

天然素材を利用した環境調和技術の開発 —自然にやさしいキトサン凝集剤による 濁水処理と脱水ケーキの有効利用—

川又 睦¹・大野 剛¹・木元 明日子¹・赤塚 真依子¹・
大脇 英司¹・藤原 靖¹・領家 邦泰²・岡崎 聡³

¹大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²大成建設株式会社 土木本部 (〒163-0606 新宿区西新宿1-25-1)

³富士エンジニアリング株式会社 (〒060-0006 札幌市中央区6条西12丁目)



建設工事では濁水の発生を伴うことが多く、適正な濁水処理を求められる。一般の濁水処理では無機凝集剤および合成有機高分子凝集剤を用いることが多く、処理水の放流先に生息する希少な水生生物への影響が懸念される。また、濁水処理で発生する脱水ケーキは産業廃棄物として処分費用および処分場逼迫の面から望ましいものではない。

本研究ではトンネル建設工事において天然素材キトサン凝集剤を用いて水生生物への影響の少ない自然にやさしい濁水処理技術を開発した。また、法面緑化試験により発生する脱水ケーキを生育基盤材として有効に利用する技術を開発した。

キーワード 濁水処理, 凝集剤, キトサン, 脱水ケーキ, 生育基盤材

1. はじめに

建設工事現場から発生する濁水は、通常、凝集剤を使用して沈降汚泥と上澄み液に固液分離され、沈降したSS（浮遊物質）はフィルタープレス等で脱水して脱水ケーキとして排出・処分される。その際、放流される上澄み液は使用した凝集剤の成分によって周辺の自然環境への影響が懸念される場合がある。また、脱水ケーキは産業廃棄物として処分される場合が多いが、近年その捨て場の確保がむずかしく、処分場があっても処分費が高いことが問題となっている。したがって、濁水処理では、排水される放流水が周辺環境に悪影響を及ぼさないこと、排出される脱水ケーキはその現場内でできるだけ再利用することが重要となる。

2. 目的

本研究では環境負荷低減技術の開発の一環として、トンネル建設工事の濁水処理において放流先に生息する水生生物や水産資源への影響の少ない処理方法を適用する目的で天然素材であるキトサン凝集剤を用いて濁水処理技術を開発した。また、濁水処理時に発生する脱水ケーキを有効に利用する目的で法面緑化試験を行い生育基盤

材としての利用技術を開発した^{1),2)}。

3. 自然にやさしい濁水処理技術

建設現場における濁水処理にあたっては、掘削等で実際に発生する濁水を試料として用い、実験室内のジャーテスト等により選定した凝集剤の凝集効果を予め確認することが重要である。本研究でもキトサン凝集剤の予備試験の結果を踏まえて処理設備の仕様設計を行った。

(1) キトサン凝集剤

多糖類のキトサン（ポリ-β1→4-グルコサミン）は、水産廃棄物であるエビやカニ殻を原料としてキチン（ポリ-β1→4-N-アセチルグルコサミン）がまず抽出され、それを中間原料として製造される³⁾。キチンは20世紀最後のバイオマス資源として注目され、地球上で合成される量は1年間で1,000億トンにもなると推定されている³⁾。キトサンとは、キチンをアルカリで処理するとアセチル基が除かれ、主としてD-グルコサミン単位からなる高分子で、酸の水溶液には溶解しやすくなる³⁾。キトサンは現在、国内では主にベニズワイガニの甲殻を原料に500～600トン/年が製造されていると言われている³⁾。一方、図-1に示すように、各産業分野ですでに利用されており、

各種動物に対する毒性試験（マウスに対する亜急性毒性・慢性毒性，ニジマスに対する経口投与試験，変異原性試験，ラットに対する急性毒性，ウサギに対する発熱性・溶血性，モルモット皮膚感作，人に対する過剰摂取・長期摂取・アレルギー試験など）によって安全は確認されている^{4),5)}。以上のようなキトサンの安全性は，今回キトサン凝集剤を現場の濁水処理で使用する上での判断材料にもなった。キトサン凝集剤を写真-1に示す。

