

文章编号: 1000-7598-(2005) 03-0427-05

真空预压淤泥搅拌墙气密性试验分析与应用技术

胡利文, 王永平

(广州四航工程技术研究院, 广东 广州 510230)

摘要: 通过淤泥搅拌桩墙的抗渗试验、工艺试验和现场试验, 从土-水特性关系分析了真空预压期淤泥搅拌桩墙的抗渗时效性、抗渗能力及墙体的抗渗厚度, 得出了淤泥搅拌墙在大面积真空预压工程中的共用密封墙桩帽技术及长短桩墙相结合等应用技术, 可有效地解决共用密封墙的沉陷开裂和周边密封墙气密性的持久有效性问题。通过对广州南沙港区陆域吹填地基 $84 \times 10^4 \text{ m}^2$ 真空预压软基处理工程的应用, 从预压期孔隙水压力、水位及真空度分布与变化情况, 分析了密封墙气密性及真空预压的加固效果, 分析表明: 真空预压处理软土地基时, 采用优化不透水淤泥搅拌墙方案进行密封处理是可行的。在 85 kPa 膜下真空度的情况下, 1 m 厚渗透系数小于 10^{-6} cm/s 的淤泥搅拌墙满足气密性的持久性要求。

关键词: 真空预压; 淤泥搅拌墙; 渗透; 气密性; 应用技术

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Test study and application technique for airtight capacity of mixing silt wall under vacuum preloading

HU Li-wen, WANG Yong-ping

(Guangzhou Sihang Institute of Engineering Technology, Guangzhou 510230, China)

Abstract: To study time-dependent airtight capacity, impermeability and breadth of mixing silt wall in vacuum preloading by soil-water character, comprehensive tests were carried out. It was found that mixing silt wall treated with pile cap at the intersection of two preloading areas and 2-rows' inequilelengthy pile wall using at the periphery was feasible to solve mixing silt wall subsiding and crazing and insure the durability of airtight capacity. A case study with large-scale area of 0.84 km^2 is presented involving the hydraulic fill treated with vacuum preloading in Nansha Harbor; and airtight capacity of mixing silt wall and soil improving effects were analyzed by the distributing and changing in pore-water pressure, underground water table and vacuums; and it was concluded that mixing silt wall with breadth 1m and permeability less than 10^{-6} cm/s met the need of the airtight capacity under vacuum of 85 kPa.

Key words: vacuum preloading; mixing slurry wall; permeability; airtight capacity; application technique

1 前言

在国内外沿海经济发达地区, 围海造地及快速造陆软基处理技术对临海工业基地及港区的建设具有重要意义。然而, 沿海地基往往在自重荷载下尚未固结完成, 而其上的陆域吹填土多为粉细砂和海相淤泥粘土, 使得软弱地基具有含水量高、压缩性大、强度及承载力低等特点。高含水量软基, 不适宜堆载预压处理^[1], 而高强度、大面积开发并伴随堆载料不足, 常采用真空预压进行软基加固。

对于大面积真空预压来说, 一般多采用分区施

工, 并且沿海场地表层土层多含中、细砂或粉细砂层。因此, 真空预压密封问题显得尤为重要, 比较常用的方法是采用淤泥搅拌桩形成淤泥墙进行密封处理。对于大面积真空预压, 一方面, 加固区周边淤泥搅拌墙在较高真空度情况下抗渗的持久有效性有待评价; 另一方面, 相邻区块抽真空及卸载不可避免的存在时间差, 搅拌墙需采取何种方案才能保证加固区内膜下真空度恒定, 同时因相邻区块淤泥搅拌墙承受双向渗流, 需要避免产生渗透沉陷开裂问题。

收稿日期: 2003-12-05

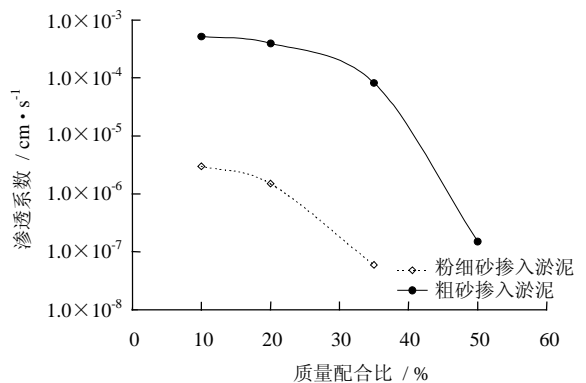
修改稿收到日期: 2004-04-28

作者简介: 胡利文, 男, 1971 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事软基加固、土工织物及环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: hoollywen@vip.sina.com

