

RBF を用いる最適耐震設計のための統合化システムについて

Optimization System Including RBF Method for Structural Seismic Design

杉本博之¹・名畑信宏²・荒川雅生³・古川浩平⁴・渡邊忠朋⁵

Hiroyuki SUGIMOTO, Nobuhiro NAHATA, Masao ARAKAWA, Kohei FURUKAWA, Tadatomo WATANABE

- 1 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)
 2 北海学園大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)
 3 工博 香川大学助教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)
 4 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2 丁目 16 番 1 号)
 5 工博 北武コンサルタント(株) (〒062-0926 札幌市豊平区月寒中央通 7 丁目)

This study first proposed design system to obtain a reasonable design solution, using the nonlinear spectrum method, non-linear static structural analysis and the optimization method GA. The nonlinear spectrum method can be regarded as the approximation method for the time-history non-linear dynamic analysis. The spectrums are calculated for simple structures in which the first order vibration mode is exceeded, and lack in the generality of its application. In this paper, as the substitute of the spectrum method, the RBF (Radial Basis Function) method is applied to the dynamic responses. These three program elements (optimization system, response surface approximation by RBF, and time-history nonlinear dynamic analysis method by TDAPⅢ) were installed independently. Data interchanging work between these programs were also extremely troublesome. So, in this paper, it is tried to integrate these three program elements and make it possible to progress all procedures automatically.

key words : RBF, optimum seismic design, GA, time-history nonlinear dynamic analysis

1. まえがき

成果品に対する説明責任を果たそうとすれば、種々の意思決定の根拠は、経験や勘ではなく、理論的である方が望ましい。しかし、理論的な根拠を得るために多数の解析が必要となる場合でも、その解析法次第では、労力、時間の制約から、十分な検討が行えないことも少なくないと考えられる。鋼製橋脚の耐震設計も、本来は多数の解析が要求される設計問題の1つである。

道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編(以下、道示)¹⁾では、構造物の耐震性は時刻歴応答解析法による照査を基本としているが、それを多数の解析が要求される設計過程で用いるのは、現実的には難しい。

そのため、筆者らはこれまでに、最終的な照査を時刻歴応答解析法により行うことを前提とした2段階最適耐震設計システム²⁾を提案し、比較的簡単な橋脚構造物に適用してきた。その時、1段階目の耐震性能の照査には、簡易動的解析法として位置づけられる非線形スペクトル法³⁾を用いていた。

しかし、鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計(以下、鉄道標準)によると、非線形スペクトル法は、①構造系が比較的単純で1次モードが卓越する場合、②主たる塑性ヒンジの発生箇所が明確な場合に適用可能とされている。このことから、より複雑な構造物の耐震性能照

査には、より汎用性の高い方法が望ましいと考えられる。

非線形スペクトル法は、近似解析法と考えることができるが、近似的な手法の一つとして、実験計画法⁴⁾が構造最適設計の分野では従来から注目されていた。これは、少ない回数の厳密な解析結果から、簡単な関数で表現される曲面を作成し、その曲面の計算により応答値の近似値を得ようとする方法である。実際に橋梁の最適耐震設計に用いた例⁵⁾も発表されている。しかしながら、この方法は、基底関数として2次多項式を用いることが多く、その近似は局所的であり、大域的な情報を得ることは難しいと考えられている⁶⁾。

局所的にも大域的にも高精度の曲面を、より少ないデータで作成するには、適所に適量のデータが必要となる。それには、効果的なデータの追加が重要となると考えられる。これらのことから、本研究では、基底関数の把握する領域が限定されず、かつ、データの追加が比較的容易なラディアルベシス関数(以下、RBF)を、耐震性の照査のための制約条件式の近似に用いることを試みる。

設計の基本的な流れは、初期線列から問題に応じた適当な複数の設計を選択し、それに対して動的解析(TDAPⅢ)を行い応答曲面を求める。この応答曲面を用いて最適設計を行い、得られた設計などを追加データとして応答曲面を修正することを繰り返す。最適設計のプログラ

