

# 鋼床版デッキ貫通型き裂進展メカニズムの実験及びX-FEMによる検討

## Experiments and X-FEM analysis of fatigue cracks in orthotropic steel decks with trapezoidal stiffeners

栗原 康行\*, 川畑 篤敬\*\*, 鈴木 克幸\*\*\*  
 Yasuyuki Kurihara, Atsunori Kawabata, Katsuyuyuki Suzuki

\*工修, JFE 技研 (株) 土木・建築研究部 (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1 番 1 号)

\*\*工修, JFE エンジニアリング (株) 鋼構造事業部橋梁技術部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2 丁目 2 番地)

\*\*\* Ph.D., 東京大学准教授, 新領域創成科学研究科 (〒277-0882 柏市柏の葉 5-1-5)

Recently, the crack that penetrates the orthotropic steel deck plates with trapezoidal stiffeners has been founded in some bridges. This report shows the factor of this type of cracks by the experiments with small specimen, F.E.M. analysis, and X-FEM method. It was clarified that the important factors of this type of cracks were 1) the residual stress and the stress concentration at the tip of lack-of-fusion between U-rib and deck plate welding, 2) the deck plate thickness.

*Key Words: Orthotropic steel deck, deck plate, fatigue crack, X-FEM*

### 1. はじめに

鋼床版構造は、軽量で現場施工の自由度が高いため、長大橋や首都圏の軟弱地盤などで多用されている。一方で、走行する車輛の影響を直接受けやすく、溶接を多用した構造であることから、過積載車の増加などを背景に、鋼床版構造に疲労き裂が多数発生している。特に、近年、Uリブとデッキプレート（以下、デッキ）の溶接部からデッキ方向に進展するき裂（以下、デッキ貫通型き裂：図1-1）が問題となっている。このタイプのき裂によりデッキプレートに有害な変形が生じ、交通障害を引き起こす可能性があることや、き裂の発生および進展がUリブの内部に進むため、発見時のき裂長さが比較的長く、補修・補強が困難なケースも見られる。これらのことから、デッキ貫通型き裂に対する早急な対策が必要とされているが、このタイプのき裂発生および進展の原因については、未解明な部分が多い。

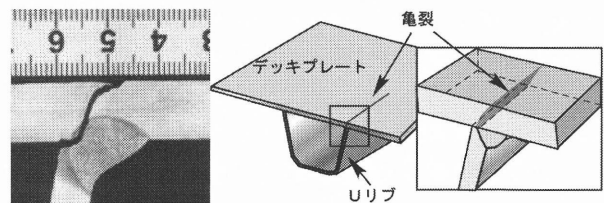
ここで、これまでに知られている実橋のデッキ貫通型き裂の発生例<sup>1),2),3),4)</sup>などを表1-1に示す。表中には、部位の諸元などを示しているが、いずれもわが国の道路橋示方書<sup>5)</sup>で示される最小デッキ厚12mm以下の箇所が発生していることがわかる。これは、デッキ厚が、デッキ貫通型き裂の発生と進展に大きな影響があることを示唆している。

一方、種々の室内実験<sup>6),7),8),9)</sup>などにより、デッキ貫通型き裂の発生を確認しているが、文献では、横リブ交差部、一般部いずれもき裂発生の可能性があることや、Uリブとデッキの溶接未溶着部（ルート部）先端に発生する応力集中や溶接残留応力の影響などについて示されている。

そこで、本研究では、デッキ貫通型き裂の発生・進展とデッキ板厚の関係を明らかにするため、デッキ板厚をパラメータとした横リブ周辺の部分模型による疲労試験を行うとともに、弾性解析により、Uリブとデッキの溶接未溶着部周辺の発生応力とデッキ板厚の関係について検討した。

また、溶接部の残留応力の影響に着目し、近年着目されている新しいき裂進展解析手法X-FEM(extended finite element method)を用いたデッキ貫通型き裂のシミュレーションを実施した。

本論文では、これらの実験的・解析的検討について述べる。



(a) 実橋損傷例 (b) イメージ図

図1-1 デッキ貫通型き裂

表1-1 デッキ貫通型き裂発生例

橋梁形式	国	き裂発見年	Uリブ形状	デッキ厚 (mm)
2主桁橋 (高架横断橋)	フランス	1977 (供用7年)	630×6 570×6	10
2主桁橋 (跳ね橋)	オランダ	1997 (供用7年)	325-300 -105-6	12
2主箱桁橋 (河川横断)	日本	1999 (供用15年)	320-210 -250-8	12

