研究成果報告書 科学研究費助成事業

今和 元年



6 月 1 9 日現在 機関番号: 32665 研究種目: 若手研究(B) 研究期間: 2017~2018 課題番号: 17K14763 研究課題名(和文)時間依存特性を考慮した高層鉄筋コンクリート造建物の構造性能評価 研究課題名(英文)Evaluation on Structural Performance of Tall Reinforced Concrete Buildings Including Time Dependent Behaviors 研究代表者 堀川 真之(HORIKAWA, Masayuki) 日本大学・工学部・助教 研究者番号:50794525 交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文):時間依存特性を考慮した高層RC造建物の構造性能評価を目的として, 60階建て骨組 の長期にわたる時間依存挙動評価, 20階建て骨組の時間依存特性を考慮した耐震性能評価という2つの課題に 取り組んだ。その結果,両課題において,概ね研究目的を達成した。特に重要な知見として,課題 では,上記 の挙動に起因する初期応力により新たに生じる塑性ヒンジと骨組全体の挙動との関係を考察し,下・中層階に 発生するヒンジが各種限界状態に影響を及ぼすことを明らかにした。これは,現行の設計では無視されている高 層RC造建物の時間依存特性を考慮することが,耐震設計上,極めて重要であることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義 国土交通省建築研究所主導によるNew RCプロジェクトから30年が経過し,次第に高強度コンクリートの時間依存 特性が明らかになるにつれ,近年,それらが柱の耐震性能に影響を及ぼすことが実験的研究により実証された。 本研究の特徴は,部材レベルにおけるそれら既往の研究成果を踏まえ,数値解析をベースに建物全体の耐震性能 評価へスケールアップした点である。実務への展開も見据え,なるべく汎用解析コードを使用し,初期応力をマ クロに導入する手法を提案・検討した点は,新築設計のみならず既存の高層に造建物を対象とした性能照査を簡 易的に実施できる点において、社会へ果たす役割は非常に大きいものと考えられる。

研究成果の概要(英文):The present study aims at evaluating the structural performance of high-rise reinforced concrete (RC) framed structures under seismic actions including the time dependent behaviors. For this purpose, two tasks were raised ; one is the evaluation of long term behaviors of framed RC structures with 60 stories and other is pushover analysis of full-scale RC framed building with 20 stories considering the initial stresses arose from the time dependent behaviors. Consequently, the research goal was almost accomplished for both the tasks. Particularly, the latter task indicated that the newly formed plastic hinges due to the initial stresses at the lower and middle floors affect the different limit states. Thus, the effect of time dependent characteristics of high-rise RC buildings, which may not be included in the current design, may be highly important in the seismic design.

研究分野:鉄筋コンクリート工学

└高層鉄筋コンクリート造建物 高強度コンクリート 若材齢挙動 クリープ 耐震性能評価 相似 三次元有限要素解析 ファイバー解析 キーワード:実大高層鉄筋コンクリート造建物 則 三次元有限要素解析 ファイノ

様 式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)1.研究開始当初の背景

昭和63年から平成4年にわたり実施された国土交通省建築研究所主導の「鉄筋コンクリート 造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」により、我が国では、高層の鉄筋コンクリート(以下、 RC)造建物の建設が一斉に普及した。本プロジェクトの特徴は、高層化と平面計画の自由度を 高めるため、高強度材料の開発に重点が置かれた点である。しかし、その後の当該分野における 研究の目覚ましい進展により、高層化するにつれ高軸力が作用する柱ではクリープ挙動が問題 視され、また、材料の高強度化は若材齢期に初期欠陥の発生を誘発することが次第に明らかにさ れ始めた。このような時間依存特性は、プロジェクト終了後に新たに浮上した課題であり、当時 の設計ガイドラインでは考慮されておらず、設計時に把握すべき耐震性能の評価に関する議論 は必ずしも十分ではなかった可能性が高い。

