

トンネル内附属物保全モニタリングシステムの実用化についての研究

野村 貢¹・戸本悟史²・西條敦志³・木村定雄⁴・芥川真一⁵

¹正会員 株式会社建設技術研究所 東北支社 (〒980-0014 仙台市青葉区本町2-15-1)
E-mail:nomura@ctie.co.jp

²正会員 株式会社建設技術研究所 東京本社 道路・交通部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)
E-mail:tomoto@ctie.co.jp

³非会員 曙ブレーキ工業株式会社 新規・センサ事業部 (〒384-8509 埼玉県羽生市東5-4-71)
E-mail:a_nishijo@akebono-brake.com

⁴正会員 金沢工業大学 環境・建築学部 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1)
E-mail: s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

⁵正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市東灘区六甲台町1-1)
E-mail:cadax@kobe-u.ac.jp

トンネル内附属物落下事故の教訓として、点検を定期的に行っているにもかかわらず、落下など第三者被害に結びつく構造物、附属物があることが判った。さらに、従来実施されている点検手法では、附属物を壁面に固定した後打ちボルトの健全性を十分に把握しきれないことも明らかにされた。

一方、経済的で高性能なセンサー類の技術向上が、社会インフラにおけるモニタリングの実用化を促進している。

本研究は、道路トンネル附属物のうち照明器具に着目し、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術によるセンサーを活用したセンシング方法を提案し、実用性の検証を行った既往研究を踏まえ、既往研究時の課題を検証する実験を行うとともに、実用化を視野に入れたトンネル保全モニタリングシステムとしての提案を行った。

Key Words : tunnel, lump, MEMS, maintenance, vibration, monitoring system

1. はじめに

2012年12月に発生した中央自動車道笹子トンネルの天井板落下事故は、建設後約40年にわたり使用されてきた後打ちボルトによる天井板定着が劣化損傷し、コンクリート製天井板が落下した事故であり、9名の人命が失われた。この事故をひとつの契機に、適切な維持管理活動を継続的に実施することにより維持管理費の費用最適化を図ることが可能になるというアセットマネジメントの考え方¹⁾に基づき、すべての社会資本を点検し、補修や更新を確実に行っていく仕組み作り²⁾が急速に進められ、道路メンテナンス年報などその結果の公表も進められている。しかし十分に技量のある点検員が不足し実施体制の確保が困難であるほか、地方自治体では維持管理に知識のあるインハウス技術者の不足、維持管理費用の不足などが顕在化している状況である³⁾。

笹子トンネルの天井板落下事故は、トンネル構造体以

外の附属物の管理のあり方についても問題を提起している。これまでのトンネル点検は覆工コンクリートを主体としたものであり、照明や換気設備、情報提供設備、ケーブルラック、点検通路、その他機器については脱落すれば利用者被害を生じる可能性は認識されていたものの、定期更新を前提にあまり重要視されていなかった。

国土交通省道路局では、これまでの点検や損傷知見を踏まえ、2015年6月に「附属物(標識・照明施設等)点検要領」、「道路トンネル定期点検要領」を公表しているが、トンネル内附属物については、本体や取付け部の劣化などについて最小限の点検しか示されていないのが現状で、個別トンネルの健全度に対する評価の外に置かれており、附属物の健全度管理という点ではまだ多くの課題が残されている。

このような状況は、道路橋梁においても同様であり、道路トンネルと同時期に公表された「道路橋梁定期点検要領」には、附属物である後打ちボルトで下部工に取り

付けあるいは上部工に取り付けられた点検通路についての点検、評価に関する項目自体が取り上げられていない。

定期点検実施時以外に点検員が点検通路を使用することはないので、多くの場合で数年の間隔を空けて点検通路は使用されることになるが、点検通路を点検してから本体部の点検を行うという手順は組み込まれていないので、前回定期点検以降の劣化進行による点検通路の脱落や落下による点検員の事故、あるいは劣化進行により自然落下することによる第三者被害の発生に対して十分な予防措置が図られているという状況とはいえないと考えられる。

本研究では、野村ほか⁴⁾が実施したトンネル照明器具の取付け異常を検知するためのセンサー基本性能試験において認識された課題について、照明器具の特性に着目して検討と実験を深め、実用化に向けた知見を得ることを目指した。

2. 研究目的

(1) トンネル内附属物の落下と点検の現状

トンネル内附属物に着目して、2010年以降にわが国で落下が報告されているものは、2010年7月に首都高山手トンネルで内照式案内板が落下、2012年4月に新東名葛山トンネル（下り）で照明器具前面ガラスが落下したことが道路管理者の記者会見資料等で報告されている。2012年12月には国道108号片倉森かがやきトンネルで機器更新後16年を経過した照明器具が落下したほか、国道8号俱利伽羅トンネルで照明器具枠が落下し車両を直撃する物損事故が発生していることが報道されている。さらに2015年8月には東名高速道路宇利トンネルにおいて、更新設置から19年を経過した照明器具が落下し、通行車両に接触、損傷させる事故が発生している。

換気施設の落下事故は、国内においてジェットファンが落下した事例は報告されていないが、笹子トンネルの天井板と同様の事例としては、走行中車両1台が被災した2006年のボストンBigDig（Ted Williams Tunnel）の天井板落下事故⁵⁾が知られている。

ここで2015年8月に発生した東名高速道路宇利トンネルの落下事例に着目する。本事例では、道路管理者により事象調査検討会が設置され、原因の究明および今後の対応方針についての検討が行われた。

本事例は、設置後19年経過した照明器具が落下、給電ケーブルにより車道空間に垂れ下がった状態となり、これに走行中の大型車両が接触したものである。落下した照明器具は、鋼製本体箱に冷間圧延鋼板により製作された取付け脚を溶接止めして塗装したもので、これを2種類の取付け金具を介して4点で覆工コンクリートに固定

する構造であった。直接の落下原因は、この4本の取付け脚が著しい腐食により破断したと考えられ、通行車両による振動などにより取付け脚が疲労破壊した可能性については、否定的に考えられている⁶⁾。

本トンネルでは2003年、2007年、2010年、2013年、2015年の5回にわたり照明器具の点検が実施され、その方法は高所作業車を用いて近接目視かつ触診を行い、亀裂、損傷、腐食および取付け状況の確認を行うものとしていた。点検による対応として、取付け脚の破損、ぐらつきは器具撤去、ボルトナットの欠損は仮補修で対応することとしていたが、2013年までの点検ではぐらつきは検出されておらず、2015年に15台が報告されている。

2013年の点検は笹子トンネルの天井板落下事故を受けて実施された点検、2015年は本トンネルの照明器具落下事象を受けて緊急実施されたもので、特に取付け部に注目して実施されており、不注意による見逃しは考えられない。また、急激に取付け脚、金具の劣化が進行することも考えられないので、2013年の点検では、点検員が実際にぐらつきを検出できなかったと考えられる。さらに事象調査検討会が実施したトンネル照明器具の「揺すり」再現試験において、照明器具を固定する取付け脚が薄肉化しただけでは複数の被験者がいずれも異常を認識できなかったことが報告されている。

これらの結果から判断されるのは、現行のトンネル内附属物の取付け状態の点検方法では、破断などの構造破壊が生じていれば異常検知できるが、劣化進行はその程度も含め検知できないということである。これは笹子トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会が最終報告において、近接点検は引抜き強度を喪失した後打ちボルトを捕捉するには有効としながらも、個々のボルトの引抜き強度の正確な把握はできないことが確認された⁷⁾としていることとも整合する。

(2) 現行点検方法の課題

国土交通省道路局の「道路トンネル定期点検要領」では、トンネル附属物の点検は、覆工コンクリートの定期点検に合わせて実施することが推奨されており、道路の通行規制を行ったうえで高所作業車を用いて対象器具に接近し、近接目視および打音検査、触診等により取付け状態を確認することとされている。

しかし、先に述べた「揺すり」再現試験の事例や笹子トンネルの調査報告に見るように、取付け金具のかみ合いなどにより破断に至るまで点検員が検知できない、あるいは打音検査でも完全に機能喪失している取付けボルト以外には異常を識別できないことも明らかになってきている。

このような状況を踏まえ、筆者らが考える現行点検方法の課題は以下である。

- a) 通常の目視，打音検査や触診では，破断や機能喪失段階まで劣化進展しているもの以外に異常検知できないため，異常検知から通行規制，保守あるいは撤去，通行規制解除までのタイムラインが成り立たない。
- b) 近接目視だけでは異常検知が困難なため，多数の附属物取付け部に対して引抜き試験など高いレベルの検査を行わなければ，劣化進行している取付け部を検出しきれない。

ここでタイムラインとは，野村ほか⁴⁾が異常検知から通行規制解除までの防災行動計画を，異常検知から落下までの時間猶予と関係付けて提案しているものである。すなわち，式(1)が利用者安全性の判断指標となる。

$$T1 > T2 \quad (1)$$

ここで $T1$ は異常検知から対象附属物が落下するまでの時間， $T2$ は異常検知から通行規制を実施し補修，撤去などの対応を行い，通行規制を解除するまでの時間あるいは，非常に緊急性が高い場合において，緊急通行規制し落下物直下に利用者が進入することを阻止する時間である。

(3) 保全モニタリングシステム

道路トンネル附属物の供用に影響を与えるような不具合が生じていないかどうかの測定技術に，利用者被害防止のための異常判断，表示（通報）の仕組みを加えたシステムをここでは「トンネル内附属物保全モニタリングシステム」（以下，保全モニタリングシステム）と定義する（図-1）。

道路トンネルの性能規定化は，性能設計の流れとともに研究が進められ，木村，森山ほか^{9),10)}が高速道路トンネルの要求性能の規定化について具体案を提示している。

