

交通振動を用いた橋梁の損傷推定に関する基礎研究

A basic study on damage identification for bridges based on coupling vibration with moving vehicles

吉田郁政*, 原数馬**, 金哲佑***, 川谷充郎****

Ikumasa Yoshida, Kazuma Hara, Chul W. Kim and Mitsuo Kawatani

*博 (工), 武蔵工業大学教授, 工学部都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

** 元武蔵工業大学学生, 工学部都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

***博 (工), 神戸大学 COE 研究員, 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

****工博, 神戸大学教授, 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

This paper proposes a method to identify the damage of bridges based on coupling vibration with moving vehicles. The identification problem is formulated as a probabilistic inverse problem where an objective function and its minimization are incorporated. The objective function for the identification consists of observation and prior information terms. DFP method is used in order to minimize the objective function. To overcome the ill-posedness when the observation data is insufficient, prior information term is useful. Gauss and Laplace distributions are compared as prior information for the damage identification. Numerical simulation of the identification is demonstrated with a three-dimensional bridge model. The simulation result shows the possibility of damage identification from limited number of observation points.

Key Words: damage identification, health monitoring, bridge-vehicle interaction, inverse problem

キーワード: 損傷推定, ヘルスモニタリング, 車両走行相互作用, 逆問題

1. はじめに

20 世紀を新規大規模建設の時代とすると 21 世紀の日本は既存ストックの効率的活用, 維持管理の時代といえることができる。社会基盤の新規整備は今後も必要であるが, 相対的には既存施設の維持管理, 有効活用の比重が高まってくる。このような背景のもと既存施設の維持管理への投資を財務管理の視点を含め広い視野からとらえるアセットマネジメントの考え方が注目されている¹⁾。構造物の劣化に関する将来予測, 補修の意思決定を行ううえで, 現状の構造物の健全度の評価が必要不可欠であり, 適切なアセットマネジメントを行う上でも健全度評価は大変重要なテーマとなっている。

健全度評価のための様々な方法が提案されているが, 振動に基づく方法としては, 振動を与えてその応答を計測する衝撃振動試験や共振試験, 常時微動や地震時の応答を用いる方法などがある^{2)など}。衝撃振動試験や共振試験では与えられる振動の大きさや位置に制限がある。また, 一般にコストが高い。後者については観測するだけなので比較的成本は安い, 得られる情報の制限が大きい。自動車道や鉄道の橋梁や高架橋は車両の走行により振動しており, こうした交通振動に基づく健全度評価が可能であれば効

率的である。

観測情報からその構造パラメータを推定する逆問題は確率理論から統一的に考えることができ, なんらかの目的関数を設定して, その最小化を行っているとして解釈することができる³⁾。また, 基本となる基礎理論から多くの推定手法をその特殊な場合として誘導することができる。例えば, 確率場に対する補間法であるクリギング(kriging)もその特殊な場合として誘導することができる⁴⁾。さらに, 逆問題における中心的議論となる非適切性(ill-posed problem)への対処法, 特異値分解による方法(一般化逆行列)等の正則化法も確率論から統一的に解釈することができる⁵⁾。確率論に従って定式化を行う利点は, 推定精度の評価や情報量基準の利用⁶⁾, 最適観測点の議論^{7,8)}など, 様々な発展性があることが挙げられる。

振動に関する応答情報から健全度を推定する問題についても同様に目的関数の設定とその最小化から解釈することができる, カルマンフィルターを用いる方法も古くから行われている方法^{9), 10)}のひとつである。

本論文では道路橋を対象として, 走行車両による交通振動から橋梁の健全度を推定する方法について基本的検討を行った結果を報告する。交通振動のシミュレーションの方法として川谷らによる一連の研究^{11), 12)}が挙げられる。

川谷らの3次元数値解析法による橋梁の応答振動波形と計測応答波形の差分から目的関数を設定して、その最小化問題を解くことにより剛性分布を推定し、損傷している部位、及びその程度を推定する。計測情報だけから解を推定することが困難な場合には事前情報を目的関数に加えることがよく行われる。損傷同定のための適切な事前情報の与え方についても検討し解の安定化を図る。

2. 走行車両との連成振動の数値解析^{11),12)}

車両-橋梁連成系における振動方程式を作成するため、式(1)に示すようにLagrange運動方程式を用いる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{a}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial a_i} + \frac{\partial V}{\partial a_i} + \frac{\partial U_d}{\partial a_i} = 0 \quad (1)$$

ここに T , V , U_d はそれぞれシステムにおける運動エネルギー、位置エネルギー、散逸関数を、また a_i は一般化座標を示す。ただし、 \mathbf{M}_b , \mathbf{C}_b , \mathbf{K}_b , \mathbf{D} はそれぞれ橋梁の質量、減衰、剛性マトリックスおよび変位ベクトルとし、車両モデルとして図-1に示す8自由度系ダンブトラックを用いると、橋梁-車両連成系のエネルギー式は次の式(2)-(4)のように表される。

$$T = \frac{1}{2} \left[\dot{\mathbf{D}}^T \mathbf{M}_b \dot{\mathbf{D}} + \sum_{v=1}^{mv} \left\{ \sum_{k=1}^2 (m_{v1k} \dot{Z}_{v1k}^2 + J_{xv1k} \dot{\theta}_{xv1k}^2 + J_{yvkk} \dot{\theta}_{yvkk}^2) + m_{v22} \dot{Z}_{v22}^2 + J_{xv22} \dot{\theta}_{xv22}^2 \right\} \right] \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{2} \left[\mathbf{D}^T \mathbf{K}_b \mathbf{D} + \sum_{v=1}^{mv} \sum_{m=1}^3 \sum_{u=1}^2 \left\{ K_{vm1u} R_{vm1u}^2 + K_{vm2u} (R_{vm2u} - Z_{0vmu})^2 + 2 \cdot W_{vmu} Z_{0vmu} \right\} \right] \quad (3)$$

$$U_d = \frac{1}{2} \left[\dot{\mathbf{D}}^T \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{D}} + \sum_{v=1}^{mv} \sum_{m=1}^3 \sum_{u=1}^2 \left\{ C_{vm1u} \dot{R}_{vm1u}^2 + C_{vm2u} (\dot{R}_{vm2u} - \dot{Z}_{0vmu})^2 \right\} \right] \quad (4)$$

