

連続ベルコン稼動状況監視システムの開発

片山 三郎^{*1}・宮崎 裕道^{*1}・松本 三千緒^{*1}・近藤 高弘^{*1}

Keywords : continuous belt conveyer, operations monitoring, meander, hopper blockage, belt damage

連続ベルコン、稼働状況監視、蛇行、ホッパー閉塞、ベルト損傷

1. はじめに

連続ベルコンは長距離のトンネル掘削ズリ搬送を効率的に行う上で極めて有効な手段である。しかしながらベルトの運転中の監視・調整方法などは技術的に未成熟であるため連続ベルコンを導入した現場においてベルトの脱索、損傷、破断などのトラブルが多く稼働率を下げているのが現状である。過去の事例調査の結果では、ベルトの損傷、脱索などのトラブルを50%低減すれば月進8%程度の向上が期待できる。そこで、連続ベルコンの稼働状況を全線に渡ってリアルタイムに監視して蛇行や脱索、ベルトの破断などのトラブルを未然に防ぎ稼働率の向上を目的とした『連続ベルコン稼働状況監視システム』の開発を行った。

また搬送の対象となる掘削ズリの性状（土砂ズリまたは岩ズリ）によって発生するトラブルの種類に相違点があるのが一般的である。そのため今回開発を行った監視システムは土砂ズリ用と岩ズリ用の2種類がある。本論はその中で土砂ズリ用監視システムについての全体概要の報告である。

2. 監視システム全体概要

本監視システムは表-1の5つの監視システムによって構成されている。全体概要図は図-1の通りである。これら5つの監視システムでベルトの蛇行、各中継点でのホッパーの詰り、各ブースタードライブ間でのブーリー回転速度の同期状況、ベルトの損傷状況を常時監視が可能となる。監視状況は各監視システムを中心監視室に設置する管理PCと接続することで集中監視を可能にした。また坑内全域を通信する手段として

*1 技術センター 土木技術開発部 土木技術開発プロジェクト室

は接続の容易なメタルケーブルを使用する。さらに長距離通信で減衰した信号を再び成形、復調可能な中継ユニットを設置することで理論的には台数、距離制限の無い通信を可能にした。

表-1 監視システム一覧

Table 1 Monitoring system list

項目	目的	概要
ベルト蛇行監視システム	ベルト脱索やベルト両端の耳切れの防止	リミットスイッチとベルトの接触状況を判断し、要注意箇所や危険箇所などを監視する。
ズリ詰り監視システム	ベルト乗継部でのホッパー詰りの監視	リミットスイッチによりホッパー前後のズリ運搬状況の検出を行い、その情報からホッパー詰りの判定をする。
ブーリー回転同期監視システム	メインドライブや各ブースターの回転ずれによる異常張力の監視	從輪に取り付けた回転検出器によりブーリーの同期運転監視を行う。
ベルト損傷画像解析システム	ベルトの亀裂や耳切れ等の傷の早期発見	画像解析により補修の必要なベルトの亀裂や耳切れを検出す。
ベルト接合部監視システム	脆弱部であるベルト接合部の劣化状況を監視	ベルト接合部に印を付けこれをセンサーで検出し同時にこの検出信号で監視カメラのシャッターを動作させ接合部の写真を撮影する。

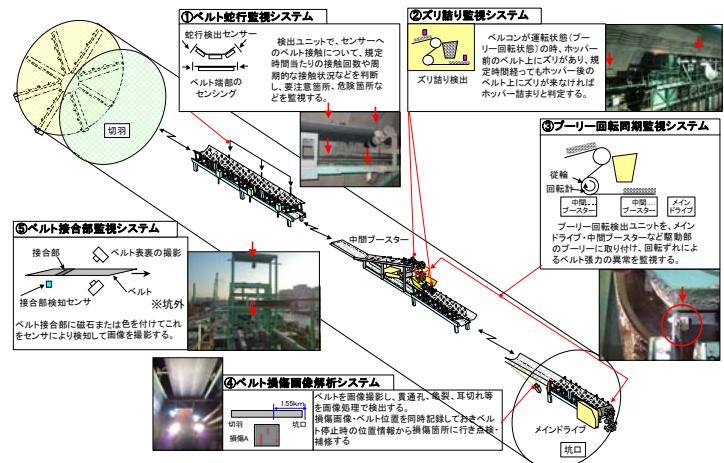


図-1 連続ベルコン稼動状況監視システム全体概要

Fig.1 Outline of the entire continuous belt conveyer operation situation monitoring system

