

# 地基与密肋复合墙结构动力相互作用测试分析\*

卢俊龙<sup>1</sup>, 张 荫<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院 西安, 710048) (2. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安, 710055)

**摘要** 为研究黄土地基与密肋复合墙结构相互作用对结构地震响应及破坏机制的影响规律, 分别在考虑地基与结构相互作用及刚性地基条件下进行了 1/15 比例密肋复合墙结构振动台试验。按不同烈度输入单向水平、双向水平及三向加速度的 EL-Centro 波和天津波, 测试了结构的加速度反应, 比较了考虑相互作用与刚性地基条件下的水平加速度响应, 对比了两种条件下的破坏现象, 分析了地基对所输地震波的放大效应及相互作用对结构楼层动力响应的影 响。结果表明: 输入地震波后, 相互作用体系的破坏形式为地基开裂, 刚性地基条件下结构的破坏形式为底部拼接缝滑移; 地基对地震作用的放大效应与地震波频谱特性、幅值及输入方式相关; 相互作用对不同楼层水平动力响应的影 响程度不同, 也受到地震波频谱及烈度的影 响; 各工况条件下的相互作用效应与地基放大效应较为接近, 可将地基对地震作用的放大系数作为考虑相互作用后的地震作用效应调整系数。

**关键词** 相互作用; 地震反应; 破坏机制; 密肋复合墙结构; 振动台试验

**中图分类号** TU352.1; TU311.3

## 1 问题的引出

密肋复合墙结构是一种新型可装配式结构, 适应我国建筑产业化及墙体改革的发展方向, 其结构构造如图 1 所示<sup>[1]</sup>。在钢筋混凝土框格单元中填充砌块构成密肋复合墙板, 砌块采用工业废料或农作物秸秆等制作, 复合墙板通过连接柱、暗梁形成抗侧力构件, 承担结构内力。密肋复合墙构造特殊, 其动力计算及抗震设计方法与传统结构区别较大。

通过密肋复合墙结构的力学性能及简化计算模型研究, 初步建立了结构抗震设计方法<sup>[2-4]</sup>。在此基础上, 文献[5-6]建立密肋复合墙结构的恢复力模型, 通过非平稳随机地震反应分析研究基于动力可靠度

的设计方法。文献[7-8]等通过分析墙体承载特性及滞回性能, 建立三道抗震防线量化设计方法。郭猛等<sup>[9-11]</sup>通过对比密肋复合墙结构和框剪结构的耗能性能, 研究隐形框架与密肋复合墙的剪力分配关系。刘佩等<sup>[12]</sup>通过试验研究轻钢龙骨密肋复合墙结构的抗震性能。文献[13-14]通过 1/6 比例密肋复合墙结构振动台试验及数值模拟, 研究结构动力特性、地震响应与破坏形态。

因密肋复合墙结构抗震性能研究未考虑结构与地基动力相互作用的影响, 相关结论存在局限性。为研究结构与地基的动力相互作用关系, 易伟建等<sup>[15]</sup>考虑桩-土-结构相互作用, 研究了脉冲型地震和常规地震作用下钢筋混凝土框架结构动力响应影响因素及规律。尚守平等<sup>[16]</sup>对比激振后刚性地基与设置土槽地基时钢框架模型的底部剪力, 得到底部剪力折减系数。陈跃庆等<sup>[17]</sup>通过动力相互作用体系振动台模型试验, 研究不同地基条件对相互作用的影响。

因密肋复合墙体力学性能、破坏模式均与传统结构区别较大, 地震时与地基相互作用的规律较为复杂。为了研究二者动力相互作用关系, 笔者设计制作了密肋复合墙结构模型及地基模型箱, 分别进

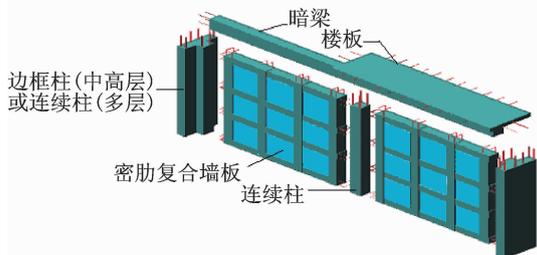


图 1 密肋复合墙结构构造

Fig. 1 Constitution of multi-ribbed composite wall structure

\* 国家自然科学基金资助项目(51178385); 陕西省自然科学基金资助项目(2016JM5017, 2018JQ5099); 陕西省教育厅科研计划资助项目(17JK0370)

