

ワイヤレスひずみ計測システム「ハカルーター®」を用いた 鋼製支保工応力測定と早期判定による支保適合性の評価

藤岡 大輔 中岡 健一

Steel Support Strain Measurement and Evaluation of Support Suitability by Early Determination Using Wireless Strain Measurement System “Haka-Router”

Daisuke Fujioka Kenichi Nakaoka

Abstract

In this study, a wireless strain measurement system (Haka-Router) was used to monitor the strain of steel support in real-time in a mountain tunnel. In addition, a stress prediction curve was created from early measurements after erection, using two methods: the empirical measurement method and the hyperbolic method. The stress after convergence was predicted using a stress prediction curve. As a result, equipment installation was completed before erection, and there was no need to approach the face. The stress after convergence was expected to be within the control value when excavating at 10 m, and the suitability of the support was confirmed at an early stage. No significant differences were observed between the predicted and measured values.

概要

鋼製支保工等で構成されるトンネルの支保構造が地山の土圧に耐えうるか否かを確認するため、施工中の山岳トンネル工事において、ワイヤレスひずみ計測システム「ハカルーター®」によりリアルタイムに支保工の応力監視を行った。次に、応力予測曲線を作成し、計測中のひずみから収束後の応力を予測した。計測機器は、事前に鋼製支保工に設置することができるため、切羽付近に近づく作業は発生しなかった。過去の現場計測結果から応力予測曲線を作成した場合、計測機を設置してから約10m掘削した段階で、収束後の応力を予測し、支保適合性を早い段階で判定できた。この方法により、予測値と実測値を比較した結果、大きな差異は認められなかった。さらに、双曲線法によって応力予測曲線を作成した場合、応力の勾配が変化するまでの実測値が得られれば、高い精度で収束後の応力を予測できる傾向があることから、引き続き本技術を改良していく予定である。

1. はじめに

ロックボルトや吹付けコンクリート、鋼製支保工等で構成される山岳トンネルの支保構造は、地表面からのボーリング調査や弾性波探査など、限られた事前調査結果に基づいて設計されている。そのため、当初予測と異なる地山が出現した場合、日常的に実施される切羽観察や内空変位計測結果を基に、発注者と協議の上、支保構造が変更される。断層破碎帯や膨張性地山を有するトンネル^(例えば1)や土被りの大きいトンネル^(例えば2)などでは、日常計測に加えて、鋼製支保工応力測定などを行い、支保構造が地山に適合しているか否かを確認している。

従来³⁾の鋼製支保工応力測定は次のような課題があった。1)ケーブルの配線時に掘削作業を一時的に止める必要がある。2)配線作業時に危険な切羽作業が発生する。3) 応力データは、切羽から離れたデータロガーに集約されるため、過大な応力が発生しても切羽作業員への警告が遅れる。そこで筆者らは、ひずみから換算した応力を無線で送信し、リアルタイムで応力を監視しながら、応

力が増加した場合に、切羽作業員に危険を知らせることが可能なワイヤレスひずみ計測システム「ハカルーター®」

(以下、ハカルーターと記す)を開発してきた⁴⁾。また、鋼製支保工の崩壊や大きな変状が予想される地山では、早い段階で将来発生する応力を予測し、事前に対策工を施工することが求められる。そこで、ハカルーターを用いて、計測中の応力から収束後の応力を予測し、支保適合性を早期に判定する方法を検討した⁵⁾。

本論文では、ハカルーターの概要と、鋼製支保工の適合性の早期判定結果、ハカルーターを用いて鋼製支保工の応力をリアルタイムに監視し、計測中の応力から収束後の応力を予測した事例、について述べる。

2. ハカルーターの概要

2.1 機器構成と仕様

Fig. 1にハカルーターの機器構成、Photo 1に機器一式を示す。また、Table 1にハカルーターの仕様を示す。以下にハカルーターの特長を列挙する。

- ハカルーターの送信機は、資材ヤードで鋼製支保工に事前に取り付けておく。ワイヤレスであるため、切羽における配線作業が不要である。
- 送信機1個につきひずみゲージが2枚接続されており、それらを鋼製支保工のウェブの地山側と内空側に貼り付ける。
- 偏土圧等によりせん断変形が予想されるトンネルにおいて、せん断応力も取得する場合は、送信機を1台追加し、ウェブ中心に貼り付けたロゼットゲージに接続する。
- 受信機と警告灯、計測用タブレットPCは、まとめて坑内に設置する。送信機と受信機は50m程度まで離すことができる⁴⁾。休工中の停電などでシャットダウンした場合でも確実に計測を再開するため、計測用タブレットPCは電源供給が再開すれば自動で再起動し、計測用ソフトウェアも自動で起動して応力測定が開始される。
- 応力の閾値を設定することで、応力が閾値を超えた場合に、警告灯が音と光で警告を発し、切羽作業員に危険を知らせることができる。
- 坑内に無線LANが構築されていれば、PC遠隔操作アプリケーションを導入しておくことで、事務所からでも計測状況を監視することができる。
- 送信機の無線周波数は、他電波からの干渉に強い920MHz帯を設定した。重機の往来などにより電波が遮断され欠測するリスクを回避するため、同じ計測データを繰り返し送信し、受信率を向上させている。また、全期間の計測データは送信機のメモリに保存され、任意のタイミングで受信できる。送信機の電池は、坑内変位が収束する1.5か月程度持続する。
- 送信機は電池を充電すれば繰り返し再利用することができる。

