

# 非饱和粉质粘土固结压缩特性及体变试验研究

吴丽君<sup>1</sup>, 蒋关鲁<sup>1</sup>, 李安洪<sup>2</sup>, 梁 栋<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国中铁二院集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为进一步研究与基质吸力相关联的非饱和土固结压缩特性, 扩展非饱和土固结理论在工程实际中的适用性, 通过分析非饱和粉质粘土土特征曲线变化规律, 对非饱和土固结变形机理进行研究。试验结果表明: 非饱和土的最终沉降量仅与土骨架的压缩模量有关。对于不同饱和度的非饱和土而言, 固结速度随初始饱和度的增加而减小, 饱和土固结过程所需要的时间比非饱和土固结过程所需要的时间短。由于孔隙流体的压缩性导致高饱和土体的瞬时沉降比低饱和土体的瞬时沉降小, 但高饱和土体的后期固结沉降受饱和度和吸力的影响, 比低饱和土体要大得多。

**关键词:** 非饱和土; 饱和度; 固结; 压缩性; 基质吸力

中图分类号: TU411.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2009)03-0559-05

## Consolidation and Compressibility of Unsaturated Silt Clay and Test Study on Volume Change

WU Li-jun<sup>1</sup>, JIANG Guan-lu<sup>1</sup>, LI An-hong<sup>2</sup>, LIANG Dong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** For studying consolidation mechanism of unsaturated soil which was correlative with matric suction, and extending the applicability of consolidation theory, consolidation mechanism of unsaturated soil under different saturations was discussed by analyzing the water soil characteristic curve based on the latest experiment results. The results indicated that the ultimate settlement is only related to the module of compression. The consolidation velocity of unsaturated soil is reducing with the initial degree of saturation, and the time of saturated soil achieved complete consolidation is longer than unsaturated soil. The instantaneous settlement of unsaturated soil under high degree is less than that under low degree in virtue of the compression of mixture in soil. Because of saturation and matric suction in consolidation, the consolidation settlement under high degree is more than that under low degree.

**Key words:** unsaturated soil; degree of saturation; consolidation; compressibility; matric suction

## 0 引言

土力学中包含饱和土和非饱和土两个主要研究对象。地球表面广泛分布的低含水率湖泊沉积物以及工程中的压实土都属于非饱和土范畴。非饱和土除了土颗粒、孔隙水、孔隙气三相外, 还存在第四相——收缩膜。通常将作用于收缩膜上

的孔隙气压力和孔隙水压力的差值, 称为基质吸力。与饱和土不同的是, 非饱和土的孔隙水压力相对于孔隙气压力而言是负值。由于非饱和土内部结构复杂, 这类土的性状难以用经典土力学来解释, 从而引起实际工程设计和计算中出现较大偏差, 甚至是错误。此外, 外界环境的变化常常会引起土体的饱和度发生改变, 进而对土体的工

收稿日期: 2008-09-27; 改回日期: 2009-03-09; 责任编辑: 楼亚儿。

基金项目: 西南交通大学博士创新基金项目(20070613044)。

作者简介: 吴丽君, 女, 博士研究生, 1981年出生, 道路与铁道工程专业, 主要从事非饱和土力学研究。

Email: grace\_binyu3@163.com。

程力学性质产生直接影响,因此深入研究非饱和土的固结压缩特性和变形机理显得尤为重要,对非饱和土在工程实际中的应用具有重要意义。

## 1 试验概述

对非饱和土而言,饱和度高低决定其内部结构特征和孔隙介质类型,直接影响土体的固结压缩特性及变形机理。试验中重点考虑不同饱和度下土体的变形规律,尤其是非饱和土固结过程中的水气运动规律。但要将土中水和孔隙气分离非常困难,因此非饱和土试验对试验仪器和操作过程的精度要求很高,由于粘性土的固结渗流速度缓慢,导致非饱和土的试验时间相对较长。

