

采用开孔式双钢管约束屈曲支撑的 网壳结构减震分析与实验研究

吴 长, 王秀丽, 周 锐

(兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:开孔式双钢管约束屈曲支撑是一种性能良好的耗能减震构件,且适用于网壳结构.利用 ANSYS 有限元分析软件对开孔式双钢管约束屈曲支撑进行了拉压循环荷载作用下的滞回性能的模拟分析.为了验证这种新型约束屈曲支撑替换网壳结构部分杆件后的减震效果,设计制作了球面网壳结构模型,进行了开孔式双钢管约束屈曲支撑替换网壳杆件的振动台试验.在替换杆件不多的情况下,主要测点的动力响应有所减小,说明新型约束屈曲支撑在网壳结构中的减震策略有效、可行.

关键词:约束屈曲支撑;开孔;网壳结构;减震控制;振动台实验

中图分类号:TU352.1;TU312.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)05-0637-07

结构控制研究越来越成为研究热点,以往的研究多集中在多、高层或高耸建筑结构,针对大跨度空间结构的控制研究还不多见^[1].文献[2-3]设置了粘滞阻尼器构件对网壳结构进行了结构控制研究,文献[4]在网壳上设置了多个 TMD 装置,文献[5]在网壳上设置了 ER/MR 杆件对网壳进行了半主动控制.文献[6]对双层柱面网壳采用粘滞阻尼器的减震参数进行了研究,文献[7]对设置了阻尼杆件的双层球面网壳结构施行减振控制研究.

在屋架、网架或网壳中的局部受力不利位置引入约束屈曲支撑,将会改善结构的受力状况,起到提高结构承载力的作用.2002 年日本专利特开 2002-227452 提出约束屈曲支撑也可以用于屋架及网架、网壳等空间结构中^[8].文献[8]对这种支撑改善网格结构的的极限承载力和网壳结构的稳定性进行了研究.

本文根据大跨度网壳的特点,提出用开孔式双钢管约束屈曲支撑替换网壳部分杆件,建立了新型的网壳减震体系.对开孔式双钢管约束屈曲支撑的滞回性能进行了研究,并对 1:10 用开孔式双钢管约束屈曲支撑替换部分杆件的 K6 型球面网壳在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行了振动台试验.理论分析和试验研究表明:开孔式双钢管约束屈曲支撑替换原有部分杆件能有效地减小网壳结构的动力反应,有较好的减震效果.

1 开孔双钢管约束屈曲支撑性能

文献[9]对双钢管约束屈曲支撑的构造及稳定性做了研究,为其在网壳结构中的应用提供了理论依据.但普通双钢管约束屈曲支撑的核心单元一般是由普通钢和低屈服点钢材焊接而成,需要进行端部加强,加工复杂,而且目前也缺乏制作约束屈曲支撑所需的低屈服点钢,不利于推广.开孔式双钢管约束屈曲支撑是对双钢管约束屈曲支撑的改进,其构造如图 1 所示,由内核心钢管、外约束钢管和间隙组成.内核只承受轴向荷载,外核只对内核提供抗侧支撑,内核长度略大于外核长度.

收稿日期:2012-05-07 修改稿日期:2012-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51068019)

作者简介:吴 长(1981-),女,甘肃兰州人,博士研究生,讲师.主要从事大跨度空间结构研究.

