

論文 Particle Swarm Optimization を用いた RC はりの損傷同定に関する基礎的研究

河村 圭^{*1}・江本 久雄^{*2}・別府 万寿博^{*3}・宮本 文穂^{*4}

要旨：本研究は、構造物の維持管理に必要な劣化や健全度情報を取得する方法として、最適化手法の一つである PSO アルゴリズムを用いた損傷同定法を提案したものである。本手法は構造解析と PSO を組合せたもので、観測データとして予め損傷させた構造解析結果を用いている。構造解析による計算結果と観測データとの差を最小にする最適化問題として損傷同定を定式化した。提案した手法により、構造物の損傷位置や損傷レベルを比較的高い精度で同定することができた。

キーワード：損傷同定, Particle Swarm Optimization, FEM, RC はり

1. はじめに

近年、高度成長期に建設されたコンクリート橋など社会基盤構造物の維持管理が注目されている。構造物の維持管理では、損傷の評価が重要となる。現状では、目視点検によって損傷の評価が行われているが、調査や評価の過程に不確定な要素を含んでいるために、構造物の損傷を客観的に評価することは難しいと考えられる。これまで、損傷評価のために種々の研究がなされており、ヘルスマonitoringや損傷同定アルゴリズムが提案されている^{1),2),3)}。例えば、吉田ら²⁾はフィルタ理論に基づいた逆解析手法を提案している。また、宮本ら³⁾は、固有振動数に関する動的感度を利用した System Identification 法により損傷パラメータを同定する手法を提案している。これらの方法は、いずれも正常時と異常時の構造物の観測データを比較することによって損傷の位置と程度を同定する方法であり、いわゆる逆解析に分類される。また、これらは数学的手法であり、非線形な問題や微分不可能な評価関数をもつ問題の場合には、適用することが難しいと考えられる。

本研究は、最適化手法の一種である Particle

Swarm Optimization⁴⁾(以下、PSO) と FEM を用いた損傷同定法を提案し、その妥当性と同定の精度について検討を行ったものである。逆解析手法の一つとしては、観測データと計算データの差の最小化を行う方法がある。本手法の特徴としては、この最小化問題に PSO を適用することにより大域的な探索が可能になることである。まず、PSO を利用した損傷同定のアルゴリズムについて述べ、次に、トラス構造物の損傷同定に適用し、アルゴリズムの妥当性を検証した。最後に、提案した方法を RC はりの損傷同定に適用し、その精度について検討を行った。

2. PSO の概要と損傷同定アルゴリズム

PSO の起源は、鳥や魚が群れをなして行動をする、いわゆる動物の社会行動を工学的に応用した最適化手法で、1995 年に James Kennedy, Russell Eberhart によって提案された⁴⁾。PSO では、探索点を粒子と呼び、すべての粒子は位置情報(座標値)と探索方向を決定するための速度をもっている。位置情報(座標値)により設計変数を表す。また、個々の粒子は探索過程における過去の最良位置の情報 ($pBest_i$) をもち、また、群全

*1 山口大学 工学部知能情報システム工学科助手 博士(工学) (正会員)

*2 山口大学 メインテナンス工学研究所主任研究員 博士(工学)

*3 防衛大学校 建設環境工学科講師 博士(工学) (正会員)

*4 山口大学 工学部知能情報システム工学科教授 工博 (正会員)

体として、すべての粒子の中での最良の位置情報 ($gBest$) を保持している。

PSO による最適化では、現在の位置情報や $pBest_i$, $gBest$ を用いて、解空間を探索する。探索点(粒子)の更新方法は、図-1に示すような簡単なベクトルの合成和となる。ここで、 x_1^k , x_2^k は探索点(粒子)の位置情報、 v_1^k , v_2^k は速度ベクトル、添え字 k はステップ、 w は粒子の慣性、 c_1 , c_2 は学習係数、さらに、 r_1, r_2 は $[0, 1]$ の一様乱数を示す。なお、計算の 1 ステップあたりの移動時間 Δt は単位時間 ($\Delta t = 1$) を考える。例えば、 x_1^{k+1} は粒子 1 の前回の速度ベクトル (v_1^k)、群全体の最良解への速度ベクトル ($gBest - x_1^k$) とその粒子自身の最良解への速度ベクトル ($pBest_1 - x_1^k$) の線形結合によって求まる。ここで、群全体への速度ベクトル ($gBest - x_1^k$) は大域探索を、粒子自身の速度ベクトル ($pBest_1 - x_1^k$) は局所探索を意味する。一般的に、 i 番目の粒子の $k+1$ 回目の速度ベクトルは、式(1)のように求められる。

