

超高层结构伸臂桁架的承载力及刚度简化计算

王 斌^{1,2}, 陈以一^{1,2}, 赵宪忠^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 对超高层结构体系中常用的伸臂桁架-单斜腹杆型式(N型)从桁架机制与刚架机制出发、依据伸臂桁架破坏模式建立了简化计算模型,揭示其受力机理.采用有限元模型对伸臂桁架的承载力和刚度指标进行了评估,得知斜腹杆是伸臂桁架主要的受力构件,对伸臂桁架整体承载力以及刚度均起着决定性作用.有限元计算值同简化模型计算结果较为接近,表明所提出的简化模型可以应用于伸臂桁架初步设计中的承载力及刚度的计算.

关键词: 超高层结构; 伸臂桁架; 简化模型; 有限元计算; 承载力; 刚度

中图分类号: U121

文献标志码: A

A Simplified Model on Strength and Stiffness of Outrigger Truss in Super High-rise Structure

WANG Bin^{1,2}, CHEN Yiyi^{1,2}, ZHAO Xianzhong^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper investigates the performance of the outrigger truss with monoclinic web member (N-type) through experiment and finite element analysis. A simplified model for the outrigger truss based on truss mechanism and frame mechanism is established. By the model, the mechanism of plastic resistance can be revealed. In addition, both the strength and stiffness of the outrigger truss can be obtained through numerical program. It is observed that among all the members, the diagonal web has the greatest impact on the strength and stiffness of outrigger. The calculation results of strength and stiffness index from FEM are close to that from the simplified calculation model, indicating that the proposed model and the calculation method can be applied to the preliminary design of outrigger truss.

Key words: super high-rise structure; outrigger truss; simplified model; finite element analysis; load; stiffness

超高层结构往往利用水平加强层,沿结构高度设置若干刚度较大的水平伸臂桁架以及沿周边的环带,形成巨柱-伸臂桁架-核心筒结构体系,加强核心筒和外围巨柱的共同工作来控制结构的变形以减小结构侧移^[1-4],也提高了结构的抗侧承载力.设置伸臂桁架的楼层整体刚度较大,需控制其刚度来实现伸臂桁架的“有限刚度”以减小结构刚度沿竖向的突变^[5],伸臂桁架还需保证必要的承载能力,使在与其连接的巨柱中形成有效的抗倾覆力矩.

当前伸臂桁架应用实例较多,但对伸臂桁架的使用仍是工程师凭借经验或参考相关工程来选取,针对特定的结构进行整体分析,以得到伸臂桁架对整体结构的作用效果,如不满足结构的抗侧需求,再进行相关的截面修改,计算过程繁琐而没有合理的理论依据.

笔者结合上海中心大厦项目单斜腹杆形式(N型)伸臂桁架试验结果^[6-7],从伸臂桁架在结构体系中的受力状态出发,对影响其所连巨柱之抗倾覆力矩的重要参数即伸臂桁架的承载力和刚度以及杆件截面形式对其承载力和刚度的影响进行分析探讨,从机理上阐述上述关键问题,为工程师更好地把握伸臂桁架的应用提供一些理论依据.

1 伸臂桁架受力特点及试验结果

1.1 巨柱-伸臂桁架-核心筒体系的受力特点

在横向荷载作用下,巨柱-伸臂桁架-核心筒结构的抗倾覆力矩主要由巨柱轴力形成的力矩 M_t 和核心筒体抗弯力矩 M_w 构成,其中, M_t 的形成有赖于伸臂桁架作用,使巨柱轴向刚度大的特点得以充分发挥,减少结构侧移.图1示出在横向荷载作用下伸臂桁架和结构体系的受力机理,图中: F_r 为在侧向荷载作用下伸臂桁架“层”产生的水平剪力,由伸臂

桁架上、下弦杆传递给核心筒,大小相等,方向相反; a 为伸臂桁架的跨度; h 为伸臂桁架的高度; L 为结构总宽度; F 为由于伸臂桁架作用在核心筒一个方向的两侧巨柱产生的轴力; M_r 为抗倾覆力矩。

