

预应力混凝土梁板体系的应用分析

骆文进

重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072

摘要: 预应力梁板体系在建筑工程机桥梁工程中得到广泛的应用, 本文较为深入的从理论和试验两个角度分析预应力混凝土梁板体系有效翼缘, 主要是研究变分法分析预应力框架梁的解析解, 结合较为典型的预应力框架结构的试验, 探讨预应力混凝土梁的有效翼缘宽度的取值。研究表明: 预应力混凝土梁的等效宽度能够描述真实的受力状态, 在实际的工程中, 预应力混凝土要进行短暂状态的应力计算, 且会改变混凝土楼面荷载的双向传递规律。本文的结果能为预应力混凝土梁板体系的设计及计算提供参考。

关键词: 预应力混凝土; 梁板体系; 有效翼缘; 工程案例

中图分类号: TU528.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-2324(2015)05-0734-06

Theoretic Analysis and Experimental Study on Beam-plate System of Prestressed Concrete

LUO Wen-jin

Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China

Abstract: Beam-plates system of prestressed concrete has been widely used in construction engineering and bridge engineering. This paper deeply analyzed the effective flange of prestressed concrete beam-plate system from the theoretical and experimental perspective with the method of the various analysis, combining more typical test of prestressed framework, and to explore the effective value of prestressed concrete beam flange width. The results showed that the equivalent width of prestressed concrete beams could describe the real stress state. In practical project, prestressed concrete needed to be calculated stress in short time and the two-way floor load transfer law of prestressed concrete would be changed, which could provide a reference for the design and calculation of prestressed concrete system.

Keywords: Prestressed concrete; beam-plates system; effective flange; engineering project

随着建筑行业的高速发展, 预应力混凝土自 20 世纪 60 年代以来开始广泛应用到, 预应力混凝土广泛应建筑工程以及桥梁工程中, 相对于普通的混凝土, 预应力混凝土的优点是强度高、质量轻、抗裂性能好、刚度大等, 能有效的调整内力并能够防止混凝土结构出现开裂。国内外很多学者展开对混凝土梁板体系有效翼缘的研究, 肖建春等^[1,2]提出了钢筋混凝土梁板体系有效翼缘静动力的有效的计算简化方法, 但是计算理论模型还有较大的局限性。在实际的工程中, 一般预应力混凝土梁板楼盖都是和普通的钢筋混凝土整体浇筑的, 这样可以保证梁板体系能够整体工作, 如果梁在荷载作用下承受的是正弯矩, 一部分的板就等同于梁的翼缘, 可以承受竖向的压力从而平衡梁内部的钢筋的拉力。对于 T 形梁来讲, 进行极限分析的时候, 可以假定该梁的纵向应力在翼缘的减宽度上面能够均匀的分布^[3]。T 形梁的有效翼缘和腹板、跨度、支座条件以及横向配筋都有关系, 在进行工程结构分析的时候, 如果精度要求不高的话, 可以认为在跨度范围内有效翼缘的宽度是一定的。

很多学者研究表明, 剪力滞后的现象无论是在工程设计和实践中都不能忽视, 有效翼缘的提出就是实际工程中兼顾剪力滞后以及计算的复杂程度, 认为预应力混凝土梁板在有效的宽度范围内的应力分布是均匀的, 从而取代实际工程中真实的翼缘宽度, 对于一些跨度较大的预应力混凝土结构来讲, 目前对有效翼缘的规定较大, 而板对梁的抗弯能力的提高包括了节点类型、直交梁的刚度以及水平加载特征等, 本文较为深入的从理论和试验两个角度分析预应力混凝土梁板体系有效翼缘, 主要是研究变分法分析预应力框架梁的解析解, 结合较为典型的预应力框架结构的试验, 探讨预应力混凝土梁的有效翼缘宽度的取值, 并提出预应力混凝土梁的有效翼缘宽度的解析解, 为建筑工程中预应力混凝土结构的设计以及施工提供有效的参考。

1 理论分析

收稿日期: 2013-06-20

修回日期: 2013-07-12

作者简介: 骆文进(1983-),女,重庆市巫山县人,硕士,讲师,研究方向:结构工程. E-mail:lwi513@163.com

数字优先出版: 2015-03-15 <http://www.cnki.net>

研究预应力混凝土梁板体系有效翼缘的宽度首先要清楚翼缘板上面的弯曲正应力的分布状态,这就要研究剪力滞后的现象,对于建筑工程中的房屋建筑来讲,主要采用能量变分法分析剪力滞后的问题。

