DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250550

流态固化淤泥路基施工变形及承载性能研究

姜 磊
[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘 要: 基于上海市金山区乐高乐园附属枫明路道路建设项目,开展流态固化淤泥回填路基的现场测试研究。首先通过室内试验得到淤泥固化土的流动性和强度特性,为现场固化土路基浇筑确定最优配比,并在现场埋设光纤光栅传感器采集固化土层养护硬化阶段的变形和温度数据。养护完成后进行测试,确定路基结构性能。结果表明:在淤泥固化土的养护初期75 h内,温度和应变变化可分为上升、下降和稳定三阶段。温度在17 h升至24.03 ℃后开始下降,并在56 h后趋于稳定。固化土在26 cm深度处的水平向应变较小,但竖直方向上的应变随着深度增加而增大,最下部测点的应变达到188.82 με。养护7 d时,淤泥固化土路基的比贯入阻力超过设计值,14 d后提升至1 MPa,明显高于石灰土路基。路基承载力在7 d和14 d均满足道路建设标准值,弯沉主要集中在280~300之间,满足设计标准值。

关键词: 淤泥固化土;流动度;无侧限抗压强度;应变分析;现场试验
中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)01-0056-08

Study on Deformation and Bearing Performance of Fluidized Solidified Silt Subgrade during Construction

JIANG Lei
[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: Based on the road construction project of Fengming Road affiliated with the Lego Park in Jinshan District of Shanghai, the field test research is conducted on the fluidized solidified silt backfill subgrade. First, the laboratory tests are performed to determine the fluidity and strength characteristics of the solidified silt in order to establish the optimal mix ratio for pouring the silt solidified soil subgrade on site. And the fiber Bragg grating sensors are embedded on site to collect the deformation and temperature data during the curing and hardening stages of the solidified silt layer. After the curing period, the tests are conducted to determine the structural performances of the subgrade. The results show that during the initial 75 h of curing, the temperature and strain changes of the silt solidified soil can be divided into three stages of rise, decline and stabilization. The temperature rises to 24.03℃ at 17 h and then begins to drop, and stabilizes after 56 h. The horizontal strain of the solidified soil at a depth of 26 cm is relatively small, but the vertical strain will increase with the increase of depth, and the strain at the lowest measurement point reaches 188.82 με. After 7 d of curing, the specific penetration resistance of the silt-solidified soil subgrade exceeds the design value. After 14 d, it will increase to 1 MPa, which is significantly higher than that of the calcareous soil subgrade. The bearing capacity of subgrade meets the road construction standard values at both 7 d and 14 d. The deflection is mainly concentrated between 280 and 300, meeting the design standard values.

Keywords: silt solidified soil; fluidity; unconfined compressive strength; strain analysis; field test

0 引 言

随着中国城市化进程加快,交通拥挤和土地资源紧张等问题日益突出。在公路、港口等城市建设工程中,每年挖出的渣土和淤泥达到数十亿立方米[1]。其中绝大部分被视为弃土,直接填埋处理,导致土地资源浪费和二次污染。因此,淤泥的再利用成为重要研究方向。淤泥主要处置方法包括排水固结和化学加固[2]。其中,前者存在占地面积大且固结时间长的问题,尤其对细粒淤泥不利;后者处理时间较短,并可以利用淤泥高含水率和低强度特性,将其制备成流态固化土。该材料在固化前具有优异的流动性和自密实性能,适用于复杂填充环境;固化后

收稿日期:2025-05-28
基金项目:上海市交通委2024年度科研计划(JT2024-KY-027)
作者简介:姜磊(1984—),男,本科,高级工程师,从事道路桥梁施工管理工作。

有一定的强度,兼具低渗透性、水稳性和环境友好性等[3]。对于市政工程,流态固化土施工时仅需轻度振捣即可满足复杂的填充环境,特别是在狭窄空间内的填筑作业中,具有显著的技术优势[4]。

流动度和强度是流态固化土最主要的工程性能,国内外众多学者针对不同的固化剂,研究适用于路基建设的流态固化土的流动性能和强度性能。易富等[5]研究了流态稻壳灰-地聚物固化土的净浆流动度,发现与稻壳灰的掺量、粒径呈负相关关系,凝结时间与稻壳灰掺量呈正相关关系。杨振甲等[6]通过矿渣-粉煤灰二元地聚物固化淤泥,研究发现掺入15%地聚物的固化淤泥28 d强度已满足规范要求。王聪聪等[7]研究工业固废赤泥、钢渣粉与水泥复合固化流态土,发现改变赤泥-钢渣粉掺量可以调控流态固化土工作性能,赤泥掺量为总重20%时,28 d龄期的抗压强度达到最大值4.67 MPa。Lee等[8]以当地的黏土和淤泥为原料制备低强度流态固化土,并通过无侧限抗压强度试验、直剪试验等室内试验验证了方案的可行性。

