

# 「地盤応答スペクトル」の提案と計算例

志波由紀夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所  
(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)  
E-mail: shiba@ce.aisei.co.jp

耐震設計で地震動加速度波形が与えられたとき、それによる構造物の動的応答の大きさを知るのに便利なのが応答スペクトルである。地中構造物の耐震設計においても、1質点系動力学モデルで計算されるそれが使われているが、本来は連続体としての地盤のモデルで計算すべきであろう。また、地中構造物の耐震設計で重要なのは、設計地震動による地盤の応答変位とともに、地中に生じるせん断ひずみの大きさを知ることであり、それが応答スペクトルの形で表示されていれば便利である。本稿は、与えられた地震動加速度波形について、連続体としての地盤がそれで揺すられたときの応答値を地盤の固有周期ごとに表示した「地盤応答スペクトル」を提案するものである。また、具体的な計算例を通して、その特性を示す。

**Key Words** : response spectrum, ground motion accelerogram, earthquake ground response, one-dimensional linear model, equation of motion

## 1. はじめに

地震動加速度波形の工学的性質を表す代表的な表示法に「応答スペクトル」がある。着目している地震動加速度波形が、様々な固有周期をもった1質点系動力学モデル群を揺すったときに、各々がどれだけ応答するか、その応答加速度や応答変位の最大値を固有周期ごとにスペクトル表示したものである。近似的に1質点系にモデル化できる構造物の耐震設計などにおいて、入力地震動の応答スペクトルが与えられていれば、そこから当該構造物の固有周期に対応するスペクトル値を読み取ることでより直ちに最大応答値を知ることができて便利である。また、そうした応答スペクトルの利用に基づく「応答スペクトル法」が、構造物の弾性域での動的解析を時刻歴応答解析法よりも簡易に行える方法として用いられている。

応答スペクトルは、地上の構造物だけでなく、地中構造物の耐震設計における、応答変位法の計算の中でも用いられている。それは、地中構造物への地震作用となる周辺地盤の地震時応答変位を算定する際に、工学的基盤面における速度応答スペクトルを使うものである。ここで周辺地盤の地震時変位（地表面での変位振幅）は、工

学的基盤面において規定された耐震設計用速度応答スペクトルと表層地盤の基本固有周期、それに表層地盤の応答の刺激係数から算出される形になっており、この算定法は古くは1974年の石油パイプライン技術基準から近年のトンネル標準示方書（シールド工法）まで引き継がれている。

ところで最近では、地中構造物の耐震設計でも時刻歴応答解析法により周辺地盤の地震時変位を計算することが普通に行われるようになり、工学的基盤面における入力加速度波形が設定されることも多くなった。この場合、工学的基盤面に設定された入力加速度波形から表層地盤の応答変位を算定するには、詳細にはもちろん時刻歴応答解析によるが、その波形はどのような基本固有周期の表層地盤を大きく揺するのかわかり、いま設計の対象となっている表層地盤では概略どの程度の応答になるのかわかり、などの大局的な情報をつかむには、やはりその加速度波形について応答スペクトル的な表現がなされていると便利である。

ただ、ここで必要な応答スペクトルは、変位応答スペクトルである。前述の各種の設計指針類のように速度応答スペクトルを介して地盤変位を計算するよりも、直接、応答変位が計算された変位応答スペクトルを使う方が、

手間もなく正確でもある。しかし、それが1質点系動力学モデルで計算された変位応答スペクトルでよいのかは、議論のあるところであろう。地震動に対する表層地盤の応答が1質点系動力学モデルで表現できる範囲、すなわち、表層地盤がほぼ基本固有モード（第1次モード）だけで震動する範囲内であればよいが、2次以上の高次モードの震動が無視できない場合は不正確になる。厚い軟弱地盤で基本固有周期が長いところに、短周期成分が卓越した加速度波形が入力する場合などがそれに当たるであろう。

また、地中構造物の耐震設計のうち特に構造物横断面方向については、地震時にその上下端がどれだけ水平方向に相対変位するかで地震時応力が決まることから、構造物の深さに位置する地盤に生じるせん断ひずみの大きさをすることが重要である。そもそも周辺地盤の地震時安定性を評価する上でも、地震時せん断ひずみの大きさは必要な情報である。そこで、与えられた基盤入力地震動に対して表層地盤内にどれだけのせん断ひずみが発生するか、それが表層地盤の基本固有周期別にスペクトル表示されるようであれば、大いに有用であろう。しかし、これを1質点系動力学モデルで計算するには、やはり表層地盤の震動を第1次モードだけに限定するといったような仮定条件を設けて行わざるを得ず、不十分である。

そこで本稿では、1質点系動力学モデルで計算する従来の応答スペクトルと同様の発想で、1次元の連続体としてモデル化した表層地盤について応答スペクトルを計算することを提案する。そしてそれを「地盤応答スペクトル」と呼ぶことにする。すなわち「地盤応答スペクトル」は、地震動加速度波形が与えられたとき、それがどのような（固有周期で表す）地盤をどのくらい大きく揺すめるのか（応答の最大値）をスペクトル形式で表示したグラフである。特に、地中に生じさせるせん断ひずみの大きさを一目で把握できることを主眼にしている。そうすることによって、その地震動加速度波形が地中構造物にとってどの程度の影響を与えるものであるか、また、複数の地震動加速度波形があったときに、どれが地中構造物にとって最も厳しい地震動であるのか、などを即座に知ることができる。

