

大面积真空预压在南沙一期工程中的成功应用

邓龙照¹, 柯朝晖²

(1.中交第四航务工程勘察设计院, 广东 广州 510230; 2.广州港南沙办, 广东 广州 510700)

摘 要: 本文阐述了真空预压排水固结法在广州港南沙港区一期工程中的成功应用。对今后南沙地区以及其它软基处理加固工程都具有重要的指导意义。

关键词: 软基处理; 排水固结; 真空预压; 南沙; 应用

中图分类号: U655.54+4.4

文献标识码: B

文章编号: 1002-4972(2004)03-0115-06

Successful Application of Large-area Vacuum Preloading in Nansha Phase I Project

DENG Long-zhao¹, KE Chao-hui²

(1.CTE Guangzhou Design & Consulting Corp., Guangzhou 510230, China;

2. Guangzhou Port Nansha Office, Guangzhou 510700, China)

Abstract: This paper mainly introduces the successful application of vacuum preloading drainage consolidation method in Guangzhou Port Nansha Port Area Phase I Project, which can be a guidance for future consolidation engineering of Nansha area and other soft soil improvement projects.

Key words: soft soil improvement; drainage consolidation; vacuum preloading; Nansha; application

1 真空预压排水固结法的加固原理

从图 1 可以看到, 在运用真空预压进行地基加固时所施加的荷载并非砂土、块石等实际的重物, 而是将大气压力作为荷载。在抽真空前, 密封膜内外均受到大气压力的作用。抽真空后, 水平排水体中的气体首先被抽出, 由于密封膜、密封沟等已将土体与外界有效隔离, 其压力逐渐下降, 密封膜内外形成压差, 这个压差称之为“真空度”。水平排水体中形成的真空度一方面通过垂直排水通道向下延伸, 另一方面又由垂直排水通道向其四周土体传递与扩展, 使得土体中的孔隙水压力逐渐降低。由于此时的孔隙水压力小于土体中原大气状态下的孔隙水压力, 也就形成了渗流所需的水力梯度, 从而使土体孔隙中的空气和水向垂直排水通道渗流, 再由垂直排水通道汇至水平排水体中, 最后被水泵抽出。

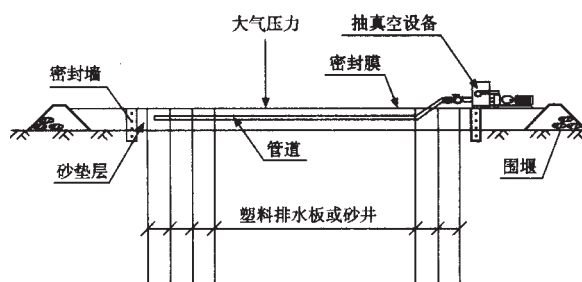


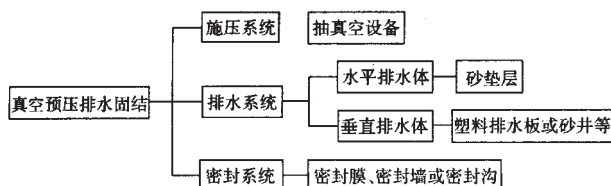
图 1 真空预压排水固结原理图

真空预压排水固结系统可分为 3 个组成部分, 分别是施压系统、排水系统以及密封系统 (图 2)。

3 个系统可以说是相辅相成, 缺一不可。施压系统对地基土起到施加荷载的作用, 使地基土的有效固结压力增加, 因此产生固结。排水系统则改变地基原有的排水边界条件以及传递真空压力, 增加孔隙水排出途径, 缩短排水

