

水平地震作用下交错桁架结构 RC 楼盖体系设计研究

甘丹, 贾雪伟

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 交错桁架钢框架结构中由于桁架交错布置, 在水平地震作用下其楼盖所受剪力较大。本文调研了现浇钢筋混凝土楼盖、预制混凝土楼盖以及组合楼盖体系的抗震设计方法, 归纳总结了楼盖体系的抗震设计方法和流程。之后, 结合水平荷载作用下交错桁架结构各层各榀桁架剪力的计算方法以及计算楼盖体系内力的简化梁模型, 将上述设计方法应用于交错桁架结构的楼盖体系, 给出了交错桁架结构楼盖设计的详细过程。设计了一 8 层的交错桁架结构并进行了有限元分析, 采用给出的楼盖设计方法对该结构的楼盖体系进行了设计。将有限元计算结果与手算进行对比, 结果表明: 有限元计算所得剪力与手算结果吻合较好, 最大误差在 14% 以内, 验证了所提出的楼盖设计方法的可行性。

关键词: 水平地震作用; 交错桁架; 钢筋混凝土楼盖体系设计; 有限元分析;

中图分类号: TU318

Research on design of RC floor system of staggered truss structure under horizontal earthquakes

Gan Dan, Jia Xuewei

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

Abstract: The floor system of a staggered truss structural usually undergoes larger shear loads when subjected to horizontal earthquakes because of the staggered layout of the truss. This paper investigates the seismic design methods of cast-in-place reinforced concrete floors, precast concrete floors, and composite floor systems, and summarizes the seismic design methods and processes of floor systems. After that, combining the calculation method of the shear force of each layer of the staggered truss structure under the horizontal load and the simplified beam model for calculating the internal force of the floor system, the . The detailed process of structural floor design is proposed and applied to the floor system of the staggered truss structure. An 8-story staggered truss structure was designed, and the floor system of the structure was designed according to the proposed floor design method. The finite element analysis of the designed staggered truss structure is carried out, and the finite element analysis results are compared with the hand calculation results. The results show that the finite element calculation results are in good agreement with the hand calculation results, and the maximum error does not exceed 14%, which proves feasibility of the proposed floor design method.

Key words: Horizontal seismic action; Staggered truss; RC floor system design; Finite element analysis;

0 引言

交错桁架钢框架结构^[1-2](Steel Staggered Truss Framing, SSTF)具有重量轻、内部空间大和用钢量少等优点, 被广泛应用于公寓、酒店和办公楼等多高层建筑中, 是一种经济、高效、实用的建筑结构体系。SSTF 结构体系的主要构件包括柱子、平面桁架以及楼板^[3]。结构的柱子布置在外围, 中间不设柱, 柱子在纵向通过框架梁连接在一起。结构横向设置平面桁架, 其高度与建筑层高相同, 跨度等于房屋的宽度。在相邻柱列间, 桁架交错布置, 从而形成有

基金项目: 国家自然科学基金 (51890902)

作者简介: 甘丹(1985-), 男, 副教授、博导, 主要研究方向: 钢结构与组合结构. E-mail: gandan@cqu.edu.cn

45

两倍柱距的开间（图 1）。在竖向荷载作用下，楼板将荷载传递至周围桁架的上下弦杆，然后再传递至柱子，柱子主要受轴力作用；在水平荷载作用下，大部分剪力首先由楼板传递至与其连接的桁架上弦杆，再由斜腹杆将力传至下弦杆，之后通过连接将力传至下层楼板，逐层传递，最后传至基础。

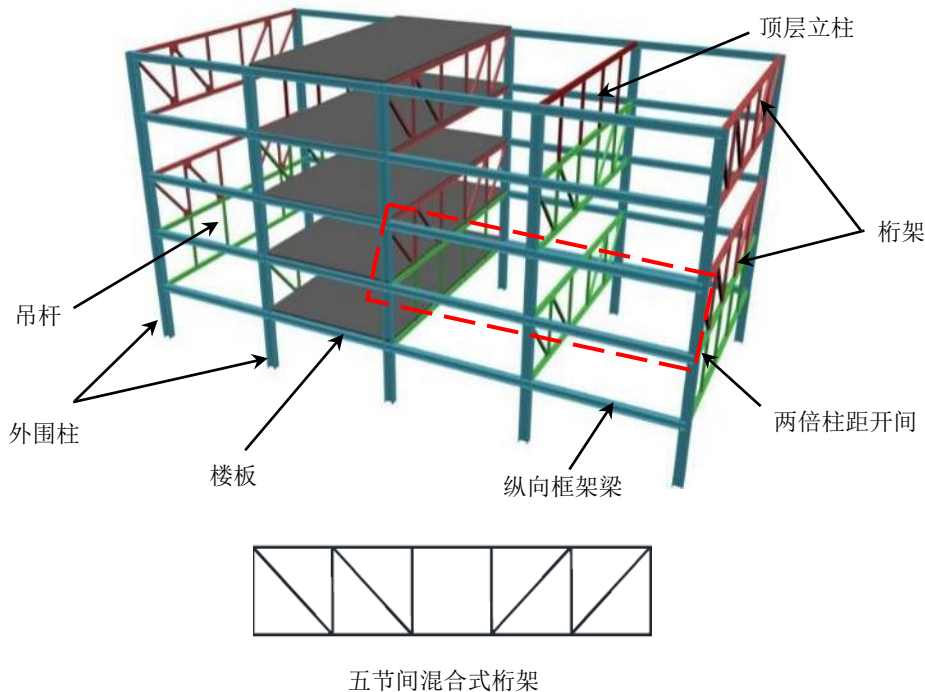


图 1 交错桁架结构体系示意图

Fig. 1 Schematic of Staggered Truss Framing System

50

交错桁架结构体系在水平荷载作用下的受力类似于悬臂工字梁^[4-5]，楼板起将水平剪力传递给相邻桁架的横隔板作用（图 2）。楼盖体系试验研究表明^[5-6]：其破坏主要发生在楼板与其他构件的连接处，设计时要注意楼板与弦杆、楼板与纵向框架梁连接的可靠性。在进行楼板设计时，先按照其所受竖向荷载作用进行配筋，然后进行平面内抗剪验算，这一过程忽略了楼盖在抵抗和传递由于水平荷载引起的板内弯矩和剪力时的设计。本文通过理论分析与有限元方法对交错桁架结构中现浇钢筋混凝土楼盖体系展开研究，研究其在水平地震作用下的设计方法。

