



固化土在海堤闭气结构中的应用与研究

邹桐¹, 李守龙¹, 朱敏杰²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 舟山绿色石化基地管理委员会, 浙江 舟山 316021)

摘要: 对于大型围填海工程, 陆域边界海堤的闭气结构是确保堤身渗透稳定、隔绝内外水系从而满足较高环保要求的重要设计内容。而通过抓取滩涂泥再分层回填的传统闭气土方案, 存在施工效率低、回填泥强度差、闭气土区域土地难以利用等特点, 往往成为制约工程进度的关键问题。结合舟山绿色石化基地围填海工程南堤闭气土结构的设计、施工, 通过首次将固化土技术运用于海堤闭气结构中, 实现了大规模闭气土方的快速回填、快速硬化。同时结合工程实践, 总结固化土作为闭气土时的关键技术问题及存在的问题。

关键词: 固化土; 闭气结构; 围填海; 渗透系数

中图分类号: P 748; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)05-0012-04

Application and research of solidified soil in closure earthwork of embankment

ZOU Tong¹, LI Shou-long¹, ZHU Min-jie²

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Zhoushan Green Petrochemical Base Management Committee, Zhoushan 316021, China)

Abstract: For large-scale reclamation projects, the closure earthwork of the land boundary is an important design content to ensure stable penetration of the embankment and isolate internal and external water systems to meet high environmental protection requirements. However, the traditional closure earthwork by grabbing mudflats and backfilling in layers has the characteristics of low construction efficiency, weak soil strength, and difficulty to use land in closure earthwork areas, which often become a key issue that restricts the progress of the project. Based on the design and construction of the closure earthwork of the Zhoushan Green Petrochemical Base Reclamation Project, we have realized large-scale closure earthwork fast backfilling and hardening through the application of soil solidification technology. At the same time, combined with engineering practice, we summarize the main points of the application of the key technical issues when solidified soil is used as closure earthwork and the existing problems.

Keywords: solidified soil; closure earthwork; embankment; permeability coefficient

随着社会的快速发展, 各省市对于建设用地的需求日益增加, 合理开发利用海洋资源成为各地区新的经济增长点。对于大型外海围填海工程来说, 海堤闭气结构是实现新成陆域防洪防潮安全、确保场地使用功能以及满足环境保护要求不可或缺的一部分。同时由于闭气土工程体量大、施工周期长、施工条件复杂, 往往成为制约工程

进度、影响工程造价的关键性工程。

在围填海工程中, 海堤闭气结构多通过“挖、运、抛”工艺将滩涂泥分层回填至堤身后方, 而形成一定厚度的闭气土结构^[1]。但由于滩涂的泥含水率高、强度低的特性, 为确保回填闭气土的稳定, 回填坡比通常较小, 回填速率也不宜过快^[2], 因此往往占地面积较大, 施工工期也较长。

收稿日期: 2020-12-01

作者简介: 邹桐(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程、岩土工程设计。

同时闭气土渗透性差，自然固结时间长，也使得闭气土区难以兼顾其他功能，降低了土地的使用率。

本文结合舟山绿色石化基地围填海工程南堤闭气土结构的设计与施工，首次将固化土技术运用于海堤闭气土结构中，通过新材料的应用，实现大规模闭气土方的快速回填、快速硬化，在确保工程建设工期的同时，实现海堤闭气土功能。

1 固化土的研究及特性

固化土即通过土壤固化技术加固后的土体。利用土体与固化剂间一系列物理、化学反应，使松散的土颗粒胶结为一体，并不断凝结硬化，从而使土体分散的单元结构渐变具有一定整体强度的结构。20 世纪 60 年代，瑞典岩土工程研究所和日本运输省港湾技术研究所率先提出将水泥作为固化剂^[3]，用来加固软土地基。随着国内外学者对于水泥固化土的的进一步研究及应用实践，采用非单一固化剂进行的软土加固，无论在加固效果还是经济性方面都更具优势^[4-5]。目前较为成熟的固化土技术多以水泥为主体，并根据加固土体的特性掺入多种添加剂，激发土颗粒本身的活性，进一步促进、稳定反应进程，使得传统水泥土无法实现的高含水率淤泥、泥炭土等的固化成为可能^[6]，应用场景更加广泛，经济效益也更为突出。

2 工程背景

舟山绿色石化基地围填海工程是一个依托于海岛的大型外海围填海工程，项目新建海堤13.84 km，填海面积 15.21 km²。

根据拟建石化园区整体规划以及陆域形成功能要求，在拟建海堤内侧需实施闭气土结构，并最终形成闭合的防渗边界，闭气土边界见图 1。同时为了最大限度利用土地，园区内的随塘河道均布置于堤后闭气土区，为确保河道开挖时的岸坡稳定，海堤闭气土结构还需具有一定的强度。尤其是对于随塘南河，由于建设工期紧，当采用传统闭气土方案时，无法很好地解决闭气土强度与建设工期之间的矛盾。而利用固化土多样的材料

