

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007 年度～2009 年度

課題番号：19560100

研究課題名 (和文) 複合荷重下での大規模延性破壊シミュレーションシステムの構築

研究課題名 (英文) Dimple fracture simulation system under mixed mode loading condition.

研究代表者

菊池 正紀 (KIKUCHI MASANORI)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：90107540

研究成果の概要 (和文)：ボイドの発生・成長・合体機構をモデル化した構成式を用いて原子力構造材料の延性破壊機構を研究した。板厚の影響、複合荷重の影響等を評価することのできる延性破壊解析ソフトを完成した。これを用いて延性破壊機構を学術的に研究したのち、原子力構造材料中の複数き裂の延性破壊過程を解析し、き裂の相互作用を検討し、保守的な設計指針について考察した。研究成果を論文として国際・国内の学術誌に発表した。また開発したソフトの普及を図った。

研究成果の概要 (英文)：Ductile fracture process is studied using Gurson's constitutive equation which considers nucleation, growth and coalescence of voids. Finite element analysis system, which can evaluate thickness effect and effect of mixed mode loading condition, is developed. Basic study on the mechanism of ductile fracture process is studied. Then this system is applied for the evaluation of interaction effect of multiple cracks in nuclear power plant structure. It is shown conservative evaluation is possible using this system. Results are presented in international and domestic journals. This system is shared in several research institutes for future application.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料/材料力学

キーワード：機械材料・材料力学、金属物性、計算機システム、構造・機能材料、破壊力学

1. 研究開始当初の背景

原子力発電施設等では、長時間の利用により構造材料内部に疲労き裂が発生することは避けられない。ここに、例えば地震荷重のよ

うな予期せぬ過大荷重が加えられると疲労き裂は大変形を生じて複合荷重のもとで延性破壊する。柏崎の原子力発電施設が地震で受けたダメージがまさにその例である。そう

した状況で延性破壊を的確に予測する手段が過去には存在しなかった。本研究はそうした予測を可能とする有限要素法解析システムの構築と、それを用いた基礎研究、及び応用研究、さらにはその解析システムの普及を目的として行われたものである。

2. 研究の目的

延性破壊の微視的機構はボイドの発生・成長・合体の過程にある。これらを考慮して大規模変形の値に延性破壊する現象を数値解析でシミュレーションする手法として、Gursonにより提案された構成式を用いる方法がある。これはすでに汎用商業 FEM(有限要素法)コードに利用されている。しかしこれらの汎用コードでは、薄板の破壊で生じる板圧の影響、傾斜破壊等が評価できない。また複合荷重下での延性破壊挙動についてはほとんど言及されていない。そこで本研究では傾斜破壊をシミュレーションできる数値解析ソフトを開発し、それを用いて複合荷重、板厚等の延性破壊機構への影響を調べることを第一の目的とした。またそれを用いて原子炉構造材料中の複数き裂の延性機械問題を解析し、き裂の相互作用の影響を評価し、現在の設計指針の保守性の確認を行うことを目標とした。そして最後のこの解析ソフトを公開して今後の広い利用に供することを目指した。

3. 研究の方法

基礎的な実験を行い、延性破壊過程において板厚の変化がどのような影響を持つかを調べる。また混合モード負荷下での延性破壊試験を行い、混合モード比の変化が延性破壊に及ぼす影響を調べる。ついでこの現象の数値解析を行うため、Gurson の構成式を用いた有限要素解析ソフトを整備する。このソフトを用いて実験のシミュレーションを行う。実験で観察された現象を再現するために Gurson モデルの修正を行う。これらを通じて、延性破壊現象をよりよく理解する。そして完成されたソフトを原子炉構造材料の保守・管理の指針の検証に用いる。

4. 研究成果

(1) 実験結果

A533B 鋼を用いた三点曲げ試験片(図 1)による延性破壊試験ののち、破面を観察したところ、傾斜破壊領域であるシャリップ破面も含めて、破面全体がディンプルに覆われていることが確認できた。これにより、シャリップ領域も含めてこの材料の延性破壊はボイドの発生・成長・合体が支配的な機構であることが分かった。図 2(a)にはシャリップ部の破面写真、図 2(b)には板厚中央部での破面写真を示す。ともにディンプルが観察されるが大

きは著しく異なっている。板厚を変えて同様の試験を行ったところ、板厚が薄くなるにつれてシャリップ領域は広がるが破壊機構は同じであることが確認できた。次に混合モード延性破壊試験を行った結果、厚板試験片では試験片表面と内部で延性破壊の進展方向が逆向きになること、薄板試験片では同じ方向に進展することが分かった。破壊試験の後は走査型電子顕微鏡を用いてディンプルの径を測定した。試験片内部ではディンプル径は大きく、内部では小さいことを確認した。図 3 にはその一例を示す。横軸は板厚上の位置を表し、0 が試験片表面、1 が試験片中央部を示す。これは直径 $20\mu\text{m}$ 以上の大きさのディンプルの分布状態である。試験片内部ほど大きなディンプルが成長していることが分かる。