ム、RBFによる応答曲面を計算するプログラム、及び動的解析のプログラムはそれぞれ独立してあるので、上記のデータのやり取りを手作業で行うのは困難である。そのため、これらの独立した実行形式のプログラムをパソコン上で結合した統合化システムを作成した。

なお、最適化の過程を統合システムで行う研究としては、既成のソフト iSIGHT を用いた小西らの研究がある⁷⁾。

2. 鋼製橋脚の耐震設計

道示において、鋼製橋脚の耐震性能照査は、時刻歴応答解析法により算出される各部材の曲率又は着目点の変位等の最大応答値、残留変位とそれぞれの許容値の関係においてなされる。本研究の耐震性能の照査、及び解析に必要な非線形特性を以下に説明する。

2.1 照査項目

本研究において、耐震性能は、時刻歴応答解析法により得られる最大応答水平変位で照査する。その許容値は、静的非線形解析により算出される。残留変位は、ここでは考慮しない。

時刻歴応答解析法及び、静的非線形解析には、鋼製橋脚の非線形特性が必要となる。道示では、鋼製橋脚の非線形特性として、断面の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係（以下、 $M-\phi$ 関係）を定義している。なお、本研究では、時刻歴応答解析法には、TDAPⅢを用いている。

2.2 鋼製橋脚の非線形特性

道示では、図-1の $M-\phi$ 関係を、鋼製橋脚の動的、静的解析のための非線形特性として定義している。

図において、YC 点は圧縮力を受けるフランジの板厚中心位置におけるひずみが降伏ひずみ ε_y に達した点であり、その時の曲げモーメントが M_{yc} 、曲率が ϕ_{yc} である。YT 点は引張力を受けるフランジの板厚中心位置におけるひずみが降伏ひずみ ε_y に達した点であり、その時の曲げモーメントが M_{yt} 、曲率が ϕ_{yt} である。A 点は圧縮力を受けるフランジの板厚中心位置におけるひずみが、終局ひずみ ε_a に達した点であり、その時の曲げモーメントが M_a 、曲率が ϕ_a である。TDAPⅢには、第1降伏曲率として ϕ_{yc} 、第2降伏曲率として ϕ_{yt} を、第1剛性低下率として、図-1の EI_2/EI_1 、第2剛性低下率として、 EI_3/EI_1 を入力している。

3. 最適耐震設計

本研究の最適設計問題の定式化について以下に説明する。なお、設計変数が離散量であるので、最適化には遺伝的アルゴリズム（以下、GA）⁸⁾ を用いた。

3.1 設計変数

本研究では、橋脚の柱断面のみを設計の対象とし、断面は補剛矩形断面としている。設計変数は図-2に示す断面寸法として、断面幅 B 、断面高さ H 、フランジ板厚 T_f 、ウェブ板厚 T_w 、補剛材高さ B_s 、補剛材板厚 T_s 、フランジ補剛材本数 N_f 、ウェブ補剛材本数 N_w 、の計8変数

