剪切模型箱在离心振动复合环境下的动力学 响应分析

陈红永,冯加权,李上明,吴连军

(中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:目的 研究剪切模型箱在复合环境下的动力学响应规律。方法 针对叠层式剪切模型箱的 结构特点,建立考虑层间滑动的动力学模型。通过对离心机在工作状态下的动力学特性进行模 拟,结合设计指标,对剪切模型箱进行离心振动复合环境下的响应分析。结果 得到了剪切模型箱 的激励力谱,以及模型箱在不同过载及振动环境状态下的固有特性。结论 离心工作环境下,模型 箱固有频率变低。离心载荷是影响模型箱强度设计的主要因素。 关键词:剪切模型箱;离心;振动;动力学模型 DOI:10.7643/issn.1672-9242.2015.05.019 中图分类号:TJ05; V416 文献标识码:A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0111-05

Dynamic Response of Shear Model Box in Centrifugal and Vibration Compound Dynamical Environment

CHEN Hong-yong, FENG Jia-quan, LI Shang-ming, WU Lian-jun (Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the dynamic response of shear model box in Compound Dynamical Environment. **Methods** Based on the structure characteristics of multidirectional laminar shear model box, the dynamic model was established considering the slippage of different layers. According to the dynamic simulation on the working status of whole centrifuge model, the spectrum of excited force was obtained. Then the dynamic response of shear model box was investigated combined with the effect of centrifugal and vibration compound. **Results** The excited force spectrum of shear model box was obtained, as well as the natural characteristics of shear model box in different overload and vibration environments. **Conclusion** The natural frequencies of shear model box decreased as a result of centrifugal effect, and the centrifugal load was the major influencing factor for the strength design of shear model box.

KEY WORDS: shear model box; centrifuge; vibration; dynamic model

收稿日期: 2015-07-26; 修订日期: 2015-08-28

Received: 2015–07–26; **Revised:** 2015–08–28

基金项目:中国工程物理研究院重点学科项目"计算固体力学";中国工程物理研究院发展基金(2015-0424)

Fund: Supported by the Key Subject "Computational Solid Mechanics" of the China Academy of Engineering Physics, and the Development Foundation of China Academy of Engineering Physics(2015–0424)

作者简介:陈红永(1986—),男,博士,助理研究员,主要研究方向为复杂结构动力学分析及测试。

Biography: CHEN Hong-yong(1986-), Male, Ph. D., Assistant researcher, Research focus: dynamic analysis and test of complex structures.

试验研究[1-2]。

土工离心机是岩土工程试验研究的重要设备,通 过高速运转产生模拟的重力场,可以为多种土工试验 提供平台,如水坝设计和边坡稳定性试验研究。通过 配置剪切模型箱,可以进一步开展岩土工程抗震减灾 及建筑物地震易损度评价等离心振动复合环境下的

将土工离心机设备与振动台结合起来,可模拟土体在地震中的反应,用于盛土的模型箱是实现这一功能的关键装置。在此类试验中,边界对土体变形的限制以及土体内部波的反射及散射对试验结果将产生严重影响^[3]。相比于刚性和柔性模型箱,剪切式模型箱可以模拟半无限土体在地震作用下的剪切效应和边界条件,是此类综合离心振动试验获得有效试验数据的关键。剪切模型箱一般都采用层式设计,包括悬挂式^[4-3]、堆叠式^[6-8]等。这类模型箱能够将边界条件对振动台及离心机整机的影响降到最小,同时在离心机工作状态下,能够使得模型土在剪切模型箱里实现超重力场中的地震反应。其中,叠层剪切模型土箱已被成功运用于饱和砂土振动台试验^[9],不受箱体重力影响的小型叠层剪切模型箱也得到了发展^[10]。

在离心振动复合环境下,振动台在运行过程中受 到离心力、激振力及科里奥利力的作用^{III}。在复合环 境载荷作用下,振动台与在单一环境下工作状态不 同,因此对其进行动力学特性的分析是确定系统技术 指标的基础。沈润杰等凹采用变形体动力学方法分析 离心场作用下振动台运动部件的动态特性。对离心 振动复合环境系统进行动力学建模还包括基于刚体 动力学的模型^[13],有限元法也是进行此类分析的重要 手段[14-15]。以上的研究主要针对刚性模型箱,而剪切 模型箱由于结构形式的不同其动力学特性与刚性模 型箱不同。袁林娟等师通过对模型箱附加质量、层间 摩擦阻力等因素的研究,基于剪切梁法建立模型箱与 土体相互作用模型,推导了动力特性及响应的解析 解,指出了土-箱体耦合系统动力学特性的主要影响 因素是附加质量和尺寸。以上研究仅对土-箱体模型 进行了简化建模,并未对离心机-振动台整机一体化 系统进行分析,且没有考虑离心载荷对振动台-剪切 模型箱系统动力学特性的影响。

