

文章编号: 1007-2993(2023)01-0019-05

基于 DCP 的不同固化粉土基层路用性能分析

孙兆云¹ 王 林¹ 张 磊¹ 付光辉² 高 晗²

(1. 山东省交通科学研究院, 山东济南 250102; 2. 齐河恒晟公路工程有限责任公司, 山东德州 251100)

【摘要】 为分析沥青乳液、沥青微粉、无机复合型三种不同固化粉土基层的路用性能, 依托黄河冲积平原农村公路项目进行不同结构层的现场动力锥贯入仪(DCP)试验, 同时与 8% 水泥固化粉土基层对比分析。结果表明: 沥青乳液、沥青微粉、无机复合型固化粉土基层的贯入度 D_a 为 1.33 ~ 1.74 mm/blow, 均小于水泥固化粉土结构层的贯入度 2.09 mm/blow, 其整体固化效果更优。三种不同固化粉土的 DCP 换算无侧限抗压强度与取芯实测无侧限抗压强度、DCP 累积平均贯入度与 FWD 弯沉之间具有良好的相关性, 采用分层计算与累积计算可分别用于单层强度和整体承载能力的快速评价。DCP 测试结果还可为黄河冲积平原粉土改良固化路用性能的评价提供数据参考与工程借鉴。

【关键词】 道路工程; 粉土; 固化材料; DCP 测试; 路用性能

【中图分类号】 U 414

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.01.004

Road Performance Analysis of Different Solidified Silt Base Based on DCP

Sun Zhaoyun¹ Wang Lin¹ Zhang Lei¹ Fu Guanghui² Gao Han²

(1. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250102, Shandong, China; 2. Qihe Hengsheng Highway Engineering Co., Ltd., Dezhou 251100, Shandong, China)

【Abstract】 In order to analyze the road performance of asphalt emulsion, asphalt powder and inorganic compound type solidified silt base course, field dynamic cone penetrometer (DCP) tests of different structural layers were conducted based on the Yellow River alluvial plain rural highway project, and compared with 8% cement solidified silt base simultaneously. The results show that the penetration of asphalt emulsion, asphalt powder and inorganic composite solidified silt base is between 1.33 mm/blow and 1.74 mm/blow, less than 2.09 mm/blow of the penetration of cement stabilized silt structural layer, and the overall curing effect is better. There is a good correlation between DCP converted unconfined compressive strength and measured unconfined compressive strength of coring, DCP cumulative average penetration and FWD deflection of the three different solidified silts, layered calculation and cumulative calculation can be used for rapid evaluation of single-layer strength and overall bearing capacity respectively. The DCP test results can also provide data reference and engineering reference for the evaluation of improved and solidified road performance of silt in the alluvial plain of the Yellow River.

【Key words】 road engineering; silt; curing materials; DCP test; road performance

0 引言

低液限粉土具有级配不均、水稳定性差、难压实等特点, 很难直接运用到道路建设中。在实际工程应用中, 通常在低液限粉土添加一定改良材料以提高其路用性能。目前, 常用的粉土改良方法有水泥稳定、石灰稳定及二灰稳定等, 随着材料科学的发展, 各种土体固化剂开始广泛运用到道路工程中^[1-2]。土体固化剂是一种由多种无机或有机材料合成的用于固化

各类土体的新型工程材料^[3], 比传统稳定材料具有更好的性能、经济和环保效应。土体固化剂通过一系列的物理化学反应改变土体的性质, 起到固化土体的作用, 使固化后的土体更易被压实和得到更高的强度等^[4-5]。本文依托黄河冲积平原地区某农村公路项目, 选用沥青乳液、沥青微粉和无机复合型三种固化材料, 对粉土进行稳定固化处理并应用于小交通量的道路基层结构, 并与传统水泥固化粉土进行试验对比,

基金项目: 山东省交通科技创新计划项目(2020B31)

作者简介: 孙兆云, 男, 1986 年生, 汉族, 高级工程师, 主要从事道路路基结构与新材料研究。E-mail: andersontwo@163.com

分析并验证其路用性能。

动力锥贯入仪(Dynamic Cone Penetrometer, DCP)作为一种简便、快捷的原位测试装置,因不受场地限制而经常用于施工现场检测,评价路基路面的强度和承载能力等指标,其贯入度指标也被用作路面设计的参数。基于国内外多年运用经验^[6-8],贯入度与其他指标建立了关系式,如土的弹性模量、加州承载比、无侧限抗压强度等。本文采用DCP对上述三种固化粉土稳定基层进行测试,并与现场取芯测试无侧限抗压强度、FWD弯沉测试进行比较,分析与评价不

