

学 位 論 文 題 名

Continuous Fiber Flexible Shear Reinforcement for Concrete Piers

（コンクリート橋脚の連続繊維フレキシブル補強材によるせん断補強）

学位論文内容の要旨

周知のように、阪神大震災における被害分析に基づき耐震設計基準が見直された。新しい耐震設計基準においては、これまでのじん性設計の思想を踏襲しつつ、高レベル地震動に対しても高いじん性能を保有させることを求めている。例えば、土木学会コンクリート標準示方書では、帯鉄筋の間隔を 150mm 以下としかつ中間帯鉄筋を配置させることが規定されている。しかし、高い施工品質を確保しつつその要求に応えることは難しい。それゆえ、安全性や耐久性とともに施工性にも優れた新しい技術開発が望まれている。

本研究は、安全性や耐久性に加え、施工の容易さや確かさと言った施工性への配慮から、新しいタイプの補強材のコンクリート橋脚のせん断補強筋としての利用を試みた。本研究では 2 種類の補強材、すなわち、炭素繊維フレキシブル補強材とポリアセタール繊維フレキシブル補強材を対象としている。炭素繊維フレキシブル補強材は、剛性の大きな炭素繊維がポリビニル製のチューブ中に配置された補強材であり、一方、ポリアセタール繊維フレキシブル補強材は、剛性は小さいが破断ひずみが大きいポリアセタール繊維単体よりなる補強材である。ともに柔軟性に優れ、主鉄筋の周りにせん断補強筋としてスパイラル状に巻き付けられる。なお、炭素繊維フレキシブル補強材においては、巻きつけ後、エポキシ樹脂がチューブ内に充填される。本研究では、これら補強材が用いられたコンクリート橋脚模型の変形性能とともにコンクリート内部での補強材の応力伝達特性や強度と言った力学特性を主として実験的に明らかにしようとするものである。

本論文は、5つの章から構成されている。

第 1 章は、研究目的及び本研究に関連する既往の研究成果がまとめられている。

第 2 章は、炭素繊維フレキシブル補強材（以下 CFFR）を用いたコンクリート橋脚模型の変形性能及び CFFR の応力伝達特性に関して述べられている。CFFR の補強量を実験変数としたコンクリート橋脚模型の一方向繰返し載荷試験及び正負交番繰返し試験を行い、橋脚模型の終局変形が、CFR を用いることにより著しく増加しかつその増加割合は正負交番繰返し荷重を受ける方が大きいこと、またその終局変形量は CFFR の折り曲げ部での破断により決定付けられることを明らかにした。さらに、CFFR には折り曲げ部を超えて大きな引張力が伝達されること、さらに、その伝達割合がほぼ一定値に収束することを明らかにした。

第3章は、CFFRの折り曲げ部における応力伝達特性とその強度について述べている。第2章においてCFFRを用いたコンクリート橋脚の変形能を予測する上で、CFFRの折り曲げ部の応力伝達特性とその強度を把握する重要性が認識された。そこで、折り曲げ部の挙動の詳細な把握を目的に、折り曲げ部の曲率、折り曲げ角度、折り曲げ後の直線部の長さ（埋め込み長さ）を実験変数とした要素試験を行った。その試験結果に基づき、折り曲げ部の曲率および折り曲げ角度の影響を大きく受けることを考慮に入れた破断強度の予測式を構築した。また、折り曲げ部での応力伝達特性を、折り曲げ部において損失する引張力と折り曲げ部の直前と直後でのCFFRの相対移動量で整理し、その関係が、チューブの変形に起因し大きな損失が見られる第1段階、チューブが十分変形した後に第1段階よりも損失割合が小さくなる第2段階、そして、繊維を結合している樹脂の破壊に起因し第2段階よりもさらに損失割合が小さくなる第3段階に分けて考えることができることを見出し、その関係の定式化を図った。

第4章において、CFFRを用いたコンクリート部材の有限要素解析による挙動予測に必要な補強材要素及び3章で開発した応力伝達モデル及び破断強度予測式を既存の3次元有限要素解析プログラムに導入した。まず、CFFRをトラス要素により表現し、トラス要素とコンクリート要素とを剛結させた場合の橋脚模型の解析を行った。その結果、マクロ的な応答（荷重と変位との関係）は実験結果と概ね一致するが、CFFRのひずみ性状、さらには破断時期及び位置が実験結果と大きく異なることを確認した。これは、この方法では、折り曲げ部間におけるCFRとコンクリート間の付着力が無視できるほど小さく、折り曲げ部での引張力の損失を考慮できないことによる。そこで、折り曲げ部間での付着力を取り除く為のリンク要素と第3章で開発した応力伝達モデルと破断強度式を導入した。最終的に、解析プログラムが3章で行った要素試験結果を精度よく予測できることが明らかにされた。

第5章は、ポリアセタール繊維フレキシブル補強材（以下PFFR）を用いたコンクリート橋脚の変形性能及びPFFRの応力伝達特性に関して述べている。PFFRの補強量を主たる実験変数とした橋脚模型の正負交番載荷試験を行った結果から、PFFRは、大変形時においても破断することなくかつ折り曲げ部において主鉄筋から肌離れせずに内部コンクリートを強固に拘束できるために、コンクリート橋脚のじん性能を大きく向上させ得ることを明らかにした。さらに、折り曲げ部における損失割合は、CFFRの約4倍と大きいこと、また荷重初期段階においては、PFFRのひずみ増加が鉄筋のそれよりも大きいことを明らかにした。最終的にトラス理論に基づくPFFRのひずみ挙動の予測式を構築した。

