



## ニューラルネットワークを用いた 橋脚の地震時リアルタイム損傷判定法に関する検討

横山功一<sup>1)</sup>、原田隆郎<sup>2)</sup>、黒田 聡<sup>3)</sup>、A.K.M. Rafiquzzaman<sup>4)</sup>

- 1) 正会員 茨城大学工学部都市システム工学科、教授 博士(工学)  
e-mail : yokoyama@mx.ibaraki.ac.jp
- 2) 茨城大学工学部都市システム工学科、講師 博士(工学)  
e-mail : harada@mx.ibaraki.ac.jp
- 3) 正会員 日本交通技術株式会社技術開発部、修士(工学)  
e-mail : s-kuroda@jtc-con.co.jp
- 4) 茨城大学ベンチャービジネスラボラトリー、研究員 博士(工学)  
e-mail : rafiq@mx.ibaraki.ac.jp

### 要約

1995年の阪神淡路大震災のように、人口が密集した都市で大地震が発生した場合、道路橋を含む交通システムが被災することにより、交通機能や復旧作業に大きな支障をきたすことが予想される。それゆえ橋梁構造物に関しては、地震発生直後の交通網の被災情報を提供し、被災度の軽減、被害の拡大防止、及び復旧作業の補助を行うための地震時リアルタイム損傷検知システムが必要であると考えられる。本研究では、ニューラルネットワーク (Neural Networks : NN) を用いた地震時リアルタイム損傷検知システムにおける橋脚の損傷判定法を提案した。損傷判定法では、まず NN を用いて健全時の構造システムの同定を行う。次に橋脚構造の同定が行われた NN を用いて、地震を受けた場合の出力値 (NN 予測値) と橋脚の応答計測値 (実測値) の間に生じる誤差 (NN 予測誤差) から損傷判定を行う。ここで、NN 予測誤差の評価指標としては、実測値と NN 予測値における振幅比と位相差を選定した。そして、独立行政法人土木研究所で行われた RC 単柱の加振実験のデータを用いて、提案した損傷判定法の検証を行った。その結果、振幅比と位相差の二つの評価指標が損傷程度 (固有周期変化・減衰定数変化) とよく一致することを確認した。また、提案した損傷判定法は、周波数領域の解析手法に比べてより迅速に損傷情報を提供することが可能である。

キーワード : 道路橋、橋脚、地震防災、リアルタイム、損傷判定、ニューラルネットワーク、動的応答計測、構造同定

### 1. 序論

平成7年の兵庫県南部地震は都市を直撃した大規模地震であったことから、都市インフラの被害は深刻で、その被災状況の把握や復旧活動には多くの時間と費用が費やされた。さらに、平成12年鳥取県西部地震、平

成 13 年芸予地震、平成 16 年新潟県中越地震などが相次いで発生しており、次なる大地震に備えて、地震被害の迅速な把握、インフラ構造物の被災箇所の検知が可能となる技術開発が喫緊の課題となっている。インフラ構造物の 1 つである道路施設は緊急避難路として、また、救命活動上の重要な役割を担う施設であり、地震後の二次災害の防止や被災状況の迅速な把握が不可欠であり、地震防災分野において発展が必要とされている。また、国際的な視点からも、1999 年の台湾の集集地震、トルコでのコジャエリ地震、デュズジェ地震、2001 年のインド西部地震等において、主な被害は建築物であったが、その被災度判定に高度な専門性と多大な時間を要している。このような観点から、地震被害を対象にした構造物の被災診断システムの開発が進められており、例えば小林ら<sup>1),2)</sup>は橋脚を有する道路橋を対象として地震時の直後情報から、中村ら<sup>3)</sup>、古田ら<sup>4)</sup>は多自由度の建築構造物を対象として常時のモニタリングデータから正確性、信頼性を重視した健全性評価手法を提案している。

一方で、リアルタイム性を重視した地震早期検知システムや早期地震警報システムに関する新技術の研究開発も活発に行われている。神田ら<sup>5)</sup>は、ニューラルネットワーク (NN) を用いて、現在試験的に稼働させている地震早期検知システムによる震源パラメータの推定精度を向上させることに成功している。また、地震動の初期微動を検知して過去の鉄道被害状況のデータベースを参照し警報判断を行うユレダスは実用的に用いられ、実績をあげてきた。交通機関としては高速道路も直前の地震警報の提供が有効な事例として挙げられる。しかし、鉄道は列車自動制御装置により走行中の列車に瞬時に情報伝達できるのに対し、現状では高速道路を走行中の車両にリアルタイムに一齐通報する手段がないが、専用の安価な受信機の作成・普及も考えられるし、21 世紀に実用化されるだろう自動車走行レーンなど、車と道路が情報交換するシステムにおいては、緊急警報のひとつとして地震直前警報は必須のものとなるであろう。

このような背景から道路橋においては、即時情報から迅速に構造物の損傷有無を検知することにより走行中の車に対する警報を発信（一次被害の軽減）し、この結果と直後情報による詳細な解析結果から交通規制の判断（二次被害の拡大防止）を行い、さらに地震後に得られている時刻歴応答波形など利用できる全ての情報から、効率的な震後対応や復旧活動の事前情報収集や被災状況の正確な把握等を行うことのできる地震防災システムが求められる<sup>6)</sup>（図 1）。

