

# 含砂量对湘北湖相软土流变特性影响研究<sup>①</sup>

李和志<sup>1</sup>, 任虎程<sup>2</sup>, 葛莎<sup>2</sup>, 蒋鑫<sup>3</sup>, 叶智森<sup>1</sup>

(1.湖南城建职业技术学院, 湖南湘潭 411104; 2.湖南科技大学, 湖南湘潭 411201; 3.核工业衡阳第二地质工程勘察有限公司, 湖南衡阳 421000)

**摘要:** 在室内配制不同含砂量的湘北湖相软土试样, 开展了单级荷载下的一维固结流变试验, 研究含砂量对湘北湖相软土流变特性的影响。结果表明, 含砂量对湘北湖相软土的固结变形影响显著; 主固结完成时间几乎不受固结压力影响; 主固结完成时间与砂土比呈线性递减关系; 软土中含砂量越高, 固结压力越大, 次固结系数越小; 次固结系数与砂土比存在良好的幂函数关系; 软土中粗颗粒含量越高, 分形维数越大; 次固结系数与分形维数呈线性关系。

**关键词:** 含砂量; 湖相软土; 流变特性; 固结流变试验; 固结时间; 砂土比

中图分类号: TU432

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.008

文章编号: 0253-6099(2024)03-0038-06

## Effect of Sand Content on Rheological Properties of Lacustrine Soft Soil in Northern Hunan

LI Hezhi<sup>1</sup>, REN Hucheng<sup>2</sup>, GE Sha<sup>2</sup>, JIANG Xin<sup>3</sup>, YE Zhimiao<sup>1</sup>

(1. Hunan Urban Construction College, Xiangtan 411104, Hunan, China; 2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. Nuclear Industry Hengyang No2 Geological Engineering Investigation Co Ltd, Hengyang 421000, Hunan, China)

**Abstract:** To study the effect of sand content on the rheological properties of lacustrine soft soil in northern Hunan, one-dimensional rheological consolidation tests under single-stage load were carried out with soft soil samples prepared with different sand content in the laboratory. The results show that the sand content has a significant effect on consolidation deformation of lacustrine soft soil in northern Hunan. The time of primary consolidation is almost unaffected by consolidation pressure, and decreases linearly with the sand/soil ratio. The higher the sand content in soil, the greater the consolidation pressure, and the smaller the secondary consolidation coefficient. The relationship between the secondary consolidation coefficient and the sand/soil ratio can be well represented by a power function. The higher the content of coarse particles in soft soil, the greater the fractal dimension. There is a linear relationship between the secondary consolidation coefficient and the fractal dimension.

**Key words:** sand content; lacustrine soft soil; rheological properties; rheological consolidation test; consolidation time; sand/soil ratio

在河流沿岸及内湖地区广泛分布着湖相软土, 该类软土大多为淤泥质黏土, 具有高天然含水率、低强度、高压缩性、低渗透性、物理状态呈软塑至流塑等特点。随着国家“中部崛起”战略的提出, 越来越多的工程建设在湖相软土地基上。由于湖相软土结构的特殊性, 将其作为地基极易发生工后沉降, 缩短建(构)筑物的使用寿命, 影响建(构)筑物的安全稳定性。

湘北地区地处长江中下游, 由于长江中下游地区

地形变化不大, 长江流速在中下游区域明显放缓, 在静水和缓慢水流中经过生化作用而形成的软土一般具有有机质含量高、含砂量地域差异大等特征。已有的研究多从有机质等流变物质含量和吸附结合水的角度考察其对湖相软土土质和各项物理参数及力学特性的影响<sup>[1-12]</sup>, 忽视了湖相软土中含砂量对湖相软土物理性质、力学强度、流变特性的影响。本文以湖南省安乡至慈利高速公路段路基湖相软土为研究对象, 在室内配

① 收稿日期: 2023-11-24

基金项目: 湖南省自然资源厅科技计划(2023-43); 湖南省自然科学基金(2021JJ30252)

