

土-结构动力相互作用的振动台试验研究综述¹

李振宝 李晓亮 唐贞云 纪金豹

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要 本文从土-结构动力相互作用振动台试验过程中所涉及的结构模型动力相似设计、模型土体的模拟及土体边界条件的模拟三个方面, 回顾了近几年来土-结构动力相互作用振动台试验研究的发展历程与现状, 重点描述了试验过程中为了更好地反映震动条件下土与结构动力相互作用的机理, 学者们所采取的办法和措施。并在此基础上, 介绍了一种新的研究土-结构动力相互作用的振动台试验技术。最后, 总结了传统的土箱-振动台试验存在的不足, 并与这种新的试验技术进行了对比, 提出了对于这种新的试验方法仍需要进一步研究和解决的问题。

关键词: 土-结构动力相互作用 振动台试验 实时子结构试验 综述

引言

上个世纪 90 年代, 在土-结构动力相互作用的理论分析和计算方法方面的研究已经有了不少成果。可以说此时关于土-结构动力相互作用的理论研究是一个“百花齐放, 百家争鸣”的时期。但是, 由于所研究问题的复杂性和不确定性, 各个国家的学者研究出来的计算方法和计算模型, 以及对模型参数的选取等各不相同, 有的甚至差异很大, 而且各种方法和模型都有或多或少的假定, 所以研究成果很难发挥其在实际工程中的指导应用价值。因此, 为了验证土-结构动力相互作用理论研究的成果, 证明理论研究成果的可靠性, 国内外进行了一系列土-结构动力相互作用的试验研究。

土-结构动力相互作用的试验研究主要包括: 室外现场试验和大比例模型试验、室内离心机试验和振动台试验。现场试验需要消耗大量的人力、物力、财力, 试验成本高, 试验周期长; 室外大比例模型试验只能用简单的激振方式进行试验。而离心机试验通过增加模型的场加速度, 可以模拟出与原型相等或相近的应力水平, 很好地再现了原型的物理特性, 对于液化场地的模拟有其独特的优越性。但是, 离心机设备价格昂贵, 只能进行较小比例模型的一维试验, 而且, 试验中存在由于坐标系之间的转换而产生的科里奥利效应, 使得试验结果存在

1 基金项目 国家自然科学基金重大研究计划 (90715010); 北京工业大学研究生科技基金资助课题 (ykj-2010-4715)

[收稿日期] 2010-05-29

[作者简介] 李振宝, 男, 生于 1962 年。教授, 博士生导师。主要从事结构与工程抗震研究。

E-mail: lizb@bjut.edu.cn

明显误差。振动台试验以其自身的优势越来越受到学者的青睐,国内外已开展了大量的振动台试验用以土-结构动力相互作用的分析与研究。振动台试验不仅试验成本较低,试验周期短,而且可以很好地再现地震过程和各种人工地震波。同时,随着振动台控制技术及其台阵技术的发展,进行二维、三维甚至多维多点的地震模拟试验也将会成为现实。

常规的纯上部结构的振动台模型试验,模拟的是结构与地基土刚性连接这一边界条件,这是一种在刚性地基假定条件下进行研究的试验方法。而土-结构动力相互作用振动台模型试验,将结构模型置于近似天然的场地土之中,来研究地震作用下结构与地基土之间的相互作用和在此边界条件下结构的动力响应。较之前者,这是一种更接近于结构实际边界条件的试验方法。本文就近些年国内外所进行的土-结构动力相互作用振动台试验研究现状所能搜集的资料,对试验过程中的模型相似设计、模型土体的模拟及土体边界条件的模拟三个公认的关键步骤,也是试验难点进行了分析。并介绍了研究土-结构动力相互作用振动台试验的新进展,之后,对这种新的试验方法在今后发展中仍需研究和解决的问题提出了自己的看法。

1 试验模型动力相似律

由于进行振动台动力试验受到台面尺寸和振动台承载力的限制,所以试验设计时必须满足模型缩尺的动力相似条件。但实际上如果完全让所有的模型参数都同时满足相似条件是一件相当困难的事情。

定义 λ 为原型与模型之间物理量的相似比,并以长度 l 、密度 ρ 和弹性模量 E 为基本未知量。根据量纲分析理论可以得到各量(应力 σ 、长度 l 、弹性模量 E 、密度 ρ 、时间 t 、位移 u 、速度 v 、加速度 a 、重力加速度 g 、圆频率 ω) 相似比必须满足的条件:

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_E, \quad \lambda_{t}^2 = \lambda_l^2 \lambda_E^{-1} \lambda_{\rho}, \quad \lambda_u = \lambda_l, \quad \lambda_v = \lambda_E \lambda_l^{-1} \lambda_{\rho}, \quad \lambda_a = \lambda_E \lambda_l^{-1} \lambda_{\rho} \lambda_t^{-1} = \lambda_l \lambda_t^{-2} = \lambda_g, \\ \lambda_{\omega}^2 = \lambda_E \lambda_l^{-1} \lambda_{\rho} \lambda_t^{-2}$$

