

25-32, 21

# 真空预压固结海淤土地基 在大型工业建设中的应用

TU276

曲永德 范燃功  
(化工部第八设计院)

## 摘 要

本文详细介绍在连云港碱厂工程建设中,采用真空预压新技术固结海淤土通过小试到扩大试验,直至大面积推广应用,取得了显著的经济和社会效益,为类似软土地基处理提供了宝贵经验。

## 一、概况

### (一) 厂区地貌、地质情况

江苏连云港碱厂是化工部第八设计院承担主体设计,由国内制造设备和施工安装的大型碱厂,建设规模为60万吨/年纯碱,是国家“七五”期间重点建设项目。厂址在连云港市墟沟镇西南边,距海边仅500米左右,

厂区地势较平坦,由南向北微倾斜,坡度约0.3%,整个地貌属海积滩地(原是盐田)。自然地面以下10~11m为滨海相(Q<sub>2</sub>)海淤层,含多量有机质,呈流塑状态,海淤层以下分别为一般亚粘土、轻亚粘土、粘土层,直至约50m深才为风化片麻岩。地下水深度在地表面下0.5m左右,具有中等硫酸盐侵蚀性。本场地基本地震烈度为7度,基本风荷载为700Pa。海淤土的主要力学性能指标

表1 连云港碱厂地基海淤土主要物理力学指标综合表

成因年代	地质名称	静力触探 P <sub>SL</sub> (0.1MPa)	标贯试验 N	电测十字板剪力试 验C <sub>u</sub> (0.1MPa)	含水量 W	单位容重 γ	孔隙比 e	塑性指数 I <sub>p</sub>
	Q <sub>2</sub> 海淤	2.0~3.5	<1	0.09~0.24 平均0.15	60.2~88.1 平均71.3	1.54~1.85 1.60	1.62~2.27 1.957	22.1~36.0 27.1
液性指数 I <sub>L</sub>	灼烧失量 %	原侧限抗压 强度 q <sub>u</sub> (0.1MPa)	灵敏度 St	压缩系数 α <sub>1-2</sub>	回弹指数	直 剪 C   φ	三轴剪 C   φ	前期固结 P <sub>c</sub>
1.22~1.81 1.52	6.71~8.31 7.21	0.27	3.02	0.290	0.108	0.13   3°	0.08   3°26'	
固结系数C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /s)		固结系数C <sub>u</sub> (cm <sup>2</sup> /s)		渗透系数K <sub>垂</sub> (cm <sup>2</sup> /s)		渗透系数K <sub>水</sub> (cm <sup>2</sup> /s)		
1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	
6.38×10 <sup>-4</sup>	3.59×10 <sup>-4</sup>	4.19×10 <sup>-4</sup>	3.34×10 <sup>-4</sup>	5.34×10 <sup>-8</sup>	3.34×10 <sup>-8</sup>	4.05×10 <sup>-8</sup>	3.11×10 <sup>-8</sup>	
颗 粒 组 成 %				建 议 桩周摩擦力 f(t/m <sup>2</sup> )		建 议 [R]值(t/m <sup>2</sup> )		
砂 粒	粉 粒							
0.1~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005					
12	8	11	69	0.5~0.8		3~5		

详见表1。

## (二) 真空预压试验

由上述可见,该厂址自然地面下的第一层海淤土不仅厚度相当大,且各项力学性能指标均极差,是一种十分软弱的土层,如不经大面积处理根本不能建厂。以往国内一般采用堆载预压法进行固结处理,但对这个厂若采用此法必然造成施工期长、基建投资大。我们受天津新港地区试验用真空预压固结淤泥质粘土建设货场的启发,并针对该厂土质打桩需采取砂井排水措施的情况,认为采用真空预压进行固结处理可行且经济,但在大型工业建设中首次应用,必须慎重对待。故在建设、施工单位大力支持下,于1984年11月正式开始在该厂进行试验。

本试验目的在于通过试验,除摸索和掌握真空预压新技术和施工工艺外,还验证真空预压新技术应用于连云港碱厂固结十分软弱的海淤层土,在技术上是否可行?在经济上是否节省(与堆载预压相比)?在施工周期上是否缩短?最终预压后的地基土能否满足设计和施工要求等重大问题。

