

DOI: 10.11779/CJGE201607018

软土的振动排水固结特性试验研究

苗永红, 李瑞兵, 陈邦

(江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 以江苏镇江某现场软土为研究对象, 室内利用自主设计的动态固结渗透仪模拟饱和软土在振动荷载作用下的响应。在不同排水条件、围压、静荷载、振动荷载和频率下进行排水固结试验, 并同单一的静压排水固结试验进行对比, 重点分析试验过程中的动应变和固结排水效应, 探讨软土的动力固结排水机理。试验结果表明, 振动作用可以明显地提高排水速度, 增加排水量; 固结压力、振动荷载和频率对软土的振动排水效应产生显著的影响。试验结果和振动排水的机理分析, 对当前软土地基处理及其施工工艺设计具有重要的实用价值和指导意义。

关键词: 软土; 振动排水; 频率; 固结

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)07-1301-06

作者简介: 苗永红(1973-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程勘察、设计、监测等相关领域的研究。E-mail: yhmiao@ujs.edu.cn。

Laboratory tests on consolidation behavior of soft soils under vibration drainage conditions

MIAO Yong-hong, LI Rui-bing, CHEN Bang

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

Abstract: The consolidation characteristics of soft soils taken from one site in Zhenjiang City under vibration drainage conditions are investigated. A series of laboratory tests are conducted on the saturated soft soils by using the self-developed dynamic consolidation oedometer. The dynamic consolidation tests are carried out considering the effects of different static loads, confining pressures, vibration loads and frequencies and they are compared with hydrostatic consolidation tests. The dynamic response of strain and consolidation drainage during the tests are focused, and the drainage mechanism is thereafter analyzed. The test results indicate that the vibration process can significantly improve the drainage speed and increase the displacement of consolidation. The drainage for soft soil is evidently affected by the confining pressure, vibration load and frequency. The analysis of tests results and its mechanism is of great importance and practical value for improving the existing foundation treatment techniques.

Key word: soft soils; vibration drainage; frequency; consolidation

0 引言

软土在中国东南沿海、珠江三角洲、长江三角洲等地区分布十分广泛。其特征为天然含水率高、天然孔隙比大、抗剪强度低、压缩性高、渗透性差^[1-2]。软土地基承载力低、沉降变形大、差异沉降显著, 因而是工程实践中遇到的较难处理的地基之一^[3]。近年来, 随着经济的飞速发展, 频繁在软土区修建构筑物, 软土地基处理亦成为工程建设的难题之一。

振动排水固结^[4-5]作为一种复合型软土地基处理方法, 可直接改善软土本身力学性能, 充分发挥土体潜在性能。它是通过地面人工震源建立起来的波动场, 将一定频率的机械波传至某一深度范围的土体, 进而对土层进行大面积振动加固处理, 从而使得软土

地基在波动的作用下能够更加快速、高效地完成固结。雷学文等^[6]提出了软土动力加固机理的4个阶段: ①能量转换与夯坑受冲剪阶段; ②孔隙水激活阶段; ③排水固结阶段; ④触变恢复阶段。张大军^[7]分析了排水系统对于固结排水的影响因素。Menard等^[8]提出动力固结模型, 从力学角度对固结机理进行了解释。Osipov等^[9]通过试验分析了饱和软土在强夯下的触变和触变恢复的微观机理。Hansbo^[10]提出: 对软黏土施转变成自由水。但是由于影响加固效果的因素多, 机制复杂, 目前尚未建立起一套既完整又符合实际的理

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272137); 江苏省六大高峰人才项目(2014JZ011)

收稿日期: 2015-07-09

表 1 淤泥质土物理性质指标

Table 1 Physical properties of slurry soils

土类	含水率 /%	密度 /(g cm ⁻³)	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	颗粒分布/%			
						10~1 mm	1~0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm
淤泥质土	65.02	1.72	1.47	43.06	20.6	27.6	35	32.9	4.5

