

# ニューラルネットワークを用いた 加速度応答に基づく橋梁の損傷判定

松田 泰治<sup>1</sup>・宮武 修也<sup>2</sup>・梶田 幸秀<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 九州大学大学院 教授 工学研究院 社会基盤部門

(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail:mazda@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程

(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail:miyatake@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 九州大学大学院 准教授 工学研究院 社会基盤部門

(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail:ykajita@doc.kyushu-u.ac.jp

地震時に道路橋の損傷を瞬時に判定し、迅速な道路網の復旧を実現することを目的に、本研究ではニューラルネットワークを用い、橋梁で観測された加速度応答から支承および橋脚における損傷度の判定を試みた。まず、観測された加速度応答から免震支承変位応答をニューラルネットワークで再現できることを確認した。また、ニューラルネットワークと完全積分を併用して加速度応答から橋脚基部曲率応答を再現できることも確認した。最後に模擬地震動を用い、免震支承変位応答および橋脚基部曲率応答を基に損傷程度を判定する本手法の精度を検証した。

**Key Words:** neural network, structural health monitoring, acceleration response, bearing, pier

## 1. はじめに

大地震が発生した場合、道路橋を含むインフラが被災することにより交通機能に障害が生じ、その結果、復旧作業に影響が出ることが想定される。しかし、現場に直接赴き橋梁の被災度を確認するという従来の方法では道路への被害や二次災害の危険も相まって、多くの時間が費やされてしまう。例えば文献<sup>1)</sup>によると、兵庫県南部地震では被災後の交通障害などが重なり、阪神高速道路の被害概況を把握するのに約6時間を要した。

その反省から地震後の迅速な道路、橋梁被害概況を把握するためのマニュアルが作成された。また新しい構造ヘルスマニタリング (SHM) 技法の導入も進められた。

ただし、これで全ての問題が解決されたわけではない。文献<sup>2)</sup>によると2016年の熊本地震では震源付近の橋梁にはカメラを用いた SHM システムが導入されていたが、地震が夜間に発生したことから視覚情報で損傷程度を把握することができなかった。そのため、現地に職員が赴いて橋梁被害の有無や程度を把握せざるを得なかった。

結局、震源付近の橋梁被害概況図を完成するのに約16時間が費やされてしまった。

近年、建造物の健全性をモニタリングする様々な SHM 技法が提案されている。中でも、加速度センサーを橋梁に設置し、観測された加速度応答から建造物の損傷検知を試みるケースが多い。例えば小国ら<sup>3)</sup>は、一本柱構造の基部と上部に加速度計をそれぞれ一つずつ設置し、両者の差を時間積分することで相対変位の時刻歴を求め、構造の塑性化を検知する手法を提案した。小寺ら<sup>4)</sup>は、建物の損傷判断の基準として、層間変形角に注目し、限られた階にのみ設置された加速度センサーから全層の層間変形角を推定する方法を提案した。特定の層の加速度応答を計測し、層間を全体として滑らかになるよう3次スプライン補間することで、加速度センサーが設置されていない層の応答を算出している。さらに岡田<sup>5)</sup>は建物の基礎・最上階に設置した加速度センサーの記録から求めた相対加速度応答から、固有振動数を検出し、観測層以外の応答波形を算出することを提案した。品川ら<sup>6)</sup>はコストを最小限に抑えるべく、建物に1台の加速

度センサーを設置し、全層の加速度応答および層間変位を算出して最大層間変形角を求める手法を提案した。

また、加速度センサーとニューラルネットワーク (NN) を組み合わせた SHM 技法も提案されている。M.Vagnoli ら<sup>7)</sup>はトラス橋に 8 個の加速度センサーを設置し、車両通過時に記録される振動による加速度応答を NN に学習させることで、橋梁の構造健全性状態を分類する手法を提案している。C.S.Huang ら<sup>8)</sup>は多層構造物に設置した加速度センサーで観測した弾性挙動時の加速度応答を NN に学習させたうえで、塑性化が発生した時の応答を NN に推定させ、実測応答との差を基に損傷判定を行う手法を提案した。横山ら<sup>9)</sup>は、橋梁の弾性時応答を学習させた NN が出力した応答値と実測値の差を基に損傷判定を行う手法を提案した。

このように加速度センサーは近年、細工技術の発展とともにコストが安くなりつつあるため SHM 技法に用いられるようになった。また NN は、入力に必要なデータさえ用意できれば即時に出力データを返すことができる。つまりこの二つを組み合わせることにより、低コスト、かつ短時間で橋梁の損傷を検知するシステムが実現できる可能性がある。

ここで重要なのは橋梁の損傷度を表す指標の内、橋梁に設置した加速度センサーで入手・生成できるものを選ぶことである。免震橋梁では、支承および橋脚に地震発生時のエネルギー吸収を分担させている。また橋梁の耐震性に関する限界状態を判定するうえで、支承のせん断ひずみ、橋脚の塑性化を考慮することとなっている。な

お一般的に、動的解析に使用する材料非線形モデルとして、ばね要素は荷重-変位関係モデル、非線形梁要素は曲げモーメント-曲率関係モデルと規定されている。免震支承変位応答、橋脚基部曲率応答の記録が入手できれば、耐荷性能を区分する限界状態に基づいて各部材の状態を判定することができる。

