

# 荷载作用下软土压缩模量与孔隙结构关系研究<sup>\*</sup>

闫小庆<sup>1,2</sup>, 周翠英<sup>1</sup>, 房营光<sup>3</sup>, 林鲁生<sup>2</sup>

(1. 中山大学工学院, 广东 广州 510275;

2. 深圳市龙岗区建筑工务局, 广东 深圳 518172;

3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 以深圳软土为研究对象, 通过压汞试验获取了软土孔隙结构的特征参数, 研究了在荷载作用下软土压缩模量与孔隙体积含量、孔隙尺度大小、孔隙连通量等软土结构特征的关系; 探讨了在荷载作用下软土压缩模量随土体孔隙结构变化的机理。研究表明: ① 在荷载作用下软土压缩模量随其孔隙体积、平均孔径大小及孔隙连通量均呈双曲线形的负幂函数变化; ② 荷载作用下软土压缩模量随孔隙结构的变化过程可分为两个阶段。

**关键词:** 软土; 压缩模量; 孔隙结构; 压汞试验

**中图分类号:** TU 443 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2018)05-0057-07

## Research on relationship between compression modulus of soft soil under loading and its pore structure

YAN Xiaqing<sup>1,2</sup>, ZHOU Cuiying<sup>1</sup>, FANG Yingguang<sup>3</sup>, LIN Lusheng<sup>2</sup>

(1. Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Bureau of Public Works of Longgang Shenzhen Municipality, Shenzhen 518172, China;

3. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Taking Shenzhen soft soil as research object, the pore structure characteristic parameters were obtained by mercury intrusion porosimetry, and the relationship between compression modulus of soft soil under loading and the pore structure characteristics such as pore volume, pore size and pore connectivity was studied, then the mechanism of compression modulus changing with pore structure of soft soil under loading was discussed. The research shows that a negative power function relation exists between compression modulus of soft soil under loading and the pore structure characteristic parameters including total pore volume content, average pore size and pore connectivity value. And the change process of compression modulus of soft soil under loading with the pore structure might be divided the two stages.

**Key words:** soft soil; compression modulus; pore structure; mercury intrusion porosimetry

软土一般具有高含水量、大孔隙、低强度、高压缩性、低渗透性、结构性和流变性等特点, 其工程力学性状复杂且工程性质差。软土的压缩特性一直是岩土工程界讨论的热点, 是土工建设中不可回

避的问题<sup>[1]</sup>。

压缩模量是研究软土压缩特性的一个重要参数, 是评价软土压缩性的重要指标。由于软土具有的高孔隙含量及高压缩性的特点, 软土压缩模量在

\* 收稿日期: 2017-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(41530638、41472257、41227002); 国家重点研发计划项目(2017YFC1501201、2017YFC0804605); 广东省应用型科技研发专项资金(2015B090925016)

作者简介: 闫小庆(1981年生), 女; 研究方向: 岩土工程; E-mail: yxqingscut@163.com

通信作者: 周翠英(1963年生), 女; 研究方向: 岩土工程; E-mail: zhoucy@mail.sysu.edu.cn

变形过程中并非一个常数。文献 [1] 分析了软土压缩模量随荷载大小、时间变化的动态规律；文献 [2] 分析了不同应力区间和不同应力路径下土的压缩模量变化规律；文献 [3] 研究了固化疏浚泥的压缩模量与固化剂掺量、养护龄期之间的关系。由此可见，软土的压缩模量是一个随着荷载、应力路径和时间等外界因素变化而不断动态变化的参数<sup>[1-3]</sup>。

软土压缩模量随外界因素变化的现象源于土体内部微观结构的变化<sup>[3-5]</sup>。因此，从土体微观结构的角度，探索软土压缩模量变化的机理十分必要。孔隙结构是土体微观结构的重要组成部分，软土孔隙结构特征包括孔隙体积含量、孔隙大小、孔隙形状及孔隙连通性等，对应的参数为孔隙比、孔隙体积含量、孔隙直径、孔隙数量、孔隙圆度与孔隙连通性等，其中大部分参数都可通过压汞试验获取<sup>[6-7]</sup>。

本文以深圳天然软土为研究对象，通过压汞试验获取软土孔隙结构特征参数；从孔隙体积含量、孔隙大小及孔隙连通性这三个方面着手研究荷载作用下软土压缩模量随着孔隙结构的变化规律；并对微观孔隙结构参数与压缩模量的关系作了定量分析；最后，从微观角度探讨了软土压缩模量随孔隙结构变化的机理。

