

砂土中垫层隔震基础地震响应离心模型试验及数值分析

张浩^{1,2}, 贾亚杰¹, 梁发云¹, 李通达¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海师范大学 建筑工程学院, 上海 201418)

摘要: 针对砂土地基中的一种新型基础型式——垫层隔震基础, 开展地基—基础—结构动力相互作用的离心振动台试验和三维数值模拟。通过对比不同峰值和类型地震波作用下新型垫层隔震基础与传统群桩基础的动力响应, 探讨垫层隔震基础的隔震机理, 并结合参数分析垫层厚度等因素对垫层隔震基础地震响应的影响规律。结果表明, 与群桩基础相比, 垫层隔震基础的上部结构加速度降低, 但其峰值及残余位移较大; 桩顶约束减弱, 筏板与垫层在强震下相对滑动, 传递的惯性力降低, 导致桩身最大弯矩减小且位置下移; 桩身弯矩随垫层厚度的降低而显著增大。

关键词: 垫层隔震基础; 群桩基础; 隔震机理; 砂土; 参数分析

中图分类号: TU47

文献标志码: A

Centrifuge Test and Numerical Analysis of Seismic Response of Cushioned Pile Raft Foundation in Sand

ZHANG Hao^{1,2}, JIA Yajie¹, LIANG Fayun¹, LI Tongda¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China)

Abstract: Centrifuge shaking table tests and three-dimensional numerical simulations of dynamic interactions among soil, foundation, and structure are conducted for both a traditional pile group foundation of bridge and a novel cushioned pile raft foundation of bridge in sand. By comparing the dynamic responses of the two kinds of foundations subjected to different peaks and types of earthquake waves, the seismic isolation mechanism of the cushioned pile raft foundation is discussed, and the influences of the thickness of cushion and other factors on the seismic response of the cushioned pile raft foundation are studied based on

parameter analysis. The results show that when compared with the pile group foundation, the acceleration of the superstructure of the cushioned pile raft foundation decreases, while its peak and residual displacement increases. The constraint of pile head is weakened, and sliding takes place between the raft and the interposed layer in strong earthquakes, thus reducing the inertial force transmitted to the foundation, which leads to a decrease of the maximum pile bending moment and a moving down of the position of the maximum pile bending moment. The pile bending moment increases significantly with the decrease of the thickness of cushion.

Key words: cushioned pile raft foundation; pile group foundation; seismic isolation mechanism; sand; parameter analysis

近年来国内外学者不断探讨适用于地震带深水环境的基础型式, 其中 Rion-Antirion 桥^[1]具有较好的代表性。该桥持力层为深厚的软弱冲积层, 采用钢管桩加固软弱土体, 在其上覆砂石垫层, 并将预制装配式主塔基础明置于砂石垫层之上, 从而形成垫层隔震基础。这种垫层隔震基础的关键创新之处在于: 一方面, 砂石垫层可以消减传递至上部结构的地震作用, 保护桥梁上部结构; 另一方面, 桩顶与主塔基础并不直接连接, 桩顶约束减弱, 上部结构施加给桩身的惯性作用降低; 此外, 主塔基础以预制装配式为主, 桩顶与主塔基础无需刚性连接, 在深水环境中的施工难度大幅度降低。Rion-Antirion 桥在 2004 年建成后经历了数次 6 级以上地震的考验^[2], 对我国强震地区深水桥梁的建设具有重要的参考价值。

垫层隔震基础虽然在 Rion-Antirion 桥等实际工程中得到了成功应用, 但更多地是从概念上把握, 将

收稿日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51878487, 52008246); 上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1436700)

第一作者: 张浩(1987—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为桩基础和岩土地震工程。

E-mail: zhanghaotumu@163.com

通信作者: 梁发云(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桩基础和岩土地震工程。

E-mail: fylang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

加固后的土体作为均质地基,采用明置基础的设计方法^[1],其中仍有一些关键问题亟待解决,如垫层对于刚性桩及上部结构地震动力响应的影响机制等。此外,垫层隔震基础虽然目前在桥梁工程领域运用较少,但与此基础形式类似的复合地基基础(非连接式桩筏基础)在建筑工程领域已经有着较为广泛的运用;然而,目前针对此类基础的研究也主要集中在静力方面^[3-5],对其动力性能方面的研究却相对较少^[6]。武思宇等^[7-8]以建筑基础为背景,初步研究了垫层隔震基础的地震响应。韩小雷等^[9]和Han等^[10]采用数值模拟研究了地震作用下复合地基-筏板-建筑结构的动力响应,分析了该基础的隔震效果。Gorini和Callisto^[11]亦采用数值分析研究了与垫层隔震基础相似的摩擦耗能基础的地震响应。文献^[12]则通过对比浅基础、桩筏基础和垫层隔震基础的离心模型试验结果,指出与浅基础和桩筏基础相比,垫层隔震基础可以显著降低基础沉降和上部结构传递至基础的惯性力。已有文献多以建筑基础为背景,通过数值模拟或离心振动台试验分析垫层隔震基础的地震响应,但对垫层隔震机理方面的研究仍然较少。鉴于此,Liang等^[13]参考Rion-Antirion桥基础形式,忽略主塔基础形状并假设与垫层接触的上覆刚性基础为筏板,开展了软黏土中垫层隔震基础-桥梁上部结构体系的离心振动台试验,重点研究了不同地震波作用下垫层对隔震基础-上部结构体系动力响应的影响机制。

国内外多个拟建的跨海工程位于地质条件复杂的深水环境中,其海底以下相当范围内为砂土地基^[14-15]。本文在上述研究的基础上,针对砂土地基中的群桩基础(连接式桩筏基础)和垫层隔震基础(非连接式桩筏基础)开展地基-基础-结构动力相互作用的离心振动台试验,并额外加入大振幅的长周期地震波输入,对比不同峰值长短周期地震波作用下群桩基础和垫层隔震基础的动力响应,分析上部结构惯性效应和土体运动作用对2种基础地震反应的影响,着重探讨垫层隔震基础的隔震机理。此外,结合动力离心模型试验,采用Abaqus软件建立三维有限元模型,开展参数分析,进一步研究垫层刚度和垫层厚度对垫层隔震基础地震动力响应的影响规律。

1 垫层隔震机理的离心模型试验

试验采用同济大学的TLJ-150型岩土离心机。开展试验时,最大离心加速度 $50g$,最大振动加速度 $20g$,最大振幅 6 mm ,激振最长持时 1 s ,振动频率

$20\sim 200\text{ Hz}$ 。离心机配置了由22层框架叠合而成的层状剪切箱,每层框架厚 24 mm 。为吸收反射波,剪切箱内壁贴有 1 mm 厚橡胶膜。

1.1 试验模型

试验土体采用普通干砂,级配曲线如图1所示,绝大部分粒径位于 $0.05\sim 0.20\text{ mm}$ 之间。砂土密度 $1450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,试验填土在 50 g 应力条件下平均剪切波速约 $100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

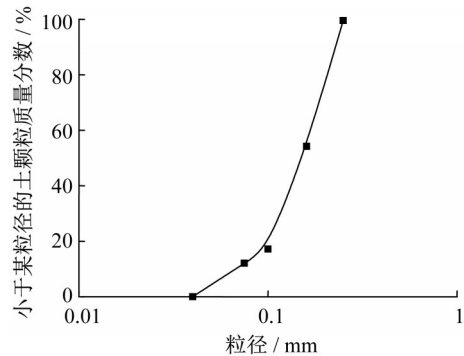


图1 砂土级配曲线

Fig. 1 Distribution curve of particle size of sand

设计离心加速度 $50g$,模型与原型长度相似比为 $1:50$,模型几何、材料及动力特性相似比如表1所示。立柱、承台(筏板)及桩采用铝合金材料,上部集中质量采用钢铁,模型尺寸及材料参数如表2所示。图2为试验模型。

表1 模型试验相似比

Tab. 1 Similitude relationships

特性	物理量	相似比
几何特性	长度	$1/50$
	惯性矩	$1/(50^4)$
材料特性	密度	1
	质量	$1/(50^3)$
动力特性	时间	$1/50$
	频率	50
	加速度	50
	位移	$1/50$
	力	$1/(50^2)$
	应变	1
	应力	1

