

山岳トンネルにおける新しい技術的取り組みについて

Empirical Results on New Seismic Prospecting and Turbid Water Treatment in a Mountain Tunnel Construction Site

新庄 大作*1 富澤 直樹*2 森山 祐三*2
Daisaku Shinjou Naoki Tomisawa Yuzo Moriyama
若林 宏彰*2 長沼 諭*2 高馬 崇*3
Hiroaki Wakabayashi Satoru Naganuma Takashi Kouma

要旨

中部地方整備局発注の新鹿トンネルは最大土被りが約 170m と大きく、調査・設計時に地表から実施される弾性波探査屈折法では、トンネル掘削深度における地質構造を正確に把握することは困難である。そこで、切羽発破を起振源として、その波動を地表で受振する弾性波探査を行い、切羽前方の地質を予測した。また、トンネル工事では、工事に伴う濁水処理が不可欠であるが、処理により生じる脱水ケーキをそのままでは有効活用することができず、産廃処理されることが一般的である。そこで、脱水ケーキの発生量を削減するとともにその含水比を大幅に低減し再利用することで、高効率で環境負荷を低減できる脱水処理システムを考案・運用した。本報告では、これらの新しい技術的取り組みである 2 テーマに関して、工法の概要とその結果について報告する。

キーワード：大土被り 弾性波探査 発破 切羽前方探査 濁水処理 環境負荷低減

1. はじめに

中部地方整備局発注の新鹿トンネル工事は、図 1 に示すように三重県熊野市に位置し、施工延長 761m、トンネル延長 734m、トンネル内空断面積 66.7m²の工事である。トンネルは平成 23 年 4 月に掘削を開始し、平成 24 年 2 月に貫通した。

本工事においては次の技術的なテーマを 2 つ掲げ、発注者の了解の下、工事内で実証した。



図 1 新鹿トンネル位置図

①切羽発破を利用した切羽前方探査

山岳トンネルにおける事前の地質調査では、一般に坑口部のボーリングと地表からの弾性波探査屈折法が実施される。しかし、弾性波探査屈折法の実用深度は 150m 程度であり、トンネル中央部の土被りの大きい区間では、トンネル掘削深度における地質構造を正確に把握することは困難である。そこで、トンネル掘削用の発破を起振源として、その波動を地表で受振することで、切羽前方の地質を把握することを試みた。

②高効率なトンネル工事中濁水処理システム

トンネル工事では、工事に伴う濁水処理が不可欠であるが、処理により生じる脱水ケーキは含水比が高いため、そのままでは有効活用することができず、産廃処理されることが一般的である。そこで、脱水ケーキの発生量を削減するとともに、その含水比を大幅に低減して再利用することでできる環境負荷を低減できる脱水処理システムを考案・運用した。

以下に、これらのテーマに関する実証結果を報告する。

2. 切羽発破を利用した切羽前方探査の試み

図 2 に本トンネルの地質縦断図を示す。事前の地質調査では、弾性波探査を図 3 に示す測線上で地表から行い、その結果を一般的なはぎ取り法とトモグラフィ的手法により解析することで、図 4 に示す弾性波速度の分布が得られ

*1 名古屋支店 土木部 *2 土木事業本部 技術部 *3 技術研究所 土木・環境技術研究部門

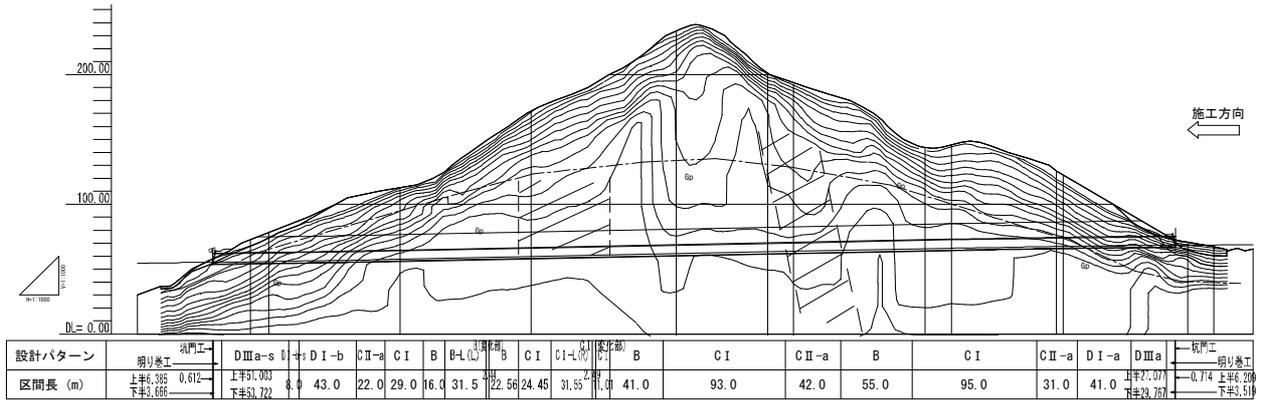


図2 地質縦断面図

ている。しかし、トンネル中央部では土被りが約170mと大きいので、トンネル掘削深度の地質情報を十分に把握できていない可能性がある。したがって、これらの低速度帯の位置および規模を正確に把握するためには、さらなる地質調査が不可欠である。

