

(76) 動的破壊モデルによる断層破壊過程のインバージョン解析

京都大学防災研究所 ○澤田 純男
京都大学防災研究所 土岐 憲三

まえがき

最近では強震動予測を行なう場合には、入倉手法¹⁾に代表されるような経験的グリーン関数重ね合わせ法が用いられることが多くなってきている。これらはKinematic modelと呼ばれ、断層面上の応力などを考慮することなく破壊伝播や震源時間関数を与えている。しかしながらこの手法は断層面上のバリヤやアスベリティを考慮することにより、予測される地震動に大きな影響を与えることが知られているが、バリヤやアスベリティを合理的に設定することが難しい。一方バリヤやアスベリティは、岩石の強度、剛性、摩擦等のパラメータに深く関係しており、これらの力学パラメータから直接地震動を評価できる動的破壊モデル (Dynamic rupture model) を用いた震源過程の解析結果が現在までに数多く報告されている。例えばMiyatake²⁾は差分法を用いた解析結果を示した。またToki and Sawada³⁾は3次元有限要素法を用いて逆断層の断層破壊過程のシミュレーションを試みた。

断層面の強度分布等を論理的に求めるためには、実際に観測された記録を用い、インバージョン解析を実施する必要がある。Kinematic modelを用いたインバージョン解析を行ない、断層面上のすべり量分布や破壊フロント等を求めた研究結果は数多く報告されており、断層運動の詳細が明らかにされつつある。しかしながら、断層面上の強度分布等を直接求めるためにはDynamic rupture modelを用いたインバージョン解析が必要であるが、インバージョン解析を行なうには、フォーワード解析を繰り返し実行する必要がある。上述したDynamic rupture modelを用いた手法は計算時間が膨大であるためインバージョンに用いることが事実上できなかった。本研究ではKinematic modelの計算によく用いられる重ね合わせの考え方をDynamic rupture modelの計算に応用して、1回のフォーワード解析に必要な計算時間を極端に減らすことにより、Dynamic rupture modelを用いたインバージョン解析を実施した。

解析手法

断層面上のある点の応力履歴は、図1に示すように、地震前の応力 (初期応力 σ_i) から徐々に応力が増加して、ついに破壊強度 σ_y を越え応力が $\Delta\sigma_d$ 降下してすべりを起こし、残留応力 σ_r に落ち着くという挙動を示すと考えられる。Dynamic rupture modelの解析法は、断層面上の σ_i 、 σ_y 、 σ_r を仮定し、上述の現象をシミュレートすることにより、断層面上の破壊伝播や食い違い量の成長を表現する。このような解析を行なうのに、ジョイント要素を導入した非線形有限要素法や断層部分に非線形の効果を導入した差分法などが用いられる。実際の計算例ではほとんどの場合3次元計算が行なわれるため、膨大な計算時間が必要であり、例えばToki and Sawada³⁾では、41x31x17のモデルを400ステップ解くのに533MFLOPSのスーパーコンピュータで12時間を要していた。したがって、フォーワード計算を何回も繰り返さなければならないインバージョン解析は事実上困難であった。

本研究では、フォーワード計算に必要な計算時間を極端に減らすことが可能なアルゴリズムを開発した。すなわち、多くのDynamic rupture modelの解析法は、非線形計算を行なっているのは断層面上のみであり、断層のまわりの岩盤部分は線形計算を行なっている。したがって、線形計算の部分は重ね合わせができるから、断層面上の1点に単位のステップの偶力を加えた時の断層面上での応力の時刻歴応答 (グリーン関数) と観測地点での時刻歴応答を有限要素法などで一度計算しておけば、このグリーン関数を重ね合わせるにより、仮定した断層面の応力場に対する断層破壊過程が計算できることになる。この場合釣り合い条件は断層面上だけでよいので、基本的に2次元の計算量で済む。ある地点の観測波形は、断層破壊過程が計算された後、Kinematic modelと同様に地表面でのグリーン関数を重ね合わせれば求めることができる。これらの手順を図2に示す。

また、本研究では、力を作用させる点は1点だけであるので、最初からそのジョイント要素のばねを設定しないことにより、修正ニュートンラプソン法の収束計算を実施せずにジョイント要素の非線形計算を行なうこととした。