收稿日期: 2004-01-15

作者简介: 邓龙照 (1978-) 男, 广东湛江人, 工程师, 从事岩土、道路堆场方面的设计工作。



距离和固结时间。相对于堆载预压，密度达到设计要求，施压系统和排水系统才能有效运作。

2 真空预压排水固结法的特点

(1) 节约预压材料、降低工程造价

真空预压利用大气压力作为预压的原动力，不需要使用大量的堆载料，例如砂土、块石等作为预压荷载，降低了工程成本，尤其是对于大面积的软基处理，更节约工程投资。

(2) 固结快、工期短

由于在真空压力作用下降低的只是孔隙水压力，作用于土体中的总应力并没有增加，土体只产生压缩变形，不会发生剪切变形。此外，随着地基中的有效应力增加，土颗粒之间的接触更为紧密，抗剪强度增大，因此在加荷过程中不管真空度多大，一次性施加都不会产生地基失稳的情况。随着我国真空预压加固技术的日臻成熟，目前膜下真空度可达到 85kPa 以上，虽然固结的快慢并非取决于预压荷载的大小，但在在使用荷载相等的情况下，超载越大，消除残余沉降的速度肯定就越快。与堆载预压相比，真空预压的荷载大且加荷过程大为缩短，故加固时间相对要短。

(3) 施工简便

真空预压是通过抽气来实现施压的，那么其卸载也只要停止抽气即可。而采用真空预压进行地基加固，在抽气且稳定维持所需的真空度后，那么剩下的工作只是日常的检查和维护了。

(4) 加固效果更好

采用真空预压进行地基加固，地基周围的土体是向着加固区内移动的，堆载预压则反之。所以二者发生同样的垂直变形时，采用真空预压加固的土体的密实度相对于堆载预压的要高。由于是通过垂直排水通道向土体传递真空度的，而大气压力在整个加固区是均匀分布的，所以土体的垂直变形在整个加固区内也较为均匀（受周边土体的约束作用，加固区边界处的沉降要稍小），堆载预压很难做到这一点。另外，

在同样情况下，采用真空预压加固的地基，与堆载预压相比，其平均沉降量要稍小，但其加固后土体的抗剪强度则要大得多，所以说，真空预压的加固效果更好。

3 真空预压排水固结法在南沙一期工程中的应用

广州港南沙港区一期工程（以下简称“南沙一期工程”）位于珠江口伶仃洋喇叭湾湾顶，其上游为川鼻水道，下游为向外海的伶仃水道，属广州市番禺区新垦沙垦区，垦区四面环水，没有与岛外相连的道路、桥梁。

港区的征地总面积多达 170 万 m^2 ，原为围海滩涂地基，原始地表高程在 1.0m 左右，其陆域通过吹填港地疏浚土形成，吹填土成分不一，主要是淤泥和中、细砂，吹填高程为 4.8m（东侧原有围堰后方 120m 为 5.8m）。软基处理工程分两阶段实施，第一阶段完成码头堆场及生产辅助区的地基加固，满足港区的生产要求，后方预留场地的软基处理根据生产发展的需要留待第 2 阶段完成。前期需要完成软基处理总面积多达 150 万 m^2 。其中重箱堆放区使用荷载为 46kPa，要求加固后使用期的残余沉降不大于 20cm，考虑到今后发展的需要，空箱堆场的设计要求与重箱堆场相同。生产辅助区及预留发展区的使用荷载为 30kPa，要求加固后使用期的残余沉降不大于 30cm。

本工程的软基处理有处理面积大、工期紧、施工条件差及加固要求高等特点。采用真空预压排水固结法对南沙一期工程中软基处理相对于堆载预压可节省投资约 1 500 万元人民币，工期则缩短 6 个月。

3.1 平面布置（图 3）

为了保证真空预压按期完成和顺利地实施，在作平面布置时，将软基处理的范围分为南（S）、北（N）两个标段、六个大区、共 45 块，单块面积在 3~4 万 m^2 左右。其中 NI 区、SI 区、NII 区、SII 区的加固要求按重箱堆场考虑，NIII 区、SIII 区的加固要求按生产辅助用地考虑。

在施工组织上，考虑南、北两个标段同步开始施工，每标段中的各区之间实行流水作业，每区各块之间则以同步施工及流水作业相结合。以图 4 北段为例，详细说明区、块之间的施工组织情况。

3.2 砂垫层

由于吹填造陆产生的冲填淤泥物理力学性质极差，必须对吹填淤泥表面进行处理方可保障后续施工顺利进行，对此所采取的处理措施是在砂垫层施工前，先在淤泥含量较大的区域铺设 1 层土工格栅和土工布，土工布采用 350g/ m^2 短纤