试验土样取自胶济客运专线试验工点,基本物理力学参数见表1。试验分3部分完成:(1)采用WG-1A三联固结仪进行常规固结试验,试验方法采用24 h加荷标准固结法,试验过程严格按照《铁路工程土工试验规程》(JTJ057—2004)、《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)进行。(2)采用GDS非饱和三轴试验仪进行 $K_0$ 固结试验。试样由原状土切削而成,试验尺寸 $D \times H = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。试验前对陶土板底座进行反压饱和,并且彻底排除试验管路中的空气。为避免出现气蚀现象,采用轴平移技术量测非饱和土的初始基质吸力。试验中同步施加围压和气压,并始终保持围压高于气压5 kPa,以模拟试样的无压状态。试验过程中围压的加载速率控制在10 kPa/h,以防止试样发生侧向变形导致轴向传感器来不及调整。(3)进行控制基质吸力的非饱和粉质粘土固结试验。将土样控制在常基质吸力下,改变净围压,按照相同的固结比进行分级加载以模拟现场实际的应力状态。固结稳定标准:轴向变形量不超过0.01 mm/h,排水量2 h不超过 $0.05 \text{ m}^3$ ,每级荷载固结时间不少于24 h。

## 2 粉质粘土水土特性

通常将基质吸力和含水量的关系曲线称为水土特征曲线。水土特征曲线从一定程度上反映非饱和土的内部结构,决定其工程力学性质。但目前水土特征曲线只能用试验的方法确定。图1是非饱和粉质粘土水土特征曲线,按含水量由高到低的顺序可分为3段:OA段土体含水量较高,土中孔隙充满水,土颗粒接触点的水膜是连续的,基

表1 试验土样物理力学参数

Table 1 Physic-mechanical property of soil samples

土样编号	天然容重/ kN/m <sup>3</sup>	含水量/ %	初始饱和度/ %	塑性指数
1-1	17.8	13.30	50.6	9.8
1-2	18.2	17.14	63.1	9.8
1-3	20.7	13.50	76.8	13.1
1-4	19.7	19.55	83.5	13.1
1-5	19.4	24.50	90.8	14.2
1-6	21.8	21.67	100.0	14.2
2-1	19.3	18.06	74.4	13.1
2-2	18.8	22.12	78.2	15.8
3-1	18.9	11.10	50.4	8.6
3-2	19.1	17.19	73.8	13.1
3-3	18.8	24.40	85.7	14.2

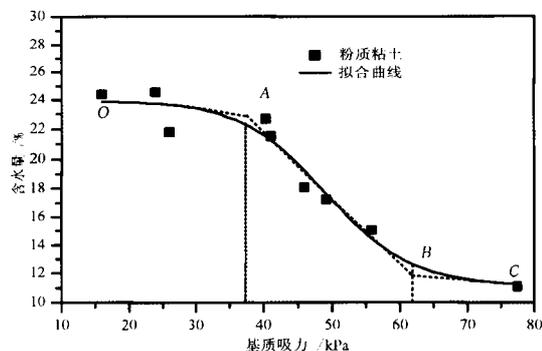


图1 非饱和粉质粘土水土特征曲线

Fig. 1 Soil-water characteristic curve of unsaturated silt clay

质吸力随含水量的变化显著。AB段基质吸力随含水量的变化幅度较OA段小,该阶段是土体由水封闭向气封闭转化的过程。转化初期土颗粒接触点的水膜搭结,土体处于水封闭结构。后期含水量变化幅度增大,孔隙水和孔隙气都不连续,土体处于双封闭状态。BC段土的含水量较低,土中孔隙气连通,水量的微小变化会引起基质吸力的剧烈增加。图中A、B两点分别对应土体的进气值和残余含水量,非饱和粉质粘土的进气值约为25 kPa,含水量23.6%,残余含水量约11.87%。

根据图1把气相形态与水土特征曲线对应起来,将非饱和粉质粘土按照气相形态分为3种类型:(1)气相完全连通(饱和度 $S_r < 55\%$ );(2)气相内部连通( $S_r = 55\% \sim 85\%$ );(3)气相完全封闭( $S_r > 85\%$ )。包承纲<sup>[4]</sup>等提出水土特征曲线的进气值与气相完全封闭和气相内部连通的分界点对应,残余含水量与气相内部连通和气相完全连通的分界点对应。由此可以得出非饱和粉质粘土水土特征曲线的变化规律:当含水量高于23.6%

