

(4) 有限要素法による地震断層のシミュレーション

京都大学防災研究所 正会員 土岐 憲三
 山口大学工学部 正会員 三浦 房紀
 清水建設 ○正会員 吉村 隆

1. まえがき

構造物の動的解析を行なう際の最も重要な要素の一つに入力地震動の問題があり、将来起こるであろう地震動を合理的に予測することが望まれている。最近では地球物理の分野での成果を反映して、断層モデルにより設計用地震動を求めようとする試みが行なわれつつある。しかしながら従来の断層モデルでは断層の幾何学パラメータの他に、本来断層運動の結果として定まる破壊の伝播速度、くい違いの時間関数、くい違い量などをあらかじめ仮定する必要がある。ところが、ジョイント要素を用いた有限要素法によれば不連続面において接触している弾性体の動的挙動をよく表現し得ることが確かめられており¹⁾、この方法によれば、造構力 (Tectonic force) および断層面上での応力降下の特性を与えるのみで断層運動をうまく再現し得るものと考えられる。そこで本研究では上述のような多くの断層パラメータを与えずに、断層の強度と応力降下量だけを与えることによって断層の破壊過程を表現することを試み、その有用性について検討を行なったものである。

2. 有限要素法による地震断層のモデル化と非線形震動解析法

2-1 ジョイント要素を用いた地震断層のモデル化 図-1に断層をモデル化するために用いるジョイント要素を示す。また図-2に本研究で仮定するジョイント要素の構成関係を示す。図(a)はジョイント面に垂直な方向(n方向)、図(b)は平行な方向(s方向)における関係である。すなわち、垂直方向に関してはジョイント要素の垂直ひずみ ϵ_n が正(剥離)の場合には応力の伝達は行なわれず、負(接触)の場合にはばね係数 K_n を介して応力とひずみは線形関係にあり、強い抵抗を示す。またせん断方向に関しては、発生しているせん断応力の絶対値が降伏せん断応力以下の場合にはばね係数 K_s を介して線形関係にあり、降伏せん断応力 τ_y に等しくなると断層が破壊して滑動が生じ、同時に降伏せん断応力が ΔT だけ降下するものである。降伏せん断応力 τ_y は $\sigma_n \leq 0$ (圧縮) に対しては Mohr-Coulomb の降伏条件式を仮定、 $\sigma_n > 0$ (引張り) に対しては 0 と仮定して次式で与えられるものとする。

$$\begin{aligned} \tau_y &= C_f - \sigma_n \tan \phi_f \quad (\text{圧縮}) \\ &= 0 \quad (\text{引張り}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 C_f 、 ϕ_f はそれぞれ接触面(ジョイント面)における粘着力、摩擦角であり、 σ_n は垂直応力である。(ただし、引張りを正としている。)
 2-2 解析手法 一般の動的解析においては静的につり合った状態からの変動を問題とすればよいから重力場における力を考慮する必要はないが、断層面での動的滑動現象を解析する場合には、まず重力および造構力に起因するところの断層面および地殻内における応力を算定しなければならない。そしてこの応力状態を初期応力状態として、断層の破壊が生じ、これが伝播して地震波動を生じるという過程を経る必要がある。そこで本研究では以下に述べるように、初期応力を重力に起因する応力と造構力に起因する応力と

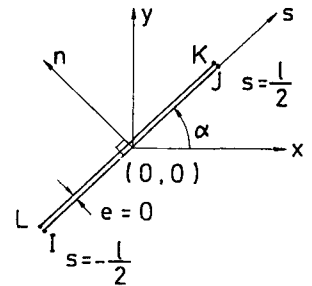
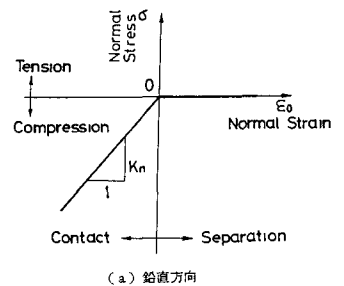
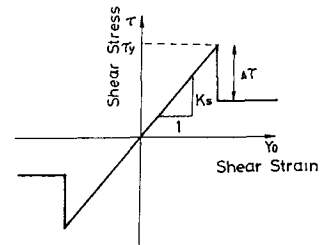


図-1 2次元ジョイント要素



(a) 鉛直方向



(b) 接線方向

図-2 ジョイント要素の構成関係

に分けて静的な2段階の過程により求め、その後断層面の破壊現象をシュミレートする動的解析を行なう。

Step 1 自重による応力の算出 まず、自重を等価な接点力に換算し、自重による応力場をもとめる。

Step 2 造構力による応力の算出 造構力による応力を求める際には十分に遠い所から力が加わっていることを表現しなければならないが、計算機の容量との関係上、図-3に示す比較的大きいモデルの両側から一様な造構力を作用させて応力場を求める。動的解析の際にこのモデルを用いると、要素長と地震波の波長との

