

# 流态固化土硬化过程抗水流冲刷特性试验研究

胡昕<sup>1</sup>, 庄涛<sup>2</sup>, 谭慧明<sup>2,3\*</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710032; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024; 3. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 水下流态固化土技术在对水下基础冲刷防护与修复方面应用越来越广泛, 其硬化过程历时抗冲刷特性反映着冲刷防护与修复的效果。为提升水下流态固化土冲刷防护的效果, 掺入絮凝剂, 通过室内抗水流冲刷试验, 探究其硬化全过程临界起动流速的历时变化特性。絮凝剂的掺入能显著提升固化全过程的抗冲刷能力, 黄原胶对流态固化土的起动形态和固化初期临界起动流速影响最显著, 醚类高分子 UWB-II 型(UWB)和聚丙烯酰胺(PAM)效果次之, 在固化后期都促进水化反应提升了流态固化土的抗冲刷能力。在 PAM 或 UWB 中掺入微量黄原胶形成复合絮凝剂, 既能提升流态固化土初期抗冲刷能力, 又能优化冲刷起动形态, 还可以促进水化反应提升后期抗冲刷能力。UWB-黄原胶复合絮凝剂中对提升流态固化土抗水流冲刷能力作用更加明显, 而 PAM-黄原胶复合絮凝剂的流态固化土在各时段均具有更高的临界起动流速, 并且 PAM 的掺入量也更小, 具有更好的经济性。此外, 通过指数关系式对流态固化土历时临界起动流速进行拟合, 相关系数均高于 0.95。

**关键词:** 流态固化土; 抗冲刷强度; 絮凝剂; 临界起动流速; 硬化过程; 冲刷试验

中图分类号: U654

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2025)07-0047-09

doi: 10.7640/zggwjs202507007

## Experimental study on water scouring resistance characteristics of flowable solidified soil during curing process

HU Xin<sup>1</sup>, ZHUANG Tao<sup>2</sup>, TAN Hui-ming<sup>2,3\*</sup>

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Shaanxi Xi'an 710032, China; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defense Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

**Abstract:** Underwater flowable solidified soil technology is more and more widely used in the field of scour protection and repair for underwater foundations, and the scour resistance characteristics of its curing process reflect the effect of scour protection and repair. In order to improve the effect of scour protection of underwater flowable solidified soil, flocculant was added, and the diachronic variation characteristics of the critical incipient flow rate in the whole process of curing were explored through the indoor water scouring resistance experiment. The incorporation of flocculant can significantly improve the scour resistance ability of the whole curing process, and xanthan gum has the most significant effect on the starting form and critical incipient flow velocity of the flowable solidified soil at the beginning of curing, followed by ether polymers UWB-II(UWB) and polyacrylamide(PAM), which promoted the hydration reaction in the later stage of curing and improved the scour resistance ability of the flowable solidified soil. Adding a trace amount of xanthan gum to PAM or UWB to form a composite flocculant can improve the initial scour resistance of flowable solidified soil, optimize the scouring incipient form, and promote the hydration reaction to improve the later scour resistance ability. The UWB-xanthan gum composite flocculant has a more obvious effect on improving the water scouring resistance of the flowable solidified soil, while the flowable solidified soil of PAM-xanthan gum

收稿日期: 2024-11-15 修回日期: 2024-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078187); 西北电力设计院有限公司技术创新项目(KC-2022-001)

作者简介: 胡昕(1979—), 男, 四川遂宁人, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事地基基础工程研究。

\*通讯作者: 谭慧明, E-mail: thming2008@163.com

composite flocculant has a higher critical incipient flow velocity at all times, and the amount of PAM is also smaller, which has better economy. In addition, the critical incipient flow velocity of the flowable solidified soil was fitted by exponential relation, and the correlation coefficients were higher than 0.95.

**Key words:** flowable solidified soil; scour resistance strength; flocculant; critical incipient velocity; curing process; scour experiment

## 0 引言

随着我国海洋空间利用开发的大力发展,海上风电、跨海大桥、海底隧道以及人工岛等涉水建筑物大量兴建。涉水建筑物的环境由于受水流、波浪等作用强烈,对水下回填与冲刷防护等也提出了更高的要求<sup>[1-4]</sup>。同时,在工程建设中又涉及大量废弃土、疏浚土等,工程性质差,处理工序繁杂且堆放又造成土地资源的浪费<sup>[5]</sup>。因此,废弃土的资源再利用成为热点,其中流态固化土备受关注。所谓流态固化土,就是以工程废弃土为主要原料,按照一定比例与固化剂、水和改性外加剂搅拌均匀而形成的具有一定强度、流动性、具备自密实效果的填筑材料<sup>[6-7]</sup>。目前关于流态固化土的研究重点是强度和流动性。已有研究表明,盾构施工、就地开挖等产生的渣土经改良后回填土强度和流动性均满足管廊工程回填的要求<sup>[8-9]</sup>。黄英豪等<sup>[10]</sup>对新搅拌固化淤泥的流动性和黏滞性进行了试验研究,认为初始含水率对固化土的流动特性影响显著,黏滞特性是决定淤泥宏观流动性的内在原因。朱伟等<sup>[11]</sup>分析了不同类型的减水剂等外加剂应用于渣土改良时对强度和流动度的影响。盛传明等<sup>[12]</sup>分析了不同增稠剂对水下流态固化土抗分散性能的影响,袁建中<sup>[13]</sup>和 Ma 等<sup>[14]</sup>则通过现场试验和室内试验验证了水下固化土对桩基础冲刷修复的有效性。

