文章编号: 1000-4750(2022)Suppl-0320-10

强震动记录的数据处理流程:去噪滤波

姚鑫鑫1,任叶飞1,岸田忠大2,3,温瑞智1,王宏伟1,冀 昆1

(1.中国地震局工程力学研究所,黑龙江,哈尔滨150080; 2.哈利法大学土木与环境工程系,阿联酋,阿布扎比127788;3.加州大学洛杉矶分校土木与环境工程学院,美国,洛杉矶90095)

摘 要: 强震动记录一直以来被用于工程结构弹塑性时程分析的地震动输入,其由仪器观测获得,需在使用前进行必要的数据处理工作。中国台网目前已累积了大量强震动观测记录,但始终缺乏标准化的数据处理流程,给使用者造成了诸多不便,不能最大程度发挥其科学应用价值。该文针对我国观测数据现状,提出了一套完整的面向工程应用的强震动记录数据处理流程,给出了高通滤波截止频率的选取原则,包括:记录的傅里叶振幅谱低频段须符合 w² 震源模型、信噪比须大于 3、确保与物理分辨率一致。研究了因果滤波与非因果滤波对记录时程的影响,结果表明:这两种滤波方式具有各自特性,因果滤波会引起记录相变、而非因果滤波则会引起信号前干扰震动;针对芦山地震数据集及 2017 年部分观测记录,研究了这两种滤波方式对伪加速度反应谱(PSA)的影响,结果表明因果滤波引起的相变会对有效周期范围内的 PSA 造成计算偏差,因此建议面向工程应用的强震动记录选用非因果滤波方式。此项工作有助于指导和规范强震动记录的合理使用。 关键词:强震动记录;数据处理流程;高通滤波截止频率;因果滤波;非因果滤波

THE PROCEDURE OF FILTERING THE STRONG MOTION RECORD: DENOISING AND FILTERING

YAO Xin-xin¹, REN Ye-fei¹, KISHIDA Tadahiro^{2,3}, WEN Rui-zhi¹, WANG Hong-wei¹, JI Kun¹

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

2. Khalifa University, Department of Civil Infrastructure and Environmental Engineering, Abu Dhabi, 127788, UAE;

3. University of California, Department of Civil and Environmental Engineering, Los Angeles 90095, USA)

Abstract: Strong motion records of ground have been used as the ground motion input for the elastic-plastic time series analysis of engineering structures. It requires necessary data processing before used, as they are obtained by instrumental observations. Many strong motion records of ground have been accumulated in China, but there is a lack of standardized procedure of data processing, causing some inconveniences to users and devaluating their scientific applications. A complete procedure of data processing for the strong motion record of ground is proposed, which will be particularly used in engineering practice. Three principles for selecting the cut-off frequency of high-pass filtering are suggested, including that the low-frequency Fourier amplitude spectrum must conform to the w^2 source model, that the signal-to-noise ratio must be greater than 3, and that the physical resolution keeps consistent. The effects of causal and acausal filtering on the recorded time series are investigated. The results show that these two approaches have their own characteristics, causal filtering causes phase shift and

收稿日期: 2021-05-12; 修改日期: 2022-02-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0115700);黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2019E036);国家自然科学基金项目(51878632, 51808514);黑龙江省头雁行动计划项目

通讯作者:任叶飞(1983-),男,江苏人,研究员,博士,主要从事工程地震相关研究(E-mail: renyefei@iem.net.cn).

作者简介:姚鑫鑫(1994-), 女,吉林人,博士生,主要从事强震动数据处理研究(E-mail: yaoxinxiniem@126.com);

岸田忠大 (1976-), 男, 日本人,教授,博士,主要从事工程地震相关研究 (E-mail: tadahiro.kishida@ku.ac.ae);

温瑞智 (1968--), 男, 山东人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事工程地震相关研究 (E-mail: ruizhi@iem.ac.cn);

王宏伟 (1990-), 男, 山东人, 副研究员, 博士, 主要从事地震动特征及预测相关研究 (E-mail: whw1990413@163.com);

冀 昆 (1990一),男,山西人,副研究员,博士,主要从事工程抗震地震动输入相关研究 (E-mail: jikun@iem.ac.cn).

