

# 饱水粘性土主固结理论

沈孝宇

深圳市勘察研究院, 广东深圳 518026

**摘要:** 对饱水软粘土的预压排水主固结研究应从其排水的本质出发, 即从软土在预压过程的含水量变化上研究主固结量的变化规律, 利用土的基本性质指标导出主固结比基本公式及主固结量(沉降量)、绝对主固结量、绝对固结度等理论计算方法。与传统的算法不一样的地方是这些算法与预压荷载(即固结应力)无关系, 直接计算出主固结的效果及评价预压排水固结地基处理卸载的可行性。利用上述基本公式亦可导出剩余主固结量、主固结速率等计算式。通过实例的分析, 证明上述理论方法与观测的数据基本相符。

**关键词:** 软粘土; 主固结比; 绝对主固结量; 堆载预压。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2005)04-0493-05

收稿日期: 2004-02-30

## Primary Consolidation Theory of Saturated Soft Clay

SHEN Xiao-yu

Shenzhen Survey Research Institute, Shenzhen 518026, China

**Abstract:** Study on primary consolidation of saturated soft clay under pre-loading drainage condition should be started with its drainage in nature, i. e., study the variation discipline of primary consolidation by its water content variation of soft clay through the pre-loading course, utilizing the basic property index of clay, then deduce the primary consolidation ration formula and get the theoretical calculation solution of primary consolidation (settlement), absolute primary consolidation, as well as absolute consolidation degree. The algorithmic difference compared with the traditional one is that this arithmetic is independent of pre-load (consolidation stress) and can calculate the primary consolidation effect and assess the unloading feasibility straightforwardly. It also can be draw the formula of residual primary consolidation and consolidation speed with above basic formula. By analysis with project examples, it was testified the theory was in accordance with principle with real data obtained by observation.

**Key words:** soft clay; primary consolidation ration; absolute primary consolidation; pre-loading.

饱水粘性土主要是指各种沉积相中的淤泥土(或称软粘土), 它主要的特征是天然含水量大于液限( $W_L$ ), 饱和度接近 1.0, 孔隙比( $e$ )大于 1.5, 液限( $W_L$ )接近 50%, 它是一种高含水量、高压缩性、低强度及低固结速率的天然软土层。

我国沿海一带, 北起渤海湾, 南到北部湾绵延 1.8 万多 km 的滨海地区都有这种软粘土层, 单层最大的沉积厚度可达 30 m(珠江三角洲)。

随着改革开放 20 多年来, 沿海经济开发区像雨后春笋一样发展起来, 各种道路、机场、码头、堆场、

房建、管道、地下工程等建构筑物的基础、地基及边坡都将遇到软土的强度与变形问题(谭松林, 2002)。仅仅解决其变形(主要是固结变形)的地基处理工程费用, 就可占总工程投资的 15%~20%。因此, 研究这一课题应该是从多学科、多种理论、多角度上进行探讨, 以期能获得正确的定性定量评价, 解决工程实际问题。

本文将从“土质学”(或“工程岩土学”)的学科角度探索这一课题。

## 1 饱水粘性土的主固结机理

饱水粘性土可以当作两相土,一相为水,另一相为各种细颗粒(主要是粘土颗粒)组成的固体,在颗粒与颗粒之间的水的状态比较复杂,它在固体颗粒表面周围从外层到内层简单地可分为两层。外层是自由液态水,内层则是结合水。自由水在土的固体颗粒或集合体之间是相连的,饱水粘性土的水主要是此种类型。结合水紧靠颗粒表面,在欠固结情况下,土中结合水是不相连的,只有在正常固结或超固结情况下,才有一部分结合水相互联结。

自由液态水可传递静水压力,具流动性,具自由水位(即可测出其水头值);结合水一般不传递静水压力,不具“流动性”,它在土层中的运动主要是通过离子扩散、热扩散、塑性流动等形式。

在一般工程的意义上(如预压、排水固结、动力固结),不可能将结合水移动(如排出土外),它只有在电渗、热烘(地热、人工加热等)及极长时间(甚至以地质时间计)的固结压力作用下发生运移。本文不专门研究这种水的运移规律。

