

染料を用いた摩耗検知装置の開発

(株)大林組 正会員 ○大前 慶恵 正会員 今岡 洋輔
正会員 上田 潤 中本 淳
東京大学 福井 類

1. はじめに

シールド工事において、許容摩耗量を超過したカッタービットで掘進を継続することは、カッター損傷などのトラブルを引き起こす原因となる。そのため、カッタービットの摩耗状況を把握し、掘進管理することが重要である。従来用いられている摩耗検知装置として、導通式摩耗検知ビットや油圧式摩耗検知ビットがあるが、これらは、摩耗量をカッタービットからシールド機内に伝達するためのケーブルや配管が必要なため、設置スペースに制約があり、とくに小口径シールドでは多数設置することが難しいのが現状であった。そこで、ケーブルや配管が不要な、色や匂いを用いた摩耗検知装置を開発した。本稿では、色を用いた摩耗検知装置の概要を説明する。また、染料の適用性を確認した基礎実験・現場実験、および実機に搭載した実証実験を実施したのでその結果について報告する。

2. 色を用いた摩耗検知装置の概要

本摩耗検知装置は、所定の摩耗量に達した際に、あらかじめ搭載しておいた染料がカッタービットから噴出される。噴出した染料は掘削土砂とともに排出されるため、掘削土砂の着色を確認することで摩耗量を把握できる。

(1) 染料の選定

染料は、噴出後には掘削土砂とともに排土・回収されるが、地山に漏れ出た場合や残土処理後を考慮し、自然に害のない物性である必要がある。環境への影響等を考慮し、摩耗検知装置に使用する染料として、地下水の流動調査等で使用される蛍光トレーサー染料を選定した。色は、黄緑色（主成分：ウラニン）と赤色（主成分：ローダミン WT）があり、水への着色性が非常に強く、特別な機器がなくても視覚による確認が容易である。また、染料が拡散し、視覚では確認できないような薄い濃度になっても、紫外線ライトの照射により発光するため、染料の有無を確認できる（写真-1）。この蛍光トレーサー染料は、環境への負荷が小さく生分解性も有する。また、現場で使用するにあたり、水質分析により、排水基準および土壌環境基準を満たしていることを確認している。

(2) 染料搭載方法

把握したい摩耗深さ（摩耗検知量）に染料搭載部を連通させ、染料を搭載する。掘削時の切羽圧に対抗して染料を放出させる必要があるため、染料は加圧した状態で搭載する。染料搭載部および加圧部は、シールド径や土質に応じた搭載量により、少量の場合はビット内に、多量の場合はスポーク内

