

夏建中, 淡浩. 大跨度钢、木混合结构屋盖设计并基于实例分析对抗震性能的研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 853-859. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.853

XIA Jianzhong, DAN Hao. Roof Design for Large-span Steel-Wood Hybrid Structures and the Seismic Performance Based on Actual Cases[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 853-859. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.853

大跨度钢、木混合结构屋盖设计并基于实例 分析对抗震性能的研究

夏建中¹, 淡浩²

(1. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000; 2. 四川省建筑科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要: 为有效提高建筑中屋盖的抗震性能、节约建筑施工成本, 深入研究大跨度钢、木混合结构屋盖的抗震性能。基于一个工程实例对该问题进行研究。分析从基本周期与抗侧刚度比、地震作用估算、承载力设置、抗震变形验算、连接与基础设计五个测试参数展开, 在此基础上确定预应力拉索的地震响应及张拉控制应力。设计的混合屋盖是使用4道X形布置的屋面预应力主索与外柱斜拉索结构, 这样是确保屋盖结构在地震下能够有效工作, 根据该结构结合一工程实例展开大跨度钢、木混合结构屋盖抗震性能测试。实验结果表明, 大跨度钢、木混合结构屋盖相对单一结构屋盖而言, 抗震性能更强; 同时实例分析表明, 在多向地震输入下大跨度钢、木混合结构屋盖的各个构件中, 内柱是抗震性能较弱的部位。

关键词: 大跨度; 钢、木混合结构; 屋盖; 多向地震; 预应力; 抗震性能

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-0853-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.853

Roof Design for Large-span Steel-Wood Hybrid Structures and the Seismic Performance Based on Actual Cases

XIA Jianzhong¹, DAN Hao²

(1. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, Sichuan, China;

2. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: To effectively improve the seismic performance of roofs in buildings and save the construction cost, the seismic performance of the roof of a long-span steel-wood hybrid structure is deeply studied based on an engineering case. The seismic response and tension control stress of pre-stressed cables are determined according to five test parameters, namely, the lateral stiffness ratio, the estimation of seismic action, the setting of bearing capacity, the checking of seismic deformation, and the connection and foundation design. The hybrid roof designed in this study ensures that the roof structure can be subjected to frequent and rare earthquakes. Based on an engi-

收稿日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(11401401)

第一作者简介: 夏建中(1966-), 男, 四川武胜人, 硕士, 副教授、高级工程师, 研究方向: 建筑结构、建筑施工技术及施工管理。

E-mail: xjz1515581186@126.com。

neering example, the seismic performance test of a long-span steel-wood hybrid structure roof is carried out according to the effective work. The experimental performance test results show that the seismic performance of the long-span steel-wood hybrid structure roof is stronger than that of a single-structure roof. Moreover, the case study shows that the seismic performance of the inner column is weaker than those of other members of the long-span steel-wood hybrid structure under multidimensional earthquakes.

Keywords: long span; steel-wood hybrid structure; roof; multidimensional earthquake; pre-stress; seismic performance

0 引言

钢结构与木结构存在各自的优点,两者组合成一个新型的混合结构,该结构相对单一结构存在优势:一方面,可有效降低施工过程中固体垃圾的堆积与生产,绿色环保^[1];另一方面,两种结构重量轻、体质轻、刚性强,受到地震的影响较弱,具有较好的抗震性能。因此两种材料结构的结合更加符合现代建筑中高抗震性能的需求^[2]。本文将大跨度钢、木混合结构应用在建筑屋盖设计中,为了解大跨度钢、木混合结构屋盖的抗震性能,基于一个工程实例,从结构基本周期与抗侧刚度比、地震作用估算、通过承载力、抗震变形验算、连接与基础设计等方面,设计大跨度钢、木混合结构屋盖,在此基础上确定预应力拉索的地震响应及张拉控制应力,使用可以确保屋盖结构在地震下能够有效工作的4道X形布置的屋面预应力主索与外柱斜拉索^[3-4]。