特性以及快速硬化的特点，能较好地解决上述工程难题。

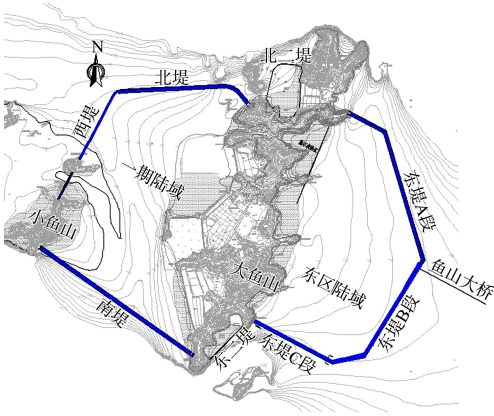


图 1 陆域闭气土分布

3 固化土材料特性的确定

固化土技术虽然近年来已大量运用于工程建设中，但目前国家仍尚未颁布关于固化土设计的相关规范、应用标准。因此，合理确定固化土的设计参数对实现设计意图、确保工程质量至关重要。

针对本工程特点，使用固化土的目的有：1)短期内形成满足河道开挖以及满足河道岸坡永久稳定所需强度的闭气土。2)满足海堤闭气、河道防渗的功能需求。3)采用吹填工艺，确保工期。

3.1 强度设计参数

固化土根据原状土含水率、固化剂掺量、养护环境等的不同所呈现出来的强度特性也不尽相同，但固化后的强度都远高于原状土，其无侧限抗压强度可达到 1~2 MPa，淤泥固化土强度也可达到 100~500 kPa。对于本工程来说，固化土的强度参数主要取决于河道开挖时岸坡稳定的需要，且并非越大越好，一方面固化土的塑性会随着强度的增加而降低，而丧失塑性的闭气土易产生裂缝，从而影响其闭气土的防渗性能及耐久性，另一方面固化土强度越高意味着固化剂的掺量也越高，强度指标过剩将导致经济性显著下降。

因此通过计算，在确保河道施工期、使用期岸坡开挖稳定以及固化土渗流稳定的基础上，最终确定固化土强度设计指标为，黏聚力不小于 20 kPa，内摩擦角不小于 12°。

3.2 渗透性设计参数

对于海堤闭气土来说，其防渗能力主要体现在闭气土自身的渗透性，根据当地建设经验，闭气土料的渗透系数通常应小于 1×10^{-4} cm/s。

对于固化土特性的研究，目前更多地集中于分析其强度变化规律，而对其渗透特性的研究成果相对较少，但根据固化土的作用机理，当固化剂中的活性矿物与土中水分发生一系列水化、水解反应后，所生成的胶凝物质能够起到包裹和填充土体颗粒孔隙、重组泌水通道的作用。因此在众多研究中也表明，在掺入固化剂后，土体的渗透系数都较原状土有所下降。而固化剂掺量越大则土体的渗透系数越小。由于固化土的渗透系数主要取决于原状土的性质，因此，为实现闭气功能，在选择拌合土料时，应首先选择渗透性较差的黏土、淤泥质土等。本项目所采用的拌合土料取自鱼山周边海域，原状海涂泥渗透系数为 $10^{-7}\sim10^{-6}$ cm/s。

3.3 其他特性

考虑到拟建河道直接在闭气土中开挖形成，因此固化土应具有一定的防冲刷能力。同时控制固化土中有害元素的含量和析出物，也应作为固化剂选择的关键指标。

4 工前试验

4.1 室内试验

室内试验土样取自鱼山北部滩涂区，表层为新淤积的淤泥土，含水率较高，下部为原生Ⅲ₂层灰色淤泥质粉质黏土，含水率相对较低，分别取两类土样若干，土样基本性质见表 1。

表 1 试验土样基本特性

淤泥	颜色	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)
1 [#] 淤泥(近期淤积)	淡黄色	81.8	1.62
2 [#] 淤泥(海涂泥)	青色	53.6	1.80

考虑到固化土施工拟采用吹填工艺，因此需将原状土调配至满足吹填施工的高含水率土样，试验土样含水率梯度见表 2。

表 2 土样含水率调配梯度

淤泥编号	含水率/%	备注
1 [#]	81.8	原状含水率
	100.0	调制含水率
2 [#]	53.6	原状含水率
	75.0	调制含水率
	100.0	调制含水率

依据前文确定的闭气土设计参数，分别对不同固化剂掺量下土样的固化特性进行室内试验，试验成果见表 3。

表 3 试验成果

淤泥	含水率/%	固化剂掺量/(kg·m ⁻³)	无侧限抗压强度/kPa			抗剪强度		抗渗系数/(10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)
			7 d	14 d	28 d	c/kPa	φ/(°)	
1 [#]	81.8	90	121	150	162	34.7	17.2	3.42
	100.0	100	113	146	170	32.2	16.3	22.60
2 [#]	53.6	80	86	92	107	21.5	11.4	1.05
	75.0	90	55	86	95	20.7	11.0	65.70
	100.0	100	68	86	106	22.3	12.5	2.93

