

I-488

入射せん断波を受ける埋設管の応答性状に及ぼす境界層の影響

室蘭工業大学工学部 正員 松岡健一
 室蘭工業大学工学部 正員 岸 徳光
 室蘭工業大学工学部 正員 菅田紀之
 日本大学生産工学部 正員 能町純雄

1. まえがき 地震時のパイプラインの被害としては、1989年10月のロムブリエタ地震でのサンフランシスコにおけるガス、電気、水道関係の被害が記憶に新しいが、この種の構造の地震時挙動を明らかにすることは、大きな規模の地震の予想される我国にとっても重要な問題である。

この種の構造のモデルとして弾性体中に埋設される円筒が考えられる。円孔や円筒を有する弾性体中を伝播する弾性波の応答問題は、Pao¹⁾や Mowと McCabe²⁾ がP波について、また、Mowと Mente³⁾はS波が入射する場合の解析を行っており、その他にも研究がなされているが、これらの多くは2次元問題として取り扱っているもので、弾性波が円孔や円筒の軸と角度をもって入射するような3次元問題はあまり取り扱われていない。著者らは、これまで弾性体中にある円筒が軸方向と角度をもって入射する弾性波を受ける時の応答問題を3次元的に解析しているが、これまでは埋設管と弾性体の境界は連続しているものとして解析している。^{4), 5)}しかし、実際の埋設管の施工に当たっては周辺部の状況は必ずしも一体とは考えられない場合も生ずると思われるので、ここでは埋設管の周囲に境界層をおいた三層構造として解析し検討を加えるものである。

2. 基礎方程式 円孔を有する弾性体や、円筒を伝播する弾性波の基本解は既に示している⁴⁾が、ここには改めて結果のみ示す。図-1のように円孔または円筒軸方向にz軸、半径方向をr、円周方向をθ軸にとり、波動の伝播方向をz軸とψの角度を持つ方向とし、定常波動伝播を仮定すれば、変位、応力は次のように仮定できる。

$$f = \bar{f} \exp[i\omega(t - z \sin \psi / V)] \quad (1)$$

ここで、 ω : 波動の角速度、 V : 波動の伝播速度である。式(1)を考慮して、三次元波動方程式をFourier-Hankel変換を用いて解けば、円筒に対する変位解は次のように示される。

$$u = \sum_{m=1}^{\infty} C_m (A_{mr} + B_{mr}) \cos \theta \exp[i\omega(t - z \sin \psi / V)] \quad (2)$$

$$v = \sum_{m=1}^{\infty} (A_{mr} + B_{mr}) \sin \theta \exp[i\omega(t - z \sin \psi / V)] \quad (3)$$

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} C_m W_{mr} \cos \theta \exp[i\omega(t - z \sin \psi / V)] \quad (4)$$

ここで、 $C_0 = 1/2\pi$ 、 $C_m = 1/\pi$ ($m \neq 0$) である。式中の A_{mr} 、 B_{mr} 、 W_{mr} は、 μ 、 λ をLameの定数、 ρ を円筒の密度、 a_1 、 a_2 を円筒の外径及び内径とし $N = \omega \sin \psi / V$ 、 $N_\mu^2 = N^2 - \rho \omega^2 / \mu$ 、 $N_\alpha^2 = N^2 - \rho \omega^2 / (2\mu + \lambda)$ とすれば、

$$A_{mr} = \sum_{k=1}^2 [\chi_{mp}^{(k)}(N_\mu r) / N_\mu \{ \alpha_{mk} / 2\mu + (m+1)A_{mk} + (m-1)B_{mk} - iNE_{mk} / 2 \} + (\mu N^2 / \rho \omega^2) \{ \chi_{mp}^{(k)}(N_\mu r) / N_\mu - N_\alpha \chi_{mp}^{(k)}(N_\alpha r) / N_\alpha^2 \} \{ \beta_{mk} / 2\mu + (m+1)A_{mk} - (m-1)B_{mk} + iNE_{mk} \}] \quad (5)$$

