

铅阻尼器对网壳结构地震倒塌影响分析

杨明飞^{1,2}, 徐赵东²

(1 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 综合考虑网壳结构杆件的失稳与失效, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立网壳结构的数值模型, 分析判定了网壳结构在强震作用下的倒塌破坏模式, 包括动力强度破坏、动力失稳破坏和综合破坏三个类型。接着将铅阻尼器以能量等效的原则加入到网壳结构中, 在三条不同地震波激励的情况下, 分析了铅阻尼器减振系统对网壳结构倒塌模式的影响。结果证实: 加入铅阻尼器减振系统之后, 网壳结构的倒塌临界荷载被提高了 1.11 倍, 同时网壳结构中的屈服杆件比例提高了 3.29 倍, 与未加铅阻尼器减振系统的情况相比, 网壳结构更倾向于发生动力强度破坏。

关键词: 网壳结构; 铅阻尼器; 倒塌模式; 能量等效原则; 动力强度破坏

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0224-05

Failure mode and effects analysis on reticulated shell with lead damper under seismic excitations

YANG Mingfei^{1,2}, Xu Zhaodong²

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

Abstract: The numerical model of reticulated shell is constructed by ANSYS/LS-DYNA software, in which both the failure and instability of the member of the structure are considered. The collapse mode of reticulated shell under strong earthquakes is obtained from analysis, including dynamic strength failure and dynamic instability failure and complex failure due to the above two factors. Subsequently, the seismic responses of reticulated shell with lead damper system under three different earthquakes are analyzed, in which the lead dampers are embedded into the structure based on energy equivalence principle. It can be concluded that the critical load of collapsed of the structure under strong earthquakes is increased by 1.11 times, and the ratio of yield member is increased by 3.29 times. The structure with lead damper system tends to be damaged in the form of dynamic strength failure compared with the structure without lead damper system.

Key words: reticulated shell; lead damper; collapse mode; energy equivalence principle; dynamic strength failure

大跨度和超大跨度建筑物及作为其核心的空间结构技术的发展状况已成为代表一个国家建筑科技水平的重要标志之一。对网壳结构设计来说, 随着网壳跨度的逐步增大, 深入研究其抗震性能则具有重要意义, 尤其在强震作用下网壳结构的倒塌模式和破坏机理等^[1-2]。而加入减振控制系统是降低网壳结构在强震下振动的重要手段, 随着网壳结构振动控制工作的普遍开展, 控制系统对网壳结构倒塌模式的影响如何值得深入研究。

文献[3-4]将粘滞阻尼器减振系统加入到单层网壳和柱壳结构中进行了数值分析和试验研究, 结果证实粘滞阻尼器减振系统对该类型的结构具有较好的减震效果, 同时能够提高结构的抗倒塌能力。文献[5-7]总结了大跨网壳结构的减震控制研究现状, 对已经应用的减振系统进行分析, 提出了对该类型结构进行减震控制时需要解决的若干问题。文献[8-9]分别研究了大跨网壳、网架结构的倒

塌模式, 并利用 ANSYS/LS-DYNA 对典型大跨网架、网壳结构进行了倒塌全过程模拟, 得出了各项倒塌指标。文献[10]将多维隔震支座加入到大跨网架结构中, 结果表明, 大跨网架结构的倒塌临界荷载被显著提高。这些研究为大跨网架结构的减振及抗倒塌研究奠定了基础。

本文以施威德勒网壳结构为例, 对加与未加铅阻尼器减振系统的网壳倒塌进行了数值模拟, 从不同的指标入手, 对比分析了强震作用下减振系统对网壳结构倒塌模式的影响, 为其工程应用提供了参考。

1 网壳结构的倒塌模式

网壳结构倒塌是一个动态连续的过程, 从杆件的角度来说可能同时存在着失稳和失效的问题, 因此为了准确得到其倒塌破坏模式, 在研究过程中本文综合考虑杆件的失稳与失效, 对结构进行了数值

收稿日期: 2014-09-24

修改稿日期: 2015-04-13

基金项目: 住房城乡建设部科技项目 (2012-k2-39); 安徽理工大学人才引进基金项目 (ZY044)

作者简介: 杨明飞 (1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事防灾减灾工程与防护工程方面研究。E-mail: yangmf_aust@163.com

分析.

