近断层脉冲型地震动作用下 RC 框架结构 抗整体性倒塌能力分析

韩建平^{12,*} 张丽丽¹² 徐 阳¹²

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室 ,兰州 730050;

2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,兰州 730050)

摘 要 首先,简要分析了近断层脉冲型地震动的产生原因及主要特征,讨论了基于峰值-峰值速度脉 冲和正则累积平方速度指标的有明显脉冲地震动记录选择方法。进而,选择一榀六层三跨钢筋混凝土 框架结构为研究对象,以非线性有限元软件 OpenSees 为平台,选择 20 条有明显脉冲的近断层地震动记 录,以结构基本周期对应谱加速度 S_a(T₁)为强度指标调整原始地震动记录,并对结构进行增量动力分 析(Incremental Dynamic Analysis ,IDA),以结构最大层间位移角 θ_{max}和楼层最大层间位移角 θ_{max};等为损 伤指标,统计分析 IDA 结果,得到近断层脉冲型地震动记录下的 IDA 曲线,进而利用 IDA 结果,评估了 结构的抗整体性倒塌能力。同时,也选择 20 条远场地震动记录进行同样分析以进行比较。结果对比表 明:在地震动强度指标相同时,近断层脉冲型地震动更容易引起结构的破坏;近断层脉冲型地震动作用 下结构的抗倒塌能力低于远场地震动作用下结构的抗倒塌能力;近断层脉冲型地震动作用下结构底层 的塑性变形相对更加集中。

关键词 近断层地震动,速度脉冲效应,抗整体性倒塌能力,增量动力分析 DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2017.01.005

Investigation on Global Collapse Resistant Capacity of RC Frame under Near-fault Pulse-type Ground Motions

HAN Jianping^{1,2,*} ZHANG Lili^{1,2} XU Yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province ,Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 ,China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education ,Lanzhou University of Technology ,Lanzhou 730050 ,China)

Abstract First the cause and main characteristics of pulse-type ground motion in the near-fault regions were introduced briefly and selection of near-fault pulse-type ground motion records based on Peak-to-Peak Velocity (PPV) and Normalized Cumulative Squared Velocity (NCSV) were discussed. Then ,a 6-story reinforced concrete frame with 3 bays was taken as a case study and the analytical model was built via OpenSees. 20 near-fault pulse-type ground motion records were selected and spectral acceleration at the fundamental period of the structure S_a (T_1) was taken as intensity measure to scale the original ground motion records to conduct incremental dynamic analysis (IDA) on the structure. Maximum interstory drift ratio of the structure $\theta_{\max i}$ of each floor were chosen as damage measures to obtain the IDA curves of the structure. Furthermore the global collapse resistant capacity was derived and the damage distribution of the structure was evaluated based on the IDA results. Meanwhile the same analysis was conducted under chosen 20 far-field ground motion records for comparison. Comparison of the results shows that with the same intensity

收稿日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268036);国家自然科学基金项目(51578273)

^{*} 联系作者 , Email: jphan@ lut. cn

measure ,near-fault pulse-type ground motion is more likely to cause damage to the structure. The global collapse resistant capacity of the structure under near-fault pulse-type ground motion is lower than that under far-field ground motion. For a multi-story reinforced concrete frame structure , plastic deformation is concentrated more at the first floor of the structure.

Keywords near-fault ground motion , velocity pulse , global collapse resistant capacity , incremental dynamic analysis

0 引 言

1957 年的美国 Port Hueneme 地震第一次唤 起了人们对近断层地震动的认识^[1]。近年来,几 次主要的大地震,如1979年美国 Imperial Valley 地震、1994 年美国 Northridge 地震、1995 年日本 Kobe 地震、1999 年土耳其 Kocaeli 地震和 1999 年 我国台湾 Chi-Chi 地震、意大利 L' Aquila 地震等 虽为中等强度的地震,但都对建筑物造成了严重 破坏 原因之一是这几次地震都具有明显的长周 期速度和位移脉冲 使结构承受高能量的冲击 产 生较大的位移和变形^[24]。与远场地震动相比, 这类短时间、高能量输入的地震动更容易引起结 构的破坏 对建筑物提出了更高的抗震需求。现 有的研究表明 建筑结构在近断层脉冲型地震动 作用下的响应会明显变大 ,并且随着结构层数的 增高 ,响应放大的现象会更明显 ,但是 ,响应放大 的规律及其具体分布特征目前还没有进行深入的 论证分析 近断层脉冲型地震动作用下结构的抗 倒塌能力评估方面的研究也不够充分[5-6]。

