

中美两国组合梁设计规范比较

柳胜华

(上海核工程研究设计院 上海 200233)

摘要 对中国《钢结构设计规范》(GB50017-2003)和美国《核设施安全相关钢结构设计、制造及安装规范》(ANSI/AISC N690-1994)中组合梁的设计进行了比较。指出两国钢结构设计规范中对组合梁设计规定的相同点及不同点。为工程设计及研究人员对组合梁的设计和研究提供参考。

关键词 组合梁, 稳定性, 挠度, 抗剪承载力

中图分类号 TU398

AP1000 核电站中土建结构大量采用组合梁结构,其设计依据美国《核设施安全相关钢结构设计、制造及安装规范》(ANSI/AISC N690-1994)^[1]。组合梁在我国主要应用于民用建筑结构及桥梁结构中,设计的主要依据是《钢结构设计规范》(GB50017-2003)^[2]和《高层民用建筑钢结构设计规程》(JGJ99-98)。为促进组合梁结构在核电厂土建结构中的应用,加深对组合梁结构的认识,本文比较了我国 GB50017-2003 和美国 ANSI/AISC N690-1994 对组合梁设计规定的异同之处,为工程设计及研究人员提供参考。

1 组合梁的优点及发展

钢与混凝土组合梁融合了钢与混凝土两种材料的优点,比钢梁或钢筋混凝土梁具有性能优势。主要是:可充分发挥两种材料的优势,降低用钢量,降低造价,提高经济效益;房屋建筑中,由于组合梁的刚度大,在同等荷载条件下,可降低梁高,使建筑物的总高度降低,或建筑物的楼层层数增加,经济效益非常显著。另外,组合梁的承载力可靠,抗疲劳性能好,可降低冲击荷载的冲击系数。

对组合梁的研究始于上世纪初。1944年,美国州际公路协会(ASSHO)制定的《公路桥涵设计规范》将组合梁的设计规定纳入其中。1946年,美国《房屋钢结构设计、制造和安装规范》也列入了组合梁的有关内容。联邦德国在1945年制定了《桥梁组合梁》(DIN1078),1956年制定了《房屋建筑组合梁》(DIN4239)标准。英国于1965年制定了《钢与混凝土组合梁结构房屋建筑中的简支梁》(CP117: pt.1),1967年制定了《钢与混凝土组合结构桥梁》(CP117: pt.2)设计标准。1966年,印度标准协会制

定了《组合结构设计规范》(IS:3955-1966)。1975年,日本制定了《组合梁结构设计施工指南和说明》。1979年,英国标准协会制定的《钢、混凝土组合梁桥》(BS5400)的第五部分为组合梁桥设计规范^[3]。

在我国,50年代初开始进行组合梁桥结构的研究,并在公路、铁路桥梁方面得到应用,编制了公路及铁路组合梁桥的标准图集。1975年,交通部颁布《公路桥涵设计规范》,对组合梁的计算与构造作了有关规定。之后在钢结构规范中也对组合梁的设计作出了相关规定。

2 GB50017-2003 关于组合梁设计的规定

2.1 一般性规定

设计分析方法:强度按截面塑性变形发展的塑性理论作分析计算;挠度按弹性理论方法计算,但考虑刚度折减。适用范围:不直接承受动力荷载的简支组合梁及连续组合梁。组合梁中混凝土翼板形式:(1)现浇混凝土板;(2)混凝土叠合板;(3)压型钢板混凝土组合板。组合梁受力分析:(1)施工阶段分析:即楼板混凝土在达到其强度设计值75%前,(2)使用阶段分析:混凝土达到其设计强度75%后。设计内容:(1)组合梁的整体计算,包括组合梁强度、挠度、裂缝计算;(2)组合梁内钢梁与混凝土交界面上抗剪连接件的纵向水平抗剪验算。

