

考虑滑移效应的钢板-混凝土组合板刚度分析

吴丽丽[†], 琚祥凯, 吕步凡, 肖圣超

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用折减刚度法分析了钢板-混凝土组合板在受弯状态下交界面的滑移情况, 建立了界面剪力关于剪跨段长度的函数, 进而推导了跨中一点加载和两点加载情况下组合板跨中挠度的计算式。此外, 将钢板-混凝土组合板看作是底部纵向受拉钢筋锚固在底面的混凝土结构, 基于钢筋混凝土梁的抗弯刚度计算式, 并采用修正的折减钢板宽度系数法近似考虑钢板与混凝土滑移的影响, 得到了组合板抗弯刚度计算式, 进而利用材料力学公式进一步计算组合板跨中挠度。将这 2 种方法的计算结果与 4 组共 9 块简支组合板的试验结果进行对比, 发现计算结果与试验结果吻合良好, 2 种方法均可用于计算钢板-混凝土组合板跨中挠度, 且第 2 种方法具有一定的安全储备, 方便实际工程的设计应用。

关键词: 钢板-混凝土组合板; 折减刚度法; 滑移效应; 挠度

中图分类号: TU317.2; TU392.4

文献标志码: A

Stiffness Analysis of Steel Plate-concrete Composite Slab Considering Slip Effect

WU Lili[†], JU Xiangkai, LÜ Bufan, XIAO Shengchao

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The interface slip of simply-supported steel plate-concrete composite slabs under bending moment was analyzed by using the reduced stiffness method, the function of the interface shear with shear span was established, and then the calculation formula of deflection under single-point loading and two-point loading was deduced. Meanwhile, assuming the steel plate-concrete composite slab as a type of reinforced concrete with the steel bars anchored at the bottom, based on the stiffness formula of the reinforced concrete beams, the design method of flexural stiffness of composite slabs was obtained and the mid-span deflection of the composite slab was derived by the material mechanic formula. The slip effect between the steel plate and concrete was considered by using the method of the modified width reduction of steel plate. These two methods were compared with the experimental results of 9 simply-supported composite slabs, which were in good agreement. Both the two methods can be used to calculate the deflection of composite slabs, the second method has some safety reservation, and the second method is convenient to the design and application of the practice engineering.

Key words: steel plate-concrete composite slab; reduced stiffness method; slip effect; deflection

* 收稿日期:2018-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678564), National Natural Science Foundation of China(51678564)

作者简介:吴丽丽(1977—),女,江西南昌人,中国矿业大学(北京)教授,工学博士,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: jennywill@163.com

钢-混凝土组合结构由于能充分发挥混凝土和钢材各自的优点,且结构形式多样,已在工程实践中得到广泛的应用.钢板-混凝土组合结构中,钢板代替钢筋承受拉力或压力,同时对内部混凝土有一定约束作用,并具有抗渗、抗裂作用^[1].钢板与混凝土能够有效连接、共同受力,形成组合作用,主要是由焊接在钢材上的抗剪连接件(栓钉、槽钢等)与上部混凝土构件连接成整体实现的^[2].

钢板-混凝土组合板是组合结构最基本的形式,近年来较多应用于桥梁结构^[3],主要桥梁结构形式包括波形钢腹板组合梁桥、槽型钢-混凝土组合梁桥、钢-混凝土组合刚桥、双重组合作用连续组合梁桥和大跨斜拉桥组合桥面系^[4].钢板-混凝土组合板结构对于解决这类桥梁板底主拉应力方向多变的问题具有非常显著的效果,同时避免了裂缝问题,使结构性能大大改善,显示出其良好的应用前景,但对其理论研究落后于工程实践.与传统的钢筋混凝土结构不同,钢-混凝土组合结构由于存在明显的材料分界面,栓钉作为柔性抗剪连接件,在传递交界面的水平剪力时,会产生不可避免的滑移变形,导致截面曲率增大,结构挠度也相应增大.

对于钢-混凝土组合梁挠度的计算方法,国外研究者进行了一些相关研究.Dall 等^[5]采用位移法对组合梁进行分析,表明结构单元的有效自由度在剪力连接件刚度无穷大时会减少.Faella 等^[6]提出了一种在考虑剪力连接件非线性时组合梁挠度计算方法.Spacone 等^[7]讨论了钢板-混凝土组合梁连接滑移的处理、本构、裂缝处理等问题,并总结了组合梁常用的模型.

