



On-Site Visualization の手法に基づく計測システムの性能評価の方法

野村, 貢

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2018-09-07

(Date of Publication)

2019-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙第3355号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003355>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

On-Site Visualization の手法に基づく計測システムの
性能評価の方法

平成 30 年 7 月

野 村 貢

目 次

第 1 章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の方法論および構成	6
参考文献	8

第 2 章 計測システムの性能規定化

2.1 計測におけるコミュニケーション	11
2.2 計測システムの正統性担保とアカウントビリティ	13
2.3 計測システムの性能規定における体系の整理	17
2.4 計測システムにおける要求性能の整理	19
参考文献	22

第 3 章 計測システムの性能評価の方法

3.1 計測システムの機能と性能定義	24
3.2 計測ツールと測定の性能値の指標化	25
3.3 計測値判断の性能の指標化	31
3.4 結果表現の性能の指標化	33
3.5 FMEA による評価方法と活用	35
参考文献	41

第 4 章 On-Site Visualization の方法論と取り組み

4.1	On-Site Visualization の概念	41
4.1.1	OSV と従来手法の相違点	41
4.1.2	OSV の特性と可能性	46
4.2	On-Site Visualization の導入手順	48
	参考文献	52

第 5 章 On-Site Visualization を用いた斜面工事における性能評価の導入

5.1	斜面工事における計測システムの性能	54
5.2	実工事における適用性の検討	55
5.3	ケーススタディによる性能ランクの提案	61
5.4	実工事およびケーススタディから得られた知見	65
	参考文献	67

第 6 章 MEMS センサーを用いた計測システムの開発

6.1	トンネル内附属物保全モニタリングシステムの開発	68
6.1.1	トンネル内附属物の落下と点検の現状	68
6.1.2	現行点検方法の課題	72
6.1.3	保全モニタリングシステムの性能規定	73
6.1.4	MEMS センサーの活用	76
6.1.5	変位計測による異常検知	79
6.1.6	振動計測による異常検知基礎実験	88
6.1.7	振動計測による異常検知実用化実験	94
6.2	OSV による実用化システムの提案	115

6.2.1 システムのグレード設計	115
6.2.2 実用化システム実施設計	119
参考文献	125

第7章 性能評価を考慮した On-Site Visualization 導入方法の提案

7.1 性能評価を考慮した導入手順の提案	128
7.1.1 計測システム導入前に実施する事項	128
7.1.2 計測システムの計画立案と評価	129
7.1.3 測定プロセスの計画	130
7.1.4 判断プロセスの計画	131
7.1.5 結果表現プロセスの計画	132
7.2 Fault Tree Analysis を活用した導入方法	135
7.2.1 FTA 活用の目的	135
7.2.2 FTA 活用方法の提案	135
7.3 経済性能を評価する方法の提案と導入方法	138
7.3.1 経済性能を評価する方法	138
7.3.2 パラメータスタディによる考察	144
参考文献	151

第8章 結 論

8.1 計測システムの性能評価方法の確立についての結論	152
8.2 On-Site Visualization の導入方法についての結論	155

謝 辞

第 1 章 序 論

1.1 研究の背景

2005 年度以降の 10 年間に災害救助法が適用された事例は 90 件あるが、風水害はその 70%以上を占めるとともに直近 10 年で増加傾向にある¹⁾。

土砂災害も頻発しており、近年でも 2014 年 8 月豪雨により広島市で 74 名の犠牲者を出す災害となったほか、毎年各地で災害死者を生じる事態となっている。

市民生活圏の拡がりや災害のトリガーとなる外力の高まりによる発災リスク上昇に加え、危険区域の指定、周知が遅れていること、土砂災害リスクの情報提供が不十分な場合があることなどを受けて、「総合的な土砂災害対策の推進について」が 2015 年 6 月に政府の中央防災会議 WG から提示された²⁾。

ここでは、「地域における土砂災害リスク情報の把握・共有」、「適切な時期・範囲の避難勧告等の発令」、「避難勧告等の情報の伝達方法の改善」が謳われ、自助、共助を軸としたソフト対応の重要性とそれを支援するシステムの重要性が強調されている³⁾。

一方、建設労働災害においては、2015 年度 327 件の死亡災害が発生しており⁴⁾、墜落、転落がその最大原因であるが、崩壊、倒壊やはさまれ、巻き込まれもそれぞれ多数発生している。わが国の大規模な開削工事や土工事では労働安全衛生マネジメントシステム(OSHMS Occupational Safety and Health Management System)に基づくリスクアセスメントが行われるため、それなりに充実した安全管理が行われるが、小規模開削や切土では、施工者能力にも起因し充実した管理は難しいため、なかなか労働災害が減少しない状況である。

一方で、様々な構造物や附属物の維持管理、保全の重要性についても着目が集

まっている。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⁵⁾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⁶⁾が急速に進められ、同時に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⁷⁾。例えば、わが国の道路トンネル約11,000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および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⁷⁾。

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⁷⁾。

これらから示唆されるのは、橋梁やトンネルを含む社会資本の点検、維持管理活動に対して、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

が中長期的に不足するということである。そのため、ハード対策としての補修・補強や改築とともにソフト対策の重要性が強調されている。リスクフリーを念頭に置いたハード対策は、多くのコストを必要とし完成までの時間も必要であることから、よりリーズナブルな手法として、監視に基づく緊急避難などのソフト対策との組み合わせによるリスク管理を念頭においたリスクフリーよりも軽易なハード対策が計画されることが多い。このような流れの意味するところは、効率的かつ精度の高い監視技術のニーズが今後、継続的に高まるということである。

監視技術を含む状態検知のハードおよびソフトの組み合わせを本論では「計測システム」と呼ぶ。さらに計測システムを、「測定」「判断」「現地での結果表現」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する。このプロセスのうち「測定」では、MEMS技術による慣性力センサーを活用した斜面計測センサー、構造物等の振動計測センサーなどが実用化されているほか⁸⁾、野村ら^{9),10)}がトンネル内附属物の状態監視への実用試験も報告している。その他のデバイスでは、光ファイバーを用いたセンシング技術も実施例が増えており、多くの実施例^{11),12),13)}が報告されている。

「判断」および「現地での結果表現」プロセスでは芥川ら^{14),15),16)}が、これまでにない方法論として組込みロジックによる判断プロセスを表示に直接化する On-Site Visualization (以下 OSV) を提案しているほか、前掲「総合的な土砂災害対策の推進について」においても、住民等への伝達方法の改善として、防災行政無線や緊急速報メールといった受信者の状況に関わらず情報を伝達可能な PUSH 型とともにウェブ、テレビ、ラジオ等の PULL 型を組み合わせ活用することが提案¹⁷⁾されている。

しかし一方では、東日本大震災の際に、PULL 型媒体を使用した津波避難情報

が停電，施設倒壊などにより相当数機能せず，住民間の口伝による情報伝達が避難行動の契機となった事例も報告されており¹⁸⁾，新たな技術や手法の導入が望まれている。

1.2 本研究の目的

わが国では，災害防除や道路構造の工事目的物あるいは仮設として切土斜面が数多く設けられている。これら斜面を設計，工事および管理するため技術基準については，土木学会や事業者から示方書や技術基準が提示されており，設計手法，施工管理手法および維持管理手法はほぼ確立されている。しかし，実際には大規模工事，小規模工事，管理段階に関わらずさまざまな形態で大小の崩壊事故が発生している。また，切梁支保工を使用した開削トンネルが，地下鉄工事や下水道工事，共同溝工事などにおいて数多く採用されているが，これらも技術基準については整備されているものの，大小の崩壊事故が発生している。山岳トンネル，シールドトンネル等においても同様である。

その結果，さまざまな工事や管理，運用において，設計基準や施工管理基準の整備だけでは安全性確保には十分ではないことが認識され，これと並行した計測システムの重要性が指摘されている。

Terzaghi K. and Peck R.B.は「地盤工事における現場観測工事の重要な役割のひとつは設計時には不確定である地盤工事の失敗のリスクを回避するもの」としてOM (Observational Method) 工法を提唱し¹⁹⁾，現在では欧州地盤規格 (Eurocode) にもOM手法として採りあげられるなど，設計基準や施工管理基準の整備だけでは工事の安全性確保には十分ではないことが認識され，これに併用する計測システムの重要性が指摘されている。

しかし、どのような計測システムを適用すれば十分であるか、言い換えると「良い性能の計測」であるか、すなわち計測システムの性能的確性については、現時点で明確に規定、評価する標準的な方法がない。例えば近年では、2012年に大阪府内で発生した淀川左岸線 正連寺西工区開削トンネル工事での山留め壁崩壊事故が開削トンネルにおける大規模事故として知られている。事故調査技術委員会報告書の結論において「教訓」として「目視・計測などにより設計値との差を常に把握し、必要に応じて逆解析などを実施することで仮定した条件を見直す。つまり現場計測工法を利用した適切かつ厳格な体制の更なる強化が最も重要である」²⁰⁾とは記されたが、具体的にどのようにすれば良いのかは明記されなかった。

もとより、労働安全衛生法第25条に「事業者は、労働災害発生の急迫した危険があるときは直ちに作業を中止し、労働者を作業場から退避させる等必要な措置を講じなければならない」と規定されているが、厚生労働省の「斜面崩壊による労働災害の防止対策に関するガイドライン」(2015年6月)では変状時点検表において措置項目として、変状のモニタリング実施の有無を問うだけであり、計測システムとしての質的評価は問わない書式となっている。また、「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」(2018年1月)も切羽監視責任者を配置することを求めるが、NATM計測の活用などの科学的な方向性は示されていない状況である。

斜面工事の計測システムの性能について論じた研究としては、武士、藤澤ら²¹⁾が検知センサーに要求される性能について例示したほか、岩崎²²⁾らがGPS自動変位監視システムの分解性能を実験的に証明した事例、玉手ら²³⁾が斜面の浅い部分のせん断ひずみを崩壊実験により計測し、要求される計測レンジについて実証した事例などがある。これらの研究は計測部分についての開発的研究が主体であ

り、結果表現と自主的行動につながる理解度まで踏み込み計測システムとしての性能を論じた研究はこれまでにないと考えられる。

公共による多くの工事や管理、運営が限られた予算のなかで施工されていることを踏まえれば、計測システムの必要性は認識されそれなりの機器が設置されているが、その性能は評価できる状態にないというのは公的アカウントビリティの観点からも望ましい状況ではない。総合的に公共の工事や管理の安全性能、品質を高め、科学的正統性を担保するためには、計測システムの性能を評価する仕組みが必要である。

また、公共事業において従来とは異なるアプローチで開発された新しい計測システム、ツール類について、従来型と同等以上であることを明示できなければ工事等に導入できない仕組みも存在しており、これら新しいアプローチによる計測システムや計測ツールの普及を促進するには、従来型に対して性能評価し、説明する仕組みが必要である。

併せて、この仕組みは、国内外の斜面工事や切梁支保工を用いた開削トンネル工事、山岳トンネル工事やシールドトンネル工事がさまざまな規模で実施されており、高度な解析技術や施工管理能力を持った事業者、設計者、施工者だけが実施しているのではない現状を踏まえると、できるだけ簡便でかつ使用性のよいもので、かつ結果が明瞭であることが望ましい。

1.3 本論文の方法論および構成

本研究では、計測システムのなかでも、対象物の状態をその場で可視化することにより簡易化を図り、かつ迅速な判断を情報受領対象者に促す仕組みである OSV に着目する。

まず第 2 章において、計測システムも工事、管理、運営の一部をなすとの立場から、公的アカウントビリティを充足する必要性と計測システムの性能を評価する方法論について、現在の設計論で主流となっている性能規定の考え方にに基づき論じる。さらにその性能規定に基づき、第 3 章において具体的な計測システムの性能評価方法について提案を行う。

第 4 章では、本研究が主に取り扱う OSV について、コミュニケーション性能に着目した考察と現状での課題整理を行う。それらを踏まえて第 5 章で実工事の代表例として斜面工事の事例について実際に評価を行うことで、本方法論の検証と考察を行い、第 6 章において計測システム開発段階における導入の検討を行う。

第 7 章では、ここまでの議論を踏まえた OSV の導入方法について、3 章に述べる方法をさらに高度化するための考察を行い、経済性能の評価を導入する方法について提案する。これらを踏まえて第 8 章を結論とする。

なお、本論では先に述べたように、計測システムは、「測定」「判断」「現地での結果表現」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する。

その上で計測システムの性能評価は各プロセスについて行い、総合値をもって計測システム全体としての性能評価を可能とすることを目指す。なお、各プロセスの評価には、機械製品等の信頼性評価において故障解析の手法として用いられる評点法である FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) を導入する。

FMEA は、複雑なプロセスから構成される機械製品等において、不具合モードに着目し、これを影響の深刻さ、起こりやすさの観点から評価する方法で、複数のプロセスからなる計測システムにおいて、解決すべき不具合を対策優先順位とともに出力することが可能な手法である。

参考文献

- 1) 防災白書 平成 26 年度版, pp.37, 2015.
- 2) 防災白書附属資料 平成 26 年度, pp.53-55, 2015.
- 3) 総合的な土砂災害対策の推進について, pp.30-38, 中央防災会議防災対策実行会議 総合的な土砂災害対策検討ワーキンググループ, 2016.
- 4) 平成 27 年における労働災害発生状況について, 厚生労働省労働基準監督局安全衛生部安全課, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei11/rousai-hassei/>
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 小林寛, 運上茂樹, 加納 匠: 加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発, 土木学会地震工学論文集, vol.28, pp.23-29, 2005.
- 9) 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, No.3 (特集号), I_63-I_79, 2015.
- 10) 野村貢, 戸本悟史, 西條敦志, 木村定雄, 芥川真一: トンネル内付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, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.72, No.3 (特集号), I_63-I_79, 2016.
- 11) 徳永法夫, 井上健一, 菊池秀夫, 日野泰雄: 光ファイバセンサを用いた計測システム等の検討, 土木計画学研究・講演集, vol.27, pp.IX(248), 2003.

- 12) 保立和夫：光ファイバーセンシング，光学，Vol.41，No.7，pp.352-353，2012.
- 13) 光ファイバセンシング振興協会，<http://www.phosc.jp/article/000023.html>
- 14) 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，第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，vol.39，pp.151-156，土木学会，2010.
- 15) 芥川真一：On Site Visualization による安全・危険情報の原位置可視化手法（特集 防災，安全・安心を確保する社会基盤整備），一般社団法人日本建設機械施工協会誌，66(9)，pp.42-47，日本建設機械化協会，2014.
- 16) Chitoshi IZUMI, Shinichi 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, 311-327, 2015
- 17) 大原美保：自治体による PUSH 型・PULL 型の災害・避難情報伝達に関する実態調査，日本地震学会論文集 第15巻，第5号（特集号），pp.2-16，2015.
- 18) 株式会社サーベイリサーチセンター：宮城県沿岸部における被災地アンケート調査報告書（自主研究），http://www.surece.co.jp/src/research/area/pdf/20110311_miyagi.pdf，2011.
- 19) Terzaghi K. and Peck R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc.
- 20) 淀川左岸線事故調査委員会報告書：阪神高速道路株式会社，<http://www.hanshin-exp.co.jp/company/topics/201204-iinkaihoukokusyo.pdf>，2012.04.
- 21) 斜面の崩落の検知センサーと検出システムの開発，土木研究所共同研究報告書 整理番号 446 号，pp.2_37，2013.
- 22) 岩崎智治，原口勝則，佐藤渉，増成友宏，内田純二，清水則一：GPS を用いた自動変位監視のための Web システムの開発，Landslides ， Journal of the Japan Landslide Society，

Vol.49, No.4, pp.174-185, 2012.

- 23) 玉手聡, 堀智仁, 伊藤和也, 吉川直孝: 斜面の浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊監視の提案, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOOSH-SRR-No.42, pp.25-33, 2012.

第2章 計測システムの性能規定化

2.1 計測におけるコミュニケーション

野村ら¹⁾は、土木分野における計測システムは、対象物の測定とその技術的判断結果の表示・表現からなる2段階のコミュニケーションであると定義している(図-2.1).

ここで、Type1 は研究者自身による室内実験などで、計測値が表示されれば一次受領者である研究者はそれを理解し、結果についての判断ができるというものである。Type2 は現地等の計測から得た情報により工事や施設などの管理者が安全性等の状態を判断し、何らかの外部表現を行うことにより、最終受領者である作業員や関係市民に具体的な行動のための情報を提供するものであり、現場管理や防災情報の提供に使用される計測システムはこちらに分類する。

Type2 の計測システムを機能に分割すると、「測定」、「判断」、「現地での結果表現」のプロセスの組合せとシステム内の内部コミュニケーションおよび表現の最

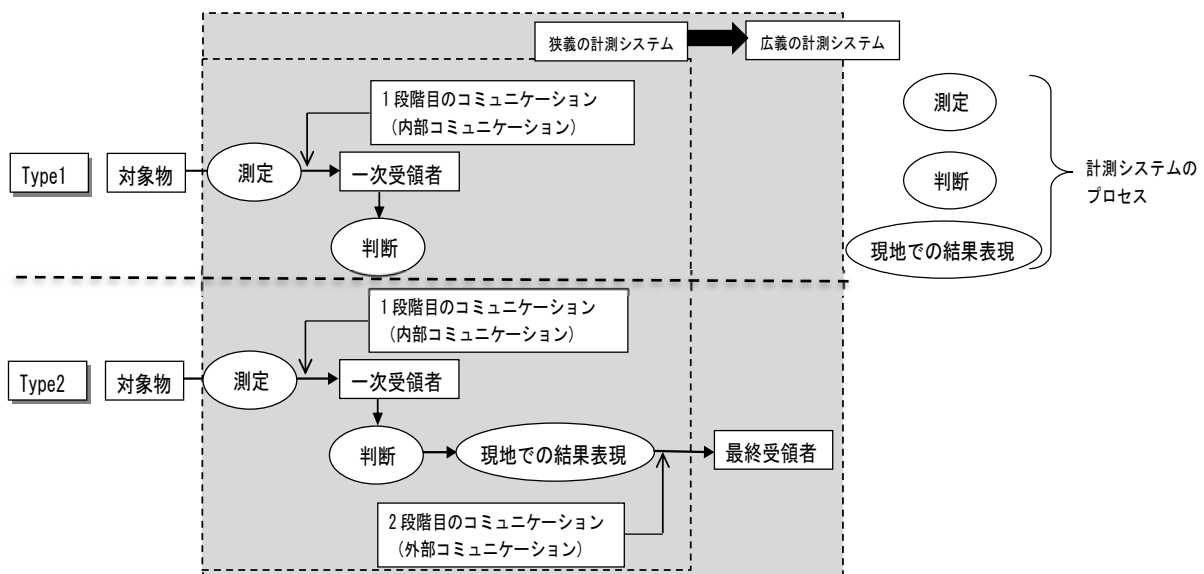


図-2.1 計測におけるプロセスとコミュニケーション構造

終受領者である作業者，関係市民などとの外部コミュニケーションである．ここで，外部コミュニケーションとは，避難情報や警報といった1方向型の防災情報の広報を指す．

例えば，これまでの洪水警報では，計測データの一次受領者である管理者がまず測定データを受領する．管理者は，コミュニケーションの最終受領者である住民や施設利用者に対して提供する情報としての「判断」を行うとともに結果表現としての広報を行う．結果表現が発災に間に合わないこともあるが，これは物理的，予算的制約の中での最善を行使した結果であり，防災行動の結果である避難の成功について性能的視点でのコミットメントを必ずしも必要としない．このような計測システムの性能が規定できないものを，ここでは狭義の計測システムと呼ぶ．

しかし実際には，さらにその判断を情報の最終受領者が2段階目のコミュニケーションにより受領したうえで，具体的な行動としての避難などの措置を実施し，生命や財産の安全が確保されたことをもって計測工の目的が達せられたこととなるのであり，2段階目のコミュニケーションの性能は十分に吟味されるべきで，この点について吟味されたものを広義の計測システムと呼ぶ．

広義の計測システムを実現し，測定と結果表現の各プロセスを管理者の意図するものとするためには，プロセスとともに性能規定されたコミュニケーションを成立させる必要がある，コミュニケーションとして必要な正統性を担保することが求められる．さらにコミュニケーションの各プロセスの実施者と受領者が異なる場合には，正統性の担保についてのアカウントビリティが必要になる．

しかし多くの土木計測工において，図-2.1のType1のような場合で各プロセスの実施者と受領者が同程度の工学的能力の保有者など同一と見なして良い場合に

は、正統性の担保はプロフェッショナルである自己による照査として暗黙に行われており、公開されることはない。アカウントビリティについても同様であり、このスタイルに不自然さを感じない状況となっている。このような非公開の正統性担保とアカウントビリティは、土木技術者が自分たちに特化したフレームを無意識に受け入れている状態²⁾であり、契約に基づき外部者が各プロセスを実施するような場合には著しく不都合であるし、調達側にとっても不利益となる危険性を持っていると言える。さらには通常の土木計測工では用いられないような機器、計測方法、計測精度が求められるような場合や伝達速度が求められる場合において異分野の研究成果や技術を導入したり、委託したりする際の不都合となるものであり、正統性の高いコミュニケーションを性能規定化することが必要である。

2.2 計測システムの正統性担保とアカウントビリティ

土木分野の計測システムにおける性能規定および正統性担保については、信頼性設計の観点から現場計測の経済的効用についての考え方を黒田³⁾が論じているが、それ以上にはこれまで論じられたことがない。そこで、まず公的アカウントビリティの正統化についての視点を援用し、土木分野の計測システムの正統性担保と必要とされるアカウントビリティについて論じることにする。

公的アカウントビリティとその正統化は、越水ら⁴⁾がその概念を明らかにしている。それによれば正統性は、1) 実用的正統性、2) 道徳的正統性、3) 認識的正統性に分類される。

ここで実用的正統性は、ある主体の行為が関連する人々の利益増進につながるかどうかを担保し、「測定」プロセスでは、対象物の観測を意図した変動が必要な項目と精度で必要な期間観測されることなどを意味する。「判断」プロセスでは、

正しい閾値を与える技術的根拠を有しているか、「結果表現」プロセスでは、観測者に理解可能な表示ができていないか、および意図する行動に結びつく情報が適切に表示されるかを意味することになる。

道徳的正統性は、行為が社会的・道徳的に正しいかどうかという判断であるが、「測定」プロセスでは計測機器の取付けが環境や景観、対象物の社会的価値を損じる可能性がある場合などの他では重視されない。「結果表現」プロセスでは、データ棄却する範囲の取り扱いや「表示しない」ことの社会的理解・倫理性が問われる可能性がある。

認識的正統性は、利益、評価ではなく、社会的に必要性が認識されることに基づく正統性とされ、理解可能性や当然性と併せて考察され、理解可能性は行為の結果が予測可能で判りやすいかを意味し、当然性は行為と結果について社会的に当然と受け入れられる成熟度を意味するとされる。本論で取り扱う計測システムについてこれらをまとめると図-2.2となる。

越水らは、プロフェッショナルの専門的知識に基づく科学的・技術的判断妥当性の限界についても指摘している。計測および表示を受託した者が、それを実施する技術レベルがない場合や、技術的未経験の計測を行う場合などがこれに該当すると考えられるが、実務マネジメントの範疇の議論であり本論の外とする⁵⁾。

	測定プロセス	判断プロセス	結果表現プロセス
実用的正統性	○	○	○
道徳的正統性	×	△	○
認識的正統性	×	×	○

ここで、○：正統性を担保することが求められる
 △：正統性が要求されることがある
 ×：基本的に正統性が要求されることはない

図-2.2 土木分野における計測システムの各プロセスにおける正統性の考え方

つぎに、土木分野の計測システムに求められるアカウントビリティについて考察する。越水らは Romzak, B.S. and Ingraham, P.⁶⁾ の行政における公的アカウントビリティの分類に基づき技術分野のアカウントビリティについても論じていて、統制の種別と当該システムの外部との自立性の観点から図-2.3の構造により4つのアカウントビリティを提示している。

	内部統制	外的統制
自立性 低い	階層的 アカウントビリティ	法的 アカウントビリティ
自立性 高い	専門的 アカウントビリティ	政治的 アカウントビリティ

図-2.3 アカウントビリティ関係の種類⁶⁾

越水らは行為の統制を行うものが内的であるか外的であるか、および組織としての自立性が高いか低いかによりアカウントビリティ関係を整理している。まず第1の階層的アカウントビリティでは、組織内の階層に基づく監査あるいは確認行為を義務的に実施される。これにより実行者の自由な裁量が制限されるが、アカウントビリティは監査のエビデンスにより表明することができる。第2の法的アカウントビリティは内部の階層に基づく監査では正統なアカウントビリティとして不十分と考えられる場合で、アカウントビリティのルールが法的に規定され、外部監査者により監査が実施されるものである。第3の専門的アカウントビリティでは自立性高い組織が裁量権を持って行為し、自分の内的規範に従い意思決定する。政治的アカウントビリティは複数の外部ステークホルダーの複雑な要望のうち、どれを満足させるかを選択する。

これを用いて土木分野における計測システムを考察すると、土木分野の計測は

原則として計測計画の企画，実施者に機器選択や計測箇所を選定についての企画と実現を行う裁量を与えられるプロフェッショナルな行為であるから，内部統制のなかで専門的アカウントビリティは必須である。

法的アカウントビリティは，法的に確立された規則が遵守されていることへのアカウントビリティであるが，計測の結果が規制情報や避難情報として表示されるのであれば，一定の基準を必要な精度で満たした計測，判断とルール化された結果表現の手順に基づくシステムであることをアカウントビリティとして示す必要があると考えられる。行政機関の発した避難情報の妥当性，適切性については，わが国においても多くの判例があるが，違法性は参照すべき基準とルール化された手順が遵法的であることを前提に，これと事案が整合しているかが論点とされている。

また，政治的アカウントビリティは，例えば予算制約下において，全ての対象者に情報提供をすることを諦め，選択的に避難情報やハザードマップのようなリスク認識ツールを提供する範囲を制限するというような場合における合意形成と考えることができ，本論が考察しようとする計測システムの性能規定とはステークホルダーに対する姿勢が本質的に異なると考えることができる。

以上を整理すると，土木分野の計測システムにおいては，法的アカウントビリティと専門的アカウントビリティに留意して性能規定書を作成すればよいということである。もちろんシステムを構築していくにあたり，組織的に実施するのであれば階層的アカウントビリティは必要であるが，これをもって最終的なステークホルダーへのアカウントビリティを保証するものにはならないということを理解する必要がある。

2.3 計測システムの性能規定における体系の整理

わが国では、計測システムの調達自身の実験等に用いるもの以外、公共調達のように外部コミュニケーションを介する仕様書規定に基づくものであったため、性能規定化するための体系が未整備である。

土木分野における計測システムとは「センサーからコンピューター等を介して処理された情報について、結果表現を介して最終受領者が得るまでの一連のハードウェアとソフトウェア,およびこれによって得られる情報を運用する人的組織」と定義する。この考えは多くの土木技術者の共感を得るであろう。

さまざまな技術分野において 2000 年以降、プロフェッショナルな技術者が、さまざまな外部技術者と必ずしもプロフェッショナルではないクライアントを交えて目的物を計画、設計、施工する必要から、それまでの仕様書規定から性能規定への転換が進んできた。また、それに伴い性能規定のあり方についての議論もさまざまな機会を通じて行われてきている^{7),8)}。

しかしながら実際に計測システムを性能規定により計画、実施しようとしても、計測システム全体を包括的に規定する「包括設計コード」に相当するものは存在せず、「固有基本設計コード」あるいは固有設計コードに相当する基準類が存在するのみである^{9),10)}。この理由は明確で、これまで計測システムは目的構造物を得るためのサブシステムあるいは仮設のひとつとして位置付けられており、最終的な目的構造物の仕様、性能に直接関係しないからである。斜面管理のように、計測システムが最終目的物である場合も同じ認識であるため、一部の現場では、機器を設置することが最終目的化してしまっている。

いくつかある固有基本設計コードに相当する計測システムの基準類も、計測システムがプロセスとコミュニケーションで構築されているという視点からは記述

されていないので、性能基準のひとつではあるとしても、プロセスとコミュニケーション全体の性能を定義するものとはなっていない。これらを踏まえると、まず土木分野における計測システムを機能と性能の観点から分析し、アカウントビリティに相当する照査アプローチまでを体系付ける必要がある。

ここで、図-2.1の土木計測のタイプのうち Type2 とした、2段階のコミュニケーション構造を持つ計測システムの階層構造と性能規定・照査アプローチの体系について考察する。性能規定・照査アプローチの体系についてはさまざまな提案が行われてきており、プロジェクトの目的から機能分析を行い、要求性能と照査方法をピラミッド型に記述する方法が一般的である¹¹⁾。

これに基づき、計測システムの階層構造と性能規定、照査アプローチを図-2.4に提案する。

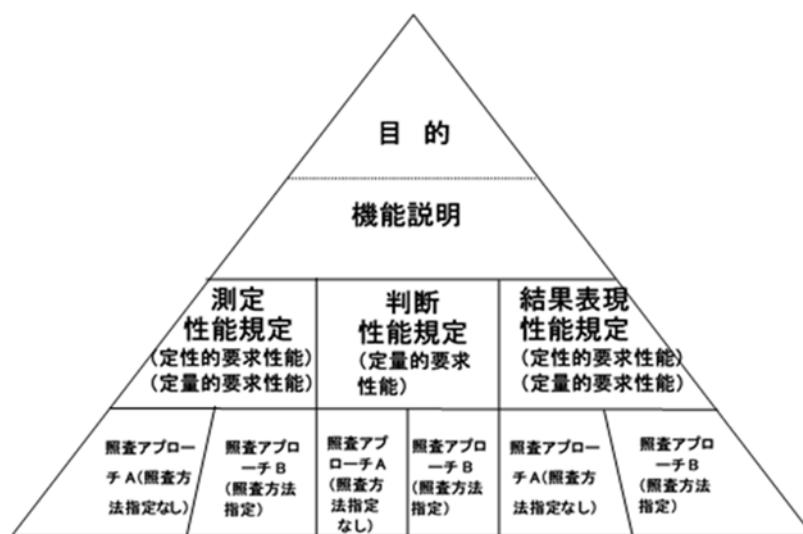


図-2.4 土木分野における計測システムの階層構造と性能規定・照査アプローチの体系

まず計測システムの目的とは、「構造物の安全性を確保する」「斜面の危険から市民を守る」といった、計測をすることによりどのような利便が得られるのかを

明示することである。

機能とは、目的に対して計測システムが果たす役割であり、「構造物の変位が危険な状態となり、関係者に避難・待避を指示する必要があるときに警報システムを介して情報提供する」「斜面の異常がある状態となり、住民避難時間を考慮すると早期に警報システムを介して情報提供する」といった内容である。前者と後者の違いは、後者において空振りリスクを加味している点であり、計測システムとしての性能を規定する主要な項目はここに規定されなければならない。

