

氏名	齊藤大樹
授与学位	工学博士
学位授与年月日	平成2年3月28日
学位授与の根拠法規	学位規則第5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	構造物のランダム応答と耐震信頼性評価に 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	東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 和泉 正哲 東北大学教授 杉村 義広

論文内容要旨

怖いものといえば昔から「地震, 雷, 火事, おやじ」と相場は決っている。また, 「天災は忘れたころにやってくる。」という言葉もある。両方に共通するのはやはり地震であろうか。現実にはわが国では, これまでに多くの人命や財産が大地震により失われてきた。

地震は複雑な自然現象であるため, 将来の大地震がいつ起るのか, またそれはどのような姿(性質)をしているのかを正確に予測することは困難である。大地震はめったにやって来ないが, いったん来るとそれが及ぼす被害は甚大である。構造物を建てる際にも, その使用年間に一度は大地震の洗礼を覚悟しなければならない。

耐震工学の役割は, 過去の教訓を生かし, 将来の大地震から貴重な人命や財産を守ることにある。構造物の設計においても, 経済的・社会的な制約条件のもとに構造物に十分な耐震性をもたせる必要がある。

このような問題では, 被害予測, 評価, 対策というプロセスが重要になる。具体的には, 予想される地震動に対する構造物の応答を解析・評価し, そこで得られた知見を, 個々の構造物の設計あるいは一般の構造物を対象とした構造設計法の中に役立てていくことである。

しかし先に述べたように, 将来の地震動の予測には大きな不確実性が伴う。また構造物についても, その材料特性等の値には少なからずばらつきが存在する。構造物の地震応答を解析する際には, こうした不確実性を適切に考慮する必要がある。さらに, 構造物の安全性を検討するには, 応答が

非線形領域に及ぶ場合を考えなければならない。

不確定な事柄を解析的に扱おうとする場合には、確率論が有力な手段となる。実際、動的な入力地震動は確率過程としてモデル化でき、さらにこれを入力とする構造物の応答解析にはランダム振動論が利用できる。しかし、地震動のもつ複雑な特性をどのようにモデル化するか、また構造物の応答を具体的にどのように解析するかは難しい問題である。また構造設計においては一般に地震力は静的な水平荷重としてモデル化される。この場合、構造物の安全性は信頼性理論により解析できるが、安全確率の評価法や、確率論的な方法を耐震設計へどのように取り入れていくかなど、やはり多くの問題が残されている。

本研究の目的は、以上のような問題点を解決するための解析方法の開発である。以下、本論文の構成と研究内容および研究成果を述べる。

第1章 序 論

本研究の背景と目的および研究の方向と論文の構成について述べている。特に、入力地震動の設定 (INPUT) → 構造物のモデル化 (SYSTEM) → 応答の解析・評価 (OUTPUT) の連続した流れの中で問題を捉えることの必要性を述べている。

第2章 地震動の特性を考慮した構造物のランダム応答解析

地震動予測には大きな不確定性が伴うため、構造物の地震応答解析においても、入力とする地震動をどのようにモデル化するかは重要な問題である。本章では、入力地震動をある振幅特性と周波数特性を有する非定常確率過程としてモデル化し、これに対する構造物の応答を解析する方法を提案している。この方法は、応答解析の際に現れる複雑な畳み込み積分を再帰的に評価する方法であり、入力のパワースペクトル密度関数を有理関数近似することで適用できる。これにより、任意の振幅包絡形とパワースペクトル密度を有する地震動に対する構造物の応答評価が可能となる。また、この方法を離散時間で定義し直し、定常時系列モデルに確定関数を掛けた非定常時系列モデルに対する応答解析も可能にする。さらに、本解析法を1質点構造物に適用し、ある時間区分ごとにスペクトル特性が変化する非定常確率過程入力に対する応答を解析し、モンテカルロ法によるシミュレーション解析との比較から解析法の有効性を検討する。

本章は、(INPUT) → (SYSTEM) → (OUTPUT) の流れのうち、入力地震動の設定 (INPUT) について検討したものである。

第3章 不確定性を有する構造物のランダム応答解析

構造特性のばらつきが地震応答に及ぼす影響については、ばらつきに関する資料が十分でないことや、ばらつきを考慮した解析が非常に難しいことなどから、まだ十分には明らかにされていない。本章では、質量、剛性、減衰定数などにばらつきをもつ構造物の、ランダムな地震動に対する応答解析法を提案している。一般に、この問題は厳密な解を求めることは困難であるので、解析には近似解法である摂動法を用いている。本章で提案する方法は従来の摂動法が定常応答のみを対象とし

ていたのに対し、非定常の応答が求められる利点がある。さらに、構造物が骨組や非比例減衰系でも適用できるなど、一般性を有している。また、本解析法を3層のRC造平面骨組および1質点スウェイ・ロッキングモデルに適用し、シミュレーション解析と結果を比較することで解法の精度を確認している。本章は、(INPUT)→(SYSTEM)→(OUTPUT)の流れのうち、構造物のモデル化(SYSTEM)について検討したものである。

