MF-Ⅲ小委員会

繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究　その3（解析WG）

この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

（一社）日本溶接協会原子力研究委員会MFD小委員会ナレッジプラットフォーム公開資料（2017年）：MF-Ⅲ小委員会「繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究（その3）（平成21年度最終報告書）」

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

小委員会の概要

MF-Ⅲ 小委員会　　(MF：Multi-axial Fatigue)

【研究題目】 繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の
健全性評価に関する研究　その3

【研究期間】 平成19年9月～平成22年3月

【研究体制】（役職・役職は研究機関当時）

主査： 矢川元基（東洋大学計算力学センター長　教授）

実験WGリーダー： 田中啓介（名城大学理工学部工学部教授）

数値解析リーダー： 菊池正紀（東京理科大学理工学部教授）

き裂進展WGリーダー： 高橋由紀夫（(財)電力中央研究所上席研究員）

幹事： 4機関，4名

委員： 17機関，24名

【委託元】 東京電力(株)，北海道電力(株)、東北電力(株)，中部電力(株)，
北陸電力(株)，関西電力(株)，中国電力(株)，四国電力(株)，
九州電力(株)，日本原子力発電(株)，電源開発(株)

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

本資料の構成

本資料は，MF-Ⅲ小委員会数値解析WGの主要な成果を以下の構成でまとめたものである．

3.3　複合荷重下の疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化
3.3.1　目的及び概要
3.3.2　疲労き裂進展シミュレーション技術検証データの採取(1)
3.3.3　疲労き裂進展シミュレーション技術検証データの採取(2)
3.3.4　疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その1
3.3.5　疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その2
3.3.6　疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その3
3.3.7　疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その4
3.3.8　疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その5
3.3.9　疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その6
3.3.10　疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その7
3.3.11　まとめ

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

■ 解析WGの活動目的

解析WGとしての課題は複合荷重下での疲労き裂進展シミュレーションの高度化，すなわち疲労により進展するき裂を連続的にシミュレーションすることを可能にする.

評価技術について検討する.

(1) 疲労き裂進展シミュレーション技術検証データの採取

(2) 2次元き裂に対する疲労き裂進展シミュレーション技術の確認

(3) 3次元平面き裂に対する疲労き裂進展シミュレーション技術の構築

(4) 3次元曲面き裂に対する疲労き裂進展シミュレーション技術の検討

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

課題(2)～(4)の混合モード下での疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化の手法が参加機関について異なる. 以下にそれぞれの手法を示す.

- エルミート型要素 + X-FEM
- 階層メッシュ, アダプティブ解析
- 重合メッシュ法, 自動要素分割
- SPH 法, メッシュレス法
- Dual BEM, メッシュ自動生成
- テトラ要素, 自動要素分割
- Smeared crack model

この課題の達成度の目安として, 課題(1)で採取されたデータとの比較・検討を目的とした.

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

(1) モードⅠの三点曲げ試験

材料	A2017−T3
ヤング率	70.6GPa
ポアソン比	0.3
応力比	$R = 0.1$
荷重の最大値	$P_{max} = 800\mathrm{N}$

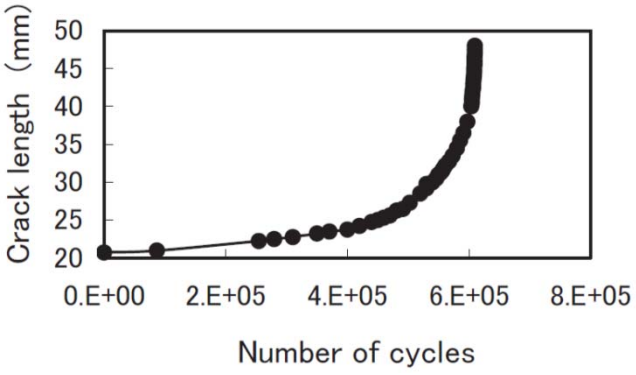


図 3.3.2-2 き裂進展量とサイクル数

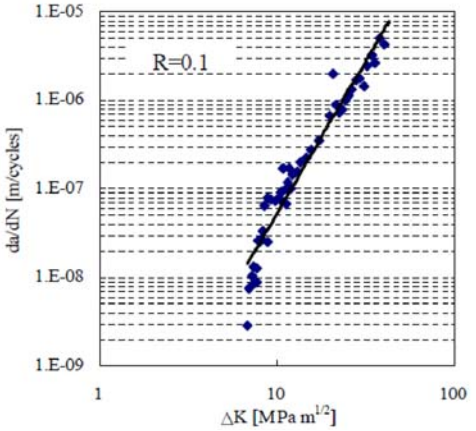


図 3.3.2-3 疲労き裂進展速度

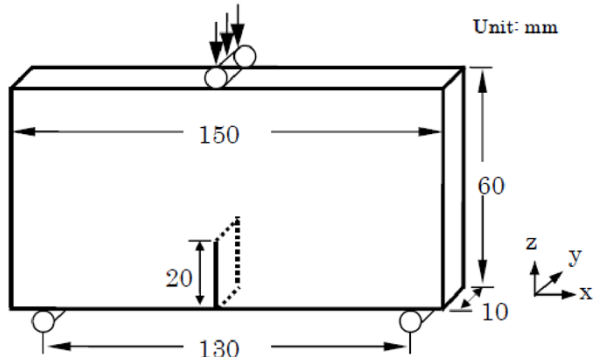


図 3.3.2-1 モードⅠ疲労試験の試験片

図 3.3.2-3 の有効応力拡大係数範囲から下記のパリス則の定数が得られた

$$\frac{da}{dN} = C\left(\Delta K_{eff}\right)^n \qquad C = 3.0\times10^{-9}, n = 3.43$$

