

近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应 对高层钢结构地震反应的影响

江 义, 杨迪雄, 李 刚

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116023)

摘要:为考察近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应引起的两种速度脉冲运动对高层钢框架结构地震反应的影响,选择具有向前方向性效应、滑冲效应和无速度脉冲的近断层地震动作为输入,利用 SAP2000 软件对一座 20 层平面钢框架进行非线性时程分析。计算结果表明,含滑冲效应和向前方向性效应的脉冲地震动主要激发结构基本振型反应,而无速度脉冲的地震动能够激起结构的高阶振型反应,而且,脉冲型地震动的结构破坏作用远强于无速度脉冲地震动。最后,引入了单自由度体系的能量耗散系数,从能量耗散和高阶振型影响的角度对钢结构动力反应计算结果和损伤破坏状态给出了合理解释。

关键词:近断层地震动;向前方向性效应;滑冲效应;高层钢结构;非线性时程分析;能量耗散

中图分类号:P315.9 TU973.15 **文献标志码:**A

Effects of forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic responses of high-rise steel structure

JIANG Yi, YANG Dixiong, LI Gang

(State Key Laboratory for Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: This paper examined the influence of two types of near-fault ground motions with different velocity pulses due to forward directivity and fling-step effects on the seismic responses of high-rise steel frame structure. Near-fault ground motions with forward directivity and fling-step effects and without velocity pulse were selected as seismic inputs. The SAP2000 software was applied to model a 20-story plane frame structure, and the nonlinear time history analyses of structure were implemented. Numerical results illustrate that the ground motions with fling step and forward directivity pulses primarily excite the fundamental modal response, while the ground motions without pulse mainly excite the response of higher modes. Furthermore, the structural damage potential of impulsive near-fault ground motions is significantly greater than that of non-pulse ground motions. Finally, the energy dissipation ratio of SDOF (single degree of freedom) system was introduced, and the computational results of dynamic responses and damage state of steel structure were explained rationally from the perspective of energy dissipation and higher modal effect.

Keywords: near-fault ground motions; forward directivity effect; fling step effect; high-rise steel structure; nonlinear time history analysis; energy dissipation

基金项目:国家自然科学基金项目(90815023, 50978047)。

作者简介:江义(1985—),男,安徽池州人,博士研究生。E-mail:jiangyiqaz@163.com

通讯作者:李刚(1966—),男,山西太原人,工学博士,教授。E-mail:ligang@dlut.edu.cn

收稿日期:2009年2月

0 引言

一般而言,近断层脉冲型地震动的加速度、速度和位移时程幅值较大;低频分量丰富,特征周期延长;断层走向的法向分量和平行分量的地震动特征和强度差别显著^[1-6]。最近几次近断层大地震,即美国北岭地震(1994)、日本神户地震(1995)、我国台湾集集地震(1999)、土耳其 Kocaeli 地震(1999)和四川汶川地震(2008)等独特的运动特征及其对工程结构的严重破坏引起了地震工程界的密切关注^[1-6]。实际上,断层的向前方向性效应和滑冲效应这两种效应都可致使近断层地震动具有明显的速度和位移脉冲,从而在振幅、频谱和持时三方面与远场地震动有明显的差别。

当满足以下两个条件时,断层破裂就会发生向前方向性效应:破裂前锋朝向观测点传播,并且断层滑动方向也指向该点^[15]。如果破裂传播方向背离观测点时,就发生向后方向性效应。破裂方向性影响地震动的持时和长周期能量成份,并且致使断层法向分量(即破裂传播方向)的地震动时程幅值大于断层平行方向分量的幅值。向前方向性效应在速度、位移波形图上表现为持时短及具有大幅值的脉冲,而向后方向性效应的速度、位移波形图则具有持时长和幅值相对较小的特点。向前方向性效应引起的速度脉冲主要发生在垂直于断层面的方向,通常呈现双向往复形式。由于其地震危害性更大,人们更加关注向前方向性效应。同时,近断层地震中某一方向的位移时程中由于断层滑动突然升高或降低形成台阶,即永久地面位移,被称为滑冲效应。地面的滑冲效应也会引起地震动的速度脉冲,它与滑冲位移的大小和产生滑冲位移的时间有关。