## 1 试验方法及试样特性

### 1.1 压缩试验

压缩模量为土在完全侧限条件下的竖向附加应力与相应的竖向应变增量之比值，一般是根据室内侧限压缩试验得到  $e-P$  曲线，然后根据公式  $E_s = (1 + e)/a$  计算求得<sup>[8]</sup>。

本文的压缩模量由常规一维压缩试验获取<sup>[8]</sup>，其仪器采用常规的一维固结仪，试样高度为 2 cm，进行加荷比为 1 的分级加载压缩试验，加载范围为 0 ~ 3 200 kPa。由于荷载持续时间也会影响软土压缩模量，为了让所有试样的变形具有同样的时间效应以便于比较，每级荷载加载时间标准都为 24 h。

此外由于软土在荷载作用过程中表现出很大的非线性，其压缩模量  $E_s$  会随着应力水平  $P$  的变化而变化，在不同的压力区段，其压缩模量会有不同，因此在  $i$  级荷载  $P_i$  作用下的软土压缩模量的计算公式为：

$$E_{s_i} = \Delta\sigma_i / \Delta\varepsilon_i = (P_i - P_{i-1}) / (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \quad (1)$$

式中： $E_{s_i}$  为在  $i$  级荷载作用下软土的压缩模量；

$\Delta\sigma_i$  为在  $i$  级荷载作用下软土的应力增量； $\Delta\varepsilon_i$  为在  $i$  级荷载作用下软土的应变增量； $P_i$  为第  $i$  级荷载； $\varepsilon_i$  为第  $i$  级荷载作用下软土的应变。

### 1.2 压汞试验

本文用压汞法获取在荷载作用下的软土孔隙结构。压汞法测量土孔隙的基本原理是基于圆柱型孔隙模型的 washburn 公式<sup>[9]</sup>，该公式建立了注入汞所需的压力和孔隙半径之间的关系为：

$$p = - \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (2)$$

式中： $p$  为所需压力； $r$  为孔隙半径； $\sigma$  为汞的表面张力系数； $\theta$  为汞对材料的浸润角。实验采用压汞仪为美国 Micromeritics 公司生产的型号为 Auto-pore IV 9510 的全自动孔径分布压汞仪，可测定的孔直径范围为 3 nm 至 350  $\mu\text{m}$ 。压汞操作按照相关规程进行<sup>[10-11]</sup>。

压汞试验的土样必须经过干燥，为防止土样在失水干燥过程中由于土水界面的张力导致土体收缩变形引起孔隙特征发生变化<sup>[12-15]</sup>，本试验采用冷冻干燥法，其试验仪器采用真空冷冻干燥机。相关实验设备见图 1。

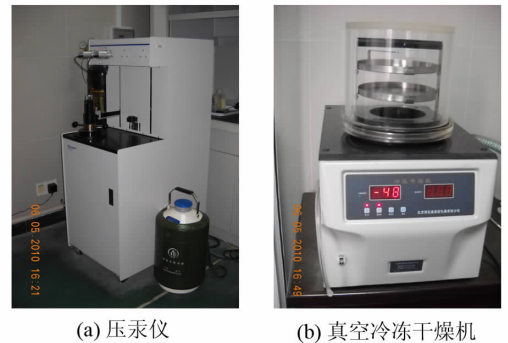


图 1 实验设备

Fig. 1 Experimental devices

### 1.3 试验软土的特性

深圳软土属滨海相和三角洲相软土。该软土取样深度在 6.4 ~ 6.7 m，呈灰黑色，包含少量贝壳碎片、蚝壳，微臭。表 1 所列为通过常规土工试验<sup>[8]</sup>得到的土样物理特性。表中数据显示：该软土饱和度高，初始孔隙比大，天然含水率大于塑限，为淤泥质软土。

## 2 软土压缩模量与荷载的关系

用传统的 Casagrande 法求得该软土前期固结压力值在 50 ~ 100 kPa 之间，为欠固结软土。考虑到

表 1 软土的物理性质指标

Table 1 Physical properties index of soft soil

比重	塑限 $W_p$ / %	液限 $W_l$ / %	塑性指数	饱和度 / %	孔隙比	含水量 / %
2.71	30.1	69.6	39.5	$\geq 95$	1.48 ~ 1.66	56 ~ 61

