

# 近断层地震动下基础隔震网壳-支承结构的 地震响应研究

石文杰<sup>1</sup>, 孙贵洪<sup>2</sup>, 钟杰<sup>2</sup>, 龚文琪<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 四川大学 土木工程系, 四川 成都 610065)

**摘要:**近断层速度脉冲效应往往引发建筑结构更为严重的破坏。为研究其对基础隔震网壳-支承结构动力响应的影响,选取一基础隔震钢筋混凝土框架结构支承的双层柱面网壳作为分析对象,分别施加3组地震动:第1组为22条断层距在5~10 km之间、脉冲周期在0.7~3.2 s之间的近断层速度脉冲型地震动;第2组为与第1组对应的去掉低频速度脉冲成分后的22条非脉冲型地震动;第3组为对第2组的地震动乘以GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》给定的近场增大系数后的地震动。通过增量动力分析,统计对比3组地震动作用下基础隔震网壳-支承结构的动力响应。结果表明:速度脉冲对隔震层的位移、下部框架结构的层间位移角、梁柱构件轴力、结构基底反力,以及上部网壳的最大节点位移、杆件轴力、塑性杆件比例等均产生了显著的放大效应。并且,若仅采用现行标准规定的近场增大系数对地震动强度进行调整,仍不能考虑近断层低频速度脉冲成分对基础隔震网壳-支承结构动力响应的影响。结论可为近断层高烈度地震区基础隔震网壳-支承结构的隔震设计提供参考依据。

**关键词:**网壳结构;基础隔震;速度脉冲;地震响应;放大效应

**中图分类号:** TU392.3; P315.9

**文献标志码:** A

## Research on seismic responses of reticulated shells with base-isolated substructure under near-fault ground motion

SHI Wenjie<sup>1</sup>, SUN Guihong<sup>2</sup>, ZHONG Jie<sup>2</sup>, GONG Wenqi<sup>2</sup>

(1. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China;

2. Department of Civil Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The near-fault velocity pulse-like earthquake ground motions usually cause more severe damage to building structures. To analyze the seismic responses of the reticulated shells with seismically base-isolated substructures subjected to near-fault velocity pulse-like earthquake ground motions, three sets of ground motions are applied to a double-layer cylindrical steel reticulated shell supported by seismically base-isolated reinforced concrete frame structure. The first group consists of 22 near-fault velocity pulse-like ground motions with a distance of 5~10 km and a pulse period of 0.7~3.2 seconds, the second group includes 22 corresponding ground motions without velocity pulse, and the third group is based on the second group, considering the near field amplification coefficients given in GB/T 51408—2021 Standard for seismic isolation design of building. Through incremental dynamic analyses, the dynamic responses of the structure under the three groups of ground motions are compared. The results show that the velocity pulse has a significant amplification effect on the isolation layer displacements, the inter-story drifts, the axial forces, the base reaction forces of the reinforced concrete supporting structure, as

收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2025-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008274); 结构工程灾变与控制教育部重点实验室开放基金项目(2022HITCE09)

作者简介: 石文杰(1981—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事工程结构设计研究。E-mail: 493423867@qq.com

通信作者: 钟杰(1987—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事大跨度空间结构地震工程研究。E-mail: zhjehit@163.com

well as the maximum nodal displacements and the member axial forces of the reticulated shell. Moreover, when only adjusting the intensity of the ground motions, the near field amplification coefficient can not effectively account for the influence of velocity pulse on the dynamic responses of the base-isolated reticulated shell with supporting structure. The conclusions of this study can provide a basis for the seismic isolation design of the base-isolated reticulated shell-supporting structure in high seismic intensity areas near fault zones.

**Key words:** reticulated shell structure; base isolation; velocity pulse; seismic response; amplification effect

## 0 引言

隔震技术通过设置隔震层来延长结构的基本周期,增大结构的阻尼,能够显著降低结构在遭受普通地震动时的动力响应,因而被广泛应用于多高层房屋、桥梁及大跨空间结构中。然而,周期延长后的隔震体系对地震动中的长周期成分变得敏感,有时甚至会发生显著的共振效应,进而加大了上部结构的地震响应<sup>[1]</sup>。震害调查及理论研究表明<sup>[2-8]</sup>,近断层地震动往往含有瞬时能量大、低频成分丰富的大幅值速度脉冲,对工程结构尤其是长周期结构具有显著的不利影响。

近年来,近断层长周期速度脉冲型地震动对隔震结构动力响应的影响逐渐得到重视。HALL等<sup>[9]</sup>较早地研究了隔震结构在脉冲型地震动作用下的地震响应,其结果显示:速度脉冲型地震动对高层隔震结构会造成比预期更严重的结构响应。MAKRIS等<sup>[10]</sup>研究发现,近断层地震动中瞬时能量大、周期长的速度脉冲会导致隔震层产生过大的位移,从而致使隔震结构破坏。杜晓磊等<sup>[11]</sup>指出,地震动的长周期脉冲效应对近断层地震区隔震结构的影响不可忽略。韩森等<sup>[12]</sup>及王昱翔等<sup>[13]</sup>均指出在结构自振周期与速度脉冲的周期接近时结构的动力响应最为显著。潘毅等<sup>[14]</sup>进行了定量研究,发现近断层速度脉冲型地震动对水平减震系数有放大作用,且该放大作用随着脉冲周期的增大而增大。更多的研究表明,近断层地震动对隔震框架结构的隔震层位移<sup>[15-18]</sup>、层间剪力、楼层加速度<sup>[19]</sup>、层间位移<sup>[20]</sup>和抗倾覆性能<sup>[21]</sup>等均有显著的影响。然而,现有文献主要报道了近断层速度脉冲型地震动对隔震框架结构的影响,而其对动力响应特征截然不同的隔震网壳结构的影响尚缺乏足够的研究,给隔震技术在近断层高烈度地震区体育馆、高速铁路车站和机场航站楼等大跨度公共建筑中的应用带来了严峻挑战。

本文选取具有工程代表性的采用基础隔震钢筋混凝土框架结构支承的双层柱面钢网壳为分析对象,以含有速度脉冲、去掉速度脉冲及考虑规范近场放大系数的3组近断层地震动作为输入,通过增量动力分析,对比研究速度脉冲对基础隔震网壳-支承结构动力响应的放大效应,从而为近断层高烈度地震区隔震大跨空间结构的抗震及减隔震设计提供参考依据。

