

文章编号:1671-8879(2015)01-0014-06

新型固化剂 CDK 固化淤泥微观结构及性能

王朝辉¹, 郭滕滕¹, 孙晓龙¹, 曾 伟², 王新岐²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘 要:针对已有固化剂固化淤泥后其最佳含水率低, 施工难以压实的现状, 将吸水材料 DK 粉与水泥(C)相结合, 开发出了一种新型 CDK 固化剂, 将其用于固化淤泥可有效提高固化淤泥的最佳含水率。采用 X 射线粉晶衍射仪(XRD)、透射电镜(TEM)和红外光谱(FTIR)深入研究 CDK 固化淤泥的微观形貌, 选择固化淤泥的最佳含水率、CBR 值以及无侧限抗压强度做评价指标确定 CDK 固化剂的最优配比, 最后选用中国常用的固化剂在最优掺量下对比其固化滨海淤泥的相关性能, 评价 CDK 固化剂固化淤泥的路用性能。研究结果表明:DK 粉掺入淤泥后并没有发生化学反应产生新的物质, DK 粉可均匀地插入淤泥土的层间, DK 粉物理性吸水, 与淤泥可形成稳定整体, 增强淤泥土的内部结构;CDK 固化剂固化淤泥的最佳配比为 6% 水泥+3%DK 粉;与常用淤泥固化剂相比, CDK 固化剂固化淤泥具有良好的力学性能、耐水性能和抗冻融性能。

关键词:道路工程;CDK;固化剂;微观机理;路用性能

中图分类号:U416.212

文献标志码:A

Investigation of microstructure and performance of silt solidified by new stabilizer CDK

WANG Chao-hui¹, GUO Teng-teng¹, SUN Xiao-long¹, ZENG Wei², WANG Xin-qi²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: Low optimum moisture content of silt solidified by current silt stabilizer makes silt difficult to be compacted in the construction. To solve this problem, a new CDK stabilizer was developed by combining DK powder (a kind of absorbing material) with cement, which could effectively improve the optimum moisture content of silt. The microstructures of silt solidified by stabilizer CDK were explored by using X-ray Diffraction (XRD), transmission electron microscope (TEM) and fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The optimum proportion of CDK was determined by selecting optimum water content, CBR, and unconfined compressive strength as the indicators. Based on this, the effect of CDK on the performance of silt was investigated by comparing with other stabilizers. The results show that there is no chemical reaction to produce new substances after DK is mixed with silt. DK powder can be dispersed evenly, and the reaction between DK powder and silt is only a physical progress of water absorption, which forms a stable structure. The optimum proportion of stabilizer CDK is 6% for cement and 3% for DK powder by weight of silt. Compared with road performance of other silt stabilizers, silt

收稿日期:2014-09-15

基金项目:天津市交通科技项目(2010-33)

作者简介:王朝辉(1980-),男,河南滑县人,副教授,工学博士,E-mail:wchh0205@163.com。

solidified by stabilizer CDK has better mechanical properties, water stability and freeze-thaw resistance. 3 tabs, 11 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; CDK; stabilizer; microstructures; road performance

0 引 言

天然淤泥含水量高,强度低,工程性能差,必须处治后才能用于填筑道路^[1]。目前,处治淤泥应用较多的是淤泥固化剂,淤泥固化剂主要有提高强度与吸水两方面作用^[2]。淤泥固化剂种类多种多样,但总体来说可分为传统淤泥固化剂和新型淤泥固化剂两大类。传统淤泥固化剂有石灰、水泥、粉煤灰等几种,新型淤泥固化剂可分为高分子类固化剂、生物酶类固化剂和离子类固化剂三大类^[3-5]。传统淤泥固化剂在提高强度方面效果良好,但其短期内的吸水效果较差。部分新型土壤固化剂短期内吸水能力虽有所提高,但提高效果不明显^[6-7]。因此,亟待开发出一种既能提高淤泥强度,又能在短期内有效吸收淤泥中水,提高淤泥最佳含水率的新型固化剂。DK 粉是一种高纯度蒙皂石粘土的烷基铵衍生物,平均晶片厚度小于 25 nm,具有良好的分散性能,广泛应用于高分子材料行业,能增强聚合物综合物理性能,同时改善物料加工性能^[8-9]。此外,DK 粉表

