

轻轨高架桥地震响应 PGA/PGV 分析: Part I 近断层效应的影响

陈令坤^{1,2}, 韩静涛², 徐定超², 周 欣³, 王 琨², 杨汉彬¹, 张 楠⁴

(1.西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2.扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127;
3. 扬州市建筑安全监察站, 江苏 扬州 225002; 4.北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要:以城市轻轨钢筋混凝土高架桥为研究对象,分别输入脉冲型、无脉冲型近断层地震和远场地震 3 种不同类型的地震,建立高烈度区地震作用下的非线性全桥模型,计算了水平及竖向地震作用下桥梁的弹塑性响应,分析了地震峰值加速度与地震峰值速度比值(PGA/PGV)对桥梁地震响应的影响.研究表明,时域分析时,脉冲型近断层地震会造成较大的梁体位移;对于梁体内力,相比其他类型地震,非脉冲地震造成的桥梁惯性力可能较大.频域分析时,相比非脉冲型近断层地震及远场地震,脉冲型近断层地震在较低的频段对桥梁横向响应的影响较大;对于竖向响应,脉冲型近断层地震可以在二阶竖向自振频率影响桥梁地震响应,非脉冲型近断层地震及远场地震在一阶竖向自振频率影响桥梁地震响应.

关键词:地震响应分析;城市轻轨高架桥梁;近断层地震;地震峰值加速度与速度比值;频谱特性

中图分类号:U442.55 **文献标志码:**A

Analysis on PGA/PGV specific seismic response of urban light rail transit viaduct: Part I Effect of fault rupture

CHEN Lingkun^{1,2}, HAN Jingtao², XU Dingchao², ZHOU Xin³, WANG Kun²,
YANG Hanbin¹, ZHANG Nan⁴

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225127, China;
3. Yangzhou Construction Safety Supervision Station, Yangzhou Jiangsu 225002, China;
4. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The global nonlinear finite element calculation model of Urban Light Rail Transit Viaduct (ULRTV) in a high seismic region is set up, then the elastic-plastic seismic responses of

收稿日期:2017-11-30
基金项目:国家自然科学基金(51778630, 51778577, 51508495);江苏省自然科学基金(BK20161337);中国博士后科学基金(2016M592695, 2015M581702);2016 年度江苏省普通高校专业学位论文研究生实践创新计划项目(SJZZ16_0262)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51778630, 51778577, 51508495); Jiangsu Province Natural Science Foundation (BK20161337); China Postdoctoral Science Foundation (2016M592695, 2015M581702); Graduate Student Scientific Research Innovation Projects of Jiangsu Province in 2016 (SJZZ16_0262)
第一作者:陈令坤(1974—),男,安徽临涣人,副教授,博士.研究方向为桥梁抗震. email: lkchen@swjtu.edu.cn.
通信作者:徐定超(1992—),男,安徽和县人,硕士生. email: gjsys7@sina.com.
引用格式:陈令坤,韩静涛,徐定超,等.轻轨高架桥地震响应 PGA/PGV 分析:Part I 近断层效应的影响[J].北京交通大学学报,2018, 42(3):86—94.
CHEN Lingkun, HAN Jingtao, XU Dingchao, et al. Analysis on PGA/PGV specific seismic response of urban light rail transit viaduct: Part I Effect of fault rupture[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(3):86—94. (in Chinese)

the bridge subjected to the combined effect of vertical and horizontal earthquakes are calculated under pulse type Near-Fault Ground Motions (NFGMs), non-pulse type NFGMs and Far-Field Ground Motions (FFGMs). And the influence of the Peak Ground Acceleration and Peak Ground Velocity (PGA/PGV) ratio on the seismic response of the bridge is presented. Results demonstrate that the pulse type NFGMs results in the larger lateral displacement at the mid-span of the girder when time-domain analysis. The pulse type NFGMs and the FFGMs maybe bring out the greater internal force compared to the non-pulse type NFGMs. While under frequency-domain analysis, the pulse-type near-fault ground motions greatly impact the seismic lateral seismic response of the bridge in the low frequency band compared to the non-pulse type NFGMs and FFGMs. As for the vertical seismic response of the bridge, pulse type NFGMs influence the response in the second order natural vibration frequency, and the non-pulse type NFGMs and FFGMs influence the response in the first order natural vibration frequency.

Keywords: seismic response analysis; ULRTV; near-fault ground motions; PGA/PGV; spectrum characteristics

近年来,近断层地震如 1995 年 Kobe 地震、1999 年 Chi-Chi 地震和 Kocaeli 地震等,以其不同于远场地震的震害日益引起了研究者的关注。一方面近断层地震由于多普勒(Doppler)效应带来的速度脉冲对桥梁结构带来严重震害^[1-2];另一方面近断层地震较大的滑冲位移将会引起桥梁较大的位错,虽然桥墩本身受到的破坏并不严重,但会出现由于残余位移过大而导致必须拆除桥墩的情况^[3]。

针对近断层地震的致震机理,文献[4-6]研究了近断层地震下公路桥梁的抗震性能,结果表明速度脉冲特性对桥梁地震响应有较大影响,在抗震设计时需要引起重视。文献[7-10]研究了地震下铁路桥梁系统的列车走行安全问题。文献[11-12]采用 PGA/PGV 参数研究了近断层地震对隔震结构的影响。以上研究多是基于公路桥梁的抗震性能展开,对断层回跳引起的地震作用下的铁路桥梁的抗震性能研究较少。随着高速铁路及城市轻轨的快速组网,如何描述近断层地震下桥梁动力响应规律并应用于抗震设计中仍是亟待解决的关键问题。