次章からは、上記のような「地盤応答スペクトル」の概念と計算方法を説明する。また、若干の計算例を示して、「地盤応答スペクトル」の特性を示す。

## 2. 「地盤応答スペクトル」の概念

「地盤応答スペクトル」は、いま着目している地震動加速度波形が工学的基盤から入力したとき、そこから上の表層地盤がどれだけ揺れるのか、その応答の大きさが

読み取れるようにしたグラフである。ただし、表層地盤といっても、硬い土質の地盤もあれば軟弱な地盤もあるし、層の厚い地盤もあれば薄い地盤もあり、そうした諸条件の組み合わせによって振動特性が異なり、入力地震動に対する応答が違ってくる。したがって、表層地盤の振動特性を一義的に規定する指標のようなものがないと、すなわち横軸となる指標がないと、着目地震動に対する応答値を表層地盤全般を網羅して描いた便利なグラフにはならない。この横軸にとる指標は、物性等の諸条件の一つ一つをみれば異なっているが地震動に対する動的応答は等しくなるような、諸条件の特定の組み合わせからなるパラメータが最適であろう。それは次章で詳しく説明するが、本提案では表層地盤を均質な線形粘弾性体としてモデル化したときの基本固有周期（第一次の固有振動モードの振動周期）とする。また、これとは別に、表層地盤の振動性状を規定する重要な要素として減衰性があるので、これについても減衰定数というパラメータを定義する。

こうして、「地盤応答スペクトル」は、表層地盤の基本固有周期を横軸にとり、縦軸にはその基本固有周期をもつ表層地盤が着目地震動に対してどれだけ応答するか、その応答の最大値を表示したスペクトル図とする。また、一つのスペクトル図は、表層地盤の減衰定数を一定にし

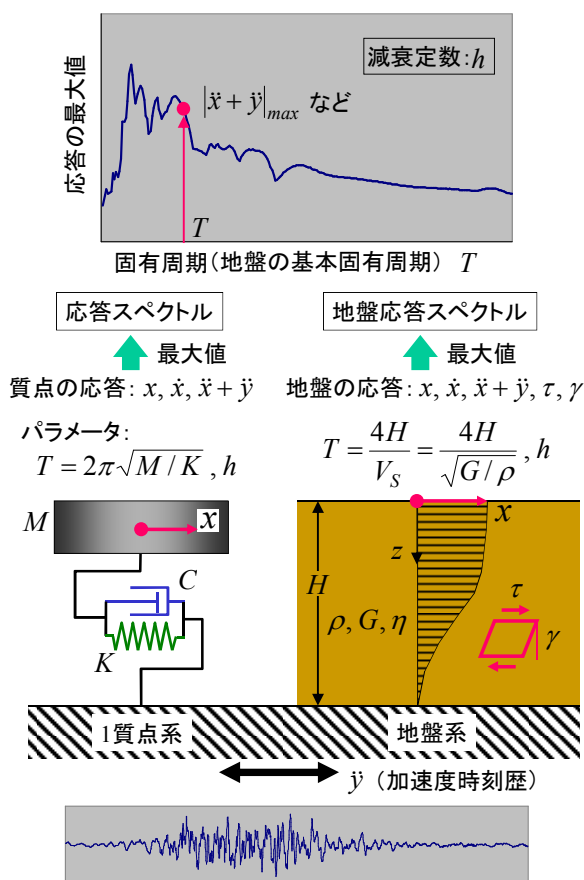


図-1 応答スペクトルと「地盤応答スペクトル」の対比

た条件下での応答値を表示したものとす。

以上に述べた「地盤応答スペクトル」の概念は、形式的に応答スペクトルと全く同じである。これら二つのスペクトルを対比して図-1に示す。応答スペクトルは、着目している地震動加速度波形で1質点系動力学モデルを加振したときの質点の応答を計算して、絶対加速度 $\ddot{x} + \ddot{y}$ 、相対速度 $\dot{x}$ 、相対変位 $x$ のそれぞれ最大値を表示したものである。ここで、 $\cdot$ および $\ddot{\cdot}$ の記号は、それぞれ時間に関する1階微分、2階微分である。また、 $y$ は入力地震動の変位であり、 $\ddot{y}$ が入力加速度波形となる。このとき、1質点系動力学モデルの振動特性を規定するパラメータとして、固有周期 $T$ と減衰定数 $h$ が選ばれている。言うまでもないことであるが、1質点系動力学モデルは、質量 $M$ の質点とばね定数 $K$ のばねと減衰係数 $C$ をもつダンパー（ダッシュポット）の3要素で構成され、その運動方程式は、

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = -M \cdot \ddot{y} \quad (1)$$

となる。そして、

$$T = 2\pi\sqrt{M/K}$$

$$h = \frac{C}{2\sqrt{M \cdot K}} \quad (2)$$

で表される固有周期 $T$ と減衰定数 $h$ が同値となるような構成要素の組み合わせであれば、 $M$ 、 $K$ 、 $C$ のそれぞれが同じでなくとも運動方程式(1)は、

$$\ddot{x} + 2h \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot \dot{x} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot x = -\ddot{y} \quad (3)$$

と書いて数学的に同じであり、その解である質点の応答も同じになる。

振動する物体が1質点系モデルから均質連続体の地盤系に置き代わった「地盤応答スペクトル」でも、理屈は同様である。地盤系では、振動する層の厚さ、質量密度、剛性（せん断弾性係数）、および粘性係数がこの表層地盤の振動特性に関わるが、土の構成式および表層地盤の運動方程式においてこれらの構成要素の変数を整理すると、やはり基本固有周期と減衰定数という2つのパラメータで記述することができ、これらをもって様々な条件の表層地盤を網羅的に取り込むことができる。そして、減衰定数を一定にした条件で表層地盤の基本固有周期を様々に変えて着目地震動に対する動的応答計算をし、その応答最大値をプロットしていけば、「地盤応答スペクトル」が得られる。このときスペクトル図として描くべ

き応答値としては、表層地盤の運動方程式を解いて得られる物理量であれば何でもよいが、工学的に利用性が高いものとしては、地表面の加速度、速度、変位のほか、地盤系の振動問題に特有な、地中の任意深さに生じるせん断応力 $\tau$ およびせん断ひずみ $\gamma$ であろう。

