

应用含水特征曲线预测浅层气藏压力

钟方杰, 朱建群

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071)

[摘要] 利用 GDS三轴系统 4D应力路径模块进行了不同围压下含浅层生物气非饱和砂土的含水特征试验。分析不同围压对含水特征曲线形态的影响。结果表明随着围压的施加与增大, 非饱和砂土含水能力逐渐减弱。应用所得含水特征曲线进行含浅层气砂土中气藏压力状态的分析预测, 结果表明使用无围压下含水特征曲线进行预测是偏于安全的。

[关键词] 含浅层气非饱和砂土; 含水特征曲线; 气藏压力状态

[中图分类号] TU452 [文献标识码] A [文章编号] 1002-8498(2007)S0-0494-03

Predicting Shallow Gassy Sand's Gas Reservoir Pressure
with Soilwater Characteristic Curve

ZHONG Fang-jie ZHU Jian-qun

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071, China)

Abstract Experiment study on shallow gassy unsaturated sand under different confining pressure with GDS triaxial system's 4D stress path module is carried out. Different forms of SWCC under different confining pressures are analyzed. The results show that unsaturated sand's water storage capacity declines gradually with confining pressure's infliction and accretion. Finally shallow gassy sand's gas reservoir pressure characteristics with SWCC are analyzed and forecasted, and it's conservative if the same thing is done based on SWCC without confining pressure.

Key words shallow gassy unsaturated sand; SWCC; pressure characteristics

浅层生物气是指埋深浅于 1 500m 的在厌氧细菌的生物化学作用下产生的天然气, 我国的生物气气藏均属常压气藏, 具有含气面积较大, 气层薄的特点, 由于埋深浅, 在这些地区开展岩土工程建设可能会由于浅层气的喷发而造成事故, 如在 2001 年 9 月和 2002 年 2 月在对杭州湾大桥的工程地质勘探过程中, 多次出现强烈井喷而使勘探作业受阻。如能保持钻孔液柱压力大于平衡浅层气压力水平即能抑制井喷发生, 因而事先预测浅层气藏的压力就非常重要。

含水特征曲线 (soilwater characteristic curve) 是由土壤水动力学引入的概念, 其定义为土的含水量与土中吸力的关系曲线^[1]。目前含水特征曲线研究的对象多是非饱和粘土, 尤其以非饱和膨胀土为多, 如文献 [2-4] 分别从微观结构、应力状态影响及室内外试验对比等角度研究了非饱和膨胀土的含水特征曲线。然而对于非饱和砂土含水特征曲线的研究并不多见。本文的主要研究内容是将含浅层气砂土作为一种特殊的非饱和土, 测试杭州湾含浅层生物气非饱和砂土在不同围压下的含水特征曲线, 并使用试验结果分析含浅层气砂土中的气藏压力状态。

1 砂样基本工程特性

本次试验研究所用细砂样取自杭州湾地区, 该地区由杭嘉湖平原和萧绍平原组成。该区在第四纪的几次海进、海退中, 交替沉积了数套富含有机质的淤泥层和砂层。淤泥层中的有机质经厌氧菌生物化学作用, 产生生物气 (主要成分是甲烷), 经过运移、富集, 储集在附近的砂层镜体或砂层顶部, 这些气藏埋深浅, 压力较低、分散且储量小。杭州湾地区全新世生物气, 在地表土层之下主要为一套河口湾相砂层, 其下为海相淤泥层, 为主要生气层及封盖层, 再下为河漫滩相为主的砂土或贝壳层, 系主要的储气层。

1.1 颗粒分析结果

由图 1 以及表 1 可见该细砂样含有少量粘粒, 不均匀系数 $C_u=10$ 曲率系数 $C_c=1.6$ 级配良好。

1.2 抗剪强度指标

表 2 给出了含气砂土在不同基质吸力条件下的三

[收稿日期] 2007-04-18

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (40372128)

[作者简介] 钟方杰 (1981-), 男, 湖北武汉人, 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室硕士研究生, 湖北武汉 430071 电话: 13871166241

