



膨润土泥浆改变砂性土振动密实特性的 室内试验研究

宋博文^{1,2}, 寇晓强^{1,2}, 陈智军^{1,2}

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;

2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222)

摘要: 钢圆筒结构具有施工工期短、经济、耐久性好、施工便捷等特点，目前已在粤港澳大湾区某工程和国内某跨江通道工程中应用。当地基中存在较硬的夹砂层时，钢圆筒在打设过程中会使砂层发生振密效应，造成砂层板结，给钢圆筒振沉带来了很大的困难，强行打设会导致钢圆筒结构产生破坏。因此有必要对夹砂层和砂层地基进行改性，改变砂层土体振动密实特性，使钢圆筒顺利振沉。通过室内膨润土改性砂样的试验研究发现：1) 膨润土可以很好地降低砂土的抗剪强度，改性后的黏聚力 c 有一定的提升，但是内摩擦角 φ 降低较为明显。2) 水土比对砂土抗剪强度的影响较小，膨润土掺量对泥浆改性砂土的抗剪强度有很大的影响。3) 膨润土改性砂土选用的泥浆配合比，建议膨润土掺量为 5%、水土比选择在 8~20。

关键词: 泥浆；改性；砂性土；振动密实

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0222-05

Laboratory test on changing vibration compaction characteristics of sandy soil by bentonite mud

SONG Bo-wen^{1,2}, KOU Xiao-qiang^{1,2}, CHEN Zhi-jun^{1,2}

(1.CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2.CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Key Laboratory of Geotechnical Engineering
of Ministry of Communications, Tianjin 300222, China)

Abstract: The steel cylinder structure has the characteristics of short construction period, economy, good durability, and convenient construction. It has been applied in a project in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and a cross-river channel project in China. When there is a hard sand layer in the foundation, the vibration density effect of the sand layer will occur during the construction of the steel cylinder, resulting in the compaction of the sand layer, which brings great difficulties to the vibration settling of the steel cylinder. Forcibly installation will cause damage to the steel cylinder structure. Therefore, it is necessary to modify the sand layer and the sand layer foundation to change the vibration dense characteristics of the sand layer and make driven of steel cylinder smoothly. Through the experimental study of indoor bentonite modified sand samples, we find that: 1) Bentonite can reduce the shear strength of sand very well. After modification, the cohesive force c will be improved to a certain extent, but the internal friction angle φ will be significantly reduced. 2) The water-cement ratio has little effect on the shear strength of sand. The amount of bentonite has a great influence on the shear strength of mud-modified sand. 3) The mud mix ratio selected for bentonite modified sandy soil is recommended to be 5% of bentonite and the water-cement ratio of 8 to 20.

Keywords: mud; modified; sandy soil; vibration dense

收稿日期: 2022-05-03

作者简介: 宋博文(1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为岩土工程监测检测信息化。

钢圆筒结构具有施工工期短、经济、耐久性好、施工便捷等特点, 而且能适应恶劣的风浪流环境, 无需抛石基床, 并可避免开挖地基, 该结构在软土地基方面具有较大的优势^[1]。目前, 国内对钢圆筒结构的研究主要集中在其使用期的稳定性研究, 对其在振动荷载作用下振沉施工的应用研究较少^[2-3]。钢圆筒快速成岛技术在粤港澳大湾区某工程中予以首次应用^[4], 该工程中的钢圆筒都是插入软土, 未见插入硬质砂层。国内某跨江通道工程在施工时, 碰到了较为密实的砂层, 砂层的标贯击数大于 30 击, 给钢圆筒的振沉带来了困难^[5]。当钢圆筒振沉到夹砂层、局部砂性土层和砂层土层, 标贯击数大于 15 击时, 砂层密实程度为中密及以上, 由于钢圆筒的振动会对夹砂层和砂层土体产生振动密实效应, 使砂层板结, 给钢圆筒振沉带来了很大的困难, 强行打设, 会导致钢圆筒结构产生倾斜或者破坏^[6]。因此有必要对夹砂层和砂层地基进行改性, 改变砂层土体特性, 使钢圆筒顺利振沉, 这项研究具有很高的实际应用价值。

工程现场对于砂性土层的密实程度评价主要通过标准贯入试验来进行, 为了对现场标贯试验指标和室内试验指标进行更加直观的对比分析, 本文将现场标贯试验得到的标贯击数通过经验公式换算成砂土的内摩擦角, 然后在室内通过直剪试验得到原状砂样和改性后砂样的内摩擦角, 最终通过内摩擦角建立起现场标贯试验和室内直剪试验的关系。首先在已知标贯击数的砂层区域进行现场取样, 在室内进行砂样的基本物理性质试验; 之后, 再利用泥浆对原状砂样进行改性, 通