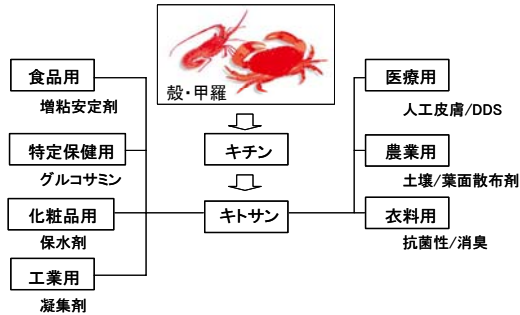


図-1 各産業分野におけるキトサンの利用。



写真-1 キトサン凝集剤

(2) 凝集剤の性能評価試験

建設工事で発生する濁水はコンクリートの影響を受けたアルカリ廃水である場合が多く，本研究でも濁水は pH 8～pH 12 の範囲であった。また，SS は 3,000～5,000mg/L の範囲であった。ところで処理水は排水基準にしたがって放流する必要があることから，凝集剤の性能評価としては pH を 5.8～8.6，かつ SS を 25 mg/L 以下にすることが重要である。室内での予備試験では濁水を塩酸（現場では炭酸ガス使用）で中和処理した後に，反応（攪拌）時間や静置（滞留）時間を検討しつつ，SS が極小（SS：25 mg/L 以下）となるキトサン凝集剤の添加適量を決定した。凝集性のほか，フロック形成能，沈降性なども評価対象とした。

実際のトンネル建設工事現場で発生した濁水や模擬濁水を試験水としてキトサン凝集剤を添加するジャーテストを実験室で行った結果を図-2に示す。また，参考までに模擬濁水に対する凝集沈降性の状況を写真-2に示す。キ

トサン添加後の濃度が3 mg/L以上でSSを数mg/L以下にすることができた。

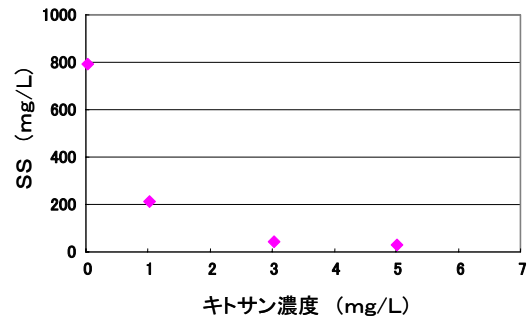


図-2 キトサン凝集剤の性能



写真-2 キトサン凝集剤の凝集沈降性
(左：処理前，右：処理後)

(3) トンネル建設工事現場AおよびBの濁水処理

掘削工事で発生する濁水の成分は地山が変化するのに伴い大きく変化する。また，濁水処理では原水の濁度や発生濁水量が時々刻々と変動する不安定な条件下で，排水基準を満足する処理水を維持する必要がある。

前節のジャーテストの結果に基づいて，キトサン凝集剤による濁水処理設備の仕様を決定した。その仕様の一例を表-1に示す。

現場Aにおける濁水処理フローの概要図を図-3に示す。濁水の前処理として沈砂池にて濁水中の粒径75 μm以上の粒子を除去した。別の現場Bではこの工程を省いたが，凝集性能に大きな差異は見られなかった。沈砂池からポンプアップした濁水は原水槽に一旦貯留した。原水は処理前に炭酸ガスにて中和処理後，凝集反応槽でキトサンの所定量を添加し，約5分間反応させた。その後，凝集沈降槽で汚泥を沈殿させ，清澄な上澄み液は排水（放流）し，汚泥は一旦貯泥槽に移し，その後フィルタープレスにより脱水ケーキとして排出した。

原水槽に流入する濁水を写真-3に示す。また，現場Bでは処理水を放流する前に写真-4に示すように最終放流水槽の中で金魚を飼育することで，処理水の生物への影響

を常時モニタリングしながら放流した。放流水は水質基準を満足するだけでなく生物への影響にも配慮して二重にチェックした。

表-1 濁水処理設備の仕様

・原水の浮遊物質濃度 (SS) : 3,000~5,000mg/L
・濁水処理量 : 20m ³ /h
・キトサン凝集剤濃度 : 約3mg/L (凝集反応槽内)
・凝集沈降速度 : 1.5m/h
・脱水ケーキ発生量 : 約0.1m ³ /h
・昼夜連続運転 (24時間)

