

文章编号:1673-9469(2023)04-0067-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.04.010

聚丙烯酰胺改善流态固化处理效果的试验研究

林泓民^{1,2}, 商志阳^{1,3}, 彭 劼^{1,3*}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235; 3. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究聚丙烯酰胺(PAM)对流态固化土的改善作用, 针对长江中下游河漫区广泛分布的软土, 研究了PAM掺量、液固比、灰土比对流态固化土的影响, 结果表明: PAM可以快速降低含水水泥流态固化土的流动度、提高黏滞性, 减缓水泥土前期的固化速度, 且可用净流动度定量描述PAM对流态固化土流动性的改善效果。由此得出, 不同初始液固比的流态水泥土在添加一定比例的PAM后其净流动度降低比例处于相同水平; 针对液固比为70%~80%的软土, PAM掺量建议控制在0.02%~0.03%, 使得流动度满足回填要求, 现场施工效果较佳; 同时PAM有效地提高了施工流程的自由度; 在此基础上, 获得了该土体动切力和流动度的关系, 可以较好地拟合实测数据。

关键词: 聚丙烯酰胺; 室内试验; 流动度; 净流动度; 黏滞性; 动切力

中图分类号: TG333.17

文献标识码: A

Experimental Study on Improving the Effect of Flow State Solidification Treatment with Polyacrylamide

LIN Hongmin^{1,2}, SHANG Zhiyang^{1,3}, PENG Jie^{1,3*}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China; 3. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to study the improvement effect of polyacrylamide (PAM) on the flow state solidification soil, the effects of PAM dosage, liquid-solid ratio, and ash soil ratio on the widely distributed soft soil in the middle and lower reaches of the Yangtze River were studied. The results showed that PAM can quickly reduce the flowability of cement-based flow state solidification soil, improve viscosity, and slow down the early solidification speed of cement-based soil. The improvement effect of PAM on the flowability of fluidized solidification can be quantitatively described by net flow rate. It can be concluded that the net fluidity of fluid cement soil with different initial liquid-solid ratios decreases at the same level after adding a certain proportion of PAM. For soft soil with a liquid-solid ratio of 70% to 80%, it is recommended to control the PAM content at 0.02% to 0.03% to ensure that the flowability meets the backfill requirements and the on-site construction effect is better. At the same time, PAM effectively improves the freedom of the construction process. On this basis, the relationship between the dynamic shear force and fluidity of the soil was obtained, which can better fit the measured data.

Key words: PAM; laboratory test; fluidity; net fluidity; viscosity; dynamic shear force

收稿日期: 2023-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578214); 江苏省交通厅科技转换项目(2021QD07)

作者简介: 林泓民(1998-), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事土地基固化方向的研究。

* 通讯作者: 彭劼(1971-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 教授, 主要从事软土地基固化方面的研究。

长江中下游河漫区广泛分布着高含水率软土,这些软土含水率数倍于自身液限、刚度差、强度低、难以自然成型、未经处理几乎无法利用,大量闲置很大程度上会造成资源和空间上的浪费,这无疑对城市化建设带来一定的阻力^[1]。传统处理的方法有许多,主要包括自然脱水、机械脱水、流态固化等几种手段^[2]。流态固化土是通过加入水泥等固化剂,搅拌成具有一定流动性的混合料^[3]后,通过浇筑和养护,硬化后形成具有强度的岩土工程材料。相比之下,流态固化技术减少了压实的工作量,处理量大,经济效益高,优点明显^[4]。

流态固化土的应用主要考虑其流动度、无侧限抗压强度、耐久性等因素,一般认为流动度是其最主要的性能之一^[5-6]。近年来,流态固化法是处理疏浚软土、管廊回填问题中的常用方法^[7-10]。然而对于流态固化土这类流体而言,宏观的流动度指标稍显粗略,朱鹏等^[11-12]借用流变学的工具探究其内在联系,推导了满足宾汉姆流体方程的流态固化土动切力和流动度的关系,且与实测数据拟合效果优异,这为流态固化土大规模浇筑提供了宝贵的指导建议。