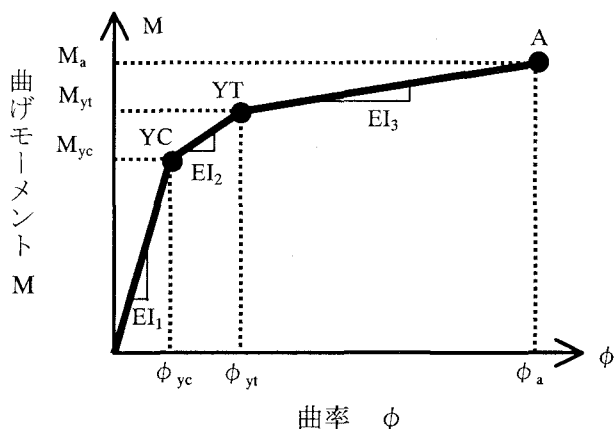


図-1 鋼製橋脚の $M-\phi$ 関係

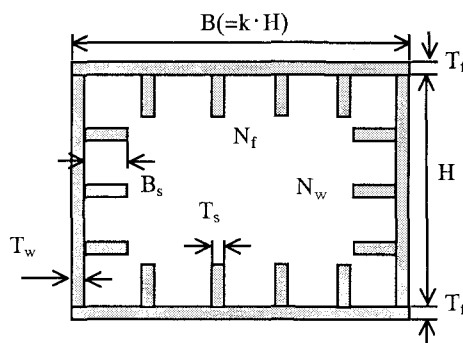


図-2 設計変数

としている。 H は、850~2400mm の 50mm 間隔で 32 個の候補値を設定している。 B は H に係数 k を乗じて算定され、数値計算例では $k=\sqrt{3}$ としている。 T_f 、 T_w 、 T_s はそれぞれ、8~38mm の範囲で 16 個の候補値を設定している。また、補剛材の断面はフランジもウェブも等しいとしている。 B_s は、50~360mm の 10mm 間隔で 32 個、 N_f 、 N_w は 0~15 本の 16 個の候補値を設定している。

3.2 目的関数

目的関数は、鋼製橋脚の総コストを考慮して、材料に関するコストと補剛材の溶接に関するコストの線形和として次式で与えられる。

$$OBJ = \frac{V}{V_0} + \alpha \cdot N \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 V は柱の総容積 (m^3)、 N は 1 断面に設置される垂直補剛材本数、 α はコスト比、 V_0 は無次元化のために導入されたパラメータ、 L は柱の総長さ (m)、 α は鋼材の単位体積重量あたりのコストと補剛材の溶接に関わるコストの比であり、ここで α は 0.08 としている。

3.3 制約条件

制約条件は、耐震性能の照査に関する制約条件と構造細目に関する制約条件⁹⁾ で構成されている。

耐震性能の照査は、RBFによる応答曲面を用いて行い、面内方向、面外方向に対してそれぞれタイプⅠ地震動、タイプⅡ地震動を同時に照査している。そのため、以下の4式を耐震性能の制約条件式としている。

$$g(1) = \delta_I^{in} / \delta_a^{in} - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$g(2) = \delta_{II}^{in} / \delta_a^{in} - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$g(3) = \delta_I^{ex} / \delta_a^{ex} - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$g(4) = \delta_{II}^{ex} / \delta_a^{ex} - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 δ_I^{in} 、 δ_I^{ex} はそれぞれ面内方向及び、面外方向におけるタイプ I 地震動に対応した応答曲面による最大応答水平変位、 δ_{II}^{in} 、 δ_{II}^{ex} はそれぞれ面内方向および面外方向におけるタイプ II 地震動に対応した応答曲面による最大応答水平変位である。また、 δ_a^{in} 、 δ_a^{ex} はそれぞれ面内方向及び、面外方向の許容水平変位である。

構造細目に関する制約条件は、幅厚比に関する条件と許容ひずみ式の適用範囲に関する条件、さらに、道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編¹⁰⁾に従って、局部座屈防止を考慮した断面寸法に関する条件等を設定している。

4. RBF を用いた耐震性能照査

4.1 RBF の概要

本研究で用いた応答曲面には、RBF を用いている。RBF は、図-3 のような釣鐘状のガウス関数を基底関数としており、その基底関数は、式 (6) で示される。

$$h_i(x) = \exp\left(-\|x_i - c_{ij}\|^2 / r_j^2\right) \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $h_i(x)$ は基底関数値、 x_i は入力データ、 c_{ij} は基底関数の中心点、 r_j は基底関数の半径である。

RBF による応答曲面は、式 (6) の基底関数を重ね合わせるにより作成され、式(7)のように表現される。

$$y(x) = \sum_{i=1}^p W_i \cdot \exp\left\{-\sum_{j=1}^n \left(\|x_j - c_{ij}\|^2 / r_j^2\right)\right\} \quad (7)$$

ここで、 $y(x)$ は、応答曲面による出力値、 p は学習用入力データ及び教師データの数、 n は変数の数、 W_i は、各基底関数の重み係数である。

W_i は、各基底関数を重ね合わされる際に、出力値が、特定の基底関数に影響されすぎないように、適切に決定される。具体的には、予め行った解析により得られる教師値と、それを用いて作成される応答曲面による出力値の差の 2 乗和と、抑制項を加えた式 (8) が最小となるように決定する。

$$E = \sum_{i=1}^p (y_i - y_i(x))^2 + \sum_{k=1}^m \lambda_k W_k \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 y_i は教師データ、 $y_i(x)$ は応答曲面による出力値、 m は採用する基底関数の数 ($m \leq p$) であり、本研究では、 $m=p$ としている。 λ_k は W_i の制御パラメータである。