上述研究主要集中于室内试验,对真实现场环境下流态固化土的应用效果分析仍缺乏系统评估。而通过现场试验,骆嘉成等[9]发现固化剂对浅层淤泥的加固效果显著,在固化剂掺量为2%~8%时,浅层固化淤泥的承载力特征值达117~200 kPa。冯亚松等[10]在真实工业污染场地进行的研究表明,羟基磷灰石基固化土强度及承载力发展速度优于硅酸盐水泥固化土,但相同龄期的强度和承载力值却低于硅酸盐水泥固化土。王沛等[11]采用石灰和石灰-SH固土剂分别固化滨海盐渍土,并通过现场碾压试验获得固化土的回弹弯沉、加州承载比和回弹模量等指标,对比分析发现掺入SH固土剂显著提升了石灰土的力学指标和水稳性。然而,流态固化土即使强度上满足了工程的要求,但固化浆液中多余水分的蒸发会导致土体收缩和开裂,从而对固化淤泥的工程使用产生不利影响,这一现象在高含水率淤泥中尤为明显[12]。

因此,本研究通过室内试验确定了适用于路基建设的淤泥固化土最佳配比,为工程应用提供可靠依据。然后开展现场测试,对路基结构性能进行了评估,并与传统石灰土路基进行了对比,同时在养护阶段利用光纤光栅传感器等设备分析固化土的应变和温度变化。研究结果总结了淤泥固化土路基建设的全阶段工艺,为淤泥固化土的工程推广提供了理论依据,并为后续优化设计和施工质量控制提供了重要参考。

1　淤泥固化土的流动特性与强度特性

1.1　试验材料

试验选用工程场地钻孔桩产生的淤泥作为研究对象,取样深度为5~8 m,土样呈灰黑色。依据《土工试验方法与标准》(GB/T 50123—2019),将淤泥自然风干、磨碎后过2 mm筛,取筛下的淤泥测得基本物理性质见表1。试验淤泥还呈弱酸性,具有高含水率、高黏粒含量的特性。

表1　淤泥基本物理性质指标

含水率 ω/%	液限 ω_L/%	塑限 ω_P/%	塑性指数 I_P	比重 γ	密度 ρ/(g•cm^{-3})	pH
38.7	43.2	20.8	22.4	2.73	1.76	4.8

固化剂采用江苏坤泽科技股份有限公司生产的KZJ-H01型号固化剂。固化剂呈粉末状,颜色灰黑,质地细腻,其中的有效成分在固化剂本身创造的碱性环境中发生充分的水化、水解反应,生成水化胶凝产物,包裹并团聚原泥细颗粒,形成以胶凝物为主的骨架结构,从而具备一定强度和稳定性。

1.2　试验方法

固化淤泥的室内试验配比方案见表2。通过控制变量法研究不同水固比、固化剂掺量、龄期对淤泥固化土力学特性的影响。其中,水固比为水的总质量与固体的总质量之比,固化剂掺量为固化剂质量与拌合的固化土总质量之比。

表2　固化淤泥试验配比

分组	水固比	固化剂掺量/%	含水率/%
A	0.8	15	92.0
	0.8	18	94.4
	0.8	21	96.8
	0.8	24	99.2
B	0.9	15	103.5
	0.9	18	106.2
	0.9	21	108.9
	0.9	24	111.6
C	1.0	15	115.0
	1.0	18	118.0
	1.0	21	121.0
	1.0	24	124.0
D	1.1	15	126.5
	1.1	18	129.8
	1.1	21	133.1
	1.1	24	136.4

流动度试验参考《引气砂浆和引气灰浆的试验方法》（JHSA313.1992），流动度试验仪器和方法如图1所示。将内径和高度均为8 cm的空心圆柱测量筒放置在尺寸为40 cm×40 cm且带有对应刻度尺的测试板正中心，并分次倒入预拌合的流态固化土，倒入过程中敲击筒壁排出气泡，在装满后刮平表面并垂直提起测量筒。待固化土不再流动后，测量坍塌体最大和最小直径的平均值以获得流动度。

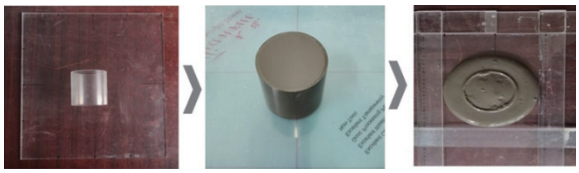


图1　流动度试验仪器和方法

无侧限抗压强度试验参考《土工试验方法与标准》（GB/T 50123—2019），流态固化土拌合完成之后15 min内倒入内径为3.91 cm、高为8 cm的有机玻璃模具，试样如图2所示。试样成型后36 h后脱模并放入温度（20±2）℃、相对湿度95%以上的标准养护室内进行养护。分别养护7、14、21、28 d后采用CTM-50万能试验机测试固化土强度，设定压力板位移速率为1 mm/min，设置完成后开始试验。

