

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.01.009

中欧规范钢-混组合梁 抗弯承载力计算方法对比

暨邦冲

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 在收集钢-混凝土组合梁试验研究资料的基础上,分别采用中国规范 GB 50917-2013、JGJ138-2016、欧洲规范 Eurocode 4(简称 EC4)及线弹性法,计算所收集试件的抗弯承载力,并与试验结果进行比较。结果表明:GB 50917-2013、JGJ 138-2016 与 EC4 中抗弯承载力的计算方法,主要的不同在于有效宽度的取值、是否考虑滑移效应的影响以及是否计入纵向钢筋对抗弯承载力的贡献;GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 的计算方法得到的抗弯承载力的计算理论值与试验实测值更加接近,且数据更为稳定;GB 50917-2013 不仅考虑了整体栓钉布置导致的滑移效应,还考虑了纵向钢筋对承载力的贡献,所计算出的结果偏于保守;线弹性法比塑性理论更为保守。由于目前的计算方法与实际情况仍有一定误差,下一步建议从有效宽度、纵向钢筋对抗弯承载力的贡献与滑移效应的角度出发,提出更适用于计算钢-混凝土组合梁抗弯承载力的方法。

关键词: 桥梁工程;组合结构;钢-混凝土组合梁;规范比较

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)01-0053-08

Comparison of calculation methods for flexural load capacity of steel-composite beams based on Chinese and European codes

Ji Bangchong

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: On the basis of the collected information from the experimental study of steel-concrete composite beams, the flexural load capacity of the collected specimens was calculated using the Chinese code GB 50917-2013, JGJ 138-2016 and the European code Eurocode 4 (EC4 for short) and the linear elastic method respectively, and then the results were compared with the experimental results. Results show that: the main differences between the calculation methods of flexural bearing capacity in GB 50917-2013, JGJ 138-2016 and EC4 are the value of effective width, whether to consider the slip effect and contribution of longitudinal reinforcement to flexural bearing capacity; the calculated theoretical value of the flexural bearing capacity obtained by the calculation method of GB 50017-2017 and JGJ 138-2016 is closer to the actual measured value of the test, and the data is more stable; GB 50917-2013 not only considers the slip effect caused by the overall peg arrangement, but also considers the contribution of the longitudinal reinforcement to the bearing capacity, and the calculated results are more conservative; linear elasticity method is more conservative than plastic theory. Since there are still errors between the current calculation method and the actual situation, the next step is to mainly consider the effective width, the contribution of longitudinal reinforcement to the flexural load bearing capacity with consideration of the slip effect, etc., and propose a calculation method more suitable for calculating the flexural load bearing capacity of steel-concrete combination beams.

Keywords: bridge engineering; combined structure; steel-concrete composite beam; code comparison

收稿日期: 2021-11-28

作者简介: 暨邦冲(1995—),男,福建南平人,硕士研究生,研究方向:组合结构桥梁。

钢-混凝土组合梁(以下简称组合梁)。通过剪力连接件将钢梁和混凝土板组合成整体共同受力,充分发挥钢材受拉、混凝土受压性能好的优点。与钢梁相比,组合梁截面刚度大,可减小梁的挠度,还可提高梁的自振频率;与混凝土梁相比,组合梁结构自重小,结构高度低,吊装重量轻,在国外应用较为广泛^[1-3]。

目前国内外已经颁布一些组合梁的设计规范,如我国颁布的 GB 50917-2013《钢-混凝土组合桥梁设计规范》^[4]、GB 50017-2017《钢结构设计标准》^[5]和 JGJ138-2016《组合结构设计规范》^[6],以及欧洲规范 EUROCODE 4(简称 EC4)^[7]。上述规范中的计算方法和理论分析各异,可靠度水准也参差不齐^[8]。

为探讨上述规范的计算精度,本文在收集组合梁试验研究资料的基础上,分别采用中国规范 GB 50017-2017、JGJ138-2016、欧洲规范 EC4 及线弹性法,计算所收集试件的抗弯承载力,并与试验结果进行比较,分析不同规范之间在计算精度方面的差异,为组合梁的结构设计提供参考。