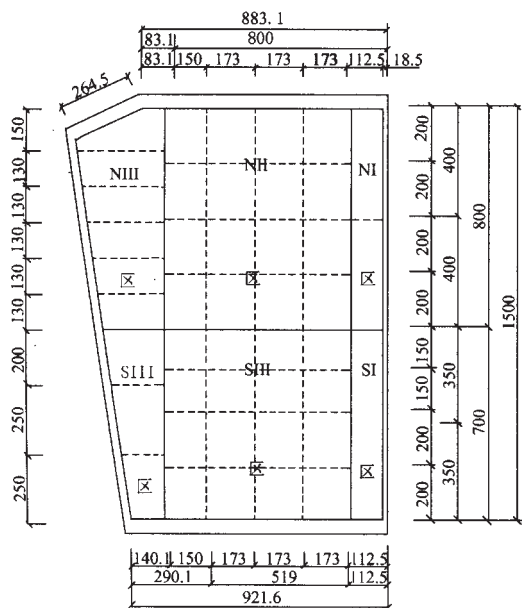


图 3 真空预压平面布置图

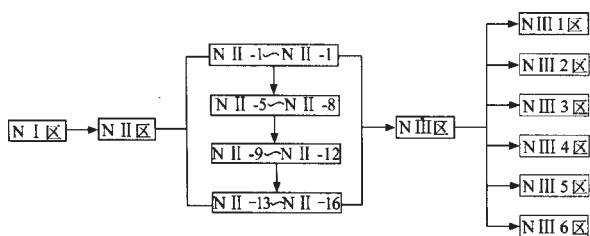


图 4 北段分区块施工组织流程图

针刺非织造土工布, 采用手提式工业缝纫机缝接, 缝接宽度 $\geq 5\text{cm}$ 。土工格栅采用单向或双向拉伸塑料土工格栅, 采用细铁丝绑扎连接, 搭接宽度 $\geq 5\text{cm}$ 。

砂垫层材料选用中、粗砂, 含泥量要求小于 5%。其施工方法采用吹填工艺, 原因是受交通条件的限制, 难以进行陆上回填, 另外吹填的施工速度相对于回填来说要快得多。砂垫层根据使用要求及地质情况的不同采用不同的厚度, N I 区、S I 区、N II 区砂垫层厚度均为 1m, S II 区、N III 区、S III 区砂垫层厚度分别为 1.8m、1.6m 和 2m。S II 区、N III 区、S III 区由于吹填土层的淤泥含量要大大高出其它区域, 如果直接在吹填淤泥的表面上吹填中、粗砂垫层, 即使采取了铺土工织物的处理措施, 仍然可能发生“拱泥”现象, 因此这几个区先吹填 80cm 到 1m 厚的中、细砂垫层, 再在其上吹填中、粗砂垫层, 这样就保证了中、粗砂垫层的质量, 使其有良好的水平排水效果。

在吹填过程中, 为保证砂垫层的平整度, 在吹填管线出口设置消能头, 减少管头的冲刷, 避免管头位置形成较

大的冲坑。吹砂完成后, 进行场地平整。砂垫层厚度误差要求 $\leq \pm 10\text{mm}$, 通过现场插竹竿, 在竹竿上用红油漆标示厚度的方法对砂垫层的厚度进行控制。

3.3 插塑料排水板

南沙一期工程采用塑料排水板作为真空预压的竖向排水通道, 排水板不仅起着垂直排水、加快土体固结的作用, 而且起到传递真空度的作用, 要让其充分发挥作用, 除了材料间距为 1m, 排水板的打设深度原则上要求穿透软土层, 但技术难点分析中曾指出各层软土之间有砂性土, 排水板穿透砂性土层可能会导致在抽真空时发生“漏气”现象。为了深入分析探讨这个问题, 设计单位对淤泥层和淤泥质粘土层之间的冲积洪地层土样进行粘粒、粉粒含量分析, 分析显示粘粒含量占 15% 以上的土样个数占 44%, 粉粒和粘粒含量占 15% 以上的土样数占 93%, 而且存在胶结现象。可见排水板穿透这一土层不会影响真空预压的加固效果。对于淤泥粘土层下方的中、粗砂层则要尽量避免被排水板打穿, 为此, 设计上要求塑料排水板的板底距离淤泥质粘土层底保持 0.50m 的距离。

