

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

藤岡 大輔^{1*}・中岡 健一¹・趙 越²・藤井 宏和²・町島 祐一²

¹株式会社大林組 技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

²株式会社レーザック（〒124-0002 東京都葛飾区西亀有1-5-3）

*E-mail: fujioka.daisuke@obayashi.co.jp

鋼製支保工のひずみを無線で送信し、リアルタイムでひずみを監視しながら、ひずみの増大時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」を開発した。また、これまで活用されることが少なかったひずみ計測結果から、収束後のひずみを推定し、支保工の適合性を確認する方法を検討した。実現場に適用した結果、約50m離れた地点から無線通信が可能であることを確認し、リアルタイムにひずみを監視することが出来た。また、実計測データを用いて収束後のひずみを推定した結果、計測データのばらつきを考慮し、着目する計測点を選択することで、推定値は実測値と概ね一致し、支保工の適合性を確認できる可能性を示した。

Key Words : mountain tunnel, wireless sysyete, strain monitoring, steel support

1. はじめに

山岳トンネル工事において鋼製支保工の安定性と妥当性（断面寸法・ピッチ等の支保適合性）を確認する際に、ひずみ計測（応力測定）が実施される¹⁾。従来のひずみ計測方法は次の課題があった。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) ひずみデータはデータロガーに集約され、切羽から距離があるため、過大なひずみ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、ひずみを無線で送信し、リアルタイムでひずみを監視しながら、ひずみが増加した場合に、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（以下、無線ひずみ計と記す）」を開発した。また、これまで活用されることが少なかったひずみ計測結果から、収束後のひずみを予測して支保適合性を確認する方法を提案した。本報では、無線ひずみ計の概要と現場適用例、支保適合性を確認した事例について述べる。

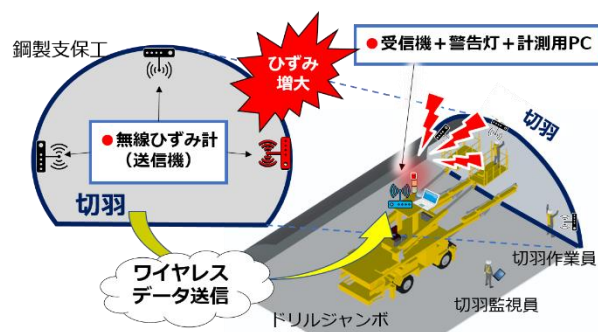


図-1 無線ひずみ計の構成

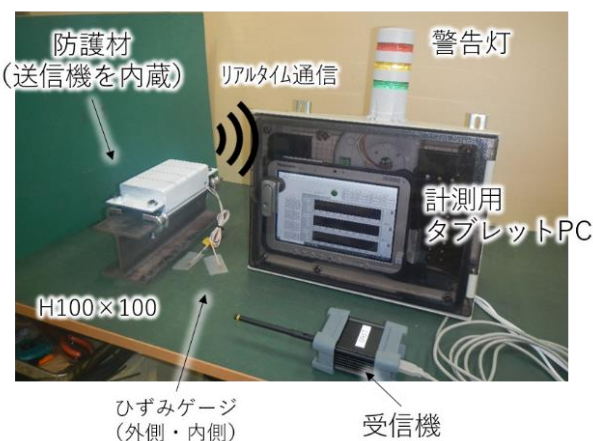


図-2 無線ひずみ計機器一式

2. 無線ひずみ計の概要

(1) 機器構成と仕様

図-1に無線ひずみ計の構成、図-2に機器一式を示す。

無線ひずみ計の送信機は鋼製支保工に設置する。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地山側と内空側に張り付ける。受信機と警告灯、計測用タブレットPCは、まとめてドリルジャンボの運転席付近等に設置する。ドリルジャンボが坑内を往来することを利用し、受信機が送信機の電波範囲（50m前後）に近づいた場合、ひずみデータが受信される。ひずみの閾値を設定することで、ひずみ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。

計測用タブレットPCは、ドリルジャンボが稼働すると同時に起動する。その後、計測用ソフトウェアも自動で起動してひずみ計測を開始するようにし、作業員の手の低減と、監視が確実に行われるように配慮した。坑内に無線LANが構築されていれば、リモートアプリケーションを導入しておくことで、事務所からでもひずみ状況を監視することができる。

表-1に無線ひずみ計の仕様を示す。周波数は、他電波からの干渉に強い920MHz帯を設定した。送信機の電池は、坑内変位が収束する1か月程度持続するようにした。送信機の大きさは、施工影響を最小限にするため、できる限り小さくした。いずれの機器もトンネル坑内の環境に耐えるように設計した。

