

金属橡胶阻尼器对强震下大跨度网壳的 减振控制研究

殷志祥,张 振

(辽宁工程技术大学土木工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘 要 目的 为提高大跨度网壳在强震作用时的抗倒塌能力,提出了金属橡胶阻尼器. 方法 将阻尼器引入到大跨度网壳中进行了强震下大跨度网壳减振控制,以凯威特网壳为例,利用 IDA 法对比分析未受控状态和阻尼器不同布置方式的控制状态的速度及结构整体倒塌临界荷载,其中阻尼器布置分为斜杆布置、环杆布置、混合布置. 结果 3 种布置金属橡胶阻尼器方式分别降低网壳顶点的竖向速度时程响应约 30.3%、28.7%、31.6%;同时环杆布置阻尼器时阻尼器用量相对较合理,降低地震对结构的破坏及提高结构抗倒塌能力程度最大,提高结构倒塌的临界荷载值大约 29.6%. 结论 3 种阻尼器布置方式的降低网壳顶点的竖向速度时程响应效果相当,选用环杆布置金属橡胶阻尼器进行大跨度网壳的减振控制效果较好. 布置金属橡胶阻尼器可以很好地降低地震波对网壳的破坏,对结构抗倒塌能力的提高显著.

关键词 网壳结构;振动控制;显式动力分析;金属橡胶材料阻尼器

中图分类号 TU352.1

文献标志码 A

Vibration Damping Control of Long-span Reticulated Shells by Metal Rubber Damper

YIN Zhixiang, ZHANG Zhen

(School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, China, 123000)

Abstract: In order to improve the collapse resistance of the large-span reticulated shell under strong earthquakes, a metal rubber damper was proposed. The damper was introduced into the large-span reticulated shell to control the vibration of the large-span reticulated shell under strong earthquakes. Wittur reticulated shell was taken as an example. The IDA method is used to compare and analyze the uncontrolled state and the control state speed and the critical load of the structure collapse in different arrangements of dampers. The arrangement of dampers is divided into inclined rod arrangement, ring rod arrangement, and mixed arrangement. Results showed that the three ways

收稿日期:2020-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51774173)

作者简介:殷志祥(1962—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事大跨度空间结构方面研究.

of arranging metal rubber dampers reduced the vertical velocity time history response of the apex of the reticulated shell by approximately 30.3%, 28.7%, and 31.6%. The amount of dampers was relatively reasonable when the dampers were arranged on the ring rod, which reduced the seismic damage to the structure and the improvement of the structure's ability to resist collapse are the greatest, and increased the critical load value of the structure collapse by about 29.6%. The three dampers arrangements have the same effect in reducing the vertical velocity of the apex of the reticulated shell. The metal rubber damper has a better effect on the vibration reduction control of the large-span reticulated shell. The arrangement of metal rubber dampers can reduce the damage of the seismic wave to the reticulated shell, and significantly improve the collapse resistance of the structure.

Key words: reticulated shell structure; vibration control; explicit dynamic analysis; metal rubber damper

大跨空间结构在大型公共建筑及工业建筑广泛应用^[1],但若大跨度网壳结构遭到强震作用,将发生倒塌并造成大量人员伤亡及财产损失.为提高大跨空间结构强震下抗倒塌能力,已经展开了对大跨空间结构的减振控制研究^[2-4].朱钊辰等^[5]对 K6 型单层球面网壳的 MTMD 振动进行控制试,证明 MTMD 具有减振控制效果.陈昱坤^[6]提出依靠金属屈服的三维金属阻尼器对大跨空间结构的减振具有作用.庄鹏等^[7]提出多功能摩擦摆支座,对比了受控与无控球面网壳结构在多维地震作用下模拟结果.薛素铎等^[8]对布置高阻尼橡胶支座的单层柱面网壳进行多点激励的振动台试验,发现其减振效果显著.赵祥等^[9]提出 SMA 复合黏滞阻尼器,并对布置该阻尼器的网架进行数值模拟,证明了其具有很好减振效果.雷海涛等^[10]将磁流变阻尼器引入网壳结构,并提出了相应的半主动控制策略,通过模拟证明了该方案有效. Yan Lu 等^[11]提出钢管摩擦阻尼器,通过试验对其力学性能进行研究,对布置该阻尼器的网壳进行数值模拟,发现其具有很好的减振效果.庄鹏等^[12]提出了一种新型摩擦-SMA 弹簧复合耗能支撑,利用 ABAQUS 建立了有限元模型,通过对比无控模型和有控模型的弹塑性动力分析结果,发现该新型支撑对网壳结构的耗能减振效果明显.徐赵东等^[13-14]分析了已经应用的减振系统,并总结

了大跨网壳减振研究现状,认为开发用于网壳结构的减振系统是减振控制的必然发展趋势.这些阻尼器存在种种问题.调谐减震仪可控制一个或有限个振型,而网壳结构振型复杂,采用调谐减震有局限性.依靠金属屈服的阻尼器可能出现刚度和强度的退化,且复位性不好.依靠摩擦原理的阻尼器的材料耐久性、长期稳定性差且不易维护.粘弹材料及粘滞材料易受环境温度和激励频率影响、易老化且不易维护.磁流变阻尼器造价高且维修复杂等.鉴于此,笔者提出金属橡胶材料阻尼器,其最大优点就是金属橡胶材料阻尼大、质轻、可吸收冲击能、不易老化、不受激励频率及高低温作用影响且复位性好等性能,并尝试将其用于控制强震下的大跨度网壳结构.