加动能将会激活可活动粒子, 从而使土体中的结合水论体系, 理论研究成果严重滞后于实践^[11-13]。

鉴于已有该方面的成果较少, 在室内自行设计了动态固结渗透仪, 以模拟软土在一定围压下, 受到振动荷载作用时, 软土中水能够快速排出, 以提高土体的强度。拟在不同固结压力、振动荷载和频率下对软土进行振动排水固结试验研究。

1 软土的振动排水固结试验

1.1 试验概况

试验软土取自江苏镇江长江流域沿岸某地基处理现场。试验前对软土进行了室内物理性质指标测试, 结果见表 1。从表 1 知, 该场地的软土孔隙比大、含水率、液限和塑性都较高。胡华等^[14]曾研究了软土的含水率对其初始剪切力和塑性黏度的影响, 表明随着含水率的增加, 初始剪切应力和塑性黏度逐步降低, 并呈近似线性递减关系。故如何提高软土的排水速率并增加排水量是提高软土强度和实现软土加固的关键。

1.2 试验装置介绍

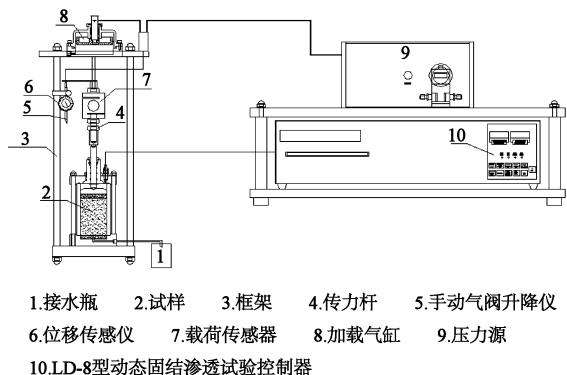
为模拟动力排水固结法加固地基的效果, 设计研发了 LD-8 型动态固结渗透仪, 该设备可同时对软土施加静力和振动荷载, 并对轴向位移、接触应力、排水量等参数进行实时监测和采集, 可对振动荷载作用下饱和软土固结、变形特性进行研究。

动态固结试验装置主要包括控制系统、压力室、加载系统和排水系统, 整个试验装置见图 1。相关参数: 最大静力荷载 2 kN, 最大动力荷载 2 kN, 最大轴向位移 ±25 mm, 最大加载频率 10 Hz, 最大施加围压 0.4 MPa。控制系统包括孔压测量, 位移显示仪、精密压力控制器。加载系统选用了气动伺服系统控制, 主要由空压机、伺服放大器、伺服油缸、伺服阀、高精度拉压传感器、高速 AD/DA 卡和计算机组成, 在试验过程中采用应力控制模式, 可选择多种波形进行加载, 该系统具有结构简单、节能高效、多功能等优点。

1.3 试验方法

为了较好地模拟工程现场的受力情况, 将软土制成直径 61.8 mm, 高度为 128.9 mm 的圆柱体。在开始制作土样时, 先沿模具内侧等距离放置 4 根长 15 cm 宽 1.5 cm 的土工布条并与上下部位透水石相连, 排水通道设置见图 2, 然后填筑土样。采用层厚度约 4 cm

分 3 层填筑的方式进行, 每层填筑完成后用细铁棒轻轻捣 3~5 次。将制备的土样置于上下活塞之间的压力室内。由于土样呈现流塑状态, 其初始强度几乎为 0, 在自重作用下, 会产生较大的竖向和侧向变形, 无法保持土样形状, 使得试验无法进行。为保持试样的直立性, 需在试样外侧设置一层固定的金属环箍(见图 3), 使试样在荷载作用下仅产生轴向变形, 无侧向变形。通过气压对试样施加轴向和侧向围压; 功率放大器将系统提供的一定频率和幅值的电信号进行放大, 并由激振器将电信号转化为轴向激振力, 再经下活塞把轴向激振力施加至试样。由于试样受强度低的限制试验采用分级加载方式, 分为前期静力固结(0~50 min)和振动排水固结阶段(50~400 min)。固结试验完成后, 关闭排水阀, 卸除荷载和围压, 测试土工布间取出的土样含水量平均值。设计固结压力分别为 20, 40, 70, 100 kPa, 用来模拟土体不同的埋深; 施加振动荷载的频率 f 为 1, 2, 5, 7 Hz 共 4 种, 以期寻找针对试验土体的最佳排水效果的频率范围。典型的加载曲线见图 4。设计的试验方案可以用来分析不同围压、振动荷载和频率对软土的振动排水固结特性的影响和效果。