ここで、本論では「測定」、「判断」、「現地での結果表現」の各プロセスは独立であることを条件としているので、それぞれに対して機能を満たすための性能が規定される。各プロセス間はコミュニケーションで連結されるので、コミュニケーションの性能についても規定する必要があるが、芥川¹²⁾の提唱する OSV は、計測結果を外部に設けた判断・表示プロセスを経由することなくその場で状態表示する概念であることから、この機能統合が果たされたシステムであると考えることができる。

性能には、閾値を要求する「判断」プロセス以外は定性的要求性能と定量的要求性能を考慮し、照査アプローチには、基準類により性能証明書の添付など照査方法が指定されているものと計測工実施者のプロフェッショナルな裁量に委ねられているものが考えられることから、2つの照査アプローチを体系化する。

2.4 計測システムにおける要求性能の整理

本項では、一般的な構造物がその目的を達成するために保有すべき性能としての基本性能と、これに加えて与えられる付加要求性能に分けて要求性能の具体化を試みている事例¹⁰⁾に準じて計測システムの要求性能を整理・分類すること

とする。各プロセスは独立して設計されるので、基本性能は、測定に係る性能と判断に係る性能、現地での結果表現に係る性能に分化し、表-2.1の各項目について規定するものとする。

表-2.1 機能分化した計測システムの基本性能

	測定	判断	結果表現
基本性能	① 測定・伝送の精度性能 ② 測定器・伝送の使用性能 ③ 耐久性能 ④ 維持管理性能 ⑤ 経済性能 ⑥ 周辺への影響度	① 閾値の信頼性	① 表示の視認・理解性能 ② 表示・伝送の精度性能 ③ 表示器・伝送の使用性能 ④ 耐久性能 ⑤ 維持管理性能 ⑥ 経済性能 ⑦ 周辺への影響度

一般的に構造物における基本性能は、利用者の安全性能、利用者の使用性能、構造安定性能、耐久性能、管理者の使用性能、維持管理性能、周辺への影響度に整理・分類されることが多いが、本項の計測システムではシステム利用者と管理者が原則同じであること、コミュニケーションの性能を包含するため測定段階、結果表現段階ともに情報伝送について規定する必要があることを考慮した。

ここで判断の基本性能は、閾値の信頼性のなかに、今後予測の精度、予測が外れた際のリスク対応を含むものとする。

図-2.5に測定段階、結果表現段階における基本性能とその内容について示す。それぞれ上位の大項目から下位の小項目に向けて記述することにより、その要求内容が具体化されるのは、構造物設計などの基本性能の考え方に整合させた。以下では、各大項目についてその内容を示す。

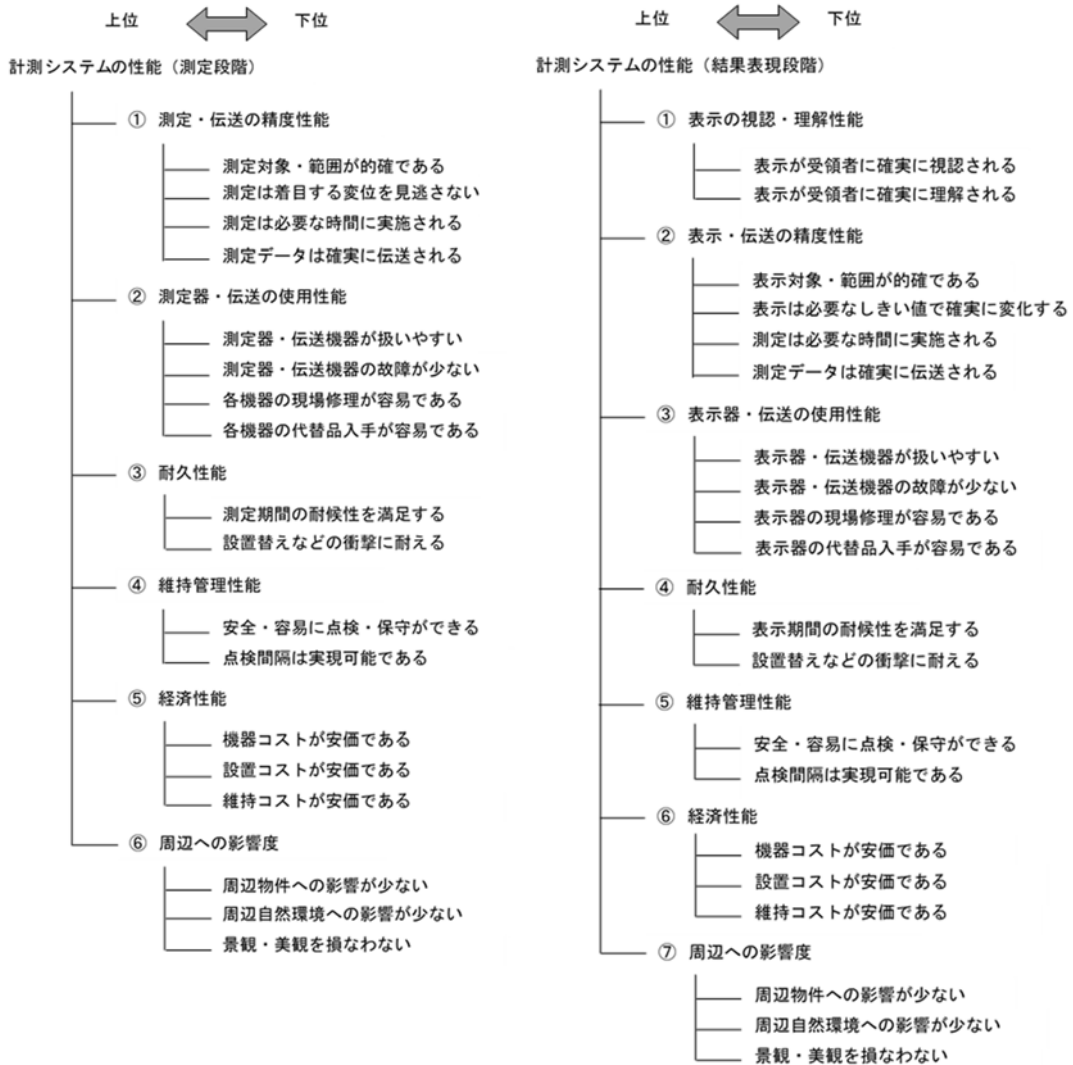


図-2.5 計測システムの基本性能分類

参考文献

- 1) 野村貢, 芥川真一, 佐藤毅: 斜面工事における計測システムの性能を評価する方法の研究, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.73, No.4, I_33-I_44, 2017.
- 2) 小林潔司: 土木工学における実践的研究: 課題と方法, 土木技術者実践論文集 Vol.1, pp.143-155, 2010.
- 3) 現場計測計画の立て方 現場技術者のための土と基礎シリーズ: 地盤工学会, 1999.
- 4) 越水一雄, 羽鳥剛史, 小林潔司: アカウンタビリティの構造と機能: 研究展望, 土木学会論文集 D, Vol.62 No.3, pp.301-323, 2006.
- 5) Schon, D.A.: The Reflective Practitioner; How Professionals Think in Action, Basic Books, 1983 (柳沢昌一, 三輪健二監訳: 省察的实践とは何かープロフェッショナルの行為と思考, 鳳書房, 2007)
- 6) Romzek, B.S. and Ingraham, P.: Cross pressure of accountability: initiative, command, and failure in the Ron Brown Plane Crash, Public Administration Review, Vol.60, No.3, pp.240-253, 2000.
- 7) 建築基準法の性能規定化のあり方に関する提言: 社団法人日本建築学会 建築法制委員会, 2007.
- 8) 片出 亮, 香月 智: リスク分担原則に基づく目標信頼性指標決定法の提案: 土木学会論文集 A Vol.65 No.1, pp.42-60, 2009.
- 9) 道路トンネル観察・計測指針 平成 21 年度改訂版 社団法人日本道路協会 2009.
- 10) 道路土工一切土工・斜面安定工指針 平成 21 年度改訂版 社団法人日本道路協会 2009.
- 11) 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.
- 12) 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: 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, 2010.

13) 藤原明敏：地すべり調査と解析－事例に基づく調査・解析法－，理工図書，1987.

第3章 計測システムの性能評価の方法

3.1 計測システムの機能と性能定義

2.1において、計測システムを3段階のプロセスとその間のコミュニケーションであると定義した。これにより Type2 の計測システムを機能に分割すると、それは「測定」「判断」「現地での結果表現」のプロセスの組合せとシステム内の内部コミュニケーションおよび情報表現の最終受領者である作業員、関係市民との警報表示、避難広報等を介した外部コミュニケーションである¹⁾。

この最終受領者の認知まで計測システムの領域を拡大したものを広義の計測システムと呼ぶことにし、本研究では広義の計測システムの性能を評価することを目的としている。

Type2 の計測システムの各プロセスとコミュニケーションは、独立した機能として取り出すことができるので、それぞれの機能において性能を規定すること可能で、その性能評価結果としての性能値を定義することができる。さらに計測システムとしての性能は、個々のプロセスとコミュニケーションの性能の総合的な結果としても考えるべきであり、アウトカム指標など市民に向けた分かりやすさに重点を置いた説明においては、この総合的な性能値をもって計測システムの性能を評価する意味があるものとする。

ここで、総合的な計測システムの性能値 P を式3.1のとおり定義する¹⁾。

$$P = P_1^\alpha \times P_2^\beta \times P_3^\gamma \quad (3.1)$$

ここで、 P_1 は計測ツールと測定の性能値、 P_2 は計測値判断の性能値、 P_3 は現地

での結果表現の性能値， α ， β ， γ は各性能値の重要度により定まる乗数である．

この P および P_1 ， P_2 ， P_3 を用いて，計測システムの各プロセスおよび全体の性能評価を行う．計測システム全体の性能を評価する場合には，総合評価値である P による性能区分を定義し， P の値の範囲と関連付ければよく，その方法は別に考察する．

3.2 計測ツールと測定の性能値の指標化

計測ツールと測定の性能値 P_1 は，適切な対象が抽出されていることの性能，適切な計器が選択されていることの性能および適切な測定間隔で計測していることの性能により評価し，式3.2のとおり定義する．

$$P_1 = P_{1-1} \times P_{1-2} \times P_{1-3} \quad (3.2)$$

ここで， P_{1-1} は適切な対象が抽出されていることの性能評価値， P_{1-2} は適切な計器が選択されていることの性能評価値， P_{1-3} は適切な測定時間に計測していることの性能評価値である．ここで P_1 は， P_{1-1} ， P_{1-2} ， P_{1-3} すべてが規定された性能の機能を発揮してはじめて性能を発揮することに注意する．

ここで，計測システムを導入するにあたり適切な対象が抽出されているとは，管理すべき工事現場や斜面などを安全管理の観点から不測の事態が発生する可能性のある独立した最小単位の集合体と捉え，この最小単位が全て認識されていることと定義し，本論ではこの最小単位をユニットと呼ぶ．

ユニットの考え方を斜面に例示して説明する．地すべりが懸念される斜面において，ひとつの土塊移動が安全確保に決定的な場合，地すべり計（伸縮計）など

によりこの土塊移動が滑落崖をまたいで計測されていることが計測成功の必要条件であり，ここにひとつのユニットが設定される．移動土塊が複数ある場合で，それぞれの挙動が独立である場合，各土塊移動を把握しなければならないので，移動土塊数に相当するユニットを設定する必要がある．

また，地下水位上昇が土塊移動のトリガーと考えられる場合には，当該ユニットに水位把握のためのユニットを定義するなど，崩壊による安全管理への影響の大きさを考慮して，ユニットを設定していく．安全管理の主眼となる対象が斜面下の道路およびその利用者である場合には，崩壊の平面的な広がりだけでなく，地すべり面の深さによる崩壊土量の規模を把握する必要があると考えられるので，土塊移動量だけでなく，地すべり面の深度とその挙動を把握するユニットを設定する．

図-3.1 に斜面工事におけるユニットの考え方を示す．この他にも不測の事態が起きる対象としては，近接構造物，周辺部の载荷，地形改変などが考えられ，斜面の安全を確保するためにはこれらを含めて監視の必要があるので，この監視対象ごとにユニットを設定する．

たとえば，独立した3ユニットの斜面が安全管理上問題とされ，それぞれに土塊移動，地下水位が観測対象とする必要がある場合，総計6ユニットとなる．つまり，6の監視があればこの斜面の監視は網羅されることになる．ここで注意しなければならないのは，大規模地すべりのなかに小規模な地すべりが存在しているような場合で，小規模地すべりのユニットに変状がないまま大規模地すべりが変状することがある．

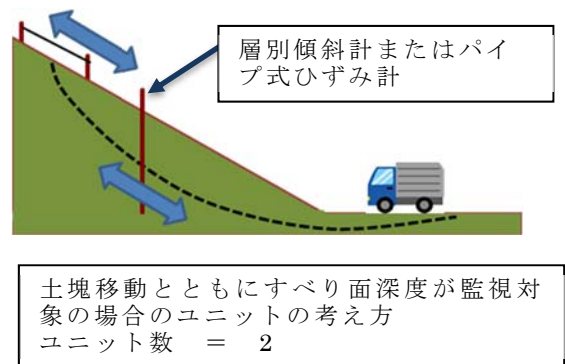
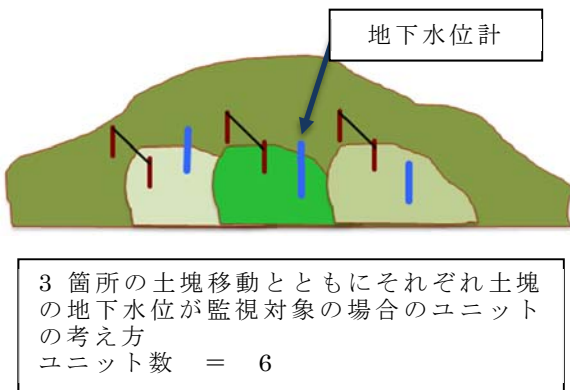
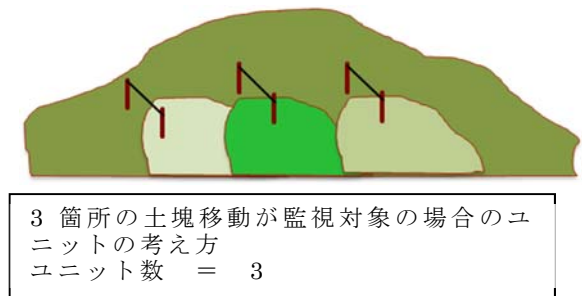
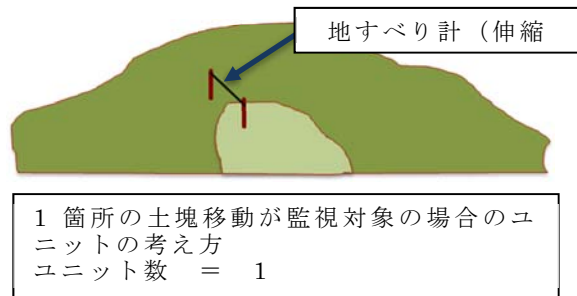


図-3.1 斜面工事におけるユニットの考え方¹⁾

計測対象をユニットに分割する方法は、斜面工事だけでなく他の計測対象にも適用可能である。図-3.2は、切梁がクリティカルな場合として仮定したユニット分割であるが、この他にも不測の事態が起きる対象としては、近接構造物、土留め壁安全性、土留め壁遮水性などがあり、この監視項目ごとにユニットを設定する。すなわち、切梁応力 P 、近接構造物 N 、土留め壁安全性 S 、土留め壁遮水性 W の4項目が監視項目となる構造である場合で、平面 n ブロック、 m 段切梁の場合、式 3.3 に示すユニット数が存在することになる。

$$\sum_{v=1}^m \sum_{h=1}^n (P, N, S, W) \quad (3.3)$$

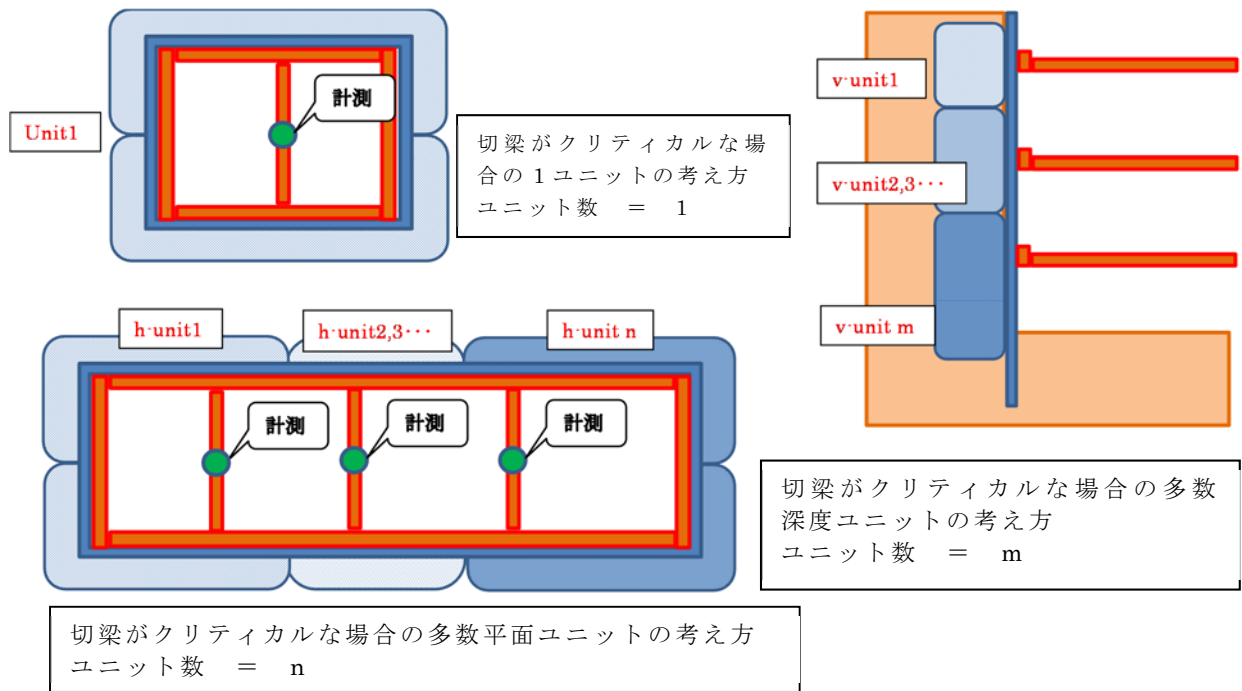


図-3.2 開削切梁工事におけるユニットの考え方

たとえば、平面3ユニット、深度3ユニットで4項目が各ユニットに監視項目となるとすると、総計36ユニットとなる。つまり、36の監視があればこの構造体の監視は網羅されることになる。

泉ら²⁾はこの方法を用いることにより、複雑な形状の開削構造の切梁支保工に対して必要な計測数を抽出することに成功している。

本方法の有意性は、第2章2.2に述べた専門的アカウントビリティを P_{1-1} において実現し得るという点であり、ユニット網羅性をもって P_{1-1} をランク付けすることが可能になることである。

全体系を把握し、ユニットを設定することの重要性は、5章事例においても述べるが、計測システムとしての性能、言い換えれば計測の成功はユニットの適切な抽出によって決定付けられることになる。すなわち、ユニット抽出は極めて専

門性の高い作業であり，この作業の照査および作業担当者の力量の照査などについて，照査アプローチにおいて明確に規定しておく必要がある．この点において，本手法はプロフェッショナルなシステムであり，専門的アカウントビリティは自動的に付与されるものではないこと，さらにシステムとしての信頼性やリダンダンシーはユニット抽出作業とその作業者の力量，思考において多くが実現されることに留意する必要がある．

次に，計測システムにおける測定段階における計器の役割は，表-2.1に示したように必要な情報を必要な期間取得することについて，その精度性能，耐久性能，経済性能（コスト）の3つの基本性能を専門的アカウントビリティとともに満たし，使用性能，維持管理性能，周辺への影響度においてシステム管理者が許容できる性能を満たすことである．一般的に，要求される精度，耐久性に対して，これを下回る計器は低性能であることになるので，厳しい予算制約など特別な条件があり，法的アカウントビリティや必要により予算不足に対する市民合意など政治的アカウントビリティが満たされない限り選定してはいけない．一方でコストは低廉なほうが望ましいという一般的理解に基づけば，無用にオーバースペックなものは総合的判断として低性能であるということになる．

最後に，適切な測定時間，測定間隔で計測していることの性能評価値を定義する．測定間隔が長すぎると，兆候の発生から崩壊までの動きを捉えきれない，言い換えると避難など人命保全や財産保全など防災行動の対応ができない可能性があることを意味する．兆候の発生から崩壊までの時間を考慮し，補強，避難，財産の移動，交通規制など必要かつ実現可能な対策を講じることができないのであれば計測している意味がなく，低性能である．

一方で測定間隔が短すぎると，データ量が膨大になりコスト増につながる可能

性があるため、要求に見合った測定間隔よりも著しく短い場合の性能は低く評価する必要がある。

これらを踏まえ、性能評価のランク付けを行う。性能評価は第 1 章 1.3 の本研究の方法論において述べたように、FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) の導入により行うので、FMEA において用いる評定点と性能呼称を合わせて示す。なお、FMEA については 3.5 において説明する。

表-3.1 適切な対象が抽出されていることの性能評価値

状 況	性能呼称	評価点
クリティカルなユニットも含め全体系が把握されている	完全	1
クリティカルなユニットは把握されているが、全体系までは困難	合格	2
クリティカルなユニットが把握されていない	放置できない	3
計測されていない	失敗	4

表-3.2 適切な計器が選定されていることの性能評価値

状 況	性能呼称	評価点
要求に見合った精度，耐久性の計器が選択されている	完全	1
要求に見合った精度，耐久性の計器が選択されているが，オーバースペック	合格	2
精度，耐久性について計器の評価が固まっていない	放置できない	3
要求に見合った精度，耐久性が満たされない計器が選択されている	失敗	4

表-3.3 適切な測定時間で計測していることの性能評価値

状 況	性能呼称	評価点
要求に見合った測定時間，測定間隔が実現されている	完全	1
要求に見合った測定間隔より短い	合格	2
要求に見合った測定間隔よりも長い	放置できない	3
測定間隔が検討されていない	失敗	4

3.3 計測値判断の性能の指標化

計測値判断の性能値 P_2 は，式 3.4 のとおり定義する．

$$P_2 = P_{2-1} \quad (3.4)$$

ここで P_{2-1} は，安全性に対する適切な判断の根拠となる閾値が，専門的アカウントビリティを満たす信頼に足る方法で決定されていることの性能評価値である．

計測値判断の性能は，危険の判断を行う適切な閾値が定められている性能として定義する．センサー計測結果の性能，品質が良くても，それを用いて行う判断の論理性が不足していると意図した結果表現ができず，結果として被害回避に失敗するなど関係者の安全性能を損ねるので，計測システムの総合的な性能としては低いということになる．

斜面の切土工事や開削工事，自然斜面の維持管理などには，さまざまな技術基準が存在し，長期にわたり誤報や空振りに対するリスクマネジメントも包含して運用されてきた実績があるので，これに拠れば専門的アカウントビリティと法的アカウント

ンタビリティは満たされると考えてよい場合がある。

一方で、新しい計測方法を導入した場合や極めて複雑な構造、複雑な地盤条件や周辺環境条件の場合において、技術基準よりも解析的検討や経験則に基づく閾値のほうが実用性のある場合が考えられる。この場合、専門的アカウントビリティは技術基準類と同様に満たされるといえるが、法的アカウントビリティを達成することはやや難しい。

さらに、これら照査アプローチを経た「根拠ある」閾値に対して、閾値はあるが根拠が不明である場合や計測値による状態表示のみで閾値を定める判断ロジックがない場合も考えられ、この場合の性能は低く評価する必要がある。これらを踏まえ、性能評価のランク付けを行う。

表-3.4 計測値判断の性能評価値

状 況	性能呼称	評価点
技術基準または確かな経験則により閾値が決定されている	完全	1
解析的検討または経験則により信頼できる閾値が提案されている	合格	2
何らかの閾値が定められている	放置できない	3
状態表示のみで判断ロジックがない	失敗	4

3.4 結果表現の性能の指標化

測定と判断の過程を経た結果表現の性能値 P_3 は、情報の最終受領者が避難などの対応、あるいは補強や交通規制など必要な対策を予定時間内に行うために必要な性能であり、広義の計測システムの性能に対応するものである。

この性能値は式 3.5 のとおり定義する。

$$P_3 = P_{3-1} \times P_{3-2} \times P_{3-3} \quad (3.5)$$

ここで、 P_{3-1} は情報が必要な時間内に伝達されることの性能評価値、 P_{3-2} は情報が正しく伝達されることの性能評価値、 P_{3-3} は伝達された情報が正しく認知されることの性能評価値である。

「情報が必要な時間内に伝達されるか」は、避難、財産の保全行動や各種の防災行動を実現する上で非常に重要な要求性能である。近年、都市部近郊で発生し被害をもたらした土石流災害では、必要な降雨情報は役場等に伝達、集積されていたが、判断を行っている間に災害発生してしまい、結果として危険情報が伝達されない状況が生じた。

ここで本論において問題なのは、表示段階における伝達、表示スピードと独立した他のプロセス（計測、判断）における時間遅延やコミュニケーションの不備による時間遅延も結果として「情報が必要な時間内に伝達されるか」の性能としては同じ結果をもたらす点で、結果表現に関する性能のみでは解決できない点であるが、ここではこれらのプロセスが直結され、コミュニケーションリスクも生じない OSV を主な対象としていることから、計測、判断は速やかになされ、コミュニケーション不備などのリスクも生じないと仮定する。

「情報が正しく伝達されること」とは、外部表現における情報量の性能を意味している。計測値が連続的に得られて閾値により判断を行っていても、外部表現ツールが貧弱であると限られた情報量しか表示できない。一般的に計測システムの外部情報表現は、表示をどのように行うかにより詳細情報や付属的な情報も併せて伝達することが可能であるが、限られた情報量しか表現できないとすると、何か異常が発生していることのみを周知するしかなく、情報提供としての性能は低く評価する必要がある。OSVでは簡素化を指向するツールとして、目隠しが倒れて表示が現出するなど不可逆的变化を活用するものがあるが、これは簡素化により経済性能という別な価値を創出しているものであり、ここでの評価とは別に考える必要がある。

「伝達情報が正しく認知されること」は、表現の最終受領者である作業員、影響範囲内の市民との警報表示、避難広報等を介した外部コミュニケーションの性能である。この性能は表示を得てどのように行動するかの教育、訓練も含めて設計される必要があるが、予算制約のある表示デバイスでは、次行動や作業員、一般市民の協力を得る共助に期待してレベル設定することも考えられる。したがって、情報の意味が伝わらないことを最も低性能として情報受領者の認知の程度により性能評価する必要がある。これらを踏まえ、性能評価のランク付けを行う。

表-3.5 情報が必要時間内に伝達されることの性能評価値

状 況	性能呼称	評価点
次行動に必要な時間が確保される	完全	1
緊急対応に必要な時間が確保される	合格	2
発災までに情報が伝わる	放置できない	3
発災に情報伝達が間に合わない	失敗	4

表-3.6 情報が正しく伝達されることの性能評価値

状 況	性能呼称	評価点
情報が正しく伝達される	完全	1
情報がほぼ正しく伝達される	合格	2
異常発生など何かが伝わる	放置できない	3
情報が伝達されない	失敗	4

表-3.7 伝達情報が正しく認知されることの性能評価値

状 況	性能呼称	評価点
教育や表示方法の対処により情報の意味が正しく認識される	完全	1
情報の意味がほぼ正しく認識される	合格	2
何か異常であると認識される	放置できない	3
情報の意味が伝わらない	失敗	4

3.5 FMEA による評価方法と活用

FMEAは、松岡ら³⁾によれば、システムをいくつかのサブシステムに分け、そのサブシステムにある故障モードが生起した場合、上位のシステムにどのような影響が現れるかを系統的に評価するものである。信頼性、保全性、安全性などへの影響を解析することで、重大な故障となる部品や機器を摘出することができる

め、製品設計、製造工程設計の段階や安全活動⁴⁾、医療分野^{5),6)}、品質管理活動⁷⁾などリスク顕在化により大きな影響を生じる分野でよく用いられている。

各故障のシステムへの影響が致命的か、重大なのか、あるいは軽微なのかを明確にし、故障影響の致命度と発生確率により各故障に順位をつけるFMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)⁸⁾も活用されているが、ここではFMEAに包含するものとする。

ここで、FMEAによる評点法により、式3.6を用いて優先対処目標を抽出するリスクインデックス (*RI : Risk Index*)である危険優先度指数 (*RPN : Risk Priority Number*) を算出する。

$$RPN = P \times O \times D \quad (3.6)$$

ここで、*P* はFMEAでは影響の深刻さ (*Severity*) を表し、計測システムの性能値 *P* である。*O* はその事象の起こりやすさ (*Occurance*)、*D* はその事象の検出度 (*Detection*) である。本研究では、FMEAの手法にしたがい最も完全な性能評価に対して1点を与え、最低レベルまで1点きざみの4段階で評価、危険優先度指数を算出する。表-3.8 にこれまで考察した各プロセスの評価項目と具体的な評価内容を示す。