面亲水性强,具有很强的吸水能力^[10]。加入到土体中能有效减少土体中的吸附水,增加固化土的抗渗透性,从而提高土的工程性质。本文以水泥(C)作为主固化剂,以 DK 粉作为添加剂,开发了一种新型 CDK 固化剂,在保证淤泥强度的基础上,能够有效提高淤泥的最佳含水率。

对于 CDK 淤泥固化剂,国内外鲜有报道,当前迫切需要对其各项性能进行全面系统的研究。为此,本文采用 TEM 和 FTIR 深入分析了 CDK 固化淤泥的微观机理,采用击实试验、CBR 试验和无侧向抗压强度试验,系统研究了 CDK 固化剂的最佳配比,并在此基础上分析了 CDK 固化淤泥的性能。

1 试验材料及制备方法

1.1 原材料

本研究采用天津滨海淤泥,按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)测得其基本物理指标,见表 1。选用的 DK 粉来自河南,物理性质见表 2。

表 1 淤泥的基本物理指标

Tab. 1 Physical indexes of silt

类型	初始含水率/%	塑限/%	液限/%	密度/(g·cm ⁻³)	黏粒含量/%	有机质含量/%	pH 值	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
滨海淤泥	41.6	21.4	39.7	2.70	47	1.72	6.6	4.6	3.7

表 2 DK 粉的物理性质

Tab. 2 Physical properties of DK powder

产品	颜色	蒙脱石含量/%	径厚比	干粉粒度/目	叠层厚度/nm	表观密度/(g·cm ⁻³)	含湿量/%
DK 粉	米白色	97%	200	200	<25	<0.25	<3

1.2 材料制备方法

首先将淤泥晾晒、破碎,然后过筛清除淤泥中的杂质,采用 SJ-160 型砂浆搅拌机拌和淤泥与固化剂。具体过程如下:首先,分别称取淤泥、固化剂、自来水等,倒入搅拌锅内;先在 60 r/s 低速条件下搅拌 30 s;接着在 120 r/s 高速下搅拌 1 min,停止 30 s,用铲刀将叶片和搅拌锅壁上的试样刮入锅中间后,再高速搅拌 2 min,制得固化淤泥。下一步按照所需试验成型试件,进行各项性能测试。

2 CDK 固化淤泥微观机理分析

2.1 XRD 试验结果及分析

为分析 CDK 固化剂在固化淤泥的过程中是否

有新物质生成,采用 X 射线粉晶衍射仪获取 CDK 固化淤泥样品的 XRD 衍射图谱。试验条件:Cu 靶,扫描范围为 10°~80°,扫描速度为 4°/min。DK 粉、原淤泥、以及添加 3%DK 粉淤泥样品的 XRD 试验结果如下页图 1 所示。为便于对比观察,绘制图 1 时,DK 粉固化淤泥的纵坐标值增加了 200,DK 粉的纵坐标值增加了 400。

由图 1 可以看出,原淤泥的峰值和出现位置基本与 DK 粉固化后的淤泥相同。因此,可以得出 DK 加入淤泥后并没有发生化学反应产生新的物质,而只是 DK 粉吸水的过程。

2.2 TEM 试验结果及分析

为研究 CDK 固化剂在固化淤泥中的分散性及

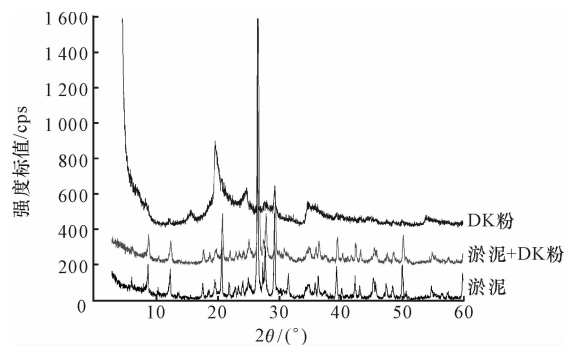
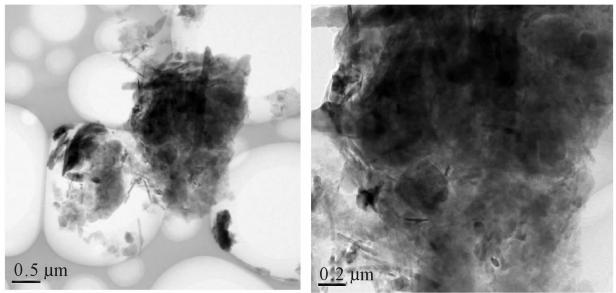


