

李祥秀,李小军,刘爱文,等.地震动速度脉冲对巨型结构体系地震响应影响研究[J].地震工程学报,2017,39(5):843-852.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.843

LI Xiangxiu, LI Xiaojun, LIU Aiwen, et al. Influence of a Near-fault Velocity Pulse on the Seismic Response of a Mega Structural System[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 843-852. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.843

地震动速度脉冲对巨型结构体系地震响应影响研究^①

李祥秀¹, 李小军^{1,2}, 刘爱文¹, 贺秋梅¹, 王玉石¹

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022)

摘要:以巨-子结构抗震体系、隔震体系以及智能隔震体系为研究对象,选择 4 组具有速度脉冲特性的实际地震动加速度记录及人工模拟的具有相同加速度反应谱而无速度脉冲的地震动时程分别作为地震动输入,采用数值分析方法分别计算在有、无速度脉冲的地震动激励下三种结构体系的地震响应,探讨地震动的速度脉冲对巨型结构体系在不同控制策略下地震响应的影响。研究表明:三种结构体系在速度脉冲型地震动作用下的地震响应大部分要大于无速度脉冲型的地震响应,近断层地震动的速度脉冲对巨-子结构抗震体系、隔震体系以及智能隔震体系的地震响应均有一定的不利影响。智能隔震体系对速度脉冲地震动较为敏感,但能有效地减小隔震层位移。

关键词:巨型结构体系;强震动记录;速度脉冲;智能控制;被动控制

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)05-0843-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0843

Influence of a Near-fault Velocity Pulse on the Seismic Response of a Mega Structural System

LI Xiangxiu¹, LI Xiaojun^{1,2}, LIU Aiwen¹, HE Qiumei¹, WANG Yushi¹

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

2. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The seismic responses of the seismic, isolation, and smart isolation systems of a mega structure were calculated and comparatively analyzed. Four groups of actual strong motion records with velocity pulses and corresponding synthetic time histories of ground motion with the same acceleration response spectra but without velocity pulses were used as ground motion inputs. Then, the influence of ground motion with and without velocity pulses on the mega structure under different control strategies was discussed. The results show that the seismic response of the mega structure's underground motion with a velocity pulse is greater than that without velocity pulse; in addition, the velocity pulse of near-fault ground motion has some negative impact on the seismic response of its seismic, isolation, and smart isolation systems. Though a mega structure with intelligent control system is more sensitive to ground motion with a velocity pulse, it can effectively reduce the displacement of the isolation layer.

① 收稿日期:2017-07-27

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8174081);国家自然科学基金(51608491, U1434210)

作者简介:李祥秀(1987—),女,助理研究员。E-mail:lixiangxiu1005@163.com。

通信作者:李小军(1965—),男,研究员。E-mail:beerli@vip.sina.com。

Key words: mega structural system; strong motion record; velocity pulse; smart control; passive control

0 引言

巨型结构体系的概念来源于 20 世纪 60 年代末,一般由刚度较大的巨型结构部分和供人居住或使用的子结构部分组成,具有受力传递路径明确、结构整体性较好、结构形式新颖美观、且能满足不同建筑布置变化需求等优点。美国学者 Feng 等^[1-2]首次提出巨-子结构体系,研究表明巨-子结构体系在脉动风激励下的风振控制效果明显优于传统的巨型框架结构;国内的王肇明等^[3]对巨型框架悬挂结构体系在地震作用下的震动反应进行了研究,分析了巨型框架减振结构的静力特性和动力特性,证实了巨型框架悬挂结构体系是一种有效的抗侧力体系;连业达等^[4]研究了巨-子结构体系的质量比对减振效果的影响规律;裴星洙等^[5]提出了在子结构顶部与主结构采用阻尼器连接的策略可取得较好的减震效果,并可防止子结构顶部与主结构的碰撞;蓝宗建等^[6]研究了巨型框架多功能减振结构的工作机理及控制效果;谭平等^[7]从结构的动力特性出发,理论上证明了巨-子结构控制体系的减震机理。

近断层地震动作为倍受工程界关注的地震类型,与远场地震动有着显著不同的特点,主要表现为长周期、大位移和速度脉冲等^[8-9]。近几年来含有速度脉冲的近断层地震动对工程结构影响的研究受到了越来越多学者的关注。杨迪雄等^[10]分析了近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响。杜永峰等^[11]在研究基础隔震结构时发现,与远场常规地震相比,有脉冲的近断层地震波会使其抗倾覆性能被削弱。韩森等^[12]对 2 个具有典型代表意义的不同自振周期的钢框架基础隔震结构分别输入 19 次地震的 120 条地震波进行分析,结果表明近断层地震动的输入能、PGV、PGA 等是表征近断层地震动破坏作用的主要参数。李小军等^[13-14]研究了速度脉冲对隔震结构和桥梁结构的影响。相对而言含速度脉冲的近断层地震动对巨型结构体系影响的研究还较少开展。同时,很多学者一般采用有、无速度脉冲的两组实际地震动记录作为输入,但无论如何选择,这些记录的反应谱特性之间仍将存在着很大差异。如果这两组地震动的反应谱不同,即便它们引起的结构地震响应存在较大差

异(这种差异很有可能源于反应谱之间的差异),也不能完全归因于速度脉冲对结构地震反应的影响。因此在比较有、无速度脉冲的地震动所引起的结构动力响应之间的差异时,所选取的两组地震动的加速度反应谱应该一致或者彼此接近。

本文以巨-子结构抗震体系、隔震体系以及智能隔震体系为研究对象,以多条含有速度脉冲的实际地震动记录作为地震动输入,同时以人工模拟的具有相同加速度反应谱而无速度脉冲地震动时程作为地震动输入进行比较,对三种结构体系进行不同地震动输入下的地震反应计算,以探讨速度脉冲型近断层地震动对巨型结构体系在不同控制策略下地震响应的影响。

