

第二届国际软土工程会议模型专题综述

徐光明 章为民

(南京水利科学研究院 南京 210024)

摘要 模型试验方法是探讨和解决岩土工程问题的一条重要途径,特别是土工离心模型,它借助于离心力场的作用,使模型土体中各点的应力与原型相等,从而满足模型相似律,在模型中能再现原型性状。更具有实用意义的是,软土层完成固结在原型中往往需花多年甚至几十年,而在模型中由于排水路径的缩短,仅需很短的时间。近年来国际上围绕软土工程开展了一系列的土工离心模型试验,重点探讨研究软土的特性和改良加固处理方法。第二届国际软土工程会议模型专题方面的论文充分体现了该领域的最新研究动态和发展趋势,在研究内容、试验模拟手段和分析处理方法等方面都有新的突破。

关键词 模型试验 软土 地基加固 综述

物理模型试验是研究岩土工程问题的传统途径之一,六七十年代土工离心模型试验方法的引入和在世界范围内的广泛传播,使得这一方法又有了新的发展和飞跃,应用的领域越来越大,发挥的作用越来越引人注目。尤其是围绕软土工程开展了大量的实践,取得了丰硕成果。为了充分反映物理模型试验方法在这一领域的发展和运用,国际软土工程会议专门就离心模型和其它模型试验设立了专题,并立即得到国内外学者的热烈响应。1996 年 5 月在南京召开的第二届国际软土工程会议模型专题共录用论文 14 篇,中外学者各 7 篇,其中离心模型试验研究论文占 10 篇。这些论文内容新颖丰富,主题突出,在研究的范围、试验水平和分析处理方法上都有新的进展和突破,因此具有相当高的学术意义和实用参考价值。

1 离心模型试验研究

1.1 离心模型试验方法简介和进展

尽管普通小比尺模型很早就用于岩土工

程的科研活动,但它还不是理想的研究工具,这是因为在普通重力场($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)中,模型各点的应力水平比原型低许多,土的许多特性如应力应变关系非线性以及内摩擦角的应力依赖性等,在模型中得不到真实反映。但当这种小比尺模型放入离心机,让其承受 N 倍重力加速度(Ng)的离心加速度惯性力场作用时(N 为模型的几何比尺),模型与原型在对应点的应力相同,与应力水平密切相关的土的特性得到反映,模型所表现的性状也就与原型相同。换句话说,原型的性状能在 Ng 模型中再现,从而可以利用它模拟各种条件或原型真实条件开展各种研究和预测。更具现实意义的是,根据固结理论,达到某一固结度,超静孔隙水压力消散所需的时间与排水距离的平方成正比,所以模型所需的消散时间缩短为原型的 $1/N^2$ 。对一般软粘土来说,其透水性很小,土层中超静孔压产生后,往往需几年甚至几十年才能完全消散。如果用离心模型试验研究固结现象,这一过程往往在几十小时甚至更短的时间就能完成,所以离心

第一作者简介:徐光明,男,硕士,高级工程师,从事土工离心模拟研究,曾发表《离心模型中的粒径效应和边界效应》等论文。

模拟技术可以很方便地用来研究和预测软基领域的现象和问题,这也就是在软土工程中离心模型试验活动特别频繁活跃的原因之一。

在本次大会交流的论文中,有关离心模型试验方法的基础研究方面也有报导。在一项由四个国家参加完成的国际合作试验项目中,介绍了离心模型试验结果的变异性和重复性^[1]。试验参加者均用 Fontainebleau sand (一种法国砂)在各自的离心机上分别用自己的方法进行浅基础承载力试验,目的探讨离心模型试验结果的变异性,结果发现这种变异性不是很大,它说明了离心模型试验方法的可靠性。对于试验结果的重复性,则利用相同条件下的重复试验结果数据,根据概率统计原理来阐述模型重复试验次数对试验结果精度的影响。

关于离心模型试验结果特别是离心加速度上升阶段测得的数据的解释和处理,过去一直缺乏认真的研究,因而它们的意义不甚清楚而未被利用。Zhang 等(中国)^[2]最近在这一领域取得了突破,明确和发掘了该阶段的物理意义和利用价值。文中建立了加速度上升阶段模型顶部实测位移值与原型堤坝中分层埋设的沉降标志所记录的沉降之间的对应关系,使分析求得的模型堤坝沉降分布和大小与原型相当一致,用有限元方法按照上述思路进行的数值模拟再次证实了所建立的模型变形和原型实测沉降关系的正确性。这一成果为进行其它各类土工建筑物施工阶段的模拟并获得合理可信的变形资料积累了经验。

