

コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

これまで主に、鉄筋コンクリート部材（以下、RCと記述する）やコンクリートの亀裂挙動は、目視観察、変位計そしてひずみゲージによる測定が殆どであったが、近年、亀裂現象を捉え理解する物理概念の進展に依って、レーザ変位計、AE、X線などを用いてより詳細に測定されるようになってきている。しかしながら、これらの従来手法からだけでは、不均一性に富む粒子材料であるコンクリートの一般的な亀裂理論を打ち立てるための実験測定資料が、十分に揃えられていないのが、現状のようである。したがって、ひとつの亀裂現象を対象として、これを説明する多角的な資料を得るためには、亀裂機構を表現する新たな概念に基づいた測定・分析手法の開発が必要であると考えられる。

コンクリート亀裂機構の終局場である亀裂面の全体像の目視観察結果を、「ヒトが持つ形状認識感度の鋭敏さ」に依拠して判断すれば、亀裂面にある程度の凹凸の規則性が存在することを認めても、差し障りはないように思われる。しかしながら、過去には、著者が知る限りにおいて、コンクリート亀裂面の傾き、深さそして表面積などについて、統一された測定・分析概念から系統的に処理された例はないようであり、「亀裂面形状が、如何なる特徴を有しているのか」を知ることは、不均一粒粒子材料であるコンクリートから、規則性を有する亀裂面形状が形成される機構を知る「新しい測定概念と資料」を提供するものと期待される。

本論文では、コンクリート亀裂面の形状分析において必要とされる莫大な亀裂面3次元座標データの取得のために、利得性に優れた測定システムを構築し、これらの取得データを形状分析する新たな手法を提案した。さらに、この著者の提案手法を用いて、亀裂面形状の基本影響因子である亀裂形成応力モードが、亀裂面形状特性に及ぼす影響について明らかにすることを目的としており、本論文は5章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と現状における問題点を明らかにし、本論文の目的と範囲を定めて、研究の概要を記述した。

第2章「コンクリート亀裂面の形状測定手法の開発」では、光切断法に基づいた、コンクリート亀裂面の亀裂面画像（3次元座標データ）の測定システムを構築して、本測定システムがデータの利得性に優れていることを実証し、亀裂面座標解析方法について簡潔に解説を加えた。

第3章「種々の応力モードで形成された亀裂面の2次元形状分析」では、本測定システムで計測したコンクリート亀裂面の3次元座標データから断面プロフィールを切り出し、このプロフィールを直線要素で区分して亀裂微小面をモデル化し、この断面プロフィールモデルに適用して「亀裂面の傾斜・深さ・表面積」を2次元の視野で抽出する分析関数を

導出した。そして、粗面を模擬した鋼製試験片を作成し、さらにコンクリート亀裂形成応力の基本モードである「引張、割裂、曲げ、せん断」の各モード下でのコンクリート亀裂実験を行った。

粗面を模擬した鋼製試験片とコンクリート引張亀裂面の測定・2次元分析結果から、分解能0.125mm/dot、サンプリング間隔1mmを設定すると、亀裂面の2次元形状特性の動向を読み取れることが明かにされた。引き続き、これら2つの測定・分析パラメータを用いて、4種の応力モード（引張、割裂、曲げ、せん断）下で形成されたコンクリート亀裂面を2次元形状分析したが、以下のような結論を得た。

- 1) 傾斜密度2次元分布は、傾斜角零に関して対称性に富んだ上に凸の分布である。
- 2) 深さ密度2次元分布は、一つの密度ピーク値を有する上に凸なる傾向を示す。
- 3) 亀裂の平均深さ、crack band及び亀裂面積増加率は、引張モードと割裂モード下では、曲げモードとせん断応力モードの場合よりも小さくなる傾向がある。
- 4) 引張モードと割裂応力モード下の亀裂面の形状特性は相互に良く類似しており、引張亀裂面の形状特性は、通常の割裂試験の結果を用いて類推することができる。

第4章「種々の応力モードで形成された亀裂面の3次元形状分析」では、光切断法によって計測したコンクリート亀裂面の3次元座標データに亀裂微小面を表現する三角形要素を貼付し、亀裂面の3次元立体モデルを構築して、「亀裂面の傾き・深さ・表面積」を3次元の視野で抽出する分析関数を導出し、引張亀裂面を対象とした3次元形状分析結果から、「分解能とサンプリング間隔」の適正值を特定した。即ち、分解能0.125mm/dot、サンプリング間隔1.0mmと設定すると、亀裂面の3次元形状特性の動向を追跡できることを明かにした。

