

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202007003

大跨度单层球面网壳抗连续倒塌性能 影响因素分析*

王媛¹, 聂晓宁², 田黎敏³

(1. 西安建筑科技大学华清学院, 陕西 西安 710043; 2. 上海宝冶集团有限公司, 上海 200941;
3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为分析大跨度单层球面网壳抗连续倒塌性能的影响因素, 通过Keiwitt-6(K6)型球面网壳缩尺模型的连续倒塌试验, 验证有限元模型的正确性。在此基础上, 分析了传力路径和初始缺陷对大跨度单层球面网壳抗连续倒塌性能的影响。研究表明, 两个传力路径依次失效后, 网壳主要通过压杆机制抵抗连续倒塌, 其破坏模式为局部倒塌。有限元分析结果与试验结果吻合较好。传力路径与初始缺陷对网壳抗连续倒塌性能影响显著: 传力路径依次失效时, 结构的抗连续倒塌性能可以得到充分发挥, 传力路径同时失效时, 结构的动力响应明显增大; 随着初始几何缺陷大小的增加, 网壳的抗连续倒塌性能降低; 当初始缺陷大小相同时, 结构并非均是在第1阶屈曲模态下率先发生连续倒塌。建议考虑传力路径的影响, 取前10阶屈曲模态进行网壳的连续倒塌分析。

关键词: 单层球面网壳; 连续倒塌; 传力路径; 初始缺陷

中图分类号: TU393.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0464-08

Influence Factors on Progressive-Collapse Resistance of Large-span Single-layer Latticed Domes

WANG Yuan¹, NIE Xiaoning², TIAN Limin³

(1. Xi'an University of Architecture and Technology Huaqing College, Xi'an 710043, China;
2. Shanghai Baoye Group Corp., Ltd., Shanghai 200941, China;
3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to analyze the factors influencing the collapse resistance of large-span single-layer latticed domes, a scaled Kiewitt-6 (K6) dome was tested and the finite element model was verified. On this basis, the effects of force transmission paths and initial imperfections on the progressive collapse resistance of large-span single-layer latticed domes were analyzed. The results indicate that after the two force transmission paths failed, the failure mode of the tested dome was local collapse. The dome relies mainly on the compression mechanism to resist progressive collapse. The finite element analysis results are well validated by the test results. The force transmission paths and initial imperfections have significant effects on the progressive collapse resistance of large-span single-layer latticed domes. When the force transmission path fails successively, the progressive collapse resistance of

* 收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608433)资助

作者简介: 王媛(1985—), 女, 副教授。主要从事结构抗倒塌研究。E-mail: wangy2711@126.com

通讯作者: 田黎敏(1983—), 男, 教授。主要从事结构抗倒塌及非线性分析研究。E-mail: tianlimin701@163.com

domes can be fully utilized. When the force transmission path fails at the same time, the dynamic response of the structure increases significantly. As the size of the initial imperfection increases, the progressive collapse resistance of domes decreases. When the size of the initial imperfection is identical, the progressive collapse of domes does not always occur firstly in the first-order buckling mode. It is recommended to consider the influence of the force transmission paths and take the first 10 buckling modes for analyzing the progressive collapse of domes.

Keywords: single-layer latticed dome; progressive collapse; force transmission path; initial imperfection

引言

连续性倒塌是指建筑结构由非预期荷载作用诱导形成局部失效,随后引起的部分或整体结构的倒塌^[1-2]。大跨空间网格结构造型优美、力学性能良好,被广泛应用于车站、体育场馆、航站楼等大型公共建筑中^[3]。由于人员密集,大跨度空间网格结构的连续性倒塌会造成严重的人员伤亡和财产损失。近年来,关于此类结构的连续倒塌事故常见于报端,引起学者的广泛关注^[4-6]。

对于网架结构,丁北斗等^[7]利用缩尺模型揭示了此类结构连续倒塌的破坏机制,在此基础上提出了相应的设计建议。韩庆华等^[8]采用基于位移响应的连续倒塌判别准则,确定了网架结构的两类连续倒塌模式。熊进刚等^[9]对某中学艺术楼屋顶网架在雪荷载超载时的连续倒塌性能进行了分析,给出不同雪载下此类结构的抗倒塌性能表现。对于桁架结构,江晓峰,陈以一等^[10]通过数值分析,归纳出桁架结构的三种局部内力重分布机制:转动铰机制、滑移面机制及长压杆机制。闫伸等^[11-12]研究了平面桁架结构的抗连续倒塌机理,在此基础上提出一种防止结构发生连续倒塌的新型节点。为揭示空间管桁架结构的连续倒塌破坏机理,舒赣平等^[13]通过连续倒塌动力试验较好的模拟了结构的倒塌过程。网壳结构方面,赵宪忠等^[14],徐颖等^[15]均进行了单层球面网壳模型的连续倒塌试验,探讨了此类结构在局部构件失效后的动力响应。张月强等^[16]运用等效荷载瞬时卸载法对绍兴山水馆进行了连续倒塌动力分析,并提出等效荷载的取值建议。为正确评估大跨度空间网格结构的动力效应,田黎敏等^[17-19]提出此类结构连续倒塌动力及简化静力的分析方法,并给出网壳结构静力分析的荷载动力放大系数和优化措施。