图 1 DK 粉固化淤泥的 XRD 图

Fig.1 XRD graphs of silt solidified by DK

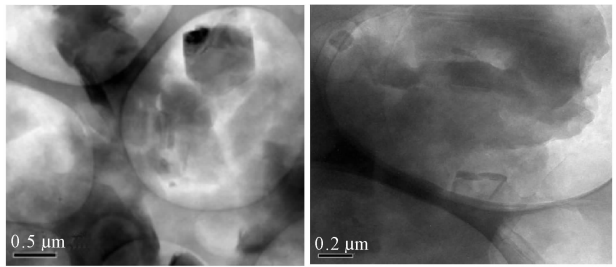
DK 粉与淤泥土颗粒间的粘结关系,采用 JEM-3010 (日本电子株式会社)高分辨透射电子显微镜(TEM)进行试验分析。JEM-3010 的技术参数为:最高加速电压 300 kV,点分辨率 0.17 nm,最高放大倍数 150 万倍。淤泥、DK 粉和 DK 粉固化淤泥的 TEM 试验结果如图 2~图 4 所示。



(a) 0.5 μm淤泥TEM图 (b) 0.2 μm淤泥TEM图

图 2 淤泥的 TEM 图

Fig.2 TEM images of pure silt



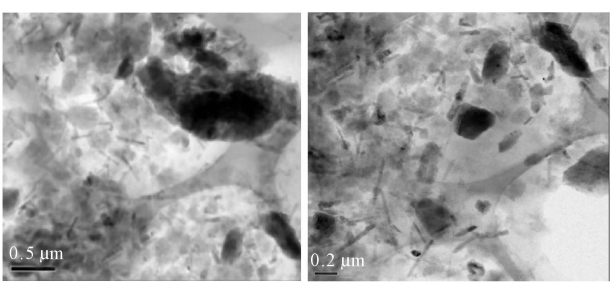
(a) 0.5 μmDK粉TEM图 (b) 0.2 μmDK粉TEM图

图 3 DK 粉的 TEM 图

Fig.3 TEM images of DK power

图 2 为滨海淤泥的 TEM 图,由图可知,淤泥土颗粒形状不规则,尺寸大小不一,分散不均匀,并存在结团现象,淤泥土颗粒的表面形貌纹理不清晰,呈现不规则形态。

图 3 为 DK 粉的 TEM 图,从图中可以看出:DK 粉微粒没有规则形状,呈游离态,颗粒之间彼此分离,这是由于 DK 粉为有机物,不呈现一定晶粒状



(a) 0.5 μmDK粉固化淤泥TEM图 (b) 0.2 μmDK粉固化淤泥TEM图

图 4 DK 粉固化淤泥的 TEM 图

Fig.4 TEM images of silt solidified by CDK

结构。

图 4 为 DK 粉固化淤泥的 TEM 图,图中的黑色颗粒状物质为土颗粒,在其周围无形状的薄膜状物质为 DK 粉。可以看出 DK 粉均匀分散在淤泥土中,淤泥土颗粒与 DK 粉颗粒之间界面模糊,说明 DK 粉与淤泥土相互融合在一起。与淤泥的 TEM 图(图 2)比较可知,淤泥土颗粒尺寸减小,土粒团聚现象明显减少。这是由于 DK 粉吸收了淤泥土中的水分,并进入土粒之间,使得淤泥土颗粒之间的粘结力降低,土粒分散更均匀,从而使得淤泥土粒结构更加密实,增强了淤泥土的内部结构,对淤泥起到了很好的固化效果。

