

文章编号: 1000-4750(2020)Suppl-0042-09

# 弹塑性时程分析中地震动输入处理方式影响

汪维依, 冀 昆, 温瑞智, 任叶飞, 尹建华

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 以包含残余永久位移和(或)速度脉冲的强震动记录为重点分析对象, 针对强震动滤波以及基线校正方式等不同处理方式对结构弹塑性响应的影响展开对比研究。考虑了多项式基线校正, Butterworth 因果滤波, 以及基于残余位移趋势线基线校正等几种常用的强震动记录处理流程和方法。首先以 2018 年台湾花莲地震, 2014 年云南鲁甸地震, 日本 311 地震等代表性的强震动记录为输入, 通过单(多)自由度体系以及典型平面 RC 框架的数值模拟结果, 从结构弹塑性反应谱, 层延性需求, 以及最大层间位移角等方面对比研究了不同记录处理方式的影响。对比结果表明速度脉冲形状与相位是否完整保留对于结构的弹塑性响应有很大影响, 对于包含速度脉冲或(及)永久位移的强震动记录, Butterworth 因果滤波在滤除噪声的同时不仅消除了地表残余永久位移, 同时使速度脉冲形状产生了畸变, 并会传递到最后的弹塑性时程分析结果中, 且对短, 中, 长周期结构均可能产生影响, 该文推荐采用基于基线趋势线校正的处理方法对该类近断层记录进行逐条处理。最后, 对于不含速度脉冲也不含永久位移的强震动记录, 该文中弹塑性时程分析结果表明记录处理方式的影响并不显著。为了尽量消除因果滤波对记录时程相位谱的影响, 我们给出了基于非因果滤波的批量化强震动记录处理流程供参考。

**关键词:** 基线校正; 永久位移; 脉冲地震动; 弹塑性时程分析; 因果滤波

中图分类号: P315.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.S003

## IMPACT OF STRONG GROUND MOTION'S PROCESS PROCEDURE ON THE STRUCTURAL NONLINEAR TIME-HISTORY ANALYSIS

WANG Wei-yi, JI Kun, WEN Rui-zhi, REN Ye-fei, YIN Jian-hua

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In this study, we focus on the records with permanent displacement and (or) velocity pulse and compared the impact of different process procedures on structural responses. We firstly classified the strong ground motion into four categories and picked typical records from different earthquake events, e.g. 2018 Taiwan Hualien earthquake, 2014 Ludian earthquake in Yunnan, and the 2011 Tokyo earthquake in Japan. These records were processed using different filtering and baseline correction process methods. The corresponding SDOF/MDOF inelastic demand and EDPs of RC frames were computed and compared. For the records with pulse-like velocity and (or) permanent displacement, the Butterworth filtering method will significantly distort the pulse portion and erase the permanent displacement, which will further influence structural responses regardless of the structural fundamental periods. For this kind near-fault ground motion, it is recommended to use the baseline trend line correction processing method before structural time-history analysis. For ground motions

收稿日期: 2019-04-29; 修改日期: 2019-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1500801); 国家自然科学基金项目(51908518, 51778589); 中国地震局工程力学研究所所长基金项目(2019B09); 黑龙江省自然科学基金项目(E2017065)

通讯作者: 温瑞智(1968—), 男, 山东人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事工程地震与强震动观测技术研究 (E-mail: ruizhi@iem.ac.cn).

作者简介: 汪维依(1996—), 女, 安徽人, 博士生, 主要从事工程地震动输入研究 (E-mail: wywang1996@163.com);

冀 昆(1990—), 男, 山西人, 助理研究员, 博士, 主要从事工程抗震地震动输入研究 (E-mail: jikun@iem.ac.cn);

任叶飞(1983—), 男, 江苏人, 研究员, 博士, 主要从事工程地震与强震动观测技术研究 (E-mail: renyefei@iem.ac.cn);

尹建华(1984—), 男, 江西人, 博士生, 主要从事工程抗震地震动输入研究 (E-mail: yinjhust@163.com).

without pulse-like velocity and permanent displacement, the process procedure have a negligible effect on structural responses. In order to eliminate the effect of causal filtering on the time-history's phase spectrum, we propose a batch-processing procedure based on a causal Butterworth filtering method.

**Key words:** baseline correction; permanent displacement; pulse-like ground motion; nonlinear time-history analysis; causal filtering method

随着强震动观测技术的进步与时间积累, 美国、日本、欧洲、中东等均历经数十年建立了相对完备且数量可观的记录数据库。我国数字强震动台网自 2008 年全面运行以来, 也获得了大量破坏性地震的强震动记录, 如 2008 年 5 月 12 日汶川 Ms8.0 级地震、2013 年 4 月 20 日芦山 Ms7.0 级地震<sup>[1]</sup>、2014 年 8 月 3 日鲁甸 Ms6.5 级地震等<sup>[2]</sup>。目前已经完全可以不依赖于几条典型强震动记录及人造波作为工程输入 (如 EL-Centro 波、Taft 波、迁安波、天津波等)。随着计算机性能的不断提高, 结构弹塑性建模软、硬件技术的日益成熟, 弹塑性时程分析的应用范围越来越广, 高层、超高层、大跨结构形式的重要工程均明确要求进行时程分析。结构弹塑性动力时程分析中很大一部分不确定性来源于输入地震动的选择上已经成为学术和工程共识<sup>[3]</sup>。