部材レベルにおける既往の実験的研究によれば,前述の時間依存特性により,柱の剛性,耐力 および靱性に影響を及ぼすことが明らかとなっている。したがって,梁破壊型全体崩壊形を仮定 する現行の耐震設計では,ヒンジを許容する柱について拘束効果を適切に考慮して靱性を確保 するものの,先の理由により種々の設計クライテリアを満足しないことが予想される。

また、筆者は、これまでに若材齢期および長期にわたるクリープが進行した高強度 RC 柱部材 を対象に有限要素法を用いてその損傷過程を検討してきた。その成果として、①RC 柱中の初期 欠陥の発生メカニズム、②柱内部のひび割れ発生状況を明かにし、検討解析を通じて、③長期ク リープ挙動が柱のせん断耐力に大きく影響を及ぼす可能性を示唆した。この分野では、これら部 材における構造性能が建物全体系へ及ぼす影響の把握が可及的速やかに解決すべき重要な課題 として残されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高強度 RC 部材に生じる種々の時間依存特性が、高層 RC 造建物の地震時挙動に及ぼす影響を明らかにすることである。とりわけ、骨組レベルでの実験的検討は極めて困難であることから、これまで構築してきた数値解析をベースとして、時間依存特性により生じる初期応力を考慮した新たな耐震性能評価手法の開発に取り組むとともに、新築のみならず既存のRC 造建物の性能照査を可能にし、今後、老朽化が進む高経年化した高層 RC 造建物における診断技術の発展に貢献したいと考えている。このような目的を達成するために、本研究では主に以下の3つの研究目標を設定した。

(1) 目標1:コンクリートの若材齢挙動ならびに長期挙動が高層 RC 造骨組へ及ぼす影響の把握

(2) 目標 2:実大高層 RC 造建物の地震応答評価

(3) 目標3:初期応力が高層RC造建物の地震時挙動に及ぼす影響の把握

3. 研究の方法

本研究では、2章に示した目標1~目標3を解決するために、以下に示す研究課題を設定し、 研究計画を立案した。

(1) 課題1: 有限要素解析による線材要素に置換した時間依存挙動のモデル化

- (2) 課題 2: 高層 RC 造建物の縮小震動台実験に基づく地震応答解析モデルの構築
- (3) 課題3:相似則に基づく実大高層RC造建物の作成と地震応答評価
- (4) 課題4:ファイバー解析による初期応力導入手法の開発

(5) 課題 5:初期応力を考慮した実大高層 RC 造建物の地震時挙動のシミュレーション

課題1は、目標1に対するものであり、骨組レベルでの検討を行うため、筆者が検証してきた有限要素解析による予測システムを発展させ、柱および梁について梁要素によるモデル化を試みる。部材レベルによる検証を経て、60層の仮想骨組に対する挙動について検討を行う。課題2および課題3は、目標2と対応する。信頼のある検討を行うために、E-ディフェンスにて実施された縮小実験を対象に検証を重ね地震応答解析モデルを構築し、相似則に基づき原型へ拡張することで実大高層RC造建物の作成に着手する。課題4は、目標1と目標2を統合する手続きを指しており、実務への展開を見据えてファイバー法を選択する点が特徴である。課題4が達成されれば、目標3に対応する課題5に着手可能となる。課題5は、本研究の核心であり、課題1〜課題4の集大成として位置づけられる。

4. 研究成果

ここでは、3章に示した研究課題に対して、本研究期間に得られた成果のうち、特に顕著な成 果を抜粋して以下に示すこととする。

- (1) 課題1に対する研究成果
- ・
 ・
 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

モデルの特徴は、乾燥収縮と持続荷重によるクリープを重ね合わせ、コンクリートのひび割れ を再現できる点である。現状では、収縮とクリープのモデル化はモデルコードに依存している。 モデルコードは、国内外で様々提案されており、各種予測式の特徴を整理しながら精度について も検討を行った。引張側構成則は、モードⅠ破壊エネルギーを考慮しモデル化した。