図 3.3.2-4 ビーチマーク写真

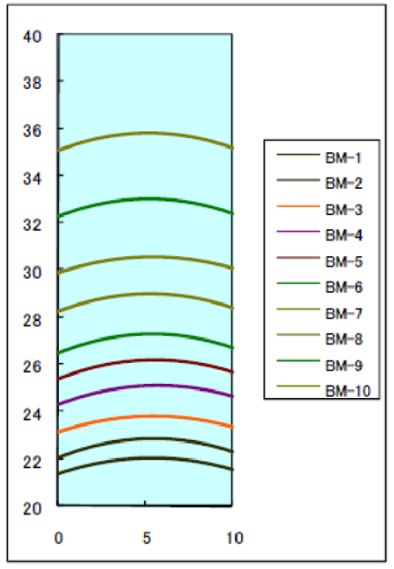


図 3.3.2-5 ビーチマーク形状

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

(2) モードⅠとモードⅡの三点曲げ試験

混合モード比	$K_{II}/K_I = 0.12$
応力比	$R = 0.1$
荷重の最大値	$P_{max} = 800\mathrm{N}$

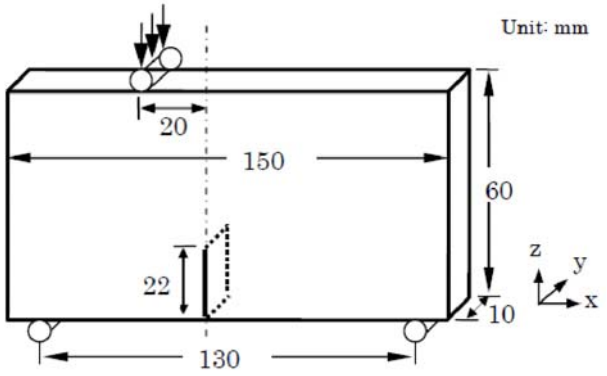


図 3.3.2-6 モードⅠ+モードⅡ疲労試験の試験片

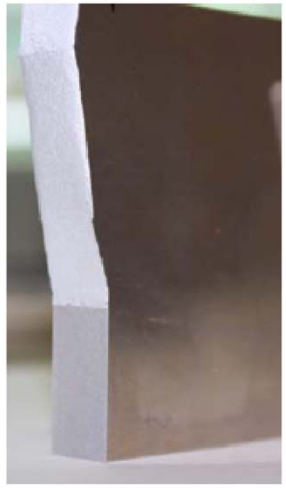


図 3.3.2-7 混合モード疲労破面

混合モード試験のため き裂は斜め方向に進展する. この進展角度は一定であり図のz軸に対して約15°である

ビーチマークに関してもモードⅠと同じ条件を導入しており, ビーチマーク形状はほぼ同じ形状となっている

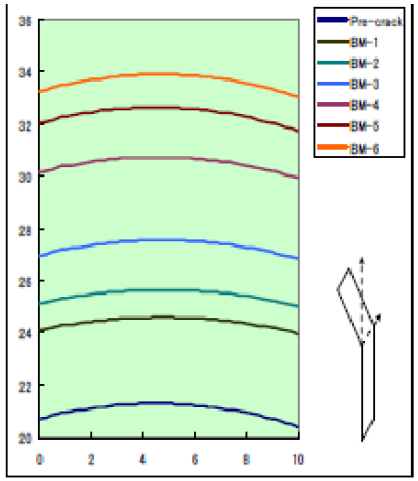


図 3.3.2-8 ビーチマーク写真　図 3.3.2-9 ビーチマーク形状

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

(3) モードⅠとモードⅡ モードⅢの三点曲げ試験

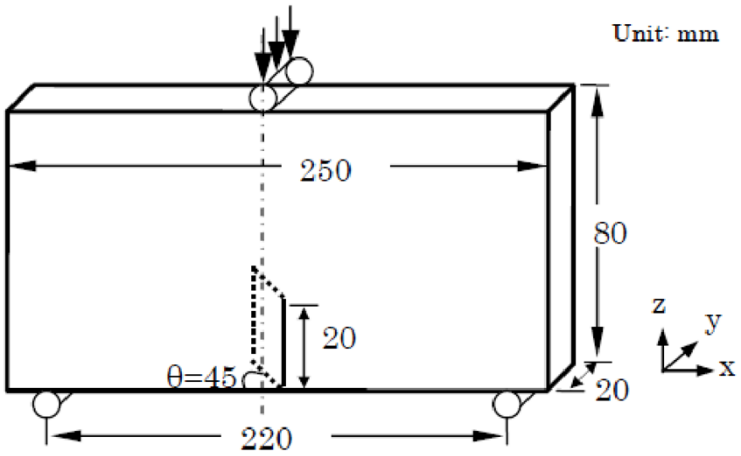


図 3.3.2-10 モードⅠ+モードⅡ+モードⅢ疲労試験の試験片

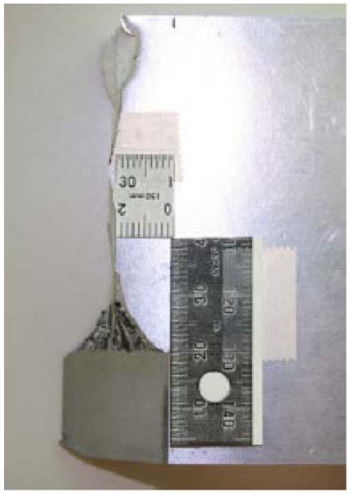


図 3.3.2-11 疲労破壊後の試験片

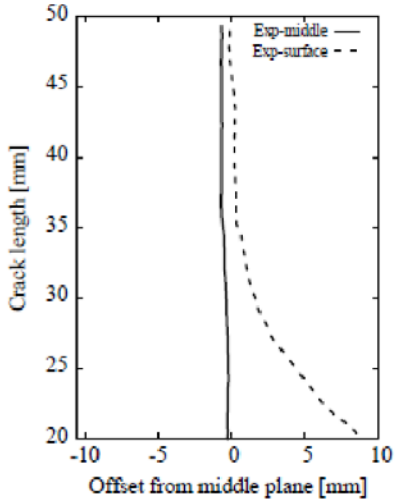


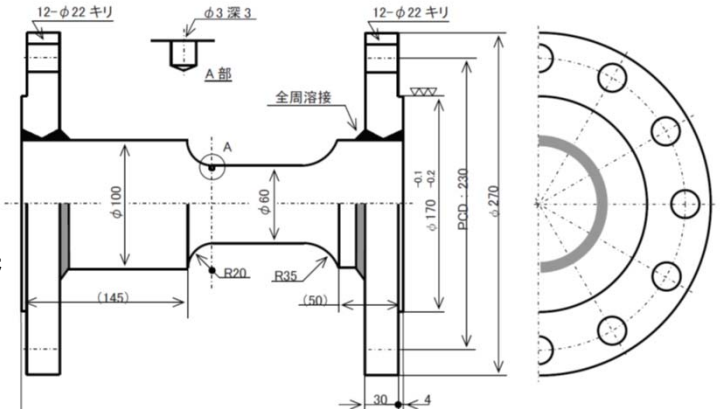
図 3.3.2-12 き裂進展経路

疲労き裂はノッチ先端からファクトリルーフを形成しつつ捩れるように進展する.
ファクトリルーフは進展につれて消滅し, 最終的にはき裂は板厚方向に平行なモードⅠき裂として進展している

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.3 疲労き裂進展シミュレーション技術検証データの採取(2)

供試材	炭素鋼 SS400 SUS316 鍛造材
試験片	段付丸棒試験片



- 純捩り
- 応力振幅 R=-0.9
- 応力振幅 140 MPa
- ビーチマーク/加熱着色によりき裂形状を記録

図3.3.3-1 疲労き裂進展シミュレーション解析の検証に用いる捩り試験片

表 3.3.3-1 炭素鋼 SS400 の疲労き裂進展試験結果

STEP	Crack length of C_1*(mm)	τ max (MPa)	Cycles for each step	Frequency/ Stress ratio R	Crack length* (mm)			Remarks
					C_2	C_3	C_4	
①	5	140	160,337	1Hz / R=-0.9	5	6	5.5	
②	6	140	941,668	5Hz / R=0.5	—	—	—	Beach mark
③	10	140	995,053	1Hz / R=-0.9	6.5	9.1	8.4	
④	10.5	140	1,570,200	5Hz / R=0.5	—	—	—	Beach mark
⑤	15	140	1,596,876	1Hz / R=-0.9	8.6	10	9.5	
⑥	15.5	140	1,980,641	5Hz / R=0.5	—	—	—	Beach mark
⑦	20	140	1,994,172	1Hz / R=-0.9	10.5	11	10	

*Symbols C_1 to C_4 indicate the cracks as shown in following figure.

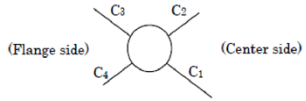
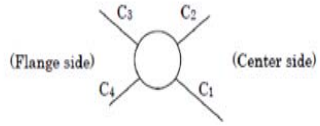


表 3.3.3-2 SUS316 鍛造材の疲労き裂進展試験結果

STEP	Crack length of C_1*(mm)	τ max (MPa)	Cycles for each step	Frequency/ Stress ratio R	Crack length* (mm)			Remarks
					C_2	C_3	C_4	
①	5	140	103,124	1Hz / R=-0.9	4.1	7.3	3.4	
②	10	140	216,761	1Hz / R=-0.9	5.7	10.0	6.5	
③	15	140	299,241	1Hz / R=-0.9	7.7	12.8	8.3	
④	20	140	341,369	1Hz / R=-0.9	8.7	14.5	9.5	

*Symbols C_1 to C_4 indicate the cracks as shown in following figure.



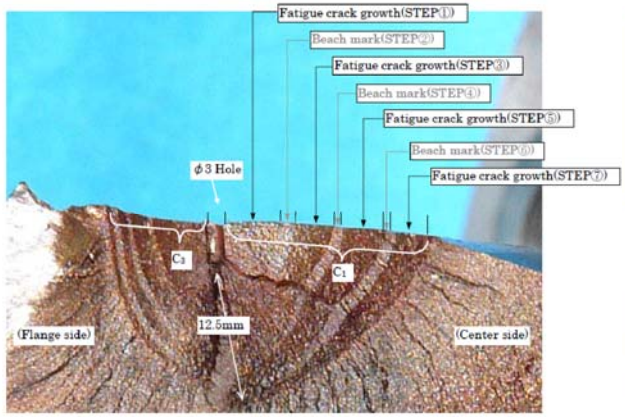


図 3.3.3-6 SS400 の疲労き裂破面の様子
($\tau_{max} = 140MPa, N = 1{,}994{,}172$)

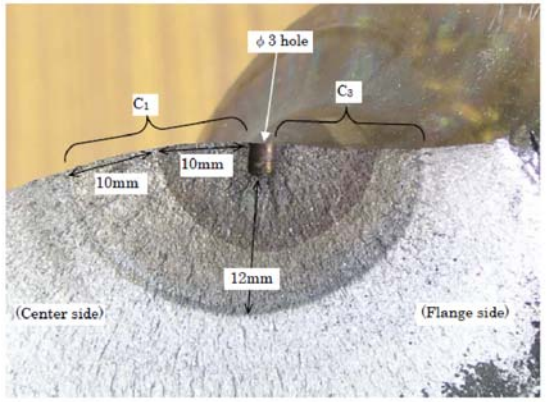


図 3.3.3-8 SUS316 の疲労き裂破面の様子
($\tau_{max} = 140MPa, N = 341{,}369$)

円孔から C1-C4 の4つのき裂が発生. SUS316ではお互いのき裂が直交し試験片軸方向にほぼ45度, SS400では軸方向に進展

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.3 疲労き裂進展シミュレーション技術検証データの採取(2)

- 炭素鋼SS400の組織観察を実施

SS400の捩り試験体においてき裂が軸方向に曲がった要因として，組織の優位な方向性が大きな影響を与えているものと考えられた

- 破面の3次元測定を実施

触針式の測定方法を採用（測定ピッチ0.15mm間隔）

破面は平面ではなく，湾曲しながら進展していることがわかった

以上により，多軸応力場における疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化の検証に資するデータが採取できた

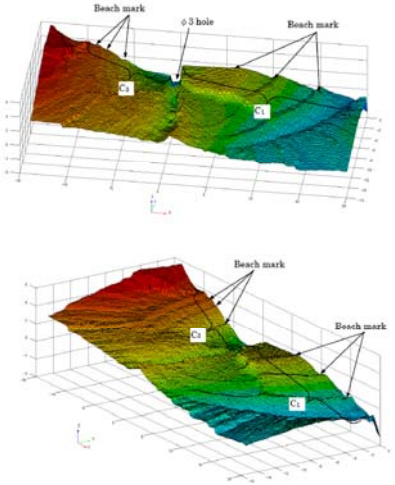


図 3.3.3-10 SS400の破面の3次元形状測定結果

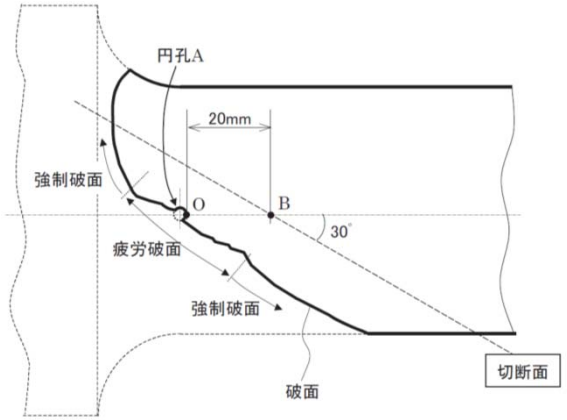
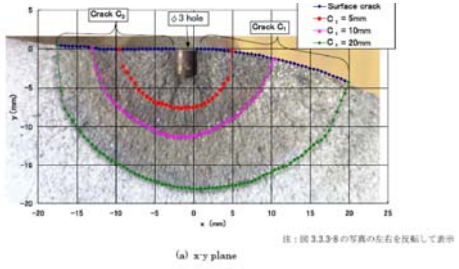