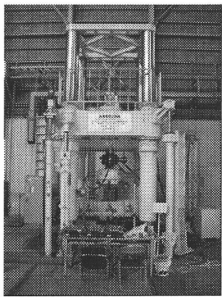
## 2. デッキ貫通型き裂の再現試験

### 2.1 試験概要

デッキ貫通型き裂の再現試験を行うに当たり、デッキ貫通型き裂の発生および進展性状を把握するために、き裂に最も近いUリブ内面にゲージが貼付可能である小型の模型試験を用いた。しかし、模型を小型化した場合、各部材の拘束条件を再現することが難しいため、拘束条件が比較的合わせやすい横リブ直上を試験対象とした。具体的な、試験条件を以下に示す。

#### (1) 試験装置

電気油圧式サーボ型高速疲労試験機を用いて載荷した。図2-1に試験機の写真及び性能を示す。



(a)試験機全景写真

(b)試験機性能

装置名称	高速サーボパルサ 高速疲労試験機
静的試験 最大荷重	静的±1000K N
動的試験 最大荷重	動的± 750K N
最大変位	±50mm
最大周波数	20Hz

図2-1 試験機概要

#### (2) 試験体

図2-2に示すように、鋼床版の横リブ交差部を対象とし、長さ1600mm×幅300mm×高さ624mmの部分模型とした。試験体の諸元は、デッキ厚12, 14, 16mm, Uリブ形状320×250×8mm, 中心間隔655mmで2本配置した。横リブは、1600×600×12mmとし、隅肉溶接によりデッキとUリブに接合した。3線交差部の溶接の影響を避けるため、3線交差部にR=35mmのスカロップを設けた構造とした。アスファルトの影響について検討した既往の研究<sup>10)</sup>などから、アスファルトは温度依存など外的要因の影響を強く受けることが指摘されているため、本試験はこれらの要素を排除するためアスファルト舗装無しで比較試験を実施した。

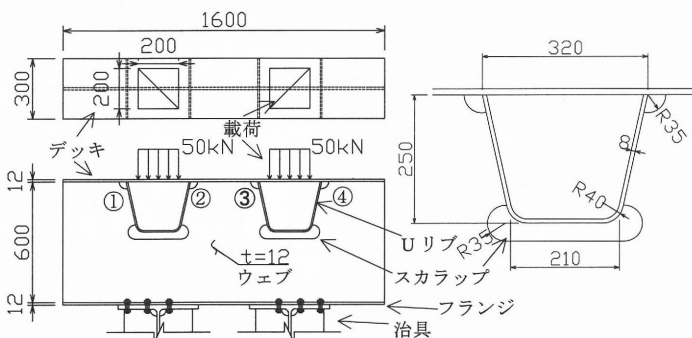


図2-2 試験体

#### (3) 溶接諸元

デッキとUリブの溶接は、MAG溶接（溶接ワイヤーMIX50S-1.2φ, 80%Ar+20%CO<sub>2</sub>, 電流350A, 電圧32V, 速度50CPM, 入熱量13.4kJ/cm）を用い、Uリブ端とデッキの間は自然開先でトーチ角度を約50度に保ち施工した。また、横リブとデッキおよびUリブの溶接はCO<sub>2</sub>半自動溶接を用いた。

#### (4) 載荷

載荷は、デッキ上面のUリブ内中心位置にシングルタイヤを想定した200×200mm硬質ゴム（板厚50mm）を介して50kN（荷重範囲10kN~60kN：周波数は、1~10Hz程度）の繰り返し荷重を2箇所同時に与えた。試験ケースは表2-1に示すようにデッキ板厚を12, 14, 16mmとし、12mmのものはバラツキを考慮して2ケースとした計4ケースとした。

### 2.2 実験結果

図2-4に示すように、実験の計測結果よりUリブ付け根から5mm内側に入った位置のひずみゲージ（橋軸直角方向）が最もデッキ貫通型き裂に対して感度が高いことが分かったため、このゲージを着目ゲージとした。この着目ひずみが15%低下（初期クラック）した載荷回数と、90%低下（き裂貫通）した時点の載荷回数を表2-2に示す。表中のき裂発生位置の記号は図2-2に示した。また、試験状況を図2-3に示す。