同固化粉土的路用性能,为后期工程应用提供参考依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

(1)粉土

土样取自黄河中下游冲积平原地区,距黄河北岸约20 km。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)的试验方法,进行室内基本物理指标测试,试验结果见表1。

表1 粉土样品基本物理性质

比重	液限 w_l /%	塑限 w_p /%	黏粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%	最大干密度 ρ_d /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/%
2.71	29.7	23.0	6.9	69.1	24.0	1.77	18.9

通过液塑限联合测定试验得到土样的塑性指数 I_p 为6.7,颗粒分析结果表明土样中粉粒的含量大于50%,且砂粒的含量小于25%。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)中土的分类标准,可判定该土样为低液限粉土。

(2)水泥

试验采用P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,依据《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)进行相关技术指标的室内试验,试验结果如表2所示。

表2 水泥样品试验结果

密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准稠度/%	初凝时间/min	终凝时间/min	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
3.08	350	28.2	184	255	6.7	9.5	34.3	55.8

(3)固化材料

试验共选用3种固化材料对粉土进行固化处理,固化材料分别为沥青乳液固化材料、沥青微粉固化材料和无机复合型固化材料。其中,沥青乳液固化材料是将沥青质基材加工成低黏性的液态材料,沥青微粉固化材料是通过一定技术手段将沥青质基材加工成固体粉末状材料,无机复合型固化材料是由多种无机类凝胶材料复配而成。

试验中粉土固化采用“固化材料+水泥”的双掺形式,将三种不同固化材料、水泥按一定比例与粉土充分拌和,经压实、养生过程的复杂化学作用,可实现粉土的“有机-无机”复合稳定固化。其中,水泥掺量均为粉土质量的4%,沥青乳液固化材料的掺量为粉土质量的7%~8%(其中沥青质组分含量为3%~4%),沥青微粉固化材料的掺量为粉土质量的3%~4%,无机复合型固化材料的掺量为粉土质量的3%~4%。工程应用中,三种不同固化粉土所替代的水泥稳定粉土基层,采单掺水泥的改良处理方式,水泥掺量为粉土质量的8%。

1.2 工程结构

本工程位于德州市齐河县,为双车道四级公路(I类),设计速度15 km/h,属于小交通量农村公路建设项目。路面宽度7 m,采用沥青混凝土路面结构,常规路面结构由下至上为:土基+35 cm 8%水泥稳定粉土基层+功能层+3 cm 沥青混凝土面层,结构示意图如图1(a)所示。

为研究黄河冲积平原地区粉土新型固化技术与材料研发,项目建设中选取600 m作为试验段,采用上述三种不同材料固化粉土用于路面基层,每种材料的试验段长度为200 m。试验段路面结构由下至上为:土基+20 cm 8%水泥稳定粉土基层+15 cm 固化粉土基层+功能层+3 cm 沥青混凝土面层,结构示意图如图1(b)所示。

沥青乳液固化材料在常温条件下呈液态,施工时采用就地冷再生专用拌和设备进行拌和。沥青微粉固化材料和无机复合型固化材料在常温条件下为固体粉末,施工时按照设计剂量现场撒布,然后采用路拌机进行拌和施工。

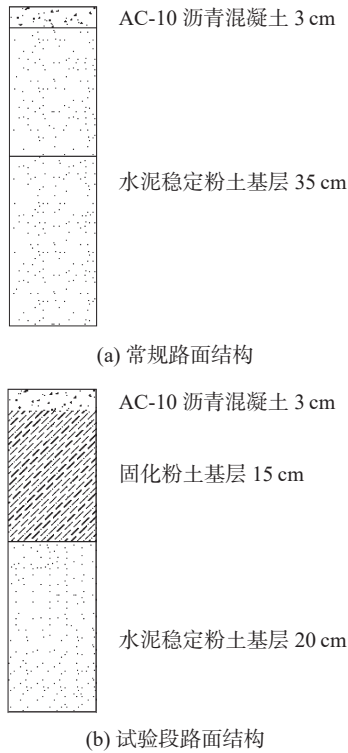


图1 四种固化粉土路面结构示意图

1.3 测试方案

动力锥贯入仪(DCP)可以在现场快速测试,并评估路基、路面强度特性。DCP由手柄、落锤、导向杆、联轴器(锤座)、扶手、夹紧环、探杆、1 m 刻度尺、锥头等部分组成,如图2所示。DCP标准落锤质量为10 kg,锥头锥尖角度为60°。测试时,落锤自由落体产生的冲击力将探杆贯入路基内部,通过计算不同层位的贯入度 D_d 评价结构层的强度和路用性能。对于相同的深度,锤击的次数越多,说明结构层越坚硬;反之,说明结构层越松软^[9]。