本文作者基于既有研究,首先引入反应地震动力特性的新的影响参数,建立高烈度区地震下城市轻轨高架桥(Urban Light Rail Transit Viaduct, ULRTV)弹塑性全桥模型,计算了水平及竖向多维地震作用下的桥梁的弹塑性响应,分析该参数对 VLRTV 地震反应的影响。分别输入脉冲型近断层地震、无脉冲型近断层地震和远场地震 3 种不同类型的地震进行时程分析,并对比不同作用下城市轻轨高架桥梁结构的动力响应,分析了反映地震频率内容的重要参数 PGA/PGV 对桥梁地震响应的影响。研究可以为城市轻轨桥梁抗震设计提供参考。

1 列车-桥梁系统振动方程

地震荷载作用下列车-桥梁振动方程为^[13]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{bb} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{M}_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_b \\ \ddot{\mathbf{u}}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{bb} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{C}_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_b \\ \dot{\mathbf{u}}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{bb} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{K}_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_b - \ddot{\mathbf{a}}_g \mathbf{M}_{bb} \\ \mathbf{f}_v - \ddot{\mathbf{a}}_g \mathbf{M}_{vv} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:下标“b”和“v”分别表示车辆和桥梁; \mathbf{M}_{bb} 、 \mathbf{C}_{bb} 和 \mathbf{K}_{bb} 分别表示桥梁子系统的质量、阻尼及刚度矩阵; \mathbf{M}_{vv} 、 \mathbf{C}_{vv} 和 \mathbf{K}_{vv} 分别表示车辆子系统的质量、阻尼及刚度矩阵; \mathbf{f}_b 和 \mathbf{f}_v 为不考虑地震作用下的车辆力向量及桥梁力向量; $\ddot{\mathbf{a}}_g = \mathbf{D} \times \{\ddot{\mathbf{u}}_{xg} \quad \ddot{\mathbf{u}}_{yg} \quad \ddot{\mathbf{u}}_{vg}\}^T$ 为地震加速度; \mathbf{D} 为地震位移影响矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}_{xg}$ 、 $\ddot{\mathbf{u}}_{yg}$ 及 $\ddot{\mathbf{u}}_{vg}$ 为顺桥向、横桥向及竖向地震。在列车-桥梁模型中,采用匀速移动的四轴荷载列模拟列车,对桥梁采用有限元法,建立列车-桥梁动力方程,采用 Newmark- β 法进行求解。

采用 BD24 型列车活载作为城市轨道交通运营列车活载,每列车采取 4 动 2 拖 6 辆编组:TC-MP-M-MP-TC(TC 代表带司机室的拖车;MP 代表带受电弓的动车;M 代表不带受电弓的动车),重车轴重为 140 kN,最高运行速度为 100 km/h,所采用的荷载形式为四轴荷载,列车编组图及荷载计算简图如图 1 所示。图中的参数分别设置为 $a=2.3$ m, $b=4.63$ m, $c=10.3$ m, $P=140$ kN。

根据 ATC-78 报告^[14]及文献[15]的研究,地震峰值加速度(PGA)与峰值速度(PGV)之比为

$$\text{PGA/PGV} = 2\pi/T_g \quad (2)$$

式中 T_g 为地震周期,此参数反映了地震的断层、场



图 1 四轴列车荷载列

Fig.1 Loading list of four-axle urban light rail
地及频率等特性,可以用来分析近断层地震对桥梁
系统地震响应的影响.

2 近断层地震特征及地震选取

不同地震的选择关系到计算结果的正确分析. 本文采用 ATC—63 项目 FEMA—P695^[16] 建议, 根据地表以下 30 m 内平均剪切波速 (V_{s30}) 的不同, 按照美国地质勘探局 (USGS) 对场地的分类方法^[17], 以平均剪切波速 360 m/s 为界, 选取剪切波速大于 360 m/s 的 AB 类场地地震, 脉冲型近断层地震、无脉冲型近断层地震和远场地震各 6 组. 以断层距 15 km 来区别近断层地震和远场地震, 以有无单向速度脉冲来区别近断层脉冲和无脉冲地震, 限于篇幅, 所选地震的速度时程图没有给出. 每组包括 1 条水平地震与 1 条竖向地震. 表 1~表 3 分别列出了各地震的相关特征参数信息.

表 1 脉冲型近断层地震参数

Tab.1 Detailed parameters of the pulse-type near-fault ground motions

地震名称	台站	震级	R/km	$V_{s30}/$ (m/s)	T_p/s	PGA_H /g	PGA_V /g	$PGA_V/$ PGA_H	$PGV_H/$ (cm/s)	$PGV_V/$ (cm/s)	A_P/V_P	A_V/V_V
Irpinia, 1980	Sturno (STN)	6.90	10.84	382.0	3.273	0.393	0.235	0.599	80.903	24.018	4.755	9.587
Loma Prieta, 1989	Saratoga	6.93	8.50	380.8	4.571	0.609	0.396	0.650	50.118	8.735	11.912	44.394
Cape Mendocino, 1992	Petrolia	7.01	8.18	422.1	2.996	0.887	0.165	0.186	25.332	5.091	34.313	31.795
Landers, 1992	Lucerne	7.28	2.19	1369.0	5.124	1.071	0.823	0.768	136.331	41.086	7.702	19.637
Northridge-01, 1994	Sylmar	6.69	5.30	440.5	2.436	1.038	0.536	0.516	37.709	4.662	26.972	112.605
Kocaeli, 1999	Izmit	7.51	7.21	811.0	5.369	0.283	0.145	0.511	44.326	12.390	6.263	11.461