根据上述构建的大跨度钢、木混合结构屋盖,展开测试研究。从弹性分析,预应力、下部支承和几何大变形,多向地震输入三种角度研究大跨度钢、木混合结构屋盖的抗震性能。采用本文研究设计的大跨度钢、木混合结构屋盖的研究屋盖抗震性,以试图获取科学、可靠的结论,为降低施工成本、提高屋盖的抗震性能提供合理依据。

1 结构相关参数与方法设计的依据

利用《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)确定钢木混合结构参数^[5],详细过程为:

(1) 估算结构的基本周期与抗侧刚度比:钢木混合结构的自振周期依据房屋高度按经验公式估算^[6],内填轻型木剪力墙和钢框架大多数情况下选取1~3作为抗侧刚度比参数。

(2) 地震作用参数的估算与分配:钢、木混合结构的水平地震作用依据底部剪力法运算,水平地震

影响系数通过设计地震水准、场地条件及结构阻尼比获取^[7]。剪力分配参数 τ 通过式(1)计算得到:

$$\tau = \frac{H_{\text{wood}}}{H_{\text{wood}} + H_{\text{steel}}} \quad (1)$$

式中: H_{wood} 为内填轻型木剪力墙所承担的剪力值; H_{steel} 为钢框架所承担的剪力值。钢框架内的剪力 H_{steel} 与内填轻型木剪力墙内的剪力 H_{wood} 分别利用 τ 运算。

(3) 通过承载力参数设计大跨度钢、木混合结构:钢框架依据《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)的规范要求^[8],根据钢框架内的剪力 H_{steel} 与承载力要求进行设计。木结构依据《木结构设计规范》(GB 50005-2003)的规范要求进行规划。钢框架不同层抗侧刚度利用Pushover分析运算,各层墙体所需尺寸与各层墙体所需数量按照所需的内填轻型木剪力墙的抗侧刚度规划,抗侧力墙体的位置依据建筑与结构设置等因素确定,同时验算内填轻型木剪力墙体的强度。运用有限元软件ABAQUS或OpenSees获取抗侧刚度下的内填轻型木剪力墙构造^[9]。大跨度钢、木混合结构周期计算需在过程(1)~(3)结束后开始,估算的结构基本周期与大跨度钢、木混合结构周期之间偏差较低时,则达到大跨度钢、木混合结构屋盖抗震性能设计标准;反之,再次执行过程(1)、过程(2)。

(4) 大跨度钢、木混合结构抗震变形参数设计:获取各地震水平下大跨度钢、木混合结构的层间位移角就是钢、木混合结构的变形参数计算过程,钢、木混合结构的校对依据各地震水准下层间位移角限值完成^[10],详细做法为:符合大跨度钢、木混合结构抗震变形标准时,多遇地震动对应的层间位移角不超过0.5%,罕遇地震动对应的层间位移角不超过3.0%;反之再次执行过程(3)。层间位移角获取方法分为两种情况:第一,大跨度钢、木混合结构的地震作用可通过底部剪力等方法运算得

到,此为多遇地震情况下大跨度钢、木混合结构出现弹性变形验算。高度小于或等于 40 cm 是底部剪力法使用的基础条件,核心是剪切变形,其结构的质量与刚度沿着高度排列均匀;第二,利用时程分析法验算大跨度钢、木混合结构在罕遇地震下构件出现塑性状况时结构不同部位的受力与变形^[11]。利用有限元分析软件 ABAQUS 与 OpenSees 为大跨度钢、木混合结构构建模型,选取合理的地震加速度并依据地震水平有效调幅,计算大跨度钢、木混合结构参数。

(5) 大跨度钢、木混合结构的连接参数设计:以过程(1)~(4)为前提设计结构的连接与基础,获取符合标准的大跨度钢、木混合结构相关参数。依据《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)设置钢框架梁柱节点与柱脚。钢框架和内填轻型木剪力墙的连接依据钢木混合体系中钢框架与轻型木剪力墙连接形式及结构性能进行设计。