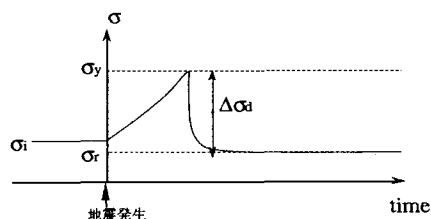


図1 断層面上の応力履歴

表1 計算時間の比較

手法	計算時間
従来の非線形FEM	約 1800分
グリーン関数の計算	約 180分
本手法 (重ね合わせ)	約 2分

このようなアルゴリズムを開発した結果、1回のフォワード計算に必要な計算時間を飛躍的に減少することが可能となった。IBM RS/6000-550による必要な計算時間を比較すると、表1に示すように約1/900の計算時間で計算できることがわかった。

非形最適化アルゴリズムは、Jackson and Matsu'ura⁴⁾を用いた。この手法を適用するために、目的関数の数値微分を計算することから、最適化変数が m 個の場合1回の解の改善に $2m+1$ 回のフォワード計算を必要とする。後述するモデルのインバージョン解析を行なう場合、1回のフォワード計算が2分で終了しても、1回の解の改善に最適化変数は16個の場合約1時間、最適化変数は32個の場合約2時間必要である。

解析モデル

解析に用いたモデルの概観を図3に示す。ストライクスリップ断層を 40×20 個の1辺1kmの四辺形ジョイント要素でモデル化し、その周辺の地殻を、 $40 \times 20 \times 19$ 個の1辺1kmの立方体要素でモデル化している。地表面（モデル上面）以外は粘性境界として反射波の発生を抑えている。地殻のS波速度は2km/sec、ポアソン比0.3、密度2.0としている。P1、P2、P3で示した3点は地表面の波形観測点である。

断層面のうち $24 \text{ km} \times 16 \text{ km}$ を破壊領域とし、この領域の破壊強度を70bar、初期応力を65bar、残留応力を10barとした場合の破壊伝播の様子を図4に示す。以後のインバージョン解析では、この状態を常にインバージョンの初期値とした。

インバージョン解析結果

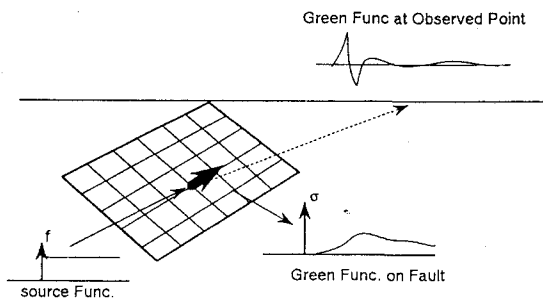
3つのケースのインバージョン解析を実施した。ケース1は破壊強度だけを求めた場合、ケース2は残留応力だけを求めた場合、ケース3は破壊強度と残留応力を同時に求めた場合である。

最適化変数を減らすため、破壊領域の内破壊開始点近傍を除いた $16 \text{ km} \times 16 \text{ km}$ を 4×4 のブロックに分割し、それぞれのブロック内では破壊強度と残留応力は一定とすることにより、ケース1とケース2では最適化変数は16個、ケース3では32個となった。なお初期応力は65barで一定とした。

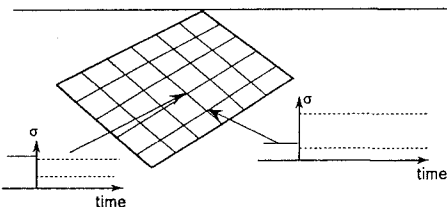
ケース1はバリヤなどがインバージョン解析から

正しい値が求めることができるかを検証する目的で行なう。まず図5(a)に示すように破壊強度が80barのブロックを1個、75barのブロックを2個設定した。これに対応するP1、P2、P3の3点の速度波形を求めておき、これをターゲットの波形とする。次に破壊強度が断層面全体で70barの場合を初期値として、P1、P2、P3の3点でターゲット波形と一致するように漸次破壊強度の値を修正して、最適な値を求めるインバージョン解析を実施した。最適化に関する収束計算の繰り返し回数は最大25回とした。インバージョン解析から求められた破壊強度分布を図5(b)に示す。図5(a)と比較することにより、インバージョン解析の精度が検証できるが、バリヤの

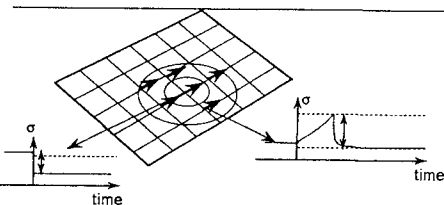
1. Green関数の計算(FEM)



