

応答曲面法（RBF）の耐震性能照査への応用

北海学園大学 正会員 杉本博之 学生員 名畑信宏 香川大学工学部 正会員 荒川雅生
 北武コンサルタント 正会員 渡邊忠朋 山口大学工学部 正会員 古川浩平

1. まえがき 鋼製橋脚の耐震性能の照査は、時刻歴応答解析によることが基本である。しかし多数の解析が要求される設計の過程において、時刻歴応答解析を用いるのは実質的に不可能であるので、筆者らは、非線形スペクトル法を利用する2段階最適耐震設計システム¹⁾を提案してきた。このとき、用いている非線形応答スペクトルは、1次モードが卓越する構造を対象に得られたものである。例えば、1層の門型ラーメン橋脚等には適用可能であるが、その他の構造に対する汎用性は少ないと考えられた。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、田口の方法²⁾が構造最適設計の分野では従来から注目されていた。実際に橋梁の最適耐震設計に用いた例も発表されている³⁾。これは、少ない回数の厳密な解析結果から、応答値を推定するための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。この応答曲面法として最近発表された荒川らの方法（RBF）⁴⁾を、構造物の非線形動的解析に応用し、その構造設計への適用性を検討することを、本研究は目的とする。

2. 設計変数 本研究で考えている設計問題では、鋼製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、フランジ側補剛材本数 N_F 、ウェブ側補剛材本数 N_W 、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 の計7変数としている。各設計変数の候補値は、 N_F, N_W は0~7本の6個、 H は1000~5200mmの50mm間隔で85個、 T_F, T_W, T_S は8~64mmの範囲で29個、 B_S は50~960mmの10mm間隔で92個、それぞれ設定している。また、断面幅 B は、 H に係数 k を乗じて算定される。本研究では、これら各変数の候補値の中から、表-1の断面寸法を選択し、それを教師データとして応答曲面を作成している。

3. 非線形スペクトル法 非線形スペクトル法で応答塑性率を算定する場合は、まず静的非線形解析から得られる構造物の固有周期 T および降伏震度 K_{hy} （降伏荷重と等価重量との比： P_y/W ）を、非線形応答スペクトル図にプロットし、その点における応答塑性率 μ を内挿により算定する。また、応答変位 s は次式により算定される。

$$s = \mu \cdot y \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 y は構造物の静的非線形解析により得られる降伏変位である。

4. 応答曲面の作成 本研究で作成した応答曲面は、ラディアルベシス関数ネットワーク（以下、RBF）を用いたものである。RBFでは、正規分布を基底関数とし、その重ね合わせによって応答曲面を生成する。RBFの応答曲面における関数 $y(x)$ は次式から得られる。

$$y(x) = \sum_{i=1}^m w_{ij} \cdot \exp\left(-\sum_{j=1}^n (x_j - c_{ij})^2 / r_j^2\right) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 m はデータ数、 n は変数の数、 w_{ij} は各基底関数の重み、 x_j は変数、 c_{ij} は基底関数の中心位置、 r_j はその半径である。また、 w_{ij} は特定の基底関数の影響が偏らないように適切に決定される。

本研究では、図-1のような1層門型鋼製ラーメン橋脚を計算の対象としている。図の左が面内構造、右が面外構造である。また、作成した応答曲面は、図-1の構造に対して時刻歴応答解析により得られる最大応答水平変位を応答値としたものである。そのときに要素に与える復元力モデルは、図-2に示す曲げモーメント M と曲率 関係を骨格曲線とする移動硬化型トリリニアモデルである。

表-1 教師データの断面寸法 (mm)

データ番号	N_F	N_W	B	H	T_F	T_W	B_S	T_S
①	3	2	2100	1200	25	19	200	19
②	3	2	2000	1150	22	22	240	9
③	3	2	2000	1150	22	19	230	8
④	3	2	2100	1200	16	13	230	8
⑤	5	4	2950	1700	25	16	190	25
⑥	5	4	3050	1750	22	22	210	13
⑦	5	3	3050	1750	22	22	210	13
⑧	5	3	2950	1700	22	19	210	11
⑨	3	2	2100	1200	25	19	240	10
⑩	3	2	2250	1300	19	22	210	12
⑪	3	2	1900	1600	22	25	200	19
⑫	3	2	2000	1650	25	28	270	36
⑬	3	2	2000	1400	22	25	200	22
⑭	3	2	2250	1600	25	25	280	28
⑮	3	2	2250	1300	25	28	300	32
⑯	4	2	2300	1150	22	19	190	19
⑰	3	2	2700	1350	25	22	240	25

キーワード 最適耐震設計システム、非線形スペクトル法、応答曲面法、時刻歴応答解析法

連絡先 〒064 0926 北海道札幌市中央区南26条西11丁目1番1号 Tel(011)841-1161 Fax(011)551

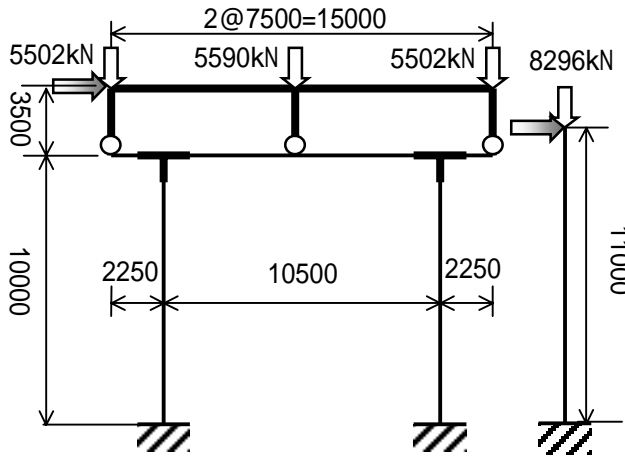


図 - 1 解析モデル図 (mm)