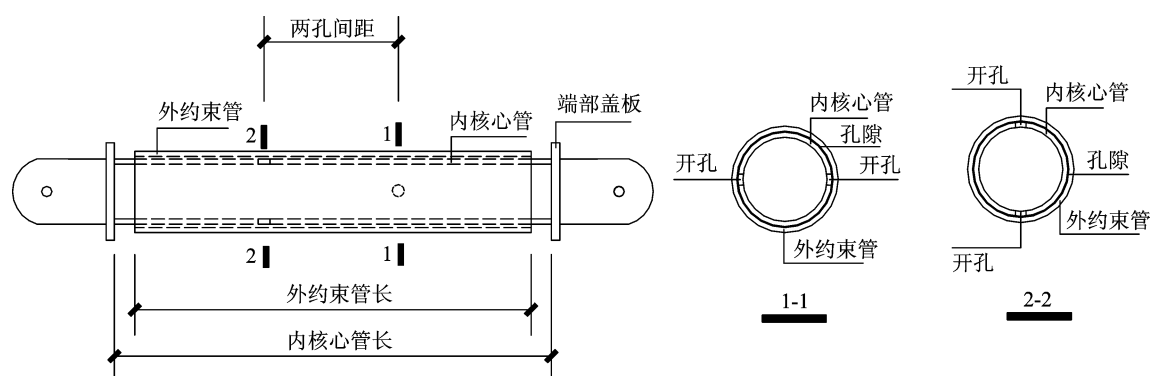


图1 开孔双钢管约束屈曲支撑构造示意图

Fig. 1 Schematic of the structure of perforated double-steel tube BRB

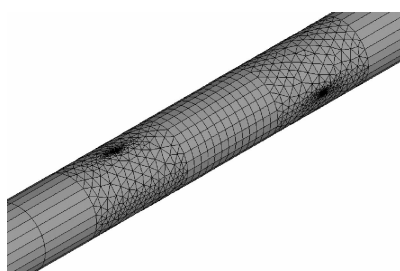


图2 内核心钢管有限元模型

Fig. 2 Finite element of core steel tube

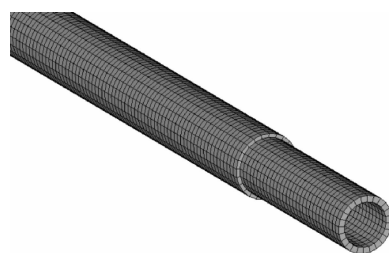


图3 开孔双钢管约束屈曲支撑有限元模型

Fig. 3 Finite element of perforated double-steel tube BRB

1.1 有限元模型

本模型内核支撑以及外包钢管的钢材均选用 Q235 B 钢,内核构件在做滞回分析时采用经典双线性随动强化材料模型,钢材的弹性模量取 $E=2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,切线模量 $E_t=0.03 E$,钢材采用 Von Mises 屈服准则.内核心管的外径为 60 mm,厚度为 3.5 mm,长度为 1 700 mm,外约束管的外径为 74 mm,厚度为 5 mm,长度为 1 400 mm.内核心管与外核心管的空隙为 2 mm,两孔间距为 500 mm,开孔半径 $R=2 \text{ mm}$.内核钢支撑及外包钢管均采用 SOLID45 单元模拟,两者之间设有接触对,采用面接触来模拟内核与套管之间的接触,用 Target170 单元定义目标面,Conta173 单元定义接触面.一般地,处于接触状态的表面具有不互相穿透、能够传递法向压力和切向摩擦力、不传递法向拉力的特点,因此接触表面可以自由地分开并相互远离.在 ANSYS 中,面面之间的摩擦采用库仑摩擦模型,即摩擦因数在求解过程中为常数.库仑摩擦模型定义了一个等效剪应力,一旦剪应力超过此值后,两个表面之间将会产生相互滑动.对于摩擦问题,ANSYS 采用对称求解器来求解.划分网格时,开孔部位对整个分析较为关键,加载时最大应力和最大变形均发生在该区域,因此在靠近开孔部位的地方采用四面体自由网格划分,在离开孔较远的区域使用六面体扫掠网格划分.图 2 和图 3 是支撑的有限元模型图.

1.2 计算结果分析

分析时对支撑一端采用固接约束,另外一端约束住径向轴向加载,加载制度采用美国《钢结构建筑抗震设计规定》所建议的加载历程,采用位移控制^[10].

