

文章编号:1671-1637(2013)02-0025-09

## 抗耐土壤稳定剂在简易机场道面中的应用

史保华, 宁文溥, 许巍, 戴圣睿

(空军工程大学 机场建筑工程系, 陕西 西安 710038)

**摘要:**基于简易机场建设的特点和使用要求, 选用济宁土在室内进行了液限、塑限、击实、回弹模量、CBR和无侧限抗压强度试验。在室外选择抗耐土壤稳定剂、水泥、石灰、二灰(水泥与石灰)等稳定土修筑了试验段, 进行了回弹模量、CBR、弯沉、土压力和滚动摩擦因数试验, 对比研究了抗耐土壤稳定剂与传统无机结合料的加固效果。分析结果表明:在室内试验中, 济宁土掺入抗耐土壤稳定剂后, 其水理性能、回弹模量和无侧限抗压强度均有提高, 尤其是掺入0.8%AC101稳定剂时, 塑性指数降低了21.9%, 最佳含水量减少了3.1%, 最大干密度与CBR值分别增大了1.32%、61.5%;涂刷HOD1稳定剂后, 试件在浸水和不浸水的条件下, CBR值分别提高了212%、146%。在现场试验中, 抗耐稳定土的早期承载能力与水泥土、二灰土作用效果基本相同, 高于石灰土, 但随着加固土龄期的增长, 水泥土、二灰土承载能力的增长幅度要大于抗耐稳定土, 28d龄期时抗耐稳定土与石灰土的承载能力基本相同。

**关键词:**简易机场; 道面工程; 抗耐土壤稳定剂; 加固土; 无侧限抗压强度; 无机结合料

中图分类号:U416.212

文献标志码:A

## Application of con-aid soil stabilizer in expedient airfield pavement

SHI Bao-hua, NING Wen-pu, XU Wei, DAI Sheng-ru

(Department of Airport and Architecture Engineering, Air Force Engineering University,  
Xi'an 710038, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the characteristics and construction requirement of expedient airfield, the indoor tests of liquid limit, plastic limit, compaction, resilient modulus, CBR and unconfined compressive strength were designed for Jining soil. The outdoor test roads were constructed with con-aid soil stabilizer, cement, lime and cement-lime, the field tests of resilient modulus, CBR, deflection, soil pressure and rolling friction factor were done, the reinforcement effects of con-aid soil stabilizer and traditional inorganic binder were compared. Analysis result shows that the physical properties of water, resilient modulus and unconfined compressive strength greatly increase after adding con-aid soil stabilizer in Jining soil. After adding the AC101 stabilizer about 0.8%, plasticity index reduces by 21.9%, the optimum water content decreases by 3.1%, the maximum dry density and CBR value increase by 1.32%, 61.5% respectively. After adding HOD1 stabilizer, CBR values increase by 212% with the flooding of test specimen and by 146% without the flooding of test specimen respectively. In field tests, the bearing capacity of con-aid soil stabilizer reinforced soil is similar to cement reinforced soil and cement-lime reinforced soil, and is higher than lime reinforced soil during early period, but the growth rates of bearing capacities for cement reinforced soil and cement-lime reinforced soil are greater than con-aid soil

收稿日期:2012-12-18

基金项目:军队科研项目(CKJ11C036)

作者简介:史保华(1960-),男,陕西兴平人,空军工程大学教授,从事机场道面设计与管理研究。

stabilizer reinforced soil with the increase of age, the bearing capacity of con-aid soil stabilizer reinforced soil is similar to lime reinforced soil at 28 d. 14 tabs, 7 figs, 14 refs.

**Key words:** expedient airfield; pavement engineering; con-aid soil stabilizer; reinforced soil; unconfined compressive strength; inorganic binder

**Author resume:** SHI Bao-hua(1960-), male, professor, +86-29-84787704, sbh12345@126.com.

## 0 引 言

关于加固土的概念,张登良在《加固土原理》中定义为采用一定的物理、化学方法及其相应的技术措施使土的物理力学性能适应工程技术上的需求。土壤固化剂按其主要成分可分为有机化合物类和无机化合物类,有机化合物类多为液体状,而无机化合物类一般为粉末状,主要采用石灰、水泥、粉煤灰和各类矿渣等。离子类、环氧树脂类、水玻璃类和高分子材料类应用较多,主要采用它们中的一种或多种组合配制而成。国内外应用水泥、石灰等传统材料研究加固土的方法很多,Nalbantoglu 等用石灰和粉煤灰来加固含有石灰质的膨胀性粘土<sup>[1]</sup>;Tomohisa 等提出用粉煤灰和纸浆渣等加固含水量高的土壤<sup>[2]</sup>;叶观宝等研究了水泥土早期强度的增长规律以及添加剂对水泥土早期强度的影响<sup>[3]</sup>;庄心善等提出工业废料粉煤灰中掺适量水泥或石灰等固化剂来加固土壤,可以提高加固土体的强度<sup>[4]</sup>。在国内外的实际道路和机场工程中,基层应用较多的是水泥、石灰及粉煤灰稳定类材料,从适用范围和效果而言,这些传统类型稳定土具有良好的效果,得到了广泛的应用<sup>[5-7]</sup>。