そこで、切羽前方のトンネル深度における地質をより高精度に把握することを目的に、トンネル掘削時の発破を用いた弾性波探査を試みた。

2.1 事前地質調査結果の概要

本トンネルはR=900mの平面線形をなすため、事前地質調査では、図3に示すような2つの測線の配置により、弾性波探査が行われている。それぞれの測線で、はぎ取り法およびトモグラフィーの解析により弾性波速度分布を求めている。はぎ取り法の結果では、トンネル中央部に低速度帯が2箇所予想されているが、これらははぎ取り法の理論的限界から垂直に表示されている。トモグラフィーの解析結果では、図4(2)A部分のトンネル中央部峠の前後に速度の落ちこみが見られる。このA部については、風化層が厚いことが推定されると、コメントされているが、図4(2)B部の速度の落ちこみについては記述がない。

そこで、事前調査の走時データを基にトモグラフィー的な再解析を行った。その結果、解析断面図（速度分布図）は同様な結果が得られたが、図5に示すように、土被りの大きいトンネル中央部では波線（解析上、弾性波が通ったと考える伝播ルート）がほとんど通過しておらず、この領域の探査精度が低いことが予想された。

2.2 切羽発破を利用した切羽前方探査

図6に切羽を起振源とする切羽前方探査の概念図を示す。地表から行う弾性波探査屈折法の場合、起振源と受振点の配置の関係で土被りが大きいとトンネル深度の情報が得られない可能性がある。これに対して、トンネル切羽での発

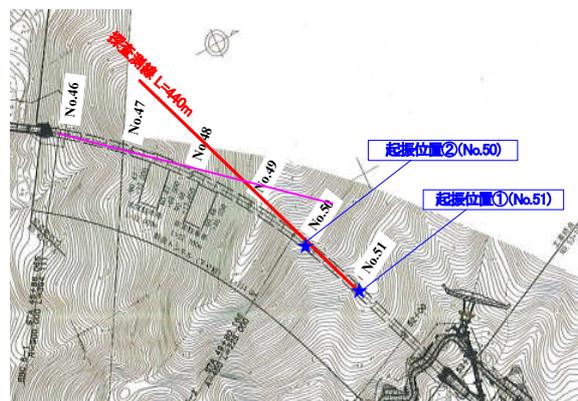
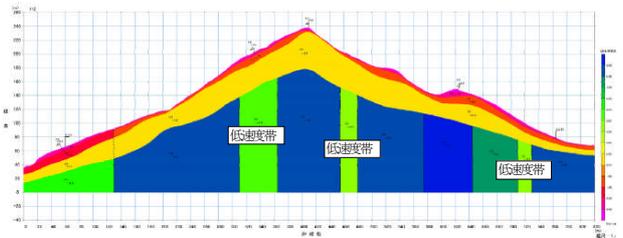
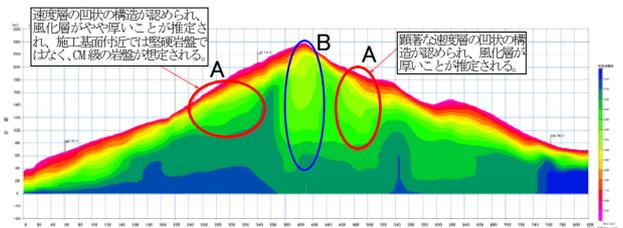


図3 弾性波探査測線とトンネル平面線形



(1) はぎ取り法による弾性波速度分布



(2) トモグラフィー的解析による弾性波速度分布

図4 事前の弾性波探査の結果

破を起振源とすることで切羽前方のトンネル深度における地質を把握できる可能性が高い。今回の試みでは、その起振源として、通常のトンネル掘削で用いる発破を利用するものである。その波動を地表で受振することにより、切羽前方の本調査による結果を事前弾性波探査データに足し合わせて再解析することで、地質予測の精度向上が期待できる。

2.2.1 新鹿トンネルにおける探査方法概要

1) 測線配置および測定区間

図7に測線配置を示す。測定位置は、既往の弾性波探査測線（H20-TD2-1 測線）と同一箇所とし、測定区間は440m区間（弾性波探査測線の0～440m(No. 51)）とした。また、起振には、No. 51 付近および No. 50 付近に切羽が到達した際の発破を利用した。また、弾性波探査反射法による切羽前方探査への適用性を確認するため、坑内にも測点を配置した。