ここに J , g は車両質量の慣性モーメントおよび重力加速度を表す。添え字 v は橋梁上走行中の車両を、 k は車両の前後軸を示すインデックス ($k=1$:前軸, $=2$:後軸) を表す。 m は車両の各軸の前後輪を示すものであり、 u は車両の左右を表す ($m=1$:前輪, 2 :後輪, $u=1$:左側, 2 :右側)。ただし、“ \cdot ” は時間微分を意味する。また R_{vmu} , W_{vmu} および $Z_{0vmu}(t)$ はそれぞれ車両のサスペンションでの相対変位、各タイヤでの静的接地力および変位を示す変数で次のように定義する。

$$R_{v12u} = Z_{v12} - (-1)^u \lambda_{yv2} \theta_{xv12} \quad (5a)$$

$$R_{vm1u} = Z_{v11} - (-1)^m \lambda_{xvm} \theta_{yv11} \quad : m=1, 2 \quad (5b)$$

$$-(-1)^u \lambda_{yv1} \theta_{xv11} - Z_{vm2} + (-1)^u \lambda_{yv(m+1)} \theta_{xvm2}$$

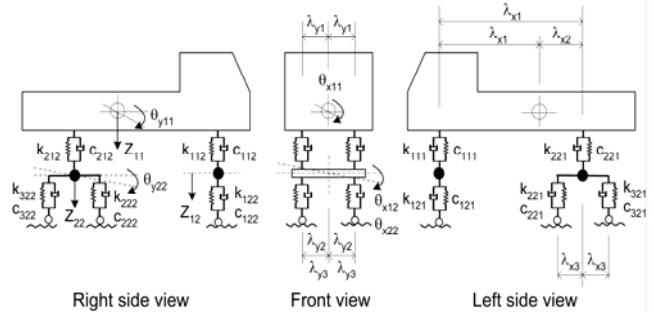


図-1 8自由度系ダンブトラックモデル

$$R_{vm2u} = Z_{v22} + (-1)^m \lambda_{xv3} \theta_{yv2} : m=2, 3 \quad (5c)$$

$$-(-1)^u \lambda_{yv3} \theta_{xv22}$$

$$W_{v1u} = \frac{1}{2} g \left[(1 - \lambda_{xv1} / \lambda_{xv}) m_{v11} + m_{v12} \right],$$

$$W_{v2u} = W_{v3u} = \frac{1}{4} g \left[(1 - \lambda_{xv2} / \lambda_{xv}) m_{v11} + m_{v22} \right] \quad (6)$$

$$Z_{0vmu}(t) = w(t, x_{vmu}) - Z_{rvmu} \quad (7)$$

式(7)の $w(t, x_{vmu})$ は車輪位置における橋梁変位を、 Z_{rvmu} はその位置での路面凹凸を表す変数である。

以上より、式(1)に式(2)-(4)を代入すると路面凹凸を有する橋梁と車両の連成振動方程式を誘導することができる。式(8)に橋梁-車両連成運動方程式のマトリックス形を示す。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{bb} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{D}}(t) \\ \dot{\boldsymbol{\delta}}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{bb}(t) & \mathbf{C}_{bv}(t) \\ \mathbf{C}_{vb}(t) & \mathbf{C}_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{D}(t) \\ \boldsymbol{\delta}(t) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$+ \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{bb}(t) & \mathbf{K}_{bv}(t) \\ \mathbf{K}_{vb}(t) & \mathbf{K}_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{D}(t) \\ \boldsymbol{\delta}(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_{bb}(t) \\ \mathbf{f}_{vv}(t) \end{Bmatrix}$$

ここで、添え字 b , v および bv は各々橋、車両および橋梁-車両連成項を表す。また、 $\boldsymbol{\delta}(t)$ は車両の変位ベクトルを示す。 $\mathbf{K}_{bb}(t)$ および $\mathbf{C}_{bb}(t)$ はそれぞれ車両の移動によって変化する橋梁の剛性および減衰マトリックスである。

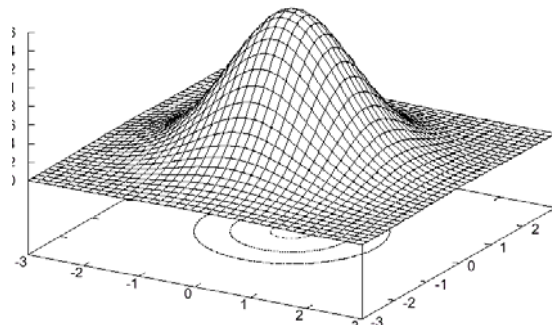
得られた橋梁-車両連成系の連立微分方程式はNewmark- β 法を用いて解くこととする。

