

膜分離方式による濁水処理方法の開発

小西正郎* 萩森健治** 水原憲三**
亀田 茂*** 高野晴男****

1. はじめに

環境への意識が高まっている近年、工事排水に対しても適切な処理が必須になっている。工事に伴う排水において、処理の対象とされている一般的な環境影響項目は浮遊物質（SS）と pH である。総理府令で定める公共領域水域への排水基準では、SS を 200mg/l 以下、pH を 5.8～8.6（河川・湖沼）とすることが定められており、SS については上乘せ基準として 30～80mg/l に設定する条例もある。トンネル工事排水においても環境保全上で問題にすべき環境影響項目として SS、pH 及び油分をとりあげている。これらは、現地に設置した排水処理設備において、炭酸ガス等による中和処理と PAC（ポリ塩化アルミニウム）や硫酸バンド（硫酸アルミニウム）等の無機凝集剤と有機系高分子凝集剤を用いる凝集沈殿処理方式で処理しているのが一般である¹⁾。一方、清流を好むヤマメ、イワナ、マス、アユ等の棲息水域では水産用水基準や生活環境の保全に関する環境基準として 25mg/l を維持することが望ましいとされている。このような清冽な河川環境を有する地域における工事等では、排水中の SS を 25mg/l 以下とする条件を付帯する事例も増加しつつあり、従来の凝集沈殿方式の維持管理をより厳密にする方法や砂ろ過を併用する方法等で対処されている。しかし、これらの方式では、メンテナンスの煩雑性が増すことや設備が大きくなる等の問題がある。また、水質環境には好ましくない高分子凝集剤などの薬品を多用する問題も残る。

一方、ろ過膜を用いた水処理が浄水場やし尿処理場など種々の排水に対して普及しつつある。また、その膜材に目開きの大きな不織布を用いて低圧でろ過するダイナミック処理方式を適用することにより、SS の高度処理と大きな透過流束を実現して設備のコンパ

クト化を図る方法が開発されつつある²⁾。この方式を工事濁水に適用することで、高度処理と凝集沈殿剤等の使用量を低減して環境への負荷を軽減することを期待できる。

以上の背景から、比較的長期にわたって水処理が必要になるトンネル工事濁水を対象として、ダイナミック膜ろ過方式による濁水処理技術の開発を進めた。開発にあたってはバッチャープラント濁水や種々の岩盤に起因する SS の処理に対処するための検討と、並行して実際の現場排水に小型試験機等を適用し、SS を 25mg/l 以下にする高度処理システムを実用化した。ここでは、これら試験の結果を報告する。

2. ダイナミック膜ろ過方式

ダイナミック膜ろ過方式とは、一定の孔径を有するろ過膜を用いて、その膜面に排水中の SS を利用して堆積層（ダイナミック層）を形成させ、それをろ過体（膜+ダイナミック層）として排水の濁度を低減させる手法であり、図-1 に示す濁水のろ過現象のうちケーキろ過現象を利用したものである³⁾。ダイナミック膜ろ過に用いる膜の種類や孔径は様々である。一般に、膜孔径よりも大きい SS が濁水中に存在すれば、ダイナミック層を形成するとされているが、ろ過初期には膜孔径よりも小さいものが透過するため、初期排水（ダイナミック膜が形成されるまでの間の透過水を

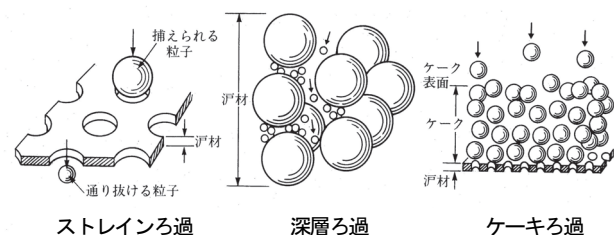


図-1 濁水ろ過の原理

*技術本部環境プロジェクト部 **技術本部土木部 ***技術研究所 ****管理本部品質環境管理部

原水槽等に還流させる処理)を適当時間実施することが必要になる。また、目的とするろ過性能(透過流束や透過水 SS 等)を良好に保持するためにはダイナミック層の定期的な更新が必要であり、一定時間ごとにエアバブリングと水による逆洗浄を膜面に施す操作等をシステムに組み込んでいる場合が多い。更に、ダイナミックろ過の機能を持続させるためには、堆積層を高圧縮することなくソフトな層の状態を保持することが要点になる。そのため、ろ過膜の外側と内側の水頭差(ろ過圧力)は100mm 前後と小さくしており⁴⁾、そのろ過動力が小さいことも特長の一つである。