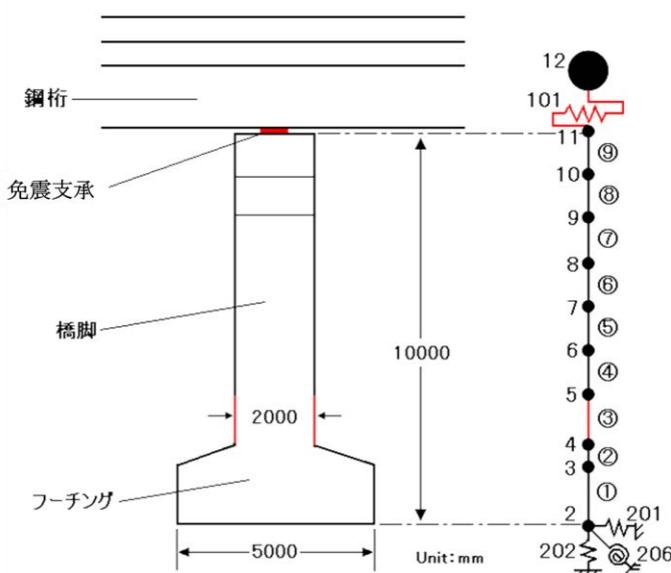
そこで本研究では、橋梁に設置した加速度センサーで記録された地震発生時の加速度応答から、免震支承変位応答および橋脚基部曲率応答を NN で再現することを試みた。免震支承変位応答、橋脚基部曲率応答という客観的なデータを直接再現することで、NN における誤差の閾値を代表とするパラメータの設定等、個人の判断にゆだねられる作業を省き、地震発生後短時間且つ遠隔で各部材の状態が判定可能となる。さらに NN が各部材における状態の判定をどの程度行うことが出来ているのか、検証も実施した。

## 2. 対象構造物

### (1) 構造モデル

既往研究<sup>10)11)12)</sup>を参考に、I種地盤 A 地域の支承条件を固定として断面設計された鉄筋コンクリート製の単柱式免震橋脚 (直接基礎)、鋼桁および高減衰積層ゴム支承から構成される構造物を検討対象とした。図-1 にその構造モデルおよび構造概要を示す。

構造モデルのうち、鋼桁は桁の重心で一質点にモデル



節点番号	位置
12	桁 (上部構造)
11	橋脚頂部
4	橋脚基部
2	フーチング下端

要素番号	種類
101	免震支承の水平ばね
③	橋脚の 2 次元非線形梁要素
①~②, ④~⑨	フーチング、橋脚の 2 次元線形梁要素
201	水平方向地盤ばね ( $4.37 \times 10^3 \text{ MN/m}$ )
202	鉛直方向地盤ばね ( $1.31 \times 10^4 \text{ MN/m}$ )
206	回転方向地盤ばね ( $2.74 \times 10^3 \text{ MN} \cdot \text{m/rad}$ )

図-1 構造モデル

化し（節点 12），フーチングを含む RC 橋脚は 2 次元梁要素でモデル化した。フーチングを除いた RC 橋脚全体を 7 分割し，橋脚基部（要素③）の塑性ヒンジ<sup>13)</sup>の領域は 2 次元非線形梁要素により考慮した。

免震支承は履歴復元力特性がバイリニア型に従う水平ばねで置き換え，鉛直方向は剛とした。水平ばねは，既往研究<sup>14)15)</sup>で提案された免震支承の形状設計の手順に従って，1 種地盤用で目標設計変位を 0.2m として設計した場合の免震支承を用いた。

橋脚基部の 2 次元梁要素の非線形性は武田モデルにより考慮した。また，フーチングの下端には地盤ばねを考慮した。地盤ばねは既往研究<sup>10)</sup>に基づき水平ばね，鉛直ばねおよび回転ばねでモデル化した。免震支承の水平ばねの減衰定数は 0% とし，地盤ばねの減衰定数は全て 20% とした。橋脚基部の 2 次元梁要素に対する減衰定数は基部の非線形梁要素が 2%，その他の線形梁要素は全て 5% とした。

