

たたみ込み理論による近似精度の向上と構造物の最適耐震設計法 への応用に関する研究

Study on Convolute Approximation and its Application to Optimum Seismic Design

杉本博之*・佐藤直樹**・阿部淳一†

Hiroyuki SUGIMOTO, Naoki SATO and Junichi ABE

* 工博 北海学園大学教授 社会環境工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

** 北海学園大学工学研究科修士 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

†工博 北武コンサルタント株式会社 (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7 丁目 4 番 7 号)

The specifications for seismic design of structures were significantly revised after the Hyogoken-Nanbu Earthquake, and the performance-based design method is being introduced. In this seismic design, it has been mainstream to verify the seismic performance by time history response analysis. Structural optimization has been developed with the approximation concept and approximation concept also has been improved in these years. The RBF approximation method was applied to approximate the constraints of seismic design problem. In this paper, not only the seismic performance but also the repair cost is considered. Both of the constraints and objective function must be approximated. So, the convolute approximation technique is tried to apply to this seismic design problem with several numerical examples.

Key Words: Optimum Seismic Design, Convolution Approximation, Repair Cost, Rigid Frame Pier

キーワード: 最適耐震設計法, たたみ込み近似法, 復旧費用, ラーメン橋脚

1. まえがき

我が国の耐震設計法は、兵庫県南部地震以降急速に進歩を遂げており、土木学会¹⁾、鉄道²⁾、道路³⁾等の多くの耐震設計基準においては、性能規定型の照査体系へと移行する準備が進められている。そこでは特に構造物の復旧性が重要な性能の一つとして規定されている。

しかし、現時点の通常の設計においては、構造物の設計解は初期建設費用にのみ着目して得られている。すなわち地震後の構造物の損傷による損失は考慮されずに、初期建設費用にのみ着目して設計解の優劣を判断しているのが通例である。

本来、復旧性を主たる性能として規定した場合は、地震によって生じる構造物の損傷の修復に要する損失を考慮した設計解が必要であることは言うまでもない。

一方、近年の耐震設計法では、構造物の地震作用による応答は時刻歴非線形解析法により算定されることが主流になりつつあるが、時刻歴非線形応答解析法を主たる応答解析法として設計解を算定することは、極めて煩雑かつ困難であった⁴⁾。

そこで筆者の一部はすでに、応答スペクトル法を用いて初期建設費だけでなく補修費も考慮した最適耐震設計の研究を行い発表した⁴⁾。

構造最適設計においては、何らかの近似法を用いるのは常識となっているが、上記の研究は、構造物の地震作用による応答解析に近似法を取り入れたものと解釈することが出来る。

しかし前記のように、免震橋あるいはラーメン橋などのように地震時の挙動が複雑な橋梁の解析、照査には時刻歴非線形応答解析法が要求される。

筆者らは、またすでに時刻歴非線形応答解析法を必要とする構造に対する最適耐震設計の研究も行い発表している⁵⁾。ただしそこでは、目的関数を初期建設費のみとし、動的挙動に対する制約条件にのみ RBF ネットワーク(Radial Basis Function Network)による近似手法を用いて最適化が行われた。

これらを背景として本研究では、時刻歴非線形応答解析法を用いて、目的関数に初期建設費のみならず復旧性も考慮した最適耐震設計を行うものとする。筆者らは、ユーザーコストも含めた復旧性を考慮した研究を行ってきたが⁷⁾、本研究においての主目的は、たたみ込み理論の導入であるため、本論文では復旧性にユーザーコストは含めず、復旧性は地震による構造物の損傷の復旧費のみで評価されるものとする。ところが、復旧費の算定には、地震動強度を受けた場合の構造物の応答・損傷が必要であるため、時刻歴非線形応答解析法が必要になる。

つまり本研究の問題の定式化のもとでは、制約条件のみならず、目的関数に対しても近似法を適用することが必要となる。

制約条件の近似の場合は、関数の値が0になる曲面の近似であり、その意味で絶対的な精度は要求されるが、設計空間全域にわたる精度は必ずしも要求されない。一方、目的関数を近似する場合は、必ずしも絶対的な精度は要求されないが、設計空間全域にわたる精度が要求され、2つの近似はそれぞれ異なる精度が要求される。つまり、従来筆者らが応用してきたRBFネットワークによる近似法に改良を加え、更なる近似精度の向上が要求されることになる。

その改良に際して、本研究では荒川ら⁶⁾により提案されたたたみ込み理論をRBFネットワークへ導入することを試みた。

RBFネットワークによる近似は、設計空間内の複数の教師値に対して複雑な曲面を作成することが出来る手法である。しかし得られた曲面が、すべての教師値の点を通るわけではない。教師値の組み合わせによっては、かなりの誤差を持つ場合がある。たたみ込み理論は、新たな構造解析を要求せずに、この誤差を次の教師値として近似曲面の精度を上げようとする手法で、1回の構造解析に多くの計算時間を有する構造物の耐震設計には適した手法と考えることが出来る。

また、RBFネットワークの近似関数としてはガウス関数を用いるが、式に含まれるパラメータの一つである半径の値は問題に依存する傾向があり、その決定自身最適化問題を形成していた。しかし、たたみ込み理論は半径は自由に設定して徐々に値を小さくして行き所定の精度が得られたら次にステップに移行する手法であるので、この半径決定の煩わしさから開放されるのも、メリットの一つと考えられる。

