

氏 名	佐 藤 俊 明
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和63年10月12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57年3月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻 前期2年の課程修了
学 位 論 文 題 目	三次元薄層要素と軸対称有限要素のハイブリッド法を用いた断層モデルによる理論地震動の作成とその応用に関する研究
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 東北大学教授 平沢 朋郎

論 文 内 容 要 旨

近年、超高層ビル・免震構造物等の固有周期の長い構造物が建設されるにともない、耐震工学上、周期1～20秒程度の地震動の評価が重要となってきた。この周期帯域は、地震学の分野で理論的検討が行われる地震動よりも短周期側にある。一方、耐震工学の分野では加速度計記録に基づいた統計・経験的検討が行える周期よりも長く、「やや長周期地震動」と呼んで短周期地震動と区別している場合がある。

地震動の性質は、震源特性・伝播特性・局所的な地形や地盤の増幅特性の総合効果として表現されるが、特に、やや長周期地震動を理解するためには、震源から観測点までの広範でかつ深さ数百mから十数kmの深い地下構造に関係した波動伝播特性や、堆積平野や盆地規模の局所的な地盤の増幅特性の把握が重要となる。これに関する理論的研究は、水平多層媒質中の実体波や表面波の波動伝播性状に対しては地震学の分野で精力的に行われているが、不規則媒質に対しては遅れている。また、工学の分野では、単一の平面実体波と特定の入射角を仮定して、理想化された二次元や軸対称三次元の不整形な堆積平野・盆地内の波動の増幅について検討したものがほとんどで、震源からさまざまな伝播経路を経て平野・盆地へ到達する入射波動に対する検討はほとんどなされていない。このように、やや長周期地震動は、地震学と工学との学際領域に位置しており、十分な検討がなさ

れていない領域でもある。

このような状況を背景として、本論文の第一の目的は、やや長周期地震動を対象として、断層から観測点までの波動伝播性状を忠実にモデル化するという観点に立ち、半無限水平多層と仮定される伝播経路の地下構造ばかりでなく、観測点近傍の局所的な地盤構造も評価可能で、実体波と表面波の両者が同時に考慮できる断層モデルの新しい数値計算手法を提案することにある。第二の目的は、単純な断層運動と詳細な媒質モデルを用いて、観測された個々の地震動特性および地震動の平均的特性のシミュレーションを行い、提案した計算手法の有効性を示し、やや長周期地震動における地下構造の影響を理論的に検討することである。その際に、工学の分野ではほとんど研究されていなかった震源から伝播経路を経て生成された入射波動の検討も含めて、局所的な地盤構造による地震動の増幅特性の検討も行うものとする。

なお、本論文で「やや長周期地震動」という用語で指し示す地震動は、周期1秒から20秒の帯域の地震動を意味するものとする。

本論文は全編7章より構成されている。

第1章 序 論

本章では、本研究の背景・目的、本研究に関連する既往の研究に関する成果と問題点、および本研究の特色、本論文の概要について記している。

第2章 運動学的断層モデルの解析理論

本章では、本研究で提案した理論地震動の計算手法について述べている。

まず、断層面上のくいちがいと等価な力系の複双力が点震源に作用することによって観測点に生ずる変位を、Green関数の相反性を利用して、観測点に作用する単力によって震源に生ずる歪として表現する方法を記している。次に、運動学的断層モデルで用いるGreen関数を、三次元薄層要素と軸対称有限要素を結合させて数値的に振動数領域で計算する方法を記述している。さらに、断層面を点震源で代表される要素断層の集合として離散化し、移動震源効果を取り入れる方法を記している。

本論文で提案する断層モデルの計算手法の特徴は次の二点である。第一点は、運動学的断層モデルで用いるGreen関数を、三次元薄層要素と軸対称有限要素とを結合させて数値的に振動数領域で解いていることである。三次元薄層要素は従来、耐震工学の地盤構造物系の動的相互作用問題の分野で開発された水平多層媒質における遠方場の表現が容易な半解析的手法であるが、地震学の理論地震動の分野では用いられていない手法である。この方法は、表面波と実体波の両者が同時に考慮できるため、表面波が卓越する遠距離地震ばかりでなく、実体波が卓越し、また実体波と表面波が混在する近距離地震にも適用できる利点を有している。第二点は、半無限要素と有限要素等のハイブリッド法によって求めたGreen関数の相反性を利用して理論地震動を計算することにより、遠方場の断層震源の表現と同時に、地震動に大きな影響を及ぼすと考えられる観測点近傍の局所的な地盤構造を有限要素等で容易に表現できることを示したことである。この考え方は完全な三次元間

