

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：道路の日常点検のためのスクリーニング計測システムの開発とそのデータ分析手法の構築
- (2) 研 究 期 間：平成 29～30 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：斉藤 成彦（山梨大学・教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：斉藤 成彦（山梨大学・教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：吉田 純司（山梨大学・准教授）  
鈴木 猛康（山梨大学・教授）  
宮本 崇（山梨大学・助教）  
荒木 功平（山梨大学・助教）  
竹谷 晃一（山梨大学・助教）
- (6) 補 助 金 交 付 総 額：17、632、000 円

(7) 技術研究開発の目的

本研究では道路に関連する構造要素のうち、劣化の頻度が高く、かつ道路の安全性に直接的に繋がる舗装路面、舗装路面下の地盤、道路橋上部構造に焦点を絞り、日常点検においてそれらの状態をスクリーニングするための計測システムを開発した。加えて、計測したデータから道路の異常を検知するための分析手法を提示した。計測システムについては、地方公共団体（県・市町村等）の利用を想定し、使いやすく、かつ安価であり、重大な異常の状態や位置を確実に検知できることを目指した。分析手法については、この計測システムのデータに特化したものを構築し、最終的な成果物として各分析手法を道路管理者が利用できる形にしたソフトウェアのプロトタイプを提示を試みた。

本計測システムでは、舗装路面はビデオカメラによる画像計測、路面下の地盤構造は電磁センサーによる探査、橋梁上部構造は加速度センサーによる計測、を想定しており、データ集録のための機器を一台の車両に集約して搭載した。本システムでは、

- 1) 車両での走行による計測を想定し、普通車両に着脱可能であること、
- 2) 比較的、安価であること（車両を除いて 700 万円程度）、
- 3) 各計測データが計測位置（GPS）と連動できること、
- 4) 一度の計測で道路 50km 以上のデータ集録ができること、

を目標とした。

一方、分析については、それぞれの計測データに特化した解析手法（画像解析、AI、振動解析等）を構築し、最終的には、PC 上で起動できるソフトウェアのプロトタイプの提示を試みた。本手法により、道路 50km 分のデータ分析を PC で半日以内（12 時間以内）に終了できることを目標とした。また、分析結果については、道路管理者がその後の維持管理業務に援用することを想定し、視覚的なデータの提示を目指した。

(8) 技術研究開発の内容と成果

本研究では、道路の日常点検における健全性評価の 1 次スクリーニングを目的として、舗装路面の画像計測ユニット、路面下の地盤の電磁探査ユニット、および橋梁支承部付近の回転振動特性の計測ユニットの開発とともに、各ユニットより得たデータの分析システ

ムの構築を行った。

## 1) 舗装路面の画像計測ユニットの開発と健全度評価手法の構築

### 1.1 路面の画像計測ユニットの開発

本研究では、市販のビデオカメラを車載化し、路面を撮影するために、山梨県の道路パトロールカーを対象として、カメラを設置するための治具を開発した。開発した治具を車両に取り付けた様子を図 1.1 に示す。この治具を車両のキャリアーフ上に取り付け、それにカメラを設置して車両後方の路面を撮影するものである。カメラの位置や撮影角度を調整することができ、かつカメラの操作は、車両内部からモニターをみながら行うことが可能である。記録された動画は、カメラ付属のメモリーカードに保存する形式となっている。実際の道路を撮影した画像の例を図 1.2 に示す。図 1.2 をみると、この計測ユニットで撮影した画像には、周辺建物や植木の影、道路の標識、標字などが一緒に写っていることがわかる。



図 1.1 パトロール車両に画像計測ユニットを取り付けた様子

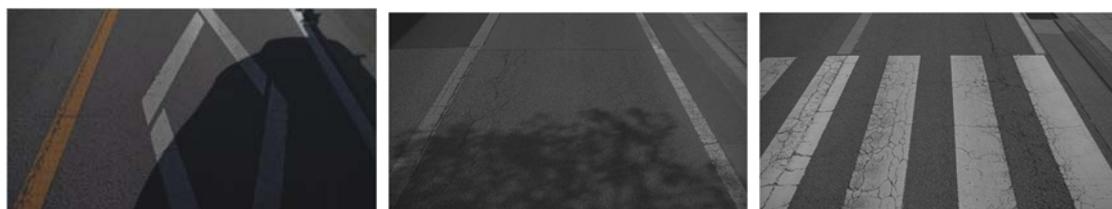


図 1.2 画像計測ユニットにより撮影した路面画像の例

### 1.2 路面画像からクラックを抽出する画像処理手法の構築

上述したように道路路面の画像には、影に代表される障害物が写っており、クラック抽出の際に抽出精度を低下させる原因となってしまう。特に影は、時間帯、天候によって濃度、範囲、向きが変わるため、どのような場合の影に対してもクラックを抽出しやすいよう補正することが望ましい。そこで、本研究では、クラックをクロージング処理により除去した路面画像に対して、輝度に応じてグループ分類する画像を作成する。図 1.3 は、実際の路面画像に対し、4 グループで分類する例を示している。その後、各グループで輝度の平均と分散を一定値に補正することで、クラックが有する濃淡レベルを損なわず、路面画像全体を均一な分布にすることができる。

