

氏名	ほり のりお 堀 則男		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成9年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)建築学専攻		
学位論文題目	地震時エネルギー応答性状に基づく 鉄筋コンクリート造建物の耐震設計手法に関する研究		
指導教官	東北大学教授 柴田 明德		
論文審査委員	主査 東北大学教授 柴田 明德	東北大学教授 杉村義広	
	東北大学教授 山田 大彦	東北大学助教授 井上範夫	

## 論文内容要旨

地震動が構造物に及ぼす破壊力については、地動の最大加速度や最大速度によって評価するのが一般的であり、耐震設計においても、最大速度を例えば 25cm/s, 50cm/s に規準化した入力地震動による検討が行われている。このとき設計用入力地震動としては、1940年 Imperial Valley 地震 El Centro 記録、1968年十勝沖地震 八戸港湾記録などが慣用的に用いられてきた。

しかしながら近年になって、1993年釧路沖地震をはじめとして、従来みられなかったような非常に大きな加速度が観測され、地震動の破壊力に関してあらためて論じられるようになった。例えば1993年釧路沖地震では継続時間の長い大加速度地震動が観測され、港湾施設をはじめとする被害がみられた。また1994年 Northridge 地震や1995年兵庫県南部地震は都市近傍を震源とする直下型地震であり、継続時間は短かったものの瞬間的な大加速度によって都市に甚大な被害を与えるものとなった。

地震動が構造物に与える影響を、瞬間的な破壊力と、継続時間内の繰返し効果の両面から捉えるため、地震動の総エネルギー入力及びエネルギーの入力過程の検討が行われており、これを耐震設計に適用することが試みられている。また、地震動エネルギーの入力の激しさと構造物の応答変形との関係が指摘されており、構造物のエネルギー応答に基づいた応答最大変形の推定も検討されている。

一方建物の地震応答レベルに関しては、応答最大塑性率、剛性低下率などの最大応答に基づく指標によって評価されるのが一般的であるが、地震動のような繰返し荷重を受ける場合には履歴によるエネルギー消費も重要な耐震性能であり、建物の応答・損傷に大きく関わっていると考えられる。そのため建物の弾塑性挙動や損傷レベルの評価は、応答最大変形と履歴消費エネルギーの両者に基づいて行うことが必要である。

本論文では鉄筋コンクリート(以下、RC)造建物の地震時挙動をエネルギー応答性状から捉え、その特性を明らかにすることを目的としている。地震動を受けた構造物の応答は、地震動の入力エネルギーを履歴及び粘性減衰によって消費するメカニズムとして捉えることができるため、これによって地震動の破壊力について考察し、構造物の最大応答と繰返し応答の性状(応答のパターン)について考えていく。

また、建物の耐震設計における簡便法として、地震動の応答スペクトルや所要耐力スペクトルによる検討が一般に行われている。これは固有周期を横軸として1質点系の応答値を示したものであり、建物の応答を簡便に推定する手法として有効である。しかしながら設計すべき建物は多層骨組であり、応答最大塑性率や降伏耐力などの、1質点系と多層骨組における相互の関係については明確な説明がなされているとはいえない。そ

ここで本論文では梁降伏型 RC 造建物に限定したものであるが、1 質点系と多層骨組における耐震性能の対応関係についての検討を行った。

さらに以上の検討結果より、地震時のエネルギー応答性状に基づいた 1 質点系及び多層骨組の耐震設計手法の提案を試みた。この方法では、入力地震動のエネルギースペクトルが与えられているとき、目標応答最大塑性率に対応する所要耐力の算定ができ、損傷のレベルを考慮した耐震設計が可能であると考えられる。

以下に、本論文の概要を各章ごとに示す。

第 1 章では本論文の目的及び背景について述べ、エネルギー応答と地震強度指標に関する既往の研究を示した。構造物の地震時エネルギー応答に関する研究は以前から、主に鋼構造物を対象として行われており、エネルギー入力とエネルギー消費が耐震設計におけるひとつの重要な因子であることは一般に認められているといえる。RC 造建物についてもエネルギー消費と損傷が深く関わっていることが指摘されており、地震動のエネルギー入力と構造物の応答・損傷に関する研究が今後ますます盛んになっていくものと考えられる。