过对不同泥浆水土比和膨润土掺入比的砂样进行直剪试验, 找出最合适的砂土改性掺量。

1 试验仪器和材料

1.1 试验仪器

本研究需要进行原材料相关试验、配合比设计试验和直剪试验, 综合以上试验要求, 配置如下试验仪器设备: 直径 30 cm 的 5 mm 标准砂石筛, 61.8 mm×20 mm 环刀, 量程 30 kg 和 500 g 的电子天平, 光滑钢捣棒, 行星式搅拌机, 振动台, 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体试模, 应变控制式直剪仪, 削土刀, 铝盒, 塑料薄膜, 钢丝锯, 冰柜。

1.2 试验材料

1.2.1 砂样

现场钻取的密实原装砂样样的基本性质为: 天然含水率 $\omega = 14.43\%$, 天然密度 $\rho = 2.01 \text{ g/cm}^3$, 标贯击数 34 击, 承载力 300 kPa, 直剪快剪黏聚力 $c = 0$ 、内摩擦角 $\varphi = 41.6^\circ$, 不均匀系数 $C_u = 7.7$, 曲率系数 $C_c = 1.63$ 。砂层粒度分析结果见表 1。根据广东省标准 DBJ 15-31—2016《建筑地基基础设计规范》, 砂土的内摩擦角 φ 可根据经验公式 $\varphi = \sqrt{20N} + 15^\circ$ 计算, 故估算出的砂土内摩擦角为 40° , 这与室内直剪试验做出的内摩擦角 41.6° 较为接近, 直剪试验可以较好地反映现场土样的内摩擦角大小。

1.2.2 膨润土

采用瑞恒牌复合高效膨润土, 型号为高效高黏。

表 1 砂层粒度分析结果

粒组/mm	10~5	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
粒组含量/%	4.1	10.9	27.7	13.6	15.6	2.8	0.3

2 试验方案

为了解决砂层在振动荷载下易板结造成钢圆筒施工困难的问题, 拟采用在砂土中喷泥浆对砂土进行改性试验。通过改变泥浆水土比和膨润土掺入比两个参数, 找出最合适的砂土改性掺量。

在砂土中喷入泥浆可以改变砂土的流动性和

颗粒级配, 使砂土内摩擦角 φ 减小, 进而改变砂土振动板结特性。喷泥浆改性砂土主要通过两个试验参数来控制, 即泥浆水土比和膨润土掺入比。泥浆水土比是指用于改性土体的泥浆中水与膨润土的质量比; 膨润土掺入比是指掺入的膨润土质量与被改性土的湿质量之比, 以百分数来表示。

具体的试验方案见表 2, 采用单一变量原则。

表 2 泥浆改性砂土的试验方案设计

试验组号	泥浆水土比	膨润土掺入比/%
T1	8	1
T2	8	3
T3	8	5

3 试验方法

3.1 原材料准备

称取试验用膨润土、水和砂样。在环刀内侧均匀涂抹 1 层凡士林, 然后称质量。

3.2 试件制备

3.2.1 试件的搅拌

将称量好的砂和膨润土放入行星式搅拌机搅拌均匀, 加入拌合水低速搅拌 1 min, 再高速搅拌 30 s, 停止搅拌并在 30 s 内将包裹在搅拌机叶片和锅壁上的砂和膨润土混合物用刮土刀刮去, 如此重复 6 次, 直至搅拌均匀。

3.2.2 试件的成型

1)首先将试模底部的通气孔用黏土堵住; 2)在 $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$ 的试模内均匀涂 1 层脱模剂; 3)搅拌完成后应尽快成型, 成型时间不应超过 25 min; 4)将称质量后的环刀居中放入试模内, 环刀与试模边不发生接触, 具有一定的缝隙; 5)将拌合土装入带环刀的试模内, 装样高度为 3 cm, 按螺旋方向从边缘向中心均匀插捣 15 次, 插捣时捣棒应保持竖直, 插捣后应用油灰刀或刮刀沿试模内壁插拔数次; 6)试模在振动台上振实 15 s, 然后将拌合土表面抹平, 盖上塑料薄膜, 放入冰柜中冷冻 12 h。

3.2.3 试件的拆模

1)首先用圆锥将试模底部通气孔处的淤泥去除; 2)用气泵将冰冻的拌合土(砂样和膨润土)试

样推出; 3)用削土刀将环刀周围多余的冰冻土样砍去, 削成环刀试样大小, 整个削样过程应在 5 min 内完成, 避免试样融化; 4)取适量削下的土测量含水率; 5)将削好的环刀样放在天平上称质量, 计算环刀样的密度; 6)将装有试样的环刀平口向下, 对准剪切盒口, 在试样顶面放不透水板, 将试样徐徐推入剪切盒内, 移去环刀; 7)试样静止 1 h 以上, 待试样完全融化后方可进行直剪试验。



