

内在する平面き裂が鋼板の表面ひずみに及ぼす影響

Influence of an embedded planar crack on surface strain distribution in steel plates

○中村 聖三*, 江藤 亮太**, 高橋 和雄***, 松田 浩****

Shozo NAKAMURA, Ryota ETOH, Kazuo TAKAHASHI and Hiroshi MATSUDA

ABSTRACT Strain gages have been generally used for strain measurement. However, it must be directly stuck on the materials and can measure the strain only at the point of the gage. In recent years, some methods being able to obtain strain distribution of certain area simultaneously such as the laser speckle method have attracted attention. In this study, the influence of position and size of an embedded crack on surface strain distribution in steel plates is examined by finite element analysis, and the possibility to detect embedded crack is evaluated.

Keywords: 内部き裂検出, 溶接欠陥, 表面ひずみ, 有限要素解析

Embedded crack detection, Weld defects, Surface strain, Finite element analysis

1. はじめに

我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、鋼橋の継手形式はリベットから溶接に変わった。この時期に製造された多くの鉄道橋や首都高速などの道路橋で溶接部の疲労損傷が発見されている¹⁾が、現在も補修・補強がなされ供用されている。これらの多くは当初想定された設計供用寿命を迎えつつあるが、社会的役割や周辺環境からは全面的取替えが困難である。また、我が国の最近の厳しい財政状況下で、欧米に比べてまだ十分とはいえない社会基盤を整備する上でも、既設の社会基盤施設を利用せざるを得ない状況である。これらの膨大な数のしかも多様な問題を抱えた既設構造物の疲労性能評価を行うためには、簡易でかつ精度の高い疲労き裂検出技術の開発が不可欠である。

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る。また、ひずみはヤング率やポアソン比などの弾性係数や熱膨張係数の導出に必要であり、ひずみの時間的な変化からはき裂発生や破断が予測できる。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、近年のひずみ測定の対象や測定環境の拡大と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。それを解消する非接触な測定法としてスペckル干渉法^{2),3)}がある。その原理は、試料表面をレーザー光で照射したときに生ずる不規則な斑点模様であるスペckルの移動を光電的に検出することにある。近年のレーザーの小型化およびデジタル画像処理技術の進歩と普及などにより、このスペckル干渉法が注目されるようになってきた。また、現在溶接部の内部欠陥の検査には放射線透過法、超音波探傷法などが用いられているが、新しい検査法として、スペckル干渉法を用いた溶接内部欠陥の検出への適用可能性が考えられている。

本論文は、スペckル干渉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、その初期段階として溶接内部にき裂が存在するモデルを対象とし、モデルサイズやき裂の位置・サイズなどのパラメータを変化させたモデルの有限要素解析

* 博(工) 長崎大学 工学部 社会開発工学科 助教授 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

** 工学士 研究当時 長崎大学 工学部 社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

*** 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番14号)

**** 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 教授 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

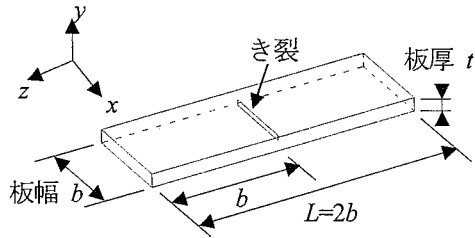


図-1 解析モデル

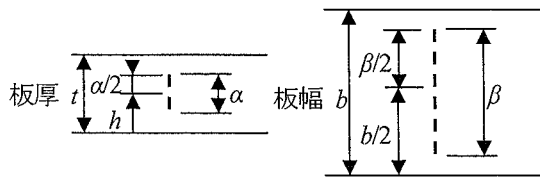


図-2 き裂モデル

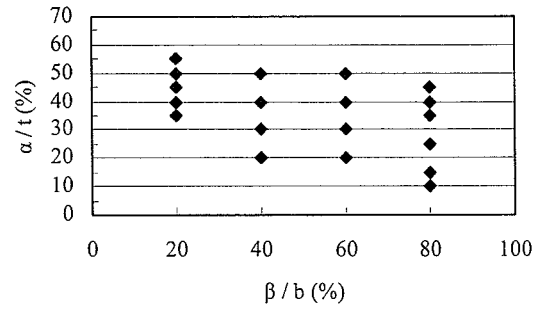
を行い、応力集中による表面ひずみの変化を計測して、モデルのサイズや内部き裂の位置・サイズなどが表面のひずみにどのような影響を及ぼしているのか検討する。

