

文章编号: 1000-7598 (2011) 11-3242-07

动力排水固结法加固软土路基的模型试验研究

薛 茹, 李广慧

(郑州航空工业管理学院, 郑州 450015)

摘 要: 软土中孔隙水压力长消规律是研究动力排水固结法加固机制及控制施工效果的关键因素。针对这一问题, 设计了动力排水固结法加固软土路基的模型试验装置并进行了试验。试验模拟某高速公路现场条件, 按不同锤重、不同落距、不同锤底面积等工况分别进行。重点研究了动力排水固结法加固软土路基时, 夯击数、夯击能、夯锤重量及落距等参数在不同组合情况下土体不同深度处孔隙水压力的长消规律。研究表明, 夯击能相同的情况下增加夯击次数将导致孔隙水压力消散减慢, 但保持夯击能不变的情况下增加锤重比增加落距的加固效果好; 高夯击能使孔隙水压力有较大增幅, 相应的加固范围也会增大。为了促使孔隙水压力消散, 施工时宜采取多遍夯击, 逐遍增加夯击能的施工方法。

关 键 词: 动力排水固结; 模型试验; 孔隙水压力; 软土路基; 地基处理

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Study of model tests of soft soil foundation by dynamic drainage consolidation

XUE Ru, LI Guang-hui

(Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In the process of soft foundation treatment using dynamic drainage consolidation, the growth and dissipation of pore water pressure play the decisive role. It is not only primary bases to control the construction schedule, but also is an important parameter to ascertain the strengthening depth and evaluate the reinforcement effect. So the model test, it simulated an expressway site conditions, is carried out with test apparatus designed by ourselves. In order to comprehend the variation of pore water pressure under different parameter combination, these parameters include tamping times; tamping energy; hammer weight; hammer bottom's area and fall distance, the test is divided into several groups. These tests include the pore water pressure of the same or different depths under different or the same tamping times, the pore water pressure of the same depth with different combinations between tamping energy and hammer weight and so on. Research shows that, when keeping tamping energy invariant, increasing tamping times will slower dissipation of pore water pressure. And increasing hammer weight will be more effective than increasing fall distance. The high tamping energy can make pore water pressure has bigger amplitude, and the corresponding reinforcement range will increase. In order to speed up dissipation of pore pressure, construction procedure should adopt the method of "multiple tamping, and successive increase tamping energy".

Key words: dynamic drainage consolidation; model test; pore water pressure; soft soil foundation; foundation treatment

1 引 言

软黏土在我国东南沿海、珠江三角洲、长江三角洲等地区分布十分广泛。其特点是天然含水率高、天然孔隙比大、抗剪强度低、压缩性高、渗透性差^[1]。软黏土地基承载力低、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^[2-3]。近年来, 随着我国国民经济的飞速发展, 在软土地基上修建的高速公路越来越多^[4], 软

土地基处理也成了高速公路建设中的一个难题。

动力排水固结法是岩土工程界根据饱和软黏土的工程特性, 将强夯法和排水固结法结合开创出来的。具体做法就是在软土地基中设置竖向排水体(袋装砂井或塑料排水板), 表面铺设砂垫层, 利用夯锤给地基土施加冲击荷载, 在土体中形成超孔隙水压力, 使水沿着设置在土体中的排水通道排出, 土体快速固结, 从而达到加固地基的目的。该方法自 20 世纪 90 年代初推广以来, 已在我国沿海甚至内地

收稿日期: 2011-03-29

基金项目: 2010 年河南省科技攻关项目(No. 102102210372)。

第一作者简介: 薛茹, 女, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事土木工程、地基处理方面的教学与科研工作。E-mail: xueru@zzia.edu.cn

区得到了成功的应用^[5-12], 特别适合于大面积软黏土地基(如机场、大型厂房、高速公路、铁路等地基)的处理。但由于影响加固效果的因素众多, 加固机制复杂, 目前尚未建立起一套既完整又符合实际的理论体系, 理论研究成果严重落后于实践^[11]。