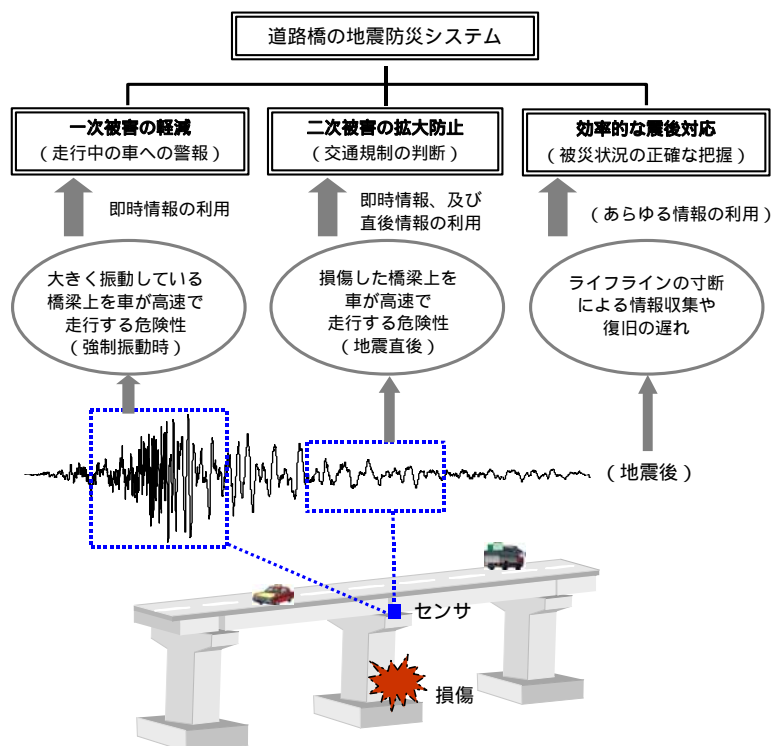


図 1 道路橋の地震防災システムの構想

-このような地震防災システムの構築には、構造物のセンシングにより取得した情報による構造同定技術が不可欠である。伝統的な多種多様の構造同定手法がある中で、非線形問題の同定方法論として、任意の入出力間の写像関係を記述できるニューラルネットワーク (NN) の土木、建築、機械などの分野における構造同定・損傷検知に対する適用が広がっている。その中で、地震損傷に関連したものと見ると、例えば佐藤ら<sup>7)</sup>は、非定常外力を考慮した震動制御アルゴリズムを構築する手段として NN を利用しており、線形地震応答データを用いて剛性や減衰定数などの動特性の推定誤差を減少させることに成功している。楊ら<sup>8),9)</sup>は、オンライン実験に関連して NN を用いて履歴特性の推定を行っており、水野ら<sup>10),11)</sup>は、振動応答推定、履歴挙動のモデリングを行っている。また、佐藤ら<sup>12)</sup>は NN とカルマンフィルタを併用して用いることにより構造物が非線形応答を示す場合にも、動特性を同定し、応答のシミュレーションができることを明らかにしている。カルマンフィルタは振動方程式に基づいた状態方程式、および観測方程式により構造物の動特性を推定するパラメトリック同定手法として用いられる。これに対して NN による同定手法は構造物の工学的な物理式を必要としないノンパラメトリック手法として用いられる。NN 手法は構造物のモデル化が不要なため、未知の構造システムにも適用できるメリットがある<sup>13)</sup>。また、パラメトリック手法と比較した場合、例えば長大吊橋のような、ケーブル、ハンガーシステム、主塔、アンカレイジ及び主塔基礎という構造的に性格の異なる部材の組み合わせで構成されている崩壊メカニズムが複雑な構造物にも適用可能性が期待できると考えている。

本研究では、NN を利用した構造同定手法を損傷判定システムの一部として利用し、地震時の即時情報を用いて図 1 に示したような、一次被害軽減のためのリアルタイム性を有し、さらに二次被害防止と地震後の被災状況の把握にも役立つ損傷情報を提供することのできる地震時リアルタイム損傷判定システムの構築を目標とする。しかし、NN はノンパラメトリック手法であり、解析結果から直接、損傷程度を表す工学的な数値が得られないため、数値を判定基準とした正確な損傷程度の判定には不向きである。そこで、本研究ではリアルタイム性を損なうことなく、固有周期や減衰定数などの損傷程度をより簡便に評価するための指標とし、構造物の応答 (実測値) と NN による予測値<sup>3),4),14)</sup> とから求まる振幅比と位相差を利用した損傷判定法を提案する。

本研究では、このような地震時リアルタイム損傷判定法を橋脚に適用し、RC 単柱の加振実験により得られる実験データを用いて、RC 単柱の損傷程度と振幅比および位相差との関係を分析するとともに、提案する損傷判定手法の妥当性を確認する。そして、リアルタイム損傷判定法の適用可能性について検討する。

## 2. 動的情報を利用した既往の損傷判定 (検知) 手法

### 2.1 二次被害拡大防止及び災害後の被災度把握のための損傷度判定システム

小林ら<sup>1),2)</sup>は、図 2 に示すように地震直後の構造物における自由振動データの高速フーリエ変換 (FFT) から固有周期を求め、さらにその値から応答塑性率を推定するシステムを提案している。このシステムは、地震直後における通行可否の判断による二次災害の防止と効率的な震後対応に必要な道路ネットワーク情報の収集・提供、及び地震後の中長期復旧計画の合理的な策定に必要な自己損傷情報の提供を目的としている。交通機能への影響を考慮すると、特に都市部の交通は簡単に規制することはできないことから、判断指標として工学的に信頼性の高い数値が必要であり、損傷程度と関連深い数値である固有周期を高速フーリエ変換 (FFT) により算定している。そして、固有周期から求めた応答塑性率と、変位データから直接求めた応答塑性率とが、損傷程度と比例して概ね変化の傾向が一致したことが報告されている。

### 2.2 NN を用いた常時モニタリングによる損傷検知システム

Nakamura ら<sup>3)</sup>は、構造物の常時微動をモニタリングし、NN を用いて損傷検知を行うシステムを提案している。この損傷検知システムは図 3 に示すように、兵庫県南部地震により大きな損傷を受けた 7 階建鋼構造物を対象として、建物の補修前後の常時微動による応答の計測データと NN を用いて、補修前後の応答の違い

を RMS により評価する。NN の入出力関係を各階の振動方程式に基づき、質点の相対変位・相対速度・絶対加速度を用いた場合、NN 予測誤差である RMS (Root Mean Square) と損傷程度 (固有周期) の変化の傾向が概ね一致したことが報告されている。

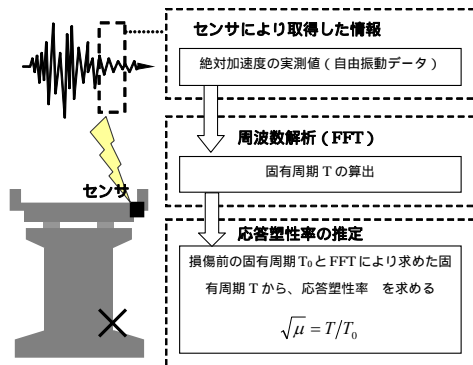


図2 直後情報を利用した損傷度判定システム

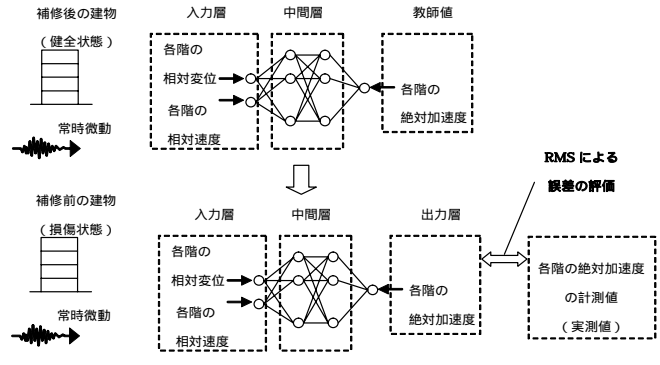


図3 常時モニタリングによる損傷検知システム

### 2.3 NN を用いた橋梁構造物全体系の地震時リアルタイム損傷検知システム

Xu ら<sup>14)</sup>は、図4に示すような地震力による構造物の強制振動データと NN を利用し、リアルタイムに損傷検知を行うシステムを提案している。これは本研究と同様に、大地震時の一次被害の軽減を主な目的としたシステムである。この損傷検知システムは、長大橋梁等の構造システムが複雑な構造物を対象として、損傷有無の検知を行うものである。NN の入出力関係は、長大橋梁を対象とした場合、構造的な理由から中央径間中央速度、中央径間 1/4 点速度、アンカレイジ加速度の3種類を選んでいる。このシステムは、出力層側のデータは入力層側のデータに比べて時刻的に 1 ステップ先の応答データを用いて、よりリアルタイムな応答予測・損傷検知を行おうとするものである。NN 予測誤差の評価は、式(1)に示す RRMS (Relative Root Mean Square) により評価する。これは強制振動時のデータが時刻によって大きく振幅のオーダーが異なるため、RMS を同じ次元の実測値で除すことにより、その影響を取り除いた指標である。ただし、 $M$  はデータ個数、 $m$  個目のデータの NN 予測値と実測値をそれぞれ  $a_m$ 、 $b_m$  とする。なお、RRMS と損傷程度の関係は、明確ではない。

