

DOI: 10.11779/CJGE202104020

上覆海水层对自由场基本周期影响的离心模型试验研究

兰景岩, 宋锡俊, 王婷

(桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 基于动态离心技术设计和构建了两组模型试验, 还原并再现了上覆无水和有水的软土自由场仿真岩土台阵, 利用白噪声扫频和强度不同的 El Centro 波作为振动台基底输入, 采用考虑相消干涉的传统谱比法, 获取了不同工况条件下的两组自由场模型的场地反应结果, 通过对比分析有水和无水场地的振型反应特征以及基本周期差异, 评价和总结上覆水在估算场地基本周期的作用及影响。研究结果表明: 由于上覆水自重以及土水相互作用的影响, 无水模型的地表峰值放大倍数要高于有水模型, 同时无水模型的地表时程波形稀疏, 表明地表地震波具有较为丰富的高频成分; 无论是白噪声扫频还是 El Centro 波的基底加载方式, 上覆无水和有水两组自由场模型的基本周期和振型放大系数均存在显著差异, 表明上覆水对海底复杂介质体系的基本周期估算具有一定的影响, 陆地模型和海域模型的基本周期最大偏差达 35.5%。

关键词: 上覆海水; 场地基本周期; 传统谱比法; 动态离心模型试验

中图分类号: TU471 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)04-0768-08

作者简介: 兰景岩(1981—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事岩土工程、土动力学及地震工程等方面的教学与科研工作。E-mail: lanjy1999@163.com。

Centrifugal model tests on influences of overlying sea layer on basic period of free field

LAN Jing-yan, SONG Xi-jun, WANG Ting

(Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Based on the dynamic centrifugation technique, two groups of model tests are designed and performed, and the geotechnical free field simulation arrays with and without water are restored and reproduced. The white noise sweep and El Centro waves with different intensities are used as the base input of the shaking table, and the traditional spectral ratio method considering cancellation interference is used to obtain the site response results of two groups of free field models under different working conditions. Through the comparative analysis of the modal response characteristics and basic period differences between watery and anhydrous sites, the function and influences of overlying water in estimating the basic period of the site are evaluated and summarized. The results show that due to the influences of the dead weight stress of overlying water, the surface peak magnification of the anhydrous model is higher than that of the watery model, and the surface time history waveform of the anhydrous model is sparse, indicating that the surface seismic waves have abundant high frequency components. Whether it is the white noise sweep or the base loading mode of El Centro wave, there are significant differences in the basic period and mode amplification factor of the two groups of free field models with and without water, indicating that the overlying water has a certain influence on the estimation of the basic period of the seafloor complex medium system, and the maximum deviation of the basic period of the land model and the sea model is 35.5%.

Key words: overlying sea water; site basic vibration period; traditional spectral ratio method; dynamic centrifugal model test

0 引言

场地基本周期是描述场地动力特性的一个基本指标和物理量。研究表明, 地震作用下结构自振周期与场地基本周期接近或相等时, 所产生的共振效应是影响震害分布和加剧结构破坏程度的重要因素之一^[1], 因此科

学合理地估计场地基本周期对于指导工程抗震设计、减

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408559); 广西自然科学基金项目(2018GXNSF0A281183); 广西岩土力学与工程重点实验室开放基金项目(桂科能19-Y-21-4)

收稿日期: 2020-06-01

轻地震灾害具有重要的工程意义和科学价值。目前国内外常用的有3种方法来确定场地的基本周期^[2-3]: ①强震动记录法, 这是基于无场地放大效应的基岩参考台而提出的新传统谱比法, 包括地表/井下谱比法^[4] (Zhao等), HVSR谱比法^[5-6]等; ②地脉动方法, 是利用微小振动的单台H/V谱比分析法^[7-8]; ③简化计算方法, 即利用基本周期求解公式 $T=4H/V_s$ 进行估算^[9]。对于多层场地土, 有子层周期求和法^[10]、加权平均波速法^[11]等, 是目前工程界广泛采用的简便计算方法。

然而上述场地基本周期的确定方法及相关研究均针对陆域场地, 而上覆有水的海域复杂介质体系的基本周期研究鲜有报道。有研究表明, 水下土层的孔隙水饱和度对平面内运动的振幅有很大的影响^[12-14]。荣棉水等^[15]利用实际观测记录的HVSR谱比法, 分析了海、陆域场地效应的差异。Fan等^[16]从理论上推导了海底场地传递函数, 通过考虑海水层和海底土层的土壤饱和度对地面运动场地放大的影响, 提出了一种模拟海底地面运动的综合方法。张奎等^[17]推导出平面P波或SV波入射时海底地基场地波动的解析表达式, 认为水深对水平位移峰值的影响较小, 但共振频率随着水层厚度增加而增加。

综上表明, 上覆海水层对于整个饱和海域体系的地震反应存在着一定的影响, 同时, 海水层作为海水—海床整个结构体系不可分割的一部分, 在场地基本周期的估算中也具有不可忽视的重要作用。鉴于此, 为了研究海水—海床结构体系的基本周期, 探讨上覆水对自由场基本周期的影响, 设计上覆有水和无水的两个离心模型试验, 模拟还原上覆有水的自由场结构体系, 根据5组振动试验所获取的地表和基底加速度观测记录, 采用考虑相消干涉的传统谱比法, 分析海床地表处的地震动放大效应, 通过对分析有水和无水场地的振型反应特征以及基本周期差异, 评价和总结上覆水在估算场地基本周期的作用及影响。研究成果有助于进一步了解、深化和揭示海域复杂介质体系的基本周期特征及地震动场地放大规律, 对于指导海域工程的抗震设防具有一定的理论意义和工程意义。

