

[编者按] 上海欧本钢结构桁架工程有限公司是国内第一家专业预制桁架公司，引进北美技术，结合国内情况，研发生产了大柱距桁架檩条系统和组合上弦楼层桁架次梁。目前年产能约一万吨，经济效益显著。这里将陆续介绍他们在该项技术方面的成果和应用。

钢-混凝土组合桁架式次梁的设计与试验分析

伏万成¹⁾ 吴玉华²⁾ 陈明³⁾

0 引言

钢-混凝土组合桁架式次梁是一种以 Z 型薄壁冷弯钢板和现浇混凝土翼板组合成上弦的简支桁架梁，它充分发挥了钢和混凝土各自的特点，是一种经济有效的结构形式。组合桁架梁受力简单明确，充分展现了桁架结构形式的魅力；结构外形简洁明快又不失美观大方；在相同的工况下较别的结构形式大大降低用钢量；加工简单，施工方便快捷节省工期。

组合桁架式楼层次梁在欧美国家随处可见，应用极其广泛。在美国钢桁架发展非常成熟，已形成了一套完整的产业。美国专门设有行业学会“钢桁架学会”（简称 SJI）；在北美钢桁架应用非常广泛，其中组合桁架式楼层次梁被广泛应用于厂房、超市、住宅、办公等屋面楼面。目前，平面式桁架在国内应用较少，而组合桁架式楼层梁在国内更属空白。但随着钢结构事业的迅猛发展，这种结构形式必将成为钢结构，特别是轻钢结构中不可忽视的力量。下面结合试验结果分析系统地介绍钢-混凝土组合桁架式次梁的设计方法。

试验模型：组合次梁 3 根，跨度 7.5m，梁高 0.5m，梁间距 1.25m，楼面 80mm 厚，C40 混凝土，配 $\Phi 8@200$ 单层钢筋网片，混凝土楼板及桁架梁测点应变片布置见图 1，2。按 640，960kg/m² 及偏载三种方式分别进行逐级加载。

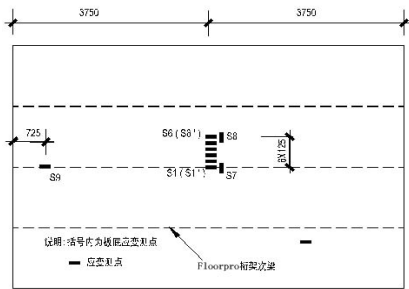


图 1 混凝土楼板板面、板底应变片布置 (mm)

1 组合桁架式次梁的组成

上弦采用混凝土翼板与 Z 型钢板组合上弦；腹杆采用圆钢；下弦采用双角钢组合。上弦混凝土翼板应按《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)^[1]的规定进行设计。

混凝土翼板有效宽度 b_f (图 3) 应按下式计算：

$$b_f = b_1 + b_2 \quad (1)$$

式中， b_1 ， b_2 分别为梁外侧和内侧的混凝土翼板计算宽度，各取梁跨度的 1/6 和翼板厚度 h_c 的 6 倍中的较小值。此外， b_1 尚不应超过翼板实际外伸宽度 s_1 ， b_2 不应超过相邻钢梁间距 s 的 1/2；当为中间梁时， $b_1 = b_2$ 。

