

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210602002

可液化场地减震结构体系地震动特性 影响效应研究*

唐亮^{1,2}, 司盼^{1,2}, 凌贤长^{1,3}, 邢东亮⁴, 刘正滨⁵, 黄腾⁶

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 黑龙江省寒区轨道交通工程技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150090;

3. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 2660333; 4. 山东港口青岛港集团有限公司, 山东 青岛 266005;

5. 山东省港口集团有限公司, 山东 青岛 266000; 6. 中国铁建港航局集团有限公司, 广东 珠海 519070)

摘要: 工程结构的地震响应规律与地震动特性紧密相关。为了研究地震动特性对可液化场地装设黏滞阻尼器的桩基-结构体系地震响应和黏滞阻尼器减震效果的影响, 选取24条不同特性的地震动作为输入, 针对可液化场地装设黏滞阻尼器的桩基-结构体系数值模型进行非线性时程分析。结果表明: 相比于远场地震动作用和近场非脉冲地震动作用, 近场脉冲地震动作用下, 液化场地减震结构体系具有更大的地震响应; 近场脉冲地震动作用下, 速度型黏滞阻尼器的减震效果得到了充分发挥; 相同振幅下, 地震动峰值速度(PGV)与液化场地减震结构体系地震响应的相关性最为显著, 可作为评价液化场地减震结构体系地震响应的主要指标。研究结果对液化场地黏滞阻尼器的减震设计具有一定的借鉴意义。

关键词: 液化场地; 黏滞阻尼器; 地震动特性; 地震响应; 相关性

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0508-10

Study on the Influence of Ground Motion Characteristics on Structure System with Viscous Damper in Liquefiable Field

TANG Liang^{1,2}, SI Pan^{1,2}, LING Xianzhang^{1,3}, XING Dongliang⁴, LIU Zhengbin⁵, HUANG Teng⁶

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Heilongjiang Research Center for Rail Transit Engineering in Cold Regions, Harbin 150090, China; 3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 4. Shandong Port Group Qingdao Port, Qingdao 266005, China;

5. Shandong Port Group Co., Ltd., Qingdao 266000, China; 6. CRCC Harbor and Channel Engineering Bureau Group Co., Ltd., Zhuhai 519070, China)

Abstract: The seismic response law of engineering structures is closely related to the characteristics of ground motion. To examine the influence of ground motion characteristics on the seismic response and damping effect of the pile foundation-structure system with a viscous damper in the liquefiable field,

* 收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0205100)、国家自然科学基金项目(51578195; 51608533)、黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA19A501)资助

作者简介: 唐亮(1981—), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学与岩土地震工程、地下工程等方面的研究。

E-mail: tangliang@hit.edu.cn

24 ground motions with different characteristics were selected. Nonlinear time history analyses were carried out on the numerical model of the pile foundation-structure system with a viscous damper in the liquefiable field. The results show that the seismic response of the structure under near-field pulsed ground motion is larger than that under far-field ground motion and near-field non-pulsed ground motion. Under the action of near-field pulsed ground motion, the damping effect of the velocity-type viscous damper is fully exerted. Given the same amplitude, the peak ground motion velocity has the most significant correlation with the seismic response of damping structures in liquefiable fields, which can be used as the main evaluation index for seismic response of damping structures in liquefiable fields. The research results have important theoretical and practical significance for the damping design of viscous dampers in liquefiable fields.

Keywords: liquefiable field; viscous damper; ground motion characteristic; seismic performance; correlation

0 引言

地震作用下,结构物承受大量的地震能量,地震响应将在能量消耗后才会终止。传统结构抗震设计是借助结构的强度和塑性变形实现地震能量的耗散,而消能减震结构抗震设计是通过附加消能减震装置提高结构的阻尼,进而达到消耗输入结构地震能量的目的。消能减震装置中,黏滞阻尼器由于具有在较宽频域内可运动的位移、对温度不敏感、产生的阻尼力与位移存在滞后现象(相位差为 $\pi/2$)等优点,在工程结构减震设计中得到了广泛应用^[1]。

地震动是由震源释放出来的地震波引起的地表附近土层的振动,它是地震工程与工程抗震之间的桥梁^[2]。工程结构的地震响应规律与地震动特性紧密相关,因此,研究地震动特性对减震结构地震响应的影响是十分必要的。D. Vafaei等^[3]针对SMA支撑框架,选取了远场地震动和具有前方向性效应、滑冲效应的近场地震动进行非线性分析,结果表明:SMA支撑在近断层地震动作用下有效减少了层间位移和残余位移,相比远场地震动作用,近场地震动作用对结构有更高的抗震需求。O. K. Soureshjani等^[4]针对布置黏滞阻尼器的钢筋混凝土桥梁在近场和远场地震动作用下的受力性能,开展了动力非线性有限元时程分析。结果表明:相比于远场地震动,近场地震动作用使相对位移和残余位移分别增大了3倍和2倍,黏滞阻尼器在近场地震

