

地中構造物の振動解析について

京都大学工学部 正員 後藤尚男
 京都大学防災研究所 正員 土岐憲三
 京都大学大学院 ○学生員 高田至郎

1. まえがき

地中に埋設された構造物の振動解析については、従来からいろいろな研究がなされているが、構造物を支持する基盤は剛であるとし、入力波としては、構造物の鉛直下方より入射するせん断波を考えて解析が進められることが多い。しかし現実には、基盤も完全に剛なものではなく、弾性を有し表層の振動に関しては地下逸散の減衰効果をもつことが知られている。また表層と基盤の境界

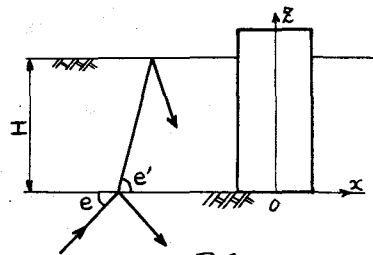


図 1

に到達した波動はその境界面と地表面の間で重複反射を繰り返すが、境界面に対してある入射角をもつ場合には、表層内においては水平方向に入射波が伝播するのと同様の現象を生じる。そこで、ここでは表層地盤のみならず基盤の弾性をも考慮して、構造物、表層地盤、基盤の三者からなる系の振動解析を行ない、基盤の弾性および入射波の入射角が系の応答にどのような影響をもつかを検討した。

2. 地表層の振動

図1に示したように射出角 e で境界面に入射してくるSH波を考えれば、境界面における反射波と屈折波もやはりSH波である。このような設定条件のもとで、境界面で満足されるべき変位と応力の連続条件式、地表面での条件式などと、表層地盤および基盤の運動方程式とから、表層地盤内の y 軸方向の変位 v_1 を求めると次式で与えられる。

$$v_1 = \frac{zA_0 \cos \left\{ \frac{\omega}{\omega_g} \frac{\pi}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 \cos^2 e} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \right\} \exp \left[ik_1 (x \cos e' - ct) + r \right]}{\sqrt{\cos^2 \left\{ \frac{\omega}{\omega_g} \frac{\pi}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 \cos^2 e} \right\} + \beta^2 \sin^2 \left\{ \frac{\omega}{\omega_g} \frac{\pi}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 \cos^2 e} \right\}}} \quad (1)$$

ここに、 A_0 は入射波の振幅、 ω_g は表層の固有振動数、 c_1 と c_2 は表層と基盤での横波速度、 $\beta = \rho_1 c_1 \sin e' / \rho_2 c_2 \sin e$ 、 $r = \tan^{-1} \left\{ \beta \sin(k_1 H \sin e') / \cos(k_1 H \sin e') \right\}$ 、 $k_1 = c_1 / \omega$ 、 ρ_1, ρ_2 はそれぞれ表層、基盤の密度である。

上式(1)からもわかるように、基盤を伝播して来たSH波が境界面にある角度をもって入射する際には、波動の反射・屈折現象によって、表層内においては、鉛直方向の重複反射現象が生じるのみならず水平方向にも、入射波の横波の速度よりも見かけ上の伝播速度の大きい波動が伝播する。この速度は $c_a = c_1 / \cos e'$ で与えられ、 $e = \pi/2$ のときには c_a の値は無限大となり、境界面に到達する波動に位相差がなく、境界面の全域が一樣な運動をしていることを意味する。したがって、上のような波動については、表層地盤内では水平方向に波

動が伝播するのと同様の効果を持ち、その進行方向と運動方向に対してはラグ波と同様な関係にあることがわかる。図2は C_1/C_2 をパラメーターとして、 v_1/A_0 の周波数応答に及ぼす射出角 e の影響を示したものである。いずれの曲線も地下逸散減衰により、基盤内の横波速度 C_2 が表層内のそれに近いほど振動倍率が低下することを示しているが、それと同時に、射出角 e も表層の振幅に対して大きな影響をもっていることが明らかである。

3. 構造物に作用する振動圧

図1で示したような、表層地盤中に設置された構造物は、波動が水平方向に伝播することによって、側方より直接に波動を受けることになる。したがって、剛な基盤か一様な振動をする場合とは異った振動性状を示すものと思われる。すなわち、構造物の側方より水平方向に伝播してきて、構造物の表面

面で散乱される散乱波と、一方、座標原点の基盤の運動と同一の運動をする構造物によって表層内に引き起こされる波動とから表層地盤の運動が決定されねばならない。ここでは、このような考え方のもとで、剛な円柱構造物を対象として、表層の振動変位を決定し、しめる後、円柱表面に作用する単位長さ当りの振動圧 F_y を求めると次式で与えられる。

$$\frac{F_y}{\rho \pi a^2 A_0 \omega^2} = \left[4 \frac{\omega_0}{\omega} \frac{H}{a} \frac{z}{\pi} \frac{C_1}{C_2} \cdot \cos e \cdot \frac{\cos \left\{ \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\pi}{z} \sqrt{1 - \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^2 \cos^2 e} \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right\} J_1(ka) e^{i\pi}}{\sqrt{\cos^2 \left\{ \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\pi}{z} \sqrt{1 - \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^2 \cos^2 e} \right\} + \beta^2 \sin^2 \left\{ \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\pi}{z} \sqrt{1 - \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^2 \cos^2 e} \right\}}} \right. \\ \left. - z \sum \left\{ (2l-1)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right\} \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \left\{ Z_l^* \Xi_l^* - \Gamma_l^* \Phi_l^* \right\} \sin \alpha_l z \right] e^{-i\omega t + \pi} \quad (2)$$

ここに、 $\alpha_l = (2l-1)\pi/zH$ 、 I_l^* 、 I_l^+ 、 Ξ_l^* 、 Ξ_l^+ は振動数、構造物の形状、地盤の諸定数などより決定されるきわめて複雑な複素量であり、その詳細は講演時にゆずる。

図3に $|F_y/\rho \pi a^2 A_0 \omega^2|$ の周波数応答曲線を示した。図より、射出角が振動圧の大きさに及ぼす影響はかなり大きいことが知られる。また、表層地盤の高次の共振点でピーク値が低下していることより、構造物の側方への逸散減衰の効果があることがわかる。図中に破線で示した曲線は基盤が一様な運動をしている場合の応答曲線であり、地下逸散減衰がないために共振点では無限大の値をもっている。その他の計算結果については、講演時にゆずる。

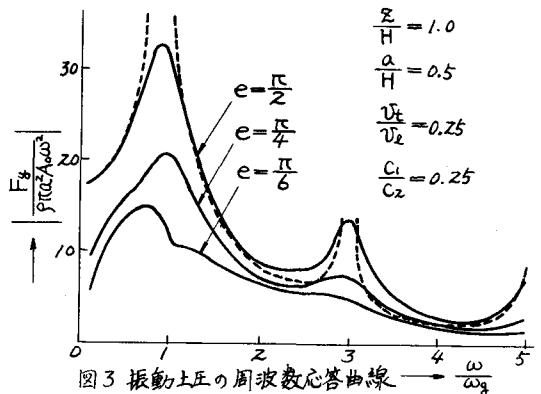


図3 振動上圧の周波数応答曲線