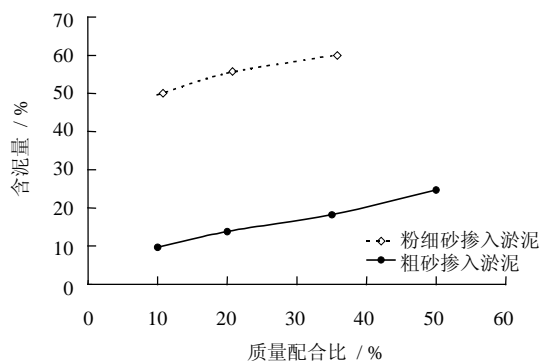
2 淤泥搅拌墙试验分析

2.1 配合比试验

由钻孔取原状粗砂和粉细砂分别与含水量为 75 % 的淤泥进行配合 (配合比为淤泥质量与砂质量的比例), 进行渗透与含泥量试验, 试验结果参见图 1。



(a) 渗透系数-质量配合比关系曲线



(b) <0.075 mm 颗粒含量-质量配合比关系曲线

图 1 淤泥与砂的配合比试验

Fig.1 Mixing test on silt and sand

由图 1 可知, 对于现场中粗砂, 淤泥与砂的质量掺入比达到 45 % 后, 渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 掺入后含泥量 (<0.075 mm 颗粒占总质量的比例) 大于 20 %。对于粉细砂, 淤泥与砂的掺入比达到 25 % 后, 渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 掺入后含泥量 (<0.075 mm) 大于 50 %。

2.2 工艺试验

根据配合比试验参数试打工艺桩, 对履带式双管搅拌桩机及步履式单管搅拌桩机采取四喷四搅方式施工, 泥浆比重 ≥ 1.35 , 下搅速度为 1.2 m/min, 上搅速度为 0.8 m/min。当仪表电流读数小于 30 A 时, 掺入比为 25 %; 当仪表电流读数大于 30 A 时, 掺入比为 40 %。成桩一个星期后, 钻取不同深度的淤泥搅拌桩进行渗透系数与含泥量试验, 其结果参见表 1。

表 1 不同工艺淤泥搅拌桩施工效果

Table 1 Results of mixing silt wall by different cases

施工工艺	取样深度/m	渗透系数/ $10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	含泥量/%
步履式	2	1.03	26.2
	5	0.727	30.5
	8	0.479	36.5
履带式	2	0.656	38.2
	5	0.965	39.2
	8	0.596	29.6

通过工艺桩试验, 采用以上施工工艺可满足密封要求。

2.3 淤泥搅拌墙抗渗能力分析

(1) 真空预压下淤泥搅拌墙抗渗机理

淤泥搅拌墙主要作用是对真空预压加固区进行周边密封, 在抽真空前, 它基本上是饱和土体, 土性为淤泥混砂。开始抽真空后, 出现液相渗流, 渗流加速, 墙体内细颗粒易被带走, 墙体内水份逐渐减少, 墙体发生脱水现象, 土-水势降低, 土颗粒对水的吸力增加, 土体处于非饱和渗流状态, 渗透系数随饱和度的降低, 土体对水的吸力增强, 相对渗透系数^[2]降低, 使搅拌墙体抗渗能力进一步加强。如果墙体单薄, 一方面渗透带走的细颗粒对搅拌墙体产生严重影响, 使搅拌墙体抗渗能力减弱; 另一方面, 土-水势的降低, 伴随基质势的增加 (土颗粒对水的吸力), 其范围可能进一步扩大到搅拌墙外砂层中, 基质势不足以平衡真空吸力, 真空吸力延伸至墙外, 随着水份补给的减少, 出现气相渗流, 真空度将回落到一相对稳定值, 此时搅拌墙体的持久抗渗能力不足。如果墙体较厚, 墙体饱和度降低, 抗渗能力增强, 高基质势区不会延伸至墙体之外, 搅拌墙体因渗透系数降低而维持较高真空度。