図 3.3.3-11 SS400試験片の切断位置



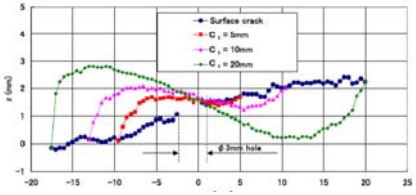


図 3.3.3-13 SUS316 鍛造材の破面の3次元形状測定結果

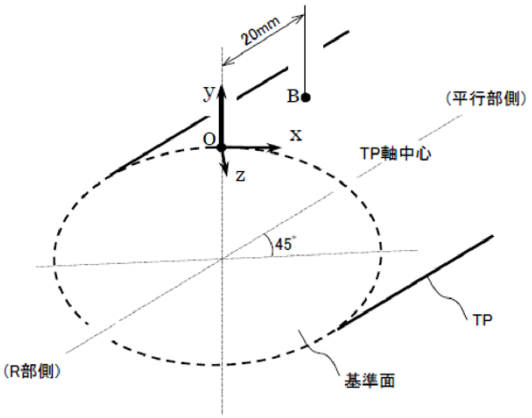


図 3.3.3-14 SUS316 鍛造材の破面の3次元形状測定データの座標系

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- 高精度3節点三角形要素の開発 (Hermite型内挿関数+X-FEM)

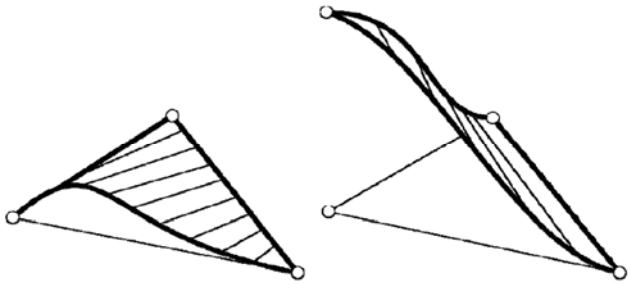


図 3.3.4-1 Hermite型三角形要素の形状関数

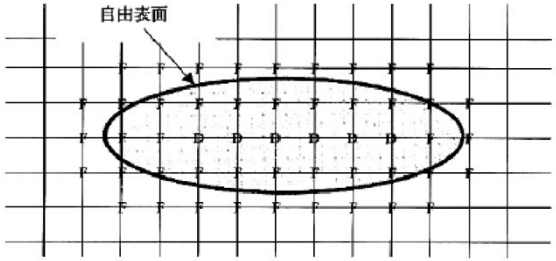


図 3.3.4-3 形状と一致しない要素分割

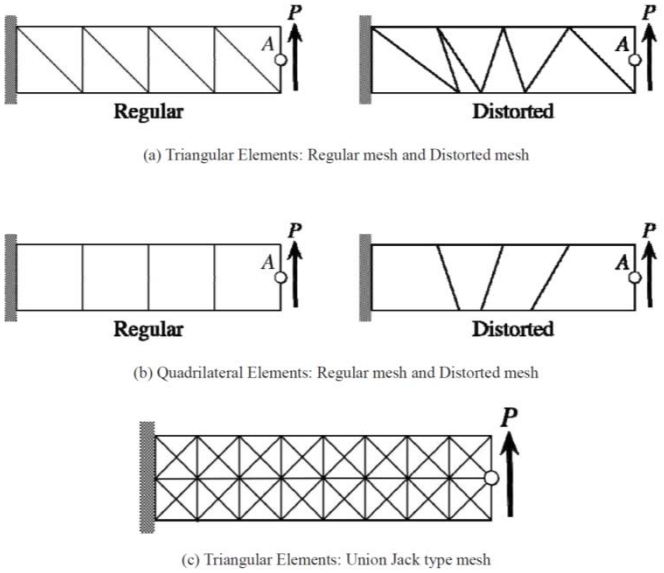


図 3.3.4-2 種々の要素パターンで分割された片持ちはり

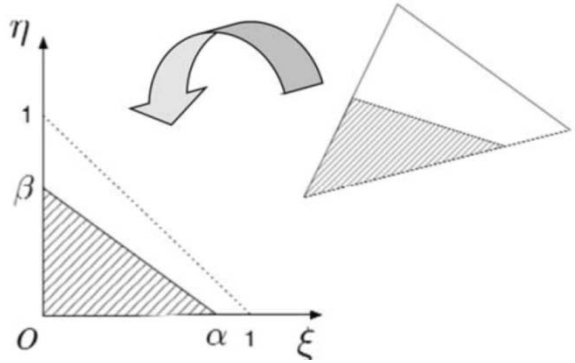


図 3.3.4-4 三角形要素の部分での積分

解析手法	エルミート型要素 + X-FEM
プログラム	内製
応力拡大係数の計算	変位外挿法

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- 高精度3節点三角形要素の開発 (Hermite型内挿関数＋X-FEM)

き裂近傍における要素内の変位場を次式で近似

$$u^h(x)=\sum_{I=1}^{m}\phi_I(x)u_I+\sum_{I\in C}\phi_I(x)\left\{\sum_{k=1}^{4}\gamma_k(x)a_I^k\right\}+\sum_{I\in J}\phi_I(x)H(x)b_I$$

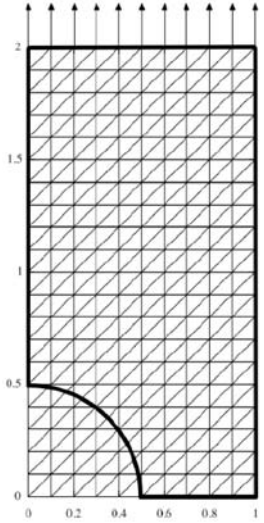


図 3.3.4-5 円孔付き平板の引張解析

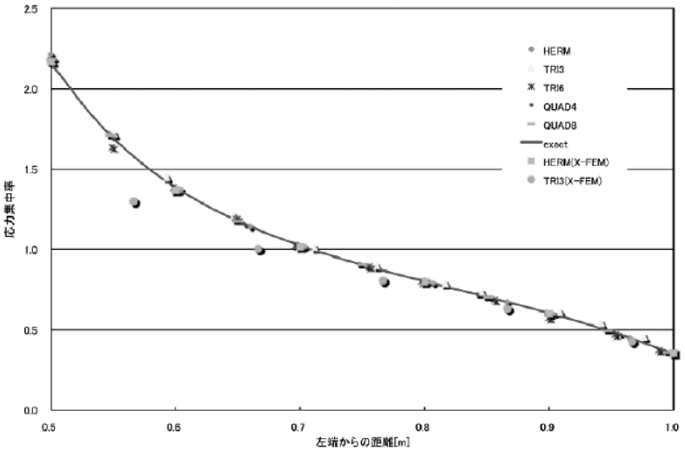


図 3.3.4-6 x軸上の応力分布

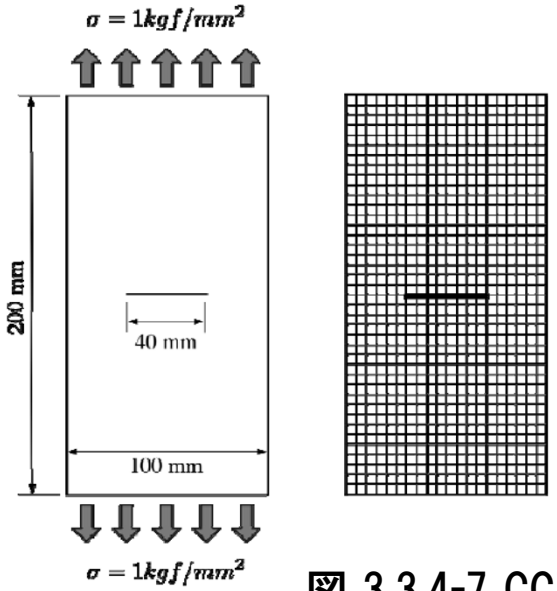


図 3.3.4-7 CCT試験片

表3.3.4-3 応力拡大係数の比較($\mathrm{kgf/mm^2\sqrt{mm}}$)

本法	長嶋ら	簡易法
7.1	7.2	7.6

得られた知見

本手法の利点として自然な定式化で様々な問題に適用できる，
要素内積分を解析的にできる，3次元問題への拡張も容易である

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- 階層メッシュとアダプティブ解析を用いたき裂進展解析 (2次元)

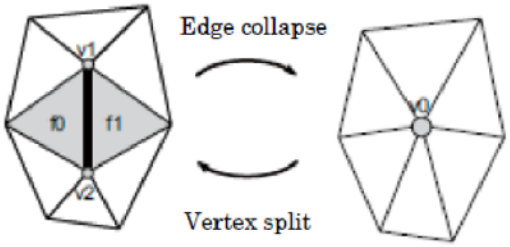


図 3.3.5-1 Edge collapse と vertex split (2次元)

