

# 离心力场中固结理论适用性的影响因素研究

张莎莎<sup>1,2</sup>, 谢永利<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为了明晰在较高的离心力场中,离心加速度及模型高度的变化对饱和土体固结理论适用性影响,提高离心力场中试验结果的可靠性,依据常规固结试验仪,研制了离心力场下的固结试验装置,并以此为基础,针对饱和砂土、典型海相土及河相土进行了不同离心力场下的固结模拟试验研究,同时对其试验时间与不同理论计算时间进行对比分析.结果表明,离心机模拟土体固结沉降时,离心加速度越大对总沉降量的影响也越大;在离心力场下,Terzaghi 一维固结理论的应用有一定的局限性;不均匀离心力场和较高的模型高度对饱和土固结试验结果的影响较大,土体自重应予以考虑;现有离心模型试验的时间比尺应根据试验条件进行修正.

**关键词:**岩土工程;固结试验;固结理论;饱和土

**中图分类号:** TU472; TU411.93

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)01-0058-08

土工离心模型试验技术是通过离心加速度场的改变来模拟不同工况下的重力场,以实现众多土工构筑物相关工况的模拟.在较高的离心力场作用下,离心加速度及模型高度的变化对饱和土体固结理论是否适用,这直接关系到离心力场中试验结果的可靠性.自上世纪末,国内外众多学者针对离心机在土木工程中的应用开展了富有成效的研究,在岩土工程领域中,包承刚和饶锡保等学者就离心模型试验的应用原理开展了相关研究<sup>[1-2]</sup>;窦宜及蔡正银等学者采用离心机针对饱和黏土体在自重应力作用下的固结沉降变形特性进行了研究<sup>[3]</sup>;谢永利等人采用土工离心机研究了软黏土地基的变形性状<sup>[4]</sup>;徐光明等研究人员针对离心模型中的粒径效应和边界效应展开了研究,为今后利用离心模型试验研究地基处理等问题提供科学依据<sup>[5]</sup>.新世纪以来,Asha Poulouse 等学者采用小型离心模型试验技术,在不同的比例尺条件下,研究不同物理、化学等因素下粉砂土中的水汽迁移规律<sup>[6]</sup>;Aïssa Rezzoug 等学者利用离心模型试验对土工环境中砂土毛细水上升测定的度定律进行了研究,对土壤中水的迁移规律进行了测试<sup>[7]</sup>;张建民和黄茂松等学者<sup>[8-9]</sup>分别应用离心机针对不同岩土工程问题予以研究,并研制了相应的离心机配套设备.通过对上述研究的总结可以看出,上世纪末,学者针对离心机在土木工程中的应用机理研究较多,新世纪以来主要侧重于采用离心机研究岩土领域的实际工程问题.然而,在离心力场中,试验模型的尺寸及离心力大小的变化对试验结果的影响,以及岩土工程中最重要固结理论在离心试验中的适用范围怎样,相关研究相对较少.

鉴于离心模型试验技术的研究现状,论文首先基于 Terzaghi 一维固结理论的创立条件,针对饱和砂土进行了不同离心加速度场下的固结模拟试验研究,同时,针对典型的饱和海相土及饱和河相土,进行了不同离心力场下的模拟试验,通过对试验过程中土体沉降及孔隙水压力变化曲线与理论的对比,以及不同理论计算时间与试验时间的对比分析,研究了不同离心力场条件下饱和土固结理论适用性的影响因素.

## 1 试验土样的基本工程性质

试验中所用海相土取自宁波,河相土取自渭河二级阶地,为了减小其它因素对离心试验结果的影响,试验土样应该均质、单一.所以对试样进行了晾晒、过 2 mm 筛及浸水饱和的处理.饱和试样的时间不少于 10 d,经过检测,试样属于饱和土样.剪切及颗分试验结果如表 1 示,其中饱和砂土的粒径范围为

收稿日期:2012-04-18 修改稿日期:2013-01-01

基金项目:国家科技支撑计划课题(2011BAG07B01)

作者简介:张莎莎(1982-),女,山西运城人,讲师,博士,主要从事特殊土性状及工程应用的科研与教学工作.

0.5 mm $\geq d>0.25$  mm. 通过室内土工试验及固结试验可以得到饱和试样的固结系数等指标,如表 2 及表 3 所示.

表 1 饱和土试验结果

Tab.1 Particle composition and physico-mechanical properties

土类	颗粒组成/%			CD 试验结果	
	2~0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm	粘聚力 $c_d$ /MPa	内摩擦角 $\varphi_d$ /°
海相土	7.23	40.44	52.33	0.011 92	10
河相土	16.75	64.15	19.1	0.003 47	30

2 离心模型试验方案

表 2 土体工程性质

Tab.2 Engineering properties of the sample

土类	土粒密度 / $\text{g}\times\text{cm}^{-3}$	初始干密度 / $\text{g}\times\text{cm}^{-3}$	初始孔隙比 e	饱和含水率 /%	液限 $\omega_L$ /%	塑限 $\omega_p$ /%
砂土	2.67	1.58	0.69	/	/	/
海相土	2.7	1.08	1.5	55.56	58.99	31.3
河相土	2.71	1.45	0.87	32.07	30.38	17.12