本文所指的饱水粘性土主固结问题主要是研究自由液态水的运移及其后果,这是工程活动所关注的首要问题。

## 2 饱水粘性土的主固结数学物理模型

作为两相土的软粘土,在工程意义上着重关注其自由水的运移、排水及相伴随的土层固结变形问题(如沉降、压缩),称之为“主固结”。研究主固结的物理基本模型有一维模型(如 Terzaghi, K.)、二维及三维模型(如 Biot, M. A.)等,它们的研究都有一个特点,即没有从自由液态水排出的变化量上研究,从而并未揭示主固结的特性。本文从最简单的饱水土的物理模型出发,阐述它们的理论关系。

取两相的单位面积土柱体(以下简称单位土柱体)(图 1),其 3 项基本物理性质指标表述如下:

$$\text{含水量: } W = \frac{m_w + m_l}{m_s} \quad (1)$$

$$\text{因 } m_w = \rho_w \cdot V_w, \text{ 式(1)亦可写成 } W = \frac{\rho_w \cdot V_w + m_l}{m_s} \quad (1')$$

$$\text{土粒密度(即土的比重): } G_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2)$$

$$\text{土的天然密度: } \rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_l + m_w}{V_s + V_l + V_w} \quad (3)$$

式中: $m_w$  为土中自由液态水的质量; $m_l$  为结合水的质量; $m_s$  为土固体颗粒质量; $V_s$  为土固体颗粒体积; $V_w$  为自由液态水体积; $V_l$  为结合水体积; $m$  为土的总质量; $V$  为土体总体积。饱水粘性土主固结前后的体积为:固结前  $V_1 = V_{w_1} + V_s + V_l$ , 经  $t$  时间固结后  $V_2 = V_{w_2} + V_s + V_l$ 。(见图 1a, 1b)。

$$V_1 - V_2 = V_{w_1} - V_{w_2} = \Delta V \quad (4)$$

因  $V_s$  及  $V_l$  在主固结过程中视为不可压缩,式中  $V_{w_1}$  为固结前自由液态水体积; $V_{w_2}$  为  $t$  时间固结后的自由液态水体积; $\Delta V$  为  $t$  时间主固结后单位土柱体变化量。

对于大面积堆载预压排水固结工程场地而言,其地基处理面积任一方面长度与其处理深度相比是很大的,可以不考虑其侧位移引起的垂直沉降变形,因此,本课题视为一维固结。换言之,对单位土柱体体积变化即是柱状土体的高度变化。因此可将式(4)变换为:

$$h_1 - h_2 = h_{w_1} - h_{w_2} = \Delta h, h_1 = h_2 + \Delta h \text{ 或 } h_{w_1} = h_{w_2} + \Delta h \quad (4')$$

式中  $\Delta h$  为  $t$  时间后的主固结量(即沉降量、压缩量)。根据式(1),两相土体初始含水量( $W_1$ )可写为:

$$W_1 = \frac{m_{w_1} + m_l}{m_s}, \text{ 因 } m_s = G_s \cdot V_s, m_{w_1} = \rho_w \cdot V_{w_1}, W_1 = \frac{\rho_w V_{w_1} + m_l}{G_s \cdot V_s}, W_1 \cdot G_s \cdot V_s = \rho_w \cdot V_{w_1} + m_l \quad (5)$$

同理: $t$  时间主固结后土体含水量( $W_2$ )可写为:

$$W_2 = \frac{\rho_w V_{w_2} + m_l}{G_s \cdot V_s}, W_2 \cdot G_s \cdot V_s = \rho_w \cdot V_{w_2} + m_l \quad (6)$$

取单位土柱体(一维主固结状态),则  $V_{w_1} = h_{w_1}$ ,  $V_{w_2} = h_{w_2}$ ,  $V_s = h_s$ 。

主固结过程中土颗粒体积及结合水体积和质量不变化,根据图 1a,单位土柱体用长度表示:

$$h_{w_1} = \frac{1}{\rho_w} W_1 \cdot G_s \cdot h_s - \frac{m_l}{\rho_w}, h_{w_2} = \frac{1}{\rho_w} W_2 \cdot$$

$$G_s \cdot h_s - \frac{m_l}{\rho_w}, h_{w_1} = \frac{G_s}{\rho_w} (W_1 \cdot h_s) - \frac{m_l}{\rho_w} \quad (7)$$

$$h_{w_2} = \frac{G_s}{\rho_w} \quad (8)$$

式(7)减式(8)得  $t$  时间主固结量( $\Delta h$ ):

