

I-21 GA と SOM による RC 橋脚耐震設計支援

Support System for Seismic Design of RC-pier using GA and SOM

近田康夫¹・中谷 武弘²・廣瀬彰則³・伊藤則夫⁴・山本紘久⁵

Yasuo CHIKATA, Takehiro NAKATANI, Akinori HIROSE, Norio ITOH, and Hirohisa YAMAMOTO

抄録：兵庫県南部地震以降，道路橋 RC 橋脚の耐震設計は非線形応答を考慮した複雑なものへと変更され，業務用ソフトウェアを用いてもすべての制約条件を満足する最適な(合理的)詳細設計案(解)を得るには多くの試行錯誤が必要となる．そこで，実務上，特定の制約条件を重視したい場合を想定し，これと費用の面から遺伝的アルゴリズムを用いた許容解の探索を行った．さらに，SOM を援用して，得られた許容解の解空間内での特徴を分析するとともに，より良い解を探索するための周辺解を分析するアプローチを示した．設計案の質的向上のための一つの方法論を提示している．

Abstract : Setting of appropriate initial values is necessary to obtain the design alternatives which satisfy the restrictions for the structure design. When a set of initial values is improper, it is necessary to repeat calculation many times. On the other hand, the bridge that has high reliability is requested and the design become complicated. Now, it is difficult for an inexperienced engineer to carry out this work. In this research, an approach is proposed for supporting of efficient initial values' setting in the RC pier design by using SOM and GA.

キーワード : 遺伝的アルゴリズム, 自己組織化特徴マップ, RC 橋脚, 詳細設計支援

Keywords : Genetic algorithm, SOM, RC pier, detail design assistance.

1. はじめに

土木技術の発展に伴い，さまざまな土木構造物が各地において数多く築造されているが，近年では，熟練した構造設計技術者の不足は深刻な問題となっている．一方で，平成7年に発生した兵庫県南部地震は，各種の構造物に大きな被害を引き起こした．この結果をうけ，平成8年度，道路橋示方書が全面改訂¹⁾され，従来にも増して安全性，耐久性の高い橋梁が求められるようになった．橋梁設計は震度法中心から地震時保有水平耐力法や動的照査法中心の設

計法へと移行され，計算処理が複雑な過程となり，特に橋脚においては，入力に対する出力応答が非線形応答となったため，設計初期段階での各種変数の設定は困難なものとなった．

現在，パーソナルコンピュータの発達により，橋脚設計には業務用のソフトウェアがよく用いられる．設計者は初期値設定を行い，プログラムに計算させ，結果を受けるという行為を繰り返すだけでよい．しかし，熟練した設計者ならば経験と知識により満足する設計案を短時間で得ることができるが，未熟な設計者が優れた設計案を得るには，多様な設計変数

¹ 正会員 工博 金沢大学 教授 大学院自然科学研究科環境科学専攻

(〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20 TEL.076(234)4634 e-mail:chikata@t.kanazawa-u.ac.jp)

² 正会員 工修 中央復建コンサルタンツ(株) 梁系グループ (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 4-11-10)

³ 正会員 博(工) 中央復建コンサルタンツ(株) 橋梁系グループ (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 4-11-10)

⁴ 正会員 博(工) (有)シー・エー・イー (〒680-8064 鳥取県鳥取市国府町分上 2-210)

⁵ 非会員 工修 北川ヒューテック(株) (〒921-8584 石川県金沢市神田 1 丁目 13 番 1 号)

の組み合わせの試行錯誤が必要であり、多大な時間と労力を費やすことになる。したがって、満足する設計案を得るまでの繰り返し初期値入力作業を低減することで、設計に費やす時間の短縮、あるいは省力化が図られると考えられる。

一方、上記の試行錯誤の末にひとつの許容解が得られた場合、さらにより良い解を求めて試行錯誤を続けることは現実的にはほとんど行われない。しかし、設計の質的向上の観点からは、得られた許容解の解空間における位置づけやより良い解を求めての努力が強く望まれる。

そこで本研究では、遺伝的アルゴリズム (GA)、および人間の神経回路を模したニューラルネットワークの一種である自己組織化特徴マップ (SOM) を援用し、道路橋 RC 橋脚の詳細設計において、簡便に許容解を求めるだけでなく、得られた許容解の質的向上を目指した One More Step を支援する。