3. 目標値と試験方法

3.1 濁水処理の目標値

トンネル濁水に膜分離処理を適用するに当たって、処理設備能力の設計指標となる透過流束(膜面を1日に通過する濁水量を膜面積で除して求める換算速度)及び排水処理性能の評価指標となる透過水 SS と pH について、それぞれ次のような目標を設定して試験検討を行った。

- ・透過流束: 5m/d 以上(仮に、膜面積を 36m² とすれば 7.5m³/h 以上の処理能力となる)
- ・透過水 SS: 25mg/l 以下(濁度換算で 28NTU)

なお、ここでは、原則として濁度を(単位 NTU: 便宜的に濁度を表すときに用いる単位でホルマジン濁度単位の略)指標に用い、SS の値は濁度測定値からの換算値として算定(Ka トンネル濁水の場合、原水濁度×0.9 及び凝集剤添加濁水の場合で同×1.5mg/l)した。

3.2 室内試験の方法

室内試験は現場実証試験での性能を事前に評価することと、現場実証試験で得られた不具合を解消する等の目的で実施した。

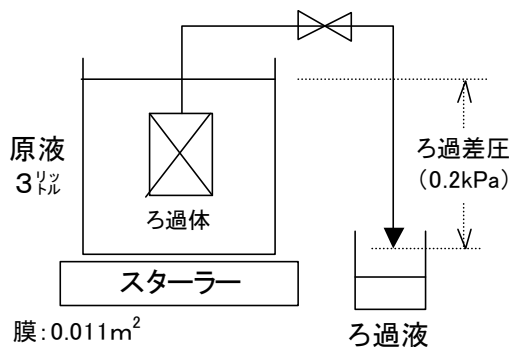


図-2 膜分離のピーカーテスト状況

a. ろ過膜の選定

火山岩系の地質からなる Si トンネルの排水と不織布を用いた試験を実施した結果、目標とした透過水濁度は得られるが、透過流束の低下が生じた。この原因を調べたところ、ダイナミック膜通過 SS が不織布内部に蓄積して性能を低下させる現象が生じていることが分かり、ステンレス膜(300メッシュ:以後#300と記す)に変更することで解決することができた。ところが、現場で発生するバッチャープラント排水の処理を試みたところ、セメント成分が膜面に付着して処理性能が大きく低下し、エアバブリングと水による逆洗浄では付着物を除去することが困難となる結果が得られた。そのため、ろ過膜素材に関して、図-2に示す試験装置と 5000ppm に調整したセメント溶液を用いて膜の選定試験を実施した。用いた膜は、テフロン膜(#170)、ナイロン膜(#300)、ポリエステル膜(#300)及びステンレス膜(#300)である。

b. セメント成分の付着対策に関する検討

濁水中のセメント成分が膜面に付着・固化することを解消する方法として、発生濁水に予め中性化を施してセメント成分の水和反応を概ね終息させ、それを膜ろ過する方法を検討した。試験は、先ず、図-3に示す方法で、セメント付着膜と中性化セメント付着膜を作製し、同時にろ過液の濁度を測定した。付着セメントの剥離性は、写真-1に示すカラム下部にセメント

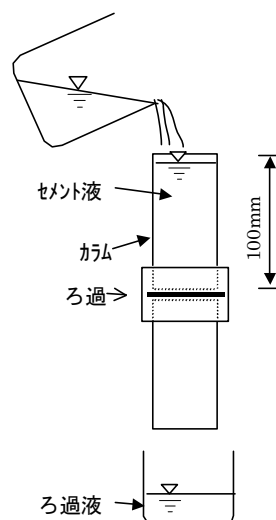


図-3 セメント付着膜の作製(カラム内径: 10mm)



写真-1 模擬逆洗状況(セメント成分を付着させた膜を逆さにして約 1mの水頭をかけ、膜の剥離性を確認)

