

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.20.022

# 利用底泥改良控制悬浮物释放的水体抑浑研究及应用

翟伟奇<sup>1</sup>, 王敏吉<sup>2</sup>, 莫银锦<sup>2</sup>, 黄 鸥<sup>3</sup>, 柏春荫<sup>4</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司 广西分院, 广西 南宁 530002; 3. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 4. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

**摘 要:** 针对因底泥不稳定极易造成水体浑浊的问题,基于对蚯蚓土的形成机理研究,提出采用仿生手段来实现底泥稳定的思路。采用以多糖高分子为主的团粒结构改良剂,实现对底泥的团粒结构改良,分析了团粒结构的包裹和固化机理。实验室的团粒造粒抑浑试验验证了仿生改良手段抑浑的有效性,中试形成了工程尺度下的底泥团粒改良工艺以及相关工程参数。工程实践进一步验证了团粒结构改良的包裹和固化机理在稳定底泥方面的有效作用,实现了预期的工程效果。

**关键词:** 膨胀性黏土; 底泥; 团粒结构; 透明度; 抑浑

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)20-0121-05

## Study on Inhibiting Turbidity Experiment in Water Body by Improved Sediment to Control the Release of SS and Its Application

ZHAI Wei-qi<sup>1</sup>, WANG Min-ji<sup>2</sup>, MO Yin-jin<sup>2</sup>, HUANG Ou<sup>3</sup>, BAI Chun-yin<sup>4</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Guangxi Branch of Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Nanning 530002, China; 3. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 4. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to control the problem of water turbidity caused by unstable sediment, the academic thought of using bionic method to realize the stability of sediment was put forward based on studying the formation mechanism of earthworm soil. A polymer ameliorator based on polysaccharide was developed to improve the aggregate structure of sediment, and the encapsulation and solidification mechanism of the aggregate structure was analyzed. The effectiveness of the bionic improved method to inhibit turbidity was verified by the experiment of granulation and SS controlling in the laboratory. The pilot-scale experiment formed the sludge improvement process and related parameters in the engineering scale. The engineering practice further verifies the effective role of the encapsulation and solidification mechanism of the improved aggregate structure on the stabilization of sediment and achieves the expected engineering effect.

**Key words:** expansive clay; sediment; aggregate structure; transparency of water; inhibiting turbidity

水质作为水环境的核心,最直接的感官效果就是透明度高,水体清澈。造成水体透明度不高的原因很多,但悬浮物浓度过高是一个很重要的因素。

对于某些河道和湖泊,导致悬浮物浓度不断增高的一个重要原因就是底泥不断向上覆水体释放细微颗粒并悬浮于水体中,继而造成水体长期浑浊,这种现

象在膨胀性黏土<sup>[1-3]</sup>普遍存在的华南地区更为常见。该区域内某些河流、湖泊在整治及清淤工程结束补水后,短短的几天内透明度可降至20 cm以下,随着颗粒物中夹杂的有机质不断扩散,水质往往持续恶化。透明度降低也严重影响了沉水植物的种植和养护,对水体深处的微生物环境营造也十分不利。因此,对因底泥不稳定引起水体透明度不高的问题,需要引起高度重视,因为感官效果对水质的判断最为直观。

## 1 抑浑问题的提出

广西南宁那考河流域在治理过程中底泥呈现膨胀性黏土的典型特征(见图1),河道清淤工程完毕后势必造成河底黏土的新鲜断面直接暴露在水体中。黏土遇水膨胀,细微颗粒持续向水体释放,造成上覆水体浑浊是可预见的大概率事件。为此,项目组在工程设计调研阶段进行了多方案的研讨,提出了强化底泥治理的思路。



图1 工程实施前那考河膨胀性黏土造成的水体浑浊现象

Fig.1 Turbidity of water caused by expansive clay in Nakao River before project implementation