1.1 变分法求解剪力滞效应

现浇梁板体系都是梁和板共同工作,一般将框架梁看成 T 型梁,将梁以及板分别称为腹板和翼缘板。

对于 T 型梁,一般其挠度可以用 $\omega(x)$ 表示,沿着梁轴线方向的位移一般用 $\mu(x,y)$ 表示:

$$\omega = \omega(x)$$
$$\mu(x,y) = h_u \left[\frac{dw}{dx} + \left(1 - \frac{y^3}{b^3} \right) u(x) \right]$$

其中, $u(x)$ 表示板剪切变形的最大差值; b 为

K_1 为荷载; K_2 的确定取决于材料的性质以及几何性质; K_3 是翼缘板的惯性矩和总截面惯性矩的比值。因此, 在实际工程计算时候, 如果梁或者板的截面尺寸、材料的性质以及支座情况等参数确定之后, 三个参数 K_1 、 K_2 、 K_3 都比较容易求出。

2 有效翼缘取值的规定及受力特点

2.1 预应力混凝土梁有效翼缘取值规定

GB 50010-2002 的 7.2.3 款规定:T 形、I 形以及倒 L 形的截面受弯构件如果要计算受压的翼缘计算宽度 b_f' 一般都应该按照规范中的最小值进行确定。这个规定在特别适用于进行计算预应力混凝土的受弯构件正截面的承载能力极限状态, 这样, 预应力混凝土梁板体系有效翼缘的宽度在受弯极限承载力下有具体规定, 但是如果是在弹性状态下规范就没有给出相应的规定。

美国 ACI318-02 的规范中对有效翼缘取值也有特定的规定: 如果预应力混凝土板是看成 T 形梁翼缘的情况, 其有效宽度要小于或者等于梁跨度的 1/4, 并且预应力混凝土梁腹的两侧悬出翼缘的有效宽度也有具体的规定: 预应力混凝土板厚的 8 倍或者相邻预应力混凝土梁净距的 1/2。如果近一侧有混凝土板的预应力混凝土梁, 悬挑出来的有效宽度如下: 预应力混凝土梁跨度的 1/12; 预应力混凝土板厚度的 6 倍; 相邻混凝土梁腹之间净距的 1/2。

MC90 模式规范对预应力混凝土梁有效翼缘的宽度也进行了规定: 预应力混凝土梁有效宽度可以在弹性或者塑性理论计算的基础进行确定, 预应力混凝土梁有效宽度可以沿着梁的轴线发生变化。如果没有很准确的确定预应力混凝土梁有效宽度的时候, 一般用于进行总体分析的预应力混凝土梁有效宽度可以取腹板厚度 (h) 加上零弯矩点之间距离 l_0 的 1/5, 但是要注意的一点是不可以超过预应力混凝土梁顶板的实际宽度 (h_0)。在这样的情况中, 预应力混凝土梁的有效宽度沿着这个跨度的方向可以取为常数, 包括了连续预应力混凝土梁接近中间支座的地方。对于预应力混凝土的边梁, 有效宽度的值等于于腹板厚度 (h) 加 (零弯矩点之间距离) /10。如果出现相邻跨度的比率变化范围在 1~1.5 之间的情况时, 而且预应力混凝土悬臂部分的长度 (l_1) 不大于邻跨的 1/2 的时候, 设计计算跨度为 l , 则各跨的零弯矩之间距离 l_0 的取值为: 预应力混凝土端跨为 0.85 l ; 预应力混凝土中间跨为 0.7 l ; 预应力混凝土悬臂跨为 2 l 。

2.2 预应力混凝土梁有效翼缘受力特点

T 形预应力混凝土梁有效翼缘宽度的取值不但要考虑腹板和、翼缘尺寸以及跨度, 而且还要考虑预应力混凝土梁的一些支座条件。美国规范 ACI318 指出“混凝土梁有效翼缘宽度取值是针对非预应力的混凝土梁所提出来的”, 规范对不同形式的荷载所采用的应力的之间的区别并没有进行考虑, 尤其是忽略了受弯作用以及受轴压作用两者之间的区别。