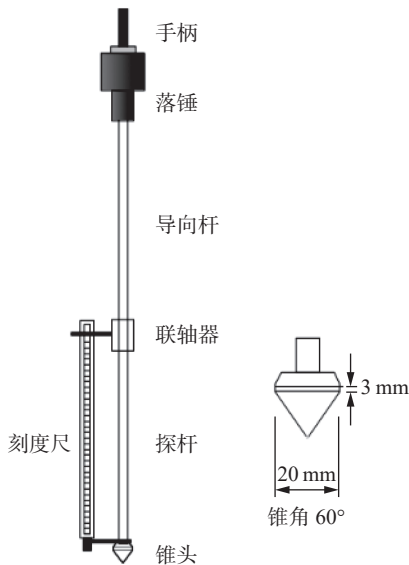


图2 DCP结构示意图

试验路铺筑完毕后,采用 DCP 对常规段和三种固化粉土基层试验段分别进行现场测试(见图3)。各测试点的贯入深度选取为 55 cm,常规段测试层位由上至下包括 35 cm 水泥稳定粉土基层和 20 cm 土基,试验段测试层位由上至下包括 15 cm 固化稳定粉土基层、20 cm 水泥稳定粉土基层和 20 cm 土基。同时,现场采用落锤式弯沉仪、取芯等方式进行结构层顶面弯沉和芯样无侧限抗压强度的对比测试。



图3 DCP 现场检测

2 结果分析

2.1 固化粉土贯入度

通过对三种不同固化粉土基层试验路和常规水泥固化粉土路段的 DCP 现场试验,计算各层位的实测贯入度 D_d ,所得试验结果汇总见表3。各路段对3个测点取平均值,并按照不同的测试层位进行对比分析,如图4所示。

表3 不同固化粉土路段的贯入度汇总

测试层位	贯入度 D_d / (mm/blow)			
	沥青乳液固化段	沥青微粉固化段	无机复合型固化段	常规水泥固化段
15 cm 固化粉土基层 (0 ~ 15 cm)	1.74	1.33	1.51	2.09
20 cm 水泥稳定粉土基层 (15 ~ 35 cm)	2.16	2.13	2.14	2.07
20 cm 粉土地基 (35 ~ 55 cm)	2.86	2.89	2.96	2.87

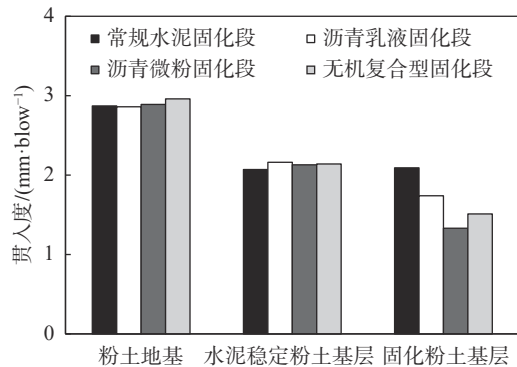


图4 不同结构层贯入度分布图

从表3和图4可以看出,不同路段粉土地基、水泥稳定粉土基层和固化粉土基层的贯入度均呈现逐层降低的趋势,说明各路段随着结构层位的上移,其强度也得到不同程度的提高。同时,四种路面结构在粉土地基(35~55 cm)、水泥稳定粉土基层(15~35 cm)的贯入度结果基本一致,这与两个结构层分别采用了相同的填筑材料的实际应用情况相一致。另外,不同路段固化粉土基层(0~15 cm)的贯入度呈现一定的差异性,其中,沥青乳液固化粉土基层、沥青微粉固化粉土基层、无机复合型固化粉土基层的平均贯入度分别为1.74 mm/blow、1.33 mm/blow、1.51 mm/blow,均低于常规水泥固化粉土基层的平均贯入度2.09 mm/blow,说明三种固化材料对粉土的固化作用均优于采用单掺水泥对粉土的固化效果。