工程实践表明, 动力排水固结法处理淤泥、淤泥质软土能否取得预期的加固效果, 关键取决于土中孔隙水压力能否迅速消散, 孔隙水能否尽快排出。但这些认识大多是根据为数有限的一些现场孔压监测资料推断而来^[13-15]。亦即, 动荷载作用下孔隙水压力的发展变化规律是土体变形和强度变化的根本因素, 正确分析不同条件下土中孔隙水压力的发展变化规律, 对研究动力排水固结法加固效果及影响因素, 揭示动力排水固结法的机制具有重要的理论意义^[16-19]。

本文利用相似模拟试验, 通过控制动力排水固结法的施工参数, 研究不同情况下土体孔隙水压力的消散规律并与现场试验进行对比, 分析确定最佳施工原则, 用于指导现场施工组织与安排, 同时为动力排水固结法加固机制的研究提供理论依据。

2 模型试验简介

土工模型试验在土力学研究中起着重要的作用, 它能够揭示土体的各种力学行为机制, 可以为岩土工程设计与施工提供依据并进行检验^[20]。

2.1 模型的相似关系

为使模型试验结果能再现原型体系的特性, 准确反映工程实际效果和机制, 采用相似理论中物理模拟的方法, 根据相似原理和量纲分析设计模型的相似系数。

考虑动力固结法加固软土地基的实际施工过程及以往成功的施工经验, 在本次模型试验中确定影响加固效果(加固深度 H 和宽度 B) 和地基夯沉量 s 的参数主要有: 单击能 E 、锤重 Q 、落距 h 、夯击次数 N 、锤底面积 A 、土的干密度 γ_d 、黏聚力 c_p 、内摩擦角 φ_p 及含水率 w ^[21]。据根据现有经验公式和理论分析, 采用量纲分析法, 求出准则方程^[23]为

$$\left. \begin{aligned} f\left(\frac{E}{Qh}, Q, h, N, \frac{A}{h^2}, \frac{\gamma_d h^3}{Q}, w, \frac{c_p h^2}{Q}, \varphi_p, \frac{H}{h}\right) &= 0 \\ f\left(\frac{E}{Qh}, Q, h, N, \frac{A}{h^2}, \frac{\gamma_d h^3}{Q}, w, \frac{c_p h^2}{Q}, \varphi_p, \frac{B}{h}\right) &= 0 \\ f\left(\frac{E}{Qh}, Q, h, N, \frac{A}{h^2}, \frac{\gamma_d h^3}{Q}, w, \frac{c_p h^2}{Q}, \varphi_p, \frac{s}{h}\right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据模型试验箱的尺寸和前面推导的相似指标, 确定锤重的相似系数 $C_Q = 20\ 000$, 落距相似系数 $C_h = 30$ 。其他参数的相似系数分别见表 1。

表 1 模型各参数的相似系数

Table 1 Similarity coefficient of model parameters

夯击能量	夯锤重量	夯锤直径	落距	沉降量	加固范围	加固深度	含水率
600 000	20 000	30	30	30	30	30	1

2.2 试验系统及装置的设计

为模拟动力排水固结法的施工过程, 本模型试验系统由模型试验装置、电桥盒、动态电阻应变仪、数据采集仪及计算机数据分析系统组成。试验装置由夯锤定位装置、试验箱、滑轮及夯锤组成。图 1 为试验装置示意图, 试验箱尺寸为 $45\text{ cm} \times 45\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 。

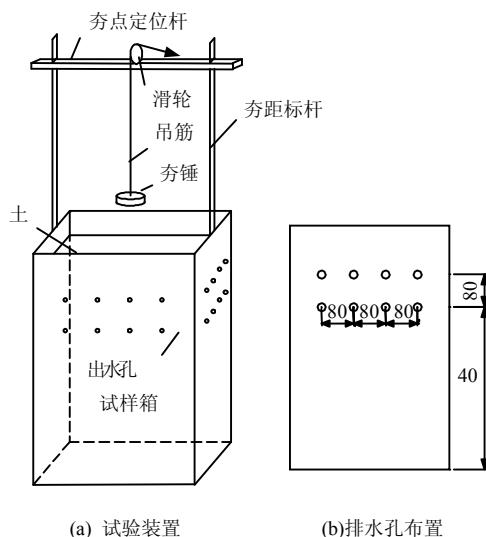


图 1 试验装置示意图(单位: mm)

Fig.1 Sketch of experiment apparatus (unit: mm)