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-09-16

行刚性地基条件及相互作用条件下的振动台试验,分析结构动力响应的变化规律,研究密肋复合墙结构与地基动力相互作用及破坏机制,以完善密肋复合墙结构的抗震设计方法。

## 2 试件设计与制作

### 2.1 结构模型

以某大学 7 层密肋复合墙结构学生公寓为研究对象,原型结构为 8 度设防,Ⅱ类场地,黄土地基,底层结构高度为 4.8 m,各层建筑层高均为 3.0 m,建筑总高度为 21 m,结构平面如图 2 所示。结构平面总尺寸为 33.8 m×13.8 m,门窗洞口尺寸分别为 900 mm×2 400 mm 和 1 500 mm×1 500 mm,密肋复合墙厚度为 300 mm,楼板厚度为 100 mm。该结构为平面规则结构,各开间单元横墙刚度及结构质量分布相同,因而各横向开间单元的动力特性与原结构接近。由于受到结构与地基相互作用系统对结构模型尺寸的限制,故以 1 个横向子单元为对象来研究原结构的动力响应及破坏规律。

选取中间一榀代表性受力单元为原型结构(见图 2 阴影部分),受到地基模型尺寸限制,几何相似系数设计为 1/15,平面尺寸为 0.54 m×0.45 m,总高度为 1.52 m,采用质量配重满足质量相似,模型结构质量为 212 kg,各层配重质量均为 65 kg,总质量为 0.97 t,复合墙体采用与原型材料类似的微粒混凝土,钢筋以镀锌铁丝模拟。主要控制参数的相似系数如表 1 所示。

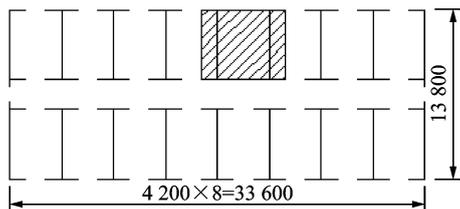


图 2 原型结构平面(单位:mm)

Fig. 2 Plan of the structure(unit:mm)

按相似比条件设计的墙板厚度为 20 mm,墙板肋梁及肋柱纵筋采用 4 根直径为 1.2 mm 的镀锌铁丝(4 $\phi$ 1.2),箍筋直径为 0.9 mm,间距为 20 mm( $\phi$ 0.9@20),形成钢筋骨架后,将砌块按框格尺寸切割后置入,再浇筑细石混凝土制作墙体。在钢筋混凝土筏板基础浇筑完成后,将基础、墙体与楼板进行装配,完成模型制作,如图 3 所示。

表 1 结构模型的相似系数

Tab. 1 Similitude coefficients of the model

物理量名称	相似关系表达式	相似系数
长度	$S_l$	1/15
加速度	$S_a$	1.48
弹性模量	$S_E$	1/1.69
质量	$S_m = S_E S_l^3 / S_a$	1/563
密度	$S_p = S_m / S_l^3$	5.99
力	$S_F = S_E S_l^2$	1/380
刚度	$S_k = S_E S_l$	1/25
周期	$S_T = \sqrt{S_l / S_a}$	1/4.71



图 3 密肋复合墙结构模型

Fig. 3 Model of the multi-ribbed composite wall structure

### 2.2 地基模型

为了减小地基模型箱效应,控制结构模型的平面尺寸,应满足地基模型与结构模型的平面尺寸之比小于 5<sup>[18]</sup>,因而地基土箱平面尺寸为 2.56 m×2.93 m,高为 2.1 m,采用 6 mm 厚的钢板制作。为防止钢板在土压力作用下产生过大变形而破坏,在钢板外部设置劲性钢梁。在箱体钢板内侧以环氧树脂胶粘贴 5 cm 厚的黏滞阻尼材料,模拟远场地基效应。在箱体底部铺设 30 cm 厚的卵石层模拟基岩层,然后将重塑黄土按分层 25 cm 进行夯实,地基土层总厚度为 1.8 m。控制压实系数不低于 0.85,含水量为 19% 左右,夯实后测得压缩模量为 13.9 MPa,地基模型总质量为 11.2 t。

### 2.3 相互作用系统模型

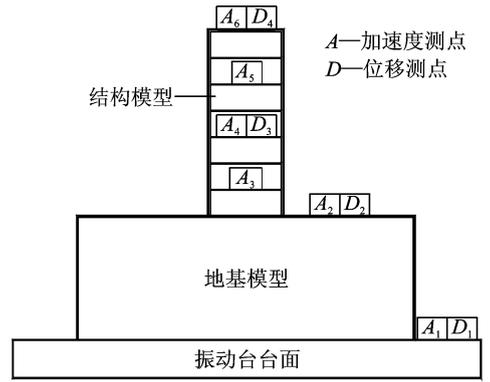
当地基土夯筑至基础底面设计标高时,将结构模型埋入土体并回填夯实,基础埋深为 0.25 m,压实地面形成密肋复合墙结构与地基相互作用体系试验模型如图 4 所示。

