

## 論文の内容の要旨

論文題目 Local-Contact Damage Based Modeling of Shear Transfer Fatigue in Cracks and Its Application to Fatigue Life Assessment of Reinforced Concrete Structures  
ひび割れ局所接触点での損傷を考慮したせん断伝達モデルと  
鉄筋コンクリート構造の疲労寿命予測への応用

氏 名 イサヤス ゲブプレヨハンス フトウィ  
Esayas Gebreyouhannes Ftwi

社会基盤を構成する主要構造形式である鉄筋コンクリートならびにプレストレストコンクリート構造の寿命推定法の確立は、新設構造の耐久設計と既設構造の寿命推定・維持管理に不可欠である。これら構造性能の寿命推定では、力学的な影響を代表する荷重と環境条件の両者を考慮することが肝要であり、構造工学、材料科学の両面からこれまで研究が行われてきた。本研究はコンクリートに導入されるひび割れのせん断応力伝達機構に焦点をあて、高サイクル疲労荷重下での応力伝達機構の劣化と、それを組み入れた構成則を定式化しようとするものである。ここで、水分環境の影響を陽な形で構成則にとれ入れることを眼目とした。さらに、微視的なレベルでの材料挙動と巨視的な部材・構造挙動を同時に追跡する直接積分法に基づく数値構造解析に組み入れることで、環境作用と高サイクル疲労荷重下にある鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート構造の寿命推定法を提示することを目的とするものである。

単一のひび割れを含むコンクリート直方体に高サイクル片振りと交番せん断応力を作用させ、せん断変形とひび割れに直交する開口変位を同時に測定した。ここで、ひび割れ直交方向の拘束条件を種々に変化させた実験を実施して、せん断ずれとそれに励起されるひび割れ開口変位（ダイレイタンス）から、劣化損傷を剛性低下の形で整理することができた。交番載荷履歴では急速な疲労劣化が測定されたとともに、水中に没しているひび割れ面での応力伝達疲労寿命は、気中のそれに比較して100倍程度、低下することが明らかとなった。実験にあたって、高強度を呈する高性能コンクリートのせん断疲労も同時に検討を行ったところ、ひび割れ面が平滑なために応力伝達と対疲労性能は普通強度コンクリートと比較して劣ることが定量的に確認された。移動荷重を受ける鉄筋コンクリートスラブなどは主応力の回転が恒常的に発生するため、構造中に存在するひび割れ面では常時、交番せん断応力に晒される。しかも雨水の侵入は多くの場合、防止困難であることを鑑みれば、数値構造寿命推定では、ここで計測されたせん断伝達機構の大幅な劣化を考慮することが不可欠であることが改めて示された。実験ならびに現実の構造物に発現される疲労

履歴経路では、クリープ等の時間効果も同時に含まれる。これらを定量化するためには、時間効果を単独で抽出する必要性を鑑み、伝達応力を固定してひび割れ面でのせん断変位を計測する実験を行った。その結果、時間効果は繰り返し履歴効果に比較して無視できる程度であることを実証した。

ひび割れ面での疲労せん断伝達挙動を、接触面密度関数モデルに基づいて定式化を行った。相対するひび割れ面が接触する点での異方性と局所破壊、接触点での局所摩擦係数の低下、ひび割れ面の形状変化を高サイクル疲労履歴のもとで表現し、さまざまな方向で接触するすべての接触点での応力状態を積分することにより、巨視的なひび割れ面応力伝達モデルを導出することが可能となった。このモデル化は応力伝達機構の源である接触点での機構から導き、かつすべての接触点での変形と局所応力の履歴を数値解析において記憶するものである。したがって、任意の高サイクル疲労荷重に対応が可能であるため、疲労振幅が一定である必要は無く、交番と片振り応力履歴の区別なく適用することが可能である。従来の疲労に対する構成則は、強度や剛性など、巨視的な材料特性値を等価に低減することで間接的に表現しようとするものであった。そのため、適用性は限定されていた。本研究でこれを一般化することが可能となった。高サイクル疲労履歴を全て力学的に追跡することで伝達応力を予測するので、既往の動的非線形応答解析等の技術に直接、導入することが可能となったのである。

本研究で定量化した高サイクル履歴に対応するせん断伝達構成則を、多方向非直交ひび割れモデルに導入することで、高サイクル疲労に対応する鉄筋コンクリート要素構成則を構築した。なお、圧縮疲労とひび割れ面に直交する方向の引張疲労および付着劣化モデルは既往の研究成果を用いた。高サイクル疲労に対応する鉄筋コンクリート構成則を、耐震構造解析で用いられる非線形動的応答解析システムに組み込むことで、構造疲労挙動を逐次追跡する解析法を得た。地震荷重に対しては、構造物の交番変位はおよそ数回～数十回程度であるのに対して、疲労解析では数万～数百万回の履歴を数値計算で追跡することとなる。これを鉄筋コンクリート梁の疲労挙動で検証を行った。固定点ならびに移動荷重の繰り返し応答を実験からもとめ、数値解析結果との比較を行い、疲労寿命精度の検証と確認を行った。対数疲労寿命において変動係数10数%を確保できた。これは、新設の構造設計および既設の構造余寿命推定に適用することが可能なレベルと判断される。

本解析モデルと疲労数値解析法を用いて、乾燥収縮を受ける構造の疲労寿命ならびに雨水による水分の侵入を許した場合の疲労寿命について検討を行った。乾燥に伴う初期ひび割れ、及びひび割れへの水分浸透は、ともに構造疲労寿命の大幅な短縮をもたらすことが予見された。鉄筋コンクリート橋梁床版の疲労寿命が建設時に導入される初期欠陥と強く関連することが経験的に知られており、これを初めて定量的に説明することが可能となったのである。これまで定性的な推定に留まってきた環境作用と荷重作用の複合効果を、疲労寿命問題に関して定量化する方法を提供することができた。