

複関数分類学習 NN によるコンクリートの損傷検知システム

防衛大学校 学生員○ 作田 健 正会員 香月 智

1. 緒 言

構造物を適切に維持管理していくために、適切な時期に構造物の損傷や劣化現象を検知することが望まれる。例えば、疲労寿命予測には、疲労損傷が線形的に累積するものと仮定するマイナー則が用いられるが、実測値にばらつきが大きいこと、予測精度があまり高くないことが知られている。本研究では、疲労試験に準じた要領でコンクリート供試体の損傷を進展させ、定期的に打撃荷重を与える。そこで、供試体に発生する加速度をモニタリングすることにより、コンクリートの疲労損傷進展に伴う状態変化を検知するため複関数分類学習ニューラルネットワーク^{1),2)}を提案し、その適用性について基礎的な検討をしたものである。

2. 複関数分類学習ニューラルネットワーク

図-1 に、提案する複関数分類学習ニューラルネットワークシステムを、従来型の 3 階層ニューラルネットワークと比較して示す。従来型ニューラルネットワークシステムでは、入力ベクトル $\mathbf{x}$ (n_i 次元) と出力ベクトル $\mathbf{y}$ (n_o 次元) との間を図-1(a) のような中間層ニューロンと関係付けて構成したうえで、学習データ $\mathbf{T}$ (n_o 次元) との誤差が最小となるようにネットワークの結合強度 $\mathbf{W}$ およびニューロン特性を決定するシグモイド関数の閾値 θ を探索決定する。

一方、提案するシステムは第 3 層にパターン数 (n_p) 倍だけの出力層ニューロン (n_o 次元 $\times n_p$ 組) を準備する。そのうえで学習データ $\mathbf{T}$ (n_o 次元) がどのパターン関数に属するかについて識別分類した後、学習するものである。ここで、識別分類の基準は各パターン出力と教師信号が最も近いものを選択する。すなわち、

$$i_{\text{select}} = \min |\mathbf{T} - \mathbf{y}_i| \quad (1)$$

よって、学習におけるバックプロパゲーションは次式のように行われる。

$$|\mathbf{T} - \mathbf{y}_{i_{\text{select}}}| \rightarrow \min \quad (2)$$

3. コンクリート供試体の繰返し载荷実験への適用

(1) 実験の概要

コンクリート供試体の疲労損傷の進展に伴う構造振動特性（加速度データ）の変化から提案システムが構造特性の同定および遷移を検知できるかを試みた。

用いたコンクリート供試体は、図-2 に示す直径 10cm および高さ 30cm の円柱供試体である。この円柱供試体には、図-3 に示すようにアクチュエータを用いて周波数