なお、物性が均一で力学的に線形な粘弾性体とした地盤モデルについて応答スペクトルを算出してみたところから、そのような理想的な条件の地盤は実際にはないのだから、さほどの意味は持たないのではないかという見方もあると思われる。確かに、現実の地盤の地震応答値を精密に議論する場面では、この「地盤応答スペクトル」はほとんど無力であるかもしれない。しかし、設計用の基盤入力加速度波形が与えられたとき、この表層地盤はどの程度揺れるのか（地表面で加速度や変位はどの程度増幅されるのか）、この地震動はどういう固有周期の地盤を大きく揺るのかなどの情報を、1質点系力学モデルで計算した応答スペクトルから推測するよりは高い精度で知ることができるであろうし、地盤の振動問題では重要な関心事である地盤内のせん断応力やせん断ひずみはどの程度のレベルになるのかのオーダーはつかめる。また、前述したように、ある条件の地盤に対して複数の地震動加速度波形が提示されたときに（加速度振幅は同レベルであったとして）、どの波形がその地盤に最も大きいせん断ひずみを発生させるのか、その地盤にある地中構造物にとって最も厳しいのはどの波形であるのか、などの相対比較をする上では十分に有用であると考えられる。

### 3. 「地盤応答スペクトル」の計算

#### (1) 地盤のモデル化

ここで提案する「地盤応答スペクトル」の計算では、表層地盤および入力地震動の条件を以下のように設定する。

- ①表層地盤は、 $H$ の層厚をもつ均質な線形粘弾性体の一次元モデルとする。
- ②この粘弾性体の応力・ひずみ関係は、図-2に示すとおり、ばねとダッシュポットが並列配置となっているVoigt型とし、質量密度を $\rho$ 、せん断弾性係数を $G$ 、粘性係数を $\eta$ とする。
- ③表層地盤の下位にある基盤層は剛であり、入力地震動はこの剛基盤の運動そのものである。

#### (2) 表層地盤の運動方程式

図-3に示すとおり、地表面から下向きに座標軸 $z$ をとり、表層地盤の任意深さ $z$ での時刻 $t$ における絶対変位を $u(z, t)$ とする。工学的基盤面の変位、すなわち入力地震

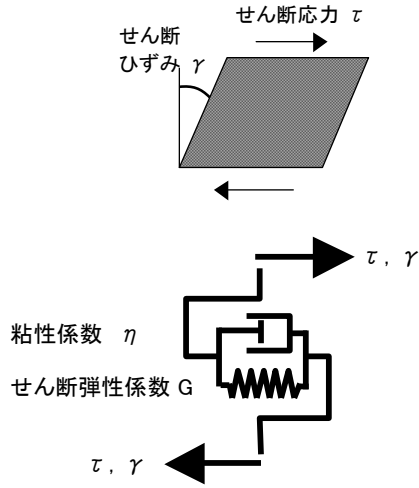


図-2 土の力学モデル

動の変位を $y(t)$ とすれば、基盤面からみた表層地盤の相対変位 $x(z, t)$ は、

$$x(z, t) = u(z, t) - y(t) \quad (4)$$

である。

また、 $\gamma(z, t)$ は任意深さ $z$ での時刻 $t$ におけるせん断ひずみで、

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial x}{\partial z} \quad (5)$$

である。Voigt型のモデルでは、せん断応力 $\tau(z, t)$ は、せん断ひずみに比例した項と、ひずみ速度に比例した項の和となり、

$$\tau(z, t) = G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (6)$$

となる。そして、図-3を参照しながら地中の微小要素の水平方向の力の釣合いを考えると、

$$-\tau - \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \cdot dz + (\tau + d\tau) \cdot dz = 0 \quad (7)$$

となり、これに式(4)、(5)、(6)を代入すると、表層地盤の変位 $x(z, t)$ に関する運動方程式が次式のように得られる。

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - \eta \cdot \frac{\partial^3 x}{\partial t \partial z^2} - G \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = -\rho \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (8)$$

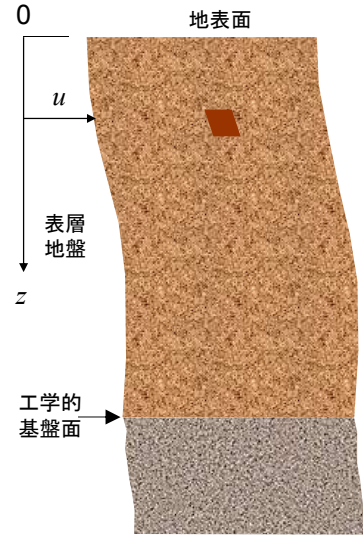


図-3 座標系の取り方と地盤の要素の力の釣合い

### (3) 運動方程式の解法

運動方程式(8)は線形の微分方程式であり、右辺の入力地震動 $y(t)$ の表記方法に応じて、解法はいくつか考えられる。基本的には、右辺をゼロとした斉次方程式の一般解と、右辺の入力地震動を具体的に規定した方程式の特解との和が、式(8)の一般解となる。

いま、表層地盤の減衰特性は振動の円振動数 $\omega$ に依存しない履歴減衰型とし、

$$h = \frac{\eta \cdot \omega}{2G} \equiv \text{一定} \quad (9)$$

の関係があるものとして減衰定数 $h$ を定義する<sup>1)</sup>。これを式(8)に適用して、さらに少し整理すると、

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - 2h \cdot \frac{V_s^2}{\omega} \cdot \frac{\partial^3 x}{\partial t \partial z^2} - V_s^2 \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = -\frac{d^2 y}{dt^2} \quad (10)$$

となる。ここに $V_s$ は、

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad (11)$$

であり、表層地盤を伝わるせん断波の速度である。

式(10)の右辺をゼロとした斉次方程式の一般解を求める際には、次の2つの境界条件を満足するようにする。

①地表面  $z = 0$  おいてせん断ひずみ  $\gamma(z, t)$  が常にゼロ。

②基盤面  $z = H$  において変位  $x(z, t)$  が常にゼロ。

すると一般解は、次式のように表せる。

$$x = \sum_{m=1}^{\infty} e^{-h \cdot \omega_m \cdot t} \cdot \left\{ A_m \cdot \cos \sqrt{1 - h^2} \omega_m t + B_m \cdot \sin \sqrt{1 - h^2} \omega_m t \right\} \cdot \cos \left( \frac{(2m-1)\pi}{2} \cdot \frac{z}{H} \right) \quad (12)$$

ここに、

$$\omega_m = \frac{(2m-1) \cdot \pi}{2} \cdot \frac{V_s}{H} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

