

4章 設計地震動に関連づけて

質問 4.1 地震動の加速度応答スペクトルとは何ですか？フーリエスペクトルとどう違うのですか？

回答 4.1

スペクトルとは、複雑な信号をその成分に分解し、成分ごとの強さを配列・表示したもので、色スペクトルや音の周波数スペクトルなどが良く知られています。地震波も時間とともにランダムに変化する信号であり、その周波数ごとに信号の強さを表した代表的なものはフーリエスペクトルとして知られています。すなわち、フーリエスペクトルは、一定の観測時間内のランダムな信号をフーリエ変換して、周波数： f_i 、 $i=1,2,3,\dots,n$ ごとにその強さを示したグラフで、観測された地震加速度波に適用すれば、図 4.1-1(a)に示すような、横軸に周波数 $f_i(\text{Hz})$ を縦軸に加速度の強さ(gal.sec)を表した図になっています。

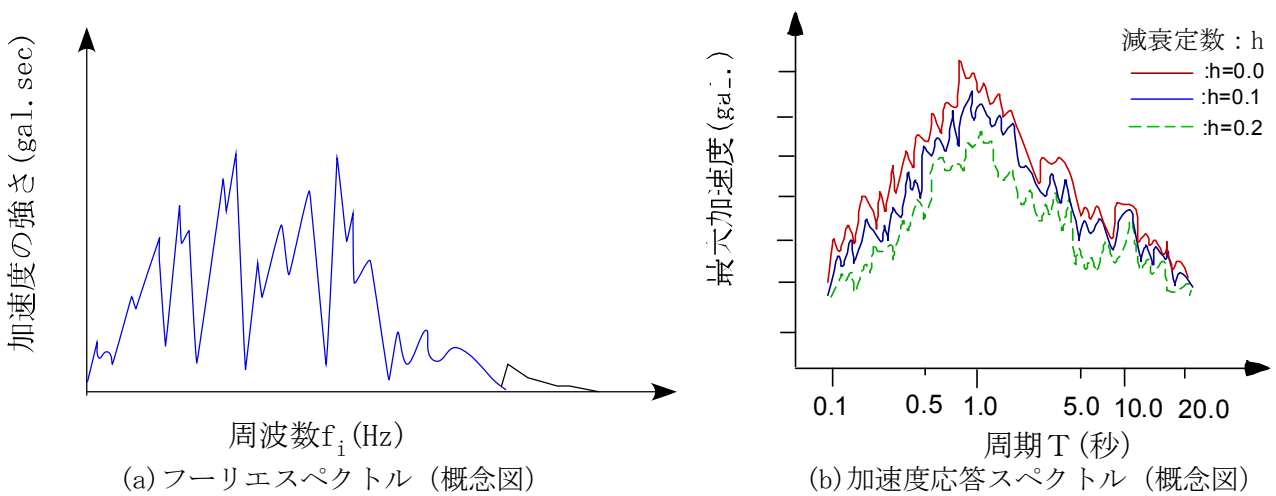


図 4.1-1 フーリエスペクトルと加速度応答スペクトル

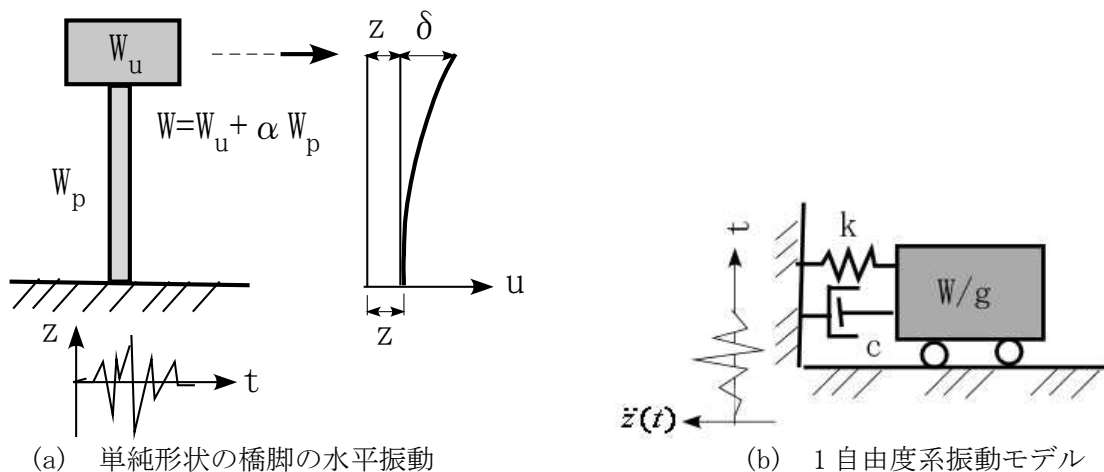


図 4.1-2 地震動を受ける橋脚の一自由度系振動モデル

一方、加速度応答スペクトルは、図 4.1-2(a)のような上部工と下部工からなる単純な形状の橋脚に対する地震時の水平振動問題を図 4.1-2(b)に示す一自由度系の振動モデルで表し、観測された地震加速度 ($\ddot{z} = \partial^2 z / \partial t^2$) をこの振動モデルに導入したときの構造物に作用する加速度の応答値を求め、横軸に

構造物の固有周期 T_i を採り，縦軸に応答加速度の最大値 (gal) を表したものであります。

具体的には，図 4.1-2(b) に示す一自由度系の振動問題での運動方程式を以下のように表し，