水泥中的主要成分是硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙等,水泥土的加固机理一般认为依次由下面几个部分组成:水泥的水解和水化反应;土颗粒与水泥水化物的作用;离子交换和团粒化作用;硬凝反应;碳酸化作用。水泥固化土强度主要来源于氢氧化钙的物理化学作用和水泥水化产物骨架共同作用,还可使粘土微粒和微团粒形成稳定的团粒结构,水泥水化产物则把这些团粒包覆并连接成坚强的整体,故提高固化土强度的决定因素是硅酸三钙水化反应。水泥加固土的优点是成本低,施工简单,强度和稳定性好,其缺点是用量比较大,运输成本高,易开裂<sup>[8]</sup>。

石灰加固土的作用机理是土中掺入石灰后发生了一系列的化学物理反应,主要包括离子交换、氢氧化钙结晶反应和碳酸化反应等。其中离子交换可使胶体吸附层减薄,降低电位,胶体不断絮凝,改善了

土壤的湿坍性,使石灰加入土后获得初期的水稳性;结晶反应是当石灰吸收水分后形成了含水晶格,并与土粒结合形成共晶体,把土颗粒与含水晶格胶结成为整体,提高其水稳性;碳酸化反应是空气中的二氧化碳与石灰土中的氢氧化钙起化学反应生成碳酸钙,它具有较好的水稳性和较高的强度<sup>[9]</sup>,从而达到了石灰加固土的目的,但其强度发展较慢,施工进度受到影响,对一些工期要求短且强度要求高的加固土工程,无法满足其使用要求<sup>[10]</sup>。

简易机场是供作战部队战时使用或满足抢险救灾等短期使用需求的机场<sup>[11]</sup>。蔡良才在《机场规划设计原理》中指出简易机场的显著特点不仅是投资小,占地少,而且修建速度快,只在短期内使用,平时只作规划,在紧急情况下则根据战争形势的发展、作战部门的意图、抢险救灾的需要而抢建。这种机场布置形式已在海湾和伊拉克等现代高技术条件下的局部战争中发挥出了强大的生命力和战斗作用。

鉴于简易机场道面快速建设、短期应急使用的性能特点,水泥等传统无机结合料稳定土可能成为简易机场道面基层的主要材料之一。但其抗裂性能不佳,易产生收缩裂缝;同时抗水冲刷能力也较差,容易产生唧浆,造成裂缝处下陷和道面变形,导致道面破坏进一步加剧<sup>[12]</sup>;材料一般都需要从较远的距离运到施工现场,运输量大,施工周期较长。相关研究表明单一使用传统加固材料并不能满足简易机场的作战使用需求<sup>[13]</sup>。2004年7月,美军应用土壤加固处理的最新研究成果,仅用1.5d抢建完成了超过3720m<sup>2</sup>的简易机场道面,并成功保障了C-130飞机的飞行起降<sup>[14]</sup>。那么基于中国各地土壤分布情况、现有施工能力及稳定剂产品,将面对哪些土壤稳定剂材料适用于简易机场道面建设、新型材料使用中有哪些问题、需要做何种改进等问题,因而,在未来的抢险救灾和战争进程中,研究出适用于中国简易机场道面建设的新型土壤固化剂是很有必要的。

改良的抗耐土壤稳定剂与使用水泥和石灰等传统的无机结合类稳定剂不同,当抗耐土壤稳定剂掺入土中以后,并没有生成新的胶结物对土进

行加固,以提高稳定土结构强度,而是由稳定剂中的表面活性成分与土作用,发生了化学和物理的综合反应,以改善土颗粒的表面特性,其间的相互作用也得到了改变,依靠土的自身特性达到了土壤固化的效果,同时克服了无机结合类材料的部分缺陷。为了进一步研究抗耐系列土壤稳定剂在简易机场道面工程中的使用性能和加固效果,本文选择济宁土在室内进行了相关的性能指标试验,并在室外结合济宁某试验中心的道路建设工程,选择 4 种形式的稳定土路面结构修筑了试验段,进行相关试验研究。

表 1 抗耐土壤稳定剂技术性能

Tab. 1 Technical performances of con-aid soil stabilizer

外观特征	浓缩液 pH 值	25 °C 时重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	凝结点/°C	阴离子表面活性剂 含量(质量分数)/%	不同稀释度溶液(%)的表面张力/( $10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )			
					0.01	0.10	1.00	10.00
半透明、深红色	0.5~1.0	1.02±0.01	<0	8.5	77	75	42	42

AC101 类产品掺入土中后主要作用可分为以下 4 个方面:首先是抗耐土壤稳定剂加入土中有利于压实和对结构的重构,主要是因为其表面活性成分可减小土颗粒间因水的表面张力引起的吸引力,在相同的压实功下可获得更大的压实度或者用较少的压实功和含水量较小时可达到相同的压实度;第 2 个方面可视为稳定作用,即物理化学吸附作用,主要是通过表面活性剂改善土颗粒表面的特性,使其憎水;第 3 个方面可视为排水作用,主要是电离作用和离子交换过程破坏了土颗粒间的吸附水结构,可使其游离为自由水;第 4 个方面可视为固化作用,主要是土颗粒与稳定剂的表面产生化学和电化学反应,减薄了双电层,降低了电势,从而减小了粘土颗粒之间的能垒,增大了土颗粒的联结强度。

HOD 系列产品属于高温聚合的共聚物水溶性粘体,其外观特征为粘稠、略带刺激性气味的液

## 1 原材料性能与配合比试验

### 1.1 原材料性能

#### 1.1.1 抗耐土壤稳定剂性能

试验采用由陕西盛茂机电有限公司研制开发的抗耐系列土壤稳定剂,共有 2 种,一种是 AC101 产品,另一种是 HOD 系列产品。

AC101 产品属于 SPP 类液体稳定剂,主要成分包括烷基苯磺酸、聚氧乙烯醚硫酸钠、稀硫酸、水玻璃等。其状态为无味的液体,加入水中搅拌后可全部离散,没有任何残留物,物理化学性质试验结果见表 1。

