



# “场地-城市效应”振动台 试验研究与模型验证

---

## 3.1 概述

数值模拟方法的合理性需要试验数据的支撑,而在“场地-城市效应”方面的试验数据十分匮乏。已有的试验研究往往局限于若干栋建筑之间的相互影响,难以直接地显示“场地-城市效应”对建筑与场地的影响。Schwan 等(2016)提出了一套用于研究“场地-城市效应”的振动台试验实现方法,其试验模型采用聚氨酯泡沫模拟场地,铝板模拟建筑,并使建筑与场地的基本频率较为接近,以期得到显著的结果。Aldaikh 等(2016)基于该试验方法进一步研究了 2~3 栋相邻建筑之间的“结构-土-结构”相互作用,并获得了较为成功的结果。然而,由于现实中的场地地形复杂,密集建筑处于复杂的地形之中,而带地形的场地与大规模建筑之间相互作用尚缺少相关试验研究。因此,为验证第 2 章所提出的耦合数值模拟方法的可靠性,本章将首先开展考虑地形的“场地-城市效应”振动台试验,然后同时采用 Schwan 等(2016)的平坦场地振动台试验数据与本章考虑地形的振动台试验数据开展模型验证。

## 3.2 考虑地形的“场地-城市效应”振动台试验设计

### 3.2.1 相似比

本研究基于 Schwan 等(2016)提出的 SCI 效应的振动台试验实现方法,采用聚氨酯泡沫进行场地的模拟,同时采用铝板加配重的方式模拟建筑(Aldaikh et

al.,2016)。缩尺试验背景场地地表土层密度约为  $2000 \text{ kg/m}^3$ , 剪切波速约为  $200 \text{ m/s}$ 。缩尺试验建筑考虑 3 种建筑层数, 分别为 3 层( $B_1$ )、9 层( $B_2$ )和 13 层( $B_3$ )。根据 Aldaikh 等(2016)研究中各项参数缩尺比例, 经过仔细选材, 最终采用表 3-1 中的缩尺比例进行试验设计。

表 3-1 振动台试验相似比

	单位	试验模型	原型模型	相似比(试验/原型)	文献相似比(Aldaikh et al.,2016)
长度	m	0.26	27	1/100	1/100
剪切波速	m/s	44	200	1/4.5	1/4.76
周期	s	0.313	0.9	1/3	1/3
密度	$\text{kg/m}^3$	34.5	2000	1/58	1/26.3

### 3.2.2 场地模型

本振动台试验考虑 2 种场地, 即平整场地(F)与带有地形的场地(H), 其尺寸如图 3-1 所示。具体地, 场地 F 高度为  $0.75 \text{ m}$ , 水平方向尺寸为  $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ; 场地 H 在场地 F 的基础上添加一处突出地形, 突出部分底部沿 X 方向尺寸为  $1.1 \text{ m}$ , 沿 Y 方向为  $1 \text{ m}$ , 高度为  $0.6 \text{ m}$ 。为方便建筑模型的摆放, 其斜坡制作成阶梯状, 每级阶梯高度和宽度均为  $0.1 \text{ m}$ 。聚氨酯泡沫的弹性模量约为  $0.148 \text{ MPa}$ , 密度约为  $34.5 \text{ kg/m}^3$ 。值得一提的是, 本章重在探究不同地形下 SCI 效应的不同特征, 因此将两种场地的土层属性选为相同。实际的复杂地形中往往存在较硬的岩石, 这一点在本试验中无法体现, 后续章节会针对实际的具体复杂地形场景及相关地层数据进行更为详细的数值分析。

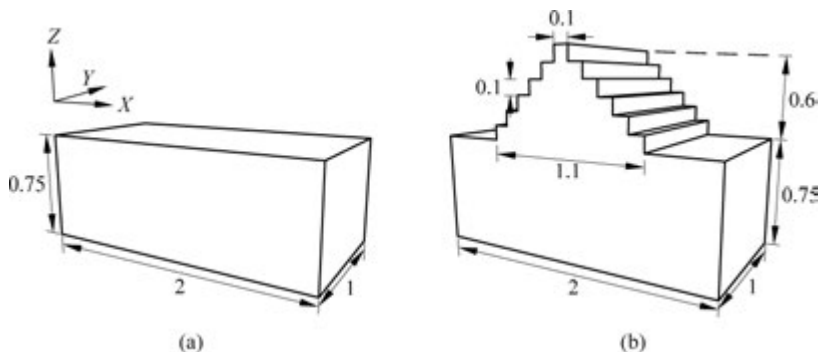


图 3-1 场地模型尺寸示意图(单位: m)

