

道路橋 RC 橋脚設計への SOM の援用に関する研究

Applying SOM to Design of Reinforced Concrete Pier of Road Bridges

廣瀬彰則*・近田康夫**

Akinori HIROSE and Yasuo CHIKATA

* 金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻 (中央復建コンサルタンツ株式会社)

** 工博, 金沢大学助教授, 自然科学研究科システム創成科学専攻 (〒 920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

The road bridge design has become more complicated in comparison with the former, with the wide variety of social demands in both diminishing of initial construction costs and affects in environment around in public works. Road bridge design engineers have produced effective and rational substructures, which satisfy the several demanded factors. On the other hand, there are so many design variables applied to current anti-earthquake standards in road bridge design. Therefore, we are in a difficult circumstance to determine proper values of substructure design items. In this study, we, taking into account the situation above, present an approach to find proper initial design values by using SOM.

Key Words : SOM, RC pier, seismic design, road bridge

キーワード : SOM, RC 橋脚, 耐震設計, 道路橋

1. はじめに

現在, 公共事業を取り巻く社会環境は, 少子・高齢化, 国際化, 高度情報化, 環境・災害に対する危機感の増大など, 従来にない社会経済情勢のもと非常に厳しい状況にある。特に公共事業に対するコスト縮減は, 今後の公共投資財源不足の問題も併せて, 重要な課題となっている。

このような状況下で, 道路橋の分野においても建設コストの縮減や周辺環境・熟年労働者不足への対応が重要視され, 各種コスト縮減策や簡素化に関する研究・開発が活発化している。

一方で, 平成7年に発生した兵庫県南部地震以後, より安全で信頼性の高い橋梁整備が, 従来にも増して強く求められている。これに対応するため平成8年に道路橋示方書が改訂され, 橋梁構造物は構造面・設計面ともに非常に複雑なものとなった。特に, 下部構造は設計変数が大幅に増え, 要求項目に対する最適断面の探索ならびに検証が非常に難しくなっている。

また一般に実業務では, 市販のソフトウェアを使って設計案を作成することが多いが, その多くは GUI 化されたメニューを追う構成で, 上述の設計過程を経験と試行錯誤により繰り返すことに多大な時間と労力を要している。

このような状況を踏まえ, 本研究では, 既往の設計実績に基づいて, 新規設計の設計変数値の候補を探索する方法を検討した。類似の設計事例を自己組織化特徴マップ (SOM) で学習させ, 想定される入力データの組み合わせの中で最も工学的に好ましい結果を得る可能性の高いものを抽出し, 得られた結果をもとに実際の設計作業を行うことで, 作業の効率化を図ることを目指している。すなわち, 設計作業で重要な初期設計値の設定を効果的に行う試みである。

2. 道路橋 RC 橋脚設計の現状

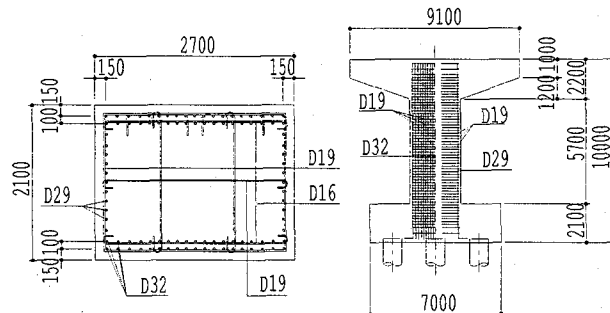
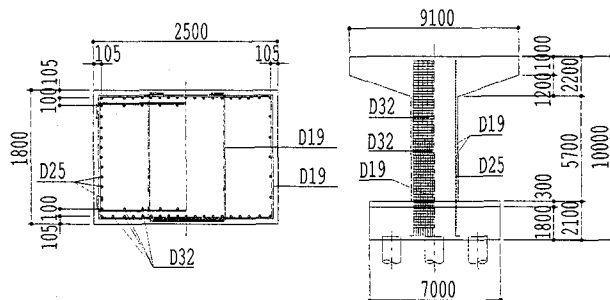
2.1 設計基準の変遷

