

动力排水固结中孔隙水压力增长和消散规律

雷学文^{1, 2} 王吉利¹ 白世伟¹ 郭应桐¹ 张平仓¹ 孟庆山¹

(¹中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) (²武汉科技大学城建学院 武汉 430070)

摘要 基于现场实测,对动力排水固结法处理饱和软粘土地基过程中的孔隙水压力变化特性进行了分析研究,发现孔隙水压力增长与消散具有独特的规律,所得结论为动力排水固结法的工程设计和理论研究提供了依据。

关键词 动力排水固结法,孔隙水压力,软粘土地基

分类号 TU 472.31, TU 413.7

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)01-0079-04

1 引言

软粘土因为具有天然孔隙比大、含水量高、强度低、压缩性高和渗透性差等特点,所以在用传统的强夯法加固软土地基时,很可能将上部土体结构严重破坏,强夯使孔隙水压力迅速上升,由于不能及时排出土体中的孔隙水而形成橡皮土,土体强度不但没有得到提高反而有所降低。而采用堆载预压或真空预压的排水固结法,加压系统比较复杂,更重要的是,其固结时间又比较长,因而对于软粘土地基的人工处理就要考虑到既要达到土体加固的要求,又要尽量地消散孔压,以较短的时间使土体完成固结沉降,因而提出了一种新的加固技术——动力排水固结法(Dynamic Consolidation by Drainage)。

软土的特点决定了其性质的改善取决于孔隙水压力能否迅速消散,孔隙水能不能尽快排出,同时又要使土体不被过分扰动,以保持软土本身的微结构不被破坏。因而,动力排水固结法在于强调排水系统设置,即按照排水固结法首先在软土中设置水平排水体和竖直排水体^[1]。同时采用能量由轻到重、少击多遍的强夯作为动力加压系统。

我们采用动力排水固结法处理软土地基的某港口仓库工程。经过对强夯前、强夯中和强夯后孔隙水压力变化的细致而全面地监测,获得了宝贵的第一手资料,从中发现了动力排水固结法处理软土地基时,孔隙水压力增长与消散具有独特的规律,为动力排水固结法的工程设计和理论研究提供了一定的参考依据。

2 工程概况

2.1 工程地质概况

某港口拟建食糖储备仓库,地基土为典型的软粘土,处理场地为海滩—海滨区的一个大水塘,塘底为多年沉积的淤泥及淤泥质土,厚度变化较大,最厚处达10m左右。经填土平整形成现有场地,填土厚度1.7~4.5m不等,地面标高约4.5m。填土以碎石粘土、粉土为主的开山土。淤泥及淤泥质土呈饱和状态,软塑~可塑,稍密,为高压缩性土,透水性差。淤泥下部为强风化和中风化泥质砂岩夹页岩,可作为持力层。

2.2 地基处理方案的确定

鉴于场地工程地质条件,原设计采用的挖孔灌注桩法加固,但只有部分能够顺利施工,大部分场地淤泥厚度大,含水量高,挖孔后立即出现塌孔,使施工不能顺利进行。并且挖孔桩工程造价相当高,工期又长。由于以上原因,后经方案论证,决定改用动力排水固结法。在原有场地上铺设40cm中粗砂垫层,并用盲沟将集水井相连形成良好的水平排水体,打设塑料排水板到持力层作为竖直排水体。为方便施工需填土1.0m左右至设计标高,与原有的老填土一起作为静荷载预压10d以上,强夯前施工准备工作完毕。在本场地内选择两个动力排水固结法试验区,强夯遍数有所不同和布点方式有所不同,第一试验区夯两遍,布点方式均为6m×7m中间夹梅花点;第二试验区分三遍夯,布点方式均为6m×6m。

1999年7月19日收到初稿,1999年9月27日收到修改稿。

作者 雷学文 简介:男,1962年生,博士,1982年毕业于武汉钢铁学院采矿工程专业,现任副教授,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。

2.3 测点布置

第一试验区面积为 $28 \times 30\text{m}^2$ ，第二试验区面积为 $24 \times 24\text{m}^2$ ，各试验区在距第一遍主夯点一定距离内分别埋设 3 组孔隙水压力传感器，每组传感器个数为 3, 2, 1 个不等，其深度如表 1 所列。为了对比，传感器的埋设考虑了：既有在相同径向距离不同深度的对比，又有在相同深度不同径向距离的对比。传感器分别埋设在淤泥与素填土的交界处、淤泥中部及淤泥下部，在埋设过程中，埋设孔径稍大于传感器直径，由于淤泥呈饱和状态，软塑到可塑，不易成孔，故采用压入法将传感器压入至设计位置。

