



地震学报
Acta Seismologica Sinica
ISSN 0253-3782, CN 11-2021/P

《地震学报》网络首发论文

题目：近断层地震动脉冲特性对设备-结构耦合隔震体系响应的影响分析
作者：韩淼，蒋金卫，杜红凯，赵鸣鹤
收稿日期：2022-07-19
网络首发日期：2022-09-16
引用格式：韩淼，蒋金卫，杜红凯，赵鸣鹤. 近断层地震动脉冲特性对设备-结构耦合隔震体系响应的影响分析[J/OL]. 地震学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2021.P.20220916.1044.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

韩森, 蒋金卫, 杜红凯, 赵鸣鹤. 2022. 近断层地震动脉冲特性对设备-结构耦合隔震体系响应的影响分析. 地震学报, 44(5): 891-902. doi: 10.11939/jass.20220129.

Han M, Jiang J W, Du H K, Zhao M H. 2022. Analysis of the effect of pulse characteristics of near-fault ground motions on the response of equipment-structure coupled isolation system. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 891-902. doi: 10.11939/jass.20220129.

近断层地震动脉冲特性对设备-结构耦合 隔震体系响应的影响分析*

韩森 蒋金卫 杜红凯[†] 赵鸣鹤

(中国北京 100044 北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心)

摘要 基于设备-结构耦合隔震体系模型, 选取了 50 条近断层脉冲型地震波, 以脉冲周期和结构基本周期比 $T_p/T=1$ 为分界线, 分析了周期比和脉冲能量对结构响应的影响; 并对穿零次数小于等于 5 的隔震层位移比与周期比和脉冲能量的关系进行了拟合. 结果表明, 脉冲特性对结构的影响主要与周期比 T_p/T 和脉冲能量有关; 同时也需考虑速度脉冲对应的加速度曲线穿零次数的影响; 此外, 设备响应与顶层楼面加速度直接相关, 与近断层地震动的脉冲特性则无明显直接相关性.

关键词 近断层地震动 脉冲特性 周期比 脉冲能量 隔震体系

doi: 10.11939/jass.20220129

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Analysis of the effect of pulse characteristics of near-fault ground motions on the response of equipment-structure coupled isolation system

Han Miao Jiang Jinwei Du Hongkai[†] Zhao Minghe

(Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of
Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the model of equipment-structure coupled isolation system, 50 near-fault pulse-like seismic waves were selected and the effect of period ratio T_p/T (the ratio of the pulse period to the basic period of the structure) and pulse energy on the structural response was analysed using $T_p/T=1$ as the dividing line; and the relationship between the displacement ratio of isolation layer and the period ratio and pulse energy was fitted while the zero-crossing times ≤ 5 . The analysis shows that the influence of pulse characteristics on the structure is mainly related to the period ratio T_p/T and the pulse energy, while the influence of the zero-crossing times of the acceleration curve corresponding to the velocity pulse needs to be con-

* 基金项目 国家“十三五”重点研发计划(2019YFC1509500)和北京未来城市设计高精尖创新中心课题(UDC2019032424)共同资助。

收稿日期 2022-07-19 收到初稿, 2022-08-22 决定采用修改稿。

作者简介 韩森, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震减灾及抗震性能研究, e-mail: hanmiao@bucea.edu.cn; [†]杜红凯, 博士, 副教授, 主要从事工程结构抗震减灾及抗震性能研究, e-mail: duhongkai@bucea.edu.cn



sidered. Furthermore, the equipment response is directly related to the top floor acceleration, but there is no significant direct correlation with the pulse characteristics of near-fault ground motions.

Key words: near-fault ground motions; pulse characteristics; period ratio; pulse energy; isolation system

引言

近年来,近断层地震动脉冲特性对结构的影响引起了国内外学者的广泛讨论.关于结构响应与脉冲特性的关系解释,主要表现在如下方面:①与速度脉冲有关(Loh *et al.*, 2002; Makris, Chang, 2000);②与速度脉冲时段内所发生的地面位移有关(Hall *et al.*, 1995);③与加速度脉冲有关(Anderson, Bertero, 1987; Vassiliou, Makris, 2011);④反应谱用于工程中描述脉冲对结构的影响仍可保证一定精度,但规范谱不能很好地描述(胡聿贤, 2006; 李爽, 谢礼立, 2007).

脉冲周期是近断层地震动脉冲特性的一个重要指标,很多学者根据速度脉冲来确定地震波的脉冲周期(Rodriguez-Marek, 2000; Mavroeidis, Papageorgiou, 2003; Bray, Rodriguez-Marek, 2004; Shahi, Baker, 2014).因近断层地震动的脉冲具有长周期的特征,而隔震技术具有延长结构自振周期的特点,故许多学者对近断层脉冲型地震动作用下的隔震结构响应进行了大量研究(杨迪雄等, 2005; 李小军等, 2018; 潘毅等, 2018).

随着社会的发展和人们对生活环境需求的提高,结构中设置的设备和仪器逐渐增多,在建筑总投资中的占比逐渐增加;建筑主体结构与其内部设备等非结构构件是耦合的结构整体,当设备质量较大时,两者的相互作用不应忽略.对远场地震作用下,采用隔震技术的设备-结构耦合体系的动力响应研究已取得一定成果(李杰等, 2003; 韩森, 王亮, 2005; 国巍, 李宏男, 2008; Oropeza *et al.*, 2010).对近断层地震作用下,设备-结构耦合隔震体系动力响应的研究较少,尤其关于近断层地震动脉冲特性对设备-结构耦合隔震体系动力响应影响的研究有待深入.