2.2 组合梁施工阶段验算

组合梁在施工阶段的验算荷载包括组合梁的自重及作用在其上的全部施工荷载。

组合梁在施工阶段的验算分有临时支撑和无临时支撑两种情况,若钢梁下无临时支撑,钢梁应按

第一作者:柳胜华,男,1976年出生,2005年于同济大学获博士学位,结构工程专业,高级工程师

收稿日期:2009-11-18

一般梁计算其强度、挠度和稳定性, 并应符合钢结构规范的相关要求。钢梁的挠度值除满足钢梁的变形要求外(主梁: 1/400, 次梁: 1/250)不应超过 25 mm; 若钢梁下有临时支撑, 则应按实际支撑情况对支撑进行验算。

2.3 组合梁使用阶段验算

使用阶段的组合梁, 可按组合梁一次承受全部荷载进行验算。

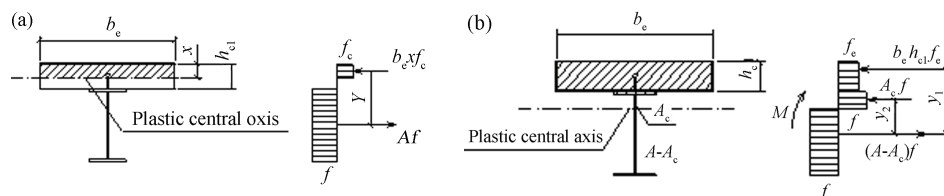


图 1 塑性中和轴位于翼板内(a)与钢梁截面内(b)时的应力分布示意图

Fig.1 Stress distribution when the plastic central axis located in the concrete floor area (a) and the height range of steel beam (b).

$$M \leq b_e x f_c y; x = Af / (b_e f_c) \quad (1)$$

式中, M 为设计弯矩, b_e 为混凝土翼板有效宽度, x 为受压区混凝土高度, f_c 为混凝土抗压强度设计值, y 为钢梁截面应力的合力至混凝土受压区截面应力合力间的距离, A 为钢梁的截面面积, f 为钢材的强度设计值, h_{c1} 为混凝土翼板的厚度。

$$M \leq b_e h_{c1} f_c y_1 + A_c f y_2 \quad (2)$$

$$A_c = 0.5(A - b_e h_{c1} f_c / f) \quad (3)$$

式中 A_c 为钢梁受压区截面面积, y_1 为钢梁受拉区截面形心至混凝土翼板受压区截面形心的距离, y_2 为钢梁受拉区截面形心至钢梁受压区截面形心的距离。

在负弯矩作用区段, 组合梁截面内应力分布如图 2。

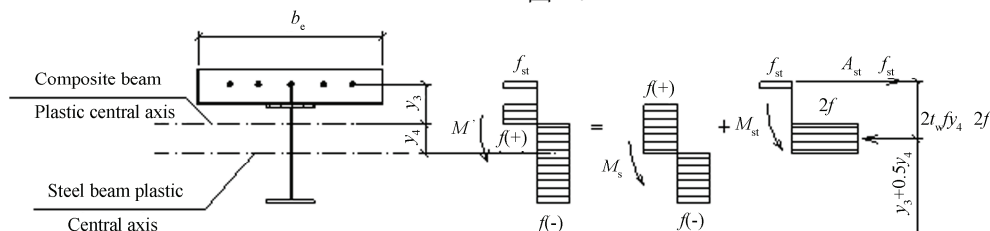


图 2 负弯矩区段组合梁截面内的应力分布示意图

Fig.2 Stress distribution for the negative flexural area.

$$M' \leq M_s + A_{st} f_{st} (y_3 + y_4 / 2) \quad (4)$$

$$M_s = (S_1 + S_2) f \quad (5)$$

$$y_4 = A_{st} f_{st} / (2 t_w f) \quad (6)$$

式中 M' 为负弯矩设计值, S_1 、 S_2 分别为钢梁塑性中和轴以上和以下截面对该轴的面积矩, A_{st} 为负弯矩区混凝土翼板有效宽度范围内纵向钢筋截面面积, f_{st} 为钢筋抗拉强度设计值, y_3 为纵向钢筋截面形心至组合梁塑性中和轴的距离, y_4 为组合梁塑性中和轴至钢梁塑性中和轴的距离, t_w 为钢梁腹板厚度。