2.4 监测方法

采用电阻应变式孔隙水压力传感器进行人工监测，从传感器埋设之日起，每天进行监测并详细记录孔压的变化情况。自试验区试夯之日起，对试夯每击后的孔压变化都进行了监测，尽量捕捉孔压增量的峰值，以后逐日进行孔压观测，待到孔压消散到一定程度，即达到 80% 以上，则指导下一次强夯施工，如此细致地监测一直到满夯后一段时间。

3 试验成果的调整

3.1 孔压实测数据

表 1 是在试验区动力排水固结处理过程中随施工进程的孔压增长、消散及间隔天数的详细记录。由表 1 中数据可以发现以下规律：

(1) 强夯后相同深度处不同测点之间的孔压值之差，由于强夯作用，较强夯前相同深度处不同测点之间的孔压值之差有所减小。

(2) 相同能量下，相同深度处，随着测点距最近夯点径向距离的减小，孔压增量有增大的趋势，且同一传感器在能量相同情况下，后一遍夯击时孔压的增幅大于前一遍夯击时孔压的增幅。相同时间内孔压在最后一遍夯击后消散比前一遍夯击后有减慢的趋势，如图 1 所示。

(3) 在软土浅层(淤泥与素填土交界处)第一试验区的孔隙水压力在满夯后要比强夯前有所增大，而第二试验区内该处的孔压值却有所减小。在两个试验区中，强夯完成后淤泥中、下部的孔隙水压力比强夯前都有一定程度的减小。浅层孔压的减小量小于深部孔压的减小量，如图 2, 3 所示。

(4) 夯击瞬间从仪器观察到第二、三遍夯击时中深部有孔压负增长的现象。

3.2 孔压增量

夯击间孔压增量随夯击击数及夯坑每击沉降量的变化如表 2 所列。

由表 2 中数据看出：在前 5 击，随着夯击击数的

增多，每击间孔压增量是逐渐减小的，当超过 5 击时，孔压每击间增量又逐渐增大，参考夯坑每击沉降量数据和有效应力原理可以理解为：夯锤前几击夯击地面时，每击引起的总应力不变，而击间孔压增量在逐渐减小，那么作用在土体中的有效应力呈缓慢减小的趋势；当土体夯到一定程度，能量逐渐积累并传到下部土体，每击间孔压增量又逐渐增大，此时作用于土体中的有效应力呈锐减趋势，这不利于强的夯加固效果。因此对孔压的监测，能有效地控制强夯参数。

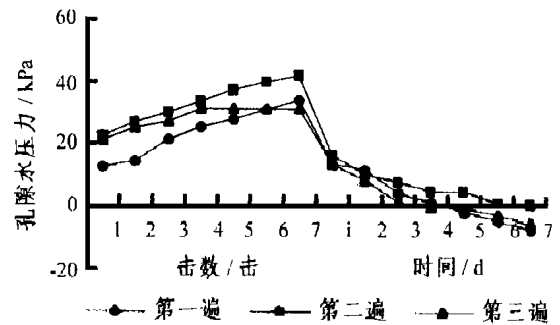


图 1 1-1 孔压随击数增长、随时间消散曲线

Fig. 1 Relation curve of pore water pressure of measuring hole 1-1 increased with ramm ing times

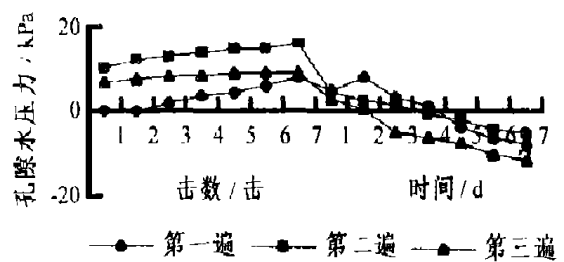


图 2 1-2 孔压随击数增长、随时间消散曲线

Fig. 2 Relation curve of pore water pressure of measuring hole 1-2 increased with ramm ing times

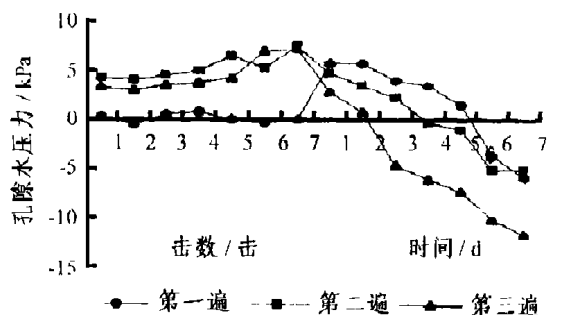


图 3 3-1 孔压随击数增长、随时间消散曲线

Fig. 3 Relation curve of pore water pressure of measuring hole 3-1 increased with ramm ing times