2 实例分析

基于实例的试验模型以某大跨度钢、木混合结构建筑实际工程为背景。具体示意图如图 1 所示。

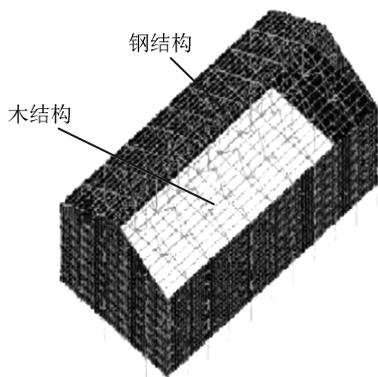


图 1 大跨度钢、木混合结构屋盖示意图

Fig.1 Schematic diagram of large-span steel and wood mixed-structure roof

整体框架为木框架加四面墙钢板,结构长 25 m,宽 12 m,檐口高度为 5 m,双坡屋面,坡度为

1:3,纵向框架 11 根木柱,抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度为 0.4g,场地为 I 类土,特征周期为 0.3 s。其中,拉索为结构中最主要的受力构件,直接平衡结构的大部分荷载。理论索长由 25~126 m 不等,索的拉力设计值由 526.5~3 808.9 kN 不等。同时设置了预应力稳定索,以满足结构施加应力要求,并主要承受由负风压产生的向上吸力。设置实验步长为 0.02 s,输入竖向地震波时选取 2/3 的水平波数值。采用 PKPM 系列软件 STS, SATWE 计算原型结构,满足规范要求。

2.1 拉索的预应力空间结构设计

结合上节中大跨度钢、木混合结构的相关参数,研究大跨度钢、木混合结构的拉索空间结构。拉索在地震下的响应,为拉索的预应力空间结构设计提供一定的指导,以提高整体结构的抗震性能。大跨度钢、木混合结构使用 4 道 X 形布置的屋面预应力主索与外柱斜拉索。从 4 种情况研究拉索预应力的设计与运算:第一(SHW1),在恒、活等荷载组合作用下的屋面交叉主索与外柱斜拉索均不脱离工作^[12];第二(SHW2),地震情况下,屋面交叉主索与外柱斜拉索不脱离工作;第三(SHW3),为降低施工张拉的复杂程度,最大限度设置较小的预应力^[13];第四(SHW4),拉索的应力在不同荷载组合下最大限度排列均衡。

存在令全部拉索在第一种情况下的荷载组合内均不脱离的最小预应力,这个最小预应力通过多次计算获取。表 1 描述了在地震下拉索不呈现松弛的预应力原始设计值。拉索的有效工作影响屋盖主要受力构件抗震能力的发挥,屋盖结构的受力性能受拉索作用较大^[14-15]。准许部分构件在罕遇地震作用下呈现塑性工作形态,按照 VonMises 屈服准则,同时采用单元材料特性作为双线性随动强化材料。多遇地震一般指小震,50 年可能遭遇的超越概率为 63% 的地震烈度值,通常其烈度 50 年一遇。罕遇地震一般指大震,50 年超越概率 2%~3% 的地震烈度,通常其烈度 1 600~2 500 年一遇。

输入的地震波曲线如图 2 所示。

表 1 拉索的预应力原始设计值(单位:MPa)

Table 1 Original design values of prestress of cables (Unit: MPa)