2.1 离心机及其固结装置的改造设计

试验采用 TLJ-3 型土工离心机,最大容量 60 g·T,有效半径 2.0 m,最大加速度 200 g. 试验变形测量仪为 ILD1300-100 型非接触式激光位移传感器,其对试样无干扰. 土压传感器和孔隙水压力传感器型号分别为 BW-0.6 型和 BWL-0.4 型,其外径为 8 mm,厚度为 5 mm. 位移传感器分别布置于

表 3 饱和试样固结系数

Tab.3 Coefficient of consolidation for saturated sample

土类	固结系数	荷载/kPa					
		12.5	25	50	100	200	400
饱和砂土	$C_v\times 10^{-2}/\text{cm}^2\text{s}^{-1}$	1.731	1.414	1.402	1.412	/	/
饱和海相土	$C_v\times 10^{-4}/\text{cm}^2\text{s}^{-1}$	/	1.646 2	2.534 9	3.407 6	3.629 1	1.492 2
饱和河相土	$C_v\times 10^{-3}/\text{cm}^2\text{s}^{-1}$	/	1.151	1.175	1.386	1.476	1.151

试样上方的中心和侧边区域;孔压及土压传感器布设于土样底部的中心及侧边区域.

为了与常规固结试验结果进行有效的对比,并减小离心模型试验中的系统误差及试验过程中的侧壁摩阻力,根据离心机模型箱长宽高(700 mm $\times$ 360 mm $\times$ 500 mm)的限制,为模型试验设计了固结试验装置,该装置材质为有机玻璃,装置结构如图 1. 固结装置以标准常规固结试验环刀的径高比为依据. 为了进行对比分析,装置的高度分别为 50 mm、70 mm、100 mm 和 125 mm,其中 70 mm 为试验标准试筒高度(径高比为 4.3). 为了使固结装置在离心机转动过程中不产生侧面变形,并使其固定于离心机中,专门设计了试筒固结仪的卡箍装置及试筒在离心机自配模型箱中的固定装置. 试筒固定装置的支架三面有定位螺丝,可有效调节钢支架在离心机自配模型箱中的位置. 钢支架中心安置试筒的四周也有四个定位螺丝,可直接帮助调节试筒处于模型箱的中心. 该试验装置可有效减少离心加速度在径向方向上的梯度误差,以试样最高高度 120 mm 进行计算,所产生的径向应力相对误差为:  $E_r=1/[2(3r/H_M-1)]\leq 1.02\%$ ;同时,试筒的环形( $\varphi 30$  cm)设计也可以有效减小离心加速度切线方向上的偏差误差;在模拟土样固结过程中,由于水自身重力的原因,土样上表面的水可直接排到外围的模型箱中,减小其对固结过程的干扰.

该试验装置既可作为单面排水离心模型试验装置,也可作为双面排水离心模型试验装置. 在进行单面排水离心模型试验时,只需将设计配套的有机玻璃板(5 mm)放置于试筒底部,利用蜡封法将玻璃板的侧边密封好;在进行双面排水离心模型试验时,可将底板取出,铺设滤纸即可. 将土样放置于试筒中之

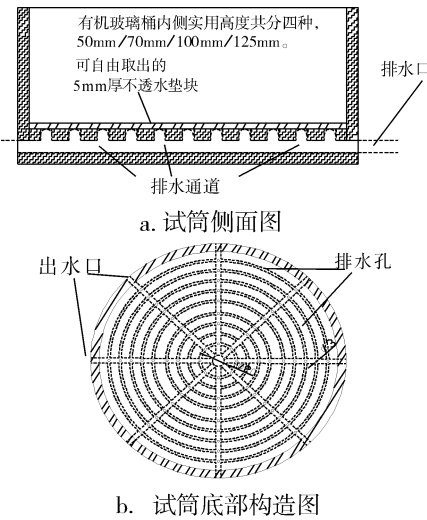


图 1 固结装置设计图

Fig.1 Design of the consolidation device

前,应将筒壁涂抹凡士林,以减小摩擦。

## 2.2 离心模拟试验方案

砂土的压缩性小,渗透性大,固结速度较快,经过清洗的砂土体结构简单,无粘性,在试验过程中可以排除一些因素的干扰,是理想的研究材料。并且,达西利用饱和砂土研究水在土体中的渗流规律,得到了达西定律,为 Terzaghi 固结理论奠定了基础。为了研究不同离心加速度场下饱和砂土的试验特点,使试验结果具有可比性,各试验土样的控制标准是相同的,试验方案为:①离心加速度设定为 50 g;②离心加速度先设定为 5 g,平稳运行一段时间后,离心加速度再设定为 10 g;③离心加速度设定为低加速度 2 g。

为了使试验结果具有广泛性,土样选取两类典型试样—海相土和河相土作为试验对象,对其分别进行了不同条件下的模型试验研究,其具体方案分三部分:(1)为了使所做离心模型试验结果具有一定的可对比性,试验所模拟土层厚度