なお、筆者らは、SOM を用いての設計初期案探索^{2),3)}や、設計空間の分析⁴⁾を行ってきているが、本報では、より効率的な初期解の探索と得られた解の質的向上の方法について検討している。

2. GA(Genetic Algorithms)

GA⁵⁾は1975年にJohn Hollandによって考案された。アイデアの簡潔さにより現在では、集団遺伝学等さまざまな分野で利用されている。GAは、自然界における生物の進化機構をヒントに考え出されており、与えられた環境の中で、より優良な解の発見を目指して探索を行う。本研究では、これを初期解探索を行うアルゴリズムとして用いた。

最も基本的な単純 GA(Simple GA) の流れを図 1 に示す。

3. SOM(Self-Organizing Map)

SOM(自己組織化特徴マップ)は、1988年にコホーネンによって提唱された教師なし学習アルゴリズムである^{6),7)}。このモデルではニューロンが1次元ないし2次元のつながりを持って配置され、競合により勝ち残ったニューロンだけでなくその近傍にあるニューロンも同時に学習を行うことを特徴としている。入力データがどの分類に属するかは与える必

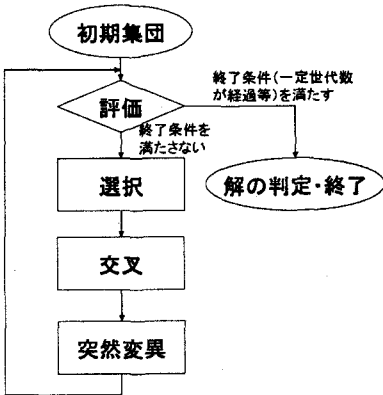


図-1 基本的な GA の流れ

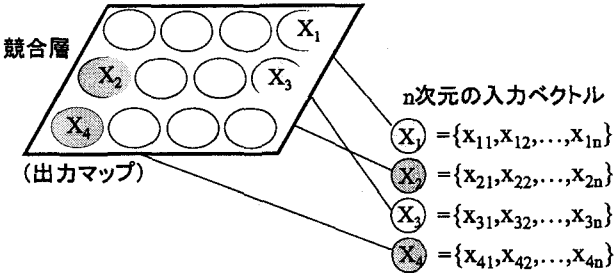


図-2 SOM の概念図

要がなく、入力データのもとの空間における相互関係(順序性、類似性など)をニューロンの1次元あるいは2次元のつながりを持つマップに写像することができる。つまり、図-2で示されるような n 次元からなる複雑な特徴を2次元平面図へ射影することで、複数のデータを視覚的にクラスタリングすることができるのである。

SOM の学習アルゴリズムは次のようである。

1. ネットワークの初期化
入力層と競合層の結合重みの初期値を乱数を用いて小さな値に設定する。意図的に設定することもできる。
2. 学習ベクトルの入力
入力層に学習ベクトル
$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \dots\dots\dots (1)$$
を入力する。
3. 競合層で学習ベクトルと結合重みとの距離を計算
競合層で、各ニューロンの重みベクトル w_{ji} と学習ベクトルとの距離は次式で与えられる。

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

ここで、 w_{ji} は入力層の i 番目のニューロンとマップ

ブ層 j 番目のニューロン間の結合重みを表わす。

4. 重みベクトルとの距離が最小となるニューロンの選択

d_j が最小となる、つまり学習ベクトルと重みベクトルとの距離が最小となるニューロンを選択する。このニューロンを勝者ニューロンと呼び、 j^* と書くことにする。

5. 重みベクトルの更新

式 (3) により重みベクトルの更新を行う。

$$\Delta w_{ji} = \eta h(j, j^*)(x_i - w_{ji}) \dots\dots\dots (3)$$

ここで η は正の定数、 $h(j, j^*)$ はガウス関数と呼ばれ、式 (4) で表される。

$$h(j, j^*) = \exp\left(\frac{-|j - j^*|^2}{\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (4)$$

σ は学習の進行とともに小さくなっていく。

6. 2 へ戻る

2 から 5 の動作を繰り返して、重みベクトルを学習する。

競合学習では一つの入力データに対して多数のニューロンが反応するが、そのうち学習ベクトルに最もよく類似したニューロンが勝ち残る。競合学習による重みの更新は、勝ち残ったニューロンすなわち勝者ニューロンとその近傍領域の結合重みを入力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、前のデータの近傍のニューロンが勝者ニューロンとして選ばれやすくなり、異なったデータなら前のデータの近傍のニューロンは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で、学習終了時には類似した特徴を持つデータが 2 次元マップにクラスタリングされる。