动作用下降低相对位移的效果更显著。X. Wu等^[5]采用五种典型的阻尼器对某钢结构进行减震设计,分析其在近断层地震作用下的减震性能及失效机理,发现脉冲速度幅值和脉冲周期对减震结构地震响应影响较大。吴应雄等^[6]提出在高层隔震结构的隔震层增设黏滞阻尼器组成复合减隔震体系,解决了近场脉冲长周期地震动作用下隔震层位移超限的问题。周雨龙等^[7]研究了近场脉冲地震动作用下黏滞阻尼器对双柱摇摆桥墩的减震效果,结果表明:黏滞阻尼器可有效提高双柱摇摆桥墩在近场脉冲地震作用下的抗倒塌能力。张亚飞等^[8]采用层间隔震与阻尼减震对某框架结构进行加固,发现其在长周期地震作用下的减震效果明显优于普通地震动作用。杜东升等^[9]基于油阻尼器对高层钢结构进行了减震加固,发现长周期长持时地震动作用下,高层结构的减震效果更明显。石岩等^[10]基于“功能分离”设计理念提出“支座+支撑”的减震控制系统,研究了其在近断层地震动下的减震效果。综上所述,国内外关于地震动特性对减震结构地震响应与减震效果的影响方面已经开展了大量研究工作。然而,针对液化场地且考虑桩-土相互作用,分析地震动特性对装设黏滞阻尼器的减震结构抗震性能的研究鲜有报道,特别是尚未明确影响液化场地减震结构地震响应的关键地震动参数,致使现阶段在进行桩基结构减震设计选取地震动时仍存在一定的盲目性。

鉴于此,本文首先建立了能精准刻画液化场地桩基-结构体系地震响应的三维有限元模型,并通过离心机试验结果验证了有限元模型的可靠性。其

次,选取合适的黏滞阻尼器参数,对比远场地震动、近场非脉冲地震动和近场脉冲地震动作用下,减震结构的地震响应与黏滞阻尼器的减震效果。最后,分析峰值速度(PGV)、平均周期(T_m)、卓越周期(T_p)和90%能量持时(D_{5-95})等地震动参数与减震结构体系地震响应的相关性,为评估液化场地桩基-结构体系减震设计的合理性与适用性提供依据。

1 地震动的选取

近断层地震动由于受到断层破裂机制、破裂传播方向等因素的影响,表现出与远场地震动明显不同的特征,比如速度脉冲效应、方向性效应、上盘效应、滑冲效应、竖向加速度效应等特征^[11]。因此,地

震动选取应同时涵盖近场地震动和远场地震动。本文从美国太平洋地震工程研究中心数据库(<http://peer.berkeley.edu/>)选取了不同振幅、频谱和持时的24条地震动,其中远场地震动(FF)、近场非脉冲地震动(NF-NP)和近场脉冲地震动(NF-P)各8条,需要说明的是,选取的输入地震动为地表波,近场地震动均取距离断层20 km的范围内,见表1。

为对比远场地震动、近场非脉冲地震动和近场脉冲地震动作用下,液化场地桩基减震结构地震响应的异同,将选取的24条地震动的峰值加速度统一调整为 $0.2g$ 。图1给出了24条地震动的加速度反应谱(阻尼比为5%),由图可知,近场脉冲地震动的长周期响应比远场地震动和近场非脉冲地震动大。

表1 地震动参数
Table 1 Ground motion parameters

地震名称	编号	台站	地震动类型	震级	断层距/km	$PGV/(m \cdot s^{-1})$	T_p/s	T_m/s	D_{5-95}/s
Chi-Chi, Taiwan	1-1	CHY019	FF	7.62	50.53	0.18	0.24	0.53	39.07
	1-2	CHY062	FF	7.62	57.50	0.15	0.34	0.54	33.95
	1-3	CHY010	NF-NP	7.62	19.96	0.28	0.44	0.59	29.81
	1-4	CHY029	NF-NP	7.62	10.96	0.24	0.46	0.88	32.28
	1-5	TCU076	NF-P	7.62	2.76	0.30	0.34	0.50	29.53
	1-6	TCU075	NF-P	7.62	0.91	0.66	0.36	0.78	26.89
Imperial Valley-06	2-1	Victoria	FF	6.53	31.92	0.11	0.28	0.35	34.34
	2-2	Superstition Mtn Camera	FF	6.53	24.61	0.09	0.14	0.27	11.60
	2-3	Calexico Fire Station	NF-NP	6.53	10.45	0.16	0.36	0.44	11.04
	2-4	Chihuahua	NF-NP	6.53	7.29	0.18	0.26	0.58	20.57
	2-5	El Centro-Meloland Geot. Array	NF-P	6.53	0.07	0.46	0.66	1.06	8.22
	2-6	El Centro Differential Array	NF-P	6.53	5.09	0.36	0.18	0.62	11.90
Loma Prieta	3-1	Hayward-BART Sta	FF	6.93	54.15	0.18	0.16	0.54	10.95
	3-2	APEEL 3E Hayward CSUH	FF	6.93	52.53	0.16	0.30	0.54	17.46
	3-3	Corralitos	NF-NP	6.93	3.85	0.17	0.30	0.48	6.86
	3-4	Gilroy Array #4	NF-NP	6.93	14.34	0.19	0.44	0.60	13.87
	3-5	Los Gatos-Lexington Dam	NF-P	6.93	5.02	0.39	1.02	0.89	4.33
	3-6	Gilroy-Historic Bldg.	NF-P	6.93	10.97	0.33	0.42	0.80	8.92
Northridge-01	4-1	LA-Century City CC North	FF	6.69	23.41	0.16	0.20	0.51	13.18
	4-2	LA-Saturn St	FF	6.69	27.01	0.16	0.14	0.47	11.56
	4-3	Pacoima Dam (downstr)	NF-NP	6.69	7.01	0.21	0.40	0.46	4.34
	4-4	LA-Sepulveda VA Hospital	NF-NP	6.69	8.44	0.21	0.66	0.60	8.21
	4-5	Sylmar-Olive View Med FF	NF-P	6.69	5.30	0.26	0.52	0.79	6.80
	4-6	Jensen Filter Plant	NF-P	6.69	5.43	0.54	1.02	1.31	12.53

