

## I-19 自己組織化特徴マップによる道路橋 RC 橋脚の耐震設計支援

## Supporting System on the Seismic Design for RC Piers with SOM

廣瀬彰則\*

近田康夫\*\*

中西 孝臣\*\*\*

Akinori HIROSE

Yasuo CHIKATA

Takaomi NAKANISHI

【抄録】近年、わが国における橋梁下部工の耐震設計は、その設計基準の改定に伴って設計変数が大幅に増加したため、非常に複雑なものとなっている。一般に橋梁下部工の耐震設計における入力条件と解との関係は非線形応答であり、設計初期値の設定が容易でないほか、得られた解がどの程度要求性能を満たしているものであるかを客観的に検証することは容易でない。

ここでは、ニューラルネットワークの一種である「自己組織化特長マップ (SOM)」を用いて、設計技術者が視覚的判断によって効率的に有効な設計初期値を設定することができる、支援システム構築に向けた研究成果と、その適用性について述べる。

【Abstract】 The seismic design for bridge-substructure has become more complicated in comparison with former. Recently, there are so many variables, for designing substructure, applied to the seismic design standards in JAPAN. Since there is a non-linear response between input and outcome of seismic design for bridge-substructure, it's a difficult to determine the initial design variables and to estimate the quality of the results. In this study, we tried to make a supporting system for the bridge engineer on the seismic design for substructure with the Self-Organizing Map, a kind of Neural-Network.

【キーワード】 SOM, 設計計算システム, 安定計算, 品質管理

【Keywords】 SOM, Systems for design, Estimation on stability, Quality Control

## 1. はじめに

橋梁の耐震設計分野への信頼性理論の適用については、地震動の不確定さや橋の変形性能の算定法の精度が不十分であることから、今後十分な研究が必要とされているところである<sup>1) 2) 3)</sup>。一方で、耐震設計の実務に着目して、信頼性理論、確率論的手法あるいは最適設計手法の考え方をを用いた、設計作業の軽減もしくは意思決定の一部を肩代わりさせようとする研究が進んでいる<sup>4) 5)</sup>。

特に橋梁下部工の耐震設計においては、必要な変形性能を確保するための具体的な構造詳細決定過程で、技術者の経験と勘に頼る部分が多く存在しており、平成8年度の道路橋示方書全面改訂以降、設計変数が大幅に増加したため、設計の各段階における

要求項目に対する最適断面の探索ならびに結果の検証が非常に難しくなっている。

本研究はこの過程に着目し、既往の設計実績を分析することで新たな設計データ作成を支援する、いわば技術者の経験と勘に相当する部分をシステム化しようとするものである。

## 2. 支援システムの概要

橋梁下部工の耐震設計における入力条件と解との関係は非線形応答であり、厳密に最適解を得るためには、多様なパターンに対する試行錯誤が必要である。一般には、その多くの部分を熟練した技術者の経験と勘に頼って省略している場合が多く、得られた解の完成度は、技術者の能力に左右されやすいも

\* 連絡先 中央復建コンサルタンツ(株) (金沢大学大学院自然科学研究科) 〒532-0004 大阪市淀川区西宮原1-8-29

TEL.06(6393)1133 e-mail:hirose.a@cfk.co.jp

\*\* 金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻 助教授 工博 e-mail:chikata@t.kanazawa-u.ac.jp

\*\*\* 京都府亀岡市

のとなっている。

また、ひとたび完了した設計結果に対して、その結果がどの程度要求性能を満足しているものであるかを客観的に検証することも容易でない。このことは、次期設計手法である性能設計への移行においても大きな障害となりうる問題である。

このような背景から、設計段階における解候補あるいは一定の段階に進んだ設計結果の、経済性、耐震性などに代表される要求性能に照らした評価をより簡単に、そして短時間に確認できるシステム構築の必要性が高まっている。

本研究では、ニューラルネットワークの1種である自己組織化特徴マップ(SOM:Self-Organizing Map)<sup>6)</sup>を用いて、既存の設計実績を分析するとともに、新たな設計代替案を既存の設計実績の分析・学習過程で得られた特徴マップ上に表現させる手法で、その代替案の評価を視覚的に行うことができるシステムの構築を目的とする。

SOMの他の土木工学分野への適用例としては、橋梁保守点検問題への適用例<sup>7)</sup>のほか、斜面崩壊予測問題への適用例<sup>8)9)10)</sup>、地盤性状の空間分布推定問題への適用例<sup>11)12)</sup>などがある。

本研究のフローチャートを図-1に示す。

### 3. 自己組織化特徴マップ(SOM)

自己組織化特徴マップ(SOM:Self-Organizing Map)は動物の神経や脳の働きを数学的に模擬したコンピュータアルゴリズムであるニューラルネットワークの手法の1つである。SOMのネットワークはデータを入力する入力層と、入力したデータを元にマップが形成される競合層の2層からなっている。

SOMの特徴としては、教師なしの学習アルゴリズムであるため、正解のデータが必要でないことと、データの中の隠れた特徴を抜き出して自動的に学習を行うことがあげられる。このため、SOMはパターン分類やパターン認識の分野で特に優れていると考えられている(図-2)。

SOMの学習による重みの更新は、勝者ニューロンおよびその近傍領域の重みをマップに提示された学習データに近づけることであり、結果として次に提示されるデータが前のデータと似ていれば前のデータの近傍領域のニューロンが勝者ニューロンとして