⁽C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

acausal filtering causes interference vibration before signal arrives. The effects of causal and acausal filtering on the pseudo acceleration response spectrum are investigated using data collected in Lushan earthquake in 2013 together with some data recorded in 2017. It shows that the phase shift caused by causal filtering can cause bias in the calculation of PSA in the effective period range. Thusly, it is recommended to use acausal filtering for strong motion records used in engineering practice. It could help to guide the use of strong motion records of ground in an appropriate way.

Key words: strong motion record; data processing flowchart; cut-off frequency of high-pass filter; causal filtering; acausal filtering

强震动记录是地震工程领域科学研究和工程 实践的重要基础数据,对记录进行科学合理的数 据处理工作是获得正确研究分析结果的前提,这 在场地效应分析^[1]、地震动衰减关系研究^[2]、结构 设计和抗震性能评估^[3-4]、抗震韧性评估^[5]等诸多 工作中是不和或缺的关键环节之一;对于结构弹 塑性动力时程分析,特别是在高层,大坝,桥梁 等长周期结构设计中,输入合理的天然地震动可 以有效地降低分析结果中的不确定性^[6-7]。但是, 存在于数字强震动加速度记录中的微小基线偏差 和噪声会产生不符合实际物理过程的速度和位移 时程偏移,不满足工程输入和研究分析需求,因 此在使用前有必要进行合理的数据处理。

针对此问题,世界各国都结合各自需求给出 了相应的方法和流程。美国 PEER 强震动数据库 在 NGA 项目支持下研究并提供了适用于工程分析 的数据处理流程,即加速度时程移除仪器响应和 零线偏移后,再经人工识别高、低通截止频率进 行滤波移除噪声干扰,通过位移时程判断处理结 果是否恰当^[8]; 欧洲地震动参考数据库 (RESORCE) 提供的处理流程其核心步骤包括:对加速度时程 进行零线调整后,经4阶非因果滤波器滤波,多 项式拟合滤波后位移时程基线,用滤波后加速度 扣除基线的二阶导数作为最终处理结果[9];智利强 震动数据库对模拟记录移除仪器响应,对所有记 录判断触发类型,对正常触发和后触发记录分别 进行不同方式的渐变趋零处理 (Taper) 再计算傅里叶振 幅谱,随后的滤波处理流程同 RESORCE 相似^[10]; 欧洲强震动工程数据库 (ESM)^[11] 及意大利强震动 数据库 (ITACA)^[12-13] 提出的数据处理流程同上述 相比,调整了零线校正方式,渐变趋零长度,及 滤波阶数等数据处理参数,在获取滤波加速度时 程后,增加了后处理环节。可以说,大部分国家 和地区在发布强震动记录前,都使用特定的数据

处理流程对其进行统一处理,并计算地震动强度 指标 IM 参数服务于各领域研究。然而,我国数字 强震动观测起步较晚,至今还未建立完整的强震 动记录数据处理流程,虽获取了大批珍贵的强震 动记录(在汶川地震、芦山地震中),但仅向公众 发布初步处理(仅作零线调整)后的记录,极大地 限制了其应用灵活性,使用者对于如何处理数据 无从下手,往往刻意回避而采用他国记录,亦或 根据各自理解进行简单处理。

因此,为充分发挥我国强震动记录的科学作 用,为工程应用服务提供统一标准处理的记录, 本文考虑我国强震动记录数据积累现状,提出了 面向工程应用的数据处理流程,着重介绍了强震 动记录滤波处理模块中的关键技术环节,给出了 高通滤波截止频率选取原则和截取标准,通过示 例比较了因果、非因果滤波方式对数据处理结果 的影响,给出了其适用性建议。该项研究一方面 将促进强震动数据的推广应用,还将为我国强震 动 Flatfile 建设提供技术支撑。

