

氏名（本籍） 出^て水^{みず}俊^{とし}彦^{ひこ}（富山県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 乙第 947 号
学位授与の日付 平成 29 年 3 月 18 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目 超高層鉄筋コンクリート造建物の $P \cdot \delta$ 効果
を考慮した応答評価法に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 北村 春幸
教授 衣笠 秀行 教授 永野 正行
教授 木村 吉郎 教授 岡田 裕

論文内容の要旨

建物は、一般的に各階床位置に質量が集約される層状の建築物である。これらは、地震によって各層の床位置に慣性力が作用し、慣性力による水平加力に伴い水平方向に変形が生じる。この時、各層の水平加力による層間変形 δ によって層が支える重量 W による荷重効果、すなわち $P \cdot \delta$ 効果が作用する。 $P \cdot \delta$ 効果によって建物に層間変形と層の重量による水平方向の付加応力 ΔQ が、層の復元力 $Q(x)$ と逆向きに作用する。また、 $P \cdot \delta$ 効果による付加応力と変形がなす仕事量は、重力場におけるポテンシャルエネルギーの解放分に相当する。したがって、 $P \cdot \delta$ 効果は、水平抵抗力の低下としてとらえられ、建物の復元力に対して負のバネで評価される。水平力に対する建物の耐力は有限で、層の降伏耐力点となる降伏変形を超える塑性変形が生じると、降伏耐力に対する $P \cdot \delta$ 効果による付加応力が増大することとなる。超高層建物は、中低層建物に比べ建物の固有周期が長くなり、建物の固有周期と地震動の周波数特性の関係から地震による入力エネルギー、地震力が減少すると考えられる。このことから、超高層建物は、建物重量に対する降伏耐力の比率が小さくなるため $P \cdot \delta$ 効果が建物の応答に及ぼす影響が大きくなる。また、建物の地震による入力エネルギーに対して、建物の損傷に寄与するエネルギー入力が建物応答のひずみエネルギーによって与えられる。この時、 $P \cdot \delta$ 効果によるポテンシャルエネルギーの解放分が、建物の損傷に寄与するため、損傷に対して吸収できる地震エネルギーが減少することとなる。したがって、 $P \cdot \delta$ 効果は、超高層建物の構造設計において考慮すべき事象となる。

1968 年霞ヶ関ビルの建設以降、事務所を用途とした超高層建物が鉄骨造(S 造)によって建設されている。また、1972 年鹿島建設椎名町アパート（地上 18 階、地下 1 階、塔屋 2

階)の建設をきっかけに、共同住宅を用途とした鉄筋コンクリート造(RC造)建物にも高層化が求められ、超高層RC造建物の構造設計法、施工技術が造り上げられてきている。近年では、圧縮強度100(N/mm²)を超える超高強度コンクリートの他、耐火性能に優れたコンクリートを採用することで、建物高さ200m級の超高層RC造建物も建設されている。このように、RC造建物の高層化に伴い、 $P \cdot \delta$ 効果は、超高層RC造建物の構造設計においても考慮しなければならないものとなってきた。さらには、南海トラフを震源とする巨大地震の発生が危惧され、従来の設計で想定した地震動レベルを上回る地震動の発生が予想されている。極大地震動に遭遇した場合に、設計クライテリアを上回る過大な塑性変形が生じる可能性も予想され、 $P \cdot \delta$ 効果が超高層建物の応答に及ぼす影響を明らかにし、 $P \cdot \delta$ 効果を考慮した建物の耐震性能を評価することが必要である。また、超高層建物は、建物の供用年数も長く、巨大地震に遭遇した場合の耐震性能だけでなく、継続使用を判断する上で地震を受けた後の残存性能を評価することも必要であると考えられる。