解析方法は直接積分法による時刻歴応答解析で，用いた数値計算法はニューマークの  $\beta$  法で， $\beta=0.25$  である。

## (2) 各部材の限界状態

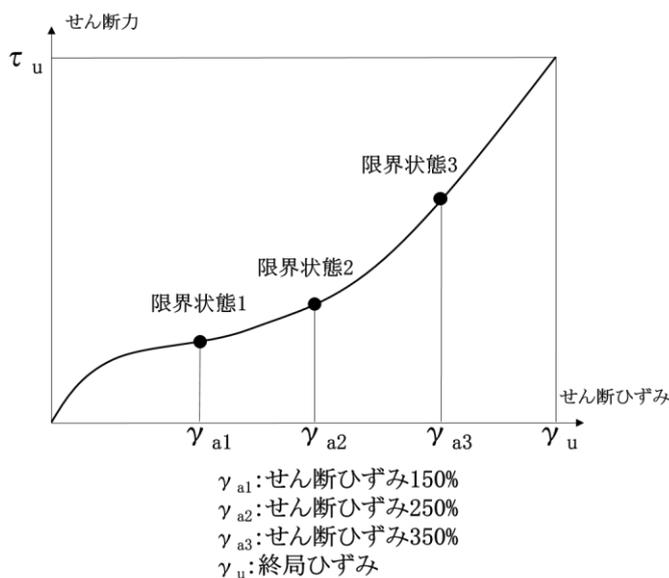


図-2 免震支承のせん断力とせん断ひずみの関係における限界状態

既往研究<sup>11)12)</sup>及び文献<sup>16)17)</sup>を参考に，免震支承変位応答，橋脚基部曲率応答に基づく各部材の損傷度を区分する限界状態の設定を行った。図-2は免震支承のせん断力とせん断ひずみの関係における限界状態を，図-3は曲げ破壊先行型の RC 橋脚の曲げモーメント—曲率関係における限界状態を示している。

なお免震支承の変位<sup>18)</sup>について，限界状態 1 をハードニングが起こらない限界の状態，限界状態 2 をハードニングが起こるが，剛性が著しく変化しない限界の状態，限界状態 3 をハードニングと剛性変化は起こるが，破断が起こらない限界の状態と設定した。

## 3. ニューラルネットワーク (NN)

NN は，入力層，中間層，出力層からなる。一般的に，入力層，出力層は 1 層であり，中間層は 1 層ないし複数層ある。また，各層に含まれる要素のことをノードと呼び，1 層あたりに含まれるノードの個数をノード数と呼ぶ。本研究では，同一のネットワークにおいて中間層のノード数は同数とした。また，入力層のノードのことを

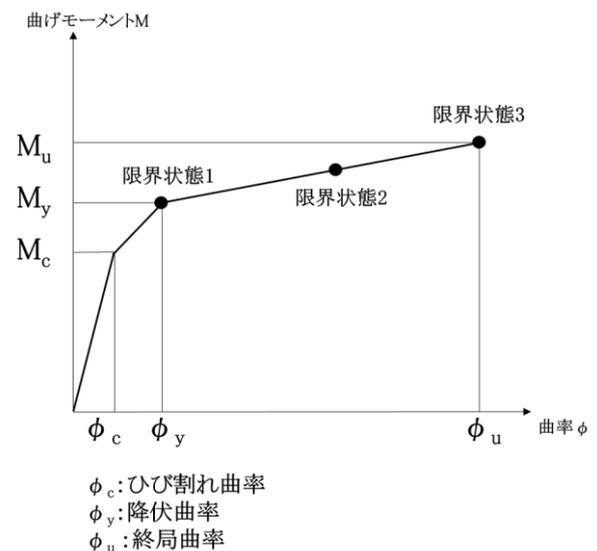


図-3 曲げ破壊型 RC 橋脚の曲げモーメント—曲率関係における限界状態

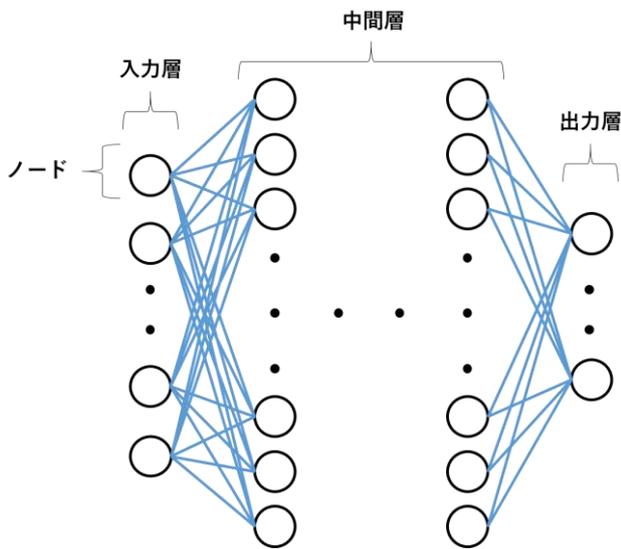


図-4 一般的な NN の概要図

表-1 学習に用いた設計地震動の種類，継続時間およびデータ数

学習に用いた設計地震動	継続時間 (s)	データ数
タイプ II-I 種地盤-1	30	3000
タイプ II-I 種地盤-2	30	3000
タイプ II-I 種地盤-3	30	3000
タイプ II-II 種地盤-1	40	4000
タイプ II-II 種地盤-2	40	4000
タイプ II-II 種地盤-3	40	4000

入力要因，出力層のノードのことを出力要因と呼ぶ。図-4に一般的な NN の概要を示す。本研究で用いる NN は，中間層数を 1-3 層，中間層のノード数を 20-100 個とし，学習回数は 1000 万回とした。また，活性化関数には ReLU 関数，最終層にのみ恒等関数を用いた。ReLU 関数は，入力値が 0 より小さいときは 0 を，それ以外の時は入力値のまま出力する。

#### 4. 入力地震動

##### (1) 学習データ

本研究で NN の学習に用いた地震動応答は動的解析ソフト TDAPIII で設計地震動を構造モデルに作用させて得た。設計地震動は日本道路協会<sup>19)</sup>が提供しているレベル