2) 測定方法

地表の測点は、事前調査時の測点杭が残存していたため、同位置の10m 間隔に受振センサーを設置した。ショットマーク（起振時間の記録波形）は、坑内より有線で測定本部に伝送した。

坑内の測点については、地上の測定システムとは別に24chの観測システムを設置し、ショットマークは共用した。測点配置は、切羽からの飛石が届かない切羽後方約50m から2.5m 間隔で20 測点とし、側壁（路盤からの高さ1～1.5m 程度）の吹付けコンクリートとその背面地山に孔（φ100）をあけ、受振センサーを設置した。

3) 発破方法

本手法で段発で斉発される切羽発破が適用可能かどうか不明であった。そのため、以下の2パターンで発破を実施し、適用性を検討した。

- ①切羽発破の芯抜き発破だけを探査用の発破として使用する。
- ②施工時の段発発破を使用する。

いずれの場合も、ショットマーク発生用に、巻き線付き電気雷管（瞬発1段）を同時に発火させた。

2.2.2 探査結果

図8に波線経路、図9に解析結果（弾性波速度分布）を、事前調査の再解析のものと比較して示す。

1) 1回目(No. 51+00での起振)の解析結果

1回目の測定では、No. 51+00における切羽発破のデータを収録し、事前弾性波探査データとあわせて解析を実施した。

図8の波線経路図に示すように、切羽発破を使用した解析では波線がトンネル深度に達しており、トンネル深度に

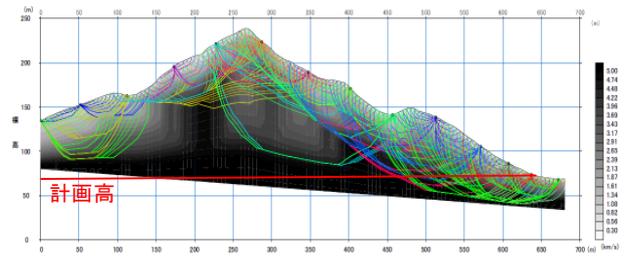


図5 再解析による波線経路図

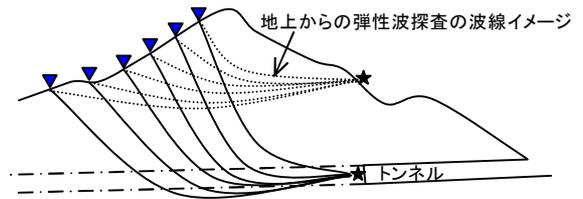


図6 切羽を起振源とする切羽前方探査の概念図

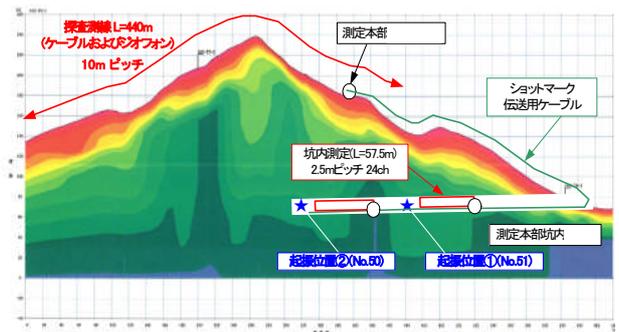


図7 測線配置図

における解析結果の信頼性が向上しているものと評価できる。

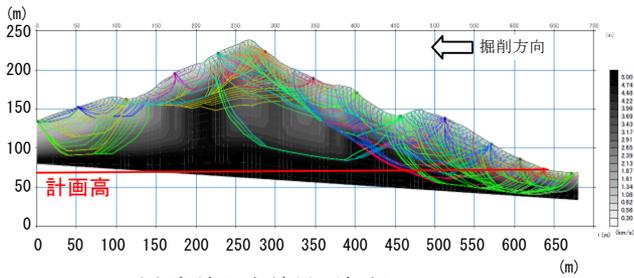
また、図9の解析結果より、以下のことがわかった。

- ・事前調査の距離程350m付近で、風化層が厚いことが懸念されたが、切羽発破を使用した解析では、トンネル深度には達していないものと判断された。
- ・距離程230m付近に、高速度（硬質）部の存在が推定された。
- ・距離程200m付近から起点側について、事前調査よりも低速度となる傾向を示している。測線がトンネル線形から外れているが、掘削に際して留意が必要である。

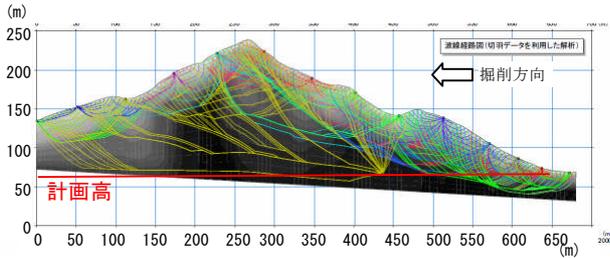
2) 2回目(No. 49+59での起振)の解析結果

2回目の測定では、No. 49+59付近での切羽発破のデータを収録した。解析は、事前調査のデータに、No. 51, No. 49+59の2つの切羽発破のデータを加えて行った。