表 1 施工过程中孔压观测数据表

Table 1 The measured data of pore water pressure during excavation

传感 器编 号	传感器 埋深 /m	夯前 孔压 /kPa	首遍夯击			二夯前			二夯			三夯前			三夯			满夯前			满夯			满 夯 后		
			至主夯 点距离 /m	孔压 峰值 /kPa	孔压 增量 /kPa	间 隔 /d	孔 压 /kPa	至主夯 点距离 /m	孔压 峰值 /kPa	孔压 增量 /kPa	间 隔 /d	孔 压 /kPa	至主夯 点距离 /m	孔压 峰值 /kPa	孔压 增量 /kPa	间 隔 /d	孔 压 /kPa	至主夯 点距离 /m	孔压 峰值 /kPa	孔压 增量 /kPa	间 隔 /d	孔 压 /kPa	至主夯 点距离 /m		孔压 峰值 /kPa	孔压 增量 /kPa
试 验 区 1	41-15	5.6	26.57	2.6	83.24	56.67	—	二遍	29.33	15.2	3	68.32	41.75	14.38	46	49.85	23.28									
	91-29	8.6	107.6	2.6	110.6	2.99	合	二为	29.97	9.8	2	105.6	2.07	14.97	29	97.75	-9.89									
	2-1	5.6	34.48	4.8	75.28	40.8	一	夯	29.31	8.3	2	59.98	25.5	14.3	68	9.39	-25.1									
	92-27	10.6	92.02	4.8	101.3	9.29	梅	花点	29.83	7.8	2	97.25	18	14.85	11	89	-3.02									
1	43-68	5.6	31.73	7.8	69.98	38.25	布	置	29.39	8.3	3	62.78	1.05	14.44	11	54.23	22.5									
试 验 区 2	1-1	5.1	39.55	2.1	73.48	33.93	9	34.64	2.1	81.67	42.12	9	43.06	2.1	70.91	31.36	13	37.68	50.08	10	53	31.36				
	1-2	7.6	85.81	2.1	98.10	12.29	9	77.12	2.1	101.9	16.07	9	82.79	2.1	97.91	12.1	13	75.98	82.6	-3.21	67.71					
	1-3	10.6	116.8	2.1	129.5	12.74	9	94.34	2.1	109.1	-7.72	9	103.1	2.1	107.3	-9.46	13	96.12	99.4	-17.4	92.84					
	2-1	5.1	32.26	4.9	83.81	51.55	9	32.11	2.1	97.64	65.38	9	42.05	2.1	73.3	41.04	13	35.43	44.36	12.1	31.11					
	2-2	7.6	78.84	4.9	91.24	12.43	9	71.48	2.1	95.24	16.43	9	78.81	2.1	93.46	14.65	13	71.04	78.81	0	63.72					
	3-1	7.6	84.5	7.8	93.50	9	9	76	4.9	98.25	13.75	9	82.75	4.9	93.25	8.75	13	75	82.25	-2.25	67.25					

注: 首遍夯击能 2 000 kN · m, 二遍夯击能 2 000 kN · m, 三遍夯击能 1 500 kN · m, 满夯 800 kN · m。

表 2 孔压增量

Table 2 Increment of pore water pressure

测点号	深度/m	至夯点最近距离 /m	夯击数						
			1	2	3	4	5	6	7
			夯坑下沉量/cm						
			27.3	20.0	18.1	14.6	12.7	11.8	11.3
1-1	5.1	2.1	12.87	1.64	7.02	3.98	2.34	3.04	3.27
1-2	7.6	2.1	0.19	-0.19	1.89	1.70	0.95	1.51	1.89
1-3	10.6	2.1	3.667	0.97	2.70	1.93	-3.28	1.74	0.19

4 成果分析及结论

动力排水固结法处理软土地基, 孔压的增长和消散具有其独特的规律性:

(1) 夯击能量高, 孔压增长快, 增幅大, 但消散较慢, 相同能量下, 后一遍孔压的增幅大于前一遍孔压的增幅, 且消散较慢。这是因为在前一遍夯击时土体表面已形成一硬壳层, 因而由动荷载反复冲击及上覆土层形成的附加压力使孔隙水压力不断增大, 淤泥受到一定程度的扰动, 渗透性及触变性变差, 孔隙水不易排出的缘故。

(2) 同一次夯击浅层孔压增幅远大于中、深部孔压的增幅, 说明素填土的孔压在外界动荷载的作用下变化大, 而淤泥质粘土在相同载荷作用下变化小, 但两种土的孔压消散速率大致相同, 见图 4。