我国研究者在组合梁刚度及变形方面也开展了相关研究.聂建国等^[8-9]对 8 根钢板-混凝土组合简支梁进行试验研究,结果表明,若合理地配置栓钉连接件,钢板和钢筋混凝土可以形成组合截面共同工作,试件呈现出典型的弯曲破坏方式,有良好的承载能力和延性性能.余志武等^[10-11]通过理论分析,建立了组合梁在考虑滑移效应影响时的变形分析理论.李明鸿等^[12]推导了考虑剪切变形影响的波形钢腹板组合梁的挠曲线初参数方程,并给出了组合梁挠度计算的初参数法.肖岩等^[13]针对组合梁受界面滑移效应的影响,进行了静力线弹性分析,提出了组合梁挠度计算的二阶算法.李凌志等^[14]针对 BSP 梁中钢-混凝土连接界面上横向滑移对加固梁性能的影响,提出了由混凝土梁和钢板抗弯刚度及螺栓连接剪切刚度计算横向滑移和横向剪力传递的实用

计算方法.

综上所述,国内外关于组合结构刚度分析方法大多针对钢-混凝土组合梁这种结构形式,对钢板-混凝土组合板的研究主要在破坏模式等方面^[15],而专门针对钢板-混凝土组合板的挠度计算和刚度分析的研究则涉及甚少.本文采用折减刚度法分析了钢板-混凝土组合板在受弯情况下交界面的滑移情况,建立了界面剪力的函数,进而推导了跨中挠度的计算式.同时,把钢板-混凝土组合板看作是底部纵向受拉钢筋超出了保护层厚度而锚固在混凝土梁底面的混凝土结构,基于钢筋混凝土梁的抗弯刚度公式,采用修正的折减钢板宽度法近似考虑钢板与混凝土滑移的影响,计算钢板-混凝土组合板的跨中挠度.将折减刚度法和修正的折减钢板宽度法的计算结果与相关试验结果进行了对比.

1 基于折减刚度法的简支钢板-混凝土组合板的挠度分析

1.1 组合板交界面剪力的计算

钢板-混凝土组合板在受弯过程中,为了研究方便,特作如下基本假设:1) 钢板与混凝土在加载过程中弯曲曲率相同;2) 抗剪连接件均匀布置;3) 混凝土板截面在加载过程中符合平截面假定;4) 由于钢板的厚度相对于宽度和长度很小,忽略钢板本身的抗弯刚度,这与现有计算方法假设不同^[16].计算简图如图 1 所示.

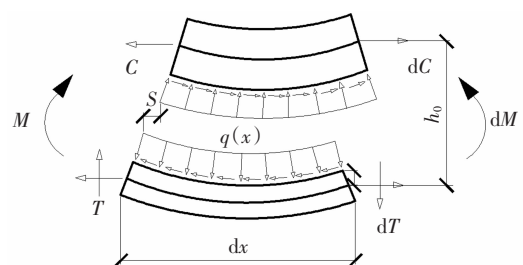


图 1 钢板-混凝土组合板微元体受力分析

Fig.1 Mechanical analysis of the differential unit

图 1 上部为混凝土微元,弹性模量为 E_c , 截面面积为 A_c , 惯性矩为 I_c ; 下部为钢板微元, 截面面积为 A_s ; 钢板与混凝土板的截面形心的距离为 h_0 . 在图 1 中, 钢板和混凝土微元沿界面分开, 界面的剪力以单位长度的剪力 $q(x)$ 替代, 在外荷载作用下, 混凝土板承受压力 C 和弯矩作用 M_c , 钢板承受拉力 T . 需要注意的是, 对于这样一个微元来说, 为保证外力平衡, C 与 T 在数值上是相等的, 假设均等于 N ,

而整个界面的弯矩为 $M(x) = Nh_0 + M_c$, 其中 x 为横坐标上距板最左端的距离。

在组合板发生弯曲变形的时候, 微元也产生了一定的弯曲变形, 在交界面上, 假设有相对滑移 $S(x)$ 发生, ds 为微段 dx 的滑移增量, 将 $\frac{ds}{dx}$ 称之为“滑移应变”^[7], 本文中记为 ε_s . 根据物理意义, ε_s 是由于交界面上相邻点的混凝土应变 ε_c 与钢板应变 ε_{ss} 不相等导致的, 有:

$$\varepsilon_s = \frac{ds}{dx} = \varepsilon_c - \varepsilon_{ss} \quad (1)$$

设 $N(x)$ 为距坐标原点 x 处的轴向力, 即界面剪力, $q(x)$ 为距坐标原点 x 处的交界面上单位长度的剪力, 则:

$$N(x) = N(0) + \int_0^x q(t) dt \quad (2)$$

由式(2)求导得 $q(x) = N'(x)$, 而单位长度的剪力 $q(x)$, 根据前述基本假定 2), 有:

$$q(x) = KS(x) \quad (3)$$

式中 K 为栓钉的纵向抗剪刚度, 由相关试验得到。

将式(2)(3)带入式(1)得:

$$\varepsilon_s = \frac{ds}{dx} = \frac{1}{K} \frac{dq}{dx} = \frac{1}{K} N''(x) \quad (4)$$

