文章编号:1005-0523(2012)02-0021-06

大跨空间网架结构铅挤压阻尼器减振控制分析

杨明飞[1,2],徐赵东[1],黄兴淮[1]

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室,江苏 南京 210096; 2. 安徽理工大学土木建筑学院,安徽 淮南 232001)

摘要:为了研究铅挤压阻尼器减振系统对大跨空间网架结构的减振控制效果,对铅挤压阻尼器的滞回耗能特性进行了试验研究与分析,结果说明铅挤压阻尼器性能稳定,是一种优秀的耗能减振装置。使用有限元软件LS-DYNA建立大跨空间网架结构的计算模型,分别对铅挤压阻尼器在网架结构中不同布置位置下的各种工况进行了减震效果对比分析,得到了铅挤压阻尼器在大跨空间网架中布置的合理位置。同时在铅挤压阻尼器合理布置位置的条件下,研究了铅挤压阻尼器减振系统对大跨空间网架倒塌极限荷载的影响。结果表明:铅挤压阻尼器减振系统能够有效降低大跨空间网架结构的地震响应;而且在合理布置阻尼器的情况下,减振系统更能够提升大跨空间网架结构的倒塌临界荷载。

关键词:大跨空间网架;滞回耗能;铅挤压阻尼器;时程响应;倒塌临界荷载

中图分类号:TU393.3 **文献标志码**:A

大跨度和超大跨度空间网格结构及作为其核心的空间结构技术已成为代表一个国家建筑科技发展水平的重要标志之一。随着网架结构正趋向大型化、复杂化,随之带来的是在计算和设计方面的各种问题。人们对该种结构的抗震规律性认识还远远不够,尤其在强、巨震下网格结构的杆件塑性发展规律还缺乏系统的研究。在空间网架结构减震技术方面的研究成果相对还较少。

文献[1]对大跨空间网格结构的动力特性进行了研究,为大跨空间网格结构减振理论的研究与应用奠定了基础。文献[2]将粘弹性阻尼器应用于空间网架结构,研究探讨了粘弹性阻尼器在网架结构减震控制中的优化设置,分析了阻尼器在网架结构中的布置位置、布置数量、阻尼器支撑倾斜角度等参数的影响,对在各种工况下的减震效果进行了对比分析。结果表明,在结构中合理布置阻尼器可显著提高阻尼器的减震控制率。文献[3]基于LQR算法提出了大跨平板网架结构的空间最优控制力的计算方法,并应用磁流变(MR)阻尼器对大跨平板网架结构的多维地震反应进行振动控制。数值仿真结果表明应用MR阻尼器能使大跨平板网架结构的地震反应得到有效控制,同一控制策略对不同地震激励的控制效果不同。采用半主动控制策略时,结构水平位移和加速度幅值的控制效果可达66.4%和47.5%。文献[4]采用粘滞阻尼器作为减振装置,对北京A380机库在三向地震波输入下进行减振控制分析。结果表明,在网架结构中布置阻尼器时,非线性阻尼器和线性阻尼器的控制效果基本相同,“替换方式”布置阻尼器的控制效果好于“附加方式”,替换下弦与中弦之间腹杆的减振效果好于替换中弦与上弦之间的腹杆,在网架四边中部布置阻尼器的控制效果优于在四边均匀布置或布置在无控结构竖向位移最大的节点周围,阻尼器数量宜适中,抗侧力结构中布置阻尼器的控制效果优于布置在网架结构中,网架与抗侧力结构均布置阻尼器,可进一步提高减振控制效果。

本文尝试利用铅挤压阻尼器减振系统控制大跨网架结构的地震响应,为铅挤压阻尼器在空间网架结构中的实际应用和设计提供借鉴。

1 铅挤压阻尼器工作原理

铅挤压阻尼器最早是新西兰Robinson根据铅受挤压产生塑性变形消耗能量的原理制造而成[5],典型的

收稿日期:2012-12-27

作者简介:杨明飞(1979—),男,博士研究生,研究方向为防灾减灾工程。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铅挤压阻尼器有两种基本形式:收缩管型和凸轴型。文献[6]试验研究了铅挤压阻尼器的滞回特性,并且数值分析了抗震剪力墙结构应用铅挤压阻尼器减振系统的减振效果,表明铅挤压阻尼器系统对该结构地震响应降低明显。本研究使用的铅挤压阻尼器为凸轴型,当外壁钢管和中心轴发生相对运动时,铅被挤压通过凸起段,从而使铅发生塑性变形而耗能。在东南大学教育部重点实验室,作者对该种类型的阻尼器进行了相应的试验研究,结果表明铅挤压阻尼器的滞回曲线饱满,耗能效率高且阻尼性能与加载频率基本无关,工作性能稳定,图1是试验测试得到的10 mm幅值的滞回曲线。