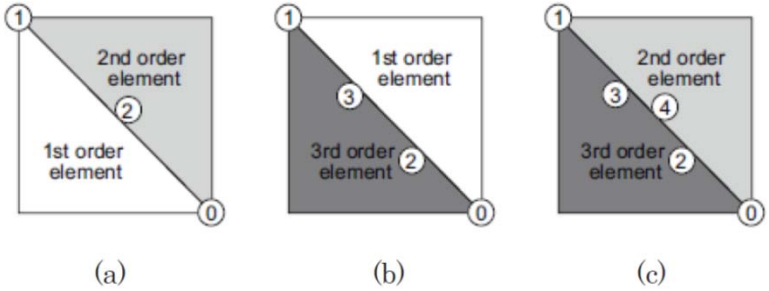


図 3.3.5-2 多点拘束

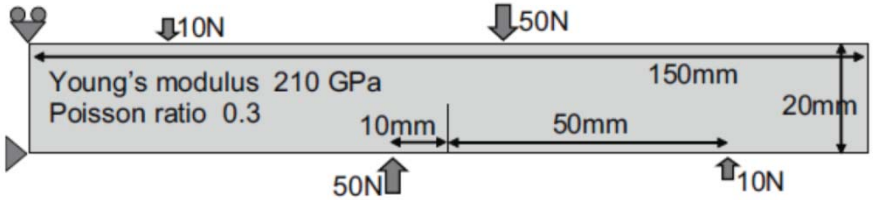


図 3.3.5-3 モデルと境界条件

表 3.3.5-1 応力拡大係数の比較

cs	cs/h	K1_F	K1_T	(K1_F- K1_T)/K1_F	K2_F	K2_T	(K2_F- K2_T)/K2_F
6	0.3	4.881	4.746	0.0283	25.83	26.03	-0.00781
8	0.4	3.851	3.654	0.0540	37.31	36.97	0.00922
10	0.5	3.090	2.983	0.0356	48.85	47.75	0.0230
12	0.6	2.321	2.214	0.0482	60.77	59.31	0.0247
14	0.7	1.419	1.428	-0.0064	74.25	73.12	0.0155

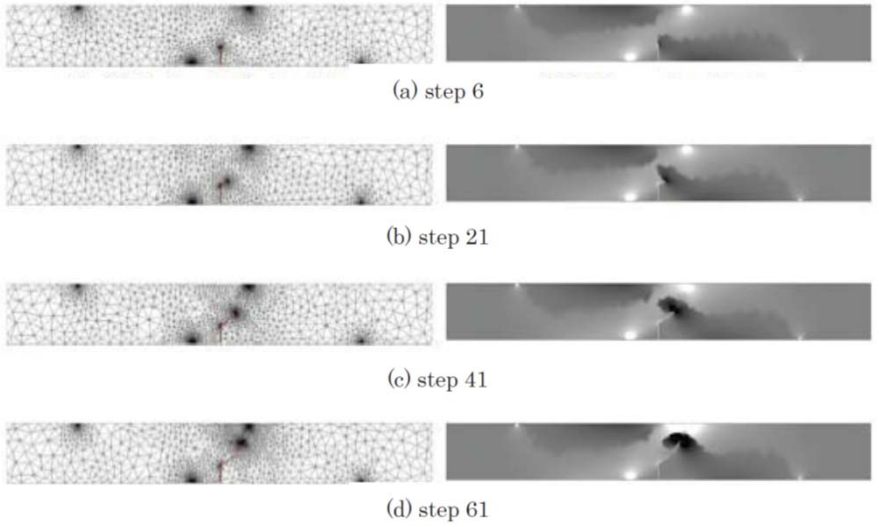


図 3.3.5-6 アダプティブメッシュと主応力分布

解析手法	階層メッシュ, アダプティブ解析
プログラム	ADVENTURE

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- 階層メッシュとアダプティブ解析を用いたき裂進展解析 (3次元)

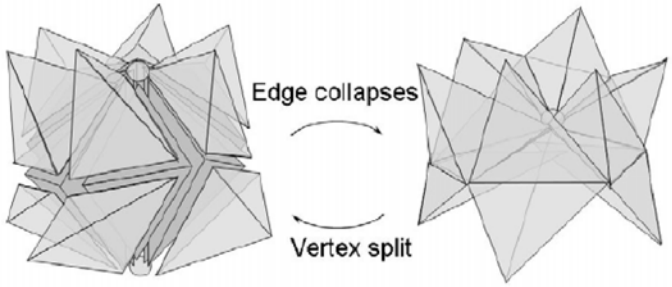


図 3.3.5-9 Edge collapse と Vertex split (3次元)

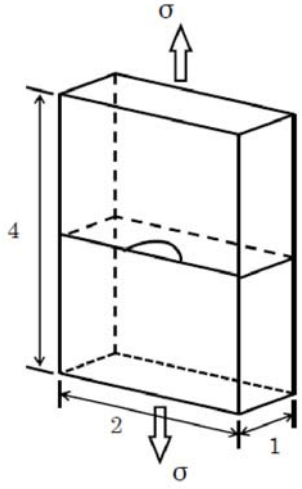


図 3.3.5-11 半楕円表面き裂モデル

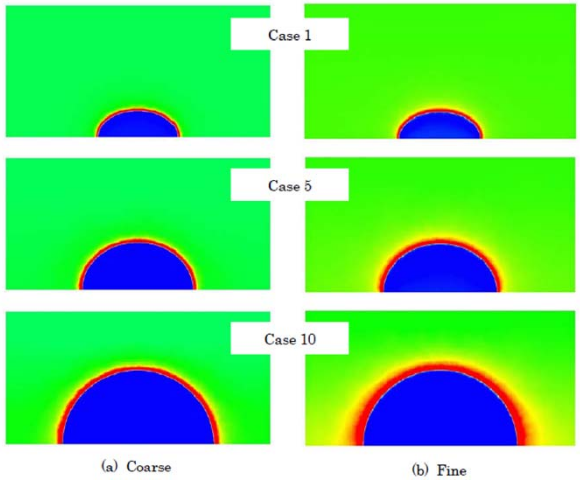


図 3.3.5-14 主応力分布

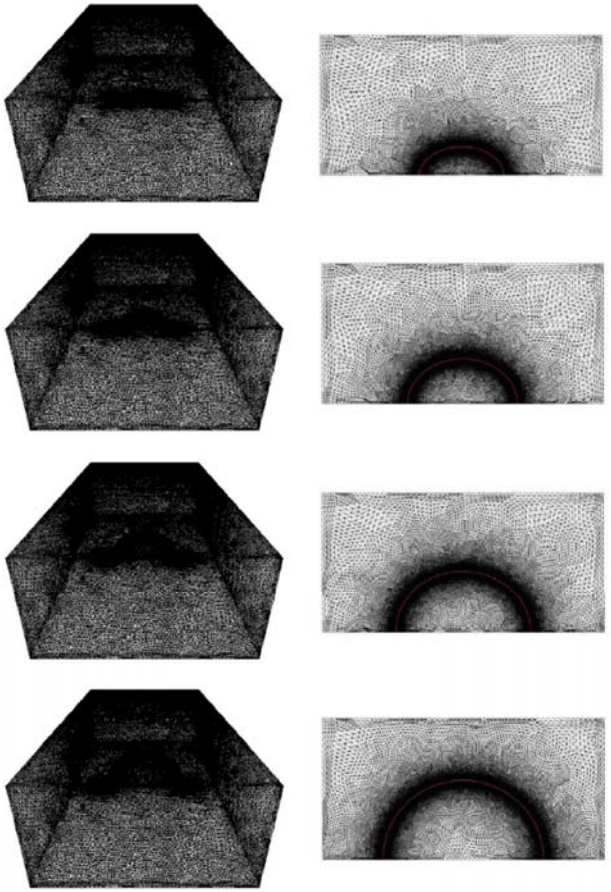


図 3.3.5-13 アダプティブメッシュ (Fine)

得られた知見

クラシカルなメッシング法と比較して大幅な時間短縮を図ることができた

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- 重合メッシュ法を用いた疲労き裂進展シミュレーション（3点曲げ試験）