体,干燥状态下缓慢溶解于水,液体状态下在水中能全部离散,凝结点小于 0 °C。根据产品组成的不同,颜色可分为绿色(HOD1)、白色(HOD2)、黄色(HOD3)三种。

HOD 系列产品的主要作用机理是在已经碾压密实的稳定土基层表面均匀喷洒一薄层 HOD 系列产品后,利用干燥后 HOD 产品缓慢溶解于水的特性,提高稳定土基层的抗水侵蚀作用,同时提高稳定土基层的表面耐磨特性。

#### 1.1.2 水泥与石灰性能

当加固的土类确定以后,水泥稳定土的作用效果还与水泥的类型、标号和性能有很大关系。本次室内外试验所用水泥均采用山东省张山水泥厂生产的复合硅酸盐水泥,其标号为 P·C 32.5,它的化学成分、混合料掺量、物理性能和强度等主要性能指标的检测结果显示见表 2。

表 2 水泥技术性能

Tab. 2 Technical performances of cement

化学成分			混合料掺量/%		石膏		物理性能			抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	
SO <sub>3</sub> / %	MgO/ %	氯离子/ %	矿渣	煤渣	品种	掺量/%	安定性	细度(0.08 mm 筛筛余)/%	凝结时间/min		3 d	3 d
									初凝	终凝		
2.440	4.640	0.008	30	—	二水石膏	4	合格	2.2	200	272	3.3	16.4

石灰稳定土的作用效果与其性能有关,济宁土的室内外试验所用石灰都采用山东省焦城贵和石灰厂生产的石灰,由块状生石灰水化磨细后得到消石灰粉,其 CaO 与 MgO 含量等主要技术性能指标检测结果见表 3。

#### 1.1.3 济宁土基本性能

中国幅员辽阔,陆地上有各种土类,当稳定剂选定后,对不同类别的土其加固效果不同。室内试验用土取自济宁某试验中心道路工程现场,按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007),对其液限、塑限、

最大干密度等基本性能进行了测定,济宁土属于低液限粉土,试验结果见表 4。

表 3 石灰技术性能

Tab. 3 Technical performances of lime

产品名称	样品状态	检验依据	CaO 与 MgO 含量/%		结论
			一等品	实测结果	
消石灰粉	正常	JC/T 481—92	≥60	69	该样品为镁质消石灰粉, MgO 含量为 13.18%

表 4 土的基本性能

Tab. 4 Basic performances of soil

名称	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	规范命名
济宁土	30.6	16.5	14.1	1.850	低液限粉土

表 5 第 1 组试验无侧限抗压强度

Tab. 5 Unconfined compressive strengths of first group tests

稳定剂掺量及种类	0.4%AC101	0.8%AC101	1.2%AC101	1.6%AC101	2.0%AC101	2.5%AC101	0.8%AC101+5%HOD1
强度/MPa	0.75	1.24	1.31	1.46	1.65	1.92	2.57

表 6 第 2 组试验无侧限抗压强度

Tab. 6 Unconfined compressive strengths of second group tests

稳定剂掺量及种类	素土	2%水泥	4%水泥	6%水泥	2%水泥+2%石灰	4%水泥+4%石灰	6%水泥+6%石灰
强度/MPa	0.70	0.74	0.85	1.55	1.91	2.49	2.98

泥掺量为 4% 时的加固作用大,效果明显,AC101 掺量为 2.0% 时与水泥掺量为 6% 时的作用效果接近,但随着掺量的提高其强度增幅相差不大。考虑到稳定土的费用成本,为了减少经费,提高经济效益,本次试验取 0.8% AC101 的抗耐稳定剂作为最终掺量。HOD1 掺量为 5% 时,在不浸水的条件下,7 d 龄期时无侧限抗压强度达到了 2.57 MPa,其加固稳定效果高于混合掺加 4% 水泥和 4% 石灰的情况,因此,在室内试验和室外试验段施工中采用 0.8% AC101 抗耐土壤稳定剂。

在室内试验中,水泥、石灰的掺量及水泥石灰混合(二灰)掺量均采取 2%、4%、6%;在室外试验段中,考虑到实际施工的时效性和经济性,试验段选取水泥、石灰及二灰的掺量都采用 5%,以上掺量均为干土质量的百分比。

## 2 室内试验分析

为了满足简易机场道面修建方便、快速的要求,对土壤加固材料提出了 4 个要求:用量不能多,越少越好;易于储备和运输;施工简单,方便易行;加固土早期强度高,以便满足飞机安全使用。按照对稳定土的这些要求,结合济宁试验段情况,本文选择了水理试验(液限和塑限)、击实试验、回弹模量试验和强

## 1.2 配合比试验

抗耐土壤稳定剂加固土的配合比以无侧限抗压强度为评价指标进行设计。在力学性质试验中,为了研究抗耐土壤稳定剂的加固效果及变化规律,确定最佳配合比,分别设计 2 组对比试验,第 1 组在济宁土中分别掺加 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%、2.5% AC101 稳定剂进行无侧限抗压强度试验;第 2 组在济宁土中加入不同掺量的水泥、石灰进行了对比试验,在 7 d 龄期,不浸水条件下的试验结果见表 5、6。

