

土工离心模型试验及其应用的发展趋势

濮家骝

(清华大学水电系, 北京, 100084)

1 概 述

在许多工程学科中, 常常需要用小比尺的物理模型去揭示和分析现象的本质和机理, 以验证理论和解决工程实际问题, 如水利工程中的水力学模型, 航空工程中的风洞试验都是行之有效的物理模型。但在岩土工程中, 土自重引起的应力通常占支配地位, 土的力学特性随应力水平而变化, 常规小比尺模型由于其自重产生的应力远低于原型, 因而不能再现原型的特性。解决这一问题的唯一途径是提高模型的自重, 使之与原型等效。一种方法是水力坡降法; 另一种方法是将模型置于特制的离心机中, 使 $1/n$ 缩尺的模型在 ng 离心加速度的空间进行试验。由于惯性力与重力绝对等效, 且高加速度不会改变工程材料的性质, 从而使模型与原型的应力应变相等、变形相似、破坏机理相同, 能再现原型特性, 这后一种试验就称为土工离心模型试验。

土工离心模型试验主要应用于: ①模拟工程原型, 为设计提供依据; ②用试验数据验证和发展土的本构模型和计算程序; ③岩土工程的应用性基础研究和新现象研究, 为解释、发展诸如液化这些现象的理论提供依据; ④参数研究, 为设计图表提供数据; ⑤教学; ⑥军事用途。

土工离心模型试验的最初设想是 Phillips 于 1869 年提出的。本世纪 30 年代初在美国和前苏联这一概念重新被提出, 并开展了试验工作。随后, 前苏联建置了 20 余台离心机, 对岩土工程和军事工程进行了大量试验, 在理论上也有相当建树。60 年代末是土工离心模型试验发展新时期的开始, 日本和英国率先开展了试验, 70 年代在英国形成的三个离心模型试验中心, 对北海石油平台的建设起了很大作用, 并在相当大程度上推动了土工离心模型试验技术在世界范围内的发展。80 年代以来, 土工离心模型试验在设备的数量、容量以及技术和应用领域都有了极迅速的发展, 成为岩土力学的新的学科前沿和焦点。1981 年国际土力学及基础工程学会成立了离心试验技术委员会, 并于 1984 年、1988 年、1991 年及 1994 年定期举行了大型国际学术会议。土工离心模型试验的作用, 正如黄文熙先生指出: “土工离心模型试验已成为验证计算方法和解决土工问题的一种强有力手段”, 是“土工模型发展的里程碑”。

2 发展趋势

(1) 土工离心机的数量、容量、种类在世界范围内有继续增长的趋势。从 1990 年以来, 又

建成了一批大容量、多功能的大型土工离心机(包括中国水科院和南京水科院两台),其中美国陆军工程师团水道试验站建置的土工离心机,在加速度为 $143g$ 时最大有效荷重 $8t$,有效半径 $6.5m$,总容量为 $1144g-t$,它的研究领域包括了海岸、岩土、环境、结构等工程;水力学、寒冷地区和军事领域。中、小型土工离心机向标准化和普及化方向发展。此外,鼓式(*drum*)离心机近年来日益多功能化,预计21世纪将有显著发展。日本等国的建筑、岩土工程公司将继续建置新的土工离心机,用于设计、投标评估和开发新的施工技术研究。

(2)模拟技术、测试仪器和数采系统发展极为迅速。土工离心模型能否再现原型特性,以及能否从试验中取得更多信息和可靠的数据,是土工离心模型试验技术发展和应用的关键。

(a)土料的模拟。地基土模型可采用原状试样,但小尺寸的原状试样在离心试验中往往不能代表整个地基剖面的物理力学性质,再加上原状样中存在的宏观组构,如结构、裂隙、夹层等在模型中不能按比例缩小,因此另一发展趋势是根据原位测试和室内原状样试验结果,重塑具有代表性的土样,但如何解决重塑土对土的结构性和老化胶结的破坏问题,尚需作深入研究。目前有人认为提高固结的温度可能解决这一问题。如何模拟堆石料是土料模拟中的一大难题,以往采用的准相似级配法,力学(指标)相似法等方法,有待进一步验证和发展。为了避免砂土模拟中的尺寸效应,仅限制基础尺寸与砂颗粒粒径的比值,对研究剪切带等问题是不够的,可能有必要进一步限制剪切带宽度与砂土粒径的比值。

(b)岩土工程施工、运行过程的模拟。岩土工程的性状在很大程度上与施工、运行过程有关,就是由于诸如入桩方式、开挖顺序、分层填筑,受荷水位变化等因素将直接影响土体的应力历史、应力水平和应力路径。如单桩在 $1g$ 条件下入桩,其轴向荷载下的承载力仅为 ng 运行时入桩的 60% 。目前在运行中对单桩和群桩的入桩、地基自动分层开挖、盾构法隧洞施工、砂土抛填等方面都取得了明显的进展,但还缺乏在离心机运行中防渗土料的分层填筑碾压等模拟技术。