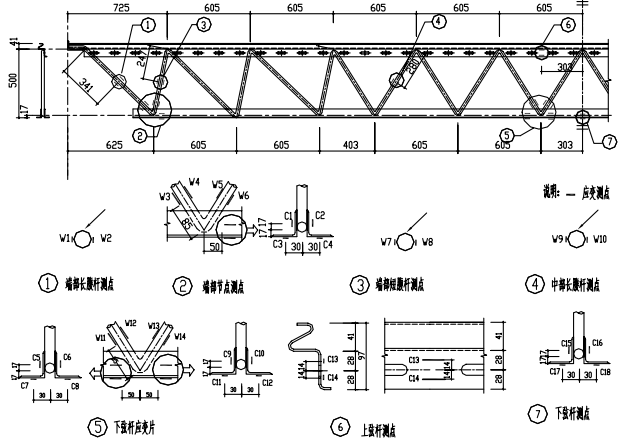


图 2 桁架应变片布置

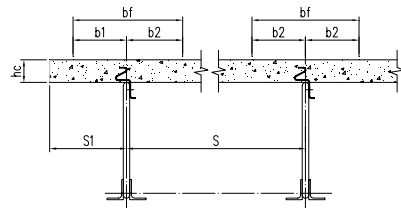


图 3 混凝土翼板计算宽度

图中补充示意 s_n ， b ， b_0 ， h_f ? 最右边的 b_2 应该为 b_1 吧?

组合桁架次梁的组合结构在承载力计算中只考虑组合上弦混凝土的受压作用，因此确定上弦混凝土楼板参与受力的有效作用宽度 b_f 对桁架的受力起着决定性作用。将组合桁架梁视为楼板体系中的次梁，其与混凝土共同作用可看成一个普通的 T 型梁，则混凝土参与受压的混凝土有效宽度可视为 T 型梁的有效翼缘宽度。混凝土规范 (GB50010-2002) 及《钢结构设计规范》(GB50017-2003) 中的 H 型钢梁与混凝土组合梁中均给出了 T 型梁有效翼缘宽度，GB50010-2002 中有效翼缘宽度 b_f 取梁跨度的 1/3， $b+12h_f$ ， $b+s_n$ 三者中的最小值；GB50017-2003 中有效翼缘宽度 b_f 取梁跨度的 1/3，

b_0+12h_f , b_0+s_n 三者中的最小值;美国 ACI 规范中有效翼缘宽度 b_f 取 $b+16h_f$ 、梁跨度的 1/4、次梁间距 s 三者中的最小值。规范中的 b 为梁腹板宽度, b_0 为板托顶部宽度, h_f 为翼缘厚度, s_n 为梁肋净距, s 为次梁中心线之间的距离, 当规范中的 b 或 b_0 取值为 0 时, 其结果与组合梁的有效翼缘计算公式一致。但该有效翼缘宽度都是实腹式梁处于极限状态下的取值, 考虑到组合桁架式梁为空腹式梁, 另外规范给出的是极限状态, 而实际上组合桁架式梁计算一般采用弹性理论, 因此, 规范给出的有效翼缘宽度是否适用, 是一个值得探讨的问题, 需通过试验分析来确定。

有效作用宽度的试验确定方法, 其原理与有效翼缘宽度的试验确定方法相同, 可以参照 T 型梁考虑剪力滞后效应的有效翼缘宽度计算方法^[1]。如图 4 所示, T 型梁的上翼缘应力分布由于剪力滞后效应, 从中间向两侧减小。T 型梁设计中将上翼缘各处的应力看成相等, 因此, 把试验或理论计算得出的翼缘上的应力分布曲线围成的体积折算为具有翼缘最大应力且厚度为 t 的等效长方体应力分布体积, 等效体积的宽度就是有效翼缘宽度, 计算公式如下:

$$b_f = 2b_e = 2 \int_{-t/2}^{t/2} \int_0^b \sigma_x(y, z) dy dz / [t \sigma_{x, \max}(y, z)]$$

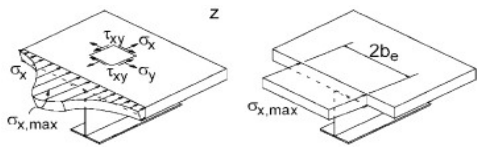
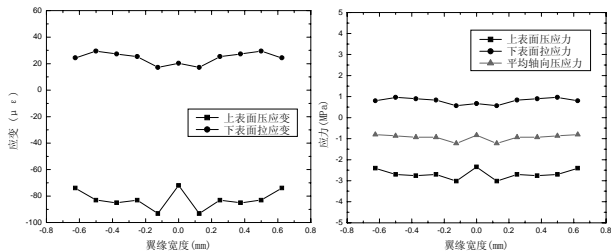


