

地震动脉冲分量表征模型研究综述

高文俊^{1,2}, 李歆^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 结构防灾减灾工程系, 上海 200092)

摘要:通过回顾地震工程研究领域的文献,对研究中采用的地震动脉冲分量表征模型进行了收集与整理。针对各类模型的特点进行了比较与讨论,并对其研究意义以及在结构抗震研究中所发挥的作用进行梳理总结,提炼出了研究框架。根据现有的研究结果指出:考虑地震动脉冲效应的地震危险性分析是研究框架中的核心环节;对于反映相同脉冲特征的不同脉冲表征模型,尽管它们采用的数学表达形式存在差异,但是在动力学上的表现是接近的;具有滑冲效应特征的脉冲表征模型和具有前方向性效应特征的脉冲表征模型之间存在相似性。最后,对结构地震反应计算分析中地震动选取的相关考虑因素进行了讨论。

关键词:地震动脉冲分量表征模型;地震动脉冲分量;脉冲型地震动;地震工程

中图分类号:P315.9; TU352.11

文献标识码:A

Review on pulse-component models of earthquake ground motions

GAO Wenjun^{1,2}, LI Xin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By reviewing literature in the field of earthquake engineering, the pulse-component models of earthquake ground motions are collected and organized. The characteristics of various pulse models are compared and discussed. The research significance of these pulse-component models is concluded and organized to form a systematic research framework. According to the existing research results, it is pointed out that the seismic hazard analysis considering the pulse effects in earthquake ground motions is the core in the research framework. Although the pulse models use different mathematical expressions to describe the same pulse characteristics, their performance is similar in structural dynamics. There are similarities between the pulse models with the forward directivity effect and those with the fling-step effect. At last, the details on considering the pulse effects in ground-motion selections for seismic design of structures are discussed.

Key words: pulse-component model of earthquake ground motions; earthquake pulse component; pulse-type ground motion; earthquake engineering

0 引言

地震工程领域的学者们认识到,脉冲型地震动可以分解为脉冲分量(pulse component)与非脉冲分量(non-pulse component)^[1],或者可以将脉冲型地震动视为脉冲分量与非脉冲分量的叠加组合^[2-3],这自然也触发了对两类地震动分量作用效果分别进行研究的关键思路与实践探索。MUKHOPADHYAY等^[2]认为脉

收稿日期:2023-08-15; 修回日期:2023-09-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52208195,51908419);上海市2022年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1201400)

作者简介:高文俊(1988—),男,助理研究员,博士,主要从事地震工程研究。E-mail:2014Joker@tongji.edu.cn

通讯作者:李歆(1988—),女,高级工程师,博士,主要从事地震工程研究。E-mail:2017lixin@tongji.edu.cn

冲型地震动可以视为多个脉冲和一个非脉冲运动的叠加,可以从脉冲型地震动中分离出脉冲分量,再单独对其进行研究。YADAV 等^[1]开展的研究也建立在脉冲型地震动可以分解为脉冲与非脉冲 2 种分量的基础之上。

脉冲型地震动对建筑结构的作用机理与所含脉冲分量的特征直接相关,与远场地震作用有显著区别^[4-5]。为了表示地震动所含的脉冲分量以及研究其作用特征,不同学者提出了多种理想化的脉冲模型,这些模型统称为地震动脉冲分量表征模型(pulse-component model of earthquake ground motions),或简称为脉冲表征模型(pulse model)。脉冲表征模型采用数学表达式描述地震动位移、速度和加速度的时程,并且可以通过改变模型中的关键参数实现对脉冲幅值、脉冲周期和脉冲相位等属性的调整。

脉冲表征模型被用于:地震动脉冲分量的识别与提取^[2,6]、探究地震动脉冲分量的基本特征^[1,7-9]、探究脉冲分量对结构地震反应的影响^[4,10-11]、探究地震动脉冲分量对反应谱的放大作用^[12-13]、人工生成含脉冲分量的地震动(即地震动模拟)^[14]、建立脉冲分量特征与近场条件下地震危险性之间的定量关系^[15]、建立脉冲分量关键特征参数与震源机制之间的关系^[14,16-20]和研发针对地震动脉冲分量作用的结构减震技术^[21]等方面。这些研究为提升近场条件下土木工程结构的抗震能力奠定了基础。

本文对与脉冲表征模型相关的文献资料进行了整理与回顾。首先,简要回顾了脉冲型地震动与地震动脉冲特征的相关概念。然后,对多种脉冲表征模型进行了整理,梳理了各类模型之间的继承、改进和衍生关系,并对脉冲表征模型的研究意义与其在结构抗震研究中所发挥的作用进行了总结与概括。同时,针对各类脉冲表征模型的特点进行了比较与讨论。最后,以现有文献中的研究结果为依据,对结构抗震设计中考虑脉冲型地震动影响的方法进行了探讨。

1 地震动脉冲特征

具有速度脉冲特征的地震动被称为脉冲型地震动(pulse-type ground motions 或 pulse-like ground motions^[12])或速度脉冲型地震动(velocity pulse-type ground motions),其引发机制有 2 种^[12]:一种是前方向性效应(forward directivity effect);另一种是滑冲效应(fling-step effect),也被称为永久位移效应(permanent displacement effect)^[8]。SHAHI 等^[15]认为,只要地震动某一方向的分量含有脉冲特征,那么该地震动即为脉冲型地震动。然而,应注意,并非所有近场区域内的地震动都具有脉冲特征。

前方向性效应引起的脉冲型地震动,其速度时程具有双向双峰的脉冲特征。该脉冲特征被称为前方向性效应特征。滑冲效应引起的脉冲型地震动,其速度时程具有单向单峰的脉冲特征,并且在速度脉冲的结束阶段,相应的位移时程则具有明显的残留位移(或称为永久位移)。该脉冲特征被称为滑冲效应特征。对于倾滑断层,前方向性效应和滑冲效应可能在垂直于断层面的方向上形成叠加^[22],可导致地震动具有 2 种脉冲形式叠加的特征。此外,虽然具有前方向性效应特征的速度脉冲在垂直于断层的方向上出现的可能性较大,但也可以在偏离垂直方向的范围内出现^[15,23-24]。因此,区分两类速度脉冲的主要依据是地震动记录中速度时程与位移时程的形状。

2 地震动脉冲分量表征模型

根据模型的建立方式,已有的脉冲表征模型分为两类:一类是基于地震动加速度建立的加速度脉冲表征模型(acceleration pulse model);另一类是基于地震动速度建立的速度脉冲表征模型(velocity pulse model)。加速度脉冲表征模型的速度和位移可以分别通过 1 次积分和 2 次积分获得;速度脉冲表征模型的加速度和位移可以分别通过 1 次微分和 1 次积分获得。

2.1 加速度脉冲表征模型

CLOUGH 等^[25]总结了半正弦脉冲荷载、矩形脉冲荷载以及线性递减脉冲荷载作用下无阻尼单自由度(single degree of freedom, SDOF)系统的动力反应,并推导了解析表达式。由于这 3 种脉冲荷载作用可以简单地通过牛顿第二定律($a=f/m$)转化为输入 SDOF 系统的加速度,所以这 3 种脉冲荷载形式也可以看作是 3 种不同的加速度脉冲表征模型,如图 1(a)、(b)和(c)所示。MYLONAKIS 等^[26]采用了如图 1(d)所示的线性三角形加速度脉冲模型。此外,CUESTA 等^[27]以及 MYLONAKIS 等^[28]采用了多种不同形式的加速度脉冲

表征模型。脉冲型地震动中脉冲分量的形式更接近正余弦形式,限制了其在地震工程实际应用中的有效性。

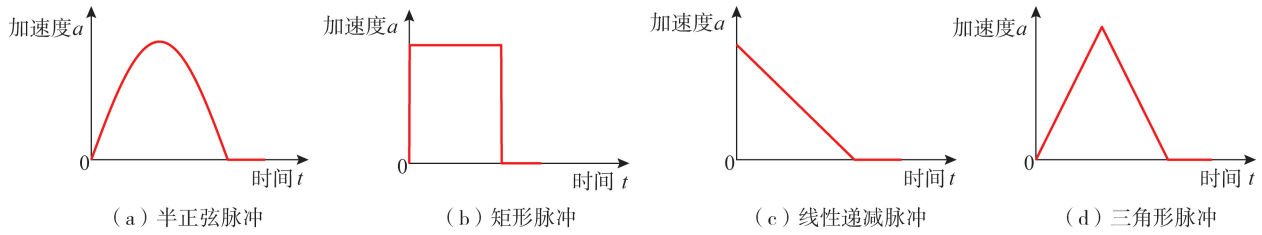


图 1 4 种加速度脉冲表征模型

Fig. 1 Pulse models of four accelerations

RICKER^[29-30]提出了一种加速度脉冲表征模型(Ricker 模型,1943 年),该模型有 2 种形式:一种是对称形式,简称为 Ricker 对称模型;另一种是非对称形式,简称为 Ricker 反对称模型。Ricker 对称模型可以采用 VASSILIOU 等^[31]改写后的简洁形式,其加速度时程可表示为

$$\ddot{u}(t) = a_p(1 - \beta^2 t^2) e^{-\frac{\beta^2 t^2}{2}} \quad (\beta > 0) \quad (1)$$

式中: a_p 为加速度时程的峰值,并且有 $\ddot{u}(0) = a_p$; $\ddot{u}(t)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上关于 $t=0$ 对称;参数 β 取 $\sqrt{2}\pi/T_p$,其中 T_p 为脉冲周期。

