

# 近场下桥梁结构的地震响应分析

王 昊, 谭 平, 殷伟希, 周福霖

(广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室培育基地, 广东 广州 510405)

**摘要:** 提出采用宽频地震 Kanai-Tajimi 模型与速度脉冲 He-Agrawal 模型来模拟近场地震动, 数值模拟验证了该近场地震模型的有效性。采用该模型定量分析了近场地震作用对桥梁结构地震响应的影响规律。近场地震动的脉冲持时是对结构产生破坏的一个重要因素, 近场地震作用对桥梁结构的设计提出了更高的延性要求。

**关键词:** 近场地震; 脉冲分量; 桥梁结构

**中图分类号:** P315.92    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-8662 (2010) 02-0008-07

## 引言

在近近年来发生的地震中, 近场地震带来的灾害日益显著, 对近场地震的研究也得到了越来越多的关注。已有的地震记录表明, 含有速度脉冲的近场地面运动会显著的改变结构的响应特点, 使结构产生较大的内力和位移, 引起桥梁破坏, 甚至倒塌<sup>[1, 2]</sup>。

针对近场地震动的特征, 国内外很多学者对其主要的速度脉冲效应进行了大量的研究工作。然而到目前为止, 记录到的近场地震数量相对较少, 无法从统计意义上对近场地震动速度脉冲给出合理的解释, 而结构在简化脉冲型记录激励下的地震反应具有相似性, 因此国内外很多学者致力于对简化的速度脉冲模型进行研究, 以此来模拟具有速度脉冲效应的近场地震记录。Somerville<sup>[3]</sup>将速度脉冲考虑为冲击的影响, 用简化脉冲模型考虑近场地震动对结构的影响, 取得良好效果。Alavi 和 Krawinkler<sup>[4]</sup>在 Somerville 的简化脉冲模型的基础上, 进行了更深入的研究, 提出了 P2 型矩形速度脉冲模型, 突出简化脉冲模型可以代表近场地震动明显的反应特征, 拟合效果良好。Menun 和 Fu<sup>[5]</sup>综合考虑以往的脉冲模型, 以最小二乘法为基础, 采用非线性回归方法, 提出了一种以指数函数与正弦函数相结合的脉冲模型。Makris<sup>[6]</sup>认为地震波可由不同周期长度的正弦与余弦波组合而成, 因此他将近场地面运动的长周期速度脉冲模拟为三种脉冲类型, 各代表一种特有的正弦或余弦函数。李

收稿日期: 2010-03-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (90815027); 国家自然科学基金项目 (50608021)

作者简介: 王昊, 男, 1982 年生, 硕士研究生. 主要从事桥梁隔震减震研究. E-mail: whao0248@163.com

通讯作者: 谭平, 男, 1973 年生, 博士, 研究员. 研究方向为结构抗震与减震控制.

Email: ptan@gzhu.edu.cn.

新乐和朱晞<sup>[7]</sup>引入了幅值对脉冲强度的贡献率及半周期循环个数两个参数, 使其速度脉冲模型具有了更加广泛的适用性。

近场地震动可认为由一个脉冲分量与一个宽频地震分量叠加而成。其中宽频分量是随机的, 并且主要与局部土质条件有关; 而脉冲分量的特性主要依赖于震源的不同特质, 且在长脉冲周期下具有高峰值地面加速度以及高峰值地面速度。这种近场地面运动脉冲是引起桥梁支座位移与破坏的主要因素。本文选用远场宽频地震 Kanai-Tajimi 模型与 He-Agrawal 近场地震速度脉冲模型, 对现有的典型近场地震记录进行非线性数值拟合, 通过调整脉冲分量跟宽频分量的比值, 得到不同脉冲分量的地震波。分析了合成近场地震波下, 对于高架桥的一系列影响。通过数值模拟与仿真分析, 得到一些对实际工程设计有指导意义的结论。

## 1 桥梁结构模型

本文研究的为一典型两跨连续现浇预应力箱梁桥, 每跨长 58.5 m, 桥面由 31.4 m 长 6.9 m 高的预应力门形桥墩支撑, 两端支承在隔震支座上。图 1 所示为在 ABAQUS 环境下建立的该桥三维有限元分析模型。桥梁上部结构由连续一致的梁截面所模拟, 与桥墩刚性连接, 并在两端各设置 4 个独立的橡胶支座。桥台与桥梁末端采用刚梁单元模拟。帽梁考虑为弹性, 而每根桥墩由刚性墩帽、弹性墩体与非线性墩体三部分组成。

