{ip} = 0.9 f_{iy} \sqrt{1 - 3(\tau_{ih}/f_{iy})}, \quad (3)$$

式中, f_{iy} 为钢、混凝土或钢筋的设计抗拉强度; τ_{ih} 为组合截面中, 钢、混凝土和钢筋的自由扭转剪应力, 即: $\tau_{ih} = M_T / (\Omega t_i)$; M_T 为截面外扭矩; Ω 为闭口周边所围成面积的 2 倍; t_i 为计算折减拉应力处材料的厚度。

在正常使用状态下, 需针对不同的施工和使用阶段, 用弹性分析法 (换算截面法) 计算组合脊骨梁的弯曲正应力和剪应力, 计算时忽略波形钢腹板挑梁对截面纵向抗弯、抗剪性能的影响:

(1) 组合脊骨梁在正常使用状态下的弯曲正应力计算方法与普通钢-混凝土组合梁相同, 详见文献 [7]。

(2) 组合脊骨梁剪应力计算分两种情况:

① 正载 (对称荷载) 作用时, 按文献 [7] 规定的方法进行正常使用状态下的剪应力计算。

④ 偏心荷载作用时, 结构在偏载作用下的扭转附加剪应力很大, 甚至超过了弯曲剪应力^[1]。

所以计算组合脊骨梁在偏载作用下的剪应力时, 必须考虑扭转附加剪应力的贡献。由于组合截面箱壁较薄, 截面扭转附加剪应力的绝大部分是由自由扭转贡献的, 为了计算方便, 可仅计入自由扭转剪应力, 即:

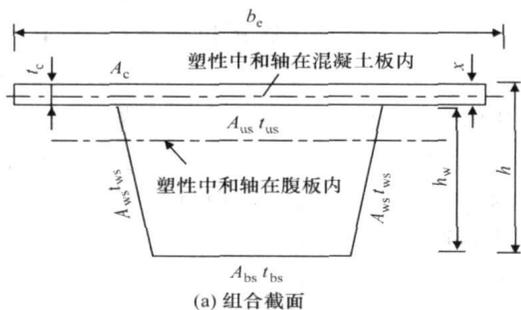
$$\begin{cases} \tau_{sy} = \tau_s + \tau_{sh} = \tau_s + M_T / (\Omega_s), \\ \tau_{cy} = \tau_c + \tau_{ch} = \tau_c + n \cdot M_T / (\Omega_d), \end{cases} \quad (4)$$

式中, τ_{sy} 、 τ_{cy} 为在偏载作用下, 钢箱梁和混凝土板计算点处的剪应力; τ_s 、 τ_c 为对应正载作用下, 钢箱梁和混凝土板计算点处的剪应力; τ_{sh} 、 τ_{ch} 为钢箱梁和混凝土板的自由扭转剪应力; $n = G_s / G_c$ 为钢与混凝土的剪

切模量比; t_d 为组合部分换算厚度。

3 抗弯承载力计算

基本假设: (1) 忽略混凝土板和钢箱梁间的界面滑移, 组合截面符合平截面假定; (2) 忽略混凝土抗拉作用, 仅考虑其范围内纵向钢筋抗拉; (3) 受压区混凝土为均匀受压, 并忽略板内钢筋作用; (4) 组合截面满足



塑性设计条件, 属密实截面; (5) 忽略波形钢腹板挑梁对截面纵向抗弯的影响。

3.1 正弯矩截面极限抗弯承载力

(1) $f_{cd} b_e t_c \geq f_p A_s$ 时, 塑性中和轴在混凝土板内。

抗弯极限状态规定: 塑性中和轴上部混凝土板全截面达到抗压设计强度 f_{cd} , 钢箱全截面达到塑性抗拉强度 $f_p = 0.9f_y$ 。其受力模式见图 2(b)。

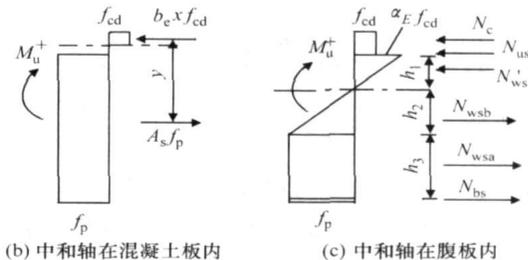


图 2 组合脊梁正弯矩截面抗弯极限状态

Fig 2 Flexural limit state of positive bending moment section on SCCSG

由 $\sum N_i = 0$ 得塑性轴距混凝土板顶距离:

$$x = A_s f_p / (b_e f_{cd}),$$

极限抗弯承载力:

$$M_u^+ = b_e x f_{cd} y, \quad (5)$$

式中, y 为钢箱截面合力至受压区混凝土合力的距离; A_s 为钢箱截面积; b_e 为混凝土板有效宽度。

(2) $f_{cd} b_e t_c < f_p A_s$ 时, 塑性中和轴在钢箱腹板内。

抗弯极限状态规定: 混凝土板全截面达 f_{cd} , 钢箱梁底部部分截面达 f_p 。其受力模式见图 2(c)。

由 $\sum N_i = 0$, $h_1/h_2 = \alpha_E f_{cd} / f_p$, 得:

$$h_1 = \frac{f_p (A_{bs} + 2A_{ws}) - f_{cd} (A_c + \alpha_E A_{us})}{(f_p + \alpha_E f_{cd})^2 A_{ws} / (\alpha_E f_{cd} h_w)},$$

$$h_2 = f_p h_1 / (\alpha_E f_{cd}), \quad h_3 = h_w - h_1 - h_2.$$

基于中和轴, 由 $\sum M_i = 0$ 得极限抗弯承载力:

$$M_u^+ = f_{cd} A_c \left[\frac{t_c}{2} + t_{us} + h_1 \right] + \alpha_E f_{cd} A_{us} \left[\frac{t_{us}}{2} + h_1 \right] + \frac{2}{3} \alpha_E f_{cd} A_{ws} \frac{h_1^2}{h_w} + \frac{2}{3} f_p A_{ws} \frac{h_2^2}{h_w} + 2f_p \frac{h_3}{h_w} A_{ws} \cdot \left[\frac{h_3}{2} + h_2 \right] + f_p A_{bs} \left[\frac{t_{bs}}{2} + h_2 + h_3 \right], \quad (6)$$

式中, α_E 为钢与混凝土弹模比; A 、 t 为面积和厚度; 下标 c、bs、us、ws 分别代表混凝土板、钢箱底板、顶板和腹板; 其余符号含义见图 2。

3.2 负弯矩截面极限抗弯承载力

负弯矩截面的抗弯极限状态规定: 混凝土板中纵向钢筋达到塑性抗拉强度 f_{tr} (0.9 倍设计强度), 钢箱梁中和轴以下部分截面达到塑性抗压强度 f_p 。其受力模式见图 3 所示。

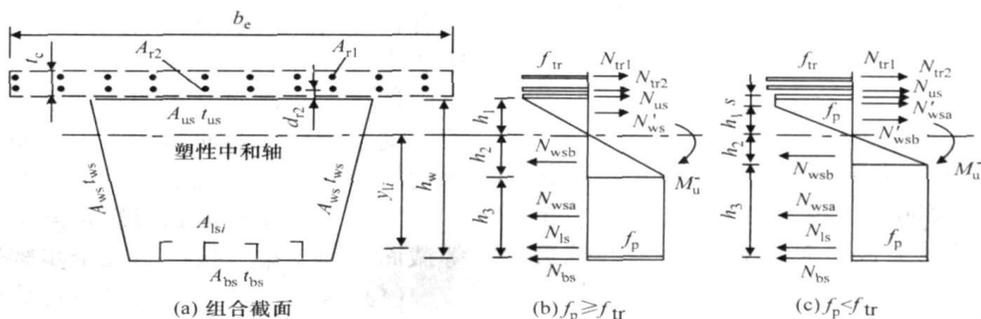


图 3 组合脊梁负弯矩截面抗弯极限状态

Fig 3 Flexural limit state of negative bending moment section on SCCSG structure

(1) $f_p \geq f_{tr}$ 时(图 3(b)), 钢箱顶板应力等于 f_{tr} 。

由 $\sum N_i = 0$, $h_1/h_2 = f_w/f_p$, 得:

$$h_1 = \frac{f_p(A_{bs} + 2A_{ws} + \sum A_{lsi}) - f_{tr}(A_{r1} + A_{r2} + A_{us})}{(f_p + f_{tr})^2 A_{ws} / (f_{tr} h_w)},$$

$$h_2 = f_p h_1 / f_{tr}, h_3 = h_w - h_1 - h_2。$$

基于中和轴, 由 $\sum M_i = 0$, 得极限抗弯承载力:

$$M_u^- = f_{tr} A_{r1} y_1 + f_{tr} A_{r2} y_2 + f_{tr} A_{us} \left[\frac{t_{us}}{2} + h_1 \right] + \frac{2}{3} f_{tr} A_{ws} \frac{h_1^2}{h_w} + \frac{2}{3} f_p A_{ws} \frac{h_2^2}{h_w} + 2f_p \frac{h_3}{h_w} A_{ws} \left[\frac{h_3}{2} + h_2 \right] + f_p A_{bs} \left[\frac{t_{bs}}{2} + h_2 + h_3 \right] + f_p \sum A_{lsi} y_{li}, \quad (7)$$

