

# 複関数分類学習ニューラルネットワークのコンクリート供試体疲労損傷検知への適用

防衛大学校 学生員○川良次郎 作田 健 正会員 香月 智 梶田幸秀

## 1. 緒言

構造物を維持管理していくためには、手遅れにならない時期に構造物の損傷や劣化現象を検知する必要がある。疲労寿命を予測するために、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ので、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、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できる複関数分類学習ニューラルネットワーク<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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  $x$  ( $n_i$  次元) と出力ベクトル  $y$  ( $n_o$  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  $T$  ( $n_o$  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  $w$  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  $\theta$  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  $T$  ( $n_o$  次元) を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、

$$i_{select} = \min |T - y_i| \quad (1)$$

よって、学習におけるバックプロパゲーションは次のように行われる。

$$|T - y_{i_{select}}| \rightarrow \min \quad (2)$$

## 3. コンクリート供試体の繰返し載荷実験への適用

### (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。

実験の概要を図-2 に示す。用いたコンクリート供試体は直径 10cm および高さ 30cm の円柱供試体である。載荷要領は図-3 に示すように、周波数 1.5Hz で最大荷

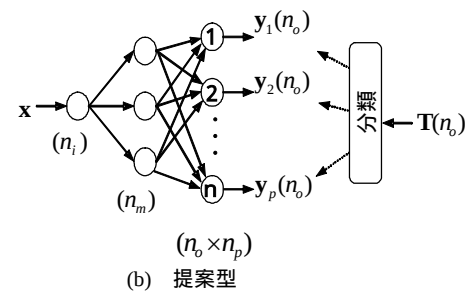
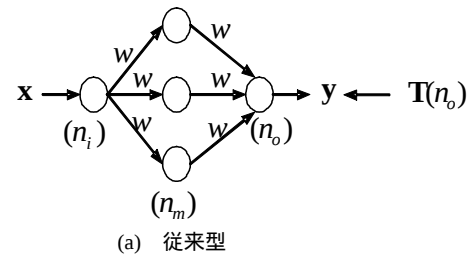


図-1 提案ネットワークと従来型ネットワーク

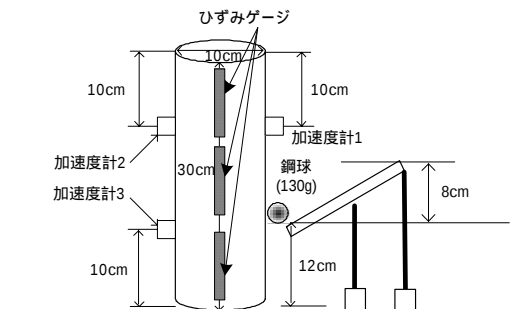


図-2 コンクリート供試体と加速度計の位置

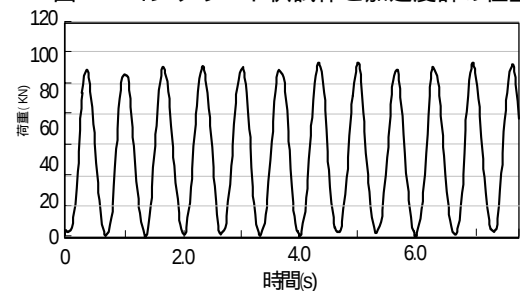


図-3 載荷要領

重を一定に保ち、sin 波の半波を繰り返すものである。打撃によるモニタリングについては、落差 8cm の滑り台から 130g の鋼球を転がし、コンクリート供試体に繰返し載荷 5400 回毎に 3 回打撃を与えた。また、加速度計は、鋼球により打撃される側のコンクリート供試体の上から 10cm、および反対側の上下 10cm の位置に計 3 箇所設置した。

