

論文審査の結果の要旨

氏名：古 谷 章

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：多数回繰り返し载荷を受ける超高層 RC 造建築物における最下層柱の構造性能に関する研究

審査委員：（主査） 教授 中西 三 和
（副査） 教授 白井 伸 明 名誉教授 安達 洋
准教授 北嶋 圭 二

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9.0という、わが国における観測史上最大の地震を記録し、東北地方から関東地方の広い地域に甚大な災害をもたらした。震源から比較的離れた首都圏においても長周期成分の卓越した継続時間の長い大きな揺れにより天井や配管設備、間仕切り壁等の2次部材に被害が生じた。このような長周期地震動を想定した建築構造物の安全性に対して対策が取られていなかった訳ではなく、国土交通省では2010年12月に「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」意見募集を行っていた矢先の大地震であったといえる。

申請者は、社会人大学院生として海洋建築工学専攻に所属するが、本務である民間の確認検査機関では高層建築物の構造安全性を評価する部署に所属している。実務の仕事を通して長周期地震動が高層建築物の挙動に及ぼす影響、特に固有周期の長い超高層鉄筋コンクリート（以下、RC）造建築物で、地震動の長周期成分による共振現象と地震継続時間の長さがもたらす多数回繰り返しの揺れが部材挙動に及ぼす影響について着目するに至った。

本研究では、まず過去に評定を受けた超高層 RC 造建築物 245 棟を対象に建物形状や使用材料などを分析するとともに、30 階建ての標準的な超高層 RC 造建築物（以降、プロトタイプ）を試設計している。設計では、現行の設計用地震動の他、長周期地震動を想定した模擬地震波による時刻歴応答解析を行い、長周期地震動を受けた超高層建築物の応答性状を把握している。その上で、柱の軸力保持能力の喪失は建物全体の倒壊の危険性につながることから、大きな軸力を支持する最下層柱を対象に多数回繰り返しの静的、動的载荷を一对とした二つのシリーズの実験を計画している。実験を行う上で実際の構造物の挙動を反映した周到な配慮がなされていることは評価される。

また、実験結果に対しては、静的载荷と動的载荷実験の比較からひずみ速度が部材挙動に及ぼす影響を、鉄筋とコンクリートの材料強度の上昇という観点から検討し、動的载荷実験における耐力の上昇を説明している。さらに、申請者がもっとも力点をおいた柱の軸力保持能力に関する検討においては、軸力保持能力喪失時に柱頭柱脚の危険断面におけるかぶりコンクリートの剥落と主筋の座屈現象が確認されたことを受け、軸力保持喪失時の水平耐力の低下がコンクリートの圧縮強度の低下に起因するとした仮説を設けた。この仮説に基づいて曲げモーメント（M）と軸力（N）の相関曲線として表される柱の降伏曲面の縮小という視点から軸力保持喪失時の水平耐力を、軸力保持限界強度比 γ_c を用いて導く提案を行った。最終的にこの γ_c と軸力比の関係から軸力保持能力喪失時の水平耐力が推定可能であることを示している。

本論文は全7章から構成されている。各章の内容とその評価を以下に述べる。

第1章「序論」では、研究の背景と目的、および構成について述べている。

第2章「既往の研究と本研究の位置付け」では、現行の設計基準における長周期地震動に対する考え方や、既往の長周期地震動を受ける RC 造柱部材を対象とする多数回繰り返し载荷実験に関する知見を整理するとともに、軸力保持能力を喪失するまでの多数回繰り返し载荷を行った例が無いことを示し、本研究の位置付けを明確にしている。

第3章「超高層 RC 造建築物の構造特性の分析とプロトタイプの時刻歴応答解析」では、超高層 RC 造建築物の評定建物 245 件を対象として、建物形状、使用材料および一次固有周期等の構造諸元の分析を行っている。その分析結果に基づき、軒高約 100m のプロトタイプを設定している。このプロトタイプについて現行の設計用地震動（観測波と告示波）6 波と長周期成分の卓越する模擬地震動 5 波の 11 波の地震動に対して時刻歴応答解析を行い、長周期地震動が建築物に及ぼす影響を検討している。時刻歴応答解析の結果、

長周期地震動（三の丸波）では長周期成分の波形を多く含むため、層間変形角 1/100 を超える応答は 10 回程度見られることを示している。この結果を参考に、実験における、長周期地震動を模した繰り返し回数は 10 回、また動的載荷実験の載荷速度は時刻歴応答解析結果の等価固有周期に基づいて決定している。このように実験計画にあたって、プロトタイプの設定から時刻歴応答解析、そして実験対象とする最下層柱の縮小模型試験体の製作に至る相似則の設定まで周到な検討を行っていることは高い評価に値する。

