

山口大学工学部 正会員 三浦房紀
○ 山口大学大学院 学生員 神中宏志

1. まえがき 耐震設計用の入力地震波と断層モデルから求める試みが多く行なわれている。通常、弾性波動論に立脚した方法で断層運動のシミュレーションが行なわれているが、これには多くの断層パラメータを仮定する必要がある。これに対して土岐らは、断層をジョイント要素でモデル化し、僅かなパラメータで断層の破壊現象とそれによる地震波を同時に算定する手法を提案している¹⁾。しかしながら、この手法では平面的広がりを持つ断層を線で表現し、問題を2次元で取扱っている。そこで本研究は、土岐らの手法を3次元へ拡張するための第一段階として、3次元ジョイント要素を用いてモデル化した不連続面(断層)が、最初のすべり破壊を生ずるだけで、あと順次破壊が自動的に伝播する現象をシミュレーションできるか否かの検討を行なう、試みである。

2. 修正3次元ジョイント要素 3次元ジョイント要素は、既に土岐らによって提案されている²⁾。これは図1に示すように、節点①～④および⑤～⑧によって構成される2つの面からなるが、それぞれの面を構成する4節点は変形後も同一平面上にあり、応力は要素の中心で評価するという前提のもとに、その剛性マトリクスが導かれている。本研究では、上述の前提条件を取り除いて、3次元ジョイント要素の剛性マトリクスを導いた。即ち図2に示すように、各対応する節点同志が(例えば、①と⑤、②と⑥、etc)3方向のばね、 k_r, k_s, k_t によって結ばれているものとした。これにより、修正後の3次元ジョイント要素においては、4組の節点の対は隣接するソリッド要素の変形にのみ依存して自由に運動できることになる。即ち、以前の3次元ジョイント要素においては、例えば節点対①-⑤の運動に対して、他の節点対の運動がソリッド要素を介してではなく直接的に影響を及ぼしていたが、この直接的な影響が取り除かれることになる。

修正3次元ジョイント要素の剛性マトリクス $[K]_J$ は次式で与えられる。

$$[K]_J = \frac{\rho_m}{4} \begin{bmatrix} [E]_J & -[E]_J \\ -[E]_J & [E]_J \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $[E]_J$ は対角要素が次式で与えられる対角マトリクスである。

$$\text{diag}[E]_J = (k_r \ k_s \ k_t \ k_r \ k_s \ k_t \ k_r \ k_s \ k_t) \quad (2)$$

また、 l, m, n はジョイント要素の辺の長さである(図1参照)。

ジョイント要素のせん断方向の構成関係は図3のように仮定した。この場合、せん断方向が2方向あるので、各々のせん断応力成分の自乗和が降伏応力に達すると滑動(すべり破壊)するものとした。その瞬間、 ΔT だけ応力降下が生じるが、この応力降下量はそのときのせん断応力の大きさに比例して2方向に配分することとした。

降伏応力 T_y は、Mohr-Coulomb の降伏条件を仮定し、付着力 E_c 、摩擦角 ϕ を与えて、次式で与えた。

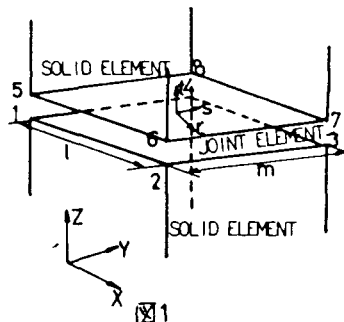


図1

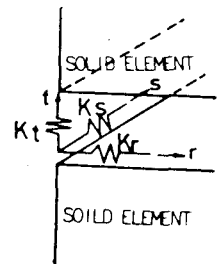


図2

ジョイント要素

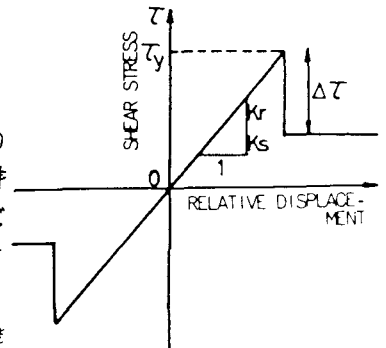


図3 構成関係

$$\tau_y = C + \sigma_n \tan \phi \quad (3)$$

ここに、 σ_n は垂直圧縮応力である。

3. 解析方法 解析の手順は以下の通りである。まず、静的解析により初期応力を求める。この際、1つのジョイント面でせん断応力が降伏応力に達している必要がある。次に、

