

基于单振动台考虑行波效应的试验方法研究*

王国波¹, 施龙飞¹, 郝鹏飞², 禹海涛³, 孙富学¹

(1.温州大学建筑工程学院 温州,325000) (2.中南建筑设计院股份有限公司 武汉,430070)

(3.同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 上海,200092)

摘要 提出一种利用常规单振动台考虑行波效应的试验方法。为了验证该试验方法的可行性,首先,将模型箱简化为通过弹簧、阻尼器连接的主动块和从动块,理论推导两质量块模型和三质量块模型的弹簧、阻尼参数的计算公式,并通过数值案例验证公式的准确性;其次,设计并实施两质量块和三质量块模型的小型单向振动台试验。试验结果表明,在简谐荷载激励下从动块加速度响应主频和时滞与目标值非常接近,表明通过弹簧阻尼器来实现行波效应的方法具有一定的可行性。该研究结果可为考虑行波效应的非一致振动试验提供参考。

关键词 振动台试验;行波效应;地震响应;时滞;质量-弹簧-阻尼模型
中图分类号 TU317⁺.1; TH69

引言

对于地下结构振动台试验,目前多为一致地震动输入^[1-4]。在地下结构尺寸较小时,采用一致性地震动输入是可行的,但当地下结构长度超过一定的长度时,地震动非一致特性就会对其产生影响。例如,长隧道结构其纵向尺度远大于横向尺度,地震波到达隧道纵向不同位置处的时间存在差异,即行波效应^[5]。Yuan等^[6]通过对超长沉管隧道的研究,发现非一致激励对隧道纵向响应的放大十分显著。因此,通过振动台试验对非一致激励下地下结构地震响应的研究是必要的。受振动台试验设备条件、试验规模、试验成本等制约,非一致地震动输入下的地下结构振动台试验研究难以广泛开展。文献[7-8]利用多台阵振动台试验的连续体模型箱,分析了埋地管道的非一致地震响应。Chen等^[9]开展了综合管廊在非一致地震激励下的振动台试验研究。谷音等^[10]通过非一致地震动激励下地铁车站模型的振动台试验,得到了地铁车站结构的动力反应规律。文献[11-12]用4个主动箱和8个随动箱组成的长达40m的模型箱进行多点振动台试验,系统地获得了超长沉管隧道在非一致地震激励下的动力响应规律。程麦理等^[13]为利用单振动台实现大跨度空间结构多维多点激励的振动台试验,拓展了地震模拟振动台的应用。笔者借鉴该思路,初步设计了一种用单振动台实现行波效应的方法,并验证其可行性。

1 理论推导及数值验证

模型箱由若干矩形层状框架从模型箱底板自下而上叠合而成,除底层框架固接在模型箱底板上外,其他层状框架之间设置滚珠或轴承。其中:将模型箱底板均分为独立的几块板,把其中一端底板与振动台通过工字钢固接,称为主动板;其他与振动台通过工字钢和滚轮实现滑动连接的板称为从动板。

试验时地震波由振动台传递至模型箱主动板,再由主动板通过弹簧阻尼器带动从动板运动。通过调节弹簧和阻尼器的取值,实现对从动板地震响应幅值、主频和时滞的调整,从而使从动板地震响应实现预期的行波效应,地震动再经由模型箱底板传递至土体及地下结构,得到地下结构在考虑行波效应时的地震响应。

笔者分别将底板分为两块及三块的情况简化为两质量模型及三质量模型进行理论推导及数值验证。

1.1 两质量模型

1.1.1 理论推导

将模型箱底板分割为通过弹簧阻尼器连接的主动板和从动板,两质量模型箱示意图如图1所示。

为了确定满足目标要求的弹簧、阻尼器取值,将模型箱底板简化为如图2所示的两质量分析模型。其中: m_1 为主动板; m_2 为从动板; m_1 与台面固接; m_2 与台面近似认为光滑接触; k, c 分别为主动板与从动

* 国家自然科学基金资助项目(51878529,52078386)

