

DOI:10.11918/202505059

# 基于实测数据和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法

胡进军<sup>1,2</sup>, 狄啸展<sup>1,2</sup>

(1. 地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080;  
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 近断层地震动是判断震害程度的重要依据,但一次地震中获取的近断层地震动记录数量往往较少。为解决近断层区域工程结构的震害评估问题,特别是补充近断层区域无观测台站处的地震动,本文提出一种基于近断层实测数据和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法。该方法通过近断层实测地震动反应谱的插值来生成近断层区域无观测台站处的地震动,再利用经验等效脉冲模型恢复地震动的速度脉冲和永久位移特征。以我国台湾集集地震为例给出了近断层区域两个典型位置的地震动复原示例,通过与实测地震动记录进行对比,验证了本文方法的有效性和合理性。研究表明,本文方法能够构造具有近断层脉冲型地震动特征的地震动,并能够复原近断层区域无实测数据的站点处的地震动,可为近断层区域缺失实测数据的地震动的需求提供一种实用方法。

**关键词:** 近断层地震动;地震动合成;反应谱插值;等效脉冲模型;集集地震

**中图分类号:** P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)05-0083-07

## Near-fault ground motion reconstruction method based on observed data and equivalent pulse model

HU Jinjun<sup>1,2</sup>, DI Xiaozhan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Near-fault ground motions are critical for assessing seismic damage. However, recorded near-fault ground motion during an earthquake is often limited. To address the challenge of evaluating seismic damage to engineering structures in near-fault regions, particularly for supplementing ground motion at sites without observing stations in near-fault regions, this study proposed a near-fault ground motion reconstruction method based on observed data and an equivalent pulse model. The method initially generated ground motion at sites without observing stations in near-fault regions by interpolating response spectra from observed near-fault ground motion. Subsequently, it employed an empirical equivalent pulse model to recover velocity pulses and permanent displacements of ground motion. By taking the Chi-Chi earthquake in Taiwan, China as an example, examples of ground motion reconstruction at two typical locations in the near-fault region were provided. By comparing them with the observed ground motion data, the effectiveness and rationality of the method were validated. The results demonstrate that the method effectively reconstructs ground motions with near-fault pulse-like characteristics and ground motion at sites without observed data in near-fault regions. This offers a practical approach to meet the need for ground motion in near-fault regions where observed data are lacking.

**Keywords:** near-fault ground motion; ground motion synthesis; response spectrum interpolation; equivalent pulse model; Chi-Chi earthquake

随着川藏铁路等重大基础设施在西部地震区的建设,越来越多的大型工程结构不可避免地受到地震活动断层威胁,工程设计时需要考虑近断层地震动的特殊影响。然而,地震中实测的近断层地震动

记录往往数量很少且位置分布不均匀。因此,复原近断层区域的地震动可为近断层区域工程结构的震害评估提供依据。

区别于远场地震动,断层附近的地震动更容易

收稿日期: 2025-05-26; 录用日期: 2025-08-28; 网络首发日期: 2025-11-21

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20251120.1716.003>

基金项目: 国家自然科学基金(52478568); 国家重点研发计划(2021YFC3100701, 2022YFC3003503)

作者简介: 胡进军(1978—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 胡进军, hu-jinjun@163.com

受到断层破裂过程的影响,地震动时程更复杂、更随机、更具有破坏性<sup>[1-2]</sup>。通常,方向性效应和滑冲效应是近场速度脉冲的两个主要原因。当断层破裂速度近似于剪切波速时,出现断层破裂方向性效应<sup>[3]</sup>。其通常表现为大幅值、长周期的双向速度脉冲,且由于断层辐射模式的影响,法向分量通常比水平分量更加强烈<sup>[4-6]</sup>。近断层区域地震动的另一个特征是滑冲效应导致的单向速度脉冲,在位移时程中表现为位移的“阶跃”<sup>[7-8]</sup>。这是由断层相对错动产生的构造位移引起的,这种地面不可恢复位移通常发生在走滑断层的走向方向和倾滑断层的倾向方向上<sup>[3]</sup>。对于走滑断层,通常认为滑冲效应脉冲和方向性脉冲相互解耦,并且断层两侧的地震动时程具有“等幅反向”的特征。但对于倾滑断层,滑冲效应脉冲和方向性效应脉冲的耦合方式十分复杂<sup>[3,9]</sup>,直接解耦十分困难。一些研究表明,近断层地震动特征可以通过等效脉冲模型进行模拟,并可以应用于跨断层工程结构输入地震动的模拟中<sup>[7,10-11]</sup>。Makris 等<sup>[12]</sup>根据断层区域地震记录的脉冲特征将其分为 3 类脉冲,并通过这 3 类脉冲分别模拟滑冲效应脉冲以及永久位移效应。Abrahamson<sup>[13]</sup>提出以简单的脉冲函数模拟近断层地震动的永久位移,Kamai 等<sup>[14]</sup>在此基础上对模型进行了进一步改进并以实测记录进行了验证。但这些方法仅限模拟地震动的低频分量,并且依赖于实测的真实地震动记录。为解决上述问题,有研究人员提出了基于扩展震源物理模型的方法,这种方法具有明确的物理机制,且不依赖于实测的地震动记录,可以模拟任何类型断层破裂时产生的地震动,但这种方法对断层滑动模型高度依赖<sup>[15]</sup>,且模拟一次地震所需时间较长,不便于工程应用。

