

文章编号:1673-2049(2006)04-0034-04

中国、欧洲钢-混凝土组合梁的设计规范比较

杨 璐,王元清,石永久,施 刚

(清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘要:根据欧洲规范 4 和中国《钢结构设计规范》对简支组合梁的设计过程进行了对比,包括施工阶段与组合阶段承载力验算、剪力连接件设计、剪力验算、挠度验算及自振频率验算等,给出了相关工程实例计算并对设计结果进行了比较。结果表明:欧洲规范 4 对于钢-混凝土组合梁的设计过程的规定更加详细,通过中国《钢结构设计规范》进行设计所得的结果较欧洲规范 4 保守。

关键词:钢-混凝土组合梁;承载力;挠度;自振频率;设计规范

中图分类号:TU202 **文献标志码:**A

Design Code Comparison of Steel-Concrete Composite Beam of China and Europe

YANG Lu, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu, SHI Gang

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: According to European standard Eurocode 4 (EC4) and Chinese standard code for design of steel structures, the simple composite beam was contrasted in the design process. The items to be designed included moment resistant in construction and composite stage, bearing capacity checking computation, shear connectors design, deflection checking computation, natural vibration frequency checking computation and so on. The related engineering examples in calculations were given and the results of design were compared. The results show that the correlative provision in EC4 is more detailed than that in Chinese standard code for design of steel structures which is more conservative.

Key words: steel-concrete composite beam; bearing capacity; deflection; natural vibration frequency; design code

0 引 言

欧洲规范 4 是目前比较完整的一部组合结构规范,该规范对组合结构的设计、研究与应用作了较全面的总结,它最初的草案于 1984 年在英国完成。近年来欧洲标准委员会(CEN)对其进行了修订,修订后的欧洲规范 4 由两部分组成:第 1 部分是关于组合结构的设计方法及防火设计规范;第 2 部分是关

于桥梁组合结构设计的内容。其中,第 1 部分又分为两个部分:第 1.1 部分主要是关于一般规定及房屋建造中组合结构的设计^[1];第 1.2 部分主要是关于组合结构的防火设计规范^[2]。中国的《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中也包含钢与混凝土组合梁的相关规范。

本文中压型钢板组合梁设计过程进行了研究,并对中国、欧洲规范相关条款进行了分析比较,

收稿日期:2006-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50578083)

作者简介:杨 璐(1982-),男,湖北宜昌人,工学博士研究生,E-mail:lyang00@mails.tsinghua.edu.cn.

并以 Lawson 在 1994 年以欧洲规范 4 为依据计算的组合梁为设计对象,进行了设计比较分析,设计过程是结合实际工程中常用的以栓钉为剪力连接件的压型钢板 T 型组合梁进行的。

1 设计对象

本文中选用的设计对象为跨度 10.0 m、梁间距 3.0 m 的组合梁,组合楼盖平面、剖面分别如图 1、2 所示。压型钢板、组合梁剖面分别如图 3、4 所示。相关设计参数如下:楼面均布活荷载 5 kPa,楼盖总厚度 $h_t=130$ mm,其中压型钢板肋高 $h_p=50$ mm;栓钉直径 19 mm,长度 100 mm,焊后长度 95 mm;选用 S355 钢材,屈服强度标准值 $f_y=355$ MPa,钢材型号 406×178×60UB(截面高度 $h=406.4$ mm,翼缘宽度 $b=177.8$ mm,腹板厚度 $t_w=7.8$ mm,翼缘厚度 $t_f=12.8$ mm);采用普通混凝土,混凝土等级为 C25/30,密度为 $2\ 400\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。整个施工过程中无支撑。

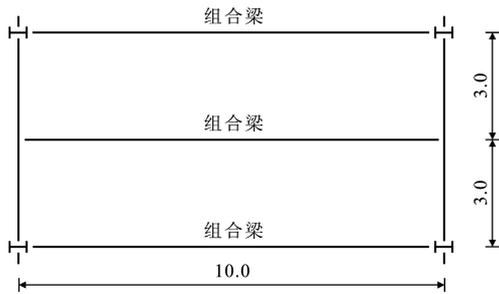


图 1 组合楼盖平面(单位:m)

Fig. 1 Plane of Composite Floor(Unit:m)