Ricker 非对称模型的加速度时程表达式为

$$\ddot{u}(t) = \frac{a_p}{\beta_R} \left(\frac{2\beta^2 t^2}{3} - 3 \right) \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \beta t \right) e^{-\frac{\beta^2 t^2}{3}} \quad (\beta > 0) \quad (2)$$

式中:参数 β_R 取 1.38 时,有 $|\ddot{u}(t)|_{\max} = |a_p|$;参数 β 取 $\sqrt{2}\pi/T_p$,其中 T_p 是脉冲周期。

可通过对加速度时程表达式(1)和式(2)进行数值积分得到 Ricker 对称模型与 Ricker 反对称模型的速度时程曲线与位移时程曲线,如图 2 所示。由图 2(a)可知,Ricker 对称模型的速度、位移时程曲线具有前方向性效应特征。

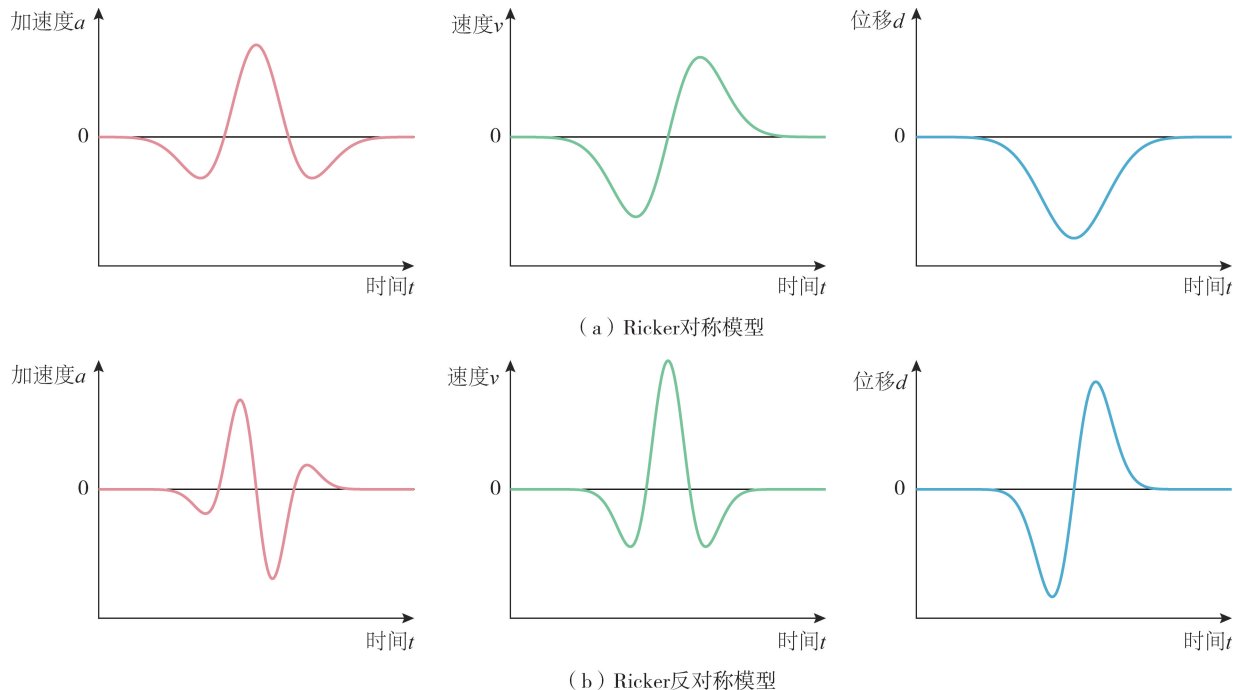


图 2 Ricker 加速度脉冲模型

Fig. 2 Ricker acceleration pulse models

2.2 速度脉冲表征模型

2.2.1 Makris 模型(1997 年)

MAKRIS 等^[10,32]基于三角函数,建议了 2 种速度脉冲表征模型,简称为 Makris-I 模型(1997 年)与

Makris-II 模型(1997年)。Makris-I 模型模拟的是具有滑冲效应特征的速度脉冲,速度时程为半个周期的单峰正弦波,加速度时程为一个完整周期的正弦波,位移时程具有阶跃特征,具有永久位移。在文献[33]中 Makris-I 模型被称为“单半波速度脉冲模型”。KAMAI 等^[14]针对 Makris 模型中的具体参数提出了确定方法。Makris-I 模型的速度时程 $\dot{u}(t)$ 、加速度时程 $\ddot{u}(t)$ 以及位移时程 $u(t)$ 的表达式分别为

$$\dot{u}(t) = \frac{V_p}{2} - \frac{V_p}{2} \cos(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (3)$$

$$\ddot{u}(t) = \omega_p \frac{V_p}{2} \sin(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (4)$$

$$u(t) = \frac{V_p}{2} t - \frac{V_p}{2\omega_p} \sin(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (5)$$

式中: $\omega_p = 2\pi/T_p$ 为脉冲周期 T_p 对应的圆频率; V_p 为速度脉冲的幅值。该模型仅有2个关键参数为 ω_p 、 V_p 。

Makris-II 模型模拟的是具有前向性效应特征的速度脉冲。Makris-II 模型的速度时程 $\dot{u}(t)$ 、加速度时程 $\ddot{u}(t)$ 以及位移时程 $u(t)$ 的表达式分别为

$$\dot{u}(t) = V_p \sin(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (6)$$

$$\ddot{u}(t) = \omega_p V_p \cos(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (7)$$

$$u(t) = \frac{V_p}{\omega_p} - \frac{V_p}{\omega_p} \cos(\omega_p t) \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (8)$$

式中: ω_p 与 V_p 参考式(3);该模型仅有2个关键参数: ω_p 、 V_p 。Makris-I 模型与 Makris-II 模型的加速度、速度和位移时程曲线绘制于图3;注意到,图3(b)中 Makris-II 模型的加速度时程曲线是不连续的。

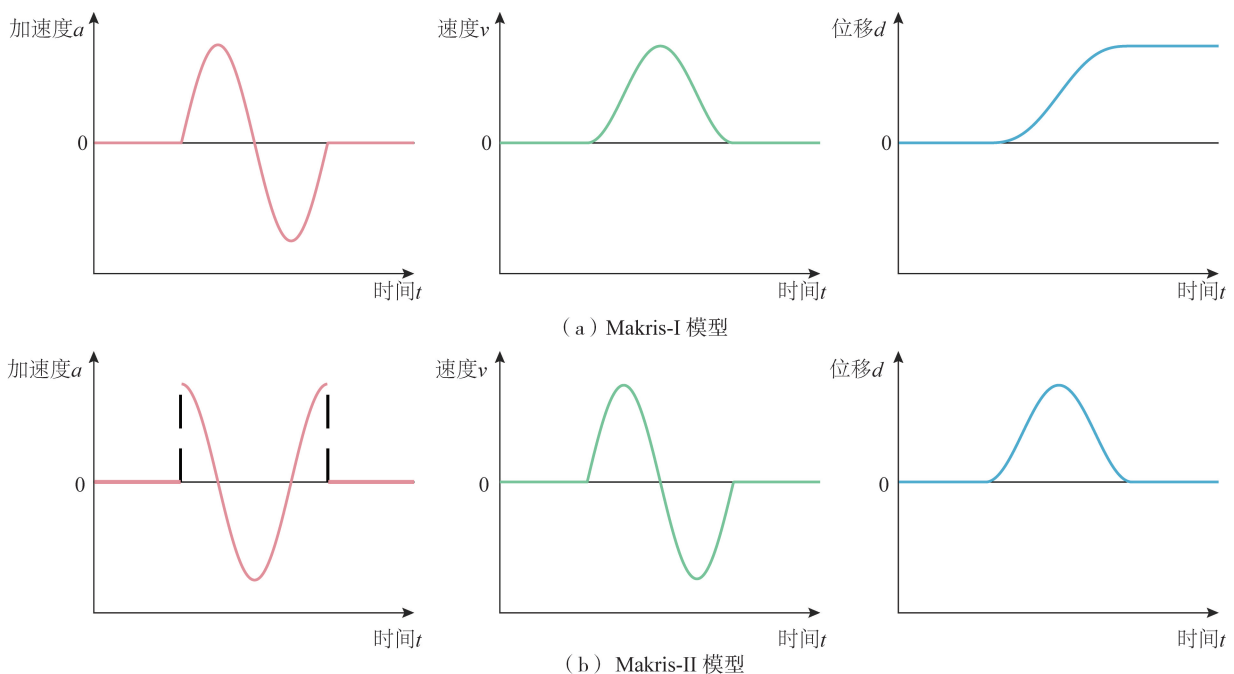


图3 Makris 速度脉冲模型

Fig. 3 Makris velocity pulse models

蒲武川等^[3]在 Makris 模型的基础上进行了改进,提出了考虑正负速度峰值差异的脉冲表征模型。PARK 等^[11]在模拟跨断层高架桥的输入地震动时,采用了 Makris 模型模拟前方向性脉冲分量,并与实际地震动记录结合生成宽频带地震动。