野村ほか⁴⁾はこれに基づき，保全モニタリングシステムへの要求事項を整理，提案している（表-1）。

ここで，保全モニタリングシステムにおいて，測定，異常判断，表示（通報）の各プロセスは独立して設計可能であるとすると，保全モニタリングシステムは，3つのプロセスとプロセス間のコミュニケーションからなり，各プロセスとコミュニケーションに保全モニタリングシステムの要求事項を満たすための性能が規定できる。

本研究で取り扱う「測定」プロセスの要求事項は以下であると考えられる。

- a) 変位，振動等の挙動変化を必要なレベルで捕捉可能であること
- b) 必要な時間内（タイムスパン）でデータを取得，次プロセスに送信できること
- c) 必要な耐久性を有していること

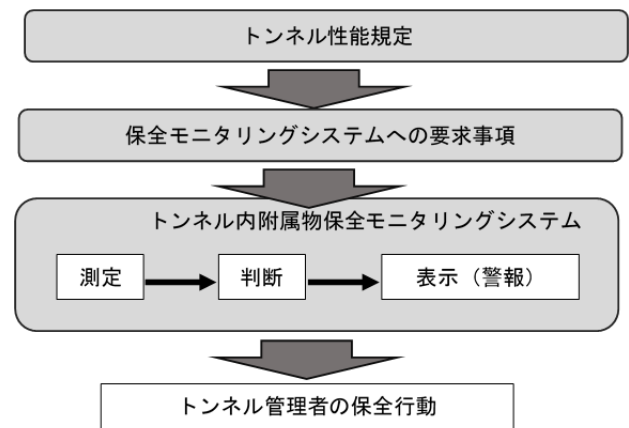


図-1 トンネル性能規定からみた保全モニタリングシステムの体系

表-1 トンネル内附属物保全モニタリングシステムへの要求事項⁹⁾

性能項目	要求事項
利用者の安全性能	・対象附属物の個別の挙動を把握すること ・異常検知から対象附属物の落下までの利用者被害防止に係るタイムラインが機能すること
利用者の使用性能	・異常検知後の通行規制時間を最小化すること
管理者の維持管理性能	・メンテナンスフリー，自己診断機能により，本システム単独での通行規制による維持管理を必要としないこと

野村ほか⁴⁾のセンサー基本性能試験では，MEMS技術による傾斜センサー，振動センサーはこれらの要求事項を満たすことが確認できたが，主に照明器具および取付け方法に起因する課題も確認されており，実用化に向けて検討が必要とされた。

(4) 本研究の目的

本研究は，トンネル内附属物において利用者や点検者の安全を確保するため，現行点検方法の課題として意識される，通常の見視，打音検査や触診では検知できない早期の異常を検出する計測技術を確認することを目的としている。

式(1)において，現段階で $T1$ を合理的に説明可能なモデルは研究途上であるが，より早期に異常検知し $T1$ を大きくすること，あるいは $T2$ を短縮するすることが利用者安全性につながる事が分かる。本研究は，異常の早期検知を実現することにより， $T1$ を拡大して式(1)の成立をめざすものである。

野村ほか⁴⁾が実施したトンネル照明器具の取付け異常を検知するためのセンサー基本性能試験では，廉価性や信頼性に優れたMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術による傾斜センサーと振動センサーに着目し，基礎実験として異常検知能力があることを確認した。一方で，照明器具の函体構造や壁面への取付け方法により変位，振動の特性変化が複雑であることも確認された。

そこで，本研究では照明器具の構造に着目して，その

振動特性や異常発生時の変化の現れ方を確認し、MEMS技術による振動センサーを用いるにあたって最適な振動計測の方法を提案することをめざした。

3. トンネル照明器具の振動検知による異常検知

(1) MEMS技術によるセンサー活用

野村ほか⁴⁾の既往研究では、保全モニタリングシステムにより異常検知から管理者への表示（警報）を短縮し、管理者の保全行動の速やかな初動につなげることを目的とした。これによりTIを最短化し、式(1)を成立させるには、できるだけ初期の段階で附属物の取付け部劣化を検出することが重要であり、劣化による状態変化の指標として附属物の姿勢変化および固有振動数の変化に着目し、変化が微小な段階からこれを検出することを目標としてきた。

これらを低コストで実現する方法として、本研究ではMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術によるセンサーに着目する。現在の自動車やスマートフォンは、姿勢検出のために多数の高精度センサーが取り付けられており、廉価で高精度、高耐久なものが提供されている。これを活用することができれば、センサーの品質や耐久性に対して信頼性を確保しつつ大量生産による廉価性を保全モニタリングシステムに活かすことが可能になる。ここでMEMSとは、半導体微細加工技術等を応用して、微小な電気回路と微細な機械要素を集積させた微細なデバイスのことである。

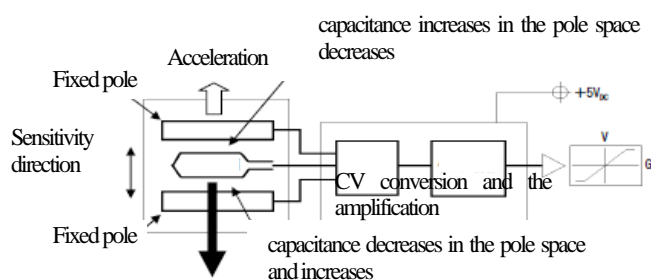


図-2 MEMS技術による加速度センサーの構造

表-2 振動センサーの主要性能

性能項目	仕様	備考
測定軸数	3軸 (X-Y-Z)	
使用電圧範囲 V_{DD}	$5 \pm 0.25V$	
検出加速度範囲	$\pm 19.6m/s^2$	
オフセット出力	$V_{DD}/2V$	
感度	$1 \pm 0.05V/G$	$1G=9.8m/s^2$
周波数特性	DC~128Hz(-3dB)	
サンプリング	512Hz	
分解能	16bit	
測定軸数	3軸 (X-Y-Z)	

MEMS技術の特徴は、半導体微細加工技術を使って大量生産することにより安価になる可能性を有することで、現在の自動車用加速度センサーやスマートフォン用モーションセンサーに代表される。MEMS応用製品は、いろいろな機能を持ったデバイスを小型集積化し、ひとつのパッケージにセンサーやアクチュエータ等が搭載された構造体であり、これらの要素を並べることで、高機能、高性能化が可能である。

民生用での活用事例としては、たとえばインクジェットプリンター用インク噴出し部などがある。今日、MEMS応用製品は情報通信、医療、バイオ、自動車、ロボット、航空、宇宙等の広範囲な分野で小型、高精度、省エネルギー性に優れた高機能な製品として期待されている。

土木分野における適用は、2001年に旧日本道路公団試験研究所が孔内傾斜計として、当時自動車用に提供されていたMEMS技術による加速度センサーを用いて開発が始まった。

それまで孔内傾斜計には機械式のものが一般的に使用され、測定精度が非常に高い反面、高額であり、密度の高い計測を行うことが経済的に難しい状況であった。土木分野における高密度かつ経済的な計測を目的とし、旧日本道路公団では、第二東海自動車道横浜名古屋線、横浜横須賀道路、中央自動車道、関越自動車道、山陽自動車道等の高速道路切土現場で適用試験¹¹⁾を進めてきた。

その結果、現在では国内計測機器メーカーにより、MEMS技術による加速度センサーや圧力センサーを適用した地盤計測ツールが市販されている^{12),13)}。

MEMS技術による加速度センサーは、微細加工技術により振り子形状をチップ上に切り出し、これを固定電極で挟み込む構造で、センサーに作用する慣性力により生じる電位差を検出し、出力するものである（図-2）。

供用中の道路トンネルの照明器具に振動センサーを取り付け、自動車走行に起因する振動の計測実験⁹⁾の結果から、100Hz付近に卓越したスペクトルが検出されており、本研究では、MEMS技術を活用した比較的低周波に良く反応する表-2のセンサーを採用した。

(2) 既往研究の課題

トンネル照明器具（写真-1）は、概ね20kg以下で、覆工コンクリートに後打ちボルトで取付け金具を固定し、この取付け金具と照明器具本体をボルト等で締結する方法で設置されている。標準的な取付け方法では、照明器具1台は4本の後打ちボルト（以下、取付けボルト）で壁面に固定されており（図-3）、トンネル内での取付け位置は、建築限界に支障しない範囲で、上部に取り付ける。そのため脱落した場合には、車道や路肩、歩道など利用者空間に落下することになる（図-4）。

野村ほか⁴⁾は、これまでにトンネル内附属物として最も多く設置され、落下すれば利用者空間に支障する道路トンネルの照明器具に着目し、専用の実験装置（図-5）を製作した。これにより照明器具の降下状況を再現、MEMS技術による加速度センサーにより姿勢変化および固有振動数の変化を観測し、異常検知のセンサー適用性について検証した。

傾斜センサーを用いた姿勢異常検知としての考え方は、取付けボルトが劣化など何らかの原因で変位することを想定し、そのような場合に4本の取付けボルトが全く同様に重力方向に変位し、照明器具の面内姿勢が変化しないまま降下することはないので、照明器具に何らかの姿勢変化が起きるはずである。この姿勢変化を初期段階で計測しようとするものである。

振動センサーを用いた異常検知としての考え方は、覆工コンクリートに定着された照明器具はある固有振動数をもっているが、覆工コンクリートとの取付けボルトの定着や取付け金具とフレームボックスの固定、前面ガラスの固定に何らかの変化が生じると振動系が変化し、固有振動数も変化すると考えられる。この変化を振動センサーで計測しようとするものである。計測が成功すれば経時変化を記録するとともに、ある段階で閾値を与えて異常と判断すれば、異常検知として成立すると考える。