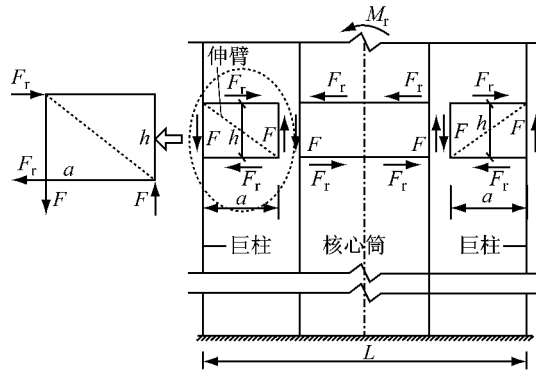


图1 横向荷载作用下结构体系受力机理

Fig.1 Mechanism of structure under horizontal loads

在图示几何关系下, M_r 可以表示为:

$$M_r = FL \quad (1)$$

其中,将“巨柱-伸臂桁架”的隔离体取出,其受力状态如图1中伸臂桁架隔离体所示,由力的平衡可知

$$Fa = F_r h \quad (2)$$

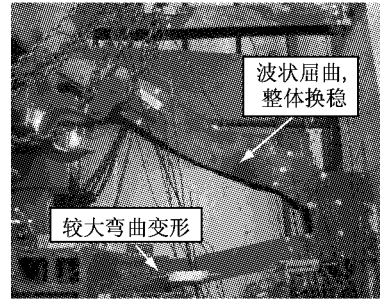
则可解出 $F_r = F(a/h)$. 可见, F_r 的大小与伸臂桁架的跨高比 a/h 有关,假设 $\kappa = a/h$, 则 $F_r = \kappa F$.

1.2 伸臂桁架单调试验及有限元计算结果

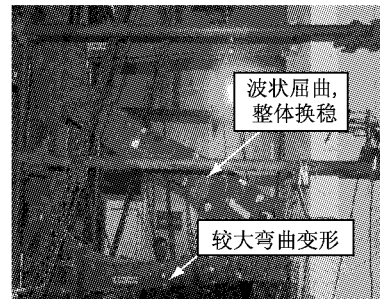
文献[6-7]对上海中心大厦工程中“巨柱-伸臂桁架”与“核心筒-伸臂桁架”隔离体在单调以及滞回加载下进行了试验研究,并对该伸臂桁架进行了受力机理分析,揭示了伸臂桁架在竖向以及水平荷载作用下的性能. 结果表明所设计的上海中心大厦伸臂桁架能够有效连接相邻构件并可靠传力,其破坏模式表现为伸臂桁架斜腹杆的受压屈曲以及上、下弦杆的弯曲变形(图2),具有较好的延性;同时,与伸臂连接的巨柱或核心筒整体上处于弹性,伸臂桁架在其平面内与平面外的变形微小。

文献[6-7]对试验进行了有限元模拟. 计算采用通用有限元软件 ABAQUS;单元类型为软件中提供的 S4R 壳单元;材料应力-应变关系采用文献[8]的方法根据材性试验结果确定,并采用随动强化材料模型;由于试件破坏发生在伸臂桁架,巨柱及核心筒墙体基本完好,因此将其视为伸臂桁架的固定约束端. 图3列出文献[6]JDA-1 和 JDB-1 单调加载试验中加载端的竖向荷载(N)与形变(δ)曲线以及对应的有限元结果,二者吻合较好,且有限元计算得到

的伸臂桁架破坏模式同试验吻合,因此认为有限元计算从数值分析角度重现了试验的进程,对伸臂桁架性能评估是真实有效的。



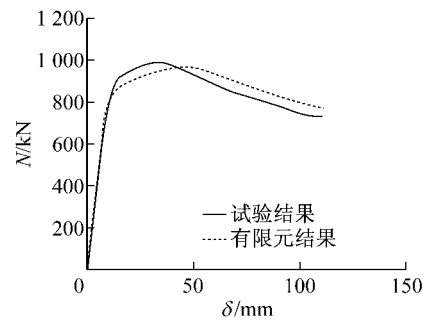
a JDA-1 试件



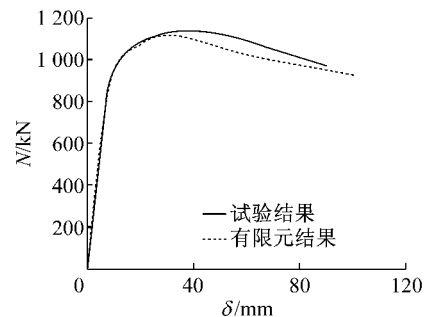
b JDB-1 试件

图2 伸臂桁架破坏形态

Fig.2 Failure modes of the specimens



a JDA-1



b JDB-1

图3 上海中心大厦单调静力试验及有限元荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves of test and FEM results

2 N 型伸臂桁架的简化计算

2.1 N 型伸臂桁架的受力性能

从上海中心伸臂桁架试验可以看出,在桁架端部竖向力 F 以及水平力 κF 作用下(见图 4, θ 为桁架斜腹杆与竖杆夹角),伸臂桁架的破坏表现为:斜腹杆受压发生局部塑性屈曲,上、下弦杆杆端出现塑性铰,伸臂桁架成为机构而丧失承载力.图 4 示出伸臂桁架破坏时塑性铰分布.

