

# (1) 有限要素法による断層生成過程の解析

山口大学工学部 正会員 三浦房紀  
 京都大学防災研究所 正会員 土岐憲三  
 京都大学大学院 学生員 藤岡 晃

## 1. まえがき

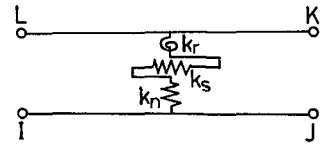
筆者らは、地盤と構造物との間の滑動や剝離を考慮に入れた、非線形動的相互作用を解析するための手法を開発しているが、これは、地盤と構造物との間の接触面に、ジョイント要素を導入した有限要素解析に基づいたものである。また、地震による断層運動も、不連続面の滑動現象の一種であるとの認識から、筆者らはこの手法を断層運動のシミュレーションに適用し、その妥当性の検討を行っている。<sup>1)</sup> そして、それによって求まった平均くい違い量、マグニチュード、地震モーメントなどが、従来の経験式とよく一致することを示している<sup>2)</sup>。

本研究はこの手法を用いて、1971年のサンフェルナンド地震の際に生じた断層を対象に、その生成過程のシミュレーションを行い、さらに断層生成後の地変に対する解析結果と観測値との比較検討を行なったものである。

## 2. 断層のモデル化と解析手法

**2-1 修正ジョイント要素** 文献1の段階では、破壊の伝播速度が縦波速度よりも速くなるという不都合な現象が生じていたが、文献2においてジョイント要素を修正することによってこれを解決した。図-1(a)に従来のジョイント要素、(b)に修正ジョイント要素の概念図を示す。(a)に示す従来の要素では、4節点全てがジョイントばね、 $k_s$ ,  $k_n$ で連結されており、要素の中央で変形および応力の評価が行われていたことから、要素の全域が同時に滑動や剝離を生じていた。そして、その影響が瞬時にして、一連のジョイントばねを通じて他のジョイント要素にも伝達され、これが原因となって破壊速度が地殻の縦波速度よりも早く伝播するという結果となっていた。一方、(b)の修正後の要素は、2組の節点对の各々にジョイントばねを結合し、それによって応力の評価を行うことから、一方の側での破壊の影響は、ジョイント要素に接するソリッド要素（地殻）の変形を通じてのみ、もう一方の側に伝達されることになる。これにより、破壊伝播速度は縦波速度より早くなることはなくなった。この修正ジョイント要素の剛性マトリクスは次式で与えられる。

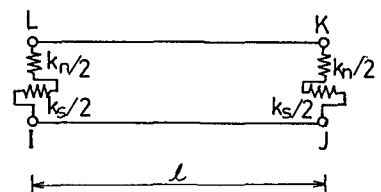
$$[k]_J = \frac{\ell}{2} \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_s & 0 \\ & k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_n \\ & & k_s & 0 & -k_s & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_n & 0 & -k_n & 0 & 0 \\ & & & & k_s & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & k_n & 0 & 0 \\ & & & & & & k_s & 0 \\ \text{Sym.} & & & & & & & k_n \end{bmatrix}$$



(a) 従来のジョイント要素

ここに、 $\ell$  はジョイント要素の長さ、 $k_s$ ,  $k_n$ はそれぞれせん断および垂直ばねである。

**2-2 解析手法** 詳しい解析手法は文献に譲り、ここでは概略だけ述べる。まず、地体力を外力とする静的解析を行い、震源となるべきジョイント要素のせん断強度に、せん断応力が一致する応力場を求める。次に、この応力場を初期応力状態として動的解析を行う。運動方程式の第1ステップにおける外力は、震源となるジョイント要素の応力降下量に等価な節点力である。この最初の要素の破壊によって、その周辺に弾性波動と共に応力も伝播



(b) 修正ジョイント要素

図-1 ジョイント要素

される。その結果、隣接するジョイント要素の応力が増大し、やがてここも破壊することになる。以下、同様の経過を経て、断層-地殻系の運動方程式を満足しながら、破壊が順次伝播してゆくことになる。その際破壊伝播速度、震源時間関数、最終くい違い量などはあらかじめ与えるのではなく、解析結果として求まるところに本解析手法の大きな特長がある。