4.2 RBF による応答曲面について

図-4 のような 2 変数の問題を設定し、RBF による近

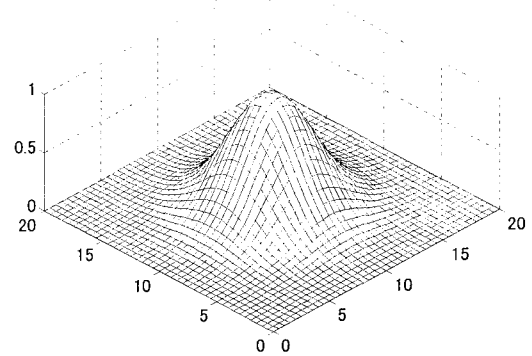


図-3 ガウス関数

似を試みた。図-4 を構成するデータの中から、任意に 8 点、56 点の学習用入力データを抽出し近似を行った。それらとの比較のために、ピーク値である 16 点の学習用入力データを抽出し近似を行った。

任意に 8 点を抽出したときの応答曲面を図-5 に、56 点を抽出したときの応答曲面を図-6 にそれぞれ示した。さらに、図-7 は、ピーク値の 16 点を抽出したときの応答曲面である。

ピーク値のデータを抽出したときの応答曲面は、16 点というデータ数ではあるが、任意にデータを抽出した場合に比べ、より忠実に形状を再現している。これは、データ数が応答曲面の良し悪しに影響することは当然ではあるが、抽出するデータによっては、少ないデータ数で精度のよい応答曲面を作成できる可能性を示しているものと考えられる。つまり、データの追加により、応答曲面の精度の向上を図ることができるので、その追加データの内容が重要になると考えられる。

以下、RBF の応用において重要な手順である、初期データと追加データについて説明する。

4.3 初期データ

初期データの選択は、初期探索領域内のデータを偏りなくすることが重要であると考えられる。そこで、以下のような方法で、初期データを選択する。

Step 1 GA から出力されるそれぞれの初期線列に対する $X1 \sim X5$ の 5 つの中間変数値 (後記) を算定する。それを、任意のデータ集団として設定する。

Step 2 Step1 で算定したデータ集団の中の一つの設計に着目し、その設計と残り総ての設計間のユークリッド距離を算定し、それらの距離の中の最小値を、着目した設計点の代表値とする。これを総ての設計に関して繰り返す。

Step 3 Step2 で得られた各設計の中から、その代表値の大きい順に、所定の数に達するまで選択し初期データとする。

4.4 追加データ

本研究では、局所的な精度と、大域的な精度の両方を、

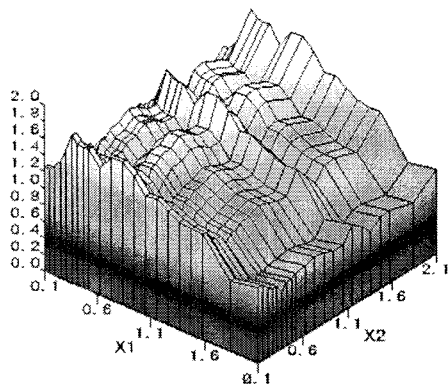


図-4 設定した2変数問題

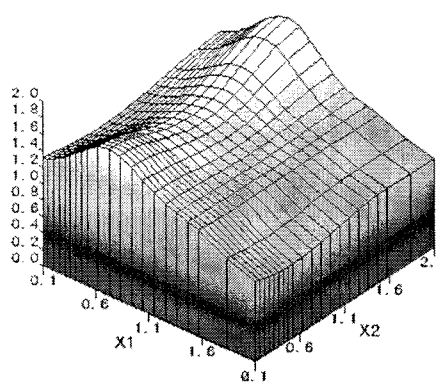


図-5 任意8点による応答曲面

同時に向上させることを考えている。局所的な精度向上のためには、最適化の結果を情報として追加している。また、大域的な精度向上のためには、精度の良くないと思われる付近のデータを追加している。その時の精度の判断は、教師データと出力値の相対誤差が最も大きいデータの近傍のデータを追加することとした。

