

## 論文の内容の要旨

論文題目 炭素繊維シート補強されたコンクリート構造要素の  
耐力・疲労寿命評価に関する研究

氏 名 田中 英紀

コンクリート構造物は、1900年代初期にヨーロッパより技術導入されて以来、橋梁をはじめ、ダム、トンネル、港湾施設などの重要な社会資本を形成してきた。特に、1960年代後半からの高度成長期には、鉄道・道路を中心とした幹線網が急速に整備されてきた。この間、技術的な改善、あるいは提案が数多くなされ、施工の合理化や設計技術の向上、研究課題の抽出と取り組みが進められてきた。

反面、急激な整備にともなう天然材料の枯渇、品質管理手法の未整備、さらに、塩害・中性化およびアルカリ骨材反応などによる化学劣化が複雑に作用して、コンクリート構造物の耐久性・耐荷性の低下が顕在していると指摘されている。

一方、わが国は世界でも有数の地震国であり、多くの構造物・人的被害を受けてきた。近年では、1995年の兵庫県南部地震、2004年の新潟県中越地震が代表的な地震として挙げられる。これらの地震によって得られた知見や課題は、コンクリート構造物の耐震技術の向上に貢献し、新材料・新工法の採用も盛んに行われるようになった。

さらに、わが国の国家財政の観点からも社会資本ストックの増加よりも、既存ストックの延命化や耐震性能向上を図る補修・補強技術の必要性はますます高くなってきている。炭素繊維シート補強は、補修・補強技術の中の一工法に位置付けられており、炭素繊維シートの高弾性、高強度および耐腐食性などの特長に着目して、1993年に適用されはじめて以来、数多くのコンクリート構造物の補強工法として採用されている。

しかし、一般に、部材厚 250~1000 (mm) のコンクリート部材に 0.15 (mm) 単位の炭素繊維シートを貼付して耐力を向上させるため、接着剤を含む炭素繊維シート近傍に生じる局部応力が、構造耐力の評価に影響を及ぼす。このため、従来のような設計コードでは、十分にその力学特性を把握できない課題があった。

連続体損傷力学（以下、損傷力学と称する）は、材料内部のマイクロクラックあるいはマイクロポイドのような微視的空隙の発生と成長による剛性、靱性などの低下、残存寿命の減少のような構造劣化を連続体力学の枠組の中で表現できる特長を有しており、クリーブ破断を評価するために提案された後、有限要素法に組み込まれて、金属材料の延性破壊、脆性破壊および疲労破壊などの評価に応用されている。

本論文では、炭素繊維シートで補強されたコンクリート構造要素の耐力・寿命解析を行う解析手法の確立を最終目的として、損傷力学に基づく解析コードの作成と解析精度の実験的な検証を実施した。主な項目は、①コンクリートの各強度試験結果による応力・ひずみ関係と弾塑性損傷構成方程式を同定したこと、②同構成方程式を有限要素プログラムにインプリメントして、炭素繊維シート補強された実寸RC版の単調載荷および200万回予疲労後の単調曲げ破壊実験と比較検討して解析手法の妥当性を検証し

たこと、③炭素繊維シート補強されたコンクリート構造要素の構造耐力に大きな影響を与え、かつその評価方法が十分確立されていない炭素繊維シートとコンクリートとの剥離破壊モードの単調載荷および疲労破壊モデルを開発し、実験結果と対比してその有効性を評価したこと、④現炭素繊維シート補強設計コードのレビューを行い、設計プロセスへの損傷力学の導入および損傷力学による数値解析を用いた設計指針の改善例を基に、炭素繊維シート補強設計への損傷力学の適用性を提案したことである。

以下に、これらの項目をさらに具体的に述べる。

まず、コンクリートの弾塑性解析に適用されている Drucker-Prager の相当応力を用いて弾塑性損傷構成方程式を定式化し、接線型の応力増分・ひずみ増分関係を表記した。さらに、コンクリートの単軸圧縮および引張強度試験から得られた応力・ひずみ関係をカーブフィッティングして同構成方程式中のコンクリートの材料定数を決定した。同様に、曲げ疲労強度試験結果を利用して、損傷発展に関わる材料パラメータを決定した。

