

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.03.013

# 扰动对软土累积排水量影响试验研究

苗永红, 卜梓轩, 王 玲, 苏靖凤, 殷 杰

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 为研究扰动对软土排水特性的影响,在各扰动状况下进行了一系列软土振动排水试验。试验中考虑了扰动时长、频率、围压和一定的停歇时长,并分析了各工况下软土的累积排水量。结果表明,扰动会明显弱化振动排水处理效果,减少累积排水量。扰动程度越高,排水量降幅越明显。扰动程度与扰动时长、频率成正比,与围压成反比。此外,扰动后的停歇有利于恢复软土的结构性和渗透性,并增加累积排水量,累积排水量的提升效果与停歇时长成正比,与围压成反比。

**关键词:** 软土; 扰动; 固结排水; 累积排水量

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)03-0421-05

## Experimental investigation of disturbance to cumulative drainage volume on soft soils

MIAO Yonghong, BU Zixuan, WANG Ling, SU Jingfeng, YIN Jie

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to study the influence of disturbance on the drainage characteristics of soft soil, a series of soft soil vibration drainage tests under different disturbance conditions are carried out. Different disturbance durations, frequencies, confining pressures and certain rest durations are considered in the test, with the cumulative drainage volume of soft soil under each conditions analyzed and compared. The results show that the disturbance obviously weakens the reinforcement effect of vibration drainage and reduces the cumulative drainage volume. The higher the disturbance degree, the more obvious the cumulative drainage. The disturbance degree is directly proportional to the disturbed duration and frequency and inversely proportional to the confining pressure. In addition, the duration after disturbance is useful to recover the structure and permeability of soft soils and increase the cumulative drainage. The improvement effect is directly proportional to the duration and inversely proportional to the confining pressure.

**Key words:** soft soil; disturbance effect; consolidation drainage; cumulative drainage

我国沿海沿江地区广布的软土含水量高、压缩性高、渗透性差和强度低等不良工程力学特性给工程建设带来困难和隐患<sup>[1]</sup>,故需对软土进行有效加固。

众所周知,各类施工器械移动不可避免地会对下伏软土层产生扰动。扰动对土体的变形以及强度的影响不容忽视, Schmertmann<sup>[2]</sup>和 Chung 等<sup>[3]</sup>通过一维固结试验研究扰动对软土压缩性的影响,表明扰动降低了屈服应力,增大了压缩性。肖晓春等<sup>[4]</sup>模拟开挖扰动和降雨组合对土体的影响,表明扰动会减小孔隙水压力并增加土层的沉降量。鲁泰山

等<sup>[5]</sup>通过有限元模拟不同开挖深度对土体受扰范围的影响并分析扰动度分布规律,表明扰动会大程度降低强扰区的土强度并增大基坑沉降。邓永锋等<sup>[6]</sup>建立受扰动土的屈服应力与扰动度的联系,分析不同灵敏度的受扰动土的屈服应力递减规律。表明高灵敏度土受扰时的屈服应力递减显著。安然等<sup>[7]</sup>借助旁压试验研究表明扰动会严重弱化土的强度和承载力。杨石飞<sup>[8]</sup>对扰动前后的软黏土进行旁压试验,发现扰动会明显降低土的极限体应变。

目前,成功用于软土处理的方法中<sup>[9-10]</sup>,多关注其在静力条件下的加固效果。为提高加固效率,我

收稿日期: 2021-11-15; 网络出版日期: 2022-04-01

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20220330.1244.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978315)

通信作者: 苗永红,男,博士,副教授,研究方向为岩土工程勘察、设计、监测等。E-mail: yhmiao@ujs.edu.cn

们提出一种由静动相结合的“振动排水法”。该方法通过在地基表层布设振动设备并激发出循环荷载,将振动波持续传至需处理层,以实现迅速排水固结的目的。已有研究表明该法可有效加快软土排水固结的速度和提升软土的强度<sup>[11-12]</sup>,并合理缩短工期。

综上所述,目前国内外学者对于扰动的研究主要是关于扰动对软土性质的影响,如软土的强度、屈服应力、应变特性等。然而目前关于扰动对软土振动排水性能影响的相关研究甚少,基于此,有必要探讨扰动对软土累积排水量的影响。