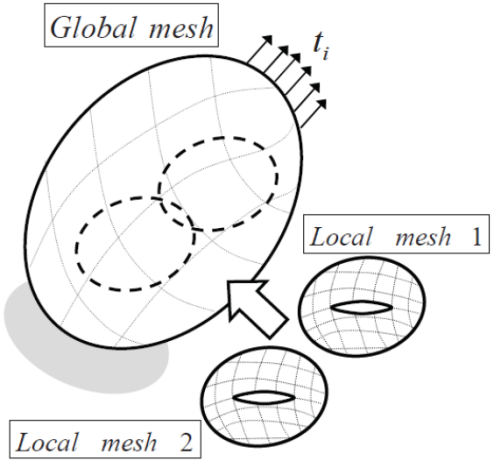


図 3.3.6-1 グローバルメッシュとローカルメッシュ

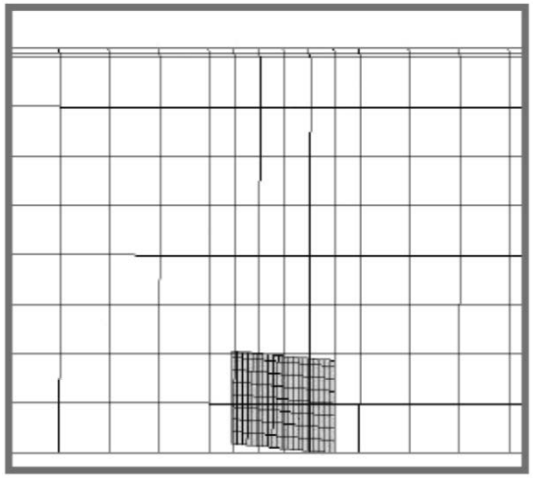


図 3.3.6-47 FEM モデル

解析手法	重合メッシュ法，自動要素分割
プログラム	内製
応力拡大係数の計算	VCCM

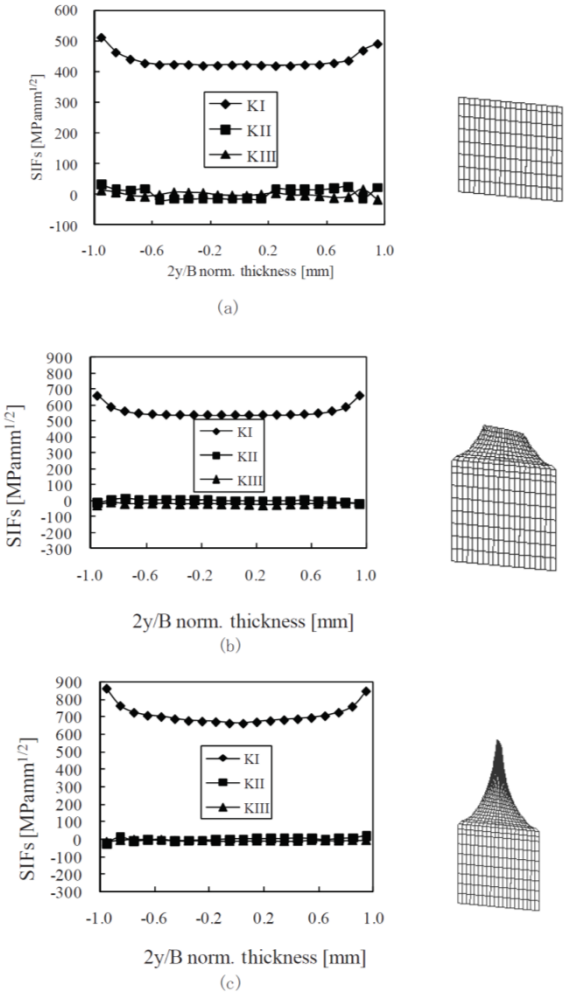


図 3.3.6-48 き裂形状と応力拡大係数の変化

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- 重合メッシュ法を用いた疲労き裂進展シミュレーション（段付丸棒試験片）

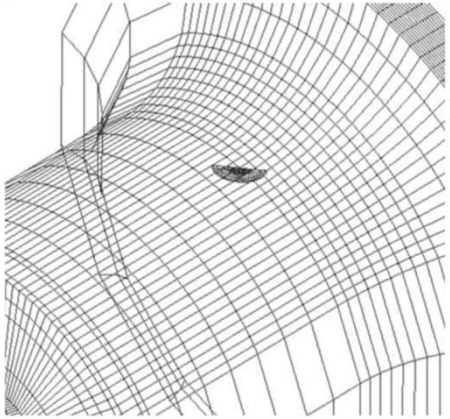


図 3.3.6-50 繰返しねじりを受ける表面き裂モデル

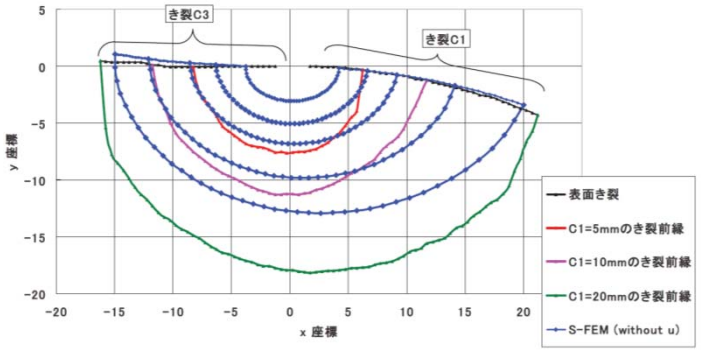


図 3.3.6-51 き裂形状について実験と数値解析との比較（開口比の考慮なし）

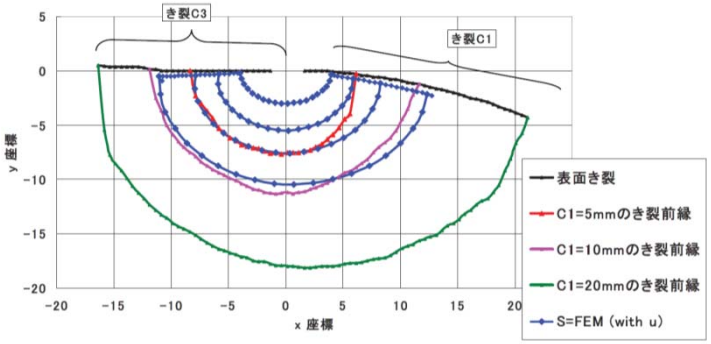


図 3.3.6-52 き裂形状について実験と数値解析との比較（開口比を考慮）

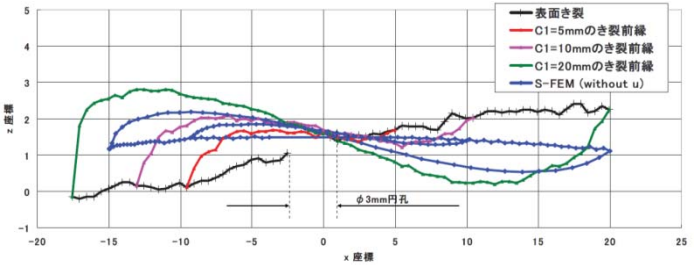


図 3.3.6-53 き裂面形状について実験と数値解析の比較

得られた知見

三次元き裂評価の分野では実験との比較・検証を通じていくつかの解決すべき重要な問題が明らかになった

これらは今まで数値解析が十分に行われなかったために見過ごされてきた問題である

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- SPH法を用いた疲労き裂進展シミュレーション (3点曲げ試験)

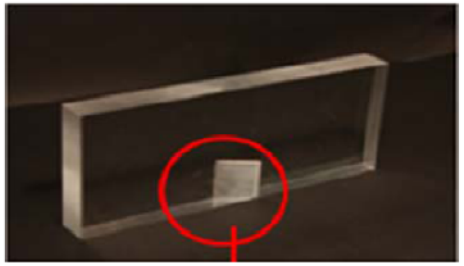


図 3.3.7-1 三点曲げ実験モデル

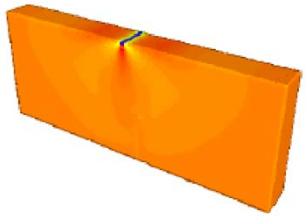


図 3.3.7-2 SPH 粒子モデル

解析手法	SPH 法, メッシュレス法
プログラム	内製
応力拡大係数の計算	J積分

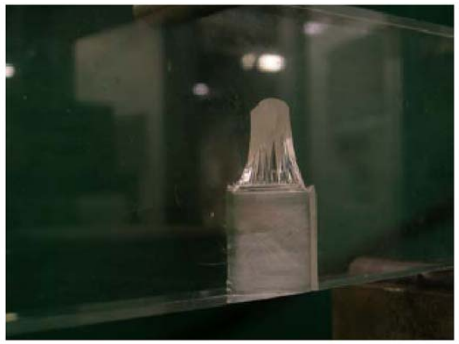


図 3.3.7-3 実験結果・クラック進展

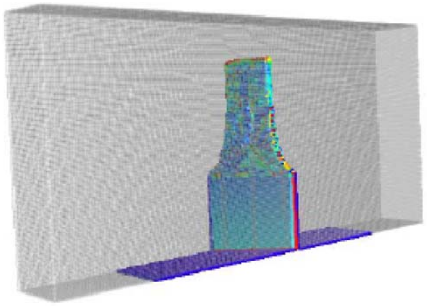


図 3.3.7-4 SPH解析結果

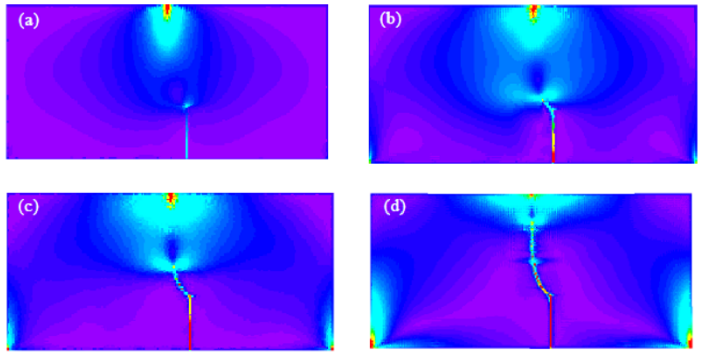


図 3.3.7-5 試験片表面におけるクラック軌跡

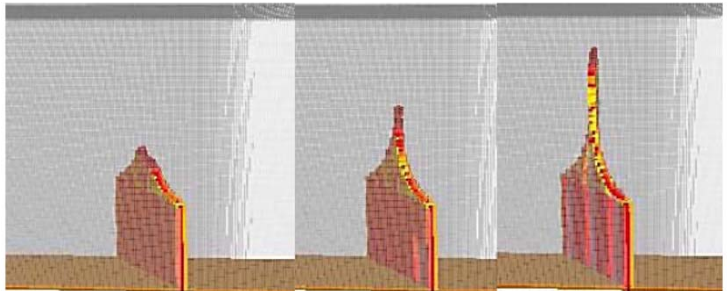


図 3.3.7-6 試験片内部を進むクラックの形状(SPH 解析結果)

