

氏 名	矢 花 修 一
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 5 年 9 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 61 年 3 月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	地震時のエネルギー授受に着目した非線形構造物の 応答推定に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 和泉 正哲      東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 杉村 義広

## 論 文 内 容 要 旨

構造物の地震時挙動を的確に把握することは、構造物の耐震設計を行う上で非常に重要なことである。特に、強地震動下における構造物の応答を把握し、さらに進んで耐震裕度解析や塑性設計を行っていくためには、非線形系の応答解析が不可欠となる。また、近年免震構造といった積層ゴムとダンパーの組み合わせによる免震装置で地震のエネルギーを吸収する構造物も盛んに建設されるようになってきており、非線形系の応答解析の機会は増加している。

しかし、非線形系の復元力特性には複雑なものが多く、そのモデル化は必ずしも容易ではない。また、復元力特性のモデル化は可能であっても、非線形応答計算においては時間刻みを細かくしたり、収束計算を行う必要があり、その数値計算にかかる時間は弾性応答解析に比べ、はるかに長くなる。今後、非線形応答の効果を一般設計へ取り入れていくためには、複雑でかつ計算コストのかかる時刻歴応答解析を行うことなく、簡略に非線形応答を推定できる手法が必要となるが、そのような手法はまだ一部しか実用化されていないのが現状である。

本論文では、ある時間内に構造物へ投入される地震エネルギーと構造物が消費するエネルギーは等しいという仮定に基づいた 1 自由度非線形構造物の地震応答推定法を提案し、その妥当性および適用性について検討することを目的とする。この応答推定法は、実験から得られる構造部材の復元力特性に関する情報のみを用いることで、与えられた地震動に対する最大応答値を予測でき、復元力特性の数学的なモデル化や非線形時刻歴解析を行う必要はなく、容易に非線形応答を求めることができる点に特徴がある。なお、地震時のエネルギー授受に着目したとき、構造物から地盤へ逸散

するエネルギーである逸散減衰を考慮しなければならない場合もあると考えられるが、ここでは地震システムのように地盤-構造物相互作用が小さい系を対象とし、逸散減衰の効果については無視する。

エネルギー応答に関する既往の研究では、ある時間内の地震エネルギー入力である瞬間入力エネルギーと最大応答変位との相関が良いことが明らかにされており、本論文では、その特徴を踏まえ瞬間入力エネルギーと系の吸収エネルギーを用いた応答推定の手順を示す。具体的には、ある地震入力に対する瞬間入力エネルギーをスペクトルの形で与え、そこに各変位での吸収エネルギーをプロットすることで両者が等しくなる交点を求め、その交点に対応する変位を最大応答変位とするものである。実際に応答推定をするにあたっては、物理的に考えられる複数の吸収エネルギーおよび瞬間入力エネルギーの定義を行い、それら組み合わせのうち最も応答推定精度の高いものを選び出すこととする。本応答推定法は等価線形化手法と類似する点もあるが、ある時間内でのエネルギー授受の釣り合いに着目した応答推定法はこれまでにはなく、非線形系の有用な解析手段となり得るものである。

本論文は以下の7章で構成されている。

## 第1章 序 論

本研究の背景と目的、本研究で提案する応答推定法の特徴ならびに論文の構成について述べている。

## 第2章 非線形応答とエネルギー応答に関する既往の研究

本章では、先に述べた本論文の内容に対応する非線形応答推定とエネルギー応答に関する既往の研究について概観し、本研究の特徴がどのような点にあるのかについて述べている。

簡略な非線形応答の推定法としては、エネルギー一定則、変位一定則といった経験則、Veletsos and Newmarkによる非線形応答スペクトル、等価線形化手法等があるが、それぞれの手法には適用範囲等に制限があり、複雑な非線形特性を持つ系に対しては適用できないことを述べている。また、エネルギー応答に関する研究としては、瞬間入力エネルギーと最大応答値との相関性に関するものはあるが、この特性を利用した応答推定法は提案されていないことを指摘している。そこで、本研究ではエネルギー授受の釣り合いに着目した応答推定法を提案することとし、その手法の特徴を既往の研究との対比により述べている。

