

文章编号:1674-2974(2016)12-0148-08

明渠流下生物作用对管道 沉积物冲蚀特性影响试验研究^{*}

邵卫云,钱 栋,马 妍,周永潮[†],张仪萍

(浙江大学 市政工程研究所,浙江 杭州 310058)

摘 要:通过调节溶解氧环境和培养时间,采用循环水槽进行沉积物明渠流冲刷试验,研究生物活动对管道中不同有机物(volatile solid, VS)含量沉积物抗冲蚀特性的影响. 结果表明:生物作用对沉积物抗侵蚀能力的影响具有两面性:一方面,生物作用促进沉积物颗粒间的结合力,另一方面,生物作用可通过增大沉积物内部结构的疏松程度以削弱其抗侵蚀能力. 有机物含量较低的沉积物,存在一定生物作用,其抗侵蚀能力随培养时间而有所增强;反之,生物活动过于强烈,其抗侵蚀能力随培养时间而有所削弱. 而对于适量 VS 含量的沉积物,生物作用对沉积物冲蚀的正负影响取决于水流剪切力的大小.

关键词:管道沉积物;高挥发性有机物含量;生物活动;冲蚀特性

中图分类号:TU992.3

文献标识码:A

Flume Experimental Study of Erosion Characteristic of Sewer Sediment with Biological Activities

SHAO Wei-yun, QIAN Dong, MA Yan, ZHOU Yong-chao[†], ZHANG Yi-ping

(Municipal Engineering Research Institute, Zhejiang Univ, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Seriousness of the problems caused by sediment deposits in urban sewer pipe has been widely recognized. Using circulating water tank, scouring tests on the sewer sediment with biological activities were carried out, and the influence of biological activities on erosion characteristics of real in-sewer sediment with different volatile solid (VS) contents under open channel flow by controlling the conditions of dissolved oxygen concentrations and incubation time was also investigated. The results indicate that the biological activities exhibited both positive and negative influences on the erosion law of sewer sediment. It improved the anti-erosion capability by enhancing the binding strength between particles, and the erosion resistance was weakened due to the increase of the porosity of the internal structure of the sediment. Meanwhile, the weak biological activities in the sediment with lower organic content can strengthen the erosion resistance with the incubation time. On the contrary, strong biological activities of sediment with high VS content led to the weakening of the erosion resistance. The effect of biological activities on erosion characteristic was also related to the shear force of the flow for the sediment with appropriate VS content.

Key words: sewer sediment; high volatile solid content; biological activity; erosion characteristic

^{*} 收稿日期:2015-11-24

基金项目:国家水体污染与治理科技重大专项(2011ZX07301-004);国家自然科学基金资助项目(51308492);浙江省自然科学基金资助项目(Y13E080011);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介:邵卫云(1970-),女,浙江建德人,浙江大学副教授

[†] 通讯联系人, E-mail: zhoutang@zju.edu.cn

城市排水系统作为城市的基础设施,在雨水、生活污水和工业污水的收集、运输、排放上具有重要作用。当前城市排水管道淤积现象严重^[1],相关调查显示,北京城区存在淤积的排水管道中,50%以上的沉积物厚度与管径之比超过 0.1^[2];广州市淤积严重的排水管道,其排水功能只有最初的 1/4~1/3^[3]。固体悬浮物在管道内的沉降和淤积,将增大管道阻力,降低管道排水性能,造成堵塞;其中生化反应易侵蚀管道,降低管道使用寿命;对于合流制管道来说,强降雨下初期冲刷将使旱季时的沉积颗粒再悬浮,由此产生高浓度污染物,进入受纳水体。研究表明,排水管道旱季沉积对受纳水体造成的污染负荷达到了 30%~80%^[4]。因此,研究排水管道内固体颗粒的沉积以及冲刷运输规律对排水系统设计与清淤管理具有重要理论意义。早期的沉积物冲刷实验以无黏性泥沙为对象^[5-7],研究主要集中于起动流速和起动统计规律^[8]。随着研究的深入,部分学者注意到真实管道沉积物的黏性特征。Crabtree^[9]在 1989 年指出颗粒间的黏聚力增强了沉积物的抗侵蚀能力。随后,众多学者采用黏土和泥沙模拟真实管道沉积物,进一步了解了黏性泥沙的冲蚀运输规律,并发现了黏性泥沙的絮凝作用^[10]、管道污水中高含量的有机絮状悬浮物^[11]、黏性泥沙的分层运输^[12]、粒径与淤积时间的关系^[13]等。

上述工作考虑到沉积物的黏性特征,然而富含有机质的沉积物还易受生物作用影响,从而导致冲蚀规律的改变。Hvitved-Jacobsen 等^[14]将排水管道比作反应发生器,发现了管道沉积物的生物降解作用;Black 等^[15]在 2002 年提出微生物作用将影响沉积物抗侵蚀能力;Vollertsen 等^[16]通过实验得出,经过一定时间培养,生物作用使得沉积物内部结构疏松,从而削弱其抗侵蚀能力,同时生物膜在沉积