1 典型自由场的离心模型方案设计

1.1 动态离心模型试验设备及主要参数

本次离心机振动台试验使用交通运输部天津水运工程科学研究院港口水工建筑技术国家工程实验室的TK-C500型土工离心试验机(图1(a)), 最大离心加速度为250g, 最大半径为5 m, 最大有效载重50 kN。土工离心机配置了先进的振动台系统, 可以实现在100g离心状态下提供高精度的垂直/水平双向振动,

最大振动加速度40g, 最大持续时间3 s, 最大振动频率350 Hz, 设计振动有效负载8 kN, 综合性能达到国际先进水平。试验所用的模型箱为轻质、高强度合金铝制的叠环式层状剪切模型箱(图1(b), (c)), 可有效降低侧边界效应^[18-19]。内部尺寸可以满足多种类型模型试验的需要。

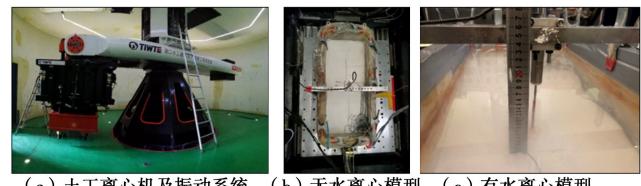


图1 土工离心试验机与叠环式模型箱

Fig. 1 Centrifugal testing machine and laminar model box

1.2 离心模型设计方案

本文设计了两组动态离心模型试验, 一组有水覆盖、另一组无水覆盖的均质饱和软黏土自由场离心模型, 试验方案如图2所示。目的是通过将有水、无水两组模型场地结合起来进行差异对比研究, 研究分析上覆海水对海床地表地震动的影响, 考察上覆海水在场地基本周期估算中的贡献和作用。

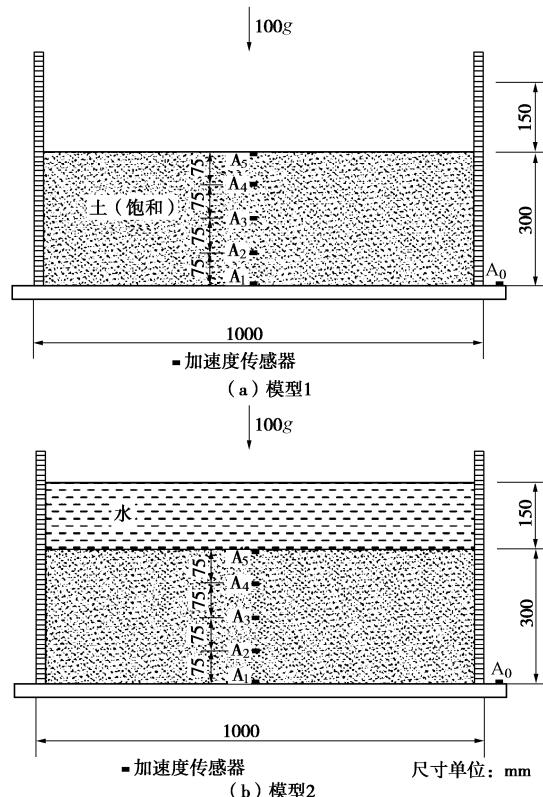


图2 动态离心机振动台试验设计模型图

Fig. 2 Design models for dynamic centrifugal shake table tests

每组模型试验从地表至基底均匀布设5个微型加速度传感器(图2所示), 其中A₁用于测定地表的加速度结果, 人工模拟海床表和地表的加速度记录, 另外1个放置在离心振动台的基座上(图2中的A₀),

用于测定基底处的加速度结果,以此模拟基底地震动输入记录。为提高加速度传感器的测量精度,降低模型箱侧边界的影响,加速度传感器均埋置于模型中部位置。

1.3 离心相似率

研究表明,地表以下 30 m 的覆盖土层对地震动的影响较大,且美国 NEHRP 抗震设计规范^[20]中明确采用 30 m 的等效剪切波速 (V_{s30}) 作为场地动力特性的重要评价指标,故本文计划依托离心机振动台,设计均质成层覆盖的动态离心模型,以期能够模拟海底自由场深度为 30 m 的原型场地,结合中国近海海水深度的平均统计值在 15 m 左右,故设计了一组能够还原上覆海水 15 m,海底土层 30 m,总计 45 m 场地原型的离心缩尺模型。结合试验方案(图 2),本次试验所采用的离心加速度取 100g,所涉及到的主要相似常数(模型/原型)为:加速度相似常数 $C_a=100$,位移相似常数 $C_l=100$,时间相似常数 $C_t=1/100$,频率相似常数 $C_f=100$ 。

1.4 试验用土

试验用土采用产自澳大利亚的IMERYS 牌水洗高岭土,等级一级,粒度 0.6 μm , Al_2O_3 含量 38.5%, SiO_2 含量 48.2%。

依据中国近海海域的海相沉积软土物理力学指标作为参考,在实验室对超细高岭土进行重新配制,得到离心模型试验用土的物理力学指标参数,如表 1 所示。模型箱制作采用控制密度和含水率,分层夯实的办法进行配制。