(2) 部分抗剪连接组合梁抗弯强度验算。

正弯矩作用区段, 组合梁截面内应力分布如图 3。负弯矩作用区段的抗弯强度按 $n_r N_v^c$ 和 $A_{st} f_{st}$ 两者中的较小值计算。

2.3.1 强度验算

使用阶段的组合梁根据钢与混凝土的粘结程度分为完全抗剪连接和部分抗剪连接, 根据塑性中和轴在组合梁截面内的位置分别进行验算, 具体如下:

(1) 完全抗剪连接组合梁抗弯强度验算。

在正弯矩作用区段: 塑性中和轴在混凝土翼板内, 即 $Af \leq b_e h_{c1} f_c$ (图 1a); 塑性中和轴在钢梁截面内, 即 $Af > b_e h_{c1} f_c$ (图 1b)。

$$x = n_r N_v^c / (B_e f_c) \quad (7)$$

$$A_c = (Af - n_r N_v^c) / (2f) \quad (8)$$

$$M_{u,r} = n_r N_v^c y_1 + 0.5(Af - n_r N_v^c) y_2 \quad (9)$$

式中, $M_{u,r}$ 为部分抗剪连接时组合梁截面抗弯承载力, n_r 为一个剪跨区的抗剪连接件数目, N_v^c 为单个抗剪连接件的纵向抗剪承载力。

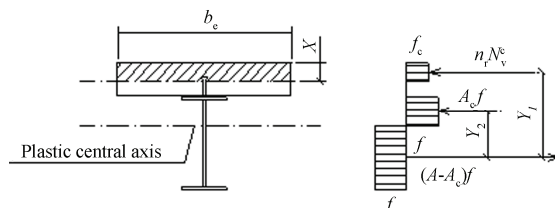


图 3 正弯矩区段组合梁截面内的应力分布示意图

Fig.3 Stress distribution for the positive flexural area.

2.3.2 挠度验算

挠度验算采用的荷载为(1)荷载标准组合;(2)准永久荷载组合。计算采用弹性理论方法,考虑混凝土与钢梁间的滑移效应,采用折减刚度 B 计算:

$$B = E I_{eq} / (1 + \zeta) \quad (10)$$

式中, I_{eq} 为组合梁换算截面惯性矩,对荷载的标准组合,可将截面中混凝土翼板有效宽度除以钢材与混凝土弹性模量的比值 α_E ,换算为钢截面宽度计算整个截面惯性矩;对荷载的准永久组合,则除以 $2\alpha_E$ 进行换算。 E 为钢梁的弹性模量, ζ 为刚度折减系数。

2.3.3 裂缝验算

在连续组合梁负弯矩区段可按轴心受拉构件验算混凝土翼板的最大裂缝宽度,并应符合《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)的规定,荷载组合取标准组合。

2.4 组合梁抗剪连接件的计算

组合梁抗剪连接件宜采用栓钉,也可采用槽钢、弯筋或有可靠依据的其它类型连接件。

2.4.1 单个抗剪件的抗剪承载力设计值

栓钉连接件

$$N_v^c = 0.43 A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7 A_s \gamma f \quad (11)$$

式中, E_c 为混凝土的弹性模量, A_s 为圆柱头栓钉杆的横截面面积, γ 为栓钉材料抗拉强度最小值与屈服强度的比值。

槽钢连接件

$$N_v^c = 0.26 (t + 0.5 t_w) l_c \sqrt{E_c f_c} \quad (12)$$

式中, t 为槽钢翼缘的平均厚度, t_w 为槽钢腹板厚度, l_c 为槽钢长度。

弯筋连接件

$$N_v^c = f_{st} A_{st} \quad (13)$$

2.4.2 抗剪连接件抗剪承载力的折减

用压型钢板混凝土组合板做翼板的组合梁,其栓钉连接件的抗剪承载力按两种情况进行折减。

(1)压型钢板肋平行钢梁布置见图4。

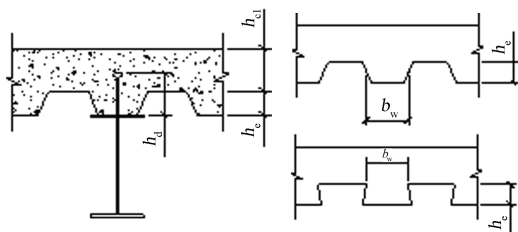


图4 压型钢板肋与钢梁平行布置示意图
Fig.4 The rib of steel deck parallel to steel beam.