表 2 非脉冲型近断层地震参数

Tab.2 Detailed parameters of the non-pulse-type near-fault ground motions

地震名称	台站	震级	R/km	$V_{s30}/$ (m/s)	T_p/s	PGA_H /g	PGA_V /g	$PGA_V/$ PGA_H	$PGV_H/$ (cm/s)	$PGV_V/$ (cm/s)	A_P/V_P	A_V/V_V
Loma Prieta, 1989	BRAN	6.93	10.72	476.5	—	0.679	0.506	0.745	67.976	27.458	9.784	27.458
Loma Prieta, 1989	Corralitos	6.93	3.85	462.2	—	0.805	0.458	0.568	73.457	22.993	10.746	22.993
Cape Mendocino, 1992	Cape Mendocino	7.01	6.96	567.7	—	1.819	0.739	0.406	32.369	49.866	55.080	49.866
Northridge-01, 1994	VA Hospital	6.69	8.44	380.0	0.931	1.198	0.318	0.265	108.858	12.463	10.784	12.463
Chi-Chi, 1999	TCU067	7.62	0.62	433.6	—	0.592	0.235	0.397	105.336	4.624	5.511	4.624
Chi-Chi, 1999	TCU084	7.62	11.48	665.2	—	1.097	0.320	0.292	137.506	12.250	7.819	12.250

表 3 远场地震参数

Tab.3 Detailed parameters of the far-field ground motions

地震名称	台站	震级	R/km	$V_{s30}/$ (m/s)	T_p/s	PGA_H /g	PGA_V /g	$PGA_V/$ PGA_H	$PGV_H/$ (cm/s)	$PGV_V/$ (cm/s)	A_P/V_P	A_V/V_V
Friuli, 1976	Tolmezzo	6.50	15.82	505.2	—	0.476	0.277	0.58	76.252	0.277	6.121	12.925
Cape Mendocino, 1992	Airport	7.01	28.78	518.9	—	0.296	0.054	0.18	4.910	0.054	59.162	33.850
Northridge-01, 1994	Maint	6.69	82.32	367.5	—	0.144	0.024	0.17	1.440	0.024	98.176	15.549
Kobe, 1995	Chihaya	6.90	49.91	609.0	—	0.143	0.075	0.52	2.859	0.075	49.164	12.340
Kocaeli, 1999	Iznik	7.51	30.73	476.6	—	0.154	0.075	0.49	12.330	0.075	12.221	21.217
Hector Mine, 1999	Barstow	7.13	61.20	370.0	—	0.097	0.044	0.46	2.352	0.044	40.283	17.459

注: R 为断层距; V_{s30} 为剪切波速; T_p 为脉冲周期; PGA_H 为水平地震峰值加速度; PGA_V 为竖向地震峰值加速度; PGV_H 为水平地震峰值速度; PGV_V 为竖向地震峰值速度; $A_P/V_P = PGA_H/PGA_V$; $A_V/V_V = PGA_V/PGV_V$.

3 列车-桥梁有限元建模

本文采用《北京轨道交通房山线工程长阳镇站—稻田站桥梁设计》图纸,建立 $5\text{ m} \times 30\text{ m}$ 单线简支箱梁桥计算模型。设计参数如下: 30 m 跨长 C50 混凝土简支小箱梁,箱梁截面尺寸见图 2; $2.2\text{ m} \times 2.3\text{ m}$ 矩形截面独柱墩,墩身采用 C45 现浇混凝土,墩高设计为 18 m ,桥墩截面尺寸见图 3。桥址为 II 类场地,按《抗规》抗震设防烈度为 VIII 度。根据特征值分析,计算出桥梁横向振动一阶自振频率为 1.684 Hz ,竖向振动一阶自振频率为 3.968 Hz ,竖向振动二阶自振频率为 14.286 Hz 。

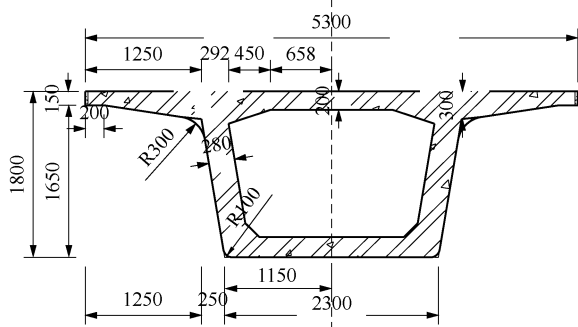


图 2 箱梁截面尺寸(单位:mm)

Fig.2 Cross-section of box girder (Unit: mm)

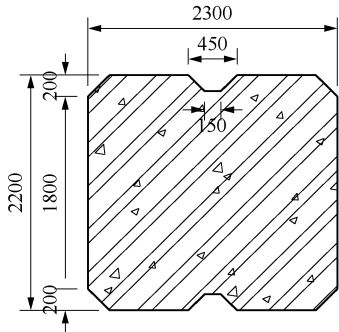


图 3 桥墩截面尺寸(单位:mm)

Fig.3 Cross-section of pier (Unit: mm)

桥址位于华北地台燕山台褶带西山坳褶的东边部,沿线附近主要分布有良乡—顺义断裂带和永定河断裂带,历史上该断层曾导致唐山等地地震,因此须充分考虑该地区断层效应对高架桥梁结构的不利影响。

本文基于 ANSYS APDL 有限元软件及计算平台,输入三维地震作用,建立多跨简支梁桥系统分析模型.采用 Beam188 单元模拟桥梁和桥墩单元并利用其非线性属性,支座采用 Combin14 单元模拟两个水平方向和竖直方向的刚度,假定墩底固结,取第三跨代表整个结构进行地震分析.