3. ベルト蛇行監視システム

3.1 概要

本システムは連続ベルコンの蛇行状況を監視するシステムである。連続ベルコンは架設区間が曲線であったり、搬送ズリの載荷が偏っていたり、支持ローラーの故障等によりベルト張力が不均等になるなどの現象によってベルトは蛇行をしてしまう。ベルトの蛇行が発生するとベルトを抑えているローラーやローラーを固定しているフレームにベルトが接触してベルト端部の損傷を引き起こしたり、ベルトを支持しているローラーから脱索してしまう。ひとたびベルトの脱索が発生するとその復旧には多大な時間と労力が必要となる。従ってその間の掘削作業は不可能となり工程に大きく影響を与える。そこでベルトの脱索やベルト端部の損傷を防止することを目的とした連続ベルコンの蛇行状況を監視するシステムの開発をおこなった。このシステムの特徴としては

- ① 連続ベルコンを全線に渡って監視が可能
 - ② 監視状況を集中監視することが可能
 - ③ 長期的な蛇行か一時的な蛇行か自動的に判断可能
- などが挙げられる。

3.2 蛇行検出器

蛇行検出には接触型検出器を使用しアクチュエータ部にはコイルスプリング式のものを採用した。(図-2 参照) この形式の検出器は検出範囲が広く取れ振れの大きなワークの検出に適している。この検出器を連続ベルコンの各断面に4ヶ配置する。(図-2 参照) この4つの検出器がベルトのキャリア側とリターン側の両端部のベルトのズレをセンシングする。またこの検出器は専用の解析ユニットで接触信号を解析、制御することで一時的な蛇行か長期的な蛇行かを自動的に判定することが可能となっている。

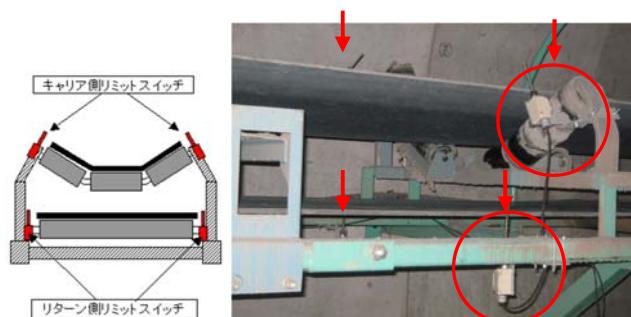


図-2 蛇行監視機器
Fig.2 Meander monitoring equipment

3.3 実験・検証

蛇行監視機器を図-3の位置に設置して蛇行検出器の接触状況を数日間に渡って監視した。蛇行検出器の設置は曲線部（曲率半径200m）に2箇所と曲線の出入口にそれぞれ1箇所の計4箇所に設置した。その結果を図-4に示す。実験の結果、頻繁に蛇行を検出する箇所とそうでない箇所が明確に確認できた。図-4では特に曲線部において蛇行しているのがわかる。