从上述试验成果可以看到，在掺入 5%~7% 固化剂后，土层强度得到了较大的提高，土体强度由天然软土的 7~10 kPa 增加到了约 50 kPa。同时直剪、快剪指标中的黏聚力指标以及内摩擦角指标也显著提高，不同龄期固化土的强度特性变化显示其强度随时间稳步提高。

而固化土渗透试验也显示，其渗透特性基本维持原状土的渗透特性，渗透系数在 $10^{-7}\sim10^{-6}$ cm/s，满足闭气土 1×10^{-4} cm/s 的防渗要求。

4.2 现场试验

对于外海围填海工程，闭气土施工条件通常较为复杂。一方面闭气土回填区位于水中，同时还受到潮汐作用的影响。因此为确保固化土水中吹填质量，在室内试验后又开展了现场吹填试验。

现场试验选在鱼山岛一处临海抛石区内。分别开挖两个泥槽，一个用作固化土的调配池，另一个模拟回填区(槽内水位与外海潮位联动)。

现场试验模拟了固化土调配→吹填→养护→开挖的整个过程。当高含水率固化土逐步吹入水中时,固化土仍保持一定的稠度,未出现明显的离析,同时逐渐将水槽中的水挤出,最终填满回填区。在养护 14 d 后,固化土已具备了一定的强度,边坡可实现垂直开挖,同时土体切口光滑,仍呈黏性土的特性。通过现场钻芯取样,各项指标均满足设计要求。

5 现场实施

为实现海堤的闭气,并有效控制固化土用量,工程采用两次吹填,吹填范围见图 2。

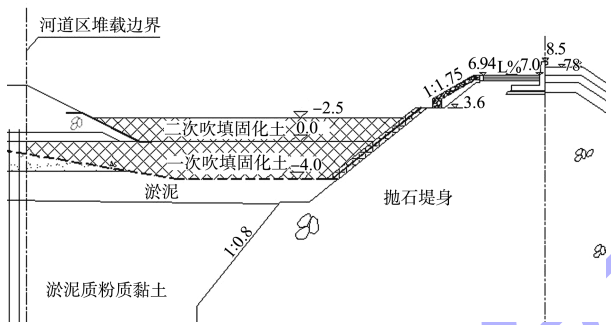


图 2 固化土分次回填 (单位: m)

工程共回填固化土 45 万 m³,施工工艺流程见图 3。

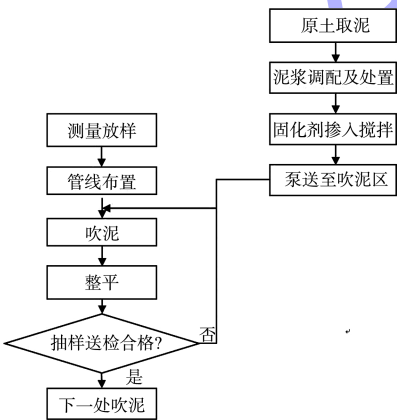


图 3 固化土施工工艺流程

随着固化土的吹填,海水不断被排除,当吹填至设计高程后,即实现了海堤的闭气。同时其强度也随着龄期快速增长,经 28 d 现场取样,其各项指标均满足设计要求。

在河道的开挖以及河道护面的施工过程中,河道内无渗水,岸坡稳定,固化土强度以及防渗性能均达到设计预期效果。

6 存在问题

1) 固化剂是固化土的灵魂,决定了固化土的材料性能、质量的优劣。然而固化剂的组成、配比却作为厂商专利不予公开,这便给工程质量的控制带来了难题,作为设计、监理、以及质监单位往往只能对最终成果进行评价,而丧失了提前发现问题、调整和优化方案的机会。因此在固化土技术应用的初期,应尽可能增加过程控制措施,对原材料、掺灰、拌合等关键工序提出明确的技术要求,并适当增加抽检频率。

2) 固化土在使土体快速硬化后,不可避免地会丧失一定的塑性,这也给固化土渗透系数的评价带来了一些难题。对于渗透系数的检测,传统取样、试验方法更多适用于软弱的黏性土,而对于固化土这类强度较高、具有一定结构性的人工合成材料来说,在取样、运输、制样过程中极易受到扰动、产生裂缝,从而影响固化土渗透性的评价。因此,对于固化土渗透性的评价,在采用传统室内渗透系数检测的同时,建议配合进行现场抽、注水试验,并结合实际止水效果综合评价。

3) 固化土质量评定标准的确定也是工程面临的一个难题。在本次应用过程中,固化土方案较好地实现了吹填软土的快速硬化,在确保工期的同时实现海堤闭气功能的基本要求,达到了设计预期效果。但在工程验收过程中,由于缺少有针对性的质量评定标准、质量检测方法,使固化土工程质量的评价缺少依据。考虑到新材料、新技术在前期应用中相关经验较少,建议在项目实施前可与相关质量验收主管部门共同商讨,事先确定合理、可行的评价办法和验收标准,以便在工程验收环节有据可依。