1 计算模型

选取一算例^[15],其中主结构为 5 层,层高 27.6 m,标准层每层质量为 9×10^5 kg,顶层质量为 4.5×10^5 kg,主结构层剪切刚度为 9×10^7 N/m,模态阻尼比取为 0.05,计算得到主结构一阶周期为 2.008 s。分析时只考虑与主结构 1~4 层楼板连接的子结构,子结构与主结构的质量比取 1.5,子结构的层剪切刚度为 4×10^8 N/m,子层数为 6 层。当子结构与主结构之间固结时定义为巨-子结构抗震体系,当子结构与主结构之间利用隔震装置连接时定义为隔震体系,而巨-子结构智能控制体系是在隔震体系的基础上,在 1~4 层楼板的隔震层处增设智能控制装置,其目的是降低隔震结构在遭受强震时由于隔震层出现过大的位移导致的结构倾覆危险。本文选用的控制装置是 SMA-压电复合智能隔震装置(图 1),

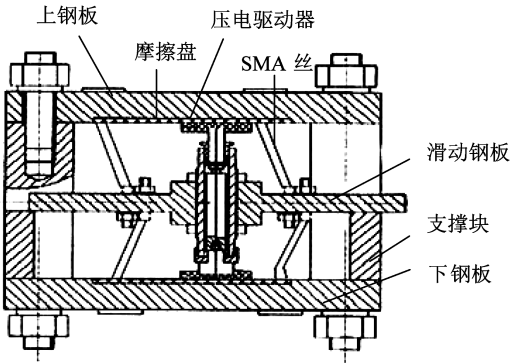


图 1 SMA-压电阻尼器工作原理图
Fig.1 The working principle diagram of SMA-piezoelectric composite intelligent damper

其工作原理为:当地震动发生时,智能阻尼器受到地震激励作用,其滑动钢板会相对上、下两钢板做水平方向的移动,SMA 丝随着滑动钢板的水平移动发生拉伸变形,偏离平衡位置,可利用其超弹性耗能能力提供阻尼。同时通过调节叠层压电驱动器的可调电压 V ,叠层压电驱动器在电场的作用下会在摩擦盘上产生一个随电压变化而变化的可调正压力,从而可实现对阻尼力的智能控制。当地震动结束后,依靠 SMA 丝的超弹性恢复力,可使智能阻尼器已偏离平衡位置的滑动钢板自动恢复到震动前的平衡位置。当地震震动发生而叠层压电驱动器不能正常工作时,SMA 丝的拉伸变形会增大,其超弹性耗能能力也会增强,可起到被动控制作用^[16]。

为了方便分析,本文采用串联质点系模型模拟主结构,将子结构简化为多个质点,采用 Kelvin 模型来模拟隔震层,在隔震层处施加 SMA-压电阻尼器这种控制装置而形成智能隔震模型。三种体系的分析模型如图 2 所示。

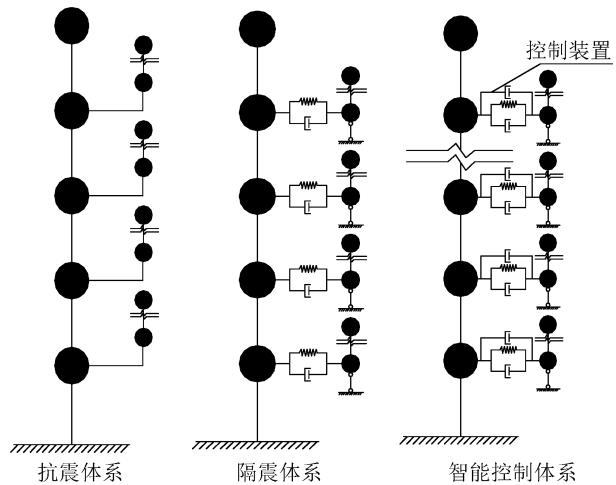


图 2 分析模型

Fig.2 Analysis model of mega-sub structure

2 输入地震动

从速度脉冲型地震动的实际地震动记录中选取 4 条峰值加速度、峰值速度和脉冲周期都具有代表

性的记录。表 1 为所选地震动记录的相关参数。图 3 为所选速度脉冲型地震动记录的加速度时程、速度时程。

本文采用李小军等^[13-14]提出的基于地震动峰值加速度、峰值速度和峰值位移分别主要由地震动的高频段、中频段和低频段成分决定的原理,采用重点调整不同频段(中频段和低频段)的傅氏幅值谱的方式来实现对地震动峰值速度和峰值位移控制的方法,针对每一条带有速度脉冲的实际地震动记录,根据记录计算的加速度反应谱分别拟合反应谱,以合成 4 条人工地震动时程。这些人工地震动时程不再具有速度脉冲特性,但具有相同的加速度反应谱和相近的时程强度包络。地震动记录 A1 对应的人工地震动记为 A11、A12、A13 和 A14;地震动记录 A2 对应的人工地震动记为 A21、A22、A23 和 A24;地震动记录 A3 对应的人工地震动记为 A31、A32、A33 和 A34;地震动记录 A4 对应的人工地震动记为 A41、A42、A43 和 A44。人工地震动加速度和速度时程的部分样本如图 4 所示。计算时将地震动加速度记录时程的峰值加速度均调整为 200 gal。

3 计算结果及分析

引入位移反应脉冲影响系数来衡量速度脉冲对巨型结构位移反应的影响效果,其值根据结构各层位移反应的最大值定义:

$$k_{ij}^c = \frac{|d_i^c|_{\max}}{|d_{ij}^c|_{\max}}$$

式中: d_i^c 和 d_{ij}^c 分别为速度脉冲型地震动时程 A_i 和合成地震动 A_{ij} 引起的结构第 c 层的最大位移反应; k_{ij}^c 为第 c 层的位移反应脉冲影响系数。计算 4 组地震动作用下各模型的主结构各层最大位移反应及隔震层的最大位移,并计算其位移反应脉冲影响系数。

3.1 主结构各层最大位移响应

表 2 给出了巨-子结构抗震体系在 4 组地震动作用下主结构各层最大位移反应及脉冲影响系数。因篇幅所限,巨-子结构隔震体系及智能隔震体系的计算结果不再一一展示。

表 1 近断层速度脉冲型地震动记录参数

Table 1 Parameters of the near-fault velocity pulse-like ground motions

代号	地震名称	震级	台站	分量	场地	持时/s
A1	Northridge(1994)	7.1	Newhall-W.Pico Canyon Rd	comp046	B/C	20.48
A2	Imperial Valley(1979)	6.5	E04	compSN	B/C	20.48
A3	CHI-CHI(1999)	7.6	TCU75	compEW	D	40.96
A4	CHI-CHI(1999)	7.6	TCU76	compEW	D	40.96