4.4 耐震性能照査のための応答曲面

(1) 対象構造

本研究では、図-8に示す一層門型ラーメン橋脚の断面寸法決定を設計の対象としている。図-8の左が面内方向、右が面外方向の構造を示している。地盤種別は、道示に示されるI種地盤で、基礎構造は直接基礎とした。さらに、橋脚の使用鋼材はSM490Yとした。

耐震性能の照査は、時刻歴応答解析法により算定される図-8の上部構造慣性力作用位置における、最大応答水平変位により行われる。その時の、時刻歴応答解析法に入力する地震波形は、各地盤種毎に道示に示されている3つの地震波形である。さらに、応答値は、その3波形による応答値の平均値としている。

(2) 設計変数と中間変数

本研究で対象としている最適設計問題の設計変数は、図-2に示した8個の断面寸法である。しかし、時刻歴応答解析法で入力するパラメータは、設計変数である断面寸法ではなく、断面の力学的な特性を示す図-1のM-φ関係における勾配及び、曲率を入力することになる。

そのため、応答曲面の作成及び、推定値の算定に用いる学習データには、図-1における第1勾配 EI_1 、第2勾配 EI_2 、第3勾配 EI_3 、圧縮降伏曲率 ϕ_{yc} 、引張降伏曲率 ϕ_{yt} の5つを、中間変数 $X1 \sim X5$ として用いている。設計変数である断面寸法が決まり、各部材の非線形特性の計算を通じて中間変数が計算され、応答値に反映されることになる。また、この手順のために、中間変数から設計変数を逆算することなしに、直接設計変数が決まることになる。

(3) 最大応答水平変位の推定値について

図-8における面内方向の構造を対象として、時刻歴応答解析法を行い、RBFにより応答曲面を作成し、推定値を算定した。ここでは、タイプII地震動に対する最大

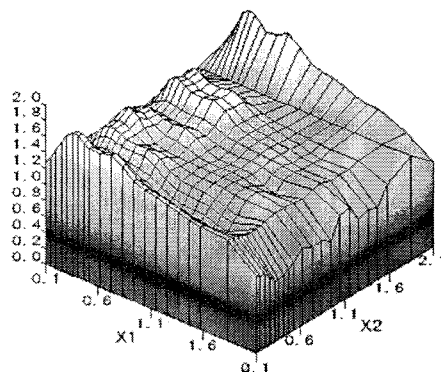


図-6 任意56点による応答曲面

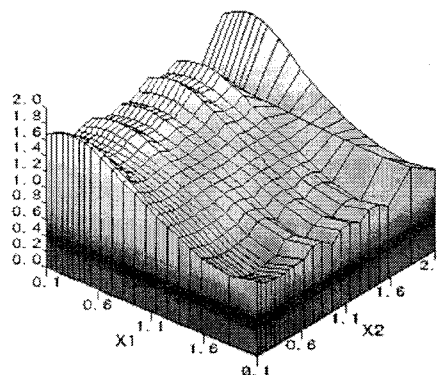


図-7 ピーク値の16点による応答曲面

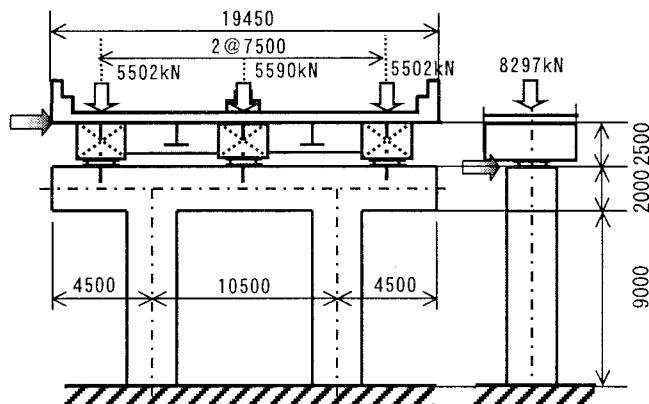


図-8 解析モデル図 (mm)

