

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

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

筐子トンネル天井版落下事故の教訓として、インフラ点検を定期的に行っているにもかかわらず、その網から漏れ、落下などの第三者被害に結びつく構造物、付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、付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、消費者向け製品に用いられる経済的で高性能なセンサー類の技術向上や、ビッグデータのハンドリング技術向上が、「どこでもセンサー」と呼ばれるインフラでのソーシャルデバイス化を促進している。

本研究は、供用中の道路トンネルに付属物として設置されている照明器具に着目し、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術による商用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。さらに、定期点検との関係を整理し、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, sensing, MEMS, maintenance, vibration, slant, monitoring system

1. はじめに

社会資本ストックの老朽化と、その維持管理に要するコストの増大について、危機的状況とその望ましい対応が最初に論じられたのは「荒廃するアメリカ」¹⁾であり、1980年代であった。

米国における社会資本の整備急増が1920年代から始まったのに対して、わが国では、第二次世界大戦後及び高度経済成長期に社会資本ストックが急激に増大した経緯から、社会資本ストックの維持管理を効率的にマネジメントする必要性について論じられるようになったのは、2000年頃からであり、マネジメント手法を導入した「アセットマネジメント」としていくつかの先進的な研究²⁾が行われ、点検とデータのストックが進んだ。しかし、多くの事業者においては新設が優先され、さらに維持管理費を含む社会資本投資全体の縮小により、最適維持管理計画として広く定着するには至らなかった。

2012年12月に発生した中央自動車道筐子トンネルの天

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、すべての社会資本を点検し、補修や更新を確実にやっていく仕組み作り³⁾が急速に進められているが、点検および管理技術、点検員など体制、維持管理費用の確保などが追い付かない状況である。

一方で、筐子トンネルの事故は、トンネル構造体以外の付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、その他機器については定期更新を前提にあまり重要視されていなかった。

しかし、全国で毎年数件の付属物落下事故は発生しており、筐子トンネルの事例を除いても、重大事故になりかねない状況が続いている。

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「付属物（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、トンネル内付属物については、最小限の点検しか示されていないのが現状であり、抜本的な解決にはまだ多くの課題が残されている。

このような状況を踏まえれば、トンネル内付属物落下による事故リスクは当面存在し続けるものと認識し、その被害を最小化することが重要である。

本論文では、トンネル内付属物のうち照明器具に着目し、付属物を含むトンネルの保有すべき性能の観点から脱落、落下までの早期に異常を検知し、利用者被害を最小化するとともに、詳細点検や補修、被害防止のための通行規制などを支援するシステムについて提案し、その基本性能試験結果について述べる。

2. 研究目的

(1) トンネル内付属物の落下と点検の現状

トンネル内付属物に着目して、わが国で落下が報告されているものは、2010年以降でも、2010年7月に首都高山手トンネルで内照式案内板が落下⁴⁾、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報告⁵⁾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更新後16年の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。報告、報道されないまま道路パトロール等が落下物を片付け、速やかに交通回復処理されている落下事例はあると見られるが、整理された情報はないのが現状である。現在、わが国のトンネル換気機器の主流はジェットファンであるが、これが落下した事例は報告されていない。

笹子トンネルの天井板は換気設備の構造体であり、これと同様の事例としては、走行中車両1台が被災した2006年のポストンBigDig (Ted Williams Tunnel) の天井板落下事故⁶⁾が知られている。なお、笹子トンネル事故以降、道路トンネルで機械換気を行うための天井板によるダクトは撤去される方向にあり、同様の換気システムを採用し、天井板設置のために同種後打ちボルトを使用していた中央自動車道恵那山トンネルは、換気システムを縦流方式に変更し、天井板を撤去している。

トンネル内付属物の定期点検がいささか軽んじられてきたのは、先に述べたとおりであり、笹子トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会においても点検の不十分性、記録の不十分性が指摘⁷⁾されている。

さらに、同委員会報告は、近接点検は引抜き強度を喪失したボルトを捕捉するには有効としながらも、笹子ト

ンネルの打音試験では、付着長や引抜き強度が所定の値以上であるかどうかまでは把握できないことが明らかになったとして、近接点検（近接目視、打音および触診）では、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も、技術的な限界として確認された⁸⁾としている。

これは、後打ちボルトの設計引抜き力を超えてもボルト軸方向変位としては、2mm程度以下であり、相当の問題があっても目視判断が困難であること、わずかでもボルトに張力が導入されると打音点検では劣化ボルトと健全ボルトに有意な差を見出せなかったことなどによる評価と考えられる。ここで示唆されるのは、手で触れるとぐらつくなど明らかに異常な後打ちボルトは点検で検出できるが、程度の差はあれ、いくらかでも機能を維持し張力を負担している劣化ボルトは検出できないということであり、定期点検間隔や日常点検の内容について大きな課題があることが明らかとなった。

その認識に基づき、今後の新技術開発の方向性として、引張り試験に頼らない非破壊検査手法の開発、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監視技術の必要性⁹⁾を挙げている。

国土交通省により整理された資料¹⁰⁾によると、わが国の道路トンネル約10 300本のうち、28%が国および高速道路会社の管理であり、都道府県、政令市が49%、市区町村が23%となっている。地方公共団体における道路施設の巡視、点検の実施状況は都道府県においては両方が実施されているが、その他の市区町村では50%近くが巡視または点検のみ実施であり、5.5%が何も実施していないことが明らかとなった。

国土交通省では、2014年からこれらの管理者でも確実な維持管理が行えるよう、地方公共団体職員の研修を強化するとともに、共同処理の枠組みを提示し各県において道路メンテナンス会議を設置するなどして取組みを加速しているが、道路管理者における維持管理担当職員の不足の深刻化、技術力不足について地方公共団体の管理者自身が懸念していることも明らかにされている。

これらから示唆されるのは、トンネルを含む社会資本の点検、維持管理活動に対しての政策的な取組みは進むが、それを担う管理者の技術、マンパワーが不足するということであり、この点からも効率的かつ精度の高い監視技術のニーズが高まっているということである。

(2) 保全モニタリングシステムの性能規定

道路トンネル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監視技術に、利用者被害防止のための仕組みを加えたシステムをここでは「保全モニタリングシステム」と定義する。本研究の目的は、道路トンネル内付属物における保全モニタリングシステムを成立させ、利用者安全性を向上させるとともに、減少する道

路管理者、維持管理担当者においてそれを可能とする効率性を付与することである。

この保全モニタリングシステムの性能規定について考察する。

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、森山ら¹¹⁾¹²⁾¹³⁾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。

ここで、高速道路トンネルについて要求性能と性能評価基準について整理しているものを一般道路に拡張し、トンネル内付属物に関する性能と性能代替指標、性能評価基準について抽出したものが図-1である。

トンネル内付属物は、筐子トンネル天井板のような特殊な構造を持つもの以外、稼働荷重、地震荷重に対する構造安全性は関係しないと考えられる。また、維持管理上の性能は、周辺への影響度についてあまり関与しない。しかし、利用者の安全性能、利用者の使用性能においては、固定物の落下やそれによる利用者被害、緊急点検や補修に伴う交通規制などの点で大きく関係する。また、道路管理者の技術、マンパワーが不足する状況下では、耐久性能や管理者の使用性能、維持管理性能にも着目する必要がある。

これらを踏まえ、本システムの要求性能と求められる機能について表-1に整理する。

トンネル内付属物は、1点以上の固定部を介してトン

ネル覆工に固定される機械物であることから、利用者の安全性能である「落下物と衝突することがない」をどの程度のレベルで実現するかが性能面での指標となると考えられる。ここでは、将来展望も踏まえ本システムへの要求事項を定義する(表-2)。

ここでタイムラインとは、異常検知から通行規制、緊

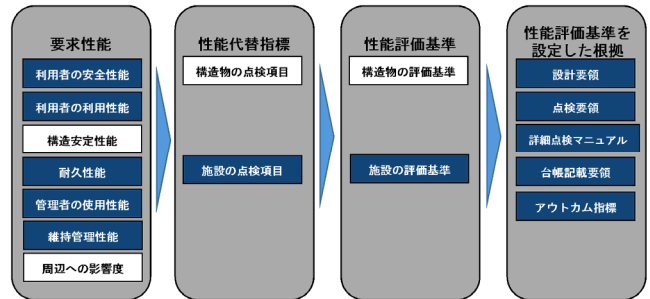


図-1 トンネル内付属物に関する要求性能（着色項目）

表-2 保全モニタリングシステムへの要求事項

性能項目	要求事項
利用者の安全性能	<ul style="list-style-type: none"> 対象付属物の個別の挙動を把握すること 異常検知から対象付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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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