导致交界面的滑移应变 ε_s 产生有 2 个原因: 一是由于钢板和混凝土抗拉刚度 EA 的不同, 所以在相同 N 作用下, 产生了不同的轴向变形; 二是由于混凝土板和钢板在弯曲变形下, 虽然具有相同的曲率, 但两者高度不同, 所以在交界面产生了滑移不一致^[6], 与现有计算方法有所不同^[7]。

1) 由荷载 N 产生的相对应变:

$$\varepsilon_c - \varepsilon_{ss} = \left(\frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_s A_s} \right) N(x) \quad (5)$$

2) 由第 2 种原因产生的滑移应变:

$$\varepsilon_c - \varepsilon_{ss} = -\frac{M_c a}{E_c I_c} = -\frac{h_0}{E_c I_c} [M(x) - N(x)h_0] \quad (6)$$

将式(5)(6)相加代入式(4), 得

$$N''(x) - K \left(\frac{1 + h_0^2}{E_c I_c} \right) = -K \frac{h_0}{E_c I_c} M(x) \quad (7)$$

令 $\delta = \frac{1 + h_0^2}{E_c I_c}$, $\Delta = -\frac{h_0}{E_c I_c} M(x)$, $\lambda^2 = K\delta$, 式(7)可化为:

$$N''(x) - \lambda^2 N(x) = K\Delta \quad (8)$$

对于跨中一点加载的情况, 考虑到板两端的对称性, 把坐标原点设在板跨中的钢板底部, 则:

$$M(x) = \frac{P}{2} x \quad (9)$$

即:

$$N''(x) - \lambda^2 N(x) = K \left(-\frac{h_0}{E_c I_c} \right) \frac{P}{2} x \quad (10)$$

方程的解可由式(11)的通解和式(12)的特解的和组成:

$$N_0''(x) - \lambda^2 N(x) = 0 \quad (11)$$

$$N_1''(x) - \lambda^2 N(x) = K \left(-\frac{h_0}{E_c I_c} \right) \frac{P}{2} x \quad (12)$$

方程(11)的通解为:

$$N_0(x) = C_1 \text{sh}x + C_2 \text{ch}\lambda x \quad (13)$$

方程(12)的特解为:

$$N_1(x) = \frac{KPh_0}{2E_c I_c \lambda^2} x \quad (14)$$

将式(13)(14)相加, 得方程通解为:

$$N(x) = C_1 \text{sh}x + C_2 \text{ch}\lambda x + \frac{KPh_0}{2E_c I_c \lambda^2} x \quad (15)$$

代入边界条件: 由于结构对称, 所以跨中交界面的剪力为 0, 有 $q\left(\frac{l}{2}\right) = N'\left(\frac{l}{2}\right) = 0$ 。

又由支座处轴力为 0, 有 $N(l) = 0$, 得出原方程的通解为:

$$N(x) = \frac{Ph_0}{\delta E_c I_c} \left(\frac{l-u}{l} x - \frac{\text{sh}\lambda(1-u)}{\lambda \text{sh}\lambda l} \text{sh}\lambda x \right), x \in (0, u) \quad (16)$$

$$N(x) = \frac{Ph_0}{\delta E_c I_c} \left(\frac{l-u}{l} x - \frac{\text{sh}\lambda(1-u)}{\lambda \text{sh}\lambda l} \text{sh}\lambda(l-x) \right), x \in (u, l) \quad (17)$$

其中 u 为集中力距左端支座的距离, 即剪跨段长度。式(17)即为界面剪力的函数。

利用相同的方法, 得出在均布荷载和在对称两点加载的条件下的通解为:

均布荷载

$$N(x) = \frac{qh_0}{\delta E_c I_c} \left(\frac{l^2 - x^2}{2} - \frac{\text{ch}\lambda l - \text{ch}\lambda x}{\lambda^2 \text{ch}\lambda l} \right) \quad (18)$$

(其中 q 为均布荷载)

两点对称加载

$$\begin{cases} N(x) = \frac{Ph_0}{\delta E_c I_c} \left(\frac{l-u}{l} x - \frac{\text{sh}\lambda(1-u)}{\lambda \text{sh}\lambda l} \text{sh}\lambda x \right) & x \in (0, u), x \in (1-u, 1) \\ N(x) = 0 & x \in (u, 1-u) \end{cases} \quad (19)$$

(其中 u 为左端荷载距支座的距离)

1.2 组合板跨中挠度的计算

由 $M(x) = N(x)h_0 + M_c(x)$, 可得 $M_c(x) = M(x) - N(x)h_0$, 则:

$$\phi(x) = \frac{M_c(x)}{E_c I_c} \quad (20)$$

同样,由材料力学中梁的挠度曲率关系得 $y''(x) = \phi(x)$.

