

俞瑞芳, 王少卿, 陈科旭, 吴敬武, 李邦武. 2020. 近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整. 地震学报, 42(4): 471-481. doi: 10.11939/jass.20190155.

Yu R F, Wang S Q, Chen K X, Wu J W, Li B W. 2020. Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion. *Acta Seismologica Sinica*, 42(4): 471-481. doi: 10.11939/jass.20190155.

近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整*

俞瑞芳^{1), †} 王少卿¹⁾ 陈科旭¹⁾ 吴敬武²⁾ 李邦武³⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100195 中国公路工程咨询集团有限公司

3) 中国海口 570204 海南省交通工程建设局

摘要 基于美国 NGA 数据库, 在断层投影距小于 25 km 范围内挑选了 1387 条地震加速度记录, 分别按照断层距和场地条件进行分组, 对近断层速度脉冲型地震动的频谱特性、特征周期, 及其与断层距、震级的相关性予以分析. 结果显示: ① 出现速度脉冲型地震动的比例与断层投影距之间存在明显的线性相关关系, 但其与震级的变化不相关; ② 地震动速度脉冲周期与震级之间存在强相关; ③ 对于近断层速度脉冲型地震动, 采用动态变化的加速度和速度反应谱峰值周期进行特征周期的计算, 更加符合真实情况; ④ 地震动速度脉冲有放大地震动特征周期的作用, 水平向放大的比例与竖向相当, 且放大作用与场地条件相关, 在较硬场地上放大较多. 本文基于上述近断层地震动的统计分析结果, 对现行抗震设计规范中定义的特征周期提出了适合于工程应用的调整系数, 并建立了速度脉冲周期与震级之间的关系模型, 分析结果显示二者的拟合效果较好.

关键词 近断层地震动 特征周期 反应谱 速度脉冲

doi: 10.11939/jass.20190155 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion

Yu Ruifang^{1), †} Wang Shaoqing¹⁾ Chen Kexu¹⁾ Wu Jingwu²⁾ Li Bangwu³⁾

1) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2) *China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing 100195, China*

3) *Hainan Transportation Engineering Construction Bureau, Haikou 570204, China*

Abstract: 1387 acceleration recordings within 25 km of Joyner-Boore distance were selected from NGA database and grouped according to the Joyner-Boore distance and site condition. Then the characteristics of near-fault pulse-type ground motions were discussed by using different ways, including spectral characteristic, eigenperiod of response spectrum and the relationships with the Joyner-Boore distance and earthquake magnitude. The results show that: ① The

* 基金项目 国家重点研发计划(2017YFC0404901)、国家自然科学基金(51878627, 51478440)和海南省交通运输厅项目(2018-HNKJ-002)共同资助.

收稿日期 2019-10-10 收到初稿, 2019-12-25 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: yrfang126@126.com



number of near-fault pulse-type ground motions is related to the Joyner-Boore distance, but not to the earthquake magnitude. ② The period of velocity pulses is strongly related to the earthquake magnitude. ③ For near-fault pulse-type ground motion, it is more accordant with the reality to use dynamic peak period of pseudo-acceleration and pseudo-velocity response spectra of ground motion to calculate the eigenperiod of response spectrum. ④ The velocity pulses of ground motion has the effect of enlarging eigenperiod of response spectrum, and the enlargement scale of horizontal and vertical are the same. Moreover, the amplification is related to the site conditions, which amplifies more on the harder site. Based on the results of statistical analysis of near-fault ground motion mentioned above, the adjustment coefficient for eigenperiod of response spectrum in the current seismic design code is provided in this research, which is suitable for application in engineering. And the satisfied relationship between period of velocity pulses and earthquake magnitude is established based on the regression analysis.

Key words: near-fault ground motion; eigenperiod; response spectrum; velocity pulse

引言

近年来大震震害表明,很多建筑物在近断层地震动作用下的破坏往往超出了人们的预期。Iwan (1997)认为近断层地震动时程中的长周期速度脉冲与结构所产生的较大侧向位移密切相关,即这种大幅值长周期的脉冲会对某一固有周期的结构造成很大的层间位移和永久变形。一般而言,近断层脉冲型地震动的加速度、速度和位移时程的幅值较大,低频分量丰富,特征周期延长;断层走向的法向分量、平行分量的地震动特征和强度差异显著(Somerville *et al.*, 1997; Bray, Rodriguez-Marek, 2004; 刘启方等, 2006; Kalkan, Kunnath, 2006)。这些不同于远震的频谱特征可能会加大一些周期较长的结构的破坏程度(Hall *et al.*, 1995; Alavi, Krawinkler, 2004; Akkar *et al.*, 2005; Spyarakos *et al.*, 2008)。在工程应用中,美国和日本抗震规范通过修改反应谱考虑了近断层地震动的增强作用(Chai, Loh, 1999),我国建筑抗震设计规范 GB 50011—2010(中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)通过规定避让距离对发震断层的位错作用进行考虑和设防,但是除考虑设计特征周期分区外,并未对近断层地震动的增强作用进行具体规定。目前,虽然对近断层地震动特性及其对结构响应影响的研究取得了较丰硕的成果,但针对近断层地震动作用下土木工程设施的设计规范尚不完善,仍需进行深入的研究。鉴于此,本文拟通过分析近断层地震动的频谱特性,对现行抗震设计规范中设计反应谱的特征周期进行讨论,以期通过对近断层地震动的统计分析结果及其与现有国内外规范的对比,提出适合工程应用的调整方法。