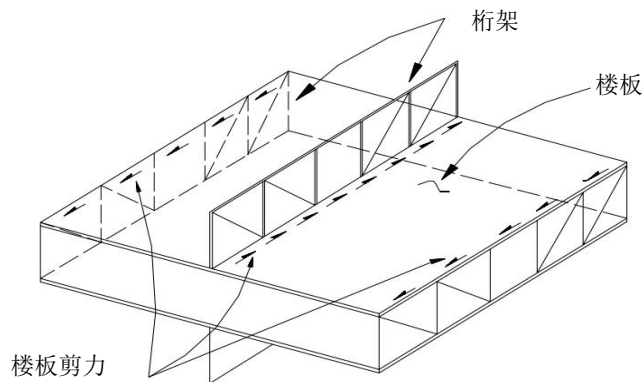


图 2 交错桁架楼板传递水平力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of force transmission of staggered truss floor slab

55

1 楼盖体系的抗震设计方法

1.1 楼盖体系内力及组成部分

60

65

如图 3 所示, 在水平力作用下, 楼盖体系可看做一简支梁, 由楼板、拉压弦杆 (tension and compression chords)、收集器 (collectors) 以及楼板与竖向构件的连接组成^[7], 拉压弦杆设计在楼板边界用于抵抗平面内弯矩的构件。与拉压弦杆垂直的构件称为收集器, 用来将楼板内的剪力传递至竖向构件, 其宽度可与竖向构件相同, 也可宽于竖向构件, 如图 4 (a)。由于楼板内剪应力沿板宽均匀分布, 故收集器构件的内力如图 4 (b) 所示。以收集器内力为压力的部分 (ao 段) 进行说明, 在剪力收集部分 (ab 段), 收集器中的压力由零线性增大到最大值 $C_{u,max}$ 。在内力传递部分 (bo 段), 收集器所受的压力将分为两部分, 与竖向构件宽度相同的“收集器”中的内力将因收集器构件与竖向构件之间的粘结摩擦作用逐渐传递至竖向构件, 其内力由最大线性变为零, 即图 4 (b) 中的 C_v , 而剩余部分则通过剪切摩擦钢筋直接传递至竖向构件中, 即图 4 (b) 中的 C_D 。同理, 收集器受拉段 (co 段) 也是这样工作的。

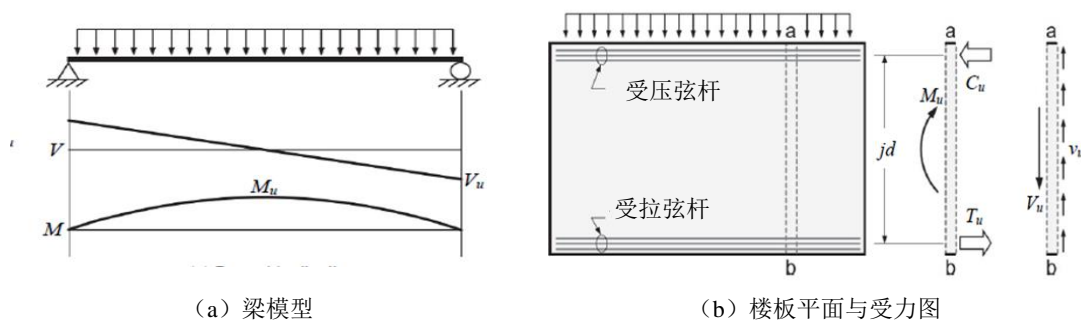


图 3 楼板理想简化模型与拉压弦杆

Fig. 3 Ideal simplified model of floor slab and tension and compression chords

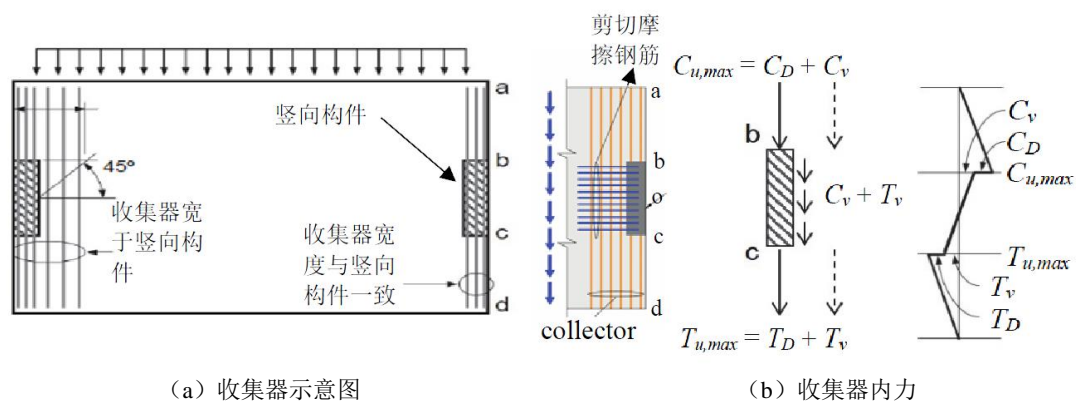


图 4 楼板收集器

Fig. 4 Floor collector

1.2 楼盖体系抗震设计

1.2.1 选取楼盖体系设计选项

70

在进行楼盖体系设计时, 首先要选择楼盖的设计选项^[8]: 弹性设计选项 (elastic design option EDO)、基本设计选项 (basic design option BDO) 以及延性设计选项 (reduced design

option RDO)。

以上三种设计选项的选择取决于楼盖地震需求水平(图5),是地震设计类别、层数、楼板跨度和楼板长宽比的函数^[8]。当地震需求水平为低时,楼盖设计可以采用上述三种选项,且楼盖设计力不需要增大。美国地区的抗震设计类别分为A-F六类^[9],对于抗震设计类别为A类的建筑结构,只需满足基本的抗震要求即可;对于抗震设计类别为B和C的结构,需满足一般的抗震要求,楼板地震需求水平自动指定为低。对于抗震设计类别为D、E或F的结构,抗震要求更高。