对式(20)积分两次,并考虑到边界条件 $y(0) = 0, y(1) = 0, y'_z(u) = y'_y(u), y_z(u) = y_y(u)$,其物理意义为:支座处的挠度为0, $y'_z(u), y'_y(u)$ 分别为跨中一点加载左右两边的两式求导后在加载点 $x=u$ 处的导数,物理意义为在加载点处左右两边转角相等.

$$y(x) = \frac{P(l-u)}{61E_c I_c} x^3 - \frac{Ph_0^2}{\delta E_c^2 I_c} \left[\frac{l-u}{6l} x^3 - \frac{\text{sh}\lambda(1-u)}{\lambda^3 \text{sh}\lambda l} \text{sh}\lambda x \right] + C_1 x + C_3 \quad (0, u) \quad (21a)$$

$$y(x) = \frac{Pu}{1E_c I_c} \left(\frac{1x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) - \frac{Ph_0^2}{\delta E_c^2 I_c} \left(\frac{u}{l} \left[\frac{1x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right] - \frac{\text{sh}\lambda u}{\lambda^3 \text{sh}\lambda l} \text{sh}\lambda x(1-x) \right) + C_2 x + C_4 \quad (u, l) \quad (21b)$$

式中:

$$C_1 = \frac{Pu^2}{2E_c I_c} - \frac{Pu^3}{61E_c I_c} - \frac{Pul}{3E_c I_c} + \frac{Pu^2}{\delta E_c^2 I_c} \times \left(\frac{u^3}{6l} + \frac{ul}{3} + \frac{u}{\lambda^2 l} - \frac{u^2}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

$$C_2 = -\frac{Pu^3}{61E_c I_c} - \frac{Pul}{3E_c I_c} + \frac{Ph_0^2}{\delta E_c^2 I_c} \left(\frac{u^3}{6l} + \frac{ul}{3} + \frac{u}{\lambda^2 l} \right)$$

$$C_3 = 0$$

$$C_4 = -\frac{Pu^3}{6E_c I_c} - \frac{Ph_0^2}{\delta E_c^2 I_c} \left(\frac{u^3}{6} + \frac{u}{\lambda^2} \right)$$

在工程设计中,通常所求的是跨中挠度,即 $u = x = \frac{l}{2}$ 时,代入式(21),得:

$$y_{\text{mid}} = -\frac{Pl^3}{48E_c I_c} - \frac{Ph_0^2}{\delta E_c^2 I_c} \left[-\frac{l^3}{48} + \frac{l}{4\lambda^2} - \frac{\text{sh}\frac{\lambda l}{2}}{2\lambda^3 \text{ch}\frac{\lambda l}{2}} \right] \quad (22a)$$

将 $\text{sh}\frac{\lambda l}{2}$ 及 $\text{ch}\frac{\lambda l}{2}$ 展开,代入式(22a)中,即

$$y_{\text{mid}} = -\frac{Pl^3}{48E_c I_c} - \frac{Ph_0^2}{\delta E_c^2 I_c} \left[-\frac{l^3}{48} + \frac{l}{4\lambda^2} - \frac{e^{\lambda l} + e^{-\lambda l} - 2}{2\lambda^3(e^{\lambda l} - e^{-\lambda l})} \right] \quad (22b)$$

将 $e^{\lambda l}$ 及 $e^{-\lambda l}$ 展开为幂级数代入式(22b),同时在计算中,略去某些高阶微量,得到简化计算方法如下:

$$y_{\text{mid}} = -\frac{Pl^3}{48E_c I_c} - \frac{Ph_0^2}{(1+h_0^2)E_c I_c} \left[\frac{-\lambda l - e^{\lambda l} + 1}{2\lambda^3} \right] \quad (P \text{ 为跨中集中荷载值}) \quad (23)$$

跨中两点对称加载情况,只需要把 P 换成 $P/2$,按照本节提出的公式在跨中叠加即可得出. 式中体现组合板剪力连接程度 K 的物理意义补充解释如下:

K 为两种材料交界面的单位长度抗剪刚度,定义为:

$$K = \frac{nN_c^v}{S} \quad (24)$$

式中: n 为组合板截面横向的栓钉排数; N_c^v 为单个栓钉的抗剪承载力(按现行(GB 50017—2017)《钢结构设计规范》相关公式进行计算如式(25)所示); S 为栓钉的纵向间距.

$$N_c^v = 0.43A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7A_s \gamma_f \quad (25)$$

2 基于修正的钢板宽度折减系数法的组合板挠度计算

GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[18]在理论与试验研究的基础上提出了钢筋混凝土梁的抗弯刚度计算公式,计算时假定梁的截面应变沿高度符合平截面假定,同时也考虑到混凝土的开裂、钢筋应变不均匀等材料特性,根据规范 GB 50010—2010,得到钢筋混凝土梁的抗弯刚度计算式为:

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}} \quad (26)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk} \rho_{te}} \quad (27)$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87h_0 A_s} \quad (28)$$

式中: ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值; σ_{sk} 为按标准组合计算的钢筋应力.