图2　无侧限抗压强度试样

1.3　试验结果分析

1.3.1　流动度分析

图3展示了是水固比0.8、0.9、1.0、1.1条件下淤泥固化土流动度试验结果，在不同固化剂掺量下，各组试样的流动度变化范围分别约为270~300、350~380、420~450、490~520 mm。根据试验结果发现，水固比和固化剂掺量对固化土流动度均有一定影响，其中水固比每增加0.1，流动度增加70~80 mm；而随着固化剂掺量的提高，固化剂与淤泥反应消耗水分的同时生成胶凝物质胶结土颗粒，固化土流动度会降低。

流态固化土材料具有自密实特性的最小流动度250 mm[13]，考虑到现场泵送过程中固化浆液流动随时间的下降，选取0.8水固比下流动度范围合适。

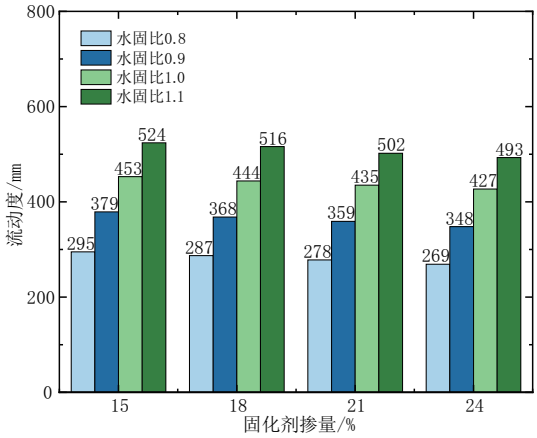


图3　不同水固比下固化剂掺量对流动度的影响

1.3.2　无侧限抗压强度分析

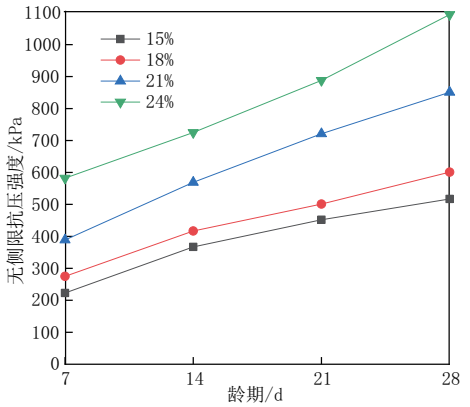
淤泥固化土的无侧限抗压强度见表3。在0.8水固比、24%固化剂掺量下，固化土可获得最高强度为1 094 kPa，相比0.8水固比下15%固化剂掺量的强度增加了112%；最低强度是在1.1水固比、15%固化剂掺量下的237 kPa，而相同水固比下24%固化剂掺量的固化土强度为691 kPa，相比增加192%。根据结果可以得出随着水固比的增加，固化土强度逐渐降低。随着固化剂掺量增加，固化土强度增加，其中水固比越大，固化剂掺量对强度影响越大。

表3　无侧限抗压强度试验结果

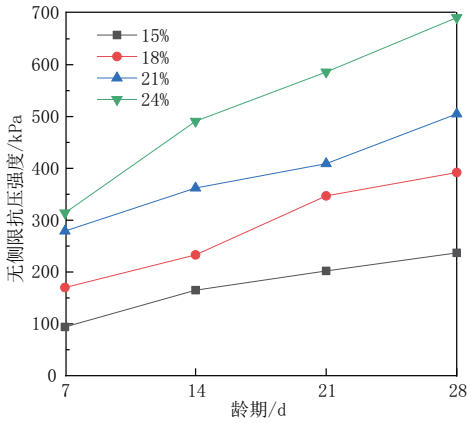
分组	水固比	掺量/%	7 d强度/kPa	14 d强度/kPa	21 d强度/kPa	28 d强度/kPa
A	0.8	15	223	367	452	517
	0.8	18	275	417	501	601
	0.8	21	389	569	721	851
	0.8	24	582	725	888	1 094
B	0.9	15	184	289	344	402
	0.9	18	225	393	477	568
	0.9	21	351	510	643	747
	0.9	24	426	608	771	903
C	1.0	15	135	249	312	354
	1.0	18	172	302	354	426
	1.0	21	288	448	559	645
	1.0	24	359	554	672	802
D	1.1	15	94	165	202	237
	1.1	18	170	233	347	392
	1.1	21	279	362	409	505
	1.1	24	314	491	586	691