1 现各规范的计算方法

1.1 GB 50917-2013

GB 50917-2013 采用塑性设计方法计算组合梁的抗弯承载力,计算时根据塑性中和轴的位置,将截面分为两种类型。

1.1.1 塑性中和轴在钢梁内

即满足公式 $A_c f_{cd} + A_r f_{sd} < A_s f_{d+} + A_s \sigma_{pu,d}$ 时,抗弯承载力应符合下列公式要求:

$$\gamma_0 M \leq k(A_c f_{cd} \gamma_1 + A_{sc} f_d \gamma_2 + A_p \sigma_{pu,d} \gamma_3 + A_r f_s \gamma_4) \quad (1)$$

$$A_{sc} = \frac{A_s f_d + A_p \sigma_{pu,d} - A_c f_{cd} - A_r f_{sd}}{2f_d} \quad (2)$$

$$k = 1 - 0.048e^{-0.43r} \quad (3)$$

$$r = \frac{n_r N_v^c}{\min(A_c f_{cd}, A_s f_d)} \quad (4)$$

式中: γ_0 为重要性系数; M 为正弯矩设计值, $N \cdot mm$; k 为滑移效应拟合系数,可取 0.96,或按式(3)计算; A_c 为混凝土桥面板截面面积, mm^2 ; A_{sc} 为钢梁受压区截面面积, mm^2 ; A_p 为体外预应力筋截面面积, mm^2 ; A_r 为中和轴上侧混凝土桥面板内纵向钢筋的截面面积, mm^2 ; A_s 为钢梁的截面面

积, mm^2 ; γ_1 为混凝土桥面板受压区截面形心至钢梁受拉区截面形心的距离, mm ; γ_2 为钢梁受压区截面形心至钢梁受拉区截面形心的距离, mm ; γ_3 为体外预应力筋的截面形心至钢梁受拉区截面形心的距离, mm ; γ_4 为混凝土桥面板内纵向钢筋的截面形心至钢梁受拉区截面形心的距离, mm ; $\sigma_{pu,d}$ 为体外预应力筋的极限应力设计值, MPa ; f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值, MPa ; f_d 为钢材抗拉强度设计值, MPa ; f_{sd} 为混凝土桥面板内纵向钢筋抗拉强度设计值, MPa ; r 为剪力连接程度; n_r 为一个剪跨区的抗剪连接件数; N_v^c 为一个抗剪连接件的抗剪承载力设计值, MPa 。

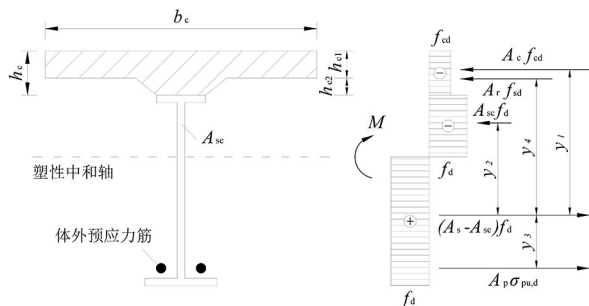


图 1 塑性中和轴在钢梁内时的应力图形

Fig.1 Graph of stresses when the plastic neutral axis is inside a steel beam

1.1.2 塑性中和轴在混凝土桥面板内

即 $A_c f_{cd} + A_r f_{sd} \geq A_s f_{d+} + A_s \sigma_{pu,d}$ 时,抗弯承载力应符合下列公式要求:

$$\gamma_0 M \leq k(A_c f_{cd} \gamma_1 + A_p \sigma_{pu,d} \gamma_3 + A_r f_{sd} \gamma_4) \quad (5)$$

$$A_{cc} = b_e x = \frac{A_s f_d + A_p \sigma_{pu,d} - A_r f_{sd}}{f_{cd}} \quad (6)$$

$$k = 1 - 0.082e^{-0.3r} \quad (7)$$

式中: A_{cc} 为塑性中和轴上侧混凝土桥面板的面积, mm^2 ; b_e 为混凝土桥面板的有效宽度, mm ; x 为混凝土桥面板受压区高度, mm ; k 为考虑滑移效应的拟合系数,取 0.94,也可用式(7)计算。

单个栓钉连接件的抗剪承载力设计值取式(8)和(9)中的较小值。

$$N_v^c = 1.19 A_{std} f_{std} \left(\frac{E_c}{E_s} \right)^{0.2} \left(\frac{f_{cu}}{f_{std}} \right)^{0.1} \quad (8)$$

$$N_v^c = 0.43 \eta A_{std} \sqrt{f_{cd} E_c} \quad (9)$$

式中, A_{std} 为栓杆的截面面积, mm^2 ; E_c 、 E_s 为混凝土和栓钉的弹性模量, MPa ; f_{cu} 为混凝土立方体

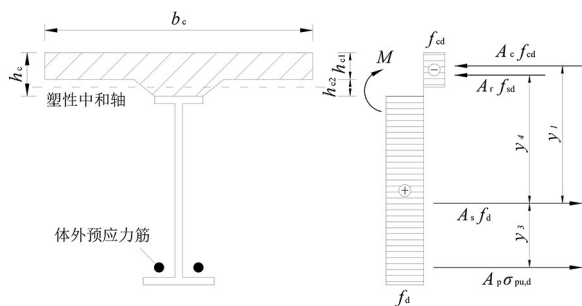


图 2 塑性中和轴在混凝土桥面板内的应力图形

Fig.2 Graph of stresses when the plastic neutral axis is inside a concrete deck slab

