

预测单层柱面网壳破坏模式的细胞自动机方法

张明¹, 张瑀¹, 景志涛², 周广春¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 北京市建筑设计研究院有限公司, 100045 北京)

摘要: 为改进网壳结构有限元数值模拟效率以及拓展数值模拟结果应用, 发展了一种预测单层柱面网壳结构破坏模式的细胞自动机方法. 该方法通过有限元模拟, 给出了单层柱面网壳简谐地面运动下动力失稳破坏模式和 TAFT 地震波作用下动力强度破坏模式; 然后, 用归一化节点有限元位移值、以及归一化节点对数应变能密度值构成网壳两种细胞自动机状态模式; 进而, 建立了单层柱面网壳相似节点域的概念, 并给出了相应的匹配准则; 最后, 以基础网壳破坏模式为依据, 通过匹配基础网壳和目标网壳之间的相似节点域, 预测了目标网壳失稳破坏位移模式和强度破坏对数应变能密度模式. 预测结果验证了所发展的细胞自动机方法的有效性, 期待成为分析网壳结构的新途径.

关键词: 单层柱面网壳; 破坏模式; 细胞自动机; 节点域; 准则

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)02-0014-06

Cellular automata technique for predicting failure mode of single-layer latticed cylindrical shell

ZHANG Ming¹, ZHANG Yu¹, JING Zhitao², ZHOU Guangchun¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. Beijing Institute of Architectural Design, 100045 Beijing, China)

Abstract: This paper develops a cellular automata (CA) technique for predicting the failure modes of single-layer latticed cylindrical shells to address computing time cost and explore computing results' further application. Firstly, finite element analysis gives out the failure modes of the single-layer latticed cylindrical shells under harmonic loads and TAFT seismic waves. Then, two CA numerical modes are established: the dynamic instability modes of shells under harmonic ground motion, described by the normalized finite element node displacements; the strength failure mode under TAFT seismic waves, described by the logarithmic strain energy density of node domain. Moreover, the concept of node domain similarity is proposed and the corresponding criterion is established to match the node domain similarity between shells. Finally, the CA technique is formed to predict the dynamic instability modes and the strength failure modes of objective shells, based on the failure modes of base shells. The predicted results validate the CA technique, which could be a new way for analyzing shell structures.

Key words: single-layer latticed cylindrical shell; failure mode; cellular automata; node domain; criterion

网壳结构因其受力合理、自重轻、抗震性能优越等显著优点被广泛应用. 与此同时, 鉴于网壳结构的公共性、标志性、群体避难性功能, 对网壳结

构在地震^[1-2]、强风、爆炸冲击^[3]等极端荷载作用下的工作行为分析提出了更高要求, 诸如网壳结构无征兆的动力失稳破坏模式研究, 网壳结构爆炸冲击荷载^[4-5]作用下工作行为研究等等.

国内外学者对网壳结构强震下破坏模式及其破坏机理进行了大量研究, 旨在指导设计, 避免出现无征兆的失稳破坏. 由于网壳试验费用昂贵、试验周期长等原因, 目前对于网壳破坏模式的判别一般基于结构动力全过程响应的有限元分析结

收稿日期: 2012-07-19.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (HIT-NSRIF-2013113).

作者简介: 张明 (1983—), 男, 博士研究生;

周广春 (1958—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 张瑀, zhangyuhit@hit.edu.cn.

果,即根据结构节点位移等特征响应判别其破坏模式^[6-8].然而,网壳的有限元分析需要反复试算、计算耗时巨大.除此之外,高运算成本获得的结果理应以充分应用.因此,本文提出了基于标准单层柱面网壳有限元分析结果,对拟建同类网壳结构破坏模式进行快捷预测的细胞自动机方法.

本文采用的细胞自动机方法,基于以下研究成果:文献[9-10]将细胞自动机方法应用于结构分析中,基于标准墙板破坏模式,预测了“新”砌体墙板的开裂模式.文献[11]细胞自动机和神经网络方法,成功预测了竖向荷载作用下、不同方位灰缝砌体小墙的破坏模式.

1 基本概念简介

将文献[9-10]中提出的概念拓展到网壳结构,构成了该方法的理论基础,简介如下.