### (2) 損傷モニタリングシステム

本研究において構成する損傷モニタリングシステムを、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

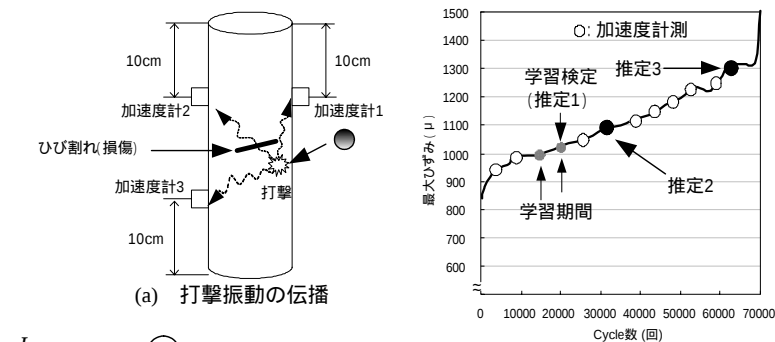


図-4 損傷モニタリングシステム

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。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 3 の時刻  $t$  におけるデータ  ${}_3O_t$  を推定するための入力データを加速度計 1 と 2 のデータ  ${}_iI_{t-\Delta t_j}$  (ここで  $i$ : 加速度番号,  $\Delta t_j$ : タイムラグ値) 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荷重載荷後の打撃モニタリングデータによって、入力データから推定される出力データの各時刻  $t$  に対する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、損傷の進展を判定するシステムである。

#### 4. 実験結果と考察

圧縮強度の 65% の繰り返し載荷実験によって破壊に至った回数は 71101 回であった。図-5 に示すように、16200, 21600 回載荷時のデータを学習データとして用い、学習収束後、検定用に隠していた学習期間と同じ構造状態である 21600 回載荷時(推定 1)の、3 回目の打撃に対する予測結果を図-6 に示す。予測波形は計測値と一致しており、決定係数も 0.965 と大きい。次に、32400 回載荷時(推定 2)の打撃データの入出力関係を推定した結果を図-7 に示す。波形は計測値と概ね一致しているが、第 1 波のピーク値付近で予測値と計測値の差が大きくなっており、決定係数が 0.922 と低下している。図-8 には、さらに繰り返し載荷が進み、載荷回数が 64800 回時(推定 3)の予測値と計測値を示す。波

図-5 最大ひずみと載荷回数

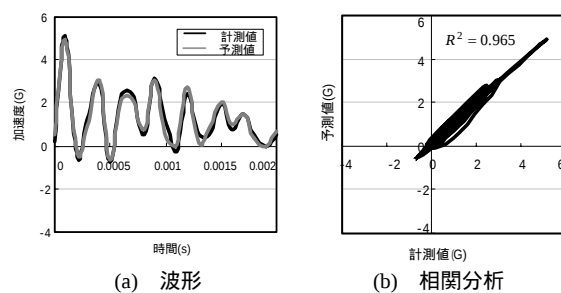


図-6 隠しデータ検定

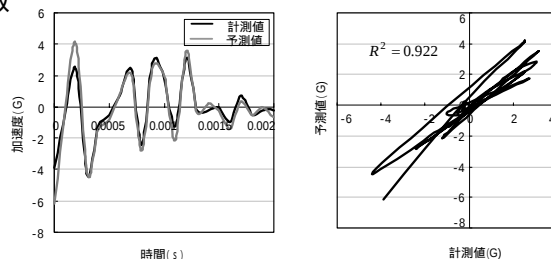


図-7 推定 (32400 回載荷時)

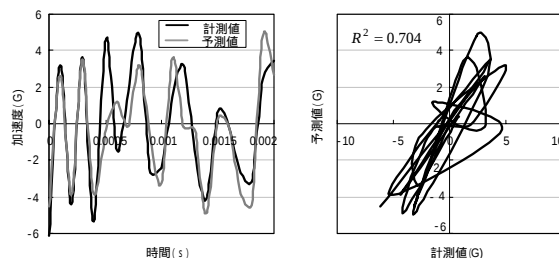


図-8 推定 (64800 回載荷時)

形は第 1 波と第 2 波は一致するものの、それ以降の 3 ~ 7 波では、ほとんど一致していない。よって、決定係数は 0.704 とかなり小さくなる。すなわち、提案システムは、繰り返し載荷回数の増加に伴い決定係数が低下し、コンクリート供試体の特性が初期のものから変化していることを明瞭に検知している。

#### 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載荷実験を行い、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が確認できた。

#### 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/-60, pp.321-335, 2002.7.
- 2) 市川絃: 階層型ニューラルネットワーク 非線形問題解析への応用, 共立出版株式会社, 1993.6.