前期固结压力值、以及加载过程中荷载越小时荷载步越多，图 2 将软土压缩模量随荷载压力变化曲线分成不同荷载区间，图 2 (a)、(b) 和 (c) 分别给出了 0 ~ 100、0 ~ 800 和 0 ~ 3 200 kPa 三个区间的荷载 - 模量关系。

当荷载大于 50 kPa 后，压缩模量会随着荷载的增加而增加。在 0 ~ 3 200 kPa 的荷载作用下，该软土的压缩模量从 1.31 提高到 27.2 MPa，且荷载与压缩模量的线性拟合相关系数为 0.99，这说明该软土的压缩模量是随着荷载的增加呈线性增加的。综上所述，在加荷比为 1 的分级加载压缩试验中，总体上该软土的压缩模量是随着荷载的增加呈线性增加的。

软土压缩模量随外荷载的变化源于软土微观结构的调整。下面将研究荷载变化过程中压缩模量与孔隙结构的关系，并探讨压缩模量变化的机理。

### 3 压缩模量与孔隙结构关系分析

#### 3.1 压缩模量与孔隙体积关系

孔隙总体积含量是孔隙结构的重要特征之一。本论文采用单位质量土体含有的总孔隙体积 ( $V$ ) 以及孔隙比 ( $e$ ) 作为反映软土中总孔隙体积含量的参数。

图 3 给出了荷载作用下软土压缩模量随孔隙体积的变化曲线。从图 3 可以看出，软土压缩模量与总孔隙体积和孔隙比都呈反比函数，可用幂函数  $y = Ax^B$  对曲线进行拟合，拟合结果见表 2，拟合的幂函数指数都为负数，且拟合的相关性很高。且，当孔隙体积很大时，比如总孔隙体积大于 0.45 mL/g 或孔隙比大于 1.2 时，软土压缩模量随孔隙体积变化平缓；当孔隙体积越来越小时，曲线变陡，这时软土压缩模量随孔隙体积变化急剧。

#### 3.2 压缩模量与孔隙大小的关系

软土的总孔隙体积含量能反映孔隙体积含量多少，却不能反映孔隙的大小特征。天然软土的孔隙比大于或等于 1.0，都具有高孔隙性，其总孔隙体积含量都很大，但是单个孔隙却不一定大。表 1 显示试验软土的孔隙比范围在 1.48 ~ 1.66 之间，具有很高孔隙体积含量，而从压汞试验的结果来看深圳软土的平均孔径不到 120 nm，这说明天然深圳软土的孔隙含量大，但构成其孔隙结构的单个孔隙体积大部分很小，因此平均孔径小，且孔隙数量多。