2. 解析概要

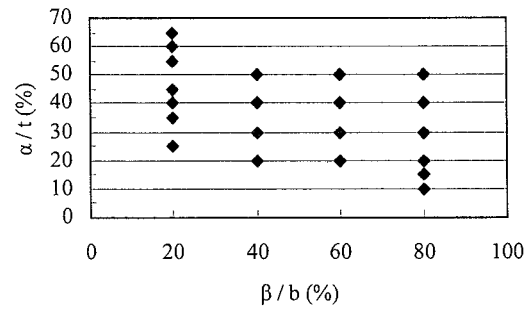
2.1 解析モデル

解析モデルは図-1 に示すような、中心位置にサイズ $\alpha \times \beta$ (板厚方向 \times 板幅方向) で、幅 0mm のき裂を挿入した幅 b 、厚さ t 、長さ $L=2b$ の平板である。図-2 にき裂モデルを示す。本研究では、き裂サイズの板厚および板幅に対する比 (α/t および β/b)、板厚方向のき裂中心位置 (h/t) に着目し、これらのパラメータが表面ひずみに及ぼす影響を調査するため、図-3 に示すようなモデルを設定した。モデルサイズは $t=35\text{mm}$ 、 $b=210\text{mm}$ である。なお、 h は裏面からき裂中心位置までの距離としたため、 h/t が大きくなるほどき裂は表面近くに存在することになる。また、 $h+\alpha/2$ は裏面から表面側のき裂先端位置までの距離となり、今回設定したモデルでは $\alpha/t=40\%$ 、 $\beta/b=20\%$ 、 $h/t=40\%$ の組合せで最大となる。

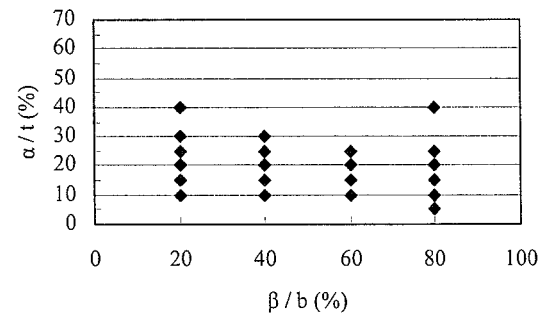
解析には汎用有限要素解析ソフトウェア MARC⁴⁾ を使用し、8 節点アイソパラメトリック要素 (No.7) でモデルを作成する。要素分割数は、 x 方向に 10、 y 方向に 40、 z 方向に 80 とする。荷重条件は一軸引張とし、一端に 70N/mm^2 の等分布荷重を載荷し、もう一端は固定する。解析は弾性範



(a) $h/t=30\%$



(b) $h/t=50\%$



(c) $h/t=70\%$

図-3 き裂モデル諸元

囲のみを対象とし、弾性係数は 200kN/mm^2 、ポアソン比は 0.3 とする。

2.2 表面ひずみの評価法

解析結果から、図-4 に示すき裂存在断面上端の A-A' に発生する z 方向ひずみを抽出し、次式よりひずみ増加率を求める。

$$\text{ひずみ増加率(\%)} = \frac{(\varepsilon - \varepsilon')}{\varepsilon'} \times 100$$