(2) 防護材

坑内作業に伴う振動や発破による爆風や振動に耐えるため、送信機は防護材で覆う必要がある。強度を高めるため、鉄製の防護材を作製した。通信距離を向上させるため、防護材の表面にスリット(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、10m以上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。

(3) 精度検証

新規に作製した無線ひずみ計の計測精度を確認するため、データロガーを用いる従来計測方法と比較した。精度検証のための機器と鋼材の配置を図-3に示す。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。同様に、新システム（無線ひずみ計）でひずみを計測した。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。

表-1 無線ひずみ計の仕様

項目	仕様
無線	周波数：920MHz 電波強度：10mW 以下 通信距離：10m 以上（防護材の形状と材質に依存）
	送信機：最大 24 個 受信機：1 個
測定	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 (0.625 μ ひずみ)
	送信機：ニッケル水素電池 受信機：USB 給電(PC より)
電源	
管体サイズ (長さ×幅×厚さ)	送信機(防護材)：236mm×100mm×53mm 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）

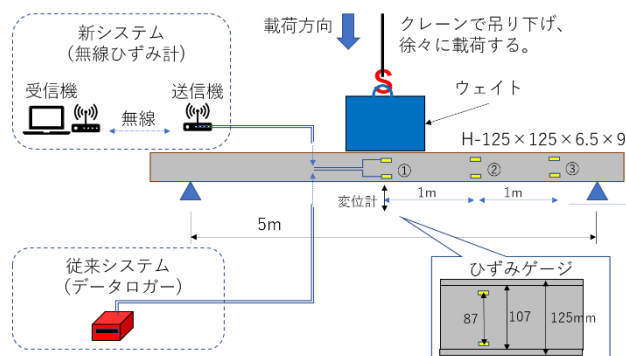


図-3 精度検証時の機器と鋼材の配置

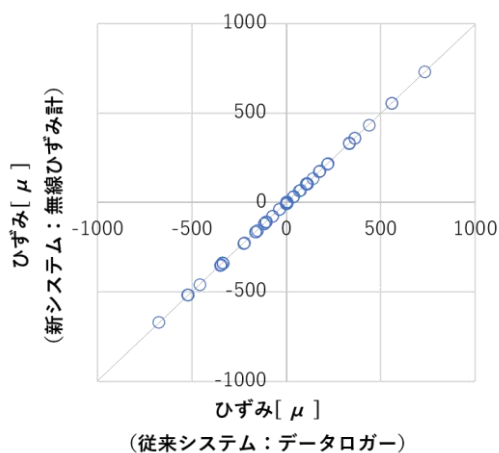


図-4 ひずみ計測結果の比較図

ひずみ計測結果の比較図を図-4に示す。新システムの従来システムに対する誤差の最大値は12 μ であった。H-125の降伏応力は235N/mm²、ヤング係数が205,000N/mm²であるため、降伏時のひずみは1146 μ 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、開発した新システムは鋼材のひずみ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. 無線ひずみ計を用いたリアルタイムひずみ監視

施工中の山岳トンネルにおいて、無線ひずみ計を用いたひずみ監視を試行した。本トンネルは機械掘削による補助ベンチ付き全断面掘削工法で施工されている。試行箇所は地山は、風化した凝灰角礫岩であり自立しているが時間経過に伴い緩みが生じる可能性があった。鋼製支保工は上半にのみ設置される。

(1) 計測概要

以下に本計測の概要を示す。無線ひずみ計送信機とひずみゲージの設置箇所を図-5、送信機と受信機の設置状況を図-6に示す。本現場ではドリルジャンボが切羽で作業する割合が少ないことから、受信機は送信機から約50m離れた側壁に設置した。この場所は、坑内自動測量システムなどの計測機器が集約されており、切羽作業員や切羽監視員が警告灯の状態を確認しやすい。その他の計測条件を以下に示す。

- ・ 計測期間：1ヵ月程度（変位が収束するまで）
- ・ 設置箇所：1断面に送信機3カ所（SL左右、天端）
- ・ 設置断面数：4断面
- ・ 計測頻度：1日目1分毎、2日目以降1時間毎に計測・データ送信（受信できなかった場合は内部メモリに保存）
- ・ ひずみ(応力)の管理値：降伏ひずみ 1146μ
(降伏応力 235N/mm^2)