本文中通过对江苏镇江某项目中的软土进行室内振动排水试验,通过对土体施加循环荷载来模拟扰动工况,以此来探讨在扰动对软土排水累积排水量的影响,为工程中软土地基的有效加固提供依据。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 试验设备与材料

本试验使用课题组自主研发的 LD-8 型动态固结渗透仪,该设备主要包括气泵、传感器、传力杆、控制系统、压力室、排水通道及数据采集系统,可以有效模拟扰动对土体排水特性的影响,试验设备参见文献[11]。该设备可以结合实际工况来设置不同的围压、静荷载、动荷载、频率等参数,试样的排水量由采集系统实时记录。

试验所用软土取自江苏镇江某软土地基处理项目,采用高 30 cm 直径 30 cm 的 PVC 圆管以静压的

方式压至设计深度获取。所取软土的天然含水率  $\omega$  为 66.18%,天然密度  $1.82 \text{ g/cm}^3$ ,孔隙比 1.71。试样尺寸为  $\Phi 61.8 \times 128$ (直径 $\times$ 高度,单位为 mm)。

### 1.2 试验方案

在试验前预先对试样固结 24 小时以模拟土沉积环境。试验由扰动和排水两阶段组成,第一阶段关闭排水通道,通过对试样施加循环荷载来模拟扰动,并在扰动后停歇一定时长。第二阶段分 4 级逐级施加静荷载至 0.67 kPa,而后保持第 4 级静荷载恒定并施加循环荷载。加载示意图如图 1。为充分实现排水条件,在试样四周设置土工条,文献<sup>[11-12]</sup>表明在 1 Hz 频率时,排水效果最佳。试验方案见表 1。

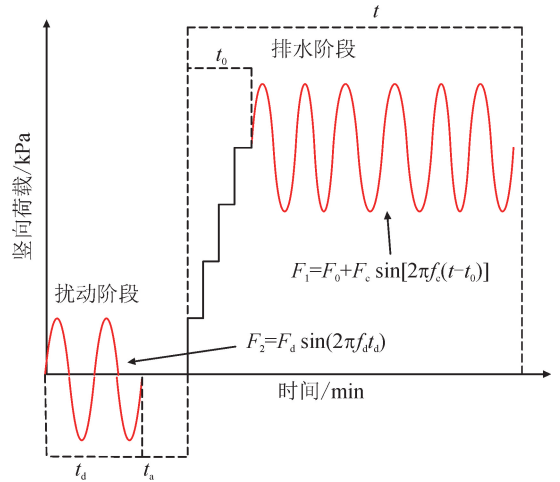


图 1 加载示意图

Fig. 1 Loading diagram

表 1 试验方案

Tab. 1 Test scheme

围压 $\sigma_3$ /kPa	动载/kPa	频率 $f_d$ /Hz	扰动时长 $t_d$ /min	停歇时长 $t_a$ /min
70,100,120	0.16	1	15,30,45	10
70,100,120	0.16	1,2,3,4	30	10
70,100,120	0.16	1	30	10,30,50

## 2 试验结果与分析

### 2.1 扰动时长对累积排水量的影响

为分析不同扰动程度对排水量的影响,分别在 3 种围压下,进行振动扰动 15 min,30 min,45 min。图 2 表明整个排水固结过程可以分为总排水量的 70%~90%快速排水阶段(0~150 min)和缓慢排水阶段(150~300 min)。在缓慢排水阶段排水量逐渐趋于稳定,并且随着时间延续,累积排水量的增速趋缓并趋于恒定。由于 200 min 以后的累积排水量变化甚微,故将 200 min 时的排水量值作为稳定值。图 2 表明,3 种围压下累积排水量均随着扰动时长

