

# 土动力学创新性实验教学中的 宏观观思维

周燕国<sup>a,b</sup>, 陈仁朋<sup>a,b</sup>, 陈云敏<sup>a,b</sup>, 黄博<sup>a,b</sup>

(a. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室 浙江 杭州 310058; b. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘要:**土动力特性的复杂性和室内外试验对土动力学理论与实践的重要促进作用, 决定了土动力学实验教学的重要性。文章分析了目前土动力学实验教学中存在的问题, 提出了研究型大学的土动力学实验教学应注重培养学生宏观与细观相结合的创新思维, 在实验是提高其宏观调查与问题抽象能力、细观观测与机理揭示能力, 正确掌握土的基本动力特性及其工程性状, 提高学生解决实际工程问题的能力。

**关键词:**土动力学; 创新性; 实验教学; 宏观观; 研究型大学

**中图分类号:** TU43 - 4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2909(2010)01-0085-04

土动力学是土力学的一个重要分支, 是研究各种动荷载(如:地震、交通、波浪、机器振动等)作用下土体的变形和强度特性, 以及地基和土工结构的变形和稳定性, 并应用于工程实际的一门工程力学学科。土动力学面临的实际问题通常很复杂:一方面, 土动力学的主要研究对象——土体是碎散的非均质多相材料, 在大变形和位移发生时其刚度和强度会产生明显退化, 表现出强非线性;另一方面, 各种动力荷载非常复杂, 如:近场强地震动的三维随机循环加载、交通及波浪荷载的主应力轴旋转等效应。而场地效应、复杂的土层分布以及土与结构动力相互作用等进一步加剧了问题复杂性, 使土动力学课程涉及地震工程学、弹性动力学以及土力学与基础工程等领域, 成为一门比较难掌握的课程, 在研究型大学里主要面向研究生(或高年级本科生)开设。目前, 土动力学分析方法主要以室内单元体试验为基础, 辅以适当的现场实测数据, 并对所研究的环境条件作适当简化。计算结果反映实际的程度需通过现场和室内试验以及实际震害观测作进一步检验。因此, 在土动力学理论及实践发展过程中, 现场测试和室内试验一直起着重要的推动作用, 这决定了实验教学在土动力学教研中的重要性<sup>[1-2]</sup>。

作者在土动力学实验教学及科研过程中发现, 当前大学生尤其是研究生在学习过程中习惯被动接受知识, 学习自觉性、主动性及思考问题能力不强。这与当前土动力学教学模式有密切关系。土动力学各种理论模型的建立及其参数获取主要依赖于实验, 这一点在实验教学过程中被忽视, 学生往往淡化了实验和理论研究的内在联系及对细观机理的理解。这种模式下培养的学生大都缺乏创新

收稿日期: 2009 - 12 - 27

基金项目: 教育部 2007 年创新人才培养模式实验区建设项目; 国家自然科学基金(50908207); 中国博士后科学基金(20080430219; 20081476)

作者简介: 周燕国(1978 - ), 男, 浙江大学岩土工程研究所副教授, 博士, 主要从事岩土工程研究, (E-mail) qzking@zju.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

思维,不了解开展土动力学实验的必要性,不知道具体试验怎么做、为什么这么做,更无法从教学过程中主动观测各种土动力学现象并揭示其机理,因此,综合分析及对工程问题的整体把握能力较弱<sup>[3-4]</sup>。2006年以来,“加强自主创新、建设创新型国家”已成为中国社会主义现代化建设的国家战略,更是要要求激发全民族创新精神,培养高水平创新人才。高等学校是创新人才培养的主阵地,中国高等教育发展迅速,研究型大学在创新型人才培养中理应承担更大的责任<sup>[5]</sup>。反映在土动力学教学上,研究型大学应体现出教学和研究紧密结合、本科生与研究生教育有机衔接的特色,倡导基于研究的学习模式。作者在已有教学研究实践的基础上就此作进一步探讨,以期抛砖引玉、共同提高。