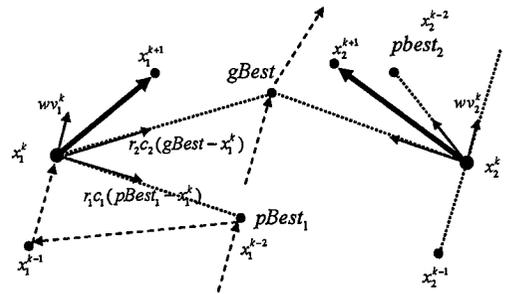


図-1 移動する粒子の模式図

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + \frac{r_1 c_1 (pBest_i - x_i^k)}{\Delta t} + \frac{r_2 c_2 (gBest - x_i^k)}{\Delta t} \quad (1)$$

また、探索点の位置は、式(2)で表される。

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \Delta t \quad (2)$$

PSO による処理手順を図-2に示す。以下、計算手順について説明する。

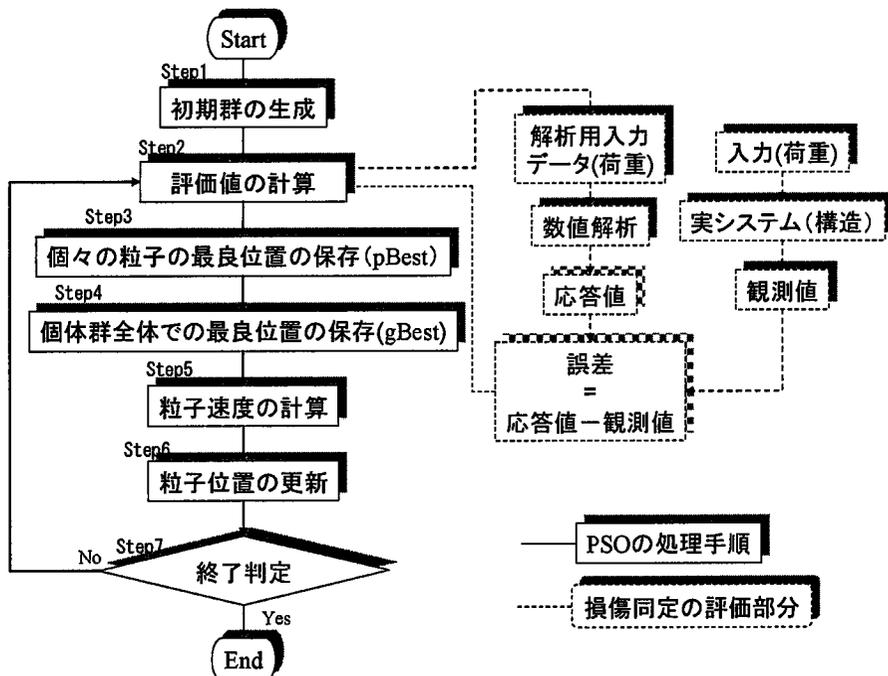


図-2 PSO と同定アルゴリズムの処理手順

Step 1: [初期群の生成]

粒子の位置と速度をランダムに決める。

Step 2: [評価値の計算]

各粒子に対して評価値を計算する。具体的には、設計変数である位置情報を解析用入力データとする。ここで、設計変数としては部材ごとの弾性係数とした。その解析から得られた結果と観測データとの誤差を求める。

Step 3: [個々の粒子の最良位置の保存]

個々の粒子について、これまでに移動してきた軌跡の中での最良の評価値を記憶する。ここで、最良の評価値とは誤差の最小化であるのでより評価値が小さいものを記憶することになる。また、これを $pBest_i$ と呼ぶ。 i は、 i 番目の粒子を表す。

Step 4: [個体群全体での最良位置の保存]

すべての粒子の中での、最良の評価値 ($pBest_i$ の中で一番良いもの) を記憶する。これを $gBest$ と呼ぶ。

Step 5: [粒子速度の計算]

式(1)によって、粒子速度を計算する。

Step 6: [粒子位置の更新]

すべての粒子に対して式(2)によって位置を更新する。

Step 7: [終了判定]