ここで、 ε : き裂がある場合の表面ひずみ、 ε' : き裂がない場合の表面ひずみ (3.5×10^{-4}) である。

また、図-5 に示す斜線部の範囲について、 z 方向ひずみ分布図を求める。

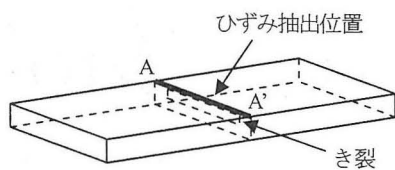


図-4 ひずみ抽出位置

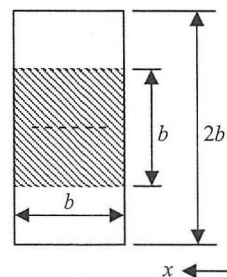


図-5 ひずみ分布図作成範囲

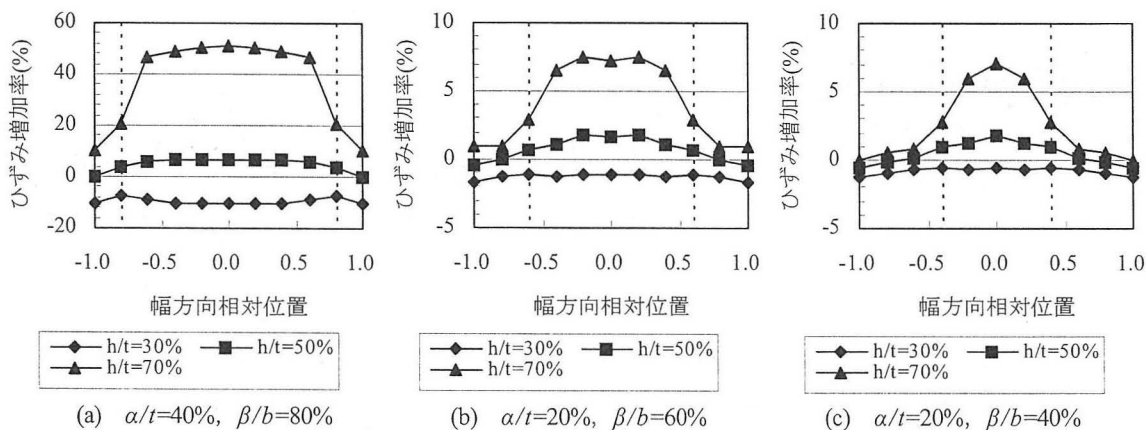


図-6 き裂位置の影響

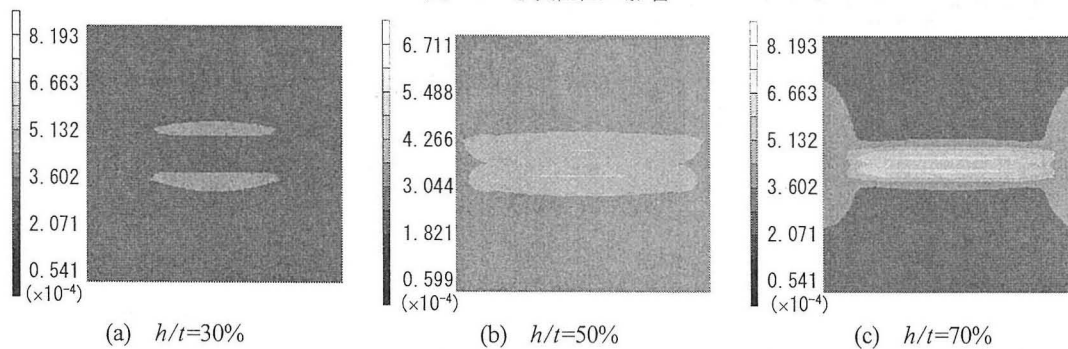


図-7 ひずみ分布図 ($\alpha/t=40\%$, $\beta/b=80\%$)

3. 表面ひずみに対する各パラメータの影響

3.1 き裂位置

図-6 は板幅方向のひずみ増加率の分布を示したグラフであり、参考のため幅方向のき裂先端位置も破線で示している。すなわち、破線間にはき裂が存在している。また、図-7 は図-6(a)に対応するひずみ分布であり、モデル全体での最大値と最小値の間を10分割して示している。

図-6(a)~(c)のいずれにおいても、き裂の位置が表面に近くなるほどひずみ増加率が大きくなっており、き裂板厚方向位置 h/t とき裂高さ α/t の組合せが同じであれば、同程度の最大値を示している。 h/t が30%の場合にはひずみが低下しているこ

とも見て取れる。また、ひずみ分布図を見ると、 $h/t=70\%$ ではき裂が表面に近い位置(き裂先端と表面との間隔が板厚の10%)にあり、き裂の影響によるひずみ変化はき裂部表面に集中することから、図-7(c)のようにき裂上で大幅なひずみ増加が発生している。そのため、ひずみ分布図から表面の局所的なひずみの変化を明確に判断できる。一方 $h/t=30\%$ では、図-7(a)のようにき裂部表面のひずみが周囲よりも低下していることがわかるものの、ひずみの変化量、変化範囲ともに小さく、表面局所的なひずみ変化を判断することは困難であると考えられる。