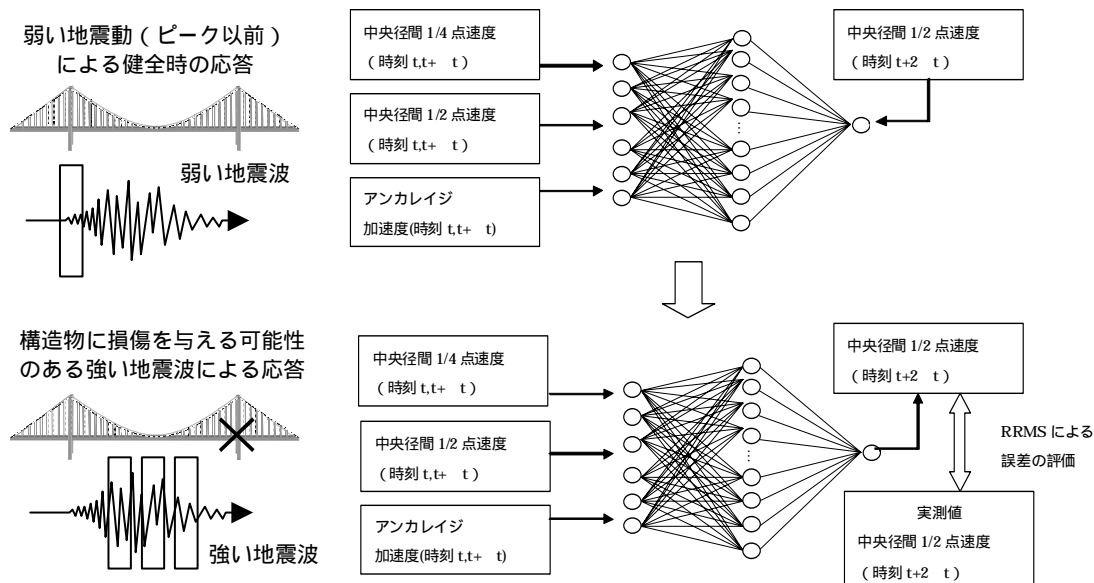


図4 NN を用いた長大橋梁構造物全体系のリアルタイム損傷検知システム

$$RRMS(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (a_m - b_m)^2}}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (b_m)^2}} \quad (1)$$

### 3. ニューラルネットワークを用いた橋脚のリアルタイム損傷判定法の提案

本研究は、ニューラルネットワーク (NN) 手法を用いて、大地震時の道路橋における迅速な警報発令等一次被害軽減、及び二次被害対応や災害後の被災状況の把握に役立つ情報を提供するための地震時リアルタイム損傷判定法を提案するものである。大地震時に走行中の車に向けた警報発信や交通規制の判断を行うためには、迅速かつある程度の正確な指標によって判断しなければならない。しかし、大地震時における構造物の強制振動データの高周波フーリエ変換 (FFT) から構造物の固有周期を得ようとした場合、損傷程度が増大するほど構造物の共振曲線のピーク値が明確に現れなくなるため、必ずしも正確な値が得られるとは限らない。また、高速フーリエ変換にはある程度データ量が必要なため、時間を要する。

以上の理由から、本研究では NN を利用した損傷同定システムの出力から、橋脚の固有周期・減衰定数変化の傾向をある程度正確に把握するための損傷判定法を提案する。以下では、本研究で提案する NN を用いた地震時リアルタイム損傷判定法の概要、リアルタイム性、損傷判定アルゴリズムについて述べる。

#### 3.1 ニューラルネットワークを用いた橋脚のリアルタイム損傷判定法の概要

本研究で提案する、NN を用いた地震時リアルタイム損傷判定法 (本手法) の概要を図 5 に示す。本手法では、はじめにセンサから構造物の地震応答データを取得する。次に、取得したデータから NN の学習機能を利用して橋脚の健全時構造システムを同定する。NN では一度構造同定を行えば、NN の前向き演算機能を利用して、同定した健全構造システムの応答予測値 (以下 NN 予測値とする) を算定することが可能である。以上に述べたシステムは Nakamura ら<sup>3)</sup>や Xu ら<sup>14)</sup>により既に構築されているが、本研究では、一次被害や二次被害対応、及び被災状況の把握を行う目的のため、NN 予測値と実測値の誤差 (以下 NN 予測誤差とする) から橋脚の損傷程度の変化を評価する。ただし、NN はノンパラメトリック手法であるため、解析結果から直接、工学的に損傷を表す数値は得られない。そこで、構造物の損傷前後において共振応答の性質が変化した場合、NN 予測誤差が生じるメカニズムに着目し、NN 予測誤差である振幅比と位相差から損傷程度 (固有周期と減衰定数の変化) の傾向を評価することとした。このメカニズムは振動工学およびニューラルネットワークの計算アルゴリズムをふまえたものであり、橋脚のような 1 自由度系モデルの応答値に近似して考えられる構造物の損傷ならば、理論的には振幅比変化が概ね固有周期変化を表現し、位相差が固有周期変化と減衰定数変化の両方の変化を反映した変化の傾向を示す。本研究では、この考え方を利用し、NN 予測誤差 (振幅比・位相差) から損傷程度 (固有周期と減衰定数の変化) をリアルタイムに評価する。

