

# 主論文の要約

論文題目 狭隘な施工条件下で適用可能な鉄筋コンクリート構造物の耐震補強技術の開発と補強メカニズムの検討  
(Development of Seismic Retrofit Technology for Reinforced Concrete Structures under Narrow Site Conditions and Investigation of the Reinforcement Mechanism)

氏名 河村 圭亮

## 論文内容の要約

本研究は、鉄筋コンクリート（RC）部材の耐震補強において、施工上の制約条件によって狭隘な作業空間しか確保できず従来工法を用いることが困難な場合でも適用可能な2つの耐震補強技術を開発し、その補強効果を検証するとともに、補強したRC部材の耐荷機構を明らかにすることを目的としたものである。対象とした耐震補強技術は、主に壁部材の面外方向の地震力に対して、あと施工プレート定着型せん断補強鉄筋（PHB）を挿入するせん断補強技術と、鉄道ラーメン高架橋などの柱部材に対して、炭素繊維シートを活用したプレキャスト材である炭素繊維複合パネル（CFP）を巻き立てる補強技術である。本論文は、全7章から構成される。

### 第1章

本章では、既設RC構造物で耐震補強が求められている背景と一般的に用いられている耐震補強工法について述べ、狭隘な作業空間しか確保できない場合には施工性に優れた耐震補強技術が必要となる点について論じた。

主に地中のボックスカルバートなどを構成する壁部材のせん断補強を目的とするあと施工せん断補強技術に関するこれまでの開発状況について述べ、現状の課題と関連する既往

の研究成果を整理した。本工法で用いる PHB は、近年コンクリート工の生産性向上のために積極的に活用されている機械式定着鉄筋の 1 つである。PHB は既設部材中の鉄筋とは独立した位置に配置されるが、断面内で生じるひび割れ進展を含めたせん断破壊挙動について明確にすることが本技術を有効活用していく上で特に重要な課題であることを論じた。

RC 柱部材のせん断耐力とじん性を向上させるためにも耐震補強が必要となるが、狭隘な作業空間での人力施工が余儀なくされる場合がある。このような条件下で適用できる耐震補強技術の開発事例について整理した。その 1 つである連続繊維シート巻立て工法の特徴について述べ、現場での作業工程が多いため省力化することが課題であることを論じた。

## 第 2 章

本章では、大型重機を配置できない狭隘な施工条件下でも適用可能なせん断補強技術である PHB を検討対象とした。施工性のさらなる向上を目的として新たに開発した両端円形プレート型 PHB と、補強対象部材の手前側に挿入する PHB 長さ分の作業空間がない場合でも適用可能な機械式継手型 PHB のせん断補強効果について、RC 梁試験体の載荷実験を行って検証した。さらに、両端部の定着性能の影響を考慮する有効係数の考え方をを用いたせん断耐力評価法の適用性について検討した。

実験結果より、両端円形プレート型 PHB と機械式継手型 PHB ではいずれも十分なせん断補強効果が得られることを示した。補強後のせん断耐力は、既往の修正トラス理論の考え方を基に、両端部の定着性能を考慮した有効係数を乗じる手法によって、実験結果を安全側に評価できることを明らかにした。また、引抜き試験にて検証した結果、PHB がせん断補強鉄筋として降伏強度までの引張力を発揮するためには、設計で想定している必要定着長以上の定着長を確保する必要があることを示した。

## 第 3 章

本章では、PHB を RC 部材のせん断補強鉄筋として配置した場合のせん断破壊挙動について、内部ひび割れ進展挙動や耐荷機構に着目して、実験ならびに数値解析により検討した。新設構造物で用いられる閉合型スターラップと比較してせん断補強鉄筋形状の違いがせん断破壊進展挙動に及ぼす影響を検討するために、第 2 章の実験よりも単純化した諸元と載荷方法にて、RC 梁試験体の載荷実験を実施するとともに、実験終了後断面分割法により内部ひび割れ状況を観察した。一方、3次元剛体バネモデル (3-D RBMSM) を用いた解析を行い、せん断補強鉄筋形状の違いが内部ひび割れ進展挙動やせん断抵抗メカニズムに及ぼす影響について検討した。

実験と解析のいずれも、閉合型スターラップを用いた場合と比較すると PHB を配置した場合の最大荷重は低下した。PHB を断面内に 1 本配置した RC 梁では、PHB の上下端付近に回り込むひび割れ状況となり、上面まで進展して鉛直ひび割れとなることを明らかにした。これに伴い、圧縮応力域で面外方向 (幅方向) の変位が生じると、RC 梁が負担できる

せん断力が小さくなることを示した。

実験結果よりせん断力分担について検討し、閉合型スターラップと比較して PHB を配置した場合は、コンクリート負担分とせん断補強鉄筋負担分の両方が小さくなることを示した。さらに、解析結果よりせん断抵抗メカニズムの分離を行い、PHB を配置した場合は鉛直ひび割れの影響でコンクリート負担分としてアーチ機構負担分が低下し、せん断補強筋負担分は斜めひび割れがせん断補強鉄筋と交差しない状況が生じ、トラス機構負担分が低下することを明らかにした。

