

氏名	栗田哲 <small>くり た さとし</small>
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和 62 年 3 月 25 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	アレー観測記録に基づく地盤中における地震波の波動伝播特性に関する研究
指導教官	東北大学教授 和泉 正哲
論文審査委員	東北大学教授 和泉 正哲 東北大学教授 平井 和喜 東北大学教授 柴田 明德

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

近年, 建築構造物の解析技術は急速に進歩をとげ, 従来経験の上に微小の変化を与えつつ着実にしかし遅々としたペースで進歩を続けてきた構造設計技術も, この進歩した解析技術をもとに未経験の構造物を大胆に設計する方向へと変化してきた。しかしながら, 入力として与えるべき荷重外力の精度は依然として低く, 構造物の解析精度との間に著しい不均衡を生じており, 一面において解析精度を生かしきれない不経済な設計を強いられると共に, 他面においては入力設定の誤りから危険な構造物の出現の可能性も危惧されている。特に, 地震国である我が国では, 殆どの構造設計において地震荷重が最も大きな影響を与えるにも拘らず, 入力としての地震動は, 未だその性格の概要の一部が明らかにされているに過ぎない。もちろん, 地震動の特性を解明するために, 各地で地震動のたゆみない観測が続けられ, かつ多くの研究が発表されている。しかし, 観測される地震動は, 数十～数百km離れた震源で発生した地震波がその距離を伝播しかつ地表近くの複雑な地盤中で反射・屈折を繰り返した波である。このような長い伝播過程において, 地震波は不確定な諸要因の影響を受けてきている。特に, 耐震工学で問題となる地震動の短周期成分は, 表層地盤構造の影響を強く受けているため, 極めて複雑な特性を有するものと考えられ, その特性は十分には把握されておらず, 建築構造物の入力地震動の精度を高める上での大きな障害となっていた。

本論文では, 多数個の地震で観測された数多くのアレー地震動記録を統計的に扱う相関解析を導

入し、表層地盤における地震波動伝播に関する統計的性質を明らかにすることを目的としている。本論文で定義する相関解析とは、第4章から第6章までに展開したアンサンブル平均で与えられる相互相関関数またはクロススペクトルを用いた解析手法を総て含む。従来における地震波の伝播特性の研究は、個々の地震に対して観測点間の伝達特性を考察することが中心であり、波動伝播に関する統計的性質を解明しようとする研究は、データ数が限られていたことや解析手法の未熟さ等の理由により、全くと言ってよいほどなされていなかった。よって、本論文では、一般に用いられている相関解析手法を地震動波形解析に適用できるように改良・発展させた方法を提案し、この手法により精度の高い情報が抽出可能であることを実証的に明らかにし、これを効果的に用いることによりバラツキを含めた地震波動伝播の現象の把握を試みる。

第2章 地震動記録に基づく地震波動伝播特性に関する既往の研究

本章では、現在耐震工学で多用されている重複反射理論に基づく波動伝播特性に関する研究、この理論では説明不可能である地震動の方向性と表面波に関する研究、耐震工学の研究分野で始められたアレー地震動記録に基づいた地震波動伝播特性に関する研究を概観・整理し、解明されていない地震波動伝播に関する問題をまとめると同時に、本論文の立場を明らかにしている。

第3章 アレー地震観測

本章では、本論文で使用した地震動記録を観測したアレー観測場所における地震計配置及び地盤調査に基づく地盤構造について5アレー地震動観測場所毎に述べ、第4章から第6章までの統計解析に用いた多数個のサンプル地震動記録の地表最大加速度および、地震諸元について述べている。

第4章 相互相関解析に基づく地震動の時間遅れと波動伝播時間

本章では、地震動に関する研究分野にて殆ど適用されていなかった、個々の地震で観測された地震動記録をサンプル記録とみなした相互相関解析を導入し、観測点間の地震動の時間遅れと地盤調査結果に基づく実体波の伝播時間との関係について調べ統計的に抽出される地震波動伝播特性について検討を行っている。

個々の地震毎に推定した相互相関係数と本論文で導入した統計解析手法により推定した相互相関係数の比較検討を5観測場所毎に行った結果、個々の地震の相互相関係数に数多くのピークが存在しサンプル地震動記録の有する周期特性が現れているのに対し、統計解析に基づく相互相関係数では波動伝播に関する重要な幾つかのピークのみしか存在しないことを実証的に明らかにしている。鉛直観測点間のこのピークの時間遅れまたは相互相関係数の偶関数と奇関数のピークの時間遅れは、P-S検層結果に基づく実体波の鉛直入射波と地表面で反射した波の伝播時間（水平動成分はS波の伝播時間、上下動成分はP波の伝播時間）と極めてよく一致していることが認められ、この反射波の伝播時間を自己相関係数の第二のピークの時間遅れからも検出できることを示している。統計解析により、地震波が下方から入射し地表面で反射している波動伝播現象を抽出でき、かつ個々の地震の解析では捉えることが困難であった反射波の存在を検出できたことはこの解析手法の有効性

を表しているといえる。観測点間距離が 100 m 付近以下の水平観測点間のピークの時間遅れは、観測点近傍における地盤の速度構造による波の伝播時間差であることを明らかにし、常時微動記録に基づく相互相関解析結果の考察からもこのことを確認している。しかし、水平観測点間距離が 500 m 程度である場合、記録波形間の相関が低く、多くの雑音が波形に混在しているために相互相関解析からの波動伝播現象の把握が困難であることが示されている。

第 5 章 1 次元波動伝播現象

本章では、1 入出力系を仮定しクロススペクトル法に基づく統計解析により、鉛直または水平の伝達関数を各地震動の方向成分毎に推定し、振動数領域での地震波の波動伝播現象並びにコヒーレンスに基づく相関性について検討している。