图 4 和图 5 分别为不开孔和开孔的支撑的荷载—位移滞回曲线,可以看出,在多次循环加载之后,没有发生刚度和强度的退化,滞回性能稳定.试件极限压力 $-P_{\max}$ 和极限拉力 $+P_{\max}$ 均大于屈服荷载 P_y .根据我国《建筑抗震试验方法规程》对于耗能系数的定义,不开孔支撑的耗能系数为 2.35,开孔支撑的耗能系数为 2.71,略高于不开孔的支撑.

图 6 和图 7 是支撑的拉压轴向变形与轴力的骨架曲线.该曲线可以分为两阶段,第一阶段为弹性阶段,第二阶段为塑性阶段,支撑的恢复力模型可用双线性模型(如图 8)来描述.

内核心管开孔后使支撑提前屈服,开孔支撑受压至 115 kN 左右时就开始发生屈服,而不开孔支撑受压达到 126 kN 左右才开始发生屈服。

对比两个支撑的承载力,开孔后并没有降低,说明内核心管与外约束管留有间隙的支撑其内核心管合理开孔后并不会降低支撑的承载力。

从以上分析可以看出,开孔双钢管约束屈曲支撑具有稳定的耗能能力,开孔后支撑的承载力没有降低,构造简单,可解决双钢管约束屈曲支撑的缺点,适用于网壳结构。

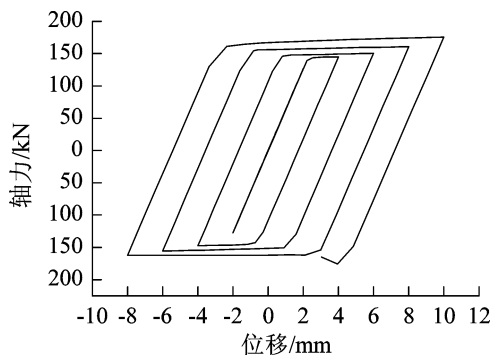


图4 双钢管支撑(BRB-1)滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curve of double-steel tube BRB

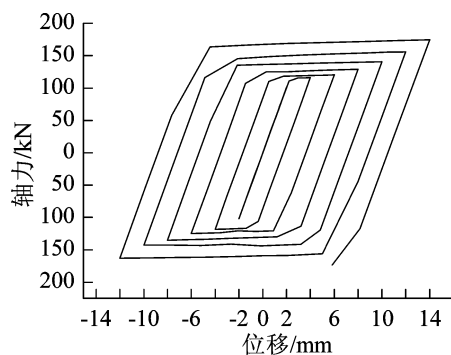


图5 开孔双钢管支撑(BRB-2)滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curve of perforated double-steel tube BRB