$t_d$  的增长而减小。图 3 为不同围压下以 200 min 时的排水量为参照的下降百分比与扰动时长  $t_d$  的关系,可以看出受扰动之后软土的累积排水量较无扰动情况均有不同程度减少。在  $\sigma_3 = 70 \text{ kPa}$  无扰动时的排水量为参考,扰动 15 min,30 min,45 min 后分别降低 22.1%,32.1%,48.8%。这表明振动扰动会明显降低累积排水量,在扰动 45 min 后降幅最大。主要的原因是土体受到扰动作用后,结构性发生一定程度改变,导致土体颗粒排列和土中孔隙状态变化,渗透性变差<sup>[13-14]</sup>,并且扰动时间越长,对土的结构性损伤程度越大。同时从图 3 中可知,在不同扰动时长下,随着围压的增大,累积排水量降幅减缓。

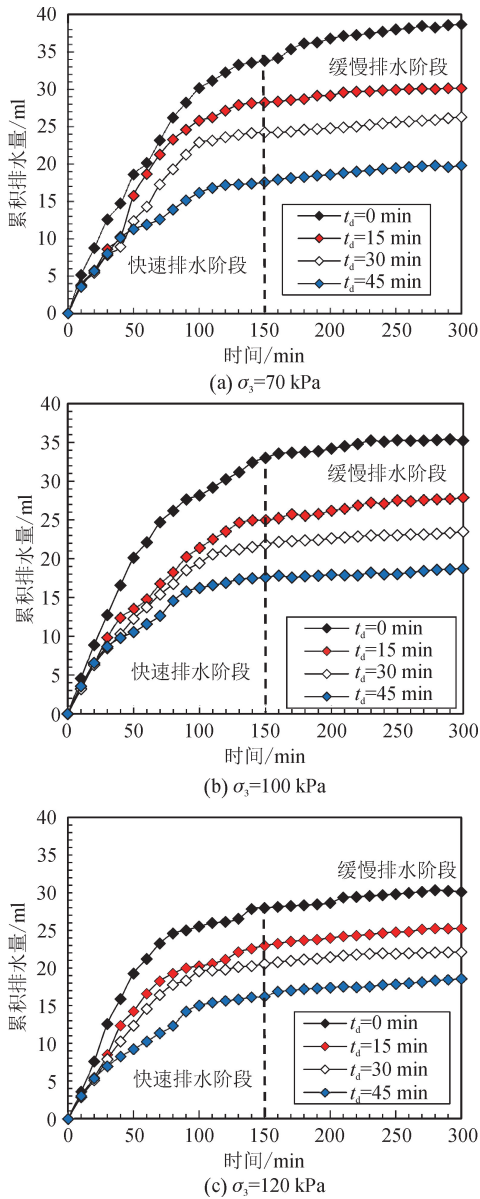


图 2 不同扰动时长  $t_d$  下累积排水量与时间的关系  
Fig. 2 Relationship between cumulative drainage and time under different disturbance duration  $t_d$ 's

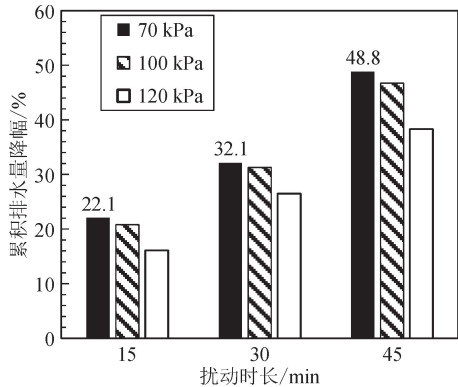


图 3 降幅百分比与扰动时长  $t_d$  的关系  
Fig. 3 Relationship between cumulative drainage volume reduction and disturbance duration  $t_d$

## 2.2 扰动频率对累积排水量的影响

为进一步分析不同振动扰动周期对软土排水特性的影响,保持扰动时长  $t_d = 30 \text{ min}$ ,在频率 1~4 Hz 范围内,分析频率对累计排水量的影响。图 4 为各围压下的排水量与时间随扰动频率的变化,表明在不同频率下,累积排水量随着频率  $f_d$  的增加而减小。