虽然很多学者对不同形式的大跨度空间网格结构进行了连续性倒塌研究,但是关于此类结构的

抗连续倒塌性能影响因素却尚未提及。因此,本文通过 Keiwiitt-6(K6)型球面网壳缩尺模型的连续倒塌试验,验证有限元模型的正确性。在此基础上,分析了传力路径和初始缺陷对大跨度单层球面网壳抗连续倒塌性能的影响,为大跨度空间网格结构抗连续倒塌性能分析提供理论依据。

1 连续性倒塌试验

1.1 试件设计

试件模型为跨度 2.4 m,矢跨比 1/8 的缩尺 K6 型网壳(缩尺比例约为 1:16),如图 1 所示。以环向杆件为分界线由内向外将网壳划分为 3 个环区,每一环的节点按照顺时针方向进行编号,杆件以节点编号命名。其中,J-T 为网壳顶部节点,J-A1 表示第 1 环第 1 个节点,J-B1 表示第 2 环第 1 个节点,J-C1 表示第 3 环第 1 个节点,M-TA1 表示 T 节点与 A1 节点之间的杆件,以此类推。目前,学者对建筑结构连续性倒塌的研究往往忽略事故的起因,重点关注局部失效后破坏的扩展。因此给出待失效杆件的位置如图 1 所示。

网壳模型的材料选用 Q235 钢,所有杆件均采用截面规格为 $\Phi 10 \times 1$ mm 的圆钢管。为获得钢管材料的实际力学性能,对杆件进行了单轴拉伸试验(图 2),

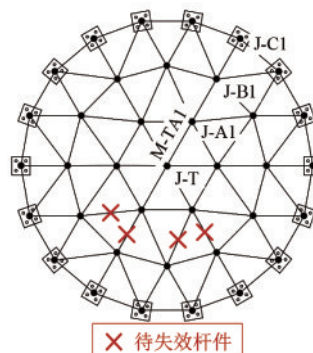


图 1 K6 网壳模型

Fig.1 Model of the tested K6 dome

测试结果如表1所示。节点均采用截面规格为 $\Phi 40 \times 4$ mm的焊接空心球节点,并在除支座节点外的其他节点正下方焊接U形开孔板,通过安全扣吊装若干配重块模拟节点荷载(40 kg,面荷载约为 1.65 kN/m^2)。

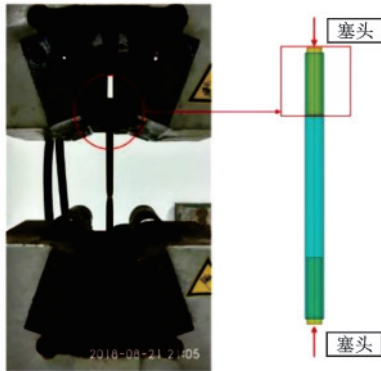


图2 杆件的单轴拉伸试验

Fig.2 Uniaxial tensile tests of the members

表1 杆件的实测材料特性

Table1 Measured material properties of the members

杆件编号	弹性模量 E / GPa	屈服强度 f_y / MPa	极限强度 f_u / MPa	极限应变 ϵ_u
1	181	330	531	0.16
2	201	358	556	0.20
3	215	369	553	0.19
4	199	333	513	0.20
5	215	360	543	0.17
6	207	365	533	0.17

1.2 加载装置

为使网壳模型可自由垂直变形,设计了一种自平衡加载装置,如图3所示。该加载装置由Q235 H型钢焊接而成,长 \times 宽 \times 高分别为 $2.6 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$,用地脚螺栓锚固于地面。在网壳的每个支座节点上焊接一个 $12 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的钢板,每个节点均利用4个M20螺栓将网壳与自平衡装置相连(网壳与自平衡加载装置之间可简化为刚性连接),其中环梁承担加载过程中的竖向荷载,支座处螺栓抵抗水平荷载。

此外,设计了一种电子装置以实现杆件的瞬时失效,如图4所示。其工作原理如下:首先截断待失效杆件,并将定制的开槽圆柱塞头固定于杆件两端断开处;随后通过将杆件失效装置的电磁铁通电使剪刀夹头咬合,并利用螺栓和塞头间的机械咬合力使杆件重新形成一个整体,从而实现待失效杆件的正常传力。试验时,通过将磁铁突然断电,继而剪