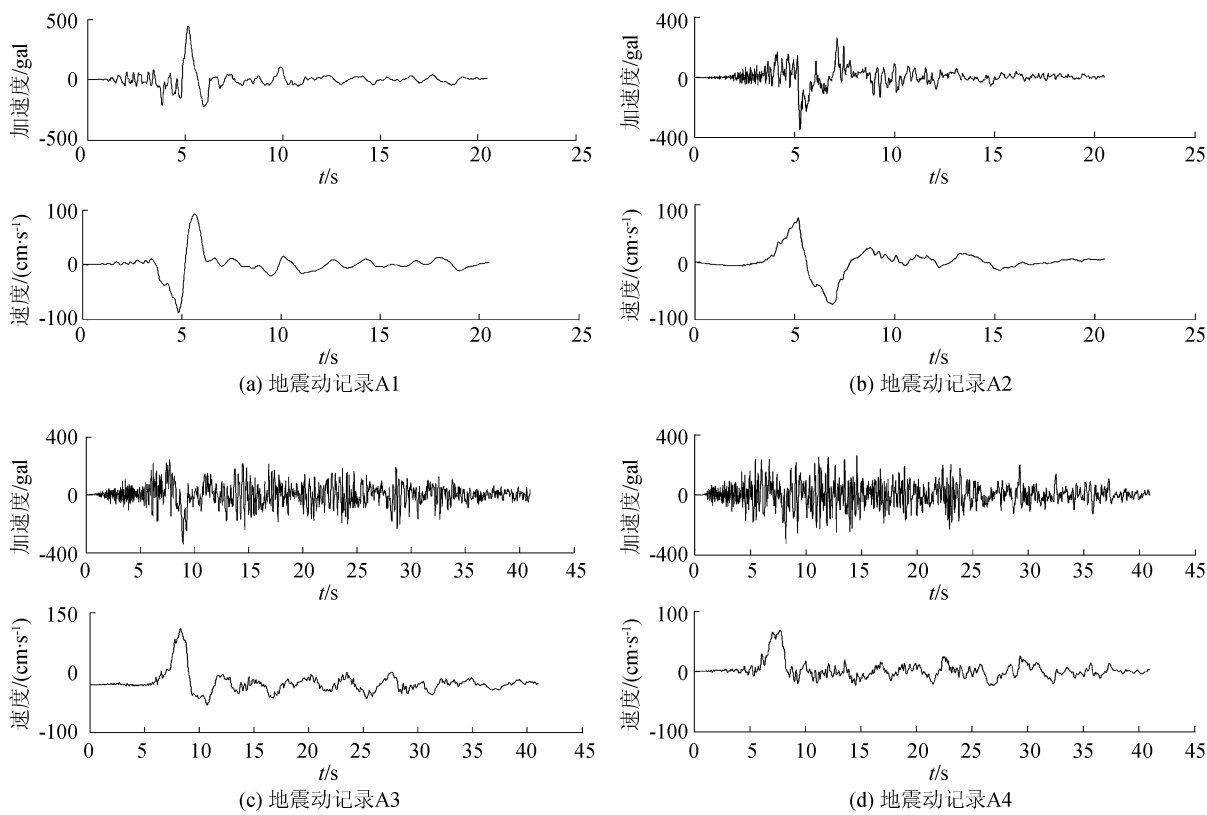


图 3 速度脉冲型地震动记录的加速度和速度时程

Fig.3 Acceleration and velocity time-histories of velocity pulse-like ground motion records