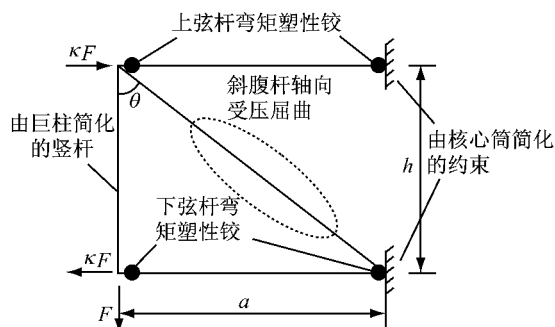


图 4 伸臂桁架隔离体受力

Fig.4 Loading conditions of outrigger truss as a free body

在实际结构中,巨柱的截面尺寸较大,其抗剪、抗弯承载力远远大于伸臂桁架各杆件,可承受较大的水平剪力而变形较小.在图 4 所示的受力条件下,斜腹杆主要受轴力作用,承担了桁架端部竖向力 F 的主要部分;伸臂桁架下弦杆所受的轴向力大于上弦杆,在竖向力 F 作用下更为不利,若在斜腹杆屈服时下弦杆仍未达到塑性,则其可承受施加于杆端的水平力 κF ;若下弦杆先于斜腹杆达到屈服,此时,维持桁架机制的下弦杆不能再继续承载,而伸臂桁架整体上仍具备较大竖向承载力,则作用于下弦杆端的水平力 κF 的增量由巨柱的抗剪承担.

2.2 N 型伸臂桁架承载力的简化计算

简化计算采用如下假定:①除竖杆外,伸臂桁架各杆件均采用 H 形截面;②各杆件材料的屈服点(f_y)相同;③上、下弦杆的截面特性(杆件截面面积 A ,杆件截面模量 W)与布置方式均相同.另外,采用刚性杆模拟桁架竖杆(即巨柱段).

在图 4 所示荷载作用下,从受力特点上可以近似将伸臂桁架的承载分为 2 个阶段:第 1 阶段为斜腹杆屈服前,依靠桁架机制承载(图 5a,5b),第 2 阶段为斜腹杆屈服后,依靠上、下弦杆的刚架机制 I 或 II 承载(图 5c,5d 或 5e,5f),据此建立伸臂桁架的简化计算模型.图 5 中 F_1 为竖向力; θ 为杆件夹角; f_y ,