その後、補正後の画像を教師データとして、機械学習（遺伝的プログラミング）を用いて、クラックを抽出するための画像フィルタを作成した。これにより、輝度補正後の路面画像からクラック抽出を試みた。図 1.4 に、路面の原画像、輝度を補正した画像、フィルタによるクラック抽出結果の画像の一例を示す。その他の影や、横断歩道、標識がある場合でも主要なクラックを抽出することができた。

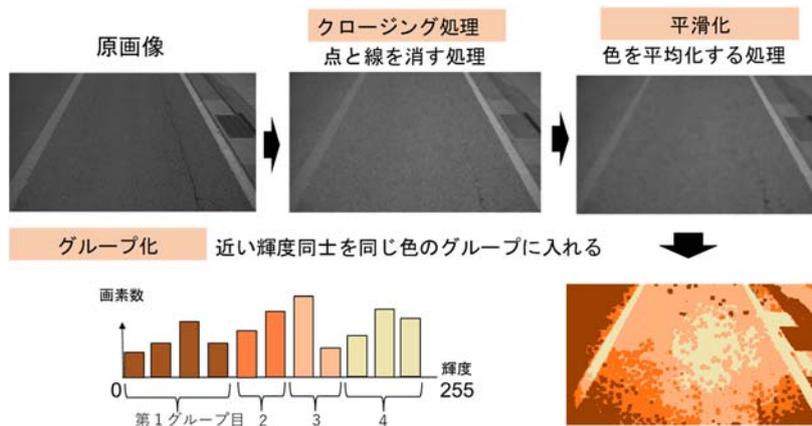


図 1.3 路面画像を輝度ごとに分類するための画像の作成



図 1.4 路面の原画像、輝度補正後の画像、クラック抽出フィルタを適用した画像の例

## 2) 路面下の地盤の電磁探査ユニットの開発と AI による地盤構造の同定

### 2.1 電磁探査センサーの車載化ユニットの開発

電磁探査センサーの車載化ユニットを、図 2.1 のように設計した。設計に当たっては、センサーの重量、金属を避ける必要があるセンサー特性、30km/h の速度での走行時に十分な強度と安定性を確保できることの 3 点を考慮して材料や諸元を決定した。

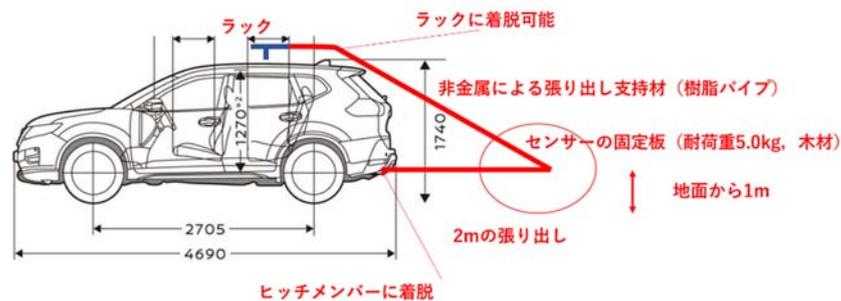


図 2.1 車載化ユニットの設計

### 2.2 電磁探査観測データの自動処理 AI 技術の開発

電磁探査による観測データの処理結果を元に、観測地域の地盤構造を自動推定する技術の開発を行った。

電磁探査観測では、観測した測線に沿って地中の比抵抗分布を得ることが出来る。一方で、観測データには地中や近傍の金属製品、電線の存在などによって発生する強いノイズの影響のために、比抵抗分布から推測される地盤構造は本来であれば連続的なものであるにも関わらず図 2.2 に示すように不連続なものとなる。

