

DOI: 10.11779/CJGE201907015

福岛核泄漏引发河湖库底泥污染及处置：实例研究

刘既明^{1, 3}, 朱伟^{2, 3}, 吴思麟^{1, 3}

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210024;

3. 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 210024)

摘要: 福岛核电站泄漏事故造成的水体污染问题主要聚焦于用水安全及辐射剂量。日本环境省的调查显示水体的放射性污染物主要累积于底泥之中, 用水安全问题较小, 可以得到保障。就底泥放射物的辐射问题而言, 由于水对 γ 射线有遮蔽作用, 水深较大的水体暂时不会对人体造成危害, 而水深较小存在枯水期的池塘则可能需要进行处理。针对这类水体的处理日本各施工企业因地制宜地开发使用了多种新的工法。本文梳理了核泄漏事故后日本政府进行或发起的水体污染调查、研究, 和污染处理的决策、施工等过程, 介绍了其中有代表性的一些处理工法, 此外还介绍了福岛第一核电站港湾内高放射性污染浮泥的原位覆盖处理实例。

关键词: 核污染处理; 底泥污染; 底泥处理; 薄层疏浚; 原位覆盖

中图分类号: TU461

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)07-1303-08

作者简介: 刘既明(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事疏浚淤泥资源化利用的理论和技術方面的研究工作。E-mail: kimingliu@yeah.net。

Sediment contamination and disposal after Fukushima nuclear accident: a case study

LIU Ji-ming^{1, 3}, ZHU Wei^{2, 3}, WU Si-lin^{1, 3}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. College of Environment, Hohai

University, Nanjing 210024, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai

University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Fukushima nuclear accident has caused serious pollution, including water body pollution. The water contamination and radiation from contaminated sediments have raised great concern among Japanese government and the public. A survey conducted by Ministry of Environment of Japan shows that most radioactive contaminants in water bodies are accumulated in sediments, and the water contamination is negligible under most circumstances. It has no need to deal with the contaminated sediments that constantly lie under several meters of water, for water shields γ -rays. However, the ponds in rural area with a dry period may have the necessity of disposal. Various construction companies in Japan have developed a variety of disposal methods according to the local conditions. This paper presents the investigations and researches of water body pollution initiated by Japanese Government, and the process of decision-making and operation of pollution treatment, with some representative new methods and their application cases. An introduction to the unique example of in-situ coverage for fluid mud within the harbor of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant is presented as well.

Key words: nuclear accident; contaminated sediment; sediment treatment; thin dredging; in-situ coverage

0 引言

2011年3月11日东日本大地震后, 福岛第一核电站发生了严重的核泄漏事故, 使遭受震灾的日本又被蒙上核污染的阴影。大量放射性物质通过大气和水循环扩散, 落入土壤、水体, 或是被生物吸收, 最终都威胁到了居民的安全; 泄漏的放射性物质主要有碘-131, 铯-134, 铯-137, 半衰期分别为8.3 d, 2.1 a, 30 a, 所以核泄漏不仅短时间内危害巨大, 长期安全

问题也需要解决。就长期安全问题而言, 除了土壤和植被, 水体的安全也因其与居民日常生活紧密联系的特性而备受关注。水体安全问题主要有两个方面: ①

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2015CB057803); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017B702X14)

收稿日期: 2018-08-02

***通讯作者** (E-mail: zhuweiteam.hhu@gmail.com)

用水安全问题,居民日常生活直接接触的生活用水、农业和工业生产用水等都需要保证水中的放射物浓度在安全范围以内;②水体辐射问题,水和底泥中的放射物可能产生较大的辐射,威胁居民的安全。

针对用水安全问题,日本厚生劳动省发布了通知,规定饮用水和自来水中的铯-134和铯-137放射物比度不得高于10 Bq/kg^[1-2]。这就要求水厂做到选用安全的水源或采取处理措施使出厂水质达到安全标准要求。对于直接用作饮用水源的一般水井,厚生劳动省文件规定应由政府组织检测水质,放射物比度超标将不推荐使用。

应对水体辐射问题,日本政府则先发起调查先掌握污染程度、危害程度、污染规律等情况,再相应地加以研究论证,随后征集解决方案、试行并推广。其中,环境省^[3]发起的调查发现,水体中的放射性污染物主要存在于底泥中,因此,污染水体的处理就聚焦在污染底泥的处理处置问题上了。那么,受灾地区污染水体中底泥的污染程度如何,什么污染程度会对周边居民造成危害并且有必要对其进行处理,以及怎样处理,处理到什么程度,这些都是处理、处置污染底泥中所要面对的具体问题。本文主要围绕以上几个问题对日本福岛核泄漏事故后底泥污染及处理处置情况进行介绍。

1 底泥污染调查

事故发生后,日本政府环境省组织开展了每年一次的公共水域放射性物质跟踪调查。调查的对象主要为受影响的8个县和东京部分区域的河流、湖泊、水库、池塘等水体,以及离岸1~2 km的近海海域。此项调查围绕水体中水与底泥的放射物含量以及现场的辐射量展开。此项调查每年多次对600余个水体的水、底泥、水体周边土壤样本进行采集,并现场测定水体附近的辐射剂量。调查的采样及现场测量方法如表1所示。