此外，选取水固比0.8和1.1条件下的无侧限抗压强度进行了分析。如图4所示，试样的强度随固化剂掺量的增加而获得提高，且试样强度随龄期的深入差值也在逐渐增大。这是由于随着固化剂掺量

的增加和龄期的深入,固化剂与淤泥之间的反应更充分,两者反应所产生的产物增加,使固化效果更明显。



(a)0.8水固比



(b)1.1水固比

图 4　不同水固比下龄期对无侧限抗压强度的影响

结合《预拌流态固化土工程应用技术标准》(DBJ 51/T 188—2022)中应用于道路地基的流态固化土的 28 d 无侧限抗压强度需大于 0.8 MPa 的性能要求,后续工程使用 0.8 水固比下 24% 固化剂掺量的固化浆液。

2　现场测试内容与实施

2.1　测试内容

本试验采用流态淤泥固化土替代石灰土回填路基,因高含水率易增大养护收缩量、加快收缩速度并提高裂缝风险。而现场难以直接获取固化土内部的温度变化和应变,故多数研究通过室内试验分析。为获取实测数据,本次试验采用光纤光栅传感技术,具有高精度、抗电磁干扰和多点实时监测等优点,近年逐渐应用于道路结构响应监测[14-15]。且结合固化土的自密实性,能有效避免传感器受损并保持紧密贴合。

此外,为了综合评估淤泥固化土的固化效果,现场试验还选取了项目实际使用的石灰土路基作为对照组。具体研究内容如下:

(1)光纤光栅应变温度测试。淤泥固化土层现场施工初期阶段,通过埋设测试传感器,采集固化土层养护硬化过程中的应变和温度变化数据。

(2)静力触探测试。依据《土工试验方法与标准》(GB/T 50123—2019),通过进行静力触探测试对不同深度的淤泥固化土层强度进行分析,并与石灰土路段进行对比。

(3)静载荷试验。依据《建筑地基与基装检测技术规程》(DG/TJ 08-218—2017),选取 7 d 和 14 d 对 4 个施工路段进行静载荷试验并分析淤泥固化地基承载力。

(4)路基回弹弯沉试验。依据《路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019),淤泥固化土层养护硬化完成后,采用贝克曼梁法分别测试淤泥固化土和石灰土路基回弹弯沉。

2.2　现场实施

淤泥固化土路基试验依托于上海金山区乐高乐园附属枫明路道路建设项目,试验段位于枫明路面杖港桥以东道路段。道路中心桩号 K1+253.972 ~ K1+334.372,以道路北幅主车道作为试验对象,该路段长度为 80.4 m,平面总面积为 1 178.17 m^2,淤泥固化土路基设计厚度为 0.3 m。

参考室内试验并结合现场条件,现场确定的材料体积掺量为原泥 790 kg/m^3、水 560 kg/m^3、固化剂 150 kg/m^3。由于淤泥固化土具备一定的流动性和自密实性,对搅拌、运送、浇筑等施工环节提出了较高要求,需要做出合理规划并控制施工质量。综合考虑运输距离、浆液方量、材料特性、施工组织等因素,试验采用现场搅拌、即时泵送的方案,并设计了新型流动性基床填筑材料的现场施工工艺流程。试验现场如图 5 所示。

(a)传感器布设　　(b)泵送浇筑

图 5　试验现场

在淤泥固化土层施工前,试验段路铺设 30 m 砾石砂,并用压路机碾压至规定压实度。之后在布设传感器前通过卷尺及标线白灰确定测试点位并安置定位三脚架,将土压力盒受力面向上水平布置,FBG

传感器竖向绑定在支架一侧。

在实际布设过程中，考虑到淤泥固化土层厚度为 30 cm，且光纤光栅传感器尺寸较大，近距离布设时会相互干扰，因此传感器按 0.5 m 间隔布设在不同深度位置。竖直方向上，在一车道的 10、18、26 cm 深度处设置测点，编号为 A1、B1、C1。水平方向上，在固化土层 26 cm 深度处，将传感器布设在一、二、三车道正中间并间隔 3.5 m，测点编号为 C1、C2、C3。具体布置如图 6 所示。

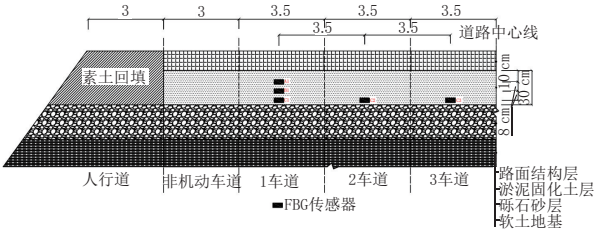


图 6　测试仪器布设路基纵断面（单位：m）

在淤泥固化土拌合阶段，使用两台搅拌斗挖机设备循环搅拌原泥 30 min，随后加水继续搅拌 1 h，测得浆液比重为 1.4，流动度 22 cm。加入固化剂后再搅拌 2 h，浆液比重提升至 1.5，流动度达 30 cm，满足泵送要求。通过预设管道泵送淤泥固化土至场地，泵送及浇筑控制在 1 h 内完成。铺摊整平后，表面覆盖塑料薄膜和土工布，连续洒水养护 14 d，确保固化土达到强度。

