MDF小委員会

軽水炉機器・構造物の繰り返し複合荷重下における破壊評価に関する研究(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):MFD小委員会「軽水炉機器・構造物の繰り返し複合荷重下における破壊評価に関する研究(平成25年度報告書)」

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

小委員会の概要

■MDF小委員会　（MDF：Multi-axial Ductile Fracture）

【研究題目】軽水炉機器・構造物の繰り返し複合荷重下
における破壊評価に関する研究

【研究期間】平成22年10月 ～ 平成26年3月（平成23年度は活動休止）

【研究体制】（所属・役職は研究期間当時）
主査：　矢川元基　東洋大学教授
副主査：　田中啓介　名城大学教授
副主査：　菊池正紀　東京理科大学教授
実験評価WGリーダー：　秋庭義明　横浜国立大学教授
数値解析WGリーダー：　岡田裕　東京理科大学教授
クライテリアWGリーダー：高橋由紀夫（一財）電力中央研究所研究参事
幹事：　3機関，3名
委員：　国内重電・鉄鋼メーカ、大学、研究所含む25機関，30名

【委託元】中国電力株式会社、北海道電力株式会社、東北電力株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社、関西電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社、日本原子力発電株式会社、電源開発株式会社、（平成22年度は東京電力株式会社を含む）

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

本資料の構成

本資料は、MDF小委員会解析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　繰返し複合荷重下での破壊挙動の解析シミュレーション技術の高度化
3.3.1　破壊力学解析の準備
3.3.2　破壊挙動解析
3.3.3　実寸法を考慮した構造部材の解析
3.3.4　まとめ

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

■ 解析WGの活動目的

地震荷重を想定して過大な繰返し複合荷重が作用する部材の破壊評価に関して、破壊解析により，繰返し複合荷重下での破壊シミュレーション技術を高度化し，実寸法を考慮した部材の破壊シミュレーション解析を行うことである。

■ 解析WGの研究活動と活動計画の概要

破壊試験で得られた延性破壊，塑性崩壊挙動に対する解析シミュレーションにより解析技術の高度化を図り，実寸法を考慮した構造部材の解析シミュレーションを実施した。

三年間の活動計画：
- ○ 研究立案と解析準備(平成22年度)
- ○ 延性破壊，塑性崩壊挙動に対する解析(平成23年度)
- ○ 実寸法を考慮した構造部材の解析(平成24年度)

実施する解析の概要：
- ○ 延性破壊，塑性崩壊挙動のシミュレーション
  - ・ 基礎破壊試験の一部に対する解析シミュレーション
  - ・ 解析検証試験に対する解析シミュレーション
- ○ 実寸法を考慮した構造部材の解析

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

3.3.2.1 付帯条件付き多次元移動最小二乗法による破壊解析 1 of 2

有限要素法のように節点に直接変位境界条件を設定でき、ひずみや回転などの物理量を未定係数に定義することができる付帯条件付多次元型移動最小二乗法を3次元破壊力学問題に適用した。

解析手法	付帯条件付き移動最小自乗法
プログラム	内製
構成則	弾性解析(微小変形)
破壊条件	最大主応力

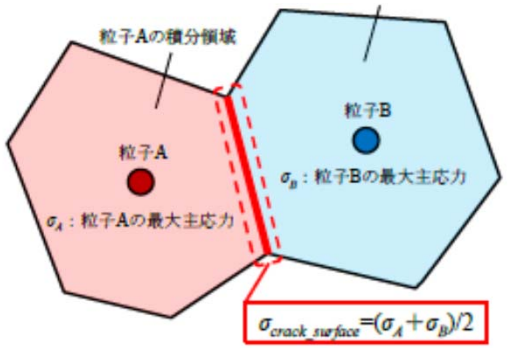
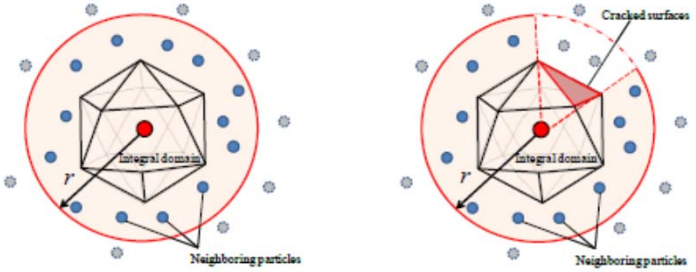


Fig. 3.3.2.1-6 Definition of maximum principal stress on crack surfaces.

き裂の表現方法



(a) Exclusive of the crack surfaces. (b) Inclusive of the crack surfaces.

Fig. 3.3.2.1-3 Interaction area of a focus particle with the crack faces.

図 3.3.2.1-3 き裂面を有する着目粒子の影響領域

き裂進展面とその基準

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

3.3.2.1 付帯条件付き多次元移動最小二乗法による破壊解析 2 of 2

局所破壊ルールで破壊初期の状態を模擬できる可能性

ノッチ付き大型試験片の静的捩り試験で、ノッチ先端からき裂が斜め方向に進展し始める

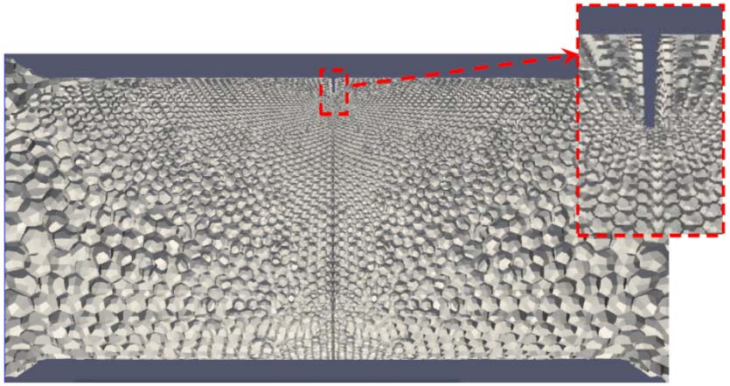


Fig. 3.3.2.1-10 Initial crack surfaces for specimen with notch

図 3.3.2.1-10　ノッチ周辺の初期き裂面

モデルの多面体分割

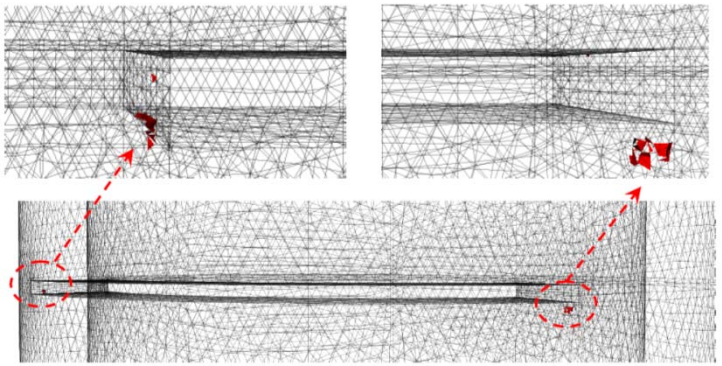


Fig. 3.3.2.1-12 Analytical result (Crack propagation)

図 3.3.2.1-12　解析結果（き裂進展）

解析結果

- **ノッチ付き弾性静解析を実施**
- **提案手法の2次で、有限要素法の四面体線形要素と同程度の精度**

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

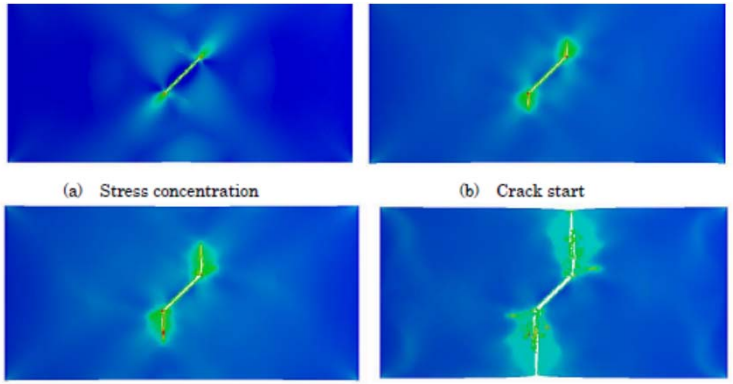
3.3.2.2 粒子法解析プログラムによる破壊解析 1 of 2

SPH法を用いた基本的なノッチ付き平板試験片の破壊解析と、90° ノッチ付き円管の捩り大変形破壊解析を行った。

解析手法	SPH法による大変形弾塑性解析
プログラム	内製
塑性モデル	Mises の降伏条件、関連流れ則、Ludwik型硬化則
破壊基準	ミーゼス応力基準による破壊

Fig.3.3.2.2-1 SPH model for fracture analysis.
図 3.3.2.2-1 中央にノッチのある平板モデル(3 次元)

粒子モデル



(a) Stress concentration (b) Crack start
(c) Crack propagation (d) Fracture of specimen

Fig.3.3.2.2-2 Fracture behaviors of plate specimen.