2.2.2 Alavi 模型(2000年)

ALAVI 等^[34]提出了三段式线性速度脉冲表征模型,简称为 Alavi 模型(2000年),该模型的速度时程表达式为

$$\dot{u}(t) = \begin{cases} \frac{V_p}{0.25 T_p} t & 0 \leq t < 0.25 T_p \\ V_p - \frac{V_p}{0.25 T_p} (t - 0.25 T_p) & 0.25 T_p \leq t < 0.75 T_p \\ -V_p + \frac{V_p}{0.25 T_p} (t - 0.75 T_p) & 0.75 T_p \leq t < T_p \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_p 为脉冲周期; V_p 为速度脉冲的幅值,可取为地面运动速度时程的最大值;该模型仅有 2 个关键参数: T_p 、 V_p 。通过对速度时程进行 1 次微分和 1 次积分,可以分别得到 Alavi 模型的加速度时程曲线与位移时程曲线,如图 4 所示。由图可知,Alavi 模型的位移时程曲线具有前方向性效应特征,也注意到其加速度时程曲线是不连续的。

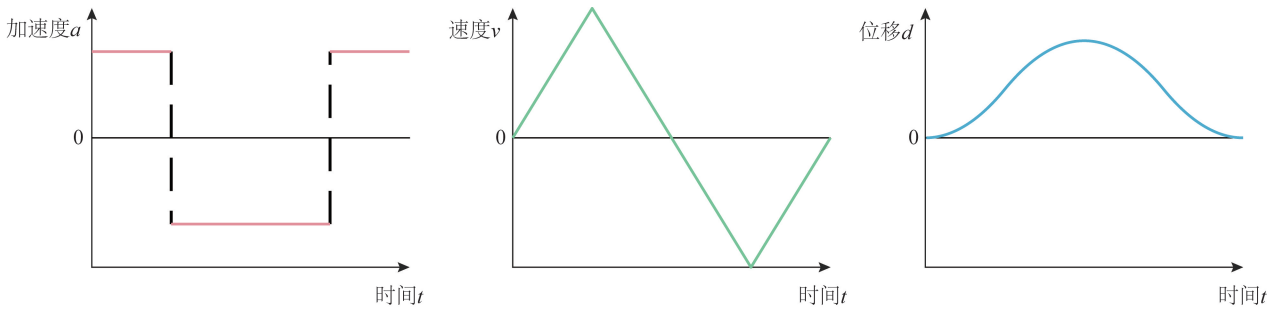


图 4 Alavi 速度脉冲模型

Fig. 4 Alavi velocity pulse models

2.2.3 Menuin 模型(2002 年)

MENUN 等^[35]提出了带包络函数的速度脉冲表征模型,简称为 Menuin 模型(2002 年),该模型的速度时程表达式为

$$\dot{u}(t) = \begin{cases} V_p \exp\left[-n_1\left(\frac{3}{4}T_p - t + t_0\right)\right] \sin\left[\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right] & t_0 < t \leq t_0 + \frac{3}{4}T_p \\ V_p \exp\left[-n_2\left(-\frac{3}{4}T_p + t - t_0\right)\right] \sin\left[\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right] & t_0 + \frac{3}{4}T_p < t \leq t_0 + 2T_p \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: T_p 为脉冲周期; V_p 为速度脉冲的幅值; t_0 为脉冲的起始时刻; n_1 、 n_2 为形状参数。该模型共有 4 个关键参数: T_p 、 V_p 、 n_1 和 n_2 。式(10)中所含的指数项 $\exp[\cdot]$ 为包络函数,其目的是为了脉冲在达到峰值之前逐渐增强,而在峰值过后,进入一个衰减过程。

根据 Menuin 模型的速度时程表达式(10),通过 1 次微分和 1 次积分可以分别得到加速度时程曲线与位移时程曲线,如图 5 所示。由图可知,Menuin 模型的位移时程曲线具有滑冲效应特征,也注意到其加速度时程曲线是不连续的。

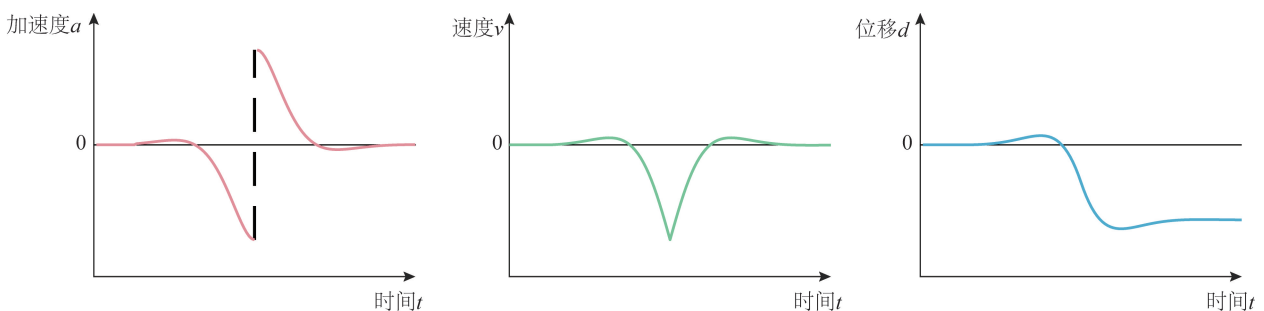


图 5 Menuin 速度脉冲模型

Fig. 5 Menuin velocity pulse models

2.2.4 Mavroeidis 模型(2003 年)

MAVROEIDIS 等^[36]基于 Gabor 小波提出了一种速度脉冲表征模型,该模型属于一种幅值可调的三角函数,简称为 Mavroeidis 模型(2003 年),该模型速度时程的表达式为

$$\dot{u}(t) = \begin{cases} \frac{V_p}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_p)\right) \right] \cos[2\pi f_p(t-t_p) + \varphi] & t_p - \frac{\gamma}{2\pi f_p} \leq t \leq t_p + \frac{\gamma}{2\pi f_p} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_p 为速度脉冲幅值; f_p 为用于幅值调制的简谐函数的频率; γ 为控制振荡过程的参数; φ 为相位角; t_p 为速度脉冲峰值对应的时刻。Mavroeidis 模型的位移时程表达式与加速度时程表达式较为复杂,可以参考文献^[36]。

根据 Mavroeidis 模型的速度时程表达式(11),通过 1 次微分和 1 次积分可以分别得到加速度时程曲线与位移时程曲线,如图 6 所示。由图可知,当参数 $\gamma = \pi/2$ 且 $\varphi = 0$ 时, Mavroeidis 模型的位移时程曲线具有滑冲效应特征。

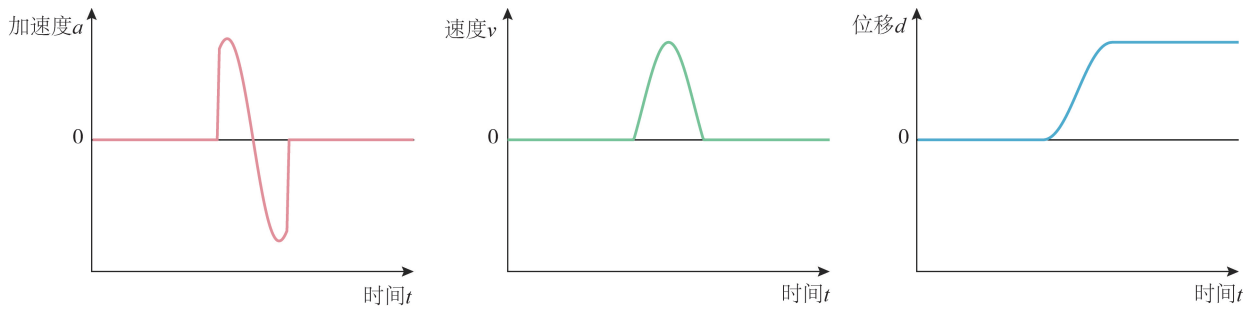


图 6 Mavroeidis 速度脉冲模型

Fig. 6 Mavroeidis velocity pulse models

DICKINSON 等^[37]直接使用 Gabor 小波作为脉冲表征模型,其中的调制函数为指数形式的高斯函数。MAVROEIDIS 等^[36]认为如果直接以 Gabor 小波作为速度脉冲,那么在该脉冲作用下,将无法得到单自由度系统动力反应的闭合解,但是,若将 Gabor 小波表达式中的调制函数(指数形式的高斯函数)替换为余弦函数,则可以得到闭合解。MAVROEIDIS 等^[38]对式(11)所示的速度脉冲模型进行了改进,并推导了在其作用下无阻尼 SDOF 系统的动力反应;而 ALONSO-RODRIGUEZ 等^[39]则推导了在其作用下有阻尼 SDOF 系统的动力反应。DABAGHI 等^[40]建议的近断层地震动模拟方法中使用了 Mavroeidis 模型。曾聪等^[41]使用 Mavroeidis 模型替代地震动中的低频分量,并与地震动中的高频分量合成,得到人工生成的断层地震动;李帅等^[42]也采用了类似的方法,获得了用于分析苏通长江大桥地震反应的输入激励。ZHANG 等^[43]通过调整 Mavroeidis 模型中的关键参数获得多种低频脉冲,并将这些低频脉冲与地震动高频分量叠加,最终得到具有不同永久位移的人工脉冲型地震动。