物表面的生长能增强其抗侵蚀能力。此外,学者们也研究了温度、溶解氧含量等条件对沉积物生物作用的影响^[17-18],以及生物作用对沉积物粒径、密度、颗粒间作用力等物理指标的影响^[19]。

但这些研究仍未全面系统地展现生物活动对真实管道沉积物的作用。本文以真实管道沉积物为研究对象,利用室内循环水槽,研究明渠水流作用下,生物活动对管道沉积物冲蚀运输规律的影响。

1 试验概况及内容

1.1 试验材料

根据对城市管道的调查,试验选取 3 种具有不同挥发性有机物含量的管道沉积物。沉积物取自杭州市江干区排水管道。为了保持真实管道沉积物的特性以及试验对于样品均一性的要求,采用湿筛法^[19]对采集的沉积物进行预处理,以除去包括树叶、大粒径石砾、毛发等杂物。湿筛选用孔径为 10 目(2 000 μm)的标准筛。处理后,测得该 3 种试验样品颗粒级配如图 1 所示,理化特性见表 1。

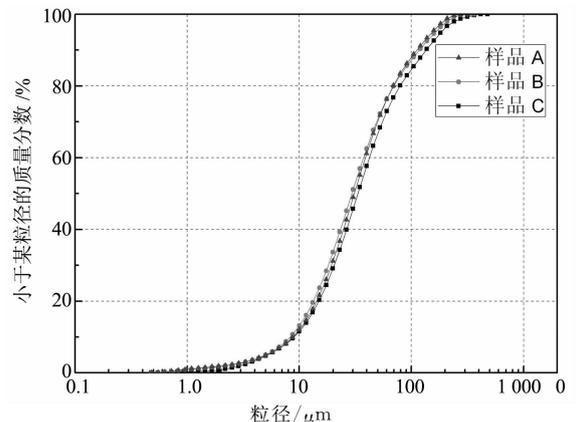


图 1 试样颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of test samples

表 1 试验样品初始物理特性指标
Tab. 1 Initial physical characteristics of test samples

试样类别	挥发性有机物 VS 质量分数/%	真密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	堆积密度 ρ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	中值粒径 d_{50} / μm	初始含水率 w /%
A	16.01	2.362	1.266	125.770	28.331
B	10.96	2.254	1.314	158.592	26.558
C	5.12	2.719	1.367	186.213	29.464

1.2 试验装置

本试验采用的循环水槽装置,主要由上游水箱、冲刷水槽、可调节溢流板、循环水箱、潜水泵、流量计等部分组成,如图 2 所示。各部分关键尺寸为:上游

水箱高 1 m,底面尺寸为 500 mm×500 mm;冲刷水槽长 3 m,横截面为 150 mm×240 mm;循环水箱长 2.5 m,横截面为 500 mm×800 mm。

试验冲刷过程中,上游水箱提供水流;沉积物在

冲刷水槽中经受水流冲刷,并采用 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)测量沉积表面水流三维流速,由此计算其表面剪切应力,仪器探头置于沉积物样品表面 10 mm 处;水流流经循环水箱,通过潜水泵

重新回到上游水箱.其中 ADV 为 Noterk 公司的 Vectrino,测量范围为: $-0.01 \sim 6.0$ m/s,精度为测量值的 $\pm 0.5\%$.

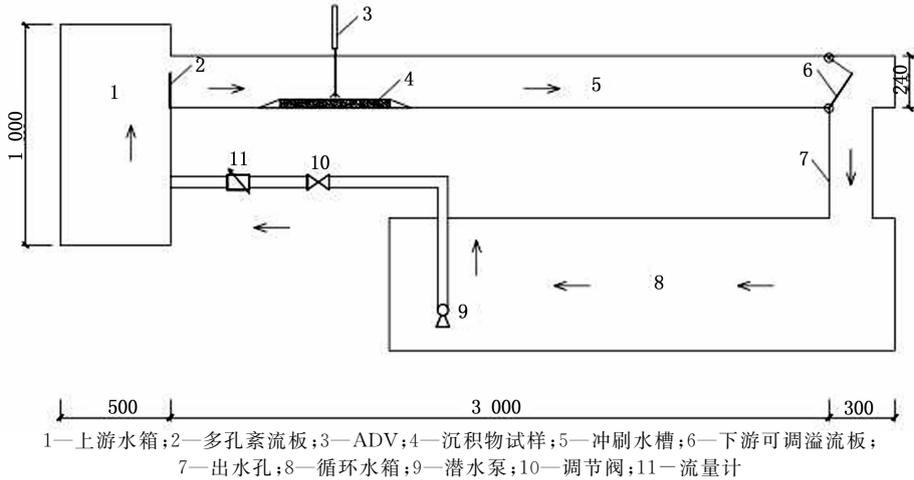


图 2 试验装置示意图(mm)
Fig. 2 Sketch of experimental setup(mm)

1.3 试验方法

1.3.1 试样培养

将经湿筛法预处理后的 3 类沉积物样品 A,B 和 C 各分为 3 组,分别置于如图 3 所示的培养槽中进行培养.沉积物铺设高度为 40 mm,横向两板可抽移.培养在 150 mm 高度的水体中进行,保持 25 °C 左右的微生物活跃条件,同时采用 ACO-002 型电磁式空气增氧泵向沉积物上覆水体中进行空气曝气,以保证充足的溶解氧(DO > 2 mg/L).待各组试样达到各自培养时间后,移至冲刷水槽中进行冲刷试验.