总的来说,向前方向性效应引起的速度脉冲主要发生于垂直于断层面的方向,而地面滑冲效应引起的速度脉冲表现在平行于断层滑动的方向,且呈单向形式。因此,对走滑断裂,向前方向性效应和滑冲效应引起的速度脉冲出现在不同的地震动分量上,其中,向前方向性效应引起的速度脉冲主要表现在垂直于断层走向的分量上,滑冲效应引起的速度脉冲表现在平行于断层走向的分量上。对倾滑断裂,向前方向性效应引起的速度脉冲和滑冲效应引起的速度脉冲都发生在垂直于断层走向的分量,因此,两种速度脉冲是叠加在一起的^[1,5]。而且,近断层地震动的上盘效应和竖向加速度效应也比较显著。

动态的向前方向性效应和静态的滑冲效应导致近断层地震动产生两种不同的长周期速度脉冲^[15]。速度脉冲在地震动的初始就给结构输入很高的能

量,从而引起强烈的结构破坏。许多学者研究了向前方向性脉冲地震动作用下工程结构的动力反应^[7-12]。但是,他们没有考虑滑冲效应对结构的严重破坏作用,也没有区分向前方向性效应和滑冲效应引起的两种不同速度脉冲运动将对结构动力反应产生何种不同的不利影响。直到最近, Kalkan 等(2006)^[5]分析了这两种不同速度脉冲对三座高度分别为4层、6层和13层的钢框架建筑结构地震反应的影响,结果表明,向前方向性效应脉冲主要增大高阶振型反应,从而结构中上部层间变形较大;滑冲效应脉冲主要激起结构基本振型,从而结构底部层间变形较大。然而,选择不同的脉冲型地震动,研究不同类型的工程结构的地震反应和影响规律仍然十分必要。

本文首先将30条近断层地震动记录根据向前方向性效应、滑冲效应与无速度脉冲等特征分为3组,然后对一座20层钢框架结构进行非线性时程分析。讨论和分析近断层地震动对高层结构地震反应的影响,研究结果可为建筑结构抗震性能设计与加固提供参考。

1 近断层地震动特性参数

选择来自两次重大地震事件:台湾集集大地震(1999年9月21日,震级 $M_w = 7.6$)和美国加州北岭地震(1994年1月17日,震级 $M_w = 6.6$)的近断层地震动记录,这两次地震都属于倾滑断裂,但具体的震源参数不同。表1所示为3组近断层地震动记录及其特性参数,其中集集地震记录到了具有滑冲效应的速度脉冲记录,而北岭地震没有记录到这类速度脉冲记录,只记录到了具有向前方向性效应的速度脉冲记录。地震动的 PGV/PGA (峰值地面速度/峰值地面加速度)可以反映地震动的频谱特征, PGV/PGA 较大表明该记录可能含有速度脉冲,其特征周期较长^[6];而无脉冲地震动记录的 PGV/PGA 比值通常较小,特征周期较短。尽可能多地选择具有滑冲效应脉冲的地震动记录,共10条,为与之匹配,再选择10条向前方向性脉冲地震动和10条无脉冲地震动。所选30条记录的 PGA 和 PGV 分别大于 $0.1g$ 和 $30\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$;断层距在20km以内。表1中也列出了地震动的95%能量(显著)持时 t_d ,脉冲地震动的能量持时较长,而无脉冲地震动的能量持时较短^[6]。

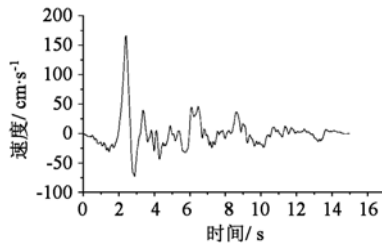
图1所示为含向前方向性效应脉冲的近断层地震动RRS228的速度和位移时程,可见其明显的速度和位移脉冲,而且脉冲呈双向往复形式。图2表示含滑冲脉冲的近断层地震动TCU052NS的速度和位移

表 1 三组近断层地震动的特性参数

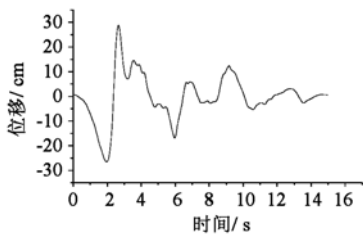
Table 1 Property parameters of three groups of near-fault ground motions