由于土层在地基中属于看不见、摸不着的东西, 要让排水板底距离淤泥质粘土层底保持 0.50m 的距离, 实际操作上有一定难度。对此所采取的办法是, 在正式插板前先用插板机按 10m \times 10m 的间距通过插空板的方式进行探摸, 摸清具体的插板深度, 再根据已确定的板长对加固区进行详细的小区划分, 最终确定整个加固区排水板的打设深度。这样虽然给施工带来了一定的不便, 但是有效地解决了排水板打穿砂层的问题, 确保了真空预压的效果不会因此而受到影响。

3.4 密封墙

要确保真空预压的加固效果, 对加固土体进行有效的封堵是非常关键的一环。加固区周边的密封形式有密封沟和密封墙两种。由于表层吹填土或是泥浆含水率过高, 或是砂层厚度较大, 不适宜采用密封沟的形式, 故最后采用密封墙形式对加固区周边进行密封。由于该地区泥浆资源丰富, 因此采用泥浆搅拌桩作为密封墙。

所谓的泥浆搅拌桩密封墙就是对地表或地下埋藏较深的透气(水)性较大的砂性土层中拌入粘土, 从而降低砂性土层的渗透性, 保证加固土体的密封性。这次使用的泥浆搅拌桩直径 0.70m, 桩距 0.50m, 成墙时彼此搭接 0.20m, 深度控制以穿透表层吹填土的透气(水)层进入其下不透水层 0.50m 为准, 粘粒($<0.005\text{mm}$)的掺入比为 15%~20%。

由于各区（块）施工实行流水作业，因此相邻的两个加固区（块）之间会出现一道共用的密封墙。在抽真空的过程中，由于加固区域的土体内缩，致使墙体中的泥浆颗粒受真空压力的作用而被抽走，时间长会使得墙体收缩，渗透系数增大，外界的空气和水容易渗入，导致泥浆搅拌桩失去密封作用。为此，对于抽真空时间间隔大于 15d 的相邻区域，其共用密封墙采用长短结合的双排泥浆搅拌桩，通过增大墙体的上部宽度来解决这个问题。短桩长度一般为 3~4m，长桩长度则通过现场探摸确定。

3.5 真空预压

要完成整个真空预压的施工，除了要有排水系统和密封系统外，还要有施压系统——抽真空系统。抽真空系统包括滤管、滤管出膜装置和真空泵等。

3.5.1 滤管

在塑料排水板施工完毕后先对砂垫层中的杂物和插板带上来的泥浆进行清理，再布设滤管。滤管采用 PVC 塑料管，主管为 76.2mm，支管为 50.8mm，壁厚 $\delta \geq 1.2\text{mm}$ ，滤管外面包 1 层无纺土工布作为过滤层。滤管布置间距不大于 6.5m，布设前先将滤管摆设和绑扎连接好，然后在砂垫层内挖管沟，沟深约 0.35m，一边挖沟一边埋管，滤管入沟深度为 0.30m，并用中、粗砂填平。要求膜下真空度测头布置在两条滤管之间，不得埋入滤管内。

3.5.2 密封膜

管道布设完毕后可进行密封膜铺设。密封膜采用 2 层聚乙烯（或聚氯乙烯）薄膜，厚度要求大于 0.12mm，其大小根据加固区的平面尺寸预定。铺设时，先将密封膜摆放在加固区的中央，由一端先后向两边展开，展开后及时用砂包压实。加固区周边的密封膜用人工踩入密封墙内，踩膜深度要求超过 1m。两层薄膜分两次完成，密封膜铺设完毕后应检查薄膜是否有破裂，如出现破裂应及时进行修补。对于相邻的 2 块加固区，后期施工的区域需要将一幅窄条的真空膜预先埋设在共用密封墙内，预留的膜接头待后续施工时再进行粘合，前一区的第 2 层密封膜需将共用密封墙的上部覆盖并和后一区的密封膜进行粘合，以保证在抽真空期间密封墙处不会产生“漏气”现象。