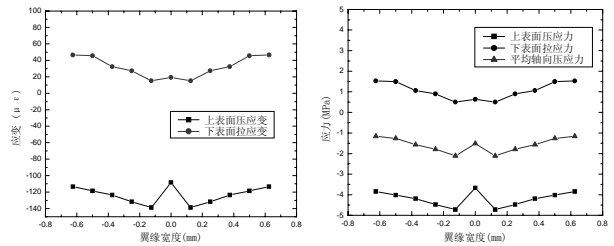
图 4 有效翼缘宽度的概念

图 5, 6 给出了当楼面荷载分别为 640, 960kg/m² 时, 跨中板上表面受压应力、应变, 板下表面受拉应力、应变以及平均轴向承压应力分布曲线, 其中横坐标为离桁架次梁所在轴线(坐标值为零)的距离。根据图 5, 6 并结合计算公式得到试验工况下的混凝土楼板有效作用宽度, 根据试验和规范计算所得到的有效作用宽度结果见表 1。



(a)各测点应变 (b)应力分布及平均轴向压应力

图 5 640kg/m² 组合上弦混凝土楼板应力、应变分布



(a) 混凝土板各测点应变 (b) 混凝土板应力分布及平均轴向压应力

图 6 960kg/m² 组合上弦混凝土板应力、应变分布

根据规范及试验结果得到的有效作用宽度值 b_f (m) 表 1

试验结果		GB5010-2002	GB50017-2003	美国 ACI
640kg/m ²	0.97	0.96	0.96	1.25
960kg/m ²	0.95			

注: 采用规范计算时, b, b_0 均取 0 代入。

从表 1 可见, 在常规应力状态(即弹性变形状态)下, 我国规范计算的 b_f 与试验值比较接近, 美国规范对有效翼缘宽度的规定则偏大。由试验值可见, 高应力状态下的有效宽度非常接近弹性变形状态下的, 此时部分混凝土进入了弹塑性状态, 故组合桁架式次梁的翼缘有效宽度按式(1)计算取值是合理的。

2 组合桁架式次梁的设计方法

组合桁架式次梁应按弹性方法分析, 可按以下经验公式进行设计: $M_u \leq T_u d_u$ $T_u \leq A_u f_y$

$$d_u = d + h_c - a/2 \quad a = T_u / (0.9 \times 0.85 f_c b_e) \leq 40$$

式中, M_u 为组合桁架梁的弯矩设计值; T_u 为下弦杆件内力设计值; d_u 为下弦杆件形心至上弦混凝土等效压力区中心的距离; a 为混凝土等效压力区高度; d 为下弦杆件形心至桁架钢梁 Z 型上弦形心的距离, 一般可简化为下弦杆件形心至混凝土板底的距离; h_c 为混凝土翼板厚度, 宜取 70~90, 不应小于 65; A_u 为下弦杆件截面面积; f_y 为钢材的屈服强度; f_c 为混凝土抗压强度设计值; 混凝土强度不宜小于 C30, 不应小于 C25。

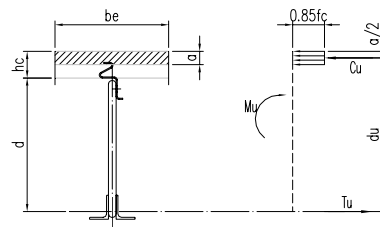


图 7 组合梁截面及应力图形

组合桁架式次梁的变形应按使用阶段和施工阶段分别计算。施工阶段的变形按普通钢桁架计算; 使用阶段的变形应采用有限元分析计算, 也可以采用将组合上弦混凝土转换成等效钢截面再按普通钢桁架按弹性分析方法来计算其变形。使用阶段的续加荷载产生的变形应与施工阶段的恒载产生的变形相叠加。