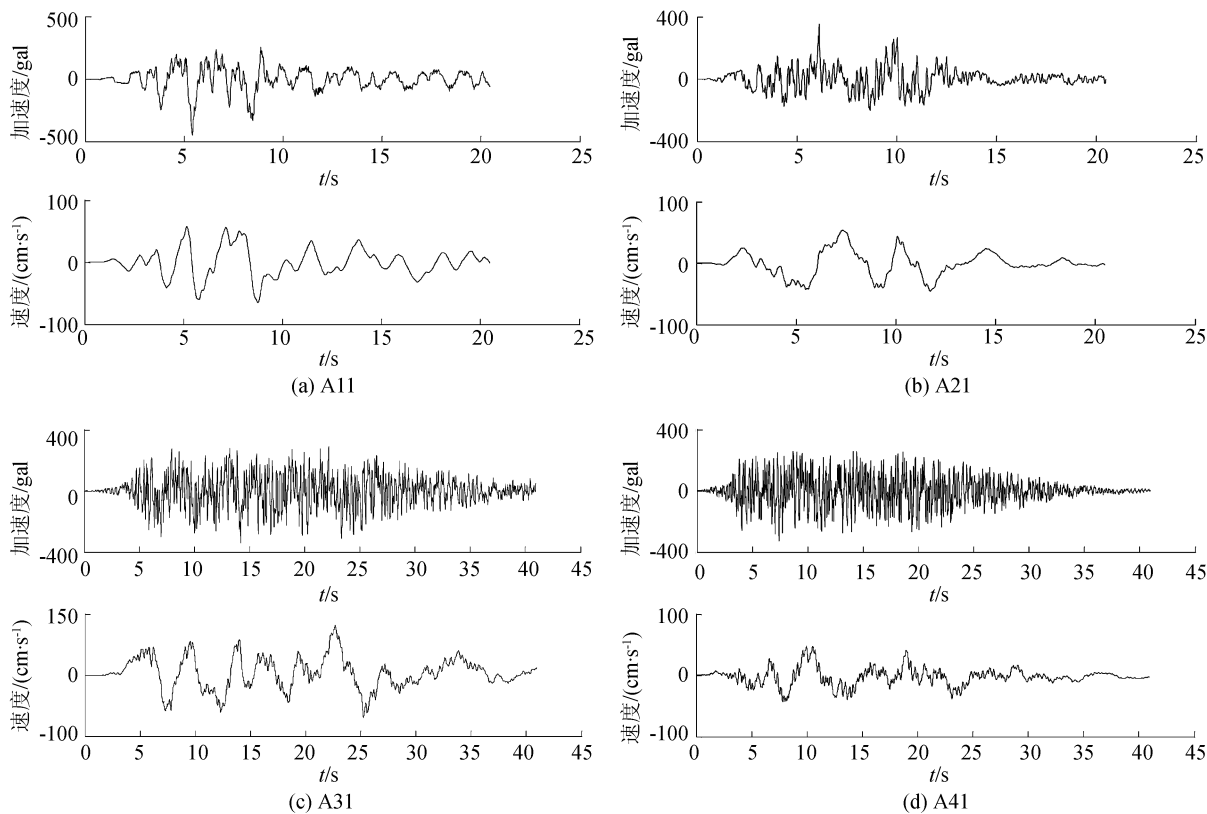


图 4 人工合成地震动的加速度和速度时程

Fig.4 Acceleration and velocity time-histories of synthetic ground motions

表 2 4 组地震动时程作用下主结构各层最大位移(抗震体系)

Table 2 Maximum displacement at each story of main structure under four group of earthquake ground motions (aseismic system)

地震记录	时程	位移/cm	1	2	3	4	5	均值
A1	A1	d_1	12.62	22.67	32.92	39.78	40.96	
	A11	d_{11}	12.10	22.48	29.77	34.43	35.34	1.09
		k_{11}	1.04	1.01	1.11	1.16	1.16	
	A12	d_{12}	10.22	19.45	28.65	34.14	35.07	1.18
		k_{12}	1.23	1.17	1.15	1.17	1.17	
	A13	d_{13}	11.93	20.36	25.77	29.05	29.67	1.24
		k_{13}	1.06	1.11	1.28	1.37	1.38	
	A14	d_{14}	9.78	17.61	24.86	28.90	29.60	1.33
		k_{14}	1.29	1.29	1.326	1.38	1.38	
	均值	k	1.16	1.14	1.21	1.27	1.27	1.21
A2	A2	d_2	12.18	23.79	34.03	40.73	41.85	
	A21	d_{21}	13.18	24.57	32.41	36.35	37.02	1.04
		k_{21}	0.92	0.97	1.05	1.12	1.13	
	A22	d_{22}	11.45	21.49	29.19	33.86	34.63	1.15
		k_{22}	1.06	1.11	1.17	1.20	1.21	
	A23	d_{23}	12.55	22.43	28.81	32.32	32.98	1.15
		k_{23}	0.97	1.06	1.18	1.261	1.27	
	A24	d_{24}	10.49	19.42	25.89	29.70	30.36	1.29
		k_{24}	1.16	1.23	1.31	1.37	1.38	
	均值	k	1.03	1.09	1.18	1.24	1.25	1.16
A3	A3	d_3	15.10	29.23	40.63	47.60	48.81	
	A31	d_{31}	12.40	23.26	31.65	36.95	37.88	1.27
		k_{31}	1.22	1.26	1.28	1.29	1.29	
	A32	d_{32}	13.84	25.57	34.25	39.36	40.22	1.17
		k_{32}	1.09	1.14	1.19	1.21	1.21	
	A33	d_{33}	12.53	23.19	31.61	36.84	37.70	1.27
		k_{33}	1.21	1.26	1.29	1.29	1.29	
	A34	d_{34}	13.80	25.80	34.79	40.03	40.95	1.16
		k_{34}	1.09	1.13	1.17	1.19	1.19	
	均值	k	1.15	1.20	1.23	1.24	1.25	1.21
A4	A4	d_4	8.49	16.42	23.2	25.64	26.23	
	A41	d_{41}	8.28	15.41	19.76	21.83	22.18	1.12
		k_{41}	1.03	1.07	1.17	1.17	1.18	
	A42	d_{42}	8.83	16.03	21.30	24.45	24.96	1.03
		k_{42}	0.96	1.02	1.09	1.05	1.05	
	A43	d_{43}	8.48	16.26	22.14	25.51	26.17	1.01
		k_{43}	1.00	1.00	1.05	1.01	1.00	
	A44	d_{44}	7.07	13.08	17.80	20.70	21.20	1.25
		k_{44}	1.20	1.26	1.30	1.24	1.24	
	均值	k	1.05	1.09	1.15	1.12	1.12	1.10

由表 2 可以得出,巨-子结构抗震体系在 4 组地震动作用下其主结构平均位移反应脉冲影响系数分别为 1.21、1.16、1.21 和 1.10,以上 4 条地震动时程速度脉冲影响系数的总平均值为 1.17,即在本文所选的 4 组速度脉冲地震动作用下巨-子结构抗震体系的主结构位移反应比在无速度脉冲人工地震动作用下增大 1.17 倍。同理,可计算出巨-子结构隔震体系的速度脉冲影响系数总平均值为 1.085,巨-子结构智能隔震体系的速度脉冲影响系数总平均值为 1.283。

图 5 为巨-子结构抗震体系、隔震体系及智能隔震体系在 4 组地震动作用下主结构的位移反应脉冲影响系数各层均值的对比图。由图 5 可以看出,速度脉冲对巨-子结构抗震体系、隔震体系以及智能隔震体系中主结构的位移反应有一定的不利影响,且智能隔震体系中主结构的位移响应对速度脉冲型地震动更为敏感。

