

文章编号: 1000-7598 (2009) 04-1191-06

鼓式土工离心机技术及其工程应用研究

张 霆^{1,2,3}, 刘汉龙^{1,2}, 胡玉霞³, STEWART Doug⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098;
3. 澳大利亚 SKM 工程咨询有限公司, 珀斯 WA6000; 4. 科廷理工大学, 澳大利亚 珀斯 WA6102; 5. 高达集团西澳分公司, 澳大利亚 珀斯 WA 6005)

摘 要: 20 世纪 90 年代以来, 离心机模型试验在岩土工程的研究和工程实践等方面的应用得到了显著的提高。研究者之所以把目光投向离心机, 是因为相对于昂贵和未知的现场试验来说, 用离心机模型试验要比现场试验更为优越。自从 1978 年剑桥大学 Schofield 首次利用鼓式离心机以来, 它的应用研究越来越多。通过介绍鼓式离心机的主要结构、模型控制以及数据采集系统等主要特征参数, 阐述了其在岩土工程应用中的优点。通过 PCC 桩的承载特性模型试验介绍了鼓式离心机在岩土工程中的应用。

关 键 词: 土工离心机; 鼓式; 模型试验; 数据采集; 工程应用

中图分类号: TQ 051.8.4

文献标识码: A

Geotechnical drum centrifuge technique and its engineering application

ZHANG Ting^{1,2,3}, LIU Han-long^{1,2}, HU Yu-xia³, STEWART Doug⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 21098, China; 3. Sinclair Knight Merz Pty Ltd, Perth WA6000, Australia;
4. Curtin University of Technology, Bentley WA6102, Australia; 5. Golder Associates Pty Ltd, Perth WA 6005, Australia)

Abstract: Since 1990s, the centrifuge modeling technique has increasingly been used in the research and practice of geotechnical engineering. Comparing with the expensive and unknown of field testing, the centrifuge modeling has more advantages and that's why the researchers prefer them. Then the details and advantages of drum centrifuge at the University of Western Australia (UWA) are described, including modeling of linear features. Finally, a joint research between GeoHohai and UWA on PCC pile modeling in drum centrifuge is introduced.

Key words: geotechnical centrifuge; drum; data acquisition; modeling; application

1 引 言

1869 年法国工程师 Edouard Philips 首次提出把离心机模型试验技术应用于土木工程领域的构想^[1], 直到 20 世纪 30 年代初期, 离心模型试验才开始用于研究岩土工程问题^[2]。80 年代开始, 法国、荷兰、意大利、新加坡等国家相继发展了大型离心机。中国水利水电科学研究院、南京水利水电科学研究院、长科院等也相继在 80 年代末和 90 年代初期建造了一些离心机^[3], 90 年代以来, 离心机试验在岩土工程的研究和工程实践等方面的应用得到了显著的提高^[4]。目前世界上土工离心机已经超过了

100 台^[5]。对于很多难处理的岩土工程问题, 离心机模拟是一个强有力的工具, 对于研究和理解大型岩土系统的基本力学性质十分有效, 可以通过直接的物理对比(相似和标度法则, 见表 1)分析其理想特性, 验证设计和计算方法, 以便于进一步对原型问题做更深入细致的分析。研究者们之所以青睐离心机, 是因为相对于昂贵和未知的现场测试来说, 用离心机模型试验要比现场试验更为优越。

2 土工离心机的应用及分类

应用于各行各业的离心机有很多种类, 而土工离心机主要可以分为两大类: 臂式离心机见图 1(a)和鼓式离心机如图 1(b)所示。

收稿日期: 2007-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50679017, No. 50639050); 澳大利亚 ARC 基金资助项目。

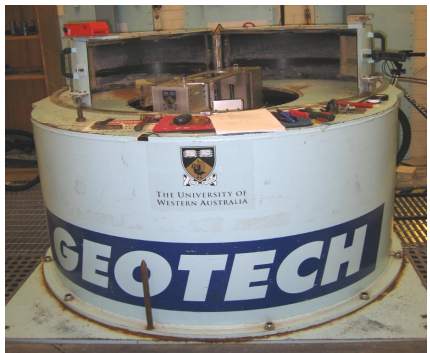
第一作者简介: 张霆, 男, 1974 年生, 讲师, 在职博士, 澳大利亚科廷理工大学访问学者。主要从事桩基础及离心机模型试验研究。E-mail: tzhang@skm.com.au