道路橋下部構造の設計には「道路橋示方書 IV 下部構造編 (以下「道示 IV」)」ならびに「V 耐震設計編 (以下「道示 V」)」が適用される^{1), 2)}。ここで, この道示 IV, V は「橋, 高架の道路等の技術基準」として昭和 55 年に建設省より通達されたものであり, その後, 平成 2 年, 平成 6 年 (設計自動車荷重の変更など) および平成 8 年 (国際化, 耐震設計, 単純化など) の 3 度にわたり改訂されてきている。これらの改訂に併せて下部構造の設計方法が見直されているが, 特に大きく変化したのは, 周知のとおり平成 8 年の耐震設計に関する改訂によるものである。

これまでの道路橋示方書の変遷過程を対比するため, 同じ上部構造と地盤条件を用い, 平成 6 年と平成 8 年の道示 IV, V に基づいて橋脚の比較設計を行った (設計には業務用ソフトウェアである SUCCES を使用: 以下「業務用ソフト」)。その計算結果を図-1, 図-2 に示すが, これらの断面を比較すると, 耐震設計基準の改訂により橋脚形状ならびに配筋が大きく変化していることが理解できる。

改訂された耐震設計手法の中で, このような状況に最も大きく影響している原因は, 震度法中心の設計法から, 兵庫県南部地震のような大規模地震動をも考慮した地震時保有水平耐力法 (以下「保耐法」) 中心の設計法に移行した点である。

この結果, 同一の上部構造と地盤条件を用いた橋脚の設計試算結果においても, この耐震設計基準の改訂前後で, 橋脚形状ならびに配筋が大きく変化する³⁾ほか, 構造面においても, じん性を向上するための, 帯鉄筋の配筋細目強化, 中間拘束鉄筋 (横拘束筋) の導入などの変化がある。



2.2 耐震設計の流れ

RC 橋脚の設計は各段階の必要な照査項目を満足することは当然であるが、図-3 の設計手順に示すように、最適断面を追求するためには、場合によっては設計の全過程を繰り返すことになり、非常に多くの労力を費やすことになる。

図-3 に示す設計手順のうち、保耐法のみに着目し、技術者の判断を必要とする入力項目とそれによる出力項目ならびに繰返し手順を整理すると、図-4 のように表すことができる。これらの入力項目は、それぞれが相互に密接な関連性を有していることから、特定の性能を変化させるための入力項目の変更は、一変数にとどまらず複数個の設計変数の変更を伴うこととなる。

このようなことから、RC 橋脚の設計にあたっては、初期断面の設定が、非常に重要な要素となる。

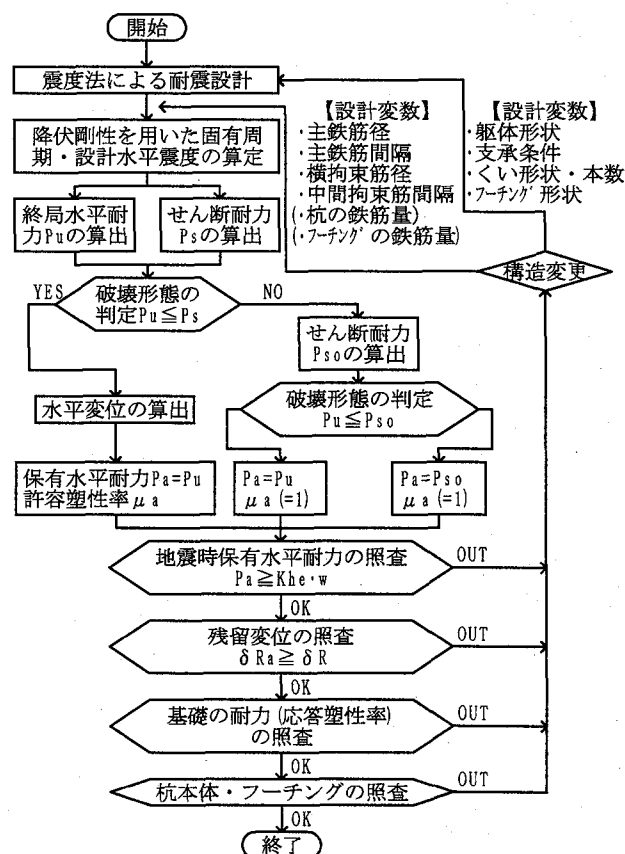
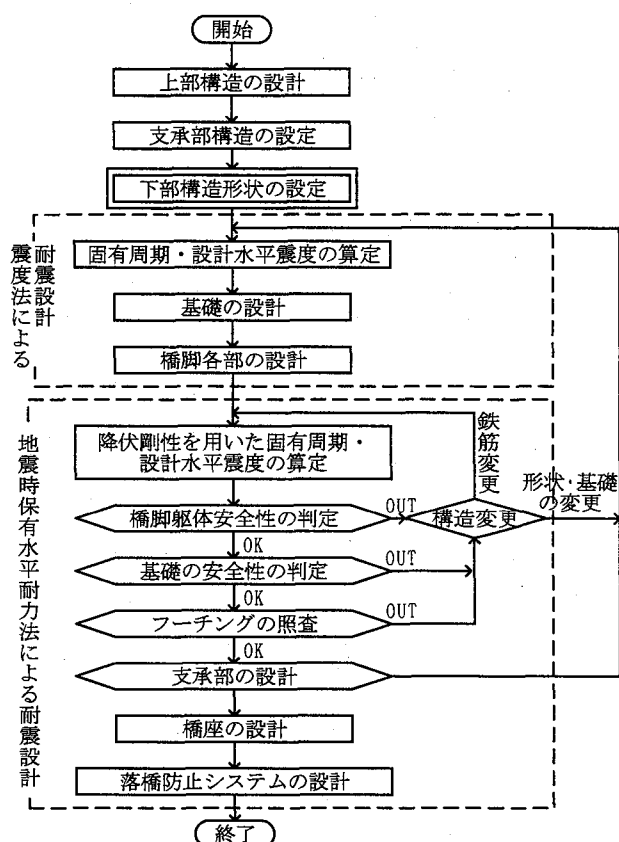
2.3 RC 橋脚設計の合理化に向けて