1.1 模型建立

以施威德勒网壳作为代表进行研究. 其中, 结构的矢跨比分别为 1/3、1/4、1/5 和 1/6, 利用 ANSYS/LS-DYNA 建立的结构数值模型如图 1-1 所示. 网壳结构的杆件尺寸见表 1.1. 为保证网壳结构“薄膜内力”有效传递, 结构周边采用钢筋混凝土环梁对壳体进行约束, 下部采用钢柱进行支撑, 柱子上端铰接在网壳的所有周边节点上, 下端固结于地面 (图中最下端的结构代表刚性地面, 地面使用 Solid164 单元模拟), 同时为了保证网壳下部结构的刚度, 在钢柱之间采用钢管进行交叉支撑. 其中环梁截面为 600 mm×600 mm, 钢柱子截面 Φ350×16 mm 和钢支撑截面 Φ150×8 mm, 环梁的混凝土采用 C30, 壳体表面布置均布荷载 2kN/m², 网壳结构所有钢材选用 Q235. 其中, 梁、柱、支撑和结构杆件使用 Beam161 单元模拟. 网壳结构杆件的材料模型采用塑性随动强化模型, 这种模型的优势就是可以考虑应变失效 (本文失效应变采用 0.02), 通过在 0 (仅随动强化) 或 1 (仅各向同性强化) 间调整参数 β 来选择各向同性或随动强化, 应变率使用 Cowper-Symonds 模型来导出, 其屈服应力为:

$$\sigma_r = [1 + (\dot{\epsilon}/C)^{1/P}] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (1)$$

式中: σ_0 是初始屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 是应变率; C 和 P 是应变参数; β 是硬化参数; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变; E_p 是塑性硬化模量, 可记为:

$$E_p = (E_{tan} E) / (E - E_{tan}) \quad (2)$$

式中: E 是材料的弹性模量; E_{tan} 是材料的切线模量.

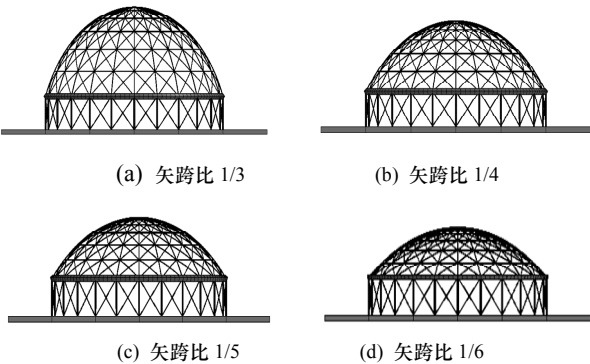


图 1 网壳结构数值模型
Fig.1 The numerical model of reticulated shell structure

表 1 网壳结构杆件布置
Tab.1 The structural layout of reticulated shell structure

径向主肋 /mm×mm	环向副肋 /mm×mm	其余杆件 /mm×mm	跨度 /m
Φ150×5	Φ120×5	Φ100×5	40

1.2 网壳结构倒塌模式数值结果

在地震动三维输入条件下, 利用 IDA 的分析方法, 通过数值模拟得出了典型的施威德勒网壳结构倒塌模式. 其中, 动力强度破坏类型和动力失稳破坏类型分别如图 2 (矢跨比为 1/5, 峰值加速度 2 200 gal 的 Taft 波作用) 和图 3 (矢跨比为 1/3, 峰值加速度 1 800 gal 的 Elcentro 波作用) 所示.

