

李久存. 地震灾害后重建建筑空间网架结构支承性能数值模拟[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 16–20. [LI Jiucun. Numerical simulation of support performance of reconstruction space grid frame structures after disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 16–20. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.004.]

# 地震灾害后重建建筑空间网架结构支承性能数值模拟<sup>\*</sup>

李久存

(东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 由于网架结构提供两道支承作用, 能够改善以少量柱间钢支撑为主要支承手段导致柱间钢支撑受力空间较大影响支承性能的问题, 该文提出灾害后重建建筑空间网架结构支承性能数值模拟方法。以某省灾害后重建建筑空间网架结构为模拟对象, 通过 ANSYS 有限元软件单元构建模拟对象 5 种不同支承(周边支承、对边支承、三边支承、周边多点支承以及点支承)形式下的有限元模型, 并进行柱间钢支撑、阻尼器与地震波等参数设置。数值模拟分析结果显示, 支承形式决定网架结构支承性能, 周边支承形式下网架结构的支承性能最强; 同种支承形式的网架结构中, 支承性能强度随弹簧硬度系数及地震影响系数增大而变强; 当阵型在前十阶时, 模拟对象柱间钢支撑体系水平向质量参与系数和竖向质量参与系数分别达到 91% 和 1.1%, 表明钢支撑体系在一定程度上改变网架结构动力特性, 提升网架结构支承性能。

**关键词:** 灾后重建; 网架结构; 支承性能; 数值模拟; 模型构建; 结构动力

**中图分类号:** TU352.1; X43; X915.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2020)01-0016-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.004

近些年, 受自然环境因素与人为因素影响<sup>[1-2]</sup>, 我国自然灾害频发, 导致受灾地区建筑损毁严重, 灾害后建筑重建成为受灾地区重建的重中之重<sup>[3]</sup>, 而灾害后重建建筑的空间结构支承性能得到相关研究人员的普遍关注。

以往灾害后重建建筑空间以少量柱间钢支撑为主要支承手段<sup>[4-6]</sup>, 由于柱间钢支撑受力空间较大, 支承性能受到一定影响。随着工业不断发展, 网架结构广泛用于灾害后建筑重建中, 该网架结构具有提高建筑空间有效面积、增强支承性以及安装简单等特点<sup>[7]</sup>, 更适于高烈度地区, 其中网架结构支承性能具有一定特殊性和复杂性<sup>[8]</sup>。建筑空间整体结构的支承性是以抗侧力体系抗震能力为基础<sup>[9-10]</sup>, 网架结构有两道支承作用, 这两道支承作用分别由柱和柱间支撑提供<sup>[11]</sup>, 可有效提升灾害后重建建筑的支承性能。因此提出灾害后重建建筑空间网架结构支承性能数值模拟方法<sup>[12]</sup>, 将 ANSYS 有限元软件单元体库的 LINK8 空间杆单元与网架结构特性相结合, 对建筑空间网架结构进行有限元建模, 通过对所构建的网架结构有限元模型支承性能进行分析。

## 1 建筑空间网架结构支承性能数值模拟

### 1.1 模拟对象简介

为模拟灾害后重建建筑空间网架结构支承性能, 以某省灾害后重建建筑空间网架结构为模拟对象。该网架结构具体情况为: 跨度为 27 m × 27 m、网格数量为 9 × 9 个、网格尺寸为 3.5 m × 3.5 m、网架高度为 2.5 m、网架距离地面高度为 14 m、建筑空间恒荷载<sup>[13]</sup>为 1.0 kPa; 建筑空间活荷载数值为 0.4 kPa; 网架结构所用材质型号为 Q345 无缝钢管。表 1 为上述网架结构杆件编号及规格, 编号 1 为上下弦所使用的杆件、编号 2 为腹杆使用的杆件、并假设杆件长度为 3.2 m。网架结构遵循《建筑钢结构防火技术规范》中规定的弹性模量和屈服强度折减系数<sup>[14]</sup>, 并用  $\psi$  表示稳定系数。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-07-02      修回日期: 2019-09-30