1 强震动记录数据处理流程

随着我国强震动记录数量的增加和质量的提高,随之而来对记录整理和处理分析的需求也越发突出。为消除观测数据中存在的背景噪声、调整基线偏差,本文提出了一套完整的数据处理流程(图1所示),共分为3个处理模块:① 信噪比计算模块,包含P 波到时和S 波到时拾取、信号窗和噪声窗截取、以及信噪比计算;② 强震动记录滤波处理模块,包括详细的滤波处理主要步骤,高通和低通滤波截止频率(*f*_{HP} 和 *f*_{LP})选取原则,高通滤波截止频率合理性判断方法,滤波结果满意度评价细则;③ 数据输出模块,根据用户需求,提供了2种输出模式,第一种是满足用户兼容性需求的滤波后处理输出,第二种是用户直接使用的记录时程和 IM 参数输出。





强震动记录在经过三个模块处理前,需进行 零线调整以确保后续计算的准确性,常用的方法 包括:扣除事前 20 s 噪声的平均值、扣除全时程 的平均值以及扣除经多项式拟合全时程记录得到 的实际零线[14]。调整后的记录进入信噪比计算模 块,若记录存在噪声窗则经此模块获取信噪比 (SNR),将其用作高通滤波截止频率的选取条件之 一,否则跳过此模块。此后记录进入滤波处理模 块,最先进行的渐变趋零和时程序列补零处理会 切断有限数据傅里叶变换的环状效应,获得更接 近实际的傅里叶振幅谱 (FAS)。根据 fup 截取原则 及截取合理性判断方法确定最佳的 fup。再通过 frp 选取的三个原则,即 SNR 大于 3、低于 80% 的 奈奎斯特频率、FAS 高频开始出现平台或坡峰 段,来确定最佳 fip。由于低通滤波频率往往取值 较大(例如,80Hz),对IM计算影响较小,因此 可依赖个人主观判断,不必过多关注。

将加速度时程采用选定的高低通截止频率经 4 阶非因果滤波器滤波后, 积分获取速度和位移 时程,判断滤波结果是否满意,若不满意则返回 重新选择 fup。经前序模块处理完的数据结果,考 虑用户的需求不同,在输出模块给出了2种方式 的数据输出。由于滤波模块中对加速度序列的补 零处理,因此有两种方式移除输出时程中的零序 列: 第一种, 在记录未移除补零序列时, 计算所 需速度时程、位移时程和 IM 参数,输出时自动移 除零序列至原始记录长度,此方式用户可直接使 用数据,无需额外处理,较为方便,但是若用户 自行使用输出的加速度时程计算 IM 参数,则无法 获得与流程输出相同的结果,不满足数据兼容 性; 第二种,将输出的滤波加速度记录移除补零 序列后,应用后处理子流程计算其他所需参数, 可有效解决数据兼容性问题。注:本文仅详细介 绍处理流程中的核心—强震动记录滤波处理模块。

2 因果和非因果滤波后信号特征

为比较因果滤波和非因果滤波方式对信号特征的影响,本文构造了图 2(a) 所示的脉冲信号, 对信号首、尾补零后在频域下进行了 5 个截止频 率的高通因果滤波 (频响见式 (1)),同等情况下进 行高通非因果滤波 (频响见式 (2)),其中 n 为滤波 阶数, f_c 为滤波截止频率。对比两种方式处理后的 脉冲信号幅值及相位变化情况。 因果滤波之后的振幅如图 2(b) 所示,清楚可见,经不同 *f*_{HP} 滤波之后脉冲信号波形出现显著差异;图 2(d) 给出了滤波之后信号的相位变化,可见因果滤波导致了严重的相位失真,失真过渡频带随着 *f*_{HP} 的增大而拓宽。











非因果滤波之后的振幅如图 2(c) 所示,与因

果滤波结果不同, 经 5 个 *f*_{HP} 滤波之后的脉冲信号 前均产生了显著的干扰震动,这将导致滤波后的 信号在积分获取位移时程时产生偏差;由图 2(d) 可见,非因果滤波不会引起信号相变。这里,需 要说明的是,由于滤波处理前对时序进行了补零 操作(见图 1 流程),图 2(b)、图 2(c)的时间轴与 图 2(a)表现的并不一致。由于因果滤波不会引 起信号前的干扰震动,所以在滤波处理模块(见 图 1)中先对记录进行因果滤波,以便于通过位移 时程 P 波到时前的波形判断噪声是否被完全过 滤掉,确定选取的*f*_{HP} 是否合理(后文通过实例 叙述)。