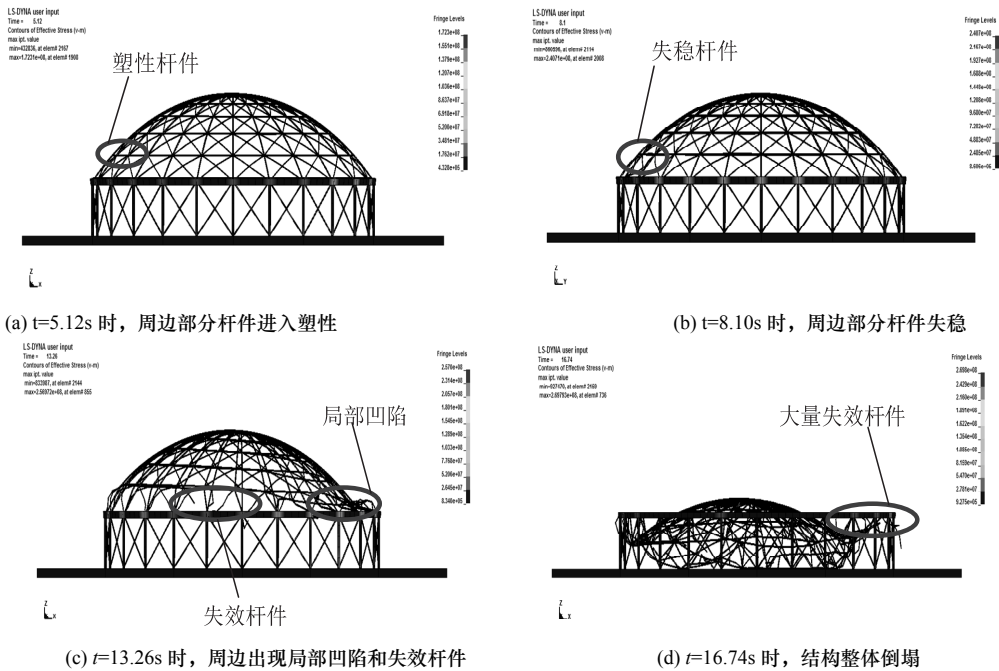


图 2 动力强度破坏类型
Fig.2 Dynamic strength failure

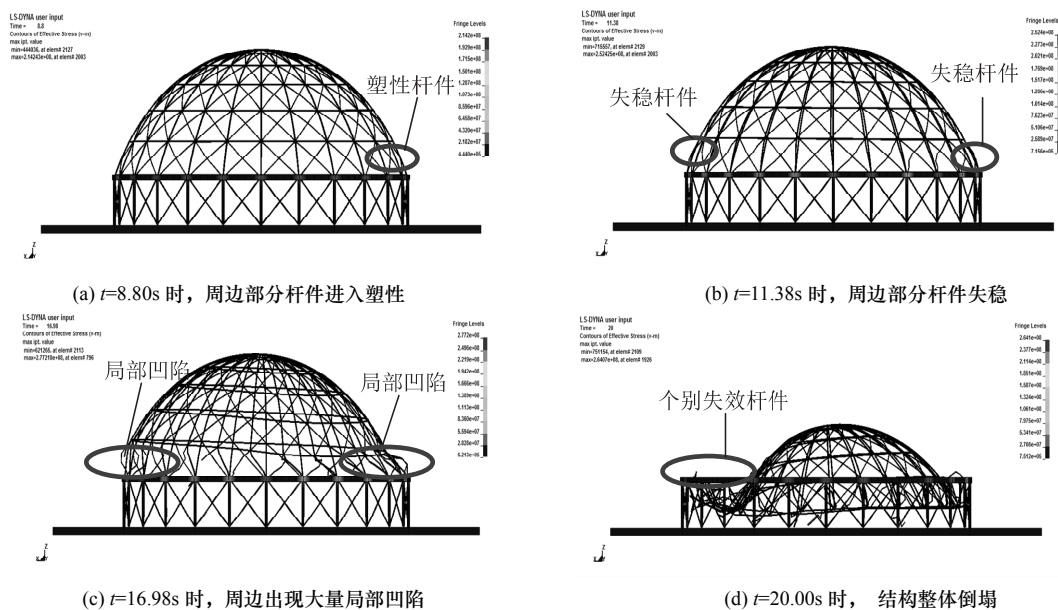


图3 动力失稳破坏类型
Fig.3 Dynamic instability failure

从图2和3可以看出,对于不同的破坏类型而言,网壳结构的破坏基本从周边杆件及节点处开始.尤其位于环梁上的支座节点受力较大,但是在地震波作用于结构的初期,支座处节点并未发生屈服,结构基本处于弹性工作状态.随着地震波加速度峰值的逐渐增大,网壳结构周边个别杆件在节点的位置开始出现屈服现象,但并未影响网壳结构“薄膜内力”的传递,结构仍然保持其稳定状态,如图2(a)和3(a)所示.随着地震波的持续输入,网壳结构周边出现的塑性杆件数量逐渐增多,随后部分杆件在轴向压力的作用下出现了弯曲失稳,结构的振动也较之前有明显的加剧,如图2(b)和3(b)所示,但是此时网壳结构中尚未出现杆件的失效现象.当地震波的加速度到达其峰值附近的时候,在某些网壳结构中开始有杆件失效现象(由于杆件的塑性应变达到了失效应变),如图2(c)所示.由于杆件的失效造成结构稳定状态发生改变同时也影响了其“薄膜内力”的传递,尤其是结构中径向主肋杆的失效,对结构的稳定性影响较大.在经历较长时间的塑性发展之后,网壳结构发生了动力强度破坏,如图2(d)所示.但是对于某些网壳结构来说,当结构周边出现大量的失稳杆件之后并没有发生杆件失效现象,而是失稳杆件的数量急剧增多,其主要集中在第一、二排(由外环向内环)区域,这直接导致了结构的某个局部瞬时失去了抵抗能力,出现局部的凹陷现象,如图3(c)所示.随着局部凹陷的迅速扩展,网壳结构在较短时间内发生了动力失稳破坏,如图3(d)所示.但是有还有一些网壳结构在

倒塌的过程中,塑性发展也不深入,失稳杆件数量介于动力强度破坏和动力失稳破坏之间,称之为综合破坏类型.

2 加入铅阻尼器后网壳结构倒塌模式