表 1 离心机试验中的通用相似条件
Table 1 Centrifuge model scaling relationships

参数	原型	模型	比例 (模型/原型)
加速度	1g	ng	n
长度	L	L/n	1/n
面积	S	S/n ²	1/n ²
体积	V	V/n ³	1/n ³
应力	σ	σ	1
应变	ε	ε	1
密度	ρ	ρ	1
质量	m	m/n ³	1/n ³
力	F	F/n ²	1/n ²
弯矩	M	M/n ³	1/n ³
时间 (固结)	t	t/n ²	1/n ²



(a) 臂式离心机



(b) 鼓式离心机

图 1 臂式离心机和鼓式离心机
Fig.1 Beam centrifuge and drum centrifuge

通常，鼓式离心机的试样和模型要比臂式离心机的都要小一些，但鼓式离心机在许多方面要比臂式离心机更具有优越性，比如，在模拟管线（海岸工程）、污染物的传播（环境岩土工程），波浪模型，或者基础响应参数研究等具有线性特性的模型等。最大的优势在于连续而均质的试样可以在不受边界效应的影响情况下提供较大的试验所需要的平面空间，一般要比具有相似直径的臂式离心机大很多倍。在鼓式离心机中进行土与结构相互作用模型试验，主要通过固定在中央控制台的驱动装置来实现。为了保证最大化利用试验区域，中央控制台必须具备以下两个重要的特征：(1) 中央控制台相对于外

围的模型槽的相对运动可以控制；(2) 中央控制台可以根据需要随时停止，以便校正或者更换试验设备，即可直接进行进一步试验而不需要停下模型槽。

3 西澳大学鼓式离心机

自从 1978 年剑桥大学 Schofield 首次利用鼓式离心机模型试验进行边坡稳定分析以来^[6-7]，鼓式离心机在岩土工程领域的应用研究越来越多。1991 年，澳大利亚西澳大学（UWA）Mark Randolph 教授发起建造了澳大利亚第一台臂式土工离心机^[8]，随着科研项目和学生数量的日趋增多，原有的臂式土工离心机已经不能满足教学和研究需要，于是 1998 年西澳大学和 Schofield 合作建造了鼓式土工离心机^[9]。离心机一些的主要特性和相关中心驱动装置其有关细节以及数据采集和控制系统简单介绍如下。

3.1 鼓式离心机的主体结构

鼓式离心机安装在实验室中一个专门建造的钢筋混凝土地下基坑内，机试样槽为环行（鼓体），竖直向宽 300 mm，径向深 200 mm，直径为 1.2 m（图 2）。它的最大转速为 850 rpm，相当于模型槽底部离心加速度为 485 g。典型试样的厚 150 mm，该试样表面的最大加速度可达 364 g。对于此厚度的试样，在它表面的最大应力误差约为 10%，最大有效加速度为 400 g（有效半径为 0.5 m）。最大允许的不平衡力为 6.3 kN。

模型槽和控制台分别与内、外两个独立的传动轴相连，通过不同的马达控制其相对转动。模型槽与外传动轴相连，通过传动皮带由一个马达来驱动，而控制台与内传动轴相连，由另一个伺服马达驱动。