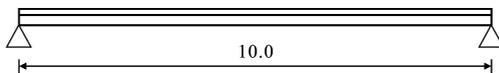


图 2 组合楼盖剖面(单位:m)

Fig. 2 Section of Composite Floor(Unit:m)

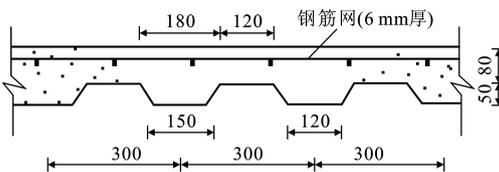


图 3 压型钢板剖面(单位:mm)

Fig. 3 Section of Profiled Steel Sheet(Unit:mm)

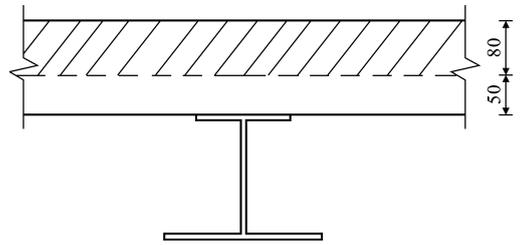


图 4 组合梁剖面(单位:mm)

Fig. 4 Section of Composite Beam(Unit:mm)

中国《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2001)与欧洲荷载规范的相关条款^[3]不同。中国的恒载、活载的分项系数分别为 1.2、1.4,而在欧洲规范中分别为 1.35、1.5。在设计过程中,中国与欧洲规范对钢材和混凝土的强度及分项系数的规定也存在不同,在设计过程中,将按规范相关规定进行强度换算,详见第 2.3.1 节。

2.2 施工阶段截面验算

在施工过程中,因钢梁不设临时支撑,所以,在施工阶段截面验算时,需要验算钢梁的局部稳定性及施工过程中钢梁的极限承载力。

欧洲规范中钢梁的局部稳定性验算可按式(1)进行^[4]

$$\left. \begin{aligned} c/t_f &\leq 10\sqrt{235/f_y} \\ d/t_w &\leq 72\sqrt{235/f_y} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

中国《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中钢梁的局部稳定性验算按式(2)进行

$$\left. \begin{aligned} c/t_f &\leq 13\sqrt{235/f_y} \\ d/t_w &\leq 80\sqrt{235/f_y} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: c 为钢梁翼缘自由外伸宽度; t_f 为钢梁翼缘厚度; d 为钢梁腹板高度; t_w 为钢梁腹板厚度; f_y 为钢材的屈服强度。

施工阶段,考虑侧面压型钢板对钢梁的支撑作用,不考虑钢梁侧向失稳,其设计弯矩按式(3)计算

$$M_{apl,Rd} = W_{pl} f_d \quad (3)$$

式中: W_{pl} 为钢梁塑性截面模量; f_d 为钢材强度设计值。

中国、欧洲规范中对于钢材强度的分项系数规定不同:欧洲规范取为 1.05;而中国规范对其取值则与钢材的强度等级有关,对于 Q235 钢材取为 1.087, Q345 钢材以上等级取为 1.111。

2.3 组合阶段截面验算

2.3.1 截面抗弯承载力

组合截面的抗弯承载力计算与组合梁的剪力连接度、组合梁有效宽度等有关。在剪力连接度的计算中,首先应确定栓钉的布置方案,如图 5 所示。对

2 设计过程对比

2.1 基本设计规定

由于涉及到中国、欧洲两类规范,在实际的组合梁设计过程中,存在基本设计规定上的不同。

于单个栓钉承载力的确定,中国、欧洲规范均考虑了栓钉受剪破坏和栓钉周围混凝土压溃两种情况。另外,中国、欧洲规范均考虑了栓钉承载力因受到压型钢板板型及单个肋部栓钉个数的影响而进行了一定的折减。剪力连接度按式(4)计算

$$\eta = \frac{R_q}{R} \quad (4)$$

式中: R_q 为栓钉纵向承载力,即一个剪跨区栓钉承载力之和; R 为剪力设计值,取钢梁抗拉承载力与混凝土抗压承载力的较小值。

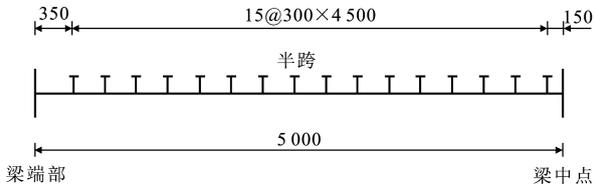


图5 栓钉布置(单位:mm)