为了探讨量大面广的钢筋混凝土框架结构在 近断层脉冲型地震动作用下的响应特点、评估结 构抗整体性倒塌能力,本文选择一按1989规范设 计建造的实际框架结构,以非线性有限元软件 OpenSees 为平台,在较为全面地考虑钢筋屈服后的强度和刚度退化、混凝土受拉、箍筋对核心区混凝土的约束效应及 *P* - Δ 效应的基础上,选择 20 条近断层脉冲型地震动记录,同时选取 20 条远场地震动记录,以结构基本周期对应谱加速度 *S*_a (*T*_i)为强度指标调整原始地震动记录,并分别进行增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA),以结构最大层间位移角和楼层最大层间位移角等为损伤指标,统计分析 IDA 结果,得到两种地震动记录下的 IDA 曲线,进而利用 IDA 结果得到近断层脉冲型地震动作用下,结构响应沿结构高度的分布特征以及结构倒塌概率曲线,分析评估了结构的抗整体性倒塌能力。

1 近断层地震动的速度脉冲效应

产生速度脉冲效应有两种原因^[7]:

(1)由破裂方向性效应引起,表现形式为双向速度脉冲(图1(a)),主要表现在垂直于断层方向的分量上,且前方向性效应上记录的脉冲较后方向性效应记录的脉冲特征明显;

(2)由地面永久位移引起,表现形式为单向 速度脉冲(图1(b)),主要表现在平行于断层滑 动方向的分量上。



图 1 1979 年 Imperial Valley 地震 Brawley Airport 台站水平加速度分量^[7]

Fig. 1 Horizontal ground acceleration components at Brawley Airport station during 1979 Imperial Valley Earthquake^[7]

2.1 计算建模

选择图 2 所示的某职业学校综合教学楼建筑 为对象 取其中一榀横向框架即阴影部分作为计 算单元 利用 OpenSees 有限元软件进行建模和分 析。该工程主体结构为框架结构 地上 6 层 底层 和二层层高为 4.2 m 3~6 层层高为 3.6 m ,主体 高度为 22.8 m。抗震设防烈度为 8 度 ,建筑场地 类别 II 类 ,混凝土强度等级 C35 ,受力主筋 HRB335 钢筋 ,箍筋 HPB235 钢筋。1-1 至 8-8 截 面尺寸分别为 700 mm × 700 mm × 500 mm × 600 mm、300 mm × 700 mm × 350 mm × 300 mm × 400 mm × 300 mm × 350 mm × 600 mm

建模时,非线性分析模型采用基于材料本构 关系的纤维单元,混凝土采用考虑混凝土受拉和 箍筋对核心区混凝土约束效应的 Concrete02 本构



(a) 平面布置图(单位:mm)

Structural Analysis

模型,钢筋采用考虑屈服和强度退化的 ReinforcingSteel本构模型^[8],梁柱单元均采用基 于位移的梁柱单元(Displacement-Based Beam-Column Element),每个柱单元设置5个积分点。 考虑到 $P - \Delta$ 效应框架柱局部坐标轴定义时,利 用 OpenSees 中 geomTransf PDelta 命令实现^[9]。 文献[10]利用 RC 框架结构的拟静力倒塌试验数 据 验证了该建模方式和参数选择可以很好地模 拟 RC 框架结构的非线性反应和退化特性。

Concrete02 本构模型可以较好地考虑纵向受 力钢筋和横向箍筋对核心区混凝土的约束作用, 参数定义时通过引入一个系数来考虑混凝土强度 的增大效应,本文取 1.2。需要设置的控制参数 有: f_{pe} ,混凝土 28 天轴心抗压强度; f_{peu} ,混凝土残 余强度; f_t ,混凝土 28 天轴心抗压强度; f_{peu} ,混凝土残 余强度; f_t ,混凝土 28 天轴心抗压强度; f_{peu} ,混凝土残 统强度; f_t ,混凝土 28 天轴心抗压强度; f_{peu} ,混凝土 输力。 "最上的。" "最近的空气。" "最近的一个系数来考虑混凝土强度。" "我们的"我们是"我们的"我们是"。" "我们的"我们是"我们的"我们是"。" "我们的"我们是"。