由表 5、6 可以看出,在不浸水的条件下,随着稳定剂掺量的增大,其 7 d 龄期无侧限抗压强度有一定的提高,AC101 在济宁土中掺量为 0.8% 时比水

度试验(CBR 和无侧限)等能反映土加固效果的室内试验项目,以评价抗耐土壤稳定剂对于济宁土加固后能否满足简易机场道面修建的需要。

## 2.1 水理性能试验

土的水理性能通常用液限、塑限和塑性指数等指标表示,为了评价济宁土以及固化后各种稳定土的水理性能,液限和塑限试验按照《公路土工试验规程》(JTJ E40—2007)规定的方法进行。先对济宁原土用 0.5 mm 筛进行筛分,制备试验用土样,然后采用 LP-100 型光电式液塑限联合测定仪进行了试验,液限、塑限和计算的塑性指数见表 7。

表 7 水理性能试验结果

Tab. 7 Test results of physical properties for water

稳定剂掺量及种类	素土	0.4%AC101	0.8%AC101	4%水泥
液限/%	30.6	29.9	34.5	36.3
塑限/%	16.5	16.8	23.5	24.0
塑性指数	14.1	13.1	11.0	12.3

试验结果表明,在济宁土中掺入 0.4% AC101 稳定剂时,与素土比较,液限基本接近,塑限略有升高,塑性指数降低了 1.0,降幅为 7.1%;AC101 掺量为 0.8% 时,液限和塑限较素土都略有升高,而塑性指数降低了 3.1,降幅为 21.9%;加入 4% 水泥时,液限、塑限较素土都略有升高,而塑性指数降低

了 1.8,降幅为 12.7%。

一般情况下,越容易稳定压实的土质其塑性指数越低,由表 7 可知,济宁土加入抗耐稳定剂后的水理性质发生了一定变化,尤其是塑性指数变小,表明稳定剂有利于施工过程中道面的压实和强度提高。

## 2.2 击实试验

土的击实试验是改良加固前需要进行的准备工作,主要目的是测定各类稳定土在标准击实功作用下含水量与干密度之间的关系,为达到最佳稳定效

表 8 击实试验结果

Tab. 8 Results of compaction test

稳定剂掺量及种类	素土	2%水泥	4%水泥	6%水泥	4%石灰	0.8%AC101	1.5%AC101
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.900	1.910	1.923	1.928	1.910	1.925	1.973
最佳含水量/%	13.0	13.5	13.9	14.5	13.4	12.6	12.5

含水量在 12.6%时压实效果最佳,即最佳含水量与济宁素土相比减少了 3.1%,最大干密度增大了 1.32%,与水泥掺量为 6%时相当;加入 1.5%抗耐稳定剂后,土壤最大干密度较济宁素土增幅达 3.8%,高于 6%水泥稳定土和 4%石灰稳定土的最大干密度。随着抗耐稳定剂掺量的增加,稳定土最佳含水量略有降低,最大干密度略有升高。

击实结果表明,抗耐稳定剂掺入济宁土以后,产生了化学和物理反应,改变了土颗粒间与水的作用效果,对土的压实起到较好的帮助作用,主要表现为:当压实度相同时,需要的含水量较小;在含水量相同时,只需要较小的压实功,对稳定土就能取得较好的压实效果。

## 2.3 回弹模量试验

路基、路面及筑路材料在外荷载的作用下会产生一定的应力和应变,其应力和相应的回弹应变的比值称为回弹模量。在机场道面及公路路面的设计中均把回弹模量作为基层抗压强度的指标。为了测试抗耐稳定土浸水和不浸水两种情况下室内抗压回弹模量值,利用 MTS810 试验机,采用顶面法对试件回弹模量进行了试验,结果见表 9。由于浸水后掺加 AC101 试件均崩解,因此,无法对浸水后结果进行比较。

表 9 回弹模量试验结果

Tab. 9 Test results of resilient modulus

稳定剂掺量及种类	MPa			
	3 d 浸水	3 d 不浸水	7 d 浸水	7 d 不浸水
6%水泥	365	560	512	786
0.8%AC101		734		772

试验结果表明:加入 0.8%AC101 后,3 d 龄期不浸水抗耐稳定土的回弹模量值比水泥土大 174 MPa,

果和指导施工提供依据。

击实试验方法同样依据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)的规定,其试验用土样采用 5 mm 筛进行了筛分。按照压实度为 95%的要求,采取静压法制备试件,试件直径为 10.0 cm,高度为 12.7 cm,分别制备原土和稳定剂掺量不同时的圆柱体试件。本文主要对素土、不同掺量的水泥土、石灰土、抗耐稳定土进行了重型击实试验,结果见表 8。

由表 8 可知:济宁土中掺入 0.8%抗耐稳定剂时,

提高了 31%,说明抗耐土早期的回弹模量比水泥土增长快;3 d 与 7 d 抗耐土不浸水回弹模量值相差不大,抗耐土 7 d 龄期的回弹模量值与 6%水泥土基本接近。

## 2.4 CBR 试验

为了评价济宁土掺入抗耐土壤稳定剂后的强度,进行 CBR 试验是一个有效的方法。根据试验规程要求,采取静压法分别制备稳定剂掺量不同的圆柱体试件,其直径为 15.24 cm,高度为 12.7 cm。将成型后的试件置于温度为 20℃±2℃,湿度在 95%的环境中进行养生,一部分试件不浸水,一部分试件浸水 4 d 后进行试验。