(2) 設置手順と時間

無線ひずみ計の設置手順と作業時間を表-2に示す。ひずみゲージを設置する時間は従来方法と同じであるが、切羽付近での配線作業等がないため、掘削を止めることなく、安全かつ短時間に計測を開始することができた。

(3) 計測結果

監視状況例として、1断面目の鋼製支保工ひずみ監視画面を図-7に示す。横軸には時刻、縦軸にはひずみを応力に変換した値が表示される。グラフ左端には、建込みや下半掘削等における応力値の乱れが確認できた。送信機や受信機の近くに重機が配置されたため、送信されたひずみデータを受信できなかった時間帯があり、グラフ上にその値が表示されなかった。

ひずみ計測結果を図-8に示す。ひずみをリアルタイムに監視した結果、管理値を超える応力やひずみは発生せず、安全に施工することができた。また、ひずみは送信

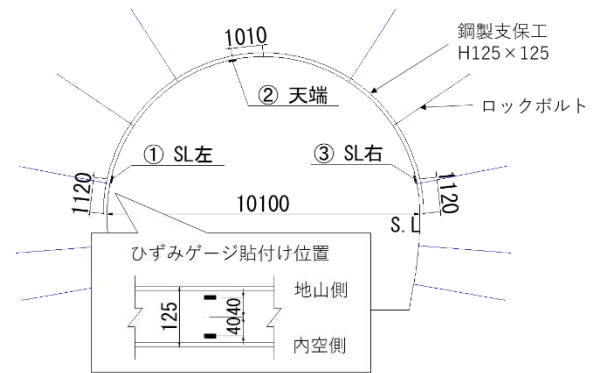


図-5 無線ひずみ計とひずみゲージ設置箇所



送信機 設置状況

受信機と警告灯 設置状況

図-6 送信機と受信機の設置状況

表-2 設置手順と作業時間

設置手順		作業時間
①	資材ヤードにおいて、鋼製支保工に無線ひずみ計送信機とひずみゲージを設置	約3時間 ・ 送信機 12 台 ・ 2 人作業
②	資材ヤードにおいて、応力が生じていない状態でひずみ値をゼロセットして、計測を開始	0.2 時間
③	受信機を坑内に設置し、鋼製支保工を建込むまで待機	0.2 時間
④	計測用タブレット PC やリモートアプリケーションで、ひずみ発生状況を監視	適宜