为此,本文以等效脉冲模型理论为基础,通过反应谱插值补充所需要的近断层地震动记录,以 1999 年我国台湾集集地震为例,收集并处理近断层区域上下盘的地震动数据。在此基础上,提出一种基于实测数据插值和等效脉冲模型近断层地震动复原方法,通过该方法复原了近断层地震动加速度、速度、位移时程,并与真实近断层地震动记录进行对比分析,验证此方法复原近断层地震动的有效性。

## 1 近断层地震动的复原方法

研究表明<sup>[11-12,14]</sup>,简化的等效脉冲模型可以模拟近断层脉冲型地震动的显著特征,但这些方法在一些地震动缺失的场景下应用困难。Lu 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于地震动记录的区域地震动模拟方法,该方法能够依靠有限的真实地震动记录,模拟目标区

域的地震动记录,但由于真实地震动记录不可避免地需要进行基线校正等数据处理过程,故以该方法模拟的地震动记录无法包含近断层区域所需要的滑冲效应脉冲特征。为此,在这两种方法的基础上,本文提出了一种基于实测数据插值和等效脉冲模型的地震动复原方法。

### 1.1 基于反应谱插值的地震动模拟方法

基于反应谱插值的地震动模拟方法能够依靠有限的真实记录模拟所需目标区域的地震动记录,并且因为使用了真实记录,模拟得到的记录能够保留区域地震动的原始特征。该方法主要包含两部分:反距离加权插值(inverse-distance-weighted, IDW)方法和连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)方法。

#### 1.1.1 IDW 方法

IDW 方法可以利用目标位置周围的数据来生成目标位置处的地震动参数<sup>[17-18]</sup>。因此,在计算出各台站的反应谱后,可以通过 IDW 方法生成目标位置反应谱,其计算公式为:

$$\hat{S}_0(T_j) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} S_i(T_j)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (1)$$

式中: $\hat{S}_0(T_j)$ 为目标位置在 $T_j$ 周期的地震动预测反应谱; $S_i(T_j)$ 为第 $i$ 站在 $T_j$ 周期的地震动反应谱值; $d_i$ 为目标位置到第 $i$ 站点的距离; $p$ 为指数,设为 $2^{[17,19]}$ ;  $n$ 为目标位置周围用于插值的站点数,考虑到台站分布以及误差要求,建议使用 $n=4$ 。

在选择台站组时参考 Lu 等<sup>[16]</sup>的选择要求:1)目标台站应被选择的周围台站包围;2)震中不应位于插值站点所组成的平面覆盖范围内;3)站点间的高程差应小于 150 m。

对于近断层区域,由于上、下盘地震动差异性过大,在上述条件的基础上选择台站时还需保证选择的插值站点组不在断层两侧。

#### 1.1.2 CWT 方法

在得到目标位置地震动反应谱后,利用 CWT 方法对目标位置距离最近的台站记录进行校正,从而得到目标位置的地震动时程<sup>[20]</sup>。这种方法不仅可以产生与目标位置反应谱相似的地震动,还能够保留目标位置周围地震动的原始特征,减少后续分析的不确定性<sup>[21]</sup>。该方法分为以下 4 个步骤。

步骤 1:选取目标位置附近的一条地震动记录作为种子地震动,然后确定种子地震动的小波系数,小波系数由公式(2)确定。

$$C(s,p) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{s,p}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-p}{s}\right) dt \quad (2)$$

式中: $s$ 和 $p$ 分别用于对小波进行缩放和平移, $\psi(t)$ 表示小波函数, $t$ 为时间,\*表示复数共轭。本文采用了广泛使用的脉冲响应小波<sup>[22-23]</sup>,由公式(3)确定:

$$\psi(t) = e^{-\zeta\Omega|t|} \sin(\Omega t) \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{1}{K_\psi} \int_0^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{s^2} R(T) C(s,p) \psi_{s,p}(t) dp \right) ds = \frac{1}{K_\psi} \int_0^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{s^2} R\left(\frac{2\pi}{\Omega}s\right) C(s,p) \psi_{s,p}(t) dp \right) ds \quad (5)$$

步骤4:计算生成地震动的反应谱,并与目标反应谱进行比较,重复步骤1~3,直至达到期望的匹配水平或达到最大迭代次数<sup>[20]</sup>。

上述地震动生成方法通常采用目标插值台站周边的4个台站的三向记录作为插值地震动。在应用CWT方法时,通常将距离最接近目标台站的地震动作为种子地震动<sup>[16]</sup>。