桥梁的振型分析由 ABAQUS 软件实现, 其前 2 阶频率分别为 1.22 Hz 和 1.56 Hz, 分别对应于桥梁结构在纵向和竖向的第一阶振型。第 3 阶振型为结构的扭转振型, 对应频率为 1.71 Hz。第四阶振型为结构竖向的第二阶的扭转振型, 对应频率为 1.82 Hz, 可以说该桥梁结构是一座典型的短跨桥。

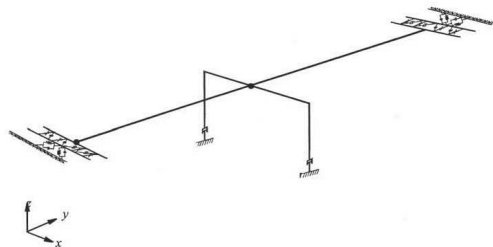


图 1 桥梁三维有限元模型

Fig.1 Three-dimensional finite element model of bridge

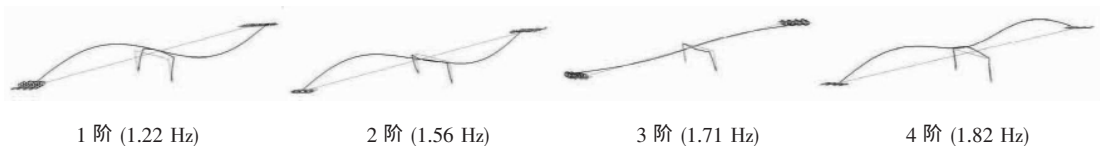


图 2 桥梁前 4 阶振型图

Fig.2 The first 4 mode shape of the 3-D bridge model

## 2 近场地震分析模型

近场地震动可视为由一个脉冲分量与一个宽频地震分量叠加而成。本文提出近场地震

分析模型为速度脉冲分量与宽频分量的组合, 可表示为:

$$\ddot{u}_g(t) = (1-\alpha) \ddot{u}_{g,F} + \alpha \ddot{u}_{g,N} \quad (1)$$

其中,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 反映脉冲和宽频分量所占的比例。当  $\alpha=0$  时, 式(1)变成  $\ddot{u}_g(t) = \ddot{u}_{g,F}$ , 表示地面运动只包括宽频部分, 当  $\alpha=1$  时, 式(1)变成  $\ddot{u}_g(t) = \ddot{u}_{g,N}$ , 表示地面运动只有脉冲部分。

本文中近场脉冲分量选用了 He-Agrawal 近场速度脉冲模型, 该模型计算精度高, 是一个既能适合于工程应用, 又能准确反映近场地震动动力特性的近场地震分析模型, 其速度脉冲可表示为:

$$\dot{u}_p = C_n t^n e^{-at} \sin \omega_p t \quad (2)$$

式中  $\dot{u}_p$  为脉冲速度;  $n$  为包络线的形状参数;  $a$  为脉冲滞后因子;  $C_n$  为脉冲放大比例因子;  $\omega_p$  为脉冲频率。

对 (2) 式进行微分计算则得到脉冲的加速度表达式

$$\ddot{u}_{g,N} = C_n t^n e^{-at} \left[ \left( \frac{n}{t} - a \right) \sin \omega_p t + \omega_p \cos \omega_p t \right] \quad (3)$$

宽频分量选用目前使用最为广泛的 Kanai-Tajimi 模型, 可表示为:

$$\ddot{u}_{g,F}(t) = \psi(t) \ddot{X}(t) \quad (4)$$

式中  $\psi(t)$  为调制函数,  $\ddot{X}(t)$  为由基岩覆盖场地土过滤后的理想白噪声平稳激励。其功率谱密度为  $S_{\ddot{X}\ddot{X}}(\omega)$ , 表达式为:

$$S_{\ddot{X}\ddot{X}}(\omega) = \frac{1 + 4\zeta_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{\left[ 1 - (\omega/\omega_g)^2 \right]^2 + 4\zeta_g^2 (\omega/\omega_g)^2} S_0 \quad (5)$$

