

(17) 3次元有限要素法による断層生成過程の解析

(財)大阪土質試験所 正会員 澤田純男
京都大学防災研究所 正会員 土岐憲三

1. まえがき 土岐・三浦らは、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。そこで著者等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た³⁾。本研究では1971年に発生したSan Fernando地震の際に生じた断層を対象として断層の生成過程を3次元で解析した。この断層を対象とした2次元有限要素解析が既に三浦らによって行われており⁴⁾、本研究では3次元解析結果と2次元解析結果との比較を行う。

2. 解析モデルおよび初期応力 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640個のジョイント要素、地殻部分の18,560個のソリッド要素からなり、断層長40km、地殻部分は層厚が8km、断層面から水平距離で上盤側20km、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、潜在断層面の大きさは40km×16kmになる。節点数は41×31×17=21,607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64,821に達する。図2に解析対象とした地殻構成を、表1に地核の物理定数を示す⁵⁾。なお地殻の減衰はRayleigh減衰とし、Q値を0.1Hzで22.5、1Hzで200としている。図3にモデルの実際の位置と断層近傍の地震観測ステーションの位置を示す。破線で囲まれた部分が図1のモデルの地表面への投影線であり、図からわかるように解析領域内にPAC(Pacoima Dam)とJPL(Jet Propulsion Laboratory, Pasadena)の2つの地震観測ステーションが含まれており、本解析波形と観測波形の比較を行う。また、図中の一点鎖線は2次元解析との比較を行う断面(比較断面)を示している。また実線で囲まれた部分は、Heatonら⁶⁾の求めた破壊領域を示している。

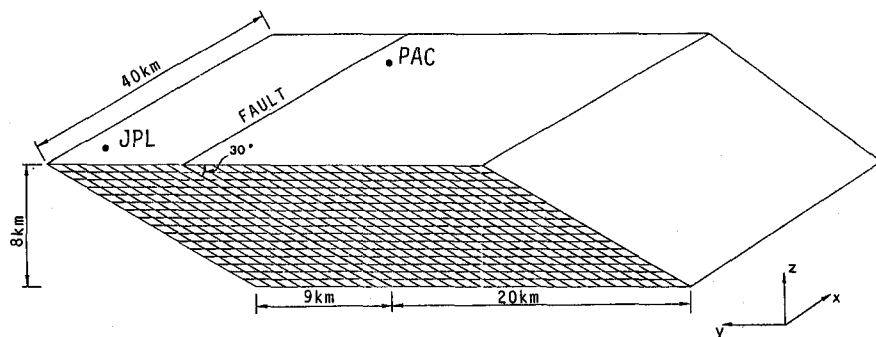


図1 モデル概要

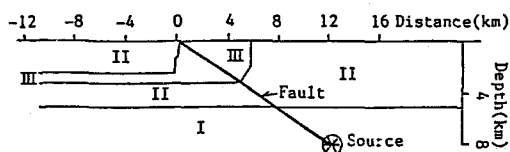


図2 地殻構成

表1 地殻の物理定数

地殻	単位体積重量 tf/m ³	縦波速度 km/s	横波速度 km/s	ポアソン比
I	3.0	6.0	3.4	0.27
II	2.5	6.0	3.4	0.24
III	2.7	4.2	2.5	0.22

図4はジョイント要素のせん断方向の構成関係である。すなわち、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。本研究では造構力(Tectonic force)による断層面上の初期せん断応力分布は、2次元静的解析⁴⁾によって求められている値を用いた。図5に初期せん断応力、降伏応力および動摩擦応力の断層幅方向の分布を示す。なおここで断層幅とは地表面から断層面に沿って下方に測った距離を表している。図6に降伏応力と動摩擦応力の断層面上の分布を示した。影を付けた部分には、図5の値を断層長さ方向(水平方向)には一定として分布させている。*印のジョイント要素は破壊開始点となるように降伏応力を周辺の要素よりやや低く設定した。一点鎖線は比較断面を示している。

