

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221226003

基于AP法的单层球面网壳结构地震倒塌破坏分析

吴文青¹, 朱南海^{1,2}

(1. 江西理工大学土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室, 江西 赣州 341000)

摘要: 在地震作用中, 结构的薄弱部位构件可能会先发生初始失效, 并导致结构在之后的地震中发生倒塌破坏。为研究在杆件初始失效下单层网壳结构的抗连续倒塌性能, 通过增量动力分析方法(IDA法)确定网壳结构薄弱区域分布规律及结构的动力响应, 引入最大响应参数(应力、塑性应变、等效塑性应变等)杆件作为初始破坏杆件, 采用备用荷载路径法(AP法)分析剩余结构在之后的地震作用中产生的动力响应。结果表明: 单层网壳结构地震薄弱区处于底部区域, 且受地震影响较大。在地震作用下, 处于薄弱区域的杆件初始失效会使结构节点最大竖向位移、塑性杆件比例、总应变能等结构响应参数急剧增大, 并且加速了结构的凹陷。由于杆件的初始失效, 其两端节点发生较大塑性, 周围杆件塑性发展明显, 应重点关注处于地震薄弱区的杆件, 该区域杆件若发生初始失效将对结构产生影响较大。

关键词: 单层网壳结构; 增量动力分析; 备用荷载路径法; 初始失效; 连续性倒塌

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0632-08

Seismic Collapse Analysis of Single-Layer Reticulated Spherical Shell Structure Based on AP Method

WU Wenqing¹, ZHU Nanhai^{1,2}

(1. School of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Jiangxi Province Key Laboratory of Environmental Geotechnical Engineering and Hazards Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Under seismic action, the weak components of a structure are highly likely to experience initial failures, leading to collapse in subsequent earthquakes. To study the progressive collapse resistance of single-layer reticulated spherical shell structures under initial member failure, the Incremental Dynamic Analysis (IDA) method was employed to analyze distribution of weak areas in the structures and their dynamic response. Maximum response parameters (stress, plastic strain, equivalent plastic strain, etc.) were introduced to identify initial failure members. The Alternate Path (AP) method was then used to analyze the dynamic response of the remaining structure under subsequent seismic actions. The results showed that the seismic weak areas of single-layer shell structures were primarily located at the base and were significantly affected by seismic forces. Under seismic loads, the initial fail-

* 收稿日期: 2022-12-26; 修回日期: 2023-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768024)资助

作者简介: 吴文青(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事大跨空间钢结构研究。E-mail: 1559215790@qq.com

通信作者: 朱南海(1981—), 男, 副教授, 博士。主要从事大跨空间钢结构研究。E-mail: zhunanhai@jxust.edu.cn

ure of members in weak areas led to a sharp increase in structural response parameters such as maximum vertical displacement of nodes, plastic member ratio, and total strain energy, accelerating structural collapse. Due to the initial failure of members, significant plastic deformation occurred at both ends of the members, with evident plastic development in surrounding members. Attention should be paid to members in seismic weak areas, as initial failure in these areas will have a substantial impact on the overall structural integrity.

Keywords: single-layer reticulated shell; incremental dynamic analysis; alternative path method; primary failure; progressive collapse

0 引言

大跨网壳结构由于受力合理、壳体优美,在我国被广泛使用,近年来其倒塌事故发生也较为频繁,造成了很大的经济损失和人员伤亡,如美国哈特福特市中心体育馆网架坍塌、明尼苏达州维京人队体育场倒塌等。网壳结构虽然具有较高的超静定次数,但其中某些杆件的失效仍极易导致结构发生连续倒塌,因此在强震作用下,应当考虑某些杆件失效对结构整体的影响,以免结构在地震中发生突然破坏。

结构在承受超过某些构件极限承载能力的偶然荷载时,容易发生渐进倒塌,建筑结构的连续性倒塌已经成为严重威胁公共安全的重要问题,是土木工程学科的前沿研究课题^[1-3],备用荷载路径法(Alternative Path Method,简称“AP法”)作为一种结构抗连续倒塌能力的评估方法,该方法不考虑局部构件失效的成因和机理,只针对偶然荷载下破坏某些构件的结构系统响应^[4]。赵宪忠等^[5-6]研究发现尽管大跨结构由数百个构件组成,在较大荷载下单根杆件的破坏足以引发结构整体倒塌。朱奕锋等^[7]对张弦结构移除构件后的剩余结构进行承载力分析。舒赣平等^[8]通过模拟空间管桁架杆件的初始破坏分析了剩余结构的动力响应。L.M.Tian等^[9-10]则对大跨结构的构件拆除进行了实验研究。目前国内外对大跨结构的研究大多只考虑了静力荷载下的结构抗连续倒塌性能,而对地震等动力荷载下的结构构件初始失效下结构抗连续倒塌性能研究较少。