表-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要求性能と付与する機能

大項目	中項目	小項目	本システムに求められる機能
利用者の安全性能	安全に走行できる	良好な線形が確保されている	
		なめらかに走行できる	
		必要な視認性を確保できる	必要な照度の確保、ちらつきの低減 → 定期交換の実施で対応すべき機能
		建築限界を確保できる	
非常時に利用者が安全に避難できる	非常時に利用者が安全に避難できる	落下物と衝突することがない	落下の前兆による異常検知から落下までに緊急対応の時間余裕がある個別に固定されるすべての付属物について異常を検知する 二重固定(フェールセーフ設計) → 新設時設計, 更新時設計で対応すべき機能
		防災設備を適切に配置できる	
		非常時に防災設備が確実に機能する	
利用者の安全を直接脅かさない	必要換気能力を確保できる	はく落が生じない(材料劣化)	
		漏水が生じない、少ない	
利用者の使用性能	快適に走行できる	快適に走行できる	
		通行規制を最小限とすることができる	点検, 補修頻度, 期間の最小化
	乗り心地が良い	乗り心地に影響する変形, 損耗を生じない	
		利用者が不快感, 不安感を持つような漏水, ひび割れが見られない	
構造安定性能	常時作用する荷重に対して安定する	必要な視認性を確保できる	
		覆工が安定する	
		地山が安定する	
耐久性能	防水性がよい	供用期間中に想定される近接施工による影響や周辺環境の変化など, 荷重条件の変化に対して必要な耐荷性能を有する	
		地すべりなどによる荷重変動	
管理者の使用性能	必要な需要を満足するためのトンネル諸設備を設置できる	供用期間中に想定される地震変動に対して覆工が必要な耐荷性能を有する	
		覆工, 諸設備の劣化原因となる漏水が生じない	
管理者の維持管理性能	安全, 容易に点検, 清掃できる	覆工材が劣化しない	
		必要の巡回, 点検, 清掃が安全, 容易にできる	メンテナンスフリー, 自己診断機能によるシステム保守の最小化
周辺への影響度	地下水への影響が少ない	安全, 容易に補修, 補強できる	監視員通路歩行空間の確保に影響しない
		地下水位変動が許容範囲内である	
		周辺の地下水汚濁影響が許容範囲内である	
		地表面の沈下, 隆起が許容範囲内である	
周辺地域の振動, 騒音が少ない	周辺地域の振動, 騒音が少ない	周辺の振動, 騒音が許容範囲内である	
		周辺地域の振動, 騒音が許容範囲内である	
		周辺地域の振動, 騒音が許容範囲内である	

急点検、保守あるいは撤去、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たもので、タイムラインを検討することにより、本システムが利用者の落下物による激突被災を防ぐ機能を有していることが確実化される。すなわち、式(1)が本システムの有効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付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緊急点検あるいは補修、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、通行することを阻止する時間、すなわちタイムラインである。

トンネルの維持管理が予算制約下において実施されることを踏まえ、これらのシステムを所与の予算の範囲で実現することも重要な要求性能と考えられるが、これは後述する多数生産によるコスト低減化によるところが大きいいため、本論では論じない。

(3) 本研究の方法論

本システムは、表-2に規定するとおり、対象付属物の個別の挙動を把握することを基本としている。これは、トンネル内付属物は、個々に独立して設置されており、覆工コンクリートへの定着という点では、相互連携していないこと、個別機器の定着に用いられる定着装置の劣化に関する知見が少なく、現段階ではサンプリングして全体の劣化傾向を予測できる状況にないことによる。

延長500mの道路トンネルに、照明器具は約100台取り付けられているので、平均500mのトンネル50本を管理している道路管理者は、5,000台の照明器具を監視することになる。実際は、入口照明による増灯や換気設備、ケーブルラック、情報提供機器などもトンネル内付属物として管理しており、同じ落下リスクを有しているとすれば、要監視数はさらに多くなる。

土木分野における計測の多くは多点計測ではなく、慎重に選定された観測点を用途に合わせたセンサーを製作して計測することが多いが、このような同型機械を多数計測する場合には、異なったセンサー開発のアプローチが必要である。

また、多数のセンサーに電力供給する方法、得られた情報を通信し、分析する機能についても同様である。

さらに、筐子トンネルの事例に見るように、トンネル内付属物の定着に用いられる後打ちボルトの定着長は100~150mm程度であり、破断時の破壊ひずみが2%程度以下であることから、変位量は小さい。このような微小な異常を検知するセンサーが必要である。

これらを低コストで実現する方法として、本研究では自動車用商用センサーとその通信ノウハウに着目した。現在の自動車は、姿勢制御を中心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。その中でも、最も多用され、信頼性と廉価性に優れる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、基礎実験として以下を確認することにした。

- a) 異常検知能力
- b) 現地適用性

そして実験対象は、トンネル内付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する。

あわせて、本システムを導入することによる効果を確認する方法についても検討する。

3. MEMSセンサー

(1) MEMS技術による商用センサー導入

MEMS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デバイスのことである。

歴史的には1960年代にマイクロマシニング概念に始まり、1987年国際学会Transducers'87を契機として、静電気モーターや3連マイクロ歯車などの画期的な発表があった。1995年頃から、トランジスタ回路集積型の加速度センサーやディスプレイ用デジタルミラーデバイス等の、MEMS応用製品が身近に使われ始め、現在に至っている。

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。

(2) 土木分野での実績

一方、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¹⁴⁾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、数種類の地盤計測ツールが市販されている。

4. トンネル照明器具の変位検出による異常検知

(1) センシングの考え方

トンネル照明器具は、多様な仕様のもので実用されているが、現在主流のものはLEDなど光源を金属製フレームボックスに格納し、電源回路を内蔵したもので、幅700mm×高さ500mm、厚さ200mm程度の大きさである。前面がガラス面になっており、開閉して光源や回路のメンテナンスを可能としている（写真-1）。重量は、概ね20kg以下で、トンネル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

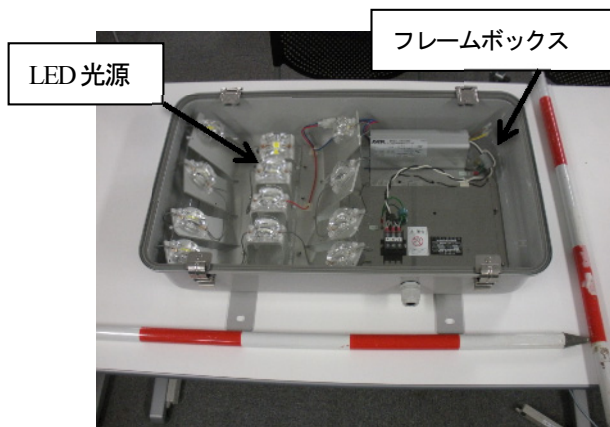


写真-1 標準的なトンネル照明器具 (LED 基本照明用)

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-2）、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-3）。

ここで、脱落に至るシナリオとして、取付けボルトが劣化など何らかの原因で変位し、やがて重力や振動により抜け落ちることが想像されるが、その際に照明器具を覆工コンクリートに固定する4本の取付けボルトがまったく同様に変位することは考え難いので、照明器具に何らかの姿勢変化が起きるはずである。この姿勢変化を傾斜センサーでセンシングし、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、異常検知システムとして成立するとの考え方である。

(2) 使用するセンサー

MEMS技術を活用した土木用傾斜センサーの開発は、前述のとおり2001年ごろから斜面の変状を把握する取組みとして始まった。その後、厳しい条件下での使用に耐える地すべり観測装置の開発として（国研）土木研究所を中心として開発が進められた。本実験に適用する傾

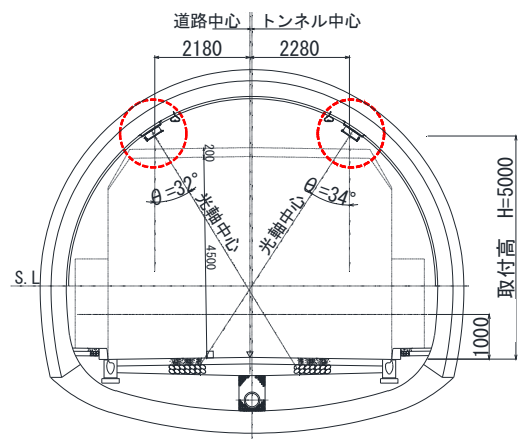


図-3 トンネル内での照明器具取付け例

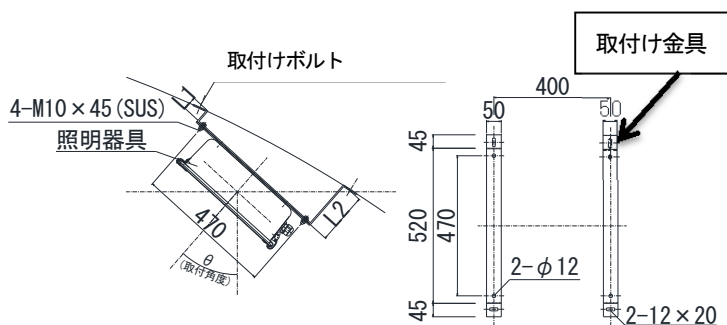


図-2 取付け金具および取付けボルト詳細

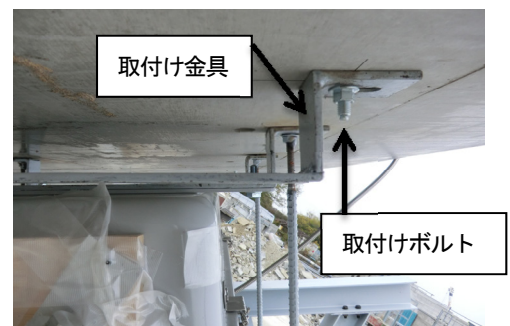


写真-2 取付け金具および取付けボルト (実験装置)