2.3 FTIR 试验结果及分析

为研究 CDK 固化淤泥中有机质及其他物质的变化情况,采用美国产 EQUINOX-55 FTIR 傅立叶变换红外光谱仪进行试验,试样制备方法为溴化钾压片法,波数测试范围为 1 000~4 000 cm⁻¹。淤泥、DK 粉及 DK 粉固化淤泥的 FTIR 图谱见图 5。

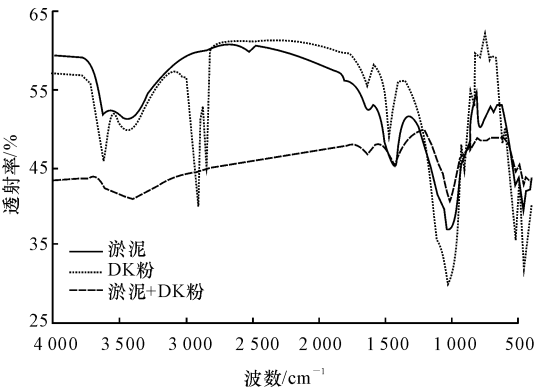


图 5 淤泥、DK 粉及 DK 粉固化淤泥的 FTIR 图谱

Fig.5 FTIR test results of pure silt, DK power and silt solidified by CDK

从图 5 可以看出,DK 粉在 3 600~3 650 cm⁻¹处出现 O-H 伸缩振动峰,在 1 030 cm⁻¹附近出现 Si-O 伸缩振动峰,而采用 DK 粉对淤泥固化后,除了含有 DK 粉

的特征吸收峰外,在 $2\,919.9\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,851.2\text{ cm}^{-1}$ 处的 C-H 伸缩振动峰消失,在 $3\,580\text{ cm}^{-1}$ 处 O-H 伸缩振动峰也消失。这是由 DK 粉对淤泥中水分的吸收作用造成,说明 DK 粉可有效吸收淤泥土中的水分,且不影响淤泥中有机质的存在。

3 CDK 固化淤泥性能

3.1 固化剂 CDK 最佳配比确定

为合理地确定 CDK 用作固化剂在固化淤泥时的最佳配比和掺量,将水泥作为主固化剂,掺量为 6%,DK 粉作为辅固化剂,掺量分别为 0、1%、2%、3%、4%。通过击实试验,确定不同 DK 粉掺量的固化淤泥对应的最佳含水率和最大干密度,并根据击实试验所得的最佳含水率分别制备 CBR 试件和无侧限抗压强度试件,进行相关试验。采用最佳含水率作为固化淤泥吸水效果的评价指标,以 CBR 值作为固化淤泥强度的主要评价指标,无侧限抗压强度作为固化淤泥强度的辅助评价指标,综合 3 个指标确定固化剂 CDK 的最佳配比。

3.1.1 击实试验结果及分析

为确定 CDK 固化剂固化淤泥的最佳含水率和最大干密度,按照目标含水率所需用水量配料,将搅拌好的固化淤泥装入塑料袋内浸润 24 h,进行重型击实试验。试验采用的仪器为天津产 CSK-1 型电动击实仪。击实曲线如图 6 所示。

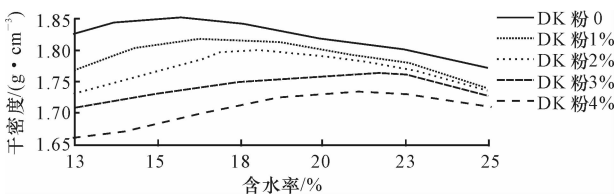


图 6 CDK 固化淤泥的击实曲线

Fig. 6 Compacting curve of silt solidified by CDK

根据图 6 的击实曲线可知,不同 DK 粉掺量(水泥掺量为 6%)对应的最佳含水率及最大干密度如表 3 所示。

表 3 CDK 固化淤泥最佳含水率及最大干密度

Tab. 3 Results of compaction test

6%水泥+DK 粉掺量/%	0	1	2	3	4
最佳含水率/%	14	15	17	20	21
最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.85	1.84	1.80	1.76	1.72

由表 3 可知,DK 粉掺量为 4%时相对于单纯的水泥固化剂,其最佳含水率提高 7%,表明 DK 粉的加入能明显提高淤泥的最佳含水率,起到良好的降水效果。DK 粉掺量由 0 增加到 3%的过程中,淤泥