実際の設計では、技術者の経験から初期断面を想定し、限られた変数のみを変化させて、その中で最適解を評価しているのが実情である。このため、得られた設計結果が厳密な最適解かどうかの判定は、一般には実行されていない。

最適解を厳密に求めるには、多数の変数を変化させ非常に多くの組合せケースを設計することになり、実業務においては非現実的な作業となる。

この問題に対して、設計システムとしての最適化を図るという目的では、従来の非線型最適化法によることも考えられるが、そのためには一般に設計パラメータの感度解析・評価関数の検討などに多くの労力を必要とする。

一方で、前述のとおり、橋脚設計をより合理的にかつ効率的に行うためには、初期断面の設定と設計変数変更の方針決定が重要な要素となる。そのため本研究



では、より効率的・合理的な設計初期断面の設定を目的として、既往の設計資料を有効利用することを考えた。

標準的な高架橋などでは類似的な橋梁規模の設計実績が多数存在しうることから、実設計に際して、設定した設計初期値が、過去の様々な特性を有する設計実績群に対してどのような類似度を持っているかを視覚的に判断できれば、作業の大幅な効率化につながるものと考ええる。

設計実務では業務用のアプリケーションを使うことが多く、ここでも、RC 橋脚の保耐法設計用の SUCCES を使用した場合について検討する。しかし、SUCCES に特化した議論をするわけではなく、類似ソフトウェアの入出力データがあれば、同様の検討が可能である。

3. 橋脚設計への SOM の援用

3.1 SOM

SOM(Self-Organizing feature Map)^{4),5),6)} は Kohonen によって提案された教師信号なしの学習過程をとるニューラルネットワークで、入力層のセル数からなる多次元空間を 2 次元平面に投影することで入力信号の特徴を視覚的に表現する。ネットワーク構成は入力層とマップ層の 2 層構成で同一層内のセル間では結合はない。