3.5.3 真空泵

真空泵（7.5kW）按每 800m² 左右布置 1 套，其安装严格按照电机、水泵、水箱、闸阀、止回阀、出膜口的次序进行连接，各连接处用橡胶垫、玻璃胶等进行密封，出膜口和水箱进水口保持在同一水平面，出膜口和水箱之间

用波纹管连接。

3.5.4 覆水

开始抽真空且膜下真空度达到 60kPa 后，可在膜上进行覆水。覆水的作用：①避免密封膜在阳光长时间的照射下出现“老化”，从而容易产生破裂；②加固区内的微小孔隙因为水的渗入而得到充灌，加固区的密封性可得以进一步加强；③水的重量加大了预压荷载，可加快施工的进度。

3.5.5 联合堆载

对于 N II 区，考虑到 85kPa 的真空预压荷载尚达不到设计荷载的要求，故该区需要采用真空联合堆载预压的方法进行地基加固。堆载料采用中、细砂，厚度为 1m，施工也是采用吹填工艺堆载在膜下真空度达到 85kPa 负压后的 5~7d 开始进行，为保护真空膜，堆载前先在真空膜上铺设 1 层土工布。堆载区域与其它非堆载区交界处采用砂包进行护坡。此外，吹填时在吹填管口下铺设砂包层防止真空膜受到直接的冲刷。同时要求规划好水流方向，疏引水流，防止溢出的水影响其它加固区。

对于南段，受各种因素影响，开工日期比原计划稍延后，由于工期十分紧迫，为抢回工期，也改为采用真空联合堆载预压的施工方案。与 N II 区不同的是堆载部分采用的是覆水荷载，水深为 1.5m。由于超载加大，工期比原计划缩短了 15d 左右。

3.5.6 真空预压的维护及卸载标准

真空预压的膜下真空度要求达到 85kPa。在抽真空过程中，需要经常检查密封膜是否破裂，当膜下真空度达到 40kPa 以上时，破损处即使非常微小也能发出很大的响声，因此，漏洞较为容易发现，一旦发现须及时修补，以保证真空预压的效果。此外，在真空预压施工过程中，由于地基向内收缩，加固区周边会出现明显的裂缝。为保证加固区周边的密封效果，对距离加固区边界 2m 范围内的裂缝应进行处理。主要的方法是保持蓄水，如果裂缝比较大，则可以通过对裂缝灌泥浆来进行密封。

实际卸载时间是以实测沉降推算的固结度达到设计要求为准。固结度要求见表 1：

表 1 各区固结度要求

分区	N I 区	N II 区	N III 区	S I 区	S II 区	S III 区
持载时间 (d)	90	110	90	90	100	90
固结度 (%)	90	93	89	89	90.5	88.5

4 南沙一期工程的地质条件及技术难点分析

南沙一期工程的地质条件属于典型的深厚软土地基，加固区的主要地层由上至下的分布情况为：冲填淤泥（局部有夹薄层粉细砂）、灰色淤泥（平均厚度约 11m）、冲洪积地层（主要为粉质粘土、中粗砂混粘性土或细砂混粘性土、中粗砂或粉细砂）、中粗砂、花岗岩强风化层。主要土层物理力学指标见表 2：

表 2 主要土层物理力学指标

土层名称	含水率	密度	孔隙比	直剪快剪		径向固结系数
				C	φ	
	(%)	(g/cm ³)		(kPa)	(°)	(10 ⁻³ cm ² /s)
冲填淤泥	72	1.57	1.93	6.46	3.9	1.2
灰色淤泥 (-5m 以上)	69	1.57	1.87	4.24	0.82	0.9
灰色淤泥 (-5m 以下)	67	1.59	1.80	7.53	0.66	0.9
淤泥质粘土	48	1.72	1.30	13	2.72	1.2