Misesひずみ分布

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

3.3.2.2 粒子法解析プログラムによる破壊解析 2 of 2

3次元モデルによるノッチ付き平板の引張試験片で破壊挙動をシミュレート、実験結果とよく一致した。

貫通ノッチ付き配管のねじり試験片で破壊挙動をシミュレート、ノッチ先端部は大きく切れ込み三角形の空隙が生じた。

- 平板試験片では妥当な破壊挙動
- 円管試験片では、ノッチ部から平坦に潰れゆく挙動
- 90° 回転ではノッチ部分が横方向に張出してこの部分が扁平化
- ノッチ先端部は大きく切れ込み、三角形の空隙が生じていることが実験結果と同様に確認

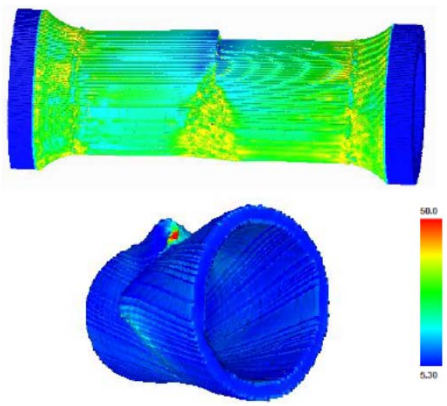


Fig.3.3.2.2-5 Deformation behaviors of a specimen with notch.

Mises応力分布（全体）

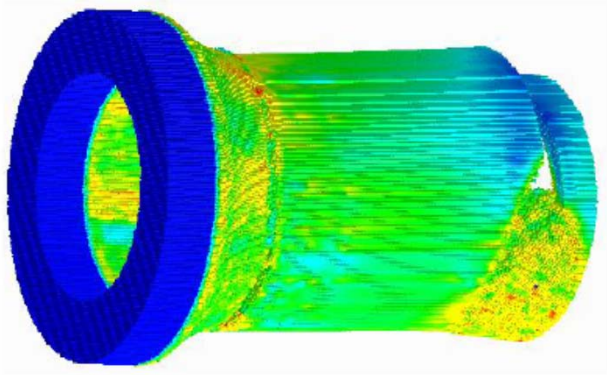


Fig.3.3.2.2-6 Deformation behaviors of a notched specimen.
図 3.3.2.2-6 ノッチ付き試験片の変形挙動（回転角度 90° Mises 応力）

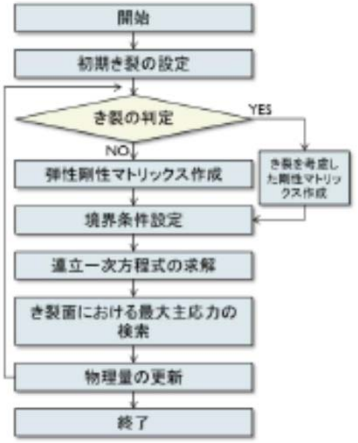
Mises応力分布（拡大）

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

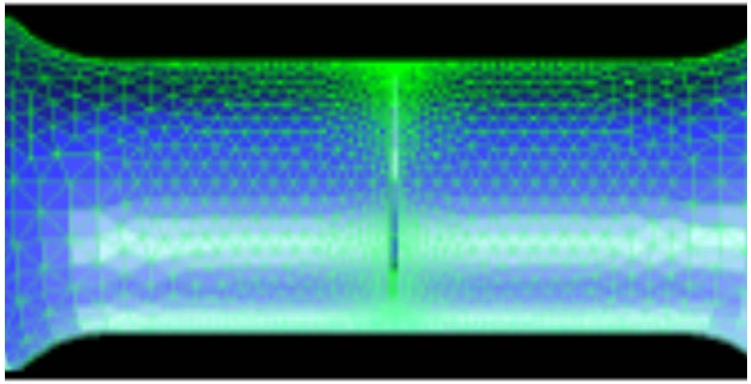
3.3.2.3 一般化有限要素法と損傷力学モデルによる破壊解析 1 of 2

回転自由度およびひずみ自由度を有する一般化有限要素法を破壊力学問題へ適用した。

解析手法	一般化有限要素法、節点に変位以外の物理量(回転、ひずみ)
プログラム	内製
塑性モデル	弾性解析(微小変形、大変形 update Lagrange)
破壊基準	最大主応力σ_1^{max}と引張強度f_tの比率r最小がき裂



解析フロー図



解析に用いたメッシュ

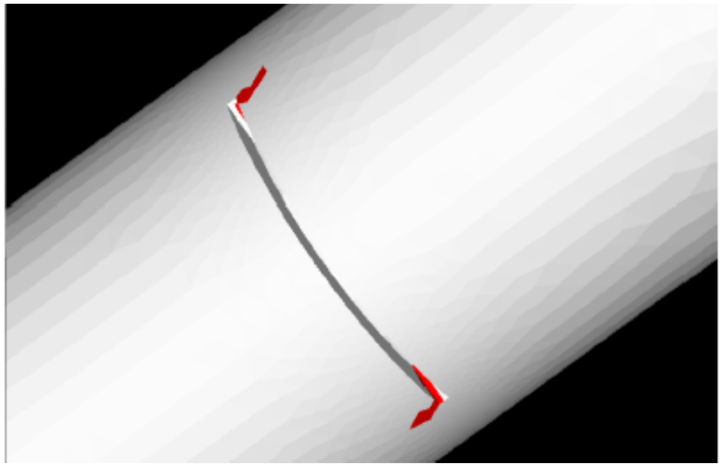
Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.2.3 一般化有限要素法と損傷力学モデルによる破壊解析 2 of 2