2.2 送信機の防護

坑内作業に伴う振動や、発破による爆風や振動、湧水に耐えるため、送信機はできるだけ小さくし、送信機の基盤は樹脂で覆い、それらを鉄製の防護材で保護することとした。鉄製材料は電波を遮断する性質があるため、防護材の表面に電波を通過させるスリット（切れ目）を複数本入れた。防護材の内部に送信機を入れ電波の透過性を確認した結果、50m程度の距離で通信できることを確認した。また、送信機を入れた防護材から漏洩電流はなく、電気雷管への影響はないことを確認した。

2.3 精度検証

開発したハカルーターの計測精度を確認するため、データロガー（分解能：1μひずみ）を用いる従来計測方法と比較した。Fig. 2に精度検証のための機器と鋼材の配置を示す。鋼材は山岳トンネル工事で使用頻度が高いH-125×125×6.5×9（以下、H-125と記す）を用いた。H-125の中央にクレーン検査用のテストウェイトをクレーンで

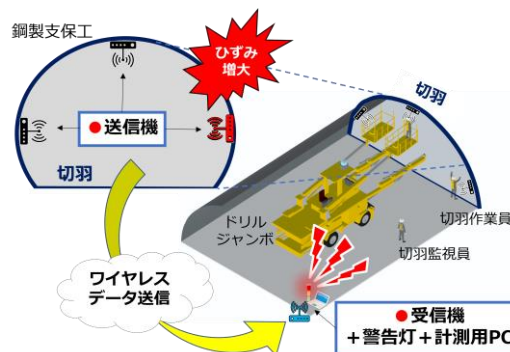


Fig. 1 ハカルーターの機器構成
“Haka-Router” Device Configuration



Photo 1 ハカルーターの機器一式
“Haka-Router” Device Set

Table 1 ハカルーターの仕様
“Haka-Router” Specifications

項目	仕様
無線	周波数：920MHz 電波強度：10mW以下 通信距離：50m以上（防護材の形状と材質に依存）
測定	送信機：最大24個 受信機：1個 チャンネル数：送信機1個につき、ひずみゲージ2個 計測頻度：任意（1分～24時間） ひずみ分解能：16bit（1μひずみ）
電源	送信機：ニッケル水素電池 受信機：USB給電（PCより）
筐体サイズ （長さ×幅×厚さ）	送信機：236mm×100mm×53mm（防護材含む） 受信機：80mm×60mm×50mm
動作環境	動作温度範囲：10～40℃ 防塵防滴（IP67以上）

吊った状態で設置した。最初に従来システム（データロガー）に接続した状態でひずみを計測しながら、鋼材中央下面での変形量が0mm・10mm・20mm・30mm・40mmとなるようにウェイトを下げて段階載荷し、その後同様な変位ステップでウェイトを引き上げて段階的に除荷した。従来システムによる計測が全て終わった後に、ひずみゲージを繋ぎ変えてハカルーターでひずみを計測した。

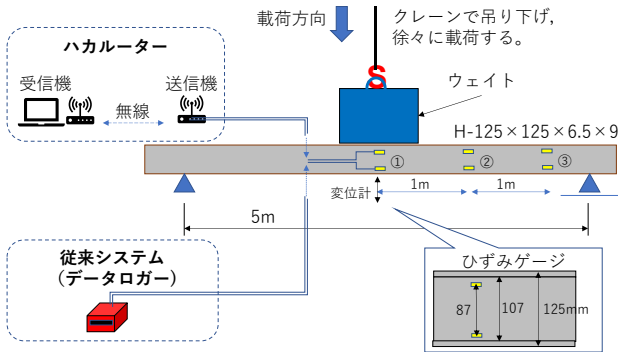
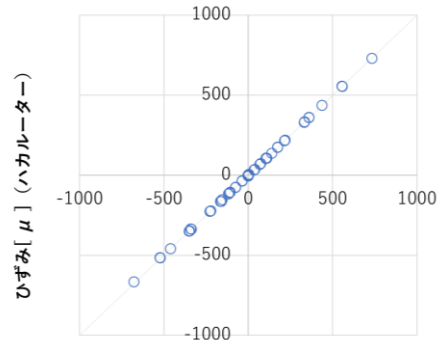


Fig. 2 精度検証時の機器と鋼材の配置
Arrangement of Device and Steel Flame
during Accuracy Verification



ひずみ計測結果の比較図
Comparison of Strain Measurement Results

中央のたわみは弾性範囲内に収まるように最大40mmとした。

ひずみ計測結果の比較図をFig. 3に示す。ハカルター®の従来システムに対する誤差の最大値は12μであった。H-125(鋼材の種類：SS400)の降伏応力は245N/mm²、ヤング係数が205,000N/mm²であるため、降伏時のひずみは1195μとなる。今回の計測誤差の最大値は降伏ひずみの約1%となり、ハカルター®は鋼材のひずみおよび応力を管理するための十分な精度を有していることがわかった。