在浸水和不浸水两种条件下,分别对济宁素土、掺加 0.8%AC101 和掺加 0.8%AC101 后上下表面涂刷 HOD1 等 3 种试件进行了 CBR 试验,试验结果见表 10。

表 10 CBR 试验结果

Tab. 10 Test results of CBR

稳定剂掺量及种类	素土	0.8%AC101	0.8%AC101+5%HOD1
浸水 CBR 值/%	6.8	4.4	21.2
不浸水 CBR 值/%	20.0	32.3	49.2

由表 10 可知:试件浸水以后,表面出现了湿软现象,其 CBR 值有所降低,试件在不浸水的条件下,AC101 稳定剂掺加 0.8%后,稳定土的 CBR 值较济宁素土增大了 61.5%;试件在浸水和不浸水的条件下,济宁土中掺加 0.8%AC101 和涂刷 HOD1 稳定剂后,CBR 的试验结果较济宁素土增加幅度都很大,分别提高了 212%和 146%。

## 2.5 无侧限抗压强度试验

### 2.5.1 试验方法

在道路或机场工程中,评价稳定材料性能的一

个重要指标是无侧限抗压强度,其方法是测试试件在侧面不受任何约束限制条件下所承受的最大轴向应力。为了更好地研究和评价抗耐稳定土的无侧限抗压强度,分别在不同压实度和含水量条件下进行试验,同时选取传统的水泥稳定土、石灰稳定土作对比试验,进一步分析和评价抗耐稳定土的加固效果。

依据无侧限抗压强度试验方法的要求,压实度按 95% 控制,并采取静压法制备试件。分别制备了不同稳定剂材料和不同掺量时的圆柱体试件,其直径为 5.0 cm,高度为 5.0 cm;将成型后的试件在温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿度为 95% 的环境条件进行养生。对部分试件在龄期为 6 d 时,浸水 24 h,进行无侧限抗压强度试验,以评价加固土样的水稳定性。

### 2.5.2 不同固化材料对固化土强度的影响

针对简易机场道面快速修建和安全使用的要求,试验只测试了在 3 d 与 7 d 龄期时,不浸水的情况下,素土、抗耐土、石灰土和水泥土等 4 种稳定土的无侧限抗压强度,试验结果见表 11。

表 11 不同材料对固化土强度的影响

Tab. 11 Influences of different materials on reinforced soil strengths MPa

稳定剂掺量及种类	素土	0.8%AC101	4%石灰	4%水泥
3 d 强度	0.62	0.89	0.78	1.12
7 d 强度	0.73	1.24	0.97	1.56

试验结果表明:掺入 AC101、石灰、水泥这 3 种稳定材料后,3 d 与 7 d 龄期时济宁土的无侧限抗压强度较素土都有明显增长。AC101 掺量为 0.8% 时,3 d 与 7 d 龄期无侧限抗压强度分别提高了 43.5%、69.8%,增幅略高于石灰土,略低于水泥土;3 d 龄期掺入 0.8%AC101 的固化土早期强度高于石灰土,但低于水泥土。随着龄期的增加,各类固化土的无侧限抗压强度均有所增加,7 d 龄期的 AC101 固化土无侧限抗压强度比 3 d 抗压强度增长了 39.3%,增幅接近于水泥土的 39.2%,高于石灰土的 24.3%,AC101 固化土 7 d 龄期的无侧限抗压强度只达到 1.24 MPa;在不在浸水条件下,不同稳定剂对固化土的强度都有提高,而抗耐稳定剂对于提高济宁土早期抗压强度略低于水泥土,但高于石灰土。

### 2.5.3 不同压实度对固化土强度的影响

为了分析抗耐土壤稳定剂加固土强度与不同压实度之间的关系,选取掺量为 0.8% 的 AC101,压实度分别采用 93%、95%、97%、98% 和 100% 制备试件,在标准条件下养生 7 d,测试其无侧限抗压强度,

试验结果见表 12。

表 12 不同压实度对固化土强度的影响

Tab. 12 Influences of different compaction degrees on reinforced soil strengths MPa

压实度/%	93	95	97	98	100
素土+0.8%AC101	0.88	1.14	1.37	1.44	1.56

试验结果表明:济宁土掺入 0.8%AC101 后,若压实度大于 93%,其抗压强度大于 0.88 MPa,满足高速公路或一级公路底基层 7 d 抗压强度大于 0.8 MPa 的要求;成型压实度为 95% 的 7 d 无侧限抗压强度比压实度为 93% 的强度提高了 29.5%,压实度为 97% 的 7 d 无侧限抗压强度比压实度为 95% 的强度提高 20%,成型压实度在 93%~97% 时,固化土的无侧限抗压强度增长最快;由于压实度的不断提高,抗耐稳定土的无侧限抗压强度也随着提高,两者呈明显的线性增长,当压实度从 93% 增加到 100% 时,其强度之差为 0.68 MPa,压实度每提高 1%,7 d 龄期无侧限抗压强度提高 10% 左右,因此,在实际工程中,为了提高固化土的抗压强度,以达到最佳压实效果,最可靠的方法是尽可能地提高压实度。

### 2.5.4 不同含水量对固化土强度的影响

水是各类稳定土的重要组成部分,对于 AC101 固化土强度的影响也很显著,它促使稳定土中发生物理化学反应而形成强度。为了研究 AC101 固化土的无侧限抗压强度与土样含水量关系,分别制备含水量为 9%、11%、12%、13%、14% 和 16% 等六种试件,标准养生 7 d 后测试无侧限抗压强度,试验结果见表 13。