在 Mavroeidis 模型的基础上,HOSEINI 等^[44]对脉冲速度时程的幅值函数进行了修正,将式(11)中用于调幅的三角函数 $0.5 [1 + \cos(2\pi f_p(t-t_p)/\gamma)]$ 替换为更加复杂的多项式函数,构成一种新的速度脉冲表征模型,用于模拟具有滑冲效应特征的速度脉冲,简称为 Hoseini 模型(2013 年)。Hoseini 模型的速度时程 $\dot{u}(t)$ 和加速度时程 $\ddot{u}(t)$ 的表达式分别为

$$\dot{u}(t) = A_p \left(\frac{4f_p}{\gamma} \right)^4 \left[(t-t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{4f_p} \right)^2 \right]^2 \cos(2\pi f_p t + \varphi) \quad t \in \left[t_0 - \frac{\gamma}{4f_p}, t_0 + \frac{\gamma}{4f_p} \right] \quad (12)$$

$$\ddot{u}(t) = A_p \left(\frac{4f_p}{\gamma} \right)^4 \left\{ \left[(t-t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{4f_p} \right)^2 \right] \left[-2\pi f_p \left((t-t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{4f_p} \right)^2 \right) \sin(2\pi f_p t + \varphi) + 4(t-t_0) \cos(2\pi f_p t + \varphi) \right] \right\} \quad (13)$$

$$t \in \left[t_0 - \frac{\gamma}{4f_p}, t_0 + \frac{\gamma}{4f_p} \right]$$

式中: A_p 为幅值调控系数; f_p 、 φ 分别为三角函数的圆频率和相位角; 参数 γ 调控速度时程穿零的振荡特征; t_0 为速度脉冲峰值对应的时刻; 该模型共有 3 个关键参数: A_p 、 γ 、 f_p 。Hoseini 模型的位移时程表达式,可以通

过对式(12)进行积分得到,积分计算结果可参考文献[44]。

2.2.5 He 模型(2008 年)

HE 等^[45]基于 Belarge 小波提出了一种速度脉冲表征模型,简称为 He 模型(2008 年),该模型的速度时程表达式为

$$\dot{u}(t) = Ct^n e^{-at} \sin(\omega_p t + \Theta) \quad t \geq t_0 \quad (14)$$

式中: T_p 为脉冲周期, $\omega_p = 2\pi/T_p$ 是脉冲周期对应的圆频率; C 为脉冲调幅系数; Θ 为脉冲相位角; a 为衰减系数; n 为偏斜系数,取非负整数; t_0 为脉冲的起始时刻。

He 模型的加速度时程 $\ddot{u}(t)$ 与位移时程 $u(t)$ 的表达式分别为

$$\ddot{u}(t) = Ct^n e^{-at} \left[\left(\frac{n}{t} - a \right) \sin(\omega_p t + \Theta) + \omega_p \cos(\omega_p t + \Theta) \right] \quad t \geq t_0 \quad (15)$$

$$u(t) = Ce^{-at} \sum_{j=0}^n \frac{(-1)^j n! t^{n-j}}{\rho^{j+1} (n-j)!} \sin[\omega_p t + \Theta - (j+1)\beta] + C \frac{(-1)^n n!}{\rho^{n+1}} \sin[-\Theta + (n+1)\beta] \quad (16)$$

式中:参数 $\rho = \sqrt{a^2 + \omega_p^2}$, $\rho \cdot \sin \beta = \omega_p$, $\rho \cdot \cos \beta = -a$,其他参数同式(14)。He 模型的参数较多,但这些参数对应的物理意义并不明确,特别是当偏斜系数 $n \geq 1$ 时。He 模型的加速度、速度、位移时程曲线如图 7 所示,其中相关的参数为: $n=0$, $a=0.9$, $w_p=1.5$ 。

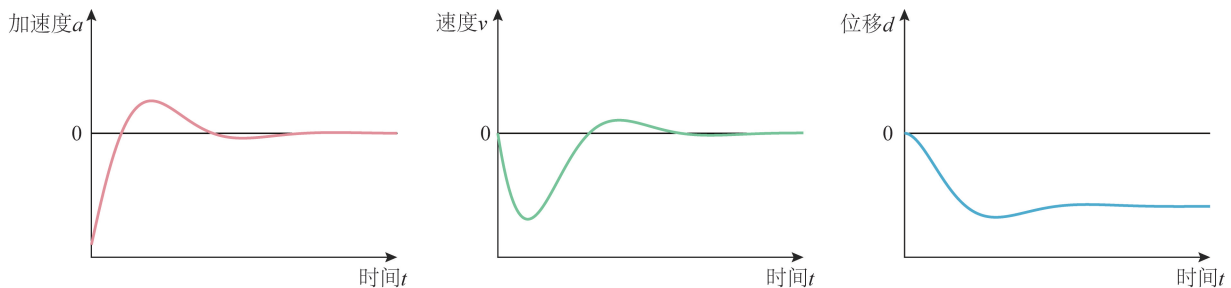


图 7 He 速度脉冲模型

Fig. 7 He velocity pulse models

2.2.6 Mukhopadhyay 模型(2013 年)

MUKHOPADHYAY 等^[2]基于 Mexican hat 函数以及 Mexican hat 函数的积分形式建立了 2 种速度脉冲表征模型,简称为 Mukhopadhyay-I 模型(2013 年)与 Mukhopadhyay-II 模型(2013 年)。

Mukhopadhyay-I 模型的速度时程 $\dot{u}(t)$ 与加速度时程 $\ddot{u}(t)$ 的表达式分别为

$$\dot{u}(t) = V_p \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2} \right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} \right) \quad (17)$$

$$\ddot{u}(t) = V_p \left(\frac{t^3}{\sigma^4} - \frac{3t}{\sigma^2} \right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} \right) \quad (18)$$

式中: V_p 为速度脉冲的幅值; σ 为脉冲周期的控制参数。该模型仅有 2 个关键参数: σ 和 V_p 。根据 Mukhopadhyay-I 模型绘制的时程曲线如图 8 所示,可以看出,当 $t=0$ 时, $|\dot{u}|_{\max} = V_p$;而当 $t=\sigma$ 时, $|\dot{u}|_{\min} = 0$ 。

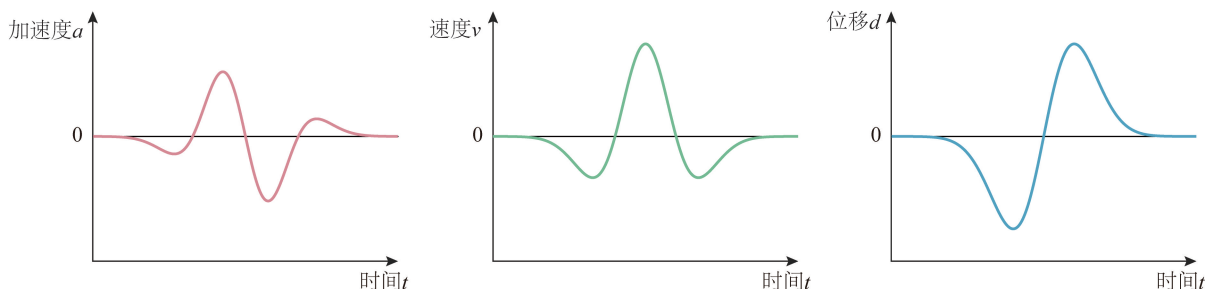


图 8 Mukhopadhyay-I 速度脉冲模型

Fig. 8 Mukhopadhyay-I velocity pulse models

Mukhopadhyay-II 模型的速度时程 $\dot{u}(t)$ 与加速度时程 $\ddot{u}(t)$ 的表达式分别为

$$\dot{u}(t) = V_p t \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (19)$$

$$\ddot{u}(t) = V_p \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (20)$$

式中: V_p 为速度脉冲的幅值; σ 为脉冲周期的控制参数。该模型仅有 2 个关键参数: σ 和 V_p 。根据 Mukhopadhyay-II 模型绘制的时程曲线如图 9 所示, 可以看出, 当 $t=0$ 时, $|\dot{u}|_{\min}=0$; 而当 $t=\sigma$ 时, $|\dot{u}|_{\max}=V_p \sigma \exp(-1/2)$ 。

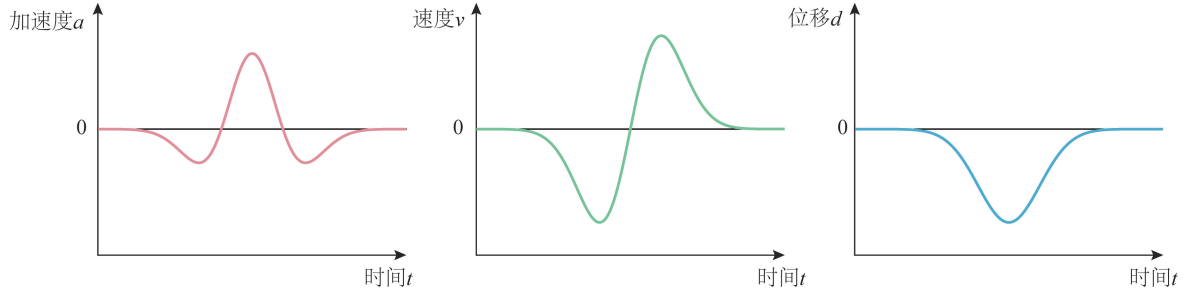


图 9 Mukhopadhyay-II 速度脉冲模型

Fig. 9 Mukhopadhyay-II velocity pulse models

2.2.7 Yadav 模型(2017 年)

YADAV 等^[1]基于正态分布函数建立了一种反映滑冲效应特征的速度脉冲模型, 简称为 Yadav 模型(2017 年), 该模型中速度时程 $\dot{u}(t)$ 与加速度时程 $\ddot{u}(t)$ 的表达式分别为

$$\dot{u}(t) = \frac{A_p}{\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(t-t_p)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

$$\ddot{u}(t) = -\frac{A_p(t-t_p)}{\sigma^3} \cdot \exp\left(-\frac{(t-t_p)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (22)$$