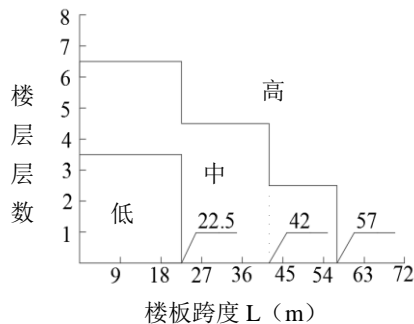


图5 楼板地震需求水平

Fig. 5 Floor seismic demand level

1.2.2 确定设计侧向力

文献^[10]提供了两组设计力:(1)一组设计力 F_x 应用于抗震系统竖向构件的设计;(2)另一组设计力 F_{px} 应用于楼盖的设计。由于楼盖设计力 F_{px} 受到高阶模态的影响更大,故除了在屋面板处两者相等之外,其余楼层 F_x 是小于楼盖设计力 F_{px} 的, F_x 不一定反映楼盖上预估最大力。因此,采用 F_{px} 作为楼盖的侧向力。

为了得到楼盖设计力 F_{px} ,首先要计算 F_x :

$$F_x = C_{vx} V \quad (1.1)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (1.2)$$

式中, C_{vx} 为垂直分布系数; V 为总的设计侧向力或结构基底剪力; w_i 和 w_x 分别为 i 层或 x 层的重力荷载; h_i 和 h_x 分别从基础到 i 层或 x 层的高度; k 为关于结构基本周期 T 的系数。

对于 V ,有:

$$V = C_s W \quad (1.3)$$

$$C_s = \frac{S_{DS}}{(R/I_e)} \quad (1.4)$$

对于地震响应修正系数 C_s ,规范规定了其上、下限值, C_s 不应该超过:

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T(R/I_e)}, T \leq T_L \quad (1.5)$$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 (R/I_e)}, T > T_L \quad (1.6)$$

C_s 还不应小于:

$$C_s = 0.044 S_{DS} I_e \geq 0.01 \quad (1.7)$$

上述式中:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} F_a S_s \quad (1.8)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} F_v S_1$$

90 式中, W 为楼层总的重力荷载; R 为地震响应修正系数; I_e 为结构重要性系数; T 为结构的基本周期; T_L 为反应谱最长周期; F_a 、 F_v 为场地系数; S_s 为短周期最大考虑地震设计谱响应加速度参数。上述参数具体取值参照 ASCE 7-10^[9] 确定。

楼盖设计力 F_{px} 表示为:

$$F_{px} = \frac{\sum_{i=x}^n F_i}{\sum_{i=x}^n w_i} w_{px} \quad (1.9)$$

按上式计算得出的楼盖设计力 F_{px} 不应小于:

$$F_{px, \min} = 0.2 S_{DS} I_e w_{px} \quad (1.10)$$

95 且不应大于:

$$F_{px, \max} = 0.4 S_{DS} I_e w_{px} \quad (1.11)$$

式中, F_i 为作用在 i 层的力, 由 F_x 给出; w_i 为 i 层重力荷载; w_{px} 为 x 层楼盖的重力荷载。

1.2.3 内部部件设计

100 本文后续研究的交错桁架结构, 其桁架刚度和尺寸均相同, 楼板平面为矩形规则平面, 因此可将楼板假定为深梁^[11], 采用基本等效梁模型计算其内力 (图 6 (a)) ^[10]。将楼盖设计力 F_{px} 等效为均布荷载 ω , 之后可得楼盖所受的最大弯矩 M_u 和竖向构件处的剪力 V_u (图 6 (b)), 从而用于拉压弦杆、收集器构件以及楼板与桁架抗剪连接件的设计。

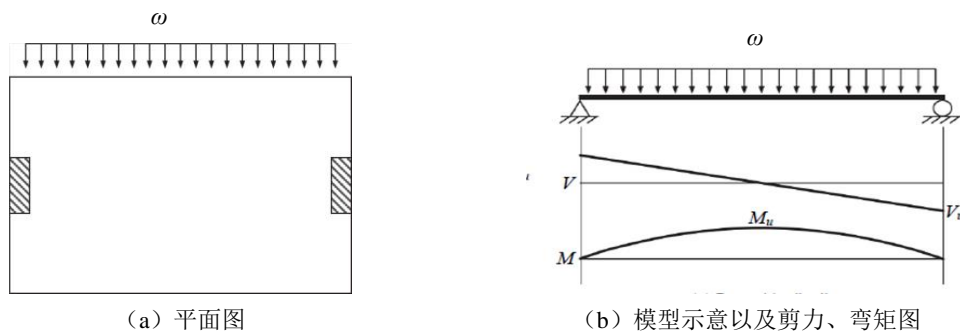


图 6 基本等效梁模型

Fig. 6 Basic equivalent beam model

楼板所受力矩通过拉压弦杆来抵抗, 因此可按最大弯矩来设计拉压弦杆:

$$T_u = C_u = M_u / jd \quad (1.12)$$

$$A_s = \frac{T_u}{\phi f_y} \quad (1.13)$$

105 式中, T_u (C_u) 为拉 (压) 弦杆所受的力; M_u 为楼板最大弯矩; jd 为拉压弦杆间距离; A_s 为拉压弦杆的面积; ϕ 为强度折减系数, 取 0.9。