收稿日期:2020-04-22;修回日期:2020-07-23

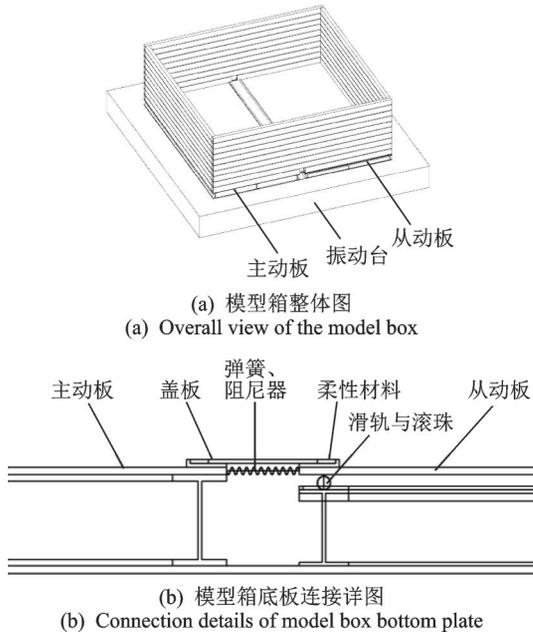


图 1 两质量模型箱示意图
Fig.1 Schematic diagram of two-mass model box

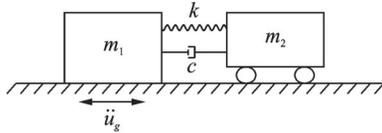


图 2 两质量分析模型
Fig.2 Two-mass analysis model

板之间的弹簧、阻尼器。设台面输入的地震波为 \ddot{u}_g , m_2 的绝对加速度响应为 \ddot{u}_2 , 则 m_2 相对 m_1 的相对加速度响应为 $\ddot{u}_2 - \ddot{u}_g$ 。对于 m_1 , 由于其固定在台面, 可以认为 $\ddot{u}_1 = \ddot{u}_g$ 。对于 m_2 , 列水平向平衡方程为

$$m_2 \ddot{u}_2 + c(\dot{u}_2 - \dot{u}_g) + k(u_2 - u_g) = 0 \quad (1)$$

设台面输入荷载 $u_g = A \sin \theta t$, 其中, θ 为荷载圆频率。 m_2 的目标加速度响应幅值、主频应与 m_1 一致, 时程滞后为 Δt , 则 m_2 目标绝对位移响应 $u_2 = A \sin[\theta(t - \Delta t)] = A \sin(\theta t - \alpha)$, 其中, $\alpha = \theta \Delta t$ 。即

$$m_1: \begin{cases} u_g = A \sin \theta t \\ \dot{u}_g = A \theta \cos \theta t \\ \ddot{u}_g = -A \theta^2 \sin \theta t \end{cases} \quad (2)$$

$$m_2: \begin{cases} u_2 = A \sin(\theta t - \alpha) \\ \dot{u}_2 = A \theta \cos(\theta t - \alpha) \\ \ddot{u}_2 = -A \theta^2 \sin(\theta t - \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $u_g, \dot{u}_g, \ddot{u}_g$ 分别为台面输入荷载的位移、速度及加速度响应; $u_2, \dot{u}_2, \ddot{u}_2$ 分别为质量块 m_2 的位移、速度及加速度响应; A 为输入荷载幅值; θ 为荷载圆频率; t 为时刻; α 为 m_2 与 m_1 动力响应的相位差。

数学推导可得 $k = m_2 \theta^2 / 2$, $c = m_2 \theta \sin \alpha / 2(1 - \cos \alpha)$ 。因此, 通过设定从动块的质量 m_2 , 荷载频率 θ 以及时间间隔 Δt , 便可确定 k, c 的值, 从动板动力响

应幅值、主频及时滞可以满足目标要求。

1.1.2 案例验证

利用 ABAQUS 建立简化的主动板、从动板, 有限元模型示意图如图 3 所示。将钢板分割为 $3 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ 的两块钢板, $m_1 = m_2 = 353.25 \text{ kg}$, 在 m_1 底部输入正弦加速度时程, 取荷载频率 $f = 10 \text{ Hz}$, $\theta = 2\pi f = 20\pi \text{ rad/s}$, $\Delta t = 0.005 \text{ s}$, $\alpha = \theta \Delta t = 0.1\pi$, 得到 $k = 6.97 \times 10^5 \text{ N/m}$, $c = 7.01 \times 10^4 \text{ (N}\cdot\text{s)/m}$ 。

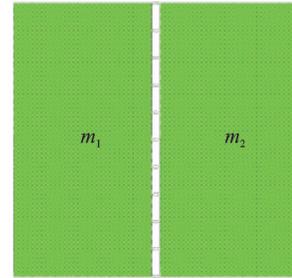


图 3 有限元模型示意图
Fig.3 Schematic diagram of the finite element model

依据 k, c 值得到如图 4 所示的 m_1, m_2 加速度时程及频谱曲线。可以发现: m_2 加速度峰值、主频与 m_1 一致, 满足目标要求; 时滞以第 4 个峰值为例, m_1 在 0.324 6 s 达到峰值 0.999 8 m/s^2 , m_2 在 0.330 0 s 达到峰值 0.997 8 m/s^2 , 峰值滞后约 0.005 4 s , 基本满足目标时滞 0.005 s 。