首先在煤堆场 $50\text{m} \times 80\text{m} = 4000\text{m}^2$ 面积进行试验,紧接着又在重碱厂房 $9860\text{m}^2$ 进一步扩大试验。经过一年多的时间,试验获得成功,现仅将主要情况介绍如下:

### 1. 关于真空度

#### (1) 膜下真空度

抽气当天膜下真空度就上升到400mm汞柱,次日出水,第5天膜下真空度上升到600mm汞柱以上。在同一时间内,最大与最小值之差均不超过20mm汞柱,说明由于抽气引起的加荷是比较均匀的。

#### (2) 砂井与海淤泥中的真空度

试验是在砂井中不同深度埋深了3个真空度测头,观测其中的真空度,发现其升降基本上与膜下真空度同步,但数值比膜下小,一般维持在320mm汞柱,最高可达340~370mm汞柱;而海淤泥中的真空度一般维持

在200mm汞柱,最高达300mm汞柱。

### 2. 地面沉降

抽真空前由于填少量土、插孔、铺砂垫层等项施工,引起沉降约5cm。由于抽真空加荷引起地面沉降平均为551~592mm,最大为643~710mm。停止抽真空后地面回弹20~30mm。

### 3. 分层沉降

在 $4000\text{m}^2$ 试验区埋设了3个分层沉降标,所测得数据如表2所示:

表2 试验区内土层压缩情况

标号	地 表	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
埋深m	0	3.0	8.0	12.0
沉降m	0.835	0.428	0.107	0.08
层厚m		3.0	5.0	4.0
压缩量m		0.209	0.319	0.099

从表2可看出主要沉降量发生在8m以上,等压缩量为528mm,占总沉降量的83.1%,8m以下也有沉降,但沉降量不大。

### 4. 水平位移

现场观察,加固地基过程中的水平位移情况见图1。从图1中可看出:地基的侧向位移随加固时间的延长而增加,最大达18~20cm,地基的累计侧向变形沿深度逐渐减小,在地面下6~7m以下就很小了。被加固区的土体都是向着加固区移动的,这与堆载预压的情况是截然相反的,因此在发生相同沉降量的情况下,真空预压加固的土体密度要比堆载预压的高,即要使被加固土体达到同样的密度,真空预压的沉降量要比堆载预压的小,同时正因为土体是侧向压缩,真空预压可以在很短时间内一次加荷到最大,不会产生地基失稳,因此真空预压在施工上就可以大大缩短时间。

