

社会基盤施設マネジメントのためのモニタリングシステムの構築*

Development of Monitoring System for Infrastructure Management*

坂井康人**・金川昌弘***・貝戸清之****・小林潔司*****

By Yasuhito SAKAI**・Masahiro KANAGAWA***・Kiyoyuki KAITO****・Kiyoshi KOBAYASHI*****

1. はじめに

旧道路関係 4 公団は平成 17 年に民営化され、道路会社として高速道路を管理運営している。民営化の前提として、道路会社は民営化から 45 年以内に債務を完済すること、管理する施設を適切な管理水準に維持すること、が義務付けられている。そのためには、債務の返済を考慮した維持管理計画を策定し、その計画を確実に実行しなければならない。このような状況で維持管理の実効性を高めるためには、①適切に管理水準を維持し、かつ確実債務を返済できる維持管理計画の策定、②計画を実行・評価・改善するための業務プロセスシステムの構築、が重要な課題となる。

①の課題については、2 つの要素が考えられる。1 つめは、劣化した部位を補修して、健全な状態に回復させる取組みである。筆者らは合理的な維持管理を支援するための阪神高速道路橋梁マネジメントシステム（以下、H-BMS : Hanshin expressway Bridge Management System）を構築し、運用している¹⁾²⁾。この H-BMS は、目視点検履歴から劣化曲線を統計的に推計し、それに基づいた将来の維持管理費用を推計する。2 つめは、部材の改良などによって、管理水準の底上げを図る取組みである。例えば、昭和 39 年以前の道路橋示方書に準拠した橋梁の RC 床版に対する鋼板補強があげられる。この取組みは、1 つめにあげた取組みとは違い、全社的な課題として集中的に対応することで、管理水準の底上げが可能になる。

*キーワード：H-BMS, ロジックモデル, 路車間無線通信モニタリング, RFID タグ

**正員, 工博, 阪神高速道路株式会社建設事業本部
(堺市堺区南花田口町2-3-20、
yasuhito-sakai@hanshin-exp.co.jp

***正員, 京都大学大学院工学研究科社会工学専攻
(京都市西京区京都大学桂、
masahiro.k@ay2.ecs.kyoto-u.ac.jp

****正員, 工博, 大阪大学特任講師
(吹田市山田丘2-1、
kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

****フェロー会員, 工博, 京都大学教授経営管理大学院
(京都市左京区吉田本町、
kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

次に②の課題については、筆者らは H-BMS の開発と並行して、アセットマネジメントの政策評価を持続的に実施するために維持管理ロジックモデル³⁾を開発し、PDCA サイクルに従い適切に評価・検証を行っている。ロジックモデルは阪神高速道路の維持管理全般を体系的に表したものであり、日常的な維持管理だけでなく、本体構造物の補修を含む総合的な内容になっている。

一方で、これらは目視点検データを中心とした方法論で構築されており、目視点検に基づくアセットマネジメントにおいては、①常時監視による損傷・劣化の早期検知、②力学的性能の定量的評価に基づく安全・安心の確保といった実務的要請の極めて高いニーズに対しては、目視点検の限界が指摘されており、アセットマネジメントの高度化のためには、その中にモニタリング技術をいかに組み入れていくかを検討すべき段階に達していると言える。そこで、本研究では具体的なツールとして IC タグや無線通信の活用を想定したセンサーネットワーク構想を提案するとともに、高速道路における鋼床版の疲労亀裂に関連する動的ひずみ挙動をモニタリングのターゲットとし、路車間通信の実証実験を行うものがある。具体的には、IC タグを活用した無線モニタリングシステムを高速道路上に構築し、モニタリングデータを高速道路上を巡回中の点検車両から回収するとともに、その結果に基づき、社会基盤施設マネジメントのためのモニタリングの可能性および実用性を評価するとともに、損傷・劣化を早期検知するためのスキーム作りを目指すのである。このように、計測データを蓄積している現場基地局（固定局）から、走行する点検車両（移動局）への無線データ通信をこれ以降、路車間無線通信モニタリングと呼ぶ。