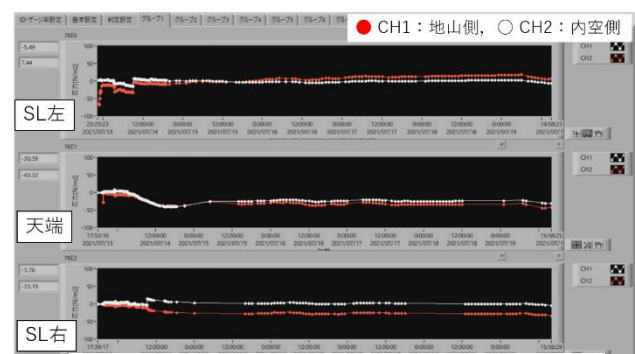


図-7 ひずみ監視状況の例

機と切羽が40~50m程度離れた地点で収束した。

(4) データ受信率

受信できなかったひずみデータは、送信機の内部メモ

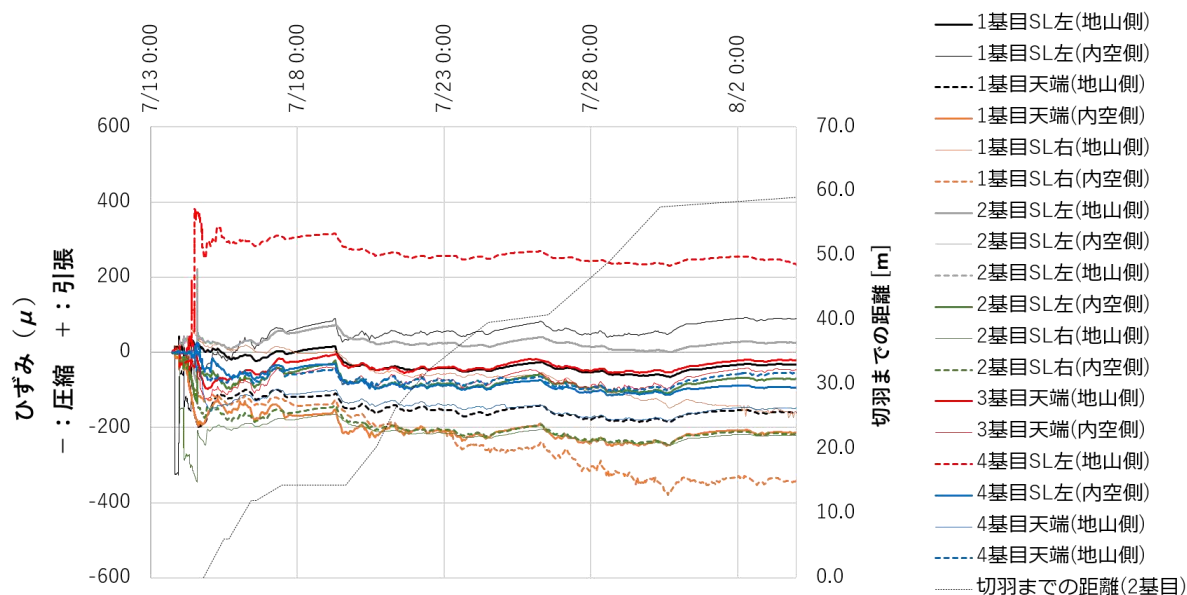


図-8 ひずみ計測結果

りに保存されている。受信データ数をメモリー内のデータ数で除すことで、データ受信率を算出した。図-9に設置箇所でも分類したデータ受信率を示す。故障等によりひずみを計測できなかった送信機のデータは除外した。設置箇所による目立った違いは確認できなかったが、50%を下回るものもあることから改善が必要である。

電波は遮蔽物があっても、広範囲に発すると壁面等に反射しながら受信機に到達する。そのため、データ受信率の改善策として、樹脂材料の適用やスリットの増設を行い、電波透過性が高く、広範囲に電波が発することができ防護材の検討が必要と考えられる。また、天端付近に受信機を設置するなど、遮蔽物が少ない状況にすることも受信率を高める方法として挙げられる。

(5) 機器の耐久性

施工時の振動等により機器が故障し、計測が中断することはなかった。設置時に配線を強く引張ったり、押し込んだりすることでひずみゲージや電源ケーブルが破断した機器があったことから、本計測後にコネクタやケーブルを強固なものに変更した。

4. 支保適合性の確認

支保適合性をひずみより確認することが必要となった場合、通常は掘進に伴って増加するひずみを計測し、管理値によって支保工の健全性を確認しながら掘削が進められる。管理値を超えた後、事後対応として対策工が施工される。事前に対策工を施工することが出来れば地山の変位や緩みを抑え、安全性を高めることができるため、

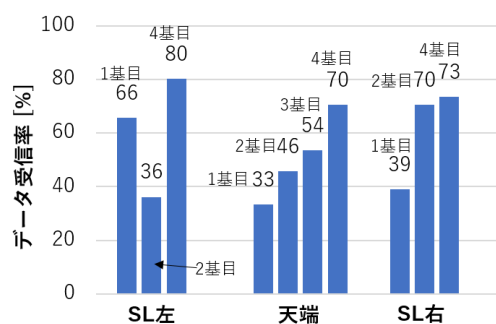


図-9 データ受信率

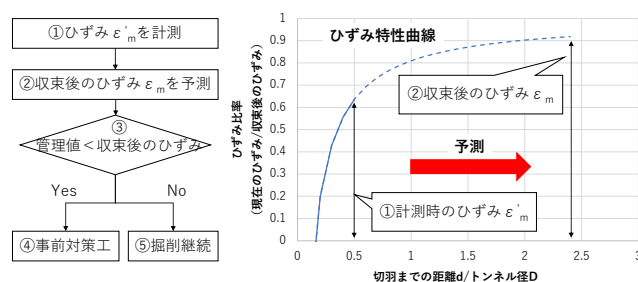


図-10 支保適合性の確認フロー

3章に示したひずみ計測結果を用いて、計測中のひずみから収束後のひずみを予測し、支保適合性を確認する方法を提案した。

(1) 支保工適合性の確認方法

トンネルは掘削により切羽が離れていくとともに変形が進んでいく。著者らは、鋼製支保工のひずみと切羽までの距離の関係を用いて収束後のひずみを推定し、地山物性の逆解析を試みている³⁾。

本研究で用いる支保適合性の確認フローを図-10に示

す。図中、①では、ひずみ計測を開始し、 $0.5D \sim 1.0D$ (D : トンネル径) 程度掘削した時のひずみを計測する。②では、収束後のひずみに対する比率と、その断面の切羽からの距離との関係を表した曲線（以下、ひずみ特性曲線と記す）から収束後のひずみを予測する。③において、収束後のひずみが管理値を超えると予想した場合、④事前対策工を検討する。