繰り返し回数に達しない場合は、Step2 から Step6 を繰り返す。

3. トラス構造物における損傷同定実験

3.1 トラスモデルと問題設定

図-3 に示す 6 節点 10 部材からなるトラス構造物に対し、提案したアルゴリズムを適用し本手法の妥当性を検証する。逆解析の観測データとしては、FEM による順解析で求めた節点変位と部材の応力を用いた。損傷同定のケースを表-1 に示す。問題 1 では部材番号 2 の弾性係数を、問題 2 では部材番号 2 と 3 の弾性係数をそれぞれ 10% 低下させたモデルを作成し、それぞれ逆解析を行い弾性係数の低下率やその位置の同定を行った。

表-1 数値解析のための弾性係数の一覧

問題 1		問題 2	
部材番号	弾性係数 (GPa)	部材番号	弾性係数 (GPa)
1,3-10	210	1,4-10	210
2	189(10%down)	2,3	189(10%down)

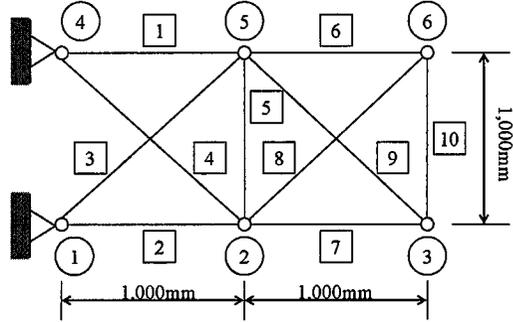


図-3 10 部材トラス構造物

表-2 PSO の入力パラメータ

パラメータ	値
粒子数	30
繰り返し回数	200
w (慣性の重み)	1.0
c_1 (学習係数1)	2.0
c_2 (学習係数2)	0.75

3.2 事前情報を利用した損傷位置の同定

逆解析 (逆問題) は、①順解析のように解の存在性や唯一性は保証されていないこと、②同定するパラメータ数の増加に伴って同定の精度が低下することから、ここでは損傷位置の同定を行うために、事前情報として弾性係数の低下率を与えた。

目的関数としては、次式のように部材ごとの観測された変位と計算された変位の残差二乗和を用いた。

$$\text{Minimize } J = \sum (x_i - x_i)^2 \quad (3)$$

ここで、 J : 残差二乗和、 x_i : 観測された変位、 x_i : 計算された変位である。

PSO のパラメータを表-2 に示す。ここで、繰り返し回数については事前に検討を行い、目的

関数値が十分に小さくなる 200 回に設定した。なお、PSO アルゴリズムは確率的方法であるため、精度は 1,000 試行回の平均で評価することにした。表-3 にシミュレーション結果を示す。この結果から、問題 1 で節点 2 に荷重した場合には、1,000 試行回数中 451 回、節点 3 に荷重した場合には 693 回の確率で損傷位置を同定できた。提案した手法の精度を改善するために、荷重を節点 2 と 3 にも作用させたところ、70%の確率で同定できた。ここで、図-4 に平均評価値の推移を示す。これより、評価値は繰り返し回数 200 で十分に収束し、同定精度は荷重点や荷重点数によって影響を受けることがわかる。すなわち、適切な荷重点を設定することによって損傷位置の同定をある程度の精度で行うことができると考えられる。

3.3 事前情報を利用した損傷程度の同定

ここでは、事前情報として損傷位置を与えたうえで、損傷程度の同定を行う。目的関数と制約条件は次式のようにになる。

$$\text{Minimize } \varepsilon = |x_i - x_i^*| \quad (4)$$

Subjected to 105 GPa < 弾性係数 < 220 GPa

ここで、 ε : 観測と計算誤差、 x_i : 観測された変位、 x_i^* : 計算された変位、 i : 要素番号である。

損傷同定の結果を表-4 に示す。これより、問題 1 の同定率は 99%であり、準最適解に至るまでの繰り返し回数は平均 95 回であることがわかる。また、弾性係数の標準偏差は 10%以内であった。一方、部材 2 と 3 を低下させた場合にお

表-3 1,000 試行回数中の成功回数

荷重点	問題1	問題2	問題3
節点2	451	441	753
節点3	693	840	860
節点2と3	732	915	824

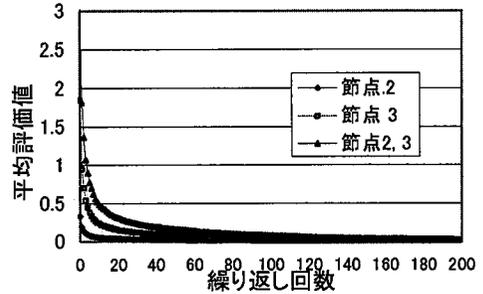


図-4 荷重点による平均評価値の推移(問題2)