3 组合桁架式次梁的结构验算方法

组合桁架式次梁结构验算应按使用阶段和施工阶段分别验算。其内力计算按不同阶段的荷载,用弹性分析方法按普通钢桁架进行计算。

3.1 组合桁架次梁上弦、下弦验算

按弹性分析方法的经验公式设计的组合桁架次梁,其使用阶段的上弦混凝土受压可不进行验算;施工阶段上弦应按《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018-2002)中的单向压弯构件进行验算。组合桁架次梁的下弦双角钢按GB50017-2003中的轴心受拉或拉弯构件进行验算。

3.2 组合桁架次梁腹杆验算

组合桁架次梁的圆钢腹杆分两类受力构件:受拉腹杆和受压腹杆。分别按GB50017-2003中的轴心受拉和轴心受压构件进行验算。受压腹杆采用圆钢,但规范中对实心圆钢截面的压杆稳定没有详细规定,设计对其按b类截面验算并通过试验进行验证。

研究表明,组合桁架梁的上下弦杆剪力很小,竖向荷载几乎都由相应受压腹杆来平衡^[2]。分析表明,端部腹杆受到压力最大,又受到失稳因素影响;同时1/4跨处的压杆压力较大且长细比最大,故试验取这两处典型压杆进行测试。根据试验所得到的受压腹杆压力为:

$$P = (\epsilon_1 + \epsilon_2) EA / 2$$

式中, ϵ_1 和 ϵ_2 分别为腹杆中部左右两侧的压应变, A 为腹杆的截面面积。

GB50017-2003 规定轴心受压稳定计算公式为:

$$N / \phi A \leq f$$

美国规范 ASD^[3] 以及 SJI 标准^[4] 都给出了临界压杆的设计允许应力(安全系数为 1.67): (原公式好像多了点东西)

$$F_a = \begin{cases} \frac{[1 - (kl/rC_c)^2] QF_y}{5/3 + 3(kl/rC_c)/8 - (kl/rC_c)^3/8} & kl/r < C_c \\ \frac{12\pi^2 E}{23(kl/r)^2} & kl/r > C_c \end{cases}$$

图 8, 9 分别为端部受压腹杆和 1/4 跨处受压腹杆在 640kg/m² 荷载作用下的测点应力、应变随荷载的变化曲线。根据图 8, 9 以及相应规范计算所得试验结果、理论值以及规范允许值见表 2。从表 2 可见, 试验结果和理论计算结果非常接近, 同时两种典型受压腹杆的稳定均能满足规范的要求, 说明计算假定是合理的。

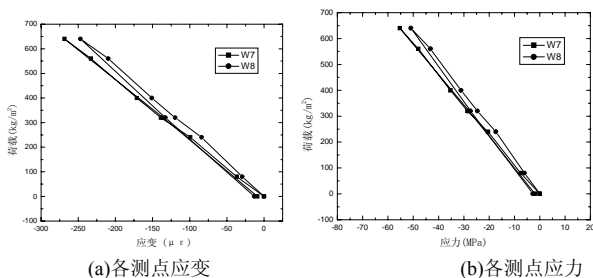


图 8 端部受压腹杆(长细比为 81.6)各测点应力、应变随荷载变化

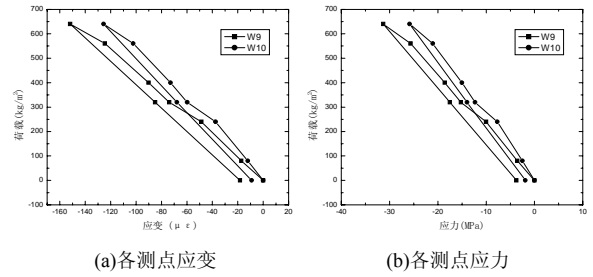


图 9 1/4 跨处受压腹杆(长细比为 93.5)各测点应力、应变随荷载变化

两种典型受压腹杆压力实测值及理论值规范允许值 表 2

受压腹杆	长细比	实测值 (kN)	理论值 (kN)	相对误差 (%)	我国规范允许值	美国规范允许值
端部	81.6	26.07	26.60	2.00	78.14	49.83
1/4 跨处	93.5	14.03	13.86	1.25	68.92	45.65

