翟永梅,刘瑶,陈贻辉,等.单层连方型球面网壳与下部支承结构协同工作的强震失效研究[J].地震工程学报,2020,42(2):299-303.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.299

ZHAI Yongmei,LIU Yao,CHEN Yihui,et al.Failure Modes of Single-layer Lamellar Spherical Reticulated Shells under Cooperative Work with Lower Supporting Structures and Severe Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42 (2):299-303.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.299

# 单层连方型球面网壳与下部支承结构 协同工作的强震失效研究

翟永梅<sup>1</sup>,刘 瑶<sup>2</sup>,陈贻辉<sup>3</sup>,符徐霞<sup>2</sup>

(1. 同济大学上海防灾救灾研究所,上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院,上海 200092;3. 上海中建建筑设计院有限公司,上海 200122)

摘要:基于 ABAQUS 有限元分析,研究了单层连方型球面网壳结构在 90 种工况下的 3 种失效模 式:弱支承结构失效模式、强支承结构失效模式和中等支承结构失效模式。不同失效模式下结构所 能承受的极限加速度有较大差别。结构处于弱支承或强支承状态时失效极限荷载较低,处于中等 支承时失效荷载较高;在由弱或强支承向中等支承过渡的区间,结构的失效荷载呈现逐渐增加的趋势。当上下部结构刚度比较匹配时,二者才能充分发挥抗震性能,同时结构的极限承载力也会相对 较高。下支承柱刚度是影响结构失效模式和极限荷载的主要因素之一,研究结果表明,随着支承刚 度的增加,结构极限荷载呈先增加后减小的趋势。随着屋面等效荷载的增加,结构的极限承载力将 会降低,在地震中更容易发生破坏。

关键词:单层连方型球面网壳;强震作用;整体结构;失效模式
中图分类号:TU375.4;TU312+.3
文献标志码:A
文章编号:1000-0844(2020)02-0299-05
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.299

# Failure Modes of Single-layer Lamellar Spherical Reticulated Shells under Cooperative Work with Lower Supporting Structures and Severe Earthquakes

ZHAI Yongmei<sup>1</sup>, LIU Yao<sup>2</sup>, CHEN Yihui<sup>3</sup>, FU Xuxia<sup>2</sup>

(1.Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Architecture Institute China State Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

**Abstract**: This paper proposes three structural failure models of single-layer lamellar spherical reticulated shells under 90 working conditions based on ABAQUS finite element analysis; these models include the failure modes of weakly supported structures, strongly supported structures, and moderately supported structures. The ultimate acceleration of the structure markedly differs

收稿日期:2017-08-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目"基于高分辨率遥感影像的城市建筑物震害预测研究"(51178351);"十三五"国家重点研发项目"滨海城市重大基础设施灾变机理、风险评估与监测预警原理与方法"(2016YFC0800209)

第一作者简介:翟永梅,女,副研究员,博士。E-mail:zymww@tongji.edu.cn。

under different failure modes, and the ultimate failure loads of the structure under the failure modes of weak and strong support are low, while that under the failure mode of moderate support is relatively high. The failure load of the structure presents an increasing trend in the interval from weak or strong support to medium support. When the stiffness of the upper and lower structures is matched, the ultimate bearing capacity of the structure is relatively high. The stiffness of the lower supporting columns is one of the main factors affecting the failure modes and ultimate loads of a structure. Increases in supporting stiffness cause the ultimate load of the structure to first increase and then decrease. As the equivalent load of the roof increases, the ultimate bearing capacity of the structure decreased and shows greater potential to be damaged in an earthquake. **Keywords:** single-layer lamella spherical reticulated shell; severe earthquake; overall structure; failure mode

## 0 引言

网壳结构以其优美的结构外形与良好的结构承 载能力成为近年来工程运用中最具有生命力的结构 之一。现阶段对于网壳结构分析工作国内外已经取 得了丰硕的研究成果<sup>[1-6]</sup>。有部分科研工作者对下 部支承结构对上部网壳力学性能的影响以及耦合体 系的强震失效机理进行了研究<sup>[7-13]</sup>。分析可知,多 数网壳结构将下部支撑以简支或固支的边界形式脱 离出来,对网壳壳体本身进行独立力学性能的计算, 然而地震作用下,网壳结构与下部支撑结构的协同 作用对于整体结构抗震性能具有显著影响。为了更 好地对网壳结构在地震作用下的损伤特性进行分析 评估,本文基于网壳结构以及下部支撑的损伤因子, 对地震作用下网壳结构与下部支撑的协同抗震性能 进行研究。