ける同定率は約 70%であり、問題 1 に比べて精度がかなり低下した。これより、複数の損傷がある場合は、観測データを増やす、あるいは目的関数を修正するなどの対策が必要であると考えられる。

4. RC はりの損傷同定問題への適用

4.1 問題設定

図-5 に示す RC はりの損傷同定を行う。損傷は、引張鉄筋および圧縮コンクリートの断面積減少とし、その程度および位置を求める問題とした。RC はりは、長さ 2,000mm で鉄筋は D13 である。はりの断面は、150mm × 250mm (width × height)である。解析モデルは、図-6 のようにはりの対称性を考慮してはりの半分のみをトラスでモデル化した。逆解析の観測データとして、節点 13 に荷重 50kN が作用したときの各節点の変位と各部材の応力を有限要素解析により求めて用いた。

表-4 損傷程度の同定結果

	問題 1		問題 2		
	繰り返し回数	弾性係数 No.2	繰り返し回数	弾性係数 No.2	弾性係数 No.3
最小	0	105 (GPa)	0	105 (GPa)	105 (GPa)
最大	200	220 (GPa)	200	220 (GPa)	220 (GPa)
平均	95	188	83	192	179
標準偏差	60		65	22	39
試行回数中誤差 10%以内の割合		99%		70%	71%

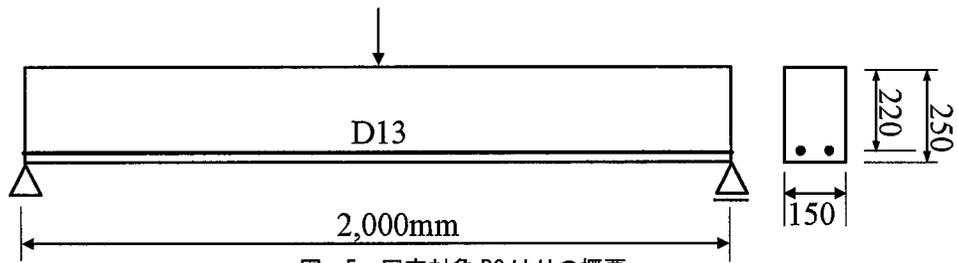


図-5 同定対象 RC はりの概要

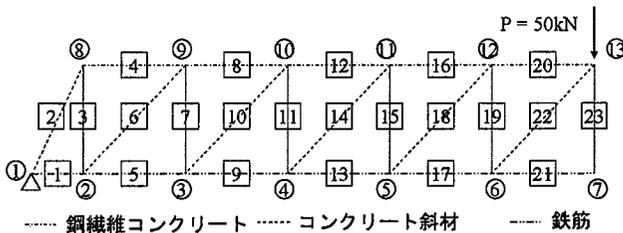


図-6 RC はりのトラスモデル図

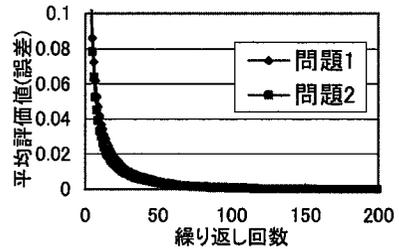


図-7 平均評価値(誤差)の推移

表-5 観測データ(順解析)に用いる鉄筋およびコンクリートの断面積の一覧

問題 1		問題 2		問題 3	
部材番号	断面積 (mm ²)	部材番号	断面積 (mm ²)	部材番号	断面積 (mm ²)
1,5,9,13,17	253	1,5,9,13	253	4,8,12,16	13,530
21	227.7 (10%low)	17,21	227.7 (10%low)	20	12,177 (10%low)

表-7 PSO パラメーター一覧

パラメーター	値
粒子数	30
繰り返し回数	200
w (慣性の重み)	0.9
c ₁ (学習係数1)	2.0
c ₂ (学習係数2)	2.0

表-6 1,000 試行回数中の成功回数

問題	回数
問題 1	1,000
問題 2	999

位置(部材番号) 程度(減少率)

5,9,13,17,21	0.8-1.0
--------------	---------

図-8 PSO の設計変数の構成例

観測データ用(順解析)の鉄筋およびコンクリートの断面積を表-5に、PSOに用いるパラメータを表-7に示す。

4.2 事前情報を利用した損傷位置の同定

ここでは、損傷位置を同定するために鉄筋の断面積の低下率を既知情報と仮定して、同定を行うための設計変数は、バイナリコードで表し、0: 損傷なし、1: 損傷ありと設定する。