1.接水瓶 2.试样 3.框架 4.传力杆 5.手动气阀升降仪
6.位移传感器 7.载荷传感器 8.加载气缸 9.压力源
10.LD-8型动态固结渗透试验控制器



图 1 试验装置图

Fig. 1 Test apparatus

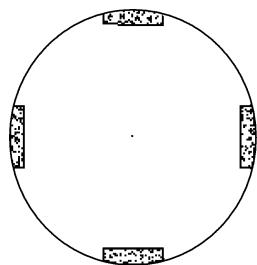


图2 排水通道设置示意图

Fig. 2 Schematic of drainage channels



图3 试件安装

Fig. 3 Set-up of sample

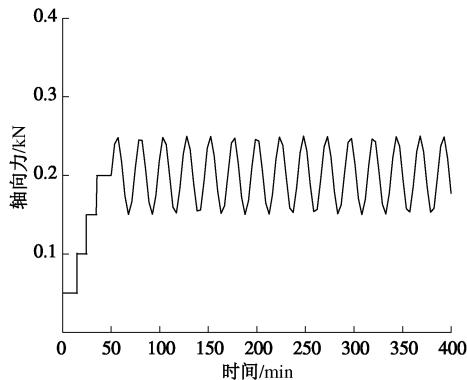


图4 加载曲线

Fig. 4 Loading curve

2 试验结果及分析

图5~14为不同围压、振动荷载和频率的振动排水固结的试验对比, 可用来分析振动排水固结特性。

2.1 围压对试验结果的影响

对比图5~8知, 在相同围压下, 振动排水固结的效果优于静压排水, 即振动作用有利于提高排水速度、增加排水量。尤其是在围压较低时(图5, 6), 振动排水速度明显高于静压排水速度, 甚至可以达33 mL, 提高效率可以达到35%左右。当围压较大时(图7, 8), 振动排水固结的效果仍优于静压排水, 但是排水效率的提高有限。各图中, 静压排水固结阶段排水量几乎一致。但是在振动排水固结阶段, 可以明显地看出静

压排水固结处理后试样的排水曲线会缓慢减缓趋于平稳, 用振动排水固结的处理的试样排水量仍会增大, 排水速率较静压明显加快。比较图5~8还可知, 不同围压下的达到排水趋于稳定所需时间不同。围压越大, 排水趋稳时间越短。

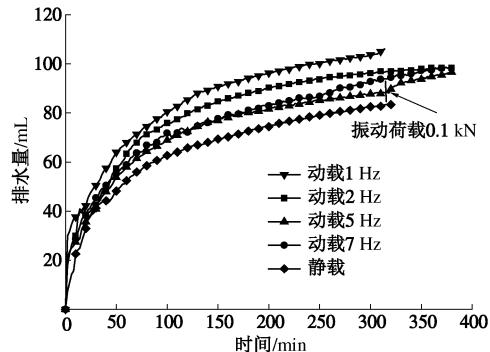


图5 不同频率下排水量与时间关系(围压为20 kPa)

Fig. 5 Variation of drainage volume with time under different frequencies (confining pressure of 20 kPa)

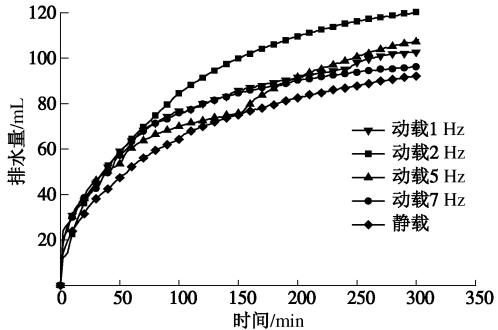


图6 不同频率下排水量与时间关系(围压为40 kPa)

Fig. 6 Variation of drainage volume with time under different frequencies (confining pressure of 40 kPa)