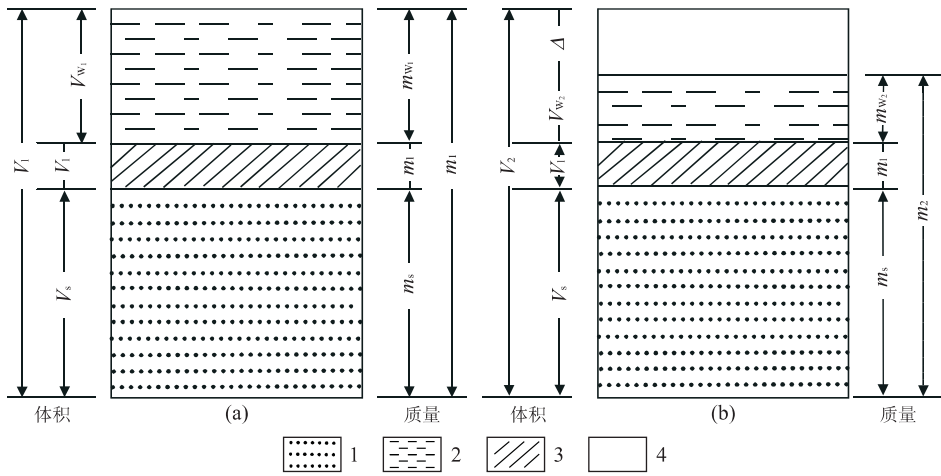


图 1 两相土的主固结物理模型

Fig. 1 Physical model of primary consolidation on two phases soil

a. 软土(两相体)初始状态; b.  $t$  时间排水后主固结状态; 1. 固结颗粒; 2. 自由液态水; 3. 结合水; 4. 排出自由液态水后主固结体积

$$\Delta h = h_{w_1} - h_{w_2} = \frac{G_s}{\rho_w} [h_s (W_1 - W_2)], \quad (9)$$

土粒密度  $G_s = \frac{m_s}{h_s}$ , 初始土干密度 ( $\rho_{d_1}$ ):  $\rho_{d_1} = \frac{m_s}{V_1} =$

$\frac{m_s}{h_1}$  代入(9)式得:  $\Delta h = \frac{\rho_{d_1} \cdot h_1 (W_1 - W_2)}{\rho_w}$ , 水的密度 ( $\rho_w$ ) 取 1,

$$\Delta h = \rho_{d_1} \cdot h_1 (W_1 - W_2), \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\Delta h}{h_1} = \rho_{d_1} (W_1 - W_2). \quad (11)$$

$\eta$  为软粘土单位长度主固结量, 在上述推导过程已证实为无因次量, 定义为主固结比. 若用土的初始天然密度表示,  $\rho_{d_1} = \rho_1 / (1 + W_1)$  代入式(11), 得

$$\eta = \frac{\Delta h}{h_1} = \rho_1 \frac{(W_1 - W_2)}{(1 + W_1)}. \quad (12)$$

由于土初始的天然密度 ( $\rho_1$ ) 或干密度 ( $\rho_{d_1}$ ) 需取软粘土原状土样, 困难大, 且在室内试验取得的指标数据离散性大, 故不容易测定准确, 远不如土粒密度 ( $G_s$ ) 取值稳定, 因而可将式(11)、(12)改写为用土粒密度 ( $G_s$ ) 表示.

因  $\rho_1 = \frac{S_r \cdot G_s \cdot \rho_w (1 + W_1)}{S_r + G_s W_1}$ ,  $S_r$  为土的饱和度, 饱

水土体的初始饱和度接近 1, 又  $\rho_w = 1$ ,

$$\rho_1 = \frac{G_s (1 + W_1)}{1 + G_s W_1}, \text{ 代入式(12), 得}$$

$$\eta = \frac{\Delta h}{h_1} = \frac{G_s (W_1 - W_2)}{1 + G_s W_1}. \quad (13)$$

式(11)、(12)、(13)均为用土的初始基本物理性质指标及  $t$  时间排水固结后的含水量表示的主固结比

( $\eta$ ), 亦为软粘土主固结数学模型.