均接近 4.6 m,以研究不同离心加速度对土体固结沉降的影响,具体试验方案设计如表 4 示;(2)为了分析离心场中饱和土的孔隙水压力及土压力的变化特点,离心加速度设定为 50 g,模型高度为 6.5 cm,研究离心场中模拟厚度为 3.25 m 的土体,其在固结过程中沉降量、孔压及土压的变化;(3)在相同的离心加速度 50 g 条件下,研究两种不同模型高度 5 cm 和 7 cm 土柱体的固结特点,即模拟的土层厚度分别为 2.5 m 和 3.5 m。在试验过程中,采用数据模拟软件 Origin 对试验曲线进行实时模拟,通过拟合得到的计算公式对试验结果的固结程度进行把握。

表 4 饱和试样的离心模型试验方案

Tab. 4 Schemes of centrifugal modeling tests

固结装置试筒编号	I		II		III		IV	
	I-海	I-河	II-海	II-河	III-海	III-河	IV-海	IV-河
试验运行时间/h	31	10.24	19.5	6.42	9.13	3	4.57	1.5
模型相似比/n	38.40		48.5		71		100	
实际厚度/cm	460.8		460.75		461.5		460	
模型厚度/cm	12		9.5		6.5		4.6	

## 3 试验结果及其分析

### 3.1 饱和砂土离心模型试验结果分析

图 2 至图 4 分别是  $a$  设定为 50 g 时,饱和砂土离心模拟试验曲线。

图 3 及图 4 中,饱和砂土随时间呈现波动变化的特点, $a$  达到 40 g 时,土体体胀达到最大值;在  $a$  达到 50 g 后,饱和砂土在 40 g 最大体胀量的基础上呈现微小的减小。

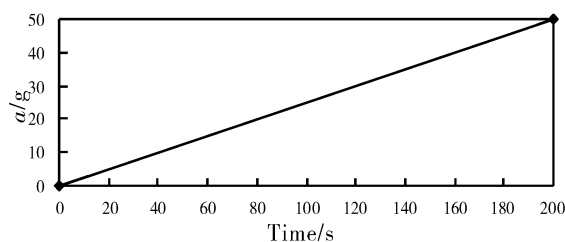


图 2 50 g 饱和砂土离心试验加速度加载过程与时间的关系

Fig. 2 The diagram of response current on 50 g acceleration

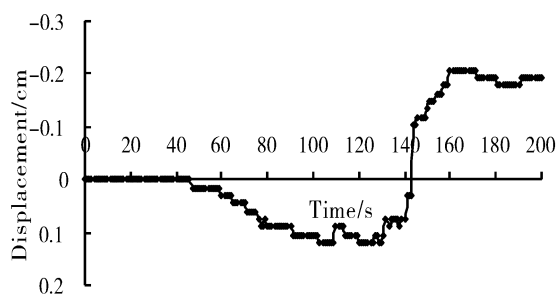


图 3 50 g 加速度加载过程中砂土的变形曲线

Fig. 3 Deformation curve of sand during 50 g loading process

在加载初期,随着  $a$  的增大,作用在饱和砂土体及其周围水上的力随之增大,使得土体和水的原有运动状态发生改变,表现为饱和砂土体向着离心力方向产生沉降;在  $a$  达到 25 g 时,砂土体达到一定密度后,土粒之间形成相互咬合的架构,土粒之间的摩擦力增大,土粒之间的相对位移暂时受到影响,而土粒之间的水依然在其“重力”下向离心力方向运动,在水聚集一定程度后水的体积在土粒之间膨胀,由于砂土粒之间的粘聚力为 0,水在土粒之间为自由水,土粒架构随之被水体积膨胀破坏,砂土体出现第一次微小膨胀,部分水也随之从土粒间排出,其后, $a$  达到 30 g 过程中,土粒继续在其增大的“重力”作用

下沉;再次,砂土粒在 30 g 时达到二次最大沉降后,土粒架构形成,此时砂土体密度大于第一次形成的密度,土粒之间的孔隙更小,砂土体中心区域水分在其“重力”作用下越聚越多,砂土粒之间没有粘聚力,随着加速度的继续增大水流速度也比前期快的多,一方面水量在土粒之间大量聚集,另一方面土粒之间的孔隙越来越小,孔隙水压力增大,土粒完全失去强度,土粒架构破坏,土粒随着水流反向于加速度运动,土粒密度减小; $a$  达到 40 g 后,土体密度空间达到了与水量之间的平衡,随着加速度的进一步增大,土粒间的水出现消散的现象,土体在此基础上呈现微小沉降变形。

$a$  设定为 50 g 时,由于饱和砂土没有黏聚力,水在土粒之间的速度非常快,已然为紊流状态,已不符合达西定律的层流规律,该现象可以从图 4 中得到证实。

图 5 和图 6 分别是变加速度(5~10 g)时的试验曲线,图 7 和图 8 分别为  $a$  设定为 2 g 时的沉降及孔隙水压力随时间变化曲线。

从图 5 和图 6 可知,在 5 g 的低离心力场下,饱和砂土体呈现随时间增长而沉降量逐渐增大的现象,到 400 s 时,沉降量基本稳定,砂土达到一定的密度,土粒与孔隙水达到相对平衡。沉降量稳定到 1 666 s 以后, $a$  设定为 10 g,在加载过程中砂土体沉降量达到一个稳定值后,砂土体随时间的变形量基本稳定。从图 7 和图 8 可知,2 g 的低离心加速度场下,饱和砂土的沉降变形随时间的变化曲线总体是比较均匀的,沉降量随着时间的增大而逐渐增长,最后趋于稳定。孔隙水压力测量值的变化比较平缓,没有出现突变点。