また併せて蛇行検出器の耐久試験も実施し接触距離1130kmで摩耗量5%以下であった。この接触距離は1か月のベルトの運転距離に相当し実用上問題ないことを検証した。

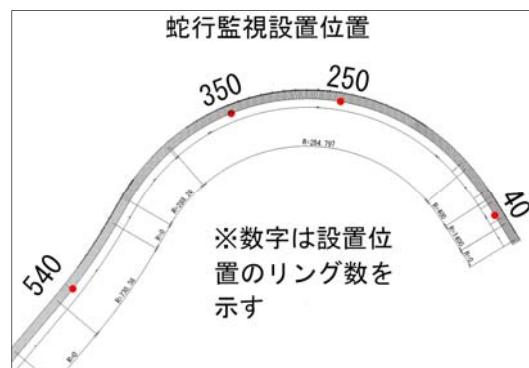


図-3 蛇行監視機器設置平面図
Fig.3 Meander monitoring equipment installation plan

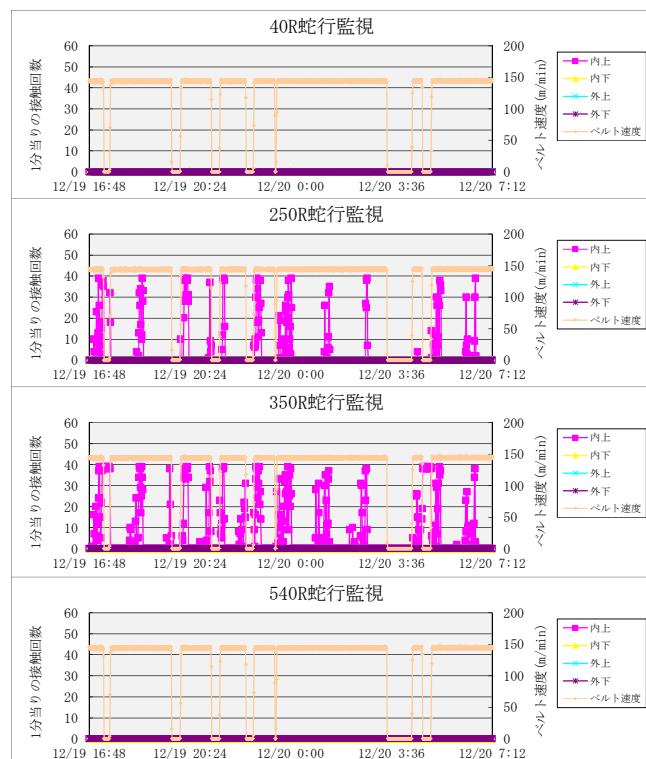


図-4 蛇行監視状況
Fig.4 Meander monitoring

4. ズリ詰り監視システム

4.1 概要

連続ベルコンは長距離のトンネルにおいて、中間ブースターと呼ばれる機械で動力の中継をおこなう。その配置間隔は時間当たりのズリの搬出量やトンネル線形、勾配といった与条件で一概には言えないが経験的にはトンネル延長 2000m程度に一箇所程度配置することが経済的に無駄のない配置と言える。そしてこの中間ブースターにはホッパーが装備されていてこのホッパーを介してベルト上のズリが乗り継いでいく構造となっている。図-5に中間ブースターのイメージを示す。

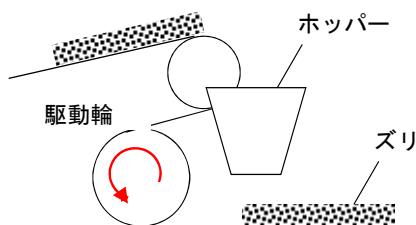


図-5 中間ブースターイメージ
Fig.5 booster image

ホッパー内にズリが堆積したり、大塊のズリの発生によってしばしばこのホッパーが閉塞してしまう。閉塞することによって生じる問題点としては下記のようなトラブルが主に挙げられる。

- ・周辺へのズリの飛散
- ・詰まったズリとベルトの接触によるベルトの損傷
- ・モーターの負荷の急激な増大

そこでこれらのトラブルを未然に防ぐことを目的としたズリによるホッパーの詰りを監視するためのズリ詰り監視システムの開発をおこなった。

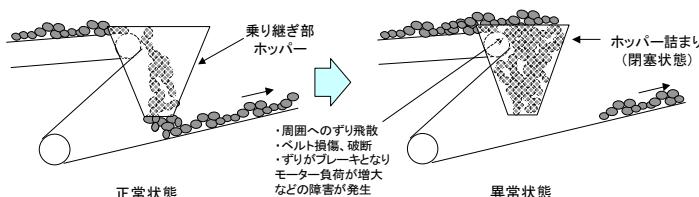


図-6 ズリ詰り概念図
Fig.6 Conceptual diagram

4.2 システムの内容

①検出器

ズリ詰り監視システムはホッパーの前後のズリの搬出状況を把握することでホッパーの詰りを判定するシステムとした。ズリの搬出状況を把握する方法として

蛇行監視と同様接触式の検出器を使用した。ただしズリの性状、搬出量は一定ではなくアクチュエータ部がフレキシブルに対応できる必要がある。そのためこの部分にはφ3mmのワイヤーロープを使用した。これによって搬出ズリの多少や固さに左右されることなく安定した検出を可能にした。