図2-5および図2-6にき裂の進展経路を示す。図2-5は、case1-1のき裂進展経路の模式図、図2-6は、case1-1, 2-1, 2-2の実験後の中央部断面マクロ写真である。これらの結果から、再現試験で発生した疲労き裂のデッキ上面への進展は、図2-5(a), (b)のように、実橋で発生したき裂（図1-1(a)）とほぼ同じ経路を辿っていることがわかった。また、図2-5に示すように、初期のき裂は、溶接部の未溶着部先端を起点として、HAZ（熱影響部）に沿って進展し（図中1)), その後HAZから離れてデッキ母材部を上方に進展（図中2))し、最後はせん断による破断によりき裂が貫通（図中3))している。最後の破断については、デッキ上面からもき裂が進展していることが他の位置の断面マクロ観察により確認された。

表2-1 試験ケース

ケース名	case1-1	case1-2	case2-1	case2-2
デッキ厚 (mm)	12	12	14	16
備考	比較1	比較2	増厚	増厚

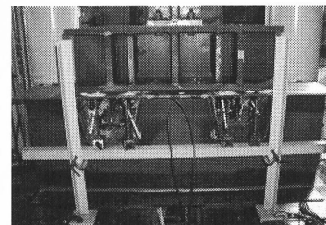


図2-3 試験状況 (case1-1)

図2-7に、縦軸に着目ひずみの値、横軸に(初期クラック・破断)回数をとった関係図を示す。この図から、デッキ厚12mmの2ケースでは、2万回程度で初期クラックが発生しているものがある。また、貫通する回数は130~515万回と大きなバラツキが見られる。一方、14,16mmでも初期クラックが55~110万回程度で発生しているが、貫通に至っていない。本検討では、シングルタイヤを想定した実験を実施したが、ダブルタイヤの影響を考慮すれば、よりき裂が進展しやすくなる可能性もある。

なる可能性もある。

図2-8は、横軸に初期クラック発生、および破断の回数、縦軸に着目ひずみ範囲の値を両対数グラフで示したものである。この結果からひずみ範囲の低下とき裂の長さはほぼ比例関係となっていると考えられる。また、デッキ厚12mmのケース case1-1, case1-2 で1万回、デッキ厚14,16mmのケースでは、2万回程度でひずみ範囲の低下が始まっていることから、初期クラックは早期に発生していると言える。

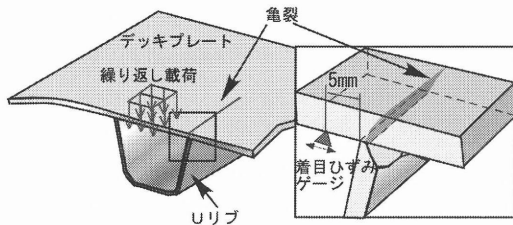


図2-4 着目ゲージ位置図

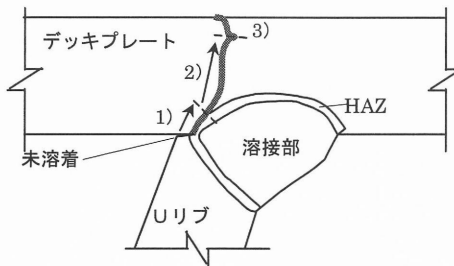
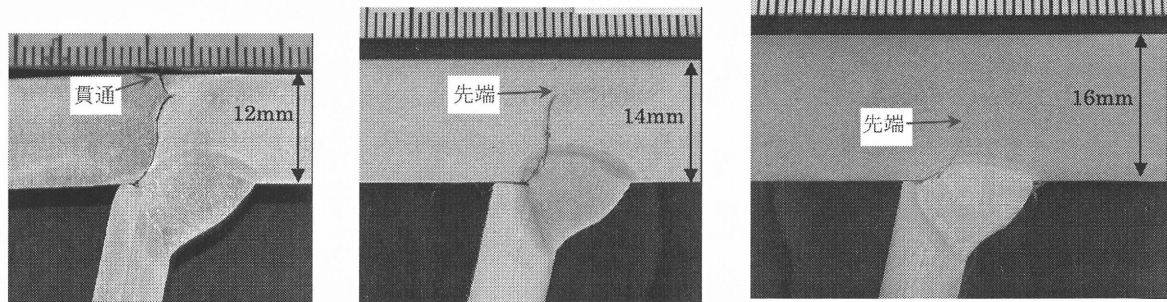