以下、RBFネットワークの簡単な概要とたたみ込み理論、その計算例を説明し、初期建設コストと地震動による損傷の復旧コストの和を目的関数とする構造物の最適耐震設計法の提案を計算例の説明とともに試みる。

2. RBF ネットワークの概要とたたみ込み理論

本研究は、近似手法を用いた最適耐震設計法の手法を提案するものである。ここでは、近似手法に用いるRBFネットワークと近似精度の向上に用いているたたみ込み理論について説明する。

2.1 RBF ネットワークの概要

近似手法に用いるRBFネットワークとは、階層型ニューラルネットワークの一種である。階層構造とは、図-1のような入力層、中間層、出力層の3層構造であり、入力層からの値を中間層における出力関数により処理し、出力層に重みを乗じて送られる。中間層における出

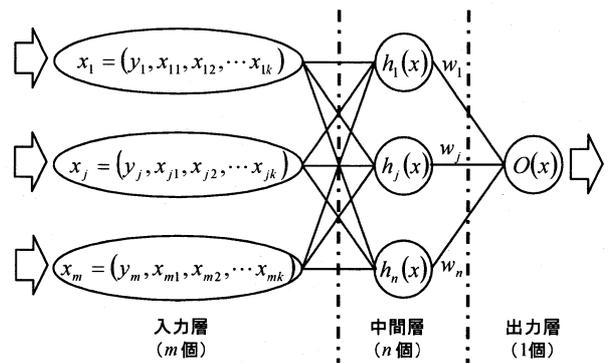


図-1 階層型ニューラルネットワーク

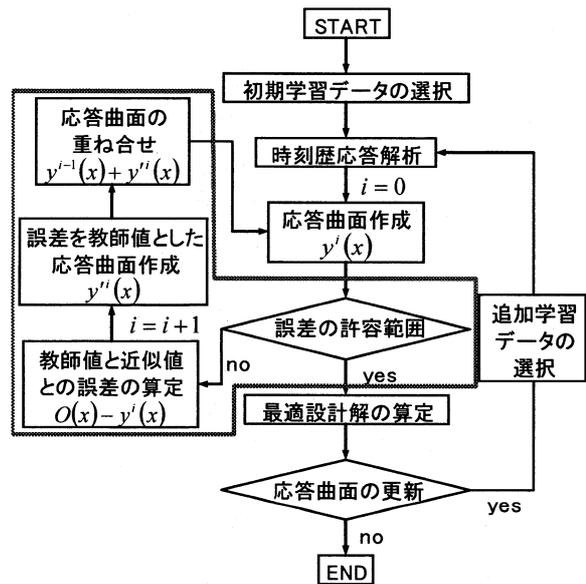


図-2 たたみ込み理論導入後の最適耐震設計のフローチャート

力関数には、放射基底関数(Radial Basis Function)を用いている。本研究では、放射基底関数に次式で示されるガウス関数を用いている。

$$h_j(x) = \exp\left(-\sum_{p=1}^K \left(\frac{(x_{jp} - c_{jp})^2}{r_{jp}^2}\right)\right) \quad (j=1 \sim n) \quad (1)$$

ここで、 $h_j(x)$ は学習データ j に対する基底関数の出力値、 K は1設計を構成する変数の数、 x_{jp} は入力層素子からの入力データ、 c_{jp} は基底関数の中心位置となる座標点、 r_{jp} は基底関数の半径、 n は基底関数の数である。本研究での初期半径の決定は、各データ間距離の最小値を算定し、初期半径として用いている。

2.2 たたみ込み理論

たたみ込み理論とは、関数に関数を重ね足し合わせることである。本研究は、たたみ込み理論をRBFネットワークへ導入することにより更なる近似精度の向上を図るものである。

たたみ込み理論の導入による最適耐震設計のフローチャートを図-2に示す。図中の赤枠内が、たたみ込み理論の導入により追加される計算プロセスである。たたみ込み理論の導入による計算プロセスには時刻歴応答解析を含まないため、短時間の計算量の追加により精度の向上が期待できる。

たたみ込み理論を用いた応答曲面の作成について1変数問題を例にとり、図-3~5を用いて以下に説明する。図中の問題は、 x_1, x_2 に学習データを与えている問題である。まず、図-3のように2つの学習データ●に対してRBFネットワークにより近似を行い、図中の赤線で示すような曲面が得られる。一般的な近似はここで終了とするが、本研究では、たたみ込み理論を用いることにより、以下に示す手順が加えられる。

まず、赤線で示された曲面から、得られた $x_i(i=1,2)$ に対する近似値と教師値の差が誤差の許容範囲以内か否かを算定する。なお、本研究では誤差の許容範囲内か否かの判定は、全学習データの中で教師値に対して誤差の割合が最大となる学習データでの近似値と教師値の関係を用いている。誤差の許容範囲以内か否かの判定式を次式に示す。

$$\max_{k=1-n} \left| \frac{O(x_k) - y(x_k)}{O(x_k)} \right| \leq \alpha \quad (2)$$