4. 本研究で使⽤した設計データ

(1) 対象とした橋脚モデル

実際の橋の設計においては、設計条件に基づいて、上下部構造一体の動的解析が行われ、橋脚に分配される外力や、橋脚高さ、梁幅などの基本的な設計変数の一部が固定される。しかし、柱の断面寸法や鉄筋量、配筋状態は設計者が決定すべきものであるが、これらには膨大な組み合わせが考えられる。

本研究では、対象とする設計変数は以下のものに

限定した。

● 柱部分

- － 橋軸方向幅 (m)
- － 橋軸直角方向幅 (m)
- － 橋軸方向主筋
- － 橋軸直角方向主筋
- － 柱帯鉄筋

● 底版部分

- － 橋軸方向幅 (m)
- － 橋軸直角方向幅 (m)
- － 底版厚さ (m)
- － 橋軸方向配筋
- － 橋軸直角方向配筋
- － 底版斜引張鉄筋

これらの設計変数を、表-1 に示す値から選択、設定した。表の注に示すように、L 方向は橋軸方向を、T 方向は橋軸直角方向、をそれぞれ意味し、これ以降もこの表記を用いることにする。

5. GA による許容解探索

先に示した、設計変数の組み合わせによる、設計代替案が満足すべき条件は、橋軸方向および橋軸直角方向それぞれに関して、変位、応力、塑性率などであり、総数 42 となる。

GA における評価関数 (目的関数) は、これらの条件を指標としたものの組み合わせとなる。本研究では式 (5) によって各条件に対する評価値を決定した。

制約条件は、指標 $C_i = |\text{計算値} / \text{設計許容値}|$ と表現でき、指標 C_i の値が 1 以下であることが条件となる。経済性の観点からは、許容値ぎりぎりに収まることが望ましく、多くの指標が 1 を若干下回る値になることが理想である。そこで、GA に用いるべき評価関数を、次式のように設定した。

$$x = \sum_{i=1}^{42} \{(1 - C_i)\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

x : GA の中で、個々のデータの判定に用いるべき評価値

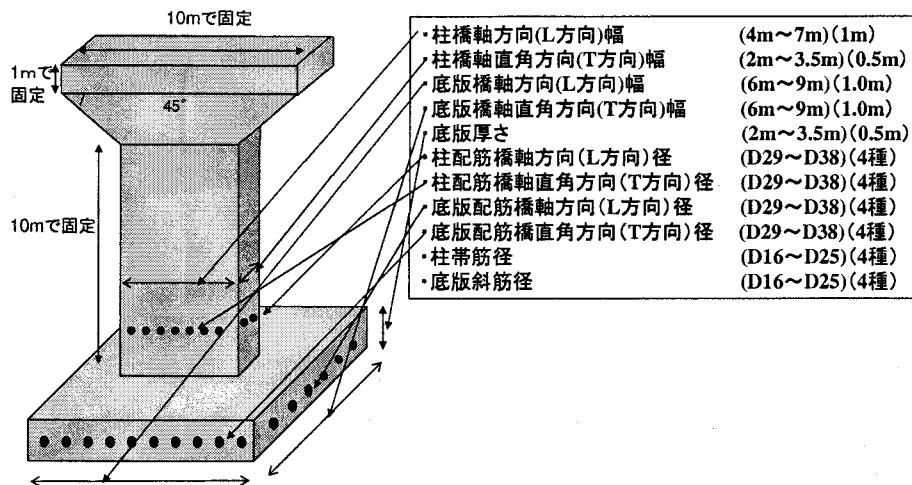


図-3 使用した橋脚モデル

表-1 設計変数の設定ケース

設計変数	設定ケース	種類
T 方向柱断面寸法	4m, 5m, 6m, 7m	4
L 方向柱断面寸法	2m, 2.5m, 3m, 3.5m	4
T 方向底版寸法	6m, 7m, 8m, 9m,	4
L 方向底版寸法	6m, 7m, 8m, 9m,	4
底版厚さ	2m, 2.5m 3m, 3.5m,	4
T 方向柱主筋径	D29, D32, D35, D38	4
L 方向柱主筋径	D29, D32, D35, D38	4
T 方向底版主筋径	D29, D32, D35, D38	4
L 方向底版主筋径	D29, D32, D35, D38	4
柱帯筋径	D16, D19, D22, D25	4
底版斜鉄筋径	D16, D19, D22, D25	4