建模时根据单元长度及列车运行速度确定每个荷载步的最终求解时间,根据地震数据采样频率,可以采用 NINT(X)函数或者线性内插法将地震加到桥梁节点上,以此实现列车经过桥梁的时间与地震发生时间的藕合.考虑到模型的完整性,本文建立有车全桥模型,研究近断层地震效应的影响.四轴列车荷载主要是通过 APDL 参数化语言实现算法的藕合并考虑了轨道不平顺的影响.

4 PGA/PGV 影响桥梁响应分析

4.1 地震下桥梁动力响应

经过大量的参数计算,取 8 度设防、水平向+竖向组合罕遇地震作用(水平加速度取 $0.4g$),应用 Xtract 软件进行截面弯曲-曲率分析,列车以 100 km/h 的车速行驶过墩高为 18 m 的桥梁结构,计算出近断层脉冲地震作用下高架桥梁地震响应峰值,见表 4.不同类型地震作用高架桥梁结构动力响应对比见图 4.

由图 4 可以看出,具有速度脉冲的近断层地震作用下与非脉冲近断层地震和远场地震作用下的桥梁结构响应有很大的差别。以梁体位移为例,在脉冲型近断层地震作用下,由于长持时的高幅值脉冲的

表 4 近断层脉冲地震作用下高架桥梁地震响应峰值

Tab.4 Peak response of ULRTV subjected to pulse type near-fault ground motions

编号	地震	跨中横向 位移/m	跨中竖向 位移/m	墩顶横向 位移/m	墩底 剪力/MN	墩底弯矩 $\times 10^7/\text{N} \cdot \text{m}$	墩底 轴力/MN
1	Irpinia, 1980, Sturmo (STN)	0.334	0.015	0.279	1.454	1.970	4.565
2	Loma Prieta, 1989, Saratoga	0.219	0.018	0.182	1.323	1.929	5.113
3	Cape Mendocino, 1992, Petrolia	0.207	0.012	0.168	1.356	1.898	4.347
4	Landers, 1992, Lucerne	0.246	0.023	0.204	1.459	1.953	5.455
5	Northridge-01, 1994, Sylmar	0.273	0.014	0.228	1.400	1.958	4.350
6	Kocaeli, 1999, Izmit	0.707	0.014	0.606	1.930	2.215	4.692

作用将导致桥梁结构在短时间内承受较大的地震能量的施加,造成较大的结构位移.对于梁体内力,由

图 4(c)、(f)及(i)可以看出,非脉冲近断层地震作用下的竖向及横向加速度相对较大,根据动力相互作用

用及惯性相互作用效应原理,相比其他类型地震,非脉冲近断层地震的惯性力可能较大.

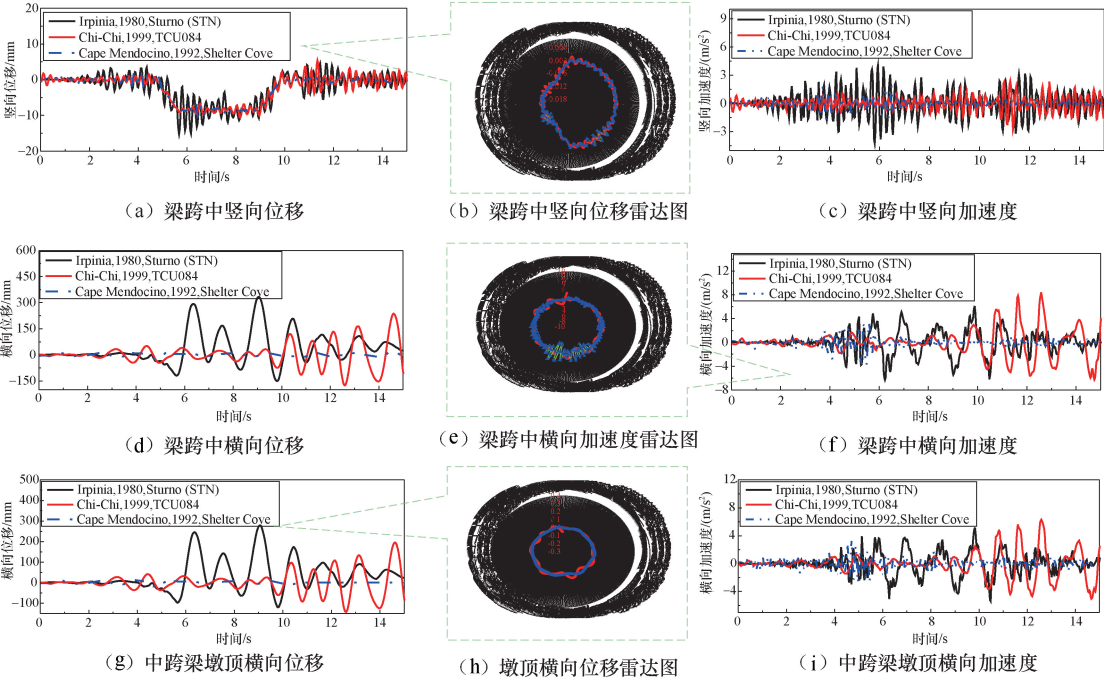


图 4 不同类型地震高架桥梁结构地震响应时程曲线对比

Fig.4 Time history curves of ULRTV subjected to different types of eardpuds

本文随机取 3 条地震波进行计算,分析比较不同地震作用下的墩底滞回性能.以近断层脉冲 Irpinia 地震、近断层非脉冲 Loma Prieta 地震和远场 Hector Mine 地震为例,不同地震作用下桥墩墩底弯矩-转角关系如图 5 所示(水平地震加速度取 $0.62g$).对于 Irpinia 地震,墩底第 1 个单元最大弯矩为 $2.17 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}$,超出屈服弯矩进入弹塑性阶

段.由图 5(a)可知,近断层地震包络的地震能量更大,且滞回环数量较少.由此可知,相比于近断层非脉冲和远场地震,对于同一结构来说,脉冲型近断层地震作用下的梁体位移、墩顶位移以及墩底弯矩相对较大,墩顶位移和墩底内力的增大,必然要求桥墩具有更大的延性和配筋.