## 3 试验概况

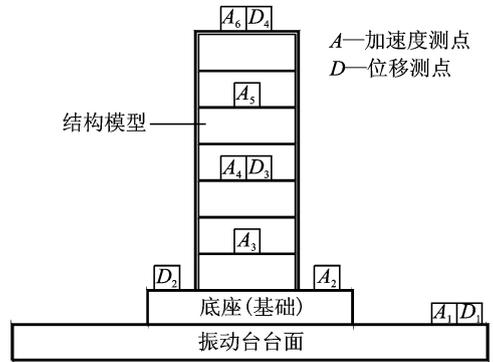
试验时,先进行密肋复合墙结构与地基相互作



图 4 密肋复合墙结构与地基相互作用体系试验模型  
Fig. 4 Model of interaction system of multi-ribbed wall structure and subsoil



(a) 相互作用体系  
(a) Interaction system



(b) 刚性地基条件  
(b) Fixed subsoil condition

图 5 测点布置示意图

Fig. 5 Location of test sensors

用系统的振动台试验,试验完成后结构基本完好,而后将上部结构模型嵌固于台面模拟刚性地基条件再进行振动台试验,通过两种工况对比,研究密肋复合墙结构与地基动力相互作用关系。

### 3.1 地震波输入

为了充分考虑场地地基条件及地震动输入对结构地震反应的影响,按烈度条件及相似比要求将地震波进行压缩与调幅,加速度峰值按 7 度、8 度及 9 度递增,选用 EL-Centro 波(以下简称为 EL 波)及天津波(以下简称 TJ 波),分别按单向水平、双向水平及三向加速度进行输入。

以结构纵向为地震作用主方向( $x$  向),单向输入时加速度峰值按相似比要求取值,双向水平输入时  $x$  向与  $y$  向(横向)峰值之比为 1 : 0.85,三向输入时  $x$  向、 $y$  向与  $z$  向(竖向)峰值之比为 1 : 0.85 : 0.65。按试验设计要求,分别在刚性地基条件及考虑地基与结构相互作用条件下进行试验,按相应烈度输入地震波,其中  $x$  向的加速度峰值如表 2 所示。

表 2 不同烈度所对应的加速度峰值

Tab. 2 Peak value of acceleration at different intensify

烈度	加速度峰值/g	
	EL 波	TJ 波
7 度	0.173	0.165
8 度	0.302	0.330
9 度	0.611	0.709

### 3.2 测点布置

试验采集台面、地基表面(刚性地基时为基础顶面)及部分楼层的加速度及位移响应,测点布置如图 5 所示。在每个测点均沿  $x$  向、 $y$  向及  $z$  向布置位移与加速度传感器各 1 个,加速度传感器采用 ICP 压电式传感器,位移传感器采用 891-II 型超低频动态传感器。

地基表面传感器安装在埋置土体中的水泥砖表面,保持砖表面水平,在其表面粘接毛玻璃片和薄钢板,将位移传感器粘接毛玻璃片,加速度传感器吸附于薄钢板上,如图 6 所示。各楼层传感器采用同样的方法安装在楼面,使传感器与测点同步运动。



(a) 地基土表面 (a) Surface of the subsoil (b) 结构楼层 (b) Floor of the structure

图 6 传感器安装

Fig. 6 Installation of sensors

## 4 试验现象

### 4.1 地基破坏

地基对地震波具有放大效应,地基土具有阻尼

效应,可吸收大部分振动能量,因而进行相互作用体系试验时上部结构基本完好,破坏现象为地基土开裂,随着烈度愈高,开裂愈显著,具体破坏过程如下。

为满足连续加载的要求,裂缝观测均在按各烈度三向 EL 波加载完成后进行。对比图 7 和图 8 可以发现,完成 7 度 EL 波加载后,地基沿结构首层底部四周开裂,进而沿纵向与横向往两边延伸(图 8 中蓝色线),裂缝宽度约为 0.5 mm,纵向裂缝长度约为结构纵向宽度,横向裂缝开展至土箱内边缘。

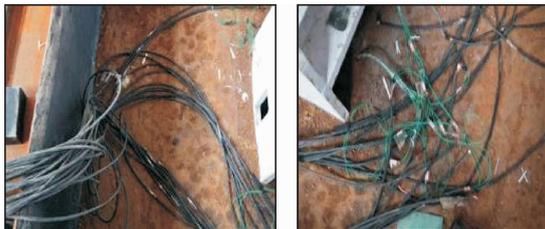


图 7 试验前地基土表面  
Fig. 7 Subsoil surface before test

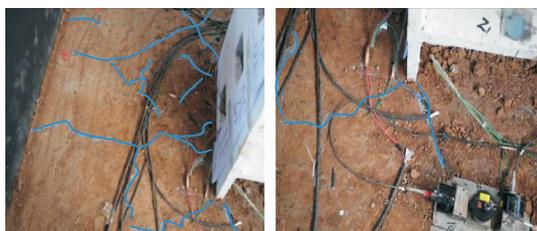


图 8 7 度后地基土表面裂缝  
Fig. 8 Cracks of subsoil surface under 7 degree

完成 8 度三向 EL 波加载后的裂缝开展如图 9 所示,原裂缝宽度增大并继续延伸,出现与原裂缝平行的新裂缝,且在原裂缝周围产生宽度较小的支裂缝,新出现裂缝如图 9 中的黄色线所示。