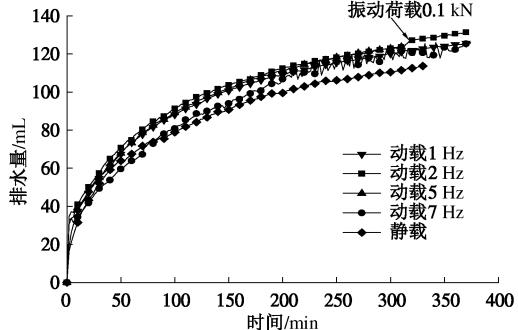


图7 不同频率下排水量与时间关系(围压为70 kPa)

Fig. 7 Variation of drainage volume with time under different frequencies (confining pressure of 70 kPa)

2.2 振动荷载对试验的影响

由图9, 10振动荷载变化时对轴向应变和排水量的影响知, 随着振动荷载的增大, 土体的轴向应变和排水量会有相应地增大, 但是这种改变量不完全一致。在试验前中期(约为整个排水过程的2/3), 振动荷载变化大, 土体形态变化会有所降低。在排水初期, 振动荷载增大, 土体在振动波作用下形成的压力梯度增

大, 排水量增大, 同样的轴向应变也会增加; 在排水后期, 振动荷载增大, 由于此时自由水分含量减少了, 所以轴向应变的变化不明显, 但是在振动作用下, 土体中的结合水转换为自由水, 所以振动荷载增大, 土体排水量仍然有相应的增大, 但是轴向应变变化量会有所降低。所以随着振动荷载增大, 土体中排水量和排水速率就会增大(见图 11)。

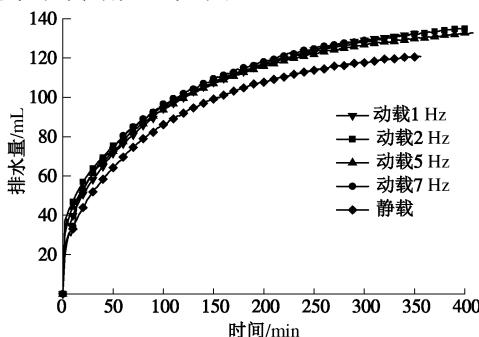


图 8 不同频率下排水量与时间关系(围压为 100 kPa)

Fig. 8 Variation of drainage volume with time under different frequencies (confining pressure of 100 kPa)

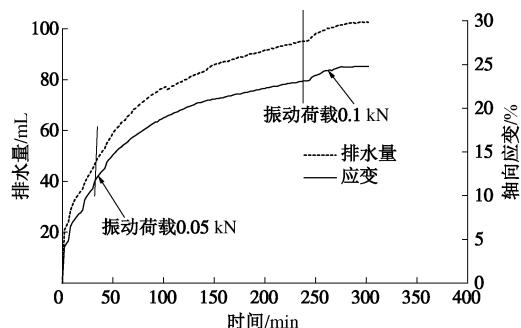


图 9 前中期振幅改变时排水量与轴向应变关系

Fig. 9 Variation of drainage volume and axial strain with time under change of amplitude in early and middle periods

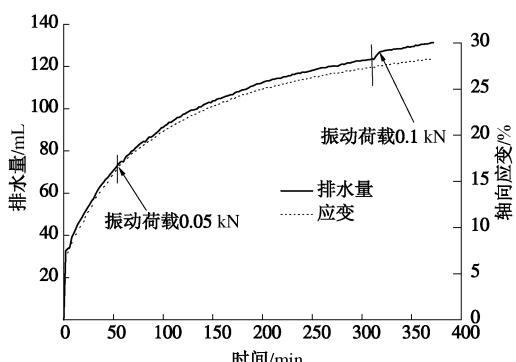


图 10 后期振幅改变时排水量与轴向应变关系

Fig. 10 Variation of drainage volume and axial strain with time under change of amplitude in late period

2.3 频率对试验结果的影响

为了分析振动频率对振动排水固结效果的影响, 试验中采用了 $f=1, 2, 5, 7 \text{ Hz}$ 4 种不同的频率进行试验。对比图 12, 13 的试验结果, 试样在不同的振动