抗压强度, MPa; f_{std} 栓钉的抗拉强度, MPa; η 为群钉效应折减系数。

组合梁也有剪力滞, 但剪力滞分析计算较为复杂^[9-10], 故各规范中均引入有效宽度进行简化计算, 且计算方法也各有不同。

GB 50917-2013 参考了 EC4 中关于组合梁有效宽度的相关规定, 其规定组合梁桥面板的有效宽度 b_e 应符合下列规定:

(1) 中间跨和中间支座的有效宽度 b_e 按下列公式计算:

$$b_e = b_0 + \sum b_{ei} \quad (10)$$

$$b_{ei} = \frac{L_e}{6} \leq b_i \quad (11)$$

(2) 边支座的有效宽度按下列公式计算:

$$b_e = b_0 + \sum \beta_i b_{ei} \quad (12)$$

$$\beta_i = (0.55 + 0.025L_e/b_{ei}) \leq 1.0 \quad (13)$$

式中: b_0 为同一截面最外侧抗剪连接件间的横向间距, mm; b_{ei} 为钢梁腹板一侧的混凝土桥面板有效宽度, mm, 且不应超过板的实际宽度 b_i ; L_e 为组合梁的有效跨径。

1.2 GB 50017-2017 与 JGJ138-2016

GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 中关于组合梁的计算方法与原则完全相同。对于完全抗剪连接组合梁的正弯矩验算, GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 也根据塑性中和轴的位置, 将截面分为两种类型:

1.2.1 塑性中和轴在混凝土翼板内

即 $A_s f_d \leq b_c h_{c1} f_{cd}$ 时, 受弯承载力应满足下式:

$$M \leq b_c x f_{cd} y \quad (14)$$

$$x = \frac{A_s f_d}{b_c f_{cd}} \quad (15)$$

式中, x 为受压区高度, mm; y 为钢梁截面至混凝土受压区截面间的应力合力距离, mm。

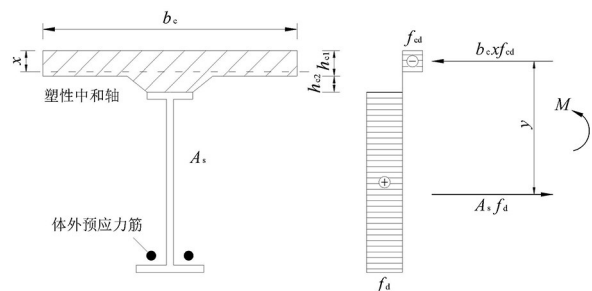


图 3 塑性中和轴在混凝土翼板内的应力图形

Fig.3 Graph of stresses when the plastic neutral axis is inside a concrete flange slab

1.2.2 塑性中和轴在钢梁截面内

即 $A_s f_d > b_c h_{c1} f_{cd}$ 时, 受弯承载力应满足下式:

$$M \leq b_c h_{c1} f_{cd} y_1 + A_{sc} f_d y_2 \quad (16)$$

$$A_{sc} = 0.5(A_s - b_c h_{c1} f_{cd} / f_d) \quad (17)$$

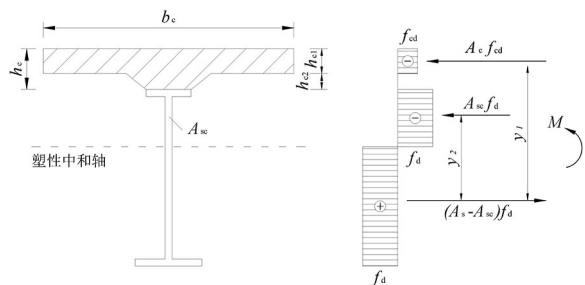


图 4 塑性中和轴在钢梁内的应力图形

Fig.4 Graph of stresses when the plastic neutral axis is inside the steel beam

由以上公式可看出, GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 的计算方法忽略了混凝土板中纵向钢筋对于承载力的贡献, 且不考虑滑移效应, 也不考虑栓钉的纵向布置对结构承载力的影响。因此计算所需确定的参数少, 公式简洁, 计算过程快。

GB 50017-2017、JGJ138-2016GB 与 GB 50917-2013 计算方法的主要差异是: GB 50917-2013 考虑了混凝土板中纵向钢筋对于承载力的贡献, 并考虑栓钉布置对于滑移效应影响, 采用系数 k 对最后计算出的抗弯承载力进行折减。但若精确计算滑移效应, 所需计算的参数较多, 计算