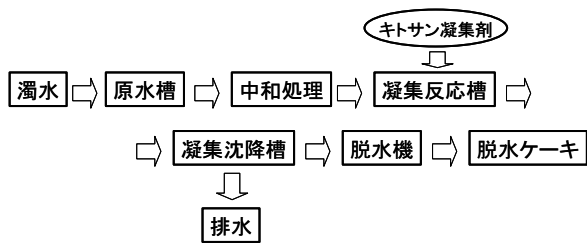


図-3 濁水処理フロー



写真-3 原水槽



写真-4 処理水の生物モニタリング

表-1に示した仕様を基本として現場Aでは発生する工事濁水を、通常はPAC (ポリ塩化アルミニウム) 凝集剤および高分子凝集剤 (以下、PAC凝集剤と略記する) の2剤を使って処理するが、図-4に示すようにキトサン凝集剤のみ (2~7mg/L) で14か月間に亘り24時間連続の処理をすることができた。すなわち、処理水量、原水pH、水温、濁度の変化にかかわらず、本濁水処理により放流水

は排水基準以下に維持することができ、所期の性能を達成することができた。

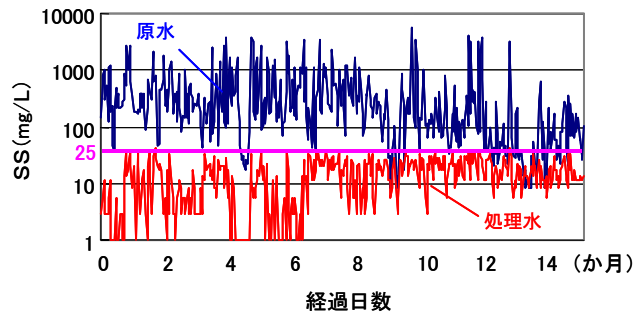


図-4 キトサン凝集剤による濁水処理性能

(4) 濁水処理システムのライフサイクルアセスメント

現場Aを例としてキトサン凝集剤を用いた濁水処理システムのCO₂排出量 (LCCO₂) について従来のPAC凝集剤の場合と比較評価した^{6),7)}。

評価の対象は、当該トンネル工事のうち濁水処理に関わる事項のみとした。ライフサイクルは設備設置から運用、設備解体までとし、期間は4年とした。脱水ケーキの廃棄は、キトサン凝集剤の場合、現地で生育基盤材として利用し、PAC凝集剤の場合、脱水ケーキを最終処分場まで100km輸送する条件とした。なお、本評価では濁水処理設備の解体物は中間処理場への輸送までとした。

濁水処理システムの機器および装置の製造、設置、廃棄におけるインベントリ分析には、経済産業省の環境調和型水処理技術ガイドライン⁸⁾に示された原単位を用いた。また、キトサン凝集剤の原単位は、製造者へのヒアリングにより、5.66kg-CO₂/kgと設定した。その他の原単位は文献に準拠して算出した^{9),10),11)}。

キトサン凝集剤およびPAC凝集剤を各々用いた場合のLCCO₂を設備設置、運用、設備解体に分別して算定したところ、設備設置および解体時のCO₂排出量には大きな差異はみられなかった。しかしながら、運用時のCO₂排出量は約20%削減していた。このCO₂排出量の内訳を消費材料、電力、廃棄物処分に分別した結果を図-5に示す。PAC凝集剤の場合は運用時全体の14%が脱水ケーキの最終処分のための輸送に起因していた。

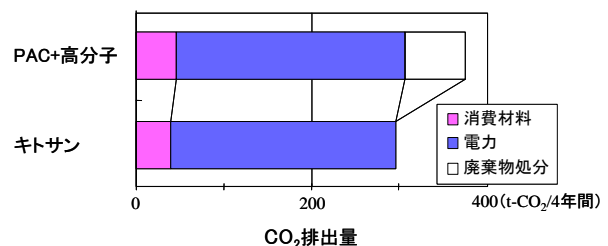


図-5 濁水処理設備運用時のCO₂排出量の比較

4. 脱水ケーキの生育基盤材への利用技術

濁水処理で排出される建設汚泥は通常、フィルタープレス等の脱水機により脱水ケーキとし、廃棄物処分される。本研究では、キトサン凝集剤で処理した脱水ケーキを生育基盤材へ利用することを目的に植物への影響を種々検討した。その結果に基づき、トンネル建設工事現場Bに仮設の法面緑化試験区（約60m²）を設けて脱水ケーキの生育基盤材としての適用性を検証した。