1.2 传感器布置

采用加速度传感器、差动式位移传感器、激光位移传感器和应变片分别测量模型的加速度、位移以及桩身和立柱的弯曲变形(弯矩)。各传感器编号及功能如表3所示,传感器位置如图3所示。值得注意的是,群桩基础(连接式桩筏基础)和垫层隔震基础(非连接式桩筏基础)模型采用同一套上部结构、立柱及桩基础,且垫层厚度为1倍桩径(对应原型 0.6 m);只

表 2 模型尺寸及参数

Tab. 2 Dimensions and parameters of model

构件	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(10 ³ kg·m ⁻³)	尺寸
上部结构	钢材	200	0.25	7.8	65 mm×65 mm×65 mm
立柱	铝合金	70	0.33	2.7	直径 18 mm, 长 65 mm
筏板	铝合金	70	0.33	2.7	180 mm×180 mm×20 mm
桩	铝合金	70	0.33	2.7	外径 12 mm, 壁厚 1 mm, 长 270 mm

注:桩的密度和弹性模量在后续数值模拟中分别取 2 500 kg·m⁻³和 36.2 GPa。

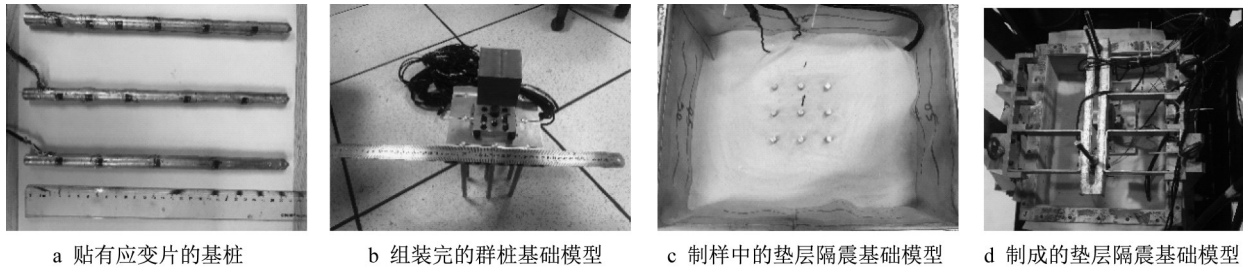


图 2 试验模型

Fig. 2 Test model

是在开展模型试验时,群桩基础桩顶与承台采用夹紧连接,夹紧长度为承台厚度(20 mm),而垫层隔震基础模型筏板为完整方形铝合金板,与桩顶不连接;故垫层隔震基础模型桩长 270 mm(对应原型 13.5 m),群桩基础桩长 250 mm(对应原型 12.5 m)。

1.3 加载方案

地震波采用短周期成分丰富的 El Centro 波和长周期成分丰富的 Mexico City 波,并通过振动台从模型箱外部施加水平地震波。因振动台激振频率为 20~200 Hz,激振前,先根据相似比调整激振时间和振动幅值,然后对调整后的地震波进行 20~200 Hz 带通滤波处理。图 4 为处理后的地震波时程、傅里叶谱及反应谱,需要指出的是,为便于分析,图 4 为

表 3 各传感器功能

Tab. 3 Function of each sensor

传感器类型	名称	功能
加速度计	A0	振动台输出加速度
	A1	土表加速度
	A2	桩顶加速度
	A3	承台(筏板)加速度
	A4	质量块加速度
差动式位移计	D1-D3	土层水平位移
	L1	质量块水平位移
	激光位移计	L2
L3		承台(筏板)竖向位移
应变片	Y0	立柱底部应变
	Y1	中心桩应变
	Y2	边桩应变
	Y3	角桩应变

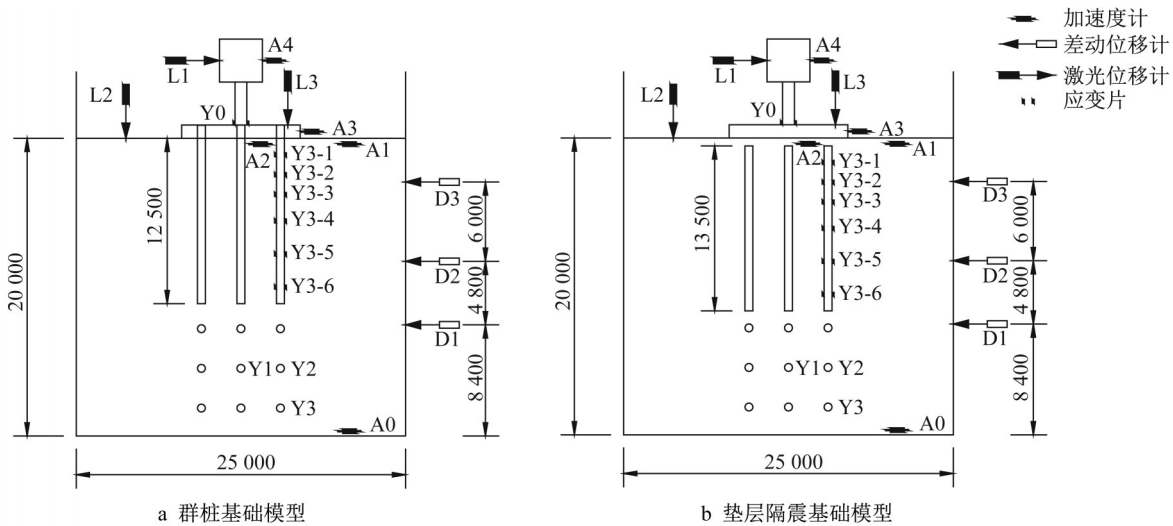


图 3 试验模型及传感器布置(单位:mm)

Fig. 3 Schematic view of model and instruments in centrifuge tests (unit: mm)

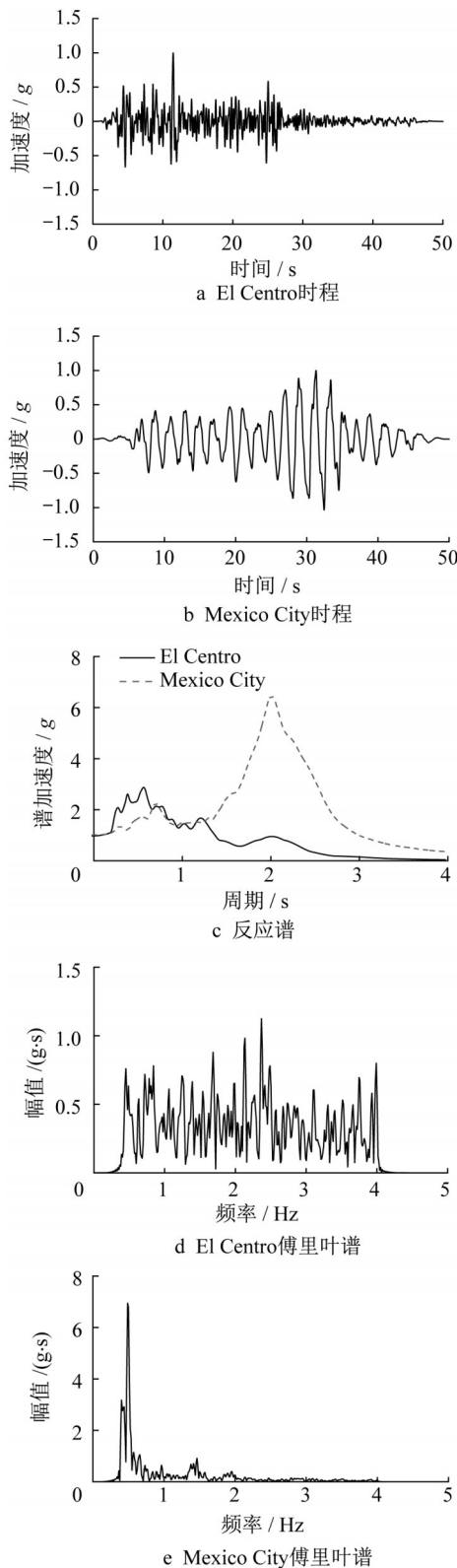


图4 输入地震波时程、傅里叶谱及反应谱

Fig. 4 Time history, Fourier spectrum, and response spectrum of input seismic wave

