



密实黏土的重塑与特性分析

郭喜亮^{1,2}, 尹崧宇^{1,2}, 王力威^{1,2}, 林森^{1,2}

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 在实际工程中, 会遇到不同的疏浚土质和各种影响疏浚效率的土质, 疏浚工程相关问题的解决都离不开对原状岩土特性的研究。针对国内外对各种疏浚土的重塑技术少为先例可循, 阻碍了相关问题的研究。本文进行了密实黏土的重塑工艺研究和重塑土性能分析, 并采用冲击夯实法进行密实处理, 得到与天然状态密实黏土特性相拟合的重塑方法。结果显示: 通过对土体的改良, 使用冲击夯实法可实现不同塑性指数、密实程度和标贯击数的黏土重塑; 并得到土体含水率和液性指数对密实度和标贯击数的影响趋势, 为研究黏土的重塑技术提供借鉴和参考。

关键词: 密实黏土; 重塑; 塑性指数; 标贯击数

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0077-04

Remolding of compacted clay and characteristic analysis

GUO Xi-liang^{1,2}, YIN Song-yu^{1,2}, WANG Li-wei^{1,2}, LIN Sen^{1,2}

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: In practical engineering, different dredging soil quality and various soil quality that affect dredging efficiency will be encountered. The solution of dredging engineering-related problems cannot be separated from the study of the original rock and soil characteristics. The remolding of all kinds of dredging soil technology at home and abroad for rare precedent, hindered the research of dredging engineering issues. This article carries on the technology research of remodeling compacted clay and the properties analysis of compacted clay. Impact compaction method is adopted to improve the compaction, getting a method which can fit natural characteristics well. The results reveal that: through the improvement of soil, the impact compaction method can realize the clay remolding with different plasticity index, compactness degree and standard penetration strike number. The influence trend of soil moisture content and liquid index on compactness and penetration strike number is obtained, which can provide a reference for clay remolding technology.

Keywords: compacted clay; remolding; plasticity index; standard penetration test

通过对国内外疏浚试验土重塑技术的调研发现, 国内在疏浚黏性土、密实砂土和岩石等土体重塑技术方面没有先例可循, 国外在疏浚土重塑技术方面也很少研究。而在实际工程中, 会遇到不同的疏浚土质和各种影响疏浚效率的土质, 这些问题的解决都离不开对原状岩土特性的研究^[1]。本文基于大型密实黏土的重塑, 对土源进行了相

应改良, 并采用夯击密实法, 使重塑密实黏土与天然密实黏土特性具有良好的拟合性, 为黏土的重塑提供借鉴和参考。

1 密实黏土特性指标分析

为了全面衡量黏性土挖掘的难易程度, 以现有的典型黏性土疏浚工程为依托, 提出以含水率、

密度、液限、塑限、黏聚力、塑性指数、液性指数和标准贯入击数作为判别疏浚黏性土挖掘难易的基本判别指标。在国内疏浚吹填工程中，天津港、厦门、东莞、龙口、烟台、连云港、鲅鱼圈、太平湾港区、北海铁山港等在施工过程中都发生了不同程度黏性土质挖掘困难、糊绞刀和耙头的工程问题，不仅降低了疏浚施工的效率，而且给

疏浚生产带来了安全隐患和经济损失。在疏浚施工中发现黏性土质挖掘较为困难，其具有密实程度大、黏性大、黏粒含量高、塑性指数大和附着力强等特点。

通过对原状土的物理力学指标分析，得出黏性土挖掘难易程度基本判别指标的代表值，见表 1。

表 1 难挖黏性土基本判别指标值

含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	快剪黏聚力/kPa	塑性指数	液性指数	标准贯入击数/击
18.2~59.3	1.74~2.15	29.2~75.0	16.0~41.8	5~108	12.0~37.6	-0.19~0.88	6~31

由表 1 可知，难挖疏浚黏性土质接近于高塑性黏土，较普通黏性土具有黏粒含量高^[2]、可塑范围大、亲水矿物含量高、黏性大、土质比表面积大和具有与刀具粘黏而不破坏分散的能力。经过分析确定重塑黏土指标见表 2。