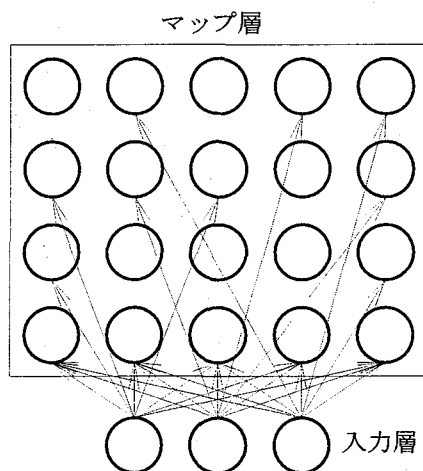


図-5 SOM の概念

SOM のネットワーク構造の概念を図-5 に示す。

詳細は文献^{4),5),6)}に譲るが、解析過程は、

Step 1 入力層とマップ層の間の重みを任意に設定する。

Step 2 入力層にベクトル

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

を入力する。

Step 3 マップ層のニューロン j と入力ベクトルの距離

d_j を、両者間の重み w_{ji} を用いて次式で計算する。

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

ただし、 i は入力ベクトルの成分を表す添え字である。

Step 4 d_j が最小となるニューロンを選択し、これを j^* で表示する。

Step 5 ニューロン j^* とその近傍のニューロンの重みを、近傍関数 $h(j, j^*)$ を用いて、次式のように更新する。

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

近傍関数は次式で表現される。

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

σ は近傍の範囲を与え、学習の進行とともに値を減少させる。 η は正值の定数である。

Step 6 Step 2 から 5 を繰り返す。

こうして選ばれたマップ層を 2 次元平面に視覚的に表示することになる。

SOM では、BP(Back Propagation) などの教師付きの学習で使われる入力信号のみを用い、入力信号に対応する出力 (教師信号) はラベルとして視覚的表示のために用いられる。

SOM の土木工学分野での応用例には、クラスタリング能力に着目した橋梁損傷度判定データの見直し⁷⁾、SOM および固定セルを導入した独自の拡張 SOM を使った地盤特性値の推定^{8),9)}がある。

4. SOM による橋脚耐震設計支援

与えられた設計条件のもとで RC 橋脚を設計する際に、想定される設計初期断面データ (以下「設計初期値」) の組み合わせを数組用意し、既往の設計実績として存在する業務用ソフトによる設計結果データ群を用いて、どの設計初期値の組み合わせが設計条件を満足するかを判定することを考える。

従来は、試行錯誤で設計値の変更を繰り返し、許容解 (設計条件を満足する設計案) を確定するが、設計値を変更する度に業務用ソフトによる再計算が必要となる。設計初期値の設定がたまたま良かったり、熟練した設計者の経験と勘がうまく働けば、少ない再計算で短時間に許容解が求まるが、現実にはかなりの再計算回数が必要となっている。

ここでは、類似の設計条件の過去の設計事例と、設計初期値候補を SOM で学習させ、許容解となりそうな設計初期値を抽出して、それを使って実際に業務用ソフトで計算することにより作業効率の向上を計ることを目的とする。

先にも述べたように、道路橋 RC 橋脚の設計においては、その設計初期値の設定が重要であることを考えれば、従来の設計プロセスに、新たな「適当な初期値の選択過程」を導入しても、設計計算での試行錯誤によるロスの減少効果が大きく期待できるものと考ええる。

4.1 対象モデルと設計条件

本研究で対象とした橋梁の概要図を図-6 に示す。また、その橋梁の設計条件を表-1 に示す。

表-2 に示す設計変数を組合せて、各柱断面に対して適切な応力度ならびに地震時保有水平耐力となる軸方

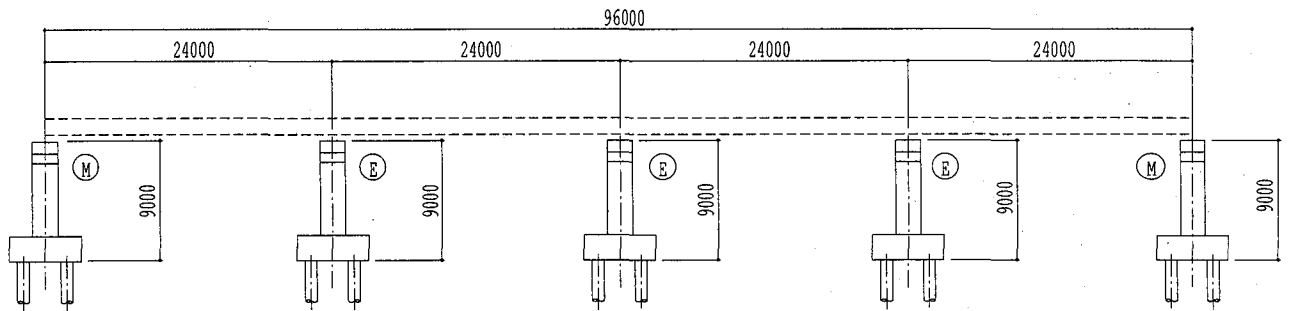


図-6 解析対象橋梁一般図

向鉄筋(柱主鉄筋)量を算出する方法で設計を行った。橋軸方向配筋、橋軸直角方向配筋それぞれに対して表-2に示す設計変数と軸方向鉄筋の配置段数を全て組合せるとその総数は約800ケースとなるが、断面構成が不可能なものや応力度もしくは耐力の余裕量が大きくなるケースを分析データから除外した結果、最終的には設計ケースは50ケースとなった。

