

I-391

3次元有限要素法による断層運動の解析

京都大学防災研究所 正員 沢田純男

京都大学防災研究所 正員 土岐憲三

1. まえがき 著者等は既にジョイント要素を用いた2次元有限要素法によって断層運動のシミュレーションを行い、有限要素法が断層運動の解析に優れた手法であることを示した¹⁾。また三浦、岡重、沖中等は、これを3次元に拡張し、断層の破壊伝播を表現し得ることを確かめている²⁾。しかしながら実際の断層を想定した3次元モデルは自由度数があまりに大きくなるため解析が困難であった。本研究はモデルに若干の制限を設けることにより、3次元動的モデルに適した有限要素法の解法を開発し、これにより解析可能な自由度数を大幅に増加させることが可能となった。これにより実際の断層を想定し、かつ現在のコンピュータ環境が許す最大のモデルを設定し、断層運動を3次元で解析したものである。

2. 大自由度モデルの数値解析法 本研究ではモデルに次の3つの条件を設定することにより、マトリックスの記憶領域の低減を図った。

A: 要素は全て8節点6面体要素とする

B: 要素は規則的に立体格子状に配置される

C: 減衰は比例減衰で全ての要素で比例定数は同じとする

条件A及び条件Bより、剛性マトリックスは42×自由度に圧縮でき、かつ剛性成分がどの節点に対応するかを示すインデックスマトリックスが不要となる。また条件Cにより減衰マトリックスを記憶する必要がない。このように記憶したマトリックスを用い、連立1次方程式を解く手法として共役傾斜法を用い、反復回数を8回に制限して計算したが、動的問題では対角項が卓越するために収束が速く、十分な精度で計算できることが明らかとなった。

3. 解析モデルおよび初期応力 現在京都大学大型コンピュータセンターでは、ベクトル計算機である富士通社製VP200が稼働しており計算速度最大533MFL OPS、記憶領域は1ジョブ当たり主記憶28メガバイト、ファイルは1ファイル当たり100メガバイトである。

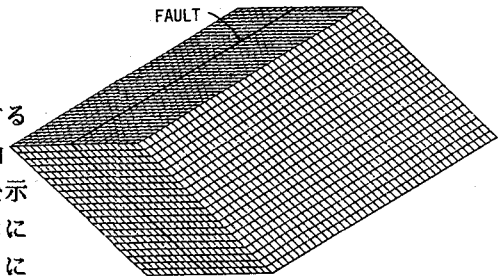


図1 モデル概要

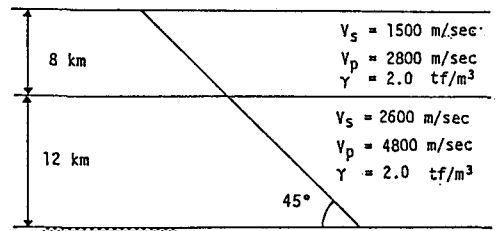


図2 地殻構成

図1に本研究で用いたモデルの概要を示す。断層をモデル化する800個のジョイント要素、地殻部分の15,200個のソリッド要素からなり、断層長40km、地殻部分は層厚が20km、断層面から水平距離で上盤側10km、下盤側9kmである。断層は地表面に対して45度傾いた逆断層であり、断層の大きさ40km×28kmになる。節点数は21×21×41=18,081であり、それぞれにX Y Z方向の成分が必要であるから自由度数は節点数の3倍の54,243に達する。図2に解析対象とした地殻構成を示す。なお地殻の減衰は、Q値を0.1Hzで22.5, 1Hzで200としている。

図3はジョイント要素の構成関係である。すなわち垂直方向に関してはジョイント方向のひずみが正（剝離）の場合には応力の伝達が行われず、負（接触）の場合にはバネ係数 K_t を介して応力とひずみは線形

