

上海浅气层工程危害机理试验研究*

Experimental studies on consolidation law of the shallow soil layer containing high-pressure gas

吕少伟, 唐益群, 叶为民
(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2000)06-0734-04

作者简介: 吕少伟, 男, 1974年生, 上海同济大学地下建筑与工程系岩土工程专业在读博士研究生。

1 前言*

由于地质条件复杂, 上海地区近年来在大规模开发利用地下空间的过程中遇到了许多难题, 高孔压浅气层问题就是其中之一。浅气层中高压孔隙气的存在增加了土层的压缩性, 降低了土层的稳定性, 而且气体一旦释放会引起浅气层和相邻土层的剧烈扰动, 严重威胁到地下工程的安全施工与运营。在上海开发利用地下空间的建设中, 由于浅气层气体释放而引发的工程事故已有多起, 引起了有关部门的重视^[1,2]。然而由于对浅气层气体释放后土体变形规律不甚清楚, 防治效果不够理想。为此有必要对其进行深入的研究。

2 上海浅气层产出分布规律概述

上海地区浅气层在嘉定至奉贤一线(原古海岸线)以东广泛分布, 主要发育在第四系浅海相沉积层中。上海地区共有三个稳定的含气层位: 第一层埋深 12.0~25.0 m, 该层对地下工程的影响最大; 第二层埋深一般在 30.0 m 以下; 第三层埋深一般在 50.0 m 以下, 这两层由于埋深较大, 对一般的地下工程影响不大。贝壳层和砂层是上海地区最主要的两种含气层类型, 其含气特点分述如下:

贝壳层含气性很好, 分布广泛; 气层厚度不大, 一般在 20 cm 左右; 结构疏松, 孔隙渗透性良好; 一般均为气水同产, 而富气区往往为干气层; 单个气藏的储量一般不大。

砂层储气层中的沼气多聚集于砂层透镜体隆起部分、尖灭体封闭端或砂层顶部起伏处; 砂层不一定都有气, 这要看其所处位置及是否有气的补给来源; 气层厚度较大, 一般厚 0.5~1.0 m, 最厚达 1.5 m 以上, 例如长江口附近粉砂含气层厚度为 4 m 左右; 气层往往具有底水; 气压高, 气流稳定, 原始压力一般为 0.10~0.30 MPa, 最大可超过 0.60 MPa; 单个气藏储量较大。

3 室内模拟试验简介

本次试验所采用的试验设备是本校吴林高教授和缪俊发博士设计、制造, 后经卢梅艳博士改进的高压渗透固结仪^[3], 使用时略作了调整, 设备由空气压缩机、土压力室、土固结室、信号转换系统、数据采集系统 5 个主要部分组成。其中空气压缩机用于施加土压力室压力及土固结室孔隙气压力; 土固结室用于安装试验土样; 土压力室用于模拟现场压缩土层的上覆土层荷重; 位移计用于测量土样的变形; 压力传感器用于测量土样中孔隙压力的变化; 信号转换系统和数据采集系统用于将位移计和压力传感器的电信号转换成可读数据并自动连续记录下来。

由于贝壳层一般厚度很小且单个气藏的储量也较小, 因此本次试验土样只采用粉砂和细砂两种, 贝壳层则不考虑。由文献[2]可知, 含气砂层的沼气富集带中土的饱和度极低, 所以本试验所用土样的含水率也较小。试验土样的含水率及颗粒分析试验结果见表 1。

表 1 试验土样含水率及颗粒分析结果表

Table 1 Water content and granulometric composition of samples

土样	含水率 $w / \%$	粒组含量 / %				
		$> 0.5\text{mm}$	$0.5 \sim 0.25\text{mm}$	$0.25 \sim 0.1\text{mm}$	$0.1 \sim 0.074\text{mm}$	$< 0.074\text{mm}$
粉砂	4.17	0.58	0.96	58.78	10.58	29.11
细砂	3.94	0.21	17.63	79.39	2.13	0.64

模拟试验工作在常温下进行。试验内容包括模拟浅气层沼气缓慢释放条件下土层的压缩变形过程、沼气重新回聚条件下土层的膨胀变形过程以及沼气再次释放后土层的再压缩变形过程。