であり、表層地盤の第  $m$  次の固有振動モードの円振動数である。また、 $A_m$  と  $B_m$  は表層地盤の変位および速度の初期条件によって決定される任意定数である。

前述の1質点系動力学モデルの運動方程式(3)を参照しつつ、表層地盤の運動方程式(10)およびその解である式(12)をみると、ここで設定した表層地盤の力学モデルの場合は、表層地盤の動的応答を規定するパラメータは、表層厚  $H$ 、せん断波速度  $V_s$ 、減衰定数  $h$ 、の3つということになる。ところで、このうちの  $V_s$  と  $H$  との比から、式(13)によって表層地盤の固有円振動数  $\omega_m$  が決まり、 $\omega_m$  は固有周期  $T_m$  と

$$T_m = \frac{2\pi}{\omega_m} = \frac{4}{2m-1} \cdot \frac{H}{V_s} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

の関係があるので、第1次振動モード ( $m = 1$ ) の固有周期、

$$T_1 = 4H/V_s \quad (15)$$

すなわち基本固有周期を用いて  $\omega_m$  は表される。結局、表層地盤の動的応答は、基本固有周期  $T_1$  と減衰定数  $h$  の2つのパラメータで特性づけられることになる。

運動方程式(8)または(10)の特解は、入力地震動  $y(t)$  を例えば有限フーリエ級数近似で表せば、正弦関数および余弦関数の和の形として求まる。また、式(12)に含まれる任意定数  $A_m$ 、 $B_m$  は、表層地盤が時刻  $t = 0$  におい

て静止しているものとして、

③変位  $x(z, t = 0)$  が全ての  $z$  に対してゼロ

④速度  $\dot{x}(z, t = 0)$  が全ての  $z$  に対してゼロ  
の2つの初期条件を満足するように決定すればよい。

#### (4) 検算

上に述べた表層地盤のモデル化および運動方程式の解法の妥当性を検証するため、均質な表層地盤と入力地震動を設定して、一次元重複反射理論に基づく動的解析プログラム (SHAKE) による動的応答計算結果と比較した。

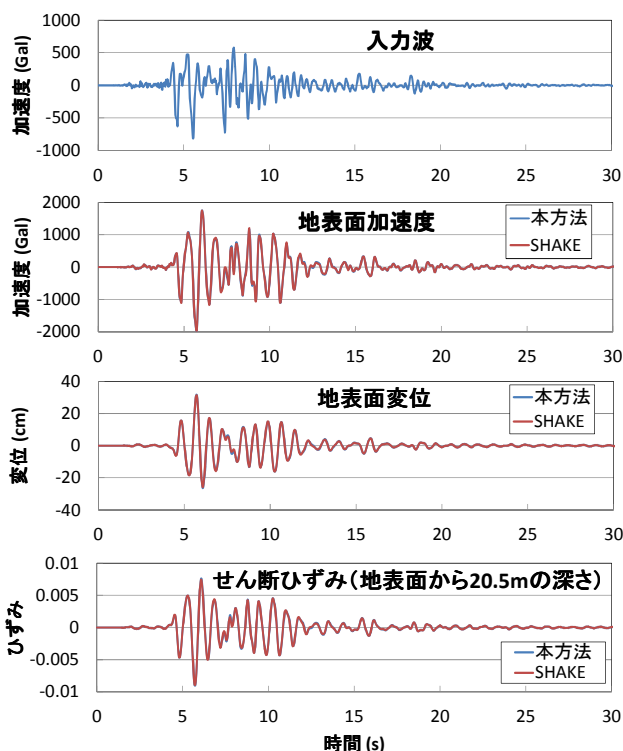
設定した表層地盤は、単位体積重量が  $18 \text{ kN/m}^3$ 、せん断弾性係数が  $73470 \text{ kN/m}^2$ 、層厚が  $40 \text{ m}$  のケースと、このうちのせん断弾性係数を  $11760 \text{ kN/m}^2$  としたケースである。前者のケースではせん断波速度  $V_s$  が  $200 \text{ m/s}$ 、基本固有周期  $T_1$  が  $0.8 \text{ s}$  であり、後者ではそれぞれ  $80 \text{ m/s}$ 、 $2.0 \text{ s}$  である。減衰定数  $h$  は、いずれのケースでも  $0.10$  とした。入力地震動は、1995年兵庫県南部地震の際の神戸海洋気象台での観測波と、振幅  $100 \text{ Gal}$ 、周期  $1 \text{ s}$  の正弦波を1波単独で入力した場合とした。

計算結果の一部を図-4に示す。表層地盤の応答として、地表面の加速度と変位、それに地中のせん断ひずみ（地表面から  $20.5 \text{ m}$  の深さでの値）を出力したが、どちらのケースでも本方法による計算結果とSHAKEによる計算結果とはほぼ完全に一致している。他の計算ケースでも同様の結果を得ており、本方法の妥当性が確認できた。