激振试验所对应的原型尺寸地震波。本试验依次增加地震波峰值,激振 El Centro 波和 Mexico City 波,激振顺序及工况名称如表 4 所示。

表4 加载方案

Tab. 4 Test cases

工况	输入地震波	理论峰值加速度/g
E1	El Centro	0.10
E3	El Centro	0.30
M1	Mexico City	0.10
M3	Mexico City	0.30

1.4 试验结果及分析

为便于分析,所有试验结果均等效为原型结果。为验证系统的可靠性,在土体底部布置加速度传感器,并对比土底加速度和振动台反馈加速度,比较二者是否一致。设振动台反馈加速度傅里叶谱为 $F_0(f)$,土底加速度傅里叶谱为 $G_0(f)$,则土底加速度与反馈加速度传递函数为 $Z_0(f) = G_0(f)/F_0(f)$,其幅值 $|Z_0(f)|$ 为加速度放大谱。图 5 为白噪声激振下的土底-振动台加速度传递函数,该放大谱幅值在 0.4~4 Hz 范围内保持在 1 附近,表明土底加速度和振动台反馈加速度基本一致,剪切箱与振动台之间加速度传递效果可靠,振动台输出加速度可视为土底实际输入加速度。此外,为保持群桩基础(连接式桩筏基础)模型和垫层隔震基础(非连接式桩筏基础)模型结果的可对比性,有必要保持 2 组模型试验的振动台输入地震波一致,且地表加速度相近。图 6 为群桩基础模型和垫层隔震基础模型 4 组试验的振动台输出加速度反应谱,虽然二者与理论输出加速度反应谱(图 4)之间存在一定的差别,但 4 种工况下上述 2 类基础模型试验得到的振动台输出加速度反应谱非常接近,说明振动台对同一种地震波的重复性较好。图 7 为 2 组试验 4 种工况下的地表加速度反应谱,不同工况下的地表加速度反应谱均较为接近,进一步说明了 2 组试验模型土的物理力学性质相似,且试验结果的可对比性较高。

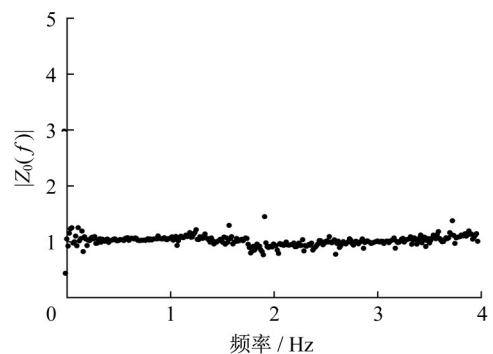


图5 土底-振动台加速度传递函数

Fig. 5 Acceleration transfer function of soil bottom-shaking table

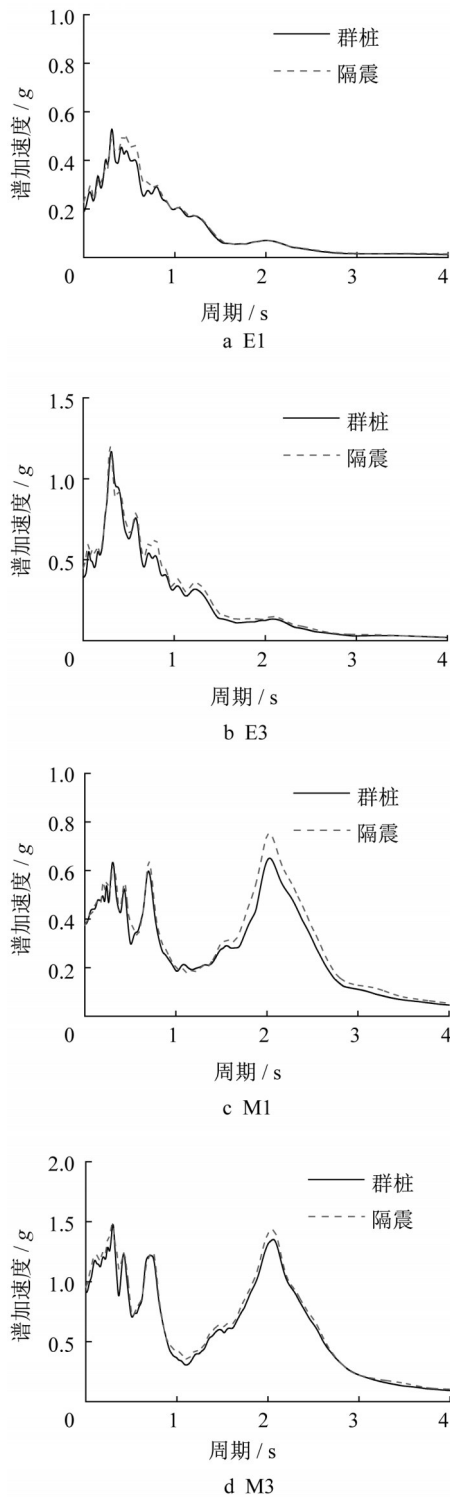


图6 振动台输出加速度反应谱

Fig. 6 Acceleration response spectrum of output motion

1.4.1 上部结构—筏板加速度

图8为群桩基础模型和垫层隔震基础模型的上部结构加速度。当输入地震波加速度峰值较小时,2种模型的上部结构加速度时程及傅里叶谱相似。输入地震波加速度峰值增加,二者差异增加,垫层隔震基础模型上部结构加速度时程峰值及其傅里叶谱幅

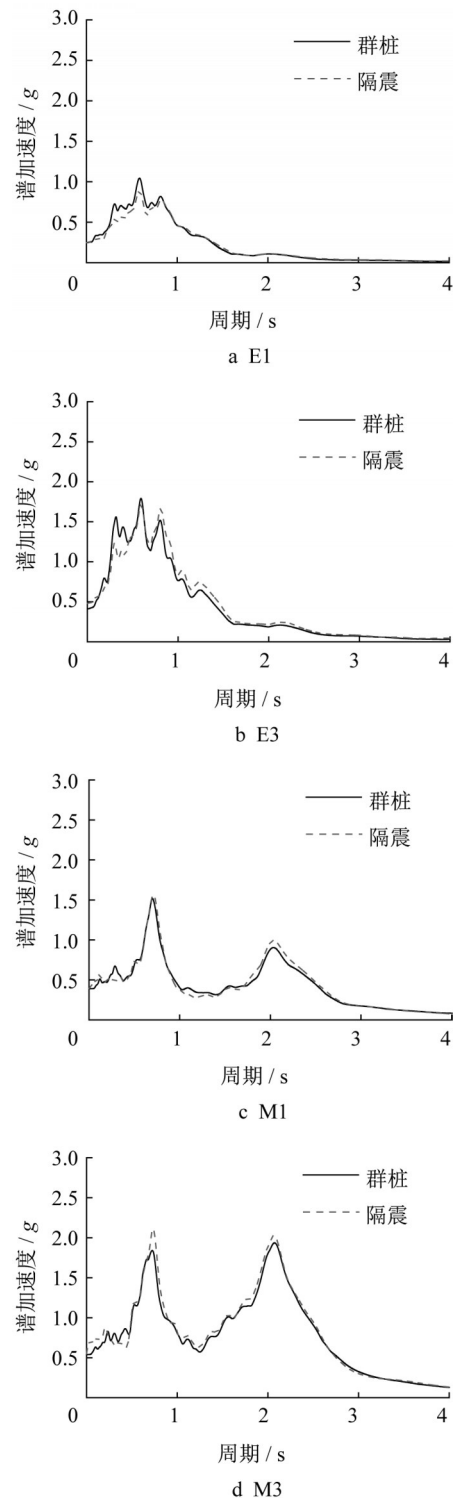


图7 地表加速度反应谱

Fig. 7 Acceleration response spectrum of ground surface

值均小于同种工况下的群桩基础,且频率分布上也产生了一定变化,表明垫层起到了隔震作用。具体而言,输入地震波为0.1g和0.3g的El Centro波时,垫层隔震基础模型上部结构加速度正(负)峰值与群桩基础上部结构加速度正(负)峰值的比例分别为1.00(1.00)和0.65(0.81);输入地震波为0.1g