## 1 分析模型及有限元建模

以基础隔震钢筋混凝土框架结构支承的双层柱面钢网壳为分析对象,其结构组成及几何尺寸见图1。其中,上部网壳周边通过三向铰支座支承于下部支承结构柱顶;网壳结构钢材采用Q235B,支承结构采用钢筋混凝土,且除圈梁采用C40外,其余梁柱构件均采用C30混凝土。网壳杆件截面及下部梁柱构件截面尺寸通过静力设计及抗震设计确定。采用通用有限元软件ABAQUS建立有限元分析模型。其中,网壳杆件两端为铰接,采用T3D2桁架单元模拟,梁柱构件采用B32梁单元模拟,并选用PQ-Fiber中的USteel02模型和UConcrete02模型分别考虑钢材和混凝土的本构关系。为使隔震层在满足GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》<sup>[22]</sup>要求的同时具有较好的隔震效果,在钢筋混凝土框架支承结构柱底同时布置了22个橡胶层厚度为56 mm、直径为300 mm的天然橡胶隔震支座(LNR300)与4个橡胶层厚度为73 mm、直径为400 mm的铅芯橡胶隔震支座(LRB400),具体布置方式见图2。隔震支座采用CONN3D2单元模拟,且天然橡胶支座采用线弹性模型模拟,铅芯橡胶支座则采用双线性滞回模型模拟,其滞回模型见图3。通过对隔震前后的有限元模型进行模态分析,获得未隔震与基础隔震结构的前20阶自振频率,见图4。通过对比可以看出,结构未隔震时1阶频率为2.15 Hz,对应的周期为0.47 s,隔震后为0.56 Hz,对应的周期为1.79 s,可见隔震后结构频率显著降低。另外,根据JGT 118—2018《建筑隔震橡胶支座》<sup>[23]</sup>。隔震支座参数见表1。

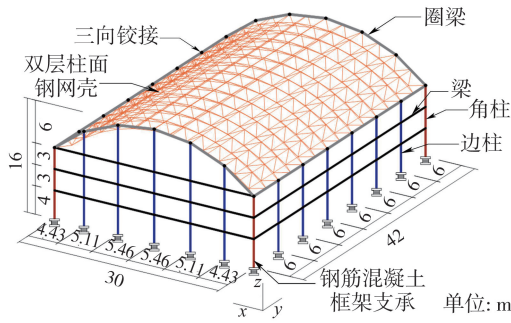


图1 基础隔震钢筋混凝土框架结构支承的网壳结构

Fig. 1 Reticulated shell with seismically base-isolated RC frame structure

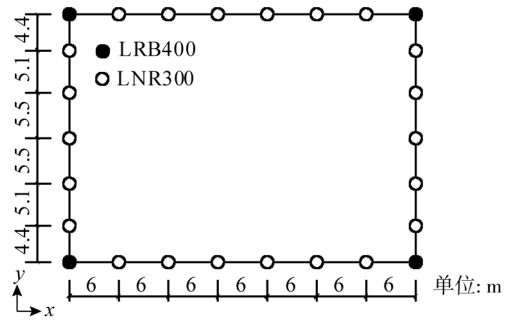


图2 隔震支座布置图

Fig. 2 Layout of seismic base isolation bearings

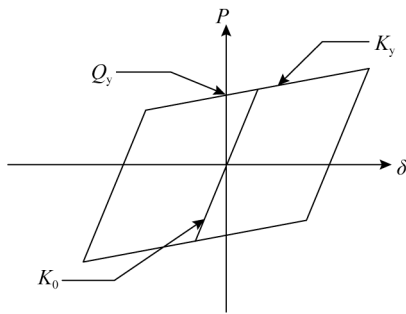


图3 铅芯橡胶支座滞回模型

Fig. 3 Hysteretic model of lead rubber bearings

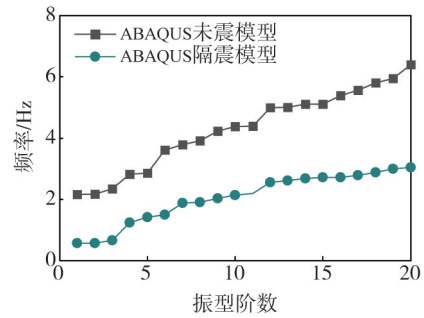


图4 隔震前后结构的自振频率对比

Fig. 4 Comparison of natural frequencies of structure systems with and without isolation bearings

表1 隔震支座力学性能

Table 1 Mechanical properties of isolation bearings

隔震支座型号	支座直径/mm	橡胶层总厚度/mm	橡胶剪切模量/MPa	水平等效刚度/(kN/mm)	屈服前刚度/(kN/mm)	屈服后刚度/(kN/mm)	竖向刚度/(kN/mm)	屈服力/kN
LRB400	400	73	0.392	1.04	8.79	0.68	1400	27
LNR300	300	56	0.392	0.49	—	—	900	—

## 2 近断层速度脉冲型地震动及残余地震动

GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》<sup>[22]</sup>中针对断层距为0~5 km和5~10 km的场地分别给出了不同的近场放大系数。为便于比较,本文选取断层距为5~10 km、矩震级大于5.5级的地震动作为近断层地震动,并基于BAKER<sup>[24]</sup>提出的速度脉冲型地震动识别方法,筛选出22条速度脉冲型地震动,具体信息见表2。由表可知,表中22条地震动的速度脉冲周期在0.7~3.2 s之间,且分布于结构基本周期(1.79 s)的两侧。

表2 本文选用的22条近断层速度脉冲型地震动

Table 2 A set of 22 near-fault pulse-like ground motions used in this paper

序号	年份	地震名称	台站	分量名称	矩震级	断层距/km	脉冲周期/s	PGA/(cm/s <sup>2</sup> )	场地类别
GM1	1979	Coyote Lake	Gilroy Array #2	G02140	5.7	9.0	1.4	251	II
GM2	1979	Coyote Lake	Gilroy Array #3	G03140	5.7	7.4	1.2	251	II
GM3	1980	Irpinia_Italy-01	Bagnoli Irpinio	A-BAG270	6.9	8.2	1.7	186	I <sub>1</sub>
GM4	1983	Coalinga-05	Transmitter Hill	D-TSM270	5.8	9.5	0.9	765	II
GM5	1984	Morgan Hill	Gilroy Array #6	G06090	6.2	9.9	1.4	287	I <sub>1</sub>
GM6	1986	San Salvador	Geotech Investig Center	GIC090	5.8	6.3	0.8	691	II
GM7	1986	San Salvador	Geotech Investig Center	GIC180	5.8	6.3	1.4	413	II
GM8	1986	San Salvador	National Geographical Inst	NGI180	5.8	7.0	2.3	396	II
GM9	1986	San Salvador	National Geographical Inst	NGI270	5.8	7.0	0.9	524	II

续表

序号	年份	地震名称	台站	分量名称	矩震级	断层距/km	脉冲周期/s	PGA/(cm/s <sup>2</sup> )	场地类别
GM10	1994	Northridge-01	LA - Sepulveda VA Hospital	SPV270	6.7	8.4	1.1	738	II
GM11	1994	Northridge-01	Newhall-W Pico Canyon Rd.	WPI316	6.7	5.5	2.0	350	II
GM12	1994	Northridge-01	Pacoima Dam (upper left)	PUL194	6.7	7.0	1.1	1261	I <sub>0</sub>
GM13	1994	Northridge-01	Pardee-SCE	PAR-L	6.7	7.5	1.2	547	II
GM14	1994	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta	RRS228	6.7	6.5	1.5	857	II
GM15	1994	Northridge-01	Sylmar-Converter Sta	SCS052	6.7	5.3	3.2	611	III
GM16	1994	Northridge-01	Sylmar-Olive View Med FF	SYL090	6.7	5.3	2.9	593	II
GM17	1999	Chi-Chi	CHY006	CHY006-W	7.6	9.8	2.9	348	II
GM18	1999	Chi-Chi	CHY074	CHY074N	6.2	6.2	2.5	335	I <sub>1</sub>
GM19	2004	Parkfield-02	Parkfield-Fault Zone 14	Z14360	6.0	8.8	0.9	565	III
GM20	1979	Montenegro	Bar-Skupstina Opstine	BSO000	7.1	7.0	1.4	365	II
GM21	2009	L' Aquila	L' Aquila-V. Aeron-Centro Valle	GX066YLN	6.3	6.3	0.7	545	II
GM22	2008	Iwate	IWTH26	IWTH26NS	6.9	6.0	3.1	888	II