采用梁模型计算得到楼板剪力, 假定剪应力沿板宽均匀分布得到单位长度的剪力, 根据

收集器受拉（或受压）部分的长度，即可求出收集器所受到的最大轴力并进行设计。

楼板与桁架之间的剪力连接件的布置参照《钢结构设计标准》GB 50017-2017^[12]进行

2 交错桁架楼盖体系设计

如图 7 所示一交错桁架，其桁架高度均为 h ，空腹节间长度为 c ，其余节间长度为 a ，纵向柱距为 l ，共设置 5 榀桁架，结构受竖向均布荷载 q 和水平荷载（地震作用） F_i 。本节将结合交错桁架钢框架结构各层各榀桁架处的剪力计算方法以及楼盖的简化梁模型，给出交错桁架结构楼盖体系的抗震设计流程。

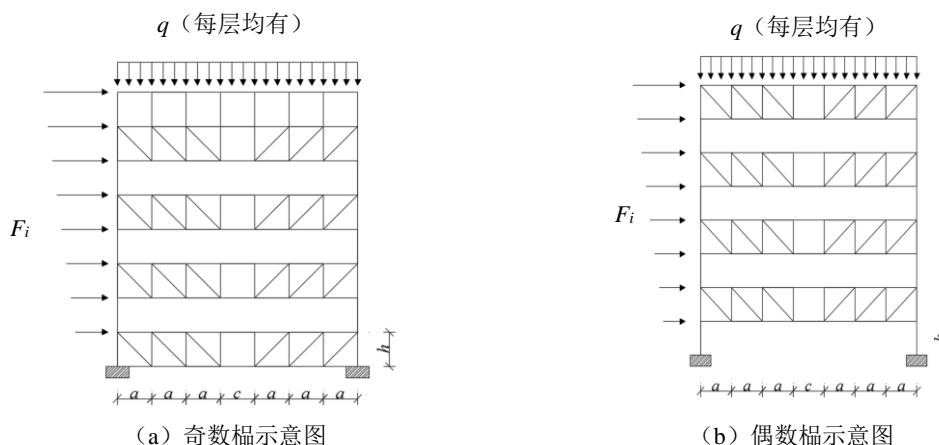


图 7 交错桁架平面示意图

Fig. 7 Schematic of staggered truss

根据侧向力分布 F_{px} 可确定结构 i 层的层间剪力 V_i 。

$$V_i = \sum_{x=i}^n F_{px} \quad (2.1)$$

计算桁架剪力时，假定楼板刚性是可以接受的，只要通过限制楼板的长宽比及采取构造措施使楼板在荷载作用下保持弹性，其横向变形得到限制^[13]。水平荷载通过楼板分配到桁架，桁架剪力计算式如下^[11]：

$$V_{ij} = V_{ij}^S + V_{ij}^T \quad (2.2)$$

$$V_{ij}^S = V_i \times K_{ij} / \sum_{j=1}^m K_{ij} \quad (2.3)$$

$$V_{ij}^T = V_i e_d x_j K_{ij} / GJ_i \quad (2.4)$$

$$GJ_i = \sum_{j=1}^m x_j^2 K_{ij} \quad (2.5)$$

式中， V_{ij} 为由于水平荷载引起的第 i 层第 j 榀桁架剪力； V_{ij}^S 和 V_{ij}^T 分别为不考虑楼层总剪力作用点与楼层刚度中心偏离时，第 i 层第 j 榀桁架所分配的楼层剪力和考虑偏离时所分配的剪力； K_{ij} 为第 i 层第 j 榀桁架的剪切刚度； m 为第 i 层桁架总数； GJ_i 为第 i 层所有桁架对楼层刚度中心的抗扭刚度之和； e_d 为偏心距设计值，非地震作用时宜取 $e_d = e_0$ ，地震作用时宜取 $e_d = e_0 \pm 0.05L$ ； e_0 为水平荷载与刚度中心的垂直距离； L 为垂直于水平荷载方向的结构平面尺寸； x_j 为以楼层刚度中心为坐标原点，单榀桁架相对于楼层刚度中心的坐标。

刚度中心为楼板在承受水平荷载时围绕其旋转的点^[13]，第 i 层的刚度中心坐标为：

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij} K_{ij}}{\sum_{j=1}^m K_{ij}} \quad (2.6)$$

式中， x_{ij} 为第 i 层第 j 榀桁架的坐标；

125 交错桁架结构重由于桁架交错布置，在偶数层和奇数层分别计算刚度中心。单榀桁架的层间剪切刚度按下式进行计算：

$$K_{ij} = \frac{El_s^2}{\sum \frac{b^3}{A} + \frac{h_s^2(2a^3 + c^3)}{24I}} \quad (2.7)$$

式中， E 为钢材弹性模量； L_s 为桁架的跨度； b 、 A 分别为斜腹杆的长度和截面面积； h_s 为桁架的高度； c 为空腹节间的宽度； a 为除空腹节间外，其他节间的宽度； I 为弦杆的惯性矩。

130 考虑扭转效应，取 5% 的偏心率，故水平荷载偏心距为 $e_d = e_0 \pm 0.05L$ 。于是，水平地震作用下第 i 层的扭转为： $T_i = V_i \times e_d$ 。由此，可按公式 2.2-2.4 计算出各层楼板各榀桁架最终所分配得到的剪力。

楼板在横向水平荷载下的计算简图如图 8 所示^[11]，各榀桁架所承受的剪力视为梁模型中所受的集中荷载，其中荷载 V_i 为上层各榀桁架的剪力，其作用位置为上层各榀桁架的位置。铰接支座相当于下层桁架提供的约束，其支反力 V_{i-1} 为下层各榀桁架的剪力。