为了更好地了解单层联方型球面网壳与下部支 承结构协同工作的抗震性能,并进一步明确整体结 构的强震失效模式,本文利用大型通用有限元软件 ABAQUS建立了网壳一支承体系的精细化有限元 模型,以非线性时程反应分析为基础,选取适当的控 制变量,对 90种工况进行动力荷载域的全过程分 析。基于已有的单层球面网壳结构强震失效准则, 通过考虑下部支承结构混凝土的损伤效应,建立了 耦合体系的失效判别准则。

#### 1 结构有限元分析模型

本文所采用单层联方型球面网壳结构如图 1 所示,跨度为 40 m,杆件采用圆钢管,材料为 Q235B,环向杆件截面尺寸为 Φ132×4、径向及斜向杆件截面尺寸为 Φ116×4。下部支承结构采用圆柱一环梁体系,柱高度为 10 m,柱截面直径选取 0.3~1.5 m 间 5 种不等直径,环梁统一采用 0.6 m×0.6 m 的矩形截面。

整个结构共设置柱子 24 根,梁、柱混凝土强度等级为 C30。上部网壳各杆件之间采用焊接球节点,为刚性 连接;网壳与下部支承结构之间在每根柱顶的环梁处 采用铰接连接。整体结构模型如图 2 所示。



Fig.1 Single-layer lamellar spherical reticulated shell



#### 2 结构动力失效准则

研究结构的强震失效问题,基于已有的关于单 层网壳结构损伤失效判别准则的基础上,建立了下 部支承结构基于混凝土损伤因子的失效准则,并将 二者相结合形成了整体结构的强震失效准则。

单层网壳结构采用支旭东<sup>[15]</sup>提出的基于结构 损伤因子的判别方法作为网壳结构损伤的评判准 则。损伤因子*d*,基于结构的变形、塑性发展程度等 多项响应指标精确量化分析结构的损伤状态,以0.9 作为网壳结构损伤因子的失效限值。

下部支撑以柱混凝土的受压损伤因子作为衡量 指标来建立支承结构的失效判别准则,将柱截面最 外围 8 个积分点处混凝土受压损伤因子的平均值作 为该支承柱的损伤因子,取各支承柱损伤因子 d<sub>i</sub>的 最大值作为下部支承结构的损伤因子 d<sub>c</sub>。本文以 受压峰值应力下降到混凝土压碎应力时,即受压骨 架曲线水平段起点处所对应的混凝土损伤因子作为 下部支承结构的失效限值,本文所采用的 C30 混凝 土,损伤因子大致分布在 0.6 附近,具体见表 1 所列。

表1 结构动力失效准则

Table 1	Dynamic failur	e criterion o	of the	structure

	$d_s > 0.9$	$d_s < 0.9$
$d_{c} > 0.6$	失效	失效
$d_{c} < 0.6$	失效	正常

从组成形式上来看,下部支承结构与上部网壳 为"串联体系",其中任意一个失效都会引起整体结 构的失效。因此,耦合体系的失效准则可以表述为: 当网壳损伤因子 d,与支承结构损伤因子 d,至少有 一个达到限值时,整体结构失效。

# 3 整体结构的失效模式

本文在大量算例的基础上,根据下部支承刚度 这一首要影响因素将整体结构的失效模式区分为三 种,即弱支承结构,中等支承结构和强支承结构。

弱支承结构的失效模式即因下部支承柱的过度 损伤而引起整体结构倒塌。极限荷载作用下,上部 网壳杆件未进入塑性状态,支承结构刚度过弱,强震 作用下发生突然倒塌破坏。图 3 为失效极限荷载作 用下弱支承结构的变形图。