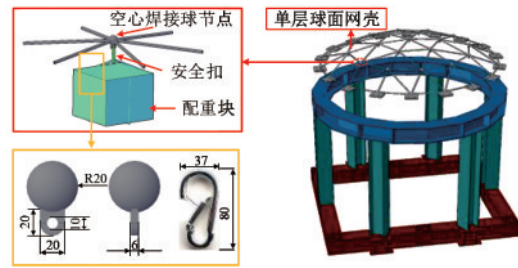


图3 自平衡加载装置

Fig.3 Self-balancing device

刀夹头咬合失效(0.1 s内)最终实现杆件的瞬时断开。与传统失效装置相比,本装置失效时间短、对网壳影响小、便于实现。

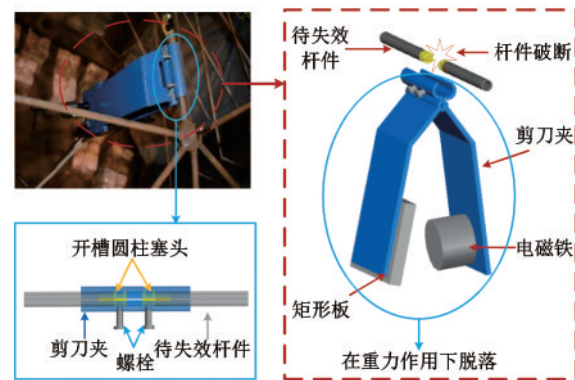


图4 杆件失效装置

Fig.4 Member-breaking device

1.3 测量装置

分别采用频率为 1024 Hz 的动静态信号测试分析系统、位移计和加速度传感器采集杆件的应变响应、节点处的动态位移及结构的高频振动。测量装置的布置如图5所示。其中,分别在失效杆件及其周边杆件、第2环径向杆件的跨中上下表面(沿长度方向,“T”和“B”分别代表杆件的上、下表面)粘贴了24个应变片。通过铝合金支架将13个位移计布置在模型顶点及第1、2环径向杆件的节点上方(节点J-T标定为位移计D1,第1环从节点J-A1处开始顺时针依次标定为D2至D7,同理第2环为D8至D13)。加速度传感器布置在径向杆件与第1环相交的6个节点上方(节点J-A1的加速度为A1,其余节点按顺时针依次增加至A6)。为保证仪器安全,第二次失效杆件时将全部位移计拆除。

1.4 试验方案

由文献[17]可知,失效构件首先应从第1环与

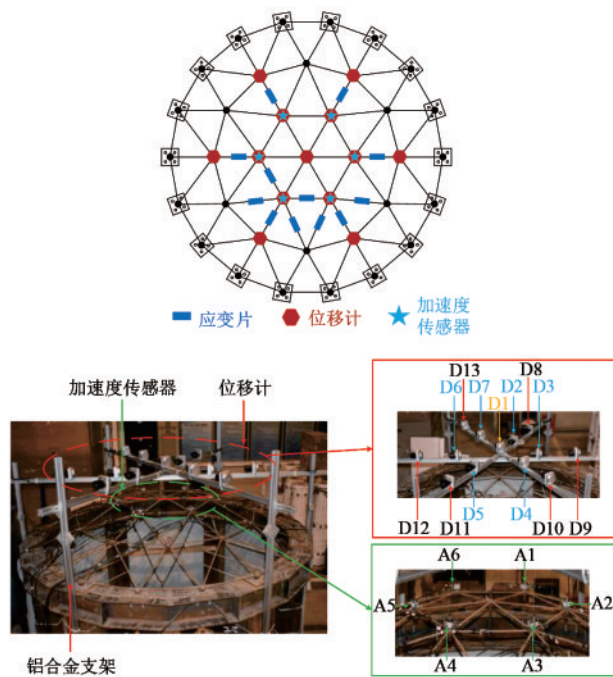


图5 测量装置布置

Fig.5 Instrumentation configurations

第2环间的肋杆中选取。以肋杆为中心,结构可分为6个相同的区域,以形成6个主要的传力路径,单个传力路径的控制区域如图6所示。根据荷载分配原则(刚度越大的区域分配荷载越多),同时去除单个控制区域内的肋杆和某根相邻斜杆,可以假定该传力路径失效。因此,试验以顺时针方向依次失效每个传力路径,考察结构的动力响应。