2. 破壊強度・初期応力等の設定



3. 破壊過程の計算



4. 波形の合成

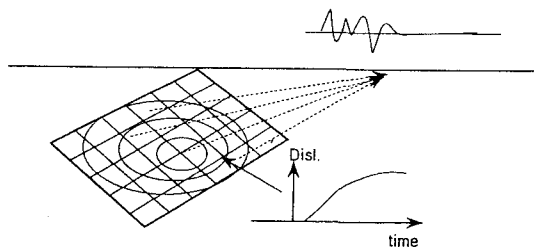


図2 重ね合わせによる動的破壊モデルの計算手順

位置は正確に求められているが、最大破壊強度は若干小さめになっていることがわかる。

ケース2は、アスベリティがインバージョン解析から正しい値が求めることができるかを検証する目的で行なう。図6(a)に示すように残留応力が破壊開始点から階段状に大きくなるように設定した。これに対してインバージョンで同定した結果を図6(b)に示す。破壊開始点近傍およびその対角線方向の破壊が停止する領域で若干誤差が大きいものの、ほぼ妥当な結果が得られている。

ケース3は、バリヤとアスベリティを分離してインバージョン解析から求めることができるかどうかを検証する。破壊強度を大きくすること、残留応力を大きくすることは、共に破壊が伝播しにくくなる効果をもたらす。破壊の遅れや停止を引き起こす。従って、波形インバージョンから両者を区別することはかなりの困難を伴うことが予想される。図7(a)に示すように破壊強度を、図8(a)に示すように残留応力を設定した。これに対してインバージョンで同定した結果を図7(b)と図8(b)に示す。残留応力は比較的妥当な値が求められているが、破壊強度についてはバリヤに位置がブロック1つ分だけ下方にずれている他、特に破壊開始点から離れた領域でかなり小さめの値や、かなり大きめの値がある。今後さらに精度を高める必要がある。しかしながら全体的な傾向としてはほぼ正しく表現されていると評価でき、本手法はバリヤとアスベリティをきちんと分離して求めることができる可能性があることを示していると思われる。

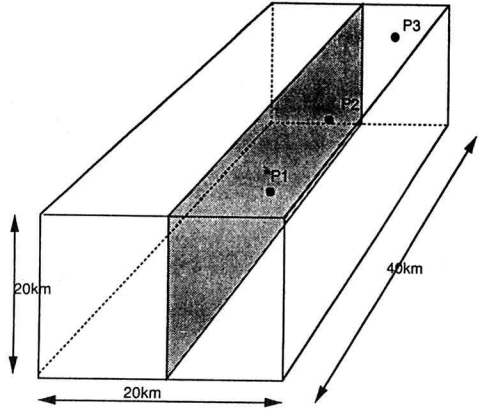


図3 計算に用いたモデル概要

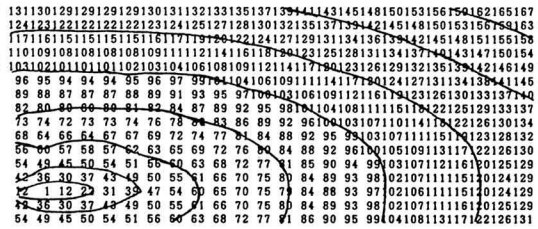


図4 破壊伝播状態（初期値）

あとがき

本研究の結果、Dynamic rupture modelを用いたインバージョン解析が可能となった。この手法により、破壊強度や残留応力等の断層面上の力学パラメータを直接かなりの精度で合理的に求める。今後この手法を実際の地震観測記録に適用し、実際の地震について解析を行なう必要がある。なお本研究の研究費の一部は文部省科研費重点領域研究(1)計画研究（研究代表者：和泉正哲）による。

参考文献

- 1) Irikura, K.: Semi-empirical estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquake, Bull. D. P. R. I., Kyoto Univ., 33, 63-104, 1983.
- 2) Miyatake, T.: Numerical Simulations of Earthquake Source Process by a Three-Dimensional Crack Model. Part I. Rupture Process: J. Phys. Earth, 28, 565-598, 1980.
- 3) Toki, K. and S. Sawada: Simulation of the Fault Rupture Process and Near Field Ground Motion by the Three-Dimensional Finite Element Method, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, pp. 751-756, 1988.
- 4) Jackson, D. D. and M. Matsu'ura: A Bayesian Approach to Nonlinear Inversion, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. B1, pp. 581-591, 1985.