表-1 対象橋脚の設計条件

下部構造	張出し式橋脚 ($H=9.0\text{m}$)
基礎構造	場所打ちくい ($\phi 1.0, L=19\text{m}$)
支持条件	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

ここで、橋脚設計には次に示す条件を設定した。

- ① 軸方向鉄筋は2段以下とする。
- ② 軸方向鉄筋の間隔は、125mmもしくは250mmとする。
- ③ 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。
- ④ 応力度もしくは地震時保有水平耐力の余裕量はいずれかの照査において20%程度以下とする。
- ⑤ 場所打ちくいの設計径および鉄筋本数は変更しない。

4.2 SOMによる設計変数組み合わせ決定

橋脚高さ9mの計算例(許容解22, 非許容解19, 以下「基本データ」), 橋脚高さを8.8mとした未計算データ(6データ), 橋脚高さを9.2mとした未計算データ(6データ)を使って検討した。未計算データは橋脚高さ以外基本データを参考に適当に与えた。

学習用データは、表-3に示す48項目で構成されている。今回使用したデータでは、荷重条件などを統一しているが、実務で蓄積されたデータを用いる場合には、荷重値や橋脚高さなども表-3の項目に加えることになる。

前節の条件のもとで業務用ソフトを使って得られた許容解(設計条件を満足した)と非許容解(許容解と類似の設計値を与えたが、設計条件を満足していない)。

表-2 比較ケースの設計変数

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

表-3 SOMの学習データの構成

柱断面寸法	幅・奥行
橋軸方向配筋	主鉄筋段数, 主鉄筋1段目(鉄筋径, ピッチ, 本数, 総断面積), 主鉄筋2段目(鉄筋径, ピッチ, 本数, 総断面積), 横拘束鉄筋(鉄筋径, ピッチ, 本数, 総断面積)
橋軸直角方向配筋	主鉄筋段数, 主鉄筋1段目(鉄筋径, ピッチ, 本数, 総断面積), 主鉄筋2段目(鉄筋径, ピッチ, 本数, 総断面積), 横拘束鉄筋(鉄筋径, ピッチ, 本数, 総断面積)
保有耐力計算用主鉄筋量(重複なし)	橋軸方向(1段目, 2段目), 橋軸直角方向(1段目, 2段目)

そして、妥当性を検討する未計算データをSOMで学習させた結果、図-7, 8, 9のようなマップが得られた。

マップ中の大円はデータが分類・配置されるべき位置(以下「セル」)を、小円は配置されたデータ間の距離の大きさをその濃淡で表している。図中の実線は許容解と非許容解との境界を示しており、データ間の距離を評価しながら近似的に描き加えたものである。

SOMの学習にはGUI環境の操作性を考慮して、Neural Net Assistantを使用した。パラメータ、マップサイズ、学習回数を、マップ上で許容解と非許容解が視覚的に最も良く分離されたと思われるまで、試行錯誤した結果、マップサイズ8×8、学習回数500回を採用した。