3. 損傷推定のための定式化

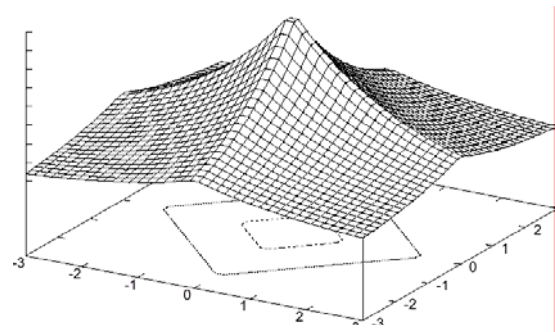
逆問題ははじめにでも述べたように、1)目的関数の設定、2)目的関数の最小化、の2つに分けることができる。以下それぞれについて簡単に述べるとともに、事前情報の確率分布の影響について考察する。

3.1 目的関数の設定

確率論から定式化を行う逆解析の基本的考え方は既往の文献³⁾などに詳細に述べてあるので、ここでは結果だけを簡単に示す。未知パラメタベクトル \mathbf{x} について期待値とその共分散行列が事前情報として与えられているとする。



(1) ガウス分布



(2) ラプラス分布

図-2 2次元空間における確率密度分布の鳥瞰図

$$\mathbf{x}_0 = E[\mathbf{x}], \mathbf{M} = E[(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T] \quad (9)$$

観測量ベクトル \mathbf{z} が次式で与えられ、

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (10)$$

\mathbf{v} は観測量誤差を表し、その共分散行列が与えられるとする。

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{v}\mathbf{v}^T] \quad (11)$$

未知パラメタと観測量誤差が互いに独立なガウス分布に従うとの仮定の下で逆解析のための目的関数は次のように誘導される。

$$J = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + \frac{1}{2}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x})) \quad (12)$$

事前情報について互いに独立でその標準偏差が全て同じ大きさとする次の形にまとめることができる。

$$J = \frac{1}{2}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x})) + w \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad (13)$$

ここで、 x_i, \bar{x}_i はそれぞれのベクトル $\mathbf{x}_i, \bar{\mathbf{x}}_i$ の i 番目の成分を表している。また、 w は事前情報の標準偏差の大きさから決まる重みである。

これに対して未知パラメタベクトル \mathbf{x} についてはガウス分布ではなく未知パラメタ間が独立なラプラス分布に従うと仮定する。この場合は次の目的関数が誘導される。

$$J = \frac{1}{2}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x})) + w \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i| \quad (14)$$

式(13)と式(14)によって得られる解の違いについて簡単に考察する。まず、観測情報と事前情報の関係を単純化して問題設定を行う¹³⁾。未知パラメタベクトルが2次元とし、それぞれの事前情報を

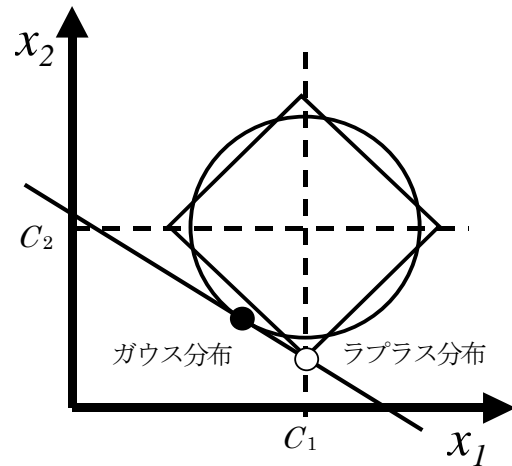


図-3 事前情報のタイプによる解の違い

$$x_1 = c_1 + u_1, \quad x_2 = c_2 + u_2 \quad (15)$$

観測方程式を

$$c_3 x_1 + c_4 x_2 = c_5 + v_1 \quad (16)$$

とする。ここで、 v_1 、及び、 u_1, u_2 は観測情報、事前情報の不確定性を表す確率変数である。不確定性が小さければその分散も小さくなる。不確定性が限りなく小さい場合にはこれらの確率変数は無視できることとなるが、その場合式(15)、(16)の3つの条件を同時に満たす未知パラメタは特殊な場合にしか存在しない。すなわち、それぞれの情報に誤差が混入しており、その誤差を表すのがこれらの確率変数であると解釈できる。そこで、誤差が全体的に小さくなるように未知パラメタを決める。しかし、この「誤差が全体的に小さくなる」と言う意味は不確定性を表す確率密度関数の形によって変わってくる。図-2 に事前情報の不確定性がガウス分布に従う場合とラプラス分布に従う場合の確率密度分布を示す。等高線は「誤差の程度」が同じ点を表しており、ガウス分布の場合は円形、ラプラス分布は四角形になっている。つまり、「誤差の程度」を表す等

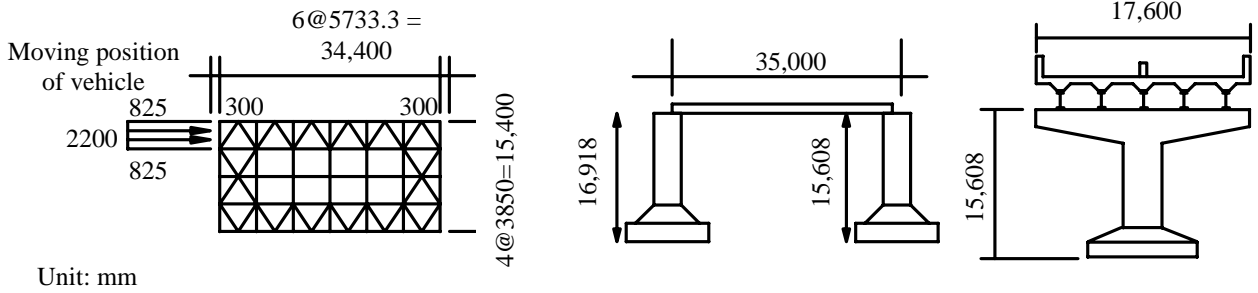


図-4 数値シミュレーションに用いた橋梁のモデル

高線は両者で異なっていることになる。

さらに単純化して、観測情報はきわめて正確で、 v_1 は0とする。そうすると、観測方程式を満たす未知パラメタの組み合わせの中で事前情報をできるだけ満たす点を探すことになる。図-3 にガウス分布とラプラス分布を用いた場合に求められた未知パラメタのイメージ図を示す。ガウス分布を用いた場合は x_1, x_2 ともに少しずつ事前情報からずれた点が求まっているが、ラプラス分布の場合は x_2 だけが事前情報からずれており、 x_1 は事前情報のままになっている。つまり、ガウス分布の場合は全体的に調整して観測情報を満たそうとするのに対して、ラプラス分布の場合はどれか特定の条件を動かして観測情報を満たそうとしていることになる。