本试验对粉砂和细砂两种试验土样各进行了 5 组 4 组模拟试验, 每组试验的模拟固结压力及初始孔隙气压力情况如下: 细砂第 1~4 组固结压力为

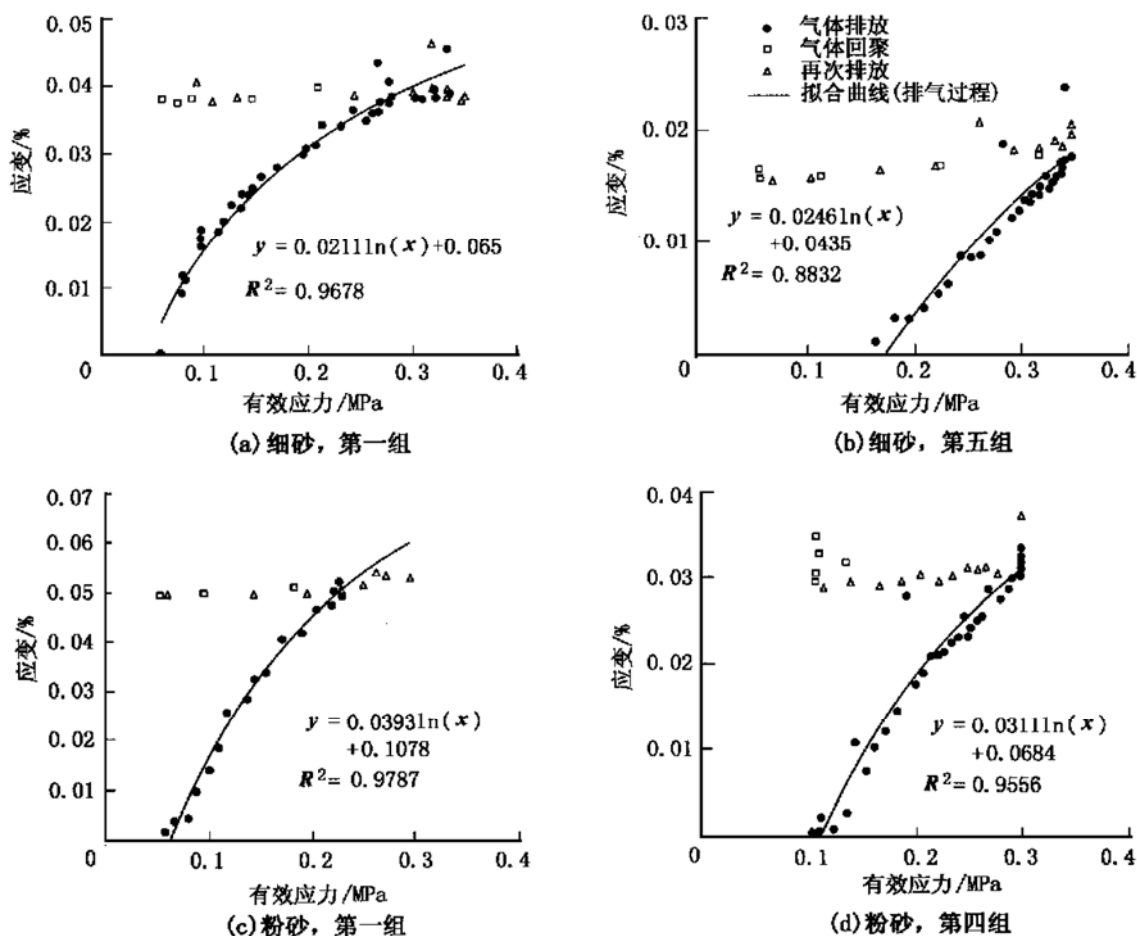


图1 应力-应变曲线

Fig. 1 The stress-strain curve

0.35 MPa, 初始孔压为 0.30 MPa, 第 5 组 (对照组) 固结压力为 0.35 MPa, 初始孔压为 0.20 MPa; 粉砂第 1~3 组固结压力为 0.30 MPa, 初始孔压为 0.25 MPa, 第 4 组 (对照组) 固结压力为 0.30 MPa, 初始孔压为 0.20 MPa。取固结压力为 0.30~0.35 MPa, 对应于现场上覆土层厚度约为 18 m 左右时所产生的自重压力。