式中  $\omega_g$  和  $\zeta_g$  分别为场地土卓越角频率和阻尼比,  $S_0$  为基岩加速度 (白噪声) 自谱密度。

为了验证所提出的近场地震分析模型的有效性, 本文选取了一些记录到的近场地震波进行参数拟合计算。对于特定的近场地震记录中的脉冲分量, 可根据式 (3) 对近场地震分量时程来进行最小二乘拟合以得到脉冲分量模型中的参数向量  $[C_N, n, a, \omega_p]$ ,

$$P(\Theta_N) = \sum_{i=1}^N [S_{ug,N}(t_i) - S(t_i; \Theta_F)]^2 \quad (6)$$

其中,  $S_{ug,N}(t_i)$  为地面运动记录下脉冲分量时程,  $S(t_i; \Theta_F)$  为根据 (3) 式 He-Agrawal 模型计算得到的加速度值,  $t_i$  为第  $i$  时刻。

对于近场地震记录中所包含的宽频分量, 可采有 Kanai-Tajimi 模型对其能量谱密度在每一频率处进行最小二乘拟合, 即:

$$P(\Theta_F) = \sum_{i=1}^N [S_{ug,F}(f_i) - S(f_i; \Theta_N)]^2 \quad (7)$$

其中,  $S_{ug,F}(f_i)$  为地面运动记录下宽频分量的能力谱密度,  $S(f_i; \Theta_N)$  为 Kanai-Tajimi 模型能量谱密,  $f_i, i=1, 2, \dots, N$  为近场地面运动记录到的宽频分量下各离散点的频率。

图 3 分别对三组近场地震其记录波与人工拟合波做了比较, 这三组近场地震分别是 1992 年发生的 Landers 地震 (LCN275); 1979 年发生的 Imperial Valley 地震 (E06230);

1995 年发生的 Kobe 地震 (KJM090)。图 4 第 (1) 行和第 (2) 行分别为记录到的近场地震加速度时程以及人工拟合加速度时程。通过比较可以看出, 拟合得到的加速度时程与记录得到的加速度时程有很好的相似性, 拟合良好。第 (3) 行为记录地震波与人工拟合地震波在单自由度体系下 5% 阻尼比的加速度谱。从图中亦可以看出二者吻合得较好。由此可见, 本文提出的近场地震分析模型尽管形式简单, 但具有较高的计算精度, 适合于实际工程应用中对近场地震效应进行定量分析。