クラック進展の挙動はほぼ同じように求められているがクラック先端形状は実験では弧状であるが, 解析結果は明確な弧状でなくやや直線に近い形状である

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- SPH法を用いた疲労き裂進展シミュレーション（段付丸棒試験片）

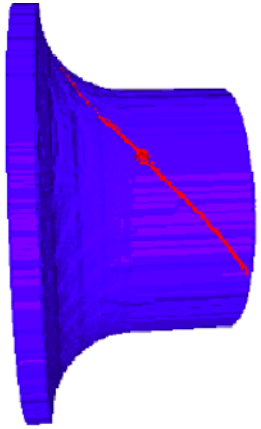


図 3.3.7-9 SPH 解析結果

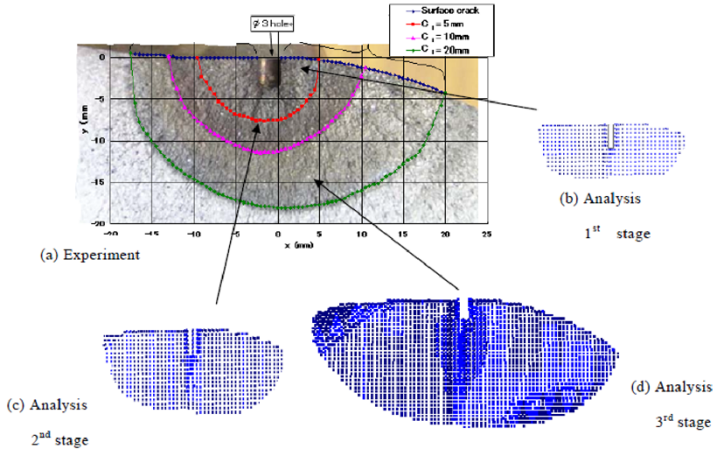
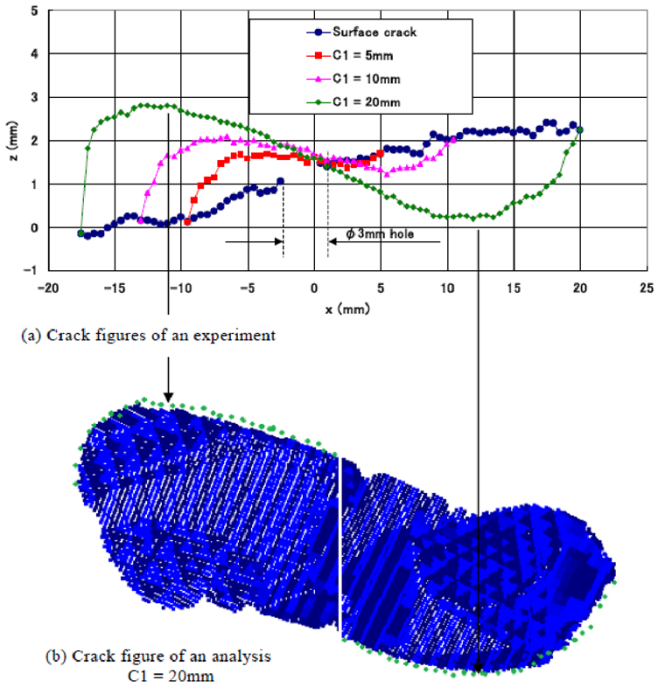


図 3.3.7-10 クラック形状の比較（実験と解析）



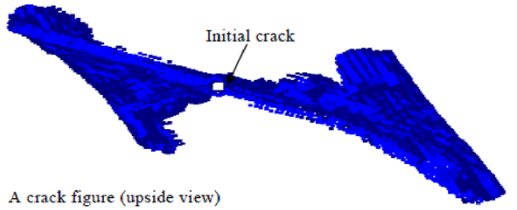


図 3.3.7-11 クラック形状の比較（実験と解析）

得られた知見

試験片が丸棒状であるため，また荷重が引張負荷と捩り負荷が重畳されているためクラック進展が大きくなる段階ではクラックも捩れて湾曲する

実験においてクラック形状と解析の結果はよく一致している

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- Dual BEMを用いた疲労き裂進展シミュレーション（段付丸棒試験片）

解析手法	Dual BEM, メッシュ自動生成
プログラム	内製
応力拡大係数の計算	変位外挿法

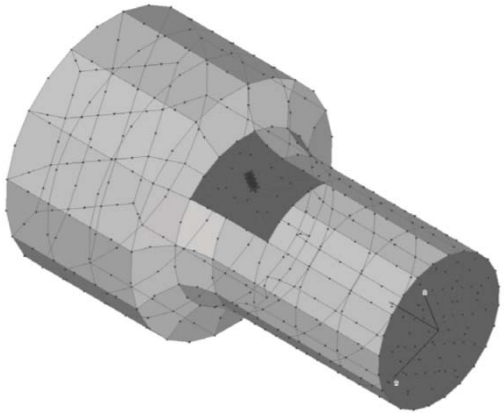


図 3.3.8-19 ベンチマーク問題のための Dual BEM メッシュ

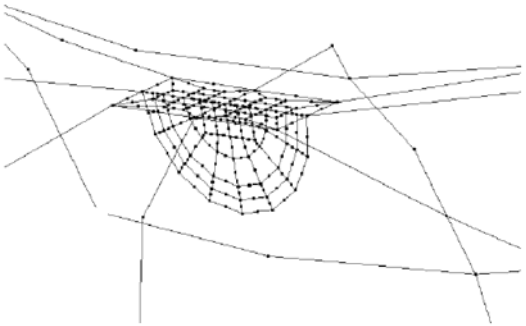
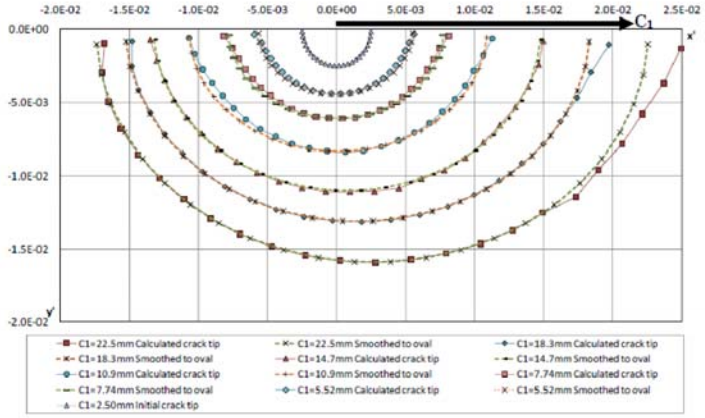
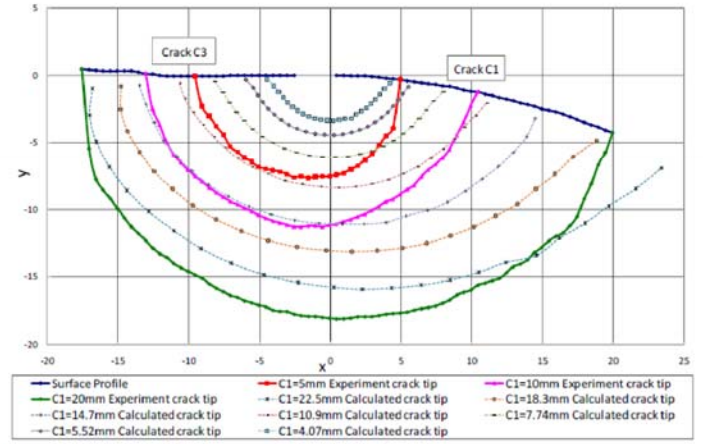


図 3.3.8-20 表面き裂部分



(a) Oval and predicted crack shapes in normalized coordinate.



(b) Comparison between experimental result and predicted result in actual coordinate.

図 3.3.8-21 Dual BEM によるベンチマーク問題き裂進展結果

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.8 疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その5