从传统的工程设计角度,为抑制水体浑浊,往往对底泥采取物理覆盖等方式<sup>[4-6]</sup>进行处置,覆盖物多为砂石类颗粒材料。事实证明,膨胀性黏土遇水后形成较厚的由微细颗粒组成的淤泥层,由于密度的差异,覆盖物往往会下沉至泥体中,造成表层覆盖失效。因此对表层底泥进行改良处理,使得改良后的底泥覆盖层能起到三个作用:①本身的稳定性,即不对上覆水体进行持续污染;②能起到良好的覆盖和阻断效应,使得被覆盖的底泥不能穿越覆盖层而污染水体;③改良层本身又能作为植物种植的土壤层和微生物栖息的理想环境。考虑到采用砂石类颗粒材料覆盖后的经济性、生态性等综合因素,项目组

结合那考河底泥的特征,现场进行了中试,并根据试验结果提出了底泥团粒结构性改良修复的方案。

## 2 抑浑试验及改良工艺

### 2.1 团粒结构改良稳定底泥的机理

#### 2.1.1 包裹封闭机理

蚯蚓土(见图2)在促进土壤改良、作物生长方面占有优势。蚯蚓土内含18种氨基酸,氮、磷、钾等含量也很高,但真正实现“沃土”效果的是其独特的天然团粒结构。普通土壤经过蚯蚓复杂的生物及化学系统后,之所以呈现天然颗粒态是因为土壤受特殊胶体表面张力影响形成的团聚效应,增大了单颗粒的直径并在单颗粒间形成了良好的胶结键,很好地阻止了细微颗粒的散落或流失。这种团粒结构的包裹机理为膨胀性黏土阻止细微颗粒释放提供了可行的思路。



图2 蚯蚓土团粒

Fig.2 Natural earthworm aggregates

膨胀性黏土遇水膨胀,细微颗粒持续向上覆水体释放并形成悬液,通过团粒结构改良后,形成多级的粒径分布(见图3)。稳定的团粒结构可以从本质上解决改良黏土细微颗粒不稳定性的问题,这是解决这一问题的重要前提。

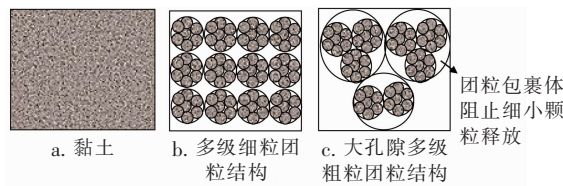


图3 土壤团粒结构

Fig.3 Schematic diagram of soil aggregate structure

#### 2.1.2 固化稳定机理

图3表明团粒造粒后,因团粒结构的存在,泥体的孔隙率呈几何级增加。团粒体形成的过程中将土壤、水进行了颗粒化固化,表现出明显的固化作用。这种固化作用实现了底泥的稳定,是采用团粒结构对底泥进行改良的重要机理。

## 2.2 抑浑试验研究

### 2.2.1 实验室试验

造粒及造粒质量控制是通过底泥改良实现抑浑目的的关键。土壤受特殊胶体表面张力影响形成的团聚效应,是仿生造粒的基本机理。为了模拟蚯蚓的分泌液,通过反复测试,选定了多糖类高分子材料作为造粒改良剂的核心材料,辅助无机矿物质成分,通过与一定含水率的土壤均匀混合后,在振动棒或者高转速搅拌机的机械作用下,形成团粒(见图4),细颗粒和粗颗粒(团粒多级包裹)均表现出了良好的抑浑效果,而且在物理扰动后,依旧具有抑浑的稳定性。