将钢板-混凝土组合板看作是底部纵向受拉钢筋超出了保护层厚度而锚固在混凝土梁底面的混凝土结构,就可利用规范 GB 50010—2010 中已有的公式去计算.但同时还应考虑到钢-混凝土交界面的滑移问题,由于滑移引起的附加曲率会使构件刚度有所降低,即在给定用钢量的前提下,不考虑滑移计算得到的承载力要比实际值要小,而挠度要比实际值大,也就是说钢板的贡献在一定程度上被削弱了.Roberts 等^[19]在双层钢板-夹芯混凝土组合梁的试验研究中提出了折减钢板宽度这一途径来近似考虑滑移的影响,所提出的钢板宽度折减系数表达式为:

$$k_b = \frac{K_s n}{K_s n + 2bt_{sp} E_s / l} \quad (29)$$

式中: K_s 为单个栓钉的抗剪刚度; n 为半跨长内的栓钉数量; l 为梁的跨度; t_{sp} 为钢板厚度; b 为梁(板)的截面宽度.

栓钉的剪力-滑移曲线受到很多因素的影响,但几乎所有的研究都有栓钉在受荷的初、中期剪力

与滑移基本保持线性关系的共识,在基于一系列不完全剪力连接的钢-混凝土组合梁的挠度研究中, Wang^[20]提出可以采用滑移量为 0.8 mm 处的割线斜率作为栓钉的抗剪刚度,文献[21]建议栓钉的刚度可以按 $K_s = 0.66V_u^{[21]}$, V_u 计算同 N_v (见式(24))。

对钢板的宽度进行折减后,钢板的面积变为 $A'_s = k_b b t_{sp}$, 代入钢筋混凝土结构的抗弯刚度公式, 得:

$$B_s = \frac{E_s A'_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}} \quad (30)$$

得到刚度公式后,运用材料力学的公式,就可以方便地计算出任何荷载水平下的构件挠度. 在计算过程中发现挠度计算结果偏大,原因在于钢板折减的稍多,由于 k_b 是一个介于(0,1)之间的数,因此可对 Roberts 提出的折减系数(式(28))开平方,修正后的钢板宽度折减系数为:

$$k_b = \sqrt{\frac{k_s n}{k_s n + 2b t_{sp} E_s / l}} \quad (31)$$

3 试验验证

3.1 试件设计

在中国矿业大学(北京)结构实验室共完成了 4 组(共 9 块钢板-混凝土组合板)静力加载试验^[22],如图 2 和表 1 所示,各组分别变化栓钉间距、混凝土板厚度、钢板厚度、组合板长宽比等参数.钢板-混凝土组合梁构件所用钢板型号为 Q235B,构件混凝土的设计强度等级为 C40,栓钉型号为 $\phi 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. 钢板通过栓钉剪力连接件与混凝土连接,栓钉在钢板面均匀布置并施焊。

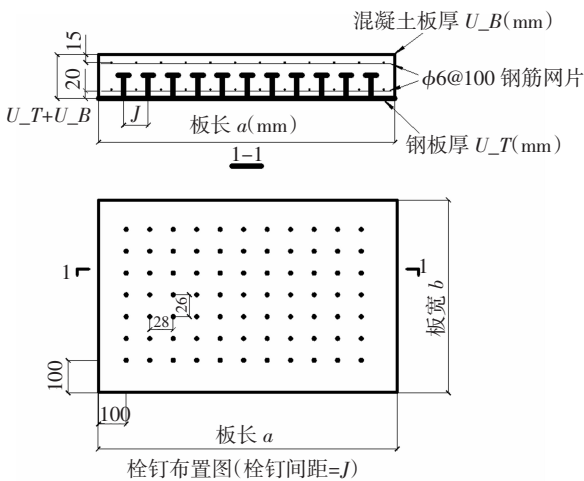


图 2 试件尺寸及构造

Fig.2 Layout diagram of steel netting and shear stud connector

表 1 试件参数

Tab.1 Parameters of specimens

组别	试件编号	钢板厚 U_T/mm	混凝土板厚 U_B/mm	板总厚 h/mm	板长 a/mm	板宽 b/mm	栓钉间距 J/mm
1	S1J1	6	100	106	2 000	1 200	50
	S1J2	6	100	106	2 000	1 200	100
	S1J3	6	100	106	2 000	1 200	200
2	S1B1(*)	6	100	106	2 000	1 200	100
	S1B2	6	125	131	2 000	1 200	100
	S1B3	6	150	156	2 000	1 200	100
3	S1@1(*)	6	100	106	2 000	1 200	100
	S1@2	6	100	106	1 600	1 200	100
	S1@3	6	100	106	1 200	1 200	100
4	S1T1(*)	6	100	106	2 000	1 200	100
	S1T2	8	100	108	2 000	1 200	100
	S1T3	10	100	110	2 000	1 200	100