式中, λ_l 、 λ_{ρ} 、 λ_E 分别为几何比尺、质量密度比尺、弹性模型比尺; λ_{σ} 、 λ_t 、 λ_u 、 λ_v 、 λ_a 、 λ_g 、 λ_{ω} 分别为应力比尺、时间比尺、变形比尺、速度比尺、加速度比尺、重力加速度比尺、圆频率比尺。

实际设计时满足上式中所有的相似关系是非常困难的。所以,试验设计时人们往往根据试验的目的采取“抓主要因素”的方法考虑主要参数的相似性。根据结构动力特性,弹性振动响应与破坏形态等不同的试验目的,林皋等(2000)、迟世春等(2004)将结构动力模型试验的相似换算关系,归纳为弹性力相似、重力相似和弹性-重力相似3种情况。

1.1 弹性力相似律

弹性力相似律的实质就是在模型设计中不考虑重力加速度的相似条件,它适合应用于研究结构的自振特性,在相似率上只要求原模型结构的惯性力和弹性恢复力相似,即弹性力相似只需满足: $\lambda_{t}^2 = \lambda_l^2 \lambda_E^{-1} \lambda_{\rho}$ 即可。考虑弹性相似律的试验大多研究的是结构的动力特性及动力反应,检验结构设计是否安全合理,对于模型材料的强度和屈服点等指标无严格相似的要求,模型材料也不必与原型结构的材料完全相似,而只要模型材料在试验过程中完全弹性,大多试验选用有机玻璃、聚丙烯树脂等作为模型材料。国内学者鲍华等(2005)根据弹性相似律,采用有机玻璃和聚丙烯树脂为模型材料制作了一个缩尺比例为 1/50 的 19 层框-筒结构模型,通过软土-桩-结构相互作用体系和刚性地基上建筑结构 2 个振动台模型对比试验,分析探讨了软土-桩-结构动力相互作用的机理,以及相互作用对结构的动力特性和地震反应

的影响; 郑少河等(2007)以1995年日本阪神大地震中遭受严重破坏的神户大开地铁车站为模型对象, 采用盐化塑料制成的模型进行了一系列振动试验, 剖析了地震时地铁车站的动态响应及破坏机理; 尚守平等(2006a)利用有机玻璃模型, 通过振动台试验研究了软土-铰接桩体系的隔震性能。国外学者 Motamed 等(2010)采用聚碳酸酯材料制作的 3×3 群桩模型, 进行了模拟码头附近液化场地条件下的群桩振动台试验; Loebach 等(2006)采用有机玻璃板和钢柱组合而制成的双塔楼高层建筑结构模型, 进行了刚性地基和考虑土-结构动力相互作用的振动台对比试验。

1.2 重力相似律

重力相似律要求模型设计中保持原型与模型之间惯性力与重力的比值相等, 放弃了弹性恢复力相似的要求, 即需满足 $\lambda_g = \lambda_E \lambda^{-1} \rho \lambda^{-1} l = \lambda_l \lambda^{-2} l = 1$, 它适合于研究结构的破坏形态。韦晓等(2002)设计实现了在用砂土模拟均匀土层的模型箱中针对单柱桩墩、单柱墩 2×2 桩基、双柱墩 2×2 桩基以及双柱墩 3×2 桩基等的一系列振动台试验, 探讨了不同桩基形式和桥墩结构在不同地震动输入下的地震反应规律及结构破坏特征; 陈国兴等(2007)以实际工程建设为背景, 考虑满足近似重力不失真的相似设计, 针对浅埋于可液化南京细砂地基中的地铁车站结构模型进行了振动台试验, 试验表明: 地铁车站结构侧向地基土液化时, 结构发生较大的不可恢复的残余变形是造成液化地基上地铁车站结构严重破坏的主要因素; Cubrinovski 等(2006)对2根长4.9m的钢桩和高强混凝土预应力桩进行大型振动台试验, 分析了在较大的桩侧土变形和土压力条件下2种桩的变形及应力情况。

1.3 弹性力-重力相似律

弹性力-重力相似律要求在研究高层建筑的地震响应时, 重力和弹性恢复力都很重要, 这是因为高层结构的 $P-\Delta$ 效应使重力的作用不能忽略。此时, 模型相似条件要求同时满足 $\lambda^2 l = \lambda^2 l \lambda^{-1} \lambda^{-1} \lambda \rho$ 和 $\lambda_g = \lambda_E \lambda^{-1} \rho \lambda^{-1} l = \lambda_l \lambda^{-2} l = 1$, 即 $\lambda_l = \lambda_E \lambda^{-1} \rho$ 。但由模型弹性力-重力相似律的要求可知, 当模型材料选定时, 则模型的弹性模量比尺和质量密度比尺就相应的确定下来, 进而模型的几何比尺也就随之确定, 因而也就没有了选择的余地, 这给模型的设计带来很大的困难。所以, 考虑弹性力-重力相似律进行模型设计、进行土-结构动力相互作用的振动台试验很少。王东坡等(2008)采用1:10的模型相似比例, 以5根长1.2m的支盘桩为基础的双向单跨12层钢筋混凝土框架为上部结构模型, 在直径为3.0m, 高为2.0m, 自上而下分别为粉质粘土(50 mm厚)、砂质粉土(900 mm厚)和砂土(450 mm厚)的圆筒形柔性容器中, 进行了一系列振动台试验。试验考虑了支盘桩、上部结构之间遵循相同的相似关系, 以及土-结构的弹性模量相似系数相同的模型相似律。试验研究了挤扩支盘桩-土-结构体系的抗震性能, 证明了支盘桩在地震荷载作用下具有非常突出的抗拔、抗倾覆性能。魏春莉等(2008)以厦漳大桥南引桥 2×2 桩基础为原型, 采用层状剪切变形土箱(长3.0m×宽1.8m×高1.9m)进行了自由场、非液化场、去除液化层、液化场地无覆盖层、液化场地有覆盖层5种场地条件下的振动台模型试验。试验考察了液化场地和非液化场地条件下桩-土-桥梁结构地震动力相互作用的机理, 并验证了有关分析方法的可靠性。