②判定方法

ズリ詰りの判定方法を図-7に示す。検出器1がズリの搬出を検出した後、一定の遅延時間後に検出器2がズリの搬出を検出しなかった場合にズリ詰りの判定をする。

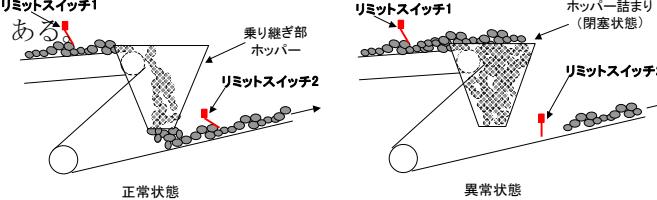


図-7 ズリ詰り監視システム概要

Fig.7 Monitoring system



図-8 ズリ詰り監視システム設置状況

Fig.8 Installation situation

4.3 実験・検証

図-9にズリ詰り監視状況を示す。このグラフはホッパー前後に設置した検出器の検出信号を時系列にプロットしたものである。これを見ると検出器の検出信号は完全に同期しておりズリの搬出状況を確実に把握していることがわかる。もしこのズリ搬出状況が一致しなければズリ詰りという判定をすることが出来る。

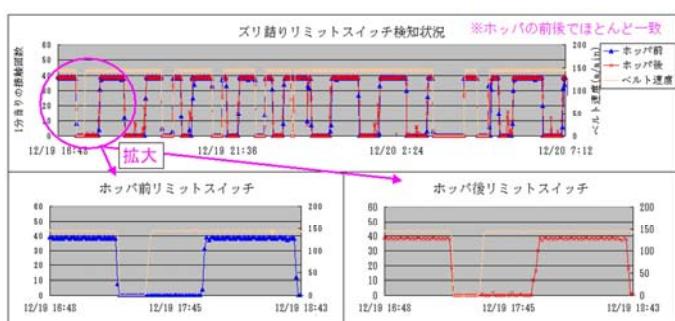


図-9 ズリ詰り監視状況

Fig.9 monitoring

5. プーリー回転同期監視システム

5.1 概要

連続ベルコンは動力源としてメインドライブと複数台の中間ブースターから構成されている。そしてこれらの機械はベルトへの動力伝達方法として電動機と接続されたプーリーとベルトとの摩擦抵抗によっておこなっている。通常、メインドライブおよび中間ブースターは電動機の回転速度を制御することでプーリーの回転速度つまりベルトの速度の同期を図っている。しかし運転手順の誤りや各ドライブに掛かっている負荷が一定でなかった場合に回転ズレが発生してベルトに過大張力が発生してベルトの破断や脱索が引き起こされる。これらのトラブルを防止するため各ドライブのプーリーの回転状況をモニタリングするプーリー回転同期監視システムを開発した。

5.2 システムの内容

プーリー回転同期監視システムは磁石、磁気センサーと演算、解析、制御するための制御ユニットから構成される。プーリーや周囲の機構は金属性の部品で作られており単に磁石を取り付けただけでは金属により磁石の磁場が抑えられ磁気検出が困難になる。そこで磁石には磁束密度が高く電車やエレベーターの駆動用に使用されている磁力の強いネオジム磁石を使用した。また、磁気センサーはセンサテック社の MGD-200 を使用した。これは磁気収束機構を用いているため高感度な磁気検出を行うことが出来る。この監視機器を各ドライブにそれぞれ設置して各々の速度情報を集約し制御することで各ブースタードライブの回転速度を把握し監視することが可能となる。図-10にプーリー回転同期監視システムの概要図を示す。