虽然输入地震动选取已有了大量学术研究成果<sup>[4]</sup>, 但是对于强震动记录处理方式对结构弹塑性响应的关注却十分欠缺。作为去除噪声, 保留地震动有效信息的关键环节, 强震动记录处理方式是后续地震工程以及结构工程研究的基础工作<sup>[5]</sup>。工程实践中进行地震动记录输入之前往往不进行处理, 或采用了“约定俗成”的滤波和基线校正手段, 并没有考虑过记录处理方式对最后结构响应的可能影响。而且工程或研究人员往往依赖于包括 Seismosignal 等在内商业软件进行处理, 对其中的技术细节影响并未深究。工程关心的强地震动输入往往来自于较强的破坏性地震, 如汶川地震<sup>[6]</sup>、集集地震<sup>[7]</sup>、日本 311 地震<sup>[8]</sup>等。强震过程中地表的振动、倾斜、破裂均会对记录造成影响, 并影响其积分后的速度-位移时程基线。上述地震事件的近场地震记录往往包含着速度脉冲, 永久位移等不同于普通中远场地震记录的特点。学者针对该问题已提出了诸多强震动记录处理方案, 但是上述研究成果往往局限于记录处理方式本身, 而并没有从工程输入和结构响应的角度对其进行系统分析。

针对上述问题, 本文拟针对强震动滤波以及

基线校正等处理方式对结构弹塑性响应的影响展开研究。以包含残余永久位移和速度脉冲的强震动记录为重点研究对象, 考虑了 Butterworth 因果滤波和基线趋势线校正等多种常用的强震动记录处理流程和方法。以日本 311 地震、2014 云南鲁甸地震、2018 年台湾花莲地震<sup>[9]</sup>等典型强震动记录为算例, 通过单、多自由度体系以及典型平面 RC 框架的数值模拟结果, 从结构弹塑性需求、层延性需求、层间位移角、底部剪力、顶点最大加速度等不同角度探讨不同处理方式对结构弹塑性响应的影响。

## 1 强震动记录处理方式及算例

### 1.1 近断层强震动处理方式

大震近断层地震记录往往包含着速度脉冲、永久位移等, 其处理方式不同于普通中远场地震记录。其中, 近断层脉冲型地震动是指在近断层区域 (通常指断层距小于 20 km~30 km 的区域) 出现的含有强速度脉冲的地震动。该速度脉冲往往自身周期较长, 且蕴含的能量占整个地震动能量的比重很大。多种原因可能导致在近断层区域形成脉冲型地震动。向前方向性效应 (Forward directivity) 和滑冲效应 (Fling step) 是目前普遍认为的两个主要原因。其中, 滑冲效应产生的速度脉冲会伴随明显的地表永久位移。理论上, 强震加速度记录在经过二次积分后可以得到合理的最大地表位移及可能发生的永久位移, 但是由于强震过程中强震仪所在地表因强烈振动而抬升或倾斜, 会导致基线漂移而失真。因此, 在强震数据的处理过程中, 如果难以消除因强烈振动而导致地表倾斜抬升所带来的基线漂移, 则无法获得合理的地表永久位移。

对于强震动记录速度脉冲的识别, 可以通过基线校正后的速度时程来主观判断, 但却缺少定量的方法来判断。本文采用 Baker<sup>[10]</sup> 提出的基于连续小波变换的识别方法识别近断层地震动的速度脉冲, 以确定它是否代表了信号中重要的部分。

确定速度脉冲有两个标准：1) 检验确定地面运动的速度脉冲到达是否比较早(这表明有可能是由于方向性的影响)；2) 地面运动具有较高的峰值速度。一般从震级大于 5.5，震中距小于 30 km，PGV 大于 30 cm/s 的地震动中进行判断提取速度脉冲。Baker<sup>[10]</sup> 提出了脉冲因子的概念，要求脉冲因子大于 0.85，这样方可认为该地震动为脉冲型地震动。工程上比较感兴趣的速度脉冲周期也比较容易确定。判断强震动记录永久位移是否存在，一般通过判断位移时程的基线漂移情况和与附近 GPS 台站的同震位移进行对比实现。

影响基线偏移的因素主要有三个方面：环境背景噪声、强震仪、地震动。从强震仪角度来说，从模拟记录阶段发展到了现在数字记录阶段。数字强震仪克服了模拟强震仪的弱点，可以用其得到的强震动记录来估算永久位移。环境背景噪声一般通过 Butterworth 因果滤波进行消除，但是在滤除环境噪声的同时也会对最后的速度脉冲和永久位移造成极大的扭曲。从基线校正方法来说，在需要考虑地面永久位移时，选用基线拟合技术，可以使残余位移得到恢复。目前的校正方法大致分为两类：基于趋势线拟合的分段方法<sup>[11-13]</sup>；基于小波变换的方法<sup>[14]</sup>。本文主要讨论实际应用中操作性更强的趋势线分段拟合方法。

Iwan 等<sup>[11]</sup> 提出了基于速度的两段式加速度校正方法以获得合理的速度和位移结果的研究，加速度噪音模型如图 1 所示，假定引起位移漂移失真的原因在于记录中存在着加速度偏移噪音，并且这种偏移噪音可以分为两段， $t_1$  和  $t_2$  分别取为首次和最后一次超过 50 cm/s<sup>2</sup> 时刻； $t_1$  取第 1 个明显的加速度脉冲出现时刻，而  $t_2$  的值要使得最终位错值最小，如果这样求出的  $t_2$  值小于  $t_1$  时，则表明存在永久位移，应使用第 1 种方法。对尾端直接积分得到速度进行线性拟合，该拟合直线的斜率值即为  $a_f$ ，再用  $t_2$  时刻的速度值除以  $(t_2 - t_1)$  即可得到  $a_m$ 。再从未校正加速度分段减去计算出的噪音值，得到校正加速度值，对其进行积分就得到速度及位移。Iwan 等人<sup>[11]</sup> 奠定了使用数字强震仪的记录来估算同震位移的基本方法。如果加速度记录中没有基线漂移，则经过一次积分后的速度时程在事件前后均应在零线附近，而再次积分后的位移时程则表现为斜坡函数。该方法提供了高效校正基线漂移的基本思路，下文称之为

