

# 土工模型试验研究状况综述

中国兵器工业勘察研究院 李 钟

**【提要】** 本文扼要地综述了土工模型试验种类及其研究状况。针对构造新颖的渗水力模型试验方法,重点阐述了它的基本原理及其在地基基础方面的应用前景。

**【Abstract】** The kinds and studied situation of the geotechnical model test were summarized briefly in this paper. The basic principle and the applied prospects in foundation engineering of the new hydraulic model test method were expounded emphasisly.

## 一、前言

一般而言,对岩土工程问题进行理论分析时,均需将初始和边界条件给予简化或假定。譬如地基强度与变形的一些理论计算公式就是建立在一定假设条件下的,因而运用这些理论公式来计算地基强度和变形时会产生一定误差。有鉴于此,对地基强度与变形特征的研究有时要借助于现场试验,如地基载荷试验。但是,由于现场试验费时费力,而且费用亦高,使得现场试验不可能做得较多。因此,很有必要建立与现场相似的物理模型进行室内土工模型试验,通过室内土工模型试验建立地基在外荷载作用下的变形和破坏物理模型,再合理简化为数学模型,以便实际工程中应用。

室内土工模型试验按其自重应力水平分为 $1g$ (即常规)与 $ng$ 条件两类。在土工建筑物和地基中,其应力场主要由土的自重引起,因此土工建筑物和地基受外荷载作用时表现出的性状与自重应力水平密切相关。模型置于 $1g$ 重力场中时,其自重应力水平远远低于原型的自重应力水平,所以 $1g$ 模型试验与原型的相似性较差,模型不能很好地反映原型所发生的现象。如将模型置于 $ng$ 重力场中,使模型材料加重几倍,把模型的自重应力水平提高到原型的自重应力水平,二者的相似性就大为提高,模型就可重现原型性状。

提高自重应力水平的方法有两种。一种

方法是將模型置于特制的离心机斗中旋转,使得 $1/n$ 缩尺的模型试验在离心力 $ng$ 的空间进行;另一种方法是渗水力法,即利用通过土孔隙的渗水力以提高土体的体积力。下面分别简要介绍这两种模型试验方法在岩土工程方面的试验应用。

## 二、离心力模型试验及其在岩土工程中的应用

离心力模型试验是通过离心力来提供高重力场、并采用原型土样做模型材料来研究其模型性状。可见,离心力模型试验是通过模拟和原型相同的应力水平来研究原型性状的,因此可用于工程破坏机理、数值验证、设计参数研究以及特定工程的现场研究。

据有关资料表明,实际上远在蒸汽机时代,瓦特(J. Watt)就建议用高重力场来模拟建筑物的自重效应,但此项技术未能实现。1869年巴黎科学院的菲利浦(E. Phillips)首先提出在离心机斗中进行模型试验的想法。直至本世纪30年代,离心力模型试验才在美国和前苏联两国萌芽,到70年代才引起广泛重视。目前,前苏联、英、美、法、日、意、德、丹麦以及捷克等国都有规模不等的离心力模型试验机,共约近百台,其容量最大的已达 $900g.t$ ,而且还计划建造容量更大的离心力模型试验机。这些离心力模型试验机的观测记录设备也更趋于自动化。离心力模型试验技术的应用范围也日趋扩大,它不但

用于研究土静力学问题,也用于研究土动力学问题,如地震与爆炸问题。因此,土工离心力模型试验被称为土工物理模型试验发展的里程碑。

国内较为普遍研究发展离心力模型试验技术是从80年代初开始的,其中长江科学院、南京水利水电科学研究院,水电部成都勘测设计院、河海大学以及成都科技大学等单位率先研制成容量较小的离心力模型试验机,致力于发展我国自己的离心力模型试验技术。最近,清华大学即将建成小型离心力模型试验机,北京水利水电科学研究院和南京水利水电科学研究院已分别建成国内容量最大的450g·t和400g·t的大型离心力模型试验机。据有关资料统计,我国目前已建成或在建的用于岩土工程试验研究方面的大小离心力模型试验机近十台。它们几乎应用到土工建筑领域的各个分科之中,如土石坝、路堤路基、建筑物地基基础、码头、土工合成材料复合地基以及土压力、固结理论、加筋无粘性陡坡计算等方面的问题。

### 三、渗水力模型试验及其在地基基础方面的应用

渗水力模型试验是通过水在土体中渗流来提供体积力,正象离心机模型试验通过离心力提供体积力一样。从所收集到的资料来看,渗水力模型试验作为一种ng模型试验手段,目前仅用于桩基和浅基础地基方面的有关试验研究。

#### 1、渗水力模型试验的基本原理

水在土体中流动将引起水头损失,这是由于水在土体孔隙中流动时拖曳土颗粒而消耗能量的结果。于是,水流在拖曳土颗粒时将给土颗粒一种拖曳力,土力学中将渗透水施加于单位体积土体上的拖曳力称作渗水力。渗水力的大小与水力梯度成正比,方向与流线一致,它是一种体积力,可以表示为:

$$j = \gamma_w \cdot I \quad (1)$$

其中 $j$ 是渗水力, $\gamma_w$ 为水的重度, $I$ 是水

力梯度。

通过分析渗流场中土体的受力状态可知,在渗透水流的作用下,单位体积土体将受到渗水力 $j$ 和土体本身有效重度 $\gamma'$ 的作用,前者方向与流线平行,而后者方向垂直向下。若人为地使渗流方向与重力方向一致,则渗流场中单位体积土体将受到合力 $j + \gamma'$ 的作用,方向垂直向下。