强震作用下的结构倒塌破坏存在两种可能的失效机理:由于几何非线性导致的动力失稳和塑性变形过度发展导致的强度破坏^[11]。增量动力分析法(Incremental Dynamic Analysis Method,简称

“IDA法”)是一种有效的非线性分析方法,其通过不断加大地震输入获得结构随地震峰值的变化曲线,以此反映结构是否存在承载力和刚度等方面的缺陷,评估不同地震强度下的结构抗震性能^[13-14]。目前对地震下结构的抗倒塌性能的研究大多为完整结构^[15-19],韩庆华等^[20]对杆件初始破坏引起的连续性倒塌研究,仅考虑了地震前结构构件的初始失效。地震作用下结构动力响应复杂,研究地震中杆件的突然失效对工程实际应用具有重要意义。

为了研究地震作用过程中由于结构构件初始失效对剩余结构抗连续倒塌性能的影响,本文首先对完整结构进行增量动力分析,得到地震作用下完整结构的薄弱部位及杆件的动力响应参数;然后将动力参数响应最大的杆件作为初始失效构件,通过UMAT子程序定义在达到其最大响应参数时失效,从而引入初始失效杆件;最后分析剩余结构在之后的地震作用中产生的动力响应。判断剩余结构是否会发生连续倒塌。

1 单层球面网壳结构在强震下连续倒塌分析

1.1 结构模型分析

以Kewitt-6型单层球面网壳为例,如图1所示,跨度为40 m,矢跨比为1/5^[21],节点为刚性连接,采用Q235钢材,主杆、环杆 $\Phi 146 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、斜杆截

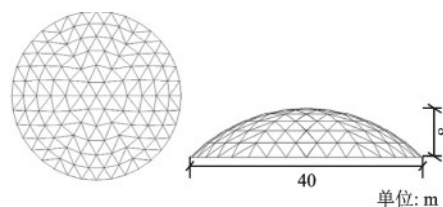


图1 K6网壳模型

Fig.1 K6 reticulated shell model

面为 $\Phi 140 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 恒荷载以及活荷载等效为节点荷载施加于结构上, 采用 $1.2 \times$ 恒荷载 $+ 0.5 \times$ 活荷载的荷载组合方式加入到网壳节点上, 节点自重以杆件自重的 25% 计算, 结构自重由程序自动计算。

采用有限元软件, 建立该结构有限元分析模型, 考虑双重非线性和初始缺陷的影响, 采用动力显示分析, 用 B31 单元模拟网壳杆件, 每根杆件划分为四个梁单元。

1.2 增量动力分析

对完整结构进行地震下的动力非线性分析, 依次输入多条地震记录并逐级增大地震波的峰值加速度直至结构发生倒塌破坏。《建筑抗震设计规范》^[22] 中规定采用时程分析法时, 应按照建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线, 其中地震记录的数量不应少于总数的 2/3。本文选取天津-宁河波、El-Centro 波以及人工波, 采用三向输入的方式, 各波三向峰值加速度比值为 $X:Y:Z=1:0.85:0.65$ 。

采用增量动力分析法, 引入节点最大位移、塑性单元比例、结构总应变能等响应指标, 在结构临近破坏极限状态时, 对结构产生的动力响应进行地震动强度调幅 (PGA), 通常认为: PGA 的微小增量导致结构响应参数的大幅增加时, 结构发生倒塌破坏。图 2~图 4 分别为三条地震波作用下结构节点竖向位移、塑性杆件比例、结构总应变能随 PGA 的变化规律曲线, 表 1 为结构的倒塌极限位移。

表 1 结构倒塌极限位移

地震波	极限位移/m	位移与跨度比值
天津-宁河波	0.48	1/83
El-Centro波	0.42	1/95
人工波	0.51	1/78

在天津-宁河波作用下, PGA 从 200 gal 增至 390 gal 时, 结构节点位移由从 0.04 m 增加到 0.39 m (图 2), 结构处于安全状态; 在 PGA 达到 410 gal 时, 结构最大节点位移达到 0.48 m (表 1), 超过了网壳跨度的 1/100, 且进入塑性杆件占比超过 50%, 结构总应变能急剧增大 (图 3(a)、图 4(a))。因此在天津-宁河波作用下, 结构的最大峰值加速度为 400 gal。同理, 在 El-Centro 波和人工波作用下的结构