为此,本文采用有限元软件建立设备-结构耦合隔震体系模型,基于耦合隔震体系的时程响应与近断层地震动的速度脉冲和加速度脉冲的对应关系,拟分析脉冲周期和脉冲能量对结构响应的影响比重与脉冲周期和结构基本周期的比值的相关性以及脉冲对应加速度曲线的穿零次数的影响,可为设备-结构耦合隔震体系在不同近断层脉冲型地震作用下的响应差异提供分析方向;此外,还研究了设备响应与脉冲特性和楼面时程的相关性,以期近断层脉冲型地震作用下耦合隔震体系的设备响应预测提供参考.

1 结构分析模型建立

某五层钢框架结构,设防烈度Ⅷ度,场地类别Ⅱ类,设计地震分组第一组,框架层高 3.6 m,纵、横向均为 6 跨,跨度 7.2 m.为开展振动台模型试验,由于受振动台台面尺寸的限制,将实际结构简化为双向单跨原型结构并制作缩尺模型;为考虑受重力效应的影响,采用人工质量模型;几何相似比为 1/4,弹性模量相似比为 1/1,加速度相似比为 1/1,质量相似比 1/16,其它参数相似比列于表 1.梁、柱均采用方钢管,截面尺寸分别为 70 mm×70 mm×6 mm 和 100 mm×100 mm×5 mm,钢材采用 Q355 钢.楼板采用 10 mm 钢板,1—4 层的配重为

表 1 缩尺模型与原型的相似关系

Table 1 Similarity relation of single-span model and prototype structure

类型	物理量	相似关系	相似比	类型	物理量	相似关系	相似比
材料特性	应力	S_E	1	荷载特性	面荷载	S_E	1
	应变	1	1		加速度	1	1
	弹性模量	S_E	1		速度	$S_L^{1/2}$	1 : 2
	泊松比	1	1		重力加速度	1	1
	长度	S_L	1 : 4		阻尼系数	$S_E S_L^{3/2}$	1 : 8
几何特性	位移	S_L	1 : 4	时间	$S_L^{1/2}$	1 : 2	
				频率	$S_L^{-1/2}$	2	

注: 表中 S_E 为弹性模量相似常数; S_L 为长度相似常数。

2040 kg, 5层配重为 2268 kg。

双向单跨原型结构与其缩尺模型的前三阶自振周期, 如表 2 所示; 将缩尺模型的自振周期根据相似比 1/2 转换后与原型结构周期进行对比, 误差 < 3%, 满足计算精度要求。

每根柱下安装一个橡胶隔震支座,

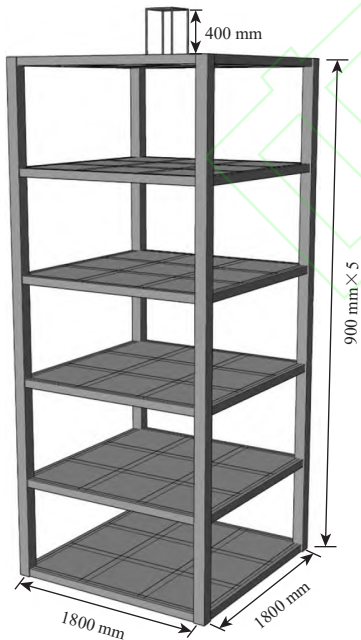


图 1 有限元分析模型

Fig. 1 Finite element calculation model

表 2 原型结构与缩尺模型前三阶自振周期

Table 2 The first 3 natural vibration periods of prototype structure and single-span model

模型	自振周期/s		
	第1阶	第2阶	第3阶
双向单跨原型	0.86	0.86	0.49
缩尺模型	0.44	0.44	0.24

支座直径 150 mm, 水平刚度为 0.25 kN/mm. 在缩尺模型顶层耦合一个由四根长度 400 mm 的圆钢连接的设备, 组成设备-结构耦合隔震体系; 圆钢间距 250 mm, 直径 12 mm, 设备质量为 200 kg, 自振周期为 0.25 s. 利用 Abaqus 有限元软件进行建模, 梁柱采用 B32 梁单元, 楼板选用 S4R5 壳单元, 如图 1 所示; 耦合隔震体系的基本周期为 0.85 s。

2 地震波选取

从太平洋地震工程研究中心 (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 缩写为 PEER) 数据库选取 50 条具有脉冲特性的近断层地震波, 按脉冲周期升序排列, 列于表 3. 选取原则如下:

1) 根据国内外大多数研究学者公认的近断层地震动断层距定义, 选取断层距在 20 km 以内的地震波。

2) 为突出近断层地震动异于远场地震动的强度特征, 选择 M_w 不小于 5.5 的地震波。

3) 为突出近断层地震动的强地面运动特性, 选择峰值加速度 (peak ground acceleration, 缩写为 PGA) 大于 0.10g 的地震波;