振動センサーは、実験において微小変化を捉えており、MEMS技術によるセンサーを用いて保全モニタリングシステムの計測プロセスを構築することが可能であると考え

えられた。同時に明らかになったのは、以下である。

- コンクリート壁面に照明器具を固定する4本の取付けボルトを1本ずつ緩める実験から、固定箇所が少なくなると卓越する固有振動数が低下することがわかったが、どのようなメカニズムにより固有振動数の低下が生じるのかの知見は得られていない。
- 振動センサーの測定軸方向により、比較的敏感な方向と鈍感な方向が見られるが、軸方向の変位事象と固有振動数変化を明確に関係づける知見は得られていない。

振動センサーの実験では、基礎実験として供用中の道路トンネルに設置されている照明器具の、さまざまな位置にセンサーを取り付け、最も感度の良い取付け位置と軸方向に着目して現地実験を行った。実験装置では、1から4箇所の取付けボルト固定を解くことにより固有振動数が段階的に低下していくことを確認した。これにより、取付け部の状態変化により照明器具の固有振動数が特徴ある変化を起こすことを用いて異常の発生を検出し

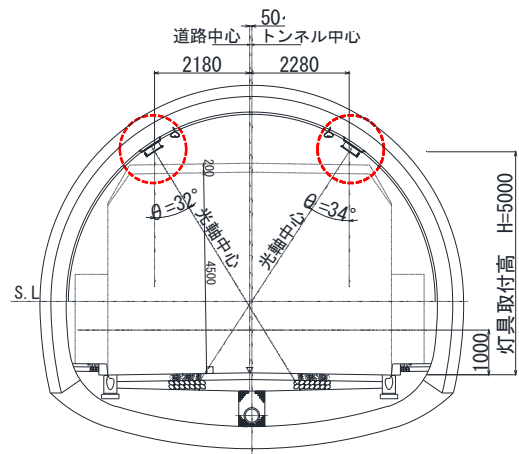


図-4 トンネル内での照明器具取付け例



写真-1 標準的なトンネル照明器具（LED基本照明用）

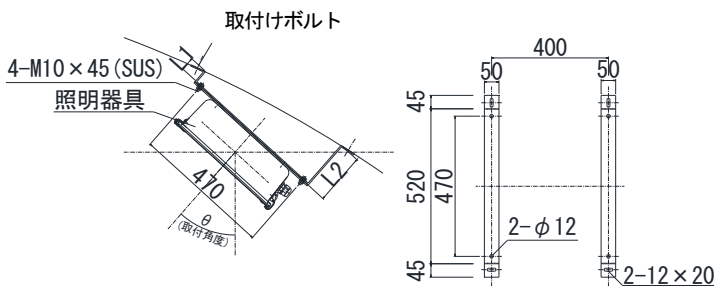


図-3 取付け金具および取付けボルト詳細

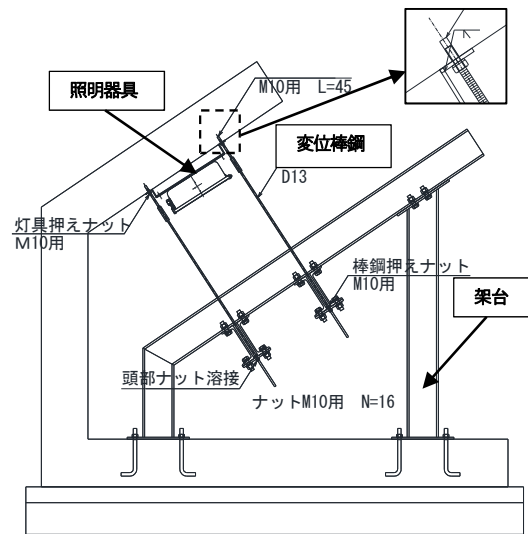


図-5 照明器具降下実験装置

通知することは可能であることはわかったが、特に初期段階において実際に照明器具がどのような状態にあるかを確実に推定するためには照明器具函体の振動に対する知見を深める必要があると考えられた。

4. 異常検知の課題への対応（その 1）

(1) 課題検討の方法

課題 a) を検討し、照明器具函体がどのように挙動しているか理解するため、既往実験結果をFEM解析により再現すること、および照明器具実機を用いて実際にどのような変形をしながら振動しているのかを観察するための実稼働解析（ODS解析：Operating Deflection Shapes）を試みた。

課題 b) に対しては、課題 a) に対する解析結果を踏まえ、最適な振動センサー取付け位置を考察した上で、既往実験と同様の実験とともに、制御された振動を起振機によって与えることにより、変状事象と固有振動数変化を既往実験よりも正確に関連づけることを試みた。

(2) 課題の検討（FEM解析による実験結果の再現）

照明器具および取付け部がどのような振動挙動をしているのかを理解するため、FEMによる応答解析を実施し、実験装置による振動実験の解析的再現を試みた。

解析は、試験装置全体をモデル化するものとし、地盤はバネ要素、基礎と壁面体はソリッド要素、照明器具はシェル要素でモデルを構築（図-6）、コンクリート壁面体と取付け金具の接続は、取付けボルトをバネ要素でモデル化し、バネの切断とバネ値低下で破断や劣化による固定の性能低下を表現できるようにした（図-7）。地盤物性値はPS検層結果から得られた表層地盤のせん断波速度より設定し、表層地盤の平均せん断波速度は120m/sである。地盤のバネ定数は「道路橋示方書」の地盤反力係数でせん断波速度より計算し、バネ端部を固定する。

なお、照明器具は函体のなかにLEDなどの灯具および電気回路などの内容物を組み込み、前面ガラスを取り付けた構造である。製造者ごとにその内容や函内での配置は異なるため、ここでは内容物を含む全体重量を等厚の鋼板にモデル化した。表-3に壁面体、基礎、照明器具の物性値を示す。

解析プログラムはSoil+Dynamicを用い、入力振動は、実験と同様に試験装置のそばで重機を走行させた振動を直下方向に与えることとし、試験装置のそばで重機を走行させた振動を点加振で再現した。なお、解析振動数は0Hzから110Hzまで、0.2Hz刻みとした。

解析結果の着目位置は、試験装置による実験と同様、照明器具上部の振動センサー取付け位置とする。

表-4に解析実施したケースを一覧する。Case0の全固定から3点緩みのCase3まで、振動実験の各ケースと対応しており、1点ずつ取付けボルトのバネを切り固定を解除し、ボルトの脱落による固定の解除を再現した。

センサー位置での応答変位振幅をケースごとに比較すると、90Hz付近と63Hz付近にピークがあることが判る。このうち、90Hz付近のピークについて着目すると、実験値と同様に、卓越する応答変位振幅を与える固有周波数が低下することが判った（図-8）（図-9）。

FEM解析による卓越固有振動数の低下が実験値より小さく得られたことについては、照明器具の内容物を含む全体重量を等厚の鋼板にモデル化したことにより板厚が増し、見かけの剛性が高くなったことによると考えられる。また、実験では取付けボルトや取付け金具の施工誤差によるかみ合いの影響によりボルトを緩めても金具が完全に解放されないことがあるが、FEM解析では取付けボルトのバネを切ることで解放をモデル化したため、部

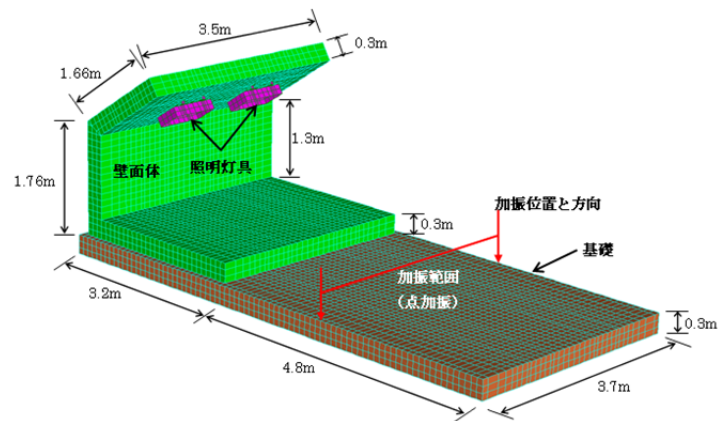


図-6 実験装置解析モデル全体図

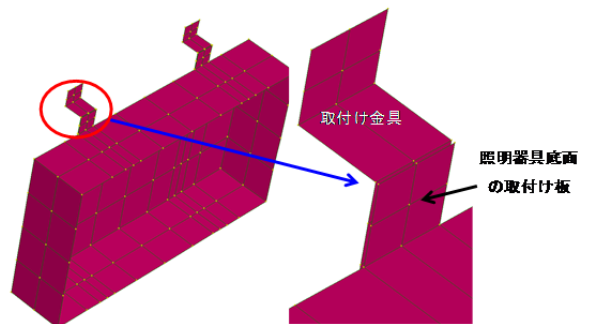


図-7 照明器具および取付け部モデル詳細図

表-3 解析モデルの物性値一覧

部材名	ヤング係数 N/mm ²	ポアソン比	単位体積重量 kN/m ³
壁面体	2.5×10 ⁴	0.167	24.5
基礎	2.2×10 ⁴	0.167	24.5
照明器具	2.0×10 ⁵	0.300	343.3

材間の接触は解けていないことも影響していると考えられた。

この結果から、実験装置において得られたボルト緩め本数による卓越固有振動数の変化が、実験装置の周辺環境や外部要因によってもたらされたものではないこと

が確認されるとともに、照明器具および取付け部のモデル化を精緻に行うことにより、解析的に閾値を考察することの可能性が確認された。

(3) 課題の検討（実稼働解析実験による検討）

トンネル照明器具は、鋼製の函体 に内部装置を取り付けて開閉式の前面ガラス蓋を取り付けたものであるが、函体は薄鋼板であるため振動時に変形している。FEM解析の結果も、照明器具函体の剛性が固有振動数の変化に対して関係があることを示唆している。そこで、実際にどのような変形をしながら振動しているのかを観察するために、実稼働解析を実施した。