(1) キトサン脱水ケーキの性状

現場で発生した濁水（泥性堆積岩のズリを含む）をキトサン凝集剤で処理した脱水ケーキ（以下、キトサン脱水ケーキ）と、PAC凝集剤および高分子凝集剤で処理した脱水ケーキ（以下、PAC脱水ケーキと略記する）の2試料について各々の性状を検討した。キトサン脱水ケーキを写真-5に示す。



写真-5 キトサン脱水ケーキ

キトサン脱水ケーキおよびPAC脱水ケーキの性状を把握するために含水比を測定したところ、各々88%および78%であった。また、風乾・粉碎後、篩により粒径20mm以下に調整した試料について、飽和透水系数、有効水分、pH、電気伝導度（EC）、陽イオン交換容量（CEC）などの項目を分析した。

キトサン脱水ケーキおよびPAC脱水ケーキの物理および化学特性値を表-2に示す。

表-2 脱水ケーキ性状の一例

	評価因子	単位	キトサン脱水ケーキ	PAC+高分子脱水ケーキ
物理特性	飽和透水系数	m/s	7.1×10^{-6}	1.1×10^{-5}
	有効水分	L/m ³	465	472
化学特性	pH		9.6	8.7
	EC	dS/m	3.6	6.5
	CEC	cmol _c /kg	26	33

各試料の分析値を「緑化事業における植栽基盤整備マニュアル」¹²⁾における土壌分析結果の分級（ランク付け）と比較すると、両試料とも有効水分は「優」であるが、

その他の評価因子は「不良」または「極不良」であった。生育基盤材として利用するには有機性資材の適量添加の必要性が示唆された。

(2) コマツナおよび数種園芸植物の発芽試験

コマツナの発芽試験ではキトサン脱水ケーキとPAC脱水ケーキの各々を客土したプラスチックポット（500mL容）を人工気象室内（25℃、14L/10D、光量子50～90 μmol・m²・s⁻¹、灌水1回/2日）で試験に供した。コマツナの発芽状況は写真-6に示すように21日間観察し各ポットの平均発芽率を算出して比較した。また、発芽率の経日変化を図-6に示す。なお、本試験中は施肥を行わなかった。

その結果、生育基盤材としてのキトサン脱水ケーキはPAC脱水ケーキに比べてコマツナの発芽率が非常に良好であり、植物の発芽促進作用を有することが示唆された。また、PAC脱水ケーキではコマツナの葉の中に変形したものや黄色く変色したものが見られた。

一方、園芸植物の生育試験ではマリーゴールド、ニチニチソウ、サルビア、パンジーを選定して地植えまたはプランターで約2か月間の生育試験を野外で実施して生育状況（草丈、株の広がり、花の数）を比較した。

キトサン脱水ケーキで生育させたマリーゴールドおよびパンジーの生育状況はPAC脱水ケーキに比べて良好であった。一方、ニチニチソウとサルビアでは大きな差異は見られなかった。なお、以上の生育試験ではいずれも施肥は行わなかった。