( $S_r = 82.8\%$ )时, 土体对应于气相完全封闭; 当含水量低于  $11.87\%$  ( $S_r = 52.9\%$ )时, 土中气体已经完全连通; 含水量介于两值之间时, 水气转换幅度大, 性质变化剧烈。

### 3 粉质粘土固结压缩特性

#### 3.1 瞬时沉降

非饱和土受外荷载作用产生的沉降主要是由瞬时沉降和固结沉降两部分组成。其中瞬时沉降是由剪应力引起的, 加荷初期孔隙水和孔隙气来不及排出, 土体的体积没有变化。此时, 瞬间沉降( $S_d$ )可按照以下弹性力学公式近似计算:

$$S_d = \frac{w(1-\mu^2)}{E} pB \quad (1)$$

式中:  $w$  为形状系数;  $\mu$  为土的泊松比;  $E$  为土层的变形模量;  $B$  为荷载板直径或宽度;  $p$  为荷载板压力。

从上式可以看出, 土的泊松比越小, 瞬时沉降越大。通过  $K_0$  固结试验得到不同含水量的非饱和土泊松比。图 2 是侧向变形为零时, 轴向应力随围压的变化曲线。从图中可以看出, 由于试验过程中初始围压的存在, 造成轴向应力在很短的

时间内变化较快; 但是随着围压的逐渐增大, 轴向应力与围压呈现出线性增长趋势。图 3 为两种不同含水量的非饱和粉质粘土侧压力系数和泊松比随围压的变化关系。图中侧压力系数随着围压的增加逐渐稳定, 最终稳定值即为侧压力系数。

表 2 列举了不同含水量的土样测试结果, 含水量  $18.06\%$  和含水量  $22.12\%$  的土体侧压力系数分别为  $0.61$  和  $0.52$ , 泊松比分别为  $0.37$  和  $0.34$ 。

表 2  $K_0$  固结试验数据  
Table 2 Data of  $K_0$  consolidation testing

土样编号	含水量/%	围压/kPa	轴向应力/kPa	侧压力系数	泊松比
2-1	18.06	148.8	245.90	0.61	0.37
2-2	22.12	150.4	288.78	0.52	0.34

显然, 含水量高的土体比含水量低的土体侧压力系数要大, 也就是说, 低饱和土体的瞬时沉降量要大于高饱和土体的瞬时沉降量, 饱和土的瞬时沉降量则要小于非饱和土的瞬时沉降量。这是由非饱和土内部孔隙流体的压缩性引起的。用  $E_f$ 、 $E_w$ 、 $E_a$  分别表示流体的体变模量、水的体变模量和气体的体变模量, 三者之间的关系为:

$$\frac{1}{E_f} = \frac{S_r}{E_w} + \frac{1-S_r}{E_a} \quad (2)$$

由于水是近似不可压缩的, 结合前述对水土特征曲线的分析, 当饱和度低于  $82.8\%$  时, 土体中气体已经完全连通或处于内部连通状态。由于饱和度较低, 孔隙流体的体变模量变小, 土体的压缩性增加。当饱和度高于  $82.8\%$  时, 孔隙气处于完全封闭状态, 此时饱和度的变化将影响孔隙流体的体变模量和土骨架模量的可比性, 饱和度愈接近于  $1$ , 孔隙流体的体变模量变化越显著。当饱和度等于  $1$  时, 土体孔隙中全部充满水, 此时孔隙流体的体变模量远远大于土骨架的压缩模量, 通常视为不可压缩流体。

