

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 白 井 伸 明

（副査） 教授 中 田 善 久 教授 長 沼 一 洋

 特任教授 梶 田 吉 弘

我が国では、1974年、地上18階建の高層鉄筋コンクリート（以下、RC造）の都市型集合住宅「椎名町アパート」が初めて竣工した。その後は1980年代後半まで、民間機関による都市型高層RC造建物の技術開発が勢力的に進められてきた。こうした背景の下、高層RC造建物の建設と普及を目的として、1988年度から1993年度の5ヵ年にわたる、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・施工法の確立まで広範な基礎技術が官学民協同により開発された。その後、集合住宅を代表とする高層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。

申請者は高強度のコンクリート及び鉄筋を用いた、RC造部材や構造物に関する最近の実験的及び解析的研究事例のレビューを通じて、既往の研究による成果及び残された課題を整理している。第1に、打設後の硬化過程に相当する若材齢期（申請者は打設後の約28日までの期間と定義）には、高強度コンクリートは水和反応により、普通強度に比べ高温の発熱があり、体積変化を伴う温度・乾燥収縮および自己収縮などの自由ひずみのうち、自己収縮ひずみが非常に大きい。また、若材齢期には、鉄筋等の拘束によるクリープひずみ及び応力が生じる。しかし、これら若材齢期の挙動がその後の長期及び短期の挙動に及ぼす影響については明確になっていないことを確認している。なお、長期挙動とは、建物の供用期間にわたり作用する固定荷重と積載荷重を組合せた常時荷重に対する挙動のことで、本論文ではクリープ挙動に焦点を当てている。また、短期挙動としては、長期荷重と短時間に作用する地震荷重（水平力）を加えた荷重に対する弾塑性挙動に注目している。第2に、地上42階建の高層RC造建物の地下1階と2階の柱主筋ひずみが、約728日間にわたり実測されている。実測の圧縮ひずみは非常に大きく、長期の高軸力下でのコンクリートのクリープ挙動によるものと考え、この挙動を解析的に検証する必要があると指摘している。なお、本論文では、若材齢期の挙動と長期のクリープ挙動を総称して時間依存挙動と呼んでいる。第3に、時間に依存する若材齢期の挙動及び長期のクリープ挙動を短期挙動の予測にどのように反映させるかは大きな課題である。また、このことを達成するためには、各種の挙動を高精度で予測できるモデルの開発及び解析手法に関する枠組みを確立することが不可欠であるとしている。しかし、若材齢期から短期までの挙動を統一的に扱った研究はほとんど見られず、大きな挑戦として評価できる。

以上の考察結果を踏まえ、本研究では、高層RC造建物の下層階柱に生じる時間依存挙動が、当該柱の地震力に対するコンクリートのひび割れ、非線形応力-ひずみ関係及び鉄筋の降伏を考慮した弾塑性挙動に基づいて評価される、耐震性能に及ぼす影響を解明することを目的としている。また、各種の挙動を検証し、その影響を把握することを目標としており、解析手法としては、高精度で詳細な情報が得られる3次元の有限要素法（以下、3D-FEM）を採用している。本研究の最大の特徴は、まだ基礎的段階であるが、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、以下に順を追って目的と成果について述べる。

第1章「序論」では、高強度の鉄筋とコンクリートを構成材料とした、RC造柱を対象とする若材齢期又は長期の挙動が、特に下層階RC造柱の破壊の進展過程や短期耐震性能に及ぼす影響の解明に取り組んだ、既報の実験的研究をレビューしている。抽出した既往の成果に基づいて、本研究の位置づけ・対象及び適用範囲を明確にし、本論文の目標及び構成を示している。

第2章「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」では、時間依存挙

動のモデル化や数値解析手法に関する以下に示す3つの手法に着目し、既往の各種挙動に対するモデル化や解析手法の有効性及び問題点について整理している：

- (1) 高強度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挙動解析の統合手法
- (3) 短期耐震性能評価に適した高精度の数値解析手法