$$\frac{W}{g}(\ddot{z} + \ddot{\delta}) + c\dot{\delta} + k\delta = 0 \quad (4.1-1)$$

ここに， W ：上部工の等価重量， g ：重力加速度 (9.8m/s^2)， δ ：構造物の応答変位， z ：地盤面での地震変位， c ：減衰係数， k ：弾性バネ係数，ドットは時間(t)に関する微分を表し， \dot{z} は地盤面での水平地震速度， \ddot{z} は地盤面での水平地震加速度， $\dot{\delta}$ ：構造物の応答速度， $\ddot{\delta}$ ：構造物の応答加速度を意味しています。式 (4.1-1) を変形すれば，

$$\ddot{\delta} + \frac{c}{M}\dot{\delta} + \frac{k}{M}\delta = -\ddot{z} \quad (4.1-2)$$

ここに， $M = W/g$ であります。

つぎに，減衰のない ($c = 0$) 場合の自由振動 ($\ddot{z} = 0$) の運動方程式は

$$\ddot{\delta} + p^2\delta = 0 \quad (4.1-3)$$

ここに， $p = \sqrt{k/M}$ で，円振動数と呼ばれており，であり，上式の解は以下のように表せます。

$$\delta = A\cos pt + B\sin pt \quad (4.1-4)$$

ここに， A, B は定数で，たとえば， $t = 0$ での初期条件が， $\delta|_{t=0} = \delta_0$ ， $\dot{\delta}|_{t=0} = 0$ であれば， $A = \delta_0$ ， $B = 0$ となり，自由振動の波形は