文中首先针对剪切模型箱的结构特点,建立了动 力学分析模型。在离心、振动载荷影响分析的基础 上,进行了剪切模型箱的动态特性研究。结合系统技 术指标,对剪切模型箱进行了离心振动复合环境下的 响应分析,分析了离心振动复合环境下系统技术指标 的影响因素。

1 土工离心振动系统的建模

以某型土工离心振动一体机为研究对象,该一体 机主要由离心机(包括基座、转臂、平衡系统、配重、模 型吊篮)以及安装在吊篮上的振动系统(包括激振油 缸、振动台和剪切模型箱组成)。建立离心振动系统 的有限元模型,如图1所示。



图1 土工离心振动系统有限元模型

Fig.1 The centrifugal and vibration compound geotechnical equipment model

离心振动系统中离心机旋转在吊篮底面产生的 最大加速度为50g(取g=9.8 m/s²),振动台最大加速度 为20g,工作频率为10~200 Hz。在结构设计中,激振 油缸通过推杆与振动台相连,振动台底面通过滑轨与 吊篮底面连接。滑轨不仅起到支承作用,而且还限制 了模型箱的侧向运动,在工作状态下,可认为主振方 向与离心力方向垂直。将激振杆简化为连接弹簧,其 中弹簧刚度对结构动力学特性的影响较大。根据理 论,剪切模型箱整体的一阶固有频率一般要避开振动 台的激振频率,以免引起结构共振。在对离心机与振 动台系统进行整体分析时,将模型箱简化为质量效应 的影响,根据弹簧与质量块单自由度系统的固有频率 计算公式,可以推得符合结构特性的弹簧刚度值。

建立剪切模型箱模型的难点在于:叠层式剪切模 型箱采用铝合金框架结构,加上滚柱、销钉等辅助结 构以实现层间滑动,而滑动摩擦属于非线性问题,在 考虑激振方向的框架的位移限制下,模拟剪切模型箱 各层之间的相互滑动行为成为建立动力学模型的关 键。基于剪切模型箱的特点,根据以下原则进行简 化:将模型箱底层框架与振动台底面之间建立固联约 束;模型箱宽度方向四根立柱与框架限制其在侧向的 位移;各层之间建立滑动约束关系,以模拟试验过程 中的剪切效应;模型土体的质量以附加质量的方式施 加在模型箱壁面上;振动台底面除激振方向之外的所 有运动自由度被约束,模拟其在滑轨上的运动。依据 以上原则简化之后的模型箱模型如图2所示。



图 2 剪切模型箱模型 Fig.2 The shear model box model

2 离心机静动力学特性分析

在离心状态下,模型箱内装填的试验件受到离心 方向50g过载的作用。在振动条件下,模型箱受到激 振方向最大20g过载的作用,将之简化为静力载荷进 行分析。两方向的过载作用在模型箱内土体上,除附 加质量外,还对模型箱内壁面产生类似于静水压的作 用,且压力沿深度方向线性变化,在支承面达到最大。

假设试验件质量为 m_i ,可以根据模型箱容积 V_m 与 装填系数 η (定义为装填土体积与模型箱容积之比) 计算试验件的等效密度 ρ_e ,见式(1):

$$\begin{cases} P_i = \rho_{e}g_ih_i \\ P_j = \rho_{e}g_jh_j \end{cases}, \rho_{e} = \frac{m_i\eta}{V_{m}} \tag{1}$$

式中:下标*i*,*j*分别表示激振方向和离心方向,两 方向的等效静水压可以通过式(1)计算;*g*为激振或 离心方向的过载*g*值;*h*为两方向从土体上表面到底 面的距离。需指出的是,在离心状态下,模型箱底面 及四周内壁面上都受到压力的作用;在激振状态下, 当激振加速度达到幅值时位移也达到最大,此时一 侧壁面受到压力作用,而另外一侧因为与试验件脱 离不受压力作用。对不同方向静水压的模拟如图3 所示。

在离心和激振联合过载作用下,剪切模型箱的应 力和位移结果如图4所示。从图4a侧视图来看,由于 受到激振方向的过载作用,模型箱向一侧倾斜,各层 之间出现明显滑动,激振方向立柱的位移限制导致应 力较高处出现在与立柱接触的中部。从图4a俯视图 来看,由于等效静水压的作用,在侧向出现了明显的 鼓胀,越靠近底板处,剪切模型箱各层的鼓胀效应越 明显。各层之间也有明显的横向错动,两方向过载作