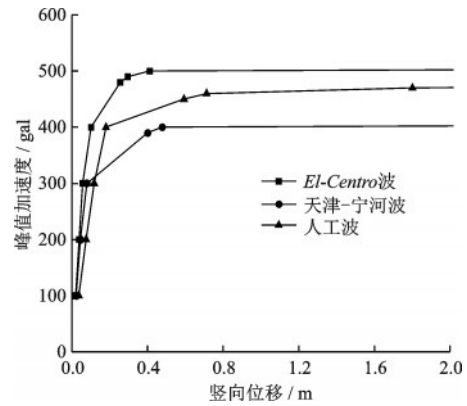


图 2 完整结构的最大节点竖向位移随 PGA 变化曲线
Fig.2 Curves of maximum vertical displacement of nodes in the complete structure as function of PGA

峰值破坏加速度分别为 500、470 gal。

从结构塑性发展角度分析, 塑性杆件比例和结构总应变能可以较好地反映结构的倒塌破坏模式, 为研究强震下结构塑性发展情况, 将杆件划分为 8 个积分点。结构的屈服杆件比例按照不同屈服程度分为 4 类即 1P、3P、5P、8P。其中 1P 表示为杆件截面上的积分点至少有 1 个进入塑性工作状态, 以此类推, 8P 即杆件全截面进入塑性。

在天津宁河波作用下, PGA 从 400 gal 增至 410 gal 时, 结构塑性杆件比例开始突然增大, 大部分杆件全部进入塑性, 结构塑性发展深入, 其中 1P 杆件占比分别增至结构的 30.85%、88.38%, 8P 杆件占比分别增大 9.80%、61.70% (图 3(a)), 同时能量开始变为不平衡状态, 总应变能急剧上升 (图 4(a)), 结构发生动力失稳破坏。El-Centro 波作用下, PGA 未达到最大峰值破坏加速度时, 结构最大竖向节点位移和塑性杆件比例较小且呈线性增长 (图 2、图 3(b)), 结构总应变能也趋于稳定 (图 4(b))。在 PGA 为 510 gal 时, 结构响应发生突变, 最大竖向节点位移和塑性杆件比例大幅增加, 总应变能在地震作用下急剧增大, 结构从稳定状态到突然发生破坏, 发生动力失稳破坏。人工波作用下, PGA 从 470 gal 增至 480 gal 时, 塑性开始不断发展至 45.32% (图 3(c)), 总应变能也随着峰值加速度的增大而逐段增加 (图 4(c)), 结构塑性发展深入, 破坏模式为强度破坏。

1.3 地震作用下结构薄弱部位的确定

由上节可知, 完整结构在天津-宁河波和 El-Centro 波作用下发生了动力失稳破坏, 在人工波

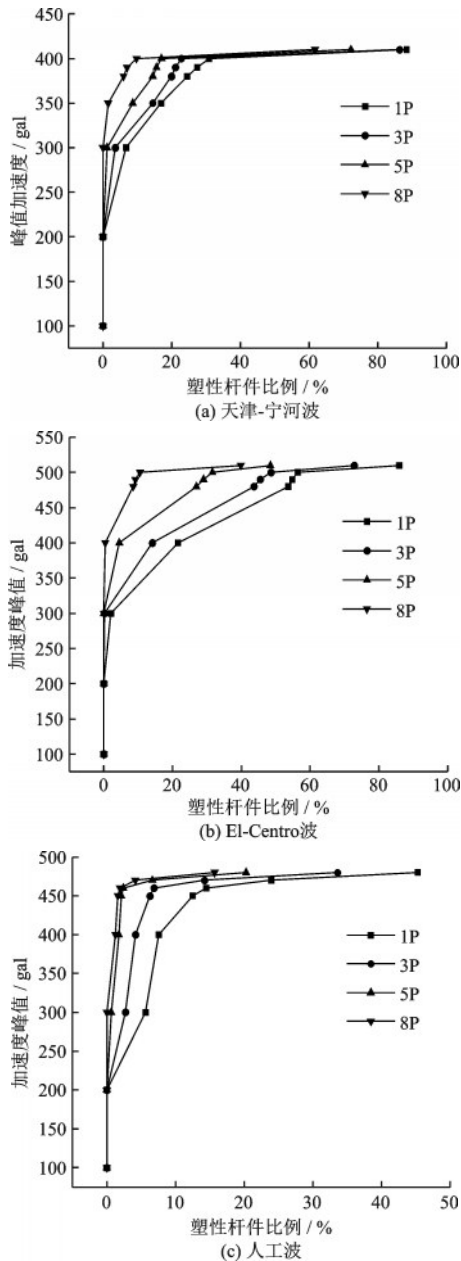


图3 完整结构的塑性杆件比例随PGA变化曲线

Fig.3 Curves of proportion of plastic bars in the complete structure as a function of PGA