3. 支保工適合性の早期判定方法

3.1 支保適合性の判定方法の概要

計測中の応力から収束後の応力を予測し、支保適合性を判定する方法をFig. 4に示す。①最初に、1.0D (D：トンネル径)程度掘削した時の応力 S_i を計測する。②次に、後述する方法で応力予測曲線を描き、収束後の応力 S を予測する。③予測された収束後の応力が管理基準値を超えると予想した場合、④事前対策工を検討する。

3.2 応力予測曲線の作成方法

以下の2種類の応力予測曲線の作成方法を適用した。

3.2.1 経験に基づく方法 過去の計測結果から得られた応力と切羽までの距離の関係(Fig. 5)を対数関数や指数関数で近似し、応力予測曲線を作成する方法である(以下、経験法と記す)⁵⁾。類似した地質条件であれば、新しい計測でも過去と同様に応力が推移すると仮定した。応力の予測値は式(1)で求める。この方法の場合、予測開始時の応力値と切羽までの距離から応力予測曲線が一意に定められる。

$$S = S_i \cdot \frac{f(t)}{f(t_i)} \quad (1)$$

ここに、 $f(t)$ ：Fig. 5に示すような過去の計測結果から得られた応力と切羽までの距離の関係式、 S ：応力の予測値(N/mm²)、 S_i ：予測開始時の応力の実測値(N/mm²)、 t ：予測地点から切羽までの距離(m)、 t_i ：予測開始時の切羽までの距離(m)

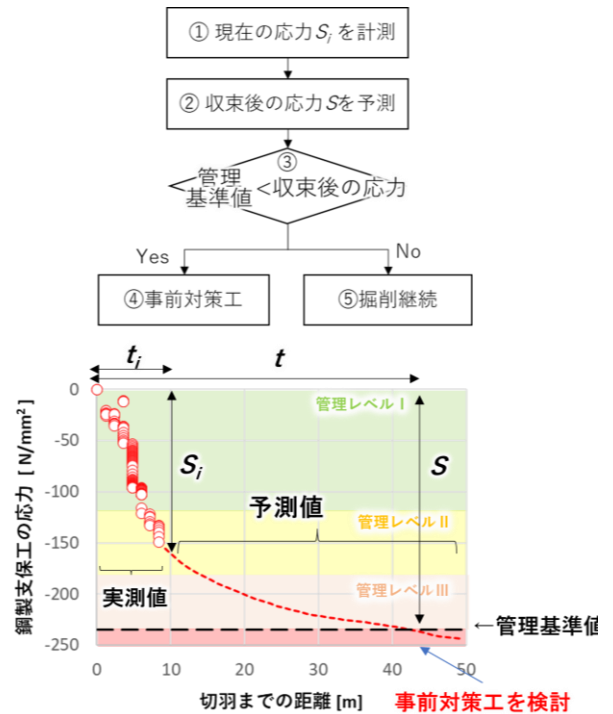


Fig. 4 支保適合性の判定方法
Determination of Support Suitability

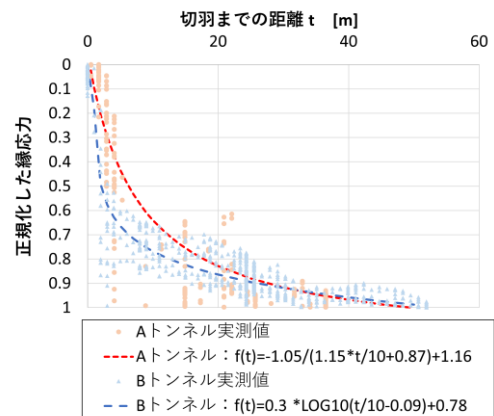


Fig. 5 過去の計測で得た応力と切羽までの距離の関係
Relationship between Stress Obtained
from Past Measurements and Distance to Face

3.2.2 双曲線法 計測開始から予測開始までの実測値に基づいて、以後に生じる応力を予測する方法である。鋼製支保工に生じる応力は掘削が進むにつれて双曲線的に進行すると仮定した。応力予測曲線は式(2)で求める。例えば t を40mとすると、切羽が40m離れた時点の応力を予測できる。

$$S = S_i + \frac{t-t_i}{\alpha+\beta(t-t_i)} \quad (2)$$

ここに、 S , S_i , t および t_i は式(1)と同じ。 α, β は定数

なお、Fig. 6(a)に示すような $(t-t_i)/(S-S_i)$ と $t-t_i$ の関係をプロットしたときに得られる回帰直線の切片が α 、傾きが β となる。プロットしたデータにバラツキが大きい場合やデータ数が少ない場合、予測精度が低下する。

3.2.3 リアルタイムひずみ予測システム 経験法と双曲線法による応力予測を簡便に行うため、Fig. 7に示すようなシステムを作成した。本システムは、経験法と双曲線法で用いる応力予測曲線式や応力予測結果の作成、閾値の指定と支保適合性の判定等、を行うことができる。本システムが予想した将来の応力予測結果が、設定した閾値を超えた場合、支保が適合していないと判定する。

4. ハカルターを用いた鋼製支保工のリアルタイム応力監視と事例

本章では、2件のトンネルにおいて、ハカルターを用いて鋼製支保工の応力をリアルタイムに監視した事例について報告する。なお、本章で述べる応力とは縁応力を意味する。縁応力とは、鋼製支保工断面のフランジ表面で生じる最大応力と最小応力であり、ウェブに貼られたひずみゲージから計測した応力から計算される。