目的関数は、上述の式(3)を用いている。評価を行う部材番号は、5、9、13、17、21とした。表-6に、1,000 試行回数中の同定結果を示す。損傷位置の同定は、問題1、2ともに、ほぼ100%の精度で同定できた。この時の平均評価値(誤差)の推移を図-7に示す。この結果から、繰り返し

回数 100 回前後ではほぼ損傷位置が同定できていることが分かる。

4.3 事前情報を利用した損傷程度の同定

ここでは、損傷位置が既知という事前情報のもとで鉄筋断面積の減少率の同定を試みた。損傷位置は部材番号 21 とした。PSO の設計変数として、断面積の減少率を示す指標を導入し、その値は 0.5 から 1.0 とした。目的関数は式(3)を用いている。同定の結果、評価値(誤差)が 0 であった数は 1,000 試行回数中、問題 1 では 996 回、問題 2 では 995 回であった。すなわち、どちらの問題においてもほぼ 100%の精度で同定できることがわかった。

表-8 1,000 試行回数中の成功回数

問題 1	損傷位置候補	21	17,21	13,17,21	9,13,17,21	5,9,13,17,21
	成功回数	999	932	863	846	795
問題 2	損傷位置候補	21	17,21	13,17,21	9,13,17,21	5,9,13,17,21
	成功回数	998	907	853	824	723
問題 3	損傷位置候補	20	16,20	12,16,20	8,12,16,20	4,8,12,16,20
	成功回数	1000	927	870	834	769

4.4 損傷位置と程度の同時同定

ここでは、損傷位置は 1 箇所のみという仮定の下に、鉄筋の断面積が減少した位置とその減少率を同時に同定することを試みた。このための工夫として、PSO の設計変数を、図-8 のように損傷位置の候補を示す部材番号と断面積の減少率を表す数値から構成した。なお、同定精度の向上のため、断面積の減少率は 0.8~1.0 までとした。

同定のケースとしては、損傷位置の候補数を変更し、1,000 試行回数中での同定成功回数で検証した。損傷箇所の候補数が増えるにしたがい、解空間が広がるので同定は難しくなることが予想される。表-8 に同定結果を示す。これより、損傷位置の候補数が増加するにつれ、同定精度が低下していくのが分かる。しかしながら、その精度は損傷候補数が 5 つある場合でも 7 割程度の精度で同定できている。

以上の検討より、損傷位置をある程度特定できる既知情報があれば、比較的高い精度で同定することが可能と考えられる。例えば、デジタル画像を用いてひび割れ位置を特定する技術⁵⁾との融合が考えられる。また、精度の向上のために目的関数についても今後検討する予定である。

5. 結論

本研究は、PSO と FEM を組合せて、構造物の損傷程度や位置を同定する手法を提案したものである。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) PSO を用いて、FEM の計算値と観測値の差を最小とする損傷同定アルゴリズムを提案

した。

- (2) トラスモデルの損傷程度および位置の同定を行い、提案したアルゴリズムの妥当性を検証した。その際、事前情報を援用し、また荷重点数を増やすことによって同定精度が向上することがわかった。
- (3) 提案した手法を、RC はりの鉄筋およびコンクリートの損傷（断面積減少）を同定する問題に適用した。その結果、損傷およびその位置ともに 7 割を超える比較的高い精度で同定できることがわかった。

参考文献

- 1) 亀山修一, 姫野賢治, 丸山暉彦, 笠原篤: 遺伝的アルゴリズムを用いた舗装体の弾性係数の逆解析, 土木学会論文集, No.550, V-33, pp.195-204, 1996.11
- 2) 吉田郁政, 佐藤忠信: モンテカルロフィルタを用いた排他的非ガウスプロセスノイズによる損傷同定, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.429-436, 2002.3
- 3) 宮本文穂, 森川英典, 山本昌孝: 既存コンクリート橋の損傷に対応する動的挙動の感度特性と損傷評価への適用, 土木学会論文集, No.442, V-16, pp.61-70, 1992.2
- 4) J. Kennedy, R. C. Eberhart: Particle swarm optimization, Proc. of IEEE International conf. on neural networks (ICNN'95), Vol. IV, pp.1942-1948, 1995
- 5) 河村 圭, 宮本文穂, 中村秀明, 佐藤 亮: 対話型遺伝的アルゴリズムによるデジタル画像からのひび割れ抽出, 土木学会論文集, No.742, VI-60, pp.115-131, 2003.9