

强夯法加固填土地基的现场试验与微观结构分析

王立朝^{1,2}, 胡瑞林², 李耀刚³, 周振鸿³, 郭书泰³

(1 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3 建设综合勘察研究设计院, 北京 100007)

摘 要: 对位于北京西北郊的某工程场地的填土地基在不同夯次、不同夯能条件下进行了现场试验, 发现地面夯沉量的变化具有阶段性的特点。通过对采自不同夯击阶段的试样进行 SEM 图像定量分析, 得到了夯击过程中地基土的微观结构参数与夯沉量变化的相关关系, 从微观角度初步掌握了强夯过程的结构控制规律。

关 键 词: 强夯; 填土地基; 微观结构分析; 孔隙比

中图分类号: TU472.3⁺¹

文献标识码: A

Field test of dynamic compaction for reinforcing filled ground and its microstructural analysis

WANG Li-chao^{1,2}, HU Rui-lin², LI Yao-gang³, ZHOU Zhen-hong³, GUO Shu-tai³

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Comprehensive Construction Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, Beijing 100007, China)

Abstract: A field dynamic compaction test of filled ground is carried out in a construction site in northwestern suburb of Beijing. Under the conditions of different blow counts and compaction energies, the subsidence of ground changes by phases. At the same time, quantitative analyzing of structure images is carried out on the samples of different compaction phases. The correlativity between microstructural parameters and the change of subsidence of filled ground is found. The test results reveal the law of controlling structure as viewed from microcosmic study during dynamic compaction.

Key words: dynamic compaction; filled ground; microstructural analysis; void ratio

1 引 言

对不良地基土进行加固的方法虽有很多, 但适用条件不一, 强夯法是其中的一种^[1,2]。它适合于大面积建筑地基的处理, 具有经济、高效等优点, 已经广泛用于处理各类碎石土、砂性土、湿陷性黄土、人工填土、低饱和度的粉土与一般粘性土, 尤其是该法还可以加固一般方法难以加固的大块碎石类土及建筑、生活垃圾或工业废料组成的杂填土^[3]。

自法国工程师 Ménard^[4] 1969 年首创该方法以来, 人们在施工技术、加固深度和宏观加固机理与力学模型的建立等方面已有比较深入地认识^[5~11], 在回填土的压密特性研究方面也取得了一系列成果。但是, 由于填土含有的大量人工废弃物具有千差万别的属性, 由此带来的地基变形特性也是千变万化的, 不同地区及不同部位的填土地基的工程特

性会有很大的差异, 而且人们对于动力固结过程中的微观结构变化及其固结效应了解甚少。实际上, 土的工程特性在很大程度上受其微观结构及其变化状态的控制, 那么微观研究在土力学的研究中就具有重要指导意义, 它可对许多力学现象提供本质的解释^[9,12,13]。如果能够从微观的角度了解动力固结的实质, 可以从机理分析角度提出更加合理、更加优化的强夯加固方案, 取得更加安全的地基加固效果。为此, 本文主要从微观分析角度对填土的动力固结特征做较为深入地研究。

2 研究方案

现场试验位于北京西北郊的一个工程场地。该场地的地基土在深度 0~3.8 m 范围内主要由工程性质较差的人工填土构成, 其土层结构与主要物理力学性质如表 1 所示。

表 1 试验场地土层结构及其主要物理力学性质（平均值）

Table 1 Structure and main physical and mechanical properties (average) of the foundation soil at the test site

土层结构	深度 / m	含水量 / %	密度 / g · cm ⁻³	比重	孔隙比	孔隙率 / %	饱和度 / %	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	内摩擦角 / (°)	粘聚力 / kPa	E ₁₂ / MPa	a ₁₂ / MPa
素填土	0.0~2.3	18.93	1.863	2.705	0.722	41.75	69.5	29.25	16.5	12.75	14.67	32.03	4.52	0.438
杂填土	2.3~3.8	25.30	1.945	2.705	0.745	42.75	92.5	29.5	17.0	12.5	7.00	13.08	4.16	0.406
粉质粘土	>3.8	22.83	2.041	2.704	0.630	38.69	97.6	30.1	18.0	12.1	14.25	30.97	6.38	0.268