3.2 隔震层位移

表 3 列出了巨-子结构隔震体系在 4 组地震动时程作用下隔震层各层最大位移反应及脉冲影响系

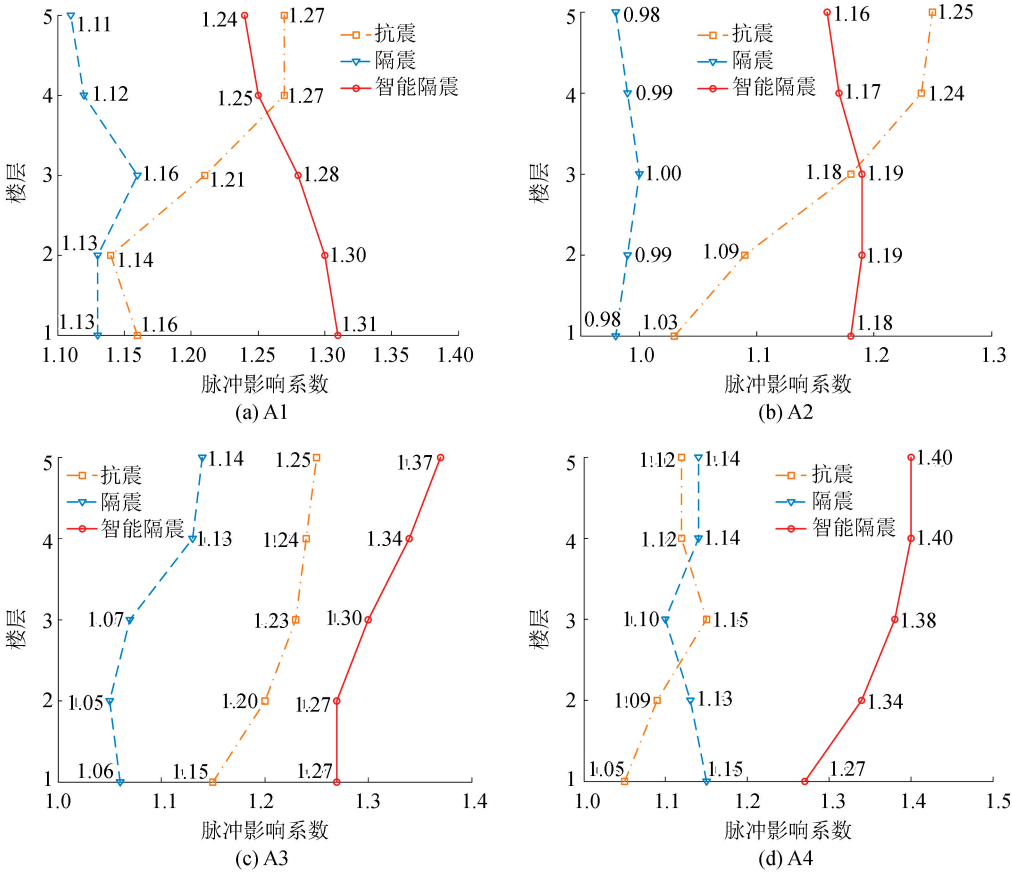


图 5 主结构各层位移脉冲影响系数

Fig. 5 Pulse influence coefficient of displacement at each story of main structure

数(巨-子结构智能隔震体系的不再列出)。由表 3 可以得出,巨-子结构隔震体系在 4 组地震动作用下其隔震层平均位移反应脉冲影响系数分别为 1.35、1.13、1.12 和 1.16,它们的地震动时程速度脉冲影响系数的总平均值为 1.19,即在本文所选的 4 组速度脉冲地震动作用下巨-子结构隔震体系中隔震层位移反应比无速度脉冲人工地震动作用下增大 1.19 倍。同理,可以计算出巨-子结构智能隔震体系在 4 组速度脉冲地震动作用下的速度脉冲影响系数总平均值为 1.293。因此有、无速度脉冲是影响巨-子结构隔震体系和智能隔震体系中隔震层位移反应大小的重要因素,速度脉冲对隔震层位移反应有一定的不利影响。

图 6 为隔震体系和智能隔震体系在 4 组地震动作用下隔震层的位移反应脉冲影响系数各层均值的对比图。由图 6 可以得出,速度脉冲对巨-子结构隔震体系以及智能隔震体系中隔震层的位移反应有一定的不利影响,且巨-子结构智能隔震体系在每一组速度脉冲地震动作用下隔震层速度脉冲影响系数均值均大于巨-子结构隔震体系在相应组地震动作用

下的速度脉冲影响系数平均值,即巨-子结构智能隔震体系中隔震层的位移应对速度脉冲型地震动更为敏感。

4 对比响应分析

4.1 主结构层位移响应

图 7 给出了巨-子结构抗震体系与智能隔震体系在速度脉冲型地震动作用下主结构各层位移最大值的对比。由图可知,在速度脉冲型地震动作用下两种结构体系的主结构位移反应均为由底层开始逐渐变大,顶层主结构的位移最大,且与抗震体系相比,巨-子结构智能隔震体系可有效减小主结构的位移。

4.2 隔震层层位移响应

巨-子结构隔震体系和智能隔震体系中隔震层每层位移最大值的对比响应见图 8。由图 8 可以看出,智能隔震体系下隔震层的相对位移响应相对普通隔震体系有所减小,即在速度脉冲强震动作用下,虽然智能隔震体系对其较为敏感,但可有效地减小隔震层处橡胶垫水平方向的位移。

表 3 4 组地震动时程作用下隔震层最大位移(隔震体系)

Table 3 Maximum displacement at each isolation layer under four group of earthquake ground motions (isolation system)

