

氏 名	藤 堂 正 喜
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 2 月 10 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 47 年 3 月 京都大学工学部建築学科卒業
学 位 論 文 題 目	確率パラメータを有する半経験的波形合成法 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

敷地が確定した重要構造物の耐震設計においては、構造物の耐用年間に発生が予想される地震動を精度高く想定する必要がある。このため地震の震源特性、地震波動の伝播特性および敷地周辺地盤による増幅効果等の要因を適切に評価した地震動のアンサンブルを作成するが、その手法の一つに地震学における断層の食い違い理論を基礎に、震源の破壊メカニズム、波動伝播特性、および敷地周辺の地盤特性を内包した、中小地震による観測記録を経験的なゲーリン関数として波形を合成する方法がある。

本論文では、この半経験的手法の基礎となる理論則および経験則を求め、断層破壊の特徴を反映しうる半経験的波形合成法を提案し、それを既往の強地震に適用して、シミュレーション解析結果を実観測記録と対比し妥当性を検証している。

本論文の構成は以下に述べるとおりである。

第 1 章では、研究の目的を述べるとともに、半経験的波形合成法に関する既往の研究を整理している。

第 2 章では、本論文で展開する半経験的波形合成法の基礎となる、断層パラメータの相似則と地震動スペクトルのスケールリング則について、既往の研究を整理するとともに強震観測記録の解析を行っている。

まず、多くの地震について決定された断層パラメータと地震モーメントの関係から、断層面積が

地震モーメントの $2/3$ 乗に比例し、最大すべり速度が一定といえる相似則があることを述べている。次に、断層すべり速度の空間的相関関数が地震動スペクトルに与える影響について検討し、すべり速度が空間的に相関がある場合には ω^{-3} モデルとなり高振動数で過小評価となるが、相関がない場合には高振動数のスペクトル振幅が地震モーメントの $1/3$ 乗に比例し地震規模の差が現れることを示している。また、岩盤における強震観測記録を用いた回帰分析結果と1979年インペリアルバレー地震の余震記録から推定した震源スペクトルについて、高振動数における地震動スペクトルのスケーリングの関係を検討し、 ω^{-2} モデルに基づくスケーリング則が有効である結果を得ている。

第3章では、本論文の主題である、断層の各要素から観測点に達する要素波間に相関性を表わす確率パラメータを導入した、 ω^{-2} モデルのスケーリング則に適合する波形合成法を提案している。さらにこの波形合成法を基本として、断層破壊の不均質性を表す方法、複数の小地震による地震動記録を用いる方法へと展開している。

本論文の波形合成法は、経験的グリーン関数として用いる小地震による観測地震動（要素地震動）を断層のすべり関数および断層面の差について断層の食い違い理論（Haskellモデル）に基づいて補正する際に、要素波間で振動数に依存した相関性が生じるように要素波のスペクトル上に確率変数を導入したことに特徴がある。この確率変数はコヒーレンス関数に相当する確率パラメータから決定されるもので、すべり関数のコーナー振動数を制御パラメータとして、各要素波が低振動数では完全相関、高振動数では無相関とした。すなわち、低振動数で大地震における平均最大すべりに対応するコヒーレントな関係、高振動数では小地震のすべり速度に対応するインコヒーレントな関係が要素波間にあることを考えている。この波形合成法に関する基本的なシミュレーション解析を行なって、確率パラメータはすべり速度に大きな影響を及ぼすこと、および遠方場における合成波は ω^{-2} モデルによるスケーリング則と良く対応するとの結果を得ている。これらは、提案した波形合成法の妥当性を示すものである。

さらに、断層内で異なっているすべり速度と立上がり時間の相対分布を表わすパラメータを導入することにより断層破壊の不均質性を表わす波形合成法、断層面を複数の副断層に分割し複数記録を要素地震動に用いる波形合成法を示している。これらの波形合成法において、本論文が提案する方法の特徴からスケーリング則に対する明確な拘束条件が示されている。

第4章では、1980年伊豆半島東方沖地震による3観測点の記録についてシミュレーション解析を行なって、提案した波形合成法の妥当性を検証している。

断層の一樣破壊による検討から、合成波の平均応答スペクトルは本震記録と差がみられる周期においてもほぼ合成波の変動係数である15~25%内の差であり、本震記録を良く表わす結果を得ている。次に、断層に近い川奈の記録について断層破壊の不均質性を考慮した検討を行って、一樣破壊では良くなかった加速度波形強度の経時変化に関する本震記録との対応が不均質性を考慮することによってほぼ再現した結果を得ている。ここで、一樣破壊、不均質破壊いずれも応答スペクトルは本震記録と良い対応を示したことから、平均的な意味での地震モーメントの関係が最も重要である

ことを指摘している。また、複数の要素地震動を用いた高田の記録に関する検討から、1記録のみを要素地震動とした結果と同等の精度が得られ、スケール則に対する拘束条件の適切さを示している。ここで、低振動数領域に要素地震動間でコヒーレンズが落ちているための影響が現れていたことから、複数の要素地震動を用いる場合には、要素地震動間の相関性についての吟味が重要であることを指摘している。

第5章では、複数の主断層からなる多重震源の地震の波形合成法、および高振動数で高いスペクトル振幅値となる地震のためのクラックモデルに相当する波形合成法を示し、それらの方法を1983年日本海中部地震による観測記録に適用している。

多重震源モデルの波形合成法は複数の独立なイベントを考えたもので、各イベントに3章の波形合成法を適用している。ここで、 ω^{-2} モデルの場合より高振動数で高振幅となる地震にも対応できるように割増率を含む拘束条件を設定している。さらに、それと等価なモデルである、マルチクラックモデルに相当する波形合成法を示している。