模拟技术是离心模型试验方法的核心之一,其目的是尽可能模拟原型的真实条件。在研究用挤密砂桩(SCP)加固的地基的性状时,模型试验的关键在于如何模拟现场砂桩设置条件进行模型挤密砂桩的制备。Lee 等(新加坡)^[3]在这一方面取得了突破。他们新开发成的一套用于设置模型 SCP 的液压装置,与通常采用的替代法(replacement method)制模不同,它能直接模拟现场 SCP 施工过

程,从而能考虑施工对桩周围土产生的挤密作用,模拟效果更佳,是一种位移法(displacement method)。

1.2 软土改良加固工程

在滨海地区的软粘土上建造建筑物时,由于其强度低、压缩性高,通常得进行改良加固处理,因此加固方法的效果和机理也就成为岩土工作者最关注的课题之一。在 10 篇离心模型试验论文中,就有 6 篇是研究软粘土地基改良加固后,在上部荷载作用下的稳定和变形性状。改良加固的方法包括砂桩挤密法(SCP)、深层搅拌法(CDM)、排水固结法、土工合成材料加筋以及钢桩基础。

在地基中设置 SCP 是日本开发的一种土的加固方法,在砂土地基和粘土地基中都能采用,文[3~5]报导了 SCP 法研究取得的成果。Lee 等(新加坡)^[3]报导了他们用新开发的液压装置在模型中用位移法设置 SCP,在加固过的地基上筑堤,该堤的性状与用替代法设置 SCP 所加固的地基上的堤性状有明显差别;但两种方法设置的 SCP 加固效果都很明显;既能减少堤荷作用引起的地面隆起,又能有效减少堤的过大沉降,从而能防止堤的突发性坍塌。

沉箱或桩承桥台后的回填施工对地基的稳定影响非常大,如果不采取加固措施,软基就可能失稳。处理的方法有:用 SCP 加固软土层,设置钢桩承受上部结构物作用,换用轻型材料回填。Watabe 等(日本)^[4]对这三种方法进行了 12 组离心模型试验,比较了它们的共同特性和不同点,探讨了 SCP 和钢桩基础的加固机理和破坏型式,这些成果对软土地基上结构物后的回填施工前加固措施的选择有参考价值。

铜渣是一种工业废料,最好能当作建筑材料被利用起来。Kitazume 等(日本)^[5]研究了低置换率的铜渣 SCP 加固的软粘土地基上护岸结构物的性状,并与普通砂 SCP 加固的地基的情况作了比较,以评估铜渣在 SCP 法中的应用价值。通过一系列离心模型试验

研究发现,铜渣 SCP 和普通砂 SCP 加固过的两种地基,它们的荷载位移关系和变形非常相似,表明 SCP 法中的加固充填料可以从普通砂扩展到铜渣,这一成果的意义不仅限于此,它还提供了一种废物利用、保护环境的极好途径。

深层搅拌法(CDM)同 SCP 法一样适用于软土工程。为了用离心模型试验检验地基加固后的效果,一般都对地基未作处理时的天然状况进行模拟,其性状就作为加固效果比较的依据。另一方面,它与原型实际发生的性状比较后还能直接检验模拟的相似程度。Xu^[1]按照上述思路成功预测了一坍塌后灰坝地基的 CDM 加固效果和稳定性。另外用同样的方法研究了一大型油罐软基用土工合成材料袋装碎石加固效果,并预测了加固期和运行期的沉降。

土工合成材料加筋作用的另一用途是建造加筋土挡墙或土坡。在软基上修筑加筋挡墙,并且就地取材用软土回填料是一种具有挑战性的设想,它可大大节省造价。Probaba(日本)^[6]就上述设想完成了 7 组离心模型试验,并选择到一种厚度仅 0.000 6 mm 的无纺布作为加筋物的模拟材料,就加筋体长度和挡墙坡角对挡墙性状的影响作了较全面的分析研究,认为加筋物长度较短而坡度较缓的模型比坡度陡而使用长加筋物的模型更稳定,而且造价较低。

除了加筋作用外,土工合成材料的另一个主要作用是排水反滤,土工合成材料制成的塑料排水板常用来替代普通砂井,在软基预压排水加固工程被广泛采用。Du 等(中国)^[7]用非扰动土样作离心模型试验,分别模拟地基未作处理和用塑料排水板处理两种状况,预测了施工期和运行期软土地基和路堤的沉降变形规律及塑料排水板加速软土层固结的效果,对该车站软土加固工程提出了合理建议。