キトサン脱水ケーキ
（播種21日後；
発芽率100%）

PAC脱水ケーキ
（播種21日後；
発芽率64%）

写真-6 コマツナの発芽状況

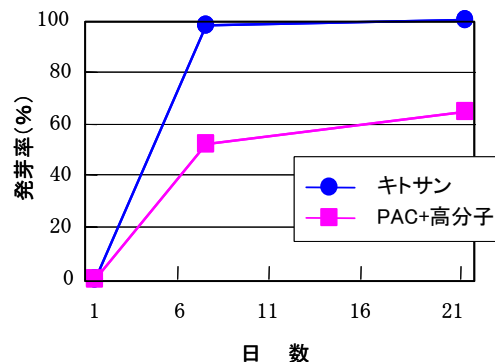


図-6 コマツナ発芽率の比較

(3) トンネル建設工事現場Bの法面緑化実証試験

キトサン脱水ケーキで生育基盤材を作製し、トンネル建設工事現場内に仮設の法面緑化試験区を設置して実証試験を行った。

生育基盤材を調合するにあたっては、キトサン脱水ケーキに配合する土壌改良材としては「植生のり面施工管理要領」¹³⁾を参考にした。脱水ケーキに配合した資材の一例としては、有機性資材（パーク堆肥：ピートモス＝80：20）、粘着材（接合材）、高度化成肥料、緩効性窒素化成肥料を使用した。脱水ケーキ（70～100%）と土壌改良材（0～30%）の配合ではできるだけ脱水ケーキの配合比率を高くして、脱水ケーキの有効使用量を多くするように考慮した。

客土吹付け用の種子には、芝草3種（トールフェスク、バミューダグラス、クリーピングレッドフェスク）を使用し、2009年9月中旬に播種した¹⁴⁾。

施工法としては客土工（脱水ケーキ：70～100%、土壌改良材：0～30%）および客土吹付工（脱水ケーキ：90%、土壌改良材：10%）の2種類とした。

緑化実証試験の試験区としてトンネル建設工事現場B内に仮設法面を造成した。試験区は、前記に示す客土工法（型枠工：メッシュリング工法）、客土吹付工法（湿式吹付工）を対象とした試験区を設定した。客土工の試験区は3種類（各試験区面積：約3m×約3m）、客土吹付工の試験区は2種類（各試験区面積：約2m×約3m）の計5試験区とした。法面勾配は1:1.2とした。

客土工の場合は重機を用いて材料を型枠内に充填した。客土吹付工の場合は生育基盤材に加水した後、吹付機により施工した。施工状況の一部を写真-7に示す。また、降雨による法面からの流出水の周辺環境への影響に配慮して簡易排水溝および釜場を設置し、最終排水は排水基準に従って処理した。

本試験では生育基盤材の配合比率や施工法を変えた各試験区について芝草の種の播種後の付着性と侵食性、芝草の繁茂・生育（植被率、生育本数）等の経時変化を相対的に比較して評価した。なお、植被率や生育本数は指針¹⁵⁾に準拠して評価した。



写真-7 施工状況の一例

法面緑化試験区の施工直後の状況を写真-8に、施工2か月後の播種した芝草の生育状況を写真-9に示す。この法面緑化の写真は2009年11月中旬の時点であり、図-7に示すように、植被率（植物が地表を被覆する割合）はいずれの試験区においても100%であった。また、施工2か月後の芝草の生育長は最大22cm、生育本数は2,500～6,000本/㎡の範囲で、植被率と同様の傾向を示した。なお、2009年12月から2010年2月末までは冬枯れ現象が見られたが、3月中旬より芝草の生育が再確認された。



写真-8 施工直後の法面の状況



写真-9 施工2か月後の法面の緑化状況

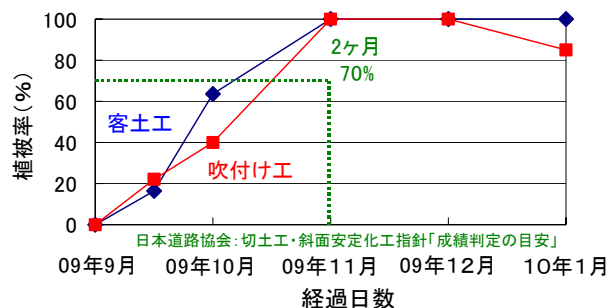


図-7 植被率の経時変化

5. 結論

(1) 自然にやさしい濁水処理

本研究では環境調和型凝集剤であるキトサン凝集剤の濁水処理性能を実験室レベルで確認した。次いで実際の2つのトンネル建設工事現場において、キトサン凝集剤を使用した濁水処理を実証・適用した。この過程でキトサン凝集剤の工事濁水に対する凝集性能を検証し、長期間に亘り排水基準を満たす処理を連続して行うことができた。キトサン凝集剤は生分解性や生体親和性にすぐれた安全性の高い天然材料であることから、処理した放流水による周辺環境への負荷も大きく低減できたと考えている。したがって、本技術は濁水処理において周辺環境に生息する希少生物や天然水産資源への影響を低減することで生物多様性に貢献できるものと考えられる。

