

1. まえがき

最近の耐震解析は震源から構造物に至るまでのすべての要因を考慮するシステム解析の様相を呈するようになってきた。この結果、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、震源特性は観測の手の届く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。この研究では、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となる。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様々な処理の要求される。とこのが、幸いなことに減衰定数 $\epsilon = 0.0$ 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、その上限値を与えは性質があり、しかも算定の容易である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 ($\epsilon = 0.0$) 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の2成分に対して速度応答スペクトル ($\epsilon = 0.0$) 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 と2次の高次式とした次式である。

$$\log D(T) = a(T)M^2 + b(T)M + c(T) \cdot \log_0(\Delta + 30) + d(T) \cdot D + e(T) + \sum_{i=1}^{N-1} A_i(T) \cdot \delta_i \quad (1)$$

ここで、 $D(T)$: 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、 δ_i : M -変数、 N : 観測変数、 T : 周期、 $a(T), b(T), \dots, A_i(T)$: 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、観測変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マータの Δ, D の平均値 ($\Delta = 78 \text{ km}, D = 43 \text{ km}$) で規格化し、 M で scaling した例が Fig. 1 にある。Fig. 1 は M, Δ, D 及び観測変の地盤条件を考慮して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。

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。ここでは比較的簡単で、物理的にも理解しやすい Papageorgiou and Aki のモデル³⁾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 F_0 の円形クラックを一本に分布し、これを斜線に表わされる障壁 (barrier) で覆われる簡単な断層モデルを考えた。

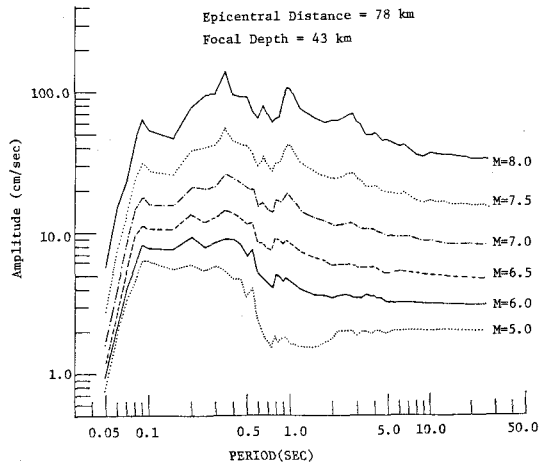


Fig. 1 統計解析による震源スペクトル $G(\omega)$

従らは、このような単純化された不均質断層を各々の円形クラックの地震波が *incoherently* に観測先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、従り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 $|G(\omega)|$ を誘導すると次の通りになる。

$$|G(\omega)| = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F^{\frac{1}{2}}}{4\pi\beta_0} \cdot \sqrt{S} \cdot (\pi \frac{\Delta U_{max}}{\rho_0}) \cdot v \cdot 2.56 \quad (2)$$

ここに、 $F^{\frac{1}{2}}$: radiation pattern, S : 断層の全面積, ρ_0 : 震源と観測先の距離, β : S 波速度, v : クラックの破壊速度, ΔU_{max}

: 円形クラックの最大くへの変位量, ρ_0 : 円形クラックの半径。

$F^{\frac{1}{2}}$, 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 , ΔU_{max} , ρ_0 によって規定される。

クラックなスペクトルになることがわかる。式(2)はこれらの量がわかれば、平均スペクトル $|G(\omega)|$ が予測できるという式であるが、逆に $|G(\omega)|$ がわかれば ρ_0

等が求まる式でもある。一方、 $|G(\omega)|$ 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

を誘導できることになる。

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 , 最大くへの変位量 ΔU_{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、佐藤(良)⁴⁾ の式を参照すると、

$$\sqrt{S} = 10^{0.57M - 2.04} \quad (3), \quad \Delta U_{max} = \frac{6}{\pi} 10^{0.57M - 1.4} \quad (4)$$

これから、円形クラックの半径 ρ_0 は次の関係式により $|G(\omega)|$ から求まる。

$$\rho_0 = \left(\frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{F^{\frac{1}{2}}}{4\pi\beta_0} \cdot 6 \cdot v \cdot 2.56 \cdot 10^{M - 3.64} \right) / |G(\omega)| \quad (5)$$

いま、地殻の S 波速度を $\beta = 3.5 \text{ km/sec}$ とし、Geller⁵⁾ の式 $v = 0.72/\beta$ を

用いて、断層の破壊速度 $v = 2.52 \text{ km/sec}$ とする。さらに、式(5)の $|G(\omega)|$ は任意方向のスペクトル期待値 ρ_0 であり、radiation pattern $F^{\frac{1}{2}}$ も震源球面の期待値として $F^{\frac{1}{2}} = 0.63$ とする。

以上の値を用いて、Fig. 1 の $|G(\omega)|$ の平理部の平均値を式(5)に代入すると、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も記載してある。

Table 1 の ρ_0 と M の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 1.0 km 程度、マグニチュード $M=8$ の地震では 11 km 程度であることがわかる。また、クラック数 n はいかなる規模の地震でも高々 10~20 程度であることがわかる。

以上に導かれた関係は多くの地震から統計的に推定された平均値であるが、断層パッチを地震の規模で scaling した最初の式であり、震源断層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る。 (参考文献) 1) 大崎: 地震動のスペクトル解析入門, 2) Kanayama and Yanagisawa: A statistical model for estimating response spectra ..., Soils and Foundation (in press), 3) Papageorgiou and Aki: A specific barrier model for the quantitative ..., Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 73, 4) Sato, R.: Theoretical basis on relationships ..., J. Phys. Earth, 27, 5) Geller, R.J.: Scaling relations for earthquake ..., Bull. Seis. Soc. Am. Vol. 66

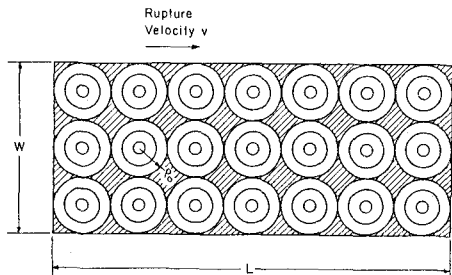


Fig. 2 円形クラックと barrier による不均質断層モデル

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 M	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
$ G(\omega) $ (cm/sec)	5.2	5.6	8.3	11.0	20.0	37.0	70.0
Radius of Circular Crack ρ_0 (km)	0.16	0.46	0.97	2.3	4.0	6.9	11.5
Number of Cracks n	21		23		13		16

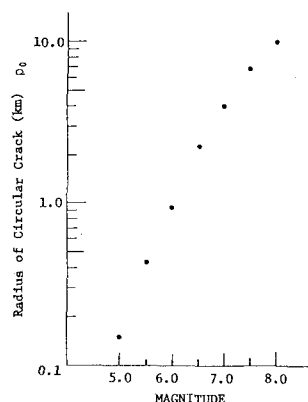


Fig. 3 マグニチュードと円形クラック半径