

道路橋耐震設計のための統合化システムについて

On integrated system for the seismic design of highway bridges

北海学園大学工学部土木工学科
 北海学園大学大学院
 香川大学工学部信頼性情報システム工学科
 山口大学工学部社会建設工学科
 北武コンサルタント(株)

正員 杉本博之 (Hiroyuki Sugimoto)
 ○学生員 名畑信宏 (Nobuhiro Nahata)
 正員 荒川雅生 (Masao Arakawa)
 正員 古川浩平 (Kohei Furukawa)
 正員 渡邊忠朋 (Tadatomo Watanabe)

1. まえがき

性能照査型設計法の普及により、示方書類の要求する解析及び、照査方法は、日々、難解かつ、繁雑になりつつある。無論、土木構造物において安全性の確保が最重要である。しかし、安全性の確保には、繁雑なルーチンワークが必要とされる場合が少なくない。また、近年、土木構造物には、安全性、経済性以外にも美観性等の性能に対する要求も強まってきている。

減少していく労働力で、繁雑なルーチンワークと、創造性の要求される仕事に対する「質」を、同時に保ち続けることには限界があると考えられる。そこで、本研究は、技術者を繁雑なルーチンワークから開放することで、限られた労働力の円滑化を図り、社会資本施設の質の向上を目指した新しい設計ツールの構築を目的としている。

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

そこで、筆者らはこれまでに、道路橋の耐震設計を対象として、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¹⁾を提案してきた。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。他に近似的な手法の一つとして、実験計画法²⁾が構造最適設計の分野では従来から注目されていた。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、その曲面の値から応答値の近似値を得ようとする方法である。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³⁾。

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、データの追加が比較的容易なラディアルベース関数(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²⁾。

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(TDAP III)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存在しているので、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、既成のソフトiSIGHTを用いた小西らの研究がある⁴⁾。

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。以下に、本研究で解析に必要な鋼製橋脚の非線形特性、耐震性能の照査項目について説明する。

2.1 鋼製橋脚の非線形特性 道示では、図-1の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係(以下、 $M-\phi$ 関係)を、鋼製橋脚の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。

動的応答解析プログラムTDAP IIIを用いる際には、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。

2.2 耐震性能の照査項目 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。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つの地震波形であり、応答値は、その3波形に対する応答値の平均値を用いるとされている。また、許容変位は、静的弾塑性解析により算出され、柱を構成するいずれかの要素の曲率が、図-1のM-φ関係における終局曲率に達した時の慣性力作用位置における水平変位としている。

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）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。設計変数は断面寸法である、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。 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。 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、 V_0 は無次元化のために導入されたパラメータ、 α は鋼材のコストと補剛材の溶接に関するコストの比である。

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、面外方向に対してそれぞれタイプI、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} はそれぞれ面内及び、面外方向のタイプ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} はそれぞれ面内及び、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、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。

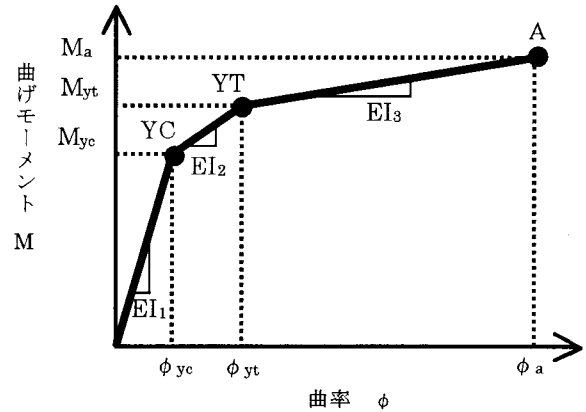


図-1 鋼製橋脚のM-φ関係

4. RBFを用いた耐震性能照査

4.1 RBFの概要 本研究では、応答曲面にRBFを応用し、その基底関数としてそのガウス関数を用いている。ガウス関数は、式(6)で示される。

$$h(x) = \exp\left(-\|x-c\|^2 / r^2\right) \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、xは入力する変数、h(x)は、xに対する基底関数の出力値、 $\| \cdot \|$ はノルムを示している。cは基底関数の中心位置であり、学習用に入力する変数から構成される座標点である。rは基底関数の半径である。

RBFによる応答曲面は、データ数だけ存在する基底関数を重ね合わせるにより形成される。つまり、式(6)の出力値に各基底関数の影響の度合いを示す重みを乗じたものの総和であり、採用する基底関数の数をm個とすると、式(7)のように表現される。

$$O(x) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot h_j(x) \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、O(x)は、関数の出力値、 w_j と $h_j(x)$ は、基底関数jに対する重み係数と、式(6)の出力値である。

