

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201809195

空间单层网壳结构损伤杆件位置识别试验

姚 姝^{1,2}, 张辉东^{1,2}, 周晓洁^{1,2}, 滕 军³

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室(天津城建大学), 天津 300384;
3. 哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

摘 要:为解决空间钢结构震后常发生杆件损伤的位置识别问题,设计一个单层网壳结构试验模型,切断单个杆件模拟实际结构的杆件损伤,对该损伤杆件进行位置识别研究.首先,根据空间钢结构自由度高,模态密集等特点,基于小波包能量分析法处理频率密集信号的优势,应用单层网壳结构损伤前后两个监测阶段的加速度响应数据,建立抗噪性能和灵敏性较好的损伤杆件位置识别指标向量.再应用有限元软件 ANSYS 建立 17 组不同位置杆件损伤的数值分析模型,分别获得 17 组有限元模型损伤前后的加速度响应数据,通过小波包分析处理后将损伤指标向量作为损伤识别样本库,再将具有单个杆件损伤试验结构的加速度响应数据处理后得到的损伤识别指标向量与损伤样本库中各杆件损伤位置的指标向量进行聚类分析,识别出实际结构杆件有可能的损伤位置.该方法能够快速识别出实际结构中损伤杆件可能损伤的区域位置,试验结果也验证了方法的可行性和有效性,为后续工程应用研究提供了理论和试验支持.

关键词: 单层网壳; 杆件损伤; 位置识别; 小波包能量分析; 聚类分析

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)06-0116-06

Test on member damage location identification of single-layer reticulated shell

YAO Shu^{1,2}, ZHANG Huidong^{1,2}, ZHOU Xiaojie^{1,2}, TENG Jun³

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Engineering and Safety Management Department Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering (Tianjin Chengjian University), Tianjin 300384, China;
3. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: To identify the damage member location for space steel structures after earthquake, a single-layer reticulated shell structure test model was designed with a single damaged member to study the location identification method. In consideration of the characteristics of spatial steel structure, such as multi-degree of freedom and dense modal, the acceleration responses of two monitoring stages (i. e., before and after structural damage) were used to establish the damage identification index based on wavelet packet energy analysis. The numerical analysis data of 17 different damage locations of members were established as the damage sample base using the finite element software ANSYS. The acceleration response data of the test structure with single member damage were processed and clustered with the damage sample base data to identify possible damage location of the actual structural members. The method can quickly identify the possible damage location of the damaged member in the actual structure and the experimental results validated the feasibility and effectiveness of the proposed method, which provides theoretical and experimental supports for engineering application.

Keywords: single-layer reticulated shell; member damage; location identification; wavelet packet energy analysis; cluster analysis

根据大量的震害分析发现,空间钢结构震后多发生杆件损伤,节点损伤和支座损伤等损伤情况^[1-4].震后如何快速识别出空间钢结构杆件损伤的具体位置成为空间结构健康监测体系研究中的重点内容之一.目前已建立比较完善的杆件损伤判别指标,其中基于小波包能量分析的损伤指标法相对比较成熟,得到了较好的数值分析结果,比仅依靠频

率的改变识别损伤具有更好的精度和抗噪性能^[5-6].但目前基于小波包分析的损伤识别研究多集中在识别损伤是否发生,而对损伤具体可能发生的位置识别研究较少,为了更好地对杆件损伤位置快速识别方法进行系统研究,本文对方法的工程应用开展了试验研究.通过建立的单层网壳结构试验模型,切断试验结构中单根杆件作为损伤杆件位置判别的目标,综合考虑结构特点,基于建立的试验结构有限元模型,模拟各种不同位置的杆件发生损伤,建立合适的损伤位置判别样本库,将实际工程中的监测数据与结构的有限元数值分析结果进行聚类分

收稿日期: 2018-09-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51508374)

作者简介: 姚 姝(1982—),女,博士,讲师

通信作者: 姚 姝, yaoshu19820331_0@126.com

析,识别出杆件发生损伤可能区域.通过试验验证了提出的基于小波包能量分析的空间结构损伤杆件位置识别方法的有效性和工程可应用性.