离上游 500 mm 处,抽离横向两板,并于横向两端设置与沉积物铺设高度一致的斜板,坡度为 30°,以保证水流的均匀冲刷,如图 4 所示.

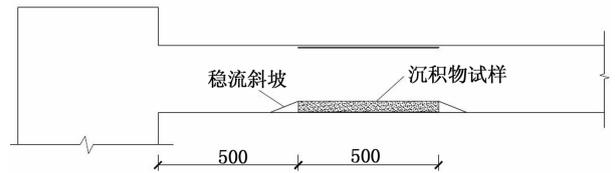


图 4 沉积物冲刷时放置位置(mm)
Fig. 4 Position of sediment erosion(mm)

本试验采用阶梯式提升流速的方法,以实现不同的表面剪切力,并在同一流速下保持一定时间.冲刷过程中,水槽内水深和流量可分别通过下游溢流板和上游调节阀进行控制.

试验开始后,调节进水管阀门使水流达到预定流速值,待流态稳定后通过 ADV 读取 10 s^[20] 内的三维流速数据.在流速稳定后 1 min, 2 min, 3 min, 4 min, 6 min, 8 min 和 10 min 时刻,分别于水槽上下游固定位置、水槽横向中心处同时取水样 500 mL,测定其总悬浮物(TSS)浓度.

1.3.3 数据处理

由于试样冲刷装置为循环系统,将上下游同时所取的水样 TSS 浓度差认为是水流冲刷沉积物后的

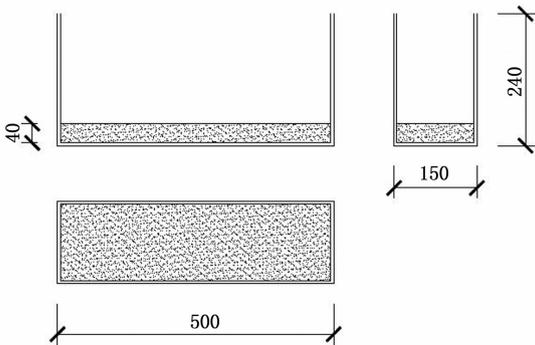


图 3 沉积物培养槽三视图(mm)
Fig. 3 Three views of sediment incubation tank(mm)

1.3.2 试样冲刷

经培养后的沉积物连同培养槽移至冲刷水槽距

TSS 改变量,由此来衡量水流对沉积物冲刷的程度.为了进一步表征水流对沉积物的冲蚀影响,引入侵蚀率(Erosion Rate, R)^[21]的概念,其计算式见式(1).

$$R = Q(TSS_1 - TSS_2). \quad (1)$$

式中: R 为侵蚀率, g/s ; Q 为流量, L/s ; TSS_1 为上游悬浮颗粒物质量浓度, g/L ; TSS_2 为下游悬浮颗粒物质量浓度, g/L .

沉积物在水流冲刷作用下的运动规律与床面剪切力相关,剪切应力可由水流流速计算^[22],如式(2):

$$\tau = -\rho \overline{u'w'}, \quad (2)$$

$$u' = v_x - \overline{v_x}, \quad (3)$$

$$w' = v_z - \overline{v_z}. \quad (4)$$

式中: v_x 为沿水流方向的流速; $\overline{v_x}$ 为取数时段内 v_x 平均值; v_z 为垂直于水流方向的流速; $\overline{v_z}$ 为取数时段内 v_z 平均值.

2 试验结果

沉积物样品的铺设层较薄,且在铺设时保证样品的均一性,因此在本试验中忽略沉积物分层沉淀及重力压实的影响,认为沉积层竖向特性一致.试验中通过调节冲刷流速以保证作用于各组沉积物试样的各组剪切力一致.

由图 1 和表 1 可知,3 种试样样品的颗粒级配曲线相近,其物理性质差异最大的为 VS 含量,且随 VS 含量增大, ρ_d 减小,中值粒径 d_{50} 减小.

2.1 生物活动下沉积物堆积密度变化

在培养阶段观察到沉积物体积膨大、厚度增高,可见在培养中生物活动导致其内部结构的变化.这与 Vollertsen 等^[16]所得到的“沉积物在曝气、20 °C 条件下培养 1~2 d 后体积增长 20%~40%”的结论相一致.前期我们做过不同培养条件下不同 VS 含量沉积物物化性质变化的试验.图 5 所示为沉积物在 25 °C 好氧条件下,深度为 30 mm 处(前期试验沉积物总厚度为 120 mm)的堆积密度 ρ_d 随培养时间的变化曲线.

