

I-410 互層地盤の地震応答解析におけるモデル化手法について

(財)電力中央研究所 正会員 ○柄木 均 正会員 平田和太
(財)電力中央研究所 正会員 塩見 哲

1. はじめに 堆積岩からなる地盤において交互に異なった岩種により形成される薄い互層岩盤が形成される場合がある。このような岩盤の地震時安定性を動的FEM解析等により検討する場合、互層の層厚(通常数10 cmのオーダー)をそのまま要素として地盤のモデル化を行うことは計算機容量、時間等を考慮すると非常に困難である。ここでは、互層地盤を均質な地盤にモデル化する手法、すなわち、各層のせん断剛性、減衰定数及び層厚から等価な均質地盤のせん断剛性、減衰の評価手法を提案し、一次元地盤の応答解析によりモデル化手法の妥当性、適用限界について検討を行った。なお、ここでの検討は一次元応答解析によるものであるが、通常、地盤の地震時応答においてはせん断振動が支配的であることを考えれば、ここで提案された手法は2次元FEM応答解析に対しても当然適用可能と考えられる。

2. 解析手法 対象とした互層地盤モデルは水平で一様な2種の層が交互に重なり合ったものである。このような地盤の1組の互層(図-1(a))について、上層と下層の複素せん断ばねが直列に連結されたものと仮定することにより均一な物性をもつ一様な層にモデル化することを試みた。上層及び下層のせん断剛性と減衰定数をそれぞれ G_1, h_1 及び G_2, h_2 とするとき、均一な層の複素せん断ばね G_{eq}^* は直列ばねの剛性として各層の複素ばね G_1^*, G_2^* によって表わされる次式により定めた。

$$G_{eq}^* = \frac{(H_1+H_2)G_1^*G_2^*}{H_1G_2^* + H_2G_1^*} = \frac{(H_1+H_2)G_1G_2[H_1G_2 + H_2G_1 + 4(H_2G_1h_1^2 + H_1G_2h_2^2) + 2i\{H_1G_2h_1 + H_2G_1h_2 + 4h_1h_2(H_1G_2h_2 + H_2G_1h_1)\}]}{(H_1G_2 + H_2G_1)^2 + 4(H_1G_2h_2 + H_2G_1h_1)^2} \dots (1)$$

等価な層のせん断剛性 G_{eq} と減衰定数 h_{eq} は上式の G_{eq}^* の実部と虚部をとることによって次式で与えられる。 h に関する2乗の項を無視することによって G_{eq} と h_{eq} の簡略的な式が得られるが、ここでは h の2乗の項を無視した場合とこれを考慮した場合の比較も行っている。

$$G_{eq} = \text{Re}(G_{eq}^*) = \frac{(H_1+H_2)G_1G_2\{H_1G_2 + H_2G_1 + 4(H_2G_1h_1^2 + H_1G_2h_2^2)\}}{(H_1G_2 + H_2G_1)^2 + 4(H_1G_2h_2 + H_2G_1h_1)^2} \approx \frac{(H_1+H_2)G_1G_2}{H_1G_2 + H_2G_1} \dots (2)$$

$$h_{eq} = \frac{\text{Im}(G_{eq}^*)}{2\text{Re}(G_{eq}^*)} = \frac{H_1G_2h_1 + H_2G_1h_2 + 4h_1h_2(H_1G_2h_2 + H_2G_1h_1)}{H_1G_2 + H_2G_1 + 4(H_2G_1h_1^2 + H_1G_2h_2^2)} \approx \frac{H_1G_2h_1 + H_2G_1h_2}{H_1G_2 + H_2G_1} \dots (3)$$

均一な層のS波速度は上記の方法で定めたせん断剛性 G_{eq}^* から求め、密度は上層と下層の密度に層厚の重みをかけて得られる平均的な密度とした。

平行な成層地盤における鉛直入射波の応答は重複反射理論により求めることができる¹⁾。基盤における複素せん断ばねを G^* 、減衰を考慮したS波速度を V_s^* とすれば、基盤から $Ae^{i\omega t}$ の波が鉛直に入射したときの地表面における変位 u の応答倍率 α は次式で表わされる。

$$\alpha = \frac{u}{A} = 2 \left/ \left| R_s^*(1,1) - i \frac{R_s^*(2,1)}{G^*R^*} \right| \right. \dots (4)$$

ここで R^* は ω/V_s^* で表わされる波数であり、 $R_s^*(1,1)$ 及び $R_s^*(2,1)$ は次の行列の1行1列、2行1列の成分である。

$$[R_s^*] = [S_s^*][S_{p-1}^*] \dots [S_1^*]$$

$$[S_m^*] = \begin{bmatrix} \cos R_m^* H_m & \sin R_m^* H_m / G_m^* R_m^* \\ -G_m^* R_m^* \sin R_m^* H_m & \cos R_m^* H_m \end{bmatrix} \dots (5)$$

