

京都大学防災研究所 ○澤田 純男
京都大学工学研究科 土岐 憲三

まえがき： 強震動予測に良く用いられる経験的グリーン関数重ね合わせ法は、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エーションやアスペ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、バリエーションやアスペリティを合理的に設定することが難しい。バリエーションやアスペリティは、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する方法が動的破壊モデル（Dynamic rupture model）であり、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。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応用して、Dynamic rupture modelを用いたインバージョン解析を実施した。

解析手法と解析モデル： 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ことで、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。この場合約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1に示す。

非形最適化アルゴリズムは、Jackson and Matsu'ura¹⁾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 $2m+1$ 回のフォーワード計算を必要とする。

解析に用いたモデルの概観を図2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。

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は残留応力のみを求めた場合、ケース3は破壊強度と残留応

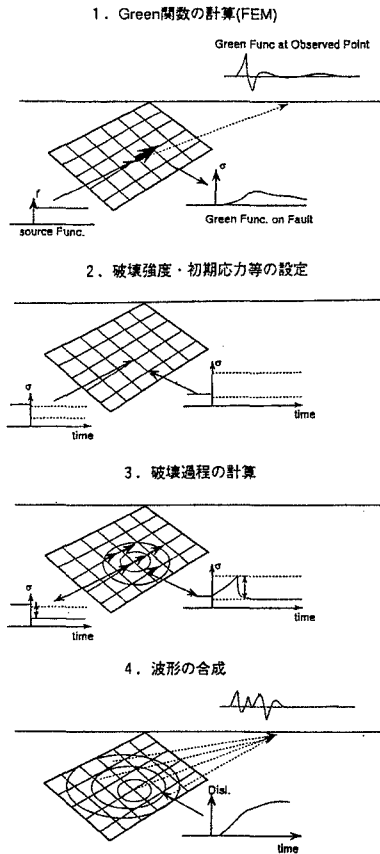


図1 計算プロセス

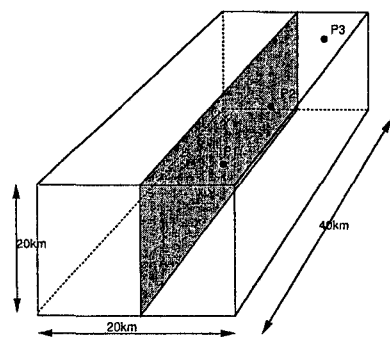


図2 解析モデル

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。また、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。

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。図3(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個設置し、その他は 70bar 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3(b)に示す。図3(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。

ケース2は、アスペリティが求めることができるかを検証する目的で行なう。図4(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。これに対して同定した結果を図4(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、バリヤとアスペリティを分離して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5(a)に示すように破壊強度を、図6(a)に示すように残留応力を設定した。同定結果を図5(b)と図6(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ペ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。

参考文献1) Jackson and Matsu'ura: JG R, Vol.90, No.B1, pp.581-591, 1985.

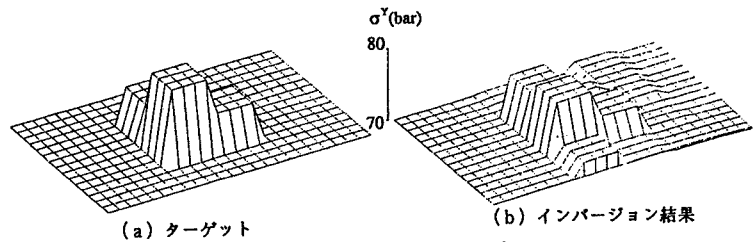


図3 破壊応力分布（ケース1）

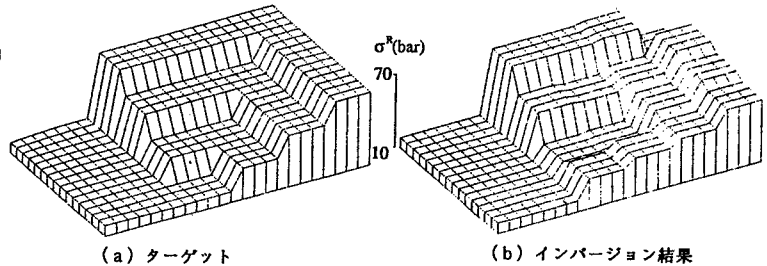


図4 残留応力分布（ケース2）

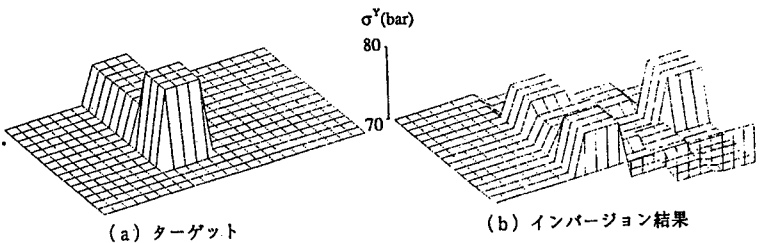


図5 破壊応力分布（ケース3）

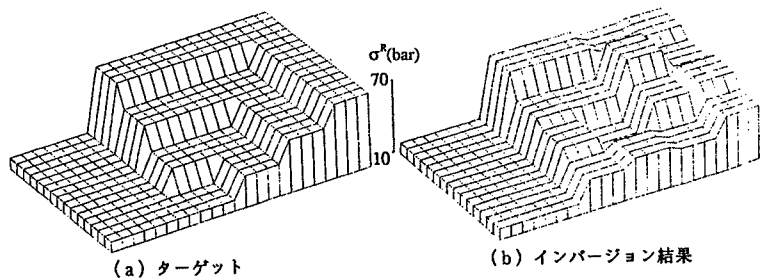


図6 残留応力分布（ケース3）