

基于微观结构的软土地基加固效果评价^{*}

周翠英¹, 林春秀², 刘祚秋¹, 李亚生², 丘建金³, 李德福²

(1. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275;
2. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275;
3. 深圳市勘察测绘院, 广东 深圳 518028)

摘 要: 以深圳市宝安新中心区软基处理工程为研究对象, 根据强夯、堆载联合塑料排水板地基处理过程, 取得实验过程和地基处理后软土再压缩的电镜扫描 (SEM) 图片, 通过图像处理和定量化研究, 得到土体微结构参数 (孔隙分布分维 d) 及其随压力变化的规律, 从而, 对施工场地不同的地基处理方案进行了加固效果对比分析。结果表明: 堆载预压法对软土地基的加固效果在研究的时间段内要优于强夯处理法。

关键词: 软土; 微观结构; 室内固结试验; 孔隙分布分维; 堆载预压; 动力固结 (强夯)

中图分类号: TU471 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 05-0024-04

1 工程背景

1.1 场地概况与软基处理设计

工程处于宝安新中心区西乡海滨地带, 拟建裕安路全长 500.27 m。在裕安路南侧, 有在建的体育馆。地基主要由高含水量淤泥组成, 厚度 3.5~6.7 m, 为典型沿海淤泥软土层, 物理力学性质极差。按照设计, 裕安路采用的是动力排水固结法处理软土地基。首先进行第一级填土和夯实处理, 填土高度 30 cm; 夯点按梅花型布置, 夯实 2 遍, 第 2 遍的夯点跳开第 1 遍夯点进行, 这样, 第 1 级填土和夯实后, 基本满夯 1 遍; 接着, 按照与第 1 级类似的填土和夯点设计进行第 3 遍夯实处理; 最后, 按照 2 锤间重叠 1/3 的设计进行满夯处理。

附近的体育馆采用的是堆载预压法处理软土地基——在施工面铺设 30~50 cm 的砂垫层后分期增加填土荷载 (填土标高达 3 m 以上)。堆载预压时间超过 10 个月。本文主要是基于动力固结和堆载预压中微观结构的变化分析进行地基加固效果评价。

2 软土微观结构试验研究

本文对不同地基处理状态及室内压缩实验下的粘土进行电镜扫描 (SEM), 利用图像处理技术^[1,2]对土体微观结构图像进行处理, 获取微观结构的量化参数如颗粒分维、孔隙分布分维^[3,4], 该方法是

当前进行土体微结构研究的主要方法^[5]。

2.1 试验设计方案

为了根据微观结构变化规律进行地基加固效果对比分析及评价, 本次研究设计了 3 种状态的土体微观结构测试方案, 以便进行地基加固效果对比分析, ①天然状态; ②强夯区地基处理后、强夯影响带处理后的以及堆载预压状态下的微观结构测试和分析; 强夯处理带及其影响带于最后一遍满夯结束 10 d 后采样, 堆载预压地基处理区于堆载预压时间超过 10 个月后采样。分别在处理结束后采取样品, 直接进行电镜扫描; ③天然状态及不同地基处理状态后室内压缩实验, 实验方案见表 1。采取实验后的样品, 对垂直和平行压力面进行扫描电镜分析, 观察土的微观结构变化特征。

表 1 室内压缩实验设计
Tab 1 The design of consolidation experiment

土样类别	最大压力 kPa	加压步长 kPa	压力级数
天然土样 N	300	50, 100	4
强夯土样 C	800	100	6~7
强夯影响带土样 K	800	100	6~7
超载预压土样 T	800	100	6

2.2 微结构测试分析

把天然和室内固结试验的样品经真空冷冻干燥

^{*} 收稿日期: 2004-08-12
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59809037); 广东省自然科学基金资助项目 (980274); 广东省科技攻关项目
专项基金资助项目 (2001B30903)
作者简介: 周翠英 (1963 年生), 女, 博士, 教授, 博士生导师; E-mail: eeszczy@zsu.edu.cn, stdzhcy@zsu.edu.cn

后，分别制成垂直压力面和平行压力面的底面平整、厚约 3 mm 的薄片进行扫描电镜分析（SEM），得到电镜扫描相片。本次试验共获得 SEM 相片 658 张，从放大倍数来看分为 800 倍、3 000 倍、20 000 倍。方便起见，统一采用 3 000 倍的照片进行计算机图像处理，提取出微结构定量参数——孔隙分布分维。孔隙分布分维的计算采用分形理论的 Sandbox 方法进行求取。

3 微结构试验结果分析

3.1 强夯地基处理后再施加不同压力时孔隙分布分维的变化规律

对强夯地基处理后不同深度的土样求取其微观结构的孔隙分布分维值（图 1）。可以看出：在一定的压力变化范围内，随着压力的增加，孔隙分布分维呈现出下降的趋势；当压力增大到一定的程度时达到临界点时，分维值的变化速率降低到最小值，并逐渐趋于稳定状态。