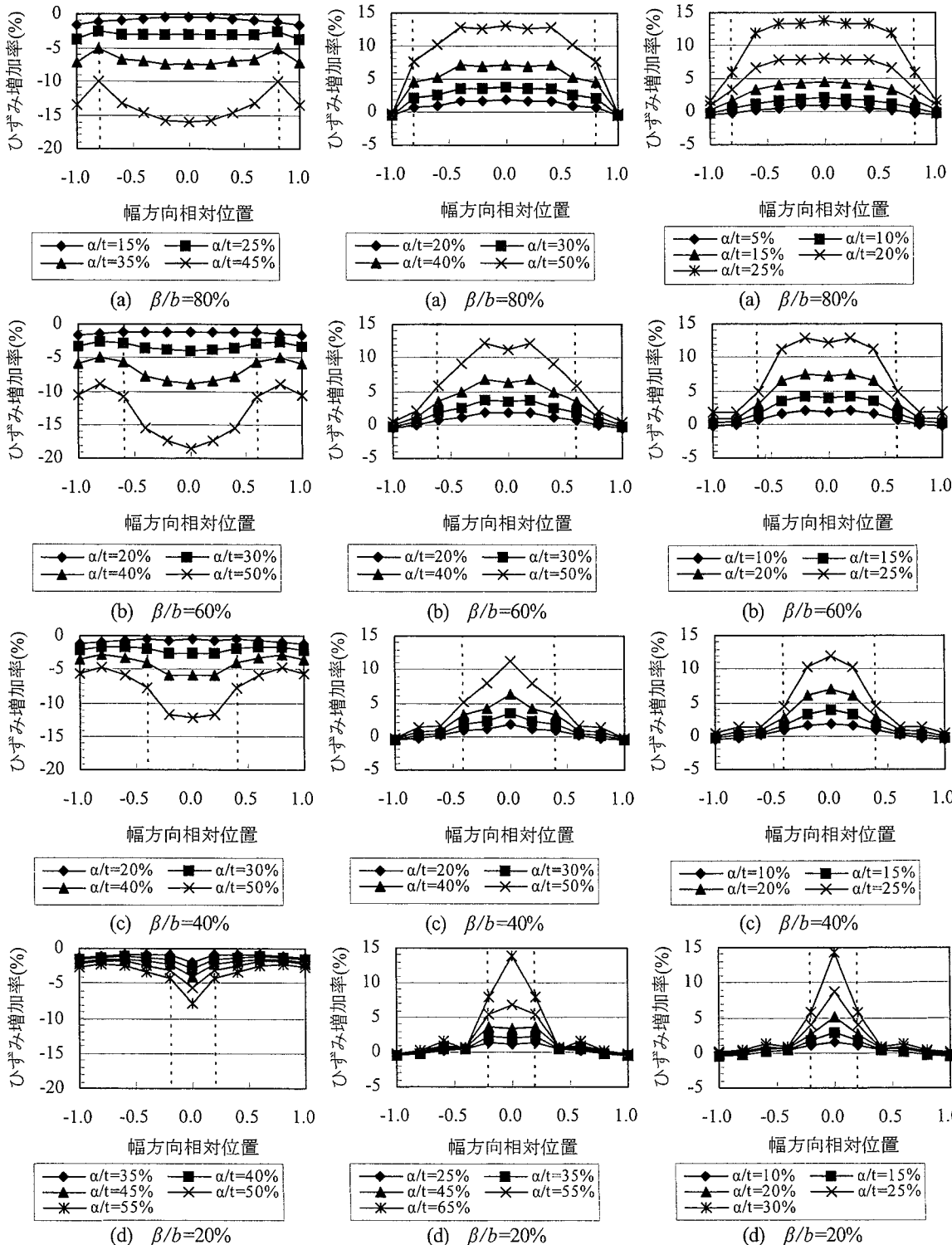


図-8 サイズの影響 ($h/t=30\%$)

図-9 サイズの影響 ($h/t=50\%$)

図-10 サイズの影響 ($h/t=70\%$)

3.3 き裂サイズ

図-8~10には、それぞれ $h/t=30\%$, 50% , 70% の場合の異なるき裂サイズに対するき裂線に沿つ

たひずみ増加率の分布を示す。

板厚方向き裂位置 (h/t), き裂幅 (β/b) を固定した場合のき裂高さ (a/t) の影響に着目すると,

α/t の増加に応じてひずみ増加率の最大値が2次曲線的に大きくなっているのがわかる。一方、き裂幅の影響に着目すると、当然のことながらき裂幅が広くなるに連れてひずみの変化が大きい領域も広がっているが、き裂高さ α/t が大きく、き裂位置が表面に近づくほど、き裂位置近傍におけるひずみ増加率の変化率が大きい。