表 1 模型土体的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of model soil

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $w/\%$	塑限 $/\%$	液限 $/\%$	孔隙比 e
1.61	36.0	26.0	48.0	1.170

1.5 试验输入加载形式

本次试验选用白噪声和 El Centro 波作为基底输入地震动,输入白噪声是为了获取典型自由场的基本频率^[21]。输入 El Centro 波是为了考察地震动的随机特性对自由场地非线性放大效应,通过调整输入峰值加速度来模拟不同强度的地震波。每一次振动试验在加载地震波时,首先要对输入的原始地震波按照相似率($N=100$)进行幅值和持时的缩放,整理成目标时程,进而对目标时程再进行滤波处理,按照原始波的预期峰值再进行一次缩放,成为滤波后时程,该时程为实际最终离心模型试验的基底地震动输入,由振动台基座上的加速度计 A_0 (图 1)通过量测获得见表 2 所示。由此可知,对应 5 组工况 EL-1、EL-2、EL-3、EL-4、EL-5 的地震基本烈度分别为 VI、VII、VII+、VIII 和 IX。

同时,从有水和无水模型的基底输入地震动幅值差异率上看(除 EL-1 工况外,其余均小于 7%),可认为两组模型的基底输入差异较小。

表 2 典型自由场离心模型试验基底输入时程参数

Table 2 Actual input ground motion parameters of free-field

centrifugal model tests

地震波类型	工况	幅值		差异率/%	持时/s
		无水 $/\text{g}$	有水 $/\text{g}$		
白噪声扫频	BZS	5.683	5.691	0.1	110
	EL-1	46.16	41.13	10.9	
	EL-2	81.40	77.57	4.7	
	El Centro 波	146.80	143.00	2.6	60
	EL-4	250.20	266.60	6.6	
	EL-5	395.30	387.40	2.0	

2 典型自由场的模拟地震动记录

随着地震工程学的深入发展与推进,以及强震动观测技术在全球范围内的长足进步,逐渐积累了大量的可用于基础理论研究的观测记录,在工程建设和抗震设防中发挥着重要作用。现已知全世界范围内规模较大和关注度较高的强震动观测台网有日本 KiK-net;美国加州 Garner Valley、Treasure Island 和 CSMIP 台站;中国台湾 Lotung 和 Hualien;中国唐山响嘡、云南通海和四川自贡台阵等。相比于陆地范围地震观测的蓬勃兴起,海域地震动观测台站和记录还十分匮乏。目前仅已知日本 K-net 和美国 SEMS 台网有少数几个海底台站获取到了海底地震记录,然而却未能同时采集到同一台站的井下和海床表的地震记录,也未能在同一地震中同时采集海底与相邻陆地地震动的观测记录,故无法直接对比海底与陆地地震动的差异和区别,也不能分析海底复杂体系的场地反应。

本文所提出的动态离心模型试验方案,可以还原和模拟具有相同场地土条件的陆地和海域强震动观测台站,可以较有效地解决上述台站在实际观测中存在的两点不足之处。

依据给出的离心模型试验的设计方案及地震动加载形式,对无水、有水两个离心模型进行振动试验,分别给出了模型箱内传感器 $A_1 \sim A_5$ 的加速度记录结果,5 组动态离心模型(EL-1~EL-5)的加速度记录见图 3~7 所示。

一般来说,地震波从基底向地表传播过程中,由于场地覆盖软土的滤波作用,引发地震波的不同频率成分的放大或缩小,体现在高频成分衰减较快而低频成分衰减慢,使地表基本周期往往集中在低频方向。从图 3~7 的时程反应结果来看,无论是无水模型还是有水模型,随着基底输入峰值的增加,地表处峰值加速度呈非线性放大趋势,地震动放大倍数($\text{PGA}_{\text{地表}} / \text{PGA}_{\text{基底}}$)

$PGA_{\text{基底}}$) 呈现先放大后缩小的趋势, 整理后见表 3 所示, 对比来看无水模型的放大倍数总体上要略高于有水模型。从地震波形上看, 由于地震波在土层的折射与反射, 导致地表处加速度时程的峰值时刻要滞后于基底时程, 并且基底时程普遍“尖刺”多, 而地表时程波形稀疏, 是由于基底高频成分显著, 而地表处则低频成分显著, 这一现象在无水模型中更为明显。而上覆有水的模型, 由于上覆水自重的影响, 提高了近地表处的场地刚度, 因此地震波形比上覆无水的较密。

