

(41) オメガスクエアモデルによる長周期領域の応答スペクトルの評価

京都大学工学部 正会員 土岐憲三

京都大学工学部 正会員 澤田純男

建設省土木研究所 正会員 濱田 禎

1. はじめに

地震学の分野で一般的なオメガスクエアモデルは、長周期地震計による観測記録を基に考えられたモデルで、コーナー周波数より長周期の領域で信頼できるモデルとなっている。しかしオメガスクエアモデルはフーリエスペクトル上で構築されており、工学の分野でよく用いられてる応答スペクトルと単純に比較することが困難である。一方、構造物の設計に用いられている応答スペクトル推定式は、加速度記録を基に作成されたもので、長周期領域の信頼性に乏しい。そこで本研究ではオメガスクエアモデルによって長周期領域の応答スペクトルを算定する方法を示し、求められた応答スペクトルと既存の応答スペクトルの回帰式とを比較する。

2. オメガスクエアモデルにおける地震の規模とスケーリングパラメーターの関係

オメガスクエアモデルに準じて地震の規模とコーナー周波数及びスペクトルレベルを関係付ける理論は多数の研究者によって提案されているが、どの理論もコーナー周波数付近よりも低い周波数領域においては大きな差異はない。そこで本研究では、最も一般的な理論であるBrune¹⁾によるストレスドロップ $\Delta\sigma(\text{bar})$ と地震モーメント $M_0(\text{dyn}\cdot\text{cm})$ からコーナー周波数 $f_c(\text{Hz})$ を求める関係式

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 \cdot 4.0 \cdot (\Delta\sigma/M_0)^{1/3} \quad (\text{Hz})$$

を用いて震源スペクトルのコーナー周波数を、またBoore²⁾のモデルによる加速度スペクトル式を積分して、変位スペクトルに変換した次式

$$D = 3.7 \cdot 10^{-3} \cdot M_0 \cdot \frac{1}{1+(f/f_c)} \cdot \frac{\exp(-7.1 \cdot 10^{-3} \cdot X)}{X} \quad (\text{cm})$$

を用いてフラットレベルを決定した。

また、工学の見地に基づく既存の短周期領域の予測スペクトルと地震学のオメガスクエアモデルを結び付けるために、気象庁マグニチュード M_j と地震モーメント M_0 を対応させることが必要となる。そこで、本研究では、両者の関係を示す式として、佐藤³⁾による日本における多数の地震から得られた式

$$\log M_0 = 1.5 \cdot M_j + 16.2$$

を用いることにした。

3. 三角形の模擬変位波形のフーリエ変換

応答スペクトルを考える場合、前述の変位のフーリエスペクトルを時刻歴の加速度波形に変換する必要があるが、本研究では地震動の変位波形の主要部が概ね三角形であるようにみてとれることに着目して、地震動の変位波形を三角形で置き換えることを考え、三角形を中心に色々な図形のフーリエ変換の特徴について考察した。

図1(a)に底辺8.0sec、高さ4.0cmの三角形の模擬変位波形を(b)にそのフーリエ変換を示す。図1(b)には0.1Hz付近よりも低い振動数領域に平坦な部分を持ち、それよりも高い振動数領域では振動数が大きくなるに従って-2の傾きで減少する包絡線が現れている。これはオメガスクエアモデルのスペクトル形状に一致する。

図1(a)のような三角形のフーリエ変換を実際に計算してみると、

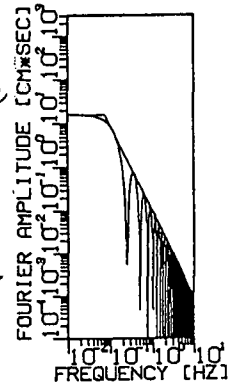
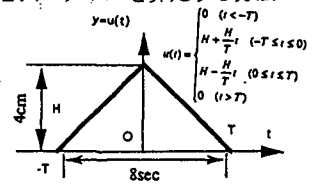


図1 (b) 変位波形のフーリエ変換

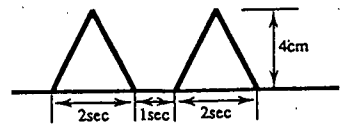


図2 (a) 変位波形

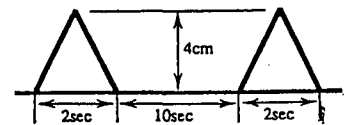


図3 (a) 変位波形

$$U(\omega) = \int_{-T}^0 \left(H + \frac{H}{T} t \right) e^{-i\omega t} dt + \int_0^T \left(H - \frac{H}{T} t \right) e^{-i\omega t} dt$$

$$= \frac{2H}{T\omega^2} (1 - \cos \omega T) - \frac{2T}{\omega^2} \frac{H}{T} \left(\frac{\sin \omega T/2}{\omega T/2} \right)^2$$