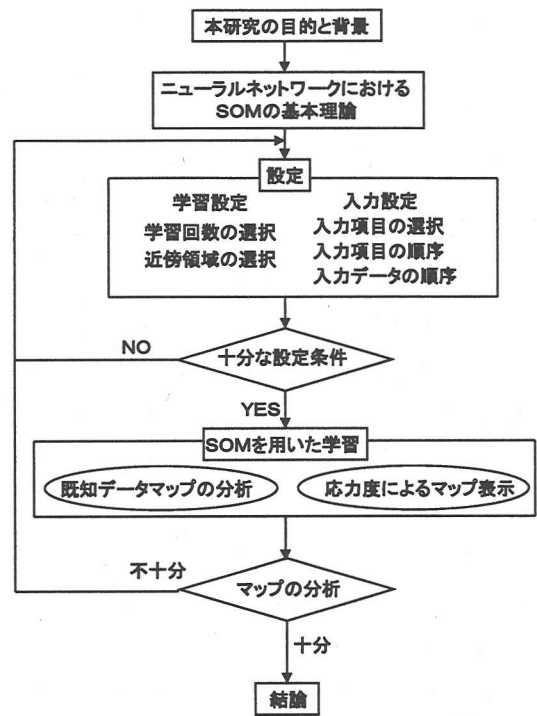


図-1 本研究のフローチャート

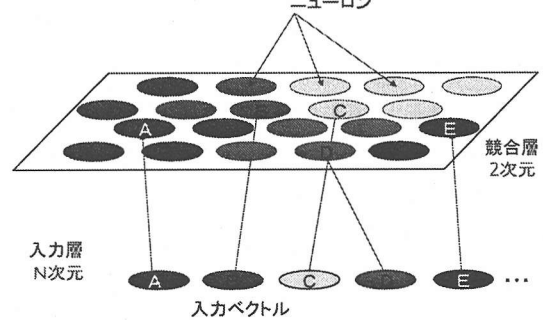


図-2 自己組織化特徴マップ

選ばれやすくなり、異なったデータなら逆に前のデータの近傍のニューロンが勝者ニューロンとして選ばれにくくなる。この操作を繰り返すことにより、学習が終わった後には類似したデータが寄り集まったマップが得られる<sup>13)</sup>。

以下にSOMの学習アルゴリズムを述べる。

- step1 入力層と、マップ層(競合層)の間の重みの初期値を乱数を用いて設定する。
- step2 入力層に入力ベクトル,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  を入力する。
- step3 次式を用いてマップ層  $j$  番目のニューロンと入力ベクトル,  $\mathbf{x}_i$  の距離  $d_j$  の計算を行う。

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - w_{ji})^2} \dots\dots\dots (1)$$

$w_{ji}$ : 入力層の  $i$  番目のニューロンとマップ層  $j$  番目のニューロン間の重み

step4 式 (1) より得られた  $d_j$  のなかで距離が最小となるニューロンを勝ちニューロン ( $j^*$ ) とする.

step5 勝ちニューロンとその近くのニューロンが次式に基づき重みが更新される.

$$\Delta w_{ji} = \eta h(j, j^*) (x_i - w_{ji}) \dots\dots\dots (2)$$

$\eta$  : 正の定数

ここで  $h(j, j^*)$  は近傍関数と呼ばれ次式で表される.

$$h(j, j^*) = \exp\left(\frac{-|j - j^*|^2}{\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (3)$$

$\sigma$  : 近傍の大きさを表すパラメーターで学習回数とともに小さくなる

step6 step2-step5 を繰り返し重みを学習する<sup>14)</sup>.

#### 4. 橋脚の耐震設計

##### (1) 地震時保有水平耐力法

ここでは特に地震時保有水平耐力法による耐震性評価の手法について概説する.

道路橋の耐震設計においては、道路橋示方書<sup>15)</sup>の規定により、プレート境界型の大規模地震を想定したタイプ I の地震動、および内陸直下型地震を想定したタイプ II の地震動の 2 種を考慮する.

##### 許容塑性率<sup>15)</sup>

許容塑性率とは構造部材の損傷あるいは応答変位を制限するために構造部材に許容する塑性率をいう.

許容塑性率は以下の式により算出する.

$$\mu = 1 + \frac{\delta u - \delta y}{\alpha \cdot \delta y} \dots\dots\dots (4)$$

$\mu$  : 鉄筋コンクリート橋脚の許容塑性率

$\delta u$  : 鉄筋コンクリート橋脚の終局変位 (m)

$\delta y$  : 鉄筋コンクリート橋脚の降伏変位 (m)

$\alpha$  : 安全係数

##### タイプ I の設計水平震度<sup>15)</sup>

設計水平震度とは耐震設計において、水平方向の慣性力を算出するために橋の重量に乗じる係数を意味する.

地震時保有水平耐力の照査に用いるタイプ I の設計水平震度は、以下の式 (5) により算出する. ただし式 (5) による値が 0.3 を下回る場合は 0.3 とする.

$$k_{hc} = c_z \cdot k_{hc0} \dots\dots\dots (5)$$

$k_{hc}$  : 地震時保有水平耐力法に用いるタイプ I の設計水平震度

$k_{hc0}$  : 地震時保有水平耐力法に用いるタイプ I の設計水平震度の標準値

$c_z$  : 地震時保有水平耐力の照査に用いる地域別補正係数

##### タイプ II の設計水平震度<sup>15)</sup>

地震時保有水平耐力の照査に用いるタイプ II の設計水平震度は、以下の式 (6) により算出する. ただし式 (6) による値が 0.6 を下回る場合は 0.6 とする.

$$k_{hc} = c_z \cdot k_{hc0} \dots\dots\dots (6)$$

$k_{hc}$  : 地震時保有水平耐力法に用いるタイプ II の設計水平震度

$k_{hc0}$  : 地震時保有水平耐力法に用いるタイプ II の設計水平震度の標準値

$c_z$  : 地震時保有水平耐力の照査に用いる地域別補正係数

##### 等価水平震度<sup>15)</sup>

等価水平震度とは地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度を許容塑性率に応じて低減した水平震度である.

