

I-139 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）

京都大学防災研究所 澤田純男
 京都大学防災研究所 土岐憲三
 神戸大学工学部 高田至郎

はじめに

地中管路や共同溝等の地中構造物では、共同溝設計指針等に規定されている応答変位法で設計する場合が多い。一方地上に建設される土木構造物の場合は、道路橋示方書の規定が準用される場合が多いように見受けられる。ところがこの2つの設計基準の地震入力考え方が大きく異なっており、それぞれ別々の設計スペクトルが規定されている。高架橋から地下に入る鉄道や道路構造物など、どこからが地上構造物でどこからが地下構造物が微妙で、どちらの基準を摘要すれば良いか判断が難しい場合もある。また、大深度地下構造物のように従来の応答変位法では設計できない構造物もあり、その場合どのような設計スペクトルにするか基準がない。地上構造物でも地下構造物でも設計入力地震動は同じものを用いるのが自然であると思われる。

澤田・土岐・高田¹⁾は、応答変位法の設計スペクトルを地表面における応答スペクトルに変換して、道路橋スペクトルとの比較を行なった。本研究では、従来の応答変位法に用いられている設計スペクトルと、道路橋示方書の設計スペクトル（平成2年）を基盤面のスペクトルに変換して、比較する。

地表面における応答スペクトルから速度振幅スペクトルへの変換法

本研究では一般的な応答変位法の設計スペクトルとして石油パイプライン技術基準（以下、石パ・スペクトル）の震度0.15の場合の規定を用いた。なお共同溝設計指針では震度が0.3相当と、またガス導管耐震設計指針では単位震度あたりの応答速度値が最大150cm/sと、今回比較したスペクトルのさらに約2倍になっていることに注意が必要である。石パ・スペクトルは基盤面（ $V_s=300\text{m/s}$ 相当層上面）で規定されている。このスペクトルの値 $S_v(\omega)$ を用いて、地表面の変位波形の振幅値 $u(\omega)$ を次式で求めることができる。

$$u(\omega) = \frac{4}{\pi} \frac{1}{\omega} S_v(\omega) \quad (1)$$

応答変位法の設計スペクトルは、基盤面における速度応答スペクトルであると説明されているが、表層地盤の固有周期と、地表面における変位波形を微分して速度振幅に直した値との関係を、単に表していると考えることができる。

一方道路橋示方書での入力設計スペクトル（以下、道路橋スペクトル）は耐震設計上の地盤面（液状化しない場合はほぼ地表面と同じ）で規定されており、これが両者の比較を困難にしている。上述の応答変位法の規定から、地下構造物の設計に必要なのは、地表面における変位波形の振幅値である。以下に道路橋スペクトルから、応答変位法の規定のスペクトルに変換する方法を示す。

道路橋スペクトルは、基本的に減衰5%の加速度応答スペクトルである。固有角振動数 n の1自由度の振動系に角振動数 ω の定常な調和変位 $u(\omega)$ が入力した場合 $u(\omega)$ に対する加速度応答値 $S_A(n)$ の比率は次式で表せる。

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

最大応答倍率を示すのは、 $\omega=n$ の場合で、 $h=0.05$ を代入して、

$$S_A(\omega) = 10\omega^2 u(\omega) \quad (3)$$

である。（1）式に（3）式を代入すると、

$$S_v(\omega) = \frac{\pi}{4} \frac{S_A(\omega)}{10\omega} \quad (4)$$

となり、加速度応答スペクトルを、応答変位法の規定のスペクトルに変換することができる。

図-1に、道路橋スペクトルを応答変位法の規定のスペクトルに変換した結果を示す。地盤種別は道路橋示方書の分類を用い、表層地盤の固有周期0.1～0.2秒をI種地盤、0.2～0.6秒をII種地盤、0.6秒以上をIII種地盤とした。図に

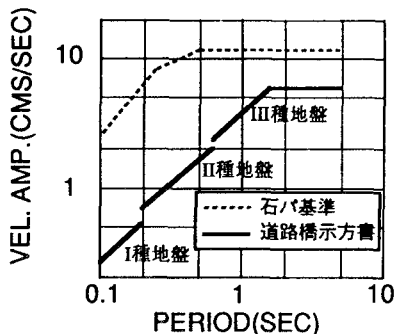


図-1 両設計スペクトルの比較

は石パ・スペクトルの震度0.15に対応するスペクトルを合わせて示しているが、石パ・スペクトルは道路橋スペクトルの約2倍であることがわかる。これは、道路橋スペクトルが、スペクトルの包絡線というより、平均スペクトルに近い性質をもつことから説明できよう。すなわち、ある地点の加速度応答スペクトルは、地盤の固有周期に対応する周期では、道路橋スペクトルの値を越えている場合が多いと考えられる。地上の構造物では、表層の固有周期と構造物の固有周期が一致しない限り問題がないが、地下構造物の場合は必ず表層の固有周期に対応する周期に対して設計しなければならない。従って、表層の固有周期に対応する加速度応答スペクトル値が、道路橋スペクトルを越えている倍率が、石パ基準の場合2倍、共同溝指針では4倍としていると考えることができる。

