

電力中央研究所 正員 〇上島照幸

電力中央研究所 正員 堤一

1 はじめに 地盤-構造物連成系の動特性を解析する際、半無限体理論では数学的取扱いが複雑で、種々の幾何形状や境界条件はこれに対応することが困難であることも少なくないため、有限なモデルによる数値計算がしばしば用いられる。この数値解析で、現在一般に使用されているモデルでは、半無限に広がりをもつ地盤中に有限な仮想境界を設けなければならないため、相互作用を検討する上で最も重要な問題の一つである地下遠散減衰の評価に難点がある。この問題を解決するため、今日に至るまで種々の数値解法が提案されているが、花田¹⁾は、J. Lysmerらの提案²⁾したモデル系列に属する数値モデルとして、半無限体理論解析に立脚し、構造物から発生する遠散波動を最大限に吸収する有限な仮想境界を地盤中に設けることによって、連成系の動特性を表現しうる数値モデルの作成手法を示している。本報告では、花田の提案に基づいて簡単な数値モデルを作成し、多重反射の理論に基づく平面波解析と併せ行なう、数値モデルの評価を試みた。

2. 2層地盤モデルによる遠散減衰特性の検討 地震波を上層下面に入力し、その地表面応答を計算する際には、下層を剛性無限大の基盤として地表面応答を求めることが多いが、剛性無限大の基盤は現実には存在せず、インピーダンス比が適当な値以下となる層を基盤と見做すことになる。そこで、これらの遠散減衰分を内部粘性的に評価するため、図1に示す $z=H$ を境とする簡略な2層モデルを例として考察する。入射波 g_2 に対する地表面の応答伝達関数を $G_I(\omega, 0)$ 、境界面 $z=H$ における応答伝達関数を $G_R(\omega, H)$ とすれば、

$$G_I(\omega, 0) = (f_1 + g_1)|_{z=0}/g_2|_{z=H} = 2/\left\{\cos\left(\frac{\omega H}{V_1}\right) + i\delta \sin\left(\frac{\omega H}{V_1}\right)\right\} \quad (1)$$

$$G_R(\omega, H) = (f_2 + g_2)|_{z=H}/g_2|_{z=H} = 2\cos\left(\frac{\omega H}{V_2}\right)/\left\{\cos\left(\frac{\omega H}{V_1}\right) + i\delta \sin\left(\frac{\omega H}{V_1}\right)\right\} \quad (2)$$

図1に $|G_I(\omega, 0)|$ と $|G_R(\omega, H)|$ を δ をパラメータとして図示する。一見して波動インピーダンス比とガー自由度数の減衰定数のような役割を果たしていることに気付く。そこで、次に上下層共に内部粘性が存在する場合について考える。この時上層は若速 v は次のように表わされる。(以下 δ は減衰ある系を意味する。)

$$v = v_0(\varepsilon + i\delta) \quad (3)$$

$$\varepsilon \equiv \beta, \quad \beta = \sqrt{1 + 4\delta^2}, \quad \varepsilon = \frac{1}{\beta} \sqrt{(\beta + 1)/2}, \quad \delta = \frac{1}{\beta} \sqrt{(\beta - 1)/2}$$

この時境界における変位 $(g_2 + f_2)$ に対する地表面の応答伝達関数 $G_R(\omega, 0)$ は、

$$G_R(\omega, 0) = (f_1 + g_1)|_{z=0}/(f_2 + g_2)|_{z=H} = 1/\cos\left(\frac{\omega H}{V_1}\right) \quad (4)$$

δ をパラメータとした応答曲線と図1に示した曲線を類似とみなし、共振点における応答倍率のみに着目すると、(1), (3), (4)式から δ との関係が導かれる。

$$\delta^2 = \cos^2\left(\frac{\pi\beta\varepsilon}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\pi\beta\delta}{2}\right) - 1 \quad (5)$$

この関係を図2に示す。以上から地震入射波が上層下面に入力し、その地表面応答を(図2) δ - ε 関係(2層地盤例)計算する際に、下層を剛性無限大として基盤振動の形で応答計算をする際には、遠散減衰分として図2の関係を示さる内部粘性を上層に付加しなけければならないことが示された。

3. 多層地盤モデルによる平面波解析 前節では、基盤振動の形で応答計算をする際に遠散減衰分として上層に付加すべき内部粘性を2層地盤モデルについて求めた。しかし、入射波に対する応答は同形で応答計算を行えば、遠散減衰分として内部粘性を上層に付加する操作は不要となる。前節の(1), (2), (4)式同様、一般に N 層の地盤

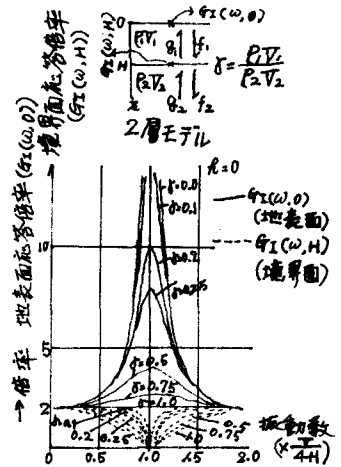
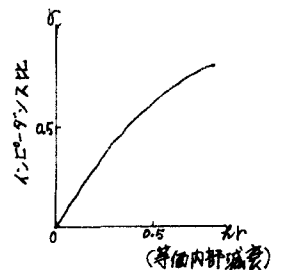


図1) 2層モデルによる地表面、境界面応答倍率の変化(単位入射波応答 $\delta=0$)