斜センサーは、その成果を受け IT孔内傾斜計として市販しているものを活用することにした（写真-3）。

ここで、IT孔内傾斜計について説明する。ここで用いるセンサーは、MEMS技術によりひとつの基板に振子型の可動電極を製作し、固定電極で挟み込むものである。センサーが加速度を受けると、可動電極は慣性により固定電極に近づくので、静電容量の変化が生じる。これをCV変換回路により電圧変換し、重力加速度との比較から角度を算出する。これを直交方向に2軸測定すれば特定面の傾斜変化を測定することが可能¹⁾となる。

IT孔内傾斜計は、このセンサー部と温度補正回路、データ通信回路などを組み込み、耐久外装して製品化したもので、地盤の動態観測用として用いられる固定式孔内傾斜計を代替するもの¹⁰⁾である。IT孔内傾斜計の主要性能について、表-3に示す。

(3) センサーの要求性能

実際のトンネル照明器具の落下事例を調査してみると、前面ガラスの脱落、取付け金具の腐食などの劣化、損傷による落下、取付けボルトの脱落がある。落下モードはさまざまであるが、ここでは、取付けボルトの脱落による落下を検出することを目指し、4本の取付けボルトのうち、2本が劣化し張力を失った場合の変位を検出することを目標とした。

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、現場に残された後打ちボルトの引抜き試験を実施した際に、設計引抜き力を満たさないボルトは約 9% 存在し、その引抜き試験の降伏時の変位は約1mm以下で

あった。この知見をもとに、図-2の取付け金具を覆工コンクリートに固定する取付けボルトのうち2本が1mm変位した場合について、照明器具と取付け金具の間は変位しないものとして、照明器具を前面から見て、手前側に前傾する方向をX方向、左右に傾く方向をY方向として、2方向について傾斜変化の検出目標値を定めた（表-4）。

(4) 実験装置

センサーであるIT孔内傾斜計は、重力加速度との差分を検出する仕組みであるため、表-3の測定範囲に示す計測レンジを有効に活用するには、傾斜計の軸方向が重力方向と一致することが望ましい。

そのため実験では、照明器具のフレームボックス左右に、それぞれIT孔内傾斜計を軸方向が鉛直となるように取り付けた（図-4）。

次に、トンネル坑内で照明器具が取り付けられている状況を再現し、さまざまな実験を可能とするためにトンネル壁面を模した実験装置を製作した。

トンネル内で照明器具は上半アーチ部に取り付けられ、斜め下方を照らしている。ボルト変位による降下を精密に再現するため、実験装置には、反力枠となる架台を設けて、後打ちボルトによる取付けボルトを含めたコンクリートによるトンネル壁面と照明器具、金具類の取付けを精密に再現し、変位制御下での降下試験が可能となるようにするとともに、大引抜き力での強制引抜き試験も可能な構造とした（図-5）。

表-3 傾斜センサー（IT傾斜計）の主要性能

性能項目	仕様	備考
測定軸数	2軸 (X-Y)	
使用電圧範囲V _{DD}	12±0.25V	
測定範囲	±20°	
定格出力	約40000digit	
分解能	1/1000°	
サンプリング	1min	
使用温度範囲	-30～+60°C	
耐水圧	0.5MPa	
測定管外径	60mm	IT傾斜計としてのボディ径
重量	1800g	IT傾斜計としての総重量

表-4 傾斜センサーの要求性能

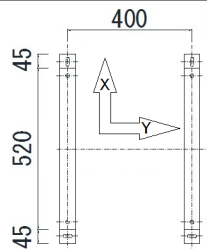
モデル図	方向	管理目標値
	X	0.11018°
	Y	0.14323°



写真-3 傾斜センサー（IT孔内傾斜計）

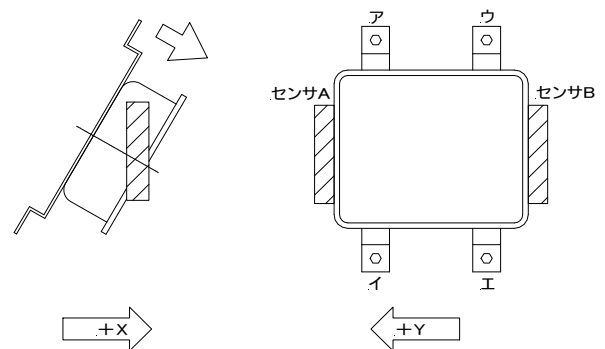


図-4 傾斜センサー取付け方法

(5) 実験方法

実験は、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、機械式的後打ちボルトにより取付けボルトを設置、取付け金具を介して実物の照明器具を取り付けた。傾斜センサーは照明器具の左右に直接固定し、4本の取付けボルト（ア～エ）のナットを架台側に巻き取ることでボルト緩みに相当する変位を与えた。このときの変位量は、コンクリート壁面と照明器具取付け金具の間で段階ごとに測定した。

また、変位の段階的な与え方として、本実験では、取付けボルトの回転数により制御することとし、1/4回転をその単位とし、取付け金具とコンクリート壁面の実測値とともに記録した。

実験は、取付けボルトの緩みケースとして1本から4本まで4ケースを行い、いずれの場合でも傾斜センサーが照明器具の姿勢変化を捉えることができることを確認するとともに、照明器具がボルト緩みとともにどのように挙動するかを計測した（表-5）。

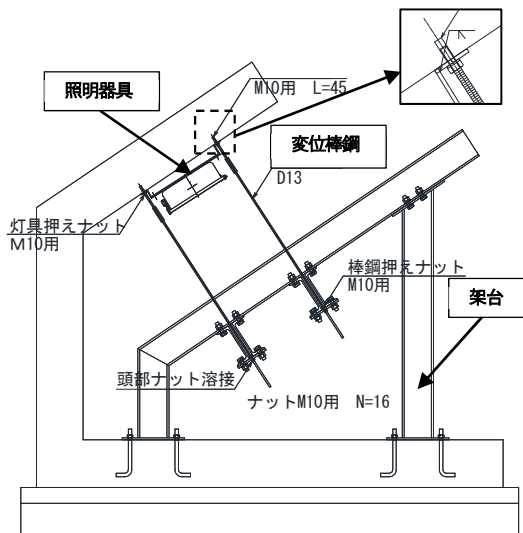


図-5 照明器具降下実験装置



写真-4 実験装置全景

(6) 実験結果

各ケースのボルト回転数と変位すなわち照明器具降下量の経過を観察した（表-6）。各ケースにおいて、照明器具が前面に傾くのがX方向、左右に傾くのがY方向と解釈してよいが、Case1ではボルト（ア）が緩んでいるにもかかわらず、変位が現れていない。これは、取付け金具固定時の金具のボルト穴とボルトのかみ合いなどが原因と考えられる。Case2以降もこの傾向は見られ、ボルト（ウ）はかみ合いなど影響なく降下しているが、ボルト（ア）は降下しない。Case4において4/4回転時にこのかみ合いが開放され全体的な降下となったことが推測される。またCase3では、ボルト（ウ）が緩み、前面側に倒れ込んだことによりボルト（エ）部の取付け金具がコンクリート壁面側に押し戻されている状況も見いだすことができる。