1 试验概况

1.1 试验模型

试验模型为 K6 型单层钢网壳,跨度 6 m,矢跨比 1/7,具体参见图 1.杆件均采用 $\Phi 15 \times 3$ 圆钢管,钢材为 Q235,网壳节点为焊接球节点,焊接球直径 100 mm,壁厚 6 mm,质量 1.5 kg.选取最外环 6 个主肋处节点焊接在 Q235b 级钢板上,钢板尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,钢板 4 个角处分别设置直径为 18 mm 的孔洞,通过膨胀螺栓将钢板与混凝土地面固定,具体形式见图 2.



图 1 试验结构
Fig. 1 Test Structure



图 2 试验结构支座
Fig. 2 Support of test structure

1.2 加载和振动测试方案

试验分别在结构的 12 个节点位置布置 38.5 kg 重的质量块,加载点现场图和位置示意图分别见图 3.在结构的顶点位置布置三向(x,y,z)加速度传感器,编号分别为 1~3 号,具体见图 4.考虑到试验中单层钢网壳结构的自振频率较高,拾振器采用加速度传感器,采样频率为 512 Hz,采用东方所的 DASP V2006 数据采集系统.试验采用锤击法以获取结构的自由衰减信号,锤击点位置见图 5.

为模拟钢杆件的损伤,在试验结构的第三环杆处选择 1 号斜向杆件作为损伤杆件(切断杆件)的位置判别目标.杆件损伤具体位置见图 5,详图见图 6.

试验结构加载后对结构完好时采用锤击法获得顶点处 3 个方向的加速度响应信号(x,y,z),在杆件损伤后,再采用锤击法获得损伤结构相同位置的振动响应信号.最终将通过采集系统获得的结构杆件损伤前后的 3 个加速度响应信号,作为后续损伤杆件位置判别的分析数据.



图 3 配重块位置
Fig. 3 Position of mass block



图 4 加速度传感器布置
Fig. 4 Position of acceleration sensors

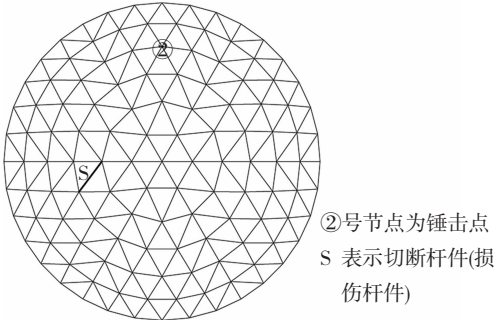


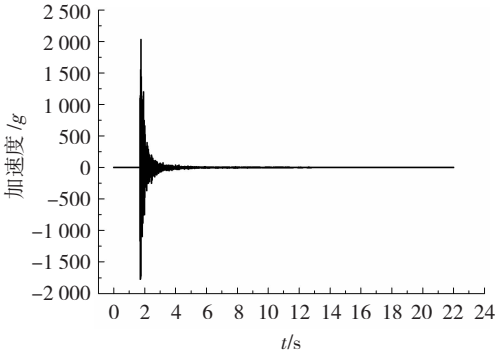
图 5 锤击点位置
Fig. 5 Location of the hammering point