图 3 弱支承结构变形图示意图 Fig.3 Deformation of the weakly supported structure

失效时下部支承结构损伤因子 d<sub>c</sub>达到限值,上 部网壳损伤因子 d<sub>c</sub>尚低于其失效限值的 1/3,即小 于 0.3。网壳结构尚未能充分发挥其抗震能力,整体 结构的失效属于下部支承结构倒塌破坏型。

中等支承结构强震失效即上部网壳和下部支承 结构的损伤程度处于同一个量级,表现出整体破坏 的特征。此时网壳结构和支承结构变形相当,二者 均比较充分的发挥了其抗震性能。图4为失效极限 荷载作用下中等支承结构的变形图。



图 4 中等支承结构变形图示意图

Fig.4 Deformation of the moderately supported structure

失效时上部网壳损伤因子 d<sub>s</sub>和下部支承结构 损伤因子 d<sub>s</sub>至少有一个达到失效限值,且另外一个 大于其失效限值的 1/3。网壳结构和下部支承结构 都发挥了较大的抗震能力,失效类型属于整体结构 破坏型。

强支承结构的失效模式即上部网壳的动力破 坏,柱子的截面较大,整个过程中下部支承结构的损 伤都很小,此种情况下下部支承结构的抗震性能并 没有得到充分发挥。图5显示了失效极限荷载作用 下强支承结构的变形图。



图 5 强支承结构变形图示意图 Fig.5 Deformation of the strongly supported structure

失效时网壳结构损伤因子 d。达到限值,且支承 结构损伤因子 d。尚低于其失效限值的 1/3,即小于 0.2。上部网壳的破坏形式可能为动力强度破坏,也 可能为动力失稳,而支承结构未充分发挥抗震能力, 属于上部网壳动力破坏型。

### 4 失效机理分析

本文对矢跨比为1/3、1/5、1/6,屋面等效重力荷

载为 1.2 kN/m<sup>2</sup>、1.5 kN/m<sup>2</sup>, 柱截面直径为0.3 m、 0.6 m、0.9 m、1.2 m、1.5 m, 输入地震动为 El Centro 波、Taft 波、兰州波共 90 种工况下的整体结构进行了 全过程的弹塑性时程反应分析,获得了失效极限荷载 和相应的结构损伤因子。表 2 为 q=1.2 kN/m<sup>2</sup> 的计 算结果,基于计算结果可以看出不同失效模式下,结

表 2 结构损伤因子与失效荷载

Table 2	Damage factor and failure load of the stru			ructure	
此雷击	矢跨	柱截面	网壳损伤	支承损伤	极限
地辰功	比	直径/m	因子 d <sub>s</sub>	因子 $d_c$	荷载
		0.3	0.001 4	0.900 0	337
		0.6	0.060 4	0.592 8	1 400
	1/3	0.9	0.776 8	0.414 2	2 037
		1.2	0.519 9	0.103 7	1 537
		1.5	1.154 0	0.001 7	550
		0.3	0.022 8	0.384 3	337
		0.6	0.068 9	0.602 3	1 450
El Centro	1/5	0.9	0.459 3	0.590 0	2 400
		1.2	0.631 9	0.153 1	1 937
		1.5	0.900 1	0.000 6	512
		0.3	0.005.3	0.971.9	350
		0.6	0.025.4	0.585.3	1 400
	1/6	0.9	0.428.3	0.599.6	2 400
	1/0	1.2	0.803.6	0.007 /	1 025
		1.2	0.844.2	0.001 1	512
		0.3	0.007 7	0.068.8	400
		0.6	0.683.3	0.500.0	1 850
	1 / 2	0.0	0.003 3	0.301 9	1 025
	1/5	0.9	0.917 5	0.140 0	1 920
		1.4	0.903 5	0.091 0	1 400
		1.5	0.898 4	0.000 6	450
		0.3	0.007 4	0.9697	400
m (	1 / 5	0.6	0.620 1	0.590 7	1 900
Laft	1/5	0.9	0.871 6	0.156 8	2 000
		1.2	0.873 1	0.073 8	1 350
		1.5	0.901 3	0.001 0	400
		0.3	0.009 9	0.969 0	525
		0.6	0.520 1	0.612 3	1 287
	1/6	0.9	0.873 5	0.022 9	1 237
		1.2	0.914 5	0.039 1	737
		1.5	0.584 8	0.000 6	387
	1/3	0.3	0.008 4	1.125 2	500
		0.6	0.200 4	0.692 8	1 550
		0.9	0.896 8	0.474 2	1 700
		1.2	0.919 9	0.103 7	912
		1.5	0.859 4	0.000 6	400
	1/5	0.3	0.049 5	0.967 7	587
		0.6	0.182 1	0.660 1	1 350
Lanzhou		0.9	0.932 0	0.502 8	1 800
		1.2	0.928 1	0.088 2	1 000
		1.5	0.901 3	0.000 3	500
	1/6	0.3	0.000 9	0.911 9	575
		0.6	0.125 4	0.785 3	1 450
		0.9	0.608 3	0.619 6	1 700
		1.2	0.893 6	0.097 4	1 100
		1.5	0.900 0	0.001 1	550