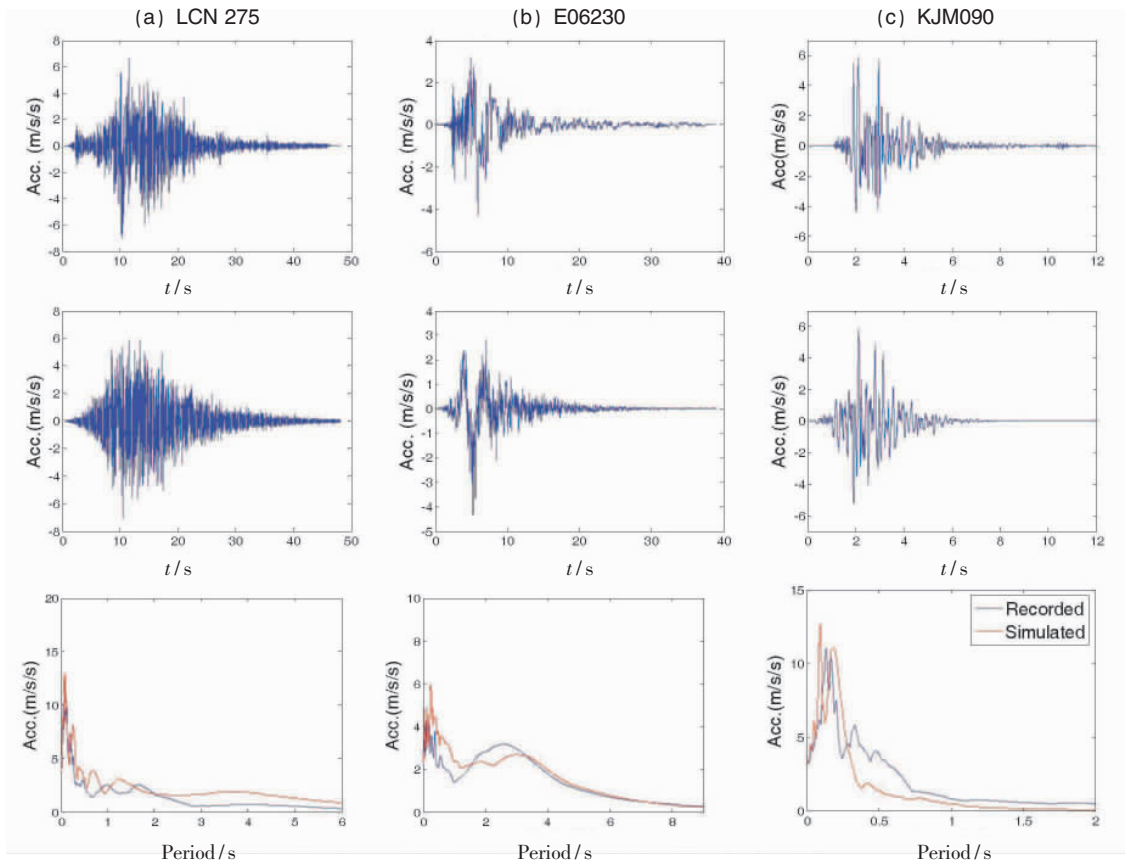


图 3 地震记录与拟合波对应的地面加速度时程以及反应谱

Fig.3 Ground acceleration time and response spectra of seismic record and simulated wave

### 3 近场桥梁的地震响应

本文只考虑地震动作用于高架桥纵轴方向, 图 4 列出了在 Landers 地震 (LCN 275) 作用下桥梁基底剪力、基底弯矩、跨中加速度、以及支座位移的时程反应。图 5 表示, 对各峰值进行规范化, 即统一除以宽频分量计算所得峰值。通过改变系数  $\alpha$  由 0.2 到 1.0 均匀取值, 以及调整脉冲周期由 0 s 增至 7.5 s 得到一系列近场地震波, 将得到的地震波分别对结构加载可定量分析脉冲分量占不同比例时结构对应的响应。由此可知, 不同地震波成份对结构的作用特点。