1 大跨度网壳耗能减振动力计算模型

布置阻尼器的大跨度网壳地震下动力平衡方程:

$$M\ddot{X}(t)+C\dot{X}(t)+KX(t)=-MH_g\ddot{X}_g(t)-F_d. \tag{1}$$

式中: M 、 C 及 K 分别为大跨度网壳结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $X(t)$ 、 $\dot{X}(t)$ 及 $\ddot{X}(t)$ 分别为大跨度网壳结构相对于地面的位移、速度和加速度向量; H_g 是元素为 1 和 0 构成的惯性力指示向量,与地面地震运动加速度激励方向一致的元素为 1,其余为 0;

$\ddot{\mathbf{X}}_g(t)$ 为地面地震运动加速度向量; \mathbf{F}_d 为金属橡胶阻尼器的控制力向量。

$$\mathbf{F}_d^{(i)} = \mathbf{C}_d^{(i)} \dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}_d^{(i)} \mathbf{X}(t).$$
 (2)

式中: $\mathbf{F}_d^{(i)}$ 为第 i 号金属橡胶阻尼器的等效出力向量; $\mathbf{C}_d^{(i)}$ 和 $\mathbf{K}_d^{(i)}$ 分别为第 i 号金属橡胶阻尼器的等效阻尼和等效刚度。

将式(2)带入式(1),式(1)则改为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_d) \dot{\mathbf{X}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_d) \mathbf{X}(t) = \mathbf{M}\mathbf{H}_g \ddot{\mathbf{X}}_g(t)$$
 (3)

求解结构动力平衡方程式(3),得各时刻布置阻尼器的大跨度网壳地震下的响应。

2 倒塌判断准则

地震作用下,输入结构的能量 E_{in} 一小部分通过动能 E_k 和弹性应变能 E_e 的相互转换贮存起来,且弹性应变能 E_e 及动能 E_k 不起耗能作用,地震作用过去后,结构恢复静止,动能 E_k 和弹性应变能 E_e 趋近于零. 大部分由结构的自身的阻尼耗能 E_c 以及塑性应变能 E_s 共同消耗掉,而自身阻尼耗能 E_c 也仅占总耗能的5%,故输入结构的能量 E_{in} 主要依靠结构塑性应变能 E_s 进行消耗,当对结构安装阻尼器时输入结构的能量 E_{in} 则由塑性应变能 E_s 以及阻尼器耗能 E_d 共同消耗,阻尼器起辅助耗能作用. 当结构塑性应变能 E_s 达到某值 E_{max} ,并不再增加,此时不能再通过结构塑性应变能 E_s 继续消耗地震波输入给结构的能量,故结构的塑性应变能 E_s 不再增长的时刻结构发生倒塌,利用 LS-PrePost 后处理软件得到塑性应变能的变化曲线。

$E_s \xrightarrow{\text{趋于}} E_{max} \xrightarrow{\text{推出}} \text{结构倒塌}.$

3 金属橡胶阻尼器试验

金属橡胶是一种新型多孔金属材料,最早由美国提出,解决了航空航天及国防装备中的缓冲、减振等关键问题,在航空航天及国防装备中表现出其他材料不能实现的优良效果^[15-16]. 金属橡胶在大跨度网壳中没有被来

制作耗能减振装置. 因此,提出了金属橡胶阻尼器,并将金属橡胶阻尼器系统用在减振控制研究,用其连接杆件和节点,左端连接节点如图1所示,右端连接杆件. 利用了金属橡胶材料压缩力学性能,当杆件受拉时,左侧金属橡胶应力释放,金属导杆带动活塞移动并挤压右侧金属橡胶,使其受压,通过材料弹性变形消耗地震波输入给结构的能量. 当杆件受压时,右侧金属橡胶应力释放,金属导杆带动活塞移动并挤压左侧金属橡胶使其受压,通过材料弹性变形消耗地震波输入给结构的能量. 地震作用过去后,阻尼器复位。

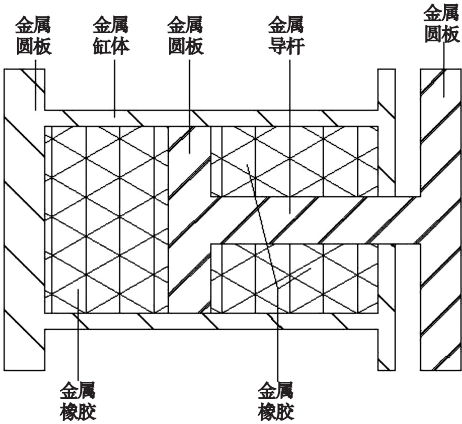


图1 金属橡胶阻尼器

Fig.1 Metal rubber damper

为证明该阻尼器具有耗能减振作用,且阻尼器在受拉受压时原理同,对最大承载为310 kN 金属橡胶阻尼器进行了静态压缩试验(见图2). 试验设备采用万能电子试验机,试验装置最大试验力为1 000 kN,试验时以8 mm 的变形幅值沿着阻尼器工作时的受力路径进行3组加载卸载试验,加载卸载速率为3 mm/min.



图2 静态压缩试验

Fig.2 Static compression test

图3 为对阻尼器静力试验得到的力-位

移曲线,滞迟曲线饱满,可知金属橡胶阻尼器具有良好的耗能减振能力. 将试验数据拟合

得到了加载卸载时阻尼器的力 - 位移关系式.