本検討では非常に損傷が進みいたるところで剛性が低下しているような構造物は対象としない。本研究で検討しているような健全度評価が必要となるのは一見健全に見えるが特定の場所で損傷が生じている構造物と考える。その場合、全体的に未知パラメタを調整しようとするガウス分布よりラプラス分布の方が好ましいことになる。

3.2 最適化手法の適用

目的関数の最小化には多くの方法の適用が可能であり、基本的にはどの方法を用いてもよいが、本研究では最適化問題で用いられることが多い準ニュートン法のアルゴリズムを用いる。その計算手順を以下に示す¹⁴⁾。 \mathbf{x}_k は k ステップにおける未知量ベクトルを、 $f(\mathbf{x}_{k+1})$ は目的関数の値を、 $\mathbf{f}_x(\mathbf{x}_{k+1})$ は微係数ベクトル、 \mathbf{B} はヘッシアン逆行列を表している。

- (i) 初期点 \mathbf{x}_0 と正值対象な \mathbf{B}_0 を与え、 $k=0$ とする。
- (ii) $\mathbf{f}_x(\mathbf{x}_0)$ を求める。 $\mathbf{f}_x(\mathbf{x}_0) \doteq \mathbf{0}$ なら終了。
- (iii) $\mathbf{d}_k = -\mathbf{B}_k \mathbf{f}_x(\mathbf{x}_k)$ 。
- (iv) $f(\mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k)$ を最小または近似最小化する α_k を1次元探索で求め、 $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k$ とする。
- (v) $\mathbf{f}_x(\mathbf{x}_{k+1})$ を求める。 $\mathbf{f}_x(\mathbf{x}_{k+1}) \doteq \mathbf{0}$ なら終了。
- (vi) $\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$ 、 $\mathbf{y}_k = \mathbf{f}_x(\mathbf{x}_{k+1}) - \mathbf{f}_x(\mathbf{x}_k)$ と置く。
- (vii) BFGS, DFP 法などの公式より \mathbf{B}_{k+1} を計算する。
- (viii) $k = k + 1$ と置いてステップ(iii)にいく。

ヘッシアンの逆行列 \mathbf{B} に関する近似行列について、いくつかの公式が次のように得られている。

DFP 公式

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \frac{\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{B}_k \mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T \mathbf{B}_k}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{y}_k} \quad (17)$$

BFGS 公式

$$\mathbf{B}_{k+1} = \frac{\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} + \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{s}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} \right) \mathbf{B}_k \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} \right) \quad (18)$$

ここで、 \mathbf{I} は単位行列を表している。

このような最適化手法を用いて問題を解く場合、十分な精度の解が得られる前に収束と判断されてしまう場合がある。そのような場合にまたそこから計算をリスタートさせるとさらに解が改善される場合がある。これは数値微分を用いているため、あるいはヘッシアン行列の近似式を用いているため誤差が溜まってしまふためと考えられる。そこで、解の改善が見られない場合には一度ヘッシアン行列を単位行列に戻す、すなわち解の改善が保証されている最急勾配法によってもう一度自動的にリスタートするアルゴリズムとした。

4. 損傷推定のシミュレーション

本研究では基本検討として実測データではなく数値解析で求めた応答波形を観測情報と仮定して損傷推定のシミュレーションを行い、損傷推定手法の限界、基本的性質について検討を行う。観測情報として用いる応答波形には適宜ホワイトノイズを加えた。

4.1 対象としたモデルと主な条件

検討の対象とした橋梁モデルを図-4 に示す。検討対象橋梁は支間 34.4m の単純合成鋼桁橋である。4 車線を想定しており、その端の車線にトラックを走行させ、その時の交通振動を測定し、その応答振動から橋梁の健全度を推定する。なお、仮定している 3 次元橋梁モデルや路面凹凸データの詳細については文献 16) を参照されたい。

ここでは、橋軸方向部材の曲げ剛性とねじり剛性が損傷により同じ比率で低下すると仮定する。健全度をこの低下の率によって定義する。すなわちまったく損傷のない状態であれば 1.0 であり、曲げ剛性とねじり剛性が 70% まで低下している場合には 0.7 となる。観測情報はいくつかの点

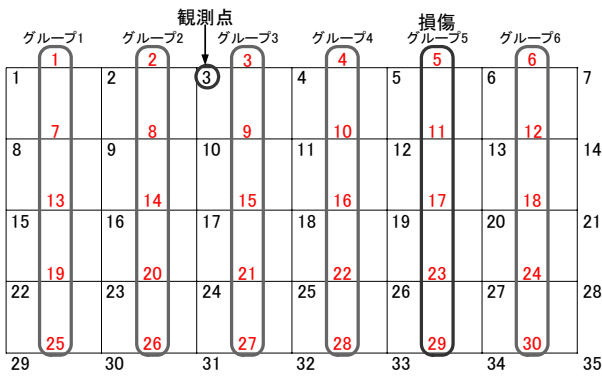


図-5 6未知量モデル 未知量と観測点の配置

における応答加速度時刻歴とする. すなわち, 目的関数の式(13)あるいは(14)における未知パラメタベクトル \mathbf{x} は各領域の健全度を表すベクトル, \mathbf{z} , $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ は観測および計算による応答時刻歴を表すベクトルとなる. \mathbf{x} の事前情報としては健全な状態である 1.0 を与えた. 観測誤差の共分散行列 \mathbf{R} は単位行列とし, 重み w は後述するパラメタスタディにより決めた.