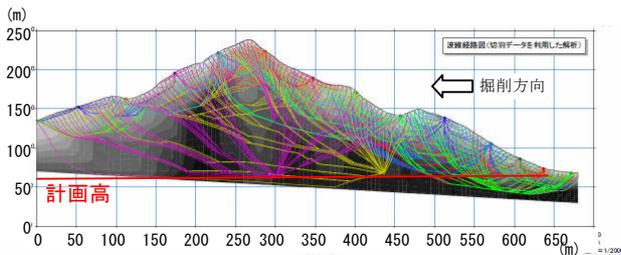
図8の波線経路図に示すように、1回目よりもトンネル深度における波線がさらに多くなっており、特に、距離程



(1) 事前調査結果再解析

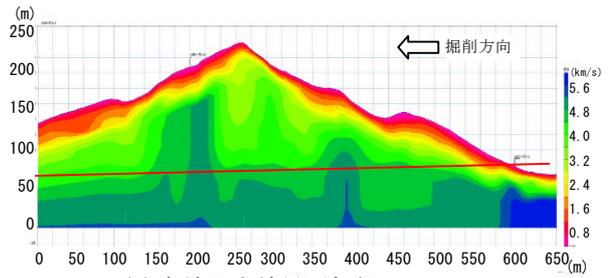


(2) 坑内を起振源とした結果 (1回目)

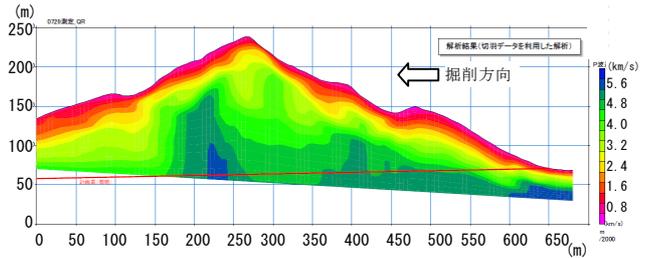


(3) 坑内を起振源とした結果 (2回目)

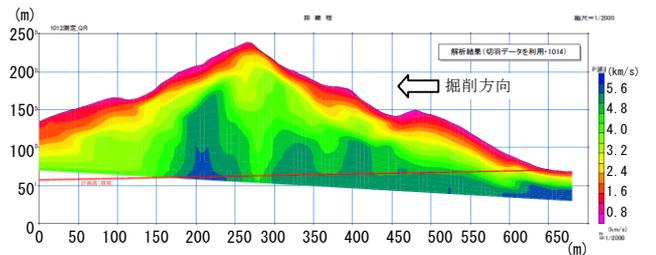
図8 波線経路図



(1) 事前調査結果再解析



(2) 坑内を起振源とした結果 (1回目)



(3) 坑内を起振源とした結果 (2回目)

図9 弾性波速度分布図

200~400m 付近では縦方向の波線が増えている。弾性波探査では、波線の数が増えることと同時に様々な方向の波線があることが解析精度の向上につながる。したがって、2回の切羽発破のデータを取り入れることで、解析結果の信頼性が、さらに向上しているものと判断できる。

また、図9の解析結果より、以下のことがわかった。

- 1回目の解析では一様な速度分布となっていた距離程 250~400m 付近の、より詳細な速度分布が明らかとなった。
- ただし、距離程 250~400m 付近の速度の変化は大きなものではなく、後述するように地山区分が変わるなど施工に直接影響するようなものではないと判断される。
- 距離程 200m 付近から起点側について、明確に低速度となる傾向を示している。測線はトンネル線形から外れているが、掘削に際して留意が必要である。

2.2.3 地山区分の評価

図10に今回実施した切羽発破のデータを使用した2回の

解析結果より想定されるトンネル上方 1.5D 位置における弾性波速度、設計・実施支保パターン、および切羽評価点の関係性をまとめて示す。

まず、弾性波速度の縦断分布より、以下のことがわかった。

- 事前調査で懸念されていた、距離程 350m (No. 50) 付近の低速度帯について、その前後区間の速度変化が明確となり、数十mにわたり速度が低下することを確認できたが、地山区分がD区分に落ち込むなど施工に影響するような低速度区間は存在しないものと推定される。
- 距離程 150m (No. 48) 付近より起点側では、事前調査よりも速度値が低くなる傾向が認められる。この付近は測線がトンネルルートから外れているため、本結果から単純に判断することはできないが、設計で想定されているBあるいはCIと比較して1ランク低い区分となる可能性があるため、施工に際しては留意が必要である。