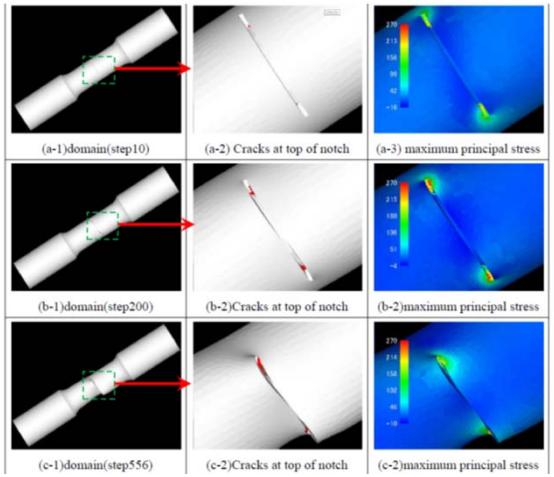
弾性における破壊解析を実施

ノッチ付き大型試験片の静的捩り試験で

- 微小変形：ノッチ先端からき裂が斜め方向に進展し始める。
- 大変形：要素が大きく変形しリゾーニングが必要である。



微小変形によるき裂進展



大変形解析によるき裂進展

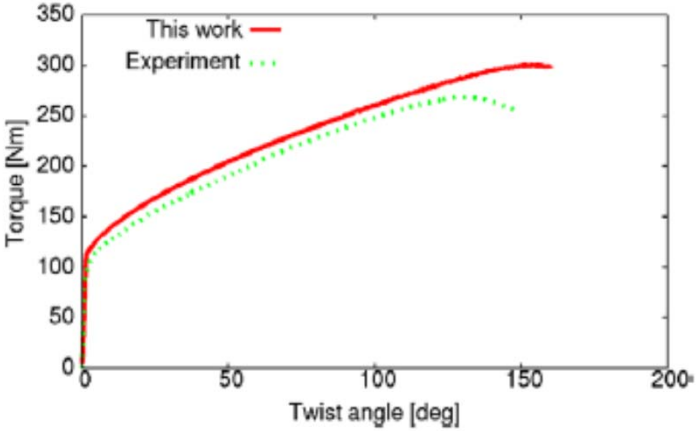
- 局所破壊ルールで破壊初期の状態を模擬できる可能性
- 微小変形と大変形で破壊の様子が異なることが明らか

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

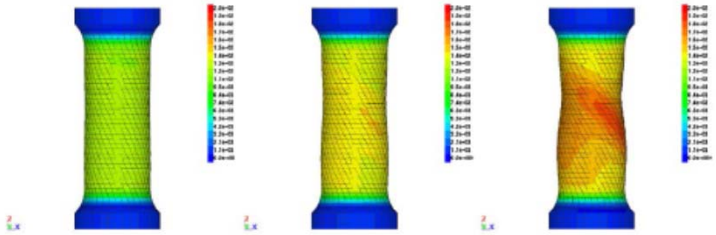
3.3.2.4 Gursonの降伏関数を用いた弾塑性破壊解析 1 of 2

Gurson の降伏関数を用いた弾塑性延性有限要素解析を実施した。さらに、せん断の影響を考慮した。

解析手法	有限要素法(大変形弾塑性解析)
プログラム	内製
塑性モデル	せん断の影響を考慮したGursonの降伏関数(2008年提案)
破壊基準	ボイド率



トルク-回転角関係



(a) Twist angle:120° (b) Twist angle:140° (c) Twist angle:160°

Fig. 3.3.2.4-9 Deformation and distribution of void volume fraction in the specimen without a notch.

図 3.3.2.4-9 ノッチ無し試験片の変形図およびボイド率の分布

ノッチなしモデルのボイド率分布

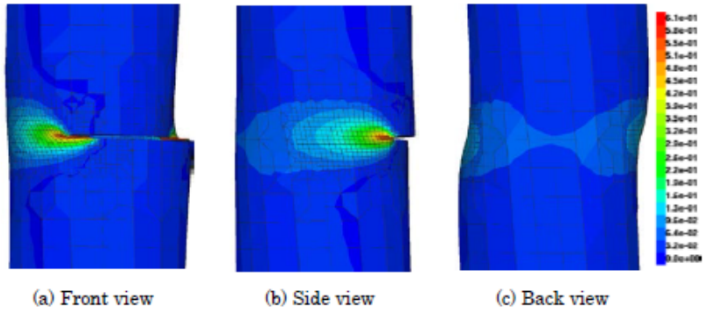
Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.2.4 Gursonの降伏関数を用いた弾塑性破壊解析 2 of 2

全体にトルクが大きく評価

ノッチなし解析：座屈の形状に沿った分布、しわの発生の傾向に定性的な一致を確認した。

ノッチあり解析： k_ω=4（せん断の影響に関する定数）のとき定性傾向が一致、ボイドの発生項と成長項の寄与は非常に小、せん断による影響項の値は大、全ボイド率とほぼ等しい値でせん断による影響項が支配的である。



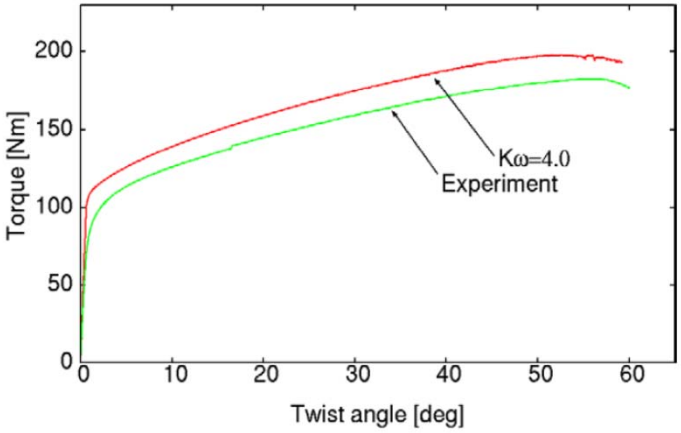
(a) Front view (b) Side view (c) Back view

Fig. 3.3.2.4-20 Distribution of equivalent plastic strain in the hoop direction (k_ω=4、twist angle=28°).

図 3.3.2.4-20 相当塑性ひずみの円周方向の分布（k_ω=4、捩り角=28° ）

ノッチありモデルの相当塑性ひずみ分布

- せん断の影響を考慮した解析によりボイド成長の傾向が判明
- せん断の影響を考慮することによって、実験で見られた円周方向のき裂進展を再現することが可能



トルク-回転角関係

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

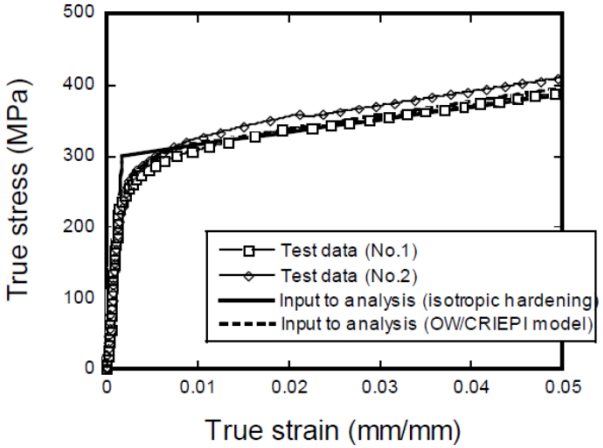
3.3.2.5 汎用プログラムに独自の弾塑性構成方程式を加えた破壊解析 1 of 2

単軸繰返し荷重下での試験結果を基に、構成式モデルの最適化を行う。

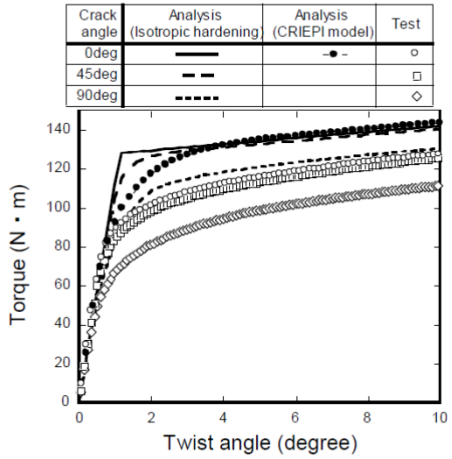
確定した構成式モデルにしたがって有限要素解析を実施するためのユーザーサブルーチンを作成する。

作成したプログラムを用いて繰返し荷重下での破壊試験に対する解析を実施する。また、繰返しJ積分を後処理プログラムによって評価し、破壊クライテリオンの検討にも資する。

解析手法	有限要素法
プログラム	MARCおよびABAQUS
塑性モデル	等方硬化則および非線形移動硬化則(大野・王に基づく電中研モデル)、von MisesおよびTresca
破壊基準	J積分範囲(領域積分法)



