

博士(工学) 余 湖 兼 右

学位論文題名

炭素繊維シート補強した RC 部材のせん断挙動解析  
および韌性能評価に関する研究

学位論文内容の要旨

鉄筋コンクリート(以下 RC とする)構造は耐久性および耐火性を併せ持ち、材料が比較的安価であることから集合住宅からオフィスビルなどあらゆる建築物に採用される優れた構造形式である。この構造形式は、世界有数の地震国である我が国にあっては、その自重の大きさ故に地震時に大きな慣性力(地震力)が作用することになるため耐震設計が極めて重要となる。

関東大震災の後、世界に先駆けて耐震設計の際に考慮すべき地震力が法制化されたが、以降の歴史は度重なる地震被害を受けての法改正による構造規定強化の繰返しであった。現在施行されている建築基準法は過去の災害の教訓をもとに、考慮すべき地震動から断面設計にいたるまで子細にわたり構造規定が設けられており、それら仕様規定を満たすことにより RC 構造物が保有する耐震性能は飛躍的に向上している。一方で構造規定が強化された場合においては、それまでに存在していた構造物は既存不適格建築物となり、改正後に新築される建物に関して要求されている耐震性能を満たしていない可能性がある。

これら耐震性能の不足している既存不適格建物が地震被害に対するリスクに極めて高い状態で晒されている中で、平成 7 年兵庫県南部地震が発生した。この地震によって構造形式を問わず大きな被害がもたらされたが、特に耐震性能不足による被害リスクの高い建物に大破や中破などの大きな被害が集中し、既存不適格建築物の耐震補強対策の重要性が一般にも認知され耐震補強工法の開発が現在までに精力的に進められてきた。

地震に対する被害リスクは一般に時間の経過に比例して大きくなるため、新たな耐震補強工法の開発はスピードが求められる。そのため比較的短期間の実験的検証しか行なわれないことが多い、適用範囲を限定しての実用化ではあったが、既存不適格建築物の耐震性向上には大きく寄与してきた。しかし、実験的検証において必ずしも性状的に明らかにならなかつた特性などについては、実用化にあたり工学的配慮の上で安全側に設計が行なわれるものの、合理性が伴っていない場合がある。また、適用範囲に納まらない場合にあってはそれぞれにおいて区々に技術的な検証が机上で行なわれるが、追加で実験的検討が行なわれることは稀である。

このような場合に現在では解析技術の進歩と計算機能能力の向上で解析精度が増している非線形有限要素解析手法を用いて性状を予測することができれば大変有意義である。しかし、現状においては耐震補強を対象として行なわれた解析的研究は少なく、特にせん断補強された部材の耐震補強効果に関して実施された解析的研究は殆ど行なわれていないのが現状である。

本研究では兵庫県南部地震以降に実用化された炭素繊維(以下 CF)シートを用いた RC 部材のせ

ん断補強方法に関して、部材形状を問わず解析的に耐震補強効果を再現できる方法の実用化を目的としている。一般の技術者が比較的容易に取り扱うことが可能である市販のパブリックプログラムを用いることで研究成果の利用価値が高まることを期待している。また、解析的手法を用いた CF シート補強部材のより合理的な耐震性能評価手法の提案を目的としている。

本論文の構成は以下の全 7 章より構成され、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章は緒論であり、本研究の目的および背景と既往の研究について述べるとともに、実用化の現況について述べている。

第 2 章は研究の手法について述べている。特に本研究で用いる非線形有限要素解析プログラムにおける、CF シートのモデル化手法について検討を行なっている。

第 3 章は CF シートによりせん断補強された梁の構造性能を、実際に実験が行なわれた試験体のモデル化を行い、せん断抵抗性状を解析的に検証した。対象とした試験体は補強対象部分のシアスパン比が 1.0 と小さく、せん断破壊が先行するように断面設計した梁型の縮小試験体である。解析に当たっては実際の試験体モデル寸法と同様に部材の 3 次元モデル化を行った。CF シートはコンクリートと完全付着を仮定したトラス要素による解析モデルと、ソリッド要素でモデル化しコンクリートの付着モデルを変えた解析モデルにより、実験結果との比較を行なっている。

第 4 章では CF シート補強された軸力を有する RC 短柱の実験シリーズに対して、解析的に実験結果の再現と構造性能の検証を行なった。モデル化は 3 章で検証した CF シートモデルを用いて、試験体と同一スケールの 3 次元モデルとした。検証にあたっては CF シート補強効果に対する軸力の影響および最大耐力時の CF シート要素引張歪分布性状の実験結果との比較などから、せん断抵抗性状を解析的に検証した。また、既往の終局耐力評価式を用いて、最大耐力実験値および最大耐力解析値の推定方法について検討を行なっている。

第 5 章は開口を有する耐震壁に対して CF シート補強効果の検証をした実験シリーズについて解析的に検討を実施した。耐震壁は平面的なせん断応力が支配的となる性状であることを考慮し、解析モデル化にあたっては 2 次元モデルとした。実験時に観察されたスリップ破壊性状や CF シート補強側柱のコンクリート拘束効果を構成則上で考慮することにより、2 次元モデルでも十分な精度で実験結果の再現が可能などを示した。