4.2 目的関数のタイプの影響

前述の目的関数の事前情報項についてガウス分布あるいはラプラス分布を仮定する場合, すなわち, 式(13)と式(14)の違いについて検討する. 未知量は図-5に示す橋軸方向の部材として6つのグループに分割した健全度とした. すなわち, 横断方向には各部材ともに同程度の健全度を有すると仮定することになる. これは当然非現実的な仮定であるが, まずは単純なモデルで基本検討を行い, 後に詳細なモデルを用いた検討を行なう.

損傷はグループ5に与え, その健全度は0.7とした. それ以外のグループは健全度1.0とした. この条件で数値シミュレーションを行い, 応答波形を算出した. 観測点は図-5に示す観測点3の1点のみとする. この6分割モデルではノイズは与えずにそのまま観測情報として健全度評価のシミュレーションに用いる.

まず, 事前情報に対する重みを 0.0, すなわち事前情報を用いずに観測情報だけから推定を行った. その後, ガウス分布, ラプラス分布のそれぞれの場合について重みを数種類設定して各グループの健全度の推定を行った. そのうちガウス分布について特徴的な結果をまとめて図-6に示す. いずれのケースにおいても損傷点において健全度が低下していることがわかる. ただし, 事前情報の重みが小さい場合には本来健全度が1.0のグループも値が変動しており損傷箇所が不明瞭となっている. 重みを大きくすることでこうした変動は抑えることができるが, 損傷点における健全度の低下程度も抑えられてしまっている. つまり最適な重みの与え方があることがわかる.

ラプラス分布についても同様の検討を行い, ガウス分布, ラプラス分布それぞれの結果から最も良いと思われるケース, 及び事前情報なしのケースについてまとめて図-7に示す. 事前情報なしのケースに比較してガウス分布, ラプラス分布ともに事前情報を考慮したケースは健全部材

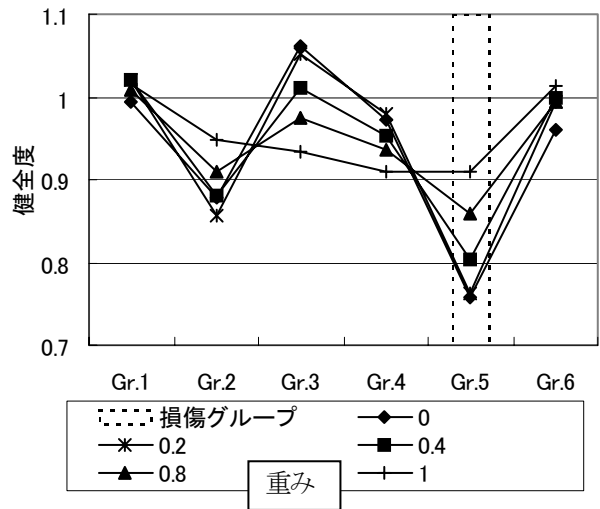


図-6 推定された健全度分布 事前情報: ガウス分布

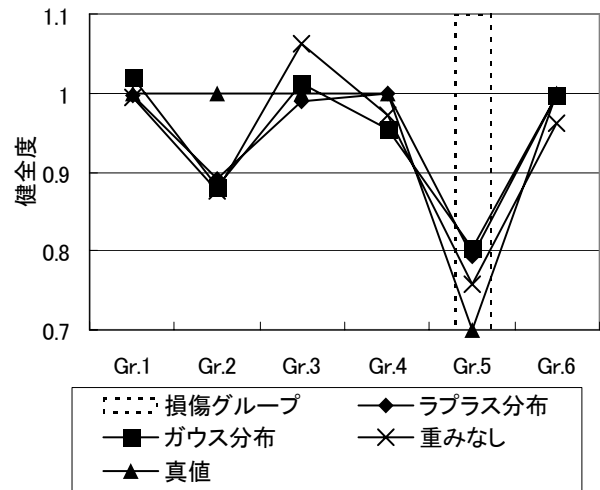


図-7 事前情報と推定された健全度分布
6未知量モデル

の健全度のばらつきを抑えており損傷部材を適切に推定している. 事前情報のタイプによる違いはあまり明確ではないが, 若干ラプラス分布に基づく事前情報の方が健全なグループの変動を抑えており, 前述の考察も踏まえると健全度評価のための事前情報としては適切と考えられる.

4.3 詳細なモデルによる推定

前節では6つの領域に分けてそれぞれの健全度を推定したが, 次に実問題を意識して領域をより細かく分けて健全度評価を行なう. 図-8に示すように未知量を橋軸方向の各部材ごとに分け, 30未知量モデルを設定する. 損傷は部材5に与え, その健全度を0.7に, それ以外は1.0とした. 観測点は図-8に示す観測点3あるいは4の1点の場合と2, 4, 6の3点の場合について検討を行った.

