



单层柱面网壳抗连续倒塌性能

杨秀来^a, 徐颖^{a, b}, 韩庆华^{a, b}

(天津大学 a. 建筑工程学院; b. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:研究了不同荷载布置形式、支承方式条件下, 单层柱面网壳的抗连续倒塌性能和倒塌破坏模式, 采用基于构件承载能力的敏感性评价指标, 分析了初始缺陷、压杆失稳等因素对杆件、节点敏感性指标的影响。结果表明, 当采用四边支承时, 满跨均布荷载起控制作用, 跨中节点为敏感构件, 与之相邻斜杆为关键构件; 当采用纵向两边支承时, 半跨均布荷载起控制作用, 杆件和节点的敏感性指标在1/3跨处最大, 支座处最小。当考虑初始缺陷时, 杆件、节点重要性系数分别增大了41%和53%; 当考虑压杆失稳时, 杆件和节点重要性系数分别增大了45%和62%。通过对关键构件进行加强, 可以优化该类结构的抗连续倒塌性能。

关键词:单层柱面网壳; 重要性系数; 敏感性指标; 关键构件; 连续倒塌

中图分类号: TU393.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)01-0100-09

Progressive collapse performance of cylindrical latticed shell

Yang Xiulai^a, Xu Ying^{a, b}, Han Qinghua^{a, b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: We studied the progressive collapse performance of cylindrical latticed shell and its failure modes indifferent load distribution and boundary conditions. By using the sensitivity assessment index based on the ultimate bearing capacity of components, the influence of imperfection and buckling of compressive rods on the sensitivity index of the rods and nodes. The results show that in the four-side boundary condition, the full uniform-distribution load is mainly controlling. Nodes at the mid-span are the sensitive components and the adjacent rods are the key components. In two-side longitudinal boundary condition, the half uniform-distribution load is basically controlling. The largest sensitivity index of the rods and nodes are found at 1/3 span, and the smallest is adjacent to the support. Considering the structural imperfection, the important coefficients of the rods and nodes increase by 41% and 53% respectively; and considering the effect of buckling of compressive rods, increase by 45% and 62%

收稿日期: 2015-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51525803); 教育部博士点基金(20130032110044); 天津市建交委科技项目(2014-02)

作者简介: 杨秀来(1989-), 男, 主要从事大跨空间结构抗连续倒塌性能研究, (E-mail) thaysokun@hotmail.com.

徐颖(通信作者), 女, 博士后, (E-mail) yingxu_civil@tju.edu.cn.

Received: 2015-01-09

Foundation item: National Science Foundation of China (No. 51525803); Doctorate Fund of Ministry of Education (No. 20130032110044); Tianjin Municipal Committee of Construction and Transportation Fund (No. 2014-02)

Author brief: Yang Xiulai (1989-), main research interest: the progressive collapse performance of large-span spatial structures, (E-mail) thaysokun@hotmail.com.

Xu Ying (1987-), Post-Doctorate, (E-mail) yingxu_civil@tju.edu.cn.

respectively. So we can optimize the progressive collapse performance of cylindrical latticed shell by strengthening the key components.

Keywords: cylindrical latticed shell; important coefficient; sensitivity index; key component; progressive collapse

连续性倒塌是指结构在非常规荷载作用(主要包括炸药爆炸、气体爆炸、车辆撞击和重物冲击以及极端雪荷载等)下,其局部破坏不断扩展并最终形成和结构初始破坏面积不成比例的破坏,甚至导致结构倒塌的过程。近年来,大跨空间结构连续倒塌事故屡有发生。例如2004年法国戴高乐机场候机厅因顶棚穿孔而导致结构大面积坍塌^[1];2009年马来西亚 Sultan Mizan Zainal Abidin 体育场因支承失效引起其屋顶整体倒塌;2010年美国橄榄球场 Hubert H. Humphrey Metrodome 由于堆积雪荷载而引起屋顶倒塌^[2];2014年韩国庆州度假村场馆在极端雪荷载作用下发生坍塌事故等。

学者们已经对各类建筑结构的抗连续倒塌性能进行了40多年研究,取得了不少研究成果,并制定了相关的设计规程。目前,针对实际工程的抗连续倒塌设计方法主要有:美国GSA(公共事务管理局)规范^[3]和UFC(国防部)标准^[4],但以上规程规范中主要针对多高层框架结构,并不适用于杆件数目众多的大跨空间结构。对于大跨度空间结构,目前可应用的鲁棒性评价方法仅有日本钢结构协会和美国高层建筑和城市住宅理事会参与制定的“高冗余度钢结构倒塌控制设计指南”^[5]推荐的敏感度分析方法。该方法是在Pandey等^[6]提出的敏感性分析方法的基础上,考虑空间网壳结构单一构件的屈曲而得到,概念上类似构件重要性评价方法,然而该方法仅针对单一构件进行敏感性分析并且没有考虑网壳结构的整体失稳,因此仍有改进的空间。