これらの変位観察結果を踏まえて傾斜センサーの計測結果を整理する（表-7）。

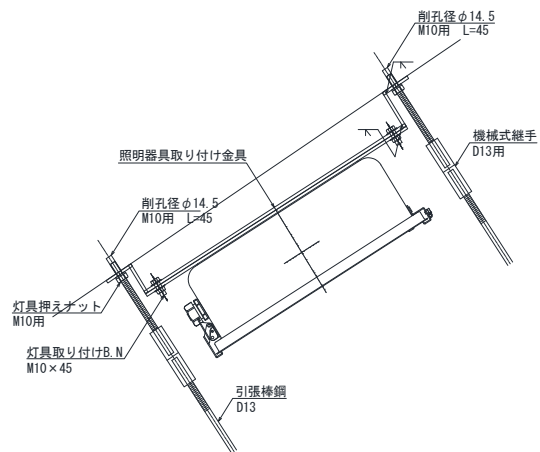


図-6 変位制御部詳細

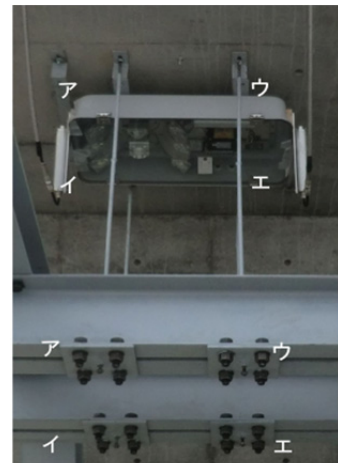


写真-5 取付けボルト配置

表-5 変位実験ケース一覧

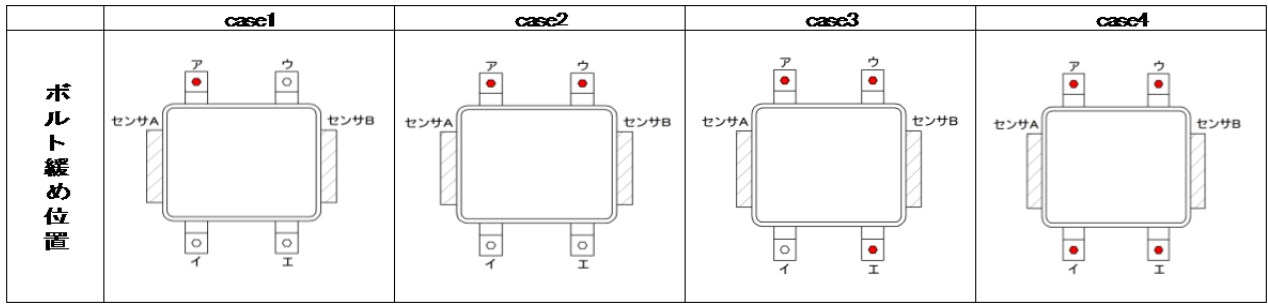


表-6 変位実験ケースおよび変位量

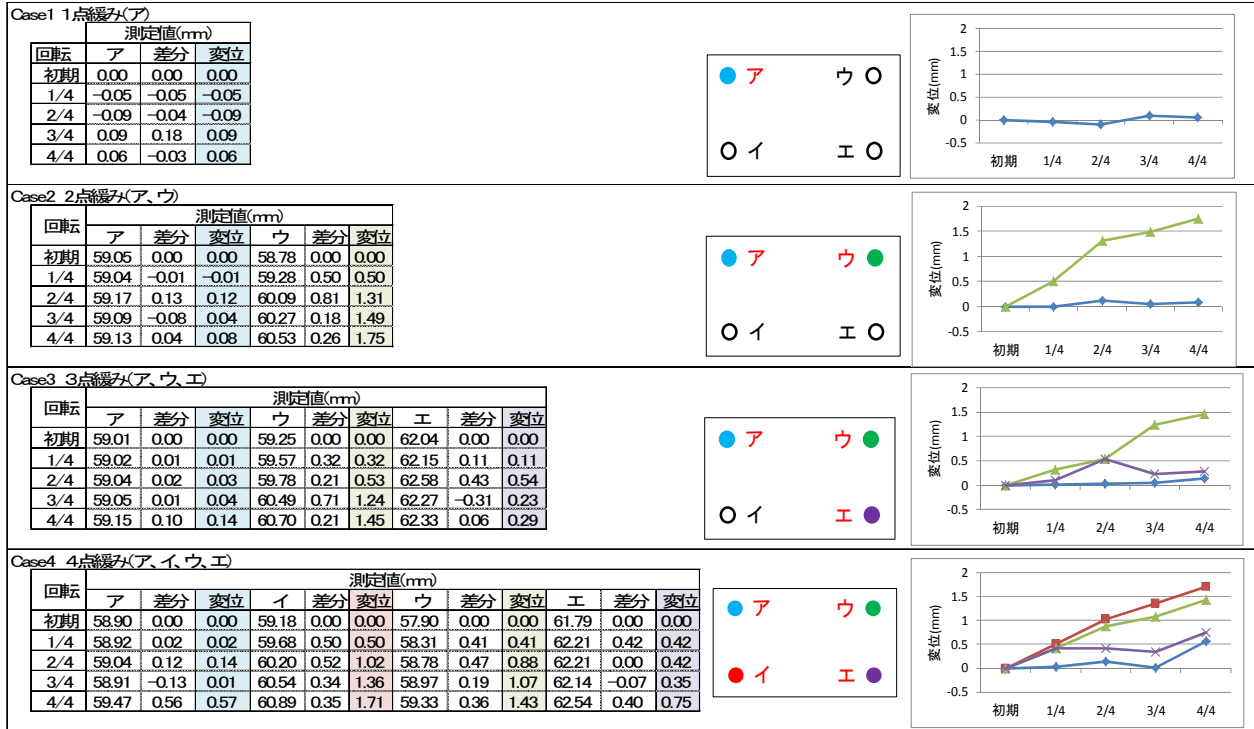
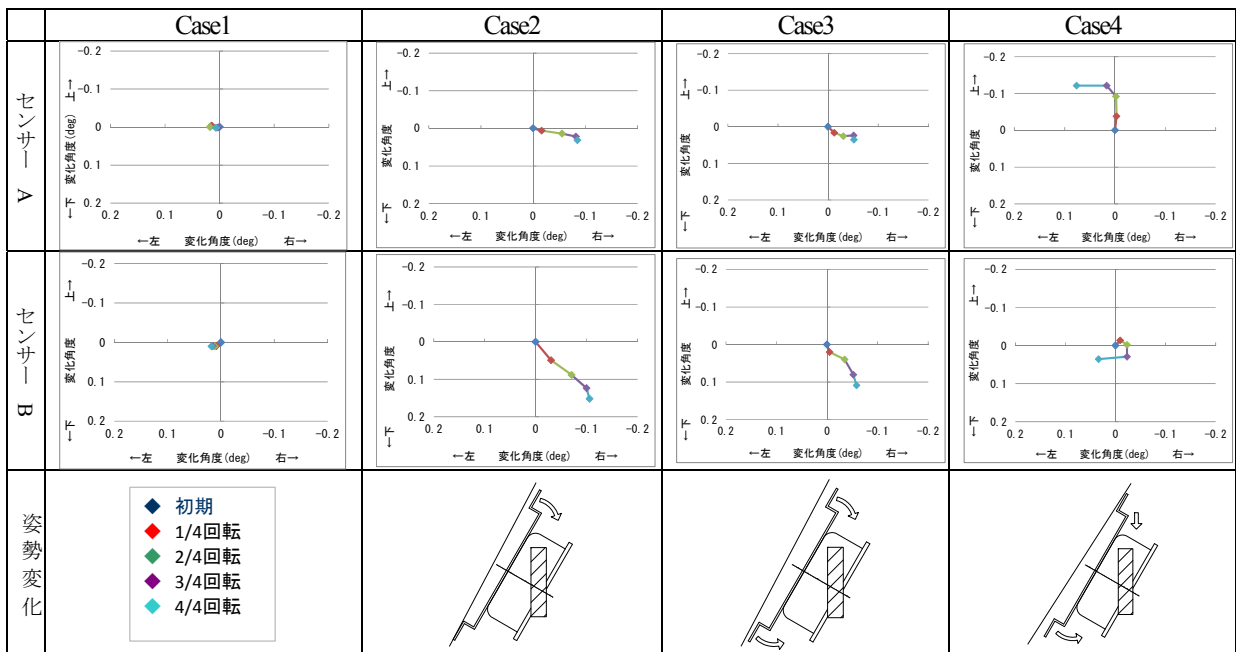


表-7 変位実験ケースおよび傾斜変化量



まず、すべてのケースにおいて、取付けボルト1/4回転目から変位を検出しており、目標とする傾斜センサーの感度に関する要求性能は満たしていることが判った。

Case1 は、ほとんど動きが見られないが、変位観察から予想される傾斜方向と計測結果は一致している。

Case2 では、変位観察ではボルト（ウ）が大きく変位していたが、この傾向はセンサーA、センサーBともに検出できている。しかし、照明器具のフレームボックスにねじれが生じないと考えた場合に変位から予想される傾斜量は得られておらず、取り付け時の金具ひずみや取り付けボルトとのかみ合いがフレームボックスの挙動に影響を与えることが推測される。

Case3 では、センサーBの検出角度がCase2 よりも小さくなっており、ボルト（エ）が緩められたことにより照明器具全体が降下し、照明器具の傾斜としては回復していることが推測される（表-7）。

Case4は4点を緩めているため全体として降下したが、1点が壁面に接するなどして均等には降下していない状況が把握されていると考えられる。

(7) 考察

実験の結果から得られた知見は以下である。

- 実験に使用した傾斜センサーは、トンネル照明器具の取付け部の緩み等による変位を初期段階から捉えることができ、この精度はコンクリート壁面に対する取付けボルトの劣化損傷による脱落変位を十分に下回る。すなわち、照明器具の脱落前に異常を検出することが可能である。
- しかし、4点でコンクリート壁面に固定された照明器具の落下までの降下モードは、取付け金具とコンクリート壁面の接触や金具と取付けボルトのかみ合いなどにより複雑であり、現在のデータの範囲では、傾斜変化と危険度を明確に結びつける結果は得られない。

後者は、傾斜センサーによるトンネル照明器具の状態把握にはさらに実験を積み重ねる必要があることを示唆している。しかし一方で、極めて初期の段階から照明器具の姿勢変化を把握できることが明らかとなったことにより、異常の早期把握による緊急点検のアラートに活用する可能性も考えられる。

5. トンネル照明器具の振動検出による異常検知

(1) センシングの考え方

道路トンネル内の付属物は、自動車の走行に起因する振動や換気設備の稼動、自然風などの影響により振動していると考えられる。

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上記の振動をするが、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センシングし、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、異常検知システムとして成立するとの考え方である。

既往研究事例としては、換気設備であるジェットファンに荷重センサーをあらかじめ取り付けられたものを、振動等により支持構造に異常が生じた場合に自己検出可能なジェットファンとして製品化しているもの¹⁷⁾や、ジェットファン運転時の異音に着目して研究した事例¹⁸⁾がある。また、さまざまな振動検知による構造物ヘルスマonitoringについての研究¹⁹⁾も進んでいる。

(2) 使用するセンサー

既往研究事例に、照明器具について固有振動数を測定したものと脱落、落下についてのヘルスマonitoringを提案した例はないと考えられるので、センサーの感度、周波数帯域を要求性能として定義するためには、これらを把握する必要がある。