表 2 粘土的土-水特性关系

Table 2 Soil water characters of clay

饱和度 S_r	1	0.989 2	0.631 5	0.379 3	0.212 5
吸力/kPa	0	31	47.87	61.12	92.02
相对渗透系数 K_r	1	0.91	0.1	0.01	0.000 2

(2) 水位降深在搅拌墙体内部的影响半径

对于真空预压期间淤泥搅拌墙的所需厚度, 需考虑水位降深对搅拌墙体内部的影响半径, 暂且将真空预压加固区看成一抽水井, 其水位降深 s 一般为 3~9 m, 考虑到抽真空过程中, 淤泥搅拌墙外水位仍有下降, 区内水位降深按 5 m 考虑。将淤泥搅拌墙看成无限厚的潜水层, 潜水深度 $H=20 \text{ m}$, 则利用库萨金经验公式:

$$R = 2s\sqrt{HK} \quad (1)$$

式中 R 为影响半径; s 为水位降深; H 为潜水深度;

K 为渗透系数。根据淤泥搅拌墙不同的渗透系数算得相应的影响半径如表 3。

表 3 淤泥搅拌墙内影响半径

Table 3 Hydraulic radii in mixing silt wall

渗透系数/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	1×10^{-5}	1×10^{-6}	5×10^{-7}	1×10^{-7}
影响半径/m	4.16	1.31	0.93	0.42

考虑到在抽真空过程中, 墙体渗透系数会因微细粒的流失而增大, 并且对于真空预压隔气来说, 要求淤泥搅拌墙体渗透系数小于 10^{-6} cm/s 。常规淤泥搅拌墙工艺较难保证墙体渗透系数小于 10^{-7} cm/s , 施工时采用双排淤泥搅拌墙, 厚度为 1.2 m, 墙体太薄, 则墙体内将会发生气液两相流, 并且带走微细颗粒, 淤泥搅拌墙密封性能的持久性得不到保证, 将影响区内真空度的稳定。

通过工艺桩试验, 经过双管履带式搅拌桩机和单管步履式搅拌桩机施工的淤泥搅拌墙渗透系数平均为 $6 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 满足搅拌墙抗渗和真空预压期持久抗渗要求。在实际工程中, 区外水位和孔压会因搅拌墙的弱透水性及搅拌墙底部绕流而影响较远, 由于区外水的补给对气密性的持久性影响较小。

3 淤泥搅拌墙施工密封技术

为保证大面积真空预压搅拌墙持久有效地发挥其密封功能, 除严格按照搅拌墙的施工工艺参数及墙体参数进行控制外, 还应按如下技术措施进行施工与防护。

3.1 淤泥搅拌墙密封深度

淤泥搅拌墙的密封深度, 一方面取决于墙体的抗渗功能要求和气密性持久性要求, 同时还要求其渗漏水较少。对沿海陆域吹填造地地基, 周边无建筑物需保护, 则搅拌墙密封深度以保证其持久气密性及减小浅层渗水为原则; 另一方面, 真空预压时, 加固区内降水一般不超过 10 m, 水位降深以内的土体容易受周边渗透及漏气影响, 搅拌墙深度应控制在 10 m 以内, 对于深度 10 m 附近存在中粗砂层, 并且处于加固区周边时, 应对其进行密封。

施工前, 对淤泥搅拌桩范围按密封轴线每 50~100 m 一个点进行钻孔探摸, 若砂层很浅, 深度小于 2 m, 可直接开挖密封沟进行周边密封处理; 若砂层较深, 则采用淤泥搅拌墙, 搅拌墙深度以进入砂层下淤泥 50 cm 为准。

3.2 双排淤泥搅拌桩长短结合密封技术

对于大面积真空预压分块施工, 为节约工程量,

同时保证墙体抗渗能力及真空预压加固效果, 采用双排长短桩相结合密封施工技术。首先, 真空度依据土性不同而传递效率不同, 真空度在排水板、中粗砂、粉细砂、粘土、淤泥中传递效率依次降低。另外, 真空度传递随深度递减, 在表层中粗砂垫层中, 真空度高并且传递效率高; 而在深部粉细砂中, 真空度低并且传递效率弱。对于表层砂厚度超过 6 m、大面积真空预压周边搅拌密封墙及相邻区块加载与卸载时间差超过 15 d 的共用密封墙等情况, 采用双排长短桩搅拌墙; 对于区块中间共用密封墙加载与卸载时间差小于 15 d 的情况, 采用单排淤泥搅拌墙。参见图 2。