(a) 平整场地 F; (b) 带地形场地 H

试验中, 采用海绵胶将场地模型粘贴在钢板底座上, 以方便吊装, 并保证其底部能与振动台的运动保持一致。试验中, 振动台只沿着场地 X 方向加载。

### 3.2.3 建筑模型

参考 Schwan 等(2016)试验中的建筑模型建立方法,本研究采用角铝、铝板与配重组装形成建筑模型,其典型的拼装形式如图 3-2 所示。其中配重分为 2 种,尺寸均为  $1\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1\text{ m}$ ,材料分别为铝( $G_1$ )和铁( $G_2$ );铝板分为 3 种,对应 3 种不同的建筑,其厚度均为  $0.5\text{ mm}$ ,高度依次为  $0.15\text{ m}$ 、 $0.24\text{ m}$  和  $0.36\text{ m}$ 。考虑到组装后结构稳定性(由于铝板很薄,加工后不可避免地存在一定的初始挠曲,因此当配重较大且铝板较高时,拼装后的结构无法保证稳定),实际试验中采用表 3-2 中的 3 种组装方式。试验中,将组装好的建筑模型中角铝的底部粘贴于场地表面,以完成建筑与场地的连接。需要说明的是,实际结构中,高层建筑的基础深度较大,而在本振动台试验中并未引入基础的建模,因此,上述建模方法在机理上并不适用于高层与深基础的建筑。但是本试验的主要目的,一方面在于考察建筑的存在引起的场地与建筑响应的变化,且所研究的建筑周期较短;另一方面希望通过振动台试验进一步验证本章提出的耦合数值模拟方法。因此,本章仍采用上述建模方法开展试验研究。更加适用于高层建筑的且符合实际情况的振动台试验建模策略有待进一步研究。

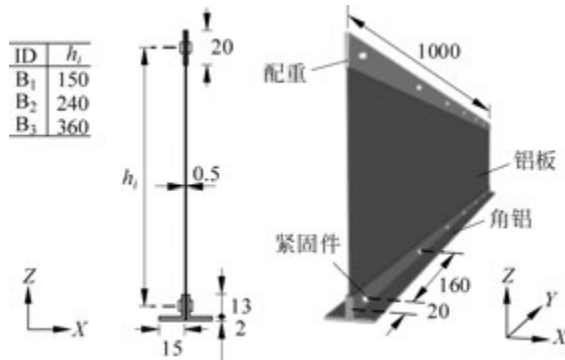


图 3-2 建筑模型示意图(单位: mm)

表 3-2 建筑模型相关参数

编号	配重	高度/m	理论周期/s(Aldaikh et al., 2016)
B <sub>1</sub>	G <sub>1</sub> × 2 (0.108 kg)	0.15	0.098
B <sub>2</sub>	G <sub>2</sub> × 2 (0.312 kg)	0.24	0.313
B <sub>3</sub>	G <sub>1</sub> × 2 (0.108 kg)	0.36	0.433

### 3.2.4 试验工况

试验中,对每种场地与每种建筑进行组合,每种组合考虑 2 种建筑布置形式,

如图 3-3 所示：①场地中间放置 1 栋建筑，记作“ $C_1$ ”；②场地上均布 17 栋相同的建筑，间距 0.1 m，记作“ $C_2$ ”。另外，无建筑（自由场地）记作“ $C_0$ ”。