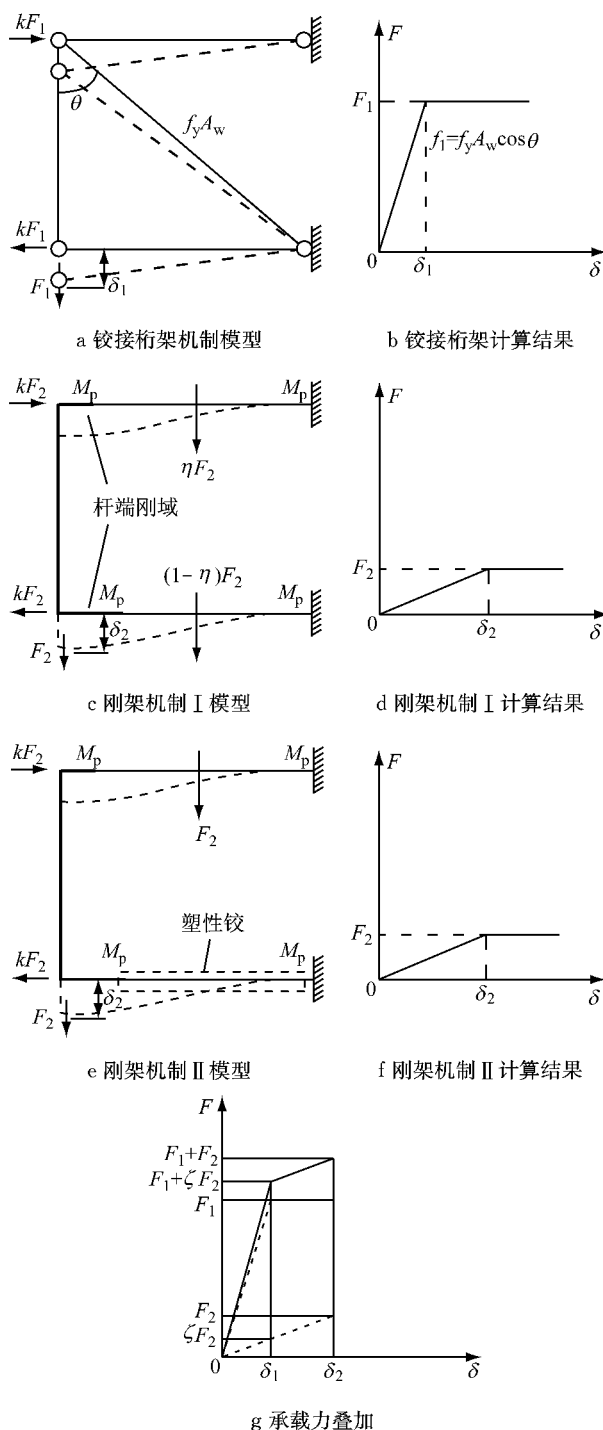


图 5 伸臂桁架简化计算模型

Fig.5 Simplified mechanical model of outrigger truss

A_w 分别为斜腹杆材料的屈服强度和截面面积; F_2 为竖向力增量; δ_1 为斜腹杆屈服时桁架端部竖向位移; δ_2 为刚架端部的竖向位移; M_p 为全截面塑性弯矩; η 为竖向力分配系数; ζ 为比例系数, $\xi=\delta_1/\delta_2$.

(1) 假定静定桁架机制模型在 F_1 和上、下弦水平力 κF_1 ($k=a/h=\tan \theta$) 作用下斜腹杆受压全截面屈服,则由桁架内力平衡条件可得

$$F_1 = N_{wp} \cos \theta = f_y A_w \cos \theta \quad (3)$$

式中: N_{wp} 为斜腹杆全截面受压屈服承载力, 通过结构力学方法可计算出对应 δ_1 , 如图 5b 所示。

(2) 在刚架机制 I 模型中, 受力不利的下弦杆在斜腹杆屈服前未达到塑性。在 F_2 和水平力增量 κF_2 作用下, 上、下弦杆端弯矩均达到全截面塑性弯矩 M_p ($M_p = f_y W_p$, 其中, W_p 为上、下弦杆塑性截面模量)。上、下弦杆应均按照压弯(拉弯)构件计算, 考虑轴力对中和轴的影响且杆件截面强轴是否在桁架平面内, 强度应按式(4)~(7)选择计算^[9]。

当绕强轴弯曲时, 若中和轴在腹板内, 则按照式(4)计算:

$$\frac{M_x}{M_{px}} + \frac{(1+\alpha)^2}{\alpha[2(1+\beta)+\alpha]} \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

式中: M_x 为绕 x 轴的弯矩值; M_{px} 为绕 x 轴的塑性弯矩; $\alpha = A_{cw}/2A_{cf}$, $\beta = t/h_0$, A_{cw} 为弦杆腹板面积, A_{cf} 为翼缘面积, t 为翼缘厚, h_0 为腹板高; N 为轴力; N_p 为弦杆的全截面轴向屈服承载力, $N_p = f_y A_c$, A_c 为上弦杆或下弦杆的面积。

若中和轴在翼缘内, 则按照式(5)计算:

$$\frac{N}{N_p} + \frac{2+\alpha+\beta}{\alpha[2(1+\alpha)+(1+2\beta)]} \left(\frac{M_x}{M_{px}} \right) = 1 \quad (5)$$

当绕弱轴弯曲时, 若中和轴在腹板内, 则按照式(6)计算:

$$\frac{M_y}{M_{py}} + \frac{\alpha(1+\alpha)^2}{1+2\alpha^2\beta} \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 = 1 \quad (6)$$

式中: M_y 为绕 y 轴的弯矩值; M_{py} 为绕 y 轴的塑性弯矩。若中和轴在翼缘内, 则按照式(7)计算:

$$\frac{1}{1-\alpha} \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 - \frac{2\alpha}{1-\alpha} \frac{N}{N_p} + \frac{1+2\alpha^2\beta}{1-\alpha^2} \frac{M_y}{M_{py}} = 1 \quad (7)$$

上、下弦杆所受到的轴向力应分别计算。轴力 N 为桁架模型所得到的弦杆的轴力 N_1 与刚架模型中 κF_2 的合力。

$$N = N_1 + \kappa F_2 \quad (8)$$

考虑上、下弦杆端部与斜腹杆连接部位刚域的影响后, F_2 按照上、下弦杆的抗剪刚度 ($12EI/L^3$) 分配, E 为钢材的弹性模量, I 为惯性矩。

由式(4)~(7)可得出按照上弦杆计算得到的竖向力 F_{21} , 按照下弦杆计算得到的竖向力 F_{22} , 取 F_{21} 和 F_{22} 的较大值作为 F_2 , 按照结构力学方法计算出在 F_2 作用下刚架端部的竖向位移 δ_2 , 如图 5d 所示。

(3) 在刚架机制 II 模型中, 因下弦杆在轴力作用下达到屈服, 由于竖向力作用在杆端形成塑性铰, 则竖向力 F_2 由还未屈服的上弦杆承担, 即 $F_2 = F_{21}$, 计算过程同步骤(2), 计算简图如图 5c。