### 1.2 基于等效脉冲模型的滑冲效应叠加方法

Kamai等<sup>[14]</sup>基于Graves和Pitarka<sup>[24]</sup>的方法提出了考虑空间滑移、破裂速度和时间的脉冲模型,该模型将滑冲效应参数化为单周期的正弦波,由式(6)~(8)给出:

$$a_f(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_1 \\ \frac{2\pi D_{\text{site}}}{T_f^2} \sin\left[\frac{2\pi}{T_f}(t-t_1)\right], & t_1 < t < (t_1 + T_f) \\ 0, & t \geq (t_1 + T_f) \end{cases} \quad (6)$$

$$v_f(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_1 \\ \frac{D_{\text{site}}}{T_f} - \frac{D_{\text{site}}}{T_f} \cos\left[\frac{2\pi}{T_f}(t-t_1)\right], & t_1 < t < (t_1 + T_f) \\ 0, & t \geq (t_1 + T_f) \end{cases} \quad (7)$$

$$d_f(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_1 \\ \frac{D_{\text{site}}}{T_f}(t-t_1) - \frac{D_{\text{site}}}{2\pi} \sin\left[\frac{2\pi}{T_f}(t-t_1)\right], & t_1 < t < (t_1 + T_f) \\ D_{\text{site}}, & t \geq (t_1 + T_f) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $D_{\text{site}}$ 为永久位移幅值; $T_f$ 为周期; $t_1$ 为滑冲效应开始的时间,通过S波到时来确定。永久地面位移 $D_{\text{site}}$ 是关于 $M_w$ 和断层距的函数。

滑冲效应脉冲区别于其他类型脉冲的一个显著特点是其位移时程包含一个显著的永久位移,但目前针对该领域的研究较少,通常情况下地面永久位

式中: $\zeta$ 和 $\Omega$ 分别用于控制小波的衰减和随时间的变化,对于上一个函数,比例因子 $s$ 和周期 $T$ 的关系由公式(4)确定:

$$T = \frac{2\pi}{\Omega}s \quad (4)$$

步骤2:计算目标反应谱与历史记录在周期 $T$ 的响应谱之比,记为 $R(T)$ 。

步骤3:将每个小波系数乘以相应的比值 $R(T)$ ,利用逆CWT生成地震动,由公式(5)确定。

移 $D_{\text{site}}$ 可以通过断层挖槽、地质测绘、钻探等方法获得,当这些地质勘察数据缺失时,可以使用 $D_{\text{site}}$ 和 $M_w$ 之间的经验关系来确定<sup>[14,25-26]</sup>,这里 $D_{\text{fault}}$ 采用Wells和Coppersmith<sup>[25]</sup>提出的式(9)确定:

$$\ln(D_{\text{fault}}) = 1.15M_w - 3.28 \quad (9)$$

$D_{\text{site}}$ 采用Kamai等<sup>[14]</sup>提出的方法,由式(10)确定:

$$\log\left(\frac{D_{\text{site}}}{D_{\text{fault}}}\right) = \begin{cases} \log a_0 + a_2 \log\left(\frac{R_{\text{rup}} + a_3}{a_3}\right), & R_x < 0 \\ \log(a_0 + a_4) + a_2 \log\left(\frac{R_{\text{rup}} + a_3}{a_3}\right), & R_x > 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $a_0$ 为 $R_{\text{rup}} = 0$ 处断层下盘的位移, $a_4$ 为 $R_{\text{rup}} = 0$ 断层上盘与断层下盘位移的差值, $a_2$ 为线的斜率或衰减速率, $a_3$ 为衰减的曲率, $R_x$ 为到断层水平走向的法向距离,用于区分上下盘, $R_x < 0$ 为下盘, $R_x > 0$ 为上盘。

滑冲效应脉冲的周期 $T_f$ 计算公式为

$$\ln(T_{f,\text{Rev}}) = 0.7M_w - 3.54 \quad (11)$$

Kamai等<sup>[14]</sup>同时提出了对 $T_f$ 、 $t_1$ 的修改公式,对于不同的地震 $T_f$ 、 $t_1$ 与 $T_{f2}$ 、 $t_2$ 对复原时程的效果不同,通常情况下 $T_{f2}$ 、 $t_2$ 的效果更好,少数情况下 $T_f$ 、 $t_1$ 效果更好。本文方法选择使用文献[14]推荐的 $T_{f2}$ 、 $t_2$ 。具体由式(12)和式(13)确定:

$$\ln(T_{f2}) = 0.645M_w - 1.45 \quad (12)$$

$$t_2 = t_1 - 0.5(T_{f2} - T_f) \quad (13)$$

在叠加滑冲效应时,需要分别对得到的滑冲效应脉冲和原始记录进行互补滤波,从而避免在叠加时重复计算<sup>[14]</sup>导致的偏差。

### 1.3 近断层地震动的复原

实际记录的近断层地震动记录在进行基线校正等处理过程中,可能会导致滑冲效应脉冲在处理时出现丢失现象<sup>[14]</sup>。因此,在使用实测记录进行地震动复原时需要考虑这一缺失。首先通过基于反应谱