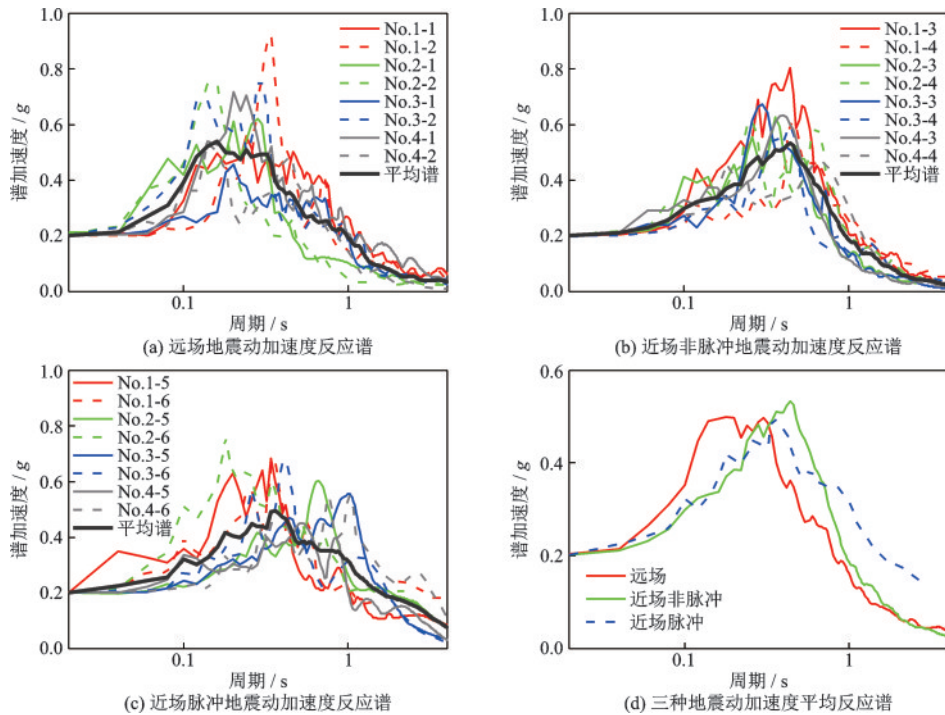


图1 地震动加速度反应谱(5%阻尼比)

Fig.1 Acceleration response spectra for the ground motions (with a 5% damping ratio)

2 液化场地装设黏滞阻尼器的桩基-结构体系数值模型

2.1 离心机试验简介

针对 D. W. Wilson^[12]完成的液化场地桩基-结构体系动力相互作用离心机试验建立数值模型,如图2所示。试验土层包含两层饱和和内华达砂。2×2群桩基础采用空心铝管桩,桩长16.8 m,桩径0.67 m,壁厚19 mm。柱墩高10.9 m,承台平面尺寸为4.6 m×4.6 m×2.3 m。桩的弹性模量为70 GPa。柱墩顶配重2 000 kN,模拟上部结构的惯性作用。试验输入地震动时程如图3所示。

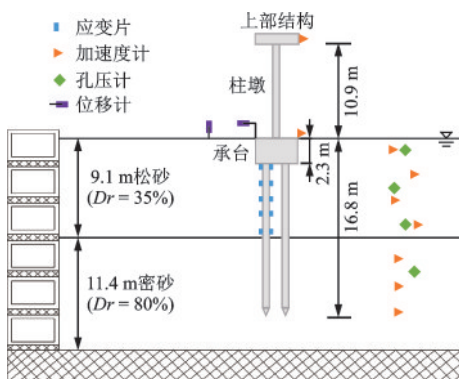


图2 试验布置示意^[12]

Fig.2 Centrifuge test setup^[12]

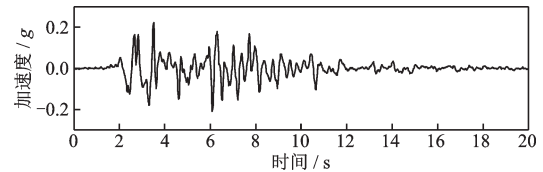


图3 基底输入激励^[12]

Fig.3 Base input motion^[12]

2.2 数值模型

基于 OpenSees^[13]有限元计算平台,建立了液化场地桩基-结构体系地震响应分析三维数值模型。采用水-土耦合的三维8节点六面体等参单元模拟饱和砂土,饱和砂土本构模型采用能够刻画砂土液化特性和累积剪切变形特性的多屈服面塑性本构模型,计算参数见表2^[14]。

为减少计算量,取一半试验体建立数值模型,模型长51.0 m×宽10.5 m×高20.5 m(见图4(a))。桩和柱墩均采用梁柱单元模拟。在桩-土刚性连接的基础上,增加零长度单元,赋予零长度单元桩-土接触面属性,近似模拟桩-土摩擦滑移机理^[15]。由于零长度单元要求连接的两个节点自由度相同,需在刚性连接节点和土节点之间增加附加节点,进而实现刚性连接单元和零长度单元的连接。使用 equal-DOF 命令约束附加节点和土节点,保证两点的水平和垂直方向位移相同(见图4(b))^[16]。

表 2 砂土本构模型计算参数^[14]

Table 2 Parameters of the sand constitutive model^[14]