$b_w/h_e < 1.5$ 时,折减系数

$$\beta_v = (0.6 b_w / h) (h_d - h_e) / h_e \leq 1 \quad (14)$$

式中, b_w 为混凝土凸肋的平均宽度, h_e 为混凝土凸肋的高度, h_d 为栓钉的高度。

(2)压型钢板肋垂直钢梁布置如图5。

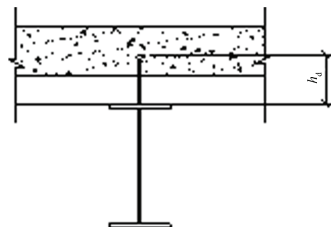


图5 压型钢板肋与钢梁垂直布置示意图
Fig.5 The rib of steel deck perpendicular to steel beam.

$$\text{折减系数 } \beta_v = \frac{0.85}{\sqrt{n_0}} \cdot \frac{b_w}{h_e} \left(\frac{h_d - h_e}{h_e} \right) \leq 1 \quad n_0 \leq 3 \quad (15)$$

式中, n_0 为在梁某截面处一个肋中布置的栓钉数目,当多于3个时,按3个取用。

位于负弯矩区段的抗剪连接件,其抗剪承载力设计值 N_v^c 应乘以折减系数 0.9(中间支座两侧)和 0.8(悬臂部分)。

2.4.3 混凝土翼板与钢梁交界面的纵向剪力 V_s 的确定

确定方法为:(1)位于正弯矩区段的剪跨: V_s 取 Af 和 $b_e h_c f_c$ 中的较小者。(2)位于负弯矩区段的剪跨: $V_s = f_{st} A_{st}$ 。

2.5 其它规定及构造要求

(1)混凝土翼板的有效宽度 b_e 如图6所示。

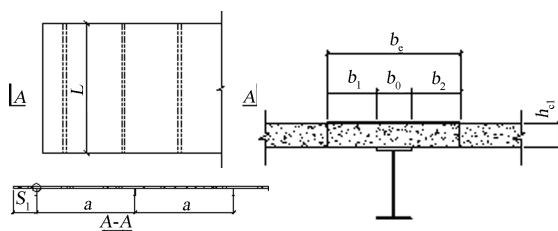


图6 组合梁有效宽度示意图(GB50017 规范)
Fig.6 The effective width of composite beam defined in GB50017.

$$b_e = b_0 + b_1 + b_2 \quad (16)$$

$$b_{1,2} = \min(l/6, 6 h_{c1}) \quad (17)$$

式中, b_0 为板托顶部宽度, b_1 、 b_2 分别为钢梁外侧和内侧的翼板计算宽度,且 $b_{1,2}$ 不超过钢梁上翼缘边到板边的距离和两钢梁上翼缘间净距离的一半。

(2)抗剪连接件的构造要求包括栓钉连接件的保护层厚度、栓钉直径与其长度关系、栓钉间距等。

3 ANSI/AISC N690-1994 关于组合梁设计的规定

3.1 组合梁分类

(1) 钢筋混凝土组合梁(包裹梁)的分析考虑施工阶段和使用阶段, 施工阶段由钢梁承担荷载, 使用阶段由钢筋混凝土组合梁共同承担荷载。

(2) 钢与混凝土组合梁(非包裹梁)的分析计算采用弹性理论方法。

进行强度和挠度验算时, 组合梁截面采用换算截面特性, 即将混凝土截面换算为钢截面, 换算方法与中国规范规定一致, 但不考虑荷载的长期效应。

3.2 钢与混凝土组合梁

3.2.1 强度验算

对于完全抗剪连接的组合梁, 由于设计采用弹性理论方法, 设计时采用换算截面法, 即将受压区域的混凝土除以钢与混凝土弹性模量的比值 α_E , 换算为等效的钢截面, 然后计算换算截面的截面特性。