为了保证夯击过程中孔隙水的顺利排出, 分别在试验箱体的 4 个侧面上部打两排直径为 10 mm 的孔作排水孔。排水孔的位置、间距及排水孔布置见图 1(b)。试验时选用重塑土作土样, 砂井用搓成卷的纱布替代, 砂井进入砂垫层 15 mm。夯击作用下土体中的水渗入砂井, 由砂井排入砂垫层, 再由箱体四周的排水孔排出。

根据动力排水固结法的实际施工参数, 按照表 1 确定的各参数的相似系数进行模型尺寸和试验参数设计。试验中采用了两种重量的夯锤, 直径分别为 8.3 cm 及 6.7 cm, 选用密度为 7.80 g/cm^3 的普通钢制成, 根据夯锤直径相似系数 $C_d = 30$, 分别对

应实际工程中 160 kN 及 140 kN 重夯锤。

2.3 试验用土的取用

本模型试验直接从现场取土。根据本课题的研究任务,选定珠江三角洲某高速公路施工现场为动力排水固结法现场试验区,模型试验土样便从试验区现场取回。取回的原状土,土层均匀性差,土样离散性大,不便于试验结果的对比分析,试验中将原状土重塑制成试验用土样。

2.4 模型制作及传感器的布设

模型中孔隙水压力传感器要在装土的同时埋设。首先,将用于替代砂井的纱布条按一定间距固定在试验箱底部,然后将制备好的软土分层放入试验箱内,土的总厚度为 400 mm,同时把孔隙水压力传感器按每组试验的要求埋入指定位置。袋装砂井高出土层约 15 mm,软土层顶面上铺 86 mm 的中粗砂层。将孔隙水压力传感器与桥盒连接,并将传感器的电缆线引到试验箱外。组桥并调试,读取初读数。测点及传感器埋设位置见图 2 的试验箱剖面图。

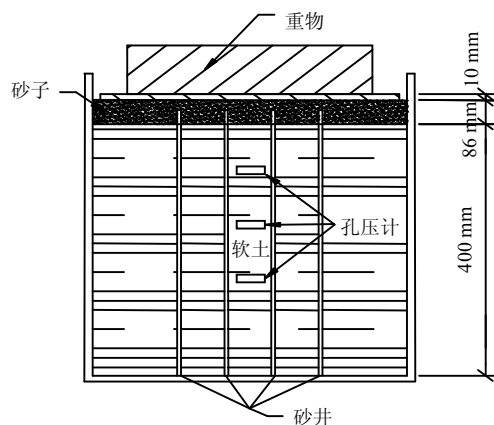


图 2 试验箱剖面图
Fig.2 Sectional drawing of testing box

3 试验方案及结果分析

为了研究不同施工条件对软土变形特征及加固效果的影响程度,将试验按不同锤重、不同落距、不同锤底面积等进行安排,试验内容要求能反映如下问题:

- (1) 不同夯击数对孔隙水压力长消规律的影响;
- (2) 同一夯击参数对不同深度处孔隙水压力长消规律的影响;
- (3) 相同夯击能、不同锤重落距组合对同一深度孔隙水压力长消规律的影响;
- (4) 不同夯击能、相同锤重对同一深度孔隙水

压力长消规律的影响。

3.1 试验方案

按照试验内容将试验安排为 4 组共 7 个试验,各组试验参数见表 2 所示。

表 2 模型试验方案
Table 2 Model test grouping sheet

试验 方案	夯击能 /(N·m)	锤重 /N	落距 /cm	夯锤尺寸 /cm	击数 /次
①	2.50	8.0	32	8.3	2
	2.50	8.0	32	8.3	4
	2.50	8.0	32	8.3	6
②	2.50	8.0	32	8.3	4
	3.33	8.0	42	8.3	5
③	3.33	6.9	48	6.7	5
	2.50	8.0	32	8.3	5
④	3.33	8.0	42	8.3	5

3.2 试验数据处理

动力排水固结法加固软土地基是一个瞬态响应问题,夯击过程中孔隙水压力的消散过程大致分为 3 个阶段:夯击阶段、压力增长阶段、消散阶段。夯击过后孔隙水压力在极短的时间内上升,为了采集到冲击瞬间孔隙水压力的峰值,就需要采用较高的数据采样频率,而在孔压的消散阶段,压力变换缓慢,所需采样频率较低。但受仪器限制,在采集过程中不能更改采样频率,致使采集到频率较高的试验数据,数据量将会很大,且数据中含有大量噪声,为此需要对获取的数据进行处理。