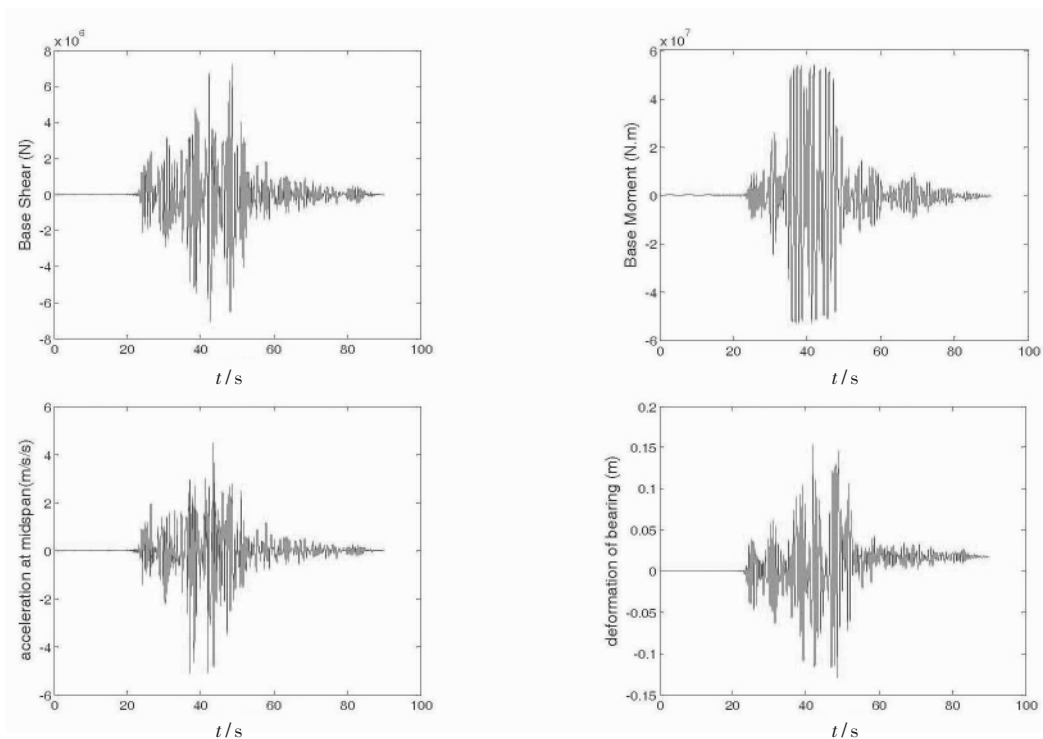


图 4 在  $\alpha=0.2$  时的合成波作用下的桥梁反应

Fig.4 Bridge responses to the synthetic earthquakes when  $\alpha=0.2$

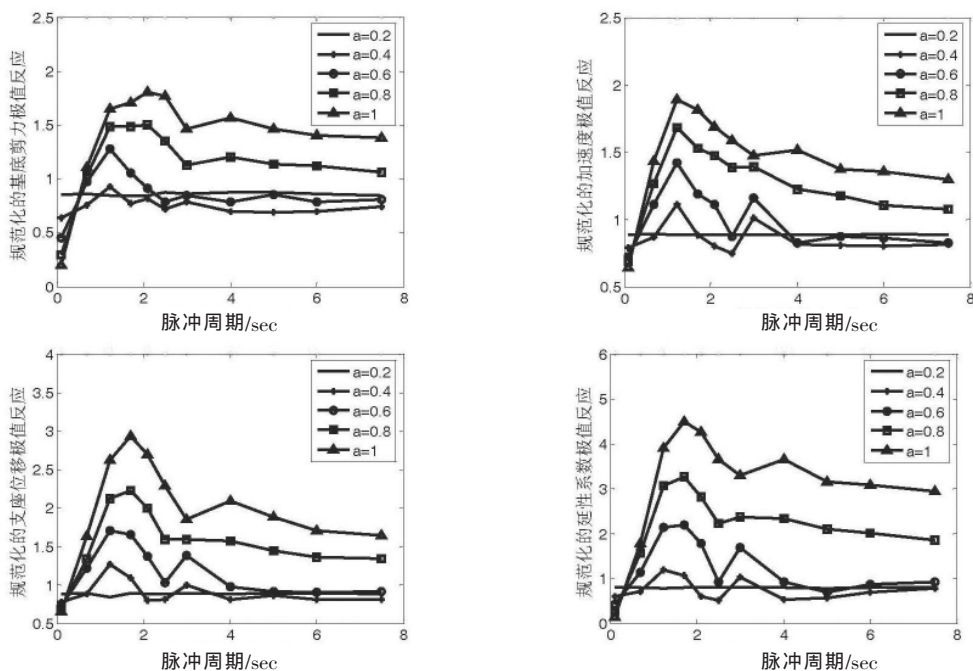


图 5 以脉冲周期为变量规范化后的合成波激励下结构的极值反应

Fig. 5 Spectra of normalized peak responses as a function of pulse period for the structure subjected to synthetic near-field ground motion

通过图 5 可以明显看出,随着系数  $\alpha$  不断增加地震波的脉冲分量不断增加,桥梁的响应也显著增加。桥梁的规范化响应值随着脉冲周期的改变亦有显著变化,且在脉冲周期 1.0 s 到 2.0 s 范围内取得峰值,这是由于结构的固有周期在此范围之内。有些学者表示,当脉冲周期比结构的基本周期更大时,结构的响应增幅会更显著。通过比较具有相同 PGA 值的宽频分量与脉冲分量,显然后者可引起桥梁结构的更大响应。

在  $\alpha \leq 0.2$  时,结构的反应随脉冲周期的改变其变化很不明显,此时近场脉冲成分占有分量较小,脉冲峰值对总的峰值贡献较小,故此时不能明显体现近场脉冲对结构的作用;在  $\alpha \leq 0.4$  时,规范化后的结构反应峰值基本小于或接近于 1,甚至是在脉冲周期接近结构固有周期时亦是如此。发生这种现象的原因是近场脉冲成分占有分量较小,对结构 PGA 值的贡献仅仅占到不足 40%。