过程繁琐。在本文介绍的若干规范中,仅有 GB 50917-2013 的计算方法考虑了布有体外预应力筋的情况,其它规范均未考虑。

对于有效宽度的计算,GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 中的条文规定仍然相同:在进行组合梁截面承载能力验算时,跨中及中间支座处混凝土翼板的有效宽度 b_e 应按下式计算:

$$b_e = b_0 + b_1 + b_2 \quad (18)$$

式中: b_0 为板托顶部的宽度,mm; b_1 、 b_2 为梁外侧和内侧的翼板计算宽度,mm,各取梁等效跨径 l_e 的 $1/6$,且 b_1 尚不应超过翼板实际外伸宽度 S_1 , b_2 不应超过相邻钢梁上翼缘或板托间净距 S_0 的 $1/2$ 。

GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 中有效宽度的计算,参照了 EC4 的相关条文并结合相关研究成果,主要还是考虑以梁跨径为影响有效宽度的主要因素,取消了旧规范 GB 50017-2003^[11] 中有效宽度与厚度相关的规定,实际上也有试验与理论分析表明^[12],板厚对有效宽度影响很小。

1.3 EC4

EC4 中规定,根据不同的结构形式,可采用塑性理论、弹性分析理论和非线性理论等不同计算方法与理论。限于篇幅,本文采用 EC4 中的塑性计算理论进行对比,EC4 中也给出了典型塑性应力分布图(见图 5)。图中, f_{yd} 为纵向钢筋设计屈服强度, f_{cd} 为混凝土圆柱体抗压强度设计值。具体计算公式参见文献[13-14]。

在 EC4 中,根据塑性中和轴所处的位置,将结构分成塑性中和轴在混凝土板内、塑性中和轴在钢梁的受压翼缘中和塑性中和轴位于钢梁腹板中 3 种情况计算截面的受弯承载力。

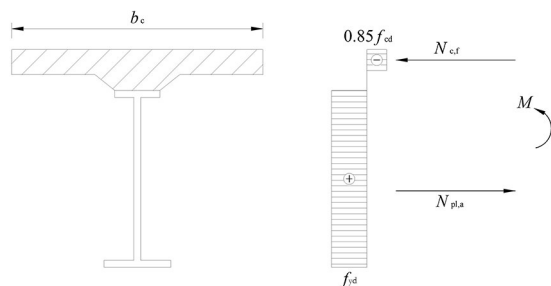


图 5 组合梁塑性应力分布示例图

Fig.5 Diagram of plastic stress distribution of combined beam

对于有效宽度,EC4 中的计算方法与 GB 50917-2013 中的方法类似。不同点为,EC4 中混凝土桥面板有效宽度 b_{ei} 取 $L_e/8$,而 GB 50917-2013 取 $L_e/6$,其余的公式均一致。另关于有效跨径 L_e ,两个规范在系数大小上的取值也略有不同。

因此,EC4 的计算方法可以说是介于另两种方法之间,有效宽度的计算方法与 GB 50917-2013 相似,同样不考虑纵向钢筋对承载力的贡献以及滑移效应和栓钉纵向布置的影响。

此外,与我国规范的主要差别在于对混凝土强度的取值,EC4 中规定受压混凝土的有效面积承受 $0.85f_{cd}$ 的应力,乘以 0.85 是为了消除结构中混凝土强度与试件混凝土强度间差异的影响。在乘以 0.85 修正后,EC4 中混凝土板对抗弯承载力的贡献比我国规范的略高一些,比我国常用的 C40~C60 混凝土,会高出 1%~10%。

1.4 线弹性法

线弹性法是较为经典的计算方法,在各国规范中均有提及,例如 EC4,以及我国的 JTG D64-2015《公路钢结构桥梁设计规范》和 JTG/T D64-01-2015《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》等,但各规范有效宽度的计算规定略有不同。限于篇幅,这里以 JTG D64-2015 与 JTG/T D64-01-2015 方法为例进行讨论。

JTG D64-2015 与 JTG/T D64-01-2015 中规定,组合梁抗弯承载力应满足下式:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \frac{M_{d,i}}{W_{eff,i}} \quad (19)$$

$$\gamma_0 \sigma \leq f \quad (20)$$

式中, i 为变量,表示不同的应力计算阶段; $M_{d,i}$ 为不同应力计算阶段作用于钢梁或组合梁截面的弯矩设计值, $N \cdot mm$; $W_{eff,i}$ 为不同应力计算阶段钢梁或组合梁截面的抗弯模量, mm^3 ; f 为钢筋、钢梁或混凝土的强度设计值, MPa 。