#### 第 4 章

本章では、第 3 章の RC 梁試験体を基準にして、PHB であと施工せん断補強を行う様々な構造条件を想定し、5 項目について各条件下でのせん断補強効果やせん断破壊挙動の特徴を 3-D RBSM を用いた数値解析により検討した。

1 つ目に、せん断補強鉄筋が配置されている既設構造物に PHB をあと挿入することを想定して、閉合型スターラップと PHB が交互に配置された場合の解析を実施した。その結果、閉合型スターラップの拘束によって幅方向に広がる変位が抑制され、PHB の補強効果が増加することを明らかにした。

2 つ目に、PHB の埋込深さが短くなった場合の解析を実施した。その結果、圧縮側部分に PHB の欠損部が生じる場合には、コンクリートのアーチ機構が負担できるせん断力が低下し、せん断耐力も小さくなることを明らかにした。

3 つ目に、RC 梁の部材幅が大きくなった場合の解析を実施した。その結果、幅が大きい場合はせん断補強鉄筋の鉛直部分の効果が発揮されにくい部分が生じることから最大せん断応力が小さくなることと、PHB は断面幅方向に均等な間隔で配置した場合に最大せん断応力が大きくなることを明らかにした。

4 つ目に、壁部材のせん断補強に適用することを想定して、幅方向が拘束された条件での解析を実施した。その結果、ひび割れ状況はせん断補強鉄筋形状によって異なるが、斜めひび割れ発生後もアーチ機構が低下することなく維持され、最大せん断力は大きく増加することを明らかにした。

5 つ目に、せん断スパン比が大きい場合と小さい場合のそれぞれで解析を実施した。その結果、せん断補強鉄筋形状の違いがひび割れ状況や最大荷重に及ぼす影響はせん断スパン比の違いに関わらず同様であることを明らかにした。

#### 第 5 章

本章では、狭隘部での人力施工が可能で、現場作業の省力化によって施工の効率化を図った RC 柱の耐震補強技術として、炭素繊維複合パネル (CFP) を巻き立てる工法を開発した。

CFP のせん断補強効果を検証するため、繊維量、付着の有無などを検討項目とした補強

試験体のせん断破壊実験を行った。その結果、炭素繊維シート巻立てと同等の効果が得られることを明らかにした。今回の実験では、せん断破壊モードが斜め引張破壊からせん断圧縮破壊に変化することと、コンクリートと充填モルタルの付着切れが生じて部材高さ全体で炭素繊維シートの伸びが生じることを明らかにした。

CFP による柱部材の耐震補強効果を検証するため、鉄道ラーメン高架橋の橋脚を模擬した RC 柱試験体で正負交番載荷実験を行った。その結果、炭素繊維シート巻立てと同等以上のじん性補強効果が得られることを明らかにした。補強後のじん性率は、シート巻立て補強を対象とした既存の算定式を準用して評価できることを明らかにしたが、せん断スパン比が 5.0 より小さくなるほどじん性率が過小評価される傾向が確認され、終局部材角を用いる場合の方が精度の高い評価手法を確立できる可能性があることを示した。

## 第 6 章

本章では、橋軸方向の水平力に対してせん断破壊する諸元の RC 壁式橋脚を対象とし、狭隘な施工環境下でも適用可能なものとして、PHB を用いたあと施工せん断補強と CFP を用いた巻立て補強を組み合わせた耐震補強技術を新たに提案した。

RC 柱試験体の正負交番載荷実験を行い、PHB によってせん断破壊する諸元の RC 橋脚を曲げ破壊モードに移行できることと、CFP によって軸方向鉄筋のはらみ出しに伴うかぶりコンクリートの剥落を抑制できることを示した。特に CFP による巻立て補強を行うことで、大変形が生じた際でも鉛直荷重を支持でき、部材としての冗長性を高める効果があることを明らかにした。

## 第 7 章

本章では、本論文の結論と今後の課題を整理して示した。

本論文では、狭隘な作業空間でも適用可能な耐震補強技術として、せん断補強を実現可能な PHB と、柱のせん断補強とじん性補強を実現可能な CFP について、補強効果の検証を行うとともに補強後の抵抗機構について論じた。一方で、本研究で得られた知見を実務設計に反映させていくためには、さらに補強メカニズムに立脚した設計手法の確立が必要であることを述べた。

既設構造物を長期的に有効活用していくためには、耐震補強を確実に進めていく必要があるが、補強した RC 部材の構造性能については未だ不明確な点も多くある。本研究では 2 つの耐震補強技術を取り上げて補強材の構造的な機能について示したが、補強した RC 部材の構造性能を評価する上で有益な知見が得られており、今後の耐震補強技術の発展に貢献するものである。