部分抗剪连接组合梁有效截面的抵抗矩 S_{eff} 为

$$S_{\text{eff}} = S_s + [1/(2V_h'/V_h)](S_{\text{tr}} - S_s) \quad (18)$$

式中, V_h' 为单个抗剪件的抗剪承载力与抗剪件数量

之乘积, V_h 为钢梁和混凝土翼板交界面处的剪力, S_s 为钢梁对下翼缘截面模量, S_{tr} 为组合截面对下翼缘的换算截面模量。

无临时支撑时, 钢梁的计算应力不应大于钢材屈服强度的 0.9 倍, 在施工阶段仅由钢梁承担其上的荷载, 使用阶段由钢梁和混凝土形成的组合梁承担其上的荷载。施工阶段和使用阶段以混凝土达到其设计强度的 75% 为界, 这与中国规范规定一致。

3.2.2 挠度验算

计算挠度所用截面的有效惯性矩为

$$I_{\text{eff}} = I_s + [1/(2V_h'/V_h)](I_{\text{tr}} - I_s) \quad (19)$$

式中, I_s 为钢梁截面惯性矩, I_{tr} 为换算组合截面惯性矩。

3.3 抗剪连接件的计算

3.3.1 单个抗剪连接件的允许承载力

抗剪连接件可采用栓钉、弯筋和槽钢。规范^[2]给出不同抗剪连接件的允许抗剪承载力, 如表 1 所示。表中所用混凝土仅适用于由 ASTM C33 委员会指定的混凝土; 单个栓钉抗剪连接件的允许水平抗剪承载力适用于长度更长的栓钉; 表中 w 指槽钢长度(单位: in.)。

表 1 一个抗剪连接件的允许水平抗剪承载力(kips)
Table 1 Allowable horizontal shear load for one connector (kips).

抗剪件 Connectors	混凝土的额定抗压强度(f_c'), ksi Specified compressive strength of concrete (f_c'), ksi		
	3.0 (C25)	3.5 (C30)	≥ 4.0 (C35)
长弯筋或圆柱头栓钉 Hooked or headed studs			
$\Phi 0.5'' \times 2''$	5.1	5.5	5.9
$\Phi 0.625'' \times 2.5''$	8.0	8.6	9.2
$\Phi 0.75'' \times 3''$	11.5	12.5	13.3
$\Phi 0.875'' \times 3.5''$	15.6	16.8	18.0
槽钢 Channels			
C3 $\times$ 4.1	4.3 w	4.7 w	5.0 w
C4 $\times$ 5.4	4.6 w	5.0 w	5.3 w
C5 $\times$ 6.7	4.9 w	5.3 w	5.6 w

3.3.2 抗剪连接件抗剪承载力的折减

用压型钢板混凝土组合板做翼板的组合梁, 其栓钉连接件的抗剪承载力按两种情况进行折减。

(1) 压型钢板肋平行钢梁布置, $b_w/h_e < 1.5$ 时, 折减系数为

$$\beta_v = (0.6b_w / h_e)[(h_d - h_e) / h_e] \leq 1 \quad (20)$$

(2) 压型钢板肋垂直钢梁布置时, 折减系数为

$$\beta_v = \frac{0.85}{\sqrt{n_0}} \cdot \frac{b_w}{h_e} \left(\frac{h_d - h_e}{h_e} \right) \leq 1 \quad n_0 \leq 3 \quad (21)$$

N690-1994 规范在 2004 年的补遗版中增加了仅有一个栓钉时的折减系数的规定如下

$$\beta_v = \frac{0.85}{\sqrt{n_0}} \cdot \frac{b_w}{h_e} \left(\frac{h_d - h_e}{h_e} \right) \leq 0.75 \quad (22)$$