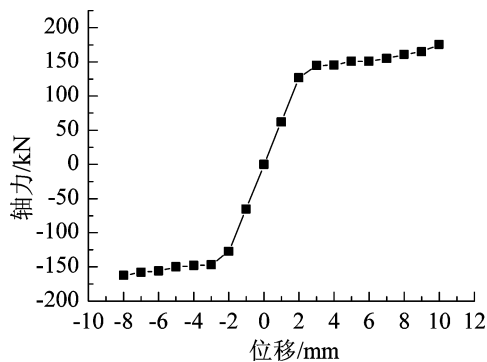


图6 双钢管支撑荷载位移骨架曲线

Fig. 6 Back-bone curve of double-steel tube BRB

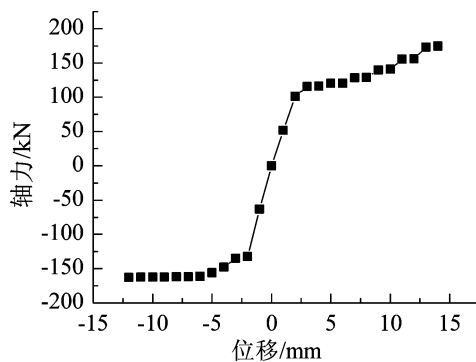


图7 开孔双钢管支撑荷载位移骨架曲线

Fig. 7 Back-bone curve of perforated double-steel tube BRB

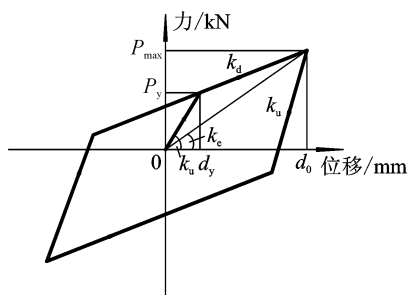


图8 双线性模型

Fig. 8 Bilinear model

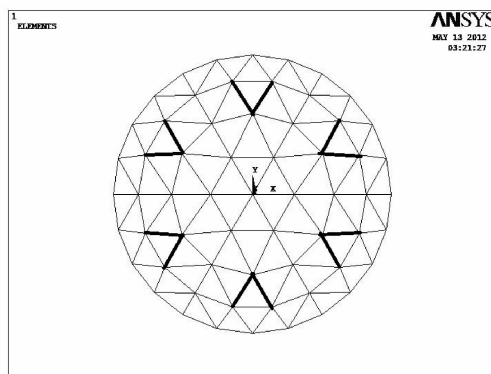


图9 约束屈曲支撑布置方式

Fig. 9 Arrangement modes of BRBs

2 网壳结构振动台试验

2.1 试验模型

试验原型为一个跨度为 30 m、矢高为 9 m 的 K6 型落地球面网壳,按照 1:10 的比例进行缩尺。

考虑振动台台面尺寸以及原型结构尺寸等综合因素,长度相似常数 S_l 取 1/10;在本模型中,考虑用现行规格的钢管模拟原型结构的杆件,也即弹性模量及材料密度与原型结构相同,弹性模量相似常数 $S_E=1$;由于振动台实际参数限制,台面输入加速度相似常数 S_a 取 2.5.

模型结构按照相似比设计进行缩尺,跨度为 3 m,球壳矢径为 2 m,矢跨比为 0.3,网壳分割频数为 4 环,所有杆件 $\varphi 6 \times 1.0$ 规格无缝圆钢管.

约束屈曲支撑布置方式经过大量有限元分析为最佳布置方案,如图 10 所示.

整个 BRB 管分为内外两管,外管约束内管屈曲,内管在中间核心段有规律削弱后,整个内管的屈服强度降低,在地震作用下的拉压往复运动中消耗能量,以达到消能减震效果. BRB 杆件采用双钢管型支撑,核心管采用与其他杆件一样的 $\varphi 6 \times 1.0$ 无缝圆钢管,核心管内开孔以削弱,外套管采用 $\varphi 12 \times 1.5$ 的铝合金管做为约束,如图 11 所示.

模型底座为全钢结构,由 24 段 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 方钢管拼接而成,并在落地球壳最外环(第 4 环)的 24 个节点下方通过钢管焊接为一体. 模型结构拟采用球节点模拟集中质量,球采用直径为 15 cm 的实心钢球模拟,节点质量 14 kg.