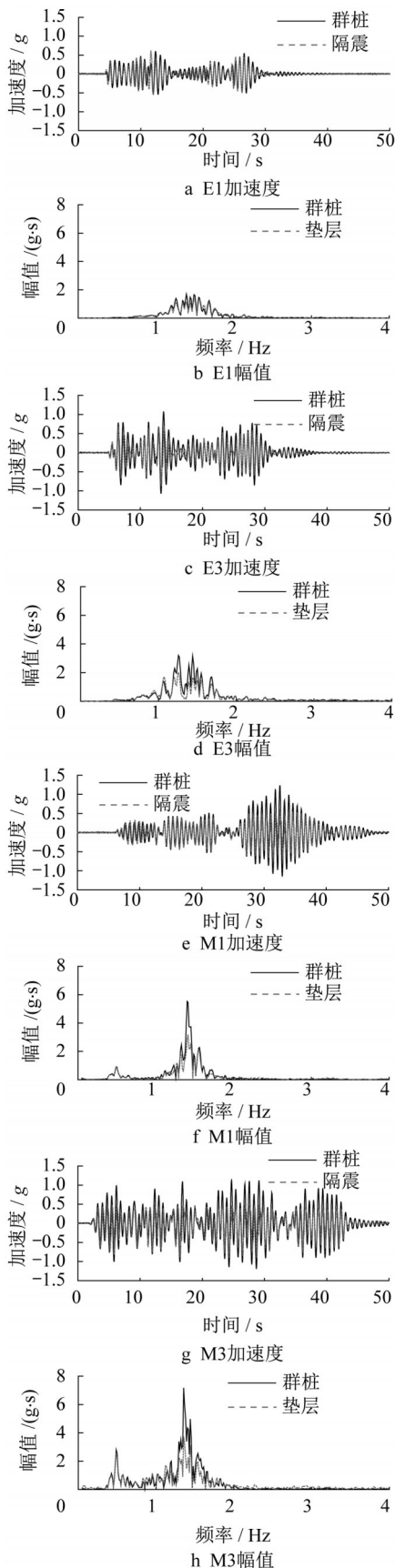


图8 上部结构加速度时程及傅里叶谱

Fig. 8 Acceleration time history and Fourier spectrum of superstructure

和0.3g的Mexico City波时,二者比例分别为0.68(0.74)和0.59(0.73),即强震时垫层隔震基础模型上部结构加速度峰值约为群桩基础上部结构加速度峰值的60%~80%,垫层隔震作用显著。

导致垫层隔震基础模型与群桩基础模型的上部结构加速度不同的原因可能有2种:①群桩基础的承台与垫层隔震基础的筏板加速度不同,导致输入上部结构(立柱-上部质量块)的加速度不同;②因承台与筏板的底部约束不同,承台-结构与筏板-结构体系的动力特性不同,从而导致上部结构加速度响应不同。

图9为各工况群桩基础模型承台和垫层隔震基础模型筏板加速度反应谱。输入地震波为0.1g的El Centro波时,承台与筏板的加速度反应谱相似,输入地震波为0.3g的El Centro波时,垫层隔震基础的筏板谱加速度峰值明显小于群桩基础的承台谱加速度峰值。输入地震波为Mexico City波时,垫层隔震基础的筏板谱加速度在0~0.5s范围内大于群桩基础承台的谱加速度;而在0.5~1.0s范围内,则小于群桩基础承台的谱加速度。

设筏板(承台)的加速度傅里叶谱为 $F(f)$,上部结构的加速度傅里叶谱为 $G(f)$,则上部结构/筏板(承台)的加速度传递函数为 $Z(f) = G(f)/F(f)$,传递函数的幅值 $|Z(f)|$ 为加速度放大谱。图10 a、10 b和图10 c、10 d分别为群桩基础(连接式桩筏基础)的上部结构-承台和垫层隔震基础(非连接式桩筏基础)的上部结构-筏板传递函数。群桩基础的上部结构-承台加速度传递函数几乎不随输入地震波的变化而改变,各工况传递函数峰值对应的频率均为1.5 Hz左右,即上部结构自振周期约为0.67 s。垫层隔震基础的上部结构-筏板加速度传递函数则随着输入地震波的改变而发生显著变化;输入地震波分别为0.1g的El Centro和0.3g的Mexico City波时,传递函数峰值对应的频率分别约为1.6 Hz和1.2 Hz,即自振周期分别约为0.63 s和0.83 s,上部结构体系自振周期逐渐增加。这是由于随着输入地震波加速度峰值的增加,群桩基础模型的基础对上部结构的约束强度几乎不变,而隔震基础模型的基础对上部结构的约束逐渐减弱;即遭遇强震时,垫层与筏板之间将产生相对滑移,进而改变结构体系的刚度,其自振周期也会相应发生变化。

1.4.2 上部结构位移

图11为各工况群桩基础模型(连接式桩筏基础)和垫层隔震基础模型(非连接式桩筏基础)上部

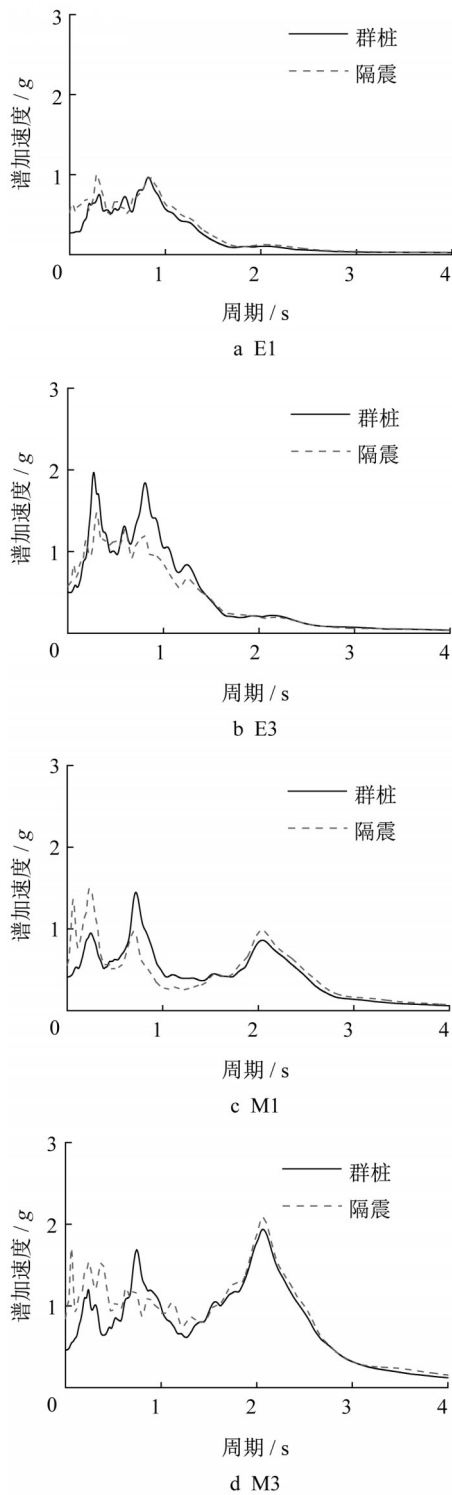


图9 筏板(承台)加速度反应谱

Fig. 9 Acceleration response spectrum of raft (cap)

结构相对振动台位移时程。

从图11可以看出,输入地震波为0.1g和0.3g的El Centro波时,群桩基础模型的上部结构残余位移分别为1.8mm和-3.7mm,垫层隔震基础上部结构残余位移分别为18.3mm和45.8mm;输入地震波为0.1g和0.3g的Mexico City波时,群桩基础