注:表中场地类别根据文献[25]进行确定。

其次,本文通过去掉上述 22 条地震动速度时程中的低频脉冲成分来获得具有相同高频成分的非脉冲型地震动。相较于选取 22 条普通的非脉冲型地震动,该方法使得 2 组地震动的高频成分几乎完全一致,从而降低了因高频成分不同对分析结果造成的不确定性影响<sup>[18]</sup>。为直观显示含速度脉冲地震动与非脉冲地震动的区别,图 5 所示分别为表 2 中的地震动 GM6 含有速度脉冲时的速度时程曲线、识别出的速度脉冲时程曲线及去掉速度脉冲成分后的残余速度时程曲线,以及含速度脉冲地震动与残余地震动的加速度反应谱。所选的 22 条脉冲型地震动与对应的 22 条残余地震动的加速度反应谱及其平均值,见图 6。

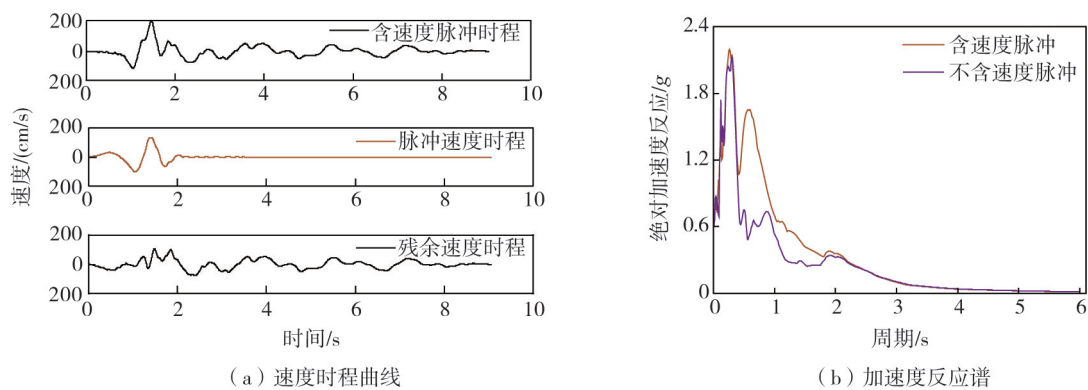


图 5 地震动 GM6 含速度脉冲和去掉速度脉冲后的速度时程曲线与加速度反应谱

Fig. 5 Velocity time history curves and acceleration response spectra of GM6 with and without velocity pulses

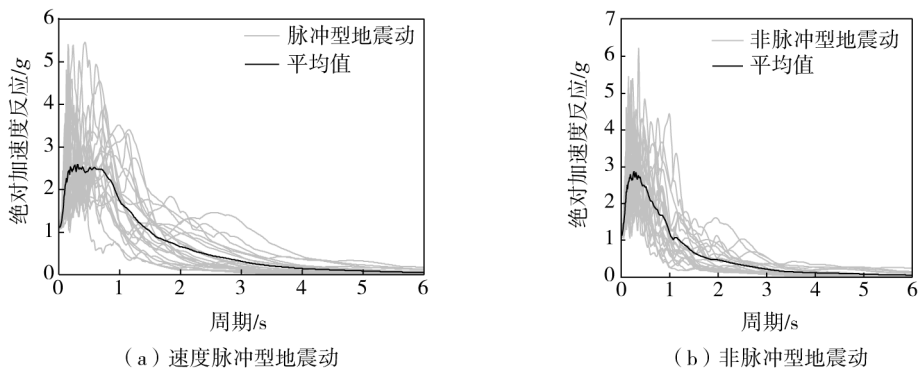


图 6 速度脉冲型与非脉冲型地震动的加速度反应谱

Fig. 6 Acceleration response spectra of ground motions with and without velocity pulses

### 3 近断层速度脉冲放大效应分析

对本文所选的基础隔震网壳-支承结构分别输入表2中的22条近断层速度脉冲型地震动及与之对应的去掉低频速度脉冲成分的残余地震动(即非脉冲型地震动),开展大量动力响应时程分析。地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)分别按照抗震设防烈度为7度(0.10g)、8度(0.20g)和9度(0.40g)取值,见表3,其中极罕遇地震下的加速度幅值为设防烈度下的2.9倍<sup>[26]</sup>。

表3 地震动峰值加速度取值

抗震设防烈度	多遇地震	设防地震	罕遇地震	极罕遇地震
7度(0.10g)	35	100	220	320
8度(0.20g)	70	200	400	600
9度(0.40g)	140	400	620	1080

为更加清晰、直观地呈现近断层速度脉冲型地震动的放大效应,首先以表2中编号为GM18的地震动为例,给出结构在去掉速度脉冲成分前后的地震动作用下关键动力响应指标的时程曲线;然后将近断层速度脉冲放大系数定义为结构在速度脉冲型地震动与非脉冲型地震动分别作用下动力响应指标最大值的比值,本文以此系数作为量化分析的依据,并分别对支承结构与网壳结构的关键响应指标进行统计分析。

#### 3.1 结构动力响应时程对比

地震动GM18含有速度脉冲和去掉速度脉冲的加速度时程分别调幅至400 cm/s<sup>2</sup>时,下部钢筋混凝土框架支承结构与上部网壳结构关键响应指标最大值所对应构件、隔震支座或节点的动态响应时程曲线以及各时程曲线的峰值,见图7和图8。由图可知,在速度脉冲型地震动作用下,构件轴力、基底反力、隔震层位移和网壳结构节点位移等均显著大于非速度脉冲地震动作用下结构的响应,说明速度脉冲对基础隔震网壳-支承结构的动力响应具有明显的放大效应。

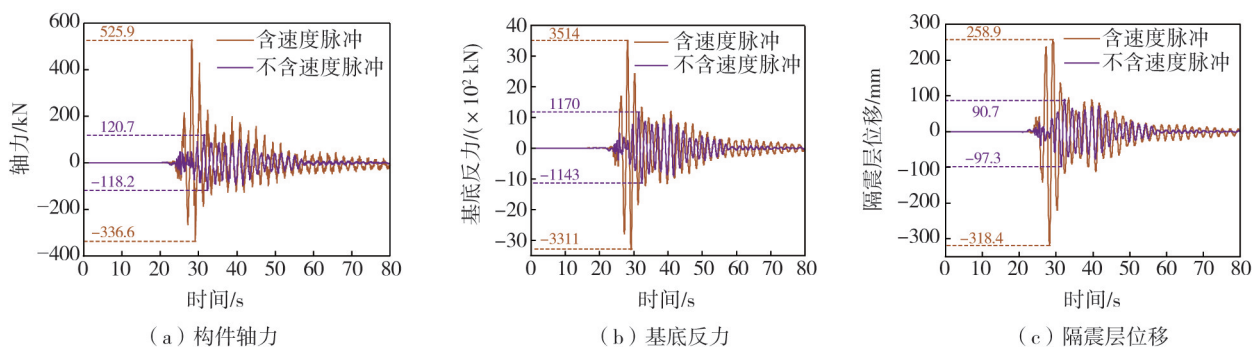


图7 钢筋混凝土框架结构动力响应时程对比

Fig. 7 Comparison of dynamic response time history curves of reinforced concrete frame