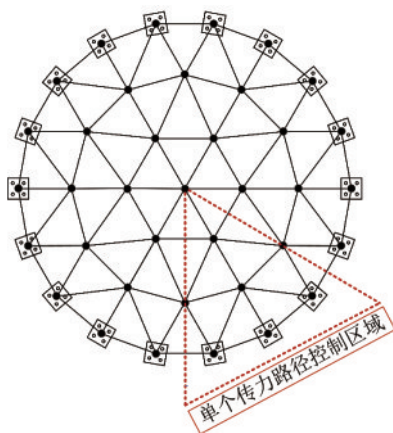


图6 单个传力路径控制区域

Fig.6 Control area of the single transmission path

试验共分为两个阶段:静力加载阶段和连续倒塌阶段。静力加载阶段时,将瞬时失效装置安装于待失效杆件 M-A3B5、M-A3B6、M-A4B7、M-A4B8 上,并始终保持电磁铁通电状态。配重块的挂载按

照由内向外,肋杆优先的原则进行。在连续倒塌阶段,分两次将待失效杆件上的瞬时失效装置启动(第一次同时失效杆件 M-A3B5 和 M-A3B6;第二次同时失效 M-A4B7 和 M-A4B8),考查结构每个阶段的动力响应。以上释放阶段每次持时 60 s,直至网壳重新获得稳定或发生倒塌。

1.5 试验现象

在静力加载阶段,网壳无明显变形。当杆件 M-A3B5 和 M-A3B6 同时失效后,节点 J-A3 出现轻微下降并伴随小幅度振动。当杆件 M-A4B7 和 M-A4B8 同时失效后,节点 J-A4 和 J-A3 开始向下运动,并带动节点 J-T 产生向下位移,失效杆件周围出现较明显的局部凹陷,结构发生局部倒塌。图 7 给出杆件 M-A4B7 和 M-A4B8 同时失效后网壳的倒塌过程。

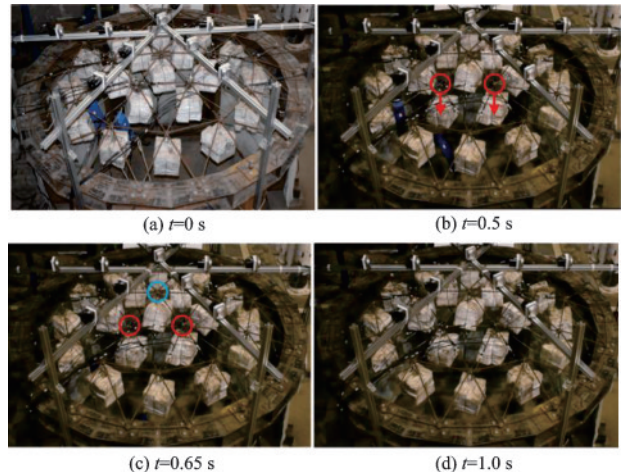


图7 M-A4B7 和 M-A4B8 失效后测试网壳的试验现象

Fig.7 Experimental phenomena of the tested dome after the failure of M-A4B7 and M-A4B8

1.6 试验结果分析

图 8 给出 M-A3B5 和 M-A3B6 同时失效后网壳的位移响应(向下为正)及应变响应。由分析可知,网壳的最大位移振幅接近 12 mm,稳定后保持在 9 mm。此时各肋杆应变基本无变化,说明此时传力路径的突然失效对结构整体影响较小,结构可快速完成局部内力重分布。

此外,M-A4B7 和 M-A4B8 失效后部分肋杆的应变响应如图 9 所示(如文献[17]所述,肋杆为此类网壳的重要构件)。由图可知,各肋杆应变增大,且肋杆受力以受压为主,结构主要通过压杆机制抵抗连续倒塌。

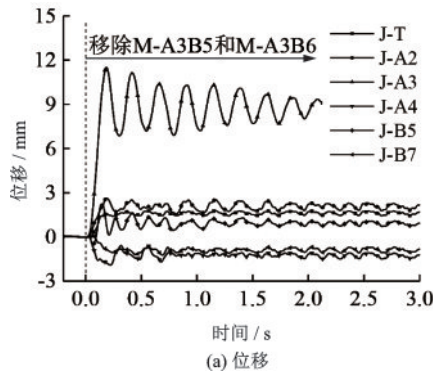


图8 M-A3B5和M-A3B6失效后网壳的动力响应
Fig.8 Dynamic responses of the tested dome after the failure of M-A3B5 and M-A3B6