表-4 解析実施ケースおよび解析結果一覧

Case	ボルト緩み	ボルト緩め配置	解析による卓越固有周波数	既往実験による卓越固有振動数
Case0	全固定	●ア ウ● ●イ エ●	92.6Hz	87Hz
Case1	1点	●ア ウ● ●イ エ●	90.8Hz	74Hz
Case2	2点	●ア ウ● ●イ エ●	89.8Hz	72Hz
Case3	3点	●ア ウ● ●イ エ●	87.8Hz	66Hz

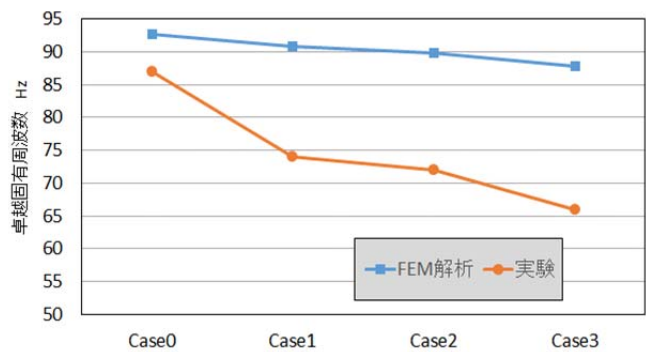


図-8 FEM解析と既往実験の比較

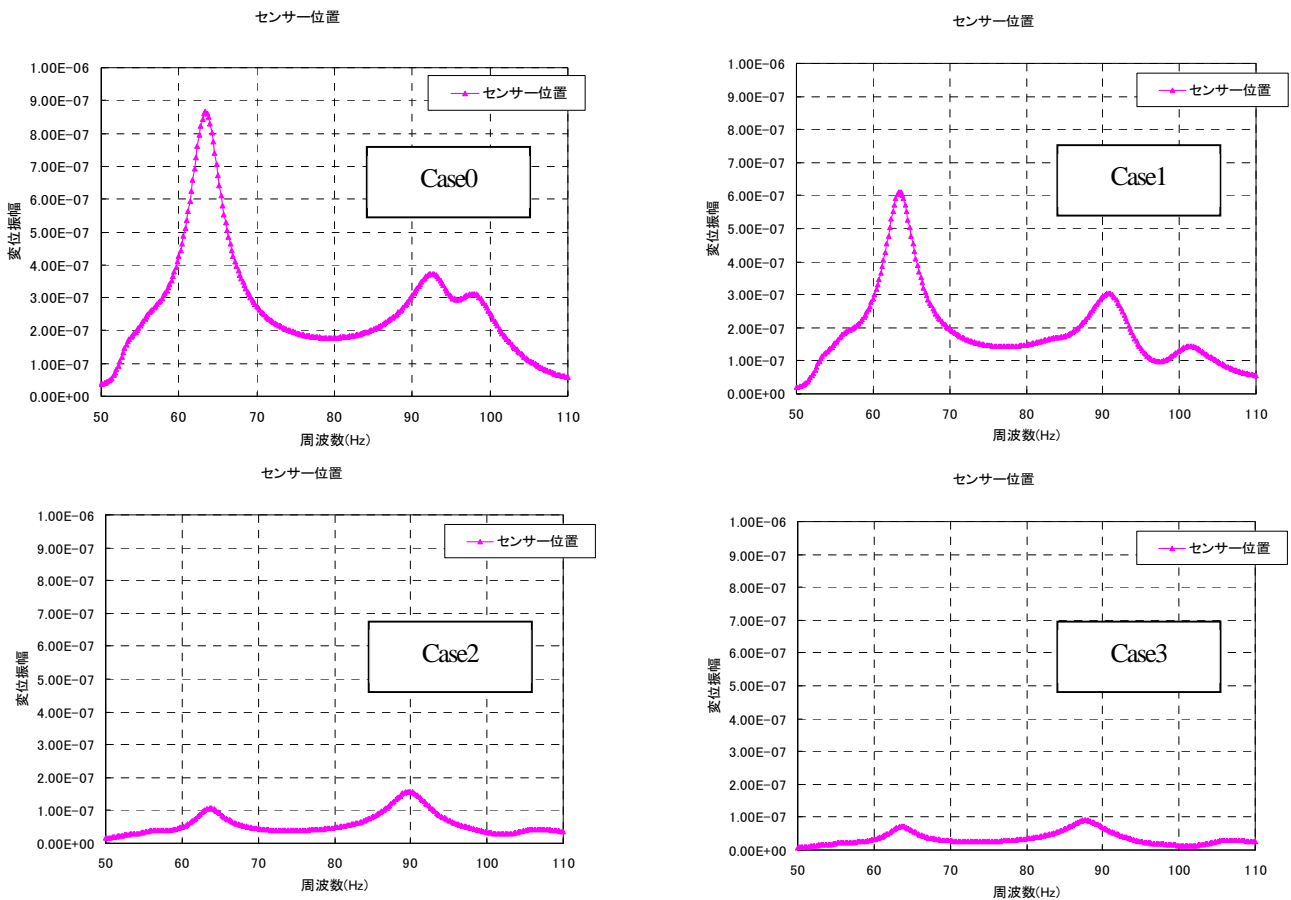


図-9 FEMによる応答変位振幅結果

実稼働解析（ODS解析：Operating Deflection Shapes）は、主に機械構造物の運転時の変形状態を可視化する技術で、強制振動を与えるなどした特定周波数での振動パターンを分析することが可能である^{14),15)}。

本研究では、照明器具函体の振動時変形を把握することを目的とするため、加速度ピックアップを函体に固定し、インパルスハンマーで打撃し振動を計測する。この計測波形データを実稼働解析し、函体の変形状態を可視化した。

まず、基本的な振動変形モードを把握するために、壁面に取り付ける前の照明器具函体について、取り付け金具を自由端としてインパルスハンマーを用いて打撃力を測定しながら振動を与えて振動測定を行い、可視化解析を行う。函体は薄板成形のため少しの外力で変形しやすいが、箱形構造のため方向により剛性が異なり、Y軸、Z軸では曲げやねじれ変形は発生しにくいと考えられる。剛性のやや低いX軸では曲げ、ねじれが発生し、これらの組合せや曲げやねじれが複数発生する2次モードが発生することが予想される。

取り付け金具が自由端となる照明器具単体の実験では、予想されたとおり、函体にねじれや曲げの変形モードが

現れており、函体の剛性が低いことの影響が強いと考えられた。通常のトンネル内での設置と同様に、取り付け金具を介して取り付けボルトにより試験装置に取り付けた状態での実験結果からは、4点固定の影響が強く現れており、振動の大きさは抑制されるが変形モードにおいては同様であることがわかった。

照明器具単体状態での実稼働解析による可視化結果を示す（図-10）。比較的低い周波数では、58Hzに1次曲げ、72Hz付近に1次ねじれが発生していることが確認された。周波数が高くなると、140Hz付近で2次曲げが発生することが確認された。

この結果から、野村ほか⁴⁾が実験により取り付けボルト緩めの影響が観察されるとし、本研究においてFEM解析によりボルト緩め影響を検討した60Hzから100Hzの周波数領域では、照明器具の振動は函体Y軸を中心軸としたX面での1次曲げ、1次ねじりにより照明器具函体が振動しているということが考察される。

照明器具函体に振動センサーを取り付ける位置としては、挙動が顕著なところが望ましいと考えられる。本解析の成果として、函体中央部ではなく、端部がセンサー取り付け位置として望ましいという知見が得られた。