参数	松砂	密砂
密度/(kg·m ⁻³)	1 700	2 100
低应变剪切模量 G_r /MPa	55.5	130.0
参考围压 P_r /kPa	80	80
内摩擦角 ϕ /°	29	40
液化屈服应变 γ_y	1%	0
剪缩系数 c_1	0.21	0.03
相位转换角 ϕ_{PT} /°	29	27
土的剪胀特性参数 d_1	0	0.8
土的剪胀特性参数 d_2	0	5.0
土的渗透系数 k /(m·s ⁻¹)	6.6×10^{-5}	3.7×10^{-5}

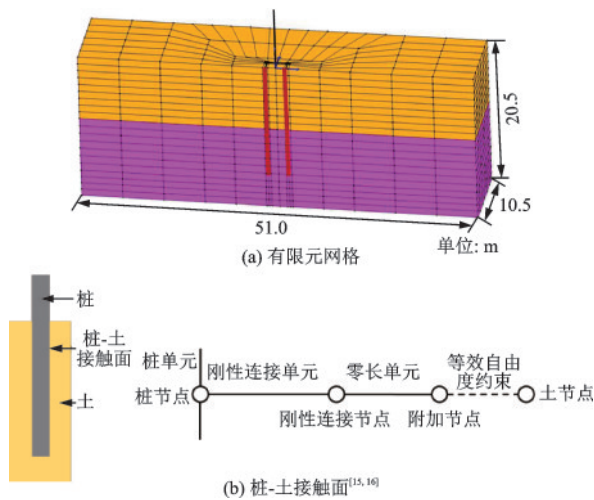


图 4 有限元数值模型

Fig.4 Finite element numerical modeling

振动前,约束模型底部节点竖向自由度,约束平行振动方向侧面上节点的 Y 方向自由度。将垂直振动方向的两侧面位于同一高度的节点位移自由端绑定,模拟层状剪切土箱边界特性。将模型底部和侧面均设置为不透水边界,地表处土体孔压为零。在模型底部输入如图 3 所示的基底激励。

2.3 数值模型可靠性验证

图 5 对比了自由场土体和桩基结构地震响应的数值计算结果和离心机试验结果。可以看出,超孔隙水压力计算值的波动形式、稳定状态等均与离心机试验结果吻合较好;模拟结果基本再现了试验中上部结构与饱和砂土加速度的时程特点;数值模型有效模拟了液化场地桩基地震响应,桩身弯矩时程的波动形式和峰值弯矩与试验结果基本一致。

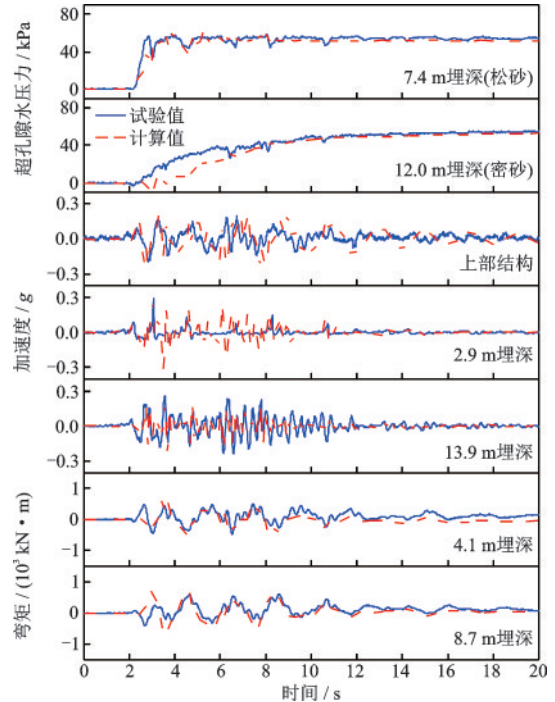


图 5 数值模型可靠性验证

Fig.5 Reliability validation of the numerical model

2.4 减震数值模型建立与验证

基于控制上部结构位移和柱墩底部地震响应的目的,将黏滞阻尼器设置在上部结构与柱墩顶部之间。为了准确体现黏滞阻尼器的频率依赖性,根据已有研究成果^[17-19],采用 Maxwell 模型模拟黏滞阻尼器的力学行为(见图 6),弹簧单元在模型中引入了频率相关特性,阻尼单元代表了装置的阻尼特性。黏滞阻尼器输出力 F 和活塞运动相对速度 v 关系如下式^[20-21]:

$$F = C \operatorname{sgn}(v) v^\alpha \quad (1)$$

式中, C 为黏滞阻尼器的阻尼系数,本文取 $1\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-0.8} \cdot \text{s}^{0.8}$; α 为速度指数,常用值为 $0.2 \sim 1.0$,参考相关文献研究成果^[22-23],本文建议 α 取 0.8 。



图 6 Maxwell 模型^[21]

Fig.6 Maxwell model^[21]

图 7 对比了黏滞阻尼器参数 $\alpha = 0.8$, $C = 1\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-0.8} \cdot \text{s}^{0.8}$ 时,非减震结构与减震结构的地震响应。可以看出,黏滞阻尼器在地震中消耗了一部分能量,衰减了结构体系的地震响应,其中上部结

构的加速度和位移响应明显降低,柱墩底部峰值剪力和峰值弯矩也显著下降,液化场地桩基-结构体系的抗震性能得到了明显的改善。验证了液化场地装设黏滞阻尼器的减震结构数值模型建立的可靠性。