$$\delta = \delta_0 \cos pt \quad (4.1-5)$$

となり，上式は図 4.1-3 のような周期 ($T = 2\pi/p$) の片振幅 δ_0 の振動波形を与えます。

つぎに，図 4.1-4 のような地盤面での水平地震加速度の観測データ： \ddot{z} による強制振動の運動方程式は以下のように表せます。

$$\ddot{\delta} + 2hp\dot{\delta} + p^2\delta = -\ddot{z} \quad (4.1-6)$$

ここに， $h = c/(2pM)$ は減衰定数と呼ばれている。したがって，円振動数 p または固有周期 T と減

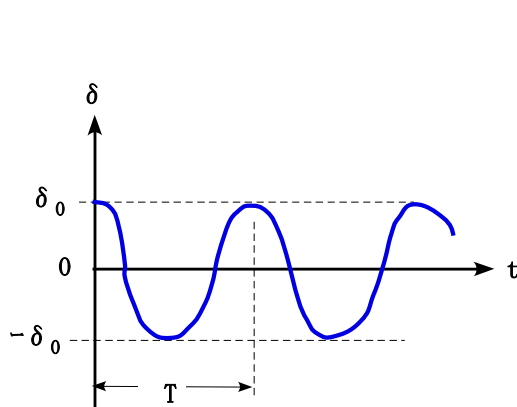


図 4.1-3 自由振動波形

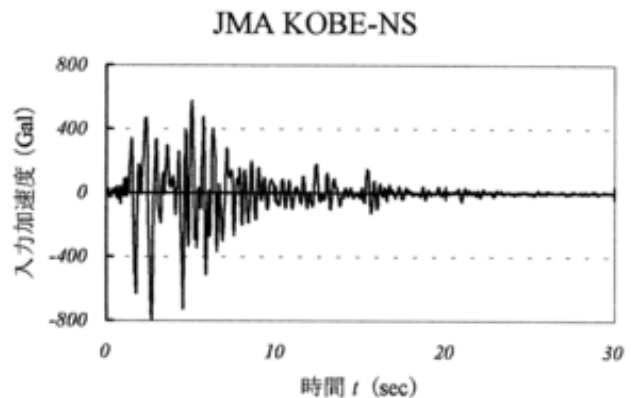


図 4.1-4 観測地震加速度 (\ddot{z}) 記録の例

衰定数 h を与えれば，特定の地盤面での水平地震加速度 (\ddot{z}) に対する応答変位 (δ) の時刻歴が式 (4.1-6) の解として求められ，固有周期 ($T = 2\pi/p$) と最大応答加速度 ($\max \ddot{\delta}$) の関係が図 4.1-1(b) のように求められます。特定の地震に対する加速度応答スペクトルの求め方については，[補足 A 1. pdf](#) を参照してください。

ところで，道路橋示方書，耐震設計編での標準加速度応答スペクトルとは，過去に観測された代表的な地盤面での水平地震加速度記録を用いて，式 (4.1-6) において，減衰定数を標準値： $h = 0.05$ に固定し，固有周期 (T) と最大応答加速度 ($\max \ddot{\delta}$) の関係を求め，基礎地盤の種類別に分類して，統計的

に処理して求められたものであります。たとえば、図 4.1-5 はレベル 1 の地震動での標準加速度応答スペクトルを示しています。この図での縦軸 S_0 (gal) は、統計的に処理された最大加速度応答値を意味しており、示方書では、レベル 1 の地震動の設計に用いる加速度応答スペクトルは、

$$S = c_z \cdot c_D \cdot S_0 \tag{4.1-7}$$

ここに、 c_z は地域補正係数、 c_D は減衰定数補正係数で、次式で与えています。

$$c_D = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \tag{4.1-8}$$

すなわち、 $h = 0.05$ では $c_D = 1.0$ 、 $h = 0.0$ では $c_D = 2.0$ となっています。

レベル 2 地震動に対しても同様の標準加速度応答スペクトルが、タイプ I の地震動に対しては S_{I0} 、タイプ II の地震動に対しては S_{II0} が図 4.1-6 のように与えられています。

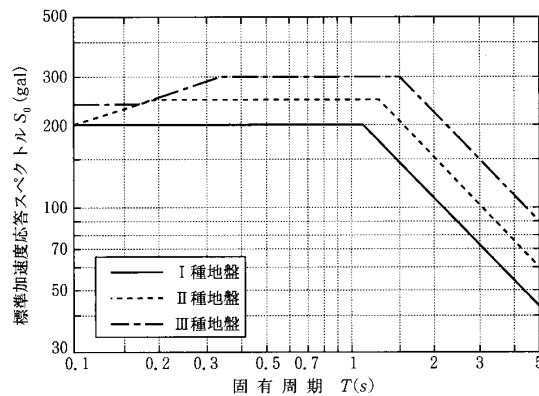


図 4.1-5 レベル 1 地震動の標準加速度応答スペクトル (S_0)