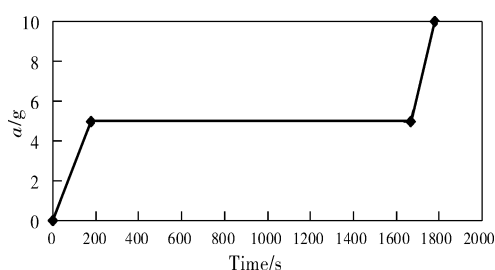


图 5 5 g~10 g 时饱和砂土离心试验加速度与时间的关系

Fig. 5 The diagram of response current on 5 g~10 g acceleration

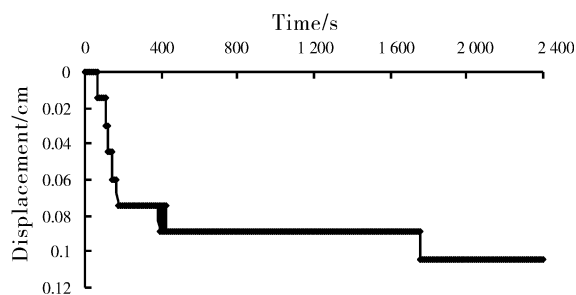


图 6 由 5 g 离心力场渐变为 10 g 离心力场的砂土变形曲线

Fig. 6 Deformation curve of sand during 5 g~10 g

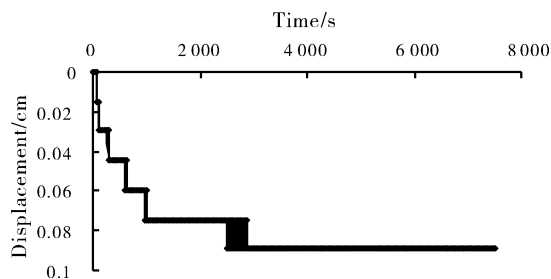


图 7 2 g 时离心力场下砂土随时间的变形曲线

Fig. 7 Deformation curve of sand with time under 2 g

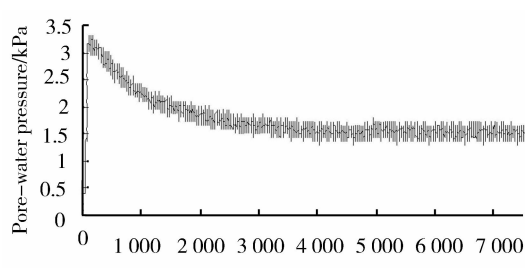


图 8 2 g 离心力场下砂土孔隙水压力测量值随时间的变形曲线

Fig. 8 The change of pore pressure curves with time under 2 g

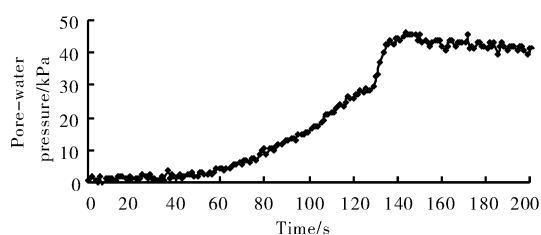


图 4 50 g 加速度加载中对应的孔压测量值随时间变化曲线

Fig. 4 The change of pore pressure curves with time during 50 g loading process

对于无黏性的饱和砂土体而言,  $a$  的大小对试验结果的影响主要是由于水在土体中的渗流状态决定的. 高离心力场下, 无黏性土粒之间的水流速度相对较快, 水流状态为紊流, 已不符合达西定律的层流要求, 所以 Terzaghi 固结理论并不适用于在高离心力场下的无黏性土. 对于低离心力场而言, 饱和砂土体中的水流属于层流状态, 可以采用 Terzaghi 固结理论加以分析.

### 3.2 海相土及河相土离心模型试验结果分析

图 9 和图 10 分别为不同离心加速度下, 饱和海相土及饱和河相土的土体沉降变形随时间的变化曲线.

