

固化吹填泥砂混合物的力学性能与微观结构分析

李悦¹, 李学辉², 李战国¹

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 保利(北京)房地产开发有限公司, 北京 100120)

摘要: 中国沿海地区吹填造地过程中产生大量低成本的淤泥和吹填砂。同时, 此类地区建设公路中却需要大量高成本水泥稳定碎石等建筑材料。针对此类问题, 本文采用不同类型的固化剂固化淤泥和吹填砂混合物替代传统公路修筑材料, 研究了固化后泥砂混合物的无侧限抗压强度及其微观结构。结果表明: 相对于水泥固化剂, 本项目研发的固化剂可大幅度提高固化泥砂混合物的强度; 其机理是新型固化剂可形成更多的胶凝和膨胀性产物, 其中有机化合物可通过聚合反应形成有机分子链, 包裹泥砂混合物颗粒, 密实土体结构。

关键词: 吹填泥砂; 固化剂; 微观结构; 固化机理

中图分类号: TU 528. 042

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2013) 06 - 0881 - 05

Analysis of Mechanical Properties and Microstructure of Solidified Hydraulic Fill Silt and Sand

LI Yue¹, LI Xue-hui², LI Zhan-guo¹

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Poly(Beijing) Real Estate Development Co., Ltd, Beijing 100120, China)

Abstract: A large amount of cheap hydraulic fill silt and sand in coastal land reclamation project will be generated, meanwhile, the road construction project in this region needed a large number of expensive building materials such as cement stabilized crushed stone. In view of these problems, different stabilized mixtures of hydraulic fill silt and sand were used to replace the traditional construction materials; and the unconfined compressive strength and microstructure of stabilized soil were studied. Results show that compared to the cement stabilizer, stabilizer developed in this project can significantly increase the strength of stabilized silt and sand mixture. The solidification mechanism is that the new stabilizers can produce more gel and expansive hydrated products, and the organic compounds in stabilizers can form organic molecules by polymerization process, which can wrap the particles of silt and sand resulting in the soil structure being compacted.

Key words: hydraulic fill silt and sand; stabilizer; microstructure; solidification mechanism

中国沿海地区吹填造地工程日益增多, 在吹填围海造地工程上修筑公路等基础设施建设日益广

泛。传统的修建公路需要大量填料及水泥稳定碎石等建筑材料, 成本高、修筑周期长; 同时, 吹填造地过

收稿日期: 2011-07-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008007); 北京市属高等学校人才强教计划资助项目(00400054RA002).

作者简介: 李悦(1972—)男, 教授, 主要从事建筑材料方面的研究, E-mail: liyue@bjut.edu.cn.

通信作者: 李战国(1980—)男, 讲师, 主要从事建筑材料、地基固化处理方面的研究, E-mail: lizg@bjut.edu.cn.

程中会产生大量的淤泥和吹填砂,其主要特点是高孔隙比、高含水量、高含盐量、低固结度、高有机质等,不能直接应用到公路建设工程中,但对其进行固化处理后替代传统建筑材料,则可达到一举两得的效果。

国内外目前对土壤固化方面进行过较多研究^[1-3],但固化处理对象主要是单独淤泥或砂,复合固化二者混合物的研究很少。例如,文献[4]研究认为加入0.25% NaCl和2%尿醛树脂后固化的砂土强度可达2.4 N/mm²;文献[5]研究用固硫渣复掺碱激发剂作土壤固化剂,具有较高的强度和微膨胀性,掺量接近50%时,用其固化的纯细砂土可作为较好的路基材料;文献[6]研究了一种针对唐山市曹妃甸纯淤泥的新型固化剂,提出了固化剂中熟料、

Na₂SO₄、Na₂SiF₆等组分的最佳配比,通过无侧限抗压强度检验其强度;文献[7]针对吹填造地形成的吹填淤泥,研究探讨了采用工业废渣产业化制备吹填淤泥固化剂的若干问题;文献[8]对滨海地区纯淤泥的快速固化方法进行了室内试验研究。