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(201602620)

作者简介: 李久存(1980-), 男, 河北唐山人, 工程师, 研究方向为土木工程. E-mail: li-iucun@sohu.com

表 1 网架结构杆件编号及规格

编号	1	2
钢管截面	70 mm × 3.5 mm	55 mm × 3.25 mm
截面面积 $A/\text{cm}^2$	8.85	7.96
截面形状系数 $\mu$	272	294
长度比 $\lambda$	113	145
稳定系数 $\psi$	0.493	0.325

1.2 网架结构有限元模型构建

采用 ANSYS 有限元模型单元体库的 LINK8 空间杆单元并结合网架特性对模拟对象进行建模，根据网架结构支座弹性约束的力学特征<sup>[15]</sup>，对 5 种网架支承形式进行建模，图 1 为模拟对象不同支承形式下有限元模型的平面布置图。图 1a 为周边支承网架结构，除了四角点为 A 类支座，剩余为 B 类支座；图 1b 为周边多点支承网架结构，除了四角点为 A 类支座，四周边跨中位置为 B 类支座；图 1c 为四角点支承网架结构，使用 4 个 A 类支座，该支座分布在边界 1.5 个网格下弦节点位置；图 1d 为对边支承网架结构，四角点为 A 类支座，对称边为 B 类支座；图 1e 为三边支承网架结构，有三条边周边支承布置，假设 A 类支座从三个方向可固定并可扭转，B 类支座的垂直方向可固定，横向不固定，法向具有弹性并可扭转。

2 实验结果分析

2.1 参数设置

模拟对象有限元模型构建完成后，以模拟对象支撑柱的距离以及模拟对象的房高为考虑前提<sup>[16]</sup>，在支撑柱之间无障碍构建支撑并不合理，

因此立面双层设置方法被广泛使用<sup>[17]</sup>。使用多次弹性时程分析网架结构钢支撑截面、型号和位置，图 2 为模拟对象柱间钢支撑分布截面图。表 2 为阻尼器参数表。输入的地震波为 El-Centro 波、Olympia 波和人工波<sup>[18-19]</sup>。

表 2 阻尼器参数

阻尼器编号	D I	D II	D III	D IV
阻尼指数 $\alpha$	0.32			
阻尼系数 $C/(\text{Nm/s})$	$5 \times 10^5$	$6 \times 10^5$	$7 \times 10^5$	$8 \times 10^5$
数量/个	28	28	9	9

2.2 支承形式对建筑空间位移变化的影响<sup>[20]</sup>

位移变化是结构支承性能的主要表现形式之一，为了分析灾害后重建建筑空间网架结构支承形式对位移变化的影响，对模拟对象有限元模型最大节点位移-地震影响系数曲线图进行构建<sup>[20]</sup>。用  $k$  代表不同种类弹簧硬度，则上文所提到的 5 种不同支承形式下的网架结构(周边支承、对边支承、三边支承、周边多点支承以及点支承网架结构)最大节点位移及地震影响系数曲线如图 3 所示。

由图 3 可知，当弹簧硬度系数取值为 0 时，周边支承、对边支承、三边支承、周边多点支承网架结构中网架结构临界地震影响系数取值分别为 1.02、0.22、0.2、0.99；当弹簧硬度系数取值为  $1 \times 10^{-6}$  时，该四种网架支承结构临界地震影响系数取值分别为 1.03、0.22、0.22、1；当弹簧硬度系数取值为无限大时，周边支承、对边支承、三边支承、周边多点支承以及点支承 5 种网架结构临界地震影响系数取值分别为 1.1、0.45、0.4、1.01、1。