注:表中试件编号有重复的板后面有“*”表示。

3.2 加载装置及测点布置方案

试验所有构件均为两端简支,采用两点对称加载(S1J1~S1J3,S1T2)或跨中一点加载(S1T3,S1B2,S1B3,S1@2,S1@3).采用中国矿业大学(北京)结构实验室 100 t 油压千斤顶对构件进行加载.加载装置示意如图 3 所示,组合板上位移计布置如图 4 所示.混凝土与钢板的相对滑移通过二者交界处沿梁纵向的导杆引伸仪测得,同时沿梁跨中、加载点和剪跨段钢梁和混凝土截面的高度及底板宽度方向布置了多个应变片(花)测量应变.数据全部通过 TDS-530 静态应变采集系统自动记录。

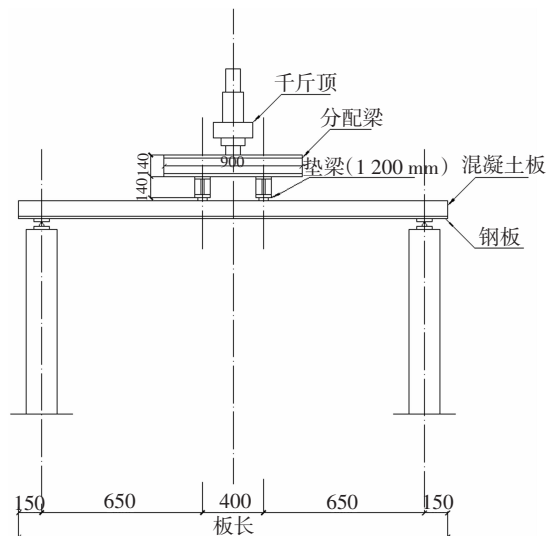


图 3 两点对称加载示意

Fig.3 Symmetrical test setup

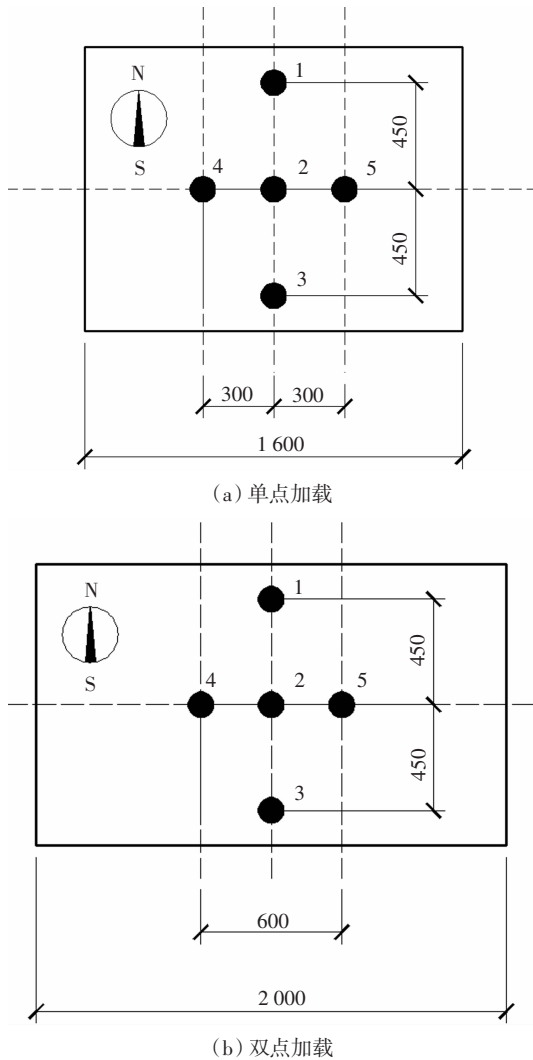


图4 位移计布置
Fig.4 Measurement layout

3.3 挠度实测结果与本文公式计算结果对比

目前国内尚无钢板-混凝土组合板的相关设计规范,本文暂且根据《钢-混凝土组合楼盖设计与施工规程》(YB9238—92)中第4.1.7条关于压型钢板组合板 L (板跨)/360作为正常使用极限状态的挠度限值来考察上述公式推导结果与本文试验结果的差异.通过试验测出钢板-混凝土组合板挠度限值约 L (板跨)/360时的挠度及相应的荷载值如表2中 δ_1 、 P_1 所示.同时按照上述两种挠度计算方法,分别根据试验构件表1列出的参数计算组合板的挠度,其中混凝土弹性模量 $E_c = 3.25 \times 10^4$ MPa,钢板的弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa,将 $\delta = \frac{1+h_0^2}{E_c I_c}$ 、式(24)及 $\lambda^2 = K\delta$ 代入式(23)中计算出各构件在试验所测得荷载 P_1 下的挠度值 δ_1 .