流态固化土在实际施工中,经常受限于即拌即用的施工工艺,导致流动度波动大影响回填效果^[13],一般在水泥浆中掺入起到增稠、缓凝、保水作用的水溶性聚合物^[14-16]。聚丙烯酰胺(PAM)作为一种典型的水溶性聚合物,引起了国内外学者的关注^[17]。通过研究发现,PAM的掺入改变了水泥砂浆的微观结构,且对其流动性产生显著影响^[18];将PAM水泥净浆、胶材的流动度影响进行比较,发现随着PAM掺量的增大,二者流动度均得到降低,且水泥净浆影响更为显著^[19-20]。

综上所述,PAM对水泥基材料的性能均有明显提升。然而,国内外对PAM改性流态固化土的综合研究仍然缺乏。本文以长江中下游河漫区道路工程为背景,结合现场软土的工程特性,通过室内试验确定了流态固化方案,研究了PAM对流态固化土的改善效果,对该方法的进一步推广具有一定的指导意义和参考价值。

1 软土特性及处理方法的室内试验

1.1 试验材料

本项目中的开挖土取自于南京江北新区横江大道,其基础物理力学性质如表1所示。本研究用水泥为海螺牌PO42.5普通硅酸盐水泥,其物理性质如表2所示。所选用的PAM为阴离子型PAM。作

为一种典型的水溶性聚合物,主要由疏水主链和官能团-CONH₂组成^[21],外观常为白色粉末状,几乎不溶于有机试剂,溶于水时呈无色黏稠胶体状、无味、pH值呈中性,当温度高于120℃时其物理性质不稳定。

表1 土样基本物理力学性质指标

Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of soil samples

密度 /(g·cm ⁻³)	干密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙比	含水率/%	液限/%	塑限/%
1.53~ 1.58	0.85~ 0.93	1.89~ 2.16	70~80	30.4	16.5

表2 水泥的物理性能

Tab. 2 Physical properties of cement

密度/ (g·cm ⁻³)	比表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)	烧失量/%	标准稠度 用水量/%	凝结时间/min	
				初凝	终凝
3.10	370	1.99	26.8	180	365

1.2 室内试验及流态固化方案

1.2.1 流动性测试

按照表3的配制方案将原状土、蒸馏水、水泥、PAM混合搅拌,搅拌后进行流动性测试。处理后的流态固化土必须具备一定的流动性,本文采用美国、日本的平板圆筒法^[22],即将直径和高度为8cm的圆筒装满流态固化土,向上提起圆筒后测量坍塌体在平板上形成的最大直径与最小直径的平均值,如图1。

表3 不同PAM掺量下的流态固化室内试验配合比方案表

Tab. 3 Table of mix proportion schemes for flow state curing laboratory tests with different PAM dosages

编号	灰土比	液固比
1	0.08	0.70
2	0.08	0.70
3	0.08	0.70
4	0.08	0.70
5	0.10	0.73
6	0.10	0.73
7	0.10	0.73
8	0.10	0.73
9	0.12	0.76
10	0.12	0.76
11	0.12	0.76
12	0.12	0.76
13	0.15	0.80
14	0.15	0.80
15	0.15	0.80
16	0.15	0.80

注:灰土比为水泥与原状干土的质量比值;液固比为水分与固相的质量比值;PAM掺量为PAM与原状干土的质量比值;PAM掺量为0‰、0.1‰、0.2‰、0.3‰、0.5‰,共5组,合计80种试样。

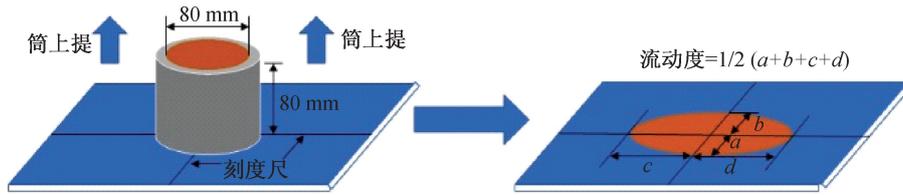


图1 平板圆筒法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flat cylinder method