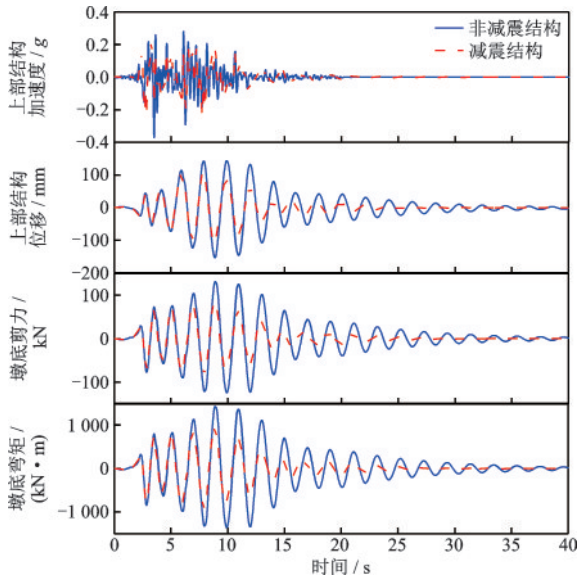


图7 非减震结构与减震结构地震响应对比

Fig.7 Comparison of seismic response of structures with and without viscous dampers

3 地震响应与相关性分析

3.1 地震动特性对减震结构体系地震响应的影响

为进一步研究地震动特性对减震结构体系地震响应的影响,对比分析了不同地震动作用下,上部结构加速度、上部结构位移、墩底弯矩和桩基地震响应的差异。图8是三种地震动作用下,上部结构加速度和位移响应对比情况,可以看出,相比于远场地震动作用和近场非脉冲地震动作用,近场脉冲地震动作用下,上部结构加速度和位移响应最大。图9是三种地震动作用下,柱墩底部峰值弯矩的对比情况,与上部结构地震响应类似,近场脉冲地震动作用下,柱墩底部峰值弯矩最大。图10对比了三种地震动作用下,桩身峰值位移和桩身峰值弯矩随埋深的变化,可以看出,桩顶处位移最大,而桩身最大弯矩出现在桩顶处或土层分界处。另外,近场地震动作用下,桩身峰值位移和桩身峰值弯矩明显大于远场地震动,特别是在近场脉冲地震动作用下。因此,在近场脉冲地震动作用下,减震结构抗震需求更高。

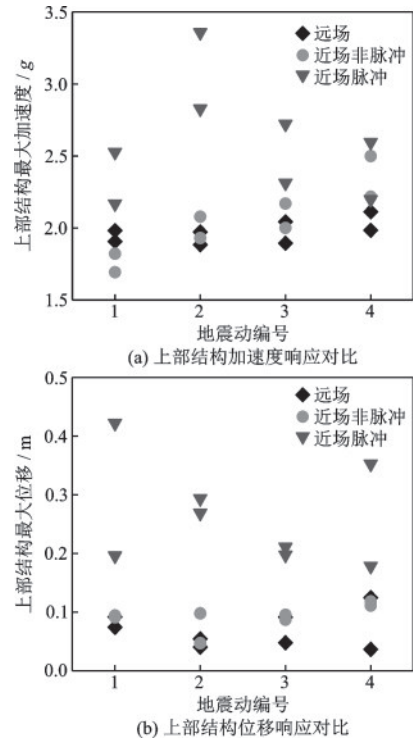


图8 三种地震动作用下上部结构加速度和位移对比

Fig.8 Comparison of superstructure acceleration and displacements under three kinds of input motions

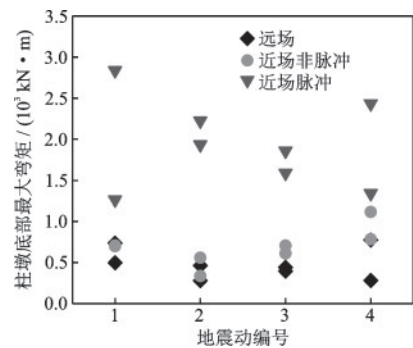


图9 三种地震动作用下柱墩底部峰值弯矩对比

Fig.9 Comparison of peak bending moments at the bottom of column piers under three kinds of input motions

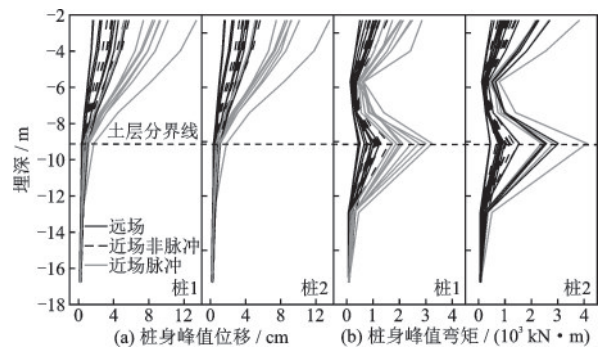


图10 三种地震动作用下桩身峰值位移和桩身峰值弯矩分布

Fig.10 Distribution of peak displacements and bending moments of the pile under three kinds of input motions

3.2 地震动特性对黏滞阻尼器减震效果的影响

图 11 对比了黏滞阻尼器在三种地震动作用下的减震效果,可以看出,近场脉冲地震动作用下,减震结构的上部结构位移和墩底弯矩的地震响应下降显著,减震效果最好,这可能是由于上部结构速度在近场脉冲地震动作用下大于远场地震动作用和近场非脉冲地震动作用,使得速度相关型黏滞阻尼器耗能能力得到充分发挥。图 12 对比了三种地震动作用下黏滞阻尼器的力-位移滞回曲线,可以看出,相比于远场地震动作用,近场地震动作用下,特别是近场脉冲地震动作用下,黏滞阻尼器的滞回曲线更饱满,耗能能力更强,阻尼器出力从大到小依次是近场脉冲地震动、近场非脉冲地震动和远场地震动作用。