插值的地震动生成方法,在保留其他地震动信息的基础上生成指定位置的地震动时程。然后通过等效脉冲方法补充丢失的滑冲效应脉冲。最后,在生成的地震动时程上叠加丢失的滑冲效应脉冲,从而复原指定位置的具有完整近断层地震动特征的地震动。本方法的研究思路如图 1 所示,具体过程如下。

1) 选择目标位置周围的 4 个站点基线校正处理后的真实记录,通过对地震动进行 IDW 方法,利用选定站点的地震动反应谱插值生成目标位置的地震动反应谱。

2) 通过 CWT 方法,使用得到的目标位置地震

动反应谱生成目标位置地震动时程。

3) 将生成后的地震动时程进行三维坐标旋转,见图 1 的步骤 4,以断层走向为  $x$  轴,垂直断层走向为  $y$  轴,断层法向为  $z$  轴。将东西、南北和竖向三向地震动时程分别旋转到新的  $x、y、z$  轴方向,并在新的  $x-y$  平面内找到位移最大方向,将这个方向作为断层滑动方向。

4) 对滑冲效应脉冲和生成的目标位置地震动记录进行互补滤波,然后分别添加滑冲效应的脉冲到最大位移方向和  $z$  轴方向,从而得到所需的带有滑冲效应脉冲的目标位置地震动时程。

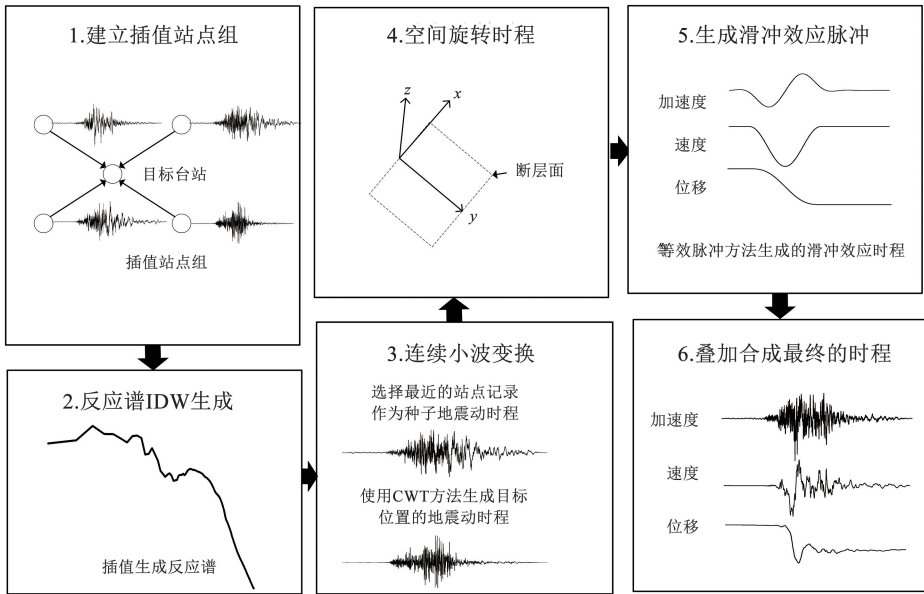


图 1 基于实测记录插值和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法

Fig. 1 Near-fault ground motion reconstruction method based on observed data interpolation and equivalent pulse model

## 2 方法验证和应用

### 2.1 集集地震介绍

1999 年 9 月 21 日我国台湾省集集发生  $M_w 7.6$  地震,这次地震由南北走向逆冲断层的剧烈活动引起,造成南北长约 105 km、东西宽近 50 km 的地表破裂,断层的倾角为  $30^\circ$ <sup>[27-28]</sup>。地表破裂起始于断层中部偏南位置,分别向南北方向延伸。此次地震中记录到较多的近断层地震动,为本文方法的验证和应用提供了数据。

### 2.2 基于实际观测地震动的方法验证

在图 2 中下盘选取插值站点组进行近断层地震动复原。选择 TCU051 站点作为目标插值站点,选择符合要求的 4 个站点组成插值站点,表 1 中给出了集集地震中下盘部分台站的位置情况,表 2 给出了插值权重,选择距离 TCU051 最近的 TCU054 的地震动记录作为种子地震动。使用 IDW 方法,根据选取站点组生成目标站点的三向加速度反应谱,如图 3 所示。在此基础上,使用 CWT 方法,根据生成的三向加速度反应谱得到目标站点处的三向加速