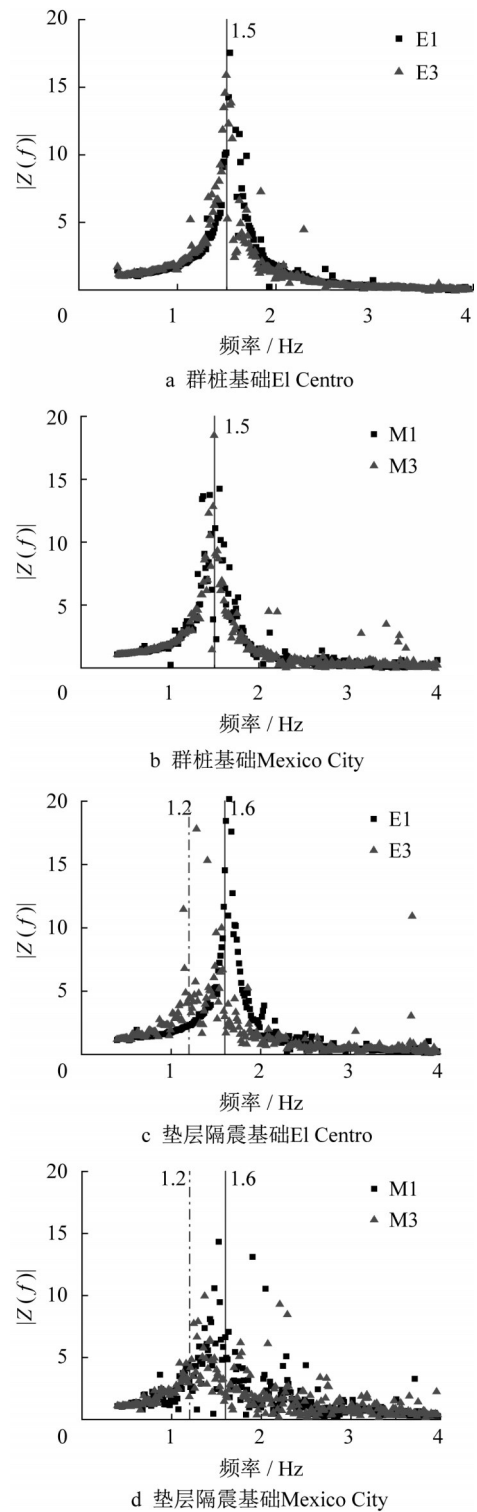


图10 上部结构-筏板(承台)加速度传递函数

Fig. 10 Acceleration transfer function of super-structure-raft (cap)

模型的上部结构残余位移均为5.5mm,垫层隔震基础上部结构残余位移分别为78.7mm和122.7mm。因群桩基础桩顶与承台刚性连接,故上部结构残余位移较小;而垫层隔震基础因筏板与刚性桩无直接连接,筏板水平向的约束只有筏板与垫层之间的摩

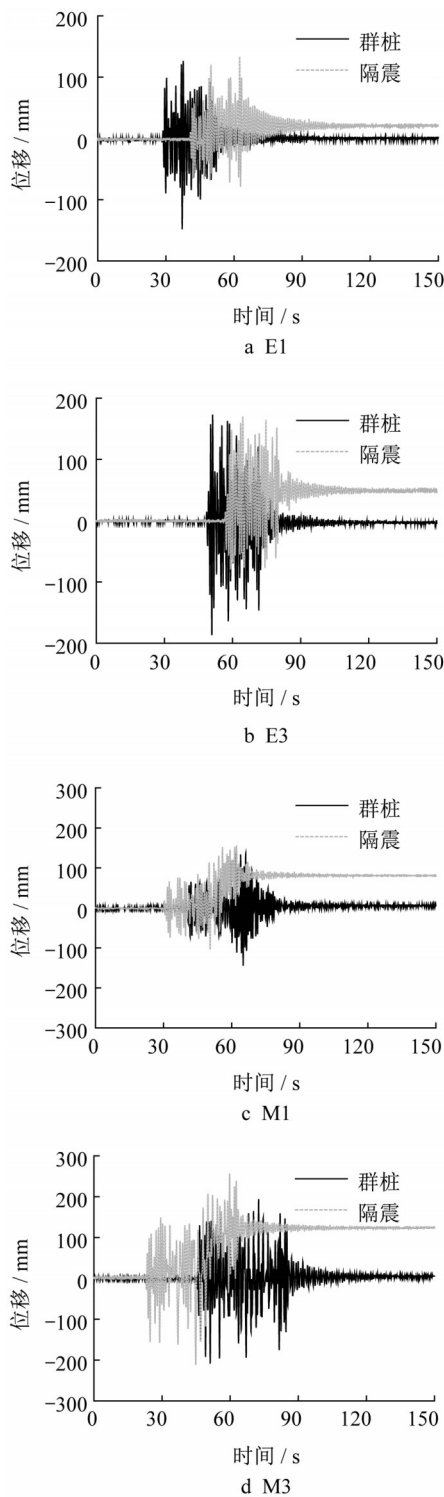


图11 上部结构位移历程

Fig. 11 Displacement time history of superstructure

擦作用,水平向约束要小得多,故上部结构残余位移较大;群桩基础上部结构残余位移远小于垫层隔震基础上部结构残余位移。

1.4.3 立柱与基桩弯矩

表5为2组模型各工况立柱弯矩正负峰值。输入地震波为0.1g和0.3g的El Centro波时,垫层隔

震基础模型立柱弯矩正(负)峰值与群桩基础模型立柱弯矩正(负)峰值的比例分别为1.00(0.90)和0.76(0.69);输入地震波为0.1g和0.3g的Mexico City波时,二者比例分别为0.61(0.62)和0.63(0.78)。强震时垫层隔震基础模型立柱弯矩约为群桩基础模型立柱弯矩的60%~80%,垫层隔震作用显著。

表5 立柱弯矩正(负)峰值

Tab. 5 Positive and negative peak bending moment of column 单位:MN·m

工况	群桩基础	垫层隔震基础
E1	5.96, -6.07	6.19, -5.47
E3	10.42, -10.66	7.97, -7.40
M1	11.43, -11.47	6.97, -7.07
M3	11.36, -11.49	7.14, -8.93

注:逗号前表示正峰值,逗号后表示负峰值。

图12a和图12b分别为群桩基础模型和垫层隔震基础模型在M3工况下的中心桩和角桩峰值弯矩。群桩基础中心桩和角桩的顶部测点处弯矩最大,而垫层隔震基础中心桩和角桩的中部测点处弯矩最大,最大弯矩峰值约为群桩基础最大弯矩峰值的50%~60%。与群桩基础的刚性连接相比,垫层隔震基础的桩顶约束要弱得多,且强震作用下上部结构作用于隔震基础的惯性力要小于群桩基础的惯性力,故垫层隔震基础将桩与筏板断开可有效降低桩身的峰值弯矩。值得一提的是,群桩基础和垫层隔震基础模型采用同一套桩基模型;群桩基础因桩顶接触连接需要,夹入承台内部2cm(原型为1.0m),而垫层隔震基础筏板与桩顶之间却有着厚度为1倍桩径(原型为0.6m)的垫层;故同一桩基应变片在2组模型中的埋深不同,其各自实际测点亦如图12标记点位置所示。

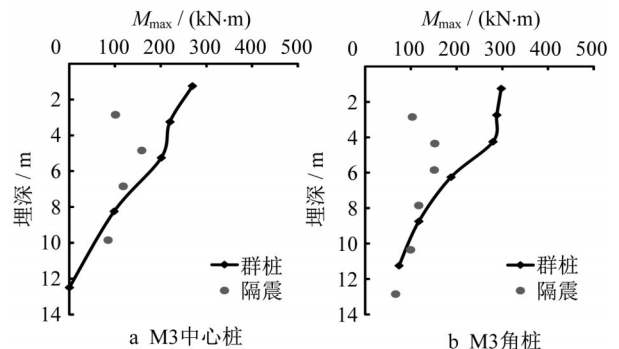


图12 基桩峰值弯矩

Fig. 12 Peak bending moment of pile

2 影响因素的三维数值分析

基于前文群桩基础(连接式桩筏基础)与垫层隔震基础(非连接式桩筏基础)的离心振动台试验,采用ABAQUS软件建立三维数值有限元模型。首先对比数值模拟和离心振动台试验的结果,验证三维数值模型的合理性;然后对比群桩基础模型和垫层隔震基础模型的筏板转角和桩身弯矩,进一步探讨垫层隔震基础的隔震机理;最后开展参数分析,研究垫层刚度和垫层厚度对垫层隔震基础地震响应的影响。

2.1 三维数值模型的建立

采用有限元方法分析基础地震响应时,选择合适的模型边界至关重要。为减小边界反射波对计算结果的影响,常采用的边界有黏性边界、黏弹性边界、无限元边界和等位移边界。黏性边界及黏弹性边界通过在土体外侧施加黏性元件或黏弹性元件吸收应力波^[16]。无限元边界本质上与黏弹性边界相似,但无需计算元件参数^[10]。等位移边界定义模型侧面相同高度处位移相同,无需计算元件参数,可以较好地模拟层状剪切箱的侧面边界^[17-18]。本文采用等位移边界模拟土体侧向边界,同时适当增加振动