1.3 其它应用研究

在航道和港池加深等防护工程中产生了

大量的疏浚土,倾倒堆放占去很多场地,而填海造地工程又需要运进大量的粒状土填料,如果疏浚土能作为填土材料在围垦工程中利用起来,将是一件一举两得的事情。Leung 等(新加坡)^[8]利用离心模拟试验技术对疏浚产生的粉质粘土进行了一项试验研究,确定它们作为填土受上部超载作用时的性状,从而评估了疏浚土作为围垦填土的可行性。

Yi 等(中国)^[9]的防波堤码头离心模型试验验证和分析了码头的稳定性和地基的承载能力,还探讨了推石棱体和卸荷板尺寸改变所产生的影响。

存在于地层中的基岩裂缝断层可能由于各种原因发生错动,从而影响到上覆土层上建筑物的安危,Liu 等(中国)^[10]用所开发的基岩错动模拟装置,分别就基岩的上下竖错动和前后水平错动对四种不同上覆土层的影响类型和影响范围开展了离心模型试验,其成果对城市工程抗震措施的评价有参考价值。

2 其它模型试验研究

物理模型,不管是离心模型还是其它普通小比尺模型,都能帮助人们认识和探讨岩土工程中的物理现象中的内在规律,推进基础研究工作地开展。普通重力模型由于简便直接,至今仍为人们采用,本次会议有 4 篇这方面的论文。Matsuoka 等(日本)^[11]用铝棒体进行了一种叫“倾斜盒(tilting box test)”的模型试验,试验结果适用于干燥和潮湿状态下的粒状材料和砂。试验结果明确了坡面上土颗粒滚动是土坡整体破坏的直接原因这一机制,他们采用的阻止坡面上颗粒运动的加筋措施也出奇地有效。Tsuchida 等(日本)^[12]研究了粘土泥浆的强度增长机制和含水量变化规律,为此进行了泥浆沉积试验和固结试验,发现含水量变化并不明显,而抗剪强度随次固结时间慢慢增长。

人工地层冻结法是一项新的软基施工加固技术,常用于地下工程的施工围护。Zhu 等(中国)^[13]介绍了用液体氮人工冻结软土

的模型试验研究。他们依据热交换分析建立了相关的模型相似律,估算了用冻管技术形成一冻墙所需的液体氮供给流量和总消耗量,这些试验数据为冻土研究和技术应用提供了定量分析的依据。

桩土共同作用问题是岩土工程师感兴趣的话题,有关的研究报导特别丰富,本次大会论文中也有一篇用物理模型试验所作的研究报导。Onuselogu 等(中国)^[4]研究了单桩和桩群在砂土中的性状,用有机玻璃管模拟桩体,管内有应变计,另外采用人工加荷。试验结果相当有规律性。

3 结 论

本次国际会议模型专题部分的论文,首先充分体现了这一领域取得的最新成果和进展,题材新颖独到,例如用土工离心模型试验研究了新提出的工程问题,象疏浚土在围海工程中作为填土时的受力特性和铜渣 SCP 性状的研究,这些工作的开展对废物利用、保持环境意义重大;其次,论文不仅题材新颖,而且主题突出,有关软土改良加固处理的研究报导最多,有的论文是对某一方法所作的系统研究的报导,例如对 SCP 性状的研究就开展得相当深入;另外,论文的范围较广,从软土特性到加固技术,从机理研究到工程应用都有涉及;更重要的是,相当多的工作取得了突破性进展,如新加坡学者成功开发了一套离心模型 SCP 施工模拟装置,对离心模型加速度上升阶段的数据分析和解释也取得了大的进展。总之,这些高水平论文在本次大会上的发表和交流必将促进物理模型试验特别是离心模型试验方法的发展和在软土工程中应用的进一步开展,更好地为该领域的理论和研究服务。

参考文献

- 1 Xu G M. The application of centrifugal model testing method to soft foundation treatment. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 427 ~ 434
- 2 Zhang W M, Xu G M. Using centrifuge model to simulate embankment construction settlement. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 421 ~ 426
- 3 Lee F H, Ng Y W, Yong K Y. Centrifuge modelling of sand compaction piles in soft ground. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 407 ~ 412
- 4 Watabe Y, Takemura J, Kimura T. Failure mechanism of clay deposits improved by SCP and pile foundations. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 449 ~ 454
- 5 Kitazume M, Mayajima S, Nishida Y. Stability of revetment on soft clay improved by SCP. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 455 ~ 460
- 6 Porbaha A. Reinforced retaining structures on soft clay foundations. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 443 ~ 448
- 7 Du J C, Zhang L M. Centrifugal modelling of soft foundation treatment of Guanggang railway station. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 413 ~ 420
- 8 Leung C F, Lau A H, Wong J C, et al. Centrifuge model tests of dredged material. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 401 ~ 408
- 9 Yi J D, Cai Z Y, Xu G M, et al. Centrifugal model test for a gravity - type wharf. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 435 ~ 442
- 10 Lin S H, Dong J C, Cai Z Y. Centrifuge modelling for effect of bedrock offsets. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 461 ~ 466