この初期応力状態で動的解析に拘るわけであるが、この時の外力は、初期応力状態において降伏している要素の応力降下量 $\Delta\sigma$ に等価な節点力である。最初の要素の破壊によって、その周辺に応力が伝播される。この結果、隣接する要素の応力が増大し、これも破壊することになる。以下同様の過程を経て、破壊が次々と他の要素に伝播するわけである。

4. 解析例 図4、5に解析に用いたモデルを示す。前者をモデル1、後者をモデル2と以下呼ぶことにする。いずれのモデルも弾性体と弾性体の間にジョイント要素が配列してある。モデル1は1次元的な破壊の伝播を、モデル2は2次元的なものを調べるために用いたものである。

図6は、せん断応力の時刻歴と破壊の距離の関係を示したものであり、図中、応力降下を生じた時刻が、その点(要素)で破壊した時刻を表わしている。これより、最初の破壊点から遠方へと応力が流れて行き、順次破壊が生じていることがわかる。

図7は、図6から求まる破壊の伝播速度と、P波、S波速度との関係を示したものである。これより、最初破壊の伝播速度はP波に近いが、次第に遅くなり、S波速度に近くなっていることがわかる。

図8は、モデル2に対して求めた破壊の伝播の様子である。図中の斜線部は最初に破壊された部分である。実線は0.5秒、破線は1.0秒、一点鎖線は2.0秒後における破壊前線(Rupture front)である。この解析例では、X方向にのみ初期せん断応力を与えている。そのためX方向に早く破壊が伝播し、X方向に長軸をもつ楕円状に破壊が広がっていることがこの図よりわかる。

以上の結果、3次元ジョイント要素を用いた破壊の自動的な伝播のシミュレーションは、2次元モデルと同様に可能であることがわかった。今後、これを基礎に、実際の断面モデルの解析を行う必要がある。

・参考文献 1)土岐・三浦・吉村、有限要素法による断面モデルのシミュレーション、京大防災年報、第26号、B-2、1993。

2)土岐・三浦・大竹、3次元ジョイント要素による地盤-構造物系の非線形震動解析、土木学会論文報告集、第322号、1992。

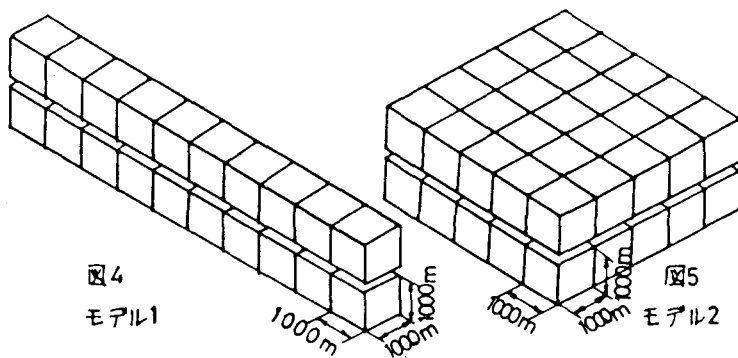


図4

モデル1

図5

モデル2

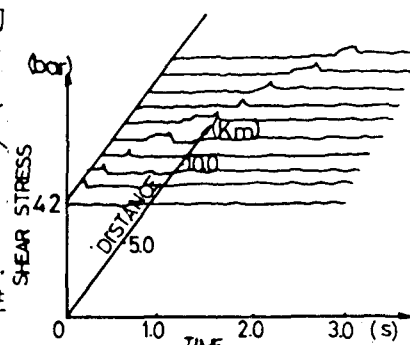


図6 せん断応力の時刻歴と破壊の距離

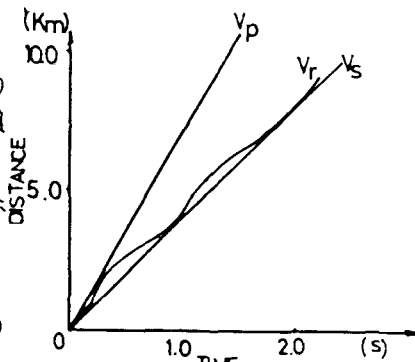


図7 破壊の伝播速度

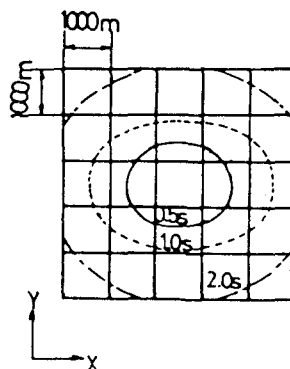


図8 破壊前線