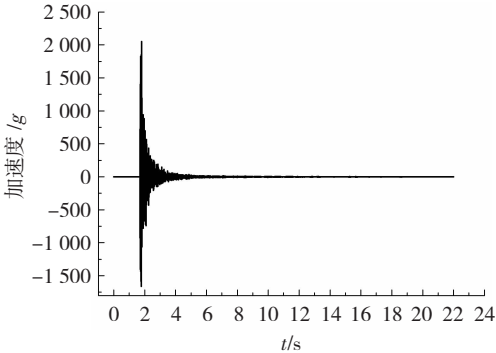
图 6 损伤杆件
Fig. 6 Damaged member

1.3 试验数据分析

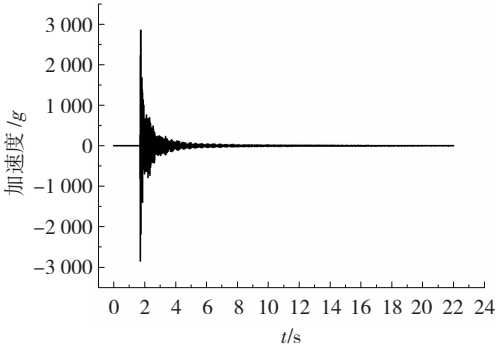
试验模型在无损状态下 3 个加速度传感器获得加速度传感器响应信息见图 7. 选取有效时长的加速度响应信号的功率谱反应分析获得结构的频率, 谱分析得到了 3 个主要参与振型的频率见图 8, 分别为 24.875、30.406 和 42.563 Hz. 由于受试验条件的限制, 试验结构模型只在顶点处布置了竖向加速度传感器, 通过该处加速度响应数据的谱分析获得的结构主要参与振型频率与实际结构自振频率稍有偏差.



(a) 1 号传感器(x 向)加速度响应信号



(b) 2 号传感器(y 向)加速度响应信号



(c) 3 号传感器(z 向)加速度响应信号

图 7 试验测试加速度响应信号(无损状态)

Fig. 7 Testing acceleration result of test structure (no damage)

2 试验结构有限元模型与数值分析

2.1 试验结构的有限元模型

应用有限元软件 ANSYS 建立试验结构的数值分析模型, 采用梁单元 beam4 模拟杆件, 杆件弹性模量 $E=2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 阻尼比取 0.02. 根据试验

结构的频率分析结果, 以有限元模型的节点质量分布为模型修正的调整参数, 通过反复迭代和调整, 获得修正后的有限元分析模型, 见图 9.

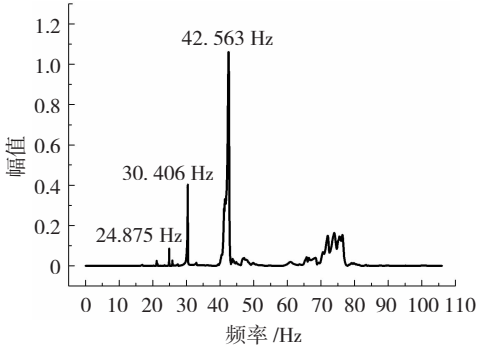


图 8 加速度响应的谱分析

Fig. 8 Spectrum analysis of acceleration

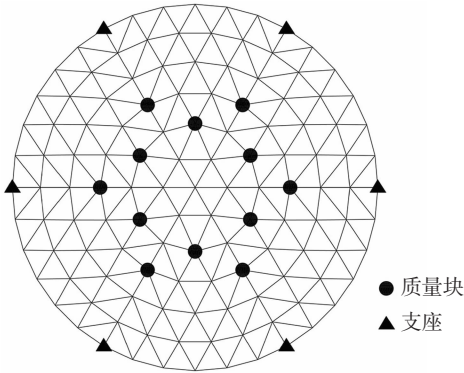


图 9 试验结构的有限元模型

Fig. 9 Simulation model of test structure

修正后有限元模型数值模拟分析, 结构的 3 个主要参与振型分别为第 7、17 和 31 阶振型. 对应的模态频率分别为 24.657、30.701 和 48.664 Hz. 均以竖向振动为主. 将实际结构谱分析获得的主要参与振型的频率与模型修正后的有限元分析结果对比, 最大误差为 14.334%, 见表 1.

表 1 实测频率与修正后有限元计算的频率对比

Tab. 1 Comparison of frequency between the measured and modified simulation models

主要参与振型	实测值/Hz	理论值/Hz	误差百分比/%
7(z 向)	24.875	24.657	-0.876
17(z 向)	30.406	30.701	0.970
31(z 向)	42.563	48.664	14.334

2.2 建立损伤杆件位置判别样本库

应用修正后的有限元分析模型, 根据结构特点数值模拟不同环杆处杆件损伤, 共计 17 个样本, 作为杆件损伤识别的样本库, 具体位置见图 10, 其中 Y1 ~ Y6 表示各主肋环杆件损伤, Y7 ~ Y12 表示各环杆件损伤, Y13 ~ Y17 表示各环斜向杆件损伤. 应用有限元软件将圆钢管杆件的厚度减少一半, 即杆件有效截面面积减小, 模拟该处杆件发生损伤.