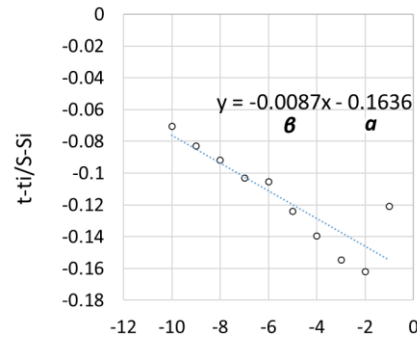
4.1 Aトンネル

頁岩主体のAトンネルは、地山等級により定めた支保パターン(支保構造)を、CIIから1ランク大きくなるDIに変更することを検討しており、鋼製支保工の適合性を判定するためひずみ監視を行う事になった。

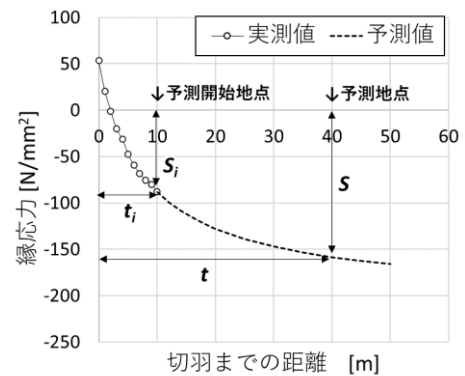
4.1.1 計測条件

計測条件は以下の通りであった。Fig. 8に送信機の設置位置とひずみゲージ2枚の貼付け位置、Photo 2に受信機設置状況と送信機設置状況を示す。受信機一式は、切羽から44m離れた位置に設置した。この地点は切羽から離れているが、坑内自動測量システム等の計測機器が集約されているため、坑内の作業員が警告灯の状態に気づき易いと判断した。応力の計測頻度は、バッテリー消費を抑えるため初期は10分間隔とした。管理基準値は、現場技術者と協議し、短期許容応力とした。

- 掘削方式：発破掘削
- 掘削工法：補助ベンチ付き全断面掘削工法
- 支保パターン：CII(地質：頁岩、土被り：133m)
- 設置断面数：1断面(1断面につき送信機を5基設置)



(a) 回帰直線の例



(b) 実測値から将来の応力を予測した例

Fig. 6 双曲線法による将来の応力予測 Predicting Future Stress Using the Hyperbolic Method

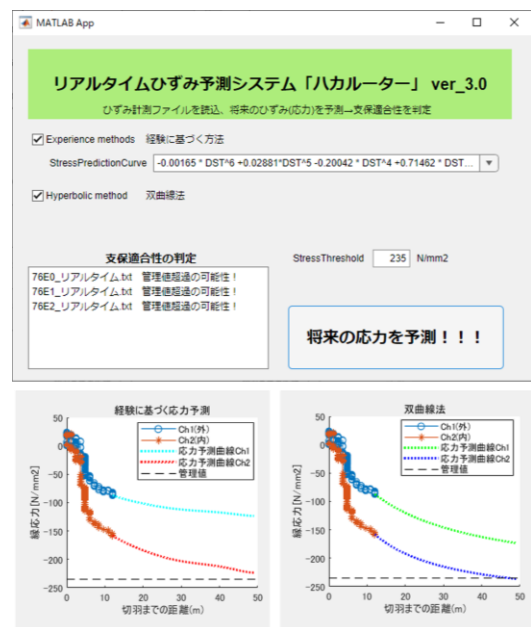


Fig. 7 リアルタイムひずみ予測システム Real-time Strain Prediction System

- 計測期間：収束するまで
- 計測頻度：1日目10分毎、2日目以降1時間毎
- 応力の管理値：短期許容応力235N/mm²

4.1.2 計測結果 ハカルター送信機の鋼製支保工への取付けは、屋外ヤードにおいて2人で作業し、約2時間で設置できた。鋼製支保工の建込み時に送信機が作業の支障になることはなかった。受信機一式は坑内に約30分で設置した。掘削を止めることなく全ての作業を完了することができた。また、発破掘削であったものの送信機が破損することなく、高い耐久性を確認できた。

ひずみを応力に換算した計測結果をFig. 9に示す。横軸に日付、第1縦軸に応力、第2縦軸に切羽までの距離を記した。ほとんどの計測データは欠測することなく受信することができた。いずれの計測点においても、建込み時の鋼製支保工の位置調整が原因と考えられる引張応力(+方向)が発生した。建込み完了後に計測値をゼロセットした場合はこのような引張応力は計測されないが、屋外でひずみゲージを貼り付け後にゼロセットしたため、このような引張応力が取得された。いずれの計測点も圧縮側に推移し、降伏応力に近づいたものの、切羽が80m程度離れた地点で降伏応力以下に収束した。内空変位および天端沈下は管理レベルⅢ(内空変位60mm, 天端沈下30mm)以内で収束した。

以上の計測結果から、計測地点では支保工の能力を最大限発揮した状態で収束したと判断できた。その後、掘削を進めると切羽の状態が悪化し、応力が降伏応力を超える可能性があったことから、支保パターンはDIパターンに変更された。