作者简介: 李和志(1985—), 男, 湖南双峰人, 硕士, 副教授, 主要从事地基础及边坡工程的教学与研究。E-mail: 493366575@qq.com

制不同含砂量的试样,进行为期 30 d 的单级荷载下的一维固结流变试验,研究含砂量对湘北湖相软土流变特性的影响。

## 1 试验方案

### 1.1 试样制备

试样由土样和标准石英砂组成。土样选自湖南省安乡至慈利高速公路段路基软土,钻孔编号为 KZK11-1,取样深度 6.5~11.5 m,其基本物理力学性质如表 1 所示。湖南省安乡至慈利高速公路段路基软土属于典型的湘北湖相软土,有机质含量高。根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》<sup>[13]</sup>,将采集的扰动土样放在烘箱中 70 °C 烘干于 24 h,将烘干后的土样充分研磨后过 0.05 mm 筛。试样用砂为标准石英砂,其基本物理指标如表 2 所示。

表 1 土样基本物理力学性质指标

| 天然密度<br>$\rho/(g \cdot m^{-3})$ | 含水率<br>$w/\%$  | 密度<br>$G_s/(g \cdot m^{-3})$ | 孔隙比<br>$e$    | 黏聚力<br>$c/kPa$       | 内摩擦角<br>$\varphi/(^\circ)$ |
|---------------------------------|----------------|------------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|
| 1.66                            | 48.5           | 2.70                         | 1.368         | 1.9                  | 1.4                        |
| 塑限<br>$W_p/\%$                  | 液限<br>$W_L/\%$ | 塑性指数<br>$I_p$                | 液性指数<br>$I_L$ | 压缩系数<br>$a/MPa^{-1}$ |                            |
| 31.9                            | 47.1           | 15.2                         | 1.09          | 0.87                 |                            |

表 2 标准石英砂基本物理指标

| 真密度/ $(g \cdot m^{-3})$ | 平均粒径/mm | 堆积密度/ $(g \cdot m^{-3})$ |
|-------------------------|---------|--------------------------|
| 2.65                    | 0.25    | 1.7                      |

用量程为 1 000 g 的电子天平分别称取所需质量的标准石英砂和烘干后的土样,轻缓倒入不锈钢托盘,利用四分法将土样初步混合均匀,配备砂土质量比 ( $W_s$ ,简称砂土比)分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 的含砂湖相软土(其粒径组成详见表 3),再分别袋装铺平,放置阴凉干燥处保存。

表 3 试样粒径组成

| 试样<br>编号 | $W_s$ | 不同粒径(mm)颗粒含量(质量分数)/% |            |            |            |          |
|----------|-------|----------------------|------------|------------|------------|----------|
|          |       | <0.005               | 0.005~0.05 | 0.05~0.075 | 0.075~0.25 | 0.25~0.5 |
| 1#       | 0     | 79.7                 | 18.6       | 1.3        | 0.3        | 0.1      |
| 2#       | 0.2   | 59.5                 | 20.0       | 0.2        | 14.4       | 5.9      |
| 3#       | 0.4   | 38.1                 | 12.8       | 0.1        | 33.8       | 15.2     |
| 4#       | 0.6   | 48.9                 | 12.0       | 0.2        | 22.7       | 16.2     |
| 5#       | 0.8   | 44.5                 | 7.3        | 0.3        | 33.0       | 14.9     |

对试样进行颗粒级配测定,级配曲线见图 1。不同含砂量试样的颗粒级配曲线介于双曲线型和反“S”型之间,随着砂土比增大,含砂试样平均粒径增加,级配曲线曲率不断增大。

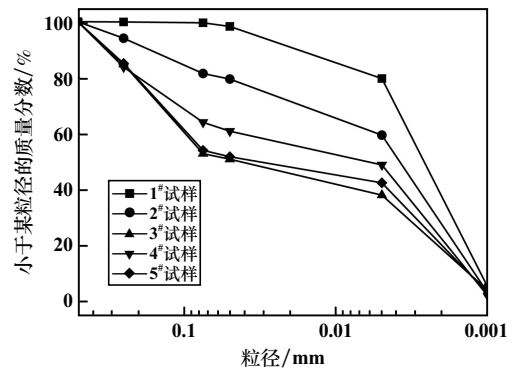


图 1 含砂湖相软土颗粒级配曲线

### 1.2 试件制备

首先将同一编号试样倒入容器中,加入预定质量的纯净水(质量为砂-土混合物的液限),充分搅拌(搅拌速率 2 r/s),形成泥浆。为了避免搅拌时发生溢出情况,筒壁周围设置宽 10 cm 的带状塑料片。含砂量较低的泥浆,其直观表征与重塑土样区别不大,表面相对平滑,用调土刀在表面进行滑移有明显痕印,且质地较为均匀细腻。含砂量较大时,可以在土样表面看到明显的颗粒,土样颗粒感明显,颜色偏浅。