図-1に解析モデルの概要および検証結果の一部を示す。骨組への展開を考えているため梁要素によりコンクリートをモデル化し、鉄筋は完全付着を仮定した埋め込み鉄筋要素を選択した。 実験値は、載荷点下のたわみが計測されており、実験値と解析値の比較から、良好な一致を確認 できる。本研究の検討範囲内においては、ACIモデルコードと大岡らの破壊エネルギー式の組み 合わせが最も良い精度であることも確認した。



② 高層 RC 造建物の長期クリープ挙動の予測

1章にて紹介した「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」では、仮想の 60階建 RC 造建物について試設計が行われている。そこで、その建物を対象に、①にて構築した 解析モデルを骨組へ応用し、長期間にわたるクリープ挙動の予測を試みた。今後の課題ではある が、ここでは、若材齢挙動や脱型後の乾燥に伴う体積変化は考慮していない。

図-2に解析モデルの概要および検討結果の一部を示す。骨組は柱と梁により構成され、コンクリート強度の違いに応じて3層に分かれており、材料特性が異なる。接合部は、剛域とした。 解析は、弾性解析(予測①)とクリープを加えた解析(予測②)の2種類である。図より、クリ ープを加えることにより、最下層階柱の軸圧縮ひずみが最大で1.4倍程度増大することを確認し た。そこから応力を算出したところ、長期許容応力度の0.74倍相当に達することも確認できた。 スラブのモデル化やその他の時間存特性の反映により、長期許容応力度を超える可能性も考え られ、今後さらなる追加検討が必要であると考えている。



(2) 課題2に対する研究成果

なるべく簡易的な性能照査手法の構築を目指す点も本研究の重要な視点であることから、短期性能評価の観点からはファイバー解析による評価に切り替えた。モデル化には、既往の研究から選定し、長周期地震動が入力された縮小 20 層 RC 造建物の震動台実験を採用した。本模型は、現行の耐震設計に基づいて設計されているため、梁破壊型全体崩壊形が形成される。しかし、本研究の主目的は、柱に生じる初期応力と建物全体の性能を関連付けて考察することであることから、ファイバーモデルの構築では、柱のモデル化が特に重要となる。

図-3 に柱の離散化図を示す。ここでは、ファイバー法の中でもより実務に近い Li らによる マルチースプリングモデルを採用した。コンクリートの骨格曲線は、Park らおよび Mander の手 法を採用し、履歴は Li に従う。鉄筋は、トリーリニアモデルとした。一方、梁は Takeda らによ る復元力に基づき評価する。柱梁接合部は、課題1と同様の方法により剛域を仮定している。ま た、P- Δ 効果による付加応力を考慮するとともに、減衰は瞬間剛性比例型を仮定し、減衰定数 を5%とした。なお、入力した主要な地震波は、東日本大震災時に東京にて観測された観測波お よび南海トラフ地震を想定した模擬波であり、いずれも長周期成分を含んでいる。 図-4 に応答解析から得られた(a)層せん断力分布および(b)層間変位分布を示す。応答解析で は、設計ガイドラインが制限する層間変形角 1/100 程度までは実験値を良好に模擬できており、 概ね解析モデルの妥当性を確認した。しかしながら、それを超える応答について、実験値を過小 に評価している点は、梁主筋の付着挙動のモデル化に改善が必要であることを別途確認してお り、今後の課題であると認識している。

図-5にプッシュオーバー(以下,静的)解析より得られた1階層せん断力-項部水平変位を 示す。図より,解析は実験の応答点を概ね包絡しており,提案モデルは,静的解析においても実 験を再現可能であることを確認した。



(3) 課題3に対する研究成果

若材齢挙動においては、寸法依存性が指摘されている。したがって、若材齢期の初期応力を考 慮した耐震性能評価を行う場合、実大寸法での検討が不可欠である。本研究では、この点に関し て、研究の信頼性も両立させることを検討し、課題2の模型実験を有効活用する計画とした。す なわち、課題3の目的は、相似則に基づき、模型実験を原型へスケールアップすることである。 **表-1**に仮定した相似則により作成した原型の部材諸元を示す。本研究では、①破壊状況が「模 型=原型」となるように応力度と加速度の縮尺が「模型 = 原型」の関係を保つこと、②材料密 度が模型と同程度となること、という2つの条件を仮定した。さらに、仮定した相似則の妥当性 を確認するため、いくつかの検証を行った。ここでは、その一部について抜粋して紹介する。 図-6に模型と原型の比較結果を示す。加速度応答スペクトルについて、原型は、観測波にお