4.2 Bトンネル

泥岩主体のBトンネルは、支保パターンをCIIからDIの変更を検討しており、鋼製支保工の適合性を判定するためひずみ監視を行う事になった。

4.2.1 計測条件 計測条件は以下の通りである。送信機は鋼製支保工の継手を避けて設置した(Fig. 10)。受信機一式は、切羽から50m離れた位置に設置した。建込み日が当初予定の2日後に延期したため、計測頻度は1時間間隔とし、バッテリー消費を抑えることとした。管理基準値は、現場技術者と協議し、短期許容応力を安全率1.5で除した長期許容応力とした。

- 掘削方式：機械掘削
- 掘削工法：上半先進掘削工法
- 支保パターン：CII (地質：泥岩, 土被り：34m)
- 設置断面数：1断面 (1断面に送信機を3基設置)
- 計測期間：収束するまで
- 計測頻度：1時間毎
- 応力の管理値：長期許容応力 156N/mm²

4.2.2 計測結果 ハカルター送信機の鋼製支保工への取付けは、屋外ヤードにおいて2人で作業し、1時間45分で設置できた。受信機一式は坑外に約10分で設置し、作業を完了させた。送信機を取付けた鋼製支保工は、掘削工程の影響で翌々日に建て込むことになったが、送信機設置直後から計測を開始しておくことで、建込み時に計測担当者が立ち会う必要はなかった。ロードヘッダー

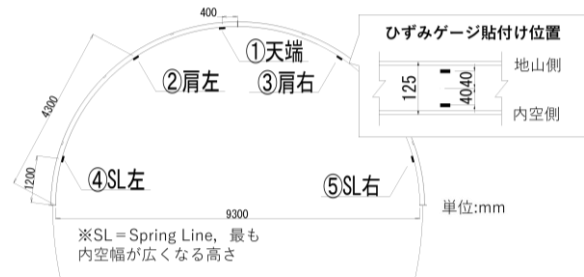
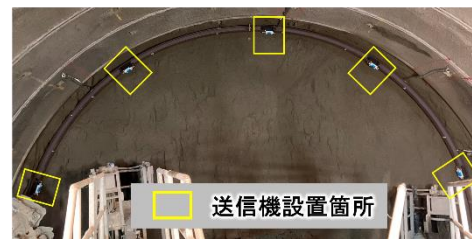


Fig. 8 送信機設置位置とひずみゲージ貼付け位置 (Aトンネル)

Transmitter Installation Position and Strain Gauge Attachment Position (Tunnel A)



(a) 受信機設置状況



(b) 送信機設置状況

Photo 2 受信機と送信機の設置状況
Receiver and Transmitter Installation Situation

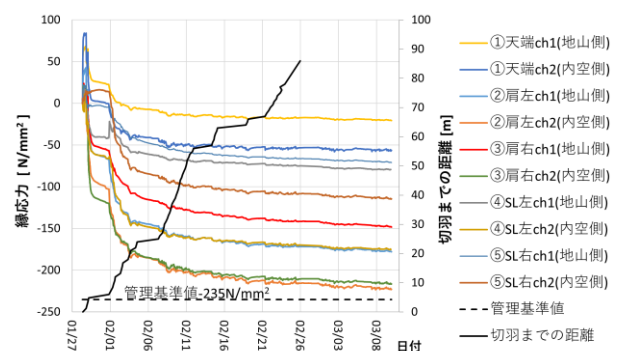


Fig. 9 計測結果(マイナスが圧縮応力)
Measurement Result (Minus is Compressive Stress)

の振動等で送信機が破損することにはなかった。建込み時に吹付けコンクリートが送信機に付着したため、ケレンで除去した。

ひずみを応力に換算した計測結果をFig. 11(a)と(b)に

示す。Fig. 11(a)は、受信した計測データである。建込み後に受信機の移設や受信機周辺に重機や資材が配置されていたことから、計測データの受信率がやや低下した。Fig. 11(b)は、送信機に内蔵された計測データである。送信機が付いた鋼製支保工の建込みは3月5日に行われ、3月7日に2基目、3月8日に3基目の鋼製支保工が建て込まれた。建込みから数日の間に応力は著しく上昇していることから、受信機は、建込み前から受信状況が良好な場所に設置されることが望ましい。いずれの計測点においても、切羽までの距離が20m程度で収束し、計測値から計算した応力は許容応力を超えなかった。SL左 (Spring Line : トンネル幅が最も大きくなる高さ) に設置した送信機は早い段階でバッテリーが切れたものの収束までの計測データを取得できた。内空変位が5.7mm、天端沈下は6.8mmであり、管理レベルI (内空変位78mm、天端沈下39mm) 以内であった。さらに、切羽状況は大きく変化する傾向が無かったことから、支保パターンをCIIで維持することになった。

5. 支保適合性の早期判定結果

本章では、2種類の応力予測曲線の作成方法を用いて、AトンネルとBトンネルの応力監視時に支保適合性を早期に判定した結果を述べる。両トンネルでは、以前に鋼製支保工の応力測定を実施しており(Fig. 5)、同じトンネルの計測結果を応力予測曲線として用いた。実際の施工では、1)経験法で将来発生する応力を予測し、施工管理を行った。2)双曲線法は、計測後のデータを用いて検証を行い、経験法と比較した。

