



疏浚土的附着力特性试验研究*

张先伟¹, 黎伟¹, 王勇¹, 孟令福²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2.中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要: 土的附着力是港航疏浚工程中一项重要技术指标, 它可为抓挖机械的选取及其操作技术提供合理建议, 为航道、港池等开挖工程以及吹填工程提供设计与施工参数, 但目前对其研究仍处初步阶段。通过对7种典型疏浚土进行物性试验与附着力试验, 从土力学角度关联土的物理指标与附着力, 从土质学角度探讨土的粘附机理。结果表明, 土的黏粒含量越高, 附着力越大。随着含水率的增加, 附着力逐渐增大, 当含水率接近液限时附着力达到峰值, 此后逐渐减小。附着力的产生与变化机理主要是由于结合水性质与含量发生变化, 进而引起接触物—水—土—电解质系统吸附力与解离力的产生、发展、平衡、破坏所导致。研究还表明, 该区土在天然含水率状态下土的附着力在数值上约为其塑性指数的5倍。疏浚工程中, 淤泥厚度大地区, 可采取冲水条件下开挖; 含较多砾、砂、粉的土体可采取增加排水措施, 用以提高掘进与排泥速率。

关键词: 土; 附着力; 疏浚工程; 塑性指数; 结合水

中图分类号: TU 411.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0045-06

Test research on adhesion characteristics of dredged soils

ZHANG Xian-wei¹, LI Wei¹, WANG Yong¹, MENG Ling-fu²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Survey Department CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The adhesion of soil is a very important technical indicator in the dredging engineering, which can provide reasonable suggestions for the selection and operation technique of digging machine and offer design and construction parameters for the excavating and jetting-filling projects of channel, harbor basin, but the research of adhesion is still at a preliminary stage now. Seven typical soils in dredging engineering were chosen to do physical property and cohesion tests, connecting the physical indexes and cohesion of soil at soil mechanics level and discussing the adhesion mechanism of soil at soil properties level. The results showed that, the higher the clay content of soil, the larger the adhesion. The adhesion increased gradually with the increasing of moisture content and reach peak when the moisture content was closed to liquid limit and then decreased gradually. The generation and variation mechanism of adhesion were mainly due to the change of properties and content of bound water, which caused the generation, development, equilibrium and damage of adhesion and dissociation force in water-soil-electrolyte system. The results also showed that, the adhesion of soil in natural moisture content was about 5 times the plasticity index numerically. In dredging engineering, the area with large thickness muck should be excavated with water filling and for soil containing more gravel, sand and silt drainage measure should be enhanced to increase the digging and spoil disposal speed.

Key words: soil; adhesion; dredging engineering; plasticity index; bound water

从广义上讲, 附着力是指两种不同物质接触部分的相互吸引力。附着力是材料科学、表面

工程、机械工程、农业工程等学科中一个非常重要的概念, 目前对其研究主要集中在如何增强硅

收稿日期: 2013-06-05

*基金项目: 国家自然科学基金(41102200)

作者简介: 张先伟(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事特殊土力学方面的科学研究。

胶、塑胶、金属、纸张和织物等的附着力达到增加粘结强度的目的,以及减小机械工作过程中周围介质材料对其粘附效应,提高机械使用性能等方面^[1-3]。

在岩土工程学科中,土在一定的含水量下,具有与其他非土壤固体材料的粘附能力,称之为土的附着力。附着力是港航疏浚工程中一项重要技术指标,可为抓挖机械选取及其操作技术提供合理建议,为航道、港池等开挖工程以及吹填工程提供设计与施工参数。港航疏浚系统相关规范^[4-5]明确指出附着力测试是疏浚岩土试验项目之一,附着力也是疏浚土分类的辅助判别指标。近年来,随着港口工程建设的不断发展,疏浚、吹填、开挖工程不断增多,工程建筑规模及复杂性的增大要求人们在工程实践必须准确的把握土性对工程建设的影响。然而,受测试仪器与测试方法等原因限制,目前国内外对于土的附着力特性研究仍停留在初步阶段^[6-8],对于土的粘附效应机理理解并不透彻,甚至对于不同类土的附着力经验值都未见报道。