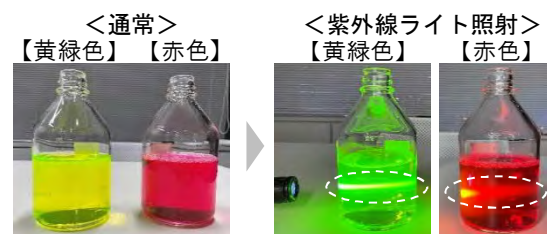


写真-1 蛍光トレーサー染料（水に添加）

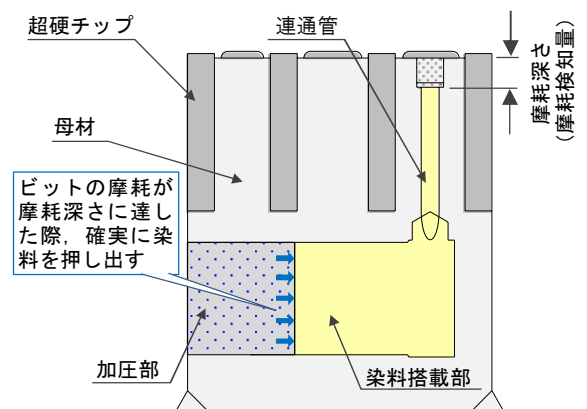


図-1 ビット内搭載例

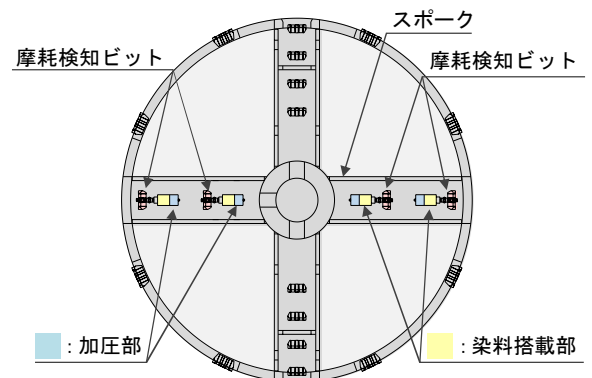


図-2 スポーク内搭載例

キーワード シールド、カッタービット、摩耗検知、染料、紫外線ライト

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株)大林組 TEL03-5769-1318

に搭載する（**図-1**、**図-2**）。ビット内・スポーク内のどちらに搭載した場合でも、染料搭載部・加圧部をビット付近に集約して設置できるため、ケーブルや配管が不要となり、従来の摩耗検知装置よりも多くの個数を装備できる。

(3) 検知方法

ビットの摩耗により放出された染料は掘削土砂とともにシールド坑内へ排出される。染料の排出は、ベルトコンベヤーやずり鋼車、土砂ピットなどにおいて、職員や作業員の視覚確認による検知を基本とする。また、掘削土砂の画像分析を行うことで機械的にも検知可能である。シールド坑内の排出土砂運搬経路上にて、照度環境が一定である場所に、紫外線ライトおよびWEBカメラを設置する。紫外線ライトを照射した掘削土砂を撮影し、RGB値を利用して画像分析する。紫外線ライトによる発光は周囲が暗い方がより強く発光すること、またRGB値を利用して分析する場合、背景色に変化すると正常に分析できないことから、検知機器は照度環境が一定である暗所や、暗室を作成しその中に設置する。

3. 基礎実験（染料の土砂への適用性確認）

(1) 目的

選定した蛍光トレーサー染料は、水流動調査に用いられている染料であり、水に混入した場合は検知が容易であることが分かっているが、シールドの掘削土砂に混入した場合でも検知可能か検証した。

(2) 実験概要

はじめに、含水比12%の土に、気泡剤（OL-10）を濃度1.0%、発泡倍率10倍、添加率20%で添加して気泡土（容量：5L）を作成した。次に、作成した気泡土へ蛍光トレーサー染料（粉体）の赤色・黄緑色を投入して攪拌し、目視・紫外線ライトによる確認を行った。なお、染料投入前の気泡土に紫外線ライトを照射したものを**写真-2**に示す。紫外線ライトを照射すると、青紫色のライトの色がそのまま映って見えた。

(3) 結果

水5Lに蛍光トレーサー染料（粉体）を溶かす場合、赤色約10mg・黄緑色約5mgで十分に目視可能とされているため、今回の実験では染料（粉体）を各色10mgずつ投入・攪拌した状態を調べた。染料を投入する前に比べて、赤色・黄緑色ともに着色し、染料の混入を視覚で十分検知できることが分かった（**表-1**）。なお着色は、土自体を着色しているわけではなく、気泡材や間隙水などの水に着色しているようであった。また、紫外線ライトを照射すると、投入前の青紫色に比べて、赤色染料を投入した場合は蛍光ピンク色、黄緑色染料を投入した場合は蛍光黄緑色に反応することが確認できた（**表-1**）。次に、暗室で染料混入土砂に対して紫外線ライトを照射・撮影した結果を**写真-3**に示す。土砂や背景が黒く映るのに対し、蛍光トレーサー染料は赤色・黄緑色に発光した。以上により、目視による確認においては、確認場所の明暗に関係なく判別可能であることが分かった。画像分析においては、暗い場所で紫外線ライトを照射させることで染料の有無をより確実に検知可能であると考えられる。

