

ニューラルネットワークを用いた吊橋のリアルタイム損傷判定法の検討

茨城大学大学院 学生会員 ○黒田 聡
 茨城大学工学部 フェロー 横山 功一
 茨城大学工学部 正会員 原田 隆郎

1.研究の背景と目的

耐震的に脆弱な構造物や老朽化している構造物が多く存在している現状に対し、都市構造物の健全性評価手法の高度化は重要な課題になっている。本研究で対象とする吊橋は大規模で複雑な構造物であり、そのような吊橋に、地震動が働いたときの健全性評価をモデル化せずに、またリアルタイムに行う手段として、参考文献 1) によるニューラルネットワーク(NN)を用いて損傷判定法を検討した。この損傷判定法は、吊橋で観測された地震応答データを用いて吊橋の構造同定を行い、次に同定した構造システムを利用して吊橋の損傷を検知するものであり、本研究はこの損傷判定法の信頼性と汎用性をより高めることを目的とする。

2.ニューラルネットワークを用いた損傷判定システム

2-1.吊橋と地震応答データに対する NN の構造

本研究で使用する NN は、入力層（ニューロン数 6）、中間層（ニューロン数 20）、出力層（ニューロン数 1）の 3 層から成る階層型 NN であり、吊橋、地震応答データと NN との対応関係は、図 1 に示すようになる。

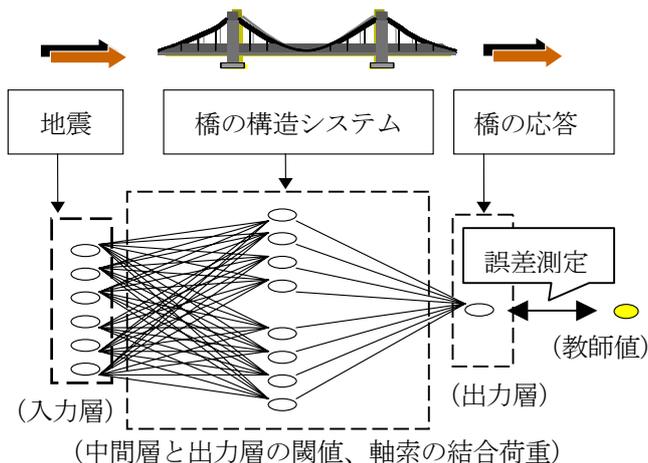


図 1.吊橋と地震応答データに対する NN の構造

2-2.損傷検知システムとしての利用

図 1 の NN を用いて地震による吊橋の損傷検知を行うために、はじめに損傷の無い健全状態での吊橋の構造同定を行う。よって、地震によってまだ損傷が生じていな

いと考えられるピーク以前の地震データを入出力層に入力して NN の学習を行う。1 度吊橋の健全時構造システムを同定すれば、地震に対する吊橋の応答を解析により予測できる。この健全な吊橋の地震に対する予測応答と、実際に観測された吊橋の応答（実測値）の値に大きな誤差があれば、それは損傷により生じた誤差であると予想される。また学習データとして教師値となる地震応答データは、入力地震データに比べて時間的に 1 ステップ先のデータを入力することにより、地震データから応答を予測することのできる NN を構築することができる。

2-3.誤差の定義

NN 学習時と応答予測時で振幅の大きさの異なるデータを扱うために、参考文献 1) と同様にデータのばらつきを割合を表す RRMS(Relative Root Mean Square)を定義する。ただし、 M はデータ個数、 m 個目のデータの応答予測値と実測値をそれぞれ a_m 、 b_m とし、式(1)に示す。

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

学習時の誤差 RRMS の値を損傷がない基準として考えるために、学習時の RRMS に対して地震ピーク以降の予測と実測の RRMS が何割変化したかを表す RRMS 変化率 (%)を損傷有無の判断基準とする。

3.安芸灘大橋を対象とした解析結果

本研究では、広島県道路公社により芸予地震と鳥取県西部地震による安芸灘大橋の応答データが測定されているので、このデータと上記の NN の計算プログラムを利用して安芸灘大橋に損傷が生じていないかどうかを確認する。安芸灘大橋は、芸予地震と鳥取県西部地震について損傷は生じなかったことが分かっている。また、NN の学習時、応答予測時共に、入力地震データとしては、4A アンカレイジでの応答加速度、中央径間 1/4 点と 1/2 点で

キーワード：ニューラルネットワーク (NN)、地震、NN の学習、リアルタイム、損傷判定法、周波数特性

連絡先：〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1 TEL：0294-38-5172 FAX：0294-38-5268

