

## 第 9 章

### 結論

## 9.1 まとめ

本研究で得られた研究成果を以下のように示す。

### 9.1.1 2章の結論

#### (1) UFCパネル挟込接着補強を施した損傷柱試験体に対する載荷実験

熊本地震でせん断破壊した RC 造ピロティ柱を模擬した縮小試験体を作製し、一次載荷により損傷を与えた後、UFC パネル挟込接着補強を施し、再び載荷実験を行うことで、UFC パネルを接着することによる補強、復旧効果を調べた。得られた知見を以下に示す。

- ・ 一次載荷において部材損傷度 V 相当の損傷を受けた C-C40T75 試験体は、断面修復および UFC パネル補強により、一次載荷最終サイクルと比較して剛性の大幅な向上が見られた。一方で、目地モルタルが全幅に対して脆性的に圧壊し破壊に至ったことで、最大耐力は一次載荷時最大耐力の 74% に留まった。
- ・ 一次載荷において最大耐力を発揮する程度の変形を経験した C-C40T75M 試験体は、UFC パネル補強により、剛性の向上は見られなかったものの、最大耐力は一次載荷時と比較して 14% 上昇した。一方で、目地モルタルの圧壊に起因して最大耐力が決定され、また脆性的な破壊に至ったことで、変形性能の向上は見られなかった。

#### (2) 有限要素解析を用いたパラメトリックスタディ

有限要素解析を用いて本実験結果を追跡しパラメトリックスタディを行うことで、補強の適用範囲の検討、補強方法の検討および実施工に向けた検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・ 一次載荷時の最大変形角が最大耐力時変形角以下であれば、UFC パネル補強により、一次載荷時の最大耐力以上の耐力を確保することができた。
- ・ 本研究の範囲内においては、UFC パネルが厚いほど、また端部断面拡大倍率が大きいほど最大耐力が上昇する傾向が確認された。
- ・ 本研究の範囲内においては、接着材厚さが厚いモデルでは最大耐力以降の耐力低下が大きくなった。
- ・ UFC パネルを水平方向に分割することで、パネルの負担軸力および負担せん断力が減少するが、本研究の範囲内では、UFC パネルの分割が補強後の部材耐力に与える影響は小さかった。

#### (3) 補強効果の評価手法の提案

損傷の影響を考慮した補強効果の評価手法を提案し、算出した終局耐力と実験および解析値との比較を行った。また評価手法の汎用化に関する検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・ 本研究の範囲内では、等価ストレスブロック法を用いた曲げ理論式に UFC パネルの項を追加して算出した曲げ終局耐力と、等価断面積比により軸力を柱とパネルに分担し、それぞれのせん断耐力を累加して算出したせん断終局耐力により、UFC パネル挟込接着補強後の部材耐力を概ね適切に評価でき、解析値/計算値は 1.09~1.23 となった。
- ・ せん断終局耐力の算定において、本計算方法では、UFC パネル厚さが大きくなるにつれてパネルの負担せん断力および負担軸力が上昇する傾向や、端部断面拡大倍率が大きくなるにつれてパネルの負担軸力が上昇する傾向など、既存柱と UFC パネルのせん断力と軸力の分担を概ね捉えることができた。
- ・ 既存柱の荷重-変形関係から被災度区分判定基準<sup>[2.6-1]</sup>に示された耐震性能低減係数  $\eta$  を算出し、こ

れを柱耐力低減係数として既存柱の耐力に乗ずることで、一次載荷における損傷の影響を概ね適切に評価することができ、解析値／計算値および実験値／計算値は 0.96~1.10 となった。また、既存柱の部材損傷度を判定し、耐震性能低減係数  $\eta$  の基準値あるいは平均値を用いることで、本計算方法を汎用的に用いることができる可能性を示した。

### 9.1.2 3章の結論

実験先立ち、対象無補強試験体（矩形柱）骨格曲線の適切な評価手法について検討した。検討対象は、1984年から2019年までに刊行された日本コンクリート工学年次論文集と日本建築学会構造系論文集から①新耐震基準（柱帯筋比 0.2 以上）②高軸力（軸力比 0.4 以上）③シアスパン比 2 以下の 3 条件を満たす計 6 体の矩形柱試験体である。得られた知見を以下に示す。

