

土木機械設備保全における無線モニタリング機器の適合性 ～トンネルと排水機場における試行実験～

金森宗一郎・田中義光・山下 尚

1. 背景と目的

1.1 土木機械設備保全の現状

トンネル換気設備や、排水機場ポンプ設備は、人命に関わる設備であるため常に正常な状態を保つことが重要である。

これらの予防保全を行う設備では、劣化傾向を監視して故障を未然に防ぐ状態監視保全を行うことが望ましい。そこで、点検データの時間変化の傾向を監視する傾向管理の実施が推進されている^{1),2)}。

現状では、月に1回程度行われる管理運転の際に、人力で測定機器を押し当てるという手法により得られた点検データを使用する人が多い。したがって、押し当て力が測定者ごとに異なったり、測定のタイミングが毎回異なったりしている。

しかし、状態監視保全で使用するデータの取得には、劣化による測定値の変化を捉えられるよう、運転条件と測定条件を揃えることが望ましい。

センサを固定し、有線接続するモニタリング機器を使用すれば、測定者が介在することなく測定を行い、測定箇所ごとの測定時間を同期させることもできる。これらのことから、測定者および測定のタイミングが異なることによる測定値のばらつきは解消され、より適正な傾向管理を行えるようになることが期待出来る。

しかし、人力で測定している項目をすべて固定式の有線モニタリング機器に置き換えるには大きなコストが必要となり、現実的ではない。

1.2 無線モニタリングの有用性および課題

この問題を解決しうる技術として無線モニタリング機器に注目した。無線モニタリング機器の利点は配線が不要で設置・撤去が容易であるため、常設せずに点検時にだけ設置し、複数の施設で使い回すことができるという点である。

しかし、トンネルと排水機場は無線通信を行う上で過酷な環境である。トンネルでは通行車が遮蔽物

となり、覆工で電波が反射するため干渉が発生する。また、排水機場では遮蔽物が多いことに加え、主ポンプとエンジンが異なる階に設置されている場合があり（図-1 (b)）受信機の位置によっては階を跨いで通信することが必要になる。

このような特異な環境で無線モニタリング機器が通信を行えるか検討した事例は少ない。そのため、どのような性能の無線モニタリング機器であればトンネルと排水機場において無線通信の信頼性を確保できるかについては、ほとんど知見がない。

また、無線振動モニタリング機器で使用されることが多いMEMS式加速度センサ（3.3において詳述）は、土木機械設備の振動計測において実績が少なく、状態監視に適用できるか分かっていない。

1.3 本研究の目的

これらの課題を踏まえ本研究では、トンネルと排水機場においてどのような特性を持つ無線モニタリング機器であれば通信の信頼性を確保できるか、実験を通じて明らかにすることを目的とした。

また、実験で得られたデータから、MEMS式加速度センサの適合性について検討することとした。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

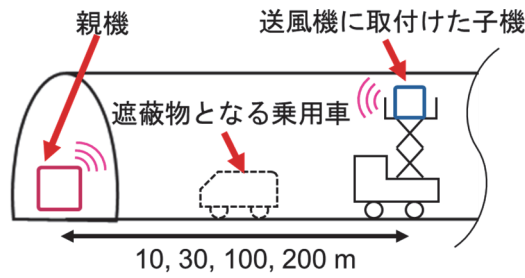
それぞれ異なる特性を持つ4種の無線モニタリング機器を使い、トンネルと排水機場で通信の可否を調べる実験を行った（図-1）。

その後、通信規格が持つ特性と各機器の通信の可否を比較した。それによって、トンネルと排水機場で無線通信の信頼性を確保するために、どのような特性の通信規格を使えばよいのか検討した。

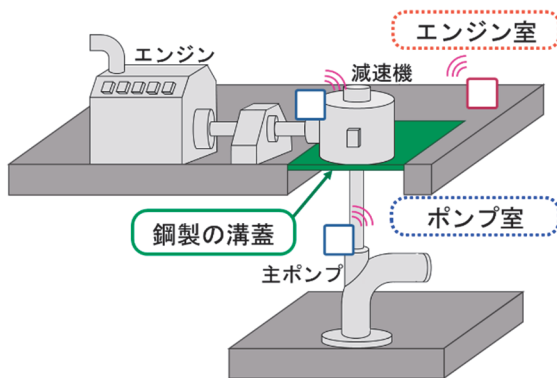
2.2 実験機器

遮蔽物の多い環境で通信の信頼性に影響を与える無線通信の特性として①通信周波数と②ネットワークポロジを挙げるができる。

①については、現在販売されている無線モニタリング機器のほとんどが920MHz帯または2.4GHz帯を使用している。周波数が低いほど回折性が大きく、



(a) トンネル実験



(b) 排水機場実験

図-1 無線振動モニタリング機器配置の概略図

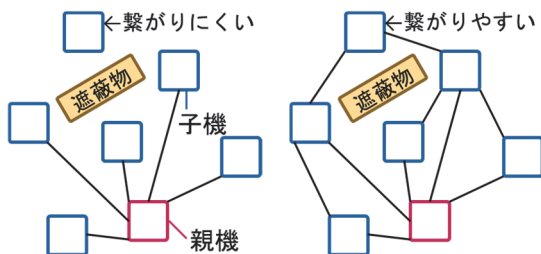


図-2 スター型トポロジー (左) とメッシュ型トポロジー (右) の通信経路の模式図

かつ伝搬距離による減衰が小さい。よって遮蔽物を回り込んでの通信や長距離の通信がしやすい。一方で、周波数が高いほど通信速度が高く、容量が大きいデータのやりとりに適している。