そこで、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を行った。

実験は、延長L=145mの県道トンネルの坑口および中央部において、照明器具の3面（上面、側面、裏面、以下 No.1, No.2, No.3）に振動センサーを取り付け、交通種別の調査とともに振動計測を実施した（写真-7）。

その結果、図-7に示すとおり、100Hz付近に卓越したスペクトルが検出された。通過車両との関係では、舗装からの走行振動よりも大型の内燃機関等からの低周波振動が卓越していた。

これを知見とし、MEMS技術を活用した比較的low周波によく反応する表-8のセンサーを採用した。

表-8 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±0.25V	
検出加速度範囲	±19.6m/s ²	
オフセット出力	V _{DD} /2V	
感度	1±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)	

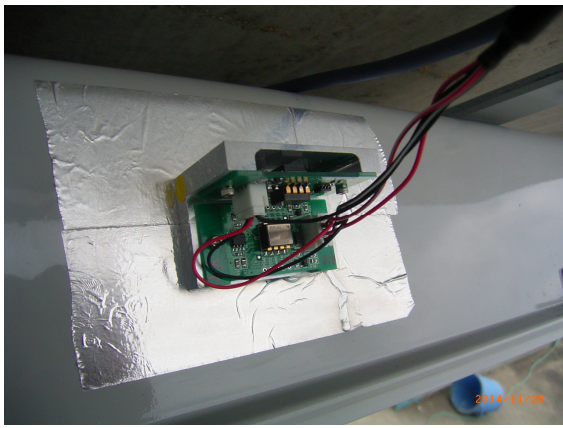


写真-6 MEMS 振動センサー

(3) 実験方法

本実験は、傾斜センサー試験により降下変位実験を実施した実験装置に照明器具を再度固定し、装置の近傍で重機を走行させることにより低周波の振動を与えることにより実施した。振動センサーの取付け位置は現地計測試験の No.1 に相当する照明器具の上面とし、照明器具のフレームボックスに直接接着して取り付けた。

実験は、4本の取付けボルトの緩みケースとして全固定 (Case0) から1本ずつ緩みボルトの本数を増やし、4本緩み (Case4) まで5ケースを行うものとし、各ケースに極力、同レベルの振動を与えるように配慮した。その上で、振動センサーにより照明器具の固定状況の変化により固有振動数がどのように変化するかを観察した。

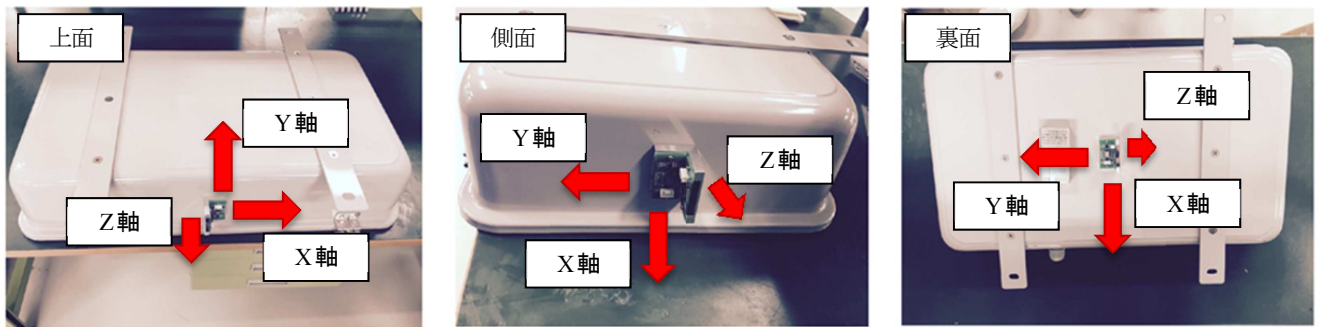


写真-7 振動センサー取付けおよび軸方向

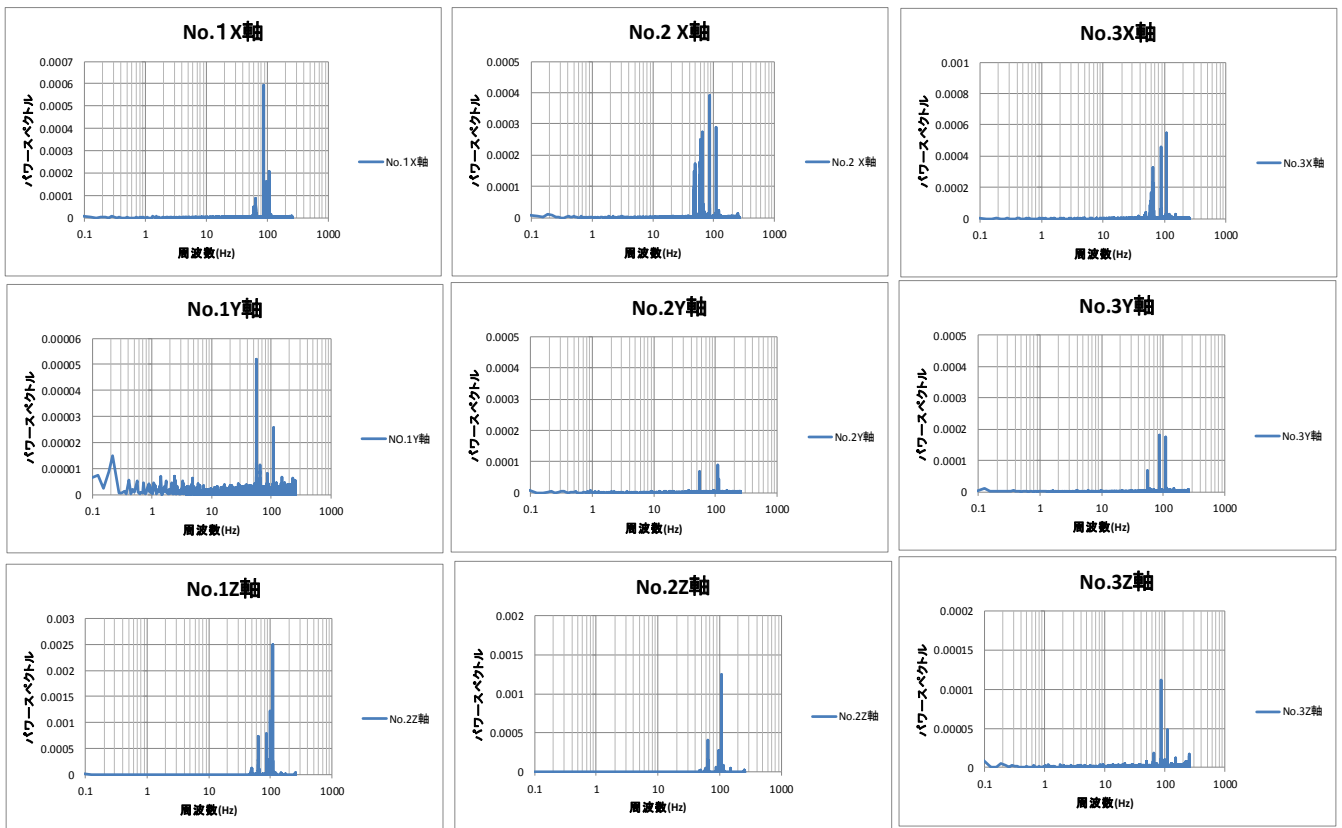


図-7 供用中の道路トンネル内照明器具の振動計測結果

(4) 実験結果

まず、県道トンネルでの調査において比較的安定した結果が得られているX軸方向に着目し、各ケースのパワースペクトルを一覧する(図-8)。

Case0において、90Hz近傍にピーク値が検出されており、この結果は、概ね県道トンネルの試験結果と整合する。

Case1から段階的に取付けボルトを緩めると、ケースごとに10Hz程度、ピーク値が低下することが確認でき

た。10Hz付近のピークは各ケースで変化しないので、重機あるいは実験装置に起因するものと推測される。

Y軸方向は、Case4において26Hz近傍にピーク値が現れたが、他のケースでは明瞭なピークが得られなかった。

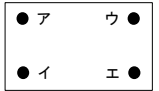
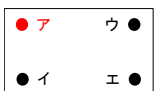
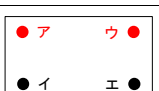
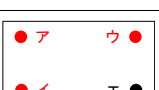
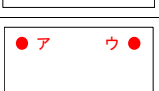
Z軸方向は、全ボルトが固定されているCase0はX軸方向とほぼ同じピーク値が確認できたが、Case1でピーク値が60Hz付近まで低下し、以後Case4までの各段階において、有意と思われるピーク値の低下は見られなかった。