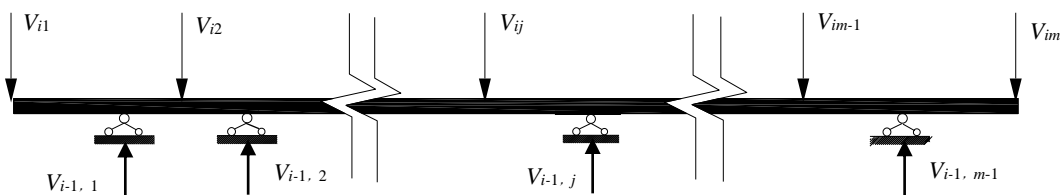


图 8 横向水平荷载作用下第 i 层楼板的计算简图

Fig. 8 The calculation diagram of the i -th floor slab under lateral horizontal load

135 拉压弦杆依据楼板所受的最大弯矩进行设计；收集器采用各榀桁架处的设计剪力进行设计，即采用分别考虑正负荷载偏心后计算结果的较大值；抗剪连接件包括水平荷载作用下需要设置的数量 n_{f1} 以及竖向荷载作用下的数量 n_{f2} ^[11]。竖向荷载作用下抗剪连接件的数量与布置方式参考《钢结构设计标准》GB50017-2017^[12]；在水平荷载下，剪力连接件数量为：

$$n_{f1} \geq V_{ij} / N_v^c \quad (2.8)$$

$$N_v^c = 0.43A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7A_s f_u \quad (2.9)$$

140 式中， N_v^c 为单个剪力连接件的抗剪承载力设计值； A_s 为圆柱头栓钉杆截面面积； E_c 为混凝土弹性模量； f_u 为圆柱头栓钉极限强度设计值。水平荷载作用下，弦杆上的栓钉 60% 均匀布置在桁架两端 1/4 跨度范围内，其余均匀布置在 1/2 跨度范围内。

对于纵向框架梁和楼板间的抗剪连接件，同样包括水平荷载的数量 n_{f3} 与竖向荷载作用下的数量 n_{f4} 。竖向荷载下抗剪连接件的数量及布置方式，仍然参考《钢结构设计标准》^[12] 中的相关规定。水平荷载下栓钉的数量：

$$n_{f3} \geq V_{fi}' / N_v^c \quad (2.10)$$

$$V'_{fi} = M_{fi,max} / l_{sd} \tag{2.11}$$

145 式中， V'_{fi} 为水平荷载作用下，纵向框架梁与楼板间抗剪连接件承受的剪力； $M_{fi,max}$ 为深
150 梁梁段内最大弯矩； l_{sd} 为将楼板简化为深梁后的计算高度，取0.8倍桁架跨度。

3 算例设计

3.1 设计信息

150 设计一 8 层的交错桁架结构体系，设计条件如表 1 所示。结构平面尺寸为 24m×16.8m，
其中，纵向长度为 24m，共设置 5 榀桁架，位于奇数轴线处的桁架命名 J 榀，如图 9 实线所
示，位于偶数轴线处的桁架命名为 O 榀，如图 9 虚线所示。横向采用 7 节间混合式桁架，
其空腹节间的长度为 3m，其余节间的长度为 2.3m。结构每层层高均为 3m，结构的平面图
与立面图如图 9、图 10、图 11 所示。

155 弦杆采用 Q420 钢材，其屈服应力 $\sigma_y=420\text{N/mm}^2$ ，除桁架弦杆之外采用 Q345 钢，其屈
服应力 $\sigma_y=345\text{N/mm}^2$ ，弹性模量均取为 $2.06\times10^5\text{N/mm}^2$ ，泊松比 $\nu=0.3$ 。楼板采用 C30 现浇
钢筋混凝土楼板，板厚 150mm。板内钢筋采用 HRB335。

表 1 设计条件
Tab. 1 Design Conditions

项目信息		项目信息	
恒载（含自重）	5.0 kN/m ²	层高	3.0m
楼面活载及屋面活载	2.0 kN/m ²	层数	8 层
雪荷载	0.25 kN/m ²	柱距	6m
基本风压	0.35 kN/m ²	纵向长度	24m
场地类别	II 类	横向跨度	16.8m
地面粗糙程度	B 类	横向节间数目	7
抗震设防烈度	8 度（0.2g）	中间空腹节间宽度	3.0m
地震设计分组	第一组	其余节间宽度	2.3m

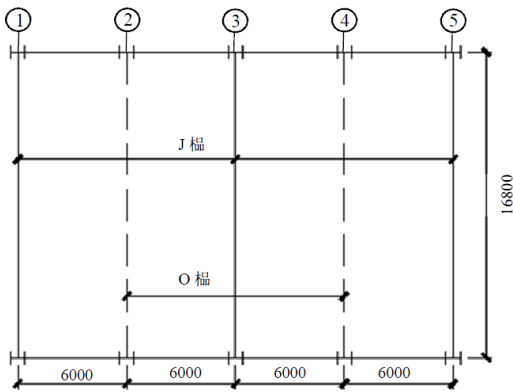


图 9 交错桁架平面布置图（单位:mm）
Fig. 9 Staggered truss floor plan（Unit: mm）

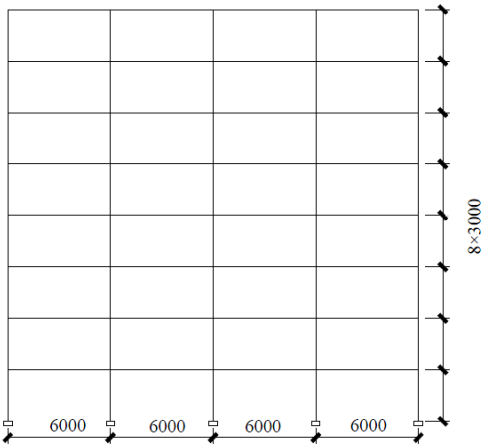


图 10 交错桁架纵向钢框架立面图（单位:mm）
Fig. 10 Elevation view of staggered truss
longitudinal steel frame（Unit: mm）

