

高通滤波对脉冲型地震动非弹性反应谱的影响*

蒲武川, 薛耀辉, 张孟成

(武汉理工大学土木工程与建筑学院 武汉, 430070)

摘要 近场脉冲型地震动中包含高能量的低频脉冲, 滤波处理中的高通滤波会改变低频与其他频率成分间的相对大小, 进而对地震动反应谱产生不可忽视的影响。选取了一组近场脉冲型地震动, 根据脉冲频率 f_p 定义 6 种相对截止频率, 研究了非因果性高通滤波对等延性非弹性位移反应谱、等延性位移比谱、等延性强度折减系数谱和能量谱等四类反应谱的影响规律。分析结果表明: 非弹性反应谱对滤波参数较为敏感; 相对截止频率和延性系数越大, 滤波后反应谱的变化越显著。截止频率较大时, 在局部微小周期段内, 滤波可能导致非弹性反应谱急剧变化; 当截止频率小于 $0.2f_p$ 时, 反应谱特征无显著变化。因此, 脉冲型地震动的高通滤波处理应考虑脉冲频率的影响, 合理选取截止频率。

关键词 高通滤波; 等延性位移反应谱; 等延性位移比谱; 等延性强度折减系数谱; 能量谱
中图分类号 TH762.2; P315.9

引言

电磁背景噪声、传感器滞后效应、地面旋转和倾斜等原因造成的各种干扰信号普遍存在于地震动数据中^[1]。这些干扰信号大都是低频或者高频噪声, 因此地震计采集到的地震动数据, 在低频和高频处的信噪比相对中频成分处有显著的降低。消除地震动时程中的噪声信号或对特定频段进行强震滤波数据处理, 对分析地震波的真实特性并最大程度地还原结构的真实地震响应具有重要的意义。国内外研究大多着眼于一般远场地震动的强震数据处理, 提出了一系列用于确定地震动滤波截止频率的方法和建 议^[2-3], 以及滤波后可用频率的区间范围^[4]。然而, 如何选取合适的滤波截断周期对长周期成分占主导地位的近场脉冲型地震动数据进行修正, 以及滤波对脉冲型地震动反应谱的影响规律尚待深入研究。

近场脉冲型地震动具有显著的长周期速度脉冲特性, 其功率谱在低频处峰值大, 能量集中^[5]。丰富的低频成分使其反应谱在长周期段主要取决于该脉冲的特性, 而低频噪声的存在会导致在基于该类地震动的长周期结构地震响应分析中产生显著误差。

笔者已研究了高通滤波处理对脉冲型地震动非线性位移反应谱的衰减规律, 讨论分析了脉冲地震动高通滤波后的可用频率范围、脉冲属性判定等, 指出

低频干扰信号会对近场脉冲型地震动频谱特征产生较明显的影响^[6]。另一方面, 强震作用可能导致结构屈服进入非线性状态。因此, 有必要分析滤波下脉冲型地震动非弹性反应谱的变化规律, 以了解滤波对结构非线性响应分析的影响。高通滤波会改变地震动频率成分的相对大小, 相比弹性反应谱而言, 频率成分的改变对非弹性反应谱的影响更加显著。非弹性反应谱比弹性反应谱对地震动相位的敏感性更高, 因此强震数据处理时不宜使用因果性滤波器^[7]。

研究以脉冲型地震动为对象, 对其进行非因果性滤波处理, 选用等延性位移反应谱、等延性位移比谱、等延性强度折减系数谱、能量谱等 4 类反应谱, 分析高通滤波对非弹性反应谱的影响。

1 恢复力模型及地震波的处理

1.1 恢复力模型

文中数值分析基于单自由度系统开展, 采用图 1 所示双线性弹塑性模型, 屈服后刚度比 k_y/k_0 取为 0.01。图 1 中, u_0 和 f_0 分别为弹性体系的最大位移和相应的侧向恢复力; u_y 和 f_y 分别为弹塑性体系的屈服位移和屈服力; u_m 和 f_m 分别为体系的最大弹塑性位移和相应的恢复力。

延性系数 μ , 非弹性位移比 C_μ 和强度折减系数

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(WUT: 2019III109CG); 中央高校基本科研业务费资助项目(195206014)
收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-08-28

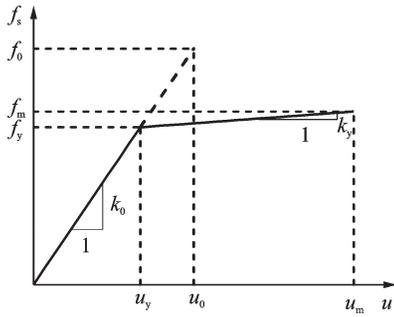


图1 双线性滞回模型

Fig.1 Bilinear hysteretic model

R_μ 的定义分别如式(1)~(3)所示。在延性系数保持不变的条件下, R_μ 和 C_μ 随结构周期的变化曲线分别称为等延性强度折减系数谱和等延性位移比谱。

$$\mu = u_m / u_y \quad (1)$$

$$C_\mu = u_m / u_0 \quad (2)$$

$$R_\mu = f_0 / f_y \quad (3)$$

1.2 脉冲型地震波的选取

本研究选用 Baker 小波分析法^[8]进行脉冲型地震动的识别和选取,其量化判别指标公式为

$$P = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6(R_V) + 20.5(R_E)}} \quad (4)$$