Iwan 方法。

Boore<sup>[12]</sup> 对  $t_1$  和  $t_2$  的选择方式提出改进，限定  $0 < t_1 < t_2 < T$ ，建议  $t_1$  和  $t_2$  应该满足最后一段速度时程拟合时最终速度为零。Wu Y M 和 Wu C F<sup>[13]</sup> 结合近断层包含永久位移时程的特点，对 Iwan 等<sup>[11]</sup> 和 Boore<sup>[12]</sup> 的方法进一步做出了修改，增加了  $t_3$ ，并引入了尾部平坦性评估函数，他们在前人的研究基础上，沿用双线性基线校正，但使  $t_1$  和  $t_2$  在一定边界内成为自由参数，通过反复尝试和迭代搜索不同的  $t_1$  和  $t_2$ ，确保校正后的位移时程满足斜坡函数。下面简称该方法为 Wu & Wu 方法。

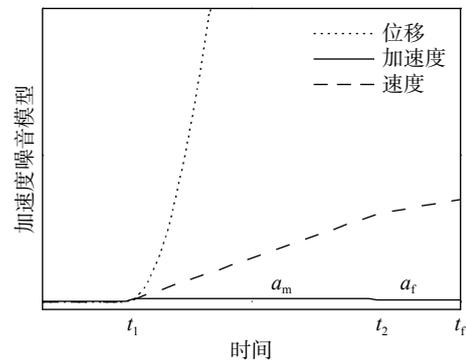


图 1 加速度噪音模型

Fig. 1 Acceleration noise models

## 1.2 算例分析

下面以中国台湾 2018 年 2 月 6 日 Mw6.4 花莲地震中断层距 5.3 km 的 HWA019 台站强震动记录为例说明不同记录处理方式对结果的影响。该地震通过 Baker 小波变换脉冲识别法判断为包含速度脉冲<sup>[15]</sup>，且附近 GPS 台站同震位移表明该台站存在永久位移<sup>[16]</sup>。下面分别采用 IWAN 方法、Wu & Wu 方法、Butterworth 因果滤波方法对 HWA019 台站水平向记录进行处理，对比处理前后的速度和位移时程。对比每条强震动记录的速度时程如图 2 所示，可以看出 Butterworth 因果滤波方法处理后的强震动记录的速度时程形状上与未处理记录相比，形状和幅值改变都很大，NS 方向甚至改变了速度脉冲的极性。其余三种处理方式基本保持了强震动记录的速度脉冲形状。

HWA019 台站两水平方向的强震动记录在不同处理方式下得到的位移时程如图 3 所示。Butterworth 因果滤波方法处理后的强震动记录的残余永久位移基本被完全滤除，而且位移时程曲线的形状与其余方法的差异很大。采用 GPS 同震位移的对比结果表明 Wu & Wu 方法的处理结果最为理想。

未处理的强震动记录出现了位移基线的漂移, IWAN 方法的永久位移识别结果也与同震位移相差较大。

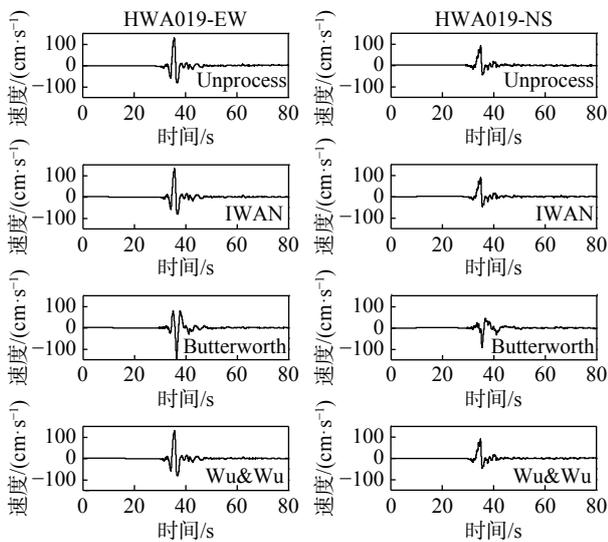


图2 HWA019 台站水平方向强震动记录不同处理方法下的速度时程

Fig. 2 Velocity time history of HWA019 horizontal strong ground motions under different process procedures

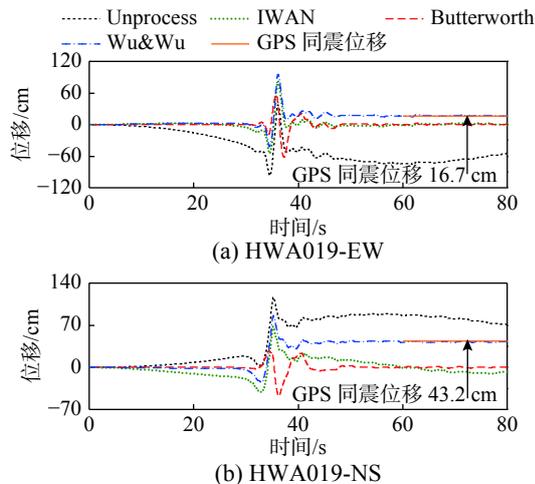


图3 HWA019 台站水平方向强震动记录不同处理方法下的位移时程

Fig. 3 Displacement time history of HWA019 horizontal strong ground motions under different process procedures

我们将强震动记录依据是否包含速度脉冲和永久位移分为四类,如表1所示。共选取了来自花莲地震(HWA014, HWA019 台站), 2014 云南鲁甸地震(053LLT 台站), 2011 年日本 311 地震(AKT006, AKT023, IWT019 台站)中的水平向强震动记录作为不同类型强震动记录输入。所选取台站和地震事件均来自于有关强震动记录处理方法的相关文献中<sup>[8-9,16]</sup>。最后选取了既不包含速度脉冲,也不包含永久位移的 EL-centro 波作为参照组。