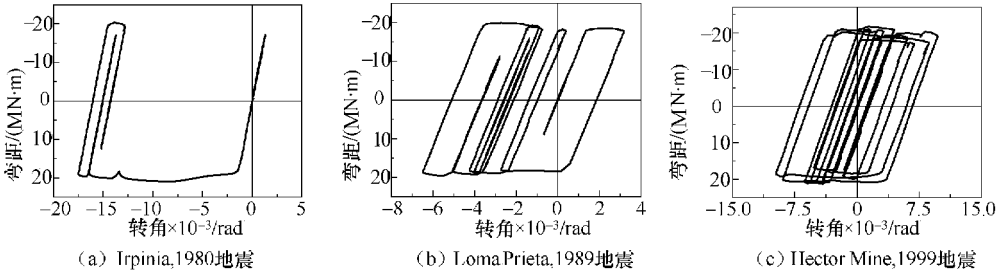


图 5 地震荷载下墩底第 1 单元弯矩-转角关系

Fig.5 Moment-rotation relationship at the first element of pier base under earthquake loading

4.2 A_p/V_p 对桥梁响应的影响

A_p/V_p 作为反映地震频率内容的重要参数,对结构的非线性响应及结构的能量耗散和刚度退化有重要影响.本节研究不同 A_p/V_p 参数对桥梁结构的影响.

图 6 给出 A_p/V_p 与桥梁结构动力响应峰值关系图,为便于说明问题,将拟合图一并附上.从图 6 中可以看出,脉冲型及非脉冲型近断层地震和远场

地震下在不同的频段影响桥梁地震响应.对于桥梁横向地震响应,脉冲型近断层地震在较低的频段对结构的影响较大,非脉冲型近断层地震及远场地震对结构的影响较小,从梁跨中横向位移傅里叶谱可以看出,非脉冲近断层地震对结构影响较小,远场地震影响最小.图 6 显示竖向响应规律与横向响应有较大不同,需要另外研究.

