

港口岩土工程十年发展概况

魏 汝 龙

(南京水利科学研究院土工所)

近十年来,我国在沿海地区进行了大规模的港口建设。因此,港口岩土工程也有了飞速发展,无论在沿海软粘土工程性质的研究,软基加固的工程实践,桩基和其他港工基础的设计和施工,以及软土地基的勘探取土和现场测试新技术的应用等方面,都已积累相当丰富的经验和大量的资料。

一、沿海软粘土工程性质的研究

在我国沿海地区,土层大多属于近代沉积层。因此,港工建筑物往往不得不建造在深厚的软粘土层上。由于软粘土一般具有含水量高、强度低、压缩性大和透水性小等不利的工程性质,在其上建造建筑物时,容易发生或大或小的工程事故。因此,必须对这些土层进行仔细的勘探、试验和分析,并在施工中采取相应的措施。

结合近年来蓬勃发展的港口建设工程,对于我国沿海软粘土的工程性质,积累了大量的资料。这些资料表明,我国沿海地区典型的软粘土主要有四类,而且,分布在各地的同类土的性质十分相似。表1汇总示出这些软粘土的工程性质的变化范围。

表1 我国沿海软粘土的几种典型

类 型	天然含 水 量 $w(\%)$	密 度 γ (g/cm^3)	孔隙比 e	界限含水量 (%)		塑性 指数 I_p	压缩 系数 a_{1-2} (MPa)	不排水 强 度 S_u (kPa)	透水系数 k ($\times 10^{-7}$ cm/s)	颗粒成组(%)		
				w_L	w_p					砂粒	粉粒	粘粒
淤 泥	60—90	1.5—1.6	>1.5	50—55	25—30	25—30	1.5—2.3	5—10	0.1	10	40	50
淤泥质粘土	45—50	1.70— 1.75	1.3	40—45	20—25	20	1	10—30	1.0	5	55	40
淤泥质亚粘土	35—40	1.80— 1.85	1.05	34	20	14	0.7	—	10.0	5	60	35
淤泥混砂	35—40	1.80— 1.85	1.0—1.15	34	20	14	—	—	—	50	15	35

在这些软粘土中,比较特殊的是淤泥混砂。它在我国华南地区特别是珠江口附近分布很广。这种土特别不均匀,其中所混砂粒往往成团出现。表面看来,除了颗粒组成外,它的物理性质指标似乎与淤泥质亚粘土十分相近。实际上,它们的力学性状并不一样。由于混有大量砂粒,这种土的总体表观含水量并不显得很高,但是其力学性状主要决定于填充在砂粒孔隙之间、将砂粒和砂团包围起来、并使它们相互隔开的淤泥。因此其强度往往接近于淤泥,有时

还不易取得其原状土样。如果按照扰动土样鉴别土类,可能误将这种土定名为砂土而进行设计,从而导致工程事故。所以在1987年出版的《港口工程地质勘察规范》中专门将这种土列为混合土,并且强调指出“对此类混合土的承载力,不应用物理性指标作为评价和计算的依据,应采用力学性指标或现场原位测试方法确定”,提醒勘探、设计人员对此不能掉以轻心。

曾根据各种类型的工程实例来总结软粘土中遇到的工程问题以及在这方面取得的经验教训;并在此基础上详细研究软粘土的强度和变形性质和各种工程计算方法。

在岩土工程实践中,需要解决的抗剪强度问题一般有两个:一是确定土的天然强度,一是确定土的强度在各种不同条件下随荷重而变化的规律。所谓天然强度就是土体保持天然含水量不变,而在不排水条件下剪切破坏时的强度。已经证明,软粘土的原位不排水强度随主应力偏转而变化,并推导出普遍表达式。此外,从大量不排水强度试验资料的统计分析发现,在现有的不排水强度测定方法中,以盒式直剪仪中的快剪试验结果最为零乱。这是由于盒式直剪仪不能严格控制排水条件,利用它进行快剪试验时,甚至会得出完全不合理的结果。例如,对于饱和软粘土有时得出 $\phi_u > 25^\circ$,这是直接与有效应力原理相违背的。因此,在1987年出版的《港口工程地基规范》有关抗剪强度计算指标的条文下,添加了一条附注:“直剪快剪不宜采用”。对于饱和软粘土的强度变化规律,在批判地评述某些现有的粘性土抗剪强度理论的基础上,提出一种综合的抗剪强度理论,以概括用总应力、有效应力和真强度参数定义的各种强度试验结果,并在它们之间建立关系。这样就可以由常规三轴试验得出的结果推求真强度参数,并用于例如象凝聚力随深度而增长的正常压密软粘土的土压力计算等。

