

地下结构抗浮计算方法试验研究

张第轩,陈龙珠

(上海交通大学船建学院安全与防灾工程研究所,上海 200240)

摘要:通过对砂土和粘土的试验,研究了无渗流条件下地下结构浮力的计算方法。试验表明,不论是砂土地基还是粘土地基,水位升高时,浮力增长的大小应按全水头计算而无需折减;并且与地基土的孔隙率无关。

关键词:地下结构;浮力;试验;中砂;粘土

中图分类号: TU91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008 - 1933(2008)03 - 105 - 04

Experiment on the computing method of anti-floating in underground structures

ZHANG Dixuan, CHEN Longzhu

(IESDP, Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the experiment of sand and clay, the computing method of buoyance without seepage is analyzed. The result proves that the increase of buoyance should be calculated according to the water-head when the water level increase. It should not be reduced and has no relation to the porosity.

Key words: underground structure; buoyance; experiment; sand; clay

0 引言

随着我国经济的发展,城市化建设进程不断加快,工程建设的规模越来越大,因限于城市用地资源的紧张,城市建筑物的建设在经历了平摊式发展和向高层发展的阶段以后,向地下发展的趋势已经受到人们越来越多的关注。北京、上海、广州等大城市的基坑深度在十多米以上,地下三四层的地下室已经不是个例,地下空间的开发利用越来越受到人们的重视。

由于向下开发深度的增加,地下工程受到的浮力问题也凸显了出来。适度的地下水浮力可以作为有利荷载加以利用,然而过量则会形成灾害。在高水位地区,地下工程或建(构)筑物的地下室部分长期处于水位线以下,或者在沿江沿海地区,因暴雨、潮汐作用使地下水位出现较大幅度的波动,结构的地下部分短时间处于水位线以下。过高的水位,对结构产生较大的浮力,特别是对于单建式的地下车库、地下商场、下沉式广场、地下人防工事等,因结构

本身的自重不足以克服浮力,或者是高层建筑在刚完成地下部分施工而上部结构还未完成之时,常发生浮力事故^[1-3]。这一问题已引起学术界和工程界的广泛关注。《建筑地基基础设计规范》^[4]首次提到抗浮条文:“当地下水埋藏较浅,建筑地下室或地下结构存在上浮问题时,尚应进行抗浮计算”。上海市工程建设规范《地基基础设计规范》^[5]中也提到了浮力,但浮力大小的计算方式,在规范中均没有明确的规定。也有学者提出,按排开水的重量乘以一个小于 1 的折减系数^[6-7],但终因缺乏令人信服的理论依据,也未形成共识。因此,本文通过试验的方法得出一些翔实的试验数据和建议来为研究或设计人员提供一些参考,就显得有必要了。

1 模型简介及介质选取

本试验模拟地下结构在高水位地区所受地下水作用时浮力的大小变化,为了使试验情况更能接近于现场实际,应尽可能选用大尺寸的池体,因此用 1000 mm(长) × 1000 mm(宽) × 1200 mm(高)的模型池盛装土样,模型池采用 5 mm 厚的钢板制作,确保了池体的整体密封性及刚度,防止因池体变形而影响测试数据的准确性。在池体的上部设置 1 根 50 mm × 50 mm × 5 mm 的角钢作为结构模型反力支架,用来固定小模型的上下位置并在小模型受到

收稿日期: 2006-12-04

作者简介:张第轩(1976-),男,陕西西安人,硕士,主要从事建筑施工工作。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50478022)

E-mail: zhangdixuan@163.com

的浮力大于自重时阻止其上浮,以利于测量浮力的变化情况。通过两端的螺栓,可以调整支架位置的高低。模型池侧壁靠近底部位置设置一排水孔,周围布置透水碎石,用来在试验后排水或在试验过程中调整模型池中的水位达到要求的高度。在模型池的外侧安装有水位测量管和标尺,可以在水位改变的过程中,通过外测水位管中水位读数,及时准确地测出模型池内的水位高度(模型池如图 1 所示)。结构模型既要考虑到其自重利于试验,又要有一定的刚度,使得在水压力作用下不会变形或失稳,采用比较轻便的有机玻璃制作成 350 mm(长)×350 mm(宽)×700 mm(高)的无盖盒体,有机玻璃厚 20 mm。因有机玻璃与水、土的作用不同于混凝土及其作用,为了更真实地模拟结构的底板和水、土的结合及相互作用,减小模拟和现实之间的误差,特在结构模型的底部涂以水泥浆,后称得模型自重 217.6 N。力传感器安装在结构模型与角钢支架之间,用来测量结构所受到浮力后的变化情况。因侧向的结构侧壁与水、土共同作用对侧向的压力一直是个难点和热点问题,虽然有很多学者投入了研究,但还没有精确的计算公式。因此,通过计算得到的侧摩阻力,就是一个非十分可靠的数据,为了减小这种原因促成的试验误差,本试验特将结构模型置于介质的表面进行测试,使水、土仅与结构的底面共同作用。