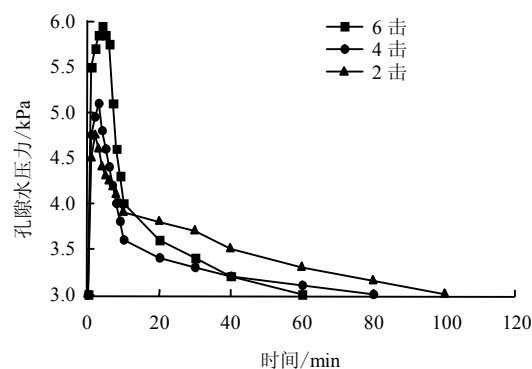
利用小波变换分析数据的变化趋势,就是将隐藏在噪声或其他高频信号中的信号显示出来。由于信号的发展趋势是由信号的低频部分所表征的,通过小波分解,可以去除那些干扰信号,最终显现出有用信号的真面目^[24]。对本研究中采集的孔隙水压力数据应用 db5 小波分解到 12 层。对第 12 层低频分解系数进行重构。所得结果即可很好地显示土体固结过程中孔隙水压力的长消规律^[25]。

3.3 试验结果分析

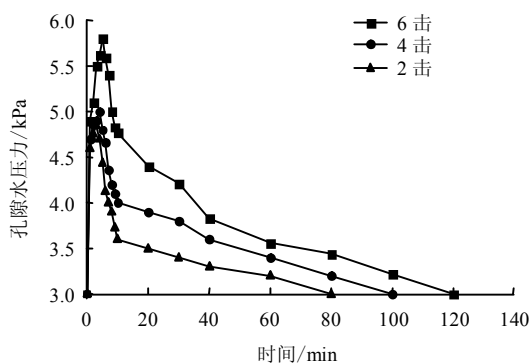
图 3 为试验方案①中第 1 遍夯击、第 2 遍夯击时夯击数对孔隙水压力长消规律的影响情况。两遍夯击时间间隔以孔隙水压力增幅基本消散为准。可以看出:第 1 遍夯击时,2 击时孔隙水压力的增幅较小,且消散慢,这是因为土体没有完全破坏,不能形成畅通的排水通道。第 2 遍夯击时,孔隙水压力增幅较第 1 遍增大,消散时间也缩短;4 击时孔隙水压力增幅介于 2~6 击之间,消散时间也介于二者之间。第 2 遍夯击时,增幅较第 1 遍时小一些,消散时间也增长。6 击时孔隙水压力增幅最大,但

消散较 4 击慢, 且夯坑周围出现明显裂缝。第 2 遍夯时, 孔隙水压力增幅较第 1 遍略小, 可认为经第 1 遍夯击后土体已变密实, 同样夯击能下孔隙水压力增值较小。

显然一味地增加夯锤击数并不十分有效, 击数过多, 可能导致孔隙水压力消散减慢, 且可能破坏土体, 致使土体承载力降低, 变成“橡皮土”。故实际施工时应遵循“少击多遍”的原则。



(a) 第 1 遍夯



(b) 第 2 遍夯

图 3 不同夯击数对孔隙水压力的影响

Fig.3 Influence of different tamping numbers on pore water pressure

图 4 为试验方案②中强夯对不同深度土体处孔隙水压力长消规律的影响情况。可以看出, 在淤泥上部接近砂垫层附近孔隙水压力急剧上升, 增幅较大, 停止夯击, 孔隙水压力立即开始消散, 消散最快。随着深度增加, 孔隙水压力增幅减小, 消散也减慢。由于下部传感器所处位置以下也是淤泥, 下面可视为不透水层, 故孔隙水压力消散最慢。主要原因是: ①上部测点因距离夯点较近, 受夯击能最大, 故增加幅值最大。但上部因为距离水平排水通道砂垫层近, 排水路径短, 故消散相对较快。②下部土体因位于淤泥深处, 受夯击能小, 且下部没有水平排水层, 所以孔隙水压力增量小且消散慢。