ひずみ特性曲線と同様に、内空変位においても収束値に対する比率と切羽までの距離の関係を曲線で表すことができる（以下、変位特性曲線と記す）。地山を弾性体と仮定した場合、ひずみ特性曲線は変位特性曲線と相似であるため、ひずみ特性曲線は掘削データから設定できる。掘削データがない場合は、掘削を進めながら補正していくことを前提にして、地質条件に近い過去の掘削データや解析で得た変位特性曲線（例えば²⁾）から定めてもよい。

(2) 実計測データの適用

3章のひずみ計測結果を支保適合性の確認フローに適用した。ひずみ特性曲線は、泥岩主体の山岳トンネルのひずみ計測データ²⁾より定めた。このトンネルは本研究で対象としたトンネルの支保工や地山の岩種に近い^{例えは³⁾}ため、変形挙動も近くなる^{例えは³⁾}と考えた。鋼製支保工の建込み後のひずみに着目するため、計測地点に到達する前に地山が変形する先行変位は考慮しなかった。

無線ひずみ計で実測したひずみデータを設置箇所ごとに分けた結果を図-11に示す。いずれの設置箇所においても、下半掘削や次の上半掘削の影響を受けるため、切羽までの距離が $1D$ 前後になるまで非常にばらつきが大きい。① SL左と③ SL右の計測データは設置箇所が鋼製支保工の脚部に近いため、特に下半掘削の影響を強く受け、ばらつくことが分かっている。②天端の計測データは、 $1D$ を超えるとばらつきが小さくなった。経験値に基づくひずみ特性曲線とよく一致したことから、このひずみ特性曲線を採用し、 $1D$ 付近の天端のひずみ計測データを用いて収束後の $4D$ 付近のひずみを推定した。具体的には、 $1D$ のひずみを 1.446 倍すると $4D$ のひずみとなる。

収束後のひずみを予測した結果を表-3に示す。実測値は10個のデータの平均値とした。3基目の結果を除き、 $4D$ 付近のひずみ推定値は実測値と概ね一致した。3基目は、坑内作業の影響で $4D$ 付近の圧縮ひずみが小さくなっており、推定値と実測値の差が大きくなった。誤差の原因が人為的な理由によるものではないと考えられる場合、誤差を小さくするためにひずみ特性曲線を補正する必要がある。また、ひずみ管理値を降伏時のひずみ(1146μ)とした場合、 $4D$ 付近のひずみ推定値は降伏時のひずみより小さいため、本予測結果から支保工は地山に適合していると言える。