放射物的测量主要针对半衰期较长的铯-134和铯-137,其含量采用的指标是放射物比度,单位是Bq/L(水样)和Bq/kg(泥样),采用锗半导体探测器测定,为表示方便,以下铯-134和铯-137的放射物比度均直称放射物比度;辐射量为现场测定,采用指标为辐射剂量,单位为μSv/h,使用NaI(Tl)闪烁谱仪测定。

综合2011年—2016年年度调查报告数据^[3],可以总结出各类水体污染总体概况,表2中显示的是除去个别污染严重的水体后的绝大多数水体的水样及底泥样的放射物比度所在的区间。

表 1 采样及现场测量方法概要^[4]

Table 1 Sampling methods		
试样与项目	要点	
河流	水	桥上或水岸使用采水器或舀子取3 L表层(表面至50 cm深)水样
	底泥	桥上或水岸使用Ekman-Birge小型箱式采泥器或勺子取3 L表层(表面至10 cm深)泥样,采样3次以上,随后混合
	周边土壤	在调查点上游堤岸靠河流一侧左右两边各取一处采样,使用采土器或小铲取表层(表面至5 cm深)土壤,每处取5个点(相隔3~5 m)并混合土样
	辐射剂量	土壤采样点处使用NaI(Tl)闪烁谱仪在地面以上1 m高处测定辐射剂量的值
湖泊、水库、池塘	水	船上或水岸使用采水器或舀子取表层(表面至50 cm深)及底层(距湖底1 m处)水样各3 L
	底泥	船上或水岸使用Ekman-Birge小型箱式采泥器或勺子取3 L表层(表面至10 cm深)泥样,采样3次以上,随后混合
	周边土壤	在调查点上游堤岸靠水体一侧左右两边各取一处采样,使用采土器或小铲取表层(表面至5 cm深)土壤,每处取5个点(相隔3~5 m)并混合土样
	辐射剂量	土壤采样点处使用NaI(Tl)闪烁谱仪在地面以上1 m高处测定辐射剂量的值
近海	水	船上使用采水器或舀子取表层(表面至50 cm深)及底层(距海底1 m处)水样各3 L
	底泥	船上或水岸使用Ekman-Birge小型箱式采泥器或抓斗式采泥器取3 L表层(表面至10 cm深)泥样,采样3次以上,随后混合

表 2 2011 年—2016 年水体放射污染调查结果概要^[3]

Table 2 Results of radioactive contamination in water body during 2011-2016				
年份	水样	泥样		
		河流	湖泊水库池塘	近海
2011	基本未检出	2000 Bq/kg以下	2000 Bq/kg以下	600Bq/kg以下
2012	基本未检出	3000Bq/kg以下	3000 Bq/kg以下	600Bq/kg以下
2013	基本未检出	1000 Bq/kg以下	3000 Bq/kg以下	150Bq/kg以下
2014	基本未检出	1000 Bq/kg以下	3000 Bq/kg以下	150Bq/kg以下
2015	基本未检出	300 Bq/kg以下	3000 Bq/kg以下	300Bq/kg以下
2016	基本未检出	200 Bq/kg以下	3000 Bq/kg以下	200Bq/kg以下

由表2可以看出,水样自2011年起,绝大部分均未达到检出限1 Bq/L,各年度调查报告的数据显示,个别水样放射物比度较高,但未有超过100 Bq/L的记录;底泥的数据中,河流和近海的底泥样本的放射物比度相对较低,且随时间有下降趋势,湖泊、水库、池塘样本较河流和近海高,随时间无明显下降趋势。

由2011年—2016年度调查报告数据,周边土壤污染程度、水体的辐射剂量数据较分散且波动较大,有

高有低, 环境省除染团队^[5]对各年度调查数据进行了整理, 得出了以下两点结论: ①水体底泥放射物比度一般低于周边土壤放射物比度。②河流与湖泊、水库、池塘的周边辐射剂量与土壤放射物比度存在良好的相关性。

水体周边土壤放射物比度一般高于底泥, 是应当重视的问题, 但需要指出的是, 针对放射物含量高的土壤、植物, 环境省发起了“除染行动”, 即将生活区受污染的土壤和植物除去, 并在指定地点处理、堆放, 因此土壤的处理不再加以细述。

对于水以及底泥而言, 一般认为水中放射性铯同位素存在极少, 且绝大部分符合饮用水辐射安全标准, 但底泥中富存了放射性铯同位素, 尤其是湖泊、水库、池塘等水体底泥的放射物比度明显高于河流与近海水域, 且其时常作为水源, 是需要重点关注的对象。

2 处理处置原则

在对水体的核污染特征有了整体的把握之后, 需要回答的问题主要有三个: ①一定的核污染程度相应会造成多大程度的危害? ②在什么情况下需要处理污染底泥? ③需要处理到什么程度?