以上研究表明,流态固化土对于水下结构的冲刷防护与修复效果良好,能抵御一定强度的水流冲刷,但目前关于流态固化土抗水流冲刷性能系统研究鲜有开展,特别是流态固化土临界起动流速在固化全过程的变化特点,而抗冲刷特性与流态固化土固化前在水流作用下的留存率密切相关,直接影响流态固化土在冲刷修复与防护工程中的有效性和经济性。因此,本文通过开展水下流态固化土抗水流冲刷室内试验,探究水下流态固化土临界起动流速随固化时间变化的历时特性,揭示不同种类絮凝剂改良水下流态固化土起动现象的差异特征并明确了起动标准,阐明了复合絮

凝剂对提升水下流态固化土抗水流冲刷能力的改良机制,分析了絮凝剂种类和掺量对水下流态固化土历时临界起动流速的影响规律,进而建立了水下流态固化土历时临界起动流速拟合经验公式,为流态固化土在水下回填与冲刷防护的设计施工、推广应用提供参考依据。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

本次试验土料取自南京江宁某基坑开挖废弃土,为灰黑色粉质黏土。试验前将土体粉碎,并筛去石块、树叶等杂质,再将土样放置空地处进行自然风干,风干土的主要物理性质见表1。选用P·O 42.5型水泥为主要固化剂,主要参数如表2所示。为提高流态固化土在凝固前的黏性以抵御水流等环境水力作用,本次试验选用了黄原胶、醚类高分子UWB-II型和聚丙烯酰胺(PAM)等3种絮凝剂开展对比研究。黄原胶呈黄色粉末状,作为食品添加剂可用作糖果、水果与烘焙食品等。UWB-II型为工程常用絮凝剂,外观为灰黑色粉末状颗粒。聚丙烯酰胺(PAM)呈白色粉末或半透明颗粒,本试验选定阴离子1 800万分子量的种类。此外,为保证流态固化土的流动性,还使用了聚羧酸减水剂。

表1 风干土物理性质

Table 1 Physical properties of air-dried soil

初始含水率 $\omega/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 $I_P/\%$
4	39.7	14.6	25.1

表2 水泥参数

Table 2 Cement parameters

凝结时间/min		安定性	烧失量/%	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
初凝	终凝			3 d	28 d	3 d	28 d
225	275	合格	1.36	$\geq 17$	$\geq 42.5$	$\geq 3.5$	$\geq 6.5$

### 1.2 试验仪器与方法

本试验采用河海大学自主设计的封闭有机玻璃矩形管道水槽进行水流冲刷试验。试验装置主要包括水泵、PVC水管、流量阀、进水阀、排气

阀、超声波流量计、矩形玻璃管道、测压管、土样筒、顶推装置、调压阀、蓄水池等。其中矩形玻璃管道的断面尺寸有效长度为 2.5 m, 固化土拌合物倒入土样筒内后装至玻璃水槽内, 土样筒在水流上下游两段各布置 1 个测压管, 上游测压管距土样筒中心 0.9 m, 下游测压管距土样筒中心距离 0.4 m, 土样筒的内径为 9.8 cm。超声波流量计可以读取水管的瞬时流量, 当流量阀开至最大时管道流量可达到 40 L/s, 通过换算矩形玻璃管道内的最大流速可达到 8.88 m/s。在灌水的初期或者流速较大时, 排气管能消除管道内夹杂的气泡, 稳定流态, 保证超声波流量计的数据准确。试验装置见图 1。

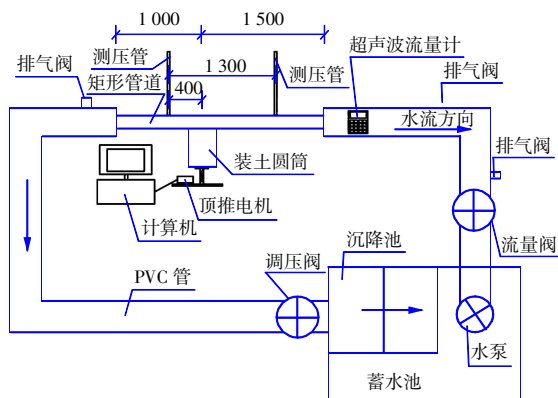


图 1 试验装置图(mm)  
Fig. 1 Diagram of the test setup(mm)

试验时, 首先将风干后的土料放入粉碎机过 2 mm 筛进行粉碎备用, 并取样烘干测定风干土含水率, 再按照设计配合比称取各材料所需量, 倒入搅拌容器内的顺序为黏土、水泥、絮凝剂、减水剂, 使用搅拌机将混合物搅拌均匀, 最后倒入所需加水量继续搅拌 5 min, 使拌合物搅拌充分、混合均匀。随后, 将流态固化土拌合物装入土样筒内, 通过顶推装置将筒内的拌合物顶推至与矩形玻璃管道底部齐平。开动进水阀使水流以较小的流量缓慢灌入水管内, 对拌合物不产生扰动, 灌满水管道后水流在测压管的两侧开始上升时关闭进水阀。此时打开水泵, 缓慢开启流量阀, 通过逐步调整流量阀的开启程度来实现流速的逐步增大。为了便于测压管数据的读取, 在流量阀开启的同时转动调压阀来控制测压管的高度, 将两侧水压的大小控制在一定的范围内, 在试样起动状态时再读取两侧测压管的数值, 进而计算出流态固化土在水流作用下所受的切应力。由于从拌

合物倒入至土样筒内, 到将水流灌满水管需要一定时间, 因此每个试验组次测试从开始制样 0.5 h 后测定临界起动状态。试样在某一流量下所受到的水流切应力采用式(1)进行计算:

$$\tau=\frac{P_1-P_2}{L}R$$
(1)

式中:  $\tau$  为床面切应力;  $P_1$  与  $P_2$  分别为上下游测压管的读数;  $L$  为上下游测压管的间距;  $R$  为矩形管道的水力半径。