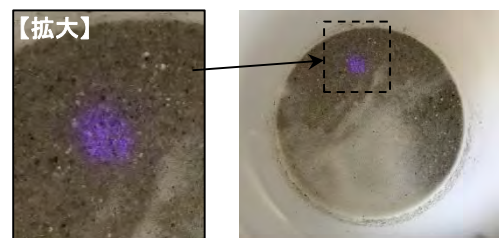


写真-2 気泡土に紫外線ライトを照射

表-1 気泡土への染料混入状況

	混入・攪拌後	紫外線ライト照射
赤 10 mg		
黄 緑 10 mg		

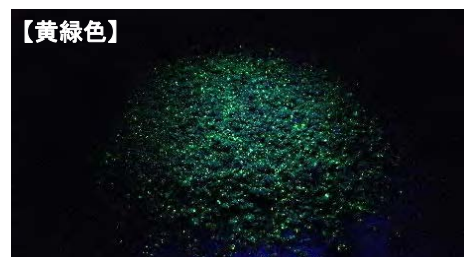
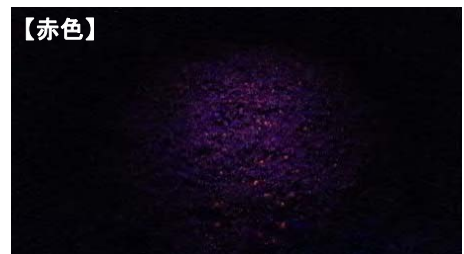


写真-3 紫外線ライト照射（暗室）

以上の基礎実験結果により、色を利用した摩耗検知装置に用いる染料として、蛍光トレーサー染料が有効であることが分かった。

4. 染料検知実験（染料の現場への適用性確認）

(1) 目的

中口径・小口径のシールド現場にて、切羽へ注入した染料が、視覚および画像分析で検知可能かを検証した。また、その時の注入量から、必要な染料搭載量を把握した。

(2) 実験方法

切羽に染料を直接注入し、ベルトコンベヤー、ずり鋼車、土砂ピットに排出される土砂の色を視覚および画像分析により確認する。染料は、蛍光トレーサー染料（液体）の赤色・黄緑色の2色を、既設の加泥ラインに手動ポンプを接続して注入した。なお、注入は掘進停止時のセグメント組立中に行った。注入量は、チャンバー内での染料がどれほど攪拌・分散されるのかの想定が困難なため、検知可否によりその後の注入量を増減させて確認することとした。実験を行った2現場の概要を表-2に示す。

表-2 対象シールド工事の概要

	土質（実験位置）	工法	シールド外径	チャンバー内体積	排土方法
現場①（中口径）	砂礫・シルト ・礫混じり砂	泥土圧	φ4.53m	約11.67m ³	ベルトコンベヤー+ずり鋼車
現場②（小口径）	粘性土	泥土圧	φ2.33m	約0.58m ³	圧送ホース+ずり鋼車

(3) 染料の確認方法

視覚による確認は、発進立坑にて、ずり鋼車を目視確認することとした。機械による確認は、2現場の排土方法が異なるため、現場①ではスクリーコンベヤー～ずり鋼車間に設置されているベルコン上に暗室を設け、その中に紫外線ライト・WEBカメラを設置した。ベルトコンベヤー稼動時に動画を撮影し、静止画像として1秒ごとに保存した（図-3、写真-4）。現場②では、坑口から100m地点に紫外線ライト・WEBカメラを設置した（図-3、写真-5）。ずり鋼車通過時に、坑内照明を自動で消灯して動画の撮影および1秒ごとの静止画像保存を行うシステムとした。画像分析は、撮影画像をRGB分解した後、緑色および赤色について二値化し、二値化画像の輝度値平均（二値化処理後の全画素数における白画素の割合）を取ることにした。これにより、少しでも緑もしくは赤色の混入部分をより強調して捉えることができる。二値化するにあたって、RGB値の明度255段階の中で、中央の127を閾値として設定した。輝度値平均に大きな変動が現れた場合、染料排出の可能性があると判断し、画像に染料が含まれているかを人間が目視判断することとする。

また、現場①ではベルトコンベヤー上を高速で土砂が通過する（約1.6 m/s）ため、人間による目視確認・画像分析に対し、カメラのシャッター速度の違いによる検知への影響を調べるため、カメラを2台設置し、2種類のシャッター速度（1/30 s, 1/100 s）での撮影を行った。