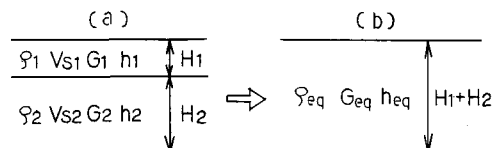


図-1 互層地盤のモデル化

3. 結果 互層地盤を形成する2種の層（図-1(a)）の上層及び下層のS波速度と減衰定数をそれぞれ $V_{s1} = 500 \text{ m/s}$, $V_{s2} = 1000 \text{ m/s}$, $h_1 = 5\%$, $h_2 = 2\%$ と定め、各層の密度を $\rho_1 = 2.0 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 2.5 \text{ g/cm}^3$ とし、互層地盤及び(1)~(3)式で定められる等価一層地盤について(4)式により周波数伝達関数を求め両者の比較を行った。互層地盤の地表から基盤までの深さは150mとし、2種の層の層厚比 H_1/H_2 を $1/2$ 及び $1/3$ として一定に保ち、地盤に含まれる互層の組数 n を変化させていくことによって各層厚が応答に及ぼす影響を調べた。図-2は層厚比 H_1/H_2 が $1/2$ の場合について互層の組数 n を変化させたときの互層地盤と均一地盤

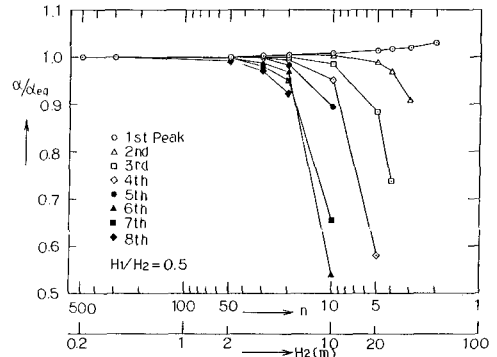


図-2 周波数伝達関数のピークの比較

の周波数伝達関数における1次から8次までのピークの比を示している。同図において、 α_{eq} は均一地盤の応答倍率のピークを示している。 n が大きく互層地盤を形成する各々の層厚が小さい場合には均一地盤の応答倍率のピークは全ての次数について互層地盤のピークと完全に一致することがわかる。 n を小さくしていくと、低次のピークはほぼ良い傾向にあるが高次のピークにずれが生じてくる。

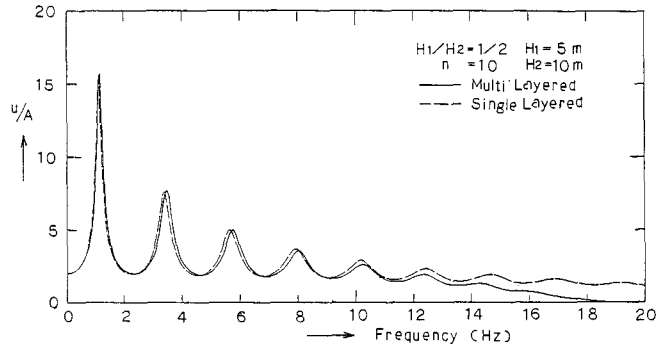
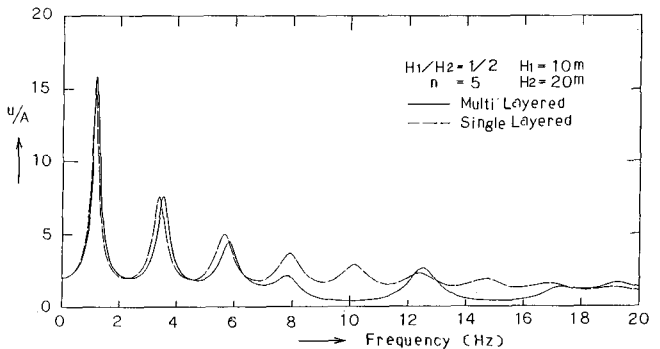
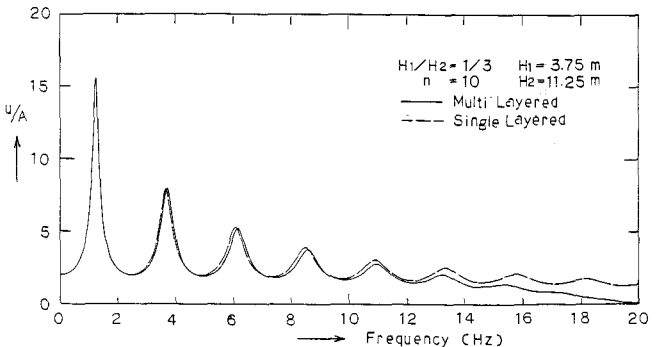
図-3 互層地盤と均一地盤の周波数伝達関数の比較 ($H_1/H_2 = 1/2$, $n = 10$)

図-3, 4はそれぞれ層厚比を $1/2$ としたときの $n = 10$ 及び $n = 5$ の場合の周波数伝達関数を比較したものであり、図-5は $H_1/H_2 = 1/3$, $n = 10$ の場合のものである。2種の層厚が10m, 20mの場合(図-4)には12.5Hz付近に局所的なピークがあり、その両側の振動数領域では応答倍率が非常に小さくなっている。これは互層地盤を形成する2層について層厚とS波速度から計算される固有振動数が共に12.5Hzで一致しており、各層の固有振動が励起された結果であると考えられる。図-3については20Hz付近で応答倍率がほとんどゼロになっているが、これは各層の固有振動数が25Hzであり、それより低い振動数領域で応答倍率が低下する上記の傾向が現われたものであると考えられる。図-5についても同様である。局所的なピークの影響が及ばない振動数領域では本手法による均一地盤の応答は非常に良い傾向にあると言える。

図-4 互層地盤と均一地盤の周波数伝達関数の比較 ($H_1/H_2 = 1/2$, $n = 5$)図-5 互層地盤と均一地盤の周波数伝達関数の比較 ($H_1/H_2 = 1/3$, $n = 10$)

文献 1) 土波: 新体系土木工学II 構造物の耐震解析