

(53) 維持管理のイノベーションのための モニタリング実装方法に関する研究

杉崎 光一¹・家入 正隆²・北原 武嗣³・長山 智則⁴・河村 圭⁵・松田 浩⁶

¹正会員 株式会社 BMC 研究開発部 (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬 2-6-1 WBG マリブウエスト 25 階)
E-mail: sugisaki@hashimori.jp

²正会員 JIPテクノサイエンス株式会社インフラソリューション事業部 (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町1-2-5)
E-mail: masataka_ieiri@cm.jip-ts.co.jp

³正会員 関東学院大学教授 理工学部土木学系 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)
E-mail: kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

⁴正会員 東京大学大学院准教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)
E-mail: nagayama@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

⁵正会員 山口大学大学院准教授 創成科学研究科知能情報工学分野 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)
E-mail: kay@yamaguchi-u.ac.jp

⁶正会員 長崎大学大学院教授 工学研究科システム科学部門 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)
E-mail: matsuda@nagasaki-u.ac.jp

インフラ維持管理のニーズが高まり、負担軽減や高度化が求められる中、ICT技術の進展を受けたイノベーションが期待されている。ヘルスマニタリング技術では、設計値の把握のための動態観測の応用として、構造物の損傷を検知する技術の研究蓄積が多くある一方、実際の維持管理における点検、診断、措置という観点においては実用化された事例は少ない。本研究では、モニタリング手法を実装する上で評価すべき項目を、マネジメント的な観点から「適用範囲」「指標と評価基準」「運用改善項目」として整理し、既存事例の位置づけや、拡張するための研究開発の在り方を提示した。提案した評価項目を具体的に記載していくことで、モニタリング技術の実装に向けたニーズへのマッチング検討が可能となる。

Key Words : health monitoring, management, innovation, statistical analysis, specification

1. はじめに

インフラ維持管理のニーズが高まり、負担軽減や高度化が求められる中、ICT技術の進展を受けたイノベーションが期待されている。ヘルスマニタリング技術では、設計値の把握のための動態観測の応用として、構造物の損傷を検知する技術の研究蓄積が多くある一方、実際の維持管理における点検、診断、措置という観点においては実用化された事例は少ない¹⁾。本研究では、モニタリング手法を実装する上で評価すべき項目を、マネジメント的な観点から「適用範囲」「指標と評価基準」「運用改善項目」として整理し、既存事例の位置づけや、拡張するための研究開発の在り方を提示した。

2. モニタリング適用範囲

モニタリング技術適用のガイドラインや委員会資料等では、メンテナンスプロセスを点検・検査(常時、異常時)、診断、対策等に分類し、そのプロセスごとにモニタリングの役割が検討されている²⁾。損傷検知を目指したモニタリング技術の蓄積がある中で、それを実際の維持管理に実装していくことが課題である。メンテナンスにおけるサイクルを点検計画を基本として図-1のように考える。メンテナンスは現場の状況に不確実性がある中で実行計画を予め立案することが実務上困難であるため、情報収集(評価)が起点となる。PDCAサイクルで考えれば、「計画(全体・個別点検)」、「評価(点検・診断)」、「措置」として、「CA」を評価と考えたサイクルとなっている。計画(P)、評価(CA)、措置(D)の



図-1 構造物維持管理とモニタリング

表-1 モニタリングの運用適用例

段階	サイクル	運用方法	効果
実装されているモニタリングの活用	評価のモニタリング	代表的（特殊）な構造物の挙動把握	性能確認
		荷重や外的条件の監視	地震、雨量、風速、水位等、過積載
	措置のモニタリング	点検・診断等で問題のある構造物	変状の進行性、対策効果監視、異常検知
		重要な構造物に対する予防的な監視	悪くないことを把握する、き裂検知、落橋監視
将来的に実装が期待されるモニタリング	評価のモニタリング（スクリーニングとカテゴリー化）	個別点検計画支援、異常検知	点検間隔の延伸、トリガー、舗装・データ相関
		カテゴリー化 新技術の促進、品質管理、長寿命化	施工から一貫したモニタリング 劣化因子の監視、共振の確認
	措置のモニタリング	診断の高度化	原因究明、リアルタイム評価
		被災時の被害評価および判断支援	対策・更新の高度化・判断支援、劣化監視