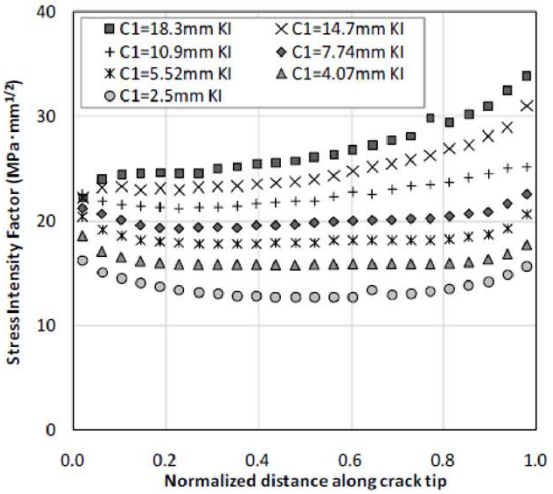


図 3.3.8-22 ベンチマーク問題の表面き裂全縁に沿った応力拡大係数 K_I

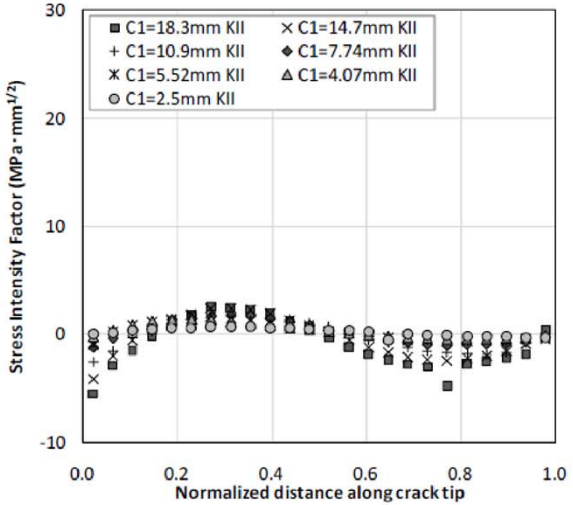


図 3.3.8-23 ベンチマーク問題の表面き裂全縁に沿った応力拡大係数 K_{II}

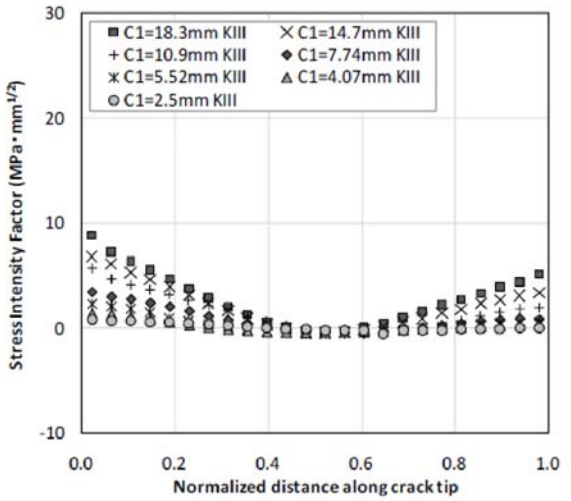


図 3.3.8-24 ベンチマーク問題の表面き裂全縁に沿った応力拡大係数 K_{III}

得られた知見

き裂初期ではフランジ側への進展速度が若干速い

最終的には平行部側へき裂が多く進展しているのがわかる

き裂が初期き裂平面内を進むと仮定しない場合にはき裂が大きく曲がることが予測される

課題としてK値のより精度の高い求め方およびクライテリアのさらなる検討が見出せた

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- 自動要素分割FEMを用いた解析（段付丸棒試験片）

解析手法	テトラ要素，自動要素分割
プログラム	内製
応力拡大係数の計算	VCCM

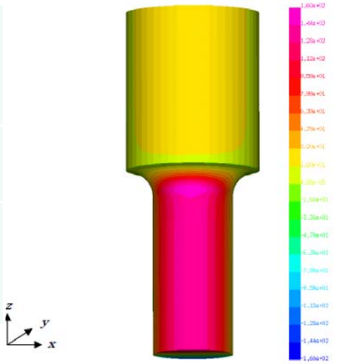


図 3.3.9-19 き裂なし段付き丸棒検証試験片の解析結果（せん断力τ_{zx}）

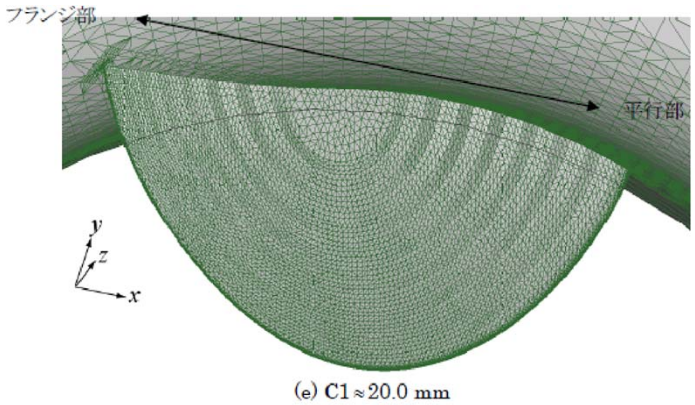


図 3.3.9-22 き裂進展に伴うき裂面形状の変化（初期き裂のアスペクト比0.8）

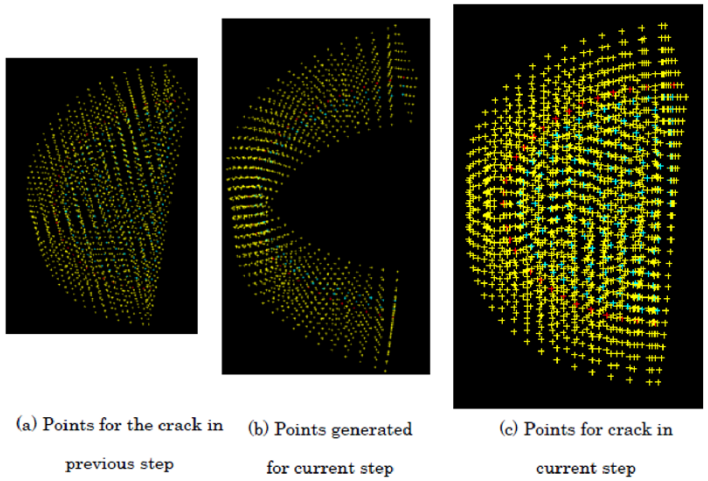


図 3.3.9-20 き裂進展問題でのメッシュ更新（き裂点群の生成）

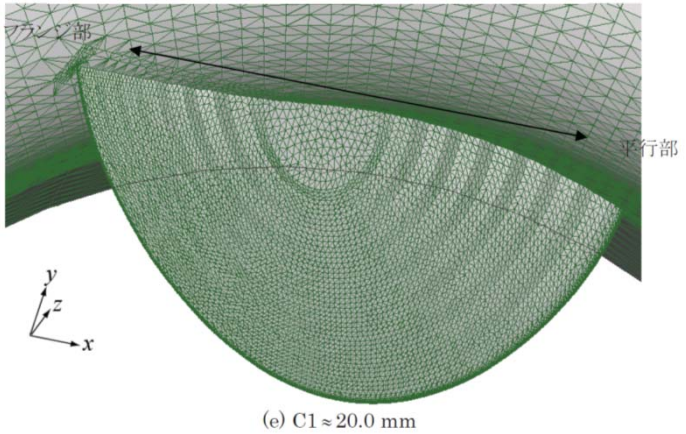
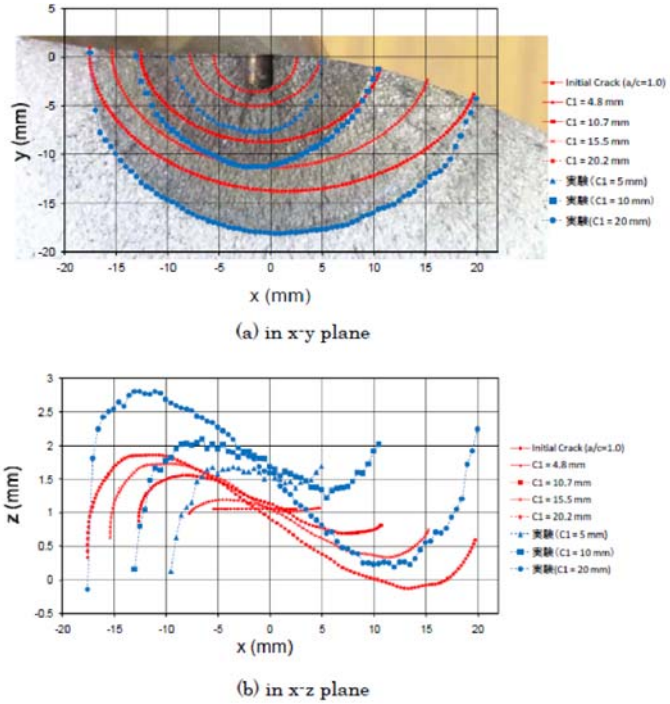


図 3.3.9-23 き裂進展に伴うき裂面形状の変化（初期き裂のアスペクト比1.0）

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

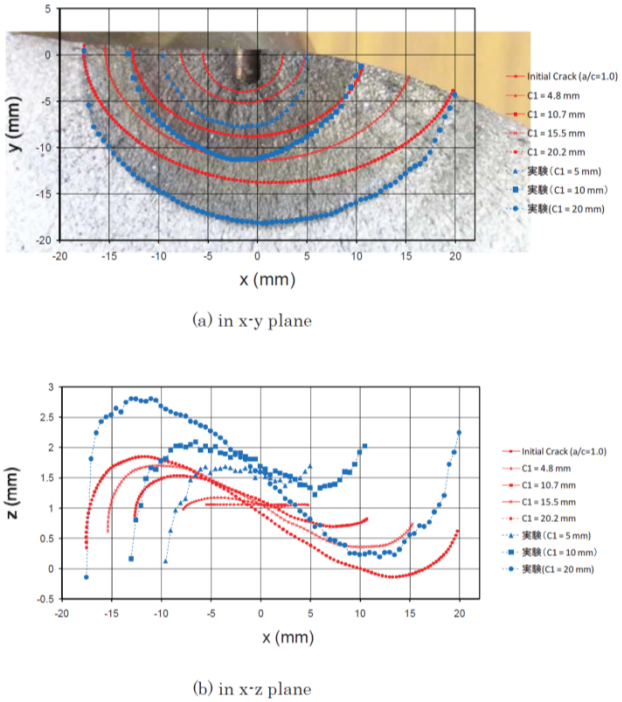
3.3.9 疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その6



(a) in x-y plane

(b) in x-z plane

図 3.3.9-24 き裂前縁状に関する有限要素法と実験結果の比較(初期き裂のアスペクト比0.8)



(a) in x-y plane

(b) in x-z plane

図 3.3.9-25 き裂前縁状に関する有限要素法と実験結果の比較(初期き裂のアスペクト比1.0)

得られた知見

初期き裂の形状に依らず試験片形状と荷重条件が同じなら，一定量のき裂進展後はほぼ同じき裂形状に収束する

有限要素法解析結果では実験結果と比較して試験片表面部に比べて深さ方向進展量が少ないことが，き裂形状データから明らかである

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- Smeared Crack Model を用いた解析（段付丸棒試験片）