地震动特征	台站及分量	断层距/km	场地类型	PGA	PGV /cm · s ⁻¹	PGD /cm	PGV/PGA /s	t _d /s
向前方向性效应脉冲	TCU051 EW	6.95	D	0.160g	51.53	124.52	0.27	24.18
	TCU054 EW	4.64	D	0.146g	45.69	121.47	0.32	23.98
	TCU082 EW	4.47	D	0.226g	51.54	152.35	0.23	23.28
	TCU102 EW	1.19	D	0.304g	87.16	163.13	0.29	14.93
	TCU120 EW	9.87	C	0.228g	62.58	107.63	0.28	32.35
	JEN022	5.43	D	0.424g	106.22	43.06	0.26	12.42
	RRS228	6.50	D	0.838g	166.05	28.78	0.20	7.03
	SCE288	5.19	D	0.493g	74.58	28.69	0.15	7.53
	SCS052	5.35	D	0.612g	117.45	53.47	0.20	15.10
	SYL360	5.30	D	0.843g	129.71	32.68	0.16	5.32
滑冲效应脉冲	TCU052 NS	1.84	D	0.448g	220.64	723.27 (676.90)	0.50	15.92
	TCU052 EW	1.84	D	0.356g	182.96	506.73 (-443.10)	0.52	16.78
	TCU065 EW	2.49	D	0.789g	132.29	194.31 (134.20)	0.17	28.78
	TCU067 EW	1.11	D	0.499g	97.26	186.16 (102.95)	0.20	21.71
	TCU068 NS	3.01	D	0.365g	291.94	867.76 (619.30)	0.82	13.21
	TCU068 EW	3.01	D	0.505g	279.88	709.11 (-567.30)	0.57	12.36
	TCU075 EW	3.38	D	0.332g	116.05	171.07 (120.00)	0.36	26.92
	TCU076 EW	3.17	D	0.343g	69.29	108.55 (87.56)	0.21	29.68
	TCU087 NS	3.42	C	0.113g	45.20	93.09 (-81.23)	0.41	24.10
	TCU128 EW	9.08	C	0.144g	60.58	145.39 (118.80)	0.43	19.20
无速度脉冲	TCU071 EW	4.88	D	0.528g	69.83	170.60	0.08	24.56
	TCU072 EW	7.87	D	0.476g	85.51	223.86	0.18	21.92
	TCU078 EW	8.27	D	0.442g	42.14	98.88	0.10	25.95
	TCU079 EW	10.95	D	0.589g	64.49	173.20	0.11	24.24
	TCU089 EW	8.33	C	0.354g	45.43	194.62	0.13	24.11
	KAT090	13.42	D	0.640g	37.84	5.09	0.06	6.57
	PKC360	7.26	D	0.433g	51.49	7.21	0.12	9.82
	SPV360	8.44	D	0.939g	76.60	14.95	0.08	8.20
	STC180	12.09	D	0.477g	61.48	22.06	0.13	10.61
	TAR360	15.60	D	0.990g	77.62	30.45	0.08	12.66

注：PGD 表示峰值地面位移，括号内数字代表含滑冲效应的近断层地震动的滑冲位移。



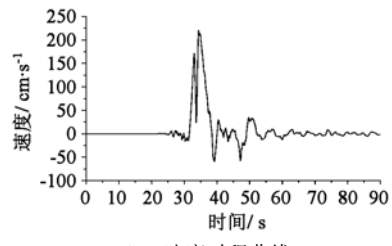
(a) 速度时程曲线



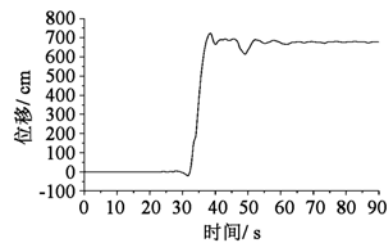
(b) 位移时程曲线

图 1 向前方向性效应脉冲的近断层地震动 RRS228 的速度和位移时程

Fig.1 Velocity and displacement time histories of near-fault ground motion RRS228 with forward directivity pulse



(a) 速度时程曲线



(b) 位移时程曲线

图 2 滑冲效应脉冲的近断层地震动 TCU052 NS 的速度和位移时程

Fig.2 Velocity and displacement time histories of near-fault ground motion TCU052 NS with fling-step pulse

时程,可见其含有明显的速度脉冲,该脉冲主要呈单向运动;位移时程可见明显的台阶,它在断层地面表现为很大的位移隆升。

2 含向前方向性效应脉冲和滑冲效应脉冲地震动作用下高层钢框架的地震反应分析

选择表 1 中三组近断层地震动作为输入,利用 SAP2000 软件对 20 层钢框架结构进行非线性时程分析。

2.1 计算模型

20 层钢框架结构计算模型选自美国土木工程师协会的基准模型,结构简化为平面框架。梁采用 A36 钢(248MPa,相当于中国碳素结构钢标准 Q235),柱采用 A992Fy50 钢(345MPa,相当于中国碳素结构钢标准 Q345)。梁截面地下 2~4 层 W30×99,5~10 层 W30×108,11~16 层 W30×99,17~18 层 W27×84,19 层 W24×62,20 层 W21×50。边柱采用□形钢,中柱采用 I 形钢。柱底与基础铰接,地面第 1 层受到水平约束,柱距 6.10m。地下室层高 3.65m,一