在中国,对于连续倒塌的研究起步较晚,目前还没有专门针对抗连续倒塌方面的规程或规范,仅在概念上提出:“结构应具有整体稳定性,结构的局部破坏不应该致使结构发生大面积倒塌”。许多学者提出了基于结构响应的冗余度评价指标,如基于刚度^[7-8]、能量^[9]、强度^[10-11]、稳定承载力^[12-14]和概念判断^[15-16]的重要构件判别方法。在以往的结构连续倒塌分析过程中,通常不考虑构件失效的原因,并需假设初始失效杆件和节点的位置。而在实际结构的连

续倒塌破坏过程当中,内力最大的杆件往往最先发生失效,因此,有必要在敏感性分析过程中考虑杆件的实际内力大小,即认为实际内力越接近极限强度的杆件其敏感性指标应该越大。

笔者以单层柱面网壳为研究对象,基于构件承载能力的敏感性评价指标,分析了初始缺陷、压杆屈曲失稳等因素对杆件、节点敏感性指标的影响,揭示了不同荷载布置形式、支承方式条件下,单层柱面网壳的抗连续倒塌性能和倒塌破坏模式。

1 空间结构冗余度评价指标

以杆件或节点的移除作为损伤参数,基于构件承载能力计算杆件或节点的敏感性指标。 S_{ij} 是*i*单元对应于第*j*个损伤参数的敏感性指标, S_{ij} 的表达式可写为

$$S_{ij} = (\sigma' - \sigma) / (\sigma_o - \sigma) \quad (1)$$

σ 和 σ' 为杆件*i*在杆件*j*失效前后的Mises应力; σ_o 为杆件*i*的容许应力。为了考虑压杆屈曲的影响^[17],对于受拉构件, $\sigma_o = \sigma_t$;对于受压构件, $\sigma_o = \sigma_c$,如表3所示。

则有

$$\begin{cases} S_{ij} = 1, \sigma' \geq \sigma_o \\ 0 < S_{ij} < 1, \sigma < \sigma' < \sigma_o \\ S_{ij} = 0, \sigma' = \sigma \end{cases} \quad (2)$$

当以单个杆件的响应作为敏感性分析的研究对象时,受损杆件*j*的重要性系数可表示为

$$\alpha^j = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^n \langle S_{ij} \rangle}{(n-1)} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \langle S_{ij} \rangle = S_{ij}, S_{ij} \geq 0 \\ \langle S_{ij} \rangle = 0, S_{ij} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: n 为结构杆件总数。

杆件重要性系数反映了其对整体结构抗连续倒塌性能的影响,而杆件敏感性指标 S_{ij} 取到最大值的杆件在*j*杆件受损后最易发生失效,通过研究其在整体结构中的位置,可以进一步分析结构在局部杆件失效后的内力重分布情况。因此,本文还将重点

研究其所在位置。当达到最大值 1 时,将会引起剩余杆件继续发生失效,此时,受损杆件 j 为结构的敏感构件。

2 结构计算模型的建立

为分析单层柱面网壳在极端雪荷载作用下的抗连续倒塌性能,以联方型单层柱面网壳为例,分析杆件或节点失效后结构的动力响应,计算杆件和节点的敏感性指标和重要性系数,并对结构的倒塌破坏过程进行模拟。

联方型单层网壳计算模型如图 1 所示,网壳跨度为 30 m,矢跨比为 1/5,屋面恒荷载取 1.0 kN/m^2 ,活荷载取 0.5 kN/m^2 ,支座形式为三向固定铰支座,杆件材料性能参数如表 1 所示。从整体来看,纵向杆轴力较小,斜杆轴力较大,且多为压杆,荷载主要通过斜杆传递。因此,斜向杆件和横向端杆杆件截面取较大值,而纵向端杆杆件截面取较小值。

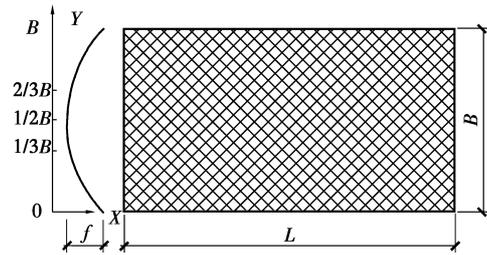


图 1 联方型单层柱面网壳结构模型图
Fig. 1 Model of single-layer lamella latted shell

表 1 杆件材料性能参数

Table 1 Material property of rods

E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_s/MPa	ϵ^p
210	0.3	7 850	235	0.2

