

◆特集：公共工事で遭遇する土壤汚染問題への対応について◆

底質中の有害物質に対する対策技術

天野邦彦* 森 啓年** 小橋秀俊***

1. はじめに

平成11年7月にダイオキシン類対策特別措置法が制定され、平成12年1月に施行された。これに基づき、水質、水底の底質についてダイオキシン類に係わる環境基準値がそれぞれ1pg-TEQ/L及び150pg-TEQ/gと定められるとともに、環境基準が達成されていない水域にあっては、可及的速やかに達成されるように努めることとなっている。

一級河川においては、河川や湖沼の水質及び底質のダイオキシン類による汚染状況を把握するため、定期的な常時監視が行われており、環境基準値を超えるダイオキシン類汚染底質が発見された場合は、速やかに対策を講じることができる体制となっている。

本稿は、河川・湖沼における底質の常時監視等により環境基準値を超えるダイオキシン類汚染底質が発見された場合に、汚染された底質の除去や封じ込め等の対策を講じることにより、ダイオキシン類の人への曝露量を低減し、人の健康を保護することを目的とするダイオキシン類汚染底質対策について概説するとともに、除去底質の新しい中間処理工法としてダイオキシン類汚染底質を封じ込めながら、脱水・減量化させるため袋詰脱水処理工法の概略について紹介するものである。

2. 河川・湖沼におけるダイオキシン類汚染底質対策

河川・湖沼において、環境基準値を超えるダイオキシン類汚染底質が発見された場合は、管理者は以下の手順で対策を講じることが望まれる。対策は、対策範囲や対策工法を検討するための事前調査から対策工事後における対策効果の継続的な

監視までの一連の工程よりなる（図-1参照）。また、一連の工程の中では、対策の段階に応じて、適宜調査結果や対策計画等について適切な情報公開をしていくことが必要である。

2.1 対策工法の検討

対策工法としては、水底にダイオキシン類を残したままで汚染底質を砂等で覆ったり、セメント等で固化することにより、ダイオキシン類が水に溶出したり、巻き上がったりするのを抑制する原位置対策工法や、汚染底質を河川・湖沼の水底から取り除き、水との接触を遮断する底質除去工法がある。汚染底質を除去した場合は、その除去底質を無害化して再利用したり、そのまま埋立処分等にする必要がある。原位置対策及び底質除去に係わる一連の工事を図-2に示す。