## 第3章 エネルギーの釣り合いに基づいた非線形応答推定法

本章では、ある時間内での地震入力エネルギーと系の吸収エネルギーの等価性に基づいた非線形系の簡易応答推定法を提案している。

まず、応答推定法に用いる非線形系の吸収エネルギーと瞬間入力エネルギーについて、物理的に考え得る複数の定義を行い、瞬間入力エネルギーについてはスペクトル表示することを提案している。吸収エネルギーおよび瞬間入力エネルギーの評価時間としては、履歴特性の1サイクルおよび

1/4サイクルを用いており、特に1/4サイクルの評価時間を採用し、1/4サイクル瞬間入力エネルギーにおいては運動エネルギーを除いた定義を行ったことは本研究の特徴のひとつであると言える。ここで、既往の地震動ならびに人工地震動を用いて、瞬間入力エネルギースペクトルの特徴について検討し、1サイクル全瞬間入力エネルギースペクトル $S_{1m}$ と運動エネルギーを除いた1サイクル瞬間入力エネルギースペクトル $S_{1m}$ はほぼ一致し、1サイクル瞬間入力エネルギーを用いる際には運動エネルギーの考慮は必要ないという理論的推察が正しいことを確認している。また、同じく地震動を用いた検討から、瞬間入力エネルギースペクトルは速度応答スペクトル $S_v$ と全体的に良く対応し、特に、1/4サイクル瞬間入力エネルギースペクトル $S_{1m}$ は減衰定数が大きな範囲でも $S_v$ と良く一致することを示している。このことを理論的に考察するために、共振時の応答から瞬間入力エネルギースペクトルと $S_v$ との比を求め、その比が減衰定数の関数となり、両者の関係が上記のような特性を示すことを明らかにしている。

次に、上記の吸収エネルギーおよび瞬間入力エネルギーを用いた応答推定の手順について述べており、本応答推定法は変位 $\delta$ を順次大きくしながら、その変位 $\delta$ に対する吸収エネルギー等価速度と非線形系の等価周期 $T_{eq}(\delta)$ 、等価減衰定数 $h_{eq}(\delta)$ から求められる瞬間入力エネルギー等価速度を比較していき、両者が等しくなったときの変位 $\delta$ を最大応答変位の推定値とするものであることを述べている。具体的な解法としては、各変位レベルの復元力に関する情報がきめ細かく得られている場合に適した数値的解法と比較的情報が粗い場合や簡易に応答を求める場合に適した瞬間入力エネルギースペクトルを用いた図的解法の2つを提案している。

さらに、履歴型非線形系とそれに対応する等価線形系の応答の関係から本応答推定法の理論的位置づけについて検討し、本応答推定法はある時間内でのエネルギー授受の等価性を満たすように等価線形系の応答値に補正を加えながら非線形系の最大応答値を決定する手法であり、その補正係数の値は推定を行う際に陽にはあらわれないが、物理的に複数の定義が可能な吸収エネルギーと瞬間入力エネルギーの組み合わせ方によって決まることを明らかにしている。

#### 第4章 応答推定法の適用性に関する検討

本章では、第3章で提案した応答推定法を数値モデルによる地震応答解析結果へ適用し、最も応答推定精度の良い吸収エネルギーと瞬間入力エネルギースペクトルの定義を選定するとともに、本応答推定法の妥当性および適用性について検討を行っている。

バイリニア型復元力モデルを用いた数値解析結果と各吸収エネルギーおよび瞬間入力エネルギースペクトルを用いた応答推定値との比較から、1/4変位サイクル吸収エネルギー等価速度 $V_{eq}$ と1/4サイクル瞬間入力エネルギースペクトル $S_{1m}$ を組み合わせた応答推定法の精度が最も良いことを明らかにしている。この組み合わせによる応答推定法をハードニング型復元力モデル、線形・非線形弾性モデルに適用するとともに、入力地震動の位相特性の影響についても検討し、各種の非線形特性を持つ振動系および位相の異なる入力地震動に対しても本応答推定法が有効であることを示している。また、本応答推定法を適用する上での留意点として、完全弾塑性モデルのようにドリフトを起こしやすい系の応答推定には適さないこと、等価減衰定数が大きい系や応答領域では推定精度が

悪くなる場合があることを指摘している。

## 第5章 複雑な非線形特性を示す構造物の振動試験

本章では、提案した応答推定法の適用対象として、復元力特性が小振幅域でのソフトニング特性から大振幅域でのハードニング特性へと複雑に変化する免震システム振動試験をとりあげ、その概要および試験結果について述べている。振動試験の結果から、水平方向復元力特性は要素試験結果とほぼ一致すること、加振レベルが上がるに従ってロッキング振動の影響が応答に現れるが、応答変位に関してはその影響は少ないこと等の知見を示している。