频率下, 排水固结的效果不同。对试样进行加载, 能使得土体产生一定幅值的受迫振动, 当振动的频率与土体本身的频率 ω_0 相近时, 还会引起共振。共振时可以提高振动效应, 同时更好地吸收振动能量, 提高压力梯度, 加快渗流速度。由于土样不均匀及制作扰动的影响, 各试验土样的物理力学性能有一定程度地差别, 导致各土样的固有频率 ω_0 离散性较大。比较图 5, 8 可知, 在围压较低时, 振动频率的对试验结果的影响大; 围压较高时, 振动频率对试验结果影响小。

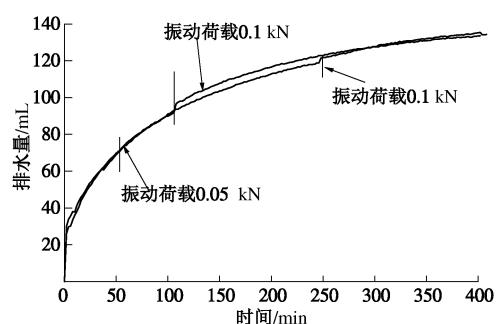


图 11 不同振幅下排水量与时间关系

Fig. 11 Variation of drainage volume with time under different amplitudes

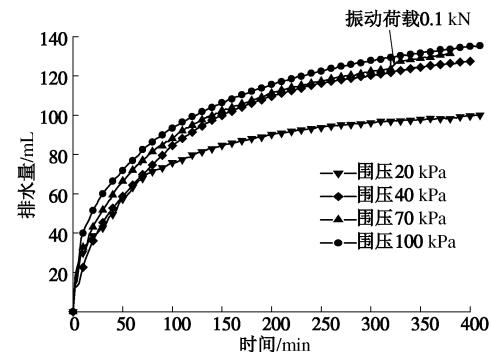


图 12 不同围压下排水量与时间的关系 ($f=2 \text{ Hz}$)

Fig. 12 Variation of drainage volume with time under different confining pressures ($f=2 \text{ Hz}$)

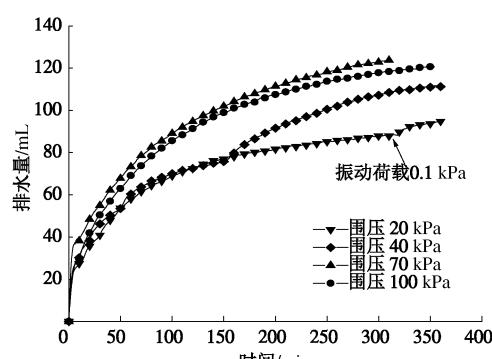


图 13 不同围压下排水量与时间的关系 ($f=5 \text{ Hz}$)

Fig. 13 Variation of drainage volume with time under different confining pressure ($f=5 \text{ Hz}$)

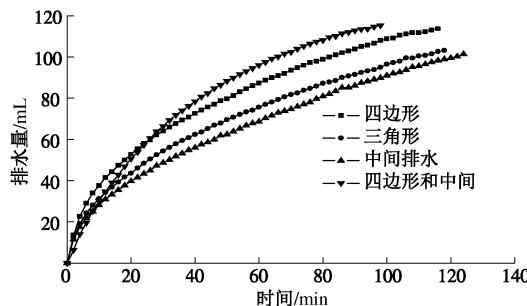


图 14 不同排水条件下的排水变化

Fig. 14 Variation of drainage volume with time under different drainage conditions

2.4 排水条件对固结试验的影响

排水通道的选择也是影响排水量的关键因素。试验选用 1.5 cm 宽土工布条作为排水通道, 分别采用四边加中间排水、四边排水、三边排水以及中间排水的方式(模拟不同排水方式), 来检验排水效果。从图 14 知, 四边加中间排水的效果最优, 四边和三边排水次之, 仅中间排水的效果最差。表明排水通道设置排水效果具有明显影响, 单位面积内设置的排水通道越多, 效果越佳。