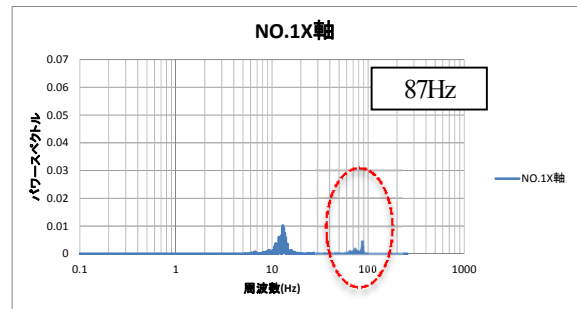
(5) 考察

実験の結果から得られた知見は以下である。

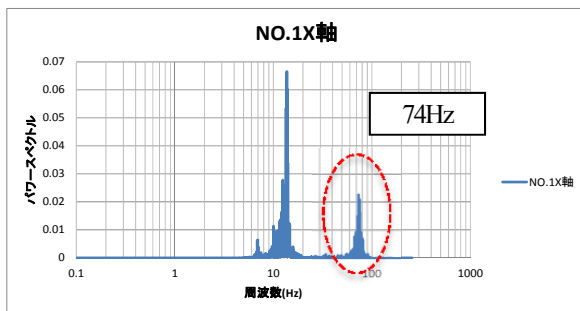
- トンネル照明器具の取付け状態における固有振動数は、約100Hzであり、舗装面からの走行振動よりも通行車両車体に起因する低周波振動により振動していると考えられる。
- 実験に使用した振動センサーは、トンネル照明器具の取付け部の緩みによる固有振動数変化を初期段階から捉えることができる可能性がある。

表-9 振動実験ケースおよび結果一覧

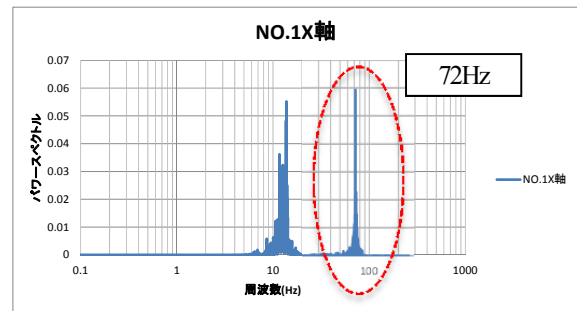
Case	緩み	ボルト緩み位置	固有振動数(Hz)
Case0	全固定		87
Case1	1点		74
Case2	2点		72
Case3	3点		66
Case4	4点		53



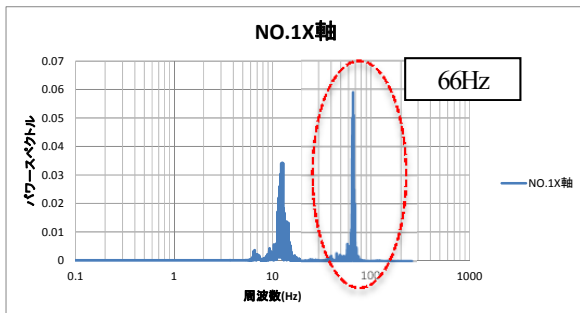
Case0



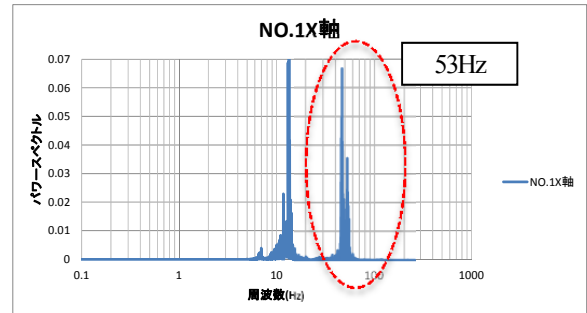
Case1



Case2



Case3



Case4

図-8 実験装置による振動試験パワースペクトル結果

- c) 振動センサーの測定軸方向により、比較的敏感に取付けボルトの変化を捉える方向と、鈍感な方向が見られる。

別途実施した取付けボルト設計検証では、4本の取付けボルトのうち1本が健全であれば、照明器具が自重により脱落することはないことを確認しているため、早期段階で何らかの異常が照明器具に発生していることを検出できれば式(1)が成立し、落下までの時間内に通行規制や緊急点検などの措置を実施し、激突など利用者直接被害の未然防止に役立つと考えられる。

また、本実験では前面ガラスの取付け部劣化による浮きや取付け金具と照明器具の固定などの、照明器具の損傷による固有振動数の変化を捉えるケースは実施していないが、これらを追加するとともに、各メーカーの照明器具において固有値を特定できれば、振動の常時監視を行うことにより、ヘルスマonitoringを成立させることができる可能性がある。

一方で、振動センサーの取付け位置や着目する軸方向によっては期待通りの事前異常を検知できない可能性もあり、照明器具フレームボックスの振動形態やコンクリート壁面への固定方法によりどのような影響があるのか引き続き実験により確認をしていく必要がある。

6. 商用センサーを用いたシステムの提案と効果

(1) システム構造

本実験でのシステム構成は、変位検出センサーおよび振動検出センサーとも、照明器具へ接着固定、電源は2次電池で連続通電、データ回収は有線でセンサーとデータロガーを接続し回収、解析はPCでの後処理とした。本システムを実用化する上での要件を以下に挙げる。

- 状態を正確に計測するためセンサーの選択と設置
- 取得データの解析により構造物の状態を判

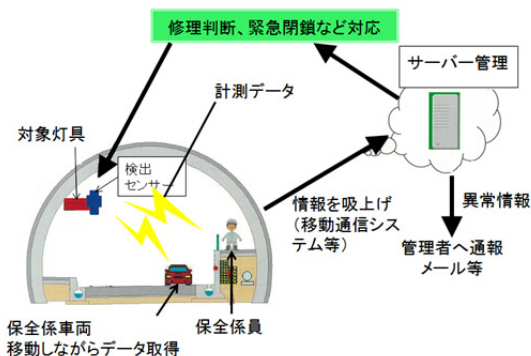


図-9 システム構成例

定し、必要があれば管理者へ通報する仕組み

- センサーからの情報を伝達する無線化
- 電源の確保

上記要素を具現化するためには、以下の課題がある。

- 異常と判断するに足る状態が絞り込み、かつ、適用センサーの仕様と合致している。
- 長期の駆動が可能な省電力化の工夫が必要である。
- 有線なみの信頼性が確保できる無線化技術の導入。
- 市場規模から維持管理費用を含めたコスト低減の提案が可能なかの評価。

上記課題に関しては、本実験を通じて適用センサーの仕様に関して知見が得られたが、その他の課題については今後、さらに検証と開発を進める必要がある。本研究が指向するシステム構成の例を示す(図-9)。

(2) 通信

トンネル内に設置されるセンサーのデータ通信は、図-9に示した例より、センサーから近距離無線技術で保全係員や保全車両に送られ、移动通信システムを介してサーバーへ送られ、計測データの閲覧、異常時の管理者への通報が行われる。

センサーネットワークで使用される主な無線方式は、表-10の通りである。

無線化を行うにあたり、有線なみの信頼性の確保と省電力化の両立を目指す必要があり、現在検討段階であるが、920MHz、2.4GHz帯を比較しながら、より有効な無線通信手段を含めた研究を行う必要がある。

(3) 監視

通信を用いてセンサー情報を取得し、これを監視する方法は常時監視に相当するものであり、式(1)のTIが短く、巡回監視ではタイムラインが成立しない場合でも保全モニタリングシステムとしての機能が発揮される。

取付けボルトを含むトンネル内付属施設について、

表-10 無線通信方式

項目	920MHz帯	2.4GHz帯			5GHz帯
		Bluetooth	Wi-Fi	Zigbee	
通信プロトコル	独自 Wi-SUN Zigbee	Bluetooth	Wi-Fi	Zigbee	Wi-Fi
通信速度(bps)	100k 500k	24M	11M 54M	250k	54M
通信距離(理論値)	約5km	10m	50m 以下	50m 以下	50m 以下
送信出力	20mW以下	10mW 以下	10mW 以下	10mW 以下	10mW 以下
利用可能なチャンネル数	38	79	13	16	19

「付属物（標識・照明施設等）点検要領」，「道路トンネル定期点検要領」に基づき，5年ごとの点検を実施したとしても，道路管理者としての日常監視は行われる。道路パトロール等による日常監視，利用者からの通報を通信に代えることができれば，システムは大幅に簡便になり，維持管理コストの低減に寄与することが考えられる。

芥川ら²⁰⁾²¹⁾²²⁾は，OSV (On Site Visualization) としてセンサーに組み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。

取付けボルトの健全性低下は，とくに著しいものを除き，現在の点検方法では検出困難であることはここまで述べたとおりである。トンネル内付属施設の思わぬ落下に備えるためには，何らかのセンシングが必要であると考えられるが，式(1)が成立し，タイムラインが機能する範囲において，システムの簡素化の方向性としてOSVなどは検討に値する。

(4) システムの経済性評価

ここまでは，主に道路管理者としての責務の観点から保全モニタリングシステムの導入について提案してきたが，導入により維持管理費の総額や社会的コストが縮減されるのであれば，導入への動機付けはより強くなる。

本研究では，保全モニタリングシステム導入と未導入でのライフサイクルコスト差分(B)を算出し，これとシステム導入コスト(C)の比をもって(BC)，システムの経済的評価を試みた。

まず，嶋本，野村²³⁾は，幹線道路近傍の斜面が崩壊した場合における遮断リスクに着目し，社会的損失を含む損失を計上する方法について提案している。

嶋本らの提案する，道路遮断リスク基本式をトンネル内照明に置き換えると，照明器具落下による道路遮断リスクは，式(2)で与えられる。

$$R = P_i \times Q_{i-j} \times C_j \quad (2)$$

ここで， R は照明器具落下リスク（損失期待値）， P_i は取付けボルトの長期劣化確率， Q_{i-j} は P_i による照明器具落下 j の発生確率， C_j は個別落下 j の損失である。なお，照明器具が落下した場合は，例外なく復旧や救助，緊急点検による交通遮断が発生することを式(2)では前提としている。