地震時保有水平耐力法の照査に用いる等価水平震度は式 (7) により算出する.

$$k_{he} = \frac{k_{hc}}{\sqrt{2\mu - 1}} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $k_{he} \geq 0.4c_z$

$k_{he}$  : 地震時保有水平耐力の照査に用いる等価水平震度

$k_{hc}$  : 地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度

$\mu$  : 鉄筋コンクリート橋脚の許容塑性率

$c_z$  : 地震時保有水平耐力の照査に用いる地域別補正係数

##### 安全性の判定式<sup>15)</sup>

鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力法における安全性の照査の判定式を式 (8) に示す.

$$P_a \geq k_{he} \cdot W \dots\dots\dots (8)$$

$$W = W_U + c_P \cdot W_P \dots\dots\dots (9)$$

$P_a$  : 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力 (kN)

$k_{he}$  : 地震時保有水平耐力の照査に用いる等価水平震度

$W$  : 安全性の照査に用いる等価重量 (kN)

$W_U$  : 鉄筋コンクリートの橋脚が支持している上部構造部分の重量 (kN)

$c_P$  : 等価重量算出係数

$W_P$  : 鉄筋コンクリート橋脚躯体の重量 (kN)

## (2) 橋脚設計計算の流れ

近年、標準的高架橋に多く用いられる地震時水平反力分散方式の鉄筋コンクリート橋脚は、平成8年度版道路橋示方書に基づいて、次の3段階の手順で設計される。

**step1** 震度法による耐震設計

**step2** 地震時保有水平耐力の照査

**step3** 動的解析による安全性の照査

震度法による設計計算では、橋軸方向、橋軸直角方向各々について、鉄筋の引張応力度 ( $\sigma_s$ )、コンクリートの圧縮応力度 ( $\sigma_c$ )、せん断応力度 ( $\tau$ ) を算出し、それぞれ鉄筋の許容引張応力度 ( $\sigma_{sa}$ )、コンクリートの許容圧縮応力度 ( $\sigma_{ca}$ )、許容せん断応力度 ( $\tau_a$ ) に対して  $\sigma_s \leq \sigma_{sa}$ 、 $\sigma_c \leq \sigma_{ca}$ 、 $\tau \leq \tau_a$  の条件を満たしているか否かを判定基準とする。

保有水平耐力法による設計計算では橋軸方向、橋軸直角方向各々についてタイプ I、タイプ II 地震動に対する安全性を式 (8) により判定する。

以上の判定式により判定項目としては、震度法による判定6項目、保有水平耐力による判定4項目、計10項目が存在する。なお、これらの項目のうち1つでも条件を満たしていない項目が存在するデータは要求性能を満たしていないデータとして取り扱われ、実設計に採用されない。

## 5. SOM の設定値

### (1) 使用データ

自己組織化特徴マップ (SOM) の有効性を検証するために、鉄筋コンクリート橋脚の柱断面に着目し、橋

表-1 対象橋脚の共通設計条件

下部構造	張出し式橋脚 ( $H = 9.0\text{m}, 10.0\text{m}, 11.0\text{m}$ )
基礎構造	場所打ちくい ( $\phi 1.0\text{m}, L = 19\text{m}$ )
支承条件	地震時水平反力分散方式
地盤種別	II種地盤
コンクリート材料	$\sigma_{ck} = 24\text{N/mm}^2$
鉄筋材料	SD345

脚の高さを変化させたデータの作成を試みた。対象とした橋脚の高さは9.0m、10.0m、11.0m、橋脚幅は10.0 mである。なお、上部構造については、高架橋として一般的な支間長25.0 mの多径間連続PC中空床版橋を想定している。

なお、具体的に本研究のデータとして用いた橋梁モデルの設計条件のうち、すべてのデータについての共通条件を表-1に示す。

実際のデータ作成においては、以下の鉄筋コンクリート橋脚の設計パラメータに着目している。

- 断面幅
  - 橋軸方向 (m)
  - 橋軸直角方向 (m)
- 橋脚の配筋条件
  - 橋軸方向、橋軸直角方向ともに
    - \* 主鉄筋段数
    - \* 主鉄筋1段目の径 ( $D$ )、ピッチ (mm)、本数、鉄筋量 ( $\text{cm}^2$ )
    - \* 主鉄筋2段目の径 ( $D$ )、ピッチ (mm)、本数、鉄筋量 ( $\text{cm}^2$ )
    - \* 帯鉄筋1段目の径 ( $D$ )、ピッチ (mm)、本数、鉄筋量 ( $\text{cm}^2$ )
    - \* 帯鉄筋2段目の径 ( $D$ )、ピッチ (mm)、本数、鉄筋量 ( $\text{cm}^2$ )
    - \* 横拘束鉄筋の径 ( $D$ )、ピッチ (mm)、本数、鉄筋量 ( $\text{cm}^2$ )
- 保有水平耐力計算用鉄筋量
  - 橋軸方向、橋軸直角方向ともに
    - \* 1段目鉄筋量 ( $\text{cm}^2$ )
    - \* 2段目鉄筋量 ( $\text{cm}^2$ )