2.5 排水固结随时间变化的规律

从试验结果知, 排水固结初期的排水速度非常快, 在整个固结过程的 1/3 时间内(约 0~100 min), 这段由于试样含水率较高, 振动和静压排水固结的排水量都较大, 排水量占总量的 60%~70%以上(即初期固结度近似达 60%~70%)。随着围压的增加, 初期的固结度增大。到了中期段(100~250 min), 静压处理试样的效果就会有所减弱, 排水速率降低, 排水量增加变缓, 但是振动排水固结处理试样的排水速率仍较高, 该阶段静压和振动排水加固试样的差异会愈加明显。试验后期(250~400 min) 排水量渐趋稳定, 振动和静压排水量差别不再扩展。分别测定试验土样上、中、下三部分(约各占土样长度的 1/3) 的含水率, 测试结果见表 2, 发现试样上、下两部分含水率较低, 且相差不大; 中部含水率最高。中部含水率和上下两部分含水率最大差值约 8%。

表 2 试验后试样含水率

Table 2 Water contents for samples after tests

静/动	频率 /Hz	上部含水 率/%	中部含水 率/%	下部含水 率/%
静		45.4	51.6	49.1
动	1	38.3	45.9	42.6
动	2	41.4	47.8	44.3
动	5	42.2	50.1	43.3
动	7	43.5	49.8	45.7

注: 初始含水率为 65.02%。

3 振动排水固结机理研究

对比试验结果的现象并结合波动理论, 对于振动排水固结机理可体现为下述 3 方面。

(1) 振动波在介质中传播时会产生锯形波面的周期性激波, 在波面处, 因纵向距离差异, 在水层纵面会产生微小的附加压力梯度, 上部附加压力大略大于下部。这种微小的附加压力梯度, 一方面减小了水分子的表面张力, 促使其向下流动。另一方面造成了上下部压力差异, 自由水会流向压力小的一侧。而在试验时, 由于试样高度的限制, 在土样上部施加应力时, 试样下部同样受力, 所以就造成了上部水向下渗流, 下部水分向上渗流, 从而水分集中在了试样的中部。这也就解释了试样上、中、下三部分含水率不同, 而且以中部含水率最大, 下部次之, 上部最小。当围压较小时, 由于振动引起的附加压力梯度相对较大, 所以振动排水效果明显; 当围压较大时, 由于振动引起的附加压力梯度相对较小, 振动排水的优势相应的降低。

(2) 振动波穿透能力较强。在振动波的作用下, 土内流体也会随着振动波产生周期性的往复运动, 水和土体的密度差异导致各自产生的振动和加速度不同, 从而使二者产生相对运动。这种运动达到一定强度就会产生撕裂, 从而使得土体中的束缚流体不断向自由流体转化, 而自由流体的排出就变得更加容易。这种现象的产生和振动波所携带的能量有关。振动荷载越大, 振动波所携带的能量就会越大。振动能量越大, 排水固结效果就会越明显, 排出的水量就会越多。试验结果与此分析相符。

(3) 振动作用下渗透性的变化。试验中施加的振动能量可使土中气泡破裂或把它们挤至土体外, 改善了孔隙的连通性, 减少气泡对水流动的阻断, 从而提高土体的渗透性。此外, 振动能量也可以被土中的结合水吸收, 以致削弱固-液相之间的联结, 提升孔隙水的流动性, 有效地改良土的渗透性, 有利于孔隙水的排出, 提高水分排除速度, 加速土体固结。

4 结 论

通过对软土的振动和静压排水固结试验对比和分析, 可得出以下主要结论:

(1) 振动作用对于提高软土的排水固结速度, 增加排水量有明显的效果。固结压力较小时, 振动排水效果明显, 固结压力较高时, 振动排水效果的优势相对降低; 振动作用越早, 振动排水效果越明显。

(2) 振动荷载和频率对振动固结排水试验有重要影响。在围压和频率不变的情况下, 振动荷载增大,

排水速度加快，排水量增加。当施加的振动频率接近土样固有频率时，振动排水效果明显。

(3) 振动排水效应主要体现为 3 方面的作用机制：①振动波在土体中传播导致附加压力梯度的形成，加快自由水分的排出；②振动作用可以促使土中的结合水转变为自由水，有利于排水固结；③振动作用可以改良土的渗透性。