真ひずみ-真応力関係



トルク-ねじり角関係

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

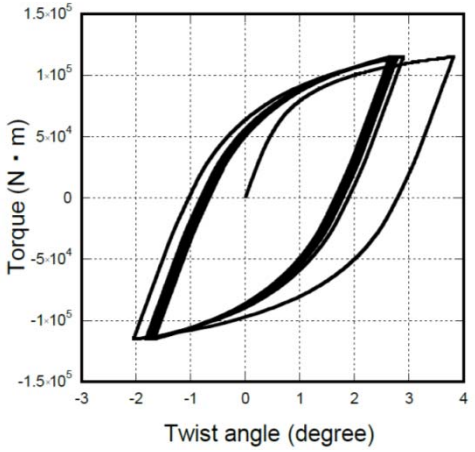
3.3.2.5 汎用プログラムに独自の弾塑性構成方程式を加えた破壊解析 2 of 2

概ねよい一致が得られたが低トルクでは大きめの評価となった。

降伏応力の比を乗じたほうが実験とよい一致

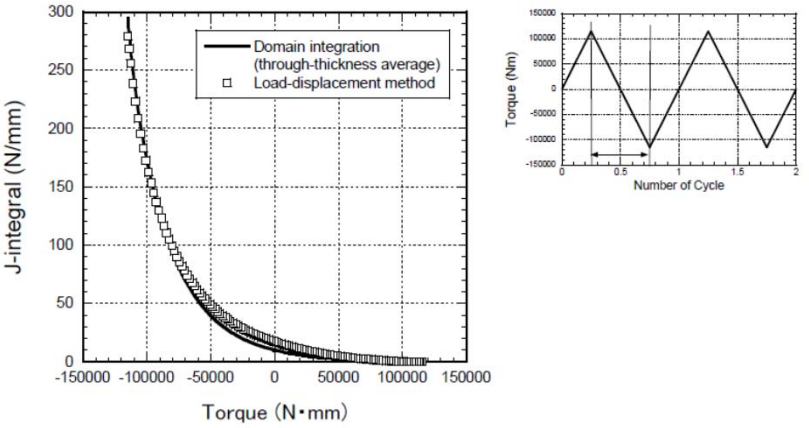
J積分は経路独立を確認した。

簡易評価式は領域積分法の結果と良い一致を示す。



OW-CRIEPIモデルによるトルク-ねじり角関係

- OW-CRIEPIモデルにより繰り返しトルクねじり角関係を良好に表現
- 大変形でないと合わない
- J積分範囲の簡易式に評価可能性
- 汎用コードのJ積分機能では不十分な場合もあるため改良等必要

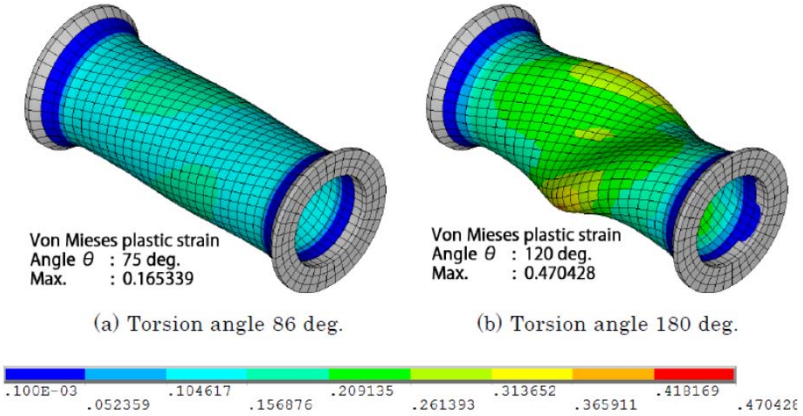


1/4-3/4サイクルのJ値変化

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

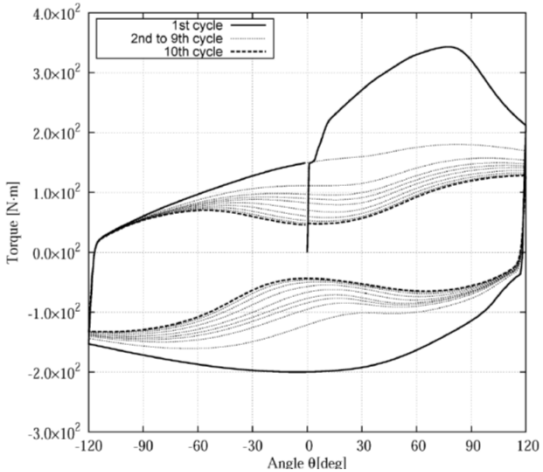
3.3.2.6 ANSYS＋J積分など独自ソフトを加えた破壊解析 1 of 2

汎用コード ANSYS 11 Multiphysics を用いて弾塑性解析を行い、破壊力学パラメータを用いて破壊評価を行う。



ノッチなしねじり解析ミーゼス応力分布

解析手法	大変形弾塑性有限要素法 移動硬化則
プログラム	ANSYS11
破壊基準	Generation phase解析(ねじり角によりき裂を進展),CTOA
き裂進展法	多点拘束の順次消去



10サイクル繰返しねじりのトルクーねじり角の関係

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

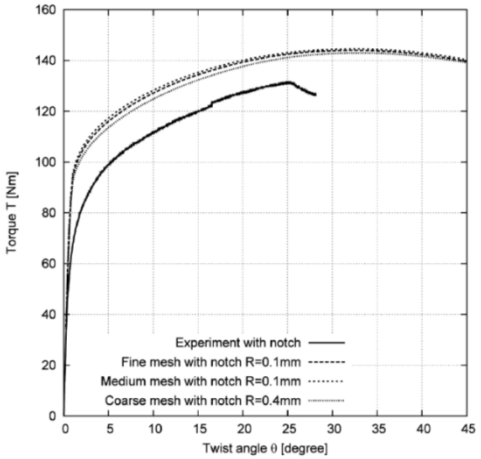
3.3.2.6 ANSYS＋J積分など独自ソフトを加えた破壊解析 2 of 2

ノッチなしねじり解析を行い定性的に実験と一致(微小外乱を与え座屈を表現)、10サイクルの解析を実施した。

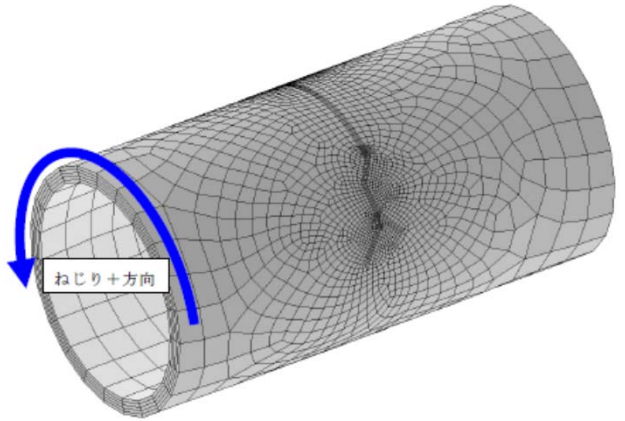
ノッチ付き解析を行い定性的に実験と一致(トルクは大きめに評価)した。

大型試験片をモデル化し解析(接触は考慮なし)した。

- 大きな塑性ひずみを伴う繰り返しねじり荷重においても解析可能
- 大型試験片の解析では接触が生じる、接触の考慮が必須
- CTODは特にモードⅡおよびⅢが大きくなりこれまでの知見と異なるため詳細な検討必要