次に、設計および実施支保パターンと切羽評価点について、以下のことがわかった。

- ・距離程 250m 付近と 310m 付近で切羽評価点が低下し、CII-b での施工となった。この範囲は、弾性波速度が低下傾向にあった。当該箇所は、速度分布の急変部境界に位置している。
- ・距離程 430m 付近で見られる速度の落ちこみは、切羽評価点には表現されていない。しかし、この範囲では断面内における評価点のバラツキが大きく、最小評価点は低下傾向を示している。
- ・距離程 450m 以降については、測線とトンネル線形が外れてきている。この範囲では比較的高速な傾向を示すが、切羽評価点も高まる傾向がある。

2.2.4 切羽発破の起振源としての適用性

図 11 に、切羽掘削で段発発破を使用した時に得られた波形データを示す。芯抜きと 2 段目（図中楕円部）との秒差は 0.25 秒であり、問題なく初動を確認できることがわかった。

したがって、本手法では、調査のために特別に瞬発発破のみ実施する必要はなく、通常の掘削サイクル内に調査を実施できる。

2.2.5 切羽発破を用いた坑内反射法としての適用性

得られたデータは全て測定機器の測定レンジを越える波動が入力されたことを示しており、使用した機器に対して薬量が多いことがわかった。したがって、本手法に合わせて坑内で反射法を行う場合には、測定機器での工夫が必要である。

2.2.6 まとめ

本トンネルで切羽発破を利用した切羽前方の弾性波探査を試行した結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ①通常のトンネル掘削で使用する段発発破を適用することができる。
- ②本手法により、切羽前方の弾性波速度のコントラストをより明瞭に把握することができる。また、測定回数を重ねデータ量が増えるほど、解析結果の信頼性が向上する。
- ③本トンネルは地山内の弾性波速度の差があまり大きくなかったこと、および掘削切羽断面内での左右の状態（切羽評価点など）の差が大きかったことから、前方探査で得られた弾性波速度の差と支保パターンの相関性を見いだすには至らなかった。