3　养护硬化阶段淤泥固化土的温度变化与应变分析

3.1　测试仪器

（1）光纤光栅传感器。本次现场测试采用上海真光捷慧物联网技术有限责任公司生产的光纤光栅应变监测传感器，实物如图 7 所示。

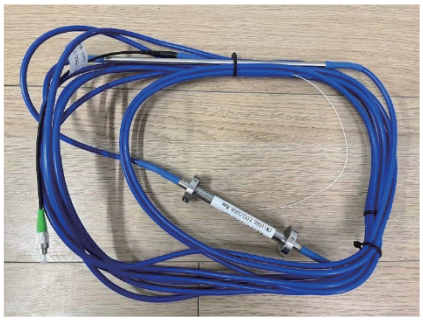


图 7　光纤光栅传感器

（2）光纤光栅信号采集仪。光纤光栅传感器数据的实时采集通过 FT910 型光纤光栅解调采集仪实现。该设备精准读取光栅波长信息，传输稳定并可联网传输至计算机，共有 16 个监测通道，分辨率 2 pm，精度 10 pm。解调采集仪如图 8 所示。解调仪的信号处理采用 OSA 光纤传感分析软件，可结合解调仪实现每 40 ms 对光纤光栅传感器波长的实时记录，单次最长连续监测时间可达 720 h。

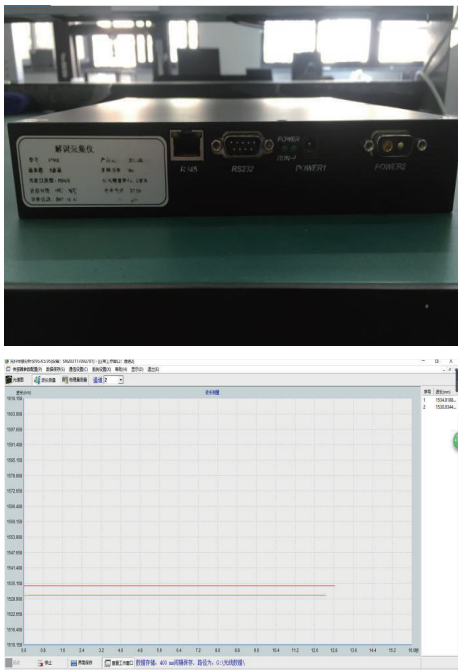


图 8　光纤光栅解调采集仪及系统软件界面

3.2　光纤光栅参数和标定

光纤光栅传感器通过采集光波长的变化来测量应变和温度，当被测构件发生变形时，传感器的光纤光栅区中心波长会随之变化，同时环境温度也会影响波长[16]。因此，在测试前需标定波长与应变、温度的数学关系及相关参数。表 4 列出了各测试点位光纤光栅传感器在测试环境温度下的零点波长和灵敏度系数。

表 4　光纤光栅传感器测量参数

测点	应变零点波长/nm	温补零点波长/nm	应变灵敏度系数	温度补偿系数	环境温度/℃
上部	1 549.573	1 547.036	0.001 87	0.63	20.3
中部	1 560.015	1 558.025	0.001 933	0.63	20.3
下部/左侧车道	1 537.084	1 534.924	0.001 787	0.63	20.3
中间车道	1 543.387	1 541.146	0.001 83	0.63	20.3
右侧车道	1 531.548	1 529.053	0.001 75	0.63	20.3

由于本次淤泥固化土测试过程中环境温度受到固化剂反应过程的影响较大，因此需对土体内部温度进行监测。固化土温度 T 计算公式如下：

$$T = 16\,935\,841\,702x^3 - 29\,483\,227x^2 + 156\,637x + b \quad (1)$$

$$x = \frac{\lambda_T - \lambda_{T0}}{\lambda_{T0}} \quad (2)$$

式中：λ_T 为温度测试波长，nm；λ_{r0} 为温度零点波

长,nm;b 为环境温度,℃。

通过温度补偿可以降低温度变化对应变测试结果的影响,固化土应变计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0) - K_T(\lambda_T - \lambda_{T0})}{K_\varepsilon} \tag{3}$$