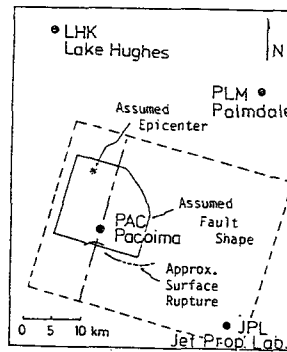


図3 モデルの位置

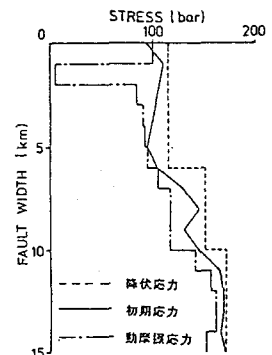


図5 初期応力等の分布

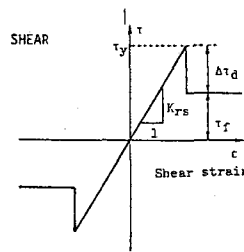


図4 ジョイントの構成関係

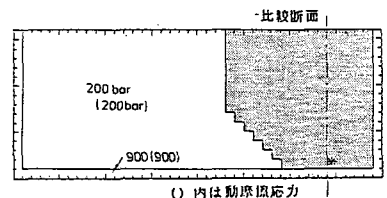


図6 降伏応力等の断層面上の分布

よりやや低く設定した。一点鎖線は比較断面を示している。

3. 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6の*印のジョイント要素は既に降伏応力に達しているので直ちに破壊し、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400ステップ、40秒間とした。計算時間は京大大型計算機センターのFACOM-VP2000のCPU時間で約9時間であった。図7に破壊時刻の等時曲線を示す。破壊開始後5秒間は殆ど破壊が伝播せず、その後9秒までにI層に接している部分が破壊している。破壊開始点付近は図5に示したように応力降下量が小さいことから、最初の5秒間については説明される。また、I層とII層の境界で破壊伝播が一時停止していることについては、図5で示した降伏応力と初期応力の差がこの領域で大きな値を持つためであろう。この見かけ上のバリアーが破壊した後は急激に破壊速度を増し、数秒で地表面に破壊が達し、14秒頃にはほぼ破壊伝播が終了する。

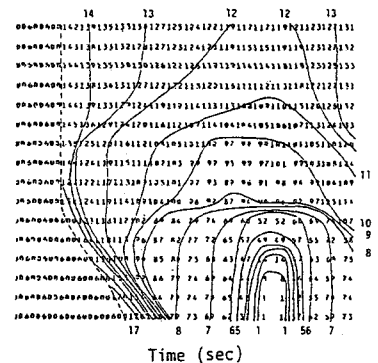


図7 破壊時刻の等時曲線

図8は比較断面上の破壊伝播速度の3次元解析と2次元解析の比較、図9(a)(b)は比較断面におけるくいちがい量の比較である。図8からわかるように2次元解析では約3秒で地表面に破壊が達しているのに対し、3次元解析では12秒程度かかっている。これは3次元解析の破壊伝播速度が9秒付近まで非常に小さいためで、それ以後は2次元解析と3次元解析の破壊伝播速度は共に V_s にほぼ等しく

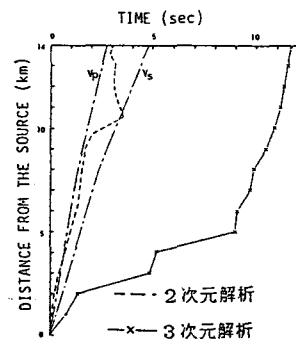


図8 破壊伝播の比較

なっている。このことは、一方向の破壊伝播で比較した場合は、2次元解析より3次元解析の方がバリエーなどの影響を強く受けやすいことを示している。すなわち、3次元モデルの場合は、破壊伝播がバリエーなどによって妨げられた場合には、バリエーのある方向以外の向きへ破壊が進み、バリエーの破壊が遅れるためであろう。また、3次元解析では前述したように最初の5秒間は応力降下量が小さいために破壊伝播速度が小さいが、こ

の現象も解放された応力が、2次元解析の場合は上下2方向にしか再配分されないのに対し、3次元解析ではまわりの8つのジョイント要素全てに配分されるため、1つのジョイント要素に再配分される応力が小さくなり、2次元解析の場合より破壊を遅らせていると考えられる。一方、図9のくいちがい量では、3次元解析のくいちがい量の方が2次元解析のくいちがい量より、おおむね20%程大きい、その発達過程は酷似している。以上のことから、2次元解析で断層運動解析をする場合は、破壊伝播についてはその精度に疑問