节点域:网壳节点及其所连结的杆件单元构成的区域.

节点状态值:将网壳各个节点作为细胞元,从而构成了网壳细胞自动机模型.细胞元(节点)状态值取单位荷载下、网壳节点归一化有限元位移值,或归一化对数应变能密度值.这样的状态值既包括结构的构造因素,又能反映荷载工况.

网壳位移破坏模式:网壳破坏时,所有节点归一化位移值所构成的数值模式.

网壳能量破坏模式:网壳破坏时,所有节点归一化应变能密度值所构成的数值模式.

相似节点域:不同(或相同)单层柱面网壳的两个节点区域有相同或相近的节点状态值,称这两个节点区域为相似节点域.

基础网壳:已知有限元模拟/试验破坏模式的典型网壳,是预测目标网壳破坏模式的基础或参照,故统称为基础网壳.

目标网壳:破坏模式待预测的网壳.

2 单层柱面网壳有限元模拟

研究对象为三向网格型单层柱面网壳,计算模型见图1.假定单层柱面网壳节点均为刚性连接,杆件采用圆钢管,斜杆和纵杆取两种不同的杆件截面,截面选取均满足常规静力设计要求;网壳四边支承,两纵边约束X、Y、Z三向位移,两横边约束X和Z方向位移.

建立多个单层柱面网壳有限元模型,包括不同矢跨比、不同屋面质量以及不同杆件截面尺寸等情况.为便于叙述,对单层柱面网壳进行统一编

号,现以网壳S15122a为例说明具体编号含义.S:单层柱面网壳;15:长度为15 m;12:屋面均布荷载为1.2 kN/m²;2:矢跨比为1/2;a:截面类型;所有算例的柱面网壳长度均为15 m.

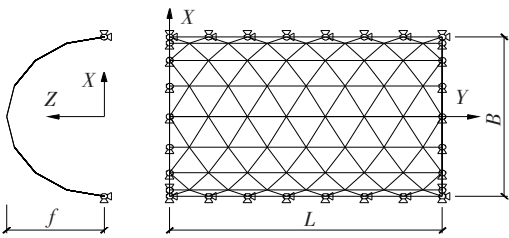


图1 三向网格型单层柱面网壳计算模型

其他同类型网壳编号以此类推,详细截面尺寸及结构构造参数见表1.

表1 单层柱面网壳构造参数

编号	跨度/m	屋面质量/ (kg · m ⁻²)	矢跨比	纵杆截面/ mm × mm	斜杆截面/ mm × mm
S15122	15	120	1/2	45 × 3.0	70.0 × 4.0
S15122a	15	120	1/2	45 × 3.0	63.5 × 4.0
S15123	15	120	1/3	45 × 3.0	70.0 × 4.0
S15125	15	120	1/5	45 × 3.0	70.0 × 4.0
S15125a	15	120	1/5	45 × 3.0	75.0 × 4.0
S15125b	15	120	1/5	50 × 3.5	83.0 × 4.5
S15062	15	60	1/2	42 × 3.0	60.0 × 3.5
S15182	15	180	1/2	54 × 3.0	76.0 × 4.0

采用有限元进行计算时,杆单元选用可实时输出截面积分点应力及应变的Pipe20单元,将屋面荷载按表面积等效为节点集中质量,选用Mass21单元;材料为双线性随动强化模型,材料弹性模量 $E_t = 0.02E$,屈服点235 MPa;阻尼为Rayleigh阻尼,阻尼比 $\xi = 0.02$;考虑初始缺陷的影响.

经过正弦波扫频分析后,取1.0、5.0、6.0、7.6、8.0、10.0 Hz共计6种频率的简谐波作为地面运动输入,对单层柱面网壳进行动力全过程响应分析,持续时间为10 s.与此同时,也计算了TAFT地震波作用下单层柱面网壳的破坏模式,由于篇幅限制,未将上述结果列于文中.

3 预测网壳破坏模式的细胞自动机方法

本文建议的预测单层柱面网壳破坏模式的细胞自动机方法见图2.下面介绍网壳细胞自动机数值模式的建立、相似节点区域及其匹配准则.