通过对加固区的地质情况的分析，真空预压在施工过程中面临以下几个技术难点：

(1) 地基处理的重点是由吹填造陆产生的冲填淤泥和原地基中灰色淤泥及淤泥质粉质粘土，其中吹填土层中，淤泥和淤泥质粉粘土之间存在着砂性土层，而淤泥质粉质粘土的下方更有较为深厚的中、粗砂层，砂性土具有良好的透气（水）性，若与外界连通，在真空预压施工过程中很有可能发生“漏气”现象，导致真空度无法上升到设计要求水平。

(2) 冲填淤泥的强度极低，在进行砂垫层施工时，将难以承受砂垫层的重量而导致被排开，其结果是砂、泥混在一起，降低砂垫层的排水效果。

(3) 冲填淤泥在区内分布广泛，其承载力相当低，必须采取有效措施保证施工机械可在其上安全、有效地进行施工。

(4) 加固面积大，钻孔密度低，如何运用有限的钻探资料对施工质量进行控制，如砂垫层厚度、排水板长度等。

5 南沙一期工程真空预压加固效果评价

一项软基处理工程的成败主要取决于加固效果的好坏，要检验加固的效果必须在施工过程中对加固区域进行实时的监测，因此，南沙一期工程设计了大量的监测项目。监测内容包括：表层沉降监测、孔隙水压力监测、分层沉降监测、深层位移监测、加固前后钻孔取土、加固前后现场

十字板剪切试验等。由于加固面积大，各项监测项目均有大量的观测数据，在此难以将其一一列出，故下面选取较有代表性的 N II 5 区的观测数据对整个加固区的加固效果进行分析评价。

5.1 表层沉降监测

各区（块）的平均沉降量在 1.4~2.5m 之间，沉降量在 2m 左右的情况较为普遍，根据实测沉降推算的固结度是检验加固效果和确定是否卸载的最主要的指标。从反算的结果来看，卸载后各区（块）的固结度均达到设计要求，有的甚至超过了设计要求，达到 95% 以上，加固效果可以说完全满足工程要求的。以 N II 5 区为例，在靠近已有围堰的区域，受围堰施工时地基曾作过处理的影响，沉降量较小，最小值为 1.50m，而该加固区中部，沉降量则与设计阶段的计算结果较为相符，最大值为 2.62m，全区平均沉降量为 2.14m，经核算，固结度为 93.2%，主固结下残余沉降为 13cm。

5.2 孔隙水压力监测

在抽真空过程中，由于真空度向下传递，引起土体孔隙水压力降低，从监测数据可以看出，各区（块）的孔隙水压力消散情况良好，在抽真空的初期，孔压下降到一稳定值，孔压消散平均在 75~95kPa 左右，孔隙水压力向深度方向传递明显。

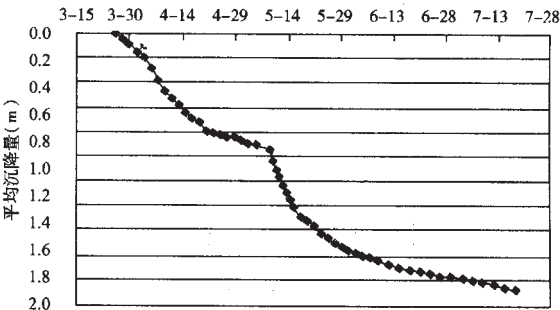


图 5 N II -5 区真空预压沉降-时间曲线

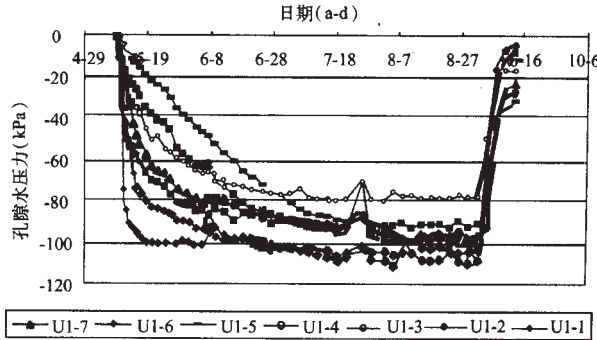


图 6 N II -5 区真空预压孔压-时间曲线

5.3 其它

从加固前后十字板剪切试验情况来看,各被加固土层的十字板平均抗剪强度由加固前的 15kPa 左右提高到加固后的 40kPa 左右,而从加固前后的土工试验结果的对比来看,淤泥和淤泥质土的含水率由加固前的 68%和 45%左右下降到加固后的 40%和 30%左右,孔隙比则由加固前的 1.8 和 1.3 左右下降到加固后的 1.0 和 0.8 左右,其它的各项指标也反映出土体有较大幅度的改良。