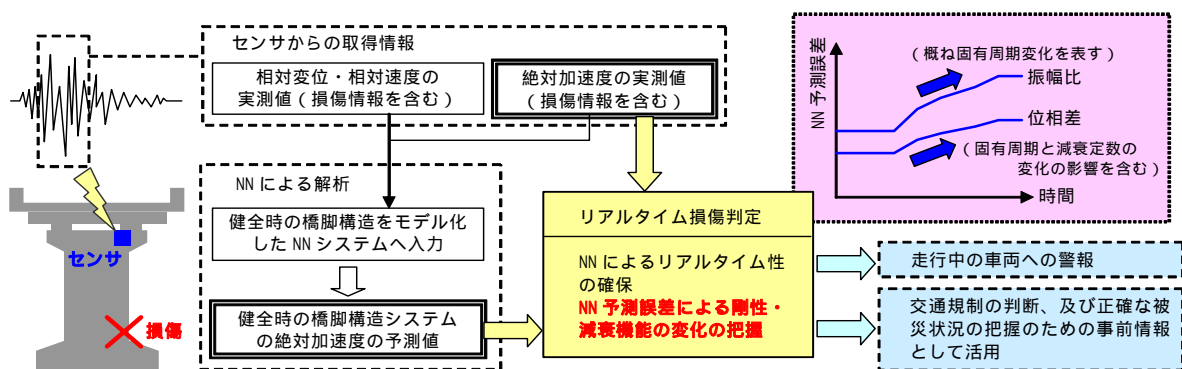


図 5 橋脚の地震時リアルタイム損傷判定法の概要



### 3.2 ニューラルネットワークによる損傷判定法のリアルタイム性について

本研究は即時情報を用いて、一次被害の軽減を計り、二次被害対応や被災状況の把握にも役立つ情報を提供しようとするものである。当然ながら、地震発生から損傷判定を行うまでに要する時間が短い方が望ましい。本手法における損傷同定法の概要を図6に示す。本手法はリアルタイム性を重視し、健全時の橋脚構造システムを同定するためのNNの学習は、過去に橋脚で得られた小規模の地震応答記録を用いて、大地震以前に済ませておく。これは、水野ら<sup>10)</sup>の研究結果により未学習の振幅範囲、スペクトル特性を有する入力地震波に対して、NNによる応答予測精度が低下することが明らかにされていることから、可能な限り学習データで大きな振幅と広範囲のスペクトル特性を学習させておくことが望ましいと考えたためである。大地震発生時には予め同定した健全時の橋脚構造システムに地震応答データを入力してNN予測値を算定する。橋脚に損傷が生じた場合NN予測誤差が生じるが、誤差として振幅比と位相差に着目し、損傷程度の変化の推定を試みる。振幅比・位相差の算定は、橋脚の絶対加速度応答のNN予測値と実測値のリサージュグラフから求める。リサージュグラフから振幅比・位相差を求めるには、最低限1周期の2波形(橋脚の応答実測値、NN予測値)が必要となる。したがって、実測値をリアルタイムに取得可能ならば、ある精度を確保するための数サイクルの振動波形を解析するに要する時間が本研究でめざすリアルタイムに相当することになる。

なお本研究における「損傷」とは「剛性と減衰機能の変化」と定義し、NNの入出力関係は、式(2)に示す1質点系振動方程式に基づき、柱基部と柱上部の相対変位、相対速度を入力、柱上部の絶対加速度を出力とした。 $k$ は剛性、 $c$ は粘性減衰係数、 $y$ は相対変位、 $\dot{y}$ は相対速度、 $\ddot{\phi}$ は地動加速度、 $(\ddot{y} + \ddot{\phi})$ は絶対加速度である。

$$ky + c\dot{y} = -m(\ddot{y} + \ddot{\phi}) \quad (2)$$

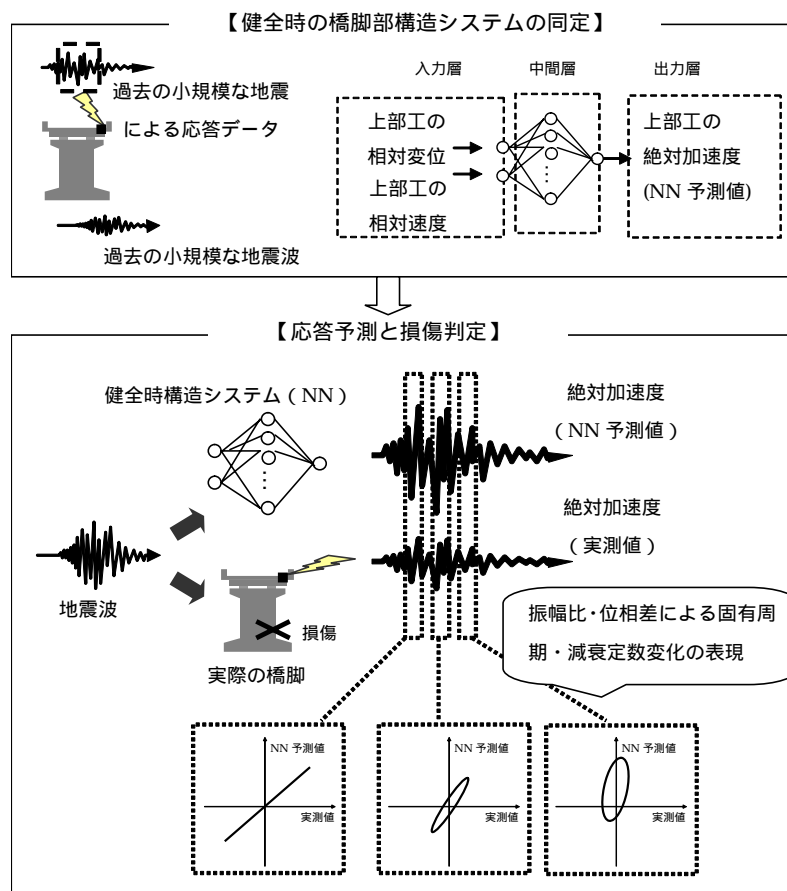


図6 本研究における損傷判定システム

### 3.3 リサーチグラフを用いた振幅比・位相差による損傷判定アルゴリズム

前述のように、NN はノンパラメトリック手法であり、解析結果から直接損傷程度を表す工学的数値は得られない。判定指標はあくまでも、橋脚の絶対応答加速度の実測値と NN 予測値の誤差 (NN 予測誤差) を用いる。Nakamura ら<sup>3)</sup>や Xu ら<sup>14)</sup>が損傷判定指標に用いた RMS や RRMS は、工学的に損傷程度を表す数値との関係が明確でないため、構造物の具体的な損傷状態と関連づけられる損傷判定指標を提案する必要がある。

本研究では、構造物の損傷前後において共振応答の性質が変化したことにより NN 予測誤差が生じるメカニズム<sup>15)</sup>に着目し、NN 予測誤差 (振幅比・位相差) から損傷程度 (固有周期と減衰定数の変化) の傾向を評価することとした。本研究の損傷判定アルゴリズムを図 7 に示す。図 7 の本研究における損傷判定アルゴリズムは、剛性が変化することにより構造物の固有周期と減衰定数が変化すること、ならびに粘性減衰係数が変化することにより構造物の減衰定数が変化することによって、構造物の共振状態 (共振曲線・位相曲線の位置) が変化するという振動工学の理論に基づいて、健全状態の構造物と損傷した構造物における応答波形の振幅比と位相差を損傷判定指標とした考え方を示したものである。

図中では 1 自由度系を例として評価式を示したが、このアルゴリズムは多自由度系でも適用可能である。図 7 中の記号について、 $m$  は質量、 $k$  は健全時の剛性、 $k'$  は損傷後の剛性 (等価剛性)、 $c$  は健全時の粘性減衰係数、 $c'$  は損傷後の粘性減衰係数 (等価粘性減衰係数)、 $T_0$  は健全時の固有周期、 $T_0'$  は損傷後の固有周期 (等価固有周期)、 $h$  は健全時の減衰定数、 $h'$  は損傷後の減衰定数 (等価減衰定数)、 $T$  は外力の卓越周期、 $L_2$  は変位応答倍率、 $L_2'$  は加速度応答倍率、 $\varphi_1$  は地動変位に対する構造物の相対変位の位相遅れ、 $\varphi_2$  は地動加速度に対する構造物の絶対加速度の位相遅れを表す。図 8 は 1 自由度系の場合の損傷程度と NN 予測誤差の関係である。図 8(a) は、振幅比と損傷程度 (減衰定数) の関係を示したものであり、1 自由度系に近似して考えられる橋脚等であれば、損傷程度が比較的小さい範囲の振幅比は、主に固有周期の値に影響を受け、損傷程度が大きくなるほど減衰定数変化の影響を含むことがわかる。図 8(b) は位相差と損傷程度 (減衰定数) の関係を示したものであり、位相差は、固有周期と減衰定数の両方に影響を受けることがわかる。