近几年,8度及以上的地震频发,尤其日本2011年3月11日在东北海域发生的9度强震,实测地震加速度峰值接近3000 gal,结构在强震下的倒塌必将成为今后结构研究方面的热点问题之一.为了研究铅阻尼器减振系统对网壳结构倒塌模式的影响,文中以能量相等为原则,将铅阻尼器减振系统加入到施威德勒网壳结构当中,对附加铅阻尼器减振系统的网壳结构进行了倒塌分析.

2.1 铅阻尼器的等效

鉴于铅阻尼器的力学特性,其存在初始刚度 K ,当阻尼器达不到初始刚度的时候,其充当支撑杆件的作用,而当阻尼器达到初始刚度时,其刚度 K 变为零,其作用类似于粘滞阻尼器.由此本文将其等效为粘滞阻尼器的形式加入到网壳结构当中进行倒塌分析.其出力等效为:

$$F_{Le} = C\dot{x} \quad (3)$$

等效粘滞阻尼器的滞回曲线为:

$$\left(\frac{x}{x_0}\right)^2 + \left(\frac{F_{Le}}{Cwx_0}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

由能量等效原理:

$$S_{Le} = \pi Cwx_0^2 = E_{Le} \quad (5)$$

式中: S_{Le} 为铅阻尼器等效的滞回面积; E_{Le} 为一圈铅阻尼器滞回曲线的耗能,可由试验测试得到;

C 为铅阻尼器等效的阻尼系数.

假定在强震下铅阻尼器发生 0.1 m 的相对位移时阻尼器发生失效,即失效位移 $x_0 = 0.1\text{ m}$.同时,铅阻尼器的耗能为 $E_{Le} = 4F_{Le}x_0 = 2 \times 10^4\text{ J}$. 铅阻尼器的最高频率取为 1Hz,可以推出其阻尼器系数 $C = 1 \times 10^5\text{ N/m/s} = 100\text{ kN/m/s}$.

将铅阻尼器等效为粘滞阻尼器加入到网壳结构中. 其中,阻尼器的两端分别铰接在网壳结构的节点,同时为了不让网壳结构产生局部刚度突变,改变薄膜内力的传递路径,因此沿网壳结构的周边环向均匀布置铅阻尼器,如图 4 所示.