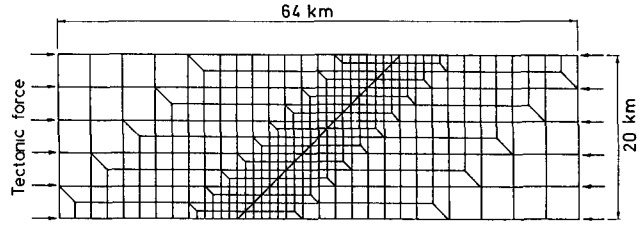


図-3 初期応力算定モデル

の関係から断層で生じた地震波動が大きい要素に伝播しないという不都合が生じる。そこで動的解析においては図-4に示す詳細な要素網のモデルを用いる。しかしこのモデルの両側から単に一様な外力を作用させた場合と、先に図-3に示すモデルを用いて求めた応力場とは異なったものとなる。そこでこのモデルの断層面上およびその周辺の応力状態は図-3のモデルで求めたものを図-4のモデルで再現して、後述の動的解析に用いることにした。自重による応力と造構力による応力を重ね合わせて動的解析の際の初期応力とするわけであるが、その際、自重によるせん断応力を0として重ね合っている。これは、一度破壊が発生した後の断層面上の応力状態から次の破壊に至るまでの応力状態の変化の中で、せん断力の増加は造構力によるという考えに基づいている。また造構力の大きさに関してはその大きさを徐々に大きくしていき、一つの小断面が破壊する状態、すなわち、あるジョイント要素のせん断応力が降伏応力に達して滑動を起こすような状態を捕えて、その状態をもって初期応力状態としている。

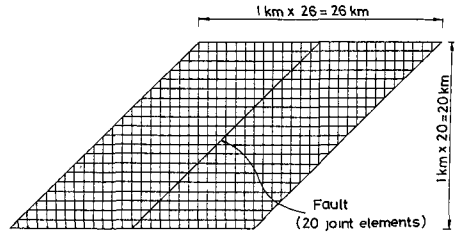


図-4 動的解析モデル

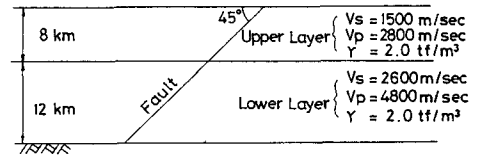


図-5 解析モデル

Step 3 動的解析 Step 2で求められた応力状態を初期応力としてニューマークのβ法 ($\beta = \frac{1}{4}$)を用いた非線形震動解析を行なう。初期応力状態においては、あるジョイント要素のせん断応力は降伏応力に達しているため、その要素は直ちに破壊する。その時、その要素の降伏応力が応力降下量 $\Delta\tau$ だけ低下することによってその分の応力が解放され、周辺のジョイント要素に再配分されて、破壊が他の要素に伝播してゆくことになる。それと同時に周辺の地殻には地震波動が放射されることになる。なお非線形の取束計算には荷重伝達法を用いている。

3. 有限要素法による断層モデルの解析

3-1 解析モデル

本研究で解析する際に対象とした地殻の構造を図-5に示す。上層の層厚は8 km、P波速度は2.8 km/sec、S波速度は1.5 km/secであり、下層ではそれぞれ、12 km、4.8 km/sec、2.6 km/secとし、単位体積重量はともに 2.0 tf/m^3 としている。断層は傾斜角が45度の逆断層である。図-5に示す地殻構造を断層付近を中心に、水平方向26 km、深さ方向20 kmの平行四辺形でモデル化したものが図-4に示した有限要素網であり正方形要

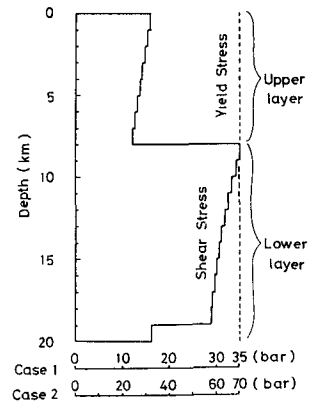


図-6 初期せん断応力分布

素の一辺は 1 km、要素数 580、自由度数 1176 である。解析には次の 2 通りの場合を考える。Case 1 は降伏応力 σ_y が 35 bar、応力降下量 $\Delta\sigma$ が 30 bar であり、Case 2 はそれぞれ 70 bar、30 bar である。また 18 km より深い場所のジョイント要素については、過去に一度も破壊が生じていない堅固な層が存在するものと仮定して、降伏応力を非常に高いものとしている。なお解析モデルの側方および下方は粘性境界を用いてここからの反射波の低減を行っている。