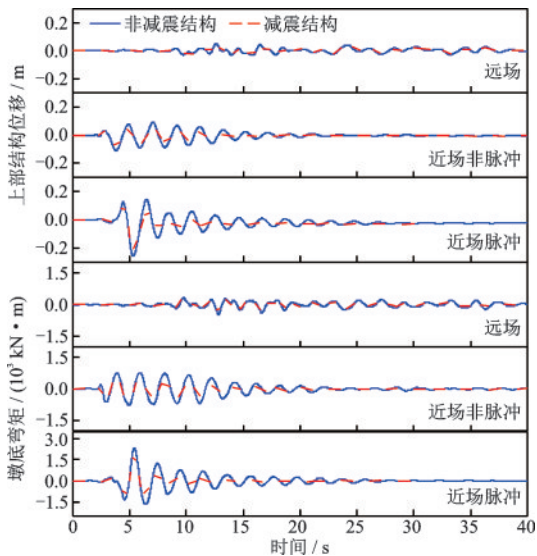


图 11 三种地震动作用下黏滞阻尼器减震效果对比
Fig.11 Comparison of damping effects of viscous dampers under three kinds of input motions

3.3 相关性分析

输入地震动的选取是结构抗震分析中的重要问题,不同输入地震动引起的结构响应有显著差异。为了在众多地震动参数中选择最具有代表性的特征参数,估计和表征地震动对结构体系的潜在破坏能力,由有限元计算得到 24 条地震动作用下减震结构的地震响应,分析地震响应(上部结构位移、墩底最大弯矩、桩身最大位移、桩身最大弯矩和阻

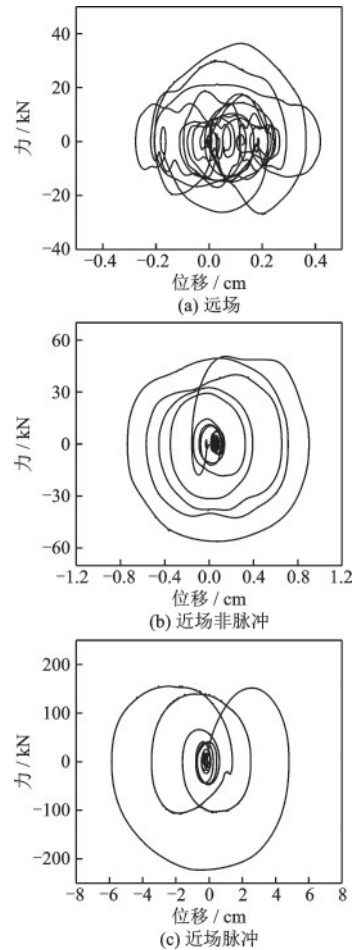


图 12 三种地震动作用下黏滞阻尼器的力-位移滞回曲线
Fig.12 Force-displacement hysteresis curves of viscous dampers under three kinds of input motions

尼器最大恢复力)与地震动参数[峰值速度(PGV)、平均周期(T_m)、卓越周期(T_p)和 90% 能量持时(D_{5-95})]之间的相关性。

图 13~图 17 分别给出了地震动参数 PGV 、 T_m 、 T_p 、 D_{5-95} 与上部结构最大位移、墩底最大弯矩、桩身峰值位移、桩身峰值弯矩、黏滞阻尼器最大恢复力的变化关系。可以看出,减震结构的地震响应与地震动参数 PGV 、 T_m 、 T_p 均呈正相关,相关系数依次是 0.85~0.90、0.42~0.57 和 0.20~0.32,相关程度由强到弱依次是 PGV 、 T_m 、 T_p 。随着 PGV 的增大,上部结构最大位移、墩底最大弯矩、桩身峰值位移、桩身峰值弯矩和黏滞阻尼器最大恢复力明显增加,二者的相关系数达到 0.9 左右,属高度相关。而减震结构的地震响应与 90% 能量持时(D_{5-95})的相关系数仅为 -0.02 左右,可以认为基本不相关。

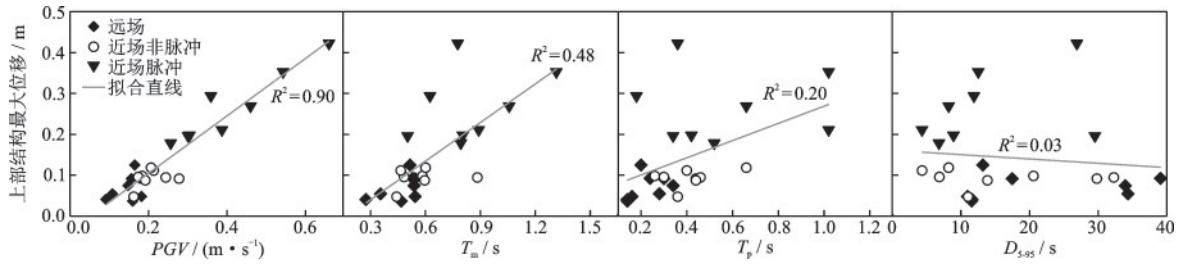


图 13 地震动参数与上部结构最大位移的变化关系

Fig.13 Relationship between ground motion parameters and maximum displacements of superstructures