考察したすべての研究が、時間依存挙動の影響により RC 造部材や構造物の短期耐震性能が低下するとした結論を導いている。申請者は、これらの結論を根拠として、時間依存挙動の重要性を主張している。また、若材齢期から長期にわたる時間依存挙動を考慮し、かつ短期性能を連続的に評価する研究事例が非常に少ないことを指摘し、応力情報に基づいた統合化手法の確立に取り組んだことが、本研究の独自性であると述べている。さらに、基本的な現象を詳細に検証するため、高精度の FEM を基礎とした解析モデルの構築に取り組んでおり、この選択は適切であると評価できる。

第3章「時間依存解析モデルの定式化と検証」は、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と検証を行っている。若材齢挙動と長期挙動の数値解析は独立に行われるが、両挙動を連成する統合手法として、若材齢挙動解析終了時の応力情報を長期挙動解析モデルに初期応力として受け渡す方法が採用された。なお、その妥当性は検証されている。若材齢期の応力・クリープ解析の特徴は、熱伝導解析を併用して、温度依存性を有する自己収縮ひずみ並びに時間依存性のある線膨張係数とヤング係数の経時変化を考慮している点である。なお、若材齢期における鉄筋等の拘束によるクリープひずみ及び応力は、計算効率の優れた二重べき乗則を適用して求めている。一方、長期のクリープ解析では、コンクリートを粘弾性体と仮定し、Kelvin チェーンモデルを適用してクリープひずみ及び応力を求めている。

提案手法を既往の実験的研究に適用して検証した結果、次のことが明らかとなった：

- (1) 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る。また、長期に生じるクリープひずみ及び応力も精度良く追跡できる。
- (2) 応力・クリープ解析の終了時に得られた応力情報を、等価節点荷重として長期クリープ解析モデルに作用させた結果、応力状態の連続性は確保されており、初期応力を介した時間依存挙動の統合は達成されることを確認している。
- (3) 材齢30日目には、鉄筋周囲に引張応力が集中している。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し、建物の損傷過程に影響を及ぼす可能性がある。
- (4) 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る。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指摘している。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ている。
- (5) 若材齢期及び長期にわたり、鉄筋には圧縮応力が累積されていることを確認し、短期水平力に対して圧縮鉄筋が早期に降伏する可能性を示している。

第3章は本研究の中で最も評価できる部分である。しかし、若材齢期及び長期にはひび割れは発生せず、また鉄筋とコンクリート間の付着は全過程を通じて完全であると仮定している点は今後の課題となろう。

第4章「数値解析手法の検証」では、第3章から得られた応力情報；つまり、初期応力を考慮して、高強度 RC 造柱の短期弾塑性挙動までを統一的に評価する数値解析手法の検証を行っている。短期挙動に対しては、鉄筋及びコンクリートの弾塑性材料構成則に基づいて、ひび割れを回転モデルにより定式化した、直交異方性非線形弾性モデルを採用している。検証には、若材齢期、長期および短期の挙動を連続的に計測した既往の高強度 RC 造柱に関する実験的研究を選定した。解析は実験に倣って、初期応力の導入、軸力の載荷、そして破壊に至るまでの水平荷重の漸増荷重の順に行われた。初期応力導入時は、ひび割れ発生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ている。この応力再分配により、主筋に作用していた圧縮応力がやや緩和されることを確認している。また、ひび割れ発生時、圧縮側主筋の圧縮降伏時、最大耐力時の水平力と部材角及び全体変形について実験値と比較し、良好な対応が得られており、提案手法は概ね妥当であることを確認している。

次に、初期応力が短期挙動に及ぼす影響に関する検討を行い、次の結果を導いている。若材齢期と長期クリープの両挙動を考慮すると、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、柱の変形性能が向上することを示している。一方、若材齢期の挙動が高強度 RC 造柱の耐震性能に及ぼす影響は小さく、高強度 RC 造柱の耐震性能に及ぼす時間依存挙動は、長期クリープによる影響が支配的であることを示している。第 4 章の検証例及び検討解析例はごく限られた範囲であり、より信頼性のある結論を導くために、今後広範な応用解析が実施されることが期待される。

最後に、第 5 章「結論と今後の課題」は、本研究で得られた成果を要約し、今後の課題を整理している。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる

以上

平成 28 年 2 月 18 日