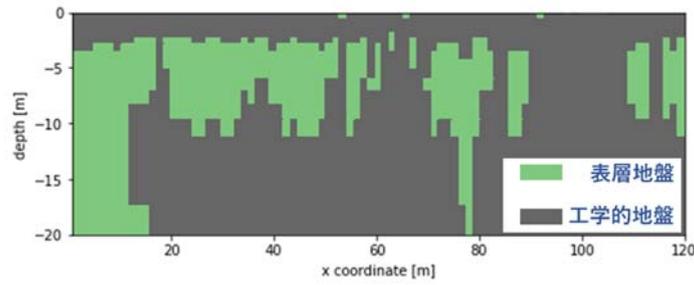


図 2.2 電磁探査観測から得られる地盤構造推定結果の例  
(比抵抗値に閾値を設け、2層地盤を仮定した場合)

このような不連続的な推定結果を補正し、連続的な地盤構造を推定するための手法として、本研究ではマルコフ確率場の手法を利用したノイズ処理手法を開発した。マルコフ確率場を用いたノイズ処理は、画像のノイズ処理などに使用される AI 技術の一種であり、以下に示す式を最大化することによって、観測結果  $\mathbf{d}$  を元に補正結果  $\mathbf{x}$  を得る手法である。

$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmax}} (P(\mathbf{x}|\mathbf{d}))$$

$$= \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmax}} \left( \frac{\prod_i p(d_i|x_i) \frac{1}{Z} \exp\left(\sum_{(i,j) \in \text{all pair}} \varphi(x_i, x_j|\theta)\right)}{\sum_{\mathbf{x} \in S} \prod_i p(d_i|x_i) \frac{1}{Z} \exp\left(\sum_{(i,j) \in \text{all pair}} \varphi(x_i, x_j|\theta)\right)} \right)$$

上式の右辺中における最大化の対象式は、観測データ  $\mathbf{d}$  を元に背後の物理量  $\mathbf{x}$  の事後確率分布を求めるベイズの式を示している。したがって上式は、観測された値から推定される、最も確率の高い物理量の値を求めることに相当している。また、式中における  $\varphi(x_i, x_j)$  の具体的な形を決める際に、互いに近い値や同一の値を取りやすいと期待される  $x_i, x_j$  の組に対して関数値が定義されるように  $\varphi$  を構成することにより、解として得られる物理量の分布はそのような期待が反映されたものとなる (図 2.3)。



図 2.3 マルコフ確率場によるデータ内のノイズ除去例

左：真のデータ分布に対してノイズが乗った観測データが得られた場合のノイズ除去例。  
右： $\varphi$  の構成イメージ。図の例では、あるピクセルが上下左右の隣接ピクセルと同一の値を取りやすいものと仮定している。

マルコフ確率場に基づく手法のこのような特性を利用し、本研究では電磁探査観測から出られるデータの有する、①地中内の埋設物に依存して、地盤の深度方向に長くノイズが乗りやすいこと②地表に点在する金属や電線に依存して、水平方向に断続的にノイズが乗りやすいこと、という 2つの性質を反映するような  $\varphi$  を試行錯誤によって決定した。最終的に得られた  $\varphi$  は水平方向にのみ長い依存関係を有するものとなり、このような  $\varphi$  を利用したノ

イズ処理モデルを図 2.3 の観測結果に適用することによって、図 2.4 に示すように実際の地盤構造分布とよく一致する推定結果が得られた。

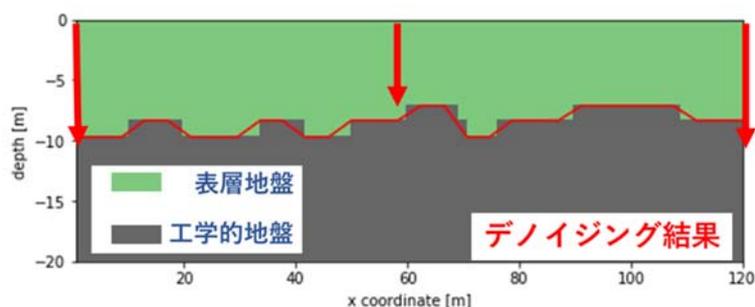


図 2.4 マルコフ確率場を用いたノイズ処理の結果  
(赤い矢印はボーリングデータから得られる表層地盤厚を示す)

### 3) 橋梁支承部付近の回転振動特性に着目した構造減衰評価システムの開発

#### 3.1 桁端部の動的特性と傾斜角

単純桁の場合の橋梁桁端部の模式図を図 3.1 に示す。車両通行などによって橋梁に鉛直たわみが生じるとき、桁端部では支承の支点を中心とした回転挙動を示すと考えられる。このとき、支点を原点(0, 0)とした場合、高さ  $H$ 、水平方向  $L$  に設置した動的挙動の計測点の  $t = 0$  [sec]における位置は  $(L, H)$  と表せる。支点を中心にしたたわみ角  $\theta(t)$  が生じたとき、計測点の水平方向変位  $y(t)$  を用いて次式のように表せる。

$$\theta(t) = \sin^{-1} \left( \frac{y(t)+L}{\sqrt{H^2+L^2}} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{L}{\sqrt{H^2+L^2}} \right) \quad (3.1)$$