4 试验数据整理与试验结果分析

4.1 试验数据整理

由文献[4]可知, 当非饱和土中的含水率很小时, 孔隙水的作用可以看作是提供土的表观粘聚力的因素之一, 而在计算土的有效应力时则可以不计孔隙水压力 (这样也就避免了在试验时气水压力分测的困难), 此时土中的有效应力就等于总应力与孔隙气压力的差。在此基础上, 可以将试验记录的孔隙气压力值换算为土中有效应力值, 再将土样表面的位移值换算为应变值, 这样就可以作出气体缓慢释放、回聚、再释放条件下土层变形的应力-应变曲线以及土层变形的应变-历时曲线。所得曲线见图 1、2 (由于篇幅有限仅给出 4 组试验的对比曲线)。

4.2 试验结果分析

(1) 由气体释放、气体回聚及再次排气过程的总的应力-应变曲线可以发现: 与气体释放过程中土样所产生的沉降量相比, 气体回聚过程中土样所产生的回弹量是很小的, 再次排气过程所产生的再次沉降量也是很小的。这说明气体释放过程产生的变形主要为塑性变形, 弹性变形只占一小部分。

(2) 气体释放过程的应力-应变曲线可以分为两部分: 第一部分为明显的曲线段, 对应于土样变形过程中塑性变形为主的阶段, 该段平均斜率比较大, 对应的应变占了总应变的大部分; 第二部分近似为直线段, 对应于土样变形过程中弹性变形为主的阶段, 该段斜率较小, 对应的应变比较小。这种变形过程与一般材料先弹性后塑性的变形特点正好相反。对此, 笔者认为: 在排气变形初期, 变形主要是由于疏松的砂粒位置移动、重排而产生的, 故而以塑性变形为主; 而在排气变形后期, 砂土已经比较密实, 变形主要是由砂土骨架的弹性压缩造成, 故而以弹性变形为主。

