

京都大学	博士（工学）	氏名	LIM SUA
論文題目	Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Columns with Ultra-high-strength Fiber-reinforced Concrete (UFC) Panels (超高強度繊維補強コンクリート (UFC) パネルによる鉄筋コンクリート柱の耐震補強)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>2016年4月、熊本でモーメントマグニチュード (Mw) 6.5 と 7.3 の地震が約 28 時間の間隔で続けて発生し、多くの建築構造物に大きな被害をもたらした。特に、駐車場や店舗を配置するため、剛性と強度が低くなる、ピロティと呼ばれる 1 階部分を持つ鉄筋コンクリート (以下、RC) 造建物の被害が甚大であった。大きな被害を受けた RC 造建物の中に、1995 年の兵庫県南部地震 (1995 年阪神淡路大震災) を踏まえ、1 階の層崩壊を防止するために導入された 1997 年の法改正前の 1992 年に建設された 10 階建てマンションがあった。日本にはこのような法改正以前に建設された建物が多く存在し、特に、1 階部分の耐震性が不十分であると考えられている。このような建物に対して迅速かつ適切な改修および補修補強を早期に実施すべきである。このためには、できるだけ短期間に適用できる効果的な改修および補修補強工法の開発が急務である。</p> <p>本研究の主な目的は、大地震時に耐力と変形性能が不足している RC 造建物の 1 階柱に適用可能な、超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) パネルを用いた迅速、かつ、効果的な耐震補強工法を開発することである。また、提案した耐震補強工法を採用することで、地震後の建物の継続使用を考慮した耐震補強設計法を提示することも重要な目的のひとつである。</p> <p>論文は以下の 7 章から構成される。</p> <p>第 1 章では、研究背景および目的についてまとめている。</p> <p>第 2 章では、RC 柱の耐震補強に関する既往研究と、地震後の建物機能維持を目指した既往の耐震改修設計法をまとめている。</p> <p>第 3 章では、UFC パネルを用いた補強工法の効果を調べるため、対象建物の 1 階 RC 柱を模した 1/3 スケール試験体を 5 体製作し、水平力と変動軸力を同時に加えるという地震時荷重を想定した載荷実験を実施した。1 体は無補強、残りの 4 体に対しては、載荷方向と平行な 2 面に UFC パネルを取り付けることで補強した。また、そのうち 2 体には、柱片側に UFC または RC 造袖壁を設置した。荷重-変形履歴、破壊モード、UFC パネルと袖壁の状況について詳細に検討した。</p> <p>柱側面に UFC パネルを取り付けた試験体のうち、パネル上下に目地材を詰めない試験体は、無補強試験体と比べて、最大耐力が 1.19 倍となった。目地材を詰めた場合は、さらに強度が上昇し、無補強試験体と比べて、1.51 倍の最大耐力となった。また、UFC および RC の袖壁を設置した場合は、無補強試験体と比べて、それぞれ 1.57 倍および 1.60 倍の最大耐力に達した。剛性および変形性能も向上しており、このような実験結果から UFC パネルによる補強の有効性が確認された。</p> <p>第 4 章では、損傷した RC 柱に対する UFC パネルを利用した補強方法について実験的な検討を行った。第 3 章で検討した補強工法が地震により損傷した柱にも有効かどうかを調べるため、第 3 章と同様に 1/3 スケール試験体を 4 体製作した。これらの試験体に対しては、最大耐力まで載荷し除荷した後、UFC パネルで補強し、再度、破壊に至るまで載荷を行っている。このような実験により、UFC パネルによる補強方法が損傷した RC 柱に対しても有効であることを確認した。</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	LIM SUA
<p>第 5 章では、第 3 章および第 4 章で実施した実験結果との比較により有限要素解析 (FEM) モデルを構築し、その妥当性を確認した。その後、これを用いて、改修工法の施工性向上と UFC パネルの使用量削減を目的とした、パネル厚やパネル分割などを変数とした数値解析シミュレーションを行った。</p> <p>検討のひとつでは、UFC パネルの端部の厚さを 45mm から 25mm まで 5mm 間隔で変化させた。各ケースの中間部の厚さは、せん断余裕度が 1 を超える最小の厚さに設定した。増厚部の厚さが 45mm のケースの最大耐力は 699kN であり、これは全解析ケースの中で最も大きくなった。</p> <p>別の検討では、UFC パネルを分割して接着することを想定した。UFC パネルは、全例ともハンチ部を除いた厚さ 25mm の中間部と、厚さ 50mm、高さ 100mm の両端増厚部から構成されている。耐震補強の作業性に配慮して、1 枚のパネルの重量が 13kg を超えないようにパネルの分割数を調整した。パネルの水平方向の分割は、垂直方向の分割よりも強度に大きな影響を与えた。パネル間の応力は主にパネル上下の目地を通じて伝達されると仮定し、パネル間の水平目地には、実際には存在する剛性の低いエポキシ樹脂を仮定した低剛性の要素を配置することでパネル間の応力伝達を抑制し、強度を低下させた。</p> <p>第 6 章では、2016 年 4 月に発生した熊本地震で甚大な被害を受けた建物を対象に、地震後の継続使用性を考慮した耐震改修手法を提案した。地震ハザードレベルに応じた、地震発生直後や地震対策実施後においても重要な活動エリアが使用可能となるような、被災状況に基づく目標性能レベルを提案した。また、柱部材の繰返し載荷試験と数値解析結果に基づき、損傷状況に対応する層間変形角を補助基準として示した。さらに、対象建物を簡略化したモデルに対して非線形地震応答解析を行い、対象建物の地震に対する応答性状に基づき耐震性能を評価した。</p> <p>第 7 章では、上記の研究をまとめるとともに、今後の研究の方向性について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本研究の主な目的は、大地震時に耐力と変形性能が不足している鉄筋コンクリート造（以下、RC）建物の特に1階ピロティ柱に適用可能な、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）パネルを用いた迅速かつ、効果的な耐震補強工法を開発することである。また、提案した耐震補強工法を採用することで、地震後の建物の継続使用を考慮した耐震補強設計法を提示することである。得られた主な成果を以下に記す。

