

京都大学防災研究所 正会員 土岐寛三  
 京都大学防災研究所 正会員 O高田至郎

1. まえがき

地中に埋設された管状構造物は地表面近くに設置され平面的な広がり大きい(1)ため特異な振動系と見做され耐震設計に関する従来の概念では十分に処理できない面がある。これまでに地中埋設構造物の地震応答に関する解析的研究には構造物と地盤を多質点系モデルに置換して応答計算を行なう方法および有限要素法による手法が主に用いられてきた。一方、著者らはこれまでに弾性波動論を用いて定常正弦波入力に対する管状構造物の固有振数応答特性などについて検討を進めてきたが今回はこれらの弾性波動論による解析結果を用いて一般の入力地震動に対する時間領域での応答を計算し得たのでその結果について報告する。この手法は固有振数伝達関数の考え方を用いて固有振数領域での応答を位相特性を考慮し、逆フーリエ変換することによって得られるものであり、FFT(高速フーリエ変換)を利用して高速かつ精度よくその結果を得ることができた。さらに地中に埋設された管状構造物の運動は埋設地点の地盤運動によって近似し得るということから、地盤の運動速度、変位から構造物に生じるひずみ等の大きさを推定する方法がこれまでに用いられてきているが、本研究においても強震記録をフーリエ級数に展開し、その積分より得られる速度、変位記録を用いて上述の応答計算結果との比較検討を行なった。

2. 管状構造物のひずみに関する固有振数応答解析

Fig. 1に示すように、半無限均質弾性地盤内に地表面に平行にその軸をもつ管状構造物が埋設されており、管軸方向に進行する縦波、横波、定常正弦波が入射する場合に管体が発生する軸ひずみ  $\varepsilon_A$ 、曲げひずみ  $\varepsilon_B$  の固有振数応答についてはこれまでの解析結果から次のように得られている。

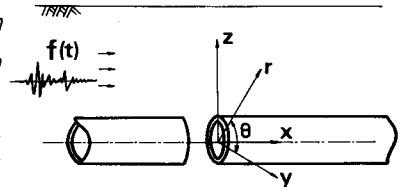


Fig.1 Analytical model

$$\varepsilon_A / U_g^*(2\pi f)^2 = \frac{i}{2\pi f C^*} \frac{U_p^A}{U_g^*}, \quad \varepsilon_B / U_g(2\pi f)^2 = \frac{a}{C^2} \frac{U_p^B}{U_g} \quad (1)$$

ここに 
$$U_p^A / U_g^* = \left[ 1 + i \left\{ \left( \frac{C_0}{C^*} \right)^2 - 1 + \frac{p}{\delta} \frac{f \alpha}{1 - (b/a)^2} \right\} \right] \exp\{ik(\lambda - C^*t)\}, \quad U_p^B / U_g = \left[ 1 + i \left\{ \frac{EI k^4}{7\pi(a^2 - b^2)\omega^4} - 1 + \frac{p}{\delta} \frac{K\alpha}{1 - (b/a)^2} \right\} \right] \exp\{ik(\lambda - Ct)\}$$

$$f\alpha = -2 \left\{ [F(k\alpha) / \left\{ \left( \frac{C_0}{U_2} \right)^2 - 1 \right\} + F(g\alpha)], \quad K\alpha = \left\{ 4 - F(p\alpha) - F(g\alpha) \right\} / \left\{ F(p\alpha)F(g\alpha) - F(p\alpha) - F(g\alpha) \right\}, \quad F(z) = z H_0^{(2)}(z) / H_1^{(2)}(z) \right\}$$

$$p^2 = (p\omega^2 - mk^2) / (\lambda + 2\mu), \quad g^2 = (p\omega^2 - mk^2) / \mu, \quad R^2 = (\omega / v_2)^2 - k^2, \quad g'^2 = (\omega / v_2)^2 - k'^2 \quad (2)$$