在模型箱底部铺一层保水性砂,然后在模型箱四周铺塑料膜,再铺具有良好透水性的土工布。将制备好的泥浆灌入模型箱中,表面整平,最后在模型箱上部施加 75 kPa 的预压荷载。为了保持土体受力均匀,要将模型箱放在相对平整的地面上,试验期间不得随意挪动模型箱,保持模型箱稳定。

采用压样法制备高度 20 mm、截面积 30 cm<sup>2</sup> 的圆柱形试件,并控制每个试件连同环刀的质量为 (150±1) g。将不同砂土比试件置于真空饱和器中饱和 24 h 后取出备用。

### 1.3 试验方法

对不同砂土比的试件进行一维固结流变试验。采用单级荷载的加载方式施加不同等级的压力,加载等级为 50、100、200、400 kPa 和 600 kPa,每个压力等级持续 30 d。每级荷载施加后的 24 h 内按照 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》<sup>[13]</sup>规定的时间间隔记录固结过程中的变形量和测读时间,24 h 后每隔 24 h 记录变形量和测读时间。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应变与时间对数的关系

整理试验数据,绘制不同固结压力下的应变-时间曲线,结果见图 2。由图 2 可知,应变-时间曲线主、次固结分界明显,呈反“S”型。在相同固结压力下,随着

砂土比增大,主固结变形明显减小;相同砂土比条件下,随着固结压力增大,主固结变形相应增大;含砂量对主固结变形影响显著。随着砂土比、固结压力增加,次固结段曲线逐渐变缓。这是因为,随着含砂量和固结压力增加,软土的颗粒接触状态发生明显变化。含砂量较小时,主要为细粒土与细粒土之间的直接接触,

细粒土为主要受力骨架;随着含砂量增加,逐渐由细粒土与细粒土之间的直接接触为主变为细粒土与砂粒之间直接接触为主,细粒土仅在土体中充当填充作用,砂粒变为土体的主要受力骨架。含砂量越高,骨架作用愈明显。同时,固结压力越大,土体越密实,颗粒结合更紧密,压缩模量变大,变形减小。