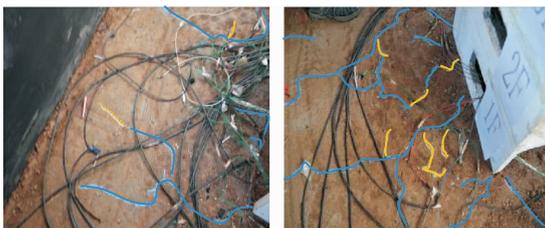


图 9 8 度后地基土表面裂缝  
Fig. 9 Crack of subsoil surface under 8 degree

当烈度提高至 9 度后,结构四周土体的裂缝均延伸至地基外边缘,且宽度显著增加,如图 10 所示。基础四周裂缝宽度最大,约为 2 mm 左右,同时沿每条主裂缝上又出现了多条支线裂缝,如图 10 中红色线条所示,但支线裂缝宽度较小,另外在结构四周新出现了部分裂缝,其长度与宽度均较小。

在加载过程中,上部结构位移响应明显,结构楼层水平位移及转动直接可见。



图 10 9 度后地基土表面裂缝  
Fig. 10 Crack of subsoil surface under 9 degree

## 4.2 结构破坏

相互作用条件下的所有加载工况完成后,密肋复合墙结构模型仍保持完好,在刚性地基条件下输入 9 度地震波时,结构发生破坏,具体如下。

当输入 7 度及 8 度地震波时,结构模型中各楼层墙板及楼板基本完好,无裂缝出现。当输入烈度达到 9 度时,结构首层及第 2 层窗洞边缘出现部分纵向细小裂缝,如图 11(a)所示,且首层横墙方向也出现部分裂缝。按 9 度继续加载,首层底部墙板与筏板间局部脱离,如图 11(b)所示,结构有明显的水平滑移,随即停止加载。



(a) 横墙及纵墙裂缝  
(a) Cracks in longitudinal walls and cross walls  
(b) 首层底部裂缝  
(b) Cracks in bottom of the first floor

图 11 上部结构裂缝

Fig. 11 Cracks of the structure

## 4.3 破坏机制

由试验现象可见,地震作用下密肋复合墙结构与地基相互作用系统的破坏形式主要为地基开裂。由于相似比条件制约,基础埋深较小,夯土地基对结构的嵌固作用有限,因此成为相互作用体系的薄弱部位。因地基土具有阻尼效应,可通过开裂变形耗散部分振动能量,从而避免上部结构发生破坏。

在刚性地基条件下,结构模型高宽比较小,刚性较大,当输入地震烈度较低时结构响应不明显,不能形成薄弱部位。当烈度较高时,结构底部剪力增大,与基础连接强度不足而发生破坏,导致结构失效。

地基模型质量与结构模型质量比为 11.5,输入地震波后地基与结构的相对运动可耗散地震能量,具有一定的阻尼减震作用。在刚性地基条件下,地震能量全部由结构吸收,结构破坏较为严重。可见,地基与结构相互作用对结构破坏模式影响显著,地基的阻尼及动力放大效应对结构地震响应也有一定影响。

### 5 相互作用分析

在相互作用体系中,结构水平位移响应由基础平动、基础转动及结构变形 3 部分组成。由于结构模型刚度较大,变形较小,因而输入地震波时结构响应由基础运动产生。在刚性地基条件下,基础固定于台面,结构位移响应由结构变形产生。通过比较地基表面与振动台面的动力响应可得到地基的放大效应,对比两种地基条件下结构楼层的动力相互作用效应。结合试验结果,定义地基放大效应系数  $\eta_s$  为

$$\eta_s = \frac{R_s}{R_0} \tag{1}$$

其中:  $R_s$  为地基表面的响应峰值;  $R_0$  为振动台面的响应峰值。

定义相互作用效应系数  $I_i$  为

$$I_i = \frac{R_i}{R_r} \tag{2}$$

其中:  $R_i$  为相互作用条件下的响应峰值;  $R_r$  为刚性地基条件下的响应峰值。

#### 5.1 地基放大效应

按式(1)计算各不同烈度及地震波输入方式时地基对水平  $x$  向加速度放大效应系数,得到放大效应曲线如图 12 所示。地基对  $x$  向加速度的放大效应与烈度、地震波及输入方式均有关系。输入 EL 波时,在单向、双向及三向输入时,加速度放大效应系数均随烈度的提高而增大,单向与双向输入时随烈度基本呈线性关系,且单向输入时的放大系数略小于双向输入时。在三向输入时,烈度较低时放大系数亦较小,随着烈度提高至 8 度后,放大系数显著增大,9 度时的放大系数大于单向及双向输入时的值。可见,多向地震作用的耦合效应亦对放大效应有一定影响。