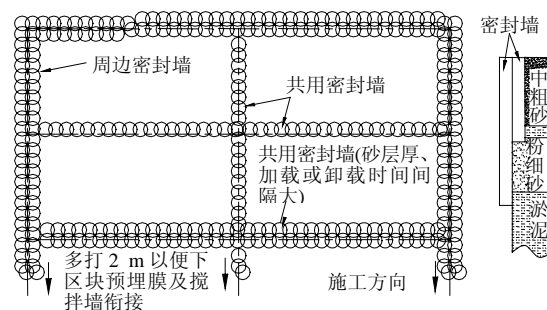


图 2 长短淤泥搅拌桩布置示意图

Fig.2 Display of 2-rows inequilelengthy mixing silt wall

3.3 共用淤泥搅拌密封墙桩帽技术

对于大面积真空预压, 相邻区块真空预压密封墙为两区共用, 并且会出现共用角点密封, 而区块之间真空预压不是同时施工, 不可避免的会对真空预压下一区块施工带来难度。因此, 对分块加固区共用角点情况, 上一区块淤泥搅拌桩施工时需向下一区块多打出 2 m (参见图 2), 以便下一区块搅拌墙连结施工和预埋膜。对于共用搅拌墙, 为有效解决相邻区块不同时铺膜, 搅拌墙固结对下一区块铺膜影响, 上一区块压 (踩) 膜时, 同时将下一区块密封膜 3~5 m 压 (踩) 入共用墙内, 当下一区块大面积铺膜后, 再与预埋膜现场采用专用聚氯乙烯胶水粘合。参见图 3。

对于相邻区块抽真空时, 共用的搅拌墙尚未完全固结, 承受来自两侧的真空吸力作用, 高含水量的墙体失水, 细颗粒被抽至附近土层或砂层, 搅拌墙表层将沉陷, 并形成较深的空洞, 共用密封墙处的密封膜易拉裂, 特别是当采取联合堆载前需及早处理。因此, 在铺设膜的过程中, 先将 3~4 m 宽的土工布压入搅拌墙, 以防泥浆颗粒在真空作用下流失, 再踩入密封膜, 并在相邻区块密封膜间填塞

泥包袋,高出顶部 20 cm,顶部采用密封膜粘结封堵,防止共用密封墙承受双向渗流沉陷开裂问题,而共用搅拌墙同时受到真空排水固结而达到加固效果。

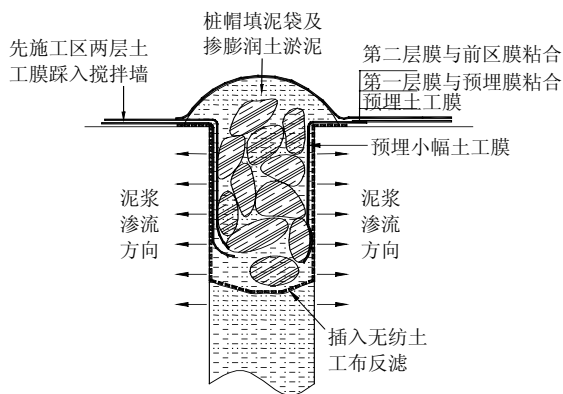


图 3 共用密封墙桩帽示意图

Fig. 3 Pile cap of intersectional mixing silt wall

4 工程实例分析

4.1 施工情况

广州港南沙港区一期工程的道路及堆场地基为大面积人工吹填造陆形成,面积达 $1.52 \times 10^6 \text{ m}^2$ (其中北段面积 $8.4 \times 10^5 \text{ m}^2$),港区陆域+0.5 m 标高以下为原有滩涂,土层以灰色淤泥为主,含水量高,强度低;+0.5~+4.8 m 为新吹填淤泥、淤泥混砂为主,土体在自重情况下未充分固结,含水量高达 67% 以上、强度及承载力低,施工机械不能直接在上作业。为了便于施工机械作业,并满足港区道路堆场沉降及承载力要求,需进行软基加固。在软基处理前,先铺一层无纺布和土工格栅,吹填中粗砂垫层。然后,采用插设塑料排水板结合真空预压或真空联合堆载预压进行软基处理,淤泥搅拌墙方案根据钻探确定,并在插设排水板期间进行搅拌墙施工。北段软基处理工程于 2003 年 1 月 13 日开工,并于同年 9 月 23 日完工。单块加固面积 24 000~45 000 m^2 ,膜下真空度长期稳定在 85 kPa 以上。北段软基处理工程平面图见图 4。

