

## ニューラルネットワークによるPC 上部構造非線形挙動の認識

九州大学大学院助手 正会員 ○矢葺 亘  
 九州大学大学院教授 正会員 大塚久哲  
 九州大学大学院助教授 非会員 松田泰治

### 1. はじめに

橋梁の性能照査型設計に向け、上部構造非線形性を考慮した照査・設計のための適切なPC部材の履歴モデルの整備が急務となっている<sup>1)</sup>。しかしながら、「プレストレスによる原点指向性」や、「PC鋼材の偏心・張出床板の影響による正負の非対称性」等によるPC上部構造部材除荷曲線の特徴を適切に表現するためには、新たな関数の導入やパラメータ数の増加などが必要であり、その複雑な定式化に多大な労力を要しているのが実情<sup>2),4)</sup>である。そこで本研究では、ニューラルネットワークの有する関数近似能力<sup>3)</sup>を用いて、PC部材の非線形履歴挙動を簡易にモデル化可能であることを示した。

### 2. 教師データ入手のためのPC桁交番載荷実験

ここでは、ニューラルネットワークによるPC桁の復元力特性のモデル化に必要な教師データ入手のため、交番載荷実験を行った。実験供試体は、①有効幅員9.0mの1室箱桁断面、②80~140m程度の中央径間を有するラーメン橋のインフレクションポイント付近の桁高を想定し、載荷装置の能力を考慮して1/8.5程度の外形寸法とした。使用材料は、 $\sigma_{ck} = 40\text{N/mm}^2$ のコンクリートとSD295 (D6, D13)の鉄筋を用い、PC鋼材は現在PC橋で一般に使用されているPC鋼より線とし、1S15.2Aを使用した。プレストレス導入度は、想定した橋梁におけるプレストレス量を考慮して、プレストレスによる平均軸圧縮応力度を3.6MPaに設定した。図-1に供試体の断面図、表-1に使用材料を示す。本実験で用いた実験装置および供試体設置状況を図-2に示す。

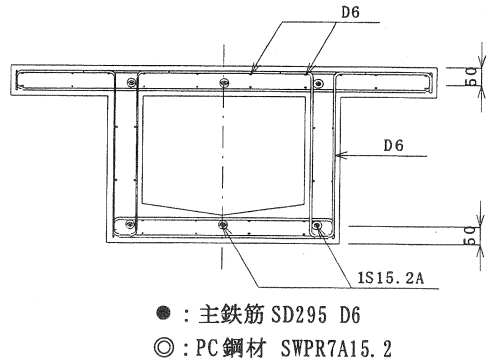


図-1 供試体断面図 (単位 mm)

表-1 使用材料

使用材料	物性値
コンクリート	$\sigma_{ck} = 40\text{N/mm}^2$
鉄筋	SD295(D6)
PCより線	1S15.2A

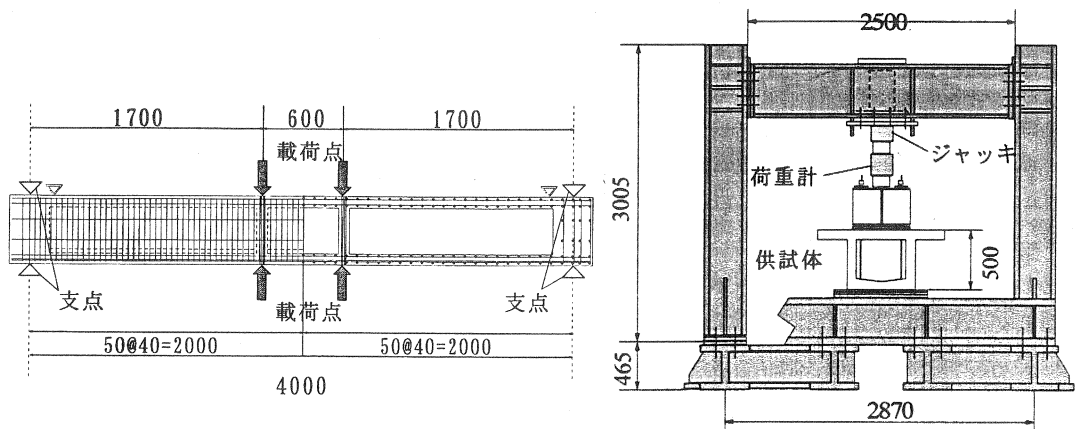


図-2 載荷装置および供試体設置状況 (単位 mm)

