

学 位 論 文 題 名

Simultaneous Synthesis of Static
and Dynamic Motions Near a Fault System

(断層近傍における静的及び動的変位の同時合成)

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

1995年の兵庫県南部地震などに見られるように、断層近傍の強震動分布は断層上の滑り分布や断層の折れ曲がり、地殻の層構造などによって複雑な分布を示す。近年、地震観測網やGPS基準点の整備によって、このような面的な観測から詳しい断層破壊の様子を再現することが可能となってきた。GPSや水準点などの測地データと地震計のデータを組み合わせて震源過程を探るジョイントインバージョンのような新しい取り組みも行われている。特にGPSによる観測は観測機器、解析法の発展により周期1秒程度までの超長周期地震計として使用できる可能性もでてきた。しかし、そういった広帯域のデータが入手可能となってもそれらを説明するための理論は未だに地震波などの動的震動と静的変位(永久変位)で別々に扱われる。特に測地データを説明するための理論は半無限媒質を用いる場合が多く、得られた結果は地震記録から得られたものと異なることもある。そこで本研究では、本来動的震動を合成するための手法である離散波数法において、静的変位まで正確に合成するためのパラメータについて議論を行う。

離散波数法については、層構造も含めて動的波動の合成のための理論的研究が多く行われている。しかし、それらの研究ではごく低周波まで考慮されているものの、静的変位である0Hzにおける計算については詳しい議論がなされていない。離散波数法は波数積分によって本来球面波の地震波を平面波の足しあわせで表現するが、周波数0の場合には最も静的変位の精度に影響を及ぼすと考えられる、波数の最大値をどこにするかという基準が全くない。本研究では、まず半無限媒質における静的変位の解析解を利用して静的変位のみ波数スペクトルを求め、その振幅の収束の様子から波数積分の打ちきり値を決定した。また水平波数が0の場合についても静的変位への影響についての議論を行った。ここまでの議論から、積分を行う最大の波数は各周波数でP波の波数の4倍、もしくはその値が4(1/km)よりも小さい場合は4とし、波数0の場合は特別なポテンシャルを用いることでほぼ半無限媒質の静的変位の解析解と等しい解が得られることが分かった。

また我々は、有限断層を扱う場合には、水平方向の波数が0の場合に特別な形のポテンシャルが必要となることを示した。波数の水平成分が0とは、垂直に伝播する波(VTSE)を表している。VTSEの波形への寄与は観測点によらず一定で、特に静的変位への寄与が大きい。震源から遠い観測点ほど相対的に波形が大きくゆがむ。また、断層の有限性の効果により厳密に水平波数を0とする代わりに 10^{-5} 程度の大きさでも等しい結果が得られる。このことから、波数の増分最低値限度は 10^{-5} と考えてよい。

次に、上記のことを考慮に入れて作成した数値計算コードを用いて、断層近傍の強震動について断層のジオメトリと破壊の伝播様式の影響を調べた。断層面上での滑り関数を階段関数として、単純な1枚の断層のsingle fault model、4つのセグメントに分割したstick slip

model、さらに兵庫県南部地震の際に淡路島に現れた野島断層の野外調査から得られた km 以下のスケールの滑り分布と断層のジオメトリを参考にした野島断層モデルについて最大速度の分布を比較した。野島断層モデルはさらに滑り関数が階段関数のもの (dislocation model) とクラック状に滑らかに滑るモデル (crack model) の2種類について比較した。1 Hz 程度までの低周波数領域では、断層に直交する、最も振幅の大きい成分にはすべてのモデルでその分布に大きな違いが見られなかったが、断層に平行な成分には断層の屈曲の影響によってスポット的な狭い範囲に直交成分に匹敵する大きさの振幅が観測された。セグメンテーションによって生じる高周波数成分によって、2 Hz 以上の周波数では最大速度分布はモデルによって大きく異なる。また、crack model と dislocation model で比較すると、2 Hz 以下の周波数で、断層直交成分を上回る大きさをもった断層に平行な成分の速度が観測された。同時に静的変位も計算し各モデルについて比較すると、stick slip model と Nojima fault model では断層のセグメント長程度の波長の静的変位の変動が見られたが、crack model と dislocation model との間には大きな違いは見られなかった。これらのことから静的変位まで含めた比較的低周波数では断層のセグメンテーションや折れ曲がりによる影響が大きく、高周波側ではさらに断層の破壊の様式による効果も加わる。周波数の領域の区切りは主に各セグメントのサイズと破壊伝播速度によって決まる。