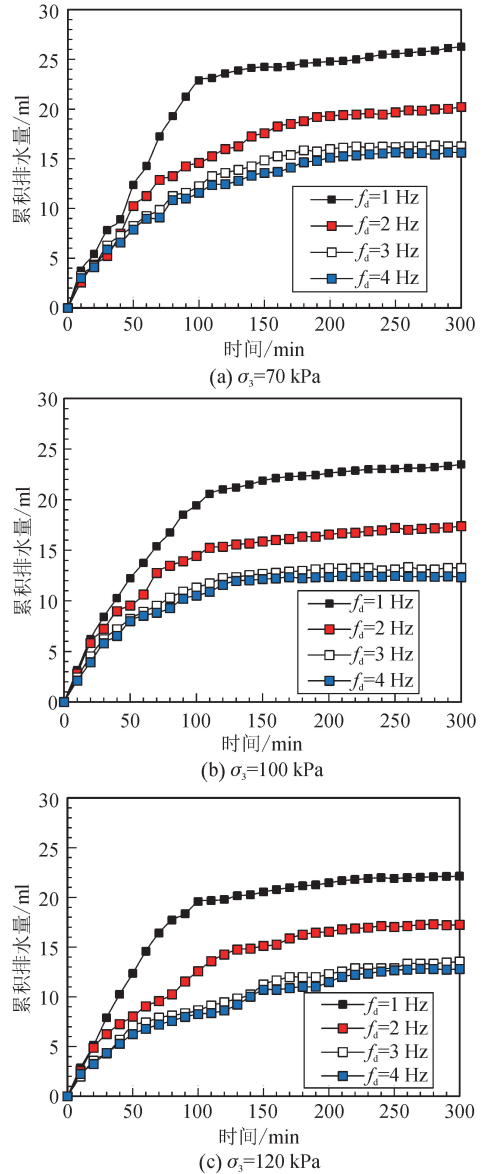


图 4 不同频率  $f_d$  下累积排水量与时间的关系  
Fig. 4 Relationship between cumulative drainage and time at different frequency  $f_d$ 's

图 5 为不同围压下累积排水量与扰动频率  $f_d$  的关系。从图 5 可知随着频率增加,累积排水量降幅百分比呈增大趋势,以 70 kPa 时排水量为参照,得 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz 和 4 Hz 的降幅百分比分别为 32.1%, 47.6%, 57.9% 和 59.5%, 1~4 Hz 的降幅百分比分别增加 15.5%, 12.3% 和 1.6%。这说明

当振幅和扰动时长不变时,随着循环频率  $f_d$  的提升,其造成的扰动程度并无明显增强,累积排水量的降幅趋缓。主要的原因可能是,高频作用下,土体的结构性即随后的变形响应不及时,无法完全吸收较高频率振动触发的能量。同图 2 相似,随着围压增大,累积排水量呈下降趋势。特别是当扰动频率  $f_d$  由 3 Hz 增至 4 Hz 时,累计排水量降幅极小。当围压为 70 kPa 时,4 Hz 比 3 Hz 仅增加 1.6%,而 100 kPa 和 120 kPa 时,仅分别增加 0.6% 和 0.4%。这主要的原因可能是,软土在较高围压下可更好地抵消部分频率增加诱发的扰动对累积排水量的影响。

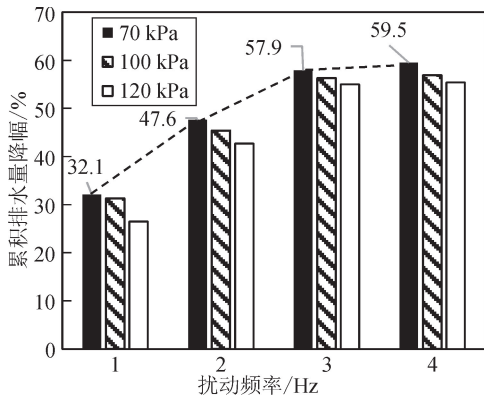


图 5 累积排水量降幅百分比与扰动频率  $f_d$  的关系  
Fig. 5 Relationship between reduction of cumulative drainage volume percent and disturbance frequency  $f_d$  at each confining pressure