判断支援のツールとしてモニタリングを捉える。表-1にはモニタリングの役割を示すために事例を整理した。モニタリングを行うことで点検・診断を省力化することが考えられるが、診断が必要な構造物を抽出する、診断して対策の要否・程度の選定支援情報とするなどが考えられる。また、モニタリングを行うことで補修・補強の代わり、補修・補強を延伸するための措置とする、もしくは補修・補強の効果を評価する等が挙げられる。特に、評価のモニタリングについては、スクリーニングとカテゴリー化が重要である。メンテナンスにおけるスクリーニングは、時間的（経時変化）もしくは空間的（複数構造物の比較）な観点から要求性能や保有性能に対して相対評価を行う概念であるが、目視情報を客観化する役割もある。カテゴリー化は、スクリーニングと補完的に、性能に対して多様な基準で構造物を相対化する方法である。モニタリングを運用するには、マネジメント的な観点が重要であり、損傷状態と余裕度（要求性能に対する保有性能）、検査性・維持管理性（構造物交差条件、周辺環境）、利用度（運行密度）と猶予（対策までの期間）等、多様な評価軸からモニタリングの適用範囲は決まる。

3. モニタリング指標と評価方法

モニタリング技術の実装においては、適用範囲に対して、指標や評価方法の構築が課題である。モニタリング指標を検討する場合、設計における入力（インプット）、

システム、出力（アウトプット）の観点を利用できる。入力の評価はモニタリング応答を計測する上では重要であるが、入力のみでの監視では、構造物評価は間接的になる。応答の監視では、外力に構造物の状態を含んだ値が観測されるため、構造物の状態を直接的に監視できる。また、構造物を利用するユーザー側に対する影響を直接評価できる。システム評価は、応答の変化に対して、入力に変化したのか、システム自体の変化かを分離して評価できる。また、指標が物理量に直接対応している場合は、例えば地震時の構造物の降伏変位などとの比較が可能である。しかし、物理量が観測できたとしても、例えばひび割れ幅などであれば、その大きさにより剛性にどの程度変化があるかは直接的に評価できない。状態の評価を行うには、応答からシステムを逆推定することや、様々な物理量の複合的な指標を利用する方法が考えられる。データマイニングや機械学習などの統計手法を利用したデータ同化を行う方法が有効である。

また、指標の評価方法は、モニタリングをどのように運用するか大きく依存する。異常検知などのリスク利用であれば欠報を無くして、誤報を最小限にするようにする、また段階的に閾値を設定する方法が考えられる。個別に診断する橋梁の抽出などのスクリーニング用途では、ある程度の誤報を許容できるだろう。また、指標や閾値の設定の難易は、対象とする問題の難易度に大きく依存する。例えば図-2のような、モデルの不確実性とマネジメントの不確実性で指標や閾値設定の難易度を評価することが可能である。モデルの不確実性が大きいよう

な対象では、閾値の設定は難しいが、マネジメント方法を絞るもしくは階層的にすることで判断材料とできる。

実際にモニタリングが実用化されている妙高大橋³⁾や垂井高架橋⁴⁾では、桁変位などの指標を選定して閾値等を設定しているが、妙高大橋のモニタリング指標評価では、注意、警戒、限界といったレベルを設けることで柔軟な対応を可能としている。また、モニタリングをマネジメントに活用した事例として国鉄飯山線の高場山トンネルにおけるトンネルの崩壊時期を予知した事例がある。これは、モデルの不確定性の高い地すべり現象に対して、環境条件や過去の崩壊箇所の2次的なすべりなどから、想定すべり面を決めたモデル化を行い、すべりの大きさや速度を評価して地すべり計と崩落現象の関係を求め、地すべり計の計測値に誘因（雨量観測）情報を加味して、補強の判断、列車抑止の措置、崩落範囲の特定、崩落時期の予知を行った事例である。崩壊する箇所を特定してモデルを単純化し、マネジメントとの手段として、崩壊前に運行を停止する運転規制を考え、そのタイミングを観測値により判断した事例である。

鉄道橋下部工の洗掘モニタリングでは、橋脚の静的な傾斜角の連続計測と列車通過時変位、また、微動応答から推定する卓越振動数評価など、複数指標を統合的に評価する方法が構築されている⁹⁾。指標は外力の変化やノイズなどによりばらつきがあるが、急激な変化、長期的なトレンド変化などを検知するため、統計的な評価を実装している。図-3には列車通過時の変位の時系列的な変化を示すが、赤枠の箇所で統計的に有意な指標の変化が確認された。原因を検討したところ、軌道の整備と支点部の補修を行っていた。異常検知の事例ではないが、軌道や支点部の異常が発生した場合は、監視指標により異常検知できる可能性がある。統計的な検定方法を適用する利点は、前述した誤検知率や欠報率に対し1%や5%といった有意水準を設定することが可能となることである。