由图 5 可看到,VS 含量较高的沉积物,其 ρ_d 随培养时间而减小,表明生物活动强烈,促进沉积物内部结构的松散;VS 含量较低的沉积物,其 ρ_d 逐步增大,可见生物活动较弱,沉积物以自身固结压实为主;适量 VS 含量的沉积物,其 ρ_d 稍有减弱.由此得出结论:在适宜的培养条件下,沉积物内部存在生物活动,且随 VS 含量的增长生物活动越强烈.

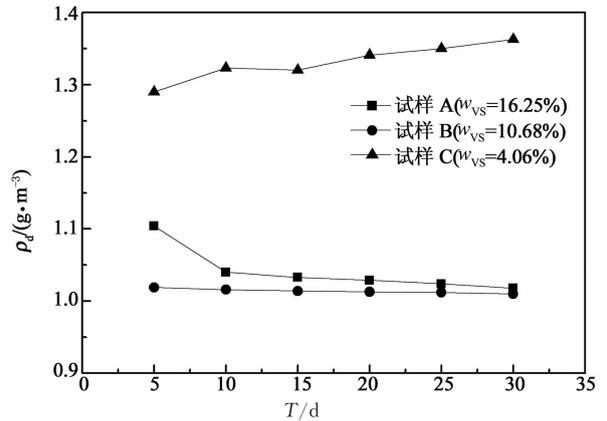


图 5 25 °C 好氧条件下不同 VS 含量沉积物的堆积密度随培养时间的变化

Fig. 5 Variation of bulk density of sediments with different VS contents and incubation time under 25 °C and aerobic condition

2.2 动态冲蚀规律

沉积物在好氧环境下经 20 d 培养后,在阶梯提升的剪切力作用下其侵蚀率 R 随冲刷时间的变化规律如图 6 所示,其中 t 为冲刷时间.

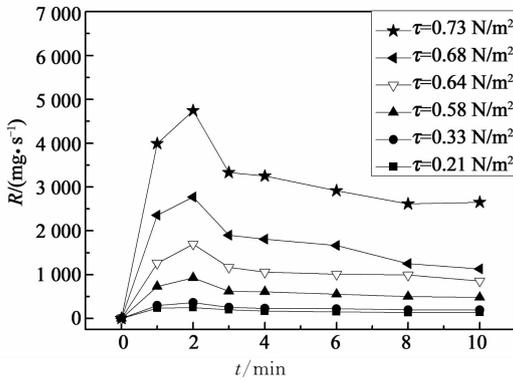
由试验结果可见,对于试样 A,侵蚀率 R 在不同剪切应力下随冲刷时间大致表现出如下规律:在 10 min 的冲刷过程中,侵蚀率在冲刷初期迅速增大,在第 2 min 左右达到峰值,记为 R_p ;随后逐渐下降趋于稳定,将第 10 min 时的侵蚀率记为 R_s .在较大剪切力作用下,上述规律表现得明显;在小剪切力下,侵蚀率的峰值表现得不明显,较早地进入稳定侵蚀阶段.

沉积物试样 B 和 C 的动态冲蚀整体上也表现出上述规律,但在前期增长幅度、峰值出现时间、稳定侵蚀出现时间等细节上有所不同.相较于试样 A 在第 2 min 内的增长幅度小于第 1 min,试样 B 在前 2 min 内的增长幅度较一致,试样 C 在第 2 min 内的增长幅度反而略大于第 1 min.与之相对应,峰值出现的时间也向后推延,由试样 A 出现在第 2 min,推延到试样 C 出现在第 3 min.可见随 VS 含量的增加,在试样培养过程中,生物活动剧烈程度增加,对沉积物抗侵蚀能力有削弱作用,使沉积物更易达到最大侵蚀状态.