图3 静水压模拟过载作用示意

Fig.3 The simulative static water pressure of static over load



图4 离心激振过载下模型箱静态应力及位移

Fig.4 The static stress and displacement of shear model box under centrifugal and vibration load

用耦合,导致剪切模型箱在静载作用下应力最大值出现在第二层(从下向上)与立柱接触处,达到100.8 MPa。图4b的位移结果也显出了两向载荷作用下的倾斜和鼓胀作用,第二层位移最大达到1mm左右,可能会对滚柱以及各层之间的配合产生影响。

分析离心机在不同转速工作状态下剪切模型箱 动力学特性的变化,将静载分析结果作为预应力加 载,分析离心激振过载作用下剪切模型箱的固有频 率,见表1和如图5所示。其中,离心机工作g值为0 表示不考虑离心及激振产生的过载作用。

表1 不同离心振动状态下剪切模型箱的固有频率

Table 1 The natural frequencies of shear model box under different centrifugal and vibration load

离心机工作	激振过载	第一阶固	第二阶固
g值/g	g值/g	有频率/Hz	有频率/Hz
0	0	103.1	235.3
20	0	89.6	194.0
0	20	93.2	197.3
50	20	70.9	182.5





从表1结果可以看出,随着离心载荷的增加,剪切 模型箱的固有频率下降最高达到31%,可见离心激振 过载对于剪切模型箱的动态特性影响很大。对比相 同g值下离心及激振过载对模型箱固有频率的影响, 离心过载的影响大于激振过载的影响。图5给出的剪 切模型箱的前两阶振型,与文献[16]根据解析法所分 析得到的振型类似。

3 剪切模型箱动力响应分析

首先进行离心载荷下离心机整机的预应力分

析,再进行整机模态分析。在动力学响应分析时,模 拟离心机振动台正弦扫频试验,采用单点控制,控制 点在模型箱底板上,用同时作用在运动质量和反作 用质量上(激振杆两端)的大小相等、方向相反的力 模拟振动台的激振力。由于是闭环反馈控制,因此 需要对激振杆两端的载荷进行识别,再进行离心机 振动台控制后的响应计算。具体过程为:首先在激 振杆两端施加大小相等、方向相反的平直力谱,计算 出控制点的加速度响应,并根据额定加速度和最大 推力,按线性关系反算出激振杆两端对应的力谱,然 后按识别出的力谱重新计算离心机的响应。按照识 别出的力谱加载之后计算得到的离心机整机典型位 移响应如图6所示。



图6 离心机整机在离心激振作用下的位移响应

Fig.6 The displacement response of whole centrifuge to the centrifugal and vibration compound effect

从图6可以看出,模型箱与底板之间在导轨的作 用下可以产生整体的相对滑动,油缸作用行程最大 为推杆与模型箱的相对位移(8.7 mm),在油缸行程范 围之内。

以相同的力谱加载在模型箱上,考虑预应力模态 的影响,模拟剪切模型箱在闭环控制下的正弦扫频试 验中的动力学响应,如图7所示。



图 7 剪切模型箱在振动状态下的应力 Fig.7 The stress of shear model box under the vibration status

剪切模型箱在振动状态下应力极值出现的位置 与静力分析时一致,最大值为56.3 MPa。分别提取静 动状态下模型箱各向应力值,根据式(2)进行静动响

$$\begin{split} \vec{w} \ \hat{g} \ \hat{G}^{[17]}: \\ \left\{ \begin{matrix} \sigma_{ss}^2 = (\sigma_{xs}^2 + \sigma_{ys}^2 + \sigma_{zs}^2) + 3(\tau_{xys}^2 + \tau_{xzs}^2 + \tau_{yzs}^2) + \\ (\sigma_{xs}\sigma_{ys} + \sigma_{xs}\sigma_{zs} + \sigma_{ys}\sigma_{zs}) \\ \sigma_{sd}^2 = (\sigma_{xd}^2 + \sigma_{yd}^2 + \sigma_{zd}^2) + 3(\tau_{xyd}^2 + \tau_{xzd}^2 + \tau_{yzd}^2) + \\ (\sigma_{xd}\sigma_{yd} + \sigma_{xd}\sigma_{zd} + \sigma_{yd}\sigma_{zd}) \\ \sigma_{s} = \sqrt{\sigma_{ss}^2 + \sigma_{sd}^2} \end{split}$$