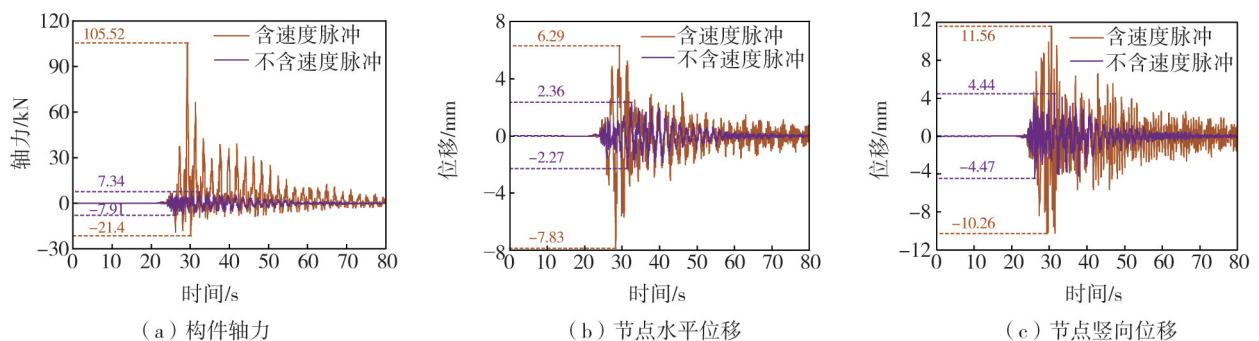


图8 网壳结构动力响应时程对比

Fig. 8 Comparison of dynamic response time history curves of the reticulated shell

#### 3.2 下部钢筋混凝土框架支承结构IDA分析结果对比

下部钢筋混凝土框架支承结构在含有速度脉冲和去掉速度脉冲的2组地震动作用下的增量动力分析结

果见图 9,动力放大系数汇总见表 4。由图 9 和表 4 可知,低频速度脉冲对下部钢筋混凝土支承结构动力响应具有明显的放大效应。具体来说:在不同强度地震动作用下,隔震层最大位移的放大系数在 1.31~1.57 之间;框架结构最大层间位移角的放大系数在 1.43~2.08 之间;梁柱构件最大构件轴力的放大系数在 1.28~1.57 之间;最大基底反力的放大系数在 1.26~1.50 之间。对支承结构施加 PGA 为 400 cm/s<sup>2</sup>的含有速度脉冲和去掉速度脉冲的地震动 GM15 时结构的塑性分布图见图 10。由图可知,结构在速度脉冲型地震动作用下有更多构件进入了塑性。

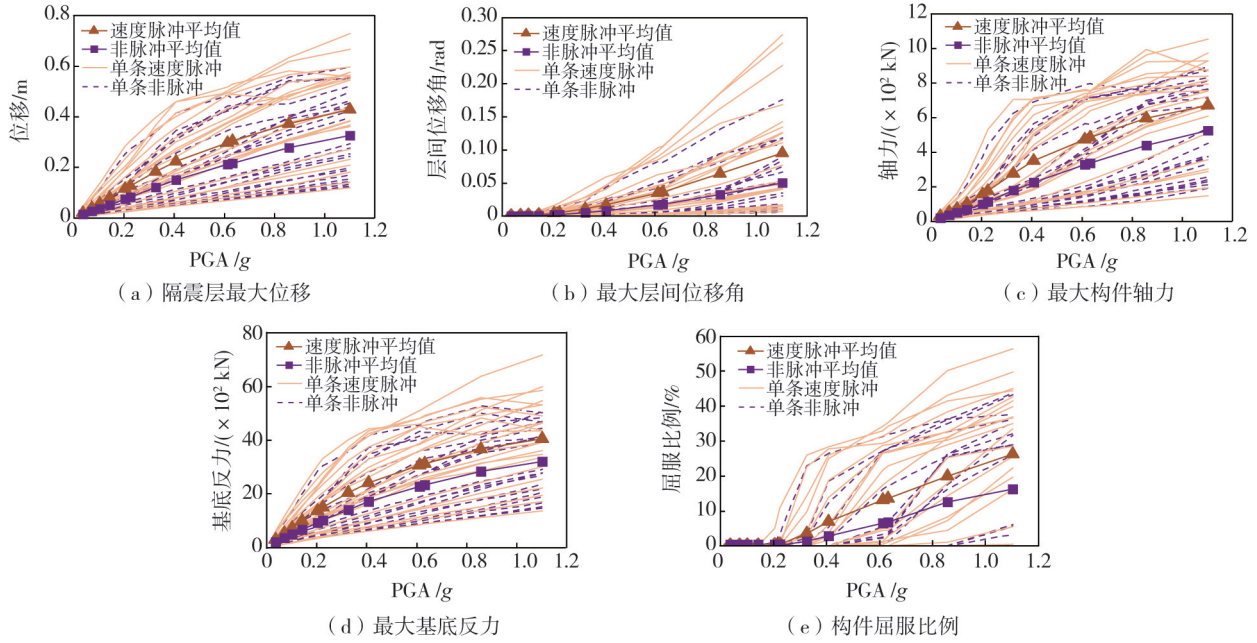


图 9 钢筋混凝土框架结构增量动力分析结果对比

Fig. 9 Comparison of IDA results of RC frame structure

表 4 钢筋混凝土框架结构动力响应放大系数平均值

Table 4 Average values of amplification coefficients of dynamic responses of RC frame structure

结构响应指标	抗震设防烈度	多遇地震	设防地震	罕遇地震	极罕遇地震
隔震层最大位移	7 度(0.1 g)	1.48	1.57	1.54	1.52
	8 度(0.2 g)	1.53	1.55	1.49	1.41
	9 度(0.4 g)	1.57	1.49	1.41	1.31
最大层间位移角	7 度(0.1 g)	1.43	1.64	1.96	2.08
	8 度(0.2 g)	1.51	1.95	1.98	2.02
	9 度(0.4 g)	1.84	1.98	2.06	1.88
最大构件轴力	7 度(0.1 g)	1.43	1.44	1.57	1.55
	8 度(0.2 g)	1.42	1.57	1.56	1.44
	9 度(0.4 g)	1.49	1.56	1.44	1.28
最大基底反力	7 度(0.1 g)	1.46	1.50	1.47	1.45
	8 度(0.2 g)	1.48	1.48	1.41	1.35
	9 度(0.4 g)	1.50	1.41	1.34	1.26