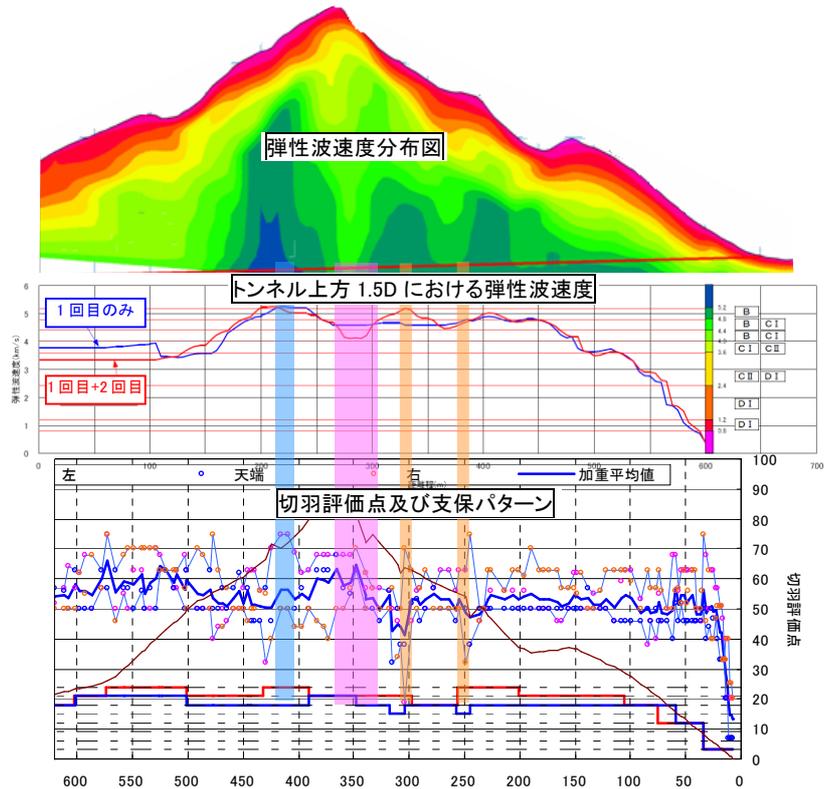


図 10 弾性波速度と切羽評価点の関係

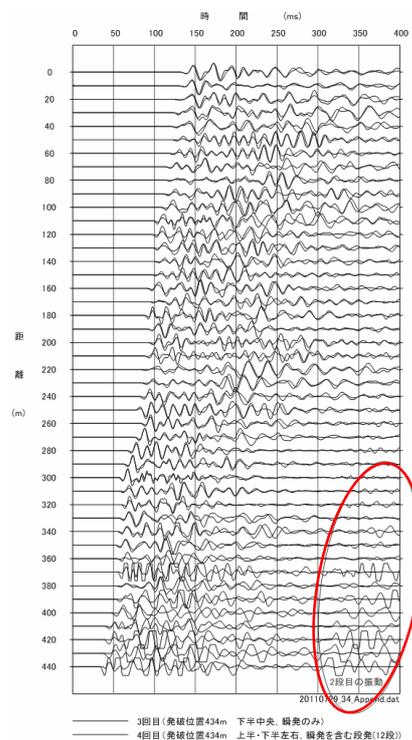


図 11 波形データ

3. 高効率なトンネル工用濁水処理システム

トンネル工事における濁水処理では、凝集剤として一般的に無機凝集剤 PAC(ポリ塩化アルミニウム)と高分子凝集剤が使用されている。処理対象となる原水は坑内で発生する湧水がずり出し作業などによって濁水となるものや、削孔水および生コンの洗浄水などであり、それぞれの性状(SS, PH)は大きく異なる。一方、原水の性状や量が時間的に変動するため、凝集剤の添加量をきめ細かく管理することは困難であるため、必ずしも最適な凝集効果が得られない場合がある。また、一般に使用されている無機凝集剤は多量(100ppm~200ppm)に使用されるため、残留した腐食性イオン(CL⁻)により水酸化アルミニウムからなる多量のスラッジが発生し、処理水は再利用に適さない(図12)。さらに、この水酸化アルミニウムは、河川等に放流されれば、魚類に影響を及ぼすことがある。

これに対して、無機凝集剤 PAC に替えて凝集効果がより優れた有機凝集剤を採用すれば、スラッジの発生を抑制でき、また万一放流されても魚類への影響がない。このような有機凝集剤を原水性状の変化に対応して種類、および添加量を自動で変えることにより最適な凝集効果が得られるシステムを考案し、本トンネルで実証した。

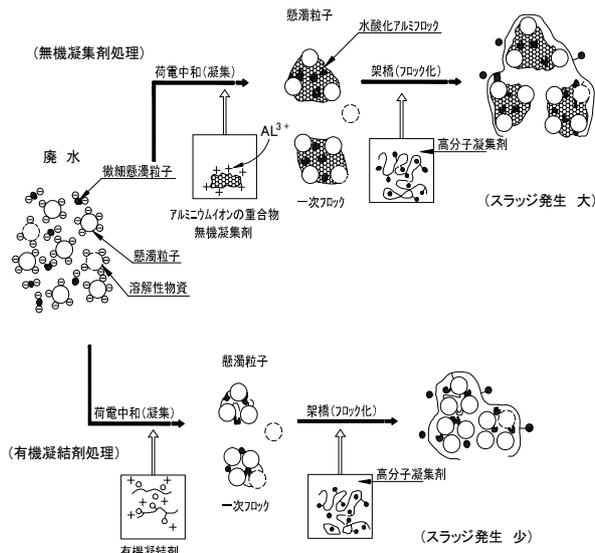


図12 凝集剤のメカニズム

表1 凝集剤の比較

	PAC	有機A	有機B
主成分	水酸化アルミニウム10%	メタクリル酸系ポリマー	ポリカチオン系有機凝集剤
外観	無色~黄色かかった薄い褐色	白色顆粒状粉末	白色粉末
PH	2.7~2.9 (原液)	4.3~5.3 (1%水溶液)	4.4~5.4 (1%水溶液)

3.1 高効率濁水処理システムの概要

本システムでは、異なる原水性状に対応するため、高い凝集効果を発揮する複数の有機凝集剤を使用する。また、原水性状の変化をリアルタイムで測定し、その性状に適した凝集剤の組合せおよび配合で自動添加する。なお、本現場では2種類の凝集剤を使用した。

3.1.1 有機凝集剤の作用機構

図12に示すように、一般にコロイド粒子(混濁物質、エマルジョン粒子)は、マイナスに荷電しており、これが凝集を妨害しているため、マイナス荷電の中和(プラス荷電を持つ凝集剤の添加)が必要となる。

今回使用した有機凝集剤の概要を表1に示す。

本現場の対象となる原水のうち生コン洗浄水は、セメント由来のカルシウム、砂、碎石粒子を主成分とする。一方、削孔水は粘土系粒子が主体となる。今回使用した有機系凝集剤はカチオン密度が高く、荷電中和量が強いため、少量の添加量で有効にコロイド粒子の荷電中和作用を発揮する。特に、有機Aは粘土系粒子に対して、有機Bはカルシウムを含む粒子に対して、それぞれ凝集効果が高い。したがって、原水の性状に応じて選択し、添加することで、安定した処理水質が期待できる。