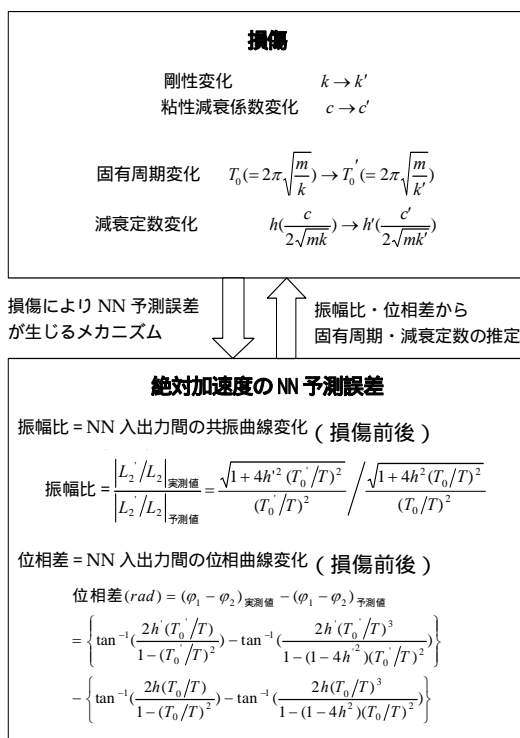
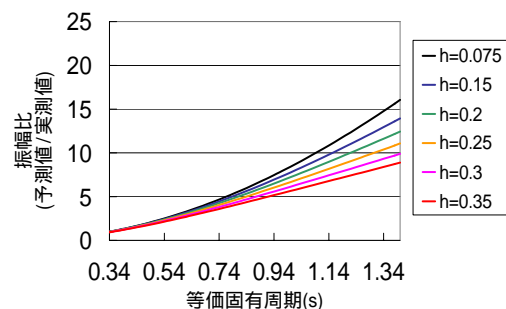
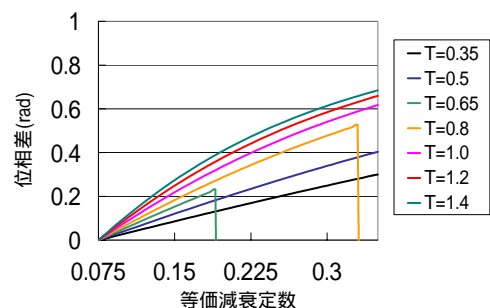


図 7 応答予測誤差による損傷判定アルゴリズム



(a) 損傷程度と振幅比の関係



(b) 損傷程度と位相差の関係

図 8 損傷程度と NN 予測誤差の関係 (1 自由度系の場合)

なお、図 8(b)の位相差が急激に負の領域へ低下しているケースは、共振に近い応答をする特別な場合であ

り、このような場合の地震応答データを入手していないことから、本稿ではこの場合の解析結果に与える影響についての検討は行わない。したがって、図 8(b)で、位相差が負（NN 予測値に対して実測値が位相遅れを生じる）の領域の図示は省略した。

共振曲線・位相曲線は、構造系への入力（地震波） - 出力（構造物の地震応答）間の関係と密接な関係がある。したがって、構造物の地震波入力地点からセンサ設置箇所より下の箇所における損傷を捉えるアルゴリズムであるといえる。したがって、地震時に損傷を受けやすい橋脚基部、支承部、桁の損傷程度を把握するために、橋脚上部の桁上面や床版下面等にセンサを設置するのが効果的であると考えられる。

#### 4 . RC 単柱の加振実験と検証データ<sup>1),2)</sup>

ここでは、本手法を検証するために、地震防災システム構築に関する茨城大学と土木研究所との共同研究の一環として実施された RC 単柱の加振実験の概要と実験結果を示す。

##### 4.1 RC 単柱の加振実験の概要

土木研究所により行なわれた RC 単柱の加振実験は、写真 1 に示すような RC 単柱を振動台上に設置し、一方向に加振することにより行われた。この実験では、供試体の柱断面は長辺 0.8m、短辺 0.45m とし、柱基部での軸応力が 1.0MPa、慣性力作用中心位置が柱基部から 3.0m となるようにウェイトを載せた。軸方向鉄筋は SD295、D10（鉄筋比 0.95%）、帯鉄筋は SD295、D6（鉄筋比 0.47%）を配筋し、被りは 40mm とした。また長辺方向には帯鉄筋と同材質同径の中間帯鉄筋を配置した。実験前の数値解析による降伏変位は、ウェイト中心位置で 18.9mm、終局変位が 62.3mm であった。入力地震波は兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された加速度波形の NS 成分の時間軸を 50% とし、振幅は 15%（加振 1 回目）、50%（加振 2 回目）、60%（加振 3 回目）、80%（加振 4,5,6 回目）と段階的に調節した。計測は 3 成分の加速度計を振動台上、フーチング上、ウェイト中心位置に設置したほか、鉄筋ひずみゲージを軸鉄筋及び側方筋の柱基部付近に配置した。また、ウェイト中心位置の変位をレーザー変位計により計測した。加速度計については加振時のほか振動台の立ち上げ時、下降時、各加振のインターバルにも微動の計測をした。

##### 4.2 载荷状況と RC 単柱の損傷状況

本研究では、加振実験における RC 単柱の損傷程度の変化をおおまかに把握するため、RC 単柱の固有周期と減衰定数の変化に着目するため、加振実験の結果として得られた橋脚のウェイト中心位置における強制振動時の地震応答データを用いて、等価線形化法の考え方に基いて求めた等価固有周期・等価減衰定数の値（加振 1~6 回目）を算出した（図 9）。

具体的な算定方法としては、1 質点モデルにおける固有周期・減衰定数別の変位・加速度の線形応答スペクトルをそれぞれシミュレーションにより算定し、RC 単柱の応答実測値が概ね一致する固有周期・減衰定数の値をそれぞれ等価固有周期・等価減衰定数の値として算定した。ただし、この方法では得られる解が 1 つとは限らないことから、FFT を用いた RC 単柱応答実測値の周波数解析により、固有周期値の範囲をおおまかに推定し、見当をつけた。等価剛性は弾塑性応答の荷重～変位関係において、最大応答変位点と原点を結んだ割線剛性で表されるため、実際に弾塑性応答を示す構造物の固有周期と比較すると、等価固有周期の値は大きな値となる。また、弾塑性応答を示す構造物は、荷重～変位履歴によりエネルギーが消費されるため、等価減衰定数はその影響分に対応して、一般的に大きな値となる。等価線形化法により算定される応答値と、実際の構造物の弾塑性応答値を一致させるためには、等価剛性・等価減衰定数の適切な設定が必要となるが、本研究においては、あくまで損傷程度の変化の傾向を知るための参考値を得ることを目的としたため、解析値としての正確性は重要視しない。

図 9 より、加振 2 回目以降、RC 単柱の損傷により固有周期・減衰定数ともに基本的には増加傾向にあり、剛性が低下していることが予想されるが、等価減衰定数に関しては加振 5 回目から加振 6 回目にかけて減少



している。小林ら<sup>1),2)</sup>により加振5回目で被りコンクリートの剥落が生じたことが報告されていることから、本研究ではこれが主要な要因であると考えている。