2. 路車間無線通信モニタリングの概要

都市高速道路において、安心・安全を確保するためのモニタリング対象としては、橋梁本体はもちろんのこと、照明柱などの道路付帯施設など多岐にわたる。モニタリングの実用化に際しては、路線上に分散的に位置するこれらの多様な施設からモニタリングデータを継続的かつ効率的に回収する必要がある。これらの分散配置された各現場基地局からのデータ回収経路を有線ネットワークで構築すると、ネットワーク構造が直列システムを形成することになる。直列システムは、事故・災害などの突

発的な事象が発生したときに1箇所でもケーブルが破断すると、ネットワーク全体が機能しなくなるという欠点がある。もちろん、必要に応じて並列システムを組み入れることは可能であるが、複雑な回収経路を整備するには必然的に膨大な費用が発生する。このような現状に対して無線通信技術の飛躍的な発展を勘案すると、分散的モニタリングへの展開を見据えた安価で効率的なデータ回収手法の構築が可能であると考えられる。特に都市高速道路に着目した場合、落下物や路面状況の監視などを行う日常点検車両が日々路線内を巡回している。

本研究では、このような点検車両の利用を視野に入れ、これまでの日常点検の効率性を損なうことなく、継続的、効率的にモニタリングデータを回収するシステムの構築を目指しているために、より大容量のデータ通信が可能となる表-1に示す5つのタイプを用いた路車間無線通信システムのプロトタイプの開発を試みる。ここで、対象とする無線通信システムの主な問題点としては、2.4GHz帯を用いることに起因する電波干渉の影響があげられ、実フィールドにおいて確認する必要がある。また、路車間無線通信においては、車両の走行速度により通信時間が変動するために、通信可能なデータ容量が変化する。さらに、実用化に際しては、営業中の高速道路におけるモニタリング計測との連動を想定しているために、データ送信アンテナ設置位置の制約、基地局と移動局の間を大型車などが混入することによる通信の一時遮断などが考えられる。これらの要因が走行中に取得可能なデータ容量の変動に及ぼす影響を明らかにするために、本研究では、実際の高速道路における鋼床版のひずみモニタリング計測と連動し、実橋において、モニタリングデータの回収性能に関する実証試験を実施するとともに、実際にモニタリングした時系列波形、あるいは時系列波形に基づき算出した分析結果が走行車両で回収可能であることを確認する。なお、本稿ではアクティブRFIDタグを用いた路車間無線通信モニタリングシステムを一例として取り上げることとする。

3. 実橋梁における路車間無線通信試験

(1) プロトタイプの試作

本研究では将来的な大容量データ通信を見据えて、ア

クティブRFIDタグを用いた路車間無線通信システムのプロトタイプの開発を試みる。具体的には、①ひずみゲージから出力される動的ひずみデータ(アナログ電圧信号)のサンプリング機能、②アナログデータをデジタルに変換するAD変換機能、③データ収録機能、④送信要求に対するデータ送信機能の4つを集約し、1つのRFIDタグに搭載した。また、受信側(車両側移動局)も通常のUSBメモリカードと同等サイズのデバイスを用意し、USBケーブルでノートPCに接続し、デバイスがPCにインストールされたソフトウェアによって受信処理が行われる。