3-2 初期応力 断層面上の初期せん断応力の分布を図-6 に示す。解析モデルは二層系であるため造構力が深さ方向に一樣に加わってもせん断応力の分布は一樣ではなく、その大部分を下層が受け持っている。そして下層の最上部に応力集中が生じており、動的解析における破壊はこの部分から生じて他のジョイント要素へと伝播していくことになる。なお、Case 1 と Case 2 の降伏せん断応力は 35 bar と 70 bar であり、両者における初期せん断応力の分布形は相似である。

3-3 解析結果および考察

(1) 破壊の伝播 図-7 に破壊の伝播の様子を示す。図中、縦軸は断層の深さであり、横軸はジョイント要素の対応する接点の相対変位、すなわち断層のくい違い量である。また図中の数字は最初の破壊からの経過時間を表わしている。初期応力からもわかるように、破壊は下層の最上部で発生し、まず降伏応力と初期応力の差が小さい下層の方へ破壊が伝播していき、破壊が断層の最深部まで到達した後に上層へと伝播している。その際、Case 1 では破壊は地表面に到達しているのに対して、Case 2 では破壊は地表面まで到達せず 7 km の深さで破壊の伝播が終っている。また破壊

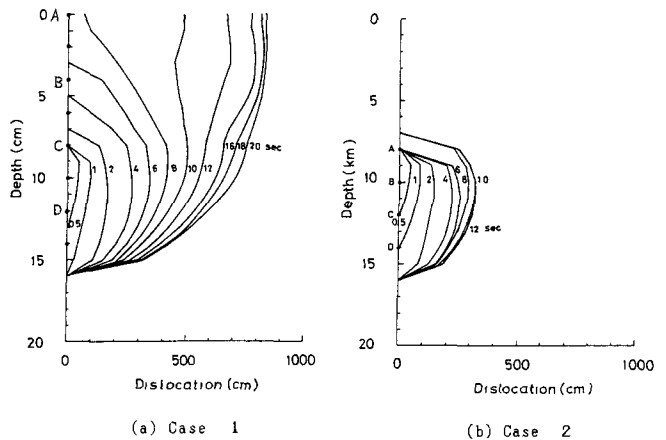


図-7 くい違い量の時間的变化

に要する時間についても、Case 2 では破壊は 12.54 秒で完全に終わっているのに対して、Case 1 では 20 秒後もまだ終了していない。両者の応力降下量は 30 bar と等しいため、これらの差は降伏応力の大きさの違いによるものである。図-8 は Case 1 におけるジョイント要素のせん断応力の時刻歴であり、図中の矢印 \downarrow は当該要素の隣接要素が破壊した時刻を示している。要素番号は小さいほど深く、逆に大きいほど浅くなっている。破壊は要素番号の小さい方、すなわち (a) ~ (c) の順に伝播している。これを見ると、いずれも隣の要素が破壊することによって急激にせん断応力が増加し、やがてその要素もせん断応力が降伏応力に達して破壊することがわかる。このように本解析手法によれば、断層面上における応力の再配分のメカニズムを定量的に評価することができる。

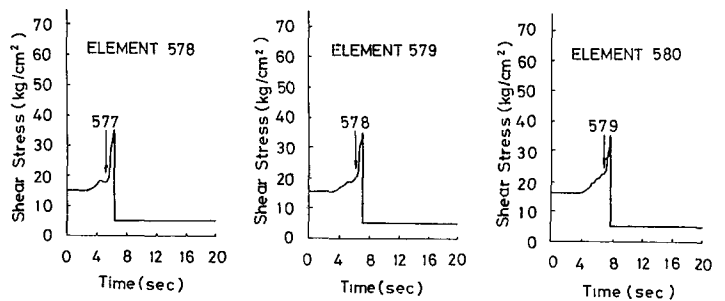


図-8 ジョイント要素のせん断応力の時刻歴

表-1 くい違い量の比較

	くい違い量 (m)	モーメント (dyn-cm)
Case 1	7.15	5.85×10^{25}
Case 2	3.14	2.57×10^{25}
弾性論	4.84	3.96×10^{25}