1 近断层速度脉冲型地震动与断层距(震级)相关性分析

1.1 速度脉冲型地震动数量

在记录到的近断层地面运动时程中,可能会出现具有长周期速度脉冲的记录,并且脉冲的幅值大、持时短(与地震动的总持时相比),这种不同于远震记录的特点会使记录的频谱特性发生变化。一般来讲,近断层地震动表现出与远场地震动不一样的特性主要与强震断层的破裂机制、破裂方向性效应有关。图 1 所示为 1992 年美国加州兰德斯(Landers) $M_w 7.3$ 地震记录到的水平向和竖向地震分量的加速度、速度和位移时程,记录台站的断层投影距(Joyner-Boore distance)大约为 2.2 km。由图 1 可见,水平方向的速度时程具有峰值超过 100 cm 的速度

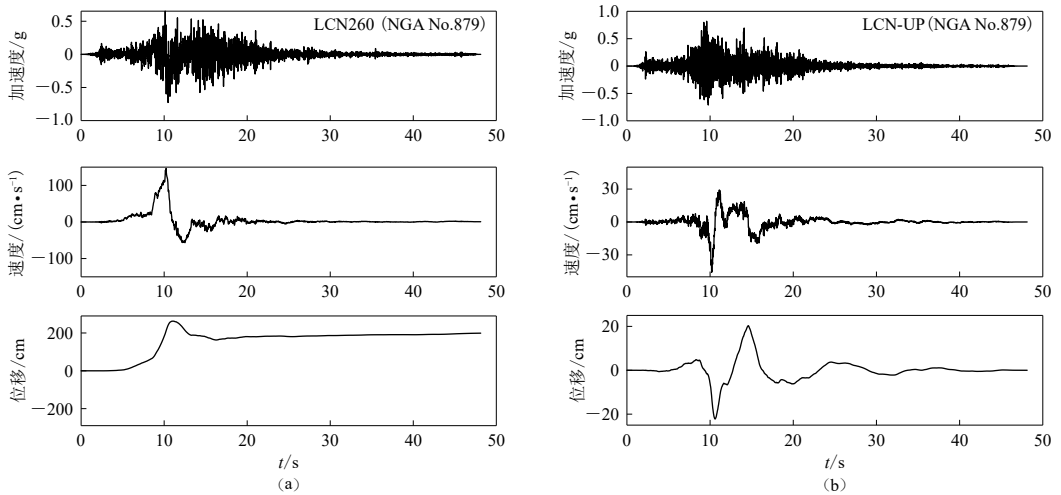


图1 1992年兰德斯 M_W 7.3地震水平向(a)和竖向(b)分量的加速度、速度及位移时程

Fig. 1 Acceleration, velocity and displacement time histories of horizontal (a) and vertical (b) components of 1992 Landers M_W 7.3 earthquake

大脉冲,且地面永久位移达到150 cm,而竖向分量存在比较明显的速度脉冲,但相应的位移时程中却无永久位移.已有研究表明,断层动态的破裂向前方向性效应和静态的滑冲位移导致近断层地震动产生两种不同的长周期速度脉冲(Somerville *et al*, 1997; Somerville, 2003).考虑到产生速度脉冲的机理分析的复杂性,且现有地震记录中包含速度脉冲的时程数量较少,因此本文的分析中未对产生速度脉冲的原因加以区分.

本文分析所采用的地震加速度记录来源于美国NGA数据库中的强震记录(Chiou *et al*, 2008),该数据库收录了1935年至2003年间发生于板内地震活跃区的地震事件.分析中对近断层的判定采用NGA数据库中的断层投影距,据此本文在断层投影距(以下简称断层距)小于25 km的范围内共挑选出加速度记录1387条,这些数据来自26个浅源地震,记录的震级范围为 M_W 5.2—7.9.