- ・せん断余裕度（曲げ精算式/大野荒川 mean 式）を各試験体で算定したところ、せん断余裕度が 1 を超えた試験体は 3 体であり、これらは全て実験で確認された破壊モードと整合している。
- ・剛性低下率の式について、本検討のようにシアスパン比が 2 以下の試験体においても、通常シアスパン比 2 以上に用いる算定式にて剛性を計算した場合がより実験値を捉えた。
- ・破壊モードがせん断破壊になると推定される試験体では、曲げ剛性、せん断剛性ともに剛性低下を考慮したものと比べ、曲げ剛性のみ剛性低下を考慮したものは精度が良い傾向があり、曲げ破壊になると推定される試験体では、その差はそれほど見られなかった。

実験は、RC 造壁および超高強度繊維補強コンクリート（UFC）パネルを用いて、ピロティ階を想定した変動軸力下における RC 造矩形柱を補強した試験体を対象に行った。無補強試験体および、RC 壁や UFC パネルを片側袖壁として補強したものや、UFC パネルを柱の両せい面に張り付けた補強試験体を加力し、各補強効果について検討を行った。その結果、RC 壁を補強した試験体は最大耐力が約 1.6 倍、剛性が約 2.6 倍に増加し、また靱性能も向上したことを確認した。UFC パネルを袖壁や貼り付けとして補強した試験体は、ともに最大耐力が約 1.25 倍、剛性が 1.7~1.8 倍に増加しており、補強による効果を確認した。

### 9.1.3 4章の結論

4章では、RC造ピロティ柱を対象にUFCパネル挟込接着およびUFCまたはRC片側袖壁補強を用いた補強工法について、縮小試験体を用いた載荷実験による構造性能および補強効果の検証、有限要素解析を用いた挙動予測、補強前の損傷を考慮した最大耐力評価を行った。

4.2節、4.3節では、縮小試験体を用いた載荷実験の概要および結果について述べた。2章、3章で示した実験では、UFC挟込パネル端部の応力集中によって比較的早期に損傷が進行した点を踏まえて、パネル端部を増厚するとともに、UFCまたはRCの片側袖壁補強を併用する方法についても検討を行った。その結果、初期剛性、最大耐力、変形性能ともに良好な結果が得られ、補強の効果を確認できた。その他、変形性状、パネルの応力状態および負担応力などについて考察を行った。

4.4節では、三次元有限要素解析を用いて、損傷後補強試験体のUFC挟込パネル補強前後の挙動予測を行った。補強前の一次載荷については、最大耐力、最大耐力時変形角を精度よく評価できたものの、補強後の二次載荷においては変形角1%までは実験結果を良好に追跡できたものの、それ以降の予測精度については課題を残した。

4.5節では、実験の試験体設計で用いた評価式による計算値と実験結果を比較し、無損傷補強試験体、損傷後補強試験体のそれぞれに対して計算結果の精度評価を行った。損傷後補強試験体については、既存柱のせん断終局耐力に柱耐力低減係数 $\eta$ を乗じることで考慮し、 $\eta$ は最大経験サイクルの耐力残存比、エネルギー吸収量の残存比、被災度区分判定基準の損傷度判定に準拠、の3つの方法で決定した。その結果、無損傷補強試験体、損傷後補強試験体で $\eta$ を最大経験サイクルの耐力残存比、エネルギー吸収量の残存比で決定した場合については良好な精度で評価できたのに対して、損傷後補強試験体で被災度区分判定基準の損傷度判定に準拠して求めた $\eta$ を用いた場合には実験値を大幅に過小評価した。

### 9.1.4 5章の結論

5章では、対象建築物の下層2.5層を模擬した架構試験体を2体作成し、1体は一次載荷において最大耐力を発揮する程度の変形を経験させ、その後補強を施して実験を実施した。また、もう1体は比較のために1次載荷をせずに補強を施して実験を実施した。この実験で得られた知見とともに、骨組み解析及び有限要素解析で得られた知見を下記に示す。

#### (1) 構造実験により得られた知見

F1, F1-R, F2-R, 3体の試験体の実験により、以下の知見を得た。

(無補強試験体 F1)