#### 3.2 固结沉降

由孔隙水和孔隙气消散引起的沉降变形称为固结沉降。图 4 是两种不同饱和度的土样在一级荷载作用下的轴向应变-时间关系曲线。从图中可以看出土样的最终变形量基本相同, 这是由于最终变形量仅与土骨架的压缩模量有关。试验中将孔隙水和孔隙气开始消散作为固结沉降的时间起点, 从表 3 中可以看出, 此类粉质粘土的固结沉降占到最终沉降量的  $90\%$  以上。通过对两种饱和度土样所测得的试验数据进行分析, 饱和度越

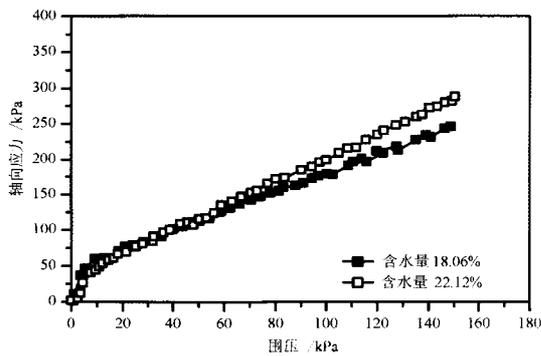


图 2 轴向应力随围压变化

Fig. 2 Variety of axial stress with pressure

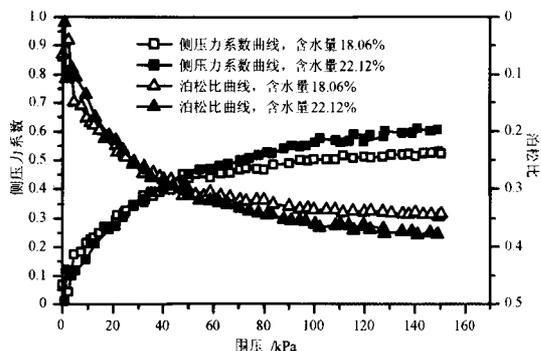


图 3 侧压力系数和泊松比随围压变化

Fig. 3 Varieties of lateral coefficients with pressure

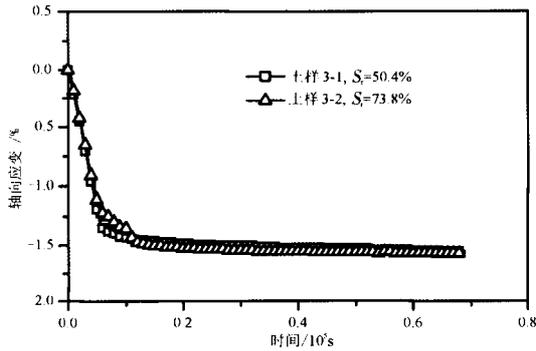


图4 第一级荷载作用下土样的轴向应变—时间关系曲线  
Fig. 4 Relationship between axial strain and time under first loading

表3 常基质吸力试验数据  
Table 3 Data of constant matrix suction

土样编号	饱和度/%	轴向应变/%	瞬时应变/%	固结引起的轴向变形/%
3-1	50.4	1.55	0.146	1.40
3-2	73.8	1.57	0.057	1.51

高的非饱和土瞬时沉降越小，固结沉降反而越大。

### 3.3 初始饱和度对固结时间的影响

非饱和粉质粘土固结时间与初始饱和度的关系曲线(初始荷载  $\sigma = 25$  kPa)如图5所示。图5表明：在低饱和土的范围内，随着初始饱和度的不断增加，固结时间逐渐延长。这是因为土体的初始饱和度越大，孔隙中的气体越少，而土的透水性远远小于透气性，造成固结过程更加缓慢。

在高饱和土的范围内，由于饱和度的变化会影响孔隙流体的体变模量和土骨架模量的可比性，此时，随着饱和度的增加，孔隙水已经完全连通并且可以传递水压力，高饱和土体的固结时间开始减小，并逐渐趋近于饱和土的固结时间。从图6

