

論文の内容の要旨

氏名：堀 川 真 之

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：時間依存性を考慮した高強度鉄筋コンクリート柱の弾塑性挙動に関する解析的研究

我が国では、高層の鉄筋コンクリート（以下、RC造）建物の建設と普及を目的として、1988年度から1993年度にわたり建設省総合技術開発プロジェクト「略称：New RC」が発足し、高強度材料の開発から、設計・施工法の確立にわたる広範な技術開発が官学民協同により体系的に実施された。その後、タワーマンションを代表とする高層のRC造建物が建設され始め、現在までに約20年が経過している状況である。一方、最近の研究では、高層RC造建物の下層階に位置するRC造柱には高軸力が持続的に作用するため、過大なクリープ変形が生じる可能性が指摘されている。この指摘を実証するため、実建物における下層階柱のクリープ変形を実測した事例、及びクリープ変形を進行させた縮小RC造柱試験体の繰返し載荷実験が報告されている。その結果、クリープ変形により主筋に累積される応力が長期許容応力度を超えること、及び短期性能としての軸力保持限界が低下することなどが明らかとなっている。今後、このような時間に依存する長期性状と瞬時荷重に対する短期性状の定量的な把握が、緊急の課題であることは明らかである。さらに、高強度コンクリートの若材齢時に生じやすい自己収縮ひずみに起因する初期応力が、柱の曲げ及びせん断耐力に及ぼす影響を解明することも重要な課題として指摘されている。しかし、実験コストや期間による制約から、収縮・クリープを考慮した各種挙動については十分な検証が実施されていない現状がある。

以上のような背景から、本論文では、高層RC造建物の下層階柱に生じる時間依存挙動が弾塑性挙動に及ぼす影響を解明することを目的として、有限要素法（以下、FEM）を用いた数値シミュレーション手法を提案する。特徴は、材料分野並びに構造分野において、個別に蓄積されてきた多くの知見を抽出・選択・統合し、数値解析の精度と容易さを両立させ、コンクリートの時間依存挙動を時間の関数として数値解析に考慮したことである。本論文は、全5章により構成されており、主な検討項目は、①若材齢コンクリートの時間依存挙動の評価（第3章）、②硬化コンクリートの時間依存挙動の評価（第3章）、③コンクリートと鉄筋間の応力伝達の評価（第3章、第4章）、④初期応力を考慮した短期の地震力に対する性能評価（第4章）である。以下に順を追って目的と成果について概説する。

第1章は「序論」である。高強度コンクリート柱を対象とする既往の実験的研究をレビューし、高層RC造建物の下層階RC造柱の耐震性能に及ぼす影響因子を確認した。得られた知見に基づき、本研究の位置づけ・対象および適用範囲を明確に示した。また、本論文の目標を述べるとともに構成を示した。

第2章は「コンクリートの時間依存挙動を考慮した数値解析手法に関する既往の研究」である。本章の目的は、①コンクリートの時間依存挙動のモデル化手法、②時間依存挙動解析と短期耐震性能解析の統合手法、③短期耐震性能評価に採用する数値解析手法の3点に着目し、既往の手法の有効性と問題点の整理を通じて、本研究への適用に適した数値解析手法について検討することである。検討の結果、いずれの研究とも、時間依存挙動の影響により、RC造部材・構造物の短期性能が低下する結論を導いており、時間依存挙動に関する研究の重要性を示した。また、若材齢時のコンクリートの時間依存挙動から長期的な時間依存挙動まで考慮して、連続的に短期性能評価を試みる事例が少ないことが明らかとなり、本研究の独自性を明確にした。さらに、FEMをベースとした解析モデルを構築する必要性を述べた。若材齢・長期・短期挙動などの各種挙動の統合手法については、応力情報を引き渡すことで連続性を確保する既往の手法及びその有効性を紹介し、本研究でも同様な手法を採用することを述べた。

第3章は「時間依存解析モデルの定式化と検証」である。本章は、高強度RC造柱に生じる時間依存挙動のモデル化とその妥当性の検証を目的としている。本論文では、時間依存挙動を若材齢挙動と長期挙動に大別し、若材齢挙動を対象とした応力・クリープ解析モデルと長期挙動を対象とした長期クリープ解析モ