表 2 重塑密实黏性土指标

含水率 w/%	塑性指数 I _p	标准贯入击数 N/击
25~30	13~21	8~16

2 大型密实黏土重塑工艺

2.1 工艺选择

常用的土体重塑方法有强夯法、预压法、冲击夯实法^[3]等。依据密实黏性土重塑的目标，重塑工艺方案比选见表 3。真空联合堆载预压法能够使重塑土质结构与原状土一致^[4]，但重塑时间较长；为满足重塑工艺简便易行的要求，黏性土重塑方案采用冲击夯实法。

表 3 重塑工艺比选

处理方法	工艺特点	优缺点
真空预压法	流动状态的淤泥,通过抽真空产生负压,使土体密实	接近疏浚挖掘的原状土质 ^[5] ;工期长;难以达到高强度要求
堆载预压法	软弱黏性土在预压荷载作用下压密固结	可控制强度;工期长;易发生结构性破坏
真空联合堆载预压法	真空预压与堆载预压联合使用	可达到高强度要求;工期较长
强夯法	通过夯击土体,使土质结构破坏再重新组合,达到排水固结的效果	可达到高强度要求;与原状土结构差异大
冲击夯实法	通过平板夯击设备,在冲击力和震动力作用下,分层夯击土体	可达到高强度要求;工期短;土体均匀性相对较差

2.2 冲击夯实法原理

冲击夯实法是在极短的时间内，对分层土体施加巨大的冲击力和振动力，加荷历时约几十毫秒，对含水量较大的土层，加荷时间约百毫秒。这种突然释放的巨大能量，将转化为各种波型传到土体^[6]。首先到达某指定范围的波是压缩波，它使土体受压或受拉，能引起瞬时的孔隙水汇集，因而地基土的抗剪强度大为降低。根据理论计算，这种波以振动能量的 7%传播出去，紧随压缩波之后的是剪切波，以振动能量 26%传播出去，剪切波会导致土体结构的破坏，使土体重塑密实。此外的瑞利波(面波)以振动能量的 67%传出，在夯

点附近造成地面隆起。在这些波的综合作用下，土体颗粒重新排列相互靠拢，并排出孔隙中的气体，使土体挤密压实，强度提高。过程大致可分为 4 个阶段：

- 1) 夯击能量转化，同时伴随强制压缩或振密，表现为土体中水及气体排出，孔隙水压力上升；
- 2) 土体液化或土体结构破坏，表现为土体强度降低或抗剪强度丧失；
- 3) 固结压密，表现为渗透性能改变，土体裂隙发展，土体强度提高；
- 4) 触变恢复并伴随固结压密，包括部分自由水又变成薄膜水，土的强度继续提高。

2.3 重塑工艺流程

1) 将疏浚土土源进行晾晒、粉碎和过筛，经过孔隙为 2 mm 筛分后留取细颗粒。

2) 对翻晒、粉碎、过筛后的土源进行实验室土工试验，物理力学参数见表 4。

表 4 土源物理力学参数

含水率 $w/\%$	比重 G_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	粒径级配占比/ $\%$				
				0.250~0.075 mm	0.075~0.05 mm	0.050~0.01 mm	0.010~0.005 mm	<0.005 mm
3.5	2.72	18.9	31.1	2.2	2.9	33.2	22.0	37.7

经过翻晒、粉碎、过筛后的土源含水率为 3.5%，塑性指数 $I_p = 12.2$ ，黏粒含量 37.7%，平均粒径 d_{50} 为 0.007 mm，土质分类为粉质黏土。

3) 进行土质改良，使之达到适应冲击夯实法制作密实黏土的目标。掺入一定量的高岭土(细度 4 000 目)，经过拌和均匀后掺入一定量铝酸盐水泥熟料(Al_2O_3 含量 60%)和矿粉(比表面积 400 m^2/g)，混合土体塑性指数 $I_p = 20.5$ ，液限 $w_L = 44.6\%$ ，塑限 $w_p = 24.1\%$ ，在含水率 $w = 25\%$ 时，土体夯实效果好，土体由粉质黏土改良为黏土。