2.2 原位置対策工法

原位置対策工法は、汚染底質の移動を伴わない、

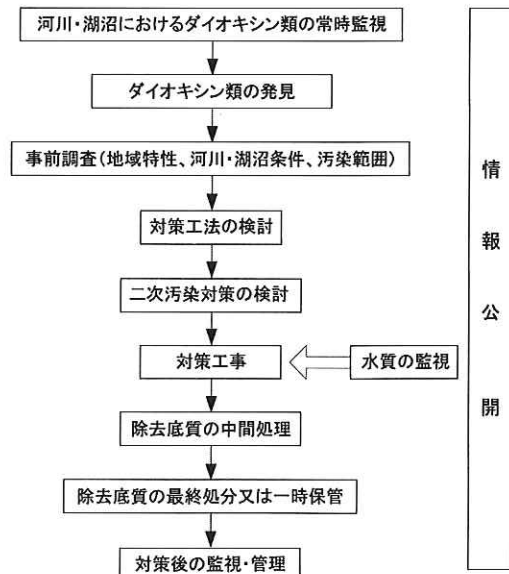


図-1 ダイオキシン類対策の流れ

A Countermeasure for Dioxin Contaminated Sediment

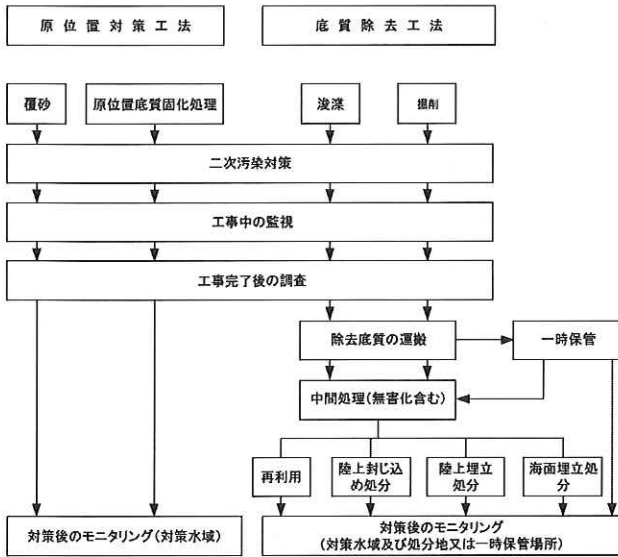


図-2 ダイオキシン類汚染底質対策工事の流れ

汚染底質の処分が不要であること等から、工費は比較的安価である。その一方で、水底にダイオキシン類が残るため、異常気象等に伴い対策工が破損等した場合にダイオキシン類が水中に拡散するリスクを内在する、河川環境の根本的な改善とならない、対策の結果として水深が減少するため舟運等の水域利用や治水対策との整合性が問題になる場合がある、ダイオキシン類の流入が続いている場合は持続的な対策とならない、といった短所を有しており、また当該汚染水域が周辺地下水の供給源となっており、かつ周辺地下水のダイオキシン類濃度が水質環境基準値(1pg-TEQ/L)を越えている場合は、原則適用できない。

対策効果の持続性が課題となるため、継続的なモニタリングが必要であり、将来的な費用を含めた総費用としては、必ずしも安価にならないことに十分留意する必要がある。

(1) 覆砂

覆砂工法は、汚染底質を砂で被覆し、汚染底質と水との接触を低減するとともに、汚染底質への流体力の作用を阻止することにより、ダイオキシン類の巻上や溶出を抑制するとともに、生物によるダイオキシン類の摂取を低減するものである。覆砂工の検討では、①流れや波浪、水底地形等に

対する覆砂工の安定性、②ダイオキシン類の溶出抑制効果、③水生生物と汚染底質の隔離、④施工精度やめり込み厚、⑤水域利用や治水計画等との整合性項目について検討し、覆砂材料及び覆砂厚を決定する必要がある。

覆砂工によるダイオキシン類の溶出抑制効果については、有機物等の溶出抑制効果に関する調査結果とダイオキシン類の大部分が有機物等に付着した形で移動することから類推すると、一般に覆砂材料の粒径が小さく、覆砂厚が大きいほどダイオキシン類の溶出抑制効果は高い。

(2) 原位置底質固化処理

原位置底質固化処理工法は、汚染底質をセメント等で固化、結合させ、底質間隙への水の侵入や汚染底質の拡散を防ぐことにより、ダイオキシン類の水への巻上や溶出、生物による摂取を抑制するものである。固化材は水硬セメントを基本とし、所要の強度、溶出低減効果を確保するため必要な量を、汚染底質層に添加する。強度の目安としては一軸圧縮強度で200kN/m²(2.0kgf/cm²)程度を確保することが目安となり、ダイオキシン類の溶出抑制効果については、固化された汚染底質に対して浸透・分配試験(環境庁告示13号)を行い、溶出量が1pg-TEQ/L以下であることを確認する必要がある。環境省が河床と海底の1000pg-TEQ/g近いダイオキシン類汚染底質を用いて行った実験では、セメント添加量が100kg/m³以上あれば、固化底質が破壊・粉碎され、粒子が水中に巻き上がった状態でも、水への移行量は環境基準値の1pg-TEQ/Lより十分小さいことが確認されている。

固化工法を大きく分類すると、比較的浅い土層(深度3m程度まで)を固化する表層混合処理工法と、比較的深い土層まで固化処理が可能な深層混合処理工法に分類されるが、締切・排水後陸上施工する場合は表層混合処理工法が、水上施工の場合は深層混合処理工法がより高い適用性を有すると考えられる。図-3に原位置底質固化処理工法