図2-5 デッキ貫通型き裂の進展経路

表2-2 実験結果一覧

ケース名	着目ひずみ	き裂発生位置と回数(回)				run-out回数
		①	②	③	④	
case1-1 (従来1)	初期クラック (15%低下)	未計測	400,000	200,000	未計測	-
	貫通 (90%低下)	未計測	1,300,000	run out	未計測	2,000,000
case1-2 (従来2)	初期クラック (15%低下)	2,000,000	100,000	450,000	1,950,000	-
	貫通 (90%低下)	run out	run out	5,150,000	run out	5,250,000
case2-1 (14mm)	初期クラック (15%低下)	550,000	2,150,000	1,500,000	700,000	-
	貫通 (90%低下)	run out	run out	run out	run out	20,000,000
case2-2 (16mm)	初期クラック (15%低下)	800,000	900,000	-	-	-
	貫通 (90%低下)	run out	run out	run out	run out	10,000,000



(a) case1-1 (t=12mm)

(b) case2-1 (t=14mm)

(c) case2-2 (t=16mm)

(130万回)

(2,000万回 run out)

(1,000万回 run out)

図2-6 貫通き裂状況 (case1)

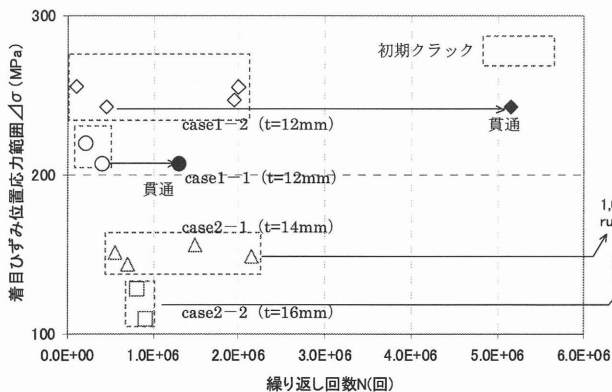


図2-7 初期クラック、き裂貫通の回数

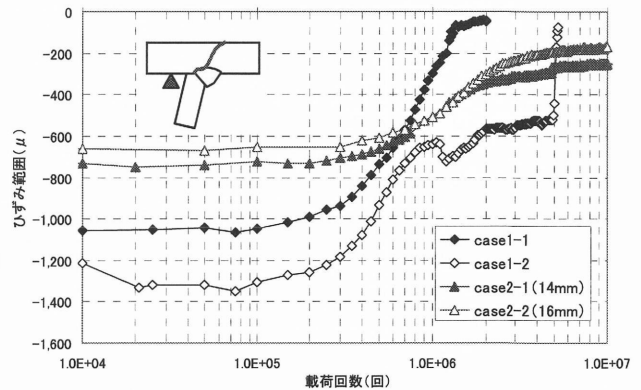


図2-8 着目部ひずみ値推移 (全ケース)

### 3. FEM 解析による検討

#### 3.1 弾性解析による検討

図 3-1 に示すように、前章で示した実験と同様な条件で Ideas Ver.6 により解析を実施した。解析手法は、疲労実験の結果などから弾性域での変形であることが明らかであるため弾性解析とした。解析モデルは、き裂の伝播が長手方向に同時に進むことを考慮し、Uリブとデッキに平面ひずみ要素を用い、横リブに平面応力要素を用いた。溶接未溶着部は接触による圧縮力の伝達を考慮し、接触面に GAP 要素を用い、き裂先端部は 2 重節点とすることで、Uリブ内側に圧縮力が伝達し、未溶着先端の応力が低減される現実の現象に近づけている。要素の最小寸法は 0.5mm 程度とした。また、省力化のため、4 分の 1 対称モデルとし、ウェブ下端は、固定端としている。荷重は、実験と同様の 50kN 相当の荷重を載荷した。

caseA1-1 は実験 case1 と対応した解析で、デッキ厚 12mm、caseA1-2 はデッキ厚 14mm、caseA1-3 はデッキ厚 16mm とした。