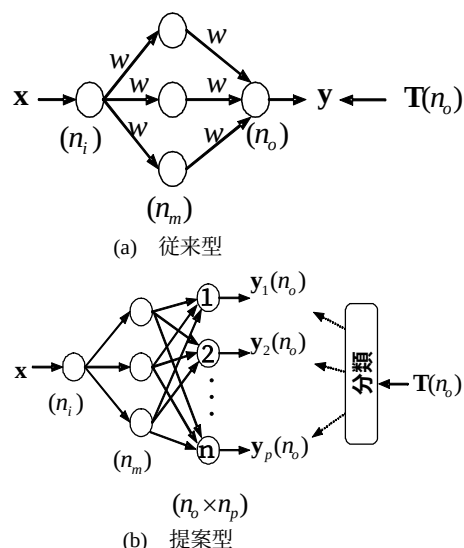


図-1 提案型ネットワークと従来型ネットワーク

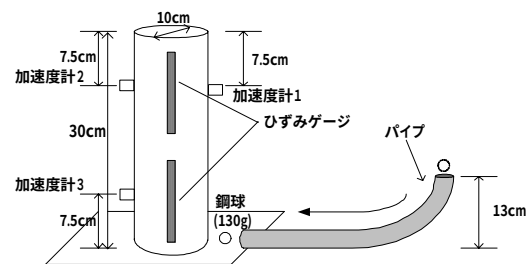


図-2 コンクリート供試体と加速度計の位置

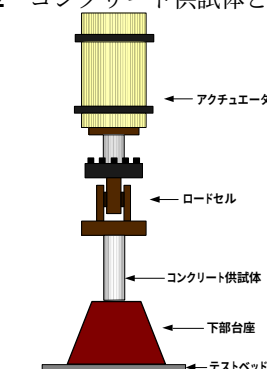


図-3 実験装置概要

1.5Hz で sin 波の半波を繰返し载荷した。また、モニタリングについては、落差 13cm の中空パイプから 130g の鋼球を転がし、繰返し载荷 100 回毎にコンクリート供試体に 3 回打撃を与えた。ここで、打撃による加速度データを測定するため、図-2 に示すように鋼球により打撃される側の上から 7.5cm、および反対側の上下 7.5cm の 3 箇所の位置に加速度計を設置した。

(2) 構造特性遷移検知システム

本研究において構成する構造特性遷移検知システムを、図-4 に示す。すなわち、図-4(a) に示すように打撃によって生じた振動波は、コンクリート内部を通過し

キーワード：繰返し载荷試験，モニタリング，複関数分類学習ニューラルネットワーク

連絡先：〒239-8686 神奈川県横浜賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL(046)841-3811 FAX(046)844-5913

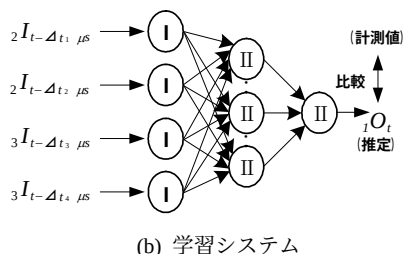
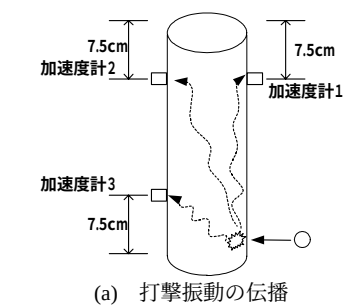


図-4 構造特性遷移検知システム

て、加速度計 1, 2, 3 に到達する。この際、内部に損傷が生ずると、健全な場合とは異なった波となって加速度計に到達すると考えられる。一方、加速度計に伝播する波は、もともと同一の波から発生したものであるの、相互に線形もしくは非線形の相関性があるものと考えられる。そこで、図-4(b)に示すように、構造物が健全時あるいは軽微な損傷時に、得られた加速度データについて、加速度計 1 の時刻 t におけるデータ $1O_t$ を推定するための入力データを加速度計 2 と 3 のデータ $iI_{t-\Delta t_j}$ （ここで i : 加速度計番号, Δt_j : タイムラグ値）から 4 種類を選ぶ。そのうえで、図-4(b)に示すように加速度データ間の非線形相関性をニューラルネットワークの学習機能を用いてフィッティングし、ある期間の繰り返し载荷後の打撃モニタリングデータによって、入力データから各時刻 t に対する出力データの加速度データを求める。これを計測値と比較し、予測値と計測値の差が大きな場合は、構造特性の遷移を判定するシステムである。

4. 実験結果と考察

応力比 85%の繰り返し载荷実験により破壊に至った载荷回数は 663 回であった。ここで、図-5 に示すように、初期の構造状態である 0, 100 回载荷時のデータを学習データとして用い、構築されたシステムによる 200 回载荷時の打撃に対する計測値と予測値の関係を図-6 に示す。予測波形は、計測値とよく一致しており、予測値と計測値の相関を示す決定係数 (R^2) は 0.97 と大きい。次に、写真-1 に示すひび割れが視認された 550 回载荷直前の、500 回载荷時の打撃に対する計測値と予測値の関係を図-7 に示す。第 3 波までの波形は、おおむね一致するものの、それ以降は一致していない。よって、決定係数は 0.23 とかなり小さくなる。