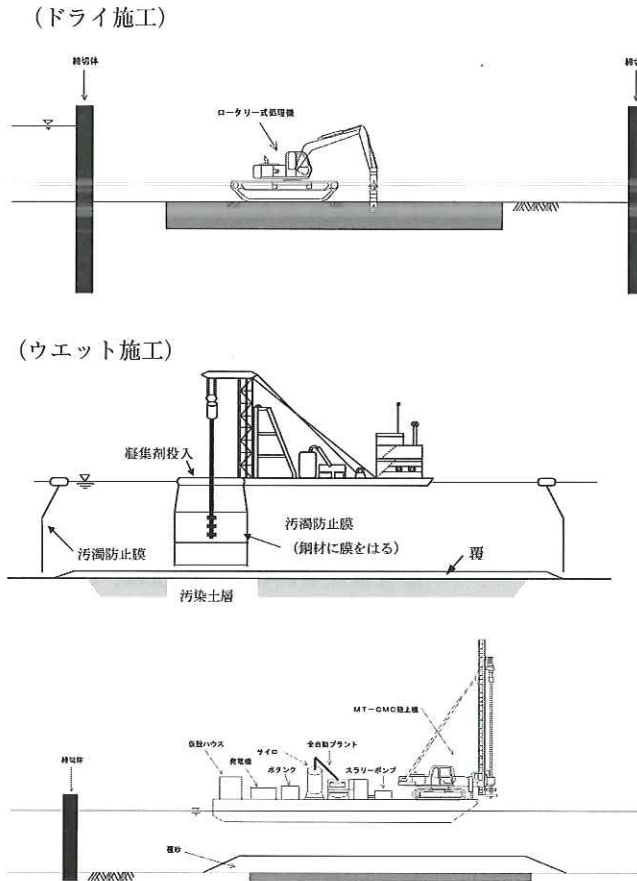


図-3 原位置底質固化処理工法のイメージ

のイメージを示す。

2.3 底質除去工法

底質除去工法では、水底のダイオキシン類を除去するため、水や魚介類を介した人への曝露経路については、ほぼ完全な遮断が可能であるとともに、河川・湖沼環境の根本的な回復が望めるため、基本的に本工法を適用することが望ましい。しかし、周辺構造物に影響が生じたり、底質の処分に高額な費用を要する場合がある。底質の処分方法には、陸上埋立処分、海面埋立処分、陸上封じ込め処分、無害化処理した上での再利用等があり、除去底質の汚染レベルに応じて、適切な方法や処分施設の構造を選ぶ必要がある。一般に、ダイオキシン類濃度が高いほど、処分費用が高額になるとともに、処分地周辺住民の理解を得るのが困難

となる。

(1) 浚渫

浚渫は浚渫船による水上施工により、汚染底質を除去するものであり、汚染底質の巻き上げ、拡散による二次汚染を防止するため、施工に伴う濁りの発生の少ない方式や、比較的表層に集中していると考えられる高濃度のダイオキシン類を高い含泥率で除去できる高濃度薄層浚渫船、ポンプ式汚泥浚渫船(カッターレスポンプ浚渫船)、密閉式グラブ浚渫船の適用性が高いと考えられる。また、必要に応じて汚濁防止工の設置等について検討する必要がある。

(2) 掘削

掘削は水域を遮水矢板等で締め切り、締切内を排水することにより、気中施工として底質を除去するものである。水域が広く、水深が大きい場合には、締切や排水が大規模になるため工費が増大するが、簡易な陸上機械での施工が可能となり、気中施工となるため確実な施工管理が可能となる。また、排水後の水底が軟弱で陸上施工機械の乗り入れが困難な場合は、仮設栈橋や土質改良等により、足場を確保する必要がある。