表-3.8 FMEA による評価表

RPN(Risk Priority Number) を算出するための項目	評価点	性能呼称	計測ツールと測定のパフォーマンス P_1			計測値判断のパフォーマンス P_2	現場での結果表現のパフォーマンス P_3		
			適切な対象が選ばれる性能評価値	適切な測定器が選ばれることでの性能評価値	適切な測定時間での測定性能評価値	計測値判断の性能評価値	適切な時間内に情報が送られてくることでの性能評価値	情報が正確に伝わる性能評価値	情報が内容が正しく認識されることでの性能評価値
不具合モード: Failure Mode			計測ツールや測定方法が悪く、良い計測値が得られない			計測値判断が悪く把握できない	結果表現が悪く、情報受領者が正しい行動を取ることができない		
計測システムの性能値 P : 影響の深刻さ Severity	1	完全	クリティカルな要素がすべて把握されている	要求精度、耐久性、信頼性が満たされている	要求時間間隔が実現されている	技術基準は満たされている	緊急避難の最小の時間が確保される	情報が正確に伝わる	教育や表示方法により情報が完全に正しく認識される
	2	合格	クリティカルな要素は把握されているが、一部は困難	要求精度、耐久性、信頼性が満たされているが、オーバースペック	要求時間間隔は短い	現場での解析は可能である	緊急避難の最低限の時間が確保される	情報がほぼ正確に伝わる	教育や表示方法により情報がほぼ正しく認識される
	3	放置できない	クリティカルな要素が把握されていない	要求精度、耐久性、信頼性が満たされていない	要求時間間隔も長い	何らかの値が定まっている	発災までは情報が伝わるが、緊急避難等が保証されない	異常発生などが伝わる	何かが異常であると認識される
	4	失敗	計測されていない	要求精度、耐久性、信頼性が満たされない	測定間隔が検出されていない	状態表示のみで判断ログがない	発災に情報が伝わらない	情報が伝達されない	情報の意味が伝わらない
不具合の起こりやすさ: Occurance	1		計測期間中に発生する可能性はないか極めて小さい				計測期間中に発生する可能性はないか極めて小さい		
	2		計測期間中に発生する可能性は小さい				計測期間中に発生する可能性は小さい		
	3		計測期間中に発生する可能性が数回				計測期間中に発生する可能性が数回		
	4		計測期間中にしばしば発生する				計測期間中にしばしば発生する		
不具合の検出度: Detection	1		自己検知装置等により不具合は確実に検出される				自己検知装置等により不具合は確実に検出される		
	2		不具合の検出は可能で、点検等により検出される				不具合の検出は可能で、点検等により検出される		
	3		異常値など経時変化などから検出可能である				異常発信などにより不具合の検出が可能である		
	4		検出は困難である				検出は困難である		

ここで、 P の 4 段階評価は、上位から「完全」、「合格」、「放置できない」、「失敗」相当としている。本論では、計測ツールと測定の評価 P_1 計測値判断の性能の評価 P_2 および結果表示の性能 P_3 の各プロセスは独立して設計可能と仮定している。評価表から各プロセスの評価点を読み取り、それが規定した性能レベルを満たしているかを確認すれば、システム全体の機能、性能は保証されることになる。

これを、計測システムを構成する各プロセスの性能に対するアウトプット評価とするならば、この計測が成功であるのか否かといったアウトカム評価が必要である。計測システムの情報受領者であり受益者である作業員や市民にとっては、人命や財産の保全が成功したかの成果が一義的な問題であり、計測システムへの投資に対するアカウンタビリティもこの点に重点を置いた総合評価であるアウトカム評価において説明がなされるべきであると考えられる。

計測システムを設計、設置し P_1 から P_3 の評価値を得たら、式 (3.1) により計測システムとしての性能値 P が評価できる。この P を用いて RPN を算出すれば、計測システムとしての総合評価を行うことが可能である。

P_1, P_2, P_3 の性能評価値はそれぞれ独立であるが、集計値である性能値は連続的な値をとるので、各性能項目の重みを考慮して集計し、別に定義する計測システムの性能ランク S と P の範囲を関連付け、閾値を設定する。これにより、計測システムの性能レベルにより表現することが可能になる。ここで、計測システムの性能ランクは表-3.9のとおり定義する。

表-3.9 総合評価値による計測システムの性能ランク

性能ランク <i>S</i>	性能呼称	性能評価
I	完全	財産保全など含め、十分に避難の安全を保証するシステム
II	合格	共助も期待し、生命保全に必要な最小限での避難の安全を保証するシステム
III	放置できない	IIが確実でなく、改善を要するシステム
IV	失敗	緊急に改善を要するまたは工事、施設保全計画の継続に対して警鐘を与えるべきシステム

例えば現場内に複数の斜面があり、多くの計測システムが設置されているような場合でも、総合評価値による計測システムの性能ランクを定義することにより、現場内の複数の計測システムについて性能ランクを比較することが可能になる。他の斜面など対象物と総合評価で比較することが可能になれば、優先的に改善すべき計測システムを抽出することが可能になる。さらに、当該計測システムの「測定」、「判断」、「現地での結果表現」の各プロセスのいずれをどこに着目して優先的に改善すべきかについては、表-3.8の配点結果から抽出可能である。

具体的な活用方法としては、例えば斜面工事は予算制約下で実施されることが前提であるので、本方法により優先順位を付けて各ユニットの計測システムを改善していき、所与の予算に達した段階で性能ランクIII（放置できない）やIV（失敗）が残っている場合には、アウトカム指標に照らして斜面工事の性能を支える計測システムの性能が不十分であるとして予算増額を求めることになる。また、すべての計測システムの性能ランクをIあるいはIIといった目標以上に改善するというアウトカム目標に対していくつかの実施案を立案し、これを費用対効果で比較すれば、工事・運用品質の改善の効率化を計量的に表現することが可能になり、事業の経営面でのアカウントビリティの有効なツールとなり得る。

なお、 O および D は、計測システム不具合対処の優先順位を決める際に重要な項目であるが、斜面や開削工事の計測実績に基づく知見がない。したがって今後の知見を得て評価を行うものとして、本論では計測システムの性能値 P の表現のなかにセンサー耐久性や精度といった項目で織り込むこととした。すなわち、 $O=1$ （計測期間中にセンサー，結果表示等の機器類に不具合が発生する可能性はないか極めて小さい）， $D=1$ （センサー，結果表示等の不具合は確実に検出される）として扱う。

参考文献

- 1) 野村貢, 芥川真一, 佐藤毅: 斜面工事における計測システムの性能を評価する方法の研究, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.73, No.4, I_33- I_44, 2017.
- 2) Chitoshi I 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.
- 3) 松岡猛, 伊藤博子, 平岡克英, 桐谷伸夫, 近内亜紀子, 塚原茂司, 伊藤泰義, 室原陽二 : FMEA (故障モード解析および影響解析) 実施手順, 海上技術安全研究所報告, 第 6 巻, 第 2 号 (平成 18 年度) 研究調査資料, pp.101-137, 2006.
- 4) 井上威恭 : FTA. FMEA 活用による安全活動, 日本信頼性学会誌 : 信頼性 18(1), pp.12-20, 1996.
- 5) 西川武一郎, 平野佳穂, 鳥居健太郎 : 業務プロセスに潜むリスク評価手法(RFMEA)の提案, 第 26 回医療情報学連合大会論文集, 日本医療情報学会事務局編, 札幌, 2006.
- 6) Virendra Kumar Paul, Chaitai Basu: Scenario Planning and Risk Failure Mode Effect and Analysis(RFMEA) based Management, KICEM Journal of Construction Engineering and Project Management Online ISSN 2233-9582, Vol.6, No.2, 2016.
- 7) 花村和男, 広瀬幸雄 : 生産革新に対応した工程の FMEA・FTA による品質問題の未然防止活動－第三報 : 機械加工工程における生産革新事例－, 日本生産管理学会論文誌, Vol.14, No.1, pp.109-114, 2006.
- 8) Military Standard Procedure for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, MIL-STD-1629A, 1980.

第4章 On-Site Visualization の方法論と取り組み

4.1 On-Site Visualization の概念

On-Site Visualization (OSV) は、計測結果を外部に設けた判断・表示プロセスを経由することなくその場で状態表示するシステム・概念である¹⁾。OSVを指向するツールは、変位センサーである計測機器にLED発光など^{2),3),4)}、外部表示装置を取り付けることにより、その場で変位が危険なレベルに達しているのか、まだ余裕があるのかといった状態を直接、市民や施設利用者といった情報受領者に告知する。その告知情報を避難行動や防災行動の制約時間内に提供することにより、直接被害の発生を防止、低減しようとする取り組みである⁵⁾。

また、計測システムにおいて「判断」プロセスと相互のプロセス間コミュニケーションに多大なコストを要している現状を改善するため、できるだけ簡素なセンサー、結果表現システムを開発することにより、コミュニケーションを直結化することでコスト縮減を実現し、予算制約下での多点計測の実現や途上国など総資金が小さい国・地域において安全・安心を広めることを指向している^{6),7),8),9),10)}。

本章では、従来の計測と状態表示手法と対比することにより OSV の概念を明確にするとともに、性能規定の観点から導入方法への考察を行う。

4.1.1 OSV と従来手法の相違点

土木工学で一般的に用いる計測は、対象とする関係者の安全を確保、改善することを目的として、計測手法はさまざまであるが大別して変位、ひずみ、力のいずれかを計測している。またその精度もそれぞれの計測手法、使用する計測ツールによって規定され、各場面において必要とする精度、計測環境による使い分け

がなされている。

計測されたデータは、2章において説明のとおり、集積され計測値そのものを表示するか、あるいは判断プロセスを介して状態として認識され、その後、利用者ニーズに見合った計測値データのかたまりあるいは状態の表現として、それぞれ最適な手法を用いてアウトプットされ、関係者の行動の起点となる。この目的と計測の位置付けそのものは従来手法と OSV で差異はない。大きく異なるのは計測から状態表示までのプロセスである。

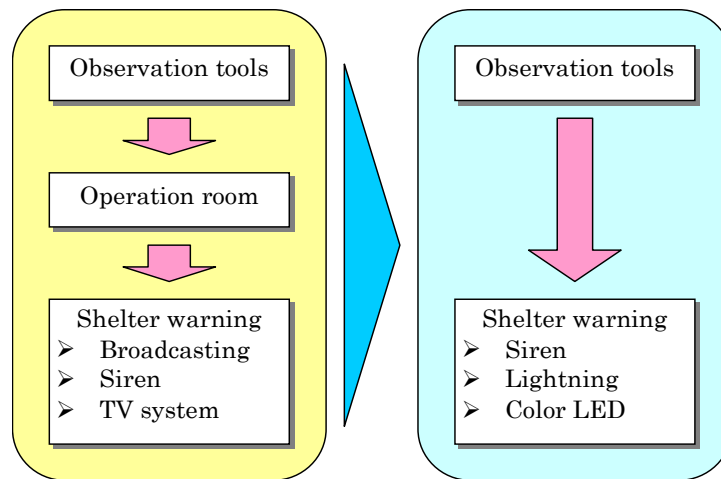


図-4.1 OSVの基本概念図⁵⁾

斜面計測を例にとると、従来手法ではまず熟練者の観察により当該斜面の観測ポイントを抽出し、変位やひずみ、応力を観測する計測機器が計画され設置される。

観測が始まると、そのデータは現地もしくはいくつかの観測地点を集約した計測管理室に多心ケーブルなどにより伝送される。さらにデータは電話回線や光ファイバー網を介して管理事務所に送信される。ここでは気象情報や道路網に関する

る情報など行動判断に必要なさまざまな情報が集約されているので、管理者はそれら全体を俯瞰しながら最適と考えられる行動判断を行う。

判断が行われると、判断結果は避難情報や道路規制情報として広報されるとともに、危険地域などに放送やサイレン、テレビ画像などにより告知される。それとともに関係行政機関に連絡され、避難支援などの公助措置が起動することになる。

OSVは、観測結果または観測結果から判断される状態をその場で表示することを基本とする。OSVの観測機器には、計測機能だけでなく予め定められた危険度などの状態判定ルールとそのレベルを表示する機能を持たせる。その機能により、情報の伝送や管理者の臨機の判断を経由することなく速やかに市民など情報の最終利用者に対して状態情報を提供することができる（図-4.2）⁵⁾。

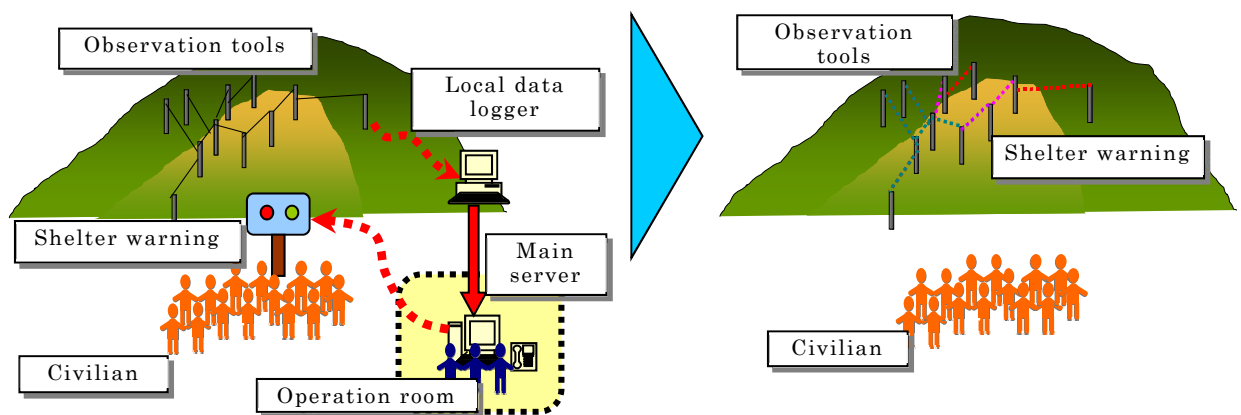


図-4.2 OSV機器による斜面管理のイメージ

従来手法における判断プロセスは、刻々と危険な状況が変化しつつある現地ではなく、遠隔地の管理事務所で行われる。これは災害における避難指示や通行規制には、多元的な情報を得た高度な判断が求められるため、現在の仕組みのなかではやむを得ない手順であるが、このような観測・警報システムは、計測装置から管理事務所の判断システムまでの伝送費、判断のための支援コンピューター、情報モニタ盤などに多額の費用がかかっている。さらに、一般的な地すべりの観測では、計測値を管理者本人または代理人が確認後、防災無線や放送により避難を促すシステムが多く、危険情報の観測から警報までのタイムラグ、誤認、情報亡失（途絶）が起きる可能性を否定できない。また、災害発生に情報伝達が間に合わないことも考えられる。

OSVによる斜面管理では、従来手法の判断プロセスのような多元的情報収集による複合的な判断は難しいものの、コミュニケーションを直結化することにより伝送遮断や管理担当者不在による情報未達リスクを皆無にできるとともに、簡素なシステム構成により経済的な斜面計測と状態表現システムを提供することが可能になる。

一般的に計測システムでは、センサーだけでなく情報伝送と判断プロセスに多くのコストが投じられているので、OSVの導入は事業者における斜面防災対策費用が一定であれば、従来は予算不足で観測ができなかった懸念サイトに対して新たな防災措置を適用する可能性が高まることを意味している。発展途上国はもとよりわが国でも、危険性が認識されているにも関わらず予算制約により観測等の措置が実施できていない懸念サイトは多数残存しているので、低コストで多数監視を可能とする斜面管理におけるOSVの普及は、今まで観測未設置であったために不測の災害に襲われて失われていた多くの人命を救う可能性を持つものであ

るといえる。

4.1.2 OSV の特性と可能性

前項で従来手法と OSV の観測から状態表示までのプロセスの差異について示した。従来手法と OSV にはそれぞれ得失があり，それを正しく理解して OSV を活用することができれば，コスト制約からこれまでは監視下に置くことができなかったさまざまな事象に対して管理が可能となるほか，異常発生から破壊までの時間余裕が極めて短いために管理困難として忌避してきた事象に対して，避難など自助的活動支援などのリスク低減を行うことができるようになる⁵⁾ (図-4.3)。

このような状況は，厳しい予算制約のある途上国の道路防災，斜面防災や工事の安全管理，災害からの市民防護において特に効果が期待できることから，OSV のさまざまな実績が海外において蓄積されつつある^{6),7)}。

表-4.1 に従来手法と OSV の比較を示す。従来と同様の計測精度を確保した上で判断プロセスと状態表示方法を簡素化することを，OSV の基本的な特性と考えれば，以下の適用について可能性があると考えられる。

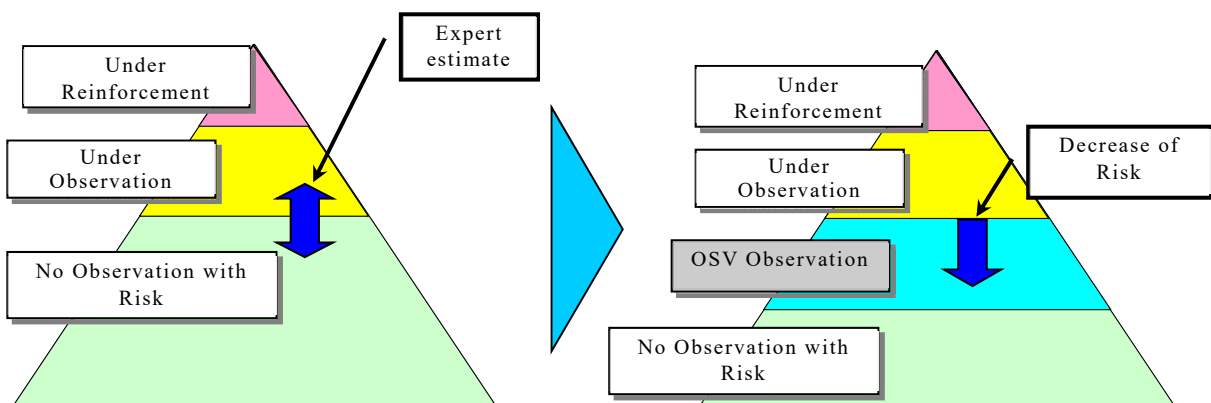


図-4.3 OSV導入によるリスク低減の考え方

- ① コスト制約から限られた計測ポイントしか観測していなかった対象に，多数の OSV 機器を配置し網羅的観測を行う．
- ② コスト制約やリスク判断により観測を行ってこなかった「顕著な変化に乏しい」あるいは「発生確率が低そうな」対象に対して試験的に OSV 機器を設置し簡易計測監視を行う．
- ③ 想定被害が小さい，または個人資産のように公的監視下に置くことが困難な対象に対して市民が自助，共助で OSV 機器を設置して計測監視を行う．
- ④ 市民が迅速に自助的行動を決定しなければならない場合の状態表示，あるいは避難行動判断の支援として，OSV 機器を設置し管理者を介しない状態判断時間ゼロの情報提供を行う．
- ⑤ 状態監視コストやプロセス構築に制約があり異常検知センサー（異常発見者）として市民を活用する場合に，OSV 機器を設置し，異常色が点灯したら管理者に通報するように協力を求める．

このうち⑤は，視覚情報受領型市民センサー¹¹⁾として野村らが新たに提案したものである．ここで野村らは，元来，市民は自身の安全に関わる情報やあらゆる政策に対してそれらを受領し判断，反応する機能を有しているものと仮定し，これを「市民センサー」と名付けた．

受動的に防災情報を受領し，その結果を踏まえて行動する市民には，表示された防災情報を認知するセンサー能力と，その意味を理解し予定行動を起動するための理解能力が求められるが，この市民センサー機能を積極的に活用し，管理者へのコミュニケーションを起動することができれば，管理者へのセンサー情報伝達コストの低廉化や速達性の改善につながると考えられる．

表-4.1 従来手法とOSVの比較

	従来手法	OSV
計測対象・精度	変位，ひずみ，応力を対象とし，精度は計測の要求性能に基づく	従来手法と同じ
状態判断方法	外部情報を取り込み，プログラムにより総合的判断を行ったり，人による判断を優先させたりすることが可能	原則として予め規定した変位(ひずみ，応力)の状態関係に対して忠実に実行する
状態判断の閾値変更	プログラムの変更により可能	製作時またはプリセットにより定め，以後は原則として変更できない
状態表現方法	光，音，画面表示，遮断器などあらゆるデバイスを用いることができる	現段階では光デバイスを中心とし，状態を予め規定した光色で表現
状態表示までの時間	一般的に判断プロセスが複雑なほど長い．情報途絶により表示できない可能性もある	基本的に計測と同時に表示される．表示デバイスによりタイマー化したりすることも可能．表示デバイスによっては可視条件が限られる(昼間のみなど)こともある
コスト	伝送費，判断プロセスにコストを要するため，一般的にOSVより高価	従来手法よりパーツ，プロセスとも簡略なため，安価になる可能性を有する

4.2 On-Site Visualization の導入手順

前章までに示した OSV の概念に基づき，OSV を導入する主な手順について考察する．

OSV はシンプルなシステム構成を指向するため，プリセットの判断，表示デバイスを基本とする．そのため，現地合わせでの表示デバイス調整，状態判断ロジックと閾値変更は機構の複雑化によりコスト性能の低下要因となる．そのため，要求基本性能の規定とその性能に合致したデバイスの選択は計測成功のために非常に重要となる．

図-4.4にOSVの導入手順を従来型観測と対比して示す。OSVと従来型観測の大きな違いは従来型が計測、判断、表示の各項目に対してインプット、アウトプットを定義し現地状況に合わせたカスタマイズができるのに対し、OSVは現地では原則、取付け作業のみが行われ、計測、判断、表示の各デバイスと判断ロジックは工場あるいは設置場所にて初期値設定し、以後は組み込み済みとなることである。そのため、要求性能の規定のフローは同じであるがその内容は異なり、OSVはこの段階でアウトプットとその期待される効果まで厳密に計画しなければならない。

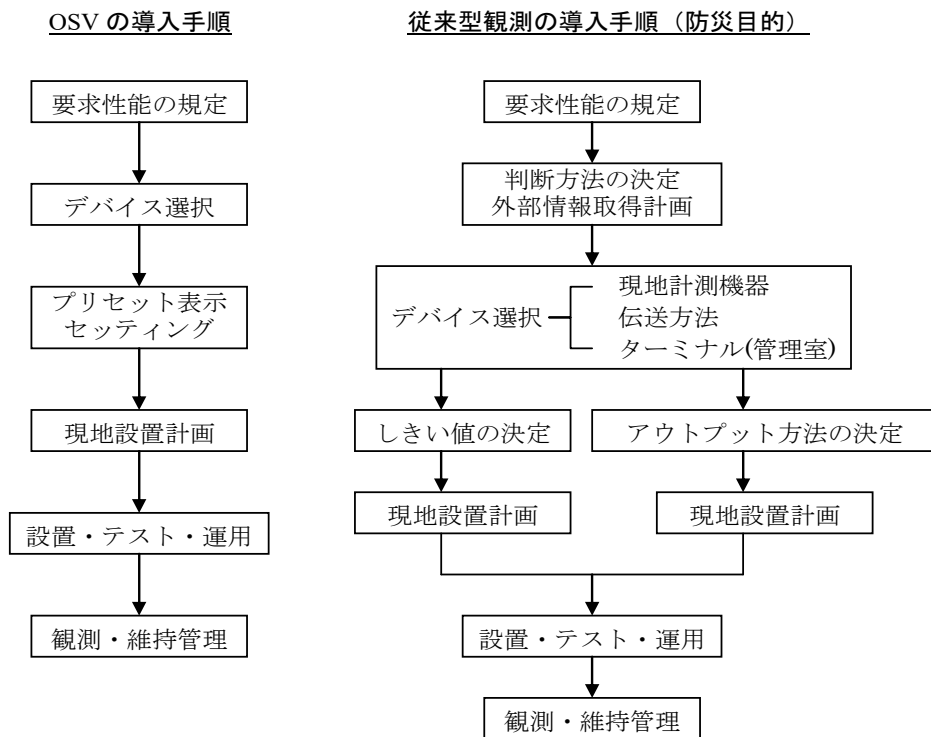


図-4.4 OSV導入手順

(1) 要求性能の規定

計測目的，対象物，結果表現の対象を特定し，OSVの要求性能を規定する．要求基本性能は表2.1に定義した内容に基づき，各項目について定義していく．定義漏れや項目間の不整合がないことを確実にするためには，要求基本性能シートなどを作成して関係者間で認識を行うことが望ましい．

(2) デバイス選択

計測，判断，表示の各デバイスの選択と組み込みを要求基本性能の規定に基づき実施する．ここでは，計測システムの維持コストも考慮する必要がある．一般的には，設置した機器の定期点検，更新費および電気料金などの施設稼働費．維持コストを縮減するため機器の耐久性能を高める場合において機器コストと維持コストはトレードオフ関係となる（図-4.5）ので，許容される範囲において精度性能が低いデバイスを選択することも必要になる．経済性能を考慮したOSVの導入方法については，7章において考察する．

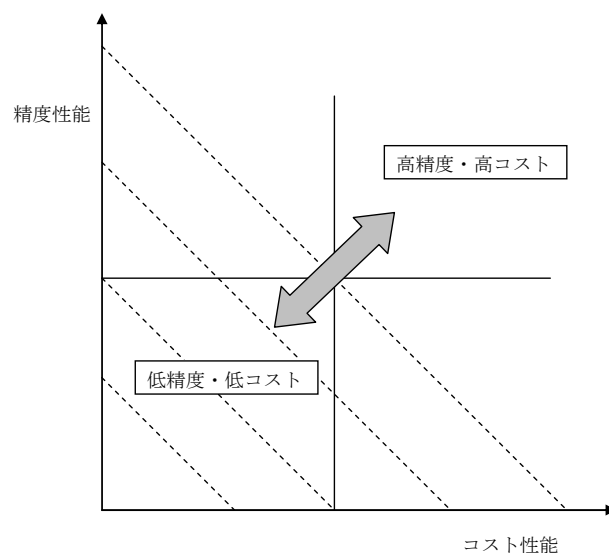


図-4.5 コスト性能と精度性能の関係

(3) 観測・維持管理

OSV の観測は、基本的には観ていれば良いということになるが、見えていなければ状態変化を見逃すことになる。要求基本性能に示す視認性は維持管理により継続的に保証されるので、機器に対する定期点検だけでなく、視認性にかかる維持管理も計画しておく必要がある。

OSV は光デバイスを情報発信の基本ツールとして用いるので、視認性が要求基本性能となる。視認性能には OSV が発する情報が予定する対象者全体に視認されるだけの性能を持つこととともに不測の障害物などにより視認が阻害されない性能が必要である。前者を自己視認性、後者を視認耐性とする。

a) 自己視認性

自己視認性は、OSV の使用目的によって異なるとともに、視認対象者によっても異なる。視認対象者は観測者であることもあれば、市民であることも考えられ、そのいずれの場合においても計測箇所である情報発信位置から視認対象者までの距離、昼夜間など周辺の明るさなどに応じて視認を確実にするようにする必要がある。

b) 視認耐性

耐視認性は設置時の自己視認性では担保できない、設置後の継続的な計測における視認性確保の性能である。具体的には OSV 機器の前面に枝葉が茂る、異物が置かれる、建物が建つなどの外力による視認性低下で、Shamen-net¹²⁾のような常設型観測点も同じ性質をもつ。これを高めるには定期的な点検と伐採などの維持管理が欠かせない。さらに建物などの移動できない障害物が発生した場合には OSV 機器の移設、補助発信機器の設置などの措置を講じる必要がある。

参考文献

- 1) 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，第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，vol.39，pp.151-156，土木学会，2010.
- 2) 芥川真一：特願 2007-130679 光の色による自然及び人工構造物の変状原位置表示装置，2007.5.
- 3) 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.29-30，2007.9
- 4) 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 16-17, Bangkok, 2008.
- 5) 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.
- 6) Chitoshi IZUMI, Shinichi 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, 311-327, 2015
- 7) 泉千年：Application and performance evaluation of On-Site Visualization for safety monitoring in overseas projects(海外プロジェクトにおける安全計測のためのOSV適用とその性能評価に関する研究)，学位論文，博士（工学），甲第6471号，神戸大学，2015.
- 8) 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），VVol.71, No.3（特集号），I-51-I_62，2015.