まず, 部材5の健全度を0.7, その他の健全度を1.0とした場合と全部材が健全な場合について交通振動の数値解析を行い, 各観測点における応答波形を算定した. 図-9に観測点4について, 全部材が健全な場合と損傷を与えた場合の応答加速度波形の比較を示す. 波形の後半で多少の

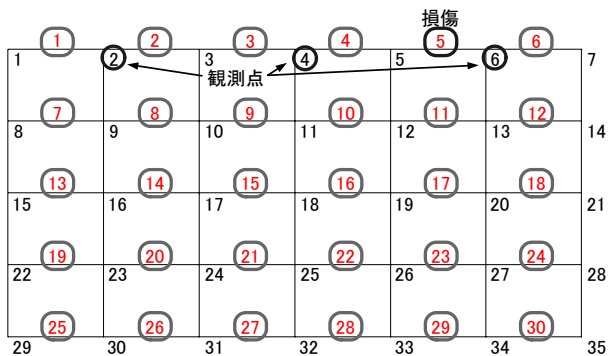


図-8 30未知量モデル 未知量と観測点の配置

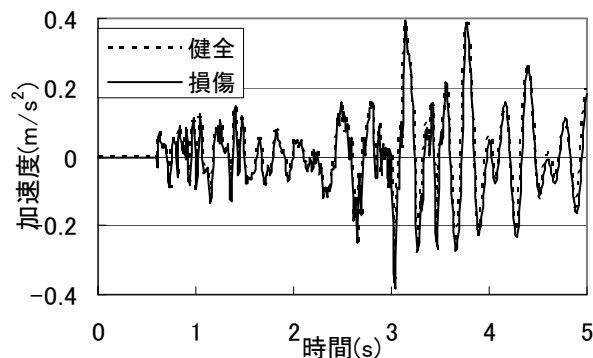


図-9 損傷の有無による応答加速度波形の違い
観測点4, 30未知量モデル, 部材5の健全度0.7

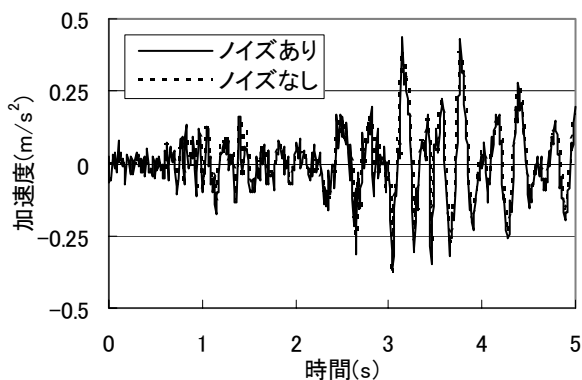


図-10 ノイズを加えた応答加速度波形の例
観測点4, 30未知量モデル, 部材5の健全度0.7

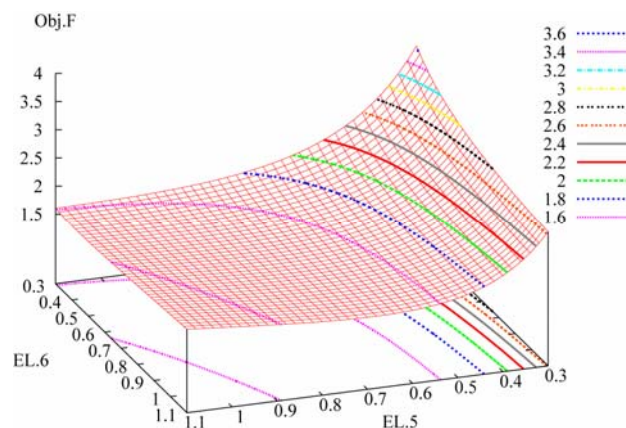


図-11 目的関数の分布状態
事前情報：ラプラス分布

部材5の代わりに部材6の健全度を小さくしても目的関数を小さく出来ることがわかる。このことは逆問題として部材5と6の健全度には強い共線性があることを示している。観測量だけから目的関数を設定するとさらに共線性が強くなり解を唯一に求めることが困難になる。

次に前述のDFP法を用いて目的関数の最小化を行い、30個の健全度の推定を行った。目的関数の収束過程の例を図-12に示す。まず、観測点数1として観測点3の場合について推定された健全度の分布を図-13に示す。事前情報を考慮していない場合と考慮している場合を図中の(1)(2)として示している。これらは図-8に示した平面図の面外方向に健全度をプロットした図となっている。事前情報を考慮する場合にはラプラス分布を仮定した。その重みは前節と同様に試行錯誤により適切な値を定めた。

事前情報がない場合には損傷点である部材5付近の健全度が小さくなっているものの、全体的に健全度の変動が大きく、部材5以外にも健全度が小さくなっている部材が複数あり、損傷位置を推定することが困難になっている。それに対して事前情報を導入した場合には全体的に変動が抑えられており損傷位置がある程度推定できる結果となっている。

図-14に観測点を4とした場合について同様に推定結果を示す。事前情報を考慮していない場合には全体的に推定

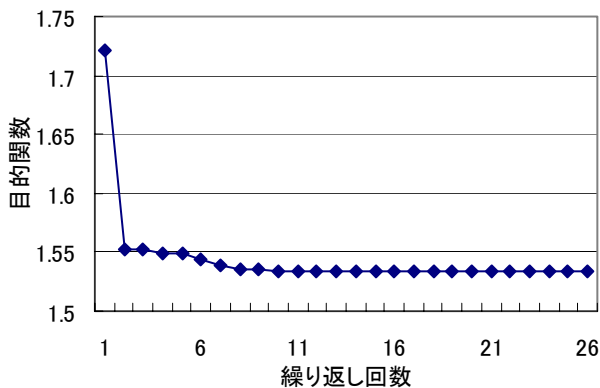
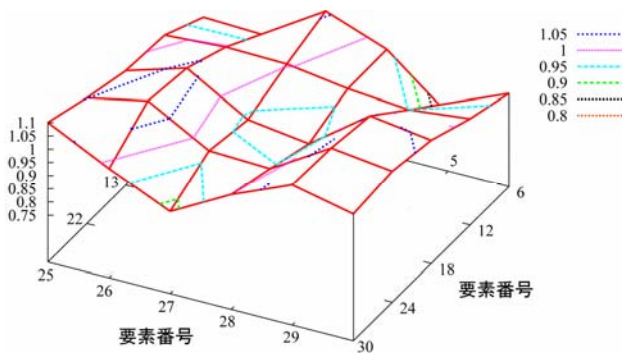