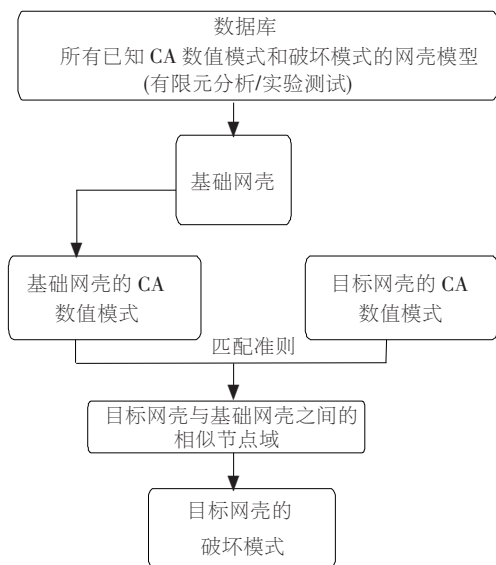


图 2 预测单层柱面网壳破坏模式的细胞自动机方法

3.1 单层柱面网壳的细胞自动机数值模型

单层柱面网壳结构的构造特征十分符合细胞自动机模型的构建要求,各个节点即可视为细胞元,而各节点之间的连接杆件可视为节点之间状态传递函数载体.这样,就构成了该网壳的细胞自动机模型.关于各个细胞元(节点)的状态值,除考虑到与网壳的构造情况有关、还尝试了融入荷载工况,即作用于网壳的屋面荷载以及地面运动的形式和频率.本文给出的单层柱面网壳状态值算法,应用单位荷载工况下网壳有限元数值模拟结果,有位移和能量两种状态值.

1)位移状态值定义为式(1)所计算的结构各节点归一化有限元位移值

$$S_i = u_i^s / \max(u_i^s), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

式中: S_i 是第*i*个节点位移状态值; u_i^s 是单位加速度幅值地面运动作用下第*i*个节点的有限元位移值; $\max(u_i^s)$ 是*N*个节点中有限元位移的最大值;*N*是单层柱面网壳的节点总数.

2)能量状态值定义为节点域归一化对数应变能密度值.其计算过程以柱面网壳第*i*节点(图3)为例进行说明.

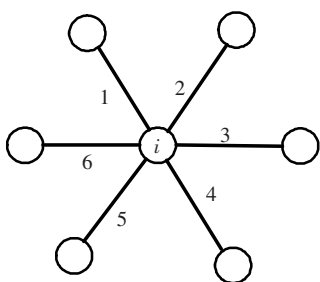


图 3 柱面网壳第*i*节点域

参照 Ansys10.0 帮助文档,与第*i*节点相连的每个杆单元的应变能计算为

$$E_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \{ \sigma \}^T \{ \epsilon^{el} \} v_j + E_e^{pl}. \quad (2)$$

式中: E_i 是单元*i*的应变能;*N*为单元积分点数目; $\{ \sigma \}$ 为应力向量; $\{ \epsilon^{el} \}$ 为弹性应变向量; v_j 为单元积分点*j*的体积; E_e^{pl} 为单元塑性应变能;

参照式(2)计算出与节点*i*相连的每根杆件的应变能后,再应用 Ansys 相关命令提取出相应杆件的体积 V_i ,从而得出第*i*根杆件的应变能密度及第*i*节点域的应变能密度.

$$I_j^i = \frac{E_j}{V_j}, \quad (3)$$

$$I_i = \sum_{j=1}^6 I_j^i. \quad (4)$$

式中: I_j^i 是第*i*节点域中单元*j*的应变能密度; I_i 是节点域*i*的应变能密度.

在式(4)基础上,对每个节点取常用对数,即将其投射到对数空间中,然后再将其归一化,即得细胞元(节点)的能量状态值为

$$S_i = \log(I_i) / \max_{i=1}^N [\log(I_i)], \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

式中: $\max_{i=1}^N [\log(I_i)]$ 为网壳*N*个节点中节点域对数应变能密度的最大值.