式中: σ 为脉冲周期的控制参数; t_p 为脉冲峰值对应的时刻; A_p 为脉冲幅值调控系数。该模型仅有 2 个关键参数: A_p 、 σ 。参数 σ 既影响脉冲周期, 又影响脉冲幅值。Yadav 模型的加速度、速度和位移时程曲线如图 10 所示。

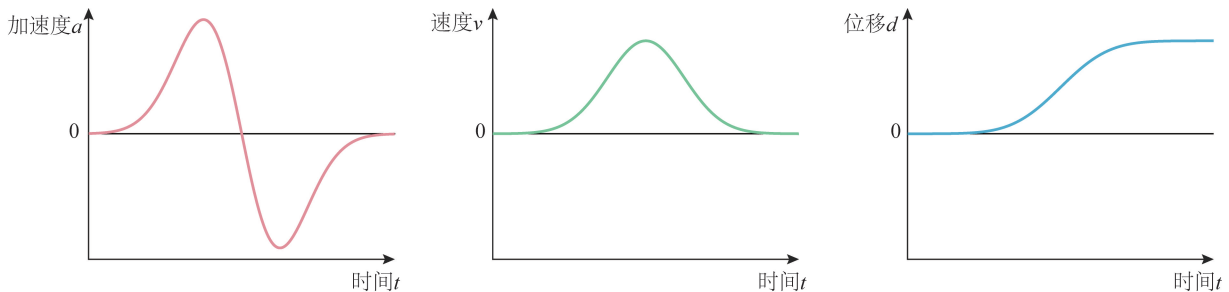


图 10 Yadav 速度脉冲模型

Fig. 10 Yadav velocity pulse models

2.2.8 Ezzodin 模型(2021 年)

EZZODIN 等^[46]基于一类多项式函数, 即一种钟形函数 (bell-shaped function), 建立了一种反映滑冲效应特征的速度脉冲模型, 简称为 Ezzodin 模型(2021 年), 该模型的速度时程表达式为

$$\dot{u}(t) = V_p [(t-t_0)^2 - t_\beta^2]^n \quad t_0 - t_\beta \leq t \leq t_0 + t_\beta \quad (23)$$

式中: V_p 为速度脉冲的幅值; 参数 t_β 控制脉冲周期, 取正值; 参数 n 建议取 2, 可以使得速度时程具有滑冲效应特征; t_0 为脉冲的起始时刻; 该模型仅有 2 个关键参数: V_p 和 t_β 。Ezzodin 模型的加速度、速度和位移时程曲线如图 11 所示。EZZODIN 等^[47]将 Ezzodin 模型用于生成具有滑冲效应特征的脉冲型地震动。

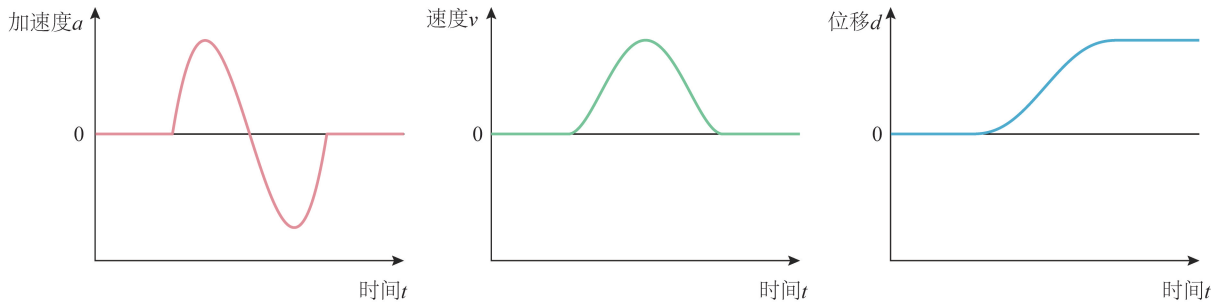


图 11 Ezzodin 速度脉冲模型

Fig. 11 Ezzodin velocity pulse models

2.3 多脉冲表征模型

除了较为明确的单脉冲形式,研究^[3,7,48]认为地震动可含有多个脉冲;但是,目前对于地震动记录中脉冲数量的确定方法并没有统一的标准,不同研究资料对脉冲数量的定义不尽相同。在文献[3,7,48]中,采用地震动速度时程的半循环个数来衡量地震动记录中所含有的脉冲数量。ZHAI 等^[48]在研究中使用与地震动能量有关的准则,从地震动速度时程中识别出多个脉冲。王东升等^[9]认为,具有多脉冲特征的地震动分量也是地震动信号中低频、短持时的组成部分。但是,对于多脉冲情况目前暂时缺乏深入研究,在结构抗震分析中也未给予充分考虑。

具有多脉冲形式的脉冲表征模型有:李新乐模型、He 模型和 Mavroeidis 模型。在 Mavroeidis 模型中,当振荡过程控制参数 γ 取较大的数值时,速度时程曲线会出现振荡特征,正负峰值多次交替出现,可以看作含有多个脉冲。MAKRIS 等^[10]基于三角函数对地震动时程中多个低频位移循环的情况建议了一种多脉冲表征模型,并认为需注意多个脉冲幅值之间的衰减关系。

李新乐等^[49]基于三角函数,建立了一种速度脉冲表征模型,简称为李新乐模型,该模型允许设定脉冲的个数,属于多脉冲模型。李新乐模型的速度时程表达式为

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=0}^N \mu_i \quad (24)$$

$$\mu_i(t) = \begin{cases} \alpha_i V_p \sin(\omega_p t) & t \in \left[\frac{i}{2} T_p, \frac{(i+1)}{2} T_p \right] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\omega_p = 2\pi/T_p$ 为脉冲周期 T_p 对应的圆频率; V_p 为速度脉冲的幅值; α_i 为第 i 个脉冲的峰值折减系数,取值范围为 $[0, 1]$; N 为多个脉冲波峰、波谷的总数,可取 $0, 1, 2, 3, \dots$ 。根据式(25)可知,李新乐模型可以通过调整脉冲峰值折减系数 (α_i) 的值体现不同时间段脉冲幅值的增减变化。应注意,李新乐模型采用了分段函数,式(25)在函数分段处只保证了函数的连续性,却不可微分。因此,李新乐模型的加速度时程是不连续的。

3 脉冲表征模型的研究意义与作用

脉冲表征模型在结构抗震研究中所发挥的作用以及研究意义,共涉及以下七个方面,分别是:①地震动脉冲分量识别;②描述地震动脉冲分量关键特征;③地震危险性分析;④地震动速度脉冲作用下的结构反应规律与特征;⑤脉冲型地震动模拟;⑥近场条件下结构抗震、防震性能评估;⑦近场条件下结构抗震、防震设计。这些研究方向或应用之间的关系可以构成具有系统性的框架,如图 12 所示。

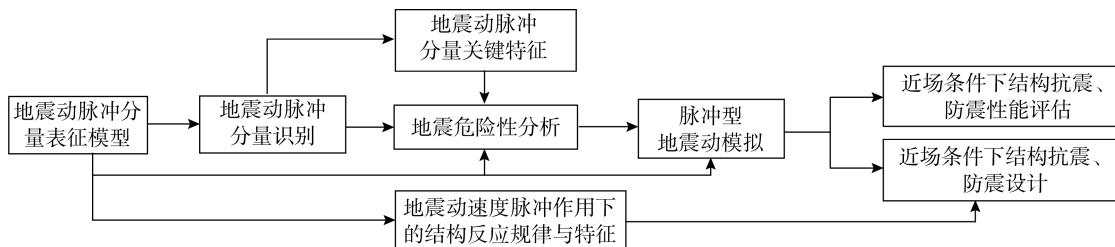


图 12 地震动脉冲分量表征模型在研究框架中的定位

Fig. 12 Role in the research framework of pulse-component models of earthquake ground motions

3.1 地震动脉冲分量的识别与提取

在部分基于拟合原理的脉冲分量识别(提取)方法中,识别出的脉冲波形以及关键脉冲表征参数均依赖于识别方法中采用的脉冲表征模型。例如, MENUN 等^[35]采用非线性回归,获得最佳的脉冲表征参数; DICKINSON 等^[37]通过使用脉冲表征模型对地震动记录进行了非线性最小二乘拟合,从而获得关键的脉冲表征参数。另外,通过对识别与提取的关键脉冲表征参数进行分析与归纳可以进一步得出地震动脉冲分量的基本属性与特征。在此基础之上,可以建立脉冲分量特征参数与震源机制的关系^[14,16-18],为明确脉冲分量特征与近场条件下地震危险性之间的定量关系奠定基础^[15]。

也有学者针对多脉冲的情况进行了研究。LU 等^[50]采用基于小波分析的累次提取方法对含有多个脉冲分量的地震动时程进行脉冲识别与提取。CHEN 等^[51]采用基于 HHT 的自动化提取方法对地震动时程进行多脉冲识别与提取,并将提取出的多脉冲参数与地震参数进行统计,从而分析它们之间的相关性。应注意到,文献[45,48,52]研究表明,脉冲型地震动中脉冲分量的识别结果并不完全相同,而是依赖于研究者使用的脉冲识别与提取方法。