为探究滤波方式对实际地震动记录的影响, 本文选用芦山主震中获取的具有完整S波震相的 112组强震动记录(每组含3个分量),以及 2017年四川省台站记录到的125组记录,共计 237组,研究两种滤波方式在相同*f*_{HP}滤波处理后 的记录时程特征。图3为051HLY130420080246 南北向记录及其局部放大时程,以此为例对比经 因果和非因果滤波后,加速度、速度和位移时程 与原时程的差别。结果显示,若不考虑速度和位 移时程存在的基线偏移情况,非因果滤波后的时



图 3 典型记录经因果和非因果滤波后加速度、速度和位移时程比较 (右图为左图阴影区域的局部放大) Fig. 3 Comparisons of acceleration, velocity and displacement time-series of a typical record processing by causal and acausal filtering (right figure represents a local zoom-in picture)

程与原时程高度吻合,而因果滤波后的时程与原 时程差异明显。

为分析这一影响在滤波处理过程中的普遍 性,本文首先针对上述所选记录按照图1给出的 流程确定各自合适的*f*_{HP},再对每个记录3个分量 分别进行因果和非因果滤波处理,计算滤波后加 速度时程与原始时程的相关系数,结果如图4所 示。图中可见,非因果滤波下加速度时程3个分 量的相关系数分布都集中于数值1,且明显高于因 果滤波情况下的结果,说明其相关性相对更强。 对于速度时程,相关系数值虽不及加速度时程分 布集中,但也明显可以看出非因果滤波结果大部



分接近数值1且优于因果滤波结果。这里需要解释的是,图中位移时程的相关性表现并不理想, 主要原因是原始时程由于噪声的干扰导致位移时 程基线偏移,而滤波处理会消除基线偏移,因而 滤波前、后位移时程的相关性会较差,但图中也 可见非因果滤波下的相关性还是要高于因果滤波 下的结果。

上述脉冲信号和实际地震动信号的处理结果 均表明,使用因果滤波方式会产生相位偏移,降 低了滤波后的时程与原时程的相关程度,这将对 于 IM 参数计算产生一定影响(后文将作进一步分 析讨论);而非因果滤波尽管会在信号之前产生干 扰震动,但这种干扰较小,显然在工程可接受的 范围之内,工程应用更多关注的是由记录计算得 到的 IM 参数。因此,相比之下,非因果滤波更适 用于面向工程应用的数据处理过程。

因果滤波虽引起了相变,但不会在地震信号 初至前的噪声段产生干扰信号(图 2(b)所示),这 对于信号初至时间提取以及噪声清除判断都远优 于非因果滤波。为更好地体现其在这方面的优 势,本文依旧针对上述实际强震动记录,比较其 滤波前后噪声段位移时程(图 5(a)所示),以及滤 波前后 P 波初至和 S 波初至时间(图 5(b)、图 5(c) 所示)。滤波前对加速度时程应用长短窗平均法拾 取 P 波到时,Husid 函数拾取 S 波到时,经人工检 查后分别以虚线形式标注于图 5(a)中。从图 5(b)



Fig. 5 Comparison of displacement time-series and P-wave and S-wave onsets of a typical record processing by causal and acausal filtering

局部放大的位移时程可知,由于非因果滤波引起 的信号前干扰震动,识别的 P 波到时较原始记录 有所提前,而采用因果滤波则不会出现此现象。 因此,如果对于 P 波到时较为注重的研究 (例如, 地震预警),若采用非因果滤波处理强震动记录, 则会导致错误的研究结果。这种情况下,建议采 用因果滤波,因为即使其会产生相变,也不会对 地震预警产生影响。图 5(c)显示,无论是因果滤 波还是非因果滤波,对 S 波到时的识别不产生显 著影响。

3 f_{HP} 选取原则及合理性判别

研究表明, 地震动在频域内通常情况下应符 合 w² 的震源模型^[15]:

$$S(f) = (2\pi f)^2 \cdot \frac{R_{\Theta\Phi}VF}{4\pi\rho\beta^3 R_0} \cdot M_0 \cdot \frac{1}{1 + (f/f_c)^2}$$
(3)