本文依托曹妃甸工业区的滨海大道工程,研发了多种新型固化剂,研究了固化吹填砂与淤泥的物理力学性能和微观结构,探索了其作为路基填料的可行性。

1 试验原材料和方法

1.1 试验用淤泥和吹填砂

吹填砂和淤泥来自于曹妃甸工业区,各项技术指标及化学成分结果如表1和2所示。

表1 吹填砂与淤泥的物理性能指标

Table 1 Physical property of hydraulic fill silt and sand

指标项	天然含水量/%	密度/(g·cm ⁻³)	天然密度/(g·cm ⁻³)	最小干密度/最大干密度/(g·cm ⁻³)	相对密度	孔隙比(e)	液限(W _L)/%	塑限(W _P)/%
吹填砂	5.55	2.71		1.35 1.65	0.71	0.65~1.02		
淤泥	65.2		1.33			1.58	41	12.6

表2 吹填砂和淤泥的化学成分

Table 2 Chemical composition of hydraulic fill silt and sand

化学成分	w(Ca ²⁺)/(mg·kg ⁻¹)	w(Mg ²⁺)/(mg·kg ⁻¹)	w(Na ⁺)/(mg·kg ⁻¹)	w(CO ₃ ²⁻)/(mg·kg ⁻¹)	w(HCO ₃ ⁻)/(mg·kg ⁻¹)	w(Cl ⁻)/(mg·kg ⁻¹)	w(SO ₄ ²⁻)/(mg·kg ⁻¹)	pH
吹填砂	10.5	59.2	850.1	22.1	1381.4	109.3	69.2	9.8
淤泥	31.1	74.1	615.8	3.93	26.12	965.8	243.3	8.4

由表1、2可看出,吹填砂中的主要化学离子为HCO₃⁻、Na⁺和Cl⁻;淤泥的主要化学成分为Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻。经试验,淤泥中活性SiO₂和Al₂O₃的质量分数分别为4.6%和0.04%。吹填砂和淤泥的pH均大于7.0,呈碱性。根据前期研究^[9]确定吹填淤泥和吹填砂以质量比4:6混合作为待固化处理的泥砂混合物。

1.2 固化剂

选择P.O 42.5普通硅酸盐水泥作为基准对比固化剂,其3d和28d抗压强度分别是19.8和47.3 MPa,细度是355 m²/kg。

本文研发了4种固化剂:G1由胶凝材料A、熟石灰、Na₂SO₄、矿渣组成;G2由胶凝材料A、聚丙烯酰胺、聚乙烯醇组成;G3由胶凝材料A和丙三醇组成;G4由矿渣、水玻璃、石膏、生石灰、碱、三乙醇胺

和减水剂组成。各种固化剂混合后粉磨至细度达350 m²/kg以上。

1.3 试验方法

吹填砂和淤泥的物理性能试验和易溶盐质量分数试验参考标准JTG E40—2007《公路土工试验规程》。试样制备、无侧限抗压强度试验和劈裂强度试验参考JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》。SEM试验采用S-3400N型扫描电子显微镜,XRD试验采用XRD-6000型X射线衍射仪。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度试验结果

采用研究得到的多种固化剂固化质量比为4:6吹填砂和淤泥混合物,固化剂采用外掺法,掺量为泥

砂总质量的 7%。各固化剂固化泥砂混合物 7 d 无侧限抗压强度结果分别为: 水泥, 1.15 MPa; G1, 1.23 MPa; G2, 1.66 MPa; G3, 1.29 MPa; G4, 0.43 MPa。