1.3 试验方案与组次

流态固化土在固化过程中的抗冲刷能力决定其水下留存率。本次试验添加絮凝剂提高流态固化土的临界起动流速, 通过流态固化土初期起动流速值控制絮凝剂掺量, 确定固化剂和外加剂的主要范围。此外, 还将不同絮凝剂按比例组合形成复合絮凝剂, 重点分析絮凝剂种类与掺量对流态固化土抗冲刷能力历时变化的影响。具体试验组次见表 3。

表 3 水下流态固化土抗冲刷试验组次表  
Table 3 Table of scour resistance test groups of underwater flowable solidified soil

组次	含水率/ %	水泥掺 量/%	黄原胶 掺量/%	PAM 掺量/%	UWB 掺量/%	减水剂 掺量/%
1	70	20	0.037 5	0	0	0.65
2			0	0.025 0	0	0.65
3			0	0	0.1	0.65
4			0	0	0.3	0.65
5			0.001 0	0.025 0	0	0.65
6			0.003 0	0.025 0	0	0.65
7			0.004 0	0.025 0	0	0.65
8			0.005 0	0.025 0	0	0.65
9			0.001 0	0.037 5	0	0.65
10			0.005 0	0.037 5	0	0.65
11			0.001 0	0	0.1	0.65
12			0.003 0	0	0.1	0.65
13			0.004 0	0	0.1	0.65
14			0.005 0	0	0.1	0.65
15			0.006 0	0	0.1	0.65
16			0.004 0	0	0.3	0.65
注：各组分掺量百分比以干土质量为基数确定。						

2 试验结果分析

2.1 水流作用下水下流态固化土起动现象分析

水流作用下土样的起动具有一定随机性, 目测法仍然是目前大部分学者观测土样起动常用方法<sup>[15]</sup>。流态固化土在初凝前处于具有一定黏性的

液体状态,随着水泥水化反应的进行,逐步硬化为失去流动性的塑性体,抗冲刷能力逐步提升,并最终定型为具有一定强度的固体,水流作用下的起动现象也随时间有所变化。总体而言分为3种类型:个别起动,即在流态固化土表面仅有个别的土样颗粒团不连续、间歇性地起动;少量起动,即土样表面已经凹凸不平,在平整床面或突起的部分以微团的形式运动,大部分都不连续,而对于凹坑内一般出现连续性的少量雾状物;普遍起动,即此时土样表面不平整,出现较多的凹坑,在冲刷坑内微团连续运动且出现大量雾状物。

试验结果表明,加入不同的絮凝剂,水下流态固化土拌合物起动现象差异明显。加入黄原胶的试验现象差异最为显著,试样(组次1)表现出较强的黏稠性,虽然拌合物仍具有流动性,但在拌和结束0.5 h已经能够抵御较大的水流作用力。图2为仅加入黄原胶的固化土拌合物的冲刷试验过程,图2(a)为初始状态,拌合物与矩形管道齐平,水流从右向左流动;随着流速的增大,土样表面发生变形,迎水面出现一定的坡度,边壁的土样下凹,中心部分突起,但仍未起动,如图2(b)所示;再稍微增大流速后土样发生大块的破坏,如图2(c)所示;同时,随着水泥固化效应土样抗冲刷能力在不断地提高,土样与筒边壁不能够很好的贴合,这可能与黄原胶对土体的黏性增稠作用有关,所以仅以黄原胶作为絮凝剂时流态固化土与原地基土或待防护结构物的界面易形成

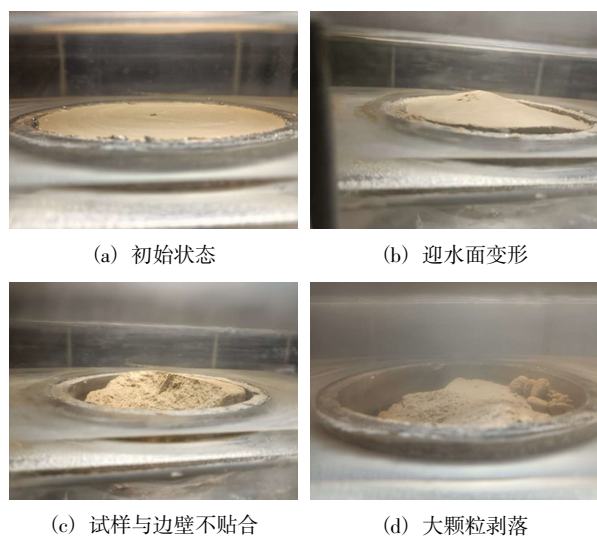


图2 掺入黄原胶的流态固化土冲刷过程试验现象

Fig. 2 Test phenomenon of scouring process of flowable solidified soil mixed with xanthan gum

潜在的薄弱面。试验后期随着流量的增大,出现大颗粒状土样的剥落。由图2(d)可以看到由于冲刷作用,土样此时位于管道平面以下,迎水面存在部分刚脱落的固化土团粒。综上,对于单独掺入黄原胶的土样,其前期起动状态判定标准为大块水泥土的剥离,随着时间的增长后期起动状态的判定为连续的大颗粒土样发生剥落。

对于掺入PAM或者UWB的流态固化土组次,整个冲刷过程中起动现象与掺入黄原胶组次有显著不同,在整个过程中土体与样桶边壁始终都能很好的贴合(如图3所示),但其初期抗冲刷能力整体较低。由图3(a)可知在固化前随着水流流速的增长,迎水面处土样表面出现小颗粒剥落起动,土样表面逐渐出现小坑;当土样逐渐由液态转为固态后,此时土样内的黏结性有较大提升,不再以微团或小颗粒的形式剥离土样表面,而是在局部发生较大块的破坏或者剥蚀,如图3(b)与图3(c)所示,并逐步形成一定规模的冲刷坑,直至冲刷稳定,图3(d)为冲刷6 h后土样表面状态。综上,掺入PAM或UWB为主的流态固化土组次对于起动的判断标准同样的可以分为2阶段,前期起动状态判别对应土样以小颗粒或微团的形式逐渐剥落,后期随着土样逐渐转化为固态,此时以土样的局部破坏或者撕裂剥离作为起动标准。