(2) 断層のくい違い量

近代地震学による断層モデルでは縦ずれ断層の場合、応力降下量 $\Delta\tau$ と平均くい違い量 D の間には次のような関係がある。²⁾

$$\Delta\tau = \frac{16}{3\pi} \frac{\mu D}{W} \quad (2)$$

ここに、 W は断層幅、 μ は剛性である。本研究の解析に用いた各値を代入することによって、弾性論から得られた平均くい違い量と有限要素解析より得られた平均くい違い量を表-1に示す。また表-1にはくい違い量から求められた地震モーメントも併せて示してある。それらの大きさはCase 1 > 弾性論 > Case 2となっているが、両手法による結果が極めてよい対応を示していることがわかる。図-9はCase 1のくい違いの時間関数を示したものであり、A~Dは図-7に示した点である。一般に断層モデルではこの関数を一次の傾斜関数で与えることが多く本解析により得られた曲線もC、D点ではほぼこれに近い状態となっているが、A、B点では二次関数的な曲線となっている。一般に断層モデルでは全ての場所を通じてその形状は同一としているが、図のようにそれは場所によってかなり様相が異なることがわかる。

(3) 地震波形 図-10はCase 1における地表面の上盤側の加速度の時刻歴であり、(a)は断層上、(b)は断層から2km地点のいずれも鉛直方向の波形である。(a)では地表面が破壊を生じた瞬間に鋭いピークをもつ波形となっているが、これは破壊の瞬間は断層面近傍のわずかな質量が運動するためであると考えられる。しかしながらこのような鋭いピークは2km地点では消失していることがわかる。最大加速度についても断層面上では1130gal、2km地点では450galとかなり小さくなっていることがわかる。図-11はCase 1における地表面の最大加速度の距離減衰の様子を示したものである。一般に下盤側より上盤側の方が加速度が大きいといわれているが、その傾向をもはっきりと表していることがわかる。

参考文献 1) 土岐憲三、三浦房紀：地盤-構造物系の非線形地震応答解析、土木学会報告集、No.317、pp.61~88、1980。

2) 金森広雄 編、岩波講座地球科学8、地震の物理、岩波書店、pp.108~110、1982。

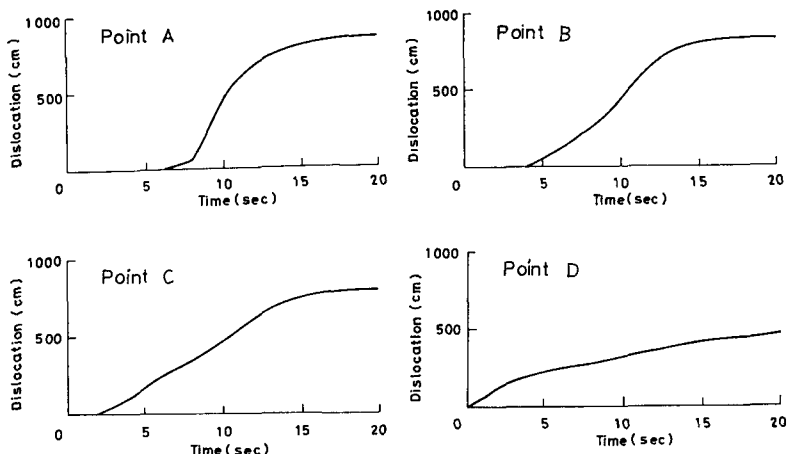
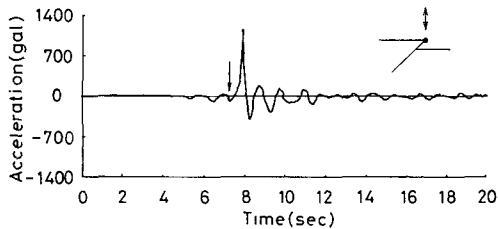
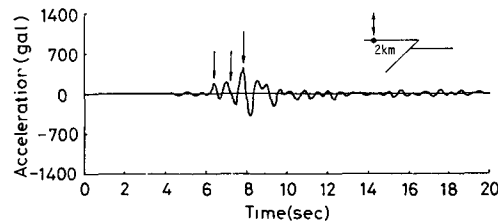


図-9 くい違いの時間関数 (Case 1)



(a) 断層上



(b) 2km地点

図-10 加速度の時刻歴 (Case 1)

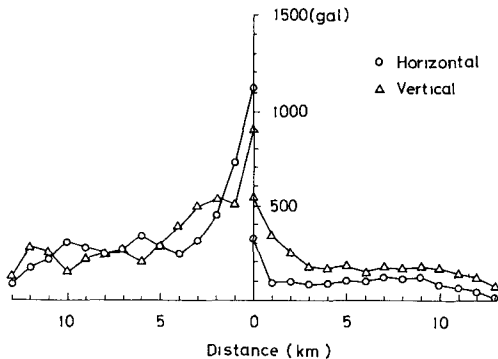


図-11 最大加速度の距離減衰 (Case 1)