

GA と FEA を用いた内部き裂同定手法に関する基礎的研究

論文

Fundamental study on embedded crack identification by genetic algorithm and FE analysis

中村 聖三*, ○永田 佳世**, Fadi FARHAT***, 高橋 和雄****

Shozo NAKAMURA, Kayo NAGATA, Fadi FARHAT and Kazuo TAKAHASHI

ABSTRACT Simple and sufficiently accurate fatigue crack detection technique is necessary to evaluate the fatigue performance of existing structures. Recently, measurement of two-dimensional displacement or strain distribution on the surface of plates becomes possible and this technique is considered to be applicable to estimate the initiation and propagation of embedded crack. In this study, possibility to estimate the position and size of embedded crack based on the measured surface displacement distribution by combining finite element analysis and optimization technique (Genetic Algorithm) is examined.

Keywords: 内部き裂同定, 表面ひずみ, 有限要素解析, 遺伝的アルゴリズム

Embedded crack identification, Surface strain, Finite element analysis, Genetic algorithm

1. はじめに

わが国における本格的な社会資本整備が始まった 1960 年代に架設された多くの鋼橋で溶接部の疲労損傷が発見されており¹⁾, かつその多くが当初想定された設計供用寿命を迎えつつある。わが国においては従来, 落橋につながるような疲労き裂は発生していなかったが, 近年プレートガーダー橋のウェブに 1m を越えるようなき裂が発見された²⁾。今後, 供用年数が長くなるにつれて, このような橋梁の安全性を脅かす疲労き裂が発生する可能性が高まることが予想される。疲労き裂の進展による既設橋梁の致命的な損傷を防止するためには, 現場に適用可能な簡易でかつ精度の高い疲労き裂の検出技術が必要である。

外力や熱変形によって生ずる応力の大きさは, 表面の伸縮量であるひずみによって知ることができ, ひずみの時間的な変化からき裂発生や破断が予測できる可能性がある。従来, ひずみの測定には一般的にひずみゲージが用いられてきた。しかし, ひずみゲージによる測定は, 対象物にゲージを直接貼り付ける必要があり, 近年のひずみの特

定対象や測定環境の拡大, 多様化などに対応することが難しくなっている。また, 測定できるひずみもゲージを貼り付けた位置に限られる。それを解決する手段として, 近年, 光学的全視野計測法が注目されている。光学的全視野計測法は, レーザを光源としてその干渉を利用した計測法と CCD 素子のようなエリアセンサで取り込んだ情報に基づく方法に分類できる。前者には, スペックル干渉法, ホログラフィ干渉法, モアレ干渉法などがあり, 非常に高精度であるが, 振動などの外乱に弱いという欠点がある。後者には, デジタル画像相関法や赤外線サーモグラフィ法があり, 対象物の画像を計測カメラで取り込むだけの比較的簡便な計測手法である。例えば, スペックル干渉法には, アルミニウム合金板³⁾や鋼部材⁴⁾のひずみ計測, RC はりのひび割れ発生・進展過程の可視化⁵⁾への適用事例が, デジタル画像相関法には, 矩形張力膜のリンクル計測⁶⁾, モルタル供試体のひずみ計測⁷⁾, 光重合型コンポジットレジンの収縮⁸⁾や吸水膨張計測⁹⁾などへの適用事例が報告されている。

*博(工) 長崎大学 工学部 社会開発工学科 教授

**修(工) パシフィックコンサルタンツ(株)

***博(工) 大成建設(株) 東京支店 東急渋谷作業所

****工博 長崎大学 工学部社会開発工学科 教授

(〒852-8521 長崎市文教町 1-14) 第2種正会員

(〒541-0052 大阪市中央区安土町 2-3-13)

(〒150-0002 渋谷区渋谷 3-11-7)

(〒852-8521 長崎市文教町 1-14) 第2種正会員

一方、近年におけるコンピュータ技術の発展は目覚しく、はり理論や格子桁理論に基づく解析法が開発された数十年前に比べると、多様な機能を備えた3次元FEM解析ソフトも数多く開発されている。パソコンレベルでもFEM解析が行えるほど設計ツールの高度化が進んでおり、FEM解析を比較的容易に実施できる環境が整ってきている。