综上所述, 数值模拟结果与理论推导结果基本

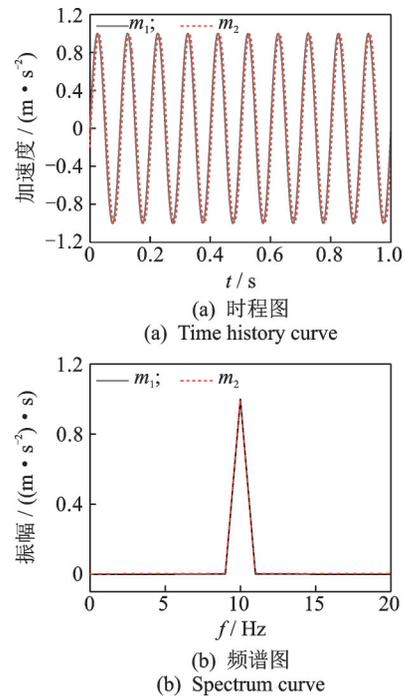


图 4 m_1, m_2 加速度时程及频谱曲线
Fig.4 Acceleration time history and spectrum curve of m_1 and m_2

一致,验证了理论推导的准确性。

1.2 三质量模型

1.2.1 理论推导

三质量模型箱示意图如图5所示。三质量分析模型如图6所示。其中: m_1 为主动板; m_2, m_3 为从动板; m_1 与台面固接; m_2, m_3 与台面近似认为光滑接触; k_1, c_1 和 k_2, c_2 分别为主动板与从动板和从动板与从动板之间的弹簧刚度、阻尼系数。

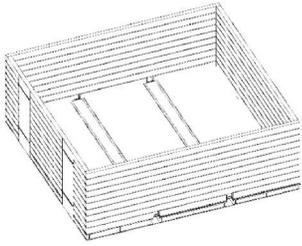


图5 三质量模型箱示意图

Fig.5 Schematic diagram of the three-mass model box

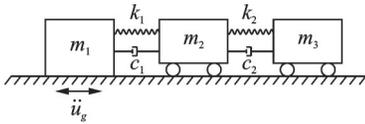


图6 三质量分析模型

Fig.6 Three-mass analysis model

设台面输入的地震波为 \ddot{u}_g , m_2 和 m_3 的绝对加速度响应为 \ddot{u}_2, \ddot{u}_3 ,则 m_2 相对 m_1 的相对加速度响应为 $\ddot{u}_2 - \ddot{u}_g$, m_3 相对 m_2 的相对加速度响应为 $\ddot{u}_3 - \ddot{u}_2$ 。

设台面输入荷载 $u_g = A \sin \theta t$,其中 θ 为荷载圆频率,则 m_2, m_3 的目标加速度响应幅值、主频应与 m_1 一致,相对于 m_1 时程滞后分别为 $\Delta t_1, \Delta t_2$,则 m_2 目标绝对位移响应 $u_2 = A \sin[\theta(t - \Delta t_1)] = A \sin(\theta t - \alpha_1)$,其中 $\alpha_1 = \theta \Delta t_1$ 。 m_3 同理。对于 m_1 ,由于其固定在台面,可以认为 $\dot{u}_1 = \dot{u}_g$ 。对 m_2 和 m_3 分别做水平向平衡方程,可得

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_1(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_1(u_2 - u_1) = c_2(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) + k_2(u_3 - u_2) \quad (4)$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + c_2(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) + k_2(u_3 - u_2) = 0 \quad (5)$$

其中: $u_3, \dot{u}_3, \ddot{u}_3$ 分别为质量块 m_3 的位移、速度和加速度响应; α_1 为 m_2 与 m_1 动力响应的相位差; α_2 为 m_3 与 m_1 动力响应的相位差。

数学推导可得

$$k_1 = \frac{m_2 \theta^2}{2} + \frac{m_3 \theta^2}{4(1 - \cos \alpha_1)} \left[2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{\cos(2\alpha_2 - \alpha_1) - (2 \cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{1 - \cos(\alpha_2 - \alpha_1)} \right] \quad (6)$$

$$c_1 = \frac{m_2 \theta \sin \alpha_1}{2(1 - \cos \alpha_1)} - \frac{m_3 \theta}{4(1 - \cos \alpha_1)} \left[2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{\sin(2\alpha_2 - \alpha_1) - (2 \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)}{1 - \cos(\alpha_2 - \alpha_1)} \right] \quad (7)$$

$$k_2 = m_3 \theta^2 / 2 \quad (8)$$

$$c_2 = \frac{m_3 \theta}{2} \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{1 - \cos(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (9)$$

因此,通过设定从动块的质量 m_2, m_3 ,荷载频率 θ 和时间间隔 Δt ,便可确定 k_1, c_1, k_2 和 c_2 的值,从动板动力响应幅值、主频及时滞可以满足目标要求。