- 9) Haihua ZHANG: Development of Mechanical Technologies and Visualizing Deformation in Structures, 学位論文, 博士 (工学), 甲第 6914 号, 神戸大学, 2017.
- 10) 芥川真一, 野村貢, 片山辰雄, 高橋厚志, 中田勝行, 小林弘典, 辻村幸治: On Site Visualization のコンセプトに基づく低コスト・低消費電力型モニタリングシステムの開発, 国土交通省建設技術研究開発費補助金総合研究報告書, 2014.
<http://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/josei/144seika.pdf>
- 11) 野村貢, 芥川真一: 視覚情報受領型市民センサーの概念と試行実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会 (平成 29 年 9 月), CS14-008, CS14-pp15-16, 2017.
- 12) Shamen-net 研究会: <http://www.shamen-net.com/>

第5章 On-Site Visualization を用いた斜面工事における性能評価の導入

5.1 斜面工事における計測システムの性能¹⁾

本章では、第3章において提案した計測システムの性能評価の方法を実斜面工事に適用し、改善を性能面から計量的に表現することを試みる。また、計測システムの総合評価値を用いた性能ランクの決定方法について、ケーススタディを行い提案する。

まず、計測システムの要求性能を規定するため、これを導入する斜面工事の性能を規定する。土木学会において各示方書の改訂が行われ、このなかでも性能規定化は大きな潮流である。斜面工事が都市、郊外を問わず行われることが多く、仮設や道路、造成斜面であれば近接構造物が存在すること、地域の自然、社会環境の保全は工事を実施する事業者の責務であるとの観点に立ち、本論では、斜面工事の性能を以下のように規定する。

- ① 所定の形状に切土または盛土できること（所定の空間が確保されること）
- ② 要求された外力に対して安定し、規定内の変形に留まること
- ③ 作業員の安全が確保されること
- ④ 第三者の安全が確保されること
- ⑤ 周辺構造物の使用性が阻害されないこと
- ⑥ 周辺自然環境に悪影響を及ぼさないこと
- ⑦ 所定の期間、①、②の性能が維持されること
- ⑧ 所定の工期、予算で①～⑥が達成されること

これを支える計測システムの性能を，本論では以下のように規定する．

a)②～⑥に必要な情報を必要なタイミングで必要な期間，発信すること

b)a)が予算内で達成されること

a)，b)から斜面工事における計測システムの性能に対する要求事項を，本論では第3章を踏まえ，以下のように規定する．

- ① 適切な計測対象が抽出されているか
- ② 適切な計器を用いているか
- ③ 適切な測定間隔で測っているか
- ④ 適切な判断ルールを用いているか
- ⑤ 適切な表示方法を用いているか
- ⑥ 現地での結果表現に対する作業者あるいは関係市民への周知，必要な教育が実施されているか

ここで，⑥の周知，教育については，危険予知活動など施工管理および定期訓練によるところが大きいと考えられるが，本研究では十分な施工管理，定期訓練が実施されており，結果表現と避難など具体的行動への心理的な結びつけは完了しているものとする。

5.2 実工事における適用性の検討

本事例は，地域景観保全を目的としてトンネル構造により計画された道路における期間限定の仮設切土斜面の掘削である（図-5.1，図-5.2）。

切土斜面は施工範囲，時期から A 斜面および B 斜面に分けられている．本地域

の地質は、更新世の段丘堆積物からなるやや硬質な未固結の粘性土、砂礫、砂質土の互層である。この地域の粘性土層には層状破碎帯が観察されているが、複数のボーリング調査等により連続性は薄いものと判断され、切土斜面の設計が行われた。

(1) A 斜面における計測の失敗

工事は A 斜面が先行して行われた。2011 年 7 月以降、表層がブロック状にはく離し、小崩壊を繰り返していたため、モルタル吹付けと鉄筋挿入工でその都度補強して斜面の切り下げを実施していたが、2011 年 10 月に斜面頂部から全体が崩壊してしまった（写真-5.1）。

施工者の原因究明により、直接的な崩壊の原因は、小崩壊を繰り返したことや地下水影響による地山の脆弱化、切土による応力解放であるとされた。切土の安全監視のための計測システムは、A 斜面の左端部に地すべり計（伸縮計）を設置し動態監視するとともに、初動対応と関連づけた管理レベルを定めて管理を行っていた。

計測結果によると、崩壊前日に下段（S1-2）変位計の計測値は要監視レベルに近づき 3.8mm であったが、崩壊当日（10/16）計測開始時には、要対応レベルを超過し約 7 時間後に崩壊、計測不能となっている（図-5.3）。

この時期は夜間の自動計測は行っていなかったため、要監視レベルから要対応レベルへの移行時期の計測データが得られていない。この結果、変形拡大の検知が遅れたとともに、要監視レベル到達後の挙動が早かったこともあり、押さえ盛土など崩壊抑止の緊急対応がとられることなく崩壊してしまった。

この結果から、計測データ自体は当初予定時刻に得られているので A 斜面に設置された計測システムの機器精度や稼働、監視レベル設定に問題はなかったが、

測定時間および測定間隔に問題があったことが考察される。

2段設置された上部の変位計 (S1-1) は反応せず、下段である (S1-2) が滑落崖をまたぎ設置されているので、平面的ユニット選択は概ね妥当であったといえる。しかし、弱層の連続性に起因する崩壊を考慮した全体系までは把握できていなかったことが施工者により報告されており、平面ユニットを包括する大きな崩壊ユニットを見逃していたと考えられる。

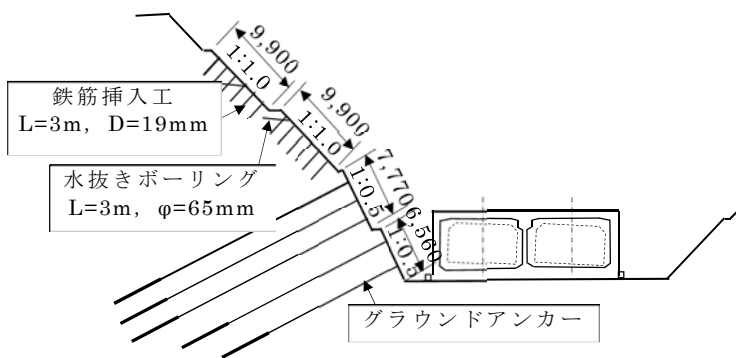


図-5.1 開削トンネル掘削の標準部断面図

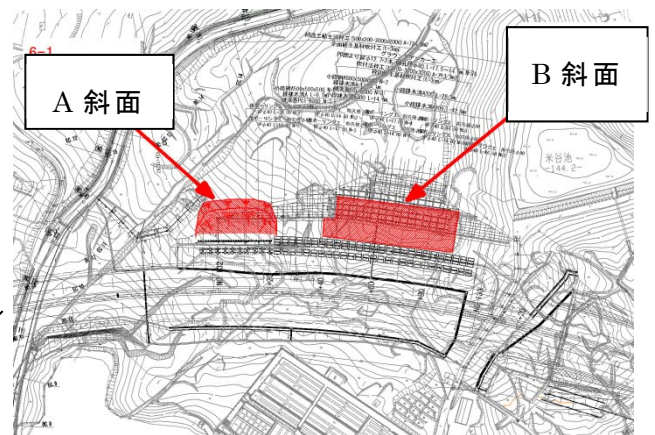


図-5.2 開削トンネル掘削斜面配置図



写真-5.1 仮設斜面の崩壊状況

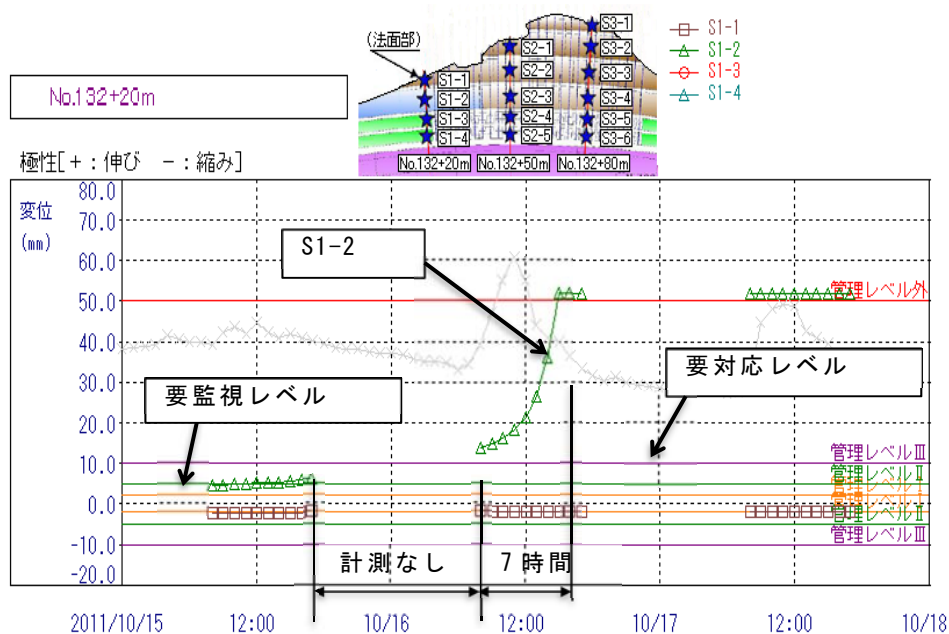


図-5.3 A 斜面の変位計計測結果

情報伝達に関する性能では、結果として発災に情報伝達は間に合っていないが、このプロセスへの入力がないことが原因であり、性能は低いとはいえない。また、伝達情報の正しさや認知については、工事続行にクリティカルな人的被害、物的被害は免れており、事前のリスク管理や安全配慮教育はなされていたと考えられた。

(2) B 斜面での計測改善による成功

遅れて施工された B 斜面では、A 斜面崩壊の経験を踏まえ、地すべり変位計の配置を見直し、ユニットの網羅性を高めた機器配置が採用された。また、計測時間間隔も見直され、1 回/h で 18 時から 7 時まで夜間のデータ採取を行っていなかったものを改め、夜間を含めて 10 分ごと測定 of 動態観測にするとともに、異常判断からタイムラグなしに結果表現を行う OSV を導入した。

2012 年 4 月、最下段まで掘削を完了していた斜面が、降雨等による表面水および地下水により部分的に変状した（写真-5.2，写真-5.3）。

計測は、変位計 (S2-2) が 4 月 3 日 10 時の降雨とともに引張り側に変位が始まり、同時に下段の変位計 (S2-3) が圧縮側に変位していることをとらえている (図-5.4)。4 月 5 日には目視でも変位計の防護管が変形しているのが確認され、監視が強化されるとともに、応急復旧対策工が検討された。その結果、表層付近の部分的な挙動であると判断されたことから、鉄筋挿入工および水抜きボーリングを追加することで大規模な変状に進展させることなく工事完了することができた。

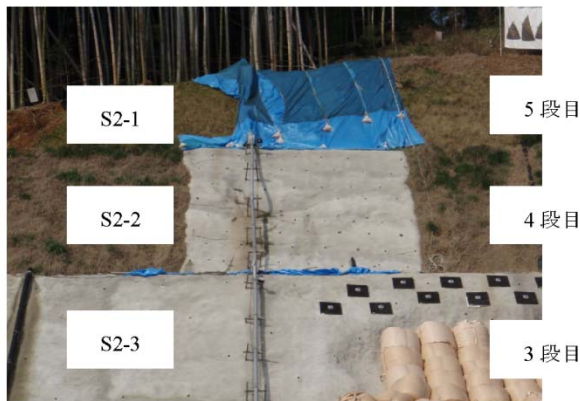


写真-5.2 B 斜面上部の状況



写真-5.3 B 斜面変状の状況

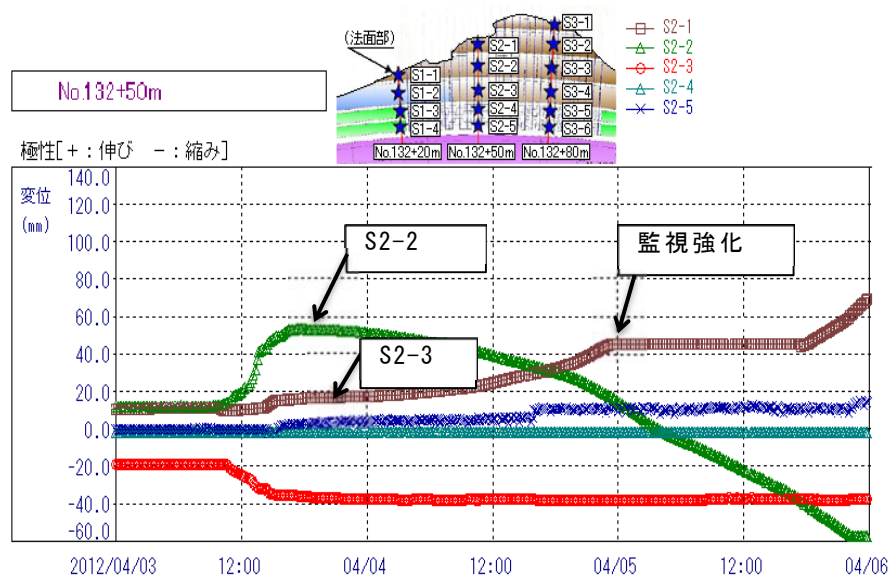


図-5.4 B 斜面の変位計計測結果

(3) 提案する方法による評価

この2つの斜面における計測システムの性能値 P と危険優先度指数 RPN を、これまでの定義により算出し考察する。

斜面 B における計測は、ユニットが把握されるとともに、対策工実施の余裕のある測定時間で計測され、崩壊の未然防止に成功しているため、計測ツールと測定性能 P_1 および測定値判断の性能 P_2 、結果表示の性能 P_3 はいずれも最低限満足な性能を有していたといえる。本斜面の計測結果の表示には、OSV に基づく原位置での危険状態表示が取り入れてあり、斜面 A の場合のような急激な変状発生時に斜面下で作業する作業員への避難告知や教育についても十分な性能が与えられていた。

一方、斜面 A では、変位事象はとらえることができたものの、測定時間間隔と情報伝達時間に要求性能に対して不十分な点があり、緊急対応の機会を逸してしまつた可能性がある。この考察を表-3.8 により評価し、式(3.1)による計測システム性能値 P および RPN を算出した(表-6.1)。ここで、式(3.1)の α, β, γ および O, D は 1.0 とした。なお、今後の事例蓄積によりこれらは最適化を目指すこととする。

結果、斜面 A の計測システム性能値 P は $P=96$ となり、改善を実施した後の斜面 B は $P=8$ となった。斜面 A は計測による対応が間に合わないため崩壊しており、計測システムの性能ランク(表-3.9)としてはIV、斜面 B は変状発生させているものの緊急的な避難の安全は保証できるレベルであったことが推定されることから性能ランクはIIと推定した。

表-6.1 斜面A, Bの性能評価値およびRPN

性能項目		斜面 A		斜面 B	
P_1	P_{1-1}	6	2	1	1
	P_{1-2}		1		1
	P_{1-3}		3		1
P_2		1	1	1	1
P_3	P_{3-1}	16	4	8	2
	P_{3-2}		2		2
	P_{3-3}		2		2
P		96		8	
O		1		1	
D		1		1	
RPN		96		8	
S		IV		II	

5.3 ケーススタディによる性能ランクの提案

ここで、性能ランクの閾値の設定を試みるため、19ケースのモデルケースを作成し、5名の専門家に判定させるスタディを行った。専門家の属性は、斜面防災の経験が豊富な建設部門、応用理学部門のコンサルタント技術士とし、個々の判定は、アンケート方式によりモデルケース図とコメントにより P_1 から P_3 の評価を行い、自身の判定した集計値を参考として主観により表-3.9の性能ランクを選定させる方法とした。5名の判定結果の整理方法は、性能評価値は5名の平均値、性能ランクは5名の専門家が判断した性能ランク値を平均し、性能ランク I からIVの性能ランクに関係付けた。ここで、各性能ランク閾値は最小値1.0と最大値4.0を均等に区切ることにした。

モデルケースの一覧および判定結果と性能ランク選定の平均値を示す(表-5.2, 表-5.3)。専門家判定は個別に実施したが、Case6, Case9, Case12 で2レンジの判定差

となった以外は、性能ランクの判定差が1レンジ以内に収まり、概ねバラツキなく判定がなされたものと考えられる。個別プロセスの集計値である性能値 P を算出した結果および事例研究による判定結果を合わせて示す(表-5.4, 図-5.5)。なお、本図では細部を見るため P の上限値を20としている点に注意が必要である。各ケースの真値は表-5.3に示す。

モデルケースは、様々な要改善点を持つケースを机上設定したため、個別プロセスの集計値である性能値 P は大きなばらつきを示す結果となった。

改善を要すると判断される性能ランクⅢ,Ⅳと避難の安全が保証されると判断された性能ランクⅠ,Ⅱで区分すると、両者には性能値 P の差が見られるようであるが本ケースのみで閾値を定めることは困難である。

さらに、性能ランクⅢとⅣは改善の緊急性によって性能ランクを区分したモデルであったが、性能ランクⅣの性能値 P が性能ランクⅢを上回るケースも見られ、ⅢとⅣのランク差は有意とはいえない。また、性能ランクⅠ,Ⅱのランク差も本ケースだけでは有意性を求めることは難しい結果となった。

表-5.2 性能ランク検討のためのモデルケース一覧

Case	Case 内容	Case	Case 内容
1	斜面の安定について意識されていない。そのため、観察や危険区域の指定もなされていない。	11	複数土塊のすべてに計測機器が設置され、判断ロジックや結果表示は良い状態。しかし、クリティカルなユニットがどれか把握されていない。
2	斜面の安定に問題ある事は認識されているが、計測は行われていない。	12	複数土塊のどれがクリティカルなユニットであるか把握されていないし、計器も不十分で測定間隔も吟味されていない。とりあえず計測機器だけは付けてみた状態。
3	複数土塊 ABC があり、土塊 A に対する計測は P_1 , P_2 , P_3 とも良いが、土塊 B, C が無視されていてクリティカルなユニットが認識されていない。結果表現は時間内に提供され理解も容易だが、自宅で CATV を見ないと情報が得られない。	13	複数土塊のなかでクリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置されている。結果表現も良いが、閾値がどのように定められたのか明らかでないため、誤報の可能性がある。
4	複数土塊 ABC があり、クリティカルなユニット土塊 A に対する計測は P_1 , P_2 , P_3 とも良いが、土塊 B, C が無視されていて全体系が把握されていない。結果表現は時間内に提供され理解も容易だが、自宅で CATV を見ないと情報が得られない。	14	複数土塊のなかでクリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置されている。結果表現も良いが、閾値の信頼性が公知の基準等でなく、現場判断に任されているため、技術的な信頼性に疑問がある。
5	複数土塊 ABC があり、土塊 A に対する計測は P_1 , P_2 , P_3 とも良いが、土塊 B, C が無視されていてクリティカルなユニットが認識されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	15	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置され、閾値も良いが、管理事務所経由で情報発信し、素早い広報手段が確立されていないため、発災までに情報が伝わらない。
6	複数土塊 ABC があり、クリティカルなユニット土塊 A に対する計測は P_1 , P_2 , P_3 とも良いが、土塊 B, C が無視されていて全体系が把握されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	16	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置され、閾値も良いが、かろうじて自宅内避難など緊急対応が可能な時間でしか情報が伝わらず、被害を避けることはできない。
7	複数土塊 ABC があり、土塊 A に対する計測は P_2 , P_3 とも良いが、計器がオーバースペックで P_1 が良くない。土塊 B, C が無視されていてクリティカルなユニットが認識されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	17	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置されて閾値設定も良いが、かろうじて自宅内避難など緊急対応が可能な時間でしか情報が伝わらない。また情報の意味が周知されていないので、意味が伝わらない。
8	複数土塊 ABC があり、クリティカルなユニット土塊 A に対する計測は P_2 , P_3 とも良いが、計器がオーバースペックで P_1 が良くない。土塊 B, C が無視され全体系が把握されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	18	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置され、閾値も良く次行動に必要な時間が確保される。しかし、発光などの情報提供しかなく、周知も不十分なので意味が伝わらず異常としか認識されない。
9	複数土塊 ABC があり、土塊 A に対する計測は P_2 , P_3 とも良いが、測定間隔が長すぎる。土塊 B, C が無視されていてクリティカルなユニットが認識されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	19	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置され結果表現も提供範囲、提供時間について十分に吟味され、確実性がある。閾値も技術基準に基づき信頼性がある。
10	複数土塊 ABC があり、クリティカルなユニット土塊 A に対する計測は P_2 , P_3 とも良いが、測定間隔が長すぎる。土塊 B, C が無視され全体系が把握されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。		

表-5.3 専門家アンケート判定結果

Case	計測ツールと測定のパフォーマンス			計測値判断のパフォーマンス	現場での結果表現のパフォーマンス			P	S	
	適切な対象抽出の性能評価値	適切な計測器選定の性能評価値	適切な測定時間での計測性能評価値	計測値判断の性能評価値	適切な時間内に発信される性能評価値	情報が正確に伝達される性能評価値	内容が適切に認識される性能評価値	計測システムの性能値	性能ランク平均値	性能ランク(表-2)
1	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	16384.0	4.0	IV
2	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	16384.0	4.0	IV
3	2.8	1.0	1.0	1.0	1.6	2.0	1.6	14.3	3.4	IV
4	2.0	1.0	1.0	1.0	1.6	2.0	1.4	9.0	2.8	III
5	2.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.6	5.4	3.0	III
6	2.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.6	4.6	2.2	II
7	2.8	2.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.4	9.4	3.0	III
8	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.4	6.7	2.8	III
9	2.8	1.0	2.6	1.0	1.0	1.2	1.4	12.2	3.4	IV
10	2.0	1.0	2.6	1.0	1.0	1.2	1.4	8.7	2.8	III
11	2.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.4	4.4	2.2	II
12	3.0	2.8	4.0	3.2	1.2	1.2	1.8	278.7	3.0	III
13	1.0	1.0	1.0	3.2	1.0	1.0	1.2	3.8	3.0	III
14	1.0	1.0	1.0	2.8	1.0	1.0	1.0	2.8	2.4	II
15	1.0	1.0	1.0	1.0	3.8	3.6	3.2	43.8	3.2	III
16	1.0	1.0	1.0	1.0	2.4	1.8	2.0	8.6	3.0	III
17	1.0	1.0	1.0	1.0	2.2	2.4	4.0	21.1	3.2	III
18	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	2.8	3.2	12.5	2.8	III
19	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	I

表-5.4 アンケート性能ランク値と性能ランクの関係

性能ランク平均値	性能ランク
3.25 ~ 4.00	IV
2.50 ~ 3.25	III
1.75 ~ 2.50	II
1.00 ~ 1.75	I

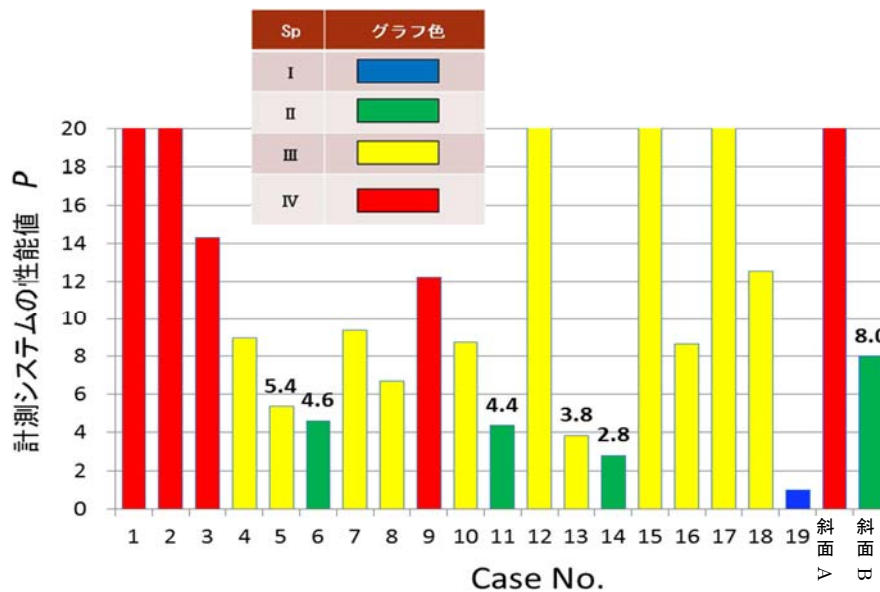


図-5.5 モデルケース性能値と性能ランクの関係

5.4 実工事およびケーススタディから得られた知見

本事例では、斜面工事の計測システムにおいて性能規定化が必要であるとの認識に立ち、計測システムの性能を評価する方法について、簡便で評価が容易な性能評価の方法を提案、その有効性について検証した。

斜面工事における計測システムを性能規定化することは本研究の方法において可能であり、本研究の方法に拠れば、「測定」、「判断」、「現地での結果表現」の各プロセスにおいて性能を評価し、必要な改善を最小の手順で明確化することができる。さらに事例の収集と研究を進め、さまざまな斜面に対応する性能ランクの閾値を設定することにより性能を数値化しランク評価できれば、関係市民や施設利用者、事業者に対して効果的なアカウントビリティを確保することが可能になると考える。

広がった生活圏のコンパクト化が求められるなか、災害の契機となる外力の高

まりや事業者の予算制約が斜面工事における計測システムに低コスト化を要求している。さらに IoT 技術の進歩によりインフラ計測全体のありようが変化しつつある。

本事例は、そのような流れのなかで計測システムの性能をどのように評価するかを考察したものであり、このような性能評価指標が明示されることにより、斜面工事だけでなく多くの分野の工事の計測システムを性能評価することが可能になるほか、市民の使用に供されている完成品としての構造物の安全性や維持管理段階での性能保持の計測にも展開が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 野村貢, 芥川真一, 佐藤毅: 斜面工事における計測システムの性能を評価する方法の研究, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.73, No.4, I_33-I_44, 2017.
- 2) 斜面の崩落の検知センサーと検出システムの開発, 土木研究所共同研究報告書 整理番号 446 号, pp.2_37, 2013.
- 3) 岩崎智治, 原口勝則, 佐藤渉, 増成友宏, 内田純二, 清水則一: GPS を用いた自動変位監視のための Web システムの開発, Landslides, Journal of the Japan Landslide Society, Vol.49, No.4, pp.174-185, 2012.
- 4) 玉手聡, 堀智仁, 伊藤和也, 吉川直孝: 斜面の浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊監視の提案, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOOSH-SRR-No.42, pp.25-33, 2012.
- 5) 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, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, vol.39, pp.151-156, 土木学会, 2010.
- 6) 芥川真一: On Site Visualization による安全・危険情報の原位置可視化手法 (特集 防災, 安全・安心を確保する社会基盤整備), 一般社団法人日本建設機械施工協会誌, 66(9), pp.42-47, 日本建設機械化協会, 2014.

第 6 章 MEMS センサーを用いた計測システムの開発

6.1 トンネル内附属物保全モニタリングシステムの開発

6.1.1 トンネル内附属物の落下と点検の現状

本章では、廉価性と耐久性に優れることから OSV ツールとして大きな可能性を持つ汎用 MEMS センサーを用いて計測システムの「測定」ツールを開発した事例をもとに、計測システムの性能評価の実証と OSV の適用性を考察する。

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や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⁴⁾。

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,実際に2010年6月に国土交通省北陸地方整備局の子不知高架橋の点検作業中に点検員が墜落,死亡する事故が発生している。この事故では,検査路の床材が腐食しており,これを点検員が踏み抜いたことが原因であると報告されている⁵⁾。

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⁶⁾,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⁷⁾。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

倶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⁸⁾が知られている。

トンネル内付属物の定期点検が軽んじられてきたのは、前述のとおりであり、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⁴⁾においても点検の不十分性、記録の不十分性が指摘されている。

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、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、程度の差はあれ、いづ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目視、打音点検でも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り、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を挙げている。

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⁹⁾。

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。

本トンネルでは 5 回にわたり照明器具の定期点検が実施され、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。点検記録では、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。

笹子トンネルの事例も併せ、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。

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、都道府県、政令市が管理するものが 49%、市区町村が 23%となっており、都道府県においては道路施設の巡視、点検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。

6.1.2 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，現行点検方法の課題は以下である。

- a) 通常の見視，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、多数の附属物の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、野村ら^{11),12)}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(6.1)が利用者安全性の判断指標となる。

$$T1 > T2 \quad (6.1)$$

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。

6.1.3 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」と呼ぶ(図-6.1)。本開発の目的は、道路トンネル内附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。

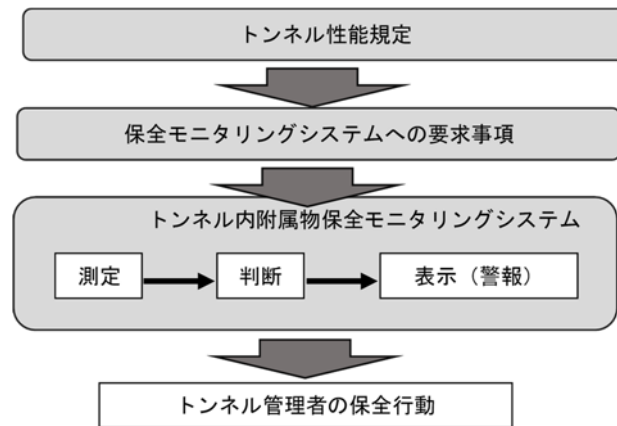


図-6.1 トンネル性能規定からみた保全モニタリングシステムの体系¹²⁾

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^{13),14),15)}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。これを一般道路に拡張し、本システムの要求性能と求められる機能について表-6.1に整理する。

表-6.1 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¹¹⁾

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	
	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
	非常時に利用者が安全に避難できる	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	必要な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	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	
	利用者に不快感・不安感を与えない	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	
	必要な視認性を確保できる		
構造安定性能	常時作用する荷重に対して安定する	覆工が安定する	
		地山が安定する	
	想定される荷重変化に対して安定する	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	
必要な耐震性能を有する	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		
耐久性能	防水性がよい	覆工, 諸設備の劣化原因となる漏水が生じない	
	覆工材が劣化しない	覆工材が劣化しない	
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	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	
管理者の維持管理性能	安全, 容易に点検, 清掃できる	日常の巡回, 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
	安全, 容易に補修, 補強できる	内空断面に補修, 補強余裕が確保されている	監視員通路歩行空間の確保に影響しない
周辺への影響度	地下水への影響が少ない	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	
	周辺地盤への影響が少ない	地表面の沈下, 隆起が許容範囲内である	
	周辺での振動, 騒音が少ない	周辺での振動, 騒音が許容範囲内である	
	周辺地域の気象環境への影響が少ない	周辺での気象環境への影響が許容範囲内である	

トンネル内附属物は、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」をどのような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-6.2)。

ここで、保全モニタリングシステムにおいて、「測定」「判断」「結果表現」の各プロセスは独立して設計可能であるとする、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。

表-6.2 保全モニタリングシステムへの要求事項¹¹⁾

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

本章で取り扱う「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

6.1.4 MEMS センサーの活用

本プロセスは，表-5.2 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，および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、3章に述べた要監視ユニットはさらに多くなる。

これ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た。

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。

すなわち、式(6.1)において、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(6.1)の成立をめざすアプローチである。

ここで、MEMS センサーについて述べる¹¹⁾。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、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¹⁶⁾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。

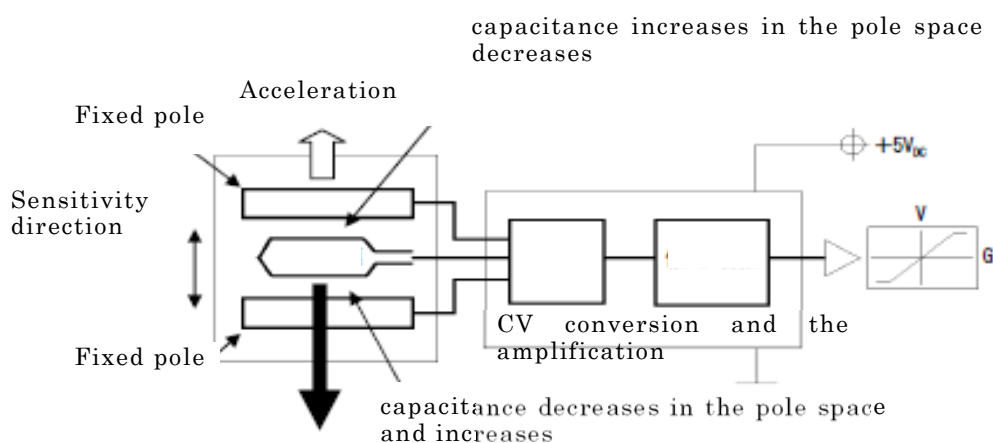


図-6.2 MEMS 技術による加速度センサーの構造

6.1.5 トンネル照明器具の変位検知による異常検知

(1) センシングの考え方

トンネル照明器具は、多様な仕様のもものが実用されているが、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-6.1)。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-6.3, 写真-6.2)、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-6.4)。