SOMの学習時間は今回使ったデータではすべて1分以内に終了しており、GUI上での作業であるため複雑

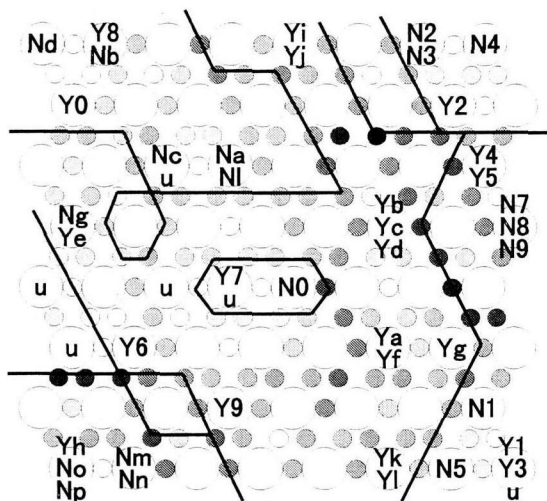


図-7 基本データ + 橋脚高 8.8m データ

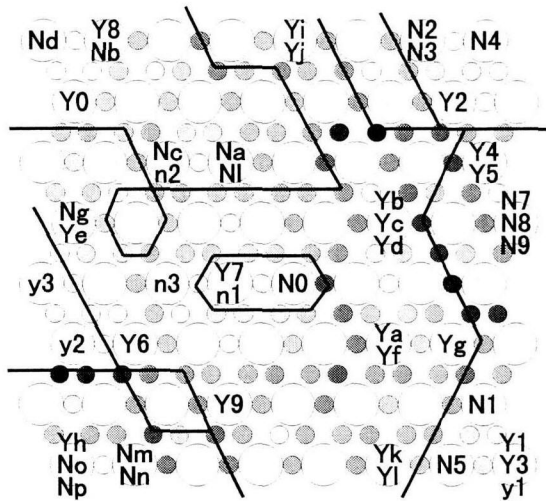


図-10 基本データ + 橋脚高 8.8m データ (判定後)

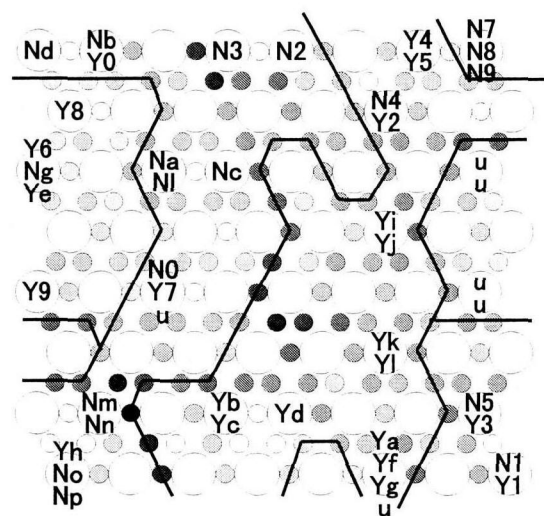


図-8 基本データ + 橋脚高 9.2m データ

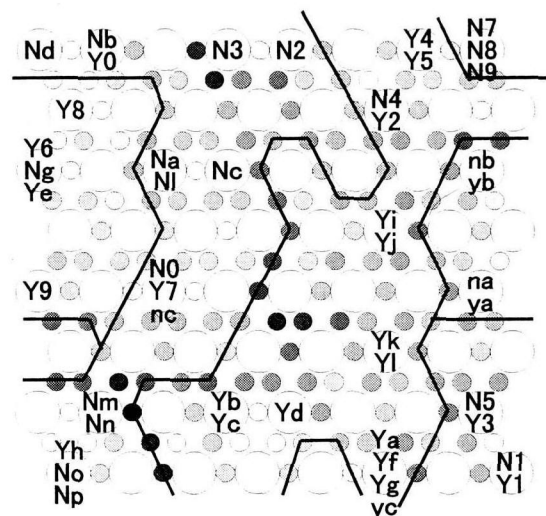


図-11 基本データ + 橋脚高 9.2m データ (判定後)