4) 地震波是否具有脉冲以及脉冲周期数值根据 PEER 数据库确定 (Baker, 2007)。

为对比分析, 从 PEER 数据库中选取 50 条无脉冲特性的近断层地震波, 并按峰值位移

表 3 研究选取的 50 条近断层脉冲型地震波

Table 3 The 50 near-fault pulse-like seismic waves selected for study

序号	PEER记录编号	分量	地震名称	发震年	M_w	脉冲周期/s
1	1050	FN	Northridge-01	1994	6.69	0.50
2	615	FN	Whittier Narrows-01	1987	5.99	0.79
3	496	FP	Nahanni, Canada	1985	6.76	0.81
4	568	FN	San Salvador	1986	5.80	0.86
5	1051	FN	Northridge-01	1994	6.69	0.90
6	828	FP	Cape Mendocino	1992	7.01	0.90
7	1602	FP	Duzce, Turkey	1999	7.14	0.91
8	569	FP	San Salvador	1986	5.80	1.00
9	451	FP	Morgan Hill	1984	6.19	1.10
10	459	FN	Morgan Hill	1984	6.19	1.20
11	150	FN	Coyote Lake	1979	5.74	1.20
12	765	FN	Loma Prieta	1989	6.93	1.20
13	1202	FN	Chi-Chi, Taiwan, China	1999	7.62	1.40
14	529	FN	N. Palm Springs	1986	6.06	1.40
15	1119	FN	Kobe, Japan	1995	6.90	1.40
16	77	FN	San Fernando	1971	6.61	1.60
17	1120	FN	Kobe, Japan	1995	6.90	1.60
18	766	FN	Loma Prieta	1989	6.93	1.70
19	1013	FN	Northridge-01	1994	6.69	1.70
20	763	FN	Loma Prieta	1989	6.93	1.80
21	568	FP	San Salvador	1986	5.80	1.80
22	803	FN	Loma Prieta	1989	6.93	1.90
23	173	FP	Imperial Valley-06	1979	6.53	2.00
24	722	FP	Superstition Hills-02	1987	6.54	2.10
25	821	FP	Erzican, Turkey	1992	6.93	2.20
26	1045	FP	Northridge-01	1994	6.69	2.20
27	1044	FN	Northridge-01	1994	6.69	2.20
28	159	FN	Imperial Valley-06	1979	6.53	2.30
29	723	FN	Superstition Hills-02	1987	6.54	2.30
30	158	FN	Imperial Valley-06	1979	6.53	2.40
31	721	FN	Superstition Hills-02	1987	6.54	2.40
32	1045	FN	Northridge-01	1994	6.69	2.40
33	1182	FN	Chi-Chi, Taiwan, China	1999	7.62	2.60
34	821	FN	Erzican, Turkey	1992	6.93	2.70
35	1013	FP	Northridge-01	1994	6.69	2.80
36	767	FP	Loma Prieta	1989	6.93	3.00
37	1063	FP	Northridge-01	1994	6.69	3.00
38	178	FP	Imperial Valley-06	1979	6.53	3.10
39	983	FN	Northridge-01	1994	6.69	3.50
40	1529	FP	Chi-Chi, Taiwan, China	1999	7.62	3.80
41	161	FN	Imperial Valley-06	1979	6.53	4.00
42	180	FN	Imperial Valley-06	1979	6.53	4.00
43	182	FN	Imperial Valley-06	1979	6.53	4.20
44	182	FP	Imperial Valley-06	1979	6.53	4.50
45	802	FN	Loma Prieta	1989	6.93	4.50
46	170	FN	Imperial Valley-06	1979	6.53	4.50

续表 3

序号	PEER记录编号	分量	地震名称	发震年	M_w	脉冲周期/s
47	1176	FP	Kocaeli, Turkey	1999	7.51	4.60
48	179	FN	Imperial Valley-06	1979	6.53	4.60
49	185	FN	Imperial Valley-06	1979	6.53	4.80
50	825	FP	Cape Mendocino	1992	7.01	4.90

注: FN为垂直断层分量, “FP”为平行断层分量, 地震波以脉冲周期升序排列。

(peak ground displacement, 缩写为 PGD) 升序排列。

3 设备-结构耦合隔震体系动力响应分析

将选取地震波的 PGA 调幅至 0.07g, 0.20g 和 0.40g, 依次对应设防烈度Ⅷ度的小震、中震和大震的峰值加速度, 分组输入到设备-结构耦合隔震体系模型, 对耦合隔震体系进行动力分析, 研究近断层地震动的脉冲特性对设备-结构耦合隔震体系动力响应的影响。表达结构动力响应的物理量有加速度、速度、位移以及应力等; 但工程中对结构响应的判断主要以位移为主, 如弹性层间位移角、弹塑性层间位移角等, 故本节主要以结构的位移响应为主要分析对象。

3.1 主体结构响应

PGA 分别为 0.07g, 0.20g 和 0.40g 时, 近断层脉冲型和非脉冲型地震作用下的隔震层最大位移如图 2 所示。可以看出, 随着脉冲周期的增长, 隔震层位移有一定的增长趋势, 但无较强的相关性。表 4 给出近断层地震作用下隔震层位移的最大值和平均值。由图 2 和表 4 可知: ① 当 PGA 相同时, 近断层脉冲型地震作用下的隔震层响应大于近断层非脉冲型地震