4.2 淤泥搅拌墙密封效果分析

为了进一步了解淤泥搅拌墙的密封效果,尤其是在高真空度情况下搅拌墙气密性的持久性,在 NIII1 区搅拌墙内外分别埋设了真空度测点、孔隙水压力和水位观测点。

(1) 墙内外真空度

真空度取真空预压期间的最大值进行比较,共用密封墙都进行了桩帽处理,真空度情况参见表 4。

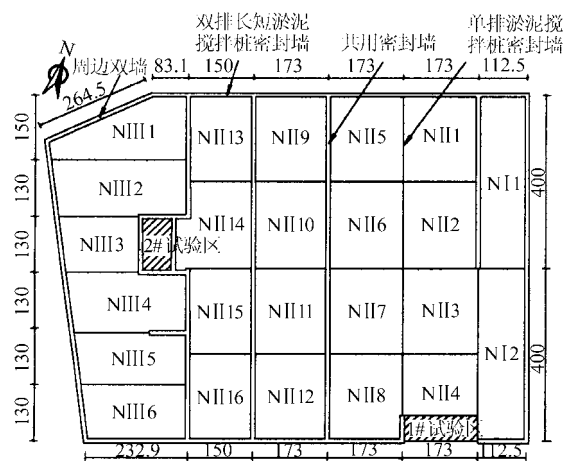


图 4 南沙港工程平面位置图(单位: m)

Fig. 4 Layout of silt wall in Nansha Reclamation Project(unit:m)

表 4 不同密封墙不同深度真空度情况

Table 4 Vacuums in different walls and depths

深度/m	真空度/kPa			
	共用单墙	共用双墙	周边双墙	区外 1 m
0	85	86	/	/
1	65	52	17	0
3	47	31.5	7	0
6	38	5.5	5	0
9	0	0	0	0

注:通过钻孔确定的共用单墙、共用双墙和周边双墙的桩长分别为 6.0, 5.5, 5.0 m。短桩采用 3.5 m。

由表 4 可知,真空度在密封墙内传递深度可达 6 m 以上,超过 3 m 真空度衰减较快。在加固区外 1 m 左右不同深度没有测到真空度。因此,采用长桩平均 6.5 m 以上、短桩平均 3.5 m 的双排长短搅拌墙足以保证 85 kPa 真空预压周边气密性的持久性。

(2) 墙内外孔隙水应力

在 NIII1 区周边淤泥搅拌密封墙内外的孔隙水应力情况参见图 5。

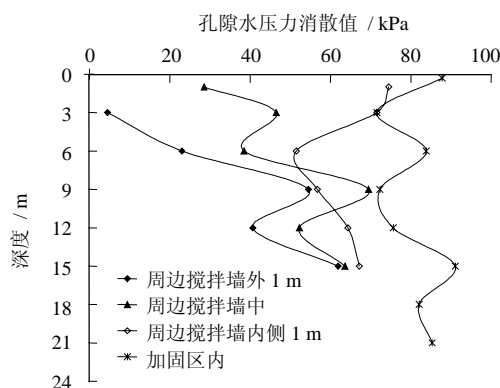


图 5 墙内外孔隙水压力消散值沿深度变化

Fig. 5 Display of porewater pressures in or out of silt wall

由图5可知,在加固区内的孔压消散值最大,引起周围、周边及加固区外的水向区内渗流,而且真空预压期间加固区内孔压消散值基本上沿深度一致。采用6 m长的双排长短桩搅拌墙明显改变了区内外的渗流场,加固区外及周边搅拌墙中孔压消散值在9 m范围内沿深度递增,在9 m与15 m深处,孔压消散值最大,接近于搅拌墙附近加固区内的孔压消散值。在搅拌墙内侧,浅层孔压消散值较大,与区内中心点的孔压消散值基本一致。

由上分析可知,采用搅拌墙改变了区内外的渗流场,土体内水分的流动,同时存在跨越渗流和绕流,从相同深度孔压差来看,6~9 m深度的不同点消散压差最小,表明绕流的作用比跨越渗流越明显,双排搅拌墙具有较强的抗渗能力。