階	柱 900×900(mm)				RHL	梁 600×800(mm)	
	C22	C12	C11	C21	旧	GX	GY
20~17	8-D38 囲-D13@90, pt =0.42, pw =0.63				R, 20	3/3-D38 2-D13@100 $p_t = 0.82, p_w = 0.42$	3/3-D38 2-D13@100 $p_t = 0.90, p_w$ =0.42
17~13	囲-D13	12-D38	19, 18	3+1/3-D38 2-D13@100 $p_t = 0.82, p_w$ =0.42	3+1/3-D38 2-D13@100 $p_t = 0.90, p_w$ =0.42		
13~8	8-D38	12-D38	8+1-D51	12-D38	17, 16	3+1/3-D38 2-D13@85 $p_t = 0.82, p_w$ =0.50	3+2/3+1-D38 2-D13@85 $p_t = 1.27, p_w$ =0.50
8~2	12-D38 \boxplus -D13@90 $p_t = 0.56, p_w$ = 0.63	12-D51 囲-D13@90 $p_t = 1.00, p_w$ =0.63	$ \begin{array}{l} 12+2-D51 \\ \boxplus-D13@90 \\ p_t = 1.00, p_w \\ = 0.63 \end{array} $	12-D51 $ ext{III}$ -D13@90 $p_t = 1.00, p_w$ = 0.63	15~13	3+2/3+1-D38 2-D13@85 $p_t = 1.16, p_w$ =0.50	3+2/3+2-D38 2-D13@85 $p_t = 1.65, p_w$ =0.50
					12~9	3+2/3+1-D38 2-D13@60 $p_t = 1.16, p_w$ =0.70	3+2/3+2-D38 2-D13@60 $p_t = 1.65, p_w$ =0.70
1	12-D38	12-D51 $ $	12+2-D51	12-D51 $ $	8~2	3+3/3+2-D38 2-D13@60 $p_t = 1.50, p_w$ =0.70	3+3/3+3-D38 2-D13@60 $p_t = 2.03, p_w$ =0.70

表-1 相似則に基づき作成した原型建物の部材諸元



いて 1.0 秒を超える長周期成分が卓越していることが読み取れる。続いて,層せん断カー層間関係,層間変形角ー層間関係に着目する。ここでの模型の値は,課題 2 にて構築した解析モデルより出力した応答値を表-1 にならいスケールアップしている。図より,若干の差異は認められるものの全体の傾向は概ね模型と一致している。以上のことから判断して,仮定した相似則は概ね妥当であることを確認した。

(4) 課題4に対する研究成果

初期応力導入手法の開発については,柱単体に焦点を当て検討に着手した。図-7(a)に提案手 法のフローを示す。ひずみの適合条件および力の釣合条件を利用して,鉄筋とコンクリート各々 の負担軸力を算出した後,計算により得られた初期応力を弾塑性構成則に反映させるべく,圧縮 側主筋の初期剛性を修正する(図-7b)。

図-8に提案手法の検討結果を示す。ここでは、小室らの手法との比較を通じて、その妥当性 を確認した。対象とした柱は、実大 RC 柱であり高強度材料が使用されている。解析では、長期 軸力が材齢 28 日から 3000 日間載荷されたことを想定し、その RC 柱について短期性能を検討 した。なお、柱のモデル化は課題 2 と概ね同様である。図より、小室らの検討した結果を概ね包 絡し、主筋の降伏状況なども一致することを確認した。なお、実験値との比較による提案手法の さらなる検証は今後の課題であるため、その準備を現在進めている。

図-9に2方向繰り返し載荷の結果を示す。地震時の柱の挙動を静的に再現した2方向曲げ 性能は、初期応力の存在により、初期剛性、最大耐力および履歴面積が大きくなることが確認で き、柱の損傷が変化することを明らかにした。また、初期応力は、同一部材角での軸縮みを進行 させ、曲げ耐力の増加により曲げ降伏後にせん断破壊に至る可能性も示唆することができた。