各基底関数の影響の度合いを示す重みは、学習に用いたデータ及び、学習に用いなかったデータに対する精度(汎化能力)が、共に保たれるように適切に決定しなければならない。最適な重みを、既知の情報から決定することは、関数による出力値と教師値の誤差が最小になるような重みを決定することに置き換えられる。

そこで、p個の学習用データ(x_i, y_i) ($i=1, \dots, p$)に対して、式(8)を最小にすることを考える。

$$E = \sum_{i=1}^p (y_i - O(x_i))^2 + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot w_j^2 \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 y_i は教師値、 $O(x_i)$ は、 x_i に対する式(7)の出力値、 λ_j は w_j の制御パラメータである。式(8)において、第1項は、関数の出力値と教師値の2乗誤差であり、第2項は、特定の基底関数の過剰反応を抑え、後述の線形方程式の正則性を保つための、重み抑制項である。以下、重みの決定について簡単に説明する。

式(8)を w_j ($j=1, \dots, m$)について編微分する。

$$\frac{\partial E}{\partial w_j} = 2 \sum_{i=1}^p (O(x_i) - y_i) \frac{\partial O(x_i)}{\partial w_j} + 2\lambda_j \cdot w_j \quad \dots \dots \dots (9)$$

右辺を 0 とおいて、次式を得る。

$$\sum_{i=1}^p (O(x_i) - y_i) \frac{\partial O(x_j)}{\partial w_j} + \lambda_j \cdot w_j = 0 \quad \dots \dots \dots (10)$$

式 (7) より、 $\partial O(x_j) / \partial w_j = h_j(x_i)$ であるので、

$$\sum_{i=1}^p O(x_i) \cdot h_j(x_j) + \lambda_j \cdot w_j = \sum_{i=1}^p y_i \cdot h_j(x_j) \quad \dots \dots \dots (11)$$

式 (11) における $h_j(x_i)$, $O(x_i)$, y_i を、

$$\mathbf{h}_j = \begin{bmatrix} h_j(x_1) \\ \vdots \\ h_j(x_p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{O} = \begin{bmatrix} O(x_1) \\ \vdots \\ O(x_p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix}$$

とすると、式 (11) は、次式となる。

$$\mathbf{h}_j^T \cdot \mathbf{O} + \lambda_j \cdot w_j = \mathbf{h}_j^T \cdot \mathbf{y} \quad (j=1, \dots, m) \dots \dots (12)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = [w_1 \quad \dots \quad w_m]^T$$

として、さらに、式 (12) を行列表示すると、

$$\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{O} + \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{W} = \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{y} \quad \dots \dots \dots (13)$$

となる。ただし、 \mathbf{H} は、

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \dots \quad \mathbf{h}_m] = \begin{bmatrix} h_1(x_1) & \dots & h_m(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_1(x_p) & \dots & h_m(x_p) \end{bmatrix}$$

さらに、式 (6) より、

$$h_j(x_i) = \exp\left(-\|x_i - c_j\|^2 / r_j^2\right) \quad \dots \dots \dots (14)$$

また、出力 O は、全ての w と h の積の総和であるので、

$$\mathbf{h}^i = [h_1(x_i) \quad \dots \quad h_m(x_i)]$$

とすると、

$$O(x_i) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot h_j(x_i) = \mathbf{h}^i \cdot \mathbf{W} \quad \dots \dots \dots (15)$$

となり、

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} O(x_1) \\ \vdots \\ O(x_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}^1 \cdot \mathbf{W} \\ \vdots \\ \mathbf{h}^p \cdot \mathbf{W} \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{W} \quad \dots \dots \dots (16)$$

式 (16) を式 (13) に代入すると、

$$\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{y} = \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{W} + \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{W} \quad \dots \dots \dots (17)$$

となり、式 (17) を \mathbf{W} について解くと、次式を得る。

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H} + \mathbf{\Lambda})^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{y} \quad \dots \dots \dots (18)$$

この \mathbf{W} を、式 (7) に代入して推定値を算定する。

また、重みの決定において、 r と λ が入力パラメータである。一般的に、 r が過大の場合、汎化能力は保たれるが、教師値付近は合わせにくくなる可能性がある。過

小の場合、教師値付近に対しては合わせやすくなるが、汎化能力が失われる可能性がある。さらに、 λ が過大の場合、式 (8) の第 2 項が支配的となり、第 1 項の最小化が不十分となるため、教師値に対する精度が失われる可能性があるが、汎化能力が保たれる。過小の場合、教師値に対する精度は保たれるが、汎化能力が劣る可能性がある。そのため、 r と λ の決定には、教師値に対する精度と汎化能力の両方を考慮する必要がある⁵⁾。

4.2 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、3.1 で示した断面寸法である。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、図-1 の $M-\phi$ 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。