JTG D64-2015 和 JTG/T D64-01-2015 有效宽度的计算方法与 GB 50917-2013 一致。

2 计算方法比较与分析

从文献[15-20]中收集 6 根不同构造组合梁的受弯试件进行分析,所有试件均为简支梁,试件基本参数如表 1 所示。

表 1 试件参数表

Tab.1 Specimen parameters

数据 来源	L_e / mm	b / mm	h_{cl} / mm	f_{cd} / MPa	A_s / mm ²	f_d / MPa
文献[15]	5 000	600	125	40.46	6 146.0	253.0
文献[16]	3 000	300	80	38.30	4 300.0	352.0
文献[17]	3 400	600	90	35.00	4 032.0	410.0
文献[18]	2 700	800	130	25.82	3 504.0	366.0
文献[19]	2 800	700	110	24.83	3 557.8	303.7
文献[20]	3 000	1 000	100	24.70	3 636.0	395.0

2.1 有效宽度的比较

根据前文所提到的各规范中有效宽度的计算方法,由表 1 中各试件的参数,计算各试件的有效宽度。计算结果如表 2 所示。

由结果可知,EC4 对于有效宽度的取值明显保守于其它规范,即更容易使有效宽度产生折减。尤其是对于只布置单个抗剪连接件或混凝土翼缘长度较长的构件^[18,20],采用 EC4 中的计算方法对有效宽度折减影响较大。

表 2 有效宽度计算结果表

Tab.2 Effective width calculation results

数据来源	L_e	b	有效宽度 b_e		
			GB 50917 -2013	GB 50017- 2017 与 JGJ 138-2016	EC4
文献[15]	5 000	600	600	600	600
文献[16]	3 000	300	300	300	300
文献[17]	3 400	600	600	600	600
文献[18]	2 700	800	800	800	675
文献[19]	2 800	700	700	700	700
文献[20]	3 000	1 000	1 000	1 000	814

2.2 计算值与试验值的比较

根据前文提到的计算方法,计算上文中各试件的极限抗弯承载力,并与实测值对比。对于 GB 50917-2013 中滑移效应的拟合系数 k ,不使用规范推荐的经验值,采用规范中的公式计算;对于线弹性法,判定构件达到极限承载力的条件是型钢

达到屈服强度或混凝土达到极限压应力。

表 3 为按各规范计算方法计算出的中性轴位置。由结果可看出,各规范计算出的塑性中性轴的位置均相同,未出现不一致现象。

表 3 塑性中性轴所在位置统计表

Tab.3 Statistics of the location of plastic neutral axis

数据来源	GB 50917- 2013	GB 50017- 2017 与 JGJ 138-2016	EC4
文献[15]	混凝土板	混凝土板	混凝土板
文献[16]	钢梁翼缘	钢梁翼缘	钢梁翼缘
文献[17]	混凝土板	混凝土板	混凝土板
文献[18]	混凝土板	混凝土板	混凝土板
文献[19]	混凝土板	混凝土板	混凝土板
文献[20]	混凝土板	混凝土板	混凝土板

按各规范的方法计算构件抗弯承载力的结果如图 6 所示,从图 6 可看出,不同计算方法计算出的试件抗弯强度荷载理论值与实测值之间存在一定的差异。从计算结果看,GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 计算结果平均值较为接近 1,为 0.969,即计算荷载值更接近实测值,其变异系数也较低,为 0.093,说明数据离散性较小,计算结果较为稳定;EC4 计算结果平均值略低于 GB 50017-2017 与 JGJ138-2016,为 0.967,相差不大,但标准差与变异系数比前两种方法大,说明数据离散性较大;GB 50917-2013 计算结果平均值较低,说明计算荷载值与实测值相差较大,该方法较为保守;线弹性法的平均值为所有方法中最低,说明计算荷载值与实测值相差偏大,且标准差与变异系数为 4 种方法中最大,说明数据离散性偏大。

从图 7 中的计算结果数据分布来看,采用塑性理论的 3 种方法几乎所有数据点均位于 45 度线 $y = x$ 附近,整体呈平行分布,说明其在不同的构造参数下都能保持较为良好的精度,但线弹性法数据点偏离直线 $y = x$ 较多。GB 50917-2013 计算方法的数据点除文献[19]外,其余数据点均位于 45 度线 $y = x$ 的上方,说明大部分构件计算荷载值均小于实测值,采用其方法计算能够给予构件一定的安全储备,对于位于直线 $y = x$ 下方的文献[19]数据点,其计算荷载值与实测荷载值之