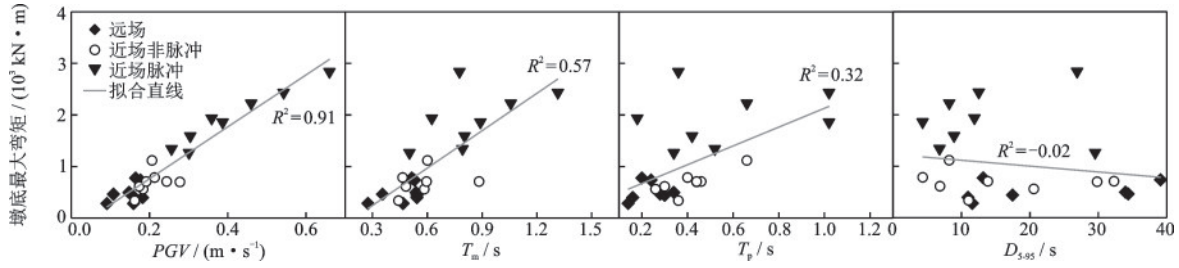


图 14 地震动参数与墩底最大弯矩的变化关系

Fig.14 Relationship between ground motion parameters and maximum bending moments at the pier bottom

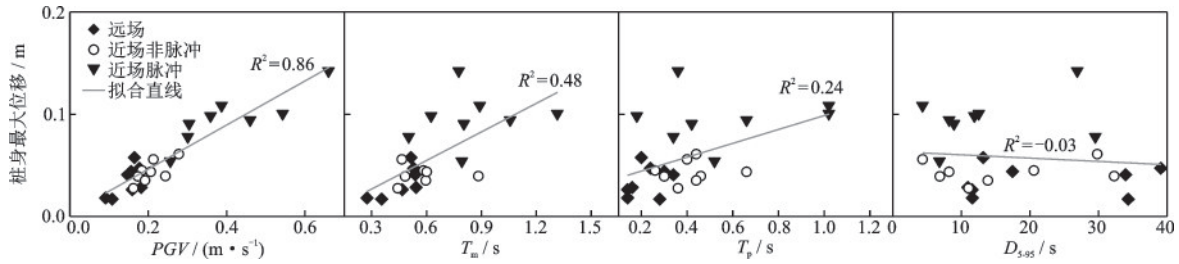


图 15 地震动参数与桩身峰值位移的变化关系

Fig.15 Relationship between ground motion parameters and peak displacements of the pile

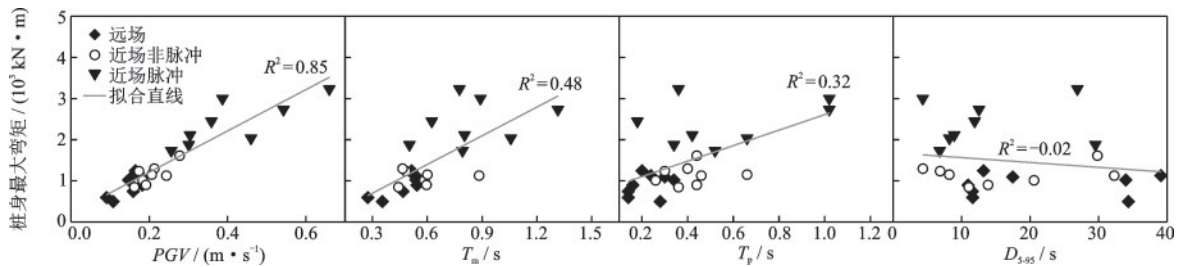


图 16 地震动参数与桩身峰值弯矩的变化关系

Fig.16 Relationship between ground motion parameters and peak bending moments of the pile

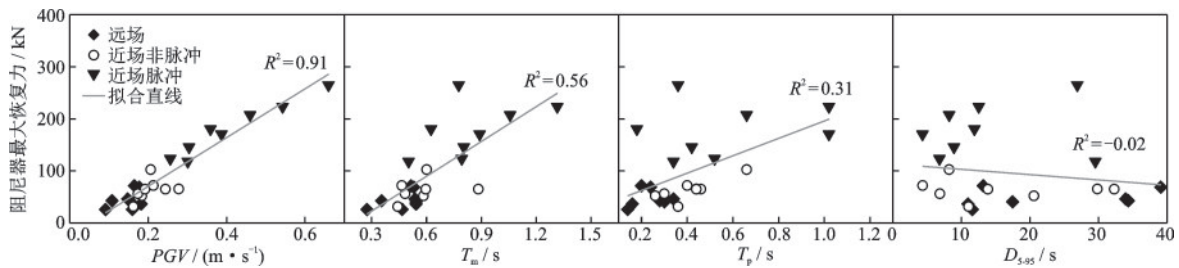


图 17 地震动参数与黏滞阻尼器最大恢复力的变化关系

Fig.17 Relationship between ground motion parameters and maximum restoring forces of viscous dampers

4 结 论

选取了远场地震动、近场非脉冲地震动和近场脉冲地震动共 24 条,基于液化场地装设黏滞阻尼器的桩基-结构体系动力相互作用数值模型,研究了地震动特性对减震结构地震响应和黏滞阻尼器减震效果的影响规律,并分析了地震动参数与减震结构地震响应的相关性,主要得到以下结论:

(1) 黏滞阻尼器有效降低了上部结构位移和柱墩底部弯矩,改善了液化场地桩基-结构体系的抗震性能。相比于远场地震动作用和近场非脉冲地震动作用,近场脉冲地震动作用下,减震结构的地震响应更为剧烈。