图 1 冰冻成型后的试件

3.3 直剪试验

剪切试验采用直剪快剪试验。放入直剪盒内试样需静止 1 h 以上, 待试样融化后方可进行直剪试验。由于用泥浆改性后的砂样无法制取直剪试验所需的环刀样, 故采用冻结试样代替, 王吕岗^[7]通过室内试验研究发现冻融循环对固化泥砂浆的强度影响较小, 故不必考虑冻融循环 1 次对试样强度的影响。直剪快剪试验步骤按国家标准 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》第 21.3 节进行。剪切速率取 1.0 mm/min。施加于试件的垂直压力分别为 50、100、150、200 kPa。

4 试验结果和分析

泥浆改性砂土试验结果见表 3。

表 3 泥浆改性砂土抗剪强度试验结果

试验 组号	上部荷载 50 kPa			上部荷载 100 kPa			上部荷载 150 kPa			上部荷载 200 kPa			黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$
	剪切强 度/kPa	试样密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水 率/%											
T1	54.21	2.08	14.50	92.44	2.09	14.08	145.22	2.06	14.14	195.26	2.15	13.89	2.80	43.59
T2	47.14	1.92	13.56	95.12	2.01	13.32	122.15	1.92	12.06	155.90	1.90	12.96	16.75	35.25
T3	22.24	1.83	13.72	45.07	1.78	13.89	73.78	1.75	13.33	91.13	1.85	13.75	0.00	24.96

由表 3 和图 2 知, T3 组试验效果最好, 砂土内摩擦角 φ 由原来的 43° 降低至 24.96° , 减少了 18.04° 。膨润土可以很好地降低砂土的抗剪强度, 改性后的黏聚力 c 有一定的提升, 但是内摩擦角 φ 降低较为明显, 并且随着膨润土掺入比的增加逐渐降低, 二者成反比关系, 具体关系见图 3。改性后的砂样含水率在 $13\% \sim 15\%$ 。由图 4 可以发现, 膨润土改性后的砂土流动性很差、砂土颗粒悬浮在膨润土浆中。这是因为膨润土的加入破坏了砂土原有的单粒结构, 转化成现在似黏土的絮凝型结构, 导致后面在进行直剪试验时, 出现膨润土浆挤出现象, 见图 5。由于膨润土的掺入, 砂颗粒间充满了黏土颗粒, 使得含黏粒砂土具有一定的黏性, 因此砂土的黏聚力增大。但随着黏粒掺量增加, 砂土逐渐被黏粒包围, 颗粒周围结合水膜增厚, 降低了剪切面上土粒的粗糙度, 从而使砂土的内摩擦角减小。将室内试验得到的内摩擦角换算成现场标贯试验的标贯击数为 5 击, 综上, 膨润土可以很好地改性砂土, 使被改性砂土的抗剪强度明显减小。

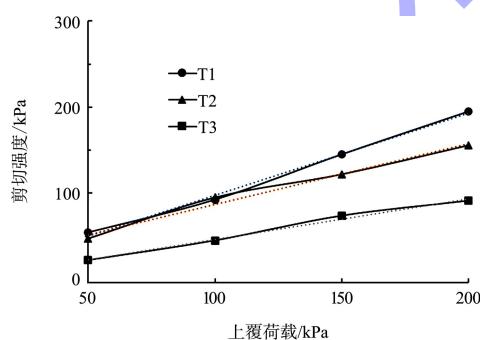


图 2 不同膨润土掺入比改性砂土抗剪强度试验

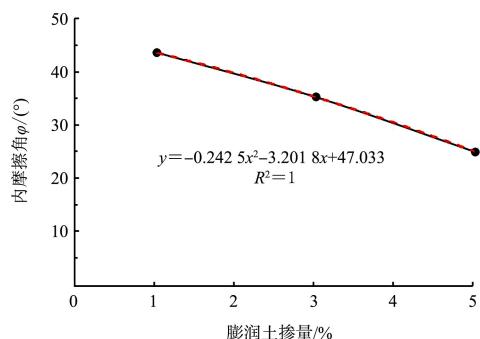


图 3 膨润土掺量和内摩擦角间的关系



图 4 膨润土改性砂土后的状态



图 5 泥浆改性砂样直剪试验后试样溢出

5 泥浆改性砂土优化试验结果

泥浆改性砂土的抗剪强度随着膨润土掺入比的增加而下降, 并且可以很好地降低了砂土的内摩擦角 φ 。T4 试验所用配合比为: 膨润土掺量 3.00% , 水土比 20.0 。泥浆改性砂土优化试验的结果见表 4, 黏聚力为 14.72 kPa , 内摩擦角为 34.57° 。