(5) 課題5に対する研究成果

本課題の目的は,課題3にて作成した実大 RC 造建物に対して,課題4の手続きに従い初期応 力を導入し,地震時の静的挙動についてプッシュオーバー解析に基づき考察することである。 図-10に中柱主筋に生じる初期応力の推移を示す。対象期間は打設から2000日目(5.5年)

とした。図-11 に骨組の全体挙動を示す。荷重分布は Ai 分布を採用している。図より、全体の 挙動に大きな違いは見当たらなかった。続いて、部材の損傷状況に着目する。図-12 に代表ラ ーメンにおけるヒンジの形成状況を示す。初期応力を考慮することで、新たなヒンジが柱に形成 されることが確認できる。特に、下・中層階に新たなヒンジが形成されている。このヒンジは、 各種限界状態にも影響を及ぼしている。 図-13 に短辺方向の層せん断力-層間変位関係を示す。 前述のヒンジにより,20 階では初期応力により変形が約2.0 倍に達している。これは,現行の設 計が,上層階の各種限界状態を過小に評価していることを示唆している。



<引用文献(抜粋)>

- ②

 (2)

 (1)

 (2)

 (1)

 (2)

 (1)

 (2)

 (2)

 (3)

 (4)

 (4
- ③ 杉本訓祥ほか:縮小20層 RC 造建物試験体の震動実験,コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.325-330, 2013
- ④ 石丸辰治ほか:動的実験法における相似則について、日本大学理工学部学術講演会論文集, pp.77-79, 1985
- ⑤ 小室努ほか: 超高強度コンクリート柱の長期圧縮特性に関する考察, コンクリート工学年次 論文集, pp.223-228, Vol.30, No.3, 2008.7
- 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- 1. 黒田啓太, <u>堀川真之</u>, 浅里和茂, 清水健次: RC 柱に生じる初期応力を考慮した多層立体骨 組の非線形解析, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 41 (掲載決定), 2019.7
- 2. <u>堀川真之</u>,浅里和茂,漆原秀明,清水健次:高強度 RC 柱に生じる初期応力が2 方向曲げ性 能に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集,査読有, Vol. 40, No. 2, pp. 115-120, 2018.7
- 3. <u>堀川真之</u>,浅里和茂,加藤舜也,長沼一洋:3次元 FEM 解析による RC 造梁および柱部材の 長期挙動評価と高層骨組への応用,コンクリート工学年次論文集,査読有, Vol. 39, No. 2, pp. 55-60, 2017.7

〔学会発表〕(計8件)

- 清水健次,荒井就英,黒田啓太,<u>堀川真之</u>,浅里和茂,瀬下守,成瀬啓一:長周期地震動を 受ける実大 RC 造多層立体骨組の短期性能評価(その1~3),日本建築学会大会学術講演会 (北陸),金沢工業大学(石川県野々市市),2019.9.5
- 黒田啓太、<u>堀川真之</u>,浅里和茂,清水健次:相似則に基づく長周期地震動を受ける実大高層 鉄筋コンクリート造建物の応答予測,第82回日本建築学会東北支部研究報告会,アイーナ (岩手県盛岡市),2019.6.29
- 3. 清水健次,荒井就英,黒田啓太,<u>堀川真之</u>,浅里和茂,瀬下守,成瀬啓一:ファイバーモデ ルによる初期応力を考慮した高強度鉄筋コンクリート柱の曲げ性能評価(その1~3),日本 建築学会大会学術講演会(東北),東北大学(宮城県仙台市),2018.9.5
- 漆原秀明,<u>堀川真之</u>,浅里和茂,清水健次:初期応力を変動因子とした高強度 RC 柱の水平
 2 方向荷重解析,第 81 回日本建築学会東北支部研究報告会,アスパム(青森県青森市), 2018.6.16
- 6. 研究組織 研究分担者なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等に ついては、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。