

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18323

研究課題名(和文) 等価分布応力下におけるき裂結合力モデルに関する研究

研究課題名(英文) A fundamental study for a strip yield modeling under equivalent distributed stress

研究代表者

田中 智行 (Tanaka, Satoyuki)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：20452609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：任意応力分布下に存在するき裂に対し等価分布応力の概念に基づくき裂結合力モデルの定式化を行い、有限要素法や既存の破壊靱性評価法との比較・検討、三点曲げ試験などにおけるCTOD評価法との関連性について検討を行った。構造的応力集中場に存在する表面き裂に対して本手法を適用しCTODを算出した。有限要素法や既存の算式との比較を行い提案法の妥当性について検討した。

研究成果の概要(英文)：A fundamental study for a strip yield modeling based on an equivalent distributed stress is carried out. The fracture mechanics theory is formulated and discretized using a program. The numerical results are compared with those of finite element results and brittle fracture testing guidelines. Relation between classical criteria and presented approach are investigated. The proposed approach is adopted two-dimensional edge crack problem and three-dimensional surface crack problems. The results are examined.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：破壊力学 有限要素法 材料力学

1. 研究開始当初の背景

脆性破壊問題は当初、小規模降伏問題として線形破壊力学をもとに発展してきた。その後、溶接構造物の脆性破壊事故を経験し、破壊靱性値の高い鋼材や溶接材料の開発が行われている。それに従い構造物を高応力下で使用する試みがなされ、小規模降伏が成立しない状態での破壊が問題になってきている。

大規模降伏条件下の脆性破壊の評価基準に関しては国内外において規格化され、多くの実績があるものの、さまざまな仮定を用いて要求き裂先端開口変位 (Crack Tip Opening Displacement: CTOD) を与えている。本研究の最終的なゴールは、溶接止端部など構造的応力集中部に存在する欠陥に対して、最深部の CTOD だけでなく、き裂マウス部のき裂開口変位 (Crack Mouth Opening Displacement: CMOD) が得られると期待される等価分布応力 (Equivalent Distributed Stress: EDS) 下でのき裂結合モデルを提案し、CTOD による溶接構造物の破壊靱性評価法を確立することである。限界 CTOD 値を求めるに際して使用されている三点曲げ試験片や CT 試験片に対してもき裂結合モデルを構築し、提案法で得られる CTOD をもとに脆性破壊評価が行えるかどうかの検討を行う。本研究では破壊力学手法、プログラム開発、二次元/三次元有限要素法 (Finite Element Method: FEM) 解析を用いて、これらの基礎的研究を実施した。

2. 研究の目的

脆性破壊試験を行う場合、破壊力学パラメータとして知られている応力拡大係数や J 積分値は計測することが容易ではないが、CTOD は間接的ではあるがクリップゲージなどを用いて測定できる量であり直感的でわかりやすい。CTOD を評価する際の代表的な破壊力学理論として Dugdale モデルがある。Dugdale モデルでは、一様分布応力下においてき裂前方に形成される引張塑性域までき裂と仮想し、仮想き裂上下面に降伏応力相当の結合力 σ_{YS} が働くとしたときの実き裂先端での開口量 δ を CTOD としている。この理論をベースとして Wells はこの CTOD が材料固有の値となった時に不安定破壊するという COD 仮説を提案している。また、Ingham らは切欠き付き三点曲げ試験片でマウス部近傍が剛体変形すると仮定して CTOD の評価を行っている。この方法では、リガメント線上のある点を中心に回転変形するとしてマウス部の開口変位 V_g から CTOD を換算している。三点曲げ試験は手軽に行えるため脆性破壊試験の基準として一般的に試験が行われている。しかし、Dugdale モデルにおける CTOD とは定義

が異なる。

これまでの脆性破壊基準ではき裂底での R 止まりの開口変位を CTOD と定義したり、実き裂先端から ± 45 度の線を引き、それとき裂面との 2 箇所の交点間の距離を CTOD とするなど、実測できる量に着目した種々の CTOD が定義されてきた。これらは、Dugdale モデルで定義したもとの CTOD とは異なり、破壊力学理論において物理的意味が明確でない量である。これまでに、さまざまな CTOD が提案されてきた理由として、Dugdale モデルは一様応力分布下のみでしか定式化されておらず、任意応力分布下におけるき裂結合モデルの CTOD を得る手法が確立されてこなかったためである。