加振1回目と加振2回目の柱基部主筋ひずみの時間変化を図10に示す。加振1回目でRC単柱は弾性応答範囲内であることがわかる。一方、加振2回目の鉄筋ひずみの時間変化を見ると、残留ひずみが生じるほど大きな損傷が発生しており、加振2回目で既にRC単柱の応答は塑性域の挙動を示していることがわかる。

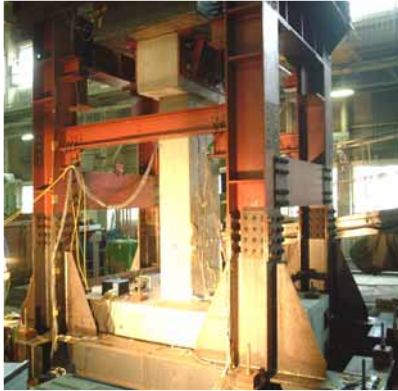


写真1 橋脚モデルの振動台実験

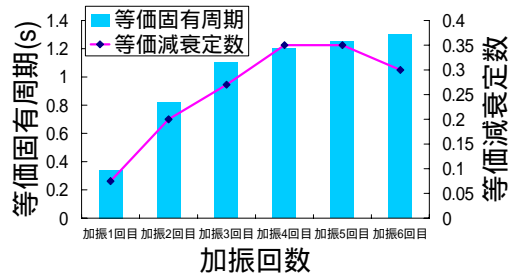
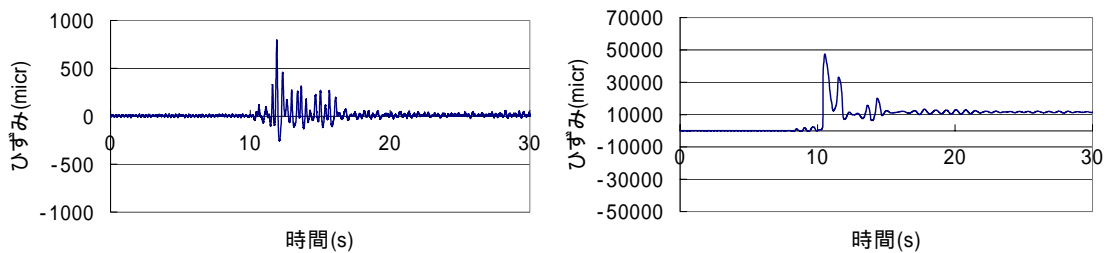


図9 RC単柱の等価固有周期・等価減衰定数の変化



(a)加振1回目 柱基部主筋ひずみ

(b)加振2回目 柱基部主筋ひずみ

図10 加振実験による柱基部主筋ひずみの時間変化

## 5. 提案した損傷判定システムの検証

4.で示した加振実験の結果を利用して、本研究で提案した損傷判定システム（図6）の検証を行う。ここでは、加振1回目から加振6回目にかけての損傷程度の変化を捉えることを目的として、加振1回目の強制振動時データ（加振開始から5秒間）を用いてNNシステムの学習を行い（構造同定）、加振2回目から加振6回目までの各加振時における強制振動データの応答予測を行った。そして各加振時全体の損傷程度の変化を、NN予測誤差により評価した。検討の流れを図11に示す。

### 5.1 健全時構造システムの同定結果

振動台実験の加振1回目のデータからRC単柱の構造システムの同定を行った。なお、加振が始まったと見られる時刻を0秒として、加振時のうち5秒間の強制振動データを用いている。このときの中間層のニューロン数は20個である。学習精度確認のため、学習されたNNを用いて加振1回目の絶対加速度を予測し、実測値と比較した結果を図12に示す。図12より、実測値と予測値が概ね一致していることから、学習精度は十分に高いことがわかる。このとき式(1)から計算されるRRMSは16.3%であった。今回の検証においては、この学習時のRRMS16%から、応答予測時にどの程度RRMSが変化するか損傷の判定材料となる。ただし、本損傷判定法では、RRMSという指標ではなく、橋脚の固有周期と減衰定数の変化の傾向を表現するこ

とが可能かどうか検証するため、振幅比・位相差という2つの指標により損傷判定を行う。

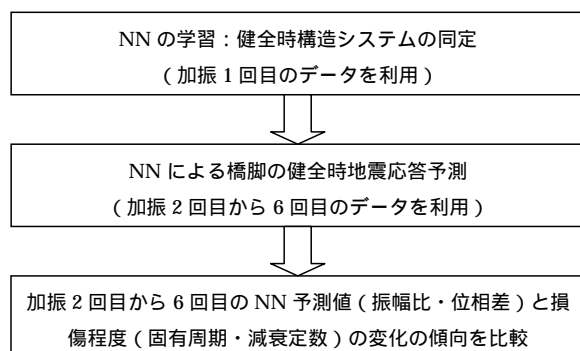


図11 検討の流れ

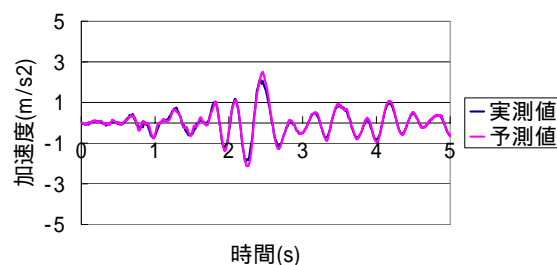


図12 学習精度の確認 (RRMS=16.3%)

## 5.2 NN予測値と実測値のリサーチグラフ

学習(構造同定)を行ったNNを用いて各加振時のNN予測値を算定し、加振2回目から加振6回目のNN予測値と実測値と比較した結果を図13に示す。また、加振2回目から6回目における絶対加速度の実測値を横軸に、NN予測値を縦軸にとったリサーチ図形を図14に示す。リサーチ図形は2波形が同一振動数の場合、位相差がなければ直線となり、傾きが2波形の振幅比を表す。2波形に位相差があるときはその量に応じて楕円または円形を描く。図14では、橋脚の損傷により振幅比、位相差が変化する様子を分かりやすく示すため、損傷発生時刻以前と考慮される入力加速度の振幅が比較的小さな時間帯(0秒から2.15秒)と、損傷発生時刻付近及びそれ以降と考慮される、振幅が比較的大きな時間帯(2.15秒から5秒)とを区別して図化した。図14より、特に加振2回目において、加振前半の0秒から2.15秒と加振後半の2.15秒から5秒にかけての振幅比・位相差の増加が著しいことがわかる。これより、加振2回目における損傷程度の著しい増加をNNにより捉えており、損傷を検知ができていていることがわかる。

## 5.3 リアルタイム損傷判定法の検証

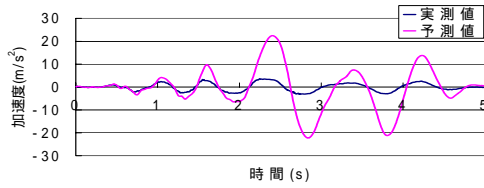
これまでに述べた本手法の内容と解析結果から、損傷同定アルゴリズムの検証、NNによるリアルタイム可能性の確認、他の損傷同定手法に対する優位性の確認を行う。