(2) フィールド試験概要

高速道路にて、モニタリング計測した時系列波形(具体的にはひずみデータ)、およびその分析結果(頻度分布)を路車間無線通信にて回収する試験を実施した。対象橋梁および橋梁側(固定局)のICタグ設置地点の概要を図-1に示す。無線設置は、路車間無線通信の適用可能性を考慮し、道路線形、遮音壁、非常駐車帯の有無など、無線通信環境が厳しい地点を選定した。具体的には、橋梁側(固定局)のアンテナ設置地点は、見通しの利きにくい曲線部の内側の非常駐車帯としている。また、当該地点にはアルミニウム製の遮音壁(路面高さが3m程度)が両側に設置してあり、送信電波を反射することが予測される。設置地点を含む当該路線は、港湾施設に隣接しているために、大型車交通量が非常に多く、鋼床版の疲労き裂の発生が危惧されている。これに伴い、試験対象とした橋梁では、実働荷重下における鋼床版の負荷状況を把握する目的で、実際の交通荷重作用下における鋼床版のひずみ値をモニタリング計測している。計測するひずみ値は、ひずみゲージからICタグの内部にあるAD変換部を介して、サンプリング周波数1Hzにて直接タグのメモリにリアルタイムで収録される。これら一連の作業はICタグの内部計測ソフトウェアによって自動的に実施される。ここでは、本システムの長期間における動的ひずみデータのモニタリングの有効性を確認するという目的で、平日の夕方5時頃から翌朝6時頃までのひずみ値を自動的に計測し、ICタグに収録した後、翌日の午前から午後までの間に路車間無線通信試験を実施した。なお、72時間のひずみ値のモニタリング計測

表-1 路車間無線モニタリングシステムの概要

項目	①RFIDタグ (パッシブ)	②RFIDタグ (アクティブ)	③無線LANカード	④3Gデータ通信 カード	⑤SS無線通信 モジュール
概要	ICタグによる移動局 PCとのデータ送受信	ICタグによる移動局 PCとのデータ送受信	無線LANカードによる 移動局PCとのデータ 送受信	3Gデータ通信カード によるインターネット上の遠隔地DB サーバへの転送	無線通信アンテナに よる移動局PCとの データ送受信
周波数	953MHz	2.4GHz	2.4GHz	1.7GHz	2.4GHz
伝送速度	40kbps(タグ→RW)	250kbps	11Mbps	5.8Mbps	11Mbps
電源	不要(PCは必要)	必要	必要	必要	必要
外形(mm)	51(W)×64(D)×11(H)	100(W)×50(D)×30(H)	19(W)×55.5(D)×81(H)	28(W)×92(D)×10(H)	120(W)×60(D)×24(H)

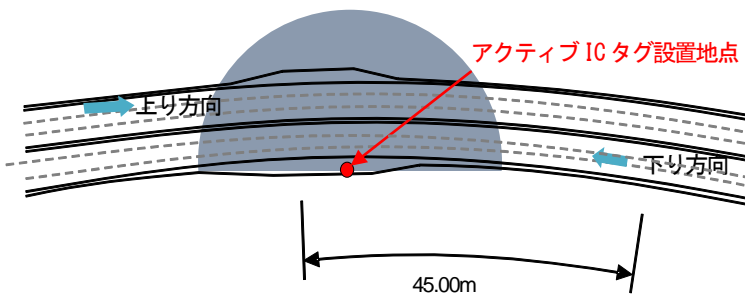


図-1 橋梁側アンテナ設置地点の概要



図-2 橋梁側の設置状況

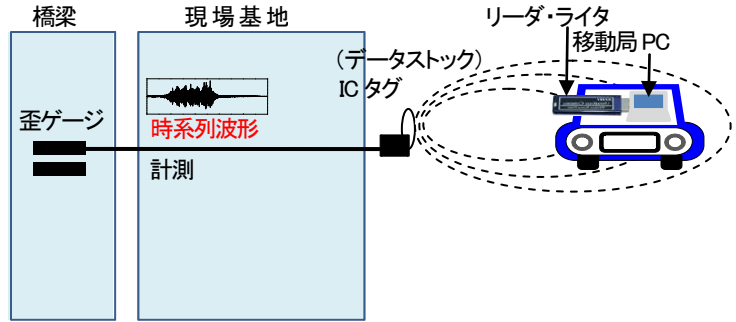


図-3 計測および通信システムの概要

は別途実施されている．このように IC タグ（基地局）に収録されたモニタリングデータ（タグの内部メモリデータとして）は、タグの内部通信制御ソフトウェアで読み込まれ、車両側（移動局）からの転送命令待ちの状態となる．また、IC タグは、路面から 1m 程度の高さに設置した（データを回収する車の車窓中心とほぼ同じ高さ）．設置状況を図-2 に示す．