ノッチ付きねじりのトルク変化



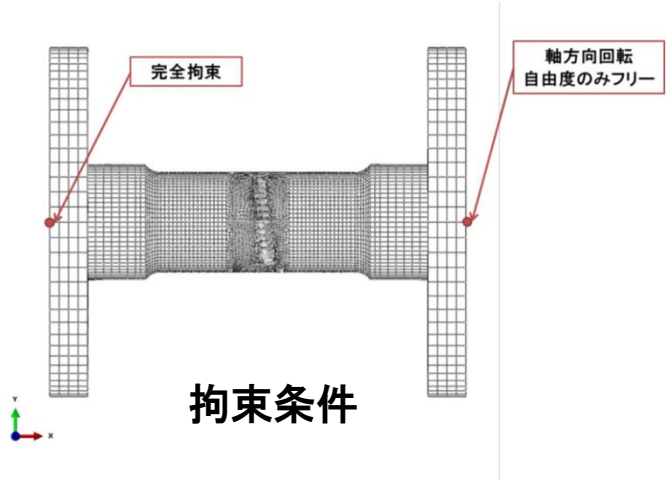
大型試験片の解析モデル

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

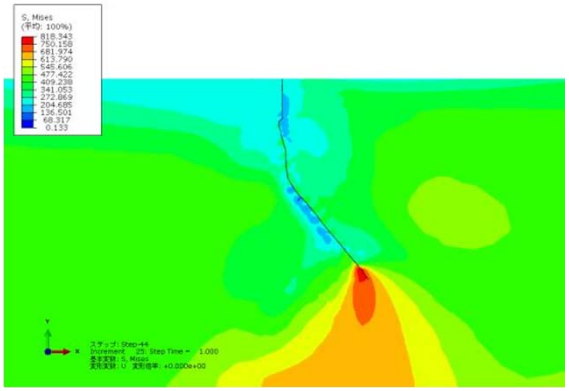
3.3.2.7 汎用プログラム (Abaqus) による破壊解析 1 of 2

「3.2.6.2 大型円筒試験片を用いた捩り破壊試験（炭素鋼）」について、汎用プログラム（Abaqus Ver. 6.11-1）を用いた解析を行った。

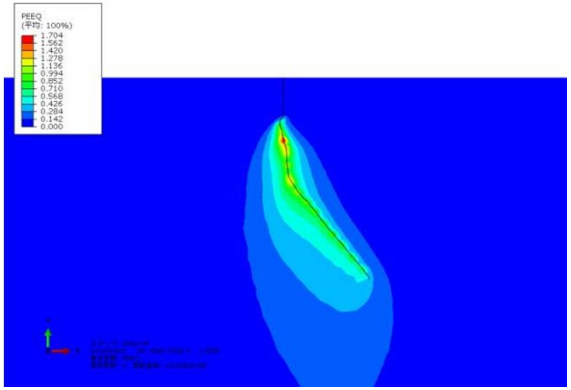
解析手法	有限要素法
プログラム	Abaqus Ver. 6.11-1
硬化則	非線形移動硬化則 *PLASTIC HARDENING = COMBINED
き裂進展法	部材結合の除去 *Model Change



拘束条件



Mises 応力コンタの例



塑性ひずみコンタの例

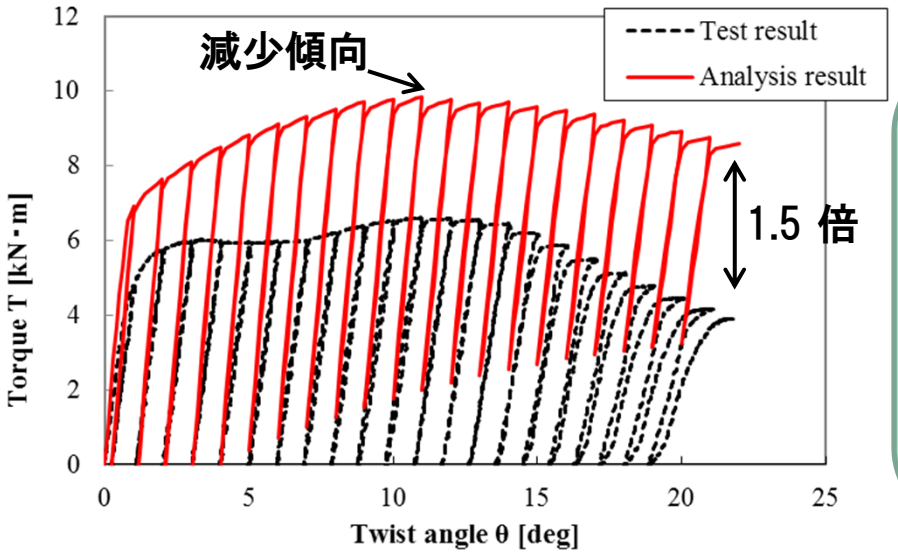
Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.2.7 汎用プログラム (Abaqus) による破壊解析 2 of 2

試験結果と解析結果の傾向は類似するが（捩り角 10° からトルクが低下）、解析結果は試験結果に比べて大きな値を示している。

塑性ひずみ領域がき裂の上下位置に分布している。

捩り荷重下においてき裂が初期き裂面に斜めに進展するときの特異な応力場の状況が把握できる。



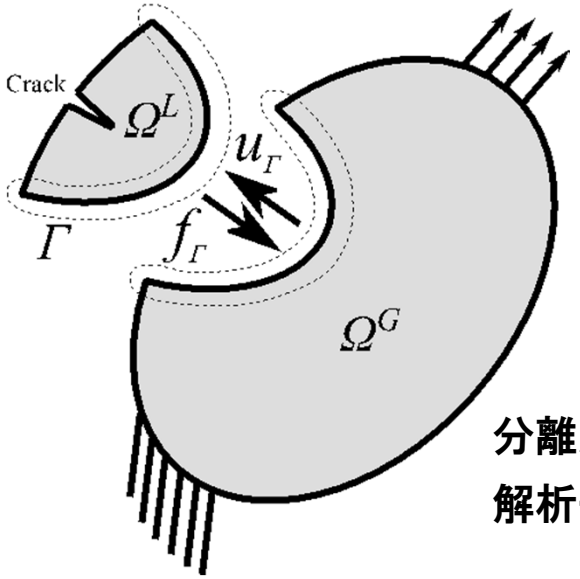
トルク―回転角の関係（実験結果と解析結果の比較）

- 大型円筒試験片の破壊試験のシミュレーションでは、捩り角 10° にトルクの減少傾向が再現できた。
- トルクの解析値は実験値の 1.5 倍あり、解決すべき課題があることが明確になった。

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

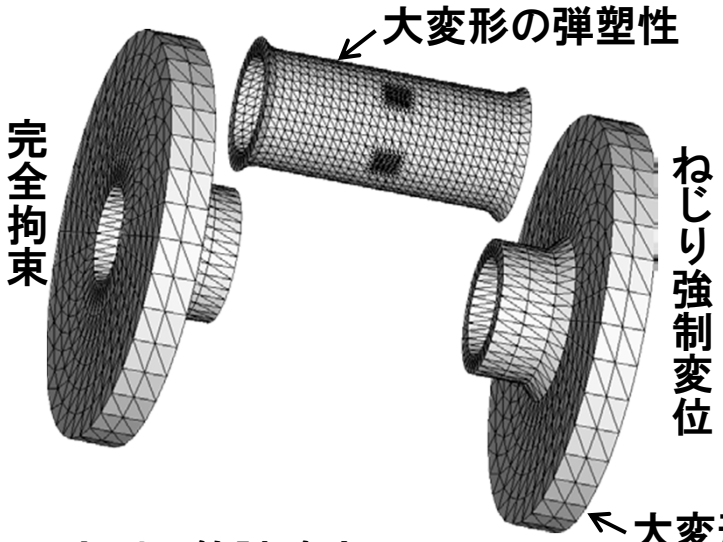
3.3.2.8 分離反復連成解法による大規模破壊解析 1 of 2

き裂先端近傍の領域とそれ以外の領域を別々に扱う分離反復連成解法を用いたき裂付きモデルの大変形弾塑性解析を示す。



分離反復連成解法の解析モデル分割

解析手法	分離反復連成解法 有限要素法
プログラム	内製
塑性モデル	Mises の降伏条件 関連流れ則 等方硬化
構成則	Kirchhoff 応力と Hencky ひずみに 基づく超弾性構成則



