

真空预压新型密封墙的密封效果研究

王世宁, 朱俊岭, 曹晓航
(中交天津港湾工程研究院有限公司)

摘要: 密封墙是真空预压法处理软土地基施工过程中一种常用的密封手段。针对砂层较厚且施工区域缺少黏土材料的情况, 为保证真空预压加固区的密封效果, 提出了一种新型密封墙材料配比及施工方法, 通过现场试验、室内土工试验结果以及后续加固过程监测表明, 在不使用黏土材料的前提下, 一定量的偶联剂、膨润土、粉砂粉土及一定超深的黏土层经双向搅拌工艺混合后形成水泥搅拌桩, 该方法可有效提高黏粒含量、降低渗透系数, 保证了真空预压工艺的密封效果, 加固效果良好, 可为类似工程提供借鉴。

关键词: 软土地基; 真空预压; 密封墙; 深厚砂层; 渗透系数

0 引言

沿海地区经常采用真空预压法进行地基处理, 为保证地基处理效果, 需要在地基处理边界打设密封墙。密封墙的质量关乎到后续真空预压的加固效果, 诸多学者对真空预压密封墙技术进行了研究, 梁爱华等^[1]收集了实际工程的黏土密封墙施工情况, 提出了黏土密封墙主要的施工质量控制参数, 指导了相关工程黏土密封墙的设计与施工。当在砂土地基上进行密封墙施工时, 则需要采取一定措施降低地基的渗透性, 冯刚等^[2]通过室内试验, 在砂土中掺入泥浆、膨润土、水泥, 可降低砂土的渗透系数, 得到了满足密封墙渗透性能要求的配合比。李军等^[3]通过工艺试验提出真空预压区域双排长短桩搅拌墙密封方案。王振文等^[4]采用水泥搅拌桩墙作为吹填砂层较厚预压区域的侧向密封系统, 黏粒含量及泥浆相对密度是施工质量控制要点。

然而, 对于砂层较厚且施工区域缺少黏土材料的情况, 并没有学者进行过相关试验, 研究在缺少黏土材料的情况下做好密封墙施工具有重要意义。本文提出了一种真空预压新型密封墙材料配比及施工方法, 进行了室内试验及现场施工, 有效降低了砂层的渗透性, 保证了密封效果, 可为类似工程提供参考。

1 工程概况

根据勘探孔揭露的地层岩性、埋藏分布情况, 各层地基土主要分布按层序从上到下依次为:

1) 第四系全新统人工堆积层(Q^m): 该层系

人工吹填后形成。根据吹填物成份细分为①₁层粉细砂、①₂层粉土、①₃层淤泥。填土年限小于 10 a。

①₁层粉细砂: 灰色~灰黄色, 饱和, 松散, 系海底沉积物经开挖后吹填至该场区, 主要成分为石英及云母, 含少量有机质、贝壳碎片, 局部夹淤泥质土, 成分不均, 层厚 0.10~7.40 m。

①₂层粉土: 灰色~灰黄色, 湿, 稍密, 含少量有机质、贝壳碎片, 摇震反应一般, 局部为粉砂或淤泥质土, 层厚 0.10~4.00 m。

①₃层淤泥: 灰色~灰黄色, 饱和, 流塑, 高压缩性, 局部夹粉土或粉砂薄层, 厚约 1.00~5.00 mm, 含少量有机质、贝壳碎片, 具腥臭味, 层厚 0.20~6.50 m。

2) 第四系全新统海相沉积层(Q_4^m): ②₁层淤泥、②₂层黏土。

②₁层淤泥: 灰色, 饱和, 流塑, 高压缩性, 含少量有机质、贝壳碎片, 具腥臭味, 夹粉土薄层, 厚约 1.00~5.00 mm, 局部 10 mm; 局部相变为淤泥质土, 层厚 15.90~21.50 m, 层底标高为 -16.79~-23.35 m。由于探摸孔钻探深度有限, 未穿透该层, TM1~TM30 钻孔区域揭露层顶埋深 7.30~11.00 m, 揭露厚度 1.10~3.20 m, 揭露底标高 -3.02~-5.04 m。