度、速度、位移时程,图 4 是经过 CWT 得到的 TCU051 站点的地震动时程与经过滤波和基线校正后不含滑冲效应的真实记录的对比。

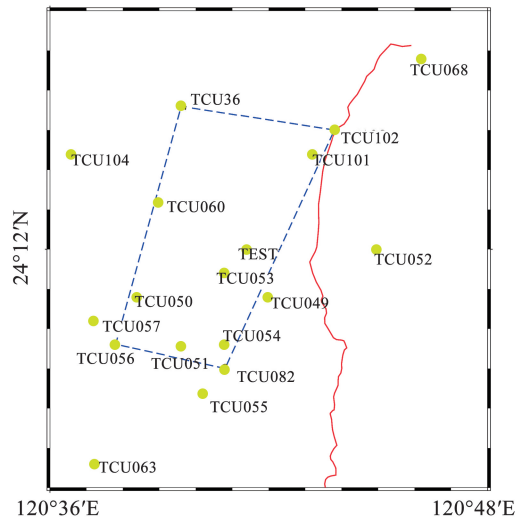


图 2 中国台湾集集  $M_w 7.6$  地震断层地表破裂和部分台站分布图

Fig. 2 Fault surface rupture and distribution of selected stations during Chi-Chi  $M_w 7.6$  earthquake in Taiwan, China

表1 1999年中国台湾集集 $M_w$ 7.6地震下盘部分强震台站位置

Tab.1 Locations of strong motion stations on footwall during 1999 Chi-Chi  $M_w$ 7.6 earthquake in Taiwan, China

台站	东经/(°)	北纬/(°)	高程/m	断层距/ km	与目标站点 距离/km
TCU102	120.73	24.25	231	1.49	12.678
TCU136	120.66	24.26	176	8.27	11.119
TCU048	120.61	24.18	192	13.53	5.988
TCU056	120.63	24.16	77	10.48	3.335
TCU050	120.64	24.18	100	9.49	3.145
TCU082	120.68	24.15	89	5.16	2.486
TCU054	120.68	24.16	97	5.28	2.223
TCU051	120.66	24.16	96	7.64	0

表2 插值站点组各台站权重

Tab.2 Weights of each station in interpolation site group

台站编号	TCU102	TCU136	TCU082	TCU056
插值权重	0.023	0.030	0.608	0.380

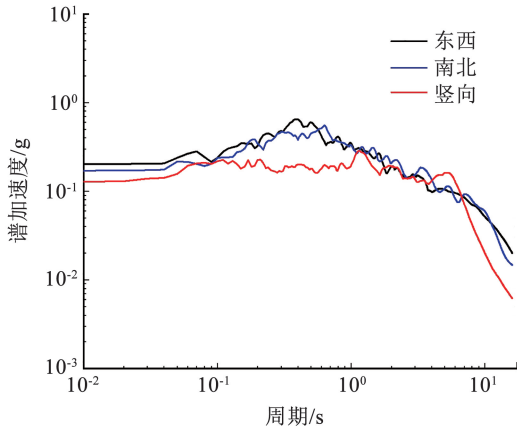


图3 IDW方法得到的TCU051台站三向反应谱

Fig.3 Three-directional response spectra of TCU051 station by using IDW method

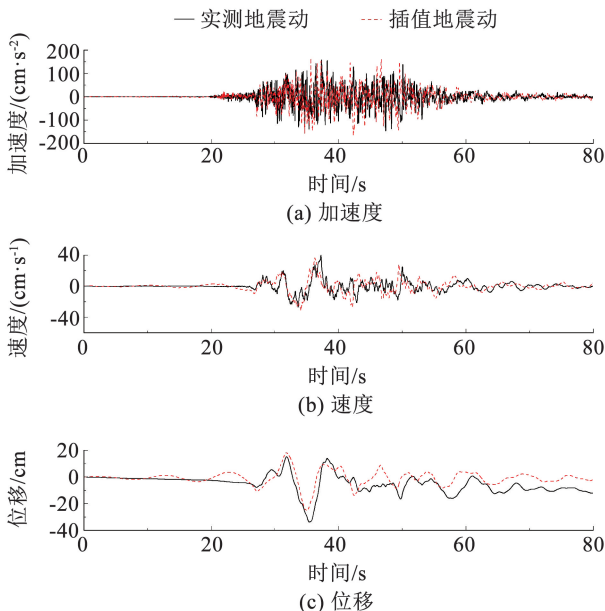


图4 IDW方法得到的TCU051台站地震动记录与实测地震动记录(无滑冲效应)对比

Fig.4 Comparison between IDW-derived ground motions and observed ground motions of TCU051 station (without fling-step)

最终通过等效脉冲方法生成滑冲效应脉冲的加速度、速度、位移时程。图5为三向加速度时程的傅里叶谱,图6是使用Kamai等<sup>[14]</sup>的方法生成的滑冲效应脉冲的加速度、速度、位移时程。图7为最终叠加了滑冲效应后的TCU051站点的加速度、速度、位移时程和加速度反应谱,与带有滑冲效应脉冲的真实地震动记录进行的对比结果。