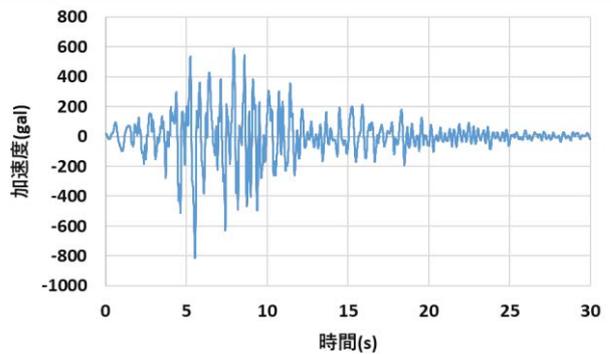


図-5 タイプ II-I 種地盤-1 設計地震動

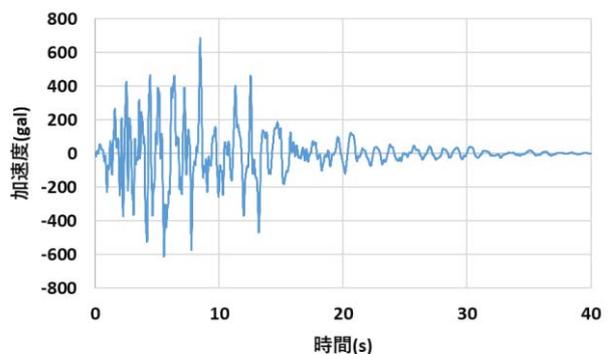


図-6 タイプ II-II 種地盤-1 設計地震動

2地震動を用いた。学習に用いた設計地震動応答はタイプ II-I 種地盤，タイプ II-II 種地盤のそれぞれ 3 波ずつである。時間刻みはそれぞれ 0.01 秒とし，継続時間およびデータ数は表-1 に示すとおりである。また，設計地震動の一例として図-5 にタイプ II-I 種地盤-1，図-6 にタイプ II-II 種地盤-1 を示す。

##### (2) 検証データ

学習済み NN の応答再現度を確認するために，模擬地震動応答を用意した。模擬地震動の作成にあたっては平成 29 年度道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編<sup>17)</sup>に記載されている標準加速度応答スペクトル（レベル 2-タイプ II）をターゲットスペクトルとし，それを基にスペクトル適合法を用いて作成した。振幅補正の許容誤差は 5% とした。用意した模擬地震動は，タイプ II-I 種地盤，タ

表-2 検証に用いた模擬地震動の種類, 継続時間およびデータ数

用意した模擬地震動	継続時間 (s)	データ数
タイプ II - I 種地盤	30	3000
タイプ II - II 種地盤	40	4000

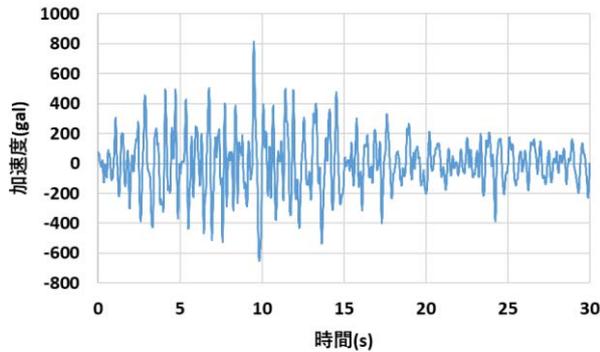


図-7 タイプ II-I種地盤模擬地震動

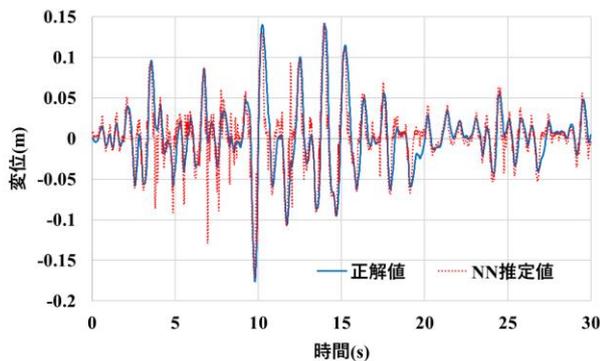


図-9 中間層が3層, 各層のノード数が60個のNNで模擬地震動による免震支承変位応答を再現した結果

タイプ II - II 種地盤の二種類である。時間刻みはそれぞれ 0.01 秒とし、継続時間およびデータ数は表-2 に示すとおりである。また、模擬地震動の一例として図-7 にタイプ II - I 種地盤のものを示す。

## 5. NNによる免震支承の損傷状態の判定

### (1) 入出力要因

免震支承の変位応答を再現する NN では、入力要因を橋脚頂部および鋼桁の加速度応答とし、出力要因を免震支承変位応答とした。なお、学習データは -1 ~ 1 の範囲に正規化した。NN の概要を図-8 に示す。