拉索类型	最外环	次外环	次内环	最内环	外柱斜索 A	外柱斜索 B
预应力	50	100	200	270	40	240

在多遇地震作用(地震加速度峰值为 0.3g)下,发现 288 根拉索中部分拉索出现松弛状况。四种工况

下最大瞬时松弛索数占拉索总数的 7%,均值为 21 根,外柱斜拉索占主要部分,屋盖外环索在 SHW3 输

入下8根索一起松弛。屋盖整个结构在多遇地震下个别拉索产生松弛状况,依据工程规范可不考虑。

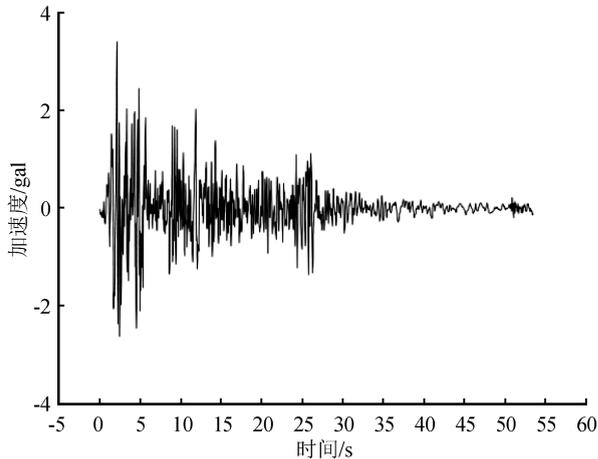


图2 地震波输入

Fig.2 Seismic wave input

表2描述在四种工况下输入罕遇地震的加速度峰值(罕遇地震的加速度峰值为 $0.5g$)时拉索的最大响应。依据表2可知,外柱斜拉索内的部分拉索在SHW3与SHW4呈现塑性阶段。

由此,可在多遇地震下使用拉索预应力的原始设计值确保部分拉索松弛,确保仅存在个别拉索进入塑性的状况。当拉索存在一定延展性时,在罕遇地震下的拉索不会断裂,可确保屋盖结构发挥受力体系抗震作用,因为此时拉索能够正常工作发挥其功能。

表3 基底剪力比较

Table 3 Comparison of base shear force

	大跨度钢、木混合结构屋盖				单独层盖			
	基底剪力/kN		剪重比/%		基底剪力/kN		剪重比/%	
	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向
地震波1	38 170	36 113	6.07	5.69	3 180	3 372	7.18	7.75
地震波2	28 287	26 552	4.26	3.94	2 605	3 166	5.49	7.14
地震波3	25 832	24 368	3.81	3.54	2 451	2 539	5.04	5.30
平均值	30 763	29 011	4.71	4.39	2 745	3 026	5.90	6.73

分析表3,从大跨度钢、木混合结构屋盖角度而言,随着地震波等级的增加,大跨度钢、木混合结构屋盖的基底剪力逐渐增加,剪重比也逐渐增加;从单独层盖角度而言,情况与大跨度钢、木混合结构屋盖相似,基底剪力、剪重比均与地震波等级成正比,不同的是,地震等级为7级时,大跨度钢、木混合结构屋盖的基底剪力为25 832 kN、24 368 kN,屋盖单独的基底剪力为2 451 kN、2 539 kN,相同地震等级下,大跨度钢、木混合结构屋盖的基底剪力约是屋盖单独的数十倍;对比大跨度钢、木混合结构屋盖与单

表2 输入罕遇地震波时拉索的最大响应(单位:MPa)

Table 2 Maximum responses of cables under rare earthquake waves (Unit: MPa)

	SHW1	SHW2	SHW3	SHW4	平均值
内环索	248	256	272	281	264
次内环索	231	222	239	247	235
次外环索	335	317	358	365	344
外环索	382	375	412	428	399
外柱斜索	415	416	456	456	436

基于以上对拉索张拉控制应力的研究,可实现拉索预应力的空间结构抗震优化设计。

2.2 结构基底剪力分析

在单向地震作用下,实验从三个方面研究大跨度钢、木混合结构屋盖抗震性能,分别为:结构基底剪力分析,预应力、下部支承和几何大变形。并进行了多向地震输入。

为验证大跨度钢、木混合结构屋盖的抗震性能,将未采用大跨度钢、木混合结构的单独屋盖作为对比测试对象,采用实验设置的三个地震波等级(地震加速度分别为 $0.4g$ (地震波1), $0.3g$ (地震波2), $0.2g$ (地震波3))作为地震输入,为减少前面地震波输入引起的模型破坏对后面地震波输入引起的模型反应的影响,在输入地震波时,按照地震加速度值由小到大的顺序输入,得到不同情况下基底剪力比较结果,如表3所示。其中,基底剪力通过PKPM软件中的WZQ.OUT文件得到,剪重比为地震作用下楼层剪力与重力荷载代表值的比值。