黄坤耀和楼文娟^[4]等人针对某个实际的工程案例, 通过有限元分析的方法, 分析了有粘结的预应力混凝土梁板柱体系, 得出相应的应力分布的基本情况, 结果表明: 影响预应力混凝土梁的有效翼缘宽度的一个很重要的因素就是结构受力类型, 翼缘在等效轴力作用下 (主要是由预应力产生), 其应力分布曲线相对比较的平坦, 预应力混凝土梁的有效翼缘宽度较宽。Aalami^[5]通过试验研究分析得出相似的结论。对于单跨预应力框架梁, 在预应力等效荷载的作用, 预应力混凝土翼缘板将会出现压应力, 而且这种应力会迅速的从端部扩展到跨中, 最后达到基本均匀分布; 但在等效的均布荷载以及集中弯矩的作用下, 预应力混凝土翼缘板跨中的压应力分布不是很不均匀, 最大的应力发生在板梁相交处, 随着远离梁的距离的不断增大而应力越来越小。预应力混凝土翼缘板梁板在受弯的时候, 一般来讲翼缘的肋梁上方位置相对其他位置具有较高的受力情况, 而且预应力混凝土翼缘内部的纵向压应力会随着离梁的远近程度而发生不同的变化。产生这种翼缘压应力变化的原因主要是由于预应力混凝土翼缘内的剪切滞后的影响, 由于存在着剪切变形, 纵向压应变与梁距离呈现负相关的关系。如果仅仅在轴向力的作用, 剪切滞后效应不会存在, 从而预应力混凝土梁跨中的压应变也相对较为均匀。

3 试验研究

3.1 工程概况

河北省的一新客站广场工程位于河北省火车站的南侧，该结构采用的是连续多跨双向预应力的框架结构，地面以上是 3 层，地下 1 层，地上的第二层的梁为连续三跨连续梁，跨度达到了 15 m，由于该大跨度的连续梁要承受结构上面柱子的自重以及较大的荷载，设计的时候采用后张法进行预应力施工，第二层的预应力梁的配筋图如图 2。

第二层楼板主要包括了两类型的混凝土板，一是厚度为 200 mm 的单层板，二是上层厚度为 220 mm，下层板厚度为 80 mm 的双层板，预应力混凝土梁的截面在单层楼板的宽和高分别是 480 mm 和 1600 mm，而在双层混凝楼板的宽和高分别是 480 mm 和 2000 mm。所采用预应力钢筋是低松弛的钢丝束， $f_{pk}=1800 \text{ Mpa}$ ，其进行张拉时的控制应力取为 1438 MPa，张拉的方式采用两段张拉，而且所采用的混凝土的等级为 C40。这是一个典型的跨度较大的双向梁板柱结构，在进行计算框架计算时，楼板对梁的弯曲刚度不能忽略。

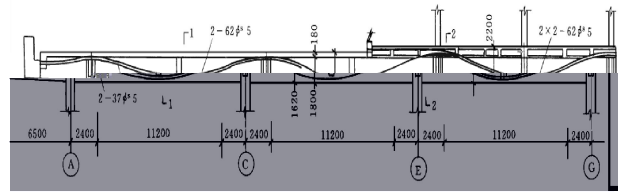


图 2 预应力混凝土梁的预应力配筋图

Fig.2 The prestressed reinforcement figure of prestressed concrete beams

本文将采用有限单元的方法确定预应力混凝土梁的有效翼缘的宽度，并将计算的结果与现场的实测结果进行对比分析。

3.2 预应力混凝土梁板的有效翼缘宽度

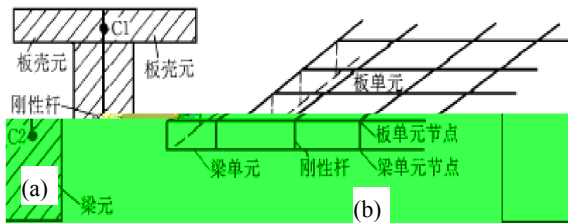


图 3 梁、板单元相连的刚性杆

Fig.3 Rigid rod of beam and plate unit connection

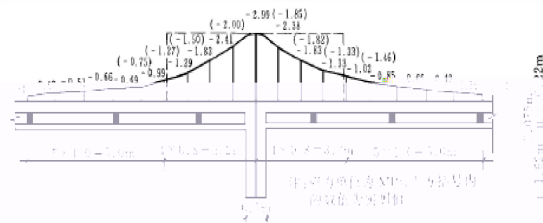


图 4 2-2 截面的应力分布图

Fig.4 Stress distribution of 2-2 section

预应力混凝土梁的计算应该分别按照 T 形以及矩形分别取值，计算得到结果相差不是很大，有图 4 可知，预应力混凝土的翼缘上面的纵向应力的分布相对而言不是很均匀，距离梁的距离较小的位置应力较大，而距离较大的地方应力较小。