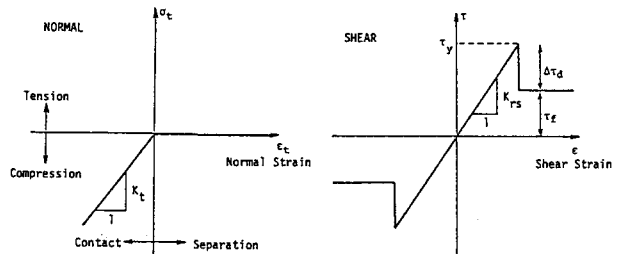


図3 ジョイント要素の構成関係

関係にあり、強い抵抗を示すものとする。また、せん断方向に関しては、せん断応力の絶対値が降伏応力以下の場合にはバネ係数 K_{rs} を介して線形関係にあり、降伏応力 τ_y に等しくなると断層が破壊して滑動が生じ、同時に降伏応力が $\Delta\tau_d$ だけ応力降下して動摩擦応力 τ_f になるものとする。図4は本研究で設定した断層面上の降伏応力分布を示す。（）内は動摩擦応力を示している。影を付けた部分はジョイント要素が破壊しないよう降伏応力を900barとした部分であり、*印は破壊開始点となるように降伏応力を69barとし、破壊開始点から離れるに従って降伏応力を階段状に高くしてゆき、破壊伝播が自然に停止するようにした。本研究では最初に静的解析によって造構力(Tectonic Force)による初期応力を求める。図5に求められた初期応力状態の断層面上でのせん断応力分布を示す。図2で示したように本解析の対象とした地殻は2層よりなっているため、造構力は一様分布を仮定しているにもかかわらず、せん断応力は一様な分布を示さず、比較的高い下層部分がせん断応力の大部分を受け持っている。

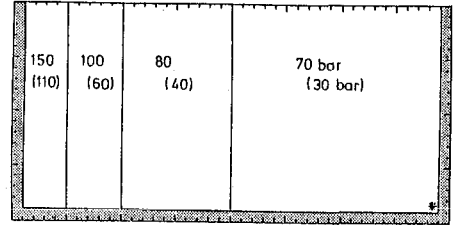


図4 降伏応力分布

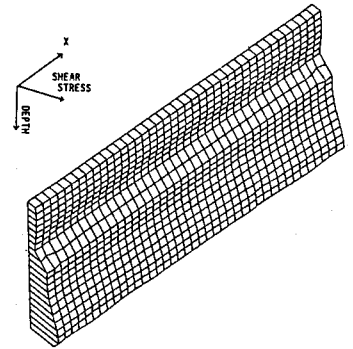


図5 初期応力分布

4. 動的解析 前節で示した初期応力の下で非線形震動解析を行った。図4の*点のジョイント要素は既に降伏応力に達しているのて直ちに破壊し、その時解放された応力が周辺のジョイント要素に近辺のソリッド要素を通じて再配分され、自動的に破壊が伝播していく。境界条件は地表面のみ自由境界とし、残り5面は粘性境界としている。なお解析時間は0.1秒間隔で300ステップ、30秒間とした。計算時間はVP200のCPU時間で約8時間であった。図6に破壊時刻の等時曲線を示す。29.5秒に1つのジョイント要素が破壊しているが、これを除けば破壊伝播は24.6秒で終了している。また、上層部分へは破壊が伝播せず、初期応力の急変部が一種の見かけ上のバリヤーとなり、破壊伝播を食い止めたことが解る。また降伏応力が100barの部分にも破壊が伝播しなかった。破壊の進行はなめらかで、殆どバリヤーのないことが解る。くいちがい弾性論によって求めたくいちがい量と本解析によって求められた30秒の時点におけるくいちがい量との比較を表1に示す。

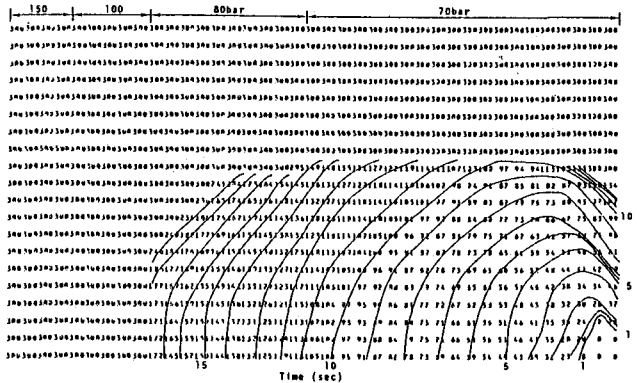


図6 破壊時刻の等時曲線

解析手法が全く異なるにもかかわらず両者は非常に良く一致しており、これは本解析手法の妥当性を示しているものと考えられる。なおバリヤーモデルの解析も実施したが、この結果については講演時に発表する予定である。

表1 弾性論との比較

断層面積 S (km ²)	L/W	$\Delta\tau$ (BAR)	弾性論による くいちがい量(m)	本解析による くいちがい量(m)
450.77	1.87	16.03	1.513	1.597

参考文献 1)K.Toki and F.Miura :Simulation of Fault Rupture Mechanism by a Two-Dimensional Finite Element Method, J.Phys.Earth,33,485-511,1985

2)三浦,岡重,沖中:3次元ジョイント要素を用いた破壊伝播の解析, 山口大学工学部研究報告36-1,1985