### (1) 損傷判定アルゴリズムの検証

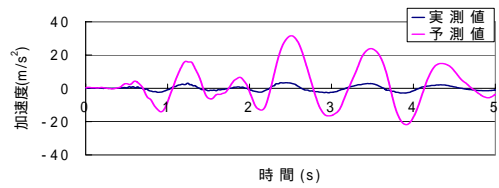
図9に示した加振実験によるRC単柱の損傷程度(等価固有周期・等価減衰定数)と、図14に示したNN予測誤差(振幅比・位相差)の比較を行い、NN予測誤差から損傷程度の変化の傾向を表すことが可能か確認した。

図15に、リサーチグラフから求めた振幅比及び位相差と、等価固有周期及び等価減衰定数の比較を示す。図15(a)より、振幅比変化は固有周期変化と概ね対応していることがわかる。ただし加振5回目から6回目の減衰定数の値が減少したことにより、固有周期変化と比較して振幅比変化は大きく増加している。この結果は、図8(a)に示した関係と同様の傾向を示していることがわかる。位相差変化については、図15(b)より、減衰定数変化と概ね対応していることがわかる。図8(b)に示した関係によれば、位相差は固有周期と減衰定数変化の両方に影響を受けることがわかっている。加振1回目から加振5回目までの剛性が低下傾向にある領域では減衰定数は理論どおりに増加傾向を示し、位相差も増加傾向を示している。加振5回目から6回目にかけての被りコンクリート剥落のような、剛性低下に比べて粘性減衰係数の低下が顕著な損傷の場合は、位相差が概ね減衰定数変化を表している。これより位相差に関しても、図8(b)に示した関係とほぼ同様の結果となっているといえる。

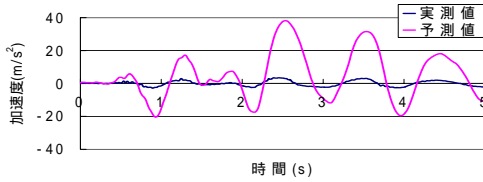
以上から、図7に示した損傷判定アルゴリズムの妥当性が確認できる。



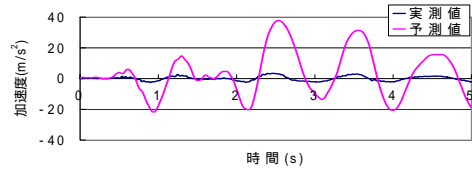
(a)加振2回目 予測値と実測値の比較



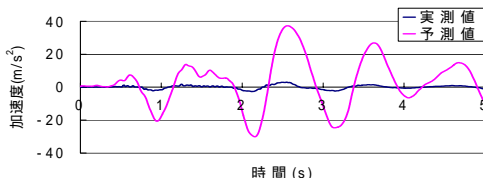
(b)加振3回目 予測値と実測値の比較



(c)加振4回目 予測値と実測値の比較

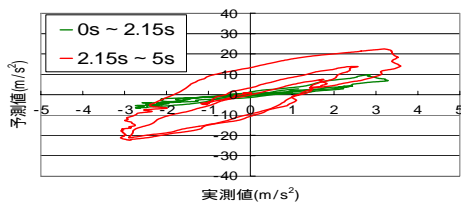


(d)加振5回目 予測値と実測値の比較

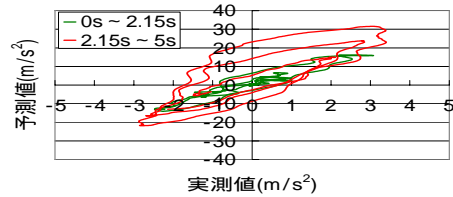


(e)加振6回目 予測値と実測値の比較

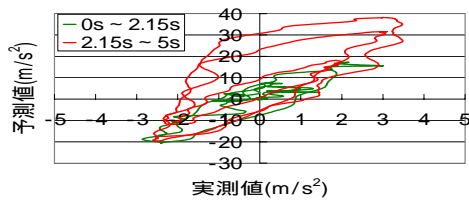
図 13 NN 予測値と実測値の比較 (加振2回目～加振6回目)



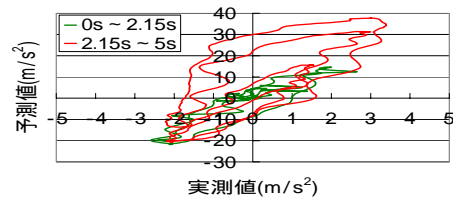
(a)加振2回目 リサージュ図形



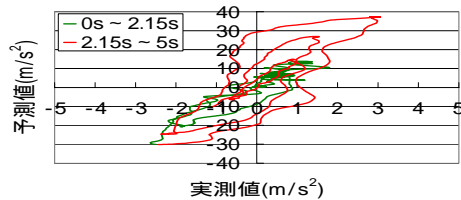
(b)加振3回目 リサージュ図形



(c)加振4回目 リサージュ図形

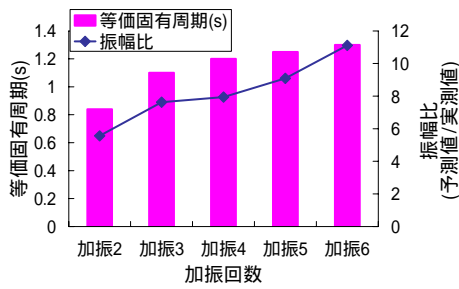


(d)加振5回目 リサージュ図形

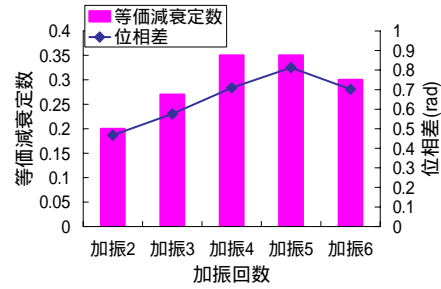


(e)加振6回目 リサージュ図形

図 14 NN 予測値と実測値のリサージュ図形 (加振2回目～加振6回目)



(a) 等価固有周期と振幅比の比較



(b) 等価減衰定数と位相差の比較

図 15 振幅比・位相差と等価固有周期・等価減衰定数の比較

## (2) 損傷判定システムのリアルタイム性

提案した損傷判定法のリアルタイム性に関しては、提案した損傷判定システムは小規模の地震応答計測による健全時構造システムの事前同定を前提としたこと、NN による応答予測に要する時間は微少であること、NN 予測誤差の算定方法としてリサージュグラフを用いることにより、時間を要する解析が不要であることから、一次被害の軽減に貢献するためのリアルタイム性は確保されると言える。また提案した損傷判定法は、データ数により解析精度が左右される周波数領域の解析手法に比べて、より迅速に損傷情報を提供することが可能であると言える。

## (3) 他の損傷判定手法に対する優位性

上記(1)および(2)の結果を踏まえると、本研究で提案した損傷判定システムでは、従来の NN 予測誤差の評価指標である RMS (Root Mean Square) や RRMS (Relative Root Mean Square) では表現できなかった固有周期・減衰定数変化の傾向を評価できることから、他の損傷判定手法と比較して優位であると言える。