4) 拌和定量的水，使土体含水率为 25%，将拌和均匀的松散黏土颗粒分层夯实。

3 重塑密实黏土特性分析

3.1 土质物性指标分析

土源经过室内试验，塑限 $w_p = 18.9\%$ ，塑性指数 $I_p = 12.2$ ，黏粒含量 37.7%，平均粒径 $d_{50} = 0.007$ mm，土质分类为粉质黏土。经过不同比例高岭土(粒度 4 000 目)、铝酸盐水泥熟料(Al_2O_3 含量 60%)和矿粉(比表面积 400 m^2/g) 掺量进行改良后，粉质黏土的物理性质发生改变，由粉质黏土改良成黏土，具备了利用冲击夯实法重塑疏浚黏土的基本物理性质，且具有良好的可控性。不同比例掺量后物理力学性质指标见表 5。

表 5 重塑土体物理力学指标

含量/ $\%$			$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$S_r/\%$	$w_p/\%$	I_p	I_L	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	标贯击数/击	状态	分类
高岭土	水泥熟料	矿粉										
0.0	0.0	0.0	1.70	68.0	18.9	12.2	0.50	43.3	7.1	1.0	可塑	粉质黏土
	3.0	0.6	1.76	73.4	21.1	14.6	0.27	45.1	14.6	4.0	可塑	粉质黏土
2.0	5.0	1.0	1.79	75.8	22.3	13.9	0.19	63.5	19.7	6.0	硬塑	粉质黏土
	8.0	1.6	1.83	80.4	22.9	17.6	0.11	71.2	26.8	11.0	硬塑	黏土
4.0	3.0	0.6	1.90	86.0	23.5	20.8	0.07	59.2	25.1	8.0	硬塑	黏土
	5.0	1.0	1.92	88.0	23.8	20.9	0.07	75.0	26.4	12.5	硬塑	黏土
	8.0	1.6	1.93	89.0	24.4	20.8	0.06	92.7	27.7	17.5	硬塑	黏土
7.0	3.0	0.6	1.94	91.0	24.3	21.3	0.03	66.6	23.1	15.0	硬塑	黏土
	5.0	1.0	1.94	91.0	24.5	21.8	0.02	83.2	26.8	16.0	硬塑	黏土
	8.0	1.6	1.95	91.8	25.0	22.0	0	103	28.9	19.0	坚硬	黏土

由表 5 可以看出，未掺入高岭土和水泥熟料之前土体塑限为 18.9%，在含水率为 25% 时，采用冲击夯实法密实效果差，孔隙比 $e = 0.99$ ，饱和度 $S_r = 68\%$ ，土体内部气体很难排出，偏向于橡皮土状态。相同含水率下，粉质黏土掺入不同比例高岭土与水泥熟料后，液限、塑限、塑性指数和密度都在变化，在相同击实工艺条件下，孔隙比和饱和度也均有变化，且标贯击数随掺量加大有明显的提高。高岭土与水泥熟料掺量比例越大，

液限、塑限、塑性指数越大。由于高岭土黏粒的胶结作用 and 水泥熟料中矿物成分的作用，土体塑限接近 25%，吸水性显著增强，具备采用冲击夯实工艺的条件，土质由粉质黏土改良为黏土，夯实效果增强。

3.2 土体含水率对密实度的影响分析

3.2.1 含水率与密度的关系

密实度越大，密度越大，在压实过程中，土颗粒克服粒间阻力，产生相对位移，使土中的孔

隙减小，密度增加。在一定夯击能量的作用下，不同含水率的黏土重塑完成后，达到最大密度所需要的含水率，为该黏性土制作的最优含水率^[7]。夯击试验的含水率-密度曲线见图 1。