鉴于以上研究现状,本文通过对多种典型疏浚土进行附着力试验与基本物性试验,试图建立土的物理指标与附着力的相互关系,探究土的粘附特性机理,这可为港航工程选择挖泥工具和计算吹填效率等提供理论依据。

1 试验方案

1.1 试验原理

附着力测试主要是测定黏性土吸附在金属板上的单位面积附着力,附着力 F (kPa)计算公式为

$$F=N/A \quad (1)$$

式中: N 为峰值拉力(N); A 为土样截面积(cm^2)。

试验中施加的拉力可通过人工添加的铁砂来实现(本文采用的方法),或通过手摇与测力弹簧连接的转轮来实现。

1.2 试验方法

试验方法参考相关规范^[4-5]。试验土样为珠海口岸某疏浚工程保持天然含水量的扰动土。试验

在中交第一航务工程勘察设计院有限公司土工试验室进行。试验前,先对土样进行包括密度、含水率、液塑限等常规土工试验^[9],其中液塑限试验采用液、塑限联合测定法。试验仪器^[10]见图1。

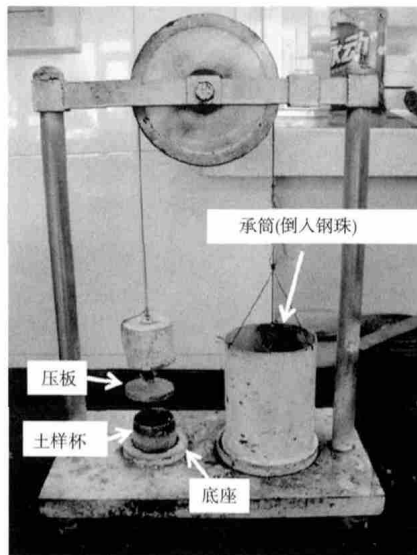


图1 附着力测试仪

试验方法如下:

1) 将土样调匀,分层装入土样杯中,填实填满。用垫圈套住杯口,刮去余土,使土面与垫圈齐平。除去垫圈,土面应高出杯口2 mm。

2) 将土样杯装在预先整平的附着力仪底座上,压板对准土样杯口,使压板平面完全接触土面。在压板上部无冲击地施加垂直荷重20,加荷时间为30 s,擦净杯口挤出的余土。

3) 将土样杯放入附着力仪底座,旋转使之固定,通过漏斗使钢珠匀速下落,当压板脱离杯口(脱离土面)时立即停止。

4) 将钢珠放入托盘,采用精度为0.01 g的电子称称量。所得质量乘以重力加速度除以压板面积 10 cm^2 ,其值即为土样的附着力值。

5) 擦净压力板上的土,按前述步骤重复进行6次,取平均值作为该土的附着力。

由于与土样接触的压板表面的光滑程度对实验结果影响较大,要求压板粗糙度规定为光面类 ∇ ,以看不见加工痕迹、划痕为准。 ∇ 表示表面的轮廓算术平均偏差的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$ 。