Fig. 5 Shear Connector Layout (Unit:mm)

中国、欧洲规范对于组合梁翼缘板宽度有效值的选择存在一定的不同。对于简支梁,欧洲规范统一选择简支梁跨度的1/4,而中国规范则考虑了梁跨度、翼缘板厚度及梁间距等因素。

对于组合梁的截面抗弯承载力,中国、欧洲规范均按应力块方法(Stress Block Method)计算。

欧洲规范中还给出了一种求组合梁截面抗弯承载力的近似方法,即按剪力连接度 η 在纯钢梁抗弯承载力及完全剪力连接组合梁之间线性插值(Linear-Interaction Approach)。

由于欧洲规范中,混凝土的强度由圆柱体试块测定,而中国规范中则采用正方体试块测定,由式(5)可将圆柱体试块强度换算为正方体强度^[5]

$$f_c = \frac{0.88k_1k_2f_{cu,k}}{\gamma_c} = \frac{0.88k_1k_2f_{ck}}{0.8\gamma_c} \quad (5)$$

式中: γ_c 为混凝土材料分项系数,取为1.4; k_1 、 k_2 分别为与混凝土强度相关的系数,按中国规范C30混凝土取值,分别为0.76和1.0。

2.3.2 截面抗剪承载力

对于组合梁的极限抗剪承载力^[6-9],中国、欧洲规范均仅考虑钢梁腹板的抗剪能力。

2.3.3 组合梁有效宽度

欧洲规范对于单排栓钉简支梁翼缘板有效宽度 b_{eff} ,取梁左右板跨的1/8之和。

中国规范简支梁翼缘板有效宽度 b_{eff} 按式(6)进行计算

$$b_{eff} = b_0 + b_1 + b_2 \quad (6)$$

式中: b_0 为钢梁翼缘宽度; $b_1 = b_2 = \min\{l/6, 6h, s_1, s_0/2\}$, h 为混凝土板总高度, s_1 为翼板实际外伸宽度, s_0 为相邻钢梁或板托间净距。

2.4 挠度验算

对于施工阶段挠度,将施工荷载、混凝土自重视为外部荷载,计算钢梁挠度。

对于组合阶段,欧洲规范中,在完全剪力连接组合梁挠度计算中,采用换算截面法计算组合梁的刚度。

对于部分抗剪连接梁,在完全剪力连接梁的基础之上,挠度 δ 按照式(7)进行计算

$$\frac{\delta}{\delta_c} = 1 + 0.3(1 - \frac{N}{N_f})(\frac{\delta_a}{\delta_c} - 1) \quad (7)$$

式中: N/N_f 为组合梁剪力连接度; δ_a 为瞬时荷载作用下的挠度, $\delta_a = \delta_c I_c / I_{ay}$, δ_c 为完全剪力连接梁挠度, I_c 为完全剪力连接组合梁等效截面刚度, I_{ay} 为钢梁截面惯性矩。

中国规范考虑了滑移效应,部分剪力连接组合梁的挠度可采用折减刚度法计算

$$B = \frac{EI_{eq}}{1 + \zeta} \quad (8)$$

式中: E 为钢梁弹性模量; I_{eq} 为组合梁换算截面惯性矩,不计压型钢板的的作用,按荷载标准组合和准永久组合两种情况进行验算; ζ 为刚度折减系数,具体计算方法见文献[10]。

2.5 自振频率验算

欧洲规范中还给出了组合梁自振频率验算的相关规定:自振频率采用瞬时荷载的标准值验算,考虑结构自重与10%的活荷载。在动力作用下,考虑组合梁截面惯性矩提高10%,在瞬时荷载作用下挠度为 δ_a 的结构自振频率按式(9)进行近似计算

$$f = \frac{18}{\sqrt{\delta_a}} \geq 4 \text{ Hz} \quad (9)$$

3 设计结果比较

根据第1节中的设计对象及第2节的设计过程进行了计算,所得的结果如表1所示。

由表1及上述分析过程可得以下结论:

(1)由于中国、欧洲规范对于荷载分项系数及材料分项系数规定有所不同,使得设计过程中设计荷载和材料设计强度存在一定的差异,相比而言,欧洲规范设计荷载较大。

(2)中国、欧洲规范对于简支组合梁有效宽度的规定存在较大的不同,中国规范考虑了梁跨度、翼缘

板厚度及梁间距等因素的影响,欧洲规范统一选择简支梁跨度的 $1/4$ 。

表 1 设计结果对比

Tab. 1 Comparison of Design Results

参 数	欧洲规范	中国规范	比值
有效宽度 b_{eff}/m	2.500	1.738	1.44
施工阶段设计弯矩 $M_{\text{sd}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	172.9	151.1	1.14
钢梁全截面塑性抗弯承载力 $M_{\text{pl,Rd}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	403.9	382.4	1.06
组合阶段设计弯矩 $M_{\text{zd}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	451.5	413.6	1.09
栓钉抗剪承载力 P_{Rd}/kN	73.00	80.77	0.72
剪力连接程度 $N\cdot N_{\text{f}}^{-1}$	0.454	0.622	0.730
组合截面抗弯承载力 $M_{\text{pl,Rd}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	620.4	606.3	1.02
总挠度 δ/mm	44.7	53.1	0.841

注:比值为欧洲规范计算值与中国规范计算值的比。

(3)对于组合梁挠度的验算,中国规范采用折减刚度法考虑了滑移效应对组合梁挠度的影响;欧洲规范考虑了剪力连接程度,采用换算截面法在完全剪力连接梁的基础上进行计算,形式上更加简单。

(4)由于按照中国规范计算的挠度值大于组合梁跨度的 $1/200$,在施工过程中应考虑一定的预起拱或增加临时支撑。

4 结 语

(1)中国钢结构规范(GB 50017-2003)与欧洲规范 4 都有关于组合结构的相关规定,但中国规范只有关于组合梁的相关设计,欧洲规范 4 对一般组合结构的设计及防火设计均有较详细的规定。

(2)中国、欧洲规范在材料强度的测定、材料强度的分项系数的选取、荷载组合系数的确定、有效宽度的选取及挠度计算方法上存在一定的不同,因此二者的设计过程存在一定的差异,但根据二者计算的组合梁设计弯矩及挠度值相差并不大。对于本文中所取的设计对象,根据中国规范计算的结果更加保守。

(3)欧洲规范 4 对组合梁设计过程的规定较中国钢结构规范详细,其中压型钢板的验算及组合梁自振挠度的验算都有相关的规定。

参考文献:

References:

[1] Eurocode 4 Part 1.1, Design of Composite Steel and Concrete Structures: General Rules and Rules for Buildings[S].

[2] Eurocode 4 Part 1.2, Design of Composite Steel and Concrete Structures: Structural Rules—Structural Fire Design[S].

[3] Eurocode 1 Part 1.1, Actions on Structures: General Actions Densities, Self-weight, Imposed Loads for Buildings[S].

[4] Eurocode 3 Part 1.1, Design of Steel Structures: General Rules and Rules for Buildings[S].

[5] 叶列平. 混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社, 2002:12-14.
YE Lie-ping. Concrete Structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002:12-14.

[6] 赵均海,郭红香,魏雪英. 圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 50-54.

ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 50-54.

[7] 周天华,何保康,周绪红,等. 高强冷弯薄壁型钢轴压长柱受力性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 65-71.

ZHOU Tian-hua, HE Bao-kang, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Research on Bearing Capacity of High-Strength Cold-Formed Thin-Walled Steel Long Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 65-71.

[8] 王元清,张 勇,石永久,等. 吊索与钢管混凝土拱桥新型节点承载性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 55-58.

WANG Yuan-qing, ZHANG Yong, SHI Yong-jiu, et al. Analysis of Load Capacity of New-Style Joints Between Cable and Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 55-58.

[9] 周天华,何保康,周绪红,等. 高强冷弯薄壁型钢轴压短柱受力性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 36-44.

ZHOU Tian-hua, HE Bao-kang, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Research on Bearing Capacity of High-Strength Cold-Formed Steel Stub Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 36-44.

[10] LAWSON R M, CHUNG K F. Composite Beam Design to Eurocode 4[R]. Berkshire: Steel Construction Institute, 1994.