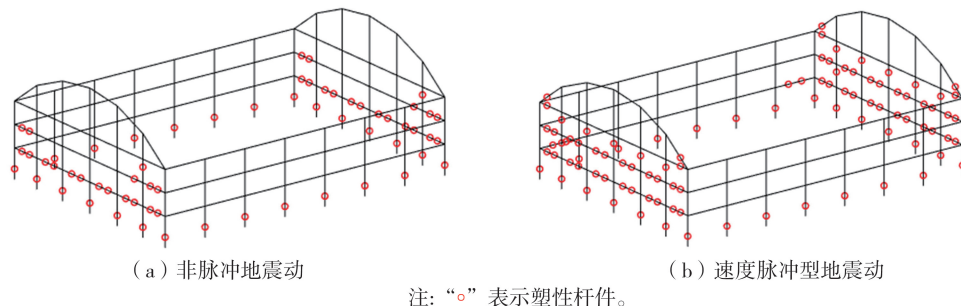


图 10 钢筋混凝土框架结构塑性分布图

Fig. 10 Plastic members of RC frame structure

### 3.3 上部网壳结构 IDA 分析结果对比

网壳结构在含有速度脉冲和去掉速度脉冲的 2 组地震动作用下的增量动力分析 (increment dynamic analysis, IDA) 结果见图 11, 动力放大系数汇总见表 5。同样可以看出速度脉冲对网壳结构放大效应显著。具体来说: 最大节点水平位移的放大系数在 1.38~1.90 之间; 最大节点竖向位移的放大系数在 1.32~1.62 之间; 最大杆件轴力的放大系数在 1.29~2.04 之间。此外, 对网壳结构施加 PGA 为 1080 cm/s<sup>2</sup> 的含有速度脉冲和去掉速度脉冲的地震动 GM15 时结构的塑性分布图见图 12。由图可知, 结构在速度脉冲型地震动作用下有更多杆件进入了塑性。为便于工程应用, 结构动力响应放大系数的推荐值见表 6。

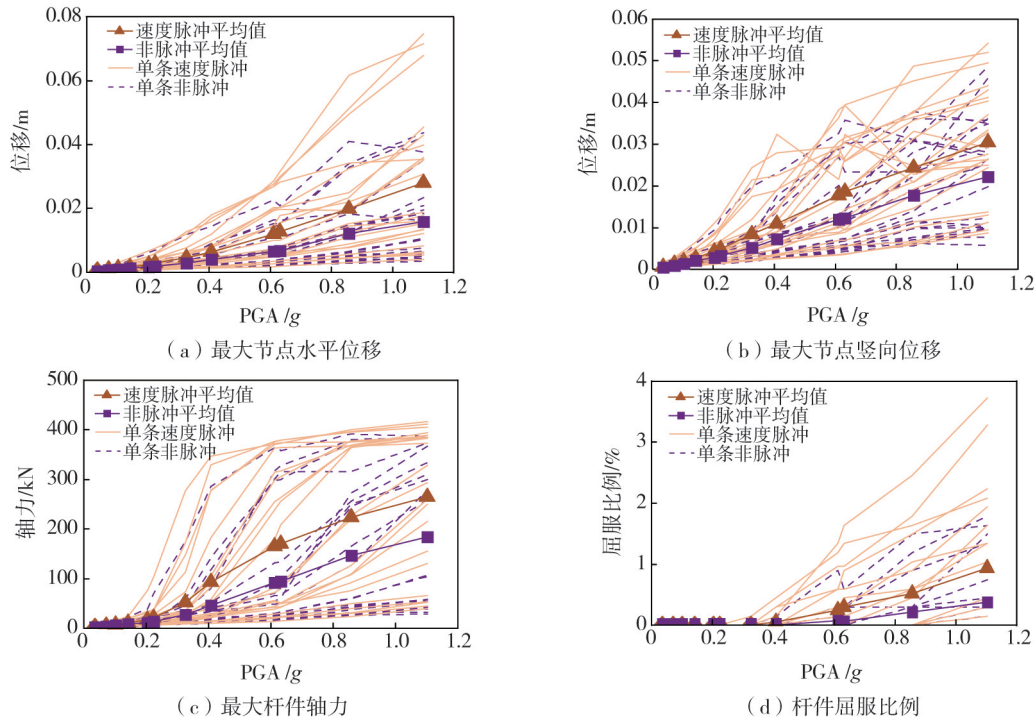


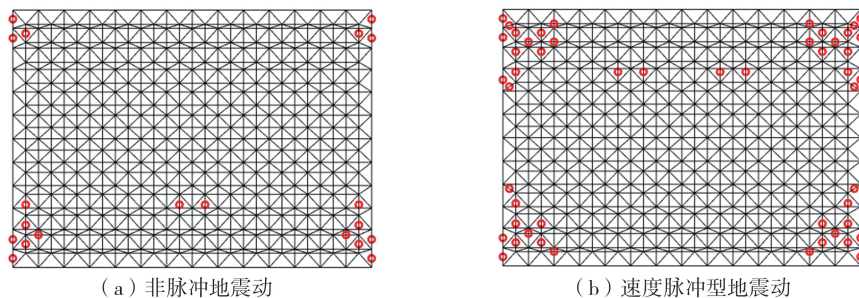
图 11 上部网壳增量动力分析结果对比

Fig. 11 IDA results of upper reticulated shell

表 5 网壳动力响应放大系数平均值

Table 5 Average values of the amplification coefficients of dynamic responses of reticulated shell

结构响应指标	抗震设防烈度	多遇地震	设防地震	罕遇地震	极罕遇地震
最大节点水平位移	7 度 (0.1 g)	1.40	1.41	1.47	1.58
	8 度 (0.2 g)	1.38	1.45	1.65	1.81
	9 度 (0.4 g)	1.43	1.65	1.90	1.77
最大节点竖向位移	7 度 (0.1 g)	1.32	1.36	1.47	1.62
	8 度 (0.2 g)	1.34	1.46	1.52	1.48
	9 度 (0.4 g)	1.34	1.52	1.52	1.37
最大杆件轴力	7 度 (0.1 g)	1.29	1.31	1.51	1.95
	8 度 (0.2 g)	1.31	1.53	2.04	1.80
	9 度 (0.4 g)	1.31	2.04	1.80	1.44



注: “○” 表示塑性杆件。

图 12 网壳塑性分布图

Fig. 12 Plastic members of reticulated shell

表 6 结构动力响应放大系数推荐值

Table 6 Recommended values of the structural dynamic response amplification coefficients