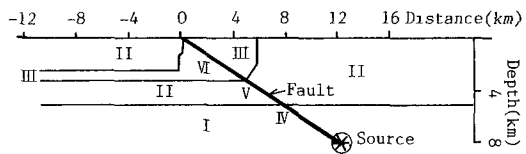


図-2 断層および地殻の構成

表-1 材料定数

### 3. 解析モデル

解析の対象とした断層および地殻構造を図-2に示す。これは、1971年のサンフェルナンド地震の際に生じたものである。地殻を構成するそれぞれの部分の物理定数を表-1に示す。地殻の減衰は、レーレー減衰を仮定し、Q値は、0.1 Hzで22.5、1 Hzで200とした。断層は傾斜角 $33^\circ$ の縦ずれ逆断層である。震源は、断層面に沿って地表面から14.3km、深さ8.0kmのところにある(図中のSource)。

| 地殻      | 単位体積重量<br>t/m <sup>3</sup> | 縦波速度<br>km/s           | 横波速度<br>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  |
| ジョイントばね | kn<br>t/m <sup>3</sup>     | ks<br>t/m <sup>3</sup> |              |       |
| IV      | 40000                      | 17500                  |              |       |
| V       | 40000                      | 17500                  |              |       |
| VI      | 28000                      | 11500                  |              |       |

図-3に、解析に用いた有限要素網を示す。自由度は954である。断層面上には、ジョイント要素が15要素配列してある。また、地表面を除く境界には、粘性境界を用い、反射波の影響の軽減を計っている。

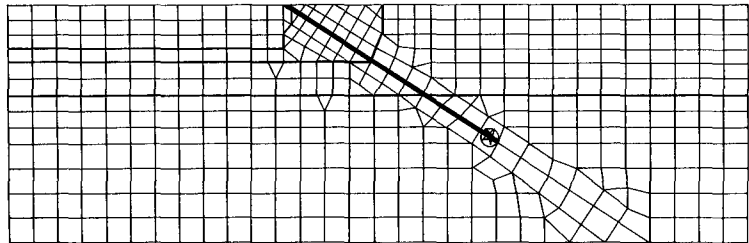


図-3 有限要素網

本解析手法で与える断層パラメータは、応力降下量 $\Delta\tau$ とせん断強度 $\tau_f$ の2つである。ここでは、これらの与え方によって4通りの場合について解析を行なった。それぞれ、Case 1、2、3、4と以下呼ぶことにする。まず、応力降下量の分布を図-4に示す。これについては、Jungelsらによりその分布が求められており<sup>3)</sup>、その分布をそのまま用いたものをCase 1とした。Case 2、Case 3はこの分布を単純化したものであり、

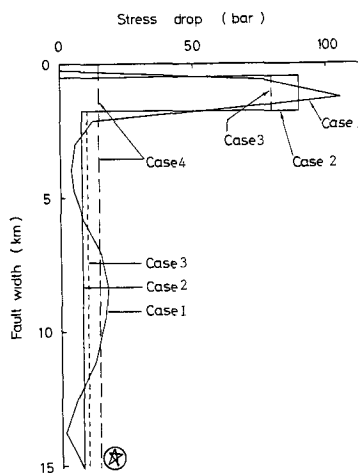


図-4 応力降下量の分布

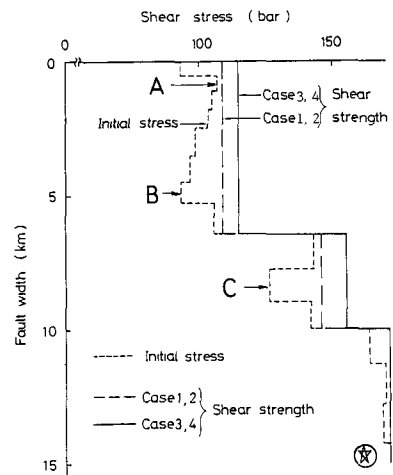


図-5 初期せん断応力およびせん断強度の分布

Case 4 は断層面上で一様な分布を持つと仮定してもものである。ただし、いずれの場合も平均応力降下量は等しく 14.3 bar とした。

次に、静的解析によって求まった初期せん断応力の分布と、上記 4 通りの場合に対して仮定したせん断強度の分布を図-5 に示す。Case 1 と 2、Case 3 と 4 は同じ分布を与えている。なおこの分布は、初期応力の分布と地殻の構成とを勘案して仮定したものである。