### (2) 学習結果

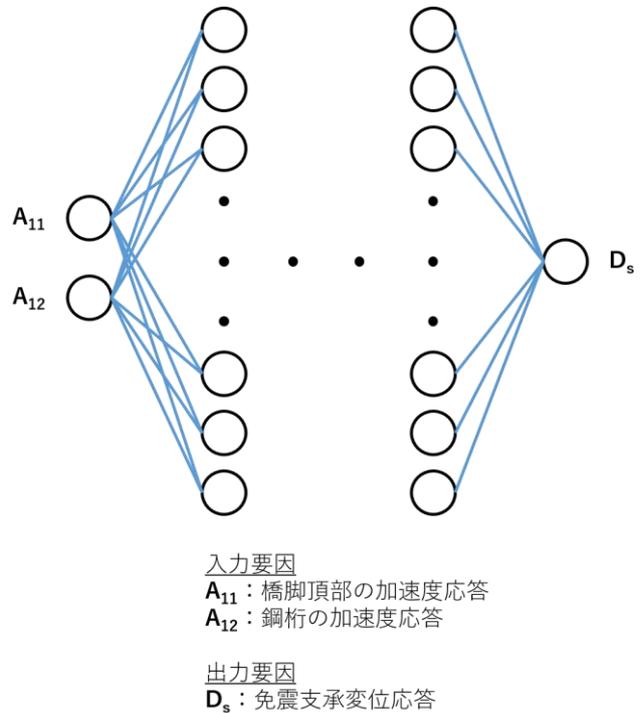


図-8 免震支承の変位応答を推定する NN の概要図

学習済みの NN が免震支承変位応答をどの程度正確に再現できたのか、模擬地震動応答を用いて検証を行った。検証は、模擬地震動による橋脚頂部、鋼桁の加速度応答を学習済みの NN に入力要因として与え、免震支承変位応答を出力させて行った。

一例として、中間層が 3 層、各層のノード数が 60 個の NN で検証を行った結果を図-9 に示す。変位応答の最高値および最低値では NN による推定値と動的解析ソフトによる正解値が概ね一致している。

### (3) 免震支承の損傷状態の判定

学習が済んだ各 NN が免震支承変位応答に基づいて、免震支承の損傷度を表す状態をどの程度正確に判定でき

表-3 NNによる免震支承状態を判定した結果を、中間層数、各層のノード数、模擬地震動種別ごとに掲載

中間層数	各層のノード数	模擬地震動	正答率(%)	中間層数	各層のノード数	模擬地震動	正答率(%)
2層	20	タイプII-I種地盤	92	3層	20	タイプII-I種地盤	93
		タイプII-II種地盤	81			タイプII-II種地盤	56
	30	タイプII-I種地盤	87		30	タイプII-I種地盤	86
		タイプII-II種地盤	86			タイプII-II種地盤	29
	40	タイプII-I種地盤	87		40	タイプII-I種地盤	85
		タイプII-II種地盤	81			タイプII-II種地盤	56
	50	タイプII-I種地盤	87		50	タイプII-I種地盤	81
		タイプII-II種地盤	56			タイプII-II種地盤	88
	60	タイプII-I種地盤	86		60	タイプII-I種地盤	89
		タイプII-II種地盤	77			タイプII-II種地盤	88
	70	タイプII-I種地盤	90		70	タイプII-I種地盤	90
		タイプII-II種地盤	86			タイプII-II種地盤	87
	80	タイプII-I種地盤	85		80	タイプII-I種地盤	87
		タイプII-II種地盤	76			タイプII-II種地盤	71
	90	タイプII-I種地盤	90		90	タイプII-I種地盤	89
		タイプII-II種地盤	93			タイプII-II種地盤	90
	100	タイプII-I種地盤	89		100	タイプII-I種地盤	87
		タイプII-II種地盤	72			タイプII-II種地盤	82