图 2 分析的 6 层 RC 框架结构

Fig. 2 The investigated 6-storey reinforced concrete frame structure

2.2 地震动的选取

参考 Connor 等建议, 按下述原则选择近断层 脉冲型地震动^[7]:

(1) 从浅源地震动记录数据库中,选取断层 距小于 30 km,且震级大于 6 的地震动记录。

(2) 过滤地震动记录:借助 Matlab 软件设计 低通,三阶巴特沃兹滤波器(Butterworth),然后输 入(1)中选取的地震动记录进行过滤,去除不稳 定的高频分量。

(3) 峰值-峰值速度(Peak-to-Peak Velocity,

PPV) 脉冲识别: 将过滤后的地震动记录进行 PPV 脉冲识别,计算所有方向的 PPV 和正则累积平方 速度(Normalized Cumulative Squared Velocity, NCSV)。如图 3(a) 所示, PPV 指地震动记录中一 次循环周期的两个速度峰值的差值。NCSV 是指 整个记录时程中,以增量 $\Delta t = 0.05$ 的步幅增加时 间,找出对应的速度值,求平方和,并归一化。在 记录的某个脉冲段,当 NCSV 的差值超过 60%, 即 NCSV 呈现急剧增加,则认为该记录有明显脉 冲(图 3(a)),否则视为无明显脉冲(图 3(b))。



图 3 地震动记录选取示例

Fig. 3 The examples of selected ground motion records

根据上述原则,从美国太平洋地震工程研究 中心(PEER)地震动数据库中选择20条近断层 脉冲型地震动记录如表 1 所示 ,其中 19 条地震动记录的脉冲周期 T_{P} 大于结构的基本周期 T_{1} 。

表 1 Table 1 选取的近断层脉冲型地震动记录^[7] Selected near-fault pulse-type ground motion records^[7]

编号	地震事件					PPV	$T_{n}(s)$
	名称	震级	发生年份	口归	地辰幼刀里	/(cm • s ⁻¹)	1 P(3)
NF_Eq. 1	Imperial Valley-06	6.5	1979	EI Centro Array # 6 IMPVALL/H-E06_233		208	3.6
NF_Eq. 2	Imperial Valley-06	6.5	1979	EI Centro Array # 7 IMPVALL/H-E07_233		159	3.6
NF_Eq. 3	Irpinia ,Italy-01	6.9	1980	Sturno	Sturno ITALY/A-STU_223		3.1
NF_Eq. 4	Superstition Hills-02	6.5	1987	Parachute Test Site	Parachute Test Site SUPERST/B-PTS_037		1.9
NF_Eq. 5	Loma Prieta	6.9	1989	Saratoga-Aloha	Saratoga–Aloha LOMAP/STG_038		6.2
NF_Eq. 6	Erzican ,Turkey	6.7	1992	Erzincan	ERZIKAN/ERZ_032	160	2.5
NF_Eq. 7	Cape Mendocino	7.0	1992	Petrolia	a CAPEMEND/PET_260		0.7
NF_Eq. 8	Landers	7.3	1992	Lucerne	LANDERS/LCN_239	170	4.4
NF_Eq. 9	Northridge-01	6.7	1994	Rinaldi Receiving Sta	NORTHR/RRS_032	259	1.1
NF_Eq. 10	Northridge-01	6.7	1994	Sylmar-Olive View	ar-Olive View NORTHR/SYL_032		2.5
NF_Eq. 11	Kocaeli ,Turkey	7.5	1999	lzmit	lzmit KOCAELI/IZT_180		4
NF_Eq. 12	Chi-Chi ,Taiwan	7.6	1999	TCU065	CHICHI/TCU065_272	442	10
NF_Eq. 13	Chi-Chi ,Taiwan	7.6	1999	TCU102	CHICHI/TCU102_278	165	2.6
NF_Eq. 14	Duzce ,Turkey	7.1	1999	Duzce	Duzce DUZCE/DZC_172		0.9
NF_Eq. 15	Nahanni ,Canada	6.8	1985	Site2	NAHANNI_S2240	52	0.6
NF_Eq. 16	N. Palm Springs	6.1	1986	North Palm Springs	PALMSPR_NPS210	109	2.5
NF_Eq. 17	Erzican ,Turkey	6.7	1992	Erzincan	ERZINCAN_ERZ-NS	160	2.9
NF_Eq. 18	Northridge-01	6.7	1994	Newhall-W Pico Canyon	NORTHR_WPI046	169	2.9
NF_Eq. 19	Imperial Valley-06	6.5	1979	EC County Center FF	IMPVALL. H_H-ECC002	97	10
NF_Eq. 20	Imperial Valley-06	6.5	1979	EI Centro Array# 5	IMPVALL. H_H-E05140	150	4.2