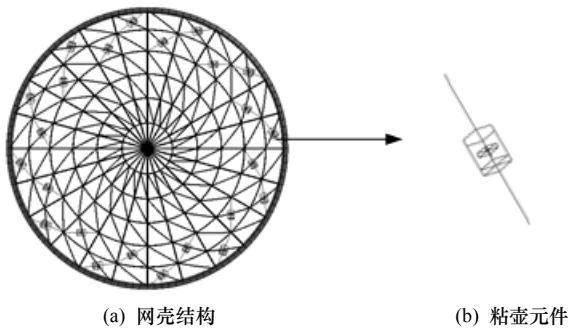


图 4 铅阻尼器布置图
Fig.4 Lead damper layout

表 3 网壳结构中屈服杆件比例 (%) 和失效杆件统计
Tab.3 The yield bar ratios (%) and failure bar statistics

矢跨比	Elcentro 波			Taft 波			人工波		
	失效杆件数量	屈服杆件比例	破坏类型	失效杆件数量	屈服杆件比例	破坏类型	失效杆件数量	屈服杆件比例	破坏类型
1/3	4(2)	6.5(3.6)	失稳破坏	0(0)	13.3(3.1)	综合破坏	2(0)	24.2(14.6)	强度破坏
1/5	6(6)	41.4(29.2)	强度破坏	1(1)	29.0(30.0)	强度破坏	7(0)	34.9(15.6)	强度破坏

注: 括号内为无铅阻尼器减振系统情况下网壳结构中屈服杆件比例和失效杆件数量统计情况.

同时可以看出,有无铅阻尼器减振系统,网壳结构的倒塌临界荷载均随着结构矢跨比的增加而减小. 铅阻尼器减振系统的加入并未影响网壳结构倒塌临界荷载随结构矢跨比的变化规律.

由表 3 可知: 通过与无铅阻尼器减振系统情况下屈服和失效杆件比例对比,矢跨比为 1/3 时,在 Elcentro 波的作用下,网壳结构的屈服杆件比例提高了 0.81 倍;在 Taft 波的作用下,网壳结构的屈服杆件比例提高了 3.29 倍;在人工波的作用下,网壳结构的倒塌临界荷载提高了 0.68 倍. 矢跨比为 1/5 时,在 Elcentro 波的作用下,网壳结构的屈服杆件比例提高了 0.42 倍;在 Taft 波的作用下,网壳结构的屈服杆件基本与未加铅阻尼器减振系统情况下持平;在人工波的作用下,网壳结构的屈服杆件比例提高了 1.24 倍,同时失效杆件的数量基本保持不变.

2.2 铅阻尼器减振系统对网壳结构倒塌的影响分析

在分析的过程中,选择了两种矢跨比的施威德勒网壳结构为例,其中矢跨比分别为 1/3 和 1/5. 加入铅阻尼器减振系统之后,网壳结构的倒塌临界荷载见表 2,失效杆件数量和屈服杆件比例统计见表 3.

表 2 网壳结构倒塌临界荷载 (gal)
Tab.2 The collapse critical loads of reticulated shell structure (gal)

矢跨比	Elcentro 波	Taft 波	人工波
1/3	3 800(1 800)	3 800(1 800)	4 800(2 300)
1/5	4 600(2 400)	4 400(2 200)	6 800(3 400)

注: 括号内为无铅阻尼器减振系统情况下网壳结构的倒塌临界荷载.

由表 2 可知: 通过与无铅阻尼器减振系统情况下倒塌临界荷载对比,矢跨比为 1/3 时,在 Elcentro 波和 Taft 波作用下,网壳结构的倒塌临界荷载分别提高了 1.11 倍;在人工波的作用下,网壳结构的倒塌临界荷载提高了 1.09 倍. 矢跨比为 1/5 时,在 Elcentro 波作用下,网壳结构的倒塌临界荷载提高了 0.92 倍;在 Taft 波和人工波的作用下,网壳结构的倒塌临界荷载分别提高了 1.0 倍.

在不同矢跨比情况下,网壳结构加入铅阻尼器减振系统后,屈服杆件比例均得到了较大幅度的提高,但是在结构倒塌的瞬时,失效杆件数量增加不多.

加与未加铅阻尼器减振系统情况下,网壳结构的倒塌情况如图 5 所示.