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。



写真-6.1 標準的なトンネル照明器具

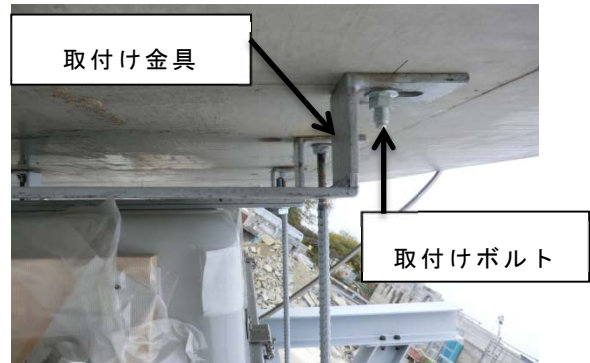


写真-6.2 取付け金具および取付けボルト

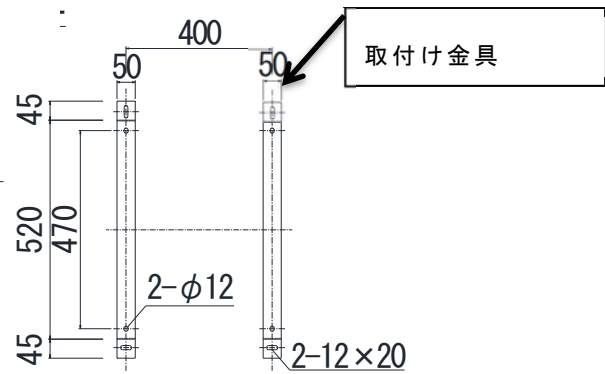
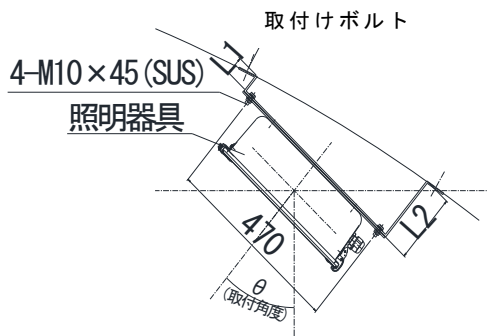


図-6.3 取付け金具および取付けボルト詳細

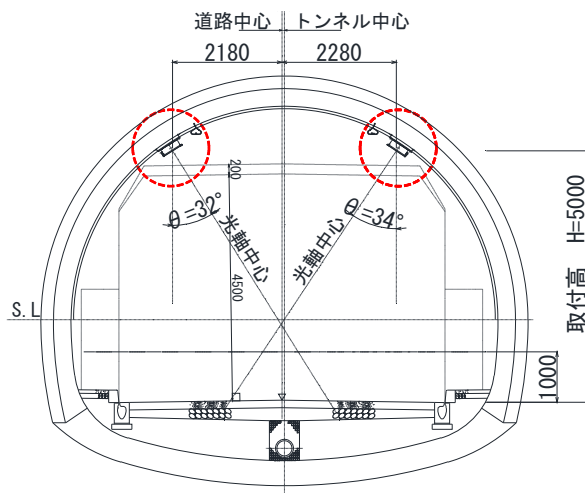


図-6.4 トンネル内での照明器具取付け例



写真-6.3 傾斜センサー (IT孔内傾斜計)

(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（写真-6.3）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¹⁷⁾となる。

IT 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¹⁸⁾である。IT 傾斜計の主要性能について表-5.3 に示す。

表-6.3 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40 000digit	
分解能	1/1 000°	
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	1 800g	IT傾斜計としての総重量

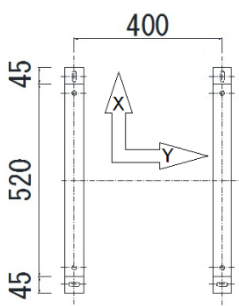
(3) センサーの要求性能

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旨とし，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-6.3**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-6.4**)。

表-6.4 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°

(4) 実験装置

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-6.5**)。

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-6.6, 図-6.7）。

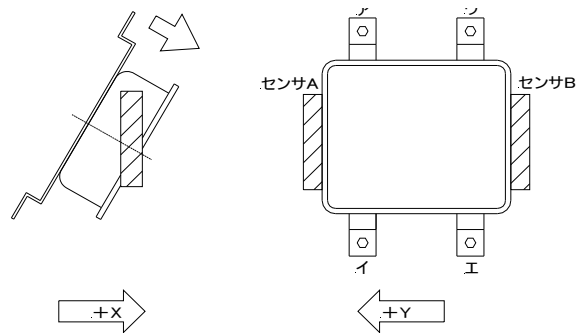


図-6.5 傾斜センサー取付け方法

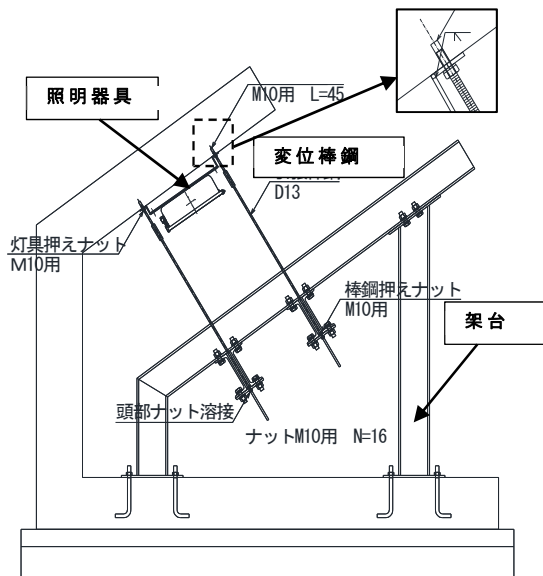


図-6.6 照明器具降下実験装置



写真-6.4 実験装置全景

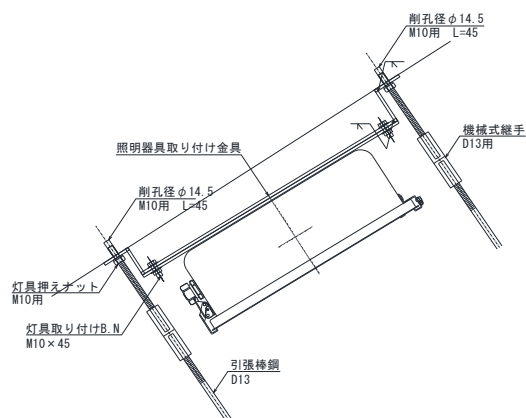


図-6.7 変位制御部詳細

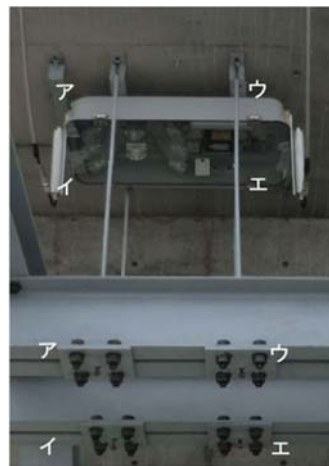


写真-6.5 取付けボルト配置

(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、機械式の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により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する。

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-6.5）。

表-6.5 変位実験ケース一覧

	case1	case2	case3	case4
ボルト緩め位置				

(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-5.6)。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)が緩んでいるにも関わらず、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-6.7)。

表-6.6 変位実験ケースおよび変位量

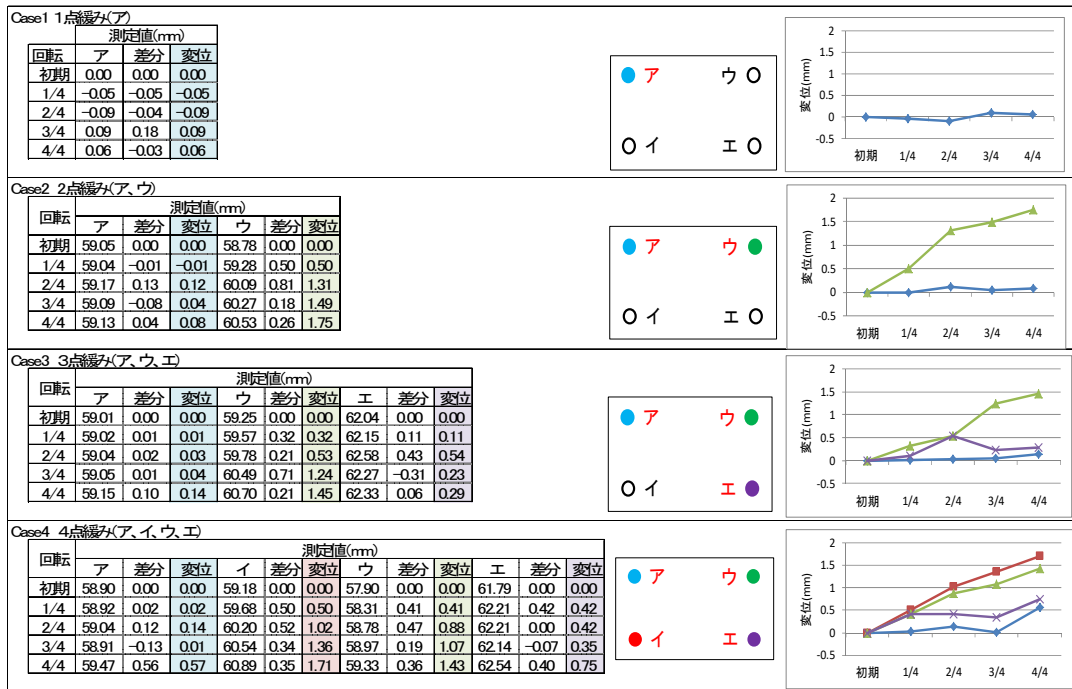
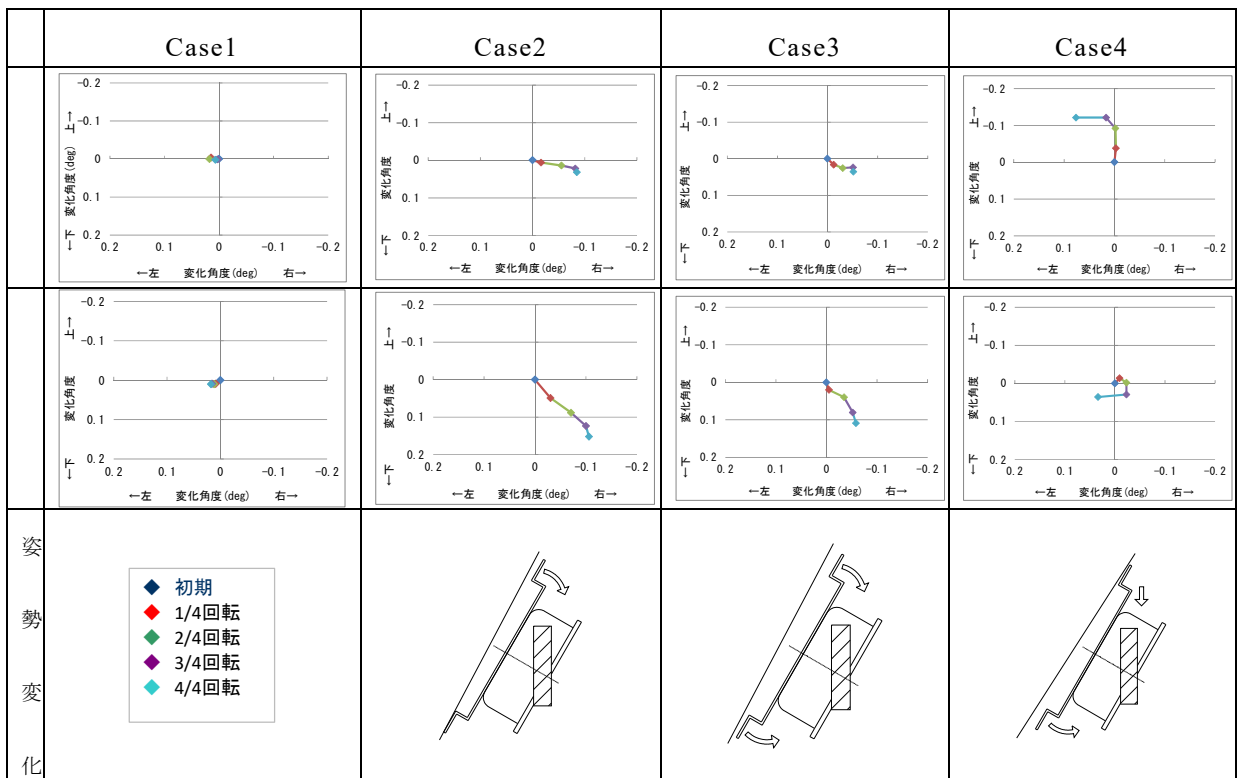


表-6.7 変位実験ケースおよび傾斜変化量



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-6.7）。

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。

- a) 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。
- b) 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。

MEMS 傾斜センサーによる函体の姿勢把握は、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できる可能性が明確になった。

しかし一方で後者は、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知見を積み重ねる必要があることを示唆している。

6.1.6 振動計測による異常検知基礎実験

(1) センシングの考え方

道路トンネル内の附属物は、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振動するが、覆工コンクリートとの固定、前面ガラスの固定に何らかの変化が生じると固有振動数も変化すると考えられる。この変化を MEMS 振動センサーで検知し、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¹⁹⁾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²⁰⁾がある。また、さまざまな振動検知による構造物ヘルスマニタリングについての研究²¹⁾も進んでいる。

(2) 使用するセンサー

既往研究事例に、トンネル照明器具について固有振動数を測定したものや脱落、落下についてのヘルスマモニタリングの研究事例はないので、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-6.6, 6.7）。

その結果、図-6.8 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。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-6.8 のセンサーを採用した。

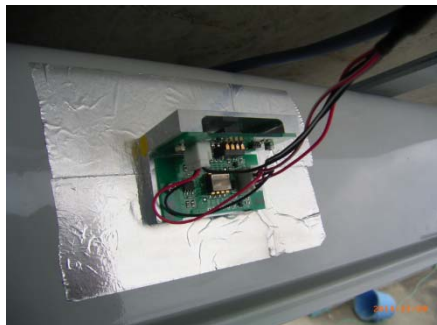


写真-6.6 MEMS 振動センサー

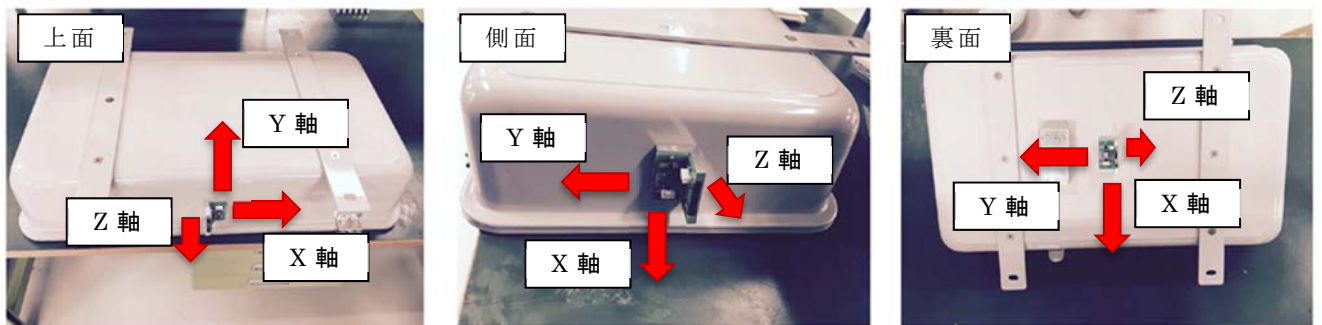


写真-6.7 振動センサー取付けおよび軸方向

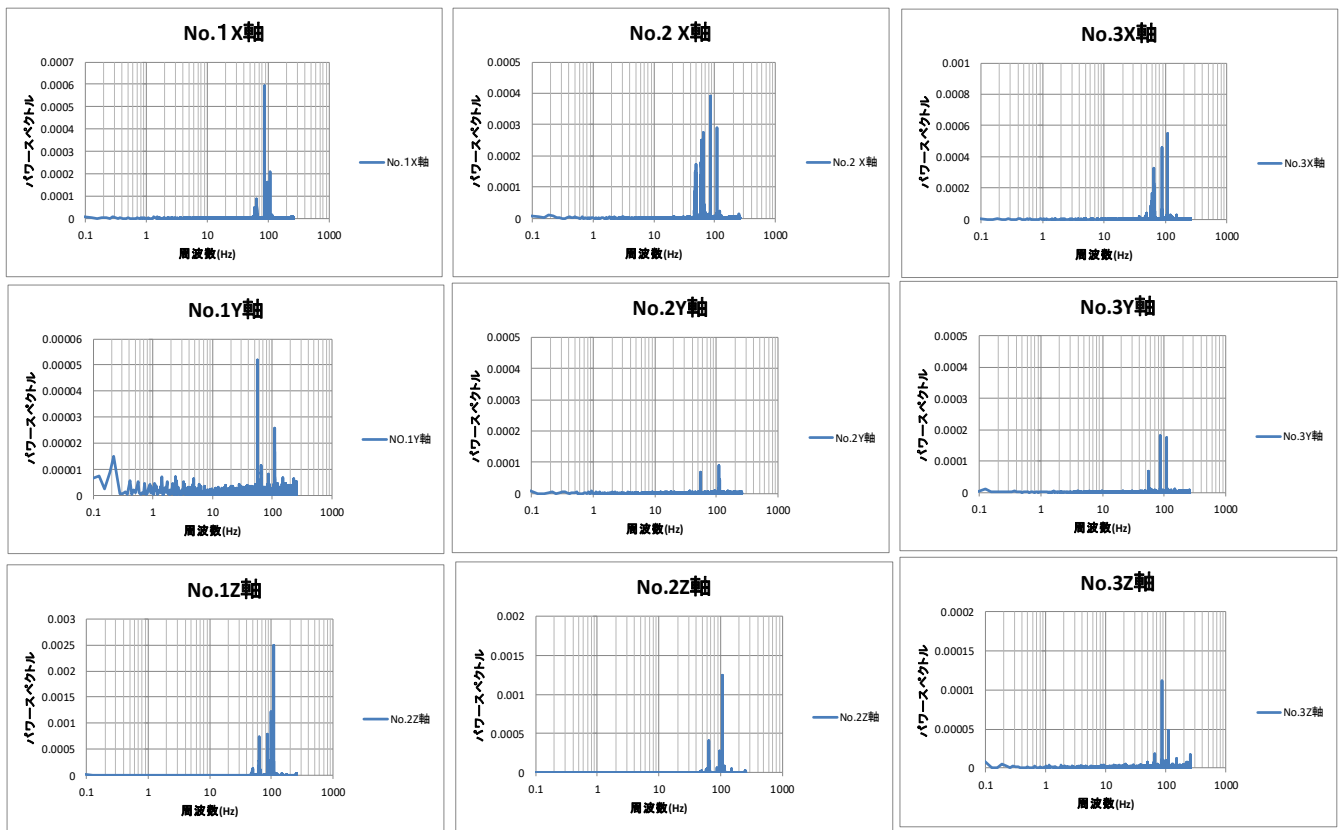


図-6.8 供用中の道路トンネル内照明器具の振動計測結果

表-6.8 振動センサーの主要性能

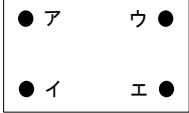
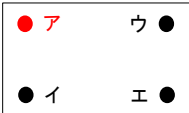
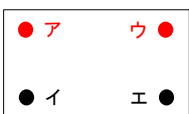

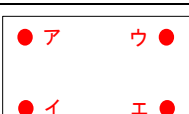
性能項目	仕様	備考
測定軸数	3軸 (X-Y-Z)	
使用電圧範囲 V_{DD}	$5 \pm 0.25V$	
検出加速度範囲	$\pm 19.6m/s^2$	
オフセット出力	$V_{DD}/2V$	
感度	$1 \pm 0.05V/G$	$1G=9.8m/s^2$
周波数特性	DC~128Hz (-3dB)	
サンプリング	512Hz	
分解能	16bit	
測定軸数	3軸 (X-Y-Z)	

(3) 実験方法

本実験は、振動センサーにより照明器具の取付け異常の検出が可能かを確認するために基礎実験として実施した。実験方法は、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、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（表-6.9）。

表-6.9 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

(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-6.9）。

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 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。

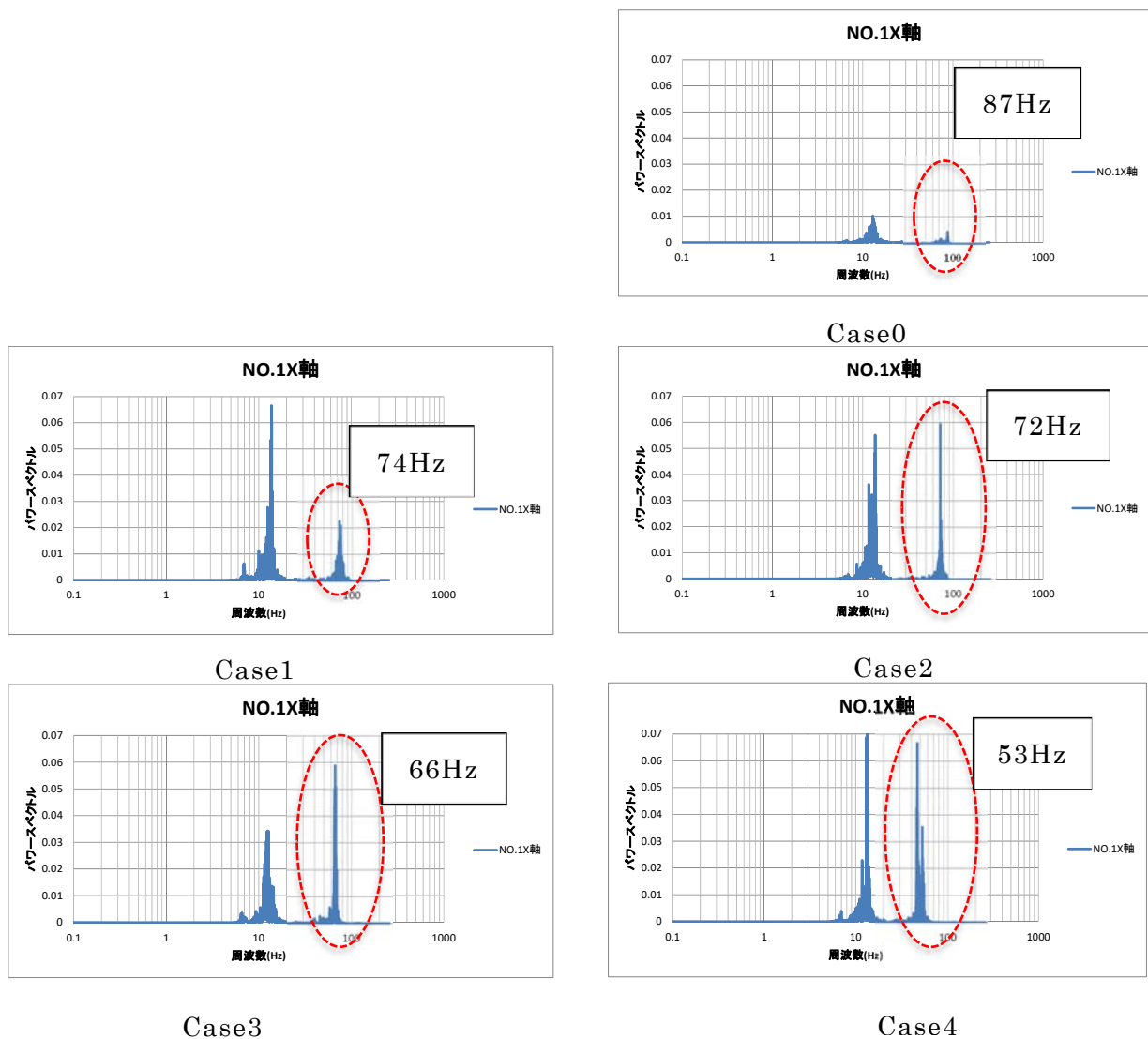


図-6.9 実験装置による振動試験パワースペクトル結果

(5) 考察

実験の結果から得られた知見は以下である。

- a) 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。
- b) 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。

- 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。

取付けボルトの設計検証により，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(6.1)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。

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，実用化にあたっては，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と考えられた。

6.1.7 振動計測による異常検知実用化実験

(1) 基礎実験の課題

6.1.6では，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，専用の実験装置を製作，これにより照明器具の降下状況を再現して，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，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函体の振動系が変化し、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。

傾斜センサー、振動センサーとも微小変化のセンシングに成功しているが、照明器具の姿勢変化は、取付け部の施工に左右される傾向が強く、段階的な劣化進行を計測結果から予測することは難しいと考えられる。一方で振動センサー実験は、段階的な変化を補足している可能性があり、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られた。同時に明らかになったのは、以下である。

- a) 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。
- b) 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、軸方向の変状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。

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通知することは可能であることはわかったが、挙動を予測することはできておらずクリティカルなユニットが把握されてはいるが、全体系把握には至っていない。

いと考えられる。これを式 3.2 および表-3.1~3.3 により評価すると以下のとおりである（表-6.10）。

表-6.10 振動計測基礎実験の P_1 評価

性能評価値	状況	性能呼称	評価点
P_{1-1}	クリティカルなユニットは把握されているが、全体系までは困難	合格	2
P_{1-2}	要求に見合った精度，耐久性の計器が選択されている	完全	1
P_{1-3}	要求に見合った測定時間，測定間隔が実現されている	完全	1

$$P_1 = P_{1-1} \times P_{1-2} \times P_{1-3} = 2 \times 1 \times 1 = 2$$

ここで，計器の精度，耐久性能は，10年間ノーメンテをクリアレベルとしている自動車用センサーであることから完全と評価，測定時間・測定間隔は秒単位設定可能であることから完全と評価した。

計測システムとして実用化するためには，最低1本の取付けボルトが機能している間に結果表現できなければならない。さらに緊急交通規制などの措置を未然に回避するためには，4本の取付けボルトのうち，どのボルトに異常発生したのかを検知する機能が必要である。

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。

(2) 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。

(3) 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-6.10）、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-6.11）。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-6.11 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-6.12 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-6.12）（図-6.13）。

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。

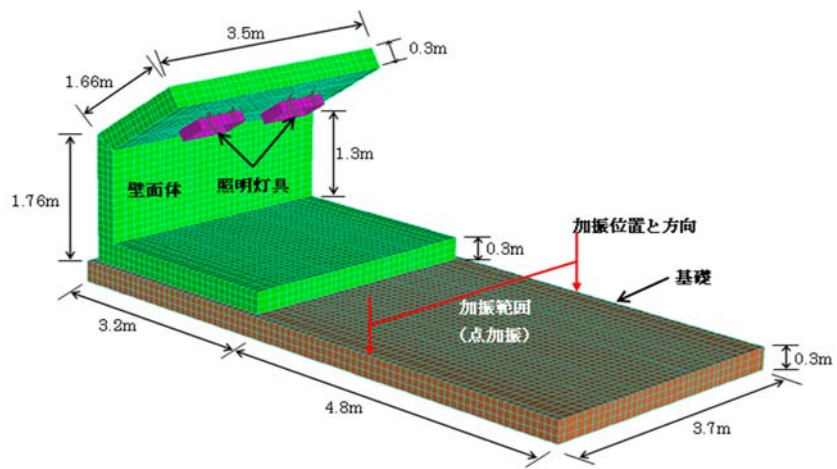


図-6.10 実験装置解析モデル全体図

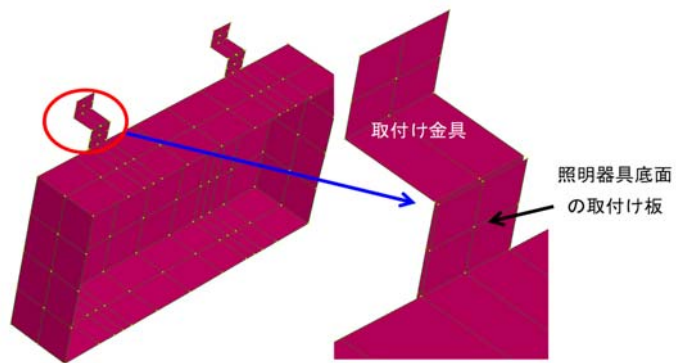






図-6.11 照明器具および取付け部モデル詳細図

表-6.11 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

表-6.12 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		92.6 Hz	87 Hz
Case1	1点		90.8 Hz	74Hz
Case2	2点		89.8 Hz	72Hz
Case3	3点		87.8 Hz	66Hz