注: NF_Eq 为近断层地震动。

为了比较 /借鉴 ATC-63 建议 同时选择 20 条 远场地震动记录如表 2 所示^[11]。

- 3 利用增量动力分析评估结构抗整体性 倒塌能力
- 3.1 增量动力分析的基本步骤

增量动力分析的基本步骤如下:

(1)选取地震动记录,确定地震动强度指标 (Intensity Measure ,IM)。

(2)确定调幅原则和调幅系数,通过调幅系数不断调整地震动强度,从而得到一系列具有不同强度水平的地震动记录。

(3) 确定结构响应的损伤指标(Damage Measure ,DM)。

(4) 将按 IM 调幅后的地震动记录依次输入结构数值分析模型进行动力分析,得到一系列DM,

Structural Analysis

表 2	选取的远场地震动记录						
Table 2	Selected far-field ground motion records						
一位旦	地	震事件		ム社	地震动分量		
编写	名称	震级	发生年份	口归			
FF_Eq. 1	Northridge	6.7	1994	Beverly Hills-Mulhol	NORTHR/MUL009		
FF_Eq. 2	Northridge	6.7	1994	Canyon Country-WLC	NORTHR/LOS000		
FF_Eq. 3	Duzce ,Turkey	7.1	1999	Bolu	DUZCE/BOL000		
FF_Eq. 4	Hector Mine	7.1	1999	Hector	HECTOR/HEC000		
FF_Eq. 5	Imperial Valley	6.5	1979	Delta	IMPVALL/H-DLT262		
FF_Eq. 6	Imperial Valley	6.5	1979	EI Centro Array#11	IMPVALL/H-E11140		
FF_Eq. 7	Kobe "Japan	6.9	1995	Nishi-Akashi	KOBE/NIS000		
FF_Eq. 8	Kobe "Japan	6.9	1995	Shin-Osaka	KOBE/SHI000		
FF_Eq. 9	Kocaeli ,Turkey	7.5	1999	Duzce	KOCAELI/DZC180		
FF_Eq. 10	Kocaeli ,Turkey	7.5	1999	Arcelik	KOCAELI/ARC000		
FF_Eq. 11	Landers	7.3	1992	Yermo Fire Station	LANDERS/YER270		
FF_Eq. 12	Landers	7.3	1992	Cool water	LANDERS/CLW-LN		
FF_Eq. 13	Loma Prieta,	6.9	1989	Capitola	LOMAP/CAP000		
FF_Eq. 14	Loma Prieta ,	6.9	1989	Gilroy Array #3	LOMAP/G03000		
FF_Eq. 15	ManjilIran	7.4	1990	Abbar	MANJIL/ABBAR-L		
FF_Eq. 16	Superstition Hills	6.5	1987	EI Centro Imp. Co.	SUPERST/B-ICC000		
FF_Eq. 17	Superstition Hills	6.5	1987	Poe Road (temp)	SUPERST/B-POE270		
FF_Eq. 18	Chi-Chi ,Taiwan	7.6	1999	CHY101	CHICHI/CHY101-E		
FF_Eq. 19	Chi-Chi ,Taiwan	7.6	1999	TCU045	CHICHI/TCU045-E		
FF_Eq. 20	San Fernando	6.6	1971	LA-Hollywood Stor	SFERN/PEL090		