一方、濁水処理におけるLCCO₂排出量を解析した結果、キトサン凝集剤を用いた場合は従来のPACおよび高分子凝集剤を用いた場合に比べて廃棄物の削減によって約20%のCO₂排出量が削減されることが分かった。したがって、キトサン凝集剤による濁水処理は地球温暖化への緩和策にも微力ながら貢献できると考える。

(2) 脱水ケーキの生育基盤材への利用

本研究ではキトサン凝集剤で処理した脱水ケーキを生育基盤材として利用するために試験植物であるコマツナなどに対する影響をまず検討した。その結果、キトサン脱水ケーキは植物の発芽や生育に比較的良好な促進効果を発現することが分かった。そこでトンネル工事現場内において仮設の法面緑化実証試験（試験面積：約60m²、試験期間：2009年9月～2010年8月）を実施してキトサン脱水ケーキの生育基盤材（植栽土）としての適用性を検証した。今後は、建設工事現場の濁水処理で発生するキトサン脱水ケーキを「自ら利用」として積極的に展開していきたい。ただし、脱水ケーキの利用にあたっては、有効性を確認するだけでなく、事前に土壌環境基準に準拠した安全性や所管監督官庁への確認が必要である。本技術は、建設工事入札時の総合評価方式にも積極的に提案していく計画である。また、排出される建設汚泥（脱水ケーキ）についてもさらなる用途開発を進めるこ

とで建設汚泥の再資源化や有効利用の拡大につなげていきたい。

謝辞：本研究では、建設工事現場内の法面緑化実証試験に関して東日本高速道路株式会社関東支社木更津工事事務所にご配慮をいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 川又 睦, 大野 剛, 藤原 靖, 秋吉美穂, 領家邦泰, 岡崎 聡: 環境調和型凝集剤を含む脱水ケーキの植栽基盤材への利用検討, 土木学会 第64回年次学術講演会, pp297-298, 2009.
- 2) 川又 睦, 大野 剛, 赤塚真依子, 辻 茂樹, 岡崎 聡: 脱水ケーキを生育基盤材として利用した法面緑化実証試験, 土木学会 第65回年次学術講演会, 投稿中, 2010.
- 3) キチン, キトサン研究会編: 最後のバイオマスキチン, キトサン, 技報堂出版, pp1-270, 1988.
- 4) Landes, D. R. and Bough, W. A.: Effect of chitosan — a coagulating agent for food processing wastes — in the diets of rats on growth and liver and blood composition, *Bull. Environ. Contam. & Toxicol.*, pp555-563, 1976.
- 5) ト蔵浩和, 小林祥泰: ヒトに対するキトサンの長期摂取及び過剰摂取における有効性と安全性の検討, 日本食物繊維研究会誌, pp61-71, 2002.
- 6) 木元明日子, 藤原 靖, 川又 睦, 大脇英司: キトサン凝集剤を使用した濁水処理システムのCO₂削減効果, 第5回日本LCA学会講演会, pp298-299, 2010.
- 7) 木元明日子, 藤原 靖, 川又 睦, 大脇英司: キトサン凝集剤を使用した濁水処理システムのLCCO₂, 第65回年次学術講演会, 投稿中, 2010.
- 8) 経済産業省: “平成14年度環境調和型水処理技術ガイドライン調査報告書”, 2003.
- 9) 社団法人産業環境管理協会: ライフサイクルアセスメント支援ソフト“JEMAI-LCA Pro”, 2006.
- 10) 国立環境研究所編: “産業連関表による環境負荷原単位データベース(3EID)”, 2010.
- 11) 土木学会編: “コンクリート技術シリーズ62 コンクリートの環境負荷評価(その2)”, 土木学会, 東京, 2004.
- 12) 緑化環境工学研究委員会編: ランドスケープ研究(日本造園学会), 63, pp224-241, 2000.
- 13) (株)高速道路総合技術研究所編: 植生のり面施工管理要領(H18.10版), pp1-14, 2006.
- 14) (株)高速道路総合技術研究所編: 設計要領 第一集 土工編(H21.7版), pp4-18, 2009.
- 15) (社)日本道路協会編: 道路土工切土工・斜面安定工指針(平成21年度版), pp191-274, 2009.