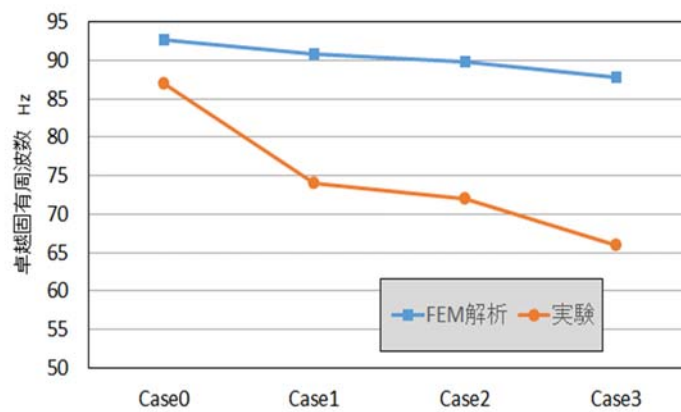


図-6.12 FEM 解析と既往実験の比較

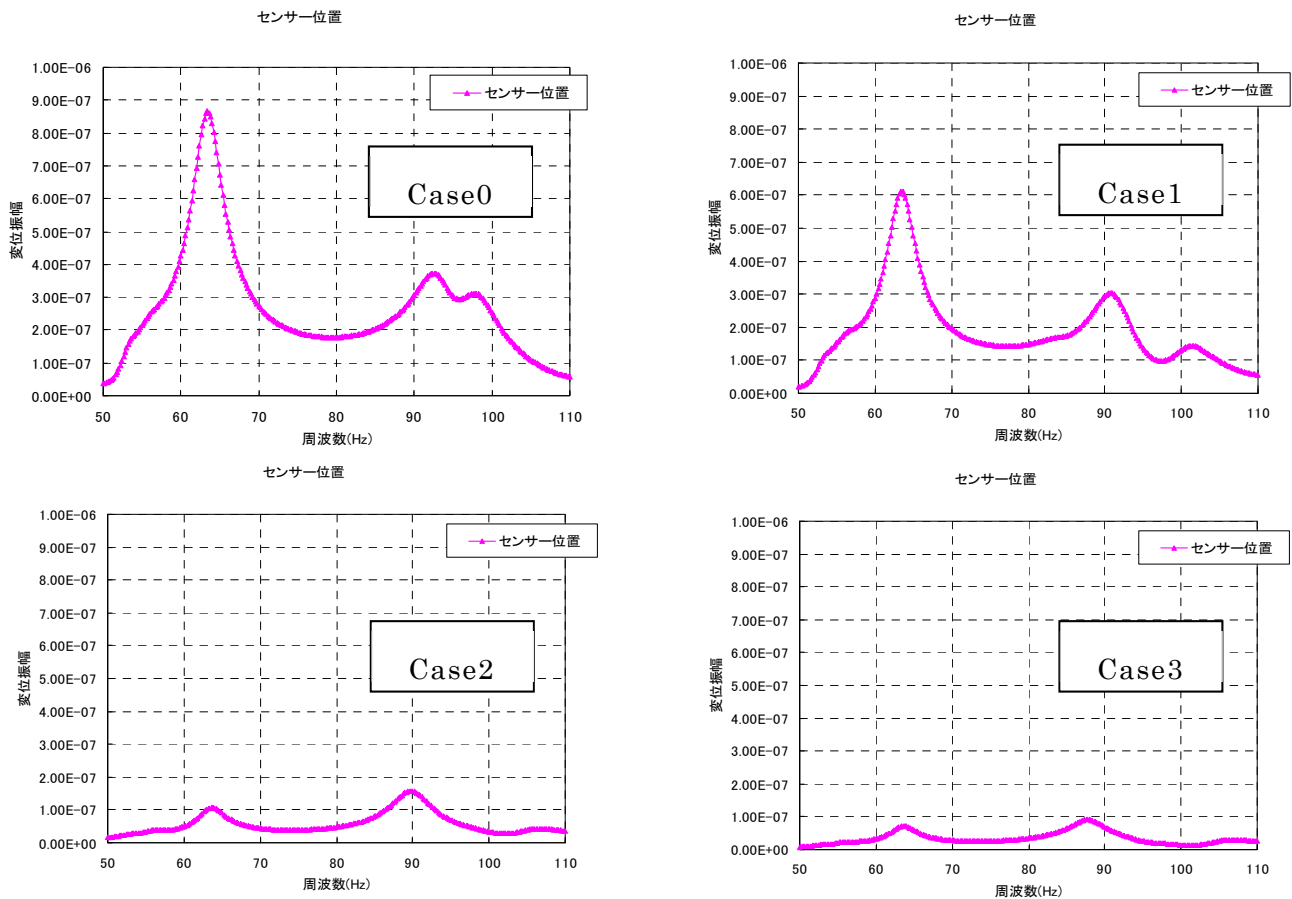


図-6.13 FEMによる応答変位振幅結果

(4) 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かを観察するために、実稼働解析を実施した。

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^{22), 23)}。

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、取付け金具を介して取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-6.14）。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、6.1.6 の実験により取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。本解析の結果として、函体中央部ではなく、端部がセンサー取付け位置として望ましいという知見が得られた。

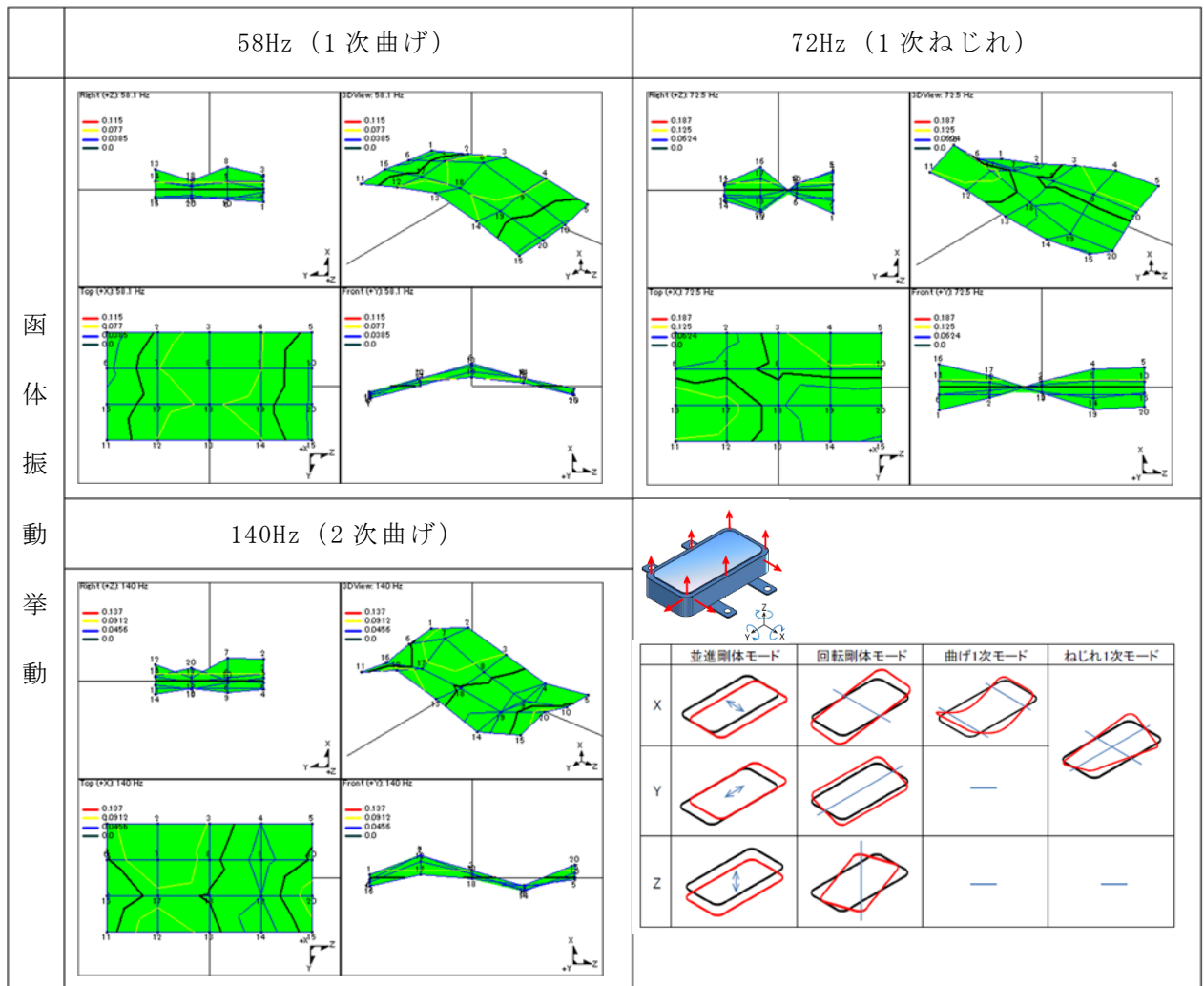


図-6.14 実稼働解析により可視化した函体振動実験結果

(5) 追加振動実験による考察

(1)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。

(6) 実験方法

実験は、これまでの実験で製作した試験装置（図-6.6）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のと並行して、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-6.3）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-6.15）．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-5.13, 加速度ピックアップおよび起振機の主要性能を表-6.14, 表-6.15 に示す．

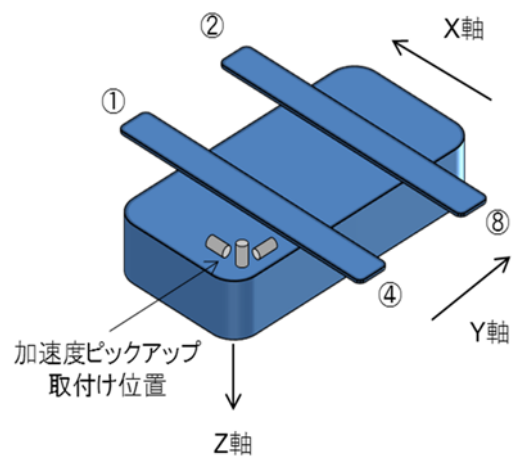


図-6.15 照明器具加振実験センサーおよび観察軸方向

表-6.13 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-6.14 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	40 pC/(m/s ²)
測定周波数範囲	1~3 000 Hz
取付共振周波数	9 kHz
最大測定加速度	400 m/s ²
使用温度範囲	-50 ~ +160 °C
静電容量	780 pF

表-6.15 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	5 200 rpm	40~120Hzを加振可能
振動シャフト	6 × 8 mm	

(6) 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。

(7) 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-6.16）。

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-6.17）。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-6.18）．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番の同じ側のボルトが緩んだ場合では，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-6.19）．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．

(8) 考察と評価

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の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, 落下が迫った状態で, 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.

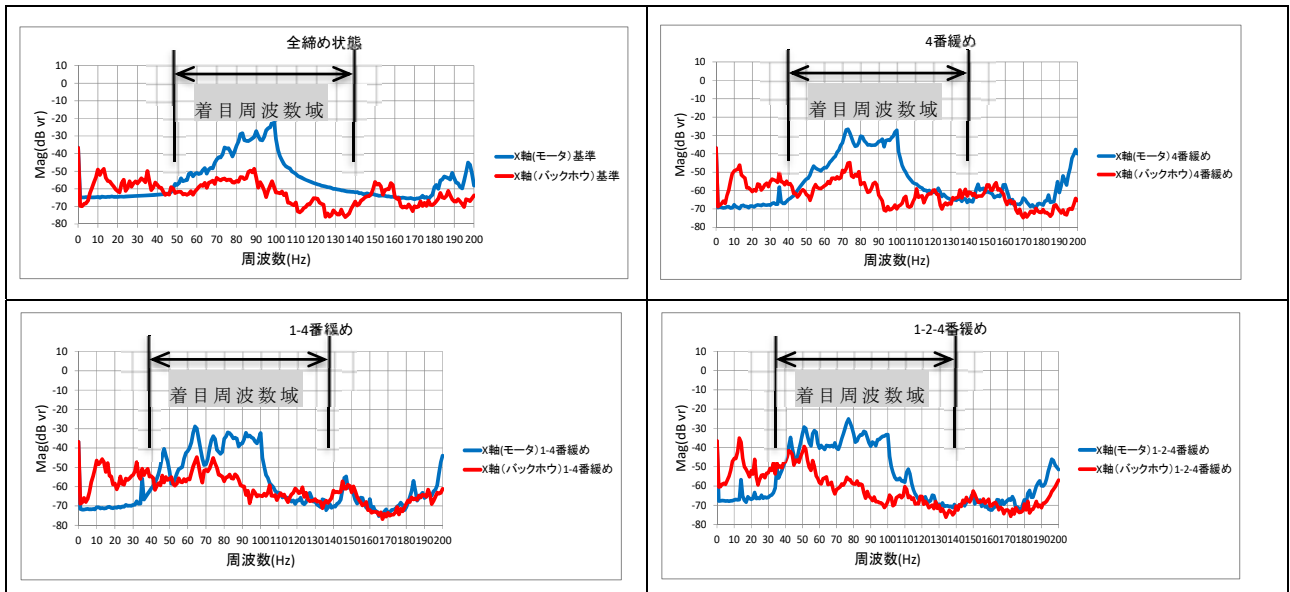


図-6.16 重機および起振機（モーター）加振の比較（X軸方向）
 青：起振機（モーター）加振，赤：重機加振

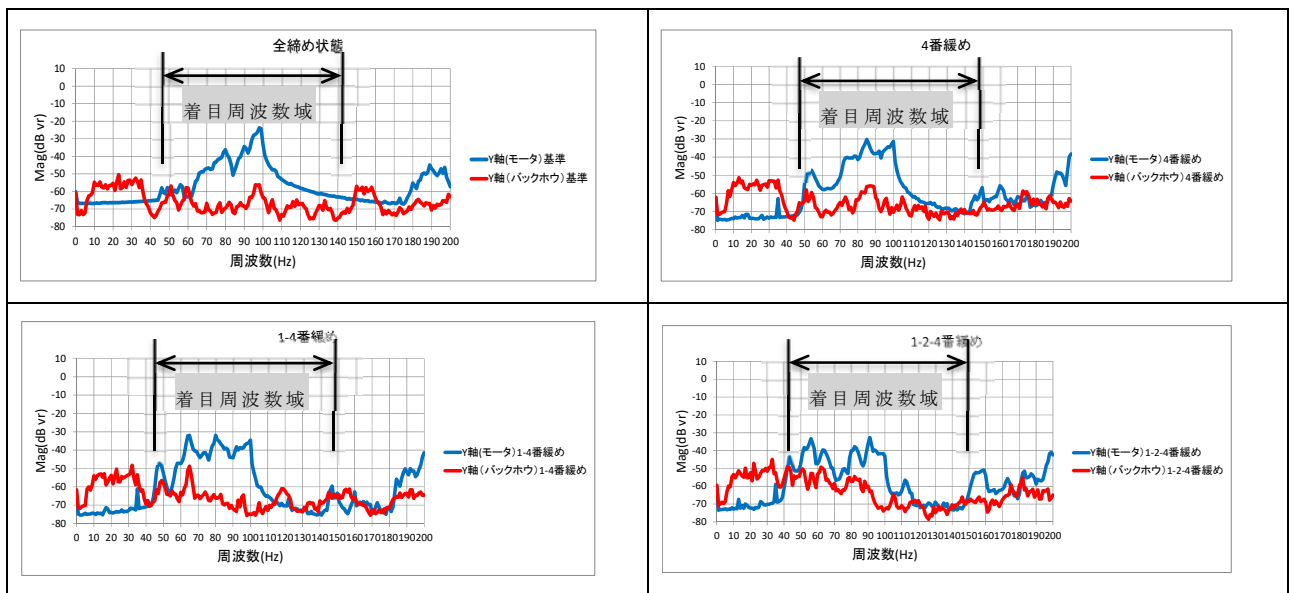


図-6.17 重機および起振機（モーター）加振の比較（Y軸方向）
 青：起振機（モーター）加振，赤：重機加振

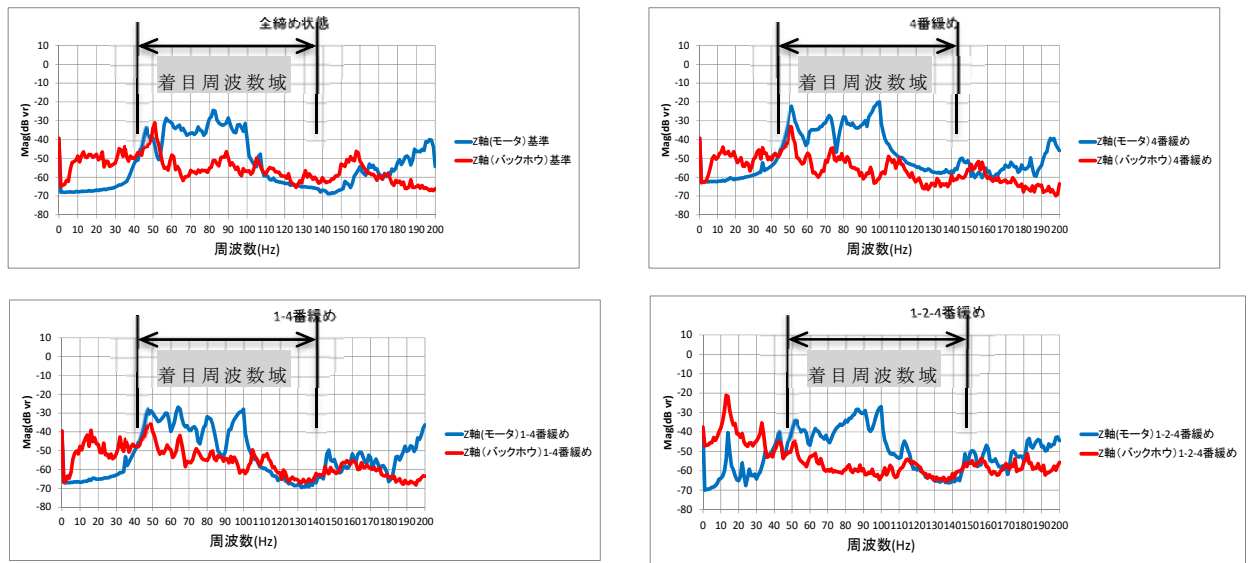
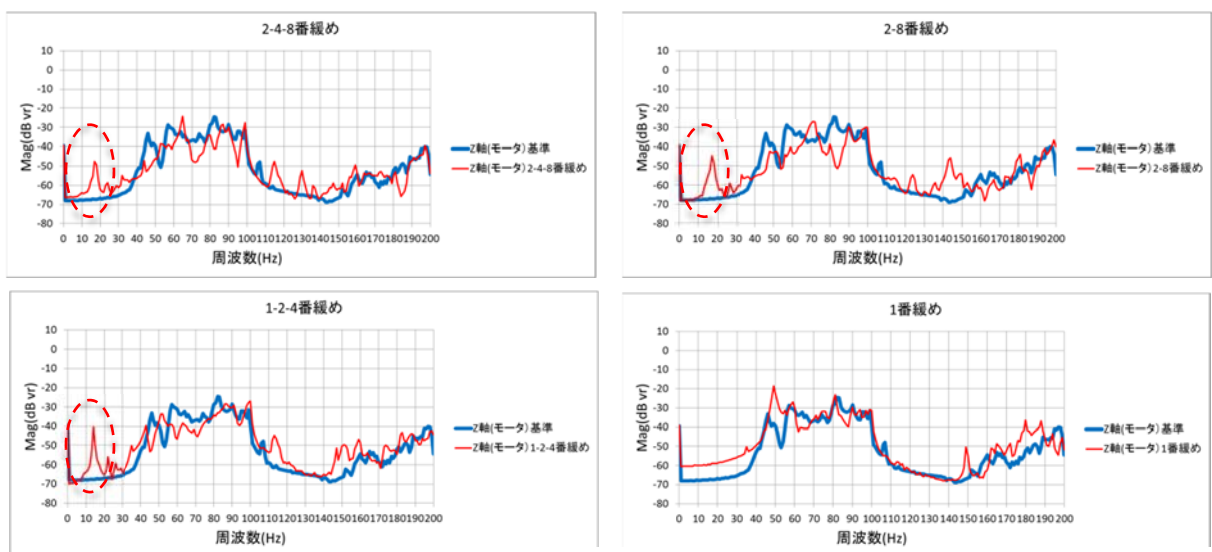


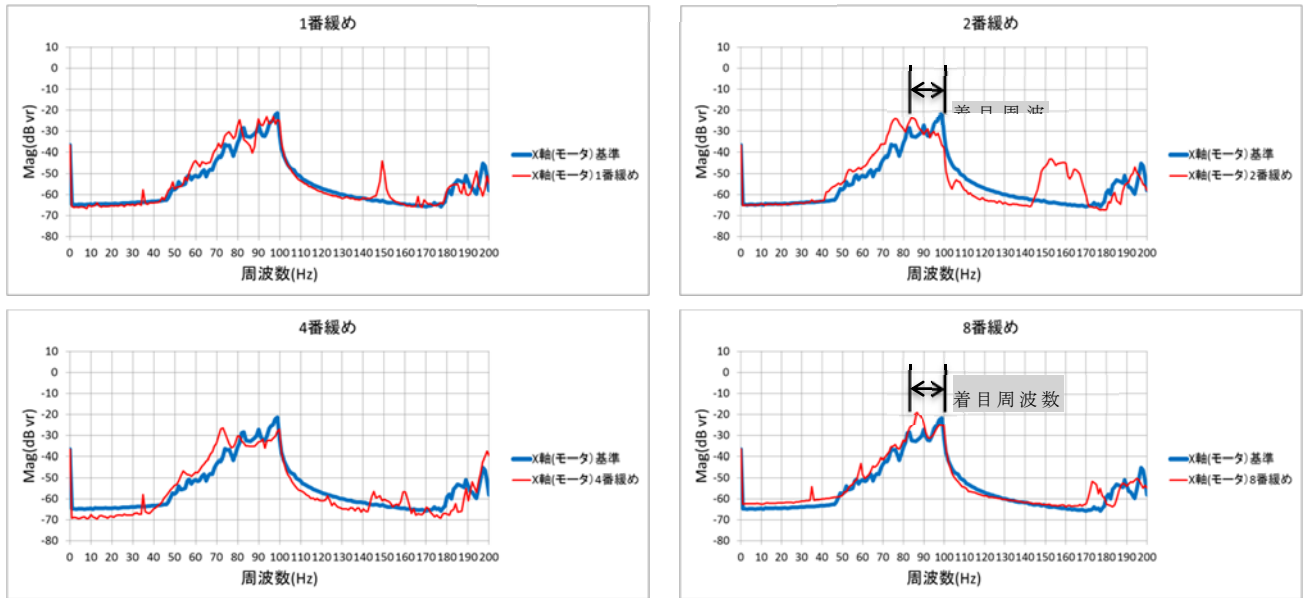
図-6.18 重機および起振機（モーター）加振の比較（Z軸方向）
 青：起振機（モーター）加振，赤：重機加振



※10Hz～20Hzの周波数卓越が顕著でない例

図-6.19 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）

計測軸方向：X 軸方向



計測軸方向：Y 軸方向

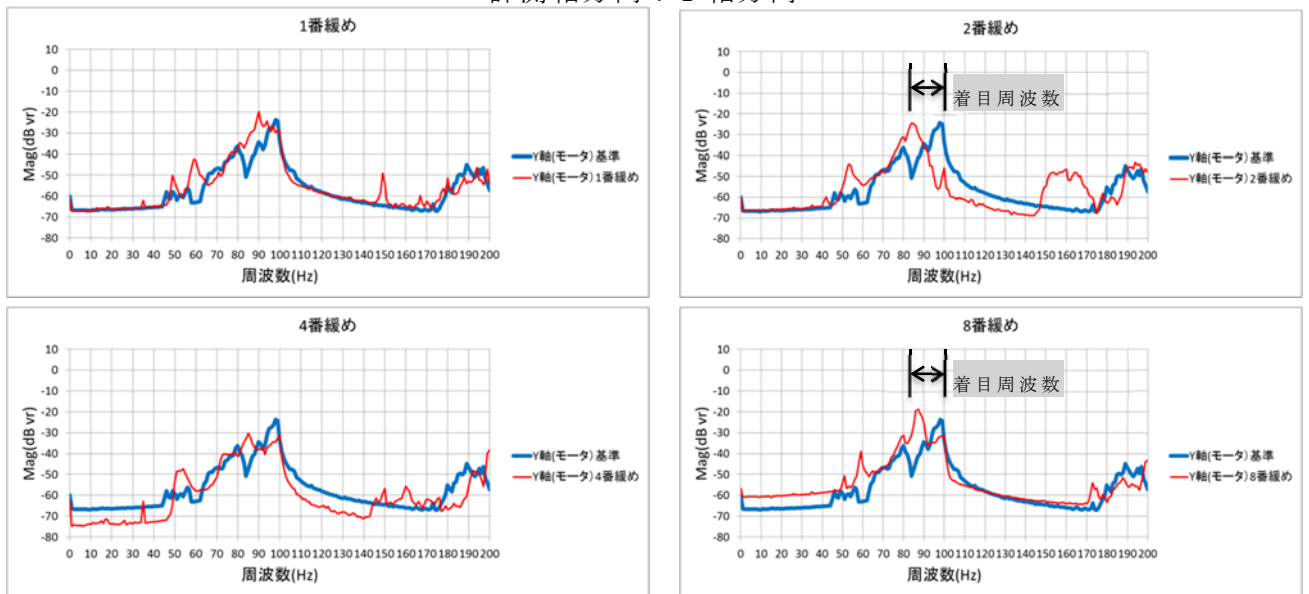


図-6.20 起振機（モーター）加振による取付けボルト緩み影響（1本緩み）

この結果を受けて、センサー性能評価を再度実施する。

基礎実験段階でのセンサー性能評価は、表-6.1において実施しており、異常検知には成功したがその状態把握までは至らないとの判断から、 P_{1-1} の評価が最高点には届かなかった。追加した函体振動系の把握解析および実験とそれによるセンサー取付け位置の最適化、振動入力方法の変更によりほぼ状態把握が可能であるとの判断を得た。この結果を反映すると、 P_1 評価は変更されるべきであると考え（表-6.16）。

表-6.16 追加実験を踏まえたの P_1 再評価

性能評価値	状 況	性能呼称	評価点
P_{1-1}	クリティカルなユニットは把握されているが、全体系までは困難	完全	1
P_{1-2}	要求に見合った精度、耐久性の計器が選択されている	完全	1
P_{1-3}	要求に見合った測定時間、測定間隔が実現されている	完全	1

$$P_1 = P_{1-1} \times P_{1-2} \times P_{1-3} = 1 \times 1 \times 1 = 1$$

この一連の実験と性能評価の再評価は、本手法を用いることによりセンサー開発の課題と克服を明確にスコープすることが可能であることを示唆している。すなわち、センサーの開発プロセスにおいても本手法を用いて評価と改善を繰り返すことにより、より高性能のセンサー開発が可能であること、そしてその開発プロセスのアカウントビリティが自動的に付与されることを意味している。

6.2 OSVによる実用化システムの提案

6.2.1 システムのグレード設計

課題検討の結果を踏まえ、OSVの特性を活かした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，システムから異常を通報された後の対応として，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技術による振動センサーはこれまでの実験を通じて，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。さらに，緩みボルト本数や緩み位置を推測することについて可能性が確認されている。

これを基本に保全モニタリングシステムは，「測定」「判断」「結果表現」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する。

野村ら¹¹⁾は道路トンネルで現地実験した結果から，車両交通により照明器具に低周波の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

振動としては安定的でないので、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、芥川ら^{24), 25), 26), 27)}は、OSV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。トンネル内附属物の思わぬ落下に備えるためには、式(6.1)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として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²⁸⁾が、交通遮断による社会的損失については嶋本ほか²⁹⁾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、投資分析の観点で投資可能額は大きくなり、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、投資可能額も小さく予算相応の対策とする、あるいは野村らがOSVにおいて提唱するように、トンネル利用者を「市民センサー」として視覚情報受領型市民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、5つのグレードを設定する(表-6.17)。

表-6.17 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) 道路利用者 (市民)	緊急パトロール 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 なし	経時変化追跡 組込みロジックによる閾値	常設管理事務所 モニター OSV	常駐管理員 道路点検員 (日常点検) 道路利用者 (市民)	緊急パトロール 緊急パトロール 通報受信し, 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) 道路利用者 (市民)	緊急パトロール 通報受信し, 緊急 パトロール
Grade 5	定期点検のみ	—	—	—	—	—	—

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次クリーブなどタイムスタンプとともに記録、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、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。また、Grade2以下では視覚情報受領型市民センサーの活用を考慮する。これにより結果表示プロセス

も簡素化，コスト縮減が可能になると考えられる。

Grade3は，測定プロセスの発振機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図り，**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。先に述べたように，入力を簡素化すると判断ミスリスクが高まるため，閾値は低めに設定する必要がある，結果として空振り率が高まることになる。センサー部を簡素化し自動復帰しないものを採用すると，異常値検出のたびに緊急点検を実施することが必要となることを考慮しておく必要がある。

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。

6.2.2 実用化システム実施設計

ここまでの成果を踏まえて、トンネル照明器具の落下に対する OSV を用いた計測システムの実実施設計を試みる。なお、実施設計においては、経済的な制約の考慮と経済面からみた最適性の確保が必要であるが、その方法については第 7 章において提案として述べる。なお、性能定義に係る体系は、図-2.4 において示したとおりである。

(1) 計測システムの目的

本計測システムの設置目的は、道路トンネル照明器具の落下により道路利用者に直接的な危害が及ぶことを防止することである。つまり、利用者に危害が及ばない範囲において照明器具の取付部の一部脱落は許容する。

(2) 機能説明

上記の目的を受けて、本システムの機能は、照明器具取付部の変位が危険な状態となったと判断される状況において、道路利用者および管理担当者に情報提供システムを介して異常性を通知するとする。

(3) システムの基本性能

システムの基本性能は、「測定」「判断」「現地での結果表現」の各プロセスにおいて行う。ここで OSV は、プロセス間コミュニケーションはプロセス間を直結することで逐次性、網羅性が担保されることから性能について定義する必要はないとしているので、プロセス間コミュニケーションについての基本性能は定義を省略する。OSV 以外の計測システムでは、プロセス間コミュニケーションがシステムの性能を規定してしまう場合が考えられるので、注意が必要である。システムの基本性能において定義すべき項目は、表-2.1 において示したとおりである。ここでは、トンネルは高速道路トンネルであると仮定し、

Grade1 のシステム導入が許容されると設定する。すなわち、経時変化を追跡しての判断ロジックが搭載可能とする。

(4) 「測定」プロセスの基本性能と設計仕様

① 測定・伝送の精度性能

基礎実験，実用化実験において使用した MEMS 振動センサーは，実験結果から十分に異常検知する機能があることが確認されたので，表-6.8 の振動センサーを使用することで基本性能は達成される。また，センサー取付け位置も実稼働解析により最適化されている。

② 測定器・伝送の使用性能

汎用センサーであることから，通常の電子回路設計を行うことが可能であり，使用性能は必要十分である。

③ 耐久性能

車両搭載用センサーであることから，通常想定し得る道路トンネル内での耐候性は製品担保されている。さらに耐久時間も 10 年が一般的に保証されており，照明器具の更新スケジュールを鑑みれば，実用上の耐久性能は十分であると考えられる。

④ 維持管理性能

汎用センサーであることから維持管理性能は，保証されている。

⑤ 経済性能

本項では省く。しかし，汎用センサーであることからセンサー単価は一般的に安価であり，良い性能が期待できる。

⑥ 周辺への影響度

道路トンネル利用者が違和感を感じることなく，設置可能であり，問題はないと考えられる．

以上の確認を踏まえ，センサー仕様は表-6.18を使用するものとし，取付位置は図-6.21とする．

表-6.18 振動センサーの性能規定

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	$\pm 19.6m/s^2$ 以上	
オフセット出力	$V_{DD}/2V$	
感度	$1 \pm 0.05V/G$ 以上	$1G=9.8m/s^2$
周波数特性	DC~128Hz (-3dB)	
サンプリング	512Hz	
分解能	16bit 以上	
測定軸数	3軸 (X-Y-Z)	

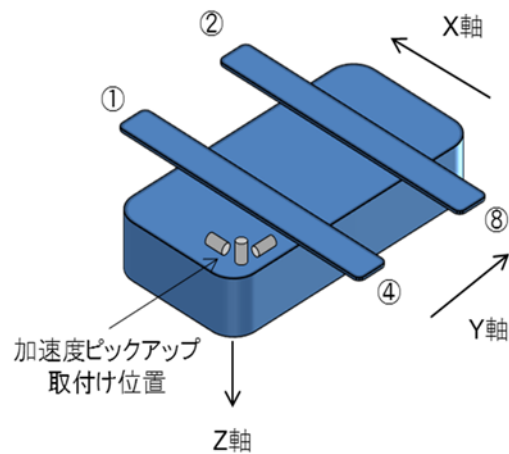


図-6.21 振動センサー取付位置および観測方向

(5) 「判断」プロセスの基本要件性能と設計仕様

判断プロセスの基本要件性能は、閾値の信頼性である。計測システムの目的としては、トンネル利用者に危害が及ばなければよいので、落下リスクが高まってきたことを通知する閾値が求められる。さらに管理者に緊急点検や目視頻度の改善など維持管理活動にも資するようにするには、そのための閾値も必要である。

ここでは、落下リスクが高まり、道路管理者として通行規制などの具体的措置を促すあるいは利用者が自ら直下の走行を回避することを意思決定する閾値として、4本の取付けボルトのうち、3本が緩んだ場合と定義し、以下を適用する。

- Y軸方向に着目し、卓越振動数の低下が30Hzから45Hzに達したとき
- Z軸方向に着目し、10Hzから20Hzの低い卓越周波数が出現したとき

これらは実験による知見から得られた閾値で、現段階では最も信頼性のある値であると考えられる。

次に、維持管理活動に資する閾値としては、4本の取付けボルトのうち、1本が緩んだ場合と定義する。このときの閾値は、以下である。

- Y軸方向に着目し、10Hzから15Hzの卓越周波数の低下が見られたとき

(6) 「現地での結果表現」プロセスの基本要件性能と設計仕様

- ① 表示の視認・理解性能
- ② 表示・伝送の精度性能
- ③ 表示器・伝送の使用性能

④ 耐久性能

⑤ 維持管理性能

OSVでは既にさまざまな結果表現ツールが開発，実用化されている。

LEC(Light Emitting Converter)はそのひとつで，「土木・建築現場における計測データの変状表示及びデータ収集アダプターユニット」として実用新案（第3193861）を得ているものである。

これを用いることで，①，②，③，④，⑤は担保されると考えられる。



写真-6.8 提案するシステムにおける結果表現ツール(LEC)

⑥ 経済性能

現段階では，LECは受注生産品であり，必ずしも安価とは言えないが，量産によりコスト低減は十分に可能であると考えられる。

⑦ 周辺への影響度

照明器具周辺に光源が現れるので，利用者に違和感はあると考えられるが，それが通行回避の動機付けにもなるので，工夫が必要である。また維持管理を促す

閾値は目立たない色調で，管理者にのみ通知されるようなものが望ましいと考えられる．

LECを使用することを前提に，閾値とLEC色替えについて，表-6.19のように設計する．

表-6.19 閾値設定とLECカラーの設計

取付状態	閾値	LECカラー設定
健全	—	青(Blue)
4本の取付ボルトのうち1本が緩み	Y軸方向に着目し，10Hzから15Hzの卓越周波数の低下	黄(yellow)
4本の取付ボルトのうち3本が緩み	Y軸方向に着目し，卓越振動数の低下が30Hzから45Hzに達した or Z軸方向に着目し，10Hzから20Hzの低い卓越周波数が出現	赤(red) & 点滅

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) 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，2013.
- 5) 橋の点検中に腐食した床を踏み抜いて転落死：日経コンストラクション，第 508 号，pp.13-14，2010.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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，pp135-146，2010.
- 9) 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.
- 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.