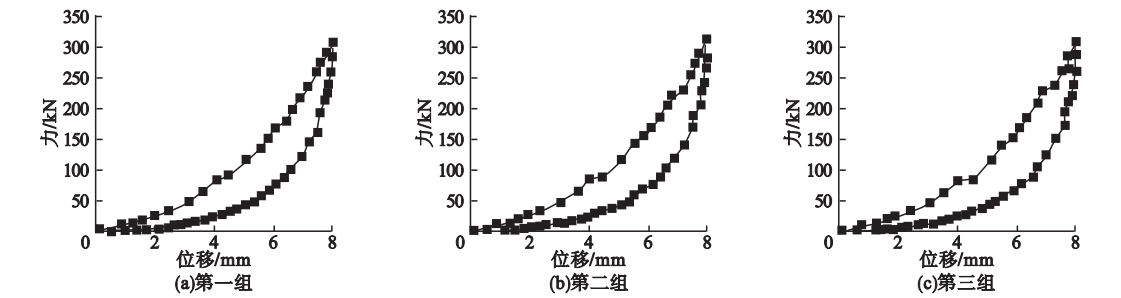


图 3 力 - 位移曲线

Fig. 3 Force-displacement curve

4 大跨度网壳耗能减振实例

以凯威特网壳为研究对象,利用 ANSYS/LS-DYNA 建立有限元模型,网壳结构的参数如表 1 所示.

表 1 网壳结构的参数

| Table 1 Parameters of reticulated shell structure | | | | |
|---|-----|------------|-------------|--------------|
| 跨度/m | 矢跨比 | 杆件数 量/根 | 杆件尺 寸/mm | 屋面荷 载/kPa |
| 120 | 1:5 | 3136 | Φ121×3.5 | 1.5 |

4.1 基本假设

影响模拟的因素有很多,为简化分析,采取假定:①不考虑行波效应;②均布荷载等效为节点集中荷载.

4.2 ANSYS/LS-DYNA 软件参数

杆件选用梁单元 BEAM161,采用 Hughes-Liu 算法,梁单元 BEAM161 的材料模型选用的是分段线性弹塑性材料模型,可输入与应变率相关的应力应变曲线.该模型是一个很常用的塑性准则,尤其是用于钢材.采用该材料模型时,也可根据有效真实塑性应变来定义失效.采用 Cowper-Symbols 模型来考虑应变率的影响,屈服应力的关系为

$$\sigma_y(\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p, \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p) = \sigma_y(\epsilon_{\text{eff}}^p) \times \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p}{C} \right)^{(1/P)} \right]. \tag{4}$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为有效应变率; C 和 P 为应变率参数; $\sigma_y(\epsilon_{\text{eff}}^p)$ 为没有考虑应变率时屈服应力.

网壳杆件选 Q235,屈服应力取值为 207 MPa,失效时的有效塑性真实应变取值为 0.18. 应变率参数 C 和 P 分别取值为 40.0 和 5.0. 全真实应力相对于有效塑性真实应变的荷载曲线选择考虑材料损伤累积的弹塑性本构模型^[17],选用考虑损伤累积的圆钢管钢材的本构方程^[17]:

$$D = (0.973\ 2) \frac{\epsilon_m^p}{\epsilon_u^p} + 0.026\ 8 \sum_{i=1}^N \frac{\epsilon_i^p}{\epsilon_u^p}. \tag{5}$$

$$E_D = (1 - 0.404D)E. \tag{6}$$

$$\sigma_D = (1 - 0.063D)\sigma_s. \tag{7}$$

式中: E, E_D 分别为无损伤和具有损伤变量 D 时的弹性模量; σ_s, σ_D 分别为无损伤和具有损伤变量 D 时的屈服强度; ϵ_i^p 和 ϵ_u^p 分别为钢材第 i 个周期塑性应变和其极限塑性应变.

金属橡胶阻尼器模拟采用 COMBI165 弹簧单元和 COMBI165 阻尼器单元.用 COMBI165 弹簧单元模拟阻尼器的力和位移,用 COMBI165 阻尼器单元模拟阻尼器的阻尼性质.COMBI165 弹簧单元的材料模型选择通用非线性弹簧模型,该模型可以通过定义加载及卸载过程的力和位移曲线的 ID 号并输入来输入考虑阻尼器的实际力和位移.

COMBI165 阻尼器单元的材料模型选择线性黏性阻尼模型,该模型只需要输入阻尼系数,金属橡胶材料采用的混合型阻尼模

型^[18],阻尼系数取 0.8^[18]. 未布置阻尼器的网壳有限元模型如图 4 所示.

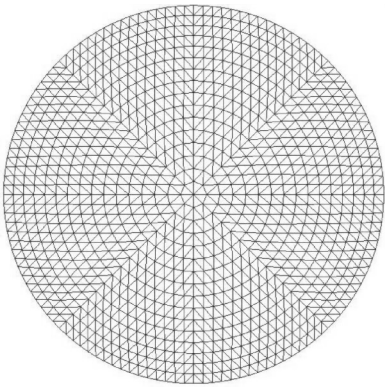


图 4 有限元模型
Fig. 4 Finite element model

4.3 算例验证

为验证模拟的正确性,因笔者研究模型与文献[19]的网壳较为相近,笔者和文献[19]模拟结果如图 5 和图 6 所示.