首先对每条加速度记录进行一次积分得到相应的速度时程,对速度时程再次积分得到相应的位移时程;然后采用经两次挑选识别出的含长周期速度脉冲的记录,即第一次对每条记录的位移时程进行分析,若含有永久位移,则认为是含有速度脉冲,并分析相应的速度时程,确定脉冲周期的大小,第二次分析剩余记录的速度时程,依据较大振动的周期和振幅来进行判定.本文对脉冲型地震动的判定结果与Yang等(2008)的判定结果一致.表1列出了1387条地震记录中水平向和竖向分量中速度脉冲型记录的数量随断层距的变化情况.

分别对水平向和竖向分量中速度脉冲型记录的比例进行线性回归,可得

$$\beta_h = -0.0036D + 0.158, \quad \beta_v = -0.0036D + 0.099, \quad (1)$$

式中: β_h 和 β_v 分别为水平向和竖向含速度脉冲型地震动所占比例; D 为断层距,拟合中取分组中间值.如图2所示,速度脉冲型地震动所占比例与断层距之间存在简单的线性负相关关系,相关系数约为-0.95.同样对震级 M 分组,取每组震级中间值,图3给出了水平向和竖向出现速度脉冲型地震动占有所有地震动的比例与震级的关系.可以看出:在断层距小于25 km的范围内,当 $5.0 \leq M < 6.5$ 时,竖向没有含速度脉冲的地震记录,而水平向含速度脉冲

表 1 断层距小于 25 km 范围内地震加速度记录随断层距的变化情况

Table 1 Variation of acceleration recordings within 25 km of Joyner-Boore distance

断层距/km	全部加速度记录条数		有速度脉冲的加速度记录条数			
	水平向	竖向	水平向	比例*	竖向	比例*
0—5	242	118	34	14.04%	12	10.17%
5—10	159	78	22	13.84%	5	6.41%
10—15	199	98	23	11.56%	4	4.08%
15—20	153	74	16	10.46%	3	4.05%
20—25	179	87	12	6.70%	2	2.30%
总计	932	455	107	11.48%	26	5.71%

*指有速度脉冲的地震动记录条数占全部地震动记录条数的比例。

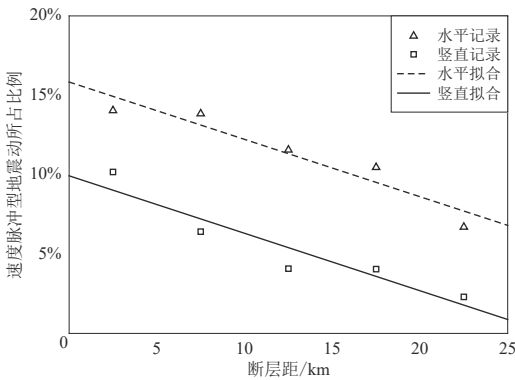


图 2 速度脉冲型地震动比例与断层距的关系

Fig. 2 The relationship between the ratio of pulse-type ground motions and Joyner-Boore distance

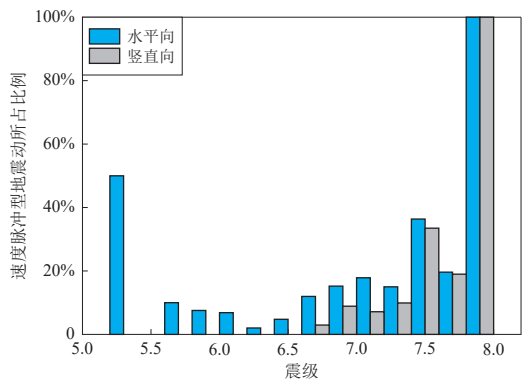


图 3 速度脉冲型地震动比例与震级的关系

Fig. 3 The relationship between the number of pulse-type ground motions and magnitude

的地震动记录所占比例随着震级的增大有所减少；当 $M \geq 6.5$ 时，无论水平向或竖向，含有速度脉冲的地震动记录均随震级增大而有所增加。

1.2 地震动速度脉冲周期

近断层地震动速度脉冲产生的原因主要有两个：破裂方向性效应和滑冲效应。破裂的方向性效应产生的速度脉冲表现为一个双向速度脉冲，而滑冲效应表现为单向速度脉冲，且出现在近断层场地上 (Somerville, 2003)。本文对 133 条速度脉冲型地震记录的速度脉冲周期进行计算，并按照

$$\rho_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}}, \quad (2)$$

计算地震动速度脉冲周期与断层距(或震级)的相关系数 (Yang et al., 2008)，式中， x_i 和 y_i 为随机过程 x 和 y 的第 i 个量， n 为样本个数。

将计算结果绘于图 4，可见地震动速度脉冲周期与断层距之间不存在相关性。然而，地震动速度脉冲周期与震级之间的相关系数为 0.752，这表明二者之间存在强相关，为此我们按照基岩 ($v_{S30} \geq 500$ m/s) 和非基岩 ($v_{S30} < 500$ m/s) 对计算数据进行分类，并进行回归分析，得