図-8 には、繰り返し载荷回数に対する決定係数の変化を従来型と提案型を比較して示す。従来型において

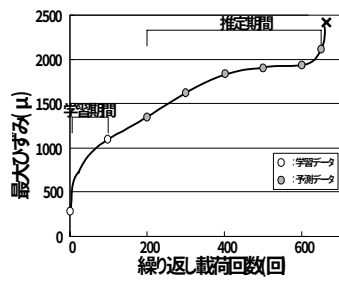


図-5 最大ひずみと载荷回数



写真-1 ひび割れ (550 回载荷時)

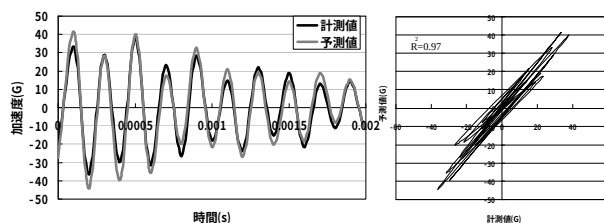
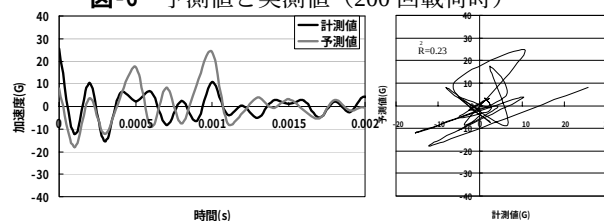
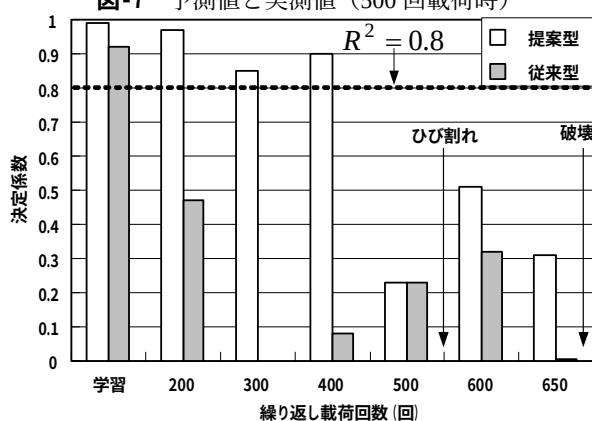
図-6 (a) 波形 (b) 相関分析
予測値と実測値 (200 回载荷時)図-7 (a) 波形 (b) 相関分析
予測値と実測値 (500 回载荷時)

図-8 繰り返し载荷回数と決定係数の変化

は、200 回载荷時の段階で決定係数が 0.47 と急激に小さくなっている。これに対して、提案型システムでは、ひび割れが視認される直前の 500 回载荷時に決定係数が急激に小さくなる。ここで、仮に構造特性遷移を判定する閾値を $R^2 = 0.8$ としたならば、提案型システムは、ひび割れ直前の 500 回载荷時にコンクリート供試体の構造特性遷移を明瞭に検知できる。

5. 結 言

本研究は、コンクリート供試体の疲労損傷モニタリングに対する、複関数分類学習ニューラルネットワークの適用について検討したものである。提案システムの適用性を検討するため、コンクリート供試体の繰り返し载荷実験を行った。ここで、疲労損傷に伴い複数パターンが存在すると思われるコンクリート供試体の打撃データを教師データとして用いると、提案型システムは構造特性の同定および疲労損傷に伴う構造特性の遷移を検知できることを確認した。

参考文献

- 1) 長通伸幸, 香月 智, 深和岳人: 複関数分類・学習ニューラルネットワークと構造モニタリングへの応用, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.321-335, 2002.7.
- 2) 長通伸幸, 作田 健, 香月 智: 複関数分類学習ニューラルネットワークによる重力式ダム漏水管理, 土木学会論文集, No.770/VI-64, pp.95-106, 2004.9.