ここで、 $O(x_k)$ は変数 x_k に対する教師値、 $y(x_k)$ は変数 x_k に対する近似値、 α は誤差の許容範囲の割合を示しており、本研究では1%を用いている。 n は基底関数の数である。式(2)の条件を満たす場合は、たたみ込みによる応答曲面の作成を終了する。式(2)の条件を満たさない場合は、以下のように応答曲面の重ね合わせを行う。まず、図-3に示すように x_1, x_2 に対する誤差 E_1, E_2 を算定する。次に、図-4のように誤差 E_1, E_2 までの距離である■を教師値とし、図-5と同じく赤線のような曲面を作成する。そこで、得られた2つの曲面(赤線同士)を加え、図-5の緑線のような教師値●に対して精度の高い応答曲面を得るものである。重ね合わせによる曲面の算定式を以下に示す。

$$y(x) = \sum_{j=1}^n \left(w_j^{(0)} \cdot h_j^{(0)}(x) + \sum_{i=1}^{N_c} w_j^{(i)} \cdot h_j^{(i)}(x) \right) \quad (3)$$

ここで、 $y(x)$ は近似値、 $w_j^{(0)}$ は初期の基底関数に対する重み係数、 $w_j^{(i)}$ はたたみ込み回数 i 回目に対する重み係数、 $h_j^{(0)}(x)$ は学習データ j に対する初期の基底関数の出力値、 $h_j^{(i)}(x)$ は学習データ j に対する重ね合わせ i 回目の基底関数の出力値である。また、 n は基底関数の数、 N_c はたたみ込みの回数である。これらの一連の操作を式(2)の条件を満たすまで繰り返す。

本研究ではたたみ込み毎の半径を0.8倍に減少させている。また、半径の下限値を設定している。これは、半径が小さくなりすぎた場合に大域的精度が損なわれる

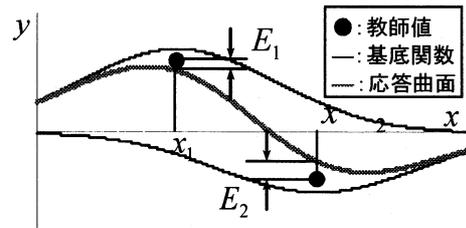


図-3 応答曲面作成

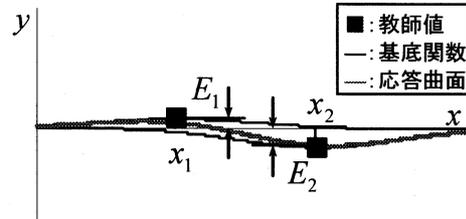


図-4 誤差を教師値とする応答曲面作成

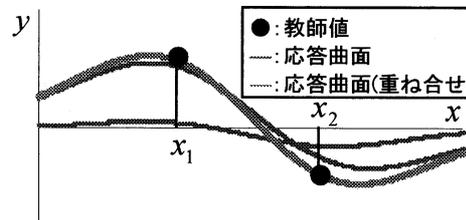


図-5 たたみ込みを行った応答曲面作成

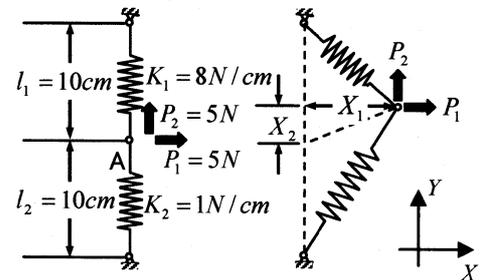


図-6 対象モデル

ことを防ぐためである。本研究での半径の下限値は、初期半径の1/20と設定している。半径の減少幅を0.8倍、半径の下限値を1/20としたのは、様々なパラメータで解析を行った結果、効果の大きかったためである。一般に、RBFネットワークにおける半径の決定は比較的难度な問題とされており、多くの研究者によってさまざまな提案および検討が行われてきた⁸⁾⁹⁾。しかし、本研究のように所定の精度を収束条件としてたたみ込みを行う度に半径を小さくすることにより、初期半径に大きく依存した形にはならないため、半径を設定する問題から開放されることになる。

2.3 ばね大変形問題へのたたみ込み理論の応用例

ここでは、簡単な無制約最適化問題において、たたみ込み理論を導入した場合と導入しない場合での近似曲面を比較することにより、RBFネットワークによる近似

手法にたたみ込み理論を導入することの有効性を示す。

問題に使用したのは、バネのポテンシャルエネルギーの最小化問題である¹⁰⁾。対象とするモデルを図-6の左に示し、図の右に変形後のモデルを示す。目的関数は、バネのポテンシャルエネルギーである。バネのポテンシャルエネルギー(PE)の算定式を以下に示す。

$$PE = 0.5K_1(\Delta L_1)^2 + 0.5K_2(\Delta L_2)^2 - P_1 X_1 - P_2 X_2 \quad (4)$$

→ min

ここで、 K_1 、 K_2 は各バネ係数(N/cm)、 P_1 、 P_2 は各バネにかかる力(N)、 ΔL_1 、 ΔL_2 は各バネの変形量(cm)、 X_1 はA点からX軸方向への移動量、 X_2 はA点からY軸方向への移動量である。 ΔL_1 、 ΔL_2 の算定式を以下に示す。

$$\Delta L_1 = \sqrt{(10.0 - X_2)^2 + X_1^2} - 10.0 \quad (5)$$

$$\Delta L_2 = \sqrt{(10.0 + X_2)^2 + X_1^2} - 10.0$$

設計変数は、A点からX(Y)軸方向への移動量 X_1 、 X_2 である。設計候補値は、 X_1 、 X_2 共に-3.5~12.0までの0.5刻みずつの離散変数である32種類とし、 $32 \times 32 = 1024$ 種類の設計候補値とした。なお、図7-9の縦軸および横軸に示すのは、-3.5を設計番号1、-3.0を設計番号2とし以下同様に、設計候補値を0.5ずつ増加するごとに設計番号を1つずつ増やしたものである。本節は、近似精度の比較を行い、たたみ込み理論の有効性を説明するため、実際の値と比較する必要がある。そこで、設計候補値全てに対して解析を行い等値線図としたものが図-7である。図-7の○は目的関数が最小となる最小解である。ここでは、初期学習データ10点からスタートし、更新毎によって得られる最適解と疎なデータの2点ずつを追加していき、この更新を繰り返して解析を行っている。なお、以下に示す計算結果は更新回数11回目、学習データ数32点での結果を示す。なお、 α は前記のように1%としている。