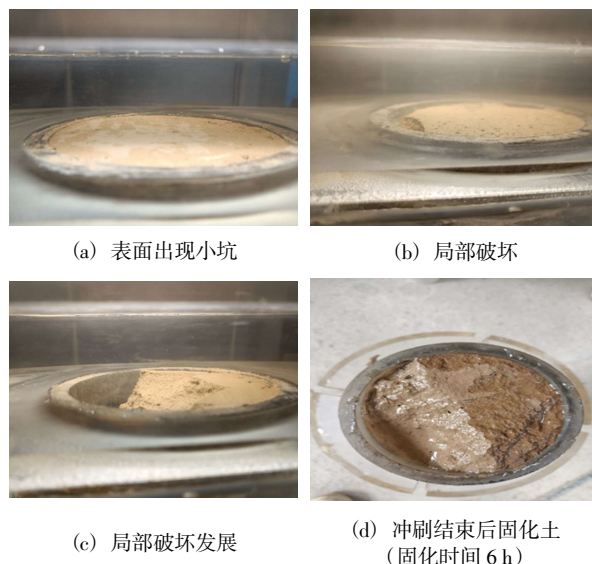


图3 掺入PAM或UWB固化土冲刷过程试验现象

Fig. 3 Test phenomenon of scouring process of flowable solidified soil mixed with PAM or UWB

## 2.2 水下流态固化土冲刷起动影响分析

图4为单独掺入各种絮凝剂的流态固化土临

界起动流速随时间变化的结果。如图 4 所示, 与天然素土比较, 掺入絮凝剂对临界起动流速均有显著提高。固化 0.5 h 后, PAM 组次(组次 2)与 UWB 组次(组次 3)的临界起动流速约为 0.2~0.3 m/s, 而黄原胶组次(组次 1)的起动流速能够达到 1.1 m/s 左右, 固化 6 h 后, 掺入黄原胶、PAM 和 UWB 各个组次的临界起动流速分别达到 5.3 m/s、2.05 m/s 和 1.94 m/s, 黄原胶提高起动流速效果最好, UWB 和 PAM 的提升效果相当。这主要是由于黄原胶的掺入大大提高了流态固化土的黏性, 土样的整体性更好, 此时的土样已经基本失去了流动性。随着时间的增长, 流态固化土临界起动流速的增长先慢后快, 近似按指数式增长。这主要是由于早期抗冲刷性能提升主要依靠絮凝剂对拌合物的增稠作用; 后期随着水化反应生成的胶凝材料逐渐填充内部孔隙, 主要依靠水泥胶凝材料产生的黏结力来抵御水流的冲刷作用。另外, 当 UWB 的含量由 0.1% 增加至 0.3% 时, 流态固化土的临界起动流速在各阶段均有所增加, 随着时间的增加, 提升的程度也越发明显, 表明通过提高 UWB 含量对流态固化土拌合物前期增稠抗冲刷和后期促进水泥水化反应都有一定的益处。

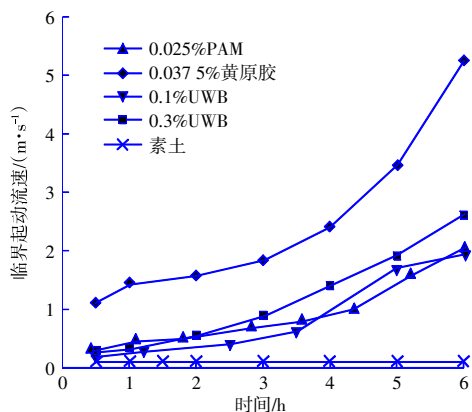


图 4 水下流态固化土临界起动流速随时间变化曲线

Fig. 4 Variation curve of critical incipient flow velocity of underwater flowable solidified soil with time

图 5 为单独掺入各种絮凝剂后流态固化土临界起动切应力随时间变化的结果。如图 5 所示, 各组次临界起动切应力随着固化时间的增长显著提高, 远高于天然素土, 与起动流速表现相似。其中, 黄原胶提高效果最好, UWB 和 PAM 提升效果总体基本相当, 但在固化 6 h 后 PAM 组次土样起动切应力要高于 UWB 组次。另外, 本次试验固化时间约在 3~4 h, 水泥终凝后其临界起动切应

力快速增长, 表明流态固化土的抗冲刷能力与水泥水化反应速度密切相关, 而这取决于水泥性质。

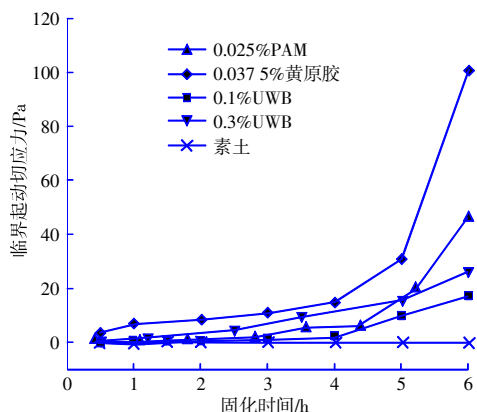


图 5 流态固化土临界起动切应力随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curve of critical incipient shear stress of flowable solidified soil with time

### 2.3 复合絮凝剂对冲刷起动的影响

单独掺入黄原胶后土样在固化的各个阶段都具有较高的临界起动流速和起动切应力, 但由于黄原胶较高的黏性, 在水流作用下土样与试验样桶边界易脱开, 这可能导致在现场条件下流态固化土与原地基土或结构物的界面黏结效果不太好, 易形成潜在的薄弱面, 对长期防护不利。而单独掺入 PAM 或 UWB 的土样固化初期提升效果一般, 后期提升明显, 但在水流作用下流态固化土与试验样桶紧密贴合, 边界处不存在薄弱环节。综合考虑, 提出了采用不同种类絮凝剂组合形成复合絮凝剂用以进一步优化水下流态固化土的抗水流冲刷能力。