2.1 现场试验

在试验场地内，对 10 m 范围内的不同土类（重点是上部的素填土）进行各种夯击条件下的强夯试验，以掌握土的动力变形特征、强度增长过程。

(1) 设计的夯击条件：① 锤重：10，16.5 t；② 锤径：2 m；③ 单点夯击能：1500，2 000，2 500 kN · m；④ 最大夯击数：12 击。(2) 取样试验控制点：① 要充分保证夯击过程中取样深度位于同一层位；② 水平采样点距夯击中心距离：0.0，1.0，2.0 m。(3) 现场监测项目：① 地面沉降观测；② 孔隙水压力监测；③ 声波测试；④ 静力荷载试验和标贯试验。

2.2 夯点地面变形规律

为掌握地基土在动力荷载作用下的变形规律，对地面夯沉量进行了监测，其结果如图 1 示。从变形观测曲线不难看到，地基土的变形具有如下一些特点：

(1) 由于地基土体松散，地面累计夯沉量很大；
(2) 在整个夯击过程中，累计夯沉量的增加速率具有阶段性。对于试验场地，地基土的变形大致可划分为 I，II，III 三个阶段：即夯击初期，累计夯沉量增加比较快；中期增加比较慢；到了后期，累计夯沉量的增速又有所提高；

(3) 从曲线形态看，整个过程的累计夯沉量与夯击次数回归曲线比较接近于二次多项式曲线，其回归方程及方差如下：

$$\left. \begin{aligned} S &= -0.0029N^2 + 0.232N + 0.1252; \\ R^2 &= 0.9863 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 S 为累计夯沉量 (m)； N 为夯击次数； R^2 为回归曲线的方差。

(4) 不同的夯击能作用下，地基土的累计夯沉量有一定的差异，夯击能越高，夯沉量越大。同时三种夯击能的夯击阶段分界点的位置也不完全一致。

3 强夯过程中土的微观结构变化规律

如上所述，强夯过程中地基土的地面累计夯沉量随夯击次数呈现一定的阶段性变化。为探讨这一

阶段性变化的原因，利用图像处理系统 (MIPS)，对采自不同夯击次数下的样品进行了 SEM 图像分析和定量研究。

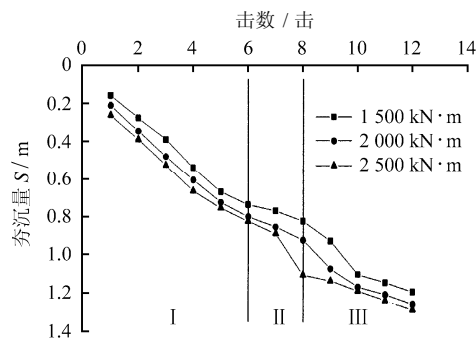


图 1 地面夯沉量观测曲线

Fig.1 Monitoring curve of compacting subsidence at different blow counts

3.1 地基土的微结构特征

由采自 1.5 m 处土样的 SEM 图像 (图 2) 及其有关结构参数统计值 (表 2) 可以看出：颗粒的粒径较小、不均匀性中等，但平面分布比较均一；颗粒的表面起伏度中等，但定向性较差；孔隙的大小居中，且平面分布较为零乱；孔隙比和粒间距离居中。

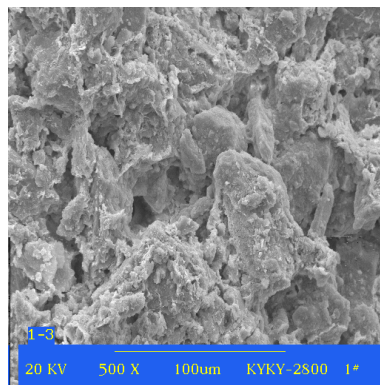


图 2 深度为 1.5 m 处初始样品的 SEM 图像

Fig.2 SEM Image sampling from depth of 1.5 m

3.2 夯击次数与微结构状态变化的关系

强夯过程中地基土的微观结构随夯击次数的变

化规律是笔者比较关心的问题。对这一问题的了解将有助于对动力固结机理的本质性认识,为优化夯击数设计提供重要依据。

为更好地反映土的结构状态变化,引入了“结构参数调整幅度”参量,其定义如下:

结构参数调整幅度 =

$$\frac{\text{某夯次时的结构参数值} - \text{结构参数的初始值}}{\text{结构参数的初始值}} \times 100\%$$

表 2 地基土的主要微结构特征

Table 2 Microstructural characteristics of foundation soil

主要微结构参数		结构参数计算值
名称	符号	
粒径	Φ_p	1.78×10^{-1}
孔径	Φ_b	1.32×10^{-1}
颗粒圆度	K_{ci}	7.08×10^{-1}
孔隙比	E	4.67×10^{-1}
粒间距	L_p	1.95×10^{-1}
粒度分维	D_{ps}	1.183 1
颗粒定向性分维	D_{di}	1.019 896
颗粒起伏度分维	D_{pr}	1.138 885

注:表中微观结构参数的涵义请参考文献[13,14]

结构参数调整幅度越大,表明土结构被改变(或扰动)的程度越大。图 3,图 4 显示了 2 500 kN·m 能级下各夯次的结构参数变化情况(其它 2 个能级的情况类似,故此从略)。可以看出,结构变化的规律性还是比较明显的:

(1) 随着夯击次数的增大,结构的变化往往会出现正、负向的相互转化。一般地,在低夯次时结构参数以正向(即比初始值增大)调整为主,而高夯次时则以负向调整为主(表 3)。一些参数(如粒径)在 12 击附近还出现了再次转向迹象。

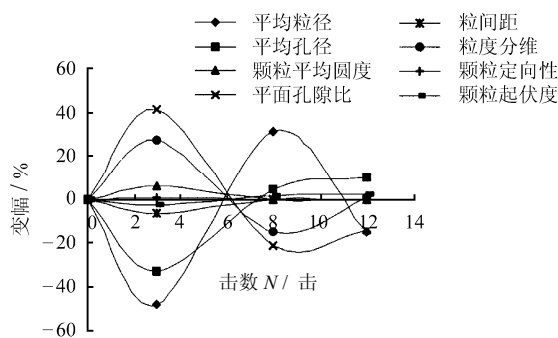


图 3 2 500 kN·m 下结构形态参数随 N 变化情况
Fig.3 Changes of structural parameters with N (blow count) under 2 500 kN·m

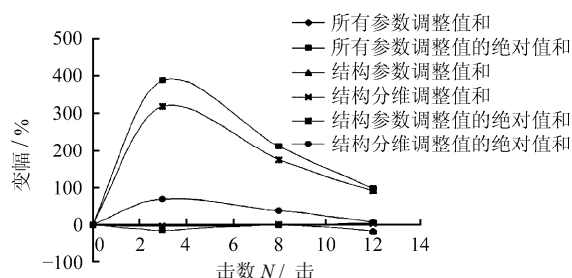


图 4 2 500 kN·m 下结构形态参数随 N 变化情况
Fig.4 Changes of structural parameters with N (blow count) under 2 500 kN·m

表 3 结构参数随 N 的变化情况

Table 3 Changes of structural parameters with N (blow count), including the definite and the non-definite

主要结构参数	夯击能 / kN·m	转换特征			最大 变幅/ %	次级 转换点
		<N _d	转换点(N _d)	>N _d		
确定 型 结 构 参 数	粒径 Φ_p	2 500	-	6	+	50
		2 000	-	8	-	30
		1 500	-	9	-	60
	孔径 Φ_b	2 500	-	7	+	35
		2 000	-	8	-	20
		1 500	-	8	-	45
	颗粒圆度 K_{ci}	2 500	+	8	-	7
		2 000	+	10	-	8
		1 500	+	8	-	5
	孔隙比 E	2 500	+	6	-	40
		2 000	+	8	+	38
		1 500	+	11	-	49
非 确 定 型 结 构 参 数	粒间距 L_p	2 500	-	8	-	8
		2 000	+	9	-	12
		1 500	-	11	-	28
	粒度分维 D_{ps}	2 500	+	6	-	27
		2 000	+	8	+	27
		1 500	+	9	-	35
	颗粒定向性分维 D_{di}	2 500	+	6	-	1.5
		2 000	+	8	-	1.6
		1 500	+	8	+	1.3
	颗粒表面起伏度分维 D_{pr}	2 500	+	7	-	2.5
		2 000	+	6	-	2.4
		1 500	+	9	+	2.5