となるが、この結果はコーナー周波数がTの値に反比例し、三角形の面積そのものが平坦部のレベルを表すことを裏付けている。

図2及び3(a)に底辺2.0sec、高さ4.0cmの三角形二個をそれぞれ1.0sec、10.0secの間隔で並べたものを、(b)に各々のフーリエ変換を示す。これらの2つの図形はコーナー周期、フラットレベル共に等しいが、間隔が開くにつれて平坦部の低周波数の領域に谷が現れてくるのがわかる。

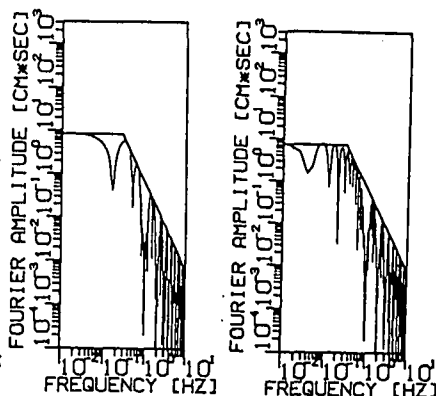


図2) 変位波形のフーリエ変換 図3) 変位波形のフーリエ変換

図4(a)及び(b)はそれぞれ底辺8.0sec、高さ4.0cmの三角形と底辺4.0sec、高さ2.0cmの三角形とを間隔なしで並べた模擬変位波形とそのフーリエ変換である。この図は大きな傾向を大きいほうの三角形が与え、小さいほうの三角形がそれを乱しているように見える。

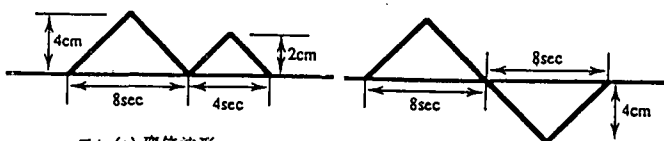


図4 (a) 変位波形

図5(a)に底辺8.0sec、高さ4.0cmの三角形を二個正逆逆に間隔なしで並べたものを示す。(b)はそのフーリエ変換である。この波形では、フーリエ振幅の最大値とコーナー周波数は底辺8.0 sec、高さ4.0cmの三角形を間隔なしで二個並べたものによるものと変わらないが、コーナー周波数よりも周波数が低くなるにつれてフーリエ振幅が減少しているのが特徴的である。

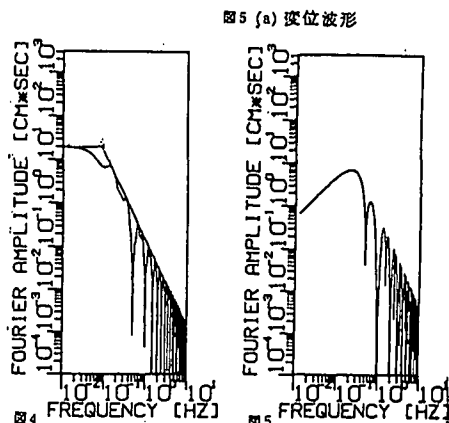


図5 (a) 変位波形

図4 (b) 変位波形のフーリエ変換 図5 (b) 変位波形のフーリエ変換

以上のことを総合すると、対称性を持つ図形のフーリエ変換に現れるフラットレベル（もしくはフーリエ振幅の最大値）は、その図形と面積の等しい三角形に置き換えることができる。また、コーナー周波数 f_c は三角形の底辺の長さTに反比例し

$$f_c = 0.63 / T$$

なる関係で表されることがわかる。

4 三角形の変位波形による応答スペクトル

2において気象庁マグニチュードとストレスドロップからオメガスクエアモデルのスケージングパラメーターであるコーナー周波数とフラットレベルを求める関係式を示した。これによると、例えばマグニチュード7.0でストレスドロップが200barの地震の場合、これが震央距離20kmの地点で観測されると、その変位波形のフーリエ変換に現れるコーナー周波数の値は0.144Hzでフラットレベルは35.6cm*secということになる。