$P \cdot \delta$ 効果が建物の応答に及ぼす影響は、S造建物を対象とした研究が数多くなされている。既往研究にて、 $P \cdot \delta$ 効果の影響を表す指標値として安定係数 θ が定義されている。安定係数 θ は、弾性剛性と塑性剛性からなるバイリニア型スケルトンカーブの弾性剛性と $P \cdot \delta$ 効果による負のバネ剛性の比で表される値で、安定係数が大きい程、 $P \cdot \delta$ 効果の影響が大きいと考えられる。 $P \cdot \delta$ 効果を考慮した場合のS造建物の応答は、塑性変形が生じると $P \cdot \delta$ 効果の影響により最大変形が増大する。また、地震動によっては、塑性変形が繰り返し生じることで応答変形が一方に片寄る応答を示しさらなる変形の増大を招く。建物の最大変形を増大を、 $P \cdot \delta$ 効果を考慮した場合の最大応答変形を $P \cdot \delta$ 効果非考慮時の最大応答変形に対する応答の増大率として評価し、安定係数を用いた応答増大率の推定式が種々示されている。また、累積塑性変形の偏りによる建物の崩壊条件や梁崩壊型架構の動的崩壊過程における変形集中現象が明らかにされている。さらに、せん断型多層骨組みのエネルギー吸収量を評価し、エネルギー吸収能力に基づく耐震設計手法が提案されている。

一方、RC造建物を対象とした研究は少なく、 $P \cdot \delta$ 効果がRC造建物の応答にどのような影響を及ぼすのか、知見を示すには至っていない。RC造建物は、経験した変形の耐力点を指向し剛性が低下する履歴特性を有するため、S造建物の最大応答変形と異なる応答となることが予想される。このため、 $P \cdot \delta$ 効果を考慮したRC造建物の最大応答変形について明らかにする必要がある。また、塑性変形が生じることによって建物に残留変形が生じる。建物が再び地震に遭遇した場合、残留変形は応答の初期値となり、先の地震による最大応答変形の耐力点を指向した応答を示す。したがって、後続で遭遇する地震によるRC造建物の応答は、建物が始めて地震に遭遇する場合と異なる応答を示すことになる。このため、超高層RC造建物の残存耐震性能を評価する上で、 $P \cdot \delta$ 効果を考慮した残留変形や後続地震での最大応答変形を評価することが必要であると考えられる。

本研究は、 $P \cdot \delta$ 効果がRC造建物の応答に及ぼす影響を明らかにし、 $P \cdot \delta$ 効果を考慮した超高層RC造建物の応答の評価方法を示すことを目的としている。既往研究で示されるS造の評価方法にならい最大応答変形および残留変形の推定方法を示す。さらには、塑性変形を経験した建物の後続地震による最大応答変形の推定方法を示し、これらの推定方法を

用いて最大応答変形に着目した応答の評価方法を提案する。

本論文は、7章で構成し、第1章序論では、研究の背景と目的を述べ、既往の研究を整理し、本論文の構成を示している。

第2章では、 $P\cdot\delta$ 効果を考慮した超高層 RC 造建物の最大応答変形ならびに残留変形を評価する上で、RC 造建物における $P\cdot\delta$ 効果の指標となる安定係数 θ を定義する。 $P\cdot\delta$ 効果を考慮した建物の応答を評価する方法として、最大変形の増大と地震エネルギーの吸収能力を説明している。また、 $P\cdot\delta$ 効果が RC 造建物の応答に及ぼす影響について、S 造建物を対象とした既往研究とは別に考える必要性があることを、RC 造建物と S 造建物が有する復元力特性を基に説明している。

第3章では、 $P\cdot\delta$ 効果を考慮した場合の応答増大率の推定式を提案している。推定式は、 $P\cdot\delta$ 効果により見かけの剛性が低下し変形が増大する影響と、地震エネルギーの吸収率が低下し、低下分を補うことによる変形を増大を評価したものである。この時、最大応答変形を示す応答履歴の半サイクルのひずみエネルギー量を同等と仮定している。応答増大率の推定式は、スケルトンカーブの塑性剛性をゼロとした完全弾塑性の場合と剛性を有する場合とでそれぞれ提案され、 $P\cdot\delta$ 効果非考慮時の塑性率 μ と安定係数 θ 、降伏点の等価剛性に対する塑性剛性の割合 β より求められる。安定係数 θ を変数とした一質点系モデルおよび多質点系モデルによる時刻歴応答解析の応答結果に対して応答増大率の推定式がよい対応を示し、推定式が $P\cdot\delta$ 効果を考慮した応答増大率を推定する標準的な値の上限値を与える有用な式となることを確認した。

