

氏 名 ( 本 籍 )	阿 部 安 秀 (東京都)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 号 番 号	甲第 93 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 11 年 3 月 25 日
専 攻	生産開発システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	強制開口外力を受けるき裂の応力関数と応力集中に関する研究 (The study of stress functions of a crack with pressure widening the crack and stress concentration)
学位論文審査委員	(主査) 教授 中 川 建 治 (副査) 教授 森 本 博 昭 教授 六 郷 恵 哲

## 論文内容の要旨

土木工学における主要な材料の一つであるコンクリートや岩石などの破壊進行過程では、マイクロクラックの発生・成長・合体に起因した破壊進行領域（プロセスゾーン）がき裂先端前方に形成されることが知られている。現在の破壊力学における主要な研究の一つに、この塑性域の変位と応力状態を含めた破壊挙動をいかに現実に則したものとして表現するかが課題となっている。本研究は、き裂先端のプロセスゾーンにおける有限な応力集中と開口変位をマクロ的に表現し得る応力関数を基礎に、一様弾性体中のき裂開口部に強制開口外力が作用する場合の解析解を導き、き裂近傍における応力集中の特性を実験結果との対比も含め研究したものである。対象としたモデルは、無限板中の一本の中心き裂に対して任意の分布幅を有する強制開口外力が面内（モードⅠ）または面外（モードⅢ）に作用するものである。面内問題においては、さらに導いた解を基礎に矩形板、自由辺を有する半無限版および円孔周辺の放射状き裂の問題に拡張したものである。

矩形板および自由辺を片側に有する半無限板の問題においては、それぞれき裂と自由辺との距離が導いた解析解の精度に与える影響を解の適用限界として検討した。矩形板の解析手法をこの適用限界を考慮しつつ、モルタル供試体を用いた孔内載荷試験結果に適用した。試験の内容は、中央の円孔に内圧を載荷し強制的にき裂を発生・進展させ、き裂周辺のひずみをゲージにより観測することによりき裂発生位置を確認したものである。作用荷重とき裂発生位置より逆推定したプロセスゾーン長さは、ばらつきがあるが約 1 cm という結果が得られた。今回検討した試験結果と計算値では開口変位量および測定点でのひずみ量は共に妥当性のある範囲であり、ひずみゲージを利用したき裂進展実験と矩形板に対する解析手法が、プ

プロセスゾーンの長さの推定に有効であり、かつき裂進展の予測に容易に活用可能であることを示した。また自由辺を有する半無限板の応力関数を、静的破砕剤工法による岩盤の破砕実験に対して適用した。実験は9個の円孔を持つモデルについて行われたため、解析では応力関数を複数重ね合わせる手法を用い、大変形問題ではあるが実験結果の開口変位量および自由面方向への変位量と近似する値を求めることが出来た。隣接するき裂のプロセスゾーン同士が相互に重なり合うという仮定を用いることにより、本解析関数を塑性力学の分野である大変形問題まで適用可能であることを示した。

無限板内の円孔周辺の放射状き裂に対しての解では、静的破砕剤や薬液注入時の膨張作用により発生するき裂を想定した円周上でき裂が開いたモデルと、鉄筋の腐食膨張などを想定した円周上で円周方向の変位が0に拘束されたモデルについて検討をおこなった。き裂長さに対しプロセスゾーン長さの比が小さくなると応力集中が大きくなることは既に報告されており、放射状き裂においても同様の結果が得られた。き裂本数ならびに円孔半径の変化は、放射状き裂特有のものであるが、いずれも増加すると最大応力の低下が認められた。

直線状き裂に対する面外問題では、き裂線に沿う断面力に符号反転現象が確認された。せん断力のこのような反転現象の検証として、プロセスゾーン部分を面外方向のばねに置き換えたシェル要素モデルを設定して、FEM解析により比較検討を行った。その結果ばね常数をき裂先端からプロセスゾーン端部の完全弾性体部まで指数関数的に増加させたモデルを設定することにより符号反転現象を裏付けることができた。このことは、古典理論に基づく薄板の曲げの微分方程式を基本とした場合には、面外方向のせん断力の符号反転現象は当然の帰結と結論付けられた。

直線状き裂に対する強制開口の面内問題と面外問題における応力および断面力集中の特性の違いを、分布荷重の作用幅およびプロセスゾーン長さの変化に対して検討した。その結果、面内問題においてはき裂先端に、逆に面外問題においては開口部中央に荷重を集中させることがより大きな応力集中を発生させることが判明した。プロセスゾーン長さの影響は、面外問題では断面力の符号反転のため正負の大きな応力集中が生じることになり、最大断面力に与える影響は面内問題より大きくなることが判明した。