层层高 5.49m,2~20 层层高 3.96m。具体信息(层高、跨度、截面尺寸等)参见文献[13]的图 3。动力分析时质量简化为自重与恒荷载之和。结构恒荷载取为每层梁的均布荷载 $35\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$,集中荷载为:边柱铰点 125kN,中柱铰点 200kN^[14]。结构前 3 阶周期分别为 2.78s,0.98s,0.57s。钢结构阻尼模型采用 Rayleigh 阻尼^[15],阻尼比为 0.02。在梁端设置 FEMA356 定义的 M3 铰,在柱端分别设置 FEMA356 定义的 PMM 耦合铰^[16]。

2.2 结构动力反应分析

将选定的近断层地震动输入计算模型,所有地震动均采用实际地震动,目的是研究真实近断层地震动对结构的动力反应的影响,因为经过调整的地震动将会干扰地震动的工程特性和结构效应^[6]。通过 30 次弹塑性时程分析,得到 30 条近断层地震动作用下框架结构的楼层位移和层间位移角,如图 3、4 所示。然后对结果进行统计分析,得到钢框架结构的平均楼层位移与层间位移角,见图 5。从图 5 可以发现,滑冲效应脉冲和向前方向性效应脉冲地震动对高层结构的破坏作用明显比无脉冲地震动要强得多,而且滑冲效应脉冲的破坏作用略大于向前方向

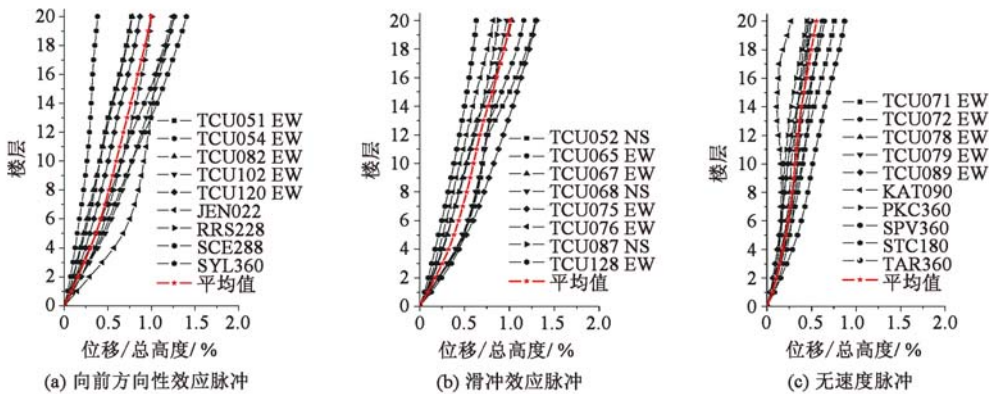


图 3 近断层地震动作用下框架结构的楼层位移比

Fig. 3 Story displacement ratio of frame structure under near-fault ground motions

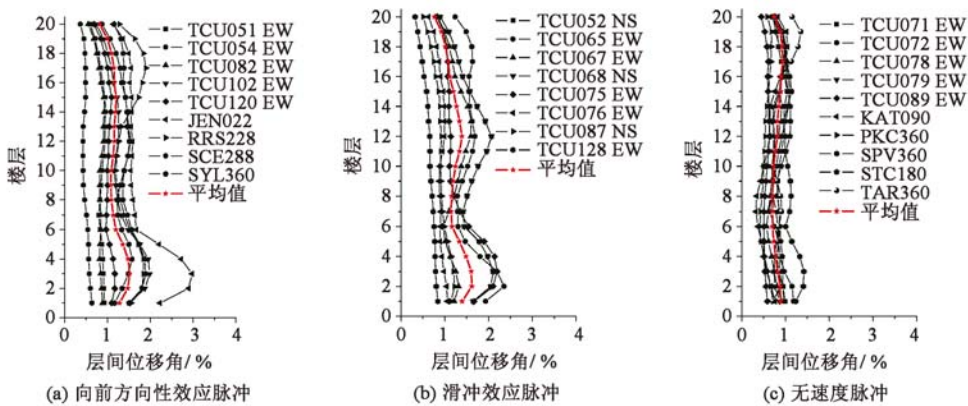


图 4 近断层地震动作用下框架结构的层间位移角

Fig. 4 Inter-story drift ratio of frame structure under near-fault ground motions