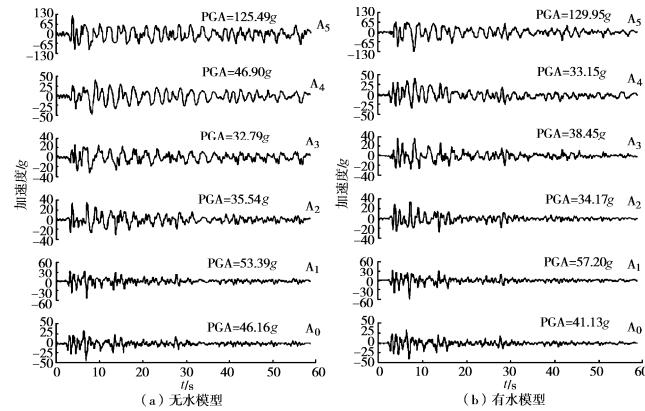


图 3 EL-1 工况加速度时程反应

Fig. 3 Time-history responses of acceleration of EL-1 situation

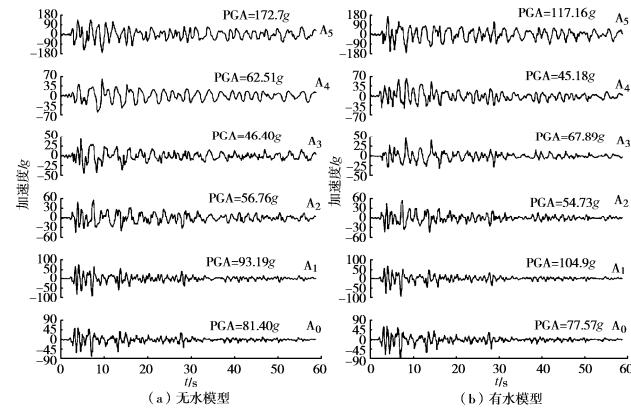


图 4 EL-2 工况加速度时程反应

Fig. 4 Time-history responses of acceleration of EL-2 situation

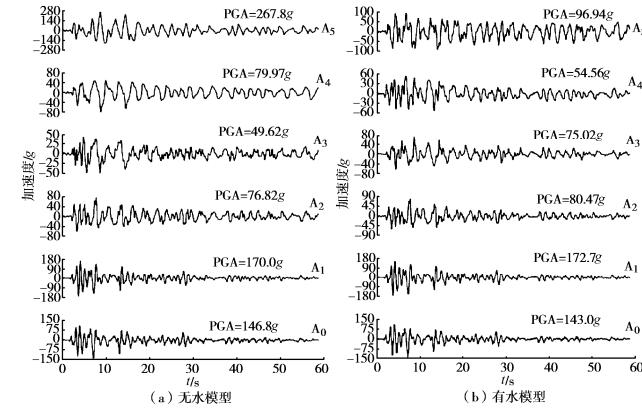


图 5 EL-3 工况加速度时程反应

Fig. 5 Time-history responses of acceleration of EL-3 situation

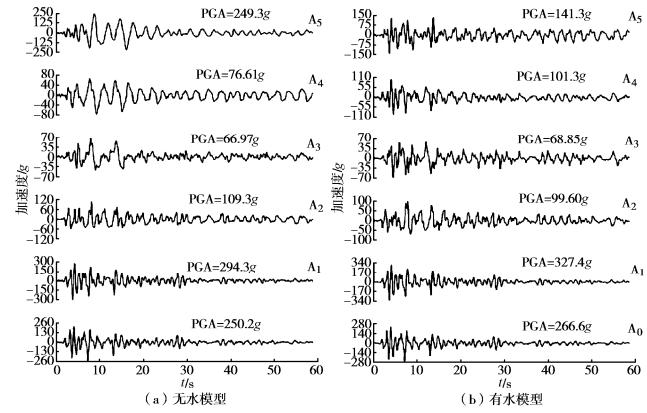


图 6 EL-4 工况加速度时程反应

Fig. 6 Time-history responses of acceleration of EL-4 situation

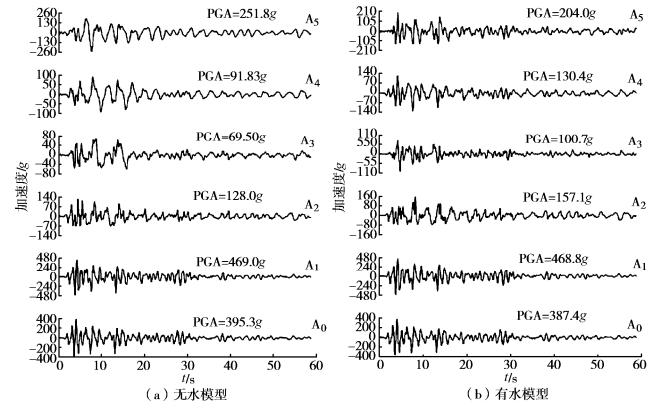


图 7 EL-5 工况加速度时程反应

Fig. 7 Time-history responses of acceleration of EL-5 situation

表 3 地表与基底峰值加速度量测结果及放大倍数

Table 3 Peak accelerations and magnification of surface and basement

模型工况	无水模型			有水模型		
	基底 PGA /g	地表 PGA /g	放大倍数	基底 PGA /g	地表 PGA /g	放大倍数
EL-1	46.46	125.5	2.70	41.13	130.0	3.16
EL-2	81.40	172.7	2.12	77.57	117.2	1.51
EL-3	146.8	267.8	1.82	143.0	96.94	0.68
EL-4	250.2	249.3	0.99	266.6	141.3	0.53
EL-5	395.3	251.8	0.64	387.4	204.0	0.53

为进一步分析上覆海水对地震动频谱特性的影响, 本文对比了两组离心模型在 5 组工况条件下的加速度反应谱结果, 可以看出上覆有水和无水条件下的自由场离心模型在地表处的加速度反应谱差异显著 (图 8 所示), 且随着基底输入峰值的增加, 两组模型的反应谱差异越明显。具体表现为: 当输入较小时的工况 EL-1, 上覆有水和无水的两组自由场模型的地表反应谱差别不明显, 上覆无水的加速度反应谱略高于有水的情况; 当基底输入增加 (EL-2、EL-3 工况), 由于上覆海水的自重影响, 上覆无水模型的地表加速度反应谱则显著高于上覆有水模型; 随着基底输入的进一步增大 (EL-4、EL-5 工况), 上覆无水模型的地