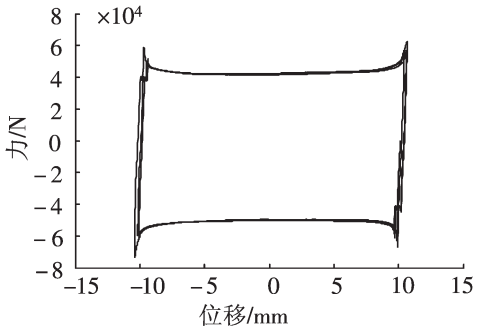


图1 铅挤压阻尼器滞回曲线
Fig.1 Hysteresis loops of lead extrusion damper

2 大跨空间网架结构减振算例

2.1 LS-DYNA软件参数

1)材料模型。根据大跨网壳结构杆件的受力特点,杆件选择了Beam161梁单元,采用Hughes-Liu算法。材料模型选取了LS-DYNA提供的塑性随动强化模型,该模型的优势就是可以考虑失效,通过在0(仅随动强化)或1(仅各项同性强化)间调整参数 β 来选择各项同性或随动强化,应变率使用Cowper-Symonds模型来考虑,用与应变率有关的因数表示屈服应力:

$$\sigma_r=\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right]\left(\sigma_0+\beta E_P\varepsilon_P^{\text{eff}}\right) \tag{1}$$

式中:σ_0 为常应变率的屈服应力;$\dot{\varepsilon}$ 为有效应变率;C,P 为应变率参数;$\varepsilon_P^{\text{eff}}$ 为有效塑性应变;E_P 是塑性硬化模量:

$$E_P=\frac{E_{\tan}E}{E-E_{\tan}} \tag{2}$$

文中组成网壳杆件钢材选用Q235,弹性模量206 GPa,泊松比为0.3,失效时杆件的塑性应变为0.05,失效应力可由式(1)进行计算。

2)阻尼单元。LS-DYNA显示分析软件提供了弹簧阻尼单元,其中,K代表弹簧阻尼单元的弹簧刚度;C_V代表弹簧阻尼单元的等效阻尼;I,J分别代表该弹簧阻尼单元的两个节点,具体如图2所示。

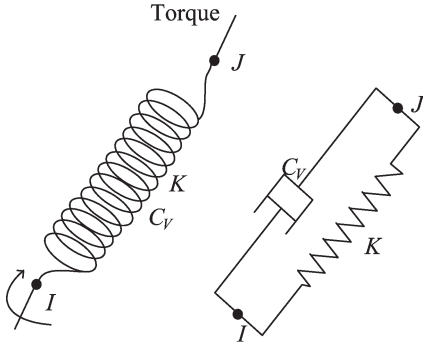


图2 Combin165单元
Fig.2 Combin165 element

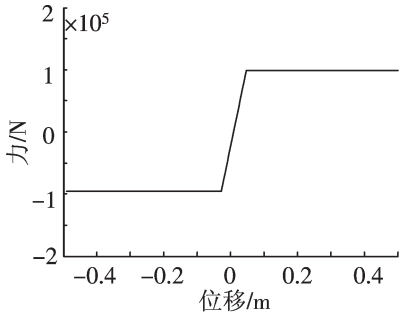


图3 铅挤压阻尼器刚度输入
Fig.3 Stiffness input of lead extrusion damper

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与其它隐式有限元分析软件不同的是软件中的Combin165弹簧阻尼单元可以建立较复杂的弹簧阻尼系统，弹簧和阻尼单元通过两个相同的点进行连接，弹簧刚度可以直接输入力位移曲线。这样，真正的弹簧刚度K不需要直接进行定义，而是通过力位移曲线的输入实现刚度的变化。考虑网壳结构的自重及均布荷载条件，文中选择了10 t的铅挤压阻尼器，阻尼器中的铅发生流动前发生2 mm的位移，荷载位移曲线输入（可推导等效刚度）如图3所示，通过试验结果和数值分析等效阻尼采用500 kN·s·m^{-1}，将12个铅挤压阻尼器分3种不同的布置方式加入大跨空间网壳结构当中对结构进行减振分析。