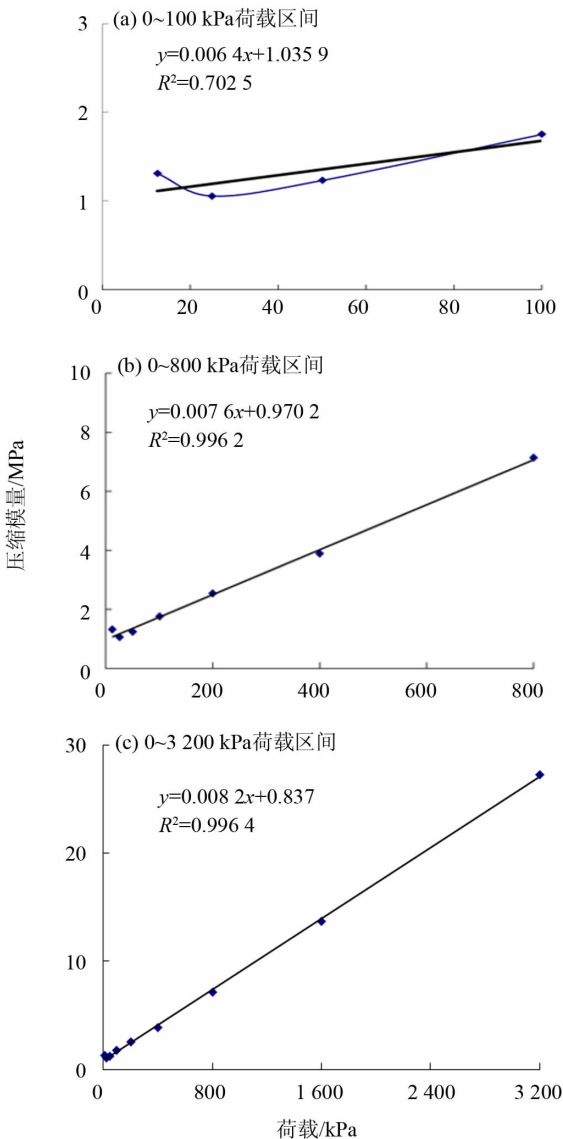


图 2 软土压缩模量与荷载关系

Fig. 2 Relationship between compression modulus of soft soil and pressure

图 2 表明，在荷载很小的情况下（小于 50 kPa），压缩模量会随着荷载的增加而稍微降低；

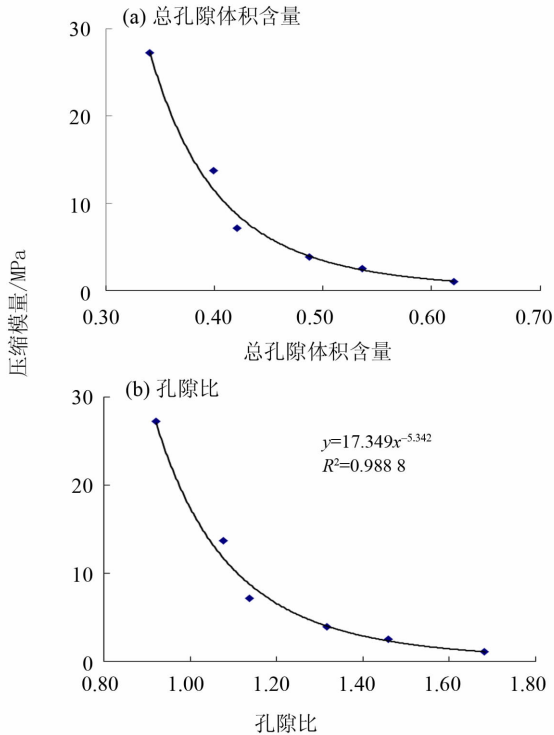


图 3 压缩模量与孔隙总体积关系

Fig. 3 Relationship between compression modulus of soft soil and total pore volume

本文通过压汞试验获取软土的平均孔径, 作为衡量软土孔隙大小的指标。图 4 给出了荷载作用下压缩模量随平均孔径的变化曲线。图 4 显示荷载作用下深圳软土平均孔径从 114.6 nm 降低到 50.1 nm, 相应的软土压缩模量则从 1.31 MPa 增加到 27.2 MPa。当平均孔径大于 70 nm 时, 压缩模量小且增加缓慢; 当孔隙平均孔径小于 70 nm 后, 这时候压缩模量增加急剧。类似于压缩模量与孔隙体积含量的关系, 软土压缩模量与其平均孔径也呈负指数的幂函数关系, 拟合结果见表 2。

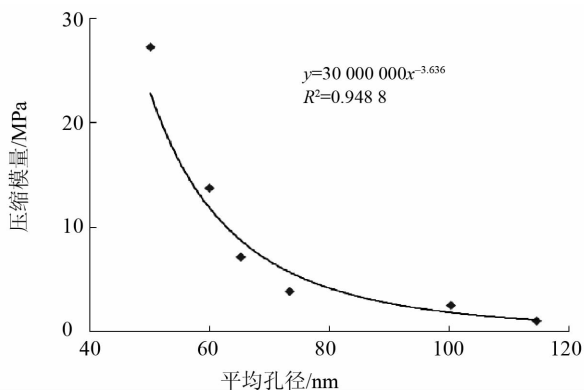


图 4 软土压缩模量与平均孔径关系

Fig. 4 Relationship between compression modulus of soft soil and mean diameter of pore

表 2 软土压缩模量与孔隙结构的关系拟合

Table 2 Fitting results of the relation between compression modulus of soft soil and pore structures

编号	孔隙结构特征参数	拟合乘幂函数参数		$R^2$
		A	B	
1	总孔隙体积含量	0.081 7	-5.389	0.989 5
2	压汞孔隙比	17.349	-5.342 1	0.988 8
3	平均孔径	30 000 000	-3.635 5	0.948 8
4	联通量	0.244 8	-6.379 4	0.905 3
5	非联通量	440.31	4.377 9	0.968 9