注: FF_Eq 为远场地震动。

进而绘制 DM 与 IM 的关系曲线 即 IDA 曲线。

选取合适的地震动强度指标 IM 和损伤指标 DM 是结构抗整体性倒塌能力分析与评估的重要 前提。已有研究表明 相比于传统的 PGA 强度指 标 以结构基本周期对应谱加速度 $S_{a}(T_{1})$ 为强度 指标可大大降低结构地震响应分析结果的离散 性,而且与现行抗震规范也具有较好的衔 模式、结构构件的损伤程度等直接相关,通常选用 θ_{max} 作为损伤指标^[14]。因此,本文采用 $S_a(T_1)$ 为 IM,以最大层间位移角 θ_{max} 为 DM。根据 FEMA350 的建议, IM 指标选用结构基本周期对 应的谱加速度 $S_a(T_1 5\%)$ 和 $\theta_{max} = 1/20$ 构成的 DM-IM 混合准则作为结构抗倒塌判定准则。

3.2 结构抗整体倒塌易损性分析

结构抗整体倒塌易损性是指在未来可能遭遇 的不同强度地震动作用下发生倒塌的概率。其分 析的具体步骤如下:

- (1) 进行 IDA 分析 得到一系列 IDA 曲线。
- (2) 确定结构的倒塌极限状态性能点。
- (3) IDA 分析输入的总地震动记录数目记为

N_{total} ,从 IDA 曲线中统计结构在某一地震动强度 如 $S_{a,i}(T_1)$ 下发生倒塌的地震动记录数目,记为 $N_{i, collarse}$,则在该地震动强度下,结构的倒塌概率 为 $N_{i, \text{collapse}}/N_{\text{total}}$ 。

(4) 重复第(3) 步可得到结构在不同地震动 强度下的倒塌概率。

(5) 以地震动强度指标为横坐标、倒塌概率 为纵坐标,按照一定的概率模型(如对数正态分 布模型)进行数据拟合,即可得到结构在不同地 震动强度下的抗倒塌能力易损性曲线。

算例分析 4

4.1 IDA 分析

4.1.1 结构整体 IDA 分析

以 OpenSees 为分析平台对建筑结构进行建 模计算,模态分析得到结构基本周期为 T_1 = 0.704 s. 以 $S_{a}(T_{1}, 5\%)$ 为强度指标分别对近断 层脉冲型地震动记录和远场地震动记录的每一条 地震动记录进行调幅,调幅的步长为0.2g,即将 每一条记录的 $S_{a}(T_{1}, 5\%)$ 分别调整为 0.2 g 0.4 g,0.6g,0.8g,……,直到分析所得 θ_{max}达到 1/20 ,认为结构倒塌 ,调幅结束 ,提取结构的最大 层间位移角 θ_{max} ,进而得到结构在近断层脉冲型 地震动和远场地震动作用下以 $\theta_{max} - S_a(T_1 5\%)$ 表示的 IDA 曲线 ,分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示。



图 4 近断层脉冲型及远场地震动记录输入下框架结构的 IDA 曲线

Fig. 4 The IDA curves of the frame under near-fault pulse-type and far-field ground motion records

比较图 4 所示近断层脉冲型及远场地震动作 用下的 IDA 曲线 ,可以看出: 当最大层间位移角 θ_{max}较小、结构处于弹性阶段时 ,两种地震动作用 下得到的 IDA 曲线均呈单调增加; 进入弹塑性阶 段后 相比于近断层脉冲型地震动 ,远场地震动作 用下的 IDA 曲线呈现较多的 "振荡"现象 ,即 IDA 曲线呈现出非单调增加。有关研究表明 ,出现这 种 "振荡"现象的原因有:

(1) 在楼层发生较大的变形后,随着地震动强度的不断增加,结构出现"应力重分布"。当输入的地震动强度不同时,结构可能会呈现出较大的强化现象,从而推迟了 IDA 曲线的平台段^[15]。