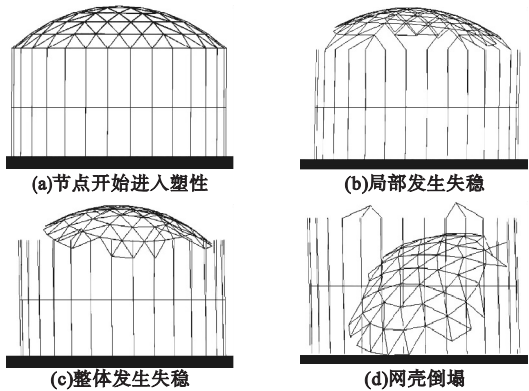


图 5 笔者模拟结果
Fig. 5 The simulation results

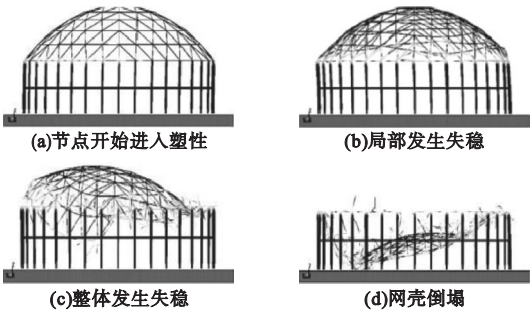


图 6 文献[19]模拟结果

Fig. 6 Simulation results in literature [19]

文献[19]中的 K6 网壳的倒塌进行动力弹塑性时程模拟分析. 文献[19]中的 K6 网壳径向杆尺寸 $\Phi 150 \times 5$,其余杆尺寸 $\Phi 100 \times 5$,跨度 18 m,失高 3.6 m,承受均布荷载 1 kPa. 对比图 5 和图 6 可见两者的倒塌过程接近,证明了本模拟的可靠性.

4.4 大跨度网壳倒塌分析

网壳结构的顶点动力反应较明显,故选择顶点作为参考对象,选取 EL Centro 地震波,其时长为 30 s,特征周期为 0.25 s,时间间隔为 0.02 s,向结构输入三向地震波,对结构强震下倒塌过程分析.

当地震加速度峰值为 27 m/s^2 时,由于地震波的输入,网壳周围杆件发生破坏,发生破坏附近区域因周围由于杆件破坏无法支撑该区域发生局部塌陷,随着网壳周围杆件的破坏以及局部塌陷的“扩展”,最终单网壳发生整体倒塌,网壳的整体倒塌临界荷载为 27 m/s^2 ,图 7 为结构倒塌的过程中的一些典型时刻的模拟结果.

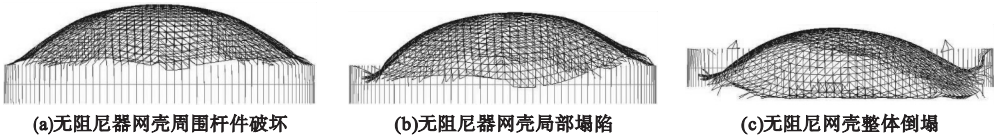


图 7 强震下网壳倒塌过程

Fig. 7 Collapse process of reticulated shell under strong earthquake

图 8 为塑性应变能时程曲线,在约 25 s 时,结构的塑性应变能开始趋于不再增长,结构不能继续消耗地震波输入的能量,结构在

约 25 s 后逐渐整体倒塌. 图 9 为顶点竖向速度时程曲线,在约 25s 时,顶点速度发生突变,也说明结构倒塌.

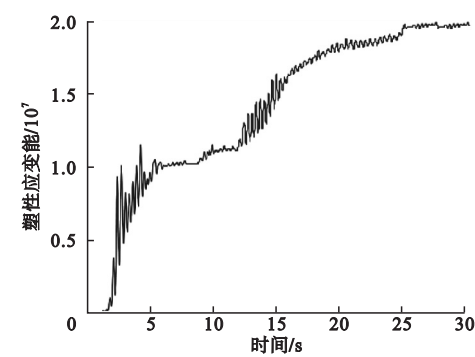


图8 塑性应变能时程曲线

Fig.8 Time history curve of plastic strain energy

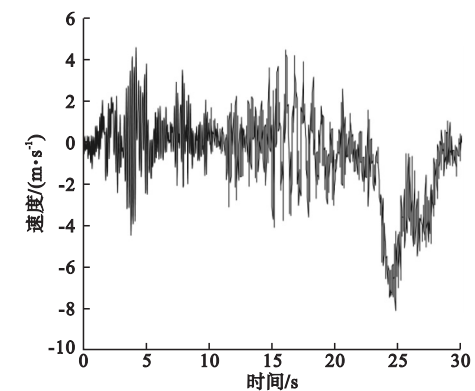


图9 顶点竖向速度时程曲线

Fig.9 Vertex vertical speed-time curve

4.5 金属橡胶阻尼器布置方式及减振控制分析

由于地震波向结构输入能量,网壳依靠自身无法消耗地震波输入的能量,周围的环杆结构破坏发生破坏.为实现耗能减振,在结构中布置阻尼器,在杆件与节点间即杆件两端安装金属橡胶阻尼器(见图10).