表-1 応答曲面作成に用いたデータとその推定値

データ 番号	N _F (本)	N _W	H	B	T _F	T _W	B _S	T _S	学習用入力データ					教師データ	推定値	相対誤差
									X1	X2	X3	X4	X5			
1	3	2	2100	1200	25	19	200	19	10.5580	3.0545	2.1194	2.4649	3.9747	109.9	109.4	0.5
2	3	2	2000	1150	22	22	240	9	8.0068	2.3197	1.6584	2.5118	4.3373	136.0	134.4	1.2
3	3	2	2000	1150	22	19	230	8	7.7666	1.9088	1.6918	2.4829	4.7239	139.0	140.7	1.2
4	3	2	2100	1200	16	13	230	8	6.4998	1.3141	1.5164	2.2672	5.5462	161.9	156.5	3.4
5	5	4	2950	1700	25	16	190	25	32.0390	11.3610	6.2861	1.8355	2.4636	59.2	62.5	5.6
6	5	4	3050	1750	22	22	210	13	29.7930	10.7640	6.4525	1.7704	2.4229	58.7	59.5	1.3
7	5	3	3050	1750	22	22	210	13	29.5350	10.1070	6.3420	1.7667	2.4602	58.9	60.0	1.9
8	5	3	2950	1700	22	19	210	11	26.0300	7.9084	5.5873	1.7993	2.6604	65.0	66.8	2.7
9	3	2	2100	1200	25	19	240	10	10.0200	2.5773	1.9138	2.4370	4.2269	110.6	110.9	0.3
10	3	2	2250	1300	19	22	210	12	10.3570	3.2926	2.3676	2.2493	3.6879	110.3	110.2	0.0
11	3	2	1900	1600	22	25	200	19	17.3850	7.0844	4.3324	1.8785	2.6905	93.5	93.1	0.5
12	3	2	2000	1650	25	28	270	36	25.1630	13.3960	5.8156	1.8916	2.3582	64.3	65.1	1.2
13	3	2	2000	1400	22	25	200	22	13.6940	5.3579	3.2284	2.1433	3.0996	109.4	108.3	1.0
14	3	2	2250	1600	25	25	280	28	23.5560	10.9310	5.0624	1.9380	2.5025	68.6	70.8	3.2
15	3	2	2250	1300	25	28	300	32	15.7070	7.8264	3.5436	2.3851	3.0172	100.3	100.0	0.2
16	4	2	2300	1150	22	19	190	19	9.6492	2.7897	1.9456	2.5756	4.1666	111.0	110.8	0.1
17	3	2	2700	1350	25	22	240	25	17.5720	6.1678	3.4384	2.2763	3.1526	92.2	92.9	0.8

表-2 入力データとその推定値

データ 番号	N _F (本)	N _W	B	H	T _F	T _W	B _S	T _S	入力データ					解析値	推定値	相対誤差
									X1	X2	X3	X4	X5			
1	4	3	2200	1650	25	25	220	25	25.1900	11.4210	5.3056	1.8792	2.4407	65.0	63.9	1.8
2	4	4	1800	1500	19	14	290	25	15.5490	8.7089	3.4205	2.0348	2.6701	100.7	100.4	0.3
3	5	0	850	1200	14	56	120	19	6.5131	3.7786	2.6583	2.3972	3.5249	148.9	146.2	1.8
4	3	3	2100	1400	10	58	280	25	13.2400	9.2960	3.8788	2.2056	2.7599	109.7	105.2	4.1
5	6	6	900	1250	19	14	240	16	7.1395	3.5475	1.9167	2.2418	3.5977	144.0	149.0	3.5

応答水平変位を推定した。

応答曲面を作成するのに用いたデータ数は17とした。表-1は、応答曲面作成に用いた断面寸法と、それに対する学習用入力データ(中間変数)、教師データ(最大応答水平変位)、推定値、相対誤差($(| \text{解析値} - \text{推定値} | / \text{解析値}) \times 100 (\%)$)である。さらに、表-1は、学習用入力データと異なるデータの断面寸法、入力データ、解析値、推定値、相対誤差である。表-1のデータを用いて、応答曲面を作成し、それを用いて表-2の入力データの推定値を算定した。