2 模型土

土-结构动力相互作用振动台试验研究, 从初期的采用砂土或直接用原型土为材料制作试验模型土体, 渐渐地发展为用不同级配的砂土, 或用不同土质的材料土进行人工配置的尽

量符合试验相似要求的模型土。模拟的试验土体环境也从均匀土体、分层土到液化条件下的土体。

国内外早期进行的土-结构相互作用试验,大都只对上部结构考虑相似率而忽略土体的相似模拟。如陈国兴等(2001)、吕西林等(2000; 2002)、陈跃庆等(2006)、楼梦麟等(2001)、Gohl等(1987)、Stanton等(1988)、Ishimura等(1992)进行的试验,只对上部结构的刚度、质量等特性按照相似准则进行了折减,而没有追求模型试验中土与结构的刚度比与原型中土与上部结构的刚度比的一致。这可能造成模型试验得出的规律与原型体系有一定的差异。由于土本身具有复杂多样的性质,再加之考虑了模型相似之后的土介质的颗粒成分难以模拟,因而要想同时满足模型土的几何尺寸、弹性模量和材料密度相似比的模型土设计要求,这基本上是不可能的。

在土-结构相互作用振动台试验研究的过程中,研究者们根据试验目的或其它相关技术尽量满足相似设计,以期达到较好的试验现象再现的要求。王东坡等(2008)为了满足土与结构的弹性模量相似系数相同的条件,在制作模型土时,采用在上海粉土中掺加一定量的水和机油的方法制成粉质粘土,同时在上海粉土中掺加一定量的水和中细砂制成砂质粉土。杨林德等(2004)用褐黄色粉质粘土通过人工粉碎、强制搅拌、严格控制掺水量及机械压密等措施,制作了满足模型相似条件的模型土。基于同样的考虑,Tamori等(1988)用一种碳酸钙和油的混合物作为模型土,在振动台上进行了桩-土-结构动力相互作用试验。Mziuno等(1988)采用由膨润土和聚丙烯酰胺组成的混合物作为模型土模拟原型土。尚守平等(2006b)通过试验验证了其用均匀锯末和长沙粘土配制成的混合土与原型土的动力特性具有较好的相似性。楼梦麟等(2006)为了很好地体现SSI对结构TLD控制的影响,采用含有一定含水量的木屑和黄砂的混合物作为土层的模型材料,使得模型土与上部结构的基频相接近。尚守平等(2006a)、Loebach等(2006)为了模拟与上部结构刚度相差很大的模型土,采用海绵作为模型土进行振动台试验。

3 土体边界条件

在研究土-结构动力相互作用的振动台试验中,使用有限大小的装土容器代替实际土-结构相互作用中的半无限地基土体,这使得试验中人为的引入了有限人工边界的影响,通常称为“土箱效应”。研究者们通过有限元分析和试验等方法,分析研究了减少试验中土箱效应影响的有效措施。陈清军等(2002)通过研究提出:对于箱基模型,当土体侧向边界取值大于4倍箱体宽度时,侧向边界对箱基地震反应影响的相对误差减弱至1%;对于桩基模型,当取地基平面直径 D 与结构平面尺寸 d 的比值大于5时,由侧向边界引起的数值计算结果的误差很小并趋于稳定。伍小平等(2002)研究的结果表明:距离土箱四周边界40cm处可以忽略边界的影响。陈跃庆(2001)认为,自由场平面尺寸与模型箱宽度之比大于2时,沿深度方向的自由场加速度放大系数的变化已趋向稳定。Fishman等(1995)根据试验结果得出对于刚性土箱,当在振动方向上的箱体长度大于其高度的4倍时,可以忽略模型箱效应的影响。研究者们除了在模型设计时注意模型与土箱之间的尺寸比例关系外,还通过不断改进土箱的结构形式等措施来减小人工边界对试验的影响。迄今为止,为了模拟土介质条件,国内外在进行土-结动力相互作用的振动台试验中,常用的盛土箱大致有3种:刚性土箱(图1);圆筒型柔性土箱(图2);层状剪切型土箱(图3)。表1从不同方面对这