可看出, G4 固化泥砂混合物强度最低; G1、G2、G3 固化泥砂混合物强度均高于水泥固化泥砂强度, 其中 G2 固化效果最好, 其固化泥砂 7 d 强度已达 1.66 MPa, 比水泥固化泥砂混合物强度增长了 44%; 对比各种固化剂组分, G2 中含有聚丙烯酰胺和聚乙烯醇可能是固化泥砂混合物强度较高的主要原因。而 G4 固化泥砂混合物强度最低的原因是其主要成分为矿渣, 不含有胶凝材料 A, 矿渣的水化活性比 A 小得多, 造成水化凝胶量减少, 强度较低。

2.2 固化泥砂混合物 XRD 试验测试结果

为了研究掺入固化剂后吹填泥砂混合物内部产生水化物的种类和相对含量, 对养护龄期为 7 d 的固化泥砂混合物进行了 XRD 分析, 测试结果如图 1 所示。

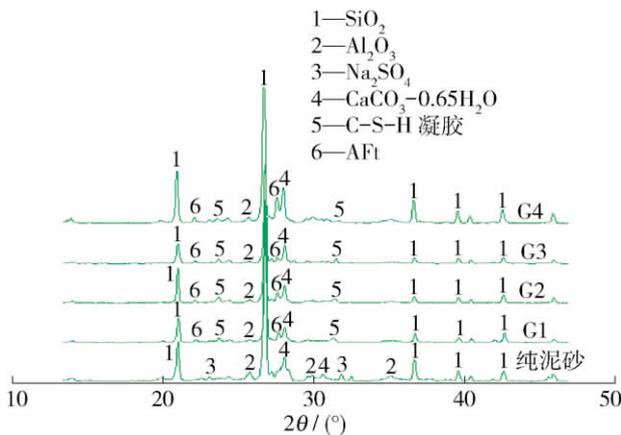


图 1 固化泥砂的 XRD 结果

Fig. 1 XRD result of stabilized hydraulic fill silt and sand

由图 1 可知, 纯吹填泥砂混合物主要组分为 SiO_2 , 少量的 Al_2O_3 、 Na_2SO_4 和 $\text{CaCO}_3 \cdot 0.65\text{H}_2\text{O}$ 。加入固化剂后 SiO_2 、 $\text{CaCO}_3 \cdot 0.65\text{H}_2\text{O}$ 和 Al_2O_3 基本没变化, Na_2SO_4 有所减少, 说明固化剂中组分与其发生了化学反应。与纯吹填泥砂混合物相比, G1 ~ G4 固化泥砂混合物中水化生成了水化硅酸钙 C-S-H 凝胶和水化硫铝酸钙 AFt。其中, G4 中水化硅酸钙凝胶和 AFt 生成量相对较少。对比 G2 固化泥砂和纯泥砂的 XRD 可知, 加入有机高分子聚丙烯酰胺和聚乙烯醇后的固化泥砂混合物并无其他新物质的衍射峰出现, 说明并无新的物质生成。

2.3 固化泥砂混合物扫描电镜 (SEM) 测试结果

对各种固化泥砂混合物在养护龄期为 7 d 时进

行 SEM 试验, 研究了固化泥砂混合物内部水化产物的微观形貌, 结果如图 2 ~ 6 所示。

由图 2 可知, 传统水泥固化泥砂混合物存在较多孔洞, 水化产物 C-S-H 凝胶较少且没有形成互穿网络结构, 整体结构不密实。

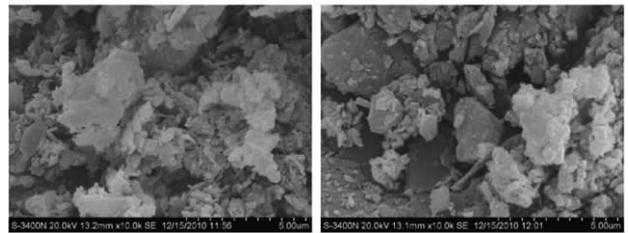


图 2 水泥固化吹填泥砂混合物的微观结构形貌

Fig. 2 Micro-structure morphology of cement-stabilized hydraulic fill silt and sand

