

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 長 沼 一 洋

（副査） 教授 田 嶋 和 樹 教授 北 嶋 圭 二

鉄筋コンクリート構造では地震時に大きなせん断力を負担できる耐震壁が用いられることが多いが、中程度の強さの地震でも耐震壁にはひび割れを生じやすいという欠点がある。微小なひび割れであればそのまま継続使用が可能であるが、ひび割れ幅が一定以上に拡大すると内部の鉄筋が錆びたり、遮蔽機能の低下を招いたりするため、ひび割れ幅やひび割れの長さを定量的に予測する技術が求められている。

解析により鉄筋コンクリート構造の耐力や変形量を予測する技術は既に開発されており、近年では実務でも活用できる精度が得られているが、ひび割れ幅やひび割れの本数を予測することは難しいのが現状である。

申請者はこの点に着目し、鉄筋コンクリート構造の耐震壁に生じるひび割れの幅や本数がどのような因子の影響を受けているかを調べるため、地震時の応力状態を再現した構造実験を行い、耐震壁に生じるひび割れを1本ずつ詳細に計測している。通常の構造実験では荷重や変位などの測定データは計測器からの電気信号により瞬時に取り込むことができるが、コンクリートに生じるひび割れの幅や長さの計測は手作業になり、相当な時間と手間がかかるため、通常は写真やスケッチで記録するのが一般的である。申請者はこの実験の遂行に中心的役割を果たし、荷重の増大に伴ってひび割れが発生し、徐々に進展していく様子を詳細に計測している。得られた情報は膨大であり、そのデータを綿密に分析して、ひび割れ幅とひび割れの開口面積は耐震壁の配筋条件や変形量から推定することが可能であることを示している。さらに、実験を行った試験体を対象として有限要素法による非線形解析を実施し、解析から得られる情報に基づいて、耐震壁に生じるひび割れの幅とひび割れの開口面積を定量的に評価する方法を導いている。これらの成果は地震による鉄筋コンクリート構造の損傷度の評価に大いに役立つものであり、今後の活用と発展が期待できる。

本論文は、全六章で構成されている。以下に各章の内容とその評価について述べる。

第一章「序論」では本研究の背景と目的、研究の流れについて述べている。まず、鉄筋コンクリート構造物に生じるひび割れを定量的に評価することの必要性と現在の評価法の概要を紹介し、現状では目視によるひび割れの観察に基づく大まかな評価に留まっていることを指摘している。申請者は現状のひび割れ観察に基づく評価法には限界があることから、より精度良く評価するため、実務において普及しつつある有限要素法を評価手段として活用し、ひび割れを定量的に予測することを目標としている。

現状では有限要素法によりコンクリートのひび割れがどの辺りに生じるかは予測できるものの、ひび割れの幅やひび割れの開口面積などを定量的に予測することは困難であることを考えると、本研究が目指す目標は高いレベルにあると言える。

第二章「既往の研究」では鉄筋コンクリート構造に生じるひび割れを予測するための解析手法や解析結果に基づく安全性の評価方法、構造実験によるひび割れ状況と解析結果の比較などに関する研究例を調査し、現時点における問題点を整理している。有限要素法の解析プログラムに複雑な処理を組み込むことでコンクリートに生じるひび割れの幅や本数を予測する技術が研究されているものの、まだ発展途上にあり、一般的に使用できる解析プログラムでは利用することができないことを述べている。

本研究では汎用の解析プログラムを用いて得られる結果から、ひび割れを定量的に評価することを目標としており、実務への普及を念頭においている点が高く評価できる。

第三章「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」では、ひび割れに関する詳細なデータを得るための構造実験とその結果の分析に関して述べている。実験は実際の鉄筋コンクリート造耐震壁の約 1/3 の縮尺の試験体を 5 体製作して行っている。試験パラメータは壁の配筋方法と壁の厚さで、地震時を想定して耐震壁にせん断力を正負繰り返して載荷している。申請者は実験中に耐震壁に生じるひび割れの 1 本 1 本の幅と長さを詳細に測定しており、ひび割れの発生と進展に関する貴重なデータを得ている。実験の結果より、ひび割れ幅に影響を及ぼす因子としては鉄筋の間隔と鉄筋の太さが主なものであることを明らかにした上で、ひび割れの開口面積の合計値は配筋条件には依存せず、壁の変形角とほぼ比例する関係にあり、変形後の壁の面積の増分量と対応することを確認している。