- 11) 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, No.3 (特集号), I_63-I_79, 2015.
- 12) 野村貢, 戸本悟史, 西條敦志, 木村定雄, 芥川真一: トンネル内付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, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.72, No.3 (特集号), I_63-I_79, 2016.
- 13) 滝川俊介, 卷田将聡, 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) (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.
- 18) 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
- 19) 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.
- 20) 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.

- 21) 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
ールド制御系による実証的検証ー, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.5, No.1, pp.1-8,
2006.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 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 .
- 25) 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.
- 26) ChitoshiI 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.
- 27) Haihua ZHANG, Shinichi AKUTAGWA, 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_51-1_62 , 2016.
- 28) 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.
- 29) 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.

第7章 性能評価を用いた On-Site Visualization 導入方法の提案

3章において提案した性能評価方法を用いて、5章および6章で事例に基づく考察を行った。その結果、本手法の実用性が確認できたので、本章ではそれを踏まえた OSV を含む計測システムの導入提案を行う。さらに、これを高度化する方法として、FTA (Fault Tree Analysis) を活用する方法および経済性能を可視化する方法について考察する。

7.1 性能評価を考慮した導入手順の提案

7.1.1 計測システム導入前に実施する事項

OSV を含め、計測システムの導入に先立ち、計測システムを適用する対象物の性能を規定することが必要である。計測システムは、これら規定された性能から定義される計測対象物の基本性能をもって目的とするからである。

2.3 に説明するように、計測システムの目的とは、「構造物の安全性を確保する」「斜面の危険から身を守る」といった計測をすることにより得られる利便を明示することであり、それを性能面からくみ取り、最大限の効率をもってアカウンタビリティとともに実現するのが本論により性能評価を用いる意図である(図-7.1)。

5.1 には、対象物としての斜面工事の性能を規定しているので参考とする。

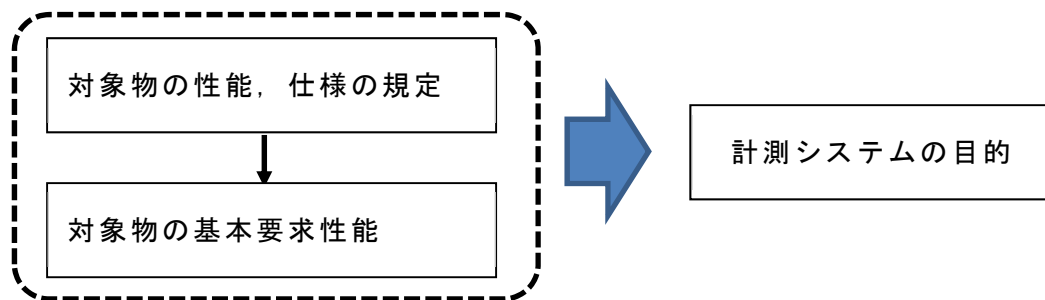


図-7.1 計測システムの目的定義ステップ

7.1.2 計測システムの計画立案と評価

計測システムの目的が定義されると、図-2.4 に示す階層構造に従い、「測定」「判断」「結果の表現」の3つのプロセスについて機能を定義し、各プロセスの性能規定を行う。OSVはプロセス間のコミュニケーションは直結であり、コミュニケーション性能を規定する必要は無いが、OSV以外の従来型計測システムの場合には、プロセス間コミュニケーションについて性能を規定する必要がある。

計測システムが公共調達の場合や利用者、第三者に危害がおよぶなど外部ステークホルダーを有する場合など、2.2 に説明するアカウントビリティを担保する必要がある場合には、法的アカウントビリティおよび専門的アカウントビリティを担保する必要があるため、照査アプローチ A または B により性能照査を実施する。

計測システムが公共調達など委託により計画される場合には、計測システムの目的説明書、機能説明書までは調達担当者または調達担当者のコンサルタントが作成または承認する必要がある。ここで承認となるのは、目的対象物の性能に基づき事業が調達、委託される場合において、計測システムがその機能に内包される場合である。

計測システムの計画立案者は、当該事業の調達担当者から目的説明書、機能説明書を受領し、プロセスの性能規定を立案し、照査アプローチとともに、実施計画書を作成する。作成された実施計画書は、第3章に説明する計測システムの性能評価の方法により評価され、個別プロセスの性能が審査される。アウトカム評価を行う場合には、総合評価値による性能ランク S により計画の正統性について審査され、ⅢやⅣの性能ランクしか得られない場合には、計画を再考するように調達担当者から勧告されることになる。

ここで意識されなければならないのが経済性能である。すべての事業は予算制約下で実施されるので、計画する計測システムにおいても経済的な価値が意識されなければならない。性能評価値 P_{1-2} には、オーバースペックによる予算上昇を戒める判断を盛り込んであり、簡便ながら経済性能も含めて評価している。

7.1.3 測定プロセスの計画

以下では、各プロセスの計画方法について説明する。測定プロセスは、図-7.2のフローにしたがい、ユニット抽出、計器選定、測定時間・測定間隔設定の順に計画する。

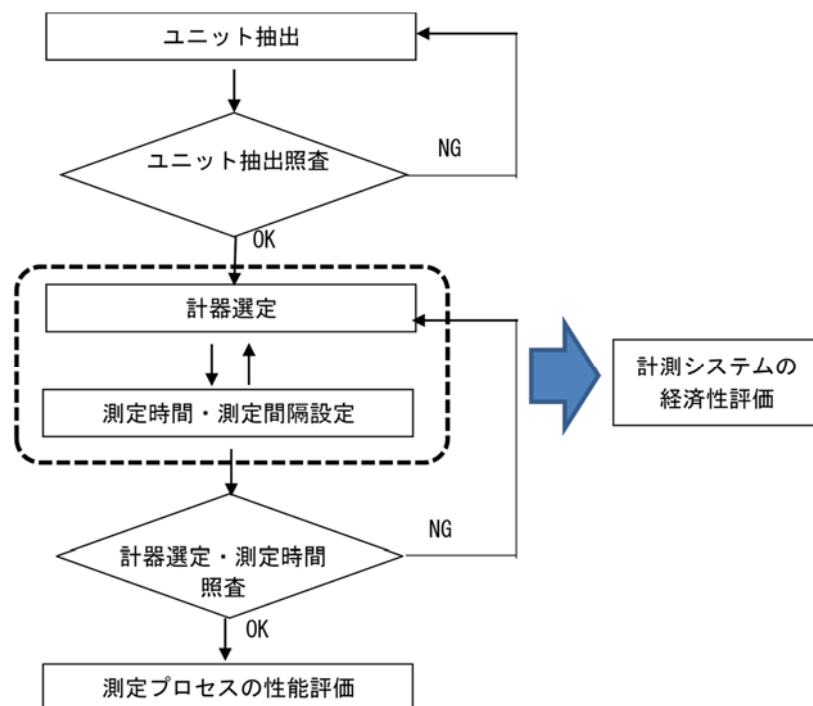


図-7.2 測定プロセスの実施フロー

測定プロセスの計画において最も重要なのは、適切なユニットの抽出である。自然斜面の保全や斜面工事、構造物のための仮設構造物等に発生する変状の要因

はさまざまであり，この最小単位を 3.2 においてユニットと呼ぶことにしたが，ユニットの抽出を誤ると，クリティカルな変状の発生初期段階を見落とす可能性がある．ユニットの抽出結果の正統性を計量的に呈示することは容易ではなく，計測機器設置のリダンダンシーも含めて行う本作業の重要性を考慮すれば，信頼性担保として，本作業には十分な力量をもった技術者が当たることが必要なプロフェSSIONALな作業であることを認識した上で，照査アプローチ A，B いずれも技術者の力量審査，複数技術者による照査などを求めることが望ましい．

7.1.4 判断プロセスの計画

判断プロセスは，結果表現に向けた閾値の決定プロセスである．閾値の決定が専門的アカウントビリティを満たす方法で行われていることは，多くのステークホルダーを対象とする場合には必須である．同様に，技術基準等の法的アカウントビリティも閾値に対して共感を得るところであり，閾値決定とその運用に対して事業者の瑕疵が問われるような場合において，判例等では外部統制である法的アカウントビリティが内部統制で実施される専門的アカウントビリティに優先されている．

そのような背景から，計測値判断（閾値）プロセスにおいても，法的アカウントビリティを優先して評価する（図-7.3）．なお，本論では判断のアカウントビリティに着目しているので，誤報や空振りについての閾値のリスク信頼性については，当面議論の外としている．

一般的に閾値設定は，誤報や空振りリスクと深く関係している．閾値を高く設定し空振りリスクを低めに見積もると，情報受領者の空振り行動や道路における事前通行規制の空振りは減少し利用者の利便性は高まる．しかし急激な変状の進

行や予想外の外力に高まりに起因する，情報未発信段階での発災による被災リスクは高まる．この閾値設定に伴う被災リスクについてのステークホルダー間合意形成は，例えば津波警報について空振りは許容され市民も空振り自体を批判することが少ないのに対して，道路の事前通行規制の空振りは厳しく評価され，空振り率低減を政策目標化されるなど，対象ハザード，発災時の想定被害の大きさ，頻度などにより異なるので，RBM (Risk Based Management) ¹⁾の考え方にに基づき，事象ごとにリスク評価し設定する必要がある．

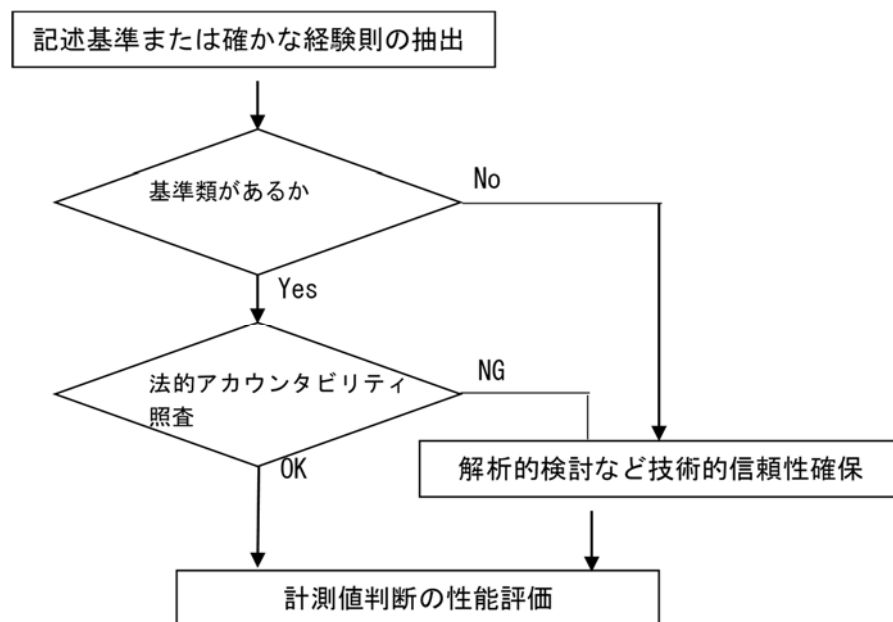


図-7.3 判断プロセスの実施フロー

7.1.5 結果表現プロセスの計画

結果表現の性能は，3.4において情報の最終受領者である利用者や市民が避難などの対応，あるいは補強や交通規制など必要な措置を予定時間内に行うために必要な性能として定義した．

結果表現は，OSVの場合には主に光を使用したデバイスによる信号により行わ

れるので、速達性ととも情報正しく伝達されること、そしてその情報の意味が正しく認識されることが重要になる。

結果表現プロセスの重要性はこれまでも感覚的には広く認識され、情報発信の適時性、適格性について行政訴訟が繰り返されているが、その情報提供内容については、情報発信者に大きな瑕疵がない限りあまり問題とされていない。そのため、情報は一方通行で改善行動に乏しいものとなっていた。本研究ではこの点に着目し、実際に情報受領者が予定行動を起動できることをもって結果表現が成功するという認識に立ち、性能評価を行う。

例えば、津波リスクに対する情報提供では、防災訓練に合わせて信号の意味や信号を受領した際の自助・共助的行動について、事業者、消防団や学校など公共とともに住民組織が訓練を行うなどの措置が行われており、訓練を受けた者とそうでない者との発災時行動に大きな差が生じることやその自助的行動に対する理解が必要であることも報告されている²⁾。

さらに泉ら³⁾は、インドの建設現場において OSV の情報発信から危険情報を読み取る訓練を作業員に対して実施した事例から、5 色の色分け信号と自助的な即時避難行動を関連づけることに成功したことを報告している。

これらから本研究における「結果表現の性能」は、教育や表示方法の対処により情報の意味が正しく認識されること、すなわち計測システムのハードのみならず、設置後あるいは設置に際しての教育・訓練を含めて性能評価することとした。この認識に立つと、計測システムの性能は、ハード設置後に改善することも可能であるし、逆にハード設置後の継続的努力が不足していると、性能評価が低下することにもなる。これは防災訓練、現場入場者教育などが被災リスク低減につながるという一般的な認識とも整合する。

なお本論では、情報が正しく伝達され認識されたにも関わらず、対象者が自助的・共助的行動を起動しないために被災する可能性があることを考慮していない。この問題を取り扱うためには、誤報や空振りの頻度がもたらす行動への心理的バイアス⁴⁾、経験不足に起因するカタストロフィの過小評価バイアス⁵⁾などに基づく知見を導入する必要がある。

結果表現プロセスは、図-7.4のフローにしたがい、情報伝達時間、情報の正しい伝達、情報内容の正しい認識の順に計画する。

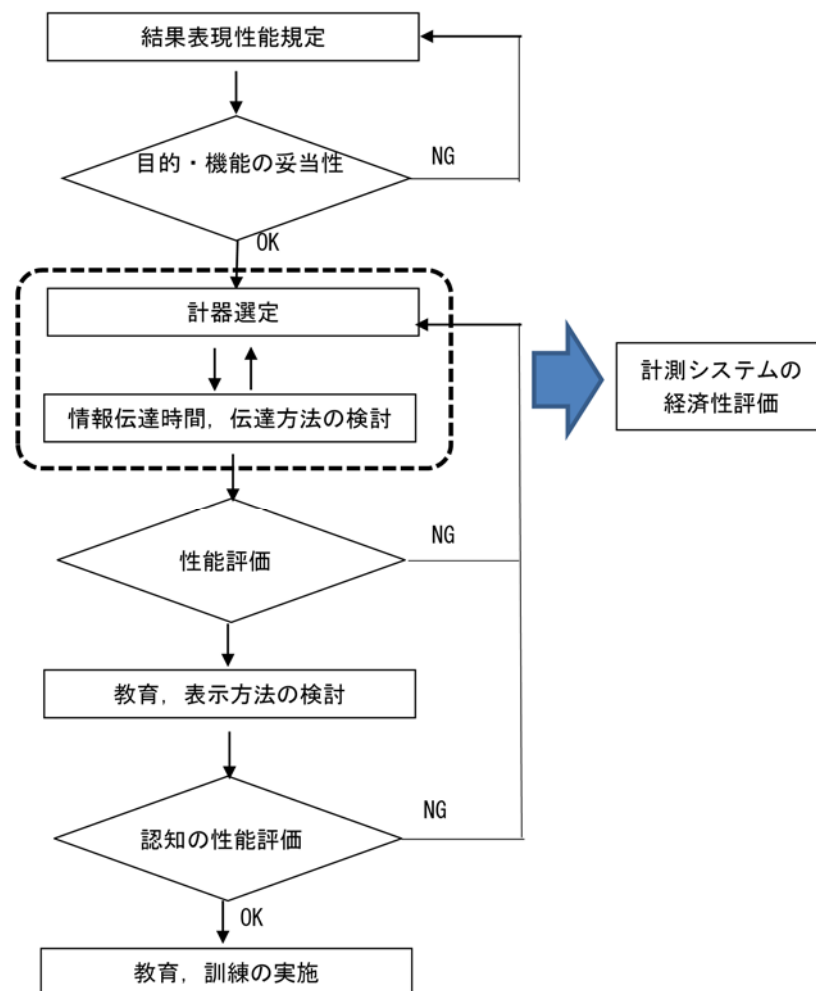


図-7.4 結果表現プロセスの実施フロー

7.2 Fault Tree Analysis を活用した導入方法

7.2.1 FTA 活用の目的

Fault Tree Analysis (FTA) は、「計測の失敗による死者発生」などの「望ましくない事象」を定義し、これの発生に関与する要因事象を系統的に分類して、分類末端に相当する基本事象（それ以上展開が不能な事象）に対して発生確率を割り当てることにより改善対象を明確化する故障分析ツールである⁶⁾。

本手法は 1960 年代から開発が進められ、わが国へは 1980 年代に導入が始められ、現在は JIS においても規格が定められている。本手法を用いることにより、望ましくない事象が発生するシナリオとその可能性を網羅的に見積もることが可能となり⁷⁾、システム改善に有効なツールとして活用が進んでいる。本研究の提案するランク付け性能評価の方法では、第 3 章において計測システムを性能評価する方法を提案し、第 5 章、第 6 章の事例研究により適用性があることを確認した。しかし、性能面で問題がある場合や、期首の計画以上に予算投入が可能となり、システムの改善が可能になった場合において、どこを改善すればよいのかを着目明示することはできない方法となっているため、改善には試行的アプローチが必要である。FTA はこの点を改善し、ピンポイントで改善の優先順位を明示することが可能であるとともに、改善により期待される「望ましくない事象」の低減効果を計量的に表現することが可能である。

これらを踏まえ、計測システムの改善方針を明確化し、改善効果を計量的に表現することを FTA 活用の目的とする。

7.2.2 FTA 活用方法の提案

OSV において FTA を活用する方法について考察する。本研究では、計測システ

ムを「測定」「判断」「結果の表現」の3つの独立プロセスとその間のコミュニケーションとして定義した。OSVではプロセス間コミュニケーションは直結されているため問題とならないことから、各プロセスの下位事象に「望ましくない事象」の原因があるものとして事象の細分化を行う。

試行として、第5章で採り上げた工事斜面の計測ミスによる崩壊事例をFTAにより分析する。まず「望ましくない事象」は、本工事が仮設斜面であることから、「計測の失敗による斜面崩壊」である。その原因事象は3つのプロセスのいずれかであり、それぞれは独立であるからORゲートによりFault Treeが連結される(図-7.5)。ここでORゲートとは、入力事象のうち少なくとも1つ発生するときに出力事象が発生することを意味する。

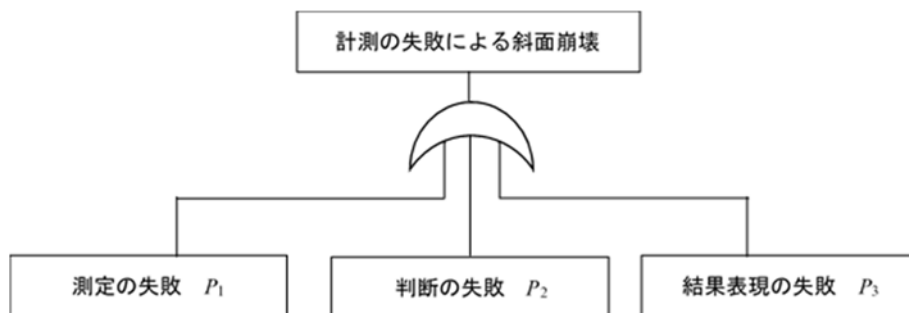


図-7.5 計測失敗を分析する Fault Tree (1次中間事象)

まず、測定の失敗をさらに高次の中間事象に分解し、基本事象または否展開事象に整理する。ここで基本事象とは、事象展開の結果、これ以上は展開できない事象であり、否展開事象は、情報不足や技術不足のため、本段階ではこれ以上の展開ができない事象のことである。測定プロセスは、「適切な対象が抽出されていること」「適切な計器が選定されていること」「適切な測定時間で計測していること」を性能評価項目としているので、中間事象はつぎのように展開できる。

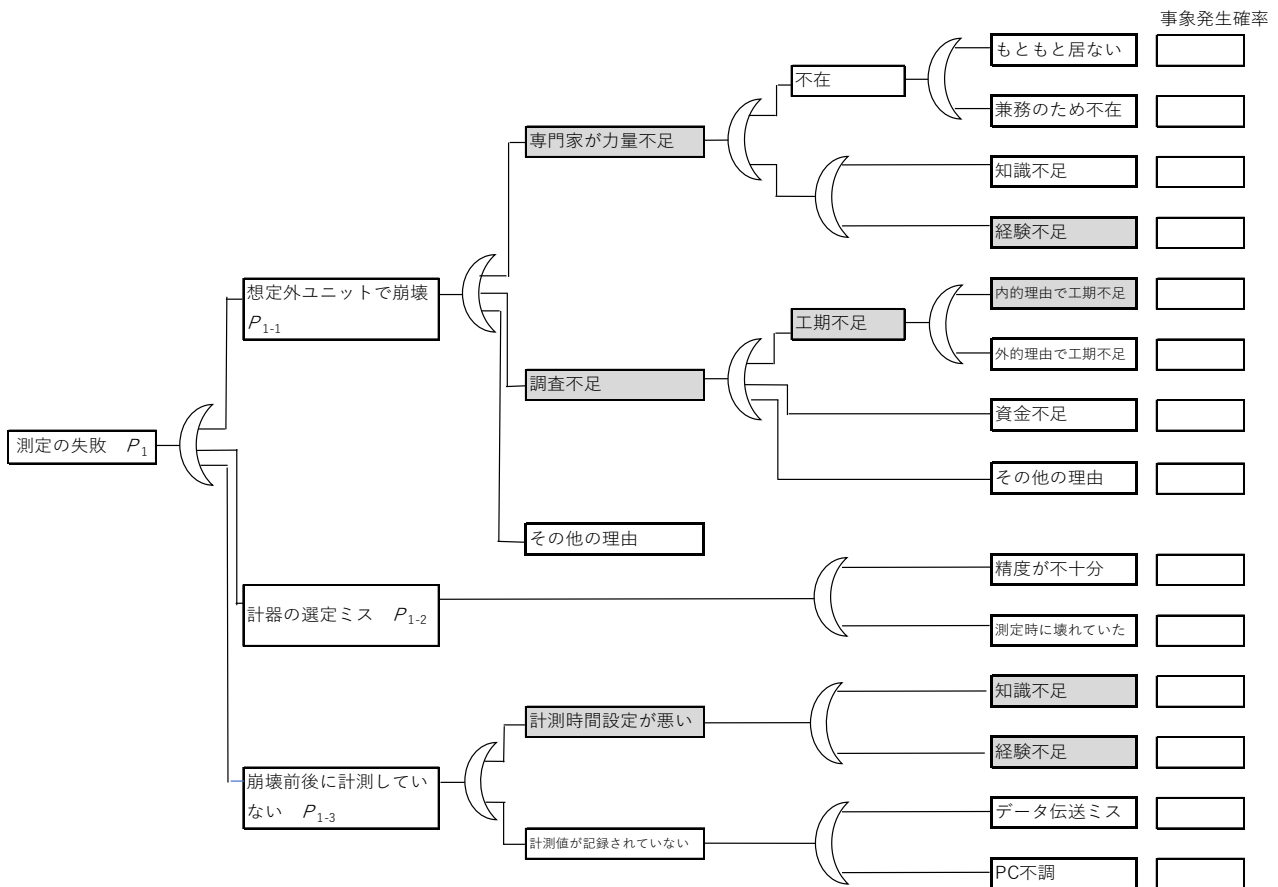


図-7.6 測定プロセスの 低次中間事象の分析結果

最も右の事象が「基本事象」に相当する。さらに各事象について発生確率を求めていくと、 P_{1-1} 、 P_{1-2} 、 P_{1-3} のどの事象が最も発生確率が高く、改善の必要があるのかを分析することができる。第5章の事例では、計測ツールと測定の性能 P_1 において、適切な対象が抽出されていることの性能評価値 P_{1-1} および適切な測定時間で計測していることの性能評価値 P_{1-3} の性能が十分でなかったことが確認されているので、図-7.6 において該当する中間事象をたどっていくと、現場の地質状況に対する知識不足、経験不足および仮設工事であることに伴う工期不足が基本事象であることが推測される。

現段階でそれぞれの基本事象の発生確率は不明であるが、これを導入することができれば優先して何を改善すれば良いかを明示することが可能である。

7.3 経済性能を評価する方法の提案と導入方法

7.3.1 経済性能を評価する方法

計測システムが予算制約下で実施される場合、その効率性が重要である。計測システムが公共調達である場合には、事業者は納税者に対してその予算効率性についてアカウントビリティを確立する必要があるとともに、計測による成果についてアウトカム評価で表現する必要がある。民間調達の場合でも計測システムの立案者であるコンサルタントは依頼者に対して、自身のシステムの優位性をアピールする必要がある。

本項では、さまざまな事業評価に用いられる費用便益比 (B/C) により計測システムの評価を行う方法を提案するとともに、費用便益比をパラメーターとして計測システムを改善する方法についての考察を行う。ここで便益(B)は、計測システムを導入することによる被害軽減額、費用(C)は計測システムのうち、センサー費用とする。被害軽減額の考え方については、既往の研究を踏まえて、道路脇の連続する斜面をモデルとして整理を行う。さらにセンサーの能力を表現するパラメーターとして「カバー率」を提案し、これらを用いてパラメータスタディにより実用性を検証する。

(1) 交通途絶に伴う被害額の考え方

まず、嶋本、野村⁸⁾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は、式(7.1)で与えられる。

$$R = P_i \times Q_{i-j} \times C_j \quad (7.1)$$

ここで、 R は確率を考慮した被害想定額（損失期待値）、 P_i は斜面崩壊を引き起こす豪雨などトリガーの発生確率、 Q_{i-j} は P_i による斜面崩壊 j の発生確率、 C_j は個別斜面 j の損失である。なお、斜面崩壊が発生した場合は、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(7.1)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(7.2)で与えられるとした。

$$C_j = n \cdot D_1 + \alpha \cdot n \cdot D_2 + D_3 + D_4 \quad (7.2)$$

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。

宇野，木村⁹⁾は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，はく落による損失を式7.3，7.4により提案している。

$$R_t = R_{nt} \cdot \frac{D_t}{t} \quad (7.3)$$

$$D_t = \sum_{i=1}^5 D_i = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 \quad (7.4)$$

ここで、 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， 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。