### 2.3 停歇时长对累积排水量的影响

图 6 为不同围压下,扰动 30 min 后不同停歇时间  $t_a$  下的累积排水量与时间的关系。图 6 中围压 70 kPa 时可以发现从静荷载施加时,排水量即出现差异,在 100 min 后差异明显,在 200 min 时差异最大且基本稳定。在 3 种围压下累积排水量皆随停歇时长增加而不同程度增大。图 7 为累积排水量增幅百分比(参照停歇时长为 10 min 下的累积排水量)与停歇时间的关系。当围压 70 kPa 分别停歇 30 min 和 50 min 时,较  $t_a = 10$  min 相应增加 14.7% 和 31.5%。这表明,扰动后一定时长的停歇可有效增加累积排水量,并且累积排水量的提升效果随着停歇时长的增加呈现而增长趋势。产生此结果最主要的原因可能是土的时效性影响<sup>[15]</sup>,土体受扰后,结构性发生改变,在静置一段时间过后,结构性会恢复,空间受力状态得到适当调整。同时,静置一定时长有助于恢复土体的应变,使土体的渗透性得到提升,可以更有效地将弱结合水转换成自由水排出<sup>[16-17]</sup>。此外,可以从图 7 看出,随着围压增加,累积排水量的增幅百分比会减小,在停歇 30 min 时,

当围压从 70 kPa 增至 100 kPa 时,增幅减小 0.2%, 100~120 kPa 时,增幅减小 8.5%。这说明在越高的围压下,土体的结构性恢复的程度较低围压工况下差,即软土结构的时效性将随着围压的增加而趋缓。

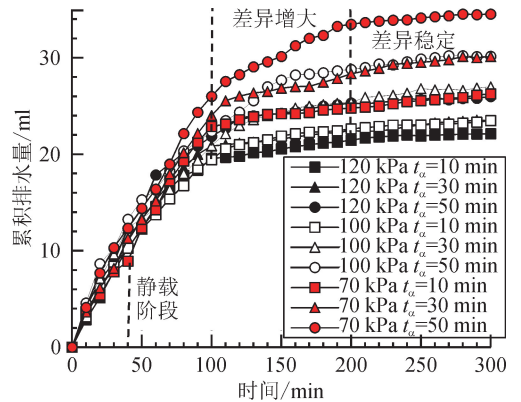


图 6 不同停歇时长  $t_a$  和围压下累积排水量下与时间的关系

Fig. 6 Relationship between cumulative drainage  $t_a$  and time under different rest durations

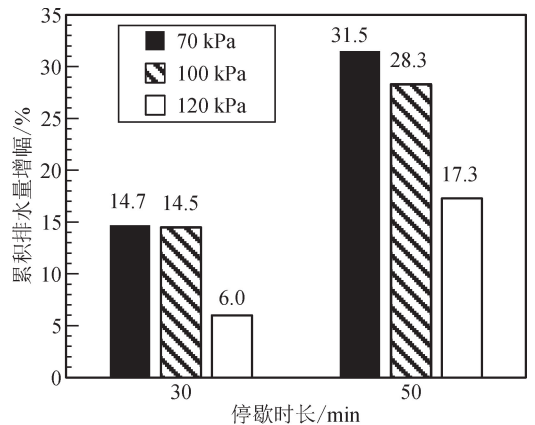


图 7 累积排水量增幅百分比与停歇时长  $t_a$  的关系  
Fig. 7 Relationship between increment of cumulative drainage volume and rest duration  $t_a$