离心机系统有一个相对独立的试样准备区域，此区域装有制冷系统来维持试验期间的恒定温度，同时可以冷却离心机的各种机械部件。

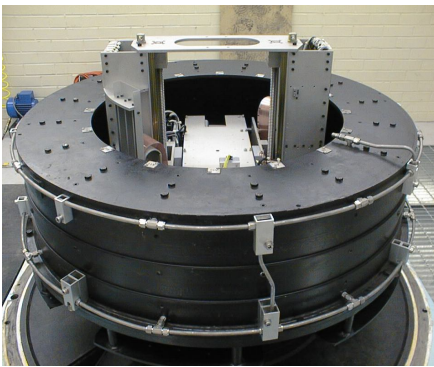


图 2 去掉保护外壳的鼓式离心机和中央控制台
Fig.2 View of drum centrifuge and central tool table

3.2 控制台驱动器

控制台与伺服马达组合在一起, 可在3个方向运动: 竖直向、径向和圆周向(转动)。

控制台驱动器见图33。所有元件都安装在一个直径为700 mm的基础板上, 它通过套管和离心机的内传动轴结合在一起。

竖直向驱动器主要用来控制离心机中间的水平平台(长780 mm, 宽290 mm)的升降, 其中一个径向驱动器用来加载模型或者准备试样, 另外一个则充当动态配重通过调节位置来维持系统平衡。每个驱动器沿着双重的线性轴承驱动一个刚性的工具架。工具架上装有夹具用来携带测试设备或者试样制备工具。在主平台的侧向有两个小的平台, 分别安装了仪器放大器和伺服放大器以收集径向驱动器信号。

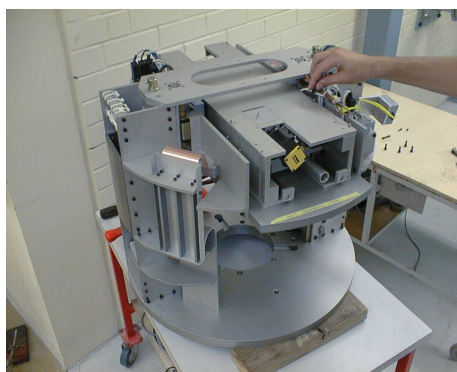


图3 鼓式离心机控制台驱动器
Fig.3 View of tool table actuator

3.3 数据采集及控制系统

数据采集和控制系统主要包括几个互相关联的部分: 模型槽控制、数据采集和控制台操作。

模型槽的旋转通过专门的软件由计算机控制并监控, 其控制软件是在原有臂式离心机软件基础上改进而成, 一旦发现不安全的情形, 程序会自动停止离心机。

鼓式离心机安装两个随机携带的数据采集系统, 分别放置在模型槽和控制台上。系统一共可记录32个信号, 模型槽和控制台各占一半。随机携带计算机的数字信号经过串行接口(RS232)输入控制室中专门的数据采集计算机。数据可直接存储在计算机磁盘上, 也可以把存储的数据传送到其他计算机上实时图像展示。控制台还携带另外一个计算机主要用来控制驱动器。伺服控制模型槽的旋

转, 动力、信号的控制和反馈都是通过滑动套环来传输。

4 鼓式离心机在桩基工程中的应用

离心机试验可以精确复制现场的应力条件, 在模拟桩基工程中具有特殊的优势, 即可模拟现场应力随深度增加这一基本的现象。河海大学岩土工程研究所和西澳大学合作进行了离心机模型试验^[10-11], 对现浇混凝土薄壁管桩(PCC桩)承载特性进行了研究, 所有试验都在UWA鼓式离心机中完成。PCC桩是河海大学岩土工程研究所开发的专利技术^[12-13]。主要工艺是通过振动力将双层钢套管所形成的环形腔体在活瓣桩靴的保护下打入到下卧层或设计深度, 然后, 在腔体内浇注混凝土后振动拔管, 在环形域中便形成混凝土管桩^[14-16]。与其他桩相比, 对于相同的混凝土体积比PCC桩有很大的桩身摩擦力, 为承担荷载提供了一个比较经济的方法^[17]。

4.1 试样准备

首先, 在离心机试样槽的底部设置一层10 mm左右厚的砂土作为排水层。加速度为20 g时, 通过专门软管再把含水率为120 %的高岭土泥浆注入鼓式试样槽, 然后让试样在250 g时进行固结。在试样槽相应的位置布置了3个微型孔隙水压力计, 以便观测黏土的固结过程。当黏土固结一段时间后, 表面会下沉, 此时再进一步注入泥浆, 重复上述步骤, 直到最后固结后的试样高度达到150 mm。再把离心加速度调整到125 g, 使得超固结比(OCR)为2, 所有的试验均在此条件下进行。