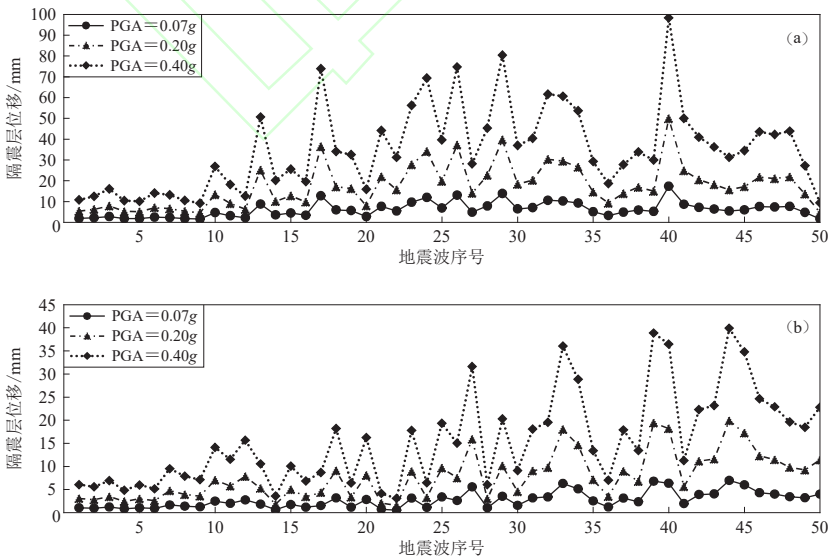


图 2 不同 PGA 近断层地震作用下的隔震层最大位移对比

(a) 近断层脉冲型地震作用; (b) 近断层非脉冲型地震作用

Fig. 2 Comparison of maximum displacement of isolation layer under near-fault ground motions with different PGA

(a) Near-fault pulse-like ground motions; (b) Near-fault non-pulse-like ground motions

表 4 隔震层位移对比

Table 4 Comparison of displacement of isolation layer

地震类型	PGA/g	隔震层位移/mm	
		最大值	平均值
脉冲型	0.07	17.35	6.11
	0.20	49.88	17.48
	0.40	98.39	35.12
非脉冲型	0.07	6.96	2.72
	0.20	19.88	7.77
	0.40	39.89	15.51

为 2.86 和 2.01, 与 PGA 的比值基本相同。

图 3 绘出 PGA 分别为 0.07g, 0.20g 和 0.40g 时, 耦合隔震结构体系的楼层层间位移的平均值曲线; 图中 P 代表近断层脉冲型地震作用的平均值, NP 代表近断层非脉冲型地震作用的平均值. 由图 3 可知, 近断层脉冲型地震作用下, 不同 PGA 的层间平均位移曲线的形状相似, 仅数值变化, 变化比例与 PGA 的比值接近; 本文后续仅挑选 PGA=0.07g 的工况分析结构响应与脉冲特性的相关性。

3.2 设备响应

在 PGA 为 0.07g, 0.20g 和 0.40g 时, 50 条近断层脉冲型地震动作用下的设备位移和顶层加速度的最大值, 如图 4 和图 5 所示. 因地震波的非平稳特性, 每条地震波在各个频带的能量存在显著差异; 即使在结构基本频率附近频带内能量相近的 2 条地震波, 也会因为在时域中瞬时能量的差异导致结构响应的巨大差别; 所以虽然各地震波经隔震层传递至上部结构时, 其顶层加速度的主频均与耦合体系的基本频率接近; 但顶层加速度的最大值仍存在较大差别, 从而导致设备位移的最大值随地震波变化。

由图 4 可知, 近断层脉冲型地震动作用下, 不同 PGA 的设备位移曲线形状整体相似, 仅

动. ② 近断层脉冲型地震动作用下, 不同 PGA 的隔震层位移曲线形状相似, 仅数值变化, 且每条地震波的变化比例均与 PGA 的比值接近; 如 $PGA = 0.40g$ 和 $PGA = 0.20g$ 隔震层位移的比值介于 1.95—2.05 (PGA 比值的 $\pm 2.5\%$) 之间. ③ 近断层脉冲型地震动作用下, $PGA = 0.20g$ 与 $PGA = 0.07g$, $PGA = 0.40g$ 与 $PGA = 0.20g$ 隔震层位移平均值比值分别

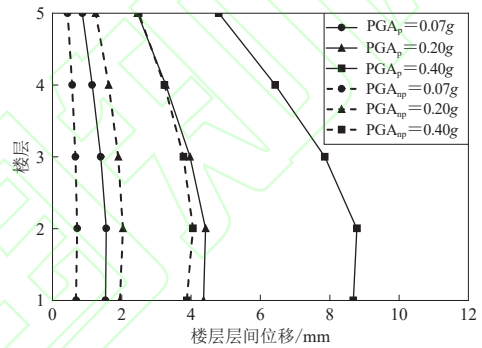


图 3 不同 PGA 近断层地震作用下的层间最大位移
Fig. 3 Maximum interlayer displacements under near-fault ground motions with different PGA

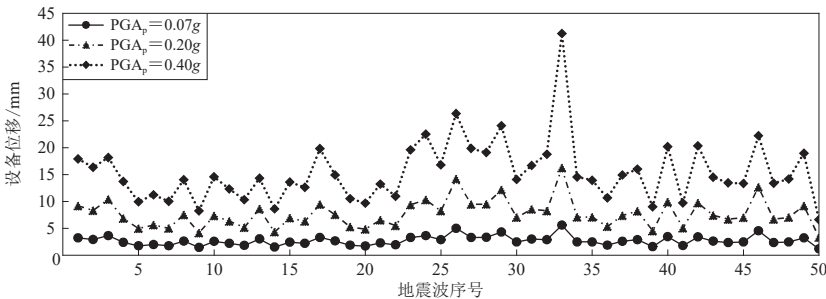


图 4 不同 PGA 的近断层脉冲型地震动作用下设备位移最大值对比
Fig. 4 Comparison of maximum equipment displacement under near-fault pulse-like ground motions with different PGA