この弾塑性損傷構成方程式を二次元有限要素プログラムに組み込み、単調載荷曲げ強度および曲げ疲労強度試験結果と比較して、実験結果と良く対応する結果を得た。特に、コンクリートのような脆性体では、局部ひび割れが構造崩壊とほぼ等しくなる特長を持っているため、部分連成解析が効率良く曲げ疲労破壊回数を把握できることを示した。無論、完全連成解析による荷重・変位曲線、ひび割れ発生、進展などは実験と良く符号しており、基本であるコンクリートの各強度試験を解析的に評価することができた。

次に、このプログラムを炭素繊維シート補強されたコンクリート構造要素の損傷破壊解析に適用した。炭素繊維シートによる補強効果を確認するため、補強しないRC版と炭素繊維シート補強されたRC版の単調載荷曲げ耐力を比較し、さらに、200万回予疲労を与えたシート補強した版の単調載荷曲げ耐力を実験結果と対比した。

その結果、補強しない版のひび割れ発生荷重は実験結果と良く整合し、ひび割れ近傍の鉄筋に高い応力集中が見られる一般的なRC構造の挙動を再現できた。補強された版については、炭素繊維シートの破断とともに急激に耐力を失う脆性挙動を示し、ひび割れ発生位置と併せて実験結果と良く対応する結果を得た。200万回予疲労を与えた版は、部分連成解析でその影響を評価し、初期損傷として単調載荷曲げ破壊解析を行った。予疲労が単調載荷曲げ耐力に与える低減率は、実験では20%、解析では12%であった。二次元モデルでの評価、損傷変数以外の塑性変形量の初期値への反映などが精度向上への課題となるが、定性的には予疲労の影響を良く評価でき、補強後のコンクリート構造物の耐力劣化予測として、補強設計に有効な解析コードを提案できた。

次の項目は、炭素繊維シートとコンクリートとの剥離破壊モードの解析的検証である。ここでの特長は、Drucker-Prager の相当応力に最大主応力を組合わせた構成式に、せん断変形が卓越する場合に対応できるよう Tresca の相当応力を組込んで二次元弾塑性損傷構成方程式を定式化し、二次元有限要素プログラムにこれを編成したことである。三次元線形弾性解析の予備解析により、剥離破壊は、付着面積による平均的な付着強度ではなく、コンクリート表層のせん断応力、特に付着区間端部に集中する最大せん断応力の影響を強く受け、付着面積の影響をほとんど受けないことが判明した。

さらに、この二次元モデルを疲労付着破壊解析に拡張した。疲労付着破壊は、周波数5(Hz)の片振り載荷である。この疲労付着破壊解析では、数十サイクルから数百サイクルまでの破壊回数に対応する最大荷重が、約4%程度の差しかないケースもあるが、対象とした3ケースにおいて、実験によく対応する結果を得ることができた。また、損傷変数分布より、疲労付着破壊は、炭素繊維シート付着区間の端部に剥離が生じ、それが先端部に進展して全付着領域に広がって最終的な破壊状況を呈することがわかった。この現象は、コンクリート表層部のせん断

応力が付着区間の根元部で最大となり、損傷変数が限界値に達して応力開放された結果であると推定でき、単調載荷付着破壊解析結果とも整合している。

最後は、損傷力学の補強設計コードへの適用性に関する提案である。現設計コードでは、有限要素法による安全性評価も導入しており、損傷力学の設計コードへの適用に関して整備されている。ここでは、一般的な方法では十分に評価できなかった重要課題である剥離破壊モードを損傷力学による数値解析で評価できる例題を提示した。このことより、一般的な評価方法を補足する形で損傷力学を適用することは、安全性能照査の精度向上、新しい知見の反映による設計の合理化などに期待できる。

メッシュサイズの依存性、多軸応力下の構成則、異方性の考慮など今後取り組む課題はあるが、コンクリート構造物の設計コードにおいて一般に利用されている有限要素法を基本として、比較的容易にこれに組み込める損傷力学は、コンクリート構造物の経時劣化にともなう構造耐力の減少を評価できる設計ツールとして利用でき、さらに、塩害、中性化などのコンクリートの化学劣化との複合作用による総合的な劣化メカニズム解明の一助となることが期待される。