3.2 相似节点域匹配准则

相似节点域的寻找与确定对目标网壳破坏模式的预测非常重要,寻找相似节点区域的过程需要相应的准则.参照文献[10]的墙板类似区域匹配准则,建立了相似节点域匹配准则数学表达式

$$E_i(k, e, j) = \min_{k=1}^{N_{base}} \left(\min_{j=0}^5 (|S[i] - S[k]| + \sum_{e=j}^{5+j} (S[Q(i, e-j)] - S[Q(k, \text{rem}(e, 6))]) \right) \bigg|_k. \quad (6)$$

式中: N_{base} 为基础网壳节点个数; $E_i(k, e, j)$ 为所有节点状态值差值中的最小值; $\text{rem}(e, 6)$ 是变量*e*除以6的余数; Q 为单层柱面网壳中任意节点的相邻节点编号; S 为细胞状态值;*i*,*k*为目标网壳和基础网壳的节点编号.

式(6)表明,确定相似节点区域时,不仅要考虑中心节点状态差值,还要考虑与中心节点相连的6个相邻节点的状态差值.此外,当目标网壳节点与基础网壳相应节点方位角完全相同时,算出的状态差值不一定最小,因此需要将式(6)中各项换位(见图4),计算出不同方位角时对应的误差,然后再寻找误差最小值.

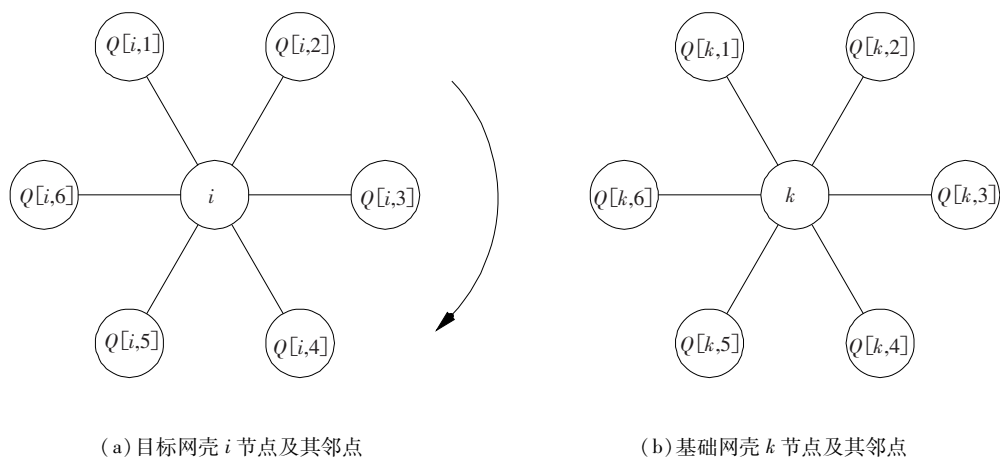


图 4 相似节点方位示意

3.3 网壳破坏模式投射准则

首先,进行基础网壳有限元模拟,得到基础网壳破坏时各节点位移值以及各杆件单元的应变能. 然后,将基础网壳破坏时的节点位移,或者节点域应变能密度值,投射给目标网壳的类似节点域. 进而,构成目标网壳的破坏模式为

$u_{\text{object}}^f(i) \leftarrow u_{\text{base}}^f(k), i = 1, 2 \cdots N_{\text{object}}, k = 1, 2 \cdots N_{\text{base}}$.
式中: $u_{\text{object}}^f(i), u_{\text{base}}^f(k)$ 分别表示单层柱面网壳结构发生动力破坏时,目标网壳中节点 i 与基础网壳中节点 k 的投射值; N_{object} 和 N_{base} 表示目标网壳和基础网壳的节点个数.

当目标网壳所有节点获得来自基础网壳的投射值之后,计算目标网壳各节点归一化投射值为

$$f_{\text{object}}^{\text{object}}(i) = \frac{u_{\text{object}}^f(i)}{\max(u_{\text{object}}^f(i))}, i = 1, 2 \cdots N_{\text{object}}.$$

式中: $\max(u_{\text{object}}^f(i))$ 表示 $u_{\text{object}}^f(i)$ 中的最大值.

3.4 均方根误差

为考察预测结果的精度,在此试用均方根误差对预测结果与有限元数值模拟结果进行评价. 均方根误差定义为各测量值误差平方和的平均值的平方根,计算公式为

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}.$$

4 目标网壳失稳破坏位移模式的预测

应用本文建立的细胞自动机方法,参照基础网壳的动力失稳破坏位移模式,预测同类型目标网壳的动力失稳破坏位移模式,预测结果以及数值模拟结果的比较见表 2.