注: E 为弹性模量; ν 为泊松比; ρ 为密度; σ_s 为材料屈服强度; ϵ^p 为材料失效应变。

在单层柱面网壳结构设计当中需要对结构进行静力分析,并按照特征值屈曲分析一阶模态引入初始几何缺陷(缺陷最大计算值取网壳跨度的 1/300)对结构进行双重非线性分析,验算结构的静力性能和稳定性能,计算结果如表 2 所示。

表 2 联方型单层网壳静力分析及稳定性分析计算结果

Table 2 Static and stability analysis result of single-layer lamella latted shell

支承布置	荷载布置	杆件截面/mm	应力/MPa	位移/mm	弹塑性极限荷载因子	
四边	满跨均布荷载	159×9	114×4	63.77	52.94	2.13
支承	半跨均布荷载	159×9	114×4	63.20	48.93	2.39
纵向两	满跨均布荷载	219×10	114×4	41.38	32.42	3.47
边支承	半跨均布荷载	219×10	114×4	60.62	72.12	2.81

为了满足结构的承载能力以及正常使用的规范要求^[18],要保持整体结构的弹塑性极限荷载因子不小于 2,同时,保证在标准荷载组合下结构的最大竖向位移小于 $B/400$ 。表 2 选取的截面规格

满足上述要求。为了考虑压杆屈服的影响,将表 3 计算得到的压杆屈服强度引入圆钢管杆单元等效弹塑性滞回模型,并通过 ABAQUS 用户材料子程序调用^[19]。

表 3 联方型单层柱面网壳受压杆件屈服强度计算结果

Table 3 The yielding strength result of compressive rods in single-layer lamella latted shell

支承布置	杆件	几何长度 l/mm	计算长度 l_0/mm	回转半径 i/mm	长细比 λ	σ_c/σ_t	σ_c/MPa
四边 支承	斜杆	3 160	2 844	53.1	54	0.962	226
	横向端杆	5 500	4 950	53.1	93	0.744	175
	纵向端杆	3 000	2 700	38.9	69	0.897	211
两边纵向 两边支承	斜杆	3 160	2 844	74	38	0.982	231
	横向端杆	5 500	4 950	74	67	0.909	214
	纵向端杆	3 000	2 700	38.9	69	0.897	211

对结构进行连续倒塌分析时,荷载组合取为:1.0 恒载+2.0 活载。初始失效杆件和节点的选取原则如下:根据结构的对称性,在满跨均布荷载作用下,取 1/4 网壳为研究对象,而在半跨均布荷载作用下,取 1/2 网壳为研究对象,由于篇幅限值,本文只列出敏感性指标较大的 1/4 区域的计算结果。初始失效杆件或节点的编号及位置如图 2、图 3 所示。

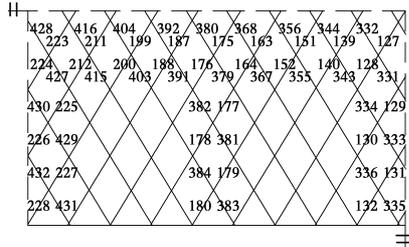


图 2 初始失效杆件的分析区域

Fig. 2 Analysis area of initial failure rods

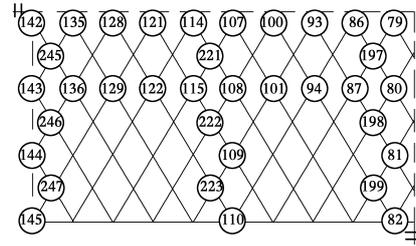


图 3 初始失效节点的分析区域

Fig. 3 Analysis area of initial failure nodes

2.1 四边支承

表 4 和表 5 列出了采用四边支承时,满跨均布荷载和半跨均布荷载作用下,部分杆件、节点的敏感性指标和重要性系数,并对比分析了理想网壳、有缺陷网壳和考虑压杆屈曲的有缺陷网壳重要性系数的变化规律。