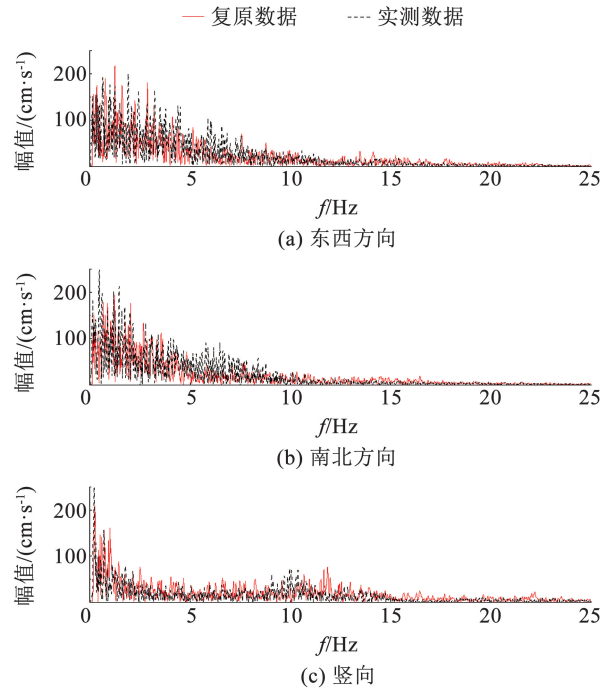


图5 TCU051台站反应谱插值后的加速度傅里叶谱图

Fig.5 Acceleration Fourier spectrum after response spectra interpolation at station TCU051

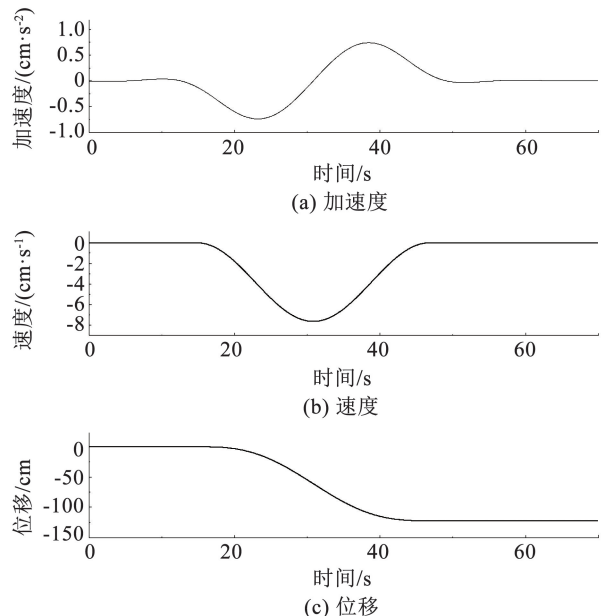


图6 TCU051台站滤波后滑冲效应的时程

Fig.6 Filtered time history of fling-step of TCU051 station

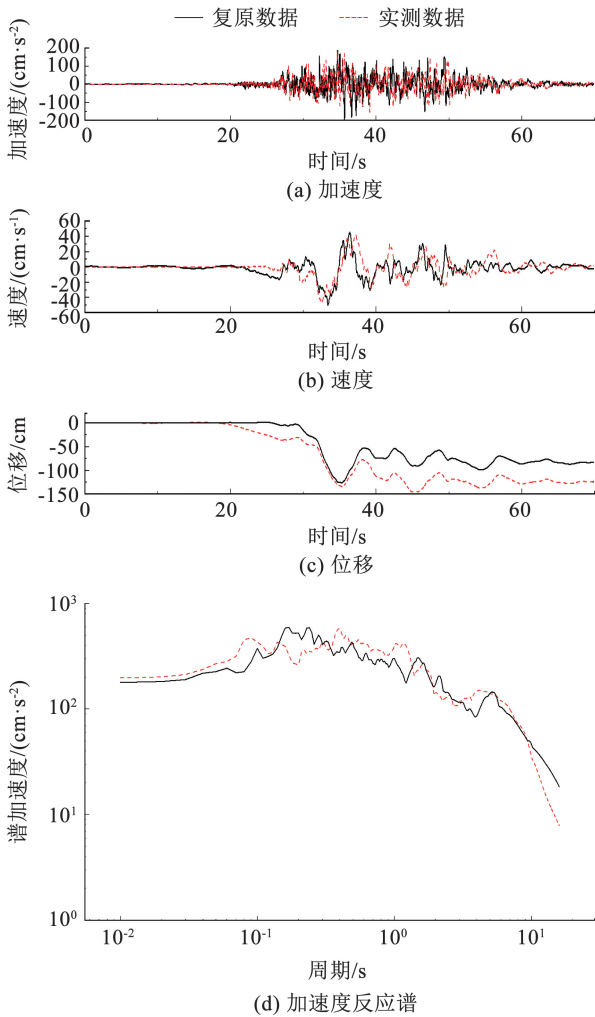


图 7 TCU051 台站叠加滑冲效应后记录与实测地震记录(含永久位移)对比

Fig. 7 Comparison between records with superimposed fling-step and observed ground motion of TCU051 station (with permanent displacement)