式中, A_{r1} 、 A_{r2} 、 A_{lsi} 为上、下层纵向钢筋和每条加劲肋的横截面积; y_1 、 y_2 、 y_{li} 为上、下层纵向钢筋中心和加劲肋形心至组合截面塑性中和轴的距离。

(2) $f_p < f_{tr}$ 时(图 3c), 钢箱顶部高度范围内达到

f_{p0} 。

由 $\sum N_i = 0$, 得:

$$h_1 = \frac{f_p \left[A_{bs} + 2A_{ws} + \sum A_{lsi} + \frac{4A_{ws}(d_{r2} + t_{us})}{h_w} - A_{us} \right]}{4f_{tr} A_{ws} / h_w} -$$

$$\frac{f_{tr}(A_{r1} + A_{r2})}{4f_{tr} A_{ws} / h_w} = h_2,$$

$$s = (f_w/f_p - 1)h_1 - d_{r2}, h_3 = h_w + t_{us} - 2h_1 - s。$$

基于中和轴, 由 $\sum M_i = 0$, 得极限抗弯承载力:

$$M_u^- = f_{tr} A_{r1} y_1 + f_{tr} A_{r2} y_2 + f_p A_{us} \left[h_1 + s - \frac{t_{us}}{2} \right] + f_p A_{bs} \left[\frac{t_{bs}}{2} + h_2 + h_3 \right] + f_p \sum A_{lsi} y_{li} + 2f_p A_{ws} \cdot \left[\frac{s - t_{us}}{h_w} \left[\frac{s - t_{us}}{2} + h_1 \right] + \frac{h_1^2}{3h_w} + \frac{h_3}{h_w} \left[\frac{h_3}{2} + h_2 \right] \right], \quad (8)$$

式中, d_{r2} 为混凝土板中下层纵向钢筋中心至钢箱梁顶面的距离; 其余符号含义同前。

4 抗剪承载力计算

对于组合梁的抗剪, 大部分规范规定仅由钢梁腹板承受剪力, 但试验表明^[8,9], 组合梁的抗剪能力至少有 20% 是由钢筋混凝土板贡献的, 组合梁的抗剪可按组合作用来考虑。由于组合脊骨梁的混凝土翼板较宽, 完全忽略其抗剪作用会使计算结果过于保守, 所以本文计算组合脊骨梁的抗剪承载力时, 在正弯矩截面考虑了钢箱顶板宽度 ($2b_2$) 和两侧各 6 倍混

凝土板厚度 ($6t_c$) 范围内钢筋混凝土板的抗剪作用; 在负弯矩截面由于混凝土板开裂而仅考虑了钢箱梁腹板对抗剪的贡献。

4.1 正弯矩截面

组合脊骨梁正弯矩截面的抗剪承载力:

$$V_u^+ = V_{ws} + V_{uc} = 2A_w f_{vp} + (0.0465 + 0.168e^{-\lambda^{1.514} / 9.67}) f_{cd} b_e' t_c, \quad (9)$$

式中, V_{ws} 为钢箱梁腹板抗剪承载力; V_{uc} 为钢筋混凝土板抗剪承载力^[7]; A_{ws} 为单片钢腹板的截面积; $f_{vp} = 0.9f_v$ 为钢材的塑性抗剪设计强度; $b_e' = 2b_2 + 12t_c$ 为钢筋混凝土板的计算宽度; λ 为混凝土板的剪跨比, 定义为剪跨长度(最大弯矩点至零弯矩点的距离)与混凝土板厚度的比值。

4.2 负弯矩截面

组合脊骨梁负弯矩截面因混凝土板开裂, 可认为剪力全部由钢箱梁腹板和底板加劲肋腹板承受, 其抗剪承载力为:

$$V_u^- = (2A_{ws} + \sum A_{ksi}') f_{vp} \quad (10)$$

式中, V_u^- 为负弯矩截面的抗剪承载力; A_{ksi}' 为钢箱底板单个纵向加劲肋腹板面积。

需要注意的是: 连续梁支座处的负弯矩区段同时承受较大的弯矩和剪力作用, 此时应考虑弯矩和剪力相关作用对承载力的影响。其计算方法与常规钢-混凝土组合梁相同^[7]。