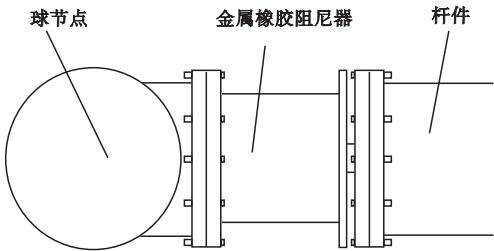


图10 阻尼器安装方式

Fig.10 Installation of the damper

阻尼器采用3种布置形式(见图11).在杆件上布置阻尼器对结构进行减振控制.斜杆布置、环杆布置及混合布置分别在320根、480根、672根杆件上布置阻尼器,分别占总杆件的10.2%、15.3%、21.4%.

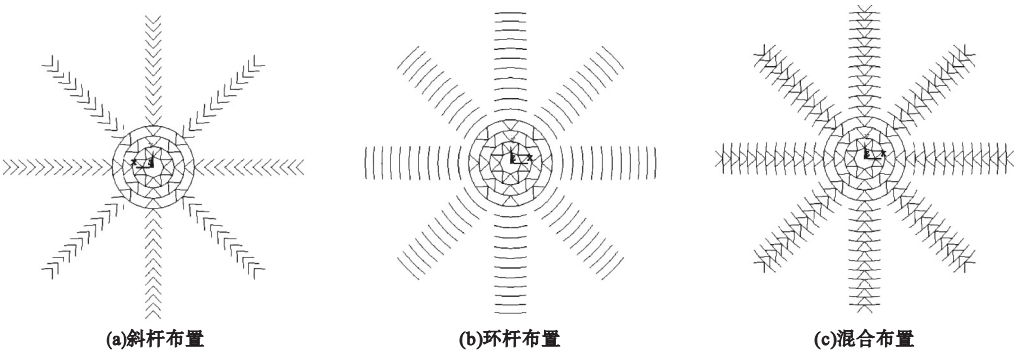


图11 阻尼器布置方式

Fig.11 Arrangement of dampers

分析不同布置方式对网壳动力响应的影响.图12分别为地震加速度峰值为 10 m/s^2 时,向结构输入三向EL Centro地震波,3种金属橡胶阻尼器布置方式时网壳顶点的速度时程曲线对比.由图12可知加阻尼器的网壳顶点速度曲线大部分包络在无阻尼器的曲线内,可以看出布置阻尼器对网壳顶点速度有

降低作用,分别降低30.3%、28.7%、31.6%.

根据图11(a)斜杆布置安装阻尼器,进行强震下的倒塌模拟.图13和图14分别地震加速度峰值为 27 m/s^2 和 32 m/s^2 的模拟结果.从图13(a)和图13(b)可以看出,由于对阻尼器的保护,在地震加速度峰值为

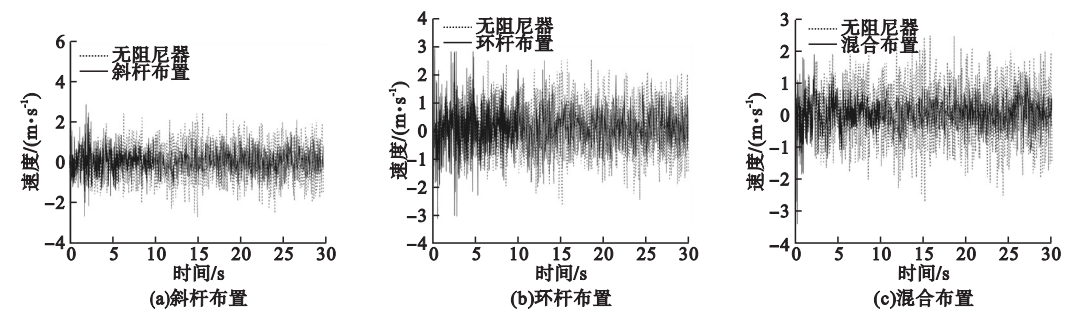


图 12 顶点的速度时程曲线对比

Fig. 12 Vertex speed-time curve

27 m/s²时,结构虽有破坏,并发生凹陷,但是结构的塑性应变能还有增加的趋势,结构在阻尼器的辅助耗能的帮助下,结构自身仍然具有消耗能量的能力,结构没有发生倒塌。从图 13(c)可知布置阻尼器后,虽然结构在地震加速度峰值为 27 m/s² 时,顶点的速度在大约 27 s 时发生突变,但其原因是网壳由于局部破坏,突然发生局部凹陷塌落,并非结构

整体倒塌,说明单靠结构动力响应不能准确判断结构倒塌。由从 14(a)和图 14(b)可知,在地震加速度峰值为 32 m/s² 时,在大约 26 s 时,结构的塑性应变能开始趋于不再增长,结构不能继续消耗地震波输入的能量,结构在大约 26 s 后逐渐整体倒塌。同时从图 14(c)可知,顶点速度发生突变,也说明结构倒塌。

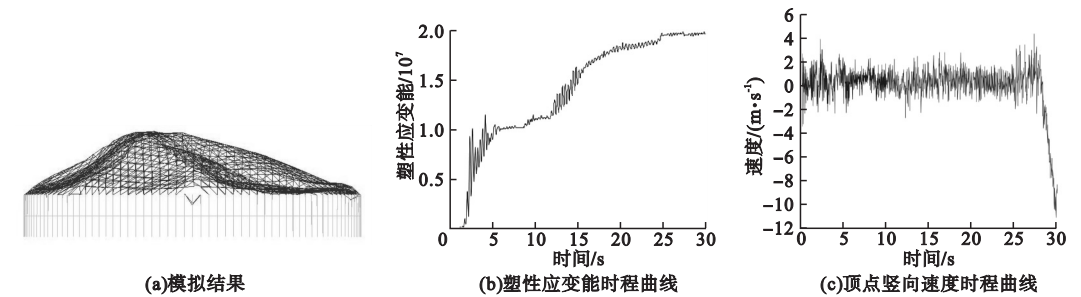


图 13 斜杆布置地震加速度峰值为 27 m/s² 模拟结果

Fig. 13 The simulation results of tilt arrangement when seismic acceleration peak is 27 m/s²