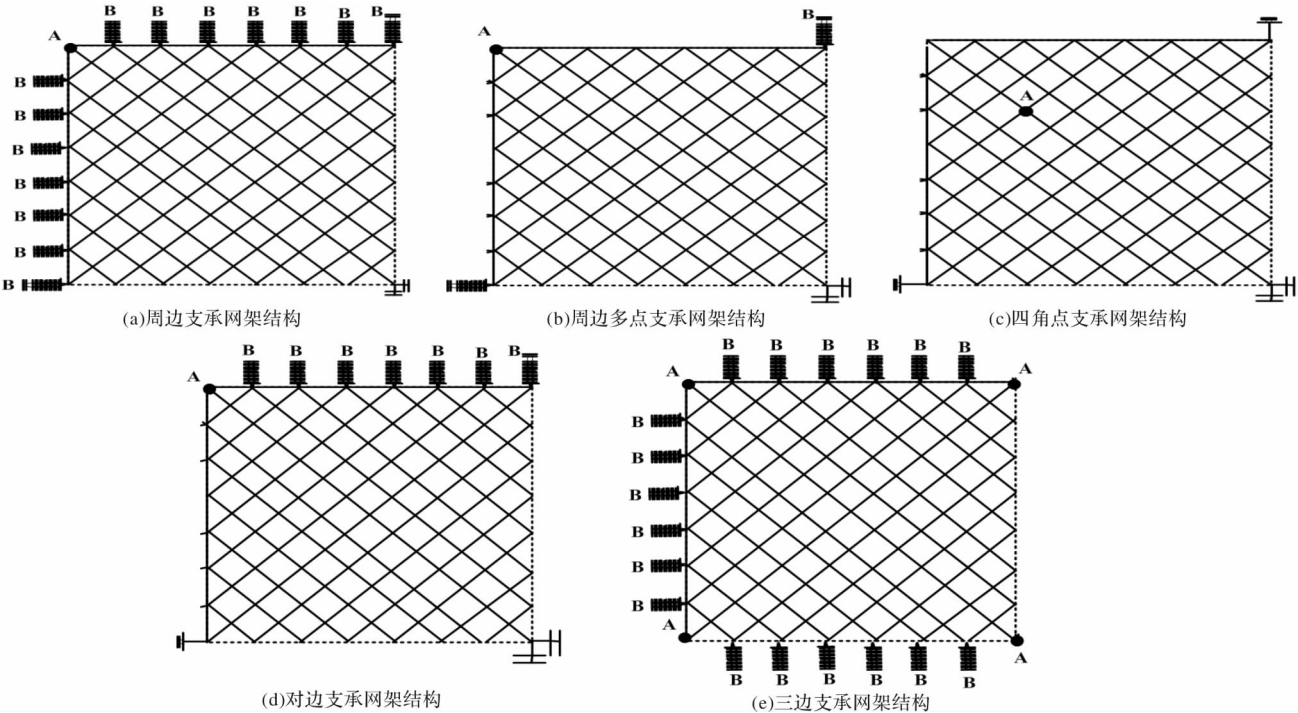


图 1 不同支承形式下的网架结构有限元模型

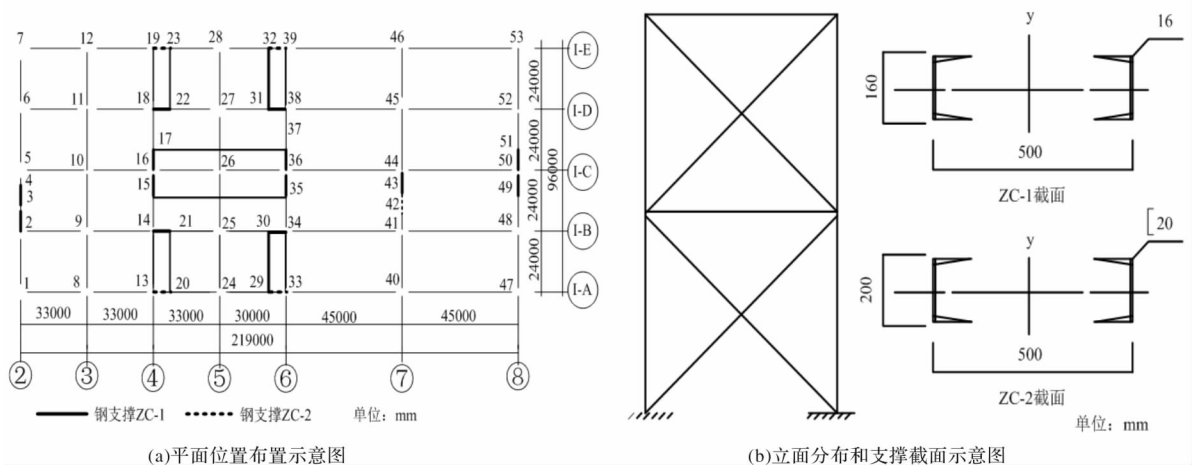


图2 柱间钢支撑分布截面图

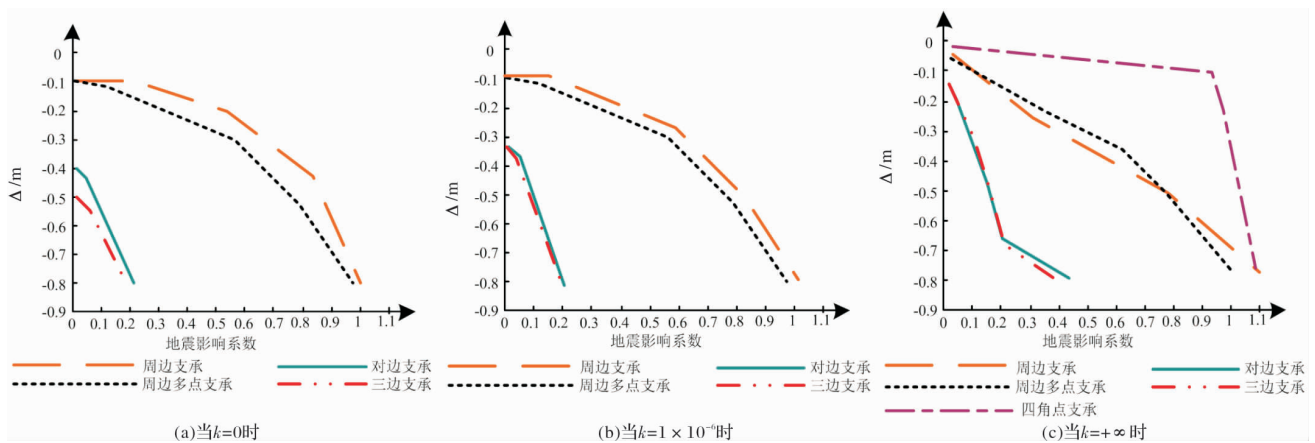


图3 最大节点位移-地震影响系数曲线图

支承形式对网架结构支承性能有着决定性作用，而周边支承下网架结构的支承性能最强；在同一种支承形式的网架中，支承性能强度随着弹簧硬度系数取值增大以及地震影响系数取值增大而变强；当地震影响系数超过1时，位移随着地震影响系数的升高而增加，网架结构支承性能也随着地震影响系数的上升而下降直至完全丧失。

### 2.3 巨大地震作用下网架结构动力响应分析

采用弹塑性模型分析模拟对象在地震作用下的结构动力响应<sup>[21]</sup>。表3为模拟对象钢支撑体系在巨大地震发生时的层间位移和衰减率。其中表明当发生巨大地震时，本文方法钢支撑体系能够提高网架结构的整体支承能力；当发生普通地震时，钢支撑体系衰减率得到降低。El-Centro波纵向巨大地震作用下，由于钢支撑体系能力消失以及支撑柱硬度降低，导致钢支撑网架结构硬度降低，网架结构特征频率也会降低，尤其当纵向的模式频率数值接近于El-Centro波功率谱密度峰值所对应的频率时，地震响应会增大。网架结构硬度降低，结构特征频率与Olympia波功率谱密度峰值所对应的频率运行轨迹越来越远，但与人工波功率谱密度峰值所对应的频率运行轨迹越来越近，因此人工波作用下模拟对象层间位移最大，而Olympia波作用下模拟对象层间位移最小<sup>[22]</sup>。表4给出模拟对象受巨大地震作用影响下钢支撑体系