1.2.2 黏滞性测试

针对70%液固比、10%水泥含量、PAM掺量为0‰、0.1‰、0.2‰、0.3‰、0.5‰的流态固化土,采用黏滞性试验,分析其掺入PAM后的变化关系。黏滞性试验采用奥地利安东帕生产的MCR302旋转流变仪,适用于低黏度液体、黏弹性液体、熔体、糊状样品、交替、软固体等样品的测试。可供选择的测试模式有六种。本试验选择旋转测试模式,该模式可测得剪切应力、剪切速率等相关曲线,其中剪切速率的范围为 $0.01\text{ s}^{-1} \sim 2\ 500\text{ s}^{-1}$,为减少时间对试验过程的影响,每次测试时间固定为10 min。

2 试验结果

2.1 流态固化土的流动性

2.1.1 液固比、水泥对流动度的影响

液固比是影响土体流动度的重要因素之一。图2表示了仅掺入10%水泥的土体流动度与液固比之间的关系。随着液固比的升高,70%、73%、76%、80%液固比所对应的流动度为292.5、322.5、382.5、432.5 mm,流动度与液固比正相关。这是因为土中大量的自由水增加了土体流动性,从而提高了流动度,这与丁建文等^[8]的研究结果一致。

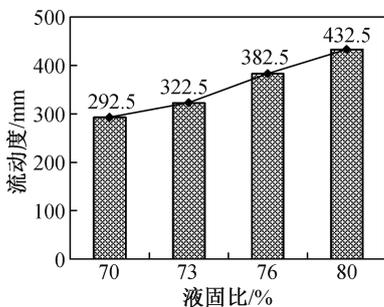


图2 流动度与液固比关系

Fig. 2 Relationship between fluidity and liquid-solid ratio

水泥的添加可以降低流态固化土的流动度,这是因为水泥与水混合之后会迅速发生水化反

应,消耗了其中一部分水,所以流动度有所降低,但改善效果并不明显^[23]。如图3所示,在不同液固比状态下,流态固化土的流动度随着灰土比的增大而小幅度减少。若只添加水泥降低流动度,以此符合流态固化土施工过程中对于流动度的要求,则水泥用量过大,且不经济环保。

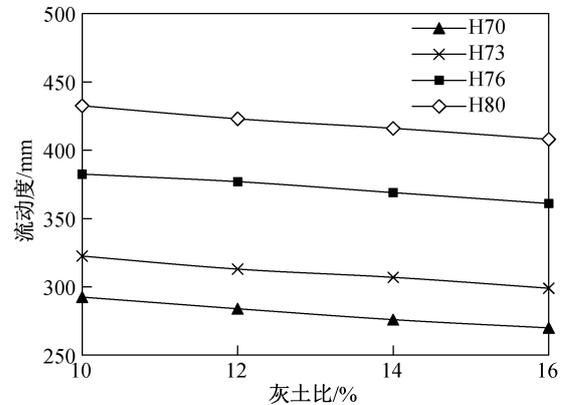


图3 流动度与灰土比关系

Fig. 3 Relationship between fluidity and cement-soil ratio

2.1.2 PAM对流动度的影响

PAM的掺入可显著降低待处理回填土的流动度,以满足流态固化施工要求。由于土体液固比介于70%~80%,即使添加一定量水泥,其大多数流动度仍超过300 mm,不满足现场回填要求。不同PAM掺入量的流动度数据如图4所示。加入PAM后,不同液固比土体的流动度与掺量负相关,且掺量小于0.03%时,下降幅度最大。这是因为PAM分子链上的氨基(-NH₂)可以与水分子形成氢键,从而限制了水分子的运动^[24]。此外,聚合物链与氢键纠缠形成的网络结构进一步增加了分子间的吸引力^[25]。为满足流动度在(200±20) mm的要求,掺量建议控制在0.02%~0.03%。