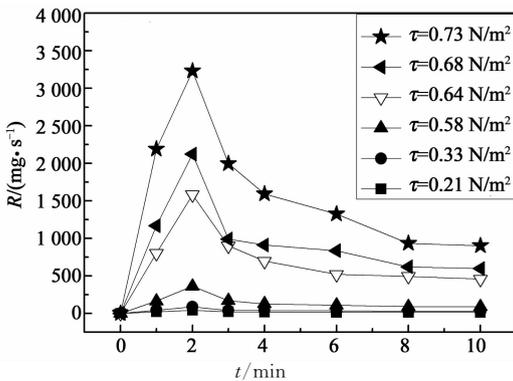
2.3 侵蚀率增长规律

图 7 为不同培养历时下的试样 A 在各冲刷试验中,其侵蚀率与水流剪切应力的关系,分别以峰值侵蚀率 R_p 和稳定侵蚀率 R_s 作为侵蚀率的代表,其中 τ

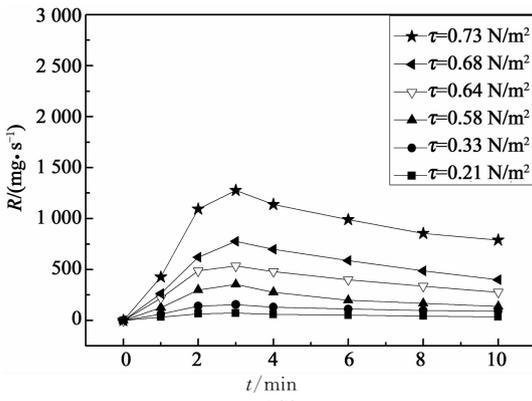
为剪切应力。



(a) 试样 A



(b) 试样 B

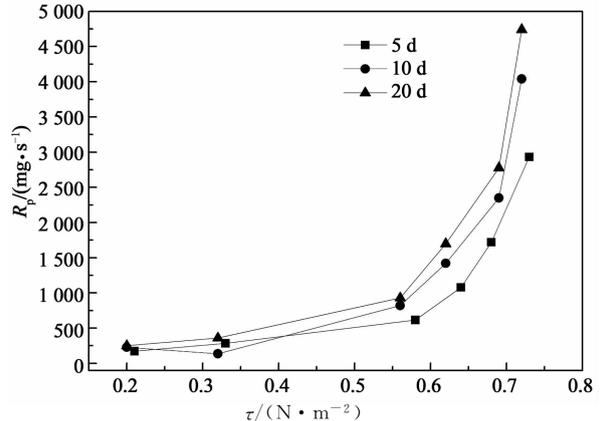


(c) 试样 C

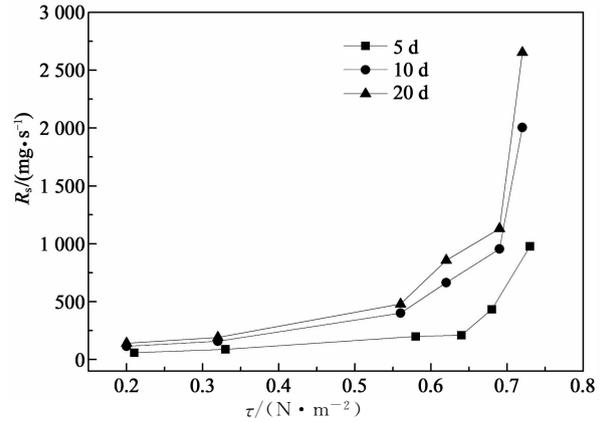
图6 试样经20 d培养后侵蚀率随冲刷时间的变化规律

Fig. 6 Variation of erosion rates with scouring time after 20 d incubation

由图7(a)可以看到:不同培养历时下,试样A在各冲刷试验中,其 R_p 总体上随水流剪切力的增大而增大; R_p 增长幅度也随剪切应力增大而增大,但在剪切应力不同范围内,增长幅度不同;在剪切应力较小($0.21\sim 0.58\text{ N/m}^2$)时, R_p 增长缓慢;当剪切力达到以及超过 0.58 N/m^2 时,其增长幅度有明显提升,随后能更快发展.可见对于试样A, 0.58 N/m^2 左右达到其临界剪切应力。



(a) 峰值侵蚀率



(b) 稳定侵蚀率

图7 不同培养历时下试样A侵蚀率随剪切应力的变化规律

Fig. 7 Variation of erosion rate of sample A with the shear stress in different incubation time

但比较不同培养历时的曲线可发现,在剪切应力达到或超过 0.58 N/m^2 后,培养历时越长其 R_p 增长幅度越大,可见生物作用时间越长对沉积物的影响越大,使其更易被侵蚀。

稳定增长率 R_s 也有上述规律,但剪切应力在 $0.58\sim 0.68\text{ N/m}^2$ 时,其增长幅度不及相同范围下 R_p 的明显。

2.4 峰值侵蚀率随培养时间的变化规律

在冲刷试验前期,侵蚀率迅速增大,至第2~3 min达到峰值.对比相同水流剪切力下,侵蚀率与试样培养历时的关系,可进一步了解生物活动对沉积物冲刷的影响.图8所示为3类试样不同剪切力下 R_p 与培养历时的关系,其中 T 为培养时间。

由图8(a)可看到,在同一剪切力作用下,对于试样A,其 R_p 随培养时间的增加而持续增长.这一结果在较大剪切应力下完全符合,在小剪切应力下存在一定差异.可见在含有较高VS的试样内部,生物活动强烈,随培养历时增加,生物作用程度加深,导致试样抗侵蚀能力削弱。