位相速度の分散性を考慮した速度振幅スペクトルへの変換法

前節で行なった比較は、表層の固有周期に対応する調和変位波形のみを対象としていた。しかしながら、実際の地震記録には、表層の固有周期以外の周期帯域にも大きな振幅を持つ波が存在し、これによって地下構造物に被害を与えることも考えられる。管路のような線状の地下構造物では、水平方向に進行する波動に対して安全に設計することが必要であるが、このような波動はほとんどが表面波と考えられる。表面波は比較的長周期域で大きな振幅を持ち、周期に応じて伝播速度が変化する分散性を持つのが普通である。

従って、前節で変換したスペクトルを用いて設計した場合、表層の固有周期よりも長周期の表面波が存在した場合被害が発生することが考えられる。ゆえに線状の地下構造物の設計スペクトルは、伝播速度の影響を考慮しておくことが必要となる。そこで表面波の伝播速度の分散性を考慮して、道路橋スペクトルを応答変位法の規定のスペクトルに変換する方法を以下に提案する。

1. 着目する表層地盤の固有周期 T に対応する地盤種別の道路橋スペクトルから、地表面の変位波形の振幅スペクトル $u(\omega)$ を式(3)で求める。このとき、上述した地盤の共振の影響を考慮するため、求められた振幅スペクトルを2倍しておく。
2. 表層地盤の固有周期に対応する表層厚を持つ地盤モデルに対するラブ波の位相速度 $p(\omega)$ を求める。
3. 地盤のひずみスペクトル $\varepsilon(\omega)$ を次式で求める。

$$\varepsilon(\omega) = u(\omega) \frac{2\pi\omega}{p(\omega)} \quad (5)$$

4. 表層地盤の固有周期に対応する角振動数 $2\pi/T$ より長周期の領域における地盤のひずみスペクトル $\varepsilon(\omega)$ の最大値 $\varepsilon_{\max}$ を求める。
5. $\varepsilon_{\max}$ に対応する設計スペクトル値 $S_v(T)$ を次式によって算出する。

$$S_v(T) = \varepsilon_{\max} \frac{p(2\pi/T)}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

上述の変換を表層の固有周期 T を変化させて繰り返すことにより、道路橋スペクトルを伝播速度の影響を考慮して応答変位法の規定に対応する設計スペクトルに変換することができる。

ここでは、地盤モデルとして、岩盤までの洪積層厚が0m, 100m, 1000m, 2000mの4種類について計算した。洪積層のうち半分の深さまではせん断波速度350m/sec, その下はせん断波速度700m/secとし、岩盤のせん断波速度3km/secとした。表層（沖積層）のせん断波速度は160m/secで、厚さは固有周期によって変化するようにした。

図-2に上述の方法によって求められたスペクトルを示す。洪積層厚が厚くなるにつれて短周期領域の設計スペクトルが大きくなっていることがわかる。図には石パ・スペクトルも合わせて示している。洪積層厚1000mと2000mについては、ほとんど同じ値となっており、図-2では洪積層厚2000mの場合しか示していない。洪積層厚1000mと2000mについては、ほぼ石パ・スペクトルに対応した値になっている。

なお本研究は「地下空間の活用と技術に関する研究協議会（座長：土岐憲三）」の研究の一部として実施したものである。また、位相速度を求めるのに、大阪土質試験所の香川敬生氏作成のプログラムを使用した。

参考文献：1)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，土木学会第47回年次学術講演会。2)土木学会：動的解析と耐震設計。3)高田：ライフライン地震工学。4)日本道路協会：道路橋示方書（平成2年2月）。5)日本道路協会：共同溝設計指針。6)小坪：土木振動学。

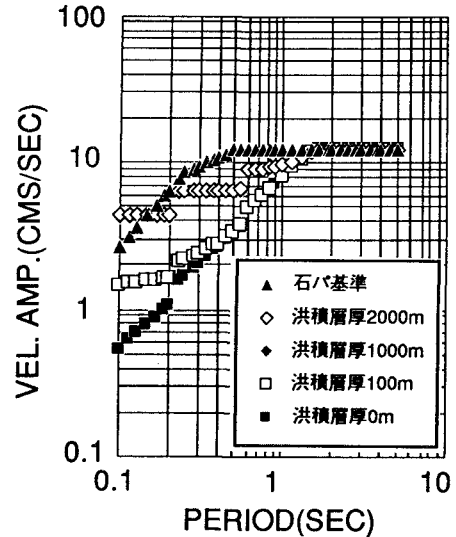


図-2 分散性を考慮したスペクトル