最右欄の相対誤差を見ると、表-1の教師データ以外ではほとんどの場合で誤差は5%を下回っていた。

5. 統合化システム

本研究では、最適化の過程で、データの追加をしながら、応答曲面を更新することを前提としている。統合化システムは、解析プログラム、最適化プログラム、応答曲面作成プログラムを結合し、その一連の作業を統合化することを目的としたシステムである。

図-9は、統合化システムのフローチャートである。図-9において、2重線で囲まれている部分が、3つの独立した実行形式のプログラムである。それぞれ最適耐震設計プログラム、時刻歴応答解析法のプログラム、応答曲面作成のプログラムである。このシステムは、この3つのプログラムの実行及び、データの交換等の処理を、

ExcelVBAでマクロ化し、それぞれを、パソコン上で結合したシステムである。

マクロを実行すると、以下のようなアルゴリズムに従って計算が行われる。

- ①初期の学習用入力データを選択する。初めに最適耐震設計システムが実行されると、初期線列がlist.datに格納される。次に、初期の学習用入力データの選択が行われ、結果がsample.datに格納される。
- ②①で選択された学習用入力データは、時刻歴応答解析法のプログラムに引き渡され、そのデータの数だけ時刻歴応答解析を行い、各学習用入力データに対する教師データが算定される。結果はrbf.datに格納される。
- ③②で得られたrbf.datを用いて、応答曲面作成のプログラムを実行し、応答曲面を作成する。rbf.outには、応答曲面の関数式である式(7)における重みW、半径r、基底関数の中心位置cが格納される。
- ④rbf.outを用いて、再度、最適耐震設計システムを実行し、最適化を行う。
- ⑤データの追加を行う。追加データは、局所的な情報として得られた最適設計を、大域的な情報として精度の悪い設計付近の設計の2つとした。後者は、同様の学習用入力データから得られる教師データと出力値の相対誤差が最も大きいデータの近傍のデータとしている。その近傍のデータは、相対誤差が最も大きい学習用入力データとのユークリッド距離が最小のデータを