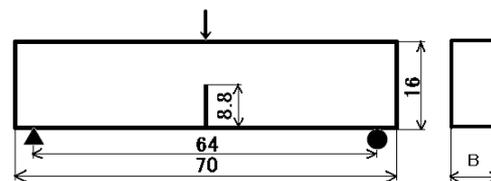
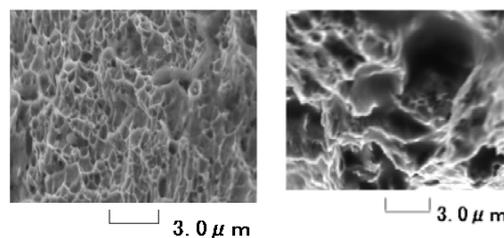


図1 三点曲げ試験片



(a) シャリップ部 (b) 板厚内部
図2 破面のディンプル

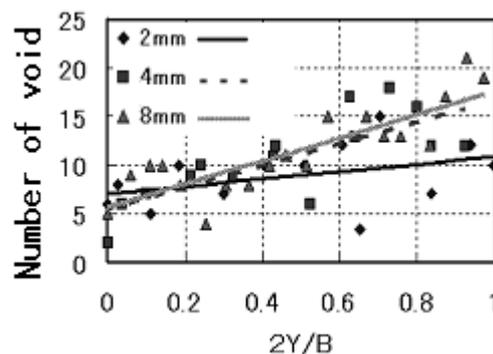


図3 $20\mu\text{m}$ 以上のディンプルの分布

(2) 数値解析ソフトの整備

Gurson の構成式を導入した有限要素法ソフトを完成し、実験のシミュレーションを行った。混合モード負荷下での破壊挙動は、従来多くの解析ソフトで用いられているモデルでは説明できないことがわかったので、モデ

ルの改良を行った。
改良点の一つは、ボイド発生モデルである。汎用商業コードで用いられている発生モデルは塑性ひずみが発生の支配因子であるとするものである。ここに、応力も支配因子の一つとなる項を追加した。すなわちボイド発生モデルは下式で与えられる。

$$\dot{f} = A(\dot{\sigma}_m + \dot{\sigma}_{kk} / 3) + B\dot{\epsilon}_m^p \quad (1)$$

ここで f はボイド率であり、 $\dot{\sigma}_m$ は相当応力 $\dot{\sigma}_{kk}$ 、 $\dot{\epsilon}_m^p$ は垂直応力 $\dot{\epsilon}_m^p$ の和、 $\dot{\epsilon}_m^p$ は相当塑性ひずみを示す。

(1)式の右辺第一項が、ここで追加された項であり、これを導入することで混合モード負荷下でのき裂進展挙動がシミュレーション可能となった。

改良点の二つ目はボイド成長モデルである。従来は球状ボイドの成長のみを考慮していたが、シヤリップ領域ではせん断変形によりボイドが引き延ばされる。それを考慮するとボイドの成長モデルは下式となる。

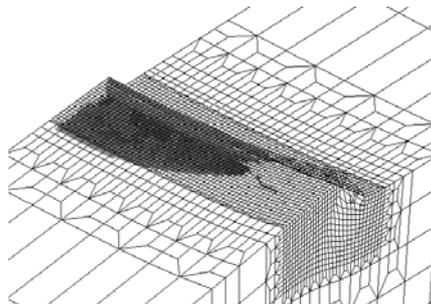
$$\dot{f} = (1-f)\dot{\epsilon}_{kk}^p + \dot{\gamma}^p \alpha^2 \quad (2)$$

ここで γ はせん断ひずみ、 α はディンプルのアスペクト比である。この項を追加したことで、傾斜破壊のシミュレーションが可能となった。

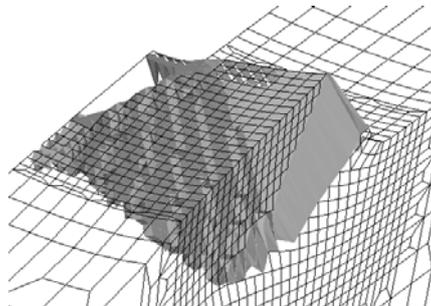
(3) 数値シミュレーション

(a) 板厚の影響

図 4(a)には数値シミュレーションの結果得られた、板厚 8 mm の試験片の平坦破壊領域を



(a) 8mm 試験片の平坦破壊領域



(b) 2mm 試験片のシヤリップ破壊領域

図 4 数値解析により得られた延性破面

示す。板厚の多くの領域で平坦破壊が生じている。また図 4(b)には板厚 2mm の試験片のシヤリップ破壊領域を示す。板厚が薄くなるとシヤリップ領域が大きくなるのが分かる。このようにここで開発した数値解析ソフトを用いることで板厚の延性破壊に及ぼす影響を評価することが可能であることが確認できた。