对于水而言, 日本厚生劳动省2012年3月发布的两则通知明确规定了饮用水和自来水的放射物比度不得高于10 Bq/L, 绝大部分水体中的水在辐射安全层面上是达标的。

对于固体废弃物而言, 环境省^[6]曾对废弃物放射物比度和其辐射剂量以及工人、居民与废弃物的接触时间进行过换算, 换算结果如表 3 所示。按 1990 年国际辐射防护委员会给出的建议辐射剂量限值 1 mSv/a 计算, 在不加防护的情况下, 放射物比度 8000 Bq/kg 以下的废弃物对公众和相关作业人员是安全的, 而 8000 Bq/kg 以上的固体废弃物则需要特别处理, 日本也通过立法将这些废弃物定为需要特殊处理的废弃物, 由国家层面组织专业力量进行处理。

根据以上标准, 可以认为水的辐射安全基本不成问题。而绝大多数水体底泥的放射物比度处于 8000 Bq/kg 以下的水平, 处于安全范围内。

此外, 日本原子力研究所^[7]的研究表明, 1 m 深的水大约能将底泥产生的辐射剂量减小100倍, 1.3 m 深的水可缩小辐射剂量1000倍, 当水深达到1.6 m缩减倍数可以达到10000 (如图1)。因此, 对近海、河流、湖泊和水库而言, 即使存在底泥放射物比度大量超标的情况, 只要常年可以保持的足够水深就能提供辐射安全的保障。但对于靠近居住地且水位变化较大甚至存在干水期的池塘而言, 存在没有足够深度的水, 甚

至没有水对 γ 射线进行遮蔽的情况, 这样就存在一定的风险。

表 3 造成 1 mSv/a 辐射剂量的放射物比度^[6]
Table 3 Radioactivity to cause a radiation dose of 1 mSv/a

情形	评价对象	造成1 mSv/年辐射剂量的放射物比度	
保管	废弃物装卸 保管场所附近居住	工人 (1000 h/a)	12000 Bq/kg
		居民 (20%居住时间在室外)	100000 Bq/kg
搬运	废弃物搬运 运输线路附近居住	工人 (1000 h/a)	10000 Bq/kg
		居民 (450 h/a)	160000 Bq/kg
处理	垃圾焚烧炉 维修 处理设施附近居住	工人 (900 h/a)	30000 Bq/kg
		居民 (20%居住时间在室外)	550000 Bq/kg
填埋	焚烧灰渣填埋	工人 (1000 h/a)	10000 Bq/kg
	脱水污泥填埋	工人 (1000 h/a)	8000 Bq/kg
	填埋场附近居住	居民 (20%居住时间在室外)	100000 Bq/kg

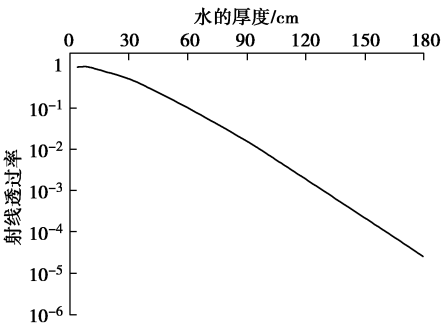


图 1 水对 γ 射线的遮蔽效果 (γ 射线源: ¹³⁷Cs)^[7]
Fig. 1 Water shielding to γ -rays (Cesium-137)

那么什么样的池塘需要进行处理, 并且进行怎样的处理呢? 农林水产省根据其震后数年的调查结果和工程实践经验, 形成了一份《池塘放射性污染物处理指南》^[8], 该指南中详细介绍了池塘清理与否的判断流程。

首先, 如果池塘满足靠近住宅、公园等生活区域, 存在一定时间的干水期, 干水期池塘周边辐射量显著提升并使该区域居民年所受辐射剂量超过一定程度这 3 个条件, 则将该池塘列为“除染对象”(居民所受辐射剂量超过20 mSv/a属于急需处理对象, 1~20 mSv/a属于需要处理的对象), 并根据日本政府颁布的《福岛核事故放射性污染特别处置法》规定的流程和方法对池塘底泥、植物、周边土壤进行处理, 其处理目标是将辐射剂量控制在1 mSv/a以下。

如果池塘不满足以上3个条件, 即不是“除染对象”, 那么还需要从重启农业生产方面考虑池塘处理

的必要性。若池塘为农用池塘，且满足底泥放射物比度较高、时常出现放射性铯同位素向水中扩散的现象等对农业生产不利的条件，则该池塘即为农林水产省的处理目标。具体判断指标如下，满足任意一条即应当列为处理目标：①池塘水中检出放射性铯同位素（检出限1 Bq/L）；②需要清淤的池塘，且其底泥放射物比度超过8000 Bq/kg；③水中时常出现浑浊并带有高浓度放射性铯同位素，流出水道存在放射物比度超过8000 Bq/kg的堆积物；④池塘管理者工作所受辐射剂量较高的情况（总计超过1 mSv/a）。