上記の波形合成法を適用して、南側に高振動数で振幅が高い主断層がある2つの主断層とした1983年日本海中部地震による記録のシミュレーション解析を行なっている。2観測点における合成結果は不老不死の一部にやや差があったが、加速度波形の経時変化、応答スペクトルともに本震記録と良い対応をした結果を得ている。次に南側の主断層のみによる地震動について、割増率のある方法、クラックモデルに相当する方法、および ω^{-2} モデルに基づく方法による波形合成を行って、設定した方法のスケール則から予想されたように応答スペクトルは前2者がほぼ同じであるのに対し、 ω^{-2} モデルによる方法では周期1秒以下でかなり小さな結果となることを示している。

第6章では、まず米国の強震観測記録における上下動と水平動の加速度応答スペクトル形状の関係について検討している。次に、上下動については無視し得ない場合もあるP波も考慮した波形合成法を示し、その方法を1979年インベリアルバレー地震による観測記録に適用している。

米国強震動については、11地震による比較的近距离の61記録を用いて減衰定数5%の加速度応答スペクトル形状について検討している。まず、個々の記録の加速度応答スペクトルが大きな値となる周期領域の中心周期を加速度フーリエ振幅スペクトルから定めている。得られた上下動と水平動の中心周期を比較すると、上下動が水平動よりも短周期である記録が多く、それらの比は平均で0.61である。加速度応答スペクトルを最大加速度と中心周期の両者で基準化した上下動と水平動の加速度応答スペクトルの平均スペクトルはほぼ同じ形状のスペクトルとなり、それらのピーク値が約2.7である結果を得ている。この上下動と水平動の中心周期の関係に関連して、深層からの鉛直アレー観測記録に対する重複反射理論と波線理論を適用した検討を行い、地表付近の上下動にはS-P変換波が影響していること、すなわち震源からのP波による地震動はもちろんのことS波到達後についても上下動は表層地盤内におけるP波伝播の影響を強く受けていることを指摘している。

次に、3章において提案した方法からP波の影響を考慮した波形合成法を用いて、1979年インベ

リアルバレー地震による5観測点における記録のシミュレーション解析を行なっている。合成結果には本震記録との差異が一部みられたが、エルセントロアレー#6 (A06)の結果を除けば、P波の影響が大きい上下動の加速度波形を含め上下動と水平動ともに合成結果は概ね本震記録の特性を表せている。一方、A06を含む14観測点の最大値の距離減衰の検討から、本震ではA06周辺に短周期で比較的高い振幅を有する震源からのP波が到達して、A06では地表近くの地盤との一種の共振状態となって大振幅の上下動を呈した可能性があることを指摘している。最後に、上下動のP波部とS波部の合成結果を検討し、両者の応答スペクトルは短周期まで比較的類似のスペクトル形状で水平動のスペクトル形状とは異なっており、前述の上下動に及ぼすSP変換波の影響が認められている。

第7章では、本研究による成果をまとめている。

審査結果の要旨

敷地が確定した重要建造物の耐震設計においては、建造物の耐用年間に発生する強地震動を精度高く想定する必要がある。このため地震の震源特性、地震波動の伝播特性および敷地周辺地盤による増幅効果等の要因を適切に評価し地震動のアンサンブルを作成するが、その手法の一つに中小地震による観測記録を要素波形とし、これを経験的なグリーン関数と考えて波形を合成する方法がある。本論文は、理論則と経験則に基づく半経験的波形合成法に対する研究結果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、断層パラメータの相似則と地震動スペクトルのスケーリング則について既往の研究を整理するとともに強震観測記録の解析を行っている。この結果、円振動数オメガの二乗モデルに基づくスケーリング則が有効であり、断層すべり速度の空間的相関がある場合には低振動数領域で、ない場合には高振動数領域で上記スケーリングに適合することを示している。

第3章では、第2章の考察に基づいて、断層の各要素から観測点に達する要素波間に相関性を表す確率パラメータを導入し、オメガ二乗モデルのスケーリング則に適合する波形合成法を提案している。この波形合成法を用い基本的なシミュレーション解析を行い、確率パラメータがすべり速度に大きな影響を及ぼし、合成波が目標のスケーリング則と良く対応することを示した。さらにこの波形合成法を基本として、断層破壊の不均質性を表す方法、複数の小地震による地震動記録を用いる方法へと展開している。

第4章では、1980年伊豆半島東方地震による多観測点記録のシミュレーション解析を行い、提案した波形合成法の妥当性を検証すると共に、要素波形として1記録及び多記録を用いた場合の精度を検討し、多記録の場合の波形間の相関性吟味の必要性を指摘している。

第5章では、複数の主断層からなる多重震源の地震の波形合成法、および高振動数で高いスペクトル振幅値となる地震のためのクラックモデルに相当する波形合成法を示し、それらの方法を1983年日本海中部地震による観測記録に適用し妥当性を確認している。

第6章では、まず米国の強震観測記録における上下動と水平動の加速度応答スペクトル形状の関係について検討し、上下動が水平動よりも短周期で卓越している記録が多く、アレー観測記録からその特徴がSP変換波の影響であることを示している。次に、上下動では無視し得ないP波も考慮した波形合成法を示し、この手法を1979年インペリアルバレー地震による観測記録に適用してSP変換波の影響が表現し得ることを示し、また手法の妥当性を検証している。

第7章は結論である。以上要するに本論文は、建築物の耐震設計に当たり必要とされる設計用強地震動波形のアンサンブルを、数多く観測される中小地震の波形記録を用いて精度高く作成する手法を提案し、検証したもので、建築学、殊に建築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。