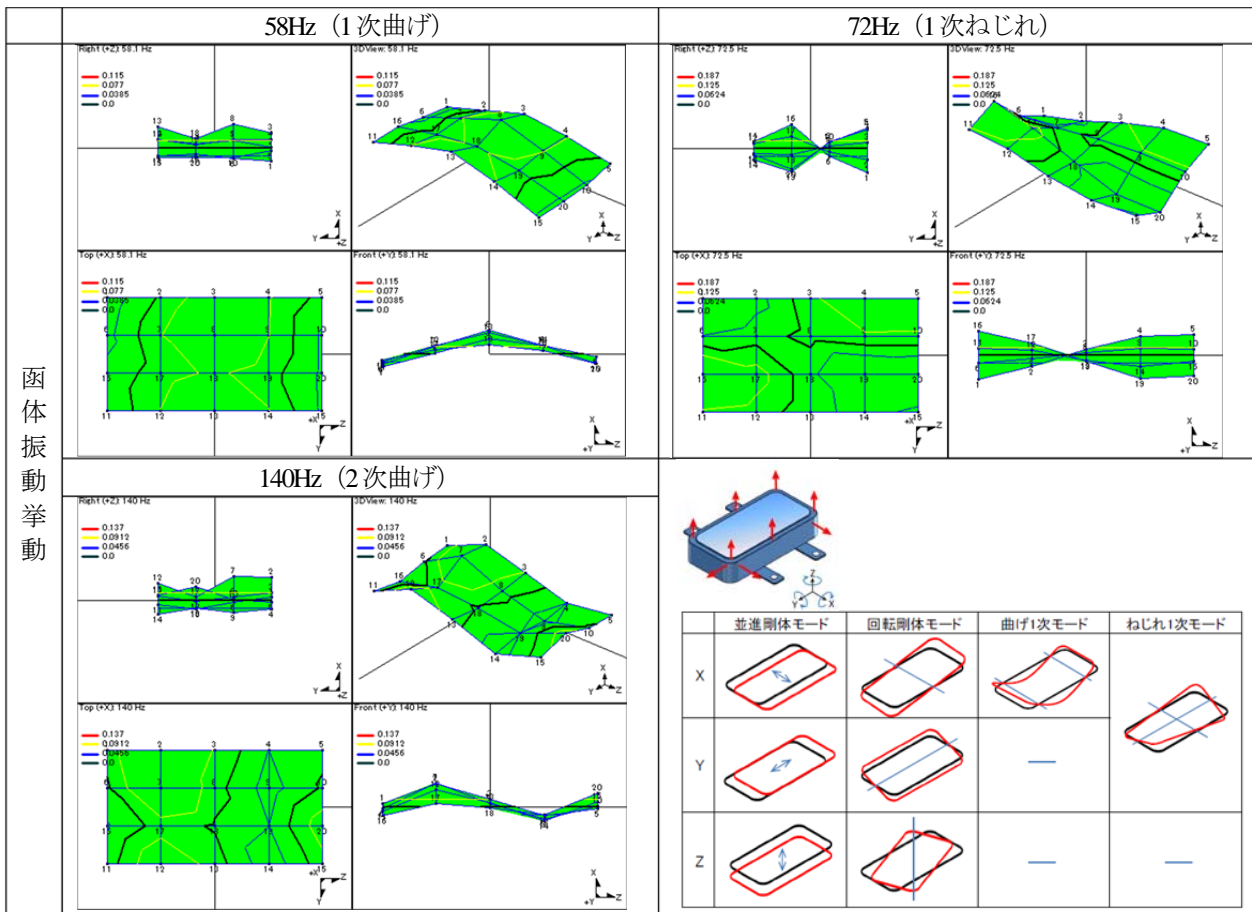


図-10 実稼働解析により可視化した函体振動実験結果

5. 異常検知の課題への対応(その 2)

(1) 課題検討の方法

3. に述べた課題b) の検討を進め、計測に適した振動センサー軸方向を検討するとともに、入力振動と取付けボルト緩みの関係の知見を得るため、制御された加振により振動検知を行う方法を確立する実験を行った。

これまでの振動実験では、試験装置を用いて照明器具をコンクリート壁面に固定、近傍を交通振動に見立てた重機を走行させ加振し、照明器具に取り付けた振動センサーで振動を計測する方法で、取付けボルトの固定を変化させることによる変化を報告してきた。この方法は、トンネル走行車両の振動特性に近く、比較的大きな振動を容易に加振できるが、加振力、振動特性が不安定で、精密実験には不向きであった。

制御された加振の方法としては、振り子等の衝撃による方法や電動機など起振機による方法がある。トンネル照明器具が定期更新を前提とした附属物であることや、さまざまな形状のトンネルに後付けされる機器であることを考慮し、工場での機器製作時に搭載や、すでに設置された照明器具に現地で後付けすることを可能とする照明器具に搭載可能な小型起振機の適用を試みた。

(2) 実験方法

実験は、これまでの実験⁴⁾で製作した試験装置(図-5)を用いて2段階に分けて行う。

- a) 既往実験と同様、重機走行による加振を行い、取付けボルト緩み影響を観察すると並行して、小型起振機による加振を行い、取付けボルト全固定時とさまざまな緩みケースについて試験する。両者の振動エネルギーを比較することにより、小型起振機の加振力と振動センサーの組合せによる計測が可能か確認する。
- b) a) により計測の可能性が確認されたら、小型起振機の加振により、取付けボルト全固定時とさまざまな緩みケースについて試験し、計測軸方

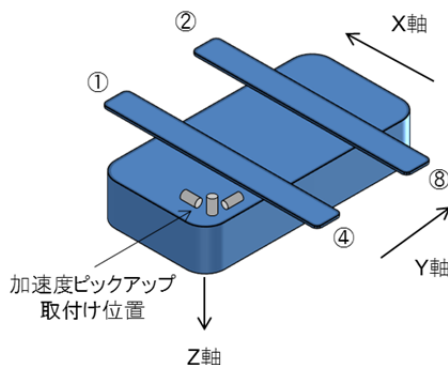


図-11 照明器具加振実験センサーおよび観察軸方向

向によるセンサー感度や振動特性の現れ方について確認、有効な観測軸について考察する。

まず、実際の照明器具取付けと同様にコンクリート壁面にドリルで穿孔し、機械式の後打ちボルトにより取付けボルトを設置、取付け金具(図-3)を介して照明器具の実機を取り付ける。

照明器具のセンサー取付け位置は、本研究の実稼働解析実験の知見から、高いセンサー感度が期待される器具端部とした(図-11)。振動センサーは、X、Y、Z軸それぞれに1軸の圧電式加速度ピックアップセンサーを用いる。

a)の実験では、重機走行と小型起振機による加振を取付けボルトの固定を変化させながらセンサリングして、固有振動数の変化とエネルギーを比較する。

b)の実験では、小型起振機による加振のみ使用し、全固定から取付けボルトの固定を変化させながらセンサリングし、全固定からの変化を観察する。

実験の実施ケースを表-5、加速度ピックアップおよび起振機の主要性能を表-6、表-7に示す。

表-5 照明器具加振実験実施ケース

Case	①	②	④	⑧
0				
1	○			
2		○		
3	○	○		
4			○	
5	○		○	
6		○	○	
7	○	○	○	
8				○
9	○			○
10		○		○
11	○	○		○
12			○	○
13	○		○	○
14		○	○	○

○：取付けボルト固定解除

表-6 圧電式加速度ピックアップセンサーの主要性能

性能項目	仕様
測定軸数	1軸
電荷感度	40pC/(m/s ²)
測定周波数範囲	1~3000Hz
取付共振周波数	9kHz
最大測定加速度	400m/s ²
使用温度範囲	-50~+160℃
静電容量	780pF

表-7 小型起振機の主要性能

性能項目	仕様	備考
使用電圧	DC1.5-6V	
回転数	5200rpm	40~120Hzを加振可能
振動シャフト	6×8mm	

(3) 実験結果 a)

まず、小型起振機（モーター）による加振による実験と近傍を重機走行させた走行振動による結果を観測軸ごとに比較する。

それぞれの軸方向について赤線が重機による加振、青線が起振機（モーター）による加振を示す。実稼働解析による実験から、50Hzから70Hz程度の周波数域では、照明器具函体は、1次ねじれまたは1次曲げの比較的単純な振動特性を持ち、140Hz程度の周波数になると2次曲げなど複雑な変形を生じることが知見として得られている。

この周波数領域を着目周波数域とすると、X軸、Y軸、Z軸いずれも起振機による加振が重機走行による加振の振動エネルギーに勝っており、搭載型の小型起振機でも振動センサーの感度に対して十分な加振を行えることがわかった。

軸方向別では、起振機による加振の場合において、X軸とY軸の振動特性（波形）が似ており、取付けボルト緩み本数が1本から3本まで増えるのと呼応して40Hzから60Hzの低い周波数域のパワーが強くなっている。一方で、Z軸ではこの傾向は見られず、緩み本数の増加を読み取るのは難しいと考えられる。

(4) 実験結果 b)

小型起振機でも振動センサーの感度に対して十分な加振を行えることがわかったことを踏まえ、小型起振機による加振で全固定（全締め）から1本緩み、2本緩み、3本緩みのすべてのパターンについて振動計測実験を行い、その結果を全固定と比較した。