動的解析は時間刻み  $\Delta t = 0.1$  秒で、400 ステップ、すなわち 40 秒間行った。後述するように、断層運動はこの時間内に終了している。

#### 4. 解析結果

**4-1 破壊の伝播** 図-6 は Case 1、Case 2 の両ケースの破壊の伝播の様子を示したもので縦軸に断層に沿った震源からの距離、横軸にその点が破壊した時間をプロットしたものである。したがって、この曲線の勾配が破壊の伝播速度を表わすことになる。また、図中には、縦波速度 ( $V_p$ ) と横波速度 ( $V_s$ ) も併せて示してある。これらと比較することにより、破壊の伝播は、場所により異なるが、ほぼ縦波と横波の速度の間で伝播していることがわかる。

震源から約 13.5 km にある地表面に近い図中の点 A は、Case 1 では 3.0 秒、Case 2 でも 3.1 秒と、それより深い所より早く破壊している。この現象だけみると、その区間 A ~ B はあたかもバリアーのようであるが、これは、ここがいわゆるバリアーのようにせん断強度が高いために破壊が遅れたのではなく、図-5 から明らかのように、初期応力が低いためにせん断強度に達するのに時間を要して破壊が遅れたものである。そして、最後に破壊したのが B 点であり、この点は初期応力分布の最も低い点 (図-5, B 点) と一致している。

なお、Case 2 には図中の C 点でも同様の現象が起っている。

#### 4-2 くい違いの生成過程

図-7 に Case 1、Case 2 両ケースのくい違い量の分布の時間的変化の様子を示す。縦軸に断層面、横軸にくい違い量を取り、各時刻ごとの分布を示したものである。両ケースとも良く似た傾向を示