同时在底座相应位置设置连接件用以连接底座与振动台台面,并开孔设置吊钩以满足模型转运吊装需求. 振动台现场试验如图 10,

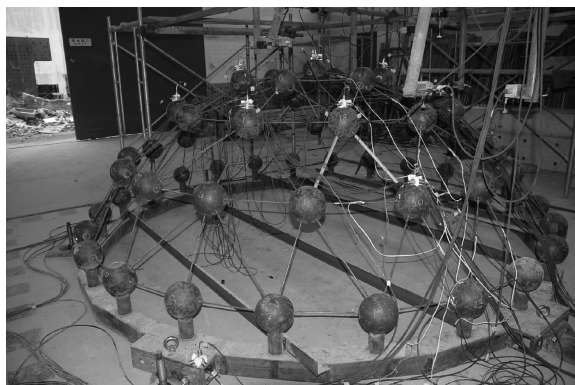


图 10 网壳模型在振动台上

Fig. 10 Reticulated shell model on the shaking table

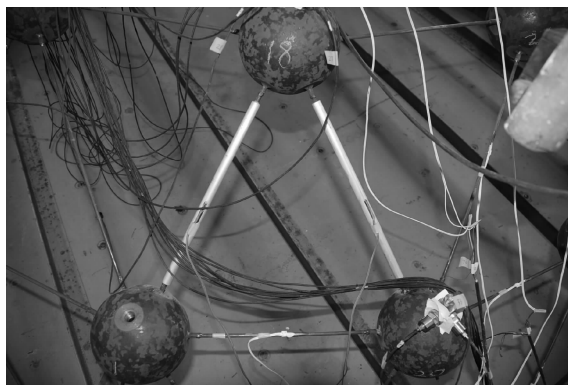


图 11 开孔双钢管约束屈曲支撑

Fig. 11 Perforated double-steel tube BRB

2.2 测点布置

实验主要测试模型结构的动力特性,所需要的测点数据为:加速度响应、位移响应以及杆件轴向应力响应. 由于振动台实验通道数量限制以及台面安装环境限制,位移测点如图 12 所示.

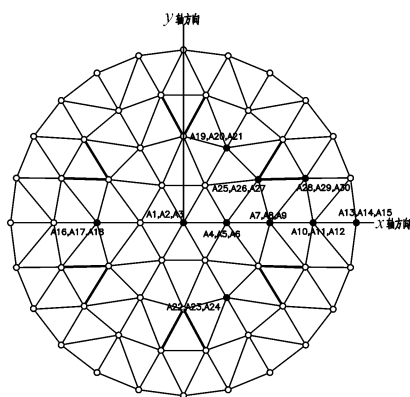


图 12 位移测点位置

Fig. 12 Locations of displacement measuring points

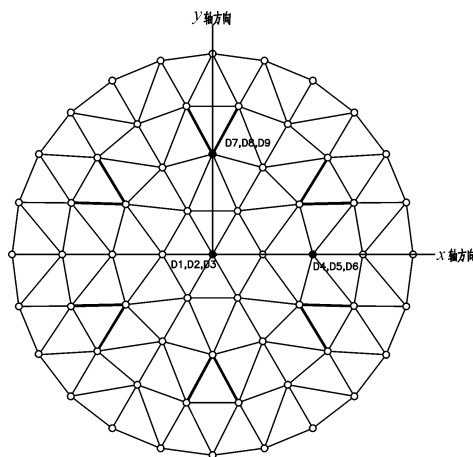


图 13 加速度测点位置

Fig. 13 Locations of acceleration measuring points

加速度传感器布置在网壳主肋杆件上, X 、 Y 、 Z 三方向要分别设置一个加速度传感器, 以监测该处在各种工况下的加速度变化情况. 加速度传感器测点位置如图 13 所示:

应变片在模型上布置 18 个($S1 \sim S18$), 应变片布置在选取的杆件中部, 具体点位布置见图 14, 以监测该杆件在各种工况下的应力变化情况.

2.3 减震控制试验

实验选用 El-Centro 波、Taft 波和 Pasadena 波作为振动台面激励, 并根据不同设防要求, 输入地震波加速度幅值由小到大依次增大. 该网壳结构进行了全跨荷载的 21 种工况和半跨荷载的几种工况, 详细工况由于篇幅不再列出.

在实验加载工况中, 每个工况前会对模型结构进行白噪声扫频, 以此得到此刻模型结构的自振频率. 以模拟多遇到罕遇多种不同水准地震作用. 结构原型输入地震波持时为 15 s, 但按相似条件, 对模型结构的输入地震波时间历程压缩 3.162 倍. 三向输入地震动加速度幅值之比取: 1.00(水平 X 向): 0.85(水平 Y 向): 0.65(竖向 Z). 输入的地震波的加速度幅值分别为 0.25 g、0.50 g、1.0 g、1.5 g, 每对应一个加速度幅值, 依次双向输入 El-Centro 波、三向 El-Centro 波、三向 Taft 波和三向 Pasadena 波.