第 6 章は CF シートで補強されたせん断破壊型柱部材の性能評価を合理的に行なう手法を提案した。現行の耐震診断基準類において耐震診断・耐震改修設計を行なう際に、せん断破壊型の部材は一般に脆性的な破壊が生じるため、変形能力が厳しく評価されている。そのため補強設計時には CF シート補強などを用いてせん断破壊型の部材のせん断強度を高めて曲げ破壊型の部材とし、耐震性能を高める手法が一般的である。しかし、部材が有する曲げ耐力が元々高い場合や、施工や材料的な要因でコンクリート強度が著しく低い場合などにおいて、CF シートによるせん断補強によっても破壊モードが曲げ型に出来ない場合が考えられる。このような場合現行の耐震診断基準においては、CF シート補強で部材の変形性能が向上しているのにもかかわらず部材の破壊モードのみで部材の変形性能が低く評価ため合理的とは言えない。そこで、本研究で行なってきた解析的手法を用いて、せん断破壊型 CF シート補強柱のより合理的な性能評価手法を示した。

第 7 章は結論であり本研究のまとめと今後の課題について言及している。本研究で用いた解析モデルの特徴と解析精度を総括し、適用にあたっての諸課題を述べている。また、本研究で到達できなかった今後の課題について述べている。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 後藤 康明

副査 教授 上田 正生

副査 教授 緑川 光正

副査 教授 上田 多門

## 学位論文題名

### 炭素繊維シート補強したRC部材のせん断挙動解析 および韌性能評価に関する研究

鉄筋コンクリート(RC)構造は耐久性および耐火性を併せ持ち材料が比較的安価であることから、わが国ではさまざまな建築物に採用される優れた構造種別であるが、その自重の大きさ故に地震時に大きな慣性力(地震力)が作用することになるため耐震設計が極めて重要となる。わが国では度重なる地震被害を受けて建築基準法の改正による構造規定強化が行われてきたが、改正以前に設計施工された構造物は既存不適格建築物となり、改正後に新築される建物に要求されている耐震性能を満たしていない可能性がある。平成7年に発生した兵庫県南部地震では、耐震性能不足による被害リスクの高い建物に特に大きな被害が集中したことから、既存不適格建築物の耐震補強対策の重要性が一般にも認知され耐震補強工法の開発が精力的に進められてきた。新たな耐震補強工法の開発では、実験的検証において明確に出来なかった特性などについては、実用化にあたり工学的配慮の上で安全側に設計が行われるが、合理性が伴っていない場合がある。また、適用範囲に納まらない場合にあっては技術的な検証を机上で行うのみで、追加で実験的検討が行われることは稀である。このような場合に現在では解析技術の進歩と計算機能力の向上で解析精度が増している非線形有限要素解析手法を用いて性状を予測することができれば大変有意義であるが、耐震補強を対象として行われた解析的研究は少なく、特にせん断補強された部材の耐震補強効果に関して実施された解析的研究は殆どないのが現状である。

そこで本論文では兵庫県南部地震以降に実用化された炭素繊維シートを用いた鉄筋コンクリート部材に関して、部材形状を問わず耐震補強効果を考察できる解析方法について、一般の技術者が比較的容易に取り扱うことが可能である汎用解析プログラムを用いて検討している。また、解析結果を用いて炭素繊維シートで補強された部材のより合理的な韌性能評価手法の提案をしている。

本論文によって得られた成果とその評価は下記の通り要約される。

- 1) 実験で得られた炭素繊維シートの挙動を分析し、大変形時まで考慮できる炭素繊維シートのモデル化手法について検討を行った。汎用解析プログラムに使用できるモデルの提案は、実用上大変有用であると評価される。
- 2) 軸力の無い梁部材および軸力のある柱部材を対象に、炭素繊維シートでせん断補強された部材

の構造性能について既往の実験結果との比較を行い、炭素繊維シートとコンクリートの付着状況を考慮したモデルを用いて提案したモデルの妥当性を検証した。対象とした試験体はコンクリート強度、軸力、シート補強量の違いをパラメータとしたものであり、これらの違いによる荷重変形挙動を解析的に精度良く再現し、提案モデルの妥当性を示している。ここで用いた3次元非線形要素解析は過去に実施例が少なく、モデル化の難しい部材挙動を適切に捉えて解析手法を確立したことは評価される。

3) 炭素繊維シートを用いて開口を有する耐震壁の耐震補強効果について解析的に検討を実施した。耐震壁は平面的なせん断応力が支配的となる性状であることを考慮し、簡略的な2次元モデルとした。実験時に観察されたスリップ破壊性状や炭素繊維シート補強側柱のコンクリート拘束効果を構成則上で考慮することにより、2次元解析でも十分な精度で実験結果の再現が可能なことを示した。

4) 炭素繊維シートで補強されたせん断破壊型柱部材の韌性能評価を合理的に行う手法を提案した。現行の耐震診断基準類において耐震診断・耐震改修設計を行う際に、せん断破壊型の部材は一般に脆性的な破壊が生じるため、変形性能が厳しく評価されている。そのため補強設計時には炭素繊維シート補強などを用いてせん断破壊型の部材のせん断強度を高めて曲げ破壊型の部材とし、耐震性能を高める手法が一般的である。しかし、炭素繊維シートによるせん断補強によっても破壊モードが曲げ型に出来ない場合が考えられる。このような場合現行の耐震診断基準においては、炭素繊維シート補強で部材の変形性能が向上しているのにもかかわらず部材の破壊モードのみで部材の変形性能が低く評価されるため合理的とは言えない。そこで、本研究で行ってきた解析的手法を用いて、せん断破壊型炭素繊維シート補強柱のより合理的な性能評価手法を示した。

これを要するに、著者は炭素繊維シートを用いた鉄筋コンクリート部材の耐震補強効果の評価において有限要素解析を用いる場合の炭素繊維シートのモデル化方法を提案するとともに、炭素繊維シート補強した鉄筋コンクリート柱の韌性能向上の評価方法について新たな提案をしたものであり、コンクリート工学および建築構造学の発展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。