由图 3 可知, G1 固化泥砂混合物经过 7 d 养护, 胶凝材料水化较充分, 生成了大量的 C-S-H 凝胶, 呈网状结构, 能有效胶结松散的泥砂颗粒, 整体结构较密实。在 C-S-H 凝胶之间还生成了大量的 AFt, 并与未水化的胶凝材料颗粒连接在一起, 部分水化产物六角薄板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 也穿插其中, 共同填充和挤压了泥砂团粒之间孔隙, 形成了牢固的内部强度骨架^[10-11]。

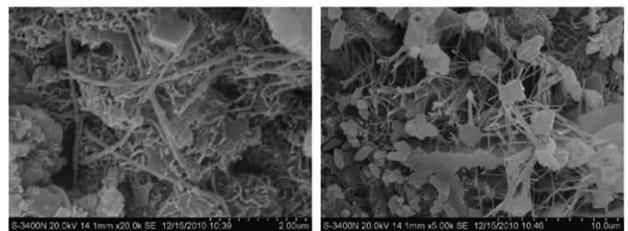


图 3 G1 固化吹填泥砂混合物的微观结构形貌

Fig. 3 Micro-structure morphology of G1-stabilized hydraulic fill silt and sand

由图 4 可知, G2 固化泥砂混合物中, 生成的 C-S-H 凝胶呈网状结构, 相互交织成密实网络, 并形成了一定量的针棒状 AFt 和六角薄板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 嵌在凝胶体之间, 进一步挤压密实了土体结构。加入的有机高分子聚乙烯醇, 在孔隙之间形成了黏弹性长链状和丝状膜层, 加强了泥砂混合物的整体性。另一种有机高分子聚丙烯酰胺 (PAM), 通过聚合反应生成大的有机高分子链包裹泥砂混合物团粒, 并加强了凝胶体、AFt、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之间的界面连接, 形成了具有一定强度的致密的网状结构。

由图 5 可知, 由于 G3 含有的胶凝组分 A 较多, 固化泥砂混合物内部生成了大量网状 C-S-H 凝胶

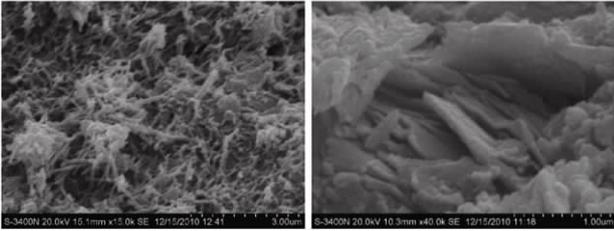


图4 G2 固化吹填泥砂混合物的微观结构形貌
Fig. 4 Micro-structure morphology of G2-stabilized hydraulic fill silt and sand

和针棒状 AFt 与板状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 交叉连接在一起,共同填充了泥砂混合物颗粒之间孔隙,提高了固化泥砂混合物整体强度。此外,固化剂组分中的丙三醇具有良好的保湿性,干燥环境下,能保证足够的水分进行胶凝材料 A 的水化硬化反应。

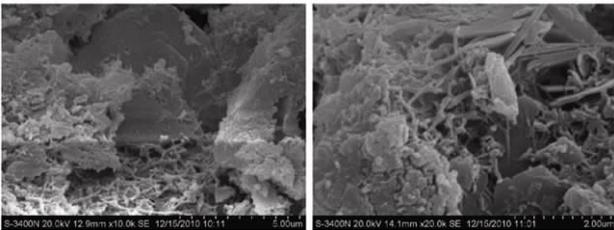


图5 G3 固化吹填泥砂混合物的微观结构形貌
Fig. 5 Micro-structure morphology of G3-stabilized hydraulic fill silt and sand