第4章では、 $P\cdot\delta$ 効果を考慮した鉄筋コンクリート造建築物の残留変形について検討している。 $P\cdot\delta$ 効果を考慮した残留変形は、最大応答変形を示す側に増大する傾向を有しており、残留変形の推定式は、正負の最大応答変形の平均値に正負の最大応答変形の片寄りの比率を用いて提案される。片寄りの比率を考慮することで推定値の精度は向上するが、応答結果全般でみると推定値に対してバラツキは大きい。 $P\cdot\delta$ 効果を考慮した RC 造建物の応答は、最大応答変形以降で地震動入力が増減し応答振幅が小さくなる過程で、振動の中心軸が最大応答変形側に移動し残留変形が増大する応答を示す場合がある。この応答は、 $P\cdot\delta$ 効果を考慮した RC 造建物の固有な応答で、有用な知見を与えている。 $P\cdot\delta$ 効果を考慮した応答性状を踏まえると、残留変形は、最大応答変形時の除荷時変形により定まる最大残留変形や最大応答塑性変形に対する割合として評価することを提案している。

第5章では、大地震あるいは巨大地震に複数回遭遇する場合の、最大応答変形の推定方法について検討している。建物に塑性変形が生じる地震動の大きさを、大地震動とより大きなレベルの極大地震動の2つに大別し、発生する地震動の大きさの順序に着目した後続で発生する地震動による最大応答変形の推定式を提案している。提案する推定式に対して、一質点系モデルを用いた時刻歴応答解析を行い、適応性を検証している。先行地震の最大応答変形を超えない場合の応答変形は、応答の初期値となる残留変形の影響を受け、後続地震で想定される最大応答変形が残留変形を変数として推定することが可能であることを示した。

第6章では、48層の試設計建物を例示し $P\cdot\delta$ 効果を考慮した超高層 RC 造建物の応答

の評価方法を示している。応答増大率の推定式を用いて、構造設計で建物の安全限界と考える層間変形を $P-\delta$ 効果を考慮した場合と $P-\delta$ 効果非考慮時の変形に対応付けて評価し、それぞれの変形に対して荷重・変形関係からなす仕事量から有効な地震エネルギーの吸収量を評価することを提案している。また、後続地震による最大応答変形の推定式を用いて、残留変形を基に建物が想定する後続地震による最大応答変形を推定する方法を提案している。これらは、 $P-\delta$ 効果を考慮した超高層 RC 造建物の耐震性能の評価値を与え、構造設計を行う上で有用な指標となると考える。

第7章では、本論文の結論として、 $P-\delta$ 効果を考慮した超高層 RC 造建物の最大応答変形の評価方法を総括して述べている。

論文審査の結果の要旨

建物に地震動により水平方向に変形が生じる時、各階重量 W による荷重効果 ($P-\delta$ 効果) として、水平方向の付加応力が層の復元力と逆向きに作用し、層の水平抵抗力が低下し、復元力が低下する。水平変形がさらに増加して、付加応力が復元力を上回ると建物は倒壊する。超高層建物は、中低層建物に比べて、固有周期が長く、水平変形が大きく、水平剛性が低いいため、 $P-\delta$ 効果の影響が大きくなる。従って、 $P-\delta$ 効果は、超高層建物の構造設計において考慮すべき事象である。

これまで、超高層事務所ビルに採用されてきた鉄骨造 (S 造) 建物を対象として、 $P-\delta$ 効果の研究が数多くなされた。近年では、鉄筋コンクリート造 (RC 造) 集合住宅の高層化に伴い、超高層 RC 造建物においても $P-\delta$ 効果の考慮が必要になった。さらには、南海トラフを震源とする巨大地震により、従来の設計を上回る地震動の発生が予想され、 $P-\delta$ 効果の考慮が耐震設計において必須になった。また、超高層建物は、供用年数も長く継続使用を判断する上で大地震を受けた後の残存性能の評価が重要になってきた。