结果见表1。

表1 土的物理性质与附着力

钻孔编号	取样深度/m	土样定名	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率/%	孔隙比 e_0	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_P	液限指数 I_L	附着力 F/kPa		
										最小值	最大值	平均值
SK07	8.7~9.2	淤泥	1.65	69.61	1.78	39.80	65.80	26.00	1.15	145.8	162.09	157.16
	11.7~11.9	砂质粉土	1.99	18.90	0.61	—	—	—	—	40.13	52.09	46.62
	26.6~26.8	砂质黏性土	1.90	26.78	0.80	25.76	34.12	8.36	0.12	28.87	34.00	31.36
SK12	9.0~9.5	淤泥	1.70	71.08	1.72	35.60	65.00	29.40	1.21	153.45	159.21	157.01
	12.0~12.2	粉质黏土	1.87	19.85	0.73	20.40	31.20	10.80	0.29	39.42	41.33	40.06
	13.6~13.8	粉质黏土	1.82	27.29	0.89	20.10	32.70	12.60	0.57	60.19	73.31	66.01
	29.3~29.5	砂质黏性土	1.93	37.75	0.93	25.10	33.20	8.10	1.56	36.07	46.81	41.92
	31.0~31.2	砾质黏性土	2.01	33.31	0.79	18.21	26.23	8.02	1.88	22.22	27.61	26.15
SK20	8.0~8.2	粉质黏土	1.87	19.46	0.72	—	—	—	—	53.19	60.41	57.37
	32.2~32.4	砾质黏性土	2.05	27.06	0.67	19.10	24.50	5.40	1.47	22.12	28.58	24.90
SK21	22.2~22.4	淤泥质粉质黏土	1.75	36.31	1.10	24.14	43.12	18.98	0.64	79.33	95.12	88.06
	32.0~32.2	砂质黏性土	1.92	20.56	0.70	—	—	—	—	15.73	35.80	22.91
SK29	18.8~19.0	粉质黏土	1.85	22.86	0.79	21.10	31.60	10.50	0.17	50.32	58.25	53.91
SK31	3.0~3.5	淤泥	1.69	46.25	1.34	32.50	67.00	34.50	0.26	160.87	170.73	165.42
	10.8~11.0	淤泥质粉质黏土	1.71	33.71	1.11	25.20	48.20	23.00	0.32	112.78	138.94	127.13
	23.2~23.4	砂质粉土	1.86	14.95	0.67	—	—	—	—	15.72	20.71	18.31
	27.2~27.4	砾质黏性土	1.97	29.37	0.77	—	—	—	—	20.01	30.67	25.75
SK34	9.5~9.7	黏质粉土	1.95	20.91	0.67	22.00	34.14	12.14	0.09	52.87	62.52	58.01
	11.4~11.6	黏质粉土	1.91	25.45	0.77	—	—	—	—	74.06	86.31	82.57

注：“—”表示土样由于含砂、砾较多，未进行液塑限试验。

2 土的附着力试验结果分析

试验土样根据JTJ/T 320—1996《疏浚岩土分类标准》^[5]定名为7种土，土样随埋深增大，黏粒含量逐渐减小，含水率逐渐减小。根据表1对土样的附着力进行分类^[5]，土样中只有淤泥的附着力超过150 kPa，为中等附着力土；淤泥质粉质黏土、黏质粉土、粉质黏土的附着力超过50 kPa，为弱附着力土；砂质黏性土、砂质粉土、砾质黏性土的附着力未超过50 kPa，为无附着力土。

按不同分类土的附着力进行统计（图2）。淤泥、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、砂质黏性土、砂质粉土的附着力逐渐下降，砂质粉土与砾质黏性土的附着力值相差不大。这说明土的颗粒成分对土的附着力影响显著，表现为土的黏粒含量越高，土的附着力越大；砂砾含量越高，土的附着力越小，换句话说也就是土本身的粘聚力越大，对其他固体材料的吸附能力也越强。