从图中还能看出,在脉冲周期达到 1 s 之后,随着近场脉冲成分的增加所有的反应都急剧增加,可见脉冲成分占不同比例时结构的反应有着显著的差别,虽然脉冲成分和宽频成分具有一样的幅值,但当脉冲成分占的比例越大时结构的反应也越大,说明近场脉冲比宽频成分破坏力更大。

在脉冲周期小于 1 s 的曲线段,与脉冲周期大于 1 s 的曲线段相反,近场脉冲成分占的比例越大的时候结构反应反而越小,这是因为此时脉冲周期太小,而选用的宽频分量波本身周期也较长,在脉冲周期小于 1 s 时,脉冲分量的作用比宽频分量波的作用反而还要小一些。在  $\alpha > 0.2$  时,结构反应在脉冲周期达到 1 s 之后随脉冲周期的增大显著增大,可看出脉冲持时是对结构产生破坏的一个重要因素。

对于纯脉冲作用 ( $\alpha=1.0$ ) 时,规范化后的结构反应峰值分别为 1.802、1.887、2.928 和 4.486,分别对应于基底剪力、跨中加速度、支座变形和延性系数反应极值。这表明了在近场地震中脉冲分量相对宽频分量的显著放大作用,特别是对于支座变形放大作用最显著。

## 4 结论

本文建立了近场地震的一般分析模型,并采用该模型对近场下桥梁的地震响应进行了定量分析,得到主要结论如下:

(1) 本文提出的近场地震分析模型形式简单,具有较高的计算精度,适合于实际工程应用中对近场地震效应进行定量分析。

(2) 相比较宽频分量作用,在受到脉冲分量作用时,桥梁结构的基底剪力、跨中加速度、支座变形和延性系数反应都发生了较大的放大作用。近场地震动,对结构提出更高的延性要求。

(3) 随着近场脉冲成分的增加结构各项地震响应都急剧增加,近场脉冲地震波比一般远场宽频地震波对结构的破坏更大,同时桥梁结构的地震反应随脉冲周期的增大亦显著增大,可看出脉冲持时是对桥梁结构产生破坏的一个重要因素。



## 参考文献

- [1] N. Abrahamson. Incorporating effects of near fault tectonic deformation into design ground motion [C]. Buffalo: University of Buffalo seminar, 2001.
- [2] A. K. Agrawal , Tan,P., Nagarajaiah,S., Development of a benchmark structural control model for a highway bridge [C]. New York: the 4th International Workshop on Structural Control, 2004.
- [3] Somerville P G.. Development of an improved ground motion representation for near fault ground motion. Seminar on Utilization of Strong-motion Data OaklandCA [C]. California:Oakland, 2004.
- [4] Alavi B, Krawinkler H.. Consideration of near-fault motion effects in seismic design [C]. New Zealand: 12WCEE, 2000.
- [5] Makris, N, Shih-PoCH.. Effect of damping mechanisms on the response of seismically isolated structures [R]. California: PEER report, 1998.
- [6] Charles Menun,Qiang Fu.. An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF system [C]. New Zealand: 12WCEE, 2000.
- [7] 李新乐, 朱晞. 近场地震速度脉冲效应及模拟模型的研究 [J]. 中国安全科学学报, 2003, 13 (12): 48-52.

## Seismic Response of Bridge Structure in Near-field

WANG Hao, TAN Ping, YIN Weixi, ZHOU Fulin

(*Earthquake Engineering & Research Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China*)

**Abstract:** This paper presented a new analytical model for near-field ground motions, in which Kanai-Tajimi broad-band model and He-Agrawal velocity pulse model were combined. The effectiveness of the proposed analytical model for near-field ground motions was verified by numerical simulation of several typical near-field records. This paper quantitatively analyzed the response pattern of bridge structure under near-field earthquakes. Results showed that the pulse duration was a key factor to the failure of bridge structure. A higher ductility level is needed for the design of bridge structure under near-field earthquakes.

**Keywords:** Near-field earthquake; Pulse-type component; Bridge structure