的柱顶位移极限值和衰减率。从表3和表4中可知，钢支撑体系在巨大地震作用下的柱顶位移数值均大于结构层间位移，而衰减率均小于结构层间位移。

表3 巨大地震作用下的结构层间位移

地震波	方向	钢支撑结构体系	
		数值/mm	衰减率/%
El-Centro 波	X	193.3	24.83
	Y	248.6	-25.14
Olympia 波	X	111.7	17.53
	Y	96.4	21.42
人工波	X	264.4	9.44
	Y	223.8	10.72

表4 巨大地震作用下的柱顶位移

地震波	方向	钢支撑结构体系	
		数值/mm	衰减率/%
El-Centro 波	X	226.1	17.94
	Y	346.8	-48.99
Olympia 波	X	168.5	-3.01
	Y	145.6	2.22
人工波	X	291.8	5.38
	Y	284.6	0.42

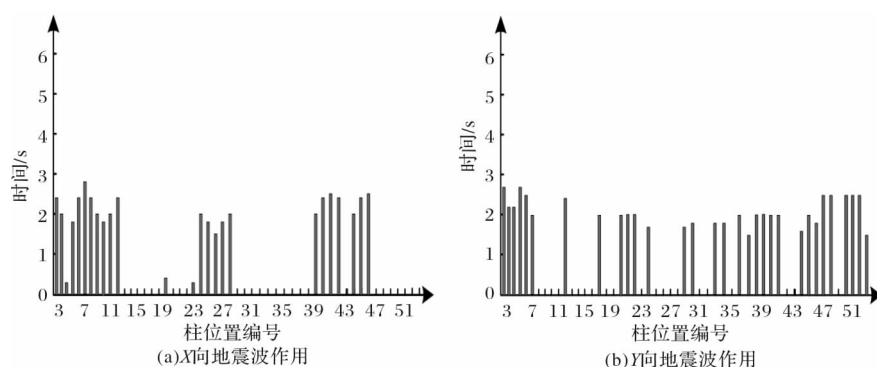


图4 El-Centro 波巨大地震作用下屈服时间

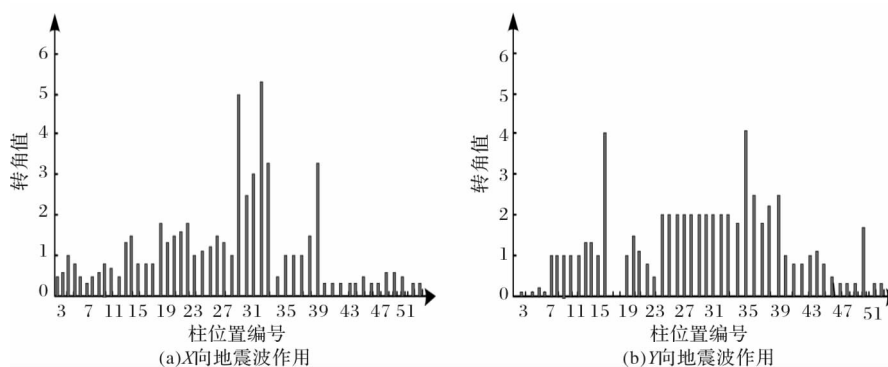


图5 El-Centro 波巨大地震作用下转角最大值

由图4看出,模拟对象钢支撑体系中,支撑及长跨附近的柱底纤维屈服时间靠前。图5为El-Centro波巨大地震作用下支撑柱底转角最大值,X向地震波作用如图5a所示,Y向地震波作用如图5b所示。由图5可看出模拟对象钢支撑体系支撑附近的支撑柱底截面转角较大。由此得出,地震刚发生时模拟对象的钢支撑体系能够抵抗住部分地震作用,起到缓冲柱底受地震影响的效果;当地震强度不断加大,钢支撑体系屈服,钢支撑附近的柱底遭到损坏;模拟对象整体特征变得更有弹性,地震作用所带来的损坏降低,其余支撑柱损坏也跟着降低。模拟对象钢支撑体系柱底破坏具有规律性,通过对表4、图4以及图5的分析可知地震发生时,网架结构钢支撑体系周围支撑柱破坏较为严重,且更依赖于地震波频谱特征的输入。