作用下发生了强度破坏。相较于强度破坏,动力失稳破坏的塑性发展较浅且倒塌更突然,某些杆件的失效可能会加速结构的破坏,结构可能会在地震中由于构件的初始失效发生破坏。结构构件初始破坏对其抗震性能有很大影响,为此需研究构件初始失效条件下的结构性能,揭示结构的破坏机理。

在天津-宁河波地震作用中选取结构动力响应参数最大的三类杆件作为初始失效杆件(最大等效塑性应变、最大应力、最大塑性应变),图5为完整结构在加速度峰值分别为390 gal、400 gal时的应力、

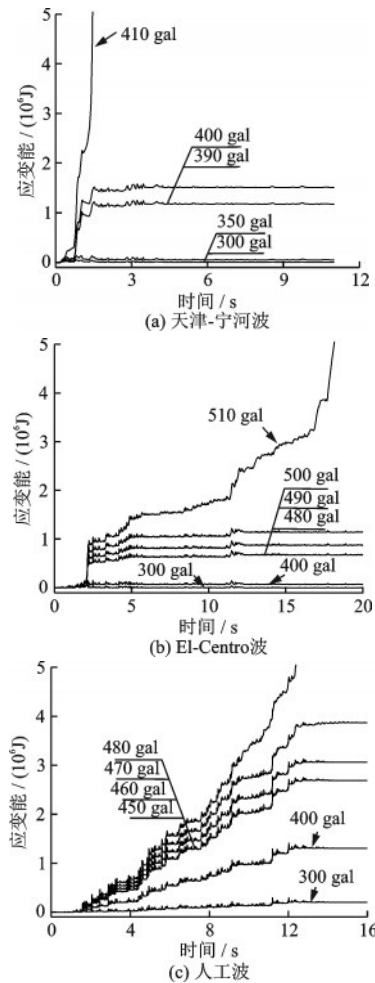


图4 完整结构的总应变能时程曲线

Fig.4 Time history curves of total strain energy in the complete structure

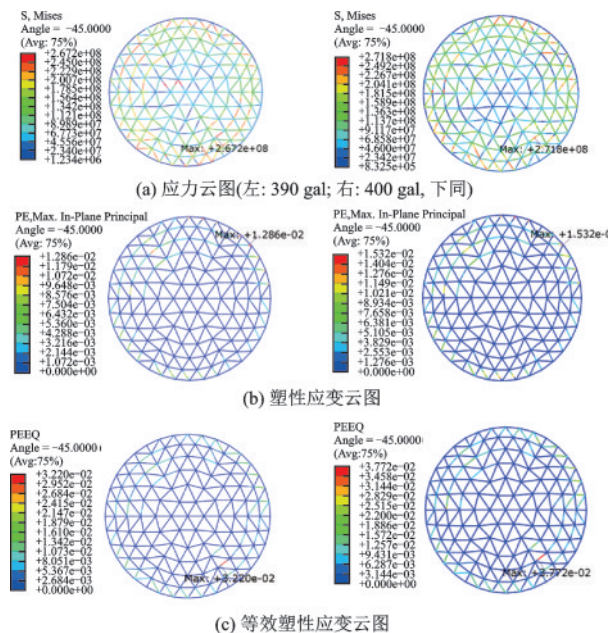


图5 不同地震加速度幅值下的结构云图

Fig.5 Structural cloud diagrams under different seismic acceleration amplitudes

塑性应变、等效塑性应变云图。可知,在结构峰值破坏加速度即PGA从390 gal增加到400 gal时,结构薄弱区域杆件逐渐达到屈服强度并开始产生塑性,随着地震的持续进行,等效塑性应变增大且进入塑性的杆件开始增多,杆件的响应参数在随着PGA的增加而不断增大。结构最大应力由267.2 MPa增加到271.8 MPa,最大等效塑性应变由 3.22×10^{-2} 增大到 3.772×10^{-2} ,其所在杆件单元为522单元(图5(b~c)),最大塑性应变从 1.286×10^{-2} 增至 1.532×10^{-2} ,杆件为116单元(图5(a))。杆件破坏后局部凹陷开始发生,并进一步延展直至结构失效,应当重点关注结构在地震过程中的薄弱部位。