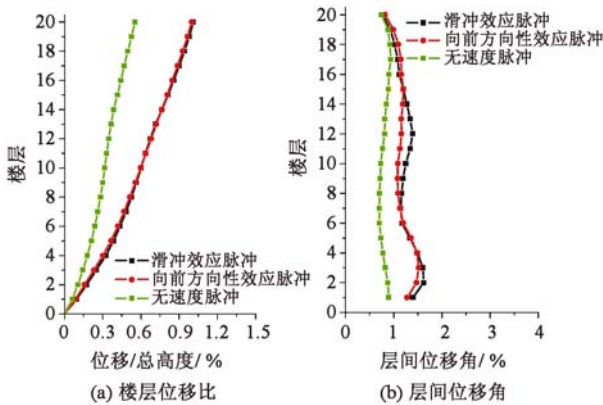


图5 近断层地震动作用下框架结构平均楼层位移比和层间位移角

Fig. 5 Mean story displacements and inter-story drift ratio of frame structure under near-fault ground motions

性效应脉冲。

结合图3~5可以看出,无脉冲地震动作用下,结构中、顶部的层间位移角需求和底部的需求相差不多,甚至更大,说明高层结构的高阶振型反应被激发;而在滑冲效应脉冲和向前方向性效应脉冲地震动作用下,结构中、顶部的层间位移角需求与底部需求明显不一样,因为它们主要激发了基本振型;这一结果与文献[5]的结论有些不一致,说明有的向前方向性效应脉冲地震动也能激发结构基本振型。概括地说,脉冲型地震动作用下,高层钢框架结构的底部最大层间变形往往较大,容易使结构产生整体倒塌破坏模式,从而对结构抗震安全造成不利影响。

表2给出了3组地震动作用下高层钢框架的地震反应平均值,比较可见向前方向性效应脉冲地震动作用下结构的顶点位移和最大层间位移角分别是无速度脉冲地震动作用下的1.80倍和1.62倍,而滑冲效应脉冲地震动作用下结构的顶点位移和最大层间位移角则分别是无速度脉冲地震动作用下的1.83倍和1.72倍。表2也列出了钢结构地震反应的变异系数,可见脉冲型地震动作用下,结构层间位移角的离散性较大。在分析中,有3种工况,分别是TCU052 EW、TCU068 EW和SCS052作用下,结构地震反应动力分析计算迭代不收敛,其原因参见下节。

表2 近断层地震动作用下结构的平均顶点水平位移和最大层间位移角比较
Table 2 Comparison on mean story displacement and maximum inter-story drift ratio of building under near-fault ground motions

参数	向前方向性效应脉冲		滑冲效应脉冲		无速度脉冲	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数
顶点水平位移/cm	80.53	0.33	81.65	0.23	44.70	0.31
最大层间位移角/%	1.52(3)	0.49(3)	1.62(2)	0.37(3)	0.94(17)	0.28(3)

注:括号内数字表示发生最大值的楼层位置。

2.3 从能量耗散的角度解释计算结果

事实上,近断层地震动的工程特性,即其振幅、频谱和持时特性决定了长周期结构的耗能状况、地震反应和抗震性能。下面从单自由度体系能量耗散的角度解释近断层地震动作用下20层钢框架结构算例的动力反应和破坏状态计算结果。选取4条代表性地震动TAR360、TCU120 EW、TCU087 NS与TCU052 EW作为输入,该结构的动力反应分别见图6与表3。图6可以发现无速度脉冲地震动TAR360作用下结构顶部局部有塑性铰形成,向前方向性效应脉冲地震动TCU120 EW作用下结构中局部有塑性铰形成,滑冲效应脉冲地震动TCU087 NS作用下结构仅在底部有塑性铰形成,而PGV更大的滑冲效应脉冲地震动TCU052 EW作用下结构瞬间倒塌。另外,从表3可以看到PGA不是度量近断层地震动对长周期结构潜在破坏势的有效指标,而PGV对长周期结构是一个重要的强度度量参数^[6]。