表 4 杆件的敏感性指标

Table 4 Sensitivity index of rods

荷载布置	单元	理想网壳		有缺陷网壳			有缺陷网壳(压杆屈曲)		
		$S_{ij,max}$	α^j	$S_{ij,max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$	$S_{ij,max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$
满跨均布荷载	332	0.146	0.005 1	0.282	0.006 8	33%	0.313	0.007 4	44
	127	0.098	0.004 7	0.205	0.006 3	32	0.211	0.006 7	42
	380	0.115	0.005 3	0.176	0.006 2	16	0.193	0.006 6	25
	175	0.098	0.005	0.171	0.005 5	11	0.177	0.005 9	19
	333	0.089	0.005 3	0.113	0.006 8	28	0.124	0.007 2	38
	228	0.105	0.004 6	0.11	0.005 1	11	0.107	0.005 5	19
	225	0.089	0.005 1	0.099	0.005 5	8	0.105	0.005 9	16
	336	0.072	0.005 3	0.088	0.006 7	26	0.091	0.007 1	34
	381	0.078	0.005 2	0.074	0.005 9	13	0.082	0.006 4	23
226	0.067	0.004 8	0.075	0.005 1	8	0.08	0.0056	17	
半跨均布荷载	332	0.138	0.004 5	0.224	0.005 4	22	0.246	0.005 8	31
	380	0.155	0.007 5	0.213	0.008 1	8	0.232	0.008 6	15
	127	0.093	0.003 8	0.15	0.004 5	18	0.155	0.004 8	25
	383	0.124	0.007 4	0.135	0.007 9	7	0.144	0.008 6	16
	381	0.106	0.007 6	0.11	0.008 2	8	0.118	0.008 8	16
	428	0.096	0.005 3	0.108	0.005 3	0	0.116	0.005 8	10
	384	0.121	0.008 1	0.109	0.008 9	10	0.115	0.009 6	18
	131	0.071	0.005 4	0.096	0.006 5	19	0.104	0.006 9	27
	336	0.079	0.005 7	0.093	0.006 8	19	0.099	0.007 2	27
427	0.087	0.006	0.084	0.0061	1	0.088	0.006 6	10	

从表 4 可看出,在满跨与半跨均布荷载作用下,敏感性指标最大值 $S_{ij,max}$ 均出现在跨中位置。在满跨均布荷载作用下,跨中 332 号杆件的敏感性指标

$S_{ij,max}$ 最大,等于 0.313,而在半跨均布荷载的作用下,最大敏感性指标 S_{ij} 为 0.246,小于满跨均布荷载的情况。说明在四边支承条件下,满跨均布荷载

起控制作用。

在两种荷载的布置下,杆件的敏感性指标变化规律如图 4 所示,由支座处往跨中逐渐增大。另外,在考虑初始缺陷的情况下,杆件的重要性系数 α^j 最多增大了 33%;在考虑压杆屈曲的情况下,其重要性系数 α^j 增加了 10%~44%。因此,在计算杆件的敏感性指标时,需要考虑初始缺陷以及压杆屈曲的影响。

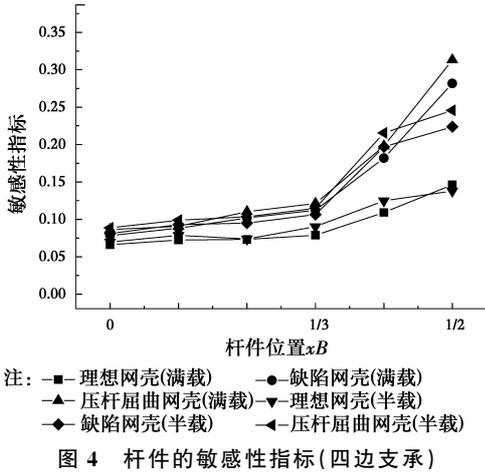


图 4 Sensitivity index of rods (four-side boundary)

从表 5 中可以看出,在满跨均布荷载作用下,节点敏感性从支座处向跨中逐渐增大,跨中节点 79 到 114 敏感性指标 $S_{ij, \max}$ 均达到最大值 1(如图 5 所示),说明在这些节点失效之后,邻近杆件将发生后续失效。这类当初始破坏发生后容易引起结构显著内力重分布或导致连续倒塌破坏的构件称之为敏感构件。例如,在 79 节点发生失效之后,其附近杆件 317、125、318、113 等将依次发生失效,导致整体结构连续倒塌(如图 6 所示),则节点 79 为敏感构件。当节点 79 失效之后,杆件 317 位于荷载传递路径上而发生失效。

将杆件 317 的截面尺寸加强到 $\Phi 168 \times 10$,此时节点 79 的敏感性指标最大值从 1 降低到 0.899,而且重要性系数降为 0.015 4,比原来降低了 35%,结构不会发生连续倒塌破坏。这类当初始破坏发生后能够有效遏制或阻断结构连续倒塌破坏的构件称之为关键构件。在满跨均布荷载作用下,结构敏感构件和关键构件的分布位置如图 7 所示,跨中节点为敏感构件,与之相邻斜杆为关键构件。