があるが、くいちがい量分布およびその発達過程については相当な精度を期待できることがわかる。図9(b)にJungelsらが求めたくいちがい量分布を示すが、これは2次元解析、3次元解析のいずれとも地表面から1~2kmあたりで大きな違いがある。同一の応力降下量を仮定しているにもかかわらず、動的解析と静的解析でこのような大きな差が生ずることは、非常に興味ある点である。

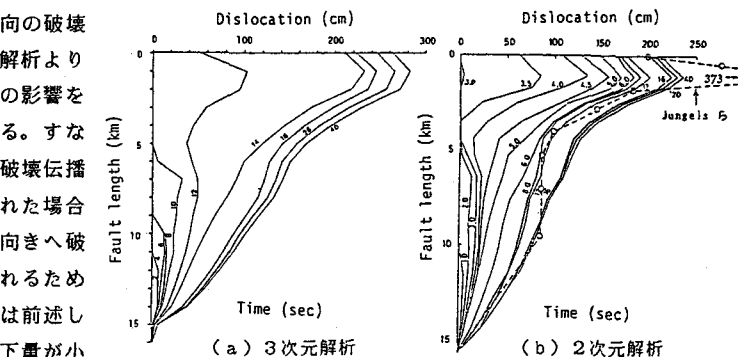


図9 くいちがい量の発達過程の比較

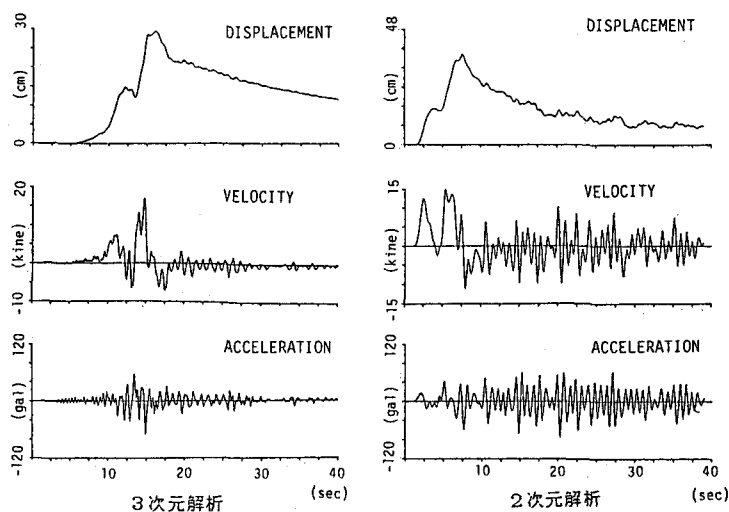


図10 時刻歴波形の比較

次に比較断面上の上盤側

7km地点における加速度、速度、変位の上下成分の時刻歴波形、および水平成分と上下成分の加速度応答スペクトルで比較する。図10に3次元解析による波形と2次元解析による波形の比較を示す。また、減衰定数5%の加速度応答スペクトルで3次元解析の波形と2次元解析の波形を比べたのが図11であり、(a)が水平成分(b)上下成分である。2次元解析による波形は、加速度、速度の最大値は3~5秒前後にあり、3次元解析の時刻より10秒程度早い、これは2次元解析は破壊が地表面に達したのが、3秒頃であることから説明できよう。また、3次元解析は加速度、速度とも20秒以後は小さくなっているが、2次元解析の波形は解析時間の最後まで大きな振幅が続いているのは、2次元

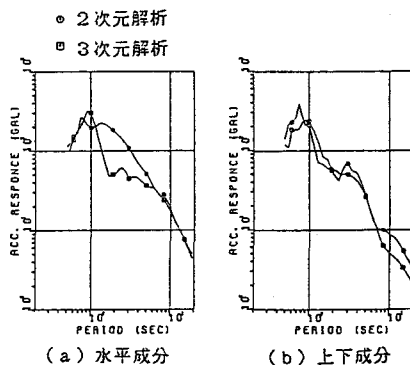


図11 応答スペクトルの比較

解析のほうで境界で発生する反射波の影響が大きいことを示している。しかしながら加速度、速度、変位とも最大値に関しては、比較的良く一致している。応答スペクトルでは、上下成分に関してはほぼ両者は一致しているが、水平成分に関しては2次元解析の方が全般に大きな応答値を示している。