実構造中に存在する三次元き裂の応力拡大係数と全く等しく変化する他の系におけるき裂は、弾性力学的にほぼ同じ力学的環境下になると考えられる。すなわち、三次元表面き裂最深部のき裂長さ-応力拡大係数の関係を無限板中の直線き裂上に再現する仮想応力である EDS を求めることができれば、三次元の破壊現象をそれと等価な二次元破壊問題へと置き換えることができる。さらに、EDS 上でのき裂結合モデルを構築することで、当初 Wells が定義したき裂先端開口変位値と同じ物理量 (き裂先端位置での活固有変位) が計算でき、大規模降伏条件下での脆性破壊や、無き裂からの高精度な疲労き裂進展解析が期待できる。本研究では活固有変位および既存の破壊靱性値との比較についても検討を行う。活固有変位とはき裂を含む構造物の弾塑性 FEM 解析を行い、き裂平面に垂直な線上に沿うリガメント部のき裂面垂直方向の塑性ひずみを積分した線分にき裂結合力が弾性的に作用して得られる線分の長さである。

本研究の目的は、溶接止端部など構造的応力集中部に存在する欠陥の最深部の CTOD だけでなく、マウス部の COD が得られると期待される EDS 下でのき裂結合モデルを提案し、CTOD による溶接構造物の破壊靱性評価法を確立することである。そして、限界 CTOD 値を求めるに際して使用されている三点曲げ試験片や CT 試験片に対してもき裂結合モデルを構築し、提案法で得られる CTOD をもとに脆性破壊評価が行えるかどうかの検討を行うものである。

3. 研究の方法

Dugdale モデルは一様分布応力下での破壊力学理論であったが、本研究では任意応力分布下でもき裂結合モデルを取り扱えるような定式化を行なった。さらに無き裂からのき裂生成をモデル化するために微小き裂

生成時の特異性を考慮した EDS について検討した。また活固有変位が脆性破壊基準のひとつになり得るかについて検討を行うため、脆性破壊試験モデルや溶接継手モデルに対して二次元や三次元 FEM 解析を用いて開口変位および活固有変位を求め、それらの結果の詳細な検討を行った。

4. 研究成果

本研究では以下の3点を目標に研究を実施し、以下の結果を得た。

(i) 任意応力分布下に存在するき裂に対し EDS の概念に基づくき裂結合モデルの定式化を行い、FEM や既存の破壊靱性評価法との比較・検討、三点曲げ試験などにおける CTOD 評価法との関連性について検討を行った。

二次元破壊力学問題では、端部き裂のき裂長さ-応力拡大係数の関係、および Paris の相反定理を用いて CTOD, CMOD の評価を行った。具体的にはき裂面に集中荷重が作用する場合の片側き裂付帯板および CT 試験片を例題に、応力拡大係数と COD の関係について FEM を用いて詳細な検討を行い、既存の算式との比較を行ない十分な精度が得られていることを確認した。さらにこれらの関係を用いて、三点曲げ COD 試験片および CT 試験片に対して Paris の相反定理をもとにき裂結合モデルの開発を行なった。FEM により得られた結果およびき裂結合モデルにより得られた結果は良好な一致を示すことを確認し、開発したプログラムの妥当性についても確認した。また、解析における境界条件が応力拡大係数や CTOD, CMOD に与える影響、Ingham や WES1108 の算式との比較についても検討を行った。

三次元問題の場合、き裂長さ-応力拡大係数の関係を二次/三次スプライン関数で補間し EDS を評価した。CTOD, CMOD の評価には無限板中に存在する貫通き裂の算式を用いた。実際の破壊力学問題では、貫通き裂の問題だけでなく端部き裂(三次元では表面き裂)の問題も取り扱うようにする必要があり、き裂開口部に該当する微小き裂領域に特異関数を導入する、もしくは集中荷重を導入するなど離散化レベルでの解析精度に関する検討を行った。得られた結果を二次元/三次元弾塑性 FEM 解析と比較し、開発したプログラムの妥当性について検討した。