以上のような背景から、著者らは以前、光学的全視野計測法を用いた溶接部の内部き裂検出の可能性を検討するため、鋼材の溶接内部に存在するき裂を対象に、その位置やサイズが表面のひずみに及ぼす影響を弾性解析により検討した¹⁰⁾。本研究では、き裂の同定を解析値と測定値との差を最小化する最適化問題と考え、FEM解析と最適化手法を組み合わせることで、鋼材表面の変位あるいはひずみ分布から鋼材内部に存在するき裂の位置やサイズの同定が可能であるかを検討する。最適化手法としては、広域的最適解を求めることができる遺伝的アルゴリズム(GA)を採用し、き裂同定精度に及ぼすき裂の位置とサイズ、測定誤差等の影響に関する検討結果に基づき、提案法の適用範囲と精度を明らかにする。

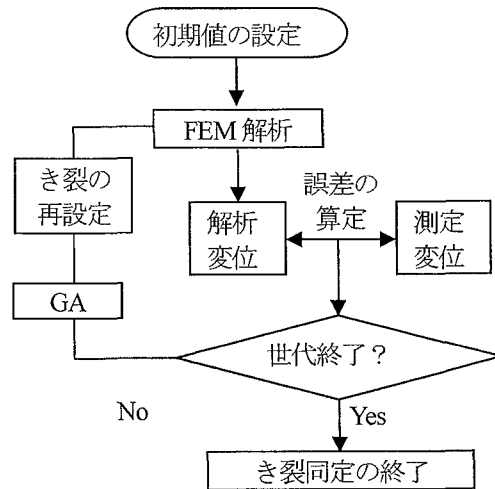


図-1 同定の流れ

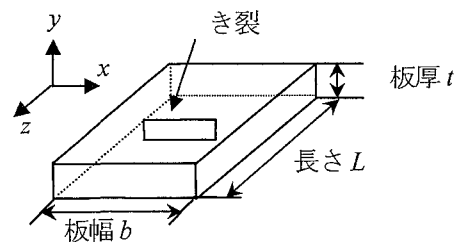


図-2 解析モデル

2. き裂の同定方法

2.1 同定の流れ

本研究におけるき裂位置およびサイズの同定の流れは以下のとおりである。(図-1参照)

- (1) 何らかの方法(光学的計測法等)で鋼材表面の変位分布を求めておく。
- (2) き裂の位置・サイズ(2.3参照)を仮定したFEM解析モデルを、設定した個体数だけ作成する。
- (3) 各モデルのFEM解析を実施し、変位あるいはひずみ分布について、解析値と測定値の誤差(目的関数)を算定する。
- (4) 最適化手法(GA)を用いて、き裂の位置・サイズを更新し、世代数終了まで(2)、(3)を繰り返す。
- (5) 世代終了までに実施した全解析の結果から、誤差(目的関数の値)が最小となるき裂の位置・サイズを同定結果として抽出する。

2.2 FEM解析

解析には汎用有限要素解析ソフトウェア

MARC¹¹⁾を使用し、線形弾性解析を行う。本研究では鋼I桁引張フランジの突合せ溶接部を想定し、図-2に示すような、長さ方向(主たる応力方向)中心位置にサイズ $\alpha \times \beta$ (板厚方向 \times 板幅方向)で、幅0mmのき裂を挿入した板幅 b 、板厚 t 、長さ L の平板を解析対象とし、8節点アイソパラメトリック要素(No.7)でモデル化する。MARCの入力データの作成には、MARCのプリポストプロセッサであるMentatを用い、解析対象をき裂面で分割してモデルを作成し、両者を一体化する際にき裂内部の節点を二重節点とする(同一位置の節点を一体化しない)ことでき裂を導入する。

2.3 最適化手法

き裂の同定を解析値と測定値との差を最小化する最適化問題と考え、以下のように定式化する。最適化手法としては、広域的最適解を求めることができる遺伝的アルゴリズム(GA)を採用する。GAに関するパラメータについては、事前に個体数、エリート数、交差率を表-1に示すように変化させた検討を行い、最もよい推定結果が得られた値(個体数64、エリート数28、交差率45%)

表-1 検討パラメータ

個体数 (16)	エリート数	4	8	10
	交叉率(%)	60	40	30
個体数 (28)	エリート数	4	10	14
	交叉率(%)	69	51	40
個体数 (41)	エリート数	8	12	20
	交叉率(%)	64	57	41
個体数 (64)	エリート数	24	28	31
	交叉率(%)	48	45	41

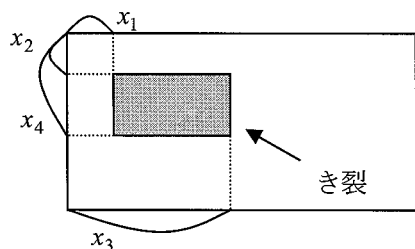


図-3 設計変数

を, 3 章以降の検討に用いることとする. 計算を終了する世代数については, 400 程度まで変化させた検討結果に基づき, 100 とする. なお, エリートとは目的関数の値が小さく, 次の世代に生き残る個体のことである.