表加速度反应谱逐渐向长周期方向移动, 低频成分进一步增大, 相反地, 上覆有水模型的地表加速度反应谱则逐渐向短周期方向移动, 高频成分进一步提高, 对比来看两组模型的反应谱差异程度逐渐提升。

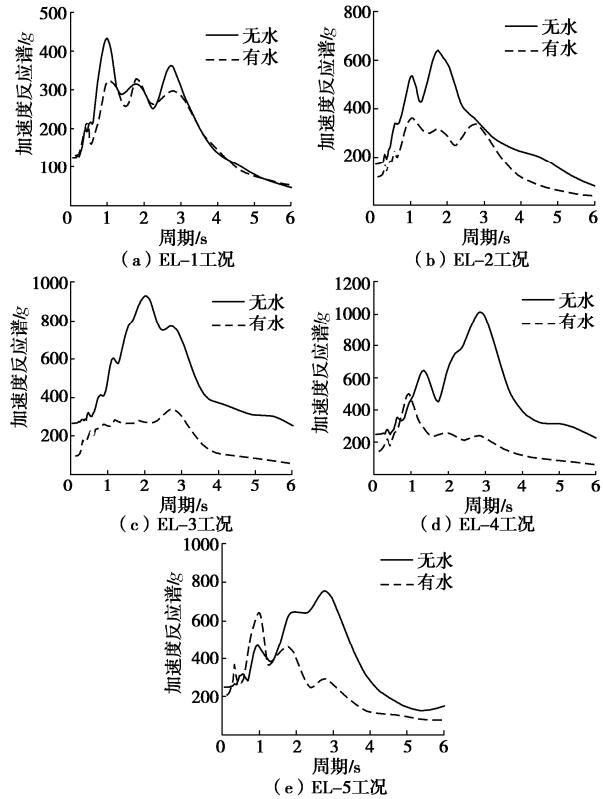


图 8 两组模型的地表加速度反应谱对比图

Fig. 8 Comparison of ground acceleration response spectra of two models

3 典型自由场的地震动反应分析

3.1 场地反应分析方法

地震波由震源断层错动产生, 经地壳介质传播与耗散, 再经局部场地条件的动力放大作用而产生强地面运动, 因此地震波由震源机制 $S(M_0, f)$ 、传播路径 $P(R, f)$ 以及场地效应 $G(f)$ 三部分构成^[22], 地震动的傅氏谱 $A(M_0, R, f)$ 表示为

$$A(M_0, R, f) = S(M_0, f)P(R, f)G(f) \quad (1)$$

式中, M_0 为地震矩, R 为震源距, f 为频率。

对于同一岩土竖向台阵获取不同深度的加速度记录, 它们之间则具有相同的震源项和路径项。本文借鉴 Borcherdt^[23]提出的基于传统谱比法研究场地效应的思路和方法, 利用动态离心模型来还原典型自由场的岩土竖向台阵, 将振动台基底作为基岩参考场地, 用地表处的地震记录与井下基岩处地震记录做傅氏谱比, 即可消除震源和路径项, 获得稳定可靠的传递函数或者场地反应。

其中, 场地反应可通过放大谱频率响应函数来表

示^[24]:

$$A_{rs}(f) = \left| \frac{G_r(f)}{G_s(f)} \right| \quad (2)$$

式中, $G_r(f)$ 表示地表及地下某层位的傅氏谱, $G_s(f)$ 表示基底层位的傅氏谱, $A_{rs}(f)$ 为层间频率反应函数的绝对值, 一般用放大系数表示 (amplification factor, 简写 AF), 其中下标 r, s 分别表示以 s 层傅氏谱结果为基准、以 r 层傅氏谱结果为对象表示其比值。

3.2 基于离心模型试验的数据处理与分析

有研究表明, 由于地表及地下岩土介质速度的不同, 地震波在分界面处将产生上行与下行波场的相消干涉作用, 造成地震动傅氏谱在特定频段的幅值显著降低, 出现“假共振”现象^[25]。为消除“假共振”并获取有效可靠的场地反应, Steidl 等^[26]引入了相干函数概念, 其与傅氏谱比的乘积便得到了地表或地下某一深度的场地反应。

相干函数表示为

$$\gamma_{12}(f) = \frac{|S_{12}(f)|}{\sqrt{S_{11}(f) \cdot S_{22}(f)}} \quad , \quad (3)$$

式中, $S_{11}(f)$ 为在地表或地下某一深度处 (d_1) 土层中记录的地震动自谱, $S_{22}(f)$ 为在地下某一深度 (d_2) 基岩参考场地记录的地震动自谱, $S_{12}(f)$ 为分别在深度 d_1 和 d_2 记录的地震动互谱。

按照上述思路, 首先对动态离心模型试验所获取的地震动时程记录 (图 3~7) 进行傅里叶变换, 得到了地表处的地震动傅氏谱, 并用 0.4 Hz 的 Parzen 窗进行平滑处理; 然后将各工况条件的振动台基底处作为参考场地, 将基座处输入地震动进行傅里叶变换, 得到了各组试验工况参考场地的地震动傅氏谱; 接下来利用式 (2) 分别计算地表与参考场地之间地震动傅氏谱比, 并利用式 (3) 计算了与之对应的相干函数; 最后将傅氏谱比和相干函数结果进行乘积, 即得到了自由场地表的场地反应, 其中场地反应最大值所对应的频率即为自由场的基本频率 f_d , 其倒数即为自由场的基本周期 T_b 。