将式(31)、 $A_s' = k_1 b t_{sp}$,代入式(30),根据试验构

件具体参数,运用材料力学公式,就可以计算出相应荷载 P_1 下的构件挠度值 δ_2 .

根据《钢-混凝土组合楼盖结构与施工规程》(YB9238—92)4.1.7条,计算出组合板在相应荷载短期效应组合下的挠度 δ_0 .

按照公式计算试验构件在荷载 P_1 下的跨中挠度如表2中 δ_0 、 δ_1 和 δ_2 所示.

表2 跨中挠度计算结果与实验结果对比

Tab.2 Comparison of mid-span deflection with experimental results

板件编号	P_1/kN	δ_1/mm	δ_0/mm	δ_1/mm	δ_2/mm	$\delta_1 \cdot \delta_1^{-1}$	$\delta_2 \cdot \delta_1^{-1}$
SIJ1	203.13	4.70	5.10	4.98	5.25	1.060	1.118
SIJ2	200.6	4.80	5.03	5.17	5.45	1.077	1.136
SIJ3	171.31	4.76	4.30	5.45	4.95	1.146	1.039
SIB2	228.13	4.72	3.39	4.63	6.21	0.980	1.315
SIB3	293.98	4.73	2.70	4.88	5.35	1.032	1.131
SI@2	132.58	3.60	1.80	3.71	4.17	1.031	1.160
SI@3	129.76	2.49	0.74	2.39	2.83	0.958	1.189
SIT2	198.41	4.72	4.41	4.79	5.17	1.016	1.095
SIT3	211.82	4.72	4.50	4.83	5.36	1.024	1.135
平均值						1.036	1.146
变异系数						0.053	0.066

从表2可以看出,利用本文推导的两种挠度计算公式所计算的结果与试验结果均比较吻合,且可以考虑钢板-混凝土结构之间的滑移,第1种方法更加精确.第2种对Roberts提出的钢板宽度折减系数进行开方处理后,基于GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中关于钢筋混凝土梁的抗弯刚度计算公式计算组合板的挠度结果偏大,偏于安全,但其形式与现行规范中的刚度计算公式统一,这种方法意义简单、明确,偏于实际工程的设计应用.而根据现有规程《钢-混凝土组合楼盖设计与施工规程》计算的挠度与实际结果相差较大,同时安全储备较小,这表明现有规程并不完全适用于本文所研究的钢板-混凝土组合板,需要进一步开展研究制定适用于钢板-混凝土组合板的刚度计算方法.

4 结论

本文分别采用折减刚度法和修正的折减钢板宽度法近似考虑钢板与混凝土滑移的影响,研究了钢板-混凝土组合板的跨中挠度的计算方法,并将这两种方法与试验结果进行了对比,得到以下结论:

1)基于“折减刚度系数”法,根据本批试件材料的实际强度参数,建立了界面剪力的函数,利用材料力学中梁的挠度曲率关系得到跨中一点加载和两点加载情况下组合板跨中挠度的计算公式,计算结果与试验值比较吻合,是一种可靠的计算钢板-混凝土组合板挠度的方法。

2)把钢板-混凝土组合板看作是底部纵向受拉钢筋超出了保护层厚度而锚固在混凝土梁底面的混凝土结构,基于GB 500010—2010《混凝土结构设计规范》中的抗弯刚度公式,同时修正的折减钢板宽度法近似考虑钢板与混凝土滑移的影响,可以进一步得到组合板的刚度及挠度。其挠度计算结果偏大,具有一定的安全储备,同时由于公式的表示形式与现行混凝土规范中的刚度计算公式统一,因此方便实际工程的设计应用。