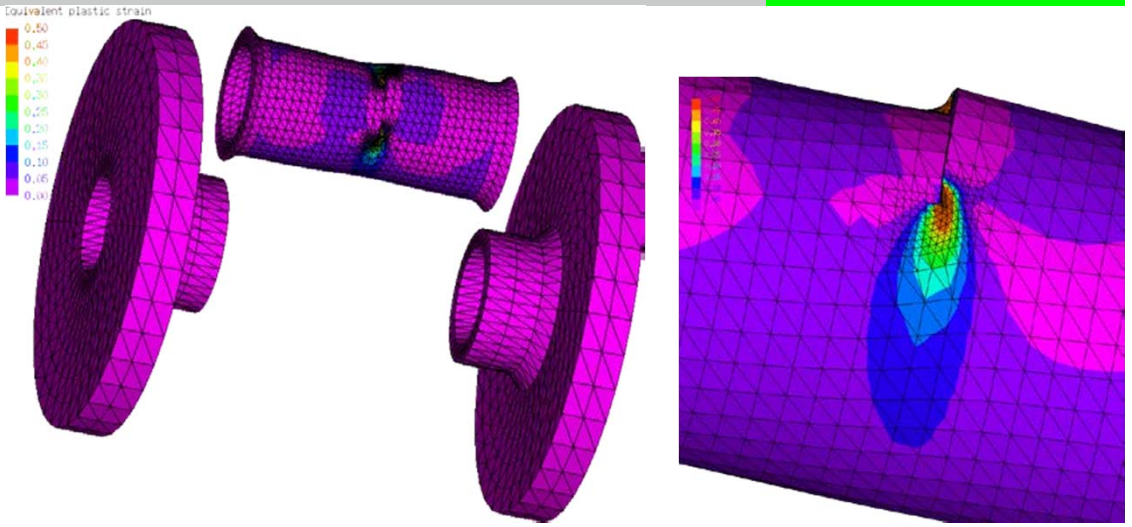
大型円筒試験片のメッシュ

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

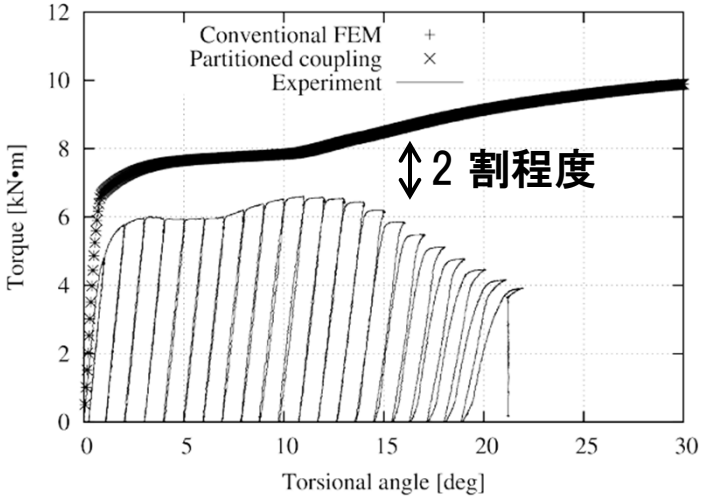
3.3.2.8 分離反復連成解法による大規模破壊解析 2 of 2

通常の有限要素法、分離反復連成解法の解析結果はほぼ一致した。

数値解は実験値よりもトルクが 2 割程度大きく、単調増加で極大値が得られなかった。



大型円筒試験片の相当塑性ひずみ分布の例



通常の有限要素法ソルバ、
分離反復連成解法ソルバ、実験における
ねじれ角とトルクの関係

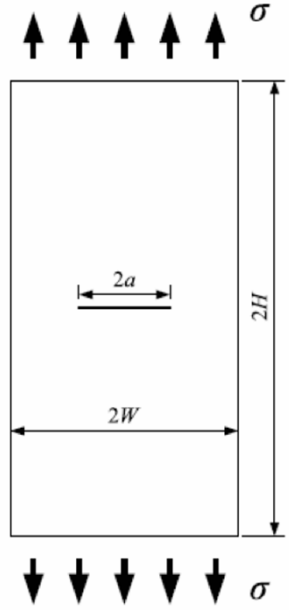
- 大型円筒試験片モデルを通常の有限要素法と分離型連成解法の二つで解析し、それぞれの解析結果がほぼ一致
- 解析結果と実験結果を比較し、解析では 2 割程度大きいトルクが得られたものの傾向としては一致

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.2.9 XFEM による破壊解析 1 of 2

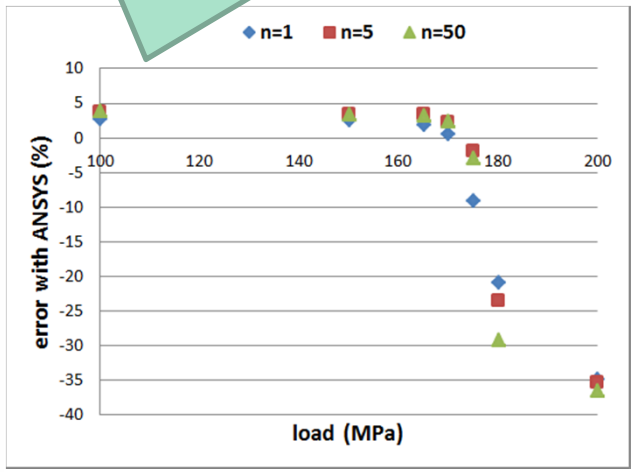
XFEM による弾塑性解析の精度評価、特にエンリッチ関数の影響について考察を行った。大型試験片の静的ねじり実験でのき裂進展を模擬した解析を、XFEM を用いて行い、実験結果と比較を行った。

解析手法	XFEM (拡張有限要素法)
エンリッチ関数	弾性体の漸近解
解析モデル	円筒試験片の約半周を伸ばした平板
き裂進展解析	き裂進展がほぼ直線と見なせるねじり角 12° までの解析



