

確率断層モデルによる理論地震動に関する一考察

徳島大学工学部 正員 澤田 勉
 日建設計 正員 岡田亨嗣
 徳島県 正員 上田信一

1. はじめに；長大化、複雑化した近年の構造物の合理的な設計には、設計入力としての地震動特性を広い周期帯、多様な立場から明らかにする必要がある。震源機構の情報にもとづいた地震動特性の評価は、この方向にそった重要な問題であるといえる。本研究は、長周期変位波の再現に有用な Haskell⁽²⁾型の断層モデルに基づき、断層パラメーターのうち、すれの立ち上り時間のみを確率変量として断層上で不規則に与え、これによって現実的な周波数特性をもった短周期成分波も発現可能な確率断層モデルを提案し、このモデルによる理論地震動特性を既往の諸経験式と比較することにより、その実用性を検討したものである。

2. 確率断層モデルの概略⁽²⁾；地震動は地殻力による累積応力の解放、あるいは、それにもなう断層すれ運動の結果生じると思われる。加速度波のような短周期成分波の模擬とその評価のためには、断層形成の不規則性を評価可能な形式でモデル内にとり入れる必要がある。本論では、すれの立ち上り時間 τ のみを確率変量とすることによって生起波の確率的評価を可能とした簡便な断層モデルを提案した。解析にあたっては均質等方体を場として想定し、地震動主要動部をなす直達S波を解析の対象とする。モデルの概略は次のとおりである。まず、断層長 L 、幅 W の矩形断層を想定し、これを $m \times n$ 個の要素断層に分割する。各要素断層は、破壊フロントの到着後、一樣すれするものとし、その変位量は断層の平均変位量に等しいとする。このとき、 i 分割要素からの x 軸方向変位スペクトルを U_{ikl} とすると、これらを周波数領域で直接重ね合わせるこにより断層全体のすれ運動による変位波スペクトル U_i を求めることができる。

$$U_i(x, \omega) = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n U_{ikl}(x, \omega) = 2 \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n F_{kkl}(x, \omega) \times D_{kkl}(x, \tau, \omega) \times A_{kkl}(x, Q, \omega) \quad (1)$$

ここで、 ω は角振動数、 x は変位を求めたい点の位置座標を、 δ は断層面上の点を、また係数 2 は、自由表面の増幅をそれぞれ表わす。

F_{kkl} は、断層の規模と方向特性によって決まる関数を表わし、

$$F_{kkl}(x, \omega) = 1/(4\pi\rho\beta^3 r_{kkl}) \cdot \mu \omega_{kkl} \bar{D}_{kkl} \cdot (-2r_1 \delta_1 \delta_3 + r_2 \delta_{11} + r_3 \delta_{23}) \times \exp\{-i\omega(\tau_{kkl}/\beta + T_{kkl})\} \times \sin \omega \chi_{kkl} / (\omega \chi_{kkl}) \quad (2)$$

$$\chi_{kkl} = l_{kkl} / (2 \cdot v) \times (1 - \nu/\rho \cdot \cos \theta_{kkl}) \quad (3)$$

ここで、 β, ρ, μ は媒質のS波速度、密度およびせん断定数を表わし、 δ は虚数単位、 v は破壊伝播速度、 T_{kkl} は破壊フロントの到着時間、 χ_{kkl} は、変位の伝播にもなう走時差、 δ はクロネッカのデルタを表わす。その他の記号については、図1を参照のこと。

D_{kkl} は、すれ速度関数のフーリエスペクトルを表わし、ランプ関数の場合、

$$D_{kkl}(x, \tau, \omega) = (\sin \omega \tau_{kkl} / 2) / (\omega \tau_{kkl} / 2) \times \exp(-i\omega \tau_{kkl} / 2) \quad (4)$$

であり、立ち上り時間 τ は、仮定した分布形にしたがってランダムに与えられるものとする。 A_{kkl} は、媒質の非弾性減衰を表わす項で、

$$A_{kkl}(x, Q, \omega) = \exp\{-\tau_{kkl} \omega / (2Q\beta)\} \quad (5)$$

ここで、 Q は減衰の程度を表わす次元量である。

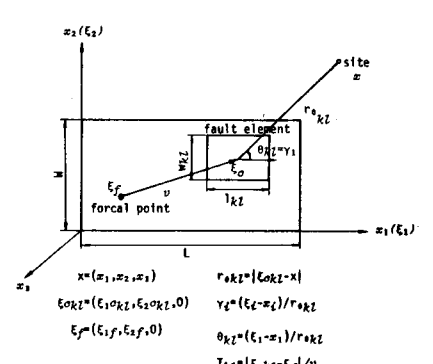


図-1 想定断層の位置関係

表-1 場定数の値

Shear-modulus	$\mu = 3.7 \times 10^{11}$ dyne/cm ²
P-Wave Velocity	$\alpha = 6$ km/s
S-Wave Velocity	$\beta = 3.5$ km/s
Density	$\rho = 3.0$ g/cm ³
Q-Value	400

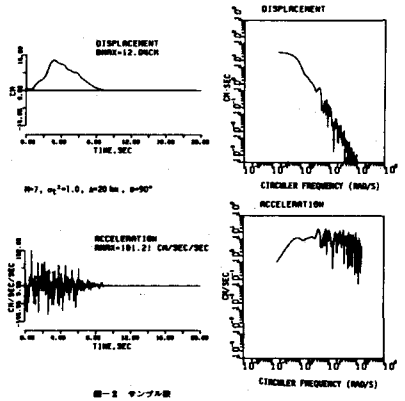
表-2 採用した平均的断層パラメーター

M	6.5	7.0	7.5	8.0
M_0 (dyne-cm)	2.44×10^{23}	1.03×10^{24}	5.85×10^{24}	3.28×10^{27}
L (km)	15.0	24.3	43.2	76.8
W (km)	7.5	12.1	21.6	38.4
\bar{D} (m)	0.62	1.00	1.80	3.18
$\bar{\tau}$ (sec)	1.25	2.00	3.58	6.40
$v = 2.52$ km/s				