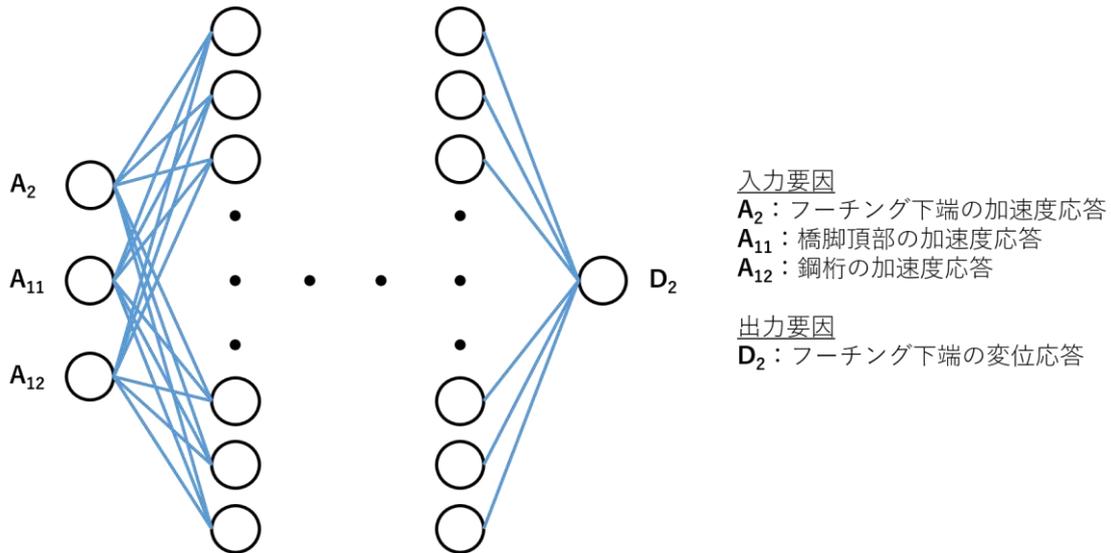


図-10 フーチング下端の変位応答を推定する NN の概要図

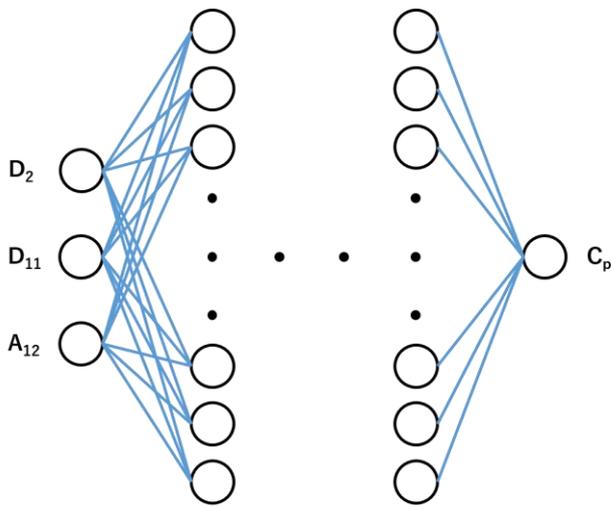
るのか模擬地震動応答を用いて検証した。模擬地震動はタイプII-I種地盤、II種地盤をそれぞれ100波ずつ用意した。NNによる判定結果と、動的解析ソフトの応答値を基にした結果が一致していた割合を「正答率」とした。各層、ノードごとの正答率を表-3に示す。なお、中間層が1層のNNは学習が進まなかったため、表からは省いた。

結果として、中間層が2層で、各層のノード数が90個のNNが正答率90%、93%という高い精度を示したが、その他のNNでも概ね良好な結果が得られた。

## 6. NNによる橋脚の損傷状態の判定

### (1) 橋脚基部曲率応答再現の流れ

橋脚基部曲率応答を再現するにあたってまず、フーチング下端、橋脚頂部、鋼桁の加速度応答を入力要因とするNNでフーチング下端の変位応答を出力させた。NNの概要を図-10に示す。次に、フーチング下端に対する橋脚頂部の相対加速度応答を2階完全積分することで、フーチング下端に対する橋脚頂部の相対変位応答を算出した。そして最初にNNで再現したフーチング下端の変位応答との和をとることで、橋脚頂部の変位応答を算出し



