

論文の内容の要旨

論文題目：多層 1 軸偏心建物の非線形地震応答評価手法に関する研究

氏名：藤井 賢志

近年において、建築物の性能評価型の耐震設計法ならびに耐震診断法の開発が世界中で進められている。その代表例としては、アメリカでは 1996 年に発表された ATC-40 や 1997 年に発表された FEMA273、日本では 1998 年に改正された建築基準法が挙げられる。これらの性能評価型耐震設計法等においては、想定した地震動に対する建物の非線形応答の評価は最も重要な項目の 1 つである。このための簡便な手法としては、FEMA273 では NSP (Nonlinear Static Procedure)、日本の改正建築基準法では限界耐力計算法に代表されるように、主としてねじれを伴わない整形建物を対象に、これが強震時に単一のモードで振動すると仮定し等価 1 自由度系に置換して評価する手法が示されている。

一方、過去の地震では耐震壁の偏在によるねじれ振動が原因で大きな被害が生じたと思われる例が報告されており、偏心を有する建物についてもその耐震性能を整形建物と統一的な概念で評価しうる簡便な手法が必要である。しかしながら、偏心建物については、強震時に高次モードの影響が顕著となり単一の代表的なモードで振動しているとは見なせなくなる可能性がある事、多方向入力の影響が顕著となる可能性がある事、などからこれまでは上記の等価 1 自由度系による簡便な応答評価手法は適用の対象外とされてきた。また、近年これを多層偏心建物に適用しようとする試みがいくつかなされているものの、その適用条件に関する検討は十分になされていないのが現状である。そこで本研究では、偏心を有する建物を対象とした等価 1 自由度系による簡便な非線形地震応答評価手法をテーマに、その最も基本かつ重要である 1 方向地震入力を受ける単層 1 軸偏心建物および各階の回転慣性が等しく重心が同一鉛直線上にあり、各階の剛性偏心距離・耐力偏心距離および弾力半径が等しいという条件を満足する多層 1 軸偏心建物(以下では単純に多層 1 軸偏心建物と記す)に対象を限定し、各構面の最大応答変位に特に着目して、その評価手法の提案およびその適用限界を論じている。

本論文は本章 8 章と付録 4 章から構成されている。以下に、本論文の内容を構成に従って各章毎にまとめて示す。

第 1 章「序論」では、偏心建物に対しては等価 1 自由度系による簡便な非線形地震応答評価手法は適用の対象外とされてきたこと、そして偏心建物の耐震性能を整形建物と統一的に評価するためには、等価 1 自由度系による応答評価手法の偏心建物への拡張が必要である事を述べた。そして本研究に関連のある既往の研究を紹介し、本論文の構成について述べた。

第 2 章「等価 1 自由度系による応答評価手法の概略」では、前半部で等価 1 自由度系による非線形地震応答評価手法の概略を述べ、等価 1 自由度系の非線形運動方程式を示した。そして後半部では線形振動する単層 1 軸偏心系を取り上げて、その応答の 1 次モード成分(以下では 1 次モード応答と記す)が単層 1 軸偏心系の応答に与える影響について検討した。その結果として、単層 1 軸偏心系の 1 次等価質量の全質量に対する比率(1 次等価質量比)は重心に関する弾力半径比の大小と対応

すること、および単層1軸偏心系の1次モード形は弾力半径比の大小により並進卓越型と回転卓越型に大別できること、そして単層1軸偏心系の1次等価質量比の値が大きい場合は弾力半径比が1より大きい場合と対応し、かつその1次モード形は並進卓越型となることを示した。この事は、従来から言われている”torsionally stiff building”と、”torsionally flexible building”の違いが1次等価質量比の大小と対応していることを示すものである。そして、1次等価質量比が大きい場合にはその応答は1次モード応答により概ね評価が可能であり、1次モード応答の影響の大小を判断するためには1次等価質量比が有力なパラメータとなりうることを示した。以上の事は、P. Fajfar 博士によって既に指摘されている、等価1自由度系による応答評価手法は”torsionally stiff building”に対してのみ適用可能であるという事が、1次等価質量比によって定量的に説明できることを示唆するものである。

第3章「多層偏心系の非線形地震応答解析手法」では本研究で用いる数値解析手法を整理し定式化した。

第4章「単層1軸偏心系の等価1自由度系による非線形応答評価」では、直交方向構面の耐力が十分に高く線形挙動すると見なせる単層1軸偏心系を対象として、等価1自由度系による非線形応答の評価の可能性について検討した。その結果として、1次等価質量比が大きい単層1軸偏心系では等価1自由度系により応答評価が可能である一方、1次等価質量比が小さい単層1軸偏心系では1次等価質量比が小さくなるため応答評価は困難である事を示した。また、単層1軸偏心系の等価1自由度系への縮約においてモード形の変動を考慮すべきであることもあわせて示した。本検討においては、弾性時における1次等価質量比が0.8以上であれば概ね良好な推定結果が得られた。