正、负向之间的转折点所对应的夯击数被称之为“转换点”(N_d)。表 3 列出了各结构参数在不同夯击能时的转换点,据此绘制了各夯次取得转换点的统计图(图 5)。由这些资料可以得到几点结论:结构参数的调整多在 8 击处出现正、负向转换现象,其取得的转换点数量达 13 个,其次是 6 击时的转换点较多。不同夯击能下的转换点位置有所变化。一般地,夯击能越高,其转换点位置越低。对于 2 500, 2 000 和 1 500 kN·m 三级夯击能,它们对应的最多转换点的夯击数分别为 6, 8 和 8/9,其转换点个数分别为 8, 7 和 4。转换点数量的分布具有正态分布特征。

(2) 从各结构参数的调整幅度看出, 粒径、孔隙比和粒度分维等的调整幅度比较大(表 3), 颗粒定向性分维调整幅度最小。因此, 地基土为适应不断变化的夯击次数, 将主要以粒径和孔隙大小及其相对位置的调整来实现的。

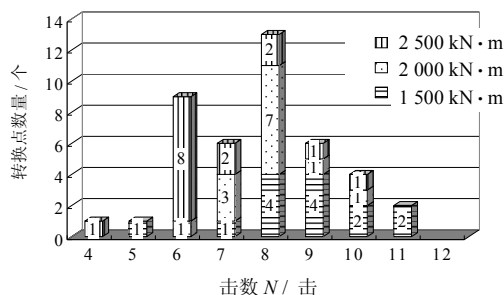


图 5 各夯击能下结构参数转换点统计
Fig.5 Statistics of conversion points under different compaction energies

(3) 如果将上述结构参数的调整幅度迭加起来, 其值(见表 4)可反映结构状态的整体调整特征。可以看到, 结构状态的调整也存在正、负向相互转换现象, 其转折点位置也以 8 击时为多, 但其取值在低夯次时以负值为主, 而高夯次时取得正值不多。这一点与单个参数时的情况有所不同, 这主要是由于后者由幅度大小决定, 而前者则由个数决定的。从分别计算的结构参数调整幅度和看, 以确定型结构参数的调整幅度最大, 约占总和的 70%~80%以上。这一点与单个参数的情况基本一致。由表 5 可以看出, 在不考虑结构参数调整方向(即取绝对值和)的情况下, 结构调整幅度绝对值曲线呈单峰状, 其峰值点位置多处于低夯次范围, 以 3 击时为多。

表 4 结构参数调整幅度之和随 N 的调整情况
Table 4 Changes of sum of readjustment of structural parameters with N (blow count)

结构参数	夯击能 /kN·m	转换特征			最大变幅 /%	次级 转换点
		<N _d	转换点(N _d)	>N _d		
所有结构参数调整幅度值之和	2 500	-	6	+	50	11
	2 000	-	8	-	30	
	1 500	-	9	-	60	10
确定型结构参数调整幅度值之和	2 500	-	7	+	35	
	2 000	-	8	-	20	
	1 500	-	8	-	45	
非确定型结构参数调整幅度值之和	2 500	+	8	-	7	
	2 000	+	10	-	8	
	1 500	+	8	-	5	

表 5 结构参数调整幅度比较

Table 5 Comparison of readjustment of structural parameters

结构参数	夯击能 /kN·m	峰值点	最大调整 幅度/%
所有结构参数调整幅度绝对值之和	2 500	3	390
	2 000	12/3	450/320
	1 500	3	500
确定型结构参数调整幅度绝对值之和	2 500	3	320
	2 000	12/3	370/260
	1 500	3	410
非确定型结构参数调整幅度绝对值之和	2 500	3	70
	2 000	12/3	80/70
	1 500	3	90

越过峰值点后, 随着夯次的增大, 调整幅度绝对值将逐渐减小。这种情况表明: 夯击初期结构的敏感性高, 而随着夯击作用的深入, 结构的调整将变得越来越困难。

通过上面的分析, 可将宏观上看到的地面夯沉量的阶段性同微观角度相结合, 其变形特点分述如下:

① 加速压密阶段 I: 为松散土体的大孔隙或架空结构在动力荷载作用下遭到破坏, 从而导致地基土显著下沉的过程。该阶段地面夯击下沉快, 夯沉量比较大。

② 减速压密阶段 II: 为地基土的再压密过程, 以集粒和粒间孔隙的细微变形为主, 同时颗粒的定向性增加。本阶段曲线的变化速率(曲线斜率)比第 I 阶段具有缓慢衰减特征。表明土体的整体性能已逐渐适应了新的动力体系, 并趋于稳定。相对于第 I 阶段而言, 该阶段的持续过程比较短。此时土体已经达到压密、稳定的结构状态。