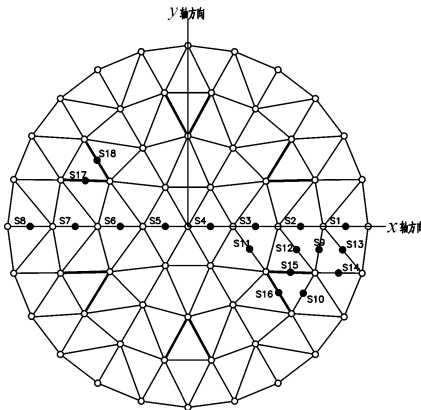


图 14 应变片测点位置

Fig. 14 Locations of strain measuring points

3 理论分析与实验结果对比

3.1 自振特性对比

前 10 阶自振频率计算和实测值的对比如表 1. 由表 1 可见, 网壳加工模型与实际计算模型的基频非常接近, 第 1 阶至第 2 阶自振频率差别较小, 说明网壳模型基本上与计算模型相符.

3.2 位移峰值对比

从图 15~图 17 中可看出: 随着地震动加速度幅值从 0.25 增加到 1.5 g, 顶点的位移峰值不断增大, 实验结果中, 当地震动加速度幅值到达 1.0 g 时, 三个方向的位移峰值的增加幅值明显大于计算结果, 这是由于计算模型在进行多工况逐级加载时, 并未考虑结构损伤积累, 同时也没有考虑残余应力、支座偏移等初始缺陷, 使得有限元模型较为理想. 最后, 两个模型中的测点处的位移峰值响应基本趋同变化, 符合预期变化规律, 也证明了振动台模型结构在动力响应相似上较为理想.

3.3 加速度峰值对比

引入有约束屈曲支撑的节点加速度峰值 (实验结果) 和无约束屈曲支撑的节点加速度峰值之比 β 来表示获得的减震效果, 称为减震系数, 见表 1, 表中 AX 、 AY 、 AZ 表示加速度响应峰值.

表 2 给出了 El Centro 波下网壳结构顶点的加速度峰值减震系数, 可以看出: 随着地震动加速度幅值从 0.25 g 到 1.5 g, 顶点的加速度峰值不断增大, 替换支撑后的网壳结构顶点的加速度峰值明显减小, 当地震动加速度幅值较小时, 减小的效果并不明显, Y 向加速度峰值还有增大, 当地震动加速度幅值达到 1.5 g 时, 减震效果非常明显, 说明约束屈曲支撑只有在大震

表 1 实验与有限元模型自振频率对比/Hz
Tab. 1 Comparison of natural frequency between test model and finite element model/Hz

阶数	实验结果	计算结果	误差/%
1	3.616	3.890	7.577
2	3.665	3.890	6.139
3	3.958	4.525	14.325
4	4.007	4.525	12.927
5	4.007	4.539	13.277
6	4.251	4.609	8.422
7	4.593	4.634	0.893
8	4.642	4.634	-0.172
9	4.984	4.649	-6.722
10	4.984	4.649	-6.722

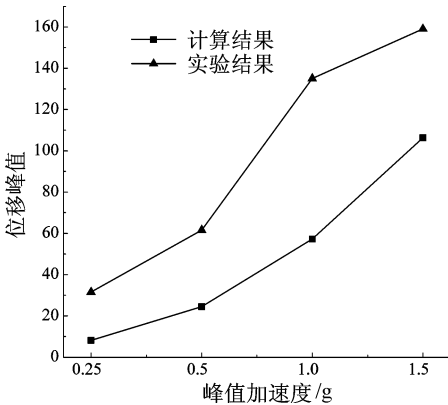


图 15 EI-Centro 波作用下
顶点 X 向最大位移

Fig. 15 Maximum displacement of lattice vertex under El Centro wave(X)