引き続き、亀裂形成応力モードを前出の4種変えて生成されたコンクリート亀裂面の3次元形状分析を行ったが、得られた結果は下記のように要約された。

- 1) 傾斜密度3次元分布は、「空洞の小さなドーム状の同心円分布」を描き、このとき想定亀裂面からの亀裂基準面の傾きは、「亀裂基準面の傾き角」で評価できる。
- 2) 深さ密度3次元分布は、「中央に大きな空洞部を持つカルデラ外輪山状の同心円分布」を呈する。
- 3) 亀裂の平均深さと亀裂面積増加率は、引張モードと割裂モード下では、曲げモードとせん断モードの場合よりも幾分小さく、そしてその亀裂発生帯領域（crack band）については、引張モードと割裂モードが曲げモードやせん断モードよりも薄くなる傾向がある。
- 4) 亀裂面の形状概念である「macro roughness」と「micro roughness」を、実態として、本分析概念から評価できることをはじめて明らかにした。
- 5) 引張モードと割裂モード下の亀裂面の形状特性は、比較的その傾向が互いに一致しており、引張亀裂面の形状特性の大要は、割裂試験の結果を用いて類推できるようなのである。

第5章「研究の総括と今後の展望」では、本論文の各章で得られた結果を総括し、さらに、本研究で引き続き進展される可能性が高い今後の研究課題と方向について述べた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	内山	武司
副査	教授	石山	祐二
副査	教授	城	攻
副査	教授	角田	與史雄
副査	助教授	上田	正生

学位論文題名

コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究

コンクリートは亀裂面の形成によって連続体から不連続体へと移行する脆性亀裂材で、材料特性の評価と物理モデルの構築如何によって、鉄筋コンクリート部材の変形挙動の理論解析値に少なからず影響を与える。コンクリートの実亀裂面から測定・分析した形状を基にした亀裂面の力学挙動の説明では、コンクリートの剪断亀裂実験の検証や構成則の構築手続きにおいて、亀裂面形状の適切な評価が必要不可欠な要素となっている。

コンクリート亀裂面の形状特性の測定・分析手法を、①レーザビーム光線を用いた光切断法による亀裂面座標測定システムの開発、②亀裂面の数値モデルの構築、③亀裂面の傾き・深さ・表面積を抽出する分析関数の導入、④測定・分析パラメータの最適値の確定、と体系的に扱い、亀裂面を形成する応力モードの相違が亀裂面の形状特性に及ぼす影響を明らかにすることを本論文の目的としている。

本論文の研究成果を以下に記す。

- (1) 亀裂面を模擬した鋼製試験片の深さ分析結果から、採用した測定システムの分解能を 0.135mm/dot 程度に設定すると深さ 1.0mm 程度の粗面の形状を精度良く分析できる。この結果を参考に、分解能とサンプリング間隔を変動させた引張亀裂面の測定・2次元分析結果から、分解能を 0.125mm/dot、サンプリング間隔を 1mm に設定すると、コンクリート亀裂面の 2次元形状特性の動向を読み取ることができること見出した。
- (2) コンクリート亀裂の実験において亀裂形成応力モードの基本である引張、割裂、曲げ、及び剪断を設定した 4 種の応力モード下での亀裂面を対象とし、提案した測定・分析パラメータによる 2次元形状分析結果から、傾斜密度 2次元分布は亀裂形成応力モードの如何に拘らず傾斜角零に関して対称性に富んだ凸状分布となる。深さ密度 2次元分布は、全般に一つの密度ピーク値を有する凸状となる傾向を示すが、引張モードと割裂モード下の分布偏差量は曲げモードと剪断モードの偏差量よりも小さい。亀裂の平均深さ、亀裂発生帯領域、及び亀裂面積の増加率は、引張モードと割裂モード下で亀裂発生領域が

薄い板状に近く、他方、曲げモードと剪断応力モード下では厚い領域に形成され、増加率が大きくなる傾向にある。また引張モードと割裂モード下の亀裂面の形状特性は相互に良く類似し、引張亀裂面の形状特性は、通常の割裂試験の結果を用いて類推できる。

- (3) 測定・分析パラメータを変動させた3次元分析結果から、分解能 0.125mm/dot、サンプリング間隔 1.0mm を設定すると、コンクリート亀裂面の3次元形状特性の動向を追跡できる。前出の4種の亀裂形成実験から生成される亀裂面の3次元形状分析から得られた結果は以下となる。傾斜密度3次元分布は、空洞の小さなドーム状の同心円分布となり、想定亀裂面からの亀裂基準面の傾きは、亀裂基準面の傾き角で評価できる。深さ密度3次元分布は、中央に大きな空洞部をもつカルデラ外輪山状の同心円分布を呈し、亀裂の平均深さと亀裂面積の増加率は、引張モードと割裂モード下では曲げモードと剪断モードの場合よりも幾分小さく、亀裂発生帯領域も、引張・割裂モードが曲げ・剪断モードよりも薄くなる傾向がある。引張・割裂モード下の亀裂面の形状特性は比較的傾向が一致し、引張亀裂面の形状特性は割裂試験の結果を用いて大要を類推できる。既に提案されている亀裂面の形状概念である macro roughness と micro roughness を実態として評価できることを明らかにした。

これを要するに、著者は、コンクリート亀裂面の形状特性分析手法として光切断法を採用した測定システムを構築し、亀裂形成の基本である応力モードの4種（引張、割裂、曲げ、剪断）について、亀裂面の傾斜密度、深さ密度、及び表面積の増加率を抽出する分析関数を導入して、応力モードの相違が亀裂面の形状特性に及ぼす影響を考察し、有益な多くの知見を得たものであり、コンクリート構造工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。