主固结比  $\eta$  的实际意义在于: 当评价大面积预压排水固结为对象的软粘土地基时, 只要测出软粘土的土粒密度(比重) ( $G_s$ ) (一般而言, 在一个沉积环境范围内软土的比重相当一致)、软粘土的初始含水量 ( $W_1$ ) (即预压排水固结前天然含水量) 及历经  $t$  时间预压排水固结后取得的软粘土含水量 ( $W_2$ ), 便可得到  $t$  时间软土的主固结比 ( $\eta$ ), 若乘以软粘土初始厚度 ( $h_1$ ) 即可得到主固结量 (即沉降量).

例如, 近年来位于珠江口深圳湾内的深港西部通道填海场坪地基处理面积 (150 万  $m^2$ ), 采用插塑料排水板超载预压排水固结法, 淤泥的初始含水量平均值为 91%, 密度为 2.67  $g/cm^3$ , 初始的淤泥厚度 9~24 m, 平均厚度为 17 m, 经 225 d 的逐级堆载及 74 d 恒载预压排水后, 其平均含水量下降到 57%, 可用式(13)求得主固结比为 0.265, 对平均厚度为 17 m 的淤泥而言, 其主固结量为 4.5 m, 它基本上符合当时 (2004 年 4 月中旬) 该场坪的地面沉降板及分层沉降标所观测到的地面沉降的实际状态. 但它不是最终状况, 因为该场坪当时仍以 0.6~0.7 mm/d 的沉降速率继续沉降, 它的最终状况在下文分析.

### 3 主固结比计算公式及其延伸问题的讨论

#### 3.1 关于终极主固结量 ( $S_\eta$ )

饱水软粘土在排出自由液态水过程中的主固结

量随着时间延续,含水量逐渐减少而增大.由于土中自由液态水的排水不可能无限量,所以取样测得的软土含水量减少也有一个限量,这个限量就是软土的液限( $W_l$ ),液限作为软土流态和塑性状态的界限含水量标志着土中自由液态水“排尽”,此时土中剩下的主要是结合水,前已述及,结合水由于极性水分子对颗粒表面的吸引力,一般的工程活动(如堆载预压或真空预压排水固结等)无法将其排出.这样排水固结将有一个终结,这个终结与固结应力大小无关,而只与液限大小有关.因此,对应于预压排水固结终结的固结量定义为“极限主固结量”或“极限沉降量”,以  $S_\eta$  表示,以区别于教科书中的与固结应力有关的“最终沉降量”.

$$S_\eta = \left[ \frac{G_s(W_l - W_1)}{1 + G_s \cdot W_1} \right] H. \quad (14)$$

式中,  $W_1$  为液限含水量,  $H$  为软粘土厚度,其他符号同前.

用上述例子,其液限( $W_l$ )平均为 50%.若以上例其他参数,厚度 17 m 的淤泥其极限主固结量用式(14)计算,得  $S_\eta = 5.43$  m,实际情况是该场坪的淤泥厚度 17 m 地段到 2004 年 10 月 7 日已观测到 4.9 m 的沉降量(此时,已完成逐级堆载预压 225 d,恒载预压 270 d).这样大的沉降量在国内排水固结地基处理工程中是少见的,利用主固结比计算方法,正确地估量出了这一结果.

### 3.2 关于剩余主固结量( $\Delta S_\eta$ )

剩余主固量或剩余沉降量是评价场地预压排水固结地基处理能否卸载交工使用的一个重要技术指标,根据式(13)及式(14)可得出:

$$\Delta S_\eta = \left[ \frac{G_s(W_2 - W_1)}{1 + G_s \cdot W_1} \right] H. \quad (15)$$

以上述例子,其目前剩余主固结量  $\Delta S_\eta = 5.43 - 4.90 = 0.53$  m.

深港西部通道地基处理工程的剩余沉降要求小于或等于 0.2 m,按上述例子,恒载预压 270 d 达不到技术要求,不可卸载,应继续预压.