題へも適用できるものである。

本論文では、提案した手法を Thin Layer Finite Element Method, 略して T L F E 法と呼ぶものとする。従来の理論地震動の計算手法は、半無限水平多層媒質に対するものが大半で、遠方の断層震源と三次元的な観測点近傍の局所的地盤構造が同時に考慮できるこのような手法は今までにはほとんど例がない。したがって、T L F E 法は、やや長周期地震動特性の定量的な把握にとって大きな意義があるものと考えられる。

第 3 章 既往の手法との比較による解析理論の検証

本章では、まず、半無限一様媒質を対象として、T L F E 法と波数積分法による理論地震動との比較を行い、解が実用上十分な精度を確保するための媒質の離散化の条件について検討している。その結果、要素分割長さは、従来からよく知られているように、S 波の最短波長の約 $1/6$ 以下にする必要があることを指摘している。また、粘性ダンパーを付けるモデル底面の深さは、実体波がモデル底面の粘性ダンパーで吸収されずに反射する影響を防ぐには、震源と観測点を結ぶ波線経路において、モデル底面への実体波の入射角が約 45° 以上となる位置に設定すること、表面波を表現するためには、考慮する最大周期の Rayleigh 波の深さ方向の振幅分布において、最大振幅の約 $1/5$ 以下の振幅となる深さ、あるいは Rayleigh 波の波長の約 $1.2\sim 1.3$ 倍以上の深さにモデル底面を設定する必要があることを指摘している。なお、深さとともに硬くなる現実的な多層媒質の場合には、層境界で反射される波が増え、相対的にモデル底面へ到達する波が少なくなること、表面波の振幅は浅いところほど大きくなることより、半無限一様媒質に対する条件よりも緩和されるものと考えられる。

次に、半無限水平三層媒質を対象として、T L F E 法と Apsel の波数積分法による理論地震動の比較を行っている。その結果、両者の解は非常に良い一致を示しており、半無限水平多層媒質に対して T L F E 法の理論地震動の妥当性を確認している。

第 4 章 近距離地震の地震動のシミュレーション

本章では、1980年伊豆半島東方沖地震（気象庁マグニチュード $M_j 6.7$ ）の際に、震央距離が $10\sim 40$ km 程度の震源近傍の 3 観測点で得られた加速度記録を 2 回積分した $1\sim$ 数秒の変位波形を対象とし、実体波が卓越し、また、実体波と表面波が混在する近距離地震の観測記録のシミュレーションを行っている。この地震の断層位置や断層パラメータに関しては多くの研究があるが、海底下で起こった地震のために、その推定値はかなりの幅を持っている。一方、伊豆半島周辺は、深部までの地下構造がわが国で最も詳細に調査されている地域のひとつである。

このような状況のもとに、媒質を詳細な水平多層構造でモデル化し、単純な断層破壊を仮定して断層面を 20 個の点震源に分割したモデルを用い、その走向や傾斜角を既往の研究の推定値の範囲内で変化させ、観測波形の主要動部分がシミュレートできることを示すと同時に、観測波形を最も良く再現する断層の走向、傾斜角および地震モーメントを推定している。さらに、断層面を 200 個の点震源に分割したモデルについても計算し、20 分割モデルの結果と比較している。それによれば、

本解析では20分割モデルと200分割モデルでは主要動部分はほとんど変化しないが、後続波は200分割モデルの方がかなり小さくなることが示され、理論地震動と断層面の分割数との関係を十分に確認して解析する必要があることを指摘している。

これらの結果から、中規模の近距離地震の場合、周期1～数秒の周期帯域では、単純な断層破壊を仮定しても、地下構造を詳細にモデル化することにより、複数観測点の観測波形の主要動部分が理論的に比較的良く説明できることを明らかにし、実体波の卓越する地震動に対するT L F E法の適用性について示している。