5 预应力波形钢腹板组合挑梁计算

5.1 荷载横向分布计算

当荷载作用于某一挑梁处时, 荷载在邻近挑梁间存在横向分配问题, 准确地计算各挑梁所承担的荷载比例对于此类结构的设计至关重要。对于波形钢腹板挑梁并排支撑的大悬臂组合桥面板而言, 混凝土桥面板既可以传递剪力、又可以承受横向弯矩, 钢挑梁间具有较好的横向联系, 故其荷载横向分布可选用刚接梁法进行计算。

计算荷载横向分布的常规刚接梁法仅适用于等截面简支梁结构, 若使其适用于变截面悬臂挑梁并排支撑的组合桥面板, 就必须对刚接梁法进行修正。其基本出发点是把变截面悬臂组合梁按等刚度原则变换为等截面的简支梁, 按以下几个步骤进行:

- (1) 采用换算截面法将组合截面换算为同一种材料的等效截面;
- (2) 变截面悬臂梁变换为等效常截面悬臂梁;
- (3) 常截面悬臂梁变换为等效简支梁。

对预应力波形钢腹板组合挑梁进行截面换算时, 需注意以下问题:

(1) 计算组合挑梁的抗弯惯矩 $I(x)$ 时, 忽略波形钢腹板对抗弯的影响^[12], 只计入混凝土板和钢挑梁上、下翼缘板的抗弯惯性矩。

(2) 截面换算时, 混凝土板有效宽度可利用预应力波形钢腹板组合连续箱梁的混凝土翼板有效宽度比 Ψ 公式^[11]:

$$\Psi = \frac{b_e}{b} = 0.55 \left[\left(\frac{b}{L} \right)^2 - 1.376 \frac{b}{L} + 1.0356 \right], \quad (11)$$

式中, b_e 为挑梁混凝土板有效宽度, 将悬臂挑梁换算成等效跨径的两跨连续梁结构, 由负弯矩相等原则得连续梁等效跨径 $L = 8l/3$; b 为相邻挑梁间距。

5.1.1 荷载作用于悬臂梁自由端

由于刚接梁法考虑了结构的抗扭刚度, 故修正刚接梁法需要进行组合挑梁抗弯刚度和抗扭刚度的变换。具体做法是将悬臂自由端作为等刚度简支梁的跨中截面看待, 则等效简支梁的跨径取悬臂梁长度的2倍(2l), 如图4所示。

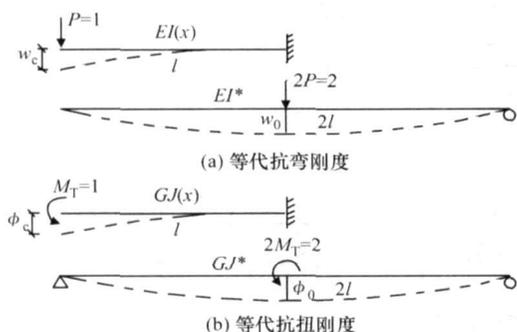


图4 悬臂梁按刚度换算成等截面简支梁示意图

Fig 4 Schematic diagram of converting cantilever beam into uniform simple beam based on equivalent stiffness

(1) 等代抗弯惯性矩 I^*

变截面悬臂挑梁的抗弯惯性矩沿其纵向呈二次抛物线变化^[10], 即: $I(x) = a_1x^2 + b_1x + c_1$ 。利用 $x = 0, l/2, l$ (坐标原点在悬臂自由端) 处的抗弯惯性矩 $I_0, I_{l/2}, I_l$ 对曲线进行拟合, 得:

$$a_1 = [2(I_l + I_0) - 4I_{l/2}] / l^2, \quad c_1 = I_0, \\ b_1 = (4I_{l/2} - I_l - 3I_0) / l.$$

如图4(a), 单位荷载 $P = 1$ 作用在变截面挑梁自由端时, 自由端的挠度为 w_c ; 荷载 $2P = 2$ 作用在等代等截面简支梁跨中时, 跨中挠度为 w_0 , 即:

$$w_c = \frac{1}{E} \int_0^l \frac{1}{I(x)} M^2 dx, \quad w_0 = \frac{2(2l)^3}{48EI^*} = \frac{l^3}{3EI^*}.$$