3 种土箱进行了对比。

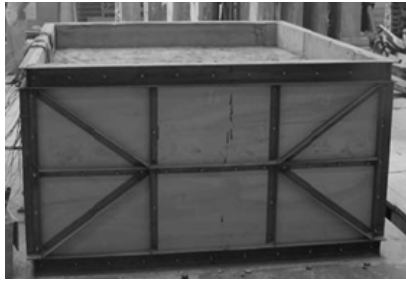


图 1 刚性土箱

Fig. 1 Rigid wall box



图 2 圆筒型柔性土箱

Fig. 2 Flexible wall barrel

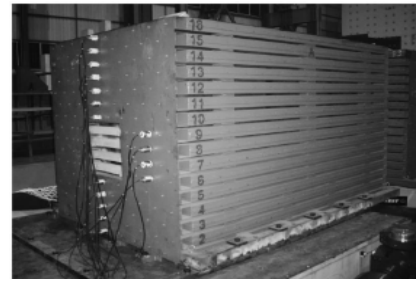


图 3 层状剪切型土箱

Fig. 3 Laminar shear box

表 1 三种不同类型土箱的对比

Table 1 Comparison of three kinds of model boxes

土箱类型	构造特点	减小边界影响采取的措施	缺点与不足	模拟效果
刚性土箱	用木板或钢板制作侧壁并加角钢支撑,侧壁刚度很大。	在侧壁内衬海绵、聚苯乙烯泡沫等柔性材料。	很难选择薄厚、刚柔都合适的侧壁柔性材料,性能不稳定,甚至产生副作用。	较差,模型箱效应明显。
圆筒型柔性土箱	橡胶膜侧壁上端固定于上部钢环,下部固定在下部基底钢板上,外包纤维带或钢丝。	采用一定厚度的橡胶模制作外壁,并在侧壁外包纤维带或钢丝。	外包纤维带的间距过小,则侧壁刚度很大,难以提供剪切变形;间距过大,则在振动时土体向外膨胀,导致土体约束压力释放。同时,土层可能产生弯曲变形。	通过调节较合适的纤维带或钢丝间距,模拟效果较刚性土箱好。
层状剪切型土箱	由很多矩形平面钢框架由下至上叠合,并在层间放置滚珠或轴承。	叠合放置钢框架,并在其间放置轴承,使得各层框架可以自由滑动。	大部分只能进行单向剪切试验,在大振情况下,土箱侧向边界效应仍然存在。	模拟土的剪切变形优于前 2 种土箱形式。

3.1 刚性土箱

在试验研究初期,大部分试验采用木板或钢板制作的侧壁刚度很大的土箱做盛土容器。如刘军等(2002)、宫必宁等(2002)、王建华等(2004)、楼梦麟等(2001)等都采用了这种容器进行试验。很显然,这种容器的模拟效果很差,模型箱效应很明显。后来通过在土箱的侧壁,尤其是在与激振方向垂直的方向上内衬柔性材料,如聚苯乙烯泡沫塑料板、海绵等可以减弱人工边界的影响。通过数值模拟和模型试验,楼梦麟等(2000)指出:在振动方向合理加入橡胶层可以有效地减小土体边界效应,一般取橡胶弹性模量是土的弹性模量的 2.5 倍左右。陶连金等(2006)采用在激振方向和垂直于激振方向的箱壁上,内衬厚度为 30mm 和 60mm 的聚苯乙烯泡沫塑料板的刚性土箱,对一几何相似比例为 1/30 的现浇细粒混凝土双层 8 跨地铁车站结构模型,进行了典型的地震波振动台试验。朱长安等(2008)采用相同的方法,以西南高烈度地震区某拟建隧道为背景,开展了山岭单洞口和双同口隧道结构振动台模型试验研究。分析了隧道洞口段和洞身段结构及模型土的破坏形态,并通过设置减震层,研究探讨了隧道洞口段的减震效果和减震机理。李雨润等(2006)采用在土箱内壁贴海绵的方法,设计并完成了包括 3 种密度的饱和砂土和非液化干砂的多工况下的桩-土动力相互作用振动台试验,分析了液化对土体和桩-承台动力反应的影响,揭示了液化土中桩-土动力相互作用机理,并提出了可液化土层中 p - y 曲线的修正方法和修正模型。试验结果显示该方法很好

地消除了模型箱效应。陈国兴等(2006)、韦晓等(2002)、杨林德等(2004)、Mizuno 等(1988)、Gohl 等(1987)、Motamed 等(2010)都采用了相似的措施来减小人工边界的影响。

虽然可以通过选择柔性材料来吸收侧向边界的波以模拟土的边界,但是所选材料的薄厚、刚柔没有一定的原则,太薄、太刚则效果可能不理想,太柔、太厚则可能在振动中材料受土体挤压而变刚,同时还可能因其挤压变形而造成土体的沉降,这都会影响试验效果,所以刚性土箱模型箱效应的消除较为困难,目前的应用已不多见。

3.2 圆筒型柔性土箱

1998年,美国 Berkeley 大学的 Meymand (1998) 首先设计并在试验中使用了圆筒型柔性容器。这种容器包括 1 块围成圆筒形的橡胶膜,上端固定于上部钢圆环,下端固定在下部基底钢板上,上部钢圆环支撑在 4 根钢杆上,钢杆与钢环用万用接头联接,它允许容器内的模型土发生多方向平动的剪切变形,橡胶膜外包纤维带或钢丝提供径向刚度。