### 3.3 关于主固结度( $U_\eta$ )

因终极主固结沉降量与固结应力无关,这里提出的“主固结度”亦与固结应力无关,可用下式表达:

$$U_\eta = \frac{S_t}{S_\eta} = \left[ \frac{G_s(W_1 - W_2)H}{1 + G_s W_1} / \frac{G_s(W_l - W_1)H}{1 + G_s W_1} \right] =$$

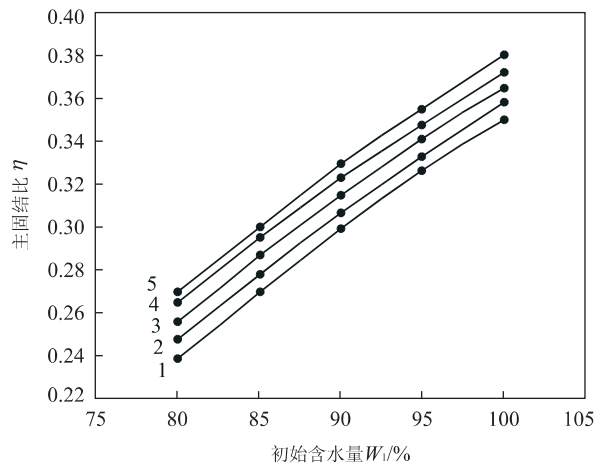


图 2 主固结比( $\eta$ )、初始含水量( $W_1$ )和液限( $W_l$ )的关系  
Fig. 2 Correlation curve of primary consolidation ratio ( $\eta$ ), initial moisture content ( $W_1$ ) and liquid limit ( $W_l$ )

1.  $W_l=0.52$ ; 2.  $W_l=0.51$ ; 3.  $W_l=0.50$ ; 4.  $W_l=0.49$ ; 5.  $W_l=0.48$

$$\frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_l} \% . \quad (16)$$

当达到完全排出孔隙自由水时,软土的含水量下降到液限( $W_l$ )附近,即  $W_2 \approx W_l$ ,则  $U_\eta \approx 100\%$ ,这是“绝对主固结度”,它不属于任何一级固结应力.

用上述举例的参数计算,当  $t$  时刻含水量下降到  $W_2 \approx 57\%$  时,其主固结度  $U_\eta = 83\%$ .

### 3.4 关于主固结速率( $V_{\eta t}$ )

预压排水固结到后期固结速率的变化及数量,可以成为卸载结束预压工程的标志之一,可以通过测定一个短时间段( $\Delta t$ ) (即  $t_2$  到  $t_3$ ,  $t_3 - t_2 = \Delta t$ ) 软土含水量的变化,求取主固结速率( $V_{\eta t}$ ).

$$V_{\eta t} = \frac{H}{\Delta t} \left[ \frac{G_s(W_1 - W_3)}{1 + G_s \cdot W_1} - \frac{G_s(W_1 - W_2)}{1 + G_s \cdot W_1} \right] = \frac{H}{\Delta t} \left[ \frac{G_s(W_2 - W_3)}{1 + G_s \cdot W_1} \right]. \quad (17)$$

### 3.5 关于主固结比( $\eta$ )、初始含水量( $W_1$ )和液限( $W_l$ )的关系

式(13)及式(14)反应出它们三者之间的关系.对一个地区而言,初始含水量和液限,都将在一定范围内变化,软土的初始含水量不可能无限增大,否则成了泥浆,同样液限也不可能无限减小,否则就不是粘性土.现以深港西部通道为例制出它们的相关曲线族(图 2).这些曲线表明随着初始含水量( $W_1$ )的增大,其主固结比( $\eta$ )亦增大.但如果软粘土的液限一定,主固结比的增大也有一个限度.