表-2 設計パラメータの変更範囲

設計変数	抽出ケース	種類
柱断面寸法	2.1 × 2.1, 2.1 × 2.7	8
	2.1 × 3.0, 2.5 × 2.5	
	2.5 × 3.0, 1.8 × 3.0	
	1.8 × 3.5, 1.8 × 4.0	
主鉄筋	D22, D25, D29	6
	D32, D38, D51	
帯鉄筋 中間拘束筋	D16, D19, D22, D25	4

表-3 使用データ数

橋脚の高さ	Yデータ数	Nデータ数	合計
9.0 m	22	26	48
10.0 m	38	20	58
11.0 m	11	18	29

以上の各項目を設計パラメータとし、これを一定条件のもとに変更してデータを抽出した。なお、設計パラメータの変更範囲は実際に使用できると思われる設計データの範囲に限定している。表-2に変更の範囲を示す。

また、構造細目上の前提条件として次の与条件を設定した。

- 主鉄筋は2段以下とする
- 主鉄筋の間隔は、125mm もしくは 250mm とする
- 帯鉄筋および中間拘束筋の鉄筋径は、主鉄筋径を上回らない
- 場所打ちくいの設計径および鉄筋本数は変更しない

以上の条件の下、抽出されたデータに対して震度法、地震時保有水平耐力法の設計条件である10項目全てについての判定を行う。これらの項目のうち1つでも条件を満たしていない項目が存在するデータはNoのデータ(Nデータ)として扱い、すべての条件を満たしているデータのみYesのデータ(Yデータ)として用いることにする。

SOMの学習に用いたデータの数を表-3に示す。

(2) 学習設定

効果的なシステム構築のため、SOMの学習結果に影響を与える可能性のある要因として以下について

検討した。

- 学習回数の増減
- 近傍領域の設定
- 入力項目の選択
- 学習項目順序の変更
- 入力データ順序の変更

a) 学習回数

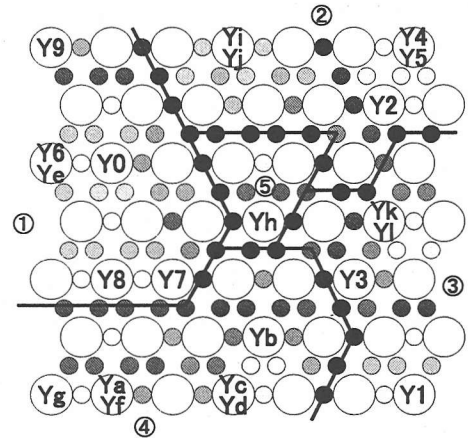


図-3 学習回数 500 回

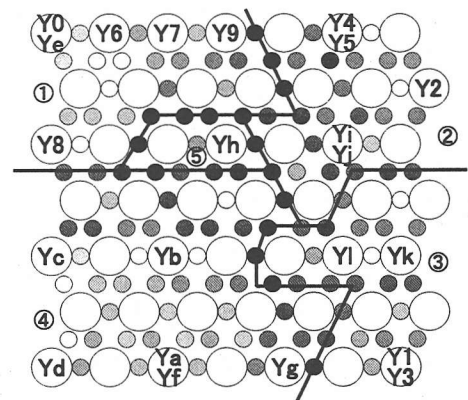


図-4 学習回数 2000 回

学習回数の影響を評価するため、500回、1000回、1500回、2000回と学習回数を変化させ、結果を比較した。図-3、図-4にはそれぞれ学習回数500回と学習回数2000回の結果を表示した。マップ中の大円はデータが分類・配置されるべき位置を示しており、小円は隣接して配置されたデータ間の空間的距離の大きさをその濃淡で表している。

これらの図は、出力されたマップに対し、視覚的に隣接するニューロン間のベクトル距離が大であると判断できる部分に境界(図中実線)を設定し、主観的にグループ分けをした結果をオーバーレイしたものであり、①~⑤の大きく5つのグループに分別し

ている。

図-3, 図-4を比較することにより, まず学習回数500回~2000回の間の変化はそれほど大きく現れてはいないことがわかる。いくつかのデータの中には学習回数の変化によって他のグループに移動するものがあるのではないかと考えられたがそのようなデータはなく, いずれの図においても同じグループに分類された。また, ①~⑤のグループの表れた場所についても, 同様に左上に①のグループが現れ, そして右回りに②, ③, ④のグループが現れており, 中心に⑤のグループが位置している。自己組織化特徴マップでの学習を行う設定はニューロンの初期重みベクトルはランダム設定になっているために学習を行うたびに異なるマップが表示されるが, 学習回数の増加させた時の変化を比較しやすいために図-3, 図-4においては各ニューロンの初期重みベクトルを統一して行った。そのために①~⑤グループが同じ位置に現れる結果となった。

これらの事例より, グループ同士の入れ替えは行われるが, グループ内の要素の入れ替えは行われておらず, 学習回数が500回~2000回の間では学習回数の大小によって自己組織化特徴マップが影響を受けることはほとんど無いといえる。

### b) 初期近傍領域

つぎに, 初期近傍領域についての最適環境を検索する。学習開始時の近傍領域を初期近傍領域と呼び, ここでは初期近傍領域が10(図-5), 6(図-6), 2(図-7)の時のマップを表示した。

ここで注目すべき点としてはグループIとグループIIである。まず, グループIIに関して見てみると図-5では1つのニューロン上にYj, N6, Yk, N5, Ynの5つのデータが固まっており, 図-6ではNデータとYデータが分離された状態でニューロン上に現れている。また, グループIも同様に図-5ではYとNのデータが混在して現れているのに対し, 図-6以降ではYデータ, Nデータに分類されてニューロン上に現れている。