3.2 地震危险性分析

在近场条件下地震危险性分析(seismic hazard analysis)^[15,53-55]中,需要统计分析出脉冲型地震动的发生概率,因此,需要对地震动记录进行脉冲分量识别,从而判断其是否属于脉冲型地震动,进而完成统计分析。同时,近场条件下地震危险性分析中的地震动预测模型需要反映脉冲周期对地震动强度指标的影响^[55]。为了探究脉冲周期与地震动强度指标之间的关系,首先需要识别并提取地震动记录中的脉冲分量并将脉冲特征参数化,而识别与提取过程需要建立或选择合适的脉冲表征模型。由此看出,近场条件下地震危险性分析的部分环节需要使用脉冲表征模型。

3.3 地震动脉冲作用下结构动力反应特征与规律

数学上,脉冲表征模型可以用解析式进行表达。如果该模型具有比较简单的形式,那么将其作为激励可以推导出单自由度(SDOF)系统脉冲反应的解析解。例如,ALONSO-RODRIGUEZ 等^[39]获得了 Mavroedis 模型作用下的解析解;MYLONAKIS 等^[28]给出了简单脉冲表征模型作用下非线性 SDOF 系统动力反应的解析结果;CLOUGH 等^[25]给出了半正弦脉冲荷载、矩形脉冲荷载以及三角形脉冲荷载作用下无阻尼 SDOF 系统的动力反应解析表达式。

一方面,通过单自由度系统脉冲反应的解析形式,可以更加深入地把握关键脉冲参数与反应峰值之间的内在关系,从而可以更好地揭示地震动脉冲作用下结构动力反应的特征与规律(例如,地震动脉冲分量对反应谱的放大作用^[12-13]),启发减小峰值反应的减震方法。

另一方面,单自由度系统脉冲反应的解析解可以为复杂结构在脉冲型地震动激励下的动力反应(振动台试验结果或时程分析计算结果)提供动力学解释,为脉冲型地震动作用下的结构反应规律提供理论依据。

此外,以脉冲表征模型作为复杂结构地震反应时程计算分析的输入激励,可以更直接地反映出地震动脉冲分量作用下结构的动力反应特点以及可能存在的抗震薄弱环节,为完善相应的结构抗震设计方法指明方向。

3.4 模拟脉冲型地震动

脉冲型地震动可以分解为低频、高频 2 种成分,或者分解为脉冲分量与非脉冲分量^[1,33,56]。脉冲表征模型可以用于替代地震动中的低频成分,然后与高频成分组合,合成新的人工脉冲型地震动(artificial pulse-type motion),用于模拟近断层地震动^[14]、构造断层地震动^[33,57-58]。例如,EZZODIN 等^[47]合成了具有滑冲效应特征的脉冲型地震动。杨怀宇等^[59]采用不同的脉冲表征模型模拟地震动脉冲分量,用于合成人工地震动,并将其作为跨断层隔震桥梁的时程计算输入激励。

3.5 结构抗震设计和抗震能力评估

脉冲表征模型也被用于替代脉冲型地震动作为输入激励,结构在其激励下的反应结果可以用于结构抗震设计和抗震能力评估^[3,39,45]。MAKRIS 等^[10,32]和 HE 等^[45]认为用脉冲表征模型作为对隔震结构的输入激励,其动力反应结果可以体现出隔震结构在脉冲型地震动作用下的主要反应特征。梁瑞军等^[60]采用非线性时程分析研究了 3 种脉冲表征模型对多层结构的作用效果,并与脉冲型地震动的作用效果进行比较,最后得出结论:合理选择的脉冲表征模型可以替代实际的脉冲型地震动用于结构地震反应分析。ALAVI 等^[61]使用脉冲表征模型替代脉冲型地震动,计算在其作用下结构的动力反应,并将脉冲表征模型用于估计结构底部的

水平抗力需求。SEHHATI 等^[62]使用修正后的 Gabor 小波作为脉冲表征模型,将其作为结构地震反应计算分析的输入激励,获得了与脉冲型地震动作用下相似的结构反应。该研究进一步指出,当结构基本周期与脉冲周期之比(T_{stru}/T_p)在 0.4~4.0 的范围内时,结构地震反应由地震动脉冲分量控制,脉冲表征模型可以较好地反映出脉冲型地震动的激励特点。类似地,ALAVI 等^[61]的研究认为,这个周期比(T_{stru}/T_p)的范围是 0.375~3.000。

4 研究现状分析与讨论

4.1 脉冲表征模型分类

目前,国内外学者已提出多种脉冲表征模型,各种模型针对不同的研究内容与目的具有各自的特点。研究人员在选用脉冲表征模型时,也并不存在统一的标准。然而,形式简洁的脉冲表征模型,如果可以得出 SDOF 系统在其激励下的闭合解,则能够为理论研究中的计算推导环节提供极大便利,值得推广使用。根据脉冲分量的产生机制,建立能够反映滑冲效应特征与前方向性效应特征的脉冲表征模型是非常重要的。基于唯象的滑冲效应特征的脉冲表征模型有:Menun 模型、Yadav 模型、Ezzodin 模型、Makris-I 模型和 Hoseini 模型;基于唯象的前方向性效应特征的脉冲表征模型有:Alavi 模型、Mukhopadhyay-II 模型、Makris-II 模型、Ricker 对称模型以及 Mavroeidis 模型(需要参数取特定的值)。

根据脉冲表征模型采用的数学函数类型进行分类:

1) 线性模型有:Alavi 模型。

2) 多项式模型有:Ezzodin 模型。

3) 正态分布函数模型有:Mukhopadhyay-I 模型、Mukhopadhyay-II 模型、Yadav 模型、Ricker 对称模型和 Ricker 反对称模型。

4) 三角函数模型有:Menun 模型、Makris-I 模型、Makris-II 模型、Hoseini 模型、He 模型、Mavroeidis 模型和李新乐模型。

根据脉冲表征模型的加速度时程曲线是否连续(是否存在突变)进行分类,加速度时程曲线不连续的模型有:Makris-II 模型、Alavi 速度脉冲模型和 Menun 速度脉冲模型;加速度时程曲线连续的模型有:Makris-I 模型、Mavroeidis 模型、Ricker 对称模型、Ricker 反对称模型、Mukhopadhyay-I 模型、Mukhopadhyay-II 模型、Yadav 模型以及 Ezzodin 模型。由于实际地震动的加速度随时间连续变化,因此加速度时程曲线连续的脉冲表征模型具有更好的物理可解释性。对于反映同一类特征的多种唯象脉冲表征模型,虽然它们在数学表达式上存在差异,但没有任何一种模型体现出关于这种差异的独特优势,这些数学表达形式上的差异也没有反映出更深刻的机理。

4.2 脉冲表征模型的相似关系

对于具有前方向性效应特征的脉冲表征模型,其加速度、速度和位移时程曲线分别具有:三峰(1 个主正峰,2 个负峰)、双峰(1 个正峰和 1 个负峰交替出现)、单峰特征;对于具有滑冲效应特征的脉冲表征模型,其加速度、速度和位移时程曲线分别具有:双峰(1 个正峰和 1 个负峰交替出现)、单峰、阶跃特征。由于在物理关系上,速度对时间的导数是加速度,所以具有滑冲效应特征的脉冲表征模型的加速度时程曲线与具有前方向性效应特征的脉冲表征模型的速度时程曲线是相似的;所以,在构建脉冲表征模型时,二者的数学表达式可以相互借鉴。

同理,具有滑冲效应特征的脉冲表征模型的速度时程曲线与具有前方向性效应特征的脉冲表征模型的位移时程曲线是相似的,二者的数学表达式也可以相互借鉴。两类模型的相似关系可以通过图 13 进行总结。

4.3 脉冲表征模型的表征对象

根据对现有脉冲表征模型的整理结果可以看出,脉冲表征模型有 3 个关键表征对象,分别是:①效应特征;②脉冲幅值;③脉冲周期。

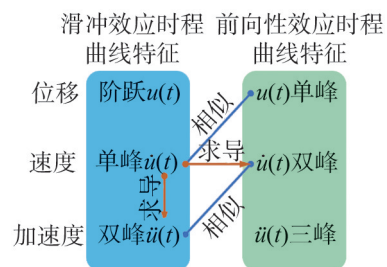


图 13 滑冲效应模型与前方向性效应模型的相似关系

Fig. 13 Similarity relation between fling-step pulse models and forward-directivity pulse models

脉冲型地震动具有两类效应特征:滑冲效应特征与前方向性效应特征;脉冲表征模型应能够反映这两类效应特征,才能将理想化的激励模型与实际脉冲型地震动的激励特点结合起来,更加针对工程结构抗震问题。

通常速度脉冲和加速度脉冲分别将速度脉冲幅值和加速度脉冲幅值作为衡量脉冲强度的指标;因而,脉冲表征模型需要对相应的幅值提供显示调控参数,以便简洁且准确地反映脉冲强度。

地震动脉冲周期(T_p)与结构基本周期($T_{S_{\text{str}}}$)的关系对结构的动力反应具有显著影响,尤其是当二者的比例接近 1:1 时。CHANG 等^[63]的研究指出,前方向性效应可以在 $T_{S_{\text{str}}}/T_p$ 为 0.75~1.09 的范围内显著放大谱加速度,并且在此范围内的平台区段,放大系数可达 3.31。LI 等^[64]的研究指出,场地底部基岩上方的覆盖土体会对地震动脉冲周期造成影响。该研究认为,基岩处的地震动在经过覆盖土层传递至场地表面后,所含脉冲分量的周期将发生改变,导致场地表面地震动的脉冲周期趋向于覆盖土体基本周期的 1.5 倍。因而,近场范围内的结构抗震设计需特别关注脉冲周期为场地覆盖土体基本周期 1.5 倍时的结构地震反应。CHIOCCARELLI 等^[55]的分析指出,脉冲周期的方差随震级的提高而增大,7 级地震的脉冲周期方差可达 60%。