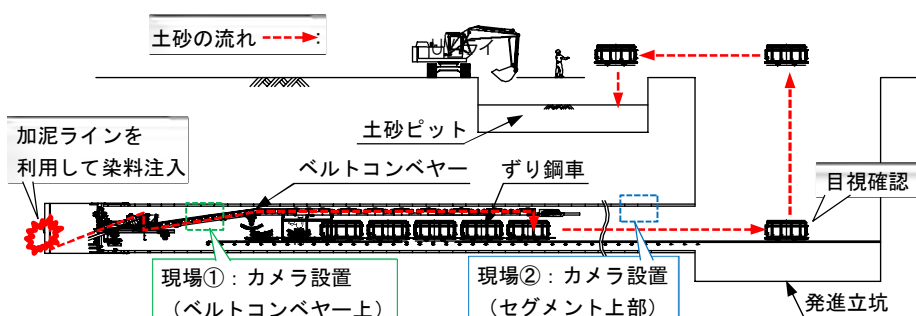


図-3 染料検知位置概要（カメラ設置・目視確認）

【ベルトコンベヤー上暗室内】



写真-4 機器設置状況（現場①）

【セグメント上部】



写真-5 機器設置状況（現場②）

(4) 実験結果

a) 現場①

ずり鋼車での土砂の目視確認は赤色 20 cc・黄緑色 40 ccでも十分に確認できた(写真-6)。砂礫分が多かったため、ずり鋼車運搬時の振動により、間隙水とともに染料が表面に浮いてきたため、少量でも確認できたと考えられる。また、カメラの動画モニター上では、同様に赤色 20 cc, 黄緑色 40 ccにて、瞬間的に目視確認が可能であった。ずり鋼車での土砂の目視確認, カメラの動画モニターでの目視確認, および静止画像の画像分析の全てで確実に染料を判別できた注入量は、赤色・黄緑色ともに 200 ccであった(図-4・5)。

シャッター速度による画像の違いを表-3に示す。シャッター速度が速い方が画像は鮮明になるが、採光量が減るため全体的に暗くなり、特に赤色については目視での確認も困難であった。画像分析では、画像の鮮明さよりも、RGB 値の違いが大きく輝度の範囲が広い方が、一般的に二値化しやすく、染料の混入を検知しやすい。よって、静止画像の目視確認においても画像分析においても、排出土砂速度に関係なく、シャッター速度はある程度遅い方が良いことが分かった。

b) 現場②

ずり鋼車での土砂の目視確認では、赤色 100 ccにて注意深く目視すれば僅かに確認することができたが、粘性土のため、染料が粘土に包含された状態となり分離して表面に浮いてくることがなかったことから、現場①に比べて目視確認が難しい結果になったと思われる。黄緑色 300 ccでは、ずり鋼車での土砂の目視確認, カメラの動画モニターでの目視確認, および静止画像の画像分析の全てで確実に染料を判別できた(図-6)。現場②は小口径のため、現場①よりも少量で判別可能と想定していたが、今回の粘性土のように、間隙水が分離しにくい土質では染料搭載量を多くする必要があることが分かった。

5. 実証実験

(1) 目的

切羽圧作用下にて、本装置(スポーク搭載型)の染料搭載部・加圧部の構造により、染料を切羽へ確実に噴出できることを確認する。

(2) 実験方法および結果

現場②のシールド機製作時に、摩耗検知装置を、黄緑色：摩耗量 10 mm, 赤色染料：摩耗量 35 mmにてスポ

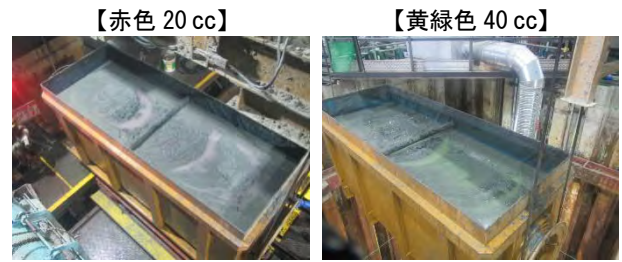


写真-6 目視による染料確認 (現場①)