2.2 路用性能分析

目前,DCP试验在国内外大量工程中得到应用,并通过实践可以建立贯入度 D_a 与加州承载比(CBR)、回弹模量(E)及无侧限抗压强度(UCC)等不同路用性能评价指标的相关关系。根据《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)并参考USACE、AASHTO等推荐的相关关系式,可建立无侧限抗压强度(UCC)与贯入度(D_a)之间的换算关系: $UCC=3218/D_a^{1.158}$ 。根据表3中实测贯入度 D_a 数据进行计算,可以得到各试验段不同结构层的换算无侧限抗压强度,如图5所示。

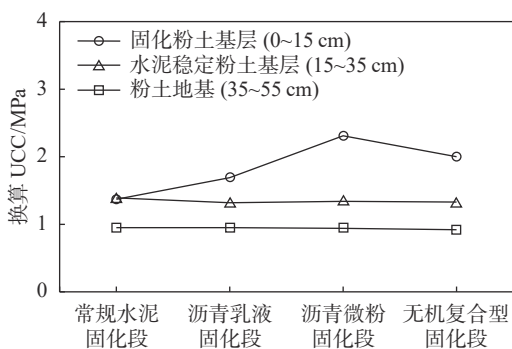


图5 不同结构层换算无侧限抗压强度分布

由图5可知,随着测试深度的增加,不同层位的无侧限抗压强度越来越小。粉土地基的换算无侧限抗压强度为0.92~0.95 MPa,水泥稳定粉土基层的换算无侧限抗压强度为1.32~1.39 MPa,而三种固化材料固化粉土的换算无侧限抗压强度值均高于单掺水泥固化粉土基层强度值1.37 MPa。其中,沥青乳液固化粉土基层的换算无侧限抗压强度为1.69 MPa,沥青微粉固化粉土基层的换算无侧限抗压强度为2.31 MPa,无机复合型固化粉土基层的换算无侧限抗

压强度为2.00 MPa。

实测无侧限抗压强度采用现场钻芯取样方法,使用取芯钻机对测试结构层进行钻取试样。钻芯取样采用直径为150 mm钻头,钻取后将样品加工成直径150 mm、高度150 mm的圆柱形试件进行无侧限抗压强度试验。现场对常规水泥固化粉土路段及三种不同固化粉土基层试验路段的0~15 cm结构层位进行了取芯和无侧限抗压强度测试,沥青乳液固化粉土基层、沥青微粉固化粉土基层、无机复合型固化粉土基层和水泥稳定粉土基层的实测无侧限抗压强度值分别为1.20 MPa、1.66 MPa、1.57 MPa、1.04 MPa。对四种固化粉土基层材料的换算无侧限抗压强度与实测无侧限抗压强度对比分析,发现DCP换算值较取芯实测值高,但两者之间具有良好的相关性,如图6所示。

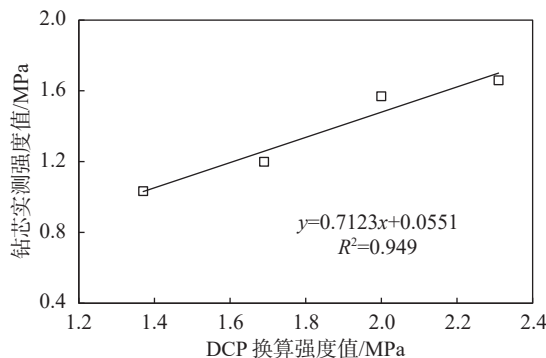


图6 DCP换算强度值与钻芯实测强度值关系

现场弯沉采用落锤式弯沉仪(FWD)进行动态弯沉测试,通过测定结构层在冲击荷载作用下的瞬时变形,对其承载能力进行评价。FWD测试承载板直径为30 cm,通过重锤下落产生 50 ± 2.5 kN的冲击荷载,由承载板中心处的位移传感器(分辨力0.001 mm)采集荷载作用期间的动态变形值。在沥青乳液固化粉土基层、沥青微粉固化粉土基层、无机复合型固化粉土基层和水泥稳定粉土基层四个不同结构层层顶进行弯沉测试,实测弯沉值分别为47(0.01 mm)、36(0.01 mm)、44(0.01 mm)、50(0.01 mm)。由于FWD测得弯沉为整体道路结构的顶面变形量且作用影响层位较深,因此对表3中各路段的分层贯入度按0~15 cm、0~35 cm、0~55 cm深度进行平均求值,并与FWD弯沉进行相关性分析,如图7所示。可以看出,FWD弯沉值与贯入度之间存在良好的相关关系,即贯入度越大其测试弯沉值越高。同时,当贯入度的计算层厚越大时,平均贯入度与弯沉值的相关性越好。