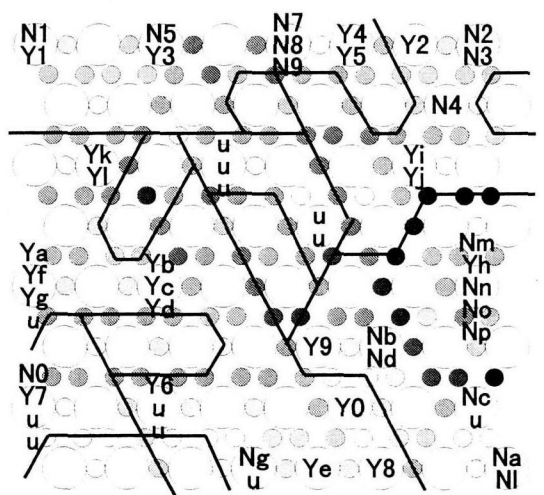


図-9 基本データ + 橋脚高 8.8m, 9.2m データ

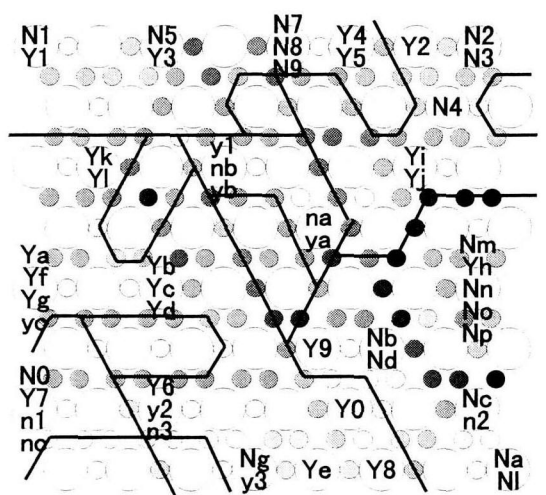


図-12 基本データ + 橋脚高 8.8m, 9.2m データ (判定後)

感はほとんどない。

マップ中のラベルは、許容解を Y_n (n はデータ識別用の数値またはアルファベット)、非許容解を N_n 、そして、未計算データを u としている。マップ上には、複数の許容解 Y_n の集合、非許容解 N_n の集合が見られるが、これは、表-3 の項目の組合せを反映していると考えられる。元データまで遡って検討すれば、この組合せによって、例えば、許容値ぎりぎりあるいは、許容値を満足しなかった指標が変位であったり、応力であったりという設計内容を反映していることを分析できる。

なお、マップの初期化を乱数で行うために、同一のマップサイズと学習パラメータを使っても同じマップ図が得られるわけではない。ただし、一見異なるマップが得られても、ラベルの集合がマップ上で位置を変えているだけで、その集合を構成するラベルはほとんど変わらない。換言すると、初期乱数によって、ラベル集合のマップ上の位置は変化するので、一見全く異なる結果と錯覚する場合があるだけである。

許容解と非許容解が明確に分離されていない領域あるいはセルは、例えば、それが Y_n であれば、設計条件は満足していても配筋方法が極端で実際的ではないなど内容的に疑問視されるものである可能性がある。同時に、設計条件をぎりぎり満足する、言い替えれば非許容解と紙一重の内容である(最適という意味ではこれを採用すべきとも言えよう)場合もある。

例えば、図-7 の左下隅のセルは Y_h と N_o 、 N_p が重複して表示されている。この場合、ごくわずかの設計データの差が許容解、非許容解を分けていると考えられる。特に、保耐法による非線形計算の結果では、設計データから許容解と非許容解の明確な境界を見つけ出すことは困難と考えられ、そのような境界近傍の解は SOM でも分離しきれなかったと考えられる。

今回用いた基本データは、設定した条件に従って、業務用ソフトによる設計例を作成したもので、必ずしも実務において満足しない(極端な配筋)ものも含まれることが、許容解、非許容解の分離の不明瞭さを強調した結果となったとも考えられるが、逆の見方をすれば、それでも比較的良く分離されていると解釈できる。

マップ上には、許容解と非許容解がだまかに分離され、未計算データがマップ上に点在している。許容解 (Y_n) の集合の中に位置する(あるいは Y_n と位置を共有する)ラベルが u である未計算データは、設計条件を満足する可能性が高い。逆に、非許容解 (N_n) の集合の中に置かれた未計算データは、設計条件を満足しない可能性が高い。孤立したデータや u のデータ、 Y_n 、 N_n が近接しているデータ近傍では、マップ中の小さな円の濃淡が隣接セル間の距離を表現しており、濃いほど距離が離れていることを意味する。これを考慮すれば、セルが隣り合わせであっても別グループであるという識別がある程度可能となっている。

未計算データ u のみの集合が形成されている場合もあるが、隣接する集合からその許容、非許容の可能性を推測できると考えられる。

したがって、SOM を使って未計算データを検討する場合、設計候補として得られる(選ばれる)のは、 Y_n

集団の中の許容解であり、かつ内容的には余裕があるものと推測される。

図で u で表示された未計算データを実際に業務用ソフトで計算したところ、図-10、11、12 のようになった。 u のデータを業務用ソフトで計算した結果を、許容解は y_n 、非許容解は nn で表示している。