表 2 目标网壳失稳破坏模式预测精度

基础网壳	目标网壳	R
S15122(6.0 Hz)	S15122(5.0 Hz)	0.089
S15122(6.0 Hz)	S15122(7.6 Hz)	0.047
S15122(8.0 Hz)	S15122(1.0 Hz)	0.046
S15122(8.0 Hz)	S15122(10.0 Hz)	0.062
S15122(6.0 Hz)	S15123(6.0 Hz)	0.089
S15122(6.0 Hz)	S15125(6.0 Hz)	0.047
S15122(6.0 Hz)	S15122a(6.0 Hz)	0.034
S15125c(6.0 Hz)	S15125a(6.0 Hz)	0.059

由表 2 可见,目标网壳的失稳破坏位移模式预测结果的均方根误差均小于 0.1. 图 5 展示了部分算例中,目标网壳细胞自动机方法预测破坏模式与有限元数值模拟破坏模式. 对比破坏模式云图及位移曲线可以看出:细胞自动机方法预测的和有限元计算的目标网壳节点位移曲线十分吻合,且两者节点位移极值分布区域一致.

5 网壳强度破坏应变能密度模式的预测

在 TAFT 地震波作用下,单层柱面网壳杆件塑性发展程度较大,在传统的二维空间里,结构塑性阶段各种响应呈现高度非线性,致使细胞自动机方法预测网壳破坏时的位移模式精度不佳. 因此,考虑以能量为切入点,将基础网壳强度破坏时的应变能密度响应投射到对数空间,形成网壳破坏时的对数应变能数值模式. 进而,运用该细胞自动机方法,参照基础网壳强度破坏的对数应变能密度模式,预测目标网壳强度破坏的对数应变能密度模式.

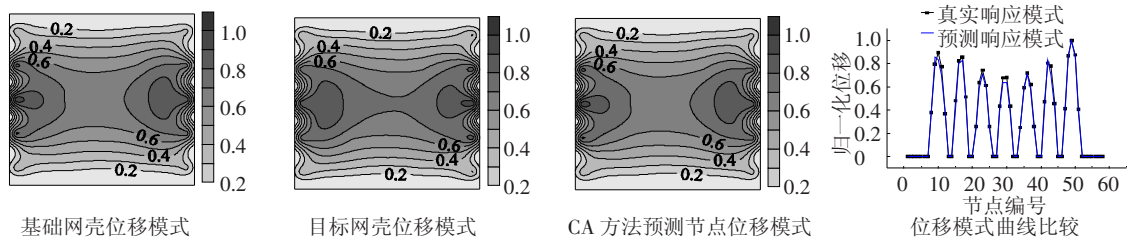
表 3 给出了细胞自动机方法预测的、单层柱

面网壳强度破坏时的应变能密度模式精度,可见均方根误差均较小。

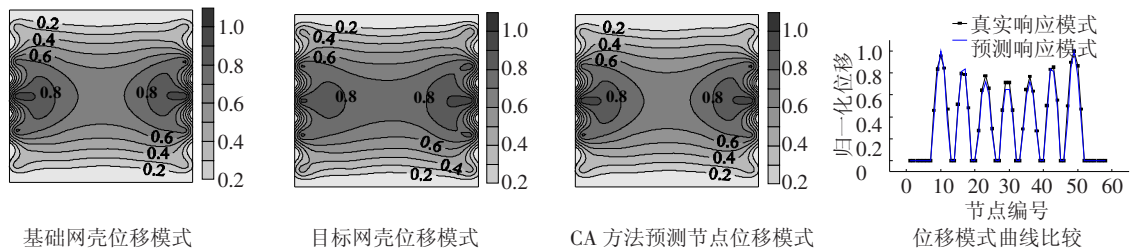
细胞自动机方法预测的目标网壳破坏模式与有限元计算破坏模式的对比见图 6。对比网壳破坏时应变能密度模式云图可以看出:细胞自动机方法预测的目标网壳破坏应变能密度模式与有限元计算的应变能密度破坏模式相近,且两者节点域应变能密度曲线吻合较好、节点域应变能极值分布区域一致。