$$B_{mr} = \sum_{k=1}^2 [-\chi_{ms}^{(k)}(N_\mu r) / N_\mu \{ \alpha_{mk} / 2\mu + (m+1)A_{mk} + (m-1)B_{mk} + iNE_{mk} / 2 \} + (\mu N^2 / \rho \omega^2) \{ \chi_{ms}^{(k)}(N_\mu r) / N_\mu - N_\alpha \chi_{ms}^{(k)}(N_\alpha r) / N_\alpha^2 \} \{ \beta_{mk} / 2\mu + (m+1)A_{mk} - (m-1)B_{mk} + iNE_{mk} \}] \quad (6)$$

$$W_{mr} = \sum_{k=1}^2 [G_m^{(k)}(N_\alpha r) E_{mk} - i(2\mu N / \rho \omega^2) \{ G_m^{(k)}(N_\alpha r) - G_m^{(k)}(N_\mu r) \} \{ \beta_{mk} / 2\mu + (m+1)A_{mk} - (m-1)B_{mk} + iNE_{mk} \}] \quad (7)$$

また、式中の関数 G_m 、 χ_{mp} 、 χ_{ms} はHankel変換の逆変換より得られる関数で I 、 K を変形第一種及び第二種のベッセル関数として

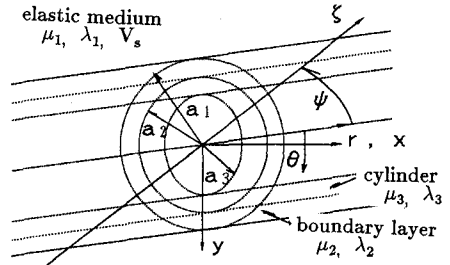


図-1 座標系

$$G_m^{(k)}(Nr) = R_{m,m}^{(k)}(Nr)/R_{m,m}^{(K)}(Na_k), \quad \chi_{mp}^{(k)}(Nr) = R_{m+1,m}^{(k)}(Nr)/R_{m,m}^{(k)}(Na_k), \quad \chi_{ms}^{(k)}(Nr) = R_{m-1,m}^{(k)}(Nr)/R_{m,m}^{(k)}(Na_k) \\ R_{j,m}^{(k)}(Nr) = I_j(Nr)K_m(Na_{k-1}) - (-1)^{j+m}I_m(Na_{k-1})K_j(Nr); \quad j=m-1, m, m+1; \quad a_0=a_2$$

と表される。さらに、式中の α, β, A, B, E は円筒の内外面の変位及び応力で与えられる積分定数である。

3. 数値解析及び考察 入射波を受ける弾性体中の埋設管の動的応答は、上で求めた変位解を円孔を有する弾性体にも拡張し、入射波動の存在のもとで、円筒と境界層の円外面の境界条件を満たすように重ね合わせて解析することができる。入射波としては種々考えられるが、ここでは過渡的な挙動も検討できるRickerwaveletを取り上げ、波動はせん断波とする。波動の進行方向を z 軸と ψ の角度とし、波動の振幅を u_0 とする。

数値計算は、境界層の外径を a_1 円筒の円外径比を a_3, a_2 、弾性係数(E)、密度(ρ)、ポアソン比(ν)は、弾性体、境界層、円筒をそれぞれ添え字 1, 2, 3 とするとき、 $a_1/a_2/a_3=1.0/0.9/0.8$ 、 $\rho_1/\rho_2/\rho_3=1.0$ 、 $\nu_1/\nu_2/\nu_3=1.0$ とし、 $E_3/E_1=1000$ 、 $E_2/E_1=0.0001, 100$ とした。また入射角は 45° とし、 $T_p=t_p V_b/a_1$ を $0.5\pi, \pi, 5\pi$ (ただし $V_b=\sqrt{E/\rho}$) とした。