表 3-1 に溶接未溶着部近傍における最小・最大主応力のベクトル図（節点応力出力）を示す。最小主応力の最大値は、溶接未溶着部先端近傍にほぼ水平方向で作用している。一方、最大主応力の最大値は、最小主応力の最大値の 3 分の 1 程度となっており、ポアソン効果により生じたものだと考えられる。また、板厚を 12mm から 16mm に上げることで最小主応力は約 38%，最大主応力は約 43%，低減していることがわかる。なお、本解析の値は弾性計算で算出された値であるため、鋼材の降伏については考慮していない。

これらから、デッキ貫通型き裂が発生した载荷条件下では、Uリブとデッキとの溶接未溶着部近傍に発生する応力は圧縮応力が支配的であることが分かった。

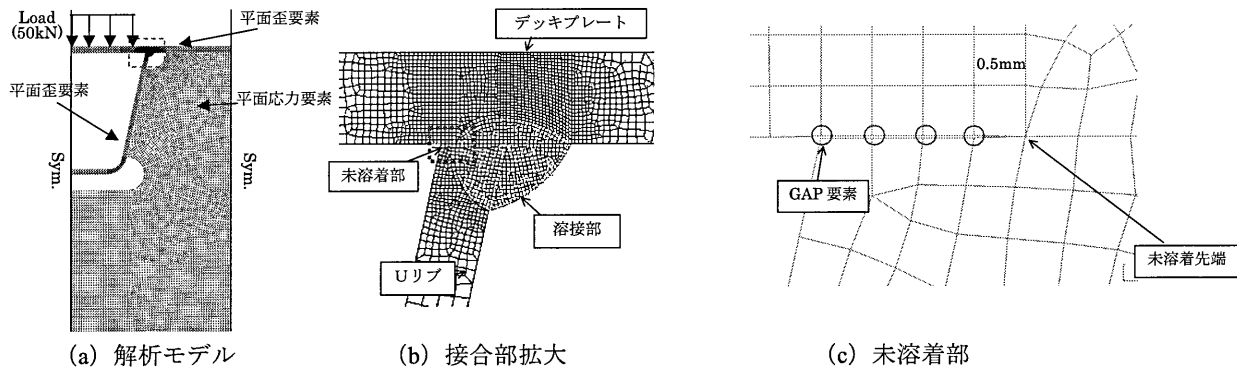


図 3-1 FEM解析モデル

表 3-1 解析結果

ケース名	最小主応力		最大主応力	
	MPa	%	MPa	%
caseA1-1 デッキ厚 12mm (実験モデル)	-504MPa	100%	175MPa	100%
caseA1-2 デッキ厚 14mm	-391MPa	78%	131MPa	75%
caseA1-3 デッキ厚 16mm	-313MPa	62%	100MPa	57%

### 3.2 X-FEMによる検討

#### 3.2.1 方針

圧縮力では通常き裂は進展しないと考えられているが、本検討のデッキ貫通型き裂の解析・実験から圧縮応力（最小主応力）と垂直な方向にき裂が進展していることがわかった。この原因について、X-FEMを用いたシミュレーションにより検討した。解析は、MATLAB R2006b上で作成したプログラムにより実施した。

#### 3.2.2 X-FEMの基本概念

X-FEMとは、Belytschkoら<sup>11)</sup>によって提案された有限要素法をベースとし、その要素内に不連続面を定義した解析法である。一般的な有限要素法によるき裂進展解析では、き裂の進展に伴うリメッシュ作業が必要であり、高度なモデリング技術および多くの人的作業を要する。一方、X-FEMは、き裂の進展過程でリメッシュを不要とする手法で、Babuskaら<sup>12)</sup>のPU-FEMの重み関数において重み関数として有限要素法の形状関数を使い、近似関数として要素内でのき裂の不連続性を表す関数およびき裂先端の特異場を表す関数を付加したもので、変位の近似式は次式で表される。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I} N_i(\mathbf{x}) \mathbf{d}_i + \sum_{j \in J} N_j(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{b}_j + \sum_{k \in C} N_k(\mathbf{x}) \sum_{l=1}^4 \psi_l(\mathbf{x}) \mathbf{c}_k^l \quad (1)$$

$N_i$  : 節点  $i$  に関する形状関数  
 $H(\mathbf{x})$  : き裂面の不連続性を表すヘビサイド関数  
 $\psi_l(\mathbf{x})$  : き裂端周辺の特異変位場を表す関数の基底