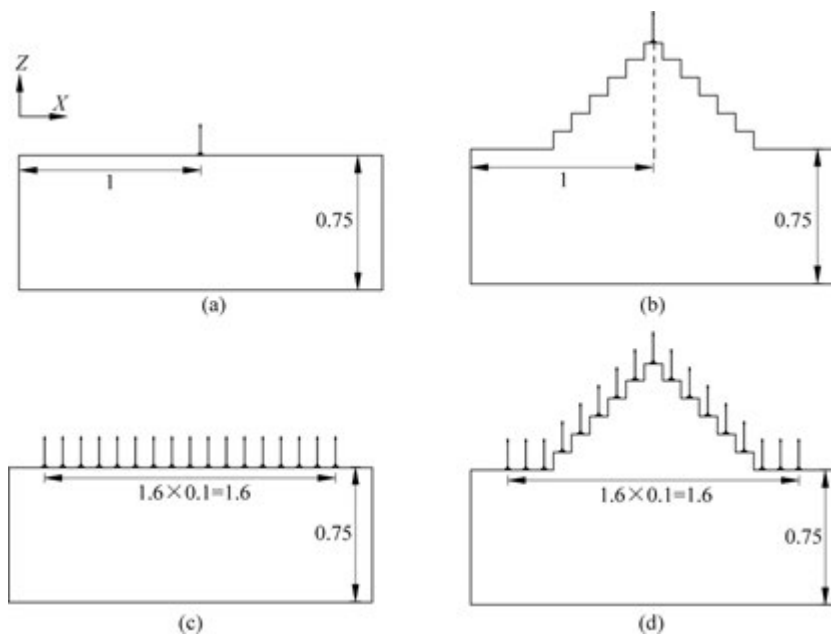


图 3-3 建筑布置示意图(单位: m)

- (a) 场地 F 的建筑布局  $C_1$ ; (b) 场地 H 的建筑布局  $C_1$ ;  
(c) 场地 F 的建筑布局  $C_2$ ; (d) 场地 H 的建筑布局  $C_2$

地震动输入主要选取以下 4 组:

- (1)  $EQ_1$ : 白噪声, 幅值  $1 \text{ m/s}^2$ , 持时 60 s。
- (2)  $EQ_2$ : Ricker 子波, 主频 8 Hz, 峰值加速度调幅至  $1 \text{ m/s}^2$ , 持时 2 s。
- (3)  $EQ_3$ : El Centro 波 (Imperial Valley-02, 5/19/1940, El Centro Array #9, 180) (PEER, 2013), 原波峰值加速度  $2.75 \text{ m/s}^2$ , 持时 53.71 s。根据表 3-1 中长度与时间的相似比, 可以得到加速度的相似比为 0.09, 对原波进行相似计算后, 试验中使用的地震动峰值加速度约为  $0.25 \text{ m/s}^2$ , 持时约为 17.90 s。

(4)  $EQ_4$ : Kocaeli 波 (No. 1158, Kocaeli Turkey, 8/17/1999, Duzce, 270) (PEER, 2013), 原波峰值加速度  $3.51 \text{ m/s}^2$ , 持时 27.18 s; 试验中采用相似变换后的地震动, 峰值加速度约为  $0.32 \text{ m/s}^2$ , 持时约为 9.06 s。

图 3-4 给出了  $EQ_2 \sim EQ_4$  的波形记录与反应谱, 从反应谱中可以发现,  $EQ_4$  的反应谱在长周期段相对较大, 可以对  $B_2$  和  $B_3$  产生较为显著的激励。另外需要说明的是, 与理论上的 SCI 效应模型不同, 本次振动台试验的地震波输入实际上是在模型底部的加速度输入, 而并未考虑场地周围的透射边界, 因此可能与实际场地情景有所区别, 不过试验结果仍可为“场地-城市效应”提供