図-7 と図-10、図-8 と図-11、そして、図-9 と図-12、がそれぞれ対応している。

Y_n の集合内または隣接したデータ(例えば、図-10 左列下から3行目のセル“ y_2 ”, 右下隅の“ y_1 ”(Y_1 , Y_3 と重複)、図-11 最下行、右から3列目の“ y_c ”(Y_a , Y_f , Y_g と重複))は許容解である可能性が高く、 N_n の集合内にあった、または隣接したデータ(例えば、図-10 上から3行め左から3列目の“ n_2 ”(N_c と重複)、図-11 上から5行め左から3列目の“ n_c ”(N_0 , Y_7 と重複))は非許容解となる可能性が高い。

この結果から、 Y_n 集合内にある、あるいは Y_n データに近接した未計算データを設計候補とすることはかなり確率の高い設計代替案(の設計初期値)を選択したことになり、かつ、異なる Y_n 集合に含まれる未計算データは、内容的にも異なる許容解であることが推測されるので、代替案の多様性が得られることにもなる。

このことは、解空間内での最適解探索において、局所(最適)解に陥ることを防止する効果についても可能性を示している。

仮に、マップ上にある、 Y_n または N_n の集合内に共通する設計上の特性がラベルから確認できれば、設計意図に沿った特性(許容判定で応力が律則であるか等)を持つ、有力候補となる設計初期値を選ぶことが可能となるほか、設計を完了した結果を未計算データに代えて入力、学習・判定することで、その設計結果が、求める特性を効果的に発揮しうるものであるかどうかを確認するツールとしても期待できるものとなる。

5. まとめ

SOM を用いて、地震時保有水平耐力法による RC 橋脚の耐震設計例を分類し、未計算の設計値の組合わせ(設計初期値)の許容、非許容の判定を試みた。

比較的短時間に、多くの設計パラメータの組合わせをチェックして、有望な設計初期値を探索できる可能性が示せた。

分類された集合ごとの特性を、そのラベルから明らかとすれば、設計対象橋脚に求める性能または特性に即した設計値の組み合わせを、目的に応じて選択することが可能となりうる。

ここでは、限られた条件下での設計例を用いたが、今後、標準高架橋を対象とした上部工規模と橋脚高さなどを指標とした設計事例の整理・蓄積を重ねて、より広範な設計条件下での適用性向上を検討していきたいと考えている。

謝辞： 条件を揃えた設計事例を集めるために、金沢大学大学院自然科学研究科の中山善隆氏，中森航洋氏ならびに工学部の中西孝臣氏の協力を得た。

また研究のためのソフトウェア利用に関して，川田テクノシステム株式会社の協力を得た。

記して感謝の意を表す。

付録 I 使用ソフトウェア

本研究で使用した市販のソフトウェアは，以下のとおりである。

- 土木・建築システム SUCCES for Windows (下部工統合システム V.1.15, 橋脚の設計計算 V.1.33), 川田テクノシステム株式会社
※同様のソフトウェアは，株式会社 総合システム，株式会社 フォーラムエイト 他でも市販している。
- NeuralNetAssistant Ver.1.3.1, 有限会社シー・エー・イー

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV 下部構造編，1996. 12.
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996. 12.
- 3) 廣瀬彰則，芝頭宗治，丹羽信弘，金子昌治，小林敏宏，中谷武弘，門田克史，角田久典，濱本浩伸，西村彩，川副孝行：道路橋 RC 橋脚の最適設計に関する一考察，中央復建技報，第 30 号，pp.42-47，1999.
- 4) 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.
- 5) T.Kohonen 著，中谷和夫 監訳：自己組織化と連想記憶，シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社，1995.10.
- 6) 萩原 将文：ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム，pp.66-72，1994.9
- 7) 近田康夫，廣瀬智士，城戸隆良：SOM/LVQ による橋梁点検データの見直し，構造工学論文集，Vol.44A，pp.593-600，1998.3.
- 8) 白木渡，長瀬裕俊，宮下英明，伊藤則夫：自己組織化マップ (SOM) による斜面崩壊予測システム，構造工学論文集，Vol.44A，pp.453 - 459，1998.3.
- 9) 伊藤則夫，白木渡，安田登：地盤特性値の空間分布推定問題への自己組織化特徴マップの応用，土木学会論文集，No.651/VI-47，pp.145-156，2000.6.

(2000.9.14. 受付)