

早稲田大学大学院 理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Mechanical Properties of Carbon Fiber Sheet
Strengthened Prestressed Concrete Member
Subjected to Cyclic Torsion

炭素繊維シートにより補強されたプレストレスト
コンクリート部材の交番ねじり特性

申請者

何	海明
Haiming	He

建設工学専攻 構造設計研究

2007年12月

多くの構造物では、大きなねじりモーメントが生じないように構造設計を行っており、ねじりに関する検討は通常省略されている。しかし、構造物の大型化による不等沈下、立地条件やデザイン面から非対称構造の採用、船舶等の衝突による偏心荷重等の影響等で、ねじりの検討が必要となる場合がある。近年、地震、波浪、風、不等沈下などによる構造物のねじり被害も報告されている。また、地震、波浪、風などによる生じた交番ねじりを受ける鉄筋コンクリート（以下 RC）部材とプレストレストコンクリート（以下 PC）部材の力学性状について、研究が不十分で、ひび割れ性状、破壊状況といった力学性状について不明な点が多い。とくに、耐震設計などにおいて、軸力の影響を考慮した交番ねじりを受ける RC、PC 部材の力学特性を十分に把握する必要がある。

一方、既存 RC、PC 構造物の補強工法として、炭素繊維シート（以下 CFS）を用いた工法が普及しつつある。CFS は高い引張強度を有し、軽量で施工しやすく、補強量の調整も容易であり、錆を伴う腐食を起こさないため耐久性にも優れている等の長を有している。近年、CFS の研究と施工実績も増え、設計、施工指針まで作成されてきた。しかし、ねじり補強に対する研究が少なく、設計ねじり耐力が十分に検討されてこなかった。

本研究では、帯鉄筋のかわりに、CFS を PC 部材の表面に貼り付けてねじり補強を行っている。CFS により補強された PC 部材のねじり特性及び CFS のねじり補強効果を調べるために、軸方向力を作用させた状況で単調と交番載荷実験を行っている。載荷実験の結果から、供試体の変形、ひび割れ、破壊状況等の基礎的な力学性状を把握している。CFS で補強された PC 部材は、ねじり耐力が大幅に増加し、ひび割れ幅が小さく、ひび割れも分散され、CFS の大きい補強効果が確認されている。また、ねじり剛性の保持、小さい残留変位、じん性に関する力学特性にも優れていることが示されている。

有限要素法解析（以下 FEM）では、CFS の異方性、引張と圧縮特性の相違、かつコンクリートとの付着特性を考慮し、コンクリートと鋼材の材料非線性の特性と交番荷重を受ける時の履歴特性を考慮している。解析結果は実験結果と良く一致し、載荷実験を追跡することができている。

CFS により補強された PC 部材のねじり耐力の算定では、立体トラス理論にせん断流の外周を供試体の表面とする考え方を今回新たに提案し、PC 部材のねじり耐力の算定式を誘導している。また、軸力を受けるときの PC 部材のねじり耐力の算定では、斜め圧縮破壊理論に軸力の影響を考慮した算定式を用いてねじり耐力を算出している。提案している算定式は両者とも実験結果を安全側に評価し、かつ良い対応を示している。

本論文は、第 1 章序論から第 10 章結論までの全 10 章で構成されており、それぞれの内容は以下のとおりである。

第 1 章では、研究の背景と目的として、まずねじりが構造物に与える被害、ね

じりを受ける PC 部材の既往の研究についての概要を述べている。次に、CFS を用いた補強工法とねじり補強への応用の概要について述べている。そして、本研究の目的について述べ、本研究の構成が整理されている。

第 2 章では、ねじりを受ける RC, PC 部材の力学性状に関連する既往の研究および CFS を用いた補強工法について述べている。ねじりに関する理論、既往の研究の成果、各国のコンクリート標準示方書のねじりに対する検討などが記述されている。また、交番ねじりを受ける RC, PC 部材の力学性状についての既往の研究も言及している。そして、炭素繊維の材料特性と分類など、CFS を用いた補強工法の現状および施工事例を述べている。

第 3 章では、載荷実験の詳細について説明されている。各供試体の寸法、使用した材料、補強方法や載荷方法などについて述べ、使用した載荷装置、荷重の制御方法や測定する項目などについて説明されている。

第 4 章と第 5 章では、載荷実験の結果について述べている。第 4 章は単調載荷実験の結果、第 5 章は交番載荷実験の結果についてそれぞれ述べている。ねじりモーメントとねじり率の関係、ひび割れ性状、破壊状況、そして補強材のひずみ挙動について説明されている。そして、それぞれ第 4 章と第 5 章の最後に、実験結果の要約がまとめられている。単調載荷実験から、CFS により補強された供試体はねじり耐力が大幅に増加し、ひび割れがより分散され、ひび割れ幅も小さく、かぶりコンクリートの剥離、剥落などが阻止でき、十分なねじり補強効果が得られている。交番載荷実験からも、CFS の十分なねじり補強効果を確認でき、さらに、CFS により補強された供試体の残留変位が小さく、回復力、じん性といった力学性状に優れていることを示している。