S 造建物を対象とした研究では、 $P-\delta$ 効果の影響を表す指標値として層の復元力特性における弾性剛性と $P-\delta$ 効果による負のパネ剛性の比で表される安定係数 θ が定義されている。 $P-\delta$ 効果考慮時の最大応答変形を $P-\delta$ 効果非考慮時に対する応答の増大率として評価し、安定係数を用いた応答増大率の推定式が種々示されている。一方、RC 造建物を対象とした研究は少ない。RC 造建物は、経験した変形の耐力点を指向し剛性が低下する履歴特性を有するため、S 造建物と異なる応答となることが予想される。

そこで、申請者は、 $P-\delta$ 効果が RC 造建物の応答に及ぼす影響を明らかにし、S 造の評価方法にならば、最大応答変形と残留変形の推定式を提案した。さらに、複数回の大地震の遭遇を想定し、塑性変形を経験した建物の後続地震による最大応答変形の推定式を提案し、これらの推定式を用いて $P-\delta$ 効果を考慮した超高層 RC 造建物の応答の評価方法を示した。

第1章序論では、研究の背景と目的を述べ、既往の研究を整理と本論文の構成を示した。

第2章では、RC 造建物における $P-\delta$ 効果の指標となる安定係数 θ を定義した。RC 造建物と S 造建物の層の復元力特性をもとに、S 造建物とは異なる方法により $P-\delta$ 効果の RC 造建物の応答に及ぼす影響を評価する必要があることを示した。

第3章では、 $P-\delta$ 効果を考慮した場合の応答増大率の推定式を提案した。推定式は、考

慮時の剛性の低下による変形増大率と、非考慮時の最大応答に対して考慮時の最大応答の半サイクル分のひずみエネルギーが等しいと仮定して、ひずみエネルギー吸収量の低下による変形増大率を算出した。さらに、一質点系モデルおよび多質点系モデルによる時刻歴応答解析結果を用いて、提案した推定式が規定した範囲で上限値を与えることを確認した。

第4章では、 $P-\delta$ 効果を考慮した場合の残留変形の推定式を提案した。 $P-\delta$ 効果考慮時の残留変形の推定式は、正負の最大変形の平均値とその片寄りの割合を乗じて求めた。安定係数をパラメータとした一質点系モデルによる応答解析結果から、応答の片寄り最大変形時に生じるだけでなく、最大変形時以降の応答が収束する過程でも増大する場合もあることを明らかにした。残留変形を、最大変形時の除荷時変形から求めた最大残留変形率や最大塑性変形率に対する割合で評価した。

第5章では、大地震に複数回遭遇する場合について、大地震動と極大地震動の2つに大別し、それらの発生順序に応じた、後続地震動で生じる最大応答変形の推定式を提案した。後続地震が先行地震より大きい場合は、第3章の単独地震の推定式を用いて、後続地震動が先行地震より小さい場合には、先行地震動の残留変形から最大応答変形を推定できることを示した。さらに、一質点系モデルの地震応答解析を行い、推定式の妥当性を検証した。

第6章では、48層の試設計建物を例に、3章、4章、5章で提案した推定式の妥当性を検証するとともに、 $P-\delta$ 効果を考慮した超高層RC造建物の応答評価方法を提案した。

第7章では、本論文の結論として、 $P-\delta$ 効果を考慮した超高層RC造建物の最大応答変形や残留変形に着目した応答評価方法を総括して述べた。

以上、本論文は、これまで研究例の少ない超高層RC造建物に対する $P-\delta$ 効果の影響を明らかにしたもので、超高層RC造建物の耐震設計に取って有益な応答評価法を提示するものである。さらに、先の2016年熊本地震で問題となった震度7の地震動に2回遭遇する場合の応答評価方法についても、第5章で論述している。このように、これまで知見の乏しい超高層RC造建物に対する $P-\delta$ 効果の影響を耐震設計で必要される応答評価法として提示したものであり、耐震設計における貢献度は極めて高いものである。

よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分価値あるものと認める。