设模型地基中某点有效应力为 $\sigma'_m$ ,则:

$$\sigma'_m = (j + \gamma') h_m \quad (2)$$

其中 $h_m$ 为模型地基中该点的深度。

对应于原型地基中该点的有效应力为 $\sigma'_p$ ,则:

$$\sigma'_p = \gamma' h_p \quad (3)$$

其中 $h_p$ 为原型地基中对应点深度。

依模型率定义,有:

$$h_p = n h_m \quad (4)$$

按ng模型试验要求,原型与模型应力水平应相等,即:

$$\sigma'_m = \sigma'_p \quad (5)$$

结合式(2)至式(5),可以得到:

$$j + \gamma' = n \gamma' \quad (6)$$

将式(6)代入式(1),则有:

$$n = 1 + \frac{\gamma_w}{\gamma'} \cdot I \quad (7)$$

显然,可以通过控制水力梯度 $i$ 来满足式(7)的要求。

可见,根据渗水力与重力等效的原理,将尺寸缩小的模型置于渗水力场中,通过调节渗水力 $j$ 的大小,可以使得模型与原型的应力水平相等。若模型率为 $n$ ,欲模拟原型的自重应力,则模型必须置于具有 $n$ 倍于重力加速度 $g$ 的渗水力场中。表1列出了有关地基基础ng模型试验的一些相似关系,该相似关系对于离心力模型试验和渗水力模型试验均适用。

#### 2、渗水力模型试验在地基基础方面的应用

表 1 地基基础 $ng$ 模型试验相似关系

物 理 量	模型率 (原型/模型)
几 何 比 尺	$n$
面 积	$n^2$
重 力 加 速 度	$1/n$
应 力	$1$
应 变	$1$
承 载 力	$n^2$
沉 降	$n$
体 积	$n^3$
容 量	$1/n$

渗水力模型试验构思新颖,有着良好的应用前景。国内外在这方面的研究工作目前仍处于探索阶段。从收集到为数不多的有关资料得知,法国人泽里克森(A. Zelikson)首先将渗水力模型试验方法运用于桩基础模型试验研究中,并指出该方法可用于研究浅基础地基方面的问题。后来法国人郑绥(Y. Tchong, 1977)利用无底圆筒研制成模型室直径为58cm、最大高度为150cm的渗水力模型试验设备,并利用其进行过饱和砂土地基浅基础及桩基础模型试验研究。

在国内,清华大学丁金粟教授等(1988)最先用圆筒形有机玻璃研制成模型室直径为20cm、高为40cm的渗水力模型试验仪,并利用该设备进行了桩基础和浅基础地基方面的有关试验研究。

与离心力模型试验相比较,渗水力模型试验具有以下优点:

(1) 应力场均匀。离心力模型试验中所形成的应力场,在模型箱底与模型箱顶处是有差别的,模型箱两端离心力方向夹角有时可达 $10^\circ$ ,而在渗水力模型试验中的自上而下沿程水头消耗均匀,则模型土体体积力均匀,方向基本平行,垂直向下。

(2) 设备造价低廉。一般研制一台渗水力模型试验仪,若模型室直径 $d=40\text{cm}$ 、高 $h=80\text{cm}$ 的大型渗水力模型试验仪,如果以 $n=120$ 计,则试验容量可达 $15\sim 18\text{g}\cdot\text{t}$ ,

其造价约5万元,仅为一台小型离心力模型试验仪(斗容积 $40\text{cm}^3$ )造价的十分之一左右。

(3) 操作方便。因渗水力模型试验设备在试验过程中处于静止状态,所以对于一些在离心力模型试验中较难解决的问题在渗水力模型试验中可以得到较好的处理。例如, $ng$ 条件下的沉桩以及浅基础地基在偏心荷载作用下的载荷性状分析等。

实际上,任何一件事物都有其局限性,渗水力模型试验方法本身也有不足之处,如研究课题范围较窄;对所试验的模型土种类有一定要求,例如透水性很大的无粘性土以及压缩性高、透水性低的软粘土均不宜选作模型土料。但是,渗水力模型试验方法用于研究诸如浅基础密实饱和粉砂地基载荷性状以及桩基工程等问题,却是一种实用且有效的手段。

#### 四、结束语

实践表明,土工模型试验是进行岩土工程试验研究的有效手段之一。离心力、渗水力两种 $ng$ 条件土工模型试验方法各有优缺点,但在各自适用范围内都有着良好的应用前景,势必会运用到岩土工程各个领域,这就也要求对这两种 $ng$ 条件土工模型试验方法急待进一步开发和完善。

由于作者水平有限,错误之处难免,欢迎指正。

#### 参 考 文 献

- 1 Craig, W. H. (1989). Edouald Phillips and the idea of centrifuge modelling. *Geotechnique* Vol. 39, No. 4, pp697~700
- 2 Zelikson, A. (1969). Geotechnical models using the hydraulic gradient similarity method. *Geotechnique*, Vol. 19, No. 4, pp495~508
- 3 张振国 (1990). 垂直受荷桩工作机制渗水水土工模型试验研究. 清华大学博士论文, 指导教师: 黄文熙、丁金粟