一方、3においてコーナー周波数とフラットレベルを与えた場合にそれらを満たすような三角形の波形を作る方法を示した。これによると上述した地震の変位波形は底辺4.46sec、高さ15.9cmの三角形にそのコーナー周波数とフラットレベルを一致させることができる。図6(a)及び(b)はこの三角形変位波形とそのフーリエ変換、また(c)及び(d)は変位を時間で二回微分した加速度波形とそのフーリエ変換を示している。



図6(a) 三角形模擬変位波形



図7(a) 台形模擬変位波形

ここでは、このような加速度波形によって絶対

加速度応答スペクトルの長周期領域での傾向を探り、既存の回帰式によって得られる加速度応答スペクトルを長周期領域に拡張することを試みる。

まず、三角形の模擬変位波形と同じコーナー周波数とフラットレベルをもつ台形の模擬変位波形による応答スペクトルがどのようになるかを考察する。図7(a)及び(b)にそれぞれコーナー周波数が0.14Hz、フラットレベルが35.6Hzとなるように調整した台形の模擬変位波形とそのフーリエ変換を、また(c)及び(d)にそれぞれ変位を二回微分した加速度波形とそのフーリエ変換を示した。図8(d)と図9(d)を比較すると、当然のことながら両者のおおまかなレベルは一致しているが、台形の方のフーリエ変換は0.2Hz付近にフーリエ振幅の落ち込む谷

を有していることからコーナー周波数を含む0.07Hzから0.3Hzの領域の成分が三角形の方より小さくなっている。これは、平坦部と-1の傾きを持つ部分との境目のコーナー周波数が、0.07Hz付近に存在する場合に相当すると考え

られる。図8は図6及び7(c)の加速度波形を入力波としたときの絶対加速度応答スペクトルであるが、両者を比較すると、当然ながら先の0.07Hzから0.3Hzの範囲、周期にして3秒から14秒の範囲で三角形による加速度応答値の方が台形によるものよりも大きな値をとっていることがわかる。それよりも長い周期では、両者ともに周期が長くなるにつれて-1.5程度の傾きで減少する傾向にある。

以上のように応答の値は入力周波数特性に支配されるが、

その周波数特性は、3での考察によると、台形や複数の三角形によるものよりも、ひとつの三角形にコーナー周波数とフラットレベルに代表させたものの方が、コーナー周波数付近より低い周波数の領域でフーリエ振幅が大きくなる。従ってひとつの三角形の変位波形を二回微分して得られる加速度波形によって得られる応答スペクトルが最大の応答スペクトルとなる。

次に、ストレスドロップと応答について考える。図9にはマグニチュードが7.0で、ストレスドロップがそれぞれ10bar、100bar、1000barで

震央距離が20kmで震源深さが40kmの地震を想定した場合の加速度応答スペクトルを示す。それぞれのコーナー周期は下から順に18.8秒、8.7秒、4.05秒である。

ストレスドロップは内陸型の地震でだいたい300から800bar、海洋型の地震で10から30bar程度の値になることが知られているが本研究では両者の平均的な値として200barを標準値として用いる。

図10に道路橋示方書・耐震設計編⁴⁾に掲載されている、加速度応答スペクトルの回帰式に基づいて作成した、マグニチュード7.0の地震による震央距離20kmの1種地盤を対象とした場合の減衰定数0.05の加速度応答スペクトル