4. モニタリング仕様と実装

モニタリングの適用範囲、指標評価方法と合わせて表-2に示す仕様検討があり、構成に対し信頼性・コスト評価ができる。指標や評価方法は、機能（運用）に応じ様々な考えられ⁹⁾、無線センサが適用できるもの、有線センサが必要なもの、また商用電源（無停電電源装置、落雷対策等を含む）が必須のもの、燃料電池のような可搬的な電源で運用可能なものなどある。MEMSセンサなどの廉価なセンサが適用できる運用に対し、高価なセンサの密な配置や商用電源を引く場合は、オペレーションに対し高度な判断を提供し、費用対効果を高くする必要がある。

表-1に示すモニタリング技術を実装していく上で、時間と空間の軸を使って適用範囲拡大を検討できる。常時監視の期間は、短くても数か月単位であり、点検時などに指標を間欠的に確認する場合でも、長期間の継続的監視が有効である。長期監視するためにはセンサは固定的に設置する必要がある、特定の構造物への設置となる。特定の構造物や部位が悪いとわかれば設置場所を決めることができるが、空間的な特定が困難な場合（類似箇所が複数なども含む）は複数センサを設置する必要がある、費用対効果が下がる。そのような場合の技術開発としては、MEMSなどの廉価なセンサの活用、省電力化などの技術開発が有効である。ただし、表-2に示すようにAD変換システムの多点对応（無線化）が必要となる。広範囲に適用が可能な技術として、レーダー、衛星などの技術

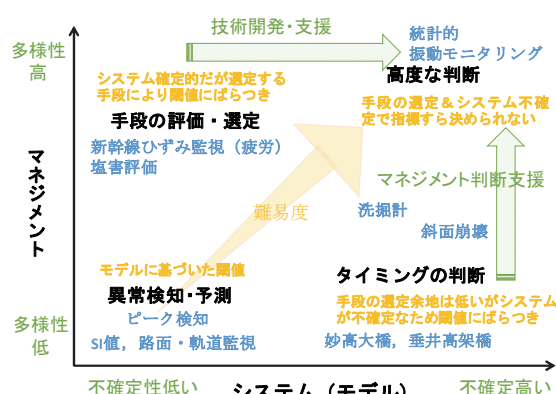


図2 モニタリング指標と閾値設定の在り方

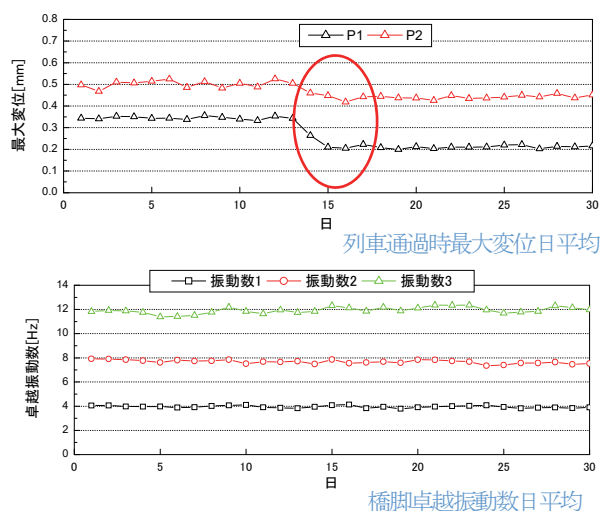


図3 指標の統計的变化例

表-2 モニタリングシステム仕様と評価

項目	評価指標
構成	センサ数、AD解像度、通信、電源 拡張性、データ融合、データ回収
信頼性 コスト	誤報・欠報率、故障・稼働率、要求精度・ノイズの影響、維持管理性（遠隔操作、定期点検）、耐久性（センサ交換）