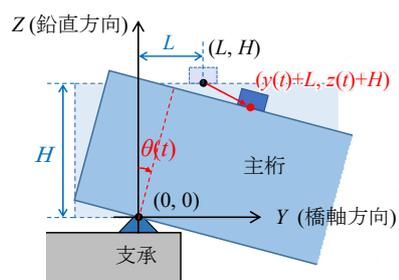


図 3.1 桁端部の動的挙動の模式図

#### 3.2 実橋梁の振動特性の分析

対象橋梁は2径間連続鋼箱桁形式であり、片側1車線の対面交通、交通量は毎時300~600台である。対象橋梁の概略図と3軸MEMS加速度センサ(M-A351、EPSON製)の設置位置を図3.2に示す。桁端部に設置した4つの加速度センサ(N-1、N-9、S-1、S-9)の支点からの位置は  $L = 0$  mm、 $H = 800$  mmとした。大型車が単独で通過したときのS-9地点での加速度から式(3.1)を用いて算出した傾斜角加速度とそれを積分した傾斜角速度を図3.3に示す。近年のMEMS式ジャイロセンサの分解能は数mdeg/secであることから、ジャイロセンサで直接傾斜角を計測できる可能性がある。

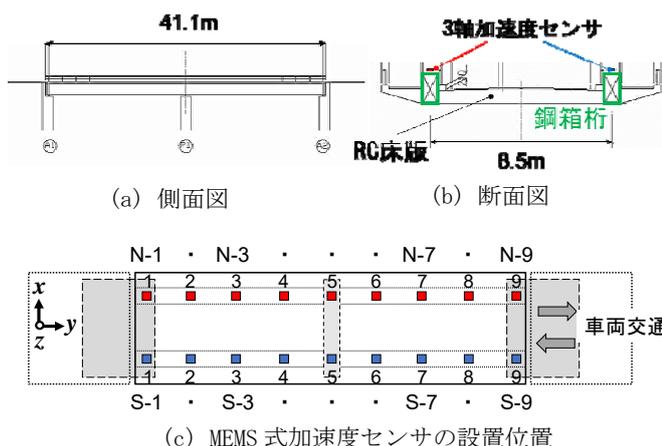


図 3.2 対象橋梁の概略図とセンサの設置位置

##### (a) 固有振動数

対象橋梁の固有周期を調べるため、加速度のパワースペクトル密度(PSD)を図3.4に示す。図3.4(a)は加速度センサS-3、S-7、N-3、N-7の鉛直(X)方向加速度から算出したPSDである。この図から3.8Hz、5.0Hz、5.6Hz、6.8Hzにピークがあり対象橋梁の卓越周波数と考えられる。一方、図3.4(b)は桁端部に設置した加速度センサ(N-1、N-9、S-1、S-9)の橋軸(Y)方向

加速度から算出したPSDである。  
**図3.4(a)**と比較すると支間中央部の鉛直方向加速度から算出した固有振動数と一致する。

(b) モード形状

対象橋梁の振動モード形状を調べるため、N-3の鉛直方向加速度を基準として各センサとの伝達関数を算出し、対象振動数におけるゲインと位相からモード形状を得た。鉛直1次振動モード(3.8Hz)と鉛直2次振動モード(6.8Hz)のモード形状を**図3.5**に示す。

(c) モード減衰比

つぎに、振動モード毎の減衰比の分析をRD法とハーフパワー法によって行う。バンドパスフィルタで対象振動モードの加速度波形を取り出した。加速度のパワースペクトル密度を算出する際、本研究では窓関数としてハン窓を用い、分析データ長さを200000として、窓長500、オーバーラップ率90%で区切った波形の重ね合わせから自由減衰波形を抽出して減衰比を推定した。表3.1に両手法の結果を示す。