可以看出，农用池塘的处理主要解决的是水质问题，并且排除在农业生产各环节可能出现的危险因素。因此农业角度出发的池塘污染处理方式应当是根据实际问题灵活选择的，同时也需要考虑经济性。由于这些农用池塘不属于《福岛核事故放射性污染特别处置法》规定的“除染对象”，且考虑到处理方式的多样性，因此没有一个处理工程应达到的效果的指标。但可以明确的是，这样的处理工程至少应做到解决问题，即控制水中的放射性铯同位素含量，以及控制工作人员所受的辐射剂量。

3 底泥疏浚及处理处置技术及实例

如上所述，部分污染特别严重、被列为“除染对象”的池塘依照《福岛核事故放射性污染特别处置法》规定进行处理，余下一些存在污染问题的农用池塘由农林水产省组织进行调查与处理。

由于这些需要处理的农用池塘实际情况各不相同、存在的污染问题各异，所以农林水产省广泛发动民间力量，开展了一系列工程实践，总结经验，在其推出的《池塘放射性污染物处理指南》中给出了多种情况下的多种推荐施工方法，并结合实例作了详细介绍。

污染农用池塘的问题主要分为以下四类：

（1）容易发生污浊的池塘

发生污浊的原因主要有上游冲刷带来浑浊水，以及底泥受到扰动。可以改变上游水流路径以阻止浑浊水流入，也可以避开池内浑浊区域取水，或者取水后再进行净化处理，抑或对底泥进行覆盖、去除等处理。

（2）需要进行清淤的池塘

此类池塘的问题是底泥中含有较高浓度的放射性铯同位素，但又因淤积问题有必要进行清淤。其解决办法有更换水源即放弃该池塘的农业功能，以及采用安全、环保的方法清理底泥。

（3）水中检出放射性铯同位素的池塘

作为灌溉水源的池塘水中检出放射性铯同位素，

其主要原因是上游冲刷以及底泥放射性污染物释放。处理方式同（1）。

（4）辐射量超标的池塘

池塘辐射量超标一般是由池塘周边的富集放射物的土壤、植物等引起的，处理方式是对池塘周边辐射剂量较大的区域进行挖土、除草处理。

针对以上四类池塘污染问题的处理对象、处理方法见表4。

表 4 污染池塘处理方法一览^[8]
Table 4 Disposal methods for contaminated ponds

处理 池塘 类型	处理 对象	处理方法							
		水				底泥		池	
		更 改 取 水 口	隔 离 污 浊 区	过 滤 净 化	更 改 水 路	更 换 水 源	原 位 覆 盖	原 位 固 化	直 接 去 除
容易 污浊 的池 塘	浊水 流入	√	√	√					
	浊水 扰动			√	√	√			
	底泥		√				√	√	√
需要 清淤 的池 塘	高放 射物 含量 底泥					√			√
水中 存在 放射 物池 塘	流入 污染 底泥			√	√	√			
	释放 污染			√		√	√	√	√
辐射 量超 标池 塘	周边 辐射 源								√

由表4可知，由污染底泥造成的问题主要是其中高浓度放射物造成的辐射问题，以及底泥中的放射物释放到水中造成污染的问题。对池塘而言，辐射问题仅能通过将底泥去除的方式解决，而应对污染物释放的问题，原位覆盖、原位固化和去除的方式都是可行的。以下简要介绍主要使用的各种池塘核污染底泥的处理方法。

（1）传统异位处理方法

直接铲除工法流程非常简单，主要分排干池水、挖除底泥、回灌池水三个步骤，去除底泥厚度约50 cm。这种工法适合较小规模的池塘，并要求池塘排干后底泥有足够的强度，能支持机械在其上行走与作业，此外还应解决池水暂存场所和污染底泥的去处。农林水产省的池塘放射性污染物处理指南》中示例工程处理后底泥放射物比度从7390 Bq/kg减小至2745 Bq/kg。

传统方法中的绞吸式疏浚方法不需要排干池水，其利用绞头搅拌底泥，随后抽吸低浓度泥水，在岸上

进行泥水分离、水处理等工序。示例工程处理后周边辐射剂量由 $0.27 \mu\text{Sv/h}$ 减少为 $0.02 \mu\text{Sv/h}$ 。

利用真空泵车去除污染底泥的方法应用也较为广泛, 其主要工序为: 将池水抽至仅剩 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 深, 利用强力真空泵车抽吸高浓度泥浆, 在岸上进行泥浆处理, 包括泥浆脱水、泥饼封装运送、尾水处理等。在福岛县福岛市柊森沼清淤工程的效果是放射物比度由 14351 Bq/kg 降至 2459 Bq/kg 。

(2) 薄层疏浚方法

直接铲除或是绞吸疏浚方法的一个欠缺之处在于底泥挖掘的深度较大, 由于放射性铯同位素一般仅存在于 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 深度范围内^[5], 所以大部分情况下可以仅清理表层 10 cm 厚度的污染底泥, 从源头上减少污染底泥的产出。