表-1 実証試験及び実用機の膜分離処理仕様

| 項目 | 装置名称 | | | |
|-----------------------|--|---|---|---|
| | 小型試験機 | 改良型試験機 | 小型実証機 | 実用機 |
| ろ過膜種類 | ステンレスネットスクリーン #300 | ステンレスネットスクリーン #400 | ステンレスネットスクリーン #400 | ステンレスネットスクリーン #400 |
| 膜面積 | 0.1m ² (0.05m ² ×2枚) | 1.0m ² (0.2m ² ×5枚) | 3.6m ² (1.2m ² ×3枚) | 3.6m ² (1.2m ² ×3枚) |
| 膜の洗浄方式 | 水逆洗+エアバブリング | 水逆洗+エアバブリング | 水逆洗+エアバブリング | 超音波洗浄 |
| 想定透過流束 | 5m/d以上 | 5m/d以上 | 5m/d以上 | 10m/d以上 |
| 設定水頭 | 200mm | 60mm | 160mm | 160mm |
| 処理水濁度 | 50(NTU)以下 | 50(NTU)以下 | 25(NTU)以下 | 25(NTU)以下 |
| 処理サイクル:初期抜水→ろ過→逆洗(時間) | 5min→40min→1min | 3min→20min→1min | 9min→20min→1min | 5min→30min→90sec |
| 実証場所 | Siトンネル | Kaトンネル | HI、Kaトンネル | Abトンネル |
| 摘要(主な検討項目) | セメント成分付着性 | 粘土成分透過措置 | 高性能化 | 実用性 |

付着膜を付着面を下方にしてセットし、そこに1mの水頭をかけ、セメント成分が膜から分離されるか否かを調べた。また、セメント成分付着膜を短いカラム(L=100mm)ごと超音波洗浄器(45kHz)に入れて加振し、取り出した後に1mの水頭をかけて、セメント成分の剥離性を調べた。ここに、膜は#300 ステンレスを用い、セメント溶液は5000ppmに調整して1時間振とうしたもの(pH11.6)と、それに炭酸ガスをバブリングしてpHを6.4として中性化させたものの2種類を用いた。

c. 凝集剤の選定

堆積岩系のKaトンネル工事濁水について、膜処理試験を実施した結果、透過流束が急速に低下する現象が生じた。このとき、膜面には粘土系の粒子が付着している状況が見られ、付着性の高いSSがろ過障害の原因となっていることが推測された。そのため、レーザー粒子分布測定装置によるSSの粒度分布測定とSSの起源と考えられる母岩の組成を粉末X線分析によって調べた。また、その対策としてSS分をダイナミック膜形成に適するように改質する目的で凝集沈殿剤を併用する方法を検討した。試験は、図-2と同様の試験装置とKaトンネル泥土を1000NTUの濁度に調整した原水を用い、先ず原水に凝集沈殿剤を所定量加えて2分間の高速攪拌を行い、その後に緩速攪拌を継続した状態で膜ろ過特性を測定した。凝集剤は、PAC、無機塩類系(ECO)、石こう系(PAO)の3種類を用いた。

3.3 現場試験の方法

膜分離処理装置として、表-1に示す仕様の小型試験機、改良型試験機、実証機及び実用機を製作して現場試験を実施した。各適用現場の概略的な濁水の特徴

表-2 実証試験及び実工事における濁水の特徴

| 濁水種類 (地質) | 濁度 | pH | 濁水の特徴 |
|---------------------|-------|------|----------------|
| | NTU | | |
| Siトンネル濁水 (花崗岩主体) | 約800 | 11.5 | パッチャープラント排水が混在 |
| Kaトンネル濁水 (泥岩主体) | 約1100 | 7.9 | 細かい粘土分多い |
| HIトンネル濁水 (花崗岩主体) | 約2000 | 12 | パッチャープラント排水が混在 |
| Abトンネル濁水 (泥岩主体) | 約400 | | 深礎基礎排水主体で粘土分多い |