たたみ込み理論を導入しない場合での等値線図は、図-8となる。得られた最適解は最小解が得られておらず、最小解近傍であった。図を実際の等値線図と比較すると、最小解近傍の局所的な部分での精度の欠落、設計空間全域における大域的精度も悪いことがわかり、近似の精度が悪いことがわかる。

たたみ込み理論を導入した場合での等値線図は、図-9となる。得られた最適解は最小解が得られた。図を実際の等値線図と比較すると、たたみ込み理論を導入しない場合から比べると、局所的かつ大域的近似の精度の向上が見てとれる。

また、たたみ込みの計算過程の誤差の収束状況を図-10に示す。図-10では、学習データ毎に線の色を変えて示しており、振動しながら収束していく傾向が見られた。なお、たたみ込み回数9回で収束条件を満たした。

本章で示した結果は1例であるが、たたみ込み理論の有効性が示された結果であると思われる。

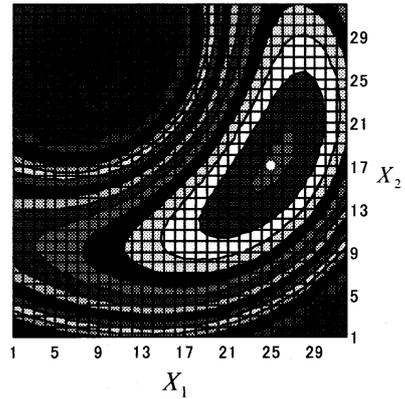


図-7 厳密な値での等値線図

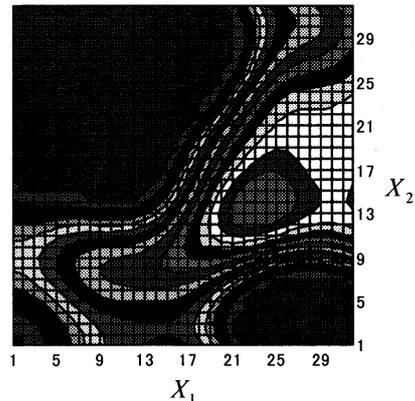


図-8 たたみ込み理論を使用しなかった等値線図

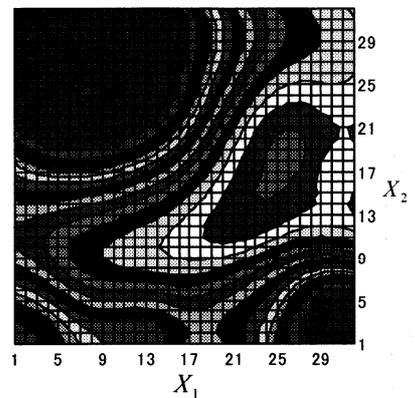


図-9 たたみ込み理論を使用した等値線図

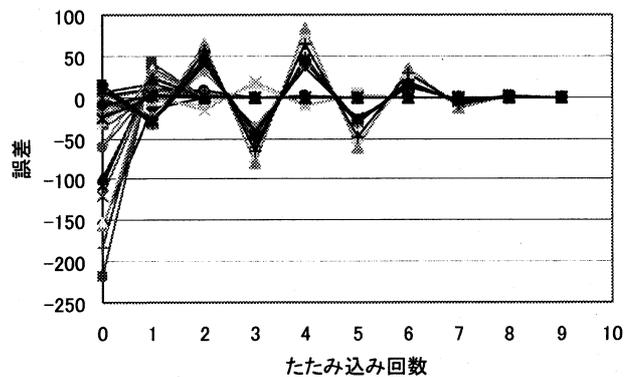


図-10 収束状況

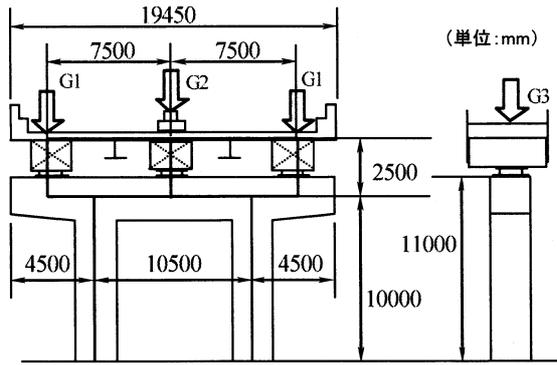


図-11 対象構造

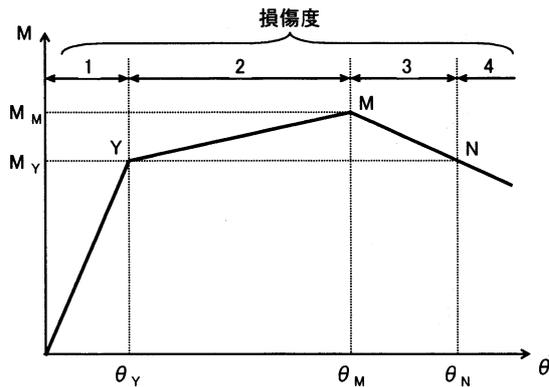


図-12 構造物の非線形性能

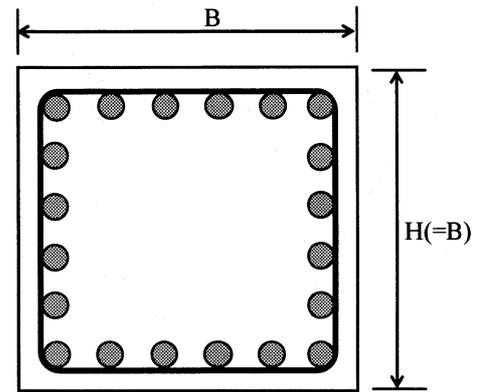


図-14 柱部材の断面構成

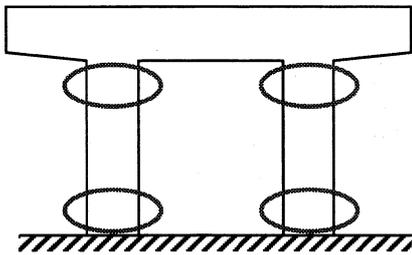


図-13 損傷箇所

表-1 補修工法

損傷度	補修工法	
	柱上端部	柱下端部
1	無補修	無補修
2	足場工 ひび割れ注入工	掘削 ひび割れ注入工
3	足場工 ひび割れ注入工 鉄筋整正 かぶりコンクリート修復	掘削 ひび割れ注入工 鉄筋整正 かぶりコンクリート修復
4	足場工 コンクリート除去 鉄筋取替え コンクリート打設	掘削 コンクリート除去 鉄筋取替え 埋戻し

表-2 設計候補値

B(mm)	N(本)															
1000	4	5	6	7	9	10	11	12	8	9	9	10	10	11	11	12
1100	4	5	7	8	10	11	13	14	9	10	11	11	12	13	13	14
1200	5	6	8	9	11	12	14	15	10	11	2	12	13	14	14	15
1300	5	7	8	10	12	14	15	17	11	12	13	14	15	15	16	17
1400	6	8	9	11	13	15	16	18	12	13	14	15	16	16	17	18