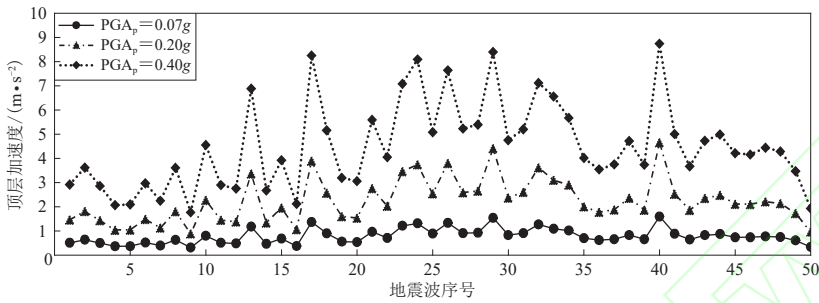


图5 不同PGA的近断层脉冲型地震动作用下顶层加速度最大值对比

Fig. 5 Comparison of maximum top floor acceleration under near-fault pulse-like ground motions with different PGA

数值变化,且大部分地震波的变化比例与PGA的比值接近;PGA=0.20g和PGA=0.07g设备位移的比值介于2.78—2.92(PGA比值的 $\pm 2.5\%$)之间;PGA=0.40g和PGA=0.20g设备位移的比值介于1.95—2.05(PGA比值的 $\pm 2.5\%$)之间的地震波35条,通过分析模型的局部应力发现,当PGA=0.40g时,设备在运动过程中进入塑性的程度大于PGA=0.20g,且因设备尺寸较小,故对设备整体变形影响较大,从而导致某些地震波PGA=0.40g和PGA=0.20g设备位移的比值与PGA的比值有较大不同。

通过对比图2a与图4发现,引起隔震层和设备最大变形的地震波不同,分别为40号和33号地震波。设备响应主要与顶层楼面响应时程有关,与地震波的关系需考虑主体结构的影响。对比图2a和图5可知,引起较大隔震层位移的地震波,同时伴随着较大的顶层楼面加速度。综上可得,近断层脉冲型地震动引起隔震层较大变形的同时,引起顶层楼面加速度较大的概率极大,但对设备的影响,需结合楼面加速度时程的频谱特性以及结构和设备之间的耦合关系确定。

4 脉冲影响分析

因分析过程中,需对每条地震波时程进行脉冲提取,故采用较易操作的零交法(Rodriguez-Marek, 2004; 徐龙军, 谢礼立, 2005)确定时程中的脉冲数量及相应的周期;以速度时程为主要分析对象,同时结合加速度脉冲进行辅助分析;取脉冲峰值速度大于峰值速度(peak ground velocity, 缩写为PGV)的30%作为速度脉冲的确定准则(刘启方, 2005);为方便对比,对地震波的加速度和速度时程进行了归一化处理。

4.1 隔震层位移与速度脉冲的对应关系

图6绘出了三种地震波速度脉冲与隔震层最大位移的关系:①最大位移处不存在速度脉冲,如图6a所示,共13条(占比26%);②最大位移处存在速度脉冲,但不是最大速度脉冲,如图6b所示,共19条(占比38%);③最大位移处对应最大速度脉冲,如图6c所示,共18条(占比36%)。

图7为上述类型①中32号地震波作用下结构最大位移与地震波加速度脉冲关系图;相比于地震波速度时程,加速度时程的相位明显提前于隔震层位移时程。通过图6a和图7的对比可知,32号地震波作用下,隔震层最大位移处没有速度脉冲,但存在加速度脉冲。

综上可得,基于速度脉冲可分析大部分脉冲地震动作用下的结构响应,若最大响应处没有速度脉冲,可尝试结合加速度脉冲进行分析。

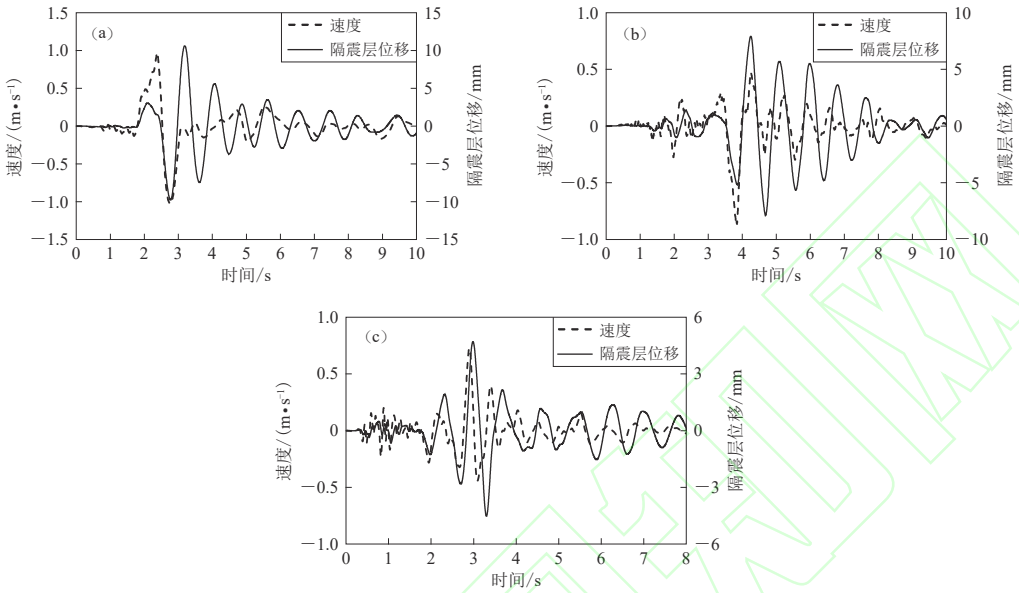


图6 隔震层最大位移与速度脉冲的三种对应关系

- (a) 最大位移处无速度脉冲(32号地震波);
- (b) 最大位移处不对应最大速度脉冲(28号地震波);
- (c) 最大位移处对应最大速度脉冲(10号地震波)