## References

- Chen, Z. Y., Zhou, J. X., Wang, H. J., et al., 2000. Soil mechanics. Tsinghua University Press, Beijing, 143—157 (in Chinese).
- Gao, D. Z., 1992. Theory and practice of soft soil foundation. China Construction Industry Press, Beijing, 94—105 (in Chinese).
- Huang, W. X., 1984. Soil engineering property. Hydraulic and Electrical Press, Beijing, 138—139, 161—168 (in Chinese).
- Shen, X. Y., 1984. Studies of environmental engineering geology on subsidence of cities at Yangtze River delta and neighbouring seashore plains of China. Proceedings of 27th International Geological Congress, Section 17 (C17) Engineering Geology, Mosco.
- Shen, X. Y., Sun, S. W., 1996. The studies of the geotechnical properties of marine muck and its improvement methods of great area in Shenzhen, China. General Proceedings of 30th International Geological Congress, Beijing, 126.
- Shen, X. Y., Yu, F., 1999. Preliminary engineering design of sea backfill and ground improvement of project Shenzhen-Hongkong West Bridge Custom. Shenzhen Survey Research Institute (in Chinese).
- Shen, X. Y., Zhou, H. T., Wang, Y. Q., 2002. Construction documents design of sea backfill and ground improvement of project Shenzhen-Hongkong West Bridge Custom. Shenzhen Survey Research Institute (in Chinese).
- Sun, B. Y., Luo, Q. Y., 1999. Thesis volume of 4th conference on soft ground consolidation techniques by plastic plate and drainage method. Hohai University Press, Nanjing, 154—161 (in Chinese with English abstract).
- Tan, S. L., 2002. Analyses of abrupt gush problem of soil and water based on strength of soil body in building foundation pit. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(2): 209—211 (in Chinese with English abstract).
- Tang, D. X., Sun, S. W., 1990. Engineering geotechnics. Geological Publishing House, Beijing, 36—41, 62—68, 70—71 (in Chinese).
- Yuan, W. M., He, K. S., 1999. Sample volume of projects soft ground consolidation by plastic plate and drainage method. People Communication Press, Beijing, 199—209 (in Chinese).
- Zeng, G. X., Gong, X. N., 1993. Ground improvement manual. China Construction Industry Press, Beijing, 45—80 (in Chinese).
- Zhang, K. C., Qiu, J. J., 2000. Theory and practice of geotechnical engineering in Shenzhen, China. China Construction Industry Press, Beijing, 305—310 (in Chinese).
- Zhang, P., Zheng, J. C., 2004. Thesis volume of Shenzhen Municipal Engineering Design Institute. Shenzhen, 174—185 (in Chinese).
- Zhe, X. S., 1999. Settlement calculation on soft ground foundation. People Communication Press, Beijing, 104—119 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. T., Dai, J., 2002. Thesis volume of 7th conference on ground treatment. China Water Power Press, Beijing, 8—14 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾, 等, 2000. 土力学. 北京: 清华大学出版社, 143—157.
- 高大钊, 1992. 软土地基理论与实践. 北京: 中国建筑工业出版社, 94—105.
- 黄文熙, 1984. 土的工程性质. 北京: 水利电力出版社, 138—139, 161—168.
- 沈孝宇, 于芳, 1999. 深港西部通道口岸场坪填海及地基处理工程初步设计. 深圳市勘察研究院.
- 沈孝宇, 周洪涛, 王勇强, 2002. 深港西部通道口岸场坪填海及地基处理工程施工图设计. 深圳市勘察研究院.
- 孙伯永, 罗庆裕, 1999. 第四届塑料板排水法加固软基技术研究会论文集. 南京: 河海大学出版社, 154—161.
- 谭松林, 2002. 考虑土体强度的建筑基坑突涌问题分析. 地球科学——中国地质大学学报, 27(2): 209—211.
- 唐大雄, 孙榛文, 1990. 工程岩土学. 北京: 地质出版社, 36—41, 62—68, 70—71.
- 袁文明, 何开胜, 1999. 塑料板排水法加固软基工程实例集. 北京: 人民交通出版社, 199—209.
- 曾国熙, 龚晓南, 1993. 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 45—80.
- 张旷成, 丘建金, 2000. 深圳地区岩土工程的理论与实践. 北京: 中国建筑工业出版社, 305—310.
- 张平, 郑建昌, 2004. 深圳市市政工程设计院论文集. 深圳, 174—185.
- 折学森, 1999. 软土地基沉降计算. 北京: 人民交通出版社, 104—119.
- 周洪涛, 代军, 2002. 第七届全国地基处理学术讨论会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 8—14.