のイメージを示す。

2.4 二次汚染防止対策

ダイオキシン類汚染底質の対策工事においては、少なからず汚染底質を攪乱・巻き上げるため、これに伴うダイオキシン類の水中への拡散に十分注意するとともに、水質環境基準を超える二次汚染が予想される場合は、利水や漁業等に影響を及ぼさないよう対策を講じる必要がある。二次汚染対策の検討は、「底質の処理・処分等に関する指針」¹⁾に準じ、図-4の手順で行うものとする。

(1) 工事水域、基本監視点等及び監視基準値の設定

二次汚染対策の基本条件となる工事水域、基本監視点及び基本監視点における水質を予察するための補助監視点を設定する(図-5参照)。取水地点や漁場等に工事の影響が及ばないよう工事水域

を設定するとともに、水質への影響が最も大きいと考えられる工事水域境界上に2地点以上の基本監視点を、また基本監視点における水質を予察できる位置に補助監視点を設定する。また、水質のバックグラウンド値や環境基準を踏まえた上で、現況の水質を悪化させない範囲で、基本監視地点の水質監視基準値を設定する。

(2) 汚濁拡散防止対策の検討

汚濁防止柵や汚濁防止膜の適用性や、これらの組み合わせ使用等について検討する。

(3) 工事に伴うダイオキシン類拡散予測と汚濁拡散防止対策の決定

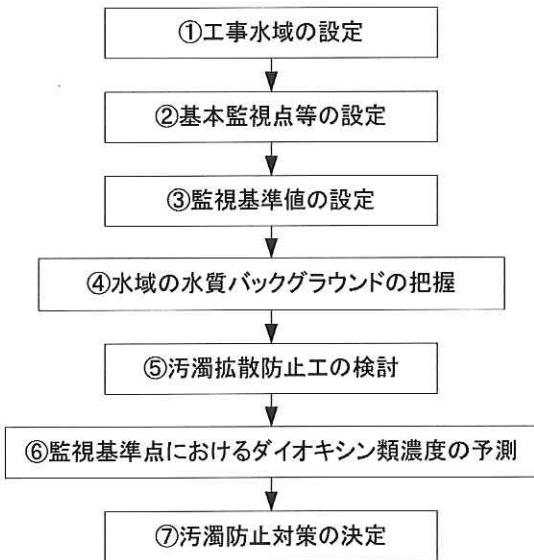


図-4 二次汚染対策検討の流れ

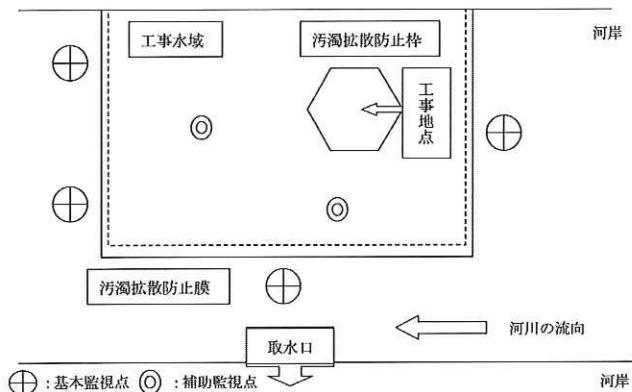


図-5 工事水域、監視地点の配置例

汚濁拡散防止工の使用案ごとに、工事中の基本監視点におけるダイオキシン類濃度を予測し、その結果を基に汚濁拡散防止対策を決定する。ダイオキシン類の濃度予測については、あらかじめ工事に伴うSSの拡散予測計算を行い、この結果と別途求めたSSとダイオキシン類濃度の関係からダイオキシン類濃度を予測することができる。

2.5 工事中の水質監視

工事中の水質監視は、「底質の処理・処分等に関する指針」⁵⁾に従い行うものとし、基本監視点や補助監視点におけるダイオキシン類の監視には、ダイオキシン類とSSや濁度の関係を把握した上で、SSや濁度を代替指標として行う。なお、工事中の水質監視の結果が監視基準に適合しない場合は、以下の通り、工事を中断する等の所要の措置を講じるものとする。