综上所述,采用沥青乳液、沥青微粉和无机复合

型材料对粉土进行固化处理, 用作基层材料时贯入度均小于 8% 剂量水泥固化粉土, 且换算无侧限抗压强度、弯沉值等指标均优于小交通量道路基层结构的技术要求^[10], 说明固化粉土稳定基层具有良好的路用性能。

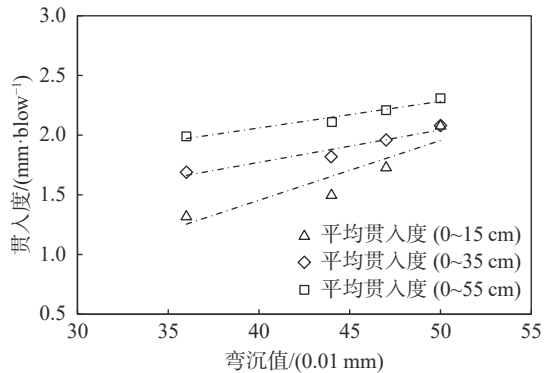


图7 FWD 弯沉值与不同层厚贯入度的关系

同时, 通过 DCP 贯入度所换算无侧限抗压强度与取芯实测无侧限抗压强度具有良好的相关关系, 可将 DCP 贯入度用于各结构层强度的快速评价, 而 FWD 测试作用深度较深, 实践中可采用累计层厚平均贯入度与其建立相关关系并用于整体结构承载能力的评价。

3 结论

依托黄河冲积平原某农村公路项目, 采用三种不同固化材料对粉土进行稳定固化处理并应用于小交通量道路基层。对实体工程采用 DCP 进行现场测试, 并结合现场取芯和弯沉测试, 对其路用性能进行评价, 得出以下结论:

(1) 沥青乳液、沥青微粉和无机复合型粉土固化材料稳定基层的贯入度为 1.33 ~ 1.74 mm/blow, 换算无侧限抗压强度为 1.69 ~ 2.31 MPa, 具有良好的路用力学性能。

(2) 与单掺水泥固化粉土相比, 沥青乳液、沥青微粉和无机复合型材料对粉土具有更佳的稳定固化

效果, 适用于小交通量道路的路基或基层结构。

(3) DCP 贯入度与取芯实测强度和结构弯沉均具有良好的相关关系, 通过分层计算和累计计算方法可分别用于固化粉土单层强度和整体承载能力的评价, 为工程应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] 赵 玮, 何 森, 刘 军. 动力锥贯入法在路基施工质量控制中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, (3): 102-105.
- [2] GEORGE V, RAO C N, SHIVASHANKAR R. Effect of Soil parameters on dynamic cone penetration indices of laterite sub-grade soils from India[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27(4): 585-593.
- [3] 陶向华, 蔡迎春, 郑元勋, 等. DCP和长杆贯入仪在粉砂土路基检测中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(4): 5-8.
- [4] 杨 博. 应用DCP快速检测土基压实质量研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- [5] 查旭东, 杨 博, 王 彬, 等. 应用动态圆锥贯入仪快速检测土基压实性能[J]. *交通科学与工程*, 2010, (1): 14-18.
- [6] MOHAMMAD L N, HERATH A, ABU-FARSAKH M Y, et al. Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(11): 986-992.
- [7] 孙兆云, 程祥俊. DCP与FWD在路用性能评价中的相关性研究[J]. *山东交通科技*, 2013, (4): 36-38.
- [8] 徐 平, 王复明, 陈忠平. DCP在高速公路路基压实质量评价中的应用[J]. *路基工程*, 2008, (4): 10-12.
- [9] 汪建峰, 王 钊, 邓卫东. 一种测试粘土路基弹性模量的简易方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, (5): 800-803.
- [10] JTG 2111—2019 小交通量农村公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

收稿日期: 2021-08-13