由等挠度原则: $w_c = w_0$, 得等代抗弯惯性矩:

$$I^* = l^3 / \left[3 \int_0^l \frac{1}{I(x)} M^2 dx \right]. \quad (12)$$

(2) 等代抗扭惯性矩 J_T^*

采用线性变化表示变截面悬臂挑梁的抗扭惯性矩变化^[10]: $J_T(x) = a_2x + b_2$ 。利用 $x = 0, l$ 处截面抗扭惯矩 J_0, J_l 可以得到:

$$a_2 = (J_l - J_0) / l, \quad b_2 = J_0.$$

如图4(b), 单位扭矩 $M_T = 1$ 作用在挑梁自由端时, 自由端扭转角为 ϕ_c ; 在等效简支梁跨中作用扭矩 $2M_T = 2$ 时, 跨中截面扭转角为 ϕ_0 , 即:

$$\phi_c = \frac{1}{G} \int_0^l \frac{1}{J_T(x)} M_T^2 dx, \quad \phi_0 = \frac{2l}{4GJ_T^*} = \frac{l}{2GJ_T^*}.$$

根据 $\phi_c = \phi_0$, 可得等代抗扭惯性矩:

$$J_T^* = l / \left[2 \int_0^l \frac{1}{J_T(x)} M_T^2 dx \right]. \quad (13)$$

最后, 得出等效简支梁的刚度参数 γ 为:

$$\gamma = 5.8 \frac{I^*}{J_T^*} \left(\frac{b}{2l} \right)^2, \quad (14)$$

式中, b 为挑梁间距; l 为悬臂梁长度。

得出 I^*, J_T^*, γ 后, 可根据桥梁荷载横向分布计算的刚接梁法来计算组合桥面板各挑梁的荷载横向分布系数。

5.1.2 荷载作用于悬臂梁任意位置

上述的修正刚接梁法仅适用于荷载作用于悬臂挑梁自由端的情况, 但实际上车轮荷载会作用在挑梁的任意位置, 故有必要对修正刚接梁法做进一步的假设和修正, 使之能够计算荷载作用在挑梁任意位置时的横向分布系数。

由于变截面组合挑梁的抗弯惯性矩 $I(x)$ 呈二次曲线变化, 抗扭惯性矩 $J_T(x)$ 呈线性变化。所以假设当荷载作用位置沿挑梁纵向变化时, 相应点位下挑梁的荷载横向分布系数呈三次曲线变化。将坐标原点设在悬臂的自由端, 则有:

$$\eta(x) = dx^3 + e.$$

根据荷载作用在悬臂自由端时 ($x = 0$) 挑梁的横向分布系数 η_0 及荷载作用在悬臂根部时 ($x = l$) 挑梁的荷载横向分布系数 $\eta_l = 1$, 就可确定两个系数: $d = (1 - \eta_0) / l^3, e = \eta_0$ 。则荷载作用在挑梁任意位置时, 受载挑梁的荷载横向分布系数可表示为:

$$\eta(x) = \frac{1 - \eta_0}{l^3} x^3 + \eta_0. \quad (15)$$

上述荷载横向分布的计算方法除适用于波形钢腹板挑梁支撑的组合桥面板外, 平面钢腹板挑梁或混凝土挑梁支撑的桥面板同样可以借鉴。

5.2 组合挑梁抗弯计算

在预应力波形钢腹板组合挑梁的抗弯计算中,引入“组合梁中波形钢腹板不参与抵抗弯矩,弯矩仅由混凝土板和挑梁上、下翼缘板承担”的结论^[12];等效得到的置换截面仍然符合拟平截面假定^[11]。

5.2.1 横向预应力作用

根据波形钢板“不传递轴向力”的受力特性^[12],认为横向预应力产生的轴力 N 只对混凝土板和挑梁上翼缘板产生作用,其分解如图 5 所示。

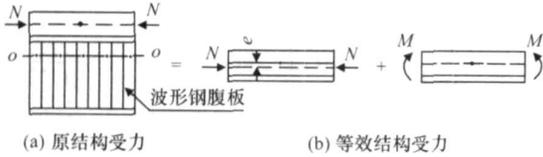


图 5 预应力作用示意图

Fig 5 Schematic diagram of prestressing effect

则横向预应力在混凝土板产生的应力 σ_c 为:

$$\sigma_c = \frac{1}{n} \left(\frac{N}{A_{st} + A_c / \alpha_E} + \frac{M_y}{i} \right), M = pe, \quad (16)$$

式中, A_{st} 为钢梁上翼板面积; A_c 为有效宽度内混凝土板截面积; α_E 为钢与混凝土的弹模比。

5.2.2 开裂弯矩

计算预应力波形钢腹板组合挑梁开裂弯矩时,所关注的是混凝土板未开裂前状态,所以需考虑混凝土板的抗拉作用;将混凝土板的抗拉设计强度 f_{td} 乘以 0.85 折减以确保安全。计算模式如图 6 所示。