式中: S(f) 为加速度震源谱; $R_{\Theta\Phi}$ 为辐射模式因 子; V为地震波水平分量含剪切波能量的比例; F为半空间表面放大; ρ 为震源处介质密度; β 为 剪切波速; R_0 为参考距离; M_0 为地震矩; f_c 为震 源拐角频率。当 $f < f_c$ 时,式 (3) 可以表示为:

$$S(f) = C \cdot f^2 \tag{4}$$

其中, C表示常数。对其两端同时取对数得到:

$$\ln S(f) = 2\ln f + \ln C \tag{5}$$

即说明观测记录的傅里叶振幅谱在低频段与频率 在对数坐标下满足斜率为2的线性相关,这正是 选取高通滤波截止频率的关键判断条件之一: fur 选取的第二个判断条件是,对于存在噪声窗的 记录,其加速度时程的 FAS 与噪声的 FAS 之比, 即信噪比 SNR 须大于 3,以保证记录含有足够强 的地震信号;此外,还需考虑物理分辨率。在数 字信号处理中,物理分辨率指在谱分析中将信号 X(n) 中两个靠得很近的谱峰仍然能保持分辨的能 力,以 Δf 表示, $\Delta f = f_s/M$,其中, f_s 为采样频率, M为数据的实际样点数;计算分辨率指在使用离 散傅里叶变换 (DFT) 时,在频率轴上的所能得到 的最小频率间隔16。本文采用快速傅里叶变换计 算 FAS 时, 需先进行时程序列的补零操作, 无形 中增加了 M 值, 使得Δf 变小, 出现了没有物理意 义的 FAS(频率低于物理分辨率),因此在选取 f_{HP}时也要考虑物理分辨率。

综上所述,选取高通滤波截止频率的3条原

则为:

1) FAS 低频段符合 w² 震源模型;

2) SNR 大于 3;

3) 满足物理分辨率。

以051LDL170104231430 东西向记录为例,通过 原则3、1、2确定的*f*_{HP}分别为0.022 Hz、0.252 Hz、 0.574 Hz、(图 6(a)所示)。如果选择*f*_{HP}=0.252 Hz 进行因果滤波,通过位移时程可以发现低频噪声 并未滤除干净(图 6(b));而选择*f*_{HP}=0.574 Hz进行 因果滤波后,P波到时前位移时程几乎全为0 (图 6(c)),表明噪声已基本被消除,高通滤波截止 频率选取合理,这也是滤波处理模块中选定*f*_{HP}后 判断P波到时前位移时程是否合理环节(见图 1)。 对于无噪声窗的记录,以051HSS170930141437 南





北向记录为例,通过原则 3、1 确定的 f_{HP} 分别 为 0.024 Hz、0.117 Hz(图 7(a) 所示)。选定 f_{HP}= 0.117 Hz,接下来执行判断 S 波到时前位移时程是 否合理步骤 (见图 1),采用不合理的 f_{HP} 进行因果 滤波后,从视觉上可见 P 波段含有长周期成分 (图 7(b) 所示),考虑到 P 波多为高频信号,可以判断此时 低频噪声没有完全被滤除;通过不断尝试增加 f_{HP} 值,重复此过程,确定合理的 f_{HP} 为 0.559 Hz, 因果滤波后的 P 波段位移时程趋于合理 (图 7(c) 所 示),噪声基本被消除。





需要说明的是,上述无论是通过噪声的位移时程还是 P 的位移时程判断选取的 *f*_{HP} 是否合理,都存在主观经验,结果也因人而异。由此也说明,强震动记录的数据处理工作需要逐条记录进