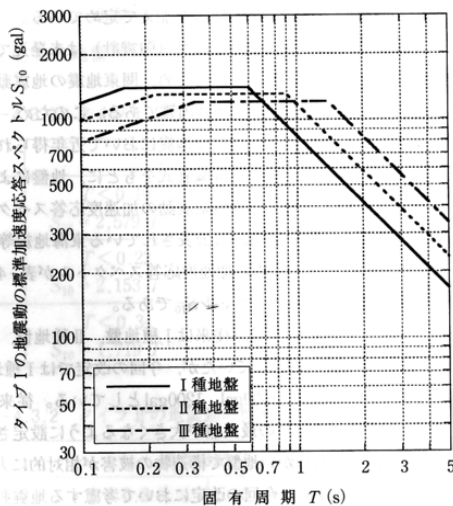


図-解4.3.1 タイプ I の地震動の標準加速度応答スペクトル S_{I0}

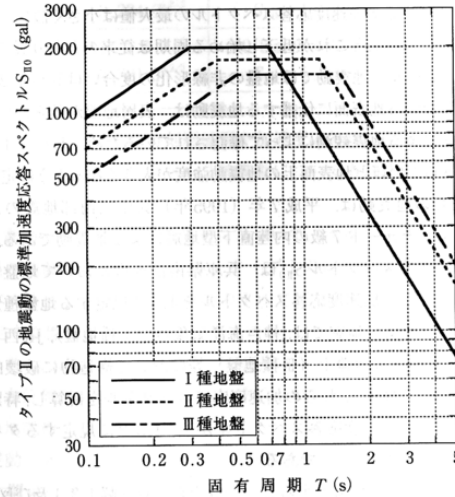


図-解4.3.2 タイプ II の地震動の標準加速度応答スペクトル S_{II0}

図 4.1-6 レベル 2 地震動の標準加速度応答スペクトル (S_{I0} , S_{II0})

なお、式(4.1-6)から加速度応答スペクトルの解析法の詳細については、[補足 A 1 .pdf](#) を参照してください。

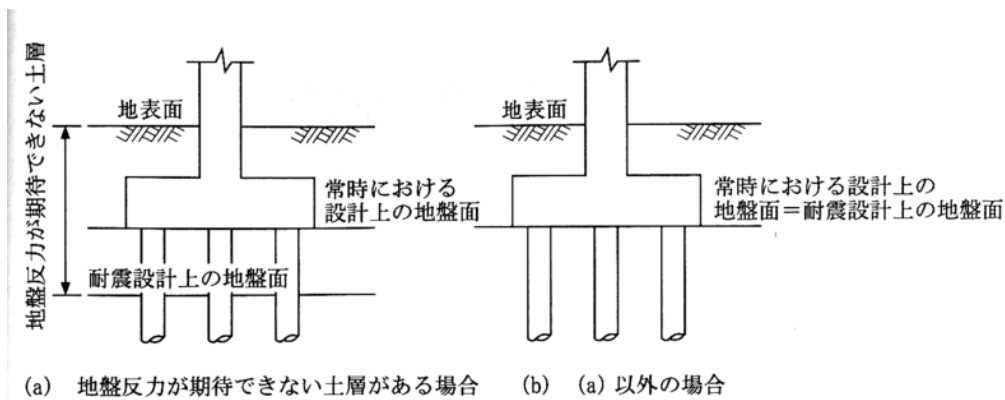
質問 4.2 図 4.1-5 および 6 での標準加速度応答スペクトルは、地盤種別 (I, II, III) に分けて与えられており、地盤種別は以下の式による基本固有周期 T_G に応じて判別されています。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (4.2-1)$$

ここに、 H_i , $i=1,2,3,\dots,n$: i 層の地盤の層厚, V_{si} : i 層の地盤でのせん断波速度であります。ところで、地盤の基本固有周期 T_G とはどのようなものですか？また、図 4.2-1 および 4.2-2 において、レベル 1 とレベル 2 地震動に対しては、短周期領域 ($T < 1.5 \text{sec}$) では、 T_G の大きさと標準加速度応答スペクトルの大きさとの相対的な関係が逆になっているのは何故ですか？