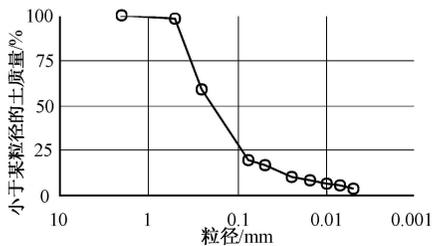


图 1 杭州湾含气砂土粒径级配曲线

表 1 杭州湾含气砂土颗粒分析结果

密度	颗粒组成 / %			
	> 0.5	0.5~0.074	< 0.074	< 0.01
2.68	2.0	78.7	19.3	7.0
				4.0

表 2 杭州湾含气砂土不同吸力下强度指标

基质吸力 / kPa	总粘聚力 / kPa	吸力摩擦角 / °	内摩擦角 / °
0	3.0	-	35.0
5	6.3	33.0	35.0
50	30.7	29.0	35.0
200	84.1	22.0	35.0

轴试验结果, 试验是在 GDS非饱和系统上进行。

根据 Fredlund提出的非饱和土抗剪强度公式, 含浅层气砂土的抗剪强度公式与指标为:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - \sigma_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

其中: 粘聚力 $c' = 3.0 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\phi' = 36.0^\circ$, 吸力摩擦角 (见表 2) 随着基质吸力的增加而减小。

2 试验方案与过程

2.1 试验方案

在不同围压下对饱和砂土施加基质吸力使之排水, 精确量测排水量、体积变化量, 计算特定基质吸力条件下的含水量, 得到基质吸力含水量关系, 即持水特征曲线 (SWCC)。

2.2 试验过程

本次试验的试样制备采取了水下成样的方法, 步骤如下: ①按预定干密度称取干砂, 用沙浴煮沸 30min 以上使颗粒充分饱和, 然后静置备用。②在 GDS系统压力室陶土板底座上布置橡皮膜, 用自行设计加工的对开承膜筒固定橡皮膜, 抽气使橡皮膜完全紧贴筒壁。③在橡皮膜内先加入蒸馏水, 然后放入步骤①中制备的砂样, 始终保持砂样处于水面以下的状态, 直到预定高度, 安装试样帽, 装样完成。

试验过程: ①分别在 100、200、300 kPa的围压下固结, 待排水稳定, 记下固结排水量 V_g ; ②控制孔隙水压 $u_w = 0 \text{ kPa}$, 施加空隙气压力 u_g 使砂样在特定吸力 ($u_a - u_w$) 下排水, 精确量测排水量, 稳定控制标准为连续 2 h 土体排水不超过 5 mm^3 , 达到稳定标准则施加下一级, 并记下每级排水量 V_i 计算剩余含水量; ③重复上述过程, 期间根据曲线走向及时调整吸力施加步长, 直

至残余含水量, 停止试验, 取试样烘干测含水量复核计算结果。

2.3 试验结果分析

图 2 为含气非饱和砂土在无围压以及围压为 100、200、300 kPa 4 种情况下持水特征曲线的比较, 表 3 为 4 种情况下持水特征曲线特征值。

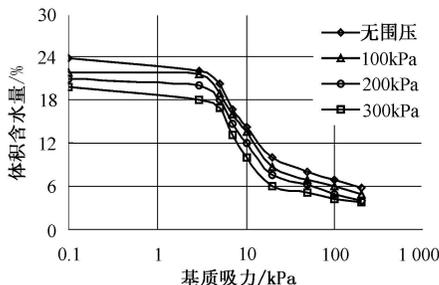


图 2 含气砂土不同围压下持水特征曲线

表 3 持水特征曲线特征值

土样	围压 / kPa	进气值 / kPa	进气值对应含水量 / %	残余含水量 / %	残余含水量对应吸力 / kPa
1	0	3.0	23.0	5.0	20.0
2	100	4.0	22.0	4.6	21.0
3	200	5.5	19.8	4	23.0
4	300	5.9	18.1	3.2	24.0

由图 2 和表 3 可以看出: ①无论是无围压状态还是无围压情况下, 持水特征曲线形态并无十分明显的差异, 说明围压并没有显著地改变砂土的内在结构。②同一吸力下, 高围压的含水量小于低围压的含水量。进气值、残余值等特征指标均随着围压的增大, 砂样的进气值、残余含水量对应吸力随之增大, 而进气值对应吸力与残余含水量随之减小。其原因是随着围压的增大, 土样排水能力增强, 持水能力减弱。围压长时间作用起到压缩固结作用, 导致孔隙变窄, 而水总是优先进入小通道, 因而也提高了排水能力。