図-2に $\theta=0, \pi$ 面での半径方向変位の状況を示す。

(a)は境界層の弾性係数が極端に小さい場合、(b)は中間的な場合である。波長が短いとき、波動は境界層で反射しているが、(a)の場合は境界面で振幅が増大し同位相となり、(b)の場合は振幅はそれ程増大せず位相が反転しているが、これは、(a)は弾性体中に円孔が存在する場合と、(b)は円筒が存在する場合と同様の分布である。波長が長くなれば、(b)の場合は円筒部も弾性体と同様の変位を生ずるが、(a)の場合は波動が境界層で吸収され円筒には殆ど変位を生じない。

4. まとめ 埋設管の波動応答に及ぼす境界層の影響を検討するために、せん断波の Ricker wavelet が入射する場合の応答解析を行った。紙面の都合で解析例を十分示すことが出来なかったが、剛性の小さな境界層の存在は、入射波動を吸収し円筒の変位を減少させることがわかる。より詳しい検討のためには、さらに入射角や弾性定数比、波長を変化させた解析を行う必要があり、現在実施中である。

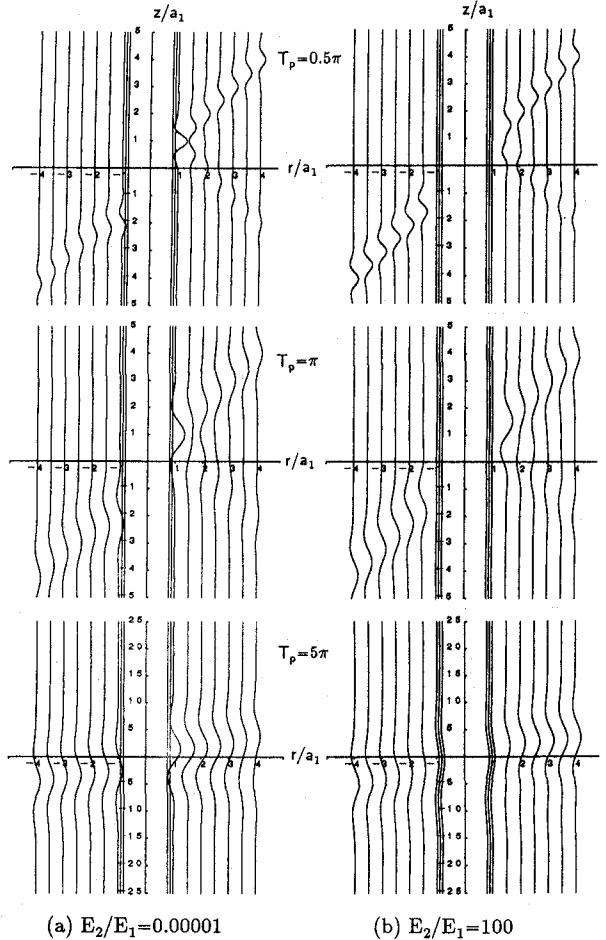


図-2 半径方向変位分布($\theta=0, \pi$ 面)

参考文献

- 1) Pao, Y. H. : Dynamical Stress Concentration in an Elastic Plate, J. Appl. Mech., Vol.29, pp.299~315, 1962.
- 2) Mow, C. C. and McCabe, W. L. : Dynamic Stresses in an Elastic Cylinder, Proc. A. S. C. E., Vol.89, No.EM3, pp.21~41, 1962.
- 3) Mow, C. C. and Mente, L. J. : Dynamic Stresses and Displacements Around Cylindrical Discontinuities Due to Plane Harmonic Shear Waves, J. Appl. Mech., Vol.30, pp.598~604, 1963.
- 4) 松岡健一, 能町純雄, 岸徳光 : 入射せん断波を受ける弾性体中にある厚肉円筒の動的応答, 構造工学論文集, Vol.31A, pp.465~472, 1985
- 5) 松岡健一, 岸徳光, 吉田紘一, 能町純雄 : 斜め入射せん断波を受ける埋設管の過渡的応答解析, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.847~854, 1988