值得一提的是，试验过程中发现部分土样（主要是砂质黏性土、砂质粉土、砾质黏性土）中

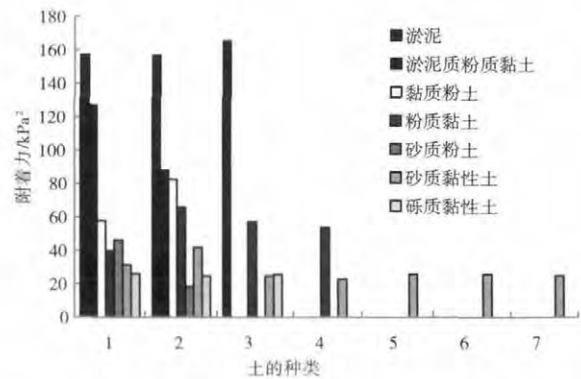


图2 不同类土的附着力

砂、砾分布不均、含量不同，分布形式有的是“夹层”，有的是“夹杂”，试验操作时首先需要将土样调匀，即黏性土与砾、砂进行充分的混合，这也导致对含有砂质、砾质的黏性土与粉土的附着力产生一定的误差。在实际工程中，若场地内土体夹杂不均匀、厚度不等的砾、砂，土体的附着力可能变化较大。

按场地区域划分（图3），钻孔SK07、SK12、SK31所处区域富含淤泥与淤泥质粉质黏土，土体附着力在10 m处最大（大于100 kPa），

随着深度增大，附着力减小趋于定值（40 kPa左右）；钻孔SK20、SK34所处区域土体由于含粉土、砂、砾，附着力略小（30~80 kPa）；钻孔SK21随土体深度增大，附着力明显下降。因此，在淤泥厚度较大地区，在挖掘与排泥过程中，应分析其对挖泥机具的粘附和形成黏土球而增加排泥阻力在管道口出现堆积的现象，及时清除机械粘结的淤泥，提高掘进与排泥速率。

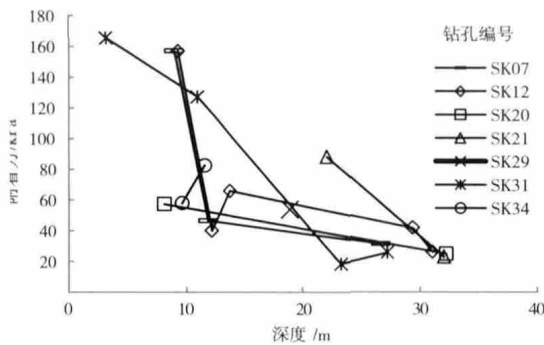


图3 不同深度土的附着力

3 土的物理指标与附着力相关性分析

土具有与其他固体材料的粘附效应必然在土的轻重、松密、湿干、软硬等一系列物理性质上有不同的反应。通过不同类型土含水率与附着力关系（图4）可知，对于黏粒含量较大，含水量较多的淤泥与淤泥质粉质黏土随着含水量的增大，附着力逐渐减小；其他类土表现为随着含水量的增大，附着力逐渐增大。这说明含水量对土的附着力影响显著，为了进一步分析不同含水率土的附着力变化，选取淤泥、淤泥质粉质黏土以及粉质黏土配比不同含水率，然后进行附着力试验，试验结果如图5所示。3种土随着含水率的增加都表现为先增大，达到峰值后附着力下降，淤泥与淤泥质粉质黏土这种现象最明显。同时发现，附着力峰值对应的含水率接近土的液限值，也就是说当土处于可塑状态向流动状态转变时，此时粘附能力最强，当含水量进一步增加，土呈流动状态时，对固体材料的附着能力反而会减弱。