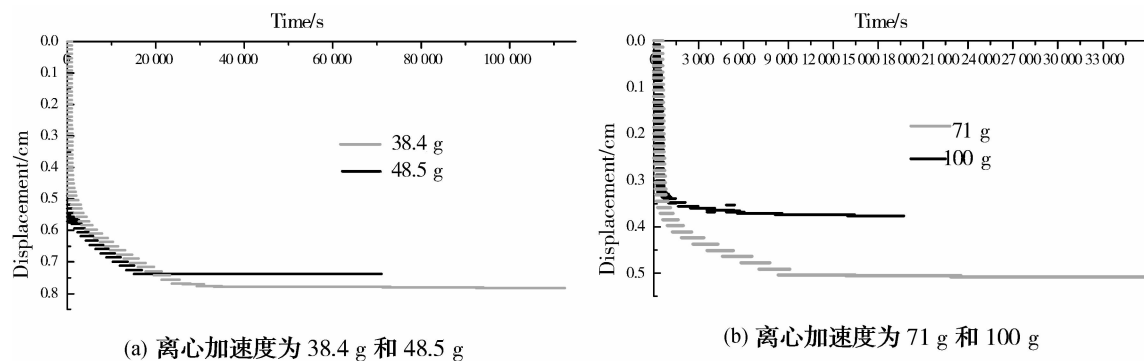


图 9 不同离心场下海相土的沉降变形随时间变化曲线

Fig. 9 Consolidation curve with time under different centrifugal acceleration for marine soil

从图 9 中可以看出, 在 38.4 g、48.5 g 和 71 g 离心力场中, 固结沉降随时间变化的曲线特点非常明显. 第一阶段, 固结沉降速率非常快, 这一阶段的沉降量基本占到总沉降量的 50% 左右或以上; 第二阶段, 随着饱和海相土固结时间的延长, 其固结沉降速率递减, 沉降趋势放缓, 固结沉降逐渐由快速固结过渡到缓慢固结阶段, 这一阶段的沉降量大约占总沉降量的 20% 多; 第三阶段, 饱和海相土的沉降速率进一步减小, 随着固结时间的增长, 固结沉降量的变化非常小, 并且逐步趋于稳定. 从上述试验曲线中可看出, 随着离心加速度的增大, 饱和海相土的固结过程和固结速度也随之加快, 并且随着加速度的增大, 试验所得到的固结时间也比计算所得到的固结时间加快. 图 10 中, 饱和黄土的沉降也与饱和软粘土的沉降过程近似.

图 11 为 50 g 离心力场情况下, 模拟 3.25 m 厚饱和海相土土柱体的孔隙水压力和土压力传感器测量值随试验时间变化曲线.

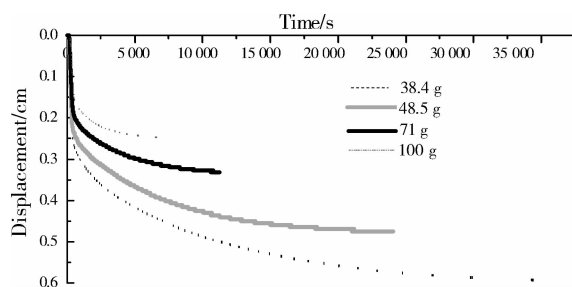


图 10 不同加速度下饱和河相土体沉降随时间变化的曲线

Fig. 10 Consolidation curve with time under different centrifugal acceleration for saturated loess

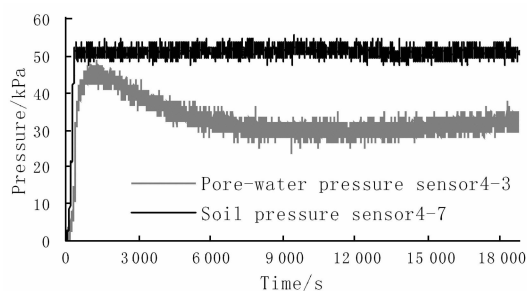


图 11 50 g 海相土孔隙水压及土压力随时间变化曲线

Fig. 11 The change of pressure curves with time for marine soil under 50 g

由图 11 可知, 当  $a$  增大时, 土柱体底层中心区的土压和孔压测量值均随着  $a$  的增大而迅速增大. 当  $a$  达到 50 g (即土层达到模拟厚度) 并稳定时, 土压达到最大值后基本趋于稳定, 而孔压依然继续增长, 达到峰值, 稳定小段时间后, 超孔隙水压力消散减小, 并趋于所对应土体高度的静水压力, 最后趋于稳

定.这是因为在试验初期,土体的固结沉降量已超过总沉降量的 30%,如此大的土体积缩小过程,是以土层潜表层水的排出为替代的,此时上覆土层的有效应力增大,其作用于下部土层,土体骨架开始压缩.同时,由于该土样的渗透系数较小,土体内部的水来不及排出,从而出现了在固结初期,土体内部孔压暂时升高的现象.在试验的中后期,由于试验模拟的土层厚度较薄,超孔隙水压力在前期已大量消散,中后期消散量较小,孔压迅速达到土体相应的静水压力趋于稳定.

从图 12 可知,在双面排水固结过程中,土体固结沉降量与离心固结时间的关系分为两个阶段,即快速固结和缓慢固结,其中快速固结阶段亦可分为线性快速固结和凹曲线形快速固结.

从图 13 中可知,土层底部的孔隙水压力传感器的测量值先是随着  $a$  的增大而增大,而后减小趋于稳定,接近于“零”.