5.1 Aトンネル

送信機と切羽までの距離 t_i が9.6mの時に、将来発生する応力を予測した結果と評価をFig. 12(a)~(e)に示す。実測値は、切羽までの距離が20m以降、緩やかに勾配が変化していくことが特徴的であった。Fig. 12(b) と(c) に示した②肩左Ch2と③肩右Ch2の計測点では、経験法による予測で管理基準値を超える可能性があるかと判断し、坑内変位計測や吹付けコンクリート面のひび割れ発生状況の確認を重点的に実施することとした。結果として、管理基準値 (235N/mm²) 以内で収束し、坑内に変状は発生しなかった。

切羽までの距離 t が50mまで進んだ時を予測した精度をTable 2に示す。適切に応力予測曲線が描けない場合、予測時期 t_i を遅らせた時の予測精度を記載した。いずれの応力予測方法においても、管理基準値(235N/mm²)に対して15%以内の精度で応力を予測することができた。

5.2 Bトンネル

送信機と切羽までの距離 t_i が9.6mの時に、将来発生する応力を予測した結果と評価をFig. 13(a)~(c)に示す。経

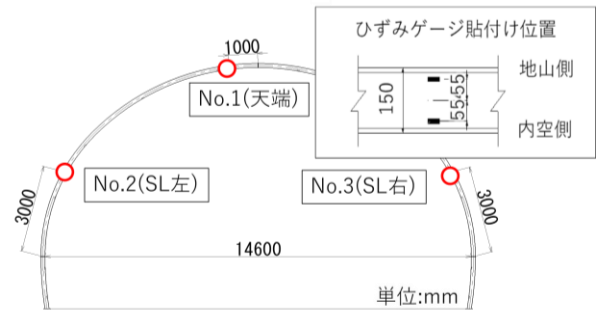
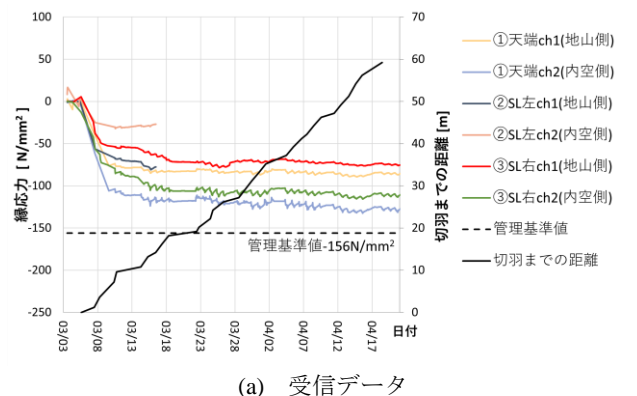
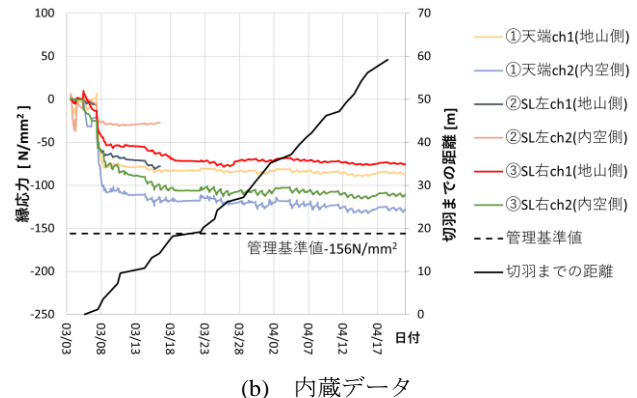


Fig. 10 送信機設置位置とひずみゲージ貼付け位置 (Bトンネル)

Transmitter Installation Position and Strain Gauge Attachment Position (Tunnel B)



(a) 受信データ

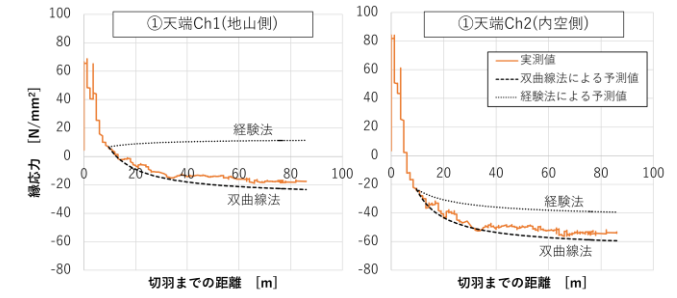


(b) 内蔵データ

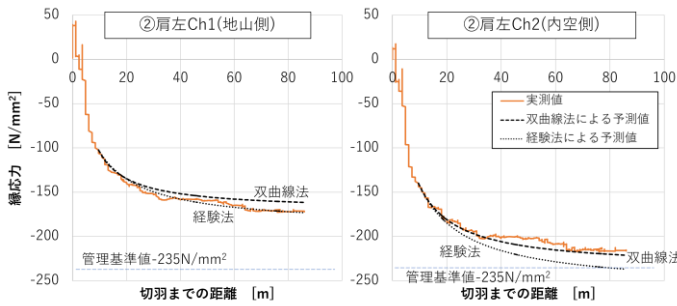
Fig. 11 計測結果 (Bトンネル)
Measurement Result (Tunnel B)

験法による予測を行った結果、いずれの計測点においても管理基準値(156N/mm²)を超える可能性は少ないと判断した。結果として、管理基準値以内で収束し、坑内に変状は発生しなかった。