L 方向：橋軸方向，T 方向：橋軸直角方向

計算値：設計変数の組み合わせに対して，安定計算，保有水平耐力法などの計算を行った結果。

C_i ：変位，応力，せん断耐力等 ($i = 1 \sim 42$)，橋脚設計時に満たすべき 42 項目の条件に対する指標値

この評価値 x が，小さければ小さいほど，設計限界に近づいた優良なデータであるとし，評価を上げることとする．また満たすべき計算結果項目のなかで $C_i < 1$ を満たしていない項目は，大きなペナルティを課した．これによって非許容設計データが上位に上がるのを防ぐ．

なお，解探索では，設計計算に用いられる常時ならびに地震時の荷重状態に対して解析を行っている．

(1) 初期解の探索

本研究で，GA による許容解探索に用いたパラメータは，個体数，最大世代数，交叉率，突然変異率は

試行計算結果に基づいて，今回の問題設定において比較的安定して許容解が得られる組合せとしてそれぞれ，40 固体，500 回，40%，1.0%の固定とした．

(2) 指標ごとに重みをかけての解探索

現実の設計では，設計条件，および重要視する指標はそれぞれ異なってくる．つまり，どの項目も許容値ぎりぎりになることが理想ではあるが，そのような許容解が存在するののか否かもはっきりしていない状態では，特定の項目は許容値ぎりぎりにまで絞り込むが，他の項目は許容値に入っていれば可とするという現実的判断が行われる．

そこで，設計時に満たすべき指標に関して，特定の項目に重みを課した場合，設計面，費用面において，どのような影響を与えるかをいくつかの例で調べた．底版部分に関する項目で，橋軸方向のコンクリートの圧縮応力あるいは鉄筋の引張応力，保有水平耐力に関する項目では，タイプ I の橋軸方向の保有水平耐力，および，タイプ II の橋軸直角方向の降伏耐力に対し，それぞれ重みをかけたものを，どの指標にも重みをかけていない場合と比較した．なお，費用面を含む重要視する項目の重みは，初期収束などの不都合が生じない範囲で効果が確認できた 5 倍とした．重みをかける方法は，式 (5) 中の， $1 - C_i$ の該当項に重みを乗ずることとした．

a) 重みをかけない場合

図-4 は，各世代における最良固体の評価値の推移を，図-5 は，各世代における最良固体の費用の推移を，表-2 は最良固体の探索結果，および，費用をそれぞれ示す．

表-2 重みをかけない場合の最優秀データ

パラメータ	T 方向 柱寸法 (m)	L 方向 柱寸法 (m)	T 方向底 版 寸 法 (m)	L 方向底 版 寸 法 (m)	L 方向 柱配筋	T 方向 柱配筋	L 方向底 版配筋	T 方向底 版配筋	底版厚さ (m)	底版斜 鉄筋	柱帯鉄筋	費 用 (千円)
1 回目	4	2	9	8	D35	D38	D29	D29	2	D22	D19	10357
2 回目	4	2	9	8	D32	D38	D29	D29	2	D19	D19	10426
3 回目	4	2	8	7	D32	D38	D29	D29	2	D16	D19	9412

表-3 底版のコンクリート圧縮応力あるいは鉄筋引張応力に重みをかけたときの最優秀データ

パラメータ	T 方向 柱寸法 (m)	L 方向 柱寸法 (m)	T 方向底 版 寸 法 (m)	L 方向底 版 寸 法 (m)	L 方向 柱配筋	T 方向 柱配筋	L 方向底 版配筋	T 方向底 版配筋	底版厚さ (m)	底版斜 鉄筋	柱帯鉄筋	費用 (千円)
1 回目	4	2	8	7	D32	D29	D29	D29	2	D16	D19	9184
2 回目	4	2	8	7	D32	D29	D29	D29	2	D16	D22	9449
3 回目	4	2	8	7	D32	D29	D29	D29	2	D19	D19	9184