4.4 不同脉冲表征模型比较方法

对于已有的多种脉冲表征模型,目前尚缺乏系统性的比较手段与评价方法,但仍有 2 种可行的方式可用于对不同脉冲表征模型的激励效果进行考察与比较。

第一种方式是以原地震动激励下的结构反应为参照,对比不同脉冲表征模型作用下结构反应与参照反应的吻合程度,吻合程度越高表明对应的脉冲表征模型能够更好地反映出原地震动中脉冲分量的作用特征,但是该吻合程度尚无统一的定量表示标准。蒲武川等^[3]、HE 等^[45]以及梁瑞军等^[60]都使用了这类比较方法。

第二种方式是以原地震动的反应谱为参照,对比不同脉冲表征模型作用下反应谱曲线与参照曲线的吻合程度,吻合程度越高表明对应的脉冲表征模型能够更好地反映出原地震动中脉冲分量的作用特征。例如,蒲武川等^[3]、谢俊举等^[13]以及 HE 等^[45]都使用了类似的比较方法。脉冲表征模型与原地震动二者的反应谱相比,通常原地震动的加速度反应谱在高频段(短周期范围)内具有更高的谱值。这种差异体现出了原地震动中非脉冲分量的作用特征。

4.5 地震动脉冲分量对反应谱的放大作用

谢俊举等^[13]为了研究脉冲型地震动中脉冲分量对地震动反应谱的放大作用,将脉冲型地震动中的脉冲分量分离出去,得到残余分量,然后,对比原脉冲型地震动与其残余分量二者反应谱的变化情况。该研究指出,脉冲效应对反应谱的放大作用具有窄带特征,并不是在全部周期段一致放大,而是在不同周期段具有不同的放大效果。类似地,相关文献[12, 15, 63]也指出,脉冲分量对反应谱的放大作用具有窄带特征。SHAHI 等^[15]指出,脉冲分量对反应谱的放大作用在 $T \approx 0.8 T_p$ 处最显著(T 为反应谱的横坐标,表示周期; T_p 为脉冲周期)。

目前,国内 GB 55002—2021《建筑与市政工程抗震通用规范》^[65](简称为《抗震通用规范》)也对近场条件下的结构抗震设计作出要求。《抗震通用规范》指出:当工程结构处于发震断裂两侧 10 km 以内时,应计入近场效应对设计地震动参数的影响(见 4.1.1 条第 1 款)。

GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》(2016 年版)^[66]在抗震性能化设计、隔震和消能减震设计中涉及近场效应的考虑范围:①在抗震性能化设计(3.10.3 条第 1 款)中规定:对处于发震断裂两侧 10 km 以内的结构,地震动参数应计入近场影响,5 km 以内宜乘以增大系数 1.5,5 km 以外乘以不小于 1.25 的增大系数;②在隔震和消能减震设计(12.2.2 条第 2 款)中规定:当处于发震断层 10 km 以内时,输入地震波应考虑近场影响系数,5 km 以内宜取 1.5,5 km 以外可取不小于 1.25。GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[66],2016 年版中采用放大地震动参数的方式(乘以放大系数)考虑近断层条件下脉冲型地震动导致的不利影响。该方法的实际效果是统一放大地震作用,没有反映脉冲效应在反应谱不同周期段具有不同放大效果的特点。

4.6 关于脉冲型地震动时程的选取

现有研究^[4, 10-11]已充分证明脉冲型地震动作用下的结构反应明显区别于远场地震动作用下的结构反应。因此,对近场范围内的土木工程结构进行抗震设计时,需在结构地震反应计算分析阶段考虑结构在地震动脉冲分量作用下的反应特点,可以在结构非线性时程计算分析的过程中选择具有脉冲作用特征的地震动作为输入激励。然而,在地震动选取时应注意对地震动中脉冲特征的识别。KOHRANGI 等^[56]的研究表明:

对于非脉冲型地震动与脉冲型地震动,二者并不能直接通过反应谱曲线的形状进行严格区分,二者的反应谱曲线可以非常接近;在反应谱曲线吻合程度较高的前提下,二者作用下的结构反应依然可能存在显著差异。

一般情况下,复杂结构的计算分析效率有限,无法使用大量的地震动作为激励得到具有概率统计意义的地震反应,而是选择若干具有代表性的地震动作为输入激励,验证结构是否满足抗震设计要求。此时,应特别注意所选地震动中脉冲分量的周期与结构基本周期之间的关系^[67-68]。HAYDEN等^[67]认为,在选取的地震动数量较少的时候,所选地震动的脉冲周期应与地震作用下结构主控模态的周期范围相接近。ALMUFTI等^[68]依据地震危险性分析结果,提出了一套确定所选地震动脉冲周期范围的方法。

由于在近场条件下,脉冲型地震动和非脉冲型地震动均有可能发生。因此,在选择地震动时,既要选择一定数量的脉冲型地震动,也要选择一定数量的非脉冲型地震动。在所选地震动中,脉冲型地震动的数量所占的比例也是亟待解决的问题之一。HAYDEN等^[67]对该问题进行了研究,提出了确定脉冲型地震动数量占比的计算方法。

5 结论

本文主要回顾了地震工程研究领域内关于脉冲表征模型的文献资料。对该研究领域内使用的脉冲表征模型进行了收集与整理,并对各类模型的特点进行了比较与归纳,收集整理的脉冲表征模型资料可供后续研究使用。在此基础之上,针对脉冲表征模型在结构抗震研究中所发挥的作用以及研究意义进行了梳理总结,提炼了清晰的研究框架,为后续相关研究提供参考。得出以下结论:

1)从梳理总结出的研究框架可以看出,考虑地震动脉冲效应的地震危险性分析是衔接专业技术与工程应用的核心环节,也是脉冲型地震动相关研究成果应用于工程结构抗震韧性提升的重要内容之一。

2)尽管不同学者针对同一类型的脉冲特征建立了多种不同的脉冲表征模型,目前尚无公认的最佳模型,或者相关的评价标准。虽然这些脉冲表征模型的数学表达形式存在差异,但是在动力学上的表现是接近的,数学表达形式上的差异并不是对本质机理的体现。此外,从计算分析的角度出发,建立的脉冲表征模型应尽可能简洁。

3)对于结构抗震问题,脉冲表征模型应能够反映两类典型的脉冲特征(前方向性效应特征和滑冲效应特征),才能将理想化的激励模式与实际脉冲型地震动的激励特点结合起来。同时指出,分别具有滑冲效应特征与前方向性效应特征的两类脉冲表征模型之间具有相似性。此外,脉冲表征模型的加速度时程应保持连续,从而具有更好的物理可解释性。

4)对于近场条件下的结构抗震设计,应在结构地震反应时程计算分析阶段选取具有脉冲特征的地震动作为输入激励,才能够更全面地反映出脉冲型地震动对工程结构的作用特点。在选取地震动时,应考虑脉冲型地震动数量所占的比例以及所选地震动的脉冲周期与结构主要周期之间的关系。

参考文献:

- [1] YADAV K K, GUPTA V K. Near-fault fling-step ground motions: Characteristics and simulation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 101: 90-104.
- [2] MUKHOPADHYAY S, GUPTA V K. Directivity pulses in near-fault ground motions—I: Identification, extraction and modeling[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 50: 1-15.
- [3] 蒲武川, 梁瑞军, 戴枫禹, 等. 基于三角函数的脉冲型近场地震动的近似模型[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(4): 208-213.
PU Wuchuan, LIANG Ruijun, DAI Fengyu, et al. An analytical model for approximating pulse-like near-fault ground motions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(4): 208-213. (in Chinese)
- [4] KALKAN E, KUNNATH S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings[J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(2): 367-390.
- [5] VAN CAO V, RONAGH H R. Correlation between seismic parameters of far-fault motions and damage indices of low-rise reinforced concrete frames[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 66: 102-112.
- [6] AMIRI G G, MOGHADDAM S A. Extraction of forward-directivity velocity pulses using S-transform-based signal decomposition technique[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014, 12(4): 1583-1614.
- [7] BRAY J D, RODRIGUEZ-MAREK A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(11): 815-828.