1500	6	8	10	12	14	16	18	20	13	14	15	16	17	18	19	20
1600	6	8	11	13	15	17	20	22	5	16	17	18	19	20	21	22
1700	7	9	12	14	16	18	21	23	16	17	18	19	20	21	22	23
1800	7	10	12	15	17	20	22	5	17	18	19	20	21	23	24	25
1900	8	11	13	16	18	21	23	26	18	19	20	21	22	24	25	26
2000	8	11	14	17	19	22	25	28	19	20	21	23	24	25	27	28
2100	8	11	14	17	20	23	26	29	19	21	22	3	25	26	28	29
2200	9	12	15	18	22	25	28	31	21	22	4	25	27	28	30	31
2300	9	12	16	19	23	26	30	33	22	3	25	27	28	30	31	33
2400	10	13	17	20	24	27	31	34	23	24	26	28	29	31	32	34
2500	10	14	17	21	25	29	32	36	24	26	27	29	31	33	34	36

1段配筋 ← | → 2段配筋

3. 2変数最適耐震設計への応用例

ここでは、2変数最適耐震設計問題への近似手法にRBFネットワークと最適化手法にGAを用いて最適化を行う。

対象とする構造は図-11に示すような一層門型ラーメン橋脚とした。図の左が橋軸直角方向、図の右が橋軸方向から見た構造図である。目的関数は、初期建設コスト C_0 に地震による損傷から算定される補修コスト C_r を加えたトータルコストであり、算定式は次式となる。

$$OBJ = C_0 + C_r \rightarrow \min \quad (6)$$

初期建設コスト C_0 は、次式により算定される。

$$C_0 = \alpha_c \cdot V_c \cdot K_c + \alpha_s \cdot V_s \cdot K_s \cdot G_s \quad (7)$$

ここで、 α_c はコンクリートの単価補正係数、 V_c はコンクリート量(m^3)、 K_c はコンクリート単位容積当たりのコ

スト($=65.1unit/m^3$)、 α_s は鉄筋の単価補正係数、 V_s は鉄筋量(m^3)、 K_s は鉄筋単位重量当たりのコスト($=9.1unit/kN$)、 G_s は鉄筋の単位重量($=77kN/m^3$)である。本研究では、 α_c 、 α_s は共に1.0とした。 K_c 、 K_s は、材料費、足場工費、人件費などを含む工事費用から換算した値である⁴⁾。

補修コスト C_r は、図-12に示すような $M-\theta$ の骨格曲線から、部材端部の応答回転角によって損傷度の判定を行う。構造物の損傷位置を図-13の○に示す。部材端部の損傷度が判定されると、損傷箇所に対する補修工法が損傷度別に算定される。損傷箇所に対する補修工法を