1.2.2 案例验证

图7为有限元模型示意图。建立平面尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的质量块,质量块之间设置弹簧和阻尼器。设 $m_1 = m_2 = m_3 = 1000 \text{ kg}$,在 m_1 底部输入正弦加速度时程,取荷载频率 $f = 10 \text{ Hz}$, $\theta = 2\pi f = 20\pi \text{ rad/s}$,考虑 m_2 相对于 m_1, m_3 相对于 m_2 的时滞均为 0.005 s ,则 $\Delta t_1 = 0.005 \text{ s}$, $\alpha_1 = \theta \Delta t_1 = 0.1\pi$, $\Delta t_2 = 0.005 + 0.005 = 0.01 \text{ s}$, $\alpha_2 = \theta \Delta t_2 = 0.2\pi$,得到 $k_1 = 7.70 \times 10^6 \text{ N/m}$; $c_1 = 3.77 \times 10^5 \text{ (N}\cdot\text{s)/m}$; $k_2 = 1.97 \times 10^6 \text{ N/m}$; $c_2 = 1.98 \times 10^5 \text{ (N}\cdot\text{s)/m}$ 。

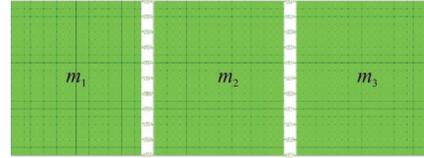
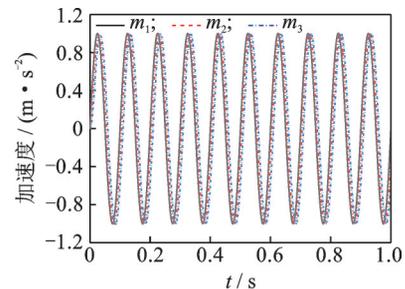


图7 有限元模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of the finite element model

依据 k_1, c_1, k_2, c_2 值,得到如图8所示的 m_1, m_2, m_3 加速度响应曲线。可发现: m_1, m_2, m_3 加速度响应峰值、主频基本一致,满足目标要求;时滞以第4个峰值为例, m_1 在 0.3248 s 达到峰值 1.0001 m/s^2 , m_2 在 0.3306 s 达到峰值 0.9992 m/s^2 , m_3 在 0.3350 s 达到峰值 1.0009 m/s^2 ,即 m_2 峰值滞后 m_1 约 0.0058 s , m_3 峰值滞后 m_2 约 0.0044 s ,均基本满足目标时滞 0.005 s 。数值模拟与理论推导结果基本一致。可见,两质量模型与三质量模型的数值结果与理论推导基本一致,验证了该理论推导方法的准确性。



(a) 时程图
(a) Time history curve

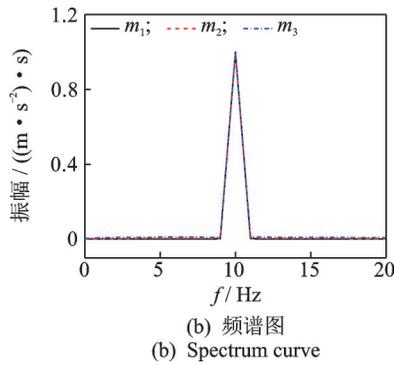


图 8 m_1, m_2, m_3 加速度时程及频谱曲线

Fig.8 Acceleration time history and spectrum curves of $m_1, m_2,$ and m_3

2 试验验证

2.1 试验方案设计

本试验在一小型单向振动台上进行,台面尺寸

为 $0.8\text{ m} \times 0.6\text{ m}$,最大荷载质量为 200 kg ,工作频率为正弦波 $0.01\sim 10\text{ Hz}$,振幅为 $\pm 150\text{ mm}$,加速度为 $\pm 0.5\text{ g}$ 。试验时将下底板固定于振动台面,上底板 2,3 通过滑轨结构与下底板实现滑动连接,滑轨之间设有凹槽及钢珠,上底板 1 通过垫板与下底板直接固定。上底板之间通过弹簧阻尼器进行连接,并在上底板上可放置不同质量的质量块。

考虑两块板之间目标时滞为 0.04 s ,每组钢板之间通过 2 个弹簧和 2 个阻尼器连接,单块上底板自重为 $0.08 \times 0.6 \times 0.01 \times 7\ 850 = 3.768\text{ kg}$,并在上底板放置 20 kg 质量块,共 23.768 kg 。两质量及三质量模型弹簧阻尼参数如表 1,2 所示。

根据表 1,2 计算结果布置相应的弹簧阻尼器,制作的模型及传感器布置如图 9,10 所示。在模型质量块顶部中心、振动台台面粘贴加速度传感器,质量块正面中心位置布置位移监测点,通过录制视频及图像识别技术可得到红色靶点位移时程。