(c)大型岩土工程的土工离心模拟。一些大型工程由于尺寸太大,以致无法在已有离心机上作整体模拟;为此可采用针对具体研究对象选取局部模型;或用一系列小比尺模型试验结果外延;或用几何与加速度比尺不同的模型的方法进行试验。局部模型的边界条件与原型的相似性,以及几何与力学比尺不同的试验的相似理论和等效材料的研制等,正在作进一步的探讨和验证。

(d)测试仪器和数采系统。近年来,非接触的激光位移计(精度可达 $2\mu m$)、可同时量测法向、切向力的土压力传感器和非接触的光纤滑环、无线电地区网络(*LANs*)已在土工离心模型试验中应用。随着有关技术的进一步发展,测试仪器数采系统将从土工离心模型中获得更多的信息和可靠的数据。

(3)动力土工离心模型试验将继续占有重要地位。地震工程缺少高质量的现场观测资料,同时对一些诸如液化引起的永久变形的机理不甚了解,动力土工离心模型试验提供了一个解决上述问题的可靠途径。该领域的模拟技术已取得了系统的进展,如采用粘滞系数大的液体替代水来解决惯性和固结耦合的时间比尺问题;研制了电液伺服等激振装置,实现了高频率、高加速度和高峰值动力的输入;开发了刚性边壁吸波的模型箱和等效剪切梁式迭环模型箱,减少了模型应力场、应变场和地震波的失真。这些技术都已综合地应用“液化分析方法的离心实验验证”(VELACS)项目中。该项目于1989年到1993年耗资数百万美元,用美、英七所大学进行不同剖面的振动土工离心模型试验数据,对已有的预测液化的模型和程序进行了检验,算

得上是土动力学本构关系验证工作的里程碑。目前动力离心试验也还存在一些问题,如模型激振频率较原型高 n 倍会引起原型并不存在的惯性效应;改用粘滞性大的液体可能改变土的阻尼特性;激振设备在单向振动输入时,在另一方向产生正交加速度等。更重要的是,到目前为止动力土工离心模型试验均为一维加速度输入,缺乏三维、二维地震加速度输入的设备,此类激振设备有待开发,香港科技大学正在筹建带有双向振动台的 $400g-t$ 土工离心机,其投入运行后将可填补离心机内双向加速度输入的空白。

(4) 环境工程、冻土工程离心模型试验将得到广泛应用。在固体废料处理时,要研究污染物在防渗层和非饱和土层迁移转化的规律,而土体中水流、电流、化学物质和热流的迁移是一个相当复杂的各种梯度作用交叉影响的耦合流动问题。以往主要依靠理论分析、试验室圆柱试验和现场试验。现场试验的边界条件常常难以控制,耗资大、观测历时长(数年至数十年)。在离心机中模拟污染物迁移过程,不仅可显著地缩短时间,模拟由重力引起的热对流、毛细现象等,并能模拟边界可控制的二维、三维问题以及利用改变离心加速度从而改变有效瑞利数 R_{ae} 的方法,进行热和污染物耦合迁移问题机理的研究。目前已进行了一定数量的环境工程离心模型试验,可以预料,环境工程土工离心试验研究项目将会不断增加,为发展可靠的环境控制措施作出贡献。

冻土工程离心模型试验目前正在起步,已对冻土蠕变、管道冻胀融沉问题进行了离心试验,并研制了离心机运行中的制冷装置和专用模型箱。针对冻土离心试验存在不同长度比尺和时间比尺耦合问题,其模拟技术尚需开发。考虑到冻土地区占陆地面积的 $1/5$,以及人工地层冻结法加固地基的推广应用,冻土离心模型试验将有广阔的发展前景。

岩石工程离心模型试验得到了广泛的应用,国外曾用带有节理的人工等效材料对矿坑支护锚固问题进行了试验,我国近年来对大型岩石工程中的开挖、边坡稳定、倾倒等问题进行了大量离心模型试验,对机理研究、数学模型建立和实际岩石工程项目的论证等发挥了重要作用。同时尚需对岩石工程离心试验的模拟理论和模拟技术作进一步研究。

至于土工离心机在军事领域的应用,随着军事预算的减少和迫于现场试验污染环境受到的压力,将有所增加。

展望未来,随着土工离心模型试验设备的迅速发展和普及,模拟技术的提高和应用领域的扩大,必将对岩土工程的理论、分析、工程技术的发展发挥更大的作用。

参 考 文 献

- 1 Taylor R N. *Geotechnical Centrifuge Technology*, Blackie Academic & Professional. 1995.
- 2 Leung C F et al. *Centrifuge' 94, Proc of the Inter Conf Centrifuge' 9*, Singapore, 1994.
- 3 *Centrifuge' 91*, H - Y Ko (editor), *Proc. of the Inter. Conf. Centrifuge' 91*, Boulder, Colorado, 1991.
- 4 第二届全国土工离心模拟技术学术会议论文集, 上海, 1991.
- 5 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状和展望. 岩土工程学报, 1991, 13(6).
- 6 濮家骝, 李树勤. 土工离心模型试验及其在岩土工程中的应用. 见: 岩土力学与工程的理论与实践, 浙江大学出版社, 1992.
7. Craig W H et al. *Centrifuge in Soil Mechanics*, 1988.