东亚建设工业开发了一套较方便的泵吸式薄层疏浚设备。该设备不需要台船, 通过四台绞车牵引控制泵头的方位和深度; 泵头(图2)呈球形, 中心是吸泥管道, 管道外部由下到上分别是配重和漂浮舱。运用该设备可以实现高泥浆浓度和池水低浑浊的疏浚效果。在池塘疏浚工程中, 可以仅吸除表层约 10 cm 厚度的底泥, 示例工程效果为放射物比度由 4915 Bq/kg 减少至 2303 Bq/kg 。

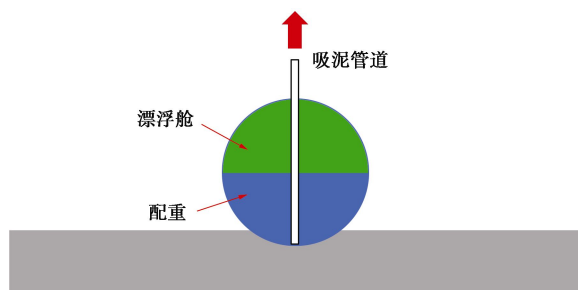


图2 薄层疏浚泵头示意图^[9]

Fig. 2 Pump head of thin dredge pump

株式会社ネオナイト开发了一套适合小型池塘的高精度绞吸式设备。利用该设备的3个空气仓控制浮潜以及倾斜角度, 设备的方位由岸上工人牵引和控制。疏浚深度分 $5, 10, 15 \text{ cm}$ 三个挡位, 通过调整绞头控制; 15 cm 疏浚深度情况下, 疏浚能力为单机每小时 $10 \sim 30 \text{ m}^2$ 。本工法适合长宽不超过 200 m 的池塘, 适用水深 $0.75 \sim 7 \text{ m}$, 在福岛县福岛市砥石沼清淤工程中, 放射物比度由处理前的 24966 Bq/kg 降低至 11912 Bq/kg 。

以上两种都是适合小型池塘的工法, 工程实例的池塘满水面积大约 $2000 \sim 4000 \text{ m}^2$, 所以两种工法仅将施工泵头安排在水中, 牵引、动力等其他设备均设置在岸上。

東洋建設株式会社则开发了一种适合大型池塘的薄层疏浚技术。施工台船(如图3)上安放有改装挖机和泵机, 泥处理和水处理装置均在岸上。将挖机的反铲改为固定装置, 下接倾斜度和开口大小可控的疏浚泵头, 疏浚厚度可调整, 施工实例中取 $15, 20 \text{ cm}$ 居多。泵头上安装有数个倾斜计, 台船上还安装有吃水计和定位系统, 施工精度非常高。福岛县双葉郡楢葉町上繁岡第1ため池疏浚工程中, 放射物比度由 13500 Bq/kg 减小至 241 Bq/kg , 效果显著。



图3 挖机改装的疏浚设备^[10]

Fig. 3 Modified dredging equipment

(3) 粗细颗粒分离处理

目前疏浚泥浆的处理中一般都会先进行沉淀, 将泥浆中的粗颗粒分离出来, 再对剩余泥浆进行脱水处理。这种通过剔除粗颗粒提高脱水效率的方法运用到放射性污染底泥的疏浚泥浆中是否可行? 其关键就在于粗颗粒是否吸附大量的放射性同位素。

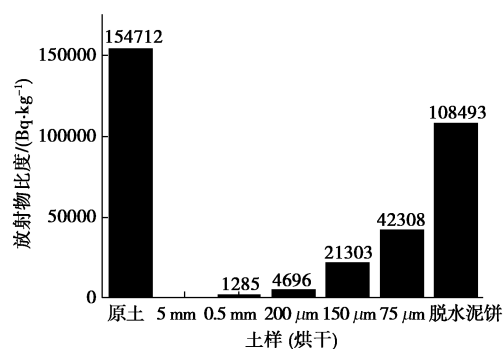


图4 土颗粒粒径与放射物浓度的关系^[9]

Fig. 4 Relationship between particle size of soil and concentration of radiation

荻野隆男^[11]将疏浚出的污染底泥进行了筛分并测定了各粒径组土样的放射物比度, 结果(图4)表明放射物主要吸附在小颗粒上, 主要存在于粒径 $200 \mu\text{m}$ 以下的小颗粒中。该研究成果成功运用在位于福岛县本宫市的東笹田池的处理工程中。東笹田池满水面积

约2000 m², 其疏浚工程利用喷射泵将约15 cm深度的污染底泥疏浚出来, 随后利用喷射泵分离装置将细颗粒初步分离出来, 随后通过振动、沉降将剩下的颗粒按粒径分离, 粒径0.2 mm以下的泥通过泥水分离、脱水处理变成泥饼, 粗颗粒加以冲洗放回池内, 尾水进行无害化处理也排回池内。最终, 東笹田池底泥的放射物比度由疏浚前的166374 Bq/kg降至3542 Bq/kg, 通过计算得出去除粗颗粒之后最终泥饼体积减少了67%。