(4) 将桁架机制得到的承载力与刚架机制 I 或 II 得到的承载力线性叠加即可求出伸臂桁架的整体承载力以及相应的位移, 如图 5d 所示。

2.3 N 型伸臂桁架杆件截面对破坏模式的影响

由简化计算可知, 在竖向力 F 和水平力 κF 作用下, 伸臂桁架杆件的破坏机制与其截面特性和材料的屈服点有关。

在桁架机制中, 假定桁架各杆件材料屈服强度均为 f_y , 则由力系平衡可得到当斜腹杆屈服时下弦杆所受的轴力 $N_1 = \kappa f_y A_w \cos \theta = f_y A_w \sin \theta$ 、下弦杆的全截面轴向屈服承载力 $N_p = f_y A_c$, 则

$$\frac{N_1}{N_p} = \frac{f_y A_w \sin \theta}{f_y A_c} = \frac{A_w}{A_c} \sin \theta \quad (9)$$

可见, 当 $N_1/N_p < 1$ 时, 下弦杆在轴向力作用下不会达到屈服, 则在桁架机制阶段下弦杆不屈服的条件为

$$A_c > A_w \sin \theta \quad (10)$$

式中: 若 $30^\circ < \theta < 70^\circ$ 时, 即 $A_c > (0.5 \sim 0.9) A_w$, 则当下弦杆的截面积约为斜腹杆截面积的 $0.5 \sim 0.9$ 倍时, 下弦杆的破坏会发生在斜腹杆的破坏之后; 当下弦杆的截面积小于该值时, 下弦杆则有可能先于斜腹杆进入塑性。

在刚架机制中, 上、下弦杆截面的抗弯承载力影响伸臂桁架的竖向承载力, 对于下弦杆, 可以通过增大 f_y 与截面模量 W 来提高其抗弯承载力, 使下弦杆的屈服发生在斜腹杆之后。

从上海中心大厦伸臂桁架试验和 2.2 节的简化计算可知, 在斜腹杆屈服前, 上、下弦杆是形成“桁架机制”的重要杆件, 而在斜腹杆屈服后, 上、下弦杆的刚架机制也不容忽视。如下弦杆破坏发生在斜腹杆之前, 则斜腹杆受压屈服后, 仅有上弦杆继续承受竖向荷载的增量, 塑性铰仅在上弦杆两端产生; 而在斜腹杆先行屈服的模式中, 上、下弦杆杆端相继出现塑性铰, 伸臂桁架塑性耗能分布更为均匀。因此, 在设计中, 可合理选择伸臂桁架各杆件的截面尺寸并采用适宜的杆件放置方式, 同时根据其受力特点而采用不同的材料来提高其抗力。

3 N 型伸臂桁架有限元分析

对伸臂桁架进行有限元分析, 以考察截面的变化对其承载力和刚度的影响, 并同简化模型计算值比较, 以校核简化计算模型的正确性。

3.1 伸臂桁架有限元计算模型

有限元模型的参数设置同 1.2 节, 各有限元模

型几何形式相同, $\sin \theta=0.82$, 杆件截面信息列于表 1 中, 表中 $A_{c,u}, A_{c,b}$ 分别为上弦杆、下弦杆的面积; $W_{c,u}, W_{c,b}, W_w$ 分别为上弦杆、下弦杆与腹杆的截面模量. 斜腹杆屈服时, 若下弦杆整体未达到塑性记为

模式 A, 若整体已达塑性记为模式 B, 由式(10)进行破坏模式预判. N 型伸臂有限元模型见图 6, 图中 b 为翼缘板高度, 计算结果见表 2.

表 1 N 型伸臂桁架计算模型截面特性

Tab.1 Section properties of N-type outrigger truss model

模型编号	面积/cm ²			截面模量/cm ³			$\frac{A_{c,u}}{A_w}$	$\frac{A_{c,b}}{A_w}$	破坏模式
	$A_{c,u}$	A_w	$A_{c,b}$	$W_{c,u}$	W_w	$W_{c,b}$			
NA-1	36	63	42	52	180	63	0.56	0.67	B
NA-2	47	63	55	108	180	130	0.73	0.87	A
NA-3	36	72	42	52	250	63	0.49	0.58	B
NA-4	53	63	63	150	180	180	0.84	1.00	A
NA-5	67	63	79	261	180	314	1.06	1.26	A
NA-6	36	53	42	52	116	63	0.67	0.79	B