### 5. 孔隙水压力

在 $4000\text{m}^2$ 试验区中部和西部边缘各埋设了4个孔隙水压力测头,实测了加固过程

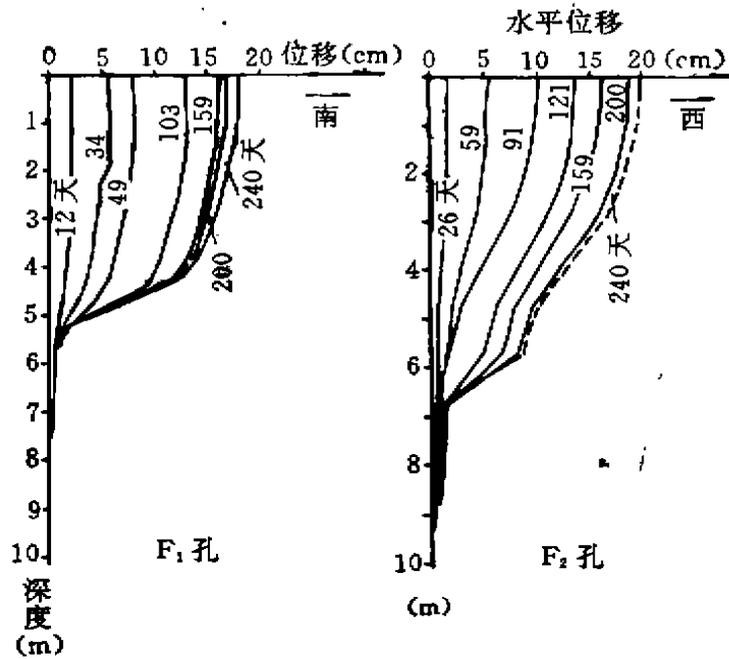


图1 水平位移

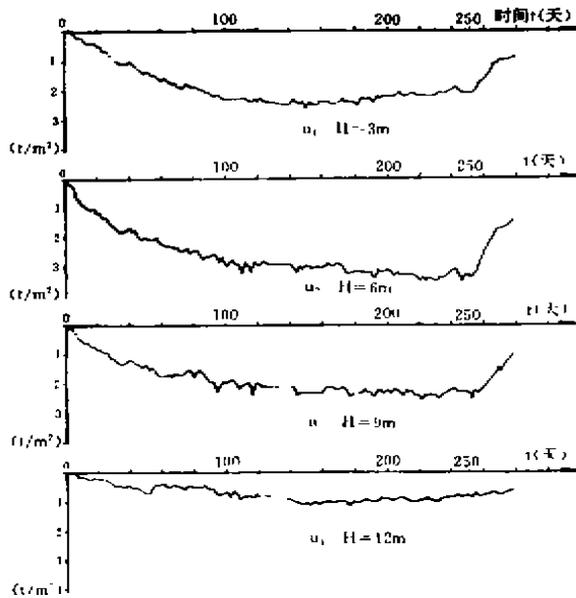


图2 孔隙水压力时程线

中孔隙水压力的变化过程，详见图2。

图2中清楚地显示出加固过程中孔隙水压力在不同深度的下降过程，总的趋势是，随着深度的增加，孔隙水压的下降幅度渐

小，但无论是边缘还是中部，在地面下6m左右下降的幅度最大。

孔隙水压力的降低，反应出土中有效应力（即固结应力）的增长，其沿深度的变化和随时间的发展，以及中部和西部的差异，分别见图3(a)(b)(c)。

### 6. 土壤的物理性能指标

加固前后土层沿深度的含水量、孔隙比、容重的变化与对比见图4、5、6。