2.1.3 净流动度

从图4可知,掺入PAM后,不同液固比土体的流动度变化值略有不同。为了量化PAM增稠的效果,本文借鉴了净流动度^[26]参数。

$$d = D - f \tag{1}$$

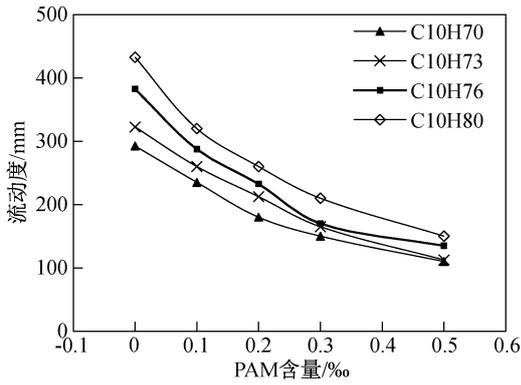


图4 PAM添加量与流动度关系

Fig. 4 Relationship between the amount of PAM added and fluidity

式中, d 为净流动度; D 为试验测得的流动度; f 为土体试样的初始直径。

在本文流动度试验中, 所用容器的直径为 80 mm, 因而式(1)中 f 取值为 80 mm。净流动度消除了土体试样初始直径的影响, 可以进一步真实地反映待处理土体的流动性能。

将不同液固比土体在不同 PAM 添加量下的净流动度值及降低比例进行了对比, 结果见图 5、图 6。从图 5 可以发现净流动度与 PAM 掺量呈负相关, 其趋势与流动度一致。由图 6 可得, 在分别添加 0.01%、0.02%、0.03%、0.05% 比例的 PAM 后, 不同液固比土体的净流动度的降低比例分别维持在 70%、50%、35%、15%。以上可以表明, 在添加一定比例的 PAM 增稠剂后, 待处理土体的净流动度降低比例是基本保持一致的, 因初始液固比不同波动较小。在工程实际应用中, 已知某液固比下的土体在添加增稠剂后净流动度的降低比例, 可以预测同类土体其他液固比条件下的净流动度, 从而预测增稠剂的流动改善效果。

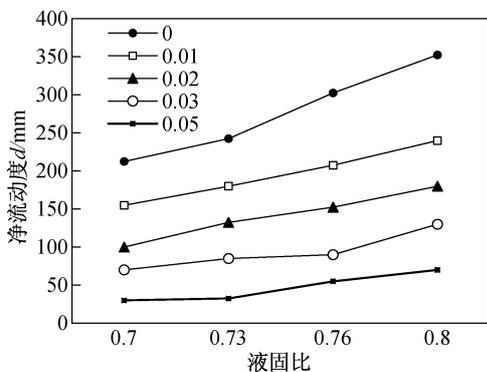


图5 液固比与净流动度关系

Fig. 5 Relationship between liquid solid ratio and net fluidity

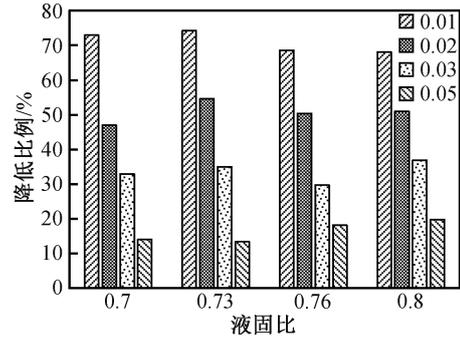


图6 液固比与净流动度降低比例关系

Fig. 6 Relation between liquid-solid ratio and net fluidity reduction ratio

2.1.4 流动度讨论

本文通过室内试验证明了 PAM 掺量会对土体流动度产生影响。事实上, 许多学者在流态固化领域已经使用其他外掺剂改善土体的流动度。通过整理现有高液固比(液固比大于两倍液限)土体改良的文章, 发现不同文献在取得良好效果时所对应的外掺剂千差万别, 且掺量比例未统一, 不易总结出其间的规律。在混凝土领域常用外掺剂与干土比值即灰土比作为考量外掺剂的关键指标。本文受其启发, 计算已有文献中发挥作用的外掺剂对应的灰土比变化值, 并统计外掺剂加入前后的流动度变化值, 并将数据汇总于表 4。