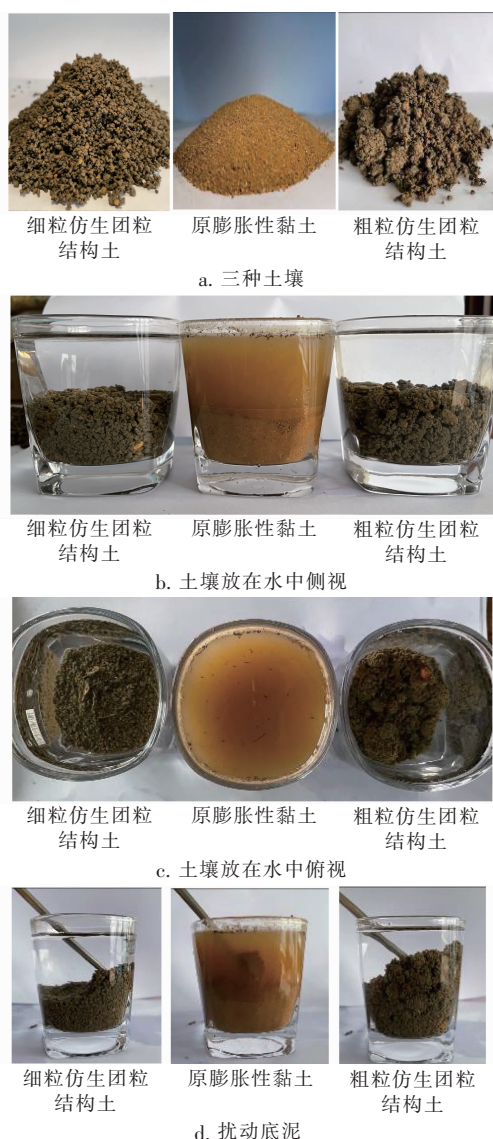


图4 仿生团粒结构对膨胀性黏土的抑浑效果

Fig.4 Effect of biomimetic aggregate structure on turbidity suppression of expansive clay

### 2.2.2 河道中试

选取那考河流域的一段 50 m 河道(两端围挡封闭,见图1)进行原位试验,目的是验证抑浑效果以及改良层的抗冲刷效果。

#### ① 试验方法及技术路线

为了保障试验取得预期效果,试验段采用如图5所示的试验方法及改良工艺。将泥水混合体抽入旁路的搅拌机进行团粒造粒,造粒后的泥体再回填到河床之上(造粒后的改良底泥未进行自然干化)。

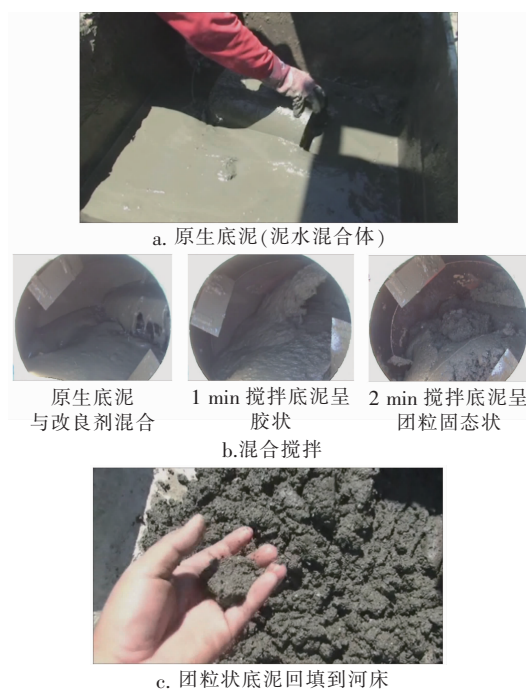


图5 中试底泥改良方法及修复工艺过程

Fig.5 Method for improving sediment in pilot test and repairing technological process

#### ② 改良层厚度的确定

改良层厚度的确定取决于两个因素:一个是要满足抗冲刷深度的要求,另一个是满足水生植物种植对厚度的基本要求。考虑到那考河行洪流速及中水补充水量,其设计流速  $< 3.0 \text{ m/s}$ ,利用极限条件计算那考河极限最大冲刷深度(顺流条件)<sup>[7]</sup>,具体见下式:

$$\Delta h_B = h_p \left[ \left( \frac{v_{cp}}{v_{\text{允}}} \right)^n - 1 \right] \quad (1)$$

式中:  $\Delta h_B$  为局部冲刷深度, m;  $h_p$  为冲刷处冲刷前的水深, 那考河水位变化为  $1 \sim 3 \text{ m}$ , 最大流速下取  $1 \text{ m}$ ;  $v_{cp}$  为平均流速, 取  $3 \text{ m/s}$ ;  $v_{\text{允}}$  为河床允许不冲流速, 参考类比工程, 取  $v_{\text{允}} = 1.2 \text{ m/s}$  (黏性底