(b) 混合モード負荷の影響

図 5(a)には混合モード比 0.25 の試験片の表面での破壊の様相を示す。混合モードではこのようにき裂が一方向に優先的に進展する。

(1)式、(2)式に示したモデルの改良を行ってこの問題をシミュレーションしたところ、図 5(b)のように実験とよく一致するき裂進展の結果を得た。



(a) 実験結果

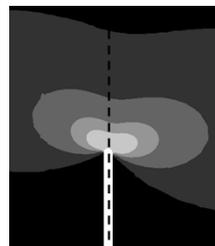


(b) 数値解析結果

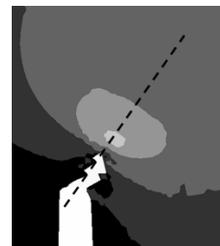
図 5 混合モード比 0.25 での破壊

こうした破壊の進展方向は、試験片中央部では応力三軸度が、表面では相当塑性ひずみが支配的な因子となっていることが明らかとなった。一方ボイドの成長項の推移を調べたところ、実験で得られたディンプル系の変化とよく対応する結果となった。

また混合モード下での延性き裂進展は、モード I 状態となる方向に生じることも確認された。図 7(a)は混合モード比が 0.25 の場合のき裂進展前の応力分布である。き裂先端に対して非対称の応力分布となっている。延性き裂が 0.3mm 進展した後の応力分布は図 7(b)に示している。応力分布が進展したき裂線に対して対称になっていることが分かる。これはき裂先端の応力状態が混合モード状態からモード I 状態に遷移したことを意味している。これは疲労き裂進展と同じ傾向である。



(a) 進展前



(b) 進展後

図 7 き裂先端の応力分布

(c) 複数き裂の相互作用の評価

原子炉構造の維持基準では、二つのき裂の相互作用の評価法が規定されている。し

しかし実際の破壊過程の解析は行われていないので、その基準の保守性を確認するため数値シミュレーションを行った。図7には二つの段違いき裂が平行に存在する問題を示す。この問題を数値シミュレーションした結果を図8に示す。二つのき裂は相互作用により互いに近づく方向に進展し、最終的に合体している。これは実験結果とよく一致している。またこのときの荷重—変位関係から、維持基準に基づいたき裂の相互作用の評価を行い、維持基準が保守的な評価法であることを確認した。図9には一方が斜めのき裂の場合の解析結果を示す。この場合もき裂の合体が生じている。またき裂の数が三つの場合、き裂が二つとも斜めに存在する場合など、パラメータを変更して数値シミュレーションを行った。その結果得られた荷重—変位関係から相互作用の

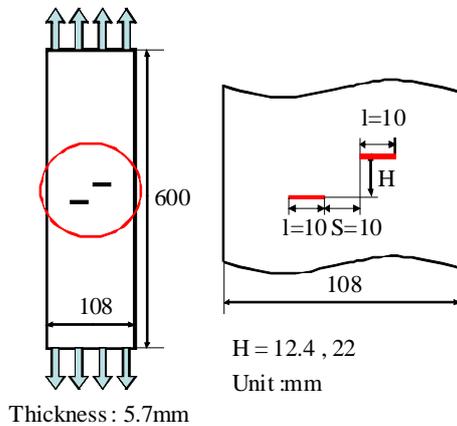


図7 二つの平行な段違いき裂

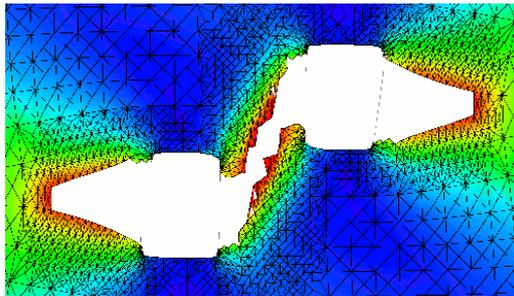


図8 二つの平行き裂の合体

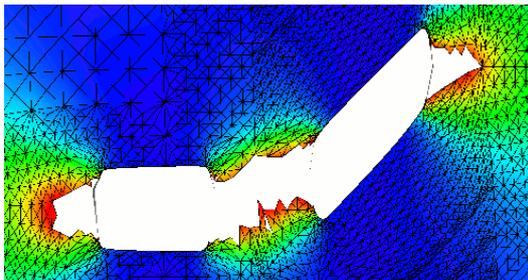


図9 一方が斜めのき裂の合体

効果を評価したところ、いずれも維持基準により保守的に評価できることを確認した。これにより実験を行わずにシミュレーションだけで保守性の確認ができることを確かめた。

また原子力設備の配管の延性破壊シミュレーションを行い、配管内壁からの表面き裂が外表面に貫通してゆく現象のシミュレーションを行うことができた。

(d) ソフトの普及と今後の利用の見通し
以上の研究成果を以下に示す論文で発表し、学会で公表してきた。またこの問題に関心の高い研究者のいる、諏訪東京理科大学、上智大学、電力中央研究所、(株)日立製作所日立研究所等にここで得られた成果を公開し、開発したソフトを公開・提供した。今後、原子炉構造の維持基準の高精度化に役立たせることができるものと期待している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