吕西林等(2000; 2002)、陈跃庆等(2006)在参考了 Meymand (1998) 的设计方法后,在国内首次使用圆筒形柔性容器(直径 3.0m, 高 2.0m),以 1/10 和 1/20 两种缩尺比例的 12 层现浇钢筋混凝土框架结构作为上部高层建筑结构,分 3 个阶段采用从均匀土到分层土、从软弱土到较硬土的多种模型土,完成了不同土质条件下的 5 个桩基模型、3 个箱形基础模型和 1 个复合地基模型的一系列振动台试验。陈国兴等(2001)在同样的柔性土箱中,以明置基础 5 榀 2 跨 10 层走廊的框架结构为上部结构模型,进行了土-结构相互作用效应对 TMD 减震效应影响的振动台试验。之后,王东坡等(2008)也利用此模型箱进行了挤扩支盘桩-土-结构体系的抗震性能振动台试验。

值得注意的是,柔性容器的外包纤维带的间距对试验结果的影响很大,过小则成了刚性容器,难以提供剪切变形;过大则在振动时,土体向外膨胀,导致土体约束压力的释放,同时土层可能发生弯曲变形。采用这种容器还应该注意避开振动过程中容器上部钢环对土体施加的惯性力的影响。

3.3 层状剪切型土箱

层状剪切变形土箱的应用较为广泛, Matsuda 等(1988)较早将层状剪切变形土箱应用于饱和砂土的振动台试验研究中。这种土箱一般由很多层矩形平面钢框架由下至上叠合,层间放置轴承制成,可以相对滑动以模拟土体的剪切变形。在国内,伍小平等(2002)首先设计了同类型的土箱并很快应用。唐亮等(2009)采用伍小平等(2002)研制的土箱(长 2.0m×宽 1.5m×高 2.0m)在国内首次进行了自由场液化和非自由场液化 1:10 钢筋混凝土单桩和 2×2 低承台群桩-独柱墩结构形式的桥墩模型振动台试验研究。试验较好地再现了地基砂土液化的各种宏观震害现象,并且模型破坏状况与其原型的实际震害情况也比较吻合。楼梦麟等(2006)采用同一土箱对一顶层装有 TLD 水箱,高度为 2.5m,基础为 6(3×2)根方桩的 4 层钢框架结构进行了一系列振动台试验,更深入地认识了 SSI 对结构 TLD 振动控制的影响。尚守平等(2006a)利用有机玻璃材料制作的层状剪切土箱,进行了 2×3 群桩基础的 5 层框架结构模型的振动台试验,研究分析了软土-铰接桩这一新型隔震体系的动力性能。此外, Kagawa 等(1995)、Adachi 等(2000)、Yao 等(2004)、Chambers 等(1999)、Chau 等(2009)、Pitilakis 等(2008)也都利用不同大小的层状剪切土箱进行了土-结构动力相互作用的振动台试验。为了更好地模拟桩-土之间的动力相互作用,以上大部分试验都是在单向运动的土箱中进行的,即在与激振方向一致的方向上的土体的剪切变形不受约束。但是,大量试验表明,在大震情

况下，土箱侧向边界对土体仍然存在较大的影响。为了消除这一影响，史晓军等（2009）研制了双向层状剪切模型箱，并通过试验验证了这种土箱在消除 2 个方向上的边界效应和满足土体的水平剪切变形方面均具有较好的特性。

4 土-结构动力相互作用振动台试验的新进展

随着科学技术的进步，地震模拟振动台设备向着大型化和多台化的方向发展，使得进行大比例尺模型-土箱的土-结构动力相互作用振动台试验成为现实。日本学者 Kobayashi 等（2002）、Tamura 等（2001）、Nakagawa 等（2000）、Yasuda 等（2000）、Yahata 等（2001），采用大尺寸的层状剪切型土箱，对在不同模型土介质环境下的不同形式的大比例尺模型桩基础进行了一系列的大型振动台试验。史晓军等（2008）在重庆交通科研设计院桥梁结构动力学实验室内的两子台地震模拟振动台上，对埋置于土箱中的地下钢筋细石混凝土综合管廊结构模型及钢制管道进行了自由场、一致激励和非一致激励条件下的振动试验。探讨了埋入地下的管廊及管线结构的地震响应特点，研究分析了地下管线在非一致地震激励下的埋地管线-土滑移反应规律及发展变化过程。

20 世纪 90 年代，Nakashima 等（1992）在拟动力结构试验的基础上，发展起来一种新的结构抗震试验方法——实时子结构试验（也称“实时耦联动力试验”）（汪强等，2008）。它将待研究对象分为通过数值计算模拟的数值子结构和进行加载试验的物理子结构 2 个部分。按照加载方式的不同，大致可以归纳为 2 种类型，一种是采用作动器将计算位移直接作用于试验子结构系统，称为作动器型实时耦联动力试验；另一种是将物理模型子结构置于振动台上进行试验，称为振动台型实时耦联动力试验。Kobayashi 等（2002）设计并完成了模型比例为 30% 钢筋混凝土桩基础单支柱桥墩结构实时子结构试验，将桥墩及上部桥梁结构视为数值子结构在试验时进行数值模拟，将桩基础部分和土体部分视为物理子结构进行实际加载试验。

