

「地盤応答スペクトル」の提案

大成建設(株) フェロー会員 ○志波 由紀夫

大成建設(株) 正会員 畑 明仁

1. 入力地震動波形に対する地盤の動的応答の最大値を表示したスペクトル

地震動加速度波形の工学的特性を表わす代表的な表示法として、様々な固有周期をもった1質点系動力モデル群が一様にその加速度波形で揺すられたときの最大応答値をグラフ表示した「応答スペクトル」がある。現状では、地盤震動の計算にもこの応答スペクトルが使われているが、本来連続体である地盤の問題にこれを適用すると、長い固有周期帯における評価誤差が大きくなる。また、地中構造物の耐震設計では、地中に生じるせん断ひずみの大きさを知ることが重要であるが、それが応答スペクトル的に表示されていると便利である。

本稿は、こうした要求に応えるため、地震動加速度波形について、地盤がこれで揺すられたときの地表面の応答加速度や地中のせん断ひずみの大きさなど、地盤応答の最大値を地盤の基本固有周期ごとに計算してスペクトル表示した「地盤応答スペクトル」を提案するものである。

2. 「地盤応答スペクトル」の算出方法

「地盤応答スペクトル」の概念を、応答スペクトルのそれと対比して図-1に示す。簡単に言えば、応答スペクトルの計算における1質点系モデルの部分をも、1次元の連続体としての地盤モデルに置き換えたものである。表層地盤を均一なVoigt型の線形粘弾性体としてモデル化することにし、パラメータを層厚 H 、質量密度 ρ 、せん断弾性係数 G 、粘性係数 η とする。地震動の入力基盤は剛とする。このモデルで深さ方向に z 軸をとり、基盤地震動変位を $y(t)$ 、深さ z における変位、せん断ひずみ、せん断応力を、それぞれ $x(z,t)$ 、 $\gamma(z,t)$ 、 $\tau(z,t)$ とすると、表層地盤の挙動に関する記述と運動方程式は、次式のようにになる。ここで t は時間である。

$$\gamma = \frac{\partial x}{\partial z} \quad \tau = G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - \eta \cdot \frac{\partial^3 x}{\partial t \partial z^2} - G \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = -\rho \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} \quad \dots \dots \dots \text{式(2)}$$

式(2)の右辺の $d^2 y / dt^2$ に入力地震動の加速度時刻歴を代入して微分方程式を数値的に解くことにより、表層地盤の変位 x 、絶対加速度 $d^2(x+y)/dt^2$ 、せん断ひずみ γ 等、各種応答の時刻歴およびそれらの最大値を得ることができる。式(2)を解く際に、表層地盤の無数の固有振動モードを組み合わせるが、それらはその最も長い固有周期(以下、基本固有周期 T)の振動を基本にして表わせる。 T は、表層地盤を伝わるせん断波の速度を V_s ($=\sqrt{G/\rho}$)とすると、 $T=4H/V_s$ である。また、表層地盤の減衰定数は震動の円振動数 ω に依存しない履歴減衰型とし、 $\eta \cdot \omega / G = 2h \equiv \text{一定値}$ の関係があるものとして減衰定数 h を定義する¹⁾。こうすると、表層地盤の応答は、 T と h の2つ(せん断ひずみ γ については層厚 H を加えた3つ)のパラメータで規定される。そこで、上述の計算を、 h を一定に保ちながら T を順次変化させて行い、応答波形の最大値をプロットしていけば、その h に対する「地盤応答スペクトル」が得られる。

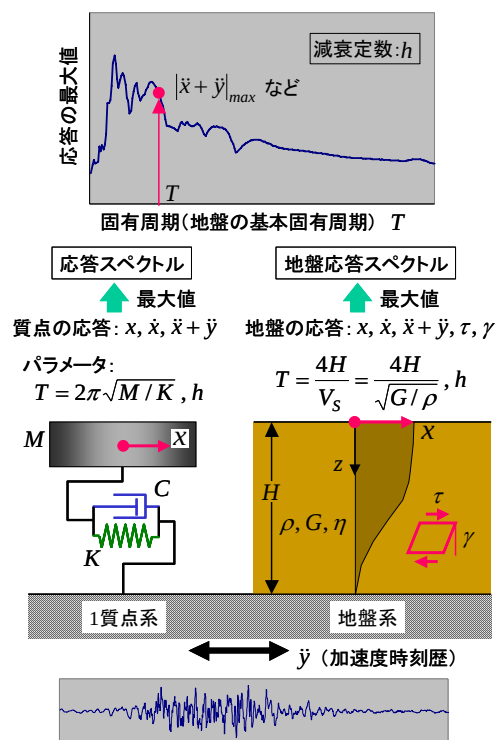


図-1 応答スペクトルと地盤応答スペクトル

キーワード 入力地震動、地盤震動、地震応答、応答スペクトル、地中ひずみ

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 TEL: 045-814-7231

3. 「地盤応答スペクトル」の計算例および応答スペクトルとの比較

「地盤応答スペクトル」の具体的な計算例として、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台波の場合を示す。図-2の左列に、その加速度波形と、地震応答計算結果としての地表面の加速度波形および変位波形、ならびに地中のせん断ひずみ波形を、各々、地盤の基本固有周期 T が0.5sの場合と3.0sの場合の二つについて示した。図-2の右列は、これらを含み T が0~5sの範囲について0.02s刻みで応答計算した結果の各最大値をプロットして描いた「地盤応答スペクトル」である。上から順に、地表面の加速度、速度、変位、そして地中のせん断ひずみのスペクトルである。これらの図には、1質点系の応答計算による応答波形と応答スペクトルも併記してある。ただし、それらには刺激関数の関係で $4/\pi$ を乗じてある。なお、減衰定数 h は全て0.05である。