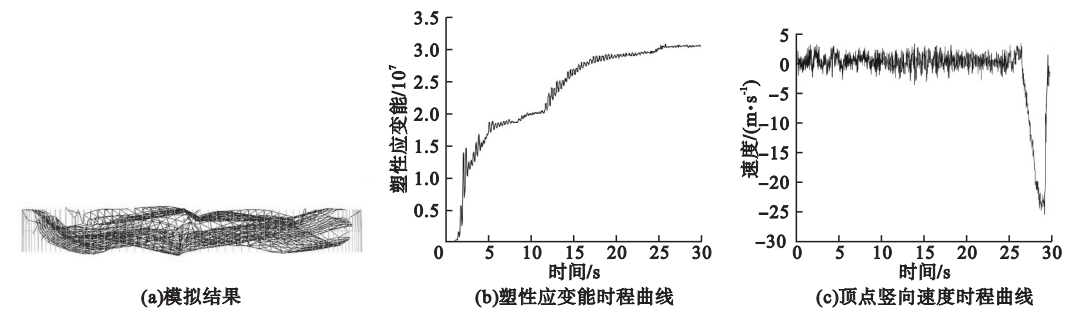


图 14 斜杆布置地震加速度峰值为 32 m/s² 模拟结果

Fig. 14 The simulation result of tilt arrangement when seismic acceleration peak is 32 m/s²

根据图 11(b) 环杆布置安装阻尼器,进行强震下的倒塌模拟。图 15 和图 16 分别是地震加速度峰值为 27 m/s² 和 35 m/s² 的模拟结果。从图 15 可以看出,由于阻尼器的保

护,在地震加速度峰值为 27 m/s² 时,结构发生轻微破坏,网壳局部发生轻微凹陷,没有发生局部塌落,结构的塑性应变能还有增加的趋势,结构在阻尼器的辅助耗能的帮助下,结

构自身仍然具有消耗能量的能力,结构没有发生倒塌,且顶点速度未突变. 从图 16(a) 和图 16(b) 可知,在地震加速度峰值为 35 m/s^2 时,在大约 27 s 时,结构的塑性应变能开始

趋于不再增长,结构不能继续消耗地震波输入的能量,结构在大约 27 s 后逐渐整体倒塌. 同时从图 16(c) 可知,顶点速度发生突变,也说明结构倒塌.

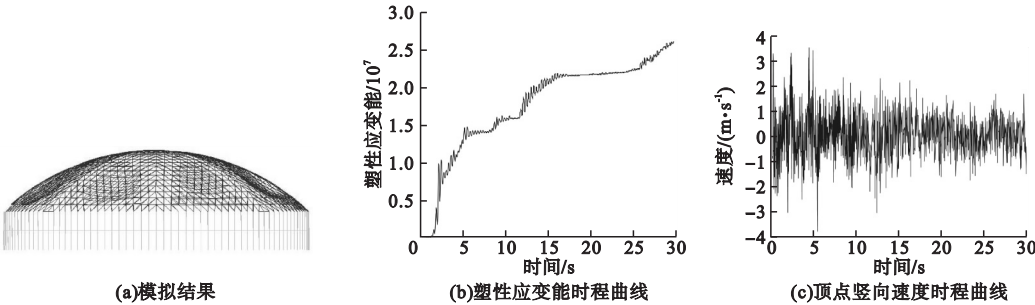


图 15 环杆布置地震加速度峰值为 27 m/s^2 模拟结果

Fig. 15 The simulation result of ring rod arrangement when seismic acceleration peak is 27 m/s^2

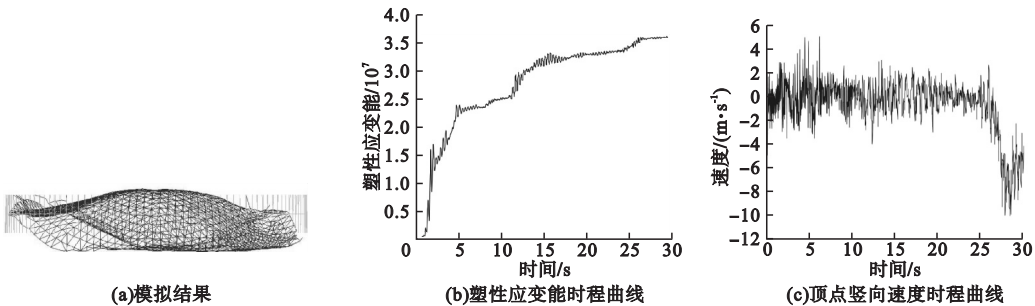


图 16 环杆布置地震加速度峰值为 35 m/s^2 模拟结果

Fig. 16 The simulation result of ring rod arrangement when seismic acceleration peak is 35 m/s^2

根据图 11(c) 混合布置安装阻尼器,进行强震下的倒塌模拟. 图 17 和图 18 分别为地震加速度峰值为 27 m/s^2 和 31 m/s^2 的模拟结果. 从图 17 可以看出,由于对阻尼器的保护,在地震加速度峰值为 27 m/s^2 时,结构发生轻微破坏,网壳局部发生轻微凹陷,未发生局部塌落,结构的塑性应变能还有增加的趋势,结构在阻尼器的辅助耗能的帮助下,结

构自身仍然具有消耗能量的能力,结构没有发生倒塌,且顶点速度未突变. 从图 18(a) 和图 18(b) 可知,在地震加速度峰值为 31 m/s^2 时,在大约 26 s 时,结构的塑性应变能开始趋于不再增长,结构不能继续消耗地震波输入的能量,结构在大约 26 s 后逐渐整体倒塌. 同时从图 18(c) 可知,顶点速度发生突变,也说明结构倒塌.