第6章は、結論であり各章の主たる知見をとりまとめたものである。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	角 田 興史雄
副 査	教 授	三 上 隆
副 査	教 授	城 攻
副 査	教 授	佐 伯 昇
副 査	助教授	上 田 多 門

学 位 論 文 題 名

Continuous Fiber Flexible Shear Reinforcement for Concrete Piers

(コンクリート橋脚の連続繊維フレキシブル補強材によるせん断補強)

本論文は、新しいタイプのコンクリート用補強材である連続繊維フレキシブル補強材の適用性に関し、せん断補強筋としての基本的性状を実験的かつ数値解析的に明らかにしたものである。新しいタイプとして、炭素繊維を用いたものと、ポリアセタール繊維を用いたものを対象としている。両タイプとも現場において手で自由に配筋できる、ポリアセタール繊維は通常の高強度繊維材料と比較すると破断ひずみが大きい、という従来の材料にない特徴を持った補強材で、補強材としての選択肢の幅を大きくするものである。炭素繊維は剛性が高い、ポリアセタール繊維は破断ひずみが大きいことにより、せん断耐力の向上、さらには、変形能力の向上に有効であることを示している。炭素繊維フレキシブル補強材の場合、折り曲げ部での力学的特性に部材の挙動が支配されることを示し、数値解析に必要な折り曲げ部のモデルを提案している。ポリアセタール繊維フレキシブル補強材の場合、そのひずみ挙動の予測モデルを実験的に提示している。

本論文は、5つの章から構成されており、各章の内容は以下のようなものである。

第1章では、研究目的及び本研究に関連する既往の研究成果のまとめを示している。

第2章では、炭素繊維フレキシブル補強材（以下 CFRR）を用いたコンクリート橋脚模型の変形性能及び CFRR の応力伝達特性に関し、実験的に次のような点を明らかにしている。CFRR の補強量を実験変数としたコンクリート橋脚模型の一方向繰返し載荷試験及び正負交番繰返し試験を行い、橋脚模型の終局変形が、CFRR を用いることにより著しく増加しかつその増加割合は正負交番繰返し荷重を受ける方が大きいこと、またその終局変形量は CFRR の折り曲げ部での破断により決定付けられる。CFRR には折り曲げ部を超えて大きな引張力が伝達されるが、その伝達割合がほぼ一定値に収束する。

第3章では、CFRR の折り曲げ部における応力伝達特性とその強度について次のような点を述べている。第2章において明らかにされた CFRR を用いたコンクリート橋脚の変形性能に大きな影響を与える折り曲げ部の挙動の詳細な把握を目的に、折り曲げ部の曲率、折り曲げ角度、折り

曲げ後の直線部の長さ（埋め込み長さ）を実験変数とした要素試験を行った。その試験結果に基づき、折り曲げ部の曲率および折り曲げ角度の影響を大きく受けることを考慮に入れた破断強度の予測式を構築した。また、折り曲げ部での応力伝達特性を、折り曲げ部において損失する引張力と折り曲げ部の直前と直後での CFFR の相対移動量で整理し、その関係が、チューブの変形に起因し大きな損失が見られる第 1 段階、チューブが十分変形した後に第 1 段階よりも損失割合が小さくなる第 2 段階、そして、繊維を結合している樹脂の破壊に起因し第 2 段階よりもさらに損失割合が小さくなる第 3 段階に分けて考えることができることを見出し、その関係の定式化を図った。

第 4 章において、CFFR を用いたコンクリート部材の有限要素解析による挙動予測に必要な補強材要素及び第 3 章で開発した応力伝達モデル及び破断強度予測式を既存の 3 次元有限要素解析プログラムに導入し、以下のことを示している。まず、CFFR をトラス要素により表現し、トラス要素とコンクリート要素とを剛結させた場合の橋脚模型の解析を行った。その結果、マクロ的な応答（荷重と変位との関係）は実験結果と概ね一致するが、CFFR のひずみ性状、さらには破断時の部材の状況及び破断位置が実験結果と大きく異なることを確認した。これは、この方法では、折り曲げ部間における CFR とコンクリート間の付着力が無視できるほど小さく、折り曲げ部での引張力の損失を考慮できないことによる。そこで、折り曲げ部間での付着力を取り除く為のリンク要素と第 3 章で開発した応力伝達モデルと破断強度式を導入した。最終的に、解析プログラムが 3 章で行った要素試験結果を精度よく予測できることが明らかにされた。

第 5 章においては、ポリアセタール繊維フレキシブル補強材（以下 PFFR）を用いたコンクリート橋脚の変形性能及び PFFR の応力伝達特性に関して以下のように述べている。PFFR の補強量を主たる実験変数とした橋脚模型の正負交番載荷試験を行った結果から、PFFR は、大変形時においても破断することなくかつ折り曲げ部において主鉄筋から肌離れせずに内部コンクリートを強固に拘束できるために、コンクリート橋脚の変形性能を大きく向上させ得ることを明らかにした。さらに、折り曲げ部における損失割合は、CFFR の約 4 倍と大きいこと、また荷重初期段階においては、PFFR のひずみ増加が鉄筋のそれよりも大きいことを明らかにした。最終的にトラス理論に基づく PFFR のひずみ挙動の予測式を構築し、実験結果と比較することによりその妥当性を示した。

第 6 章は、結論であり各章の主たる知見をとりまとめている。

以上から、本論文は、コンクリート構造用の新しいタイプの補強材の適用性を、せん断耐力および変形性能の向上という視点で明らかにするとともに、その数値解析手法を提示することによって、大変新規的かつ独創的な研究成果を挙げており、構造工学およびコンクリート工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。