つぎに, グループIIIを見てみると図-5~図-6までは1つのニューロン上にY4, Y7, Y8, Y0, Yaのデータが現れているが, 図-7では3~4のニューロン上に別れて現れている。グループIVについてもIII

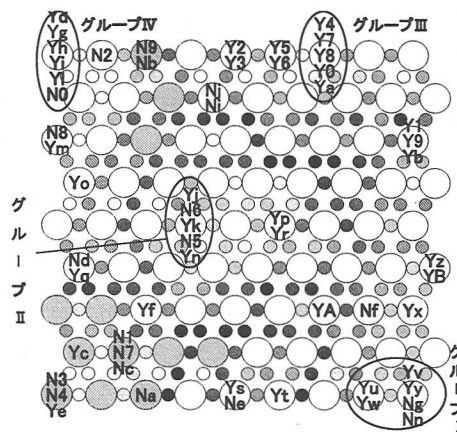


図-5 初期近傍領域10 - 最終近傍領域1

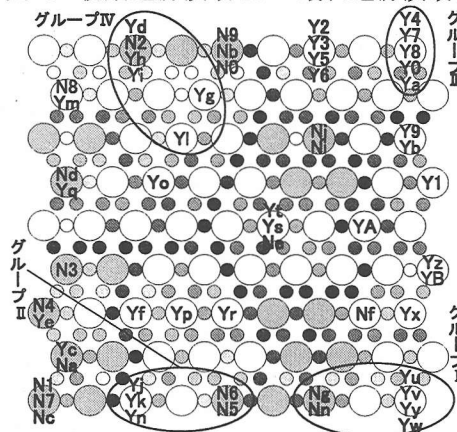


図-6 初期近傍領域6 - 最終近傍領域1

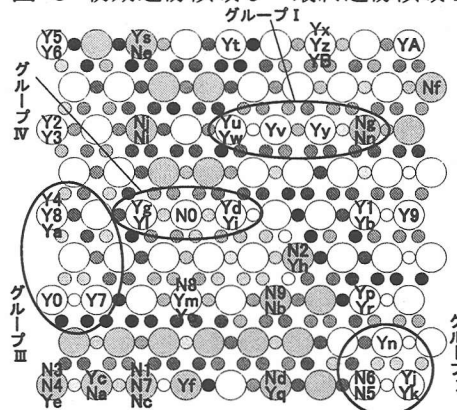


図-7 初期近傍領域2 - 最終近傍領域1

と同じような結果が得られた。

以上の結果より, 初期近傍領域の値はIとIIのグループから出た結論として初期近傍領域は6以下の方がうまく分類できているといえる。また, それぞれのデータの配置によるグループ分けを行う際, データがバラバラに表示されるのではなく, ある程度グループ化されて表示されることが望ましい。そこで, 今回の初期近傍領域を変化させた結果, 初期近傍領域が大きいほどグループ化される傾向を見ることができたためにできるだけ初期近傍領域を大きく設定

した方が好ましい。

以上の検討によれば、今回の事例では初期近傍領域の設定値としては6前後が最適であるといえる。

c) 入力項目の順序

入力項目の順序変更とは自己組織化特徴マップで学習を行う際、入力する項目のみの順序を変えることである。図-3のマップのデータの入力項目の順序変更を行って学習したものが図-8である。図-8のマップも図-3同様に5つのグループ分けを行った。

この結果から見て、まず表示されたデータの名前であるが、両方のマップとも同じグループに分類される。図-3と図-8で異なったグループに表示されたデータは存在しない。次に、①~⑤のグループの配置についてであるが、中心の⑤配置はほぼ同様であるのに対し、他の①~④のグループは異なった位置に表示されている。この学習結果の原因としてあげられることは、学習開始時のニューロンの重みの設定である。学習開始時の各ニューロンの重みベクトルの設定は学習開始時に乱数で設定され、学習が開始される時点で決定する。そのために、新しい学習を行うたびに異なった重みベクトルを各ニューロンは保持するわけである。よって、最初に学習が行われたデータがどの位置のニューロンを勝者ニューロンにするかによって、入力データのグループの形成される位置が決定される。

図-8では図-3と比べるとグループの配置が変化しているが、その変化は入力データ項目の順序に起因してマップの表現形状が変更されたのみであり、その学習・分類結果に影響していないことが明らかである。

6. 耐震設計への適用例

(1) 既存設計データの分析

図-9には、SOMにより既存のYデータのみを対象として学習・出力されたマップが、入力データの特徴をどのように分類しているかの分析を行った結果を示す。

最も顕著な分類結果は、橋軸方向主鉄筋段数によるものであり、②、③、④は2段、①、⑤は1段となっている。つぎには断面寸法に関する分類が行われており、特に①と③のグループではその影響が大きくみられた。④と⑤のグループでは直角方向主鉄