独屋盖的剪重比可知,大跨度钢、木混合结构屋盖的剪重比相对较优。

上述数据表明,大跨度钢、木混合结构屋盖的基底剪力大于单独层盖的基底剪力,能够更好地抵抗地震波的作用。

表4描述了水平地震作用下屋盖结构的桅杆顶点位移情况。分析表4能够看出,在不同地震波下,大跨度钢、木混合结构屋盖桅杆顶点位移超过屋盖单独桅杆顶点位移,原因是:地震波对大跨度钢、木混合结构屋盖模型下端产生的位移变形较大,导致

屋盖整体的桅杆顶点受到影响,产生较大的位移变化。

表 4 水平地震作用下桅杆顶点位移比较

Table 4 Comparison of displacement at mast vertex under horizontal earthquake

	屋盖整体模型/mm		屋盖单独模型/mm	
	X 向地震	Y 向地震	X 向地震	Y 向地震
地震波 1	63	48	13	12.2
地震波 2	28	27	8.2	7.7
地震波 3	23	21	6	5

2.3 预应力、下部支承和几何大变形对大跨度钢、木混合结构屋盖动力特性的影响

在 2.1 小节实验设置基础上,依据屋盖模态存在的三种状况,分析预应力、下部支承以及几何大变形对大跨度钢、木混合结构屋盖的作用,状况如下:

(1)不考虑预应力效应的屋盖模型;(2)考虑预应力效应的屋盖模型;(3)考虑预应力效应并包括下部结构的整体模型。此时选取的地震波等级为 7 级。

图 3 描述了三种状况下大跨度钢、木混合结构屋盖固有频率排列情况,此为研究前 24 阶固有频率与自振周期模态得到的结果。

分析图 3 能够看出,大跨度钢、木混合结构屋盖的动力特性为:(1)大跨度钢、木混合结构屋盖 4 阶振型频率为 0.62 Hz,基频较小,存在较柔特性;(2)大跨度钢、木混合结构屋盖 4~24 阶频率相差约为 1 Hz,频谱变化无显著波动,说明该结构以及相应的动力具有较高的复杂性;(3)屋盖动力特性几乎不受几何大变形特性作用;(4)分布振型的不同反映出预应力效应对屋盖动力特性的作用。

表 5 屋盖结构主梁在多向地震输入下的响应

Table 5 Response of main beam of roof structure under multidirectional seismic input

输入条件响应		单向		双向		三向	
		幅值	幅值	幅值	变化率/%	幅值	变化率/%
下弦最大索拉力/N		3.71×10^5	3.87×10^5		4.13	4.03×10^5	4.03
主梁最大弯矩/(N·m)	内柱处	2.36×10^7	2.32×10^7		-1.47	2.40×10^7	3.14
	外柱处	1.00×10^7	1.09×10^7		-0.88	1.06×10^7	6
最大挠度/m	屋顶	0.301	0.282		-3.04	0.288	2.04
	悬挑端	0.275	0.251		-8.22	0.288	13.13

最大响应、各维度输入条件下最大地震响应变化情况。

由表 5 可知:第一,除屋盖外缘悬挑端的挠度响应以外,主梁受到多向地震输入的作用较弱;第二,随着地震输入维数的增加,主梁内柱处的弯矩最大值始终大于外柱的弯矩最大值,相对而言,内柱受到地震作用更容易出现弯矩,即对地震的抵抗性相对较弱;第三,随着地震输入维数增加,屋顶与悬挑端