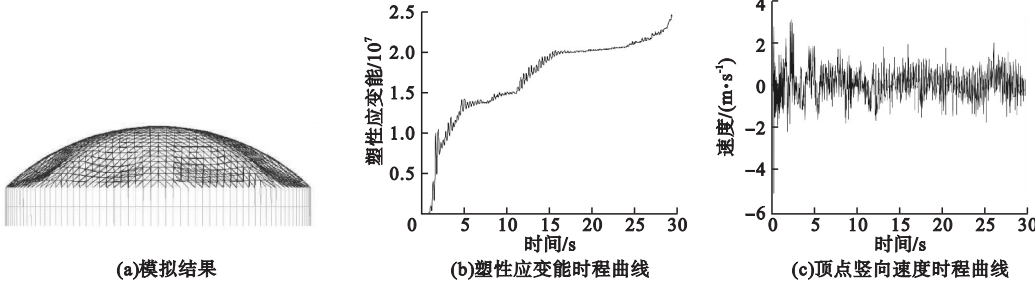


图 17 混合布置地震加速度峰值为 27 m/s^2 模拟结果

Fig. 17 The simulation result of mixed layout when seismic acceleration peak is 27 m/s^2

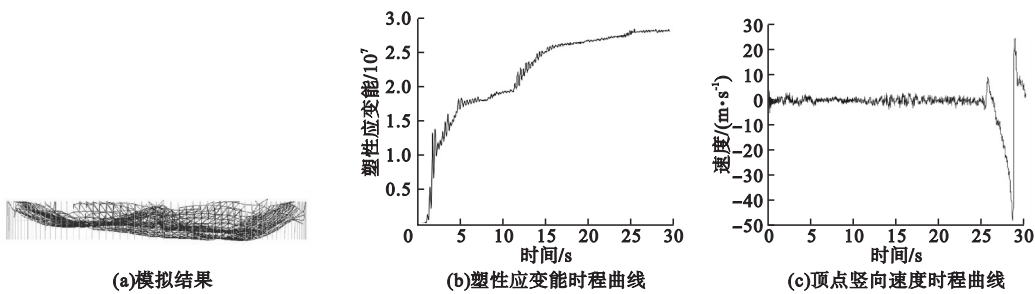


图 18 混合布置地震加速度峰值为 31 m/s² 模拟结果

Fig. 18 The simulation result of mixed layout when seismic acceleration peak is 31 m/s²

阻尼器布置方式对网壳的影响如表 2 所示.从表 2 可以看出,斜杆布置方式时,阻尼器用量最少,但该布置方式下的网壳在地震加速度峰值为 27 m/s² 时破坏较重.混合布置方式时,虽然该布置方式下的网壳在地震加速度峰值为 27 m/s² 时破坏较轻,但阻尼器用量最多.环杆布置方式时,较斜杆布置阻尼器用量多,但该布置方式下的网壳在地震

加速度峰值为 27 m/s² 时破坏较斜杆布置轻.与混合布置相比,虽同样在地震加速度峰值为 27 m/s² 时破坏程度相差不大,但阻尼器用量较少.与此同时,环杆布置方式时,对于网壳的抗倒塌能力提高最大.因此布置金属橡胶阻尼器可以提高大跨度网壳的在强震下的抗倒塌能力,且混合布置方式较佳.

表 2 阻尼器布置方式对网壳的影响

Table 2 The influence of damper arrangement on reticulated shell

| 结构形式 | 布置阻尼器的 杆件比例/% | 地震加速度峰值为 27 m/s ² 时破坏程度 | 倒塌临界荷载/ (m·s ⁻²) | 倒塌临界荷载 提高程度/% |
|------|------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------|
| 斜杆布置 | 10.2 | 结构虽有破坏,并发生凹陷,结构没有发生倒塌 | 32 | 18.5 |
| 环杆布置 | 15.3 | 结构发生轻微破坏,网壳局部发生轻微凹陷,没有发生局部塌落 | 35 | 29.6 |
| 混合布置 | 21.4 | 结构发生轻微破坏,网壳局部发生轻微凹陷,没有发生局部塌落 | 31 | 14.8 |

5 结 论

- (1)布置金属橡胶阻尼器系统可以对大跨度网壳的进行减振控制,3 种阻尼器布置方式分别降低网壳顶点的竖向速度时程响应约 30.3%、28.7%、31.6%.
- (2)对于网壳,单层球面网壳进行环杆布置阻尼器时阻尼器用量相对较合理且可降低地震对结构的破坏,同时提高抗倒塌能力程度最大,增大了结构倒塌的临界荷载值大约 29.6%.
- (3)布置金属橡胶阻尼器可降低网壳顶点的竖向速度时程响应,降低效果相当;可降低地震波对网壳的破坏,提高结构抗倒塌能力显著.选用环杆布置金属橡胶阻尼器进行

大跨度网壳的减振控制较好.