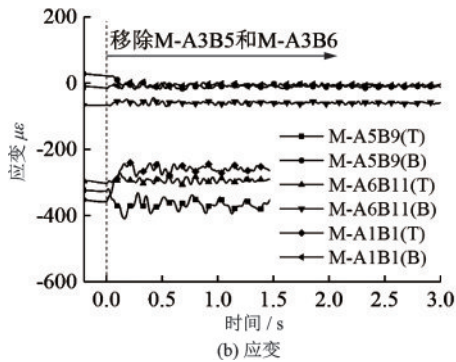


图8 M-A3B5和M-A3B6失效后网壳的动力响应

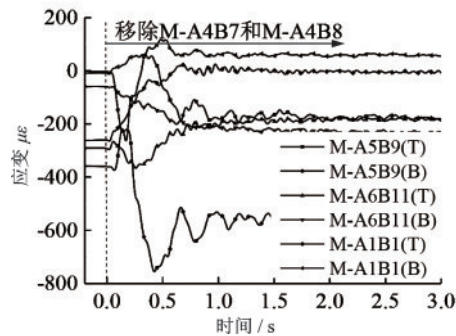


图9 M-A4B7和M-A4B8失效后网壳的应变响应
Fig.9 Strain responses of the tested dome after the failure of M-A4B7 and M-A4B8

2 有限元验证

采用备用荷载路径法(AP法)对网壳进行连续性倒塌分析。通过有限元软件ABAQUS进行建模,杆件用B31梁单元模拟,约束方式为固接,钢材本构利用实测材性(平均值)的双线性等向强化模型进行分析,阻尼比取0.03,采用一致缺陷模态法设置 $L/400$ 的初始几何缺陷。杆件全部失效后网壳的最终有限元分析结果如图10所示。

图11对比了测试网壳动力响应的有限元与试

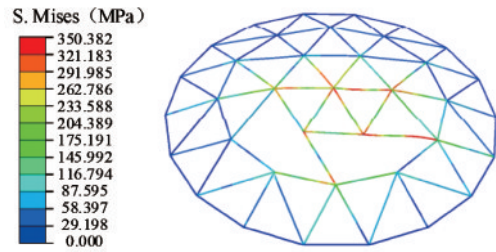
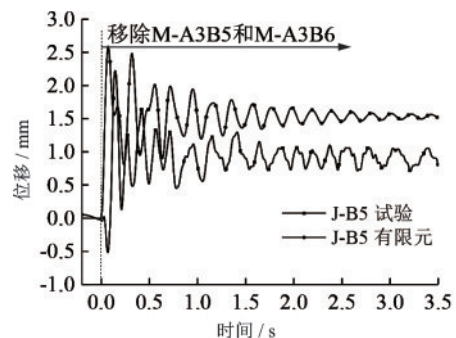


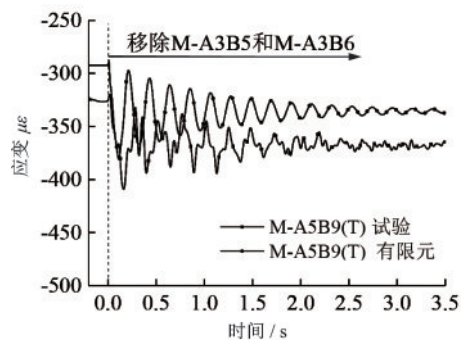
图10 测试网壳的最终有限元结果

Fig.10 Final finite element result of the tested dome

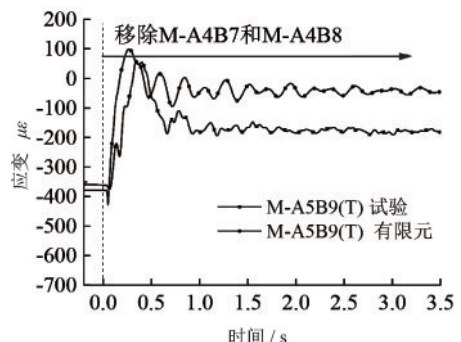
验结果。由分析可知,二者的位移和应力总体吻合较好,该有限元模型可以合理的模拟网壳的连续倒塌过程。有必要特别说明的是,有限元与试验结果的差异可能是由试验中实际的几何缺陷引起的。



(a) M-A3B5和M-A3B6失效后的位移



(b) M-A3B5和M-A3B6失效后的应力



(c) M-A4B7和M-A4B8失效后的应力

图11 有限元与试验结果的对比

Fig.11 Comparisons of finite element simulation and experimental results for the tested dome

3 影响因素分析

3.1 足尺有限元模型

采用验证后的建模方法建立足尺有限元模型,对单层球面网壳的抗连续倒塌影响因素进行分析。网壳跨度为60 m,矢跨比为1/8,支座固接。材料选用Q235钢,径/环向杆、斜杆分别采用 $\Phi 146 \times 5.5$ mm、 $\Phi 133 \times 4$ mm的圆钢管^[20]。钢材本构采用等向强化模型,弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$ N/mm²,强化段切线模量 $E_t=0.01 E$ 。参考缩尺模型,将失效杆件布置于第3环与第4环之间,如图12所示。结构中每个节点施加2 100 kg的荷载。