回答 4.2

道示 4.5 の解説では、図一解 4.6.1 (図 4.2-1 に転載) に示すように、耐震設計上の基盤面とは、振動すると見なせる地面近傍の地盤の下に存在する十分堅固な地盤の上面を想定しており、せん断波速度 (V_s) が 300m/s 程度以上の強固な地盤であり、地震波はこの基盤面に入力すると考えています。したがって、この基盤面と地表面の間の地盤が軟弱で反力が期待できない場合 (図一解 4.6.1(a)) には、地震時には水平地盤振動を起こし、橋脚基礎への入力地震加速度の増幅現象を考慮しなければならなくなります。



図一解 4.6.1 橋脚における耐震設計上の地盤面

図 4.2-1 耐震設計上の基盤面

ところで、式(4.2-1)は、耐震設計上の基盤面から地表面の間の地盤が n 層からなる成層地盤である

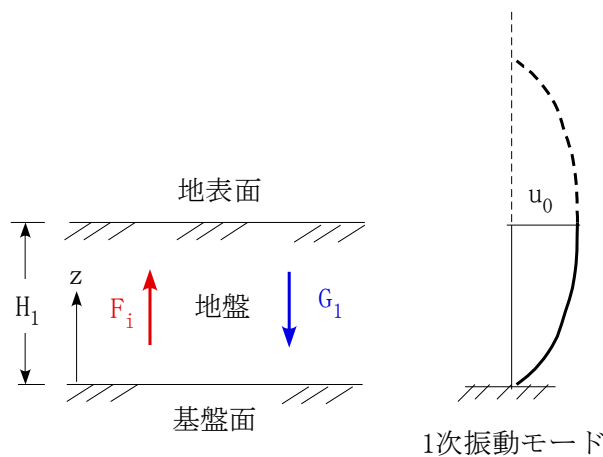


図 4.2-2 地盤の水平 1 次振動モード

と考え、せん断波のそれぞれの層内の伝播時間 (H_i/V_{si}) を考慮して、水平振動での 1 次固有周期 (T_G) を与えた式であります。

図 4.2-2 は、地表面の水平振動変位を示しています。基盤面から入射したせん断地震波: $F_1(z - V_s t)$ 、ここに z : 基盤面から上方の距離、 V_s : せん断波速度、は、地表面で反射し、後退波: $G_1(z + V_s t)$ となって戻ります。その時の地表面での水平変位は、図 4.2-2 に示したように、時刻 $t = 0$ で基盤面に入射したせん断波が地表面到達した時刻 ($t = t_G$) でピーク値 (u_0) になり、その後は減少し、 $0 \leq t \leq 2t_G$ での振動波形は半波長の波になるので、1 周期の時間は $4t_G$ に相当します。したがって、速度 V_s のせん断波の層厚 H_1 の通過時間は $t_G = H_1/V_s$ であるので、地盤の 1 次固有周期は、

$$T_G = 4 \frac{H_1}{V_s} \quad (4.2-2)$$

となります。道示では、基盤面と地表面の間の表層地盤は n 層から成っているとし、各層に対して式 (4.2-2) を適用して重ね合わせ、 T_G を式 (4.2-1) のように与えたものであります。

道示では、せん断波の速度 (V_s) は、地盤が粘性土の場合は N 値でも与えられており、地盤が軟弱で N 値は低くなるほど、 V_s は小さくなり、 T_G は長くなります。したがって、標準加速度応答スペクトルでは、基盤面より上の地盤特性を固有周期 (T_G) の大きさに応じて分類しています。

すなわち、レベル 1 の地震動では、地盤振動による増幅を考慮して、 T_G が大きくなるにつれて加速度応答スペクトルが大きくなるように設定されていますが、レベル 2 の地震動では、地盤は非線形域に入り、表層地盤の固有周期が長くなるので、構造物の短周期領域での地盤との増幅現象は考慮されていません。なお、詳しい解説は、**道示 4.3 の解説** をご覧ください。

以上