の応答速度を入力し、教師値（実測値）のデータは中央径間 1/2 点での応答速度とする。

3-1. 学習波形の性質が応答予測に及ぼす影響

実際に鳥取県西部地震の地震応答データ（19s～24s）で学習した NN を用いて、29s 以降の鳥取県西部地震鉛直方向の予測応答と実測値の誤差を解析した結果を表 1 に示す。表 1 の結果から、39s 以降の時間帯については精度よく応答を予測できているのに対し、29s～34s の時間帯だけ誤差の値が大きい。鳥取県西部地震により安芸灘大橋に損傷はなかったため、損傷以外の原因で誤差が生じたと考えられる。この誤差の原因を調べることを目的とし、学習時と応答予測時（時間帯別）のデータの周波数解析を行った結果を、図 2 に図示する。図 2 より、誤差の原因として学習時と予測時の周波数特性の違いが考えられ、これより、同一地震により構造同定し、その結果を用いて損傷判定するのは難しいことがわかった。

表 1. 鳥取県西部地震鉛直方向における
実測値と予測値の誤差

	RMS (mm/s)	RRMS (%)	RRMS 変化率 (%)
19s-24s (学習)	0.57	12.9	0
29s-34s	2.02	21.7	68.2
39s-44s	3.33	10.5	-18.0
49s-54s	4.24	9.59	-25.7
54s-64s	4.62	10.4	-19.4
69s-74s	2.51	7.44	-42.3

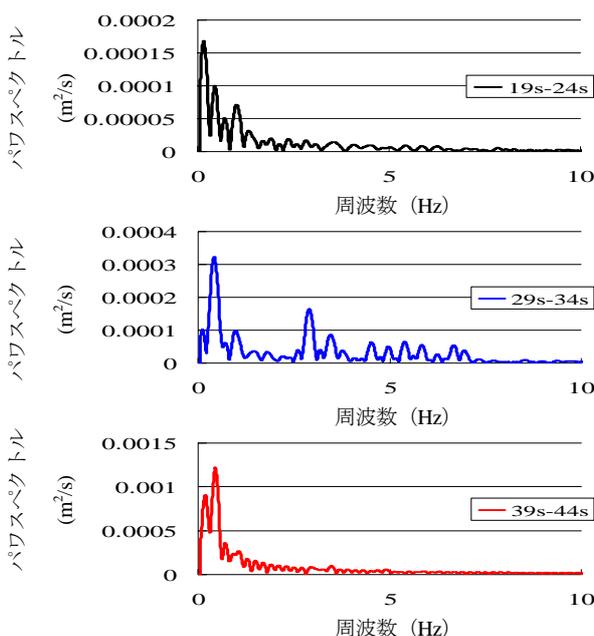


図 2. 鳥取県西部地震鉛直方向における
時間帯別のパワースペクトル波形図

3-2. 地震波全体での学習・応答予測

次にこの難点を改善するために、高～低周波数すべてを含む 1 つの地震波全体で学習させた NN を用いて他の地震波の応答予測を行い、地震発生から経過した時刻までの RRMS 変化量の累計を損傷有無の判断基準とすることとした。この方法で次の損傷判定基準を考えた。

- ・ 損傷が無ければ、時刻が経過するにつれて周波数特性は学習時と似たものになってくるので、RRMS 変化率は小さくなっていき、ほぼ一定の値に収束する
- ・ 損傷が生じたならば、周波数特性が変化し、ある時刻で急に RRMS 変化率が大きくなり、その後 RRMS 変化率は増えつづける。

表 2 に、芸予地震全体（鉛直方向）で学習した NN を用いた鳥取県西部地震鉛直方向における実測値と予測値の誤差を図示する。0s～30s と 0s～40s の間で RRMS 変化率が増えるのは、およそ 35s で S 波が到達し、35s 以前と地震波の性質が変化したためであると思われるが、40s 以降で誤差の値はほぼ一定に収束した。これより、新しい損傷判定法の可能性を得ることができた。

表 2. 鳥取県西部地震鉛直方向における
実測値と予測値の誤差（全体学習・応答予測）

	RMS (mm/s)	RRMS (%)	RRMS 変化率 (%)
0s-60s (学習)	1.88	8.93	0
0s-10s	0.28	12.9	44.5
0s-20s	0.31	10.8	20.9
0s-30s	0.53	8.43	-5.60
0s-40s	1.76	10.9	22.1
0s-50s	2.61	11.0	23.2
0s-60s	3.08	11.0	23.2

4. 結論

1. NN 予測誤差(RRMS 変化量)は、学習データと予測データの性質の違いに左右される。1 つの地震波全体で学習させると、NN 予測時の RRMS 変化率は一定に落ち着く
2. これにより新しい損傷検知法の可能性が確認できた

【参考文献】

- 1) Bin Xu, Zhishen Wu, Koichi Yokoyama : 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, 2002.8