(1) 含水量降低5%~15%，大部分降低10%左右，最大降低20%。

(2) 孔隙比减小11%~48%，一般均在15%左右。

(3) 容重提高3%~16%，一般均在5%左右。

以上三个量都是自地面下3~4m范围内变化较大，4~8m范围内变化稍小。

### 7. 十字板强度

预压前做过3个十字板孔，预压后对比

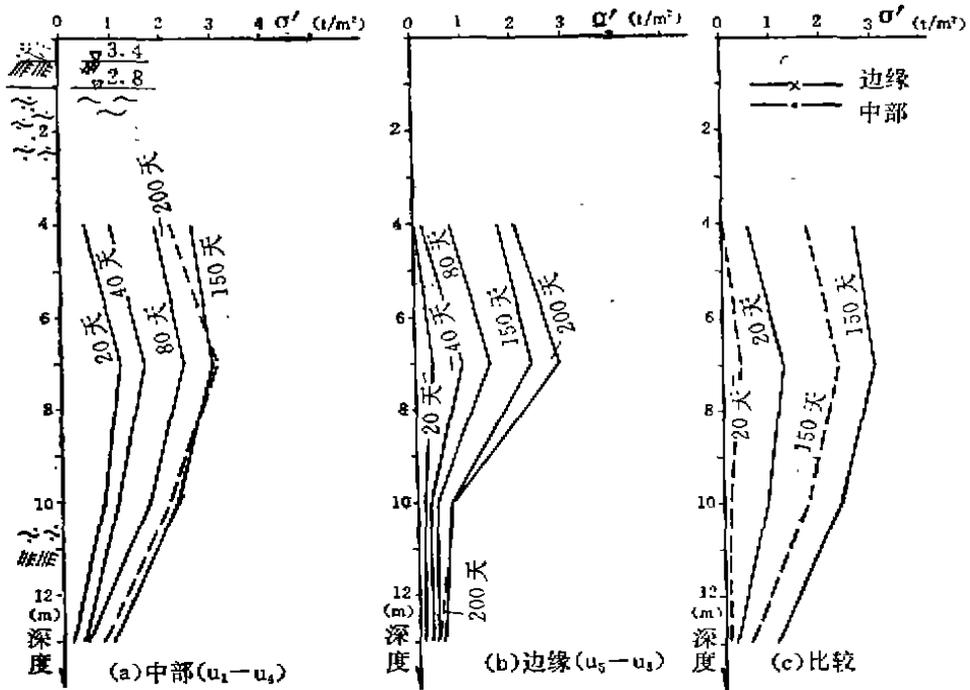


图 3 有效应力沿深度的变化情况

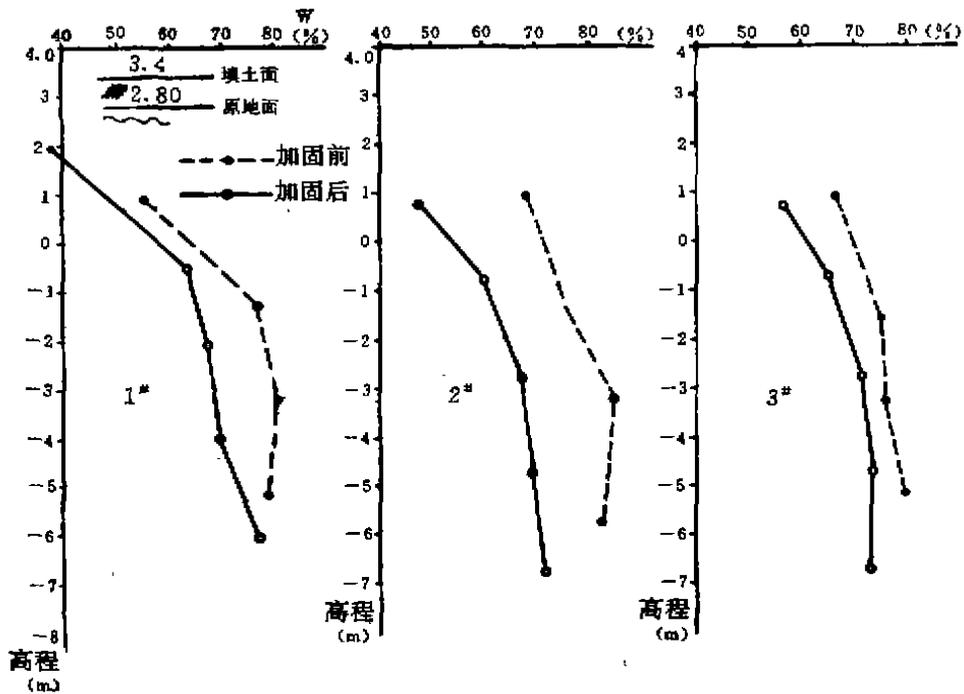


图 4 预压前、后含水量沿深度的变化

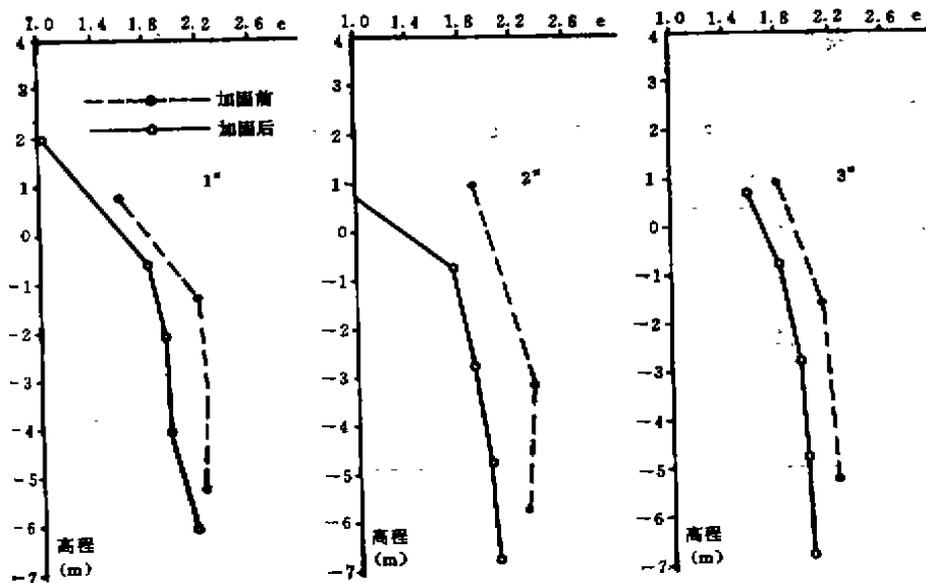


图5 预压前、后孔隙比沿深度的变化

做了3个孔，另外在其他区域又做了5个十字板孔，见图7。从对比孔看，每孔强度均有提高，但3m以上提高幅度较大，最大增长 $3.4t/m^2$ ，3m以下也有不同程度的提高，详见表3。