方向土体计算区域,以降低反射波的影响。

因主要研究垫层隔震基础(非连接式桩筏基础)的隔震机理,故土体采用较为常用、参数较少且易于确定的弹性模型。根据前文离心振动台试验建立有限元模型并确定模型参数,土体密度 $1450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量 50.0 Mpa ,泊松比 0.3 ,阻尼采用Rayleigh阻尼模型,即 $C=\alpha M+\beta K$,其中 C 为阻尼矩阵、 M 为质量矩阵、 K 为刚度矩阵、 α 和 β 分别为2个比例系数,阻尼比取 10% ,在ABAQUS软件中,设置 $\alpha=0.942$, $\beta=0.0106$ ^[19]。模型集中质量、立柱、筏板及桩的参数如表2所示,并根据离心模型试验所用材料反算出原型尺寸确定,其中上部结构材料为铁,立柱和筏板材料为铝,桩身弹性模量根据抗弯刚度等效,将空心桩等效为实心桩。

土体尺寸为 $40\text{ m}\times 30\text{ m}\times 20\text{ m}$,采用C3D8R单元类型,全局网格尺寸 1 m ,局部加密尺寸 0.5 m ,土体共包含 $85\ 760$ 个单元。分别建立群桩基础模型(连接式桩筏基础)和垫层隔震基础模型(非连接式桩筏基础)。群桩基础模型桩顶与承台采用Tie接触,垫层隔震基础模型筏板与垫层采用接触对摩擦接触。通过设置同一高度处模型四周节点位移相同实现等位移边界,模型如图13所示。

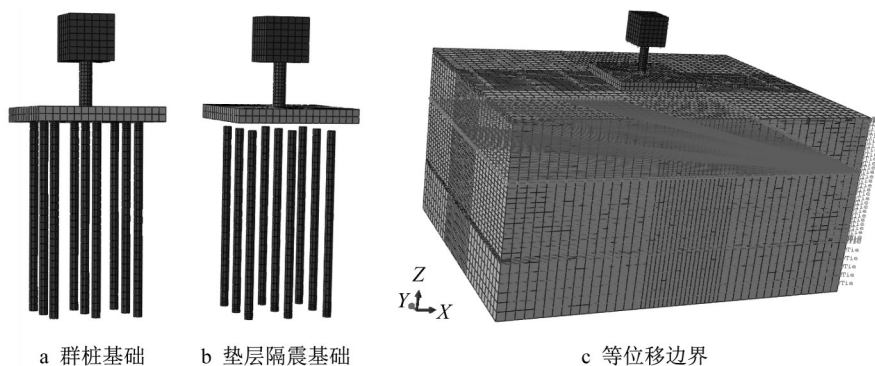


图13 三维数值计算模型

Fig. 13 Three dimensional numerical model

模型分析包含3个步骤:①平衡地应力;②施加上部结构荷载;③施加地震荷载。地震波采用El Centro地震波,时间间隔 0.02 s ,地震波时程、傅里叶谱及反应谱如图4所示。

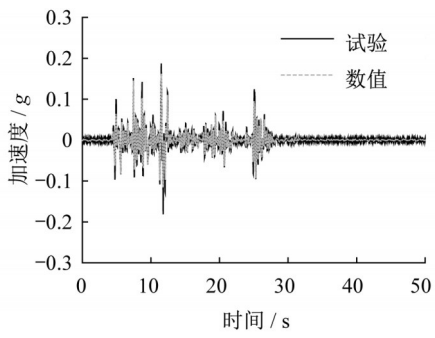
2.2 模型验证

对比数值模拟和前文离心振动台试验结果,以验证所建立的有限元模型的合理性。图14为输入地震波为 0.1 g 的El Centro波时,群桩基础模型振动台试验和有限元结果。值得注意的是,对比数值模拟和离心振动台试验结果时,数值模拟地震波采

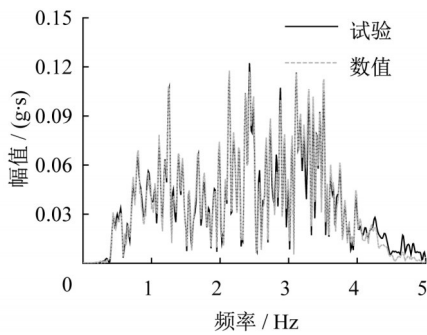
用振动台实际输出地震波,但时间间隔取 0.02 s 。由图14可知,尽管数值模拟所得傅里叶谱幅值在较高频率范围内($4\sim 5\text{ Hz}$)略低于试验结果,但整体而言有限元结果与试验结果接近,表明所建立的有限元模型较为合理。

2.3 参数分析

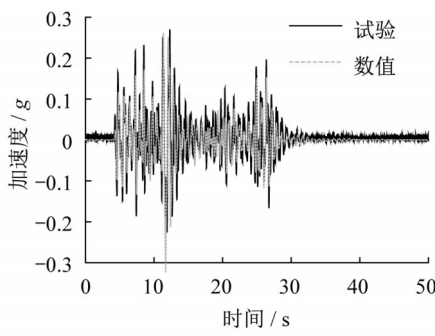
调整垫层隔震基础(非连接式桩筏基础)有限元模型的垫层参数,包括垫层刚度和垫层厚度,如表6所示,以分析这2个参数对垫层隔震基础地震响应的影响。作为对比,同时分析群桩基础模型有限元结果。



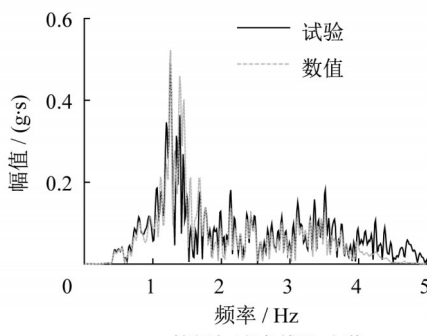
a 土底加速度时程



b 土底加速度傅里叶谱



c 筏板加速度时程



d 筏板加速度傅里叶谱

图 14 数值模拟与离心振动台试验结果对比

Fig. 14 Comparison of numerical simulation and centrifuge shaking table test

图 15 为群桩基础(连接式桩筏基础)承台转角。群桩基础承台最大转角 0.001 9, 傅里叶谱最大幅值 0.003 8, 位于 1.68 Hz 处。图 16 为群桩基础模型中各桩桩位及其峰值弯矩。各桩桩顶处峰值弯矩较大, 2 列边桩峰值弯矩接近, 中心桩与边桩及角桩峰

表 6 参数分析取值

Tab. 6 Parameter analysis

垫层厚度 / d	垫层刚度 / MPa
0.5	50
1.0	75
1.5	100

注: d 为桩径原型尺寸, $d=600\text{mm}$ 。

值弯矩在埋深较浅部分差别较大, 此部分受惯性作用影响较大。后续以桩 4、桩 5 和桩 6 为例, 分析不同工况桩身峰值弯矩。

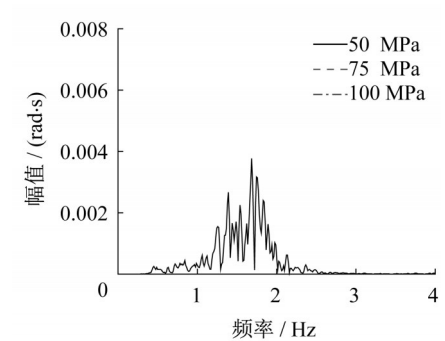
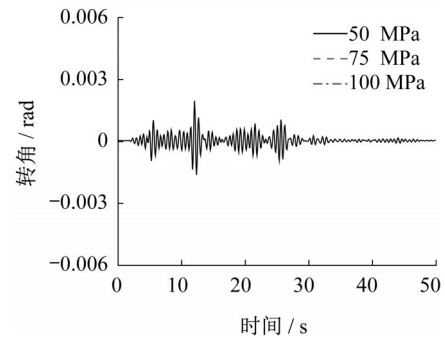