式中: σ_{xs} , σ_{ys} , σ_{zs} , τ_{xys} , τ_{xzs} , τ_{yzs} 分别表示离心 静载状态下的正应力和切应力; σ_{xd} , σ_{yd} , σ_{zd} , τ_{xyd} , τ_{xzd} , τ_{yzd} 分别表示及正弦扫频激振状态下的正应力和切应 力; σ_s 表示复合应力。

模型箱等效应力最大值出现在第二层与立柱接触处,达到114.8 MPa。根据材料屈服强度为275 MPa 计算,在离心振动状态下,剪切模型箱的安全系数达 到2.4。若仅考虑静载荷,安全系数为2.7。可见对振 动应力的考虑,可以提出更加合理的结构设计指标。

4 结论

通过对叠层式剪切模型箱的结构特点分析,提出 了等效简化原则,建立了剪切模型箱的动力学模型, 并根据整机工作状态的不同,分析了不同状态下过载 对剪切模型箱动力学特性的影响。通过反馈控制算 法,分析了剪切模型箱在离心振动复合环境下的响 应。结果表明:

 1)随着离心载荷的增加,剪切模型箱的固有频率 下降,离心过载的影响大于激振过载。

2)通过对静动载荷的复合,在强度校核时考虑振动应力的影响,可以提出更加合理的结构设计指标。

参考文献:

冉光斌. 土工离心机及振动台发展综述[J]. 环境技术,2007
 (3):25-29.

RAN Guang-bin. Summarization of Geotechnical Centrifuge and Table Vibrator's Development[J]. Environment Technology, 2007(3):25—29.

- [2] 吴建国,李海波,张琪,等. 综合离心环境试验技术研究进展[J]. 强度与环境,2014,41(1):1—9.
 WU Jian-guo, LI Hai-bo, ZHANG Qi, et al. Advances in Synthesis Centrifugal Environment Test[J]. Structure & Environment Engineering,2014,41(1):1—9.
- [3] 伍小平,孙利民,胡世德,等. 振动台试验用层状剪切变形 土箱的研制[J]. 同济大学学报,2002,30(7):781—785.
 WU Xiao-ping, SUN Li-min, HU Shi-de, et al. Development

of Laminar Shear Box Used in Shaking Table Test[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(7):781-785.

[4] 杜修力,李霞,陈国,等. 悬挂式层状多向剪切模型箱的设计分析及试验验证[J].岩土工程学报,2012,34(3):
1038—1042.

DU Xiu-li, LI Xia, CHEN Guo, et al. Design and Test Verification of Suspension Multidirectional Laminar Shear Model Box[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (3):1038—1042.

[5] 杜修力,李霞,曹喜,等. 悬挂式层状多项剪切变形模型箱
 的设计分析[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(2):531—
 533.

DU Xiu-li, LI Xia, CAO Xi, et al. Design and Analysis of Multidirectional Laminar Shear Model Box[J]. Journal of Civil Architectural& Environmental Engineering, 2010, 32 (2) : 531-533.

- [6] 高博,张鸿儒. 堆叠式剪切模型箱的改进[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):4021—4026.
 GAO Bo, ZHANG Hong-ru. Improvement of Stacked Shear Model Box[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):4021—4026.
- [7] 梁栋,蒋关鲁,刘先峰.大型堆叠式剪切模型箱的研制[J]. 铁道建筑,2009(10):63—66.

LIANG Dong, JIANG Guan-lu, LIU Xian-feng. The Development of Large Scale Stacked Shear Model Box[J]. Railway Engineering, 2009(10):63-66.

- [8] 黄春霞,张鸿儒,隋志龙.大型叠层剪切变形模型箱的研制
 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10):2128—2134.
 HUANG Chun-xia, ZHANG Hong-ru, SUI Zhi-long. Development of Large-scale Laminar Shear Model Box[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2128—2134.
- [9] MATSUDA T, GOTO Y. Studies on Experimental Technique of Shaking Table Test for Geotechnical Problem[C]// Proceedings of the 9th World Conference Earthquake Engineering.Tokyo, 1998:837—842.
- [10] TURAN A, HINCHBERGER S D, NAGGSR H E. Design and Commissioning of a Laminar Soil Container for Use on Small Shaking Tables[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29:404-414.
- [11] 田昌会, 雷虎民, 屈马林, 等. 振动离心复合环境下科里奥利力的计算及分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版).
 2008,1(3):39-41.

TIAN Chang-hui, LEI Hu-min, QU Ma-lin, et al. Calculation and Analysis of Corioli's Force under the Circumstances of Centrifuging and Vibration[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2008, 1(3):39-41.