初雁興業株式会社の底泥分級減容化工法则在疏浚时就进行了颗粒分离的工作。在疏浚泵头处加装离心装置, 将砂粒和粉粒、黏粒分离并只取粉粒、黏粒进行后续处理。泥浆经过絮凝处理和带式压滤变成泥饼。此工法水上所需空间较小, 但每小时仅能处理8 m³的泥水, 疏浚一个面积为300 m²的水池需要15 d, 故该工法仅适合处理1000 m²以下规模的小型池塘。

(4) 原位处理方法

在符合环境要求的情况下, 无疑不产出放射性污染底泥的原位处理方法较异位处理方法更优。原位处理的主要方式是原位固化和原位覆盖。其中原位固化是一种应用广泛且成熟的技术。而原位覆盖少有实践, 在池塘处理中并无实例, 但在福岛第一核电站港湾内浮泥的处理工程中得到了具有创新性的应用。

原位固化处理的工序主要包括排水、固化搅拌、养护、回灌池水。東急建設株式会社在福島県南相馬市鷹ノ巣ため池完成了一项池塘底泥固化处理工程。固化处理的主要目标是抑制放射物的溶出和扩散。企业技术团队进行了室内浸出试验和强度试验并确定了满足要求的水泥掺量。其中, 浸出试验主要针对铯-134、137和六价铬, 强度的设计目标是能够保证重型机械在固化后土层上正常行走。最终, 工后的固化土满足浸出和强度要求, 在取样搅拌后其浊度较未固化土样大大减少, 辐射剂量从工前的0.19 μSv/h减小至0.09 μSv/h, 施工后3个月左右池水pH由12左右恢复至正常水平。

青木あすなろ建設株式会社在福島県南相馬市一处池塘采用了改进的原位固化施工方法。原计划采用原位加料搅拌的固化方法, 由于底泥含水率较高, 原位机械搅拌不能很好把控固化材料的添加与搅拌的均匀程度。改进的内容主要是将表层30 cm厚的底泥挖出, 并使用自走式搅拌设备添加水泥进行搅拌、固化, 再挖出20 cm厚底泥并使用中性固化材料利用同样的方式固化, 最后将水泥固化后的上层底泥先行填埋, 随后将中性材料固化处理的下层底泥覆盖其上。该自走式搅拌设备处理能力为40 m³/h, 水池处理面积共计20815 m², 工期全长约2个月, 最终, 辐射剂量由0.6~1.0 μSv/h降至完工后的0.3~0.4 μSv/h。

(5) 福岛第一核电站原位覆盖工法

核泄漏事故发生后, 福岛第一核电站港湾内水底发现一层含高浓度放射物的浮泥, 浮泥密度为1.05 g/cm³, 现场采集的底泥样本放射物比度最高可达190000 Bq/kg。由于浮泥密度接近于水, 容易受扰动而扩散, 且放射物含量极高, 一旦扩散将造成极大环境影响, 因此有必要进行处理。浮泥“轻”、“危”的两个性质造成了异位处理的难度, 但若选择将污染物固定在原位置的原位处理方法, 覆盖材料很可能在浇筑时搅动浮泥, 也会引起二次污染, 可以看出此处污染浮泥的处理难度。

五洋建设和东亚建设工业的联合团队采用了原位覆盖的方法处理了第一核电站港湾内的污染浮泥。针对特殊的施工对象和严格的施工要求, 技术团队选用以膨润土、水泥和水作为原料的固化土作为覆盖材料, 并通过室内试验和室内模型试验确定了固化土的材料配比和施工效果^[12]。原位覆盖是通过两层不同配比、不同性质的固化土来实现的。第一层浇筑的固化土的密度为1.10 g/cm³, 接近浮泥密度, 并且其水中流动性极小, 浇筑后均呈块状。利用这样一种轻型的固化土, 能够在不引起浮泥搅动的情况下, 将浮泥固定在土块间隙中。待第一层固化土达到一定强度后, 即可浇筑第二层固化土。第二层固化土同样采用膨润土、水泥、水作为原材料, 但作为覆盖层, 该固化土需要有良好的充填性、稳定性和耐久性。最终配出的固化土密度为1.31 g/cm³, 水中流动性好, 实验室养护3 d无侧限抗压强度119.2 kPa, 28 d无侧限强度612.2 kPa。按照50 a耐久计算得出, 上层覆盖材料厚度应达到10 cm。



图5 第一层固化土(左)和第二层固化土(右)的浇筑情况^[12]

Fig. 5 Pouring of first (left) and second (right) layers of solidified soil

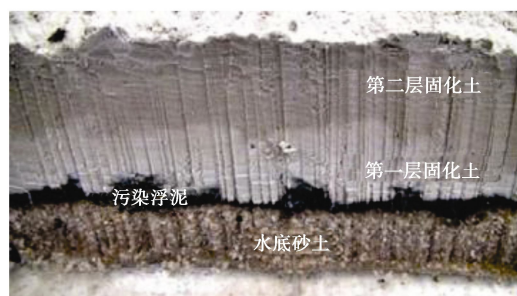


图6 试验浇筑效果^[12]