地表面の応答加速度、応答速度、応答変位について見ると、2つのスペクトルは1s程度より短い固有周期帯ではよく一致しているが、それより長い固有周期帯では応答スペクトルが地盤応答を過小評価する形になって差が生じている。また、地盤変位の計算に、1質点系の速度応答スペクトル S_V を用いた $2/\pi^2 \cdot S_V \cdot T$ という計算式²⁾がよく使われるが、これも1s以上の固有周期帯において誤差が生じている。

せん断ひずみ γ の応答スペクトルは、関係するパラメータの都合で表層厚 H を乗じた形($\gamma \cdot H$)で表示してあるが、1質点系の応答にはない、地盤応答に特有なスペクトルである。 γ は深さ z ごとに異なるため、ここでは z/H 比が1/4, 1/2, 3/4の3深度について示した。例えば、基本固有周期が0.5sの地盤では、層中央($z/H=0.5$)で $\gamma \cdot H$ は18.9cmと読み取れ、表層厚 H が20mであれば、発生するせん断ひずみ γ の最大値は 9.45×10^{-3} となる。

均質地盤を考えたときには、 γ は深さ方向に増大する、というのが一般的である。本例では、 T が1s強より短い周期帯ではそのようになっているが、これよりも長い周期帯では深度との相関はなくなっている。

以上のように二つの応答スペクトルの長周期帯で差異が生じる理由は、高次振動モードの影響である。すなわち、せん断ひずみの応答波形を見ると分かるが、短周期帯では浅い所から深い所まで波形の位相がよく合っており、地表面の変位波形の位相ともよく合っていて、地盤震動は1次モードが支配的である(1質点系で表現可能)。一方長周期帯では、ひずみ波形の位相が深さ方向に揃っておらず、高次モードの混入が認められる。

参考文献

- 1) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，pp.168-173，鹿島出版会，1994年
- 2) 日本道路協会：共同溝設計指針，1986年

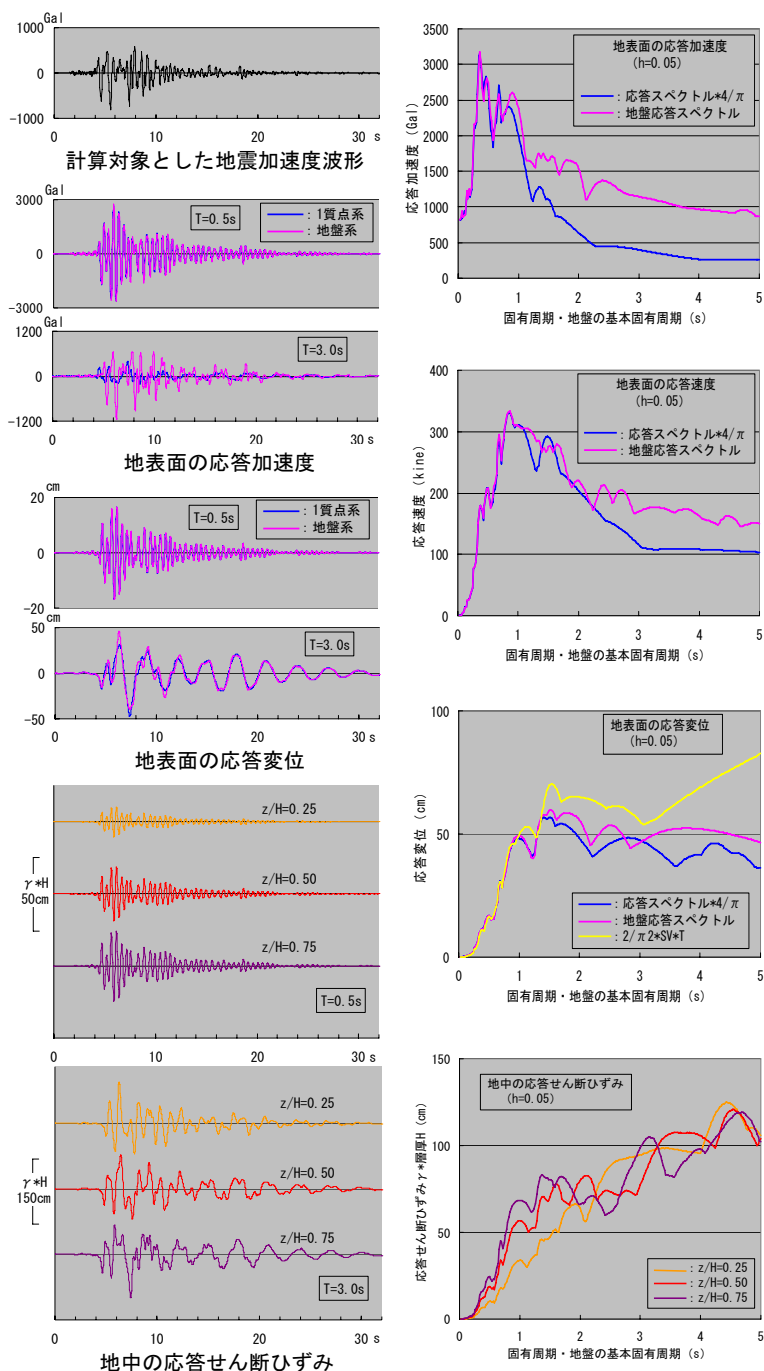


図-2 地震応答波形と地盤応答スペクトル ($h=0.05$)
(1質点系と地盤系との比較)