在疏浚工程中，随着挖掘工作的开展，土层的含水量势必产生一定的变化。对于黏质粉土、粉质黏土、砂质黏性土、砂质粉土、砾质黏性土

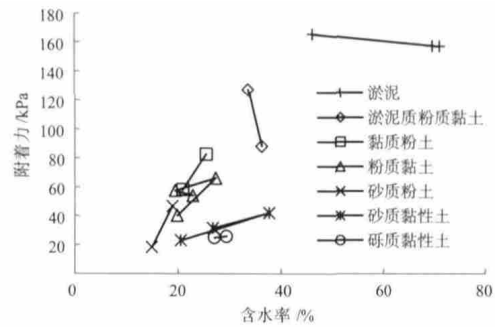


图4 不同类型土附着力与含水率关系

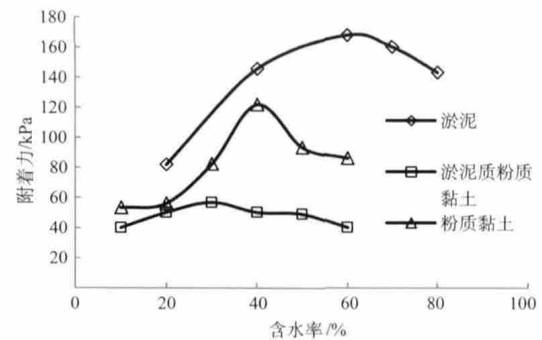


图5 不同含水率土的附着力

这类粉质土或含砾、砂的黏性土要注意因施工带来含水量的增大进而增加土体附着力。为了提高施工效率，可适当考虑增加排水措施。由于淤泥的天然含水率普遍高于液限，增加排水对减弱附着力可能效果不明显，可考虑在冲水下施工，以提高破土能力与清除堵塞。

从对图5分析可知，土的物理状态（稠度）直接影响其附着力大小，因此，建立附着力与液限、塑限、液性指数、塑性指数的相互关系，如图6~8所示。分析可知，土的附着力普遍随着界限含水率的增大而增大。

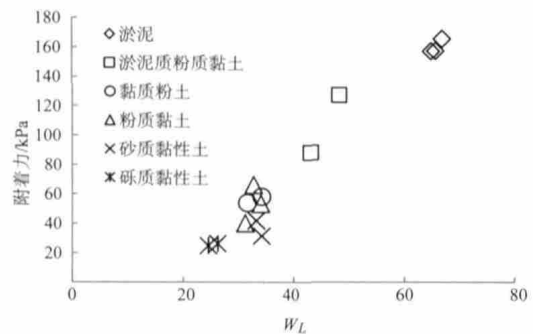


图6 不同类型土附着力与液限关系

土的液性指数表征土的天然含水率与界限含水率之间的相对关系，即此时天然土所处的状

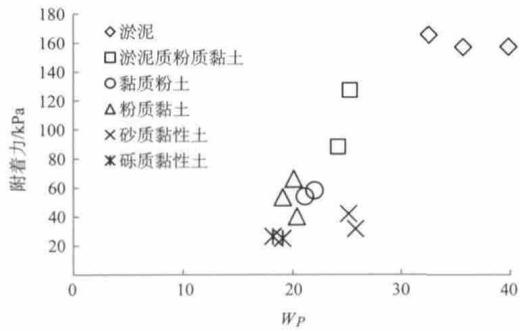


图7 不同类型土附着力与塑限关系

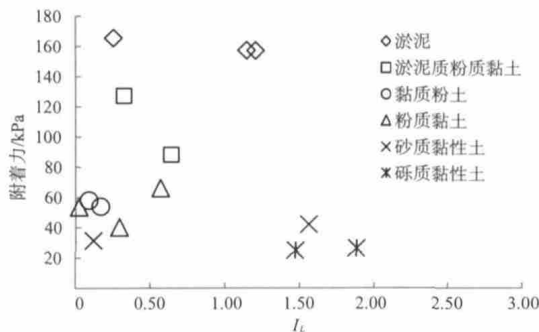


图8 不同类型土附着力与液性指数关系

态。从图8可见, 附着力与液性指数的相关性规律不明显, 这与图5分析的结论是一致的, 如图5中的淤泥, $W > W_L$ 时处于流动状态, $W < W_L$ 时处于可塑状态, 流动状态下土的附着力可能小于可塑状态下土, 也可能比其大, 甚至相等。塑性指数是黏性土的最基本、最重要的物理指标之一, 它综合地反映了黏性土的物质组成, 广泛应用于土的分类和评价。从图9中可以看到, 土的附着力与塑性指数呈明显的线性关系, 关系式为 $F=4.922I_p$, 其中 F 单位为kPa, I_p 单位为%, 即天然含水率状态下土的附着力在数值上约为其塑性指数的5倍。值得注意的是, 由于不同含水率对土的附着力影响较大, 该关系式是对天然含水率状态下土的统计分析结果, 对于饱和状态下, 以及其他地区土的附着力是否也可通过该式进行估算, 还需做进一步深入研究。