この状態で、車両側（移動局）が通信範囲内に進入することにより、橋梁側（基地局）から無線通信により車両側へデータの送信が行われる．これらの一連の計測、および通信システムの概要を図-3 に示す．

(3) 車両の走行速度と通信データの容量

車両走行速度とデータ量との関係を図-4 に示す．計測されたひずみデータは橋上から送信される．路車間通信によりデータ回収を行う車両は、図-1 の下り線側の走行車線を走行した．試験に際しては、車両速度を 40～80km/時まで 10km/時刻みで変更させた．各速度において 1 回、50km/時のみ 2 回の走行試験を実施したので、合計 6 回の路車間無線モニタリングによる通信試験を実施することができた．車両走行速度と路車間無線通信により取得したデータ量との関係を図-4 に示す．速度と取得データ容量の間に逆相関の関係を見て取ることができる．また、車両走行速度は最大 80km/h の時にでも通信データ量は約 5kbytes という結果を得た．これは、例えばサンプリング周波数 100Hz の 1ch 分のモニタリングデータに換算すると、数秒間のデータに相当する．したがって、

現状の路車間無線モニタリングでは固定局側で蓄積された長時間の時系列波形を取得することは困難である．しかし、実務上、このような生波形を継続的に取得する必要性は少なく、生波形に対して何らかの信号処理を施した結果（1 次分析データ）を送受信できれば十分であると考えられる（1 次分析データに異常が確認された場合に車両を停車させて生波形を回収することが現実的である）．そこで、本研究では計測したひずみデータの 1 次分析データとして、頻度分布を算出した．今回の場合、ひずみ振幅を 100 のクラスに分類し、各クラスの頻度をレインフロー法によりカウントしたが、データ容量は約 300kbytes 程度であった．実際の頻度分布データの回収では、いずれの走行速度においても、無線通信に伴うノイズや欠損のない良好な結果が得られた．

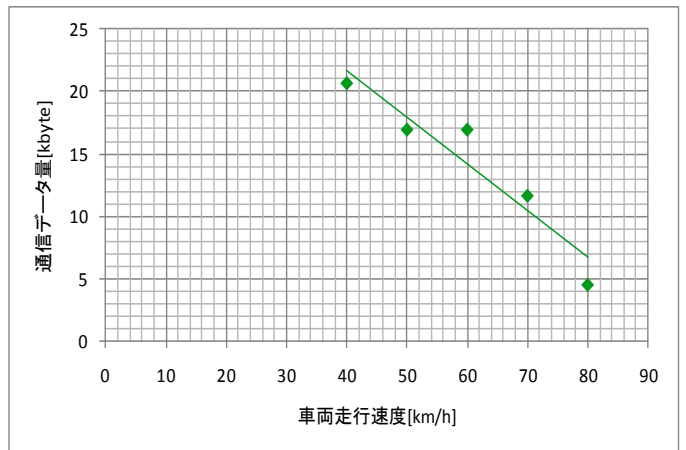


図-4 車両走行速度と取得データ量との関係

4. 実用化に向けた課題

フィールド試験の結果から、本システムを用いることで、モニタリング計測の分析結果を走行車両で回収できることを示したが、実用化に際しては、ハードウェア、ソフトウェアの両面でいくつかの課題が存在することも事実である。

ハードウェアにおいては、まず計測、分析、通信を同一のセンサー内で実施する機器の開発があげられる。本試験では試験中における操作性に配慮して、ノート PC を用いているが、計測対象と取得したいデータが決定していれば、センサー、記憶メモリ、計測結果の分析ソフト、通信制御ソフトを同一のパッケージ内に収納し、スマート化することが可能である。また、本システムでは都市高速道路での使用を想定しているために、ケーブルによる電源供給を前提としている。しかしながら、地震などの非常時においては、断線などの影響により電源供給が困難になる可能性が十分想定されることから、事故・災害時での稼働を視野に入れた非常時用バッテリーを内蔵することが必要であると考えられる。さらに、耐久性については、耐風雨用の外装を別途検討する必要がある。