表 3 动力强度破坏模式精度

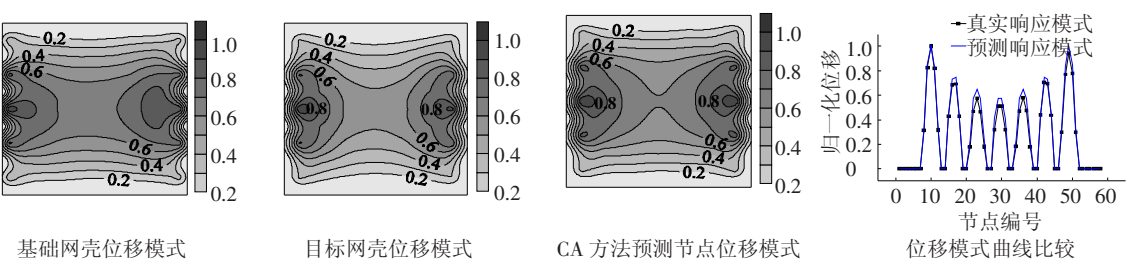
基础网壳	目标网壳	<i>R</i>
S15122	S15123	0.093
S15122	S15125	0.161
S15122	S15062	0.110
S15122	S15182	0.123
S15122	S21122	0.183



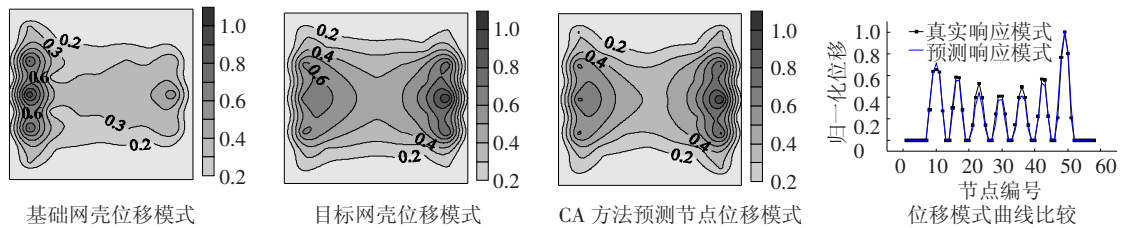
(a) 以基础网壳 S15122(6.0 Hz) 预测目标网壳 S15122(5.0 Hz)



(b) 以基础网壳 S15122(8.0 Hz) 预测目标网壳 S15122(1.0 Hz)



(c) 以基础网壳 S15122(6.0 Hz) 预测目标网壳 S15123(6.0 Hz)



(d) 以基础网壳 S15125b(6.0 Hz) 预测目标网壳 S15125a(6.0 Hz)