- ・ 1F ピロティ柱について、設計時に想定した柱のせん断破壊または軸方向ひび割れを伴う破壊は見られず、せん断補強筋の降伏も見られなかった。また、事前の検討では反曲点が柱の中央にあると考えていたが、実験では柱脚しか主筋が降伏しておらず、反曲点が柱の中央より上にあることがわかった。
- ・ 試験体は以下のような順番で破壊が進んでいった。1Rx=0.86%時の耐力低下は、2F 壁のスリップ破壊によるものと考えられる。また、この時の壁のスリップ破壊は梁の軸伸び変形や梁端部の圧壊を伴っているものと考えられる。

- ① 1F ピロティ柱（引張軸力側）の曲げ降伏（1/400rad～1/200rad）
- ② 1F ピロティ柱（圧縮軸力側）の曲げ降伏（1Rx=0.59%）
- ③ 2F 壁縦筋の降伏と 2F 壁脚部のスリップ（1Rx=0.86%、このとき耐力低下）
- ④ 2F 梁端の圧壊（1Rx=0.86%～1.0%）

(補強試験体 F1-R, F2-R)

- ・ 補強試験体 F1-R, F2-R は、UFC パネル補強を施すことで 1F ピロティ柱の柱脚と柱頭にヒンジが形成され、1層の層崩壊系の破壊形式となった。1F の層間変形角で正負ともに 2.0%の繰返し載荷まで層せん断力が最大耐力の 80%以下に低下することはなく、良好な変形性能が得られた。
- ・ 無補強試験体と補強試験体の載荷条件は同一ではないため単純な比較はできないが、F1-R は正側で 1.49 倍、負側で 1.63 倍の耐力上昇、F2-R は正側で 1.59 倍、負側で 1.68 倍の耐力上昇が見られ、補強効果が確認できた。

#### (2) 骨組み解析により得られた知見

F1, F1-R, F2-R, 3体の試験体の実験を対象として、骨組み解析を行い、以下の知見を得た。

(無補強試験体 F1)

- ・ 従来の解析モデルは、耐力は実験値と概ね一致したが、ピロティ梁のモデル化は剛性の大きい梁で破壊しないものとして評価しているため、架構の水平剛性は実験値より大きい結果となった。また実験において梁端部の損傷が見られたことから、ピロティ柱に接続する 2 階梁のモデル化の必要性があることが明らかとなった。
- ・ 本試験体は、スラブの有効幅を最大に考慮した場合の層剛性が実験値と概ね一致した。
- ・ 梁の耐力を考慮したモデル化において、スラブの有効幅を最大に考慮しピロティ柱を MS モデルとした組み合わせのモデル 4 を用いた結果、層せん断力-層間変形角関係は実験値を概ね捉えられ、部材の損傷分布も概ね再現できるモデル化手法であることを確認した。

## (補強試験体 F1-R)

- 対象試験体において、顕著な耐力低下を示す1層変形角  $1/50\text{rad}$  までのモデル化手法を検討した。補強を施した1層柱の評価式において、UFCパネルにより補強した既往の柱試験体にてその精度を検証した。また、既往の部材実験に基づき、1階柱の剛域を部材フェイス位置から  $D/4$  の長さ ( $D$ =部材せい) だけ移動させることで架構の最大耐力以前の荷重変形関係を適切に評価できることを確認した。
- 実験にて UFC 袖壁の浮き上がり挙動が確認されたことを踏まえ、UFC 袖壁を弾性ばねに、目地モルタル部を鉛直ばねにモデル化することで UFC 袖壁の浮き上がり挙動の再現を試み、目地モルタルの断面積のうち  $1/15$  を応力伝達に有効とすることで当該試験体の挙動を適切に評価できることを確認した。本稿では、設計法構築に向けた実験に整合する基本モデルの作成を目的とし、対象試験体に適合するモデルを作成したため、今後は更なる実験及び検討によりモデルの一般化を試みる

## (補強試験体 F2-R)

- 柱部材試験体の鉛直方向ひずみより試験体の負担軸力算定手法を決定し、架構試験体に適用した結果、同手法の架構への適応が概ね妥当であることを確認した。
- 損傷部材の初期剛性に既往の式から算出した曲げ剛性低下率を考慮することで試験体の挙動を概ね評価した。
- 予備載荷時の全エネルギー吸収量に対する残存エネルギー吸収量の比を曲げ終局耐力の低減率として考慮することで試験体の挙動を概ね評価した。
- 無損傷補強モデルの解析モデルを基に、損傷の影響を受けた箇所を構造性能を一部変更することにより損傷後補強試験体の荷重変形を概ね適切に評価できた。