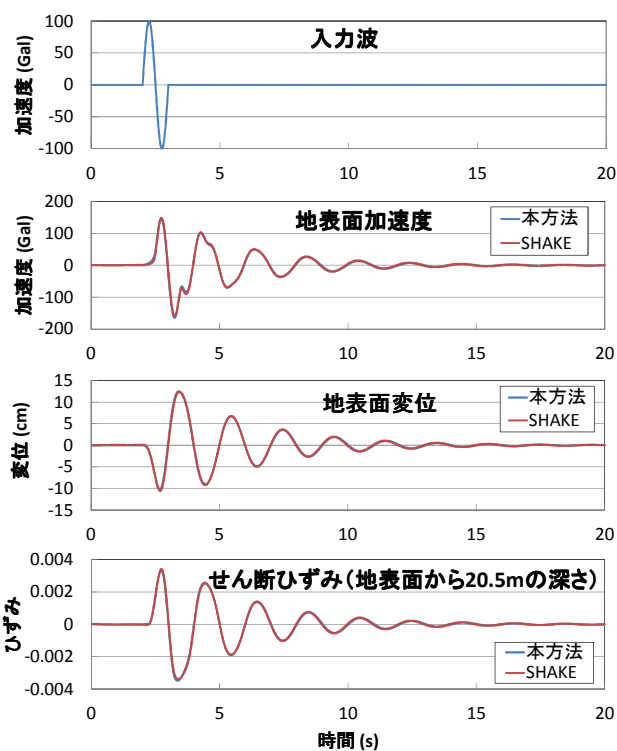
## 4. 計算例

### (1) 計算例 1

前章に示したとおり、地震動加速度波形（入力波形）が与えられ、表層地盤の基本固有周期  $T_1$  と減衰定数  $h$  という2つのパラメータを設定すれば、表層地盤の運動方程式を数値的に解くことにより、表層地盤のあらゆる動的応答を得ることができる。例えば、減衰定数のある一定値（例えば  $0.05$ ）に固定し、基本固有周期を  $0.02 \text{ s}$  から  $5.0 \text{ s}$  まで細かく刻んで地震応答計算を行い、それぞれの計算で得られる地表面応答加速度の最大値を取り出して、基本固有周期を横軸にとったグラフにそれらをプロットすれば、地表面応答加速度のスペクトルが描ける。これと同様に、地表面から一定の深さにおけるせん断ひずみについて応答の最大値を取り出していけば、その深さの応答せん断ひずみのスペクトルが描ける。このようにして表層地盤の様々な応答についてスペクトルを描いたものが「地盤応答スペクトル」である。ここでは、1995年兵庫県南部地震の際の神戸海洋気象台での観測波を対象にして、「地盤応答スペクトル」を描いてみる。この地



(a) 基本固有周期 0.8s, 減衰定数 0.1 の地盤に  
神戸波を入力したケース



(b) 基本固有周期 2s, 減衰定数 0.1 の地盤に  
正弦波を入力したケース

図-4 本方法による地震応答計算の妥当性の検証

震動加速度波形を図-5に示す。

まず、地表面の応答加速度の最大値として、図-6に「地盤応答スペクトル」を示す。同図は、表層地盤の減衰定数を0.05としたときのもので、基本固有周期が0.02sから5.0sの範囲の地盤について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ものである。赤線がその「地盤応答スペクトル」で、青線は同じ地震動加速度波形に対して1質点系動力学モデルにより応答スペクトルを計算した結果である。ただし、これには地表面位置での応答値に整合させるための刺激係数 $4\pi$ を乗じてある。これら2つのスペクトルを比較すると、基本固有周期がおよそ0.8sを境にして、それよりも固有周期が短い地盤では両者はほぼ一致しているが、それよりも固有周期が長い地盤では「地盤応答スペクトル」の方が大きくなっていて、両者にかなり大きな差がでている。これは、地盤の応答波形そのものにも見られる。実際に応答波形を比較したのが図-7である。同図では、基本固有周期が0.5sの地盤と3.0sの地盤について、1質点系動力学モデル（式(3)）により応答計算した場合と地盤系の動力学モデル（式(10)）により応答計算した場合とを比較して示してある。前者の地盤では2つの応答波形がほぼ完全に重なっているのに対して、後者の地盤では、2つの応答波形は大きく異なっている。これは、入力地震動波形の主要周期成分（本例の神戸波では概ね0.3sから1.3s）