②₂层黏土: 灰色, 饱和, 软塑, 高压缩性, 局部呈蜂窝状结构, 含少量有机质, 偶见贝壳碎片, 夹粉土团, 局部夹淤泥, 层厚 2.20~8.40 m。

3) 第四系上更新统海陆交互沉积层(Q_3^{mc}): ③₁层粉质黏土。

③₁层粉质黏土:灰黄色,饱和,可塑,中压缩性,局部相变为粉土或黏土,土质不均,夹灰绿色团块,揭露厚度 1.50~2.30 m。

根据预压场地边界密封墙探摸报告,压膜沟区透水透气层包括①₁层粉砂、①₂层粉土,②₁层与①₃层交界面存在约 20~30 mm 的贝壳碎屑层,①₃层淤泥局部夹小于 2 mm 的粉土粉砂薄层。

根据探摸结果,处理的目标土层为粉砂、粉土等含水量高、透水透气性高的土层。同时工程所在地缺少黏土材料,需要在加固区边界打设密封墙。

2 新型密封墙试验方案

经研究,拟采用“膨润土+偶联剂”、“膨润土+普硅水泥”2 种新型密封墙方法。基于不同的掺入量和打设深度,设计了 4 种密封墙方案。每种方案在平面上各试打 5 m。各方案的详细参数见表 1。密封墙采用双排搅拌桩,桩径 700 mm,搭接宽度 200 mm,桩中心距 500 mm,密封墙搭接形式图如图 1 所示。

表 1 各方案设计参数

方案	膨润土/%	偶联剂/%	普硅水泥/%	打设深度/m
方案一	8	0.3	—	10
方案二	10	0.2	—	7
方案三	12	0.2	—	7
方案四	8	—	4	7

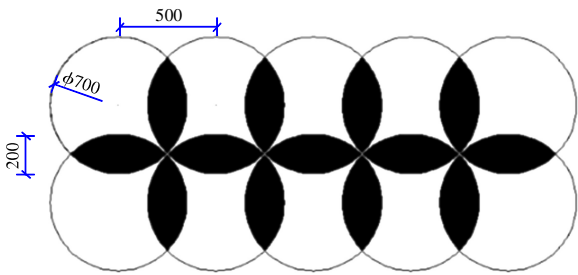


图 1 密封墙搭接形式图

经现场测量方案一泥浆相对密度 1.3,方案二、三、四泥浆相对密度均为 1.45。在满足现场施工打设的情况下尽可能增大泥浆密度。

采用 SXJB-A 型搅拌桩机双向搅拌泥浆桩成桩,保证不同深度的搅拌桩喷浆的均匀性,根据桩机性能结合实际地质情况确定输浆速率、下钻速度、提升速度、内外钻杆转速、垂直度控制等参数,密封墙深度进入黏土层不小于 1.5 m,利用翻浆填充增加搅拌墙的黏粒含量。

每孔取样深度与 4 个方案打设深度相同。各方案于轴线取 1 孔,距轴线两侧 40 cm 处各取 1 孔,轴线位置的孔位于 4 根桩相交处,两侧孔位于非搭接区。为补充数据多取 2 个孔,共 14 个孔。