第 2 章では 1 質点系の地震時エネルギー応答性状を検討した。前半では長周期側で速度応答スペクトル一定となるような模擬地震動を用い、エネルギー応答の一般的な性状の把握を目的とした。地震動入力エネルギーは地震動ごとに固有であり、固有周期以外の構造特性に対する依存性の小さいことが確認された。本論文では RC 造建物を対象とした Takeda モデル型の復元力特性を有する 1 質点系を用いたが、この場合は降伏時周期による挙動が支配的であり、弾塑性地震動入力エネルギーは、初期周期から降伏時周期に読み替えることによって弾性地震動入力エネルギーと対応することが分かった。

入力された地震動のエネルギーを、構造物は粘性減衰及び履歴によって消費するわけであるが、その割合は主として減衰定数と応答最大塑性率に依存するものである。本論文においては減衰定数を 0.05 とした場合のみの検討を行ったが、減衰消費エネルギーと履歴消費エネルギーの比を略算式によってある程度推定できた。

本論文では、構造物の最大応答を評価する指標として応答最大塑性率 $\mu$ 、繰返し応答を履歴消費エネルギーに基づいて評価する指標としてエネルギー塑性率 $\mu_e$ を用いた。応答最大塑性率 $\mu$ とエネルギー塑性率 $\mu_e$ の値、相関性が構造物の応答パターンに大きな影響を与え、それゆえに両者を考慮することによって応答評価をよりの確に行うことができると考えられる。応答最大塑性率 $\mu$ とエネルギー塑性率 $\mu_e$ を関係づける指標として損傷パラメータ $\gamma$ が提案されており、本論文においても損傷パラメータ $\gamma$ の安定性を示した。この損傷パラメータ $\gamma$ によって構造物の最大応答と繰返し応答が結びつけられ、両者を考慮した耐震設計手法への利用が期待できる。

後半では観測地震動に対して同様の応答解析を行い、地震動ごとの共通点、相違点の検討を行った。地震動入力エネルギーの地震動ごとの安定性、損傷パラメータ $\gamma$ の安定性に関しては共通しているといえるが、履歴消費エネルギーと地震動入力エネルギーの比についてはそれぞれの地震動ごとに特徴的であった。これは地震動の繰返し効果、構造物の繰返し応答、塑性変形の量などと関連があり、地震動が及ぼす破壊力特性の評価に利用できると思われる。

第 3 章では梁降伏型 RC 造骨組の応答性状を検討し、1 質点系と多層骨組の応答の対応関係を考えた。検討対象建物は 5, 10, 15 層純フレーム RC 造建物の中柱モデルであり、ある降伏ベースシア係数を与え、それに対応する  $A_i$  分布外力での静的線形解析によって得られた部材端モーメントを降伏モーメントとして耐震設計を行った。このとき、降伏モーメントが小さすぎる場合でも最小配筋量の規定は適用しないこととした。この骨組の応答は、弾性時 1 次固有モードを仮定して 1 自由度系に縮約し、骨組と縮約 1 自由度系の対応関係について考察を行った。

$A_i$  分布外力による静的載荷解析結果より、縮約 1 自由度系の復元力は骨組のベースシア、縮約 1 自由度系の応答変位は骨組の 1 次等価高さでの応答変位にそれぞれ対応していることが分かった。また、縮約 1 自由度系の塑性率と骨組の梁端塑性率には、建物高さ、降伏ベースシア係数によらない相関関係がみられた。地震応答時においても、復元力と応答変位は縮約 1 自由度系と多層骨組で対応している。塑性率は、応答が小さい範囲においては静的載荷時と同様の対応がみられるものの、塑性率が大きい範囲では対応性が悪くなり、塑性応