到速度脉冲周期与震级之间的关系式,即

$$\begin{aligned} \lg \beta_{TR} &= 0.55M - 3.46, \\ \lg \beta_{TS} &= 0.40M - 2.40, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, β_{TR} 为基岩场地的地震动速度脉冲周期, β_{TS} 为非基岩场地的地震动速度脉冲周期, M 为地震震级. 图 5 给出了计算得到的速度脉冲周期与震级的拟合曲线, 并与 Somerville (2003) 给出的拟合结果进行对比. 结果分析表明, 脉冲周期与地震震级存在指数相关关系, 且随着震级的增大, 脉冲周期也随之增大. 虽然本研究的拟合采用了更多的数据, 但结果与 Somerville (2003) 的结果比较相似, 且在基岩场地上相关关系变化不大.

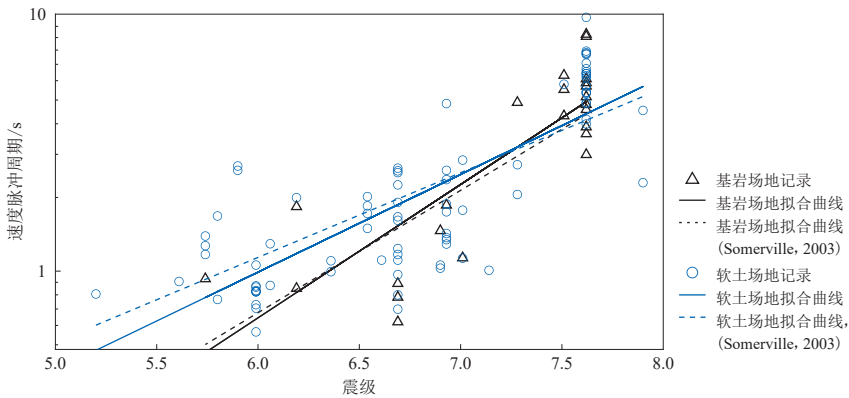


图 5 地震动速度脉冲周期与震级的关系曲线

Fig. 5 The relationship between the period of velocity pulses of ground motion and magnitude

2 近断层速度脉冲型地震动频谱特性

2.1 断层距对地震动频谱特性的影响

将地震动按照断层距、记录方向和是否含速度脉冲分为 20 组(表 1), 分别计算每个分组内每条记录的加速度反应谱(阻尼比为 0.05), 并计算每个分组内加速度反应谱的均方根(root mean square, 缩写为 RMS), 即

$$S_a(T_i) = \sqrt{\frac{S_{a1}^2(T_i) + S_{a2}^2(T_i) + \dots + S_{an}^2(T_i)}{n}}, \quad (4)$$

式中: n 为每个分组内地震动加速度记录条数; $S_{a1}(T_i)$, $S_{a2}(T_i)$, \dots , $S_{an}(T_i)$ 为采样周期 T_i 处由每条地震加速度记录计算得到的反应谱值.

在考虑断层距对地震动频谱特性的影响时, 由于受地震记录的数量限制, 我们未考虑场

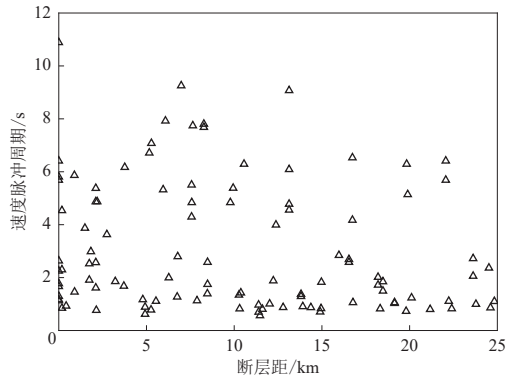


图 4 地震动速度脉冲周期随断层距的分布图

Fig. 4 Distribution of the period of velocity pulses with Joyner-Boore distance

地因素，因此采式(4)计算得到的统计结果相对应的方差相对较小。图6给出了由20个地震动分组计算得到的加速度反应谱的均方根值。为便于比较，将同一个距离分组中有速度脉冲记录计算得到的反应谱均方根值(虚线)和无速度脉冲记录计算得到的反应谱均方根值(实线)都绘制在同一幅图中。分析图6可以看出：①与未含有速度脉冲的记录相比，由含速度脉冲的记录计算得到的加速度反应谱普遍较宽；②与水平向地震反应谱相比，含速度脉冲的竖向地震反应谱在1s以后，衰减相对较慢；③当断层距大于20km时，由速度脉冲型地震动计算得到的加速度反应谱在中长周期的放大效应不明显。