表 1 两质量模型弹簧阻尼参数

Tab.1 Two-mass model spring damping calculation

荷载频率/Hz	m_2/kg	最大位移/m	荷载圆频率/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	时滞/s	相位/rad	$k/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
1.5	24	0.01	9.42	0.04	0.38	1 066	593
6	24	0.008	37.70	0.04	1.51	17 055	482

表 2 三质量模型弹簧阻尼参数

Tab.2 Three-mass model spring damping calculation

荷载频率/Hz	$(m_2, m_3)/\text{kg}$	最大位移/m	荷载圆频率/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	时滞/s	相位/rad	$k_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_1/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_2/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
1.5	24	0.01	9.42	0.04	0.38	4 114	1 102	1 066	593
6	24	0.008	37.70	0.04	1.51	36 251	60	17 055	482

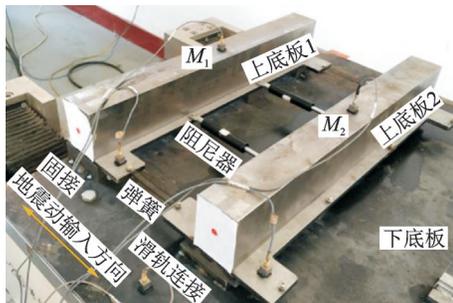


图 9 两质量模型结构

Fig.9 Two-mass model structure

考虑不同频率的正弦波及实际地震波的影响,两质量块模型试验工况如表 3 所示。三质量块也完全一样。

2.2 试验结果及分析

2.2.1 两质量模型

限于篇幅,这里仅给出 1.5 Hz 正弦波和 0.1 g E1

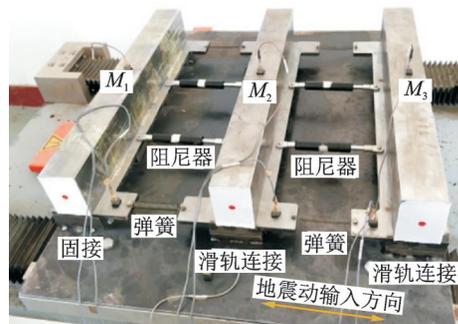


图 10 三质量模型结构

Fig.10 Three-mass model structure

波的试验结果。

图 11 为 1.5 Hz 正弦波作用下结构加速度时程及频谱图。可见:①从动块 M_2 的加速度时程曲线规律与主动块 M_1 的基本趋于一致,均与振动台输入的 1.5 Hz 正弦波波波形相似,而从幅值来看,主动块与台面一致,这是由于主动块固定在振动台底板上,符合

表 3 两质量块模型试验工况

Tab.3 Test conditions of two-mass model

序号	荷载	荷载	位移	加速度
		频率/Hz	幅值/mm	幅值/g
1	正弦波	1.5	10	—
2	正弦波	3	8	—
3	正弦波	5	8	—
4	正弦波	6	8	—
5	El-Centro 波	1.5	—	0.1
6	El-Centro 波	1.5	—	0.4
7	Kobe 波	1.5	—	0.1
8	Kobe 波	1.5	—	0.4

预期结果;②从主、从动块加速度幅值来看,从动块加速度响应幅值普遍大于主动块,以图 11(b)为例, M_2 在 10.905 s 的幅值比 M_1 在 10.865 s 的幅值放大约 14.6%,这是由于加速度幅值相对较小,导致幅值波动百分比较为明显,但绝对值上相差不大。从时滞来看, M_2 比 M_1 滞后约 0.04 s,与目标时滞 0.04 s 一致。从频谱来看,主、从动块的频率均与输入主频 1.5 Hz 相等,可以认为其频谱基本满足目标要求。整体而言,从动块加速度响应可以较好地满足目标波形的频率,整体上可达到试验预期。