(1) 目的関数:

$$F = 1 - \exp \left\{ - \frac{\sum |(\Delta_{1i} - \Delta_{2i}) - (\Delta'_{1i} - \Delta'_{2i})|}{\sum |\Delta_{1i} - \Delta_{2i}|} \right\}$$

ここに, Δ_{1i} , Δ_{2i} は測定で得られた節点 i の変位, Δ'_{1i} , Δ'_{2i} は解析で得られた節点 i の変位である.

(2) 制約条件:

$$\sigma_y \leq \frac{f}{A - (x_3 - x_1)(x_4 - x_2)}$$

ここに, f は作用力, σ_y は降伏応力, A は鋼板の断面積である. 本制約条件は, き裂の存在を考慮した断面の平均応力が弾性範囲内に留まることを保証するために設定したものである.

(3) 設計変数: (x_1, x_2, x_3, x_4)

図-3 に示すき裂の位置とサイズを表す変数であり, GA における各個体の遺伝子情報となる. x_1, x_3 が幅方向, x_2, x_4 が深さ方向のき裂情報であり, $x_1 < x_3, x_2 < x_4$ とする.

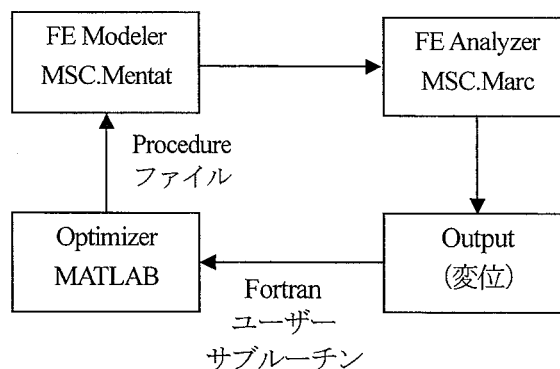


図-4 構築システム

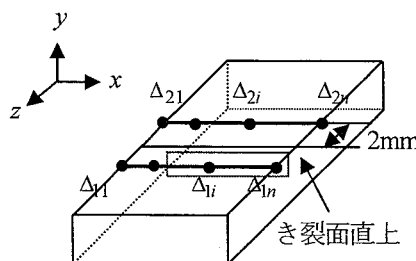


図-5 変位抽出位置

2.4 システム化

本研究では, 前述したように構造解析を行うためのモデラー・ソルバーとしてMARC/Mentatを, 最適化を図るオプティマイザーとして MATLAB の GA and direct search Toolbox¹²⁾を用い, 図-4 に示すようなシステムを構築した.

き裂の同定に際しては, き裂サイズおよび位置を変化させて繰り返し FEM 解析を行う必要があるが, それには Mentat の Procedure ファイルを利用している. Procedure ファイルとは, Mentat におけるモデル作成手順を記録したファイルのことであり, Excel のマクロ機能と同様, これを用いることで記録された一連の動作を一気に実行することが可能となる. 本研究では MATLAB で作成した最適化ルーチンが定めた個体の情報に応じて Procedure ファイルを書き換えるようにすることで, 新しい個体に関する FEM 解析の自動実行を実現している.

3. 測定誤差を含まない場合の検討

3.1 き裂位置とサイズの影響

(1) 解析条件

モデルサイズは $t=10\text{mm}$, $b=150\text{mm}$, $L=100\text{mm}$

表-2 同定ケース

ケース番号	き裂サイズ	$\alpha \times \beta$ (mm)	き裂深さ (mm)	縁端距離 (mm)
1	13%	40×5	3.5	2, 26, 50
			6.5	
2	10%	30×5	3.5	2, 26, 50
			6.5	
3	4%	20×3	2.5	2, 26, 50
			4.5	
			7.5	
4	2%	10×3	2.5	4, 32, 60
			4.5	6, 34, 56
			7.5	4, 32, 60
5	1%	8×2	2.0	4, 32, 60
			5.0	
			8.0	

(き裂深さは $(x_2+x_4)/2$, 縁端距離は x_1 に対応)