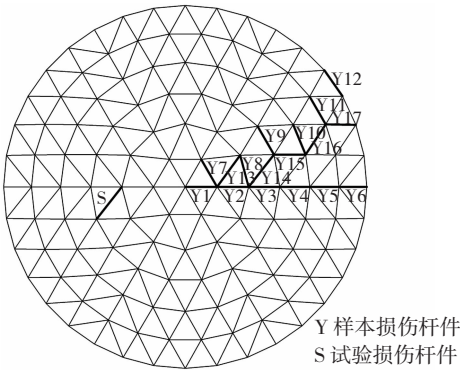


图 10 试验结构和样本库中损伤杆件位置

Fig. 10 Member damage position of the test structure and the sample database

3 杆件损伤位置识别方法

3.1 损伤指标

因小波包分析较传统小波分析在处理频率密集信号时有优势^[7-9],对高频部分能够逐级分解,可自适应的选择相应频带,提高时频分辨率,小波包分解详图见图 11,图中 $f(t)$ 表示加速度响应信号,进行 j 层($j = 2$) 小波包分解后获得从低频到高频成分的信号分解系数,再对小波包各层分解系数重构,获得第 j 层第 i 个频带的重构系数 $f_j^i(t)$ ($i = 1, \cdots, 2^j$). 应用式(1) 获得小波包分解的各频带能量.

$$E_i = \int_{-\infty}^{\infty} [f_j^i(t)]^2 dt. \tag{1}$$

另外,根据已取得的研究成果,见文献[5],本文

采用结构出现损伤前后的加速度响应信号的小波包能量频带分布的变化情况,通过归一化处理,获得杆件损伤位置判别的损伤判别指标,该损伤指标对于判别空间结构杆件损伤具有很好的灵敏性和抗噪性能. 损伤指标计算公式为

$$T_i = \frac{|E_{qi} - E_{hi}|}{(|E_{qi} - E_{hi}|)}, \tag{2}$$

式中: $E = [E_1, \cdots, E_i]$ ($i = 1, \cdots, 2^j$), j 为小波包分解层数; E_q 和 E_h 分别表示杆件损伤前后结构加速度响应信号获得的小波包分解能量分布向量.

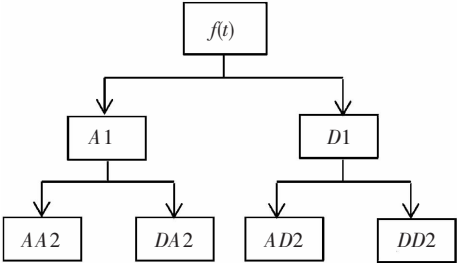


图 11 小波包分解图

Fig. 11 Wavelet packet decomposition

以杆件损伤样本库中 Y1、Y7 和 Y13 为例选取具有正交性,可以完全重构的 Daubechies 小波 (Db21) 小波,分解层数为 6 层,获得共计 $2^6 = 64$ 阶频带能量. 对 3 种不同杆件位置损伤的结构顶点竖向加速度响应信号进行小波包能量分析,其中前 32 阶频带能量分布情况见图 12, 由于第 33 ~ 64 阶频带能量分布相对较小,图中未列出.