1. 菊池正紀、山王丸将吾 “混合モード荷重下における延性破壊機構の研究 (第2報, 板厚の影響)” 日本機械学会論文集A編、75巻 751号 pp.353-359, 2009
2. XIE Wei, HUANG Qiqing, Masanori Kikuchi “Study on the Stress Intensity Factor For Mixed Mode Surface Crack Under Three Point Bending” Advanced Materials Research, Vol.33-37, pp.85-90, 2008
3. M.Kikuchi, S.Sannoumaru “ Study on ductile fracture including shear-lip fracture under mixed mode loading condition ” Advanced Materials Research, Vol.33-37, pp.23-28, 2008
4. Masanori Kikuchi, Shogo Sannoumaru “Dimple Fracture Simulation under Mixed Mode Loading Condition” Key Engineering Materials Vol.385-387, pp.757-760, 2008
5. 菊池正紀、山王丸将吾 “混合モード荷重下における延性破壊機構の研究” 日本機械学会論文集A編、74巻 745号 pp.1235-1241, 2008
6. 菊池正紀、出羽辰也、山王丸将吾 “SUS316L材の延性破壊機構に関する研究” 日本実験力学学会講演論文集・2008・pp.331-33
7. 菊池正紀、山王丸将吾 “混合モード負荷下での延性破壊機構の研究” 日本機械学会第57期学術講演会講演論文集・2008・pp.53-54
8. 菊池正紀、山王丸将吾 “シヤリップ破壊も含めた延性破壊過程の研究” 日本機械学会論文集A編・73巻・732号・2007年8月 pp.934-941
9. M.Kikuchi, S.Sannoumaru “ Numerical Simulation of Ductile Fracture Process including Shear-Lip Fracture ”

Proceedings of International Conference
on Computational & Experimental
Engineering and Sciences, January 2007

[学会発表] (計 10 件)

1. Masanori Kikuchi, Shogo Sannoumaru, “Study on The Ductile Fracture Including The Shear-Lip Fracture”The 8th International Conference on Fracture and Strength of Solids, Penang Island · Copthorne Orchid Hotel, 2009
2. 菊池正紀 “破壊シミュレーション ～疲労破壊と延性破壊シミュレーション～” 第 13 回 C A E 活用事例セミナー、北九州市・北九州テクノセンター、2008
3. 菊池正紀、山王丸将吾、出羽辰也 “ステンレス鋼の板厚効果に関する研究” 日本機械学会 第 21 回計算力学講演会 CDM2008、琉球大学工学部 (沖縄)、2008
4. M.Kikuchi, S.Sannoumaru “Dimple Fracture Simulation under Mixed Mode Loading Condition”7th International Conference on Fracture and Damage Mechanics, Seoul, Korea, 2008
5. 菊池正紀、出羽辰也、山王丸将吾 “SUS316L材の延性破壊機構に関する研究” 日本実験力学会 2008 年度年次講演会、北海道・北海道大学、2008
6. Masanori Kikuchi and Shougo Sannoumaru “Dimple Fracture Simulation under Mixed Mode Loading Condition”International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, Honolulu, Hawaii USA, 2008
7. 菊池正紀、山王丸将吾 “混合モード負荷下における延性破壊機構の研究” 日本機械学会・M&M2007 材料力学カンファレンス、東京大学 生産技術研究所、2007
8. XIE Wei, HUANG Qiqing, Maasnori Kikuchi “Study on the Stress Intensity Factor For Mixed mode Surface Crack Under Three Point Bending”7th International Conference on Fracture and Strength of Solids, Urumqi, China, 2007
9. Masanori Kikuchi, Shogo Sannoumaru “Study on ductile fracture including shear-lip fracture under mixed mode loading condition”7th International Conference on Fracture and Strength of Solids, Urumqi, China, 2007
10. Masanori Kikuchi “Numerical Simulation of Ductile Fracture Process including Shear-Lip Fracture”International Conference on Computational & Experimental Engineering & Sciences Miami, USA, 2007

[その他]
ホームページ等

<http://kikuanni.me.noda.sut.ac.jp/index.i.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池正紀 (KIKUCHI MASANORI)

研究者番号：90107540