第 6 章では、実験結果に対する考察と比較検討が行われている。比較検討項目はそれぞれ、CFS のねじり補強効果、交番載荷によりねじり耐力の低下、交番載荷時のねじり剛性の低下となっている。CFS により補強された供試体は CFS を供試体の表面に被覆することで、終局までかぶりコンクリートの剥離などを阻止して、供試体の全断面が有効にねじりモーメントを抵抗でき、大きなねじり補強効果が出ている。また、交番載荷の供試体のねじり耐力は単調載荷の供試体より低下するが、CFS により補強された供試体のねじり耐力の低下率は帯鉄筋により補強された供試体より低いことを示している。さらに、交番載荷時のねじり剛性の低下についても同様な傾向が得られている。

第 7 章では、FEM でのモデルの作成方法について説明されている。ねじりを受ける PC 部材の解析では、各材料の特性を十分に検討し、3 次元モデル化しなければならない。本解析では、CFS の材料特性である異方性および引張と圧縮側の特性の差を反映して CFS をモデル化している。また、CFS とコンクリートの間に界面要素を設け、付着応力について検討を行っている。さらに、コンクリートのひび割れ発生後のせん断応力の伝達について、せん断保持係数を取り入れて検討を

行っている。交番載荷供試体の解析においては、各材料の履歴特性をモデル化している。コンクリートについては、除荷、再載荷時コンクリートの残留変位を考慮した履歴モデルを使用している。

第8章では、FEMの結果および実験結果との比較について述べている。第7章でモデル化した各材料の力学特性と履歴特性をそれぞれ適用し、実験結果との比較検討を行い、CFSにより補強された供試体のコンクリートのひび割れ発生後のせん断保持力は帯鉄筋により補強された供試体より高いことが示されている。交番載荷供試体のFEM結果では、除荷、再載荷時の残留変位を考慮した履歴モデルをコンクリートに適用した場合、交番載荷実験をよく再現し、追跡することができている。

第9章では、CFSにより補強された供試体のねじり耐力の算定について述べている。CFSにより補強された供試体はCFSを供試体の表面に被覆することで、かぶりコンクリートの剥離などを阻止し、供試体の全断面が有効にねじりモーメントを抵抗できるため、立体トラス理論において、せん断流の外周を供試体の表面とする方が合理的と考えている。その概念を取り入れ、せん断流の有効厚さの算定方法について考察を行い、ねじり耐力算定式を誘導し算出している。CFSにより補強された供試体の軸力を受ける時のねじり耐力の算定については、斜め圧縮破壊理論に軸方向力（プレストレスと軸力）の影響を考慮した算定式を用いてねじり耐力を算出している。両者とも実験結果と良い対応を示している。

第10章では、本研究の結論についてまとめ、本研究から得られた成果がまとめられている。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 何 海明 印

(2007年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○ 1) Haiming He・Osamu Kiyomiya, Mechanical Behaviors of Carbon Fiber Sheet Strengthened PC Member Subjected to Torsion, Journal of Composites for Construction, ASCE (修正意見対応中)</p> <p>○ 2) Haiming He・Osamu Kiyomiya, Study on Torsion Properties of Carbon Fiber Sheet Strengthened PC Member with Zebra-Shaped, Journal of the JSCE (修正意見対応中)</p> <p>○ 3) 何 海明・清宮 理, 炭素繊維で補強された PC 部材のねじり力学特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 28, No. 2, pp. 1417~1422, 2006.</p> <p>○ 4) 何 海明・清宮 理, 軸力と交番ねじりを同時に受ける PC 部材の力学性状に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 52A, pp. 1009~1016, 2006.</p> <p>○ 5) Haiming HE・Osamu KIYOMIYA・Akihito MASUDA, Experimental Study on Torsion Behavior of PC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Japan Concrete Institute, Vol.26, No. 2, pp. 1627~1632, 2004.</p> <p>○ 6) 何 海明・清宮 理・白 濟鉉・増田明仁, 接合部を有する PC 梁のねじり載荷試験と有限要素法解析, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 25, No. 2, pp. 709~714, 2003.</p> <p>7) 王 涛・何 海明・清宮 理, 軸力影響下に交番ねじりを受ける C F T 部材の力学挙動に関する載荷実験, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 28, No. 2, pp. 805~810, 2006.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<p>7) 何海明・白 濟鉉・清宮 理，接合部を有する PC 梁のねじり載荷試験，第 57 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，5-305，pp.1223～1224，2002.</p> <p>8) 増田明仁・何海明・清宮 理，接合部を有するプレストレストコンクリート梁のねじり試験，第 59 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，5-344，pp.685～686，2004.</p> <p>9) 増田明仁・何海明・清宮 理，PC 梁の静的ねじり載荷試験，第 58 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，5-305，pp.575～576，2003.</p> <p>10) 白 濟鉉・何海明・清宮 理，充填コンクリートの挙動を考慮した円形断面鋼製柱ねじり載荷試験とねじり剛度の解析法，第 57 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，5-305，pp.649～650，2003.</p>