ただし、これらはき裂端を原点とし、き裂線に平行に  $x$  軸をとった局所直行座標系及びそれと対応する極座標系の関数である。また、 $J$  はき裂面周辺の変位の不連続性を考慮する節点の集合、そして  $C$  は、き裂端周辺の特異変位場を考慮する節点の集合である(図3-2参照)。すなわち、節点の内挿関数がき裂線によって完全に切断されるような節点は集合  $J$  に属し、内挿関数が完全には切断されず、その内部にき裂端を含むような節点は集合  $C$  に属する。そして  $\mathbf{d}_i, \mathbf{b}_j, \mathbf{c}_k^l$  は節点自由度である。

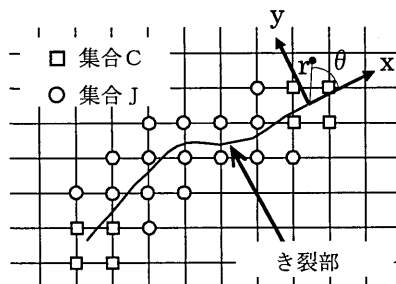


図3-2 X-FEM基本概念

き裂進展の計算は、まず、領域積分法<sup>13)</sup> (Domain integral method)により求められる  $J$  積分から、モード分離を行うため相互積分法<sup>13)</sup>を用いて、 $K_{I}$  値、 $K_{II}$  値を求める。次に、き裂が進展するときの進展方向角度  $\theta$  を決定する。 $\theta$  の決定には maximum circumferential stress criterion を用いた。これは円周方向の応力が最大となるような方向にき裂が進展するという仮説に基づいている。各計算ステップにおいて得られた  $K_{I}$  値、 $K_{II}$  値を用いて次式により進展方向角度が求まる。

$$\theta = 2 \arctan \frac{1}{4} \left( \frac{K_I}{K_{II}} \pm \sqrt{\left( \frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) \quad (2)$$

#### 3.2.3 鋼床版への適用

X-FEMを用いて先に示した実験モデルのデッキ貫通型き裂進展のシミュレーションを試みた<sup>14)</sup>。解析モデルは、図3-3に示す。溶接未溶着部として長さ2.2mmの初期き裂を与えた。また、図3-4に示すように、活荷重により大きな圧縮応力が作用しているが、その近傍には、残留応力による引張応力が作用しているため、初期のき裂が進展していると仮定し、溶接部に残留応力を想定した応力を与えて解析を実施した。

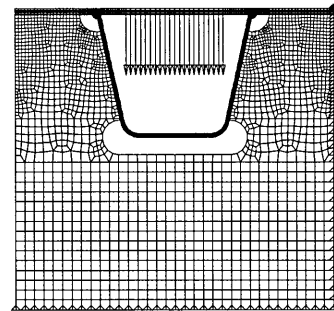


図3-3 構造モデル

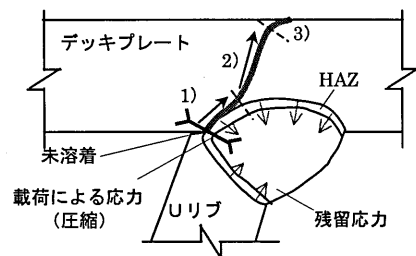


図3-4 き裂進展経路と溶接残留応力の関係

具体的には、図3-5に示すように、溶着金属部分に仮定の温度変化 ( $-400^{\circ}\text{C}$ ) を付与し、熱収縮を考慮した弾性解析結果を用いた。温度変化の値は、溶着金属が液状の状態から冷却していく段階で鋼材としての剛性が発現する範囲を仮定した値である。今後、溶接プロセスのシミュレーションなどから、より正確な値を得ることが可能だと考えられるが、簡便な手法として

の利用価値は高いと考えられる。

ところで、解析上、残留応力  $\sigma_0$  がある場合、応力  $\sigma$  とひずみ  $\varepsilon$  の関係は以下のように表すことができる。

$$\sigma = D\varepsilon + \sigma_0 \quad (3)$$

よって、残留応力を考慮した解析においては節点に対して下記のような等価節点力  $f^e$  を与えればよい。

$$f^e = \int_{vol} B^T \sigma_0 d(vol) \quad (4)$$

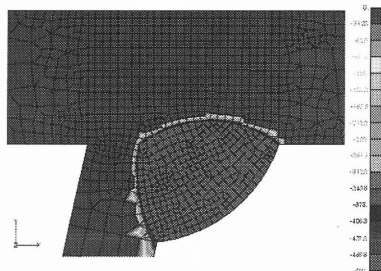
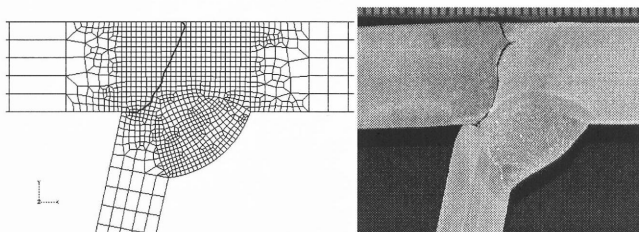