載荷方法は、単純曲げ載荷(2点載荷)の正負交番漸増載荷とし、押し引き980kNの油圧ジャッキを用いて、軸方向鉄筋初降伏時の変位  $\delta_{y0}$  までは荷重制御、その後は  $\delta_{y0}$  の整数倍を片振幅とした両振り交番載荷 ( $\pm 2 \delta_{y0}$ ,  $\pm 3 \delta_{y0}$ ,  $\pm 4 \delta_{y0}$ ...) を、最大荷重以下に低下するまでを目標に行った(図-3)。

実験で得られた供試体のP- $\delta$ 履歴曲線を図-4に示す。PC部材の特徴である除荷時の剛性が荷重の低下とともに小さくなり、履歴曲線は原点付近を指向する結果を得た。本研究では、この結果をニューラルネットワークの教師データ(学習対象)とした。

### 3. ニューラルネットワークの構築と解析

#### (1) ニューロンモデル

ニューロンモデルとは生物の神経細胞における情報処理の仕組みを工学的に模倣したモデルのことである。以下では単一のニューロンモデルの信号処理組織ごとをユニットと呼ぶ。このユニットの特徴は図-5に示すような多入力1出力の構造にある。図中の任意のユニットjに隣接するn個のユニットからはそれぞれ  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  の信号が出力される。 $w_{ij}$ は隣接するユニット加間の結合の強弱を表現するもので、結合荷重と呼ばれる。Iはバイアス入力と呼ばれるもので、ユニットの出力を抑制したり促進したりするパラメータ(閾値)を与える。計算上Iは、恒等的にIを出力するユニットとして考慮するため、閾値は他の結合荷重と同様にバイアス入力を出力するユニットIとユニットjとの結合荷重  $w_{ij}$  として扱われる。一信号処理の流れは、隣接するn個のユニットから出された出力信号  $x_1 \sim x_n$  が結合荷重の大小により増幅または減衰された後ユニットjへの入力信号となる。ユニットjへ入力されたn個の入力信号の総和が内部ポテンシャルXとなり、応答関数fを介してユニットjの出力信号Yとなる。ここで応答関数fはユニットへの入力信号の総和である内部ポテンシャルXを[0, 1]の値に正規化する役割を果たす単調増加関数である。本研究においては神経細胞の働きを模倣可能な応答関数fとして式(1)に示すシグモイド関数を使用した。

$$f(X) = \frac{1}{1 + \exp(-X/Tn)} \quad (1)$$

式(1)中の  $Tn$  は温度定数と呼ばれるもので、ニューロンの発火し易さを表現するための正の定数であり、Tが小さいほどシグモイド関数は閾値関数(2値関数)に近づく。内部ポテンシャルXとシグモイド関数に基づく出力信号Yの関係を図-6に示す。