その結果は、X軸方向とY軸方向は、周波特性の変化がよく似ており、各ケースにおける取付けボルト緩みの

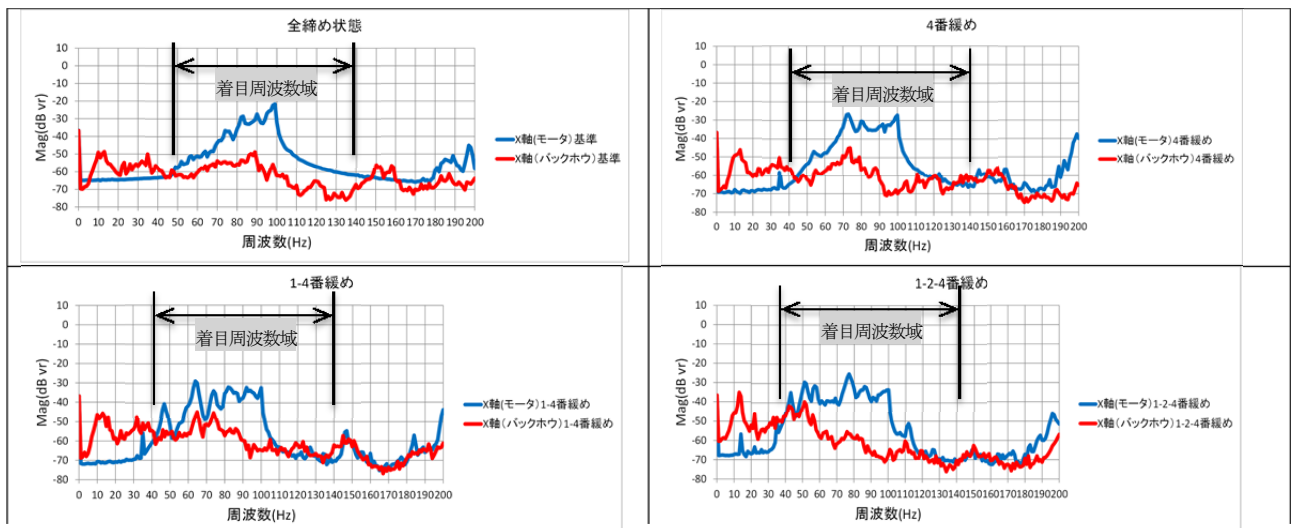


図-12 重機および起振機（モーター）加振の比較（X軸方向）

青：起振機（モーター）加振，赤：重機加振

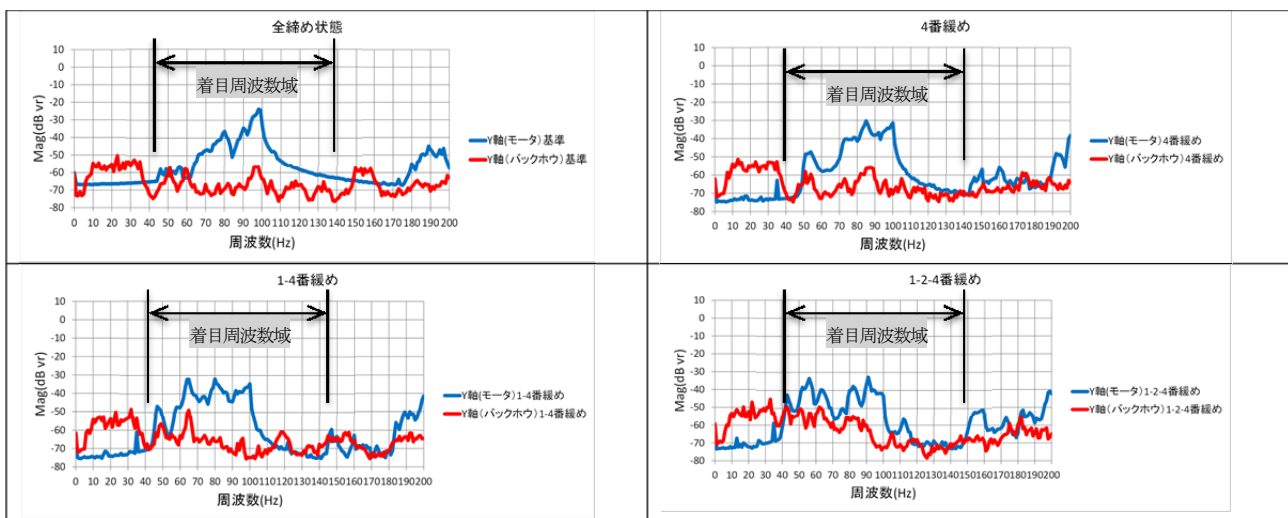


図-13 重機および起振機（モーター）加振の比較（Y軸方向）

青：起振機（モーター）加振，赤：重機加振

影響も1本から3本緩みになるほど顕著に観察された。一方、Z軸方向は多くのケースにおいて卓越周波数の変化が顕著でなく、緩み本数による傾向もあまり見られない。2本緩みと3本緩みの数ケースでは、10Hzから20Hzの非常に低い周波数で共振によると思われる卓越周波数が観察されている(図-15)。

以下ではX軸方向、Y軸方向に着目する。取付けボルトが1本緩むケースの、X軸方向、Y軸方向の実験結果に着目する(図-16)。各ケースにおいて、振動センサーは、ボルト④番に最も近い位置に取り付けられている。いずれのケースでも周波数特性に変化が現れており、全固定状態から卓越周波数のピークが低下していることがわかる。

ボルト位置とセンサーの位置関係では、センサーから遠いボルト②番および⑧番でピークの低下が顕著であり、10Hzから15Hzの低下が観察された。一方で、センサーから近い①番および④番のボルトではピーク低下は遠い側ほど顕著ではなく、その低下量も相対的に小さいことから、センサー側を固定として距離のある自由端が振動する方が卓越振動数の低下が大きくなると考えられる。

取付けボルト2本が緩むケースは、①番④番など同じ取付け金具のボルトが緩むケースと①番⑧番など千鳥側のボルトが緩むケース、①番②番など同じ側のボルトが緩むケースが考えられる。

Y軸方向の実験結果に着目する(図-17)。②番④番の千鳥側ボルトが緩んだ場合と①番②番、④番⑧番の同じ

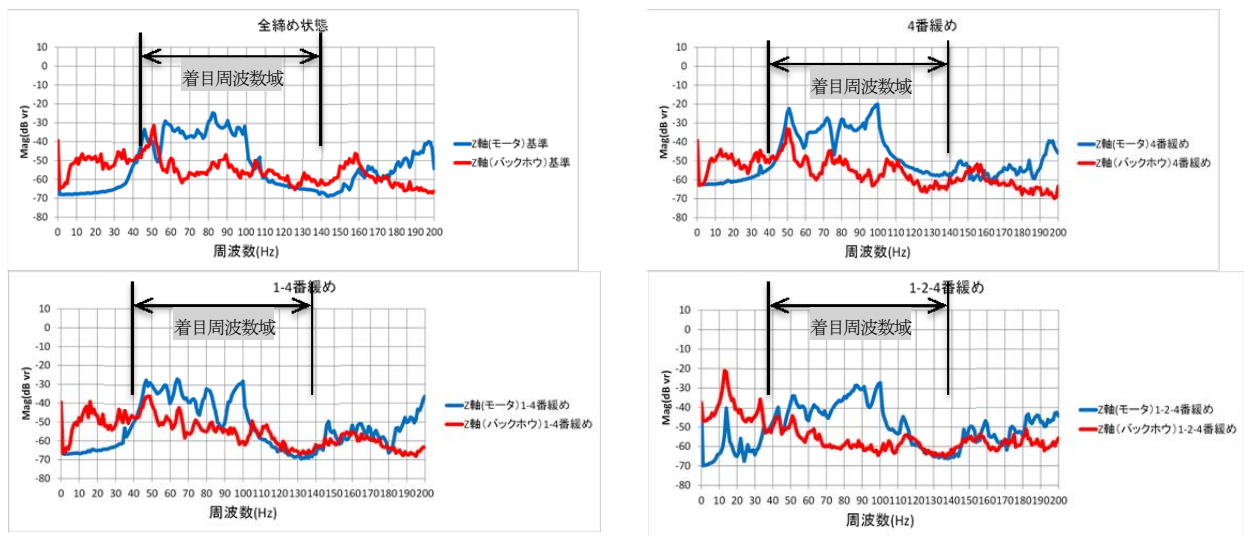
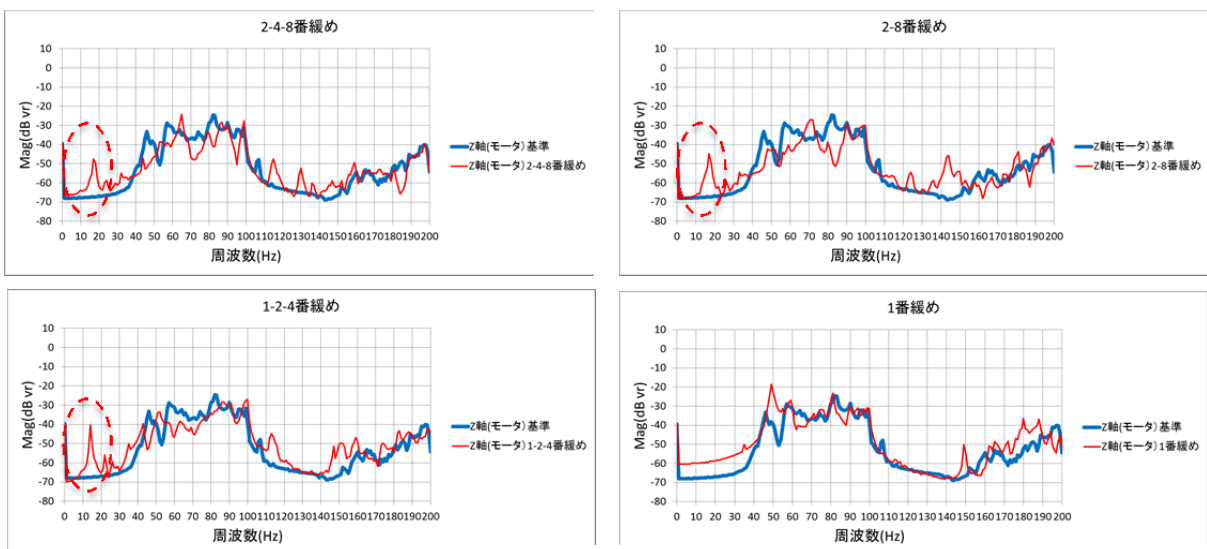


図-14 重機および起振機(モーター)加振の比較(Z軸方向)

青：起振機(モーター)加振，赤：重機加振

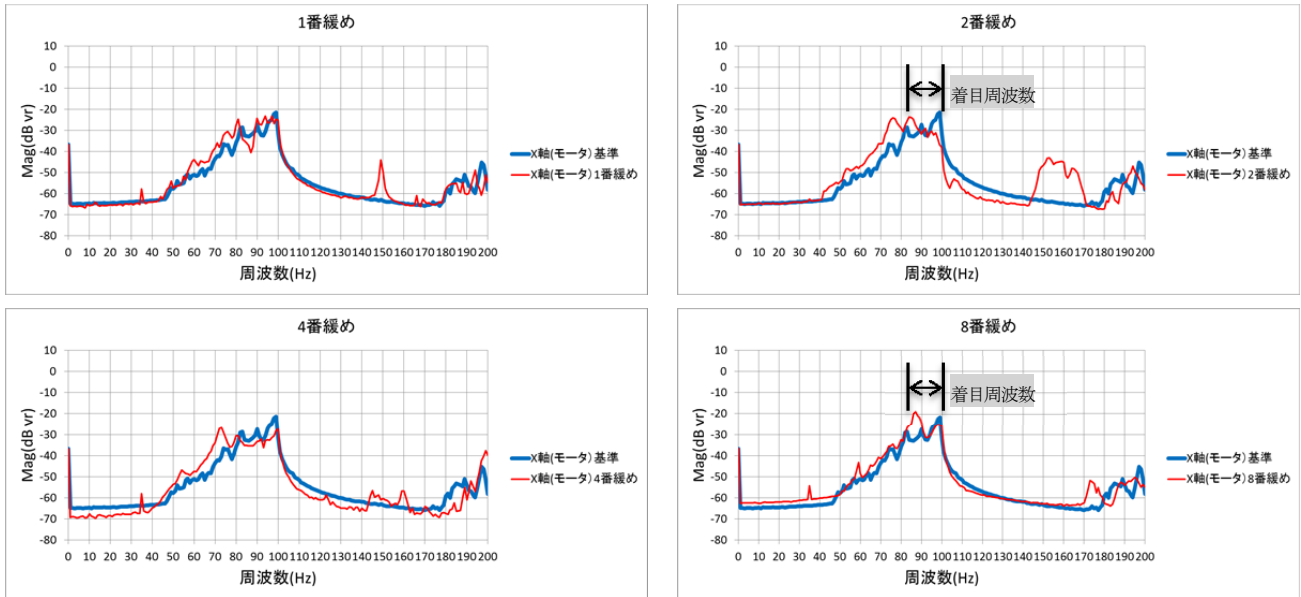


※10Hz~20Hzの周波数卓越が顕著でない例

図-15 起振機(モーター)加振による取付けボルト緩み影響(Z軸方向)