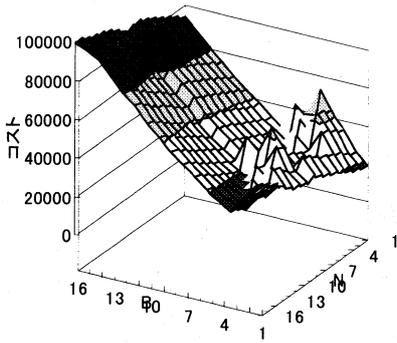


図-15 目的関数実曲面

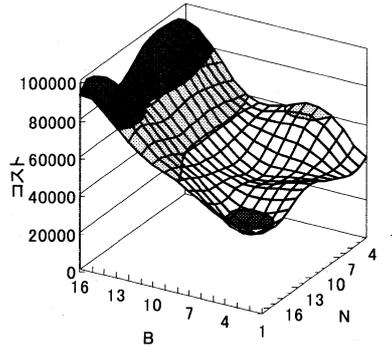


図-17 応答曲面
(たたみ込み理論導入前)

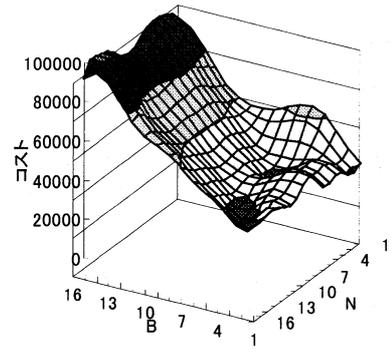


図-19 応答曲面
(たたみ込み理論導入後)

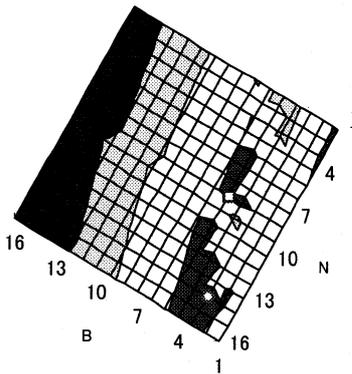


図-16 目的関数実曲面の等値線図

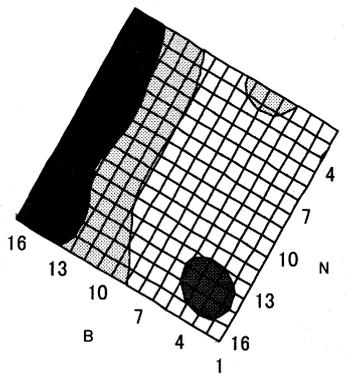


図-18 等値線図
(たたみ込み理論導入前)

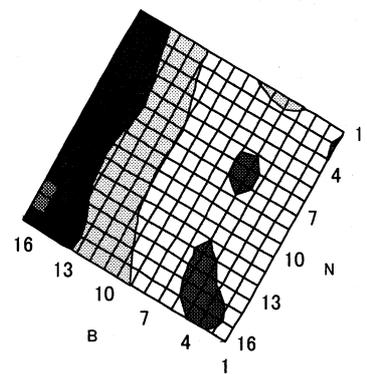


図-20 等値線図
(たたみ込み理論導入後)

表-1 に示す⁴⁾。なお、ここでは柱の基部の両側が損傷度4の場合を崩壊と定義した。設計の対象とするのは橋脚柱とし、断面構成は図-14に示す断面幅と断面高さが同等な正方形断面とした。本研究では、設計基準強度 24N/mm^2 のコンクリートと SD345 の鉄筋を使用材料とした。また、固定値として、コンクリートのかぶり C は 40mm 、せん断補強鉄筋径 D_w は 19mm 、軸方向鉄筋径 D は 32mm を用いた。また、軸方向鉄筋間隔は等間隔とした。

制約条件は、曲げ破壊に対する照査とせん断破壊に対する照査とした。回転角に関する照査は次式となる。

$$g^{PM}_j = \gamma \cdot \frac{\theta_{dk}}{\theta_{ak}} - 1 \leq 0 \quad (i=1 \sim N_m, k=1 \sim 2), \quad (8)$$

せん断に関する照査は次式となる。

$$g^{PS}_j = \gamma \cdot \frac{V_{di}}{V_{ai}} - 1 \leq 0 \quad (i=1 \sim N_m) \quad (9)$$

ここで、 γ は構造係数(=1.0)、 θ_{dk} は i 番目の橋脚における部材端部の応答部材角(rad)、 θ_{ak} は i 番目の橋脚における部材端部の許容部材角(rad)、 V_{di} は i 番目の橋脚における応答せん断力(kN)、 V_{ai} は i 番目の橋脚における許容せん断力(kN)である。なお、 θ_{dk} 、 V_{di} は動的解析により算定される項目である。設計変数は、断面幅 $B(\text{mm})$ と軸

方向鉄筋本数 $N(\text{本})$ の2変数とした。設計の候補値は、断面幅 B が $1000 \sim 2500\text{mm}$ で 100mm 間隔ずつの16種類、軸方向鉄筋本数 N が断面幅によって異なる16種類とし、設計候補値の総数は $16 \times 16 = 256$ 種類とした。各設計候補値を表-2に示す。この問題は前記の問題と同様に2変数問題である。ここでも、視覚的精度の確認を行うため全設計候補値に対して厳密な解析を行い、実曲面として表している。図-15に実曲面を示す。図-16は実曲面を等値線図としたものであり、図中の○は大域的最適解である。また、この設計問題では局所解もあり、図中の□に示す。ここでは、初期学習データ10点からスタートし、更新毎によって得られる最適解と疎なデータの2点ずつを追加していき、この更新を繰り返して解析を行っている。なお、以下に示す計算結果は更新回数15回、学習データ数40点での結果を示す。なお、 α は前記のように1%としている。また、本章では、全学習データの中で目的関数値が最小となる値で全学習データに対して正規化を行い、正規化した値を教師値として用いて近似曲面を作成している。