据此, 得到了两组离心模型试验在 6 组工况条件下的地表场地反应放大谱, 图 9 所示。其中图 9 (a) 是采用白噪声对自由场模型体系进行的扫频后得到的场地反应结果, 图 9 (b) ~9 (f) 分别对应于基底输入不同幅值 El Centro 波时的场地反应结果。

由图 9 可知, 两组典型自由场地表处的场地反应在 0.01 Hz 至 10.0 Hz 频段间, 有多个放大系数峰值, 其对应的频率即为自由场结构体系的不同振型频率, 其中第一个峰值对应的频率即为基本频率 f_d , 其倒数即为基本周期 T_b 。据此, 获取了白噪声扫频工况下两组自由场模型的基本频率和基本周期, 如表 4 所示,

可以看出无水模型的基本周期为 1.47 s, 而有水模型的基本周期为 1.22 s, 无水模型的基本周期高出有水模型的基本周期约 17%。从自振频率的基本概念上来看, 结构体系的基本周期(或基频)与其刚度和质量相关, 一方面由于两个模型刚度和质量不同, 另一方面模型的组合体系也有显著差别, 故此导致了两个模型基本周期的差异。从图 9 还可以看出, 场地反应中的第一振型放大作用最显著, 表明自由场的基本周期也是其卓越周期, 并且占体系总体反应的主要部分, 其他振型放大作用不明显, 这是由于离心模型对应于原型自由场为均质场地, 且覆盖层较薄(厚度 30 m), 故本文所设计的典型自由场可近似看做一个单自由度体系。

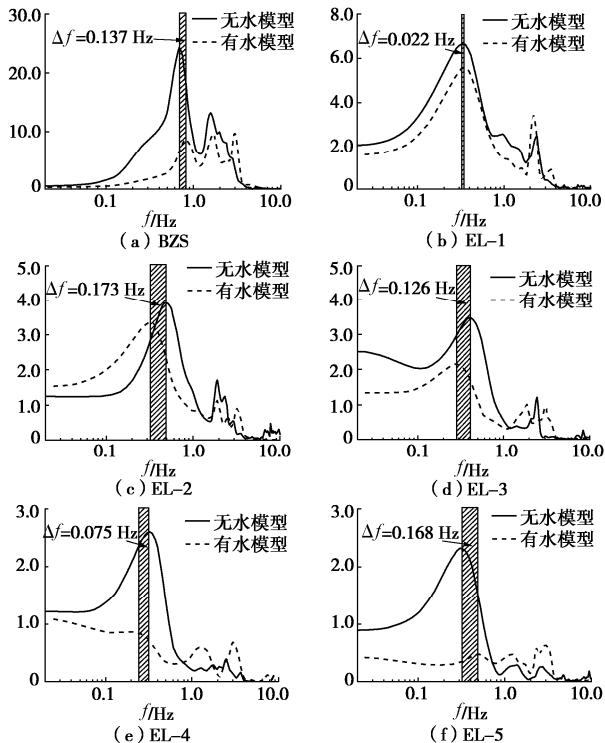


图 9 典型自由场地表处的场地反应放大谱

Fig. 9 Site response amplification spectra at surface of typical free fields

为了系统研究输入地震动对典型自由场基本周期的影响及相应规律, 根据图 9 的场地反应分析结果, 整理出两组自由场模型的第一振型的自振频率及对应的放大系数, 如表 5 所示。同时, 依据表 5 结果计算了不同输入工况条件下无水和有水两组自由场模型的基本周期值及其差异率, 如表 6 所示。

表 4 模型体系动力特性

Table 4 Dynamic characteristics of model system

加载工况	无水模型		有水模型	
	f_d/Hz	T_b/s	f_d/Hz	T_b/s
白噪声扫频 BZS	0.682	1.47	0.819	1.22

表 5 地震动振型放大系数及其相应的自振频率

Table 5 Amplification factors and their corresponding natural frequencies of ground motion modes

加载工况	无水模型		有水模型	
	f_d/Hz	AF	f_d/Hz	AF
EL-1	0.330*	6.671	0.352	5.583
EL-2	0.488	3.932	0.315	3.365
EL-3	0.403	3.492	0.277	2.155
EL-4	0.317	2.596	0.242	0.848
EL-5	0.312	2.318	0.480*	0.466

注: *表示试验非正常点。

表 6 不同工况条件下两组离心模型的基本周期 T_b 及差异率 δ

Table 6 Basic periods and difference rates of two groups of centrifugal models under different working conditions

模型工况	无水模型	有水模型	差异率
	T_b/s	T_b/s	$\delta/\%$
EL-1	3.03	2.84	-6.7
EL-2	2.05	3.17	35.5
EL-3	2.48	3.56	30.3
EL-4	3.15	4.13	23.7
EL-5	3.21	2.08	-35.2

由图 7、表 5、6 可知, 无水模型的振型放大系数显著高于有水模型, 两者的差距随着基底输入峰值增加会被进一步增大(图 10 (a)), 从另一个角度可以得出这样一个结论, 由于上覆水的作用, 导致海床表处的地震动放大作用被抑制。此外, 随着基底输入峰值的增加, 无水和有水两组自由场模型的基本频率总体上呈降低趋势, 基本周期呈增长趋势, 并最终趋于一个定值(图 10 (b) 所示)。分析这一现象产生的主要原因是, 随着基底输入的提高, 自由场土层等效剪切波速逐渐降低, 进而导致卓越频率逐渐向低频方向移动, 这与 Dimitriu 等^[27]的理论研究结论是一致的。