图6为在地震峰值加速度为410 gal时结构的变形云图,可知,结构由凹陷区域逐渐发展并倒塌,杆件130处于结构的凹陷区域即薄弱部位,杆件29位于结构底部,处于结构的非凹陷区域。由于结构的倒塌破坏往往与结构构件失效有关,选取处于结构底部116单元、522单元所在杆件(即杆件29、杆件130)作为初始失效杆件。

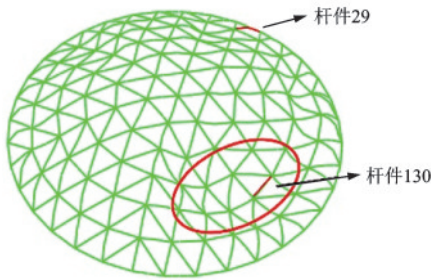


图6 结构临界破坏变形云图(圈出为凹陷区域)

Fig.6 Critical failure deformation cloud diagrams of the structure (circled area indicates the depression region)

2 杆件初始失效后强震下结构的连续倒塌分析

2.1 杆件初始失效

裴学良等^[23]采用单元删除技术实现单元损伤累积引起的断裂现象,其结果与实际震害状况相符。因此本节选取结构响应系数较大的杆件29和杆件130作为初始失效杆件,分析结构在杆件失效条件下的抗地震连续倒塌性能。图7为杆件初始失效流程图,具体操作步骤如下:

①建立网壳模型。考虑材料、几何非线性、初

始缺陷等;

②编辑UMAT子程序定义失效单元。先通过提取杆件应变值传递更新,然后建立应变的判断条件,判别该杆件是否达到最大响应。如达到最大响应则控制杆件应力、弹性模量为0(即杆件失效);如未达到最大响应则程序继续计算。

③输入天津-宁河三向地震波并逐级增大PGA直至结构倒塌破坏。

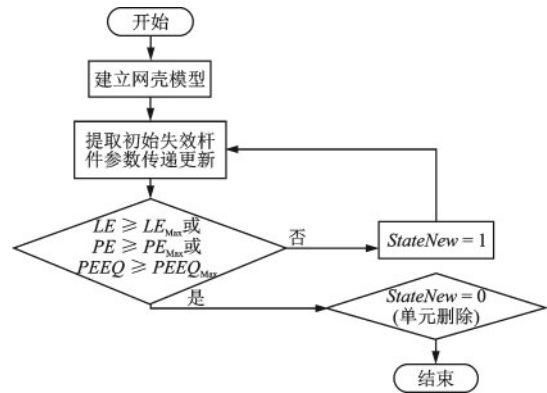


图7 杆件初始失效流程

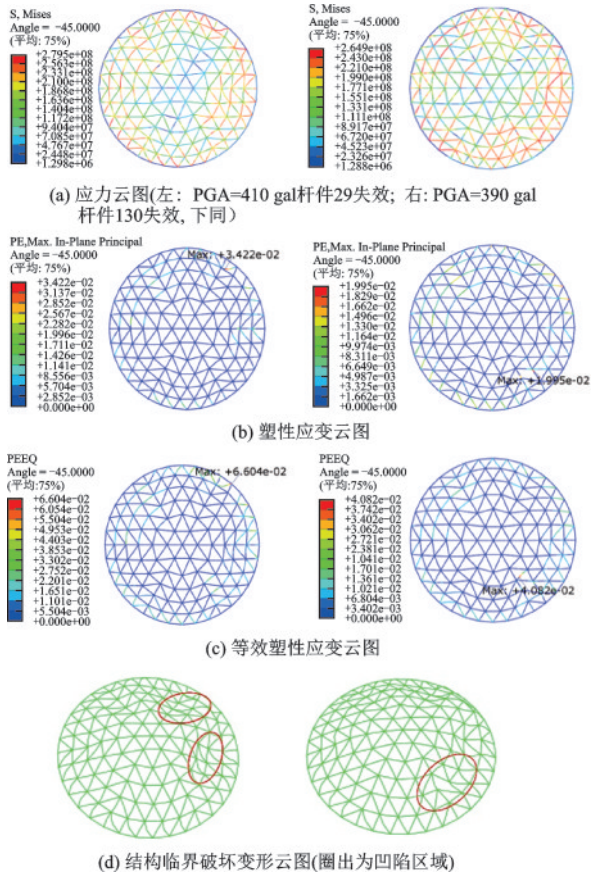
Fig.7 Flow chart of initial failure of members