的最佳含水率提高 6%,降水效果显著;当 DK 粉掺量由 3%增加到 4%时,最佳含水率仅提高 1%,降水效果提高不明显。因此,从降水效果方面考虑,选择 DK 粉掺量 3%为最优。

3.1.2 CBR 试验结果及分析

为评价 CDK 固化剂固化淤泥的强度,在最佳含水率条件下成型试件,试件分 3 层击实,击实后在水中浸泡 4 d,进行 CBR 试验。固化淤泥的加州承载比(CBR)采用河北产 CBR-I 型承载比试验仪进行试验,CBR 试验结果如图 7 所示。

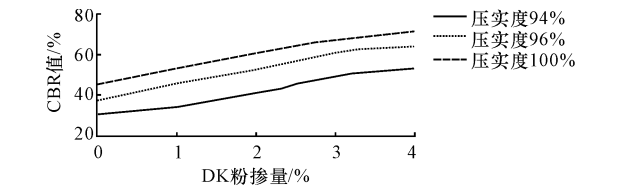


图 7 CDK 固化淤泥的 CBR 试验结果

Fig. 7 CBR test results of silt solidified by CDK

从图 7 中可以看出:CDK 固化淤泥的 CBR 值远大于《路基施工技术规范》(JTG F10—2006)中规定的公路路基填料的最小 CBR 值的要求,说明 CDK 固化淤泥具有良好的强度^[9]。此外,同一压实度下,CDK 固化淤泥的 CBR 值随 DK 粉掺量的增加而增大,并且当 DK 粉掺量小于 3%时,CBR 值增长较为明显,在 DK 粉掺量超过 3%后,CBR 的增长趋于平缓;同一 DK 粉掺量下,压实度越大,则 CDK 固化淤泥的 CBR 值越大,适当增加路基的压实度可提高路基的整体强度。因此,从强度方面考虑,DK 粉掺量 3%较为合适。

3.1.3 无侧限抗压强度试验结果及分析

为辅助评价 CDK 固化剂固化淤泥的强度,采用上海产 MQS-2 型路面材料强度试验仪,分别测定正常养生 7 d 和 28 d 的固化淤泥试件的无侧限抗压强度。CDK 固化淤泥的无侧限抗压强度试验结果如图 8 所示。

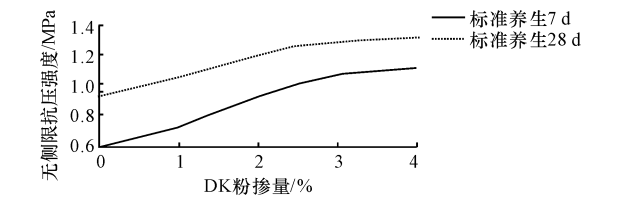


图 8 CDK 固化淤泥的无侧限抗压强度试验结果

Fig. 8 Unconfined compressive strength of silt solidified by CDK

从图 8 可以看出,CDK 固化剂中 DK 粉掺量从 0 增加到 4%时,固化淤泥的 7 d 无侧限抗压强度和 28 d 无侧限抗压强度均大幅增加,说明 DK 粉掺入

对固化淤泥强度提高效果极为明显。当 DK 粉掺量为 3% 时,CDK 固化淤泥的 7 d 无侧限抗压强度能达到规范对道路底基层强度的要求。因此,固化剂最佳配比中 DK 粉的掺量 3% 是可行的。综上所述,固化剂 CDK 的最佳配比为 6% 水泥 + 3% DK 粉。

DK 粉之所以能提高固化淤泥的 CBR、无侧限抗压强度和最佳含水率,是因为 DK 粉属于高分子类固化剂,加入到土体中会产生化学聚合反应而生成的有机分子链,形成网状或空间结构,填充土中孔隙,并胶结土体颗粒。大的有机分子交换到粘土分子的表面后会产生屏蔽作用,减少土体中的吸附水,增加固化土的抗渗透性,从而提高土的工程性质。

3.2 最佳配比下 CDK 固化淤泥的性能

为对比分析 CDK 固化剂的路用性能,选取中国常见固化剂,采用其最佳掺量对滨海淤泥进行固化处理,并进行抗压回弹模量试验、耐水性能试验和抗冻融试验,对比分析固化淤泥的相关性能。