对于软粘土的变形性质,已提出各种非线性弹性、弹塑性应力应变模型,并结合Biot理论和有限单元法而应用于软粘土地基的固结和变形计算中。

为了进一步降低港工建筑物的工程费用,加速港口建设的周期,必须对作为港口工程设计基础之一的软粘土工程性质作更进一步的研究。可以先从积累数据着手,收集沿海各港已有的工程地质资料,加以整理分析,建立沿海软粘土工程性质的数据库。为此,要合理地评价现有软粘土试验资料,并拟订一套统一的整理和统计分析方法。目前正以连云港的软粘土资料为试点,初步建立了该地区的软粘土工程性质数据库。

二、软土地基加固技术

港口工程中从50年代开始就采用砂井排水堆载预压的方法加固软粘土地基。这种方法后来又演变成袋装砂井和塑料纸板排水,以适应我国大部分淤泥质海岸缺乏砂源的情况。最近十年左右,在我国港口工程中又陆续开发出几种加固软基的新技术,例如振冲碎石桩法、强夯法、真空预压法、深层拌和法、填土超载挤淤法和爆炸挤淤法等。其中,振冲碎石桩法曾用于澄西船厂、高港船坞等工程中,并在烟台港进行过振冲法加固水下地基的试验。真空预压法曾获得国家科技进步奖。并在天津港东突堤工程国际招标中,以工艺先进、加固效果好和造价低而一举中标。到目前为止,全国采用此法加固的面积已达100万 m^2 左右,共计节约资金约1000万元。真空预压的工艺还在不断改进。例如,单块铺膜面积已达25000—30000 m^2 ,膜下真空度可达650—700mm汞柱以上。抽真空后2—3月后,地基固结可达80%以上,承载力提高1—2倍。此外,室内外试验均证明,真空和堆载的预压效果可以叠加,从而又研究成功真空与堆载联合加固的方法。这就打破了真空预压荷载不能超过80—90kPa的界限。强夯法主要用于加固表层土,包括各种填土(松散砂、砾土、粉煤灰、不饱和的亚粘土河砂或

亚砂土, 工业废渣和建筑垃圾, 山皮土和生活垃圾等)以及天然的松散粉、细砂层。迄今全国采用此法加固的面积已达70万 m^2 。此法施工简单, 可缩短工期, 并节约投资。仅秦皇岛和石臼两个煤港堆场地基采用强夯法加固, 就节省了投资约400万元。目前我国港口工程中一般使用的夯锤不超过16t, 落距在18m以内, 相应的加固深度在以8—9m内。加固后地基承载力可由60—100kPa提高到200—300kPa, 个别的甚至可达400kPa。天津港东突堤工程中的深层拌和法(MDM法)是由我国港口工程部门与日本有关公司联合施工的, 1987年完成了突堤南侧970m码头共21.6万 m^3 的拌合体。岸坡加固体的尺寸为: 深14—17m, 宽17.5—21m。不同部位的置换率分别为100%和50%。加固后60天, 水泥拌合土体的无侧限抗压强度大于2500kPa, 比原地基土的大百倍以上, 其加固效果是不言而喻的。它构成一道坚固的地下挡土墙, 使岸坡稳定性大为增强。据初步估算, 在包括地震力在内的外荷作用下, 其水平位移将小于7cm, 预计码头承台不再会象唐山地震时那样由于岸坡挤压而造成裂桩等现象。但是, 这种加固方法的费用相当昂贵。970m码头岸坡的水泥拌和土体的造价达2200多万元, 约合每延米2.3万元(约为105元/ m^3)。目前, 还在天津港东突堤北侧1100m码头中利用此法加固20万 m^3 的软土地基, 试图在加固后的地基上建设重力式码头, 为天津港建设中打破传统的高桩梁板码头结构型式开辟新的途径。填土超载挤淤法首先在深圳蛇口港二突填码头陆域回填工程中采用获得成功。根据当地经验, 凡水下淤泥厚度小于4—6m的, 利用超高回填, 一般可成功地将淤泥基本上挤走, 残留淤泥厚度均在1m以下。此项试验将推广用于深圳赤湾港的突堤码头中。爆炸挤淤处理软基技术在连云港地区经过二年多的试验研究和工程实践, 已于1987年9月通过技术鉴定, 并将在连云港6688m长的西大堤工程中得到进一步应用和改进。

此外, 在深圳赤湾港的深厚淤泥上建造防波堤时, 曾在12000 m^2 左右的面积上铺设土工织物。这是在国内首次采用土工织物垫层、砂垫层和堤侧镇压层相结合的地基处理技术。为了验证和总结土工织物在防波堤工程中的应用, 不仅在设计时利用离心模型试验检验各种计算结果, 而且在施工的全过程中进行沉降、水平位移和孔隙压力消散等现场观测。该防波堤在短短的一年多时间内就建设成功, 并在近5年的使用期间, 经受台风袭击而毫无损坏。