## 二、宏观细观结合的土动力学实验教学

传统的土动力学实验包括现场原位测试和室内实验两部分。土动力特性的室内试验,是将土样按要求的湿度、密度、结构和应力状态制备于一定试样容器中,然后施加不同形式和强度的振动荷载,并测量在荷载作用下试样的应力、应变和孔压等,从而对土性和有关指标的变化规律作出定性和定量判断。由于土动力问题研究的应变范围很大( $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-1}$ ),需要用不同的测试方法确定土动力计算所用的特性参数,包括:动三轴试验、振动剪切试验、共振柱试验、振动台试验和土工离心振动台模型试验等。而实际工程中土的性状和试验条件往往不能完全一致,基于理论模型分析结果不一定与实际吻合。因此,原位测试也成为土动力学实验的重要内容,包括地基的动力测试、土层的波速测、试桩的动力测试等,可获得实际场地或土工构筑物性状并检验已有模型正确性和参数可靠性。而创新性教学要求在这些传统内容基础上,进一步在教学思想和教学方法及手段上取得突破,培养学生的宏观调查和问题抽象能力,提高其细观观测和机理揭示能力,形成宏观细观结合的创新思维。

### (一) 宏观调查和问题抽象能力

土动力学创新性实验教学中,教师首先需要从实际地震震害出发,探索场地、地基、土体在基础设施破坏中扮演的角色,归纳各种破坏现象,激发学生主动学习的兴趣。1978年中国唐山大地震、1964年日本新潟大地震(如图1所示)、1964年美国阿拉斯加大地震等引发了人们对砂土地震液化研究;1995年日本神户地震中大量地下基础设施震害加速了研究界对土结动力相互作用的研究(如图2所示);2008年中国汶川大地震中大量的滑坡和泥石流破坏更是对土动力学研究和教学提出了新的迫切要求。教师要引导学生对这些震害进行调查和学习,归纳

出宏观现象背后的土动力学问题,作出符合基本物理定律的假设,明确边界条件,从而能够选择合适的实验手段揭示土体在特定动力条件下的基本特性,为建立描述土体宏观性状的模型提供基础,实现在工程上的应用。因此,土动力学实验就成为了学生主动探索问题的有力工具,而不再是枯燥的学习任务。在单元体试验方面,饱和土动强度的测定是一个典型例子。通过动三轴试验(如图3所示)测定单元体试样动强度时,应让学生理解动三轴试验施振方式、加载频率、固结条件、排水条件和试样扰动等因素都会对试验结果有重要影响。就试样扰动而言,饱和砂土重塑样的动强度有时会比原位强度低一半以上,因此,实际工程采用室内试验获得的强度指标时需要根据实际情况综合考虑,而对于土结动力相互作用问题,显然已有的单元体试验在尺度上已无法满足要求,此时,引导学生将注意力投向振动台、土工离心机振动台(如图4所示)等模型试验和原位测试,将大大加深学生对模型试验和原位测试必要性和功能的理解。



图1 1964年日本新潟地震液化倒塌



图2 1995年日本神户地震地下基础破坏



图3 配备弯曲元的动三轴系统

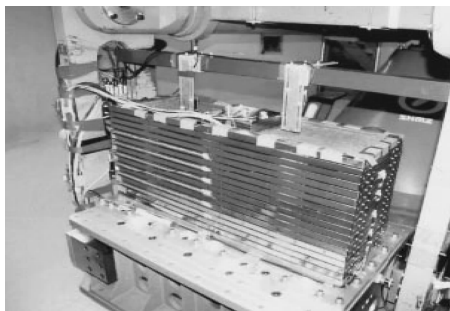


图4 土工离心机振动台试验技术

## (二) 细观观测和机理揭示能力

然而,在土动力学实验教研过程中仅有宏观把握是不够的。当前土动力学的迅猛发展对诸如:土体结构性、各向异性、应变局部化等问题对土动力特性的影响机理提出了更高要求。这些新的科学问题和难题应当在研究型大学的实验教学中得到反映,促进创新型人才的培养。从本质上看,工程材料的各种宏观物理力学性质都是其细观特性的一种表现。土是由固体颗粒、孔隙流体和气体组成的三相体,土的动模量、阻尼比、动强度和变形特性等基本动力特性无一不是土细观性状的一种宏观表现。认识土的宏观动力特性首先必须对土的细观结构有深刻的了解。因此,土动力学实验教学中,对细观性状的学习理解是单元体性状和宏观性状学习的基础。