を表-2に示す。

現場試験は、稼働中の凝集沈殿方式の処理設備に隣接して試験装置を設置し、原水の一部を試験機に流入させる措置をとって膜分離処理を実施した。最初に実施した小型試験機の運転条件は、初期抜水5分、ろ過40分及び逆洗1分を1サイクルとし、ろ過水頭を200mmに設定して着手した。このサイクルは、ダイナミックろ過による活性汚泥処理において、定期的なエアと水による逆洗浄が有効であること、及びその頻度は3時間に一回程度とすることでろ過流束の低下を抑えることができると報告されているため、これらの知見を参考にした⁵⁾。その後、現場濁水への対応及び処理性能の向上等を検討する過程で、ろ過時間、凝集剤添加方法及び膜洗浄方法等をパラメータとした試験を実施し、これらに関する最適条件を把握して、実用機の仕様を決定した。

3.4 実用機の工事濁水処理への適用

実用機には、膜面の洗浄機能として水逆洗+エアバブリングよりも効果の高い超音波膜洗浄装置を用いることとし、小型実証機にはこれを付加した仕様とし



写真-2 実用機設置状況 (Ab トンネル)

た。現場設置状況を写真-2 (Ab トンネル工事所) に示す。なお、この現場における工事排水は、堆積岩系地質における深礎基礎工事からの濁水とコンクリートポンプ車の洗浄排水であり、これらを膜処理によって適正処理した後に排水路に放流した。

4. 室内試験結果

4.1 ろ過膜選定試験の結果

5000mg/lに調整したセメント溶液と4種類の膜を用いた試験結果を図-4及び5に示す。

図より、透過流速、透過水濁度ともにポリエステル(#300)とステンレス膜(#300)が良好な値を示すことが分かる。一方、膜モジュールを構成するに際しての加工性の点では、たわみが発生するポリエステルより展張性に富むステンレス膜の方が適当であり、この点を考慮してステンレス膜をモジュール用素材として選定した。

4.2 セメント成分のステンレス膜への付着性対策

写真-1に示すカラムへの注水液とろ過液の濁度測定結果を図-6に示す。図より、セメント溶液に予め炭酸ガスを施して中性化を図ったろ過液の方が大きい濁度の低下を示すことが分かる。また、炭酸ガスで中性化処理したセメント付着膜と未処理の付着膜の超音波洗浄試験結果を図-7に示す。図より、中性化処理して超音波を加振したもののカラム水頭は急速に低下していることが分かる。即ち、超音波で剥離が生じて透過が生じた結果である。これらのことから、セメント成分を含む濁水に対しては、予め炭酸ガスによる中

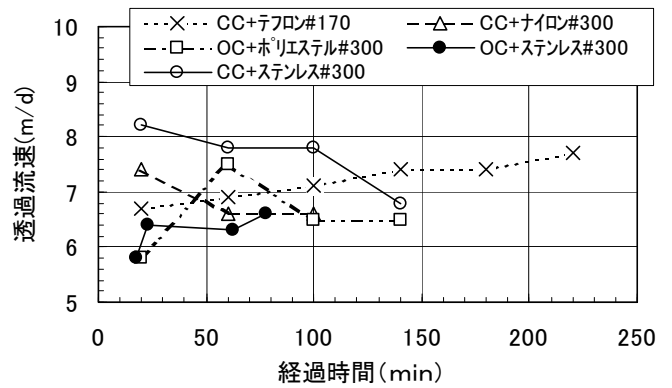


図-4 セメント溶液の膜分離ろ過における透過流速
CC: 中性化セメント液 (pH≒8)、OC: 普通セメント液 (pH≒12)

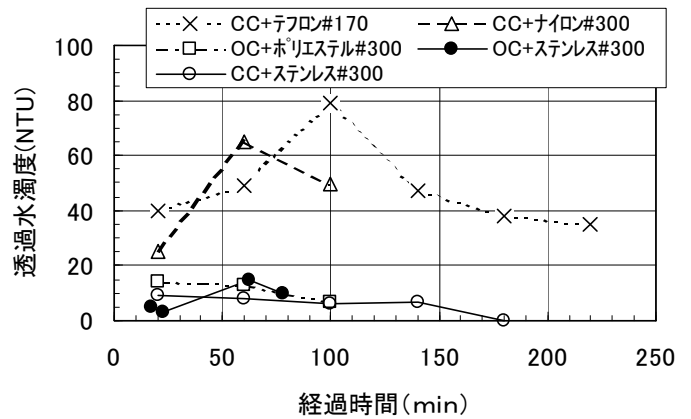


図-5 セメント溶液の膜分離ろ過における透過水 SS
CC: 中性化セメント液 (pH≒8)、OC: 普通セメント液 (pH≒12)