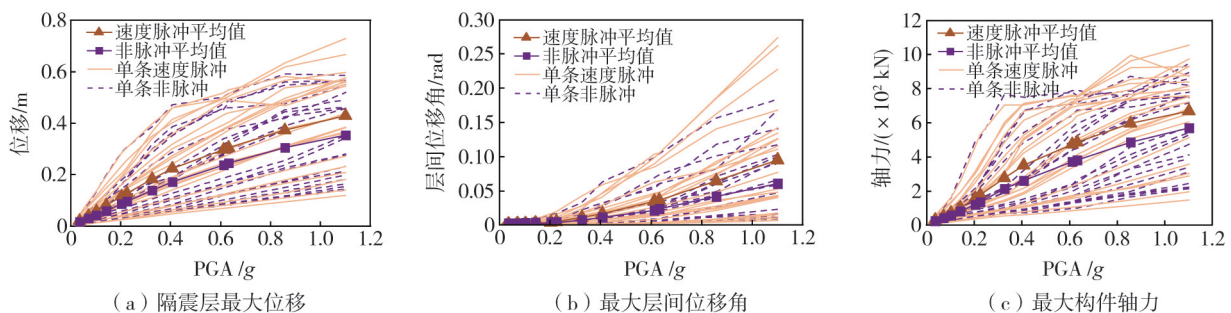
结构	结构响应指标	抗震设防烈度	多遇地震	设防地震	罕遇地震	极罕遇地震
支承结构	隔震层最大位移	7 度(0.1 g)	1.50	1.50	1.50	1.50
		8 度(0.2 g)	1.50	1.50	1.50	1.50
		9 度(0.4 g)	1.50	1.50	1.50	1.25
	最大层间位移角	7 度(0.1 g)	1.50	1.50	2.00	2.00
		8 度(0.2 g)	1.50	2.00	2.00	2.00
		9 度(0.4 g)	1.75	2.00	2.00	1.75
	最大构件轴力	7 度(0.1 g)	1.50	1.50	1.50	1.50
		8 度(0.2 g)	1.50	1.50	1.50	1.50
		9 度(0.4 g)	1.50	1.50	1.50	1.25
	最大基底反力	7 度(0.1 g)	1.50	1.50	1.50	1.50
		8 度(0.2 g)	1.50	1.50	1.50	1.25
		9 度(0.4 g)	1.50	1.50	1.25	1.25
网壳结构	节点最大水平位移	7 度(0.1 g)	1.50	1.50	1.50	1.50
		8 度(0.2 g)	1.50	1.50	1.75	1.75
		9 度(0.4 g)	1.50	1.50	2.00	1.75
	节点最大竖向位移	7 度(0.1 g)	1.25	1.50	1.50	1.50
		8 度(0.2 g)	1.25	1.50	1.50	1.50
		9 度(0.4 g)	1.25	1.50	1.50	1.50
	最大杆件轴力	7 度(0.1 g)	1.25	1.25	1.50	2.00
		8 度(0.2 g)	1.25	1.50	2.00	1.75
		9 度(0.4 g)	1.25	2.00	1.75	1.50

### 4 规范中近场影响增大系数验证

GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》<sup>[22]</sup>中规定:当隔震结构与发震断层的距离间于 5~10 km 之间时,抗震分析时应考虑近场效应的影响,即对地震动乘以近场增大系数 1.15<sup>[22]</sup>。本文将去掉低频速度脉冲成分的残余非脉冲型地震动乘以增大系数 1.15,以此作为一组地震动,输入基础隔震网壳-支承结构进行增量动力分析,并将其分析结果与速度脉冲地震动作用下的结果进行对比。以下将分别针对钢筋混凝土框架结构和网壳的动力响应结果进行对比分析。

#### 4.1 下部钢筋混凝土框架支承结构

下部钢筋混凝土框架支承结构在 2 组地震动作用下的增量动力分析结果见图 13。由图可知,在考虑了近场增大系数后的 22 条非脉冲型地震动作用下,隔震层最大位移、钢筋混凝土框架结构梁柱构件的最大构件轴力和构件屈服比例等的平均值仍小于速度脉冲型地震动作用下的结果。为了更加直观,隔震层和下部钢筋混凝土框架支承结构在速度脉冲型地震动与调幅后的非脉冲型地震动作用下结构响应的比值,见表 7。由图可知,隔震层位移的比值在 1.22~1.37 之间,结构层间位移角的比值在 1.23~1.59 之间,结构构件轴力的比值在 1.18~1.34 之间,结构基底反力的比值在 1.16~1.33 之间。PGA 为 400 cm/s<sup>2</sup> 的速度脉冲型地震动 GM15 及对应残余地震动的 PGA 乘以近场增大系数 1.15 后为 460 cm/s<sup>2</sup> 的非速度脉冲型地震动 GM15 作用下,下部支承结构的塑性分布图,见图 14。由图可知,支承结构在速度脉冲型地震动作用下进入塑性的构件相对更多。



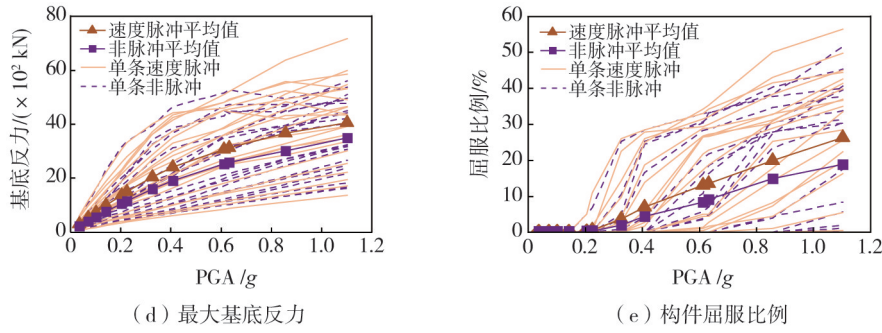


图 13 考虑近场增大系数后钢筋混凝土框架增量动力分析结果对比

Fig. 13 Comparison of IDA results of RC frame structure considering near-field amplification factors

表 7 考虑近场增大系数后钢筋混凝土框架动力响应放大系数平均值

Table 7 Average values of the amplification coefficients of dynamic responses of RC frame structure considering near-field amplification factors

结构响应指标	抗震设防烈度	多遇地震	设防地震	罕遇地震	极罕遇地震
隔震层最大位移	7度(0.1g)	1.30	1.37	1.33	1.32
	8度(0.2g)	1.35	1.34	1.31	1.26
	9度(0.4g)	1.36	1.31	1.25	1.22
最大层间位移角	7度(0.1g)	1.23	1.40	1.55	1.55
	8度(0.2g)	1.31	1.55	1.51	1.59
	9度(0.4g)	1.51	1.51	1.56	1.56
最大构件轴力	7度(0.1g)	1.28	1.27	1.32	1.30
	8度(0.2g)	1.27	1.30	1.34	1.28
	9度(0.4g)	1.28	1.34	1.27	1.18
最大基底反力	7度(0.1g)	1.30	1.33	1.29	1.28
	8度(0.2g)	1.32	1.30	1.27	1.21
	9度(0.4g)	1.31	1.27	1.21	1.16

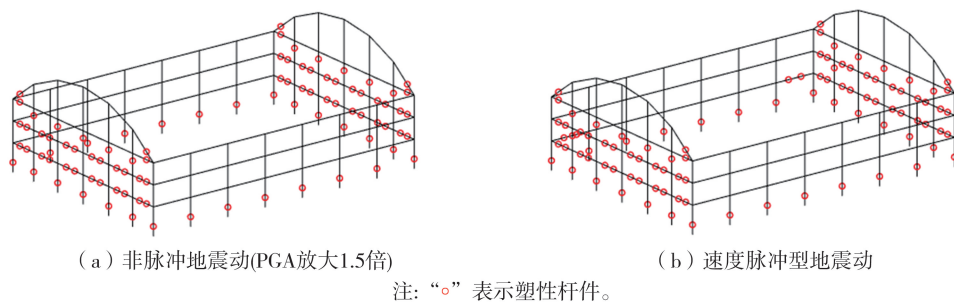


图 14 考虑近场增大系数后钢筋混凝土框架塑性分布图

Fig. 14 Plastic members of RC frame structure considering near-field amplification factors