表4 现有文献外掺剂数据汇总表

Tab. 4 Summary of admixture data in existing literature

文献来源	外掺剂	处理对象	流动度变化/mm	灰土比变化值/%
纪文栋 ^[26]	SAP	重塑土	70	1
丁建文 ^[8]	水泥+工业废渣	重塑土	20	3.8
朱鹏 ^[11]	1.6 cm 聚丙烯纤维	重塑水泥土	18	1.5
冯忠民 ^[27]	粉煤灰	重塑水泥土	60	18
Lee ^[22]	水泥	重塑土	50	10
本试验	425 硅酸盐水泥	重塑水泥土	10	2
本文	PAM	重塑水泥土	196.5	0.02

通过整理分析以上学者和本文试验数据可以发现, 针对高液固比土体, 最初加入水泥时重塑土的流动度改变较为明显。但若想进一步降低流动度以达到施工标准, 针对水泥土流动度的改善, 大多数添加辅助外掺剂或继续加入水泥的措施改善效果一般, 且原材料耗损量大。在对比中可以发现, 本文采用的 PAM 可以大幅度减小水泥土的流

动度以期符合流态固化施工要求,处理效果明显,且掺入比较小,可以获得较大的工程效益。

2.2 流态固化土的黏滞性

2.2.1 黏滞曲线类型

根据流体剪切力和剪切速率的关系形成的黏滞曲线方程共分为四个类型,如图 7 所示, τ 为剪切应力,Pa; μ 为液体的黏度,Pa·s; γ 为剪切速率, s^{-1} ; τ_0 为剪切屈服应力,通常也可称为为动切力; n 为流动指数, n 值小于 1,是非牛顿性的量度,与 1 相差越多,非牛顿性越强。

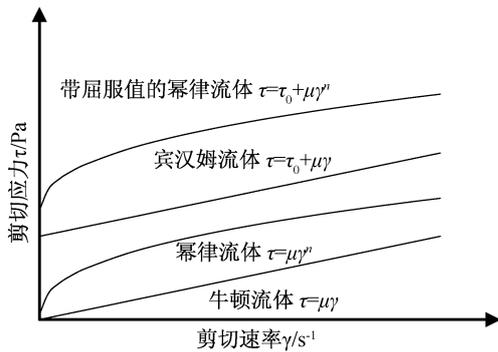


图 7 黏滞曲线方程

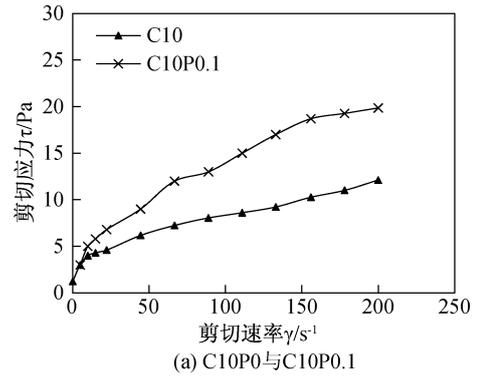
Fig. 7 Viscosity curve equation

2.2.2 PAM 对黏滞性的影响

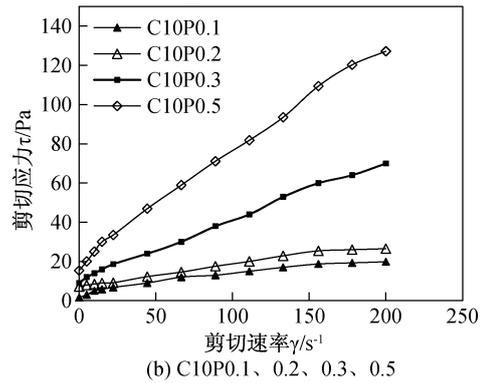
水泥土与掺入 0.1% PAM 的黏滞曲线如图 8(a)所示,不同 PAM 掺量的黏滞曲线变化如图 8(b)所示。总体来看,PAM 的掺入可以显著提高流体的黏滞性。由图 8(a)可知,水泥土和掺入 PAM 后的水泥土从黏滞性曲线来看,可认为是两条不过原点的直线,都为流动度较大的宾汉姆流体,因此一定掺量的 PAM 并没有改变流体类型。二者的剪切应力都随着剪切速率的增大而增大,但从斜率上可知,加入 PAM 后流体黏性增强,这说明 PAM 对水泥浆体的絮凝效果较好,促进了水泥浆体结构的形成^[14]。从 8(b)可知,PAM 掺量的增加对流体黏滞性有一定的影响。四种流体的剪切应力都与剪切速率正相关,但相同的剪切速率下,PAM 掺量越多,剪切应力越高,流体黏滞性越大,而黏滞性可以看作是流动度的微观体现,这与上文流动度测试的结论一致。