CCT 試験片

弾塑性解析であっても弾性解 (n = 1) に基づくエンリッチ関数を用いても大きな誤差は現れない。

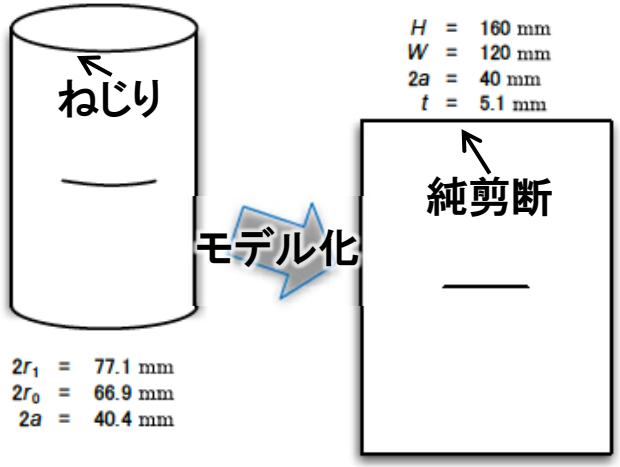


ANSYS との比較

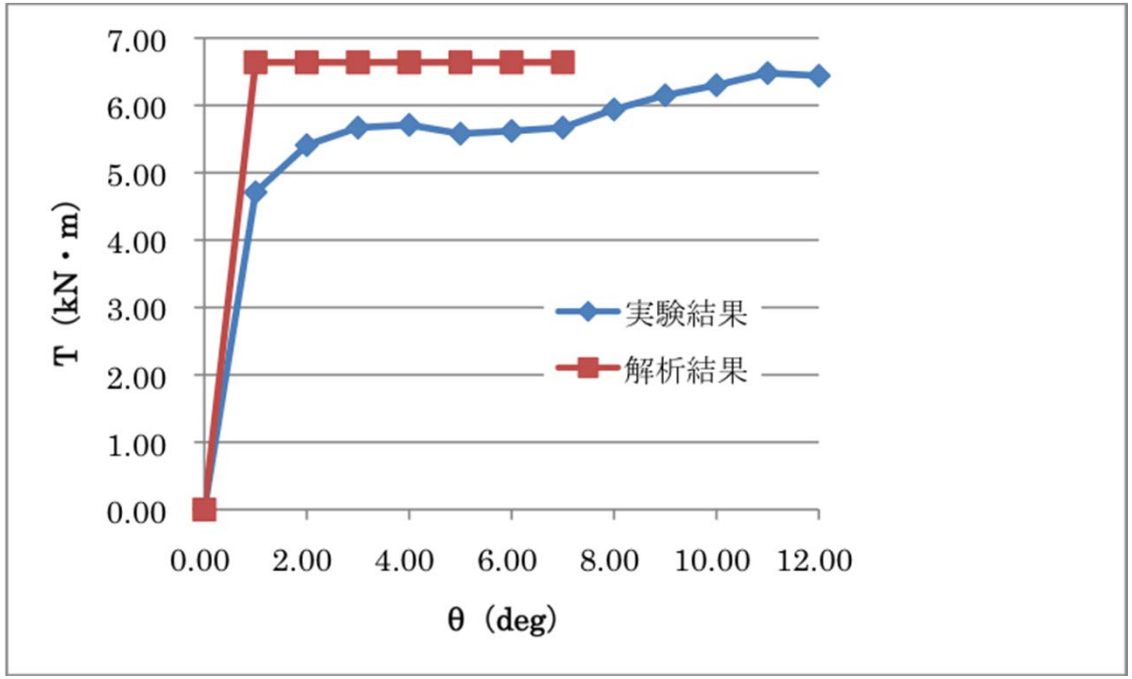
Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3.3.2.9 XFEM による破壊解析 2 of 2

ねじり角とトルクの関係を実験値と比較した。誤差は生じているものの同じような値を示している。



き裂進展解析モデル



ねじり角とトルクの関係

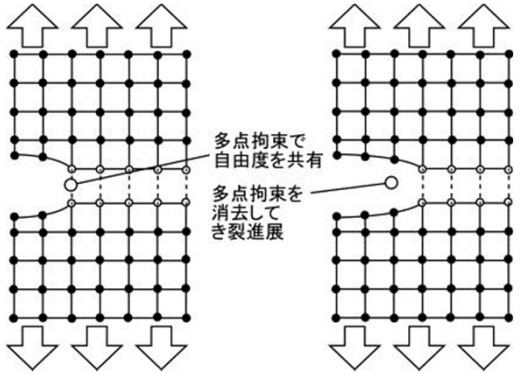
- 大型試験片の静的ねじり実験でのき裂進展を模擬した解析を、XFEM を用いて行い、実験結果との比較
- モデル化の違いがあるものの比較的良好な結果

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

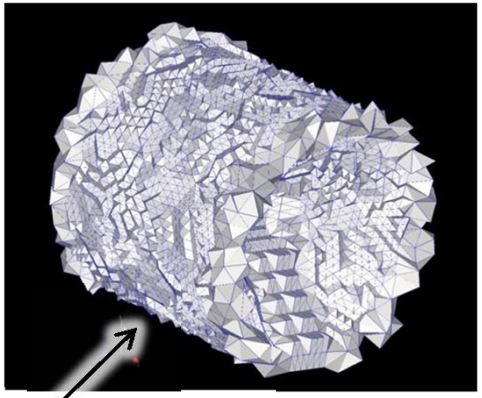
3.3.2.10 破壊力学プラットフォーム (MSC.Marc＋独自のＪ積分プログラム) の整備による破壊解析 1 of 2

破壊力学解析プラットフォーム（MSC.Marc＋独自の Ｊ 積分プログラム）の整備とそれを用いた解析検証破壊試験に関する解析
―大型試験片（炭素鋼）の解析を進めた。

解析手法	有限要素法
プログラム	MSC.Marc
Ｊ積分評価手法	四面体 2 次要素用領域積分法
き裂進展法	多点拘束の順次消去(一種の節点解放法)

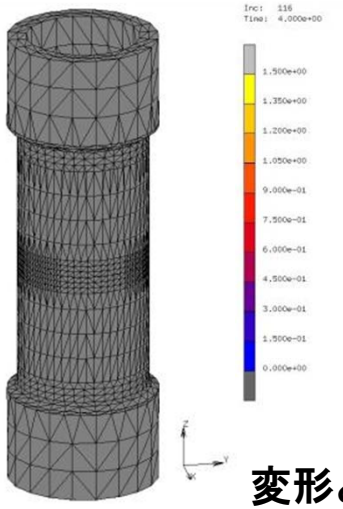


多点拘束を用いたき裂面の表現とき裂進展

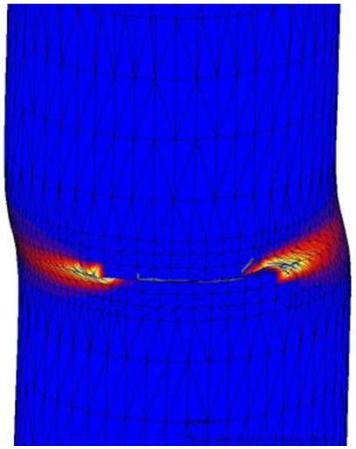


Ｊ積分計算のための積分領域の一例

四面体 2 次要素



有限要素法モデル



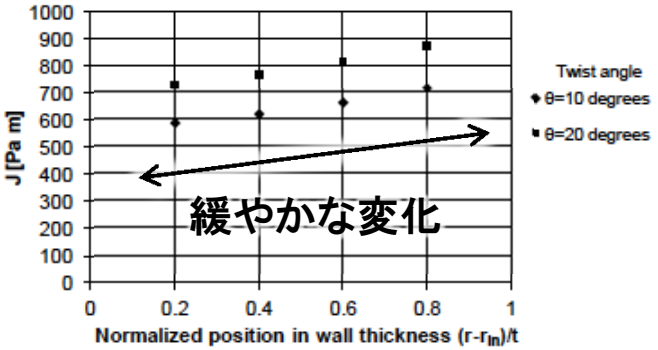
変形と相当塑性ひずみ分布の例

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

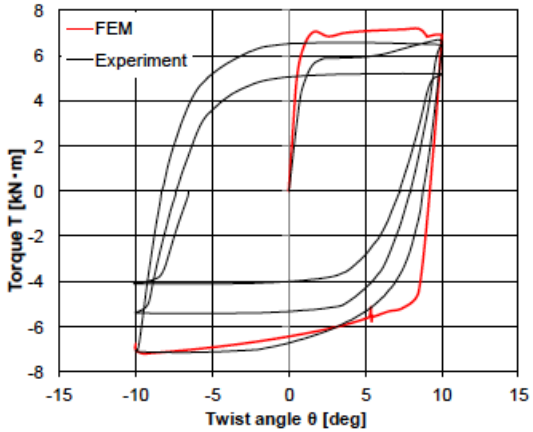
3.3.2.10 破壊力学プラットフォーム (MSC.Marc＋独自のＪ積分プログラム) の整備による破壊解析 2 of 2