#### 1) PAM-黄原胶复合絮凝剂对冲刷起动的影响

图 6 和图 7 分别为 PAM-黄原胶复合絮凝剂改性流态固化土临界起动流速和复合絮凝剂对临界起动流速提升效果影响的结果。由试验结果可知, 在 PAM 中掺入微量黄原胶联合改良流态固化土后其抗冲刷性能有显著提升。流态固化土冲刷初期(固化 0.5 h)仅使用 PAM 时(组次 2)的初始起动流速为 0.293 m/s, 而增加 0.001% 黄原胶后(组次 5)提升为 0.372 m/s, 增幅约为 26.9%。随着固化时间的增长, 起动流速也近似按指数形式增大, 并且随着黄原胶掺量的增多起动流速增长更快, 这主要是由于黄原胶的掺入除了提升固化初期黏度外, 还加速了水化反应, 从而使流态固化土抗冲刷性能的增长速率也随时间有所增加。在 PAM-黄原胶复合絮凝剂中提高 PAM 的掺量也能

提高流态固化土的抗冲刷能力。另外,如图7所示,同时提升PAM和黄原胶的掺量相比单独提高某一组分掺量能获得更好的改良效果。以组次5(PAM掺量0.025%、黄原胶掺量0.001%)固化时间6h为例,当仅提高PAM掺量至0.0375%时,固化6h时的起动流速增量约为0.80 m/s;当仅提高黄原胶掺量至0.005%时,固化6h时的起动流速增量约为1.68 m/s;而同时提高PAM和黄原胶掺量至相同水平时,固化6h时的起动流速增量约为2.97 m/s,比分别提高PAM和黄原胶掺量导致的起动流速增量之和还高0.49 m/s左右,表明PAM与黄原胶具有良好的相容性和互促进作用。

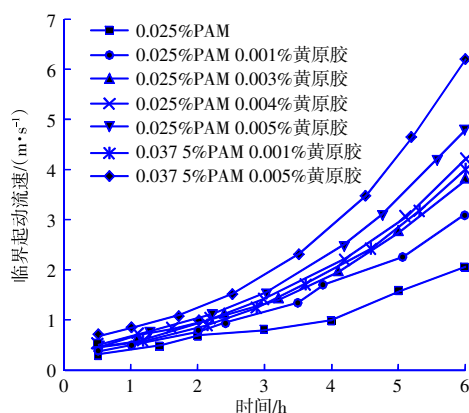


图6 PAM-黄原胶联合改性流态固化土临界起动流速随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curve of critical incipient flow rate of PAM-xanthan gum modified flowable solidified soil with time

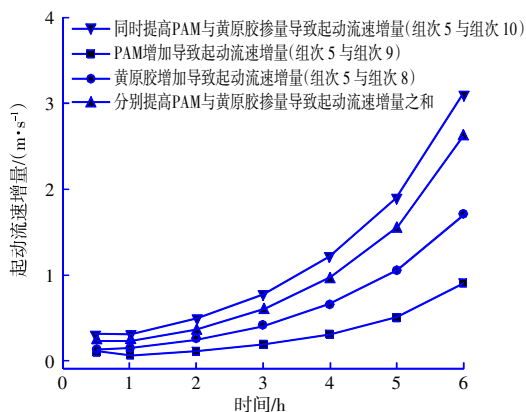


图7 PAM-黄原胶复合絮凝剂联合改良作用对临界起动流速变化的影响

Fig. 7 Effect of PAM-xanthan gum composite flocculant on change of critical incipient flow velocity

## 2) UWB-黄原胶复合絮凝剂对冲刷起动影响

图8和图9分别为UWB-黄原胶复合絮凝剂改性流态固化土临界起动流速和复合絮凝剂对临

界起动流速提升效果影响的结果。

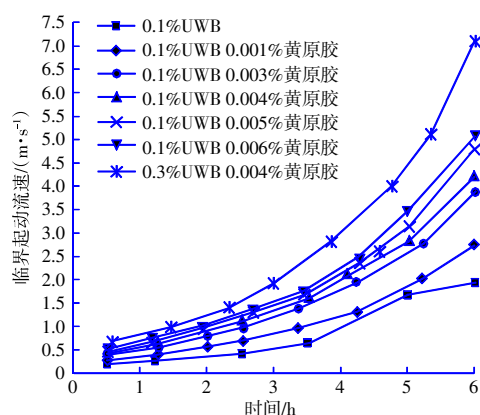


图8 UWB-黄原胶联合改性流态固化土临界起动流速随时间变化曲线

Fig. 8 Variation curve of critical starting flow velocity of UWB-xanthan gum modified solidified soil over time

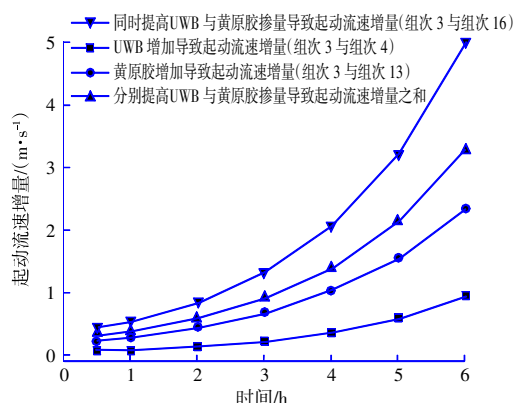


图9 UWB-黄原胶复合絮凝剂联合改良作用对临界起动流速变化的影响

Fig. 9 Effect of UWB-xanthan gum composite flocculant on change of critical incipient flow velocity