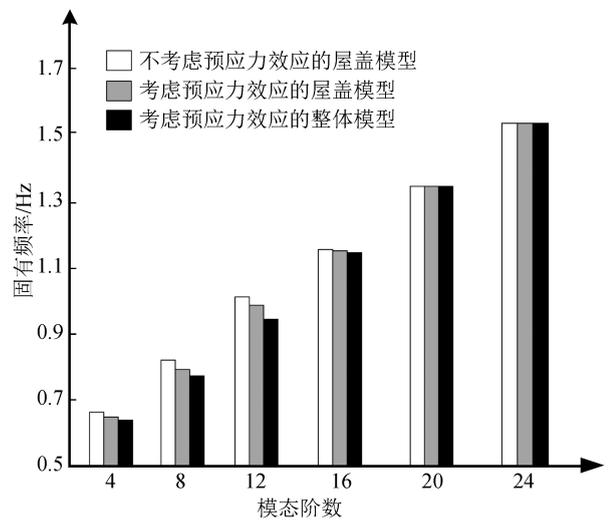


图 3 三种状况下结构固有频率排列

Fig.3 Natural frequency arrangement of structure under three conditions

2.4 多向地震输入对大跨度钢、木混合结构屋盖地震响应的影响

通过三向地震输入下的时程分析,了解拉索在地震下的松弛状况与屈服状况,从而考虑屋盖结构在地震下持续有效工作的能力。以水平向 1 作为地震主方向,考察多向地震输入下屋盖的地震响应。三向地震输入比值设置为:1(水平 1):0.85(水平 2):0.65(竖向),利用多向地震输入下的弹性时程分析研究多向地震输入对屋盖关键受力构件的地震响应状况,在屋盖纵横方向各选取一榀主梁,记录两者地震响应的最大值、各种地震输入下最大地震响应变化情况,用表 5 描述。同时分析全部内外柱的