3.3 工程案例二

某一个桥梁工程的单幅宽度是 15.5 m，这座桥目前来讲是跨越永定新河的一座特别大的桥，单幅的桥宽达到 16.5 m，由于该桥的长度较长，超过了 1000 m，而且与永定新河呈 45° 的交角，为了更好的进行施工，采用三联 3×55 m PZ 造桥机施工而成的预应力混凝土连续箱梁，平曲线的半径达到了 5000 m。施工的第一阶段是简支的单悬臂，施工长度为 55 m 米简支加 11 m 悬臂，该桥设计的悬臂尺寸为跨径长度的 1/5，从力学角度来讲，该位置的弯矩最小，所以将施工缝设在该位置，施工的第二阶段完成长度为 44 m 加 11 m 悬臂，施工的第三阶段是进行剩下的 44 m。采用的主要预应力钢束都是单向张拉的方式，而且最大单向的张拉长度达到了 66 m。按预应力混凝土采用 C50。基本参数如下： $E_c=3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$ ； $f_{cd}=22.4 \text{ MPa}$ ； $f_{td}=1.83 \text{ MPa}$ 。

预应力钢绞线的基本参数： $E_p=1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$ ； $f_{pk}=1860 \text{ MPa}$ ， $f_{pd}=1260 \text{ MPa}$ 。

HRB335 级钢筋： $E_s=2.00 \times 10^5 \text{ MPa}$ ； $f_{sd}=280 \text{ MPa}$ ； $f_{sd}=280 \text{ MPa}$

3.3.1 预应力混凝土翼缘有效宽度的计算 对于箱形截面预应力混凝土梁承受弯矩作用的时候，在横桥的方向会存在剪力滞的效应，这样接近腹板的翼缘的法向应力就会和腹板法向应力较为接近，而离预应力混凝土腹板距离愈大则愈小。在进行预应力施工过程中，所有的预应力的钢束都应该布置

在预应力混凝土翼缘的有效宽度以内，这样可以保证预应力混凝土能够均匀受力，在进行设计与计算的时候认为分布在预应力混凝土翼缘有效宽度范围内的普通钢筋能够有效的发挥作用。

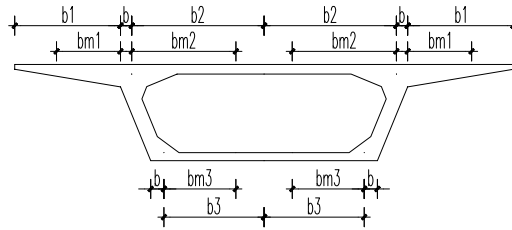


图 5 箱梁的截面尺寸
Fig.5 Sectional size of box girder

对于预应力混凝土梁的边支点以及边跨中的梁段 $L_1=0.8L=44\text{ m}$ ；对于预应力混凝土梁跨中梁段 $L_1=0.6L=33\text{ m}$ ，中间支点的 L_1 等于 0.2 倍的两个相邻跨径的和，即 $L_1=0.2 \times (55+55)=22\text{ m}$ 。

(1) 计算应力混凝土梁中支点的翼缘的等效宽度：

悬臂板： $b_1/L_1=0.16\text{ m}$ ，查 $\rho-s$ 曲线， $b_{m1}/b_1=0.55\text{ m}$ ， $b_{m1}=0.55\text{ m} \times 3.5\text{ m}=1.93\text{ m}$

箱内顶板： $b_2/L_2=0.17\text{ m}$ ，查 $\rho-s$ 曲线， $b_{m2}/b_2=0.5$ ， $b_{m2}=0.5 \times b_2=1.92\text{ m}$

箱内底板： $b_3/L_3=0.13$ ，查 $\rho-s$ 曲线， $b_{m3}/b_3=0.65$ ， $b_{m3}=0.65 \times 2.92\text{ m}=1.90\text{ m}$