从图 5 可以看出,加与未加铅阻尼器减振系统的情况下,网壳结构破坏的位置明显不同. 未加铅阻尼器减振系统情况下,破坏位置在周边两排杆件区域;加铅阻尼器减振系统情况下,由于阻尼器的加强作用,破坏的位置在靠近顶部的局部区域. 同时,铅阻尼器减振系统明显地提高了网壳结构对地震波破坏作用的抵抗能力,尤其对矢跨比较大网壳结构的倒塌临界荷载有明显的提升,最高幅度达到 1.11 倍. 主要原因是由于铅阻尼器消耗了大量的地

震能量,同时也对网壳结构易失稳的区域起到了支撑的作用,增加了结构的整体性.屈服杆件的数量

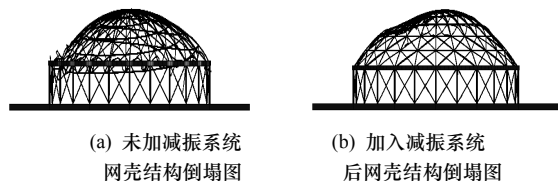


图5 网壳结构倒塌对比

Fig.5 The comparison of reticulated shell structure collapse

3 结论

将铅阻尼器减振系统加入到不同矢跨比的网壳结构中,对其进行了理论和数值分析,得出以下结论:

(1) 网壳结构的倒塌过程分为:动力强度破坏、动力失稳破坏和综合破坏类型;

(2) 铅阻尼器减振系统可以明显地提高网壳结构在强震下的抗倒塌能力,倒塌临界荷载提高了1.11倍;

(3) 加入铅阻尼器减振系统之后,屈服杆件的比例明显增加,网壳结构更倾向于发生动力强度破坏.

参考文献 References

- [1] 沈世钊, 支旭东. 球面网壳结构在强震下的失效机理[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 11-20.
SHEN Shizhao, ZHI Xudong. Failure mechanism of reticular shells subjected to dynamic actions [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 11-20.
- [2] 陈应波, 陈军明, 吴代华. 网壳结构在地震作用下的动力稳定研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(10): 40-42.
CHEN Yingbo, CHEN Junming, WU Daihua. Dynamic stability of reticulated shell under earthquake excitation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2004, 32(10): 40-42.
- [3] 范峰, 沈世钊. 网壳结构的粘滞阻尼减振分析与试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 105-111.
FAN Fang, SHEN Shizhao. Vibration reducing analysis and experimental study of viscous damper on reticulated shells [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(1): 105-111.
- [4] 张微敬, 钱稼茹, 沈顺高, 等. 北京 A380 机库采用粘滞

明显增加, 由于多数杆件产生了屈服从而导致网壳结构更多出现了动力强度破坏.

阻尼器的减振控制分析[J]. 建筑结构学报, 2007, 30(2): 1-7.

ZHANG Weijing, Qian Jiaru, SHEN Shungao, et al. Vibration reduction analyses of Beijing A380 hangar structure with viscous dampers [J]. Journal of Building Structures, 2007, 30(2): 1-7.

[5] 徐赵东, 李爱群, 叶继红. 大跨空间网壳结构减震控制的研究与发展[J]. 振动与冲击, 2005, 24(3): 59-61.

XU Zhaodong, LI Aiqun, Ye Jihong. Study and development on earthquake mitigation control of long-span spatial reticulated shell structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(3): 59-61.

[6] 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 Jihong, CHEN Mingyue, SHEN Shizhao. 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.

[7] 朱礼敏, 钱基宏, 张维. 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): 58-63.

ZHU Limin, QIAN Jihong, ZHANG Wei. Parameter analysis of vibration reduction of double-layer cylindrical latticed shell with viscous dampers [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(4): 58-63.

[8] 杨明飞, 徐赵东. 大跨网壳结构的动力倒塌判别分析[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2011, 41(4): 836-840.

YANG Mingfei, XU Zhaodong. Dynamic collapse analysis and judgment for large-span reticulated shell structures [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(4): 836-840.

[9] 黄兴淮, 徐赵东, 杨明飞. 多维地震下大跨网壳结构倒塌分析与抗倒塌措施[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2012, 42(1): 109-113.

HUANG Xinghuai, XU Zhaodong, YANG Mingfei. Collapse modes and anti-collapse measures for long span trusses under multi-dimensional earthquakes [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(1): 109-113.

[10] 郭一峰. 多维隔震装置力学性能及受控结构优化分析[D]. 南京: 东南大学, 2011.

GUO Yifeng. Mechanical properties of the multi-dimensional earthquake isolation and mitigation device and optimization analysis on the controlled structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2011.

(本文编辑 吴海西)