对4条代表性地震动进行反应谱和能量谱分析,选取单自由度体系的质量 $m = 1.752 \times 10^5 \text{ kg}$ (相当于英制单位 $1 \text{ kip} \cdot \text{sec}^2 \cdot \text{in}^{-1}$),阻尼比 $\zeta = 0.02$,延性系数 $\mu = 4$,屈服刚度比 $\alpha = 0.03$,计算得到速度反应谱、输入能谱、以及能量耗散系数谱(图7)。单自由度体系的能量方程为:

$$E_k + E_c + E_H + E_s = E_1 \quad (1)$$

其中, $E_1 = - \int_0^t m \ddot{x}_g \dot{x} dt$ 表示系统的输入能; $E_c = \int_0^t c \dot{x} \dot{x} dt$ 表示系统的阻尼耗能; $E_k = \int_0^t m \ddot{x} \dot{x} dt$ 表示系统动能; $E_s = f_k^2 / (2k)$ 表示系统可恢复的弹性应变能,其中 f_k 为体系弹性阶段的恢复力, k 为体系弹性刚度; $E_H = \int_0^t f_s(x, \dot{x}) \dot{x} dt - E_s$ 表示系统的塑性滞回耗能。根据结构塑性耗能和损伤破坏的联系,参照文献[17]引入单自由度体系的能量耗散系数 R_E 如下:

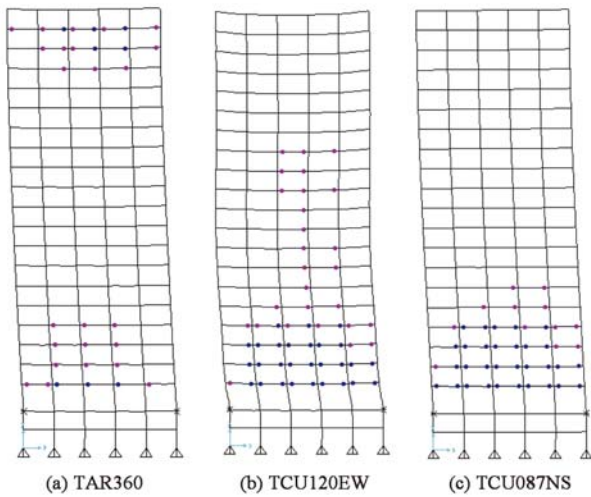
$$R_E = E_H / E_1 \quad (2)$$

结构塑性耗能需求大小和损伤程度取决于 E_1 与 R_E 。 R_E 越接近1, E_1 越大,结构塑性耗能需求也越大,对于没有专门设置耗能减振控制元件的普通结构的损伤程度也越严重,而对于专门设置耗能减振元件

表 3 代表性地震动作用下结构的动力反应

Table 3 Dynamic responses of structure under representative ground motions

地震动特征	记录	PGA	PGV /cm · s ⁻¹	PGV/PGA /s	最大层间位移角 (楼层位置)	塑性铰发展	是否倒塌
无速度脉冲	TAR 360	0.990g	77.70	0.08	1/74(19)	低层塑性铰较多,顶层少数	否
向前方向性效应脉冲	TCU120 EW	0.228g	62.61	0.28	1/85(2)	低层塑性铰较多,中层少数	否
滑冲效应脉冲	TCU087 NS	0.113g	45.31	0.41	1/81(2)	塑性铰集中于底部,且底部破坏较严重	否
	TCU052 EW	0.356g	183.20	0.52	—	塑性铰集中于底部,瞬间倒塌	是



注: B、IO、LS、CP、C、D、E 表示塑性铰的性能水平,如 B 表示屈服,IO 表示立即入住,LS 表示生命安全,CP 表示防止倒塌,C 表示倒塌^[16]。

图 6 TAR360、TCU120EW、TCU087NS 作用后钢结构塑性铰分布

Fig. 6 Distribution of plastic hinges of steel structure under TAR360, TCU120EW, and TCU087NS

的控制结构的损伤程度并不严重,因为大部分地震输入能量将被耗能减振控制元件耗散吸收。

图 7 的竖直粗虚线对应高层钢结构弹性状态下的前三阶周期 T_1 、 T_2 、 T_3 ,随着结构进入塑性,结构振型、周期在不断改变,周期线都将由于振型周期变大而右移。从速度反应谱(图 7a)可以清楚地看到,脉冲型近断层地震动含有丰富的低频分量,速度谱卓越周期相应会有所延长。从输入能谱可见,大速度