### 3.3 软土压缩模量与孔隙连通性关系

孔隙连通性也是孔隙结构的重要特征。孔隙连通性本质上是一个尺度问题, 取决于孔隙通道与流动介质分子的相对尺度。同一孔隙通道, 对于不同尺度流动介质分子, 可以由连通孔隙转化为非连通孔隙。同理, 对于同一流动介质分子, 存在一个控制孔径, 当孔径大于该控制孔径, 流体能自由通过, 该孔隙则为连通孔隙, 否则为非连通孔隙, 确定控制孔径尺度是孔隙连通性的关键问题。

对于流体为水的软土, 孔隙连通性除考虑软土孔隙通道尺度及流体也就是水分子的尺度外, 还要考虑软土颗粒与水的相互作用。由于土水相互作用, 软土孔隙中并存着不能自由流动的结合水和自由水, 有研究认为孔径小于 100 nm 时候<sup>[16]</sup>, 孔隙中可能全是不能自由流动的结合水, 因此软土中孔径小于 100 nm 的小孔隙可被认定为非连通孔隙。

为了量化表达软土孔隙连通性的好坏, 假定控制孔径为 100 nm, 定义联通量  $T$  为孔径大于控制孔径 100 nm 的孔隙体积占总孔隙体积的比例, 非联通量  $NT$  为孔径直径小于 100 nm 的孔隙体积占总孔隙体积的比例。软土孔隙连通性越好, 则联通量  $T$  的数值越大, 非联通量  $NT$  的数值越小。

图 5 给出了荷载作用下软土压缩模量与孔隙连通性关系。由图 5 可见, 软土压缩模量与孔隙联通量  $T$  呈指数为负常数的反比幂函数关系, 软土压缩模量随联通量  $T$  增加而减少。软土压缩模量与孔隙非联通量  $NT$  呈正比幂函数关系, 软土压缩模量随非联通量  $T$  增加而增加。这说明连通性越好时, 软土压缩模量越低, 也就是连通性越好的软土越容易被压缩。

一般认为饱和软土的压缩主要是由于土体孔隙被压、同时孔隙中水排出的结果。孔隙连通性可通过影响软土中孔隙水排出通道从而间接影响软土的压缩模量。当孔隙连通性好时候, 孔隙水排出顺

畅，孔隙体积减小容易，软土容易被压缩，相应的压缩模量低。当软土中的大孔隙大部分被压缩成自由水难以通过的小孔隙时，土体的孔隙连通性变差，孔隙水排出困难，孔隙体积难以减小，软土很难被压缩，此时软土压缩模量急速增大。

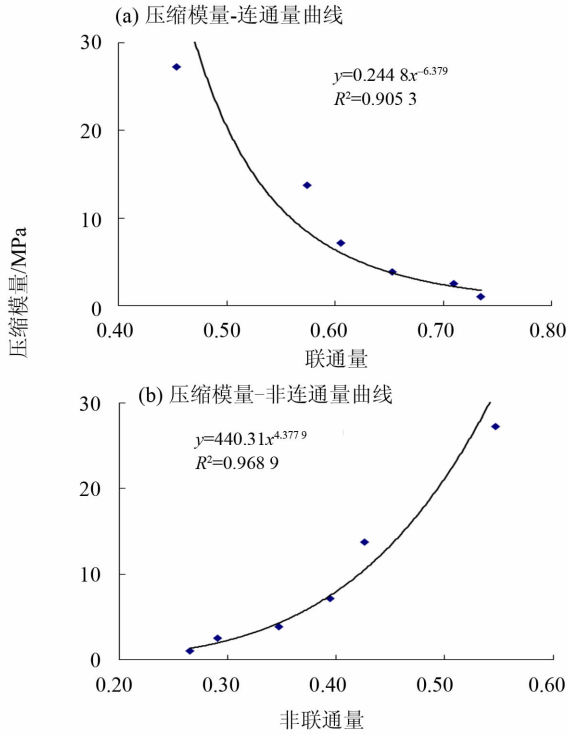


图 5 软土压缩模量与孔隙连通性关系  
Fig. 5 Relationship between compression modulus of soft soil and pore connectivity