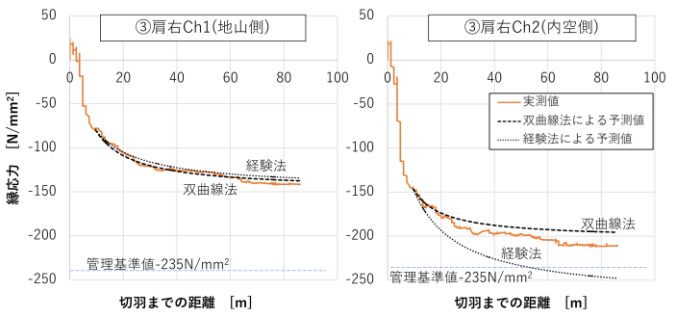
切羽までの距離 t が50mまで進んだ時を予測した精度をTable 3に示す。計測期間が短かった②SL左の計測点では、 $t=14m$ の予測値で評価した。Aトンネルと比較して予測精度を評価するため、誤差割合はAトンネルの管理基準値(235N/mm²)に対する割合とした。その結果、10%以内の精度で応力を予測することができた。



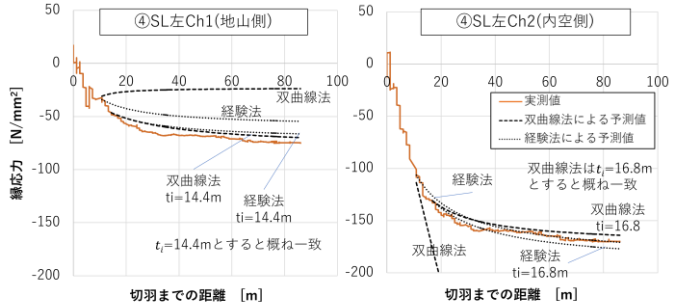
(a) 天端の応力予測結果



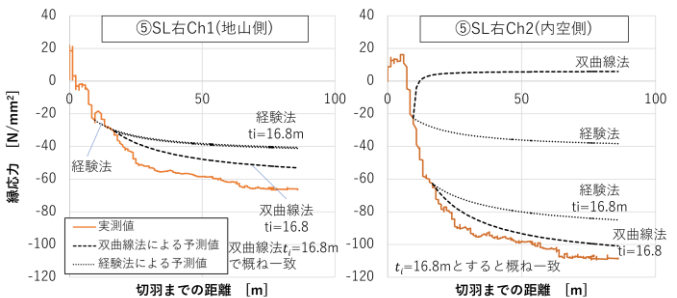
(b) 肩左の応力予測結果



(c) 肩右の応力予測結果



(d) SL左の応力予測結果



(e) SL右の応力予測結果

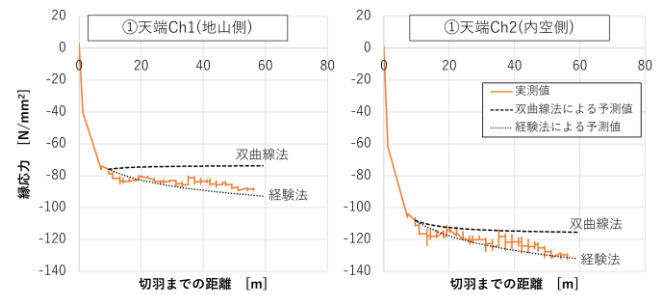
Fig. 12 Aトンネルの応力予測結果
Stress Prediction Result (Tunnel A)

Table 2 予測精度(Aトンネル, 単位: N/mm²)

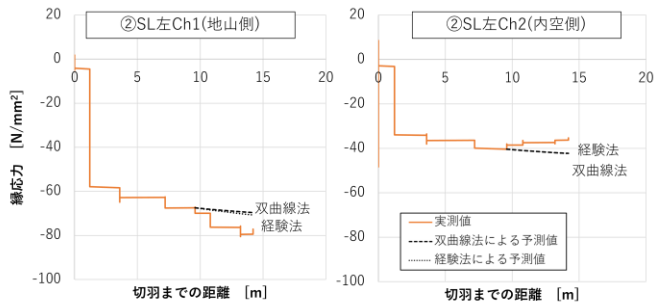
Prediction Accuracy (Tunnel A)

設置位置	Ch	実測応力	経験に基づく方法による予測			双曲線法による予測		
			予想応力	誤差	誤差割合(%) ※3	予想応力	誤差	誤差割合(%) ※3
天端	Ch1(地山側)	-14	11	-25	-11	-20	6	2
	Ch2(内空側)	-50	-37	-13	-5	-56	6	3
左肩	Ch1(地山側)	-160	-163	3	1	-155	-4	-2
	Ch2(内空側)	-202	-223	21	9	-211	9	4
右肩	Ch1(地山側)	-128	-127	-1	0	-130	3	1
	Ch2(内空側)	-198	-234	36	15	-191	-7	-3
SL左	Ch1(地山側)※1	-69	-63	-6	-3	-64	-4	-2
	Ch2(内空側)※2	-161	-167	6	2	-158	-4	-2
SL右	Ch1(地山側)※2	-58	-39	-20	-8	-48	-11	-5
	Ch2(内空側)※2	-98	-80	-18	-8	-93	-5	-2