3.2 传力路径

将杆件的失效方式分为3种,即:四根杆件依次

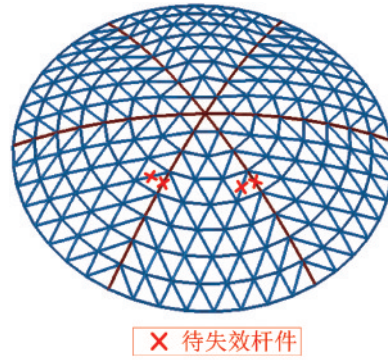


图12 足尺网壳模型

Fig.12 Model of the full-scale dome

失效 M-1(传力路径依次失效)、相邻两根杆件同时失效 M-2(传力路径部分依次失效)以及四根杆件同时失效 M-3(传力路径同时失效)。图13给出网壳中部分杆件在不同失效工况下的应变对比结果(根据响应大小及重要性,选取失效杆件附近杆件及其

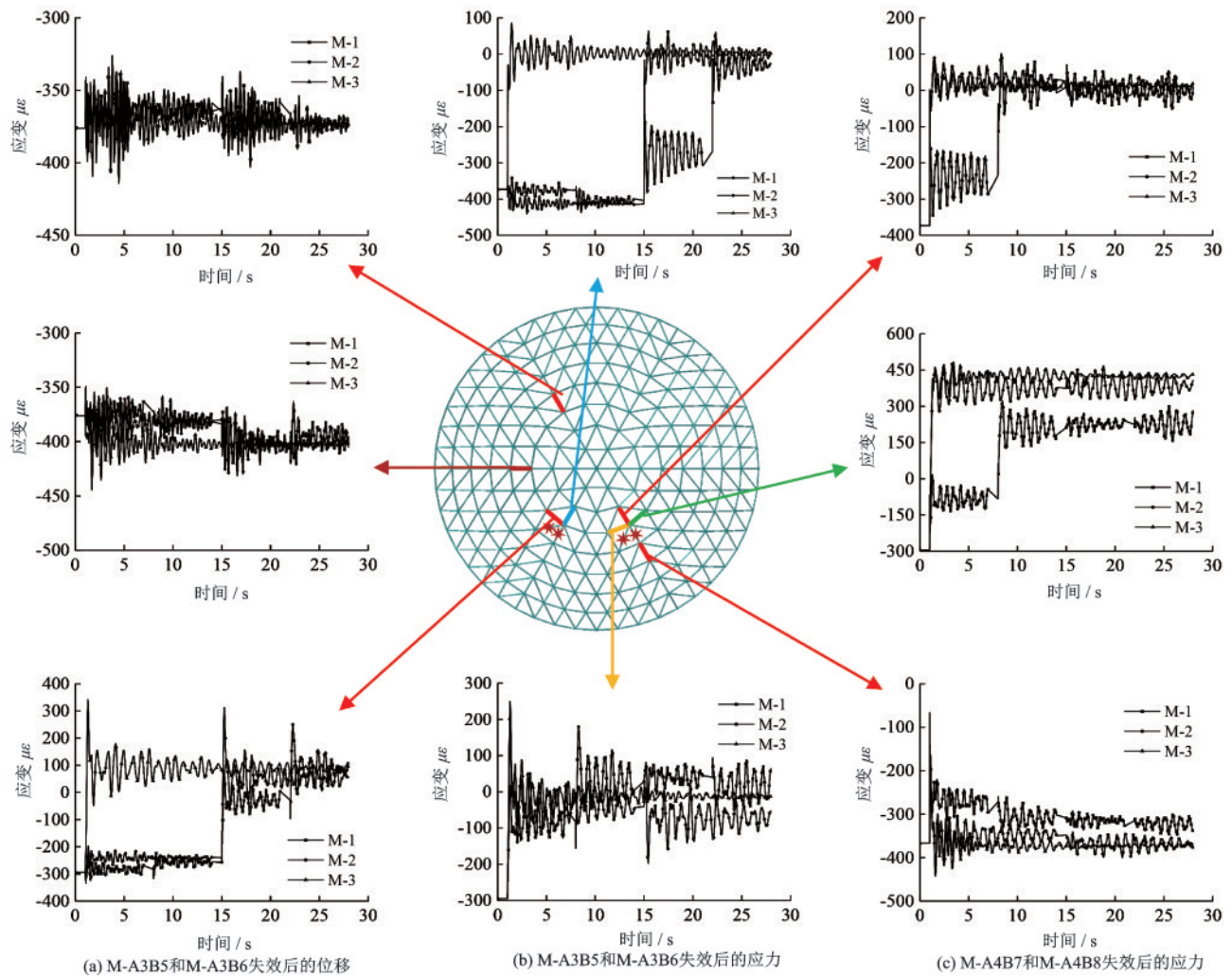


图13 不同失效工况下的应变对比

Fig.13 Comparisons of the strain under different failure conditions

他肋杆进行对比)。

由图 13 可知,特定杆件失效后,远离失效杆件的区域基本未受到影响,此区域杆件经历过轻微振动后,稳定时的应变基本与静载时一致。对于失效区域附近的杆件,其应变出现了较大的波动,且杆件同时失效(M-2、M-3)对结构的影响较依次失效(M-1)的影响大。此时,进一步增加各工况下的节点荷载进行连续倒塌分析,直至网壳出现倒塌。图 14 给出三种工况下节点的荷载一位移曲线。