## (3) 有限要素解析により得られた知見

無補強試験体 F1 に対して2次元有限要素解析を行い、載荷実験における試験体の挙動追跡および崩壊形式の特定を試みた。得られた知見を以下に示す。

- 本解析では、実験で確認された崩壊形式とは異なる結果となった。特に1階南柱に関しては、解析ではせん断破壊したような性状が確認されたが、実験ではそのような様子は確認されず、破壊性状に大きな差が見られた。
- 1階柱の負担応力として、軸力、せん断力および曲げモーメントを求めた。軸力に関しては、北柱と南柱ともに、北柱の主筋が全降伏したと仮定したときの軸力よりも小さくなった。せん断力に関しては、北柱では早期に頭打ちとなったものの、南柱では増加し続けた。南柱の曲げモーメントに関しては、はじめは柱脚で大きなモーメントを負担していたが、途中で頭打ちとなった。対して柱頭では曲げモーメントが増加し続けた。
- 1階南柱の負担曲げモーメントから反曲点高さを計算した。解析では反曲点高さは柱中心高さ付近に見られたが、実験では柱脚の主筋のみ降伏し柱頭が降伏しなかったことから反曲点高さが柱中央よりも上にあることが推察されており、両者の傾向が一致しなかった。
- 1階柱の柱頭および柱脚に関して曲げ終局強度とせん断終局強度を算定した。曲げ終局強度に関して、北柱では負担曲げモーメントが曲げ終局強度を上回ったが、南柱では上回ることはなかった。せん断終局強度に関して、北柱の負担せん断力はせん断終局強度に到達しなかったが、南柱ではせん断終局強度を上回った。このことから、北柱では曲げ破壊、南柱ではせん断破壊が発生したことが推察される。

### 9.1.5 6章の結論

6章では、RC造ピロティ柱を対象に、非分割のUFCパネルによる補強を施した試験体と、分割したUFCパネルによる補強を施した試験体の静的載荷実験を通して、UFCパネルの分割による補強効果への影響について検討した。以下に、得られた知見を示す。

- ・ 非分割のUFCパネルを貼り付けた試験体であるC2-UFC1に比べ、UFCパネルを横方向にのみ分割して貼り付けた試験体であるC2-UFC2、およびUFCパネルを縦、並びに横方向に分割して貼り付けた試験体であるC2-UFC3は、水平荷重-変形角関係において、変形角 $R=1.0\%$ 程度まで、剛性および耐力は概ね同程度であり、UFCパネルを分割して貼り付けた場合でも、非分割と同程度の補強効果が得られた。
- ・ 一方、C2-UFC2は変形角 $R=1.5\%$ サイクルにて最大耐力を迎えた後、その後の耐力低下がC2-UFC1に比べて大きかった。また、C2-UFC3は他の試験体に比べ早期に柱帯筋が降伏したことで最大耐力時の変形角が小さかった。最大耐力以降の耐力低下も大きく、他の試験体に比べ靱性能が小さかった。耐力増加率(実験時最大耐力/RC柱単体のせん断終局耐力の計算値)は、C2-UFC1、C2-UFC2、C2-UFC3の順に大きく、分割によって最大耐力の低下が見られた。
- ・ UFCパネル面の損傷状況、UFCパネル表面の主応力分布、および光学式モーショントラッキングによる計測結果から、C2-UFC3は最大耐力を迎えた変形角サイクル付近において、パネル間の縦目地、および横目地に開きが生じたことによってパネルが分離し、パネル個々が個別の挙動を示したことによってパネルの負担せん断力が小さくなり、相対的に既存RC柱の負担せん断力が大きくなったことが、最大耐力以降の靱性能の低下につながったと考えられる。
- ・ C2-UFC2は鉄筋の降伏状況や変形性状において、C2-UFC1と概ね同様の性状を示した。一方で、UFCパネル面の損傷状況、および主応力分布より、C2-UFC2では、パネルの断面が変化する断面切り替わり位置において局所的に応力が集中し、パネル中央部への応力伝達がC2-UFC1に比べ小さかったことによって、相対的に既存RC柱の負担せん断力が大きくなり、最大耐力以降の耐力低下につながったと考えられる。
- ・ 横方向のみの分割、および縦・横方向の分割共に、最大耐力への分割による影響は小さいと考えられるが、最大耐力後の耐力低下には影響が見られ、 $R=3.0\%$ において、C2-UFC2では15%程度、C2-UFC3では46%程度の耐力低下が見られた。

