

論文の内容の要旨

氏名：古谷 章

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

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

長周期地震動は、2003年（平成15年）9月に十勝沖地震の際に震央から250km離れた苫小牧市内で、石油タンクが地震動の長周期成分により、スロッシングを起こし火災が発生した原因の一つとして注目された。長周期地震動は、海溝型の巨大地震が起きた際に堆積層の厚い平野部（首都圏、名古屋圏、大阪圏）などで発生しやすいと考えられており、揺れの周期が長い（2秒～20秒）波を多く含む地震動で、ゆっくりとした揺れが非常に長く続くのが特徴である。固有周期の長い超高層建築物では、地震動の長周期成分による共振現象と地震継続時間が長いことから多数回繰り返しによる影響が危惧されている。それを実証するかのように2011年東北地方太平洋沖地震では、首都圏においても長周期成分が卓越した地震動により、超高層 RC 造建築物が継続時間の長い大きな揺れを経験し、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。

このような背景から近年、長周期地震動を受ける RC 造柱部材の多数回繰り返し載荷実験が行われるようになった。これらの実験では、載荷方法を微小変形から大変形に至るまでの各変形レベルにおいて、同一変形の多数回の繰り返し載荷を行うことで長周期地震動の影響を検討している。実験結果として、最大水平耐力に達するまでの変形レベルでは、同一変形の繰り返し回数による影響は小さく、最大水平耐力以降の変形レベルでは、同一変形の繰り返し回数により水平耐力が低下することが報告されている。しかしながら、超高層 RC 造の柱を対象とした多数回繰り返し載荷による実験例は少なく、これらの実験の載荷方法はいずれも静的載荷であり、地震動を模擬した動的載荷実験は例を見ない。また、多数回繰り返し載荷による軸力保持能力の挙動に関する研究例は殆どなく、柱の基本的な性能である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ついての検討は行われていない。

一方、軸力比 $\eta=0.30$ 程度 ($\eta=N/bDFc$) が作用した状態での曲げ破壊先行型柱の軸力保持能力は、塑性変形能力が大きいことから、最大水平耐力時の部材角を大きく上回る部材角にて、軸力保持能力が喪失することが知られている。前述の通り最大水平耐力近傍の部材角での繰り返しにより、水平耐力の低下は確認されているが、最大水平耐力近傍の部材角の繰り返しにより、軸力保持能力を喪失するまで繰り返し実験を行った例はない。

以上のことを踏まえ、本研究では繰り返しの変位載荷履歴が同じである下記の静的および動的載荷を一对とした2つのシリーズの実験を行い、載荷速度の違いが部材挙動に及ぼす影響と軸力保持能力を喪失する際の挙動について検討を行った。

シリーズ I の実験：最下層の中柱および隅柱が長周期地震動により挙動している状態を想定し、軸力保持能力を喪失する大変形レベルまで同一部材角の繰り返しを10回（10サイクル）とする漸増多数回繰り返し載荷実験である。

シリーズ II の実験：最下層の中柱（軸力比 $\eta=0.30$ ）を対象に、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（1セット、20サイクル）として、軸力保持能力を喪失するまでの多数回繰り返し載荷した実験である。

本論文は、全7章で構成されている。以下に各章の概要を記す。

第1章「序論」では、本研究の背景および目的を示した。また、本論文の構成について示した。

第2章「既往の研究と本研究の位置付け」では、既往の長周期地震動を受ける RC 柱部材の多数回繰り返し載荷実験に関する知見を整理すると共に、本研究の位置付けを明確にした。

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、軒高、階高、柱スパン、使用材料および一次固有周期等の構造諸元の分析を行い整理した。その分析結果に基づき、最も件数の多い軒高90～100mの建物に着目して、試設計建物（以下、プロトタイプと称す）を設定した。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た。時刻歴応答解析の結果、1) 現行の設計用地震波では、層間変形角 1/100 程度の応答は、1~2 回程度であったのに対して長周期地震動（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 回程度見られた。2) 時刻歴応答解析による建物の応答吸収エネルギーを内部粘性減衰によるエネルギー吸収量と架構の歪エネルギー吸収量とに分けて検討した結果、架構の歪エネルギー吸収量（損傷エネルギー吸収量）は、三の丸波では観測波と告示波と比較すると 4.5~12.7 倍である。すなわち、長周期地震動は現行の設計用地震波と比較して、架構の損傷が非常に大きくなることを意味している。なお、実験における長周期地震動の繰り返し回数は、時刻歴応答解析結果および既往の研究を参考として、現行の設計用地震波による同一変位の繰り返し回数を 1~2 回と想定し、長周期地震動の繰り返し回数は 10 回と設定した。また、動的載荷実験の載荷速度は時刻歴応答解析結果に基づき設定した。

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、シリーズ I の部材角 $R=1/10$ 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）およびシリーズ II の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）を行った。得られた主な知見として、1) 同一諸元の試験体では、静的試験体と比較して、載荷速度の影響により動的試験体の方が最大水平耐力は大きくなるが、水平耐力の低下、等価粘性減衰等の挙動に大きな差がないことを確認した。2) シリーズ II の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においても軸力保持能力喪失を確認した。ただし、軸力保持能力の喪失は静的試験体で 33 セット、動的試験体で 27 セットと軸力保持能力は極めて大きい。3) 全ての試験体において、最大水平耐力経験後の繰り返し載荷では、既往の研究と同様に水平耐力の低下が大きい。ただし、シリーズ II の試験体（軸力比 $\eta=0.3$ の静的・動的実験）は、最大水平耐力経験後の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、徐々に耐力が低下した。

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った。得られた知見として、1) 静的載荷試験体に対しては材料試験結果の強度を、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は、実験値と概ね一致し、適合性を確認した。2) 動的載荷実験より得られたひずみ速度より、実建物とした場合のひずみ速度を算定した結果、実建物においても、ひずみ速度による動的材料強度上昇が生じることを示した。

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、静的・動的載荷による載荷速度および載荷履歴の異なる 2 つのシリーズの試験体について、柱の基本的な性能である軸力保持能力の解明を試みた。具体的には、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た。検討方法は、コンクリート圧縮強度の低下により M-N 降伏曲面が縮小するとして軸力-水平荷重関係を求めた。ここで、コンクリート圧縮強度の低下する比率を軸力保持限界強度比と定義した。得られた知見として、1) 縮小した M-N 降伏曲面上では、全ての試験体は釣り合い軸力を超える領域（曲げ圧縮破壊領域）に位置し、破壊形式はコンクリートの圧壊や主筋の座屈が想定されることから、実験結果の破壊状況と一致した。2) 本手法により、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。3) 軸力保持能力喪失直前の水平耐力（軸力保持限界水平変形時）の低下について、M-N 降伏曲面が縮小するとして、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た。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）を推定することができる。

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た。