

地震記録に基づく表層地盤の非線形応答に関する研究

学位論文内容の要旨

強震観測記録は、しばしば表層地盤の非線形応答の影響を受けている。これは、強震動による大ひずみにより、軟弱な表土では入力地震動に対する動力学的な応答特性が線形で近似できる範囲を大きく外れ、非線形化することによるものである。この非線形化は、土質動力学分野でサンプルを用いた室内実験により詳細に調べられている。その成果によれば、地盤内のひずみレベルが大きくなるにつれて応力-ひずみ関係が線形から外れ、剛性率が低下し減衰が増大する。非線形応答が起こった際の強震データでは、減衰の増大により特に数 Hz から 10Hz 以上の高周波数帯域のレベルが大きく低下する。

このため、非線形応答を考慮に入れずに強震動予測を行うと、高周波数成分、最大加速度(PGA)が著しく過大評価となることがある。特に非線形応答の影響を受ける大加速度の強震動は、シナリオ地震による被害予測のためにも重要な部分である。そこで、強震動予測に非線形応答の影響を組み込む必要があるが、このとき用いられる等価線形手法や逐次法は、ある程度詳細な地盤物性値を必要とする。しかし、強震動シミュレーションが行われる強震観測点では大抵地盤情報が乏しい。また、被害予測のための面的な強震動予測に非線形応答の影響を組み込むには、最低でも表層の面的な(三次元)速度構造が必要となる。現在、表層地盤について日本全国をカバーする面的な情報としては表層地質メッシュデータがあるが、表層の速度構造については、ボーリングデータが高密度に得られている大都市圏などでようやく作成され始めた程度である。こうした中、表層土質など簡単な地盤情報から非線形応答の程度を大まかにでも見積もれる手法を開発できれば、大いに力を発揮するものと思われる。

従来、地震記録を用いた非線形応答解析は、ボアホール観測点の記録を用いて行われる。強震動記録の S 波部分について、地表水平動のスペクトルを地中水平動のスペクトルで割ったスペクトル比(地表/地中スペクトル比)は表層地盤の S 波応答特性を示しており、これが弱震時から変化していれば非線形応答が起こったということがわかる。当然ながら、この手法は地表記録しかない観測点では用いることができず、K-NET などそういった観測点で得られた大加速度の記録については、非線形応答の詳しい解析はこれまで行われずにきた。そうした中で、Wen *et al.*(2006)は地表/地中スペクトル比に代わり、強震記録の S 波部分の水平動と上下動のスペクトル比(S-H/V スペクトル比)を用いる手法を提案した。これは地表のみの観測記録にも用いることができるという長所がある。

本研究では、この S-H/V スペクトル比が非線形応答を調べる手段として従来の地表/地中スペクトル比と同様に有効であることを確認した。まず、東北地方前弧側の KiK-net ボアホール観測点で得られた多数の強震動記録について、地表/地中スペクトル比と S-H/V スペクトル比を計算し、それらと弱震時との比を調べた。その結果、強震時には地表/地中スペクトル比の高周波数側が大きく落ち込む記録が数多くみられ、非線形応答がひろく起こったことが確認された。これにより、非線形応答は特殊な事例ではなく、強震記録の多くが非線形応答の影響を受けていると考えるべきことが示

された。また、S-H/V スペクトル比は地表/地中スペクトル比と同じ高周波数帯域で同程度の落ち込みを見せた。これらスペクトル比について、さらに弱震時と強震時の比をとると、特に高周波数帯域での落ち込みの部分で両者はほぼ一致した。次に、一次元重複反射理論を用いてモデル構造から S-H/V スペクトル比を計算し、等価線形手法を用いて S-H/V スペクトル比の非線形応答時の振る舞いをシミュレートすると、観測記録と同様の変化がみられ、理論的な裏づけが得られた。以上より、非線形応答を調べる手段として S-H/V スペクトル比が有効であることが確かめられた。この S-H/V スペクトル比を用いれば、非線形応答解析を行えるデータ数を大幅に増やすことができる。

次に、非線形応答の定量的指標 DNL(Degree of Non-Linearity)を提案した。DNL は地表/地中スペクトル比または S-H/V スペクトル比について、強震時と弱震時の差を周波数領域で足し上げた量と定義した。多数のデータについて恣意性を排除して計算を行う意図で、足し上げを行う領域は一律 0.5-20Hz とした。まず、観測データについて S-H/V スペクトル比から得られた DNL は、地表水平動 PGA と明らかな相関を示した。次に、理論的に計算された S-H/V スペクトル比から得た DNL は、入力地震動のレベルおよび表層地盤でのひずみレベルが上がるにつれ大きくなるという結果になった。この理論的に得られた DNL について、入力地震動の PGA に対する地表の波形の PGA の比(PGA 増幅率)の線形応答時からの低下との比較を行った。その結果、DNL が大きいほど PGA 増幅率が低下するという傾向が見られた。特に、高周波レベルの低下がピークシフトより卓越する場合、表層地盤パラメータ(層厚、S 波速度、土質)に関係なく、PGA 増幅率の低下と DNL が一意に対応した。この関係を用いれば、強震データについて S-H/V スペクトル比とその DNL さえ得られれば、地盤情報がまったくなくても PGA 増幅率の低下を定量的に見積もることが可能である。

