

水平地殻変動に基づく地震動の予測法の力学的関係式と初期破壊の生成

栗田 哲

東京理科大学 工学部第一部 建築学科 kurita@rs.kagu.tus.ac.jp

1. はじめに

水平地殻変位をFEMモデルの側面境界に与えて、地震動を予測する手法を文献1)で提案した。その手法は地震間に蓄積される応力の静的解析(図1-a)を行い、そして自発的な破壊伝播を引き起こす初期破壊を生成し(図1-b)、その初期破壊を用いて動的解析(図1-c)を行うという解析プロセスで構成されている。本報告では、文献1)で述べなかった初期破壊生成及び動的解析の力学的関係式を示し、初期破壊の生成で与える水平地殻変位の大きさの設定について、数値解析により検討を行った。

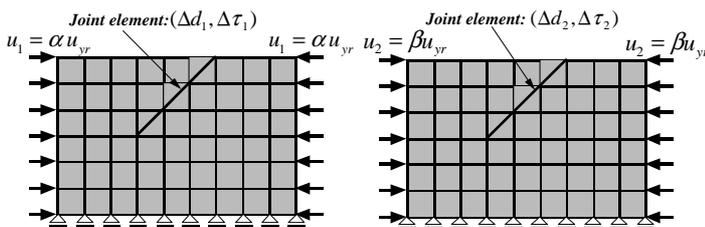
2. 予測法の力学的関係式

(a) 地殻と断層の内力

地殻は、線形弾性体として、FEMの連続体要素を用いてモデル化する。断層は上盤側の断層面と下盤側の断層面の2枚の面で表し、2枚の断層面を図2に示す修正ジョイント要素²⁾で結合する。断層面上の節点を除く全節点を地殻節点、断層面上にある全ての節点を断層節点と呼ぶ。以下に示す数式で、下添字1と2が付く記号は、それぞれ、地殻節点と断層節点を表す。例えば、変位を記号 u で表すと、地殻の節点変位と断層の節点変位はそれぞれ $\{u_1\}$ 、 $\{u_2\}$ となる。地殻の変形と内力の関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} [k'_{11}] & [k'_{12}] \\ [k'_{21}] & [k'_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_1\} \\ \{u_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{R'_1\} \\ \{R'_2\} \end{Bmatrix} \dots (1)$$

$[k'_{ij}]$ ($i=1 \square 2, j=1 \square 2$) は地殻の剛性マトリックスであり、記号 R' は地殻節点に作用する内力である。次に、断層の内力と変形について考える。修正ジョイント要素はせん断バネと軸バネで構成される。軸バネは線形バネで、せん断バネは、すべり弱さを考慮したせん断応力の構成則(図3)に従う非線形ばねとする。断層のすべり等の断層面間の相対変位を $\{u_2\}$ とすれば、断層の内力 $\{R'_2\}$ は関数 f を用いて次の様に表される。



(a) 地震間の応力解析

(b) 初期破壊生成

(c) 動的解析

図1 予測法の概要 (u_{yr} : 一年間当たりの水平地殻変位)

$$\{R'_2\} = \{f(\{u_2\})\} \dots (2)$$

断層のせん断応力が最大せん断応力(せん断破損応力)に達していない場合には、すべりとせん断応力の関係は線形であるので、断層の内力は次式となる。

$$[k'_{22}]\{u_2\} = \{R'_2\} \dots (3)$$

(b) 初期破壊生成と動的解析¹⁾

地殻変動に伴う応力解析(図1-a)を行い、断層のある点が最大せん断応力に達した状態を一旦求め、さらに β 年間の水平地殻変位 βu_{yr} をモデル側面に静的に与えて初期破壊を生成させることを考える。

図4に示すように、断層のせん断応力が最大せん断応力 τ_p を超えても、せん断応力とすべりの関係を線形に保たせて強制変位 βu_{yr} を与える。この強制変位により地殻節点と断層節点の変位がそれぞれ $\{u_1^2\}$ と $\{u_2^2\}$ だけ増加したとすれば、式(1)と(3)から力の釣合いに関する増分表現式を得る。

$$\begin{bmatrix} [k'_{11}] & [k'_{12}] \\ [k'_{21}] & [k'_{22}] + [k'_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_1^2\} \\ \{u_2^2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{p_1^2\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \dots (4)$$

$\{p_1^2\}$ は地殻節点に働く外力の増分である。図3に示すせん断応力の構成則を考慮した場合には、力の

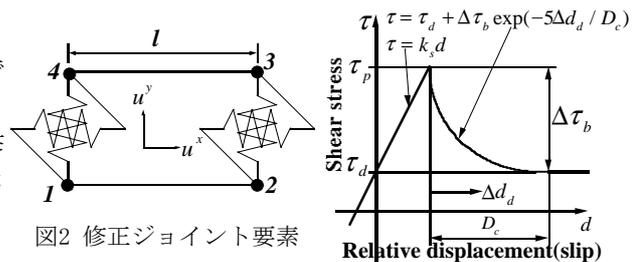


図2 修正ジョイント要素

図3 断層のせん断応力の構成則の例

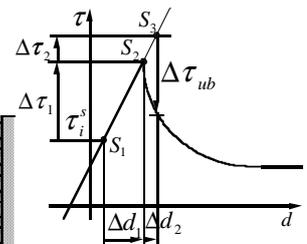


図4 初期破壊生成時のせん断力の変化(強制変位を与える前の状態が S_2 、与えた後の状態が S_3 。 $\Delta \tau_{ub}$ は不釣り合いせん断応力。)

