

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.01.020

中美压型钢板—混凝土组合楼板设计对比研究

王圆

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 通过对比美国《组合楼板结构设计规范》与我国(CECS 273—2010 和 JGJ 99—98)关于组合楼板设计的有关规定, 分别对组合楼板施工阶段和使用阶段的设计进行对比, 分析了组合楼板施工阶段的荷载及组合、承载力设计及变形的异同, 以及组合楼板使用阶段的抗弯强度、剪切—粘结强度、斜截面抗剪强度和挠度的异同, 为我国的涉外工程设计以及国内规范的修订提供参考依据。

关键词: 压型钢板; 组合楼板; 强度; 美国规范

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)01-0096-05

Comparative Research on Composite Slab Design Between Chinese and American Structural Design Specification

WANG Yuan

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: A comparison of composite slab design is studied between American society of civil engineers standard for the structural design of composite slabs and Chinese code for composite slabs design and constructions (CECS273:2010) and Chinese technical specification for steel structure of tall buildings(JGJ 99—98). It is analyzed similarities and differences of composite construction stage and service stage. Loads combination, flexural strength design, shear-bond strength and deflection are compared. The conclusion could be referenced for structural design of overseas projects and structure design specification revising in the future.

Key words: steel deck; composite slab; strength; American code

随着我国“十二五”规划中能源领域“走出去”战略的全面实施。我国的电力行业陆续走出国门, 接受国际化的考验。在涉外工程中, 大部分国外的业主要求国内的设计人员使用国际通用标准进行工程设计。而美国标准当仁不让成为一些国家和地区的首选。中美标准的异同点因此成为我国设计人员探讨的一个热点。压型钢板—混凝土组合楼板具有自重轻、塑性和抗震性能好, 经济效果显著以及施工方便等特点, 被广泛应用于多高层钢结构的楼板体系中^[1]。

本文结合美国 ASCE 3—91^[2] 和中国 CECS 273—2010^[3] 组合楼板结构设计规范, 基于荷载和抗力系数的设计方法(简称 LRFD), 对压型钢板—

混凝土组合楼板的设计进行对比分析。压型钢板—混凝土组合楼板的施工顺序是先铺设压型钢板, 再浇筑混凝土, 因此, 在进行设计时需要分成施工和使用两个阶段来进行设计, 确保压型钢板—混凝土组合楼板满足要求。本文仅限于将压型钢板—混凝土组合楼板作为单向板计算的情况。

1 施工阶段设计

1.1 施工荷载及荷载组合

压型钢板—混凝土组合楼板在施工阶段时, 压型钢板承受的荷载包括: 压型钢板的自重、未达到设计强度的湿混凝土的自重以及施工活荷载。施工活荷载指施工人员和施工器具的荷载, 并考虑施工过程中可能产生的冲击和振动。表 1 对比了中美两国施工活荷载的取值。

从表 1 可见, 我国 CECS 273—2010 中的施工活荷载在没有实际施工荷载数据时, 仅给出了楼面

收稿日期: 2015-03-27

作者简介: 王圆(1985), 女, 吉林四平人, 工程师, 硕士, 主要从事发电工程电力设计研究工作(e-mail) wangyuan@gedi.com.cn。

均布荷载，并未考虑集中活荷载。在我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[4]中规定：施工集中荷载标准值不应小于 1.0 kN，也小于美国规范给出的参考值。

表 1 中美施工活荷载的对比

Table 1 Comparative of Differentlive Load

规范	均布活荷载/(kN/m ²)	集中活荷载/(kN/m)
CECS 273—2010	以施工实际荷载为依据，不得小于 1.0	以施工实际荷载为依据
ASCE 3—91	1.0	2.2

我国 CECS 273—2010 中的施工阶段的荷载组合可以根据承载力极限状态和正常使用极限状态两种设计分为荷载效应基本组合和标准组合，采用的是荷载系数设计法；而美国规范中，组合楼板施工阶段时采用的是容许应力设计法，即强度需满足下式规定：

$$R \leq R_n / \Omega \quad (1)$$

式中： R 为所需容许强度； R_n 为标称强度； Ω 为安全系数； R_n / Ω 为容许设计强度。

我国的荷载组合系数取值详见表 2。从表 2 可见，在施工阶段的承载力极限状态，我国将混凝土自重与可变荷载均作为施工活荷载，其组合系数为 1.4。施工阶段的正常使用极限状态，其组合值系数均为 1。美国规范中的 Ω 的取值详见本文 1.2 节的说明。

表 2 中国荷载组合系数(施工阶段)