试验采用孔隙比和透水性相差很大的中砂和粘土两种介质来进行测试。

表 1 砂子粒径组成

Table 1 Size distribution of sand

粒径/mm	颗粒划分							细度模数	土名
	10~5	5~2.5	2.5~1.25	1.25~0.63	0.63~0.315	0.315~0.16	<0.16		
质量比/%	5.6	11.6	9.4	16.4	34.2	20	2.8	2.47	中砂

试验分两步进行:第一步将模型置于试验介质表面,在不采取任何约束的情况下分别进行空模型和模型配重 80 N 后的自由上浮测试:将位移计安装在结构模型的两侧,向模型池中缓慢注水,水位每上升 2 cm 高度后停止注水,静置 15 min,测其垂直方向的位移,形成水位与上浮位移曲线如图 2 所示(因测量位移的位移计最大量程为 10 mm,所以上浮后纵坐标取最大值 10 mm)。第二步为有约束测试:在无约束位移测试完成以后,重新排水到初始位置,将结构模型放入模型池中的介质表面,安装好压力传感器、位移计和水位标尺,调整位置调节螺栓,给予结构模型一个初始的反力 F_0 ,记录此时的水位高度后开始往模型池中缓慢注水,数据记录方式与第一步相同,在水位每上升 2 cm 高度后停止注水,静

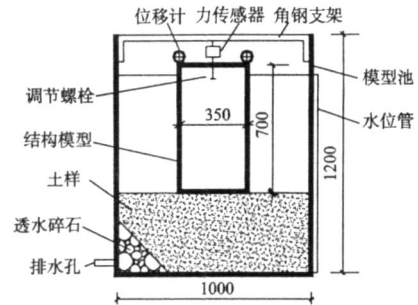


图 1 试验模型示意

Fig 1 Test model

2 中砂试验

试验前,选取干净的河砂(其性质指标见表 1),用 10 mm 孔径筛将粒径大于 10 mm 的粗砾筛除,将筛底小于 10 mm 的砂收集作为试验土样,填装于模型池中。第 1 次采用自然坍塌的方式填装,后测得其孔隙率 $n = 37.1\%$;第 2 次为了获取较小的孔隙率,采取分层填装,边填装边振动,制成比较密实的样品(实测孔隙率 $n = 28.3\%$)。在试验过程中,为了减小压力传感器的测量误差,务必使结构模型的受力方向与传感器接触面垂直,这就要求砂的表面必须平整,与结构模型的底面接触良好。因此,在干砂填装好后对其表面进行平整,并用水平尺量测以确保其表面水平。对试样浸水饱和后静置 7 d,以待砂子充分饱和及其各样性质达到稳定后进行试验。

置 15 min,使压力传感器的数据稳定后记录(各水位时的压力传感器所测得的反力值与初始水位时的反力值的差即为反力增量)。注水到模型池的最高水位后,排水至初始水位。静置 1 d 后重复上述试验,不同孔隙率时测得的反力数据形成曲线如图 3, 5 所示,相应的模型位移变化如图 4, 6 所示。图中横坐标水位比 h/h_1 指的是实测水位 h 与理论上浮水位 h_1 (按浮力等于模型排开水重量计算所需的理论浮起水位)的比值。

由于试验中上浮曲线是间断点组成,所以对于起浮点合理的取值就是取最后一个未浮起的测点水位和已经浮起的测点水位的平均值。试验前称得结构模型重 217.56 N,如果按理论水位计,起浮水位应该为 18.1 cm,从实际测量知 37.1% 孔隙率砂中

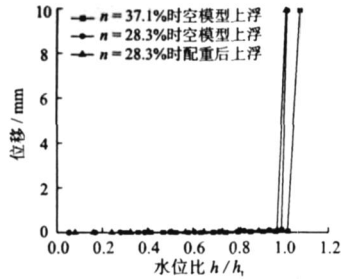


图 2 砂土介质中结构模型无约束上浮位移曲线

Fig 2 Rising displacement of structure in sand without restraint

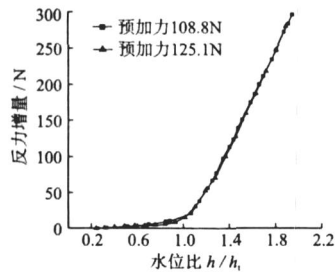


图 3 n=37.1%砂中水位上升时反力变化曲线

Fig 3 Counterforce vs water-stage in sand (n=37.1%)