由表 4 可以看出, 泥浆改性砂土试验优化后, 砂土的抗剪强度与 T2 组相比有一定的减小, 但是强度不明显, 说明增大水土比对于减小泥浆改性砂土的抗剪强度不明显、对砂土抗剪强度的影响较小, 印证了膨润土掺入比对泥浆改性砂土的抗剪强度有很大的影响。综合以上试验, 建议泥浆改性砂土试验所用的膨润土掺入比为 5% 、水土比选择在 $8 \sim 20$, 可使改性后的砂性土层的标贯击数控制在 4 击左右, 将砂性土层改性为标贯击数小于 10 击的松散砂, 满足现场钢圆筒振沉的需要。

表 4 泥浆改性砂土优化试验结果

上部荷载/kPa	剪切强度/kPa	试样密度 g/cm ³	含水率/%
50	43.95	1.78	27.95
100	87.97	1.77	23.63
150	125.10	1.77	21.61
200	146.42	1.79	21.14

6 结论

1) 膨润土泥浆可以很好地降低砂性土层的标贯击数, 使改性后砂性土层的标贯击数降低至4击左右。

2) 膨润土泥浆改性砂土优化试验表明, 加大水土比, 对于减小泥浆改性砂土的抗剪强度不明显、对砂土抗剪强度的影响较小, 膨润土掺量对泥浆改性砂土的抗剪强度有很大的影响。

3) 膨润土泥浆改性砂土选用的泥浆配合比建议膨润土掺量为5%, 水土比选择在8~20。

(上接第207页)

- [3] 王萧寒, 王俊刚, 卢军民. 水工建筑物水下三维检测精确定位分析[J]. 水运工程, 2021(10): 85-89.
- [4] 陈星辰, 陈斌. 双频识别声呐水下影像监测系统及其应用[J]. 中国水能及电气化, 2015(11): 22-25, 17.
- [5] 荆丹翔. 基于识别声呐的鱼群目标检测跟踪方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [6] WANG J Y, HAN J, DU P F, et al. Three-dimensional reconstruction of underwater objects from side-scan sonar images[C]// OCEANS 2017-Aberdeen. IEEE, Aberdeen: [s.n.], 2017: 1-6.
- [7] AYKIN M D, NEGAHDARIPOUR S. Three-dimensional target reconstruction from multiple 2-d forward-scan sonar views by space carving[J]. IEEE Journal of oceanic engineering, 2017, 42(3): 574-589.
- [8] ASSALIH H. 3D reconstruction and motion estimation using forward looking sonar[D]. Edinburgh: Heriot-Watt University, 2013.

参考文献:

- [1] 李伟仪, 卢永昌. 插入式大直径钢圆筒岸壁结构的设计实践及应用前景[J]. 水运工程, 2004(3): 24-29.
- [2] 徐艇. 大直径薄壁圆筒结构振动下沉过程瞬态动力有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [3] 肖新伟, 刘亚平, 高潮. 大直径钢圆筒振动下沉可行性分析方法[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(4): 9-11.
- [4] 孔令磊, 孙竹, 杨润来, 等. 港珠澳大桥西人工岛钢圆筒及岛内回填砂成岛技术[J]. 水运工程, 2019(S1): 62-66, 76.
- [5] 安秀山, 冯宝强. DSM 法硬土层辅助贯入施工技术的研发与应用[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(5): 16-19, 54.
- [6] 张洋, 徐新成. 浅插法大直径钢圆筒在换砂振沉施工中的应用[J]. 水运工程, 2018(1): 220-223.
- [7] 王吕岗. 吹填式固化泥砂浆灌注大粒径堆石体填筑台背路基关键技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
- [9] KWAK S, JI Y, Yamashita A, et al. 3-D reconstruction of underwater objects using arbitrary acoustic views [C]// Mechatronics. IEEE, 2016: 74-79.
- [10] JI Y, KWAK S, YAMASHITA A, et al. Acoustic camera-based 3D measurement of underwater objects through automated extraction and association of feature points [C]// 2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. Piscataway: IEEE, 2016: 224-230.
- [11] HURTÓS N, RIBAS D, CUFI X, et al. Fourier-based registration for robust forward-looking sonar mosaicing in Low-visibility underwater environments[J]. Journal of field robotics, 2015, 32(1): 123-151.
- [12] 李雪峰, 姜静. 一种声纳图像的三维重建方法[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(5): 38-45.

(本文编辑 武亚庆)

(本文编辑 王传瑜)