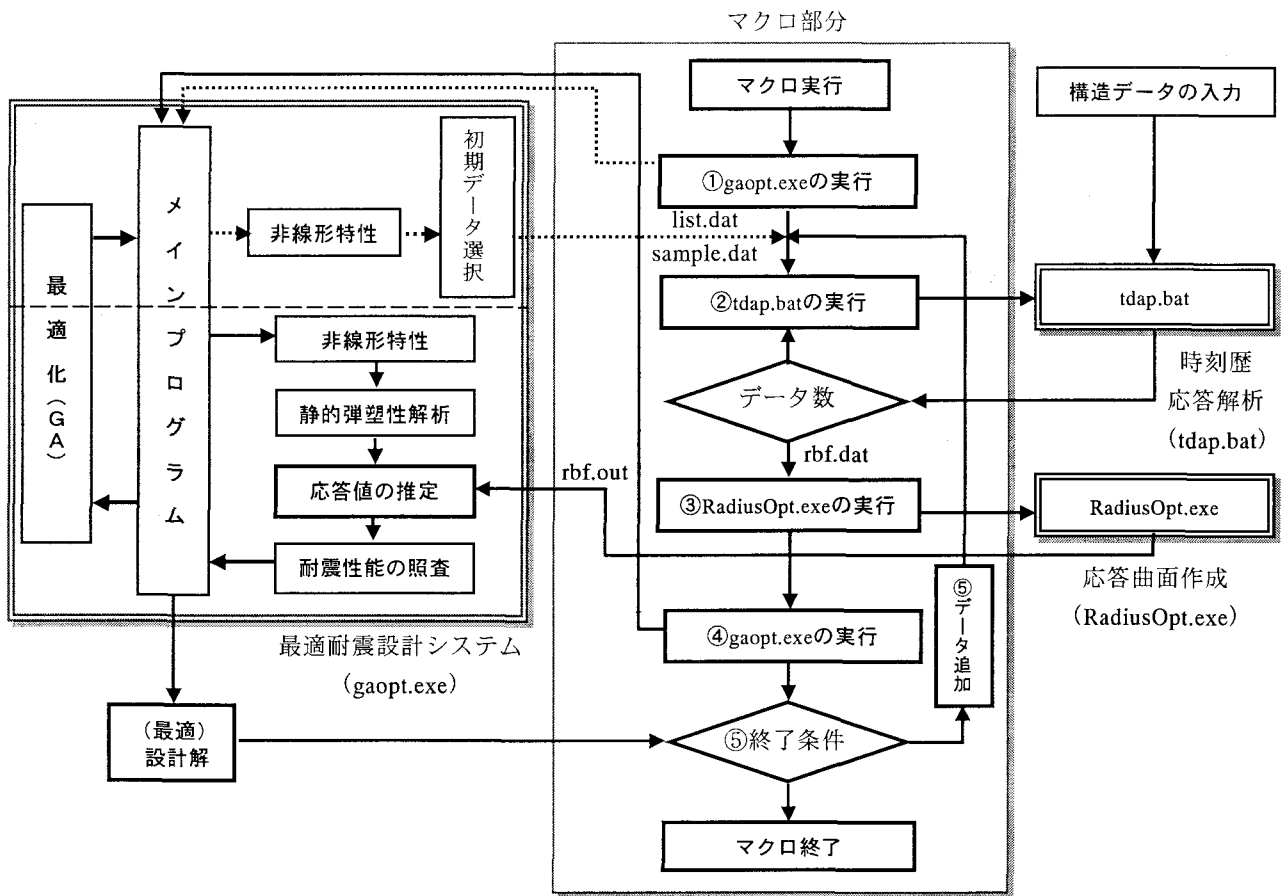


図-9 統合化システムのフローチャート

list.datの中から選択している。

⑥計算回数を終了条件としているので、その回数だけ上記の作業を繰り返すことになる。

6. あとがき

RBFを耐震性能照査に用いた統合化システムの構築を目指し、RBFの構造設計への適用性について検討した。本報告では、統合化システムを提案し、応答曲面法としてRBFを用い、最大応答水平変位の算定を試み、時刻歴応答解析の結果と比較した。RBFによる推定値に対する相対誤差の多くは5%を下回っていた。このことから、RBFは応答値の推定法として有効性を示すものであると考えられる。

今後は、統合化システムを構築し、単純な構造モデルに対する検討を踏まえ、より複雑な構造の耐震設計への応用を考えている。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 杉本博之・古川浩平：ラーメン鋼製橋脚の最適設計（設計と設計事例），鋼製橋脚の耐震設計マニュアル（ラーメン橋脚等の耐震設計編）中間報告書，日本橋梁建設協会，pp.46-63，2001。
- 3) 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，丸善株式会社，1999。
- 4) 柏村孝義：統計的設計支援システムの開発とその応用，横浜国立大学博士学位論文，1997。
- 5) 大久保禎二・田中賢太・門田圭司：建設費および地震被害の補修費を考慮した免震橋梁システムの最小コスト設計法，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.191-208，2002。
- 6) 荒川雅生・中山弘隆・石川浩：ラディアルベース関数ネットワークと領域適応型遺伝的アルゴリズムを用いた最適設計，機械学会論文集 67-655C，pp.789-796，2002。
- 7) 小西拓洋・富澤雅幸・三木千寿：FEMと数値最適化に基づいた鋼橋コスト最小化設計の試み，土木学会論文集 No. 717/I-61，pp.23-36，2002。
- 8) 杉本博之・鹿沬麗：工業最適設計のための汎用GAプログラムについて，北海学園大学学園論文集，第96・97号，pp.81-105，1998。
- 9) 杉本博之・佐々木利健・名畑信宏・渡邊忠朋・古川浩平：新道路橋示方書に基づく鋼製橋脚の最適耐震設計とアクティブな条件に関する研究，構造工学論文集，Vol. 49A，pp.189-199，2003。
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，丸善株式会社，2002。