第5章「多層1軸偏心系の等価1自由度系による非線形応答評価」では、前半部では多層1軸偏心系の1次等価質量比が等価単層1軸偏心系の1次等価質量比と多層無偏心系の1次等価質量比との積で表されることを示し、これを用いて等価単層1軸偏心系への縮約について論じた。そして後半部では4層と7層のせん断型の多層1軸偏心系を対象として、多層1軸偏心系を等価単層1軸偏心系ならびに等価1自由度系に縮約してそれぞれの応答を比較し、縮約の妥当性について検討した。その結果として、単層1軸偏心系の場合と同様に、1次等価質量比が大きい多層1軸偏心系の場合には等価1自由度系による非線形応答の評価が可能である事を示した。本検討では多層1軸偏心系の弾性時における1次等価質量比が0.6以上であれば概ね良好な推定結果が得られた。すなわち、第4章および第5章で得られた結論は、第2章で示唆された1次等価質量比が大きい偏心建物の応答は等価1自由度系により評価可能であるという事を裏付けるものである。

第6章「単層1軸偏心系の非線形応答評価における直交方向構面の剛性低下の影響」では、直交方向の特性が各構面で全て等しい単層1軸偏心系を用いて直交方向構面の剛性低下の影響を考慮して1次モード形の変動を考慮した静的漸増載荷解析を行い、直交方向構面の剛性低下を考慮した場合において1次モード応答により応答変位分布を評価する事の可能性について検討した。その結果として、直交方向構面の剛性低下が顕著な場合には1次モード応答のみによる評価では重心および剛側構面の応答変位を過小評価する可能性があること、ならびに線形応答解析で一般的に用いられる各次モード応答の重ね合わせによる方法による応答評価の精度改善は困難である一方で、1次モードと2次モードに相当する外力分布の和（以下では簡略化したモード直和外力と記す）による静的漸増載荷解析を併用する事によりその改善が可能である事を示した。また、等価1自由度系による非線形応答評価法の適用性を判断するためのパラメータとしては、これまでに議論した弾性時

の1次等価質量比よりも剛性低下の影響を考慮した等価1自由度系における1次等価質量比の最小値が有効である事を示した。本検討においては、これが0.6以上となるケースについては、等価1自由度系による1次モード応答の結果と簡略化したモード直和外力による静的漸増載荷解析結果とを包絡することにより良好な評価精度が得られた。

第7章「等価1自由度系による多層1軸偏心建物の非線形地震応答評価手法の提案」では、これまでの検討結果を総合して多層1軸偏心建物の非線形応答評価手法を提案し、解析例を示した。さらにP. Fajfar博士が提案する“N2 method”との相違点について論じ、その応答評価結果と比較した。本研究で提案した非線形地震応答評価手法は、①平面骨組の静的漸増載荷解析結果を用いて多層1軸偏心建物をまず等価な単層1軸偏心系に縮約してから等価1自由度系に縮約するため、多層立体骨組の静的漸増載荷解析が不要である、②等価単層1軸偏心系において1次モード形の変動を考慮した静的漸増載荷解析と、第6章で論じた簡略化したモード直和外力による静的漸増載荷解析の2種類の異なる静的漸増載荷解析を行うことにより、剛側および柔側構面ともに変形を概ね良好に評価できる、の2点の特徴を有している事、および“N2 method”では動的解析時に比較してねじれの影響を過小評価する傾向があるのに対して、本応答評価手法では概ね良好に評価でき評価精度が改善される事を示した。

第8章「結論」では、本研究で行った多層1軸偏心建物の非線形地震応答評価手法に関する解析的検討で得られた知見について総括するとともに、今後に残された検討すべき課題について分類して述べた。

付録1「せん断型多層無偏心系の非線形応答評価」では、第5章で議論した多層建物から等価1自由度系への縮約について、せん断型多層無偏心系の平面振動を取り上げて検討をした。ここでは、特に等価1自由度系による層間変位の評価精度について議論をおこなった。

付録2「偏心建物の耐震性能における建物の平面形状の影響」では、本文で提案した多層1軸偏心建物の非線形地震応答評価手法を用いて、2スパン×2スパンの単層1軸偏心建物を例に挙げて偏心による耐震性能の低下に関して議論を行った。

付録3「多層せん断型偏心系の非線形地震応答解析プログラム”DYNASTY”のマニュアル」および付録4「等価加速度—等価変位関係の3折れ線近似のための算定プログラム」では、本研究で用いた解析プログラムに関する説明を行った。

以上により本研究では、構面方向からの1方向入力を受ける多層1軸偏心建物の各構面の最大応答変位を等価1自由度系により簡便に評価する手法を提案した。