### 4 探讨与分析

土体微观结构最早由 Terzaghi (1925) 提出，他发现了粘粒悬液在电解质作用下形成的蜂窝结构。Mitchell<sup>[17]</sup> 认为“结构”为粒间胶结和组构（颗粒或者说孔隙的排列）的共同作用，可把影响软土压缩模量的微观结构因素简略分为粒间联结作用和孔隙结构（孔隙水的排出）因素两个方面。

根据相关文献<sup>[14-15,17-18]</sup>，图 6 给出软土孔隙结构示意图，孔隙结构存在大中小三种孔隙。在大孔隙和中孔隙中，孔隙水中自由流动的水比例很高，荷载作用下水流动排出使得粘土颗粒有移动的空间，此时土体能够产生大变形，同时软土压缩模量小；在小孔隙中，孔隙水几乎都是不能自由流动的结合水，荷载作用下结合水很难排出，小孔隙体积几乎不会减少，但能产生形状变化。

根据在荷载作用下压缩模量随孔隙结构的变化

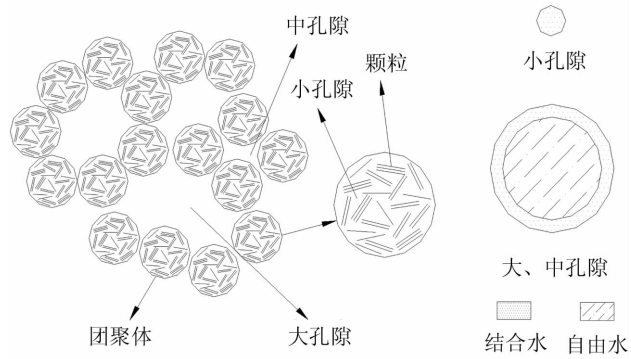


图 6 软土微观孔隙结构示意图  
Fig. 6 Sketch of pore structure of soft soil

曲线，可以把压缩模量随软土孔隙结构的变化分为二个阶段：

1) 第一阶段是软土孔隙结构急剧变化而压缩模量变化缓慢阶段。这个阶段软土产生大变形，土体的总孔隙体积迅速减少，而且主要是孔隙直径在 0.1 ~ 10 μm 之间的中孔隙体积含量急剧减少，这导致整个土体的孔隙平均孔径也迅速减少，同时软土的连通性也随之变差。在第一阶段初期，由于软土中大部分为大中孔隙，可被压缩的孔隙空间大，孔隙连通性好，孔隙中的水容易排出；只要外荷载作用达到破坏土体粒间或团聚体间联结作用的时候，软土中的黏粒或团聚体就可以发生移动调整，直到形成新的平衡静止状态。这个阶段软土变形容易，软土压缩模量变化幅度小，影响软土压缩模量变化的主导因素是粒间或团聚体间联结作用。

2) 第二阶段是孔隙结构缓慢调整而压缩模量急剧增大阶段。这个阶段软土的孔隙比降低到了 1.2 以下，土体的总孔隙体积已经降低到 0.5 mL/g 以下，中孔隙体积含量也降低到 0.25 mL/g 以下，整个土体的孔隙平均孔径降低到 70 nm 以下。在第二阶段，因软土中大部分孔隙为小孔隙，其可压缩的总孔隙空间和单个孔隙空间都变得越来越小，甚至大部分单个小孔隙尺度小于粘土颗粒尺度，因此粘土颗粒移动发生困难，此外软土中小孔隙比例变多导致孔隙连通情况持续变差，孔隙中的水难以排出，阻碍了软土中的微小孔隙空间的压缩，软土孔隙结构调整幅度趋于缓慢。在第二阶段，即使外荷载达到足以破坏粒间或团聚体间联结作用的量，由于可压缩空间小，孔隙连通性变差，孔隙水难以排出，宏观表现为软土变形趋于缓慢，土体越来越难以压缩，软土的压缩模量急剧增加。这个阶段控制软土压缩模量变化的主导因素由粒间或团聚体间联

结作用转换为孔隙结构因素(孔隙水的排出)。

综上所述,在压缩模量变化的不同阶段,影响软土压缩模量变化的主导因素不同。相对于岩石,软土的粒间联结作用很容易在外荷载作用下破坏,当工程荷载作用很大时,软土压缩主要是孔隙水的排出控制,而孔隙水的排出难易又取决于软土的孔隙结构。