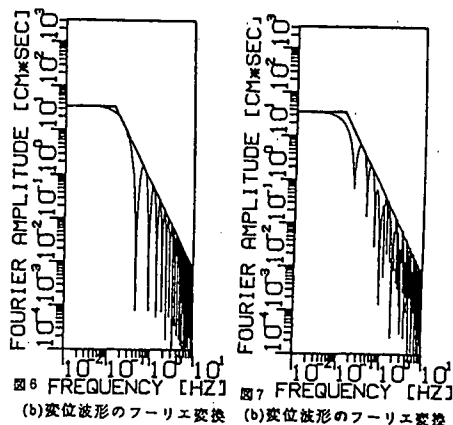


図7 (a)変位波形のフーリエ変換 (b)変位波形のフーリエ変換

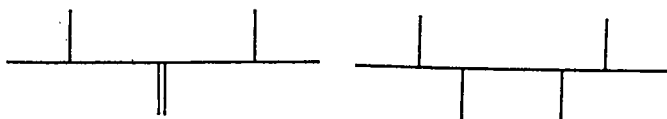


図8 (c)加速度波形

図7 (c)加速度波形

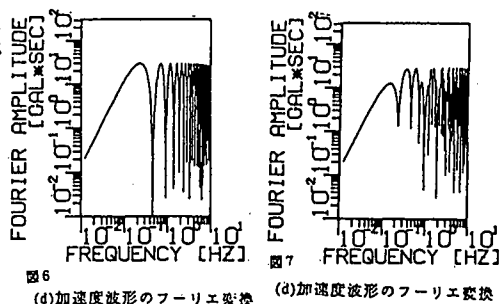


図6 (d)加速度波形のフーリエ変換

図7 (d)加速度波形のフーリエ変換

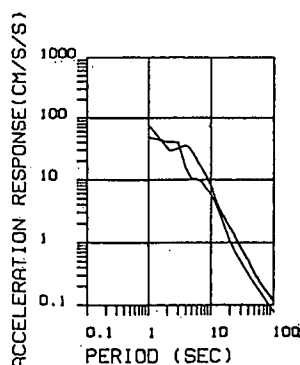


図8 三角形と台形による応答スペクトルの違い

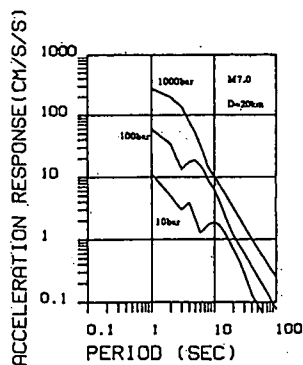


図9 ストレスドロップによる応答スペクトルの違い

(太線)と本研究による同条件でストレスドロップ $\Delta\sigma$ が200barの場合の加速度応答スペクトルを重ねて示した。本研究によるスペクトルでは、信頼できる領域はオメガスクエアモデルの特性上コーナー周期(この場合約7.0秒)よりも長い周期の領域であるが、全体的なレベルとしては距離減衰式によるものと大きな違いはない。

図11に同じく3種地盤の場合の応答スペクトル(太線)と本研究による同条件でストレスドロップ $\Delta\sigma$ が200barの場合のものを重ねて示した。本研究による加速度応答スペクトルは硬い地盤を対象としたものに相当するが、応答スペクトルの長周期成分のレベルが増大するのは地盤の固有周期よりも短い周期までで、それよりも長い周期においてはそれほど影響を受けないと考えられることから、これをそのまま3種地盤の長周期の応答スペクトルとしても差し支えないと考えられる。

図10及び11のような図において、3.0秒以下の領域では推定式の値、コーナー周期以上の領域では本研究による応答値、その間は直線で結んだものを、その条件における推定スペクトルとする。ただし、“その間を直線で結んだ”部分には不透明さが残っている。

5 まとめ

以上のような研究の結果、オメガスクエアモデルのスペクトル特性を三角形の変位波形に代表させることにより、地震動の長周期成分を簡便に評価することができ、既存の推定式と組み合わせることにより、広い周波数範囲に及ぶ応答スペクトルを推定することができた。

参考文献

- 1) Brune, J.N. :Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, Bull.Seism.Soc.Am.68, 1555-1576, 1970.
- 2) David M.Boore:Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra,Bulletin of the Seismological Society of America,Vol.73,No.6,pp.1865-1894,December1983.
- 3) Sato,R. :Theoretical bases on relationships between focal parameter and earthquake magnitude, J.Phs.Earth, Vol.27, pp.353-372,1979.
- 4) 社団法人 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V 耐震設計編、平成2年2月

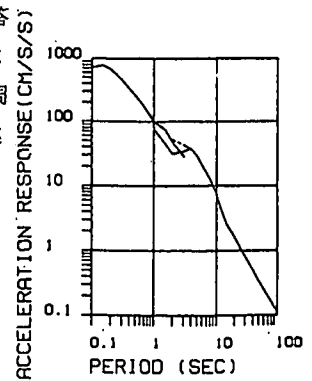


図10
マグニチュード7.0、震央距離20Km、
1種地盤の推定スペクトル

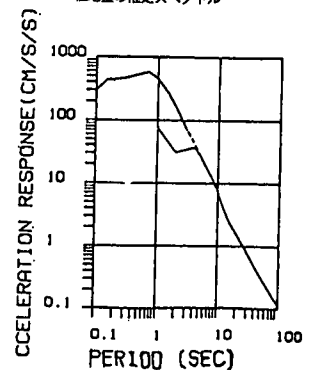


図11
マグニチュード7.0、震央距離20Km、
3種地盤の推定スペクトル