Table 2 Load Comination Factor for Chinese Code (Construction Stage)

设计状态	压型钢板、钢筋自重 S_s	混凝土自重 S_c	可变荷载 S_q
承载力极限状态	1.2	1.4	1.4
正常使用极限状态	1.0	1.0	1.0

1.2 施工阶段的承载力

在施工阶段，压型钢板起到模板的作用，承受自重、湿混凝土荷载及施工荷载。在这一阶段，我国规范按承载能力极限状态进行设计，其荷载效应组合的设计值按式(2)确定：

$$S = 1.2S_s + 1.4S_c + 1.4S_q \quad (2)$$

式中： S 为荷载效应设计值； S_s 为楼承板、钢筋自重 在计算截面产生的荷载效应标准值； S_c 为混凝土自重 在计算截面产生的荷载效应标准值； S_q 为施工阶段可变荷载在计算截面产生的荷载效应标准值。

这一公式涵盖了我国规范正弯矩设计、负弯矩设计及剪力设计的设计思想，即采用分项系数法对施工阶段组合楼板的承载能力进行设计。

美国规范中，施工阶段的承载力设计包括：正弯矩设计、负弯矩设计、剪力设计。

1.2.1 正弯矩设计

美国规范中分别对单跨、等跨双跨以及等跨三跨楼板的正弯矩计算给出了详细的计算公式。本文仅列出等跨三跨楼板的正弯矩计算情况，其余可参见美国规范。中美两国规范在计算施工阶段的楼板正弯矩时，均考虑了组合楼板自重及施工活荷载的影响。中国规范采用极限强度设计方法，荷载取设计值，而美国规范在验算组合楼板的施工阶段强度时采用的是容许应力法，荷载取标准值，其安全系数 $\Omega = 1.67$ 。对于等跨三跨楼板的正弯矩计算，其荷载示意图见图 1，计算公式见公式(3)和公式(4)，并取两者中的较大值。

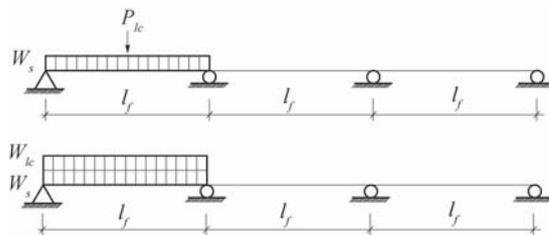


图 1 等跨三跨楼板正弯矩计算

Fig. 1 Loading Diagram of Positive Moments

$$+M = 0.200P_{ic}l_f + 0.094W_s l_f^2 \quad (3)$$

$$+M = 0.094(W_s + W_{ic})l_f^2 \quad (4)$$

式中： W_s ——组合楼板自重，包括压型钢板自重和混凝土自重； W_{ic} ——施工均布活荷载； P_{ic} ——施工集中活荷载； l_f ——板的跨度。

1.2.2 负弯矩设计

美国规范中给出了等跨两跨和三跨的负弯矩计算简图以及公式，本文仅列举了等跨三跨的情况，其荷载示意图见图 2，计算公式见式(5)。其安全系数同正弯矩设计，为 1.67。

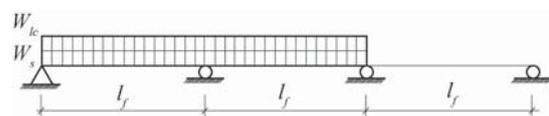


图 2 等跨三跨楼板负弯矩计算

Fig. 2 Loading Diagram of Negative Moments

$$-M = 0.117(W_s + W_{ic})l_f^2 \quad (5)$$

1.2.3 剪力设计

美国规范中给出了单跨、等跨两跨和等跨三跨的剪力计算简图以及公式, 本文仅列举了等跨三跨的情况, 荷载示意图见图3, 计算公式见公式(6)和公式(7)。安全系数 $\Omega = 1.60$ 。

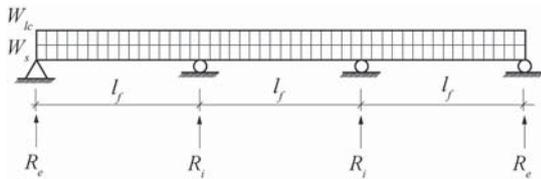


图3 等跨三跨楼板剪力计算

Fig. 3 Loading Diagram of Shear Force

$$R_e = 0.4l_f(W_s + W_{ic}) \quad (6)$$

$$R_i = 1.25l_f(W_s + W_{ic}) \quad (7)$$

1.3 施工阶段的变形

中美两国规范中均规定: 在施工阶段, 楼承板施工阶段的挠度不应大于板跨的 $1/180$, 且不应大于 20 mm 。这一限值也在我国《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99—98)[5]中有所规定。美国规范中给出了变形的计算公式, 荷载示意详见图4, 计算公式见公式(8)。

