

文章编号: 1000-7598-(2007)10-2145-04

砂土一维循环压缩试验及在地下水库中的应用

李旺林¹, 殷宗泽², 李桂国³, 迟海燕⁴

(1. 山东省调水工程技术研究中心, 济南 250013; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210024;
3. 山东省莱州市水利局, 莱州 261400; 4. 山东省水利勘测设计院, 济南 250013)

摘要: 通过砂土一维循环压缩试验, 模拟了地下水位升降引起的含水层的压缩和回弹变形, 分析了砂土竖向变形、孔隙率随循环次数的变化规律, 提出了用孔隙降低率评价地下水位升降对地下水库库容影响的方法, 得出地下水位的反复升降一般不会影响地下水库正常使用的结论。

关键词: 循环压缩试验; 孔隙率; 地下水库; 孔隙降低率

中图分类号: TU 411; TV 62³

文献标识码: A

Sandy one-dimension circulating compression test and application to groundwater reservoir

LI Wang-lin¹, YIN Zong-ze², LI Gui-guo³, CHI Hai-yan⁴

(1. Research Center of Water Diversion Technique of Shandong, Jinan 250013, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Laizhou Water Conservancy Bureau, Laizhou 261400, China;
4. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China)

Abstract: Through doing one-dimensional equal amplitude circulating compression test of sand, the compression and resilience deformations of the aquifer caused by the groundwater level rising or falling are simulated; and the effect of the circulating number on the vertical deformation and porosity is analyzed; the reduction rate of porosity is proposed; the influence of groundwater level rising or falling upon the groundwater reservoir storage is evaluated by the reduction rate of porosity; a conclusion is obtained that rising or falling of groundwater level will can not affect using of groundwater reservoir.

Key words: circulating compression test; porosity; groundwater reservoir; fall ratio of porosity

1 引言

地下水库是近 10 余年兴起的一种新的蓄水工程, 是利用天然地下储水空间兴建的具有拦蓄、调节和利用地下水流作用的特殊的水库^[1]。修建地下水库, 提高了供水能力, 增加了库区地下水位升降的次数, 并引起土层的反复压缩和回弹, 最终产生不可恢复的塑性变形, 其结果是引起一定的地面沉降, 降低了砂土孔隙率, 减小了砂土的储水能力。

过去认为地下水位下降时, 含水砂层呈现弹性变形的特点, 不会带来地面沉降, 大部分沉降是由软黏土压缩引起的。近年来的研究发现含水砂层的压缩也产生塑性变形, 并引起地面沉降^[2-5, 9]。但是却很少有人研究砂层储水能力降低的问题。

地下水位升降引起的砂土变形, 不同于周期性地震荷载作用引起的砂土变形, 其荷载作用的历史长, 且不产生动孔隙水压力。另外, 张云做过砂土不等幅反复加卸荷单向固结试验^[4], 初步研究了地下水位升降引起的砂土塑性变形, 其特点是施加的循环荷载是不等幅的, 但试验的数量相对较少, 且没有涉及到砂土储水能力的问题。

地下水库库容等于砂土给水度与其体积的乘积。给水度指饱和岩土在重力作用下释出水的体积与岩土体积之比。孔隙率是土中孔隙的体积和土的总体积之比。受荷载作用时饱和砂土排出土中重力水而产生压缩变形, 因此可以通过孔隙率的变化, 反映砂土给水度的变化, 进而评价砂土储水能力和地下水库库容的变化。

收稿日期: 2005-10-10

基金项目: 水利部科技创新项目 (No. SCX2003-5); “十一五” 国家科技支撑计划重大项目 (No. 2006BAB04A05)。

作者简介: 李旺林, 男, 1964 年生, 博士, 工程技术研究员, 主要研究方向岩土工程和地下水库。E-mail: cswlw@jnncc.com

文中结合山东省王河地下水库,进行了不同干密度、不同初始竖向压力和不同循环压力的砂土一维等幅循环压缩试验,详细研究了砂土一维等幅循环压缩变形的特性,并分析了地下水位升降对砂土的储水能力和地下水库库容的影响。

2 试验简介

2.1 地下水位升降过程中砂土含水层的工作状况和室内模拟

当地下水位下降时,土层有效重量增加,水位以下的砂层加载压缩,孔隙率减小,降低了砂土的储水能力。当地下水位上升时,土层有效重量减少,水位以下的砂层减载回弹,孔隙率增大,恢复了砂土的部分储水能力。

根据砂层埋深和地下水位变幅,砂层工作状态分为两种:第1种位于地下水位变幅以下的砂层,始终处于饱和状态;第2种位于地下水位变幅内的砂层,处于饱和~不饱和相互交替的状态。