由于横向预应力在混凝土板中事先储备了压应力,其对应的压应变为 ε_c ,当混凝土板顶面达到开裂临界条件时,其应变变化到了混凝土折减抗拉强度 $0.85f_{td}$ 所对应的拉应变 ε_+ ,因此可将波形钢腹板组合挑梁的开裂弯矩定义为:使混凝土板上表面产生拉应变 ε_{ck} ($\varepsilon_{ck} = 0.95\varepsilon_c + \varepsilon_+$) 时的外加弯矩 M_K 。其中系

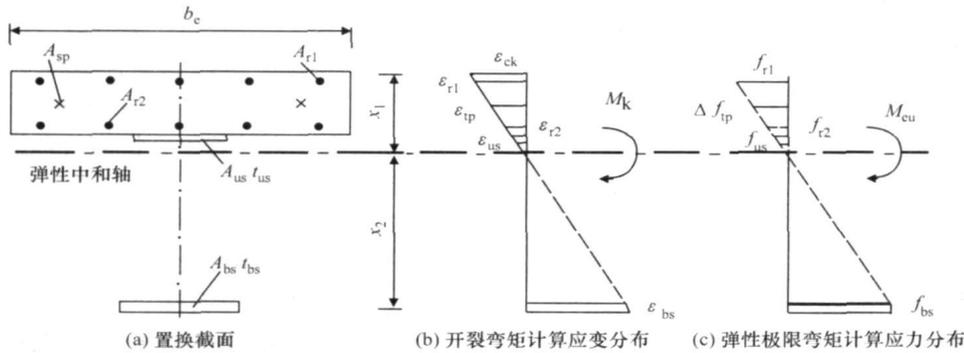


图 6 波形钢腹板组合挑梁抗弯计算简图

Fig 6 Schematic diagram of flexural calculation of composite cantilevered beams with corrugated steel webs

数 0.95 为考虑到横向预应力在混凝土板中(沿脊骨梁纵向)的不均匀性而对 ε_c 的折减。根据拟平截面假定可得(图 6(b)):

$$\varepsilon_{ck} = \frac{0.95\varepsilon_c + 0.85f_{td}}{E_c}, \varepsilon_{bs} = \frac{x_2}{x_1} \varepsilon_{ck}, \varepsilon_{us} = \frac{y_1}{x_1} \varepsilon_{ck},$$

$$\varepsilon_{r2} = \frac{y_2}{x_1} \varepsilon_{ck}, \varepsilon_{tp} = \frac{y_3}{x_1} \varepsilon_{ck}, \varepsilon_{r1} = \frac{y_4}{x_1} \varepsilon_{ck}$$

基于弹性中和轴,由 $\sum M_i = 0$,得预应力波形钢腹板组合挑梁的开裂弯矩为:

$$M_K = E_s(\varepsilon_{bs}A_{bs}x_2 + \varepsilon_{us}A_{us}y_1 + \varepsilon_{r2}A_{r2}y_2 + \varepsilon_{r1}A_{r1}y_4) + E_{tp}\varepsilon_{tp}A_{tp}y_3 + E_c\varepsilon_{ck}A_c \left(x_1 - t_c + \frac{t_c^2}{3x_1} \right). \quad (17)$$

5.2.3 弹性极限弯矩

组合挑梁截面一般为纤细截面,设计时应考虑其弹性极限弯矩^[7]。规定:使挑梁下翼缘板或混凝土板

中上层普通钢筋受压(受拉)屈服时的外加弯矩 M_{eu} 为其弹性极限弯矩。此时混凝土板因开裂而忽略其对承载力的影响,仅计混凝土板有效宽度(按式(11)计算)范围内钢筋和预应力筋的作用。忽略普通钢筋、预应力钢筋和钢板弹性模量的微小差别后,三者的应力也可由拟平截面假定按比例求出,如图 6(c) 所示。

(1) 当 $\frac{x_2}{y_4} \leq \frac{f_{sp}}{f_{st}}$ 时,受拉钢筋先屈服,则:

$$f_{r1} = f_{st}, f_{us} = y_1 f_{st} / y_4, f_{r2} = y_2 f_{st} / y_4, f_{bs} = x_2 f_{st} / y_4, \Delta f_{tp} = y_3 f_{st} / y_4$$

由 $\sum M_i = 0$,得组合挑梁的弹性极限弯矩:

$$M_{eu} = f_{bs}A_{bs}x_2 + f_{us}A_{us}y_1 + f_{r2}A_{r2}y_2 + \Delta f_{tp}A_{tp}y_3 + f_{st}A_{r1}y_4. \quad (18)$$