Fig. 6 Three correspondences between the maximum displacement of isolation layer and the velocity pulse

- (a) No velocity pulse correspond to the maximum displacement (seismic wave 32);
- (b) Maximum velocity pulse do not correspond to the maximum displacement (seismic wave 28);
- (c) Maximum velocity pulse correspond to the maximum displacement (seismic wave 10)

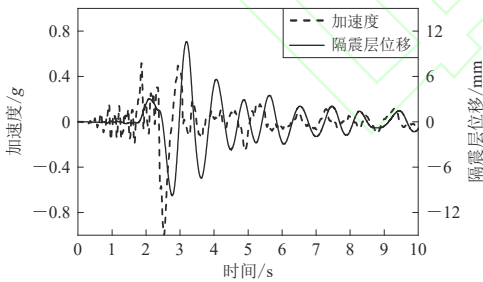


图7 最大位移与加速度脉冲的关系(32号地震波)

Fig. 7 Maximum displacement of isolation layer versus acceleration pulse (seismic wave 32)

4.2 隔震层最大位移与对应脉冲的相关性分析

由图2a可知, 40号地震波引起最大隔震层位移, 29号地震波次之. 为分析引起隔震层较大位移的原因, 采用式(1)计算速度脉冲对应的能量

$$E = \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt, \tag{1}$$

式中 t_1 和 t_2 分别为脉冲的开始和结束时刻; $a(t)$ 为脉冲段对应的加速度.

对比计算结果, 40号地震波的速度脉冲对应的能量 E 最大; 29号地震波的速度脉冲对应的能量 E 虽不是最大, 但脉冲周期为0.86 s, 与结构基本周期最近. 据此后文基于脉冲周期与结构基本周期的相近程度以及脉冲能量 E 进行分析.

4.2.1 隔震层最大位移处存在速度脉冲

对37条隔震层最大位移处存在速度脉冲的地震波(即上节类型②和③)进行相应的脉冲周期 T_p 识别; 同时对速度脉冲对应的能量 E 进行计算.

隔震层最大位移与周期比 T_p/T (37条地震波隔震层最大位移处的脉冲周期 T_p 和结构基

本周期 T 的比值) 的关系, 如图 8a 所示. 一般认为当 $T_p/T=1$ 时, 容易引起结构的较大响应, 故以 $T_p/T=1$ 为界线, 分别计算相关系数; 当 $T_p/T<1$ 时, 两者相关系数为 0.80; 当 $T_p/T>1$ 时, 两者相关系数为 -0.07. 隔震层最大位移与脉冲能量 E 的关系, 如图 8b 所示; 隔震层响应随着脉冲能量 E 的增大, 整体呈增大趋势; 当 $T_p/T<1$ 时, 隔震层最大位移与脉冲能量 E 的相关系数为 0.46; 当 $T_p/T>1$ 时, 两者相关系数为 0.79.

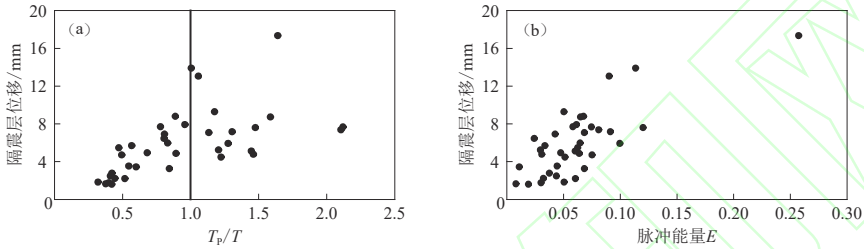


图 8 隔震层位移与周期比 T_p/T (a) 和脉冲能量 E (b) 的关系

Fig. 8 Displacement of isolation layer versus period ratio T_p/T (a) and pulse energy E (b)

通过计算发现, 当 $T_p/T>1$ 时, 所选地震波的脉冲平均能量为 $T_p/T<1$ 时的 1.90 倍; 即当脉冲周期较小时, 相应脉冲能量 E 普遍偏小; 当脉冲周期较大时, 相应脉冲能量 E 普遍偏大.

综上可得, 当周期比 $T_p/T<1$ 时, 周期比对结构响应的影响大于脉冲能量 E ; 隔震层响应随着脉冲周期与结构周期的接近, 整体呈增大趋势. 当 $T_p/T>1$ 时, 周期比的影响小于脉冲能量 E ; 即会出现当脉冲周期远大于结构周期, 但因脉冲能量 E 大, 导致结构响应大的现象 (如 40 号波); 此亦可作为当 $T_p/T>1$ 时隔震层最大位移与周期比 T_p/T 的相关系数仅为 -0.07 的解释.

4.2.2 隔震层最大位移与对应脉冲的拟合关系

虽然地震波的速度时程相比于加速度时程高频分量较少, 但部分地震波的速度脉冲过程中仍会存在明显波动. 通过对比发现, 该部分波动主要来源于速度脉冲区域对应加速度曲线的穿零次数; 加速度曲线的穿零次数越多, 对速度脉冲的影响越大, 从而影响结构的响应. 速度脉冲区域对应加速度曲线穿过时间轴的次数称为穿零次数 (谭潜等, 2019). 图 9 绘出速度脉冲对应加速度曲线穿零次数与速度脉冲波动关系; 当穿零次数较少时, 速度脉冲 (图中黑框区域的脉冲) 整体平滑, 如图 9a 所示; 当穿零次数较多时, 速度脉冲存在多次波动, 如图 9b 所示.