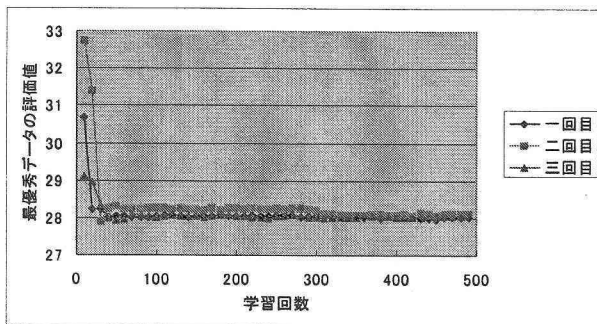


図-4 重みをかけない場合の評価値の推移

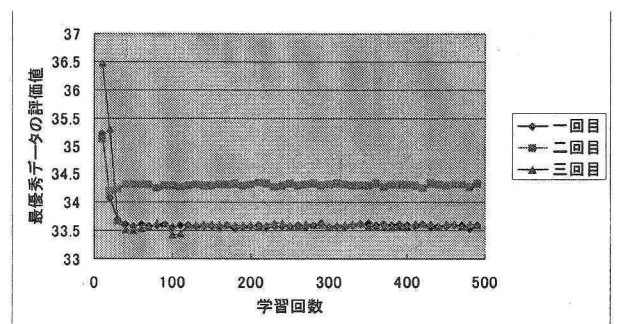


図-6 底版のコンクリート引張応力に重みをかけたときの評価値の推移

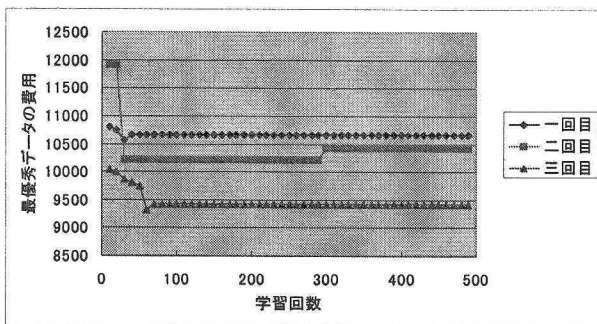


図-5 重みをかけない場合の費用の推移

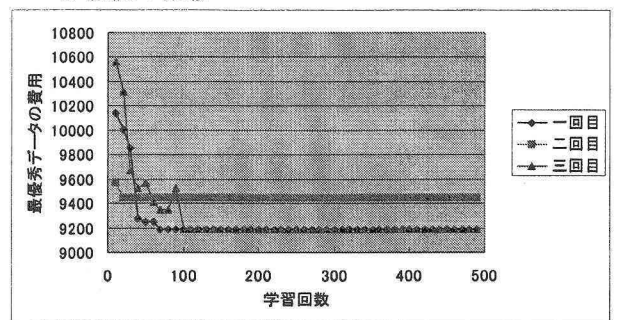


図-7 底版のコンクリート圧縮応力あるいは鉄筋引張応力に重みをかけたときの費用の推移

図-4, および, 図-5 に着目すると, 世代進行に伴う単調減少傾向がみられた。また, 表-2 からは, 最優秀データとして, 安全性に余裕を持ち, 費用が比較的高いデータが選ばれる傾向がみられた。

b) 橋軸方向の底版のコンクリート圧縮応力あるいは鉄筋引張応力に重みをかけたとき

図-6 は最優秀データの評価値の推移を, 図-7 は最優秀データの費用の推移を, 表-3 は最優秀データの探索結果, および費用をそれぞれ示す。

表-3 に着目すると 3 回の学習の最優秀データのどれもが, かなり類似したデータとなり, 費用に関してもかなり優秀なデータであった。

c) タイプ I の保有水平耐力に重みをかけたとき

図-8 は最優秀データの評価値の推移を, 図-9 は最優秀データの費用の推移を, 表-4 は最優秀データの探索結果, および費用をそれぞれ示す。図-8, および, 図-9 に着目すると, 世代が進んでもほとんど評価値が減少しないことがわかる。3 回目の学習の出

表-4 タイプ I の保有水平耐力に重みをかけたときの最良データ

パラメータ	T 方向 柱寸法 (m)	L 方向 柱寸法 (m)	T 方向底 版 寸 法 (m)	L 方向底 版 寸 法 (m)	L 方向 柱配筋	T 方向 柱配筋	L 方向底 版配筋	T 方向底 版配筋	底版厚さ (m)	底版斜 鉄筋	柱帯鉄筋	費 用 (千円)
1 回目	4	2	8	7	D35	D38	D29	D29	2	D16	D19	9572
2 回目	4	2	9	8	D32	D38	D32	D29	2	D16	D19	10444
3 回目	4	2	6	6	D29	D29	D29	D29	2	D16	D16	非許容