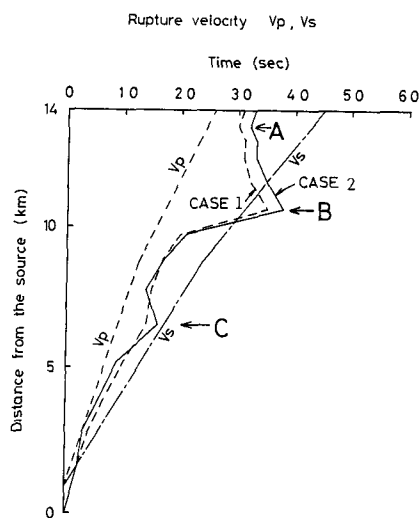


図-6 破壊の伝播の様子

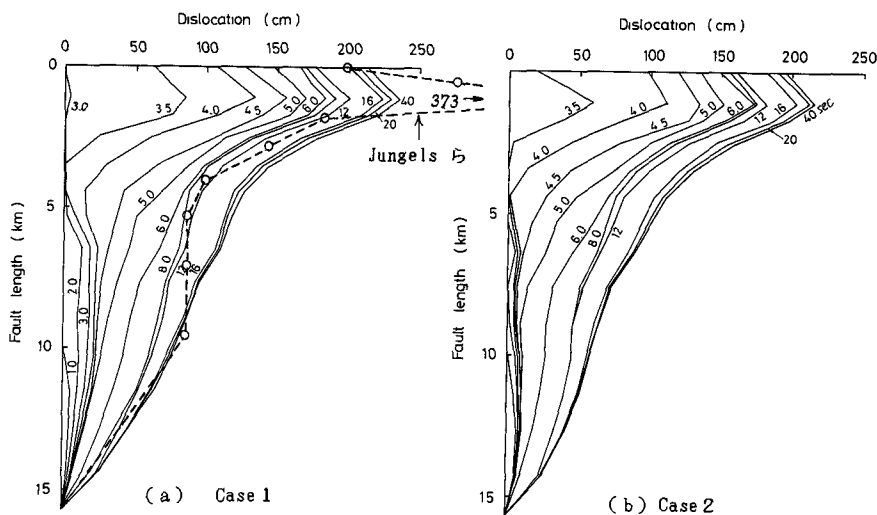


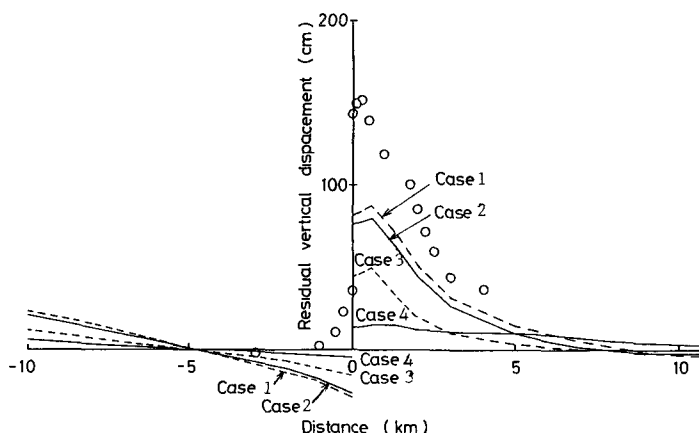
図-7 くい違い量の時間的変化

しており、破壊が地表面に達する3秒までは、あまりくい違い量は多くない。地表面に破壊が達した後の3～5秒間は地表面に近い数kmで大きくくい違いが生じており、その後の5～8秒間は深い方に主たるくい違いが生じている。これは地表面付近に生じた大きなくい違いの影響が深部にフィードバックされ、そこで再び破壊が助長されたものと考えられる。その後はわずかな破壊がほぼ一様に進み、40秒では終了している。

この40秒におけるくい違い量が最終的なくい違い量であるが、これと比較するためにJungels らによって計算されたくい違い量を図－(a)にあわせて破線で示した。Jungels らの静的解析による結果は地表面から1～2 kmの間で非常に大きな値となっており、本解析法による結果とは大きな差がある。この大きなくい違い量に関してはJungels らによって明確な説明はなされていない。

**4-3 鉛直残留変位量の観測記録との比較** 図－8に本解析によって求めた、地表面の鉛直変位(残留変位)と観測記録とを示す。図中の○印が観測記録である。図の横軸は断層の地表面への路頭地点からの距離であり、右側が上盤、左側が下盤である。まず、応力降下量を断層面に渡って一様と仮定したCase4の変位は、ほぼ一様であり、しかも小さい値となっている。地表面近くに応力降下量を集中させたが、せん断強度は比較的高く仮定したCase3では、断層近くでの変位は相対的に大きくなっているが、全体のレベルは低い。これに対してせん断強度を比較的低く仮定したCase1と2では、上盤の変位は大きく、最大80～90cmとなり、下盤側では約30cmの沈下となっている。一方、観測結果は、上盤側で最大約150 cmの隆起となっており、数値解析結果よりも大きい。また、下盤側の変形をみると、数値解析結果ではもぐり込んでいるのに対し、観測値は隆起している。このように、解析結果と観測値との間にはその分布形に差はあるが、これを上盤側と下盤側との差でみると、ほとんど差がないことがわかる。これをまとめて示したのが表－2である。すなわち、観測値が110cmであるのに対して、Case1、Case2はそれぞれ112 cm、103 cmと、非常に近い値となっている。

以上の結果より、次のことがいえる。まず、Case1からCase4までの結果を比較することにより、地表面の変位分布は主に応力降下量の分布に影響を受け、くい違い量は、せん断強度と初期応力の差に影響を受けるようである。また、Case1と2とが非常によく似た結果を与えてい



図－8 地表面の残留鉛直変位の比較

ることから、応力降下量に対してはその詳細な分布は必要ではなく、概略の分布が分かれば良いということもわかる。さらには、震源付近のせん断強度を精度よく推定できれば、それ以浅のせん断強度は、静的解析により求めた初期応力分布を勘案して、それに近づけて仮定すればある程度良い結果の得られることが期待できそうである。しかし、これらの点に関しては、今後さらに詳しい検討を行う予定である。

表－2 くい違い量の鉛直成分 (cm)

|        |      |
|--------|------|
| 観測値    | 110  |
| Case 1 | 112  |
| Case 2 | 103  |
| Case 3 | 60.5 |
| Case 4 | 17.8 |

- 参考文献** 1) 土岐、三浦、吉村；有限要素法による断層モデルのシミュレーション、京大防災研年報、1983。  
 2) Toki and Miura；Simulation of a fault rupture mechanisms by a two-dimensional finite element method, Int. J. Physics of the Earth, 投稿中。  
 3) Jungels and Frazier；Finite element analysis of the residual displacements for a earthquake rupture: Source parameters for the San Fernando Earthquake, J. Geophysical Research, No.23, 1973。