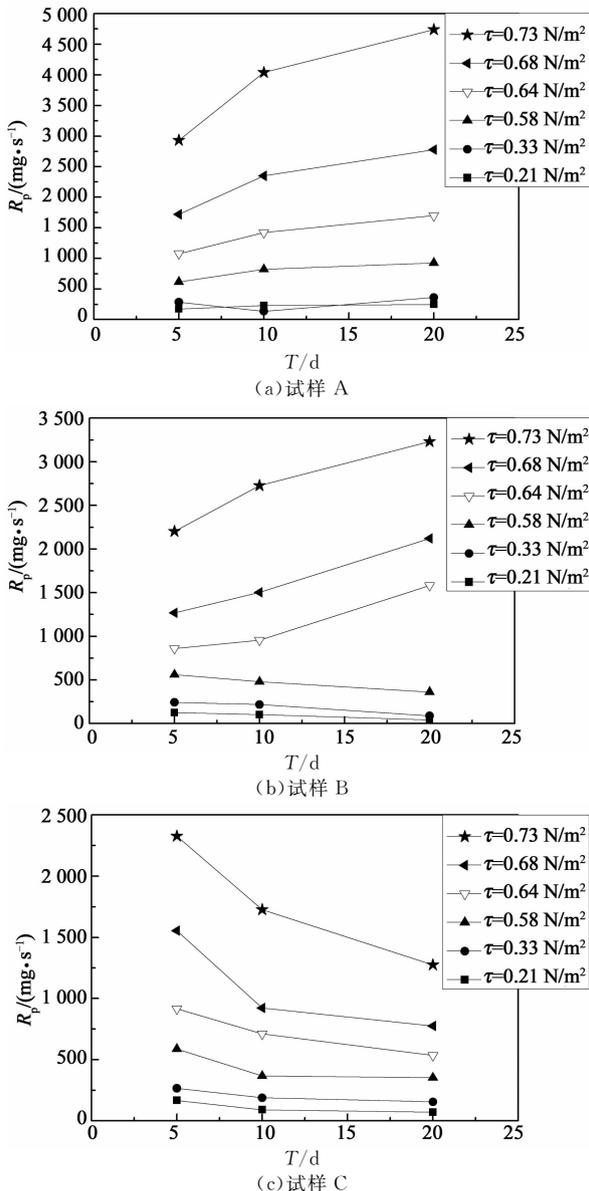


图 8 不同剪切应力下峰值侵蚀率随培养时间的变化

Fig. 8 Variation of peak erosion rate with incubation time under different shear stresses

相比于试样 A 的 R_p 随培养时间的增长而增大, 其他 VS 含量的试样在冲刷中有着不同的规律. 对于 VS 含量稍低的试样 B, 在剪切力超过 $0.64 \text{ N}/\text{m}^2$ 的工况下, R_p 随培养时间增加而增长; 在范围为 $0.21 \sim 0.58 \text{ N}/\text{m}^2$ 时的较小剪切力下, R_p 随培养时间的增加而减小. 说明生物作用对试样 B 的抗侵蚀能力具有一定增强效果, 使得颗粒间结合力增强, 而这种增强效果存在上限值, 当水流剪切力超过这个上限值时, 颗粒间的黏结力无法有效抵抗侵蚀. 对于 VS 含量较低的试样 C, 在相同剪切力作用下, R_p 随培养时间的增加总体呈现减小趋势. 说明试样 C 的抗侵蚀能力在生物作用下得到了增强.

2.5 稳定侵蚀率随培养时间的变化规律

在冲刷试验后期, 侵蚀率逐渐趋于稳定, 记第 10 min 的侵蚀率为稳定侵蚀率 R_s . 图 9 所示为 3 类试样不同剪切力下 R_s 与培养历时的关系, 其中 T 为培养时间.

如图 9 所示, 不同 VS 含量的沉积物, 其稳定侵蚀随培养时间的规律与峰值侵蚀率一致. 即对于 VS 含量较高的试样 A, 在相同剪切力作用下, 其 R_s 随培养时间的增加而持续增长; 对于 VS 含量较低的试样 C, R_s 随培养时间的增加总体呈现减小趋势; 而对于 VS 含量介于两者之间的试样 B, 其 R_s 随培养历时的规律与水流剪切力有关.