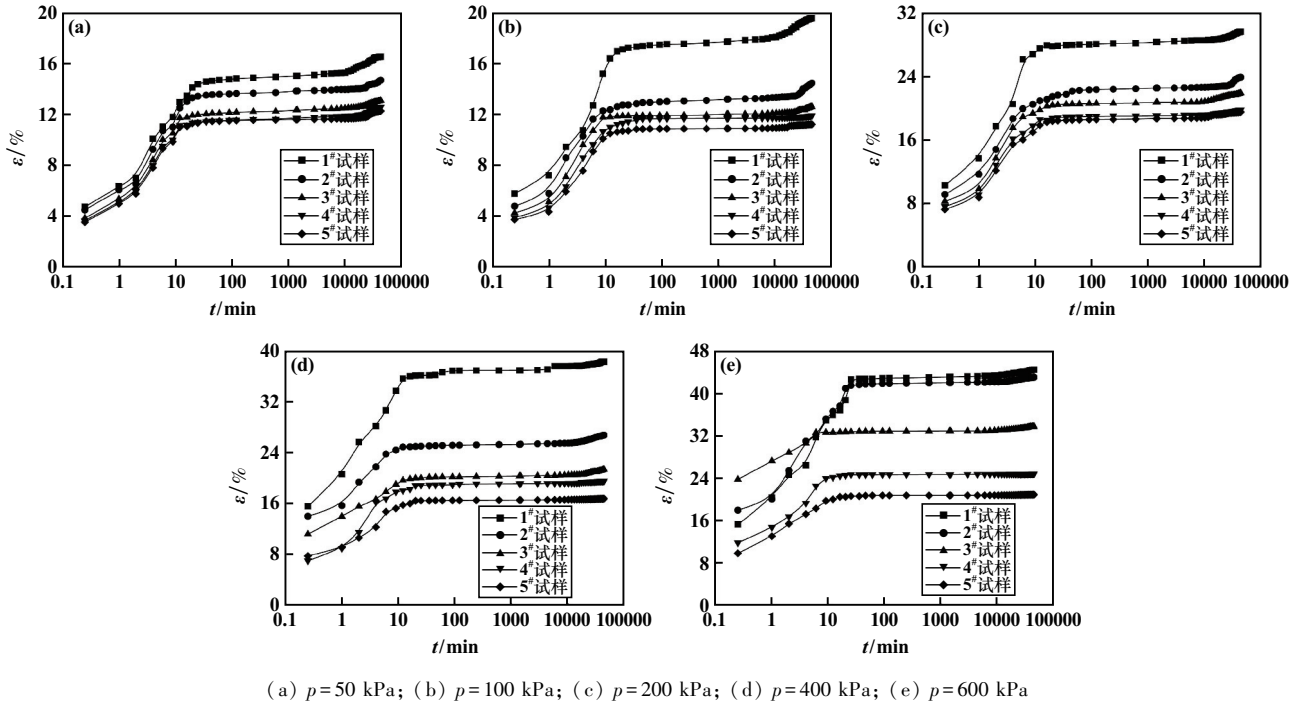


图2 单级荷载下土样应变-时间曲线

### 2.2 含砂量对湖相软土主固结时间的影响

采用应变速率法来划分主次固结时间<sup>[14]</sup>。通过应变速率法所确定的主固结时间 $t_{pc}$ 如表4所示。主固结时间 $t_{pc}$ 与砂土比的关系见图3。由图3可知,主固结时间几乎不受固结压力影响;主固结时间随着含砂量增加而减小。这是由于随着土体中含砂量增加,自由水的排出更加顺畅,土体可以更加快速地进入次固结阶段。通过Origin对主固结时间 $t_{pc}$ 与砂土比 $W_s$ 进行线性拟合,结果同样列于图3中。拟合函数表达式为:

$$t_{pc} = Q + GW_s \quad (1)$$

式中 $Q$ 、 $G$ 均为拟合参数,其值如表5所示。

表4 试验土样的主固结时间 $t_{pc}$

| 样品名称 | 不同固结压力下的主固结时间 $t_{pc}/\text{min}$ |         |         |         |         |
|------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 50 kPa                            | 100 kPa | 200 kPa | 400 kPa | 600 kPa |
| 1#   | 57                                | 58      | 53      | 59      | 62      |
| 2#   | 48                                | 39      | 46      | 41      | 43      |
| 3#   | 34                                | 35      | 38      | 36      | 40      |
| 4#   | 28                                | 29      | 31      | 33      | 26      |
| 5#   | 16                                | 18      | 21      | 23      | 14      |

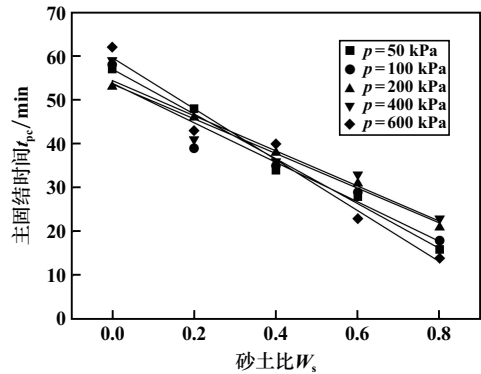


图3 主固结时间 $t_{pc}$ 与砂土比 $W_s$ 的关系及拟合结果

表5  $Q$ 、 $G$ 拟合参数值及相关系数 $R^2$

| 参数类别  | 不同固结压力下的拟合参数值及拟合相关系数 |          |          |          |          |
|-------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
|       | 50 kPa               | 100 kPa  | 200 kPa  | 400 kPa  | 600 kPa  |
| $Q$   | 57.0                 | 53.8     | 53.6     | 54.4     | 59.6     |
| $G$   | -51.0                | -45.0    | -39.5    | -40.0    | -58.0    |
| $R^2$ | 0.989 73             | 0.934 47 | 0.995 69 | 0.910 13 | 0.965 83 |

### 2.3 含砂量对湖相软土次固结系数的影响

不同砂土比 $W_s$ 土样的次固结系数 $C_\alpha$ 与固结压

力  $p$  的对数关系见图4。可以看到,随着固结压力  $p$  增加,砂土比为0的试样次固结系数  $C_\alpha$  几乎呈线性下降;随着砂量增加,次固结系数  $C_\alpha$  随固结压力  $p$  增加呈双线性变化,固结压力 200~400 kPa 时,存在一个次固结系数急剧下降的固结压力节点;固结压力 400~600 kPa 时,土体的次固结系数与  $\Delta p$  的比值比进入急剧下降节点前的值明显更小,斜率相对平缓。