3 新型密封墙密封效果

根据室内试验,得到了各方案的渗透系数及黏粒含量(<0.005 mm),对试验结果进行统计,见表 2、图 2。

表 2 各方案渗透系数及黏粒含量一览表

方案	渗透系数数量级	样本数量	样本占比/%	渗透系数/(cm·s ⁻¹)			黏粒含量/%		
				最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
方案一	1.00×10 ⁻⁴	1	2.94	2.54×10 ⁻⁴	2.54×10 ⁻⁴	2.54×10 ⁻⁴	10.3	10.3	10.3
	1.00×10 ⁻⁵	6	17.65	9.50×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁵	2.97×10 ⁻⁵	27.8	9.3	16.7
	1.00×10 ⁻⁶	24	70.59	9.85×10 ⁻⁶	1.06×10 ⁻⁶	4.12×10 ⁻⁶	34.7	8.0	18.3
	1.00×10 ⁻⁷	3	8.82	6.02×10 ⁻⁷	1.57×10 ⁻⁷	4.23×10 ⁻⁷	46.1	31.6	38.3
	统计			2.54×10 ⁻⁴	1.57×10 ⁻⁷	1.57×10 ⁻⁵	46.1	8.0	19.5
方案二	1.00×10 ⁻⁵	2	9.52	1.15×10 ⁻⁵	1.06×10 ⁻⁵	1.11×10 ⁻⁵	16.9	14.4	15.7
	1.00×10 ⁻⁶	16	76.19	9.25×10 ⁻⁶	1.81×10 ⁻⁶	5.33×10 ⁻⁶	21.3	9.7	13.8
	1.00×10 ⁻⁷	3	14.29	3.02×10 ⁻⁷	2.62×10 ⁻⁷	2.77×10 ⁻⁷	39.2	26.0	32.1
	统计			1.15×10 ⁻⁵	2.62×10 ⁻⁷	5.15×10 ⁻⁶	39.2	9.7	16.6
方案三	1.00×10 ⁻⁴	1	4.76	1.19×10 ⁻⁴	1.19×10 ⁻⁴	1.19×10 ⁻⁴	6.4	6.4	6.4
	1.00×10 ⁻⁵	2	9.52	5.65×10 ⁻⁵	1.04×10 ⁻⁵	3.35×10 ⁻⁵	11.6	11.0	11.3
	1.00×10 ⁻⁶	11	52.38	7.88×10 ⁻⁶	1.88×10 ⁻⁶	5.32×10 ⁻⁶	19.8	9.3	14.0
	1.00×10 ⁻⁷	7	33.33	9.98×10 ⁻⁷	1.61×10 ⁻⁷	4.79×10 ⁻⁷	27.4	9.4	16.6
	统计			1.19×10 ⁻⁴	1.61×10 ⁻⁷	1.18×10 ⁻⁵	27.4	6.4	14.3
方案四	1.00×10 ⁻⁴	2	9.52	1.97×10 ⁻⁴	1.09×10 ⁻⁴	1.53×10 ⁻⁴	4.6	6.0	5.3
	1.00×10 ⁻⁵	8	38.10	4.21×10 ⁻⁵	1.06×10 ⁻⁵	1.71×10 ⁻⁵	13.4	6.8	8.4
	1.00×10 ⁻⁶	8	38.10	6.92×10 ⁻⁶	1.06×10 ⁻⁶	3.98×10 ⁻⁶	12.7	6.3	9.3
	1.00×10 ⁻⁷	3	14.29	1.95×10 ⁻⁷	1.69×10 ⁻⁷	1.81×10 ⁻⁷	34.1	27.4	31.5
	统计			1.97×10 ⁻⁴	1.69×10 ⁻⁷	2.26×10 ⁻⁵	34.1	4.6	11.8