重要参考。综上,本试验共有 7 组工况(同种建筑布置、不同场地记为一组工况),如表 3-3 所示。

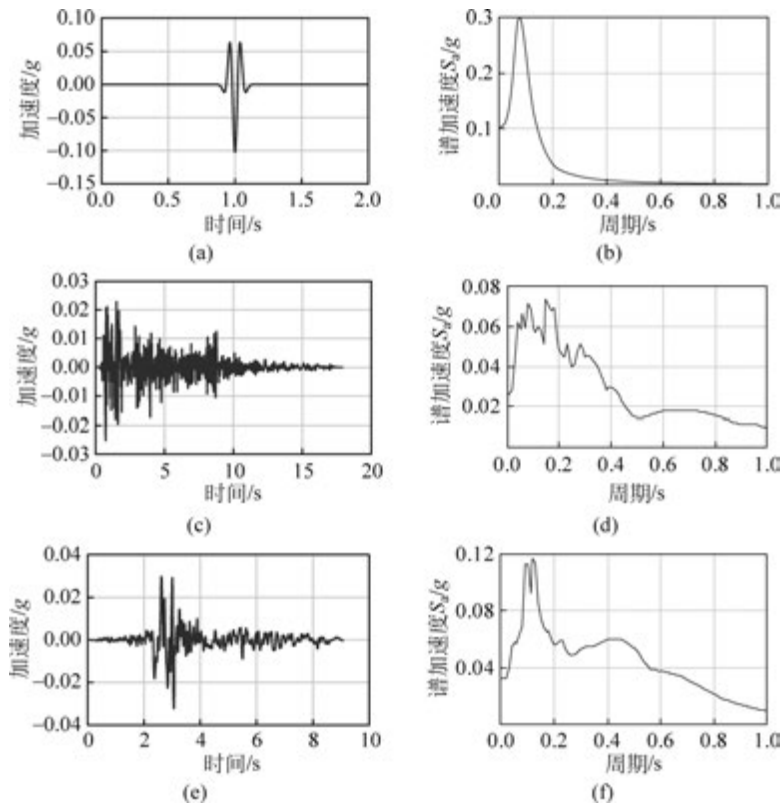


图 3-4 地震动输入时程与反应谱

(a) EQ<sub>2</sub> 加速度时程; (b) EQ<sub>2</sub> 反应谱; (c) EQ<sub>3</sub> 加速度时程;  
(d) EQ<sub>3</sub> 反应谱; (e) EQ<sub>4</sub> 加速度时程; (f) EQ<sub>4</sub> 反应谱

表 3-3 振动台试验工况

编 号	场 地 模 型	建 筑 模 型	建 筑 布 局	地 震 动 输 入
F[H]-C <sub>0</sub>	场地 F: 平坦场地 [场地 H: 局部突出地形]	无	无	EQ <sub>1</sub> ~ EQ <sub>4</sub>
F[H]-B <sub>1</sub> -C <sub>1</sub>		B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	
F[H]-B <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>		B <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	
F[H]-B <sub>2</sub> -C <sub>1</sub>		B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	
F[H]-B <sub>2</sub> -C <sub>2</sub>		B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	
F[H]-B <sub>3</sub> -C <sub>1</sub>		B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	
F[H]-B <sub>3</sub> -C <sub>2</sub>		B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	

### 3.2.5 数据采集

由于本试验中的试件尺寸小、质量轻,因此需要数据采集装置的质量很小以最大限度地降低数据采集装置对试件本身动力行为的影响。本试验选用三轴 ADXL335 加速度传感器(3-axis ADXL335 micro electro mechanical systems)(Bhattacharya et al., 2012)进行试验试件的加速度数据采集。该加速度计尺寸小、质量轻,对本试验轻质量试件影响很小。其量程至少可以达到 $\pm 3g$ ,满足试验需求。ADXL335 加速度计灵敏度典型值为 $300 \text{ mV}/g$ ,在试验中,为了更加准确地对该加速度计采集的数据进行修正,采用2个经过专业标定的加速度计(灵敏度分别为 $0.3043 \text{ V} \times \text{s}^2/\text{m}$ 和 $0.3034 \text{ V} \times \text{s}^2/\text{m}$ )同时进行测量。加速度计具体布置如图 3-5 所示。

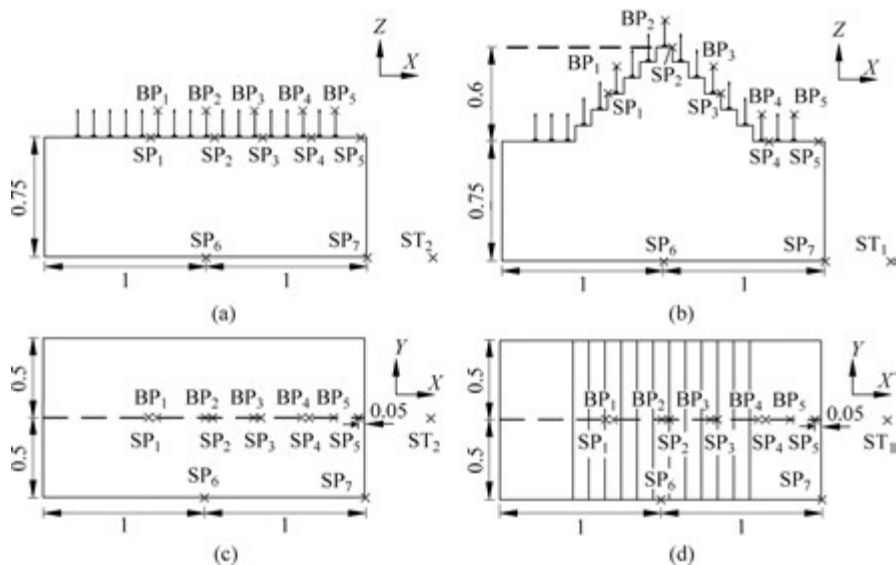


图 3-5 加速度传感器布置示意图(单位: m)