表-5 タイプ II の降伏耐力に重みをかけたときの最良データ

パラメータ	T 方向 柱寸法 (m)	L 方向 柱寸法 (m)	T 方向底 版 寸 法 (m)	L 方向底 版 寸 法 (m)	L 方向 柱配筋	T 方向 柱配筋	L 方向底 版配筋	T 方向底 版配筋	底版厚さ (m)	底版斜 鉄筋	柱帯鉄筋	費 用 (千円)
1 回目	4	2	8	7	D38	D35	D29	D29	2	D16	D19	9669
2 回目	4	2	8	7	D38	D32	D29	D29	2	D16	D19	9594
3 回目	4	2	8	7	D35	D38	D29	D29	2	D16	D19	9572

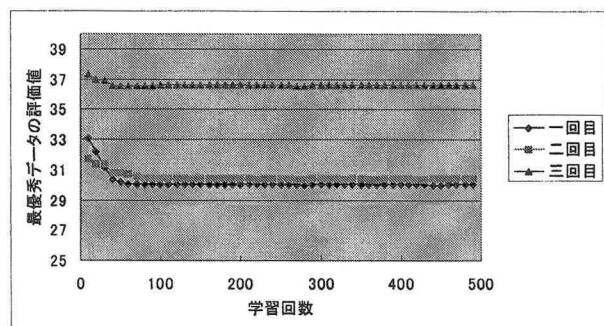


図-8 タイプ I の保有水平耐力に重みをかけたときの評価値の推移

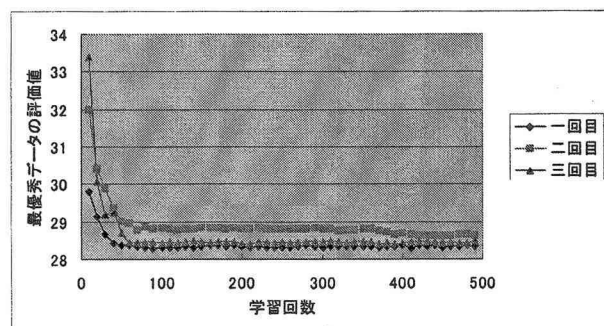


図-10 タイプ II の降伏耐力に重みをかけたときの評価値の推移

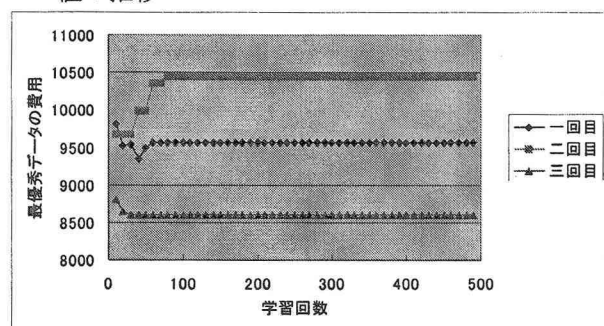


図-9 タイプ I の保有水平耐力に重みをかけたときの費用の推移

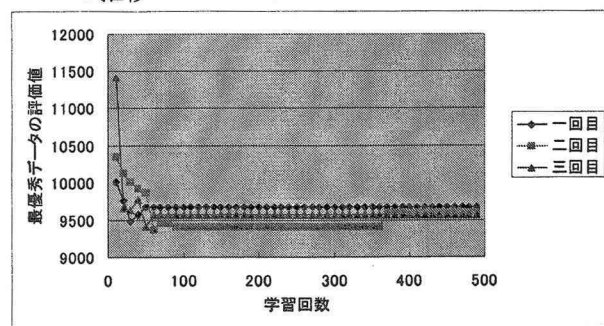


図-11 タイプ II の降伏耐力に重みをかけたときの費用の推移

力指標に着目すると、重みをかけたタイプ I の橋軸方向の保有水平耐力に関する指標値が、全データ中一番高い値であることがわかる。

d) タイプ II の降伏耐力に重みをかけたとき

図-10 は最優秀データの評価値の推移を、図-11 は最優秀データの費用の推移を、表-5 は最優秀データの探索結果、および費用をそれぞれ示す。

表-5 に着目すると設計パラメータ、費用ともに、3 回とも類似したデータが、最優秀データと判断され

た。また、指標値に関してもすべての項目に関して、かなり類似した値となった。

e) 結果

重みをかけなかった場合は、すべて最優秀データが、設計許容データであったものの、得られた最優秀データに統一性が存在しなかった。

橋軸方向の底版コンクリートの引張応力に重みをかけた場合、3 回の学習とも、費用、設計パラメータ、出力指標値にほとんど違いが見られなかった。また、