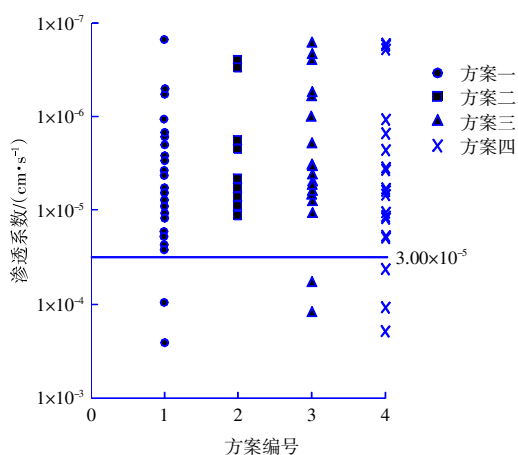
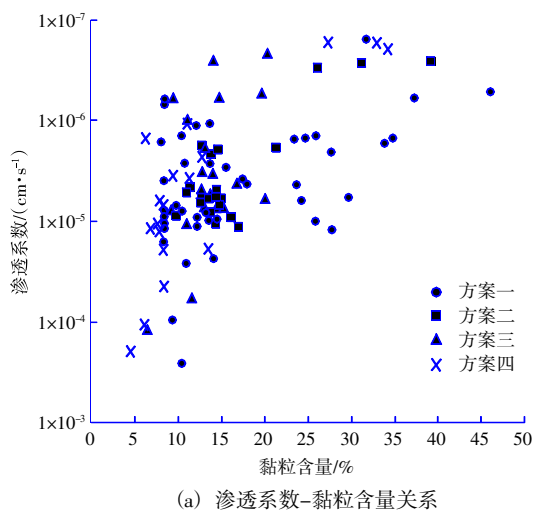
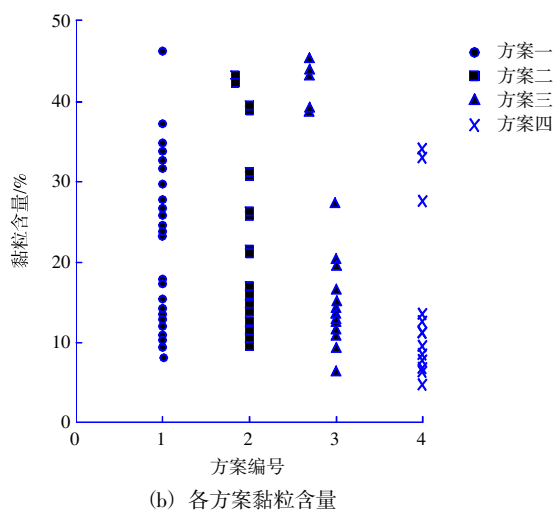


图2 各方案渗透系数图



(a) 渗透系数-黏粒含量关系



(b) 各方案黏粒含量

图3 黏粒含量-渗透系数关系图

由表2中各方案的渗透系数及黏粒含量平均值统计可知,方案一渗透系数范围为 $1.57 \times 10^{-7} \sim 2.54 \times 10^{-4}$ cm/s,平均值为 1.57×10^{-5} cm/s,黏粒含量范围为 8.0%~46.1%,平均值为 19.5%;方案二渗透系数范围为 $2.62 \times 10^{-7} \sim 1.15 \times 10^{-5}$ cm/s,平均值为 5.15×10^{-6} cm/s,黏粒含量平均值范围为 9.7%~39.2%,平均值为 16.6%;方案三渗透系数范围为 $1.61 \times 10^{-7} \sim 1.19 \times 10^{-4}$ cm/s,平均值为 1.18×10^{-5} cm/s,黏粒含量范围为 6.4%~27.4%,平均值为 14.3%;方案四渗透系数范围为 $1.69 \times 10^{-7} \sim 1.97 \times 10^{-4}$ cm/s,平均值为 2.26×10^{-5} cm/s,黏粒含量平均值范围为 4.6%~34.1%,平均值为 11.8%。

试桩取样结果表明,局部位置搅拌不均匀,大部分区域搅拌效果较好;从渗透系数来看,各方案均存在个别不合格点,但总体抗渗透性能良好,方案二的不合格点较少,且渗透系数分布数

由图2可知,渗透系数大于 3×10^{-5} cm/s 级别的试样共7个,其中方案一2个,方案二0个,方案三2个,方案四3个。结合表2及图2可以看出,方案二的渗透系数结果较好且分布比较均匀。

结合前期探摸结果得知,各个方案中渗透系数大于 3×10^{-5} cm/s 级别的试样深度范围内均含有大量贝壳及少量石块,渗透系数没达到要求应与搅拌均匀性较差有关。

将黏粒含量与渗透系数进行关联绘图,如图3所示。由图3可知,渗透系数大体上会随着黏粒含量的增加而增长。部分密封墙黏粒含量不足15%时,渗透系数仍满足相关要求。

值较均匀。根据土工试验结果,最终确定以方案二作为本工程整体密封墙施工方案,即膨润土掺入量10%,偶联剂掺入量0.2%,泥浆密度在满足打设的情况下尽可能增大,打设深度为透气层底部以下1.5 m。