地震记录	时程	位移/cm	1	2	3	4	均值
A1	A1	d_1	30.35	36.56	42.10	46.13	1.45
	A11	d_{11}	22.29	25.54	28.43	30.55	
		k_{11}	1.36	1.43	1.48	1.51	
	A12	d_{12}	24.37	26.86	31.52	34.64	1.32
		k_{12}	1.25	1.36	1.34	1.33	
	A13	d_{13}	28.07	30.95	33.04	34.65	1.22
		k_{13}	1.08	1.18	1.27	1.33	
	A14	d_{14}	22.59	26.06	29.42	31.59	1.41
		k_{14}	1.34	1.40	1.43	1.46	
	均值	k	1.26	1.34	1.38	1.41	1.35
A2	A2	d_2	52.46	53.82	54.72	55.40	1.16
	A21	d_{21}	45.04	45.92	47.24	48.73	
		k_{21}	1.16	1.17	1.16	1.14	
	A22	d_{22}	43.25	45.56	47.86	49.92	1.16
		k_{22}	1.2	1.18	1.14	1.11	
	A23	d_{23}	43.77	47.86	50.90	52.78	1.11
		k_{23}	1.20	1.12	1.08	1.05	
	A24	d_{24}	43.99	48.23	51.73	54.01	1.10
		k_{24}	1.19	1.12	1.06	1.03	
	均值	k	1.19	1.15	1.11	1.08	1.13
A3	A3	d_1	67.30	68.45	70.48	72.17	1.28
	A31	d	48.33	53.06	57.45	60.36	
		k_{11}	1.39	1.29	1.23	1.20	
	A32	d_{12}	60.00	62.83	64.94	66.21	1.10
		k_{12}	1.12	1.089	1.09	1.09	
	A33	d_{13}	62.28	69.32	74.75	78.04	0.98
		k_{13}	1.08	0.99	0.94	0.92	
	A34	d_{14}	58.19	60.10	62.20	63.70	1.14
		k_{14}	1.16	1.14	1.13	1.13	
	均值	k	1.19	1.13	1.10	1.09	1.12
A4	A4	d_2	33.28	34.33	35.28	35.60	1.09
	A41	d_{21}	30.32	31.55	32.41	33.02	
		k_{21}	1.10	1.09	1.09	1.08	
	A42	d_{22}	31.69	34.69	37.14	38.88	0.98
		k_{22}	1.05	0.99	0.95	0.92	
	A43	d_{23}	26.11	27.33	28.82	29.80	1.24
		k_{23}	1.27	1.26	1.22	1.19	
	A44	d_{24}	24.55	25.15	26.07	26.80	1.35
		k_{24}	1.36	1.37	1.35	1.33	
	均值	k	1.19	1.17	1.15	1.13	1.16

5 结论

以实际的近断层速度脉冲地震动记录和相应的人工合成的无速度脉冲地震动时程作为地震动输入,通过对比巨-子结构抗震体系、隔震体系以及智能隔震体系在有、无速度脉冲地震动激励下的反应,分析了速度脉冲对这三种结构体系地震响应的影响,主要研究结论如下:

(1) 三种结构体系在速度脉冲地震动作用下的大部分地震响应要大于无速度脉冲地震动作用下的

地震响应,表明近断层速度脉冲地震动对巨-子结构抗震体系、隔震体系以及智能隔震体系地震反应均具有一定的不利影响;

(2) 巨-子结构智能隔震体系对于速度脉冲型地震动较为敏感,主结构位移和隔震层位移的脉冲影响系数平均值分别为 1.283 和 1.293,均大于巨-子结构抗震体系和隔震体系中主结构位移和隔震层位移的脉冲影响系数,但是巨-子结构智能隔震体系中隔震层位移响应相对隔震体系有所减小,即在速度脉冲强震动作用下,虽然智能隔震体系对其较为