图 5 为试验③中不同夯击能对孔隙水压力的长消规律的影响情况。可以看出, 高夯击能使得孔隙水压力有较大的增幅, 低夯击能孔隙水压力增幅相应也较小。从动量定理或能量守恒原理的角度来考虑, 夯击能越大, 由夯锤震动产生的波动能量也就越大, 相应地夯锤落地时对土体产生的动压力也就越大, 强夯的有效加固范围也就越大。

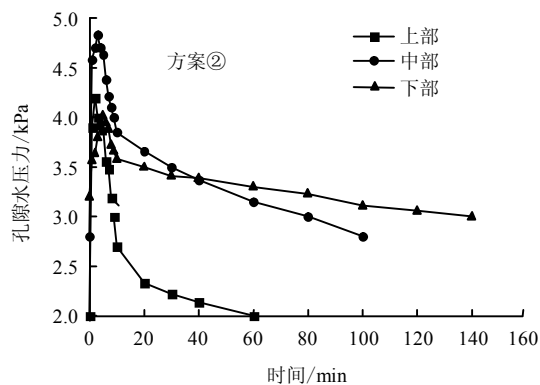


图 4 不同深度孔隙水压力的变化

Fig.4 Variations of pore water pressure in different depths

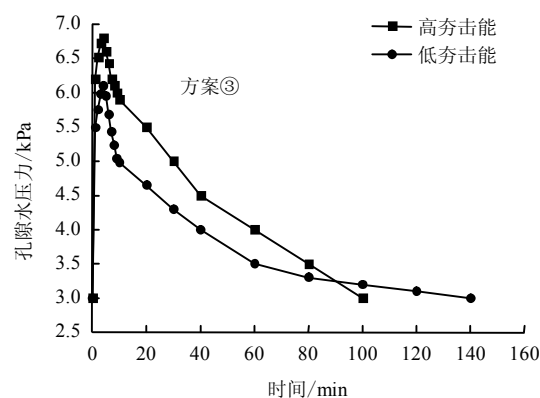


图 5 不同夯击能对孔隙水压力的影响

Fig.5 Influence of different tamping energies on pore water pressure

图 6 为试验方案④中不同锤重、落距组合对孔隙水压力长消规律的影响情况。可以看出, 夯击能不变情况下, 锤重增加, 落距减少, 孔隙水压力增幅大但消散慢, 这是因为重锤的直径比轻锤直径大 (现场也是如此), 相同夯击能下, 较大面积的重锤对土体水平方向的影响范围相应也大, 土体中孔隙水压力产生的范围也大, 分布区内的孔隙水压力相互作用影响了消散, 从而使得孔压消散时间延长。

显然, 为了提高加固效果, 增加锤重往往比增加落距更有效。这一点在工程实践中已得到印证^[26]。这对于研究水平方向加固范围也是很有意义

的, 因为水平方向加固范围对合理选取夯点间距有着直接的指导意义。尤其在大面积强夯施工过程中, 相邻夯坑的孔隙水压力必然相互干扰, 影响孔隙水压力的消散, 而且夯点间距选择不当, 还会引起孔压的相互叠加, 延长孔压的消散。

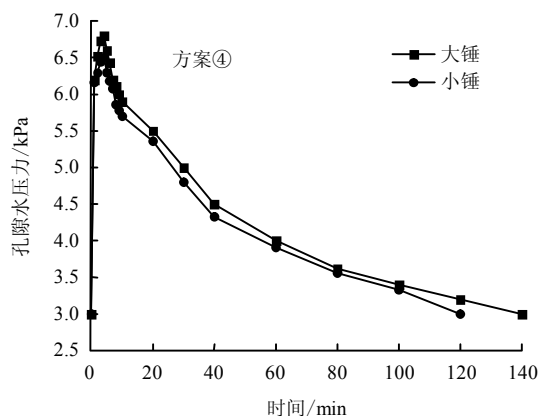


图6 不同锤重与落距组合对孔隙水压力的影响

Fig.6 Influence of combining with different falling heights and hammer weights on pore water pressure

试验结果还显示, 夯锤夯击后期, 尽管孔隙水压力消散减慢, 但却继续保持下降趋势。表明上部砂垫层对地基继续施加静力荷载, 使孔隙水压力会进一步消散, 淤泥强度也会进一步提高。