(下转第 58 页)

b. 以太网网络通讯软件。

2.3.2 应用软件

教学电厂计算机监控系统的用户应用软件(包括报表、图形、SOE事件表等),将在上述计算机系统软件和硬件支持下由用户自行开发。这是一项关系到系统功能能否实现的关键性工作。我们将以模块化的结构编辑下述用户功能软件。

a. 数据采集与处理软件。时钟同步处理、中断开关量变位报警处理、扫描开关量变位报警处理、参数越限报警处理、趋势分析处理、I/O通道故障报警处理、正常扫描信息处理。

b. 数据库管理软件。基本数据库管理模块、实时数据库管理模块、历史数据管理模块(包括事故追忆、统计计算)、预置数据管理模块、画面及打印制表数据库管理模块、计算数据管理模块。

c. 基本应用软件。电量累计软件(分时计度)、机组运行工况统计软件、定时任务管理软件、画面刷新软件、事故追忆软件、运行日志和报表生成软件、机组开/停机顺序控制程序软件、机组有功/无功控制软件、分合闸操作软件、在线自诊断软件、操作票管理软件、双机热备自动切换软件。

d. 人机联系软件。命令分析软件模块、电站运行方式设置模块、LCU联机/脱机处理模块、画面目录模块、打印任务目录模块、负荷曲线设置模块、机组单机手动开/停机控制模块、机组单机有功/无功手动调节模块、参数修改软件模块。

3 结束语

自行研制、开发、组建教学电厂计算机监控系统对成都水电学校来讲是一个较艰巨的系统工程,鉴于经验和经费的原因,工程的实施可分为两步。第一期工程的前半期,完成单台机组 LCU1 和上位机(单台)系统的设计组建及相关的自动化元件、传感器改造,通讯网络进行全局性布置,实现单台机组的计算机控制;后半期,组建另外两台机组现地控制单元 LCU2、LCU3 及公用系统——开关站 LCU4,完善上位机系统及其它自动化元件的配套改造工作。这样,第一期工程结束后,就基本完成了教学电厂的计算机监控系统。第二期工程可考虑对三台机组的调速、励磁调节系统和辅机系统进行计算机化改造,并进一步深层次的开发和完善全厂计算机 AGC、AVC 及最优化控制等功能,还可以考虑全厂水情测报、火灾报警、大坝监测、通信等的改造工作,使教学电厂达到“无人值班,少人值守”的目标,使这座 70 年代建成的教学电厂重新焕发出活力,成为现代化水电站和计算机监控技术的教学样板和培训基地。

参考文献

- 1 电力工业部.水电厂计算机监控系统基本技术条件(电力行业标准:DL/P578-95)北京:电力出版社,1995
- 2 顾隽修等.计算机局域网络原理与应用.北京:中国广播电视出版社,1993

(收稿日期:1996-04-05 编辑:熊水斌)

(上接第 41 页)

- 11 Matsuoka H, Sugiyama Y. Failure mechanism and effective reinforcement of granular soil slope. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 486 ~ 491
- 12 Tsuchida T, Tang Y X. Developing mechanism of shear strength at the top of seabed. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 480 ~ 485
- 13 Zhu L N, Chen R J. Modelling test research on artificial freezing of soft soil with liquid nitrogen. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 474 ~ 479
- 14 Onuselogu P, Yin Z Z, Xu Y F. Pile group characteristics in sand environment. In: Shen Z J, et al eds. Proc of the 2nd Int Conf on Soft Soil Engineering, 1996, Nanjing, China. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 467 ~ 473

(收稿日期:1996-09-06 编辑:熊水斌)

(上接第 51 页)

参考文献

- 1 Eggelsmann R. Subsurface drainage instructions. Verlag Paul Parey-Hamburg and Berlin: Kommissionsverlag, 1978
- 2 Schultz B. Lecture and exercises on drainage and land reclamation. International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1992. 4 ~ 25
- 3 Stugt L C. Drainage envelope research in the Netherlands. In: Proceedings 2nd International Drainage Workshop, WDC, USA, 1982. 378 ~ 411
- 4 Farr E, Nanderson W C. Land drainage. London and New York: Longman, 1986. 195 ~ 217
- 5 Smart P, Herbertson J G. Drainage design. New York: Blackie, 1992. 178 ~ 197

(收稿日期:1996-01-08 编辑:许宇鹏)