②については、現在販売されている無線モニタリング機器のほとんどがスター型またはメッシュ型トポロジー (図-2) を使用している。メッシュ型トポロジーは通信経路に冗長性があり、子機と親機の間には遮蔽物があっても別の経路から通信が可能である。

通信方式ごとの以上のような既知の性質を踏まえ、通信周波数とネットワークトポロジーの組み合わせが異なる4種の無線モニタリング機器 (表-1) を実験に使用した。

表-1 4 製品の通信周波数とネットワークトポロジー

	製品A	製品B	製品C	製品D
通信周波数	920 MHz	920 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
ネットワークトポロジー	メッシュ	スター	メッシュ	スター
加速度計の方式	MEMS	圧電	圧電	MEMS



写真-1 トンネル実験を行った施設



写真-2 排水機場実験で使用した施設

2.3 実験施設

トンネルの実験には国土技術政策総合研究所内の実大トンネル実験施設を使用した。本施設は断面が高さ約5.5mの半円形で、コンクリートの覆工を持つ。ジェットファンを模擬するため、送風機をリフト車で持ち上げて実験を行った (写真-1)。

排水機場の実験は関東地方整備局古ヶ崎排水機場で行った。本機場は2台のポンプ設備を有し、二床式である。減速機周辺の一部はコンクリートの床板が無く鋼製架台に鋼製蓋が置かれている (写真-2)。

2.4 トンネルでの実験手順

- I 坑口付近に無線振動モニタリング機器の親機を置く。これは無線モニタリング機器の親機はAC100V電源を必要とすることが多く、実際の施設で使用する場合も、電源が取りやすい坑口付近に親機を設置する可能性が高いためである。
- II ジェットファンを模擬した送風機に無線振動モニタリング機器の子機を取付け、発電機とともにリフト車に載せる。

Ⅲ リフト車を親機から 10m、30m、100m、200m の地点に停め送風機を ON にして、振動の測定とデータ送受信をそれぞれ行う。この際、メッシュ型トポロジーの機器はリフト車と親機の間の中継用の子機を設置する。

V リフト車と親機の間には遮蔽物となる乗用車を止め、Ⅲを再度行う。ただし、メッシュ型トポロジーを持つ機器は監査路に中継機を置くことで乗用車による遮蔽を回避できるため、乗用車を停めた状態での実験は行わなかった。

2.5 排水機場での実験手順

- I 製品A~Dの親機をエンジン室に設置する。
- II ポンプ室の主ポンプケーシング 1 号機に製品 A と製品 C の子機を、2 号機に製品 B と製品 D のセンサをそれぞれ設置する。メッシュ型トポロジーの機器はエンジン室に中継機を設置する。この際、親機と中継機間は見通すことができ、中継機と子機間は溝蓋で遮蔽されている。
- Ⅲ MEMS式加速度センサと圧電式加速度センサの測定値を比較するため、減速機に製品Bと製品Dのセンサを設置する。減速機に設置するのは、同じ階の親機と、確実に通信できるためである。
- IV 1号機および2号機の管理運転に併せて振動の測定とデータ送受信を行う。

3. 結果と考察

3.1 トンネルにおける高信頼性無線通信の条件

トンネルでの通信の可否を製品ごとにまとめたものを表2に示す。乗用車による遮蔽のないトンネルでは製品A、B、Cが距離200mまで成功し、製品Dは距離10mでのみ成功した。スター型トポロジーを持つ製品B、Dについては乗用車による遮蔽を伴う実験を行ったが、製品Bは乗用車が無い実験と同様距離200mまで成功し、製品Dは距離10mでの通信の成功確率が低下した。

以上の結果より、乗用車による遮蔽のないトンネルにおいては、通信周波数帯が920MHz、もしくはメッシュ型トポロジーを持つ無線モニタリング機器であれば通信の信頼性を確保できることが分かった。また、停まった乗用車による遮蔽が通信の信頼性に与える影響は大きくないことが分かった。

したがって、トンネルにおける無線通信の信頼性確保には、長距離通信に適した比較的低い周波数帯を使うこと、または中継機を使うことで子機親機間

の距離を大きく取れるメッシュ型トポロジーを使うことが有効であると言える。

3.2 排水機場における高信頼性無線通信の条件

エンジン室とポンプ室間での通信の可否を製品ごとにまとめたものを表-2に示す。親機のあるエンジン室に設置した子機については製品A、B、Dの全てで成功した。製品Cはエンジン室に子機を設置していなかったが、同室に設置した中継機との通信の確立には成功した。一方、ポンプ室に設置した子機については製品A、Bは成功したが、製品C、Dでは通信の成功確率が低下した。