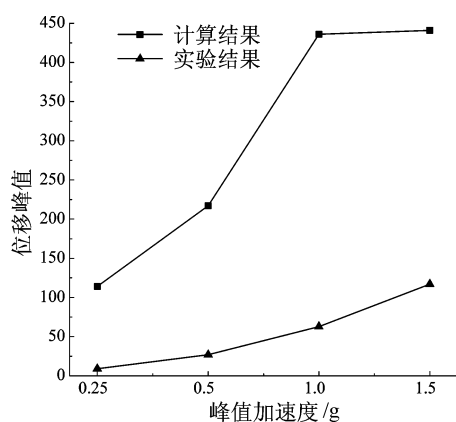


图 16 EI-Centro 波作用下顶点 Y 向最大位移

Fig. 16 Maximum displacement of lattice vertex under El centro wave(Y)

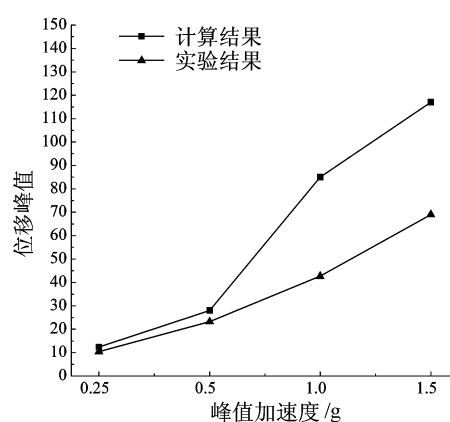


图 17 EI-Centro 波作用下顶点 Z 向最大位移

Fig. 17 Maximum displacement of lattice vertex under El centro wave(Z)

及强震作用下才能发挥作用,支撑率先进入耗能状态,耗散地震输入的大部分能量,迅速衰减结构的动力反应(位移、速度、加速度等).此外,Z向的减震效果明显好于X向的减震效果,说明此种支撑布置的方式对Z向的加速度峰值有较好的减震效果.

表 2 EI Centro 波作用下顶点的加速度峰值减震系数

Tab. 2 Peak acceleration damping coefficient of lattice vertex under El Centro wave

峰值加速度	AX/ ms^{-2}		$\beta/\%$	AY/ ms^{-2}		$\beta/\%$	AZ/ ms^{-2}		$\beta/\%$
	计算结果	实验结果		计算结果	实验结果		计算结果	实验结果	
0.25g	5.4	5.2	96.3	6.4	6.88	107.5	12.2	3.56	29.2
0.5g	10.9	10	91.7	13	12.1	93.1	22.6	5.6	24.8
1.0g	21.8	21.2	97.3	26.6	19.4	72.9	45	15.4	34.2
1.5g	32.8	23	71.8	40.7	20.1	49.4	68.5	13.8	20.1

4 结 论

通过以上分析,可以得到以下结论:

(1)开孔双钢管约束屈曲支撑,具有良好的耗能性能,具有质量轻、连接方便、刚度高等优点,适用于网壳结构.

(2)采用开孔式双钢管约束屈曲支撑对网壳结构有一定的减震效果.在替换杆件不多的情况下,减震效果即可达20%~90%.这意味着将约束屈曲支撑用在网壳结构上,会有显著地经济效益.

(3)网壳在同一地震波不同加速度峰值下的减震控制效果有显著不同.加速度峰值越大,减震效果越好.因为在较大的地震加速度峰值下约束屈曲支撑更能充分耗能,发挥减震作用.

(4)约束屈曲支撑在大跨度空间结构特别是网壳结构中的应用通过实验模拟证明是能够起到一定减震耗能效果的.