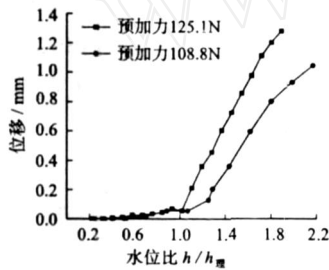


图 4 n=37.1%砂中有约束时模型位移曲线

Fig 4 Rising displacement of structure in sand with restraint (n=37.1%)

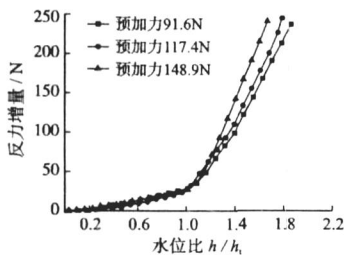


图 5 n=28.3%砂中反力变化曲线

Fig 5 Counterforce vs water-stage in sand (n=28.3%)

在 18.5 cm 上浮,滞后 2% (即折减为 0.98 倍); 28.3%孔隙率砂中空模型在 18.3 cm 上浮,滞后 1% (即折减为 0.99 倍)。加 80 N 的配重后,在 24.5 cm 处发生完全上浮 ($h_t = 24.7$ cm),无滞后。

对于存在约束情况下反力的变化,通过图 3,5 可以看出,3 条曲线均在从开始到水位比小于 1.0

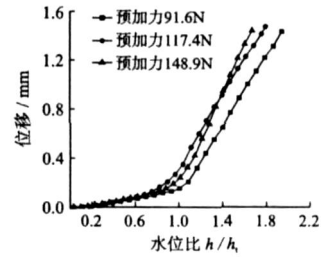


图 6 n=28.3%砂中有约束时模型位移曲线

Fig 6 Rising displacement of structure in sand with restraint (n=28.3%)

的一段区间内,约束反力以很小的幅度增加,当水位比略大于 1.0 后,曲线发生一个明显的抬升,且约束反力的增量加大。此处的水位,即为结构模型的起浮点。起浮以后,因浮力大于结构的自重,土对结构底板的作用力降为 0,约束反力的变化,实际上就是浮力的变化。从图可以看出,且其逐渐趋于稳定,可按下式进行拟合:

$$F = \gamma_w A_s h + F \quad (1)$$

式中 F ——传感器实测力 (N);

——折减系数;

γ_w ——水的容重 (N/m^3);

A_s ——结构模型与介质的接触面积 (m^2);

h ——关于模型底面的水位差 (m);

F ——函数常数项 (N)。

将各次测试曲线用函数 (1) 进行拟合,可得到相关的模拟数值见表 2。

表 2 测试相关数值

Table 2 Experimental data			
孔隙率 n/%	F_0/N	折减系数	的平均值
37.1	108.8	1.001	0.996
	125.1	0.991	
28.3	91.6	0.964	0.984
	117.4	0.988	
	148.9	1.001	

如果将按阿基米德定律所计算的浮力作为理论浮力,两种孔隙率下起浮以后的实测浮力的增长,是理论浮力增长的 0.996 倍和 0.984 倍,与按起浮点所计算的一致。所以,虽然孔隙率不同,但对于处于砂土地基中的结构,都有一个明显的规律:随着初始预加力的增大,起浮的水位也随之升高,当超过起浮点以后,即只有浮力作用时,浮力增长倍数远远大于孔隙率,更接近于 1.0。所以,在进行抗浮计算时,可以将孔隙率对浮力的影响忽略不计,不应该用孔隙率而对浮力进行折减。

3 粘土试验

本试验所用粘土取自上海市某基坑工程,该工

程场区地下水类型主要为赋存于浅部土层中的潜水,且水位高(地面下 0.7~1.9 m 左右),其补给来源主要为大气降水,是常见的工程地基类型土质(性质指标见表 3)。

表 3 试验用土性质指标

Table 3 Index of property of test soil

土名	含水量 / %	密度 / (g/cm ³)	比重 G	孔隙率 n / %	塑性指数 I _p	内摩擦角 / (°)	压缩模量 E _s / MPa
粘土	25.4	1.83	2.74	41.0	17.3	15.5	3.53