第4章 弾塑性構造物のランダム応答解析

構造物の耐震安全性を検討するには、地震時の応答が非線形域に及ぶ場合を考える必要がある。しかし、ランダムな地震動モデルに対する非線形形の応答を厳密に求めることは容易ではない。そのため、これまでに数多くの近似解法が提案されている。その中でも、Atalik and Utkuにより開発された等価線形化法は、精度と実用性の点で最もバランスのとれた解析法である。この方法は、これまでに種々の履歴モデルに応用されているが、扱える履歴モデルはまだ限られているのが現状である。本章では、Bilinear型履歴系に対して提案されている従来の等価線形化法を、RC部材のような剛性低下型履歴系に拡張する方法を提案する。本解析法は、パラメータを変えることにより剛性低下の割合を調節することができ、従来のBilinear型履歴系を含んだ定式化になっている。また、3種類の1質点剛性低下型履歴系に本解析法を適用し、シミュレーション解析との比較によりその精度を確認している。

本章は、(INPUT)→(SYSTEM)→(OUTPUT)の流れのうち、第3章と同様に構造物のモデル化(SYSTEM)について検討したものである。

第5章 構造物の耐震信頼性評価

現在、荷重のばらつきや構造特性のばらつきを考慮した確率論的な構造設計法への関心が高まっており、これはいわば、静的な確率入力を受ける不確定構造物の安全性評価の問題でもある。本章では、設計規範が、非線形関数の場合に安全確率を求める新しい解析法を提案している。この方法は、非線形関数との誤差の二乗平均を最小とするように線形化する方法であり、実用上十分な精度と簡便さを備えている。また、現在建築学会により提案されている終局型の耐震設計指針案を基本に、耐震設計法への信頼性理論の応用についても検討している。これは設計のプロセスを、大地震時に望ましい降伏機構を実現させるための降伏機構設計と、それを保証するための降伏機構保証設計に分ける設計手法であり、本章でもそれぞれの設計段階について信頼性理論を応用していく方法を検討している。

本章は、(INPUT)→(SYSTEM)→(OUTPUT)の流れのうち、応答の解析・評価(OUTPUT)について検討したものである。

第6章 結 論

本研究のねらいは、入力地震動(INPUT)→構造物(SYSTEM)→応答の評価(OUTPUT)の一連の流れの中で耐震信頼性という問題を捉えることであった。これはさらに、設計変更、防災計

画といった、さらなる流れへとつながっていくべきものである。そのねらいが十分に達成されたとは思われないが、そのためのいくつかの新しい解析法を提案できたことは大きな成果と考える。

本章では、本論文を総括し、そこで得られた主な研究成果を述べている。さらに、本研究に続く今後の研究の方向として、特に、(INPUT) → (SYSTEM) → (OUTPUT) の段階から設計変更、防災計画といった最適化の段階へ進む方向や、入力地震動や構造物モデルをより詳細とする方向について述べ、また構造設計法に信頼性理論を応用していく上での難しさについても触れている。

審査結果の要旨

構造物の耐震解析並びに耐震設計において、地震動や構造物の不確定性を適切に考慮することは極めて重要であるが、その方法に関する検討は十分になされているとは言えない。

本論文は、入力地震動や構造物特性のばらつきを考慮した弾性並びに弾塑性動的応答の解析及び構造信頼性の評価に関して、いくつかの新しい解析方法を提示したもので、全6章から成る。

第1章は序論であり、本論文の背景と目的について述べている。

第2章では、入力地震動を定常確率過程に振幅の非定常性を表す確定関数を乗じた非定常確率過程で表し、これに対する確定弾性構造物のランダム応答を、再帰的評価法を用いて、連続的及び離散的な時間領域で効率的に解析する方法を述べている。周波数特性の非定常性は、異なる特性の地震動波形の区分的接続により表現している。1質点系の非定常応答に関する本解析の結果とモンテカルロシミュレーションの結果は良く一致し、本方法の妥当性を示している。

第3章では、剛性、質量及び減衰等の構造特性にばらつきを有する系の、非定常ランダム地動に対する応答を、摂動法を用いて評価する方法を提示している。3層RC造平面骨組と、1層スウェイロッキング系について、質量、ヤング係数及び減衰を確率変数とした場合の共分散応答を本方法により求め、シミュレーション結果との対比から、良好な解析精度を有することを示している。

第4章では、RC造等に見られる剛性低下型の復元力特性をもつ構造物の非定常ランダム地動に対する応答を、統計的等価線形化法により求める方法を示し、弾塑性応答シミュレーションとの比較により、本方法の精度が優れていることを述べている。

第5章では、作用荷重及び構造耐力を確率量と考え、限界状態を表す関数が非線形関数の場合の構造信頼性評価を、統計的等価線形化法の考え方をを用いて行う方法を示している。また、RC造建物の終局型耐震設計プロセスに対して、様々な不確定要因を導入するための基本的な考え方を述べている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、入力地震動や構造物特性がばらつきを有する場合の構造物の応答特性評価に関して独創的な解析方法を提示し、それらの有効性を明らかにしたもので、建築学及び耐震工学の発展に寄与する所が少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。