

建築物の弾塑性挙動に伴うエネルギー消費能力と 地震力低減効果に関する研究

学位論文内容の要旨

世界各国の耐震規定の多くは、構造物の靱性に期待しエネルギー消費能力(塑性変形能力)に応じて設計用地震力を低減する係数を取り入れている。例えば、日本の構造規定での構造特性係数 D_s 、米国 UBC の R ファクターのように世界各国で同様な係数が用いられている。これらの係数の概念は良く理解されてはいるが、その値は各国で大きく異なっているのが現状であり、例えば、米国では最も靱性のある構造物では設計用地震力を $1/8$ に低減するが、日本では $1/4$ に低減するのみである。

建物を設計する際には最終的にどのような崩壊型を形成し崩壊に至るかを勘案する必要がある。例えば建物全体の梁端部に塑性ヒンジが発生する全体崩壊メカニズムが耐震性能に優れているという考えから、梁降伏による全体崩壊メカニズムとなるような設計手法が提案されている。しかしながら、実際の地震被害では国内外を問わず特定の層に損傷が集中し崩壊に至るケースが多々見られることは、過去の地震被害からも明らかである。

以上より、本論文では、耐震上望ましいとされる全体崩壊型および望ましくない特定層(最下層や中間層)での崩壊といった異なる崩壊メカニズムを形成する建物モデルを構築し、弾塑性地震応答解析を行うことにより、その挙動やエネルギー消費能力の違いを明らかにするとともに、地震力低減効果(構造特性係数)の性質およびその極値を示した。また、建物の弾塑性挙動を規定する復元力特性の違いがもたらす塑性変形の片寄りが、建物のエネルギー消費能力を大きく左右することを明らかにした。また、耐震規定の中での構造特性係数の与え方について提案した。

第1章では、先ず本論文の研究目的・研究背景を示し、次に日米両国の耐震規定における構造特性係数の背景と現状について示し、次に建築物の弾塑性挙動に伴うエネルギー消費能力による地震荷重の低減に関する既往研究の整理を行い、最後に本論文の構成を述べた。

第2章では、最も耐震性に優れていると考えられる全体崩壊(梁降伏)型モデルを対象とした。建物の崩壊メカニズムとして最も耐震性に優れているのは全体崩壊メカニズムである。全体崩壊型では建物全体の梁端および最下層の柱脚に塑性ヒンジが生じ、1次モードが卓越する逆三角形の振動モードとなり等価な1自由度系に置換できる。この章では、全体崩壊型を模した1自由度建物モデルに対し、復元力特性として完全弾塑性型復元力を与え、かつ無限の変形能力を持つと仮定し、弾塑性地震応答解析を行った。無限のダクティリティがあっても降伏ベースシア係数を徐々に減少させると重力効果($P-\Delta$ 効果)によりモデルは完全に崩壊する(変形角が $\pi/2$ となる)。降伏ベースシア係数を徐々に減少させていき、最初に塑性率 μ が4に達するときの必要なベースシア係数、および建物が崩壊するときのベースシア係数(崩壊ベースシア係数)をそれぞれ求め、それらを弾性ベースシア係数で除すことにより、建物の塑性変形エネルギーにより設計用地震力を低減する係数、いわゆる構造特性係数とその極値を求めた。解析結果を検討した結果、全体崩壊型

建物の構造特性係数は入力地震動毎に値が大きく異なり、設計等に取り入れる場合には平均値だけでなくばらつきを考慮する必要があること、全地震動の平均値で見ると短周期では単調減少し長周期では周期によらず比較的一定に近い傾向を示すこと等を明らかにした。また、日本での構造特性係数の最小値である 1/4 はほぼ塑性率 4 に相当する塑性変形に対応しており、それ以上の塑性変形能力を持つ建物であれば崩壊の可能性は低いこと、米国での構造特性係数の最小値である 1/8 は地震力を低減し過ぎており、極短周期および長周期の建物に対しては崩壊の可能性が少なくないことなどが分かった。