(2) 当 $\frac{x_2}{y_4} > \frac{f_{sp}}{f_{st}}$ 时,受压钢板先屈服,则:

$$f_{bs} = f_{sp}, f_{us} = y_1 f_{sp} / x_2, f_{r2} = y_2 f_{sp} / x_2,$$

$$f_{r1} = y_4 f_{sp} / x_2, \Delta f_{tp} = y_3 f_{sp} / x_2.$$

由 $\sum M_i = 0$, 得组合挑梁的弹性极限弯矩:

$$M_{eu} = f_{sp} A_{bs} x_2 + f_{us} A_{us} y_1 + f_{r2} A_{r2} y_2 + \Delta f_{tp} A_{tp} y_3 + f_{r1} A_{r1} y_4, \quad (19)$$

式中, 下标 c、s、tp、us、bs、r1、r2 分别代表混凝土、钢、预应力筋、挑梁上、下翼缘板和混凝土板中上、下层普通钢筋; $E、A、\varepsilon、f$ 分别表示弹性模量、面积、应变和应力 (应变、应力的符号不论拉、压均取正值); $f_{sp} = 0.9 f_y$, f_{st} 为钢板塑性抗压设计强度和普通钢筋的抗拉设计强度; $y_1、y_2、y_3、y_4$ 分别为挑梁上翼缘板、下层普通钢筋、预应力筋、上层普通钢筋中心至置换截面弹性中和轴距离。

以上均为组合截面弹性中和轴在波形钢腹板内时的抗弯计算公式, 当弹性中和轴在挑梁上翼缘板或混凝土板内时, 可采用相同的方法和思路来推导其抗弯计算公式。

6 结果对比

为了验证上述组合脊骨梁的计算方法, 进行了组合脊骨梁基本受力性能的静载试验, 试验模型见图 7。

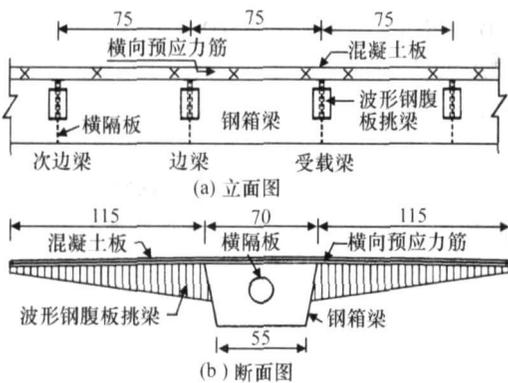


图 7 大悬臂组合脊骨梁试验模型 (单位: cm)

Fig 7 Test model of long cantilevered composite spine girder (unit: cm)

6.1 应力、抗弯承载力结果对比

组合脊骨梁在正常使用状态下应力和抗弯承载力计算结果与试验结果对比见表 1。表 1 中 σ_{bs} 、 τ 和 M_u 分别为钢箱梁底板弯曲正应力、弹性中和轴处腹板剪应力和极限抗弯承载力。

表 1 中的理论公式计算结果与试验结果吻合较好, 误差大部分在 10% 以内, 说明本文的组合脊骨梁应力、抗弯承载力计算公式具有较好的精度, 且有

一定的安全储备, 能够满足实际工程设计的要求。

表 1 应力、抗弯承载力结果对比

Tab 1 Contrast of stress and ultimate capacity of bending resistance

	正弯矩截面			负弯矩截面			
	计算值	试验值	误差	计算值	试验值	误差	
σ_{bs} / MPa	103.51	93.3	9.8	-32.14	-29.6	8.6	
τ / MPa	正载	17.1	18.4	7.6	19.72	18.1	9.0
	偏载	15.3	14.8	3.4	-	-	-
M_u / (kN·m)	388.6	419.6	7.4	-398.1	-467.4	14.8	

6.2 挑梁荷载横向分布结果对比

对波形钢腹板组合挑梁施加集中荷载, 沿挑梁纵向分 4 个点位加载, 实测受载挑梁的荷载横向分布系数结果与计算结果对比详见表 2。

表 2 受载挑梁荷载横向分布系数结果对比

Tab 2 Contrast of load lateral distribution factor of loading cantilevered beam

距端部距离 / cm	15	40	65	90
刚接梁法结果	0.476	0.496	0.567	0.711
试验结果	0.494	0.512	0.581	0.639
误差 / %	-3.6	-3.1	-2.4	11.2

从表 2 的结果对比可看出, 本文修正刚接梁法计算得到的组合挑梁荷载横向分布结果与试验结果的对比误差基本上在 8% 以内 (靠近挑梁根部点位除外), 说明采用换算截面法的修正刚接梁法, 并假设受载挑梁的荷载横向分布系数随荷载作用位置变化按三次曲线分布来计算组合挑梁的荷载横向分布能够与实际情况相符合, 该方法可用于实际设计计算。