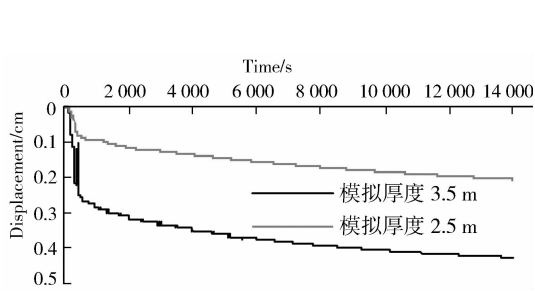


图 12 双面排水条件下海相土  
沉降变形随时间变化曲线  
Fig. 12 Consolidation curve of marine soil under  
double-sided drainage condition

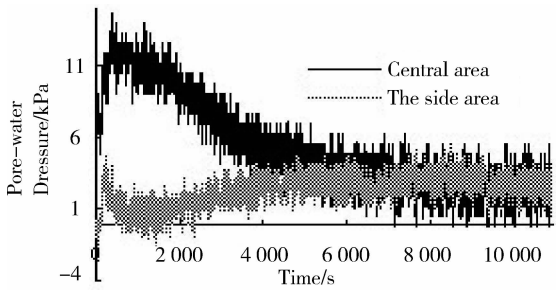


图 13 双面排水的河相土底部  
孔隙水压力随时间变化曲线  
Fig. 13 The change of pressure curves with  
time for saturated loess under 50 g

图 14 为 50 g 离心力场下,固结试验过程中的土柱体含水率分布曲线图.

从图 14 可知,在单面排水情况下,土柱体中的含水率是沿着从土柱体的上表面到底层而逐渐增大的;在双面排水情况下,土柱体的含水率分布是呈现中间大,两端小的趋势,上表面含水率稍大于底部含水率,这是因为在离心力场中,土柱体底部的排水能力比上表面强.

依据土体固结过程中水在土柱体中的分布特点,从离心试验结果中可以看出,用离心试验模拟海相土的土体固结过程与固结理论基本一致.

3.3 试验时间与理论计算时间的对比分析

Gibson 大变形固结理论相比 Terzaghi 一维固结理论,其多了反映土体自重应力对土体固结的影响.现有离心模型固结试验时间与实际固结时间相差  $n^2$ .不同试验条件下,土样离心固结试验时间与不同理论计算的理论时间对比分别如表 5 至表 9 所示.

从表 5 可知,在 2 g 的离心加速度场中,饱和砂土的离心固结时间与理论计算时间比较接近;在 5 g 离心加速度场中,两种时间差值较大.

从表 6 可知,采用 Gibson 大变形一维固结理论计算的时间比采用 Terzaghi 一维固结理论计算的时间更接近于模型试验时间;随着固结程度的增大,理论时间与试验时间越接近.并且,离心加速度在 71 g 范围内,离心模型试验时间是随着模型土柱体高度的减

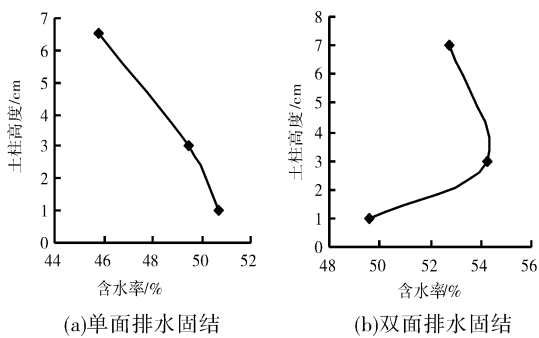


图 14 海相土土体含水率分布曲线  
Fig. 14 Water content distribution in soil sample  
in centrifugal consolidation test

表 5 饱和砂土一维固结单面排水离心模型  
试验时间与太沙基理论计算时间的比较

Tab. 5 Comparison of single drainage test time and  
Terzaghi theoretical time for saturated sand

土样	比较项 /%	试验时间 $t_1$ /s	理论时间 $t_2$ /s	理论时间 $t_2/n^2 \text{ s}^{-1}$	$t_2'/t_1$
2g	80	1 701	7 487	1 872	1.1
	90	2 698	10 775	2 694	1.0
5g	80	170	46 795	1 872	11.0
	90	430	67 345	2 694	6.3

注:  $t_2' = t_2/n^2$ ,  $t_3' = t_3/n^2$ ,下同.

小而更接近于理论计算时间,虽然离心加速度有加速土柱体固结速率的作用,但是从试验结果中可以看出,土柱体的模型高度所起的作用更大.当离心加速度为 100 g 时,即使模型土柱高度较小,但由于加速度过大使得试验模型固结速率过快,试验时间与理论计算时间偏离得更大.

表 6 饱和海相土一维固结单面排水离心模型试验时间与理论计算时间的比较

Tab. 6 Comparison of single drainage test time and theoretical time for marine soil