其中: R_V 和 R_E 分别为提取主要脉冲后的残余波形与原波形的最大速度和能量的比值。

当指标 P 的值在 0.85~1 之间,最大地表速度 V_m 大于 30 cm/s,且属于早到脉冲时,地震动可被判定为前向性效应脉冲型地震动。

基于该方法,笔者从太平洋地震工程研究中心 (pacific earthquake engineering research center, 简称 PEER) 原 NGA (next generation attenuation, 简称 NGA) 数据库中选取 30 条原始未经滤波处理的方向性效应引起的近场脉冲型地震动,采样频率均为 200 Hz,基本信息如表 1 所示。 A_m 与 V_m 为地震动峰值加速度和峰值速度; $T_{p,ap}$ 为滤波前脉冲型地震动的脉冲周期,是描述脉冲地震波特征的重要参数; FN (fault normal, 简称 FN) 分量表示垂直断层方向的水平分量。

1.3 原始地震波处理

文中对 30 条原始近场脉冲型地震动的处理选用 4 阶 Butterworth 非因果性滤波器,采用 PRISM 程序^[9] (processing and review interface for strong-motion data, 简称 PRISM) 进行滤波。地震动滤波流程遵循强震动观测合作组织 (The consortium of orga-

nizations for strong-motion observation system, 简称 COSMOS) 的准则和建议^[10],数据处理流程图如图 2 所示。其中,加速度时程“加零”是为了适应由于非因果性正向和反向滤波带来的瞬态效应,根据式 (5) 进行加零处理^[11-12]

$$T_s = 1.5n/f_c \quad (5)$$

其中: T_s 为加零长度; n 为滤波阶数; f_c 为滤波截止频率。

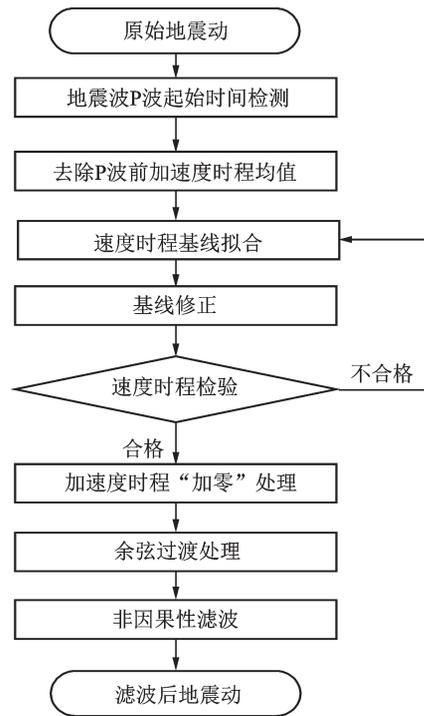


图2 强震数据处理流程图

Fig.2 Flow chart of strong ground motion processing

为了避免位移时程发生漂移和尾部翘起的现象,地震记录的两端都需增加一定数量的零,通常首尾各加 $0.5T_s$ 。同时为了平滑记录两端与加零区域之间的非连续过渡,加零后的地震动记录采用 cosine taper 进行处理,平滑区域长度设为 2 s。非因果滤波会造成明显的震前时程扰动,因此为了保持数据的兼容性,滤波后的地震动数据在反应谱计算时依旧保留加零成分。

对于滤波截止频率的选择,本研究基于脉冲频率 f_p 定义高通相对截止频率 f_c 分别为 f_p 的 1 倍, 0.8 倍, 0.6 倍, 0.4 倍, 0.2 倍和 0.1 倍,同时设定低通滤波的截止频率均为 50 Hz,以滤除高频噪声的干扰。基于以上 6 种滤波工况,对表 1 中的 30 条地震记录进行滤波处理,研究脉冲周期与截断周期的相对比例对地震动脉冲成分以及频谱特征的影响程度。