費用値が、他の場合と比べて比較的安いという結果が得られた。

タイプIの橋軸方向の保有水平耐力に重みをかけた場合、最優秀データの費用、設計パラメータ、安定計算に関する指標値、および保有水平耐力の指標値は、3回ともかなり異なった値であった。このことから、保有水平耐力の指標値が少しでも変化した場合、安定計算の指標値や費用に多大な影響を及ぼすことがわかる。

タイプIIの橋軸直角方向の降伏耐力に重みをかけた場合は、3回の学習とも、費用、設計パラメータ、出力指標値にほとんど違いが見られなかった。唯一、柱配筋に関してのみ違いが見られたが、このことにより、降伏耐力が、設計パラメータの中で柱配筋に影響を受けていることがわかる。

この結果を考慮すると、GAを用いることにより単なる初期許容解だけではなく、ある程度は目的とする特徴、換言すれば設計上重要視する特徴を持った初期許容解の探索にも有効なシステム構築が可能であることがわかった。

6. SOMによる許容解の吟味

(1) 近傍設計案の作成

GAを用いて初期解の探索を行った場合、設計条件を満たす初期許容解は発見できるものの、その許容解は、与えられた条件内での最適解、または重みをかけた目的関数が最適である解とは限らない。もちろん、すべての組み合わせをチェックできないことから、得られた許容解の解空間における周辺を探索してより良い解の存在を調べることは可能である。GAでは、必ずしもそのような周辺解をすべて探索してはいないこと、SOMのマップによる視覚化を行うことで、周辺の詳細なチェックとともに、得られている許容解周辺の解空間の状態を確認できることが工学的判断を助けることになる。GAのように、基本的にはランダム・サーチによって、得られた許容解に対する工学的判断が付加される余地を、SOMを用いることである程度埋められると考えられる。数式では表現しきれない、設計の質を向上させる最も強力なオプティマイザは人間ということになる。

手順としては、GAで抽出した初期許容解周辺で設

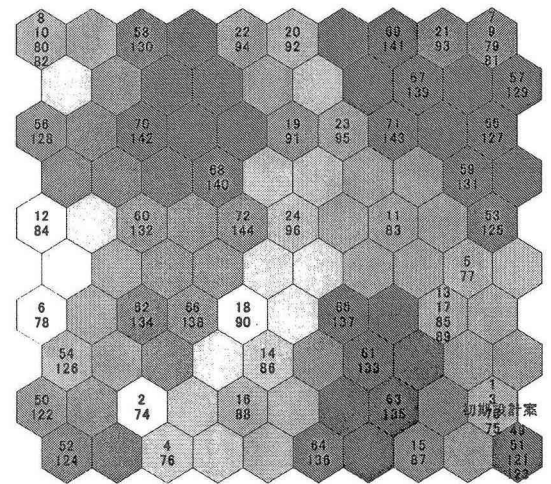


図-12 費用面に重みをつけた場合のマップ (許容解のみ)

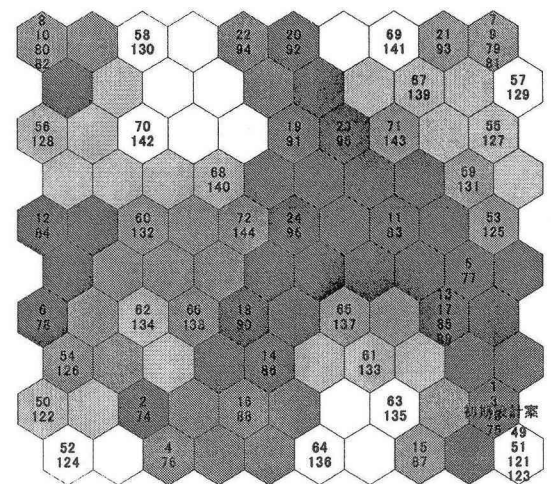


図-13 タイプIIの降伏耐力の重みマップ (許容解のみ)