(3) 墙内外水位

对于淤泥搅拌墙内外水位,采用水位管进行观测,水位管滤水孔位于密封膜下8~12 m深的淤泥中,滤水孔深度已超过搅拌墙深度而进入原状淤泥层,水位反映了滤水孔深度范围内孔隙水压力的平均值,参见图6。

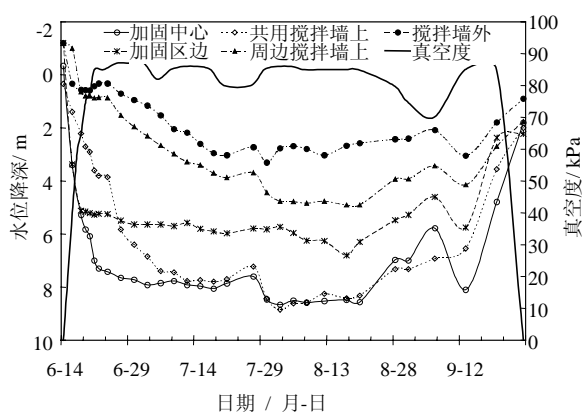


图6 真空度-水位时程曲线

Fig. 6 Relationship of vacuum and water table

由图6可知,水位下降的整体趋势是离加固区越远,下降越小,共用密封墙上水位受相邻区真空预压影响而水位下降较靠近加固区周边大,主要是因为靠近加固区边水位下降到一定程度受到区外补给水作用而维持一相对稳定水位。

加固区内水位随真空度的增大而同步下降,而在搅拌墙上和区外的水位相对于真空度的变化有所滞后,并缓慢下降。搅拌墙的应用较好地起到了抗渗作用。

很明显,由上试验分析可知,采用双排长短相结合搅拌墙起到了很好的气密性作用,而且在高真空度情况下,气密性的持久性并未发生多大变化;

另一方面,搅拌墙同时起到了较好的抗渗作用,并且使区外向区内渗流部分为绕流渗流。

4.3 真空预压加固效果

通过采用淤泥搅拌墙密封技术进行真空预压软基处理,南沙港区北段道路及堆场地基得到有效加固,真空度传递较深,孔隙水应力在20 m深度附近消散值达80 kPa左右,同时,采用桩帽后的共用密封墙也得到了有效加固,加固效果见表5和表6。

表5 真空预压加固沉降情况

Table 5 Soil settlements under vacuum preloading

参数	加固区块		
	N I 区	N II 区	N III 区
	85kPa 真空	85kPa 真空+16kPa 堆载	85 kPa 真空
平均沉降/m	1.654	1.983	1.640
最大沉降/m	2.427	2.961	2.565
固结度/%	92.1	94.1	92.9

表6 加固前后十字板剪切强度

Table 6 Vane strengths of soil by vacuum preloading

加固区块	加固前/kPa	加固后/kPa	强度增加/倍
N I 区	19.35	41.85	2.16
N II 区	16.87	48.53	2.87
N III 区	13.37	40.32	3.02
共用搅拌墙	2.08	31.43	15.11
周边搅拌墙	2.28	25.62	11.24

5 结论

(1) 采用淤泥搅拌墙双排长短桩相结合进行大面积吹填地基真空预压加固处理,能够保证周边密封性能在高真空荷载下的持久稳定性,可使真空度长期维持在85 kPa以上。

(2) 对共用淤泥搅拌墙进行桩帽改进,使共用搅拌墙密封能经历单向抗渗、双向抗渗过程,不但能保证相邻区块真空预压同时抽真空,也能避免加载与卸载的不同步性造成不利影响和保证搅拌墙本身的加固效果。

(3) 实践证明,针对真空预压的特性,从淤泥搅拌墙隔气、弱透水性出发,对搅拌墙进行改进,能有效保证大面积真空预压真空度向深度的传递、加固区内孔隙水压力消散和水位降深,使真空预压加固平均沉降量达1.86 m。

参考文献

- [1] Bo M W, Choa V, Wong K S. Compression tests on a slurry using a small-scale consolidated meter[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39: 388-398.
- [2] 吴梦喜,高连士. 饱和-非饱和土体非稳定渗流数值分析[J]. **水利学报**, 1999, (12): 792-795.
WU Meng-xi, GAO Lian-shi. Saturated-unsaturated unsteady seepage numerical analysis[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1999, (12): 792-795.