とし、要素分割は x (板幅) 方向に 75 分割, y (板厚) 方向に 10 分割とし, z (長さ) 方向についてはき裂面を対称中心とし, 2, 5, 10, 20, 30, 50mm 間隔で分割する. 鋼材は SM490 を仮定する. 荷重条件は一軸引張とし, 一端に 10N/mm^2 の分布荷重を作用させ, もう一端は固定する. 弾性係数は 200kN/mm^2 , ポアソン比は 0.3 とする. 誤差を評価するための変位抽出位置は, き裂面直上から z 軸方向 (図-5 参照) $\pm 2\text{mm}$ の位置とする. ここでは, あらかじめ FEM 解析を実施して得られた変位分布を測定値として用い同定を行う. よって, 測定値として用いる値には測定誤差を含まないことになる. 断面に対するき裂サイズ (面積比) を 13, 10, 4, 2, 1% と変化させ, 表-2 に示すようにそれぞれをケース 1 から 5 とする. 各ケースにおいて, き裂深さおよび縁端からの距離を変えた計 39 パターンの問題を設定し同定を行う.

(2) 同定結果

完全に同定可能なものは 11 パターンであった. き裂中心位置の同定誤差の平均値をき裂サイズごとに表-3 に示す. き裂サイズが 1% になると幅方向に大きな誤差が出ている. 誤差の大きさ自体はき裂サイズが 2% の場合も小さくなっているが, き裂サイズに対する相対的な誤差で考えると, き裂サイズが大きくなるにつれて精度が向上してい

表-3 測定値との誤差の平均

き裂サイズ	幅方向 (mm)	深さ方向 (mm)
13%	1.83 (1.2%)	0.53 (5.3%)
10%	1.67 (1.1%)	0.16 (1.6%)
4%	1.00 (0.7%)	0.50 (5.0%)
2%	1.11 (0.7%)	0.33 (3.3%)
1%	9.77 (6.5%)	1.08 (10.1%)

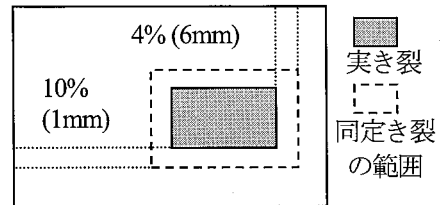


図-6 同定範囲 (ケース 1~5)

るものと判断される. 本検討事例では, き裂サイズが 4%以上であれば, 一定の精度でき裂の同定が可能であったと考えている.

き裂サイズが 4%以上のものについてより詳細に見てみると, 測定値に対し, き裂中心位置の平均誤差は幅方向に 3.23mm, 深さ方向に 0.46mm であった. また同定されたき裂については実き裂に対して幅方向に 6mm ずつ, 深さ方向に 1mm ずつの範囲内に収まっていた. つまり, 図-6 に示すように, 全てのパターンで幅方向に板幅の 4%以内, 深さ方向に板厚の 10%以内の精度で同定可能であった.

3.2 幅厚比による影響

(1) 解析条件

幅厚比の影響を探るために, 鋼材断面の幅厚比を 3.1 で用いた 1/15 から 1/30 に変えて検討を行う. その際, 3.1 で用いたモデルの板幅方向を 2 倍にしたもの (ケース 6, 7) と板厚方向を 1/2 にしたもの (ケース 8, 9) の 2 種のモデルを対象とする. き裂のサイズに関しては, 3.1 において一定の精度でき裂の同定が可能であったと考えた 4%および 13%とする. 同定ケースの一覧を表-4 に示す. ケース 6, 7

$t=10\text{mm}$, $b=300\text{mm}$, $L=160\text{mm}$ とし, x (板幅) 方向に 150 分割 (1.5mm 間隔), y (板厚) 方向に 10 分割 (1mm 間隔), z (長さ) 方向にはき裂面を対称中心とし, 2, 5, 10, 40, 80mm 間隔で分割する.

表-4 同定ケース

ケース 番号	き裂 サイズ	$\alpha \times \beta$ (mm)	き裂 深さ (mm)	縁端 距離 (mm)
6	13%	78×5	3.5	2, 38, 78
			6.5	
7	4%	30×4	3.0	2, 52, 102
			5.0	
			7.0	
8	13%	40×2.5	1.75	2, 26, 50
			3.25	
9	4%	20×1.5	1.25	2, 26, 50
			2.25	
			3.75	

(き裂深さは $(x_2+x_4)/2$, 縁端距離は x_1 に対応)

ケース 8,9

$t=5\text{mm}$, $b=150\text{mm}$, $L=100\text{mm}$ とし, x (板幅) 方向に 75 分割 (1.5mm 間隔), y (板厚) 方向に 10 分割 (0.5mm 間隔), z (長さ) 方向にはき裂面を対称中心とし, 2, 5, 10, 20, 30, 50mm 間隔で分割する.