青：4点取付けボルト固定時出力，赤：各条件時におけるピックアップ出力

計測軸方向：X軸方向



計測軸方向：Y軸方向

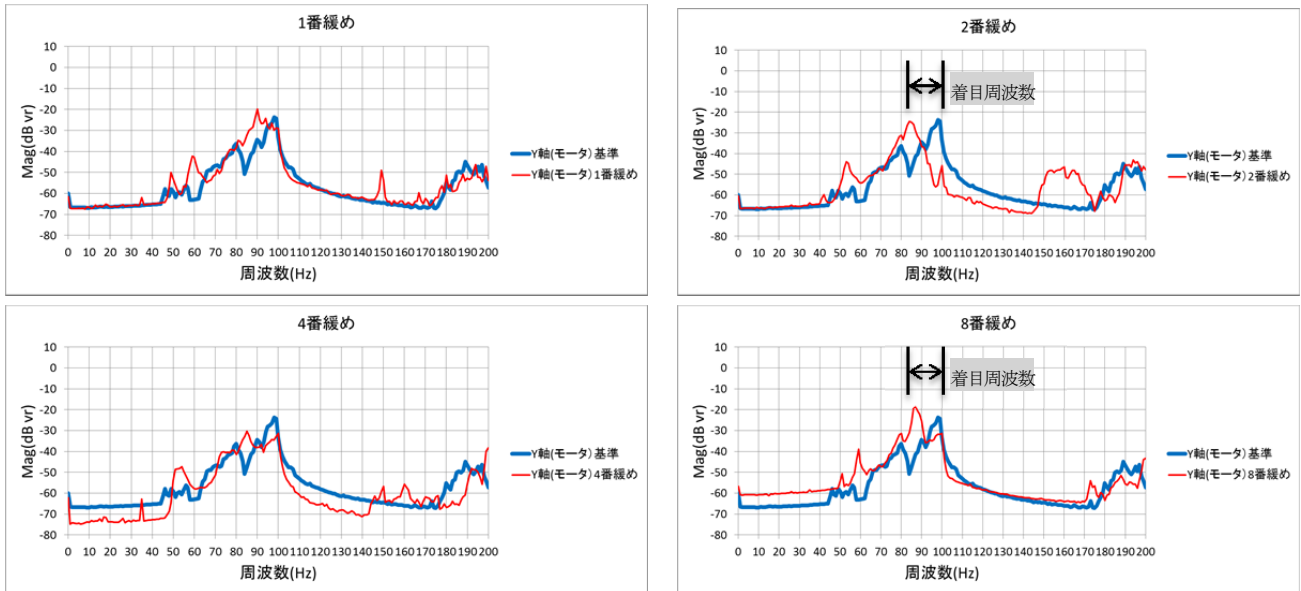


図-16 起振機（モーター）加振による取付けボルト緩み影響（1本緩み）
 青：4点取付けボルト固定時出力，赤：各条件時におけるピックアップ出力

側のボルトが緩んだ場合には、同じ側のボルトが緩んだ方が卓越周波数の低下が大きい。さらにセンサーから遠い側の同じ取付け金具のボルト②番⑧番が緩むケースでは、50Hzから60Hzに大きな卓越周波数が現れる。これは実稼働解析による1次曲げ変形に相当する。この場合は、X軸を曲げ軸として自由端である②番⑧番側が大きく変形したものと考えられる。これらの変化はX軸方向にも観察されるが、変動量はY軸方向が大きく、顕著である。

取付けボルト3本が緩むケースもY軸方向の実験結果に着目する（図-18）。この場合では、④番が固定され、他のボルトが緩む場合がセンサーと自由端が離れるケー

スに相当する（1-2-8番緩め）。各ケースとも卓越周波数は大きく低周波側にシフトし、影響が観察される一方、どの組合せも同じような波形を示し、振動センサーとの位置関係により特徴が顕在化することがなくなった。

(5) 考察

重機振動と小型起振機により加振する実験および小型起振機により取付けボルトの固定を変化させ、全固定と比較する実験により得られた知見は以下である。

- a) 照明器具に搭載可能な小型起振機により、既往実験等から取付けボルトの緩みの影響が観察される40Hzから140Hzの範囲において重機加振を越える振動エ



同じ側 2 本のボルトが緩んだ場合



同じ取付け金具側 2 本のボルトが緩んだ場合



千鳥側 2 本のボルトが緩んだ場合

図-17 起振機加振による取付けボルト緩み影響 (2本緩み)
 青：4点取付けボルト固定時出力
 赤：各条件時におけるピックアップ出力

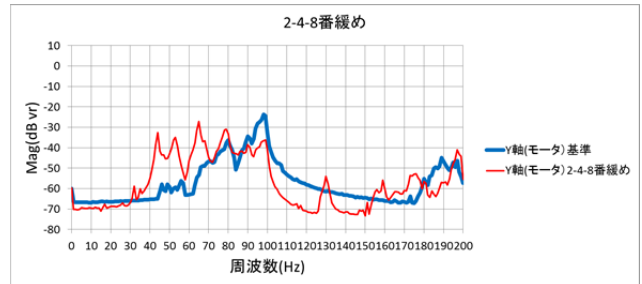


図-18 起振機加振による取付けボルト緩み影響 (3本緩み)
 青：4点取付けボルト固定時出力
 赤：各条件時におけるピックアップ出力

エネルギーを振動センサーに与えることが可能で、振動センサーの感度に十分対応している。

- b) 小型起振機の加振による実験から、振動センサーの感度軸方向について、X軸方向、Y軸方向はおおむね同じ傾向でボルト緩み影響を検知し、Y軸方向の感度が優れているが、Z軸方向はボルト緩み本数による変化が明瞭には検出できない。
- c) X軸方向、Y軸方向が反応している着目周波数領域は、実稼働解析の結果から、比較的単純な1次曲げ振動であることがわかった。さらに振動センサーが固定が維持されている取付けボルト側にある場合、検出の可能性が高まる。
- d) Y軸方向に着目した整理により、1本のボルトが緩んだ場合の卓越振動数の低下は10Hzから15Hzであることが観察された。
- e) また、Z軸方向の試験から全4本のうち3本が緩み、脱落、落下が迫った状況で、10Hzから20Hzの低い卓

越周波数が発生するケースがある。

本実験により、照明器具に振動センサーを取り付ける位置と感度軸方向を提案することが可能になった。さらに全固定とボルト緩み本数の比較により、緩みボルト本数や緩み位置を推測することの可能性を示すことができたと考えられる。

6. 実用化システムの提案

課題検討の結果を踏まえ、保全モニタリングシステム実用化の検討を行う。実用化の検討において留意する点は以下である。

- a) 道路管理者の予算制約や管理すべき道路の重要性、落下リスクが顕在化したときの影響の大きさなどを考慮し、精緻で即時性のあるシステムから定期点検のみ実施のレベルまでいくつかの選択肢(グ

表-8 トンネル内附属物保全モニタリング実用化システムの提案

	測定			判断	表示		アラート後の対応
	使用センサー	通信	ロジック		アラート	アラート対象	
Grade 1	MEMS センサー アクティブセン サリング	・ 振動センサー ・ 起振機 ・ 傾斜センサー (サブ)	リアルタイム	経時変化追跡	常設管理事務所 モニター	常駐管理員	緊急パトロール
Grade 2	MEMS センサー アクティブセン サリング	・ 振動センサー ・ 起振機 ・ 傾斜センサー (サブ)	なし	組込みロジック による閾値	OSV	道路点検員 (日常点検)	緊急パトロール
						道路利用者 (市民)	通報受信し、緊急 パトロール
Grade 3	MEMS センサー	・ 振動センサー ・ 傾斜センサー	リアルタイム	経時変化追跡	常設管理事務所 モニター	常駐管理員	緊急パトロール
			なし	組込みロジック による閾値	OSV	道路点検員 (日常点検)	緊急パトロール
Grade 4	OSV センサー	・ 傾斜センサー	なし	組込みロジック による閾値	OSV	道路点検員 (日常点検)	緊急パトロール
						道路利用者 (市民)	通報受信し、緊急 パトロール
Grade 5	定期点検のみ	-	-	-	-	-	-

- レード) を持たせること
- b) 個々の照明器具において振動特性が異なること、交通振動はさまざまな振動が含まれることから、検査振動を制御することにより精緻な判断を可能とするシステムを含むこと
 - c) 道路管理者による日常点検としての道路パトロールは予定されていること。また、システムから異常あるいは非常態を通報されたのちの対応として、道路管理者による緊急パトロールは予定されていること