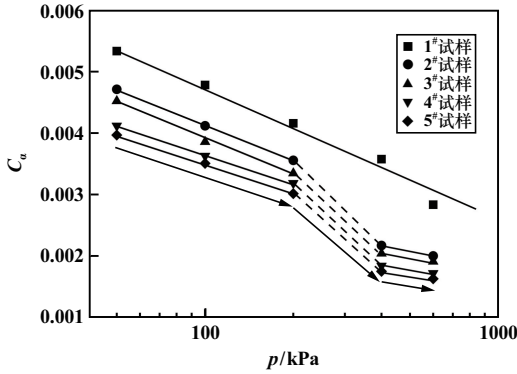


图4 次固结系数  $C_\alpha$  与固结压力  $p$  的关系

通过图4还发现,固结压力低于 200 kPa 时,所有试样的次固结系数  $C_\alpha$  随固结压力  $p$  变化曲线的斜率大致保持一致,说明低固结压力下含砂量不会对次固结系数  $C_\alpha$  与  $\lg p$  关系曲线的斜率产生影响。

计算得到的次固结系数  $C_\alpha$  与砂土比  $W_s$  的关系如图5所示。可以看到,在相同固结压力下,次固结系数  $C_\alpha$  随砂土比  $W_s$  增大而减小;含砂量相同时,次固结系数  $C_\alpha$  随固结压力增加而减小。说明含砂量越大,次固结系数  $C_\alpha$  越小,土体结构强度更稳定,土工后沉降越小。

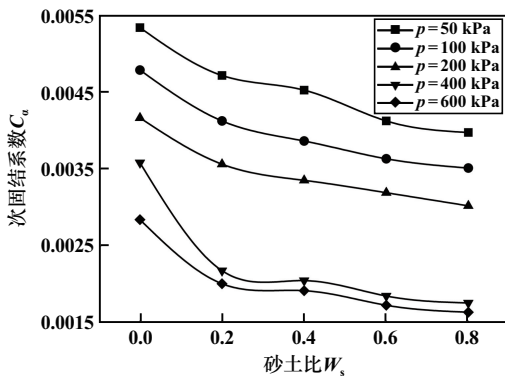


图5 次固结系数  $C_\alpha$  与砂土比  $W_s$  的关系

图6为次固结系数  $C_\alpha$  与砂土比  $W_s$  的拟合曲线,拟合关系式为:

$$C_\alpha = \lambda W_s^m \quad (2)$$

式中  $\lambda$  和  $m$  均为拟合参数,其值如表6所示。

拟合结果表明,次固结系数  $C_\alpha$  与砂土比  $W_s$  存在

良好的幂函数关系,相关系数  $R^2$  均在 0.91 以上,相关性良好。

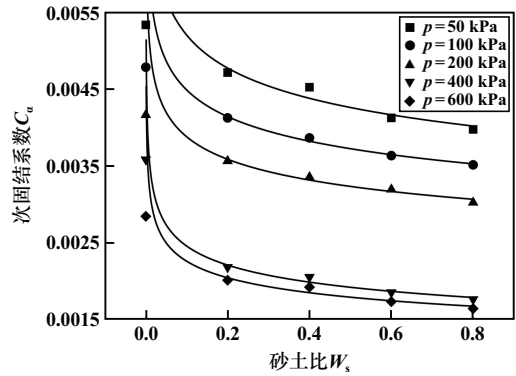


图6 次固结系数  $C_\alpha$  与砂土比  $W_s$  的拟合曲线

表6  $\lambda, m$  拟合参数值及相关系数  $R^2$

| 参数类别      | 不同固结压力下的拟合参数值及拟合相关系数 |           |           |           |           |
|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | 50 kPa               | 100 kPa   | 200 kPa   | 400 kPa   | 600 kPa   |
| $\lambda$ | 0.003 91             | 0.003 43  | 0.002 99  | 0.001 72  | 0.001 62  |
| $m$       | -0.124 11            | -0.115 97 | -0.113 18 | -0.153 00 | -0.144 38 |
| $R^2$     | 0.921 00             | 0.989 94  | 0.972 21  | 0.945 53  | 0.914 15  |

### 2.4 颗粒组成对湖相软土次固结系数的影响

采用 Talbot 的级配方程<sup>[15]</sup>对含砂湖相软土的分形维数进行计算:

$$P = \left( \frac{d}{d_{\max}} \right)^{3-D} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $P$  为小于某粒径  $d$  的累计百分含量;  $d_{\max}$  为集配最大粒径;  $D$  为分形维数。