(2) 同定結果

き裂中心位置の同定誤差の平均値をケースごとに表-5 に示す. 表中の括弧内の値は, 断面の幅あるいは厚さに対する割合である. 板幅方向を 2 倍とした場合 (ケース 6, 7) には同定精度が低下している. これは, 要素分割が増加したモデルに対し, 同じ最適化パラメータを用いたことが原因だと考えられる. 要素分割が多くなると解析の精度自体は向上するが, 設計変数の組み合わせが多くなる. そのため個体数が変わらない場合, 初期世代で選択できないスペースが多くなり, 同定精度が低下したものと考えられる.

全ての条件を同じにして, 厚さのみを変えた場合 (ケース 8, 9) では, 同定されたき裂は, 実き裂に対して幅方向に 10mm ずつ, 深さ方向に 2mm ずつの誤差範囲に収まっていた. つまり幅方向に板幅の 6.7%以内, 深さ方向に板厚の 20%以内の精度で同定可能であった. これは, ケース 1~5 の同定精度と大きくは変わらない.

測定誤差を含まない場合について全 9 ケースの検討を行った結果, 図-7 に示すように, き裂が

表-5 測定値との誤差の平均

ケース 番号	幅方向 (mm)	深さ方向 (mm)
6	20.50 (6.8%)	0.53 (5.3%)
7	2.67 (0.1%)	0.50 (5.0%)
8	1.67 (1.1%)	0.16 (3.2%)
9	1.11 (0.7%)	0.83 (16.7%)

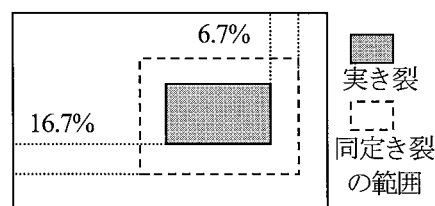


図-7 同定範囲 (ケース 1~9)

断面の面積に対して 4%以上のサイズであれば, 実き裂に対して幅方向に板幅の 6.7%, 深さ方向に板厚の 16.7%の範囲に全てのパターン同定き裂が存在した.

4. 測定誤差を想定した場合の検討

4.1 適用モデル

適用モデルは, 3.1 で使用したものと, 全ての条件において同様のものとする. 断面に対するき裂サイズ (面積比) については 3.1 のケース 2 と同様の 10%とし, き裂深さおよび縁端からの距離についても同様とする (表-2 参照). 誤差については正規分布に従う乱数とし, その平均値をゼロ, 標準偏差をあらかじめ FEM 解析から得られた変位の最大値の 8, 10, 15%の値が 99%信頼区間の限界となるよう設定した.

4.2 同定結果

ケースごとに, き裂中心位置の誤差の平均値を表-6 に, 同定き裂の面積の平均値, 最大値, 最小値を表-7 に示す. また, ケースごとの検討については以下に示す.

測定誤差を 8%以下とした場合 (ケース 10)

中心位置の平均誤差は幅方向に 9.67mm (6.44%), 深さ方向に 1.83mm (18.33%) である. 同定き裂の面積の平均は 152mm^2 であり, 正解の 150mm^2 に対して 1%大きくなっていった.

位置に関しては, 実き裂に対する同定誤差は, き裂幅方向に最大 28mm, すなわち板幅の 18.7%

表-6 測定値との誤差の平均

ケース番号	幅方向 (mm)	深さ方向 (mm)
10	9.67 (6.4%)	1.83 (18.3%)
11	10.83 (7.2%)	1.67 (16.7%)
12	9.50 (6.3%)	1.92 (19.2%)

表-7 サイズの同定結果

ケース番号	平均値 (mm ²)	最小値 (mm ²)	最大値 (mm ²)
10	152	100	190
11	158	120	200
12	90	45	156