8. 载荷板试验

真空预压后，除进行静力触探和十字板孔检验外，还进行了 $2m \times 2m$ 的载荷板试验。结果在3m以内土层均能达到 $8t/m^2$ ，3m以下分别为 $7t/m^2$ 和 $6.5t/m^2$ ，均有不同程度的提高。

9. 固结度

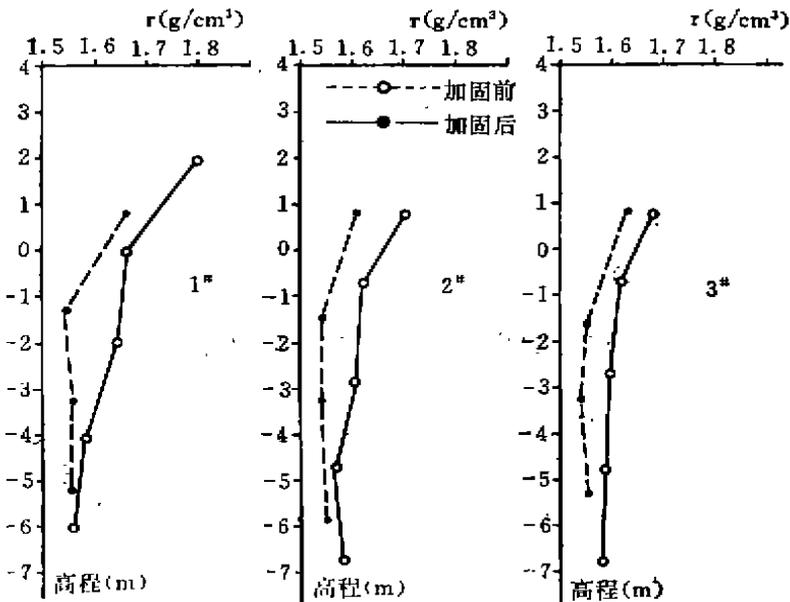


图6 加固前、后土壤的容重变化

表 3

深 度 (m)	预压前平均十字 板强度( $t/m^2$ )	预压后平均十字 板强度( $t/m^2$ )	增长强度 $t/m^2$	增长率 %	备 注
1.0~2.0	1.00	4.40	3.4	340	
2.0~3.0	0.88	2.22	1.54	228	
3.0~4.0	0.82	2.11	1.29	157	
4.0~5.0	1.08	2.33	1.25	116	
5.0~6.0	1.17	2.43	1.26	108	
6.0~7.0	1.26	2.54	1.28	102	
7.0~8.0	1.59	2.71	1.12	70	
8.0~9.0	1.80	2.85	0.85	47	