的挠度最大值增加幅度较小,所以抵抗地震作用的能力较强。

由此可得,内柱柱底弯矩受多向地震输入作用显著,并且内柱的单柱水平位移角比外柱的单柱水平位移角大,所以屋盖结构体系内较薄弱部位是内柱。

图 4 描述了三向地震波输入下大跨度钢、木混合结构屋盖结构中内柱柱底弯矩、柱顶水平位移时程响应曲线。分析图 4 能够看出屋盖的内柱柱底

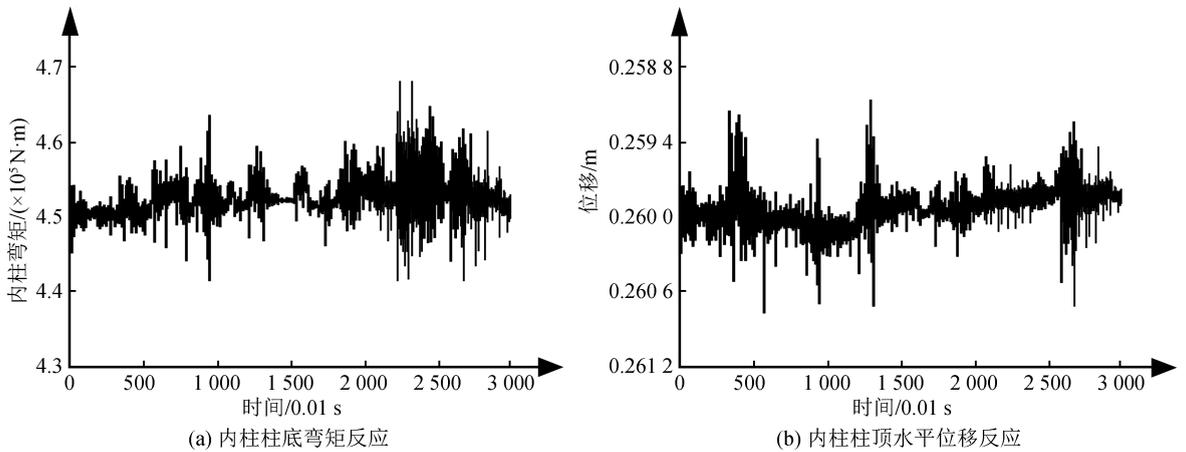


图4 屋盖不同构件地震响应时程曲线

Fig.4 Seismic response time history curve of different main components of roof

弯矩反应、柱顶水平位移反应,图4(a)中,内柱柱底弯矩值总体较高,仅在中间阶段短暂降低,后期弯矩值同样较大,说明内柱弯矩值较大,对于地震作用的抵抗能力较弱,此结果与表5得到的结果一致;图4(b)中,柱顶水平位移总体波动性大、发生的位移量较高,仅在实验中后期存在位移小幅度波动的情况。

综上所述,多向地震输入下大跨度钢、木混合结构屋盖的各个构件中,内柱是抗震性能相对较弱的部位,在以后的建筑施工过程中可适当加固屋盖内柱设计,提高大跨度钢、木混合结构屋盖的整体抗震性能。

3 结论

本文研究大跨度钢、木混合结构屋盖抗震性能从两方面入手:第一,从基本周期与抗侧刚度比、地震作用估算、承载力设置、抗震变形验算、连接与基础设计五个方面设计屋盖结构;第二,确定合理的预应力拉索的地震响应及张拉控制应力,使用4道X形布置的屋面预应力主索与外柱斜拉索,确保屋盖结构在地震下能够有效工作。抗震性能研究实验从结构基底剪力分析,预应力、下部支承和几何大变形,多向地震输入三方面进行,根据实验结果得到如下启示:

(1) 地震波对大跨度钢、木混合结构屋盖模型下端产生的位移较大,影响屋盖整体的桅杆顶点,使得在水平地震作用下,屋盖结构的桅杆顶点产生较大的位移变化。

(2) 研究大跨度钢、木混合结构屋盖的动力特性,发现其基频较小,存在较柔特性;频谱变化无显著波动,说明该结构以及相应的动力具有较高的复

杂性;屋盖动力特性几乎不受几何大变形特性作用。

(3) 多向地震输入下大跨度钢、木混合结构屋盖的各个构件中,内柱是抗震性能较弱的部位,所以采用大跨度钢、木混合结构设计建筑屋盖时,应加固内柱,以提高屋盖的抗震性能。

参考文献(References)

- [1] 郭宏超,孙立建,刘云贺,等.柔性钢框架外挂再生混凝土墙结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(2):63-73.
GUO Hongchao, SUN Lijian, LIU Yunhe, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Flexible Steel Frame with Recycled Concrete External Wall[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 63-73.
- [2] 杨大彬,云超光,吴金志,等.基于下部支承分离式设计的大跨度网壳结构抗震性能研究[J].振动与冲击,2018,37(3):237-242.
YANG Dabin, YUN Chaoguang, WU Jinzhi, et al. Aseismic Performance of Large Span Latticed Domes with Separated Substructures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(3): 237-242.
- [3] 唐利纯,舒兴平, TANG Lichun, 等.大跨度钢桁架结构弹塑性时程分析[J].结构工程师,2016,32(2):118-125.
TANG Lichun, SHU Xingping, TANG Lichun, et al. Inelastic Time-History Analysis of a Long-Span Steel Truss Structure [J]. Structural Engineers, 2016, 32(2): 118-125.
- [4] 李科,刘长玲.某砖混结构顶部钢结构加层的抗震性能分析[J].四川建筑科学研究,2016,42(1):90-92.
LI Ke, LIU Changling. Analysis of the Seismic Performance of Masonry Structure Top Steel Structure Adding Layer [J]. Building Science Research of Sichuan, 2016, 42(1): 90-92.
- [5] 郁敏杰,陆伟东.多高层重木框架-混凝土核心筒混合结构抗震性能研究[J].结构工程师,2017,33(5):76-83.
YU Minjie, LU Weidong. Study on Seismic Performance of Mid-And High-Rise Wood-Concrete Hybrid Structures [J]. Structural Engineers, 2017, 33(5): 76-83.