4.2 试验装置

试验所用的模型桩的示意图见图4(a)。模型桩所用材料为铝, 外径为10.2 mm, 桩表面进行了磨砂处理。试验所用模型桩一共有3种: 闭口桩、开口厚壁管桩(桩端有效面积比 $A_r = 0.46$)和开口薄壁管桩($A_r = 0.13$)。群桩包含5个单桩, 群桩桩帽的设计见图4(b)(平面图), 桩帽也是铝制的, 质地较轻, 但是相对刚度较大。桩间距比(s/D)可定义为中心桩和边角桩中心到中心的距离与桩的外径之比(由桩外径归一化处理)。桩间距可以通过桩帽上连接桩头的连接器位置来调节。在群桩试验时, 在桩帽的顶部安装了一个量程为8 kN的总测力计, 另外, 在1、2、4桩号的顶部分别安装了1个量程为1 kN的测力计, 这样既可以测群桩总的承载力, 又可以测得单桩的承载力。

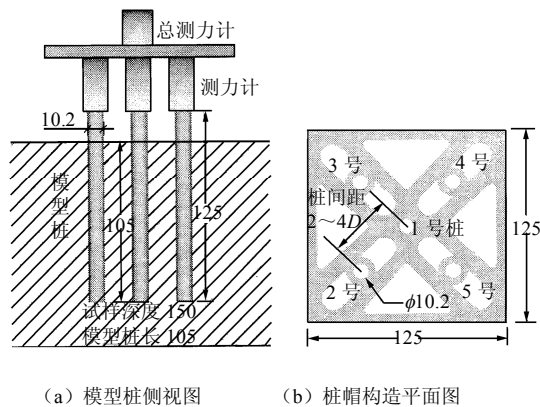


图 4 模型桩群桩的示意图 (单位: mm)
Fig.4 Model piles and pile group layout (unit: mm)

4.3 试验方案

在离心加速度为 125 g 时, 模型桩的安装是通过一个专门设计的槽型钩以 1 mm/s 的速度匀速压入试样中, 最后模型桩压入试样的深度为 105 mm。5 根单桩安装完成以后把桩帽安装在控制台上, 通过计算机精确控制完成其与群桩的对接。在单桩安装完成 100 min 和群桩安装完成 120 min 后, 进行压缩试验。试验方案见表 2。

表 2 单桩及群桩离心机试验方案
Table 2 Centrifuge testing program

编号	类型	桩端	间距/mm	壁厚/mm	桩径壁厚/mm	桩端面积比 A_r
SC	单桩S	闭口				
GC2D	群桩G	闭口	2D			
GC3D	群桩G	闭口	3D			
GC4D	群桩G	闭口	4D			
GCB2D	群桩G	开口厚	2D	1.35	7.6	0.46
GCB3D	群桩G	开口厚	3D	1.35	7.6	0.46
GCB4D	群桩G	开口厚	4D	1.35	7.6	0.46
SOB	单桩S	开口厚		1.35	7.6	0.46
SOA	单桩S	开口薄		0.35	29	0.13
GCA2D	群桩G	开口薄	2D	0.35	29	0.13
GCA3D	群桩G	开口薄	3D	0.35	29	0.13

注: G 表示为群桩, S 表示单桩, C 表示闭口桩, O 表示开口桩; A、B 分别表示薄壁和厚壁。

4.4 试验结果分析

(1) 单桩 与单桩 (编号 SC、SOB 和 SOA) 有关的荷载位移关系见图 5。总的极限承载力 Q_{ult} 定义为当桩头发生 10 % 的桩径的沉降值。需要注意的是, 测试结果需要考虑到模型桩自身的重量, SC 和 SOA 为 10 N, SOB 为 20 N, 如图 5 所示曲线的起点并不是 0。单桩的极限承载力 Q_{ult} 、桩端阻力 Q_b 和桩侧摩阻力 Q_s 见表 3, 这里假设压缩过程