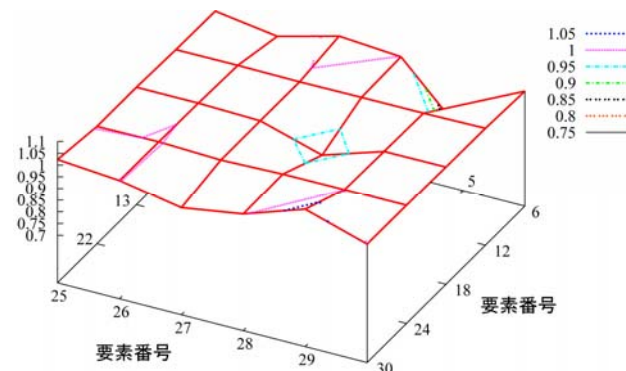
図-12 目的関数の収束過程, 30未知量モデル
観測点2,4,6

違いが見られるがその差は小さいことがわかる。損傷を与えた場合について、各波形の最大振幅に対してRMS比で8%のホワイトノイズを観測誤差として与えた。観測点4における応答加速度について、ノイズを与えた波形を図-10に示す。図-9との比較からも与えたノイズの程度がわかる。これを観測情報として以下の検討に用いる。

ラプラス分布を事前情報とした場合について、部材5、と6の健全度を変化させて目的関数を算定し、その分布状態を図-11に示す。部材5、6以外については健全度を1.0とした。目的関数値の分布は谷のような形状となっており、

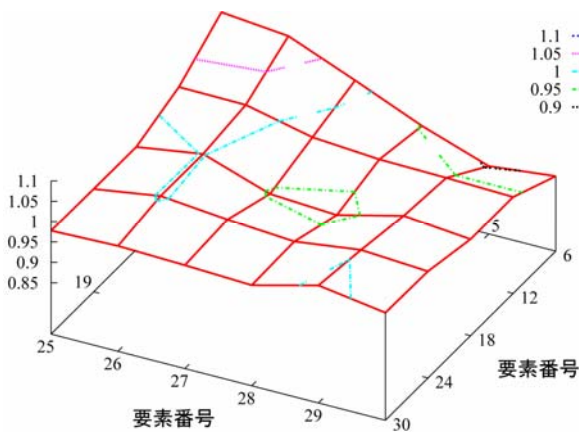


(1) 事前情報なし

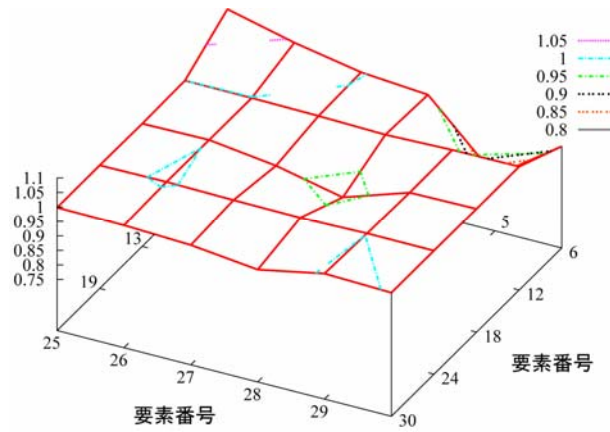


(2) 事前情報あり

図-13 推定された損傷位置 (1 観測点3, 事前情報: ラプラス分布, 損傷要素5)



(1) 事前情報なし



(2) 事前情報あり

図-14 推定された損傷位置 (1 観測点4, 事前情報: ラプラス分布, 損傷要素5)

された健全度が大きく、損傷点における健全度も多少は小さくなっているもののあまり明確ではない。また、他の部材において健全度が1.0よりも大きくなっている領域があり、やや不自然な結果となっている。しかし、事前情報を考慮することによりこうした不自然な推定は抑えられる傾向にある。図-13と図-14を比較した場合、事前情報なしの場合には推定された健全度分布の傾向が大きく異なっているが、事前情報を導入することにより比較的類似の結果が得られており、両図とも部材5における健全度の低下を識別することができる。このように事前情報を導入することにより安定した推定となっていることがわかる。

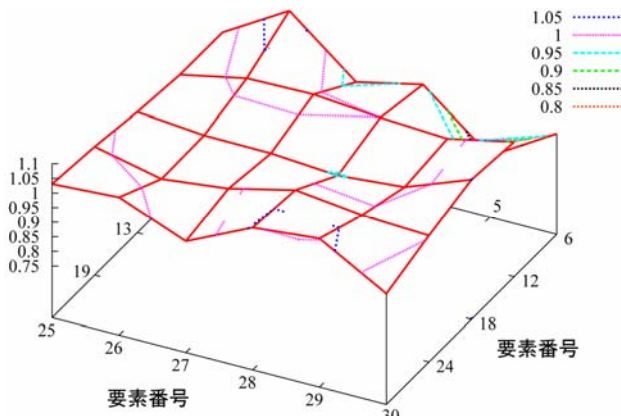
図-15に観測点2, 4, 6の3点の場合について同様に健全度の推定結果を示す。事前情報がない場合も観測情報が増えた分、多少改善された推定となっており、部材5付近で健全度が小さくなる大まかな傾向は把握できるが、やはり全体的変動が大きく、損傷位置を推定することはやや困難である。それに対して、事前情報を加えたケースでは全体的な変動が抑えられ、損傷位置の健全度の低下が相対的により明確になっている。しかし、観測点数が1点のケースである図-14に比較してさほど大きな改善とはなっていない。このことは観測点2, 6の情報が観測点4の情報との独立性が低いことを示唆しており、観測点を増やした