釣合に関する増分表現は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} [k'_{11}] & [k'_{12}] \\ [k'_{21}] & [k'_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_1^d\} \\ \{u_2^d\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{R_2^d\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{p_1^d\} \\ \{p_2^d\} \end{Bmatrix} \dots (5)$$

$\{R_2^d\}$ は式(2)で与えられる断層の内力の増分である。 $\{p_2^d\}$ は、せん断応力とすべりの関係を線形に保たせるために、断層節点に加える仮想の節点外力である。仮想節点外力は式(4)と(5)から次式となる。

$$\{p_2^d\} = \{R_2^d\} - [k'_{22}]\{u_2^d\} \dots (6)$$

仮想節点外力は実際にありえない外力であるので、 p_2^d と逆方向の力 $F = -p_2^d$ を与えて、断層面に作用する外力がゼロとなるようにすると、静的な力の釣合い状態を保つことが出来ず、動的な運動が起こる。この逆方向の力を加えた時を時間 t の原点とし、節点変位の増分を $\{u_1^d(t)\}$ と $\{u_2^d(t)\}$ とすれば、運動方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} [m_1] & 0 \\ 0 & [m_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_1^d(t)\} \\ \{\ddot{u}_2^d(t)\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [k'_{11}] & [k'_{12}] \\ [k'_{21}] & [k'_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_1^d(t)\} \\ \{u_2^d(t)\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{R_2^d(t)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{p_2^d\} \end{Bmatrix} \dots (7)$$

$\{R_2^d(t)\}$ は断層の内力の変化量である。 $[m_1]$ と $[m_2]$ は地殻節点と断層節点の質量マトリックスである。 p_2^d がゼロでない領域が初期破壊領域となり、破壊を引き起こす力は $-p_2^d$ である。動的解析では、側面境界と底面境界に反射波を吸収させるために、粘性ダンパーをモデルに取り付ける(図1-c)。粘性ダンパーが取り付けられていることを除けば、動的解析モデルは静的解析モデルと同一である。

3. 初期破壊領域のサイズ

初期破壊生成では、自発的な破壊伝播を誘発するために水平地殻変位(または β) を与える必要がある。Griffith CrackのCritical half-length³⁾を2倍にした長さを臨界クラック長とし、この臨界クラック長に基づいて β の値を設定することを検討する。検討に使用するモデルは文献1)と同一

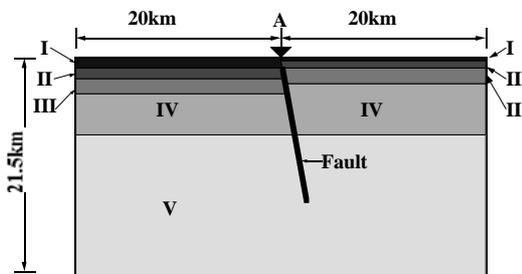


図5 数値解析モデル
表1 初期破壊領域のサイズと臨界クラック長

	R/100	R/200	R/500
初期破壊領域サイズ (km)	3.55	3.05	1.52
臨界クラック長 (km)	2.58		

の天白河口断層モデル(平面歪問題)のmodel-2である。R/100, R/200, R/500, R/1000の4ケース(R=1600年)の β の値を用いて初期破壊を生成し、動的解析により破壊伝播の有無を調べた結果、R/1000では破壊伝播が起こらなかった。表1に各ケースの初期破壊領域のサイズを示す。初期破壊が生じる可能性の高い領域ではせん断応力が最大せん断応力に極めて近いから(文献1の図7参照)、初期せん断応力=最大せん断応力として算出した臨界クラック長の値も表1に示す。図6に図5のA点の加速度時刻歴波形を示す。初期破壊領域のサイズが異なっても、地震波の到達時刻を除けばR/100とR/500の時刻歴波形は殆ど一致している。臨界クラック長がR/100とR/500の初期破壊領域のサイズの間にあることから、臨界クラック長を初期破壊領域の長さとしても時刻歴波形は変わらない。従って、初期破壊領域の長さが臨界クラック長となるように β の値を設定することが可能である。

4. まとめ

初期破壊の生成法と動的解析法を中心に、水平地殻変位から地震動を予測する方法について力学的関係式を用いて述べた。そして、初期破壊の生成で与える水平地殻変位の大きさを臨界クラック長に基づき設定することが可能であることを、平面歪問題の断層モデルの数値シミュレーションにより示した。

参考文献

- 1) 栗田哲：水平地殻変動に基づく断層破壊と地震動の予測に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 46B, pp. 381-388, 2000
- 2) 坪井利弘・三浦房紀：断層運動を模擬する岩石すべり破壊実験の有限要素法解析，土木学会論文集，No. 537/I-35, pp. 61-76, 1996
- 3) Andrews, D. J.: Rupture Velocity of Plane strain shear Cracks, J. Geophys. Res., Vol. 81, pp. 5679-5687, 1976

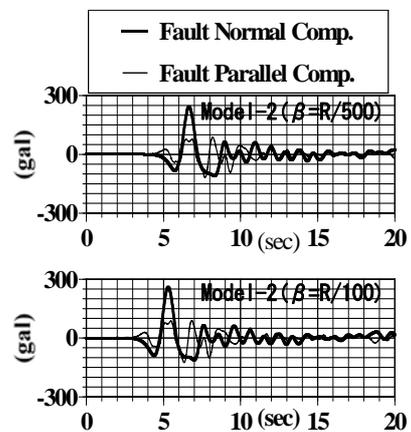


図6 A点(図5参照)の加速度時刻歴波形