- [6] 彭胜,许成祥,万冲,等.型钢混凝土柱震后加固方法对比试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(30):206-211.
PENG Sheng, XU Chengxiang, WANChong, et al. Comparative Experimental Investigation on Strengthening Approach of Seismic-Damaged Steel Reinforced Concrete Frame Columns [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30): 206-211.
- [7] 王楠,张晓光,罗永峰,等.某会展中心钢屋盖结构静力弹塑性分析[J].空间结构,2017,23(1):24-29.
WANG Nan, ZHANG Xiaoguang, LUO Yongfeng, et al. Static Elasto-Plastic Analysis on the Steel Roof Structure of a Convention and Exhibition Center [J]. Spatial Structures, 2017, 23(1): 24-29.
- [8] 徐琳,张军,等.大跨度双曲面管桁架钢结构屋盖施工受力性能研究[J].施工技术,2016,45(8):64-66.
XU Lin, ZHANG Jun, et al. Study on Mechanical Performance of Steel Roof Construction with Large-Span Hyperbolic Truss [J]. Construction Technology, 2016, 45(8): 64-66.
- [9] 张鹏,王艺环,秦国晋,等.非随机过程的地震激励下埋地压力管道的非概率可靠性分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):134-141.
ZHANG Peng, WANG Yihuan, QIN Guojin, et al. Non-Probabilistic Reliability Analysis of Buried Pressure Pipeline under Non-Random Process Earthquake Excitation [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6): 134-141.
- [10] 陈奕玮,杜东升.基于损伤的大跨隔震结构抗震性能评价[J].工程抗震与加固改造,2016,38(4):87-93.
CHERT Yiwei, DU Dongsheng. Seismic Damage Performance Evaluation of Large-Span Isolated Structure Based on Damage Model [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(4): 87-93.
- [11] 赫英爽.杭州南站主站房大跨度钢桁架屋盖滑移技术研究[J].钢结构,2017,32(10):114-119.
HE Yingshuang, HE Yingshuang. Research on Sliding Technique of Long-Span Steel Truss Roof of Hangzhou South Railway Station [J]. Steel Construction, 2017, 32(10): 114-119.
- [12] 郝雨辰,江叶峰,仇晨光,等.基于多代理系统的直流微电网分区式稳定控制方法研究[J].电力工程技术,2017,36(5):15-20.
HAO Yuchen, JIANG Yefeng, QIU Chenguang, et al. Research on Sub-Regional Stability Control of DC Microgrid Based on Multi-Agent System [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(5): 15-20.
- [13] 汪梦甫,龙思, Wang Mengfu, 等.高层钢-混凝土混合结构抗震分析的耐震时程方法[J].工程抗震与加固改造,2016,38(4):1-11.
WANG Mengfu, LONG Si, WANG Mengfu, et al. Endurance Time Method for Seismic Response Analysis of Steel-Concrete Hybrid Structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(4): 1-11.
- [14] 顾群,张咪,张玉明,等.±800 kV 换流站高端阀厅钢-钢筋混凝土抗震墙混合结构抗震性能分析[J].中国电力,2016,49(8):36-40.
GU Qun, ZHANG Mi, ZHANG Yuming, et al. Seismic Performance Analysis of Steel-Reinforced Concrete Combined Shearwall Structure of High Voltage Side Valve Hall in ±800 kV Converter Station [J]. Electric Power, 2016, 49(8): 36-40.
- [15] 丁声荣,霍艳华.混凝土结构建筑物抗震加固强度测试仿真[J].计算机仿真,2017,34(8):429-432.
DING Shengrong, HUO Yanhua. Strength Test and Simulation of Seismic Strengthening of Concrete Structures [J]. Computer Simulation, 2017, 34(8): 429-432.