以土动力学中常见的饱和砂土地震液化现象为例<sup>[6]</sup>:地震动造成土颗粒结构有从松散向紧密状态发展的趋势,不排水条件下土颗粒与孔隙水的相互作用造成孔压上升,当孔压大到一定程度就使大部分土颗粒间的接触脱离,这是液化的细观实质(如图5所示),此时可借助CT、扫描电镜等试验技术获取土体细观结构损伤演变的定性认识(如图6所示),并利用TDR、压电弯曲元技术测定孔隙比和剪切波速等指标以定量表征土骨架结构;在单元体尺度这种大量的土颗粒接触脱离表现为局部土体在剪切(压缩)作用下有效应力丧失、刚度及强度的急剧降低和塑性变形的急剧发展,土作为两相饱和介质而呈现液体状,即发生通常意义上的液化,与此对应可开展不排水动三轴试验(或动剪切试验)以获得土体动应力与应变关系、动孔压增长模式,开展共振柱试验获得动模量和阻尼比与动剪应变的关系等,为本构模型的建立提供基础;而对于一个土工构筑物单体(如:建筑、堤坝)而言,作为弹塑性连续介质的地基由于液化而丧失刚度和抗剪强度,使得内部的桩基无法继续承受来自上部结构的巨大惯性力,造成桩的剪断或者大幅倾斜,最终导致上部结构的倾覆,此时需要通过振动台试验或土工离心机试验实现对这一复杂土结动力相互作用的模拟和分析,为

抗震设计提供理论依据。可见,土动力学中的各种破坏过程是一种涵盖了土颗粒细观结构、单元体到土工构筑物的多尺度问题,必须从宏细观结合角度研究土体物理力学特性,才能真正揭示破坏机理,为理论和模型建立、设计方法提出、现场监测验证等工作提供可靠依据。

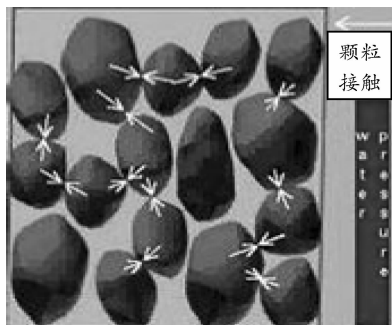


图5 砂土液化细观机理示意图

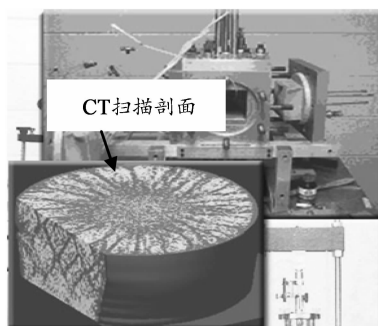


图6 三轴试验过程中的CT扫描

## 三、创新能力培养实践

研究型大学培养的学生应该是科学家和工程师的综合体,或者称之为具有创新能力的工程师。土动力学实验教学除了引导学生了解已有的土动力知识之外,还必须培养其主动探索未知世界的科学家素质,以及根据实践需要主动创造并解决工程问题的工程师素质<sup>[7]</sup>。土动力学创新性实验是培养学生创新能力的重要手段,不仅可以激发学生的创新意识,开拓学生的视野,最关键的是可以培养学生从凝练科学问题、揭示机理和解决具体工程问题的能力。目前,国内土力学实验教学已有长足进步,尤其在室内土单元体试验尺度上<sup>[8-9]</sup>。然而,面对土力学内在发展规律和当前创新性人才培养的国家需求,土力学创新性实验教学应当加强引导学生从宏、细观结合的角度主动探索土体行为并发现规律,形成创新性思考和实践的良好学习氛围。