表 5 节点的敏感性指标
Table 5 Sensitivity index of nodes

荷载布置	单元 编号	理想网壳		有缺陷网壳			有缺陷网壳(压杆屈曲)		
		$S_{ij, \max}$	α^j	$S_{ij, \max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$	$S_{ij, \max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$
满跨均布荷载	86	0.693	0.012 9	1.000	0.019 7	52	1.000	0.020 8	61
	79	0.694	0.012 8	1.000	0.019 7	53	1.000	0.020 8	62
	93	0.685	0.012 9	1.000	0.019 3	50	1.000	0.020 4	59
	100	0.692	0.013 0	0.985	0.018 4	42	1.000	0.019 4	50
	107	0.678	0.012 8	0.909	0.017 0	32	1.000	0.018 1	41
	197	0.571	0.012 2	0.698	0.017 6	45	0.725	0.018 5	52
	80	0.640	0.011 5	0.662	0.015 1	31	0.718	0.016 0	39
	108	0.643	0.011 3	0.648	0.013 1	15	0.705	0.013 9	22
	221	0.603	0.011 9	0.595	0.014 3	20	0.621	0.015 0	26
	245	0.542	0.007 1	0.551	0.007 5	6	0.551	0.007 9	11
半跨均布荷载	101	0.594	0.012	0.766	0.014	12	0.838	0.015	18
	94	0.603	0.012	0.767	0.013	13	0.837	0.014	20
	87	0.602	0.011	0.761	0.013	16	0.831	0.014	22
	108	0.596	0.013	0.757	0.014	8	0.828	0.015	15
	80	0.601	0.012	0.752	0.013	14	0.808	0.014	20
	221	0.627	0.013	0.607	0.015	12	0.607	0.015	17
	197	0.592	0.012	0.585	0.014	25	0.606	0.015	30
	245	0.570	0.011	0.568	0.011	28	0.568	0.012	9
	79	0.506	0.009	0.473	0.012	37	0.507	0.012	43
	107	0.490	0.010	0.451	0.011	12	0.484	0.012	22

在半跨均布荷载作用下,敏感性指标最大的节点出现在1/3跨处且均为未达到1(如图5所示),邻近杆件不会继续发生后续失效,而支座处节点重要性系数最小。

考虑初始缺陷的网壳比理想结构节点的重要性系数增加了6%~53%;考虑压杆屈曲时,杆件的敏感性指标 $S_{ij,max}$ 以及重要性系数 α^j 增加了9%~62%,因此,在对节点进行敏感性分析时,结构的初始缺陷和压杆屈曲不应忽略。

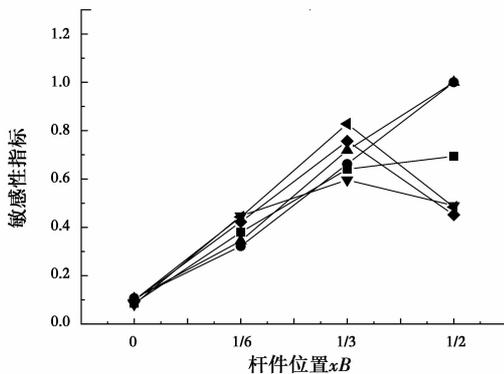


图5 节点的敏感性指标分布(四边支承)
Fig. 5 Distribution of node sensitivity index (four-side boundary)