同时发现,在天津波作用下,地基放大效应随烈度的变化规律与 EL 波不同,在单向及双向输入烈度为 8 度时放大系数最小,而当三向输入 8 度时的放大系数最大,且不同烈度时放大效应系数较为接近。由图 13 可见,试验输入的地震波频谱特性有一定区别。其中:天津波的峰值激励频段为 2~6 Hz,位于其他频段的峰值均较小;而 EL 波峰值激励频段位于 2~4 Hz,7~10 Hz 两个区间;EL 波的激励为双频段;天津波的激励为单宽频带。

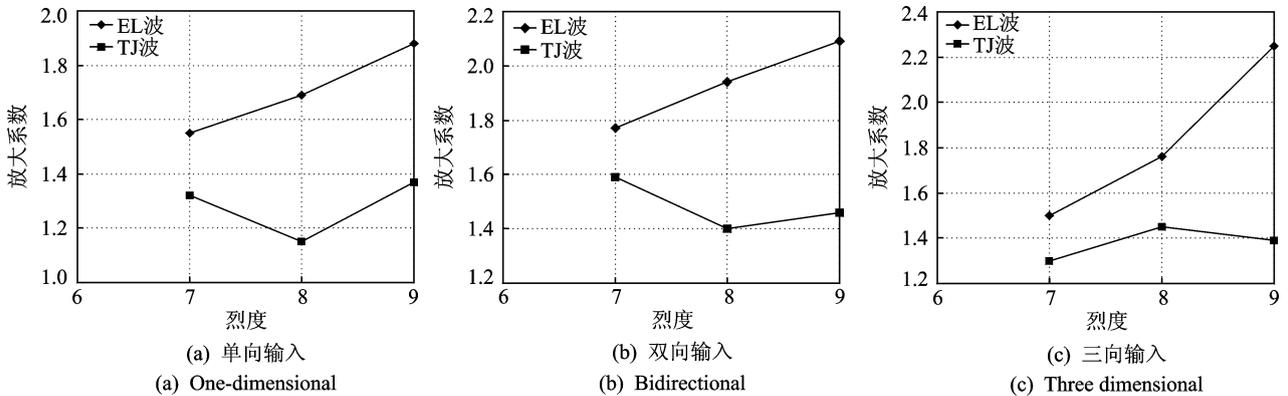


图 12 地基放大效应系数

Fig. 12 Coefficient of amplify effect of subsoil

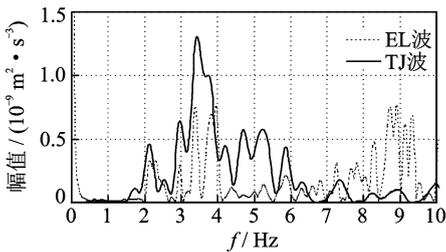


图 13 输入地震波的频谱曲线

Fig. 13 Spectrum curve of the earthquake wave

依据白噪声扫频试验结果,对地基表面测点进行快速傅里叶变换得到频域响应曲线如图 14 所示。地基模型在加载前对 0.5~3 Hz 频段激励的响应显著,加载后地基频响曲线略有变化,其中在 7 度加载完成后的频响曲线变化较明显,如图 14(b)所示。因振动加载导致地基土密实,地基频率略有提高。继续提高烈度加载完成后,地基的响应曲线变化不大,如图 14(c)和图 14(d)所示,且与加载前的响应曲线较为接近,其原因为烈度增加后,地基土开裂严