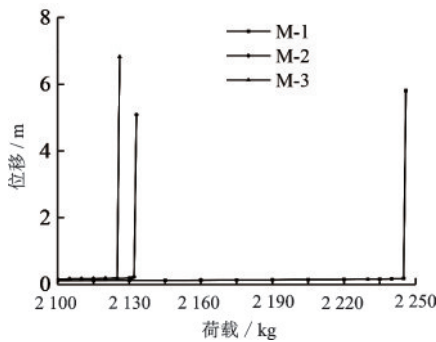


图 14 4 节点的荷载一位移曲线
Fig.14 Load-displacement curves of the joints

由分析可知,三种工况下网壳的倒塌模式基本一致,即失效杆件周边内力重分布失效,引起附近区域节点向下运动,出现局部凹陷,随着凹陷范围的持续扩展,引起主要受力杆件失稳,从而发生连续倒塌。但是,三种工况下网壳的节点极限承载力却大不相同,分别为 2 246、2 133、2 126 kg(M-1>M-2>M-3),说明传力路径对网壳抗连续倒塌性能影响显著。传力路径依次失效时,结构的抗连续倒塌性能可以得到充分发挥,传力路径同时失效时,结构的动力响应明显增大,建议进行连续倒塌分析时考虑传力路径不同对网壳产生的影响。

3.3 初始缺陷

初始几何缺陷对网壳抗连续倒塌性能的影响主要由初始几何缺陷的大小及位置决定。此次连续倒塌分析中,初始几何缺陷的大小取: $L/300$ 、 $L/400$ 、 $L/500$ 、 $L/600$ 、 $L/700$ 、 $L/800$ 、 $L/900$ 、 $L/1\ 000$ (其中 L 为网壳跨度),初始几何缺陷的位置考虑前 10 阶屈曲模态。对上述计算参数逐一按照备用荷载路径法进行抗连续倒塌动力分析,结果如图 15 所示。

由分析可知,随着初始几何缺陷大小的增加,网壳的抗连续倒塌性能降低(节点极限承载力越高,结构抗连续倒塌性能越好),且缺陷越大结构抗

连续倒塌性能下降越快。初始缺陷越大,缺陷构型对结构抗连续倒塌性能的影响越大,说明初始缺陷位置对网壳的抗连续倒塌性能影响显著。对各缺陷下网壳结构的极限承载力取平均值,则结构为最不利缺陷时($L/300$)的抗连续倒塌性能下降幅度为 23%。

此外,图 16 给出不同初始缺陷大小在同一模态下节点极限承载力的平均值。由图可知,当初始缺陷大小相同时,结构并非均是在第 1 阶屈曲模态下率先发生连续倒塌(最低阶缺陷模态对应的临界荷载值未必最低),考虑高阶模态发生概率的减小,建议取前 10 阶屈曲模态作为初始缺陷构型进行网壳的连续倒塌分析。

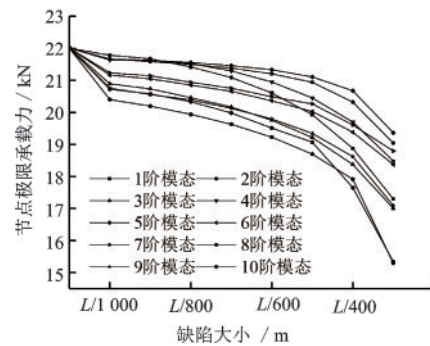


图 15 不同初始缺陷下节点极限承载力的对比
Fig.15 Comparisons of the ultimate bearing capacity of the joint under different initial imperfections

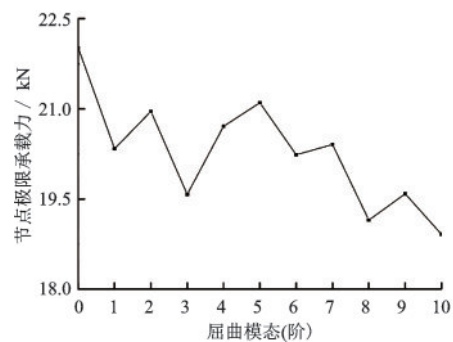


图 16 节点极限承载力的对比
Fig.16 Comparisons of the ultimate bearing capacity of the joint

4 结 论

本文通过 K6 型球面网壳缩尺模型的连续倒塌试验,验证有限元模型的正确性。在此基础上,分析了传力路径和初始缺陷对大跨度单层球面网壳

抗连续倒塌性能的影响,得出以下结论:

(1)两个传力路径失效后,失效节点开始向下运动,并带动周边节点产生向下位移,失效杆件周围出现较明显的局部凹陷,结构发生局部倒塌。

(2)网壳肋杆应变增大,且肋杆受力以受压为主,结构主要通过压杆机制抵抗连续倒塌。

(3)有限元分析结果与试验结果吻合较好,有限元模型可以合理的模拟网壳的连续倒塌过程。

(4)传力路径与初始缺陷对网壳抗连续倒塌性能影响显著:传力路径依次失效时,结构的抗连续倒塌性能可以得到充分发挥,传力路径同时失效时,结构的动力响应明显增大;随着初始几何缺陷大小的增加,网壳的抗连续倒塌性能降低;当初始缺陷大小相同时,结构并非均是在第1阶屈曲模态下率先发生连续倒塌。

(5)建议考虑传力路径的影响,取前10阶屈曲模态进行网壳的连续倒塌分析。

参考文献:

- [1] Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects: GSA2013[S]. Washington D C: General Services Administration, 2013.
- [2] Design of buildings to resist progressive collapse: UFC 4-023-03[S]. Washington D C: Department of Defense, 2013.
- [3] 田黎敏, 郝际平, 陈韬, 等. 世界大学生运动会主体育场施工过程模拟分析 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(5): 70-77.
Tian L M, Hao J P, Chen T, et al. Simulation analysis on erection procedure of main stadium for the Universidad Sports Centre [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 70-77. (in Chinese)
- [4] Kamari Y EI, Raphael W, Chateaufneuf A. Reliability study and simulation of the progressive collapse of Roissy Charles de Gaulle Airport [J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2015, 3: 88-95.
- [5] Augenti N, Parisi F. Buckling analysis of a long-span roof structure collapsed during construction [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 127(1): 77-88.
- [6] 赵宪忠, 闫伸, 陈以一. 大跨度空间结构连续性倒塌研究方法与现状 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 1-14.
Zhao X Z, Yan S, Chen Y Y. A review on progressive collapse study for large-span space structures [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 1-14. (in Chinese)
- [7] 丁北斗, 吕恒林, 李贤, 等. 基于重要杆件失效网架结构连续倒塌动力试验研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 106-114.
Ding B D, Lyu H L, Li X, et al. Tests for dynamical progressive collapse of a grid structure based on key member failure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 106-114. (in Chinese)
- [8] 韩庆华, 邓丹丹, 徐颖, 等. 网架结构连续倒塌破坏模式及倒塌极限位移研究 [J]. 空间结构, 2018, 24(1): 9-16, 61.
Han Q H, Deng D D, Xu Y, et al. Research on progressive collapse modes and ultimate displacements of square pyramid spatial grids [J]. Spatial Structures, 2018, 24(1): 9-16, 61. (in Chinese)
- [9] 熊进刚, 骆乐. 网架结构在雪荷载超载时的连续倒塌性能 [J]. 南昌大学学报(工科版), 2013, 35(3): 263-266.
Xiong J G, Luo L. Progressive collapse performance of steel grid structures under snow overload [J]. Nanchang University (Engineering & Technology), 2013, 35(3): 263-266. (in Chinese)
- [10] 江晓峰, 陈以一. 大跨桁架体系的连续性倒塌分析与机理研究 [J]. 工程力学, 2010, 27(1): 76-83.
Jiang X F, Chen Y Y. Progressive collapse analysis and mechanism study for large-span steel truss structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 76-83. (in Chinese)
- [11] Yan S, Zhao X Z, Lu Y. Collapse-resisting mechanisms of planar trusses following sudden member loss [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(9): 04017114.
- [12] Yan S, Zhao X Z, Chen Y Y, et al. A new type of truss joint for prevention of progressive collapse [J]. Engineering Structures, 2018, 167: 203-213.
- [13] 舒赣平, 余冠群. 空间管桁架结构连续倒塌试验研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2015, 17(5): 32-38.
Shu G P, Yu G Q. Experimental study on the progressive collapse of spatial pipe truss structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2015, 17(5): 32-38. (in Chinese)
- [14] Zhao X Z, Yan S, Chen Y Y. Comparison of progressive collapse resistance of single-layer latticed domes under different loadings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 129: 204-214.

(本文责编: 苏泽云)

(下转第 479 页)