デルの構築を行った。そして、応力を介して若材齢挙動と長期挙動を統合する手法の構築を行った。若材齢時の応力・クリープ解析では、熱伝導解析を併用して、温度依存性のある自己収縮ひずみ並びに線膨張係数及びヤング係数の経時変化を考慮している点が特徴である。加えて、本解析では、計算精度とコストの節減を図るため、二重べき乗則によりクリープひずみをモデル化している。一方、長期クリープ解析では、コンクリートを粘弾性体と仮定し、Kelvin Chain Model を用いてモデル化を試みた。なお、本モデルを構成するバネとダッシュポットの材料定数は、CEB Model Code 1990 から求めたクリープ関数に適合するよう決定している。以上、提案した手法を既往の実験的研究に適用・検証した結果、解析モデルは、若材齢期に生じる応力及びひずみ状態を適切に再現でき、また長期に生じるクリープひずみを精度良く追従できることを示した。解析結果の考察より、材齢 30 日目には鉄筋周囲に引張応力が集中していることが明らかとなった。引張応力の集中は、コンクリートのひび割れ発生、鉄筋とコンクリート間の付着劣化、コアコンクリートの拘束効果の低下及びせん断ひび割れ発生強度の低下を誘発するものと考えられ、建物の損傷過程に影響を及ぼす可能性を示している。さらに、若材齢期の応力進展を分析した結果、温度応力による影響が支配的であり、その要因として弾性係数の経時変化の影響が大きいことを示した。今後、高強度コンクリートに対する弾性係数の発現モデルの検証を通じて、初期応力に最も敏感な体積変化を抽出し、定量化する必要性を指摘した。また、若材齢期および長期にわたり、鉄筋には圧縮応力が累積されていることを確認し、地震力に対して圧縮鉄筋が早期に降伏する可能性を示した。最後に、応力・クリープ解析の最終ステップから得られた応力を、長期クリープ解析モデルに等価節点荷重として作用させた結果、応力状態の連続性は確保されることを示し、応力を介した時間依存挙動の統合は十分満足できることを確認した。

第 4 章は「数値解析手法の検証」である。本章の目的は、第 3 章から得られた応力情報を考慮して、短期挙動の解析までを統一的にシミュレーションする手法の検証を行うことである。第 3 章で計算した初期応力が、等価節点荷重として短期挙動用の解析モデルに作用される。短期解析では、コンクリートのひび割れや鉄筋の降伏を考慮した、弾塑性材料構成則により定式化を行っている。したがって、引張強度を超える初期応力は、不釣合い力として扱われ、反復的に求解することにより応力-ひずみ関係の軟化域にマッピングされる。本手法では、この状態を初期状態としたプッシュオーバー解析を実施した。なお、ひび割れモデルには、等価なせん断剛性を評価できる回転ひび割れモデルを採用している。検証には、若材齢期、長期及び短期の挙動を連続的に実測した既往の実験を選定した。解析結果から、初期応力導入時は、ひび割れにより応力の再分配が行われ、柱全体にわたり引張応力が一様に分布することを確認した。これにより、主筋に作用する圧縮応力も減少することが確認された。しかし、降伏強度の 1/3.5 に相当する圧縮応力が累積していることが明らかとなった。次に、最大耐力、主筋の圧縮降伏時の水平力と対応する部材角および全体変形について実験値と比較した結果、良い対応を示し、本手法の妥当性を確認している。続いて、初期応力を無視した解析ケースとの比較を行った。その結果、若材齢挙動及び長期クリープ挙動を考慮すると、①主筋の早期圧縮降伏が生じること、②最大耐力がやや低下すること、③若材齢期に帯筋に累積した圧縮応力の存在により、帯筋の引張降伏が遅れ、柱の変形性能が幾分向上することが明らかとなった。一方、若材齢挙動のみしか考慮しないと、最大耐力の低下は殆ど見られず、若材齢挙動が RC 造柱の耐震性能に及ぼす影響は小さいことが明らかとなった。以上のことから、柱の耐震性能に及ぼす時間依存挙動は、長期クリープ挙動による影響が大きいことが示された。そこで、長期解析における軸力比を変動因子としたパラメータ解析を実施し、クリープ量の違いが柱の短期挙動に及ぼす影響を考察した。なお、軸力比は、0.1、0.2 及び 0.3 と変化させた。その結果、軸力比が大きいと耐力低下も大きいことを明らかにした。また、軸力比 0.1 としたケースでは、①初期剛性の低下が著しく、引張主筋の降伏が先行すること、②最大耐力に及ぼす影響が小さいことを示した。最後に、長期軸力の大きさが異なる、低層部と高層部からなる、セットバック建物を想定して仮想骨組を作成し、長期クリープ解析を実施した。隣接する柱間の軸伸縮量の差が構造物の短期性能に及ぼす影響は、非常に小さいことを確認した。

最後に、第 5 章は「結論と今後の課題」であり、本研究で得られた成果を要約し、今後の課題を整理した。課題としては、①提案手法の高精度化、②提案手法を利用した建物全体の耐震性能評価への展開が考えられる。前者を達成するためには、長期クリープ挙動に伴う付着-すべり挙動を実験的に把握するとともに、適切なモデル化が不可欠である。さらに、繰返載荷による耐力劣化を考慮したモデル化も課題として残した。今後、材料分野と構造分野のさらなる連携が必要不可欠であると考えている。