4 土的附着力机理讨论

对于土力学研究者而言, 我们更多关注的是土自身的粘聚性, 如土粒间分子引力形成的原始粘聚力、土中化合物的胶结作用形成的固化粘聚力、表征土缓慢流动的黏滞力等^[11], 而对于土接触的其他固体材料产生的附着能力机理研究并

不深入。虽然一些学者从不同角度提出了如水分张力理论、毛细管理论、五层界面理论等来阐述土的粘附机理^[12-13], 但仍有不少粘附现象解释不清, 令人满意的粘附理论尚待建立。

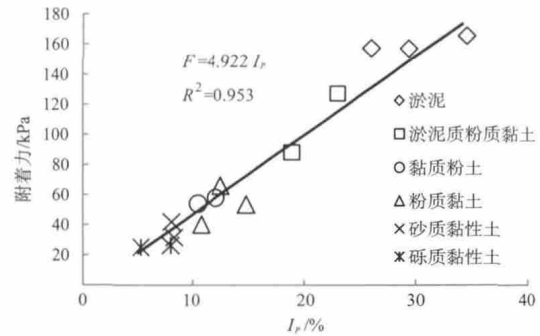


图9 不同类型土附着力与塑性指数关系

从前述分析可知, 土的附着力大小主要取决于土的物理化学性质, 土本身的粘聚力越大, 对其他固体材料的吸附能力也越强。若要真正了解土对其他固体材料的吸附机理, 还应从土壤本身入手。其实土的附着力可用接触物-水-土-电解质系统之间吸引力与解离力来解释。黏土矿物由于同晶代替, 或与水相互作用后具有选择性吸附, 或本身解离, 至于是吸附还是解离这与土中结合水性质与含量关系密切。结合水根据与黏粒表面结合强度的不同, 分为强结合水与弱结合水, 其中强结合水指被牢固地吸附在颗粒表面的一层极薄的水层, 相对于弱结合水, 具有更大的黏滞性。黏性土结合水见图10^[14], 它有利于把土的含水量同颗粒表面的结构状态联系起来。由绝对干土值吸着含水量 W_T 这段湿度范围内, 形成的是黏粒表面强烈连结的强结合水层-吸附水内层, 土与接触材料间开始具有较小附着力; 当含水量至最大吸着含水量 W_{MT} 时, 导致强结合水的急骤增加, 并开始形成毛细水, 土进一步吸水时, 随着含水量的增加, 在原来有孔隙的地方可能较早出现弱结合水, 强结合与弱结合水都在增加, 土的附着力明显增大; 当吸附水到最大分子水容度 W_{MM} (可认为是液限 W_L)时, W_{MM} 是黏性土的最大持水度, 是结合水与自由水的界限, 土再吸水时, 不会增加结合水含量, 相反, 会打破原有水层吸附平衡, 使附着力逐渐下降^[15]。这就可以解释当

含水量增加到附着界限后,附着力随着含水量的增加而增加;含水量继续增加到某一限度后,附着力又随含水量增加而减低。而含砾、砂、粉较多的黏性土由于黏粒含量少,结合水含量少,加之土颗粒比表面积小,与接触物的相互吸引力小,所以附着力也小。