表1 四种强震动处理方式及算例

Table 1 Four process procedures of strong ground motion and examples

类型	永久位移	速度脉冲	地震事件
A	包含	包含	花莲地震
B	不包含	包含	云南鲁甸地震
C	包含	不包含	日本311地震
D	不包含	不包含	EL-centro波

## 2 SDOF/MDOF 弹塑性响应分析

限于篇幅,下文仅给出了 HWA019(NS 方向)、053LLT(EW 方向)、AKT023(EW 方向)的结构响应对比结果。其余台站计算结果仅进行一般描述。

### 2.1 SDOF 体系弹塑性需求计算

本文将采用理想弹塑性模型计算 SDOF 延性需求,不考虑刚度退化和强度退化。采用弹塑性位移比,即结构弹塑性最大位移同结构弹性位移的比值( $S_{di}/S_{de}$ )来判断不同自振周期结构的弹塑性需求。作者对四种记录类型的记录分别采用了 Iwan 方法、Wu&Wu 方法、Butterworth 因果滤波方法进行了处理,得到不同强度折减系数  $R=2$ 、 $R=4$ 、 $R=6$  和  $R=8$  下的弹塑性位移响应比谱如图 4 所示。

由图 4 可见,随着强度折减系数的增大, $S_{di}/S_{de}$  的峰值逐渐变大。三种非滤波处理方式下的记录弹塑性位移响应比谱之间的差异可以忽略不计,即使在强度折减系数  $R=8$  时,该结论依然成立。但是采用 Butterworth 因果滤波方法得到的弹塑性位移响应比谱与其余方法均存在较大差异。对于记录类型 A 和 B,在短周期内,滤波方法与非滤波方法的弹塑性位移响应比谱曲线出现交叉;在长周期部分,二者变化趋势趋于稳定,在周期为 7.0 s 之后,二者差别开始下降。对于记录类型 C,随着强度折减系数  $R$  的增大,长周期部分的二者相差比例由 40% 左右增大到 80% 左右,且随着强度折减系数  $R$  的增大,差别更加明显。对于记录类型 D,3 s 以下的中短周期内相对误差并不如其余三种类型那么显著。

### 2.2 MDOF 体系层延性需求计算

分别以 9 层和 14 层的集中质量剪切型多自由度(MDOF)体系作为研究对象,其一阶自振周期分别为 0.9 s 和 1.4 s。每层的层高、质量、刚度和侧向屈服强度为均匀设置。采用了克拉夫刚度退化滞回模型作为本构,应变硬化率为 0.1。分析中不考虑重力二阶几何效应,结构前二阶模态阻尼比取为 0.05。分别考虑剪重比为 0.2 和 0.4 的两种工况。