表3 モニタリング実装のための評価項目と事例

運用目的 (単目的/多目的)	適用範囲 スクリーニング&カテゴリー化	事例 (想定事例)	指標/ 評価基準	モニタリングシステム性能仕様						運用評価		運用改善項目
				センサ (数)	AD 変換	通信	電源	データ 回収	点検	欠報率 誤報率	対象範囲	
点検・診断で問題のある構造物に対して変状箇所と関連する指標を監視する。	①損傷：点検結果悪い ②余裕度：無し ③検査性：河川長大橋 ④構造特徴：初期PC橋 ⑤利用度：交通量多 ⑥猶予：2年	PC鋼棒の破断	たわみ／たわみ制限	水管式傾斜計	高周波カット	固定	常設	常時	2ヶ月に1回目視	0.1% 1%	A変状(判定IV)橋梁	汎用化、コストダウン 適用範囲の拡大
重要構造物の予防的な監視。現状の健全性の定量化	①良い ②無し ③足場無し ④下路溶接 ⑤新幹線 ⑥10年	き裂、ひずみ	疲労限／疲労限以下	検知線歪ゲージ	アナログフィルタ	携帯	電池	点検時常時	不要	1% 10%	管理橋梁400の内10	適用範囲の拡大 データ蓄積
特殊材料・構造の評価。異常外力・荷重監視	①良い ②無し ③都市部長大橋 ④斜張橋、⑤BCP ⑥20年	高張力鋼橋斜張橋	固有モード／解析値比較	MEMS加速度計	デジタルフィルタ	固定	常設	定期的	年に1回目視	1% 10%	管理橋梁400の内5	維持管理活用、異常検知併用
災害時異常構造物の抽出と状態評価。常時に詳細点検トリガー	①類似で損傷 ②無し ③山間部 ④単柱橋脚 ⑤中 ⑥2年	上部工変位洗掘	傾斜角／統計(3σ)	サーボ式傾斜計	低周波特性高	携帯	燃料電池	一定期間常時	年に1回目視	0.5% 15%	発生ハザードが高いもの	評価方法高度化、適用範囲拡大

があるが、モニタリングに利用するには、継続監視を可能とするなどの開発が重要となる。広範囲にセンサを設置する場合は、監視カメラ等の既存システム近傍に設置すれば電源等を併用できる。

近年活用が期待されるIoT技術は、固定的に設置される機器(固定系)だけでなく、アクセス困難箇所等に適用するロボット、ドローン、運行車両、衛星など(移動系)が開発されている。センサ、電源、通信が一体となったスマートホンの活用では、機能に応じた階層的な運用を実現すればモニタリングへの活用が可能となる。IoT技術は様々な目的で開発され、運用の多様性を確保する上で有効である。表-1で検討を行った適用範囲について、表-3のように、個別のモニタリング技術ごとに運用目的や適用範囲を決め、仕様項目に対して性能を記載し、運用評価を行い、改善項目を記載することでマッチングを意識した実装や技術比較が可能となる。

5. 結論

以下に本論文の結論を整理する。

- ・メンテナンスサイクルにおけるモニタリング適用範囲を、損傷度、余裕度、検査・維持管理性、構造特徴、利用度、猶予などマネジメント的観点から検討した。

- ・モニタリング指標と評価基準について、入力・システム・出力、絶対・相対、物理的・統計的などの観点から整理した。運用に応じたシステム仕様を整理した。

- ・モニタリング実装のための評価項目を整理した。

謝辞：本研究の一部は総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術(PD 藤野陽三)」(管理法人等：国土交通省、科学技術振興機構[JUST]、新エネルギー・産業技術総合開発機構[NEDO])における「インフラ予防保全のための大規模センサ情報統合に基づく路面・橋梁スクリーニング技術の研究開発と社会実装(代表 JIP テクノサイエンス株式会社 家入正隆)」によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ24センシング情報社会基盤、センシングと情報社会基盤研究小委員会、2015。
- 2) 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会、<www.mlit.go.jp/common/001031990.pdf>、(入手 2017.6.30)
- 3) 樋口徳男：妙高大橋のモニタリングによる管理、<www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h25/d07.pdf>、(入手 2017.6.30)
- 4) 土木学会：垂井高架橋モニタリング評価委員会、<<http://www.jsce.or.jp/opcet/tarui.shtml>>、(入手 2017.6.30)
- 5) 樺建典、鈴木修：橋脚の健全度モニタリングが可能な新しい洗掘検知装置の開発、JR EAST Technical Review No.45, pp.53-58, 2013.8
- 6) 杉崎光一、阿部雅人、奥水聡：慣性計測を用いた鉄道橋モニタリングのためのセンサ性能評価、土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, pp.315-328, 2013。
- 7) 松村隆爾、杉崎光一、鎌田敏郎、松田浩：コンクリートのひび割れおよび剥離・剥落の点検技術の評価に関する研究、土木学会論文集 F4, Vol.72, No.3, pp.73-83, 2016。