以上分析表明，在断层距小于20km的范围内，速度脉冲型地震动的反应谱相对而言较宽，因此在实际工程应用中，应适当调整抗震设计规范中反应谱特征周期的取值。

2.2 场地条件对地震动频谱特性的影响

为了分析场地条件对地震动频谱特性的影响，本文按照剪切波速 v_{S30} 将场地条件分为三类，即基岩场地($v_{S30} \geq 500$ m/s)、中硬土场地($250 \leq v_{S30} < 500$ m/s)和中软土地($v_{S30} < 250$ m/s)，对1387条地震加速度记录重新进行分组，并考虑地震记录方向以及是否含速度脉冲的情况，将地震动记录分为12组，如表2所示。可以看出：水平向地震记录中出现速度脉冲型地震记录所占的比例相对要高一些；在基岩场地条件下，速度脉冲型记录在两个方向所占的比例相当；但随着场地条件逐渐变软，水平向记录中出现速度脉冲型地震记录所占比例明显大于竖向。然而，速度脉冲型记录所占的比例与场地条件却无明显的相关性。

表2 近断层地震动按照场地条件的分组情况

Table 2 Grouping of near-fault ground motions according to the site condition

场地条件	记录方向	有脉冲型记录条数	无脉冲型记录条数	合计	速度脉冲型地震动所占比例
$v_{S30} \geq 510$ m/s	水平向	25	226	251	9.96%
	竖向	11	112	123	8.94%
$260 \leq v_{S30} < 510$ m/s	水平向	70	500	571	12.26%
	竖向	15	266	280	5.36%
$v_{S30} < 260$ m/s	水平向	11	99	110	10.00%
	竖向	1	51	52	1.96%

计算每个分组内每条地震记录的加速度反应谱(阻尼比为0.05)，并记录其加速度反应谱最大值所对应的周期 T_p ，即加速度反应谱峰值周期，然后计算每一分组内 T_p 的均方根 T_{PA} ，即

表3 不同分组地震动的均方根值 T_{PA}

Table 3 The RMS value T_{PA} in different groups of ground motions

记录方向	类型	T_{PA}/s		
		$v_{S30} \geq 500$ m/s	$250 \leq v_{S30} < 500$ m/s	$v_{S30} < 250$ m/s
水平向	有脉冲	0.46	0.46	0.55
	无脉冲	0.32	0.32	0.39
竖向	有脉冲	0.34	0.34	0.38
	无脉冲	0.25	0.25	0.27

$$T_{PA} = \sqrt{\frac{T_{p1}^2 + T_{p2}^2 + \dots + T_{pn}^2}{n}}, \quad (5)$$

式中： n 为每个分组内地震加速度记录的数目； $T_{p1}, T_{p2}, \dots, T_{pn}$ 分别为每条地震加速度记录计算得到的拟加速度反应谱峰值周期。

12个地震动分组计算得到的均方根 T_{PA} 如表3所示，可以看出：①在中软场地的条件下，地震动拟加速度反应谱的 T_{PA} 值相对较大；②速度脉冲型记录计算得到的