式中:λ 为应变测试波长,nm;λ_0 为应变零点波长,nm;K_T 为温度补偿系数;K_ε 为应变灵敏度系数。

3.3　淤泥固化土温度变化与应变分析

固化土层浇筑完成后,持续监测了 75 h,将现场测试获得的数据经过处理后,图 9 展示了淤泥固化土层内部温度的变化规律。整个过程可分为上升、下降和稳定三个阶段。养护前期,温度在 17 h 内逐渐上升至峰值,沿水平方向 C1、C2、C3 测点温度分别达到 23.96、23.87、23.78 ℃,比初始温度平均上升约 3.57 ℃;沿竖直方向 A1、B1、C1 各测点温度分别升至 24.03、23.89、23.78 ℃,平均上升约 3.63 ℃。测点温度变化接近,表明固化剂拌合均匀,传感器测量准确。该升温阶段源于固化剂水化反应释放的大量热量,以最主要的硅酸三钙 C_3S 为例:

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

式中:水化硅酸钙凝胶(C-S-H)能够将土壤颗粒牢固地黏结并起到固化作用。峰值后,温度在 35 h 内迅速下降,一方面是由于水化反应速率减缓,放热量减少;另一方面则是由于反应消耗大量游离水及水分蒸发散热,导致土体产生收缩变形的趋势。至 56 h 后,温度接近环境温度,变化趋于稳定,表明主体水化反应已基本完成。

结合温度变化数据,利用式(3)对应变结果进行温度补偿后,图 10 展示了淤泥固化土层内部应变随时间的变化规律,可分为三个阶段。浇筑后前 17 h 为固化剂反应高峰期,温度上升,游离水蒸发,土体由液态转为半固态。在此阶段,尽管水化热导致温度显著上升,但由于土体尚处于可塑状态且固化剂的水化反应需进一步释放,因此水平方向应变极小,仅为 56 $\mu\varepsilon$。随后,固化反应继续,土体内部水分减少,由于水分消耗和蒸发,土体收缩效应显著增强,导致应变迅速增加,至 56 h 后固化土转为固态。75 h 后,C1、C2、C3 测点应变分别达到 188.85、182.68、196.49 $\mu\varepsilon$,表明同一深度固化土层应变差异较小,而垂直方向上测点深度对应变影响显著。具体来看,测试刚开始时,由于是固化剂反应的初始时间,各测点应变接近。但随着时间延长,因为下部土

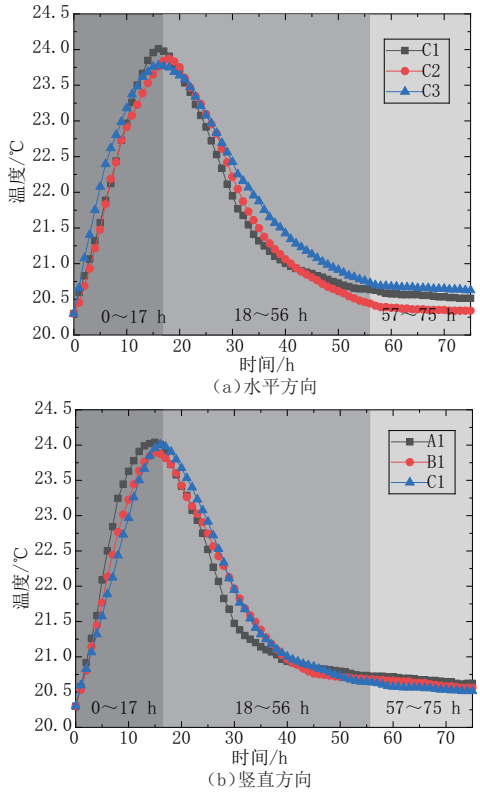


图 9　淤泥固化土层温度随时间变化规律

体受到上部土体自重应力作用,并且水分迁移路径较长、深层热量散发较慢,导致其反应时间较长,加剧了应变发展,所以其应变值明显大于上部和中部。综上,在淤泥固化土的施工中应重点关注深层区域的应变变化,采取适当措施控制整体均匀性和稳定性。

4　现场试验结果分析

4.1　静力触探试验

静力触探测试结果见表 5,淤泥固化土在养护 7 d 后比贯入阻力显著提升,各浇筑路段的阻力均超过工程建设要求的设计值(0.5 MPa)。淤泥固化土初期比贯入阻力略低于同龄期石灰土路基,但随着养护龄期延长,其比贯入阻力持续大幅提升,而石灰土路基的比贯入阻力因材料特性基本保持不变。这表明淤泥固化土在后期强度增长和承载能力方面表现优异,表现出比石灰土更好的长期性能优势。

4.2　静载荷试验

测试淤泥固化土路基和石灰土路基的地基承载力,选取 7 d 龄期淤泥固化土和石灰固化土的荷载-位移曲线进行分析。如图 11 所示,随着荷载的增加,曲线初始段为一条斜率陡峭的直线,累积沉降逐渐上升。此时荷载主要由土颗粒的弹性变形和土体中的微小孔隙的闭合来承担,荷载与位移呈近似线