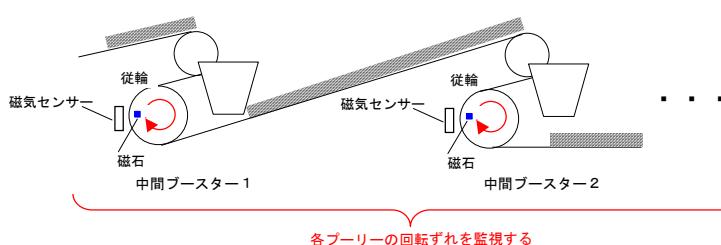


図-10 プーリー回転同期監視システム概要
Fig.10 Pooley rotation synchronous monitoring system

5.3 実験・検証

図-11にプーリー回転同期監視システムの設置状況、図-12に本システムでの監視状況を示す。この

結果からメインドライブ、中間ブースターのそれぞれの回転を検出し同期を確認することが検証できた。



図-11 プーリー回転同期監視システム
Fig.11 Pooley rotation synchronous monitoring system

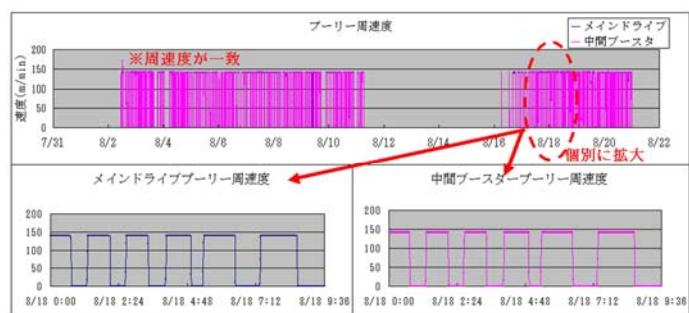


図-12 プーリー回転同期監視状況
Fig.12 monitoring

6. ベルト損傷画像監視システム

6.1 概要

連続ベルコンのベルトは長期使用による劣化、岩や金属片の落下時の衝突、フレームとの接触などさまざまな要因で亀裂や摩耗などの損傷を受ける。そしてこの損傷が進行するとやがてベルトの破断を引き起こすことになる。そこでベルトの損傷を軽微な状況で発見しベルト破断という重大なトラブルを引き起こす前にベルト補修作業をおこなえることを目的としたベルト損傷画像監視システムの開発をおこなった。

6.2 システムの内容

本システムはベルトの損傷を検出するための画像処理カメラ、検出画像を記録として保存するための撮影用のデジタルカメラおよびこれらを制御するための制御ユニットで構成されている。

・動作手順について

- ① 画像処理カメラでベルトの損傷を検出
- ② 損傷を検出した時デジタルカメラで撮影

・画像検出について

① 傷の特徴化

傷部分に影が出来るようにベルト面に対して斜めに照明を設置する。

②撮影

ベルト速度を考慮したシャッター速度にする。

③画像の二値化

撮影画像から閾値を決定し、二値化画像を作る。

④面積計算

二値化後の黒の面積を計算

上記①～④の手順で傷らしいものを抽出する。その後抽出された傷らしいものを面積判定およびパターンマッチング処理を実行して傷として検出する。面積判定は指定した面積以上であれば傷と判定する。またパターンマッチングは傷のサンプル形状との比較を行いまッチング度が指定値以上の場合は傷と判定する。パターンマッチングのパラメータは角度、寸法、形状のあいまい度を設定する。



図-13 画像処理カメラ
Fig.13 Image processing camera

6.3 実験・検証

実験方法として回転ドラムにベルトを巻き付けその巻き付けたベルトに貫通孔と縦裂きを想定した傷を付ける。そして回転ドラムを連続ベルコンのベルト速度と同等以上の200m/分で回転させる。この時、画像処理カメラにより傷の検出を行った。図-14に傷として判定した画像を示す。結果として面積判定ではベルト速度200/分に追従して模擬した傷を検出することが出来た。またパラメータの設定によって監視したい大きさに応じた傷の検出が確認できた。