根据试验曲线的形态, 采取了下面的方程形式:

$$\theta_w = a + \frac{b}{1 + (\frac{\psi}{c})^d} \quad (2)$$

式中: θ_w 为体积含水量, ψ 为基质吸力, a 、 b 、 c 、 d 为待定拟合参数, 对试验数据进行参数拟合, 结果如表 4 所示。

表 4 持水特征曲线方程拟合参数

净围压 / kPa	a	b	c	d	相关系数 R^2
0	6.02	18.38	9.27	1.5	0.9921
100	5.0	17.86	10.0	1.5	0.9862
200	4.51	17.17	19.15	1.7	0.9926
300	4.04	15.98	18.29	2.0	0.9930

2.4 运用 SWCC 分析含气砂土层气藏压力状态

在含浅层气砂土地区开展各类工程建设, 需要弄清楚其气藏压力状态, 与传统天然气勘探方法相比, 运

用 SWCC 进行气藏压力状态分析更能满足工程建设的需要,也更加准确。

在预先取得持水特征曲线的前提下,通过不同深度砂土的含水量 θ_w 便可查出对应基质吸力 S_d 则有:

$$S_d = u_a - u_w = u_a - \gamma_w h \quad (3)$$

可得浅层气藏压力即为:

$$u_a = u_w + \gamma_w h \quad (4)$$

可以看出,不同深度下同一含水量对应的气藏压力值是不同的,运用有围压下持水特征曲线所得的气藏压力低于运用无围压下持水特征曲线得出的气藏压力。下面来分析使用无净围压的持水特征曲线预测浅层气藏压力时带来的相对误差。由(2)式可得:

$$\psi = c \left(\frac{b}{\theta - a} - 1 \right)^{1/d} \quad (5)$$

以净围压为 300 kPa 与净围压为 0 kPa 相比较为例:

$$\psi_{300} - \psi_0 = c_1 \left(\frac{b}{\theta - a_1} - 1 \right)^{1/d} - c_2 \left(\frac{b}{\theta - a_2} - 1 \right)^{1/d} \quad (6)$$

代入数据整理可得图 3。

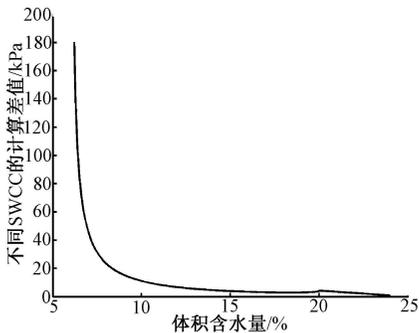


图 3 不同 SWCC 的预测误差
当体积含水量接近 6% 时,两者的计算结果差别

将达到 180 kPa,杭州湾地区浅层气藏压力大约为 0.12~0.46 MPa,使用净围压为零条件下的持水特征曲线,浅层气藏压力预测值将偏小 40%,其结果是偏于安全的。

3 结语

1) 非饱和砂土试验中,砂土难以成形,且由于高进气值陶土板的存在难以用常规方法饱和,可以使用水下成样的方法完成,既能满足饱和度的要求,又可在成样后直接进行试验而不需要移动试样,较好地模拟了细砂的自然沉降结构。

2) 从低围压到高围压,持水特征曲线形态并没有十分明显的差异,围压并没有显著地改变砂土的内在结构,但其持水能力逐渐减弱,砂样的进气值、残余值都随之增大。

3) 应用持水特征曲线可以分析预测含浅层气地区的储气层中的气藏压力状态。通过不同围压下持水特征曲线可以得到沿地质剖面气藏压力的分布,随着深度的增加,相同含水量对应的气藏压力逐渐减小,当使用无围压下的持水特征曲线预测浅层气藏压力时,其结果偏安全。

参考文献:

- [1] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [2] CHEN Bao, QIAN Lixun, YE Weimin, et al. Soil water characteristic curve of GaoMiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006, 25(4): 788-793.
- [3] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1915-1918.
- [4] 李志清, 胡瑞林, 王立朝, 等. 非饱和膨胀土 SWCC 研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 730-734.