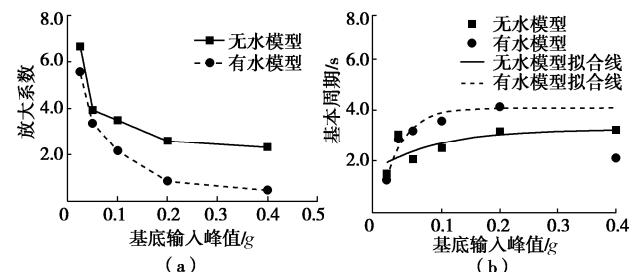


图 10 场地基本周期与放大系数随基底输入峰值的关系

Fig. 10 Relationship among basic period, amplification factor and the peak value of base input

其中个别试验测试点略有偏差, 分别是无水模型的 EL-1 工况以及有水模型的 EL-5 工况。结合图 9(b), (f) 和表 6 结果, 分析产生这两个试验非正常点的原因, 当基底输入较小时, 两个离心模型的结构体系尚处于弹性变形阶段, 上覆海水与饱和海床土层整体性较好, 因此基本周期和地震动放大系数差异不大, 而随着基底输入的增加, 两个离心模型差异逐渐显著, 上覆

有水模型已经出现了较明显的第二振型反应，并且高阶振型反应占总体反应的主要部分，因此第一振型反应已并不显著，也是导致出现试验非正常点的原因。

对比无水和有水两组自由场模型的场地反应结果不难发现，无论是白噪声扫频还是基底输入 El Centro 波的工况条件，两组模型的基本周期和振型放大系数均存在显著差异（图 9 阴影部分），基本周期的最大偏差达 35.5%，表明由于上覆水会影响自由场体系的基本周期估算结果，进而也说明上覆海水对海底复杂介质体系的地震动反应具有一定的影响，因此在实际海域场地动力特性评价以及地震反应分析工作中，不可忽视上覆海水的作用和实际影响。

4 结 论

本文利用动态离心模型试验还原并设计了上覆无水和有水两组自由场模型，采用白噪声扫频和不同输入强度 El Centro 波的加载形式，利用考虑相消干涉的传统谱比法，研究总结了两组典型自由场的基本频率、基本周期、场地反应放大系数及随输入峰值的变化规律。具体结论如下：

（1）根据两组自由场离心模型试验结果可知，由于覆盖软土的非线性特性以及地震波在土层内部的折射与反射等作用，地表处加速度时程的峰值时刻要滞后于基底时程，并且峰值加速度放大倍数呈现非线性放大效应，表现出先放大后缩小的趋势。对比来看，由于上覆水自重以及水土相互作用的影响，无水模型的地表峰值放大倍数要高于有水模型，同时无水模型的地表时程波形稀疏，表明地表地震波具有较为丰富的高频成分。

（2）利用白噪声扫频获取了两组自由场的基本周期和基本频率，无水模型的基本周期高于有水模型基本周期的 17%，产生这一结果的原因可以归结于两个模型在刚度、质量以及结构组合体系的差异而导致基频的显著差异。

（3）限于模型箱尺寸的原因，本次离心模型试验仅能够还原到地表以下 30 m 的原型场地，可以近似看成是一个单自由度体系，从两组离心模型的场地反应分析结果来看，自由场第一振型放大作用最显著，并且占体系总体反应的主要部分，其他振型放大作用不明显。

（4）利用不同强度的 El Centro 波作为基底输入，分别计算了两组自由场模型的场地反应，结果表明两组模型的基本周期和振型放大系数均存在显著差异，基本周期差异高达 35.5%，无水模型的振型放大系数显著高于有水模型，并且随着基底输入峰值增大，无水和有水两组自由场模型的基本周期呈增长趋势，最

终趋于一个定值。

总的来看，上覆水作为复杂自由场结构体系不可分割的一部分，在描述场地动力特征和地震动场地反应评价中，是不可忽视的重要组成部分，在实际海洋工程的抗震设计和地震风险评估工作中要予以充分的重视和考虑。

致 谢：本次离心机振动台试验得到了交通运输部天津水运工程科学研究院港口水工建筑技术国家工程实验室大力支持。感谢刘晓强博士、安晓宇博士、李建东工程师对本次试验付出了辛勤的工作和热情的支持。同时感谢匿名审稿人对本文提出了专业且富有建设性的修改意见。