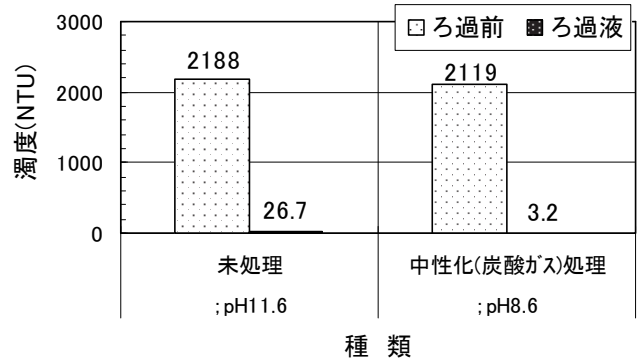


図-6 カラム試験 (水頭 1m) によるセメント溶液と炭酸ガス処理した溶液のろ過液の濁度

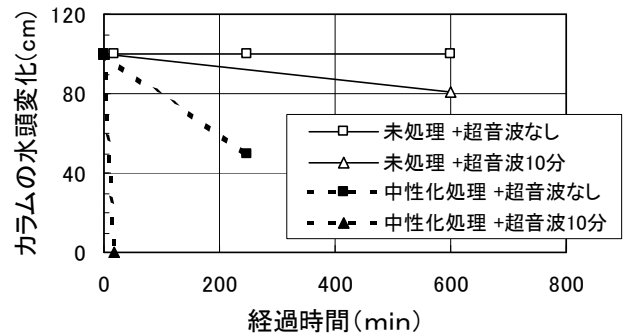


図-7 セメント付着膜 (ステンレス#300) の炭酸ガス処理及び超音波加振による剥離性効果

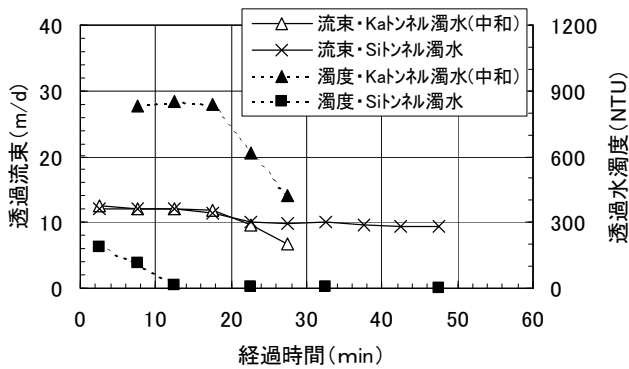


図-8 Ka, Si トンネル濁水のビーカーテスト結果

性化処理が有効であり、膜面に付着したものを超音波で除去できる可能性が高いと言える。

4.3 凝集剤選定試験の結果

Ka トンネルで採取した汚泥を 5000NTU (pH7.9) に調整した濁水及び良好なるろ過結果が得られた Si トンネル原水について、図-2の装置を用いた試験結果を図-8に示す。図より Ka トンネル濁水では、ろ過水濁度が 800NTU を超える値を示すこと及び 20 分頃から濁度と透過流束が低下し、ろ過不良が生じていることが分かる。この原因を明確にするために、濁水成分の粒度分布と母岩の粉末X線分析を実施した。その結果を表-3及び図-9に示す。図-9には、良好な膜ろ過性能を示した中性化セメント溶液の粒度分布も示した。表-3に示すように、良好なるろ過を示す Si 及び不良の Ka トンネルの母岩には、何れも粘土成分の組成鉱物と推定される緑泥石を含むことが分かった。しかし、原因鉱物を特定するには至らなかった。一方、図-9を見れば、濁度 196NTU の原水では 20 μ m、1100NTU 原水では 9 μ m 近傍に粒径ピークがあり、中性化セメントでは 50~60 μ m であることが分かる。#300 ステンレスの開孔径はおよそ 44 μ m であり、1100NTU 原水のように 40 μ m を超える粒径が少ない濁水ではダイナミック層の形成に長時間を要するのは、その形成までに SS 分が大量にろ過側に漏出するためと考えられる。また、ダイナミック層形成後は、ろ過体の空隙に粘土分が詰まるためにろ過不良が生じると考えられる。実際、粘土分と推定される粘着性のある粒子が膜面を覆っている状況が目視で分かり、これは逆洗でも剥離が困難な状態であることが分かった。以上のことから、膜ろ過の阻害要因は 40 μ m 以下の微細な粘土成分であり、なおかつ高い粘着性を示すものであると想定し、開孔径が 34 μ m の#400 ステンレス