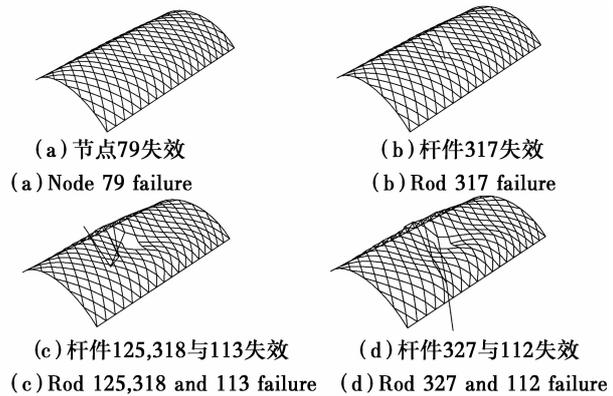


图6 节点失效后的倒塌过程
Fig. 6 Progressive collapse simulation after node failure

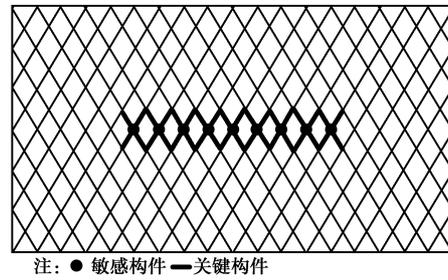


图7 敏感构件与关键构件的分布

Fig. 7 Distribution of sensitive components and key components

2.2 纵向支承

表6和表7列出了采用纵向两边支承时,满跨均布荷载和半跨均布荷载作用下,部分杆件、节点的敏感性指标和重要性系数。

表6 杆件的敏感性指标

Table 6 Sensitivity index of rods

荷载布置	单元编号	理想网壳		有缺陷网壳			有缺陷网壳(压杆屈曲)		
		$S_{ij,max}$	α^j	$S_{ij,max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$	$S_{ij,max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$
满跨均布荷载	228	0.09	0.002 6	0.093	0.002 9	12	0.086	0.003	14
	225	0.062	0.001 4	0.074	0.002	41	0.076	0.002 1	45
	227	0.06	0.002 7	0.063	0.003 3	22	0.064	0.003 5	26
	179	0.042	0.001 6	0.053	0.002	28	0.053	0.002 1	32
	131	0.041	0.001 7	0.051	0.002 1	25	0.051	0.002 2	29
	332	0.045	0.001 7	0.048	0.001 8	1	0.05	0.001 8	4
	177	0.033	0.001 7	0.043	0.002 3	35	0.043	0.002 4	38
	180	0.038	0.001 4	0.041	0.001 6	11	0.039	0.001 6	14
	178	0.03	0.001 7	0.038	0.002 3	36	0.038	0.002 4	38
	130	0.029	0.001 7	0.038	0.002 4	35	0.038	0.002 4	38

续表 6

荷载布置	单元编号	理想网壳		有缺陷网壳			有缺陷网壳(压杆屈曲)		
		$S_{ij,max}$	α^j	$S_{ij,max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$	$S_{ij,max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$
半跨均布荷载	430	0.114	0.001 5	0.159	0.002 1	38	0.166	0.002 2	41
	128	0.123	0.002 1	0.159	0.002 5	19	0.166	0.002 6	22
	382	0.118	0.002 9	0.154	0.003 6	24	0.161	0.003 7	28
	334	0.114	0.002 6	0.148	0.003 2	25	0.155	0.003 3	28
	379	0.108	0.002 4	0.139	0.002 9	20	0.141	0.003	23
	331	0.105	0.002 3	0.136	0.002 7	20	0.138	0.002 8	22
	225	0.107	0.002 0	0.134	0.002 6	28	0.136	0.002 7	31
	132	0.061	0.001 6	0.073	0.001 8	11	0.069	0.001 8	11
	383	0.027	0.001 2	0.04	0.001 4	18	0.043	0.001 5	20
	431	0.025	0.000 7	0.03	0.000 8	26	0.032	0.000 9	32

表 7 节点的敏感性指标

Table 7 Sensitivity index of nodes

荷载布置	单元编号	理想网壳		有缺陷网壳			有缺陷网壳(压杆屈曲)		
		$S_{ij,max}$	α^j	$S_{ij,max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$	$S_{ij,max}$	α^j	$\Delta\alpha^j / \%$
满跨均布荷载	114	0.310	0.004 8	0.303	0.005 5	15	0.307	0.005 6	17
	107	0.308	0.004 8	0.293	0.005 5	14	0.297	0.005 6	16
	100	0.303	0.004 9	0.288	0.005 4	11	0.291	0.005 6	13
	93	0.301	0.004 9	0.285	0.005 4	11	0.289	0.005 5	13
	79	0.300	0.004 9	0.285	0.005 4	10	0.289	0.005 5	12
	86	0.299	0.004 9	0.285	0.005 4	10	0.289	0.005 5	13
	80	0.295	0.004 7	0.258	0.005 2	10	0.262	0.005 3	13
	108	0.283	0.004 6	0.240	0.004 9	8	0.245	0.005 1	10
	145	0.213	0.009 1	0.238	0.011 3	24	0.233	0.011 8	30
	144	0.197	0.006 1	0.219	0.008 6	40	0.225	0.009 0	46
半跨均布荷载	108	0.363	0.007 5	0.415	0.009 1	22	0.431	0.009 2	23
	101	0.363	0.007 5	0.414	0.009 1	22	0.430	0.009 3	24
	94	0.362	0.007 5	0.413	0.009 1	22	0.428	0.009 3	24
	86	0.361	0.007 5	0.412	0.009 1	22	0.428	0.009 3	24
	80	0.361	0.007 5	0.412	0.009 1	22	0.427	0.009 3	24
	115	0.359	0.007 5	0.411	0.009 1	22	0.427	0.009 3	24
	143	0.284	0.007 2	0.329	0.009 3	29	0.342	0.009 4	31
	246	0.261	0.006 0	0.317	0.007 7	28	0.326	0.007 8	30
	198	0.228	0.007 0	0.279	0.008 9	27	0.286	0.009 1	29
	222	0.222	0.007 2	0.273	0.009 1	27	0.279	0.009 3	29