参考文献

- [1] 杨悦,刘晶波,樊健生,等.钢板-混凝土组合板受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(10):24—31.
YANG Y, LIU J B, FAN J S, *et al.* Experimental study on flexural capacity of steel plate-concrete composite slabs [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10):24—31. (In Chinese)
- [2] 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,2005:75—88.
NIE J G, LIU M, YE L P. Steel-concrete composite structural[M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2005:75—88. (In Chinese)
- [3] 陈宝春,牟廷敏,陈宜言,等.我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J].建筑结构学报,2013,34(S1):1—10.
CHEN B C, MU T M, CHEN Y Y, *et al.* State-of-the-art of research and engineering application of steel-concrete composite bridges in China[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1):1—10. (In Chinese)
- [4] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等.钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J].土木工程学报,2012,45(6):110—122.
NIE J G, TAO M X, WU L L, *et al.* Advances of research on steel-concrete composite bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6):110—122. (In Chinese)
- [5] DALL A A, ZONA A. Non-linear analysis of composite beams by a displacement approach [J]. Computers and Structures, 2002, 80: 2217—2228.
- [6] FAELLA C, MARTINELLI E, NIGRO E. Shear connection nonlinearity and deflections of steel-concrete composite beams a simplified method [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(1): 12—20.
- [7] SPACONE E, SHERIF E. Nonlinear analysis of steel-concrete composite structures state of the art [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 159—168.
- [8] 聂建国,沈聚敏,袁彦声.钢-混凝土简支组合梁变形计算的一般公式[J].工程力学,1994,11(1):21—27.
NIE J G, SHEN J M, YUAN Y S. The general formula for calculating the deformation of the simply supported steel and concrete composite beam [J]. Engineering Mechanics, 1994, 11(1):21—27. (In Chinese)
- [9] 聂建国,赵洁.钢板-混凝土组合加固钢筋混凝土简支梁试验研究[J].建筑结构学报,2008,29(5):50—56.
NIE J G, ZHAO J. Experimental study on simply supported RC beams strengthened by steel plate-concrete composite technique [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(5):50—56. (In Chinese)
- [10] 蒋丽忠,余志武,李佳.均布荷载作用下钢-混凝土简支梁界面滑移理论及变形计算[J].工程力学,2003,20(2):133—137.
JIANG L Z, YU Z W, LI J. The interface slip and deformation of steel-concrete composite beams under uniformly distributed loads [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(2):133—137. (In Chinese)
- [11] 余志武,蒋丽忠,李佳.集中荷载作用下钢-混凝土简支梁界面滑移理论及变形计算[J].土木工程学报,2003,36(8):1—6.
YU Z W, JIANG L Z, LI J. The interface slip and deformation of steel-concrete composite beams under concentrated loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(8):1—6. (In Chinese)
- [12] 李明鸿,万水,蒋正文,等.波形钢腹板混凝土组合梁挠度计算的初参数法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(2):66—74.
LI M H, WAN S, JIANG Z W, *et al.* Initial parameter method for deflection calculation of concrete composite girder with corrugated steel webs [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(2):66—74. (In Chinese)
- [13] 肖岩,彭罗文, KUNNATH S. 组合梁考虑滑移效应的理论分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(1):77—86.
XIAO Y, PENG L W, KUNNATH S. Analysis of composite beams with interlayer slip [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(1):77—86. (In Chinese)
- [14] 李凌志,姜常玖,陆洲导,等.梁侧锚固钢板加固混凝土梁的横向剪力传递模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(3):113—119.
LI L Z, JIANG C J, LU Z D, *et al.* Transfer model of transverse shear in bolted side-plated reinforced concrete beams [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(3):113—119. (In Chinese)
- [15] 吴丽丽,刘艳,姜宇鹏,等.钢板-混凝土组合板在横向集中荷载作用下的破坏模式分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(7):68—74.
WU L L, LIU Y, JIANG Y P, *et al.* Failure modes analysis of steel plate-concrete composite slabs under transverse concentrated load [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(7):68—74. (In Chinese)
- [16] 聂建国.钢-混凝土组合结构[M].北京:中国建筑工业出版社,2013:100—104.
NIE J G. Steel-concrete composite structure [M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2013:100—104. (In Chinese)
- [17] 朱聘儒.钢-混凝土组合梁设计原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:192—200.
ZHU P R. Design principle of steel concrete composite beam [M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2006:192—200. (In Chinese)
- [18] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:86—89.
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2010:86—89. (In Chinese)
- [19] ROBERTS T M, EDWARDS D N, NARAYANAN R. Testing and analysis of steel-concrete-steel sandwich beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 38(3):257—279.
- [20] WANG Y C. Deflection of steel-concrete composite beams with partial shear interaction [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10):1159—1165.
- [21] 聂建国.钢-混凝土组合梁强度、变形和裂缝的研究[D].北京:清华大学土木水利学院,1994:34—50.
NIE J G. The study on strength, deformation and crack of the steel-concrete composite beam [D]. Beijing:College of Civil Engineering, Tsinghua University, 1994:34—50. (In Chinese)
- [22] 吴丽丽,姜宇鹏,张栋栋,等.简支钢板-混凝土组合板受弯性能及承载力分析[J].建筑结构学报,2015,36(12):125—134.
WU L L, JIANG Y P, ZHANG D D, *et al.* Flexural behavior and bearing capacity of simply supported steel plate-concrete composite slab [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12):125—134. (In Chinese)