6 结语

经过 10 个多月的紧张施工,南沙一期工程陆域软基处理已基本完工,现已进入验收阶段。在 2003 年 10 月 13 日的中间验收及科研成果评议会上,专家们对南沙一期工程陆域软基处理所取得的成果给予了充分的肯定。

(1) 南沙一期工程陆域软基处理采用真空预压排水固结法进行地基加固是成功的。通过本工程证明,采用真空(联合堆载)预压施工工艺对吹填土及软土基进行大面积加固处理不但加固效果良好,而且可大大缩短工期,经济效益十分显著。

(2) 针对吹填土层含泥量高,强度极低的实际情况,

采取以土工织物水平排水的技术措施可以有效地约束土体的侧向变形和提高吹填土层的地基承载力,保障了后续施工的顺利进行。

(3) 采用长短结合的泥浆搅拌桩作为密封墙有效解决了共用密封墙双向渗漏沉陷与开裂的技术难题。

(4) 通过覆水进行联合堆载预压的施工可节约砂料,节省投资,加快施工进度,值得进一步推广使用。

(5) 经过本工程的施工实施,真空预压施工工艺的成套技术有了新的发展,进一步丰富了真空预压施工的实践经验,充分体现了我国真空预压加固技术的高水平,对今后南沙地区和其它类似软基处理工程均具有指导意义。

参考文献:

- [1] 姜 炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京:人民交通出版社,2001, 1-11.
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院,河海大学. 广州港南沙护岸围堰及试挖工程陆域软基处理试验研究报告[R]. 广州:中交第四航务工程勘察设计院,2003.
- [3] 柯朝晖,邓龙照. 真空预压在南沙港区陆域软基处理试验区中的成功应用[J]. 广州:华南港工,2003, 1-7.

(上接第 102 页)

津港 RMG 的跨度为 33m (跨 9 排箱),宁波港 RMG 的跨度为 37m (跨 11 排箱),香港国际货柜码头 RMG 跨 12 排箱(估计其跨度为 40m)。RMG 的高度从堆四过五发展到目前的堆六过七。

2 工艺布置

集装箱码头的工艺布置是装卸工艺设计的主要组成部分,工艺布置直接关系到码头的生产效率,关系到整个码头的安全生产。

2.1 码头前沿作业地带

码头前沿作业地带指码头前沿线至码头前方堆场的区域。其中海侧轨至码头前沿线的距离一般取 3.5m,我国有些码头此值取 8m,实践证明是不需要的。海侧轨至码头前沿线的距离取 8m 的情况用于全自动化的集装箱码头,因为全自动化的集装箱码头作业时,海侧轨以内是全封闭的(以保安全),非作业的车辆只能在海侧轨以外行驶。

集装箱装卸桥轨距内一般布置 5 条车道。并布置存放

集装箱锁销的箱子。集装箱装卸桥后伸距内除布置堆放舱盖板的位置外,一般还应布置不少于 2 条的车道。

因此,对于一般的集装箱码头,其前沿作业地带一般不应小于 65m。

2.2 堆场布置

堆场的布置主要依据 RTG 或 RMG 的跨距及堆场的横向(沿码头岸线方向)分块决定。实践证明,堆场的横向分块以 250m 左右较好,这个尺度车辆的运行距离较短较为经济。堆场的纵向分块 RTG 作业时,一般按 8~10 跨 RTG 作业宽度布置。

危险品堆场应独立布置,应设置降温、防火、避雷、排污等设施,并应设置围墙。

2.3 道路布置

港区道路的布置应主次明确,进出分开。形成纵横相通,车流顺畅的道路网络。纵向主要道路宽度一般不应小于 6 车道,横向道路宽度一般按 4 车道布置。道路边线至堆场集装箱的距离应有 3~4m,以保证车辆转弯有较好的安全视距。