MEMS技術による傾斜センサー、振動センサーはこれまでに実験を通じて、照明器具の取付けに何らかの異常が生じたことを検出することが可能である。これを基本に保全モニタリングシステムは、「測定」「判断」「表示」の3段階のプロセスとその間のコミュニケーションにより成立するものと定義し、それぞれのプロセスは独立して設計可能な場合を対象とした。

野村ほか⁴⁾は道路トンネルで現地測定し、車両交通により照明器具に振動が生じることを報告しており、試験装置による実験もそのような交通振動を想定して行われた。しかし、交通振動には雑音やばらつきも多く、検査振動としては精緻でないので、コストは上昇するが精度の高い状態判定を行うため、一定の制御された検査振動を自ら発振する測定プロセスも提案する。

また、芥川ほか^{16),17),18),19)}は、OSV (On Site Visualization) として非電源型を含む簡便なセンサーの開発とともに、センサーに組込みロジックによる閾値判断とそれに基づく状態表示を一体化するシステムを提案している。トンネル内附属物の思わぬ落下に備えるためには、式(1)が成立し、タイムラインが機能する範囲において、予算制約下におけるシステムの簡素化の方向性としてOSVの導入は検討に値すると考えられることから、より簡素な保全モニタリングシステムの一部にOSVの採用を提案する。

トンネル内附属物の落下による損失額の算出方法と設

備投資の関係については宇野ほか²⁰⁾が、交通遮断による社会的損失については嶋本ほか²¹⁾が提案しているところであり、これを用いると自動車専用道路のような走行速度が高く通行車両数の多いトンネルは、附属物が落下した際のリスクも大きく事故時の損失額も大きいことから、投資分析の観点では可能投資額は大きくなり、高コストな上位グレードの選択が可能である。

一方で、交通量の少ない地方道のトンネルでは、可能投資額も小さく予算相応の対策とする、あるいはOSVが提唱するようにトンネル利用者である市民をアラート検知センサーとして活用し、市民通報によりアラート後の対応を起動するようにするなど、費用を抑えた低グレードであるが現実的な対応が必要になると考えられる。保全モニタリングシステムの導入コストに着目し、おおまかに5つのグレードを設定した(表-8)。

Grade1は、検査振動を起振機により与えることにより精密な状態把握をめざすとともに、判断プロセスでは経時変化を考慮し、取付け部の2次クリープなどタイムスタンプとともに記録、変位あるいは振動数変化の非線形性に着目して判断を行うことをめざす。これは日常的な交通規制や通行止めによる社会的影響が大きい高速道路や幹線道路を想定したグレードである。

Grade2は、判断プロセスに組込みロジックを導入し、コスト減を提案する。異常発生を判断する組込みロジックについては、芥川らのOSVでは、あらかじめ工学的あるいは道路管理者判断による閾値をセンサーおよびアラート表示部に回路として組み込むことによりシステムの簡素化が可能であると提案している。しかし、組込みロジック方式は個別照明器具の取付け状態による振動特性の変化、取付け金具のかみ合いなどによる差異を考慮できない一般値の採用となるため、閾値は空振りなど通報失敗リスクを持ったものになる。したがって、高速道路よりはリスクの低い一般公道や重要な地方道などを想定するものである。

Grade3は、測定プロセスのレベルを起振機搭載から交通振動入力に変更することによりコスト減を考え、Grade4は、センサーもOSVが提案するような簡素で低コストなものに切り替え、全体のコストを抑制することを想定するものである。

Grade5には、定期点検のみ実施するという選択肢も提案した。現行の定期点検要領に基づく点検でも、照明器具の取付け金具の一部が破断していたり、取付けボルトの機能が完全に失われていたりする場合には、検知可能である。多くの場合、一部の取付け部が機能喪失しても附属物の脱落、落下は起きない設計となっていることから、定期点検とその点検結果に基づく処置行動が機能すれば、多くの落下リスクは除くことが可能とする道路管理者の判断もあると考えられる。

7. おわりに

本研究では、道路トンネルの性能として重要な、利用者安全性に係る課題であるトンネル内附属物の落下リスクについて、照明器具に着目してモニタリングシステム実現のための実験と実用化システムの提案を行った。

トンネル照明器具や橋梁下部工の点検通路など後打ちボルトにより固定される施設は、その取付け方法から定期点検で微細な劣化を的確に検出することは困難であり、センシングによる異常検知と通報を管理のタイムラインに乗せ、利用者安全を図ることが管理者責任の実現のために望ましい。

本研究では、MEMS技術を活用した自動車用汎用センサーにより照明器具の姿勢変化および振動を監視する方法を提案し、実験によりセンサーに適用性があることを確認したうえで実用化システムとしての適用を考察した。

MEMS技術による汎用センサーは今後、社会資本維持管理において最も着目されるセンサーのひとつであり、全部材監視に道を開く可能性を有していることから、本研究の展望としては、トンネル照明器具など附属物ばかりでなく、すべての構造物、附属物の利用者安全性を向上させることが期待される。

参考文献

- 1) 小林潔司：アセットマネジメント研究のフロンティア，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.11-13，2003.
- 2) 国土交通省社会資本整備審議会 道路分科会；道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.
- 3) 国土交通省社会資本整備審議会社会資本メンテナンス戦略小委員会：市町村における持続的な社会資本メンテナ

ンス体制の確立を目指して(参考資料)，pp.2-8，2015.

- 4) 野村貢，戸本悟史，西條敦志，木村定雄，芥川真一：MEMS技術によるトンネル内付属物保全モニタリングシステムの研究，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，vol.71(2015)，No.3，p.163-179，2016.
- 5) 独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構：欧州の有料道路精度等に関する調査報告(平成20年4月)，諸外国の最新事例調査，pp.135-146，2010.
- 6) 中日本高速道路株式会社：東名高速道路宇利トンネル照明灯具落下事象調査検討会第3回委員会資料，p.31，2016.
- 7) 国土交通省道路局：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書，p.35-41，2013.
- 8) 滝川俊介，巻田将聡，森山守，木村定雄：高速道路トンネルの要求性能の規定化と実用的な性能評価基準の検討，土木学会第68回年次学術講演会 VI-116，pp.231-232，2014.
- 9) 篠田将希，木村定雄，白子哲夫，山田浩幸：山岳トンネルの健全度と保有性能の定量的評価に関する一考察，地下空間シンポジウム論文・報告集第16巻，pp.55-62，2011.
- 10) 土木学会トンネル工学委員会：性能規程に基づくトンネルの設計とマネジメント，トンネルライブラリー第21号，2009.
- 11) 竹本将，佐藤重樹男，松山裕幸，緒方建治，国見敬：加速度センサを使用した新しい設置型孔内傾斜計の開発，地盤工学研究発表会発表講演集，vol.36，pp.179-180，2001.
- 12) 佐藤重樹男，緒方建治，松山裕幸，根津正浩：マイクロマシニング技術を利用した加速度センサーによる斜面の動態観測，土と基礎50-6(533)，2002.
- 13) 国立研究開発法人土木研究所：厳しい条件下での使用に耐えうる地すべり観測装置の開発，共同研究報告書整理番号第393号，pp.4.1-4.29，2011.
- 14) 能村幸介：実稼働伝達経路解析の理論と適用例，音響学会誌，67(4)，pp.163-168，2011.
- 15) 黒田勝彦：実稼働伝達経路解析を用いたインフラ構造物の異常状態余地技術の基礎検討，長崎総合科学大学紀要，55(1)，pp.24-29，2015.
- 16) 芥川真一，野村貢，山田浩幸，片山辰雄：On Site Data Visualization の概念と岩盤工学における適用可能性について，土木学会，岩盤力学に関するシンポジウム講演集，Vol.39,pp.151-156，2010.
- 17) Mitsugu NOMURA and Shinichi AKUTAGAWA：Development of a Disaster Information System Using a Light Emitting Device, Proceedings of the 3rd WFEO-JFES-JSCE Joint International Symposium, pp.63-70, September 3, Fukuoka, 2009.
- 18) Chitoshi ZUMI, SHINISHI AKUTAGAWA, Mitsugu NOMURA, Reiko ABE, Haihua ZHANG; : Quality Assessment of Effectiveness of Safety Monitoring Based on On-Site Visualization Using New Devices with Various Cost Ranges, Journal of JSCE, Vol. 3, PP.311-327, 2015.
- 19) Haihua ZHANG, Shinichi AKUTAGAWA, Yasuhisa AONO, Koji TSUJIMURA：A Mechanical Method for Deformation Measurement

- and Visualization in Tunnel Construction, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), vol.71(2015), No.3, p.1_51-I_62, 2016.
- 20) 宇野洋志城, 木村定雄: 道路トンネルにおけるはく落リスク変動モデルの特性評価, 土木学会論文集 F4, Vol.68, No.2, pp.92-118, 2012.
- 21) 嶋本宏征, 野村貢: 道路交通遮断による影響評価に関する基礎的考察, 土木学会年次学術講演会概要集 2007, 4-071, pp.141-142, 2007.

(2016. 5. 16 受付)

RESEARCH OF PRACTICAL MONITORING SYSTEM FOR TUNNEL APPENDAGE WITH MEMS TECHNOLOGY

Mitsugu NOMURA, Satoshi TOMOTO, Atsushi NISIJO, Sadao KIMURA
and Shinichi AKUTAGAWA

By the collapse of ceiling panels in Sasago tunnel and the collapse of lump in Uri tunnel in 2015, it turn out completely inevitable the falling of the appendage by periodic inspection. This research proposed the sensing method which aimed at a lump among the road tunnel appendage and utilized sensor by MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology. Moreover it was based on the past study which inspected practicality, and the proposition as the tunnel preservation monitoring system which made an experiment as well as put practical use in the view to inspect the problem which is at the time of the past study was performed.