中的桩侧摩阻力 Q_s 和随后拉伸试验中所测试的桩侧摩阻力相同。

试验结果表明, 桩端有效面积比 A_r 对上述桩的极限承载力有重大的影响。桩侧摩阻力随着 A_r 的增加 而增加。开口厚壁管桩和闭口桩的桩端阻力大小相近, 但要比开口薄壁管桩 ($A_r=0.13$) 大 50 %。

Q_s 与 A_r 之间的相互关系与文献[18]所得到的结果一致。另外, 还有一些相关研究表明, 在 $A_r < 0.2$ 时, 典型管桩的桩身承载力只比闭口桩小 10 % 左右。

表 3 相关单桩的极限承载力
Table 3 Ultimate capacities for single reference piles

承载力	单桩		
	SC ($A_r=1$)	SOB ($A_r=0.46$)	SOA ($A_r=0.13$)
Q_s/N	40 ^a	30 ^a	25 ^a
Q_b/N	64	60	41
Q_{ult}/N	104	90	66

注: a 为拉伸试验中所测的桩侧摩阻力。

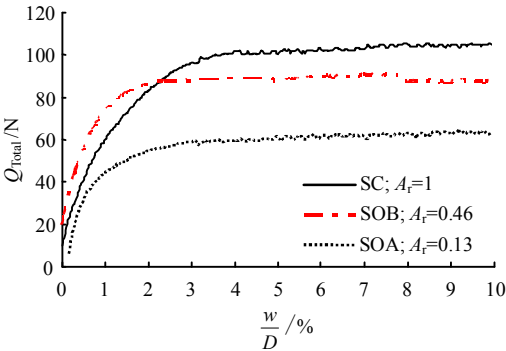


图 5 实测单桩 (SC、SOB 和 SOA) 的荷载-位移关系曲线
Fig.5 Measured load displacement response of single piles (SC, SOB & SOA) under compression loading

(2) 群桩 压力荷载作用下实测的群桩的荷载-位移关系见图 6。一共进行了 8 组压缩试验。

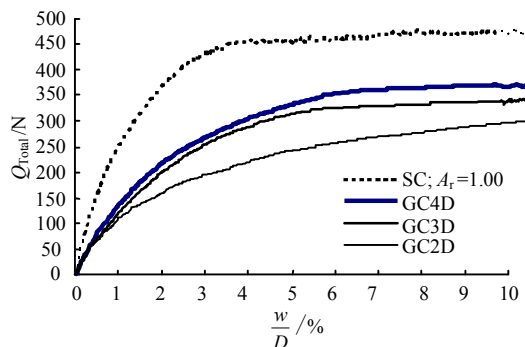
群桩承载力效应折减系数 $\eta_{capacity}$ 可定义为群桩总的承载力与单桩的承载力乘以单桩数量 (本文为 5) 的比值。本文中极限承载力定义为桩顶位移达到直径的 10 % 时的对应值。由图 6 可以得到 $\eta_{capacity}$ 值, 作为桩端面积比 A_r 和间距比 s/D 的函数, 见图 7。很显然闭口群桩的 $\eta_{capacity}$ 值随着 A_r 的增加而增加, 当 $s/D=3$ 时, 约为 0.8, 该值和文献[19]在类似的现场试验中所测得的值基本相同。有趣的是, 对于管桩群桩来说, $\eta_{capacity}$ 值并不随桩间距 ($2D \sim 4D$) 的变化而变化。但是, 试验所预期是 $\eta_{capacity}$ 值随着 A_r 的增加可能会减小。