## 6. 結論

本研究では、道路橋等の橋梁構造物における地震発生直後の交通網の被災情報を提供し、被災度の軽減、被害の拡大防止、及び復旧作業の補助を行うための地震時リアルタイム損傷検知システム構築の一環として、時刻領域の解析手法であるニューラルネットワーク (NN) を用いて、地震時リアルタイム損傷検知システムとして有用な情報を提供するための、橋脚の損傷判定法を提案した。提案した損傷判定法では、まず対象橋脚で予め得られている地震応答記録と NN を用いて健全時の構造システムの同定を行う。対象橋脚において地震応答記録が得られていない場合、もしくは得られていたとしても古い記録で、橋脚の構造特性に経時変化が予想される場合は、発生地震波のピーク時以前の振幅が小さいデータを用いて構造同定する方法も、今後検討すべき価値があると考えられる。ただしこのような構造同定手法を検討する場合には、NN は未学習の振幅とスペクトル特性を有する入力地震波に対して、構造物の応答予測精度が低下するという特徴<sup>10)</sup>を、本損傷判定結果に及ぼす影響を考慮しなければならない。次に橋脚構造の同定が行われた NN を用いて、地震を受けた場合の出力値 (NN 予測値) と橋脚の応答計測値 (実測値) の間に生じる誤差 (NN 予測誤差) から損傷判定を行った。NN 予測誤差の評価指標としては、実測値と NN 予測値における振幅比と位相差を選定した。そして、独立行政法人土木研究所で行われた RC 単柱の加振実験のデータを用いて、提案した損傷判定法の検証を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) RC 単柱の加振実験データ (ウェイト中心位置の絶対加速度、相対変位、相対速度) と実験結果を用いて提案した損傷判定アルゴリズムを検証した結果、振幅比が概ね固有周期変化を評価できることを確認した。また、位相差は固有周期と減衰定数変化の両方に影響をうけ、剛性低下に比べて粘性減衰係数の低下が顕著な損傷の場合 (被りコンクリート剥落) は、位相差が概ね減衰定数変化を評価できることを確認した。

- 2) 提案した損傷判定法では、従来の NN 予測誤差の評価指標である RMS (Root Mean Square) や RRMS (Relative Root Mean Square) では表現できなかった固有周期・減衰定数変化の傾向を表現できることを確認した。
- 3) 本提案手法を小林らが提案する損傷度判定システム<sup>1),2)</sup>と併用することで、より効果的な地震防災システムの構築が可能になると思われ、提案した損傷判定法により大地震時に走行中の車への警報発信や交通規制の判断に役立つ信頼性の高い情報を提供し、災害後の被災状況の把握にも利用可能な情報を提供できる可能性が見出された。

#### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(A)(研究代表者：横山功一，課題番号：15206054)の援助を受け、茨城大学と独立行政法人土木研究所の共同研究として実施された。ここに記して厚く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 小林 寛，運上茂樹：道路橋の地震時被災度判定システムに関する基礎的研究，リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム論文集，pp.161-164，2004
- 2) 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，第 28 巻，CD-ROM，2005
- 3) Nakamura, M., and Masri, S. : A method for non-parametric damage detection through the use of Neural Networks, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, pp.997-1010, 1998
- 4) 古田 均，服部 洋：AdaBoost による多自由度構造物のヘルスマニタリングに関する研究，構造工学論文集 Vol.52A，pp.651-658，2006.3
- 5) 神田克久：ニューラルネットワークによる自己学習機能を持った地震早期検知システムの研究，日本建築学会構造系論文集，No.498，pp.59-66，1997.8
- 6) 菊地正幸：リアルタイム地震学，東京大学出版会，2003
- 7) 佐藤忠信，土岐憲三，橋本雅道：構造物の地震応答における自己学習機能を有する震動制御，土木学会論文集，No.471/I-24，pp.115-124，1993.7
- 8) 楊 元植，中埜良昭，真田靖士：ニューラルネットワークの履歴推定手法を用いたサブストラクチャ・オンライン実験の精度向上に関する研究，構造工学論文集，Vol.50B，2004.3
- 9) 楊 元植，中埜良昭，山内成人，真田靖士：ニューラルネットワークを用いたリアルタイム履歴特性同定手法に基づくサブストラクチャ・オンライン実験，日本建築学会構造系論文集，No.589，pp.89-96，2005.3
- 10) 水野啓示朗，松井徹哉：ニューラルネットワークによる構造物の振動応答推定，日本建築学会構造系論文集，No.498，pp.53-60，1998.1
- 11) 水野啓示朗，松井徹哉，福田隆介：ニューラルネットワークによる構造物の塑性履歴挙動のモデリング，日本建築学会構造系論文集，No.510，pp.61-66，1998.8
- 12) Sato, T., and Sato, M. : Structural Identification Using Neural Network and Kalman Filter Algorithms, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.14, No.1, pp.23s-32s, 1997.4
- 13) 臼井支朗，岩田 彰：基礎と実践 ニューラルネットワーク，コロナ社，1995
- 14) Xu, B., Wu, Z.S., and Yokoyama, K. : Neural Networks based identification for the Akinada suspension bridge with earthquake responses, The Seventh International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, Tianjin, P. R. China, pp.474-482, 2002
- 15) 小坪清眞：入門建設振動学，森北出版，1996.1

(受理：2007年2月13日)  
(掲載決定：2007年6月19日)



# **Real-time evaluation of bridge pier damages due to earthquake by using Neural Networks technique**

YOKOYAMA Koichi <sup>1)</sup>, HARADA Takao <sup>2)</sup>, KURODA Satoshi <sup>3)</sup>,  
A.K.M. Rafiquzzaman <sup>4)</sup>

1) Professor, Ibaraki University, Department of Urban and Civil Engineering, Dr. Eng

2) Lecturer, Ibaraki University, Department of Urban and Civil Engineering, Dr. Eng

3) Japan Transportation Consultants, Inc. MS

4) Researcher, Ibaraki University, Venture Business Laboratory, Dr. Eng

## **ABSTRACT**

It is expected that damages of transportation system including highway bridges cause serious interference of traffic function and recovery efforts, when a large earthquake occurs to a densely populated urban area as it was happened during the great Hanshin Awaji Earthquake in 1995. Therefore, the real-time earthquake damage detection system for bridge structures seems to be necessary to provide information of damages in transportation network system just after the occurrence of the earthquake and to assist the damage reduction, prevention of damage expansion and recovery works. This research proposes the method of evaluating the damages of bridge pier to provide useful information for real-time earthquake damage detection system by using Neural Networks technique. In this study, the emulator was constructed first to express intact structure by using Neural Networks. Then, it was examined whether the difference between output of the emulator and measured response of the bridge pier showed the damages of the bridge structure. Dynamic experimental data which were acquired at the shaking table test of RC single column conducted by Public Works Research Institute, Tsukuba, were used to verify the proposed method. Amplitude ratio and phase difference were selected to show the difference between output of the emulator and measured response of the bridge pier. As a result, it was confirmed that these two indices corresponded well to the damages, namely the change in the natural frequencies and the damping constant. The proposed method is able to provide the useful information for damages more quickly than frequency domain analysis method.

*Key Words: Highway bridge, Bridge pier, Earthquake disaster prevention, Real-time, Damage evaluation, Neural Networks, Dynamic response measurement, Structural identification*