在这一方面,浙江大学近年来发挥自身学科优势,大力建设和完善土动力学宏细观结合的实验平台<sup>[10]</sup>。在细观尺度上,依托学校扫描电镜、CT等设备基础,自主研发了高性能TDR和压电弯曲元系统,为加深学生对土体细观结构和特性的理解提供了必要手段;在室内单元体测试技术手段上,先后建

成了先进的动三轴弯曲元测试系统、双向振动三轴仪和空心圆柱振动扭剪仪,具备了在复杂应力条件下开展动力试验的能力;在土工构筑物和场地尺度上,除不断开展原位波动测试的教学与实践外,高性能土工离心机也即将建成。这些先进的实验平台与教育部创新人才培养模式实验区建设项目有机结合,促进了宏观思想指导下的土动力学创新性实验教学,对学校岩土工程乃至土木工程学生的创新研究和设计教学起到了很大的推动作用,取得了很好的效果<sup>[11]</sup>。

#### 四、结语

研究型大学的突出特点是教学与研究的紧密结合,土动力学实验教学应借鉴研究性学习的模式,倡导学生培养宏观调查与问题抽象能力、细观观测与机理揭示能力,正确掌握土的基本动力特性及其工程性状,从而提高学生解决实际工程问题的能力,以适应土力学自身发展规律和当前创新性人才培养的国家需求。

#### 参考文献:

[1] 贺瑞霞, 张国强. 土力学课程特点及其教学方法的探讨[J]. 高等建筑教育, 2007, 16(2): 92-94.

- [2] 林皋. 岩土地震工程及土动力学的新进展[J]. 世界地震工程, 1992(2): 1-11.
- [3] 陈云敏, 陈仁朋. 土木工程专业课程的教学与创新人才培养[C]. 第九届全国高校土木工程学院(系)院长(主任)工作研讨会论文集, 2008, 161-166.
- [4] 俞亚南, 姜秀英, 陈云敏. 宽口径、厚基础的“大土木”人才培养模式研究[J]. 高等理科教育, 2003(z2): 166-169.
- [5] 潘云鹤. 研究型大学本科生教育的改革与发展[J]. 中国高等教育, 2001(5): 6-7.
- [6] 周燕国, 陈云敏, 柯瀚. 砂土液化势剪切波速简化判别法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2369-2375.
- [7] 陈云敏, 陈仁朋. 土力学教学和创新人才的培养[C]. 第一届全国土力学教学研讨会论文集, 2006, 52-55.
- [8] 徐志伟, 刘志强. 土力学课程中试验结果与成果辨析[J]. 高等建筑教育, 2008, 17(1): 112-113.
- [9] 赵志峰, 王海波, 何文龙. 土力学实验教学改革的思考[J]. 高等建筑教育, 2008, 17(6): 120-122.
- [10] 陈云敏, 陈仁朋, 詹良通, 等. 岩土工程的多尺度试验[C]. 第25届全国土工测试学术研讨会论文集, 2008, 43-56.
- [11] 姜秀英, 俞亚南, 陈仁朋. 土木工程创新设计实验班的架构与实施[J]. 高等建筑教育, 2008, 17(6): 109-112.

## Macro-meso perspectives in the innovative experimental teaching of soil dynamics

ZHOU Yan-guo<sup>1,2</sup>, CHEN Ren-peng<sup>1,2</sup>, CHEN Yun-min<sup>1,2</sup>, HUANG Bo<sup>1,2</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

**Abstract:** The complexity of dynamic properties of soils and the great positive effects of experiments on the theories and practices of soil dynamics highlight the importance of experimental teaching in this course. We analyzed the problems existing in the current experimental teaching of soil dynamics, and introduced the innovative macro-meso perspectives into this course in research universities, to cultivate students' abilities of abstracting scientific problems from macro phenomena and revealing the mechanisms from meso-observations. Then the dynamic properties and engineering behaviors of soils could be properly learned by the students and their capabilities of engineering practice are strengthened.

**Keywords:** soil dynamics; innovative; experimental teaching; macro-meso; research university

(编辑 梁远华)