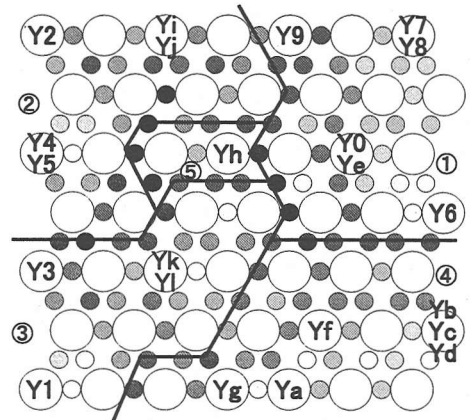


図-8 入力項目順序変更後

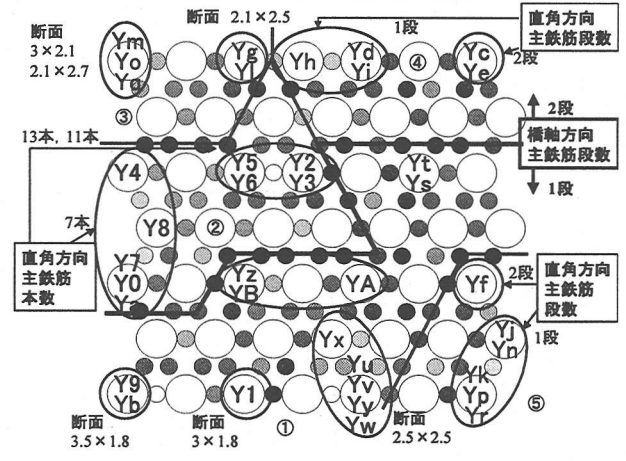


図-9 既存設計橋脚の主要入力データ

筋段数によってグループの中でも分けられている。さらに、②のグループでは直角方向主鉄筋本数によって分類されている部分も存在した。

以上の結果から、データ分類に影響する入力項目(設計パラメータ)の重要度は、橋軸方向主鉄筋段数、橋軸直角方向主鉄筋段数と断面寸法の順に大きいことが判明した。さらに影響する項目としては橋軸方向、橋軸直角方向の主鉄筋の径があげられ、これ以下の細部の項目については影響をみる事ができなかった。

(2) 力学的影響の分析

既存のYデータの震度法ならびに地震時保有水平耐力法による安全性の判定結果に着目し、各判定項目ごとの決定度として以下の比率を定義する。

- 震度法
  - 橋軸方向、橋軸直角方向ともに
    - \* コンクリートの圧縮応力度 ( $\sigma_c$ ) と許容応力度 ( $\sigma_{ca}$ ) の比率
    - \* 鉄筋の引張応力度 ( $\sigma_s$ ) と許容応力度

( $\sigma_{sa}$ ) の比率

- \* せん断応力度 ( $\tau$ ) とせん断許容応力度 ( $\tau_a$ ) の比率

● 地震時保有水平耐力法

－ 橋軸方向, 橋軸直角方向ともに

- \* タイプ I の地震動に対する慣性力 ( $k$ ) と地震時保有水平耐力 ( $P_a$ ) との比率
- \* タイプ II の地震動に対する慣性力 ( $k$ ) と地震時保有水平耐力 ( $P_a$ ) との比率

各設計データごとに, 震度法における 6 項目の決定度の中で最大の項目を図-10 に示した. また, 地震時保有水平耐力法についても同様に 4 項目の中で決定度が最大となる項目を図-11 に表示した. ここで, 各ラベルの先頭文字,  $k$  は橋軸方向,  $t$  は橋軸直角方向をそれぞれ表す.

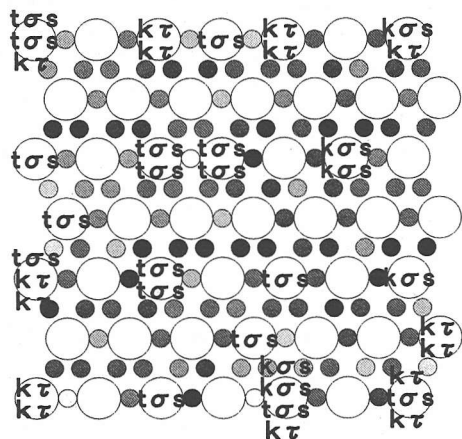


図-10 震度法による分類

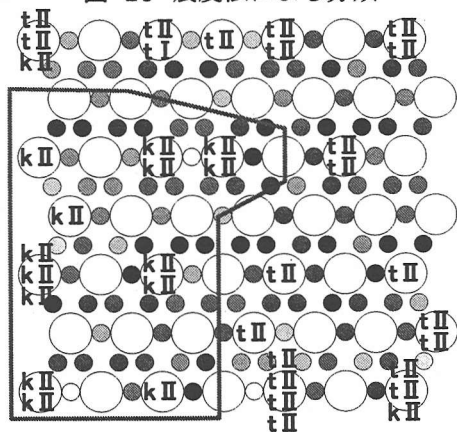


図-11 保有水平耐力法による分類

これらの図の中でもっとも特徴が現れているのは図-11 である. 地震時保有水平耐力法ではタイプ I 地震動とタイプ II 地震動の 2 つの項目が存在するが, タイプ I の地震動に関してはマップに表示されること

がほとんど無かった. これは, 本研究で取り扱った標準的な規模の橋脚においては, ほとんどの場合でタイプ II 地震動による判定項目で決定されることが一般的であることによる.

また, 橋軸方向 ( $k$ ) と橋軸直角方向 ( $t$ ) のマップの配置をみると橋軸方向が左下に固まって現れていることが分かる. これは橋軸方向の耐力が橋軸直角方向の耐力よりも低い設計データが集まっているためである.

入力したデータには橋脚の設計に用いた各部材の断面寸法や鉄筋量が主な項目であり, 地震時保有水平耐力法の判定式に含まれる慣性力や地震時保有水平耐力は入力していない. しかしながら, 図-11 ではその比率の関係が明らかに現れている. このことは自己組織化特徴マップ (SOM) によって, 入力されたデータからデータ同士の特徴をつかみ, 学習を重ねることによりグループ化された結果であり, 設計結果の力学的な特徴による分類がマップ上で行われたことになる.