3.3 き裂形状

図一11~12に、き裂断面積比(部材断面積に対するき裂面積の比)を一定としてき裂形状を変化させた場合のひずみ増加率を示す。

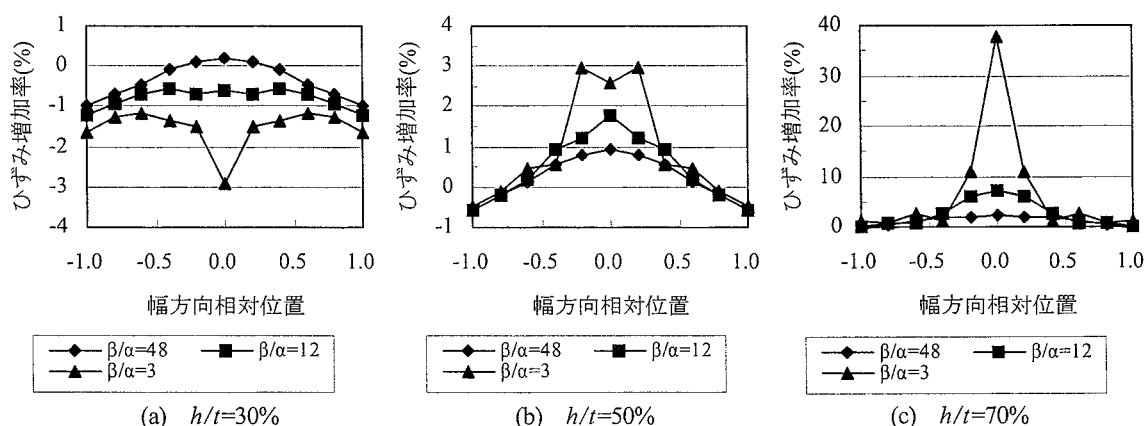
いずれのき裂断面積比においても、 β/α が小さいほどひずみ増加率の最大値が大きくなっている。すなわち、幅方向のサイズに比べ板厚方向のサイズが大きい形状ほど、ひずみの変化による検出が容易であると言える。その傾向はき裂位置が表面近くにある場合に顕著である。また、 $h/t=50\%$ において同じ縦横比を有するき裂による

ひずみ増加率を比較すると、き裂面積比の増加に対して、必ずしもひずみ増加率の値が大きくなる訳ではないことがわかる。

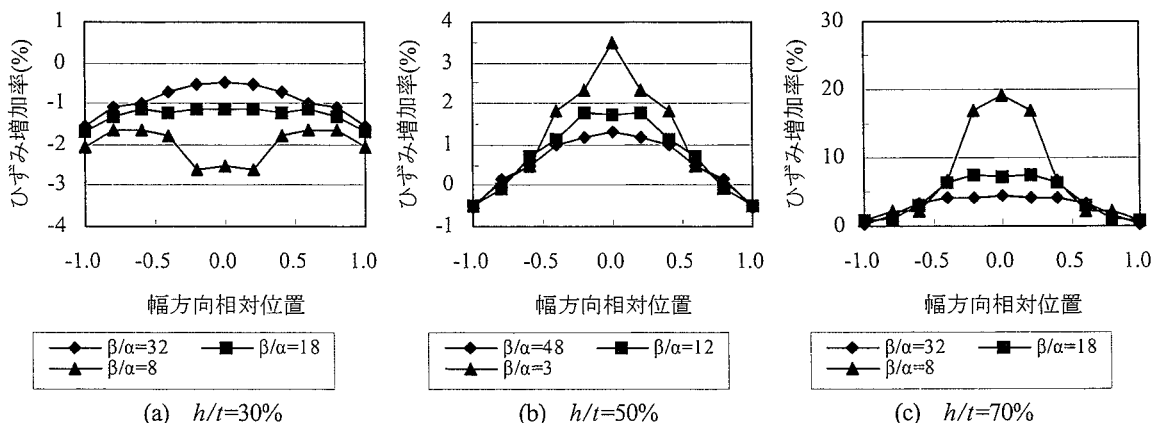
以上の結果から3つのき裂パラメータ(h/t , α/t , β/b)の表面ひずみに対する影響力を比較すると、 h/t が最も大きいと言える。また、き裂形状については、板幅方向のサイズ(β/b)よりも板厚方向のサイズ(α/t)の影響が大きい。

4. 検出可能なき裂サイズ

図一13は、それぞれの解析から得られた着目位置におけるひずみ増加率の最大値を代表値として取り出し、各 β/b ごとの α/t とひずみ増加率の関係から、ひずみ増加率2%, 4%, 6%, 8%, 10% ($h/t=30\%$ ではマイナスとする)での α/t を直線補間より計算して得られた、き裂サイズとひずみ増加率の関係である。き裂の位置が表面から深くなるほど、 β/b の減少に伴う α/t の増加が大きくなっていることがわかる。き裂先端位置が表面付近