三、桩基工程和其他基础结构型式

自从50年代初在湛江港第一期工程中首次使用预应力钢筋混凝土空心方桩以来, 高桩梁板码头在我国港口工程获得广泛应用, 并已有了很大发展, 特别是软土地基中。目前预应力钢筋混凝土空心方桩的最大断面为60×60cm, 最大长度达52m。在南通狼山港区三泊位码头中还用过直径为80cm的钢筋混凝土八角桩。在某些无掩护水域建造深水码头时, 还曾采用过直径为1.2m、长度达70m的钢管桩。由于钢管桩费用昂贵, 而且还带来了难以完满解决的防止海水腐蚀的问题, 故在80年代根据国家“六五”科技攻关项目, 研制出了大直径预应力钢筋混凝土管桩。这种大管桩采用离心、振动、辊压复合工艺, 制造直径为120cm的管节, 每节长4m, 然后用后张法工艺拼接成28—36m长的管桩。从大直径管桩的整体结构试验、试打和试桩的情况来看, 其桩身的结构强度、刚度、混凝土密实度、耐锤击性能和承载能力均优于目前传统使用的60×60cm预应力钢筋混凝土空心方桩。该项成果已于1985年12月通过部级鉴定, 将应用于连云港庙岭二期工程的木材码头和集装箱码头以及北仑电厂的煤码头中。仅以后一工程中400根 $\phi 120\text{cm}$ 管桩的桩基计算, 采用预应力钢筋混凝土管桩代替钢管桩, 就可节资金约1500万元以上。为了进一步提高上述大管桩的抗弯能力、降低管桩码头造价, 正在对

制桩工艺(加接管节、强化接头、提高预应力钢丝强度)和码头上部结构型式等方面作进一步的研究、试验,以期改进和完善。

除了桩基工程外,在港口工程中还曾采用过其他各种型式的基础结构,例如,锚碇板桩,斜拉桩板桩,地下连续墙、加筋土挡墙,以及空心、实心方块,大型扶壁,沉井和沉箱等重力式结构。例如,在黄浦新港-12.5m水深的码头中采用大型扶壁结构。在援外工程马尔萨什洛克港水深达27m、设计波高为10m的大型防波堤中,采用重达7000t的沉箱结构。该防波堤历经地中海强风暴多次袭击,始终安然无恙,屹立水中。江阴二线船闸采用地下连续墙及土锚技术,经济效益十分明显。加筋土不仅已相当广泛地应用于一般挡土墙中,还成功地用于码头中。例如四川长寿白沙湾的最大水位落差达34m,其加筋土码头建成后使用4年,经受了多年不遇的暴雨山洪冲刷、洪水淹没和超载试验等证明是成功的。

四、地基勘探和现场测试技术

近年来,港口工程的勘察、科研单位在地基勘探、取土和现场测试方面也采用了不少新技术。例如,曾采用浅层剖面仪在大面积水域中进行初步勘探。但应强调指出,此时必须结合少量钻孔,才能合理地鉴别土类和划分土层。

为了查明我国目前取土方法中的取土扰动影响,并研究薄壁取土器的取土效果,近3—4年来,港口工程勘察和科研单位曾结合工程,先后在天津、青岛、连云港和深圳赤湾港进行了几次软粘土取土技术的对比试验,用固定活塞薄壁取土器与我国现行的常规取土器(敞口厚壁取土器)进行比较。研究表明,土样扰动对室内测定的力学性指标以及工程设计的经济合理性影响很大。取土器是决定土样质量的关键因素。但钻孔方法、取土操作、土样运输、贮藏及试样制备和试验方法等,都对试验结果有直接影响。海上钻探宜搭建简易平台,以减小取土时水面波动的影响。建立工地试验室就近对土样进行试验,可以避免土样运输途中的扰动并缩短土样贮藏时间。这两项措施可减小土样扰动,在重要工程中应坚持这样做。在保证上述条件下,只要操作符合要求,采用固定活塞薄壁取土器均能取得高质量的土样。其无侧限抗压强度一般比采用厚壁取土器时提高50—60%,而其平均破坏应变大致保持在3%左右。对于广泛分布在我国沿海地区的中等灵敏软粘土来说,后一数值可以方便地用来作为定量地鉴别土样质量的指标。

在现场测试和原体观测技术方面,除了常用的标贯、静力触探、十字板剪力仪、分层沉降标、孔隙压力计、土压计和测斜仪外,各个港口工程勘察单位均已引入剑桥大学的自钻式旁压仪,只是实际应用经验尚不多。多功能触探仪正在研制和试用中。此外,微机的应用已经普及到各个港口工程勘察和科研单位。有的已将微机用于某些室内试验的自动控制和数据采集,也有的已成功地将微机用于绘制钻孔柱状图和工程地质剖面图等,使工程地质勘察工作的资料整理基本上实现自动化。

本文承交通部第一航务工程局科研所刘翼熊、第二航务工程设计院周炳源、第四航务工程设计院曾展中提供部分素材,特此志谢。