以上の結果より、二床式の排水機場において鋼製蓋を越えて通信を行う場合、ネットワークトポロジーに関わらず、通信周波数帯が2.4GHzの無線モニタリング機器よりも920MHzの無線モニタリング機器を使う方が、信頼性が高くなることが分かった。

したがって、二床式の排水機場における無線通信の信頼性確保には、高い回折性を持つ比較的低い周波数帯を使うことが有効であると言える。

3.3 MEMS式加速度センサの適合性

MEMS式加速度センサは微細加工技術を使って作製された微小な梁のたわみによる静電容量の変化から加速度を測定する。圧電式加速度センサと比べ、比較的軽量・小型であるため、無線振動モニタリング機器で使用されることが多い。

圧電式加速度センサを使用する製品Bと、MEMS式加速度センサを使用する製品Dで測定された値(図-3)を比較した。その結果、ポンプ運転時において製品Bと製品Dの測定値の平均の差は、製品Dの測定値の標準偏差 σ の3倍より小さかった。

土木機械設備の状態監視においては、測定値が平均値 $\pm 3\sigma$ から外れた場合に無視できない差であるとして、機器の破損の可能性について帰無仮説を棄却するものとしている⁹⁾。よって、製品Bの測定値の平均は、製品Dの測定値の平均 $\pm 3\sigma$ の範囲に収まっていることから、製品Bと製品Dの測定値に大きな差はなかったと言える。

このことは、MEMS式加速度センサを搭載した無線振動モニタリング機器であっても土木機械設備に適合しうることを示唆するものである。

表-2 通信試行実験の結果（各製品の特徴は表-1を参照）

実験条件	製品A	製品B	製品C	製品D
トンネル（乗用車無）				
10 m	○	○	○	○
30 m	○	○	○	×
100 m	○	○	○	×
200 m	○	○	○	×
トンネル（乗用車有）				
10 m	—	○	—	△
30 m	—	○	—	×
100 m	—	○	—	×
200 m	—	○	—	×
排水機場				
エンジン室	○	○	—（中継機との通信は成功）	○
ポンプ室	○	○	△	×

凡例：○100%受信成功 △50%以上100%未満受信成功 ×50%未満受信成功 —実験なし

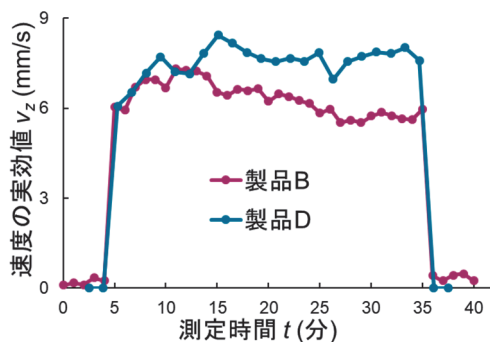


図-3 製品B、Dで減速機を測定した振動速度の鉛直方向成分の実効値

4. 結言

トンネルと排水機場で無線振動モニタリング機器の試行実験を行った。その結果、排水機場ではネットワークトポロジーを問わず回折性の高い920MHzの周波数帯を使う機器を使えばよいことを示した。

一方、乗用車による遮蔽のないトンネルでは回折性の高い920MHzの周波数帯を使う機器、または経路に冗長性のあるメッシュ型トポロジーを持つ機器を使えばよいことを示した。

また、無線モニタリング機器に搭載された圧電式加速度センサとMEMS式加速度センサでは、測定

値に大きな差がなく、MEMS式センサが土木機械設備に適合しうることが分かった。

一方で、トンネル断面の寸法や形状、排水機場建屋の大きさや溝蓋の種類といった条件は施設ごとに異なる。このような条件の違いが無線通信の可否に影響する可能性は否定できない。そのため、現状では本研究の結果が必ずしも全ての施設に当てはまるとは言い切れない。

施設の条件が変化することによって、通信の信頼性を確保するためのネットワークトポロジーと通信周波数の組合せがどのように変化するか明らかにすることは今後の課題である。

謝 辞

古ヶ崎排水機場での実験は、管理者である国土交通省 関東地方整備局 江戸川河川事務所の協力を得て行った。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川ポンプ設備状態監視ガイドライン（案）、2018
- 2) 国土交通省：トンネル換気設備（ジェットファン）状態監視ガイドライン（案）、2018

金森宗一郎



国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター社会資本施工高度化研究室 研究官
KANAMORI Soichiro

田中義光



国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター社会資本施工高度化研究室 主任研究官
TANAKA Yoshimitsu

山下 尚



国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター社会資本施工高度化研究室長
YAMASHITA Hisashi