鉛直観測点間における水平動成分の推定伝達関数は、P-S 検層結果に基づく 1 次元成層 S 波地盤モデルのそれと比較検討した結果、伝達関数の振幅特性のみならず、波動伝播問題で重要な位相遅延時間、群遅延時間を含めた位相遅れ構造について、このモデルと推定値の間に定性的一致がみられた。しかしこの定性的一致にもかかわらず、コヒーレンスは、地盤の固有振動数付近で極端に低下する現象がみられ、この振動数領域で相関を有しない成分が多く地震動記録に含まれていることを明らかにしている。水平動成分と同様に上下動成分に関しても、推定伝達関数は 1 次元成層 P 波地盤モデルの伝達特性と定性的一致し、かつコヒーレンスと地盤の固有周期との関係がみられるが、推定伝達関数の固有周期は長周期側にずれる傾向を有していることを実証的に明らかにしている。このことから、上下動成分にも P 波成分以外の波動成分が含まれている可能性を指摘できる。

同程度の距離だけ離れた鉛直観測点間と水平観測点間のコヒーレンスを比較した場合、低振動数領域さえも水平観測点間の方がはるかにコヒーレンスが悪い、すなわち、相関性がないという現象が前章の結果と同様に見られる。このことから、水平観測点間では、互いに相関のない成分が多く混入する可能性が大であることを振動数領域で裏付させている。この現象は、低振動数領域において地震動の振幅スペクトル特性は水平観測点間ではほぼ類似していることを考え併せると、水平観測点における地盤構造の違いを考えれば、地振動の振幅特性ではなく、地震波動の位相特性がその地盤構造の影響を受けやすいと指摘できる。

コヒーレンスに関する考察として、地震動を振幅と位相に分け、振幅コヒーレンスと位相コヒーレンスを算出した結果、位相コヒーレンスが実際の地震動のコヒーレンスとよく対応しており、振幅コヒーレンスは極めて相関性の高いものが得られた。この結果も、地震動の振幅特性ではなく地震動の位相特性が地盤構造の影響をより受けやすいことを指摘している。

これらの結果及び現象は、振動数領域での地震波動伝播現象の把握に統計解析が有効であることを裏付けるものである。

第 6 章 3 次元波動伝播現象

地震動の 3 成分はなんらかの連成関係を有しながら伝播しており、同成分のみの伝達関数やコヒーレンスに関する前章の検討では、地盤中の地震動の運動方向の変化などの伝播特性は引出すこと

が困難である。したがって、本章では、地震動の3成分を入力と出力とした3入力3出力システムを考え、伝達関数やコヒーレンスの考察をしている。また、これに付随して回転スペクトル特性とその伝達特性の考察も行っている。

この結果、地震波は各成分が独立に伝播するのではなく、各成分が互いに連成関係をもちながら伝播している様子を実証的に明らかにしている。このことは、前章の上下動成分のところでも述べたように、地震動が伝播する過程において、ある波動成分が他の成分を発生させる可能性のあること、例えば、入射したP波が地表面や層と層の境界面で反射S波を発生させている現象に対応すると指摘できる。なお、地盤の深さ方向に対する地震動の運動方向の変化に関しては、地震動の主軸の空間的な分布においても現われており、その存在を確認している。

第7章 結 論

本章では、各章で得られた結論を要約し、本論文の結論を述べている。

審査結果の要旨

地震国の我が国では耐震構造物に関する研究ならびに技術開発が進んでいるものの、外乱として想定すべき地震動については、未だ性格の一部が明らかにされているのみであり、これが耐震工学分野の発展上大きな障害となっている。

筆者は、地盤内鉛直または水平方向に多数の地震計を配置して得られたアレー地震観測記録を統計的に処理し解析することにより、地震動の表層地盤内における伝播特性を明らかにすることを試みて来た。本論文はその成果を取り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、表層地盤近傍における波動伝播に関する既往の研究を整理し、問題点を抽出し、本論文の立場を明らかにしている。

第3章では、地盤構成、地盤条件、地震計配置、その他のアレー観測群の条件と解析に使用した多数個の地震諸元ならびに地震記録の諸特性について述べている。

第4章では、地震記録をサンプル記録とみなして相互相関解析を導入し、観測点間の時間遅れと地盤調査に基づく実体波の伝播特性を時間領域において解析し、統計的に抽出された地震波動伝播特性の検討を行っている。この結果、従来、個々の地震記録の解析では捉えられなかった地表面からの反射波を明確に検出して、表層鉛直方向の伝播機構を明らかにしている。

第5章においては、1入出力系を仮定し、クロススペクトル法を用いて鉛直ならびに水平成分の地震波の波動伝播現象を周波数領域で解析し、1次元成層モデルの解と対比検討している。この結果、両者の定性的一致にも拘らず、上下動に関してコヒーレンスが地盤の固有振動数付近で低下し、推定伝達関数の固有周期が長周期側へずれる現象を捉え、また水平アレー観測結果の解析と合わせ、地震動特性のうち、振幅特性よりも位相特性が、地盤構造の影響を受け易いことを見出している。

第6章においては、これらを3次元問題へと拡張し、回転スペクトル特性を併せ求め地盤の伝達特性を検討している。前章と合わせ、地層の傾斜や、波動の地盤内における屈折・反射により発生する異種成分の影響を考察し、表層地盤の構造とそれを媒体とする地震波動の伝播機構を論じている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、表層地盤中における地震波動伝播について、アレー観測資料を基に解析して、その特性を明らかにしたもので、建築学ならびに耐震工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。