行人工干预,通常也以权威机构发布的结果为准 (例如美国 PEER、欧洲 RESORCE 等)。

4 因果和非因果滤波对 PSA 值影响

根据图1给出的流程,在确定合理的fm和 fup 之后,选择非因果滤波方式对记录重新进行滤 波处理。原因是因果滤波会产生相变 (如图2所 示),从而可能对 IM 参数计算产生一定影响。为 验证这一猜想,仍以图 3 记录为例,通过上述 fm 的选取原则确定其合理值为 0.19 Hz,本文同时考 虑了其他四个高通滤波截止频率 (0.1 Hz、0.15 Hz、 0.3 Hz、0.4 Hz)分别进行两种方式滤波后,计算 滤波前后 5% 阻尼比的伪加速度反应谱 (PSA),如 图 8 所示。图中可见,非因果滤波下,中短周期 的 PSA 不受 fur 影响,长周期段由于信号被滤除 以及滤波过渡带的存在, PSA 因 fup 不同而有所差 异;因果滤波结果显示,选取不同的fm 会引起短 周期 PSA 较原始记录出现不同程度偏差,证实了 因果滤波引起的相变对 PSA 计算有所影响,因此 宜采用非因果滤波处理。



拟加速度反应谱对比

Fig. 8 Comparison of the pseudo spectral accelerations of a typical record before and after its causal and acausal filtering

为定量比较因果滤波和非因果滤波对 PSA 的 影响程度,图 9 给出第 2 节选用的数据集记录经 两种方式滤波后 PSA 与滤波前 PSA 的对数差,用 以量化滤波前后 PSA之间差异。每个记录的 *f*_{HP} 都通过上述原则确定合理值。

由于滤波过渡带的存在,滤波后记录的 PSA 最大有效周期(这里用 T_{max} 表示)并非是 1/f_{HP}。 Ancheta 等学者^[17]在对 NGA-West2 数据库记录进 行处理时提出最大有效周期须考虑 1.5 的比例因 子,即:



g. 9 Differences of pseudo spectral accelerations on a logarithmic scale between original and causal acausal filtered records in the dataset

$$T_{\max} = \frac{1}{1.5 f_{\rm HP}} \tag{6}$$

效周期范围取值过大。

这个因子的取值取决于滤波阶数以及滤波方 式,鉴于本文给出流程中采用的滤波阶数和滤波 方式与其一致,同样采用式(6)确定各记录的*T*_{max}。 因此,图9仅给出了有效周期范围内的滤波前后 PSA 对数差,图中也可见不同记录的*T*_{max}有所差 异,图中还给出了均值和标准差。

结果显示,相比于因果滤波非因果滤波下的 均值曲线更趋于0值,同时标准差也非常小,且 明显小于因果滤波的结果;而因果滤波后的PSA 较滤波前变化明显,说明因果滤波对PSA的影响 不仅是图8所示个体现象,而是针对大部分记录 的普通现象。综合上述分析,在强震动记录数据 处理流程中,在确定合理的f_{HP}和f_{LP}之后,本文 推荐优先采用非因果方式的滤波处理,以确保滤 波不致对PSA产生较大影响。需要说明的是,图9 中显示个别记录在非因果滤波后的PSA 较原始记 录也有明显偏差,主要出现在周期接近 T_{max} 位 置,这是因为滤波过渡带的存在,1.5 的比例因子 对个别记录还不能完全覆盖这个过渡带,导致有

5 结论

针对我国强震动记录数据处理尚未建立统一 的标准流程,本文提出了面向工程应用的强震动 数据处理流程,通过实例解释了强震动记录滤波 处理模块的技术要点,得到结论如下:

(1)给出了高通滤波截止频率选取的3个原则,包括:记录的傅里叶振幅谱低频段须符合 w² 震源模型、信噪比须大于3、确保与物理分辨 率一致。通过示例解释了各原则的意义与作用, 说明了强震动记录的数据处理需要逐条进行人工 操作的原因。

(2)通过实例调查了因果滤波与非因果滤波对 记录时程的影响,结果表明这两种滤波方式具有 各自特性,因果滤波会引起记录相变,而非因果 滤波则会引起信号前干扰震动。

(3) 采用芦山主震记录和 2017 年部分观测记录,研究了两种滤波方式对于拟加速度反应谱 (PSA)的影响。结果表明,因果滤波引起的相变会 对有效周期范围内的 PSA 造成计算偏差,而非因 果滤波的影响则较小。因此建议,面向工程应用 的强震动记录选用非因果滤波方式。

参考文献:

- Ren Yefei, Zhou Ying, Wang Hongwei, Wen Ruizhi. Source characteristics, site effects, and path attenuation from spectral analysis of strong-motion recordings in the 2016 Kaikōura earthquake sequence [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(3): 1757 – 1773.
- [2] Wen Ruizhi, Xu Peibin, Wang Hongwei, Ren Yefei. Single - station standard deviation using strong-motion data from Sichuan region, China [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(4): 2237 – 2247.
- [3] 温瑞智,冀昆,任叶飞.结构时程分析中多层次强震动 记录输入选取研究综述[J].地震工程与工程振动,2019, 39(5):1-18.
 Wen Ruizhi, Ji Kun, Ren Yefei. Review on selection of

strong ground motion input for structural time-history dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(5): 1 - 18. (in Chinese)

[4] 任叶飞, 尹建华, 温瑞智, 冀昆. 结构抗倒塌易损性分析 中地震动输入不确定性影响研究[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 115-125.

Ren Yefei, Yin Jianhua, Wen Ruizhi, Ji Kun. The impact of ground motion inputs on the uncertainty of structural collapse fragility [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 115 – 125. (in Chinese)

[5] 宗成才,冀昆,温瑞智,毕熙荣,张晓瑞.城市燃气管网 三维度抗震韧性定量评估方法[J]. 工程力学, 2021, 38(2):146-156.

Zong Chengcai, Ji Kun, Wen Ruizhi, Bi Xirong, Zhang Xiaorui. Three-dimensional seismic resilience quantification framework for the urban gas network [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(2): 146 – 156. (in Chinese)

- [6] 冀昆. 我国不同抗震设防需求下的强震动记录选取研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
 Ji Kun. Real ground motion selection for multiple levels of seismic demand in China [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2018. (in Chinese)
- [7] 汪维依,冀昆,温瑞智,任叶飞,尹建华.弹塑性时程分 析中地震动输入处理方式影响[J].工程力学,2020,

37(增刊1):42-50,62.

Wang Weiyi, Ji Kun, Wen Ruizhi, Ren Yefei, Yin Jianhua. Impact of strong ground motion 's process procedure on the structural nonlinear time-history analysis [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(Suppl 1): 42 - 50, 62. (in Chinese)

- [8] Chiou B, Darragh R, Gregor N, et al. NGA project strongmotion database [J]. Earthquake Spectra, 2012, 24(1): 23 - 44.
- [9] Akkar S, Sandikkaya M A, Şenyurt, M, et al. Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE) [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(1): 311 – 339.
- [10] Bastias N, Montalva G A. Chile strong ground motion flatfile [J]. Earthquake Spectra, 2015, 32(4): 2549 – 2566.
- [11] Luzi L, Puglia R, Russo E, et al. The engineering strong - motion database: A platform to access Pan -European accelerometric data [J]. Seismological Research Letters, 2016, 87(4): 987 – 997.
- [12] F Pacor, Paolucci R, Ameri G, et al. Italian strong motion records in ITACA: Overview and record processing [J].
 Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 9(6): 1741 – 1759.
- [13] Paolucci R, Pacor F, Puglia R, et al. Record processing in ITACA, the New Italian Strong-Motion Database [M]. Berlin: Springer, Dordrecht, 2011.
- [14] 任叶飞,温瑞智,周宝峰,黄旭涛. 2013年4月20日四川 芦山地震强地面运动三要素特征分析[J]. 地球物理学 报, 2014, 57(6): 1836 - 1846.
 Ren Yefei, Wen Ruizhi, Zhou Baofeng, Huang Xutao. The characteristics of strong ground motion of Lushan earthquake on April 20, 2013 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 1836 - 1846. (in Chinese)
- [15] Goulet C A, Kishida T, Ancheta T D, et al. PEER NGA-East Database [R]. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2014.
- [16] 宋知用. MATLAB数字信号处理85个实用案例精讲:入 门到进阶[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
 Song Zhiyong. MATLAB digital signal processing 85 practical cases: Entry to advanced [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2016. (in Chinese)
- [17] Ancheta T D, Darragh R B, Stewart J P, et al. PEER NGA-West2 database [R]. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.