- (a) 场地 F 的加速度传感器布置(X-Z 平面); (b) 场地 H 的加速度传感器布置(X-Z 平面);  
(c) 场地 F 的加速度传感器布置(X-Y 平面); (d) 场地 H 的加速度传感器布置(X-Y 平面)

图中,BP 表示安装在建筑顶端的加速度计编号;SP 表示安装在场地模型上的加速度计编号;ST 表示已经过专业标定的加速度计(粘贴于加载底座上)。由于该类型传感器较少出现在土木工程试验中,因而为了更好地完成试验,本章对其连接方式进行了研究。最终确定传感器连接方案如图 3-6 所示。

首先,加速度传感器模块具有 5 个接口,分别为 VCC(电源输入)、X-OUT(X 轴输出)、Y-OUT(Y 轴输出)、Z-OUT(Z 轴输出)、GND(电源地)。通过端子将这些接口与五芯屏蔽线连接;屏蔽线另一端分别连接电源与数据采集设备。需要注意的是,为了避免工频干扰,电源应直接选用直流电源(如电池等)供电,而避免采用交流转直流的方式。本次试验中数据采集设备由北京东方振动和噪声技术研究所提供。

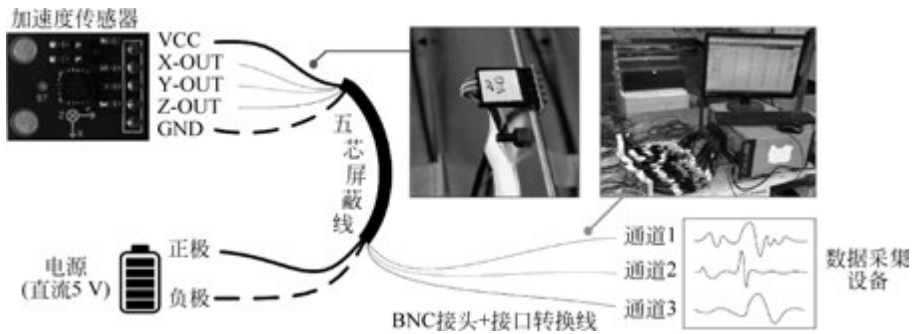


图 3-6 传感器连接方案示意图

本次试验加载装置采用中国地震局工程力学研究所地震模拟振动台,其尺寸为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ ,配备 8 个作动器,可以同时进行 2 个场地模型的试验加载,安装后的试验模型如图 3-7 所示。

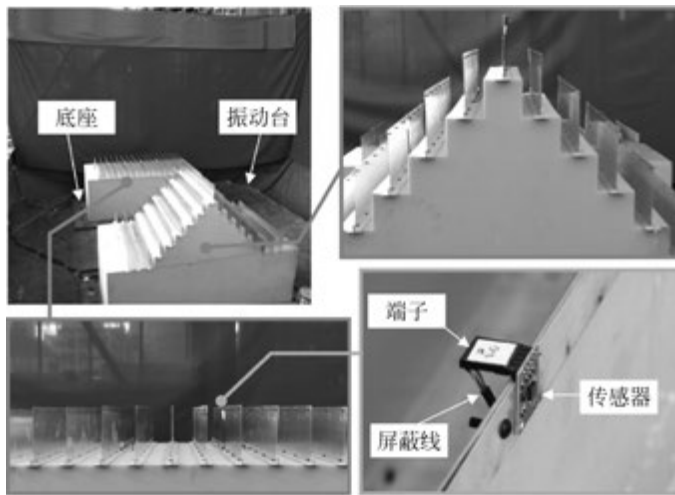


图 3-7 试验模型

### 3.3 考虑地形的“场地-城市效应”振动台试验结果

#### 3.3.1 自由场地工况结果

图 3-8 给出了自由场地工况下,2 种场地表面各点运动时程。

从图中可以发现,由于场地平整,场地 F 表面各点运动基本一致;而对具有突出地形的场地 H,其山顶处( $SP_2$ )的加速度被明显放大,越接近山脚放大效应越小。输入同一条地震波,场地 H 山顶的响应普遍大于场地 F 表面的响应,而场地 H 山腰处( $SP_1$  和