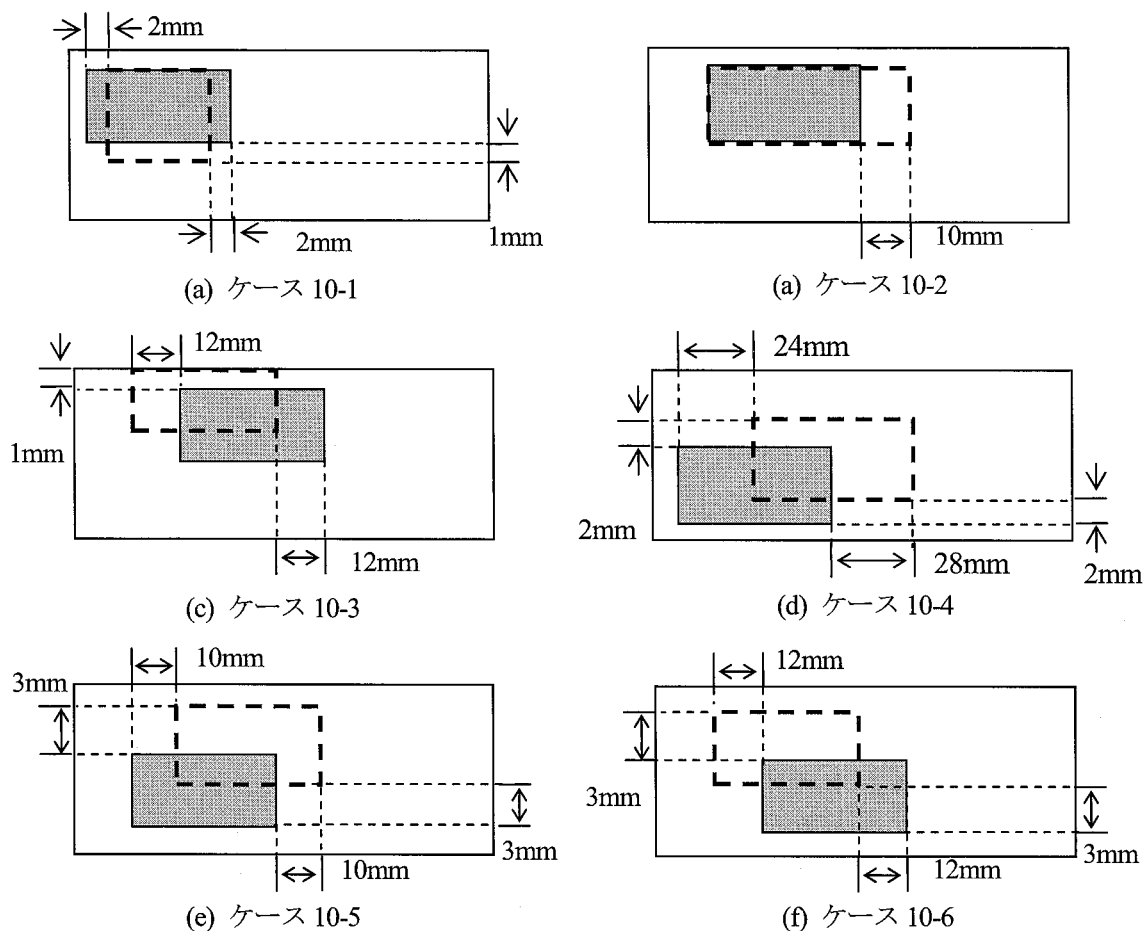


図-8 実き裂と同定き裂の位置とサイズ (ケース 10)

であった。き裂の幅が 30mm あるので、左右に 28mm ずつとれば断面の 1/2 の幅を占める。すべてのパターンの実き裂と同定き裂の位置とサイズを比較して図-8 に示す。目的関数の収束状況を、測定誤差を含まないケース 2 (図-9(a)) とケース 10 (図-9(b)) で比較すると、傾向としては類似しているが、誤差を乗せた分だけ 0 (正解) から離れている。

測定誤差を 10%以下とした場合(ケース 11)

サイズが同定可能であったものが 2 パターンあった。中心位置の平均誤差は幅方向に 10.83mm

(7.22%)、深さ方向に 1.67mm (16.7%) である。同定き裂の面積の平均は 158mm² であり、正解の 150mm² に対して 5%大きかった。表-7 に示すようなばらつきがあるものの、平均してみると、おおよそ正しいサイズで同定されていると言える。実き裂に対する同定き裂範囲は、ケース 10 と同様であった。すべてのパターンの実き裂と同定き裂の位置とサイズを比較して図-10 に示す。

測定誤差を 15%以下とした場合(ケース 12)