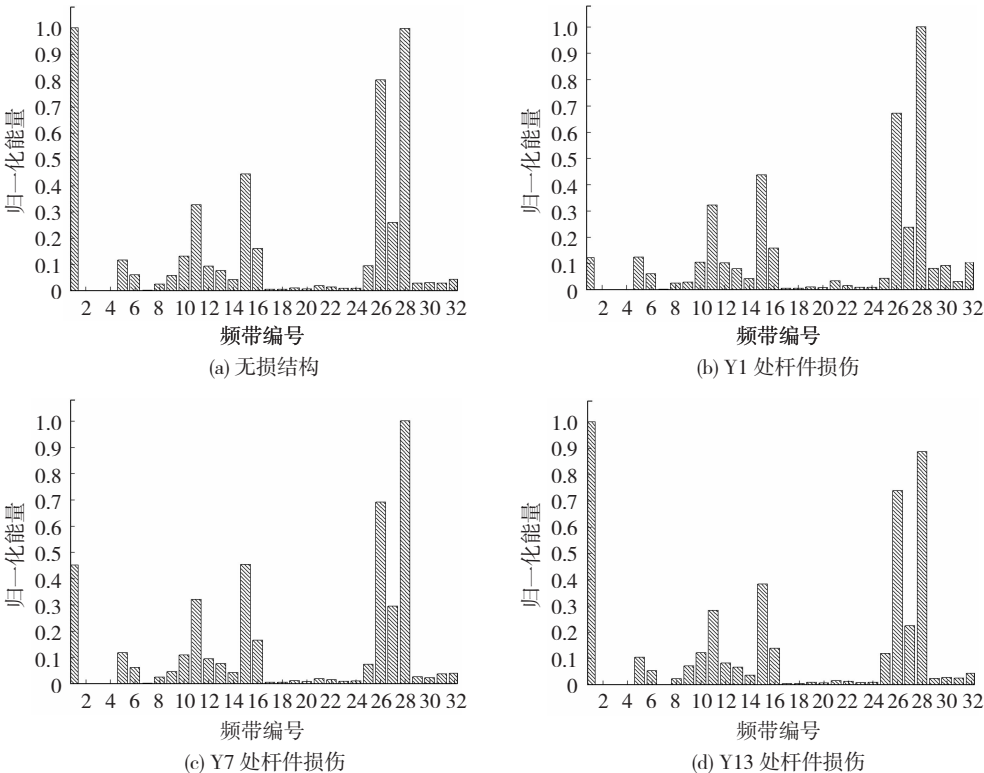


图 12 顶点竖向加速度的小波包能量分布

Fig. 12 Wavelet packet energy distribution of vertical acceleration on peak joint

由图 12 中频带分布可见,不同位置的杆件发生损伤,小波包频带分布都不尽相同. 其中无损结构顶点竖向加速度响应信号的小波包能量分解以第 1、26 和 28 阶频带能量占优,而当 Y1 处杆件损伤,第 1 阶频带能量分布显著下降,仅以第 26 和 28 阶占优;当 Y7 处环杆杆件损伤时以第 26 和 28 阶频带能量占优,但第 1 阶能量分布又有显著的升高;当 Y13 处斜向杆发生杆件损伤时,表现为第 1 阶频带能量占优,而第 11 和 15 阶的频带能量又较无损结构的频带能量分布稍有降低.

3.2 杆件损伤位置判别

在试验结构质量块布置后,对无损结构中的有效位置用锤击法获得结构加速度响应测试数据. 然后切断一个斜向杆件,具体位置见图 10 中 S 处杆件. 对损伤结构再次用锤击法获得结构顶点加速度响应测试数据. 对两次数据进行消噪处理后,进行小波包能量分解. 选取 Db21 小波,分解层数为 6 层,获得共计 64 阶频带能量,应用式(2)得到实际试验结构杆件损伤时的损伤指标向量.

应用聚类分析法(见式(3)),将试验得到的损伤指标向量和样本库中各样本损伤指标向量进行聚类判别,研究表明^[5],杆件位置判别指标越小,即实际损伤指标向量距离样本库某种位置发生杆件损伤的指标向量越接近,发生该处杆件损伤的可行性越大.