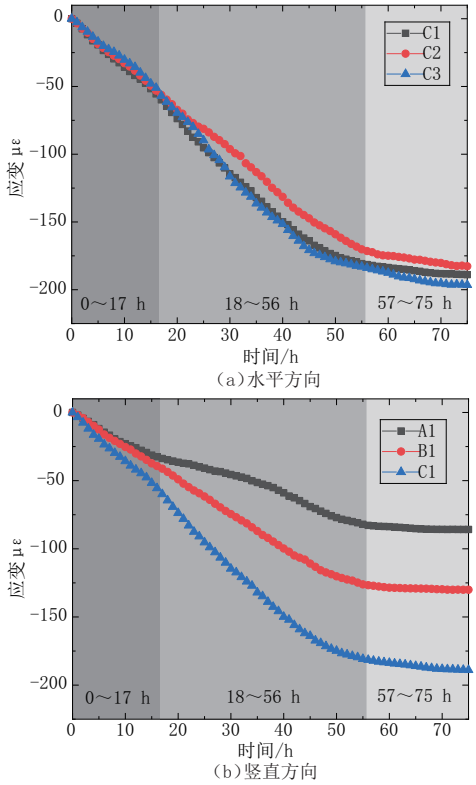


图 10　淤泥固化土层应变随时间变化规律

表 5　静力触探测试结果

路基材料	龄期 /d	沿深度方向的静探 ps 值/MPa		
		0.1 m	0.2 m	0.3 m
淤泥固化土	7	0.73	0.82	0.85
	7	0.65	0.74	0.79
	7	0.69	0.76	0.82
	7	0.59	0.61	0.77
	14	1.28	1.37	1.55
	14	1.46	1.57	1.73
	14	1.50	1.66	1.82
	14	1.35	1.49	1.63
石灰土	7	0.82	0.93	1.01

性关系，处于初始压实的弹性阶段。继续增加荷载后，曲线开始明显偏离直线，斜率逐渐减小并形成一个微弯的塑性起始点，此点标志着土体开始进入塑性变形阶段，卸载后土体将产生永久的塑性变形，当斜率接近 0 时则表明土体中形成了连续的剪切破坏面，土体结构整体失稳。在本次现场测试中，当荷载超过 80 kPa 时达到了现场固化土路基建设需要的设计标准值，此时曲线并未出现明显的陡降段。静载荷试验表明土体状态稳定，沉降量无剧增，未达到极限承载力，未发生挤出或压板周围裂缝。

具体的静载荷试验结果见表 6，可以发现淤泥固化土各路段在 7 d 和 14 d 的承载力均满足设计标准值。养护 7 d 时，最大沉降量平均为 21.75 mm，回弹

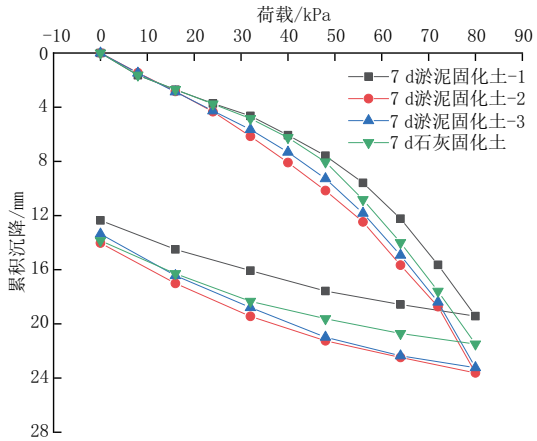


图 11　荷载-位移曲线

量平均为 8.63 mm，回弹率平均为 39.49%，各项指标与石灰土相差不大。根据室内试验表明，淤泥固化土后期强度增长速率要远远大于石灰土。因此，随着养护龄期的增加，其各项指标会优于石灰土。

表 6　静载荷试验结果

路基材料	龄期/d	最大加载量/kPa	最大沉降量/mm	回弹量/mm	回弹率/%
淤泥固化土	7	80	19.43	7.07	36.39
	7	80	23.62	9.59	40.60
	7	80	23.23	9.86	42.45
	14	100	18.21	5.79	31.80
	14	100	19.68	6.65	33.79
	14	100	23.73	6.86	29.91
	14	100	19.52	7.22	36.99
石灰土	7	80	21.49	7.63	35.50

4.3　路基回弹弯沉试验

弯沉测试结果见表 7。不同桩号对应依次浇筑的 4 仓淤泥固化土路基段，可以看出淤泥固化土路面弯沉主要在 280~300（单位：0.01 mm），均小于设计标准值 323（单位：0.01 mm），符合道路建设要求。常规石灰土路基弯沉值小于固化土路段，是由于淤泥固化土含水量较高，而路基土的含水量高会导致路基弯沉值的增加。