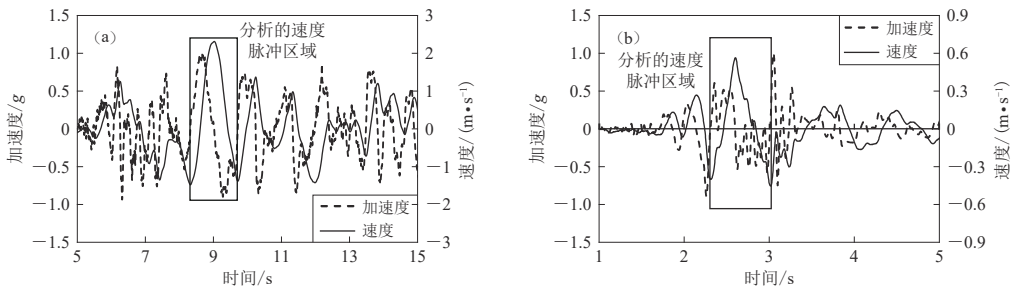


图 9 穿零次数为 1 (a) 和 9 (b) 时, 速度脉冲对应的加速度曲线

Fig. 9 Acceleration curve corresponding to velocity pulse with zero-crossing times is 1 (a) and 9 (b)

为排除速度脉冲区域波动的影响，同时考虑适用性，对速度脉冲对应加速度曲线穿零次数 ≤ 5 的 21 条地震波进行拟合分析。因隔震层最大位移随着脉冲周期与结构周期的接近以及脉冲能量 E 的增大，整体呈增大趋势，故选取二元二次函数进行拟合；自变量为周期比 T_p/T (x_1) 和脉冲能量 $E(x_2)$ ，因变量为隔震层位移比 y (隔震层最大位移与隔震支座橡胶层厚度之比)；其拟合关系如式(2)所示，判定系数 $r^2=0.94$ 。

$$y = -0.27 + 0.81x_1 + 1.82x_2 - 0.29x_1^2 - 1.82x_2^2; \tag{2}$$

4.3 设备位移与地震波脉冲特性的关系

由图 2a、图 4 和图 5 可知，若近断层脉冲型地震动引起的隔震层位移最大，同时引起最大顶层楼面加速度的概率极大，但设备位移的大小需结合楼面加速度时程具体分析。通过对顶层楼面加速度时程的频谱分析可知，近断层脉冲型地震波传至顶层楼面时，其主频已与耦合隔震体系的基本频率近似；而设备频率与该频率相距较远，故顶层楼面加速度峰值最大并不代表肯定能引起最大的设备位移。设备相对于顶层楼面属于单质点体系，设备最大位移与

顶层楼面加速度时程的反应谱值(设备周期 0.25 s)的关系，如图 10 所示，两者相关系数为 0.99。据此可知，设备响应与顶层楼面加速度的直接相关。

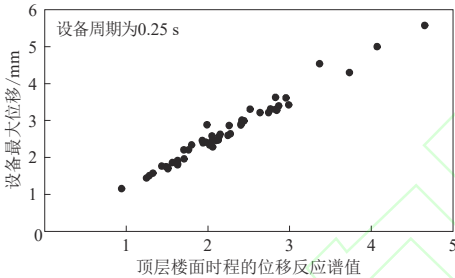


图 10 设备位移与顶层楼面加速度时程的位移谱的关系

Fig. 10 Relationship between equipment displacement and displacement spectrum of top floor acceleration time history

图 11 绘出了高频分量较丰富的 23 号波的加速度和速度时程以及结构顶层的楼面加速度和速度时程；由图可知，楼面加速度和速度时程整体平缓，存在多个脉冲(图 11a)；与地震波的加速度和速度时程(图 11b)的高频波动存在显著差别。

综上可得，因地震波通过主体结构作用于设备，故耦合体系的设备响应与地震波的脉冲特性无明显直接相关性，与主体结构的特性密切相关。

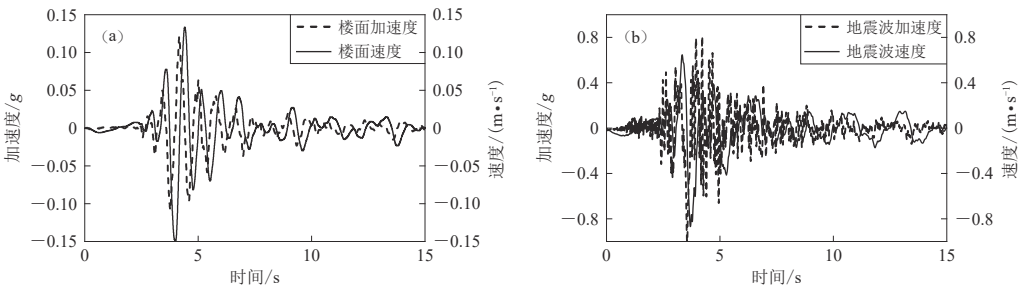


图 11 地震波时程与顶层楼面时程(23号地震波)

(a) 顶层楼面时程; (b) 地震波时程

Fig. 11 Seismic wave time history and top floor time history (seismic wave 23)

(a) Time history of top floor; (b) Time history of seismic wave

5 讨论与结论

本文基于设备-结构耦合隔震体系模型，研究主体结构和设备的动力响应与近断层地震

动脉冲特性的关系;根据结构响应与速度脉冲的对应关系,分析脉冲周期和脉冲能量等参数对结构响应的影响,并基于各参数的影响规律进行关系拟合.主要结论如下:

1) 除基于速度脉冲分析脉冲特性与结构响应的关系外,可通过加速度脉冲进行辅助分析.