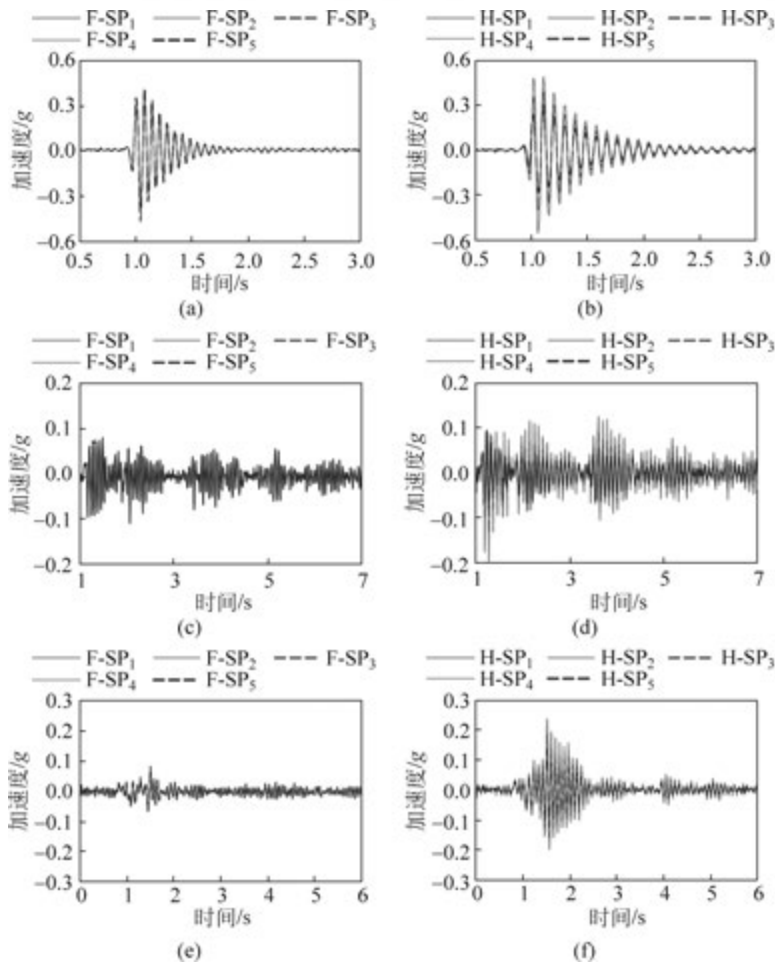


图 3-8 自由场地工况下场地表面各点运动时程

- (a) 场地 F 表面在  $EQ_2$  下响应；(b) 场地 H 表面在  $EQ_2$  下响应；(c) 场地 F 表面在  $EQ_3$  下响应；  
(d) 场地 H 表面在  $EQ_3$  下响应；(e) 场地 F 表面在  $EQ_4$  下响应；(f) 场地 H 表面在  $EQ_4$  下响应

$SP_3$ ) 的响应则与场地 F 表面响应接近, 山脚处 ( $SP_4$  和  $SP_5$ ) 的响应则一般略小于场地 F 表面响应。特殊地, 在  $EQ_4$  下, 场地 F 的响应很小, 这主要与  $EQ_4$  自身反应谱的特性有关, 如图 3-4(f) 反应谱所示, 在场地 F 的自振周期处,  $EQ_4$  反应谱较小, 因此响应也小; 在场地 H 的自振周期处,  $EQ_4$  的反应谱较大, 因此响应明显较大。

图 3-9 给出了自由场地工况下, 场地 F 表面中心运动 ( $F-SP_2$ )、场地 H 山顶 ( $H-SP_2$ )、山腰 ( $H-SP_3$ ) 以及山脚 ( $H-SP_4$ ) 处表面运动相对于