(3) 由于设置了良好的水平及竖直排水体系, 在动荷载反复作用下, 素填土土体内产生一定程度的破坏并形成裂隙, 其渗透性有所提高, 因而浅层孔隙水易排出, 而塑料排水板贯穿整个淤泥层, 在强夯中动荷载反复冲击形成的附加应力作用, 相当

于增加了静载荷, 使得孔隙水通过竖直排水体排出地面, 从而使软土地基孔隙水压力明显低于初始静水压力值。

(4) 试验区各遍间歇时间内, 孔压消散至少达到了 80% (如图 4 所示), 因此在具体施工时, 在保证强夯击效果的前提下, 还可适当缩短间歇时间, 这也是以信息指导施工。

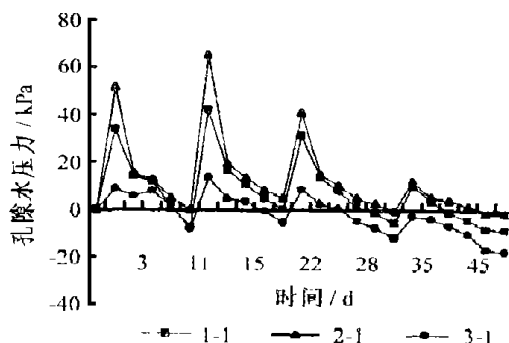


图 4 第二试验区孔隙水压力增长和消散曲线
Fig 4 Relation curve of pore water pressure of experimental range 2[#] increased with ramming times

(5) 由表 1 中两试验区数据以及两试验区静载试验曲线的综合评定也可以看出, 第二试验区强夯效果要好于第一试验区。其原因是在第一试验区一、二遍一起夯, 夯点太密, 使土体微结构易于破坏, 孔隙水压力消散变慢。所以按第一种夯法易出现橡皮土。可见强夯布点对加固效果也起着重要作用, 在动力排水固结处理软土地基过程中, 适当增加夯击遍数能更有效地提高强夯功效。

参 考 文 献

1 王发国, 丘建金, 张大中. 动力排水固结法浅析[J]. 土工基础,

1997, 12(1): 21~ 24
 2 郑颖人, 李学志, 冯遗兴等. 软粘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
 3 白 冰, 刘祖德. 冲击荷载作用下饱和软粘土孔压增长与消散规律[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 33~ 38
 4 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989

INCREMENT AND DISSIPATION OF PORE WATER PRESSURE
 IN DYNAMIC DRAINAGE CONSOLIDATION

Lei Xuewen^{1, 2}, Wang Jili¹, Bai Shiwei¹, Guo Yingtong¹, Zhang Pingcang¹, Meng Qingshan¹
 (¹ Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)
 (² Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070 China)

Abstract Based on the measurement in site, the change of pore water pressure in saturated soft clay foundation improved by dynamic drainage consolidation is analyzed and studied. The laws of increment and dissipation of the pore water pressure are discovered. The obtained conclusions provide some useful bases for engineering design and theoretical study of dynamic drainage consolidation.

Key words dynamic drainage consolidation, pore water pressure, soft clay foundation

第 2 届结构工程与力学进展国际会议 2002 年将在韩国召开

第 2 届结构工程与力学进展国际会议(A SEM 02)于 2002 年 8 月 21~ 23 日将在韩国釜山召开。这次会议的议题为: (1) 人工智能与专家系统, (2) 复合材料, (3) CAD/CAE, (4) 结构力学, (5) 结构动力学, (6) 空气动力学, (7) 结构工程, (8) 安全与可靠度, (9) 地震工程, (10) 结构设计, (11) 软件开发, (12) 风-结构相互作用, (13) 流体-结构相互作用, (14) GIS 与信息技术, (15) 热动力学, (16) 壳板结构, (17) 稳定性与挠曲, (18) 桥梁工程, (19) 建筑工程, (20) 模糊理论与神经网络, (21) 岩土力学, (22) 数值模拟, (23) 随机分析, (24) 优化与控制, (25) 计算技术, (26) 钢结构, (27) 材料与本构定律, (28) 非线性分析, (29) 混凝土与钢筋混凝土结构, (30) 土与结构的相互作用, (31) 疲劳与断裂力学, (32) 施工管理, (33) 生物力学, (34) 维护与修复。

该次大会接收论文摘要的截止日期为 2001 年 8 月 31 日。有关这次会议的进一步信息可从下列地址获得:

Secretariat, A SEM 02
 Department of Civil Engineering
 Korea Advanced Institute of Science & Technology
 Taejeon 305-701, Korea
 Tel: (+ 82-42)869-8451/3621 Fax: (+ 82-42)869-8450
 Email: technop@chollian.net