入力要因  
 $D_2$  : フーチング下端の変位応答  
 $D_{11}$  : 橋脚頂部の変位応答  
 $A_{12}$  : 鋼桁の加速度応答

出力要因  
 $C_p$  : 橋脚基部曲率応答

図-11 橋脚基部の曲率応答を推定する NN の概要図

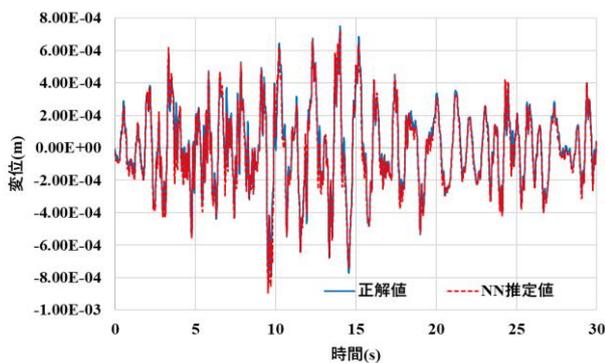


図-12 中間層が2層、各層のノード数が60個のNNで模擬地震動によるフーチング下端変位応答を再現した結果

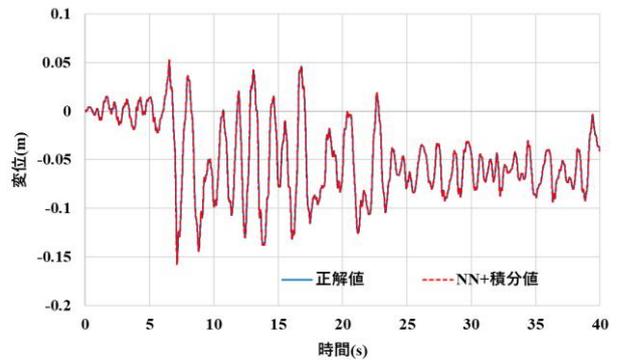


図-13 NNおよび完全積分で橋脚頂部の変位応答を再現した結果

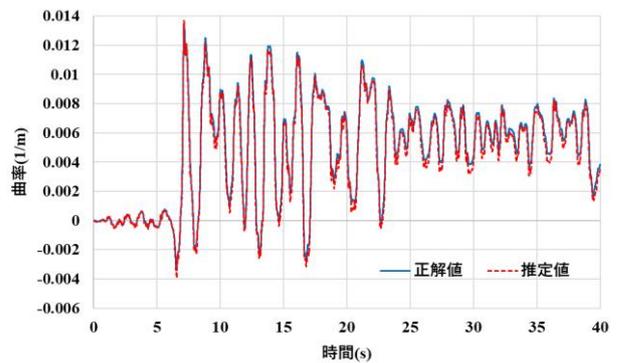


図-14 中間層が3層、各層のノード数が60個のNNで模擬地震動による橋脚基部曲率応答を再現した結果

た。

最後に、NNおよび積分で再現したフーチング下端、橋脚頂部の変位応答に加え、鋼桁の加速度応答を入力要因としたNNで橋脚基部曲率応答を再現した。なおこのNNの学習には、NNや積分で再現した変位応答ではなく、動的解析ソフトで直接得られた変位応答を用いた。また学習データは-1~1の範囲に正規化した。このNNの概要を図-11に示す。

## (2) 学習結果

学習済みNNによる応答再現度合いを確認するため、模擬地震動応答を用いて検証を行った。フーチング下端、橋脚頂部、鋼桁の加速度応答を入力要因とする、中間層2層、各層のノード数が60個のNNでフーチング下端の変位応答を出力させた結果の一例を図-12に示す。変位応答は、最大値、最小値を含めてNNによる推定値と動的

解析ソフトによる正解値が概ね一致している。

このNNによって再現したフーチング下端の変位応答に、2階完全積分で求めた相対変位応答を加えて再現した橋脚頂部の変位応答の結果の一例を図-13に示す。残留変位が生じる区間を含めて推定値と正解値の間に大きな差は見られない。

最後に、NNおよび積分で再現したフーチング下端、橋脚頂部の変位応答および、鋼桁の加速度応答を入力要因としたNNで橋脚基部曲率応答を出力した結果の一例を図-14に示す。継続時間を通して、NNによる推定値と正解値に大きな差は見られなかった。

## (3) 橋脚の損傷状態の判定

橋脚の曲率応答を出力する各学習済みNNが橋脚基部曲率応答に基づいて、橋脚の損傷度を表す状態をどの程度正確に判定できるのか模擬地震動応答を用いて検証し

表-4 NNによる橋脚状態を判定した結果を、中間層数、各層のノード数、模擬地震動種別ごとに掲載

中間層数	各層のノード数	模擬地震動	正答率(%)	中間層数	各層のノード数	模擬地震動	正答率(%)
2層	20	タイプII-I種地盤	90	3層	20	タイプII-I種地盤	61
		タイプII-II種地盤	100			タイプII-II種地盤	100
	30	タイプII-I種地盤	48		30	タイプII-I種地盤	38
		タイプII-II種地盤	100			タイプII-II種地盤	100
	40	タイプII-I種地盤	93		40	タイプII-I種地盤	87
		タイプII-II種地盤	100			タイプII-II種地盤	99
	50	タイプII-I種地盤	27		50	タイプII-I種地盤	90
		タイプII-II種地盤	100			タイプII-II種地盤	100
	60	タイプII-I種地盤	41		60	タイプII-I種地盤	91
		タイプII-II種地盤	97			タイプII-II種地盤	100
	70	タイプII-I種地盤	67		70	タイプII-I種地盤	83
		タイプII-II種地盤	100			タイプII-II種地盤	100
	80	タイプII-I種地盤	43		80	タイプII-I種地盤	87
		タイプII-II種地盤	100			タイプII-II種地盤	100
	90	タイプII-I種地盤	63		90	タイプII-I種地盤	66
		タイプII-II種地盤	100			タイプII-II種地盤	98
	100	タイプII-I種地盤	91		100	タイプII-I種地盤	73
		タイプII-II種地盤	99			タイプII-II種地盤	100

た。模擬地震動はタイプII-I種地盤、II種地盤をそれぞれ100波ずつ用意した。NNによる判定結果と、動的解析ソフトの応答値を基にした判定結果が一致していた割合を「正答率」とした。各層、ノードごとの正答率を表-4に示す。なお、中間層が1層のNNは学習が進まなかったため、表からは省いた。また、フーチング下端、橋脚頂部、鋼桁の加速度応答を入力要因としてフーチング下端の変位応答を出力するNNは、中間層が2層、各中間層に含まれるノード数が60個のものに固定した。

結果として、中間層が2層で、各層のノード数が100個のNNが正答率91%、99%という高い精度を示した。また、免震支承の場合と比較するとばらつきがあるものの、複数のNNで良好な結果が得られた。

## 7. まとめ

本研究では、地震発生後短時間且つ遠隔で橋梁の各部材の損傷度を表す状態を判定するため、フーチング下端、橋脚頂部、鋼桁で観測された加速度応答から免震支承変位応答、橋脚基部曲率応答をニューラルネットワーク(NN)によって再現することを試みた。そのうえで、NNによって再現された各応答がどの程度の正確性を持っていたか、模擬地震動応答を用いた各部材状態の判定結果を通じて検証した。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

(1) 橋脚頂部、鋼桁の加速度応答を入力要因とし、免震支承変位応答を出力するNNにおいては、高精度で、変

位応答の最大・最小値が再現可能であることが確認された。

(2) 橋脚基部曲率応答を再現するにあたり、本研究で用いたNNおよび完全積分を組み合わせた方法では、橋脚に比較的大きな残留変位が生じる場合でも、曲率応答を高精度で再現可能であることが確認された。