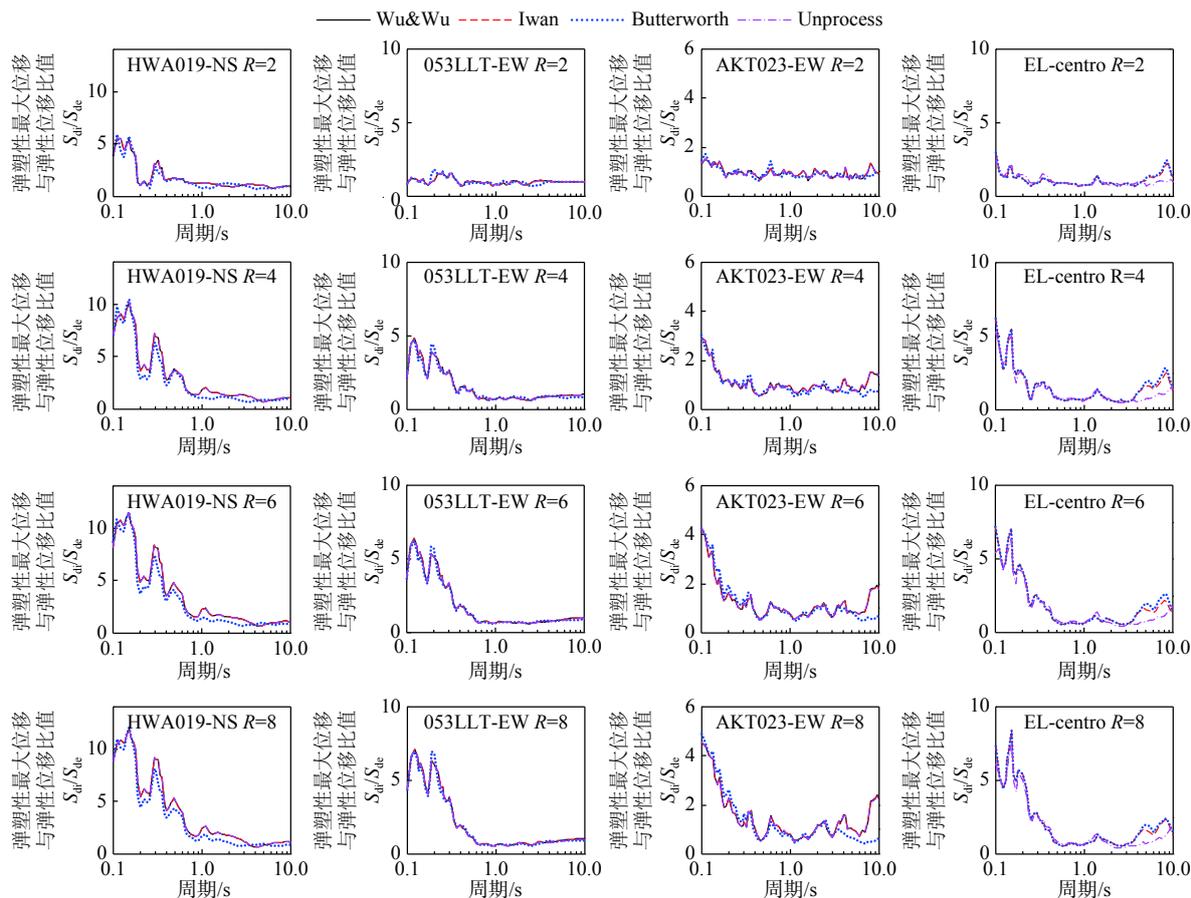


图4 不同记录处理方法下的SDOF的 $S_d/S_{de}$ 结果

Fig. 4  $S_d/S_{de}$  results of SDOFs under different process procedures

由图5可知, Butterworth因果滤波方法得到的强震动记录的层延性需求曲线虽然变化趋势与其余方法以及未处理的结果相仿, 但是仍然在数值上存在明显差异。14层MDOF体系的层延性需求差异要明显大于9层体系的差异, 这可能与其较长的自振周期有关。对比不同剪重比的计算结果发现, 其对最终层延性需求的影响并不显著。此外, 对于不含有速度脉冲的强震动记录, 不论是否包含永久位移, 不同处理方法得到的层延性需求虽然有差异, 但是差异并不如含有速度脉冲的结果差异显著(记录类型C、D)。

### 3 RC框架结构弹塑性响应差异

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规范要求<sup>[17]</sup>, 设计了三层以及十五层两个钢筋混凝土框架结构。结构的平面图、中间一榀框架、梁柱截面尺寸以及配筋如图6所示。首层层高均为4.5 m, 其余层高均为3.3 m, 楼板厚度为120 mm。框架梁、柱和楼板均为现浇, 混凝土等级为C40,

纵筋采用HRB335, 箍筋采用HPB235。框架顶层恒载 $4.0 \text{ kN/m}^2$ , 活载 $2.0 \text{ kN/m}^2$ ; 其余层恒载 $6.0 \text{ kN/m}^2$ , 活载 $2.0 \text{ kN/m}^2$ 。建筑场地均为II类, 抗震设防烈度7度, 设计基本地震加速度 $0.10 \text{ g}$ , 设计地震分组第二组。本文基于OpenSees对其进行数值模拟分析, 其自振周期以及有效质量参与系数如表2所示。由于结构平面对称, 故只选用其中一榀框架进行数值分析。混凝土本构关系采用concrete02, 钢筋本构关系采用steel02。

由图7和图8中三层和十五层RC框架的计算对比结果可以看出, 对含有速度脉冲和永久位移的记录类型A, 采用Butterworth因果滤波方法处理得到的最大层间位移角, 和其余方法相比会显著低估结果。底部剪力和顶点最大加速度的计算结果也明显低于其余处理方法。对于仅含有速度脉冲的记录类型B, 三层结构的最大层间位移角等结构响应也存在较明显差异。对于仅含有永久位移的记录类型C以及普通的记录类型D, 对于三层结构来说, 四种处理方法得到的最大层间位