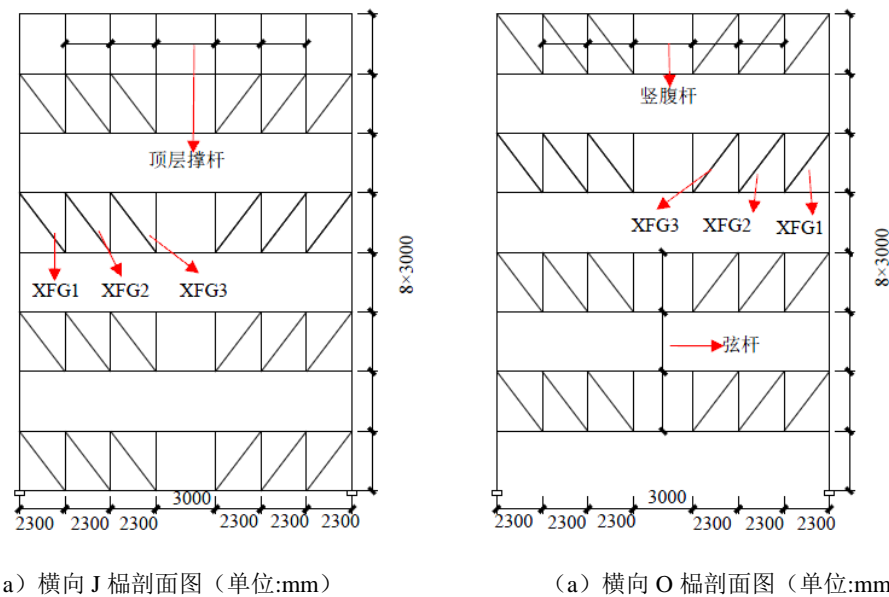


图 11 交错桁架横向立面图

Fig. 11 Staggered truss horizontal elevation

3.2 交错桁架钢框架结构设计结果

钢框架结构将根据《钢结构设计标准》^[12]和《建筑抗震设计规范》^[14]的相关规定进行设计。设计结果如表 2 所示。

表 2 钢框架结构的构件截面信息

Tab.2 Sectional information of steel frame structure

构件	截面	构件	截面
1~4 层柱	HW400×400×20×20	顶层撑杆	F100×8
5~8 层柱	HW400×400×20×20	竖腹杆	F140×6
(纵向) 框架梁	HN400×200×10×12	斜腹杆 XFG1	F140×6
0~4 层弦杆	HW200×200×10×12	斜腹杆 XFG2	F120×6
5~8 层弦杆	HW200×200×10×10	斜腹杆 XFG3	F120×6

3.3 楼盖体系设计结果

根据场地类别划分标准，该结构处于Ⅱ类场地，在美国规范中按 C 类场地计算，楼板的地震需求水平为低地震需求水平，楼板设计采用弹性设计选项，设计力 F_{px} 不需要增加 15%；结构的基本周期可按经验公式取^[9]，即 $T=0.1N=0.1\times8=0.8s$ ，根据《建筑结构荷载规范》^[15]，楼盖体系设计参数见表 3，得到楼盖设计力 F_{px} 见表 4。

表 3 楼盖体系设计参数

Tab. 3 Design parameters of floor system

设计参数	参数值	设计参数	参数值
结构基本周期/s	0.8	与结构周期相关的指数 k	1.15
S_s	0.9	长周期转换周期 T_L/s	6.0
S_1	0.4	反应谱修正系数 R	7
场地系数 F_a	1.04	重要性系数 I_e	1.00
场地系数 F_v	1.40	地震反应修正系数 C_s	0.0667

短周期谱加速度 S_{Ds}	0.624	等效重力荷载 W/kN	19353.60
1s 周期谱加速度 S_{D1}	0.373	结构基底剪力 V/kN	1290.24

表 4 楼盖设计力 F_{px}

Tab. 4 Floor design force F_{px}

层	h_x/m	w_x/kN	$w_x h_x^k$	C_{vx}	F_x/kN	F_{px}/kN	层间剪力 V/kN
8	24.0	2419.2	93522.197	0.237	305.215	305.215	305.215
7	21.0	2419.2	80209.159	0.203	261.767	283.491	588.706
6	18.0	2419.2	67179.251	0.170	219.243	262.075	850.781
5	15.0	2419.2	54472.427	0.138	177.774	241.000	1091.781
4	12.0	2419.2	42143.462	0.107	137.538	220.307	1312.088
3	9.0	2419.2	30272.665	0.077	98.797	200.056	1512.144
2	6.0	2419.2	18990.907	0.048	61.978	180.330	1692.474
1	3.0	2419.2	8557.782	0.022	27.929	161.280	1853.754
总和	—	19353.6	395347.850	—	1290.240	1853.754	—

175 根据作用在各层楼盖上的设计力 F_{px} 以及各层间剪力后, 得到楼板的剪力图、弯矩图, 从而可进行内部部件的设计。各楼层各榀桁架设计剪力及楼板最大弯矩如表 5 所示:

表 5 各层各榀桁架处的设计剪力及板内最大弯矩

Tab. 5 Design shear force and maximum bending moment in the slab at each truss of each layer

楼板	① (kN)	② (kN)	③ (kN)	④ (kN)	⑤ (kN)	$M_{max}(kN \cdot m)$
ROOF	-117.00	183.13	-101.74	183.13	-117.00	701.99
8	225.67	-353.22	196.24	-353.22	225.67	1354.02
7	-326.13	510.47	-283.59	510.47	-326.13	1956.80
6	418.52	-655.07	363.93	-655.07	418.52	2511.10
5	-502.97	787.25	-437.36	787.25	-502.97	3017.80
4	579.66	-907.29	504.05	-907.29	579.66	3477.93
3	-648.78	1015.48	-564.16	1015.48	-648.78	3892.69
2	710.61	-1112.25	617.92	-1112.25	710.61	4263.63