2.2　铅挤压阻尼器布置位置及减振效果分析

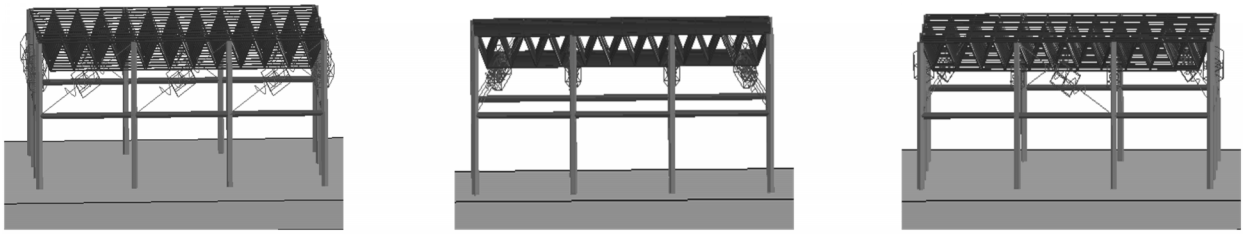
通过显示有限元分析软件LS-DYNA建立网架结构的参数如表1，结构采用柱子支撑，柱子的上端铰接于网架结构的上弦节点，下端固结于地面，柱子截面采用500 mm方柱，高度10 m，柱子间通过梁进行连接，其中柱子和梁采用C40混凝土，且不考虑梁柱的失效。按规范要求，地震波选择EL-Centro波、Taft波及一条Ⅱ类场地的人工波，模拟的过程中对结构进行三向输入，地震波加速度峰值分别为240，400和620 gal。

表1　模拟用网架参数

Tab.1　Simulation parameters of simulated lattice structure

网架杆件/mm×mm	跨度/m×m	网架高度/m	屋面荷载/kN·m^{-2}
Φ150×5	24×24	2	1

为了考察铅挤压阻尼器不同位置对大跨空间网架结构减振效果的影响，模拟过程中采用3种布置的方式：① 在所有柱子之间采用交叉支撑的形式，铅挤压阻尼器上端铰接在网架结构的上弦节点，下端铰接于梁柱节点上，布置如图4(a)所示；② 斜撑布置，所有的铅挤压阻尼器上端铰接在网壳结构的第三排上弦节点（由外向内）上，下端铰接于梁柱节点，如图4(b)所示；③ 混合支撑，铅挤压阻尼器的数量不变，其中4个选择交叉支撑布置，另外8个选择斜撑布置，如图4(c)所示，所有布置均沿结构中心对称分布。

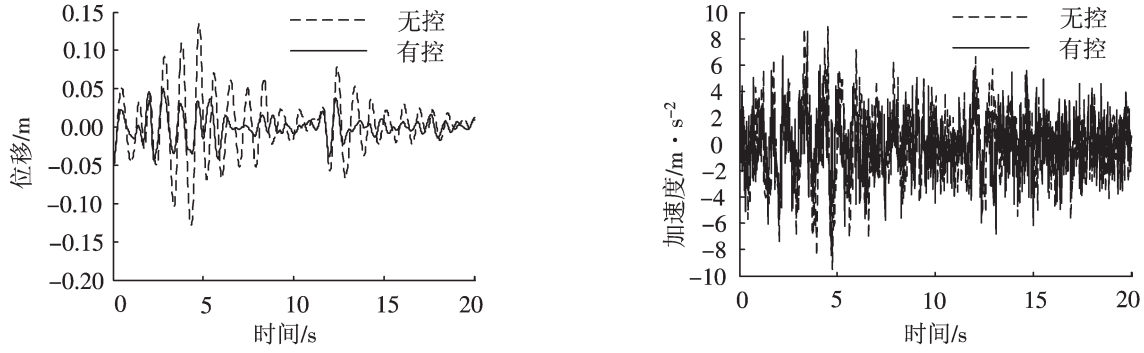


（a）　交叉支撑　　（b）　斜撑　　（c）混合支撑

图4　铅挤压阻尼器在网架结构中的布置

Fig.4　Arrangements of lead extrusion dampers in Grid structure

模拟过程中，选择网架结构的顶点作为参考点，计算减振效果如式(3)。由于篇幅的限制，文中仅显示了400 gal E-LCentro波（对结构进行三向输入）作用，铅挤压阻尼器混合支撑布置情况下，网架结构的顶点位移时程和加速度时程对比图，如图5所示。