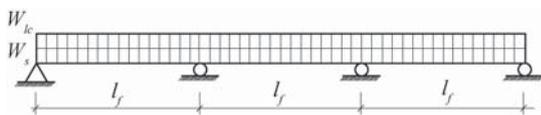


图4 等跨三跨楼板挠度计算

Fig. 4 Loading Diagram of Deflections

$$\Delta = 0.53 \times \frac{5W_s l_f^4}{384E_s I_s} \quad (8)$$

2 使用阶段设计

当组合楼板的混凝土达到设计强度, 并承受使用阶段的荷载时, 组合楼板需要进行使用阶段的设计, 其承受的荷载需按各国的荷载规范的规定乘以相应的分项系数/荷载系数后进行组合。中美两国在使用阶段均采用分项系数设计法进行设计。在这一阶段, 压型钢板起着受拉钢筋的作用。

2.1 强度验算

2.1.1 正弯矩计算

计算组合楼板正弯矩区正截面时, 一般认为压型钢板全部屈服。我国规范中给出正弯矩区段设计的公式, 见式(9):

$$M = M_{1G} + M_{2G} + M_{2Q} \quad (9)$$

式中: M 为组合楼板弯矩设计值; M_{1G} 为组合楼板自重产生的弯矩设计值; M_{2G} 为除组合楼板自重以外, 其余永久荷载在计算截面产生的弯矩设计值; M_{2Q} 为可变荷载在计算截面产生的弯矩设计值。

我国组合楼板的正弯矩计算方法与钢筋混凝土梁的计算相似。首先需要确定混凝土受压区高度 x , 见公式(10)。

$$x = \frac{A_a f_a + A_s f_y}{f_c b} \quad (10)$$

式中: A_a ——计算宽度内压型钢板截面面积; A_s ——计算宽度内受拉钢筋截面面积; f_a ——压型钢板抗拉强度设计值; f_y ——钢筋抗拉强度设计值; f_c ——混凝土抗压强度设计值; b ——组合楼板计算宽度(mm), 可取单位宽度 1000 mm 或取一个波距宽度。

当 $x \leq h_c$ 且 $x \leq \varepsilon_b h h_0$ 时, 正弯矩按公式(11)计算,

$$M \leq f_c b x \left(h h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (11)$$

式中: h_c ——压型号钢板肋以上混凝土厚度; h_0 ——组合楼板截面有效高度。

当 $x > \varepsilon_b h h_0$ 时, 取 $x = \varepsilon_b h h_0$; 当 $x > h_c$ 时, 表明压型钢板肋上部分的混凝土受压面积不够, 还需要压型钢板内的部分混凝土及压型钢板受压, 对压型钢板较为不利, 宜调整压型钢板型号和尺寸, 若无替代产品, 取 $x = h_c$ 。

在美国规范中, 首先需要根据对比配筋率 ρ 和应变平衡状态下的配筋率 ρ_b , 来判断板的类型: 少筋板或是超筋板。当 $\rho \leq \rho_b$ 时, 板为少筋板, 若压型钢板中未配置其他受力钢筋且板全截面达到屈服应力, 此时, 正弯矩承载力按公式(12)计算

$$\varphi M_n \leq \varphi A_a f_a \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (12)$$

式中: $a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c b}$; d ——组合楼板截面有效高度; 强度折减系数 $\varphi = 0.85$ 。

2.1.2 负弯矩设计

使用阶段的负弯矩不仅与支座条件有关, 同时与加载顺序、临时支撑条件也密切相关。若不设置临时支撑, 在混凝土硬结前, 负弯矩钢筋与混凝土并没有粘结, 负弯矩钢筋不承受荷载, 只有在混凝土