表1 选取的近场地震波
Tab.1 List of the selected near-fault ground motions

编号	地震(年份)	震级	测点	分量	A_m/g	$V_m/(cm \cdot s^{-1})$	断层距/km	$T_{p,up}/s$
1	Northridge (1994)	6.7	Sylmar-Converter Sta	SCS052	0.61	117.49	6.20	3.38
2	Northridge (1994)	6.7	Sylmar-Converter Sta East	SCE018	0.83	117.52	6.10	3.19
3	Northridge (1994)	6.7	Rinaldi Receiving Sta	RRS228	0.62	166.04	7.10	1.50
4	Kocaeli (1999)	7.4	Duzce	DZC180	0.22	58.85	12.70	5.14
5	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Array#3	FN	0.17	41.10	12.90	5.24
6	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Array#4	FN	0.36	77.93	7.10	4.61
7	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Array#5	FN	0.38	91.48	4.00	4.05
8	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Array#6	FN	0.44	111.87	1.40	3.84
9	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Array#7	FN	0.41	108.82	0.60	4.23
10	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Array#8	FN	0.37	48.55	3.90	5.39
11	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Array#10	FN	0.14	46.92	6.20	4.49
12	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Array#11	FN	0.37	41.10	12.50	7.36
13	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	El Centro Differential Array	FN	0.42	59.61	5.10	5.86
14	Imperial Valley-06 (1979)	6.5	Holtville Post Office	FN	0.26	55.15	7.70	4.80
15	MammothLakes-06(1980)	5.9	Long Valley Dam (upper left abut)	FN	0.31	33.00	14.00	1.06
16	Westmorland (1981)	5.9	Parachute Test Site	FN	0.17	35.85	16.70	3.58
17	Coalinga-05 (1983)	5.8	Oil City	FN	0.87	41.70	4.60	0.70
18	Coalinga-05 (1983)	5.8	Transmitter Hill	FN	0.85	45.43	6.00	0.92
19	Coalinga-07 (1983)	5.2	Coalinga - 14th & Elm (old CHP)	FN	0.63	36.13	9.60	0.40
20	Morgan Hill (1984)	6.2	Coyote Lake Dam (s.w.abut)	FN	0.64	62.30	0.50	0.95
21	Morgan Hill (1984)	6.2	Gilroy Array #6	FN	0.24	35.39	9.90	1.24
22	N. Palm Springs (1986)	6.1	North Palm Springs	FN	0.36	73.63	4.00	1.38
23	San Salvador (1986)	5.8	Geotech Investigation Center	FN	0.61	62.26	6.30	0.86
24	Whittier Narrows-01(1987)	6.0	Downey - comp. maint.build.	FN	0.23	30.40	20.80	0.79
25	Whittier Narrows-01(1987)	6.0	LB-Orange Ave.	FN	0.26	32.88	24.50	0.93
26	Superstition Hills-02(1987)	6.5	Parachute Test Site	FN	0.42	106.75	1.00	2.28
27	Cape Mendocino (1992)	7.0	Petrolia	FN	0.61	82.10	8.20	2.95
28	Landers (1992)	7.3	Barstow	FN	0.14	30.39	34.90	8.91
29	Landers (1992)	7.3	Lucerne	FN	0.72	143.20	2.20	5.10
30	Kobe, Japan (1995)	6.9	Takatori	FN	0.68	169.61	1.50	1.63

2 等延性非弹性反应谱

2.1 等延性位移反应谱

对非弹性反应谱的计算选用等延性非弹性谱, 阻尼比 ξ 取0.05, 通过计算并分析不同滤波工况下的反应谱差异, 探究高通滤波对非弹性反应谱的影响规律。当延性系数 $\mu=1$ 时, 即是弹性反应谱结果。当滤波处理后, 一般取反应谱幅值衰减0.5 dB (94%)处的频率作为最低可用频率 $f_u^{[13]}$ 。最低可用频率是指在截止频率处截断时, 周围频率成分不受滤波所影响的最低频率, 与截止频率直接相关, 采用

式(6)所示比例因子 η 来表达 f_u 与 f_c 的关系

$$\eta = f_c/f_u = T_u/T_c \quad (6)$$

其中: T_u 为最低可用频率对应的最大可用周期; T_c 为截止频率 f_c 对应的截断周期。

图3, 4分别为延性系数 $\mu=1$ 和2时, 在6种不同的滤波工况下滤波后与滤波前非弹性位移反应谱的比值。图中横坐标为用截断周期标准化的结构周期 T/T_c , 纵坐标为滤波后与滤波前的非弹性位移反应谱比值 $S_{d,p}/S_{d,up}$ 。由于对地震波的高通滤波处理, 图3中弹性反应谱的比值在长周期段内基本上小于1, 即滤波后反应谱谱值降低。当截止频率取