ピークトルクの値は良く再現できていることがわかる。ただし、途中の振り角―トルク関係には実験と有限要素法で差が見られる。

き裂から円周方向に向け、相当塑性ひずみの高い部位が拡がる。また、変形状態は捩り角の反転とともに変形状態もほぼ反転している。



様々な捩り角における、大型円筒試験片の静的捩り問題でのＪ積分値の分布



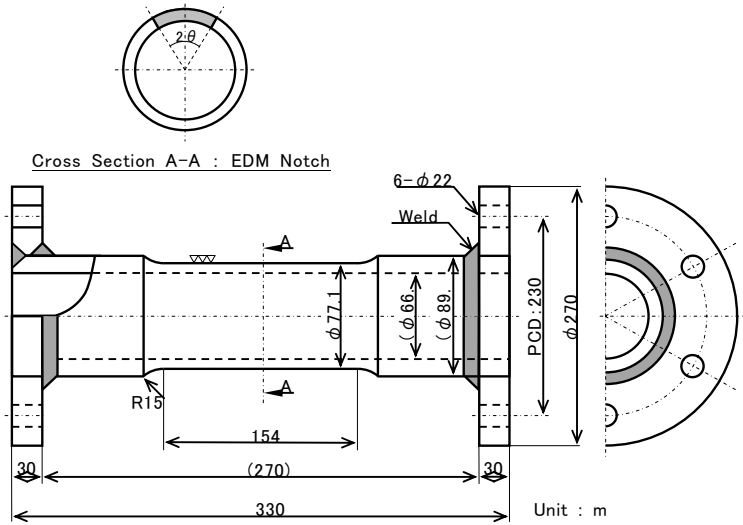
トルクと捩り角の関係

- 繰返し捩り解析において、等方硬化則より移動硬化則を用いて解析を行う方が適切
- 数 10～100 以上の相当塑性ひずみに対する適切な応力―ひずみ関係が必要
- 繰返し変形におけるＪ積分評価手法が必要
- Ｊ積分値は内壁近傍と外壁近傍で大きく異なる

Copyright © 2015 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

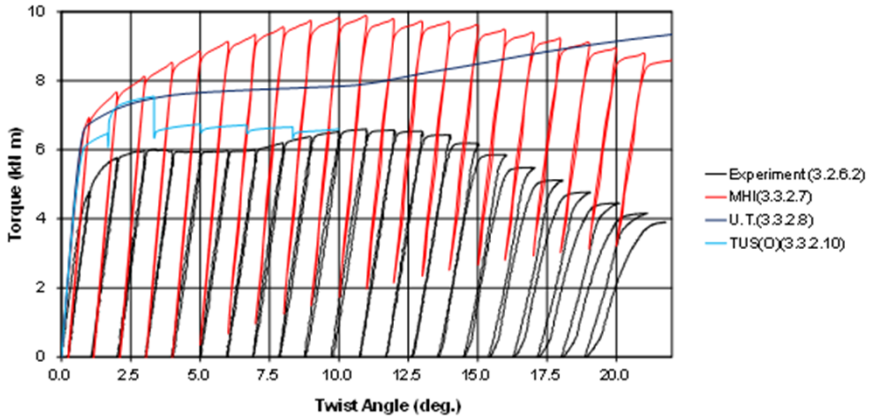
3.3.3 実寸法を考慮した構造部材の解析

■ 解析対象とした試験片



- ノッチ:2θ = 60°
- 荷重条件:静的および繰返し捩り
- 実験条件
  - 捩り角制御
  - 繰返し捩り問題での捩り角±10°
  - トルクー捩り角関係とき裂進展長さのデータ取得。繰返し捩り問題での捩り角は±10°

静的捩り試験解析の結果(トルクと捩り角の関係)



トルクと捩り角の関係

- 解析はトルクを過大評価する傾向
- MHI(3.3.2.7)とTUS(3.3.2.10) はき裂進展解析
- U.T.(3.3.2.8)はき裂進展を考慮せず静止き裂として解析
- き裂進展を考慮してもしなくてもトルクの過大評価が発生

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

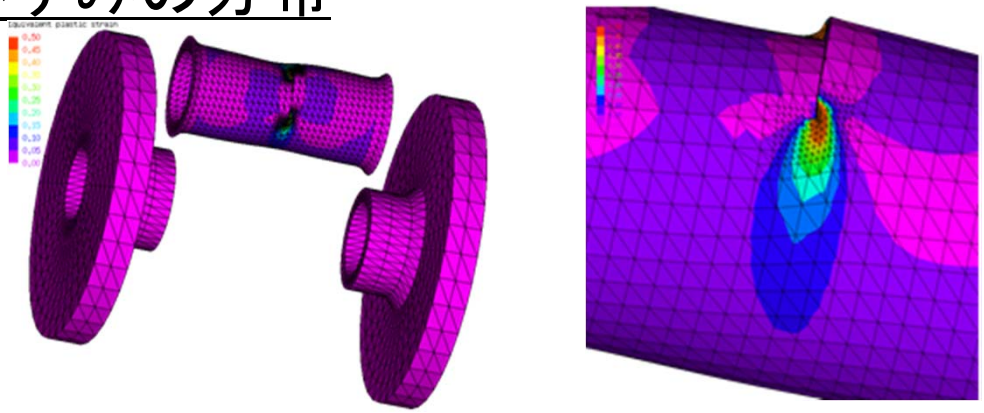
3.3.3 実寸法を考慮した構造部材の解析

繰返し捩り試験解析

- 大変高度な解析
- 繰返し1サイクル目までではトルクー捩り角関係が解析と実験で概ね一致

欠陥面の食い違い変形と塑性ひずみの分布

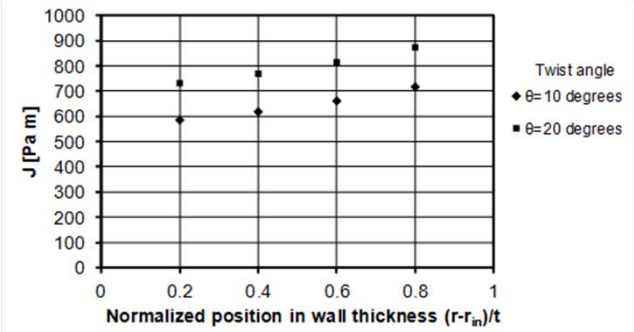
- 欠陥面の食い違い変形を明瞭に再現
- 塑性ひずみの分布の様相も示すことが可能に



欠陥付き試験片の捩じり変形と相当塑性ひずみの分布

き裂前縁のJ積分分布

- 大型円筒試験片であっても、き裂前縁で円筒内壁側から外側に向けてJ値が大きく増加



円筒内壁側から外側に向けてJ値分布の一例

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

3.3.4 まとめ

解析WGの活動の成果と得られた知見

1. 種々の解析手法を複合荷重下の破壊問題へ適用。複合荷重下の破壊解析手法の高度化を達成
2. 捩りを受ける円筒試験片の大変形挙動解析の高精度なシミュレーション可能
3. 静的捩り試験解析のJ積分結果から（新しい知見と技術的課題）:
   - （新しい知見）き裂前縁に沿って、板厚方法のJ積分値の変化が非常に大きい
   - （技術的課題）板厚方向に値を平均するなど、破壊クライテリオンとしてのJ積分計算手法の提案
4. 繰返し荷重下ではJ積分の経路／積分領域独立性が不成立、ΔJなどの新手法必要
5. J積分以外に、き裂開口角度(COA)等の破壊クライテリオンの検討必要

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

3.3.4 まとめ

解析WGの活動の成果と得られた知見（続き）

6. 捩りを受ける円筒試験片の変形は、純粋モードⅡ変形ではない（モードⅠ＋Ⅱ＋Ⅲ混合モード状態）
7. 周方向欠陥表面が交差する食い違い変形挙動の発生をシミュレーションで再現
8. 捩りを受ける円筒試験片の解析ではトルクを過大評価、全ての研究機関で共通、今後の課題

まとめ

地震荷重を想定して過大な繰返し複合荷重が作用する部材の破壊評価に関して、従来にない大規模な大変形挙動を高精度にシミュレートできることを明らかにし、多くの新しい知見を得ることによって、繰返し複合荷重下での破壊シミュレーション技術を高度化した。

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