从图 4 可以看出反应谱插值和 CWT 得到的加速度、速度和位移时程与真实记录吻合良好,误差为 22.625%。从图 5 可以看出,经过反应谱插值得到的加速度时程与真实记录在频谱上比较接近,东西方向和南北方向的频谱在 5 ~ 10 Hz 区间内与真实情况有一些差距,竖向频谱与真实情况吻合良好。将生成的地震动时程进行三维坐标旋转,并在断层内最大位移方向叠加滑冲效应脉冲,结果如图 7 所示,可以看出,最终复原的地震动时程与恢复了永久位移的真实地震动时程特征相似,最大互相关系数为 0.587,但在残余位移上复原结果与实测情况尚存在一定差距。

### 2.3 预测无实际观测地震动的应用

本文方法同样可以适用于近断层区域无观测台站处地震动的合成,示例站点位置由图 2 给出,具体坐标为东经 120.69°,北纬 24.20°。选择 TCU102、

TCU136、TCU082、TCU056 共 4 个站点构成插值站点组,经过计算,选择距离目标站点最近的 TCU053 的地震动记录作为种子地震动,复原结果如图 8 所示。复原的记录在时程上具有近断层脉冲型地震动的特点,并包含了工程上所需要的永久位移。

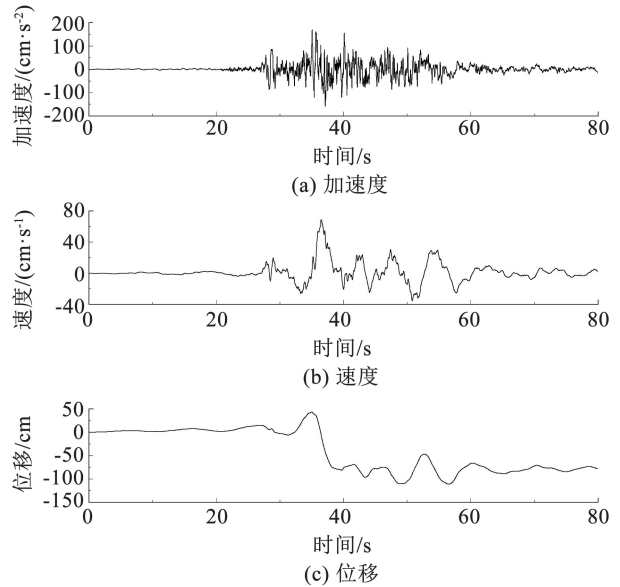


图 8 无实测地震动站点处复原的记录

Fig. 8 Reconstructed records at sites without observed ground motion data

### 2.4 结果分析

通过对比 TCU051 台站的复原地震动时程与实测地震动时程,表明复原的加速度、速度时程和反应谱与实测记录吻合良好。复原的位移时程在幅值上与真实记录接近,但残余位移与真实记录存在一定误差,造成这种误差的主要原因与使用回归的经验公式有关。本文采用的断层参数  $D_{fault}$  是由经验公式确定的,与真实的断层情况存在一定差异。残余位移在本文方法中主要是由参数  $D_{site}$  确定,其是由  $D_{site}$  与  $D_{fault}$  的经验公式控制的,其中所需的参数是由地震动数值模拟出来的记录进行回归得到的,使用这些参数生成的某一次地震事件的滑冲效应脉冲势必会与真实情况存在一定偏差,对于参数  $D_{site}$ ,后续可以考虑更多元的数据,如将 GPS 同震位移纳入考虑,从而降低使用经验公式导致的偏差。

### 3 结论

本文提出了一种基于实测数据插值和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法,并验证了方法的合理性,得到如下结论。