图 15 承台转角

Fig. 15 Rotation angle of cap

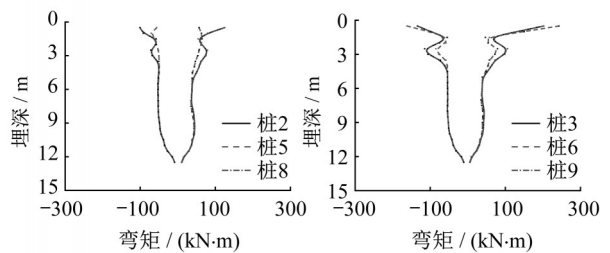
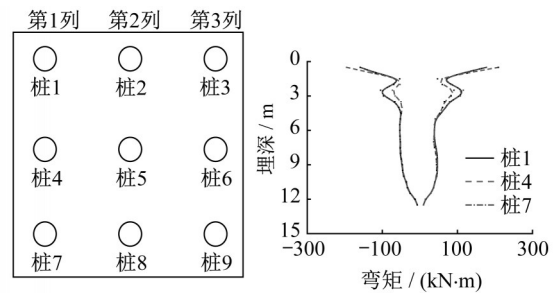


图 16 群桩基础桩身弯矩

Fig. 16 Pile bending moment of pile group foundation

2.3.1 垫层刚度的影响

图17为不同垫层刚度的垫层隔震基础模型的筏板转角。垫层模量分别为50、75、100 MPa时,筏板最大转角分别为0.0057、0.0050、0.0047rad;傅里叶谱最大峰值分别为0.0060、0.0049、0.0048rad·s,最大峰值均位于1.68 Hz处。垫层刚度增加,筏板最大转角略有降低,但仍远大于群桩基础承台最大转角;垫层模量为100 MPa时,筏板最大转角约为群桩基础承台最大转角的3倍。

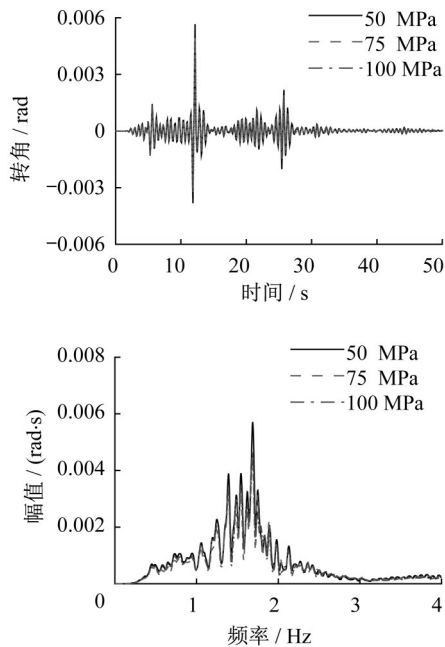


图17 不同垫层刚度的筏板转角

Fig. 17 Rotation angle of raft with different stiffness of cushion

图18为不同垫层刚度的垫层隔震基础模型的桩身峰值弯矩。垫层刚度为50、75、100 MPa时,桩4最大峰值弯矩分别为94.2 kN·m(-51.0 kN·m)、84.5 kN·m(-50.7 kN·m)和81.4 kN·m(-54.8 kN·m);垫层刚度由50 MPa增加至100 MPa,最大峰值弯矩变化幅度在10%以内。桩5和桩6的最大峰值弯矩同样变化幅度较小,即改变垫层刚度对桩基峰值弯矩影响较小。

2.3.2 垫层厚度的影响

图19为不同垫层厚度的垫层隔震基础模型的筏板转角。垫层厚度分别为0.5d(300 mm)、1.0d(600 mm)和1.5d(900 mm)时,筏板最大转角分别为0.0049、0.0057、0.0058 rad;傅里叶谱最大峰值分别为0.0057、0.0060、0.0063 rad·s,最大峰值均位于1.68 Hz处。垫层厚度降低,筏板最大转角略有

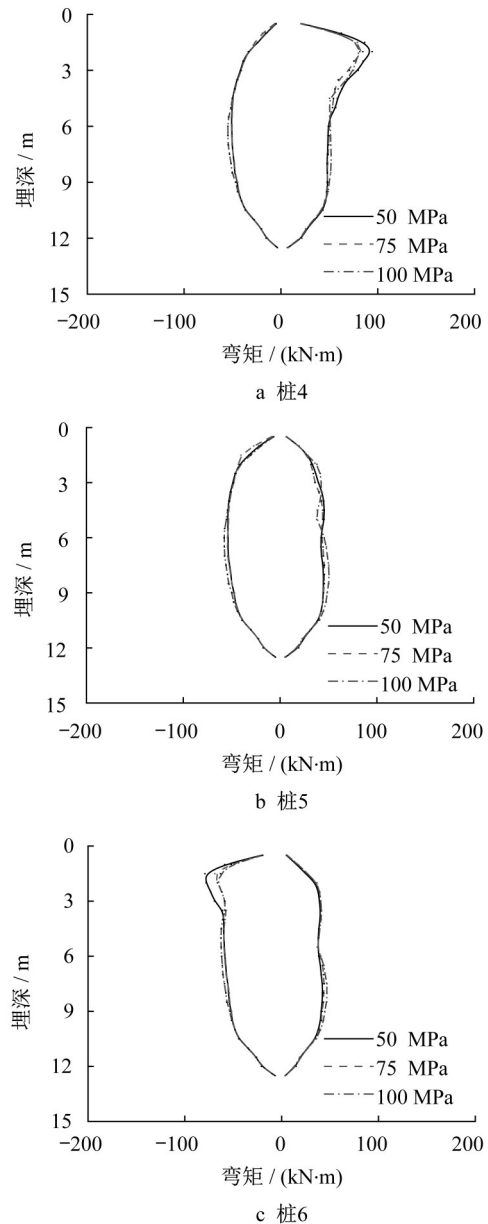


图18 不同垫层刚度的垫层隔震基础桩身弯矩

Fig. 18 Pile bending moment of cushioned pile raft foundation with different stiffnesses of cushion

降低,但变化幅度较小;垫层厚度为0.5d时,筏板最大转角约为群桩基础承台最大转角的3倍。

图20为不同垫层厚度的垫层隔震基础模型的桩身峰值弯矩。垫层厚度为0.5d、1.0、1.5d时,桩4最大峰值弯矩分别为136.7 kN·m(-67.8 kN·m)、94.2 kN·m(-51.0 kN·m)和72.1 kN·m(-50.9 kN·m);桩5最大峰值弯矩分别为50.3 kN·m(-59.5 kN·m)、45.6 kN·m(-54.0 kN·m)和45.3 kN·m(-54.1 kN·m);桩6最大峰值弯矩分别为47.2 kN·m(-121.9 kN·m)、42.1

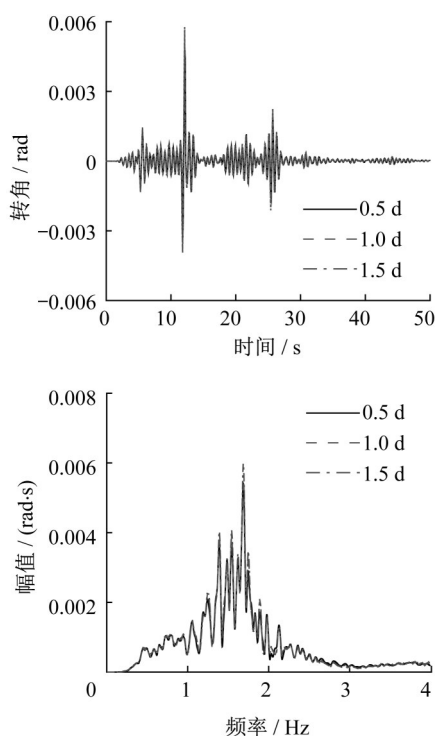


图19 不同垫层厚度的筏板转角

Fig. 19 Rotation angle of raft with different thicknesses of cushion

$\text{kN}\cdot\text{m}$ ($-79.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$) 和 $42.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ($-60.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$)。垫层厚度由 $1.5 d$ 降低至 $0.5 d$, 桩4最大峰值弯矩增加 89.6% , 桩5最大峰值弯矩增加 11.0% , 桩6最大峰值弯矩增加 100.1% , 即垫层厚度变化对桩身峰值弯矩的影响显著。