移角相差并不大，底部剪力和顶点最大加速度的差别也并不显著。从上述对比结果来看，含有速度脉冲的强震动记录不推荐采用 Butterworth 因果

滤波方法处理分析，否则会严重低估结果。而对不包含速度脉冲的强震动记录，不同的处理方式对最后结构响应结果造成影响比较有限。

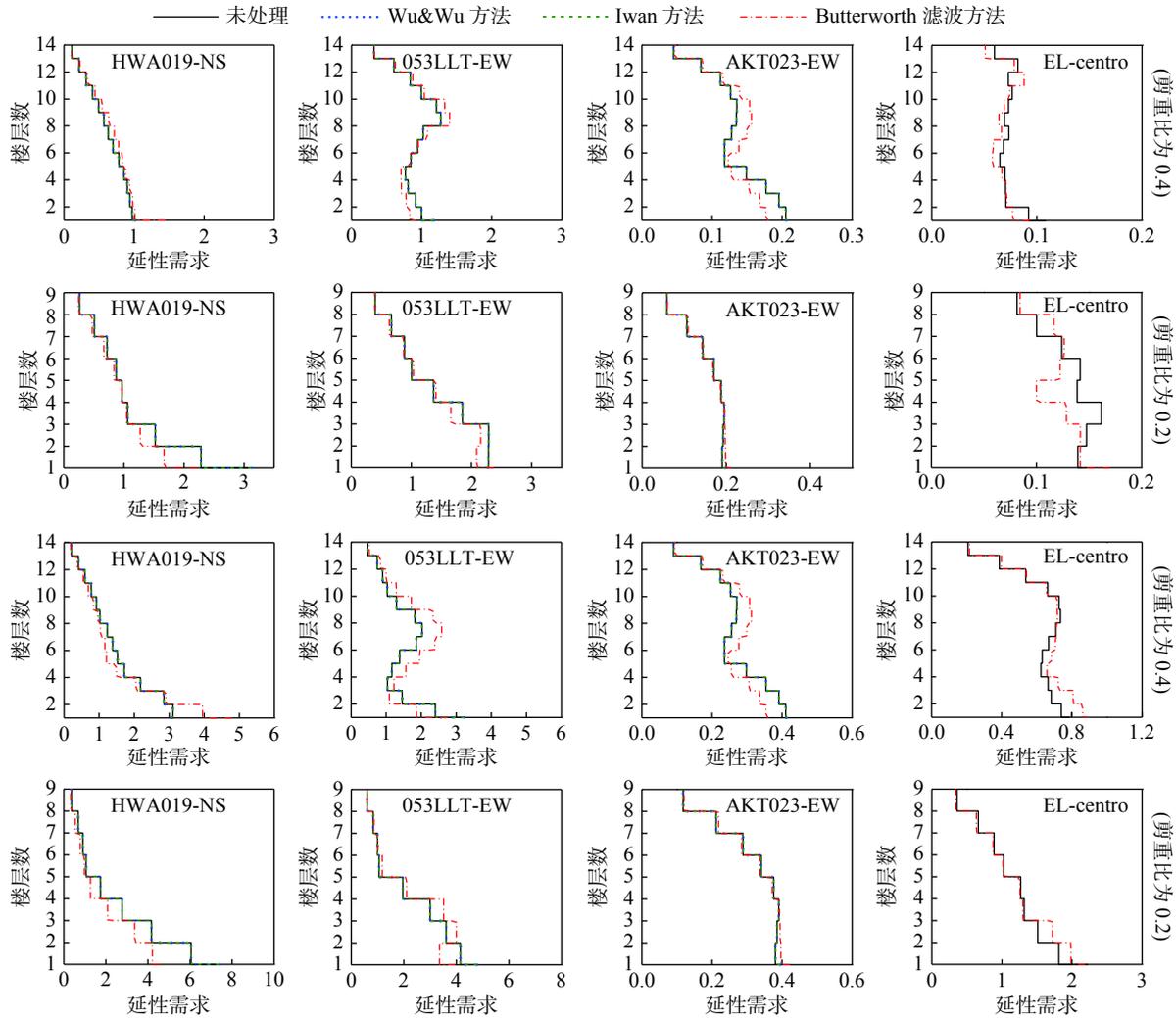


图 5 不同记录处理方法下的 MDOF 层延性需求

Fig. 5 Floor ductility demand for MDOF under regarding different process procedures

#### 4 推荐地震动批量处理流程

针对不含速度脉冲与永久位移的强震动记录，包括 Seismosignal 等商业软件在内所使用的 Butterworth 因果滤波可以满足工程输入的基本要求。但是因果滤波采用的是单向滤波，因此会改变相位谱，在某时刻的滤波只与该时刻前的数据有关，而与该时刻后的数据无关，适用于记录到时信息十分重要的地震预警等场合。而非因果滤波采用时域内向前和向后两个方向的滤波，不会改变记录的相位谱。这对于保留对结构弹塑性响应十分重要的速度时程相位信息十分重要。

因此本文参考美国 PEER 数据库的强震动记录处理流程，给出了批量化地震动处理流程供工程和研究参考，核心步骤分为记录预处理、非因果 Butterworth 因果滤波以及多项式基线校正三部分，如图 9 所示。如果有背景噪声记录，将记录触发前的信号作为噪声，计算记录的信噪比，一般根据信噪比大于 3 为原则选择合适的高通和低通截止频率。不管是记录预处理部分中的补零，还是滤波后记录的移除补零操作，一定要通过在截断处加余弦函数窗消除截断效应。最后的基线校正流程对于非因果滤波来说是保证最后位移结果不漂移的必要操作流程，不可省略。

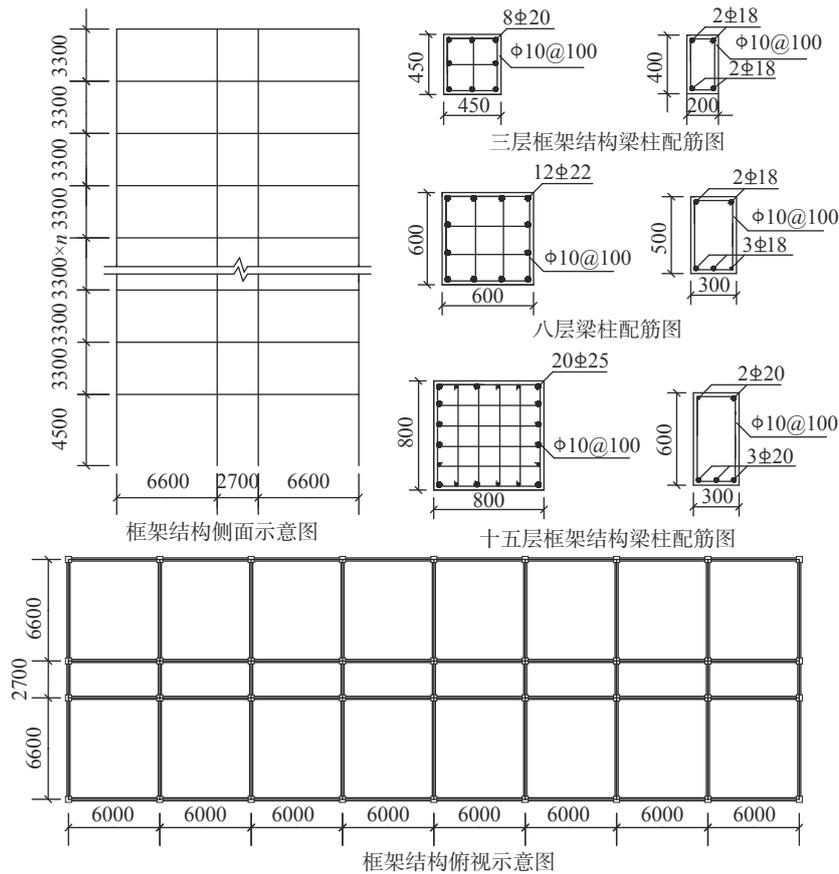


图 6 RC 平面框架计算模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of two RC frames

表 2 结构自振周期及有效质量参与系数

Table 2 Natural vibration period and effective mass participation coefficient of the structure