泥); $n$ 为与防护岸坡在平面上的形状有关的系数,可取 $n=1/4$ 。

代入式(1),得 $\Delta h_B=0.26\text{ m}$ 。

综合上述两个因素,团粒改良层厚度取 $0.3\text{ m}$ ,见图6。

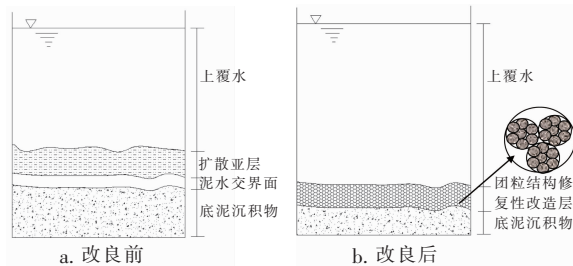


图6 河床表层底泥团粒结构改良前、后河床底泥剖面示意

Fig.6 Diagram of sediment profile before and after improvement of aggregate structure of surface sediment

### ③ 中试效果

中试结果表明,除了改良层本身的稳定抑浑效果外,这种改良方式使得改良层表现出稳定的覆盖效应,而且改良覆盖层的密度和被覆盖的底泥密度具有一致性,不会出现砂砾覆盖层因密度不同沉至底泥内部的情况。悬浮物浓度降低后,水体透明度长期维持在一个较高水平(见图7、8)。

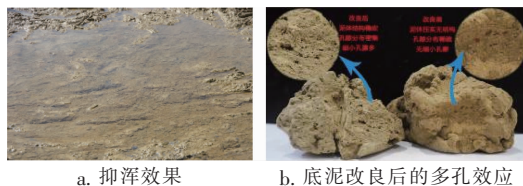


图7 试验段河床表层底泥团粒结构改良后的抑浑效果及底泥自然干化后的多孔效应

Fig.7 Inhibiting turbidity effect of surface sediment improvement of aggregate structure and porosity effect of nature drying sediment after improvement of aggregate

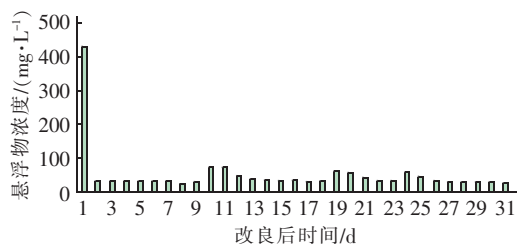


图8 试验河道进行团粒结构性改良后悬浮物浓度连续30 d的实测数据

Fig.8 Measured data of suspended matter concentration for 30 days after structural improvement of aggregate in the experimental river

试验河道经过团粒结构改良的抑浑处置后,原来表层的高浓度悬浮物水体被团粒结构包裹形成了致密的固化层后与底泥成为一体而消失。补水30 d后悬浮物浓度基本为 $30\text{ mg/L}$ ,表现出极强的稳定性。第10、11天以及第19、24天,因下雨流入溢流雨水,造成了悬浮物浓度的波动,但经过缓冲后,悬浮物浓度恢复到正常水平,说明水中即使混入了溢流雨水的悬浮物,在底泥团粒结构稳定底泥的条件下,水体中的悬浮物在补充水体的推动下能够流走或者沉淀到底部,团粒结构的抑浑机理得到了验证<sup>[8-9]</sup>。

## 3 工程实践

广西南宁那考河流域治理项目全长 $6.35\text{ km}$ ,其中包括湿地公园和河道水生态构建,总投资 $11.9$ 亿元,以PPP形式建设。那考河流域是典型的膨胀性黏土质底泥,团粒结构改良工程实施后,彻底解决了膨胀性黏土返浑问题,沉水植物难以种植的难题也一并解决。目前,那考河水体常态下悬浮物浓度基本稳定在 $8\text{ mg/L}$ ,所有指标均优于考核标准。

底泥团粒结构改良工程的实施关键是保障造粒的效果,包括造粒强度、造粒层厚度的控制。设计中为了提高造粒的效率,提高团粒的稳定性,掺入一定比例的粗细搭配的砂粒,起到“引核”的作用。设计技术路线见图9。