③ 结构破坏阶段 III: 界限夯击点以后, 与强度降低相对应的参数(粒度分维和颗粒表面起伏度分维)调整幅度比较大, 为强度的降低创造了条件^[15]。如果继续夯击, 土体体积不会继续减小, 取而代之的是塑性变形, 其表现特征就是夯坑四周土体明显隆起。这是夯能浪费的表现, 应该尽力避免。

综上所述, 地基土的阶段性变形受多种结构因子制约, 但最为重要的影响因子是地基土的孔隙性变化。夯击过程中, 土的孔隙性结构参数不仅调整幅度较大, 而且对地面变形的影响也比较显著。所以, 利用强夯法对人工填土地基进行加固时必须充分地监测孔隙性的变化。

另一方面, 从地面变形和结构参数的变化情况看, 前者的阶段性特征远不如后者显著。因此, 用结构参数控制加固质量是一条可取的途径。从结构

变化是否达到稳定的角度看, 只有经历了减速压密阶段后, 地基土的性质才得到了根本的改变。最佳的夯击次数应当是第Ⅱ阶段的右界夯击数。

4 结 语

本研究首次将微结构定量分析技术应用于填土地基土的动力固结机理中, 通过现场试验和微结构分析, 取得的主要认识归纳如下:

(1) 填土地基夯沉变形具有阶段性变化的特点, 分为加速压密、减速压密和结构破坏 3 个阶段。地基土经历了减速压密阶段后达到压密、稳定结构状态, 土体性质发生了根本的改变, 所以, 最佳的夯击次数应当是第Ⅱ阶段的右界夯击数。

(2) 夯击过程中, 地基土的微观结构变化比较明显, 与固结变形具有比较一致的阶段性变化趋势。可以认为, 固结变形的阶段性变化是由微观结构变化引起的。

(3) 控制地基土阶段性变形的最重要影响因子是土的孔隙比变化。

本文对夯击过程中土体结构变化进行了定量分析, 但是如何将微观结构变化的定量分析与土体的宏观力学特性相结合, 有待于作者进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1991.
- [2] 曾国熙主编. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [3] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 1—17.
Qian J H, Qian X D, Zhao W B, et al. Theory and practice of dynamic compaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1986, 8(6): 1—17.
- [4] Ménard L, Boroise Y. Theoretical and practice aspects of dynamic consolidation[J]. **Geotechnique**, 1975, 25(1): 3—18.
- [5] Scott R A, Pearce R W. Soil compaction by impact[J]. **Geotechnique**. 1975, 25(1): 19—30.
- [6] Smoltczyk U. Deep Compaction[C]. Proc. 8th ECSMFE, Helsinki, 1983, (3): 278—284.
- [7] 吴义祥. 强夯法处理湿陷性黄土地基问题的室内试验研究及数据的微机处理方法[硕士学位论文D]. 武汉: 武汉地质学院, 1985.
- [8] 范维垣. 关于强夯法加固地基的几个问题[A]. 第一届全国地基处理学术讨论会论文集[C]. 上海, : [s.n.], 1986.
- [9] Terzaghi K, Peck R B. Soil Mechanics in Engineering Practice (Third Edition)[M]. New York: Wiley, 1996.
- [10] Hu R L, Yueng M R, Lee C F, Wang S J. Mechanical behaviour and microstructural variation of loess under dynamic compaction[J]. **Engineering Geology**, 2001, 59(3-4): 203—217.
- [11] ZHONG Qi-yue, Isabelle Morin. Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures[J]. **Canadian Journal of Civil Engineering**. 1996, 23(2): 480—489.
- [12] 奥西波夫. 粘土类土和岩石的强度与变形性质的本质[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [13] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 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.
- [14] 胡瑞林, 李向全, 官国琳. 粘性土微结构形态要素及其定量信息处理技术[J]. 地球学报, 1996, 17(增刊): 229—236.
- [15] 胡瑞林, 李焯芬, 王思敬. 动荷载作用下黄土的强度特征及结构变化机理研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 174—181.
HU Rui-lin, Lee C F, WANG Si-jing. Approach to the strength behaviors and microstructural changes of loess under dynamic load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 174—181.