以上より、本実験で用いた分割方法の範囲においては、UFCパネルを横方向にのみ分割して貼り付けた補強、およびUFCパネルを縦、および横方向に分割して貼り付けた補強ともに、終局強度までパネルが分離することなく、非分割のUFCパネルを貼り付けた補強と同程度の補強効果を得られることを確認した。一方、分割方法によっては最大耐力以降の変形性能が低下する可能性があることについては留意する必要があると考えられる。

### 9.1.6 7章の結論

本章では、補強を施した RC 造ピロティ柱部材の復元力特性評価についての検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- UFC パネルをせい面に貼付し端部目地部にモルタルを充填した試験体について、UFC パネルによる剛性・耐力の増大分を考慮した骨格曲線の評価手法を検討した。特に、曲げ終局耐力については、せい面に UFC パネルを補強した柱全体が平面保持しているという仮定のもと、端部目地モルタルを無視した簡易計算および当該部を考慮した詳細計算を行い、いずれの方法も試験体の荷重変形関係を概ね評価することを確認した。
- UFC パネルをせい面に貼付し端部目地部にモルタルを充填しない試験体について、曲げ挙動は RC 柱を対象とした既往の評価式により、せん断挙動は UFC パネルによる剛性・耐力の増大を考慮した評価法により、実験結果の包絡線を適切に評価できた。
- RC 壁を片側袖壁として増設した試験体について、既往の評価式を用いて、柱と壁の終局強度を累加して算定することで、正載荷時のせん断耐力と負載荷時の曲げ耐力どちらも実験値を安全側に評価した。
- UFC 袖壁を片側袖壁として増設した試験体について、正載荷時においては、柱と壁の終局状態になるタイミングが近かったため、柱のせん断耐力と UFC 袖壁の曲げ耐力を累加することで実験値を安全側に評価した。負載荷時の耐力については、柱と UFC パネルの曲げ耐力を累加して耐力を算定したところ実験結果を危険側に評価した。そこで、UFC パネルの曲げ耐力算定する際に実験から得られたひずみを用いたところ実験結果を安全側に評価した。
- 端部を増厚した UFC パネルによる挟み込み接着と RC 袖壁または UFC パネルを片側袖壁として補強した試験体について、実験の破壊性状を踏まえ、UFC パネルを挟込接着補強した RC 柱と RC 袖壁・UFC 袖壁の負担力を個別で算定し足し合わせることで、実験値を概ね評価することができた。

### 9.1.7 8章の結論

8章では、本工法を施したRC造ピロティ架構の設計を行うにあたって必要となる、地震後継続使用性を考慮した設計方針、設計例、施工上の注意点について示した。

8.1節では、地震後継続使用性を考慮した設計の現状について概説するとともに、これを本工法に適用するにあたっての方針を説明した。

8.2節では、部材実験の結果や試設計建物の立体骨組モデルを用いた解析により、1.1.5項で示した継続使用性を考慮した損傷クライテリアの設定および適用性の検証、問題点の抽出を行った。本検討ではMSばね要素を用いたことで、コンクリートの圧壊や鉄筋の降伏に基づいて部材の損傷状態を判定し、継続使用性クライテリアを用いて補強設計を行うプロセスを示したが、残留ひび割れ幅による判定には、部材実験による損傷データの取得が必要となることから、解析結果から残留ひび割れ幅による判定を行う方法について更なる検討が必要である。

8.3節では、本工法を用いた補修補強時の施工上の注意点として、割付計画、製作、固定用ボルト貫通穴の加工、貼付けおよび目地部への接着材充填、無収縮モルタル打設のそれぞれにおける注意点等をまとめた。

## 謝辞

本研究は、官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）革新的建設・インフラ維持管理技術／革新的防災・減災技術（統括：田代民治）における「仮設・復興住宅の早期整備による応急対応促進（PD：緑川光正）」、及び建築研究所指定研究課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」の一環として実施しました。ここに関係各位に謝意を示します。