(2) 地震动的谱形影响,在进行地震动强度 调幅,使其不断增大的过程中,会加剧结构的损伤 甚至造成破坏,使结构的刚度呈现退化现象,同时 也可能导致结构地震作用的下降,有可能使结构 变形减小^[16]。 图 4 结果表明,IDA 曲线在弹塑性阶段表现 出一定的离散性,即不同地震动作用下,同一 S_a (T_1 5%)对应的 θ_{max} 变化范围很大。因此,考虑 到因地震动记录的差异而导致结构响应的离散 性,要合理准确地衡量结构的性能,必须对 IDA 分析结果进行处理并分析,进而基于概率评估结 构的抗震性能,本文分别计算近断层脉冲型及远 场地震动作用下 16%、50% 和 84% 分位数的 IDA 曲线,如图 5(a)和图 5(b)所示。

近断层脉冲型及远场地震动记录输入下 50%分位数的 IDA 曲线对比如图 6 所示。

图 6 结果表明: 在弹性阶段,近断层脉冲型地 震动和远场地震动引起的最大层间位移角基本一 致; 在弹塑性阶段,相比于远场地震动,近断层脉 冲型地震动引起的结构最大层间位移角更大,更 容易导致结构破坏。



图 5 近断层脉冲型及远场地震动记录输入下以不同分位数表示的框架结构 IDA 曲线

Fig. 5 The IDA curves with 16% 50% and 84% fractiles of the frame under near-fault pulse-type and far-field ground motion records















Fig. 11 The IDA curves of the 5th floor maximum interstory drift ratio



图 12 第六层最大层间位移角的 IDA 曲线

Fig. 12 The IDA curves of the 6th floor maximum interstory drift ratio

统计结构各层达到界限层间位移角 $\theta_{max,i,b}$ (图7—图12 虚线)时,近断层脉冲型、远场地震 动记录数目如表3所示。底层达到最大层间位移 角 θ_{max} =0.05的近断层脉冲型、远场地震动记录 数目一样。而第2~6 层达到界限层间位移角的 近断层脉冲型地震动记录数明显少于远场地震动 记录数,如第5层达到界限层间位移角0.005时, 近断层脉冲型地震动记录数为1,而远场地震动 记录数为9。这一结果说明相对于远场地震动, 近断层脉冲型地震动作用下结构底层的塑性变形 相对更加集中,近断层地震动对多层结构底层的 影响更加明显。

表3

达到最大层间位移角或界限层间位移角的地震动记录数

Table 3 Comparison of ground motion records number to reach maximum or boundary interstory drift ratios

楼层	$ heta_{\max i,b}$	地震动记录数		+* D	Δ	地震动记录数	
		近断层脉冲型	远场	~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	$\theta_{\max i,b}$	近断层脉冲型	远场
1	0.05	20	20	4	0.006	4	12
2	0.012	4	8	5	0.005	1	9
3	0.007	7	14	6	0.003 5	3	7

4.2 结构抗倒塌能力评估

以结构基本自振周期对应的谱加速度 S_a ($T_1 5\%$)为横坐标、倒塌概率为纵坐标,将得到 的散点数据按照对数正态分布模型进行数据拟 合,即可得到结构在近断层脉冲型及远场地震动 作用下的倒塌概率曲线分布如图 13(a)和图 13 (b)所示,同时也可以得到 50% 倒塌概率对应的 $S_a(T_1 5\%)$,即 $S_a(T_1 5\%)_{50\% 倒塌</sub>作为结构抗倒$ $塌能力指标。结果表明,远场地震动作用下 <math>S_a$ ($T_1 5\%$)_{50% 倒塌} = 2.034g,近断层脉冲型地震动作 用下 $S_a(T_1 5\%)_{50\% 倒塌</sub> = 1.756g 较远场地震动作$ $用下 <math>S_a(T_1 5\%)_{50\% 倒塌}$ = 1.756g 较远场地震动作 用下 $S_a(T_1 5\%)_{50\% 0}$,说明近断层脉冲型地震动作用 下结构的抗倒塌能力低于远场地震动作用下结构 的抗倒塌能力。

5 结 论

本文选取某职业学校综合教学楼实际结构中 的一榀代表性框架 利用 OpenSees 有限元软件进 行建模分析,分别选择 20 条远场地震动记录和 20 条近断层脉冲型地震动记录,以 S_a(T₁5%)为 地震动强度指标分别调整地震动记录并进行增量 动力分析,分析结果表明:

(1)当最大层间位移角 θ_{max}较小、结构处于 弹性阶段时,两种地震动作用下的 IDA 曲线均呈 单调增加。进入弹塑性阶段后,相比于近断层脉 冲型地震动,远场地震动作用下的 IDA 曲线呈现 较多的"振荡"现象。