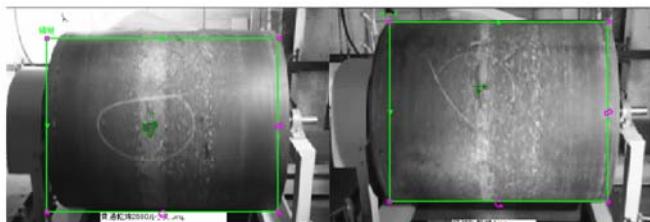


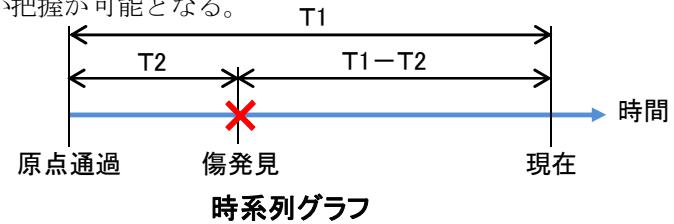
図-14 面積判定
Fig.14 Area judgment

6.4 損傷位置の特定

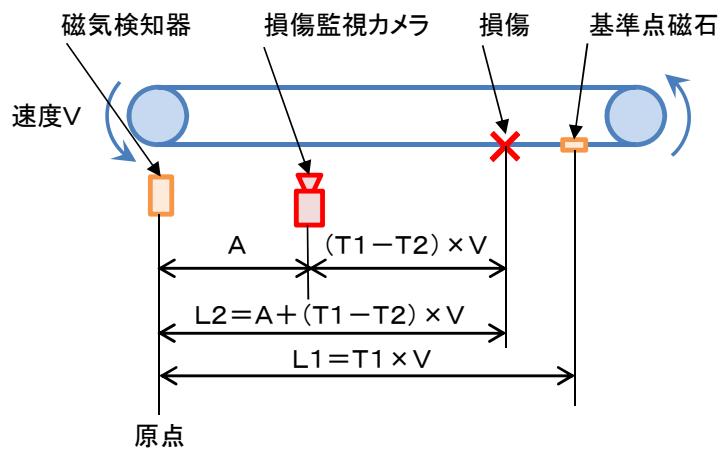
連続ベルコンの延長は長いため損傷部を把握しておかなければ損傷箇所を探すのに大きな労力が必要となる。そこでベルトに基準点を設けこの基準点と共に損傷部を追跡することで損傷箇所の特定を可能にした。

基準点検出の方法はベルト内部に磁石を埋め込みこの磁石を磁気検出器で検出することでおこなう。

位置特定の原理を図-15に示す。原点とする箇所をベルト内の磁石が通過した瞬間を0として時間カウントを開始する。そして現在の時間とベルトの損傷を発見した時間を記録することで、ブーリ回転速度情報および磁気検出器と損傷監視カメラとの位置関係の情報から、現在の損傷位置が何処であるかが特定できる。また原点を坑口としキャリア側、リターン側それぞれで磁気検出をおこない基準点の通過を把握することでトンネル坑内を往復する時間がわかる。トンネル延長は『ベルト速度×往復時間／2』となることから現在ベルト損傷がリターン側、キャリア側のどちらにあるか把握が可能となる。



時系列グラフ



各点の位置関係

- ・原点通過から現在までの時間 : T1
- ・原点通過から傷発見までの時間 : T2
- ・原点から監視カメラの距離 : A
- ・原点から基準点磁石の現在位置 : L1
- ・原点から損傷箇所の現在位置 : L2

図-15 位置検出イメージ
Fig.15 Image of Position tracking

7. ベルト接合部監視システム

7.1 概要

連続ベルコンのベルトはベルト同士を溶着することで一本のベルトとして掘削延長に追従させている。こうした構造のためベルトは一定延長で継ぎ足され

ばならないがこのベルトの接合部が弱点となりベルトが破断するケースがある。従来方法ではこの接合部を目視するしかなく高速に移動するベルトの接合部の劣化状況を把握するのは困難であった。そこで接合部を常時監視できるシステムの開発をおこなった。