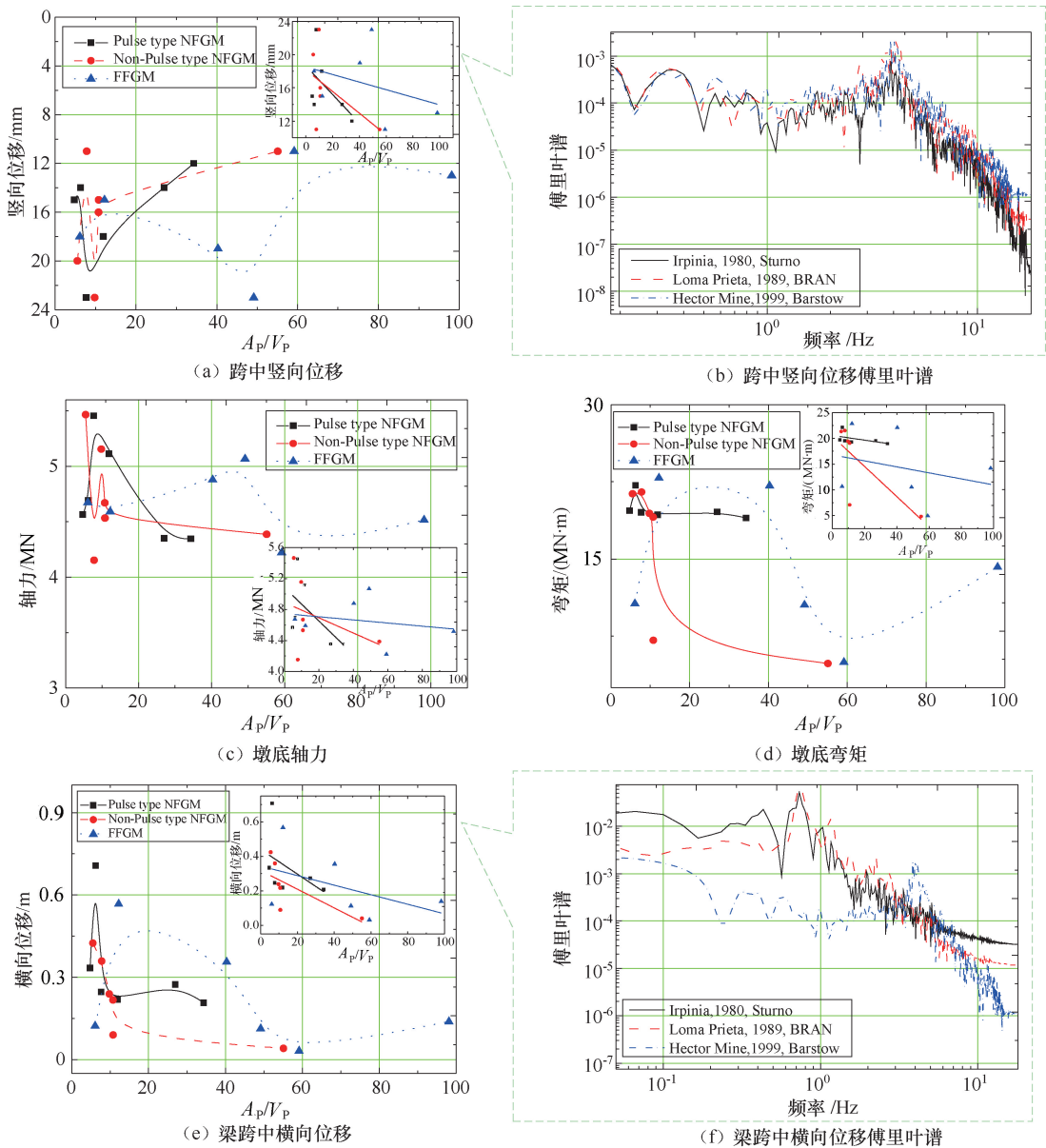


图 6 A_P/V_P 与桥梁结构动力响应峰值关系

Fig. 6 Relationship between the peak response of the bridge and A_P/V_P ratio

4.3 A_V/V_V 对桥梁响应的影响

研究发现^[18],断层地震的另一个特征是有较大的竖向地震分量,竖向地震分量甚至远大于横向分量.以 Northridge, 1994 及 Kobe, 1995 地震为例, Northridge, 1994 地震的竖向及横向加速度之比在 0.98~1.79 之间,而 Kobe 地震的竖向及横向加速度之比达到 1.63 ~ 1.96.关于竖向地震对桥梁地震响应的影响,有很多因素可以进行分析研究,比如竖向地震加速度与横向加速度比值的影响,现有规范也多取横向地震的 65%作为竖向地震输入.既有研究表明:较大的竖向地震导致较大的轴力,会对短周期结构造成较大的损伤^[19-20],为更深入研究断层地震对桥梁影响,本文引入 A_V/V_V 指标研究竖向地震的影响.

图 7 给出 A_V/V_V 参数与桥梁结构地震响应峰值关系,限于篇幅,以 Irpinia 地震、Loma Prieta 地震和 Hector Mine 地震为例,并给出不同类型地震墩底轴力和墩底弯矩的傅里叶谱,以代表竖向地震对竖向响应及横向的影响.对于竖向响应,显示地震在较高频段上影响桥梁响应,需要对地震的不同频段影响进行分析.

为进一步分析竖向地震的影响,给出三种地震竖向分量的傅里叶谱图(见图 8).根据特征值分析结果,竖向振动自振频率为 3.9688 Hz,二阶振动频率为 14.286 Hz.根据图 8(a)及(b),发现脉冲地震可以在二阶振动频率影响桥梁地震响应.同时根据图 8(c)、(d)、(e)及(f),非脉冲型地震及远场地震在一阶振动频率影响桥梁地震响应.