参 考 文 献：

- [1] 李小军. 地震动参数区划图场地条件影响调整[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 21 - 29. (LI Xiao-jun. Adjustment of seismic ground motion parameters considering site effects in seismic zonation map[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 21 - 29. (in Chinese))
- [2] 华永超, 齐文浩, 薄景山, 等. 场地周期的确定方法综述 [J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 239 - 251. (HUA Yong-chao, QI Wen-hao, BO Jing-shan et al. Review of methods for determining site period[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(2): 239 - 251. (in Chinese))
- [3] ZHAO J X, ZHANG J, AKIHIRO A. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 2006, 96(3): 898 - 913.
- [4] 陈永新, 迟明杰, 李小军. 基于强震动记录确定的场地卓越周期[J]. 地震学报, 2016, 38(1): 138 - 145. (CHEN Yong-xin, CHI Ming-jie, LI Xiao-jun. Determination of site dominant period based on strong motion records[J]. Acta Seismological Sinica, 2016, 38(1): 138 - 145. (in Chinese))
- [5] CHAVEZ-GARCIA F J, SANCHEZ L R, HATZFELD D. Topographic site effects and HVSR. A comparison between observations and theory[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(5): 1559 - 1573.
- [6] RONG M, FU L, WANG Z, LI X, et al. On the amplitude discrepancy of HVSR and site amplification from strong-motion observations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2017, 107(6): 2873 - 2884.
- [7] NAKAMURA Y. A Method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface[J]. Quarterly Report of Railway Technical Research

- Institute of Japanese National Railways, 1989, **30**(1): 25 - 33.
- [8] 高广运, 吴世明, 周健, 等. 场地卓越周期的讨论与测定[J]. 工程勘察, 2000, **2**(5): 29 - 31. (GAO Guang-yun, WU Shi-ming, ZHOU Jian, et al. Discussion and measurement of site predominant period[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000, **2**(5): 29 - 31. (in Chinese))
- [9] DOBRY R, OWEIS I, URZUR A. Simplified procedures for estimation the fundamental period of a soil profile[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, **66**(4): 1293 - 1321.
- [10] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (Editorial Board of Engineering Geology Manual. Engineering Geology Manual[M]. 5th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [11] 齐文浩, 薄景山, 刘红帅. 水平成层场地基本周期的估算公式[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 779 - 784. (QI Wen-hao, BO Jing-shan, LIU Hong-shuai. Fundamental period formula for horizontal layered soil profiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 779 - 784. (in Chinese))
- [12] YANG J. Saturation effects on horizontal and vertical motions in a layered soil–bedrock system due to inclined SV waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, **21**(6): 527 - 536.
- [13] WANG S, HAO H. Effects of random variations of soil properties on site amplification of seismic ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, **22**(7): 551 - 64.
- [14] ZHANG D Y, XIE W C, PANDEY M D. Synthesis of spatially correlated ground motions at varying sites based on vector-valued seismic hazard deaggregation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **41**: 1 - 13.
- [15] 荣棉水, 喻烟, 王继鑫. 基于强震观测的海域和陆域场地效应的对比研究[J]. 建筑结构, 2018, **48**(增刊2): 345 - 349. (RONG Mian-shui, YU Tian, WANG Ji-xin. Comparative study on site-effects of sea and land area based on strong earthquake observation[J]. Building Structure, 2018, **48**(S2): 345 - 349. (in Chinese))
- [16] FAN S, SHI Y, LIU C, et al. Simulation of spatially varying seafloor ground motions with random seawater layer and complex terrain[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **111**: 110 - 118.
- [17] 张奎, 赵成刚, 李伟华. 海底软土层对海洋地基场地动力响应的影响[J]. 岩土力学, 2019, **40**(6): 1 - 13. (ZHANG Kui, ZHAO Cheng-gang, LI Wei-hua. Study on the seismic response of the seafloor ground with seafloor soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(6): 1 - 13. (in Chinese))
- [18] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗刚. 离心机振动台试验叠环式模型箱边界效应[J]. 北京工业大学学报, 2008, **34**(9): 931 - 937. (LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, WANG Zong-gang. Boundary effect of laminar model box for shaking table tests on geotechnical centrifuge system[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, **34**(9): 931 - 937. (in Chinese))
- [19] LEE C J, WEI Y C, KUO Y C. Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2012, **34**: 37 - 51.
- [20] Building Seismic Safety Council. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures[S]. 2020.
- [21] 许成顺, 豆鹏飞, 杜修力, 等. 液化场地—群桩基础—结构体系动力响应分析——大型振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2173 - 2181. (XU Cheng-shun, DOU Peng-fei, DU Xiu-li, et al. Dynamic response analysis of liquefied site-pile ground foundation-structure system—large scale shaking table model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2173 - 181. (in Chinese))
- [22] BOORE D M. Simulation of ground motion using the stochastic method[J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, **160**(3/4): 635 - 676.
- [23] BORCHERDT R D. Effect of local geology on ground motion near San Francisco Bay[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, **60**(1): 29 - 61.
- [24] 大琦顺彦. 地震动的谱分析入门[M]. 田琪, 译. 北京: 地震出版社, 2008: 171 - 174. (OSAKI Yorihiko. Shin Jishindo No Spectre Kaiseki Nyumon[M]. TIAN Qi, trans. Beijing: Seismological Press, 2008: 171 - 174. (in Chinese))
- [25] 王海云. 土层场地的放大作用随深度的变化规律研究—以金银岛岩土台阵为例[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(5): 1498 - 1509. (WANG Hai-yun. Study on variation of soil site amplification with depth: a case at Treasure Island geotechnical array, San Francisco Bay[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, **57**(5): 1498 - 1509. (in Chinese))
- [26] STEIDL J H, TUMARKIN A G, ARCHULETA R J. What is a reference site?[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, **86**(6): 1733 - 1748.
- [27] DIMITRIU P, KALOGERAS I, THEODULIDIS N. Evidence of nonlinear site response in horizontal-to-vertical spectral ratio from near-field earthquakes[J]. Soil dynamics and Earthquake Engineering, 1999, **18**(6): 423 - 435.