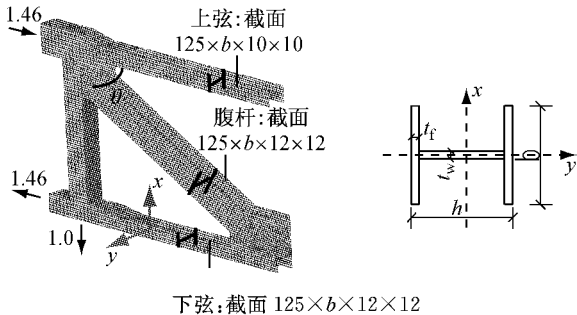


图 6 N 型伸臂有限元模型
Fig.6 FEM model of N-type outrigger truss

表 2 计算模型 b 值

Tab.2 b value of outrigger truss model

模型编号	上弦杆	斜腹杆	下弦杆
NA-1	125	212	125
NA-2	180	212	180
NA-3	125	250	125
NA-4	212	212	212
NA-5	280	212	280
NA-6	125	170	125

3.2 破坏模式

图 7 所示为典型计算模型 NA-1 与 NA-6 在受力过程中的等效塑性应变分布, 图中数值大于零即进入塑性, 灰色区域表示仍处于弹性.

从图中可以看出不同破坏模式发生时伸臂桁架进入塑性的状况: 模型 NA-1 初步判断为破坏模式 B, 从图中可以看出下弦杆全截面进入塑性时, 斜腹杆仅在端部局部区域有塑性开展; 模型 NA-6 初步判断为破坏模式 A, 从图可见斜腹杆有较大塑性开展, 而上、下弦杆仅端部有塑性开展. 其余计算模型也均表现出了与初判相似的性质, 可见, 从伸臂桁架各杆件截面特性以及材料特性出发对伸臂桁架破坏模式的判别与有限元计算基本吻合.

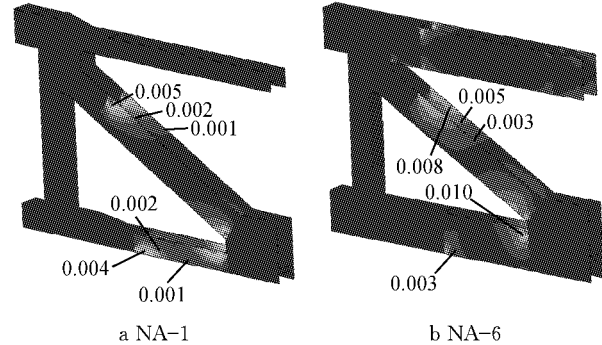


图 7 等效塑性应变分布
Fig.7 Equivalent plastic strain distribution of outrigger truss

3.3 简化计算校核

有限元计算得到的各模型竖向荷载-变形曲线以及简化模型计算结果如图 8 所示, 刚度与最大承载力的比值列于表 3, 表中 N_{m-s}, K_{s-s} 与 N_{m-f}, K_{s-f} 分别表示简化计算模型与有限元模型计算得到的伸臂桁架最大荷载以及初始刚度, 有限元初始刚度的选取为原点与 1/3 最大荷载连线的刚度.

从计算结果可以看出: 伸臂桁架简化模型计算所得初始刚度及最大承载力同有限元值吻合较好, 伸臂桁架屈服后, 二者的刚度也近似, 可见简化计算方法从机理上解释了伸臂桁架在不同受力阶段的性能, 这一简单力学模型不仅可以说明伸臂桁架各阶段非线性行为的主要特征, 也可大致预测伸臂桁架的关键力学指标, 即初始刚度和最大承载力.

3.4 杆件截面特性对伸臂桁架的影响

在伸臂桁架各杆件中, 斜腹杆以轴力为主, 则以其截面积 A 作为考察指标, 上、下弦杆为压(拉)弯构件, 破坏时端部发展弯矩塑性铰, 则以杆件的截面模量 W 作为考察指标. 以 NA-1 中斜腹杆截面面积