Fig. 6 Test pouring

施工现场船团包括固化土制造船和浇筑船,通过管道传送固化土材料;在不远处的福岛第二核电站设立有膨润土制造站,通过运输船将制备好的膨润土运送至现场的固化土制造船上。浇筑前在施工区域设置大型淤泥滤布,在此基础之上,浇筑点还设置了一道边长14 m的正方形防污膜,尽可能防止污染物向外扩散。施工时采用了特制的浇筑喷头,该喷头的特点是向多向水平出浆,保证了浇筑的均匀和稳定。此外,施工现场设点实时监控pH和水中固体悬浮物两项环境指标。

最终下层固化土厚度 10.8 cm, 上层 12.6 cm, 满足设计要求;水下观察显示,水底面未发现浮泥。此外,pH 和水中固体悬浮物均无明显变化,可以认为施工达到了预期的效果。

4 对中国污染底泥处理的启发

(1) 充分调查,掌握污染状况。核泄漏事故后,日本政府环境省将受影响地区的放射物水域调查常态化,每年调查地点 600 余个,调查次数 3100 余次,并形成年度调查报告公布于环境省网站。通过这些调查可以把握整个受影响区域的水体放射性污染情况,通过环境省团队的整理,还得出水体污染分布规律、放射性污染物和辐射量之间的关系,以及放射物含量、辐射量随着时间空间推移的规律等。这些调查结果不仅勾画出了整体和个体尺度上污染分布的图景,也为后续的研究和决策提供了非常多必要且有价值的材料。事实上,研究和决策必须在第一手资料的基础上进行。

(2) 充分论证处理的必要性。不难看出,无论是环境省面对各类水体污染问题,还是农林水产省面对池塘污染问题,都抱着谨慎的态度——不仅需要把握污染状况,还需要明了污染造成的影响程度。比如,虽然湖泊水库池塘这类水体底泥核污染程度较为突出,但是否需要处理还是应当取决于它会造成什么程度的影响,如果有足够上覆水能够遮蔽绝大多数射线,以及水质也有充分措施予以保障,那么这样的水体的底泥就没有处理的必要了。结合我国的现状,我们也能得到一些启发。在检测出底泥存在污染的情况下,还应进一步研究污染底泥是否造成了不良的影响,这种不良影响是否能够通过或者只能通过疏浚来消除,换句话说,疏浚工作存在充分理由的条件下才应该开展,疏浚前应当进行充分的论证。这样的谨慎的态度不仅能避免无用功与经济上的浪费,更是一种对环境负责任的态度。

(3) 鼓励创新,发动民间创新力。在灾后对放射

性污染的处理方面,除了环境省的“除染行动”,农林水产省对农业池塘的处理行动也为灾区做出了很大的贡献。农林水产省采取了公开征集池塘放射性污染处理技术的做法,动员了众多施工企业,提供项目,鼓励创新,最终将其中较好的一些或传统或创新的施工方法公布并推广,随后编入其推出的涵盖了从调查、决策到施工及概预算等过程的池塘放射性污染物处理指南,以指导后续的污染池塘处理工作。同时这份指南也给参与的企业和它们的技术做了很好的宣传。

(4) 因地制宜,灵活选择施工方法。在农林水产省推出的池塘放射性污染物处理指南中,可以看到诸如真空抽除、挖掘、绞吸疏浚等传统工法,这些传统工法在适宜的条件下完全能达到较好的处理效果;也能看到一些为应对场地限制而对设备做出的改装与创新,例如在较小池塘的施工中取消施工台船,在水中仅安放泵头这样的做法。此外较多案例针对池塘底泥污染深度较小的特点,实现了对污染底泥的薄层清理,从源头上减少了污染底泥的产出,缓解了后续处理、填埋的压力。在施工条件适合的情况下,应尽量选择经济、高效的施工方法;在面对现场条件的限制或是较高的施工效果要求时,原本的方法在应用时可能会出现这样或那样的问题,这时灵活创新就显得尤为重要。日本的施工和研究团队在池塘污染底泥处理以及福岛第一核电站污染浮泥原位覆盖的这些案例中所展现的灵活与创新是令人佩服的,这些创新的方法值得我们借鉴,而创新的能力更是我们需要培养和提升的。

参考文献:

- [1] 厚生労働省. 平成 24 年 3 月 15 日厚生労働省告示第 130 号 [EB/OL]. 日本: 厚生労働省, 2012[2018-03-16]. [\(https://www.mhlw.go.jp/hourei\)](https://www.mhlw.go.jp/hourei). (Ministry of Health, Labor and Welfare. March 15, 2012 Notification No. 130 of the Ministry of Health, Labor and Welfare[EB/OL]. Japan: Ministry of Health, Labor and Welfare, 2012[2018-03-16]. [\(https://www.mhlw.go.jp/hourei\)](https://www.mhlw.go.jp/hourei). (in Japanese))
- [2] 厚生労働省. 平成 24 年 3 月 5 日健康水 0305 第 2 号. 水道水中の放射性物質に係る管理目標値の設定等について [EB/OL]. 日本: 厚生労働省, 2012[2018-03-16]. <http://www.water.yokosuka.kanagawa.jp/quali/shihyou.pdf>. (Ministry of Health, Labor and Welfare. March 5, 2012 Notification No. 2 About setting of management target value for radioactive substances in tap water[EB/OL]. Japan: Ministry of Health, Labor and Welfare, 2012[2018-03-16]. <http://www.water.yokosuka.kanagawa.jp/quali/shihyou.pdf>. (in Japanese))