(3) 各NNによって再現された免震支承変位応答、橋脚基部曲率応答を基に、各部材状態をどの程度正確に判定できるのか検証を行った結果、免震支承、橋脚共に高精度で判定可能であることが確認された。

今回NNの学習および検証に用いた設計地震動・模擬地震動はレベル2-タイプIIのみであり、より汎用性の高いNNを構築し、各部材状態の判定を行うために、レベル2-タイプIの地震動も学習・検証に用いることが必要だと考えられる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省: 的確な震後対応のための被災イメージ活用と被災状況の迅速な把握技術の開発, <<https://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h17giken/program/kadai/pdf/shitei/shi2-01.pdf>>, (入手 2021.4.12) .
- 2) 国土交通省: 近年の主な災害で得られた教訓と課題, <<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/sdt/pdf01/04.pdf>>, (入手 2021.4.12) .
- 3) 小国健二, 堀宗朗: 無線センサネットワークによる構造

- 物塑性化検知のための計測・解析手法の提案, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.67, No.1, pp.13-24, 2011.
- 4) 小寺健三, 西谷章, 沖原有里奈: 限られた階の加速度記録のみに基づく3次スプライン補間による建物全層の応答推定, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.746, pp.527-535, 2018.
  - 5) 岡田敬一: 2ヶ所のセンサにより得られた地震記録を用いた建物全層応答推定手法の提案, 清水建設研究報告, Vol.93, 2016.1.
  - 6) 品川祐志, 三田彰: 1台の加速度センサのみを用いた建築構造物の振動応答推定手法, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.42, pp.461-464, 2013.6.
  - 7) Vagnoli, M., Remenyte-Priscott, R., Andrews, J. and Kim, C. W.: A machine learning classifier for condition monitoring and damage detection of bridge infrastructure, Training in Reducing Uncertainty in Structural Safety (TRUSS) Workshop, Dublin, Ireland, pp.57-62, 2018.
  - 8) Huang, C.S., Hung, S.L., Wen, C.M. and Tu, T.T.: A neural network approach for structural identification and diagnosis of a building from seismic response data, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No.32, pp.187-206, 2003.
  - 9) 横山攻一, 原田隆郎, 黒田聡: 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, 日本地震工学論文集 Vol.7, No.5, pp.31-44, 2007.6.
  - 10) 土木学会: 橋の動的耐震設計, 土木学会, 2003.
  - 11) 高森麻由美, 松田泰治, 大塚久哲: 免震橋梁を対象とした多重非線形系における性能照査型設計に関する一考察, 第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2005.2.
  - 12) 松田泰治, 高森麻由美, 松尾龍吾, 大塚久哲: 不確定性を考慮した免震橋梁の性能評価に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.53A, 2007.3.
  - 13) 白木渡, 井面仁志, 今井慈郎, 伊藤則夫, 石川浩: 地震時保有水平耐力照査式を用いた終局限界状態に対する鋼製ラーメン橋脚の耐震信頼性評価, 構造工学論文集, Vol.45A, 1999.3.
  - 14) 松田泰治, 大塚久哲, 楊光遠, 山口濟: 免震橋梁の固有周期決定および免震沓の簡易設計法に関する考察, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998.3.
  - 15) 松田泰治, 大塚久哲, 神農誠, 入江達雄: 変位制御型の道路橋の免震設計法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.46A, 2000.3.
  - 16) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III 耐震設計編, pp.24-26, 2017.
  - 17) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.46-54, 114-137, 2017.
  - 18) 足立幸郎, 運上茂樹: 免震支承のハードニング特性に着目した免震支承と橋脚に塑性化が生じる免震橋梁の地震応答特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, 2001.3.
  - 19) 日本道路協会: 技術資料, <<https://www.road.or.jp/dl/tech.html>>, (入手 2019.11).

(Received ?)  
(Accepted ?)

## A STUDY ON ASSESSING THE DAMAGE OF A BEARING AND A PIER WITH NEURAL NETWORK USING THE ACCELERATION RESPONSES OF A BRIDGE

Taiji MAZDA, Shuya MIYATAKE and Yukihide KAJITA

After an earthquake, quickly identifying damage on bridges is crucial to early recoveries. However, current method of structural health monitoring on bridges rely on cameras, cable networks, and manpower. These methods require high costs and also lead to slower recovery effort. In order to address these issues, a health monitoring model of a bridge bearing and a pier using neural networks and accelerometers were proposed. Such a model ensures real time evaluation of bearing and pier damage while using only the acceleration responses of a bridge. In order to evaluate the bearing damage, a neural network was proposed with acceleration responses of girder and pier top being the input while the output being bearing displacement. In order to evaluate the pier damage, first a neural network was proposed with acceleration responses of footing, girder and pier top being the input while the output being footing displacement. Then a neural network was proposed with displacement responses of footing, pier top and acceleration responses of girder being the input while the output being pier curvature. Several different combinations of seismic motions were considered as the learning data set. The results demonstrated that the neural network estimated the bearing displacement and the pier curvature with high precision.