比为 1.075,误差较低,采用该方法较为保守;GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 计算方法的数据点除文献[19]及文献[20]外,其余更加靠近直线 $y = x$, 且均位于直线上方,说明采用此方法,在有一定安全储备的同时,计算荷载值与实测荷载值也较为接近,对于位于直线 $y = x$ 下方的文献[19]与文献[20]数据点,其计算荷载值与实测荷载值之比分别为 1.131 与 1.012,说明该方法在计算文献[19]此类结构时,误差较大,但是计算其它类型的结构精度较高;EC4 计算方法的数据点与直

线 $y = x$ 靠近程度介于以上两种方法之间,但是采用该方法计算文献[16]与文献[19]的结构,其计算荷载值与实测荷载值之比分别为 1.131 与 1.008,总体与 GB 50017-2017 和 JGJ138-2016 的计算结果相似;线弹性法为 3 种方法中最保守的,除文献[20]的构件外,其余均位于 $y = x$ 上方,说明该方法有较大的安全储备,但整体误差大,对于文献[20]的构件,其计算荷载值与实测荷载值之比为 1.001,实际采用线弹性法时,会取用较高的安全系数,使得该方法进一步偏向保守,造成材料浪费。

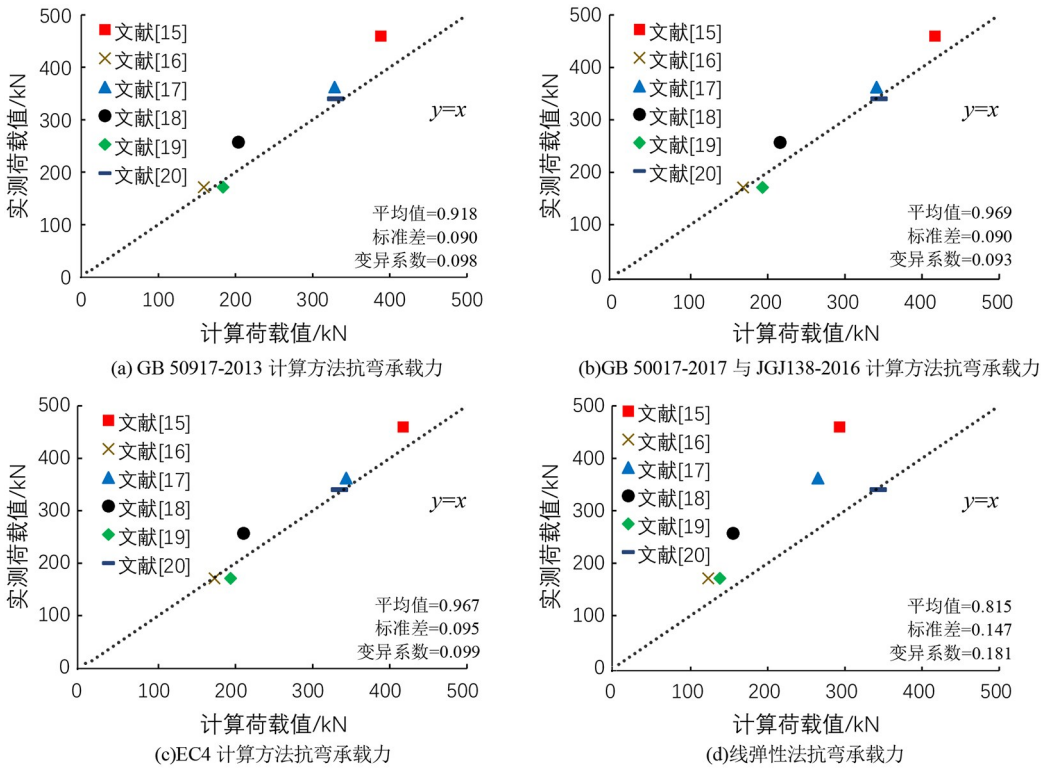


图 6 组合梁抗弯承载力计算值与试验值的比较

Fig.6 Comparison of calculated and tested values of flexural load capacity of combined beams

图 7 为采用 GB 50917-2013 的计算方法计算时,不考虑滑移效应折减,即按公式(1)或(5)计算,但去除公式中考虑滑移效应的拟合系数 k 。计算结果平均值为 0.982,比考虑滑移效应及其它规范的结果更接近 1,变异系数也略微降低,说明去除滑移效应的拟合系数 k 后,计算荷载值更接近实测值,数据离散性也更小。

图 8 为采用 GB 50917-2013 的计算方法计算时,考虑滑移效应对承载力的折减占比。滑移效应对承载力的平均折减率为 6.3%,即平均折减系数 k 为 0.937。本次计算的试件中,仅有文献[16]

的塑性轴位于钢梁,计算出的折减系数值为 0.963,即折减率为 0.037;而其余 6 个试件的中性轴都位于混凝土板,其计算出的折减系数平均值为 0.932,即折减率为 0.068。计算得出的折减系数分别与规范推荐经验值 0.96 与 0.94 差别较小。