工程整体密封墙施工后,对密封墙开展钻孔取样检测,对中心取样检测,渗透系数小于 10^{-6} cm/s 数量级的样本数占总数的87.3%,渗透系数小于 10^{-5} cm/s 数量级的样本数占总数的97.9%。渗透系数以 $\leq 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s 为控制标准进行统计^[5-6],整体基本满足要求。对于夹杂砂性土搅拌均匀性较差的地方,抽真空时应加大对此处密封系统的排查。同时密封墙间隔一段距离应设置隔墙并覆水,通过水位波动直观观测密封墙密封效果,此外可定期对加固区外裂缝进行透气性观测,检验是否因地基变形导致密封墙漏气。

4 加固效果验证

为了验证新型密封墙的密封效果,在抽真空过程中对加固区域进行实时监测。

4.1 真空度监测

开启真空泵后,分级加载到 80 kPa 以上,膜下真空度与排水板内真空度传递数据采用自动采集装置进行采集。后续膜下真空度保持良好,深层排水板内真空度传递效果良好,加固深度 27 m 以内排水板真空度均在 80 kPa 左右,证明密封墙密封效果良好。

4.2 孔隙水压力监测

采用高精度振弦式孔隙水压力仪、振弦式频率测定仪、自动采集装置等仪器进行孔隙水压力值的监测,每个监测点位沿深度方向共布设 8 个测头。由后续孔隙水压力监测结果可知,抽真空过程中,孔隙水压力逐渐消散,除了由于现场故障导致停电外,孔隙水压力消散情况正常,符合真空预压规律,证明加固效果良好。

4.3 十字板剪切试验及土工试验结果

在加固过程中对加固区域进行十字板剪切试验,由原位剪切试验结果可知,土体抗剪强度有较大提高,加固效果显著。同时对取样进行室内试验,土工试验结果表明土体的含水率也有明显降低。

地基加固过程中数据监测情况表明,加固过程中土体表面沉降、深层分层沉降、孔隙水压力、土体深层水平位移等的变化趋势基本符合真空预压的加固机理,膜下真空压力及排水板内压力稳定,加固效果良好。

5 结语

本文以连云港某工程为例,进行了真空预压新型密封墙的现场试验及室内土工试验,主要结论如下:

1) 针对存在深厚砂层的地基进行真空预压处理,当缺乏黏土材料时,可通过提高泥浆密封墙的膨润土掺量,替代黏土材料,密封墙黏粒含量越高,密封性能越好,一定量的偶联剂、膨润土与粉砂粉土混合后形成水泥搅拌桩墙可有效降低渗透系数,综合考虑密封性能及施工成本,密封墙的最优配比为:膨润土掺入量 10%,偶联剂掺入量 0.2%,泥浆比重 1.5~1.6,密封墙深度进入黏土层不小于 1.5 m。经后续预压过程监测数据表明,该新型密封墙的密封效果是满足要求的,加固效果良好。

2) 试验表明,部分密封墙黏粒含量不足 15%,而渗透系数满足相关要求,设计密封墙时可适当对密封墙黏粒含量要求进行调整。

参考文献:

- [1] 梁爱华,刘爱民,朱耀庭,等. 粘土密封墙施工质量指标控制[J]. 中国港湾建设,2010,30(1):28-31.
- [2] 冯刚,牛飞. 砂土地基密封墙室内配合比试验研究[J]. 水运工程,2021(6):233-237.
- [3] 李军,胡继业,邓元广. 大面积吹填陆域真空预压密封墙处理技术的应用[J]. 水运工程,2004(2):44-48.
- [4] 王振文,卢志伟,王锋. 吹砂造地真空联合堆载预压密封墙处理经验[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊),2017(10):153-154.
- [5] 张哲,张力,左志刚,等. 滨州港大面积真空预压软基处理密封工艺[J]. 水运工程,2021(9):178-181,200.
- [6] 高志义. 真空预压法的理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2015.