图 5 目标网壳失稳破坏模式比较

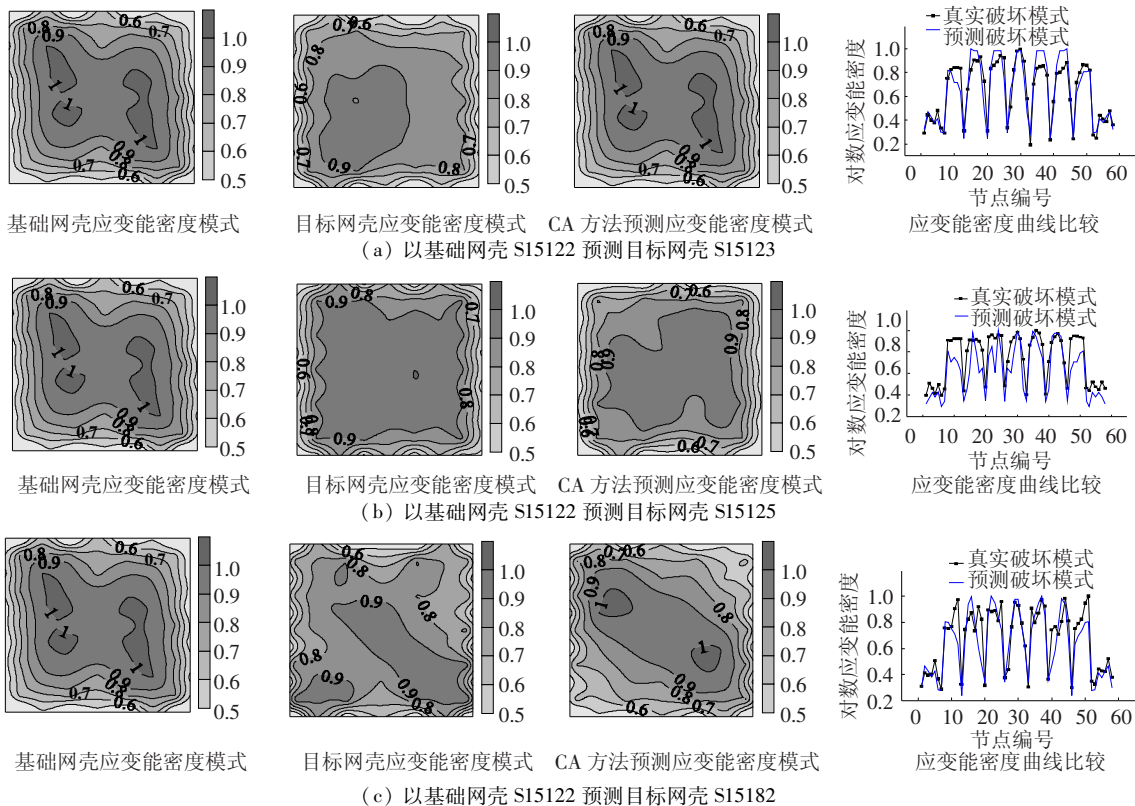


图6 目标网壳强度破坏模式比较

6 结 论

1) 本文建立的细胞自动机方法,以有限元计算的柱面网壳破坏模式为基础,对目标网壳的破坏模式——节点位移模式和节点域应变能密度模式进行预测,预测结果表明,方法有效,可简捷快速对目标网壳进行分析。

2) 提出了由网壳节点域对数应变能密度描述网壳结构细胞自动机数值模式,并以此为基础实现了基于基础网壳动力强度破坏模式预测目标网壳动力强度破坏模式,从而将细胞自动机方法拓展到网壳结构塑性阶段的分析。

致谢

感谢哈尔滨工业大学“空间结构研究中心”提供的技术支持!

参考文献

[1] SEISHI Y. Vibration behaviour of single-layer latticed cylindrical roofs [J]. International Journal of Space Structures, 1997, (3/4): 181-190.
 [2] KUMAGAI T, OGAWA T. Dynamic buckling behavior of single-layer latticed domes subjected to horizontal step wave [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2003, 44(3): 167-174.
 [3] ROSS S S. Construction disaster: design failures, causes, and prevention [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1984: 299-322.

[4] FAN F, WANG D Z, ZHI X D, *et al.* Failure modes of reticulated domes subjected to impact and the judgment [J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(2): 143-149.
 [5] FAN F, WANG D Z, ZHI X D, *et al.* Failure mechanism for single-layer reticulated dome under impact loads based on microcosmic dynamic response[C]//Proceedings of the International Symposium on Advances in Mechanics. Hangzhou: Materials and Structures, 2008: 155-164.
 [6] 郭海山, 沈世钊. 单层网壳结构动力稳定性分析方法[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(3): 1-9.
 [7] 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.
 [8] 苑宏宇, 叶继红, 沈世钊, 等. 单层球面网壳在简单动荷载作用下的失效研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(4): 10-17.
 [9] ZHOU G C. Application of stiffness/strength corrector and cellular automata in predicting response of laterally loaded masonry panels [D]. UK: University of Plymouth, 2002: 69-110.
 [10] ZHOU G C, RAFIQ M Y, BUGMANN G, *et al.* Cellular automata model for predicting the failure pattern of laterally loaded masonry panels [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2006, 20(6): 400-409.
 [11] ZHANG Y, ZHOU G C, XIONG Y, *et al.* Techniques for predicting cracking pattern of masonry wallet using artificial neural networks and cellular automata [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(2): 161-172.

(编辑 赵丽莹)