楼层数	自振周期/s			有效质量参与系数/(%)		
	一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
三层	0.5	0.18	0.12	92.2	6.9	0.9
十五层	1.5	0.42	0.22	78.9	11.9	4.0

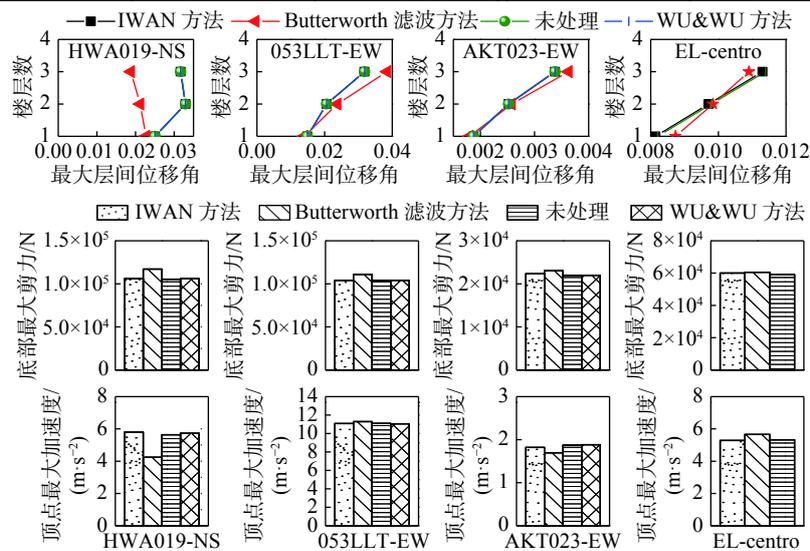


图 7 不同记录处理方法下的三层 RC 框架结构的最大层间位移角、底部最大剪力和顶点最大加速度

Fig. 7 Maximum drift, maximum bottom shear force and maximum peak acceleration of the 3-floors RC frame structure under different process procedures

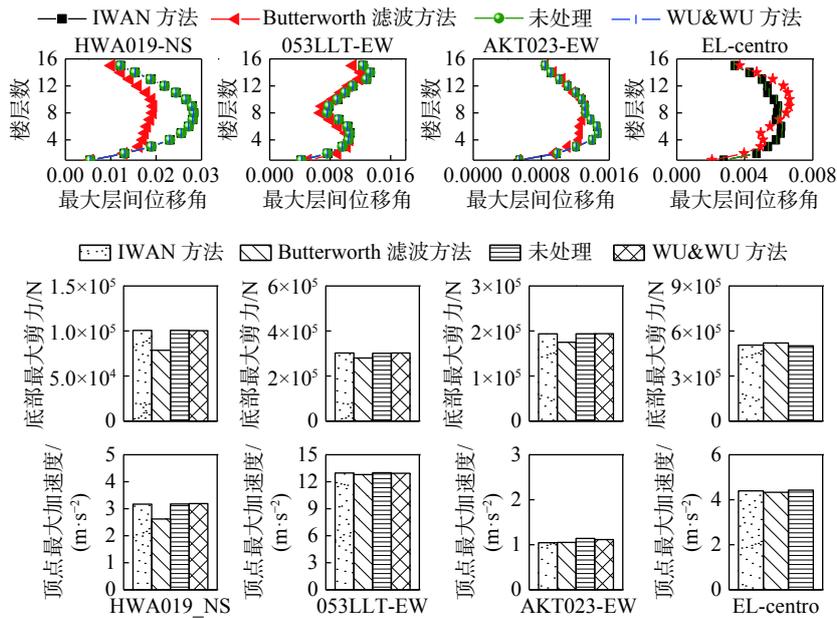


图 8 不同记录处理方法下的十五层 RC 框架结构的最大层间位移角、底部最大剪力和顶点最大加速度

Fig. 8 Maximum drift, maximum bottom shear force and maximum peak acceleration of the 15-floors RC frame structure under different process procedures

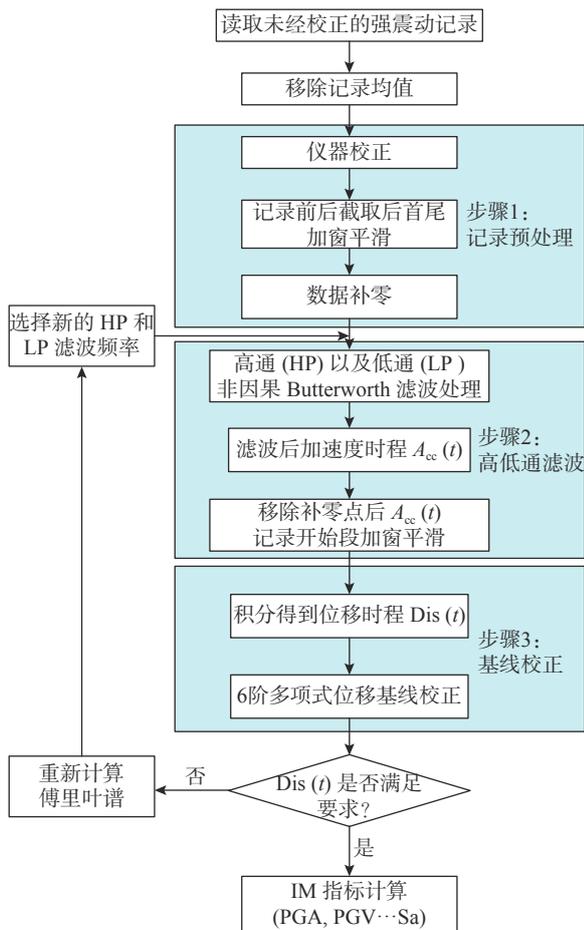


图 9 强震动记录批量处理流程图

Fig. 9 Flow chart of batch-process procedure of strong ground motion

### 5 结论

本文将强震动记录按照是否含有速度脉冲和永久位移分为四种类型，针对不同强震动记录处理方式对结构弹塑性响应的影响展开研究，采用花莲地震、2014 云南鲁甸地震、日本 311 地震以及 El-centro 波强震动记录做为算例，分析结果表明：