表 2 不同损伤位置下聚类分析后损伤指标 P_s

Tab. 2 Damage index of different positions

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9
37. 24	36. 14	27. 84	37. 97	30. 70	32. 66	40. 20	28. 78	32. 29
Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15	Y16	Y17	
30. 66	36. 66	34. 30	39. 64	27. 81	28. 86	38. 36	32. 18	

4 结 论

本文提出的空间钢结构杆件损伤的位置识别方法能够有效判别空间钢结构杆件损伤的可能区域,并具有可操作性和工程应用价值,同时也完善了空间结构健康监测体系. 该方法主要应用结构中布置的加速度传感器获得的结构在损伤前后两个重要阶段的响应数据,基于小波包能量分析建立损伤判别指标,通过聚类分析完成杆件损伤可能发生区域的最终识别. 杆件损伤位置识别具体方法如下:

1) 获得实际结构损伤前后监测点的加速度响应数据,对加速度信号归一化处理后,进行小波包分解,选取具有正交性和可以重构的小波函数和合适的分解层数,层数越多精度越高,但计算时间越长. 应用式(2)计算实际结构损伤指标向量.

$$P_{Sj} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{2^k} (T_{Si} - T_{Yji})^2\right)}, \tag{3}$$

式中: $T_s = [T_{s1}, \cdots, T_{si}] (i = 1, \cdots, 2^k)$ 为试验结构损伤指标向量, $T_{yj} = [T_{y1}, \cdots, T_{yji}] (i = 1, \cdots, 2^k)$ 为样本库中第 j 个样本损伤获得损伤指标向量. ($j = 1, \cdots, m$), m 是样本库中样本的个数,本文中 $m = 17, k$ 为小波包分解层数.

将试验中 S 处杆件发生损伤前后结构的加速度响应数据进行小波包分解后,与样本库中 17 种不同位置的杆件损伤进行聚类分析,应用式(3)分别得到 17 个聚类分析损伤指标数值,具体结果见表 2. 当 Y14 位置杆件发生损伤时, $P_s = 27. 81$ 为最小值,判断试验中损伤杆件位置出现在 Y14 处,即第 3 环(由内到外)斜向杆件的可能性最大. 另外, Y3 和 Y8 的 P_s 值也相对较小,分别为 27. 84 和 28. 78. 进一步分析发现, Y3 为第 3 环与 Y14 杆件交汇同一节点的肋杆, Y8 为第 3 环与 Y14 杆件交汇同一节点的环向杆,这也说明当 Y14 处杆件损伤时,杆件两端的节点也发生了一定程度的损坏,与该损伤节点相连的杆件也有可能被识别出损伤,这与实际结构损伤情况相符. 所以在实际结构损伤判别中,应对 Y3、Y8 和 Y14 处损伤指标相对最小的杆件损伤位置进行检查和加固.

2) 根据修正后结构有限元模型,获得完好结构和不同位置杆件损伤结构监测点的加速度响应信号,对加速度信号归一化处理后,应用式(1)、(2)计算损伤识别指标向量,作为损伤识别样本库的基础数据库.

3) 将前述 1) 中获得的实际结构的损伤指标向量,应用式(3)聚类分析方法,与前述 2) 计算得到的损伤识别样本库中的数据进行对比,获得聚类分析损伤识别指标,其中值越小判别其为损伤杆件的可能区域,完成最终的杆件损伤位置识别.

另外,本试验由于试验条件的限制,仅在结构顶点处布置了加速度传感器,如条件允许,根据结构特点,可以先划分子结构,在不同子结构处设置响应加速度传感器,先判别哪个子结构处发生杆件损伤,再进行杆件损伤的具体位置判别,这样可大大缩短判别时间和提高判别精度.

参考文献

[1] 聂桂波,戴君武,张辰啸,等. 芦山地震中大跨空间结构主要破坏模式及数值分析[J]. 土木工程学报,2015,48(4):1
NIE Guibo,DAI Junwu,ZHANG Chenxiao,et al. Failure patterns of large span space structures in Lushan earthquake and numerical simulation [J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(4):1. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2015.04.003

[2] SHEN Shizhao. Recent advances on the fundamental research of spatial structures in China [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2006, 47(2): 93