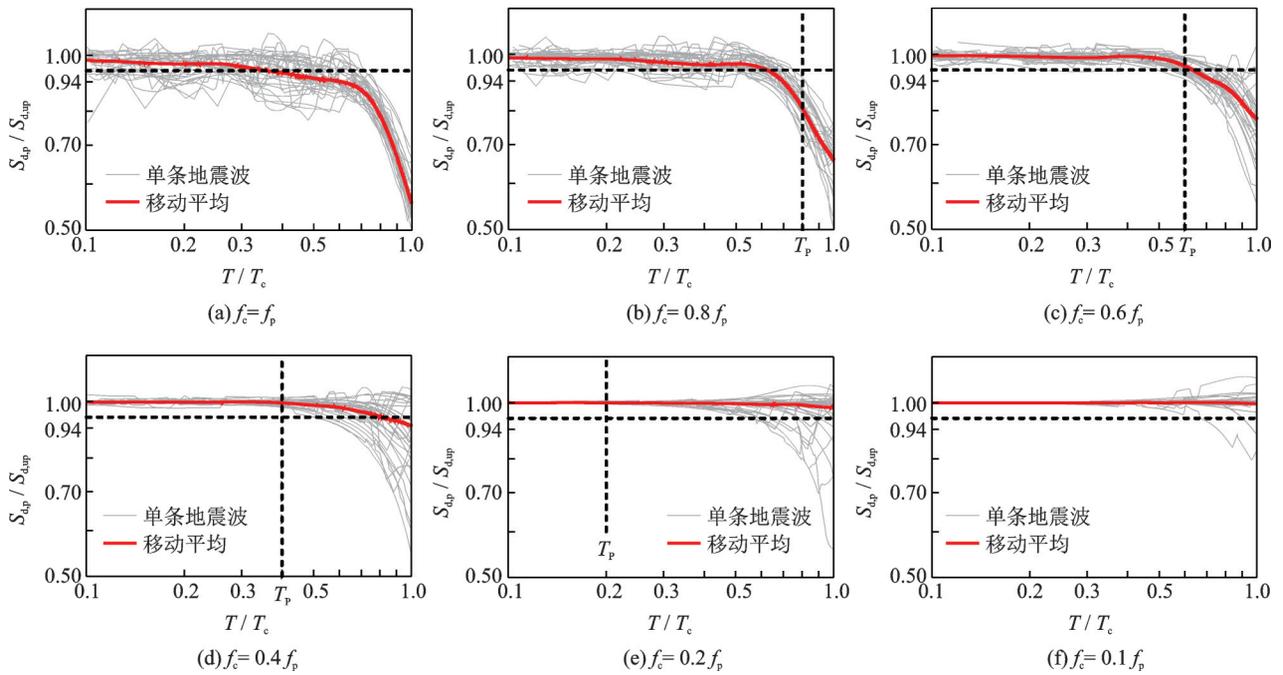


图 3 滤波后与滤波前弹性位移反应谱的比值

Fig.3 Ratio of elastic displacement spectra with/without filtering

为 $f_c = f_p$ 时, 反应谱比值在整个周期段内都有较明显的衰减, 且在脉冲周期处 ($T/T_c = 1$), 反应谱降低近一半。随着相对截止频率的减小, 反应谱的衰减程度也相应降低。当截止频率取 f_c 小于 $0.2f_p$ 时, 即截断周期距脉冲周期超过 5 倍时, 在小于截断周期的范围内, 滤波后与滤波前弹性位移反应谱的比值趋于 1; 且在脉冲周期 T_p 处所有地震动的反应谱

比值接近于 1。在此工况下, 滤波不会改变脉冲的频率成分, 其对弹性反应谱的影响可以忽略。

相对于弹性反应谱而言, 图 4 所示非弹性位移谱的比值在整个周期范围内的变化规律不明显, 且各地震动的结果之间存在较大的离散性。对于单条地震波而言, 滤波后非弹性反应谱比值会在某些局部周期段内急剧增加或减小, 滤波后非弹性反应谱

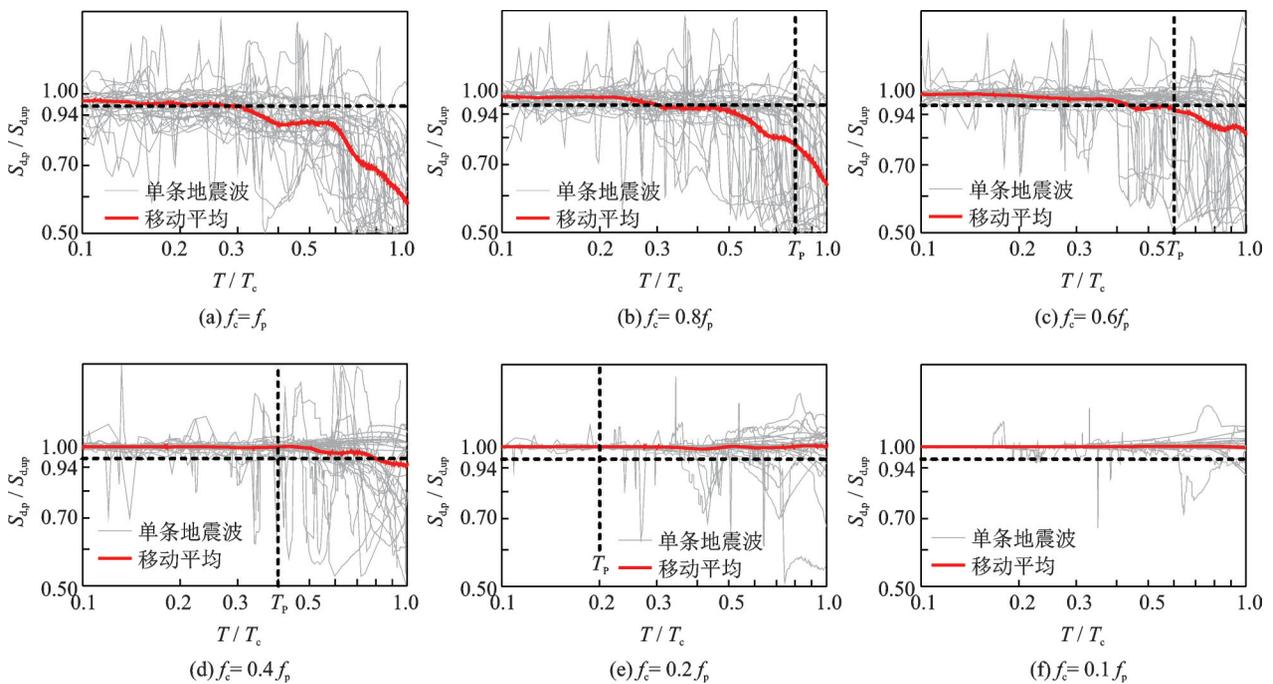


图 4 滤波后与滤波前非弹性位移反应谱的比值 ($\mu = 2$)

