

経験的グリーン関数と焼きなまし法を組み合わせた震源過程の逆解析

Inversion method for seismic rupture process using simulated annealing with empirical Green's function

芝 良昭[1], 植竹 富一[2]

Yoshiaki Shiba[1], Tomiichi Uetake[2]

[1] 電中研, [2] 東京電力・耐震技術G

[1] CRIEPI, [2] Seismic Design Gr., TEPCO

1. はじめに

我々は、既往の研究（芝、2002）において経験的グリーン関数法による波形合成法の枠内で、局所的応力降下量や立ち上がり時間といった微視的な震源パラメータを未知数とした震源過程の探索法を提案し、1997年伊豆半島東方沖地震（Mj5.7）の強震記録に適用することにより、その妥当性を検討した。逆解析法の構築においては、高周波地震動の予測・評価に適した経験的グリーン関数法の特長をそのまま生かせるように、要素地震の重ね合わせの際に畳み込み積分される補正関数（Irikura, 1986）の振幅と継続時間を未知数とし、非線形方程式として定式化をおこなった。このとき、補正関数の振幅は本震と要素地震の局所的応力降下量の比に、また継続時間は立ち上がり時間の比にそれぞれ相当する。また解の探索には、組合せ最適化問題の大域的探索法として知られている焼きなまし法（SA: Metropolis et al., 1953; Ingber, 1989）を用いた。SAはGA（遺伝的アルゴリズム）と同様にヒューリスティック解法の一つであり、微分係数を必要としないために目的関数の選択の自由度が大きく、またアルゴリズムの構築が比較的容易であるという利点をもつ。一方で最適解を得るために多くの計算量を必要とする点や、劣悪解（一致度の低い解）を受容する確率を決定する温度と呼ばれる制御パラメータの設定に恣意性が高い点などが解決すべき課題として挙げられる。

本報では、これらの課題に対して改良点を提案するとともに、同手法を海溝型地震である1987年福島県沖群発地震のうち、M6.5以上の地震群に対して適用し、結果の検討をおこなう。

2. 手法の改良

焼きなまし法では、解空間の各要素を順に変化させて目的関数を計算し、観測値との適合度判定を繰り返すことから、目的関数の計算時間、すなわち経験的グリーン関数法による波形合成の時間を短縮することにより、全体の計算時間の短縮が期待できる。このため、2回目以降の目的関数の計算では、前回計算された合成波に対しパラメータを変動させた部分の要素地震のみを入れ替えることで新しい目的関数を合成するよう、アルゴリズムを変更した。その結果、伊豆半島東方沖地震の解析事例において、全体の計算時間を約6割短縮させることができた。

また、同じく伊豆半島東方沖地震の解析において、解パラメータの変化に対する目的関数の変化量として定義される感度を評価した結果、補正関数の振幅の感度は継続時間の感度に比べて十倍程度高くなることがわかった。このため、焼きなまし法のオプションの一つである、継続時間の探索に対する温度冷却の速度を相対的に遅くする再焼きなまし（re-annealing）を適用したが、得られた解には通常の焼きなまし法による結果と大きな違いが見られなかった。また目的関数において卓越周期が長い変位波形に重みをつけることにより、補正関数の継続時間に対する感度の向上が期待できる。しかしながら、工学的により重要な場合が多い加速度波形や速度波形の再現性を重視するという立場もあり、利用目的により選択されるべきであると考えられる。

3. 1987年福島県沖群発地震への適用

プレートの沈み込み帯で発生する海溝型地震に対して強震記録を用いた波形インバージョンをおこなう場合、観測点の配置が陸側に偏り、また理論的グリーン関数の計算においては地震波伝播媒質の横方向不均質性を考慮に入れる必要があるなど、困難な点が多い。我々の手法では、経験的グリーン関数の利用により、少なくとも後者の問題は解決が可能であると考えられる。1987年福島沖群発地震では、福島県の海岸付近に設置された複数の観測点で多数の良好な強震記録が得られており、Takemura et al. (1993)により震源スペクトルのコーナー周波数の空間分布や規模依存性についての検討がおこなわれている。ここではMが6.5以上の3地震について震源インバージョンをおこなった。経験的グリーン関数として用いる要素地震には震源が近いM5.0から6.1の地震記録を選んだ。またインバージョンに用いた観測点数は5点~7点である。Takemura et al. (1993)ではM6以上の地震の震源スペクトルが複数のコーナー周波数を持ち、理論的な均質震源モデルと一致しないことを指摘しているが、本研究では要素地震は全て均質震源モデルに従うものと仮定し、Andrews (1986)の客観的手法によりコーナー周波数と地震モーメントを決定した。断層の破壊伝播速度を固定した予備的なインバージョン解析では、観測波形の振幅レベルや継続時間が概ね良く再現されており、今後は震源スペクトル解析結果との比較をおこなうなど、さらに検討を進める予定である。