

神戸大学大学院 学生員○大塚良治

神戸大学工学部 正会員 高田至郎

1. はじめに: 地中構造物の耐震設計に関しては応答変位法が適用される場合が多い。応答変位法の従来の入力地盤変位振幅の設定法は、耐震設計上の基盤（S波速度300m/sec以上の層の上面）を定め、その基盤面上での相対入力地盤変位振幅を零と見なしている。その基盤面から地表面に向かってせん断一次モードを仮定して、表層地盤の卓越周期と応答スペクトルから構造物位置での変位振幅を決定している。大深度構造物の場合には、構造物が基盤中に位置することも十分考えられるので、従来の方法だと入力地盤変位が零になってしまい不都合が生じる。従って、本法は道路橋示方書の標準加速度応答スペクトルを用いて地表面変位スペクトルを算定し、そのあと地下に戻す方法を考える。

2. 解析方法: 震源から射出された地震波は、地殻を伝播して地表近くの表層地盤に到着する。そこで表層地盤の増幅特性により大きく変形されて、地表において地震動として観測される。このことを次式のように表すことができる。

$$u_s(\omega) = G(\omega) \cdot u_z(\omega) \quad \dots\dots(1)$$

ここで $u_s(\omega)$ は地表面の地震動スペクトルであり、 $u_z(\omega)$ は地盤内の地震動スペクトル、 $G(\omega)$ は表層地盤で発生する波動の増幅特性を表している。地表面の地震動スペクトルは、道路橋示方書の加速度応答スペクトル¹⁾ (図2) より次式によって求める。

$$\frac{S_A(n)}{u_s(\omega)} = \omega^2 \frac{(\omega/n)^2}{\sqrt{\{1 - (\omega/n)^2\}^2 + 4h^2(\omega/n)^2}} \quad \dots\dots(2)$$

式(2)は地表面の変位スペクトル $u_s(\omega)$ に対する加速度応答値 $S_A(\omega)$ の比率を表し、澤田らによって定義されている²⁾。道路橋示方書の入力設計スペクトルは5%の加速度応答スペクトルのため、 $h=0.05$ を代入し、最大応答倍率となる $\omega=n$ の場合を考えると地表面の地震動スペクトル $u_s(\omega)$ が求まる。表層地盤はせん断剛性が上層は線形、下層は一定 (CASE1, 図3) としたケースを考えた。a) 自由表面では応力が零, b) 境界面で変位が連続, c) 境界面で応力が連続, の3つの境界条件を用いて、上層と下層についての波動方程式を解き、(3)式のように地表面の変位 u_s に対する地盤内の任意深さでの変位 u_z の比 $Y(\omega)$ を求めた。この比を伝達率とし、(4)式のようになる。

$$Y(\omega) = 1/G(\omega) = u_z/u_s \quad \dots\dots(3)$$

$$Y(\omega) = \pi H_0 f_0 \left[(f_0/f) \sqrt{H_0/H_1} \alpha \sin\{f_1(z-H_1)\} + \beta \cos\{f_1(z-H_1)\} \right]$$

$$\alpha = Y_1(2k\sqrt{H_0}) J_1(2k\sqrt{H_1}) - J_1(2k\sqrt{H_0}) Y_1(2k\sqrt{H_1})$$

$$\beta = J_1(2k\sqrt{H_0}) Y_0(2k\sqrt{H_1}) - Y_1(2k\sqrt{H_0}) J_0(2k\sqrt{H_1})$$

$$f_0 = \omega \sqrt{\rho_0/G_0}, \quad f_1 = \omega \sqrt{\rho_1/G_1}, \quad k = \sqrt{H_0} f_0 \quad \dots\dots(4)$$

(3)式のように表層地盤の増幅特性を表すと、(2)式で求めた地表面の地震動スペクトルにこの伝達率を掛けることにより任意深さの地震動スペクトルを求めることができる。

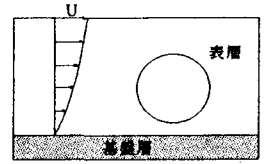


図1 従来の変位設定

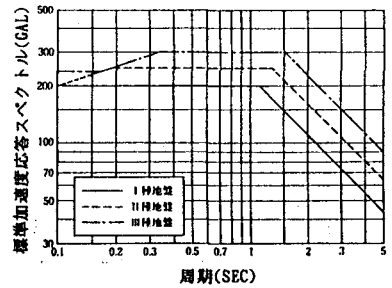


図2 標準加速度応答スペクトル

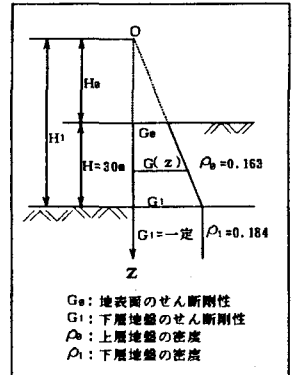


図3 表層地盤モデル (CASE1)