4.3 初期データ 初期データは、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、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。最適化の結果が、以前に、得られている結果と等しい場合は、追加は行わないとしている。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。

5. 統合化システム

本研究では、最適化の過程でデータ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-2 は、統合化システムのフローチャートである。図-2 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

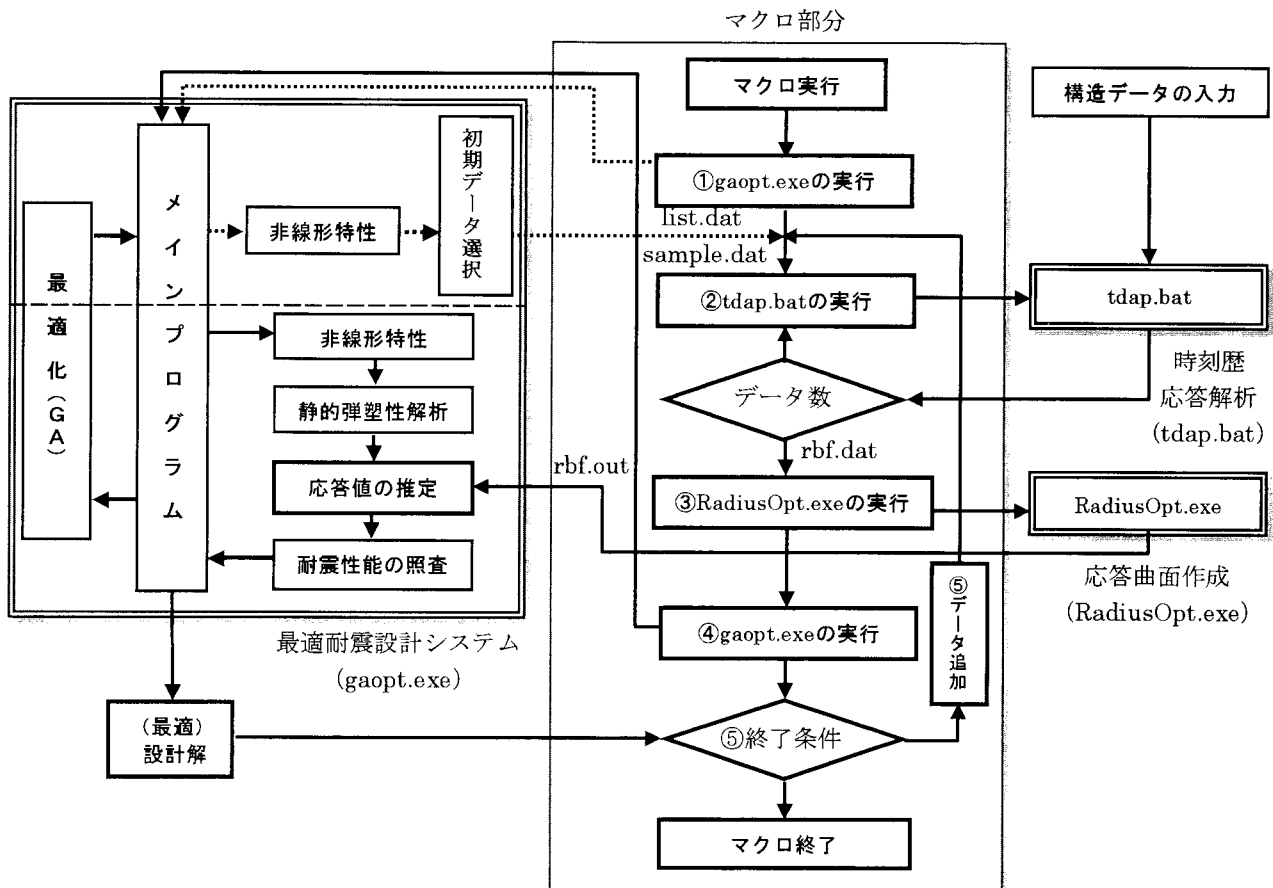


図-2 統合化システムのフローチャート

合したシステムである。

マクロを実行すると、以下の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、式 (7) における各基底関数の重み係数 w_j 、式 (6) における半径 r_j 、基底関数の中心位置 c_j 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の結果を、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 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

本報告では、RBF を用いた統合化システムを構築し、RBF と統合化システムの詳細について説明した。

今後は、比較的簡単な橋脚構造を対象として、統合化システムの妥当性についての検討を考えている。

具体的には、 λ の値、初期データ、追加データ数及びその内容の検討を行う。さらに、耐震性能の照査に非線形スペクトル法を用いる従来法と統合化システムによる設計解を比較し、その妥当性の検討を考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 山川宏他：最適設計ハンドブック，朝倉書店，2003.