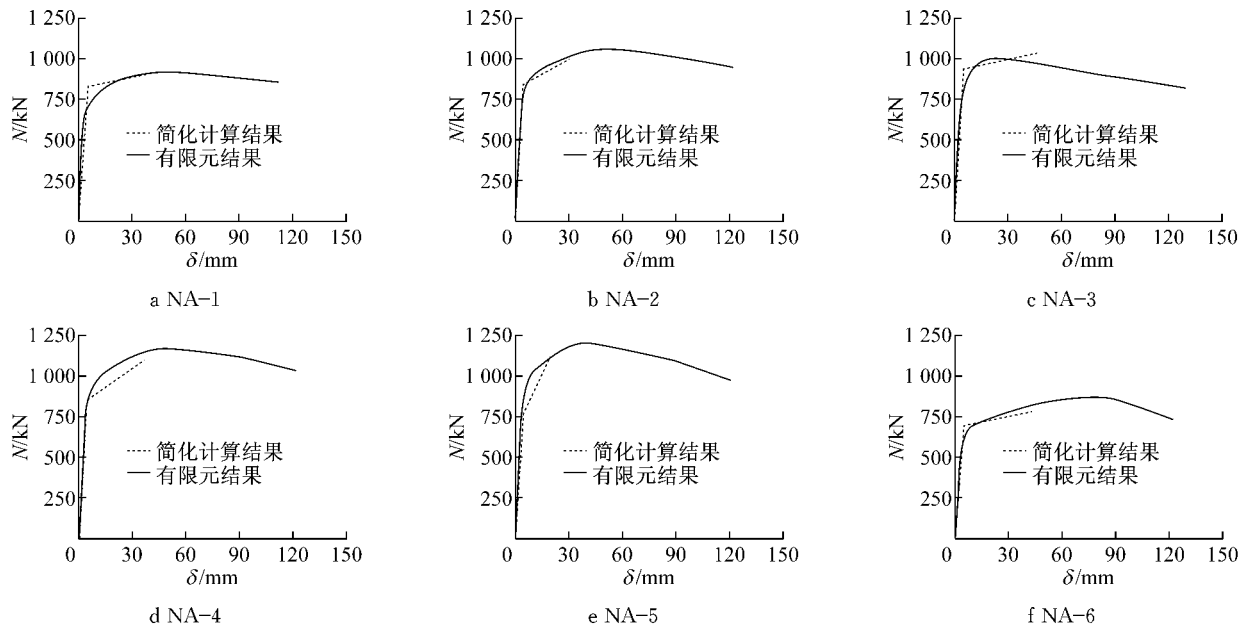


图8 N型伸臂竖向荷载-变形曲线

Fig.8 Load-displacement curves of N-type outrigger

表3 简化模型最大承载力及初始刚度与有限元结果对比
Tab.3 Comparisons of ultimate strength and initial stiffness between simplified model and FEM results

模型编号	K_{s-s}/K_{s-f}	N_{m-s}/N_{m-f}	模型编号	K_{s-s}/K_{s-f}	N_{m-s}/N_{m-f}
NA-1	0.77	0.99	NA-4	0.81	0.94
NA-2	0.85	0.94	NA-5	0.70	0.93
NA-3	0.88	1.02	NA-6	0.96	0.90

A_{NA-1} 和上弦杆截面模量 W_{NA-1} 为基准,其他模型相应杆件的 A, W 值相对NA-1模型的变化量(用 $\Delta A/A_{NA-1}, \Delta W/W_{NA-1}$ 表示)对该计算模型刚度以及最大荷载的影响列于图9。图中, $\Delta K_s/K_{(NA-1)s}, \Delta N_m/N_{(NA-1)m}$ 分别表示各模型的刚度值与最大荷载值与NA-1模型刚度值与最大荷载的差值之比,其中NA-1, NA-3, NA-6模型仅变换斜腹杆截面面积,

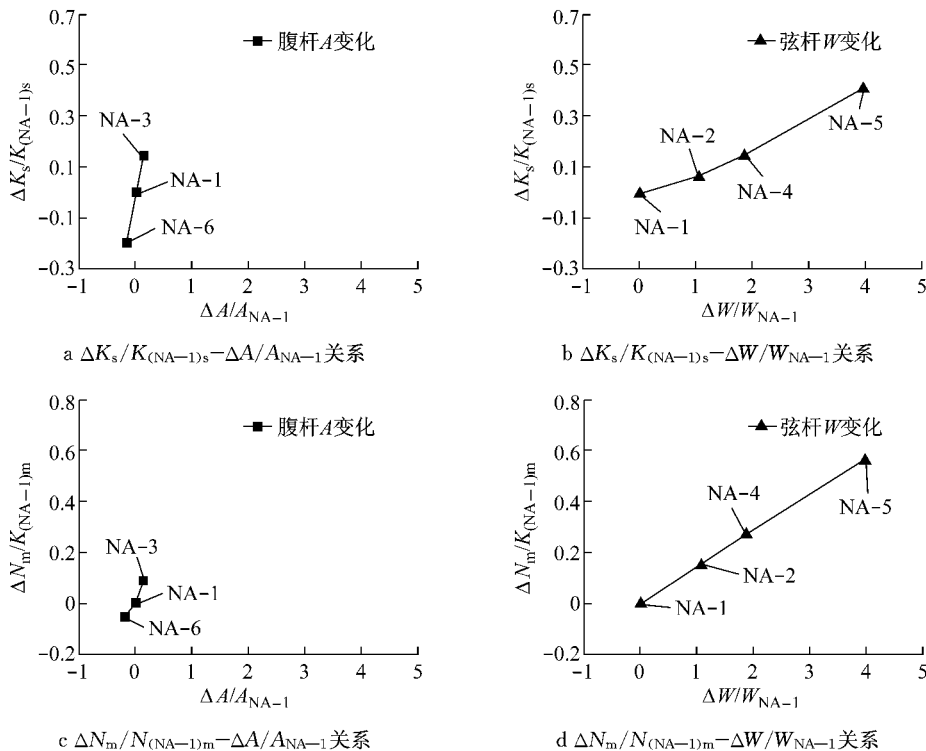


图9 模型刚度及承载力与截面特性相对变化关系

Fig.9 Relationship between strength and stiffness obtained from FEM model and section properties