第 3 章では、建築物の崩壊メカニズムの違いがエネルギー消費能力および地震力低減効果にどのような影響を及ぼすかについて明らかにするため、耐震上望ましくないとされる特定層崩壊型メカニズムを持つ建物モデルの構造特性係数について検討を行った。1995 年兵庫県南部地震であらためて注目されたが、過去の国内外の地震被害においても、建物の特定の層に損傷が集中し、その損傷が進行することにより層が崩壊する現象は珍しくない。この章では、ピロティ建物に代表される最下層が弱（崩壊）層となる最下層崩壊モデル、および何れの層でも崩壊が起こり得るとした層崩壊型モデルについて、第 2 章と同様の解析を行い、その構造特性係数および極値について検討した。なお、実建物で考え得る最も P- Δ 効果が強く表れるモデルが最下層崩壊モデルである。解析の結果、層崩壊となる両モデルの地震力低減効果は全体崩壊となる場合よりもかなり小さく、構造特性係数は周期 1 秒以上の建物では日本の規定での最小値 1/4 を大きく超えることが明らかになった。また、何れの層でも崩壊し得るモデルにおいても実際の崩壊は殆ど最下層で起こり、すなわち層崩壊モデルの構造特性係数は最下層崩壊モデルで概ね近似できることを明らかにした。また全体崩壊モデルでの結果と同様に、入力地震動によるばらつきが非常に大きいことが分かった。

第 4 章では、復元力特性の違いが建築物のエネルギー消費能力および地震力低減効果に及ぼす影響について検討した。第 3 章まで用いてきた完全弾塑性型復元力は大きな荷重-変形ループの面積をもち、すなわち大きなエネルギー消費能力を持つことが予想されたが、応答結果の荷重-変形ループを詳細に見ると必ずしも想定していたようなエネルギー消費能力を発揮していない場合があることが分かった。そこで第 4 章では、完全弾塑性型に加え、復元力特性を剛性逓減 Bi 型（改 Clough モデル）および剛性逓減 Tri 型（改 TAKEDA モデル）とした解析を行った。その結果、完全弾塑性型では除荷（戻り）剛性が高いため塑性域に入った変形が初期位置に戻りにくく、すなわち応答が 1 方向に片寄り易い傾向があり、変形が 1 方向のみに進んでしまい、荷重-変形曲線が十分にループを描くことなく崩壊に至る場合があることが分かった。一方、改 Clough および改 TAKEDA モデルでは、初期位置からほぼ左右均等に片寄りの少ない応答となる傾向があり、1 方向のみに変形が進行し崩壊してしまうケースが少ないことが分かった。荷重-変形ループの面積はそのまま建築物のエネルギー消費能力に直結するため、大きなループあるいは数多くのループを描くことが耐震上大切であるが、そのためには応答が 1 方向に片寄らないよう十分留意する必要があることが確認された。ただし、応答の片寄りは復元力特性のみによって生じるものではなく、入力地震動の性質にも大きく依存するため、設計用地震力の与え方（低減）には、種々の側面から総合的に検討する必要がある。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章で得られた研究結果をまとめると共に、今後の課題について示した。本論文の総合的な結論として、設計用地震力低減係数は現在の構造特性係数などのような形で与えられるのではなく、予想される地震動の特性、建物の崩壊モード、復元力特性、ダクティリティーなどに応じた、非線形設計用応答スペクトルで与えられる方が適当であると考えられる。また、非常にばらつきが大きいことから、確率論的な手法に基づくあり方も今後考えるべきであろう。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 山 祐 二
副 査 教 授 城 攻
副 査 教 授 鏡 味 洋 史

学 位 論 文 題 名

建築物の弾塑性挙動に伴うエネルギー消費能力と 地震力低減効果に関する研究

構造物のエネルギー消費能力に応じて設計用地震力を低減する係数は、例えば、日本の規定での構造特性係数 D_s 、米国 UBC の R ファクターなどのように多くの国の耐震規定に取り入れられている。しかし、これらの係数の概念は同一でも、その値は各国で大きく異なっている。また、現在各国で採用されている低減係数は、建物の最終的な崩壊型が全体崩壊（梁降伏）型であることを前提に算出されている場合が殆どである。しかし、実際の地震被害では特定の層に損傷が集中し崩壊に至るケースが多々見られることは、過去の国内外の地震被害からも明らかである。本論文では、異なる崩壊型を形成する建物モデルの解析を行い、崩壊型によるエネルギー消費能力の違いを明らかにするとともに、地震力低減係数の特性および極値を示すことを目的としている。また、復元力特性の違いによる建物のエネルギー消費能力への影響を明らかにすることを目的としている。また、耐震規定の中での地震力低減効果の与え方について提案を試みている。