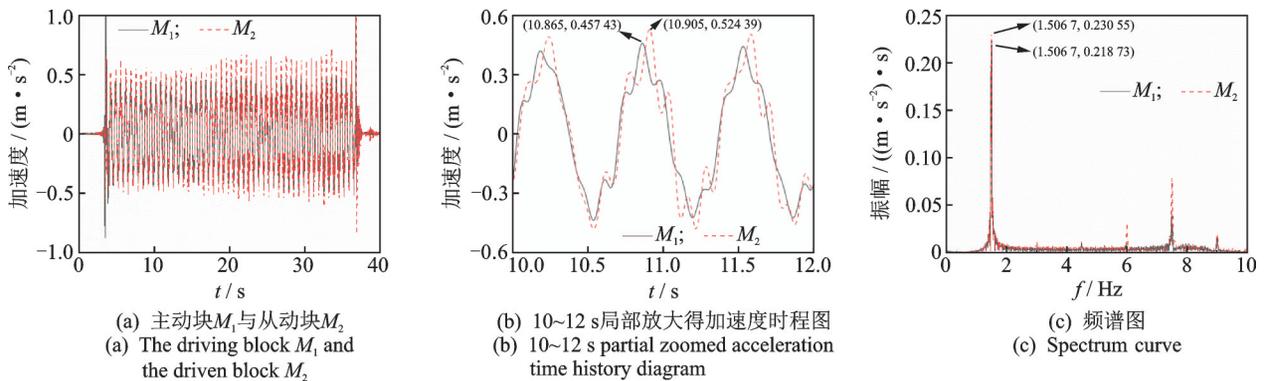


图 11 1.5 Hz 正弦波作用下结构加速度时程及频谱图

Fig.11 Time history and frequency spectrum of structural acceleration under 1.5 Hz sine wave

图 12 为两质量模型体系在 0.1g El-Centro 波作用下的结构加速度时程及频谱图。可见:主动块加速度时程与台面波基本一致,而从动块与主动块的加速度时程趋势相似,但有个别峰值差别较大。以图 12(b) 为例, M_2 在 4.39 s 的幅值相比 M_1 在 4.37 s 的幅值放大约 15%,从时滞来看, M_2 比 M_1 滞后约 0.02 s,表现出一定的时滞效果,但与目标值 0.04 s

仍有所差距。这是由于主动块的加速度响应中包含过多的高频成分,导致其波形相比从动块加速度响应存在诸多密集的细小波动,影响了峰值与时滞的读取,这在频谱图中也有所体现。 M_1 在 20~25 Hz 附近存在较多的高频成分,但从主频来看,主、从动块的主频分布基本一致,均在 1.46 Hz 附近,与 El-Centro 波主频一致。

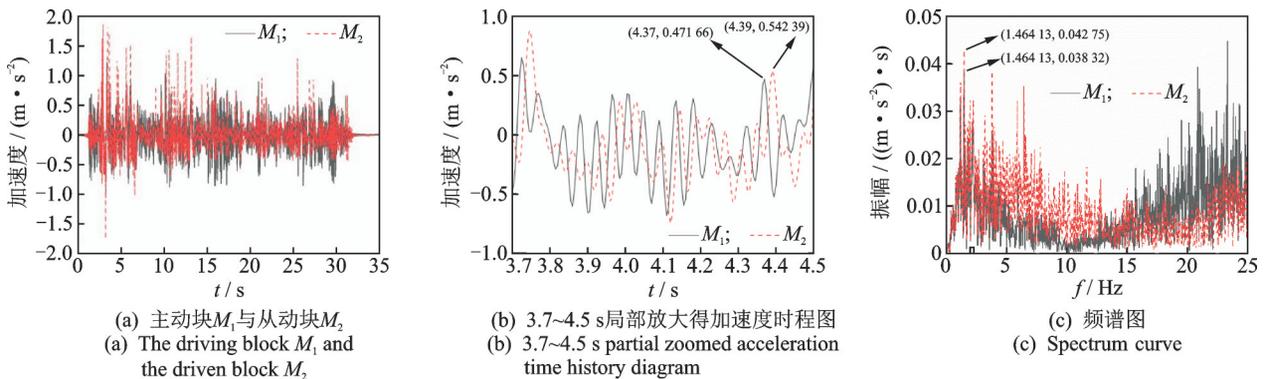


图 12 0.1g El-Centro 波作用结构加速度时程及频谱图

Fig.12 Time history and frequency spectrum of structural acceleration under 0.1g El-Centro wave

由此可见,从动块 M_2 地震响应的主频基本可以满足目标要求,但其峰值及时滞与目标值在某些时段存在差异,这是由于地震波中包含有多种频率成

分的波,而试验时采用的弹簧、阻尼器参数的确定是依据频率固定的正弦波计算得到,其在地震波作用下的自适应性较弱,从而导致从动块峰值与时滞相

对误差较大,这也是目前方法的不足所在。

2.2.2 三质量模型

限于篇幅,笔者仅给出 3 Hz 正弦波和 0.1g El 波的试验结果。

三质量模型体系在 3 Hz 正弦波作用下的结构加速度时程及频谱如图 13 所示。可见:从动块 M_2 , M_3 的加速度响应规律与主动块 M_1 大体相似,但其加速度幅值存在一定的波动。以图 13(b) 为例,相对于 M_1 在 10.22 s 的加速度幅值 1.50 m/s^2 , M_2 放大了 20%, M_3 缩小了 13%。从时滞来看, M_2 相比 M_1 滞后 0.06 s, M_3 相比 M_2 滞后 0.06 s, 与目标时滞 0.04 s 相对误差为 50%, 其主要原因在于试验过程中,结构时滞变化受较多因素的影响,如阻尼器的响应速度、滑轨结构等的摩擦以及试验数据采集精度等,可能导致实际时滞与目标时滞有一定的偏差。由于时滞本身很小(量级为 10^{-2} s),即使时滞绝对值误差较小,折算出的相对误差也较大。另一方面,