これは, 次節で述べる, 設計初期値設定問題への適用において極めて有用な情報となる.

(3) 設計初期値設定問題への適用

本研究で行った SOM の橋脚設計初期値設定問題への具体的な適用例について文献<sup>16)</sup>を一部引用して概述する.

SOM による既存橋梁設計データの分析結果を用いて, ランダム作成した 6 つのデータが, どのように分類判定されるかを試みた.

図-12 では作成した未照査データを  $u$  として表示し, 図-13 では個々の設計計算結果に基づく判定結果を  $n, y$  で示している. なお,  $n$  は No のデータ,  $y$  は Yes のデータを示す.

図-13 を見ると, 入力した新しいデータ  $n01, n02, n03, y01, y02, y03$  は 4 つのニューロン上に表示されている.

$y02, y03$  のデータは同じニューロンに重なって表示され, その他にも既存の  $y$  データ 2 つが同一位置に存在している. この結果からみると,  $y02, y03$  は設計上十分な条件を満たしていると考えられる. また,  $n02$  については既存の  $y$  データ 2 つのニューロンと同じニューロン上に現れている. この結果として



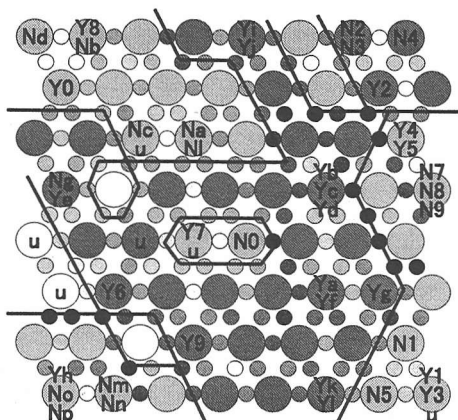


図-12 設計初期値設定入力例 (u 表示)

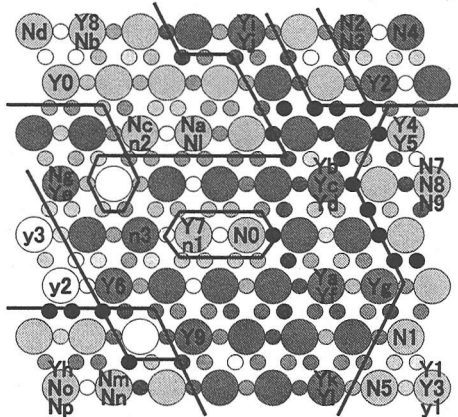


図-13 設計初期値設定入力例 (データ名表示)

考えられるのは、n02 データは設計計算上は基準を満たしていないものの、かなり設計基準に近い耐力を持った解候補であるといえる。さらに、n01, n03, y01 のデータについても同様のことがいえる。これらの結果、y01 のデータが新たに入力したデータの中で最も経済性と安全性をともに持ち合わせたデータであると推定できる。

また、u データがどの Y データ群に含まれるかで、前項で述べたように力学的な特徴もあわせて推定することが可能になる。

#### (4) 設計条件変更時への適用例

橋梁の設計において、設計条件の変更を行う場合、一般には橋脚にかかる荷重や橋脚の耐力を計算しなおす必要が生じる。この場合にも、SOM を用いた合理的な対応が可能であることを確認する。

図-14、図-15 は、橋脚の高さが 9m の設計データについての学習マップに、橋脚の高さが少し異なる 8.8m の橋脚のデータを入力し学習・分類を行った結果を示す。図-14 は、前項 (3) と同様に 8.8m のデータを u で表示したものであり、図-15 は、実際に設

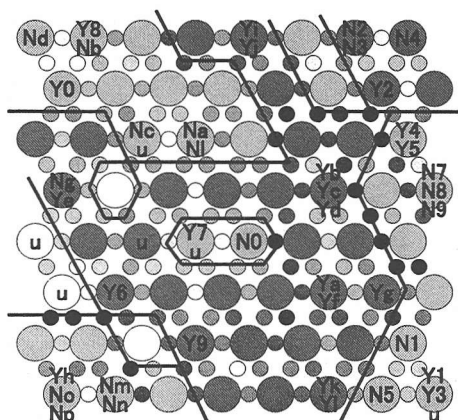


図-14 8.8m 橋脚データ入力時の学習結果 (u 表示)

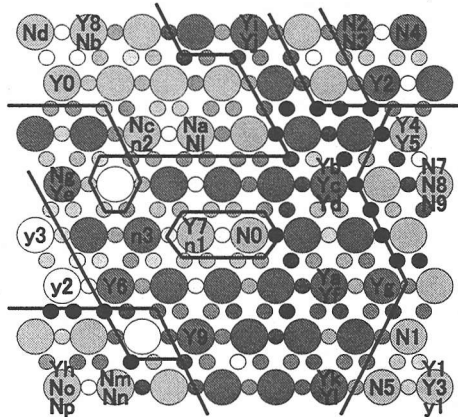


図-15 8.8m 橋脚データ入力時の学習結果 (データ名表示)

計計算を行った結果を併せてデータ名で表示したものである。

図-15 により、判定結果から逆に考察すると、y1, n2 はそれぞれ同一の判定結果を有するニューロンに分類され、それぞれ設計基準を十分に満足するデータ、設計基準を満足しないデータであると判断できる。

y2, y3 に関しては、n データと y データの境界に存在するものの基準は満たすデータである。

これらの結果から、このように u データとして新しい入力データを加えて学習を行った結果、橋梁の高さ 8.8m のデータとして新たに用意した 6 つのデータの中から望ましい解候補として詳細に検討すべきデータの絞り込みを行う際にも有効であり、作業の合理化への活用が期待できる。