第5章 遠距離地震の地震動のシミュレーション

本章では、表面波が卓越する遠距離地震に対して、観測点近傍の地盤条件が大きく異なる近接2地点の観測記録のシミュレーションを行っている。ここで対象とした記録は、1961年北米濃地震($M_J 7.0$)の神戸と大阪の気象庁一倍強震計記象であり、主に2～20秒の周期範囲について検討している。神戸、大阪とも方位、震央距離(約200km)はほぼ同じであるが、大阪の記象は神戸のそれに比べて振幅が大きく、継続時間がかなり長い。これは大阪気象台が大阪盆地の厚い堆積層上にあり、花崗岩質の六甲山のふもとの神戸とは地盤条件が大きく異なるためと考えられる。

まず、神戸の観測記象は、震源と観測点間の平均的な半無限水平多層構造に対する理論記象で説明できることを示すとともに、表面波の基本モードが支配的であることを明らかにしている。

次に、大阪気象台の近傍を堆積層を含む地下構造を用いた軸対称有限要素で、その外周を先に設定した平均的な水平多層構造を用いた三次元薄層要素でモデル化することによって、大阪の地震動のシミュレーションを試みている。これより、堆積盆地を考慮したモデルによる理論地震動は、振幅が増幅され、大阪の観測記象の主要動部分をシミュレートできるが、従来の水平多層媒質による理論地震動は堆積層を考慮した場合でも振幅レベルが小さく、観測記象を説明できないことが明らかとなり、媒質のモデル化に当たって、平野・盆地規模の地下構造を適切に評価することの重要性を指摘している。さらに、非定常スペクトル、位相の傾き T_{gr} の平均値、表面波の理論分散解析によって、波動伝播性状について論じている。

これらの結果より、表面波が卓越する地震動に対してT L F E法が適用できることを確認するとともに、観測点近傍の局所的な地盤構造が表現できるT L F E法の有用性を観測地震動のシミュレーションを通して示している。これまでに、遠方の断層震源と三次元的な観測点近傍の局所的な地盤特性の両者を同時に考慮した理論地震動によって実際の観測地震動をシミュレーションした例はほとんどなかったことから、ここで得られた結果は非常に興味深いものと考えられる。

第6章 堆積盆地の大きさとやや長周期地震動の増幅特性との関係

本章では、日本の大域的な地下構造モデルとして、堆積層が無い水平多層構造モデルと盆地の大きさが異なる3つの堆積盆地構造モデルを設定し、それらに対する3～20秒の周期帯域の理論地震動を計算して、堆積盆地の大きさとやや長周期地震動の増幅特性との関係について検討するとともに、多数の観測記録の統計解析から得られている日本各地の“揺れやすさ係数”との対応関係につ

いても論じている。

はじめに、震源と観測点の相対的な位置と卓越する波動との関係を、非定常スペクトル、位相の傾き T_{gr} の平均値、表面波の理論分散解析によって理論的に検討し、堆積盆地への入射波動と考えられる水平多層構造モデルの岩盤上の地震動において、直下の地震の場合には実体波、遠方の浅発地震の場合には表面波が優勢となることを示している。さらに、堆積盆地が存在することによって発生する二次的な波についても理論的に考察しており、異なる媒質が接する場合の表面波の波動伝播について、ある特定の限られた周期帯域が、入射側の構造に対しては i 次モードの Love 波のエアリー相に、透過側の構造に対しては j 次モードの Love 波のエアリー相に対応し、かつ入射側媒質で i 次モードの Love 波が励起される（震源深さに依存する）場合には、その特定の限られた周期帯域においては、入射側媒質の i 次モードの Love 波から透過側媒質の j 次モードの Love 波への変換が卓越する可能性を指摘している。

次に、理論地震動の最大値の岩盤上の値に対する堆積盆地上のその値の比（増幅倍率）を用いて、震源位置との関係もふまえて、堆積盆地の大きさとやや長周期地震動の最大変位の増幅倍率との関係について検討している。その結果、堆積盆地の大きさと最大変位の増幅倍率との関係は、直下の地震の場合、直達実体波の部分で最大変位が決まっており、その増幅倍率は堆積盆地の大きさよりも堆積層と基盤との波動インピーダンス比に支配されるのに対し、浅い遠方の地震の場合には堆積盆地で励起された二次的表面波でその最大値が決まっており、堆積盆地の大きさによる影響が顕著であることを明らかにしている。また、堆積盆地の大きさと周期 3～6 秒の理論地震動の帯域波形の最大値との関係は、観測記録から統計解析的に求められた周期 1～6 秒程度の“揺れやすさ係数”（岡田・鏡味，1978）の大阪と東京の値の相違（両地点は盆地規模が異なる）とも整合することを示している。

