

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 Time-Dependent Compressive Deformation of Concrete and Post-Peak Structural Softening

(コンクリートの時間依存圧縮変形と耐力以後の構造軟化挙動)

氏 名 エルカシフ, カーレッド ファロウク

大変形領域でのコンクリート構造の残存性能と崩壊過程の詳細なシミュレーションは、耐震性能設計の実現と既存社会基盤施設の維持管理に大きな貢献を果たすものと期待される。高度な数値解析法とひび割れ近傍の材料非線形性の解明によって、最大耐力以後の軟化挙動を数値モデルで再現することが可能となってきた。この場合、構成材料に変形と破壊の局所化が伴う結果、たとえ構造体が一定の変位速度を受ける状況にあったとしても、各部位で材料の受ける時間とひずみ履歴は破壊近傍で大きく変動する。部材強度以後の荷重-変位関係に顕著な時間効果が見られることから、コンクリート複合材料の構成則に時間依存性を組み込み、構造体と構成材料の損傷の両者に時間依存性を考慮できる一般化された高次の破壊追跡法を開発することが必要である。本研究は大ひずみ領域の塑性と損傷に関する時間依存型構成則を提案し、構造破壊以後の軟化挙動解析法の大幅な精度向上を実現することを目的としたものである。

時間依存性を考慮したコンクリート複合材料構成則の研究では、低応力域の数年～数十年レベルでの長期クリープ変形を対象としたものと、マイクロ～ミリ秒単位の衝撃荷重を念頭においた高ひずみ速度域での材料構成則が代表的である。前者は社会基盤の寿命推定と維持管理に関わるものであり、後者は衝撃荷重に対する構造安全解析に関するものである。しかし、静的な荷重下での構造強度以後の挙動追跡には、大ひずみ領域で数秒～数分オーダーの時間依存性を記述する構成則が必要となる。本研究はこの時間-ひずみ領域に対して高い精度と合理性を有する材料構成則の開発を行った点に特色がある。軟化解析では載荷と除荷の両履歴に対して時間依存性を考慮することが不可欠であるため、塑性変形と損傷（残存弾性剛性）に現れるひずみ経路依存性と時間依存性を分離する実験方法を新たに考案し、履歴依存型の塑性と損傷速度の抽出と構成則による記述に成功した。

応力状態は主として1軸圧縮に焦点を当てたものであるが、これを3次元横拘束状態に対しても一般化をはかり、拘束条件下での塑性と損傷の進展則から全応力-全ひずみに対する時間履歴構成則を導出した。定式化された構成則は、系統的に載荷履歴を変化させた約40パターンでの1軸載荷実験結果から検証がなされ、硬化から軟化領域に至る全ひずみ域で高い精度を有していることが確認された（図1）。

定式化された軟化領域の時間依存型構成則を、2次元多方向固定ひび割れモデルに基づくRC構成則に組み込むとともに、梁-柱部材のための3次元fiber構造モデルに組み込んだ。これにより、2次元ならびに3次元的な幾何構造を有する社会基盤施設の厳密な構造応答解析を、荷重の時間経路依存性を考慮可能なシステムにまで機能向上させることができた。

材料試験で再現した時間履歴と比較して、より広範で多様な時間履歴が構造体中の構成材料に展開することから、本研究で開発した構成則を組み込んだ非線形応答解析を実構造物の破壊シミュレーションに適用し、実験結果から部材レベルでの検証を実施した。曲げ圧縮破壊モードを呈する RC 梁の耐力以後の荷重-変位関係と圧縮部位のひずみ履歴を、一定変位速度載荷実験から求め、解析と実験との比較を行った結果、最大耐力までの挙動のみならず、耐力以後の軟化挙動と時間依存性を高精度で追跡可能であることを示した (図 2)。また、拘束鋼材を配置した部材実験と解析から、時間依存型構成則は拘束鋼材を配置した部材解析の精度向上により大きく貢献することが判明した。

多方向にひび割れを受ける構造として、耐震壁の高速および低速度交番載荷実験結果を用いて、提案された弾塑性破壊型コンクリート構成則の信頼性を検証した。繰り返し荷重を受ける構造物の復元力特性は、繰り返し数とともに耐荷力を徐々に失うが、これは主として時間の経過に伴う塑性と損傷の進展によるものであり、応力ひずみの折り返し点効果(純粋な繰り返し効果)は殆ど構造応答には寄与していないことを実証することに成功した。

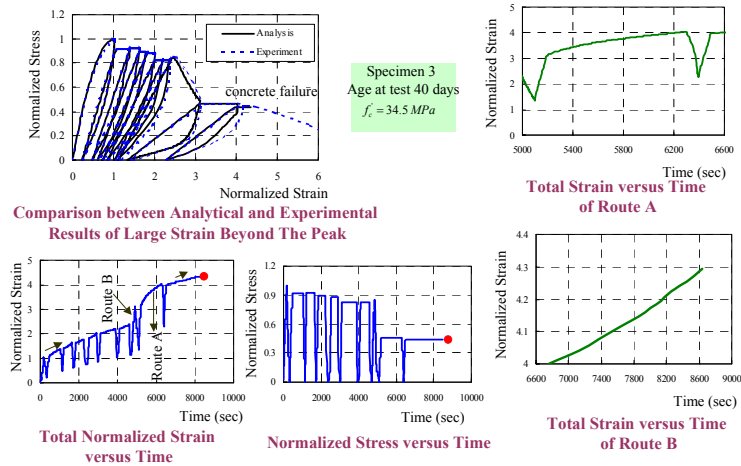


図 1 任意時間ひずみ履歴に対応する応力経路と構成モデルの検証例

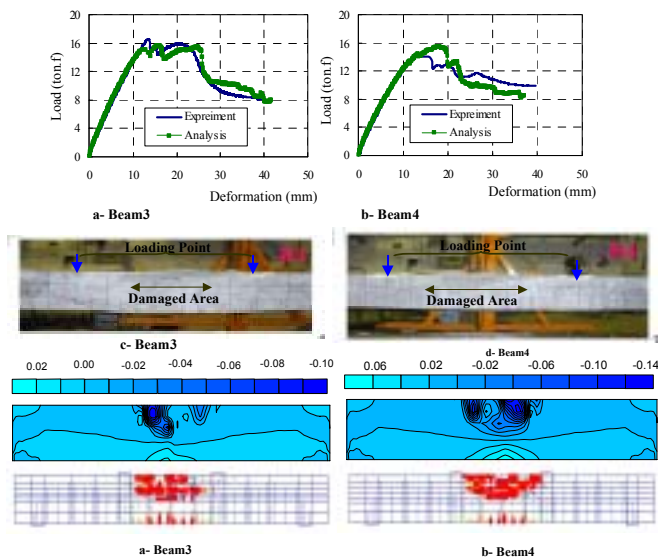


図 2 拘束鋼材を配置した RC 梁の耐力以後の荷重変位関係と数値予測