中心位置の平均誤差は幅方向に 9.50mm (6.33%)、深さ方向に 1.92mm (19.2%) である。

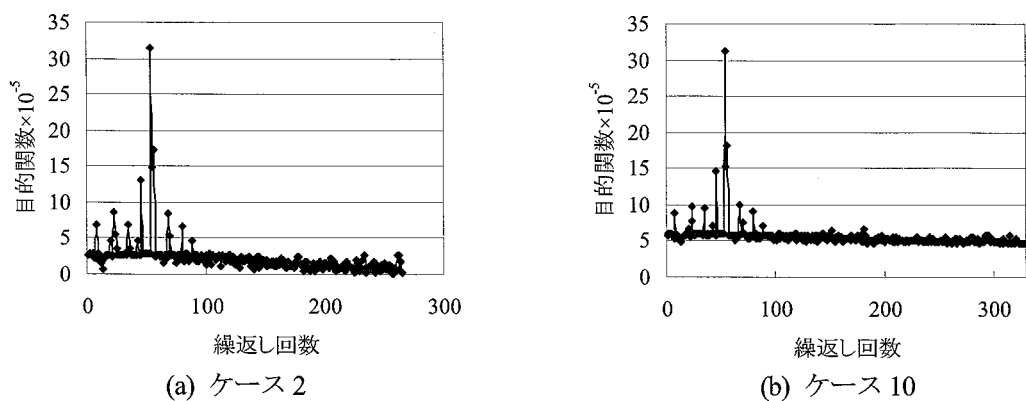


図-9 目的関数の収束状況

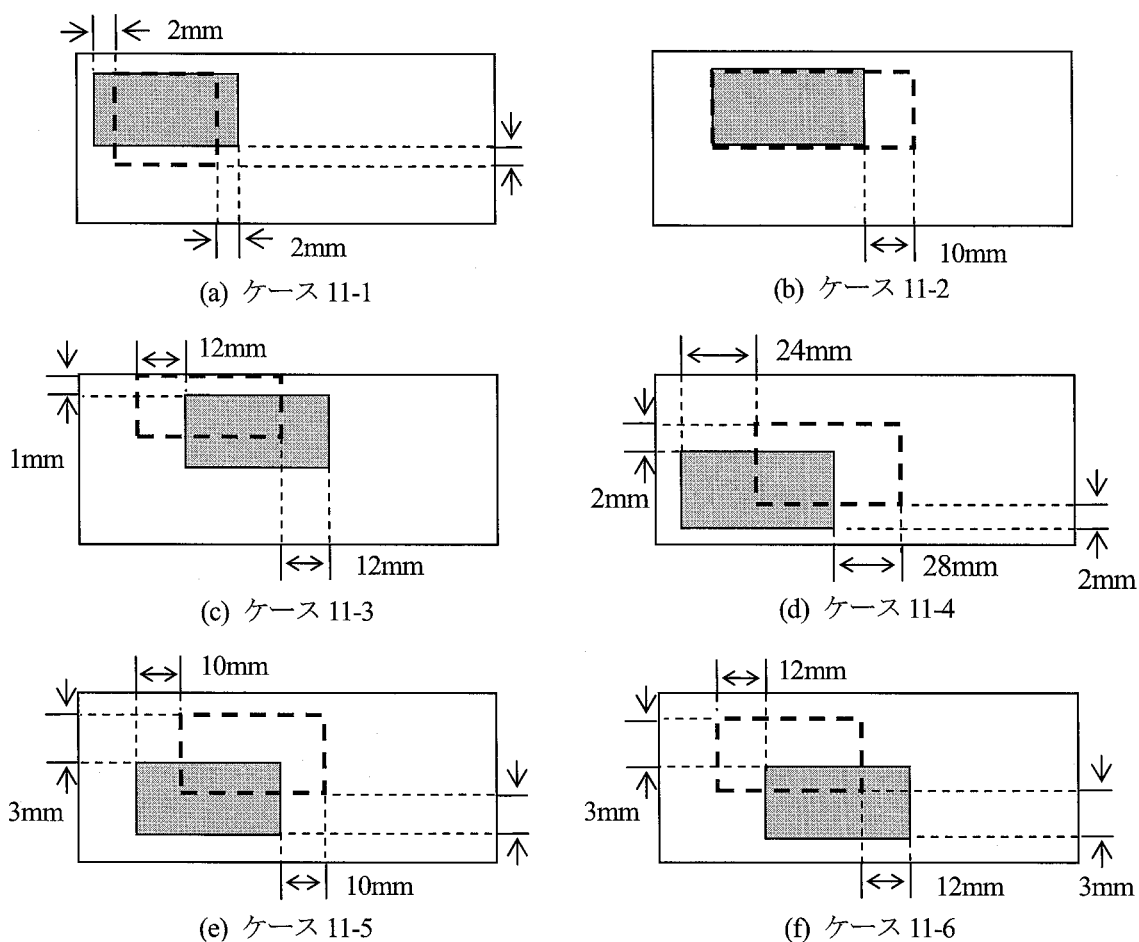


図-10 実き裂と同定き裂の位置とサイズ (ケース 11)