また，野村ら¹⁰⁾は，嶋本らにより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ことに対して、迂回路のある道路脇斜面が、崩壊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することが可能であるとした。その場合には式7.2は式7.4で置換可能であるとして、トンネル照明器具落下の10年ごと損失期待値を算出し、点検費用等を加味した計測システムの費用と対比して費用便益比による導入可能性判断を行っている。

(2) 被害総定額の算出

これらの知見を踏まえ、本スタディを行うにあたり、以下の条件を設定した。

- ・ 対象斜面はすべて道路に面しており、全部で10のユニットから構成される。
- ・ 各ユニットの被害対象は表-7.1のとおりとする。
- ・ 被災は各ユニットに同時かつ被害対象すべてが被災するものとする。
- ・ 各ユニットの復旧施工は同時に実施される。

表-7.1 試行計算に用いるユニット被害対象

	ユニット番号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
人的損失 (死亡)	3	2	1							
人的損失 (後遺症)				5	3	1				
人的損失 (軽症)							5	3	1	0
被害幅(m)	100	50	30	100	50	30	100	50	30	10
物的損失 (建物, 外構)	3	2	1	3	2	1	3	2	1	0
物的損失 (公共建物, 公園)	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
物的損失 (普通車)	3	2	1	5	3	1	5	1	1	0
物的損失 (貨物車)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
物的損失 (移動可能な公物)	5	3	1	5	3	1	5	3	1	1
復旧施工範囲 (=被害幅)	100	50	30	100	50	30	100	50	30	10

想定被害額は、式 7.5 で計算する。

$$D_t = \sum_{i=1}^5 D_i = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 \quad (7.5)$$

ここで、 D_1 は人的損失および車両修理費、 D_2 は物的損失および復旧施工費、 D_3 は道路利用者損失、 D_4 は社会損失、 D_5 は緊急点検費である。

各損失項目に対する原単価を表-7.3 に定め、これらの条件により各ユニットの被害総額を算出する (表-7.4)。

表-7.2 試行計算による各ユニット個別損失総額

	Unit Number	1	2	3	4
D1-1	人的損失	¥737,022,000	¥491,348,000	¥245,674,000	¥47,645,000
D1-2	車輛修理費	¥9,000,000	¥6,000,000	¥3,000,000	¥5,000,000
D2-1	物的損失A(移動できないもの)	¥190,000,000	¥120,000,000	¥50,000,000	¥190,000,000
D2-2	物的損失B(移動できるもの)	¥24,000,000	¥19,000,000	¥14,000,000	¥30,000,000
D2-3	復旧施工費	¥50,000,000	¥25,000,000	¥15,000,000	¥50,000,000
D3	道路利用者損失(日当たり)	¥2,987,390	¥1,493,695	¥1,066,925	¥1,493,695
D4	社会損失(日当たり)	¥0	¥0	¥0	¥0
D5-1	緊急点検費	¥15,712,000	¥7,856,000	¥4,713,600	¥15,712,000
D5-2	定期点検費				
n	交通遮断日数	14	7	5	7

5	6	7	8	9	10
¥28,587,000	¥9,529,000	¥6,890,000	¥4,134,000	¥1,378,000	0
¥3,000,000	¥1,000,000	¥2,500,000	¥1,500,000	¥500,000	¥500,000
¥120,000,000	¥50,000,000	¥190,000,000	¥120,000,000	¥50,000,000	¥10,000,000
¥22,000,000	¥14,000,000	¥30,000,000	¥22,000,000	¥14,000,000	¥1,000,000
¥25,000,000	¥15,000,000	¥50,000,000	¥25,000,000	¥15,000,000	¥5,000,000
¥1,066,925	¥426,770	¥1,493,695	¥1,066,925	¥426,770	¥213,385
¥0	¥0	¥0	¥0	¥0	¥0
¥7,856,000	¥4,713,600	¥15,712,000	¥7,856,000	¥4,713,600	¥1,571,200
5	2	7	5	2	1

表-7.3 試行計算に用いる原単価

人的損失原単価	原単価	単位	引用元
C0 人的損失(物損のみ)	¥0	(円/人)	
C1 人的損失(死亡)	¥245,674,000	(円/人)	(1)
C2 人的損失(後遺症)	¥9,529,000	(円/人)	
C3 人的損失(軽傷)	¥1,378,000	(円/人)	(1)
C0 時の車両修理費	¥500,000	(円/人)	
C1 時の車両修理費	¥3,000,000	(円/人)	
C2 時の車両修理費	¥1,000,000	(円/人)	
C3 時の車両修理費	¥500,000	(円/人)	
物的損失原単価	原単価	単位	
建物, 外構	¥20,000,000	円/件	
道路等交通インフラ	¥1,000,000	円/m	
公共建物, 公園等	¥30,000,000	円/件	
車両(普通車)	¥3,000,000	台	
車両(貨物車)	¥10,000,000	台	
移動可能な公物, 私物	¥1,000,000	円/件	
道路利用者損失原単価	交通内訳 (台/日)	時間価値原単価 (円/分・台)	
交通量	4,000		
乗用車	2,000	39.6	(1)
バス	50	365.96	(1)
乗用車類		45.15	(1)
小型貨物車	950	50.46	(1)
普通貨物車	1,000	67.95	(1)
社会損失原単価	原単価	単位	
社会損失	¥0	日	
その他	原単価	単位	
復旧施工費	¥500,000	円/m	
緊急点検費	¥1,571,200	式	(2)

引用元

(1) 費用便益分析マニュアル<連続立体交差事業編>H30.2

(2) 交通量 4,000 台/日として, 規制日数 4 日, 片側交互通行と想定

表-7.4 各ユニットの被害総定合計額

ユニット番号	被害総定額（円）	備 考
1	¥1,028,721,390	
2	¥670,697,695	
3	¥333,454,525	
4	¥339,850,695	
5	¥207,509,925	
6	¥94,669,370	
7	¥296,595,695	
8	¥181,556,695	
9	¥86,018,370	
10	¥18,284,585	

(3) センサー能力

計測システムの計画には、さまざまなセンサーから最適な計器を選択し、予算制約の範囲で最適配置を行うことが重要である。本スタディでは、3種類のセンサーを適用することとし、その単価は表-7.5とする。

表-7.5 計算に用いるセンサー単価

センサー型式	被害総定額（円）	備 考
A	¥1,000,000	
B	¥500,000	
C	¥300,000	

ここで、センサーに「カバー率」を導入する。センサーはその仕様により精度保証、耐久性・耐候性、測定レンジ、精度保証期間さらには OSV のセンサーについては、測定値の連続性や測定の不可逆性が異なる。これらは計測システム設計

において、センサーを選択する際に考慮される項目である。

例えば、センサーの測定レンジ、精度が高いものであっても、精度保証期間が短いものは、頻繁にセンサーを点検、交換する必要があり、経済的には不利である。また、予算制約下であれば、機能はやや劣るとしても安価なセンサーを多数設置し、網羅的にユニットの計測を実現する方が結果として被害軽減額が大きくなる場合が生じる。これら、センサーの感度や耐久性などに係る能力を総合してカバー率と呼び、個々のセンサーはカバー率に応じて測定に成功すると仮定する。

このカバー率を考慮しながら、各ユニットにセンサーを配置し、センサー費用と被害軽減額から費用便益比 (B/C) を算出することにより、さまざまなセンサー配置パターンに対して比較すること、特定パターンに対してさらに改善を計画することが可能になる。

7.3.2 パラメータスタディによる考察

(1) センサーのカバー率による経済効果の比較

センサー予算を 3,000,000 円として、表-7.6 のカバー率に基づき、費用便益比を算出する。ここで、各ケースで使用するセンサーは、A, B, C で統一し、予算範囲内で設置可能な数をユニット番号 1 から順に配置する計画とする。

表-7.6 計算に用いるセンサーカバー率 Case1-Case3

センサー型式	カバー率(%)		
	Case1	Case2	Case3
A	100	90	80
B	50	40	60
C	30	20	40

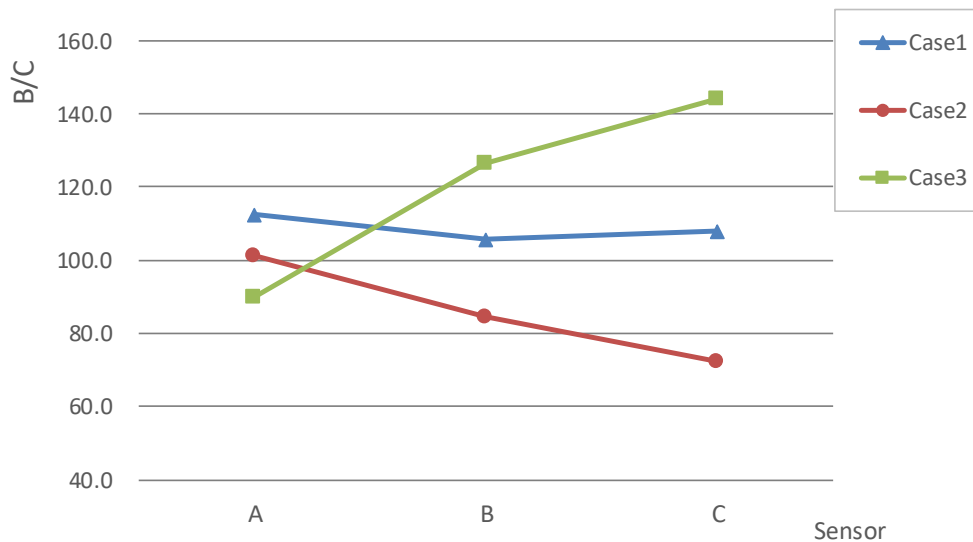


図-7.7 カバー率による計測システム B/C の変化(1)

センサーのカバー率を変化させると、各ケースにより B/C は変化する。Case1, Case2 は、センサーA と B, C のカバー率に大きな差がある場合で、予算制約によりセンサーA を使用した場合で 7 箇所、センサーB で 4 箇所のユニットには計測システムが導入されていない一方で、センサーC はすべてのユニットに計測システムが導入される。しかし、各センサーにはカバー率によりシステム導入していても人的被害を生じる場合があることから、単にユニットを網羅すれば良いということではないことが分かる。

これは Case3 で各センサーのカバー率の差が小さくなると、ユニット網羅性の高いセンサーC を積極的に活用することが有利であることから理解される。

つぎに、各ケースで使用するセンサーは、A, B, C で統一するものの、被害総定額が大きく、計測が成功すればより大きな被害軽減が期待できるユニットから順に計測システムを配置していくことをモデル化する。センサーのカバー率は、表-7.7 のとおりとする。

表-7.7 計算に用いるセンサーカバー率 Case4-Case6

センサー型式	カバー率(%)		
	Case4	Case5	Case6
A	100	90	80
B	50	40	60
C	30	20	40

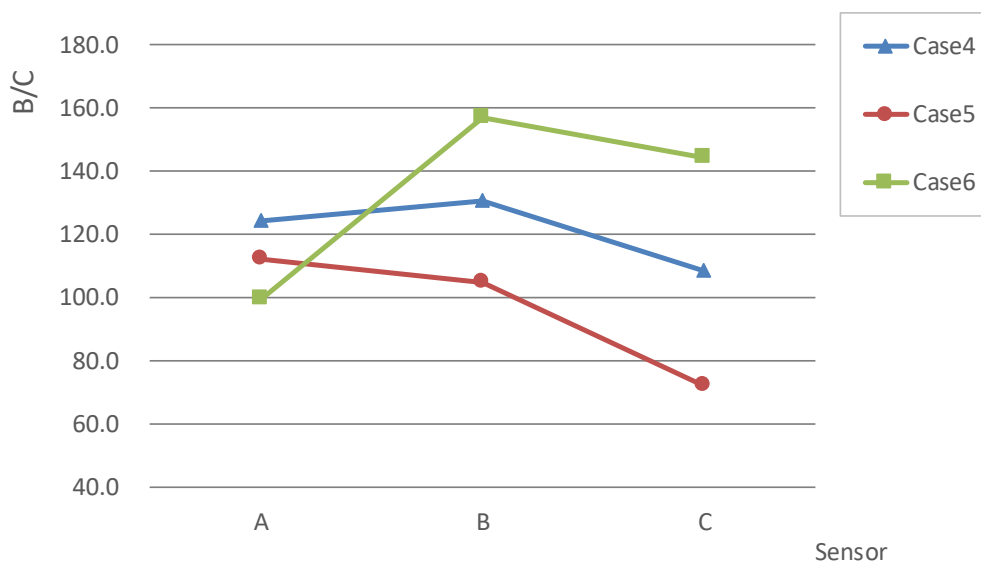


図-7.8 カバー率による計測システム B/C の変化(2)

各センサーのカバー率は Case1-Case3 と同じ設定であるが、センサーBにおいて各ケースに顕著な差が現れる。これは、センサーCはすでに全ユニットに計測システムが導入されているので、Case1-Case3 と変化はないが、センサーBは各ユニットの被害総額に基づき、被害軽減効果の高い順から6ユニットに計測システムを導入することができるため、被害軽減額は増大し、B/Cの改善として現れたものといえる。

この2つのスタディから、予算制約下で計測システムを導入する場合で、全ユニットを網羅できない場合には、各ユニットの被害総額を試算し、優先配置を

検討することが必要であることが分かった。さらに、カバー率の考え方を導入すると、ユニットの網羅性が必ずしも最適解をもたらさないことも分かる。

(2) センサー組み合わせ効果の確認

実際の現場では、さまざまなセンサーを組み合わせで最大効果を得る努力が行われる。そこで、センサーA, B, Cを予算制約の範囲内で使い分けるケースを試算する。ここで、センサー予算は3,000,000円とし、カバー率の高いセンサーAを中心に3通り使い分ける表-7.8を想定する。

表-7.8 センサー使い分けケース

ユニット番号	被害総定額 (円)	Type1	Type2	Type3
1	¥1,028,721,390	A	A	B
2	¥670,697,695	A	B	B
3	¥333,454,525	B	B	B
4	¥339,850,695	B	B	B
5	¥207,509,925			C
6	¥94,669,370			
7	¥296,595,695		B	C
8	¥181,556,695			C
9	¥86,018,370			
10	¥18,284,585			

※A, B, Cは各センサータイプを表す

※空欄は計測システムが導入されないユニットを表す

表-7.9 計算に用いるセンサーカバー率 Case7-Case9

センサー型式	カバー率(%)		
	Case7	Case8	Case9
A	100	90	80
B	50	40	60
C	30	20	40

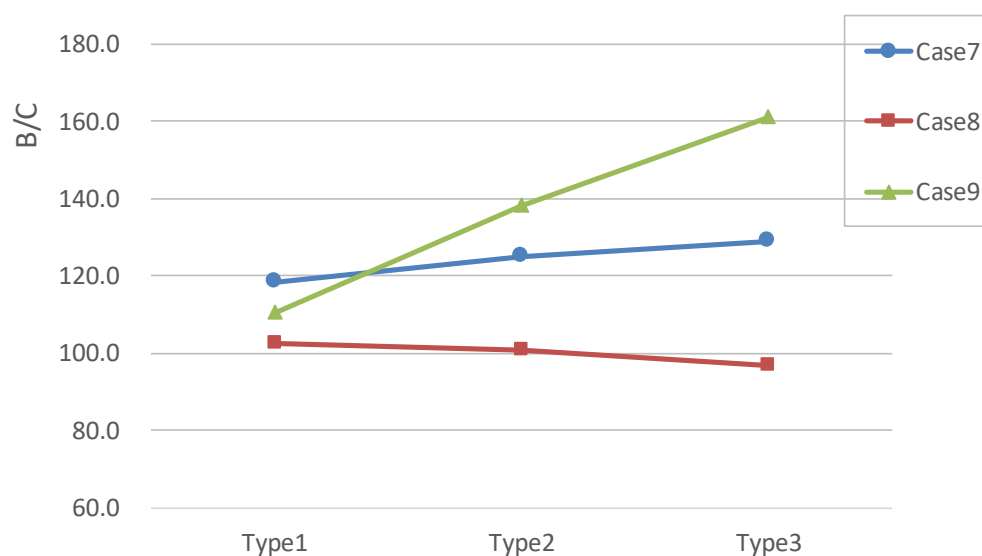


図-7.9 センサー使い分けによる計測システム B/C の変化

予算制約下でセンサーを使い分けると、本条件ではセンサーのカバー率に差がない場合には、安価なセンサーで多点計測を行うことが有利であることが分かる (Case9)。センサー使い分けを可とすると、効率よく想定被害額の大きいユニットにカバー率の高いセンサーを配置し、他はカバー率が低くても安価なセンサーで未導入ユニットを減らすことが可能になる。一方で、さまざまな組み合わせを網羅的にスタディしなければ最適解が得られないことも認識され、本手法の改善ポイントとして考えることができる。

(4) センサー開発のための活用

本研究で提案した「カバー率」はセンサーの諸性能を包括するものといえるが、同じセンサー単価であれば、カバー率が高いセンサーの方が効率的に異常を検知できることが分かる。この考え方をうければ、ある計測システムに対して異なるセンサーを適用しようとするとき、どの程度のカバー率を実現すれば同等となるのかを探ることができる。

Case10 は、Case1 の条件において、コスト変更はせずにセンサーB のカバー率を改善することによって、センサーA と同等の B/C が得られるように試算したものである(図-7.10)。



図-7.9 センサー使い分けによる計測システム B/C の変化

Case1 におけるセンサーB のカバー率は 50%であるが、これを 53.2%まで改善することができればセンサーA と同等、すなわち本条件下での最適解と同等の費用対効果を得ることが可能である。

これはシステム改善目標の設定に使えるほか、センサー開発などの目標設定にも活用できる可能性がある。

表-7.10 改善したセンサーカバー率 Case1-Case10

センサー型式	カバー率(%)	
	Case1	Case10
A	100	100
B	50	53.2
C	30	30

(5) パラメータスタディの結論

本項では、計測システムの測定プロセスに着目し、カバー率を導入することにより、さまざまなセンサーを予算制約下で使い分けることで、複数ユニットを管理する計測システムの経済性能を評価する方法を提案した。判断、結果表現プロセスも同じ考え方が適用できると考えられる。

実際にカバー率をさまざまなセンサー、結果表現ツールにおいて定義することは容易でないが、カバー率を細分化し実験等により知見が得られた部分から精緻化していくことで、精度を向上させることが可能であると考えられる。

カバー率の考え方は、神戸大学大学院 織田澤利守准教授との議論をもとに整理した。ご協力に謝意を表す。

参考文献

- 1) 酒井信介：リスクベース工学の基礎，日本金属学会誌 特集「リスクベースの材料工学・材料技術」，Vol.66，No.12，pp.1170-1176，2002.
- 2) 及川康：「津波てんでんこ」の誤解と理解，土木学会論文集 F6 (安全問題)，Vol.73，No.1，82-91，2017.
- 3) Chitoshi IZUMI, Shinichi 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, 311-327, 2015
- 4) 平成 24 年度「土砂災害への警戒の呼びかけに関する検討会」-土砂災害に対する実効性の高い呼びかけに向けて- 報告書，国土交通省，2012.
- 5) 田中孝治，梅野光平，池田満，堀雅洋：知識と行動の不一致に見られる不安全行動の危険認知に関する心理実験的検討，Cognitive Studies，22(3)，356-367，2015.
- 6) 佐山隼敏，井上紘一：フォールト・ツリー解析－その基礎と応用，計測と制御，Vol.20，No.2，pp.32-41，1981.
- 7) 穂坂重孝，高見勲：診断用故障木による故障診断法，計測自動制御学会論文集，Vol.26，No.8，pp.878-885，1990.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.1_63-1_79，2016.

第 8 章 結 論

8.1 計測システムの性能評価の確立についての結論

本論文で問題としたのは，土木工学のさまざまな場面において計測システムの必要性は認識されているが，その性能が評価できる状態にないということはアカウントビリティの観点から望ましい状況でないことである．これを受けた研究目的は，OSV などさまざまな従来とは異なるアプローチで開発された新しい計測システムやそのツールの普及を図るには，従来型に対して同等以上の性能を有することを評価し，説明する仕組みが必要であるとの認識から，これまで全く取り組まれてこなかった計測システムを性能評価する方法を確立することであった．

そのため，まず第 1 章では，社会インフラの状況，計測システムの現状から問題となっている事項を明確化し，計測システムを性能評価する方法論の必要性について論じた．合わせて本研究の目的，方法論と構成を説明し，論文全体のガイドとした．社会インフラが成熟しつつあるとされるわが国においてですら，インフラの点検と維持管理を十分に行うための自治体インハウスエンジニアが不足していること，東日本大震災の災害情報提供の経験を踏まえたことにより，緊急情報の提供方法について新たな技術や手法の導入が望まれていることを示した．

その目的を具体化し解決するため，第 2 章では計測システムはその構造から「測定」「判断」「結果表現」の 3 つのプロセスと 2 段階のコミュニケーションから構成されることを明らかにするとともに，そのコミュニケーション構造から情報受領者がデータの塊として情報を得られれば要求性能が満足される狭義の計測システムと結果としての避難行動や財産保全行動に提供情報が結びつき，かつその行為が成功することをもって計測システムの機能が発揮されたと考える広義の計測

システムに分類されることを示し、本論では広義の計測システムについて性能規定化することに焦点を当てることとした。

さらに計測システムが公的調達や委託により実施されるものであることを踏まえ、公的アカウントビリティの観点から正統性を担保するために必要な措置を示した。また、計測システムが性能規定に基づき議論されていない現状を踏まえ、計測システムの性能規定体系を提案し、要求性能を明確にした。

第3章では、これらの整理の上に、計測システムの新しい取り組みである On-Site Visualization(OSV) を意識して、具体的に3つのプロセスを性能評価する方法を提案した。

3つのプロセスのうち、「測定」プロセスにおいては、管理すべき工事現場や斜面などを安全管理の観点から不測の事態が発生する可能性のある独立した最小単位の集合体にとらえ、この最小単位をユニットと呼ぶことを提案した。すなわち、計測機器の配置計画や機器選定などのプロフェッショナルで総合的な行為について、対象物をユニットに分割し、個々のユニットに対して適切な測定が実施されているかをもって評価することを提案した。この方法を用いることにより、プロフェッショナルで内部的な行為であった測定計画について、性能表現をもって評価することが可能となった。また、このユニットの考え方が斜面工事や開削トンネル工事などの幅広い対象に対して適用可能であることを説明した。

さらに「測定」プロセスを、適切な対象（ユニット）が抽出されていることの性能、適切な計器が選定されていることの性能、適切な測定時間で計測していることの性能に細分化し、性能呼称をもって評点化することを提案した。

つぎに「判断」プロセスでは、計測値判断として与えられる閾値を性能評価するための状況レンジを提案することにより、閾値設定にも性能評価が可能である

ことを示した。

最後に「結果表現」プロセスでは、本方法を **On-Site Visualization(OSV)** の現場で適用することを意識し、情報の最終受領者である避難あるいは財産保全すべき人への情報提供の質において性能評価を行うことを提案した。これを実現することにより先に述べた広義の計測システムとしての評価が得られることになる。また、これらの評点の区分および合算方法について、製造業や医療分野においてシステムの故障を分析し、改善する手法である **FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)** を用いた具体的な評価表を提案した。

ここで提案する計測システムを性能評価する方法は、**FMEA** による工学的背景は与えているが、実施段階ではそれらを意識することなく、簡単に使用することができる。これは **OSV** が指向する簡素で効果的な計測システムが途上国において活用されることを意識している。途上国であればこそ、計測システムをはじめとする諸事業は効率的に行われなければならないし、アカウントビリティが重視されなければならないはずである。

第4章では、本論文が主に扱う **On-Site Visualization(OSV)** について、概念とともに従来法との相違、先進性について説明し、簡便な手法を用いた多数計測や組み込みロジックによる待ち時間ゼロの計測結果表現のもつ価値が本方法の可能性としてあることを示した。

第5章では、これまで論じた方法を用いて実際斜面での事例から実用性の確認を行った。この事例では、隣接する仮設斜面において、一方では計測システムの性能が低いために崩壊を引き起こしたことを性能評価の観点から説明した。それを受けて改善されたシステムでは、変状は発生したものの崩壊まで至らせずに問題解決できたことを示し、両斜面の性能の違いを再現設計により評点で示し

た．合わせて専門家を対象としたケーススタディを実施し，アウトカム評価などにより計測システムの総合性能評価を表現するための閾値の提案を行った．

第 6 章では，トンネル照明器具の落下事故に着目し，OSV において有望なセンサーである MEMS センサーを活用する開発を実施し，その基礎実験から実用化実験に至る過程の説明およびその成果を用いた新しい計測システムの提案を行った．ここで用いた MEMS センサーは車両搭載用の汎用センサーである．

実験結果としては，MEMS センサーは十分に実用的であり，4 本の照明器具取付けボルトのうち，どのボルトが変状したのかを概ね判定可能であることが知見として得られた．

この実験結果を用いて，トンネル照明器具に計測システムを導入するためのグレード設計，OSV を用いた計測システムにおける各プロセスの試設計を提案した．

これらの研究および事例の分析，実験により，当初に意図した広義の計測システムを性能規定化し，公的アカウントビリティを付与することは十分に可能であり，本研究において提案した FMEA の考え方に基づく評点法がその有効な手法たり得ることを証明した．

8.2 On-Site Visualization の導入方法についての結論

計測システムを性能評価する方法論が確立された上で，実際に現地において実装するためには，導入マニュアルに相当する手順書が必要である．本論文では，プロセス間コミュニケーションを介さないという点で構造的にシンプルである OSV に基づく計測システムに着目し，第 7 章において性能評価を意識した 3 つのプロセスの設計手順を提案し，その一部について事例を援用した考察を行った．

また、本方法を高度化する方法として、FTA(Fault Tree Analysis)を活用する方法、経済性能を評価し、予算制約がある場合や予算配分面での事業効率性を指標にシステムを改善していく方法について提案した。とくに経済性能を考察し、評価する方法は、これらの検討結果が将来的に計測システムについてアウトカム評価を行う際の基礎になるはずであり、計測システムと他の工法的選択や事業実施判断といった事業マネジメント、政策マネジメントに結びつくことが期待される。

一方で、本方法に基づき計画、設計された計測システムはまだ事例がなく、本論文でも事例に対する後追い評価に留まっている。本方法を熟度の高いものとするためには、多くの実施事例により鍛えていくほかなく、OSVをはじめとするさまざまな計測システム計画において積極的な適用が望まれる。

さらにアウトカム評価については、まず基本的な導入方法が定着してから、さらなる高度化として取り組むべきという意見もあるが、高度化の方向性を明確にするために提案したものであり、多くの意見を頂きつつ熟成していくことが肝要であると考えている。

謝 辞

本論文を終えるに当たり、一貫して研究を指導して頂いた芥川真一神戸大学大学院教授に心からお礼を申し上げます。On-Site Visualization が指向する簡便・安価に市民生活の安全性を改善する取り組みは、まさに私が途上国において微力を尽くそうと考えている分野であり、この研究に取り組んだことが今後の私の活動に大きな力を与えることになると確信しています。

本研究で提案した評点法による計測システムの性能評価というアイデアは、平成 24 年度から 3 箇年にわたり取り組んだ国土交通省建設技術研究開発助成「On-Site Visualization のコンセプトに基づく低コスト・低消費電力型モニタリングシステムの開発」において発想したものです。この研究代表である芥川教授はもとより、研究を共同で進めた環境総合テクノス株式会社 片山辰雄博士（当時）、高橋厚志氏、オフィスひもろぎ 中田勝行社長、大日本印刷株式会社 小林弘典氏、SK ラボ 辻村幸治社長に心から感謝するとともに、産官学テーマ推進委員としてご指導を頂いた、沖村孝神戸大学名誉教授（委員長）、仲谷善雄立命館大学教授、篠田博之立命館大学教授ほか高速道路会社、行政関係の皆さまにお礼申し上げます。特に沖村孝名誉教授は私が学部時代の指導教官でもあり、35 年にわたりご指導を賜ったことは私の大きな財産となっています。

斜面工事における計測システムの評価を行うに当たり、快く事例の提供を頂いた西松建設株式会社 繁縄章吾氏、研究成果とするにあたり多くの示唆を与えて頂いた株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング 佐藤毅博士にお礼申し上げますとともに、MEMS センサーによる計測システムの開発を共に進めた曙ブレーキ工業株式会社 西條敦志氏、相川誠氏、株式会社建設技術研究所 戸本悟史氏にお礼申し上げます。また、これらの研究を進めるに当たり性能規定について多くの

助言を頂いた木村定雄金沢工業大学教授にお礼申し上げます。

これらの方々に加え、私が主に研究活動の場としている一般社団法人 **On-Site Visualization** 研究会の特別顧問である櫻井春輔神戸大学名誉教授にもお礼申し上げます。本研究会の主要メンバーである鹿島建設株式会社 山本拓治博士，一般社団法人日本建設機械化協会施工技術総合研究所 寺戸秀和氏，株式会社東亜エルメス 田中茂社長，株式会社演算工房 林稔社長，株式会社テクニカルシンク 下嶋一幸氏，曙ブレーキ工業株式会社 国見敬氏，芳賀博文氏，株式会社レーザーック 町島祐一社長，研究会事務局 柳原久美子氏とは，今日の喜びを共に分かち合いたいと思います。本当にありがとうございました。

また，本研究を開始するにあたり，大学院後期課程への入学を許可し，なかなか研究成果が上がらないにも関わらず業務調整に配慮頂いた株式会社建設技術研究所および技術者各位に感謝の意を表します。

最後に本論文を私の学生時代の指導教官であり，人生の大きな局面でさまざまな助言を頂いた，故 西 勝先生に捧げます。研究を始めるご報告はしたものの，先生が鬼籍に入られるまでに成果をまとめるには至りませんでした。ここにご報告したいと思います。また，同窓の先輩であり，電力土木の発展に一生を捧げた父 靖二，教育を与えてくれた母 アサコにもこの成果を捧げたい。私は二人の願いが，せめて息子二人に大学教育を受けさせたいというささやかなものであったことを知っています。

研究と仕事の二足の草鞋となるわがまを快く受け入れてくれた夏佳，そして篤志にも感謝したい。思ったより時間も手間も大変でしたが，何とかやり遂げることが出来ました。これは家族二人の協力なしには考えられなかったことです。

皆さん，本当にありがとうございました。

神戸大学博士論文

「On-Site Visualization の手法に基づく計測システムの性能評価の方法」全 156 頁

提出日 2018 年 7 月 11 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日
(公開日) はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 野 村 貢

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。