构的失效极限荷载具有较大差别。

基于上述计算结果,得到 El Centro 波、Taft 波、兰州波作用下极限荷载值的概率密度分布图 (图 6)。对于单层联方型球面网壳结构,当不考虑 下部支承影响时,其强震失效模式只有 2 种,即由几 何非线性起主导作用引起的动力失稳和由于塑性变 形过度发展引起的动力强度破坏。由图 2 可以看 出,考虑下部混凝土支承结构的协同作用及其材料 非线性影响之后,整体结构的失效模式和极限状态 发生了本质的变化,呈现出下述 3 种形态。各失效 模式之间由于损伤因子分布的不同,在坐标空间内 呈现出不同的聚集区域。



图 6 结构失效极限荷载概率密度分布图 Fig.6 Ultimate load probability density distribution

of structure failure

在结构失效荷载方面,当下部支承结构过弱或 过强时,失效极限荷载较低;当处于中等程度时失效 荷载较高;在由弱支承或强支承向中等支承过度的 区间,结构的失效荷载呈现增高趋势,这说明只有当 上下部结构刚度比较匹配时,二者才能充分发挥抗 震性能,结构的极限承载力才会相对较高。

从以上分析可以看出,考虑混凝土支承的协同 作用及其材料非线性影响后,随着支承刚度由弱到 强,结构将经历依次上述3种失效状态,即由支承倒 塌到二者共同作用再到网壳动力破坏的过程。

# 5 总结

本文采用纤维梁模型及自编的混凝土材料子程 序,建立了包含下部支承在内的整体结构精细化有 限元模型。基于支承柱混凝土的受压损伤因子建立 了下部支承的失效判别准则,并将其与已有的单层 球面网壳结构强震失效准则相结合,初步形成了耦 合体系的失效判别准则。

大量算例分析表明,随着下部支承由弱到强,结 构将依次经历弱支撑、中等支撑和强支撑3种失效 模式。

这3种模式的极限荷载差别较大,当支承刚度 过弱或过强时失效荷载较低,当支承刚度适中时失 效荷载较高,即当上下部结构刚度比较匹配时,二者 才能充分发挥抗震性能,结构的极限承载力相对 较高。

下支承柱刚度是影响结构失效模式和极限荷载 的最主要因素,在本文研究的范围内,随着支承刚度 的增加,结构极限荷载呈先增加后减小的趋势。随 着屋面等效荷载的增加,结构的极限承载力将会降低,在地震中更容易发生破坏。

#### 参考文献(References)

- [1] SHEN S Z,LAN T T.A Review of the Development of Spatial Structures in China[J].International Journal of Space Structures,2001,16(3):157-172.
- [2] 范峰,支旭东,沈世钊.大跨度网壳结构强震失效机理研究[J].建筑结构学报,2010,31(6):153-159.

FAN Feng, ZHI Xudong, SHEN Shizhao. Failure Mechanism of Large Span Reticulated Shells Subjected to Severe Earthquakes[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 153-159.