### 3 结论

1) 扰动会导致软土累积排水量明显降低。扰动效应与扰动时长、扰动频率成正比,与围压成反比,但随着扰动频率增至某值,频率对累积排水量变化的影响不再显著。

2) 扰动后的停歇有助于恢复软土的结构性和渗透性,并增加累积排水量,停歇增强的排水效果与停歇时长成正比,与围压成反比。

3) 各围压下原状土较扰动土的排水效果更佳,且浅部软土的处理效果优于深部软土。应用时,应采取避免扰动,并结合扰动程度确定停歇时长从而优化加固软土效果。

## 参考文献:

- [1] ZENG Lingling, HONG Zhenshun, GAO Yufeng. Practical estimation of compression behaviour of dredged clays with three physical parameters[J]. *Engineering Geology*, 2017, 217:102-109.
- [2] SCHMERTMANN J. Estimating the true consolidation behavior of clay from laboratory test results[J]. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1953, 79(10): 1-26.
- [3] CHUNG S G, KWAG J M, GIAO P H, et al. A study of soil disturbance of Pusan clays with reference to drilling, sampling and extruding[J]. *Geotechnique*, 2004(1): 61-65.
- [4] 肖晓春,唐倩,徐军,等. 开挖扰动及降雨入渗影响的地表沉降特征研究[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(2): 133-139.
- XIAO Xiaochun, TANG Qian, XU Jun, et al. Characteristics of surface settlement induced by excavation disturbance and rainfall infiltration[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(2): 133-139.
- [5] 鲁泰山,刘松玉,蔡国军,等. 软土地层基坑开挖扰动及土体再压缩变形研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 565-573, 580.
- LU Taishan, LIU Songyu, CAI Guojun, et al. Study on the disturbance and recompression settlement of soft soil induced by foundation excavation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 565-573, 580.
- [6] 邓永锋,刘松玉. 扰动对软土强度影响规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(9): 1940-1944.
- DENG Yongfeng, LIU Songyu. Effect of sample disturbance on soft soil strength[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(9): 1940-1944.
- [7] 安然,黎澄生,孔令伟,等. 花岗岩残积土原位力学特性的钻探扰动与卸荷滞时效应[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(1):109-116.
- AN Ran, LI Chengsheng, KONG Lingwei, et al. Effects of drilling disturbance and unloading lag on in-situ mechanical characteristics of granite residual soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 42(1):109-116.
- [8] 杨石飞. 扰动土旁压试验初探[J]. *土工基础*, 2016, 30(3):403-406.
- YANG Shifei. Pressuremeter tests in disturbed cohesive soils[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2016, 30(3):403-406.
- [9] 曹杰,郑建国,刘智,等. 真空预压法处理软土地基的工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(增刊 2):124-127.
- CAO Jie, ZHENG Jianguo, LIU Zhi, et al. Application of vacuum preloading method in consolidating soft soil foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(S2):124-127.
- [10] 刘松玉,杜广印,毛忠良,等. 振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(8): 1377-1383.
- LIU Songyu, DU Guangyin, MAO Zhongliang, et al. Field tests on improvement of collapsible loess by vibratory probe compaction method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(8):1377-1383.
- [11] 苗永红,李瑞兵,陈邦. 软土的振动排水固结特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(7):1301-1306.
- MIAO Yonghong, LI Ruibing, CHEN Bang. Laboratory tests on consolidation behavior of soft soils under vibration drainage conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(7):1301-1306.
- [12] MIAO Yonghong, ZHOU Fanbo, YIN Jie, et al. Effects of frequency and confining pressure on consolidation drainage behavior of soft marine clays[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 37(6): 746-754.
- [13] 郑娟. 考虑时效性的饱和重塑粘土固结特性研究[D]. 西安:长安大学, 2016.
- ZHENG Juan. Research on the consolidation properties of saturated remolded clay considering the timeliness [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [14] 叶朝良,谢玉芳,曹凤旭,等. 饱和状态下海积软土一维渗透固结特征试验研究[J]. *铁道标准设计*, 2021, 65(3):28-33.
- YE Chaoliang, XIE Yufang, CAO Fengxu, et al. Experimental study on permeability and one-dimensional consolidation characteristics of marine soft soil under saturated state[J]. *Railway Standard Design*, 2021, 65(3):28-33.
- [15] 陈晓平,朱鸿鹄,张芳枝,等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(12): 2142-2148.
- CHEN Xiaoping, ZHU Honghu, ZHANG Fangzhi, et al. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(12):2142-2148.
- [16] GANIEV O R, GANIEV R F, UKRAINSKY L E. Enhanced oil recovery: resonance macro- and micro-mechanics of petroleum reservoirs[M]. Wiley, 2016.
- [17] 赖小玲. 压实膨润土膨胀应变时效性试验及模型研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(1):122-127.
- LAI Xiaoling. Test and model research of ageing effects on swelling strain of GMZ01 bentonite[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(1):122-127.