(下转第130页)

参考文献:

 [1] 吴付岗,王军. 精密离心机加速度载荷模型研究[J]. 机械工 程学报,2010,46(18):36-40.

WU Fu-gang, WANG Jun. Research on Acceleration Load Model of Precision Centrifuge[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18):36-40.

- [2] 乔仁晓,孟晓风,季宏.加速度计非线性项系数校准误差分析与建模[J].系统仿真学报,2008,20(6):1633—1635.
 QIAO Ren-xiao, MENG Xiao-feng, JI Hong. Error Analysis and Modeling in Calibration of Accelerometer's Nonlinear Terms's Coefficients[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6):1633—1635.
- [3] 陈希军,任顺清,李巍. 加速度计高阶误差模型系数的标定 方法[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(4):508—512.
 CHEN Xi-jun, REN Shun-qing, LI Wei. Calibrating Method for High-order Coefficients in Accelerometer Error Model[J].
 Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(4):508— 512.
- [4] 熊磊,何懿才,龙祖洪,等.精密离心机不确定度分析与应用[J].航空计测技术,2003,23(6):36—37.
 XIONG Lei, HE Yi-cai, LONG Zu-hong, et al. Uncertainty

Analysis and Application of Precise Centrifuge[J]. Metrology & Measurement Technology, 2003, 23(6):36–37.

- [5] JJG 1066—2011, 精密离心机检定规程[S].
 JJG 1066—2011, Verification Regulation of Precision Centrifuge[S].
- [6] JJF 1059.1—2012,测量不确定度评定与表示[S].
 JJF 1059.1—2012, Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement[S].
- [7] IEEE Std 836—1991, IEEE Recommended Practoce for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers[S].
- [8] JJF 1116—2004,线加速度计的精密离心机校准规范[S]. JJF 1116—2004, Calibration Specification for Linear Accelerometer Used Precision Centrifuge[S].
- [9] 凌明祥,李明海,杨新,等.高精度精密离心机静态半径测量方法与应用[J].仪器仪表学报,2014,35(5):1072—1078. LING Ming-xiang, LI Ming-hai, YANG Xin, et al. A Measurement Method and Application for Static Radius of High Precision Centrifuge[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2014,35(5):1072—1078.
- [10] 杨巨宝. 精密离心机半径值动态测试系统[J]. 宇航计测技 术,1994,13(2):5—10.

YANG Jv-bao. Dynamic Measurement System for the Radius of Precision Centrifuge[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1994, 13(2):5—10.

(上接第115页)

- [12] 沈润杰,何闻,陈子辰. 离心力场下振动台运动部件动态特性分析[J]. 振动工程学报,2001(14):9—12.
 SHEN Run-jie, HE Wen, CHEN Zi-chen. Analysis of Dynamic Characteristics of Moving-part on Vibration Table under the Centrifugal Force Field[J]. Journal of Vibration Engineering,2001(14):9—12.
- [13] 宫晓春,朱曦全,胡彦平. 离心振动复合环境试验系统的动力学建模[J]. 强度与环境,2013,40(3):15—24.
 GONG Xiao-chun, ZHU Xi-quan, HU Yan-ping. Dynamic Modeling of Centrifugal Force-vibration Compound Environment Experiment System[J]. Structure & Environment Engineering,2013,40(3):15—24.
- [14] 冉光斌,罗昭宇,刘小刚,等. 土工离心机吊篮的设计及优 化方法[J]. 工程设计与力学环境,2009(1):45—50.
 RAN Guang-bin, LUO Zhao-yu, LIU Xiao-gang, et al. Design and Optimization Method of the Suspended Basket of Geotechnical Centrifuge[J]. Engineering Design and Mechan-

ics Environment, 2009(1):45-50.

- [15] 余建军,闫桂荣,徐君. 离心力-振动复合动力学环境的仿 真[J]. 系统仿真学报,2001,13(6):726—735.
 YU Jian-jun,YAN Gui-rong,XU Jun. Simulation of Centrifugal and Vibration Compound Dynamical Environment[J]. Journal of System Simulation,2001,13(6):726—735.
- [16] 袁林娟,刘小生,汪小刚,等.振动台土-箱结构模型动力特 性及反应的解析分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(6): 1038—1042.

YUAN Lin-juan, LIU Xiao-sheng, WANG Xiao-gang, et al. Analytic Solution of Dynamic Characteristics and Responses of Soil-Box Model for Shaking Table Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6):1038—1042.

[17] PATRICK A T. Application of Algorithms for Percentiles of Von Mises Stresses from Combined Random Vibration and Static Loading[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2011, 133:1-5.