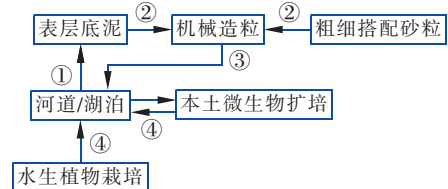


图9 底泥结构性改良技术路线暨施工工序

Fig.9 Technical roadmap for structural improvement of sediment

施工过程不带水作业(见图10),采用高效率的搅拌机头(机头切深不小于 $30\text{ cm}$ ,且机头切入土壤后,周边采用封闭围挡,以保证造粒过程中颗粒相互碰撞,便于形成团粒)直接对河床进行原位团粒造粒。具体施工步骤:首先对河床进行漫灌处理,以便河床不出现板结土,同时为团粒造粒提供合适的含水率;其次将团粒造粒剂根据改良深度要求进行定量均匀喷洒,同时均匀铺撒砂粒(厚度不超过 $1\text{ cm}$ );然后对河床表层进行喷洒水,让造粒剂充分吸收水分;最后,在 $30\text{ min}$ 以后即可进行原位机械搅

拌造粒,对造粒深度和造粒效果进行严格质量控制,造粒效果可采用“改良后的底泥或土壤置于水中,水体是否清澈”判断。补充水体后,还要对本土微生物进行扩培和水生植物的栽培。



图10 底泥改良施工过程

Fig. 10 Construction process of sediment improvement

#### 4 结论

① 底泥不断向上覆水体释放微细颗粒是导致水体混浊的一个重要原因,底泥的稳定性影响了水体的透明度。

② 团粒结构的包裹性是稳定底泥的重要机制,试验证明了通过团粒结构对膨胀性黏土进行抑浑是可行的思路。

③ 团粒结构改良层具有自身的稳定性,还具有覆盖和阻断效应,高孔隙率的团粒结构为水生植物种植和微生物提供了良好的载体。

④ 工程实践表明对膨胀性黏土底泥进行结构改良,具有抑浑的长期稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.  
LIU Tehong. Expansive Clay Problems in Engineering Construction[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997 (in Chinese).
- [2] 黄赓祖. 膨胀黏土填筑条件的控制[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 157 - 166.  
HUANG Gengzu. Control of placement moisture and density in compacted expansive clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(1): 157 - 166 (in Chinese).
- [3] 许松宜. 南宁膨胀土边坡植被加强系统的试验研究[D]. 南宁:广西大学, 2014.  
XU Songyi. Experimental Study on Vegetation Reinforcement System of Expansive Clay[D]. Nanning: Guangxi University, 2014 (in Chinese).

- [4] 陈荷生, 石建华. 太湖底泥的生态疏浚工程——太湖水污染综合治理措施之一[J]. 水资源保护, 1998(3): 11 - 16.  
CHEN Hesheng, SHI Jianhua. The ecological dredging project of the bottom mud of Taihu Lake—one of the comprehensive measures to control the water pollution of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 1998(3): 11 - 16 (in Chinese).
- [5] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 269 - 279.  
PU Peimin, WANG Guoxiang, HU Chunhua, et al. Can we control lake eutrophication by dredging? [J]. Journal of Lake Sciences, 2000, 12(3): 269 - 279 (in Chinese).
- [6] 路程. 生物沸石覆盖修复扬州古运河底泥实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.  
LU Cheng. The Research of Repairing Yangzhou Ancient Canal Sediment by Biological Zeolite Capping [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese).
- [7] 高波. 推荐冲刷深度计算公示的应用浅析[J]. 陕西水利, 2004(4): 106 - 108.  
GAO Bo. Application of recommended scour depth calculation formula [J]. Shaanxi Water Resources, 2004(4): 106 - 108 (in Chinese).
- [8] 蔡煜, 王景燕, 龚伟, 等. 柑橘林下养鸡对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 225 - 232.  
CAI Yu, WANG Jingyan, GONG Wei, et al. Raising chickens in citrus orchards on fractal features of soil aggregates [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2017, 34(2): 225 - 232 (in Chinese).
- [9] 李军, 王淑莹. 水科学与工程试验技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.  
LI Jun, WANG Shuying. Water Sciences and Engineering Test Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002 (in Chinese).

作者简介:翟伟奇(1976 - ),男,湖北武穴人,大学本科,高级工程师,从事环境综合治理、市政污水处理工作。

E-mail: 20478741@qq.com

收稿日期: 2021 - 01 - 12

修回日期: 2021 - 03 - 04

(编辑:衣春敏)