

1. まえがき

最近, 従来の地震学での議論を越えて, 耐震工学の分野でも震源特性の重要性が認識されるようになってきた。一般に, 震源特性は直接的な観測の範囲を越えた対象なので, その詳細な把握は極めて困難である。この研究は, 強震記録の統計解析を利用することにより震源スペクトルの平均像を抽出して, これを断層破壊のbarrierを導入した不均質断層モデルから考察し, 震源パラメータに対する一つのscaling lawの誘導を試みたものである。

2. 震源スペクトル(加速度フーリエスペクトル)の平均像の抽出

耐震工学では加速度スペクトルが重要である。しかも, 震源パラメータとスペクトルの関係を考察するためにはフーリエスペクトルが必要になる。しかし, 一般にフーリエスペクトルの算定には地震記録の解析区間長の設定, スムージングの問題などやっかいな処理が要求される。ところが, 幸いなことに減衰定数 $h=0.0$ の速度応答スペクトルは近似的に加速度フーリエスペクトルに等しく, その上限値を与える性質があり, しかも算定が容易である¹⁾。この研究では, この性質に目をつけ, 速度応答スペクトル($h=0.0$)を加速度フーリエスペクトルの近似値として用いて震源問題を考える。

日本で得られた強震記録水平動228成分に対して速度応答スペクトル($h=0.0$)を求め, これに著者が開発した多変量解析²⁾を施した。用いた重回帰モデルは地震のマグニチュード M を2次の高次式とした次式である。

$$\log_{10} V(T) = a(T)M^2 + b(T)M + c(T)\log_{10}(\Delta + 30) + d(T)D + e(T) + \sum_{i=1}^{N-1} A_i(T)S_i \quad (1)$$

ここに, $V(T)$: 応答スペクトル振幅, M : マグニチュード, Δ : 震央距離, D : 震源深さ, S_i : ダミー変数, N : 観測点数, T : 周期, $a(T)$, $b(T)$, ----- $A_i(T)$: 回帰係数。

式(1)は震源スペクトルを M , Δ , D でscalingするモデルであり, 観測点の地盤条件の影響を除いた第1項から第5項により震源スペクトルのattenuationが得られる。解析の結果得られたスペクトルを対象データの Δ , D の平均値($\Delta=78$ km, $D=43$ km)で規格化し, M でscalingした例がFig.1である。Fig.1は多くの強震記録から統計的最適値として求められた震源スペクトルの平均値を M でscalingしたものに相当する。Fig.1をみると, 短周期側にHanks³⁾のいう f_{max} , 長周期側にIzutani⁴⁾のいう f^* の二つのcorner frequencyがみられる。しかも, f_{max} は M によらず一定, f^* は M によって変化する様相が見て取れる。

3. 理論震源スペクトル

不均質断層モデルによる震源スペクトル理論は多くの研究者により各種のものが提案されている。ここでは, 比較的簡単で, 物理的にも理解しやすいPapageorgiou and Aki⁵⁾のモデルをとりあげ, Fig.1の震源スペクトルを考察する。Papageorgiou and AkiはFig.2に示すような $L \times W$ の震源断層に半径 ρ_0 の円形クラックが一樣に分布し, これが斜線で表されるbarrierで境される簡単な断層モデルを考えた。

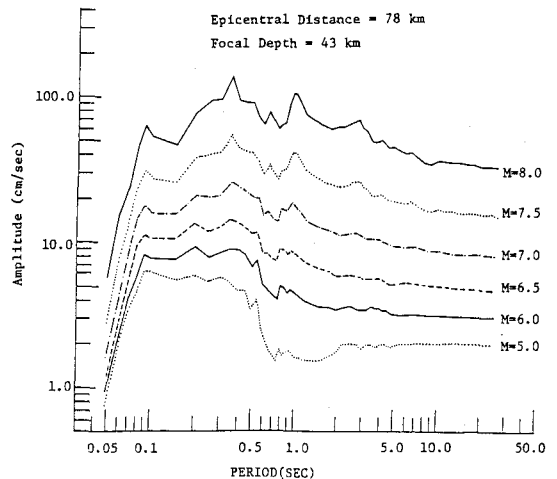


Fig.1 統計解析による震源スペクトル

彼等は、このような単純化された不均質断層で各々の円形クラックの地震波が incoherently に観測点に到達するという仮定のもとに、加速度パワースペクトルの期待値を与えた。ここで、彼等のパワースペクトルを参照して、加速度フーリエスペクトルの期待値 $|F(\omega)|$ を誘導すると次の通りになる。

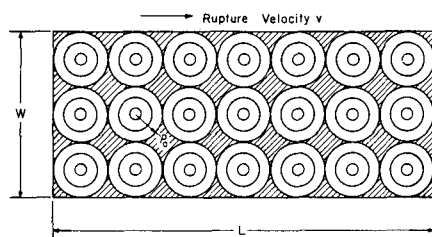


Fig. 2 円形クラックによるbarrierモデル

$$|F(\omega)| = \frac{2}{2^{1/2}} \cdot \frac{R^s}{4\pi\beta r_0} \cdot S^{1/2} \left(\pi \frac{\Delta u_{\max}}{\rho_0} \right) \cdot v\beta \cdot 1.82 \dots (2)$$