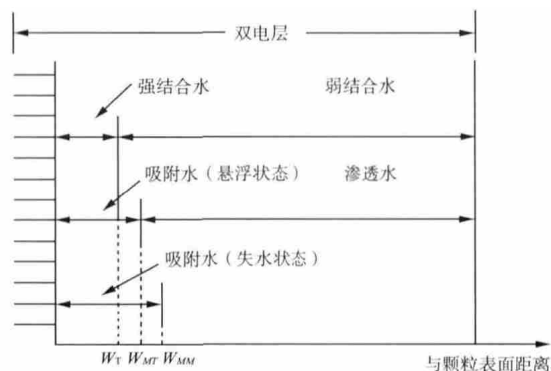


图10 黏粒表面结合水

结合水与土的活动性、矿物成分、粒度成分、孔隙溶液的成分和浓度、温度都有密切关系,同样,这些因素也对土附着力具有重要影响。由于附着力的影响因素较多,我们更希望能通过一个土的常规指标来关联,方便分析。塑性指数能综合地反映土的矿物成分和颗粒大小的影响,塑性指数愈大,表明土的颗粒愈细,比表面积愈大,土的黏粒或亲水矿物含量愈高,土处在可塑状态的含水量变化范围就愈大。因此,本文通过塑性指数指标来评价土的附着力是具有一定理论依据的。

此外,本文实施的附着力试验是模拟土与非土材料紧密接触时,接触界面的投影面的垂直方向上单位面积的拉脱力,这是一种法向附着力测试。应该说港航工程中机械施工时触土部件的粘附,基本上属于法向粘附力。但当机械在抓挖过程中,土与非土材料表面沿运动方向的粘附阻力,是一种切向附着力,这种附着力测试方法与特性还需进一步探讨。此外,以往研究表明,土的附着力与其黏土矿物构成有密切联系,由于土样数量限制,作者并未对试验土样进行矿物成分分析,土的矿物组成对其附着力的影响也是今后研究的重点方向。

5 结论

1) 土的黏粒含量越高,附着力越大;土的附着力随着含水率的增加而增大,当含水率接近液限时,附着力达到峰值,此后随含水率增大而减小。

2) 疏浚工程中,在淤泥厚度较大地区,应清除机械粘结的淤泥,防止土对挖泥机具的粘附和形成黏土球而增加排泥阻力在管道口出现堆积,可采用冲水条件下施工。而对含较多砾、砂、粉的土体可以采取增加排水措施,提高掘进与排泥速率。

3) 土的附着力可用接触物—水—土—电解质系统之间吸引力来解释,它主要受土内部的结合水性质与含量所控制。可采用塑性指数估算土的附着力,天然含水率状态下土的附着力在数值上约为其塑性指数的5倍。

鉴于土附着效应的复杂性,本文对土附着力特性及机理的研究是初步的,还应对土的矿物成分、胶结物质等对附着力有何影响展开研究。此外,研究受力状态发生变化的切向附着力也是下一步需要开展的工作。

参考文献:

- [1] 卢琳,胡建文,李晓刚,等.光老化对丙烯酸聚氨酯/钢板界面附着力的影响[J].复合材料学报,2011,28(2):94-99.
- [2] 吴鸿云,陈新明,刘少军,等.履带板、齿间粘附底质对集矿机附着性能的影响[J].农业工程学报,2010,26(10):140-145.
- [3] 王宗田.附着力测定方法及其影响因素[J].现代涂料与涂装,2010,13(8):22-24.
- [4] JTJ 319—1999 疏浚工程技术规范[S].
- [5] JTJ/T 320—1996 疏浚岩土分类标准[S].
- [6] Ren L Q, Tong J, I J Q, et al. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method[J]. Journal of Terramechanics, 2001, 38(4): 211-219.
- [7] L Q Ren, J Tong, J Q Li, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 73(9): 239-263.

(下转第56页)

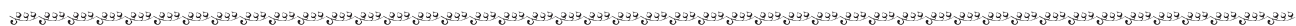
研究主要基于长期观测资料的统计和分析，本次研究的依据资料仅为验证分析模型的有效性，有必要收集长系列资料对该地区的台风暴潮灾害作进一步研究。

参考文献：

[1] 冯士筜. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
 [2] Welander P. Numerical prediction of storm surges[J]. Advances in Geophysics, 1961(8): 315-379.
 [3] 王静, 李维涛, 陈丽棠. 海堤工程防洪标准与区域社会经济发展[J]. 水利技术监督, 2005(3): 47-51.
 [4] 刘德辅, 亢清珍, 韦勇, 等. 海洋环境因素极值组合及设计标准[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 146-150.