効果あまり大きくなかったことを示している。適切な観測点数、及び観測点位置の検討については今後の課題としたい。

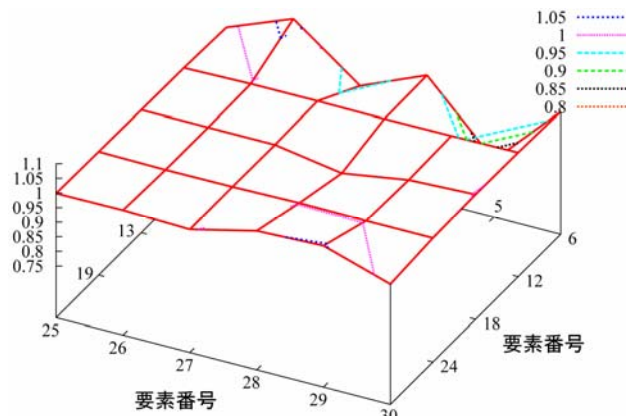
5. 結論

本論文では交通振動による橋梁の健全度評価の方法について基本的な検討を行った。その主な結論は次のようにまとめることができる。

- 1) 3次元モデルに基づく交通振動解析による応答波形と観測による応答波形の差分、および事前情報項から目的関数を設定し、その最小化問題から各部位の健全度を推定する方法を示した。
- 2) 事前情報はガウス分布、ラプラス分布のどちらでも大きな違いは見られなかったが、若干後者の方が健全度評価には好ましい。
- 3) 事前情報の重みの与え方によって推定結果は大きな影響を受けるため、適切な重みの与え方を決める必要がある。
- 4) 本例題モデルにおいては未知量を数十としても1点における観測情報から損傷位置、および程度を大まかに推定することができた。



(1) 事前情報なし



(2) 事前情報あり

図-15 推定された損傷位置 (3 観測点2,4,6, 事前情報 : ラプラス分布, 損傷要素 5)

事前情報の大きさの与え方に関する研究としては、情報量基準 AIC や AIBC を用いる本城らの一連の研究⁶⁾や吉田らの研究¹⁵⁾が挙げられる。こうした考え方の導入や新たな事前情報の与え方については今後の課題としたい。さらに、適切な観測点配置^{7,8)}についても今後の課題である。以上の課題も含めて、走行車両による交通振動の室内実験を行い、本論文で示した健全度評価法の適用性について検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会, 特集社会資本へのアセットマネジメント導入に向けて, 土木学会誌, Vol.89, 8月号, 2004
- 2) 地盤工学会, 土構造物と基礎の健全性診断技術に関する研究委員会, 活動成果報告書, 1999
- 3) 吉田郁政, 黒瀬浩公, 福井史朗: 確率論に基づく逆解析手法の基礎研究, 土木学会論文集, 第 483 号/I-26, pp.61-68, 1994
- 4) Hoshiya, M. and Yoshida, I., Identification of Conditional Stochastic Gaussian Field, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.122, No.2, pp.101-108, 1996
- 5) 吉田郁政: 未知パラメタ空間の基底変換を用いた逆解析, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.205-215, 1997
- 6) 本城勇介: 講座・地盤工学における逆解析・5. 逆解析における事前情報とモデルの選択, 土と基礎, 43-7, 43-8, 1995
- 7) 本城勇介, 工藤暢章: 情報エントロピーによる逆解析のための観測計画の評価方法に関する基礎的考察, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.321-333, 1998
- 8) 吉田郁政, 佐々木卓也, 星谷勝: 逆解析によって推定されたモデルの信頼度と最適観測点位置, 応用力学論文集, pp.109-116, 1998
- 9) Yun, C.-B. and Shinozuka, M.: Identification of Nonlinear Structural Dynamic Systems, ASCE, J. Struct. Mech., Vol.8, No.2, pp.187-203, 1980
- 10) Hoshiya, M. and Saito, E.: Structural Identification By Extended Kalman Filter, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.110, No.12, pp. 1757-1770, 1984
- 11) 川谷充郎, 山田靖則, 嶽下裕一: 三次元車両モデルによる桁橋の動的応答解析, 土木学会論文集, 第 584 号/I-42, pp.79-86, 1998
- 12) Kim, C.W., Kawatani, M and Kim, K.B.: Three-dimensional dynamic analysis for bridge-vehicle interaction with roadway roughness, Computers and Structures, Vol.83/19-20, pp.1627-1645, 2005.
- 13) 吉田郁政, 佐藤忠信: モンテカルロフィルタを用いた排他的非ガウスプロセスノイズによる損傷同定, 構造工学論文集, Vol.48A, pp429-436, 2002
- 14) 嘉納秀明: システムの最適理論と最適化, コロナ社, 1987
- 15) 吉田郁政, 佐々木卓也, 星谷勝: 拡張目的関数によるモデル化誤差の影響を考慮した逆解析, 応用力学論文集, pp.65-72, 1999
- 16) Kawatani, M., Kobayashi, Y. and Kawaki, H.: Influence of Elastomeric Bearings on Traffic-Induced Vibration of Highway Bridges, Transportation Research Record, No.1696, Vol.2, pp.76-82, 2000

(2006年4月13日 受付)