4 现场试验验证

为了更深入研究动力排水固结法加固软基的加固效果及其影响因素, 同时验证模型试验段准确性, 课题组在珠江三角洲某高速公路工地进行了现场试验研究。该项目在夯击前后及夯击过程中做了静力触探、轻便触探、标贯、钻孔取样以及孔隙水压力与沉降观测等试验与测试工作。施工顺序为: 先进行沟塘回填、平整场地等预处理, 铺设砂垫层后进行第1、第2遍点夯。选用夯锤直径为2.5 m、重量为16 t的夯锤。前后两遍的夯击能分别为1 000、1 800 kN·m, 前后两遍夯击的间隔时间以孔隙水压力消散程度来控制。

试验区在3个断面不同深度(分别位于淤泥层上中下位置)共埋设了21个孔隙水压力计, 用以观察动力排水固结法对不同深度土体孔隙水压力的影响情况。图7为在断面II测试得到的土体不同深度(2.0、3.2、4.0、6.2、10.0 m)处孔隙水压力-时程曲线。

比较图7与图4可以看出, 孔隙水压力的长消曲线形状与室内模型试验一致, 孔隙水压力增长较

大的区域集中在深度为10.0 m以内, 并且在此范围内具有随着深度增加, 孔隙水压力增加幅度变小的规律。由此可见, 模型试验可以较准确地模拟现场的施工情况, 其研究方法可以用于动力排水固结法加固机制的研究。

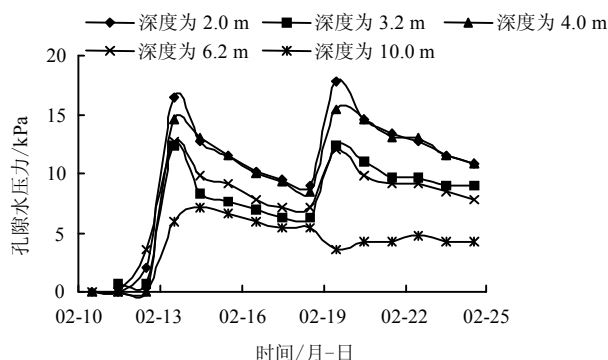


图7 II断面孔隙水压力-时程曲线

Fig.7 Time-history curves of pore water pressure at section II

5 结 论

(1) 夯击能相同的情况下, 增加夯锤击数可能导致孔隙水压力消散减慢, 且可能破坏土体, 致使土体承载力降低, 变成“橡皮土”, 故施工时应遵循“少击多遍”的原则。

(2) 不同夯击能对孔隙水压力的长消规律影响不同。高夯击能使得孔隙水压力有较大的增幅, 低夯击能孔隙水压力增幅相应也较小。从动量定理或能量守恒原理的角度来考虑, 夯击能越大, 由夯锤震动产生的波动能量也就越大, 相应地夯锤落地时对土体产生的动压力也就越大, 强夯的有效加固范围也就越大。

(3) 不同锤重、落距组合对孔隙水压力长消规律的影响是, 夯击能相同的情况下增加锤重比增加落距的加固效果好。

(4) 同夯击能下, 较大面积的重锤对土体水平方向的影响范围相应也大, 土体中孔隙水压力产生的范围也大, 分布区内的孔隙水压力相互作用会影响孔隙水压力的消散, 从而延长消散实践。

(5) 室内模拟试验方法的探索对动力排水固结法加固机制的研究有着较大的理论与实际意义。试验结果表明, 动力排水固结法施工应遵循以下原则: 设置良好的排水系统, 夯击时应采用少击多遍, 逐遍增加夯击能的施工方法; 为了有利于孔隙水压力的消散, 应采用较小夯锤直径, 且应从中间向两边夯击。