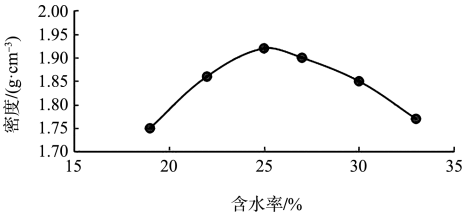


图 1 含水率-密度关系曲线

由图 1 可知，土体最优含水率 $w_{op}=(25\pm2)\%$ ，当土体含水率在此范围内时，可用最小的夯击能达到最大干密度，密实效果最佳。

3.2.2 含水率与饱和度的关系

采用夯实法加密土体，当土体含水率一定，土体越密实，夯实过程中排出土中的气体越少，饱和度越高。此种黏性土在最优含水率时，夯击效果好，相应饱和度也高。夯击试验的含水率-饱和度和曲线见图 2。

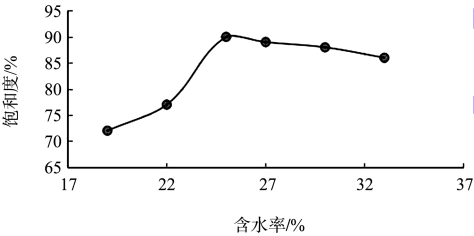


图 2 含水率-饱和度关系曲线

从图 2 可知，随着含水率的减小，土的可塑性减小，在同一夯击能量前提下，疏浚黏土的密度不断增大；当含水率减小到某个值时，干密度和湿密度反而会不断减小，这个临界含水率即为最优含水率，由图 2 可知最优含水率为 25%。因此在冲击夯实法制作重塑黏土时，含水率为 25% 时可制作出最大密度和强度的试验黏土。

3.3 土质液性指数对标贯击数影响分析

土的比表面积和矿物成分不同，吸附结合水的能力也不一样。对于黏性高的土，水的形态可能全是结合水；对于黏性低的土，则可能相当部分是自由水，所以仅由含水率并不能说明土体处于何种状态。液性指数可表征土的天然含水率与

分界含水率之间的相对关系，区分黏性土的状态，进而体现在标贯击数的不同，关系曲线见图 3。

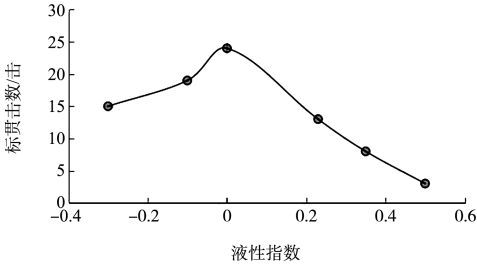


图 3 液性指数-标准贯入击数关系曲线

对于重塑密实黏土，其液限、塑限与土颗粒吸水性质有关，液性指数与含水率的变化趋势一致，当含水率减小到塑限 25 以下，液性指数约为 0 时，土体呈现半固体状态，土体间的颗粒具有很大的支撑强度。在固定的冲击夯能下，随着含水率的减小，液性指数减小，处理效果反而较差，标准贯入击数测试值也逐渐减小。

4 结论

1) 得出了密实黏性土的基本判别指标，疏浚密实黏性土的含水率 $w=25\% \sim 30\%$ ，塑性指数 $I_p=13 \sim 21$ ，标准贯入击数 $N=8 \sim 16$ 击。

2) 通过掺入不同比例高岭土(粒度 4 000 目)、铝酸盐水泥熟料(Al_2O_3 含量 60%)和矿粉(比表面积 $400\text{ m}^2/\text{g}$)进行土质改良后，原粉质黏土的性质发生改变，具备了利用冲击夯实法重塑疏浚黏土的基本性质，具有便捷可控性。高岭土黏粒的胶结作用和水泥熟料中矿物成分的作用，在相同含水率和相同密实工艺条件下，重塑黏土密度、液限、塑限、塑性指数、标贯击数与掺量成正相关关系。当土体塑限接近 25% 时，吸水性显著增强，具备采用冲击夯实工艺的条件，夯实效果显著提升。

3) 得到土体含水率对密实度以及液性指数对标贯击数的影响趋势，在最优含水率时重塑黏土饱和度高，密实效果好。重塑密实黏土的液性指数与含水率的变化趋势一致，当液性指数为 0 时，土体标贯击数较高，在固定的冲击夯能量下，随着含水率的增大或减小，标准贯入击数测试值均逐渐减小。