- [3] 王多智,范峰,支旭东,等.冲击荷载下网壳结构的失效模式及 其动力响应特性[J].工程力学,2014,31(5):180-189.
  WANG Duozhi,FAN Feng,ZHI Xudong,et al.Failure Modes and Characteristics of Dynamic Response for Reticulated Shells under Impact[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5):180-189.
- [4] MA H H, SHAN Z W, FAN F.Dynamic Behaviour and Seismic Design Method of a Single-layer Reticulated Shell with Semirigid Joints[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 119:544-557.
- [5] 聂桂波,戴君武,张辰啸,等.芦山大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):1-6. NIE Guibo, DAI Junwu, ZHANG Chenciao, et al. Failure Patterns of Large Span Space Structure in Lushan Earthquake and Numerical Simulaion [J]. China Civil Engineering Journal, 2015.48(4):1-6.
- [6] CHEN G B, ZHANG H, RASMUSSEN K J R, et al. Modeling Geometric Imperfections for Reticulated Shell Structures Using Random Field Theory [J]. Engineering Structures, 2016, 126: 481-489.
- [7] 曹资,张超,张毅刚,等.网壳屋盖与下部支承结构动力相互作用研究[J].空间结构,2001,7(2):19-26.
   CAO Zi,ZHANG Chao,ZHANG Yigang, et al. A Study on the Dynamic Interaction between Lattice Shells and the Supporting Structures[J].Spatial Structures,2001,7(2):19-26.
- [8] 徐光辉. 网壳屋盖下部支承结构组合体系静、动力性能研究 [D].南京:东南大学,2005.
- [9] 丁洁民,康晓菊.北京奥运会乒乓球馆钢屋盖与下部结构的协同工作[J].建筑结构,2006,36(增刊1):227-230.
   DING Jiemin, KANG Xiaoju. Cooperative Effect between the Steel Roof Structure and Supporting Structure of Beijing Olympic Pingpang Gymnasium[J].Building Structure,2006,36 (Supp1):227-230.
- [10] 李娜.单层网壳结构与下部支承结构间的动力相互作用[D]. 沈阳:东北大学,2008.
- [11] YU Z W, ZHI X D, FAN F, et al. Effect of Substructures Upon Failure Behavior of Steel Reticulated Domes Subjected to the Severe Earthquake[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49 (9):1160-1170.
- [12] 支旭东,于志伟,范峰.下部支承结构对网壳结构强震响应的 影响研究[J].建筑钢结构进展,2012,14(4):27-31.
   ZHI Xudong,YU Zhiwei,FAN Feng.Influence Study of Substructure Upon Dynamic Responses of Reticulated Shells under Severe Earthquakes[J].Progress in Steel Building Structures,2012,14(4):27-31.
- [13] 张辰啸.空间双层网格结构强震失效机理与隔震研究[D].哈 尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016.

(下转第310页)

[7] 李宏男, 霍林生. 结构多维减震控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.

LI Hongnan, HUO Linsheng. Structural Multi-dimensional Vibration Control[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[8] 党育.复杂隔震结构的分析与软件实现[D].武汉:武汉理工大学,2011.

DANG Yu. Analysis and Software Development of Complex Isolated Buildings[D].Wuhan:Wuhan University of Technology,2011.

[9] 范立础,聂利英,李建中.复杂结构地震波输入最不利方向标准

问题[J].同济大学学报(自然科学版),2003,31(6):631-636. FAN Lichu, NIE Liying, LI Jianzhong. Discussion on Standard of Critical Angle of Seismic Wave in Seismic Analysis of Complicated Structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science) 2003,31(6):631-636.

[10] 全伟,李宏男.曲线桥多维地震时程分析主方向研究[J].振动 与冲击,2008,27(8):20-24.

QUAN Wei, LI Hongnan. Research on Critical Angle of Curved-Bridge in Multi-dimensional Earthquake Time History Analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8):20-24.

\*\*\*\*\*

(上接第 303 页)

ZHANG Chenxiao. Study on the Failure Mechanism under Strong Earthquake Excitation and Isolation of Space Doublelayer Lattice Structure[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016.

[14] 聂桂波.网壳结构基于损伤累积本构强震失效机理及抗震性 能评估[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012. NIE Guibo.Failure Mechanism and Performance Evaluation of Reticulated Shells under Severe Seismic Motion Based on Damage Cumulative Constitutive Model[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2012.

[15] 支旭东.网壳结构在强震下的失效机理[D].哈尔滨:哈尔滨工 业大学,2006.