2.2.3 时间对黏滞性的影响

图 9 是各流体在一定时间静置后的黏滞性曲线,易得出 PAM 的缓凝作用使得水泥土的黏滞性更加稳定。从图 9(a)可得,随着时间的推移,水泥水化过程的发生,使得水泥土的稠度迅速增加^[15],



(a) C10P0与C10P0.1



(b) C10P0.1、0.2、0.3、0.5

图 8 流态固化土黏滞曲线

Fig. 8 Viscosity curve of fluid-solidified soil

并且在 $100 s^{-1}$ 的剪切速率下,剪切应力随着时间不断增大,两个小时剪切应力近乎提高到原来三倍。因此在工程实际中,无其他外掺剂的水泥土在搅拌后若未能迅速浇筑,则其快速黏滞的特点将极大地影响施工流程。由图 9 可以看出,加入 0.1% 的 PAM 后,黏滞性在前两个小时几乎没有明显变化,相当稳定。掺入 0.2% 和 0.3% PAM 的水泥土虽然随着时间黏滞性发生了波动,但在相同剪切速率下,剪切应力值的波动不超过 20%。但掺入 0.5% 的 PAM 后,黏滞性波动略为明显,剪切应力最大波动接近 50%,但仍然比未加 PAM 的水泥土稳定。

PAM 之所以可以稳定水泥土稠度,是因为其与水泥中 Ca^{2+} 发生相互作用,延缓了 C-S-H 凝胶的生成^[16],从而稳定了稠度。PAM 易吸附在水泥颗粒表面,交联水泥颗粒。PAM 也会起到润滑缓凝作用,类似于其他水溶性聚合物,但这种作用通常弱于絮凝作用。黏滞曲线的变化是絮凝效应和润滑缓凝效应相互竞争的结果。当 PAM 含量达到一定值时,随着时间的推移,PAM 的润滑作用开始表现出优势,在水泥浆体中的润滑作用比絮凝作用更明显。PAM 可以吸附在水泥颗粒表面,进一步减小了水泥与水的接触面积。这可能会导致溶液中浓度的降低,延缓水化产物的沉淀^[24]。