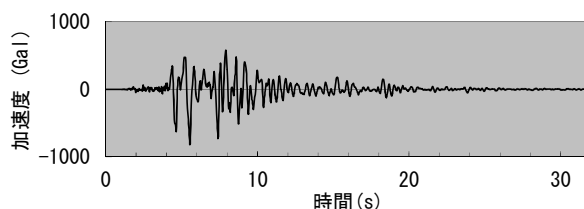


図-5 「地盤応答スペクトル」の計算対象とした地震動加速度波形

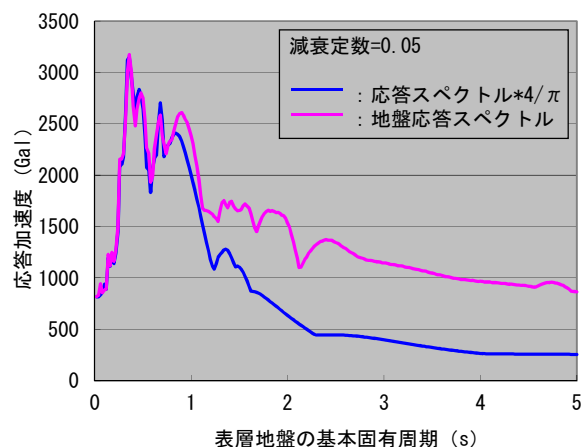


図-6 地表面加速度の「地盤応答スペクトル」



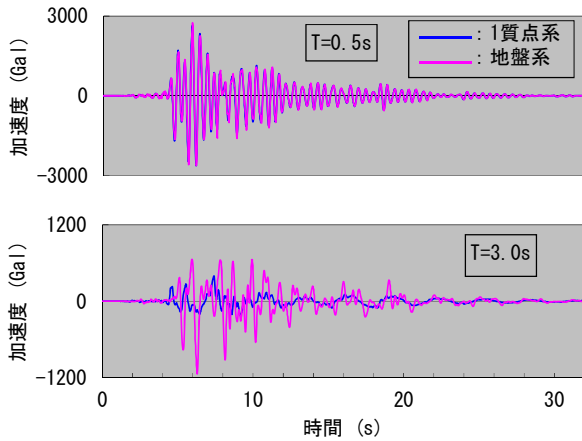


図-7 地表面の応答加速度波形の比較

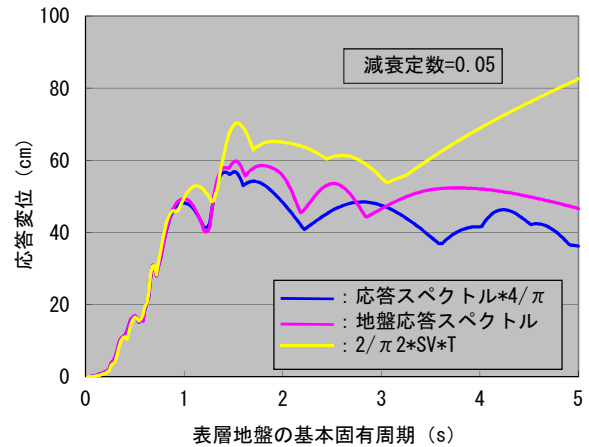


図-9 地表面変位の「地盤応答スペクトル」

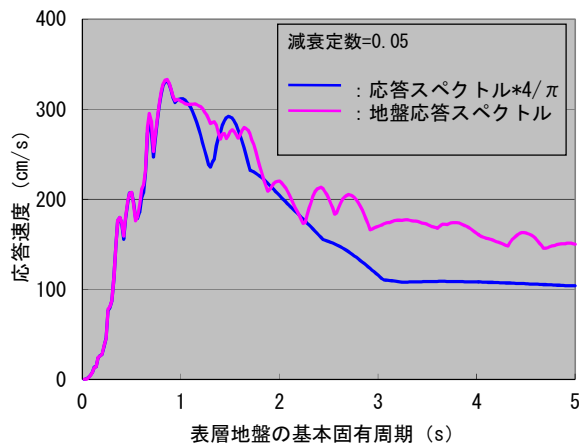


図-8 地表面速度の「地盤応答スペクトル」

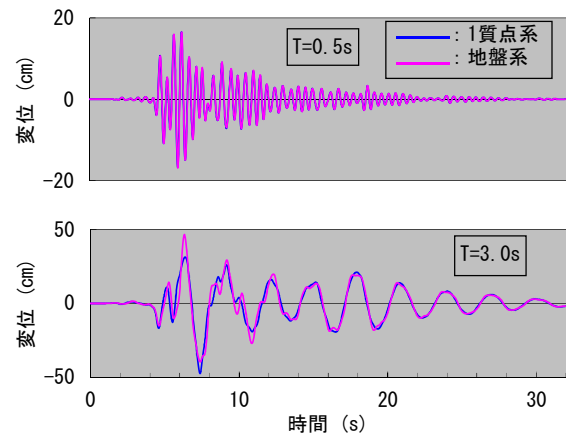


図-10 地表面の応答変位波形の比較

に比べて基本固有周期が長い地盤が加振された場合、2次以上の高次モードの振動も励起され、それが全体の応答に少なからず影響を及ぼすことになるが、そのことが地盤系の動力学モデルであれば考慮されるのに対して、1質点系動力学モデルでは考慮されずに結果として応答が小さく評価されるためである。

次に、地表面の応答速度の最大値について見てみると、図-8のようになる。やはり、基本固有周期が1s程度より短い地盤については、応答スペクトルと「地盤応答スペクトル」はよく一致しているが、それよりも長周期の地盤では両者に差がでている。

同じように、地表面の最大応答変位を計算したスペクトルが図-9である。この図には、さらに黄線を併記してある。これは、地中構造物の耐震設計において地盤変位の計算によく使われる次式<sup>2)</sup>に基づき、1質点系の速度応答スペクトル（図-8に示した青線）を用いて計算した地表面変位を示している。

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_V \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{2H}\right) \quad (16)$$

ここに、

$U_h(z)$  : 地表面からの深さ $z$ における水平方向の変位  
振幅

$S_V$  : 設計応答速度（地震動の速度応答スペクトル）

$T_s$  : 表層地盤の固有周期

$H$  : 表層地盤の厚さ

このスペクトル図でも、基本固有周期が約1sよりも短い地盤では応答スペクトルと「地盤応答スペクトル」はよく一致しているが、それよりも長い固有周期の地盤では両者に差が生じている。ちなみに、応答波形を比較すると図-10のようになる。また、式(16)による地盤変位も、基本固有周期が約1sより短い地盤についてはよい精度で計算できているが、それよりも長い固有周期の地盤になると、計算誤差が無視できない大きさになっている。

最後に、地中に生じるせん断ひずみの最大値のスペクトル（減衰定数=0.05）を図-11に示す。これは1質点系動力学モデルによる応答スペクトルにはない、「地盤応答スペクトル」に特有なものといえる。せん断ひずみの大きさは表層地盤内の深さごとに異なるため、ここでは

$z/H$ 比が0.25, 0.50, 0.75の3深度について示した。なお、せん断ひずみの大きさ（スペクトル図の縦軸）は、パラメータの正規化の都合により、表層厚 $H$ を乗じた形で表示してある。例えば、基本固有周期が0.5sの地盤の層中央（ $z/H = 0.5$ ）では、せん断ひずみ×層厚の値は18.9cmと読み取れ、仮に表層厚が20mであれば、この地震動により発生するせん断ひずみの最大値は $18.9\text{cm} \div 20\text{m} = 9.45 \times 10^{-3}$ ということになる。