表 13 不同含水量对固化土强度的影响

Tab. 13 Influences of different water contents on reinforced soil strengths MPa

含水量/%	9	11	12	13	14	16
素土+0.8%AC101	1.08	1.30	1.17	1.02	0.89	0.67

由表 13 可知:当抗耐稳定土含水量由 9% 逐步增大后,其无侧限抗压强度也随之快速增大;当抗耐稳定土含水量增至 10%~12% 之间时,其无侧限抗压强度达到了最大值;当抗耐稳定土含水量大于 12% 后,随着含水量的逐渐增大,其无侧限抗压强度下降趋势比较明显;当抗耐稳定土在最佳含水量 12.6% 时,无侧限抗压强度反而减小,其值小于 1.17 MPa,为最大值的 90% 左右;抗耐稳定土在最佳含水量时,其无侧限抗压强度不是最大值,对于 AC101 固化土而言,其含水量在最佳含水量的

90%±5%范围内时,强度就能达到最大值。

### 3 现场试验分析

#### 3.1 试验段概况与铺筑

试验段选在济宁某试验中心道路建设工程中,采用抗耐稳定土、水泥稳定土、石灰稳定土、二灰稳定土等 4 种形式的稳定土进行现场试验。根据室内配合比试验结果,现场试验段 AC101 抗耐稳定剂掺量为 0.8%,水泥、石灰、二灰的掺量均为 5%。试验段总长 80 m,宽 10 m。每个试验段长度依次为 30、15、15、20 m,厚度均为 20 cm。试验段平面布置见图 1,结构横断面见图 2,现场试验段的基本施工流程见图 3。

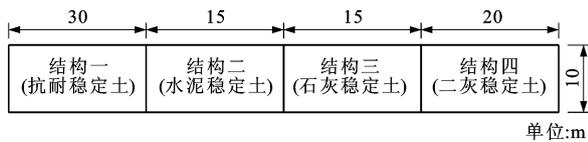


图 1 试验段平面布置

Fig. 1 Overall layout of test road

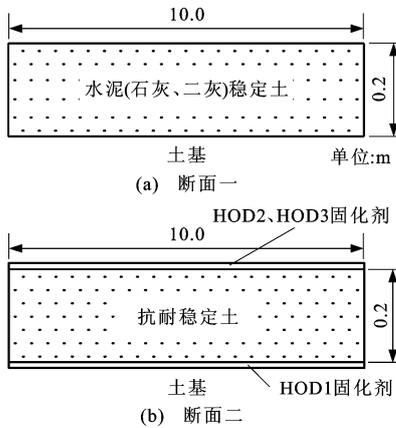


图 2 试验段横断面

Fig. 2 Cross sections of test road

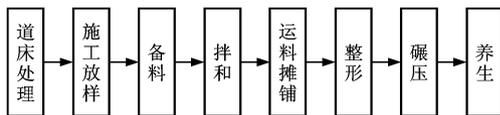


图 3 试验段施工流程

Fig. 3 Construction flow of test road

为了提高抗耐稳定土结构层的抗水侵蚀性,防止水分渗透结构层而降低稳定效果,在其施工过程中,首先在平整碾压后的 300 m<sup>2</sup> 试验段原土基表面喷洒了 HOD1 固化剂,以隔绝地下水分的毛细上升与侵入,然后在碾压密实后的抗耐稳定土表面分别喷洒了 100 m<sup>2</sup> 的 HOD2 固化剂和 200 m<sup>2</sup> 的 HOD3 固化剂,以抵抗自然条件下雨水的侵蚀。施

工中 HOD 产品的喷洒用量均为 0.2 kg·m<sup>-2</sup>。

观察结果表明,经其处理的抗耐稳定土试验段雨水作用前后表面性状及结构性能无明显变化,HOD2 固化剂的防水效果好于 HOD3 固化剂。

#### 3.2 回弹模量试验

依据《公路路基路面现场测试规程》(JTG E60—2008),在现场试验段进行抗耐土、水泥土、石灰土、二灰土在不同龄期(3、14、28 d)的回弹模量试验,结果见图 4。

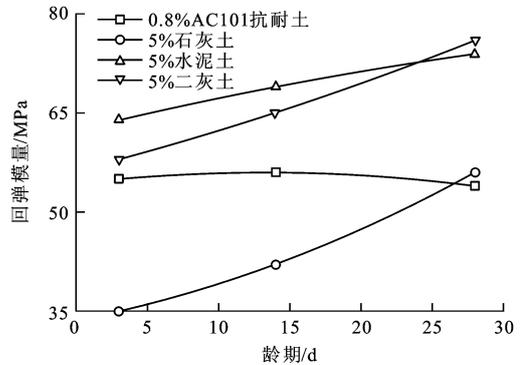


图 4 回弹模量现场试验结果

Fig. 4 Field test results of resilient modulus

回弹模量试验结果表明:现场试验中加入抗耐稳定剂后,稳定土结构层的回弹模量值在各个龄期基本保持不变;3 d 龄期时回弹模量值高于石灰土,接近于二灰土,但低于水泥土;随着水泥水化产物的增加,28 d 时水泥土、二灰土的回弹模量值明显高于抗耐土,石灰土的回弹模量值较水泥土和二灰土增长缓慢,28 d 时略高于抗耐土。