- [3] 環境省. 東日本大震災の被災地における放射性物質関連の環境モニタリング調査: 公共用水域[EB/OL]. 日本: 環境省, 2011(2019-03-27)[2018-01-21]. http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/results_r-pw.html. (Ministry of the Environment. Radioactive Material Monitoring Surveys of the Water Environment[EB/OL]. Japan: Ministry of the Environment, 2011(2019-03-27)[2018-01-21]. http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/results_r-pw.html (in Japanese))
- [4] 環境省. 平成 28 年度公共用水域放射性物質モニタリング調査結果(まとめ)[EB/OL]. 日本: 環境省, 2017[2018-01-21]. http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/results_r-pw-h28.html. (Ministry of the Environment. FY2016 Results of the Radioactive Material Monitoring in the Water Environment[EB/OL]. Japan: Ministry of the Environment, 2017[2018-01-21]. http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/results_r-pw-h28.html. (in Japanese))
- [5] 環境省. 環境回復検討会(第 12 回)資料 2: 河川・湖沼等における放射性物質に係る知見の整理[EB/OL]. 日本: 環境省, 2016[2018-01-21]. <http://www.env.go.jp/jishin/jishin/rmp/conf/12/mat02.pdf>. (Ministry of the Environment. Organization of knowledge on radioactive materials in rivers, lakes, etc. [EB/OL]. Japan: Ministry of the Environment, 2016[2018-01-21]. <http://www.env.go.jp/jishin/jishin/rmp/conf/12/mat02.pdf>. (in Japanese))
- [6] 環境省. 災害廃棄物の広域処理の推進について[EB/OL]. 日本: 環境省, 2012[2018-01-21]. http://www.env.go.jp/jishin/attach/memo20120111_shori.pdf. (Ministry of the Environment. Promotion of wide area treatment of disaster waste[EB/OL]. Japan: Ministry of the Environment, 2012[2018-01-21]. http://www.env.go.jp/jishin/attach/memo20120111_shori.pdf. (in Japanese))
- [7] 日本原子力研究所. 実効線量評価のための光子・中性子・ベータ線制動輻射線に対する遮へい計算定数(2001 年 1 月) [EB/OL]. 日本: 日本原子能研究開発機構, 2001[2018-01-23]. <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAERI-Data-Code-2000-044.pdf>. (Japan Atomic Energy Research Institute. Shielding calculation constant for photon, neutron and beta ray braking radiation for effective dose evaluation (January 2001) [EB/OL]. Japan: Japan Atomic Energy Agency, 2001[2018-01-23]. <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAERI-Data-Code-2000-044.pdf>. (in Japanese))
- [8] 農林水産省. ため池の放射性物質対策技術マニュアル[EB/OL]. 日本: 農林水産省, 2015[2018-03-20]. <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/saigai/150327.html>. (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries. Anti-radioactive material countermeasure technical manual[EB/OL]. Japan: Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2015[2018-03-20]. <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/saigai/150327.html>. (in Japanese))
- [9] 东亚工業建設. マジックボール浚渫[EB/OL]. 日本: 东亚建設工業, 2014[2018-03-22]. <https://www.toa-const.co.jp/techno/civileng/dredge/e16>. (Toa Corporation. Magic Ball dredging[EB/OL]. Japan: Toa Corporation, 2014[2018-03-22]. <https://www.toa-const.co.jp/techno/civileng/dredge/e16>. (in Japanese))
- [10] 東洋建設. 水域(湖沼・河川等)の底質除染システム[EB/OL]. 日本: 東洋建設, 2014[2018-03-22]. <http://www.toyo-const.co.jp/technology/781.html>. (Toyo Construction Co., Ltd. Sediment decontamination system of water bodies (lakes, rivers, etc.) [EB/OL]. Japan: Toyo Construction Co., Ltd., 2014[2018-03-22]. <http://www.toyo-const.co.jp/technology/781.html>. (in Japanese))
- [11] 荻野隆男, 金成麻里. ため池における泥土の放射性物質除去システム[J]. 農業農村工学会誌, 2014(82): 58 - 59. (OGINO T, KANARI M. Radioactive Substances Removal System of Sludge in Irrigation Ponds[J]. Water, Land and Environmental Engineering, 2014(82): 58 - 59. (in Japanese))
- [12] 大久保泰宏, 新舎博, 秋本哲平, 等. 浮泥の封じ込めを目的とした固化処理土の配合選定と施工方法[J]. 土木学会論文集 b3(海洋開発), 2013, 69(2): 946 - 951. (OKUBO Y, SHINSHA H, AKIMOTO T, et al. Mix proportion determination and execution method of cement mixed soils for containing fluid mud[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu B3. Kaiyo Kaihatsu, 2013, 69(2): 946 - 951. (in Japanese))