①水質ダイオキシン類について、基本監視点における水質調査結果が監視基準に適合しない場合又はその恐れがある場合は、直ちに工事を中断し、その原因を究明した上、必要な措置をとる。

②生活環境項目について、基本監視点における水質調査結果が、監視基準に適合しない場合、補助監視点の水質調査結果が監視基準に適合しない場合または工事地点周辺の水質に異常が認められた場合は、監視を強化し、その原因を究明するとともに、必要に応じて工事速度を減ずるか又は工事を中断するなど、早急に環境基準が達成されるよう所要の措置を講ずる。

2.6 除去底質の中間処理工法

2.6.1 概要

中間処理工法は除去底質のワーカビリティの向上、減容化、不溶化、無害化等を目的として行うものであり、脱水、固着、分級、無害化等の処理及びこれらの処理に伴い生じた余水の処理からなる(ダイオキシン類の水質排出基準値は10pg-TEQ/l)。

(1) 脱水

脱水処理は運搬や処分等における底質のワーカビリティの向上、汚染水の浸出防止、減量化等を目的として行われるものである。工法としては、標準型フィルタープレス、高圧薄層型フィルタープレス、高圧型フィルタープレスは作業中の密閉度が高く、遠隔操作も可能であるため、ダイオキシン類汚染底質の処理には適用性が高いと考えられる。

(2) 固化処理

固化処理は除去底質の拡散や浸出水の発生を防止することを目的として行われる。工法としては、管中固化工法、仮置場混合方式、プラント混合方式があり、除去底質の含水比や処理量に応じて適切な工法を選定する必要がある。

(3) 分級

分級は、除去底質について、ダイオキシン類がより付着していると考えられる細粒成分と比較的清浄と考えられる粗粒成分やゴミ等を選別することにより、汚染濃度や粒径別の処理を可能とし、処理効率全体を向上させるものである。

(4) 無害化処理

ダイオキシン類の無害化技術については、これまでに①溶融固化法、②アルカリ触媒化学分解法等の技術が開発されており、溶融固化法については、和歌山県においてダイオキシン類汚染土の無害化処理を安全に施工した実績を残している。

しかし、現状においては、いずれの技術も単位処理量当たりの費用が高額で、大量の汚染底質の発生が想定される河川・湖沼のダイオキシン類対策への適用は容易でないため、極めてダイオキシン類濃度の高い比較的少量の汚染底質に対して重点的に適用するか、より安価な技術が開発されるまで、安全な場所に一時保管することが考えられる。

(5) 余水処理

ダイオキシン類の水質排出基準値は10pg-TEQ/lであり、中間処理場や埋立処分地等からの排水がこれを越える場合は、周辺公共用水域を汚染しないよう適切な処理を実施する必要がある。余水の処理方式は、余水中の不純物質の濃度、粒子の大

きさ及び溶存物質等に応じて適切なものを適用する。

2.6.2 袋詰脱水処理工法による封じ込め

除去底質の新しい中間処理工法として、土木研究所ではダイオキシン類汚染底質を封じ込めながら、脱水・減量化させるため袋詰脱水処理工法を改良してきた。以下に、その概略について述べる。

(1) 袋詰脱水処理工法とは

土木研究所、(財)土木研究センターと民間各社の共同研究により、ジオテキスタイル製袋を用いて浚渫土などの高含水比の建設発生土を再利用する「袋詰脱水処理工法(エコチューブ、写真-1)」^{2),3)}が実用化されている。袋詰脱水処理工法は、対象となる建設発生土をジオテキスタイル製袋に充填し、ジオテキスタイル等のフィルター効果を利用して、土粒子を袋内に留めたまま水分のみを袋外に排出する工法である。袋内に充填された建設発生土には、脱水に伴う強度増加のみならず、ジオテキスタイル製袋の補強効果も期待でき、積み重ねて堤防や護岸などに使用することが可能である。