(2) 计算预应力混凝土梁中跨跨中翼缘的等效宽度：

悬臂板： $b_1/L_1=0.11$ ，查 $\rho-f$ 曲线， $b_{m1}/b_1=0.9$ ， $b_{m1}=0.9 \times 3.5\text{ m}=3.15\text{ m}$

箱内顶板： $b_2/L_2=0.13$ ，查 $\rho-f$ 曲线， $b_{m2}/b_2=0.86$ ， $b_{m2}=0.86 \times 4.38\text{ m}=3.77\text{ m}$

箱内底板： $b_3/L_3=0.10$ ，查 $\rho-f$ 曲线， $b_{m3}/b_3=0.92$ ， $b_{m3}=0.92 \times 3.31\text{ m}=3.05\text{ m}$ 。全部的计算结果见表 1。

表 1 翼缘有效宽度计算(m)
Table 1 Effective flange width calculation (m)

计算位置 Calculation site	混凝土悬臂板 Cantilever plate of concrete		底板 Floor		底板箱内顶板 Roof in the cabinet	
边部支点	b_1	3.45	b_3	2.84	B_2	3.82
	L_1	44.24	L_3	43.95	L_2	43.98
	b_1/L_1	0.08	B_3/L_3	0.06	B_2/L_2	0.09
	B_{m1}/L_1	0.74	B_{m3}/L_3	0.89	B_{m2}/L_2	0.82
边跨的跨中部位	B_{m1}	2.62	B_{m3}	2.54	B_{m2}	2.79
	b_1	3.49	b_3	3.32	B_2	4.37
	L_1	43.98	L_3	43.98	L_2	43.98
	b_1/L_1	0.08	B_3/L_3	0.08	B_2/L_2	0.09
中部的支点	B_{m1}/L_1	0.94	B_{m3}/L_3	0.94	B_{m2}/L_2	0.93
	B_{m1}	3.34	B_{m3}	3.13	B_{m2}	4.02
	b_1	3.49	b_3	2.93	B_2	3.82
	L_1	21.98	L_3	21.98	L_2	21.98
中跨的跨中位置	b_1/L_1	0.15	B_3/L_3	0.12	B_2/L_2	0.16
	B_{m1}/L_1	0.54	B_{m3}/L_3	0.66	B_{m2}/L_2	0.49
	B_{m1}	1.92	B_{m3}	1.89	B_{m2}	1.91
	b_1	3.49	b_3	3.32	B_2	4.37
中跨的跨中位置	L_1	32.98	L_3	32.98	L_2	32.98
	b_1/L_1	0.12	B_3/L_3	0.11	B_2/L_2	0.12
	B_{m1}/L_1	0.89	B_{m3}/L_3	0.91	B_{m2}/L_2	0.88
	B_{m1}	3.14	B_{m3}	3.04	B_{m2}	3.76

通过对计算结果进行分析可得，预应力混凝土的跨中翼缘的有效宽度的折减相对是比较小的，但在预应力混凝土的支点的位置的折减比较大，产生这种现象的原因是由于支点位置的剪力滞的效应较大。

3.3.2 预应力混凝土压应力的控制 (1) 预应力混凝土的正截面压应力的控制公式为： $\sigma_{pt}+\sigma_{kc}\leq 0.5f_{ck}$ ，也就是要求本案例中的预应力混凝土的正截面压应力 $\leq 16.19\text{ MPa}$ 。如图 6 所示，预应力混凝土的最大压应力 9.93 MPa ，大约在节点 105 的上缘位置，基本满足要求。

(2) 预应力混凝土斜截面的主压应力的控制公式为： $\sigma_{cp}\leq 0.6f_{ck}$ ，也就是要求本案例中的预应力混凝土的主压应力 $\leq 19.43\text{ MPa}$ 。预应力混凝土的最大主压应力为 9.918 MPa ，大约在节点 105 上缘的位置，满足要求。