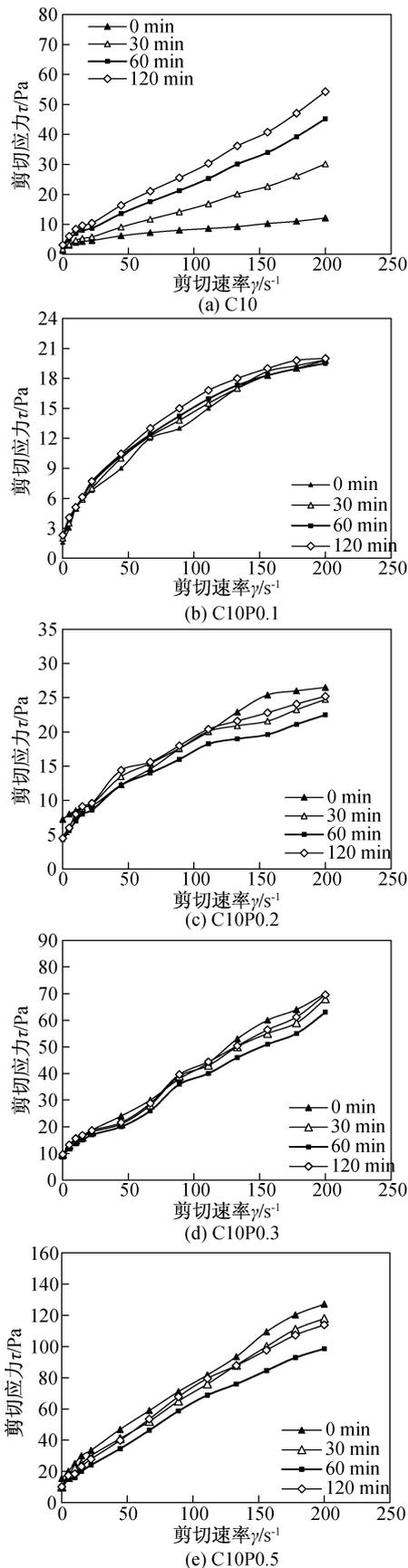


图9 流态固化土黏滞曲线与时间关系图
Fig. 9 Relationship between viscosity curve and time of fluid-solidified soil

2.2.4 拟合方程

为了定量地分析流态固化土的黏滞曲线、流动度之间的关系,各参数见表5。由表可得,流态固化土的剪切应力与剪切速率都线性相关,拟合度较好,即符合宾汉姆流体条件。随着PAM的掺入,动切力与黏滞系数因PAM的絮凝作用均得到了提升^[11]。同时可以发现,宏观层面的流动度与黏滞参数也存在某种联系。我们通常认为黏滞系数表征了流体开始流动后流动快慢,而动切力则决定了流体在力作用(土体自重)下能否进行流动。黄英豪等^[12]通过幂函数拟合了流动度与动切力的关系,因此本文也对二者进行幂函数拟合,详见图10。该函数较好地拟合了动切力与宏观流动度的关系,我们可以看出黏滞参数是决定软土宏观流动性的内在原因,拟合方程很好地将二者紧密连接起来,这对今后大规模的流态固化施工具有一定的参考价值。

表5 黏滞曲线参数
Tab. 5 Viscosity curve parameters

PAM 掺入量	流体类型 (方程)	τ_0/Pa	$\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	R^2	D/cm
0%	宾汉姆流体	3.26	0.06	0.95	29.25
1%	宾汉姆流体	4.13	0.09	0.96	23.50
2%	宾汉姆流体	7.56	0.11	0.99	18.00
3%	$\tau = \tau_0 + \mu\gamma$	10.71	0.30	0.99	15.00
5%	宾汉姆流体	19.73	0.56	0.99	11.00

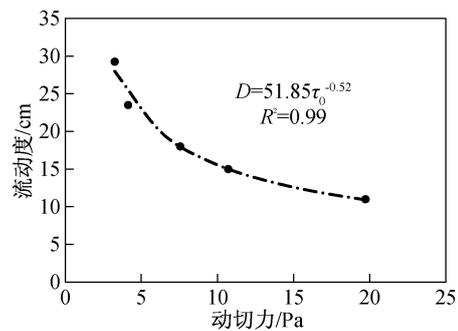


图10 动切力与流动度关系
Fig. 10 Relationship between dynamic shear force and fluidity

3 结论

1) 仅掺入水泥时,液固比是影响流态固化土的重要指标之一。随着灰土比的增加,流动度虽然有所降低,但影响不显著。PAM的掺入可以快速降低含水水泥流态固化土的流动度。针对液固比为70%~80%的软土,PAM的掺量为0.02%~

0.03%时,工程效果最佳。

2)不同初始含水率的水泥土在添加一定比例的PAM后其净流动度降低比例处于相同水平。PAM的加入缓解了前2个小时水泥固化土快速硬化的缺陷,有效地提高了施工流程的自由度。

3)提出了可以预测软土流态固化土动切力和流动度关系的经验公式,此公式可为流态固化土大规模浇筑提供设计参数和施工指导。

参考文献:

- [1] 刘松玉,曹菁菁,蔡光华,等. 压实度对MgO碳化土加固效果的影响及其机理研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(08): 30-38.
- [2] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002(4): 39-41+50.
- [3] 顾欢达,陈甦. 河道淤泥的流动化处理及其工程性质的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002(01): 108-111.
- [4] 赵晓冬. 流态水泥土工程设计研究[J]. 交通标准化, 2011(17): 93-95.
- [5] 赵晓冬. 流态水泥土施工技术研究[J]. 交通标准化, 2011(16): 122-125.
- [6] 张宏,凌建明,钱劲松. 可控性低强度材料(CLSM)研究进展[J]. 华东公路, 2011(6): 49-54.
- [7] 丁建文,洪振舜,刘松玉. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3591-3596+3603.
- [8] 丁建文,洪振舜,刘松玉. 疏浚软土流动固化处理与流动性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 280-284.
- [9] 刘成龙. 新型预拌流态固化土性能及回填施工工艺[J]. 山东交通学院学报, 2021, 29(04): 91-98.
- [10] 姚波,杜利鹏,万磊. 综合管廊流态水泥土基坑回填关键技术研究[J]. 江西建材, 2021(09): 244-245.
- [11] 朱鹏. 考虑纤维加筋效应的高液固比固化废弃泥浆流动及力学性状研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [12] 黄英豪,戴济群,徐锴. 新拌固化软土的流动性和黏滞性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(02): 235-244.
- [13] BESSAIES-BEY H, FUSIER J, HANAFI M, et al. Competitive Adsorption of PAM and HPAM on Siliceous Material[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 579: 123673.
- [14] HISSEINE O A, BASIC N, OMRAN A F, et al. Feasibility of Using Cellulose Filaments as a Viscosity Modifying Agent in Self-consolidating Concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 94: 327-340.
- [15] LIU J C, TAN K. Mechanism of PVA Fibers in Mitigating Explosive Spalling of Engineered Cementitious Composite at Elevated Temperature[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 93: 235-245.
- [16] ZHI F F, JIANG Y, GUO M Z, et al. Investigation on the Performance of Hydroxyethyl Methyl Cellulose Modified Cement Mortars with Portland Cement-calcium Sulfoaluminate Cement Binders[J]. Construction and Building Materials, 2021, 283: 122721.
- [17] LI H X, NI D Y, LI L, et al. Insight into the Role of Polyacrylamide Polymer Powder on the Cracking in Plastic Period of Cement Mortar[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119914.
- [18] 孙增智,申爱琴,胡长顺. 聚丙烯酰胺改性水泥砂浆的强度与工艺研究[J]. 公路交通科技, 2006(04): 33-36.
- [19] 杨林,李从号. 絮凝剂(PAM)对水泥(胶材)净浆及混凝土性能的影响[J]. 混凝土世界, 2021(04): 80-83.
- [20] BESSAIES-BEY H, BAUMANN R, SCHMITZ M, et al. Effect of Polyacrylamide on Rheology of Fresh Cement Pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2015(76): 98-106.
- [21] ZHI F, JIANG Y, GUO M Z, et al. Effect of Polyacrylamide on the Carbonation Behavior of Cement Paste[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 156: 106756.
- [22] LEE L T. Method to Rapidly Assess the Index Properties of Fine Grained Dredged Materials[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, 27(5): 464-468.
- [23] 林泓民,白兰兰,彭劫,等. 含泥量对砂质土流态固化处理效果的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(03): 30-35.
- [24] YUAN Q, XIE Z L, YAO H, et al. Comparative Study on the Early Properties of Cement Modified with Different Ionic Polyacrylamides[J]. Construction and Building Materials, 2022, 339: 127671.
- [25] 程传铭. 不同锚固基团减水剂对新拌水泥浆体性能的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [26] 纪文栋,张宇亭,颜容涛,等. 高吸水材料改善高含水率软土流动性的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 281-286.
- [27] 冯忠民. 大连湾海底软土流动固化土室内试验研究[D]. 保定: 河北大学, 2020.

(责任编辑 周雪梅)