図-16 ベルト接合部
Fig.16 Belt joint

7.2 システムの内容

本システムは中央制御室のPCモニタに常時ベルトの接合部（裏表の両面）の画像を表示するシステムである。ここで言う常時とは接合部を撮影するデジタルカメラを設置している箇所を接合部が通過してから次の接合部が通過するまでの間のことである。

システムの内容は溶着時にベルト接合部を検出するための磁石を埋込んでおく。この磁石を磁気検知器で検出することでベルトの接合部を特定する。検知後に検知器とデジタルカメラの設置してある間の分だけの遅延時間後にデジタルカメラがシャッターを切るように制御する。撮影した画像データは中央制御室にLAN経由で送られモニタに表示する。

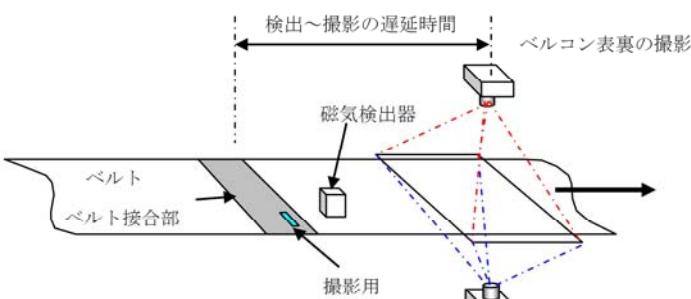


図-17 ベルト接合部監視システムイメージ
Fig.17 System Image

7.3 実験・検証

図-19は中央制御室に表示されたモニタ表示である。実験から接合部の劣化状況を確認するのに必要な解像度の画像が撮影できることを検証した。またベルト速度に追従するためデジタルカメラのシャッター速度は1/1000秒とした。さらにベルト接合部の溶着時の温度は約140°Cまで達するため埋込む磁石は高温下に

おいても強力な磁力を維持できる耐熱用磁石であるサマリウムコバルト磁石を選定した。この磁石は350°Cまで磁力を維持することができる。



図-18 ベルト接合部監視システム設置状況
Fig.18 Installation situation

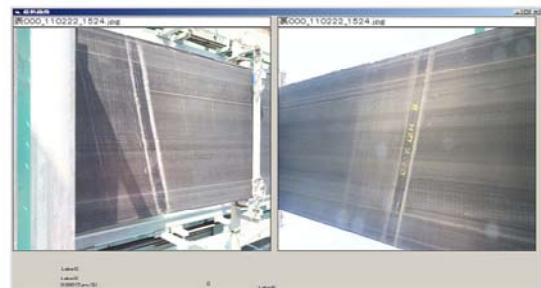


図-19 監視状況
Fig.19 monitoring

8. 中央監視

これまで見てきた5つのサブシステムは中央監視室に設置した1つのPCで遠隔監視できるようにした。その結果、連続ベルコンの稼働状況がリアルタイムに監視することができになりトラブルの早期発見、早期対処が可能になった。図-20、21に監視システムの中央監視状況を示す。



図-20 中央監視室
Fig.20 Central monitoring room



図-21 監視モニタ
Fig.20 monitoring display

9. まとめ

従来、連続ベルコンの稼働状況の監視は目視、ブースタードライブの電流値あるいはベルト張力程度の監

視しか方法がなかった。しかしこれらの監視方法では連続ベルコンの稼働率を大きく低下させる種類のトラブルの監視は難しいものであった。そのため連続ベルコンを導入した現場においてはトラブルが頻発しており連続ベルコンの導入効果を十分に得られていないのが現状であった。しかし本監視システムの開発によって的確なトラブルの監視が容易になりトラブルに対する対処が迅速に行えるようになる。その結果、連続ベルコンの稼働率が大きく向上して工期短縮に繋がることが期待できる。今後はこの監視システムが多くの現場に導入され連続ベルコンの稼働率を上げズリ搬出効率を向上させると共にトンネル工事の長距離化、高速化に大きく寄与していくことを期待する。