損失 C_j は社会的損失を盛り込み，式(3)で与えられる。

$$C_j = n \cdot D_1 + \alpha \cdot n \cdot D_2 + D_3 + D_4 \quad (3)$$

ここで， D_1 は日あたり道路利用者損失（走行時間，走行経費増加額）， D_2 は日あたり社会経済損失， D_3 は激

突による直接的な人的損失と物的損失， D_4 は復旧費用， n は交通遮断日数， α は被害の大きさによる係数である。

道路トンネルの劣化損傷によるリスク評価と経済損失については，宇野，木村²⁴⁾がトンネル覆工コンクリートのはく落リスクについて研究している。

宇野らによれば，はく落リスクを加味したライフサイクルコストは，式(4)で与えられる。

$$C_t = R_t \cdot \frac{D_t}{(1+k)^t} \quad (4)$$

ここで， C_t はライフサイクルコスト， R_t は年平均はく落リスク， D_t ははく落による損失， t は供用期間， k は社会的割引率である。

年平均はく落リスクは，式(5)で与えられ，はく落損失は式(6)で与えられる。

$$R_t = R_{nt} \cdot \frac{D_t}{t} \quad (5)$$

$$D_t = \sum_{i=1}^5 D_i = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 \quad (6)$$

ここで， R_{nt} は年平均はく落発生確率， D_1 は人身損失， D_2 は復旧施工費， D_3 は点検費， D_4 は迂回損失， D_5 は救急医療損失である。

嶋本らは，重要幹線道路が長期間にわたり遮断されるような事態では，物流の機会損失などは無視しえないとして，日あたり社会経済損失を計上することを提案しているが，迂回路のある単独トンネルが，はく落や照明器具落下により数日から数週間遮断される程度であれば，物流機会損失は無視できて，その場合，式(3)に式(6)を置換することが可能である。

取付けボルトの定着が劣化しても，孔とのかみ合い等によりすべて照明器具は落下するわけではないと考えられることから，式(2)を踏まえると，年平均照明器具落下確率 R_{ns} は式(7)で与えられる。

$$R_{ns} = \frac{1}{\beta} \times P_i \times Q_{i-j} \quad (7)$$

ここで， β は交通規制されないまま道路パトロール等が落下物を片付け，速やかに交通回復処理されることによる未報告確率である。

トンネル照明器具の管理に係る特性を踏まえ， D_i を照明器具落下による損失として式(6) D_1 から D_5 を再定義する。

a) 人身，物的損失

落下物が人や車に衝突することによる人身損失とする宇野らの定義に加えて、落下照明器具が激突することによる車両損害を考慮し、式(8)で与えられる。

$$D_1 = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=0}^3 I_j \cdot (C_j + CC_j) \right) \quad (8)$$

ここで、 D_1 は人身、物的損失(円)、 N は照明器具落下回数、 I_j は衝突確率、 C_0 は物的損失のみ、 C_1 は死亡による人身損失、 C_2 は後遺症による人身損失、 C_3 は軽傷による人身損失、 CC_j は各事故レベルによる車両損失(修理費)である。

b) 復旧施工費、緊急点検費

復旧施工費は、落下した照明器具を再設置するための材料費、施工費、交通規制費の合計である。緊急点検費は、当該トンネルの他の照明器具に危険がないか確認するための点検費、交通規制費の合計であり、事業者によっては、管理する他のトンネルにも一斉緊急点検として波及する可能性があることから、宇野らの定義に一斉緊急点検費を加算する。

復旧施工費、一斉緊急点検費は、照明器具落下に伴う復旧1件ごとに発生する費用として式(9)で与えられる。

$$D_2 = \sum_{i=1}^N C_{ri} + C_s + n \cdot D_D \quad (9)$$

ここで、 N は1回の復旧工事で復旧する照明器具数、 C_{ri} は照明器具復旧費で新品照明器具および取付け金具、取付けボルト材料費、同施工費、 C_s は工事に伴う交通規制費、 n は一斉緊急点検を行うトンネル数、 D_D はトンネル1本あたり緊急点検費である。なお、緊急点検で実施する内容は定期点検とほぼ同様と仮定し、緊急点検費と定期点検費は同値とする。

c) 定期点検費

トンネル照明器具の定期更新に明確な規定はなく、更新されるまでは定期点検が実施される。照明器具に伴う緊急点検費は D_2 で計上するので、本項は定期点検費および交通規制費として、式(10)で与えられる。

$$D_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s C_{ej-i} + C_{s-i} \quad (10)$$

ここで、 n は評価期間内の定期点検回数、 s は対象トンネルの照明器具数、 C_e は照明器具1台あたり点検費、 C_s は点検に伴う交通規制費である。

d) 交通損失

宇野らは、はく落が原因による交通規制は通行止めによる迂回となることを想定して迂回損失を定義した。

トンネル照明器具の落下に伴う復旧施工、点検による交通規制は通行止めではなく、片側通行規制が想定されるので、平均速度低下に伴う到着遅延による交通損失として、式(11)で与えられる。

$$D_4 = n \cdot \sum_{i=1}^M Q_i \cdot C_0 \quad (11)$$

ここで、 n は規制期間(時間)、 M は車種、 Q_i は平均交通量、 C_0 は規制による到着時刻の遅延による路線の費用増加(円/台)である。

e) 救急医療損失

救急医療損失は、交通規制により救急医療を受けるまでの時間が増大することによって生じる損失であり、灯具落下が原因で発生する規制件数1件ごとに発生するとして式(12)で与えられる。

$$D_5 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 I_i \cdot E_j \quad (12)$$

ここで、 N は照明器具落下発生件数、 I_i は救急車の混入率、 E_1 は死亡に至る医療損失、 E_2 は後遺症が残る医療損失、 E_3 は軽傷で済む医療損失である。

これらの定義により、式(4)および式(5)から、照明器具落下リスクを加味したライフサイクルコストの算定が可能である。

取付けボルトの長期劣化確率は、知見が少ないため笹子トンネルのボルト引抜き試験結果を参照した。また、照明器具の落下による人的被害の実績が得られなかったため、宇野らと同様に人的損失発生確率を仮定した。事業者の管理規模としては、わが国の山岳トンネル平均延長に近い400mのトンネルを50本管理する事業者を想定する。10年ごとの合計損失値を算出してシステム未導入(without)とシステム導入(with)で比較した結果を表-11に示す。

なお、報告、報道から、照明器具の落下事故が発生すると、管理者は類似トンネルの一斉点検を実施していることが確認されたので、これを加味することとし、緊急点検の実施は定期点検のサイクルには影響しないものとして定期点検費用を算出した。また、照明器具落下発生確率の根拠としている、笹子トンネルの設計耐力を満たさないボルト比率は、本トンネルの後打ちボルト施工が道路トンネルとして2例目の、ごく初期の施工であり、

表-11 トンネル照明器具落下の10年ごと損失集計表

1. モニタリングシステム未導入(without)

経過年		0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
Pi	取付けボルト長期劣化確率	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125
Qi-j	Piによる照明器具落下発生確率	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
β	未報告確率	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Pnt	年間照明器具落下確率	0.0125	0.025	0.0375	0.05	0.0625
N1	管理照明器具数	3000	3000	3000	3000	3000
N0	照明器具落下数	37.5	75	112.5	150	187.5
J1	衝突確率	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
C0	人的損失(物損のみ)					
C1	人的損失(死亡)	¥23,031,938	¥46,063,875	¥69,095,813	¥92,127,750	¥115,159,688
C2	人的損失(後遺症)	¥8,933,438	¥17,866,875	¥26,800,313	¥35,733,750	¥44,667,188
C3	人的損失(軽傷)	¥1,291,875	¥2,583,750	¥3,875,625	¥5,167,500	¥6,459,375
C10	C0時の車両修理費	¥4,687,500	¥9,375,000	¥14,062,500	¥18,750,000	¥23,437,500
C11	C1時の車両修理費	¥281,250	¥562,500	¥843,750	¥1,125,000	¥1,406,250
C12	C2時の車両修理費	¥937,500	¥1,875,000	¥2,812,500	¥3,750,000	¥4,687,500
C13	C3時の車両修理費	¥4,687,500	¥9,375,000	¥14,062,500	¥18,750,000	¥23,437,500
D1	人身, 物的損失	¥43,851,000	¥87,702,000	¥131,553,000	¥175,404,000	¥219,255,000
Cr1	照明器具復旧費	¥350,000	¥350,000	¥350,000	¥350,000	¥350,000
Cs	交通規制費	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000
n0	一斉点検数	管理トンネルすべて	50	50	50	50
D2	復旧施工費, 一斉点検費	¥173,125,000	¥201,250,000	¥229,375,000	¥257,500,000	¥285,625,000
Ce	照明器具1台あたり点検費	¥45,000	¥45,000	¥45,000	¥45,000	¥45,000
Cs	交通規制費	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000
D3	定期点検費	5年ごと実施	¥290,000,000	¥290,000,000	¥290,000,000	¥290,000,000
n	規制日数4日, 1落下あたり	交通量4000台/日として, 規制日数4日, 片側交互通行と想定	¥1,571,200	¥1,571,200	¥1,571,200	¥1,571,200
D4-1	落下トンネル	¥58,920,000	¥117,840,000	¥176,760,000	¥235,680,000	¥294,600,000
D5	救急医療損失	¥ -	¥ -	¥ -	¥ -	¥ -
Dt	灯具落下損失	¥565,896,000	¥696,792,000	¥827,688,000	¥958,584,000	¥1,089,480,000