モデルの応答伝達関数も粘性地盤に対して求めることが可能である。後節で述べる2次元モデルと同一の層構造を有する図3(d)モデルについて基盤底面より合成単位変位を入力した時の①点～⑤点(図3中の番号)の応答を図4に、また入射単位変位を入力した時の①～⑤点の応答を図5に示す。この結果を比較すると、合成単位変位に対する応答 $G_R(\omega, z)$ と、入射単位変位に対する応答 $G_I(\omega, z)$ とは、歴然とした差異がある。 $\omega=0$ 時の条件も合わせて単純にピーク値で比較すれば20倍程度の違いがある。合成波応答における入力境界面 $z=H_0$ の応答は、定義から言って当然単位値になるが、入射波応答における入力境界面の応答 $G_I(\omega, H_0)$ はフラットにらず、上層の共振振動数付近で進行波と後退波の位相が逆転するため、0に近い値になっている。2層地盤モデルにおける計算と同様、やはり次式が成立する。

$$G_R(\omega, z) = G_I(\omega, z) / G_I(\omega, H_0) \quad \text{----- (6)}$$

合成波応答曲線が共振点付近で鋭く立ち上るのはこのためである。

4. 2次元F.E.M.による計算 計算モデルは底面及び側面に層のインピーダンスに依じた境界ダンパーを付したものである(理論については文献1)を参照)で、側面については、構造物から十分に遠方の地盤の1次元動的振動を表現する無限遠1次元モデル(M_∞)にダンパーを介して結合されている。境界ダンパーのないモデル(図3(a): M_R)が基盤応答計算であるのに対して、ダンパーを付したモデル(図3(b): M_D)は入射波応答計算が可能である。この計算結果(図6, 7)を見ると、平面波解析による結果とよく一致している。今回の計算で与えた物性ではマット基礎は地盤変形とはば一致して挙動しており、構造物振動の影響のない水平成層構造の解析と殆んど同一となる。従って両者の計算結果の一致は双方の数値計算の精度を確証したものとされる。故に前節で述べたと同様のことが2次元解析にもあてはまるわけで、基盤応答と入射波応答の差異はここでも歴然としており、2次元における数値モデル改良の意義が明らかとなった。また、入射波応答結果から(6)式を利用して側方境界のみの影響を取り出すことができ、この結果を基盤応答結果と比較すると(図3のM_RとM_Sのちがい) 図8に見るように、モデル側端の境界条件及び境界形状から生ずる数値計算上の誤差を、境界ダンパーを介したM_∞の設定により、除去できることが示された。

参考文献1)花田他, 地盤-構造物連成系の動的挙動に対する数値解法 '75 X4回日本地震工学会

2) LySmev他, Finite Dynamic Model for Infinite Media Aug '69 ASCE EM4

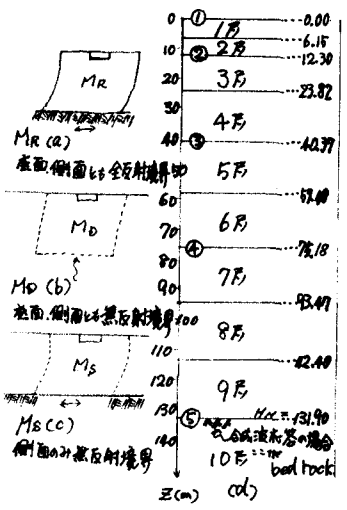


図3 計算モデル概念図

(a), (b), (c): 2次元F.E.M. (d): 平面波解析

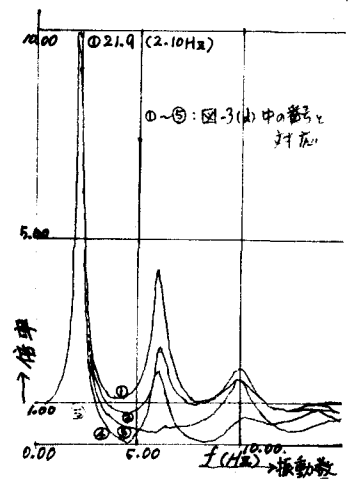


図4 99%モデル解析(単位合成波応答)

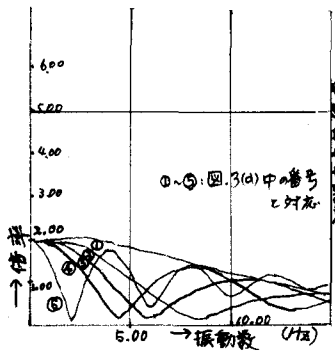


図5 99%モデル解析(単位入射波応答)

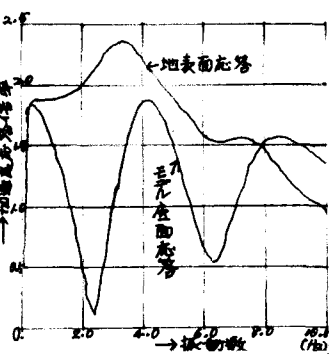


図6 2次元F.E.M. (入射波応答)

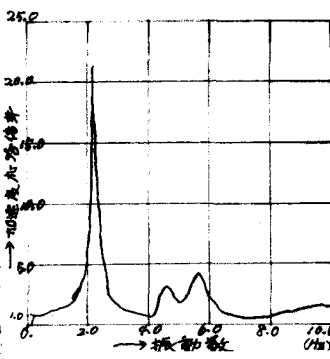


図7 2次元F.E.M. (合成波応答)

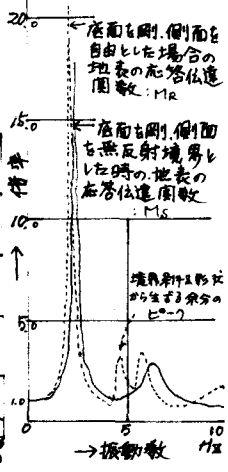


図8 モデルによる地表応答(ちがい(M_RとM_S))