从表 6 中可以看出,在满跨均布荷载作用下,敏感性指标最大的杆件出现在支座附近,角部支座处杆件 228 的 $S_{ij,max}$ 达到 0.086 为最大。此时,端部杆件敏感性分布规律为由跨中向支座处逐渐增大,如图 8 所示。

在半跨均布荷载作用下,位于 1/3 跨处的杆件 430,其 $S_{ij,max}$ 达到 0.166 为最大,而支座处敏感性指标最小,如图 8 所示。

半跨均布荷载作用下杆件敏感性指标最大值为满跨情况的 2 倍,说明在纵边支承条件下,由半跨均

布荷载起控制作用。

在考虑初始缺陷的情况下,杆件重要性系数比理想网壳增加了 1%~41%;在考虑压杆屈曲的情况下,杆件重要性系数比理想网壳增加了 4%~45%。

如表 7 所示,在满跨均布荷载作用下,114 号节点敏感性指标最大,为 0.307 的,节点敏感性指标从支座处向跨中逐渐增大;在半跨均布荷载作用下,108 号节点敏感性指标最大,为 0.431,节点敏感性指标在 1/3 跨度处取到最大值,而在支座处最小,如图 9 所示。

考虑初始缺陷的网壳比理想结构节点的重要性系数增加了 8%~40%;考虑压杆屈曲时,杆件的重要性系数增加了 10%~46%。

综上所述,在沿纵向两边布置支承的情况下,杆件最大敏感性指标只达到 0.166,节点最大敏感性指标达到 0.431,不会引起相邻杆件失效,结构不易发生连续倒塌破坏。

3 结 语

采用基于构件承载能力的敏感性评价指标,分析了不同荷载布置、支承方式下单层柱面网壳的抗连续倒塌性能和破坏模式。

1)当采用四边支承时,满跨均布荷载起控制作用,杆件敏感性指标由支座向跨中逐渐增大,节点敏感性指标在跨中处达到最大值 1,支承处最小,此时跨中节点为敏感构件,与之相邻斜杆为关键构件,而对于关键杆件进行加强有效提高结构的抗连续倒塌性能;半跨均布荷载作用下,敏感性指标最大的节点出现在 1/3 跨处且均为未达到 1。

2)当采用纵向两边支承时,半跨均布荷载起控制作用,杆件和节点的敏感性指标在 1/3 跨处最大,支座处最小;满跨均布荷载作用下,杆件敏感性指标最大值出现在角部支座处,而跨中和 1/3 跨度处较小,节点敏感性指标从支承处向跨中逐渐增大。

3)当考虑初始缺陷时,杆件重要性系数最多增大了 41%,节点重要性系数最多增大了 53%;当考虑压杆失稳时,杆件重要性系数最多增大了 45%,节点重要性系数最多增大了 62%,因此,在分析单层柱面网壳抗连续倒塌性能时,不能忽略上述因素的影响。

参考文献:

[1] Torres P. The new terminal 2E at Paris-charles de gaulle airport [R]. Massachusetts Institute of Technology,2004.

[2] Kostick M, Hubert H, Humphrey metrodome roof snow collapse of 2010 [R]. Pennsylvania State University,2012.

[3] U. S. General Services Administration. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [S]. Washington DC;GSA,2003.

[4] U. S. Department of Defense. UFC 4-023-03 design of buildings to resist progressive collapse [S]. 2005

[5] 陈以一. 高冗余度钢结构倒塌控制设计指南 [M]. 赵宪忠. 译. 上海:同济大学出版社,2007. Chen Y Y. Guidelines for collapse control design, construction of steel buildings with high redundancy [M]. Shanghai: Tongji University Publication, 2007. (in Chinese)

[6] Pandey P C, Barai S V. Structural sensitivity as a measure of redundancy [J]. Journal of Structural

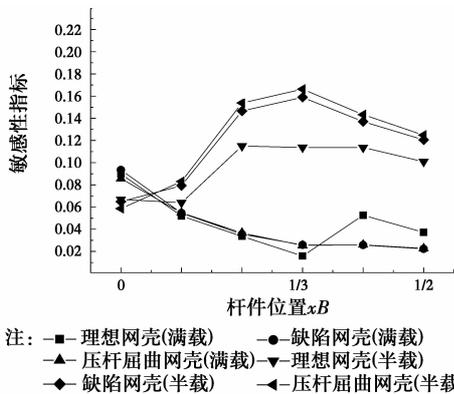


图 8 杆件的敏感性分布(纵向两边支承)