3. 解析結果: CASE1について5つのモデルを解析した。それぞれの解析モデルの物性値を表1に示す。MODEL1を基本モデルとし、剛性(MODEL2),インピーダンス比(MODEL3),深さ(MODEL4, 5)を変化させ、MODEL1との比較を行った。まず剛性、インピーダンス比を変化させたときのそれぞれの伝達率のスペクトルを図4, 5に表す。

表1 解析モデルの物性値

	S波速度 (m/s)		インピーダンス比	深さ (m)
	G_0	G_1		
MODEL1	135	240	1/2	60
MODEL2	108	192	1/2	60
MODEL3	81	288	1/4	60
MODEL4	135	240	1/2	90
MODEL5	135	240	1/2	45

す。図4, 5をみると地盤の共振現象があらわれていることがわかる。インピーダンス比一定で剛性を小さくした場合は卓越周期は大きくなり、伝達率の大きさはあまり変わらなかった。またインピーダン

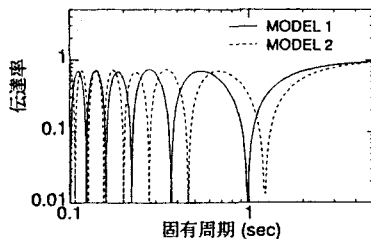


図4 MODEL1, 2の伝達率の比較

ス比を小さくすると伝達率は小さくなり、増幅特性が大きくなる。このことより、インピーダンス比が増幅特性に影響を与えることが確認できた。また、深さを変化させた場合の地盤内の変位スペクトルを図6に載せる。これより深さを変化させても地盤内のスペクトルにあまり影響を与えないことがわかる。次に図7のようにせん断剛性を上層、下層とも一定とした表層地盤モデル(CASE2)で近似する方法を考えた。この場合、伝達率は次式のように簡単になる。

$$Y(\omega) = \cos f_0 H \cos f_1 (z-H) - \sqrt{G_0 \rho_0 / G_1 \rho_1} \sin f_0 H \sin f_1 (z-H)$$

$$f_0 = \omega \sqrt{\rho_0 / G_0}, \quad f_1 = \omega \sqrt{\rho_1 / G_1} \quad \dots (5)$$

上層のせん断剛性は、CASE1の G_0, G_1 を用いて次式のように近似できるものと仮定した。

$$G'_0 = (G_0 + G_1) / 2 \quad \dots (6)$$

入力物性値はMODEL1とまったく同じものを用いて、解析を行った結果を図8に示す。図8よりCASE1, 2とも同じような挙動を示し、卓越周期はほぼ同じ値になった。また地盤の固有周期が小さくなるにつれて、CASE2の方が地盤内の変位スペクトルはやや大きくなる傾向にある。よって、図3のような表層地盤モデルは、補正を行えば上層地盤のせん断剛性を均一として近似することが可能だと思われる。

4. まとめ: 地表面変位応答スペクトルに伝達率を掛け合わせることで地盤中の変位スペクトルを算定する方法を考えた。この解析方法より地盤の共振現象などの地表の地震動特性が表現できることが確認できた。また、(6)式を用いて上層のせん断剛性を仮定することにより、図3のように上層のせん断剛性が深さ方向に対して線形に変化する地盤モデルを近似できる。ただしその場合は、固有周期が小さくなるにつれてやや大きくなるので、いくらかの補正が必要である。

参考文献: 1) 日本道路協会: 道路橋示方書V耐震設計編, 1990. 2) 澤田・土岐・高田: 応答変位法と道路橋示方書の設計スペクトルの比較(その2), 土木学会第48回年次学術講演会, 1993.

図5 MODEL1, 3の伝達率の比較

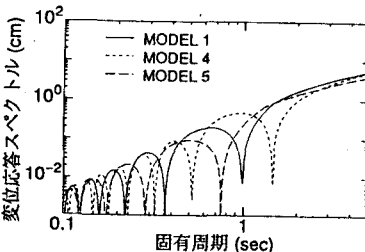


図6 MODEL1, 4, 5の地盤内の
変位スペクトルの比較

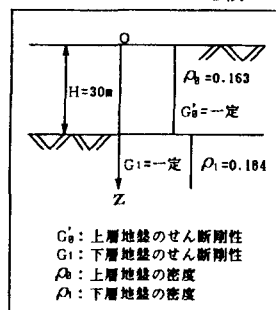


図7 表層地盤モデル(CASE2)

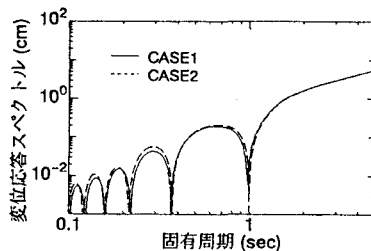


図8 地盤内の変位スペクトルの
CASE1とCASE2の比較