たたみ込み理論を導入しない場合での応答曲面を図-17に示す。また、このときの等値線図は図-18となる。曲面を実曲面と比較すると設計空間全域における大域的近似精度は、比較的精度の高い近似結果が得られた。しかし、等値線図を実曲面の等値線図と比較すると、局

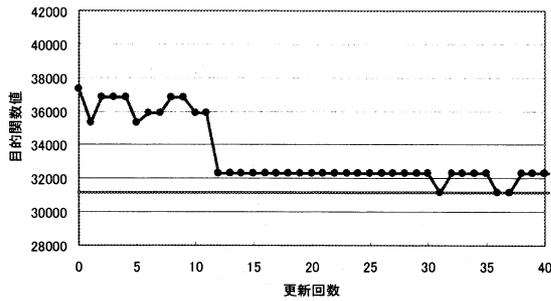


図- 21 最適解推移 (Case1 : たたみ込みあり)

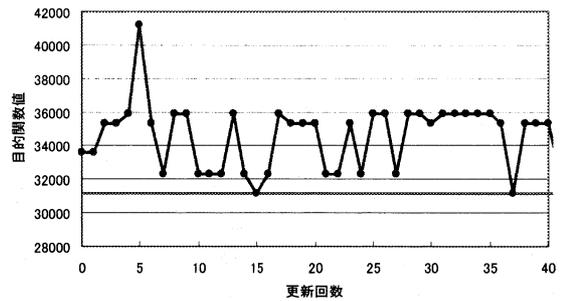


図- 22 最適解推移 (Case1 : たたみ込みなし)

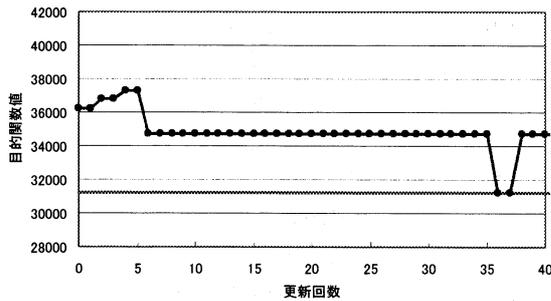


図- 23 最適解推移 (Case2 : たたみ込みあり)

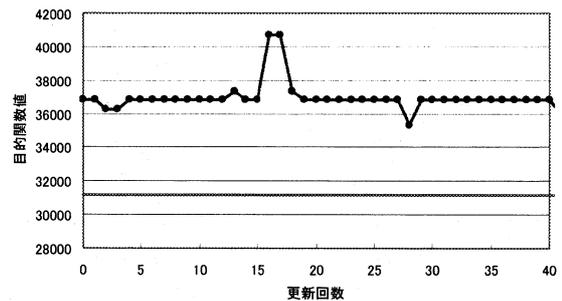


図- 24 最適解推移 (Case2 : たたみ込みなし)

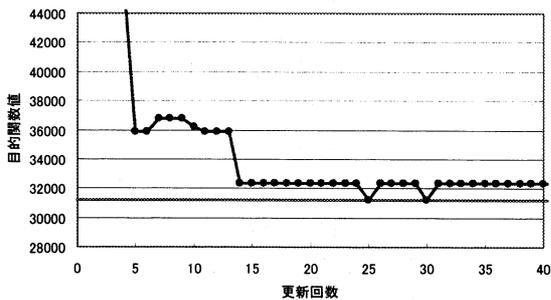


図- 25 最適解推移 (Case3 : たたみ込みあり)

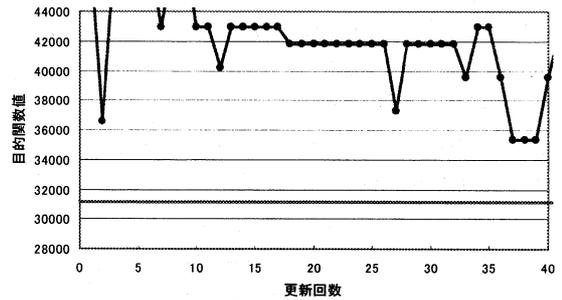


図- 26 最適解推移 (Case3 : たたみ込みなし)

所的最適解が得られておらず、局所的精度が欠落していることがわかる。

たたみ込み理論を導入した場合での応答曲面を図-19に示す。また、このときの等値線図は図-20となる。曲面を実曲面と比較すると設計空間全域における大域的近似精度は、たたみ込み理論を導入しなかった場合と同じく比較的精度の高い近似結果が得られた。また、等値線図を実曲面の等値線図と比較すると、導入しない場合での近似結果では得られていなかった局所最適解が得られている。

本章では、局所解が得られているか得られていないかに着目したが、実際の設計問題では上記のように設計点全てに厳密な解析を行うことは非常に困難であるため局所解が既知でない。そのため、本章では局所解が得られているか得られていないかによって、近似結果が良好か良好でないかの判断をしたものである。結果としては、たたみ込み理論の導入により近似精度および、局所解の近似精度に関して、導入しなかった場合と比較して、良好な結果が得られた。

ここで説明している問題は2変数問題であり、規模は小さいが最適耐震設計の問題となる。この問題に図-2に示す流れを適応して、たたみ込み理論を導入した場合と導入しなかった場合での3例の結果を比較する。