ここに、 R^s : radiation pattern (S波)、 S : 断層の全面積、 r_0 : 震源と観測点の距離、 β : S波速度、 v : クラックの破壊伝播速度、 $\Delta u_{\max}$: 円形クラックの最大くい違い量、 ρ_0 : 円形クラックの半径、 1.82 : Geller⁶⁾の式 $v=0.72\beta$ を用いた定数。 R^s 、 v は地震による差が小さいので、式(2)から震源スペクトルは主に S 、 $\Delta u_{\max}$ 、 ρ_0 によって規定されるフラットなスペクトルとなることがわかる。式(2)はこれらの量が知れば、平均スペクトル $|F(\omega)|$ が予測できるという式であるが、逆に $|F(\omega)|$ が知れば ρ_0 等が求まる式でもある。一方、 $|F(\omega)|$ は統計的にFig.1のように求まっている。従って、これを利用すれば未知の量 ρ_0 のマグニチュード M による scaling law が誘導できることになる。

Table 1 マグニチュードと円形クラック半径、クラック数の関係

Magnitude	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
Period range for $ F(\omega) $ (sec)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
$ F(\omega) $ (cm/sec)	5.54 ±0.57	6.12 ±0.64	8.11 ±0.64	12.10 ±1.24	18.24 ±3.23	35.26 ±7.20	71.55 ±19.56
Radius of circular crack ρ_0 (km)	0.14 ±0.02	0.41 ±0.04	0.99 ±0.08	2.09 ±0.21	4.38 ±0.78	7.17 ±1.46	11.17 ±3.05
Number of cracks n	103 ±11	39 ±4	22 ±2	15 ±2	13 ±2	13 ±3	17 ±5

4. 円形クラック (断層パッチ) の半径 ρ_0 のマグニチュード M による scaling law

式(2)の断層面積 S 、最大くい違い量 $\Delta u_{\max}$ はマグニチュード M の関数として幾つかの経験式が提案されている。ここでは、佐藤(良)⁷⁾の式を参照すると、

$$S^{1/2} = 10^{0.5M-2.04} \dots (3), \quad \Delta u_{\max} = 6 \cdot 10^{0.5M-1.4} / \pi \dots (4)$$

これから、円形クラックの半径 ρ_0 は次式により $|F(\omega)|$ から求まる。

$$\rho_0 = \left(\frac{2}{2^{1/2}} \cdot \frac{R^s}{4\pi\beta r_0} \cdot 6 \cdot v \cdot 1.82 \cdot 10^{M-3.44} \right) / |F(\omega)| \dots (5)$$

いま、地殻のs波速度を $\beta=3.5\text{km/sec}$ としてGeller⁶⁾の式 $v=0.72\beta$ を用いると、断層の破壊伝播速度 $v=2.52\text{km/sec}$ となる。さらに、式(5)の $|F(\omega)|$ は任意方向のスペクトル期待値だから R^s も震源球での期待値をとって $R^s=0.63$ とする。以上の値を用いて、Fig.1の $|F(\omega)|$ の平坦部の値を式(5)に代入

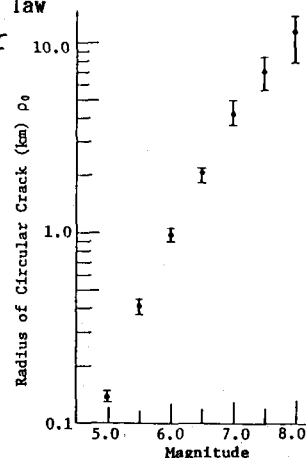


Fig. 3 マグニチュードと円形クラック半径

すると、マグニチュード M による ρ_0 の値が求まる。これを表にしたのがTable 1である。Table 1には ρ_0 と S の値から求まる円形クラックの数 n も記載してある。Table 1の ρ_0 と M 関係をプロットしたのがFig.3である。Table 1とFig.3から震源断層の破壊クラック (断層パッチ) の半径 ρ_0 はマグニチュード $M=6$ の地震ではせいぜい1.0km程度、マグニチュード $M=8$ の地震では11km程度であることがわかる。また、クラック数 n は被害を与える規模の地震 ($M \geq 6$) では高々10-20程度であることが知れる。以上に導かれた関係は多くの地震から経験的に推定される平均値であるが、断層パッチを地震の規模で scaling した最初の式であり、断層震源モデルを考慮して強震動特性を予測する研究に有益な知見を与えるものと考えられる。(参考文献) 1) 大崎:地震動のスペクトル入門, 2) Kmamiyama and Yanagisawa: Soils and Foundation, Vol.26, No.1, 3) Hanks: Bull. Seism. Soc. Am. Vol.72, 4) Izutani: J. Phys. Earth, Vol.129, 5) Papageorgiou and Aki: Bull. Seism. Soc. Am. Vol.73, 6) Geller: Bull. Seism. Soc. Am. Vol.66, 7) Sato: J. Phys. Earth, Vol.27