2.2 杆件失效后的结构倒塌破坏分析

以天津-宁河地震波为例,对杆件初始失效下的结构逐级增大峰值加速度,得到不同杆件初始失效下的结构变形云图如图8所示。可知,在杆件发生初始失效后,剩余结构开始产生应力重分布且应力集中(图8(a)),杆件两端塑性明显,其周围杆件塑性发展深入,结构塑性开始增大,同时集中于失效杆件两端,且最大塑性和最大等效塑性杆件集中初始失效杆件周围(图8(b~c))。由图8(d)可知,杆件29发生初始失效后对周围杆件产生较大影响,其失效周围塑性开始发展,导致结构产生新的凹陷区域;杆件130处于结构地震破坏的凹陷区域,即结构薄弱部位,并且加大了结构的凹陷位置,加速了结构的倒塌。结果表明:杆件的初始失效会对其周围杆件尤其是两端节点产生较大影响,在内力重分布过程中,其周围杆件应力更大,两端节点发生较大塑性,并会导致其他杆件达到了其最大承载能力后,结构局部产生塑性变形并发生凹陷。

杆件130和29失效下的结构最大竖向节点位移、塑性屈服单元比例随PGA变化规律曲线如图9、10所示。结构的总应变能时程曲线如图11所示。

如图9所示,当杆件130发生初始失效时,结构



(d) 结构临界破坏变形云图(圈出为凹陷区域)

图8 杆件初始失效下结构的变形云图

Fig.8 Deformation cloud diagrams of the structure under initial failure of members

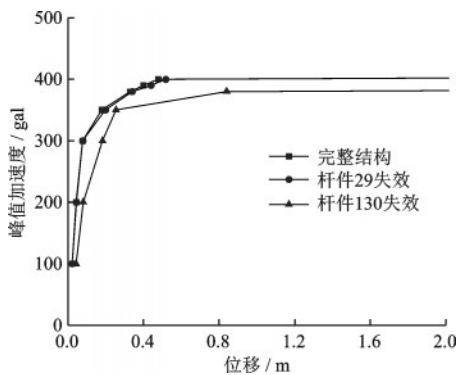


图9 杆件失效下最大节点竖向位移随PGA变化曲线

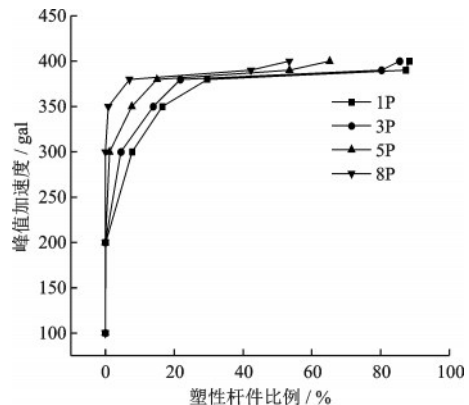
Fig.9 Curves of maximum vertical displacement of nodes as a function of PGA under member failure

的极限破坏加速度为380 gal,其最大节点竖向位移增大了78%。与完整结构的IDA分析相比,在PGA由380 gal增至390 gal过程中,塑性杆件所占比例较完整结构分别增大了29.62%、87.32%,其中完全进入塑性杆件比例(即8P杆件占比)与完整结构相比分别增大了17.36%、502.56%(图10(a)),同时结构的应变能峰值较完整增大39.81%至破坏

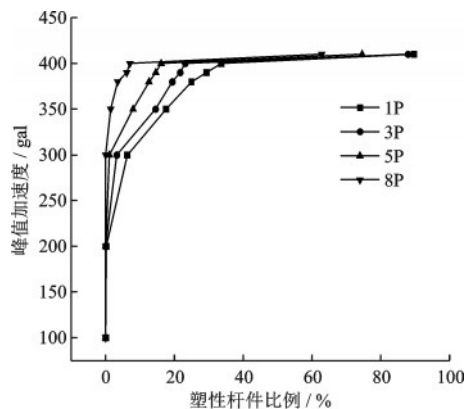
(图11(a))。杆件130初始失效下对结构的影响较大,结构在低于理论峰值加速度下发生倒塌破坏。