第 1 章では、研究目的・研究背景を示し、次に日米両国の設計用地震力低減係数の背景と現状について示し、次に建築物の弾塑性挙動に伴うエネルギー消費能力による地震力低減効果に関する既往研究の整理を行っている。

第 2 章では、最も耐震性に優れている全体崩壊型モデルを検討対象としている。等価 1 自由度系に置換した建物モデルについて、完全弾塑性型の復元力を与えた弾塑性地震応答解析を行い、地震力低減係数および極値を算出している。解析結果から、全体崩壊型建物の地震力低減係数は入力地震動毎に値が大きく異なり、設計等に取り入れる場合には平均値だけでなくばらつきを考慮する必要があること、短周期では単調減少し長周期では周期によらず比較的一定に近い傾向を示すこと等を明らかにしている。また、日本での構造特性係数 D_s の最小値 0.25 はほぼ塑性率 4 に相当する塑性変形に対応しており、それ以上の塑性変形能力を持つ建物であれば崩壊の可能性は低いこと、米国での低減係数の最小値である $1/8$ は非常に周期の短い建物および長周期の建物に対しては地震力を低減し過ぎていることなどを明らかにしている。

第 3 章では、建築物の崩壊メカニズムの違いが及ぼす影響を明らかにするため、ピロティ建物が代表される最下層が崩壊層となる最下層崩壊型モデル、および何れの層

でも崩壊が起り得るとした層崩壊型モデルについて、第 2 章と同様の解析を行い、地震力低減係数および極値について検討している。解析の結果、両モデルの地震力低減効果は全体崩壊型よりもかなり小さく、低減係数は周期 1 秒以上の建物では日本の規定での最小値 1/4 を大きく超えることを明らかにしている。また、層崩壊型モデルの崩壊は殆どが最下層で生じ、層崩壊型モデルの地震力低減係数は最下層崩壊型モデルで概ね近似できることを明らかにしている。また、第 2 章での全体崩壊型モデルでの結果と同様に、入力地震動によるばらつきが非常に大きいことを示している。

第 4 章では、復元力特性の違いが及ぼす影響を明らかにするため、完全弾塑性型に加え、復元力特性を剛性逓減 Bi-linear 型 (改 Clough モデル) および剛性逓減 Tri-linear 型 (改 TAKEDA モデル) とした解析を行っている。解析の結果、完全弾塑性型では除荷剛性が高いため塑性域に入った変形が初期位置に戻りにくく、応答が 1 方向に片寄り易い傾向があり、荷重-変形曲線が十分にループを描くことなく崩壊に至る場合があることを明らかにしている。一方、改 Clough および改 TAKEDA モデルでは、ほぼ左右均等に片寄りの少ない応答となる場合が多く、1 方向のみに変形が進行し崩壊することが少ないことを明らかにしている。耐震上、荷重-変形曲線が大きくなるあるいは多くのループを描くことが大切であるが、そのためには応答が 1 方向に片寄らないよう十分留意する必要があると述べられている。また、応答の片寄りは入力地震動の性質にも大きく依存するため、設計用地震力の低減には、種々の側面から総合的に検討する必要があることを指摘している。

第 5 章では、得られた研究結果をまとめると共に、今後の課題について示している。本論文の総合的な結論は、設計用地震力低減効果は現在の構造特性係数などのような形で与えられるのではなく、予想される地震動の特性、建物の崩壊型、復元力特性、ダクティリティーなどに応じて与えられるべきであり、また、ばらつきが大きいことから、確率論的な手法に基づくあり方も今後考えるべきとなっている。

これを要するに、著者は、建物の弾塑性挙動に伴うエネルギー消費能力および地震力低減効果について新知見を得、新たな提案をしたものであり、耐震工学、耐震設計法の向上に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。