図一11 き裂形状の影響(き裂面積比8%)



図一12 き裂形状の影響(き裂面積比12%)

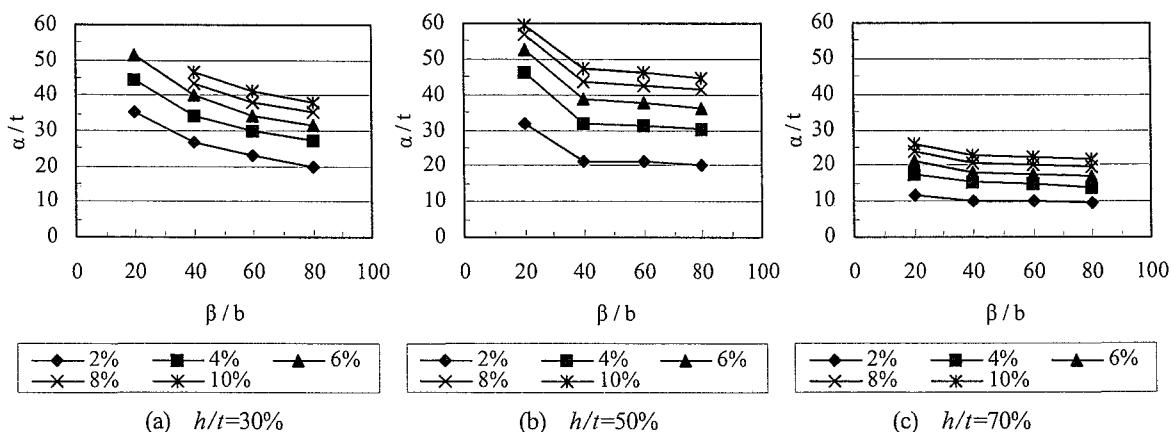


図-13 き裂サイズとひずみ増加率の関係

の場合、応力集中によるひずみ変化範囲が狭くなるため、 β/b の影響はき裂上部の表面に集中するが、位置が深くなるほど応力集中によるひずみ変化範囲が広がるなり、 β/b の影響も表面の広い範囲に及ぶと考えられる。

図-13に基づくと、仮にひずみ増加率2%を検知できる表面ひずみの測定精度であれば、 $h/t=30\%$ の場合、 $\beta/b=80\%$ では $\alpha/t=19.8\%$ 、 $\beta/b=20\%$ では $\alpha/t=35.3\%$ までのき裂検出が可能である。 $h/t=50\%$ の場合、 $\beta/b=80\sim40\%$ では $\alpha/t=20.4\sim21.3\%$ となり、 α/t の検出可能サイズにほとんど変化がないのに対し、 $\beta/b=40\sim20\%$ では α/t の検出可能サイズの変化は大きくなっており、 $\beta/b=20\%$ では $\alpha/t=32.0\%$ までのき裂サイズの検出が可能である。 $h/t=70\%$ の場合、 $\beta/b=80\sim20\%$ では $\alpha/t=9.4\sim11.8\%$ となり、 β/b の変化による α/t の検出可能サイズの変化はほとんどなく、 $\beta/b=40\sim20\%$ においても α/t の検出可能サイズの変化は小さい。

5. まとめ

本研究では、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について弾性解析により検討した。しかし、対象とした継手形式、き裂形状・位置などは限られたものであり、今後より広範に幅厚比やき裂の

位置・サイズなどのパラメータの組み合わせを変化された解析を実施するとともに、実験的な検討を実施し、スペックル干渉法での内部き裂検出の可能性をより詳細に検討する予定である。最終的には、広範なパラメトリック解析結果やFEMと最適化手法あるいはパラメータ同定手法との組合せに基づくき裂の位置やサイズの推定方法を確立できればと考えている。

謝辞

本研究の一部は、日本學術振興会科学研究費補助金(基盤研究B, 課題番号14350264)の研究助成を得て行った。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会；鋼橋の疲労，1997.5
- 2) 神原天鳴，松田浩，下郡康二，崎山毅，坂上直美：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.519-524，2003.11.
- 3) 山口一郎：レーザースペックルひずみ計と最近の展望，溶接学会誌，第73巻，第7号，pp.24-28，2004
- 4) MARC Analysis Research Corporation：MARC User Manual Volume A-Volume E，version K7，August 1997