5　结　论

本文依托上海金山区乐高乐园附属枫明路道路建设项目开展了淤泥固化土试验段研究，现场测试研究了淤泥固化土路基的性能指标，得到结论如下：

（1）随着水固比的增大，固化土的流动度逐渐增加，而无侧限抗压强度则逐渐降低。固化剂掺量的增加虽然会降低流动度，但能显著提高固化土的强度，且在较高水固比条件下，固化剂的影响更为显著。基于室内试验，选取 0.8 水固比下 24% 固化剂掺

表 7　弯沉测试结果

路基材料	桩号	测试位置	弯沉值/0.01 mm
淤泥固化土	K1+270	一车道	300
		二车道	286
		三车道	286
	K1+290	一车道	290
		二车道	288
		三车道	282
	K1+310	一车道	296
		二车道	290
		三车道	298
	K1+330	一车道	296
		二车道	300
		三车道	298
石灰土	K1+370	二车道	226
	K1+390	二车道	266
	K1+410	二车道	242
	K1+430	二车道	262

量为工程参考。

（2）在淤泥固化土浇筑完成后，养护初期 75 h 内按照温度和应变的变化趋势可将整个过程划分为上升（0 ~ 17 h）、下降（18 ~ 56 h）和维持稳定（56 ~ 75 h）三个阶段。在水平方向上，固化土层应变差异较小；在竖直方向上，应变随深度的增大而增大。

（3）淤泥固化土的比贯入阻力随龄期显著提升并在 28 d 后远超设计要求的 0.5 MPa。静载荷试验表明，淤泥固化土各路段在 7 d 和 14 d 的承载力均超过标准值 80 kPa 和 100 kPa。弯沉试验表明，淤泥固化土路面弯沉小于设计标准值 323（单位：0.01 mm），符合道路建设要求。

综合室内试验和现场试验，淤泥固化土回填路基效果良好，且在强度增长和承载能力方面优于石灰土，能够满足路基填筑要求，可以作为流态路基填料，替代石灰土进行路基填筑施工。

参考文献：

[1] 刘帅，徐玉飞，詹进生，等. 国内流态固化土的研究与应用进展[J]. 新型建筑材料，2022，49（8）：167-171.

[2] 王保田. 高含水率淤泥的固结特性与改良技术[M]. 北京：科学出版社，2015.

[3] 郭聚坤，曹芯芯，马永明，等. 道路用水泥-粉煤灰流态固化土宏观力学性能与细观行为研究[J]. 硅酸盐通报，2024，43（11）：4107-4118.

[4] 韩会林. 流态固化土压缩特性及其在工程中的应用研究[J]. 工程技术研究，2024，9（10）：125-127.

[5] 易富，管茂成，李军，等. 稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析[J]. 水文地质工程地质，2022，49（2）：94-101.

[6] 杨振甲，何猛，吴杨，等. 矿渣-粉煤灰地聚物固化淤泥力学性能和路用性能研究[J]. 硅酸盐通报，2022，41（2）：693-703；724.

[7] 王聪聪，刘茂青，宋红旗，等. 赤泥-钢渣粉-水泥固化流态土性能试验研究[J]. 硅酸盐通报，2023，42（7）：2488-2496.

[8] LEE K H. Performance evaluation of modified marine dredged soil and recycled in-situ soil as controlled low strength materials for underground pipe[J]. KSCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 17（4）: 674-680.

[9] 骆嘉成，邵吉成，袁波，等. 分层加固法对温州淤泥类渣土加固的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40（S2）：3483-3492.

[10] 冯亚松，夏威夷，杜延军，等. 新型磷基固化剂固化稳定化电镀工业污染黏土现场试验研究[J]. 土木工程学报，2018，51（12）：90-100.

[11] 王沛，柴寿喜. 固化滨海盐渍土路用性能的室内试验与现场测试[J]. 工程地质学报，2011，19（3）：440-446.

[12] 张春雷，朱伟，范公俊. 水泥固化高含水率淤泥的收缩性质[J]. 河海大学学报（自然科学版），2010，38（3）：295-299.

[13] 李雅曦，王琴，张秋臣，等. 无机固化剂对流态固化土结构和性能的影响[J]. 材料导报，2023，37（S1）：156-162.

[14] 谭忆秋，王海朋，马韶军，等. 基于光纤光栅传感技术的沥青路面压实监测[J]. 中国公路学报，2014，27（5）：112-117.

[15] MOIRANGTHEM J S, SOURABH C, WEN-BO CHEN, *et al*. Applications of fibre Bragg grating sensors for monitoring geotechnical structures: A comprehensive review[J]. Measurement, 2023（218）：113171.

[16] 郦亮，谢长岭，冯立力，等. 一种新型光纤光栅应变计的温度补偿方法研究[J]. 城市轨道交通研究，2023，26（12）：179-183.