同定き裂の面積の平均は 90mm^2 であり、正解の 150mm^2 に対して 40%小さかった。位置については、他のケースに比べ実き裂に対する同定誤差は増加しており、最大でき裂幅方向に 36mm、深さ方向に 3mm であった。

以上のように、ケース 10, 11 に関しては、平均してみると正解に近いき裂サイズが同定されてい

る。き裂の位置に関しては、同定き裂範囲が正解のき裂幅まで含むと、断面の幅の 1/2 を占めることになる。しかし、き裂が上部に存在する場合には、実き裂に対する同定き裂範囲は幅方向に 12mm (8%)、深さ方向に 1mm (10%) に収まっており、同定精度が高い。つまり、測定誤差が 10%程度で、き裂が上部にある場合は、測定誤差

を含まない場合と同様に、比較的精度がよい同定が可能ではないかと考えている。

5. まとめ

本研究では、き裂の同定を解析値と測定値との差を最小化する最適化問題と考え、FEM 解析と GA を組み合わせることで、鋼材表面の変位あるいはひずみ分布から鋼材内部に存在するき裂の位置やサイズを同定する一手法を提案し、その精度を鋼 I 桁引張フランジの突合せ溶接部を想定した数値実験により検討した。その結果、内在する平面き裂の同定範囲、測定誤差の許容範囲を明らかにすることが出来た。すなわち、き裂サイズが断面の面積に対して 4%以上あり測定誤差のない場合、また、測定誤差が 10%程度まででき裂が上部にある場合には、実き裂に対して幅方向に板幅の 8%、深さ方向に板厚の 16.7%の誤差範囲で同定可能であることを示した。

今後、提案法を実用化するためには、以下のよう
な課題に取り組む必要がある。

- 1) 最適な変位あるいはひずみの抽出位置
- 2) GA で用いるパラメータの最適化
- 3) 荷重が未知である場合の同定手法
- 4) 他のき裂形状や継手形式への適用性
- 5) 光学的全視野計測と組み合わせた実験的な検証

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.5
- 2) 国土交通省 近畿地方整備局 奈良国道事務所：国道 25 号名阪国道「山添橋」主桁亀裂発生に伴う名古屋方面行き車線の通行止めについて（第 1 報），同事務所 HP，2006.10.
- 3) 松田浩ら：電子スペックルパターン干渉法によるアルミニウム合金板の破壊挙動の全視野ひずみ計測，応用力学論文集，Vol.7，pp.1241-1250，2004.
- 4) 神原天鳴ら：スペックル干渉法による鋼部材の非接触全視野ひずみ計測，鋼構造年次論文報告集，Vol.11，pp.519-524，2003.
- 5) 松田浩ら：スペックル干渉法を用いた RC はりのひび割れ発生・進展過程の非接触全視野計測，構造工学論文集，Vol.52A，pp.11-18，2006.
- 6) 松田浩ら：デジタル画像相関法を用いた矩形張力膜のリンクル計測，応用力学論文集，Vol.9，pp.581-590，2006.
- 7) 佐川康貴ら：一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測へのデジタル画像相関法の適用性に関する検討，実験力学，Vol.7，No.2，pp.114-120，2007.
- 8) 古川太一ら：デジタル画像相関法を用いた光重合型コンポジットレジンの収縮変位場評価，実験力学，Vol.8，No.2，pp.115-120，2008.
- 9) 新川和夫ら：光重合型コンポジットレジンの吸水膨張計測へのデジタル画像相関法の応用，Vol.9，No.2，pp.90-95，2009.
- 10) 中村聖三，江藤亮太，高橋和雄，松田浩：内在する平面き裂が鋼板の表面ひずみに及ぼす影響，鋼構造年次論文報告集，Vol.13，pp.143-148，2005.11.
- 11) MSC Software Corporation：MSC.Marc2005 User Manual，Volume A-Volume E
- 12) The MathWorks，Inc.：Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox User's Guide，pp.2.3-2.2