一方、ソフトウェアにおける主な課題として、回収可能なデータ容量に応じたマネジメント戦略、橋梁とモニタリング機器のそれぞれについての異常検出アルゴリズム、目視点検によるベンチマーク評価と連動したモニタリング導入区間の設定などがあげられる。

回収可能なデータ量は走行車両の速度と逆相関の関係性を有するために、回収効率と獲得可能なモニタリングデータ量の間にはトレードオフの関係が存在し、この関係を前提としたデータ回収戦略を検討する必要がある。一例として以下の2段階のモニタリングデータ回収戦略が考えられる。通常時に走行車両から回収するデータは、各橋梁の識別 ID、計測生波形を解析した結果、あるいは異常判定結果のみとする。正常であればそのまま巡回するが、異常であった場合、近くに停車してより詳細な計測生波形、もしくはそれに準じるデータを固定局から送信させる。このような戦略については、スマートセンサーに内蔵する CPU 設計時点で想定しておく必要がある。

また、橋梁の劣化などを長期にわたって計測する際には異常検出アルゴリズムを開発する必要がある。計測データは客観的かつ常時計測であることから、気温、日光量、交通量など、各種要因の影響を受け変動する。これらの変動の中から橋梁の性能に関する変動のみを抽出し、モニターする必要があるとともに、その変動が許容範囲内であるかどうかを判定する必要がある。

最後に実用化への可否を検討するためには、維持管理へのモニタリングシステム導入の有意性を評価するため

の方法論を整備しなければならない。すなわち、目視点検をモニタリングの一種と考えると、本研究の路車間無線モニタリングは目視点検との相互補完的な位置づけを出発点としているが、モニタリングシステムを導入することに対するインセンティブをいかにして確保するか、という問題である。近年、H-BMS^{1),2)}に代表される大規模アセットマネジメントシステムなどが、実際に運用されている。これらの目視点検結果をベースとしたベンチマーク評価により、異質性が高い橋梁を対象とし、橋梁の維持管理上のリスクをモニタリングシステムによりヘッジすることで、例えば通常の見視点検の間隔を延伸するか否かの戦略を検討することができる。この際に、モニタリングシステムの導入・管理費用と、点検間隔を延伸することにより削減される費用の多寡を比較することで、維持管理にモニタリングシステム導入することの意義を経済性の観点から明らかにすることが可能である。

5. おわりに

本研究では、モニタリングシステムのアセットマネジメントへの適用可能性について、データ回収の継続性と効率性という観点で検討を行った。具体的には、モニタリングによる常時監視を実現させるために、路車間無線通信を用いた効率的なデータ回収手法の開発を行うとともに、都市高速道路においてモニタリング計測と連動した路車間無線通信試験を実施することで、走行車両により取得可能なデータ容量を明らかにするとともに、頻度分布のような分析結果であれば80km/hの高速走行中であっても十分に回収可能であることを明らかにした。

今後は、実用化に向け継続的に検討していくとともに、継続的モニタリングシステムとして、段階的にパッケージ化していく必要がある。また、照明柱など量的に多数存在する道路付帯施設を対象として空間的なデータ回収の効率性と異常検出アルゴリズムに関する検討を行うことも重要である。

参考文献

- 1) 坂井康人, 荒川貴之, 井上裕司, 小林潔司: 阪神高速道路橋梁マネジメントの開発, 情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.17, pp.63-70, 2008.
- 2) 坂井康人, 慈道充, 貝戸清之, 小林潔司: 都市高速道路のアセットマネジメント, 建設マネジメント論文集, 土木学会, Vol.16, pp.71-82, 2009.
- 3) 坂井康人, 上塚晴彦, 小林潔司: ロジックモデル (HELM) に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化, 建設マネジメント研究論文集, 土木学会, Vol.14, pp.125-134, 2007.