図 3-5 Uリブとデッキの溶接部近傍

これらの式を与えて解析した結果を図 3-6 に示す。解析結果 (図 3-6(a)) は実験結果 (図 3-6(b)) に近い挙動を示している。また、残留応力を考慮せずにき裂進展解析を行うと、き裂は進展しない ( $K_I$  値が負となる) ことを確認している。これらの結果から、鋼床版のデッキ貫通型き裂は残留応力の影響が強く、さらに現実に近い残留応力が求まれば、正確なき裂進展解析が可能であると考えられる。また、パリス則などを考慮することで寿命の計算も可能になると考えられる。



(a) シミュレーション結果 (b) 実験結果

図 3-6 き裂進展経路

#### 4. まとめ

本検討により、デッキ貫通型き裂に対して以下のことを明らかにした。

- ・横リブ近傍の小型試験によりデッキ貫通型き裂の再現実験が可能。
- ・Uリブ内の荷重でデッキ板厚 12mm の場合、き裂がデッキを貫通するが、14mm 以上であれば、き裂は生じるが貫通はしない。
- ・デッキ貫通型き裂が生じる条件の荷重では、溶接未溶着部先端の圧縮応力が卓越している。
- ・X-FEM により、溶接部の残留応力によりデッキ貫通型き裂が発生および進展する要因となる。

#### 参考文献

- 1) P.Mehue : Crack in Steel Orthotropic Decks, Proceedings Bridge Management Inspection Maintenance Assessment and Repair, Elsevier, London, 1990
- 2) H.Koesten and J.Wardenier : A New Type of Fatigue in Steel Orthotropic Bridge Decks, 5th Pacific Structural and Steel Conference, 1998
- 3) 井口進, 川畑篤敬, 山田健太郎 : オランダにおける鋼床版疲労損傷の補修・補強事例の調査報告, 橋梁と基礎, 2006年5月
- 4) 玉越隆史, 渡辺陽太, 中州啓太, 石尾真理 : 道路橋の鋼製部材の耐久性向上策に関する試験調査,
- 5) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 共通編, 鋼橋編, 2002年3月
- 6) J.Janss : Fatigue of Welds in Orthotropic Bridge Deck Panels with Trapezoidal Stiffeners, J.Construct. Steel Reserch 9, 1988 pp.14-154
- 7) 三木千壽, 館石和雄, 奥川淳志, 藤井裕司 : 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度, 土木学会論文集 No.519 I-32, 1995年7月
- 8) 寺尾圭史, 鈴木克弥 : 鋼床版横リブと閉断面縦リブ溶接部構造詳細の検討, 横河ブリッジ技報 No.25, 1996年1月
- 9) 森猛, 鴨原志保, 中村宏 : 溶接溶け込み深さを考慮した鋼床版デッキプレート・トラフリブ溶接部の疲労試験. 土木技術資料. vol.46, no.11, 2004年, p.34-39
- 10) 岩崎雅紀, 永田考, 西川武宏, 小塩達也, 山田健太郎 : アスファルト舗装が鋼床版の疲労に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.563 I-32, 1997年4月
- 11) Belytschko T, Black T. : Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. Int.J. Numer. Meth. Eng., Vol. 45(5), pp601-620 (1999)
- 12) Babuska, I and Menlenk, J.M. : The partition of unity finite element method, Int. J. Numer. Meth. Eng., Vol.40, pp727-758 (1997)
- 13) J.F.Yau, S.S.Wang, H.T.Corten : A mixed-mode crack analysis of isotropic solids using conservation laws of elasticity. J. Appl. Mech, 47, 335-341(1980)
- 14) 中川玲, 鈴木克幸, 栗原康行, 中住昭吾 : 鋼床版デッキ貫通型き裂の X-FEM き裂進展解析, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.141-147, 2007年3月