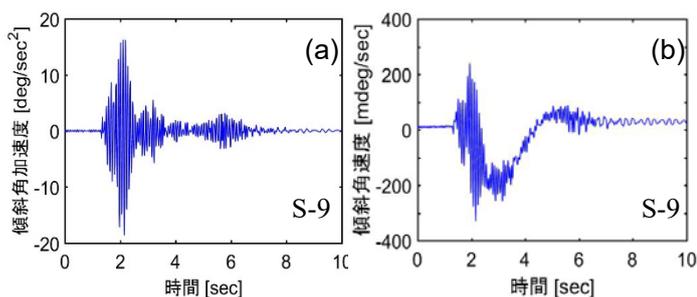


図 3.3 (a) 傾斜角加速度と (b) 傾斜角速度

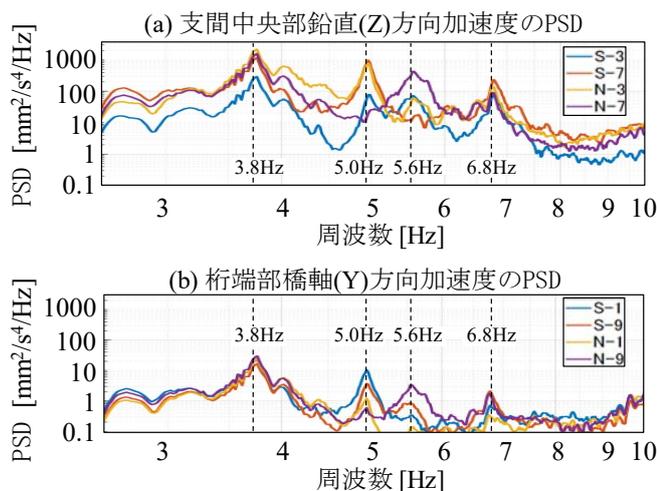


図 3.4 パワースペクトル密度の比較

### 3.3 減衰比評価方法の検討

減衰比の同定に必要な窓長とデータ点数の検討を行った。検討した窓長は5、10、15、20波形分の4パターンである(以下、窓長5、10、15、20と呼ぶ)。窓長が短いと対数近似の点数は少なくなるが、重ね合わせ数を増やすことができる。**図3.6**は窓長5、10の対数近似の一例であり、**図3.7**はデータ長( $n=100$ 秒、300秒、...19800秒)に対象振動数[Hz]を掛けて正規化したデータ長と対数近似の決定係数 $R^2$ の関係を表している。灰色の線( $m=1, 2, \dots, 11$ )は異なる時刻データでの結果を示しており、データ選択による分析結果の分散を考慮している。

窓長5では決定係数が0.8前後で収束するが、窓長10は決定係数が0.95前後になり近似精度が高い。**図3.8**はデータ数と減衰比の関係を示しており、灰色の線が異なる時刻データ $m$ での減衰比 $\zeta(n, m)$ 、黒点がデータ数 $n$ 毎の平均減衰比 $\bar{\zeta}(n)$ 、赤線が全体の平均減衰比 $\bar{\zeta}_{all}$ であり、 $n$ が十分大きいとき $\bar{\zeta}_{all}$ を減衰比の収束値 $\bar{\zeta}^*$ としている。ここで提案する平均減衰比は以下の式で与えられる決定係数 $R^2$ を重みとした重み付き平均である。

$$\bar{\zeta}_{all} = \frac{\sum_n \sum_m R_{(n,m)}^2 \zeta_{(n,m)}}{\sum_n \sum_m R_{(n,m)}^2} \rightarrow \bar{\zeta}^* \quad (3.2)$$

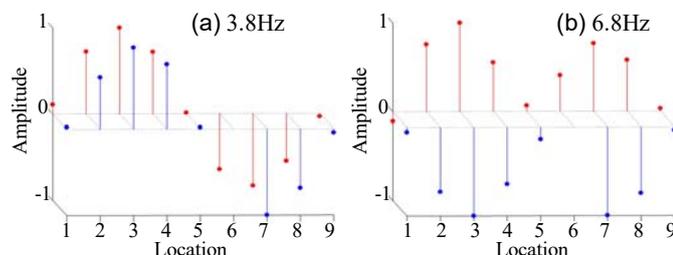


図 3.5 鉛直振動モード形状

窓長が15, 20と大きくなるほど決定係数は1に近づくが、重ね合わせ数が減るため減衰比の収束が鈍くなる。以上の検討の結果、最適な窓長は10程度、必要な正規化データ長は40000以上（3.8Hzで約3時間分）である。RD法を用いた減衰比の推定結果を表3.1に示す。