4.2 上部网壳结构

上部网壳结构在 2 组地震动作用下的增量动力分析结果见图 15。同样可以看出,在考虑了近场增大系数后的 22 条非脉冲型地震动作用下,网壳的最大节点位移、最大杆件轴力和杆件屈服比例等的平均值仍小于速度脉冲型地震动作用下的结果。为了更加直观,网壳结构在速度脉冲型地震动与调整后的非脉冲型地震动作用下响应的比值见表 8。具体来说:结构最大水平位移比值在 1.23~1.59 之间,最大节点竖向位移比值在 1.14~1.33 之间,最大构件轴力比值在 1.12~1.47 之间。PGA 为 1080 cm/s<sup>2</sup> 的速度脉冲型地震动 GM2 及与之对应的考虑近场增大系数后 PGA 为 1242 cm/s<sup>2</sup> 的非速度脉冲型地震动 GM2 作用下上部网壳的塑性杆件分布见图 16。通过对比可以看出,在含有低频速度脉冲成分的地震动作用下,上部网壳仍有更多的杆件进入了塑性,再次说明近场增大系数不能反映低频脉冲成分的影响。

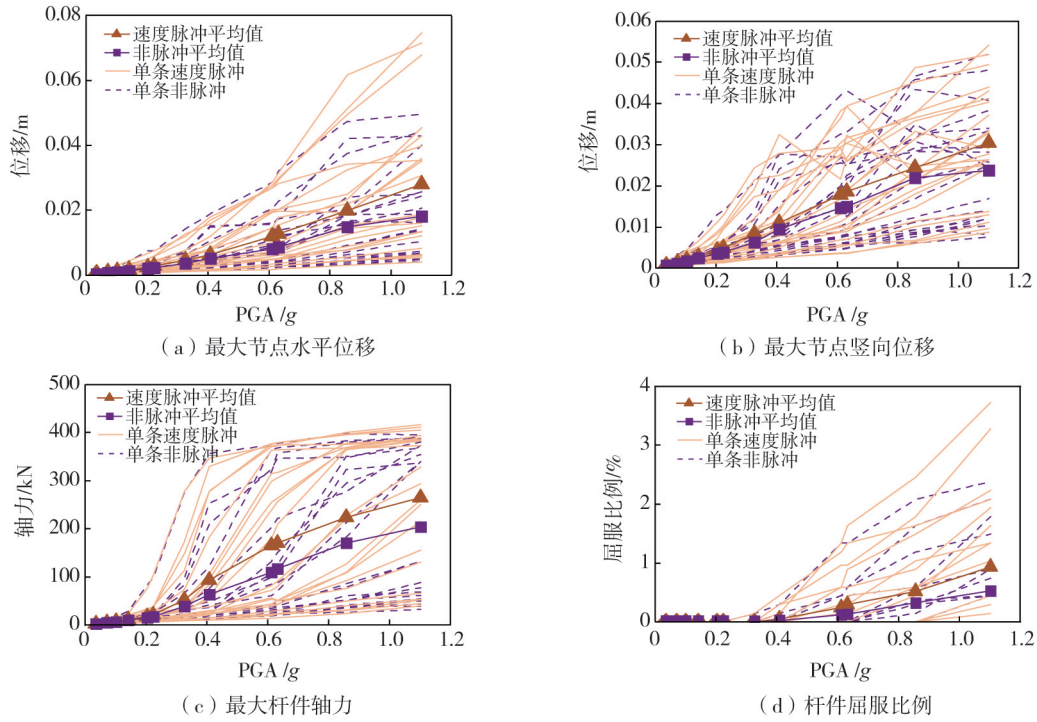


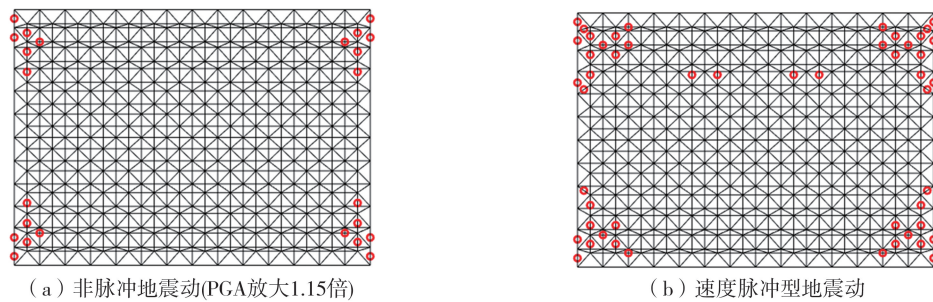
图 15 考虑近场增大系数后上部网壳增量动力分析结果对比

Fig. 15 IDA results of upper reticulated shell considering near-field amplification factor

表 8 考虑近场增大系数后网壳动力响应放大系数平均值

Table 8 Average values of the amplification coefficients of dynamic responses of reticulated shell considering near-field amplification factor

结构响应指标	抗震设防烈度	多遇地震	设防地震	罕遇地震	极罕遇地震
最大节点水平位移	7度(0.1g)	1.24	1.25	1.29	1.31
	8度(0.2g)	1.22	1.25	1.23	1.48
	9度(0.4g)	1.25	1.23	1.47	1.55
最大节点竖向位移	7度(0.1g)	1.14	1.16	1.26	1.33
	8度(0.2g)	1.15	1.22	1.17	1.22
	9度(0.4g)	1.15	1.17	1.25	1.28
最大杆件轴力	7度(0.1g)	1.12	1.13	1.25	1.35
	8度(0.2g)	1.12	1.17	1.47	1.52
	9度(0.4g)	1.13	1.47	1.46	1.29



注：“o”表示塑性杆件。

图 16 考虑近场增大系数后网壳塑性杆件分布

Fig. 16 Plastic members of reticulated shell considering near-field amplification factors

## 5 结论

1) 以典型的基础隔震网壳-支承结构为分析对象,通过对其输入含有低频速度脉冲成分、去掉速度脉冲成分以及考虑近场影响增大系数的3组近断层地震动,采用增量动力分析,统计并对比3组地震动作用下结构的动力响应。结果表明:近断层速度脉冲对基础隔震网壳-支承结构的动力响应具有显著的放大效应,且动力放大系数因地震动强度的不同而不同;当在抗震设防烈度在7度多遇地震至9度极罕遇地震之间时,结构响应动力放大系数约在1.25~2.00之间。

2) GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》中给出了近场影响增大系数,以对地震动参数进行放大调幅。本文分析结果表明:当输入的地震动仅考虑该近场影响增大系数而不考虑地震动频谱成分,尤其是近断层低频速度脉冲成分时,所获得的动力响应仍小于速度脉冲地震动作用下的动力响应;具体说来,后者相较于前者,仍有1.13~1.59倍的放大系数。