2. モニタリングシステム導入(with)

経過年		0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
Pi	取付けボルト長期劣化確率	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125
Qi-j	Piによる照明器具落下発生確率	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
β	未報告確率	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Pnt	年間照明器具落下確率	0.0125	0.025	0.0375	0.05	0.0625
N1	管理照明器具数	3000	3000	3000	3000	3000
N0	照明器具落下数	37.5	75	112.5	150	187.5
J1	衝突確率	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
C0	人的損失(物損のみ)					
C1	人的損失(死亡)					
C2	人的損失(後遺症)					
C3	人的損失(軽傷)					
C10	C0時の車両修理費					
C11	C1時の車両修理費					
C12	C2時の車両修理費					
C13	C3時の車両修理費					
D1	人身, 物的損失	¥0	¥0	¥0	¥0	¥0
Cr1	照明器具復旧費	¥350,000	¥350,000	¥350,000	¥350,000	¥350,000
Cs	交通規制費	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000
n0	一斉点検数	管理トンネルすべて	50	50	50	50
D2	復旧施工費, 一斉点検費	¥173,125,000	¥201,250,000	¥229,375,000	¥257,500,000	¥285,625,000
Ce	照明器具1台あたり点検費	¥45,000	¥45,000	¥45,000	¥45,000	¥45,000
Cs	交通規制費	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000
D3	定期点検費	5年ごと実施	¥290,000,000	¥290,000,000	¥290,000,000	¥290,000,000
n	規制日数4日, 1落下あたり	交通量4000台/日として, 規制日数4日, 片側交互通行と想定	¥1,571,200	¥1,571,200	¥1,571,200	¥1,571,200
D4-1	落下トンネル	¥58,920,000	¥117,840,000	¥176,760,000	¥235,680,000	¥294,600,000
D5	救急医療損失	¥ -	¥ -	¥ -	¥ -	¥ -
Dt	灯具落下損失	¥522,045,000	¥609,090,000	¥696,135,000	¥783,180,000	¥870,225,000

B1	システム導入効果①	人的損失, 物的損失のみ考慮	¥43,851,000	¥87,702,000	¥131,553,000	¥175,404,000	¥219,255,000
B2	システム導入効果②	緊急一斉点検が不要を考慮	¥188,851,000	¥232,702,000	¥276,553,000	¥320,404,000	¥1,018,510,000
Ct1	社会的割引率考慮		¥43,851,000	¥59,248,329	¥60,039,072	¥54,080,328	¥217,218,728
Ct2	社会的割引率考慮		¥188,851,000	¥157,205,133	¥126,215,179	¥98,786,534	¥571,057,847

3. システム導入コスト

C1	現在価格	センサー100千円/台+通信2,000千円/TN, 20年ごと更新	¥400,000,000		¥182,554,778		¥582,554,778
C2	目標価格	C1×0.5	¥200,000,000		¥41,657,809		¥241,657,809

現在行われている後打ちボルトに対する品質管理などがなかった時期の施工であるため、初期欠陥を含め、現在の施工より高率となっている可能性がある。

表-12に、4%の社会的割引率を考慮したシステム導入効果と導入コストを整理する。システム導入は照明器具の落下による事故の未然防止を支援するので、人的、物的損失の差分が導入効果となる。これをシステム導入効果①とし、さらに落下事故が未然防止されたことにより、一斉緊急点検は実施されずに済むとした結果をシステム

導入効果②とする。すなわち、システム導入効果①は、表-11のD1に社会的割引率を乗じて算出、システム導入効果②は、表-11のD1および低減したD2の合計に社会的割引率を乗じて計算される。

システム導入コストは、センサー単価および通信施設費としてのケーブル類を見込み、20年更新とした。なお、本研究段階でセンサー以外は試作レベルのため概算見込みであるが、量産により1/2程度のコストダウンが期待できるものとして、目標価格とした。

表-12 保全モニタリングシステム経済性評価結果

項目	試算結果 (百万円)	摘要
システム導入効果①	217.2	人的, 物的損失
システム導入効果②	571.1	緊急点検考慮
システム導入コスト①	582.6	現在価格
システム導入コスト②	241.7	目標価格

50トンネルの一斉緊急点検を実施せずに済むと考えた場合、 $B/C = 0.98$ となり、量産化等により導入コストが低減されれば $B/C > 1$ も期待できる結果が得られた。なお、この結果は先に述べた照明器具落下発生確率の設定により大きく変化するものであり、本論のみをもってシステム導入の経済性確立の根拠とすることはできない。

また、照明器具を取付けボルトとともに20年程度で定期更新する場合などは考慮しておらず、その場合には取付けボルトの長期劣化確率がリセットされるので、導入の経済性判断に影響を与える。

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付属物の落下リスクについて、照明器具に着目した。

照明器具は、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相当に困難であり、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ることが利用者安全のために望ましい。

本研究では、MEMS技術を活用した自動車用商用センサーにより照明器具の姿勢変化および振動を常時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。

MEMS技術による商用センサーは今後、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、「どこでもセンサー」として語られる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付属物の安全性を向上させることによるトンネルの性能向上とともに、MEMSセンサーの活用をさらに推し進めることが期待される。

参考文献

- 1) Pat Choate, Susan Walter; America in Ruins, (米国州計画機関評議会編; 岡野行秀監修, 古賀一成訳, 開発問題研究所, 1987.02)
- 2) 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, 2003.10
- 3) たとえば, 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, 2014.04

- 4) 初台南出口付近案内看板落下事故に関する記者会見について; 首都高速道路株式会社プレスリリース, <http://www.shutoko.co.jp/~media/pdf/corporate/company/press/h22/12/pr12sv000000b532.pdf>, 2010.12
- 5) 新東名高速道路葛山トンネル(下り線) 照明器具前面ガラスの落下について; NEXCO 中日本定例記者会見資料, http://media2.c-nexco.co.jp/images/press_conference/85/1096505164f979e2c0dbcd.pdf, 2012.04
- 6) 諸外国の最新事例調査; 欧州の有料道路制度等に関する調査報告 (平成 20 年 4 月), 独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構, pp.135-146, 2010.04
- 7) 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; 国土交通省道路局, p.39, 2013.06
- 8) 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; 国土交通省道路局, pp.35-41, 2013.06
- 9) 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; 国土交通省道路局, p.44, 2013.06
- 10) 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); 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 pp.2-8, 2015.02
- 11) 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, 2014.09
- 12) 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, 2011.1
- 13) 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, 土木学会トンネル工学委員会, 2009.10
- 14) 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相対観測; 土と基礎 50-6 (533), 加速度センサーを使用した新しい設置型孔内傾斜計の開発 第 36 回地盤工学研究発表会 (徳島), 2001.06
- 15) (独)土木研究所ほか; 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, 2011.06
- 16) 曙ブレーキ工業株式会社, 製品・技術情報, IT 傾斜計測システム「IT 孔内傾斜計」, http://www.akebono-brake.com/product_technology/product/sensor_solution/it/index.html
- 17) たとえば, 特開 2003-161292 ジェットファン; 株式会社電業社機械製作所, 東京都大田区大森北 1 丁目 5 番 1 号, 公開日 2003.06
- 18) 児玉好雄, 林秀千人, 村山将, 近藤重樹, 山口秀告; ジェットファンの離散周波数騒音に関する研究, ターボ機械, 29(10), pp.611-618, 2001.10
- 19) 高木清志, 西郷宗玄; スマート構造物のクラック推定を伴う振動制御ーゲインスケジュールド制御系による実証的検証一, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.5, No.1,

- pp.1-8, 2006
- 20) 芥川真一, 高野晃佑, 竹中嗣人: 相対変位を光の色に変えて表示する装置の開発と斜面変位モニタリングの一例, 平成 19 年度土木学会年次学術講演, 広島, 3-015, pp.29-30, 2007.09
- 21) Shinichi AKUTAGAWA and Shoya MORI; Development of new deformation sensors for monitoring of infrastructures, Proceedings of the EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering, September pp.16-17, Bangkok, 2008.
- 22) 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.
- 23) 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, 2007.09
- 24) 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.

(2015. 5. 18 受付)

RESEARCH OF TUNNEL APPENDAGE CONSERVATION MONITORING SYSTEM WITH MEMS TECHNOLOGY

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

By the collapse of ceiling panels in Sasago tunnel, it turn out completely inevitable the falling of the appendage by periodic inspection. In conventional inspection method, it can't fully grasp the soundness of the bolt for securing the appendage. While, with technology improvement of economical, high-performance sensors and handling of big data, it has been promoting the social device in the infrastructure field called "anywhere sensor". This paper focused on lumps in load tunnel, proposes a sensing method utilizing commercial sensors with MEMS technology and verifies its practicality. And proposes the tunnel conservation monitoring system with organizing the relationship with periodic inspection.