最後に、2003 年宮城県沖地震(Mw7.0、深さ 72km、スラブ内地震)について経験的グリーン関数(EGF)法を用いて波形合成を行った。震源モデルには浅野・他(2004)がやはり EGF 法によって求めたものを用いた。その結果、浅野らと同様に地表水平動 PGA のみについて過大評価が目立った。この PGA 過大評価の程度を DNL と比較すると、観測 PGA の大きいサイトで PGA が過大評価になることが多く、またそういった点では DNL の値も大きいという結果になった。つまり、DNL の値が大きく、非線形応答の度合いの強い観測点で PGA が過大評価となるという傾向がみられた。特に DNL が 5 を超える記録では PGA は概ね 2 倍の過大評価となった。このことは、強震動予測結果の PGA 過大評価の程度を DNL を用いて評価できることを示している。この DNL を用いた手法の利点は、震度計のような地盤情報のない強震動記録について波形合成を行った際にも用い得ることである。

以上を示した S-H/V スペクトル比および DNL を用いることにより、ボアホール観測点に限らず、多数の強震観測点でとれた大量の強震データについて非線形応答解析を行うことを可能にした。ひとつのサイト、強震データについて詳細な非線形応答を行う従来の研究に対し、大雑把にはなるが、広汎なサイトについて大量のデータを蓄積できる。こうして得られる大量の事例を用いて、例えば土質ごとの非線形応答の傾向などを統計的に調べることができるようになる。その結果、経験的な関係式が得られれば、強震動予測の際に土質ごとに大まかに非線形応答の影響を加味することができるようになる。面的な強震動予測などで表層のデータが土質しかないという場合には、こういった手法が力を発揮すると思われる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 山 順 二

副 査 教 授 池 田 隆 司

副 査 教 授 蓬 田 清

副 査 教 授 笠 原 稔

副 査 教 授 笹 谷 努 (工学研究科)

学 位 論 文 題 名

地震記録に基づく表層地盤の非線形応答に関する研究

大地震の強震観測記録は、しばしば表層地盤の非線形応答の影響を受けている。非線形応答が起こると減衰が著しく増大するため、特に強震記録の高周波数成分が弱震時に比べ大きく低下する。本研究では、東北地方前弧側の KiK-net ポアホール観測点で得られた強震動記録について、地表水平動記録のスペクトルと地中のそれとの比(地表/地中スペクトル比)を弱震時の比と比較して調べた。その結果、強震時には地表/地中スペクトル比の高周波数側が大きく落ち込んでいる記録が数多くみられ、地中のスペクトルは地盤の非線形応答の影響を大きく受けていないと考えられるので、表層のスペクトルが地盤の非線形応答を強く受けていることを定量的に明らかにした。

さらに同じ強震記録について地表水平動成分と地表上下動成分のスペクトル比(S-H/V)をとり、弱震時の比と比較すると、地表/地中スペクトル比と同様の変化を示すことを見出した。地表/地中とS-H/Vのスペクトル比について、さらにそれぞれ弱震時と強震時の比(強震/弱震スペクトル比)をとると両者のスペクトル構造はよく似ており、S-H/Vスペクトル比が地表/地中スペクトル比と同様に非線形応答を調べる手段として有効であることが確認された。ポアホール観測点は限られているが、地表での強震観測は数多く存在し、地盤の非線形応答を定量的に評価する新しい道を切り開いたことになる。

次に、強震/弱震のスペクトル比から非線形応答の定量的指標DNLを提案し、これが地表水平動のPGA(地表最大加速度)および表層S波速度と相関を持つことが示された。また、等価線形手法とPropagator Matrix法を用いて、水平多層の地盤モデルから、理論的に地表/地中およびS-H/Vスペクトル比を計算する新しい手順を開発した。その結果、非線形応答を仮定して計算された地表/地中およびS-H/Vスペクトル比は、実際の強震観測記録と同様の変化を示し、S-H/Vスペクトル比の有効性が新たに開発した理論から裏付けられた。S-H/Vスペクトル比の変化から計算したDNLは、PGA増幅率の低下と高い相関を示し、DNLが非線形応答によるPGA増幅率の低下を定量的に測る指標として用い得る可能性を示した。

最後に、2003 年宮城県沖地震 (Mw7.0, 72km, スラブ内地震) について、経験的グリーン関数 (EGF) 法を用いて波形合成を行った。その結果、地表の水平動成分に非線形応答によるとみられる PGA の過大評価が目立った。この過大評価の程度を DNL と比較すると、DNL が 5 を超える記録では PGA は概ね 2 倍程度の過大評価となり、強震動予測結果の PGA 過大評価の程度を DNL を用いて評価できる可能性を示し、地盤の非線形効果を取り入れた、より現実に近い強震動予測法を開発することができた。

以上のように野口科子提出の論文は、従来限られたボアホール地震観測でのみ評価が可能であった地盤の非線形応答の研究を飛躍的に押し進める新しい手順を開発し、それを裏付ける計算理論を確立した。よってこの論文は博士論文（理学）として、十分に値するものである。