土硬结后，负弯矩区钢筋才发挥作用，此时负弯矩钢筋承受除压型钢板和混凝土自重外的荷载。我国规范给出公式(13)：

$$M = M_{2G} + M_{2Q} \quad (13)$$

若设置临时支撑，在拆除临时支撑时，混凝土已经硬结，则按普通钢筋混凝土现浇板组合弯矩设计值来验算负弯矩钢筋，见公式(14)：

$$M = M_{1G} + M_{2G} + M_{2Q} \quad (14)$$

美国规范中并未区分是否设置临时支撑对负弯矩设计的影响，其采用的计算公式同公式(14)，而通过负弯矩的设计方法同正弯矩设计方法。

2.1.3 剪力设计

使用阶段，我国规范中给出了压型钢板—混凝土组合楼板的剪力设计值计算公式(15)：

$$V = \gamma V_{1G} + V_{2G} + V_{2Q} \quad (15)$$

式中： V ——组合楼板最大剪力设计值； V_{1G} ——组合楼板自重计算截面产生的剪力设计值； V_{2G} ——除组合楼板自重以外，其余永久荷载在计算截面产生的剪力设计值； V_{2Q} ——可变荷载在计算截面产生的剪力设计值； γ ——施工时与支撑条件有关的支撑系数。满支撑时 $\gamma = 1.0$ ，无支撑时 $\gamma = 0.0$ 。

美国规范中没有详细提及在使用阶段剪力设计的情况，可以参考美国钢结构设计规范进行设计。

2.1.4 剪切粘结承载力计算

组合楼板的剪切粘结破坏是最常见的破坏形式，组合板底部混凝土受拉开裂，导致压型钢板与混凝土界面应力增大，当剪应力超过纵向粘结力，界面出现局部纵向滑移和竖向分离，从而导致组合板的纵向剪切—粘结破坏^[6]。影响组合楼板纵向剪切能力的因素很多，如压型钢板的类型(含板肋表面齿槽、肋高等)、混凝土强度、楼板含钢量、剪跨比等因素有关^[7-8]。因此，不同板型的组合楼板的剪切粘结系数需由试验确定。

美国规范中给出了组合楼板的剪切粘结承载力计算公式：

$$\varphi V_n = \varphi [bd(\frac{m\rho d}{l'_i} + k \sqrt{f'_c}) + \frac{\gamma W_s l_f}{2}] \quad (16)$$

式中： $\varphi = 0.75$ ； m ， k ——剪切粘结系数，根据剪切粘结试验确定； ρ ——压型钢板配筋率，为压型钢板面积与有效混凝土截面的比值； l'_i ——剪跨，对均布荷载， $l'_i = \frac{l_i}{4}$ ； W_s ——板的自重； l_f ——组

合楼板跨度或支撑跨度； γ ——恒载支撑影响系数。这一系数的取值可参见文献[2]。

中国规范也沿用了此公式，但我国没有 $\sqrt{f'_c}$ 这一特征值，我国混凝土抗拉强度 $f_t = \beta \sqrt{f'_c}$ ，为此我国规范用 f_t 替代 $\sqrt{f'_c}$ ，并对不同种类、不同型号的压型钢板组合楼板进行了大量试验，给出了剪切粘结承载力的计算公式：

$$V = m \frac{A_a h_0}{1.25a} + k f_t b h_0 \quad (17)$$

式中： V ——组合楼板最大剪力设计值； a ——剪跨，均布荷载作用时取 $a = l_n/4$ ； l_n ——板净跨度，连续板可取板反弯点之间的距离。 A_a ——计算宽度内组合楼板中压型钢板截面面积。

2.1.5 斜截面受剪承载力计算

我国规范中在计算组合楼板斜截面受剪承载力时，将组合楼板简化为 T 形截面，斜截面承载力主要由腹板混凝土承担，其计算公式为：

$$V \leq 0.7 f_t b_{min} h_0 \quad (18)$$

式中： b_{min} 是计算宽度内组合楼板换算腹板宽度。

实际上对斜截面受剪承载力的要求是组合楼板最小截面的要求。美国规范认为不需要对斜截面受剪承载力进行验算。

2.2 挠度验算

在使用阶段，我国规范中组合楼板的挠度需按荷载效应的标准组合以及准永久组合进行计算。对应美国规范中果对短期荷载及长期荷载产生的挠度进行计算。对于挠度的限值，我国规范中规定组合楼板使用阶段的挠度不应大于板跨的 1/200。美国规范中对挠度限值的分类较细，根据楼板的类型，其取值范围为板跨的 1/180 ~ 1/480，详见表 3。

表 3 正常使用荷载下的最大允许挠度 (ASCE 3—91)
Table 3 Maximum Allowable Deflection Under Service Loads
(ASCE 3—91)