(ii) 構造的応力集中場に存在する表面き裂に対して本手法を適用し CTOD を算出した。FEM や既存算式との比較を行い提案法の妥当性について検討した。

矩形板中の表面き裂問題、また構造的応力集中場に存在するき裂として三次元の溶接継手の試験片モデルを作成した。活固有変位を評価するために表面き裂最深部では非常に細かく規則的な格子状要素を生成した。三次元弾塑性解析を行い、活固有変位の評価を行った。二次元問題と同様に三次元問題でもき裂先端部の塑性域から CTOD, CMOD に至るまで滑らかな活固有変位を得ることが可能であることを確認した。一方、き裂先端部の塑性域が進むと溶接止端部など他領域での構造不連続部による応力集中が影響を及ぼすため、滑らかな活固有変位を得ることができなくなることが分かった。き裂を含む構造の塑性ひずみ分布から、同じ構造を持つ無き裂状態での塑性ひずみ分布の差を取ることによって活固有変位を評価できるか等の検討を行った。

開発したき裂結合モデルを用いて三次元弾塑性 FEM 解析との比較を行なった。現在のき裂結合モデルでは開口変位を評価するために貫通き裂の開口変位式を用いている。そのことによりマウス部の開口変位を FEM の結果と比較して低めに見積もることが分かった。三次元問題のき裂結合モデルに対して改良を行ない、三次元 FEM 解析の結果を高精度に予測できようなプログラム開発を行う必要があるとの課題が残った。

(iii) 三点曲げ脆性破壊試験用のジグおよび試験片を設計し、脆性破壊試験を実施した。

開発したき裂結合モデル、二次元および三次元の弾塑性 FEM の妥当性を行なうために鋼材の三点曲げ脆性破壊試験を実施した。鋼材として SS400 を用いた。脆性破壊試験を実施するためのジグおよび試験片の設計を行った。WES1108 に即した試験を行うためにジグを開発し、脆性破壊試験片に対しても疲労予き裂を導入した試験片を用いた。き裂先端近傍に熱電対を配置し温度制御のもと複数の温度域での脆性破壊試験を実施し、変位-荷重曲線、クリップゲージを用いた CMOD の評価を行った。これらの脆性破壊試験から CMOD や CTOD に関する基礎的知見を得た。

これまでに二次元貫通き裂問題や端部き裂問題において脆性破壊問題や疲労問題に対する活固有変位の有効性は示されていた。本研究では三次元問題において活固有変位が有効であるかどうかを検討した。矩形板中の表面き裂問題や溶接継手など構造的応力集中部に存在する表面き裂問題に対して、き裂の開口変位および活固有変位を評価した。三次元 FEM 解析により得られた結果では実き裂の COD と活固有変位が全体として連続していることが確認できた。CTOD はき裂先

端位置での活固変位とみなすことができるので Dugdale モデルにより定義された CTOD と同じ定義と考えることができることから、二次元問題だけでなく三次元問題においても活固変位が脆性破壊評価を行うための破壊基準として有効である可能性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

1. S. Tanaka, H. Suzuki, S. Sadamoto, S. Okazawa, T.T. Yu, T.Q. Bui, Accurate evaluation of mixed-mode intensity factors of cracked shear-deformable plates by an enriched meshfree Galerkin formulation, Archive of Applied Mechanics, Vol.87, pp.279-298, 2017. (査読有)
2. M. Imachi, S. Tanaka, T.Q. Bui, Mixed-mode dynamic stress intensity factors evaluation using ordinary state-based peridynamics, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol.93, pp.97-104, 2018. (査読有)

〔学会発表〕(計1件)

1. 大沢直樹, 田中智行, 田中和輝, ノッチ底近傍の K 値を利用した等価分布応力決定法に関する一考察, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第24号 2017S-GS7-1, pp.393-397, 2017.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
6. 研究組織
(1)研究代表者
田中 智行 (TANAKA SATOYUKI)
広島大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：20452609

研究者番号：

(2)研究分担者 ()

研究者番号：

(3)連携研究者 ()

研究者番号：

(4)研究協力者 ()