表-3 トンネル母岩の粉末 X 線分析結果

| 名称 | ろ過特性 | 分析組成鉱物 |
|-----------|------|--------------|
| Si トンネル母岩 | 良好 | 長石、緑泥石、沸石 |
| Ka トンネル母岩 | 不良 | 石英、長石、雲母、緑泥石 |

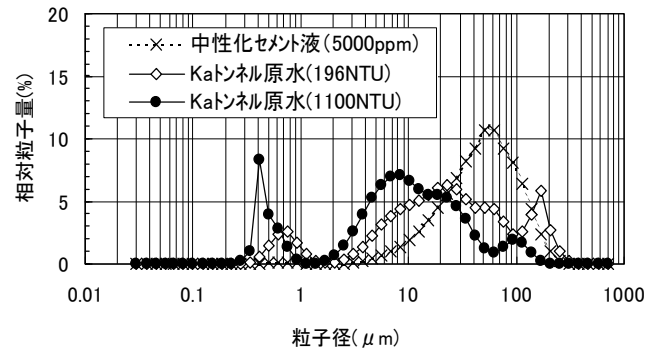


図-9 Ka トンネル濁水の粒度分布

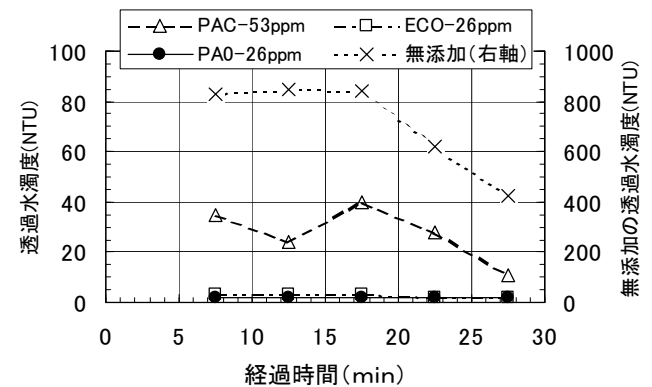


図-10 凝集剤の添加に関するビーカーテスト結果

膜の使用と前処理として凝集処理（粒径増大と非粘着性への改質）を施す方法をとることとした。そのための凝集剤として3種類を用いたときの試験結果を図-10に示す。図より凝集剤を事前に添加することで、透過水濁度を大きく改善できることが分かる。また、試験終了後ビーカーより取り出したステンレス膜の表面に水道水をかけて付着膜の除去を試みたところ、PAO の剥離性が良好であることも分かった。これらのことから、石膏系の PAO を前処理凝集剤として用いることとした。

5. 現場実証試験結果

表-1に示す各装置を用いて実施した現場実証試験の結果を図-11及び図-12に示す。Si トンネルでは、膜へのセメント付着が生じたため7時間程度までの結果しか得られていない。Ka トンネル1（1回目）ではセメント成分に対する対策及び粘土成分の目詰まり