当 $\eta_{capacity} < 1$ 时, 需要考虑承载极限状态, 大多数群桩设计均由可适用性极限状态来控制, 因此定

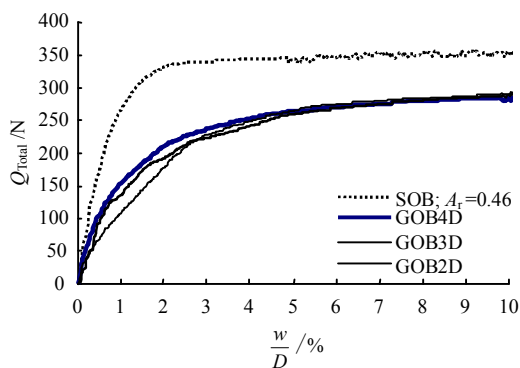
义刚度效应折减系数 η_g 比较重要, 见式(1)。 η_g 值取决于桩的作用系数, 桩的作用系数则随着土的刚度非线性、 s/D 、 L/D 、 A_r 群桩中桩的数量和位置以及桩帽的刚度而变化。

$$\eta = k_g / [nk_s] \quad (1)$$

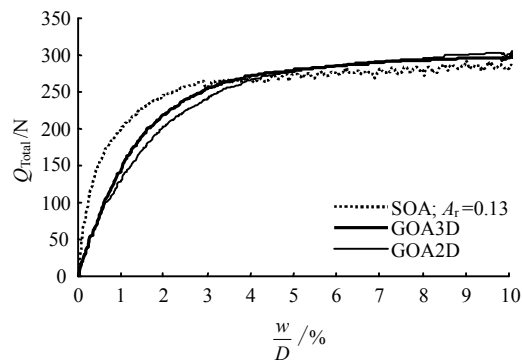
式中: k_g 为群桩的轴向刚度 (发生单位位移的荷载); k_s 为单桩的轴向刚度; n 为群桩中单桩数。



(a) 单桩GC



(b) 单桩GOB



(c) 单桩GOA

图6 实测群桩的荷载位移关系曲线

Fig.6 Measured load displacement response of pile groups

4.5 模型试验小结

通过讨论一系列的 PCC 桩的单桩和群桩离心机模型试验结果, 与闭口桩试验结果的比较, 得到了单桩和群桩性能的有关特征 (图7): ①桩端有效

面积比 (A_r) 对单桩和群桩极限承载有着很大的影响。桩侧摩阻力的增加与 A_r 成正比, 而且在荷载试验过程中, 桩端阻力随着 A_r 及其相应的是否发生闭塞效应而变化。②对于群桩结构, 当 $s/D=3$ 时, 研究所得闭口群桩承载力折减系数为 0.8, 而开口薄壁管桩, 承载力折减系数接近 1。

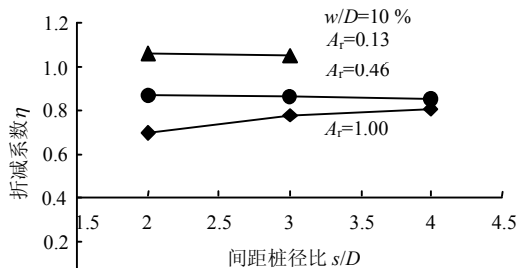


图7 s/D 和 A_r 对应的承载力折减系数

Fig.7 Capacity reduction factor against s/D and A_r

5 结 语

鼓式土工离心机有独特的多功能中心控制台, 可以随时根据试验需要启动和停止, 而不受模型槽转动的影响, 因此可以在试样保持旋转的过程中准备试验设备和测试工具。控制台可以在垂直向、径向和圆周向 3 个方向精确驱动转动, 并且保持着动态平衡。专门设计了多功能的数据采集系统和控制系统可以得到试验所需要的相关结果。

瑞士联邦工学院于 1999 年也建造了同类型的鼓式土工离心机, 我国大连理工大学已经开始着手鼓式离心机的建造。随着海洋技术的开发, 环境岩土工程的发展, 鼓式离心机在岩土工程、海岸工程和环境岩土工程等领域的开发和应用将越来越广泛。

参 考 文 献

- [1] PHILLIPS E. De l'equilibre des solides elastiques semblables[J]. C. R. Academy of Science. Paris, 1869, 68: 75—79.
 - [2] CRAIG W H. Edouard phillips (1821—1889) and the idea of centrifuge modeling[J]. Geotechnique, 1989, 39: 697—700.
 - [3] 濮家骊. 土工离心模型试验及其应用的发展趋势[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 92—94.
- FU Jia-liu. The development of Geotechnical centrifuge modeling and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 92—94.