土样	比较项 /%	离心固结 试验时间 $t_1$ / s	Terzaghi 理论时间 $t_2$ / s	Terzaghi 理论时间 $t_2 / 50^2 \text{ s}^{-1}$	$t'_2 / t_1$	Gibson 理论时间 $t_3$ / s	Gibson 理论时间 $t_3 / 50^2 \text{ s}^{-1}$	$t'_3 / t_1$
50 g (6.5 cm)	80	33 339	281 785 313	112 714	3.4	192 074 623	76 830	2.3
	90	58 999	/	/	/	275 071 013	110 028	1.9
38.4 g (12 cm)	80	10 646	562 210 384	381 273	35.8	343 500 674	232 951	21.9
	90	22 177	809 242 219	548 802	24.7	486 358 431	329 833	14.9
48.5 g (9.5 cm)	80	8 355	562 088 383	238 958	28.6	343 426 133	145 999	17.5
	90	19 765	809 066 612	343 954	17.4	486 252 890	206 718	10.5
71 g (6.5 cm)	80	20 577	563 919 786	111 867	5.4	344 545 088	68 349	3.3
	90	37 587	811 702 722	161 020	4.3	487 837 205	96 774	2.6
100 g (4.6 cm)	80	507	560 259 959	56 026	110.5	342 308 999	34 231	67.5
	90	921	806 434 790	80 643	87.6	484 671 152	48 467	52.6

从表 6 和表 7 的比较可知,在模拟相似原型土样的离心模型试验中,饱和河相土与饱和海相土都是随着模型土柱体厚度的减小,离心试验时间更接近于理论计算时间.但是,当离心加速度设定为 100 g 时,两种土样的时间变化规律不尽相同,饱和海相土由于离心加速度的增大,离心试验时间与理论计算时间之间的差异增大,而饱和河相土则依然随着模型厚度的减小接近于理论计算时间.

从表 8 可知,在双面排水条件下,一维固结离心模型试验中,试验时间与理论计算时间的比值随着模型土层厚度(即固结排水距离)的增大而增大.对饱和海相土在固结度达到 80% 时的离心固结试验时间而言,土层厚度小的离心模型固结时间反而长.但是,基于小变形固结理论计算得到的固结时间是土层厚度大的固结所需要的时间长.试验结果与基于小变形固结理论的计算结果相反.表 9 中采用

表 7 不同加速度条件下饱和河相土一维固结单面排水离心模型试验与 Gibson 理论比较

Tab. 7 Comparison of single drainage test time and theoretical time for saturated loess

土样	比较项 /%	试验时间 $t_1$ / s	Gibson 理论时间 $t_2$ / s	Gibson 理论时间 $t_3 / n^2 \text{ s}^{-1}$	$t'_3 / t_1$
38.4 g (12 cm)	80	9 668	57 624 534	39 079	4.04
	90	16 731	74 438 491	50 483	3.02
48.5 g (9.5 cm)	80	6 166	57 577 808	24 478	3.97
	90	10 618	74 378 131	31 620	2.98
71 g (6.5 cm)	80	3 371	57 764 824	11 459	3.40
	90	6 298	74 619 717	14 803	2.35
100 g (4.6 cm)	80	1 607	57 391 094	5 739	3.57
	90	3 492	74 136 938	7 414	2.12

表 8 不同厚度饱和海相土层一维固结双面排水模型试验时间与 Terzaghi 理论计算时间的比较

Tab. 8 Comparison of double drainage test time and Terzaghi theoretical time for marine soil

土样	比较项 /%	试验时间 $t_1$ / s	Terzaghi 理论时间 $t_2$ / s	Terzaghi 理论时间 $t_2 / 50^2 \text{ s}^{-1}$	$t'_2 / t_1$
2.5 m 厚	50	3 296	18 428 812	7 372	2.2
	80	13 904	41 684 218	16 674	1.2
3.5 m 厚	50	430	36 120 472	14 448	33.6
	80	6 560	81 701 067	32 680	5.0

表 9 不同厚度饱和海相土层一维固结双面排水模型试验时间与 Gibson 理论计算时间的比较

Tab. 9 Comparison of double drainage test time and Gibson theoretical time for marine soil

土样	比较项 /%	试验时间 $t_1$ / s	Gibson 理论时间 $t_3$ / s	Gibson 理论时间 $t_3 / 50^2 \text{ s}^{-1}$	$t'_3 / t_1$
2.5 m 厚	60	5 884	17 008 711	6 803	1.2
	90	21 952	50 081 204	20 032	0.9
3.5 m 厚	60	752	33 337 073	13 335	17.7
	90	15 666	96 307 100	38 523	2.5

了 Gibson 大变形固结理论计算,从比较结果可以看出,随着固结程度的增大,离心模型试验的时间值与大变形固结理论的计算值越接近;固结土层厚度越小,试验值与理论计算值越接近。

## 4 结 论

通过对固结试验过程中饱和土体沉降变形随时间的变化曲线、孔隙水压力随时间的变化曲线,以及固结试验时间和理论计算时间的对比分析,可以得到以下主要结论:

(1)在较高的离心场作用下,饱和砂土中水的渗流速度过快,水流呈现紊流(甚至射流)状态,不符合达西定律,Terzaghi 一维固结理论已不适用。

(2)在离心力场中,离心加速度越大,土层快速固结对土层总固结产生的影响越大,对最终沉降量影响越大。

(3)多组离心模型试验时间与理论计算时间的比较可知,在进行离心模型试验时间计算时,土体自重应力应予以考虑,Gibson 一维固结理论比 Terzaghi 一维固结理论更适用。

(4)模型土层厚度相差不太大时,土层越厚,其试验时间相对较短,与理论计算时间相差得较大;高离心场和较厚的模型均会对试验结果产生影响。由均匀离心加速度场推导的时间比尺已不能完全适用于试验时间的计算,应根据试验条件进行修正。