（a）位移时程对比　　（b）加速度时程对比

图5　混合支撑布置下顶点时程对比

Fig.5　Vertex time history response comparison under mixture braces

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\beta=\frac{\left|\text{无控结构地震响应}\right|_{\max}-\left|\text{有控结构地震响应}\right|_{\max}}{\left|\text{无控结构地震响应}\right|_{\max}} \tag{3}$$

由图5可以看出，混合支撑布置铅挤压阻尼器，顶点最大位移峰值被降低了63%，最大加速度峰值被降低了29%。减振效果明显，原因在于铅挤压阻尼器的一端铰接在网架结构节点上，对网架结构的稳定发挥了重要作用。

网架结构在El-Centro波、Taft波和人工波作用下，铅挤压阻尼器不同布置位置，不同加速度峰值情况下，结构在单方向（x方向）的减振效果汇总见表2和表3。

表2 x方向位移减振效果

Tab.2 Displacement vibration reducing effect in x direction %

地震波/gal		交叉	斜撑	混合支撑
Elcentro波	240	70	59	62
	400	70	61	63
	620	65	56	58
Taft波	240	53	36	46
	400	61	56	58
	620	56	46	49
人工波	240	35	52	54
	400	60	52	51
	620	58	50	52

表3 x方向加速度减振效果

Tab.3 Acceleration vibration reducing effect in x direction %

地震波/gal		交叉	斜撑	混合支撑
Elcentro波	240	31	28	43
	400	23	23	29
	620	30	28	46
Taft波	240	+10	1	25
	400	41	44	50
	620	8	39	33
人工波	240	29	29	22
	400	9	+2	+6
	620	+4	27	31

注："+"表示放大。

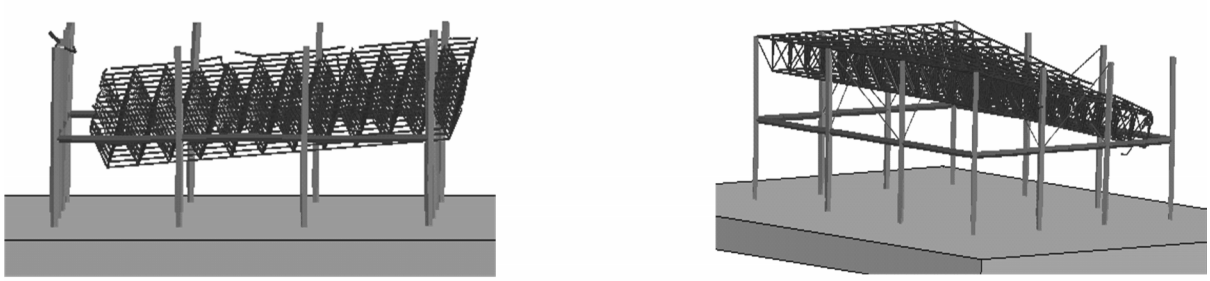
对大量算例进行分析总结，结果表明：对大跨空间网架结构而言，不同的布置方式和不同的地震波对铅挤压阻尼器减振系统的减振效果有较大的影响。从位移的角度出发，相同的布置位置不同的地震波加速度峰值情况下，铅挤压阻尼器减振系统的减振效果较稳定，但加速度的减振效果随着地震波峰值的增加减振效果出现了波动，甚至是放大。因此在考虑铅挤压阻尼器参数尤其刚度的时候应尽量降低阻尼器的刚度。从加速度的角度出发，混合布置的减振效果较好，且这种布置方式对减小地震波对网壳结构的破坏作用最有利。综合考虑位移和加速度的减振效果，混合支撑布置既能有效降低位移时程响应，又能减小地震波对网架结构的破坏作用，显然更为合理。

2.3 铅挤压阻尼器减振系统对大跨空间网壳结构倒塌的影响

为了研究铅挤压阻尼器减振系统对大跨空间网架结构倒塌的影响，本文参考IDA的分析方法[7-8]，对EL-Centro波的峰值加速度按照一定的比例进行调幅，然后三向输入调幅过的每一条地震波对结构进行时程分析，得到在该地震波作用下结构在倒塌过程中的各状态所对应的临界加速度峰值，其中地震波的调幅基础为620 gal（9度罕遇地震）。对无铅挤压阻尼器减振系统的大跨空间网架结构（布置见表1），通过分析得到该结构在倒塌时刻对应的地震波峰值加速度是3 500 gal，倒塌时刻网架结构与柱子连接的节点失效，结构整体下落，如图6(a)所示。而对于有铅挤压阻尼器减振系统的大跨空间网架结构，铅挤压阻尼器的布置选择布置方式③：混合支撑，数量12个，通过IDA分析发现，当峰值加速度达到6 500 gal时，网架结构周边出现大量的杆件的失效，造成网架结构逐渐向一侧倾斜至倒塌，倒塌情况如图6(b)所示。