NA-2, NA-4, NA-5 仅变换上、下弦杆截面。

从图中可以看出, 伸臂桁架承载力和刚度随杆件截面的相对变化基本呈线性变化, 图中曲线的斜率大小表明斜腹杆截面变化对其影响大于上、下弦杆的截面变化: 图 9a 中, NA-3 斜腹杆截面积增大 14%, 刚度提高约 15%, 而要达到相当的增长率, 弦杆的截面模量要增大 1.86 倍(模型 NA-4); 图 9c 中, NA-3 斜腹杆面积增大 14%, 最大承载力增长约 10%, 而 NA-2 弦杆截面模量增大 1.06 倍, 其最大承载力仅增大 15%。可见, 增大斜腹杆截面对于提高伸臂桁架的刚度及承载力较增大上、下弦杆截面更有效。

4 结论

(1) N 型伸臂桁架的简化模型计算揭示了伸臂桁架的受力机理, 对伸臂桁架破坏时各杆件状态的判别结果与有限元计算基本吻合; 刚度与承载力计算结果同有限元值也吻合较好, 可应用于设计中对伸臂桁架承载力和刚度的评估。

(2) 在伸臂结构体系中, 伸臂桁架斜腹杆是其主要受力构件, 对伸臂桁架整体承载力以及刚度均起着决定性作用, 增大斜腹杆或上、下弦杆截面均可提高伸臂桁架的刚度与承载力, 但从提高效率来看, 增大斜腹杆截面更行之有效。

(3) 对于初步设计中抗侧不满足要求的 N 型伸臂桁架结构, 可用本文提出的简化计算模型进行承载力及刚度的相关计算, 对伸臂桁架各杆件截面进行相应的调整, 使之满足结构抗侧需求。

参考文献:

- [1] 汪大绥, 周建龙, 袁兴方. 上海环球金融中心结构设计[J]. 建筑结构, 2007, 37(5): 8.
WANG Dasui, ZHOU Jianlong, YUAN Xingfang. Structural design of Shanghai World Financial Center [J]. Building Structures, 2007, 37(5): 8.
- [2] Li Q S, Wu J R. Correlation of dynamic characteristics of a super tall building from full scale measurements and numerical analysis with various finite element models [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33: 1311.
- [3] 徐培福, 黄吉峰, 肖从真, 等. 带加强层的框架-核心筒结构抗震设计中的几个问题[J]. 建筑结构学报, 1998, 20(4): 2.
XU Peifu, HUANG Jifeng, XIAO Congzhen, et al. Some problems in aseismic design of frame-core wall structures with strengthened storeys[J]. Journal of Building Structures, 1998, 20(4): 2.
- [4] 丁洁民, 巢斯, 赵欣, 等. 上海中心大厦结构分析中若干关键问题[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 122.
DING Jiemin, CHAO Si, ZHAO Xin, et al. Critical issues of structure analysis for the Shanghai Center project [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 122.
- [5] 傅学怡. 实用高层建筑结构设计 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
FU Xueyi. Applied structural design of tall building [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [6] 赵宪忠, 王斌, 陈以一, 等. 上海中心大厦伸臂桁架及其与巨柱和核心筒连接的静力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 20.
ZHAO Xianzhong, WANG Bin, CHEN Yiyi, et al. Monotonic static tests on outrigger truss and its connection with mega column and core tube of Shanghai Tower [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 20.
- [7] 陈以一, 王斌, 赵宪忠, 等. 上海中心大厦伸臂桁架及其与巨柱和核心筒连接的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 29.
CHEN Yiyi, WANG Bin, ZHAO Xianzhong, et al. Hysteretic tests on outrigger truss and its connection with mega column and core tube of Shanghai Tower [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 29.
- [8] WANG Yuanqing, ZHOU Hui, SHI Yongjiu, et al. Fracture prediction of welded steel connections using traditional fracture mechanics and calibrated micromechanics based models. [J]. International Journal of Steel Structures, 2011, 11(3): 351.
- [9] 沈祖炎, 陈扬骥, 陈以一. 钢结构基本原理 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
SHEN Zuyan, CHEN Yangji, CHEN Yiyi. Steel structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.