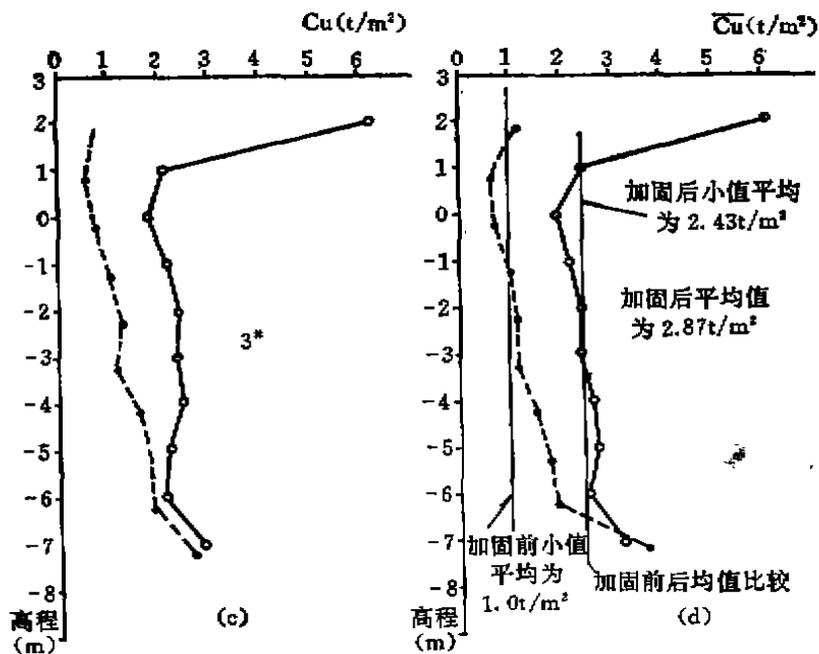


图 7 加固前、后十字板强度比较

固结度是实测沉降量与计算最终沉降量之比。计算最终沉降量之值，由于没有负压条件下的计算方法（现有计算方法都是在正压条件下的），虽然从试验中知，达到同样密实度的情况下，负压比正压沉降量要小，但还没有相应确切数据，因此无法正确确

定。南京水科院土工所建议用现行规范公式计算，并将公式中的修正系数 $m_s = 1.3$ 改为 $m_s = 1.0$ 。结果加固区平均固结度为77.5%~88%，实际固结度估计更要高一点。

## 二、真空预压后的土层直接作为天然地基的扩大试验实例

仪电修厂房是由三部份组成，它们既是独立结构，但互相间对地基又有一定的影响，有一定代表性，故举此例。平面图见图8；主厂房部份为15m和6m跨的钢筋混凝土排架结构，主跨内设有5吨吊车一台，其余两部份为三层砖混结构（即预制空心板和砖墙）。

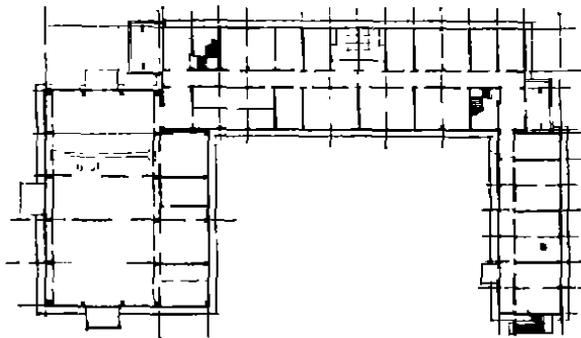


图8 仪电修厂房预压范围平面图

### (一) 真空预压情况

1. 预压面积见图8所示，为3833.67m<sup>2</sup>。
2. 砂井规格和布置：砂井直径φ70mm，长度11m。
3. 间距：0.9m，正方形布置，砂垫层厚0.2m。
4. 抽真空时间：从1986年12月19日至1987年9月8日，共266天，有效时间为220天。

表4 加固前、后十字板强度的比较

深度 (m)	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	5.0~6.0	6.0~7.0	7.0~8.0	8.0~9.0	9.0~10.0	10.0~11.0
加固前 177*(t/cm <sup>2</sup> )	0.611	0.76	0.62	0.66	0.85	0.78	0.75	0.96	0.85	1.04
加固后2*(t/cm <sup>2</sup> )	6.10	6.64	2.85	3.01	3.08	2.88	2.74	2.89	2.30	2.58
加固后6孔 平均(t/cm <sup>2</sup> )	6.19	6.08	2.75	2.76	2.60	2.90	2.98	2.84	2.64	3.03

5. 地面沉降：最大为79.7cm，最小为50.5cm，全区平均沉降为70.5cm。在预压范围内因原有一汽车便道已经过较长时间使用，土层已压密实，故沉降量较小，影响了平均沉降量，这便是最大与最小沉降量相差较大的主要原因。