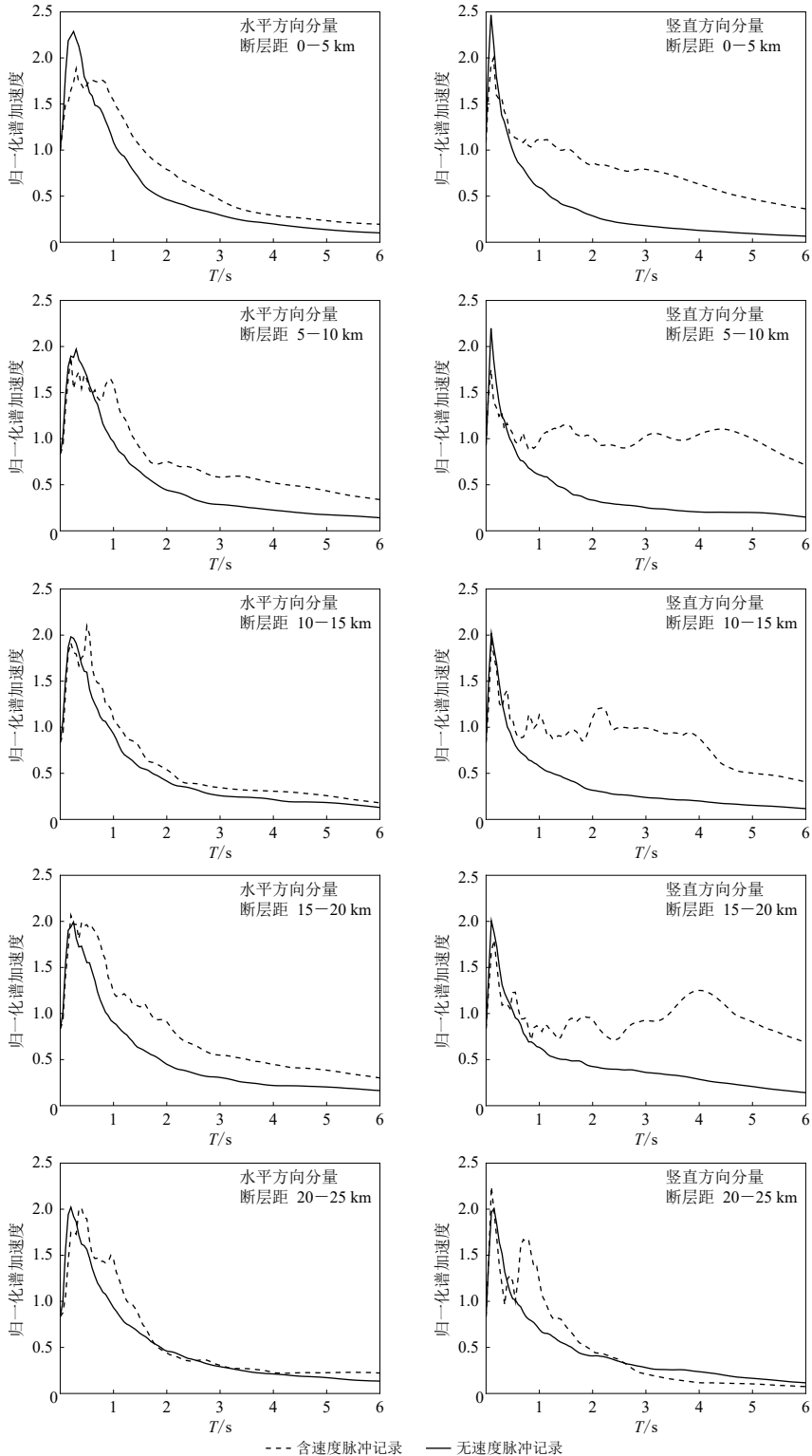


图 6 断层距小于 25 km 的范围内不同分组地震加速度反应谱均方根值变化

Fig. 6 The RMS values of acceleration response spectrum in different group within 25 km of Joyner-Boore distance

T_{PA} 值约为普通记录结果的 1.4 倍; ③ 与水平记录的 T_{PA} 值相比, 竖向记录的 T_{PA} 值都偏小.

3 近断层地震动特征周期的计算方法

本文所讨论的特征周期是指相应于我国抗震设计规范(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)中规范化的加速度反应谱曲线开始下降点所对应的周期值, 它是根据大量地震统计数据提出来的一个概念. 采用 ATC (Applied Technology Council) (1978) 定义的有效峰值加速度 EPA 和有效峰值速度 EPV, 可得到相应的特征周期的定义为

$$T_g = 2\pi \frac{EPV}{EPA}, \quad (6)$$

式中: $EPA = S_a/2.5$, 其中 S_a 为阻尼比等于 0.05 时拟加速度反应谱在周期 0.1—0.5 s 之间的平均值; $EPA = S_v/2.5$, S_v 为阻尼比等于 0.05 时速度反应谱在 0.8—1.2 s 周期内的平均值. 由 EPA 和 EPV 的定义可以看出, 这两个参数分别以地震动加速度谱和速度谱的峰值周期 T_{PA} 和 T_{PV} 为 0.3 s 和 1.0 s 为条件, 由此得到的 EPA 和 EPV 被认为代表着地震动的能量和强度. 一般来说, 对于远场地震动, T_{PA} 和 T_{PV} 分别取值为 0.3 s 和 1.0 s, 与实际地震统计分析得到的值比较接近, 但是对于富含低频的近断层地震动, 有效峰值加速度则明显小于真实的峰值加速度. 被列入美国 ATC (1978) 和 IBC (2018) 抗震规范作为强度度量参数的 EPA 和 EPV 由于未考虑近断层地震动长周期分量丰富的特点, 因此不能适应近震区抗震设计的需要, 需要进行修改. 考虑到近断层地震动的 T_{PA} 和 T_{PV} 可能会大于 0.3 s 和 1.0 s (如表 3 所示), Yang 等 (2008) 提出了改进的有效峰值加速度 (improved EPA, 缩写为 IEPA) 和改进的有效峰值速度 (improved EPV, 缩写为 IEPV), 其表达式为