答や高次モードの影響があるものと思われる。

多層骨組のエネルギー応答性状についての検討も行ったが、地震動によって入力されたエネルギーのうち履歴で消費されるエネルギーの比率は、1 質点系の場合と同様に  $V_H/V_I \simeq 0.8$  という結果が得られた (1 次減衰定数 0.05 の瞬間剛性比例型減衰の場合)。また、多層骨組に対する地震動の総エネルギー入力は、初期周期が等しい等価 1 質点系によって概ね推定することができた。

第 4 章では、第 2 章の結果に基づき、地震動のエネルギー入力と構造物の繰返し応答を考慮した RC 造建物の耐震設計手法を示した。ここでは地震動の破壊力を総エネルギー入力スペクトルによって評価し、応答最大塑性率  $\mu$ 、または応答最大塑性率  $\mu$  とエネルギー塑性率  $\mu_e$  の両者を考慮した損傷指標  $D$  によって目標損傷レベルを与え、これに対応するような所要耐力をエネルギー応答に基づいて算定を行った。この手法によって求められた所要耐力は、繰返し応答計算によって求めた所要耐力に概ねよく対応しているといえ、1 自由度質点系に関しては有効な耐震設計手法である。

また、第 3 章で示した縮約 1 自由度系と多層骨組の対応関係 (それぞれの復元力とベースシア、塑性率と梁端塑性率) に基づき、梁降伏型 RC 造骨組の降伏ベースシア係数を等価 1 質点系の所要耐力から求める手法を示し、試設計骨組の応答評価を行った。想定した損傷レベルに対応するような耐震設計が精度よくできたとはいいがたいが、ひとつの手法の提案として、ある程度の成果は得られたものと考えている。

第 5 章は結論であり、各章の内容の総括と今後の検討課題を述べた。

以上が本論文の要旨であり、構造物の地震時エネルギー応答性状と、損傷を考慮した RC 造建物の耐震設計に関して基本的な考え方を示すことができたと考えている。

## 審査結果の要旨

地震動が構造物に及ぼす破壊力については、地動の最大加速度や最大速度で評価するのが一般的であったが、近年、瞬間的な破壊力と継続時間内の繰り返し効果の両面から捉えるためには地震動のエネルギー入力の観点から検討を行うことが有効であると考えられるようになった。しかし、その重要性にもかかわらず、鉄筋コンクリート建物を対象としての研究はまだ緒についたばかりであるのが現状である。

本論文は、鉄筋コンクリート建物の地震時挙動をエネルギー応答性状として検討し、その特性を明らかにするとともに、地震動の入力エネルギーを履歴と粘性減衰によって消費するメカニズムとして捉え、その破壊力を定量的に評価し、さらに、エネルギー的な観点より耐震設計を行う手法を提案したものであり、全5章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では1質点系モデルを用いて模擬地震動および国内外で観測された地震動に対するエネルギー応答の検討を行い、地震動入力エネルギーは、構造物の減衰及び応答最大塑性率に対して比較的安定していること、最大応答と繰り返し応答を関連づけるものとして定義された損傷パラメータも安定した指標であることを指摘している。また、粘性減衰と履歴によって消費されるエネルギーの割合を略算式で概ね推定できることも示している。

第3章では、多層の梁降伏型骨組と、それを縮約した1質点系での応答結果の比較検討を行い、縮約1質点系の応答値から多層骨組の復元力-変形関係及び部材塑性率を推定できることを示している。また、多層骨組のエネルギー応答性状も、等価1質点系により概ね推定できることを示している。

第4章では、地震動の破壊力をエネルギー入力スペクトルによって評価し、建物の目標損傷レベルを与えてそれに対応するような所要耐力を精度よく求める手法を提案している。この手法は縮約1質点系のみならず、多層骨組においても適用できることを明らかにしている。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文は鉄筋コンクリート建物を対象として、地震動に対するエネルギー応答を明らかにするとともに、目標損傷レベルを満足するような骨組をエネルギー的観点から設計する手法を提案したものであり、建築学及び耐震工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。