限于第2种试验的复杂性,文中仅研究第1种含水状态砂层的变形特性。地下水位升降是一个相对缓慢的过程,对于大面积分布的含水砂层,可利用固结仪通过一维等幅循环压缩试验模拟地下水位升降引起的含水砂层的压缩变形。室内试验模拟时,始终保持试样饱和,分级加荷和分级卸荷,循环进行,并保持施加的最大荷载相同。

2.2 试验设计

参照山东省莱州市王河地下水库含水砂层的情况确定试验条件。砂土为砾质粗砂,天然干密度 15.4 kN/m^3 , 孔隙率 0.419。砂层埋深 0~23.7 m, 层厚 5.0~15.0 m, 地下水位变幅 10~20 m, 砂层承受的竖向压力 0~400 kPa 左右。

试验是在全自动固结仪上进行的,试样选用重塑试样,直径 61.8 mm, 高 2 cm。试验选用 14.4, 15.4, 16.4 kN/m^3 3 种干密度的试样,相对密度分别为 0.33, 0.55, 0.75, 相应的密实性为松砂、中砂和密砂。初始竖向压力选用 100, 200, 300, 400 kPa 4 种,初始竖向压力 100 kPa 时,分级加荷等级为 20, 50 kPa; 初始竖向压力 200 kPa 时,分级加荷等级为 20, 50, 100 kPa; 初始竖向压力 300, 400 kPa 时,分级加荷等级为 20, 50, 100, 200 kPa; 荷载分级、瞬时施加,每次荷载循环时,先分级加荷到预定最大值,再分级卸荷至初始值,且每个试样均采用等幅循环荷载,循环次数为 3~5 次。

3 饱和砂土一维循环压缩试验成果

3.1 竖向变形的特点

在饱和循环压缩试验中,做了 3 种初始干密度、4 种初始竖向压力共计 12 种组合的循环压缩试验,循环次数为 3~5 次。典型的竖向变形与竖向压力循环压缩曲线见图 1。

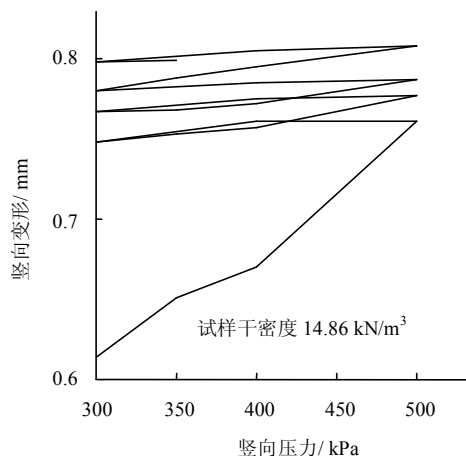


图1 典型的竖向变形与竖向压力循环压缩曲线
Fig.1 Representative circulating compression test curve

由图1中可知:(1)在循环压缩试验中,每一循环的起始点和终止点不重合,说明竖向变形存在塑性变形,这验证了在地下水位升降过程中含水砂层存在着不可恢复塑性变形的结论。(2)竖向变形与竖向压力曲线为上升螺旋线。第1次循环中塑性变形较大,第2次循环中塑性变形迅速减小,此后塑性变形随循环次数增加有减小的趋势,说明循环次数影响砂土的塑性变形。

通过试验,还可得到:(1)对比同一干密度、而不同初始竖向压力的循环压缩试验曲线,可知初始竖向压力不同的试样,其循环压缩的塑性变形随循环次数衰减的速度不同。初始竖向压力越高,塑性变形衰减的速度越快;反之,衰减的速度就慢,说明初始竖向压力影响循环压缩的竖向变形。(2)对比同一初始竖向压力、而不同干密度的循环压缩试验曲线,可知在相同初始竖向压力的情况下,不同干密度的试样,表现出相似的变形规律,仅仅是变形量大小的不同。

3.2 孔隙率变化的特点

饱和循环压缩试验中,孔隙率(每次循环起始点)随循环次数变化的规律见图2。

从图2中看出孔隙率随循环次数变化的特点:

(1)孔隙率随循环次数的增加而降幅逐渐变小。第1次循环中,曲线斜率较大,说明孔隙率下降的幅

度较大；此后曲线斜率变缓，说明孔隙率下降的幅度较小。(2) 初始干密度决定着孔隙率的大小，并对孔隙率循环曲线有一定的影响。(3) 初始竖向压力对孔隙率循环曲线有一定的影响。(4) 地下水位变幅对孔隙率有一定的影响。低压力(100, 200 kPa)试样的地下水位变幅分别为 5, 10 m，曲线相似，第 1 级循环曲线的斜率较缓，之后各级曲线趋向水平。高压力(300, 400 kPa)试样的地下水位变幅均为 20 m，曲线相似，第 1 级循环曲线的斜率较陡，且影响到第 2 级曲线，从第 3 级曲线才趋向水平。这说明地下水位变幅越大，对孔隙率的影响越大。