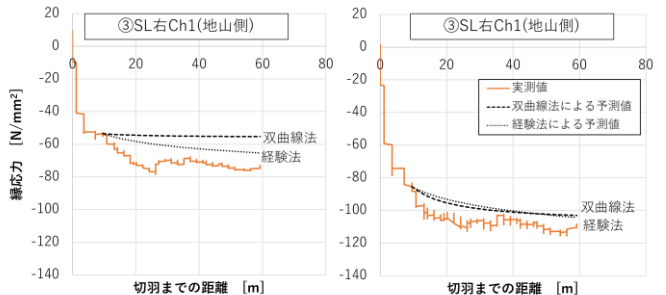
※1: $t_i=14.4\text{m}$ の予測, ※2: $t_i=16.8\text{m}$ の予測
※3: 管理基準値に対する誤差の割合 = (実測値-予測値)/235 × 100



(a) 天端の応力予測結果



(b) SL左の応力予測結果



(c) SL右の応力予測結果

Fig. 13 Bトンネルの応力予測結果
Stress Prediction Result (Tunnel B)

5.3 応力予測曲線の特徴

経験法と双曲線法を用いて応力を予測したことで得られた特徴や留意点を以下に列挙する。いずれの方法も計

算コストは低いため、今後は、両者を用いて応力を予測し、それぞれの特徴を踏まえて予測結果を評価することとした。

5.3.1 経験法の特徴

- 1) Fig. 12(b)_Ch1の予測結果のように、過去の応力測定結果と同様に応力が推移する場合、精度良く応力を予測することができる。
- 2) 将来の予測値は現在の応力に比例するため、予測時点で引張応力が生じていると、以降も引張が生じると予想してしまう(Fig. 12(a)_Ch1などで確認)。
- 3) 現在の値のみを用いるため、計測データが少なくても応力予測曲線を描くことができる(Fig. 13(a)_Ch1などで確認)。

5.3.2 双曲線法の特徴

- 1) Fig. 12(b)_Ch2の予測結果のように、勾配が変化するまで実測値が得られていると、高い精度で応力を予測することができる。逆に、実測値が直線的に推移している段階では、正しく予測することが難しい(Fig. 12(d)_Ch2などで確認)。
- 2) 実測値のデータ数が少ない、あるいはバラつきが大きいとき、回帰直線を正しく描くことができずに予測精度が悪化する(Fig. 13(a)_Ch1などで確認)。
- 3) 予測を開始する時期を遅くし、予測開始時の切羽までの距離 t_t を大きくするほど、応力予測曲線は実測値に近づく(Fig. 12(e)_Ch2などで確認)。

6. まとめ

ワイヤレスひずみ計測システム「ハカルター」を用いて鋼製支保工の応力をリアルタイムに監視した。また、計測中のひずみから将来発生する応力を予測し、支保適合性の早期判定を行った。以下に本研究で得られた知見を列挙する。

- 1) 鋼製支保工を建込む前に機器設置を完了させておくことで、切羽作業が発生しない。
- 2) 送信機を防護材や樹脂で覆うことで、発破の衝撃や施工中の振動に対する耐久性が得られる。
- 3) 受信機は電波状況が良好な地点に設置し、建込みか

Table 3 予測精度(Bトンネル, 単位: N/mm²)

Prediction Accuracy (Tunnel B)

設置位置	Ch	実測応力	経験に基づく方法による予測			双曲線法による予測		
			予想応力	誤差	誤差割合(%) ※3	予想応力	誤差	誤差割合(%) ※3
天端	Ch1(地山側)	-87	-91	4	2	-74	-13	-6
	Ch2(内空側)	-128	-130	3	1	-115	-12	-5
SL左	Ch1(地山側)※4	-79	-71	-9	-4	-70	-10	-4
	Ch2(内空側)※4	-36	-42	6	3	-42	6	3
SL右	Ch1(地山側)	-75	-64	-10	-4	-55	-19	-8
	Ch2(内空側)	-111	-103	-9	-4	-102	-9	-4

※3: Aトンネルの管理基準値に対する誤差の割合=(実測値-予測値)/235×100

※4: t=14m到達時の予測値

ら数日間の応力の挙動を適切に受信することが重要である。

- 4) 過去の計測と同様に応力が推移した場合、経験法による応力予測が有効である。
- 5) 勾配が変化するまで実測値を得られた場合、双曲線法による応力予測が有効である。

引き続き、本技術を様々な現場に導入して応力予測方法の改良を行い、実用化を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 北川修三, 梶原雄三, 信士正人: 施工時差を考慮した多重支保工法の膨張性地山に対する適用, 土木学会論文集No.721, VI-57, pp. 27-39, 2002.12
- 2) 宮腰一也, 玉野達, 柏原宏輔: 大土かぶり区間の前方地山予測と変状対策およびDXによる遠隔切羽評価, トンネルと地下第52巻9号, pp. 19-30, 2021.9
- 3) 日本道路協会: 道路トンネル観察計測指針<平成21年改訂版>, pp. 57-60, 2009
- 4) 藤岡大輔, 中岡健一, 趙越, 藤井宏和, 町島祐一: ワイヤレスひずみ計測システムによるリアルタイムひずみ監視と支保適合性確認に関する研究, 第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 196-201, 2022.1
- 5) 藤岡大輔, 中岡健一: ワイヤレスひずみ計測システムを用いたひずみ監視と支保適合性の早期判定, 第49回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 85-90, 2023.1