#### 3.3 现场 CBR 试验

按照《公路路基路面现场测试规程》(JTG E60—2008)规定的试验方法,测试了现场试验段 4 种稳定土在不同龄期(3、14、28 d)的 CBR 值,试验结果见图 5。

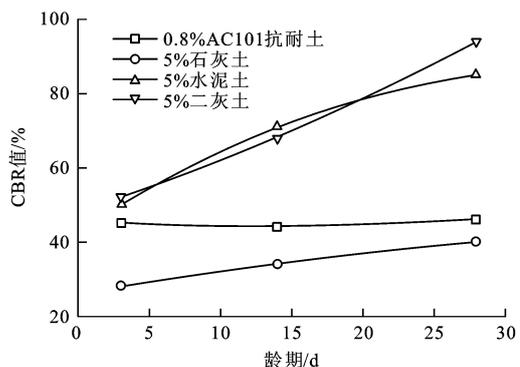


图 5 CBR 现场试验结果

Fig. 5 Field test results of CBR

CBR 试验结果表明:加入抗耐稳定剂后,稳定土结构层的现场 CBR 值在各个龄期基本保持不变;3 d 龄期时 CBR 值高于石灰土,低于水泥土、二灰土;28 d 时水泥土、二灰土的现场 CBR 值明显高于抗耐土,石灰土的 CBR 值增长较缓慢,28 d 时仍低于抗耐土。

### 3.4 弯沉试验

为了分析不同稳定土承载能力的变化情况,采用贝克曼梁法测定了 4 种稳定土在不同龄期(3、14、28 d)的回弹弯沉值,试验结果见图 6。试验所用车辆的标准轴荷载、轮胎尺寸、轮胎间隙及轮胎气压均满足 BZZ-100 的要求,测试仪器包括两台长 3.6 m 的贝克曼梁和配套的百分表及表架。

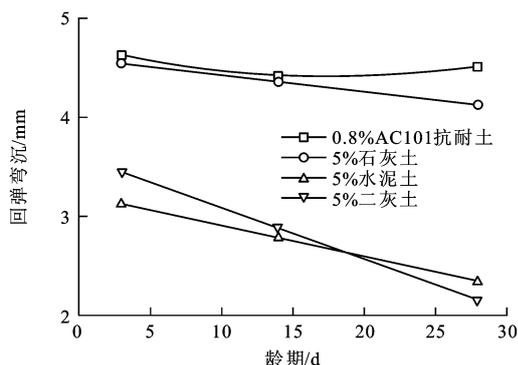


图 6 弯沉试验结果

Fig. 6 Test results of deflection

弯沉试验结果表明:加入抗耐稳定剂后,稳定土结构层的弯沉值在各个龄期基本保持不变;3 d 龄期时弯沉值基本接近石灰土,但大于水泥土、二灰土;随着水泥、石灰材料的化学反应及水化产物的生成,28 d 龄期时水泥土、二灰土的弯沉值明显低于抗耐土,石灰土的弯沉值仍与抗耐土接近。

### 3.5 土压力测试

土压力试验是在平整压实后的土基表面一定位置,埋设土压力盒。土压力盒采用辽宁丹东虬龙仪器厂生产的 JXY-4 型压轴双膜土压力盒,量程为 1.0 MPa,利用脉冲激发器频率仪读数,并换算成压力值。4 种稳定土不同龄期的土压力测试结果见图 7。

土压力试验结果表明:加入抗耐稳定剂后,稳定土结构层的竖向土压力值在各个龄期基本保持不变;各个龄期时土压力值与石灰土基本接近,均大于水泥土、二灰土相应数值。需要注意的是,如果土压力盒埋设偏斜,上方土壤不够密实等,读数可能较理论计算值有较大出入。

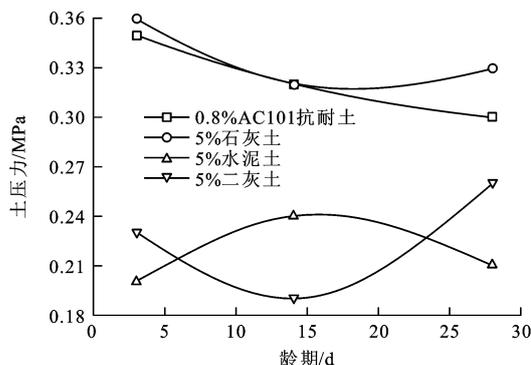


图 7 土压力试验结果

Fig. 7 Test results of soil pressure

### 3.6 滚动摩擦因数测试

本试验使用 50 kN 的数显式拉力计,可得模拟加载车在不同道面上均速前行状态下的拉力值,再与模拟加载车自重荷载值相比即得滚动摩擦因数,采用此种方法得出了各个试验段的滚动摩擦因数,同时测试了水泥混凝土路面的滚动摩擦因数,结果见表 14。

表 14 滚动摩擦因数试验结果

Tab. 14 Test results of rolling friction factor

龄期/d	结构层形式				
	0.8%AC101 抗耐土	5% 石灰土	5% 水泥土	5% 二灰土	水泥 混凝土
3	0.36	0.25	0.22	0.23	0.15
14	0.34	0.23	0.23	0.24	0.13
28	0.32	0.24	0.26	0.28	0.13