由图6可知,G4 固化泥砂混合物整体密实程度较低,孔洞较多,水化产物 C-S-H 凝胶较少,没有形成较好的骨架结构。对比 G1 固化剂,发现 G4 固化剂中主要组分是矿渣,缺少胶凝材料 A。虽然矿渣含有一定量的活性成分 SiO_2 和 Al_2O_3 ,在碱性环境下有一定的水硬性,但是缺少胶凝材料 A,不能反应生成大量的 C-S-H 凝胶固结泥砂颗粒,造成固化泥砂混合物强度低。

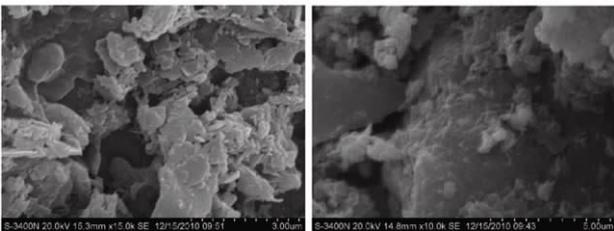


图6 G4 固化吹填泥砂混合物的微观结构形貌
Fig. 6 Micro-structure morphology of G4-stabilized hydraulic fill silt and sand

2.4 分析与讨论

分析各固化剂组分、无侧限抗压强度、水化产物成分与微观形貌可发现,胶凝材料 A 在泥砂中发生

水化反应是产生固化强度的主要原因,水化产物 C-S-H 凝胶能胶结大量泥砂颗粒形成团粒,构成了固化泥砂的基本强度骨架。由于 G4 缺少胶凝材料 A,因此造成其固化泥砂强度大幅度降低。

从泥砂矿物的构造形式可知,晶体结构物的结构特性及其原子或分子间联系的性质决定了泥砂颗粒表面吸水特性。吸水的主要原因是矿物表面存在着未补偿的氧原子和羟基团,水的结构单元与土粒表面补偿原子相互作用,形成水分子的初始吸附层并逐渐加厚。要使泥砂颗粒表面憎水,必须平衡泥砂颗粒表面的动力活动中心,如采用有机极性阳离子、有机极性分子等^[12]。

G2 固化剂中含有有机高分子聚乙烯醇和聚丙烯酰胺,其中聚乙烯醇能与泥砂颗粒接触发生螯合作用、吸附作用和絮凝作用,高分子链相互聚积,进而形成膜或单个直链高分子,主链上的羟基、羧基可和吹填泥砂中的钙、镁、硅等离子发生络合反应,使高分子链紧紧抓住这些离子,增加凝胶体的整体强度。此外,高分子材料还能填充土团粒中一部分较小的孔隙,降低泥砂的孔隙率,提高固化泥砂的水稳性和整体性;另一种有机高分子 PAM 是一种有机高分子水处理药剂,具有大分子量、中性充电和高效凝聚的特性,主要起到絮凝的作用。将 PAM 加入吹填泥砂中,受胶凝材料 A 水化反应生成的 Ca^{2+} 、泥砂颗粒表面的带电性及其自由水等的影响,PAM 在泥砂中发生聚合反应生成大的有机分子链,包裹泥砂颗粒,形成具有一定强度的网状结构,从而提高泥砂固化后的强度和抵抗变形的能力^[13]。

3 结论

1) 研发出了适用于吹填砂和淤泥混合物的固化剂,与水泥固化剂相比,7 d 无侧限抗压强度显著提高,可满足公路建设要求。

2) XRD 分析结果表明,纯吹填泥砂混合物主要组分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2SO_4 和 $\text{CaCO}_3 \cdot 0.65\text{H}_2\text{O}$ 。加入固化剂后上述组分基本没变化,但出现了水化硅酸钙 C-S-H 凝胶和钙矾石 AFt,二者是强度和膨胀的主要来源。