## 学位論文等審査結果の要旨

土木工学における主要な材料の一つであるコンクリートや岩石などの破壊進行過程では、マイクロクラックの発生・成長・合体に起因した破壊進行領域（プロセスゾーン）がき裂先端前方に形成されることが知られている。現在の破壊力学における主要な研究の一つに、この塑性域の変位と応力状態を含めた破壊挙動をいかに現実にもつたものとして表現するかが課題となっている。本研究は、き裂先端のプロセスゾーンにおける有限な応力集中と開口変位をマクロ的に表現し得る応力関数を基礎に、一様弾性体中のき裂開口部に強制開口外力が作用する場合の解析解を導き、き裂近傍における応力集中の特性を実験結果との対比も含め研究したものである。対象としたモデルは、無限板中の一本の中心き裂に対して任意の分布幅を有する強制開口外力が面内（モードⅠ）または面外（モードⅢ）に作用するものである。面内問題においては、さらに導いた解を基礎に矩形板、自由辺を有する半無限版および円孔周辺の放射状き裂の問題に拡張したものである。

矩形板および自由辺を片側に有する半無限版の問題においては、それぞれき裂と自由辺との距離が導いた解析解の精度に与える影響を解の適用限界として検討した。矩形板の解析手法をこの適用限界を考慮しつつ、モルタル供試体を用いた孔内載荷試験結果に適用した。試験の内容は、中央の円孔に内圧を載荷し強制的にき裂を発生・進展させ、き裂周辺のひずみをゲージにより観測することによりき裂発生位置を確認したものである。作用荷重とき裂発生位置より逆推定したプロセスゾーン長さは、ばらつきがあるが約1 cmという結果が得られた。今回検討した試験結果と計算値では開口変位量および測定点でのひずみ量は共に妥当性のある範囲であり、ひずみゲージを利用したき裂進展実験と矩形板に対する解析手法が、プロセスゾーンの長さの推定に有効であり、かつき裂進展の予測に容易に活用可能であることを示した。また自由辺を有する半無限版の応力関数を、静的破砕剤工法による岩盤の破砕実験に対して適用した。実験は9個の円孔を持つモデルについて行われたため、解析では応力関数を複数重ね合わせる手法を用い、大変形問題ではあるが実験結果の開口変位量および自由面方向への変位量と近似する値を求めることが出来た。隣接するき裂のプロセスゾーン同士が相互に重なり合うという仮定を用いることにより、本解析関数を塑性力学の分野である大変形問題まで適用可能であることを示した。

無限板内の円孔周辺の放射状き裂に対しての解では、静的破砕剤や薬液注入時の膨張作用により発生するき裂を想定した円周上でき裂が開いたモデルと、鉄筋の腐食膨張などを想定した円周上で円周方向の変位が0に拘束されたモデルについて検討をおこなった。き裂長さに対しプロセスゾーン長さの比が小さくなると応力集中が大きくなることは既に報

告されており、放射状き裂においても同様の結果が得られた。き裂本数ならびに円孔半径の変化は、放射状き裂特有のものであるが、いずれも増加すると最大応力の低下が認められた。

直線状き裂に対する面外問題では、き裂線に沿う断面力に符号反転現象が確認された。せん断力のこのような反転現象の検証として、プロセスゾーン部分を面外方向のばねに置き換えたシェル要素モデルを設定して、FEM解析により比較検討を行った。その結果ばね常数をき裂先端からプロセスゾーン端部の完全弾性体部まで指数関数的に増加させたモデルを設定することにより符号反転現象を裏付けることができた。このことは、古典理論に基づく薄板の曲げの微分方程式を基本とした場合には、面外方向のせん断力の符号反転現象は当然の帰結と結論付けられた。

直線状き裂に対する強制開口の面内問題と面外問題における応力および断面力集中の特性の違いを、分布荷重の作用幅およびプロセスゾーン長さの変化に対して検討した。その結果、面内問題においてはき裂先端に、逆に面外問題においては開口部中央に荷重を集中させることがより大きな応力集中を発生させることが判明した。プロセスゾーン長さの影響は、面外問題では断面力の符号反転のため正負の大きな応力集中が生じることになり、最大断面力に与える影響は面内問題より大きくなることが判明した。