[5] 董胜, 刘德辅. 不完整风暴增减水序列的统计分析[J]. 海洋通报, 1999, 18(6): 63-70.
 [6] 刘德辅, 王莉萍, 宋艳, 等. 复合极值分布理论及其工程应用[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 893-902.
 [7] 董胜, 郝小丽, 李锋, 等. 海岸地区致灾台风暴潮的长期分布模式[J]. 水科学进展, 2005(16): 42-46.
 [8] 丁千龙. 海口港风暴潮分析与预报[J]. 海洋预报, 1999, 16(1): 41-47.
 [9] 南京水利科学研究所. 金塘大浦口集装箱码头工程波浪数模计算[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2005.
 [10] 国家海洋局. 1989—2008年中国海洋灾害公告[R]. 北京: 国家海洋局, 2009.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第44页)

4 结论

1) 我国船舶溢油损失序列不服从正态分布，而是呈现出“尖峰、厚尾”的特点。

2) 将分段建模与完整建模相比，分段建模对原始损失数据的主体和尾部均有较好的拟合效果，拟合结果显著优于完整建模。

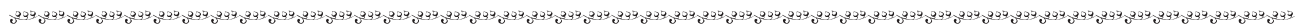
3) DTD-GPD 模型克服了单纯传统损失分布法或单独使用极值理论描述船舶溢油损失分布特征的不足，更准确地刻画了船舶溢油损失分布。

参考文献：

[1] 王君, 潘伟然, 张国荣, 等. 厦门湾海上溢油风险的评估与分析[J]. 台湾海峡, 2009 (4): 31-36.

[2] 申瑞婷, 胡宗敏, 梁刚. 港口船舶溢油环境风险评价方法研究[J]. 水运工程, 2011(11): 159-163.
 [3] Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values [M]. London: Springer, 2001.
 [4] Embrechts P, Kluppelberg C, Mikosch T. Modelling Extremes Events for Insurance and Finance[M]. Berlin: Springer Verlag, 1997.
 [5] 赵智红, 李兴旭. 非寿险中巨额损失数据的拟合与精算[J]. 数理统计与管理, 2010, 29(2): 336-347.
 [6] 欧阳资生. 极值理论: 巨灾保险的统计理论基础[J]. 统计与决策, 2006(11): 13-14
 [7] 张庆洪, 葛良骥. 厚尾稳定分布巨灾风险的集合分散效应[J]. 统计与决策, 2008(3): 29-33.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第50页)

[8] Soni P, Salokhe V M. Influence of dimensions of UHMW-PE protuberances on sliding resistance and normal adhesion of Bangkok clay soil to biomimetic plates[J]. Journal of Bionic Engineering, 2006, 3(2): 63-71.
 [9] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
 [10] 郭玉华, 胡长友, 林荃, 等. 附着力测量仪[P]. 中国: CN 201449366 U. 2010.
 [11] 张先伟, 王常明. 结构性软土的黏滞系数[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3 276-3 282.
 [12] Spektor M. Principles of soil-tool interaction[J]. Journal of

Terramechanics, 1981, 18(1): 51-56.
 [13] Ren L Q, Tong J, Chen B C. Fractal phenomena in soil and wettability research[J]. Transactions of CSAE, 1993, 9(1): 1-6.
 [14] 房后国. 海积软土固结过程中结合水的行为[D]. 长春: 吉林大学, 2001.
 [15] 刘德新, 岳湘安, 候吉瑞, 等. 固体颗粒表面吸附水层厚度实验研究[J]. 矿物学报, 2005, 25(1): 15-19.

(本文编辑 郭雪珍)