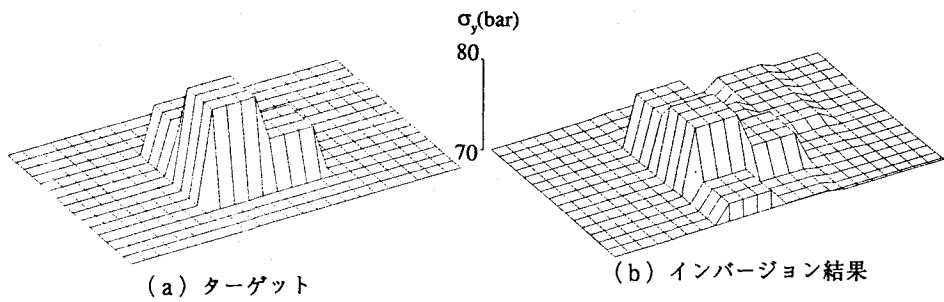


図5 破壊強度分布 (ケース1)

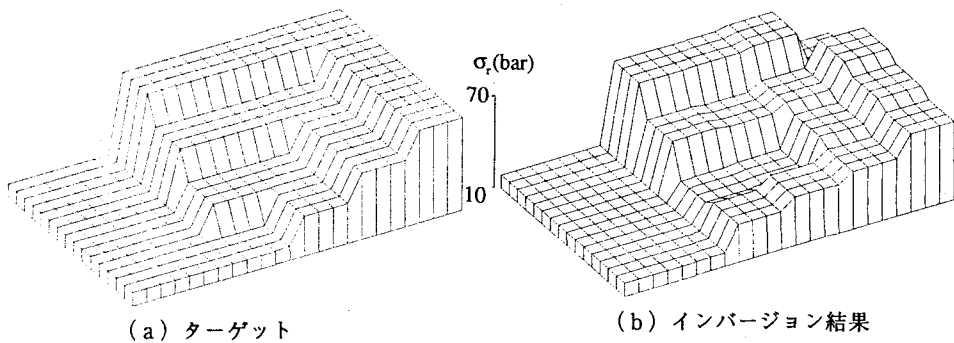


図6 残留応力分布 (ケース2)

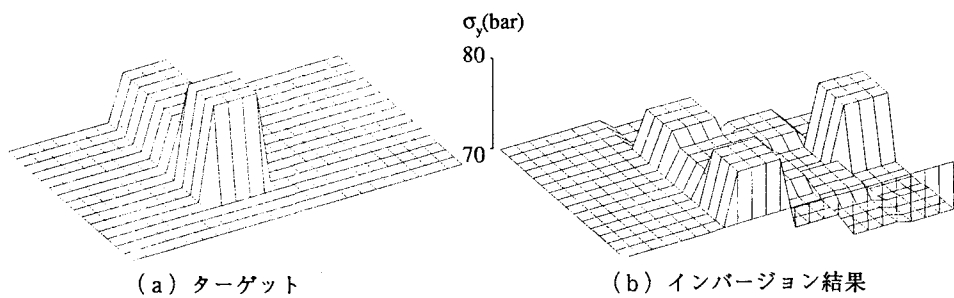


図7 破壊強度分布 (ケース3)

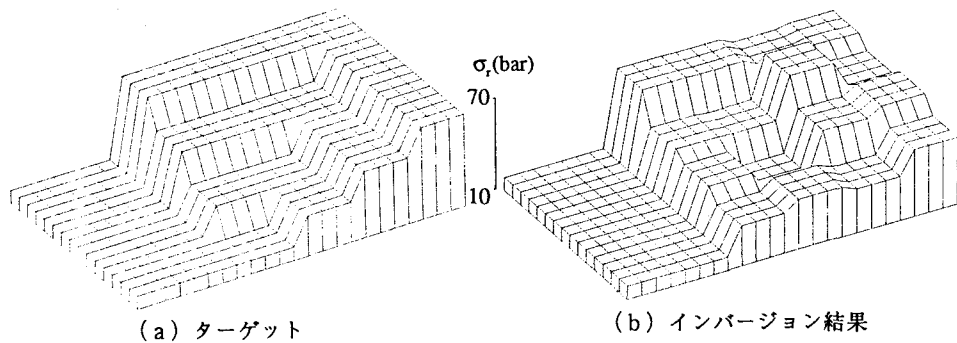


図8 残留応力分布 (ケース3)