(1) 采用 Butterworth 因果滤波方法不仅会对残余永久位移造成影响，同时会很大程度上影响速度脉冲的形状。所选方法中对保留强震动记录真实永久位移信息效果最好的是 Wu&Wu 的方法，在合理选择参数的条件下校正后的计算位移和 GPS 同震位移比较一致。

(2) 单(多)自由度体系弹塑性响应结果表明：随着强度折减系数的增大， $S_{di}/S_{de}$  的峰值逐渐变大。三种非滤波处理方式下的单自由度弹塑性位移比谱  $S_{di}/S_{de}$ ，9 层和 14 层多自由度层延性需求之间的差异可以忽略不计，即使在较大的强度折减系数或较低的剪重比下，该结论依然成立。而采用滤波处理的结果在长周期部分弹塑性响应与其余方法差别较大。对于不含有速度脉冲的强震动记录，不论是否包含永久位移，不同处理方法得到的层延性需求差异不如含有速度脉冲的记录差异显著。

(3) 基于 OpenSees 软件对三层和十五层平面 RC 框架结构进行弹塑性时程响应分析。计算结果表明含有速度脉冲和永久位移的强震动记录, 在采用 Butterworth 因果滤波方法处理的情况下得到的响应会明显低估最大层间位移角、顶点最大加速度及底部剪力。而仅含有永久位移的强震动记录, 在采用 Butterworth 因果滤波方法处理的情况下得到的层间位移角、顶点最大加速度及底部最大剪力与其余方法的结果差异并不明显。

综上所述, 速度脉冲形状与相位是否完整保留对于结构的弹塑性响应有很大影响, 对于包含速度脉冲或(及)永久位移的强震动记录, Butterworth 因果滤波方式在滤除噪声的同时畸变了速度脉冲形状, 抹除残余永久位移, 并会传递到最后的弹塑性时程分析结果中, 且对短、中、长周期结构均可能产生影响。当采用包含速度脉冲与永久位移的大震近断层强震动记录作为地震动输入时, 推荐采用基于基线趋势线校正的处理方法。虽然不同基线趋势线校正方法得到的残余永久位移信息不同, 但是对速度脉冲波形影响不大, 因而结构响应也并无显著差异。值得指出的是, 本文结论均基于一致地震动输入下的结果, 如果是考虑多点非一致输入(大跨结构, 如桥梁等), 含永久位移记录的处理方式很可能对最后结构响应造成不同的影响。

最后, 对于不含速度脉冲也不含永久位移的强震动记录, 记录处理与否对于弹塑性时程分析结果的影响并不显著, 实际操作中通过 Butterworth 因果滤波合理选择滤波频段进行高低频噪声滤除可以满足工程输入需求, 为了尽量消除因果滤波对记录时程相位可能造成的影响, 我们给出了一种可靠的基于非因果滤波的批量化强震动记录处理流程供工程参考。

#### 参考文献:

- [1] 温瑞智, 任叶飞, 黄旭涛, 等. 芦山7.0级地震强震动记录及其震害相关性[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 1—14.  
Wen Ruizhi, Ren Yefei, Huang Xutao, et al. Strong motion records and their engineering damage implications for Lushan Earthquake on April 20, 2013 [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(4): 1—14. (in Chinese)
- [2] 冀昆, 温瑞智, 崔建文, 等. 鲁甸M<sub>s</sub>6.5级地震强震动记

录及震害分析[J]. 震灾防御技术, 2014, 9(3): 325—339.

- Ji Kun, Wen Ruizhi, Cui Jianwen, et al. Observation of strong motion and damage investigation for Ms6.5 Ludian Earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(3): 325—339. (in Chinese)
- [3] 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, China Earthquake Administration, 2018. (in Chinese)
- [4] 张锐, 李宏男, 王东升, 等. 结构时程分析中强震记录选取研究综述[J]. 工程力学, 2019, 36(2): 1—16.  
Zhang Rui, Li Hongnan, Wang Dongsheng, et al. Selection and scaling of real accelerograms as input to time-history analysis of structures: A state-of-the-art review [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 1—16. (in Chinese)
- [5] 周宝峰. 强震观测中的关键技术研究[J]. 国际地震动态, 2019, 36(2): 1—16.  
Zhou Baofeng. Some key issues on strong motion observation [J]. Recent Developments in World Seismology, 2019, 36(2): 1—16. (in Chinese)
- [6] 曲哲, 师晓. 汶川地震和鲁甸地震的脉冲型地震动比较研究[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 150—157.  
Qu Zhe, Shi Xiao. comparative study on the pulse-like ground motions in the Wenchuan and the Ludian earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 150—157. (in Chinese)
- [7] 王国权, 周锡元. 921台湾集集地震近断层强震记录的基线校正[J]. 地震地质, 2004, 26(1): 1—14.  
Wang Guoquan, Zhou Xiyuan. Base-line correction of strong earthquakes recorded near fault in the 921 Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. Seismology and Geology, 2004, 26(1): 1—14. (in Chinese)
- [8] Wang R, Parolai S, Ge M, et al. The 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of GPS and strong-motion data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(2B): 1336—1347.
- [9] Ji K, Ren Y, Wen R, et al. Near-field velocity pulse-like ground motions on February 6, 2018 MW6.4 Hualien, Taiwan earthquake and structural damage implications [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105784.
- [10] 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.

(参考文献 [11]—[17] 转第 62 页)