同理,在杆件29发生初始失效后,结构的极限破坏加速度为400 gal,最大竖向节点位移较完整结构增大8.3%。在PGA由400 gal增至410 gal过程中,进入塑性杆件比例较完整结构分别增大了24.93%、29.33%(图10(b)),结构应变能峰值较分别增大了21.2%、35.3%(图11(b)),杆件29对剩余结构影响较小,仅加大了剩余结构的响应,并未使结构发生提前破坏。

在上述初始失效杆件中,两类杆件都处于结构底部。其中杆件29为非凹陷区域杆件,其初始失效后其两端节点和周围杆件塑性开始发展,结构的动力响应参数变大,结构新的凹陷区域进而发生破坏;而杆件130处于结构薄弱部位且位移薄弱部位,其初始失效使得结构在低于预期地震峰值加速度发生破坏,结构最大节点倒塌位移、塑性杆件比例、总应变能急剧增加,加大了结构的凹陷程度。应当重点关注结构局部凹陷即薄弱区域的杆件,其失效



(a) 杆件130失效下结构塑性杆件比例



(b) 杆件29失效下结构塑性杆件比例

图10 初始失效下结构塑性杆件比例随PGA变化曲线

Fig.10 Curve of plastic member proportion with varying PGA under initial failure

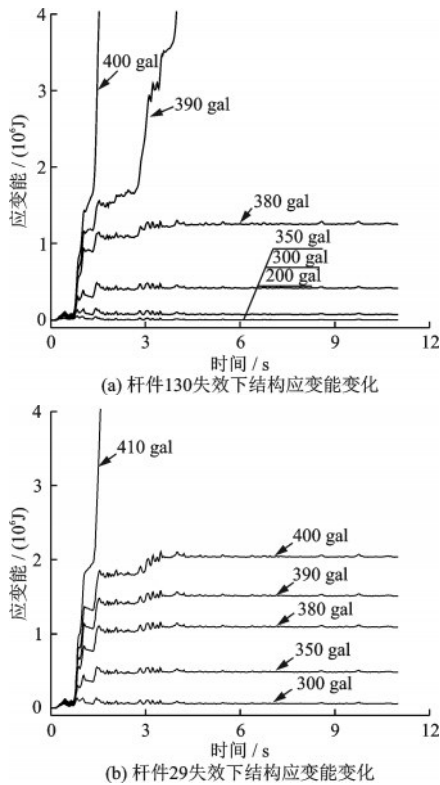


图 11 初始失效下结构的总应变能时程曲线

Fig.11 Time-history curves of total strain energy in the structure under initial failure

后会比通常情况的增量动力倒塌会更加危险。

3 结 论

研究了地震作用下结构杆件初始失效对剩余结构抗连续倒塌性能的影响。通过增量动力分析得到结构响应最大应力、应变、等效塑性应变杆件,采用定义的 UMAT 子程序引入初始失效杆件,得到了杆件初始失效下剩余结构的破坏加速度、结构倒塌位移、杆件进入塑性比例、结构应变能变化等指标的变化规律,分析了单层网壳结构在强震作用下的连续倒塌破坏机理和破坏模式。所得结论如下:

(1)在考虑了材料、几何非线性及初始缺陷等条件下,网壳结构底部构件受地震影响较大,可能发生动力失稳破坏或强度破坏。

(2)针对动力失稳破坏下的杆件失效,通过选取地震响应参数最大的杆件作为初始失效杆件,对结构进行了连续倒塌分析。在地震过程中杆件初始失效会使其两端节点产生较大塑性,周围杆件塑性发展明显,并在接下来的地震中产生凹陷,导致

结构更容易发生倒塌破坏。

(3)在薄弱区域杆件发生初始失效后,结构的极限峰值加速度有所降低,节点最大竖向位移大幅增加,而塑性杆件比例、结构总应变能的增加幅度次之,结构的响应急剧增大加速了结构的凹陷;在非薄弱区域杆件失效后,与完整结构相比较,节点竖向位移、塑性杆件比例增加幅度相对较小,而结构总应变能的增加幅度则较大,其失效加大了结构的响应,并产生了新的凹陷区域。

参考文献:

[1] Stephen D, Lam D, Forth J, et al. An evaluation of modelling approaches and column removal time on progressive collapse of building [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 153: 243-253.

[2] 姜健, 吕大刚, 陆新征, 等. 建筑结构抗连续性倒塌研究进展与发展趋势[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 1-28.