- [4] ZHANG L M, FEI K, YANG J. Centrifuge modeling of PCC pile under axial loads[R]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2005.
- [5] XU Xiang-tao. Investigation of the end bearing performance of displacement piles in sand[PhD D]. Australia: The University of Western Australia, 2007.
- [6] SCHOFIELD A N. Use of centrifuge model testing to assess slope stability[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, 15: 14—31.
- [7] SCHOFIELD A N. Cambridge geotechnical centrifuge operations[J]. **Geotechnique**, 1980, 30(3): 227—268.
- [8] RANDOLPH M F, JEWELL R J, STONE K J L, BROWN T A. Establishing a new centrifuge facility[C]// Proceedings of the International Conference on Centrifuge'91. USA: Boulder/ Colorado, 1991: 3—9.
- [9] STEWART D P, BOYLE R S, RANDOLPH M F. Experience with a new drum centrifuge[C]// Proceedings of the International Conference Centrifuge, Tokyo: [s. n.], 1998: 35—40.
- [10] XU Xiang-tao, LEHANE B M, GAUDIN C, ZHANG Ting, LIU Han-long. Centrifuge studies of single and group displacement piles in clay[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Hongkong: [s. n.], 2006: 895—900.
- [11] 张霆. PCC 桩单桩和群桩离心机试验研究[M]//刘汉龙等: 岩土力学前沿. 南京: 河海大学出版社, 2006: 229—243.
- [12] 刘汉龙, 马晓辉, 储海岩, 等. 用于软基处治的套管成模大直径现浇管桩机: 中国, ZL01273182.X[P]. 2002—10—09.
- [13] 刘汉龙, 马晓辉, 宫能和, 等. 软基处治大直径现浇管桩复合地基施工方法: 中国. CN013672962A[P]. 2002—09—04.
- [14] 刘汉龙, 费康, 马晓辉, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I): 开发研制与设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 164—168.
- LIU Han-long, FEI Kang, MA Xiao-hui, et al. Cast-in-place concrete thin-wall pipe pile with vibrated and steel tube mould technology and its application(I): Development and design[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 164—168.
- [15] 刘汉龙, 郝小员, 费康, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 372—375.
- LIU Han-long, HAO Xiao-yuan, FEI Kang, et al. Field pour cast-in-place concrete thin wall cased pipe pile technology and its application (II): Application and in-situ test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 372—375.
- [16] 费康. 现浇混凝土薄壁管桩的理论与实践[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [17] XU Xiang-tao, LIU Han-long, LEHANE B M. Pipe pile installation effect in soft clay[J]. **Geotechnical Engineering**, 2006, (10): 285—296.
- [18] MILLER G A, LUTENEGGER A J. Influence of pile plugging on skin friction in overconsolidated clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(6): 525—533.
- [19] MCCABE B A, LEHANE B M. Behavior of axially loaded pile groups driven in clayey silt [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, March, 2006, 132(3): 401—410.

第九届全国桩基工程学术会议

会议背景: 第九届全国桩基工程学术会议将于 2009 年 8 月 19—21 日在兰州召开。会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会、中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会、甘肃省土木建筑学会地基基础学术委员会主办。除常规议题外, 本届会议将侧重研讨特殊土地和特殊环境下的桩基工程, 论文集 将由中国建筑工业出版社正式出版发行。

征文范围及要求: 投稿要求: 未公开发表, 文责自负; 论文字数, 不超过 8000 字 (含图表、公式), 格式要求可来电联系; 来稿请注明作者详细通讯地址、E-mail 及联系电话。截稿日期: 2009 年 3 月 31 日前。寄 2 份纸质稿件, 同时提供电子文本。

会务组联系方式: 联系人: 李大展 联系电话: 010-64517585 E-mail: lidazhan22@163.com

通讯地址: 北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院地基所 邮编: 100013

(信息来源: 中国学术会议在线)