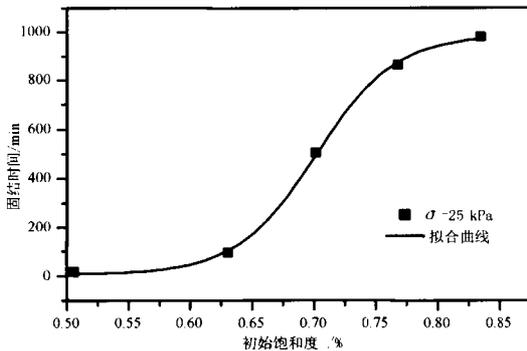


图5 非饱和和粉质粘土固结时间与初始饱和度关系曲线  
Fig. 5 Relationship between time to achieve saturation and initial degree of saturation

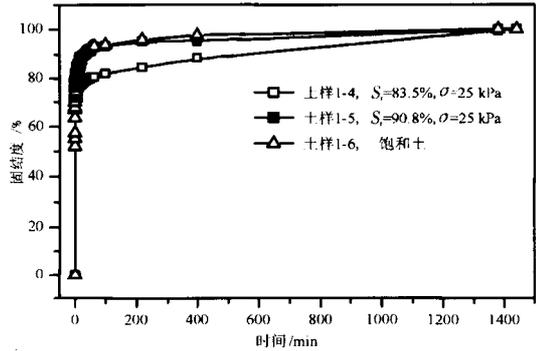


图6 固结度—时间关系曲线

Fig. 6 Relationship between time and consolidation degree

固结度与固结时间的关系曲线可以看出：随着初始饱和度的增加，非饱和土的固结时间开始减小，总体上看，饱和土固结过程所需要的时间比非饱和土的固结时间短。

### 3.4 体变规律

图7是不同饱和度下土样的体积变化曲线，图中分别列出了气相、液相和土结构的体积变化曲线。土样受自身的结构性和饱和度影响产生的体积变化各不相同，变形量与固结时间无关。但是，饱和度的高低决定了固结过程的快慢。总体而言，随着饱和度的增加，固结速度减慢，固结过程需要的时间不断增加，从试验过程中水气运动规律进一步证实了这一点。

从表4中可以看出，饱和度低的土体排出的气相体积占到土体积的61.4%，土体积变化以气相体积变化为主；饱和度高的土体排出的液相体积占到土体积的85.8%，体积变化以液相体积变化为主。笔者认为，在原状土固结过程中，土体饱和度较低时(气相完全连通)，土中大孔隙基本与大气连通，当受到外荷载作用时，孔隙气的消散几乎在瞬间完成，而孔隙水始终处于张力状态，排出体外的速度非常缓慢甚至不可能排出体外，但是可能发生内部的水分迁移<sup>[4]</sup>，宏观上表现为土结构变化以气相体积变化为主。正是由于孔隙气消散速度远远大于孔隙水的消散速度，导致土

表4 不同饱和度下土样水气相体积变化  
Table 4 Volume changes of water and gas under different saturations

土样编号	初始饱和度/%	液相体积变化/%	气相体积变化/%
3-1	50.4	38.6	61.4
3-2	73.8	63.9	36.1
3-3	85.7	85.8	14.1