由图8可知,在UWB中掺入微量黄原胶联合改良流态固化土后其各个时间段的抗冲刷性能均有明显提升,在冲刷初始时刻(固化0.5h)仅使用UWB组次的起动流速为0.194 m/s,而增加0.001%黄原胶后提升为0.263 m/s,增幅约为35.6%,这表明掺入黄原胶后所引起的增稠效应对提升流态固化土初期抗冲刷能力效果明显。随着固化时间的增长,起动流速也近似按指数形式增大,由于掺入黄原胶还能加速水化反应,因此UWB与黄原胶联合改性流态固化土起动流速增长也更为明显。同时,随着黄原胶掺量的增大起动流速也有更明显的增长。另外,在UWB-黄原胶复合絮凝剂中提高UWB的掺量也能提高流态固化土的抗冲刷能力。试验结果还表明(见图9),

由于 UWB 与黄原胶也具有良好的相容性和互促进作用, 与单独提高复合絮凝剂中某一组分的掺量相比, 同时提到 UWB 和黄原胶的掺量将获得更好的改良效果。

### 3) 黄原胶对复合絮凝剂改良效果影响分析

图 10 和图 11 分别为 PAM-黄原胶复合絮凝剂和 UWB-黄原胶复合絮凝剂中黄原胶含量对流态固化土临界起动流速的影响结果。

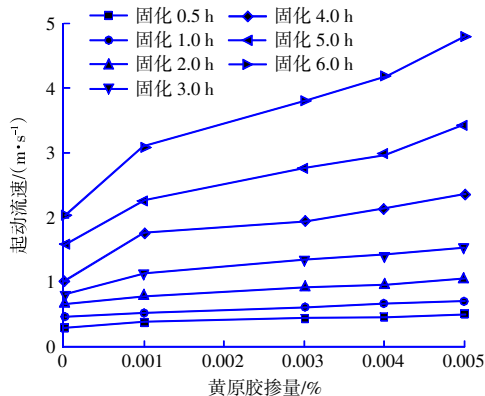


图 10 PAM-黄原胶复合絮凝剂中黄原胶含量对流态固化土临界起动流速的影响

Fig. 10 Effect of xanthan gum content in PAM-xanthan gum composite flocculant on the critical incipient flow velocity of flowable solidified soil

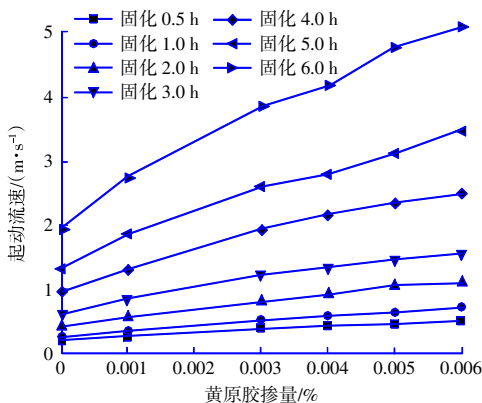


图 11 UWB-黄原胶复合絮凝剂中黄原胶含量对流态固化土临界起动流速的影响

Fig. 11 Effect of xanthan gum content in UWB-xanthan gum composite flocculant on the critical incipient flow velocity of flowable solidified soil

从试验结果可以看出, 随着黄原胶掺量的增加, 流态固化土在各时刻的临界起动流速基本呈线性增大, 并且随着固化时间的增长临界起动流速增加更显著。PAM-黄原胶、UWB-黄原胶复合絮凝剂中, 黄原胶对提升后者流态固化土抗水流冲刷能力作用更加明显, 例如: 两者均采用

0.005%掺量黄原胶形成复合絮凝剂后流态固化土 0.5 h 时起动流速增幅分别为 69.7%和 134.0%, 但 PAM-黄原胶组次的临界起动流速量值依然较高。

图 12 反映了黄原胶掺量在水泥水化反应不同阶段对流态固化土起动流速增长速率的影响。从图中可以看出, 在初凝阶段前(固化 0.5~3 h), 随着黄原胶掺量的增加, 采用 UWB-黄原胶复合絮凝剂组次引起的流态固化土起动流速增加速率远大于 PAM-黄原胶复合絮凝剂组次; 在初凝阶段后(固化 4~6 h), 2 种复合絮凝剂引起的起动流速增长程度逐渐接近, 此阶段采用 PAM-黄原胶复合絮凝剂组次增速显著提高, 而采用 UWB-黄原胶复合絮凝剂组次在整个水化过程中其起动流速增长速率都基本一致。这表明对于 UWB-黄原胶复合絮凝剂而言, 黄原胶掺量的增加对流态固化土增稠增黏作用更加明显, 而对水化反应增速影响不大, 但与此不同的是, 增加 PAM-黄原胶复合絮凝剂中黄原胶的掺量会对流态固化土初凝后的水化反应增速影响显著。此外, 对于 UWB-黄原胶和 PAM-黄原胶 2 种复合絮凝剂而言, 在相同黄原胶掺量条件下, 采用 PAM-黄原胶复合絮凝剂的流态固化土在各时段均具有更高的临界起动流速, 体现出更好的抗水流冲刷能力, 并且 PAM 的掺入量也更小, 具有更好的经济性。

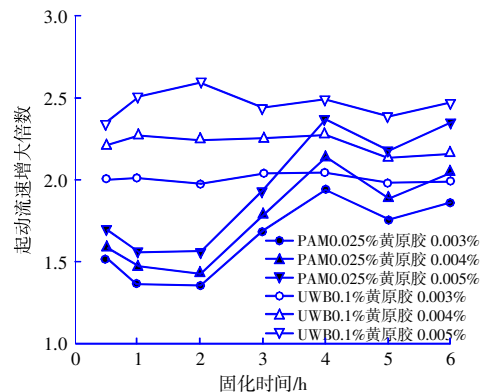


图 12 复合絮凝剂种类和掺量对流态固化土起动流速增大倍数的影响

Fig. 12 Effect of the type and dosage of composite flocculant on the increase of the incipient flow velocity of the flowable solidified soil