随着土-结构动力相互作用理论研究和现代计算机技术的快速发展，土-结相互作用的数值计算模型和算法日渐成熟，无论是计算精度还是稳定性上已经能够较好地模拟土体的半无限空间体的震动特性。本文作者利用集总参数模型和将集总参数模型与时域递归模型相结合的模型，分别建立了 2 种无限地基的简化力学模型，并基于实时子结构试验技术思想，建立了土与结构动力相互作用的数值模型和振动台试验模型。通过振动台控制算法、试验传感器采集的实时数据及结构数值分析算法相结合，实现了地震模拟振动台对土与结构动力相互作用的模拟，为土-结构动力相互作用的研究提供了一种直接、方便的实验方法（试验的基本思路如图 4 所示）。试验已进行了基于 Matlab/Simulink 工具箱功能下的数值仿真虚拟实验和实验室简单结构模型的振动台实时子结构试验。由于篇幅限制，以下只简单介绍振动台试验的一些基本情况。

试验在北京工业大学工程抗震与结构诊治实验室的台面尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的单向振动台上进行，振动台的最大承重为 5t，工作频率范围 0.1—50Hz。试验以 2 个单层钢框架（高度均为 1.0m）和 1 个 2 层钢框架（由 2 个单层框架组合而成）为试验结构，分别引入 2 自由度 8 参数的集总参数模型和改进的集总参数模型为试验系统的数值子结构。并以加速度幅值为 0.1g 的 EL-centro 波和汶川地震卧龙波为输入波，进行了模拟刚性地基、硬土与中硬土地基、软土与中软土地基上的一系列工况的振动台试验。试验结果表明，考虑结构-地基动力相互作用

用下的结构加速度反应和层间剪力有所减小。在一定范围内，结构与地基土层刚度比越大，结构反应的变化越明显。

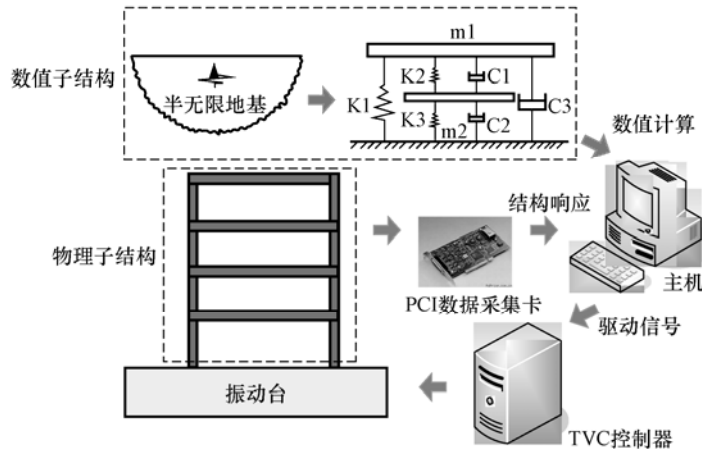


图4 试验流程图

Fig. 4 Flowchart of test

5 结语

进行土-结构动力相互作用的振动台试验研究还存在很多问题。一是，由于地震模拟振动台台面尺寸和承载能力的限制以及土箱效应的影响，只能进行小比例模型的试验，试验的相似率常常难以完全满足，只能根据试验的目的来满足比较重要的物理量的相似关系。这使得模型试验的结果不能很好地反映原型结构的实际性质，尤其对于一些尺寸敏感的结构，这种反演更是困难甚至产生错误的结论。二是，同样是由于台面尺寸和承载能力有限的制约，加之引入有限大小的模型土箱，使得有限体积的模型土无法模拟土层的半无限区域。三是，无法全面的考虑试验相似关系，一般情况下只对上部结构考虑模型相似关系而忽略土体，实际上也难以将上部结构与土体统一考虑，因为土介质的颗粒成分无法模拟，所以很难满足土体的重力场相似律。如何解决这些问题，成了提高试验精度的瓶颈。

与传统的“结构-土箱”振动台试验相比，土-结构动力相互作用的实时子结构试验具有其独特的优势，由于试验系统引入了数值计算模型的数值子结构用以模拟半无限土体，使得试验中不存在“模型箱效应”的影响，而且通过调整数值计算模型的参数，可以实现综合考虑上部结构模型与模型土的整体相似关系；因为省去了土体和土箱的重量，使得上部结构模型设计的缩尺比例相对增大；同时，通过调整土模型参数可以很方便地实现基于不同性质土体的模型试验，而且可以实现多点输入条件下的土-结构动力相互作用的振动台试验。但是，目前土-结构动力相互作用的实时子结构试验研究仍处于起步探索阶段，试验中的物理子结构都比较简单，由于受数值地基阻抗函数的时频域转换方法及数值计算方法的限制，这种新的试验方法的适用范围还具有一定的局限性。目前国内已经进行了基于2自由度集总参数模型和改进的时域递归模型的条形基础、桩基础的双层钢框架土-结构动力相互作用实时子结构振动台试验，并且只进行了一维单点试验。根据实际工程研究的需要，试验还需要向多维多点以及地震动的一致输入和非一致输入拓展，而且在提高试验的精度和稳定性方面仍有许多问

题需要更进一步完善。如系统中存在的时滞问题;作动器的控制精度问题;试件与振动台接触面间反力的实时准确获取以及实时补偿问题;地基阻抗的时频域转换、数值积分方法等问题。总之,由于问题本身的复杂性,在这一研究领域仍有许多疑难问题,为此还需要科研人员不断的努力与开发,进而使得这种新的试验方法继续向前发展。