4 组合桁架式次梁设计应注意的问题

(1) 组合桁架式次梁是一种标准化的产品,制作安装方便快捷,自带混凝土楼板浇筑的模板支撑体系,设计时应充分考虑其特点,次梁间距应与现通用的木模板宽度相配合,国内常用木模板宽有 1220mm 和 900mm 两种规格,故一般次梁间距按 1250mm 和 930mm 设计。

(2) 组合桁架式次梁 Z 型冷弯上弦带有模板支托的安装孔,标准间距 152mm。施工阶段模板托杆连接在安装孔中,托杆既是模板的支撑杆件,同时又作为桁架上弦施工阶段的平面外支撑用,故设计过程中应注意施工阶段桁架上弦平面外计算长度的取值要与托杆间距相适应。考虑木模板的强度和刚度,一般托杆间距不大于 4 个安装孔设置,故平面外计算长度取值一般不大于 608mm,当设计过程中计算长度取值较小时,设计图中应注明托杆的安装间距。

(3) 对组合桁架式次梁的节点次弯矩研究表明,下弦节点的次弯矩从端部向中间递减,跨中约为零,而在端部节点个杆件的节点次弯矩较大。由于次弯矩的影响,节点端部应力较为复杂,从试验结果来看各腹杆最大拉应力和压应力均出现在端部节点,设计时应注意采取措施减少次弯矩对节点端部杆件的影响。

(4) 组合桁架式次梁端部在支座部分 Z 型上弦有所削弱,故在施工阶段,当支座反力较大时应注意对上弦变截面处进行抗弯及抗剪验算,必要时应对该处进行加强处理。

(5) 组合桁架式次梁的楼面混凝土较薄,当楼面有较大的动载时楼面有时会产生振动,设计时应注意这方面的影响。一般对于办公、住宅类的结构楼面应采取减少楼面振动的措施,如增加次梁下弦侧向支撑或做较厚的装饰面等;对结构舒适度要求较高的楼面必要时进行楼面振动分析。

(6) 试验结果表明,组合梁在高应力状态下,即受压混凝土进入弹塑性变形状态时,作为受压上弦的混凝土楼板

(下转 页)

(上接 页) 的非线性快速增长不明显, 而混凝土板底拉应力的非线性快速增长较为明显, 表明适当提高混凝土的标号能充分利用该系统各构件的材料性能, 从而提高结构承载力, 因此设计时应注意采用较高标号的混凝土来体现该结构系统的优势。

参考文献

- [1] II-SANG AHN , METHEE CHIEWANICHAKOM , STUART S.CHEN*, AMJAD J. AREF. Effective flange width provisions for composite steel bridges. *Journal of Engineering Structures*. ELSEVIER, 2004, 26: 1843-1851.
- [2] JOSPECH ROBERT YOST, DAVID W DINEHART, SHAWN P GROSS, JOSPECH J P, BRAIN GARGAN. Strength and design of open web steel joists with crimped-end web members. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2004, 130(5): 715-724.
- [3] AISC. Specification for Structural Steel Buildings-Allowable Stress Design and Plastic Design. 9th ed. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, 1989.
- [4] SJI(2002). Standard Specifications, Load Tables, and Weight Tables for Steel Joist and Joist Girders, Steel Joist Institute, Myrtle Beach, S.C.
- [5] Floorpro 桁架结构静力荷载试验报告. 浙江大学土木系, 2005.