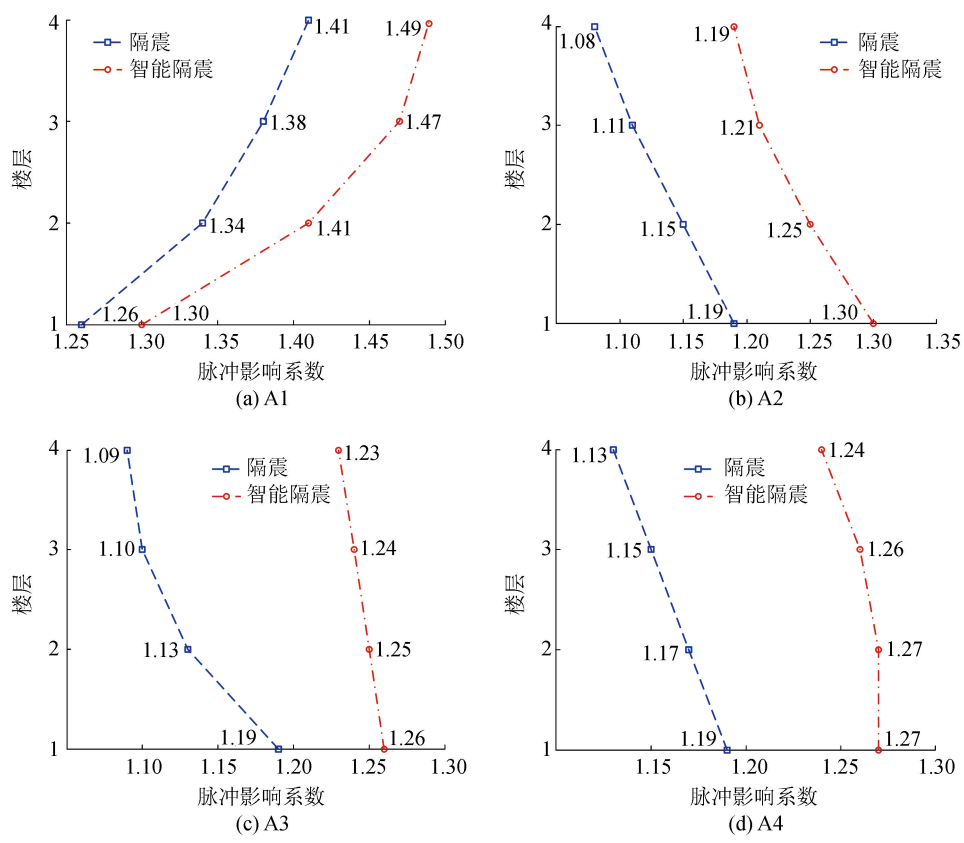


图 6 隔震层各层位移脉冲影响系数

Fig.6 Pulse influence coefficient of displacement at each isolation layer

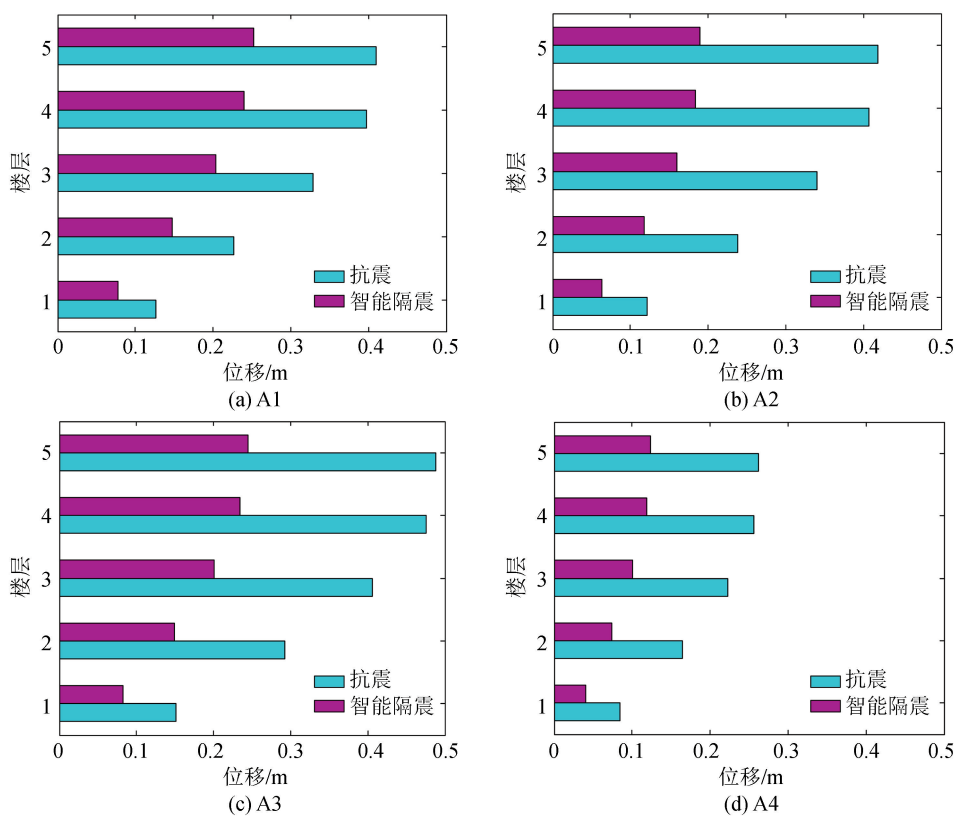


图 7 主结构各层最大位移响应对比

Fig.7 Comparison between the maximum displacement response of each layer of main structure

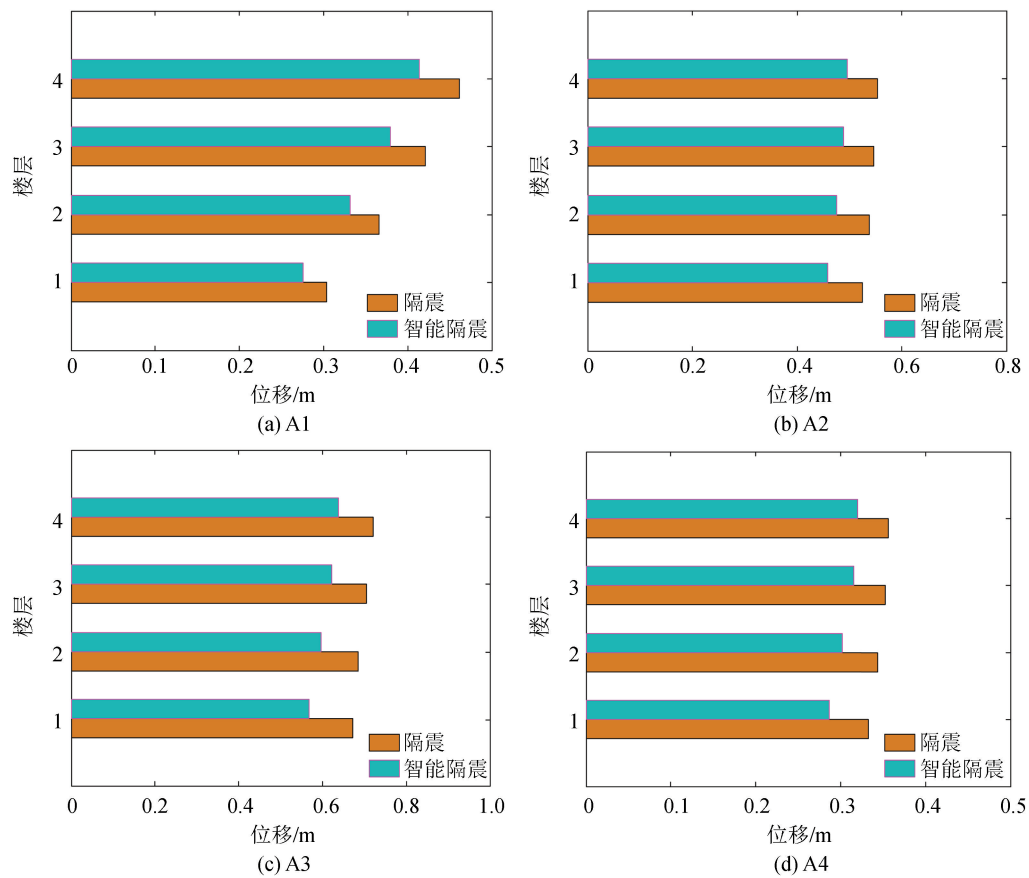


图 8 隔震层位移响应对比

Fig.8 Comparison between the maximum displacement response of each isolation layer

敏感,但相对巨-子结构隔震体系而言,可有效地减小隔震层处橡胶垫水平方向的位移,从而可以避免出现钢板与橡胶层剥离现象,保证结构的安全。

参考文献(References)

[1] FENG M Q, MITA A. Vibration Control of Tall Buildings Using Mega Sub Configuration[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(10): 1082-1088.

[2] CHAI W, FENG M Q. Vibration Control of Super Tall Buildings Subjected to Wind Loads[J]. International Journal of Nonlinear Mechanics, 1997, 32(4): 657-668.

[3] 王肇明, 邓洪洲, 董军. 高层巨型框架悬挂结构体系抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 2(1): 23-30.

WANG Zhaoming, DENG Hongzhou, DONG Jun. A Study of Aseismic Properties of Huge Frame Suspended Structure in Tall Buildings[J]. Journal of Building Structures, 1999, 2(1): 23-30.

[4] 连业达, 张洵安, 王朝霞. 巨、子结构质量比对新型有控结构建筑结构的影响研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(8): 113-115.