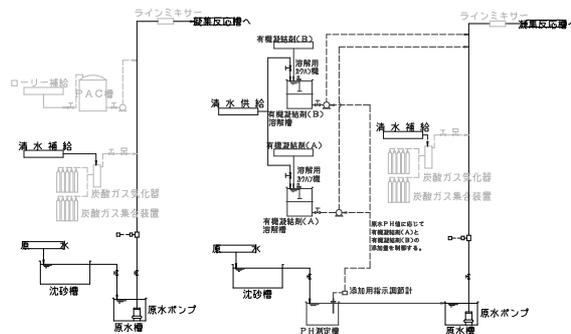


図13 処理フローの比較

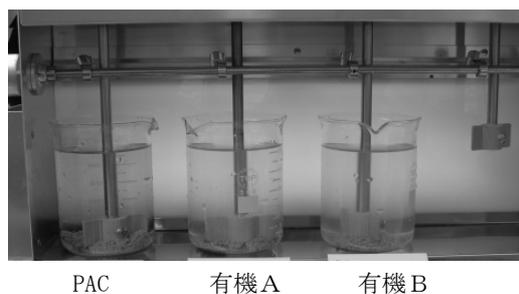


写真1 ジャーテストの一例

3.1.2 濁水処理フロー

図 13 に従来の濁水処理システムおよび本システムの処理フローを比較して示す。本システムでは、原水の pH に応じて薬剤配合を切り替えている。

表 2 配合切替の閾値

	有機A	有機B
pH ≤ 11.3	100	0
11.3 < pH ≤ 11.5	50	50
11.5 < pH	0	100

3.2 実証結果

3.2.1 ジャーテスト

実機による実証に先だって、実際に現場で排出されている濁水を対象としてジャーテスト（写真 1）を行い、使用薬剤の選定と配合切替え閾値の設定を行った。有機系凝集剤として 3 種類について試験を行った結果、有機Aは主に坑内排水に、有機Bは主に生コンの洗浄水に対して凝集効果が高いことが確認された。さらに、その配合切り替えは原水の pH で行い、その閾値は表 2 に示すとおりとした。

3.2.2 実機稼働結果

ジャーテスト等で確認した配合比およびそれを切り替える pH 閾値で、約 1 ヶ月間にわたり、自動運転でトンネル濁水の連続処理を行った。図 14 の原水濁度と処理濁度の経時変化に示すように、原水の濁度は大きく変動したが、放流基準 70ppm に対し、処理濁度は安定して 10ppm 以下を満たした。写真 2 に本システムによる濁水処理水の状況を示す。

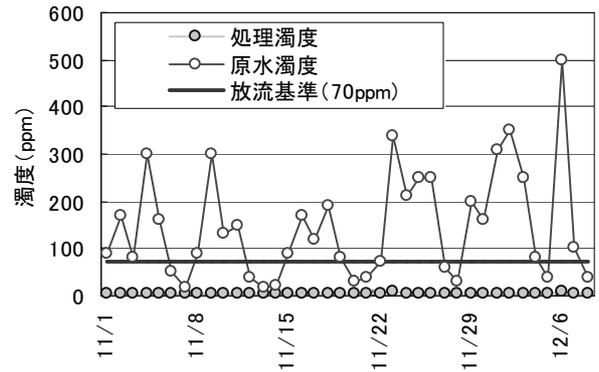


図 14 原水及び処理水の濁度

図 15 に有機凝集剤の使用実績を示す。薬剤使用量は日単位での計量結果である。概ね処理流量に合わせて薬剤の使用量が変化しているが、有機A・Bの使用比率は細かく変化しているのがわかる。使用比率は pH にり変動しているが、pH を日単位で表現できないため、同図には示していない。



写真 2 本システムによる濁水処理水の状況

3.2.3 脱水ケーキの含水率

実機で濁水処理した際に発生した脱水ケーキ表面の状態にあまり差違は認められないが、それらの切断面の水分量には明らかな差があった。脱水ケーキの含水率を測定した結果、図 16 に示すように、無機凝集剤が平均 41.4%であったのに対して本システムでは平均 36.6%であり、含水率にして約 5%、体積にして約 10%低減できることがわかった。含水率の低減により圧縮強度やコーン指数等の向上が期待でき、盛土材等へ再利用の可能性が考えられる。

3.2.4 処理スラリーの脱水性

実機で処理した濁水スラリーを用いて、フィルタープレスにおける脱水性の目安となる濾紙への浸透性を CST 試験により測定した。本試験は、図 17 に示すように、スラリーを濾紙に浸し、スラリー中の水分が一定距離を浸透するのに要する時間を測定するものである。測定された時間が短いほど、脱水性がよいと判断できる。図 18 は、CST 試験の結果である。攪拌時点における希釈状態での値と、沈降後の濃縮状態の値を測定した。濃度にかかわらず、無機凝集剤よりも有機凝集剤の方が浸透時間が約 3 割短く、浸透性