注: 上述剪力正值表示与荷载方向相同, 负值表示与荷载方向相反。

180 拉压弦杆钢筋采用 HRB335, $f_y=300MPa$, 设计结果见表 6。

表 6 拉压弦杆设计结果

Tab. 6 Tension and Compression chord design results

楼板	$M_{max}(kN \cdot m)$	T_u (kN)	A_s (mm ²)	钢筋选择
ROOF	701.99	41.79	154.76	1 Φ 16
8	1354.02	80.60	298.51	1 Φ 20
7	1956.80	116.48	431.39	1 Φ 25
6	2511.10	149.47	553.39	1 Φ 28
5	3017.80	179.63	665.30	2 Φ 22
4	3477.93	207.02	766.74	2 Φ 25
3	3892.69	231.71	858.18	2 Φ 25
2	4263.63	269.85	999.45	2 Φ 28

185 假设收集器钢筋的受拉长度与受压长度一致, 均等于桁架长度的一半, 既可得到“收集器”钢筋所受的最大拉力(或压力), 为单位长度的剪应力乘以 1/2 桁架长度, 从而可进行“收集器”钢筋的设计。钢筋采用 HRB335, $f_y=300MPa$, 设计结果见表 7。

表 7 各层各榀桁架处“收集器”钢筋设计结果
Tab. 7 Rebar design results of the "collector" at each truss on each floor

楼板	①		②		③		④		⑤	
	A_s (mm ²)	钢筋 选择	A_s (mm ²)	钢筋 选择	A_s (mm ²)	钢筋 选择	A_s (mm ²)	钢筋 选择	A_s (mm ²)	钢筋 选择
ROOF	195.00	1Φ16	305.22	1Φ20	169.56	1Φ16	305.22	1Φ20	195.00	1Φ16
8	376.12	1Φ22	588.71	1Φ28	327.06	1Φ22	588.71	1Φ28	376.12	1Φ22
7	543.55	2Φ20	850.78	2Φ25	472.66	2Φ18	850.78	2Φ25	543.55	2Φ20
6	697.53	2Φ22	1091.78	2Φ28	606.55	2Φ20	1091.78	2Φ28	697.53	2Φ22
5	838.28	3Φ20	1312.09	3Φ25	728.94	3Φ18	1312.09	3Φ25	838.28	3Φ20
4	966.09	3Φ22	1512.14	3Φ28	840.08	3Φ20	1512.14	3Φ28	966.09	3Φ22
3	1081.30	3Φ22	1692.47	3Φ28	940.24	3Φ20	1692.47	3Φ28	1081.30	3Φ22
2	1184.34	4Φ20	1853.75	4Φ25	1029.86	4Φ20	1853.75	4Φ25	1184.34	4Φ20

190 栓钉直径采用 19mm, 根据《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》^[16], 取 $f_u=400\text{MPa}$, 根据式 2.8-2.11 可得水平荷载作用下, 各层各榀桁架栓钉数量以及纵向连梁与楼板间的栓钉数量。考虑到水平荷载下交错桁架栓钉的布置形式, 最终栓钉数量如表 8 所示。

表 8 水平荷载下各层各榀桁架及纵向连梁栓钉数量

Tab. 8 The number of studs for each layer of each truss and longitudinal connecting beam under horizontal load

楼板	①	②	③	④	⑤	纵向连梁
ROOF	2	4	2	4	2	1
8	4	6	4	6	4	2
7	6	8	4	8	6	2
6	6	10	6	10	6	3
5	8	10	6	10	8	3
4	8	12	8	12	8	4
3	10	14	8	14	10	4
2	10	16	8	16	10	4

4 有限元验证

195 对设计的 8 层结构进行有限元分析, 施加侧向力为 F_{px} , 将分析所得各层各榀桁架处的剪力与手算结果进行比较。有限元模型如图 12 所示, 提取出的各层各榀桁架剪力见表 9。

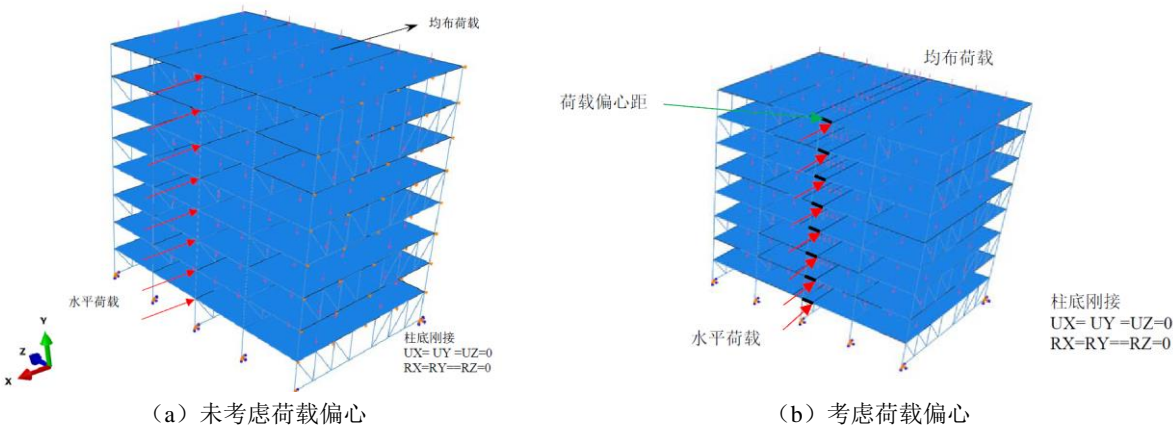


图 12 有限元模型

Fig. 12 Staggered truss horizontal elevation

表 9 不考虑荷载偏心时各层各榀桁架剪力有限元计算结果 (kN)