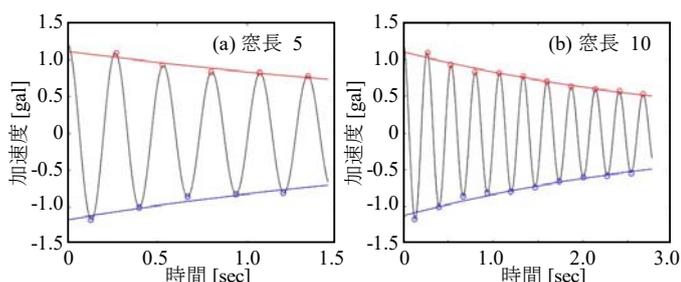


図 3.6 RD法による自由減衰波形と対数近似曲線の一例

### 3.4 モニタリングシステムの開発と試用

対象橋梁は山梨県甲府市の一般道路橋であり、9径間単独鋼桁橋で各支間長は約10m、片側1車線の対面交通で交通量は毎時600~900台である。計測地点は図3.9に示すように、第1・2径間の支間中央と支承部の3点（第1径間から順に計測点A~C）において、中央桁の上フランジ下側にMEMS型加速度センサ(EPSON, M-A550)をネオジム磁石によって強固に接着している。ソーラーパネルと12Vシールドバッテリーを用いて継続的な電気供給を可能にした。

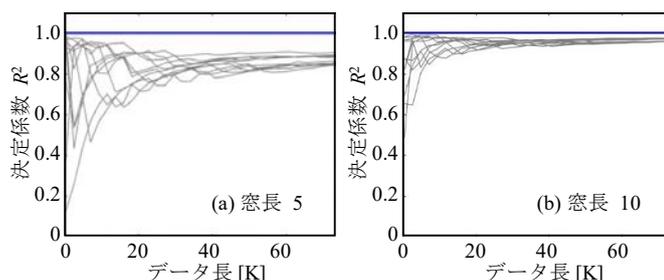


図 3.7 対数近似曲線の決定係数 $R^2$ とデータ長の関係

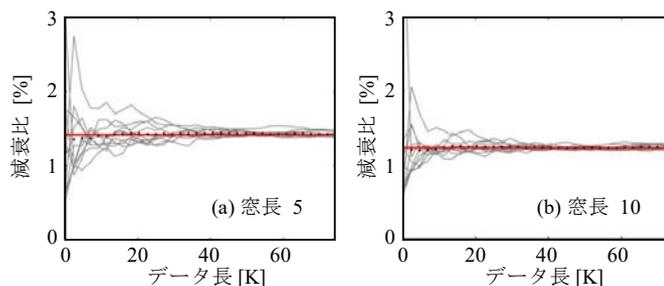


図 3.8 減衰比とデータ長の関係

### 3.5 減衰比の算出

気温の影響によって基線が数 $\text{mm/s}^2$ 程度変動するため、60秒移動平均フィルタを用いて基線補正を行った後に閾値（ $1.5\text{mm/s}^2$ ）以下の振動成分を常時微動とみなしてデータの抽出を行った。

RD法を用いて減衰特性の分析を行った。分析に必要なデータ長は3時間、窓長は10とした。RD法により得られた自由減衰波形と減衰包絡線の例を図3.10に示す。

抽出した常時微動データを気温毎に整理して減衰比の分布の算出を行った結果を図3.11に示す。

ここで、式(3.2)に示したRD法における決定係数を重みとした減衰比の同定手法を利用して、減衰比の気温による変動成分を多項式近似して得られた変動成分の曲線を図3.12の黒破線で示す。

表 3.1 減衰比の分析結果の比較

	ハーフパワー法							
	桁端部(橋軸(Y)方向加速度)				桁中央部(鉛直(Z)方向加速度)			
センサ	N-1	N-9	S-1	S-9	N-3	N-7	S-3	S-7
鉛直1次(3.8Hz)	1.41%	1.44%	1.43%	1.48%	1.36%	1.41%	1.37%	1.42%
鉛直2次(6.74Hz)	1.19%	1.21%	1.08%	1.07%	0.89%	0.98%	1.10%	1.00%
	RD法							
	桁端部(橋軸(Y)方向加速度)				桁中央部(鉛直(Z)方向加速度)			
センサ	N-1	N-9	S-1	S-9	N-3	N-7	S-3	S-7
鉛直1次(3.8Hz)	1.12%	1.14%	1.17%	1.14%	1.15%	1.16%	1.14%	1.14%
鉛直2次(6.74Hz)	1.75%	1.65%	1.70%	1.65%	1.40%	1.70%	1.38%	1.39%