Fig.4 Ratio of inelastic displacement spectra with/without filtering ($\mu = 2$)

甚至可以达到滤波前的1.8倍,这种现象表明结构的非线性响应周期非常敏感。对于非弹性位移反应谱,即使当截止频率 f_c 等于 $0.2f_p$ 时,在小于截断周期的范围内依旧有较大离散;但滤波前后反应谱比值的移动平均值以及在脉冲周期处的比值均趋近于1。

图5表示了延性系数分别取 $\mu = 1, 2, 8$ 时,滤波后与滤波前非弹性反应谱比值的移动平均值与截止频率的关系。横坐标为用截断周期标准化的周期 T/T_c ,纵坐标为滤波后与滤波前的非弹性位移反应谱比值 $S_{d,p}/S_{d,up}$ 。从图中可以发现,对于同一截止频率,延性系数越大,滤波前后反应谱的差异性越显著。对于截止频率小于 $0.2f_p$ 的滤波工况,延性系数

增大并不会对反应谱产生更大的影响。表2给出了基于图5(a)弹性反应谱和式(6)计算得到的可用频率范围。

表2 可用频率的范围

Tab.2 The range of usable frequency

截止频率 f_c	η	f_u
f_p	0.36	$2.78 f_p$
$0.8 f_p$	0.61	$1.31 f_p$
$0.6 f_p$	0.63	$0.95 f_p$
$0.4 f_p$	0.80	$0.50 f_p$
$0.2 f_p$	1.00	$0.20 f_p$
$0.1 f_p$	1.00	$0.10 f_p$

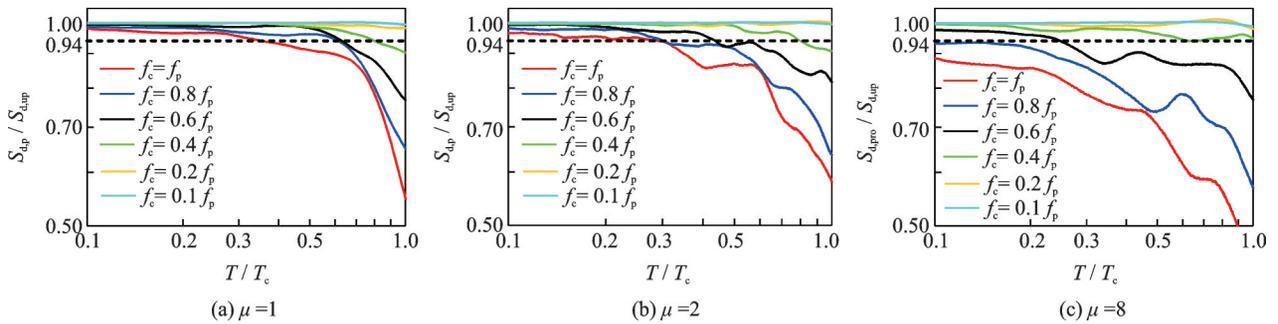


图5 延性系数对非弹性位移反应谱比值的影响

Fig.5 Influence of ductility on the ratio of inelastic displacement spectra with/without filtering

结构进入非线性状态后,其自振周期会延长,非线性结构的周期可由式(7)近似估计^[14]

$$T_{ex} = \sqrt{\mu} T_e \quad (7)$$

其中: T_{ex} 为非线性结构的等价周期; T_e 为弹性结构自振周期。

对于截止频率的选择,PEER数据库建议滤波器通带的低限值应小于感兴趣的频率区段^[14],即 T_{ex} 对应的频率 f_{ex} 应该在可用频率范围内,如式(8)所示

$$f_{ex} > f_u \text{ 或 } T_{ex} < T_u \quad (8)$$

综合式(6)~(8),当地震动记录以某个特定的截止频率 f_c 高通滤波后,使结构的非线性响应不受滤波影响的最大弹性周期满足

$$T_e = \eta T_c / \sqrt{\mu} = \eta / (f_c \sqrt{\mu}) \quad (9)$$

图6表示了当延性系数等于2时,滤波前后非弹性位移反应谱的比值与弹性周期的关系。横坐标为用弹性周期标准化的周期比 T/T_e ,纵坐标为滤波后与滤波前非弹性位移反应谱的比值 $S_{d,p}/S_{d,up}$ 。可以发现,在 T/T_e 小于1的周期段内,所有地震动滤波后与滤波前非弹性位移反应谱比值的移动平均值均大于0.94,即符合可用频率范围的要求。

2.2 等延性位移比谱

等延性位移比谱表示了非弹性位移与弹性位移的比值,在工程应用中,结合弹性位移谱可用于估计非弹性位移^[15]。本研究计算得到了不同滤波工况下的等延性位移比谱。结果显示,相对截止频率越大,滤波前后等延性位移比谱的差异性越大,不同地震动结果的离散性也越大。随着延性系数的增加,短周期内位移比谱的变化程度随之增大。当相对截止频率小于 $0.2f_p$ 时,滤波对位移比谱的影响可以忽略。限于篇幅,结果不再列出。