GA¹¹⁾の人口サイズはいずれの計算例も40であるが、初期学習データ数とランダムシーズの組み合わせを変えて計算した結果である。

結果を図-21~26に示す。図中の赤線は最適解の目的関数値であり、●は各更新された近似曲面に対して得られた最適解の推移を示している。

Case1は、ランダムシーズを98481、初期学習データ数を20点とした場合で、たたみ込み理論を導入した場合の結果を図-21に示し、導入しなかった場合の結果を図-22に示す。

両者を比較すると、最適解が得られているのは、たたみ込み理論を導入した場合で更新回数31, 36, 37回目、導入しなかった場合で更新回数15, 37回目となった。導入しなかった場合での結果のほうが、早めに最適解が得られている。しかし、最適解推移を見ると導入しな

った場合は、一時的に最適解が得られてもその後目的関数値が安定せず、大きく振動しているのがわかる。一方、導入した場合は最適解が得られた更新回数は遅いものの、更新回数が 14 回目からは目的関数値が小さい領域にあることがわかり、比較的安定している。

Case2 は、ランダムシーズを 84345、初期学習データ数を 20 点とした場合で、たたみ込み理論を導入した場合の結果を図- 23 に示し、導入しなかった場合の結果を図- 24 に示す。

同様に両者を比較すると、たたみ込み理論を導入した場合および導入しなかった場合のどちらの結果でも、比較的安定している傾向が見られる。しかし、たたみ込み理論を導入した場合には、更新回数 36, 37 回目で最適解が得られているのに対し、導入しなかった場合では最適解が得られていない。

Case3 は、ランダムシーズを 84345、初期学習データ数を 10 点とした場合で、たたみ込み理論を導入した場合の結果を図- 25 に示し、導入しなかった場合の結果を図- 26 に示す。

両者を比較すると、たたみ込み理論を導入した場合には、更新回数 25, 30 回目で最適解が得られているのに対し、導入しなかった場合では最適解が得られていない。また、導入した場合には目的関数値が小さい領域で推移しているのに対し、導入しなかった場合では目的関数値がかなり大きい領域にありかつ振動している。

以上は 3 例であるが、他のパラメータの場合でも同様の結果が得られており、たたみ込み理論の導入により、収束の過程が安定し、かつ設計解の改善が可能になったことが示されていると考えられる。

4. まとめ

本研究では、近似手法である RBF ネットワークにたたみ込み理論を導入した場合の有効性について、数値計算例を用いて示した。

バネの大変形問題を用いた無制約最適化問題では、等値線図からたたみ込み理論を導入した場合と導入しない場合での近似結果を比較した。ここでは、たたみ込み理論の導入により最適解周辺に対しての近似精度および大域的近似精度が比較的良好な近似結果が得られた。

2 変数問題とした最適耐震設計問題では、応答曲面を作成することにより視覚的に近似精度の確認を行い、たたみ込み理論の導入による効果を示した。得られた結果から、たたみ込み理論の導入による大域的近似精度および局所解の近似精度の向上が見られた。実際の設計問題では局所解がどこに存在するか不明であるため、細部までの近似精度の向上が必要であると考えられる。

また、この問題において、最適化手法として GA を用いて、近似曲面の更新と最適解の収束の関係を検討した。3 種類のパラメータの組み合わせの結果を示したが、どの場合においても、たたみ込み理論を導入した場合の結果は、導入しなかった場合の結果と比べると目的関数値が小さい領域で安定しており、最適解の探索においてもたたみ込み理論の導入による効果が示された。

今後、より規模の大きい問題に適用し、目的関数にも時刻歴非線形応答解析法を必要とする最適耐震設計法の実用化を目指したいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・耐震設計編[平成 8 年制定]，2002。
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善株式会社，2002。
- 4) 渡邊忠朋，杉本博之，朝日啓太：補修費用を考慮した耐震設計に関する一考察，土木学会論文集，No.718/V-57，pp.81-93，2002。
- 5) 阿部淳一，渡邊忠朋，杉本博之：RBF ネットワークによる設計条件近似と RC 橋脚の最適耐震設計に関する研究，土木学会論文集 A，Vol.62，No.2，pp405-418，2006。
- 6) Masao Arakawa and Akira Andatsu：Development of Convolute Approximation, *The 7th International Conference on Optimization Techniques and Applications(ICOTA7)*, 2007。
- 7) 阿部淳一，杉本博之，渡邊忠朋：地震リスクを考慮した設計地震動強度算定に関する研究，土木学会論文集 A，Vol.63，No.4，pp.780-794，2007
- 8) 井上幸一，中山弘隆，吉森幸浩：ラディアル基底関数ネットワークによる既設構造物の最適耐震要素決定法に関する研究，土木学会論文集，No.752/I-66，pp.227-237，2004
- 9) 荒川雅生，中山弘隆，石川浩：RBF ネットワークと領域遺伝型遺伝的アルゴリズムを用いた近似最適化・推奨関数の提示と基礎的な検討，日本機械学会論文集 C 編，Vol.70，No.697，pp.2674-2681，2004
- 10) Garret N. Vanderplaats：Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, mCgRAW-Hill Book Company, 1984。
- 11) 杉本博之，鹿美麗，山本洋敬：離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究，土木学会論文集，No.471/I-24，pp.67-76，1993。

(2008 年 4 月 14 日 受付)