Jiang J, Lyu D G, Lu X Z, et al. Research progress and development trends on progressive collapse resistance of building structures[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 1-28. (in Chinese)

[3] 周健, 崔家春, 周健. 结构抗连续倒塌设计规范和办法比较[J]. 建筑结构, 2015, 45(23): 98-105.

Zhou J, Cui J C, Zhou J. Comparative study on design codes and methods for structural resistance of progressive collapse [J]. Building Structure, 2015, 45(23): 98-105. (in Chinese)

[4] Fu F, Parke G A R. Assessment of the progressive collapse resistance of double-layer grid space structures using implicit and explicit methods[J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(3): 831-842.

[5] 赵宪忠, 闫伸, 陈以一. 空间网格结构连续性倒塌试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(6): 1-8.

Zhao X Z, Yan S, Chen Y Y. Progressive collapse test of a space frame structure[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(6): 1-8. (in Chinese)

[6] 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.

[7] 朱奕锋, 冯健, 蔡建国, 等. 梅江会展中心张弦桁架抗连续倒塌分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(3): 45-53.

Zhu Y F, Feng J, Cai J G, et al. Analysis on progressive collapse resistance of truss string structure of Meiji-

- ang Exhibition Center [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(3): 45-53. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] Tian L M, He J X, Zhang C B, et al. Progressive collapse resistance of single-layer latticed domes subjected to non-uniform snow loads [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 176: 106433.
- [10] Tian L M, Bai C, Zhong W H. Experimental study and numerical simulation of partial double-layer latticed domes against progressive collapse in member-removal scenarios [J]. Structures, 2021, 29: 79-91.
- [11] 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.
Shen S Z, Zhi X D. Failure mechanism of reticular shells subjected to dynamic actions [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 11-20. (in Chinese)
- [12] Bertero V V. Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments [J]. Structural Engineering and Structural Mechanics, 1977, 53(1): 29-79.
- [13] 陆新征, 叶列平. 基于 IDA 分析的结构抗地震倒塌能力研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 13-18.
Lu X Z, Ye L P. Study on the in collapse resistance of structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 13-18. (in Chinese)
- [14] 白久林, 欧进萍. 基于 IDA 方法的钢筋混凝土结构失效模式优化 [J]. 工程力学, 2011, 28(增2): 198-203.
Bai J L, Ou J P. Optimization of failure modes for reinforced concrete buildings based on IDA method [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Sup2): 198-203. (in Chinese)
- [15] 支旭东, 范峰, 沈世钊. 凯威特型单层球面网壳在强震下的失效研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(9): 7-12.
Zhi X D, Fan F, Shen S Z. Seismic failure of single-layer reticulated domes [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 7-12. (in Chinese)
- [16] 张成, 吴慧, 高博青. 网架结构在强震下的失效模式及其数值表述 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 45-50.
Zhang C, Wu H, Gao B Q. Failure modes and their numerical descriptions of grid structures subjected to earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 45-50. (in Chinese)
- [17] 卜一, 吕西林, 周颖, 等. 采用增量动力分析方法确定高层混合结构的性能水准 [J]. 结构工程师, 2009, 25(2): 77-84.
Bo Y, Lyu X L, Zhou Y, et al. Studies on the multi-levels of hybrid structures using incremental dynamic analysis [J]. Structural Engineers, 2009, 25(2): 77-84. (in Chinese)
- [18] 叶继红, 李柯燃. 多点输入下基于响应敏感性的单层球面网壳冗余特性研究 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(9): 20-29.
Ye J H, Li K R. Redundancy evaluation of domes under multi-support excitations based on response sensitivity [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(9): 20-29. (in Chinese)
- [19] 巴盼锋, 张毅刚, 吴金志, 等. 单层球面网壳动力失效全过程试验研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(1): 31-37.
Ba P F, Zhang Y G, Wu J Z, et al. Whole process test and dynamic failure analysis for single-layer spherical lattice shells [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 31-37. (in Chinese)
- [20] 韩庆华, 郑靖潇, 徐颖, 等. 强震作用下立体桁架结构抗连续倒塌性能研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(14): 231-238.
Han Q H, Zheng J X, Xu Y, et al. Progressive collapse performance of spatial truss structures subjected to severe earthquakes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(14): 231-238. (in Chinese)
- [21] 网壳结构技术规范: JGJ61—2003 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [22] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [23] 裴学良, 许德峰, 刘玉妹, 等. 钢框架结构地震倒塌数值模拟方法研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(11): 101-112.
Pei X L, Xu D F, Liu Y S, et al. A numerical simulation method on the seismic collapse of steel frame structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(11): 101-112. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)