ここでは、袋詰脱水処理工法の持つ土粒子の封じ込め能力に着目し、その能力を向上させることにより、ダイオキシン類に汚染された高含水比の土壌や底質を袋内に封じ込めるとともに脱水・減量化させる「『高機能型』袋詰脱水処理工法」(以下、「本工法」という)について述べる。

(2) 本工法の適用用途

土木研究所では袋材の改良と、充填する底質への凝集剤添加により、従来の袋詰脱水処理工法と

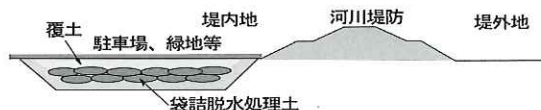


写真-1 袋詰脱水処理工法(エコチューブ)

① 堤内地側に限定した河川堤防腹付け盛土材として利用



② 堤内地の緑地・駐車場等の盛土材や飛行場の緑地帯下等の盛土材として利用



③ 堤外地（高水敷）に保管

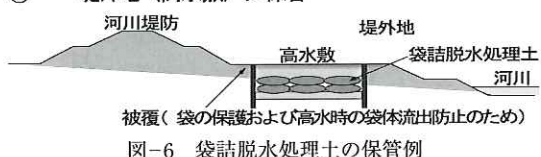


図-6 袋詰脱水処理土の保管例

比較して土粒子の封じ込め能力を100倍以上高めた本工法を開発した。

本工法をダイオキシン類汚染底質の封じ込めに用いることにより、含有されるダイオキシン類のうち99.9%以上を袋内に残留させ、脱水・減量化して、図-6に示すように適切に保管することが可能になる。

- ①堤内地側に限定した河川堤防腹付け盛土材として利用
- ②堤内地の緑地・駐車場等の盛土材や飛行場の緑地帯下等の盛土材として利用
- ③堤外地（高水敷）に保管

なお、国土交通省より平成15年6月に出された『「河川、湖沼等における底質ダイオキシン類対策マニュアル」(案)』⁴⁾において、本工法は「袋詰め工法」として、「除去底質」を「土質材料として利用する」場合の「陸上処分」の節に示されている。

(3) 汚染底質の袋への充填実験

本工法が持つろ過性能への袋材および凝集剤の影響を明らかにすることを目的に、ジオテキスタイル製袋へのダイオキシン類汚染試料の充填実験を行った。

表-1 袋材の基本特性

袋材		材質	厚さ (mm)	透水係数 (cm/s)	AOS* (mm)
1	織布	PET	0.35	1.5*10 ⁻³	0.108
2	織布	PET	0.225	4.3*10 ⁻⁴	<0.068

*布の開口径、ガラスビーズにより測定

実験では、以下のものを利用して行った。

試料としては、19mmメッシュのふるいにかけて礫やごみなどを取り除いた①廃棄物焼却場の排煙に起因するダイオキシン類を含有する試料1 (71,500pg-TEQ/g)、②農薬工場からの排水に起因するダイオキシン類を含有する試料2 (790pg-TEQ/g) の二種類を用いた。

袋材としては、一般的な土木工事で用いられるジオテキスタイルである袋材1とろ過性能を高めるため高密度に織られたジオテキスタイルである袋材2の2種類を用いた (表-1)。

凝集剤としては、ポリ塩化アルミ (PAC) と高分子凝集剤としてカチオン系凝集剤を土壤に応じて使い分けた。なお、アニオン系凝集剤については、予備実験として行った土研式加圧ろ過試験⁵⁾において排水速度を加速させる効果はあったものの、ろ過性能がカチオン系凝集剤と比較して小さかったため本実験では用いなかった。

封じ込め実験では、上記に示す二種類の試料に水道水を加え含水比600%に調整した後、20Lの大きさの袋を用いた実験ケースでは土槽から漏斗を用いて自然流下させ充填した。また、200Lの大きさの袋を用いた実験ケースでは電動ポンプを用いて直接ジオテキスタイル製袋へ充填した。試料の充填後、袋からの排出水を採取瓶により採取し、ダイオキシン類の濃度を測定した。