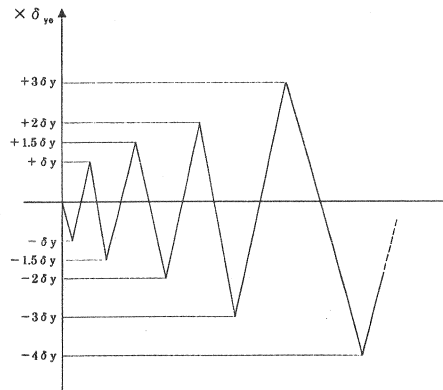


図-3 入力漸増繰り返し変位

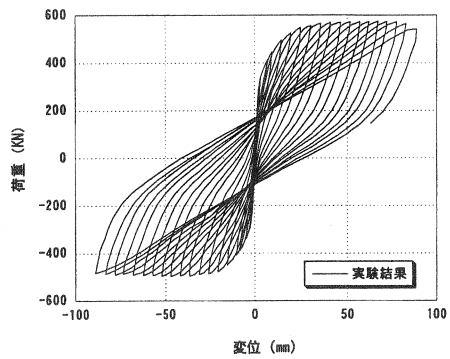


図-4 実験結果

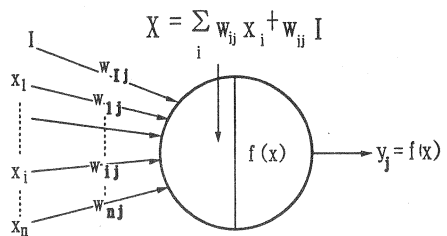


図-5 ニューロンモデル

(2) 階層型ニューラルネットワークと入力層のユニットの選定

本研究では図-7に示す階層型ニューラルネットワークを使用した。階層型ニューラルネットワークとは、複数のユニットからなる入力層、中間層および出力層から構成され、信号が入力層から中間層を経て出力層に一方へ流れる。このため信号処理が単純であり応用範囲も広いのが特徴である。

入力層ユニットは、「最大経験変位」、「最大経験荷重」、「最新の変位折り返し点」、「最新の荷重折り返し点」に加え、接線剛性の変化に関わる情報として「1ステップ前の変位増分」および「1ステップ前の荷重増分」を、さらに現時点での変位を加えた7ユニットとした。これらのパラメータは、学習用教師データ（今回は交番載荷実験）により容易に取得可能な物理量である。出力層は入力層の7ユニットの情報より荷重を推定することから、荷重の1ユニットとした。学習には、誤差逆伝播法を用いた。

(3) 教師データに基づくニューラルネットワークの学習

本研究では、Rumelhartらにより提案された誤差逆伝播法(ErrorBackPropagationMethod)を学習アルゴリズムとして用い、出力層の出力信号と教師信号の誤差を最小化するように出力層から入力層へ向かって最急降下法を用いて結合荷重を修正した。学習回数は5000回とした。図-8には学習回数の増加に伴う二乗誤差の減少傾向を示す。二乗誤差は2000回程度の学習によりほぼ収束しており、本研究に於いて選択した入力層ユニットが出力層の評価に対して適切であったことが確認された。

- ・ 入力層7ユニット:
  - 最大経験変位 ( $X_{max}$ )
  - 最大経験荷重 ( $P_{max}$ )
  - 最新の変位折り返し点 ( $X_0$ )
  - 最新の荷重折り返し点 ( $P_0$ )
  - 1ステップ前の変位増分 ( $\Delta X_{n-1} = X_{n-1} - X_{n-2}$ )
  - 1ステップ前の荷重増分 ( $\Delta P_{n-1} = P_{n-1} - P_{n-2}$ )
  - 現時点での変位 ( $X_n$ )

- ・ 出力層1ユニット:
  - 現時点での荷重 ( $P$ )