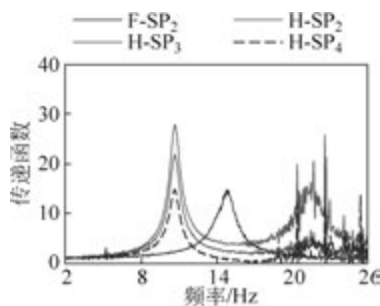


图 3-9 自由场地工况下场地表面相对于底部的传递函数

底部输入的传递函数。可以发现,场地 F 的运动主要体现出一个基本模态,其对应频率为 14.8 Hz,采用半功率点法获得阻尼比约为 3.9%;而模型 H 由于存在突出地形,会在各个地震动激励下表现出 2 种基本模态,其对应的频率分别为 10.7 Hz 和 21.8 Hz,阻尼比分别约为 3.4%和 3.8%。

从传递函数的结果可以看出,由于地形的存在,符合基本频率成分的波在山顶处放大效应更为明显,在山腰处放大效应其次,在山脚处放大效应与平整场地效果类似,只不过场地 H 山脚处传递函数的峰值频率比场地 F 的峰值频率更低。由于这样的地形效应,一些建筑抗震设计规范对突出地形上建筑的地震荷载均有特殊的放大需求。例如,中国的《建筑抗震设计规范》(GB/T 50011—2010)(2024 年版)将建筑场地分为 4 类(有利地段、一般地段、不利地段、危险地段),其中“高耸孤立的丘”被认为属于“不利地段”,需要对水平地震作用乘以 1.1~1.6 的增大系数。由此可见,地形本身对建筑输入的影响比较大。

### 3.3.2 非自由场地工况结果

图 3-10 和图 3-11 分别给出了 F[H]-B<sub>1</sub>-C<sub>1</sub> 和 F[H]-B<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> 工况下,2 种场地表面各点运动时程。图 3-12 和图 3-13 分别给出了 F[H]-B<sub>1</sub>-C<sub>1</sub> 和 F[H]-B<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> 工况下,2 种场地表面建筑顶点运动时程。由于篇幅所限,本节仅给出部分结果。

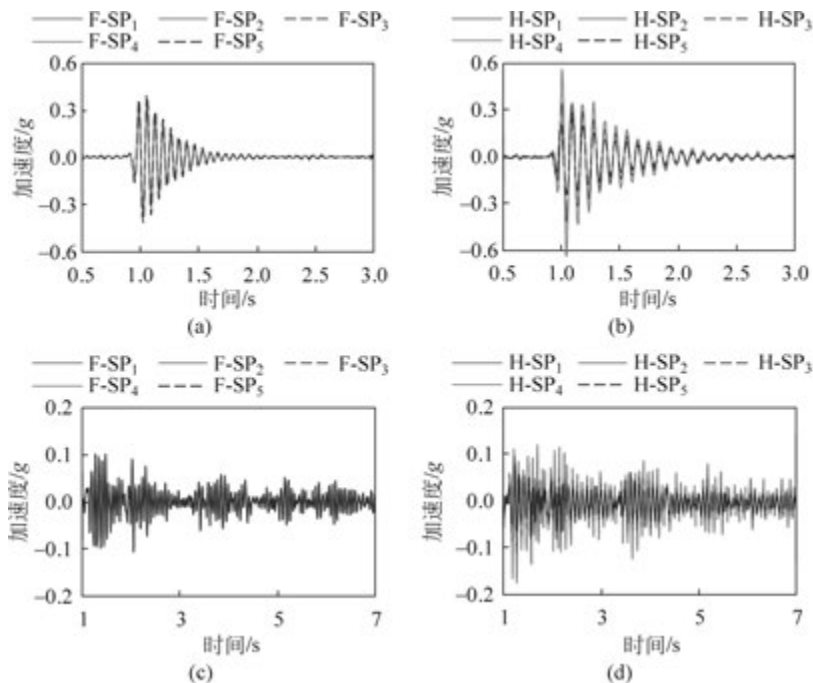


图 3-10 F[H]-B<sub>1</sub>-C<sub>1</sub> 工况下场地表面各点运动时程

- (a) EQ<sub>2</sub> 下场地 F 表面响应; (b) EQ<sub>2</sub> 下场地 H 表面响应; (c) EQ<sub>3</sub> 下场地 F 表面响应;  
(d) EQ<sub>3</sub> 下场地 H 表面响应; (e) EQ<sub>4</sub> 下场地 F 表面响应; (f) EQ<sub>4</sub> 下场地 H 表面响应