#### 2.4 动力特性分析

根据本文所设的模拟对象钢支撑结构体系各类参数,对模拟对象柱间钢支撑体系进行振动模态分析。假定模拟对象重力荷载由恒载和雪载组成,恒载取值1.0,雪载取值0.5;支撑体系周期与无支撑体系周期差,除以无支撑体系周期获取的数值即为改变率,由此得到模拟对象柱间钢支撑体系5种振型下的振动模态改变率,如表5所示。由表5可知,水平向振型偏向于前几阶,而振型质量参与系数在80%上下的平动阵型在前2阶内出现;当阵型在前十阶时,模拟对象柱间钢支

撑体系水平向质量参与系数达到91%。由此可知,模拟对象整体结构上部网架硬度强,以质量系数为主要因素,网架下部结构柱支撑距离相对较大而硬度较小,并且以平动阵型为主要结构阵型。在前10阶振型中,竖向振型参与系数为1.1%,表明模拟对象钢支撑体系竖向振型变化显著,且形成较早。分析结果表明模拟对象钢支撑体系使整体网架结构下部硬度变强,说明钢支撑体系在一定程度上改变网架结构动力特性,提升了网架结构支承性能。

表5 柱间钢支撑结构体系前5阶模态

振型号	钢支撑结构体系	
	周期/s	改变率/%
1	0.94	21.73
2	0.916	21.54
3	0.876	21.14
4	0.754	15.36
5	0.671	17.54

### 3 结论

本文以某省灾害后重建建筑空间网架结构为模拟对象,通过ANSYS有限元软件单元体库的LINK8空间杆单元并结合网架特性,对其进行有限元建模,通过对所构建的网架结构有限元模型支承性能进行数值模拟分析。分析结果显示,支承