2) 近断层地震动的脉冲特性对结构响应的影响,与周期比 T_p/T 、速度脉冲对应的能量 E 以及速度脉冲对应的加速度曲线穿零次数有关.当 $T_p/T < 1$ 时,周期比对结构响应的影响大于脉冲能量 E ;当 $T_p/T > 1$ 时,周期比对结构响应的影响小于脉冲能量 E ;同时需考虑速度脉冲对应的加速度曲线穿零次数的影响.

3) 设备-结构耦合隔震体系中设备响应与近断层地震动的脉冲特性无明显直接相关性;分析设备响应时,需结合楼面时程的频谱特性和主体结构特性进行具体分析.

参 考 文 献

- 国巍,李宏男.2008.多维地震作用下偏心结构楼板谱分析[J].*工程力学*,**25**(7):125-132.
- Guo W, Li H N. 2008. Floor response spectrum of eccentric structure to two-dimensional earthquake[J]. *Engineering Mechanics*, **25**(7): 125-132 (in Chinese).
- 韩森,王亮.2005.考虑耦联影响的二次结构体系减震分析[J].*世界地震工程*,**21**(1):42-46.
- Han M, Wang L. 2005. Seismic analysis of secondary systems considering coupling effect[J]. *World Earthquake Engineering*, **21**(1): 42-46 (in Chinese).
- 胡聿贤.2006.地震工程学[M].北京:地震出版社:103-104.
- Hu Y X. 2006. *Earthquake Engineering*[M]. Beijing: Seismological Press: 103-104 (in Chinese).
- 李杰,陈淮,孙增寿.2003.结构-设备动力相互作用试验研究[J].*工程力学*,**20**(1):157-161.
- Li J, Chen H, Sun Z S. 2003. Shaking table tests on spatial structure-equipment model systems[J]. *Engineering Mechanics*, **20**(1): 157-161 (in Chinese).
- 李爽,谢礼立.2007.近场问题的研究现状与发展方向[J].*地震学报*,**29**(1):102-111.
- Li S, Xie L L. 2007. Progress and trend on near-field problems in civil engineering[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(1): 102-111 (in Chinese).
- 李小军,贺秋梅,张慧颖,雷墟.2018.地震动速度脉冲对不同高宽比基础隔震结构抗震性能的影响[J].*建筑结构学报*,**39**(1):35-42.
- Li X J, He Q M, Zhang H Y, Lei Y. 2018. Effects of velocity pulse of ground motion on seismic capacity of base-isolated structures with different height-to-width ratios[J]. *Journal of Building Structures*, **39**(1): 35-42 (in Chinese).
- 刘启方.2005.基于运动学和动力学震源模型的近断层地震动研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所:19-41.
- Liu Q F. 2005. *Studies on Near-Fault Ground Motions Based on Kinematic and Dynamic Source Models*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 19-41 (in Chinese).
- 潘毅,时胜杰,常志旺,胡思远.2018.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*,**51**(11):8-16.
- Pan Y, Shi S J, Chang Z W, Hu S Y. 2018. Quantitative study on amplification effect of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. *China Civil Engineering Journal*, **51**(11): 8-16.
- 谭潜,李英民,向澜明,罗文文,卜长明,王丽萍.2019.远场长周期地震动特征[J].*地震工程与工程振动*,**39**(5):177-188.
- Tan Q, Li Y M, Xiang Y M, Luo W W, Bu C M, Wang L P. 2019. Study on characteristics of far-field long period ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **39**(5): 177-188 (in Chinese).
- 徐龙军,谢礼立.2005.集集地震近断层地震动频谱特性[J].*地震学报*,**27**(6):656-665.
- Xu L J, Xie L L. 2005. Characteristics of frequency content of near-fault ground motions during the Chi-Chi earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **27**(6): 656-665 (in Chinese).
- 杨迪雄,李刚,程耿东.2005.近断层脉冲型地震动作用下隔震结构地震反应分析[J].*地震工程与工程振动*,**25**(2):

119–124.

- Yang D X, Li G, Cheng G D. 2005. Seismic analysis of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **25**(2): 119–124.
- Anderson J C, Bertero V V. 1987. Uncertainties in establishing design earthquakes[J]. *J Struct Eng*, **113**(8): 1709–1724.
- Baker J W. 2007. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(5): 1486–1501.
- Bray J D, Rodriguez-Marek A. 2004. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **24**(11): 815–828.
- Hall J F, Heaton T H, Halling M W, Wald D J. 1995. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings[J]. *Earthq Spectra*, **11**(4): 569–605.
- Loh C H, Wan S, Liao W I. 2002. Effects of hysteretic model on seismic demands: Consideration of near-fault ground motions[J]. *Struct Design Tall Build*, **11**(3): 155–169.
- Makris N, Chang S P. 2000. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **29**(1): 85–107.
- Malhotra P K. 1999. Response of buildings to near-field pulse-like ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **28**(11): 1309–1326.
- Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(3): 1099–1131.
- Oropeza M, Favez P, Lestuzzi P. 2010. Seismic response of nonstructural components in case of nonlinear structures based on floor response spectra method[J]. *Bull Earthq Eng*, **8**(2): 387–400.
- Rodriguez-Marek A. 2000. *Near-Fault Seismic Site Response*[D]. Berkeley: University of California: 103–198.
- Shahi S K, Baker J W. 2014. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(5): 2456–2466.
- Vassiliou M F, Makris N. 2011. Estimating time scales and length scales in pulslike earthquake acceleration records with wavelet analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(2): 596–618.