(3) 无论是细砂还是粉砂, 其孔隙气体释放过程的应力-应变曲线都可以很好地用自然对数曲线拟合,

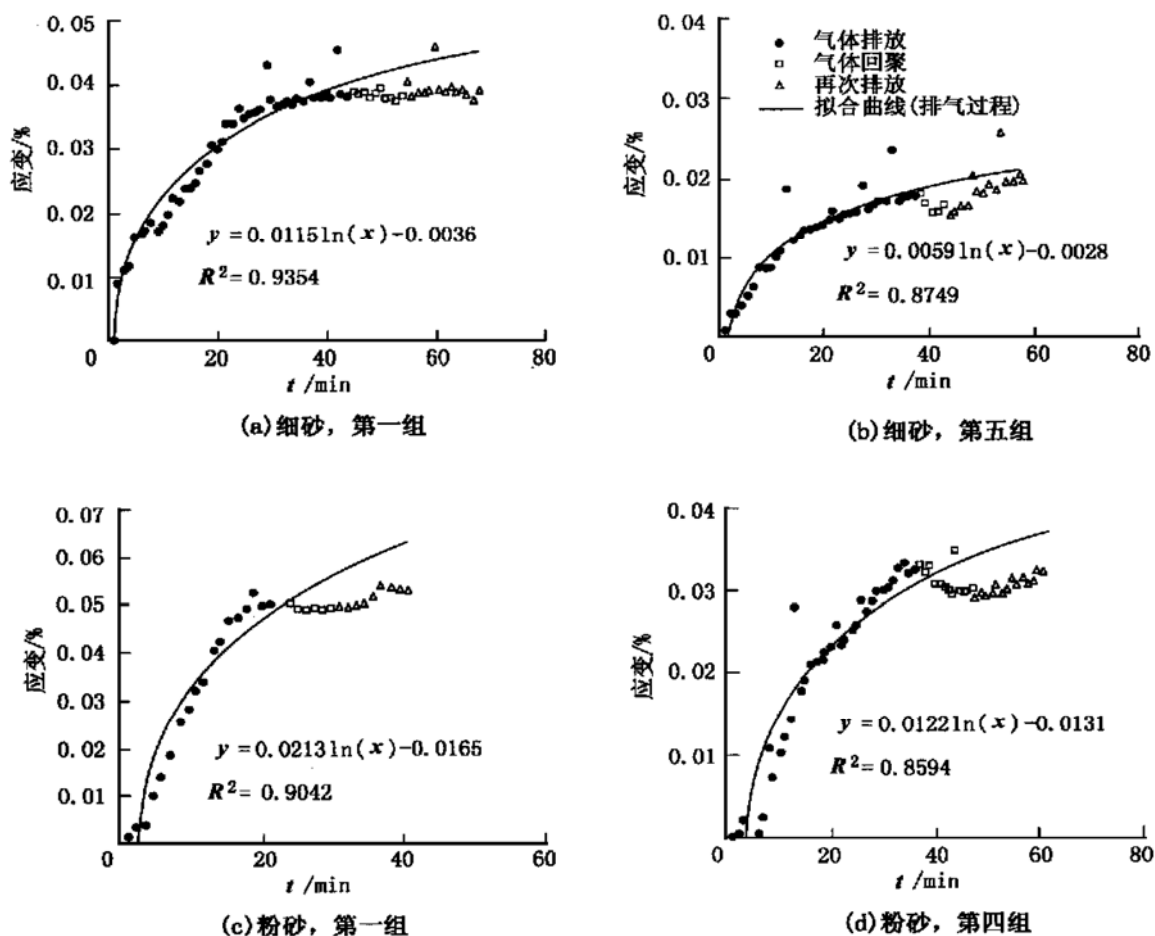


图2 应变-历时曲线

Fig. 2 The strain-time curve

应变(y)与有效应力(x)成简单对数关系,可以用式(1)表达:

$$y = k_1 \ln(x) + b_1 \quad (1)$$

式中 k_1 与 b_1 为常数。 k_1 值与土样的性质有关。本次试验中细砂的 k_1 值约为 0.023, 粉砂的 k_1 值约为 0.035。粉砂的 k_1 值比细砂的 k_1 值要大,表明相同条件下,粉砂层的压缩量要大于细砂层。

(4) 无论是细砂还是粉砂,其气体释放过程的应变-历时曲线同样可以很好地用自然对数曲线拟合,应变(y)与时间(x)成简单对数关系,可以用式(2)表达:

$$y = k_2 \ln(x) + b_2 \quad (2)$$

式中 k_2 与 b_2 为常数。 k_2 值与孔隙气的释放速度有关。这是容易理解的,排气速度越慢,则变形速度越慢, k_2 值就越小。

(5) 细砂第5组试验及粉砂第4组试验的初始孔隙气压力同其他组的相比要小。将这两组试验所得曲线与其他组的比较可以发现:在总的固结压力相同的条件下,土样的初始孔隙气压力小,其排气固结总沉降量也小;其气体释放过程的应力-应变曲线越接近直线(说明弹性变形在总变形中所占的比例越高);其气

体释放过程的应变-历时曲线的拟合公式中的 k_2 值也越小。

5 浅气层工程危害机理及防治措施

根据试验的结果分析,可以对浅气层的工程危害机理进行讨论,并提出相应的防治措施。

5.1 浅气层工程危害机理分析

含气层中的气压力可以达到很大的值。在大的气压力作用下,含气层中的有效应力要远远低于自重应力。这必然使得土的结构相对比较疏松,所以在气体释放后,含气层会产生相对较大的沉降量。由试验的结果可以推算出,埋深 18 m 左右,厚 1.5 m 左右,初始孔隙气压力 0.3 MPa 左右的含气砂层在气体缓慢释放的情况下,产生的沉降量约为 5.0~8.0 cm。如果初始孔隙气压力和含气层厚度更大(例如长江口附近存在厚度约为 4.0 m,气水压力最高可达 0.61 MPa 的含气粉砂层),那么变形量也会更大,这对重要的地下工程来说是不能接受的。

与气体缓慢释放相比,急剧释放的情况则更加危险。在地下工程开挖时,随着上覆土层的变薄及工程

振动的影响, 高压沼气会揭穿顶板, 急剧释放, 快速的气流必然会对土层产生强烈的冲刷作用; 含气层的气压力下降, 必然会导致气-水分离面向喷气口推进, 与此同时产生的地下水流也会对土层产生冲刷的作用, 从而引起更大范围内土层的扰动。因此沼气急剧释放会使土层产生剧烈的扰动, 带走大量的土颗粒及水, 引起流砂及土层的坍塌。这是浅气层造成灾难性事故的主要原因。