### 4) 水下流态固化土历时临界起动流速拟合分析

从以上采用单一絮凝剂和复合絮凝剂改良的流态固化土临界起动流速变化过程可以看出, 不同配比的流态固化土临界起动流速基本都随时间的变化近似呈指数增长, 采用统一的指数关系式

$y=Ae^{Bt}$ (式中:  $y$  为临界起动流速, m/s;  $t$  为时间, s;  $A$ 、 $B$  为拟合参数)对本次试验各组次进行拟合, 相关系数均处在 0.95 以上, 各组次拟合参数见表 4, 图 13 为黄原胶对流态固化土历时起动流速拟合参数的影响曲线。

表 4 水下流态固化土历时临界起动流速拟合参数表

Table 4 Fitting parameters of the critical incipient flow velocity of the underwater flowable solidified soil

试验组次	拟合参数 $A$	拟合参数 $B$	相关系数 $R^2$
1	0.964 8	0.258 5	0.959 2
2	0.291 4	0.330 2	0.973 1
3	0.167 3	0.410 6	0.981 0
4	0.222 2	0.428 9	0.990 6
5	0.352 0	0.376 0	0.986 7
6	0.403 7	0.383 1	0.984 5
7	0.428 2	0.385 7	0.985 1
8	0.442 3	0.405 5	0.986 7
9	0.389 0	0.394 8	0.998 2
10	0.548 9	0.407 4	0.992 8
11	0.228 6	0.417 8	0.997 3
12	0.334 9	0.410 5	0.997 4
13	0.365 6	0.411 0	0.997 4
14	0.408 3	0.412 0	0.995 0
15	0.441 5	0.410 1	0.994 4
16	0.519 3	0.432 5	0.991 6

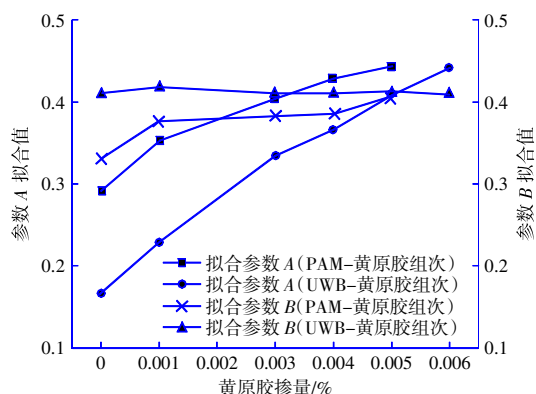


图 13 黄原胶对流态固化土历时起动流速拟合参数的影响  
Fig. 13 Effect of xanthan gum on the fitting parameters of the critical incipient flow velocity of the flowable solidified soil

如图 13 所示, 总体而言, 黄原胶掺量变化对拟合参数  $A$  的影响程度远大于拟合参数  $B$ , 无论采用哪种复合絮凝剂, 参数  $A$  基本都随着黄原胶掺量的增加而线性增大, 但采用 UW-B-黄原胶复合絮凝剂组次的增幅更加明显, 这之前分析所得, 与 PAM 相比在 UW-B 中掺入微量黄原胶对提升流态固化土初期起动流速更加明显的结论吻合。各组次的拟合参数  $B$  变化都较小, 特别是对于采

用 UW-B-黄原胶复合絮凝剂组次, 在本次试验 UW-B 掺量分别为 0.1% 和 0.3% 的各组次拟合值分别约为 0.41 和 0.43, 表现出与 UW-B 掺量较好的关联性。

### 3 结语

采用水下流态固化土对涉水结构物基础进行冲刷防护与修复是一项新的技术, 具有施工方便、对已有结构影响小、就地取材等优点, 并且冲刷防护能力随固化发展而增长, 但其在固化前的抗水流冲刷能力是决定流态固化土在水流作用下留存率的重要参数, 直接影响工程实施有效性与经济性。针对水下流态固化土固化全过程抗水流冲刷能力研究不足的问题, 本文采用室内试验的方法对水流作用下水下流态固化土历时临界起动流速进行了测量, 提出了采用复合絮凝剂提升流态固化土固化全过程抗冲刷能力的方法, 揭示了水流作用下流态固化土起动特征并确定了起动标准, 探究了絮凝剂种类与掺量对流态固化土历时临界起动流速的影响规律, 进而建立的水下流态固化土历时临界起动流速拟合经验公式, 主要研究结论如下:

1) 与未处理素土比较, 在固化剂与絮凝剂等外加剂的作用下, 水下流态固化土在固化全过程的临界起动流速均显著提升, 随固化时间的增长, 流态固化土临界起动流速值表现为指数式增长。在本次试验各组次中, 流态固化土临界起动流速在固化初期 0.5 h 时最大值 1.1 m/s 左右, 在完全固化后 6 h 时最大值约为 7.1 m/s。

2) 絮凝剂种类影响流态固化土在水流作用下的起动形态, 对于单独掺入黄原胶的土样, 大流速条件下土样与试验样桶边壁脱离, 前期起动状态表现为大块流态固化土剥离, 随着时间增长后期起动状态表现为连续的大颗粒土絮团发生剥落; 对于掺入 PAM 或 UW-B 为主的土样, 土样与试验样桶边壁贴合紧密, 前期起动状态表现为土样以小颗粒或微团形式逐渐剥落, 后期起动表现为土样的局部破坏或者撕裂剥离。