3.2.1 抗压回弹模量

采用上海产 MQS-2 型路面材料强度试验仪,测定固化淤泥的抗压回弹模量。在最佳含水率条件下成型试件,制成的试件标准养生 89 d,浸水 1 d 后测试抗压回弹模量。抗压回弹模量试验结果对比如图 9 所示。

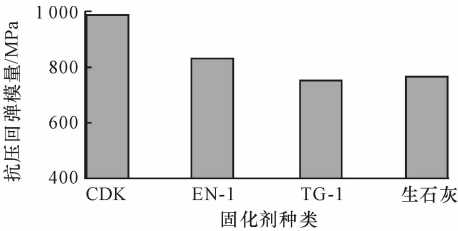


图 9 不同类型固化剂的抗压回弹模量

Fig. 9 Compression modulus of resilience for different types of stabilizing agent

注:CDK 为 6% 水泥 + 3% DK 粉; EN-1 固化剂为 0.01% EN-1 + 4% 石灰; TG-1 固化剂为 0.01% TG-1 + 4% 石灰; 生石灰为 10% 石灰。

通过试验,测得 CDK 固化淤泥的抗压回弹模量为 987.5 MPa。从图 9 可看出,采用 CDK 固化淤泥的抗压回弹模量最大,其抗压回弹模量高于其他固化剂,比只掺 10% 生石灰的固化淤泥高出 15.3%。表明采用 CDK 固化剂固化淤泥具有较好的力学性能,远大于《路基施工技术规范》(JTG D10—2006)规定的填筑路基用稳定土抗压回弹模量 600~900 MPa 要求。

3.2.2 耐水性能

采用上海产 MQS-2 型路面材料强度试验仪,分别测定正常养生和浸水 2 d 的固化淤泥试件的 7 d 无侧限抗压强度,以浸水后试件的强度损失表征固化淤泥的耐水性能。耐水性能试验结果对比如图 10 所示。

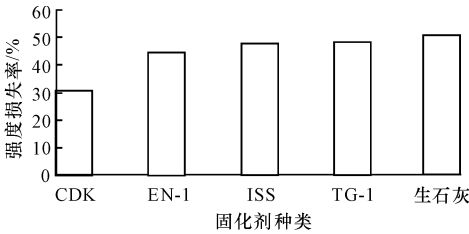


图 10 不同类型固化剂的耐水性能

Fig. 10 Water stability of resilience for different types of stabilizing agent

注:ISS 固化剂为 0.2 L/m³ ISS + 4% 石灰。

从图 10 可以看出,采用 CDK 固化剂固化淤泥的强度损失率明显小于采用其他类型固化剂固化淤泥的强度损失率。与用生石灰做固化剂的固化淤泥强度损失率相比,其强度损失率减小 41%。表明应用 CDK 固化剂固化淤泥具有较好的耐水性能。

3.2.3 抗冻融性能

采用上海产 MQS-2 型路面材料强度试验仪,分别测定冻融前后固化淤泥试件的 28 d 无侧限抗压强度,以冻融后试件和正常养生试件的 28 d 无侧限抗压强度比 BDR 表征固化淤泥的耐水性能。对比试验结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,CDK 固化剂的 BDR 与其他固化剂固化淤泥的 BDR 值相比最大。与用生石灰做固化剂的固化淤泥 BDR 值相比,增大了 13%,表明 CDK 固化剂固化淤泥的抗冻性能在固化剂中处于前列。

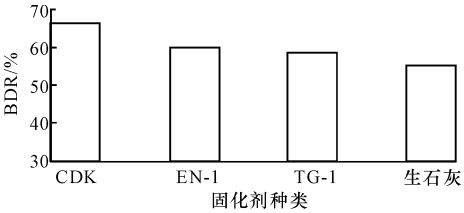


图 11 不同类型固化剂的抗冻融性能

Fig. 11 BDR of silt stabilized by different types of stabilizing agent

综上所述,CDK 固化剂与其他固化剂相比,在最佳配比下的 CDK 不仅能提高固化淤泥的最佳含水率,具有较好的降水效果,而且具有良好的力学性能、耐水性能和抗冻融性能。因此,可将 CDK 用于固化淤泥,填筑道路。