参 考 文 献

- [1] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1991.
- [2] 曾国熙. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑出版社, 1992.
- [3] 林楚琴. 沿海地区软土地基及其处理技术[J]. 西部探矿工程, 2001, 71(4): 43—44.
LIN Chu-qin. Soft soil foundation in coastal areas and its processing technology[J]. **Journal of Western Exploration Engineering**, 2001, 71(4): 43—44.
- [4] 徐永福, 陈冠军. 高速公路路基软土的特性及其处理方法比较[J]. 山西交通科技, 1998, (4): 23—28.
XU Yong-fu, CHEN Guan-jun. The characteristics of highway subgrade soft soil and its processing method comparison[J]. **Shanxi Transportation Science Technology**, 1998, (4): 23—28.
- [5] 梁惠达, 张远荣. 深圳市 HB 大道软土路基处理方法的比选[J]. 铁道建筑, 2002, (5): 9—10.
LIANG Hui-da, ZHANG Yuan-rong. The comparison and election of Shenzhen HB avenue soft soil subgrade treatment methods[J]. **Railway Construction**, 2002, (5): 9—10.
- [6] 周国然, 高宏兴, 吴心怡. 上海地区软基处理的现状及发展趋势[J]. 港工技术与管理, 2003, (3): 1—4.
ZHOU Guo-ran, GAO Hong-xing, WU Xin-yi. Current situation and development tendency of soft foundation treatment in Shanghai[J]. **Technology and Management of Port Engineering**, 2003, (3): 1—4.
- [7] 周凡. 汕头港广澳港区陆上强夯软土地基加固处理方法[J]. 港工技术, 2003, (2): 51—52.
ZHOU Fan. Reinforcement treatment method of soft soil foundation in onshore district using tamping in Shantou, Hong Kong, Guangzhou and Macao[J]. **Technology of Port Engineering**, 2003, (2): 51—52.
- [8] 赵江倩, 陈金昌. 强夯加排水法加固软土地基的效果分析[J]. 江西水利科技, 2001, 27(1): 50—53.
ZHAO Jiang-qian, CHEN Jin-chang. Effect analysis of improving the soft soil foundation by the dynamic compaction and drainage method[J]. **Jiangxi Water Conservancy Science and Technology**, 2001, 27(1): 50—53.
- [9] 陈建业. 强夯处理软土地基的应用与效果分析[J]. 山西建筑, 2003, 29(5): 29—30.
CHEN Jian-ye. Application and effect analysis of soft soil foundation treatment using tamping method[J]. **Shanxi Building**, 2003, 29(5): 29—30.
- [10] 陈永东. 强夯置换法加固软土地基工程实例[J]. 甘肃科技, 2004, 20(2): 99—100.
CHEN Yong-dong. Engineering project of soft soil foundation reinforcement using tamping substitution method[J]. **Gansu Science and Technology**, 2004, 20(2): 99—100.
- [11] 胡瑞林. 软黏土动力排水固结机制研究综述[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 45—51.
HU Rui-lin. Research review of soft clay dynamic drainage consolidation mechanism[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2006, 14(1): 45—51.
- [12] 孟庆山, 汪稔. 软土动力固结理论研究及应用的现状[J]. 建筑技术, 2005, 36(4): 179—185.
MENG Qing-shan, WANG Ren. Theoretical research and applied current situation of soft soil dynamic consolidation[J]. **Architectural Technology**, 2005, 36(4): 179—185.
- [13] 张明. 强夯垫层法加固软土的机制探讨与工艺要点[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2004, 25(2): 90—97.
ZHANG Ming. Mechanism discussion and technology essential of soft soil reinforcement using tamping cushion method[J]. **Postgraduate Journal of Zhongshan University (Natural Science, Medical Edition)**, 2004, 25(2): 90—97.
- [14] 郑颖人, 李学志, 冯遗兴, 等. 软黏土地基的强夯机理及其工艺研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 571—579.
ZHENG Ying-ren, LI Xue-zhi, FENG Yi-xing, et al. Tamping mechanism and technical study of soft clay foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(5): 571—579.
- [15] 白冰. 冲击荷载作用下饱和软黏土孔压增长与消散规律[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 33—38.
BAI Bing. The growth and dissipation regularity of pore water pressure of saturated soft clay under impact load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(2): 33—38.
- [16] 雷学文, 王吉利, 白世伟, 等. 动力排水固结中孔隙水压力增长和消散规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 79—82.
LEI Xue-wen, WANG Ji-li, BAI Shi-wei, et al. The growth and dissipation regularity of pore water pressure in dynamic drainage consolidation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(1): 79—82.