文献[15-16]指出,近场地震动普遍拥有较高的 V_m/A_m 值,即有较宽的加速度敏感区,较高的 V_m/A_m 值可能会对结构的等延性位移比谱产生较大的影响。 $V_m/A_m > 0.2$ 的地震动的位移比谱大于 $V_m/A_m < 0.2$ 的比谱,且其影响随着延性的增大而增大。图7为各滤波工况下地震动记录的 V_m/A_m ,横坐标0~6分别代表未滤波以及 $f_c = f_p, 0.8f_p, 0.6f_p, 0.4f_p, 0.2f_p, 0.1f_p$ 等7种工况。可以发现,当截止频率 $f_c > 0.2f_p$ 时,滤波会使部分地震动 V_m/A_m 的值降低到0.2以下;当截止频率 $f_c < 0.2f_p$ 时, V_m/A_m 值与滤波前近似

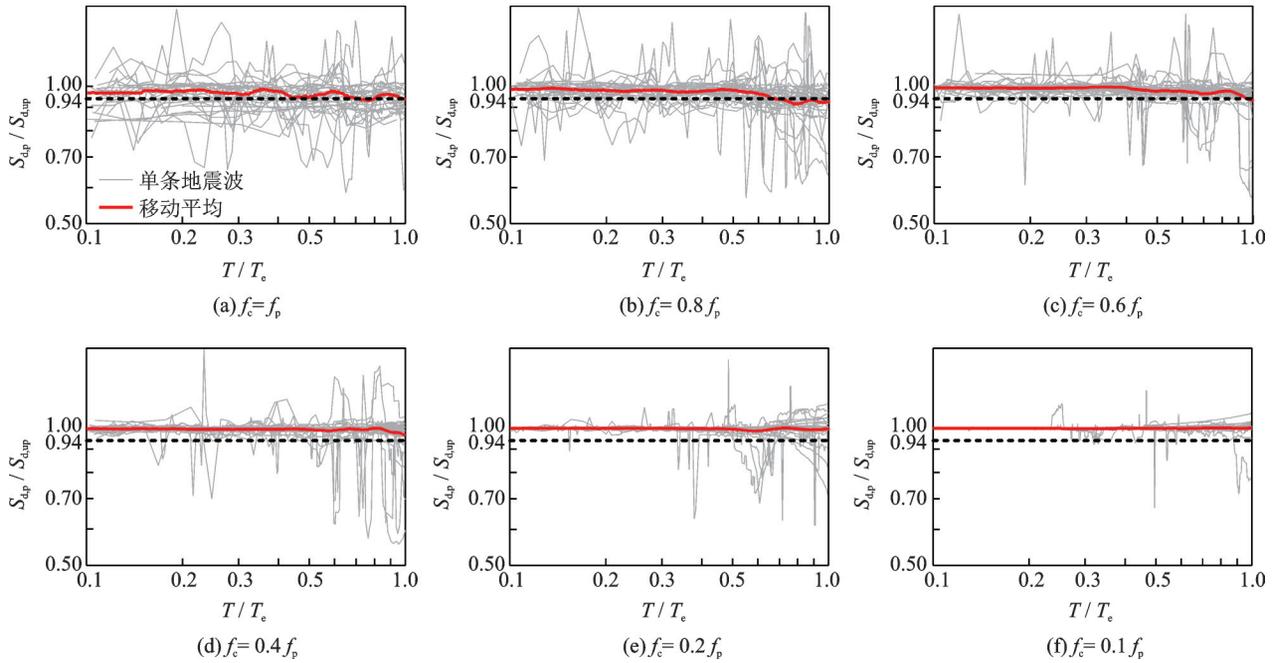


图6 可用周期(频率)范围内的非弹性位移反应谱比值 ($\mu = 2$)

Fig.6 Ratio of inelastic displacement spectra with/without filtering during usable period range ($\mu = 2$)

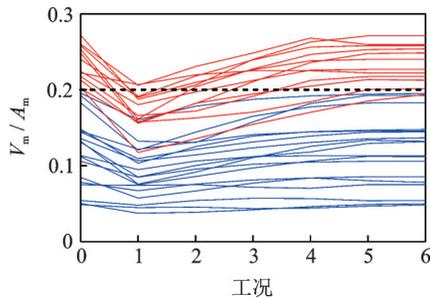


图7 滤波对 V_m/A_m 的影响

Fig.7 Influence of filtering on the value of V_m/A_m

相等。

2.3 等延性强度折减系数谱

基于性能的抗震设计,强度需求和延性需求是结构非线性响应的重要指标。等延性强度折减系数反映了在延性需求保持不变的情况下,非线性变形对结构强度折减的影响^[17]。以1994年Northridge地震Sylmar-Converter Sta站点的脉冲地震动为例,分析滤波引起的强度需求的变化。地震动反应谱中加速度、速度和位移敏感区的周期界限值 T_c 和 T_d 由式(10)和(11)确定