3) 通过 SEM 观察固化泥砂微观结构形貌,表明胶凝材料水化反应生成了水化硅酸钙 C-S-H 凝胶,构成了固化泥砂的基本强度骨架;膨胀性水化产物 AFt 有挤压、填充土体的作用。在固化剂中适当加入有机高分子组分,可进一步密实泥砂固化体结构,并提高其强度。

参考文献:

- [1] KANIRAJ S R , HAVANAGI V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures [J]. Cement and Concrete Research ,1999 ,29(5) : 673-677.
- [2] KAMON M , GU H , MASAHIRO I. Improvement of mechanical properties of ferrum lime stabilized soil with the addition of aluminum sludge [J]. Materials Science Research International ,2001 ,7(1) : 47-53.
- [3] SIVAPULLAIAH P V , PRASHANTH J P , SRIDHARAN A , et al. Reactive silica and strength of fly ashes [J] . Geotechnical and Geological Engineering ,1998 ,16(3) : 239-250.
- [4] MITCHELL J K , HOOPER D R , CAMPANELLA R G. Permeability of compacted clay [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div ,1965 ,91(4) : 41-65.
- [5] 万百千,路新瀛. 用固硫渣作土壤固化剂的可行性研究[J]. 粉煤灰综合利用,2002(3): 21-22.
WAN Bai-qian , LU Xin-ying. The feasibility study of sulfur residue-soul stabilizer [J]. Fly Ash Comperhensive Utilization ,2002(3) : 21-22. (in Chinese)
- [6] 秦鹏飞,周克,高华东. 曹妃甸滩涂淤泥化学加固处理的试验研究[J]. 地基处理,2008,19(4): 32-37.
QIN Peng-fei , ZHOU Ke , GAO Hua-dong. Chemical stablization research tests on coastal mud of caofeidian [J]. Ground Improvement , 2008 , 19 (4) : 32-37. (in Chinese)
- [7] 李战国. 工业废渣制备软土固化剂若干问题探讨 [D]. 北京: 北京航空航天大学交通科学与工程,2009.
LI Zhan-guo. Study on some problems of utilization of industrial wastes to prepare soft soil stabilizer [D]. Beijing: School of Transportation Science and Engineering , Beihang University ,2009. (in Chinese)
- [8] 徐艳. 滨海淤泥的快速固化研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所,2007.
XU Yan. Study on the curing of silt in coastal regions [D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics , the Chinese Academy of Science ,2007. (in Chinese)
- [9] 张务民. 路基用吹填泥砂稳定性能研究 [J]. 中外公路,2011,31(3): 1-5.
ZHANG Wu-min. Character analysis of hydrates needed in stabilized saline sludge [J]. Highway of China and Foreign Country ,2011 ,31(3) : 1-5. (in Chinese)
- [10] HUANG Xin , LI Zhan-guo , NING Jian-guo , et al. Principle and method of optimization design for soft staiblizer [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition ,2009 ,24(1) : 154-160.
- [11] 黄新,许晟,宁建国. 含铝固化剂固化软土的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(1): 156-161.
HUANG-Xin , XU Sheng , NING Jian-guo. Experimental research on stabilized soft soils by alumina bearing modifier [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2007 ,26(1) : 156-161. (in Chinese)
- [12] 柴寿喜. 固化滨海盐渍土的强度特性研究 [D]. 兰州: 兰州大学土木工程与力学学院,2006.
CHAI Shou-xi. Study on the special properties of strength of solidified saline soil in inshore [D]. Lanzhou: College of Civil Engineering and Mechanics Sciences , Lanzhou University ,2006. (in Chinese)
- [13] 张硕峰. 城市污泥调理工艺及其机理研究 [D]. 广州: 广东工业大学环境科学与工程学院,2012.
ZHANG Shuo-feng. Research on conditioning echnology and mechanism of municipal excess sludge [D]. Guangzhou: Faculty of Environmental Science and Engineering Guangdong University of Technology ,2012. (in Chinese)

(责任编辑 吕小红)