参考文献

- 鲍华,徐礼华,凡红,邹万山,2005.软土-桩-结构动力相互作用振动台模型试验研究.沈阳建筑大学学报(自然科学版),**21**(6):644—648.
- 陈国兴,王志华,宰金眠,2001.考虑土与结构相互作用效应的结构减震控制大型振动台模型试验研究.地震工程与工程振动,**21**(4):117—127.
- 陈国兴,庄海洋,程绍革等,2006.土-地铁隧道动力相互作用的大型振动台试验:试验方案设计.地震工程与工程振动,**26**(6):178—183.
- 陈国兴,庄海洋等,2007.土-地铁车站结构动力相互作用大型振动台模型试验研究.地震工程与工程振动,**27**(2):171—176.
- 陈清军,赵云锋,王汉东等,2002.振动台模型试验中地基土域的数值模拟.力学季刊,**23**(3):407—411.
- 陈跃庆,2001.结构-地基动力相互作用体系振动台试验研究.同济大学博士学位论文.
- 陈跃庆,吕西林,李培振等,2006.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.土木工程学报,**39**(5):57—64.
- 迟世春,林少书,2004.结构动力模型试验相似理论及其验证.世界地震工程,**20**(4):11—20.
- 宫必宁,赵大鹏,2002.地下结构与土动力相互作用试验研究.地下空间,**22**(4):320—324.
- 李雨润,袁晓铭等,2006.液化土中桩基础动力反应试验研究.地震工程与工程振动,**26**(3):257—260.
- 林皋,朱彤,林蓓,2000.结构动力模型试验的相似技巧.大连理工大学学报,**40**(1):1—8.
- 刘军,王丹民等,2002.土-结构相互作用的非线性反应.东北大学学报(自然科学版),**23**(9):915—918.
- 楼梦麟,王文剑等,2000.土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题.地震工程与工程振动,**20**(4):30—36.
- 楼梦麟,王文剑,马恒春,朱彤,2001.土-桩-结构相互作用体系的振动台模型试验.同济大学学报,**29**(7):763—768.
- 楼梦麟,宗刚,牛伟星,陈根达,2006.土-桩-钢结构-TLD系统振动台模型试验研究.地震工程与工程振动,**26**(6):172—177.
- 吕西林,陈跃庆,2002.高层建筑结构-地基动力相互作用效果的振动台试验对比研究.地震工程与工程振动,**22**(2):42—48.
- 吕西林,陈跃庆等,2000.结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究.地震工程与工程振动,**20**(4):20—29.
- 尚守平,刘方成等,2006b.振动台试验模型地基土的设计与试验研究.地震工程与工程振动,**26**(4):199—204.
- 尚守平,姚菲,刘可,2006a.软土-铰接桩体系隔震性能的振动台试验研究.铁道科学与工程学报,**3**(6):19—24.
- 唐亮,凌贤长等,2009.可液化场地桥梁群桩-独立墩结构地震反应振动台试验研究.土木工程学报,**42**(11):102—108.
- 史晓军,陈隽,李杰,2008.地下综合管廊大型振动台模型试验研究.地震工程与工程振动,**28**(6):

116—123.

- 史晓军, 陈隽, 李杰, 2009. 层状双向剪切模型箱的设计及振动台试验验证. 地下空间与工程学报, **5** (2): 254—261.
- 陶连金, 王沛霖, 边金, 2006. 典型地铁车站结构振动台模型试验. 北京工业大学学报, **32** (9): 798—801.
- 汪强, 王进廷, 金峰, 张楚汉, 2008. 实时祸联动力试验方法述评. 见: 第 17 届全国结构工程学术会议论文集 (第 III 册). 北京: 清华大学出版社, 178—186.
- 王东坡, 钱德玲, 2008. 支盘桩-土-上部结构动力相互作用体系的振动台模型试验设计. 合肥工业大学学报(自然科学版), **31** (5): 776—781.
- 王建华, 冯士伦, 2004. 桩土相互作用的振动台试验研究. 岩土工程学报, **26** (5): 616—618.
- 韦晓, 范立础, 王君杰, 2002. 考虑桩-土-桥梁结构相互作用振动台试验研究. 土木工程学报, **35** (4): 91—97.
- 魏春莉, 2008. 桩-土桥梁结构地震动力相互作用振动台模拟试验研究. 重庆交通大学硕士学位论文.
- 伍小平, 孙利民等, 2002. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制. 同济大学学报, **30** (7): 781—785.
- 杨林德, 季倩倩等, 2004. 地铁车站结构振动台试验中模型箱设计的研究. 岩土工程报, **26** (1): 75—78.
- 郑少河, 车爱兰, 岩. 敞广, 2007. 地铁地震响应的减震效果模型振动试验研究. 四川建筑科学研究, **33** (22): 42—44.
- 朱长安, 高波, 索然绪, 2008. 强震区隧道洞口段振动台模型试验研究. 现代隧道技术, **45** (1): 48—52.
- Adachi Naohito et al., 2000. Experimental Study on Pile Stress in Liquefied and Laterally Spreading Soils. See: Proceedings of the 12th WCEE, 956—965.
- Chambers A.M., McManus K.J., Yang J. and Berrill J.B., 1999. The dynamic behaviour of drilled shaft micropiles. Civil Engineering Research Report, University of Canterbury, 99—112.
- Chau K.T., Shen C.Y. and Guo X., 2009. Nonlinear seismic soil-pile-structure Interactions: Shaking table tests and FEM analyses. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **29**: 300—310.
- Cubrinovski M. et al., 2006. Interpretation from large-scale shake table tests on piles undergoing lateral spreading in liquefied soils. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **26**: 275—286.
- Fishman K.L., Mander J.B., Richards R., 1995. Laboratory Study of Seismic Free-field Response of Sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **14** (1): 33—43.
- Gohl W.B. and Finn L.F., 1987. Seismic Response of Single Piles in Shaking Table Studies. See: Proceedings of the Fifth Canadian Conference Earthquake Engineering, 435—444.
- Ishimura K., Ohtsuki A., Yokoyama K. and Koyanagi Y., 1992. Sway-Rocking Model for Simulating Nonlinear Response of Sandy Deposit with Structure. See: Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, **3**: 1897—1903.
- Kagawa T., Minowa C., Abe. A. and Oda S., 1995. Shaking-Table Tests on Analyses of Piles in Liquefying Sand. See: Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, **2**: 699—704.
- Kobayashi H. et al., 2002. Hybrid vibration experiments with a bridge foundation system model. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **22**: 1135—1141.
- Kobayashi H., Tamura K. et al., 2002. Hybrid vibration experiments with a bridge foundation system model. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **22**: 1135—1141.
- Loebach Leah et al., 2006. A Hybrid Experiment for Examination of Structural Control Considering Soil-Structure