### 3.6 まとめ

橋梁桁端部の動的挙動に着目して構造特性を把握する手法を検討し、対象橋梁の加速度からRD法を用いて減衰比を算出して分析方法を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 桁端部の3軸加速度とセンサの設置位置から傾斜角の算出方法を示し、実橋梁に適用する際のセンサの設置位置の検討を行った。
- 2) 実橋梁での計測を行い、桁端部に設置した加速度センサの振動データから傾斜角加速度を算出した。加えて、固有振動数の把握や、ハーフパワー法とRD法を用いた減衰比の同定を試みた。
- 3) RD法において窓長とデータ長を検討した結果、窓長約10、正規化データ長40k以上が最適であることを示した。
- 4) 決定係数で重み付け平均した減衰比の評価方法を提案し、実橋梁実験から、データ選択に依存せずに自動で減衰比を算出する方法を提案した。
- 5) 減衰比の確率密度分布を同定し、減衰比と気温の関係明らかにすることで外乱の影響を評価した。

減衰比の推定では固有振動数が高くなるにつれて精度低下があったため、手法の検討をさらに進めて行く。本研究では特に減衰比に着目してその分析方法を検討したが、計算過程で固有振動数や振動モード形を算出しているため、今後これらのパラメータを含めて総合的に評価する方法についても検討を行っていく。構造に起因する減衰について、気温以外の影響などの分析を今後進めていくことでヘルスマonitoringに役立てたい。