## 第6章 複雑な非線形特性を示す構造物への応答推定法の適用

本章では、第5章で述べた免震システムの振動試験を対象に本研究で提案の応答推定法による推定値と免震要素の復元力特性を精粗いくつかにモデル化した時刻歴応答解析結果を比較・検討している。振動試験に提案した応答推定法を適用し、最大応答変位の推定値は試験結果と良く一致していること、また時刻歴応答解析値ともほぼ同等の推定精度が得られることを示している。最大応答加速度の推定値についても、せん断変形が卓越した振動では試験結果と比較的良く一致し、簡略なモデルによる時刻歴応答解析結果と同程度の推定精度が得られることを明らかにしている。ただし、本応答推定法の適用限界として、ロッキング振動が卓越する領域における最大応答加速度の推定精度については期待できないことを指摘している。

## 第7章 結 論

本研究で得られた知見をまとめ、本論文の結論を述べている。

## 審査結果の要旨

強地震動下における建築物の非線形応答を的確に把握することは耐震設計上重要であり、非線形応答による地震力低減効果を積極的に取り入れた免震建築物も近年設計されるようになったが、その際必要となる履歴型復元力特性を有する建築物のモデル化とその地震応答推定は必ずしも容易ではない。本論文は、復元力特性と関連づけた地震の瞬間入力エネルギースペクトルの概念を提案し、それと建築物の消費エネルギーの等価性に基づく1自由度非線形構造物の地震応答推定を簡易かつ高精度に行うための研究をとりまとめたものであり、全編7章からなる。

第1章は、序論である。

第2章では、地震時の建築物の非線形応答とエネルギー授受に関する既往の研究を概観し、これらと対比して本研究の立場と特徴を明確にしている。

第3章では、エネルギーの評価時間を履歴特性の1サイクルおよび $\frac{1}{4}$ サイクルとした瞬間入力エネルギースペクトルおよび非線形系の吸収エネルギーを定義し、それらの等価性に基づいた最大応答値の推定法を提案している。また、定義した瞬間入力エネルギースペクトルの特徴を速度応答スペクトルとの対比から理論的に明らかにし、さらに、履歴型非線形系とそれに対応する等価線形系の応答の比較から本応答推定法の理論的な位置づけを明確に示している。

第4章では、提案した応答推定法をバイリニア型復元力モデルによる地震応答解析結果に適用し、物理的に考え得る複数の吸収エネルギーおよび瞬間入力エネルギースペクトルの組み合わせの中で、 $\frac{1}{4}$ 変位サイクル吸収エネルギーと $\frac{1}{4}$ サイクル瞬間入力エネルギースペクトルによる応答推定法の精度が最も良いことを明らかにしている。また、この組み合わせによる応答推定法が各種の非線形特性を持つ振動系および位相の異なる入力地震動に対しても有効であることを示している。

第5章では、提案した応答推定法の適用対象として、免震システムの震動試験を行い、その概要と試験結果について述べている。免震システムの復元力特性は、小振幅域でのソフトニング特性から大振幅域でのハードニング特性へ複雑に変化することを、免震要素試験ならびに振動試験から確認している。さらに、ロッキング振動により加速度応答は上部構造の重心位置の高い場合ほど増大する傾向がみられる一方、変位応答へはその影響が顕著ではないことを明らかにしている。

第6章では、第5章で述べた免震システムの振動試験を対象に、提案した応答推定法による推定値と免震要素の復元力特性を精粗いくつかモデル化した時刻歴応答解析結果を比較し、本応答推定法の有効性および適用性について検討している。検討の結果、せん断変位が卓越した振動では推定値は試験結果と良く一致し、また精解の時刻歴応答解析値ともほぼ同等の推定精度が得られることを示しており、本応答推定法の適用に問題のないことを明らかにしている。

第7章は、結論である。

以上要するに本論文は、地震時において非線形応答を示す建築物の最大応答値を瞬間入力エネルギースペクトルを用いて簡易かつ高精度に推定する手法を提案し、その適用性および有効性を示したもので、建築耐震工学の発展に寄与するところがすくなくない。

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。