试验结果表明:各个龄期时,水泥混凝土路面摩擦因数最小,而石灰土、水泥土、二灰土 3 种结构试验段的滚动摩擦因数数值相差不大,抗耐土试验段在各个龄期时的滚动摩擦因数数值均大于其他 3 种试验段,可能是表面喷洒的 HOD 试剂导致表面粗糙程度增加。如果飞机在此种结构上滑行起飞,所需的推力作用相应最大,轮辙应较深。

## 4 结 语

(1) 采用抗耐土壤稳定剂加固济宁土以后,其水理性能、回弹模量和强度等指标都有不同幅度的提高,对压实度有较好作用效果的是 AC101 稳定剂,对于防止水分渗入而保护道面起较明显效果的是 HOD1 稳定剂。

(2) 抗耐土壤稳定剂掺量不同,稳定土的作用效果不同,随着掺量的增加其强度有一定提高,但提高幅度不大。为了节省经费,提高经济指标,建议 AC101 掺量为 0.8%,HOD1 掺量为 5%或  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(3)抗耐稳定土的早期承载能力与水泥土、二灰土作用效果基本相同,高于石灰土,但随着加固土龄期的增长,水泥土、二灰土承载能力的增长幅度要大于抗耐土,28 d龄期时抗耐土与石灰土的承载能力基本相同。

(4)采用 AC101 稳定剂加固土时,为了获得最大的强度,其含水量应在土壤最佳含水量的 90%±5%范围内。在实际施工过程中,要获得较高的稳定效果,其含水量应控制在小于土壤最佳含水量的 2%~3%范围内进行碾压。

(5)液体性质的抗耐稳定剂采用喷洒翻拌方法加入土中,施工机械简单,操作方便,施工费用低,所需时间短。针对简易机场快速建设、公路快速抢修的特点和要求,抗耐稳定剂具有一定的实际应用价值。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] NALBANTOGLU Z, GUCBILMEZ E. Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments [J]. Journal of Arid Environments, 2001, 47(4): 453-463.
- [2] TOMOHISA S, SAWA K, NAITOH N. Hedoro hardening treatment by industrial wastes[J]. Journal of the Society of Materials Science, 1995, 44(503): 1023-1026.
- [3] 叶观宝,陈望春,杨晓明.水泥土早期强度的室内试验研究[J].岩土工程技术,2003(6):346-348.  
YE Guan-bao, CHEN Wang-chun, YANG Xiao-ming. Lab study on early strength of cement-stabilized soil [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(6): 346-348. (in Chinese)
- [4] 庄心善,王功勋,田 蕊.含工业废料加固土的特性研究[J].土木工程学报,2005,38(8):114-117.  
ZHUANG Xin-shan, WANG Gong-xun, TIAN Bi. A study on the characteristics of soils consolidated with industrial wastes[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(8): 114-117. (in Chinese)
- [5] GRABER E R, FINE P, LEVY G J. Soil stabiliazation in semiarid and arid land agriculture[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(2): 190-197.
- [6] 曹源文.机场跑道道面翻修施工要求及设备[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(2):26-29.  
CAO Yuan-wen. Construction requirements and equipment in airport runway renovation [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2010, 27(2): 26-29. (in Chinese)
- [7] 田加亨.碎石桩在高填方机场软基处理中的试验研究[J].筑路机械与施工机械化,2012,29(6):49-52.  
TIAN Jia-heng. Experimental study on treatment of soft foundation of high fill airport with gravel pile [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2012, 29(6): 49-52. (in Chinese)
- [8] 郭 印.淤泥质土的固化及力学特性的研究[D].杭州:浙江大学,2007.  
GUO Yin. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properties of stabilized soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [9] MODMOLTIN C, LU Jiang, ONITSUKA K.腐殖酸与盐分浓度对石灰加固土有明黏土的影响以及微观结构研究[J].岩土工程学报,2004,26(2):281-286.  
MODMOLTIN C, LU Jiang, ONITSUKA K. Influence of humic acid and salt concentration on lime-stabilized ariake clays and microstructure research [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 281-286. (in Chinese)
- [10] 王 梅,白晓红,梁仁旺,等.生石灰与粉煤灰桩加固软土地基的微观分析[J].岩土力学,2001,22(1):67-70.  
WANG Mei, BAI Xiao-hong, LIANG Ren-wang, et al. Microstudy on soft foundations reinforcement with lime-fly ash piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 67-70. (in Chinese)
- [11] 许 巍,岑国平,戴经梁.简易机场道面结构的疲劳特性试验[J].交通运输工程学报,2008,8(6):40-43.  
XU Wei, CEN Guo-ping, DAI Jing-liang. Fatigue characteristic experiments of field airfield pavement structure [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(6): 40-43. (in Chinese)
- [12] 许 巍,岑国平,林兴刚.简易机场水泥稳定细粒土基层使用性能研究[J].路基工程,2009(6):59-60.  
XU Wei, CEN Guo-ping, LIN Xing-gang. Field airfield cement stabilized fine-grained soil grassroots use performance research [J]. Subgrade Engineering, 2009(6): 59-60. (in Chinese)
- [13] 葛东华,岑国平.简易机场跑道基层快速加固试验研究[J].路基工程,2007(4):70-72.  
GE Dong-hua, CEN Guo-ping. Field airfield runway grassroots quickly strengthening test research [J]. Subgrade Engineering, 2007(4): 70-72. (in Chinese)
- [14] ANDERTON G L, BERNEY E S, MANN T, et al. Joint rapid airfield construction (JRAC) 2007 technology demonstration[R]. Washington DC: US Army Corps of Engineers, 2008.