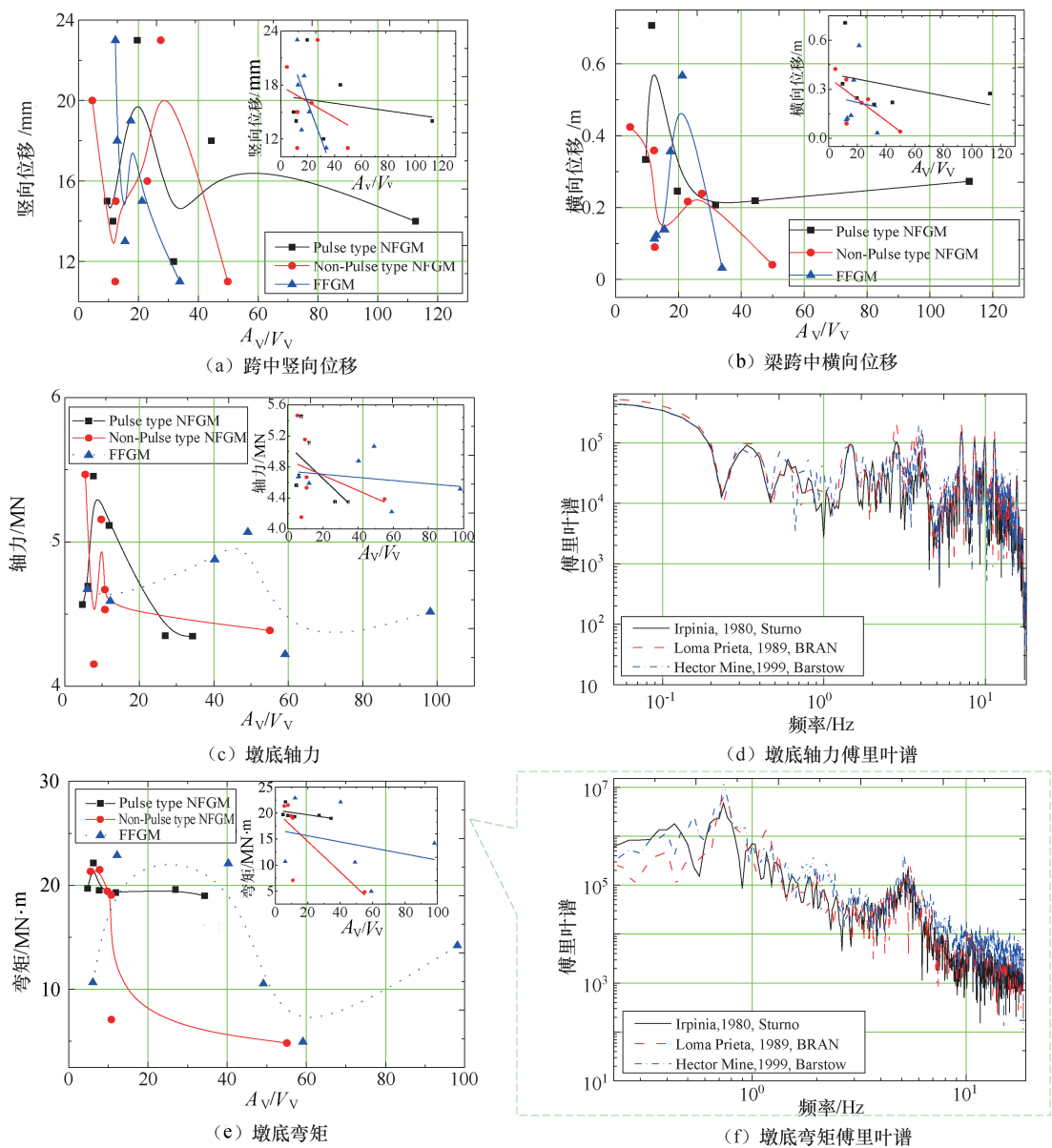
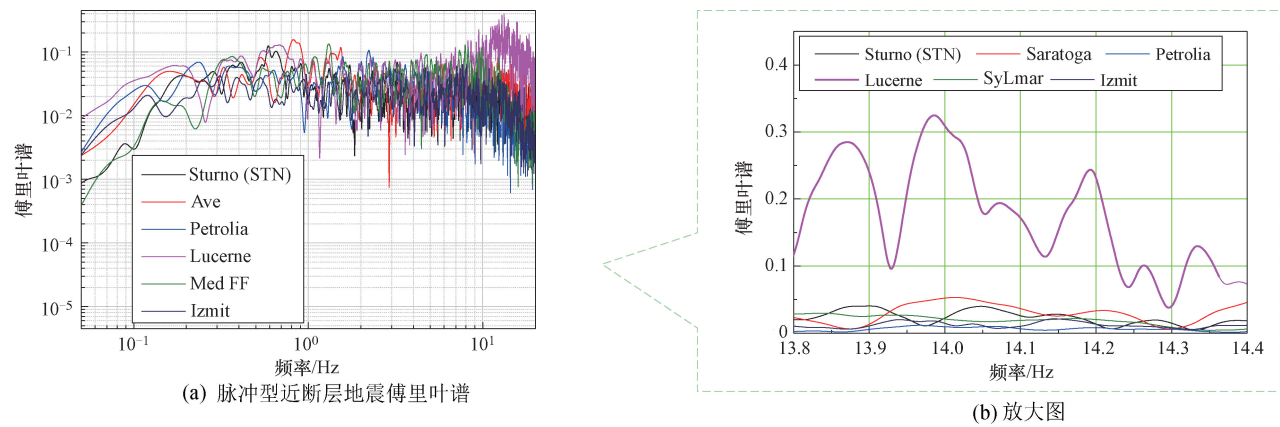