図-7に示す通り、袋材1により作成したジオテキスタイル製袋を用いたケース1~3では、時間が進行するに従って、ダイオキシン類の濃度が低下する傾向がみられた。これは、充填した試料が脱水する過程で袋の内側に泥膜を形成し、ろ過性能が高まったことに起因すると考えられる (写真-2)。

また、表-2に示すように、凝集剤の添加によ

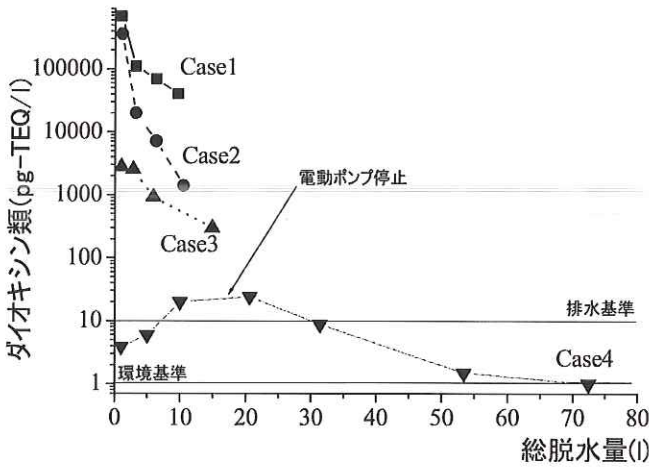


図-7 実験結果

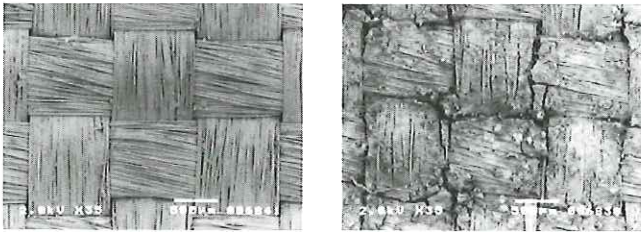


写真-2 泥膜形成の様子 (左：充填前、右：充填後)

る影響であるが、ケース1, 2を比較すると、PACの添加により排水中のダイオキシン類が約1/3に低下していることが確認された。このことは、フロックが形成され、充填した試料が袋材によりろ過されやすくなったため袋内にとどまったことに起因すると考えられる。また、カチオン系の高分子凝集剤と高密度に織られた袋材2を併用したケース4は、同じ試料を充填したケース3と比較して、排水中のダイオキシン類濃度が1/100にまで低下していることが確認された。さらに、袋に充填したダイオキシン類量に対する、袋内に留まったダイオキシン類量(表-2では「割合」と表記)を

表-2 実験結果

濃度 pg-TEQ/g	袋材	凝集剤	割合 %	平均濃度 pg-TEQ/l
71,500	1 (20L)	-	99.5	140,000
		PAC	99.8	45,000
790	2 (200L)	-	99.5	860
		カチオン	99.9	7.3

計算すると、従来の袋詰脱水処理工法は99.5%程度であったが、本工法では99.9%以上となることが明らかになった。

上記の検討に加えて、脱水・減量化後の袋詰脱水処理土からのダイオキシン類の拡散を調査するために1年間水没させたが、ダイオキシン類の拡散は特に認められなかった(表-3)。1日目の測定結果と比較して、90, 365日目のダイオキシン類濃度は低下した。この理由として、袋の表面に付着していた土粒子が水中に拡散したためと考えられる。したがって、施工時には袋詰脱水処理後に袋の表面に付着した土粒子を洗浄する作業が必要である。一方、90, 365日目ではその土粒子が水槽内で沈降し濃度が低くなったためと考えられる。

(4) 結論

上記の実験により、本工法はダイオキシン類汚染底質を封じ込めながら、脱水・減量化を可能にすることが確認された。

2.7 除去底質の処分

除去底質もしくは無害化処理等された底質の処分に当たっては、処分時点のダイオキシン類濃度に応じて適切な処分方法を選定するものとする。ダイオキシン類濃度に応じた適用可能な処分方法は、以下の通りである。