$$IEPA = \frac{S_a(T_{PA}-0.2, T_{PA}+0.2)}{2.5}, \quad (7)$$

$$IEPV = \frac{S_v(T_{PV}-0.2, T_{PV}+0.2)}{2.5}, \quad (8)$$

式中: $S_a(T_{PA}-0.2, T_{PA}+0.2)$ 表示阻尼比为 0.05 的拟加速度谱在 $[T_{PA}-0.2 \text{ s}, T_{PA}+0.2 \text{ s}]$ 周期区间的平均值, 区间长度为 0.40 s, 与 ATC (1978) 规范中定义的一样; $S_v(T_{PV}-0.2, T_{PV}+0.2)$ 表示阻尼比为 5% 的速度谱在峰值周期 T_{PV} 附近的平均值, 区间长度不变. 这个表达式动态地考虑了加速度反应谱和速度反应谱中峰值所对应的周期, 更加符合真实情况. 基于式 (7) 和式 (8) 的定义, 可得到特征周期的计算公式, 即

$$\bar{T}_g = 2\pi \frac{IEPV}{IEPA}. \quad (9)$$

本文依据表 2 的分组, 分别按照式 (6) 和式 (9) 计算每条加速度记录的特征周期 T_g 或 \bar{T}_g , 并且计算每个分组内特征周期的均方根值, 将其作为调整特征周期的依据. 表 4 给出了计算得到的水平向和竖向地震动特征周期的均方根值, 其中, 表中第一行为不同场地条件下全部地震加速度记录 (不区分是否含速度脉冲) 计算得到的结果, 第二行是基于速度脉冲型记录得到的结果, 第三行是基于无速度脉冲记录计算得到的特征周期值, 第四行为有脉冲与无脉冲记录估计的特征周期值的比值, 第五行为有脉冲与全部记录估计的特征周期值的比值, 用来反映有速度脉冲情况下特征周期的放大情况.

表 4 近断层地震动特征周期 T_g 和 \bar{T}_g 的均方根值

Table 4 The RMS value of characteristic period of near-fault ground motions (horizontal)

地震动类型	$v_{S30} \geq 500$ m/s				$250 \leq v_{S30} < 500$ m/s				$v_{S30} < 250$ m/s			
	T_g/s		\bar{T}_g/s		T_g/s		\bar{T}_g/s		T_g/s		\bar{T}_g/s	
	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向
全部记录	0.56	0.49	0.81	0.75	0.57	0.52	0.96	0.90	0.63	0.55	1.10	1.01
有脉冲记录	0.76	0.63	1.27	1.16	0.79	0.70	1.35	1.28	0.81	0.74	1.42	1.33
无脉冲记录	0.53	0.47	0.72	0.66	0.54	0.52	0.84	0.75	0.55	0.54	0.95	0.89
有脉冲/无脉冲记录	1.43	1.34	1.76	1.76	1.46	1.35	1.61	1.65	1.47	1.37	1.49	1.49
有脉冲/全部记录	1.36	1.29	1.57	1.55	1.39	1.35	1.41	1.42	1.29	1.35	1.29	1.32

4 近断层地震动特征周期值的调整系数

分析表 4 中列出的地震动特征周期的均方根值, 可以看出:

1) 如果不区分地震记录是否为速度脉冲型记录, 那么计算得到的特征周期(第一行)略大于普通地震记录估计得到的特征周期(第三行), 这说明速度脉冲对地震动特征周期的估计有影响, 但由于不同分组内速度脉冲型地震数量相对较少, 所以影响不显著;

2) 采用式(9)计算得到的 \bar{T}_g 均大于式(6)的计算结果 T_g , 这主要是因为式(9)的定义中采用了更加符合实际情况的呈动态变化的 T_{PA} 和 T_{PV} 来估计近断层地震动的特征周期;

3) 速度脉冲型记录计算得到的特征周期(第二行)一般都大于普通记录的计算结果(第三行)和全部记录计算得到的结果(第一行), 相应的放大情况如第四行和第五行所示;

4) 从表 3 给出的 T_{PA} 可以看出, 记录到的竖向速度脉冲型地震动的 T_{PA} 在 0.3—0.4 s 之间变化, 无速度脉冲记录的 T_{PA} 一般都小于 0.3 s, 因此按照式(6)估计近断层地震动的特征周期, 在较硬的场地条件下是可行的;

5) 与水平向地震动特征周期相比, 竖向地震动的特征周期普遍偏小, 但是无论水平向还是竖向, 速度脉冲型记录对特征周期的放大情况基本一致。

由以上的统计分析可以看出, 速度脉冲型地震动的特征周期取值一般均大于普通地震动的特征周期, 并且其特征周期比值的的变化与场地土的特性有关. 与其它国家抗震规范相比, 我国现行建筑结构抗震设计规范(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)对近断层地震动特征周期的取值偏小. 因此, 基于抗震设计安全考虑, 就近断层速度脉冲型地震动, 针对现有抗震设计规范给出的特征周期进行相应的调整十分必要。