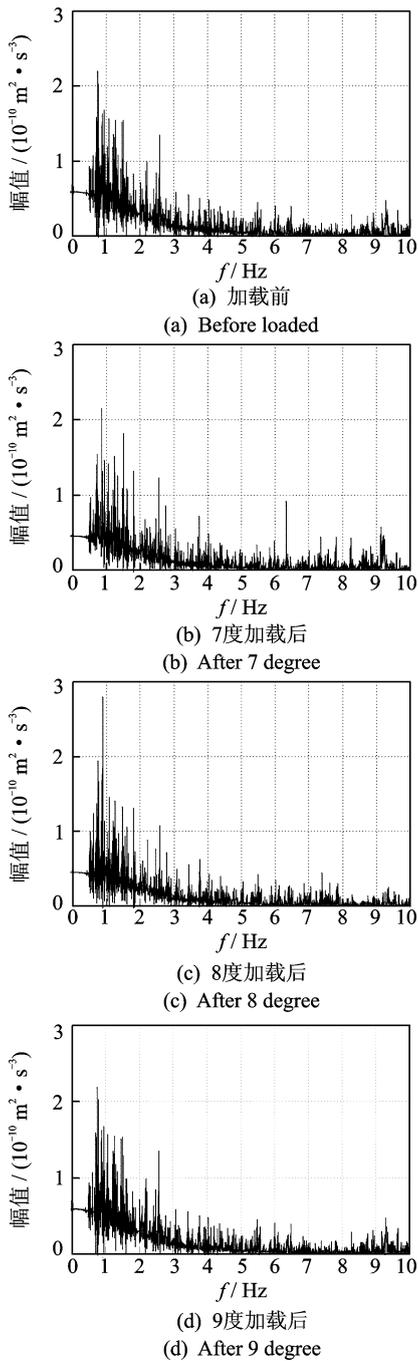


图14 白噪声激励下地基的频域响应曲线

Fig. 14 Response curve of the subsoil affected by White Noise wave in frequency domain

重,振动导致地基土的密实效应也随之减弱。

比较图13与图14可知,按不同烈度地震波加载后地基频率变化范围位于天津波的峰值激励频段范围内,地基动力响应随输入地震动的强度变化较大,因而在不同烈度下地基的动力放大效应变化较大。

## 5.2 相互作用效应

通过式(2)计算各工况条件下各结构楼层测点的水平  $x$  向加速度的相互作用放大系数,以此比较

分析相互作用效应与楼层及地震动输入的关系。

当按7度输入地震波时,由图15可见,输入EL波时的相互作用效应均较输入天津波时显著。当输入单向及双向EL波时,相互作用效应系数随测点高度的变化规律基本一致,最大值位于第5层,在顶层时减小,且单向输入时顶层的值最小,相互作用衰减了结构顶部的加速度响应,表现出减震效应,而在其他测点均对加速度具有放大效应。同时,EL波与天津波作用下的相互作用效应值除顶层外,其他楼层均相差较大。分析其原因在于,加载时先输入烈度较小的EL波,地基开裂不明显,结构与地基相对运动较小,完成EL波加载后输入天津波,地基开裂严重,振动时结构相对地基运动较为剧烈,二者相互作用的模式与输入EL波时有一定区别,故在两个工况下各楼层的相互作用效应系数相差较大。在三向地震作用下,输入EL波时的相互作用效应值略大于输入天津波时的值,曲线沿楼层高度方向的变化规律基本一致,输入EL波时3层以上各测点的效应值较为接近,而输入天津波时,5层以下各测点的效应值基本接近,表明烈度较小时,三向输入不同地震波时相互作用效应随楼层高度的变化规律基本一致。

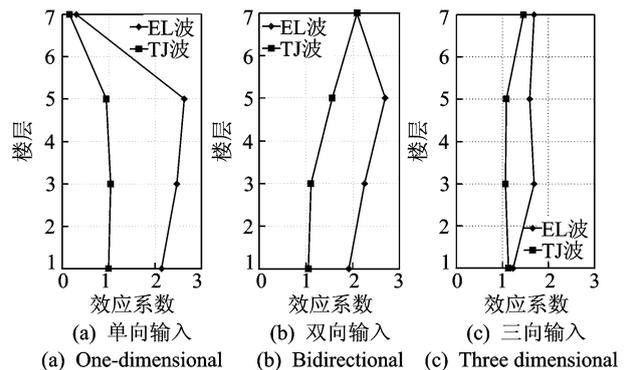


图15 7度时相互作用加速度效应系数

Fig. 15 Acceleration coefficient of interaction effect under 7 degree

当烈度提高至8度时,各工况条件下加速度相互作用效应随测点高度的变化规律较为接近。由图16可见,各工况条件下1层顶测点的相互作用效应系数值均接近于1,且单向输入两种波时,相互作用效应随测点高度的变化规律与7度时一致,在5层最显著,7层最弱。当输入双向及三向地震波时,顶层的相互作用效应均较为显著,且两种工况下各测点的相互作用效应系数值较为接近。

由9度时相互作用加速度效应系数随测点高度的变化曲线可知,输入两种地震波时相互作用效应系数随测点高度的变化规律一致,但各测点对应的数值相差较大,如图17所示。单向输入两种不同地