$$T_c = 2\pi \frac{\alpha_V}{\alpha_A} \frac{V_m}{A_m} \quad (10)$$

$$T_d = 2\pi \frac{\alpha_D}{\alpha_V} \frac{D_m}{V_m} \quad (11)$$

其中: $\alpha_A, \alpha_V, \alpha_D$ 分别为加速度、速度和位移的动力放大系数,其值与阻尼比 ξ 相关; D_m 为地震动峰值

位移。

基于滤波前地震动确定谱的加速度、速度和位移敏感区。图8为滤波后强度折减系数谱随截止频率的变化,延性系数 $\mu=2$,阻尼比 ξ 取5%。从图中可以发现,在反应谱的短周期范围, R_μ 趋近于1,即此时没有强度折减;在长周期段内, R_μ 接近于延性系数 μ ^[18]。高通滤波会使速度敏感区和位移敏感区周期段内反应谱发生较明显的变化,会改变强度折减系数值趋于延性系数所对应的长周期值以及谱值大小。较大的滤波截止频率显然会降低长周期结构的强度需求。当截止频率 $f_c = f_p$ 时,甚至会对加速度敏感区内反应谱产生比较大的影响。随着滤波相

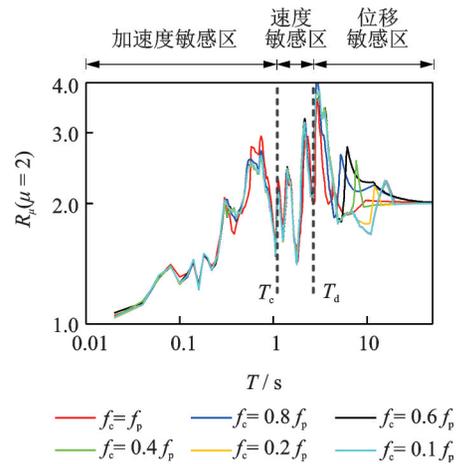


图8 等延性强度折减系数谱

Fig.8 Strength reduction factor spectra of constant ductility factors

对截止频率的逐渐减小,滤波后地震动记录在位移敏感区内长周期段的强度折减系数谱峰值所对应的周期越大。相同地,当截止频率 f_c 小于等于 $0.2 f_p$ 时,滤波对等延性强度折减系数谱的影响极小。

3 能量反应谱

基于地震反应能量的分析,可以充分考虑地震动持时因素以及吸收和耗散能量的过程,这是结构非线性响应研究的重要方法^[19-20]。地震波的能量大小可以采用式(12)计算^[21]

$$E = \int_{t_a}^{t_b} [\dot{u}_g(t)]^2 dt \quad (12)$$

其中: E 为地震动的能量; t_a 和 t_b 分别为地震动记录的起止时间; $\dot{u}_g(t)$ 为地震动的速度时程。

图9表示了地震波能量与截止频率的关系。横坐标为截止频率与脉冲频率的比值 f_c/f_p ,纵坐标为滤波后与滤波前地震动能量的比值 E_p/E_{up} 。当 $f_c/f_p = 0.1$,即截断周期为脉冲周期的10倍时,滤波前后地震动能量几乎没有变化。当 $f_c/f_p = 0.2$ 时,滤波后能量保留了滤波前能量的95%以上。当 $f_c/f_p = 1$ 时,滤波后地震动能量衰减了近一半,验证了脉冲型地震动的长周期速度脉冲包含了地震动中的大部分能量的特征。

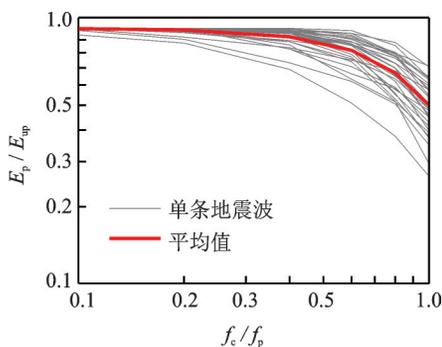


图9 滤波前后地震波能量比值

Fig.9 Energy ratio of ground motions with/without filtering

对于单自由度系统,动力学方程以能量的形式可表示为

$$\int_0^t m \ddot{u} \dot{u} dt + \int_0^t c \dot{u} \dot{u} dt + \int_0^t F(u) \dot{u} dt = \int_0^t (-m \ddot{u}_g) \dot{u} dt \quad (13)$$

其中:等号两端4个积分项分别为结构的动能 E_K 、阻尼耗能 E_D 、变形能($E_S + E_Y$)和地震动输入能量 E_I ,其中 E_S 和 E_Y 分别为弹性变形能和塑性变形能。

在结构振动停止时,结构动能和弹性变形能为0,地震输入能量、塑性变形能和阻尼耗能达到最大

值。能量反应谱反映了输入能的最大值与结构周期的关系,滤波对地震动输入能量的衰减规律以滤波后与滤波前能量谱的比值表示。

如前述非弹性反应谱一样,动能、阻尼耗能、弹性变形能、塑性变形能和地震动输入能等5种能量反应谱滤波后与滤波前的比值情况,在短周期区段内离散性小于长周期段;且在 $f_c = 0.2 f_p$ 滤波工况下滤波前后能量谱变化的移动平均值在小于截断周期的范围内可以忽略,结果不再列出。个别地震动在某个较小的周期段内塑性变形能有急剧放大的效应,放大系数可达1.5倍左右,意味着基于滤波后地震动的结构地震响应分析可能得到更大的非弹性变形。