3) 为便于工程应用,本文给出了在不同强度的近断层速度脉冲型地震动作用下,基础隔震网壳-支承结构各项关键响应指标放大系数的推荐值,从而为近断层高烈度地震区基础隔震网壳结构的抗震及隔震设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 杨迪雄,赵岩,李刚.近断层地震动运动特征对长周期结构地震响应的影响分析[J].防灾减灾工程学报,2007,27(2):133-140.  
YANG Dixiong, ZHAO Yan, LI Gang. Influence analysis of motion characteristics of near-fault ground motions on seismic responses of long-period structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(2): 133-140. (in Chinese)
- [2] 吴国盐,钟杰,聂桂波,等.近断层震下网壳-支承结构动力响应及速度脉冲放大效应分析[J].地震工程与工程振动,2022,42(3):216-225.  
WU Guoyan, ZHONG Jie, NIE Guibo, et al. Analyses of dynamic responses and amplification effects of velocity pulses of near-fault ground motions for reticulated shell-supporting structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(3): 216-225. (in Chinese)
- [3] 吴强,陈少林.近断层双向水平地震作用下隔震结构地震反应[J].地震工程与工程振动,2022,42(1):104-109.  
WU Qiang, CHEN Shaolin. The seismic response of base-isolated structure under bi-directional earthquake action of near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(1): 104-109. (in Chinese)
- [4] 张令,徐略勤.近断层地震下大跨钢管混凝土拱桥损伤模式研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(3):204-215.  
ZHANG Ling, XU Lueqin. Damage pattern analysis of large-span CFST arch bridge under near-fault earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(3): 204-215. (in Chinese)
- [5] 曲哲,师骁.汶川地震和鲁甸地震的脉冲型地震动比较研究[J].工程力学,2016,33(8):150-157.  
QU Zhe, SHI Xiao. Comparative study on the pulse-like ground motions in the Wenchuan and the Ludian earthquakes[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 150-157. (in Chinese)
- [6] 贾俊峰,杜修力,韩强.近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J].建筑结构学报,2015,36(1):1-12.  
JIA Junfeng, DU Xiuli, HAN Qiang. A state-of-the-art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 1-12. (in Chinese)
- [7] 陈笑宇,王东升,付建宇,等.近断层地震动脉冲特性研究综述[J].工程力学,2021,38(8):1-14,54.  
CHEN Xiaoyu, WANG Dongsheng, FU Jianyu, et al. State-of-the-art review on pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(8): 1-14, 54. (in Chinese)
- [8] CHAMPION C, LIEL A. The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(10): 1391-1409.
- [9] HALL J F, HEATON T H, HALLING M W, et al. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings[J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(4): 569-605.
- [10] MAKRIS N, CHANG S P. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(1): 85-107.
- [11] 杜晓磊,吴进标,李志,等.近断层脉冲地震作用下基础隔震体系动力响应[J].低温建筑技术,2019,41(12):102-105,123.  
DU Xiaolei, WU Jinbiao, LI Zhi, et al. Research on seismic response of base isolation system under near-fault impulse earthquake[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2019, 41(12): 102-105, 123. (in Chinese)
- [12] 韩森,许浒,杜红凯,等.近断层地震下层间隔震结构楼层反应谱[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):42-49.  
HAN Miao, XU Hu, DU Hongkai, et al. Research on floor response spectrum of storey seismic isolation structure under near-fault earthquake[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 42-49. (in Chinese)

- [13] 王昱翔,叶昆. 近断层脉冲型地震作用下基础隔震结构的抗震性能研究[C]//中国力学学会结构工程专业委员会,武汉理工大学,中国力学学会《工程力学》编委会——第29届全国结构工程学术会议论文集(第II册). 华中科技大学土木工程与力学学院. 武汉:2020:257-264.
- WANG Yuxiang, YE Kun. Study on seismic performance of base isolated structure under near-fault pulse-like earthquake[C]//Structural Engineering Professional Committee of Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, Wuhan University of Technology, Editorial Board of Engineering Mechanics (sponsored by Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics)——Proceedings of the 29th National Structural Engineering Academic Conference (Volume II). School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology. Wuhan: 2020: 257-264. (in Chinese)
- [14] 潘毅,刘永鑫,宋佳雨,等. 近断层脉冲型地震动对基础隔震结构水平向减震系数的影响分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(1): 33-42.
- PAN Yi, LIU Yongxin, SONG Jiayu, et al. Study on horizontal seismic reduction factor of base-isolated structure subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(1): 33-42. (in Chinese)
- [15] BHANDARI M, BHARTI S D, SHRIMALI M K, et al. The numerical study of base-isolated buildings under near-field and far-field earthquakes[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(6): 989-1007.
- [16] 吴应雄,颜桂云,石文龙,等. 长周期地震动作用下高层隔震结构减震性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(5): 806-816.
- WU Yingxiong, YAN Guiyun, SHI Wenlong, et al. Experimental study on the seismic-reduction performance of high-rise isolated structure under long-period ground motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(5): 806-816. (in Chinese)
- [17] 杜红凯,王延森,韩森,等. 近断层地震动平动-摇摆耦合作用下隔震结构的动力响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(6): 45-50.
- DU Hongkai, WANG Yansen, HAN Miao, et al. Dynamic response analysis of isolated structures under translation-swing coupling of near-fault ground motion[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2022, 44(6): 45-50. (in Chinese)
- [18] 潘毅,时胜杰,常志旺,等. 近断层脉冲地震动对基础隔震结构放大效应的量化分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(11): 8-16.
- PAN Yi, SHI Shengjie, CHANG Zhiwang, et al. Quantitative study on amplification effect of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(11): 8-16. (in Chinese)
- [19] 杜晓磊,吴进标,李志,等. 近断层脉冲地震作用下基础隔震体系动力响应[J]. 低温建筑技术, 2019, 41(12): 102-105, 123.
- DU Xiaolei, WU Jinbiao, LI Zhi, et al. Research on seismic response of base isolation system under near-fault impulse earthquake[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2019, 41(12): 102-105, 123. (in Chinese)
- [20] 叶昆,陈耀晖,胡轩,等. 近断层脉冲型地震动下基础隔震结构的碰撞响应[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(增刊1): 836-840.
- YE Kun, CHEN Yaohui, HU Xuan, et al. Seismic response of base-isolated structures under near-fault pulse-like ground motions considering potential pounding[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(Sup. 1): 836-840. (in Chinese)
- [21] 张亮泉,夏天. 长周期地震动作用下基础隔震结构抗倾覆能力研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 170-180.
- ZHANG Lianguan, XIA Tian. Study on the overturning resistance of base-isolated structure under the action of long-period ground motion[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(4): 170-180. (in Chinese)
- [22] GB/T 51408—2021 建筑隔震设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- GB/T 51408—2021 Standard for seismic isolation design of building[S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)
- [23] JGT 118—2018 建筑隔震橡胶支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- JGT 118—2018 Rubber isolation bearings for building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [24] BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.
- [25] 陶林惠,李杰. 中美抗震设计规范主要地震动参数的对比研究[J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 122-126.
- TAO Linhui, LI Jie. Comparative study on the main parameters of ground motions in seismic design codes in China and America[J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 122-126. (in Chinese)
- [26] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)