图 7 A_v/V_v 与桥梁结构动力响应峰值关系

Fig.7 Relationship between the peak response of the bridge and A_v/V_v ratio



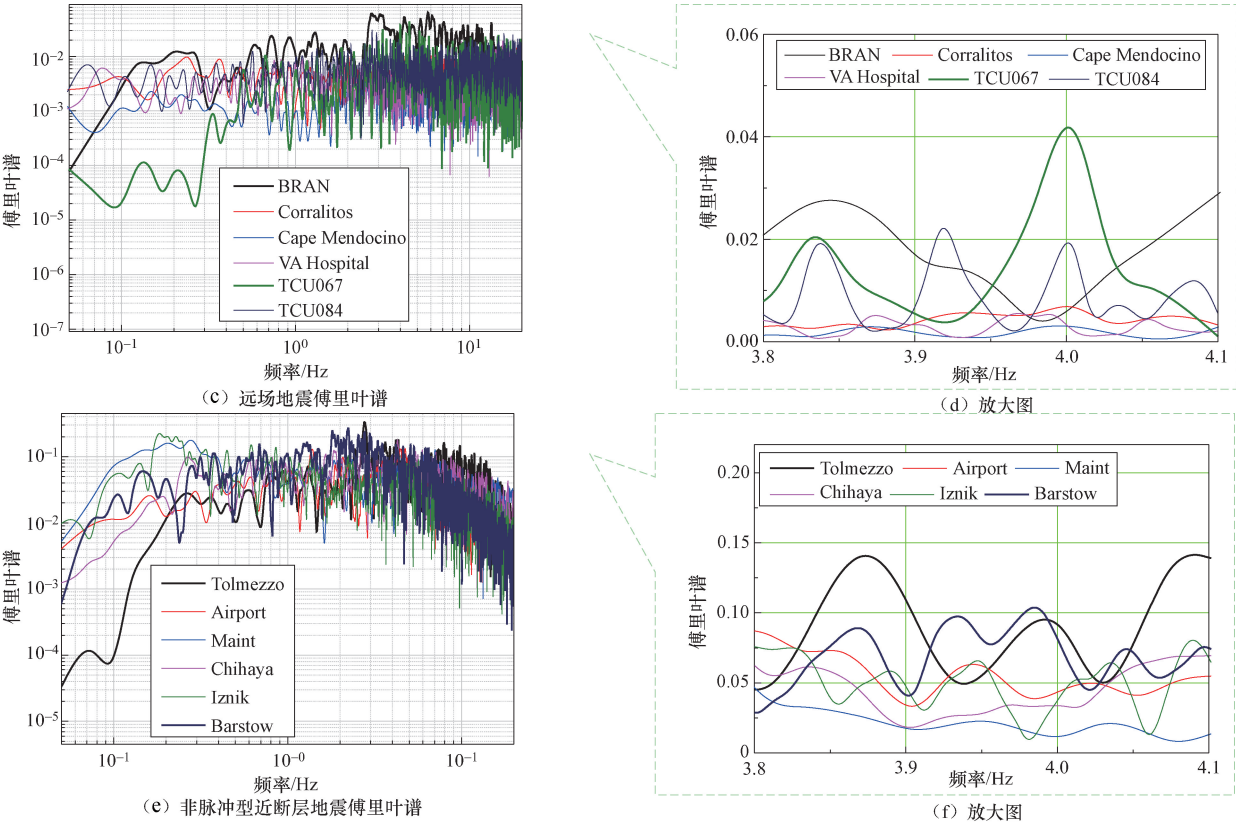


图 8 3 种地震竖向分量傅里叶谱

Fig.8 Fourier spectra of three types of vertical earthquakes

5 结论

本文以典型城市轻轨高架多跨简支梁桥为研究对象,筛选具有速度脉冲及竖向地震效应的地震记录,建立非线性桥梁结构分析模型,计算了横向及竖向地震作用下桥梁的非线性地震响应.研究表明:

1)根据桥梁响应时程曲线及其傅里叶谱分析,不同类型地震基于其不同频谱特性影响桥梁地震响应.对于桥梁横向地震响应,脉冲型近断层地震在较低的频段对结构的影响较大,非脉冲型近断层地震及远场地震是典型的宽谱激励,其对桥梁地震响应的影响较小.

2)对于竖向响应,地震在较高地震频段上影响桥梁响应,脉冲型近断层地震可以在二阶振动频率影响桥梁地震响应,非脉冲型近断层地震及远场地震在一阶振动频率影响桥梁地震响应.

3)由于长持时的高幅值脉冲作用导致桥梁结构在短时间内承受较大的地震能量,脉冲型近断层地震作用造成较大的结构位移.相比之下,非脉冲型近断层地震及远场地震作用下的桥梁结构位移较小,但是其引起的惯性力可能较大.

参考文献 (References):

[1] JALALI R S, JOKANDAN M B, TRIFUNAC M D.

Earthquake response of a three-span, simply supported bridge to near-field pulse and permanent-displacement step[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2012, 43(12):380—397.

[2] SHRESTHA B. Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2015, 19(1):180—187.

[3] MASCE Y F, HASHIMOTO S, MASCE M A. Damage analysis of Hanshin Expressway Viaducts during 1995 Kobe earthquake. I: residual inclination of reinforced concrete piers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(1): 45—53.

[4] SAIIDI M S, VOSOOGHI A, CHOI H, et al. Shake table studies and analysis of a two-span RC bridge model subjected to a fault rupture[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(8):A4014003.

[5] ANTONELLIS G, PANAGIOTOU M. Seismic response of bridges with rocking foundations compared to fixed-base bridges at a near-fault site [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 19(5):644—651.

[6] 丁幼亮, 谢辉, 耿方方, 等. 近断层地震作用下多塔悬索桥的地震反应分析[J]. 工程力学, 2015, 32(7):38—46.

DING Youliang, XIE Hui, GENG Fangfang, et al. Seismic response analysis of a multi-tower suspension

- bridge subjected to near-fault ground motions[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(7):38—46.(in Chinese)
- [7] JU S H. Improvement of bridge structures to increase the safety of moving trains during earthquakes[J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(6):501—508.
- [8] ZENG Q, DIMITRAKOPOULOS E G. Seismic response analysis of an interacting curved bridge-train system under frequent earthquakes[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2016, 45(7):1129—1148.
- [9] ZENG Q, DIMITRAKOPOULOS E G. Derailment mechanism of trains running over bridges during strong earthquakes[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 199:2633—2638.
- [10] WU X, CHI M, GAO H. Post-derailment dynamic behaviour of a high-speed train under earthquake excitations[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 64:97—110.
- [11] DURUCAN C, DICLELI M. A_p/V_p specific inelastic displacement ratio for seismic response estimation of structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44(7):1075—1097.
- [12] LIU T, ZHANG Q. A_p/V_p specific equivalent viscous damping model for base-isolated buildings characterized by SDOF systems[J]. *Engineering Structures*, 2016, 111: 36—47.
- [13] KIM C W, KAWATANI M. Effect of train dynamics on seismic response of steel monorail bridges under moderate ground motion[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 35(10):1225—1245.
- [14] Applied Technology Council (ATC). Tentative provisions for the development of seismic regulations of buildings: a cooperative effort with the design profession, building code interests and the research community[R]. Washington DC: National Bureau of Standards, 1978.
- [15] NEWMARK N M, HALL W J. Earthquake spectra and design[M]. Los Angeles: EERI Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- [16] FEMA P695. Quantification of building seismic performance factors[R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [17] BOORE D M, JOYNER W B, FUMAL T E. Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American Earthquake: an interim report [R]. Reston: United States Geological Survey, Denver, 1993.
- [18] KUNNATH S K, ERDURAN E, CHAI Y H, et al. Effect of near-fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, 13(3): 282—290.
- [19] SAIIDI M, VOSODGHI A, NELSON R B. Shake-table studies of a four-span reinforced concrete bridge[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(8): 1352—1361.
- [20] ÇAĞNAN Z, AKKAR S, ÖZKAN K, et al. Erratum to: a model for predicting vertical component peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV) and 5% damped pseudospectral acceleration (PSA) for Europe and the Middle East[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, 15(7):2617—2643.