4 结论

1) 较弹性反应谱而言,非弹性反应谱对滤波的影响更为敏感,地震波滤波前后反应谱比值的离散性更大,且随延性系数的增大而增大。

2) 在截止频率小于 $0.2 f_p$ 时,4种非弹性反应谱在滤波前后的变化微小,其影响可以忽略。

3) 滤波后的非弹性位移谱、地震动输入能量谱等在局部周期段内有急剧放大的现象,在滤波处理时应引起注意。

4) 非弹性位移谱不受滤波影响的最大可用周期与截止频率 f_c 和延性系数 μ 有关。

参 考 文 献

- [1] LIN Yuanzheng, ZONG Zhouhong, TIAN Shizhu, et al. A new baseline correction method for near-fault strong-motion records based on the target final displacement [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 114: 27-37.
- [2] BOORE D M, BOMMER J J. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(2): 93-115.
- [3] 张同宇. 基于芦山地震强震动记录的数据处理技术研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016.
- [4] AKKAR S, BOMMER J J. Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(9): 1145-1165.
- [5] 周继磊,杨迪雄,陈国海. 近断层脉冲型地震动功率谱特性分析[J]. 世界地震工程,2017, 33(1): 20-28.
ZHOU Jilei, YANG Dixiong, CHEN Guohai. Charac-

- teristic analysis of power spectrum for near-fault impulse type ground motion [J]. *World Earthquake Engineering*, 2017, 33(1): 20-28. (in Chinese)
- [6] 蒲武川,薛耀辉,张孟成.高通滤波对近场脉冲型地震动位移反应谱的影响[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(13): 116-124.
PU Wuchuan, XUE Yaohui, ZHANG Mengcheng. The effect of high-pass filter on the displacement spectra of impulsive ground motions [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13): 116-124. (in Chinese)
- [7] BOORE D M, AKKAR S. Effect of causal and acausal filters on elastic and inelastic response spectra [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003, 32(11): 1729-1748.
- [8] 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.
- [9] JONES J, KALKAN E, STEPHENS C, et al. Processing and review interface for strong-motion data (PRISM) - methodology and automated processing, Version 1.0.0 [R]. Menlo Park, California: United States Department of the Interior Geological Survey, 2017: 1-72.
- [10] 徐扬,周正华.强震动观测合作组织关于强震动记录处理和发布的准则与建议及其注解[J]. *国际地震动态*, 2009, 369(9): 28-42.
XU Yang, ZHOU Zhenghua. Guidelines and recommendations for strong-motion record processing and commentary of COSMOS [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2009, 369(9): 28-42. (in Chinese)
- [11] STEPHENS C D, Boore D M. ANSS/NSMP strong-motion record processing and procedures [C] // *Proceedings of COSMOS Invited Workshop on Strong-Motion Record Processing*. California: Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS), 2004: 123-130.
- [12] BOORE D M. On pads and filters: processing strong-motion data [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(2): 745-750.
- [13] ANCHETA T D, DARRAGH R B, STEWART J P, et al. PEER NGA-West2 database [R]. PEER Report No. 2013-03, California: Duarters at the University of Berkeley, 2013: 127-128.
- [14] SEO C Y, SAUSE R. Nonlinear structural response to low-cut filtered ground acceleration records [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2013, 17(8): 1212-1232.
- [15] 翟长海,李爽,谢礼立,等.近场脉冲型地震动位移比谱特征研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(10): 1-5.
ZHAI Changhai, LI Shuang, XIE Lili, et al. Characteristics of displacement ratio spectra for near-field ground motions [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(10): 1-5. (in Chinese)
- [16] 汪梦甫,汪帆辉,唐毅.近场脉冲型地震对结构非弹性位移比谱的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(6): 9-15.
WANG Mengfu, WANG Zhihui, TANG Yi. Influence of near-fault pulse-type ground motions on inelastic displacement ratio spectra [J]. *Journal of Hunan University (Nature Science)*, 2014, 41(6): 9-15. (in Chinese)
- [17] 张海明,易伟建.近场地震作用下单自由度结构强度折减系数谱[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(10): 53-59.
ZHANG Haiming, YI Weijian. The spectrum of strength reduction factor for SDOF systems under near-field ground motions [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(10): 53-59. (in Chinese)
- [18] CHOPRA A K. *结构动力学:理论及其在地震工程中的应用* [M]. 谢礼立,译. 4版. 北京:高等教育出版社, 2016: 216-221.
- [19] 公茂盛.地震动能量衰减规律的研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2002.
- [20] 滕军,董志君,容柏生,等.弹性单自由度体系能量反应谱研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(S1): 129-133.
TENG Jun, DONG Zhijun, RONG Baisheng, et al. Energy spectra of SDOF systems [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(S1): 129-133. (in Chinese)
- [21] LIAO W I, LOH C H, WAN S. Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions [J]. *Structural Design of Tall & Special Buildings*, 2001, 10(3): 219-229.



第一作者简介:蒲武川,男,1980年3月生,博士、副教授。主要研究方向为结构抗震与减震控制等。曾发表《Influence of high-pass filtering of near-fault earthquake record on the responses of base-isolated building》(《Soil Dynamics and Earthquake Engineering》2020, Vol.135)等论文。

E-mail: puwuchuan@whut.edu.cn