① 1000pg-TEQ/g以下

底質のダイオキシン類濃度が1000pg-TEQ/g以下の場合は、陸上で再利用することができる。除去底質については、汚染土の監視、拡散防止のため、公共用地で使用することを原則とする。再利用にあたっては、環境基準を超える浸出水の発生を防止するとともに、汚染土には覆土や植樹、シート掛け等を行い、風による拡散を防止する他、

表-3 水没実験結果*

	1日	90日	365日
ダイオキシン類 (pg-TEQ/l)	4.4	3.6	0.35

*ケース1の試料について固液比1:10で実施

ダイオキシン類濃度が150pg-TEQ/gを超える場合は、降雨等により水域へ流出することを防止するための対策を講じる必要がある。また、ダイオキシン類の拡散を防止し、管理を徹底するため、再利用は原則官地に限り、運搬等を行わないものとする

②1000pg-TEQ/g～3000pg-TEQ/g

底質のダイオキシン類濃度が1000pg-TEQ/g超の場合は、土壤の環境基準を超えており、再利用することはできない。このため、陸上埋立処分、海面埋立処分、陸上封じ込め処分とするか、もしくは無害化処理を前提とした一時保管を行うものとする。

③3000pg-TEQ/g～

底質のダイオキシン類濃度が3000pg-TEQ/g超の場合は無害化を原則とするが、大量の底質に適用可能な無害化技術が未確立であることから、当面無害化処理を前提とした一時保管でもよいものとする。なお、一時保管の形態は、陸上埋め立て処分、もしくは陸上封じ込め処分とする。

2.9 対策後の監視・管理

工事完了後の調査により工事の成果が確認され、対策が終了した後においても、対策効果の持続、対策工の安定性、新たなダイオキシン類の流入等について引き続き調査を実施するものとし、対策工の破損や所要の対策効果が持続されていないことが確認された場合は、必要に応じて補修等の適切な対策を講じるものとする。

2.10 情報公開

ダイオキシン類の詳細調査や対策に当たっては、

調査及び対策の実施者が、関係地方公共団体及び地元関係者に対して当該事業に関する情報を保管・提供することが重要である。

3. おわりに

本稿では、河川・湖沼におけるダイオキシン類汚染底質対策に関する概説を行った。ダイオキシン類対策の観点から、既存の汚泥対策技術の適用性を検討し、ダイオキシン類汚染底質に関する一連の工程、技術事項及び留意事項等を整理した結果については、土木研究所資料⁶⁾として発刊されている。また、この成果の内容は、河川局のダイオキシン類対策マニュアル⁴⁾にも反映されている。

参考文献

- 1) 環境省環境管理局水環境部：「底質の処理・処分等に関する指針」, 2002.
- 2) 建設省大臣官房技術調査室監修、「発生土利用促進のための改良工法マニュアル」、財団法人土木研究センター, 1997.12
- 3) 土木研究所編著、「建設発生土利用技術マニュアル(第3版)」, 丸善, 2004.9
- 4) 国土交通省河川局河川環境課、「河川、湖沼等における底質ダイオキシン類対策マニュアル(案)」, 国土交通省ホームページ, <http://www.mlit.go.jp/>, 2003.6
- 5) 土木研究所資料第3902号「袋詰脱水処理工法による高含水比ダイオキシン類汚染底質・土壤封じ込めマニュアル(案)」, 独立行政法人土木研究所, 2003.7
- 6) 土木研究所資料第3938号「建設分野におけるダイオキシン類汚染土壌対策技術の開発」, 独立行政法人土木研究所, 2004.3.

天野邦彦*



独立行政法人土木研究所水循環研究グループ河川生態チーム上席研究員, 工博
Dr. Kunihiko AMANO

森 啓年**



独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ土質チーム研究員
Hirotoshi MORI

小橋秀俊***



独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ土質チーム上席研究員
Hidetoshi KOHASHI