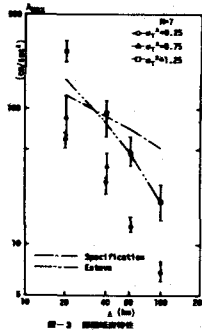
3. 理論地震動の検討; 弾性体場および断層規模を表1,2のように設定し、立ち上り時間の分布には矩形一様分布を仮定した。断層ずれが断層中心から同心円状に一定速度で進行するものとし、震央距離 Δ 、マグニチュード M 、立ち上り時間の分散 σ^2 をかえて理論地震動を作成した。一設定条件あたり10個のサンプル波を発生させ、平均化を行ったのち、次のような実用性の検討を行った。なお、Nyquist振動数は25 Hzとした。

(1) サンプル地震動について; 図2に、変位波および加速度波の一例を示す。加速度波に注目すると、地震動の非定常性が比較的良好に再現されていることがわかる。

(2) 最大加速度の平均値 \bar{A}_{max} の距離減衰特性; 図3は、本モデルによる最大加速度値の平均値 \bar{A}_{max} の距離減衰の傾向を、Estevaおよび道路橋示方書に示されている第1種地震に対する回帰式と比較したもののうち、マグニチュード $M=7$ に対するものである。距離減衰傾向は、震央距離 Δ の $\Delta^{-2} \sim \Delta^{-2}$ に比例しており、Estevaの傾向とよく一致しており、最大加速度の大きさも比較的妥当である。また、最大加速度を立ち上り時間 T のばらつきから検討した結果、最大加速度は、立ち上り時間の分布の下限値の逆数によって特徴づけられることがわかった。



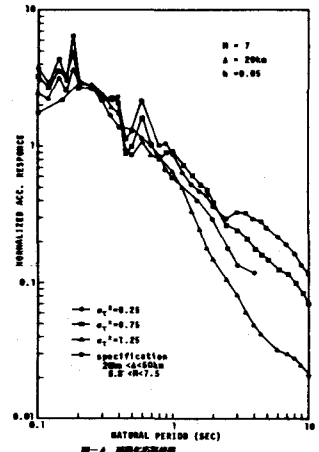
(3) 加速度フーリエスペクトルについて; 加速度フーリエスペクトルを、 ω^0 と ω^2 の漸近勾配の交点として定まるコーナー振動数 ω_c と高振動数側でのスペクトル振幅の大きさ $F.A.$ について検討した。表3は、この結果をとりまとめたもので、コーナー振動数は、ほぼ平均的なずれ時間 T の逆数(表中 c)で示した値)に比例することがわかった。



M	T (SEC)	σ^2 (SEC ²)	Epicentral Distance Δ (km)			
			20	40	60	100
6.5	1.25	0.1	ω_c 0.7	0.6	0.5	0.3
		F.A.	2.0	2.4	1.22	0.75
		0.3	ω_c 0.7	0.6	0.55	-
(6.5)	0.8	F.A.	5.2	2.6	1.50	-
		0.5	ω_c 10.0	5.5	3.5	0.7
		F.A.	16.0	9.9	6.0	2.6
7.0	2.0	0.25	ω_c 0.45	0.35	0.1	0.25
		F.A.	7.23	3.77	1.75	0.80
		0.75	ω_c 0.60	0.35	-	-
(6.5)	1.25	F.A.	0.70	0.65	0.50	0.50
		0.5	ω_c 12.0	9.9	4.0	2.6
		F.A.	6.9	6.0	-	-
7.5	3.00	0.5	ω_c 0.25	-	-	-
		F.A.	10.0	-	-	-
		(7.25)	2.50	ω_c 0.30	0.30	0.20
(6.5)	2.00	F.A.	75.0	0.0	7.0	3.0
		0.10	ω_c 0.10	0.15	0.10	0.1
		F.A.	16.0	9.1	7.0	4.1
8.0	9.22	0.10	ω_c 0.20	0.16	0.10	-
		F.A.	15.0	10.0	0.0	-
		10.03	ω_c 0.20	0.20	0.10	0.15
		F.A.	15.0	12.0	10.0	6.0

(4) 加速度応答スペクトルについて; 図4に、立ち上り時間の分散を変えた場合の加速度応答倍率と道路橋示方書に示されているものとの比較を行った一例を示す。その傾向はよく一致しており、このことから本論の理論地震動は、実地震動の特性を、かなりよく反映していると考えられる。

4. むすび; 以上、本論では、ずれの立ち上り時間のみを確率変数とした確率断層モデルを提案し、それより発生させた理論地震動の特性を、最大加速度および、応答スペクトルにより検討した。その結果、比較的単純なモデルにもかかわらず、本モデルは、実地震動特性をかなりよく再現していることがわかった。今後、モデルの改良、生起波の詳細な解析を通じて、実地震動の特性を明らかにしてゆきたいと考えている。



参考文献

(1) N. A. Haskell ; Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. B. S. S. A., Vol.54, No.6, 1964.
 (2) Aki K. and P. G. Richards ; Quantitative seismology theory and methods. Vol.I, II.