5.2 浅气层工程危害防治措施

既然试验已经证明浅气层气体释放会造成土层的很大变形, 而当气体急剧释放时使土层产生剧烈扰动更是造成危害的主要原因, 那么对浅气层工程危害进行防治的主要方向是防止高压孔隙气在地下工程施工或建成使用过程中释放。为了达到这一目的, 可以采用以下措施:

(1) 由试验结果可知, 气体一次释放完全后, 含气层的塑性变形基本全部发生, 即使气体再次回聚, 再次释放, 也不会再产生大的变形。因此, 在工程施工之前, 通过勘察, 摸清含气层的位置, 打排气孔预先排气是一种有效的防治措施。

(2) 由于提前排气往往进行的不彻底, 且沼气会重新回聚, 所以在地下工程施工过程中, 要加强沼气的同步探排工作, 有时还要采取必要的密封措施。例如在地下隧道的盾构法施工中, 在有浅气层威胁的地段最好采用密封的、具有超前触探排气装置的盾构。

(3) 浅气层所释放的气体(主要成分为甲烷)在地

下建筑物内积累到一定程度后, 易发生火灾甚至爆炸, 所以要加强地下建筑物内的通风工作, 对易产生电火花的电器设备应加以防爆处理。

6 小 结

通过模拟试验可以发现气体释放过程中土体变形具有先塑性后弹性的特点, 且总变形以塑性为主, 一次排气固结完成后, 即使气体再回聚, 释放也不会再产生大的变形。这为防治浅气层工程危害指明了方向。在我国东南沿海软土发育地区, 往往具备浅气层的发育条件(富含有机质)。本文的研究对于存在浅气层的地区的地下工程安全施工有借鉴意义。本试验研究的只是浅气层缓慢排气固结变形规律, 至于较复杂的急剧排气扰动变形规律只做了定性的分析, 有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 唐益群, 张庆贺. 长江口软土层中沼气与隧道安全施工技术[J]. 同济大学学报, 1996, 24(4): 465~470.
- [2] 唐益群, 吕少伟, 叶为民. 浅气层的赋存特征及其对土的工程性质的影响[J]. 同济大学学报, 1998, 26(增刊): 34~37.
- [3] 吴林高, 缪俊发. 抽灌水作用下土层变形及应力-应变本构律的研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(5): 581~588.
- [4] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

《勘察科学技术》2001 年征订启事

《勘察科学技术》是由冶金勘察研究总院主办的面向全国工程勘察行业的学术-技术类双月刊, 是中国科技论文统计源期刊, 中国科学文献数据库收录期刊, 美国《SCI》数据库引用期刊, 中国地质文摘引用期刊, 中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网、万方数据系统科技期刊群全文收录期刊。多次被评为河北省优秀科技期刊, 曾获得河北省优秀科技期刊特等奖。

《勘察科学技术》主要向读者介绍工程地质与岩土工程, 环境地质, 水文地质与地下水资源与评价, 测量工程, 水文、工程物探, 岩土钻凿工程, 岩石、土与水质试验的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法等。

《勘察科学技术》真诚面对读者、作者、各界朋友, 精心处理作者来稿, 讲究时效, 刊登周期短。本刊立论严谨, 科学性、实

用性强, 信息量大、覆盖面广, 编排规范标准, 满足科研、生产、教学不同层次读者的需求。本刊刊名已取得注册商标专用权(商标注册证: 第 990297 号)。

《勘察科学技术》创刊于 1983 年, 国内外公开发行。每双月 20 日出版, 16 开, 64 页, 每册定价 5.0 元, 全年 30.0 元(含邮费), 刊号: CN13-1100/TF, ISSN1001-3946, 广告经营许可证号: 1306024000013, 编辑部自办发行。

欢迎单位及个人订阅、投稿、欢迎刊登广告。欲订者请向本刊编辑部索取订单(常年随时满足读者的订阅要求)。

地址: 河北省保定市东风中路 43 号 邮编: 071067 电话: (0312) 3020887