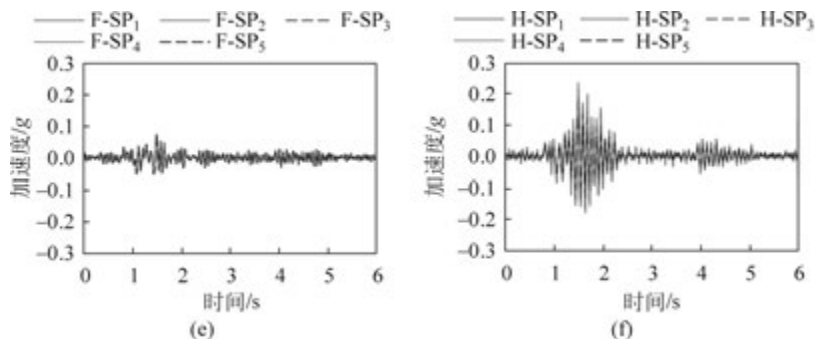


图 3-10 (续图)

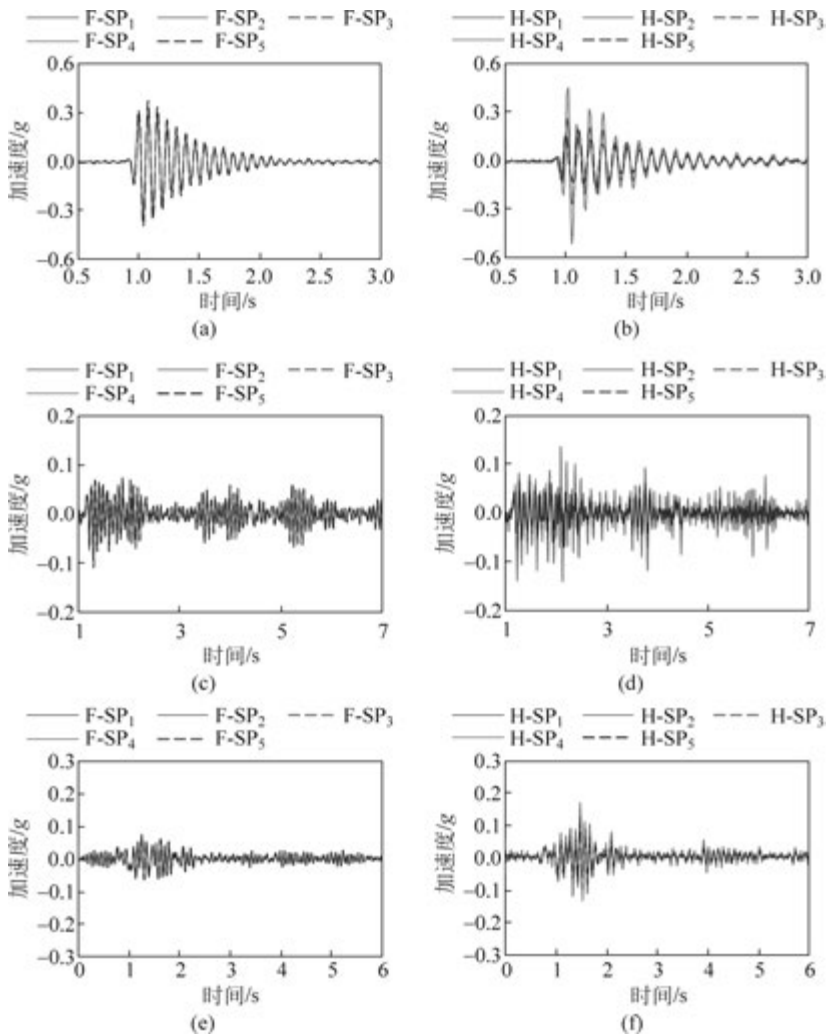


图 3-11 F[H]-B<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> 工况下场地表面各点运动时程

- (a) EQ<sub>2</sub> 下场地 F 表面响应; (b) EQ<sub>2</sub> 下场地 H 表面响应; (c) EQ<sub>3</sub> 下场地 F 表面响应;
- (d) EQ<sub>3</sub> 下场地 H 表面响应; (e) EQ<sub>4</sub> 下场地 F 表面响应; (f) EQ<sub>4</sub> 下场地 H 表面响应