脉冲使得脉冲型地震动对于长周期结构具有较高的能量输入且能量耗散系数 R_E 接近 0.8,而无速度脉冲地震动 TAR360 对短周期结构具有很高的能量输入,但是对于周期大于 2s 时能量耗散系数 R_E 会迅速下降(图 7b、7c)。

无速度脉冲地震动 TAR360 的第一振型对应的输入能和能量耗散系数相比其它 3 条地震动都是最小的,第二、三振型对应的输入能和能量耗散系数比第一振型增加较多,即其在高阶振型的需求表现得相当明显,从而结构的最大层间变形为 1/74,发生在第 19 层,塑性铰集中于底部和顶部(表 3 和图 6a)。对于向前方向性效应脉冲地震动 TCU120EW,其速度反应谱第二阶振型的结构需求明显要比第三阶振型的需求要大得多,而其输入能量谱在周期大于 2s 后明显下降,但是能量耗散系数 R_E 仍然较大。因此,在向前方向性效应脉冲地震动 TCU120EW 作用下,结构的高阶振型可能会被激发,高阶振型的贡献率较大。此时结构的最大层间变形为 1/85,塑性铰集中于底部和中部(表 3 和图 6b)。而滑冲效应脉冲地震动 TCU052EW 的结构第一振型的输入能要比其它地震动大得多, E_I/m 高达 $3.29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$;而且能量耗散系数 R_E 一直接近 0.8。因此,它将导致结构发生更为严重的破坏,甚至会在瞬间发生倒塌。滑冲效应脉冲 TCU052EW 和 TCU087NS 速度反应谱和输入能谱都有随周期逐渐增加的趋势,这意味着这样的滑冲效应脉冲会更多地激发结构基本振型反应,而抑制高阶振型反应(图 6c)。

对应于该结构的基本周期 $T = 2.8 \text{ s}$ 的双线性单自由度体系,绘制 4 条地震动的能量时程(图 8,包括

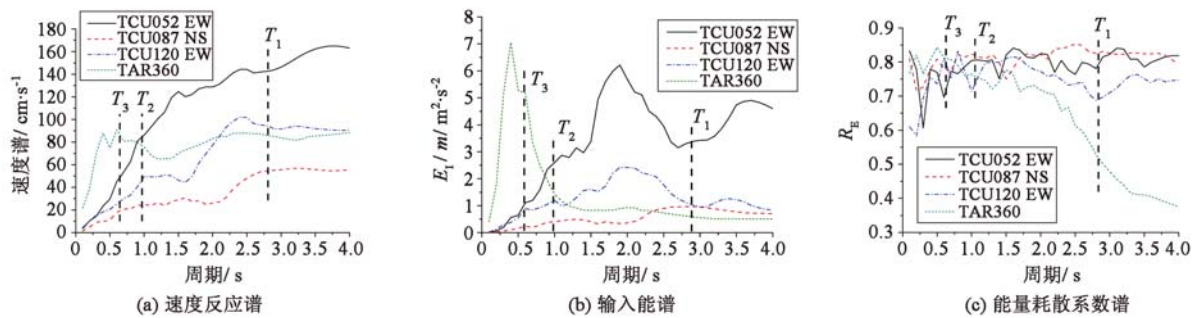


图 7 代表性地震动的速度反应谱、输入能谱与能量耗散系数谱

Fig. 7 Velocity response spectra, input energy spectra and energy dissipation ratio spectra of representative ground motions