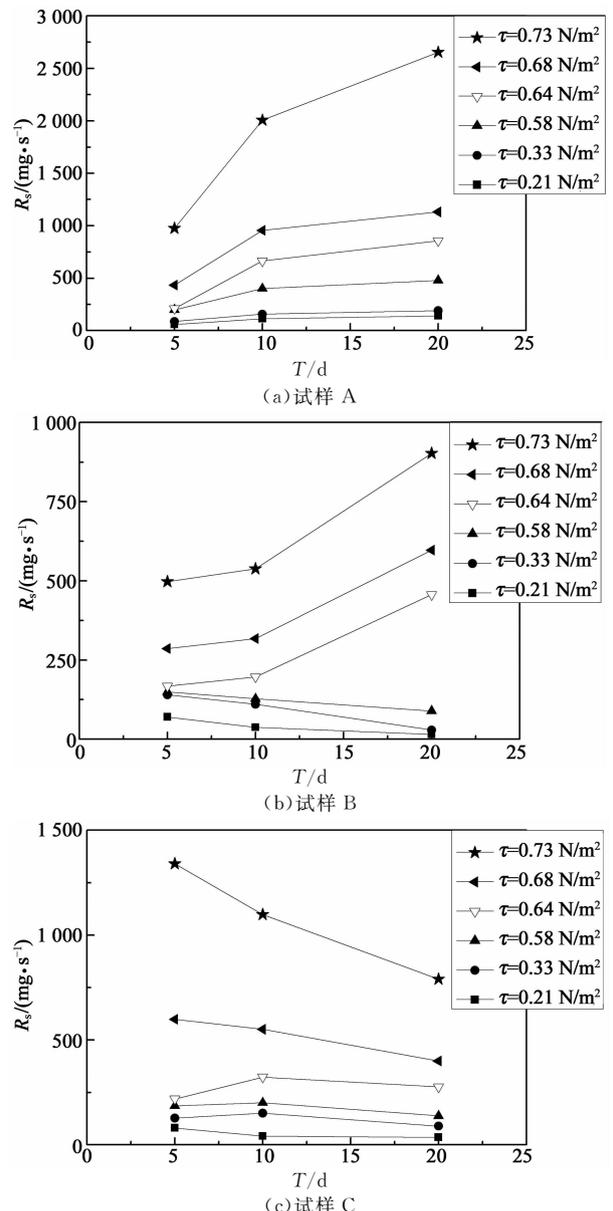


图 9 不同剪切应力下稳定侵蚀率随培养时间的变化

Fig. 9 Variation of stable erosion rate with incubation time under different shear stresses

3 讨论

沉积物所含有的挥发性有机物导致在培养过程中内部存在一定生物作用,生物作用的发展会影响沉积物抗侵蚀能力,但生物活动随作用时间存在两面性:一方面,生物作用促进沉积物颗粒间的结合力^[18]以及在沉积物表面生成光滑致密的生物膜以增强沉积物的抗侵蚀能力^[19];另一方面,生物作用可通过增大沉积物内部结构的疏松程度以削弱其抗侵蚀能力^[16]。有机物含量不同将导致不同程度的生物作用,对沉积物抗侵蚀能力具有不同的影响。

试样 A 有机物含量较大,生物活动强烈,在培养中破坏沉积物内部结构的程度明显,而对颗粒间结合力的增强效果不明显,总体上其抗侵蚀能力被削弱,故在冲刷中表现为在各组剪切力作用下,以最大侵蚀率 R_p 与稳定侵蚀率 R_s 为代表的侵蚀率均随培养时间而增大。

试样 B 挥发性有机物含量有所减少,生物活动减弱,随培养时间增加,对沉积物内部结构的破坏程度也减弱;而颗粒间结合力仍有一定增强,但存在一个上限值,在水流剪切力较大时无法抵抗水流作用,因此表现为在水流剪切力较小时,最大侵蚀率 R_p 和稳定侵蚀率 R_s 随培养时间减小,而在水流剪切力较大时,则随培养时间而增大。

试样 C 有机物含量较低,生物活动进一步减弱,随培养历时的增加,对其内部结构的破坏较小;相比之下,一定的生物活动能增强沉积物颗粒间的结合力以及促进表面致密光滑的生物膜生成,总体上增强了沉积物抗侵蚀能力,故在冲刷中表现为在各组剪切力作用下,最大侵蚀率 R_p 与稳定侵蚀率 R_s 均随培养时间而减小。

4 结论

本试验选用不同 VS 含量的真实排水管道中的沉积物作为试验材料,采用循环水槽装置,在一系列不同流速的恒定流工况下,讨论了不同程度生物活动对沉积物冲刷规律的影响,得到以下结论:

1) 不同 VS 含量的沉积物经过不同培养时间,在一系列剪切力作用下其动态侵蚀率 R 的变化规律较一致:在冲刷初期,侵蚀率随冲刷迅速增大,在第

2~3 min 达到最大侵蚀率 R_p , 随后出现大幅下降,并逐渐趋于稳定。

2) 不同程度的生物作用对沉积物抗侵蚀能力产生不同的影响。沉积物 VS 含量较低时,生物作用相对较弱,其抗侵蚀能力随培养时间有所增强;VS 含量较高时,生物活动强烈,抗侵蚀能力有所削弱;VS 含量介于前两者之间时,生物作用导致沉积物疏松的同时也增加了颗粒间的黏结力,但存在上临界值,即生物活动对沉积物侵蚀率的影响存在两面性。

3) 在冲刷过程中,沉积物侵蚀率的增长幅度在剪切应力较小时增长缓慢;当达到及超过临界剪切力后,增长幅度有明显提升,随后能更快地发展。同一组 VS 含量的沉积物,培养历时越长后期侵蚀率的增长幅度越大,可见在突破颗粒间结合力的上临界值后,生物作用时间越长对沉积物的影响越大,使其更易被侵蚀。