- 1) 基于实测数据插值和等效脉冲模型的方法生成的近断层地震动,在时程和反应谱上与真实情况吻合良好。
- 2) 本文方法使用目标位置周围的真实地震动

记录进行 IDW,可较好地反映目标地区的原始特征,更合理地复原目标区域的地震动。

3)本文方法可以应用于断层距小于 15 km、高程差小于 150 m 的无实测记录的位置,可为近断层工程结构的震后评估提供地震动输入参考。

## 参考文献

- [1] 陈笑宇,王东升,付建宇,等.近断层地震动脉冲特性研究综述[J].工程力学,2021,38(8):1  
CHEN Xiaoyu, WANG Dongsheng, FU Jianyu, et al. State-of-the-art review on pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(8): 1. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0582
- [2] 胡进军,靳超越,张辉,等.匹配多目标参数的地震动合成方法[J].工程力学,2022,39(3):126  
HU Jinjun, JIN Chaoyue, ZHANG Hui, et al. A ground motion synthesis method for matching multi-objective parameters [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(3): 126. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0095
- [3] SOMERVILLE P. Characterizing near-fault ground motion for the design and evaluation of bridges [C]// Proceedings of the 3rd National Seismic Conference and Workshop on Bridges and Highways. Portland, OR: MCEER, 2002: 137
- [4] HEATON T H, HALL J F, WALD D J, et al. Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical  $M_w$  7.0 blind thrust earthquake[J]. Science, 1995, 267(5195): 206. DOI: 10.1126/science.267.5195.206
- [5] 胡进军,李琼林,鄢迪,等.基于PSHA的核电厂近断层抗震设计谱构建方法[J].工程力学,2019,36(5):192  
HU Jinjun, LI Qionglin, WU Di, et al. Construction method of the near fault seismic design spectrum for nuclear power plants based on PSHA[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 192. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.04.0242
- [6] 谢俊举,李小军,温增平.近断层速度大脉冲对反应谱的放大作用[J].工程力学,2017,34(8):194  
XIE Junju, LI Xiaojun, WEN Zengping. The amplification effects of near-fault distinct velocity pulses on response spectra [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 194. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.09.0680
- [7] 李爽,谢礼立.近场问题的研究现状与发展方向[J].地震学报,2007,29(1):102  
LI Shuang, XIE Lili. Study on the current status and development trends of near-field issues [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 102
- [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. DOI: 10.1785/0120060255
- [9] OGLESBY D D. Fault geometry and the dynamics of the 1999 Chi-chi (Taiwan) earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 91(5): 1099. DOI: 10.1785/0120000714
- [10] 田玉基,杨庆山,卢明奇.近断层脉冲型地震动的模拟方法[J].地震学报,2007,29(1):77  
TIAN Yuji, YANG Qingshan, LU Mingqi. Study on the simulation method of near-fault pulse-type ground motions [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 77. DOI: 10.1007/s11589-007-0080-5
- [11] 盛兆琦,胡进军,谢礼立.跨断层工程输入地震动模拟及其应用研究进展[J].地震工程与工程振动,2023,43(1):1  
SHENG Zhaoqi, HU Jinjun, Xie Lili. Progress in simulation and application of cross-fault engineering input ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(1): 1. DOI:10.13197/j.ceed.2023.0101
- [12] MAKRIS N, CHANG S P. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(1): 85. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(200001)29:1<85::AID-EQE902>3.0.CO;2-N
- [13] ABRAHAMSON N A. Velocity pulses in near-fault ground motions[C]// Proceedings of the UC Berkeley—CUREE Symposium in Honor of Ray Clough and Joseph Penzien. Berkeley, CA, USA, 2002: 40
- [14] KAMAI R, ABRAHAMSON N, GRAVES R. Adding fling effects to processed ground-motion time histories [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(4): 1914. DOI: 10.1785/0120130272
- [15] ZHANG Fan, LI Shuai, WANG Jinquan, et al. Effects of fault rupture on seismic responses of fault-crossing simply-supported highway bridges[J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110104. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110104
- [16] LU Xinzhen, CHENG Qingle, TIAN Yuan, et al. Regional ground-motion simulation using recorded ground motions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2021, 111(2): 825. DOI: 10.1785/0120200243
- [17] SUZUKI W, AOI S, KUNUGI T, et al. Strong motions observed by K-NET and KiK-net during the 2016 Kumamoto earthquake sequence[J]. Earth, Planets and Space, 2017, 69: 19. DOI 10.1186/s40623-017-0604-8
- [18] ZERVA A. Spatial variation of seismic ground motions: Modeling and engineering applications[M]. Florida: CRC Press Inc, 2009
- [19] THRAINSSON H. Modeling of earthquake ground motion in the frequency domain[D]. CA: Stanford University, 2000
- [20] MONTEJO L A, SUAREZ L E. An improved CWT-based algorithm for the generation of spectrum-compatible records[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2013, 5(1): 1. DOI: 10.1186/2008-6695-5-26
- [21] GASCOT R L, MONTEJO L A. Spectrum-compatible earthquake records and their influence on the seismic response of reinforced concrete structures[J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(1): 101. DOI: 10.1193/011714EQS010M
- [22] SUÁREZ L E, MONTEJO L A. Generation of artificial earthquakes via the wavelet transform[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(21-22): 5905. DOI: 10.1016/j.ijlsolstr.2005.03.025
- [23] HANCOCK J, WATSON L J, ABRAHAMSON N A, et al. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2006, 10(1): 67. DOI: 10.1080/13632460609350629
- [24] GRAVES R W, PITARKA A. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5A): 2095. DOI: 10.1785/0120100057
- [25] WELLS D L, COPPERSMITH K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 974. DOI: 10.1785/BSSA0840040974
- [26] AKI K. Generation and propagation of g waves from the niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum [J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1966, 44: 73
- [27] MA K F. Spatial and temporal distribution of slip for the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1069. DOI: 10.1785/0120000728
- [28] 王卫民,赵连锋,李娟,等.1999年台湾集集地震震源破裂过程[J].地球物理学报,2005,48(1):132  
WANG Weimin, ZHAO Lianfeng, LI Juan, et al. Source rupture process of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 132. DOI: 10.1002/cjg2.635