

# 論文の内容の要旨

氏名：穴 吹 拓 也

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：せん断力を受ける鉄筋コンクリート造耐震壁のひび割れ幅・面積の定量化に関する研究

## 第1章：序論

一般に鉄筋コンクリート（以下、RCとする。）造部材の損傷度の評価や補修要否の検討には、ひび割れ幅が用いられる。また、壁見付面におけるひび割れ面積（ひび割れ幅×ひび割れ長さにより評価）はひび割れ補修費用の予測に有用と考えられ、また、防水性や水密性を評価するための漏水量の評価式にはひび割れ幅とひび割れ長さが含まれている。地震後の補修要否や建物機能を予測する技術は、既存建物の安全性や使用性を評価し、長く使用すること（長寿命化）に役立ち、ひいては持続可能な社会づくりに貢献できる。しかしながら、現状ではそれらを計る指標となるひび割れ幅やひび割れ面積を精度良く評価できる解析手法や予測式が無い。

コンクリート系構造物を対象としたシミュレーション技術の一つに有限要素解析がある。有限要素解析はコンクリートのひび割れや鋼材の降伏といった非線形事象を考慮し、地震時の構造物の挙動を予測することが可能であり、近年では、計算機の性能の向上により、建物全体をモデル化した大規模な解析も見られるようになった。しかしながら、一般的な非線形有限要素解析では、耐力や変形は予測できるが、現状ではひび割れの本数やひび割れ幅の予測は困難である。これはコンクリートのひび割れを表すために広く用いられる分散ひび割れモデルが、要素内に一樣にひび割れが分布すると仮定するものであり、ひび割れの幅や長さを直接評価することができないことによる。有限要素解析によりひび割れの発生間隔やひび割れ幅を評価する研究事例もあるが、その手法を用いるためには、解析プログラムに複雑な処理を組み込む必要がある。そこで、本研究では、広く普及している一般的な分散ひび割れモデルを用いた有限要素解析の結果から、ひび割れの進展度合いを表す指標を算出し、その指標により、ひび割れ面積や最大ひび割れ幅を定量的に評価することを目的とした。

## 第2章：既往の研究

RC造構造物のひび割れの定量評価手法やそれを構築するための基礎実験に関する研究事例を挙げ、その概要及び現時点での課題を整理した。

非線形有限要素解析によりRC造構造物に生じるひび割れ幅を評価する手法に関する研究事例はあるが、実務への導入が容易でかつ一定の精度が得られる手法は現状では確立されていない。また、壁見付面におけるひび割れ面積もRC造耐震壁の損傷度を評価する指標の一つとなり、建物の水密性能などの機能評価への展開も考えられるが、非線形有限要素解析によりひび割れ面積を評価する方法については研究事例がなく、検証のための実験データそのものも殆ど無いのが現状である。従って、有限要素解析によるひび割れ定量化手法を提案するだけでなく、その検証用データを取得することも、本研究を実施する上では重要であることが分かった。

## 第3章：ひび割れデータ取得のための鉄筋コンクリート造耐震壁の実験

配筋条件を変数とした5体のRC造耐震壁の静的繰返し載荷実験を行い、壁板に生じるひび割れ幅やひび割れ間隔に関するデータを詳細に取得した。実験より、壁筋比が大きくなる程、ひび割れは壁全体に分散し、それぞれのひび割れ幅が小さくなる傾向を確認した。また、壁筋比が等しい場合は、より鉄筋径が大きく鉄筋間隔が広い方あるいはダブル配筋よりもシングル配筋とした方が大きなひび割れ幅が生じる傾向が見られた。

変形角0.1%~0.3%の範囲において、壁板部分で計測された最大ひび割れ幅と変形角の間には正の相関性があり、壁筋比等の配筋条件の影響を受けることが示された。

また、壁見付面におけるひび割れ面積と変形角の間にも正の相関性が見られた。このひび割れ面積は、最大ひび割れ幅とは異なり、壁筋比等の配筋条件には依存せず、変形角に比例して増大することが示された。更に、壁見付面におけるひび割れ面積は壁見付面の元の面積からの増分とほぼ等しいことがわかった。

#### 第4章：非線形有限要素解析によるひび割れ面積の評価

実験結果に基づき、耐震壁のひび割れ面積が壁板の見付面積の増分により評価できると仮定し、有限要素解析により得られる節点変位及び要素ひずみからひび割れ面積を評価する二通りの方法を提案した。

解析モデルは試験体の対称条件を考慮し、壁厚方向の1/2を取り出した3次元モデルとした。コンクリートは六面体要素で表し、壁筋は鉄筋の剛性をコンクリート要素に均して重ね合わせる埋込み鉄筋でモデル化した。コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表し、非直交分散ひび割れモデルを用いて多方向に生じるひび割れを考慮した。5体の静的繰返し載荷実験を模擬した解析を行い、実験の荷重-変形関係における初期剛性や最大荷重を良好に再現した。

本解析においては節点変位に基づく評価法も要素ひずみに基づく評価法も殆ど一致し、解析により得られた壁見付面積の増分は、いずれも実験のひび割れ面積と良好に対応することが示された。なお、要素ひずみに基づく評価法は、熱による自由変形の影響を受けず、比較的計算式が簡便であることから、節点変位に基づく評価法よりも実用的な評価法と考えられる。