图 9 为采用 GB 50917-2013 的计算方法计算时,纵向钢筋对承载力的贡献(不考虑滑移效应的折减),另两种采用塑性理论规范的计算方法均未考虑纵向钢筋对抗弯承载力的贡献。纵向钢筋的平均值为 10.3%,说明纵向钢筋对抗弯承载力有一定贡献。文献[19]与文献[20]的构件混

凝土板配筋率较高,故纵向钢筋对总承载力的占比较高,分别为 14.27%与 15.63%。

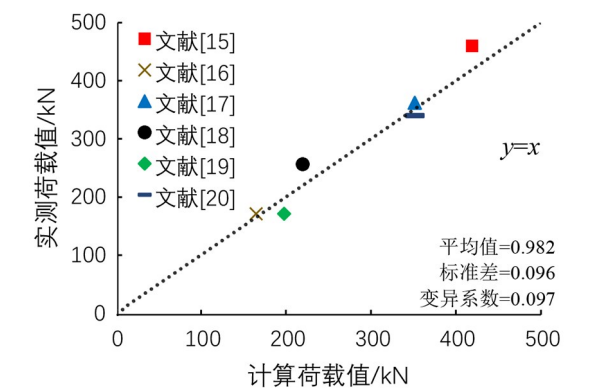


图 7 不考虑滑移效应时 GB 50917-2013 方法计算结果
Fig.7 Calculation results of the method of GB 50917-2013 without considering the slip effect

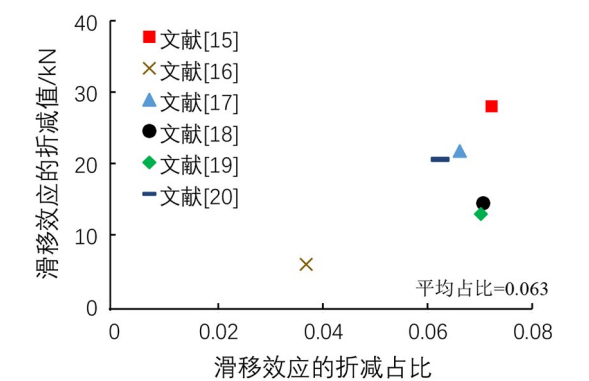


图 8 GB 50917-2013 方法中考虑滑移效应的折减占比
Fig.8 Percentage of discount considering the slip effect in the method of GB 50917-2013

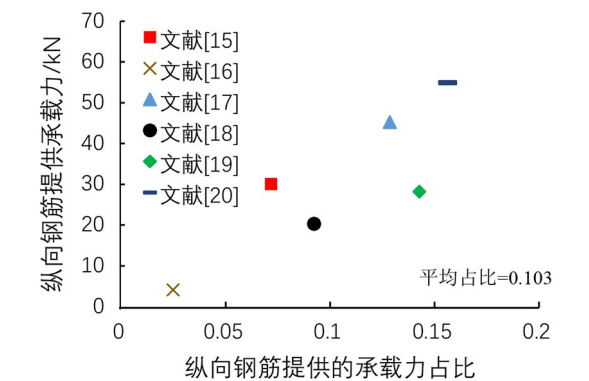


图 9 纵向钢筋对抗弯承载力的贡献
Fig.9 Contribution of longitudinal reinforcement to flexural load bearing capacity

综上所述,使用 GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 的计算方法计算出的理论值较其它 3 种计算方法更为接近实测值,且稳定性最好。当考虑需要一定安全储备时,也可采用较为保守的 GB 50917-2013 计算方法。在设计较为重要的结构时,建议额外采用线弹性法进行校核。

2.3 计算方法分析

(1)GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 的计算公式较为简洁,但该方法在计算文献[19]这类构件时,由于该构件混凝土翼板较宽、钢梁上翼缘宽度较小、钢梁与混凝土板连接件采用单排连接件,且有效宽度未折减,导致计算出的承载力偏高。文献[18]与文献[19]构件基本相同,但文献[18]构件钢梁上翼缘宽度大,导致计算结果较为保守。建议在计算类似于文献[19]的构件时,采用 GB 50917-2013 的方法。

(2)GB 50917-2013 的计算方法考虑了混凝土板中纵向钢筋对于承载力的贡献,相对于其它两种计算方法,原本应使计算值更大,但是考虑滑移效应的拟合系数 k 后,结构最终的承载力折减较大,因此计算值偏于保守。对于混凝土板配筋率较高、混凝土翼板较宽、钢梁上翼缘宽度较小、钢梁与混凝土板连接件采用单排连接件的构件(如文献[19]),纵向钢筋对总抗弯承载力的贡献较大,且滑移效应的不利影响较明显,两者均不宜忽略,故采用该方法计算精度较好。但该公式较为繁琐,建议实际计算时,考虑滑移效应的拟合系数 k 直接取规范所推荐的经验值。