4 结 语

(1)通过研究 CDK 固化淤泥的微观形貌,对 CDK 固化剂固化淤泥的机理进行了分析,选择固化淤泥的最佳含水率、CBR 值以及无侧限抗压强度为指标确定了 CDK 固化剂的最优配比,与中国常用的固化剂在最优掺量下固化滨海淤泥的相关性能作对比,评价了 CDK 固化剂固化淤泥的路用性能。

(2)DK 粉加入到淤泥中,淤泥内部并没有发生化学反应产生新的物质,而只是 DK 粉吸水的过程;并且 DK 粉插入淤泥土的层间,有效吸收淤泥土中的水分;DK 粉与淤泥土相互融合在一起,增强了淤泥内部结构。

(3)采用最佳含水率作为固化淤泥吸水效果的评价指标,CBR 值及无侧限抗压强度作为固化淤泥强度的评价指标,综合确定了 CDK 固化剂的最佳配比为 6%水泥+3%DK 粉。

(4)与常用淤泥固化剂在最优掺量下固化淤泥的相关性能指标进行对比,CDK 固化淤泥的路用性能优良,可在道路工程领域推广应用。

参考文献:

References:

- [1] 谭文英,汪益敏,陈页开.土固化材料的研究现状[J].中外公路,2004(8):169-172.
TAN Wen-ying,WANG Yi-min,CHEN Yan-kai. The current research status of soil solidified materials[J]. Journal of China & Foreign Highway,2004(8):169-172. (in Chinese)
- [2] Lin D F, Lin K L, Hung M J. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil[J]. Journal of Hazardous Materials,2007,145(8):58-64.
- [3] Sezer A, Yilmaz H R, Ramyar K. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay [J]. Building and Environment,2006,41(2):150-155.
- [4] 王朝辉,刘志胜,王晓华,等.应用新型 CVC 固化剂固化淤泥路用性能[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(5):1-6.
WANG Chao-hui, LIU Zhi-sheng, WANG Xiao-hua, et al. Study on the performance of road built with CVC solidified silts[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(5): 1-6. (in Chinese)

- [5] 朱伟,张春雷,高玉峰,等.海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J].浙江大学学报:工学版,2005,49(10):1561-1565.
ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, GAO Yu-feng. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 49(10): 1561-1565. (in Chinese)
- [6] 苏群,王国峰,张复实,等.寒区路基土 PAMCATS 固化剂的固化机理[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(3):32-36.
SU Qun, WANG Guo-feng, ZHANG Fu-shi, et al. Solidification mechanism of PAMCATS soil stabilizer in subgrade at cold area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 32-36. (in Chinese)
- [7] 田见效,彭波. S 土壤稳定剂路用性能[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(5):20-23.
TIAN Jian-xiao, PENG Bo. Properties of S-soil-solidified-agent for road performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(5): 20-23. (in Chinese)
- [8] 李刚,张虎平,吕德生.膨润土-有机复合吸水材料的制备及其吸水保水特性研究[J].石河子大学学报:自然科学版,2007,25(1):88-91.
LI Gang, ZHANG Hu-ping, LU De-shen. Synthesis and characterization of water-absorption and water-retention of bentonite-organic compound absorbent water material[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2007, 25(1): 88-91. (in Chinese)
- [9] 谢奕明,吴季怀.膨润土/聚丙烯酸钠超吸水性复合材料的表征[J].华侨大学学报:自然科学版,2007,28(3):282-286.
XIE Yi-ming, WU Ji-hua. Characterization of poly sodium acrylate/bentonite superabsorbent composite [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2007, 28(3): 282-286. (in Chinese)
- [10] 余剑英,魏连启,曹献坤,等.有机蛭石/酚醛树脂熔融插层纳米复合材料的研究[J].材料工程,2004(4):20-23.
YU Jian-ying, WEI Lian-qi, CAO Xian-kun, et al. Organized vermiculite/phenolic resin nanocomposites prepared by melt intercalation[J]. Journal of Materials Engineering, 2004(4): 20-23. (in Chinese)