不同时间和深度实测的沉降量详见图9。

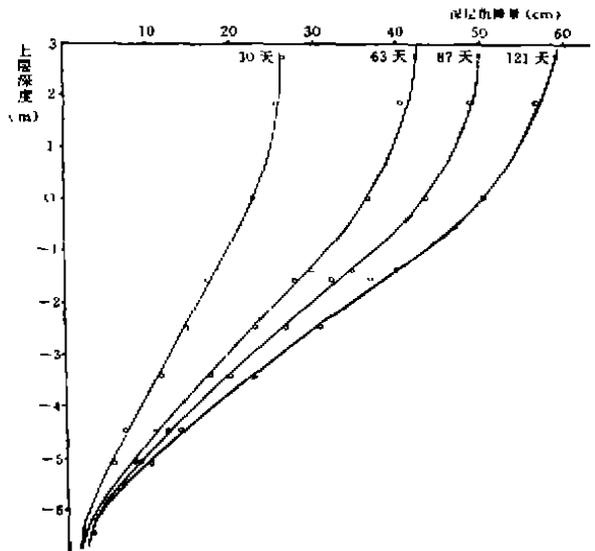


图9 不同时间实测沉降随深度变化的分布曲线

从图9可见沉降大部份发生在4~5m范围内，随着时间的延长，对深度影响逐渐加大（121天后未继续实测）。

固结度：预压后地基平均固结度达81.5%；

十字板强度：预压前做过2个孔十字板，预压后做过7个孔十字板（其中一孔在预压区外），结果见表4。

地基容许承载力：根据预压后提供的勘察报告提供的结论是：地面下 $0\sim 3\text{m}[R]=9\text{t}/\text{m}^2$ ， $3\sim 5\text{m}[R]=6.5\text{t}/\text{m}^2$ ， $6\sim 10\text{m}[R]=6\text{t}/\text{m}^2$ 。

设计中所采取的措施：为了预防地基产生不均匀沉降影响墙体开裂，故全部基础均采用钢筋混凝土带形基础。从预压效果看，地下 $0\sim 3\text{m}$ 范围内最好，因此尽量利用该层土作为天然地基，即基础仅埋深为 $1\text{m}$ 。上部结构除按7度地震要求设置圈梁外，在底层窗间适当配置了 $\phi 6$ 的构造筋。其余部分均按常规进行设计。

仪电修厂房于1987年11月开始施工，次年12月正式交付生产使用，经过一年多的生产使用考验，从外观上看未发现墙体裂缝等异常现象。从沉降观察资料来看，最大累计沉降量为 $2.5\text{cm}$ ，各点相差不超过 $0.3\text{cm}$ ，可见沉降基本是均匀的，也是符合规范要求的。实践证明，象连云港碱厂这样差的超软土，经真空预压后作为天然地基技术上是可行的，经济上是节约的，真空预压决算为 $18.78$ 万元（如采用堆载预压或钢筋混凝土预制桩，投资约需 $35\sim 40$ 万元），仪电修厂房真空预压的成功为大面积推广应用真空预压新技术提供了宝贵的经验。

### 三、大面积推广应用

通过小试及扩大试验的实际摸索，全面掌握了袋装砂井真空预压的新技术，给全面应用推广创造了条件，因根据试验所得的各项数据，完全达到设计预期的目的，满足设计要求，证明应用于连云港碱厂工程中，技术上可行，经济上合理，且能大大加快施工进度。因此我们决定在连云港碱厂工程中全面推广应用，该工程占地面积约 $50$ 公顷，采用袋装砂井真空预压加固面积为 $162931.66\text{m}^2$ 。

1. 预压后再打预制桩总面积约 $6\text{万m}^2$ ，主要用于重型的化工生产装置，有大量的地

下管道、电缆沟和设备基础等，基础埋设较深，由于采用了预压，加快了施工进度，确保了施工质量，节省了施工措施费用，使深达 $11\text{m}$ 厚的海淤泥层得到了固结，提高了桩的垂直和水平承载能力，使桩的数量相应减少 $10\%\sim 15\%$ 。

石灰装置由于进度要求未能采用真空预压措施，而直接在海淤泥层上打预制桩，结果桩打完后地面隆起最高达 $1\text{m}$ ，基槽开挖后，由于海淤泥层流塑状态，致使土体产生蠕变和滑移，造成桩有规律的倾斜和位移，甚至断桩，最后不得不采取加固措施，影响进度半年之久，因补桩和其它加固措施共耗资 $48$ 万元。由此可见，在该工程中应用袋装砂井真空预压加固技术才是正确的。