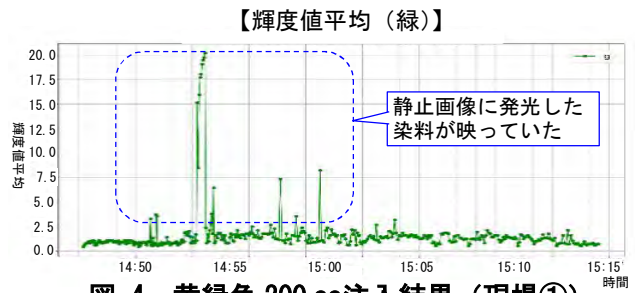


図-4 黄緑色 200 cc 注入結果 (現場①)

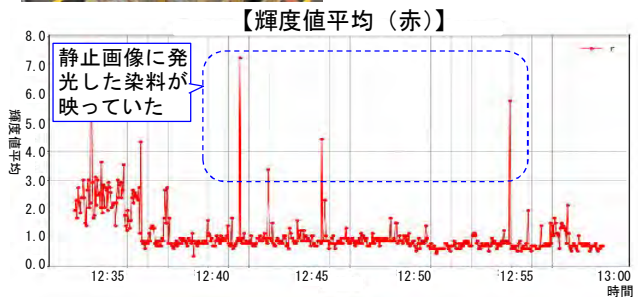


図-5 赤色 200 cc 注入 (現場①)

表-3 シャッター速度と画像

	1/30sec	1/100sec
赤色		
黄緑色		

ーク内に装備（搭載量：300 cc）した。掘進延長は約 3.8 km（2.5 km + 1.3 km）であり，計画では約 0.9 km 掘進時に黄緑色，約 3.0 km 掘進時に赤色が排出される予定である。現在 2.5 km を掘り終わり，1 つめの到達立坑に到達しているが，1.02 km 掘進時にずり鋼車および土砂ピットにて，黄緑色に着色した土砂が排出されていることを職員の視覚により検知することができた（写真-7）。到達後のビットには，ビットと染料搭載部を連通させていた穴も確認できた。これにより，切羽圧下でも所定の摩耗量に達した際に確実に染料を噴出し，排出土砂から容易に目視確認でき，実工事に適用可能であることを実証できた。

6. おわりに

蛍光トレーサー染料を利用した摩耗検知装置は，目視で確認できるため，誰でも判別可能であり，また画像分析でも判別できることが分かった。中口径・小口径のシールド現場では，スポーク内に搭載可能な量で十分に判別可能であり，実工事への適用性も確認できた。しかし，土質により検知のしやすさが変わるため，染料搭載量は土質条件を考慮して計画する必要がある，土質条件と必要搭載量の関係について，今後データを蓄積していく。

また，大口径シールドに適用する場合には，チャンバー内土砂の容量が大きく，染料がより拡散される可能性があるため，大口径シールドにおける必要搭載量の確認実験を今後行う予定である。

今後は，実工事への適用により知見を増やしていくとともに，本装置を広く展開し，ビットの摩耗に伴う掘進トラブルの防止に貢献していきたい。

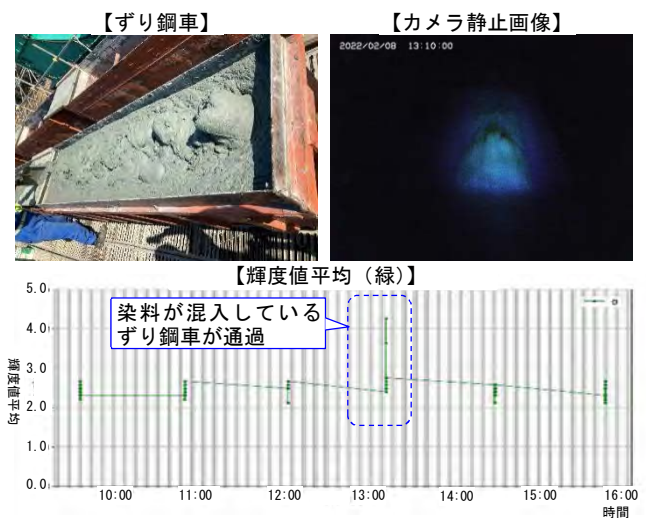


図-6 黄緑色 300 cc 注入（現場②）



写真-7 実機搭載の摩耗検知装置からの染料排出状況