#### 第5章：非線形有限要素解析に基づくひび割れ進展指標の提案

ひび割れ面積及び最大ひび割れ幅と変形角の関係、更に有限要素解析によるひび割れ面積の評価法を関係付けて、有限要素解析に基づくひび割れ進展指標を提案した。ここで、最大ひび割れ幅と変形角の関係は線形関係で表すよりも、指数を0.5とするべき乗関係で表した方がより高い精度が得られることを確認した。また、べき乗関係の回帰係数は試験体の配筋条件等が影響しており、壁筋比、壁筋の径、壁と柱の平均軸応力度を説明変数とする重回帰式により良く表せることを示した。

ひび割れ進展指標の算定手順は以下のように定義した。有限要素解析のステップごとに解析モデルの要素ひずみから要素の体積増大率(式1)を求め、ひび割れ進展指標による判定基準として予め決めたひび割れ幅と前述の重回帰式によるべき乗関係の回帰係数から定義する基準化要素体積増大率(式2)で除して基準化し、その平方根を個々の要素のひび割れ進展度(式3)として求める。解析モデルの評価対象範囲における全ての要素のひび割れ進展度を、その要素の体積で重み付け平均して合算し、当該ステップのひび割れ進展指標(式4)を得る。

$$\Delta V_{\varepsilon} = 100 \times (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (式1)$$

$$\Delta V_{\varepsilon_0} = 0.46 \times (w_{cr0}/a)^2 \quad (式2)$$

$$Di(t)_{elm} = \sqrt{\Delta V_{\varepsilon} / \Delta V_{\varepsilon_0}} \quad (式3)$$

$$Di(t) = \sum (Di(t)_{elm} \times V_{elm}) / \sum V_{elm} \quad (式4)$$

ここで、 $\Delta V_{\varepsilon}$ は要素の体積増大率(%)、 $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ は要素の中心点で評価する局所方向ごとの垂直ひずみ、 $\Delta V_{\varepsilon_0}$ は基準化要素体積増大率(%)、 $w_{cr0}$ はひび割れ進展指標による判定基準とするひび割れ幅(mm)、 $a$ は配筋条件を考慮して評価するひび割れ幅と変形角の関係におけるべき乗回帰式の回帰係数、 $Di(t)_{elm}$ は要素のひび割れ進展度、 $Di(t)$ はひび割れ進展指標、 $V_{elm}$ は要素の体積(mm<sup>3</sup>)である。

ひび割れ進展指標は最大主応力度がひび割れ強度に達した要素が生じてから徐々に増大し、やがて指標が1.0に到達したとき、判定基準としたひび割れ幅に近いひび割れが生じていることを表すものである。

実験を対象とした非線形有限要素解析を実施し、ひび割れ進展指標の適用性を確認した。いずれの解析も、ひび割れ進展指標が1.0に到達したとき、判定基準としたひび割れ幅に近い最大ひび割れが生じており、ひび割れ進展指標により壁の最大ひび割れ幅の予測が可能であることを示した。

#### 第6章：結論

最後に本研究により得られた知見と今後の課題について整理した。

本研究では、配筋条件を変数とした5体のRC造耐震壁の静的繰返し載荷実験を行い、壁板に生じるひび割れのデータを詳細に取得した。壁見付面におけるひび割れ面積は、配筋条件によらず、変形角に比例して増大することが示された。また、ひび割れ面積は壁見付面の元の面積からの増分とほぼ等しいことがわかった。最大ひび割れ幅と変形角の間にも正の相関性があり、その関係は線形関係で表すよりも、指数を

0.5 とするべき乗関係で表した方がより高い精度が得られた。べき乗関係の回帰係数は試験体の配筋条件等が影響しており、壁筋比、壁筋の径、壁と柱の平均軸応力度を説明変数とする重回帰式により良く表された。更に、非線形有限要素解析に基づくひび割れ進展指標を提案し、ひび割れ進展指標により壁の最大ひび割れ幅の予測が可能であることを示した。

実験においては、壁厚、壁筋比、壁筋の径、配筋形式を試験変数としたが、ひび割れ幅やひび割れ面積に影響を及ぼす因子は、これらの他に柱軸力やコンクリート強度等も考えられる。本研究に用いた試験体のコンクリート強度の範囲は  $30\sim 40\text{N/mm}^2$  程度に限られており、各試験変数も 2 水準での検討に留まった。また、シングル配筋の実験データは少なく、熱ひずみの影響を考慮した実験的な検証は行っていない。ひび割れ進展指標の検討にあたり、最大ひび割れ幅と変形角の関係を、指数を 0.5 とするべき乗回帰式で整理したが、その指数はひび割れの発生本数に依存すると考えられ、検討の余地がある。以上のように、ひび割れ幅やひび割れ面積の評価精度を更に向上させるためには、より多くの変数、より広範囲のデータを用いることが課題である。

本研究を更に発展させることで、従来のシミュレーション技術では評価が難しかったひび割れ幅やひび割れ面積を精度良く評価できるようになり、地震被災後建物の補修要否の判定や建物機能評価等の実務に活用されることを望む。