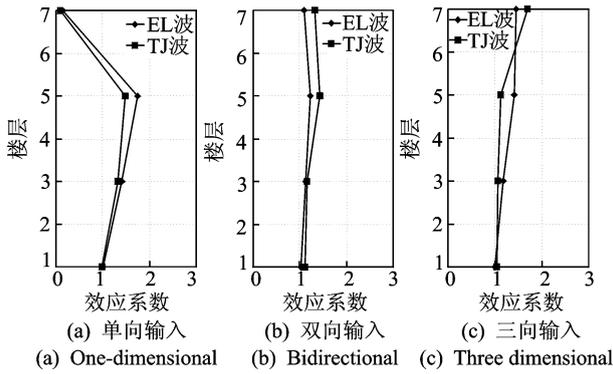


图 16 8 度时相互作用加速度效应系数

Fig. 16 Acceleration coefficient of interaction effect under 7 degree

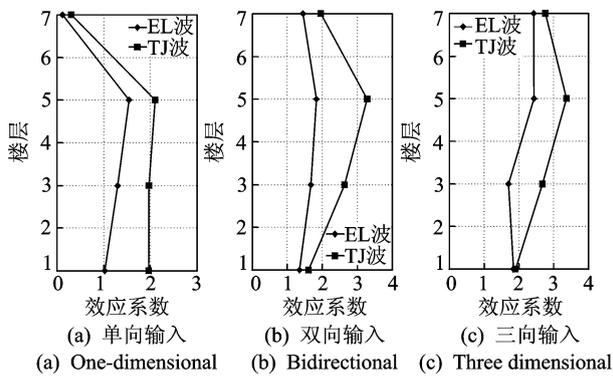


图 17 9 度时相互作用加速度效应系数

Fig. 17 Acceleration coefficient of interaction effect under 9 degree

震波时,1层顶的效应系数相差较大,随测点高度的变化规律相同,7层顶的相互作用效应值均接近于0。双向及三向输入时,相互作用效应系数随测点高度的变化规律与单向输入时相同,但5层测点在输入天津波时的效应值均大于EL波,而到7层顶时,输入两种波时的相互作用效应又较为接近。同时可见,三向输入时首层顶的相互作用效应值接近,随测点高度的变化规律与7度及8度时相同,但各测点的效应值显著大于7度及8度输入时的值。

综合各工况加速度响应的相互作用效应曲线可以发现:当烈度为7度时,输入EL波时的相互作用效应值均大于输入天津波时的值;烈度为8度时,二者较为接近;当烈度为9度时,输入EL波与输入天津波时效应值的大小关系与7度时恰好相反。可见,结构顶部楼层测点的加速度响应受相互作用的影响较为显著。

### 5.3 相互作用机制

通过地基放大效应分析可见,各工况条件下地基对振动台面输入的加速度均具有放大效应,但放大后的地震动作用于模型结构时,各楼层动力响应与刚性地基条件时直接输入地震波时相比并非全部

被放大。

结合试验加载过程及现象可以看出,因EL波适用于较硬场地土且在试验中首先输入该条波,当烈度较小时,地基尚未开裂,结构与地基相互作用系统的自振频率较高,地基对EL波的放大效应显著,相互作用对结构加速度及位移响应均具有放大效应。当EL加载完成后,地基开裂较多,结构与地基相互作用系统的自振频率随之降低,当输入地震波峰值较小时,相互作用对结构动力响应的放大效应不明显,当地震波峰值增加后,地基开裂后的阻尼增大,使相互作用体系的自振频率降低,相互作用对结构动力响应的放大效应随之显著。

通过对比地基放大效应与相互作用效应的最大值可以发现,各工况条件下地基放大效应系数的最大值为2.25,加速度相互作用效应系数的最大值为3.37。因此,对多层密肋复合墙结构进行抗震计算时,可依据地基对地震作用的放大系数确定考虑相互作用后的地震作用效应调整系数。

## 6 结 论

- 1) 输入地震波时密肋复合墙结构与地基相互作用体系的破坏形式为地基土开裂,刚性地基条件下的破坏形式为结构底部的水平拼接缝滑移。
- 2) 地基对所输入地震波具有放大效应,影响放大效应的因素有地震波频谱特性、峰值及输入方式,试验中采用的人工夯实重塑土黄土地基对EL波的放大效应较天津波显著。
- 3) 相互作用对加速度的放大效应随楼层高度的变化规律为先增大后减小,且受到地震烈度及地震波频谱特性的影响,在顶部楼层加速度响应影响显著。
- 4) 进行多层密肋复合墙结构抗震分析时,可依据地基对地震作用的放大效应确定考虑相互作用影响后的地震效应。

### 参 考 文 献

[1] 姚谦峰,陈平,张荫,等. 密肋壁板轻框结构节能住宅体系研究[J]. 工业建筑,2003,33(1):1-5.  
Yao Qianfeng, Chen Ping, Zhang Yin, et al. Study on energy-saving residential system of multi-ribbed wall slab with light-weight outer frame[J]. Industrial Construction, 2003, 33(1): 1-5. (in Chinese)

[2] 姚谦峰,袁泉. 小高层密肋壁板轻框结构模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(1):59-63.  
Yao Qianfeng, Yuan Quan. Study on shaking table test of a 1/10 scale high-rise multi-rib wall plate slab light-