解析手法	Smeared Crack Model
プログラム	内製

図 3.3.10-25 段付丸棒試験片検証モデル

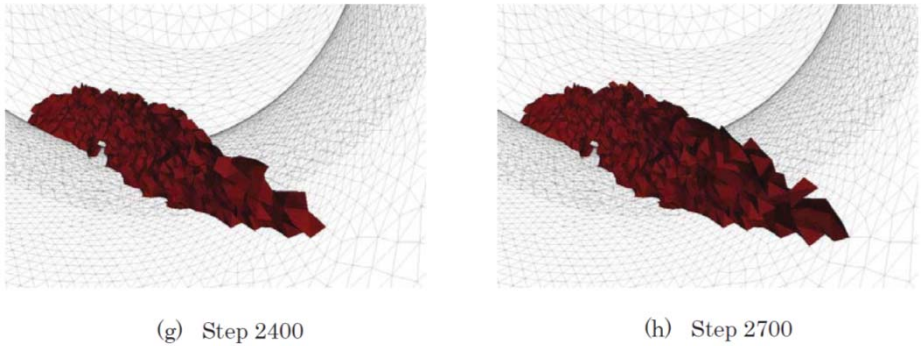


図 3.3.10-27 段付丸棒試験片検証モデルにおける内部のき裂進展状況

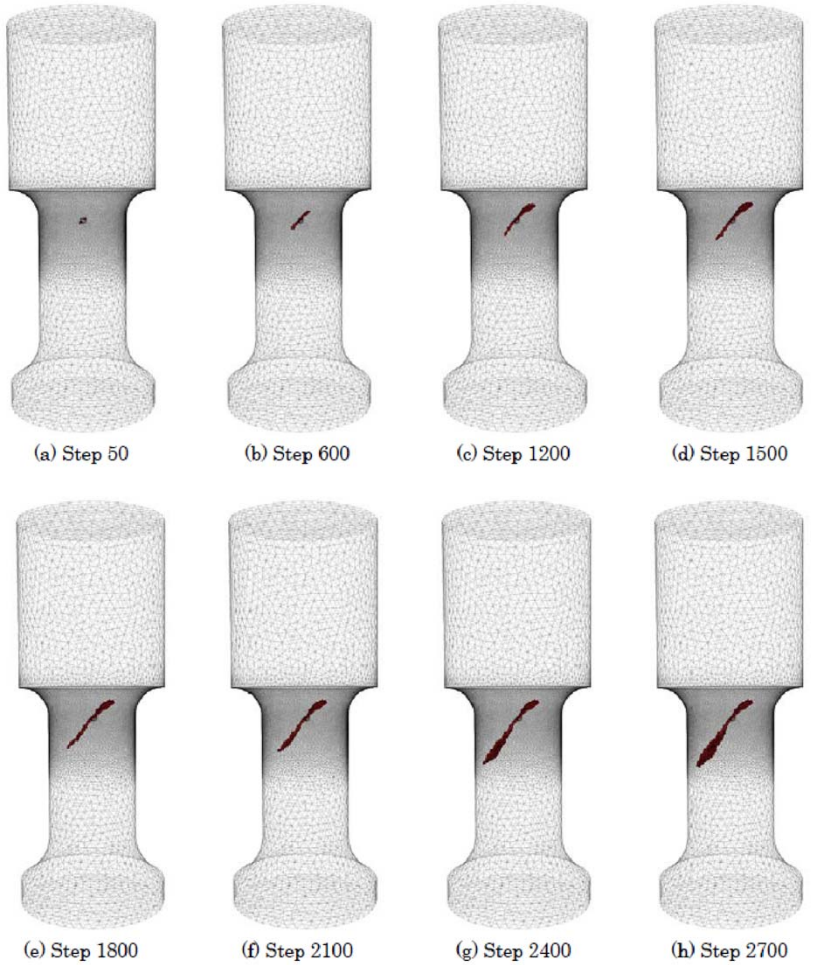


図 3.3.10-26 段付丸棒検証モデルにおける表面のき裂進展状況

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.10 疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化-その7

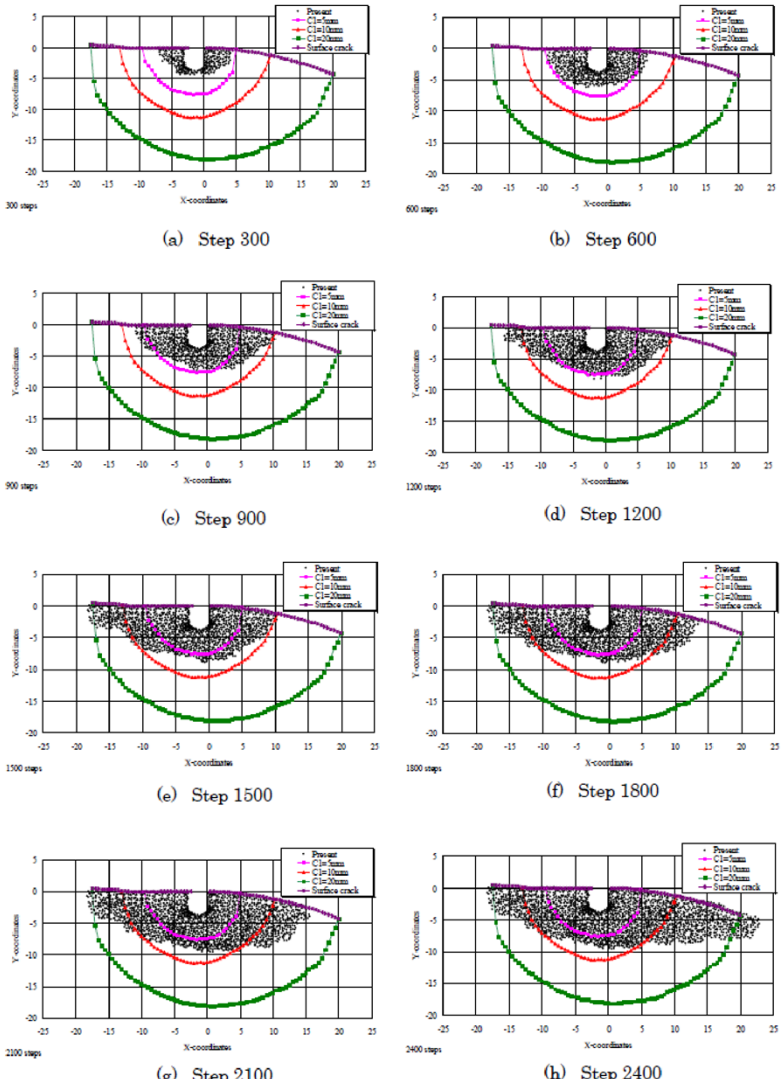


図 3.3.10-28 段付丸棒検証モデルにおける解析値と実験値の比較

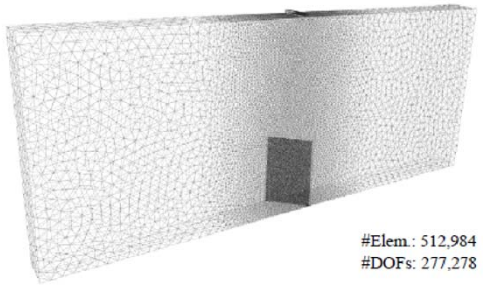


図 3.3.10-29 斜め切り欠きを有する単純梁モデル（平板検証モデル）

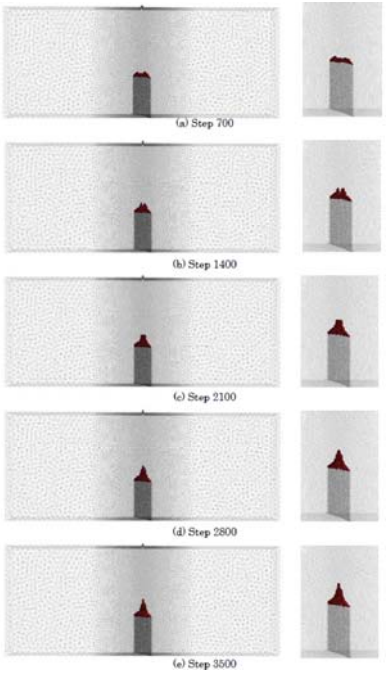


図 3.3.10-30 平板検証試験モデルにおけるクラック進展状況

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

得られた知見

段付丸棒検証試験においては，せん断剛性低減係数の適切な設定が必要であると考えられ，今後は実験値とより詳細なキャリブレーション作業を実施することが望まれる

平板検証試験に関して，現段階においては実験値との詳細な比較・検討は実施していないが，この結果に関しても前節同様にせん断剛性低減係数の値によって異なる解が得られることが予想されるため，今後は実験値とより詳細なキャリブレーション作業を実施することが望まれる

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

(1) 疲労き裂進展シミュレーション技術検証データの採取

(2) 2次元き裂に対する疲労き裂進展シミュレーション技術の確認

(3) 3次元平面き裂に対する疲労き裂進展シミュレーション技術の構築

(4) 3次元曲面き裂に対する疲労き裂進展シミュレーション技術の検討

(5) 将来の課題

① 疲労クライテリオンの検討

② 数値解析技術のさらなる向上

③ 本研究の成果の普及と定着

表 3.3.11 き裂進展シミュレーション技術とその適用

	2-D. crack	3-D. plane crack	3-D. curved crack
X-FEM	○		
Hierarchical Mesh	○	○	
S-FEM	○	○	○
SPH Method	○	○	○
Dual BEM	○	○	○
Tetra element	—	○	○
Smeared Crack Model	—	○	○

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.