由式(3)可得:

$$\frac{d}{d_{\max}} = P^{\frac{1}{3-D}} \quad (4)$$

含砂湖相软土的不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  计算式为:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (5)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (6)$$

式中  $d_{60}, d_{30}, d_{10}$  分别为小于该粒径的颗粒质量为 60%、30%、10%的粒径,也可分别称之为限制粒径、中值粒径和有效粒径。

将  $d_{10}$  和 10%,  $d_{30}$  和 30%,  $d_{60}$  和 60% 分别代入式(4), 可得:

$$d_{10} = d_{\max} \times 0.1^{\frac{1}{3-D}} \quad (7)$$

$$d_{30} = d_{\max} \times 0.3^{\frac{1}{3-D}} \quad (8)$$

$$d_{60} = d_{\max} \times 0.6^{\frac{1}{3-D}} \quad (9)$$

将式(7)、式(8)、式(9)分别代入式(5)和式(6),得:

$$C_u = 6^{3-D} \quad (10)$$

$$C_c = 1.5^{3-D} \quad (11)$$

计算得到分形维数  $D$  与不均匀系数  $C_u$  的关系如图 7 所示。可见不均匀系数  $C_u$  与分形维数  $D$  呈指数递增关系。分形维数  $D > 2.5$  时,不均匀系数  $C_u$  很快增长,曲线曲率减小。结合试验结果分析,土样的分形维数越大,其竖向应变越小,土体强度越高。

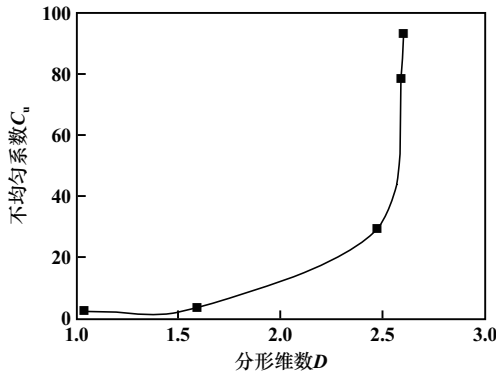


图 7 分形维数  $D$  与不均匀系数  $C_u$  的关系

对式(3)进行对数变换,可得:

$$(3 - D) \lg P = \lg(d/d_{\max}) \quad (12)$$

分形模型级配方程参数具有明确的物理意义。由此可见,分形模型级配方程参数是双对数坐标系中直线斜率的度量。分形维数定量反映了土体中颗粒粒径的分布特征。同一种土体,其分形维数越大,表明粗颗粒含量越高;分形维数越小,表明细颗粒含量越高。

计算得到分形维数  $D$  与砂土比  $W_s$  的关系如图 8 所示。通过图 8 可以看出,含砂量不同,土体颗粒级配和分形维数均不同,砂土比 0~0.4 时,随着砂土比增大,土样分形维数显著提升;砂土比大于 0.4 后,随着砂土比变化,土样分形维数趋于平缓。

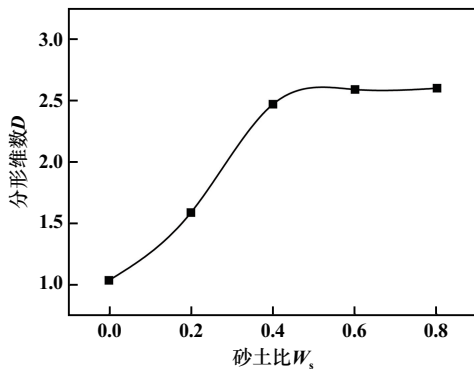


图 8 分形维数  $D$  与砂土比  $W_s$  的关系

通常规定级配良好的土能同时满足不均匀系数

$C_u \geq 5$  和曲率系数  $C_c = 1 \sim 3$  的条件<sup>[16]</sup>。由式(10)~(11)反算可得,级配良好的路基填土,其分形维数为:

$$3 - \frac{\lg 6}{\lg 5} \leq D \leq 3 - \frac{\lg 1.5}{\lg 3} \quad (13)$$

整理式(13)可得:  $1.8867 \leq D \leq 2.6309$ 。

次固结系数  $C_\alpha$  与分形维数  $D$  的关系如图 9 所示。由图 9 可知,两者存在线性关系。次固结系数与分形维数的线性表达式为:

$$C_\alpha = A_2 + B_2 D \quad (14)$$

式中  $C_\alpha$  为次固结系数;  $D$  为分形维数;  $A_2$ 、 $B_2$  均为参数,其拟合值及相关系数如表 7 所示。

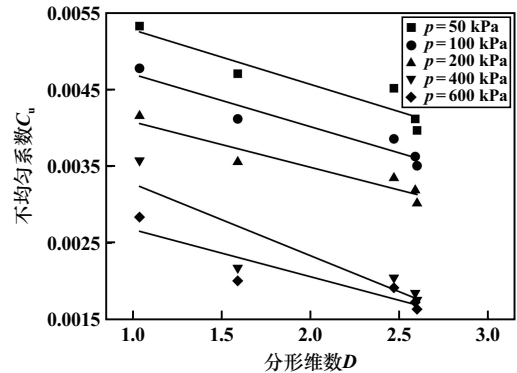


图 9 次固结系数  $C_\alpha$  与分形维数  $D$  拟合关系

表 7  $A_2$ 、 $B_2$  拟合参数值及相关系数  $R^2$

| 参数类别  | 不同固结压力下的拟合参数值及拟合相关系数    |                         |                         |                         |                         |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|       | 50 kPa                  | 100 kPa                 | 200 kPa                 | 400 kPa                 | 600 kPa                 |
| $A_2$ | 0.006 00                | 0.005 39                | 0.004 68                | 0.004 22                | 0.003 30                |
| $B_2$ | $-7.120 \times 10^{-4}$ | $-6.850 \times 10^{-4}$ | $-5.933 \times 10^{-4}$ | $-9.403 \times 10^{-4}$ | $-6.163 \times 10^{-4}$ |
| $R^2$ | 0.878 48                | 0.922 42                | 0.904 34                | 0.801 76                | 0.832 63                |

### 3 结 论

1) 应变-时间曲线主、次固结分界明显,明显呈反“S”型。含砂量对湘北湖湘软土固结变形影响显著。

2) 湘北湖湘软土的主固结时间几乎不受固结压力影响;主固结时间与砂土比呈线性递减关系。

3) 含砂量越高,固结压力越大,湘北湖湘软土的次固结系数  $C_\alpha$  越小;次固结系数  $C_\alpha$  与砂土比  $W_s$  存在良好的幂函数关系。

4) 湘北湖湘软土的粗颗粒含量越高,分形维数越大;次固结系数  $C_\alpha$  与分形维数呈线性关系。

#### 参考文献:

- [1] 裴友强,张留俊,富志鹏,等. 内陆河湖相软土土性指标统计特征与竖向变化规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023,54(12):23-34.
- [2] 杨 冰. 滇池湖相软土化学改良与力学参数统计推断[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.

- [3] 贺建清,林孟源,陈立国,等.考虑围压影响的湖相软黏土 K<sub>0</sub> 固结经验蠕变模型[J].自然灾害学报,2022,31(1):147-156.
- [4] 魏德永.滇池湖相软土固结渗透试验及参数取值研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- [5] 李荐华,甘建军,万胜,等.湖相软土固结变形特性试验及微观分析[J].中国农村水利水电,2019(8):120-128.
- [6] 刘嘉正.里下河泻湖相软土土性参数变异性统计分析[J].土工基础,2023,37(6):979-981.
- [7] 甘建军,万胜,李荐华,等.基于沉积环境与工程地质特征的湖相软土分类研究——以鄱阳湖流域四种典型软土为例[J].地质论评,2019,65(4):983-992.
- [8] 邵勇,阎长虹,许宝田,等.湖相软土流变模型识别及其工程应用分析[J].岩土力学,2012,33(8):2383-2387.
- [9] 付贵海,阳标,张根宝,等.湖相软土单轴蠕变特性及其模型研究[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2023,32(3):1-7.
- [10] 谷任国,房营光.软土流变的物质基础及流变机制探索[J].岩土力学,2009,30(7):1915-1919.
- [11] 阮永芬,朱尚万,乔文件,等.湖相沉积泥炭质土蠕变特性[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):166-171.
- [12] 邓宗伟,朱志祥,曾向军,等.不同应力水平下湖相软土流变特性研究[J].工业建筑,2014,44(6):67-72.
- [13] 中华人民共和国交通运输部.JTG3430—2020公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2020.
- [14] 刘世明,曾国熙.一个考虑次时间效应的一维固结模型[J].浙江大学学报(自然科学版),1990(5):49-60.
- [15] 丁林楠,李国英,魏匡民.描述土体级配分布的级配方程及其适用性[J].岩土力学,2022,43(增刊1):173-183.
- [16] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学(第3版)[M].北京:清华大学出版社,2022.
- 引用本文:李和志,任虎程,葛莎,等.含砂量对湘北湖相软土流变特性影响研究[J].矿冶工程,2024,44(3):38-43.