4. 観測波形との比較

PACのNS成分と本解析の当該波形の比較を図12に示した。

なお同じ条件で比較するた

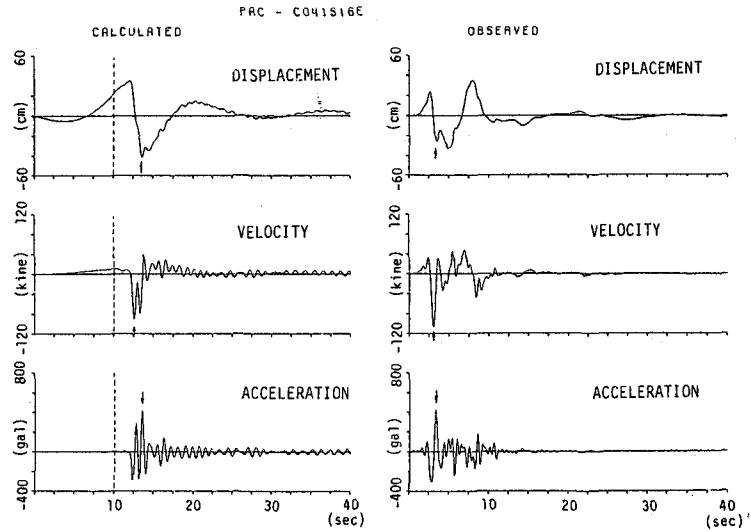


図12 観測波形と本解析波形との比較 (PAC-NS)

めに、観測波形および本解析波形は共に通過帯域が0.07~2Hzのバンドパスフィルターを通してている。これは、観測波形はCALTECにおいて補正される際、ハイパスフィルターによって0.07Hz以下が取り除かれていることと、本解析波形はメッシュサイズから2Hz以上の成分を含まないためである。図中の破線はトリガー時間を示しており、矢印は対応すると思われるピークを示したものである。図からわかるように、加速度、速度および変位とも良い対応を示している。また加速度、速度、変位の最大値でも両波形はほぼ一致している。本解析で用いた応力降下量は、Jungelsらが求めた2断面の内の小さい方を用いており、その平均応力降下量は15barに過ぎない。すなわちKanamoriら⁷⁾によると、このSan Fernando地震の平均応力降下量は62barと推定されており、本解析に用いた応力降下量は相当小さい値であると考えられるにもかかわらず、加速度等の最大値が一致しているのは興味深い。

5. あとがき 本解析は、周期0.5秒以上の周期領域においては、観測記録と比較的良好な対応がとれることがわかったが、本解析結果は観測記録に合致するようにパラメータの値を設定したものでない点に留意する必要がある。すなわち本解析結果は、いわば第1近似であり、この結果を用いて、より実地震記録に合致する断層パラメータを同定することが可能であり、本解析手法を用いて断層運動を説明することができるほか、将来起こるであろう地震の大きさや特性を合理的に推測できる可能性があることを示唆していると考えられる。

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

3) K.Toki and S.Sawada: Simulation of a Fault Rupture Process and Near Field Ground Motion by the Three-Dimensional Finite Element Method, Proc. of the 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 1986

4) 三浦, 土岐, 藤岡: 有限要素法による断層生成過程の解析, 第18回地震工学研究発表会講演概要, 1985

5) P.H.Jungels and G.A.Frazier: Finite Element Analysis of the Residual Displacements for an Earthquake Rupture, J.Geophys. Res., 23, 1973

6) T.H.Heaton and D.V.Helemerger: Generalized Ray Model of San Fernando Earthquake, BSSA, 66, 5, 1976

7) H.Kanamori and D.Anderson: Theoretical Basis of some Empirical Relation in Seismology, BSSA, 65, 5, 1975