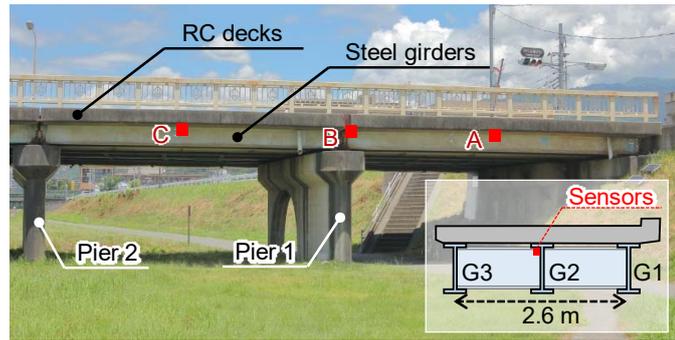


図 3.9 加速度センサの設置位置

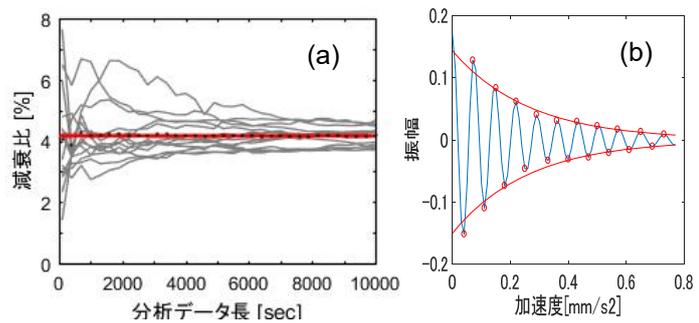


図 3.10 RD法を用いた減衰比の算出方法の検討

(a) 算出された減衰比とデータ長の関係

(b) RD法により得られた自由減衰波形と減衰包絡線の例

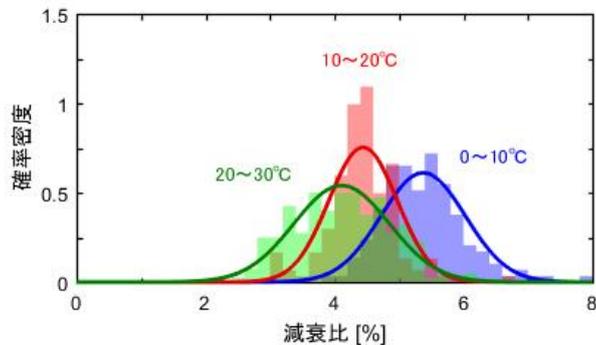


図 3.11 気温別の減衰比の確率密度分布

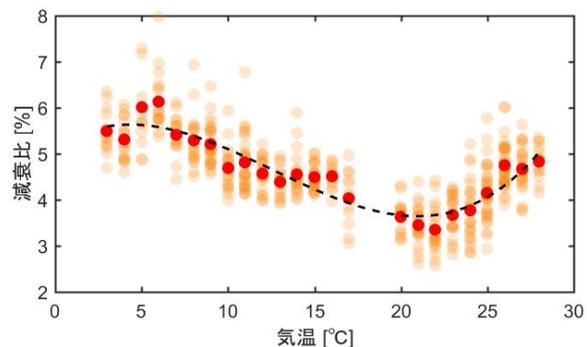


図 3.12 気温毎の減衰比の分布と重み付き平均および気温による変動成分の推定曲線

(3) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
第 22 回知能情報メカトロニクスワーク ショップ (画像処理を用いた舗装路面画 像からのクラックの抽出)	H29. 08. 27	電気学会	吉田純司
土木学会第 72 回年次学術講演会 (ディ ジタル舗装路面画像からクラックを抽 出するための画像処理手法)	H29. 09. 11	土木学会	吉田純司 小野義道
土木学会第 45 回関東支部技術研究発表 会概要集 (I-46、橋梁桁端部のたわみ角 に着目したヘルスマモニタリングの基礎 的検討)	H30. 03. 07	土木学会 関東支部	竹谷晃一 小野拓郎
土木学会第 73 回年次学術講演会 講演概要集 (CD-ROM Proceedings)	H30. 08.	土木学会	有賀和貴、 小野義道、 吉田純司
土木学会第 73 回年次学術講演会 講演概要集 (I-107、橋梁桁端部の動的 挙動に着目した構造動特性の分析法)	H30. 08. 29	土木学会	太田小春 竹谷晃一 佐々木栄一 小野拓郎
土木学会第 73 回年次学術講演会 講演概要集 (I-083、橋梁ヘルスマモニ タリングのための加速度応答に基づく減 衰評価方法の検討)	H30. 08. 29	土木学会	竹谷晃一 梅川雄太郎 佐々木栄一 小野拓郎
鋼構造年次論文報告集 (vol. 26、No. 56、動画像を用いた橋梁 の活荷重挙動の分析方法の基礎的検討)	H30. 11. 15	鋼構造協会	竹谷 晃一 吉田純司 太田小春 高木詩歩

(4) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の 種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし				

(5) 成果の実用化\*の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

1) 舗装路面の画像計測ユニットの開発と健全度評価手法の構築

本研究では、日常点検における道路路面の維持管理を客観的・効率的に行うことを目的として、路面をスクリーニング画像計測するための装置の開発と、計測画像を分析する手法の構築を試みた。計測装置については、当初の達成目標どおり、費用面や精度など実用的な範囲で構築することができた。また、分析手法についても、実際の路面で問題となる影や白線などに対処する手法を構築できたと考えている。ただし、現状ではいくつか問題点もあるため、以下に記載しておく。

- a) 今回の画像計測では市販のビデオカメラを使って撮影しているが、圧縮された動画ファイルから静止画を取得するのに時間がかかりすぎる。
- b) 撮影位置の情報と撮影した路面画像とのリンクができていない。

実用化に際しては、まず、これらの問題を解決する必要がある。現状での見通しとしては、市販のビデオカメラに代り CCD カメラで直接 PC に静止画像を記録し、かつ GPS 情報も同一の PC に同時計測することで解決できるものと考えている。また、これらの問題を解決後に、

実道路路面での計測を数多く行い、クラックの抽出精度を検証していく必要があると考えている。

## 2) 路面下の地盤の電磁探査ユニットの開発とAIによる地盤構造の同定

本研究における開発では、主に地盤構造の推定に着目した技術開発を行い、検証のための計測データでは十分な精度で推定可能であることが確認された。一方で、有識者を交えた産学官テーマ推進委員会における意見交換の中では、道路の維持管理業務においては特に地盤中の空隙などの異常を検知することの需要が高いため、この点に今後対応していくことの重要性について指摘された。そこで、本研究の今後の見通しとしては、地盤構造に加えて空隙や老朽化したパイプなどの異常を検知できるようデータ処理手法を改良し、業務上の需要により対応した技術とすることにより、成果を実用化したいと考えている。

## 3) 橋梁支承部付近の回転振動特性に着目した構造減衰評価システムの開発

本研究では対象橋梁を絞り分析を行い、構造減衰評価システムの開発を行ってきた。実務レベルで使える安価・簡易な健全度評価システムは、得られる健全度評価と地方公共団体が定める維持補修の対策区分を対応させるとともに、健全度評価の精度を向上させることが望ましい。今後、様々な橋梁の減衰比データを長期的に計測し、データベースを作成していくことで健全度評価に結びつけるシステムを構築することができれば、社会実装が可能になると考えている。現在はほかの構造形式の橋梁でも試行的に計測を開始しており、今後は山梨県と協力してデータベースの作成を進めていくことを検討している。これまでに開発した計測システムは、地方公共団体が管理する多くの橋梁で使えるように改良を続けており、設置が容易なMEMS式加速度センサーを利用し、かつソーラー発電によって長期計測が可能としている。今後、消費電力の削減やワイヤレス通信方式の改良を行っていくことでより実用性の高いシステムが構築できると考えている。

- (12) その他  
特になし。