

機関技術研究所 正会員 松原勝己

機関技術研究所 正会員 三原正哉

1. 概 要

Lysmerら¹⁾により、開発された有限要素法プログラムFLUSHでは、左右側方の境界に伝達境界を、面外方向の境界には粘性境界を使用することにより半無限地盤の影響を考慮している。しかしながら、FLUSHでは、基礎を剛体として取扱っており、基礎で反射する波動による応答への影響を考慮するためには、基礎境界面を深くとる必要がある。また、入力地震動を入射波の加速度で指定することができず、基礎上での実加速度で指定しなければならない。ここでは、2次元平面ひずみ状態のもとで、左右側方には伝達境界を、基礎上には粘性境界を設定したモデルにより、半無限地盤の影響を考慮することにした。その際、FEM領域の運動方程式は、入射波の変位の2倍に対する相対変位で表現したものをを用いた。また、伝達境界でトリックスを形成する際に基礎の影響を考慮するために、水平方向の波数に関する固有値問題を、断面にギャングショットを付加した形で解いた。今回は、ファーストケースとして、図1に示す簡単な一層系地盤モデルで計算し、若干の考察を行った。

2. 基礎粘性境界の設定について

1) FEM領域の基礎粘性境界に関する要素マトリックス

Lysmerら²⁾により、提案された粘性境界を基礎に設定する時、粘性境界から受ける応力 $\{T\} = [\rho_b V_{sb} \dot{u}, \rho_b V_{pb} \dot{w}]^T$ (ρ_b : 基礎の密度, V_{sb} : 基礎のS波速度, V_{pb} : 基礎のP波速度, $\dot{u}$: 水平方向速度, $\dot{w}$: 鉛直方向速度)により、発生する断面節点力 $\{F\}$ は、有限要素の基礎に接する面を S_0 として、次式で表わされる。

$$\{F\} = \iint_{S_0} [N]^T [C_v] [N] \{\xi\} dS = [C^e] \{\xi\} \quad (1)$$

ここに、

$$[C_v] = \begin{bmatrix} \rho_b V_{sb} & 0 \\ 0 & \rho_b V_{pb} \end{bmatrix}, [N]: \text{形状関数}, \{\xi\}: \text{節点速度}$$

であり、 $[C^e]$ が要素レベルでの粘性境界に関するマトリックスである。

2) FEM領域の運動方程式

FEM領域断面に粘性境界を設定した時の運動方程式を、絶対変位に関して表現すれば、次式で表わすことができる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{\dot{u}\} = [G]\{u\} - ([R]_s + [L]_s)(\dot{u}_f - \dot{u}_g) + [C](\dot{H}) \cdot 2\dot{E} - \{\dot{u}\} \quad (2)$$

ここに、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は複素剛性マトリックス、 $[G]$ は自由地盤の物性値により定まるマトリックス、 $[R]_s$ および $[L]_s$ は伝達境界に関するマトリックス、 $[C]$ は基礎粘性境界に関するマトリックスである。また、 $\{u\}$ はFEM領域の絶対変位、 $\dot{u}_f$ は自由地盤の絶対変位、 $\dot{H}$ は基礎の加振方向に、定まる1と0からなるベクトル、 $2\dot{E}$ は入射波の速度の2倍を意味している。ここで、式(2)を $2E$ に対する相対変位で表現するために、相対変位 $\{u\} = \{u\} - \dot{H} \cdot 2E$ を定義する。式(2)を $\{u\}$ で表現して、 $[K]\{\dot{u}\} = [K]\{\dot{u}\}$ 、 $[G]\{u\} = [G]\{u\}$ を考慮すれば、次式が導かれる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [G]\{u\} - ([R]_s + [L]_s)(\dot{u}_f - \dot{u}_g) - [M]\dot{H} \cdot 2\dot{E} \quad (3)$$

式(3)を周波数領域で表現すれば、次式をうる。

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K] + [R]_s + [L]_s)\{U\} = ([G] + [R]_s + [L]_s)\{U\} - [M]\dot{H} \cdot 2\dot{E} \quad (4)$$

式(4)が $2E$ に対する相対変位に関する運動方程式である。ここに、 $\{U\}$ および $\{U\}$ はそれぞれFEM領域での相対変位 $\{u\}$ および自由地盤での相対変位 $\dot{u}_f$ の複素Fourier振幅である。本報告においては、式(4)を用いて計算を行った。

3) 波数に関する固有値問題

伝達境界に関する剛性マトリックスを形成する際、成層地盤で水平方向の波数 \$k\$ に関する固有値問題を、基礎の影響を考慮した形で解かなければならない。ここでは、やや物理的意味が不明確な点もあるが、断面にダッシュポットを付加した形で、次式で表わされる固有値問題を解いた。

$$|k^2[A] + k[B] + [G] + i\omega_s[C] - \omega_s^2[M]| = 0 \quad (5)$$

ここに、\$[A]\$、\$[B]\$、\$[G]\$ および \$[M]\$ は自由地盤の物性値によって定まるマトリックスであり、\$[C]\$ は断面にダッシュポットに関するマトリックスである。