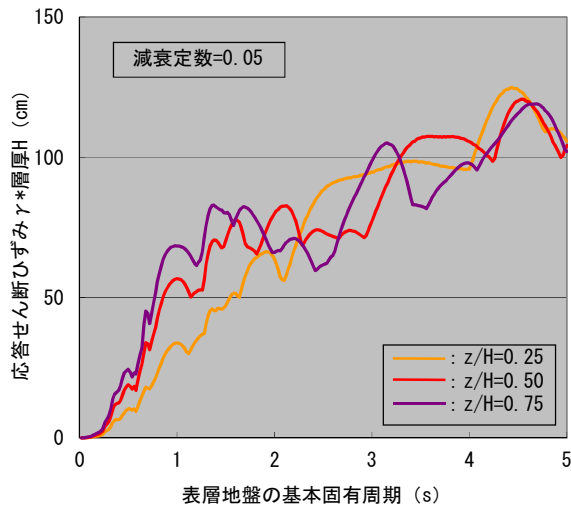


図-11 せん断ひずみの「地盤応答スペクトル」

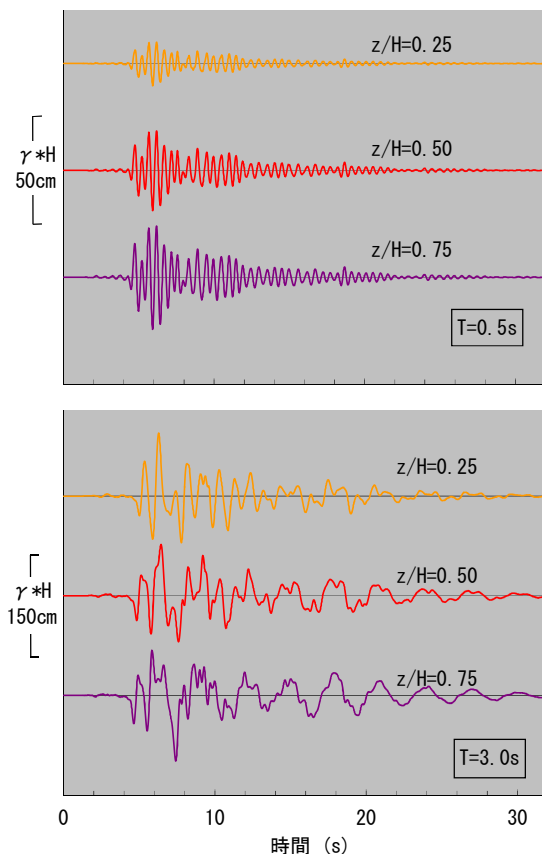


図-12 せん断ひずみの応答波形

図-11を見ると、全体としては、層厚が同じという条件であれば、固有周期が長い地盤ほどひずみの発生が大きいという傾向が見られる。深さの観点からみると、1.5s程度までの短周期の地盤では、深い位置ほどひずみが大きい。これは、均質な表層地盤が1次モードだけで振動する場合には、せん断ひずみが深さ方向に正弦波状の分布形状となることが理論的に導かれることに対応している。実際、せん断ひずみの応答波形を図-12に示すが、3つの深度で波形の位相がよく合っており、1次モードで振動していることが裏付けられる。一方、長周期の地盤では、せん断ひずみの大きさの順位が入り乱れており、深さとの相関はなくなっている。応答波形を見ても、深さ方向に位相が揃っていない。これは、2次以上のモードの振動が混じっているためと考えられる。

## (2) 計算例2

防災科学技術研究所の強震観測網KiK-netの観測波形の中から、2004年新潟県中越地震（NIGHで始まる記号）および2008年岩手・宮城内陸地震（WITHで始まる記号）のときに記録された合計8波の地中加速度波形について「地盤応答スペクトル」を計算し比較した。ただし、図-13に示すように、全て最大値が100Galになるように正規化した。

図-14から図-17に、地表面の加速度、速度、変位、せん断ひずみの「地盤応答スペクトル」を示す。せん断ひずみとしては層厚中心深さ（ $z/H = 0.5$ ）での値とした。

8つの加速度波形は、最大振幅は等しくしているものの、周期成分がそれぞれ異なるために、「地盤応答スペクトル」の形は大きく異なっている。

地表面加速度に関しては、8波形ともに基本固有周期0.5s以下の地盤での応答値が大きい。中でもNIGH06NS1波形は0.3s前後の地盤に大きな応答加速度を生じさせる。IWITH25EW1, IWITH25NS1, NIGH15NS1の波形は、ごく短周期の地盤には大きな加速度を生じさせるが、0.3s以上の地盤における応答は相対的に小さい。NIGH01NS1, NIGH06NS1, NIGH11NS1, NIGH12NS1の波形は、比較的周期の長い成分を多くもっており、固有周期0.5s以上の地盤に対しても、比較的大きな加速度を生じさせる。

地表面速度および地表面変位の応答に関しては、加速度応答に比べて、波形によるばらつきが大きい。上述のNIGH01NS1, NIGH06NS1, NIGH11NS1, NIGH12NS1の波形は、応答変位が8波の中でも相対的に大きい。このうちNIGH01NS1, NIGH06NS1, NIGH12NS1の3波形は、固有周期1sを超える地盤をも大きく揺する。これに対して、IWITH25EW1, IWITH25NS1, NIGH15NS1は応答速度、応答変位ともに相対的に小さい。

せん断ひずみの「地盤応答スペクトル」は、形状的には地表面変位のスペクトルに最も似ている。



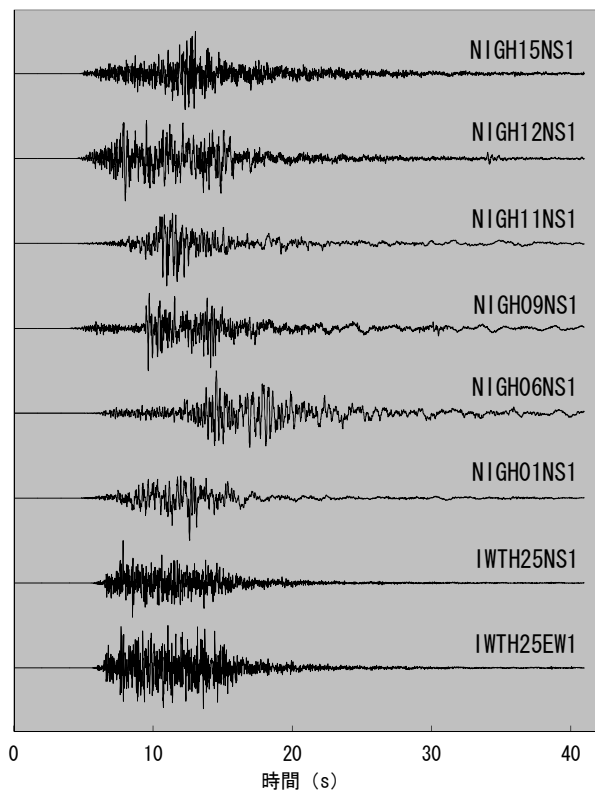


図-13 地震動加速度波形  
(最大振幅を 100Gal に正規化)