- [8] 刘启方, 袁一凡, 金星, 等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 1-10.
LIU Qifang, YUAN Yifan, JIN Xing, et al. Basic characteristics of near-fault ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)
- [9] 王东升, 陈笑宇, 张锐, 等. 基于希尔伯特-黄变换的近断层地震动脉冲特性研究[J]. 地震学报, 2022, 44(5): 824-844.
WANG Dongsheng, CHEN Xiaoyu, ZHANG Rui, et al. Characteristics of pulses in near-fault ground motion based on Hilbert-Huang transform[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(5): 824-844. (in Chinese)
- [10] 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): 85-107.
- [11] PARK S W, GHASEMI H, SHEN J, et al. Simulation of the seismic performance of the Bolu viaduct subjected to near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(13): 1249-1270.
- [12] 赵晓芬, 温增平. 近断层速度脉冲型地震动相关问题研究[J]. 地震学报, 2022, 44(5): 765-782.
ZHAO Xiaofen, WEN Zengping. Review on issues of near-fault velocity pulse-like ground motions[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(5): 765-782. (in Chinese)
- [13] 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): 194-211.
XIE Junju, LI Xiaojun, WEN Zengping. The amplification effects of near-fault distinct velocity pulses on response spectra [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 194-211. (in Chinese)
- [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): 1914-1929.
- [15] SHAHI S K, BAKER J W. An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(2): 742-755.
- [16] HISADA Y. A theoretical method for computing near-fault ground motions in layered half-spaces considering static offset due to surface faulting, with a physical interpretation of fling step and rupture directivity[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1154-1168.
- [17] BURKS L S, BAKER J W. A predictive model for fling-step in near-fault ground motions based on recordings and simulations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 80: 119-126.
- [18] DREGER D, HURTADO G, CHOPRA A, et al. Near-field across-fault seismic ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(1): 202-221.
- [19] SCALA A, FESTA G, DEL GAUDIO S. Relation between near-fault ground motion impulsive signals and source parameters[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(9): 7707-7721.
- [20] 李华聪, 钟菊芳. 垂直和平行于断层方向的脉冲参数特性分析[J]. 地震工程学报, 2021, 43(2): 331-344.
LI Huacong, ZHONG Jufang. Characteristics of pulse parameters perpendicular and parallel to the fault direction [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 331-344. (in Chinese)
- [21] ZHANG Y F, IWAN W D. Active interaction control of tall buildings subjected to near-field ground motions [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 69-79.
- [22] SOMERVILLE P G, SMITH N F, GRAVES R W, et al. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. Seismological Research Letters, 1997, 68(1): 199-222.
- [23] HOWARD J K, TRACY C A, BURNS R G, et al. Comparing observed and predicted directivity in near-source ground motion[J]. Earthquake Spectra, 2005, 21(4): 1063-1092.
- [24] BOORE D M, STEWART J P, SEYHAN E, et al. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes[J]. Earthq Spectra, 2014, 30(3): 1057-1085.
- [25] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [26] MYLONAKIS G, REINHORN A M. Yielding oscillator under triangular ground acceleration pulse[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2001, 5(2): 225-251.
- [27] CUESTA I, ASCHHEIM M A. Isoductile strengths and strength reduction factors of elasto-plastic SDOF systems subjected to simple waveforms[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30(7): 1043-1059.
- [28] MYLONAKIS G, VOYAGAKI E. Yielding oscillator subjected to simple pulse waveforms: Numerical analysis & closed-form solutions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(15): 1949-1974.
- [29] RICKER N. Wavelet functions and their polynomials[J]. Geophysics, 1944, 9: 314-323.
- [30] RICKER N. Further developments in the wavelet theory of seismogram structure[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1943, 33(3): 197-228.
- [31] VASSILIOU M F, TSIAVOS A, STOJADINO Ć B. Dynamics of inelastic base-isolated structures subjected to analytical pulse ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(14): 2043-2060.
- [32] MAKRIS N. Rigidity-plasticity-viscosity: Can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions? [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26(5): 571-591.
- [33] 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): 1-13.

- SHENG Zhaoqi, HU Jinjun, XIE Lili. Review on the simulation of input ground motion for fault-crossing structure and its application[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(1): 1-13. (in Chinese)
- [34] ALAVI B, KRAWINKLER H. Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design[C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, E.T.S.I. Industriales(UPM), 2000: 1-8.
- [35] MENUN C, FU Q. An analytical model for near-fault ground motions and the response of MDOF systems [C]//Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Boston, Massachusetts: Mira Digital Publishing, 2003: 1-10.
- [36] MAVROEIDIS G P, PAPAGEORGIOU A S. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(3): 1099-1131.
- [37] DICKINSON B W, GAVIN H P. Parametric statistical generalization of uniform-hazard earthquake ground motions[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(3): 410-422.
- [38] MAVROEIDIS G P, DONG G, PAPAGEORGIOU A S. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(9): 1023-1049.
- [39] ALONSO-RODRIGUEZ A, MIRANDA E. Assessment of building behavior under near-fault pulse-like ground motions through simplified models[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 79: 47-58.
- [40] DABAGHI M, DER KIUREGHIAN A. Stochastic model for simulation of near-fault ground motions[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2017, 46(6): 963-984.
- [41] 曾聪, 江辉, 黄磊, 等. 跨断层独塔斜拉桥的非线性地震响应特性研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 230-245.
ZENG Cong, JIANG Hui, HUANG Lei, et al. Nonlinear seismic response characteristics of fault-crossing single-tower cable-stayed bridge[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 230-245. (in Chinese)
- [42] 李帅, 张凡, 颜晓伟, 等. 近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(2): 86-97, 106.
LI Shuai, ZHANG Fan, YAN Xiaowei, et al. Synthetic method for near-fault ground motions and its influence on seismic response of super-span cable-stayed bridge[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(2): 86-97, 106. (in Chinese)
- [43] ZHANG F, LI S, WANG J Q, et al. Effects of fault rupture on seismic responses of fault-crossing simply-supported highway bridges [J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110104.
- [44] HOSEINI VAEZ S R, SHARBATDAR M K, GHODRATI AMIRI G, et al. Dominant pulse simulation of near fault ground motions [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12(2): 267-278.
- [45] HE W L, AGRAWAL A K. Analytical model of ground motion pulse for the design and assessment of seismic protective system[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(7): 1177-1188.
- [46] EZZODIN A, AMIRI G G, DEHKORDI M R. Simulation of fling step pulse of near-fault ground motion by using wavelet smoothing and improved bell-shaped function[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 140: 106462.
- [47] EZZODIN A, AMIRI G G, DEHKORDI M R. A Random vibration-based simulation model for nonlinear seismic assessment of steel structures subjected to fling-step ground motion records[J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022, 10(7): 2641-2655.
- [48] ZHAI C H, LI C H, KUNNATH S, et al. An efficient algorithm for identifying pulse-like ground motions based on significant velocity half-cycles[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2018, 47(3): 757-771.
- [49] 李新乐, 朱晞. 近断层地震动等效速度脉冲研究[J]. *地震学报*, 2004, 26(6): 634-643, 678.
LI Xinle, ZHU Xi. Study on equivalent velocity pulse of near-fault ground motions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(6): 634-643, 678. (in Chinese)
- [50] LU Y, PANAGIOTOU M. Characterization and representation of near-fault ground motions using cumulative pulse extraction with wavelet analysis[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(1): 410-426.
- [51] CHEN X Y, WANG D S. Multi-pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 137: 106275.
- [52] 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.
- [53] EFTEKHARI S N, SAYYADPOUR H, KOWSARI M. A near-fault probabilistic seismic hazard assessment for Yasouj, located in the Kazerun fault system, southwest Iran[J]. *Natural Hazards*, 2021, 105(2): 1945-1961.
- [54] YAZDANI A, NICKNAM A, DADRAS E Y, et al. Near-field probabilistic seismic hazard analysis of metropolitan Tehran using region-specific directivity models[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2017, 174(1): 117-132.
- [55] CHIOCCARELLI E, IERVOLINO I. Near-source seismic hazard and design scenarios[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(4): 603-622.
- [56] KOHRANGI M, VAMVATSIKOS D, BAZZURRO P. Pulse-like versus non-pulse-like ground motion records: Spectral shape comparisons and record selection strategies[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2019, 48(1): 46-64.
- [57] YANG S, MAVROEIDIS G P, UCAK A. Analysis of bridge structures crossing strike-slip fault rupture zones: A simple method for generating across-fault seismic ground motions[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2020, 49(13): 1281-1307.
- [58] 惠迎新, 王克海. 跨断层桥梁地震响应特性研究[J]. *桥梁建设*, 2015, 45(3): 70-75.
HUI Yingxin, WANG Kehai. Study of seismic response features of bridges crossing faults[J]. *Bridge Construction*, 2015, 45(3): 70-75. (in Chinese)

- [59] 杨怀宇, 李建中. 断层震动对隔震桥梁地震响应的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 1144-1152.
YANG Huaiyu, LI Jianzhong. Response analysis of seismic isolated bridge under influence of fault-crossing ground motions [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(8): 1144-1152. (in Chinese)
- [60] 梁瑞军, 蒲武川, 黄斌, 等. 脉冲型近场地震动的近似模型比较研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(4): 43-49.
LIANG Ruijun, PU Wuchuan, HUANG Bin, et al. Comparative study of approximating models for pulse-like near-fault ground motions [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(4): 43-49. (in Chinese)
- [61] ALAVI B, KRAWINKLER H. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(6): 687-706.
- [62] SEHHATI R, RODRIGUEZ-MAREK A, ELGAWADY M, et al. Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures [J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 767-779.
- [63] CHANG Z W, SUN X D, ZHAI C H, et al. An empirical approach of accounting for the amplification effects induced by near-fault directivity [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(5): 1871-1885.
- [64] LI B, LU Y, DUAN Z, et al. Near-fault forward directivity effect on the estimation of ground motion amplification factors [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(12): 04021139.
- [65] GB 55002—2021 建筑与市政工程抗震通用规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
GB 55002—2021 General code for seismic precaution of buildings and municipal engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [66] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [67] HAYDEN C P, BRAY J D, ABRAHAMSON N A. Selection of near-fault pulse motions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(7): 0001129.
- [68] ALMUFTI I, MOTAMED R, GRANT D N, et al. Incorporation of velocity pulses in design ground motions for response history analysis using a probabilistic framework [J]. Earthquake Spectra, 2015, 31(3): 1647-1666.