另外, 荷载作用位置对挑梁间的荷载横向分布影响很大, 荷载作用位置愈靠近挑梁的悬臂根部, 其受载梁的荷载横向分布系数愈大, 相邻挑梁所承担的荷载比例就愈小。

6.3 组合挑梁抗弯计算结果对比

波形钢腹板组合挑梁的开裂弯矩和弹性抗弯承载力计算结果与试验结果对比见表 3。

表 3 开裂弯矩、弹性极限弯矩结果对比

Tab 3 Contrast of cracking moment and elastic ultimate moment

参数	开裂弯矩 / (kN·m)	弹性极限弯矩 / (kN·m)
试验值	-18.6	-24.7
计算值	-17.3	-21.8
误差 / %	-7.0	-11.7

表 3 表明, 两种方法所得到的组合挑梁抗弯结果基本吻合, 并且实用公式计算结果小于试验结果, 说明本文提出的组合挑梁开裂弯矩和弹性极限弯矩实用计算公式在精度上能够满足实际工程设计的要求, 并且结果偏于安全。

7 结论

(1) 偏载时组合脊骨梁的剪应力计算考虑扭转附加剪应力的影响是合理的, 本文提出的组合脊骨梁抗弯承载力计算公式能够满足实际工程设计的要求。

(2) 基于换算截面法的修正刚接梁法, 并假设荷载作用位置沿挑梁纵向变化时, 受载挑梁的荷载横向分布系数呈三次曲线分布的计算方法, 能较好地分析悬臂组合桥面板挑梁间的荷载横向分布问题。

(3) 利用“波形钢腹板不承担弯矩”的结论, 推导得到的组合挑梁开裂弯矩和弹性极限弯矩实用计算公式, 能够用于实际工程设计。

参考文献:

References:

- [1] 张阳. 带波形钢腹板悬臂挑梁的组合脊骨梁力学性能分析与试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
ZHANG Yang. Experimental Study and Analysis on the Behaviors of Steel-concrete Composite Spine Girder with Large Cantilevered Beams Possessing Corrugated Steel Web [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [2] 周安, 刘其伟, 戴航. 预应力钢-混凝土连续组合梁的挠度研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (4): 63-66.
ZHOU An, LIU Qi-wei, DAI Hang. Study on Deformation of Continuous Prestressed Steel-concrete Composite Beams [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (4): 63-66.
- [3] 张南. 体外预应力对钢-混凝土组合连续梁桥受弯性能的影响分析 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (8): 57-62.
ZHANG Nan. Analysis of External Prestressing Effect on Flexural Performance of Composite Steel Box-concrete Continuous Girder Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (8): 57-62.
- [4] LUO R, EDLUND B. Ultimate Strength of Girders with Trapezoidally Corrugated Webs under Patch Loading [J]. Thin-Walled Structures, 1996, 26 (4): 135-156.
- [5] Eurocode No 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures [S].
- [6] AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications [S].
- [7] 聂建国, 刘明, 叶列平. 钢-混凝土组合结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
NIE Jian-guo, LIU Ming, YE Lie-ping. Steel-concrete Composite Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [8] 聂建国, 陈林, 肖岩. 钢-混凝土组合梁正弯矩截面的组合抗剪性能 [J]. 清华大学学报, 2002, 42 (6): 835-838.
NIE Jian-guo, CHEN Lin, XIAO Yan. Composite Shear Behavior of Steel-concrete Composite Beams under Sagging Moment [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2002, 42 (6): 835-838.
- [9] JOHNSON R P, WILLMINGTON R T. Vertical Shear in Continuous Composite Beams [J]. Proceeding Institute of Civil Engineer, 1972, 53: 189-205.
- [10] 胡肇滋. 桥跨结构简化分析-荷载横向分布 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
HU Zhao-zi. Simplifying Analysis of Bridge Span Structure: load Transverse Distribution [M]. Beijing: China Communications Press, 1996.
- [11] 吴文清. 波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应问题研究 [D]. 南京: 东南大学, 2002.
WU Wen-qing. Study of Shear Lag Effect in Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs [D]. Nanjing: Southeast University, 2002.
- [12] 杨明, 孙筠, 张树仁, 等. 波纹钢腹板体外预应力箱梁桥的发展与展望 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (12): 72-75.
YANG Ming, SUN Jun, ZHANG Shu-ren, et al. Development and Prospect of Externally Prestressed Box Beams with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (12): 72-75.