2. 预压后直接作天然地基使用，主要用在辅助生产装置和大量的砖混结构辅助建筑中，由于预压后海淤泥层表面承载能力由原来的 $3\text{t}/\text{m}^2$ 提高到 $8\sim 9\text{t}/\text{m}^2$ ，预压前的回填土层，经预压后承载能力达 $10\sim 12\text{t}/\text{m}^2$ ，硬壳层厚度在 $3\text{m}$ 左右，因此有条件直接作天然地基使用。例如在建材库的施工中，采用了先回填（回填土 $2\text{m}$ ）再预压的方案，其结果证明此方案除预压时间稍长外，效果更好，形成了厚达 $4\text{m}$ 多的硬壳层，使其作为天然地基更为有利。这也就证明，真空预压与堆载预压联合使用后，能得到更好的预压效果。通过上述实例，为今后类似地基采用此技术提供了宝贵的成功经验。

3. 预压后直接作为大面积的石灰石、煤焦场使用，总面积约 $4.5\text{万m}^2$ 。使用后未发现因堆料后引起对其堆场内的铁路、装卸桥轨道的使用发生影响及堆场地面的不均匀沉降变形。而由另一单位设计和施工的原盐堆场，由于未采用真空预压加固处理技术，使用后地面沉降达 $1\text{m}$ 多、地坪全部开裂、堆场内的盐皮带支架和盐栈桥因不均匀沉降

（下转第21页）

用上述方法分析带有一个侧线采出口的精馏塔的设计变量数, 见图3。

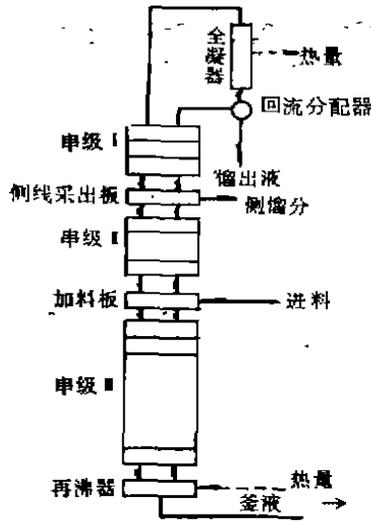


图3 带有侧线采出口的精馏塔

塔顶为全凝器, 塔底有再沸器, 塔内无压力降。

$N_{\Sigma}$ :

压力等级数	1
进料变量数	$c + 2$
合计	$c + 3$

$N_{\Sigma}$ :

串级单元数	3
回流分配器	1
侧线采出单元数	1
传热单元数	2

合计 7

与图2设计变量计算结果相比较可以看出, 带有侧线采出口时, 可调设计变量将比无侧线时增加2, 一般这两个可调设计变量常被用来指定侧线流率及侧线采出口的位置。

### 参 考 文 献

- [1] Kwauk, M., AIChE J., 1958, (2): 240.
- [2] McCabe, W.L. and Smith, J.C., Unit Operations of Chemical Engineering, 3rd ed., McGraw-Hill, 1976.
- [3] King, C.J., Separation Processes, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1988.
- [4] Henley, E.J. and Seader, J.D., Equilibrium-Stage Separation Operations in Chemical Engineering, New York, 1981.
- [5] Perry, R.H. and Green, D.W. (Eds.), Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1984.

(上接第32页)

和倾斜影响了生产使用。

### 四、结束语

连云港碱厂于1989年10月投产至今, 经受了生产实践的考验, 所有的建、构筑物以及大型设备基础的沉降均符合设计规范要求, 证明地基处理是成功的, 方案选择是正确的。

采用了真空预压地基处理技术, 施工过

程缩短, 预压处理施工费用低廉, 整个工程节省投资900~1000万元, 其经济效益和社会效益都十分显著。

真空预压加固地基技术在连云港碱厂的应用, 是我国第一次在10~11m厚海淤泥土层大面积应用成功, 第一次做到可一次加固2万m<sup>2</sup>的面积, 也是第一次在重型工业建筑中应用, 为今后类似软土地基处理提供了宝贵经验, 因此特撰写此文供同行参考。