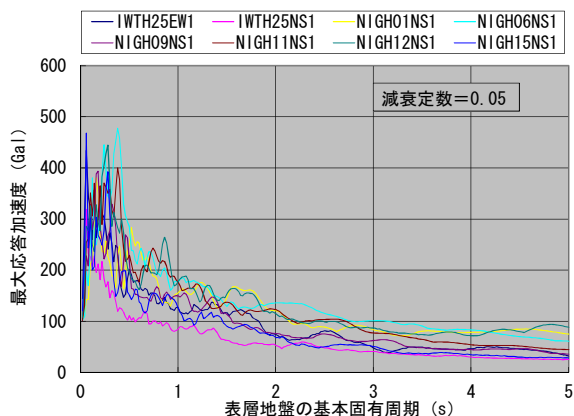


図-14 地表面加速度の「地盤応答スペクトル」

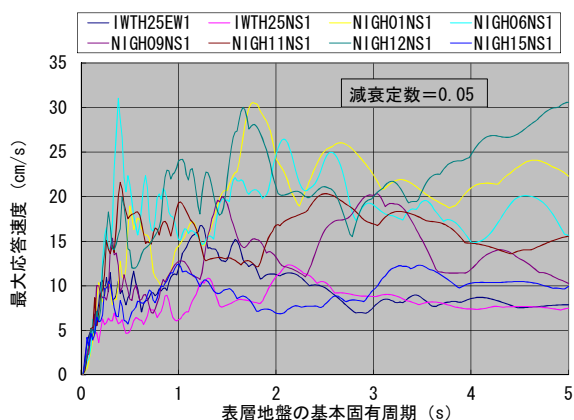


図-15 地表面速度の「地盤応答スペクトル」

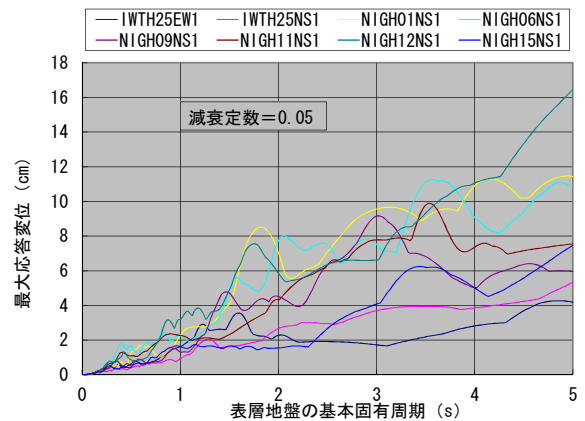


図-16 地表面変位の「地盤応答スペクトル」

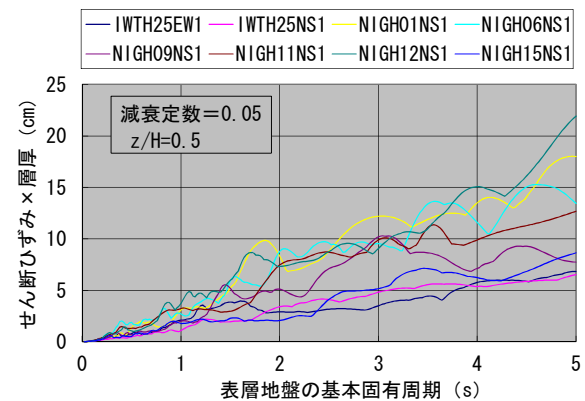


図-17 せん断ひずみの「地盤応答スペクトル」

NIGH01NS1, NIGH06NS1, NIGH11NS1, NIGH12NS1 は、ほとんどの固有周期帯の地盤に大きなせん断ひずみを生じさせる。一方, Iwth25NS1, NIGH15NS1 の 2 波形では、それらの半分程度のひずみしか生じない。

## 5. まとめ

地震動加速度波形が与えられたとき、それによって表層地盤はどれだけ揺れるのか、その応答の大きさが読み取れるようにしたグラフ：「地盤応答スペクトル」というものを提案した。基本的に、1質点系動力学モデルで計算する応答スペクトルと同じ考えのものである。

「地盤応答スペクトル」では、工学的基盤面から上の表層地盤を均質な線形粘弾性体に理想化して運動方程式を立て、着目している入力地震動に対する応答計算をするので、1質点系動力学モデルで計算する応答スペクトルに比べて、連続体という特性をもった地盤の地震応答をより現実的に評価できると言える。特に、基本固有周期が長い地盤で高次の振動モードが励起されるような場合に、それが発揮される。また、表層地盤内に生じるせん断ひずみの大きさを、表層地盤の基本固有周期に対し

てスペクトル表示したグラフが描けることが、「地盤応答スペクトル」の大きな特長である。

計算例で見たとおり、加速度振幅のレベルを合わせた複数の地震動波形が提示されたとき、地盤にとってどの地震動の影響が大きいのかは、一見しただけでは分からないことが多いが、「地盤応答スペクトル」を計算すれば、それが容易に議論できる。特に、表層地盤内に生じるせん断ひずみの大きさが耐震設計上大きな意味をもつ地中構造物にとっては、せん断ひずみスペクトルは有用であろう。

今後の研究課題としては、多くの地震動加速度波形について「地盤応答スペクトル」を計算し、波形の性状・特性と表層地盤の応答との関係性を調べることが第一に挙げられよう。

**謝辞：**第4章の「地盤応答スペクトル」の計算例2において、（独）防災科学技術研究所の強震観測網KiK-netによる観測記録波形を使わせていただいた。

その観測記録波形の整理では、大成建設（株）技術センターにおける同僚の畑明仁氏の手を煩わせた。ここに記して謝意を表する。

#### 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.
- 2) 日本道路協会：共同溝設計指針，pp.52-58，1986.

## PROPOSAL OF “GROUND RESPONSE SPECTRUM” AND PRESENTATION OF THEIR EXAMPLES

Yukio SHIBA

“Ground response spectrum” is proposed in this paper. “Ground response spectrum” is the graph which is so drawn as to read the maximum values of dynamic responses of subsurface ground to a seismic accelerometer, such as particle acceleration, velocity, displacement on the surface and shear strain caused in the ground. The calculation method of the spectrum is the same as the ordinary response spectrum except the use of simple one-dimensional continuum of linear viscoelastic medium; instead a single-degree-of-freedom oscillation system is used in the calculation of ordinary response spectrum. A few examples of the “ground response spectrum” are presented and special feature and usefulness of the spectrum is discussed in this paper.