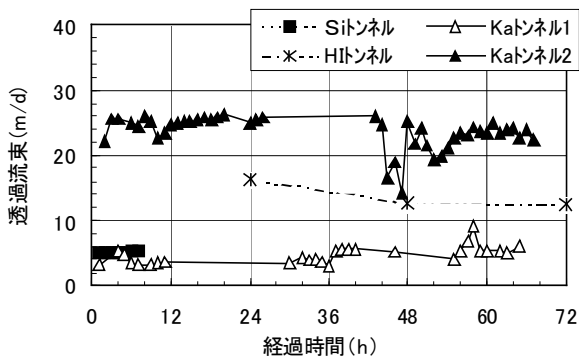


図-11 膜分離装置による現場濁水の実証処理

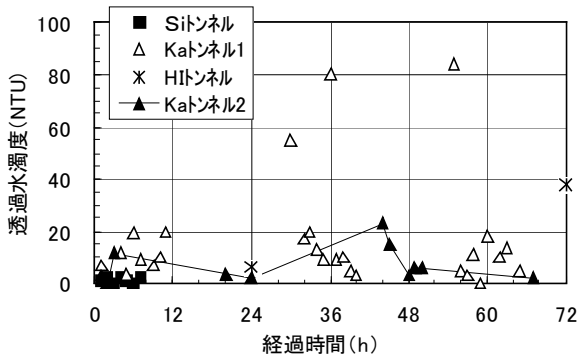


図-12 膜分離装置による現場濁水の実証処理

対策を施した結果であり、逆洗直後の濁度の上昇を除いては比較的良好な処理ができていていることが分かる。HI トンネルでは、凝集剤の添加方法等をより効果的に改良すること等で10m/d以上の透過流束を得ることができた。また、Ka トンネル2（2回目）では、それまでに得られら知見を集約して透過流束が25m/d程度で透過水の濁度も25NTU（約22mg/l）と当初設定した目標値を上回る処理を実現できた。

6. 工事濁水の処理

実証試験等で得た知見に基づいて設計した装置を実際の工事排水に適用した結果を図-13に示す。対象現場の原水は400~2000NTU程度の濁度を示し、SS成分は粘土質に富む濁水である。その結果、7.5m/dと幾分小さいものの透過水濁度は1~2と良好な処理状況を示し、実工事排水への適用可能性を明らかに出来たと言える。但し、現時点では、排水発生量が少なく連続処理を行うまでには至っておらず断続的な処理を行っている状況である。今後更に処理・観測を継続する予定である。

7. あとがき

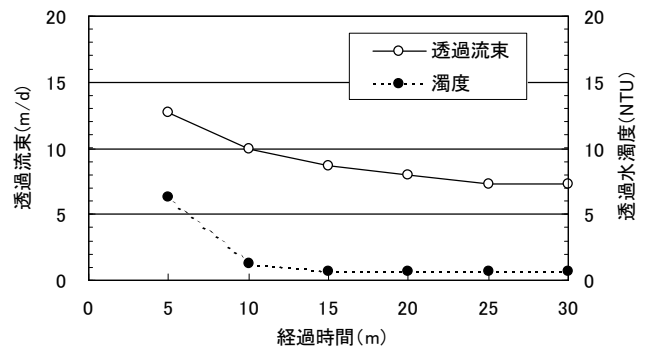


図-13 膜分離装置を用いた工事濁水の処理

ダイナミック膜ろ過方式により山岳トンネル排水を高度処理する方法の開発を実施した。その結果、透過流束は15m/d前後で濁度25以下に高度処理することが可能な実用機として、中和処理・凝集剤を併用した3.6m²の膜面積を有する装置の仕様を明らかにした。膜ろ過の特長はコンパクトな設備で高度処理できることとあり、それを基本にして前処理や限外ろ過膜処理等を併用すれば様々な排水への適用可能性が大きく、今後建設工事でも多用な場面で膜処理が適用される機会が増加するものと考えられる。

なお、本方法は、ダイセン・メンブレン・システムズ(株)との共同開発によるものであり、宮崎泰光氏、熊見和久氏を筆頭に同社の真摯な取り組みの賜物である。また、現場実験等で協力いただいた新日本坂 T、金谷 T、東生駒 T、阿部倉 T 及び濁水の提供等を頂いた薩摩 T、冠岳 T、小丸川 T、高取山 T、平山 T、栗東 T、桜井(工)、青野 T、八甲田 T、嵐山 T の関係者各位に紙面を借りて謝意を表す。

【参考文献】

- 1) トンネルと地下連載講座小委員会、「山岳トンネル工事の環境保全（5）」、トンネルと地下、Vol. 33、No. 11、pp. 57-66、2002
- 2) 大同均他、「ダイナミックろ過に及ぼす活性汚泥性状の影響」、第36回下水道研究発表会講演集、(社)日本下水道協会、pp. 643-645、1999 など
- 3) 杉本康治、「濾過～メカニズムとろ材・ろ過助剤」、地人書館、1992
- 4) 熊見和久他、「ダイナミックろ過方式によるし尿活性汚泥のろ過特性」、第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp. 265-267、2001
- 5) 麻生栄治他、「ダイナミックろ過の運転方法の考察」、第37回下水道研究発表会、pp. 704-706、2000