LIAN Yeda, ZHANG Xun'an, WANG Zhaoxia. Research on the Influence of Mass Ratio for New Mega-sub Controlled Structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8): 113-115.

[5] 裴星洙, 汪玲. 附加阻尼的悬挂式巨型框架复合支撑体系地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 191-197.

PEI Xingzhu, WANG Ling. Earthquake Response Analysis of Mega-suspended Braced Frame Attached with Damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 191-197.

[6] 蓝宗建, 田玉基, 曹双寅, 等. 巨型框架多功能减振结构体系的减振机理及其减振效果分析[J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 1-5.

LAN Zongjian, TIAN Yuji, CAO Shuangyin, et al. The Mechanism and Efficiency of Multifunctional Vibration Absorption for Megaframe Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6): 1-5.

[7] 谭平, 李祥秀, 刘良坤, 等. 巨-子结构控制体系的减震机理及性能分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 55-63.

TAN Ping, LI Xiangxiu, LIU Liangkun, et al. Control Mechanism and Performance Analysis of a Mega-sub Structure Control System[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 55-63.

[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 Vibration, 2006, 26(1): 1-10.

[9] 王海云, 谢礼立. 近断层强地震动的特点[J]. 哈尔滨工业大学

- 学报,2006,38(12):2070-2072,2076.
- WANG Haiyun, XIE Lili. Characteristics of Near-fault Strong Ground Motions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2070-2072, 2076.
- [10] 杨迪雄, 赵岩. 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 579-587.
- YANG Dixiong, ZHAO Yan. Effects of Rupture Forward Directivity and Fling Step of Near-fault Ground Motions on Seismic Performance of Base-isolated Building Structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 579-587.
- [11] 杜永峰, 徐超, 李慧. 近断层地震作用下基础隔震结构抗倾覆性能的分析[J]. 兰州理工大学学报, 2012(5): 111-115.
- DU Yongfeng, XU Chao, LI Hui. Analysis of Overturing Resistant Performance of Base-isolated Structures Subjected to Near-fault Earthquake[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012(5): 111-115.
- [12] 韩森, 段燕玲, 孙欢, 等. 近断层地震动特征参数对基础隔震结构地震响应的影响参数[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 8-13.
- HAN Miao, DUAN Yanling, SUN Huan, et al. Influence of Characteristics Parameters of Near-fault Ground Motions on the Seismic Responses of Base-isolated Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 8-13.
- [13] 贺秋梅, 李小军, 杨宇. 近断层速度脉冲型地震动作用基础隔震建筑位移反应分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 1-13.
- HE Qiumei, LI Xiaojun, YANG Yu. Displacement Response Analysis of Base-isolated Buildings Subjected to Near-fault Ground Motions with Velocity Pulse[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(1): 1-13.
- [14] 李小军, 贺秋梅, 开兴军. 地震动速度脉冲对大跨斜拉桥减震控制的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(2): 272-285.
- LI Xiaojun, HE Qiumei, QI Xingjun. Seismic Mitigation Control Effects of Long-span Cable-stayed Bridges to Ground Motions with Velocity Pulse[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2): 272-285.
- [15] 蓝宗建, 田玉基. 钢筋混凝土巨型框架多功能减震结构的调频减振原理[J]. 工业建筑, 2002, 32(1): 4-6.
- LAN Zongjian, TIAN Yuji. Structure-control Mechanism of Multifunctional Vibration-absorption of RC Megaframe Structures[J]. Industrial Construction, 2002, 32(1): 4-6.
- [16] 戴纳新, 谭平, 周福霖. 新型压电变摩擦阻尼器的研发与性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 205-214.
- DAI Naxin, TAN Ping, ZHOU Fulin. Piezoelectric Variable Friction Damper and Its Performance Experiments and Analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 205-214.
- *****
- (上接第 828 页)
- [9] 李小珍, 马文彬, 强士中. 车桥系统耦合振动分析的数值解法[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 21-25.
- LI Xiaozhen, MA Wenbin, QIANG Shizhong. Coupling Vibration Analysis of Vehicle-bridge System by Iterative Solution Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(3): 21-25.
- [10] 曾庆元, 杨毅, 骆宁安, 等. 列车-桥梁时变系统的横向振动分析[J]. 铁道学报, 1991, 2(13): 38-46.
- ZENG Qingyuan, YANG Yi, LUO Ning'an, et al. Lateral Vibration Analysis of Train-bridge time Varying System[J]. Journal of the China Railway Society, 1991, 2(13): 38-46.
- [11] 潘家英, 高芒芒. 铁路车-线-桥系统动力分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- PAN Jiaying, GAO Mangmang. The Dynamic Analysis of Railway Vehicle Line Bridge System[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [12] 王福天. 车辆系统动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- WANG Futian. Dynamics of Vehicle System[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.
- [13] 杨毅, 曾庆元. 列车-桥梁时变振动系统模态综合法[J]. 振动与冲击, 1988, 25(1): 1-9.
- YANG Yi, ZHENG Qinyuan. Train-bridge Time-varying System Mode Synthesis Technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 1988, 25(1): 1-9.
- [14] 夏禾, 张宏杰, 曹艳梅, 等. 车-桥耦合系统在随机下的动力分析及其应用[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 142-149.
- XIA He, ZHANG Hongjie, CAO Yanmei, et al. Dynamic Analysis of Train-bridge System under Random Excitations[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 142-149.
- [15] 万家. 高速列车-无砟轨道-桥梁耦合系统动力学性能仿真研究[D]. 北京: 铁道科学研究院, 2005.
- WAN Jia. Study on the High-speed Train-Ballastless Track-bridge Coupling System Dynamics Simulation[D]. Beijing: Academy of Railway Sciences, 2005.
- [16] 中华人民共和国铁道部. 铁路桥梁检定规范: 铁运函[2004] 120[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- People's Republic of China Ministry of Railways Rail. Railway Bridges Test Specification: Transport Letter[2004] 120[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [17] 国家铁路局. 轨道几何状态动态检测及评定: TB/T 3355-2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- National Railways. Dynamic Testing and Evaluation Track Geometry: TB/T 3355-2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.