(3)EC4 的计算方法与 GB 50017-2017 和 JGJ138-2016 相似,在计算类似于文献[19]的构件时误差较大,而精度与稳定性介于另两种采用塑性方法的规范之间。EC4 的有效宽度折减较为严格,使得在计算部分构件时其结构比 GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 的结果更偏向于保守。另由于我国与欧洲计算时选用的混凝土标准强度不同,导致按其方法计算时混凝土板对抗弯承载力的贡献会比我国规范的略高一些。

(4)线弹性法的计算过程较为简单,但计算结果为所有方法中最保守,且在实际计算时,规范本身的设计值已做折减,另还需要考虑安全系数,使得按线弹性法的结果进一步偏向于保守,按线弹性法设计的构件材料容易造成浪费。

4 结论

1) 采用塑性理论的 GB 50917-2013、GB 50017-2017、JGJ138-2016 与 EC4 中抗弯承载力的计算方法,主要的不同在于有效宽度的计算、是否考虑滑移效应的影响与是否计入纵向钢筋对抗弯承载力的贡献。

2) 由于现有研究在试件参数、具体构造及选用理论的差异,本文提及的 4 种计算方法的计算结果与实际得到的试验值都存在一定的偏差,相对而言,GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 的计算方法得到抗弯承载力的计算理论值与试验实测值更加接近,且数据更为稳定。但采用此方法计算钢与混凝土连接较弱、混凝土板较宽且钢梁上翼缘宽度较小的构件时,会使计算理论值高于试验实测值,导致结果偏不安全。

3) GB 50917-2013 考虑了纵向钢筋对于承载力的贡献与整体栓钉布置导致的滑移效应,使得混凝土板中纵向钢筋配筋率较高时,采用该方法精度较好。但是该方法中考虑滑移效应后对最后计算出的抗弯承载力折减较大,使得该方法计算出的结果较为保守。

4) EC4 的有效宽度折减较为严格,使得在计算部分构件时其结构比 GB 50017-2017 与 JGJ138-2016 的结果更偏向于保守,而精度与稳定性则介于另两种采用塑性方法的规范之间。但是由于我国与欧洲计算时选用的混凝土标准强度不同,导致按其方法计算时混凝土板对抗弯承载力的贡献会比我国规范的略高一些。

5) 线弹性法比塑性理论更为保守,建议仅在设计较为重要的结构,额外地采用线弹性法进行校核,或规范规定不能采用塑性理论时再采用该方法。

参考文献:

- [1] 冯正霖. 我国桥梁技术发展战略的思考[J]. 中国公路, 2015(11): 38-41.
- [2] 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.
- [3] 肖林, 卫星, 温宗意, 等. 钢-混组合结构桥梁 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 168-182.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢-混凝土组合桥梁设计规范: GB 50917—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [7] British Standards Institution; Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures—Part 2: General rules and rules for bridges: BS EN 1994-2:2005[S]. London: european committee for standardization, 2005.
- [8] 杨伟, 胡夏闽. 钢-混凝土组合梁设计规范比较[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(2): 56-62.
- [9] 聂建国, 李法雄, 樊健生, 等. 钢-混凝土组合梁考虑剪力滞效应实用设计方法[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 45-51.
- [10] 李法雄, 聂建国. 钢-混凝土组合梁剪力滞效应弹性解析解[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 1-8.
- [11] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计规范: GB 50017—2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [12] YAM L C P. Design of composite steel-concrete structures[D]. London: Surrey University, 1981.
- [13] 胡夏闽. 欧洲规范 4 钢-混凝土组合梁设计方法(3): 组合梁的内力分析[J]. 工业建筑, 1995, 25(11): 55-59.
- [14] 胡夏闽. 欧洲规范 4-钢-混凝土组合梁设计方法(4): 组合梁的受弯承载力[J]. 工业建筑, 1995, 25(11): 42-49.
- [15] 刘君平, 徐帅, 陈宝春. 钢-UHPC 组合梁与钢-普通混凝土组合梁抗弯性能对比试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 92-98, 145.
- [16] 李文贤. 不同连接程度下钢-混凝土组合梁的理论及试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [17] 罗鑫源. 钢-混组合梁疲劳全过程分析及试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [18] 鲁玉曦. 钢-预制带肋混凝土叠合板组合梁抗弯性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [19] 张海鹏. 栓钉锈蚀钢-混凝土组合梁静力及疲劳性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [20] 薛铖. 新型钢-混凝土组合梁组合作用的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.

(责任编辑: 陈雯)