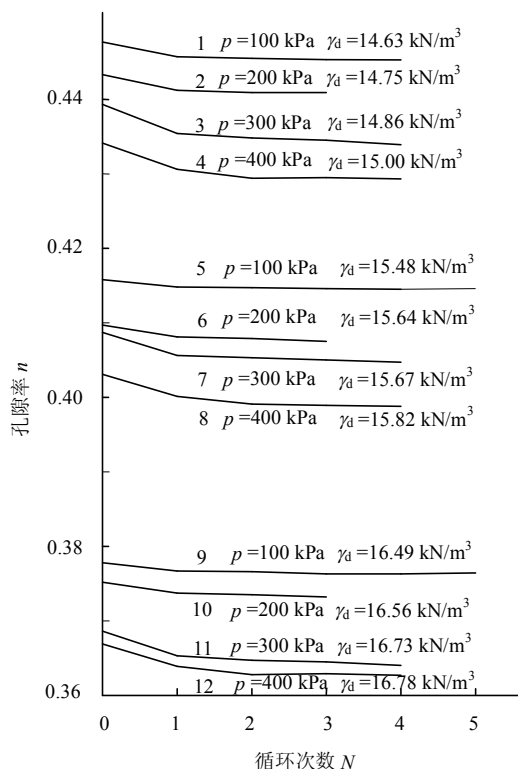


图 2 孔隙率和循环次数的关系

Fig.2 Correlativity curve of porosity and circulating period

4 地下水位升降对地下水库库容影响

上述分析可知影响砂土孔隙率的主要因素有：土的颗粒组成，初始干密度，初始竖向压力和循环荷载的大小、次数等。由于孔隙率的变化反映了地下水库库容的变化，因此影响地下水库库容的因素有：土的颗粒组成，初始干密度，砂层的埋深，地下水位升降幅度和升降次数等。

为评价地下水位升降对地下水库库容影响的程度，引入孔隙降低率的概念，用 R_n 表示，定义 $R_n = (n_0 - n_i) / n_0$ ，其中 n_0 为循环压缩试验第 1 次循环起始点的孔隙率， n_i 为第 i 次循环后的孔隙率。

在循环压缩试验中，不同初始干密度砂土试样的 R_n 随循环次数变化的规律见表 1~3。

表 1 孔隙率降低率与循环数 (初始干密度 16.4 kN/m³)

Table 1 Reduction rate of porosity and circulating period

初始竖向压力 / kPa	孔隙率降低率 R_n / %					
	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
100	0	0.29	0.32	0.40	0.40	0.37
200	0	0.40	0.45	0.53		
300	0	0.90	1.06	1.11	1.25	
400	0	0.82	1.12	1.09	1.14	

表 2 孔隙率降低率与循环数 (初始干密度 15.4 kN/m³)

Table 2 Reduction rate of porosity and circulating period

初始竖向压力 / kPa	孔隙率降低率 R_n / %					
	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
100	0	0.24	0.26	0.29	0.31	0.29
200	0	0.39	0.44	0.54		
300	0	0.76	0.83	0.91	0.98	
400	0	0.74	0.99	1.04	1.07	

表 3 孔隙率降低率与循环数 (初始干密度 14.4 kN/m³)

Table 3 Reduction rate of porosity and circulating period

初始竖向压力 / kPa	孔隙率降低率 R_n / %				
	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
100	0	0.45	0.49	0.54	0.54
200	0	0.47	0.54	0.63	
300	0	0.89	1.02	1.09	1.23
400	0	0.81	1.08	1.06	1.11

由表 1~3 可知：(1) 对于不同初始干密度、不同初始竖向压力的试样，在第 1 次循环中，孔隙率就达到了最大降低值(总循环 3~5 次)的 70%~80%。这说明初次的地下水位升降，对地下水库库容降低影响较大。从表 1~3 中得出，初次地下水位升降对地下水库库容的最大减小量为 0.9% 左右。

(2) 对于初始竖向压力 100 kPa 的试样，循环 4~5 次，孔隙率降低率就趋向稳定或波动。可以推论，对初始竖向压力较高的试样，循环次数增加到一定程度，孔隙率降低率也会趋向稳定；同理，对循环荷载较大的试样，循环次数增加到一定程度，孔隙率降低率同样会趋向稳定。这说明地下水位反复升降对地下水库库容的减小是有限的，地下水库库容不会随地下水位反复升降而无限的减少。(3) 对于初始竖向压力 100 kPa 的砂层，地下水位反复升降对地下水库库容的总减小量为 0.54% 左右；由表中结果推知，对于初始竖向压力较高的砂层，地下水位反复升降(最大 20 m)对地下水库库容的最大减小量为 1.5% 左右。说明地下水位反复升降对地下水库库容的影响较小。