- [17] 雷学文, 白世伟, 孟庆山, 等. 动力排水固结法加固机理的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 1089—1091.
LEI Xue-wen, BAI Shi-wei, MENG Qing-shan, et al. Numerical analysis of reinforcement mechanism of dynamic drainage consolidation method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp. 1): 1089—1091.
- [18] 孟庆山, 汪稔, 王吉利. 动力排水固结法处理软土地基孔压和变形问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1738—1741.
MENG Qing-shan, WANG Ren, WANG Ji-li. Research of pore water pressure and deformation of soft soil foundation treatment using dynamic drainage consolidation method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1738—1741.
- [19] 孟庆山, 汪稔, 陈震. 淤泥质软土在冲击荷载作用下孔压增长模式[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1017—1022.
MENG Qing-shan, WANG Ren, CHEN Zhen. Growth model of sludge soft soil under impact load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1017—1022.
- [20] 左东启. 模型试验的理论与方法[M]. 北京: 水利电路出版社, 1984.
- [21] 费香泽, 王钊, 周正兵. 黄土强夯的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 437—441.
FEI Xiang-ze, WANG Zhao, ZHOU Zheng-bing. Testing research of loess tamping[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 437—441.
- [22] 崔广心. 相似理论与模型试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [23] 飞思科技产品研发中心. MATLAB 6.5 辅助小波分析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [24] 薛茹, 毛灵涛. 小波分析在动态实验数据处理中应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(1): 59—62.
XUE Ru, MAO Ling-tao. Application of wavelet analysis in dealing with dynamic experimental data[J]. **Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2007, 22(1): 59—62.
- [25] 杨建国, 彭文轩, 刘东燕. 强夯法加固的主要设计参数研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1335—1339.
YANG Jian-guo, PENG Wen-xuan, LIU Dong-yan. Research of choosing tamping factors for dynamic consolidation method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1335—1339.
-
- 上接第 3241 页
- [10] 殷德顺, 任俊娟, 和成亮, 等. 一种新的岩土流变模型元件[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1899—1903.
YIN De-shun, REN Jun-juan, HE Cheng-liang, et al. A new rheological model of element for geomaterials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1899—1903.
- [11] 殷德顺, 任俊娟, 和成亮, 等. 基于分数阶微积分理论的软土应力—应变关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2973—2979.
YIN De-shun, REN Jun-juan, HE Cheng-liang, et al. Stress-strain relation of soft soil based on fractional calculus operators theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 2973—2979.
- [12] 齐海涛, 徐明瑜. 分数阶黏弹性模型的蠕变柔量: 广义 Zener 和 Poynting-Thomson 模型[J]. 山东大学学报(理学版), 2004, 39(4): 42—48.
QI Hai-tao, XU Ming-yu. Creep compliance of fractional viscoelastic models: generalized Zener and Poynting-Thomson model[J]. **Journal of Shandong University (Natural Science)**, 2004, 39(4): 42—48.
- [13] ERDÉLYI. Higher transcendental functions, Vol. III[M]. New York: McGraw-Hill, 1955.
- [14] 陈沅江, 潘长良, 曹平, 等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 209—214.
CHEN Yuan-jiang, PAN Chang-liang, CAO Ping, et al. A new mechanical model for soft rock rheology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 209—214.
- [15] 丁志坤, 吕爱钟. 岩石黏弹性非定常蠕变方程的参数辨识[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 1): 37—40.
DING Zhi-kun, LU Ai-zhong. Parameter identification of non-stationary creep equation of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.): 37—40.
- [16] 楼志文. 损伤力学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [17] 罗润林, 阮怀宁, 孙运强, 等. 一种非定常参数的岩石蠕变本构模型[J]. 桂林工学院学报, 2007, 27(2): 200—203.
LUO Run-lin, RUAN Huai-ning, SUN Yun-qiang, et al. Nonstationary parameter creep constitutive model of rocks[J]. **Journal of Guilin University of Technology**, 2007, 27(2): 200—203.
- [18] 杨彩红, 毛君, 李剑光. 改进的蠕变模型及其稳定性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(1): 92—97.
YANG Cai-hong, MAO Jun, LI Jian-guang. Modified creep model and its stability[J]. **Journal of Jilin University(Earth Science Edition)**, 2008, 38(1): 92—97.