(上接第33页)

#### 参考文献:

- [1] 徐永福.膨胀土的水力作用机理及膨胀变形理论[J].岩土工程学报,2020,42(11):1979-1987.
- [2] 徐永福,程岩,唐宏华.膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):1-20.
- [3] 吴镇清,葛允雷,杨果林,等.膨胀土路堑边坡支挡结构形式试验研究[J].铁道建筑,2017,57(11):79-81.
- [4] 赵乐涛,杨兆林.东边坡不良地质体勘查及安全治理研究[J].矿业工程,2021,19(3):10-14.
- [5] 刘妮娜.普速铁路加筋膨胀土路堤填筑与现场监测研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(6):27-38.
- [6] 肖杰,杨和平.膨胀土堑坡格栅加筋柔性支护的数值模拟[J].公路交通科技,2016,33(6):1-8.
- [7] 赵亮,龚壁卫,李青云,等.加筋膨胀土边坡土工格栅的导水作用研究[J].长江科学院院报,2012,29(6):44-47.
- [8] 许英姿,廖旭航,苏超,等.加筋宽度与间距对膨胀土特性影响研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(10):2583-2590.
- [9] Riccardo S, Simon J W, Marti L C. Conceptual hydraulic conductivity model for unsaturated soils at low degree of saturation and its application to the study of capillary barrier systems[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020,146(10):04020106.
- [10] Kuo-Hsin Y, Joseph N T, Vo D A H, et al. Numerical evaluation of reinforced slopes with various backfill-reinforcement-drainage systems subject to rainfall infiltration [J]. Computers and Geotechnics, 2018,96:25-39.
- [11] 曲永新,张永双,杨俊峰,等.中国膨胀性岩、土一体化工程地质分类的理论与实践[C]//中国地质学会.工程地质学报,2000:140-164.
- [12] 肖杰,杨和平,符浩,等.膨胀土边坡加筋作用的对比模型试验[J].中国公路学报,2014,27(7):24-31.
- 引用本文:李昱,常锦,郭剑雄.考虑格栅水力特性的柔性支护处治膨胀土边坡的数值模拟分析[J].矿冶工程,2024,44(3):28-33.

(上接第37页)

- [2] 单仁亮,汪学清,高文蛟,等.人工神经网络在巷道爆破中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):3322-3328.
- [3] 谢超群,李启月,刘玉丰,等.基于SVR的隧道掘进光面爆破效果预测模型[J].矿冶工程,2022,42(2):28-31.
- [4] 蒋复量,杨文超,郭锦涛,等.基于鲸鱼算法的巷道掘进爆破参数优化与应用[J].南华大学学报(自然科学版),2019,33(2):27-32.
- [5] 李伟,杨仁树.中深孔光面爆破技术在岩石巷道掘进中的应用研究[J].矿冶工程,2013,33(3):21-23.
- [6] Probst P, Wright M, Boulesteix A. Hyperparameters and tuning strategies for random forest[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews-Data Mining and Knowledge Discovery, 2019,9(3):1301-1316.
- [7] CHEN C, ZHANG Q, Kashani M H, et al. Forecast of rainfall distribution based on fixed sliding window long short-term memory[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2022,16(1):248-262.
- [8] Janitza S, Celik E, Boulesteix A. A computationally fast variable importance test for random forests for high-dimensional data [J]. Advances in Data Analysis & Classification, 2018,12:885-915.
- [9] 李航.统计学习方法[M].北京:清华大学出版社,2019.
- [10] 刘玉丰.隧(巷)道光面爆破参数选择与效果预测模型研究[D].长沙:中南大学,2022.
- [11] 刘敏,郎荣玲,曹永斌.随机森林中树的数量[J].计算机工程与应用,2015,51(5):126-131.
- 引用本文:侯胜心,马晶晶,唐虹靖,等.基于随机森林算法的隧(巷)道光面爆破参数选择模型研究[J].矿冶工程,2024,44(3):34-37.