参考文献

- [1] 王淑芝, 马秀凤, 曲秀贤. 城市排水管道堵塞的原因与防治措施[J]. 森林工程, 2000, 16(2): 58—59.
WANG Shu-zhi, MA Xiu-feng, QU Xiu-Xian. Reasons of causing the blocks of drainage pipelines in cities and the measures to prevent the blocks[J]. Forest Engineering, 2000, 16(2): 58—59. (In Chinese)
- [2] 李茂英, 李海燕. 城市排水管道中沉积物及其污染研究进展[J]. 给水排水, 2009, 34(S1): 88—92.
LI Mao-ying, LI Hai-yan. Research progress of sediment and pollution in urban drainage pipeline[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 34(S1): 88—92. (In Chinese)
- [3] 张伟, 余建, 李葳. 广州市排水管道沉积现状研究分析[J]. 给水排水, 2012, 38(7): 147—150.
ZHANG Wei, YU Jian, LI Wei. Research and analysis on the current situation of drainage pipe in Guangzhou[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(7): 147—150. (In Chinese)
- [4] 李海燕, 徐尚玲, 黄延, 等. 合流制排水管道雨季 overflow 污染负荷研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2522—2530.
LI Hai-yan, XU Shang-ling, HUANG Yan, et al. Pollution loading of overflow in combined drainage channels during rainy season[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(9): 2522—2530. (In Chinese)
- [5] 韩其为, 何明民. 泥沙运动统计理论[J]. 科学通报, 1980, 25(2): 82—84.
HAN Qi-wei, HE Ming-min. Statistical theory of sediment movement [J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 25(2): 82—84. (In Chinese)

- [6] 韩其为, 何明民. 泥沙起动规律及起动流速[J]. 泥沙研究, 1982(2): 11—16.
HAN Qi-wei, HE Ming-min. Sediment incipient motion and starting velocity[J]. Journal of Sediment Research, 1982(2): 11—16. (In Chinese)
- [7] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1—9.
DOU Guo-ren. Incipient motion of coarse and fine sediment [J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1—9. (In Chinese)
- [8] 刘春嵘, 邓丽颖, 呼和敖德. 复杂流动下泥沙起动概率的图像测量[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(3): 24—27.
LIU Chun-rong, DENG Li-ying, HUHE Ao-de. Image measurement of the probability of sediment incipience under complex flow[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(3): 24—27. (In Chinese)
- [9] CRABTREE R W. Sediments in sewers[J]. Journal of the Institution of Water & Environmental Management, 1989, 3(6): 569—578.
- [10] PARTHENIADES E. Turbulence, flocculation and cohesive sediment dynamics[J]. Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, 1993, 42: 40—59.
- [11] 陈勇民, 张仪萍, 周永潮, 等. 合流制排水系统截留工程淤积分析与探测[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(2): 71—75.
CHEN Yong-min, ZHANG Yi-ping, ZHOU Yong-chao, *et al.* Analysis and inspection on siltation of intercepting combined sewer system[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(2): 71—75. (In Chinese)
- [12] 王家生, 陈立, 刘林. 黏性泥沙分层运动特征的试验研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 13—18.
WANG Jia-sheng, CHEN Li, LIU-Lin. Experimental study of feature of the cohesive sediment lamination movement[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 13—18. (In Chinese)
- [13] 吕平, 谈广鸣, 王军. 黏性泥沙淤后起动流速试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(2): 56—58.
LV Ping, TAN Guang-ming, WANG Jun. Cohesive sediment after deposition and consolidation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(2): 56—58. (In Chinese)
- [14] HVITVED-JACOBSEN T, VOLLERTSEN J, MATOS J S. The sewer as a bioreactor—a dry weather approach[J]. Water Science & Technology, 2002, 45(3): 11—24.
- [15] BLACK K S, TOLHURST T J, PATERSON D M. Working with natural cohesive sediments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(1): 2—8.
- [16] VOLLERTSEN J, HVITVED-JACOBSEN T. Resuspension and oxygen uptake of sediments in combined sewers[J]. Urban Water, 2000, 2(1): 21—27.
- [17] SCHELLART A, VELDKAMP R, KLOOTWIJK M. Detailed observation and measurement of sewer sediment erosion under aerobic and anaerobic[J]. Water Science & Technology, 2005, 52(3): 137—146.
- [18] BANASIAK R, VERHOEVEN R, DE SUTTER R. The erosion behaviour of biologically active sewer sediment deposits: observations from a laboratory study[J]. Water Research, 2005, 39(20): 5221—5231.
- [19] 邵卫云, 马妍, 周永潮, 等. 生物作用下排水管道沉积物的冲蚀特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2014, 48(6): 1075—1079.
SHAO Wei-yun, MA Yan, ZHOU Yong-chao, *et al.* Erosion characteristics of sewer sediment with biological actions[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(6): 1075—1079. (In Chinese)
- [20] SONG T, GRAF W H. Velocity and turbulence distribution in unsteady open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(3): 141—154.
- [21] SKIPWORTH P J, TAIT S J, SAUL A J. Erosion of sediment beds in sewers; model development[J]. Journal of Environment Engineering, 1999, 125(6): 566—573.
- [22] AHYERRE M, CHEBBO G, SAAD M. Nature and dynamics of water sediment interface in combined sewers[J]. Journal of Environment Engineering, 2001, 127(3): 233—239.