(2) 在弹性阶段,近断层脉冲型地震动和远



图 13 结构倒塌概率曲线



场地震动引起的最大层间位移角基本一致;在弹 塑性阶段 相对于远场地震动,近断层脉冲型地震 动引起的结构最大层间位移角更大,更容易导致 结构破坏。

(3)相对于远场地震动,近断层脉冲型地震动作用下结构底层的塑性变形相对更加集中,近断层脉冲型地震动对多层结构底层的影响更加明显。

(4)近断层脉冲型地震动作用下结构的抗倒塌能力低于远场地震动作用下结构的抗倒塌 能力。

参考文献

- Housner G W ,Hudson D E. The Port Hueneme earthquake of March 18 ,1957 [J]. Bulletin of the Seismological Society of America ,1958 ,48(2): 163-168.
- [2] Phan V Saiidi M ,Anderson J ,et al. Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge columns
 [J]. ASCE Journal of Structural Engineering ,2007 , 133(7):982-989.
- [3] Sehhati R ,Rodriguez-Marek A ,ElGawady M ,et al. Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures [J]. Engineering Structures 2011 33(3):767-779.
- [4] Chioccarelli E, Iervolino I. Near-source seismic hazardand design scenarios [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42 (4): 603-622.
- [5] Tothong P ,Cornell C A. Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures
 [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics , 2008 37(7):1013-1037.
- [6] Champion C ,Liel A. The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk [J]. Earthquake En-

gineering & Structural Dynamics ,2012 ,41 (10): 1391-1409.

- [7] Connor P H Jonathan D B Norman A A et al. Selection of near-fault pulse motions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014,140(7):1-14.
- [8] 韩建平 杨军平.考虑结构构件退化特性评估大震下RC框架抗整体性倒塌能力[J].地震工程与工程振动 2012 32(6):111-122.
 Han Jianing, Yang Junping. Investigation on global collapse resistant capacity of RC frame under severe earthquake considering deterioration characteristic of

structural components [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2012 32(6):111-122. (in Chinese)

- [9] Mazzoni S ,McKenna F ,Fenves G L et al. The Opensees getting started manual [EB]. http://www.opensees. berkeley. edu 2010.
- [10] 杨军平.大震作用下考虑退化特性的 RC 框架结构 抗整体性倒塌能力分析评估 [D]. 兰州: 兰州理工 大学 2012.

Yang Junping. Investigation on global collapse resistance of RC frame subjected to severe earthquake considering deterioration characteristic [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology 2012. (in Chinese)

- [11] Applied Technology Council. FEMA P695 ,Quantification of building seismic performance factors [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency 2009.
- [12] 叶列平,马千里,缪志伟,等.抗震分析用地震动强 度指标的研究[J].地震工程与工程振动,2009,29 (4):9-22.

Ye Lieping ,Ma Qianli ,Miao Zhiwei ,et al. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2009 29(4):9-22. (in Chinese)

[13] Vamvatsikos D ,Cornell C A. Incremental dynamic a-

nalysis [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics 2002 31(3):491-514.

- [14] 卜一,吕西林,周颖,等.采用增量动力分析方法确 定高层混合结构的性能水准[J].结构工程师, 2009 25(2):77-84.
 Bo Yi,Lu Xilin,Zhou Ying,et al. Studies on the multi-levels of hybrid structures using incremental dynamic analysis [J]. Structural Engineers,2009,25 (2):77-84.(in Chinese)
- [15] Ibarra L F ,Krawinkler H. Global collapse of frame structures under seismic excitations [R]. Report No.

PEER 2005/06 ,Pacific Earthquake Engineering Research Center ,University of California at Berkeley , Berkeley ,California.

[16] 陈亮 李建中. 地震波的反应谱谱形对 RC 梁桥结 构非线性地震反应的影响[J]. 工程力学 2011 28 (10): 86-92.

> Chen Liang ,Li Jianzhong. The influence of response spectral shape of earthquake ground motions on nonlinear seismic responses of reinforced concrete girder bridge structures [J]. Engineering Mechanics ,2011 , 28(10):86-92. (in Chinese)