最後に、1枚の表層を入れた場合の静的変位への影響について調べた。離散波数法への水平成層構造の導入は容易に行える。本研究では strike-slip、dip-slip それぞれについて垂直な断層と 45° 傾いた場合について、地表面での静的変位を半無限媒質の場合に比較した。断層が層境界よりも深い場合は、表層の厚さが厚いほど、また断層と層境界の距離が近いほど、静的変位が増幅される。静的変位の波長は無限大と考えると、数キロメートル程度の表層には影響されないとされていたが、実際は 1 km 程度の厚さの表層でも半無限媒質の場合に比べて変位量が増幅されることが分かった。これは、周波数ゼロの静的変位であっても波数の足しあわせで表現されるため、大きい波数の成分はちょうど表面波のように地表面付近に集中するためである。断層が層境界のすぐ下にある場合、層厚が 2 km の場合に比べ 5 km の時は増幅率が約 1.5 倍であった。ところが断層が層境界を切る場合には、全体のモーメントリリースが小さくなるために半無限媒質の場合の変位に近くなる。これは地震波の振幅がこのような場合でも増幅することと対照的である。垂直な断層の場合には、すべりの方向に係わらず全体的に静的変位が大きくなるため層構造を無視してインバージョンを行うと、断層面上の滑り量や断層の深さの見積を誤る可能性が大きいことを指摘した。傾いた strike-slip 型の断層では、変位の最大値をとる点が震央方向 (断層の浅い部分から遠ざかる方向) にずれる。Dip-slip 型では、最大値の位置は変化しないが、変位の増幅率が最大値付近よりも数キロ程度離れた部分で最大になる。これらの結果から、断層が傾いている場合半無限媒質を用いたインバージョンでは断層の傾きの見積を誤る可能性があることを指摘した。

以上をまとめると、離散波数法を用いて動的変位と同時に静的変位を正確に求めるために幾つかのパラメーターの取りうる値を決定し、層構造などの変位場への影響について議論した。複雑なジオメトリを持つ断層系近傍では、比較的低周波領域の最大速度分布は断層系の形状に大きく依存する。このことから野外調査から得られる断層の形状は断層近傍の強震動予測に対して重要であることがわかる。また、1~2 km 程度の薄い表層によっても静的変位は増幅されることが示された。このことは、断層の形状と同様に地表面付近の構造が断層近傍での変位場を理解する上で重要であることを示す。

学位論文審査の要旨

主査	教授	蓬田	清
副査	教授	小山	順二
副査	教授	笠原	稔
副査	助教授	森谷	武男
副査	助教授	笹谷	努

学位論文題名

Simultaneous Synthesis of Static and Dynamic Motions Near a Fault System

(断層近傍における静的及び動的変位の同時合成)

地震動を理論的に再現する為の研究は、古くは20世紀初頭から行われ70年代以降は計算機の発展に伴って幾つかの数値計算手法が開発されてきた。その中でも離散波数法は各種震源や層構造が比較的容易に導入できるため、現在でも幅広く使用されている。また、観測データにおいては90年代以降GPSのように全く新しい技術が登場し、これまで別々に観測されてきた地震波による動的変位と断層のずれによる静的変位が同時に観測できるようになりつつある。

しかし、そういった広帯域のデータが入手可能となっても、それらを説明するための理論は未だに地震波などの動的震動と静的変位（永久変位）で別々に扱われる。そこで本論文では、動的震動を合成するための手法である離散波数法において、静的変位まで正確に合成するためのパラメータについての議論をまず行っている。

離散波数法によって静的変位に対応する周波数0の計算を行う場合、最も精度に影響を及ぼすと考えられる、波数の最大値をどこにするかという基準がこれまではあいまいであったが、本論文では独創的な手法を用いて種々の断層形状にも妥当な値を得た。また、有限断層の場合、垂直に伝播するS波が静的変位に対して非常に大きな影響を与えることを示し、同時に波数の増分の最小限度の値を具体的に述べている。

これらの成果により、合成波形と新しい高速サンプリングGPSデータや高品質強震動記録とを静的変位まで含めて直接比較することができるようになり、断層破壊についての新たな知見を得ることを可能にしたことは高く評価できる。

さらに上記の成果を実際の数値計算に適用し、断層近傍での変位について考察を行っている。野島断層の現地調査によって得られたkm以下のスケールでの滑り量分布を参考に、折れ曲がりや細かいセグメントをもつ断層モデルについて断層近傍の最大速度分布と静的変位の計算を行った。その結果、低周波数領域、特に建築物の倒壊につながる1Hz付近より低周波側では最大速度の分布は断層のジオメトリに強く影響されることが分かった。地震による災害予測を行う上で、破壊の伝播の様式やアスペリティの分布だけでなく、直接観測できる地表断層のジオメトリ及び滑り分布によって最大速度分布が大きく影響されることを示した

ことは重要である。

断層の破壊過程のインバージョンを行う場合、地震動だけでなく GPS などの測地データも使用されることが多くなってきたが、これまでは半無限媒質を仮定してきた。静的変位は地殻の層構造にはほとんど影響されないと考えられているからである。本論文では表層がある場合の動的及び静的変位への影響を示した。その結果、2 km 程度の薄い層でも静的変位は増幅され、層構造の影響は無視できないことを示した。これは動的変位の場合と同じ構造を用いて静的変位を計算することの重要性を示すもので、実際に非常に大きな静的変位が観測された Chi-Chi 地震をみても、その断層運動を解明する上でこの表層の影響は極めて重要であると考えられる。

これを要するに、著者は、離散波数法によって静的変位まで含めた広帯域の波形を得るための手法を開発し、測地及び地震学的観測データと直接比較しうる波形合成を可能にした。これは測地学、地震学および地質学などの広範な観測データを融合させ、地球物理学に新たな知見をもたらす可能性がある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。