第 4 章「静的・動的載荷を一对とした多数回繰り返し載荷実験」では、多数回繰り返し載荷による軸力保持能力喪失過程を詳細に調べるために二つのシリーズの実験を行っている。シリーズ I の実験は、部材角 $R=1/10$ までの漸増増分変位制御による多数回繰り返し実験（軸力比 $\eta=0.3$ および 0.6 の静的・動的実験として試験体 4 体）、シリーズ II の実験は損傷限界レベルの部材角 $R=1/200$ と最大水平耐力近傍の部材角 $R=1/75$ を一对とした多数回繰り返し載荷実験（軸力比 $\eta=0.3$ の静的・動的実験として試験体 2 体）である。実験結果より、①静的載荷実験の耐力に比べ動的載荷実験では耐力の上昇がみられるが、破壊性状を含めその後の挙動に大きな差異がないこと、②いずれの試験体でも急激に軸方向変位が縮むと同時に軸力保持能力を喪失しているが、損傷限界レベルの部材角 $R=1/200$ と最大水平耐力近傍の部材角 $R=1/75$ を一对とした多数回繰り返し載荷を行った実験シリーズ II における軸力保持能力喪失は極めて多数回の繰り返しによって生じたもので軸力保持能力は高いこと、③最大耐力経験後の繰り返しによる耐力低下は全ての試験体において起こるが、シリーズ II の試験体（軸力比 $\eta=0.3$ の静的・動的実験）は、損傷限界レベルの部材角 $R=1/200$ での繰り返し載荷では耐力低下がほとんど見られないのに対し、最大水平耐力近傍の部材角 $R=1/75$ の繰り返しでは柱頭柱脚の危険断面において圧縮側コンクリートの剥落、主筋の座屈現象などにより徐々に耐力が低下することを確認している。これらの結果を踏まえて、第 5 章、第 6 章におけるひずみ速度の影響と軸力保持能力喪失時の水平耐力の評価に結び付けている。

第 5 章「ひずみ速度が最大水平耐力に及ぼす影響に関する検討」では、ひずみ速度の影響を受けて材料強度の上昇により最大水平耐力が大きくなるとして、実験結果より得られた鉄筋のひずみ速度と材料強度推定式にて最大水平耐力の検討を行い、動的載荷試験体に対してはひずみ速度による材料上昇を考慮した動的材料強度を用いて求めた最大水平耐力が実験値と概ね一致することを示している。

第 6 章「軸力保持能力と軸力保持能力を喪失する際の水平耐力に関する検討」では、二つのシリーズの実験結果に基づいて、軸力保持能力と軸力保持能力を喪失する際の水平耐力（軸力保持限界水平耐力）との関係について検討を行っている。まずは、軸耐力を失う際の破壊状況において圧縮側コンクリートのかぶり部分の剥落や主筋の座屈現象などによって断面が縮小し耐力が低下していく過程をコンクリートの圧縮強度の低下とする仮説に基づいて評価したところに申請者は解決の糸口を見つけている。さらに、コンクリート圧縮強度の低下と M-N 降伏曲面の縮小を関連付けて軸力-水平荷重関係を求めることで、コンクリートの損傷を表す軸力保持限界強度比と実験値の軸変位（軸縮み量）の相関性を示したうえで、軸力保持限界強度比を軸力比の関数とした推定式を提案している。これにより、柱に作用する軸力を設定することによって、最大水平耐力に対して水平耐力がどの程度低下した際に、軸力保持能力を喪失するか（軸力保持限界水平耐力）を推定することを可能とした。限られた実験結果ではあるが、これら成果は、柱部材の軸力保持能力喪失という建物の崩壊につながる挙動をより詳細に検討できる手段となることを示したものであり、有益な成果が得られている。

第 7 章「結論」では、本論文の各章で示した結果を総括し、今後の課題として、軸力保持能力に着目した超高層 RC 造柱の多数回繰り返し載荷実験の実験結果の蓄積と共に、更なる軸力保持能力と水平耐力との関係の究明が望まれることを述べている。

以上、本論文は長周期地震動を受ける継続時間の長い多数回繰り返し載荷を受ける超高層 RC 造柱の最下層柱の軸力保持能力喪失時の水平耐力をコンクリートの圧縮強度の低下に関連付けた軸力保持限界強度比から適切に把握することができることを示したものである。これらの結果は、超高層 RC 造柱部材の軸力保持能力を適切に評価可能な研究成果であると判断される。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、またはその他の高度な専門的業務に従事するために必要な能力およ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、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。

以 上

平成 27 年 2 月 19 日