## 5 结 论

1) 软土压缩模量与总孔隙体积、平均孔径呈双曲线形的反比幂函数关系。

2) 采用孔隙连通量的概念量化软土孔隙连通

性。试验表明软土压缩模量与孔隙连通量呈双曲线形的反比幂函数关系,与孔隙非连通量呈双曲线形的正比幂函数关系。

3) 软土压缩模量的变化可以分为两个阶段,第一阶段孔隙结构急剧变化而压缩模量变化缓慢的,第二阶段孔隙结构缓慢调整而压缩模量急剧增大。不同阶段,孔隙结构不同,控制软土压缩模量变化的主导因素不同。在第一阶段,控制软土压缩模量变化的主导因素为粒间或团聚体间联结作用,在第二阶段控制软土压缩模量变化的主导因素逐渐转换为孔隙水的排出因素。

## 参考文献:

- [1] 周翠英,林春秀,林鲁生,等. 外荷载作用下软土压缩模量的动态演化规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 32(7): 2040 - 2044.  
ZHOU C Y, LIN C X, LIN L S, et al. Research on dynamic evolution law of compression modulus of soft clay under external loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 32(7): 2040 - 2044.
- [2] 黄雄,郭玉华,区少凤. 土的压缩模量随荷载的变化规律分析[J]. 水运工程, 2013, 7: 95 - 99.  
HUANG X, GUO Y H, OU S F. Evolution law of compression modulus of soil under loads' changing [J]. Port and Waterway Engineering, 2013, 7: 95 - 99.
- [3] 崔勇涛,刘文白,许冰沁. 疏浚土固化前后的压缩模量及微观结构变化的定量研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(15): 260 - 267.  
CUI Y T, LIU W B, XU B Q. The study of compression modulus and changes in microstructure of dredged mud before and after solidification [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 260 - 267.
- [4] 周翠英,林春秀. 基于微观结构的软土变形计算模型[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(1): 16 - 20.  
ZHOU C Y, LIN C X. Research on deformation calculation model of soft soil based on microstructure [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(1): 16 - 20.
- [5] 莫海鸿,单毅,马灏,等. 软土动剪切模量与微观孔隙结构试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1445 - 1451.  
MO H H, SHAN Y, MA H, et al. Experimental study of dynamic shear moduli and microscopic-pore structure of soft clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1445 - 1451.
- [6] ROMERO E, SIMMS P H. Microstructure investigation in unsaturated soils; a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy [J]. Journal of Geotechnical and Geological Engineering, ASCE, 2008, 26(6): 705 - 727.
- [7] LAPIERRE C, LEROUEIL S, LOCAT J. Mercury intrusion and permeability of louisville clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(6): 761 - 773.
- [8] GB/T 50123 - 1999, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.  
GB/T 50123 - 1999, Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [9] WASHBURN E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material [C]//Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 1921, 7(4): 115 - 116.
- [10] ASTM D4404 - 84, Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry [S]. USA: the American Society of Testing and Materials, 1984.
- [11] GB/T 21650.1 - 2008, 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第1部分: 压汞法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
GB/T 21650.1 - 2008, Pore size distribution and poros-

- ity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption-part 1: Mercury porosimetry [S]. Beijing: China Standard Presss, 2008.
- [12] de KIMPE C R. Effect of air drying and critical point drying on the porosity of clay soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21: 181 - 185.
- [13] SHI B, WU Z, et al. Preparation of soil specimens for SEM analysis using freeze-cut-drying [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, 58 (1): 1 - 7.
- [14] 谈云志, 喻波, 刘晓玲, 等. 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 369 - 375.
- TAN Y Z, YU B, LIU X L, et al. Pore size evolution of compacted laterite under desiccation shrinkage process effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 369 - 375.
- [15] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anhminh, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (8): 1271 - 1279.
- TANG C S, CUI Y J, TANG A, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (8): 1271 - 1279.
- [16] YAN X Q, FANG Y G. Experiments on micro-pore structure characteristics of Shenzhen marine clay in consolidation permeability process [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 981 - 992.
- [17] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1976.
- [18] 冯晓腊, 沈孝宇. 饱和粘性土的渗透固结特性及其微观机制的研究[J]. 水文地质工程地质, 1991, 18(1): 6 - 12.
- FENG X L, SHEN X Y. Permeability consolidation characteristics of saturated cohesive soil and its micromechanics [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1991, 18(1): 6 - 12.