组合楼板的类型	挠度类型	挠度限值
不支撑或与可能由大变形引起破坏的非结构构件相关的屋面	由屋面活荷载引起的短期挠度	$\frac{l_i}{180}$
不支撑或与可能由大变形引起破坏的非结构构件相关的楼面	由楼面活荷载引起的短期挠度	$\frac{l_i}{360}$
支撑或与可能由大变形引起破坏的非结构构件相关的楼面或屋面	这部分的挠度是指在非结构构件附加后产生的挠度，长期挠度	$\frac{l_i}{480}$
不可能由大变形引起破坏的非结构构件的楼面或屋面	需要减掉非结构构件附加前产生的挠度。	$\frac{l_i}{240}$

3 构造措施的对比

中美两国规范中都对组合楼板的混凝土强度以及厚度提出了构造要求。我国规范中规定组合楼板的混凝土强度不得低于 C20, 美国规范中规定 f' 。不得小于 17 MPa。两国都规定组合楼板的总厚度不应小于 90 mm, 压型钢板以上的混凝土厚度不应小于 50 mm。另外, 中美两国规范中还规定了组合楼板的附加钢筋、抗裂钢筋、支承长度以及栓钉的设置等, 此处不展开一一列举, 具体规定可参见参考文献^[2-9]。

4 结论

通过对比中美两国的组合楼板设计规范, 可以得到以下结论:

1) 与美国规范相比, 中国规范中给出的施工荷载的数值偏小。中美两国的施工均布活荷载均不得小于 1.0 kN/m², 我国的施工集中荷载标准值不应小于 1.0 kN, 美国的施工集中荷载标准值不应小于 2.2 kN/m。

2) 施工阶段的承载力设计包括: 正弯矩设计、负弯矩设计、剪力设计。我国规范采用荷载分项系数法计算施工阶段的承载力, 而美国规范采用的是容许应力法计算, 并对抗弯、抗剪分别给出了不同的安全系数, 在抗弯设计时, 安全系数取为 1.67, 在抗剪设计值, 安全系数取为 1.60。

3) 中美两国规范组合楼板在施工阶段的挠度限值相同。楼承板施工阶段的挠度均不应大于板跨的 1/180, 且不应大于 20 mm。

4) 使用阶段时, 我国规范需验算组合楼板的正弯矩承载力、剪切—粘结承载力以及斜截面抗剪承载力。美国规范在验算正弯矩承载力时, 需要考虑强度折减系数 ϕ , 对不同的验算条件, ϕ 的取值也不同。美国规范认为不需要验算斜截面抗剪承载力。

5) 中美两国使用阶段的挠度限值不同。我国规范中规定组合楼板使用阶段的挠度不应大于板跨的 1/200。美国规范中对挠度限值的分类较细, 根据

楼板的类型, 其取值范围为板跨的 1/180 ~ 1/480。

参考文献:

- [1] 刘维亚. 钢与混凝土组合结构理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 410-422.
LIU Weiya. Steel and Concrete Composite Structure Theory and Practice[M]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2008: 410-422.
- [2] ANSI/ASCE3-91, Standard for The Structural Design of Composite Slabs[S]. American Society of Civil Engineers, 1992.
- [3] CECS 273: 2010, 组合楼板设计与施工规范[S]. 北京, 中国计划出版社, 2010.
CECS 273: 2010, Code for Composite Slabs Design and Construction[S]. Beijing, China Planning Press, 2010.
- [4] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50009—2012, Load Code for The Design of Building Structures[S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2012.
- [5] JGJ99—98, 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
JGJ99—98, Technical Specification for Steel Structure of Tall Buildings[S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 1998.
- [6] 史晓宇, 陈世鸣, 裴子豪. 组合板剪切—粘结机理及承载能力试验[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2012, 40(5): 666-672.
SHI Xiaoyu, CHEN Shiming, QIU Zihao. Experimental Investigation on Shear-bond Mechanism and Strength of Composite Slabs with Steel Profiles[J]. Journal of Tongji University(Natural science). 2012, 40(5): 666-672.
- [7] 陈世鸣. 连续跨压型钢板—混凝土组合楼板的承载力[J]. 钢结构. 2001, 4(16): 37-40.
CHEN Shiming. Load Carring Capacity of Continuous Profiled Sheet-concrete Floors. Steel Structure. 2001, 4(16): 37-40.
- [8] 陈世鸣. 压型钢板—混凝土组合楼板设计中的若干问题[J]. 建筑结构. 2003, 33(1): 45-47.
CHEN Shiming. Load Carring Capacity of Continuous Profiled Sheet-concrete Floors. Building Structure. 2003, 33(1): 45-47.
- [9] ANSI/ASCE 9-91, Standard Practice for Construction and Inspection of Composite Slabs[S]. American Society of Civil Engineers, 1992.

(责任编辑 黄肇和)