2 个从动块响应表现出相同的相对时滞,满足预期要求。从频谱来看,主、从动块的频率分布基本一致,且主频均在 3 Hz 附近,与输入波相同。可见,三质量模型的从动块在 3 Hz 正弦波作用下的动力响应主频可基本满足要求,且 M_2, M_3 均呈现出一定的时滞效应,可基本达到预期试验效果。

三质量模型体系在 0.1g El-Centro 波作用下的结构加速度时程及频谱如图 14 所示。可见:从动块与主动块的加速度时程趋势相似,但峰值有所不同。以图 14(b) 为例,相对于 M_1 在 3.06 s 的加速度幅值 1.36 m/s^2 , M_2 缩小了 7.9%, M_3 放大了 16.5%, 从时滞来看, M_2 比 M_1 滞后约 0.02 s, 与目标时滞 0.04 s 相差 50%, M_3 比 M_2 滞后约 0.035 s, 与目标时滞相差 12.5%。从主频来看,主、从动块的主频分布基本一致,均在 1.46 Hz 附近,与 El-Centro 波主频接近。可见,从动块在地震波作用下的动力响应主频可基本满足要求,且从动块表现出一定的时滞效果。

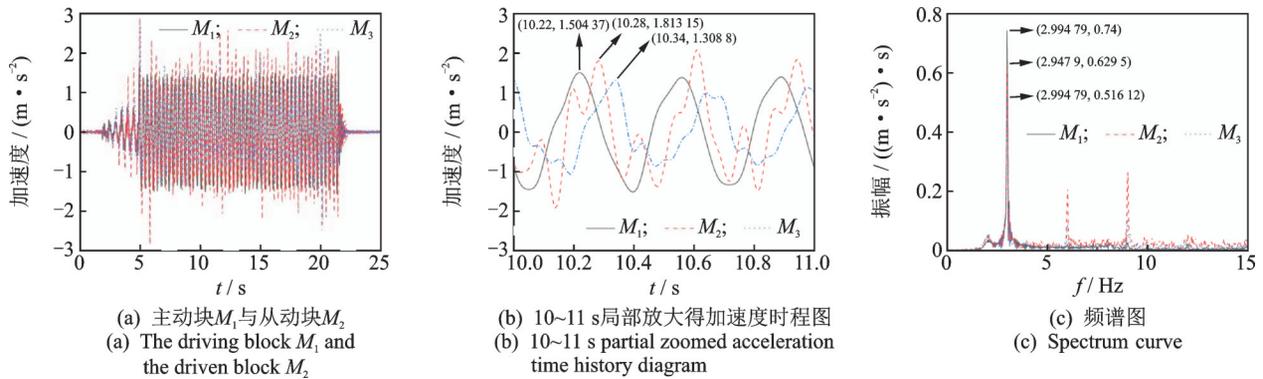


图 13 3 Hz 正弦波作用下结构加速度时程及频谱图

Fig.13 Time history and frequency spectrum of structure acceleration under 3 Hz sine wave

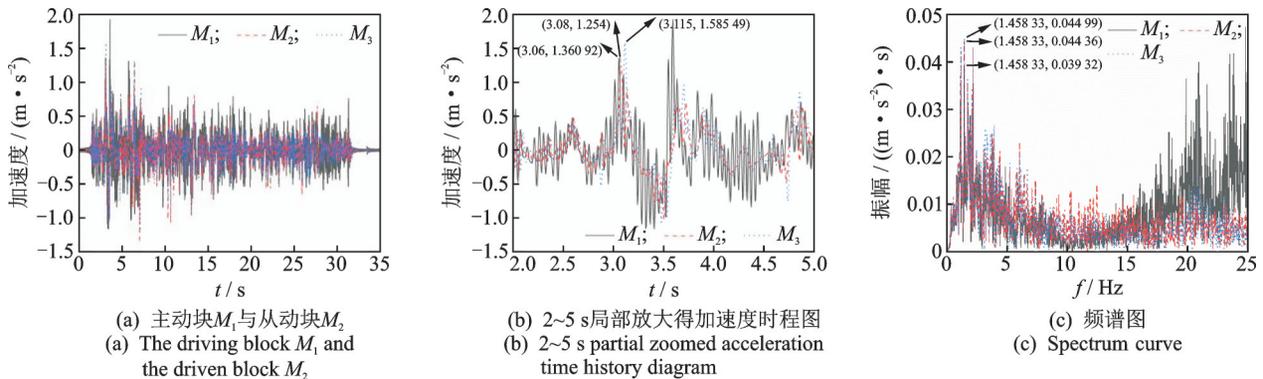


图 14 0.1g El-Centro 波作用结构加速度时程及频谱图

Fig.14 Time history and frequency spectrum of structural acceleration under 0.1g El-Centro wave