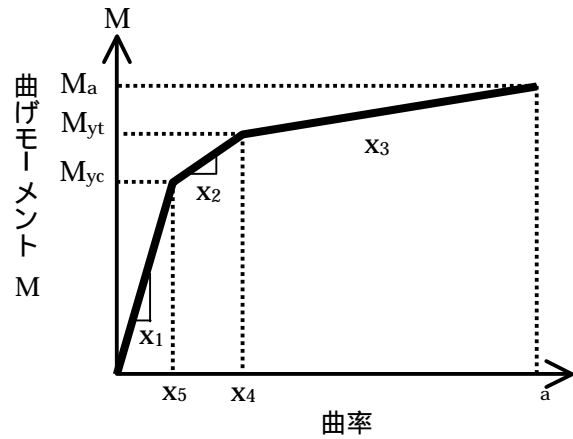


図 - 2 M - 関係の骨格曲線

応答曲面の変数は、上述したような断面寸法を直接用いるのではなく、図 - 2 の骨格曲線における以下の 5 つ ($n=5$) の値を中間変数として設定している。第 1 配 x_1 、第 2 勾配 x_2 、第 3 勾配 x_3 、圧縮降伏曲率 x_4 、引張降伏曲率 x_5 である。

5. 応答曲面法による応答値の検討 表 - 2 は応答変位の推定に用いた設計変数、およびその応答値と応答変位比である。上段は面内構造、下段は面外構造の数値である。表中の s, r, d は、それぞれ非線形スペクトル法、RBF、および時刻歴応答解析法から得られるタイプ 地震動に対する最大応答水平変位である。また、 $d/s, d/r$ は応答変位比である。さらに、CASE1-1 ~ 1-5 は、表 - 2 の各断面に対応する中間変数値が、表 - 1 の教師データ 1 ~ 17 に対応する中間変数値の最大値から最小値の範囲内にある（内挿）場合である。CASE2 は表 - 1 に対する中間変数の内 3 つが範囲内にある場合、CASE3 は中間変数の内 2 つが範囲内にある場合、そして、CASE4 は全てが範囲外（外挿）にある場合である。RBF による推定値と時刻歴応答解析による応答値を応答変位比で比較すると、RBF の応答変位比は、ケース 1 では、面内構造で 0.97 ~ 1.04、面外構造で 0.95 ~ 1.13 であり、非線形スペクトル法の推定値に比べ、精度の良い推定値が得られていた。また、ケース 2 ~ 4 の結果の多くは、面内構造、面外構造ともに、その推定値は応答値と大きく異なる結果となった。また、ケース 1（内挿）の推定値に比べ、他のケース（外挿）の推定値の精度が落ちる結果が得られた。今後、使用にあたっては何らかの対応が必要であると考えられる。

6. まとめ 適用可能な構造が限定される非線形スペクトル法に対して、新たな応答値の推定方法として RBF の利用を検討した。そこで、門型ラーメン橋脚における最大応答水平変位の応答曲面を作成し、いくつかのケースにおいて RBF および非線形スペクトル法と時刻歴応答解析法による最大応答水平変位と比較し検討した。その結果、RBF による推定値は、変数が内挿の範囲では、非線形スペクトル法の推定値に比べ精度の良い結果が得られていた。本報告では、最大応答水平変位のみの応答曲面を作成したが、今後は、さらにデータ数、変数の数を増やし、残留変位、最大応答曲率等の応答曲面を作成することで、より実用的なレベルでの検討を行っていきたいと考えている。

参考文献 1) 杉本, 佐々木, 名畑, 渡邊, 古川: 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条件に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 49A / 189-199, 2003. 2) 柏村: 統計的設計支援システムの開発とその応用, 平成 9 年横浜国立大学博士学位論文, 1997. 3) 大久保, 田中, 門田: 建設費および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 No710 / I-60, 191-208, 2002. 4) 荒川, 中山, 石川: 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, 789-796, 2002.

表 - 2 断面寸法および応答値と応答変位比 (mm)

構造	CASE 番号	N_f	N_w	B	H	T_f	T_w	B_s	T_s	δ_s	δ_r	δ_d	$\frac{\delta_d}{\delta_s}$	$\frac{\delta_d}{\delta_r}$	
面内	1-1	4	3	2200	1650	25	25	220	25	70	63	65	0.94	1.04	
	1-2	4	4	1800	1500	19	14	290	25	106	100	101	0.95	1.00	
	1-3	5	0	850	1200	14	56	120	19	177	146	149	0.84	1.02	
	1-4	3	3	2100	1400	10	58	280	25	116	105	110	0.95	1.04	
	1-5	6	6	900	1250	19	14	240	16	173	149	144	0.83	0.97	
	2	0	7	900	1500	48	62	330	62	69	90	60	0.87	0.67	
	3	1	2	600	1000	60	19	360	10	194	109	189	0.98	1.74	
	4	3	3	1000	1000	28	32	290	32	172	141	160	0.93	1.13	
	面外	1-1	4	3	2200	1650	25	25	220	25	170	158	156	0.92	0.99
		1-2	6	6	1900	1250	19	14	240	16	235	189	190	0.81	1.01
1-3		1	3	2050	1350	32	16	360	52	178	168	168	0.94	1.00	
1-4		1	7	2000	1000	40	16	240	36	176	165	157	0.89	0.95	
1-5		6	1	2100	1050	38	25	220	14	197	177	200	1.03	1.13	
2		4	3	1650	1650	25	25	220	25	232	190	192	0.83	1.01	
3		0	7	1250	2450	14	14	310	46	274	199	221	0.81	1.11	
4		3	3	1000	1000	28	32	290	32	386	169	313	0.81	1.85	