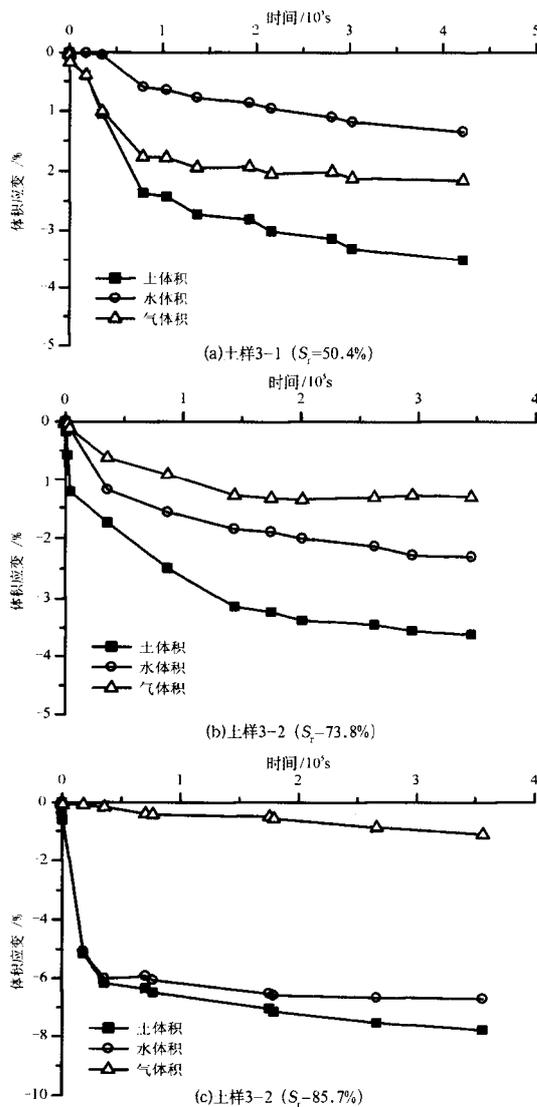


图7 不同饱和度下土样的体积变化曲线

Fig. 7 Volume changes of soil samples under different saturations

体固结时间相对较短;但是土体饱和度较高时(气相完全封闭),孔隙气已经形成完全封闭的气泡,只有少量孔隙气随水流移动,孔隙气不能在短时间内完全排出,此时土体变化主要是孔隙水引起的,土体固结所需时间相应延长。同时,试验中固结速度的快慢和土体的饱和度并不是呈现单一的函数关系,加载速率、初始孔隙比、密度对土体的固结速度都有显著影响,需要进一步研究。

## 4 结论

(1)通过对非饱和和粉质粘土水土特征曲线的分析可以看出,当含水量高于23.6%(饱和度 $S_r=82.8\%$ )时,土体对应于气相完全封闭,土体的进气值约25 kPa;当含水量低于11.87% ( $S_r=$

52.9%)时,土体中气体已经完全连通。

(2)非饱和土的沉降主要分为瞬时沉降和固结沉降。由于水气混合物的压缩性,导致高饱和土的瞬时沉降量比低饱和土的瞬时沉降量小,分别占总沉降的3.7%和9.4%。非饱和土固结沉降主要受孔隙水结构形式的影响,高饱和土的固结沉降量较低饱和土反而大,分别占总沉降的96.3%和90.6%。

(3)非饱和土的瞬时沉降量比饱和土的瞬时沉降量大,但是土体的最终沉降量相同,因为土体的最终沉降仅与土骨架的压缩模量有关。

(4)非饱和土固结过程所需要的时间受初始饱和度的影响,在低饱和度范围内,初始饱和度越大,土体的固结速度越慢。在高饱和度范围内,土体的固结时间随饱和度的增加逐渐减小,并最终趋近于饱和土。

(5)非饱和土的水气特征与固结特性有密切联系,低饱和土的孔隙气几乎在瞬间消散完成,土体变形以气相变化为主,约占土体变形的61.4%;高饱和土的孔隙气是以封闭气泡的形式存在,随孔隙水一起运动,土体的变形以液相变化为主,占到土体变形的85.8%。

## 参考文献:

- [1] Fredlund D G, Hasan J U. One dimensional consolidation theory: unsaturated soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(3): 521 - 531.
- [2] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土力学 [M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 78 - 84.
- [3] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 高饱和土体的压缩和固结特性及其应用 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 264 - 269.
- [4] 包承纲. 非饱和和压实土的气相形态及孔隙压力消散问题 [M] // 王仲琦, 卢肇钧, 冯国栋, 等. 第三届全国土力学和基础工程会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979: 129 - 135.
- [5] Rahardjo H. The study of undrained and drained behavior of unsaturated soils [D]. Canada: University of Saskatchewan, 1990.
- [6] 杨代泉, 沈珠江. 非饱和土一维简化计算 [J]. 岩土工程学报, 1991, 13(5): 70 - 77.
- [7] 沈珠江. 非饱和土简化固结理论及应用 [J]. 水利水运工程学报, 2003(4): 1 - 6.
- [8] 李顺群. 非饱和土的吸力与强度理论及试验验证 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.