粘土试验的步骤和砂土试验的步骤完全一样,但由于粘性土的渗透性差,所以,饱和静置的时间取半个月。测量时,每次停止注水 30 min 后,记录 1 次数据。在进行结构模型无约束自由上浮试验时,也分别测取了空模型和对模型进行配重 80N 后的自由上浮,所测得的上浮位移曲线如图 7 所示。做有约束试验时,在测取传感器上力的大小变化的同时进行模型位移监测,试验共测得 4 组数据,形成粘土介质中结构模型的反力变化曲线如图 8 所示,位移变化曲线如图 9 所示。

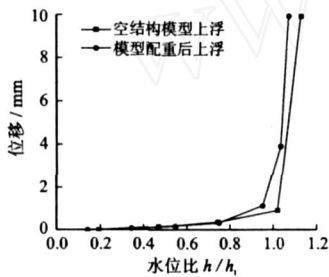


图 7 粘土介质中结构模型无约束上浮位移曲线

Fig 7 Rising displacement of structure in clay without restraint

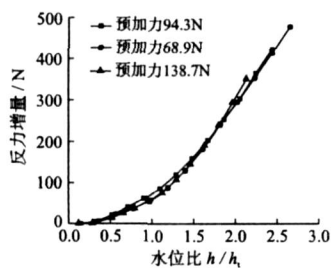


图 8 粘土介质中反力变化曲线

Fig 8 Counterforce vs water - stage in clay

测试数据显示,在水位升高到 18.5 cm 时,空模型保持稳定,再加水至 20.5 cm 时则完全上浮,取平均值为 19.5 cm,和理论值相比,滞后 8% (即折减为 0.92 倍)。配重 80 N 后,最终测得在 26.0 cm 高水位处发生上浮,理论水位应该为 24.7 cm,滞后 5% (即折减为 0.95 倍),均比砂性土中的情形稍有滞后。

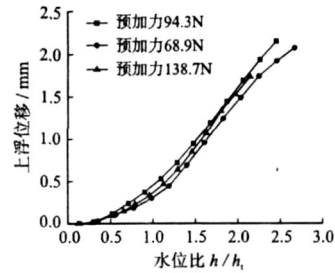


图 9 粘土介质中模型有约束时位移变化曲线

Fig 9 Rising displacement of structure in clay with restraint

与砂土中的试验情况相比,在粘土介质中,水位没达到起浮点时,有约束的位移变化在同一水位比时要比砂土中大,这是由于粘土的压缩系数远远大于砂土,而加水的过程是对土体的卸载过程,卸载时产生较砂土大的回弹。随着水位的增长,反力的变化并没有像砂土中那样形成明显的折点,而是缓变式上升,起浮点也是随着初始力的增大而推后。当水位比大于 1.0 后,底板只有水的浮力,没有土的作用,浮力增长变为线性增长。通过计算实测值,其增长是理论值增长的 0.92 倍,与按起浮点所计算的接近,没有接近 1.0,与可能观测的时间不够长有关。但不论是按起浮点还是按浮起以后的浮力测试值计算,浮力的折减也远远大于土体的孔隙率,并不是以孔隙率的倍数折减。

4 结 论

当结构全部或部分处于水中时,地下水对上部的结构均会产生一定的浮力。

(1) 不论是砂性地基还是粘性地基,随着地下水位的升高,浮力呈线性增长,但其大小与地基土的孔隙率基本无关。

(2) 在进行地下结构的抗浮设计或施工时,浮力的大小应按全水头(水位差)计算,无需折减。

参 考 文 献:

- [1] Donald C Jackson It is a crime to design a dam without considering upward pressure: engineers and uplift, 1890-1930[J]. Darcy and Hydraulics, 2003.
- [2] 王贵生. 一项大型水池工程上浮事故的处理[J]. 特种结构, 1998, 15(2).
- [3] 李平先, 梁国仓, 黄秋风. 水池漂浮事故处理及抗浮构造措施[J]. 中国给水排水, 2004, 20(2).
- [4] GB5007 - 2002 建筑地基基础设计规范[S].
- [5] GB5007 - 2002 建筑地基基础设计规范[S].
- [6] 黄志仑. 关于地下建筑物的地下水扬力问题分析[J]. 岩土工程技术, 2002, (5).
- [7] 袁裴豪. 地下结构的抗浮设计探讨[J]. 福建建筑, 2004, (1).