- weight frame mode[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(1): 59-63. (in Chinese)
- [3] 袁泉, 刘海涛, 汪训流, 等. 密肋复合板结构非线性数值分析模型研究与验证[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5): 151-157.  
Yuan Quan, Liu Haitao, Wang Xunliu, et al. Research and verification of numerical analysis model of multi-ribbed composite slab structures [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(5): 151-157. (in Chinese)
- [4] 常鹏, 姚谦峰. 密肋复合墙体受剪性能试验研究及弹塑性数值分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 116-123.  
Chang Peng, Yao Qianfeng. Experimental study and elasto-plastic numerical analysis on shear behavior of multi-ribbed composite wall [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4): 116-123. (in Chinese)
- [5] 刘佩, 姚谦峰. 基于动力可靠度计算的密肋复合墙结构设计方法[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(S2): 19-23.  
Liu Pei, Yao Qianfeng. Design method of multi-ribbed composite wall structures based on dynamic reliability calculations [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(S2): 19-23. (in Chinese)
- [6] Liu Pei, Yao Qianfeng. Dynamic reliability of structures: the example of multi-grid composite walls [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2010, 36(4): 463-479.
- [7] 钱坤, 袁泉, 张杰, 等. 密肋复合墙结构体系抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 119-123.  
Qian Kun, Yuan Quan, Zhang Jie, et al. Tests for a seismic performance of a multi-grid composite wall structure systems [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(3): 119-123. (in Chinese)
- [8] 贾穗子, 袁泉. 密肋复合墙结构滞回退化参数及耗能减震性能[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(7): 32-35.  
Jia Suizi, Yuan Quan. Deteriorating hysteretic parameters and energy dissipation performance of multi-ribbed composite wall structures [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(7): 32-35. (in Chinese)
- [9] 郭猛, 袁泉, 钱坤, 等. 外框密肋复合墙抗剪机理及承载力计算[J]. 应用力学学报, 2012, 29(1): 76-80, 119.  
Guo Meng, Yuan Quan, Qian Kun, et al. Shear mechanism and capacity calculation for the multi-grid composite wall with outer frame [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(1): 76-80, 119. (in Chinese)
- [10] 郭猛, 袁泉, 黄炜, 等. 密肋复合墙-剪力墙混合结构水平位移计算方法研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 62-66.  
Guo Meng, Yuan Quan, Huang Wei, et al. Calculation method for horizontal displacements of multi-grid composite wall-shear wall structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 62-66. (in Chinese)
- [11] 郭猛, 姚谦峰, 袁泉. 框架-密肋复合墙结构剪力分担率计算方法研究[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 141-146.  
Guo Meng, Yao Qianfeng, Yuan Quan. Calculation method for the shear-sharing ratio of frame-composite wall structure [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 141-146. (in Chinese)
- [12] 刘佩, 郭猛, 李挺, 等. 轻钢龙骨框格密肋复合墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 128-133.  
Liu Pei, Guo Meng, Li Ting, et al. Experimental investigation on seismic behavior of multi-grid composite wall reinforced by light steel [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 128-133. (in Chinese)
- [13] 袁泉, 何玉阳. 框支密肋复合墙结构模型振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(22): 72-77.  
Yuan Quan, He Yuyang. Tests for a seismic performance of a multi-grid composite wall structure system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(22): 72-77. (in Chinese)
- [14] 何玉阳, 袁泉. 框支密肋复合墙结构振动台试验与数值模拟分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 205-210.  
He Yuyang, Yuan Quan. Frame-supported multi-ribbed composite wall shaking table test and numerical simulation analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 205-210. (in Chinese)
- [15] 易伟建, 夏玲琼. 近场地震下考虑桩-土-框架结构相互作用的拟动力试验[J]. 土木工程学报, 2014, 47(4): 1-8.  
Yi Weijian, Xia Lingqiong. Pseudo dynamic experimental analysis of pile-soil-frame interaction in near-fault earthquakes [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4): 1-8. (in Chinese)
- [16] 尚守平, 鲁华伟, 邹新平, 等. 土与结构相互作用大比例模型试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 41-46.  
Shang Shouping, Lu Huawei, Zou Xinping, et al. Experimental study on soil-structure interaction through large scale model tests [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 41-46. (in Chinese)
- [17] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 等. 不同土性的地基-结构动力相互作用振动台模型试验对比研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 57-64.  
Chen Yueqing, Lü Xilin, Li Peizhen, et al. Comparative study on dynamic soil-structure interaction system with various soil by using shaking table model tests [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 57-64. (in Chinese)
- [18] 吕西林, 陈跃庆, 陈波, 等. 结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 20-29.  
Lü Xilin, Chen Yueqing, Chen Bo, et al. Shaking table testing of dynamic soil-structure interaction system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 20-29. (in Chinese)



**第一作者简介:** 卢俊龙, 男, 1978年11月生, 副教授。主要研究方向为工程结构抗震与振动控制。曾发表《地震作用下填充墙 MTMD 减震结构频域响应分析》《《振动与冲击》2013年第32卷第18期》等论文。

E-mail: lujunlong@sohu.com