形式对网架结构支承性能有着决定性作用,而周边支承形式下的网架结构的支承性能最强,钢支撑体系能够提高网架结构的整体支承能力。

## 参考文献:

- [1] 杨玲. 工业企业中大空间网架结构耐火性能研究进展综述[J]. 广东化工, 2017, 44(14): 168-169.
- [2] 王化杰, 钱宏亮, 范峰, 等. 杭州国际博览中心飘带网架结构施工全过程分析[J]. 施工技术, 2016, 45(2): 13-17.
- [3] 段慧川, 焦晋峰, 雷宏刚. 十字板+圆钢管-焊接空心球节点静力性能理论及试验研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(5): 62-68.
- [4] 张中海. 综放工作面过空巷超前支承压力数值模拟研究[J]. 机械管理开发, 2018, 33(2): 33-34.
- [5] 刘启超, 崔少华, 李尚飞. 廊坊某钢结构房屋加固方法研究[J]. 华北地震科学, 2017, 35(S1): 20-25.
- [6] 李尚飞, 周建男, 刘启超. 某多层钢结构商住楼功能改造加固设计研究[J]. 华北地震科学, 2017, 35(S1): 26-29.
- [7] ZHANG X, TANG X, Uzuoka R. Numerical simulation of 3D liquefaction disasters using an automatic time stepping method[J]. Natural Hazards Journal of the International Society for the Prevention & Mitigation of Natural Hazards, 2015, 77(2): 1275-1287.
- [8] 商波, 万里波, 谭晓晶, 等. 某大型体育场安全性鉴定及抗震性能数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(5): 131-135.
- [9] 崔璟, 郭小明, 尹凌峰. 基于拟夹层板法的高温及过火后网架结构计算方法研究[J]. 空间结构, 2016, 22(2): 37-43.
- [10] 梁玉国, 田朝阳. 地基不均匀沉降下侧限桩的模型试验研究与有限元分析[J]. 华北地震科学, 2017, 35(S1): 6-9.
- [11] 游桂模, 周观根, 张珈铭. 郑州新郑国际机场 T2 航站楼主楼钢屋盖施工数值模拟分析[J]. 施工技术, 2016, 45(14): 27-30.
- [12] 赵士永, 褚少辉, 付素娟. 粘钢加固钢梁的有限元分析[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 15-20.
- [13] 王小盾, 黄丙宁, 周婷. 在役升降网架结构的力学性能检测与评估[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(1): 53-58.
- [14] 王语卉, 苗峻峰, 蔡亲波. 海南岛海风三维结构的数值模拟[J]. 热带气象学报, 2016, 32(1): 109-124.
- [15] 常炉予, 许建明, 周广强, 等. 上海典型持续性 PM<sub>2.5</sub> 重度污染的数值模拟[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 825-833.
- [16] 周西华, 门金龙, 李诚玉, 等. 综放孤岛工作面采空区自然与爆炸危险区监测及数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 24-28.
- [17] 蒋军军, 李晓璐, 欧阳振华, 等. 特厚煤层综放采场支承压力分布的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2016, 47(1): 208-211.
- [18] 高庆, 杜咏, 邹捷. 轴向约束圆管高温力学响应全过程数值模拟[J]. 建筑钢结构进展, 2017, 19(3): 35-40.
- [19] 刘科元, 李海滨. 地震引起建筑结构损伤可靠性预测仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 423-426.
- [20] 赵士永, 石磊, 王海龙. 钢筋混凝土柱-钢梁组合节点研究现状及展望[J]. 华北地震科学, 2017, 35(S1): 1-5.
- [21] 聂瑞. 强震环境下建筑复合节能墙体抗震性能评估模型[J]. 华北地震科学, 2019, 37(4): 78-83.
- [22] 楚艳峰, 赵小龙, 李铁纯. 等层间位移角比在高位转换结构中的应用[J]. 华北地震科学, 2018, 36(2): 52-57.

# Numerical Simulation of Support Performance of Reconstruction Space Grid Frame Structures after Disasters

LI Jiucun

(Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Because the space truss structure provides two supporting functions, it can improve the problem that the bearing space of the steel support between columns is greatly affected by the small amount of steel support between columns. A numerical simulation method of the supporting performance of the space truss structure reconstruction after disaster is proposed. Taking the reconstruction of space truss structure after disaster in a province as the simulation object, the finite element model of five different supports (peripheral support, opposite support, tri-lateral support, peripheral multi-point support and point support) of the simulation object was constructed by ANSYS finite element software unit, and the parameters of steel support, damper and seismic wave between columns were set. The results of numerical simulation show that the support form determines the support performance of the grid structure, and the support performance of the grid structure is the strongest under the surrounding support form. In the same support form of the grid structure, the strength of the support performance increases with the increase of spring hardness coefficient and seismic influence coefficient. When the array is in the first ten steps, the horizontal mass participation coefficient and vertical mass participation coefficient of the steel support system between columns of the simulated object are increased. The mass participation coefficient reaches 91% and 1.1% respectively, which indicates that the steel support system can change the dynamic characteristics of the grid structure to some extent and improve the supporting performance of the grid structure.

**Key words:** post-disaster reconstruction; grid structure; support performance; numerical simulation; model construction; structural dynamics