[3] 曹正罡,严佳川,周传波. 80m 球径螺栓球节点单层球面网壳强震失效机理[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):39
CAO Zhenggang, YAN Jiachuan, ZHOU Chuanbo. Failure mechanism of an 80 meters span single-layer reticulated dome with bolt-ball joints subjected to severe earthquakes [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 39. DOI: 10.11918/j.issn 0367-6234.201603155

[4] 支旭东,龚俊,范峰. 正放四角锥平板网架楼盖地震易损性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):32
ZHI Xudong, GONG Jun, FAN Feng. Research on the seismic fragility of orthogonal pyramid space grid [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2017, 49(12): 32. DOI:10.11918/j.issn 0367-6234.201705079

[5] 滕军,姚姝. 基于小波包分析的地震作用下网壳结构的损伤判

别方法[J]. 工程力学,2011, 28(9): 183
TENG Jun, YAO Shu. A method of earthquake-induced latticed shell damage detection by wavelet packet analysis [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 183

[6] YAO Shu, TENG Jun, XIAO Yiqing, et al. Detection of the support damage spatial steel structures under earthquakes based on shaking table test [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2011,1(3):5

[7] TOUATI S, PESQUET J. Some results on the wavelet packet decomposition of nonstationary processes[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2002,2(11): 1289

[8] 魏玉明,张永志,王涛,等. 基于小波包能量特征向量的结构动力响应损伤识别[J]. 地震工程学报,2017,39(6): 1157
WEI Yuming, ZHANG Yongzhi, WANG Tao, et al. Damage identification based on structural dynamic responses using wavelet packet energy eigenvector [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1157

[9] SUN Z, CHANG C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(10):1354

[10] 钢结构设计标准:GB 50017—2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018:19
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018:19

(编辑 赵丽莹)

(上接第 108 页)

[7] LIU M B, LIU G R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2010, 17(1): 25. DOI: 10.1007/s11831-010-9040-7

[8] MORRIS J P, FOX P J, ZHU Y. Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH [J]. Journal of Computational Physics, 1997, 136(1): 214. DOI: 10.1006/jcph.1997.5776

[9] ZHU Yi, FOX P J. Simulation of pore-scale dispersion in periodic porous media using smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 182(2): 622. DOI: 10.1006/jcph.2002.7189

[10] TARTAKOVSKY A M, TRASK N, PAN K, et al. Smoothed particle hydrodynamics and its applications for multiphase flow and reactive transport in porous media [J]. Computational Geosciences, 2016, 20(4): 807. DOI: 10.1007/s10596-015-9468-9

[11] 饶登宇,白冰,陈佩佩. 基于 SPH 方法的非饱和多孔介质相变耦合研究[J]. 岩土力学. 2018, 39(12): 4528
RAO Dengyu, BAI Bing, CHEN Peipei. Simulation of hydro-thermal coupling with phase-change in unsaturated porous media by SPH method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4528. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0827

[12] BAI Bing, RAO Dengyu, XU Tao, et al. SPH-FDM boundary for the analysis of thermal process in homogeneous media with a discontinuous interface [J]. International Journal of Heat & Mass

Transfer, 2018, 117: 518. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.004

[13] 夏维学,王聪,魏英杰,等. 高速旋转小球入水空泡特性数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(4): 139
XIA Weixue, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Numerical simulation investigation on water-entry cavity of high-speed spinning sphere[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(4): 139. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201510024

[14] MONAGHAN J J. On the problem of penetration in particle methods [J]. Journal of Computational Physics, 1989, 82(1): 1. DOI: 10.1016/0021-9991(89)90032-6

[15] 李维仲,赵月帅,宋永臣. 多孔介质孔隙尺度下不可压缩流体流动特性 SPH 模拟[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(2): 190
LI Weizhong, ZHAO Yueshuai, SONG Yongchen. Simulation of incompressible fluid flow in porous media at pore scale via smoothed particle hydrodynamics [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(2): 190. DOI: 10.7511/dllgxb201302006

[16] BAI Bing, LI Huawei, XU Tao, et al. Analytical solutions for contaminant transport in a semi-infinite porous medium using the source function method [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 115. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.05.002

(编辑 赵丽莹)