参考文献：

- [1] 薛茹, 李广慧. 动力排水固结法加固软土地基的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(11): 3242 – 3248. (XUE Ru, LI Guang-hui. Study of model tests of soft soil foundation by dynamic drainage consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(11): 3242 – 3248. (in Chinese))
- [2] 经绯, 刘松玉, 邵光辉. 软土地基上路堤沉降变形特征分析[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(6): 728 – 730. (JING Fei, LIU Song-yu, SHAO Guang-hui. The settlement of embankment on soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(6): 728 – 730. (in Chinese))
- [3] 刘勇健, 李彰明, 张丽娟. 动力排水固结法在大面积深厚淤泥软基加固处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 4000 – 4007. (LIU Yong-jian, LI Zhang-ming, ZHANG Li-juan. Application of dynamic drainage consolidation method to reinforcement and treatment of deep and thick silt foundation of large area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 4000 – 4007. (in Chinese))
- [4] WESTERMARK R V, BRETT J F, MALONEY D R. Using downhole vibration stimulation for enhanced oil recovery[J]. World Oil, 2001, **222**(10): 57 – 66.
- [5] KOUZNETSOV O L, SIMKIN E M, CHLINGAR G V, et al. Improved oil recovery by application of vibro-energy to waterflooded sandstones[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998, **19**(3): 191 – 200.
- [6] 雷学文, 白世伟, 孟庆山. 动力排水固结法的加固机理及工艺特征[J]. 岩土力学, 2004, **25**(4): 637 – 639. (LEI Xue-wen, BAI Shi-wei, MENG Qing-shan. Mechanism and technology characteristics of dynamic consolidation by drainage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(4): 637 – 639. (in Chinese))
- [7] 张大军, 李彰明, 刘俊雄. 超软土地基静动力排水固结法处理的竖向排水体系影响因素分析[J]. 施工技术, 2014, **43**(2): 97 – 100. (ZHANG Da-jun, LI Zhang-ming, LIU Jun-xiong. Study on vertical drainage system of static-dynamic drainage consolidation method for super soft soil foundation[J]. Construction Technology, 2014, **43**(2): 97 – 100. (in Chinese))
- [8] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[J]. Géotechnique, 1975, **23**(1): 3 – 18.
- [9] OSIPOV V L, NIKOLAEVA S K, SOKOLOV V N. Microstructural change associated with thixotropic phenomena in clay soils[J]. Géotechnique, 1984, **34**(3): 293 – 303.
- [10] HANSBO S. Dynamic consolidation of mixed fill-acost-effective alternative to piling a case record[J]. Géotechnique, 1996, **46**(2): 351 – 356.
- [11] 白冰, 周健, 曹宇春. 冲击荷载作用下软黏土变形和孔压的若干问题[J]. 同济大学学报, 2001, **29**(3): 269 – 272. (BAI Bing, ZHOU jian, CAO Yu-chun. Some problems on the deformation and pore pressure of soft clay under impact loading[J]. Journal of Tongji University, 2001, **29**(3): 269 – 272. (in Chinese))
- [12] 李彰明, 张丽娟. 动静力排水固结法在淤泥质地基处理工程中的应用[J]. 岩土力学, 2009, **27**(5): 898 – 903. (LI Zhang-ming, ZHANG Li-juan. The application of dynamic-static drainage consolidation method on a silt ground disposal project of Guangzhou[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **27**(5): 898 – 903. (in Chinese))
- [13] 张季超, 梁永康. 动力排水固结法处理软土地基的关键技术研究[J]. 施工技术, 2012, **41**(3): 42 – 45. (ZHANG Ji-chao, LIANG Yong-kang. Study on the key construction technology of dynamic consolidation by drainage for soft soil ground[J]. Construction Technology, 2012, **41**(3): 42 – 45. (in Chinese))
- [14] 胡华. 含水率对软土流变参数的影响特性及其机理分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **19**(3): 134 – 136. (HU Hua. The influencing characteristics and mechanism of water content on rheological parameters of soft-soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, **19**(3): 134 – 136. (in Chinese))