3 结论

1) 理论推导方面:可以确定一组主动板与从动板之间的弹簧、阻尼器参数,使从动板动力响应幅

值、主频以及时滞满足目标要求,从而实现地震动的行波输入,且通过数值模型验证了公式的准确性。

2) 模型试验方面:①在正弦荷载作用下,从动块的加速度响应规律与主动块大体相似,其动力响

应的主频与目标值较为接近,试验能取得较好的效果;②对于实际地震动,由于弹簧刚度和阻尼系数的推导和确定是基于单一频率的正弦波,而实际地震动包含太多的频率成分以及峰值点,从动块体在振动时适应慢且分析困难,导致其峰值和时滞与目标值之间的误差存在一定的波动性,使得该方法对实际地震动的适用性有所折扣。

3)综合来看,通过弹簧阻尼器实现行波效应的方案具有一定的可行性,利用正弦波进行机理分析是可行的。对于实际地震动而言,虽然效果没正弦波那么理想,但也可在条件有限时做一些有益的尝试。

参 考 文 献

- [1] CHEN S, TANG B Z, ZHAO K, et al. Seismic response of irregular underground structures under adverse soil conditions using shaking table tests[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 95: 103145.
- [2] TAO L J, DING P, SHI C, et al. Shaking table test on seismic response characteristics of prefabricated subway station structure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 102994.
- [3] WANG G B, YUAN M Z, MIAO Y, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 76: 145-159.
- [4] 庄海洋,付继赛,陈苏,等.微倾斜场地中地铁地下结构周围地基液化与变形特性振动台模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(4): 1263-1272.
ZHUANG Haiyang, FU Jisai, CHEN Su, et al. Liquefaction and deformation of the soft foundation around a subway underground structure with a slight inclined ground surface by the shaking table test[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2019, 40(4): 1263-1272. (in Chinese)
- [5] 禹海涛,袁勇.长大隧道地震响应分析与试验方法新进展[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(10): 19-35.
YU Haitao, YUAN Yong. Review on seismic response analysis and test methods for long and large tunnels[J]. *Journal of China Highway and Transport*, 2018, 31(10): 19-35. (in Chinese)
- [6] YUAN Y, YU H T, LI C, et al. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings-Part I: theory and validation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 108: 177-186.
- [7] 孟海,陈隽,李杰,等.地下管线-土非一致激励振动台试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, 4(5): 852-859.
- MENG Hai, CHEN Jun, LI Jie, et al. Shaking table test of soil-pipe dynamic interaction under non-uniform earthquake wave excitation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(5): 852-859. (in Chinese)
- [8] 韩俊艳,杜修力,李立云.土工振动台试验连续体模型箱的适用性研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(2): 200-208.
HAN Junyan, DU Xiuli, LI Liyun. Study on applicability of continuum model box used in shaking table test[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33(2): 200-208. (in Chinese)
- [9] CHEN J, SHI X J, LI J. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform earthquake wave excitation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(11): 1400-1416.
- [10] 谷音,谌凯,吴怀强,等.考虑地震动空间非一致性的地铁车站结构振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(17): 255-261.
GU Yin, CHEN Kai, WU Huaqiang, et al. Shaking table tests for a subway station structure under spatially non-uniform ground motion[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(17): 255-261. (in Chinese)
- [11] YAN X, YUAN J Y, YU H T, et al. Multi-point shaking table test design for long tunnels under non-uniform seismic loading[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 59: 114-126.
- [12] YU H T, YUAN Y, XU G P, et al. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings-part II: application to the HZM immersed tunnel[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 108: 187-195.
- [13] 程麦理,李青宁,吴多,等.地震模拟振动台多向扩展系统[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(8): 73-77.
CHENG Maili, LI Qingning, WU Duo, et al. Seismic simulation shaking table multidirectional expansion system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(8): 73-77. (in Chinese)



第一作者简介:王国波,男,1979年6月生,博士、教授。主要研究方向为工程结构的抗震分析。

E-mail: 20190337@wzu.edu.cn

通信作者简介:孙富学,男,1974年10月生,博士、副教授。主要研究方向为地下工程。

E-mail: sunfuxue@163.com