5 饱和砂土循环压缩试验微观分析

饱和砂土循环压缩变形的特点与其微观结构有关。砂土是由单粒结构组成的散体结构,颗粒之间点点接触。松散砂土,粒间咬合力较弱、接触不稳定。密实砂土,粒间咬合力较强、颗粒间接触相对稳定。在相同荷载作用下,松砂易引起颗粒的重新排列,产生较大的塑性变形;密砂不易引起颗粒的重新排列,而产生较小的塑性变形。

在循环荷载作用下,第 1 周期加载过程中,砂土颗粒间重新排列,产生的塑性变形较大;由于各个周期施加的最大荷载相同,因而在第 2 周期荷载作用下,仅引起部分颗粒的重新排列,产生的塑性变形大幅降低;随着循环次数的增加,重新排列的颗粒越来越少,塑性变形也逐渐降低。竖向变形与竖向压力的循环压缩曲线也表现为升幅降低的上升螺旋线。砂土循环压缩塑性变形的特点,决定了砂土孔隙率变化的规律,在第 1 周期的循环压缩中,孔隙率大幅度的降低,此后的各级循环中,孔隙率逐渐降低,达到稳定。

循环荷载加荷的最大幅度也影响砂土的塑性变形。加荷幅度越大,引起粒间排列的幅度大,同时破碎的颗粒越多,产生的塑性变形越大,也形成较为稳定的粒间结构;首次循环压缩中,塑性变形降低的幅度更大。

6 结 论

在分析砂土一维等幅循环压缩试验的基础上,得出以下结论:

(1) 影响砂土循环压缩变形(地下水库库容)的因素有:砂土的颗粒组成,初始干密度,初始竖向压力(砂层埋深),循环加卸荷幅度(地下水位升降幅度)和循环次数(地下水位升降次数)等。

(2) 在地下水位升降的过程中,砂层产生不可恢复的塑性变形,并导致地下水库库容的减小。

(3) 砂土单粒微观结构和等幅循环荷载的特点,决定了初次的循环压缩变形具有较大的塑性变形;随后循环,塑性变形减小。

(4) 砂土孔隙率随循环次数的增加而减小,并趋向稳定。

(5) 从砂土孔隙率的角度分析,由于设计地下水库时,限制了地下水位升降的范围,因此在地下水位反复升降的过程中,地下水库库容出现一定程度的有限的减小,但不会影响地下水库的使用功能。当地下水位升降的范围在 20 m 左右时,对于所研究地下水库,库容的最大减小量为 1.5 % 左右。

参 考 文 献

- [1] 李旺林,束龙仓,殷宗泽. 地下水库的概念和设计理论[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 613—618.
LI Wang-lin, SHU Long-chang, YIN Zong-ze. Concept and design theory of groundwater reservoir[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 37(5): 613—618.
- [2] 薛禹群,张云,叶淑君,等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 585—593.
XUE Yu-qun, ZHANG Yun, YE Shu-jun, et al. Land sub-sidence in China and its problems[J]. **Quaternary Sciences**, 2003, 23(6): 585—593.
- [3] 张阿根,刘毅,龚士良. 国际地面沉降研究综述[J]. 上海地质, 2000, (4): 1—7.
ZHANG A-gen, LIU Yi, GONG Shi-lang. Overview of in-ternational land subsidence research[J]. **Shanghai Geology**, 2000, (4): 1—7.
- [4] 张云,薛禹群,李勤奋. 上海现阶段主要沉降层及其变形特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2003, (5): 6—11.
ZHANG Yun, XUE Yu-qun, LI Qing-fen. Current prominent subsidence layer and its deformation properties in Shanghai[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2003, (5): 6—11.
- [5] 岳梅. 淮南市抽排松散层地下水造成区域性地面沉降的机理分析[J]. 重庆环境科学, 1998, 20(1): 8—11.
YUE Mei. Mechanism analysis of regional surface subsidence caused by pumping and draining groundwater in ravelly ground in Huainan[J]. **Chongqing Environmental Science**, 1998, 20(1): 8—11.
- [6] 朱俊高,陆晓平. 大面积地面沉降研究现状[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(4): 74—79.
ZHU Jun-Gao, LU Xiao-Ping. Review of study on ground subsidence[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2001, 12(4): 74—79.
- [7] Ortega-Guerrero A, Rudolph D L, Cherry J A. Analysis of long term land subsidence near mexico city: field investigations and predictive modeling[J]. **Water Resources Research**, 1999, 35(11): 3 327—3 341.
- [8] Thu T M, Fredlund D G. Modelling subsidence in the hanoi city area, vietnam[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(3): 621—637.
- [9] Bravo R, Rogers J R, Cleaveland T G. A new three dimensional finite difference model of groundwater flow and land subsidence in the Houston area[A]. **Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence**[C]. USA Houston: IAHS Publ. 1991. 15—26.