1. UFCパネルを用いた補強工法の効果を調べるため、対象建物の1階RC柱を模した1/3スケール試験体を5体製作し、水平力と変動軸力を同時に加えるという、地震時荷重を想定した載荷実験を実施した。1体は無補強、残りの4体に対しては、載荷方向と平行な2面にUFCパネルを取り付けることで補強した。また、そのうち2体には、柱片側にUFCまたはRC造袖壁を設置した。補強した試験体は無補強試験体に対して、剛性、耐力、変形能力が著しく上昇し、UFCパネルによる補強の有効性を確認した。

2. 地震により被害を受けた建物の柱を補修補強することを想定し、損傷したRC柱に対するUFCパネルを利用した補強方法についても実験的な検討を行った。1.で検討した補修補強工法が地震により損傷した柱にも有効かどうかを調べるため、1.と同様に1/3スケール試験体を4体製作し、最大耐力まで載荷した後、一旦除荷し、UFCパネルで補強し、再度、破壊に至るまで載荷を行った。このような実験により、UFCパネルによる耐力、剛性、変形能力の上昇が確認でき、補修補強工法が損傷したRC柱に対しても有効であることを示した。

3. 上記実験結果との比較により有限要素解析モデルを構築し、その妥当性を確認した後、これを用いて、本補修補強工法の施工性向上とUFCパネルの使用量削減を目的として、パネル厚やパネル分割などを変数とした数値解析シミュレーションを行った。その結果、端部増厚部をパネル全長にわたるよう大きくすると、最大強度に達した後の強度低下が緩やかとなった。ただし、このようなパネルは重量増につながり、施工性が低下するため、さらなる検討が必要である。

4. 2016年4月に発生した熊本地震で甚大な被害を受けた建物を対象に、地震後の継続使用性を考慮した耐震改修設計法を提案した。地震ハザードレベルに応じて、地震発生直後や地震対策実施後においても重要な活動エリアが使用可能となるような、被災状況に基づく目標性能レベルを提案した。また、柱部材の繰返し載荷試験および数値解析結果に基づき、損傷状況に対応する層間変形角を補助基準として示した。さらに、対象建物を簡略化したモデルに対して非線形地震応答解析を行い、対象建物の地震に対する応答性状に基づき補強後の耐震性能を評価した。

本論文は、建築物の地震被害低減を目指し、UFCパネルという高性能新材料を利用した、迅速かつ安価な耐震補強工法を開発しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年8月10日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。