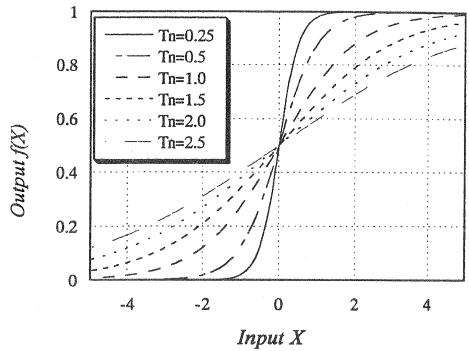


図-6 内部ポテンシャルXと出力信号Yの関係

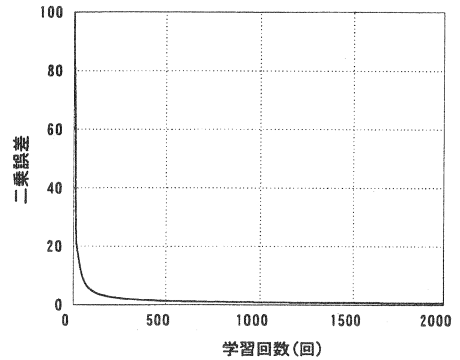


図-8 学習回数と二乗誤差の関係

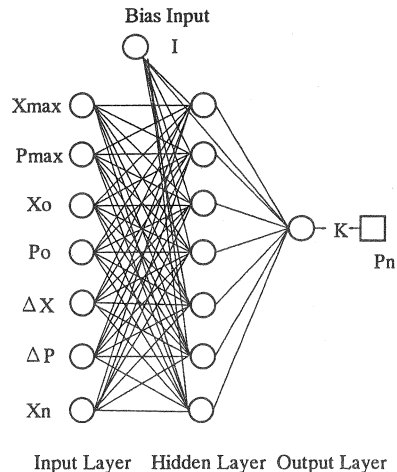


図-7 ニューラルネットワークの構造と入出力ユニット

#### 4. 解析結果

学習を終えたネットワークに、载荷実験で入力した変位波形と同様の変位波形を入力し、荷重の模擬（ネットワークによる出力）を行った結果を図-9、10に示す。

両者は非常によく一致しており、学習を行ったネットワークを、荷重の予測子として用いることで、PC部材の特徴である除荷時の原点指向性を再現可能であることが確認できる。

#### 5. まとめ

本研究では、ニューラルネットワークを用いて、交番载荷実験により得られたPC箱桁部材の履歴復元力特性のモデル化が可能であることを示した。今後は、プレストレスの導入度、鋼材の偏心等を変化させたPC箱桁履歴実験結果に基づくモデル化と、地震応答解析への適用について検討を行う予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は、平成12、13年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A) (代表：矢葺 亘)の補助を受けて行ったものである。また、実験を遂行するにあたり浦川洋介氏(オリエンタル建設(株))には、多大なご協力を賜った。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 大塚, 矢葺ほか: 上部構造の非線形性を考慮したPCラーメン橋の耐震性照査, 構造工学論文集, Vol.145A, pp. 967-974, 1999. 3
- 2) 鈴木, 森, 山口, 池田: プレストレストコンクリート橋脚の復元力モデル, 第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 673-678, 1999. 10.
- 3) 大塚, 岡田他: PC箱桁の復元力特性に関する交番载荷実験, プレストレストコンクリート, Vol. 42, No. 2, pp90-97, 2000. 4
- 4) 大塚, 岡田他: 交番载荷実験に基づくPC箱桁の復元力特性の提案, プレストレストコンクリート, Vol. 42, No. 5, pp18-24, 2000. 9
- 5) 松田, 矢葺他: ニューラルネットワークによる高減衰積層ゴムの非線形履歴挙動の認識と動的解析への適用, 土木学会論文集No. 605, I-45, 29-36, 1998. 10

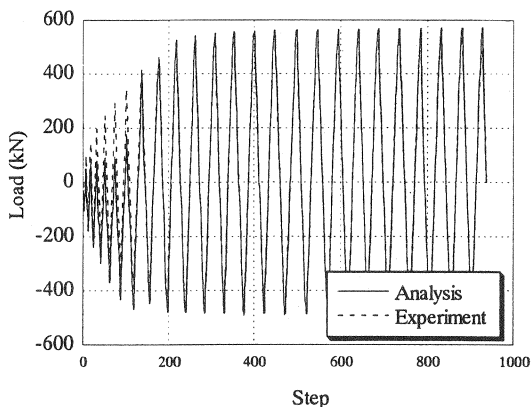


図-9 ネットワークによる出力と実験結果の比較 (ステップ比較)

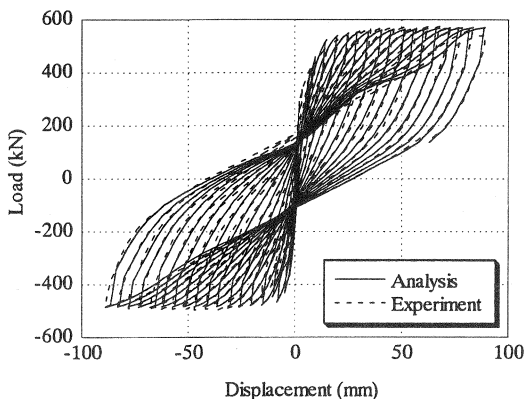


図-10 ネットワークによる出力と実験結果の比較 (履歴比較)