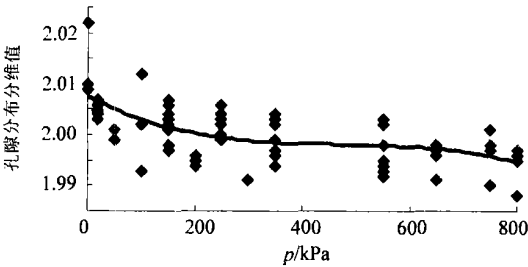


图 1 强夯处理后土样的孔隙分布分维随压力变化图
Fig. 1 Pressure-varying curve of pore distributed fractal dimension

3.2 强夯影响范围内土样再施加不同压力时孔隙分布分维变化规律

对强夯影响范围内不同深度的土样，求取其微结构孔隙分布分维值，得到图 2。可以看出，该曲线与强夯区的关系曲线存在差别，其差别主要体现在临界点压力之后，强夯影响范围内的土样曲线呈现略微的反翘，但总体趋势是趋于稳定的。说明强夯影响带的土体较之强夯区的土体排水固结速度慢，且尚未达到固结稳定状态。

3.3 堆载预压后再施加不同级别压力时孔隙分布分维的变化规律

同理，对堆载预压后不同深度的土样，求取其微结构孔隙分布分维值，得到图 3。由图 3 可以看出，该曲线的后半段不存在反翘现象，说明该种地基处理状态下的土体已经达到固结稳定状态，排水固结过程趋于完成。

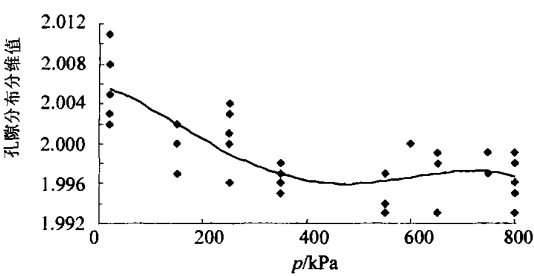


图 2 强夯影响范围内土样的孔隙分布分维变化图
Fig. 2 Pressure-varying curve of pore distributed fractal dimension

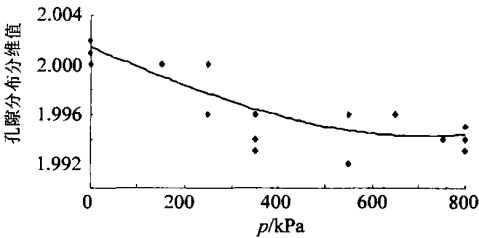


图 3 堆载预压后样的孔隙分布分维随压力变化图
Fig. 3 Pressure-varying curve of pore distributed fractal dimension

4 软土地基加固效果评价

4.1 软土地基加固效果的微观结构分析与评价

图 4 分别是天然软土、强夯区软土、强夯影响带软土、堆载预压软土在室内压缩固结前后的微结构电镜扫描相片，对比研究表明：经过 3 种地基处理措施后的 3 组土样明显比天然状态的土样致密得多，颗粒不再是多孔浑圆状，孔隙更小、形状更加规则，集合体结构排列呈现出明显的成层性。从天然软土到强夯影响带软土，到强夯区软土，再到堆载预压软土，土样的致密程度是依次增加的，特别是后两者比前两者密实，颗粒集合体排列更紧密，说明强夯、超载预压比单纯的降水作用更有效；而堆载预压软土在最大固结压力下，颗粒集合体比其它土样更加细密，孔隙更小、连通性更差，是由于堆载预压进行到了后期，长时间的压密作用使得软土的整体结构发生了根本性的变化，比起仅进行了几个月的强夯施工来，加固效果更好。