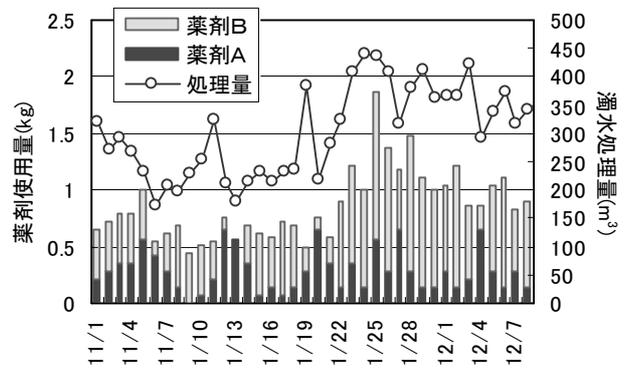


図 15 有機系凝集剤の使用実績

が高い。これより、本システムを使用することで脱水時間を大幅に短縮できることが確認できた。

3.2.5 まとめ

本トンネルで高効率のトンネル用濁水処理システムを試用した結果をまとめると、以下のとおりとなる。

- ①原水の性状にかかわらず、安定して濁度 10ppm 以下の処理を行うことができる。
- ②脱水ケーキを約 10%減容化できる。その結果、脱水ケーキの廃棄量を低減でき、環境負荷を低減できる。
- ③脱水ケーキの含水率を約 5%低減できる。その結果、脱水ケーキの強度が向上し、盛土材等への再利用を行うことで、環境負荷を低減できる。
- ④脱水時間を約 3 割短縮でき、効率的に濁水処理を行うことができる。

以上のような特長より、本システムは合理的であること、環境負荷低減に寄与できることおよびコスト削減が期待できる(②④)ことが確認できた。

4. おわりに

新鹿トンネルにおいて、①切羽発破を利用した切羽前方探査と②高効率なトンネル工用濁水処理システムを実証した。

①は、トンネル線形が曲線であるのに対して、事前の弾性波探査測線が直線であったため、必ずしも本手法に最適な現場条件ではなかったが、切羽発破を起振源として地表で測定した探査データを積み重ねていくことで、切羽前方地山の弾性波速度の推定に関する信頼性が向上する事が確認された。なお、本実証にあたり、財団法人災害科学研究所トンネル調査研究会(松井保委員長)と応用地質株式会社に技術的な指導をして頂いたことを、深く感謝する。

②は、本システムを使用することで、より効率的に濁水処理を行え、さらに脱水ケーキを再利用できる可能性を確認できた。なお、本技術は、栗田工業株式会社と株式会社フジテックスとの共同開発成果である。

今後、トンネル現場でこれらの技術を適用し、現場の生産性を高めると共に、なお一層の高度化を図る予定である。

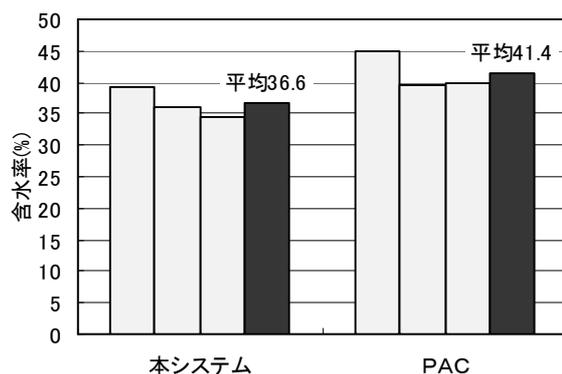


図 16 含水率測定結果

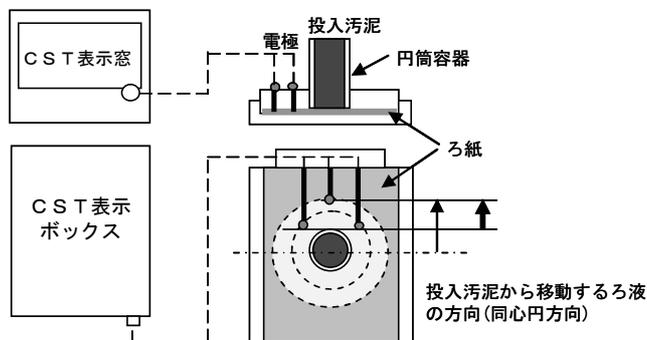


図 17 CST 試験装置概要

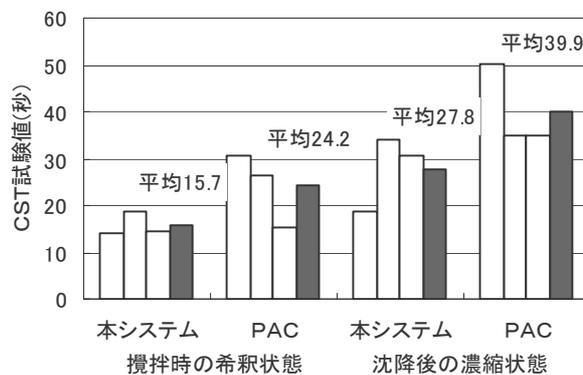


図 18 CST 試験結果