計変数を変化させて、解空間内での近傍設計案を作成する。これらのデータに対する構造計算を行い、そのデータを用いてSOMのマップを作成し、分析する。

ここでは、T方向のタイプIIの降伏耐力に重みをかけた場合のデータに関して調べることにした。

ところで、底版寸法は鉄筋径に比較して費用面での影響はるかに大きいため、底版寸法に関してはGAの探索段階でかなり最適設計案に近づいていると思われる。

そこで、鉄筋径の値を変化させて得られた周辺許容解のデータのみを使ってマップを作成した。図-12は費用面でラベリングしたマップ、図-13はT方向のタイプIIの降伏耐力でラベリングしたマップである。いずれの図も、網掛けが濃いほど、指標の値が大きなことを示している。

費用に着目した場合、初期許容解よりも優秀なデータとしては、No.2やNo.18をはじめとして、多くのデータを発見することができた(図-12で網掛けの薄い許容解)。しかも、これらのデータは、図-13の降伏耐力に関しても初期許容解よりも優れている(網掛けが濃い)ことがわかる。

(2) 結果

SOMを用いて、GAで探索した初期許容解周辺で設計変数を変更したマップに関して、費用の観点から見た場合には、鉄筋径に関する分析でより優れた解を発見することができた。

SOMを用いてマップを描くことにより、技術者は、そのときの設計制約に応じて費用面を重視した設計を用いるか、安全性を重視した設計を用いるかをわかりやすく判断することができるといえる。また、マップを作成する際、ラベリングを変化させることにより多岐にわたる安全性を考慮し判断することができる。

7. まとめ

RC橋脚の設計を行う際の、試行錯誤による許容解探索の煩雑さを解消するために、GAを援用した特徴的な許容解の探索を試みた。さらに、SOMを用いてGAで得られた許容解近傍の解空間を分析することで、より良い解の探索あるいは得られた解の解空間近傍での位置づけを行うことを試みた。

まず、GAを用いて解探索を行った場合、ある程度優秀な、初期許容解が探索可能であることを確認した。GAを用いた場合の特徴、傾向としては

- 費用や設計の判定基準となる指標値ごとに重みをかけて、探索をした場合、費用やその重みをかけた指標値をある程度重視した初期許容解が得られる。
- 橋軸方向の底版コンクリート圧縮応力あるいは鉄筋引張応力に重みをかけた場合は、他の基礎部分以外に関する指標値に重みをかけた場合に比べ、費用が比較的安い。

すなわち、何らかの設計指標に重みをかけて初期解探索を行えば、その指標を重視した初期許容解が得られることがわかる。

次に、初期許容解周辺のSOMによる分析では、より優秀な設計案を発見できるかどうかを調べた。今

回の探索では、初期許容解周辺で設計変数を変化させたデータを用いてマップを作成したので、初期許容解からかけ離れた設計変数値を持ったデータは、発見できなかったものの、費用面に関して初期設計案よりもさらに優秀なデータを発見することができた。仮に、より良い解が発見できなくても、解空間の初期許容解近傍内における最適解を得ていることが確認できたことになる。

これらのことにより、設計者は、こういった種類の設計変数が費用や設計指標値に大きく影響を与えているのかを判断することができる。また、GAによる初期解探索のみではわからなかった、さらに優秀な解の探索が可能であることがわかる。

付録

本研究では、SOMによる分析に以下の市販ソフトウェアを使用した。

・SOMアナライザー Ver.2.0.8 (有限会社シー・イー・イー)

また、橋脚データの構造計算にはDLL化したモジュールを使い、GAプログラムおよびMicrosoft Excel内のマクロから利用することで作業の簡便化を図った。

参考文献

- 1) 日本道路協会編, 道路橋示方書 V, 丸善株式会社出版, 2000
- 2) 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
- 3) 廣瀬彰則, 近田康夫, 中西孝臣自己組織化特徴マップによる橋梁下部工の耐震設計支援土木情報システム論文集, Vol.10, pp.165-174, 2001.10.
- 4) 廣瀬彰則, 近田康夫, 道路橋 RC 橋脚の設計変数と構造最適化のための影響度解析, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.257-266, 2002.3
- 5) 小林重信: ニューロ・ファジィ・AIハンドブック, 計測自動制御学会, pp.323-324, 361-364, 1994
- 6) T・コホネン: 臼井支朗: 基礎と実践ニューラルネットワーク, コロナ社, pp.130-148, 1995
- 7) ニューラルネットアシスタント操作説明書, 有限会社シー・イー・イー, pp.1-78, 2002

(2005.5.17 受付)