由此得出：堆载预压软土的加固效果优于强夯区软土，而强夯区软土的加固效果优于强夯影响带软土。

4.2 软土地基加固效果的孔隙分布分维值分析

表 2 和图 5 列出了各个地基处理状态下的土样在施加各级压力时的孔隙分布分维值的平均值。

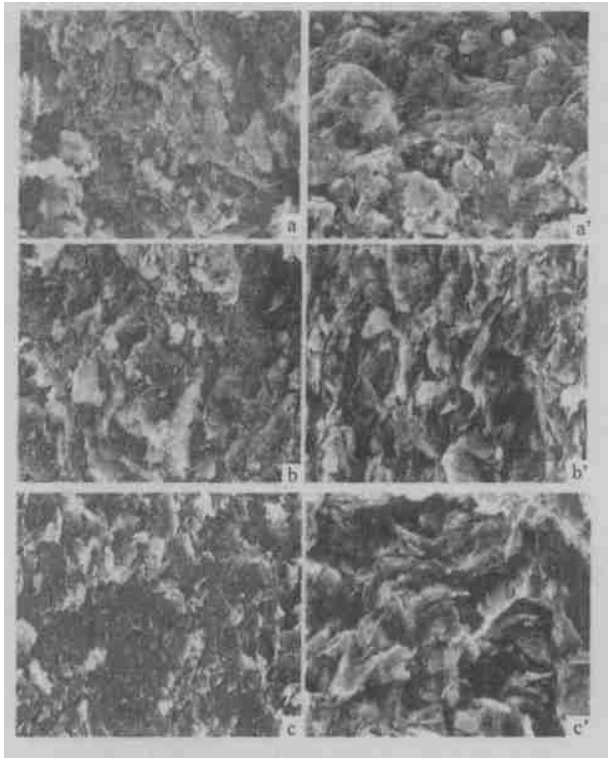


图 4 天然状态 (a) 强夯影响带 (b) 以及强夯处理区 (c) 软土室内压缩前后微观结构变化图

Fig. 2 Variation of microstructures before and after consolidation of soft clay

由表 2 和图 5 可以看出：同一地基处理措施下的土样，其孔隙分布分维值随压力的增加而减少；同时，在相同的压力条件下，3 种地基处理状态的土样的分维值存在如下规律：堆载预压软土孔隙分布分维值 d_T 强夯区软土孔隙分布分维值 d_C 强夯影响带软土孔隙分布分维值 d_K 。个别离散点的存在可能是因为加压过程中或采样及制样过程中的干扰所致。因此得到：堆载预压软土的加固效果好于强夯区软土，而强夯区软土的加固效果好于强夯影响带软土。

表 2 软土不同地基处理后孔隙分布分维变化表

Tah. 2 Pore distribution fractal dimension variations of different reinforcement methods at different pressures

p/kPa	孔隙分布分维值		
	堆载预压软土	强夯区软土	强夯影响带软土
0	2.0058	2.0058	2.0010
150	2.0025	1.9997	2.0000
250	2.0023	2.0008	1.9987
350	1.9983	1.9998	1.9963
550	1.9975	1.9967	1.9943
650	1.9964	1.9958	1.9960
750	1.9947	1.9964	1.9940
800	1.9962	1.9940	1.9947

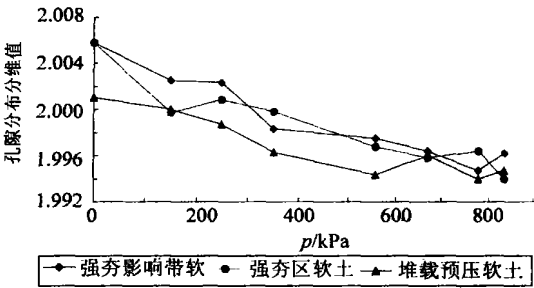


图 5 软土不同地基处理后在不同压力作用下孔隙分布分维变化图

Fig. 5 Variation of pore distribution fractal dimension of soft clays by different reinforcement methods at different pressures

5 结 论

(1) 对不同地基处理方案的软土进行电镜扫描和图像处理，通过定义的孔隙分维计算，得到土体微结构参数（孔隙分布分维 d ）及其变化规律，从而，对施工场地不同地基处理方案的加固效果进行了对比分析。结果表明：采用孔隙分布分维表征软土的微观结构变化是适宜的。压力和孔隙分布分维的变化存在良好的对应关系，即：随着压力的增加，孔隙分布分维值呈下降趋势。其原因是在压力的作用下土体结构进行自我调整，由较疏松的结构转变为较紧密的结构，强度提高（孔隙分布分维值减小），从而能承受更大的压力。

(2) 综合微观结构、孔隙分布分维，对施工场地强夯区、强夯影响带、堆载预压 3 种不同地基处理方案的加固效果对比分析得到：堆载预压软土的加固效果好于强夯区软土，而强夯区软土的加固效果好于强夯影响带软土。微观结构分析结果与现场实验结果存在良好的一致性。说明从微结构出发对地基进行加固效果评价具有较好的实用性。

(3) 孔隙性虽然是软土微结构特征中最重要的因素，但不能代替其它所有因素，如：排列、定向性和连接特点，今后可以考虑将其它因素考虑进来，这是一个值得进一步深入的问题。

参考文献:

[1] 胡瑞林. 粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.

[2] TOVEY N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs soil fabric[J]. J Microscopy, 1990, 120: 303—315.

[3] 施斌. 粘性土微观结构 SEM 图像的定量研究[J]. 中国科学, 1995, 25(6): 666—672.

[4] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量参数研究的新途

徐 J. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651—656.

若干进展与思考[J]. 地球科学, 2000, 25(2): 215—220.

[5] 周萃英. 土体微观结构研究与土力学的发展方向——

Effect evaluation of the Reinforcement of Soft Ground
Based on Microstructure

ZHOU Cui ying¹, LIN Chun xiu², LIU Zuo qiu¹, LI Ya sheng¹ QIU Jiang jin³, LI De fu²

- (1. School of Physical and Technical, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Department of Earth Science, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Institute of Investigation and Survey, Shenzhen, Guangdong 518028, China)

Abstract: This paper associating the consolidation experiment with the reinforcement of soft ground by dynamic compaction and preloading; get the photos of the scanning of electrical microscope (SEM); get a quantitative parameter — pore fractal dimension and its developmental trend along with the pressure through imaging manipulation and quantitative analysis; gave a effect evaluation of the reinforcement of soft ground by dynamic compaction and the influenced area of the compaction as well as the preloading. The results show that the preloading is better than dynamic compaction on the reinforcement effect in the research time.

Key words: soft clay; microstructure; consolidation experiment; preloading; dynamic consolidation