SOM で得られるマップの応用としては、(Y, N) の既知データで学習したマップを使って、未知データ (u) が、マップ上のどのニューロンに反応するかを調べる (認識作業のみを行う) 方が一般的であるが、ここでは、Y, N の領域の境界が必ずしも明瞭でないことと、結果の検証が終われば、未知データは既知デー

タとして、新たな判定用マップ作成用のデータとなり、これを含めて学習し直すことになることから、ここでは、手順を簡略化して、未知データを含めた状態で学習し直している。結果としての出力マップは若干異なるものの、未知データの(y/n)判断精度は、今回用いたデータでは、既知マップ上で未知データを認識する場合とほとんど変わらなかった。

### (5) 設計照査問題への適用

前項(3)、(4)と同様のプロセスを利用して、さらに多くの設計実績を蓄積・学習したマップ上に、通常の手法等により作成された設計結果をこのシステムに入力し、分類・判定させることで、その設計結果が要求性能に対してどのような完成度を有しているかを評価する「設計照査システム」としての適用も可能である。

## 7. まとめ

本研究では、自己組織化特徴マップを用いて、あらかじめ準備した鉄筋コンクリート橋脚の設計データを分類し、得られた特徴マップを新たな設計・検証活動の支援ツールとして利用するための可能性について検討した。また、その具体的な設計支援への適用可能性を示し、その有用性を確認した。

検討の結果、鉄筋コンクリート橋脚柱に本システムを適用する場合の、最適なデータ学習環境については以下の知見が得られた。

- 学習回数による SOM のマップの影響は 500 回以上の場合、ほとんど影響しない。
- 入力項目の順序変更と入力データの順序変更で、現れる影響はほとんどない。
- 初期近傍領域の設定は 6 前後、最終近傍領域の設定は 1 が最適である。

現状の橋梁下部工設計データは非常に多様で、かつ各データ間の相関が複雑であるため、これまでそのままの形で最適設計手法を適用することは困難と考えられていた。一方で、自己組織化特徴マップのアルゴリズム自体は複雑でなく、SOM を利用して多くの設計データを蓄積し学習・分析することで、対象データの直接入力していない、力学的な特徴にまで踏み込んだ判定が可能となることを確認した。

今後、具体的な支援システム構築に向け、自己組

織化特徴マップを分析するためのグループ分けに関する基準の設定と、より多様な設計データへの対応が課題である。

## 参考文献

- 1) 川島一彦(監訳), M.J.N.Priestley, F.Seible, G.M.Calvi:「橋梁の耐震設計と耐震補強」, 技報堂出版, pp.31-32, 1998.4
- 2) 秋山充良, 松中亮治, 土井充, 鈴木基行:「地震時保有水平耐力法により設計されたRC橋脚の耐震安全性のばらつきに関する確率論的考察」, 土木学会地震工学委員会, 第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.7-12, 2000.12
- 3) 大住道生, 運上茂樹, 足立幸郎, 星隈順一:「道路橋の耐震信頼性評価に関する研究」, 土木学会地震工学委員会, 第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.13-16, 2000.12
- 4) 山田 善一:「耐震構造設計論」, 京都大学学術出版社, pp.181-190, 1997.
- 5) 杉本博之, 村部剛史, 朝日啓太, 古川浩平, 高久達将:「鋼製橋脚の最適耐震設計法の一試み」, 土木学会地震工学委員会, 第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.251-256, 2000.12
- 6) T.Kohonen 著, 高德・岸田・藤村 訳:「自己組織化マップ」, シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, 1996.6
- 7) 近田康夫, 広瀬智士, 城戸隆良:「SOM/LVQを援用した橋梁点検データの見直し」, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.503-510, 1998.3
- 8) 白木渡, 松保重之, 宮下英明, 伊藤則夫:「自己組織化特長マップ(SOM)による斜面崩壊予測システム」, 構造工学論文集, Vol.44A, p.453-459, 1998.3
- 9) 伊藤則夫, 白木渡, 今井慈朗, 井面仁志, 石川浩:「自己組織化特長マップを用いた斜面崩壊予測システムの高精度化に関する研究」, 第15回ファジーシステムシンポジウム講演論文集, pp.335-338, 1999.6
- 10) 伊藤則夫, 白木渡:「斜面崩壊予測システムへのSOMCPNの応用」, 第6回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.17-22, 1999.12
- 11) 伊藤則夫, 白木渡, 安田登:「自己組織化特長マップを用いた地盤性状の空間分布推定法」, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.487-492, 1999.3
- 12) 今井慈朗, 白木渡, 伊藤則夫, 井面仁志, 石川浩:「種類の物性地の空間分布推定問題への自己組織化特長マップの応用」, 第15回ファジーシステムシンポジウム講演論文集, pp.319-322, 1999.6
- 13) 伊藤 則夫:「自己組織化ニューラルネットワークを用いた地盤特性値の空間分布推定手法に関する研究」, 金沢大学博士論文, pp.17-18, 2000.
- 14) 萩原 将文:「ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム」, 産業図書株式会社, pp.66-68, 1994.
- 15) 日本道路協会:「道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説」, pp.59-68, 120-121, 1996.
- 16) 廣瀬 彰則, 近田 康夫:「道路橋RC橋脚設計へのSOMの援用に関する研究」, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.219-225, 2001.3.