Fig. 8 Distribution of rod sensitivity index

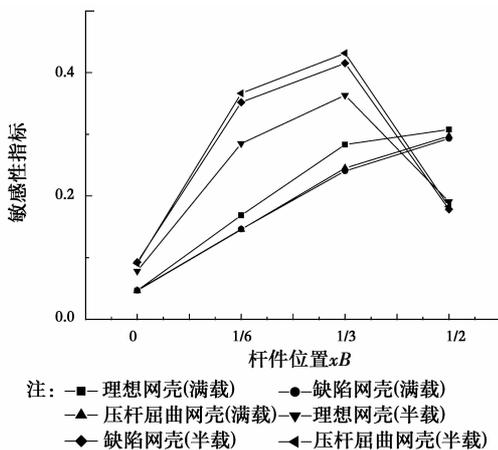


图 9 节点的敏感性分布(纵向两边支承)

Fig. 9 Distribution of node sensitivity index

- Engineering, 1997, 123: 360-364.
- [7] 柳承茂, 刘西拉. 基于刚度的构件重要性评估及其与冗余度的关系[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 746-750.
Liu C M, Liu X L. Stiffness-based evaluation of component importance and its relationship with redundancy [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(5): 746-750. (in Chinese)
- [8] 叶列平, 林旭川, 曲哲, 等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 1-6.
Ye L P, Lin X C, Qu Z, et al. Evaluating method of element importance of structural system based on generalized structural stiffness [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 1-6. (in Chinese)
- [9] 张雷明, 刘西拉. 框架结构能量流网络及其初步应用[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 45-49.
Zhang L M, Liu X L. Network of energy transfer in frame structures and its preliminary application [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 45-49. (in Chinese)
- [10] 胡晓斌, 钱稼茹. 结构连续倒塌分析改变路径法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 8-13.
Hu X B, Qian J R. Study on alternate path method of structural progressive collapse analysis [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(4): 8-13. (in Chinese)
- [11] 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]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 76-83. (in Chinese)
- [12] 韩庆华, 王晨旭, 徐杰. 大跨双层球面网壳结构连续倒塌失效机理研究[J]. 空间结构, 2014, 20(2): 29-36
Han Q H, Wang C X, Xu J. Progressive collapse mechanism analysis of large-span double-layer latticed domes [J]. Journal of Spatial Structures, 2014, 20(2): 29-36. (in Chinese)
- [13] Han Q H, Liu M J, Lu Y, et al. Progressive collapse analysis of large-span reticulated domes [J]. International Journal of Steel Structures, 2015, 15(2): 261-269.
- [14] 韩庆华, 金辉, 艾军, 等. 工程结构整体屈曲的临界荷载分析[J]. 天津大学学报, 2005, 38(12): 1051-1057.
Han Q H, Jin H, Ai J, et al. Analysis of the overall buckling load for engineering structures [J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(12): 1051-1057.
- [15] 蔡建国, 王峰岚, 韩运龙, 等. 大跨空间结构重要构件评估实用方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(3): 7-11
Cai J G, Wang F L, Han Y L, et al. Practical method for the evaluation of important structural components of long-span space structures [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2011, 38(3): 7-11 (in Chinese)
- [16] 蔡建国, 王峰岚, 冯健, 等. 连续倒塌分析中结构重要构件的研究现状[J]. 工业建筑, 2011, 41(10): 85-89.
Cai J G, Wang F L, Feng J, et al. Review of the key element for progressive collapse of structures [J]. Journal of Industrial Construction, 2011, 41(10): 85-89. (in Chinese)
- [17] 谢道清, 沈金, 邓华, 等. 考虑受压屈曲的圆钢管杆单元等效弹塑性滞回模型[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 160-165.
Xie D Q, Shen J, Deng H, et al. Equivalent elasto-plastic hysteretic model of steel circular-tub bar elements considering compressive buckling [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 160-165. (in Chinese)
- [18] JGJ—2010 空间网格结构技术规程[S].
JGJ—2010 Technical specification for space frame structures [S]. (in Chinese)
- [19] 徐颖, 韩庆华, 芦燕. 考虑损伤累积效应的拱形立体桁架结构倒塌分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(4): 1-8.
Xu Y, Han Q H, Lu Y. Progressive collapse analysis of steel studded arch structure considering damage cumulative effect [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2014, 36(4): 1-8. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)