3.3.3 混凝土翼板与钢梁交界面的纵向剪力 V_h 按下列方法确定

(1) 位于正弯矩区段的剪跨: V_h 取下式中较小者。

$$V_h = 0.85 f'_c A_{ec} / 2 \quad (23)$$

$$V_h = A_s f_y / 2 \quad (24)$$

式中, A_{ec} 为混凝土有效翼缘的实际面积。

(2) 位于负弯矩区段的剪跨: $V_h = f_{st} A_{st} / 2$ 。

3.4 其它规定及构造要求

(1) 混凝土翼板的有效宽度 b_e 如图 7 所示。

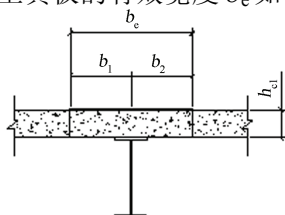


图 7 组合梁有效宽度示意图(N690 规范)

Fig.7 The effective width of composite beam in Code N690.

$$b_e = b_1 + b_r \quad (25)$$

$$b_{1,r} = l/8 \quad (26)$$

式中, b_1 、 b_r 都不大于梁中距的一半以及梁中线到板边的距离。

(2) 关于抗剪连接件的构造要求包括栓钉连接件的保护层厚度、栓钉直径与其长度的关系、栓钉间距等。两国规范规定基本一致。

4 结语

对中美两国关于组合梁设计的规范进行了比较, 两国规范不同之处如下:

(1) 钢结构承载力的设计方法和组合梁的计算理论不同: 中国规范^[1]采用以概率理论为基础的极限状态设计法, 美国规范^[2]本质上仍采用允许应力法。中国规范采用塑性理论方法, 美国规范采用弹性理论方法。

(2) 组合梁混凝土翼板有效宽度取法不同: 美国规范有效宽度主要与组合梁的跨度有关, 梁每边宽度为跨度的 1/8, 也不超过梁中距的一半; 中国规范的取法与梁的跨度及翼板的厚度都有关系。

(3) 组合梁中单个抗剪连接件的抗剪承载力规定不同, 中国规范给出具体的计算公式, 美国规范给出了特定抗剪连接件的承载力值。中国规范与美国规范单个抗剪连接件的承载力比值介于 1.19~1.45 之间。

(4) 组合梁中混凝土翼板和钢梁交界面的纵向剪力取值方法不同, 主要是两国采用的计算理论不同造成的。

(5) 组合梁挠度计算采用的截面惯性矩规范不同, 中国规范考虑了混凝土翼板和钢梁之间的滑移, 并在试验基础上对换算截面的惯性矩进行了折减; 美国规范未考虑滑移的影响。

(6) 对栓钉抗剪承载力的折减, 不同之处在于: 中国规范增加了负弯矩区内抗剪连接件承载力折减规定, 而美国规范没有折减; 美国规范在 2004 年的修订版本中新增加了一条规定, 如本文 3.3.2 所述。

参考文献

- 1 American National Standard, Specification for the Design, Fabrication, and Erection of Steel Safety-Related Structures for Nuclear Facilities, ANSI/AISC, N690-1994
- 2 中华人民共和国国家标准: 钢结构设计规范(GB50017-2003). 北京: 中国计划出版社, 2003
National Standard of Republic of China: Code for design of steel structures, Beijing: China Plan Press, 2003
- 3 周起敬, 姜维山, 潘太华. 钢与混凝土组合结构设计施工手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994
ZHOU Qijing, JIANG Weishan, PAN Taihua. Manual of composite of steel and concrete structures for design and construction. Beijing: China Construction Industry Press, 1994

Comparison of composite beam design codes in China and USA

LIU Shenghua

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract In this paper, we compare composite beam design under China's Code for Design of Steel Structures (GB50017-2003) and the US Specification for the Design, Fabrication, and Erection of Steel Safety-related Structures for Nuclear Facilities (ANSI/AISC N690-1994). Differences and similarities of the two codes are pointed out. This would be useful for engineers and researchers to design or study.

Key words Composite beam, Stability, Deflection, Shear resistant capability

CLC TU398