- Interaction. See: Proceedings of 17th Analysis and Computation Specialty Conference, 825—836.
- Matsuda T. and Goto Y., 1988. Studies on Experimental Technique of Shaking Table Test for Geotechnical Problems. See: Proceedings of the 9th WCEE, Tokyo, 837—842.
- Meymand P.J., 1998. Shaking Table Scale Model Test of Nonlinear Soil-pile-superstructure Interaction in Soft Clay. Doctoral Dissertation of the University of Berkeley.
- Mizuno H. and Liba M., 1988. Shaking Table Testing of Seismic Building-Pile-Soil Interaction System. See: Proceedings of the 9th WCEE. New Zealand Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering Technical Committee, Tokyo, 875—881.
- Motamed Ramin et al., 2010. Shaking Table Model Tests on Pile Groups behind Quay Walls Subjected to Lateral Spreading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136** (3): 477—489.
- Nakagawa T. and Tanaka M. et al., 2000. Experimental Study on the Soil-pile-structure Interaction by Shaking Table Tests Using Large-scale Laminar Box. See: Proceedings of the 12th World Congress on Earthquake Engineering, 1922—1931.
- Nakashima Masayoshi, Kato Hiroto, Takaoka Eiji, 1992. Development of Real-time Pseudodynamic Testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21** (1): 79—92.
- Pitilakis Dimitris, Matt Dietz et al., 2008. Numerical simulation of dynamic soil-structure interact in shaking table testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**: 453—467.
- Stanton J.F., Banerjee S. and Hasayen I., 1988. Shaking Table Tests on Piles. Final Report Research Project Y-2811 Prepared for Washington State Transportation Commission.
- Tamori S. and Kitagawa Y., 1988. Shaking Table Tests of Elasto-Plastic Soil-Pile-Building Interaction System. See: Proceedings of the 9th WCEE. New Zealand: International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering Technical Committee, Tokyo, 843—848.
- Tamura S., Miyazaki M., Fujii S. et al., 2001. Earth Pressure Acting on Embedded Footing During Soil Liquefaction by Large-scale Shaking Table Test. See: Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 556—564.
- Yahata K., Suzuki Y., Funahara H. et al., 2001. Pile Response Characteristics of Liquefied Soil Layers in Shaking Table Tests of a Large Scale Laminar Shear Box. See: Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
- Yao S. et al., 2004. Interactive behavior of soil-pile-superstructure system in transient state to liquefaction by means of large shake table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**: 397—409.
- Yasuda S., Ishihara K., Morimoto I. et al., 2000. Large-scale Shaking Table Tests on Pile Foundations in Liquefied Ground. See: Proceedings of the 12th World Congress on Earthquake Engineering, 1474—1485.

Review of Research on Shaking Table Test of Dynamic Soil-Structure Interaction

Li Zhenbao, Li Xiaoliang, Tang Zhenyun and Ji Jinbao

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract This paper presents a review of shaking table test related to dynamic soil-structure interaction in three aspects: i.e. scale modeling method, simulation of soil, and simulation of soil boundary conditions. The active and effective measures adopted by researchers for better reflecting the interaction mechanism between soil and structure under shaking are described emphatically. Moreover, the disadvantages of the traditional test way by means of model box and shaking table are summarized. Finally, a new test technology in shaking table test of soil-structure interaction research is introduced and contrasted with the traditional test way. Some problems about this new test method need to be solved and investigated further are put forward in the end.

Key words: Soil-structure interaction; Shaking table test; Real-time substructure testing; Review