Tab. 9 Shear force at each truss of each layer calculated by finite element (kN)

楼板	①	②	③	④	⑤	奇数榀之 和	偶数榀之 和	层间剪 力
ROOF	-98.23	149.75	-98.43	146.78	-99.44	-296.10	296.53	305.22
8	171.57	-245.99	131.47	-242.18	185.47	488.51	-488.17	588.71
7	-247.92	411.63	-240.81	402.98	-263.54	-752.27	814.61	850.78
6	381.60	-530.46	264.93	-521.16	405.25	1051.78	-1051.62	1091.78
5	-367.91	634.06	-493.26	620.39	-393.50	-1254.67	1254.45	1312.09
4	485.12	-734.64	449.94	-720.19	519.72	1454.78	-1454.83	1512.14
3	-483.86	837.90	-650.57	816.70	-520.56	-1654.99	1654.60	1692.47
2	563.05	-853.75	527.03	-832.15	595.16	1685.24	-1685.90	1853.75

注：上述剪力正值表示与荷载方向相同，负值表示与荷载方向相反

200 分析表 9，可以发现：有限元模型提取出的各层剪力，奇数榀剪力之和与偶数榀剪力之和大致相等，除第 7 层差距在 8%，其余楼层差距均小于 0.2%；奇数榀剪力之和与偶数榀剪力之和均大致等于楼层剪力，除第 8 层差距为 17%，其余楼层最大差距小于 10%。对比表 5 和表 9，有限元模型的水平荷载通过了楼板的刚度中心，未考虑荷载的偏心，而在手算中，考虑了偶然偏心的影响 ($\pm 5\%L$)，故其计算结果略大。

205 表 10 考虑荷载偏心时各层各榀桁架剪力有限元计算结果 (kN)

Tab. 10 Shear force at each truss of each layer calculated by finite element under eccentric load (kN)

楼板	①	②	③	④	⑤
ROOF	-102.27 (-117.00)	160.34 (183.13)	-102.12 (-101.74)	160.34 (183.13)	-102.27 (-117.00)
8	215.55 (225.67)	-332.38 (-353.22)	206.64 (196.24)	-332.38 (-353.22)	215.55 (225.67)
7	-293.20 (-326.13)	460.68 (510.47)	-289.10 (-283.59)	460.68 (510.47)	-293.20 (-326.13)
6	430.94 (418.52)	-606.05 (-655.07)	361.41 (363.93)	-606.05 (-655.07)	430.94 (418.52)
5	-495.43 (-502.97)	696.52 (787.25)	-438.45 (-437.36)	696.52 (787.25)	-495.43 (-502.97)
4	579.59 (579.66)	-820.34 (-907.29)	509.88 (504.05)	-820.34 (-907.29)	579.59 (-579.66)
3	-661.67 (-648.78)	923.59 (1015.48)	-576.00 (-564.16)	923.59 (1015.48)	-661.67 (-648.78)
2	691.85 (710.61)	-1031.36 (-1112.25)	640.76 (617.92)	-1031.36 (-1112.25)	691.85 (-710.61)

注：上述剪力正值表示与荷载方向相同，负值表示与荷载方向相反；括号内的值考虑正负偏心后手算得到的结果（即表 5）

210 当荷载偏心距取手算时所用的值时，有限元计算结果如表 10 所示。对比表 5 和表 10，可以发现：当考虑荷载偏心后，有限元计算得出的桁架剪力与公式求解出的桁架剪力大致相

等,屋面板差距为 14%,其余楼层最大差距不超过 10%,手算结果总体大于有限元计算结果,说明该设计方法是可行的。

5 结论

楼盖体系作为交错桁架结构的重要组成部分,在承受和传递竖向和水平荷载过程中发挥着重要作用。本文给出了交错桁架钢框架结构楼盖体系的抗震设计方法与流程,着重介绍了楼盖体系侧向力的确定,拉压弦杆、收集器构件和连接件的设计。设计了一 8 层交错桁架结构并对其受力性能进行了有限元分析,有限元分析所得各层各榀桁架剪力与手算结果吻合较好。

[参考文献] (References)

- [1] Scalzi JB. The staggered-truss system: structural considerations[J]. AISC Engineering Journal, 1971, October: 138-143.
- [2] 周绪红, 莫涛, 蔡益燕,等. 新型交错桁架结构体系的应用[J]. 钢结构, 2000(02):16-19.
- [3] 甘丹, 周绪红, 周期石. 交错桁架钢框架结构抗震性能研究现状[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 021(004):1-10.
- [4] 冉红东, 苏明周, 胡天兵等. 循环荷载作用下混合式钢交错桁架结构的滞回性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 55-63.
- [5] 莫涛, 周绪红, 刘永健等. 交错桁架结构体系的受力性能分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(6): 49-54.
- [6] 赵宝成, 顾强, 何若全, 申林, 胡天兵. 交错桁架结构楼板受力性能的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(13):69-72+82.
- [7] Sabelli R, Sabol T, Easterling W S. NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 5 - Seismic Design of Composite Steel Deck and Concrete-filled Diaphragms: A Guide for Practicing Engineers.
- [8] Ghosh S K, Cleland N, Naito C J. Seismic Design of Precast Concrete Diaphragms: A Guide for Practicing Engineers. 2017..
- [9] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures.[J]. minimum design loads for buildings & other structures, 2010
- [10] Moehle J P, Hooper J D, Kelly D J, et al. Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Diaphragms, Chords, and Collectors: A Guide for Practicing Engineers. 2010.
- [11] CECS 323:2012. 交错桁架钢框架结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2012.
- [12] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计标准 GB(GB50017-2017). [M]. 中国计划出版社, 2017,
- [13] Wexler N, Lin F B. Steel Design Guide Series 14: Staggered Truss Framing Systems[S]. 2002.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [15] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范[S], 2012.
- [16] 电弧螺柱焊用圆柱头栓钉: GB/T10433-2002[S]. 2002