按照式(2)定义的相关系数, 分别计算速度脉冲周期与不同方法计算得到的特征周期 T_g 和 \bar{T}_g 的相关系数, 计算结果表明速度脉冲周期与特征周期 T_g 不相关, 但与修正的特征周期 \bar{T}_g 之间的相关系数为 0.769, 呈强相关性, 因此本文基于修正的特征周期 \bar{T}_g 的分析结果, 根据不同的场地条件, 提出相应的调整系数, 如表 5 所示. 调整时, 对于地震动的两个方向(水平向和竖向)可以采用同样的调整参数. 需要指出的是, 现行抗震设计规范按照《中国地震动

表 5 特征周期 T_g 的调整系数Table 5 The adjustment coefficient of the characteristic period T_g

方向	$v_{S30} \geq 510$ m/s	$260 \leq v_{S30} < 510$ m/s	$v_{S30} < 260$ m/s
水平向、竖向	1.55—1.76	1.40—1.65	1.29—1.49

参数区划图》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2015)中提供的特征周期分区情况,将设计地震动分为三组,其中根据特征周期的分区,将1区(近震区)和2区(中远震区)作为设计地震第一组,因此,在实际工程应用中,可仅对第一组的特征周期进行调整。

5 结论

本文将 NGA 数据库中断层投影距小于 25 km 范围内的地震加速度记录,分别按照断层距和剪切波速进行了分组,通过分析不同分组内近断层速度脉冲型地震动的频谱特性、特征周期及其与断层距、场地条件的关系,得到以下几点结论:

- 1) 出现速度脉冲型地震动的比例与断层距之间存在明显的线性相关关系,距断层越近,出现速度脉冲型地震动的概率越大,但其数量与震级之间并无明显的相关关系;
- 2) 建立了速度脉冲周期与震级之间的关系模型,拟合效果较好;
- 3) 对于近断层速度脉冲型地震动,拟加速度反应谱峰值周期 T_{PA} 相对较大,因此采用动态变化的 T_{PA} 和 T_{PV} 来进行特征周期的计算,更加符合真实情况;
- 4) 地震动速度脉冲有放大地震动特征周期的作用,并且水平向放大的比例与竖向相当;放大作用与场地条件相关,在较硬的场地上放大较多;
- 5) 对于近断层速度脉冲型地震动,现有抗震设计规范给出的特征周期需要进行相应的调整.对于需要考虑近断层地震动影响的结构,确定场地设计反应谱特征周期时,可按照本文给出三类场地条件的调整系数,对规范反应谱的特征周期直接进行调整.

参 考 文 献

- 刘启方,袁一凡,金星,丁海平. 2006. 近断层地震动的基本特征[J]. *地震工程与工程振动*, 26(1): 1-10.
- Liu Q F, Yuan Y F, Jin X, Ding H P. 2006. Basic characteristics of near-fault ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 26(1): 1-10 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2010. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社:18-21.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. *GB 5001-2010 Code for Seismic Design of Buildings*[S]. Beijing: China Architecture and Building Press: 18-21 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2015. GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京:中国标准出版社:3.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2016. *GB 18306-2015 Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China*[S]. Beijing: China Standards Press: 3 (in Chinese).
- Akkar S, Yazgan U, Gülkan P. 2005. Drift estimates in frame buildings subjected to near-fault ground motions[J]. *J Struct Eng*, 131(7): 1014-1024.
- Alavi B, Krawinkler H. 2004. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions[J]. *Earthq Eng Struc Dynam*, 33(6): 687-706.
- ATC (Applied Technology Council). 1978. *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings*[R]. Redwood City, California: Applied Technology Council: 1.
- 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.

- Chai J F, Loh C H. 1999. Near-fault ground motion and its effect on civil structures[C]//*International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures*. Taipei, China: National Center for Research on Earthquake Engineering: 70–81.
- Chiou B, Darragh R, Gregor N, Silva W, Eeri M. 2008. NGA project strong-motion database[J]. *Earthq Spectra*, **24**(1): 23–44.
- 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.
- International Code Council. 2018. *International Building Code*[S]. Brea, CA: International Code Council.
- Iwan W D. 1997. Drift spectrum: Measure of demand for earthquake ground motions[J]. *J Struct Eng*, **123**(4): 397–404.
- Kalkan E, Kunnath S K. 2006. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings[J]. *Earthq Spectra*, **22**(2): 367–390.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, Abrahamson N A. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. *Seismol Res Lett*, **68**(1): 199–222.
- Somerville P G. 2003. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **137**(1/4): 201–212.
- Spyrakos C C, Maniatakis C A, Taflambas J. 2008. Evaluation of near-source seismic records based on damage potential parameters: Case study: Greece[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **28**(7): 738–753.
- Yang D X, Pan J W, Li G. 2008. Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **38**(11): 1257–1280.