3) 不同种类絮凝剂对比试验表明, 掺入絮凝剂后流态固化土在固化前的黏性都有增加, 提高了土样的初期临界起动流速, 其中黄原胶效果最好, UW-B 和 PAM 效果相当。固化后期水化反应对提升流态固化土抗冲刷能力显著, 本次试验选择的 3 种絮凝剂都对水化反应有促进作用。

4) 在 PAM 或 UWB 中掺入微量黄原胶形成复合絮凝剂在提升流态固化土初期抗水流冲刷能力的同时还能优化冲刷起动形态,避免在流态固化土边界形成薄弱面;同时提高复合絮凝剂中黄原胶与 PAM(或 UWB)的掺量对流态固化土临界起动流速的提升效果优于分别提高絮凝剂掺量导致的临界起动流速增量之和,表明 PAM(或 UWB)与黄原胶具有良好的相容性和互促进作用。

5) 复合絮凝剂对比试验结果表明,黄原胶掺量增加都会提高流态固化土各阶段的临界起动流速,黄原胶在 UWB-黄原胶复合絮凝剂中对提升流态固化土抗水流冲刷能力作用更加明显。但在相同黄原胶掺量条件下,采用 PAM-黄原胶复合絮凝剂的流态固化土在各时段均具有更高的临界起动流速,并且 PAM 的掺入量也更小,具有更好的经济性。

6) 受试验条件和时间限制,本次试验是在均匀流条件下测得流态固化土固化过程的临界起动流速,并没有考虑实际存在的紊流、绕流等复杂水流条件影响。后续将开展更符合实际的物理模型试验等研究。

#### 参考文献:

- [1] SUMER B M, FREDSON J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. Singapore:World Scientific, 2002.
- [2] 张诗怡,刘畅,朱浩宇,等.海上风机单桩基础的三种防冲刷方案应用研究[J].中国港湾建设,2023,43(8):9-14.  
ZHANG Shi-yi, LIU Chang, ZHU Hao-yu, et al. Research on engineering application of three anti-scour schemes for monopile foundations for offshore wind turbines[J]. China Harbour Engineering, 2023,43(8):9-14.
- [3] 刘汝嘉,王栋,郭文韬,等.波流作用下单桩基础局部冲刷试验研究[J].中国港湾建设,2023,43(1):47-51.  
LIU Ru-jia, WANG Dong, GUO Wen-tao, et al. Experimental study on local scour of monopile foundation under combined action of waves and currents[J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(1): 47-51.
- [4] 俞梅欣,杨皓然,朱艳,等.海上风电场四圆柱基础冲刷问题数值模拟研究[J].中国港湾建设,2024,44(1):13-17,60.  
YU Mei-xin, YANG Hao-ran, ZHU Yan, et al. Numerical simulation study on the scouring problem of four-cylinder foundations in offshore wind farms[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(1): 13-17, 60.
- [5] 陈萌,杨国录,徐峰,等.淤泥固化处理研究进展[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):128-138.  
CHEN Meng, YANG Guo-lu, XU Feng, et al. Research progress on solidification treatment of dredged silt[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 128-138.
- [6] 朱伟,闵凡路,吕一彦,等.“泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J].岩土力学,2013,34(11):3041-3054.  
ZHU Wei, MIN Fan-lu, LÜ Yi-yan, et al. Subject of "mud science and application technology" and its research progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3041-3054.
- [7] T/CECS 1175—2022,自密实固化土填筑技术规程[S].  
T/CECS 1175—2022, Technical specification for self-compacted soil filling in construction engineering[S].
- [8] 朱瑜星,卞怡,闵凡路,等.地铁盾构渣土改良为流动化土进行应用试验研究[J].土木工程学报,2020,53(增刊1):245-251.  
ZHU Yu-xing, BIAN Yi, MIN Fan-lu, et al. Improvement of metro shield muck to controlled low-strength material[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Suppl.1): 245-251.
- [9] 周海成,单宏伟,冯良平,等.基于粉质黏土的流态水泥固化土配合比试验及应用研究[J].公路,2022,67(10):374-378.  
ZHOU Hai-cheng, SHAN Hong-wei, FENG Liang-ping, et al. Mixture test and application of fluidized cement-solidified soil based on silty clay[J]. Highway, 2022, 67(10): 374-378.
- [10] 黄英豪,戴济群,徐锴.新拌固化淤泥的流动性和黏滞性试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(2):235-244.  
HUANG Ying-hao, DAI Ji-qun, XU Kai. Flowability and viscosity of freshly solidified dredged materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 235-244.
- [11] 朱伟,赵笛,范惜辉,等.渣土改良为流动化回填土的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):134-139.  
ZHU Wei, ZHAO Di, FAN Xi-hui, et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 134-139.
- [12] 盛传明,马超,练继建,等.固废底泥水下应用抗分散性能研究[J].水资源与水工程学报,2023,34(1):181-189.  
SHENG Chuan-ming, MA Chao, LIAN Ji-jian, et al. Washout resistance analysis of solidified silt in underwater applications[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(1): 181-189.
- [13] 袁建中.固化土在海上风电单桩基础冲刷修复中的应用[J].中国海洋平台,2021,36(4):46-50.  
YUAN Jian-zhong. Application of stabilized soil in scour repair of offshore wind power single pile foundation[J]. China Offshore Platform, 2021, 36(4): 46-50.
- [14] MA C, SHENG C, LIAN J, et al. Solidification sludge as a scour countermeasure in ocean engineering[J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110423.
- [15] 洪大林,缪国斌,邓东升,等.黏性原状土起动切应力与物理力学指标的关系[J].水科学进展,2006(6):774-779.  
HONG Da-lin, MIAO Guo-bin, DENG Dong-sheng, et al. Relation of starting shear stress and physical and mechanical indexes of cohesive undisturbed soil[J]. Advances in Water Science, 2006(6): 774-779.