参考文献 References

- [1] 秦乃兵,张毅刚,茹 洋.采用新型阻尼杆的双层柱面网壳结构减震分析与试验研究[J].建筑结构学报,2005,26(6):108-113.
QIN Nai-bing, ZHANG Yi-gang, RU Yang. Shaking table experimental study on earthquake resistance control of double-layer latticed cylindrical shell with new type damper element[J]. Journal of building structures, 2005, 26(6): 108-113.
- [2] 范 峰,沈世钊.单层柱面网壳的粘滞阻尼器减震分析[J].世界地震工程,2003,19(2):28-29.

- FAN Feng, SHEN Shi-zhao. Vibration reduction analysis of viscous damper on single-layer reticulated vaults[J]. World Earthquake Engineering, 2003,19(2):28-29.
- [3] 张 凯. 钢网壳结构采用粘滞阻尼器的动力稳定性控制分析[D]. 上海:同济大学,2009.
- ZHANG Kai. The dynamical stability control of reticulated shell with viscous dampers [D]. Shanghai: Tongji University,2009.
- [4] 叶继红,陈月明,沈世钊. TMD 减震系统在网壳结构中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2000,33(5):10-14.
- YE Ji-hong, CHEN Yue-ming, SHEN Shi-zhao. The present situation of seismic vibration control of reticulated shell structures using TMD system[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture,2000,33(5):10-14.
- [5] 瞿伟廉,徐幼麟. ER/MR 智能阻尼器对空间网壳结构地震反应的半主动控制[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(4):24-31.
- QU Wei-lian, XU You-lin. Semi-active control for earthquake responses of reticulated shells with ER / MR smart dampers[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2001,21(4):24-31.
- [6] 朱礼敏,钱基宏,张维岳. 双层柱面网壳采用粘滞阻尼器的减震参数分析[J]. 建筑结构学报,2007,28(4):24-31.
- ZHU Li-min, QIAN Ji-hong, ZHANG Wei-yue. Parameter analysis of vibration reduction of double-layer cylindrical latticed shell with viscous dampers[J]. Journal of building structures, 2007,28(4):24-31.
- [7] 杨 颀,李友明,何 政. 双层球面网壳结构的阻尼替代杆件减振控制研究[J]. 世界地震工程,2011,21(7):83-89.
- YANG Yang, LI You-ming, HE Zheng. Vibration control analysis of a double-layer spherical latticed shell with replaced bar-type dampers [J]. World Earthquake Engineering, 2011,21(7):83-89.
- [8] 哈敏强. 普通和新型抑制屈曲支撑的力学性能及其应用研究[D]. 上海:同济大学,2004.
- HA Min-qiang. Study on the mechanical performances and applications of conventional and innovative Buckling Restrained Braces[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [9] 余绍锋,郑维科,邓长根. 新型抑制屈曲支撑构造及稳定性研究[J]. 结构工程师,2008,24(3):55-59.
- YU Shao-feng, ZHENG Wei-ke, DENG Chang-gen. Research on Construction and Stability of a New-Style BRB [J]. Structural Engineers,2008,24(3):55-59.
- [10] ANSI /SISC 345-05. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. American Institute of Steel Construction, 2005:84-87.

Shaking table experimental study on vibration control of reticulated Shell with perforating double-steel tube buckling-restrained braces

WU Chang, WANG Xiu-li, ZHOU Kun

(College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The perforating double-steel tube buckling-restrained braces(BRBs) is an energy damping device, which can be suitable for space structure as a novel device of good performance. Based on the ANSYS software, the hysteretic curve of the perforating double-steel tube buckling-restrained brace through the simulation of the cyclic-loading test is obtained. In order to test the vibration reduction effect of the reticulated Shell with several elements replaced by the perforating double-steel tube the vibration test of a reticulated Shell model with several elements replaced by the BRBs was carried out on the shaking table. The result shows that the seismic response of shell with Buckling Restrained Braces decrease, and that this study is valuable for further research and practical application for the vibration control of reticulated shell.

Key words: buckling-restrained brace; perforating; reticulated Shell; vibration control; shaking table test