由IDA分析可见，铅挤压阻尼器减振系统提高了大跨空间网架结构对地震波破坏作用的抵抗能力，尤其对大跨空间网架结构倒塌临界荷载有明显的提升。通过数据分析，减振系统对网架结构整体倒塌临界荷载提高1.86倍。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a） 无铅挤压阻尼器减振系统网架结构倒塌　　（b） 有铅挤压阻尼器减振系统网架结构倒塌

图6　平板网架结构倒塌对比
Fig.6　Collapse comparison of the lattice structure

3　结论

通过对大跨空间网架结构铅挤压阻尼器减振系统理论分析方法的推导及对该类结构的减振分析，结果表明应用铅挤压阻尼器对大跨空间网架结构进行减振的方式有较明显的减振效果。

1）通过试验和数值分析，铅挤压阻尼器具有良好的滞回耗能能力，滞回环为正方形，说明该阻尼器符合库伦摩擦的假定，耗能能力较强，且出力稳定，是一种优秀的耗能减振装置；

2）通过对3种不同布置位置情况下大跨空间网架结构的减振效果分析，说明应用混合支撑的方式对大跨空间网架结构进行减振较为合理，既可以降低结构的位移时程响应，又可以有效地减小地震波对结构的破坏作用；

3）铅挤压阻尼器减振系统可以明显的提高大跨空间网架结构在巨震下的抗倒塌能力。

参考文献：

[1] 沈世钊. 大跨空间结构理论研究和工程实践[J]. 中国工程科学，2001，3(3)：34-41.

[2] 薛素铎，凌和海. 粘弹性阻尼器在网架结构减震控制中的优化设置[J]. 建筑结构学报，2007，28(4)：51-57.

[3] 李忠献，林伟，丁阳. 多维地震激励下空间结构MR阻尼器半主动控制[J]. 天津大学学报，2007，40(5)：512-518.

[4] 张微敬，钱稼茹，沈顺高，等. 北京A380机库采用粘滞阻尼器的减振控制分析[J]. 建筑结构学报，2009，30(2)：1-7.

[5] ROBINSON W H，GREENBANK L R. An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics，1976，4(3)：251-259.

[6] 杨军，李黎，叶昆. 铅挤压阻尼器的研究[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2006，34(6)：115-117.

[7] ASGARIAN BEHROUZ，SADRINEZHAD AREZOO. Seismic performance evaluation of steel moment resisting frames through incremental dynamic analysis [J]. Journal of Constructional Steel Research，2010，66(2)：178-190.

[8] ZARFAM，PANAM，MOFID MASSOOD. Evaluation of modal incremental dynamic analysis，using input energy intensity and modified bilinear curve [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings，2009，18(5)：573-586.

[9] BEL N HADJ ALI，SMITH I F C. Dynamic behavior and vibration control of a tensegrity structure [J]. International Journal of Solids and Structures，2010，47(9)：1285-1296.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Vibration Control Analysis of Long-span Space Lattice Structure with Lead Extrusion Dampers

Yang Mingfei[1,2], Xu Zhaodong[1], Huang Xinghuai[1]

(1.Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to study vibration control effect of long-span space lattice structure with lead extrusion dampers vibration reducing system, hysteretic energy dissipation characteristics for lead extrusion damper are studied. The results show that lead extrusion damper is an excellent energy dissipation device in which energy dissipation is stable. Based on the finite element software LS-DYNA, long-span space lattice structure model is established, and then, the influences of three different arranging positions of lead extrusion dampers on the effectiveness of the vibration control are investigated, and relatively reasonable position is obtained. Finally, the influences on collapsed critical loads of long-span space lattice structure are also studied under the conditions that lead extrusion dampers are positioned reasonably. It is proved by numerical results that the vibration reducing system of lead extrusion damper is excellent for large-span space lattice structure, and the collapse critical loads of long-span space lattice structure also can be effectively improved by a reasonable arrangement of lead extrusion dampers。

Key words: long-span space lattice structure; hysteretic energy dissipation; lead extrusion damper; time history response; the collapse critical load

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net