

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 El-Kashif, Khaled Farouk

社会基盤施設を構成する主要材料の一つである無機セメント系複合材料は、微細な空隙構造を有する多孔体であること、高剛性の骨材が分散して固結されていること等から、時間に依存するクリープ塑性変形と遅れ損傷が、工業材料の中で相対的に大きいことが知られている。数年に渡る長期の塑性変形に対しては、ナノ-マイクロメートルスケールの CSH ゲルの変形と空隙内の水分状態に基づくクリープモデルが与えられ、社会基盤施設の長期性能評価に適用されている。一方、マイクロ-ミリメートルスケールの微細ひび割れの進展、骨材と周辺セメント硬化体間のずれや局所的な座屈などに依存する、大変形領域での時間依存性については、定ひずみ/応力条件に限定された研究が主であった。近年、最大耐力以後の構造応答を解析する技術が進展しつつあり、数秒から数分で発現する時間依存性が、耐力以後の挙動に有為な差となって現れることが予見された。ここでは、たとえ一定速度の変形や荷重が与えられたとしても、構成材料にひずみの局所化が展開するために、定ひずみ速度下での構成モデルでは対応できないことは明らかである。以上の背景から、本研究は任意の大ひずみ-時間履歴に対して、残存応力を与えるコンクリート構成則を定式化することを第一の目的とした。さらにこれを既往の 2 次元、3 次元構造応答解析システムに組み入れて、構造強度以後の軟化挙動に現れる時間依存性を多角的に検討することを第二の目的とした。ここでは、複合体内に展開する微小な分散ひび割れの進展に関連する時間依存性を、もっぱら対象とした。

第 1 章は序論であり、既往の時間依存性モデルとそれらの適用範囲を俯瞰し、本研究で目標とする構造軟化領域の解析で求められる、材料構成モデルの要件を明確化することで、本研究の目的と意義および開発の方法について論じている。

第 2 章では、無拘束一軸状態での短期時間依存性を考慮可能な構成則を導出している。塑性および損傷に対する時間依存性と弾性ひずみ経路依存性を、応力-ひずみを交番させた実験から抽出する方法を提案するとともに、既往の実験結果とあわせて構成モデルの検証を多角的に行った。高応力クリープ経路でのひずみ、ならびにクリープ破壊に至る塑性-損傷速度の特異点を合理的に予測できることが示された。

第 3 章は、第 2 章の成果を踏まえて、3 軸横拘束下にあるコンクリート構成則まで適用範囲を拡張したものである。拘束の効果は、除荷時の弾性剛性の低下として表される損傷の進展を抑制する形でモデルに取り入れることができることを示している。見かけの拘束効果はこれまで現象としては良く知られている挙動であるが、時間依存性と経路依存性を本研究で分離した結果、3 次元拘束効果は塑性の進展には主たる影響を与えていない、という新たな知見を得ることもできた。

第 4 章では、一定の高軸力を受け続ける RC 構造の非線形クリープ座屈現象を用いて、提案モデルの検証を部材レベルで行ったものである。構造解析手法としては、1 次元応力場を

前提とするファイバーモデルを採用している。偏心軸圧縮を受ける RC 柱の遅れ破壊に至る時間ねならびに終局変位を正確に数値解析できることが示されている。

第 5 章では、変位を制御した RC 梁の終局以後の軟化挙動から、提案モデルの検証を行っている。変位速度を変え、さらに帯鉄筋量で横拘束効果を変えた実験を実施し、曲げ圧縮ひずみの分布と荷重変位関係を、耐力以後の軟化領域で計測することに成功した。横拘束の無い RC 構造では、変位速度を大きく変えても荷重変位関係には大きな差は見られず、数値解析でも同様の結果となった。耐力を越えて軟化領域に至ると、変位速度がたとえ遅くとも、変形の局所化が曲げ圧縮領域に展開し、局部的に大きなひずみ速度が展開されるため、終局に至るまでのひずみ速度の大小の影響が払拭されてしまうことが明らかとなった。換言すれば、構造変位速度の如何にかかわらず、大ひずみ速度(100-1000  $\mu$ /sec)の材料実験から得られた応力ひずみ関係を数値構造解析に適用しても、問題無いことが分かった。一方、横拘束を有する RC 構造の軟化解析では、ひずみ速度の影響は、実験・解析ともに最大耐力以後の挙動に有為な差となって現れることが明らかとなった。すなわち、時間効果は横拘束を受ける、より靱性の高い RC 構造の解析にこそ、必要とされるものであることが判明した。

第 6 章では、低サイクル繰り返しを受ける RC 耐震壁と RC 橋脚部材の解析に、本研究の成果を適用したものである。高応力下での低サイクル繰り返し履歴で変形が加速的に進展することは、現象的に知られた事実であるが、常に時間効果が含まれたものである。本研究で定式化された時間依存構成則を用いることで、純然たる時間依存性を評価することが可能となり、応力の繰り返しによって付加される損傷を逆に抽出することが可能となった。これを損傷の付加進展としてモデル化して構造解析システムに組み入れ、低サイクル劣化を呈する高速および低速載荷実験のシミュレーションを実施し、良好な解析精度を得ることができた。

第 7 章は結論であって、本研究の総括と今後の研究課題の整理を行っている。

本研究は、コンクリートの応力ひずみ関係に現れる時間依存性のうち、微細ひび割れの進展や局所座屈等に起因する圧縮遅れ塑性と遅れ破壊の定量的評価を可能とした。この知見は、耐震性の高い、横拘束を受ける RC 構造の破壊解析と残存性能照査の精度向上に大きく貢献するものである。また、CSH ゲルの微小変形に基づくコンクリート複合体の変形を、実験を通じて抽出することが可能となることは、今後の研究をより発展させる基盤となることが期待される。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。