3. 一層系地盤モデルでの計算

図1に示すような一層系地盤モデルについて、左右側方には伝達境界も、断面には粘性境界をもとに設定した2次元FEMモデルによって応答計算を行った。地盤の物性値を表1に、計算に使用した入力地震動を図2に示す。表2に、図3に示した各点での最大加速度を示す。表中には、伝達関数も補間して計算した時(0~10Hzまで4個, 10Hz~15Hzまで8個, 15Hz~20Hzまで16個づつ)と補間せずに計算した時の両方が示されている。自由地盤とFEM領域の値を比べると、マッシーの非対称性から若干の違いが生じているが、概ね一致を示していると言える。表3は、一次元波動伝播解析プログラムSHAKEでの計算結果であるが、表2の計算結果と比較すると、伝達関数も補間した時で0.5%未満、補間しない時で0.1%未満の差で一致している。この結果によると本モデルとSHAKEとで理論上差が生じると考えられる以下の点、すなわち(1)離散化による誤差、(2)種々剛性の形の違による差、(3)基礎境界面に対して上部が斜めに入射してくる実体波を基礎粘性境界で十分に吸収できないことによるものは、本モデルの場合ほとんど影響していないことがわかる。表3は、左右側方の伝達境界がない場合(左右側方の境界条件は水平および鉛直方向とも自由)の最大加速度値を示している。表3によれば、SHAKEの結果と比べて全般的に応答値が小さくなり、断面ごとに値が異なる。これは、左右側方の境界条件として、水平および鉛直方向とも自由としたため、側方境界に沿ってRayleigh波が発生したことが考えられる。これに対し、伝達境界を設定した場合(表2)では、側方境界に沿って発生したRayleigh波が左右の伝達境界によって吸収されたため、SHAKEの結果と一致したと考えられる。表4は、左右側方の境界条件として、水平方向のみを自由にした場合であるが、この場合もSHAKEの解と概ね一致を示している。すなわち、本モデルのような本来一次元のモデルに対しては、側方境界の境界条件として鉛直変位をゼロに指定することにより境界上のRayleigh波の発生を防げることができると考えられる。(参考文献 1) Lysmer他, 1975 2) Lysmer他, 1969)

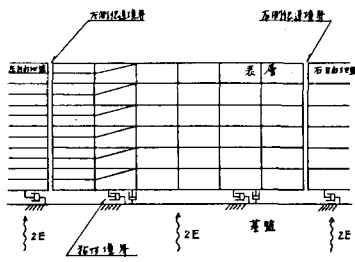


図1 一層系地盤モデル

表1 地盤物性値

項目	地盤	基礎
単位重量 \$\gamma\$	1.8	1.8
圧縮率 \$C_u\$	170	250
ポアソン比	0.4	0.4
減衰率 \$\beta\$	5	0
層厚 \$m\$	3	—

図3 位置図

表2 最大加速度(両側伝達境界, カブ内補間なし)

位置	側方境界	側方境界	L1	L2	L3	C	R3	R2	R1
伝達境界	304.8	304.9	304.7	304.7	305.1	305.0	305.0	305.0	305.0
0.0	(304.3)	(304.3)	(304.2)	(304.2)	(304.4)	(304.4)	(304.4)	(304.4)	(304.4)
1.0	296.5	296.6	296.5	296.5	296.6	296.6	296.6	296.6	296.6
	(292.6)	(292.7)	(292.6)	(292.6)	(292.8)	(292.8)	(292.8)	(292.8)	(292.8)
2.0	282.3	282.4	282.3	282.3	282.4	282.4	282.4	282.4	282.4
	(282.4)	(282.5)	(282.4)	(282.4)	(282.5)	(282.5)	(282.5)	(282.5)	(282.5)
3.0	261.8	261.9	261.8	261.8	261.9	261.9	261.9	261.9	261.9
	(261.2)	(261.2)	(261.2)	(261.2)	(261.2)	(261.2)	(261.2)	(261.2)	(261.2)

表3 最大加速度(伝達境界なし, カブ内補間なし) (単位:ガル)

位置	L1	L2	L3	C	R3	R2	R1
伝達境界	281.0	279.3	276.8	275.5	276.8	279.3	281.0
0.0	(281.1)	(280.4)	(277.6)	(276.3)	(277.6)	(280.4)	(281.1)
1.0	276.5	274.7	272.8	272.0	272.8	274.7	276.5
	(272.0)	(273.3)	(273.3)	(272.5)	(273.3)	(273.3)	(272.0)
2.0	269.1	266.1	263.5	262.6	263.5	266.1	269.1
	(269.1)	(266.1)	(263.5)	(262.6)	(263.5)	(266.1)	(269.1)
3.0	255.4	253.4	250.8	249.2	250.8	253.4	255.4
	(254.7)	(252.7)	(250.8)	(249.2)	(250.8)	(252.7)	(254.7)

表4 最大加速度(側方境界ローラー, 補間なし)

位置	L1	L2	L3	C	R3	R2	R1
伝達境界	306.3	306.3	306.4	306.6	306.5	306.6	306.6
0.0	297.7	297.7	297.8	297.8	297.9	297.5	297.2
1.0	282.3	282.3	282.3	282.6	282.0	282.5	281.9
2.0	261.3	261.2	261.0	260.8	260.8	261.4	262.1
3.0	241.3	241.2	241.0	240.8	240.8	241.4	242.1

表5 SHAKE

位置	側方境界
伝達境界	306.1
0.0	297.6
1.0	282.4
2.0	261.4
3.0	241.4

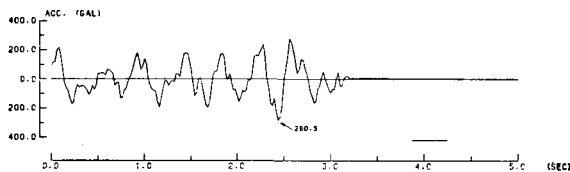


図2 入力地震動