(2) 作为速度型阻尼器,黏滞阻尼器在近场脉冲地震动作用下的减震效果比在远场地震动和近场非脉冲地震动作用下的减震效果更为显著,黏滞阻尼器的力-位移滞回曲线更饱满。

(3) 卓越周期(T_p)、平均周期(T_m)和 90% 能量持时(D_{5-95})与减震结构地震响应的相关性并不明显。而峰值加速度(PGV)与减震结构体系地震反应的相关程度最高,可以用来表征地震动对液化场地减震结构潜在破坏势的特征参数。

参考文献:

- [1] 翁大根,张超,吕西林,等. 附加黏滞阻尼器减震结构实用设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 80-88.
Weng D G, Zhang C, Lyu X L, et al. Practical design procedure for a energy-dissipated structure with viscous dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 80-88. (in Chinese)
- [2] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 2 版. 北京:地震出版社, 2006:44-53.
Hu Y X. Earthquake Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press, 2006: 44-53. (in Chinese)
- [3] Vafaei D, Eskandari R. Seismic performance of steel mega braced frames equipped with shape-memory alloy braces under near-fault earthquakes[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2016, 25(1): 3-21.
- [4] Soureshjani O K, Massumi A. Effect of near and far-field earthquakes on RC bridge with and without damper

- [J]. Earthquakes and Structures, 2019, 17(6): 533-543.
- [5] Wu X, Guo W, Hu P, et al. Seismic performance evaluation of building-damper system under near-fault earthquake[J]. Shock and Vibration, 2020(2): 1-21.
- [6] 吴应雄,颜桂云,石文龙,等. 长周期地震动作用下高层隔震结构减震性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(5):806-816.
Wu Y X, Yan G Y, Shi W L, et al. Experimental study on the seismic-reduction performance of high-rise isolated structure under long-period ground motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(5): 806-816. (in Chinese)
- [7] 周雨龙,张劲泉,韩强,等. 近场脉冲型地震作用下黏滞阻尼器对双柱摇摆桥墩减震作用研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增 2):288-293.
Zhou Y L, Zhang J Q, Han Q, et al. Effect of dampers on seismic response of rocking double-column bents under near-field ground motions with strong pulses [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup2): 288-293. (in Chinese)
- [8] 张亚飞,刘德稳,李利平,等. 云南鲁甸某既有框架结构在长周期地震动作用下隔减震加固研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5):148-154.
Zhang Y F, Liu D W, Li L P, et al. Study on seismic isolation reinforcement of an existing frame structure under long period ground motion in Ludian, Yunnan Province[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(5): 148-154. (in Chinese)
- [9] 杜东升,宋宝玺,许伟志,等. 高层钢结构考虑长周期地震动的减震加固研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 189-200.
Du D S, Song B X, Xu W Z, et al. Seismic retrofit of a high-rise steel structure considering long-period and long-duration ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7): 189-200. (in Chinese)
- [10] 石岩,张展宏,韩建平,等. 近断层地震动下大跨度铁路连续梁拱桥的自复位性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(3):390-396.
Shi Y, Zhang Z H, Han J P, et al. Self-centering performance of long-span railway continuous beam-arch bridge subjected to near-fault ground motions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(3): 390-396. (in Chinese)
- [11] Davoodi M, Jafari M K, Hadiani N. Seismic response of embankment dams under near-fault and far-field ground motion excitation [J]. Engineering Geology, 2013, 158: 66-76.

- [12] Wilson D W. Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay[M]. America: University of California, 1998.
- [13] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. OpenSees command language manual [M]. America: Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 2006.
- [14] Yang Z, Elgamal A, Parra E. Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1119-1127.
- [15] 苏雷. 液化侧向扩展场地桩—土体系地震模拟反应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Su L. Earthquake simulation response of soil-pile system in liquefaction-induced lateral spreading ground [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 惠舒清, 张效禹, 唐亮, 等. 考虑群桩效应的液化场地桩—土动力 p-y 曲线研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(6): 7.
Hui Sh Q, Zhang X Y, Tang L, et al. The p-y curve in liquefying ground considering pile group effect[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(6): 7. (in Chinese)
- [17] Lu L Y, Lin G L, Shi M H. An experimental study on a generalized maxwell model for nonlinear viscoelastic dampers used in seismic isolation[J]. Engineering Structures, 2013, 34(1): 111-123.
- [18] Constantinou M C, Symans M D. Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers[M]. America: National Center For Earthquake Engineering Research, 1992.
- [19] Constantinou M C, Symans M D. Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers[J]. The Structural Design of Tall Buildings, 1993, 2(2): 93-132.
- [20] Akcelyan S, Lignos D G, Hikino T, et al. Evaluation of simplified and state-of-the-art analysis procedures for steel frame buildings equipped with supplemental damping devices based on e-defense full-scale shake table tests[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(6): 1-18.
- [21] Sarven A, Lignos D G, Tsuyoshi H. Adaptive numerical method algorithms for nonlinear viscous and bilinear oil damper models subjected to dynamic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 488-502.
- [22] Qiang H, Wen J, Du X, et al. Nonlinear seismic response of a base isolated single pylon cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2018, 175: 806-821.
- [23] Yi J, Zhou J, Ye X. Seismic control of cable-stayed bridge using negative stiffness device and fluid viscous damper under near-field ground motions[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020(2): 1-18.

(本文编辑: 苏泽云)