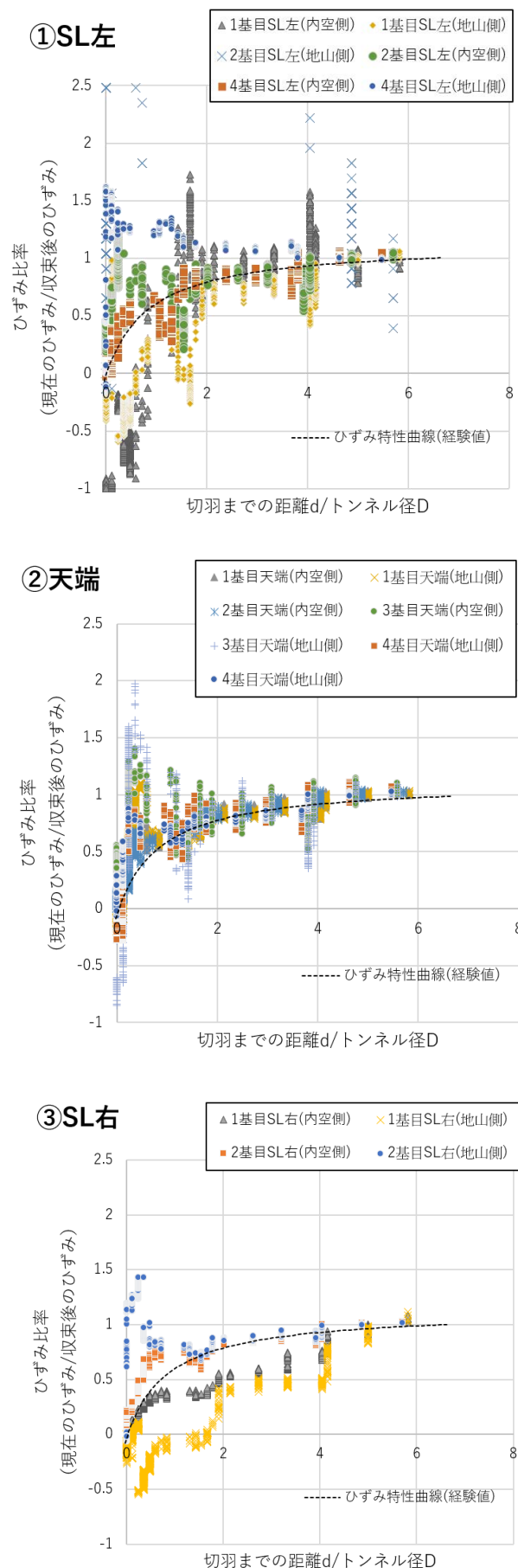


図-11 実測データとひずみ特性曲線

(3) 実用化にむけた提案

ひずみ計測による支保工適合性確認を実用化するための留意点を以下のように提案する。

- ひずみ計測値 ε'_m は、下半支保工設置等が終了し、ひずみのばらつきが収まってから取得する。
- SL付近のひずみはばらつきが大きいため、無線ひずみ計は鋼製支保工の天端や肩に設置することが望ましい。
- ひずみ特性曲線は、ひずみ実測値から適宜見直しを行う。

5. まとめ

鋼製支保工のひずみ計測を安全かつ簡易に行うため、リアルタイムでひずみを監視できる無線ひずみ計を開発した。また、実際の計測データに基づき、支保適合性の確認方法を提案した。以下に本研究で得られた知見を列挙する。

- ひずみ計を無線化することで切羽における設置作業を省略することができるため、安全であり、掘削を止める必要がない。
- 防護材で送信機を覆うことで、掘削に伴う振動や衝撃に対する耐久性を得ることができる。
- 送信機は約50m離れた地点にひずみデータを送信することができる。
- 実測値や経験値からひずみ特性曲線を定めることで、収束後のひずみを推定できる可能性がある。
- ひずみ計測値はばらつきが大きいため、ばらつきが小さくなった段階から地山挙動を評価できるようになる。
- 計測データのばらつきを考慮し、着目する計測点を選択することで、収束後のひずみの推定値は実測値と概ね一致した。このことから、本提案方法により支保工の適合性を確認できる可能性がある。

表-3 収束後のひずみ予測結果

	1D付近ひずみ ε'_m 実測値 (平均値)①	4D付近ひずみ ε'_m 推定値 ②=④×①	4D付近ひずみ ε'_m 実測値 (平均値)③	倍率 ③/①	誤差 ③-②
ひずみ特性 曲線	0.663	-	0.958	④ 1.446	-
1基目地山側	-109	-158	-159	1.459	-1
1基目内空側	-155	-224	-215	1.387	9
2基目地山側	ひずみゲージ破断のため欠測				
2基目内空側	-140	-202	-192	1.371	10
3基目地山側	-56	-81	-47	0.839	34
3基目内空側	-97	-140	-90	0.928	50
4基目地山側	-125	-181	-174	1.392	7
4基目内空側	-76	-110	-98	1.289	12

引き続き、本技術を様々な現場に導入し、検討を重ねていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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
- 2) 藤岡大輔，中岡健一：鋼製支保工ひずみ計測結果を用いた地山物性の逆解析と支保適合性確認に関する研究，第56回地盤工学研究発表会，12-7-1-03，2021
- 3) 真下英人，水川雅之，日下敦：トンネル早期閉鎖効果に関する解析的検討，トンネル工学報告集第17巻，pp.35-41，2007

STUDY OF REAL-TIME STRAIN MONITORING AND SUPPORT SUITABILITY CONFIRMATION USING WIRELESS STRAIN MEASUREMENT SYSTEM

Daisuke FUJIOKA, Kenichi Nakaoka, Yue ZHAO,
Hirokazu FUJII and Yuichi MACHIJIMA

"Wireless strain measurement system" that can wirelessly transmit the strain of steel support was developed to monitor the strain in real time, and notify the danger to workers near the face when the strain increases. In addition, we examined a method for estimating the strain after convergence from the strain measurement results, and confirming the support suitability. As a result, it was confirmed that wireless communication was possible from a point about 50 m away, and the strain could be monitored in real time. In addition, by selecting the measurement data in consideration of the variation, and selecting the measurement point of interest, the feasibility of the support suitability confirmation method was confirmed.