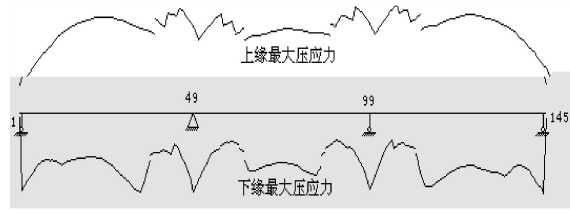


图 6 正截面混凝土压应力

Fig.6 Stress of normal section of concrete

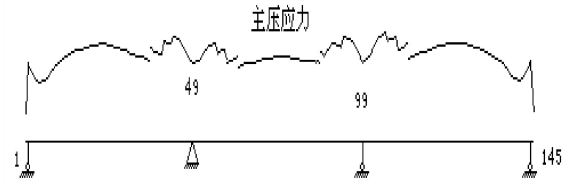


图 7 基本组合混凝土的主压应力

Fig.7 Master stress of the basic combination of concrete

3.3.3 预应力混凝土钢筋拉应力控制 (1) 预应力混凝土中的钢绞线的最大拉应力控公式为制： $\sigma_{pe} + \sigma_p \leq 0.64f_{pk}$ ，也就是钢绞线的最大拉应力 ≤ 1208 MPa。

(2) 预应力混凝土的最大拉应力 $1239 \text{ MPa} > 0.65 f_{pk} = 120 \text{ MPa}$ ，通过计算可以看出只有局部的一个点的值略大，在 2.48% 左右。详细的计算结果见表 2。由表 2 可以得出，对于预应力混凝土中的短钢束，竖向弯矩较少的，可以通过减小施工工程中的张拉控制应力进行解决，即使张拉的控制应力为 $0.70 f_{pk}$ ，钢束上面的永存的应力一般不会超过标准的要求。

表 2 钢束最大永存应力

Table 1 The maximum permanent stress of steel beam

编号 NO.	钢束编号 NO. of steel beam	预应力钢筋的最大拉应力 Maxi-stress of prestressed reinforce	钢筋容许拉应力 Allowed stress of reinforce	超出标准的范围(%) Range beyond the standard
1	19	1229	1208	
2	20	1240	1208	2.47%
3	21	1234	1208	
4	22	1219	1208	
5	23	1223	1208	
6	24	1234	1208	
7	29	1234	1208	

4 结论

本文较为深入的从理论和试验两个角度分析预应力混凝土梁板体系有效翼缘，主要是研究变分法分析预应力框架梁的解析解，结合较为典型的预应力框架结构的试验，探讨预应力混凝土梁的有效翼缘宽度的取值，得出以下结论：

(1) 通过能量变分法分析得出了均布荷载作用下预应力混凝土 T 型梁的有效翼缘宽度的表达式。

(2) 详细分析了预应力混凝土梁板体系的受力特点，并通过两个具体案例分析不同的有效翼缘宽度对计算结果的影响。

(3) 通过工程案例分析，预应力混凝土梁的等效宽度能够描述真实的受力状态，在实际的工程中，预应力混凝土要进行短暂状态的应力计算，本文的结果能为预应力混凝土梁板体系的设计及计算提供参考。

参考文献

[1] 肖建春,马克俭.剪力键式双向空心大板的分解刚度法[J].贵州工业大学学报,1997,26(4):24-35
 [2] 黄 勇,马克俭.多层空腹夹层板柱结构的动力特性研究[J].建筑结构学报,2000,21(3):23-29
 [3] CEB 欧洲国际混凝土委员会.11990CEB-FIP 模式规范(混凝土结构)[S].中国建筑科学研究院译,1991
 [4] 黄坤耀,楼文娟,孙炳楠,等.预应力梁板体系的空间分析及有效翼缘宽度[J].建筑结构,2001(2):40-42
 [5] Aalami B O. Effective Width in Post-Tensioned Flanged Beams, ADAPT Technical Note, ADAPT Corp., 2001
 [6] 黄 勇,江绍飞.钢筋混凝土空腹夹层板楼盖体系的研究与应用[J].建筑结构学报,1997,18(6):55-64
 [7] 黄 远.钢-混凝土组合框架受力性能的试验研究与模型分析[D].北京:清华大学,2009
 [8] 王聚厚,聂建国,卫 军,等.用普通钢筋混凝土叠合板作受压翼的钢-混凝土组合梁[J].工业建筑,1992(2):6-9
 [9] ANSI/AISC 360-05.Specification for structural steel buildings[S].Chicago:American Institute of Steel Construction,2005
 [10] EN 1994-1-1:2004 Design of composite steel and concrete structures. Part1-1:general rules and rules for buildings[S]. Brussels:European Committee for Standardization,2004