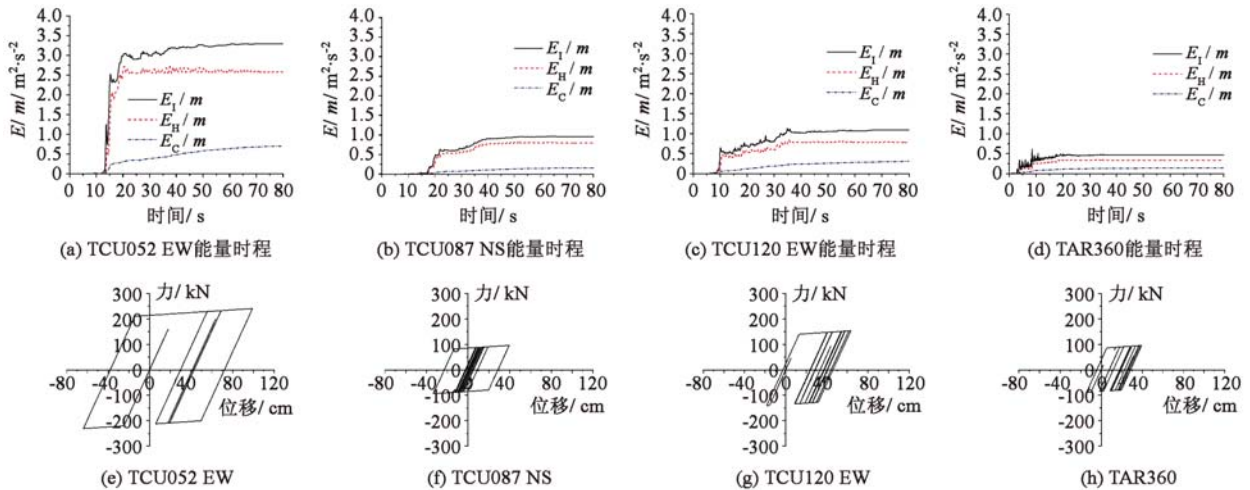


图8 TCU052 EW、TCU087 NS、TCU120 EW、TAR360 单自由度体系能量时程曲线与滞回曲线

Fig. 8 Time histories of energy and hysteretic loops for TCU052 EW, TCU087 NS, TCU120 EW, and TAR360

输入能、阻尼耗能和塑性滞回耗能时程), 可以发现对于 TCU052 EW、TCU087 NS、TCU120 EW、TAR360 四条地震动, 弹塑性变形滞回耗能 E_H 分别约占输入能 E_1 的 78.1%、82.6%、68.7%、53.0%, 由此可以说明前 3 条脉冲型地震动引起的弹塑性变形要比无速度脉冲地震动的严重。考察滑冲脉冲 TCU052 EW 对应的双线性单自由度体系 ($T = 2.8s$) 的滞回曲线, 可以发现其滞回曲线图中具有少数的往复作用, 但强度较大, 这种情况使结构系统无法在短时间内将地震输入能耗散掉, 使得结构的地震损伤也更为严重, 直至倒塌破坏, 从而表现为数值迭代不收敛。

3 结论

(1) 滑冲效应脉冲与向前方向性效应脉冲地震动主要激发结构基本振型反应, 而无速度脉冲地震动则会激起结构的高阶振型反应, 并且脉冲型地震动的结构破坏作用远强于无速度脉冲地震动。

(2) 结合单自由度体系能量分析可知, 脉冲型地震动对于长周期结构具有较高的输入能和能量耗散系数, 且一般表现为较少往复作用的滞回特性, 而无速度脉冲型地震动则不然。同时, 合理解释了结构地震反应计算结果和损伤破坏状态。

参 考 文 献

[1] Somerville P G, Smith N F, Graves R W, et al. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. Seismological Research Letters, 1997, 68(1): 199-222.
 [2] Somerville P G. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 137(2): 201-212.

[3] Bray J D, Rodriguez-Marek A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(5): 815-828.
 [4] 刘启方, 袁一凡, 金星, 等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 1-10. (Liu Qifang, Yuan Yifan, Jin Xing, et al. Basic characteristics of near-fault ground motion[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese))
 [5] Kalkan E, Kunnath S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 367-390.
 [6] Yang D X, Pan J W, Li G. Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 38(11): 1257-1280.
 [7] 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.
 [8] Makris N, Chang S P. Effects of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29(1): 85-107.
 [9] Alavi B, Krawinkler H. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33(6): 687-760.
 [10] Mavroudis G P, Dong G, Papageorgiou A S. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom system [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33(9): 1023-1049.

- [11] Akkar S, Yazgan U, Gulkan P. Drift estimates in frame building subjected to near-fault motions [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(7): 1014-1024.
- [12] Spyrakos C C, Maniatakis C A, Taflambas J. Evaluation of near-source seismic records based on damage potential parameters case-study: Greece [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(7): 738-753.
- [13] Ohtori Y, Christenson R E, Spencer Jr B F, et al. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(4): 366-385.
- [14] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范 [S]. (GB 50009—2001 Code for loads of building structures [S]. (in Chinese))
- [15] Chopra A K. 结构动力学理论及其在工程中的应用 [M]. 谢礼立, 吕大刚, 译. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 455-458. (Chopra A K. *Dynamics of structures: Theory and application to earthquake engineering* [M]. Translated by Xie Lili, Lu Dagang. 2nd Ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 455-458. (in Chinese))
- [16] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [R]. FEMA Report 356. Washington D C: FEMA, 2000: 2-15.
- [17] Fajfar P, Vidic T. Consistent inelastic design spectra: Hysteretic and input energy [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1994, 23(5): 523-537.