実験から得られたこれらの知見は、従来の研究では定性的な認識に留まっていた内容を定量的に明らかにしたものであり、工学的に非常に有用であると考えられる。

第四章「非線形有限要素解析によるひび割れ面積の評価」では、第三章の構造実験から得られた知見に基づいて、有限要素法による非線形解析の結果からひび割れの開口面積の総和を求める方法を示している。解析は 5 体の試験体全てに対して実施しており、解析によって得られる情報からひび割れの開口面積の総和を 2 通りの方法で求めている。一つは各節点の変位量から求める方法であり、もう一つは各要素のひずみ量から求める方法で、この両者の結果がほぼ一致することを確認した上で、簡便で汎用性に富む方法として、要素のひずみ量からひび割れの開口面積の総和を算定できることを示している。

従来、有限要素法による解析結果からは、ひび割れの発生領域やひび割れの方向は得られるものの、ひび割れの開口面積を推定できることを示した例は無いことから、有益で新規性がある方法であると判断できる。

第五章「非線形有限要素解析に基づくひび割れ進展指標の提案」では、まず、申請者が実施した 5 体の鉄筋コンクリート造耐震壁の実験結果に加えて、他の研究者による 4 体の実験結果を含めた合計 9 体のひび割れに関するデータを分析し、ひび割れの開口面積の総和と最大ひび割れ幅および壁の変形角の関係を整理している。その結果、壁に生じる最大のひび割れ幅は壁の変形角の平方根に比例すると見なすことができること、さらに、その比例係数を壁の鉄筋比、鉄筋の径、作用圧縮応力度の 3 つを変数とする重回帰式によって決定することで、最大ひび割れ幅を精度良く評価できることを確認している。

このことから申請者は有限要素法による解析結果を活用することで、壁に生じる最大のひび割れ幅とひび割れ開口面積を推定することが可能であると考え、ひび割れの進展度合いを指標化する手法を考案している。この手法は要素にひび割れが発生し、それが進展すると要素の体積が増大することに着目し、各要素の体積の増大率に基づいて一つの指標を定義するもので、これまでに例のない手法である。

この手法では最大ひび割れ幅が一定の値に達する時の要素の体積増大率（基準化体積増大率）をどう定義するかが重要であるが、申請者は第三章で得られた壁の面積の増分量と最大ひび割れ幅の関係、および第四章で確認した解析による要素のひずみ値から壁の面積の増分量を求める方法を利用して、壁の配筋条件と作用圧縮応力度から基準化体積増大率を定義している。そして、解析により求められる各要素の体積増大率を基準化体積増大率で除しておき、その値を全ての要素について体積で重み付け平均化することで一つの指標を導いている。これをひび割れ進展指標と定義し、その値から最大ひび割れ幅とひび割れ開口面積を推定できることを示している。このひび割れ進展指標は獨創性に富むものであり、その誘導に際して実験結果と解析結果を明快な論理展開により関係付けている点も高く評価できる。

第六章「結論」では本研究で得られた知見と成果をまとめた上で、今後の検討課題と展望を述べている。本研究では鉄筋コンクリート造の耐震壁を対象としているが、コンクリート強度は限定された範囲に留まっている。申請者は本研究の成果が活用できる範囲を明確にしており、今後、適用範囲を拡大するために検討すべき課題を整理している。

以上のように、申請者が提案するひび割れ進展指標の概念はこれまでに例のないものであり、有限要素法による解析結果からひび割れの開口面積や最大ひび割れ幅を推定できることは大きな成果であると言える。今後、より広範な条件下で実験データを蓄積し、本手法の適用性を拡充することで、地震後の建物の機能性評価と損傷度の推定に貢献できるものと考えられる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和4年2月17日