## 参考文献 References

- [1] 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状和展望[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 92-97.  
BAO Cheng-gang. The State and Prospect of Centrifugal Model Test in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(6): 92-97.
- [2] 包承纲, 饶锡保. 土工离心模型的试验原理[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 2-7.  
BAO Cheng-gang, RAO Xi-bao. Principle of the Geotechnical Centrifuge Model Test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 2-7.
- [3] 窦 宜, 蔡正银, 盛树馨. 自重应力作用下饱和粘土的固结变形特性[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 29-37.  
DOU Yi, CAI Zheng-yin, SHENG Shu-xin. Consolidation Characteristics of Saturated Clays under Self-Weight Stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 29-37.
- [4] 谢永利, 潘秋元, 曾国熙. 应用离心模型试验研究软基变形性状[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 45-50.  
XIE Yong-li, PAN Qiu-yuan, ZENG Guo-xi. Study on Deformation Behavior of Soft Clay Ground with Centrifugal Model Test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(4): 45-50.
- [5] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 80-86.  
XU Guang-ming, ZHANG Wei-min. Grain size effect and boundary effect in centrifuge modeling test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 80-86.
- [6] Aïssa Rezzoug, Diethard Koinig, Theodoros Triantafyllidis. Scaling Laws for Centrifuge Modeling of Capillary Rise in Sandy Soils[J]. JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, JUNE 2004: 615-620.
- [7] POULOSE Asha, NAIR Smitha R, SINGH Devendra N. Centrifuge Modeling of Moisture Migration in Silty Soils [J]. JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, AUGUST 2000: 748-752.
- [8] 李 明, 张 嘎, 李焯芬, 等. 离心模型试验中边坡开挖设备的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1638-1642.  
LI Ming, ZHANG Ga, LEE C F, et al. Development and application of a slope excavation device for centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1638-1642.
- [9] 黄茂松, 李 波, 程 岳. 长短桩组合路堤桩荷载分担规律离心模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2543-2550.  
HUANG Mao-song, LI Bo, CHENG Yue. Centrifuge Model Test and Numerical Simulation of Load Sharing Law for Composite Embankment with Long and Short Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2543-2550.

(下转第 85 页)



- ZHAO Li-ying. Historic Architecture in Shaanxi [M]. Xi'an: Shaanxi people Press, 1992: 275-277.
- [7] Alexander, Christopher. A new theory of urban design[M]. New York: Oxford University Press, 1987.
- [8] Mumford, Lewis. The City in History: Its Origins its Transformation and its Prospects[M]. New York: Macmillan, 1972: 15-18.
- [9] 周若祁. 韩城村寨与党家村民居[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999: 25-26.
- ZHOU Ruo-qi. Ramparts, villages and vernacular dwellings of Dang-Jia-Cun village of Han-Cheng[M]. Xi'an: Shaanxi science and Technology Press, 1999: 25-26.

## Design method and pattern about Sima Qian Temple in Hancheng from the perspective of human settlement science

ZHANG Tao

(School of Architecture, Xian University of Architecture & Technology, Xian 710055, China)

**Abstract:** This paper attempts to study the design concept, specific methods and cultural communication system in Hancheng Sima Qian Temple from the traditional settlement environment science. Sima Qian Temple proves that the Chinese ancient city and architecture create a whole environment which includes implications natural, cultural, architecture and human. This environment appears in hierarchy. Ained to set up a human space which contains spiritual information and cultural connotation. The ancient Chinese are likely to draw mental pictures, design cultural streamlines and plan belief structures. The final aim is to educate people and make spiritual home.

**Key words:** *human settlement environment; mental picture; cultural streamline; belief structure*

**Biography:** ZHANG Tao, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tell: 0086-18710757087, E-mail: 873955118@qq.com

(上接第 65 页)

## Research on influencing factors of consolidation theory applicability in centrifugal force field

ZHANG Sha-sha<sup>1,2</sup>, XIE Yong-li<sup>1,2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to research the impact of centrifugal model test results from the change of acceleration and the model height and improve the accuracy of centrifuge test results, based on conventional consolidation test instrument, The consolidation test device in centrifugal force field was developed. Taking the consolidation simulation of saturated sand, marine soil and saturated loess in different centrifugal acceleration field as subject, the comparison of test time and different theoretical computation time were analyzed. It is indicated that there are two phases in the consolidation process of saturated soil in centrifugal model test, namely the quick consolidation and the sequent slow consolidation. The quick consolidation process is mainly influenced by centrifugal acceleration. The application Terzaghi one-dimensional consolidation theory has its limitations in centrifugal force field. Uneven distribution and high of centrifugal acceleration on the model has a greater impact on the results, were the impact of soil weight must be considered. The existing time scale formula should be corrected by the test conditions.

**Key words:** *centrifuge; consolidation test equipment; consolidation theory; saturated soil*

**Biography:** ZHANG Sha-sha, Ph. D., Xi'an 710064, P. R. China, Tel: 0086-15934806782, E-mail: zss-lx@126.com