参考文献

[1] ZHANG C X, NIE G B, DAI J W, et al. Experimental studies of the seismic behavior of double-layer lattice space structures I: experimental verification [J]. Engineering failure analysis, 2016 (3) : 85 - 96.

[2] ALI N B H, 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.

[3] AIDA T, ASO T, NAKAMOTO K, et al. Vibration control of shallow shell structures using a shell-type dynamic vibration absorber [J]. Journal of sound & vibration, 1998, 218 (2) : 245 - 267.

[4] 刘怡鹏. 大跨度空间结构 MTMD 地震控制研究 [D]. 上海: 同济大学, 2018.

(LIU Yipeng. Research on MTMD seismic control of large-span spatial structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2018.)

- [5] 朱钊辰,罗永峰,刘怡鹏,等. 单层球面网壳 MTMD 振动控制试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2019,49(4):696-704.
(ZHU Zhaochen, LUO Yongfeng, LIU Yipeng, et al. Experimental study on MTMD vibration control for single-layer spherical reticulated shells [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2019, 49(4):696-704.)
- [6] 陈昱坤. 大跨空间隔震结构三维金属阻尼器研究[D]. 天津:天津大学,2018.
(CHEN Yukun. Study on three-dimensional metal dampers with long-span space isolation structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.)
- [7] 庄鹏,戢广禹,刘沛,等. 设置多功能摩擦摆系统的单层球面网壳结构地震响应分析[J]. 振动与冲击,2020,39(8):79-87.
(ZHUANG Peng, JI Guangyu, LIU Pei, et al. Seismic response analyses of a single-layer spherical lattice shell structure with a multifunctional FPB system [J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(8):79-87.)
- [8] 薛素铎,单明岳,李雄彦,等. 多点激励的高位隔震单层柱面网壳振动台试验[J]. 世界地震工程,2017,33(3):24-33.
(XUE Suduo, SHAN Mingyue, LI Xiongyan, et al. Shaking table experiment for high position seismically isolated single-layer latticed cylindrical shell under multi-support excitations [J]. World earthquake engineering, 2017, 33(3):24-33.)
- [9] 赵祥,刘忠华,王社良,等. 多维地震作用下大跨空间结构的减震控制分析[J]. 地震工程学报,2018,40(3):398-405.
(ZHAO Xiang, LIU Zhonghua, WANG Sheliang, et al. Seismic control analysis of large-span space structures under multidimensional earthquakes [J]. China earthquake engineering journal, 2018, 40(3):398-405.)
- [10] 雷海涛,李志军,刘园园. MR 阻尼器-网格结构的滑模变结构控制[J]. 西安工业大学学报,2018,38(6):588-596.
(LEI Haitao, LI Zhijun, LIU Yuanyuan. Sliding mode control of space grid structure with MR damper [J]. Journal of Xi'an technological university, 2018, 38(6):588-596.)
- [11] LU Y, HAO G Q, HAN Q H, et al. Steel tubular friction damper and vibration reduction effects of double-layer reticulated shells[J]. Journal of constructional steel research, 2020, 169.
- [12] 庄鹏,王文婷,韩森,等. 摩擦-SMA 弹簧复合耗能支撑在周边支承单层球面网壳结构中的减震效应研究[J]. 振动与冲击,2018,37(4):99-109.
(ZHUANG Peng, WANG Wenting, HAN Miao, et al. Seismic control effect of friction-SMA spring hybrid energy dissipation braces in a single-layer spherical lattice shell with surrounding columns [J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(4):99-109.)
- [13] 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(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(3):59-61.)
- [14] 全希坤,李宏男,曹勇,等. 减震控制技术在 大跨空间网壳结构中的研究与发展[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006(5):745-749.
(QUAN Xikun, LI Hongnan, CAO Yong, et al. Study and development of earthquake mitigation control of long-span spatial reticulated shell structure [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2006(5):745-749.)
- [15] 姜洪源,夏宇宏,敖宏瑞,等. 金属橡胶构件的性能分析与实验研究[J]. 中国机械工程,2001(11):93-96.
(JIANG Hongyuan, XIA Yuhong, AO Hongrui, et al. Experimental research on characteristics of metal rubber element [J]. China mechanical engineering, 2001(11):93-96.)
- [16] 姜洪源,敖宏瑞,夏宇宏,等. 金属橡胶成型工艺研究及其应用[J]. 机械设计与制造,2001(2):85-86.
(JIANG Hongyuan, AO Hongrui, XIA Yuhong, et al. Research on manufacturing technology and application of metal rubber [J]. Machinery design & manufacture, 2001(2):85-86.)
- [17] 聂桂波. 网壳结构基于损伤累积本构强震失效机理及抗震性能评估[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
(NIE Guibo. Failure mechanism and performance evaluation of reticulated shells under severe seismic motion based on damage cumulative constitutive model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [18] 周艳国,屈文忠. 金属橡胶非线性动力学特性建模方法研究[J]. 噪声与振动控制,2013,33(1):31-36.
(ZHOU Yanguo, QU Wenzhong. Several practical approaches for nonlinear dynamic modeling of metal rubber [J]. Noise and vibration control, 2013, 33(1):31-36.)
- [19] 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.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)