3 结论

针对砂土中的群桩基础(连接式桩筏基础)和垫层隔震基础(非连接式桩筏基础),开展了地基-基础-结构地震响应离心振动台试验和三维数值模拟,并通过对比2种基础形式的上部结构加速度和位移、筏板(承台)加速度和转角以及立柱和桩身弯矩,探讨了垫层隔震机理,分析了垫层刚度和垫层厚度等因素对垫层隔震基础地震响应的影响,得到的主要结论有:

(1)群桩基础上部结构-承台加速度传递函数峰值及其对应频率几乎不随输入地震波的变化而改变;随着输入地震波峰值的增加,垫层隔震基础上部结构-筏板加速度传递函数峰值及其对应频率却有所降低。

(2)与群桩基础相比,垫层隔震基础上部结构的峰值加速度和立柱的峰值弯矩降低,强震时分别约

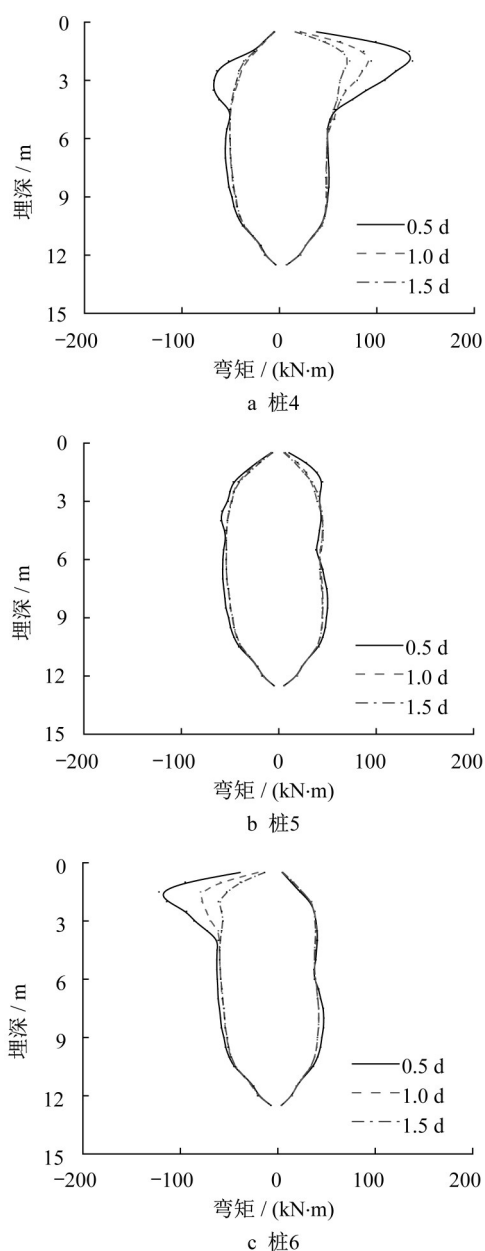


图20 不同垫层厚度的垫层隔震基础桩身弯矩

Fig. 20 Pile bending moment of cushioned pile raft foundation with different thicknesses of cushion

为群桩基础上部结构加速度峰值和立柱弯矩峰值的 $60\% \sim 80\%$, 垫层隔震作用显著;强震下垫层隔震基础上部结构峰值位移增加,且残余位移较大。

(3)强震作用下垫层隔震基础筏板与垫层产生相对滑动,则与群桩基础相比,其上部结构传递至基础的惯性力降低,且桩顶约束变弱,桩身最大峰值弯矩由桩顶处转移至桩身中上部,且峰值弯矩值降低,最大弯矩峰值约为群桩基础最大弯矩峰值的 $50\% \sim 60\%$ 。

(4)随着垫层厚度的降低,筏板转角略有降低,

而桩身最大峰值弯矩增加幅度较大,垫层厚度变化对桩身峰值弯矩影响显著;改变垫层刚度对筏板转角和桩身峰值弯矩影响较小。

作者贡献说明:

张 浩:设计试验方案,构建数值模型,撰写论文。

贾亚杰:进行试验研究,开展数值分析。

梁发云:提出研究课题,指导撰写论文,审阅修订论文。

李通达:协助试验研究,处理试验数据。

参考文献:

- [1] PECKER A. Design and construction of the Rion Antirion Bridge [C]// Geotechnical Engineering for Transportation Projects, Proceedings of Geo-Trans. Los Angeles: ASCE, 2004: 216-240.
- [2] SOKOS E, TSELENTIS G A, PARASKEVOPOULOS P, *et al.* Towards earthquake early warning for the Rion-Antirion bridge, Greece [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(9): 2531.
- [3] 芮瑞, 孙义, 朱勇, 等. 刚性基础下复合地基褥垫层细观工作机制[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 31.
RUI Rui, SUN Yi, ZHU Yong, *et al.* Mesoscopic working mechanism of cushion of composite foundation under rigid slab [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 31.
- [4] 朱小军, 赵学亮, 龚维明, 等. 刚性桩复合地基垫层土拱效应宏微观机理研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(1): 82.
ZHU Xiaojun, ZHAO Xueliang, GONG Weiming, *et al.* Macro and micro-mechanism analysis of soil arching effect in the cushion of rigid pile composite foundation [J]. Building Structure, 2014, 44(1): 82.
- [5] 池跃君, 宋二祥, 高文新, 等. 刚性桩复合地基承载及变形特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 237.
CHI Yuejun, SONG Erxiang, GAO Wenxin, *et al.* Experimental research of load-bearing and deformation characteristics of rigid pile composite ground [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(3): 237.
- [6] 盛桂琳, 鲍鹏, 苏彩丽, 等. 刚性桩复合地基桩体抗震性能分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1274.
SHENG Guilin, BAO Peng, SU Caili, *et al.* Analysis of seismic behavior of pile body in rigid pile composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1274.
- [7] 武思宇, 宋二祥, 刘华北, 等. 刚性桩复合地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 99.
WU Siyu, SONG Erxiang, LIU Huabei, *et al.* Shaking table test of composite foundation with rigid pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 99.
- [8] 武思宇, 宋二祥, 刘华北, 等. 刚性桩复合地基抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 77.
WU Siyu, SONG Erxiang, LIU Huabei, *et al.* Shaking table test study on aseismic behavior of rigid pile composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 77.
- [9] 韩小雷, 肖成安, 英峻豪. 地震作用下复合地基-筏板-上部结构相互作用体系的动力弹性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 762.
HAN Xiaolei, XIAO Chengan, YING Junhao. Dynamic elastoplastic analysis of interaction system of composite foundation-raft-superstructure under earthquake action [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 762.
- [10] HAN X, LI Y, JI J, *et al.* Numerical simulation on the seismic absorption effect of the cushion in rigid-pile composite foundation [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 15(2): 369.
- [11] GORINI D N, CALLISTO L. Seismic performance and design approach for friction dissipative foundations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 513.
- [12] HA J G, KO K W, JO S B, *et al.* Investigation of seismic performances of unconnected pile foundations using dynamic centrifuge tests [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17: 2433.
- [13] LIANG F Y, LI T D, QIAN Y, *et al.* Investigating the seismic isolation effect of the cushioned pile raft foundation in soft clay through dynamic centrifuge tests [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 142: 106554.
- [14] 张莉, 李文成, 沙志彬. 琼州海峡跨海工程新Ⅶ线区地质条件及地质灾害因素评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 17.
ZHANG Li, LI Wencheng, SHA Zhibin. Evaluation of geological condition and potential geohazard factors in new line Ⅶ survey area of crossing Qiongzhou strait engineering [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 17.
- [15] 李振, 彭华, 马秀敏, 等. 琼州海峡古河道及其工程地质评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 1017.
LI Zhen, PENG Hua, MA Xiumin, *et al.* Paleochannels and engineering geological evaluation along Qiongzhou strait [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 1017.
- [16] GHORBANI A, HASANZADEHSHOOIILI H, GHAMARI E, *et al.* Comprehensive three dimensional finite element analysis, parametric study and sensitivity analysis on the seismic performance of soil-micropile-superstructure interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 58: 21.
- [17] LU J, ELGAMAL A, YAN L, *et al.* Large-scale numerical modeling in geotechnical earthquake engineering [J]. International Journal of Geomechanics, 2011, 11(6): 490.
- [18] WANG R, LIU X, ZHANG J M. Numerical analysis of the seismic inertial and kinematic effects on pile bending moment in liquefiable soils [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(4): 7731.
- [19] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
FEI Kang, ZHANG Jianwei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.