最後に、岩盤上の理論地震動に対する堆積盆地上のそれらの周期 3～20 秒間のフーリエスペクトル比（増幅倍率）を用いて、堆積盆地の大きさと増幅倍率の周期依存性との関係を検討している。その結果、直下の地震の場合、卓越周期は鉛直入射した平面 SH 波の重複反射によるものとほぼ対応するが、増幅倍率は盆地形状による二次的な後続波の焦点効果のために平面 SH 波の重複反射による結果と比べ最大で 2 倍強も増幅されることを明らかにしている。一方、浅い遠方の地震の場合には、卓越周期は堆積盆地内部の地下構造に対する Love 波のエアリー相と良く対応し、堆積盆地によって励起される二次的表面波と密接な関係があることを明らかにしている。また、浅い遠方の地震に対する周期 3～20 秒の理論地震動から計算した堆積盆地の大きさと増幅倍率の周期依存性との関係が、盆地規模が異なる大阪と東京の観測記録から求められた周期 3～15 秒の“振幅係数”（Mamura, Kudo and Shima, 1984）とも整合することを示している。これらの結果から、観測事実から求められたやや長周期地震動の増幅特性の地域による著しい相違が、堆積盆地の大きさによって励起される二次的表面波のエアリー相が異なることと密接に関係していることを指摘している。

観測点近傍の局所的な地盤構造とやや長周期地震動の増幅特性との関係を、このような理論地震動を用いて定量的に検討した例はこれまでに見当たらない。したがって、ここで得られた知見は、やや長周期地震動の地域的な特性を把握するために有意義な情報を与えるものと考えられる。

第7章 結 論

本章では、本論文で得られた成果、知見を要約している。

審査結果の要旨

長周期構造物の耐震設計に重要な周期約1秒から20秒の“やや長周期地震動”の評価は、理・工学の学際領域にあり未だ十分な検討がなされていない。本論文では、震源から観測点至るやや長周期地震動に支配的な地下構造が考慮できる地震動解析手法を提案し、堆積盆地構造等における波動の伝播・増幅特性を明らかにしたもので、全7章よりなる。

第1章は序論であり、既往の研究を整理し、本論文の立場を明確にしている。

第2章では、従来、地盤・構造物系の動的相互作用の分野で用いられてきた三次元薄層要素と軸対称有限要素の結合解法によって得られたグリーン関数の相反性を利用して理論地震動を計算する地震動解析手法を提案し、この手法が断層震源、媒質の水平成層性、および観測点近傍の局所的な地盤構造を同時に考慮できる利点を有することを示している。

第3章では、半無限一様媒質および水平多層媒質を対象として、本手法と波数積分法による理論地震動との比較を行い、解が実用上十分な精度を確保するための要素分割長さ、粘性ダンパー付きモデル底面深さの設定位置等の媒質の離散化の条件を明確にしている。

第4章は、本手法を近距離地震に適用するために、実地震として1980年伊豆半島東方沖地震を選び、震源近傍で観測されたやや長周期地震動が本理論により明確に説明し得ることを明らかにし、実体波の卓越する地震動に対する本手法の適用性を確認している。

第5章では、遠距離地震として1961年北美濃地震を選び、硬質地盤上の神戸および堆積盆地の上の大阪におけるやや長周期地震動を解析的に求めて観測記録と対比し、表面波が卓越する地震動に対する本手法の適用性を確認するとともに、観測点近傍の地盤構造がやや長周期地震動に及ぼす影響の重要性を明らかにしている。

第6章では、日本の大局的な堆積盆地構造モデルを設定して理論地震動を計算し、波動の伝播・増幅特性を定量的に明らかにするとともに、本解析の結果が多数の観測記録から統計・経験的に求められた日本各地のやや長周期地震動の増幅倍率をよく説明することを示し、堆積盆地の大きさならびに形状が増幅倍率と密接に関係している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、震源から観測点至るやや長周期地震動に支配的な地下構造を考慮し得る理論地震動の計算手法を提案し、堆積盆地等鉛直・水平両方向に変化する媒質構造におけるやや長周期帯域の波動の伝播・増幅特性を明らかにしたもので、建築構造学ならびに耐震工学に寄与するところが少なくない。

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。