上式中において  $\lambda, \mu, v_2, v_2', p$  は埋設地盤のラーメの定数、縦波、横波速度、密度を表わしており、 $U_g^*, U_g, C^*, C, k', R, f$  はそれぞれ入射波動の変位振幅、伝播速度、波数、固有振数である。また、 $a, b, r, C_0, EI$  は管状構造物の外径、内径、単位体積重量、圧縮波伝播速度、曲げ剛性である。 $U_p^A, U_p^B$  は管体の軸方向、および曲げ絶対変位を表わしている。

本解析においては定常正弦波動を用いており、 $U_g(2\pi f)^2$  は入射波動の加速度を表わしている。したがって式(1)は単位加速度入力に対する応答ひずみを表示したものであり、式(1)の右辺は複素数値をとってくるため次のように書き改められる。

$$\varepsilon_A / U_g^*(2\pi f)^2 = \varepsilon'_A(f) e^{i\varphi_A(f)}, \quad \varepsilon_B / U_g(2\pi f)^2 = \varepsilon'_B(f) e^{i\varphi_B(f)} \quad (3)$$

すなわち、 $\varepsilon'_A(f), \varepsilon'_B(f)$  はひずみの振幅固有振数応答を、 $\varphi_A(f), \varphi_B(f)$  はその位相特性を示すものである。これより

式(3)の右辺は単位の加速度をもつ地震波動が管軸方向に伝播する際に管体に生じる軸ひずみ、曲げひずみの大きさを表わす周波数伝達関数であると考えるよ。

### 3. ひずみの地震応答解析

管軸方向に伝播し、構造物から十分離れた場所での地盤の運動加速度波形を  $f(t)$  と表わし、そのフーリエ変換を  $F(f)$  とすれば、ひずみの周波数伝達関数が式(3)で与えられていることを考慮して、ひずみの地震応答波形  $\varepsilon(t)$  は周波数伝達関数の逆フーリエ変換として次のように求められる。

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon'(f) F(f) e^{i2\pi ft} df \quad (4)$$

$$\text{こゝに } \varepsilon'(f) = \varepsilon'(f) e^{i\phi(f)}, \quad F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (5)$$

### 4. 数値計算例とその考察

地震応答計算の1例として  $\rho/\gamma = 0.95$ ,  $b/a = 0.90$ ,  $\nu = 0.4$ ,  $C^*/Vt = 0.95$ ,  $C/Va = 0.95$ ,  $E/M = 500.0$  とし、横波伝播速度  $100 \text{ m/sec}$  の地盤中に外径  $2 \text{ m}$  のコンクリート製管状構造物が埋設されており、 $5265 \text{ N}$  (港研資料、最大加速度  $170 \text{ gal}$ ) の地震波が管軸方向に  $C^*$ ,  $C$  で伝播する際の構造物のひずみ応答を求めた。Fig. 2には軸ひずみの周波数伝達特性および地震波のパワースペクトルを示した。周波数の増大とともに軸ひずみの振幅はほぼ指数的に減少しており、加速度一定の入力に対する応答であるので軸ひずみは地盤の運動速度に比例的であることが知られる。

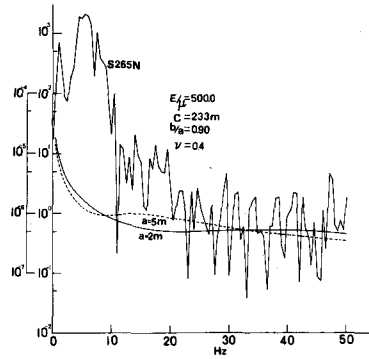


Fig. 2 Power Spectrum and Frequency Response of Axial Strain

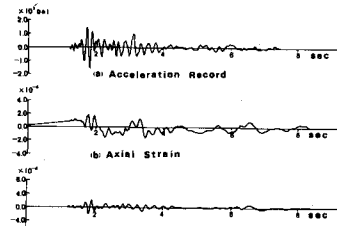


Fig. 3 Response of Axial and Bending Strains

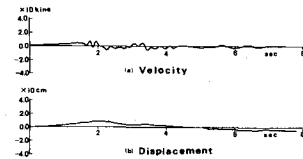


Fig. 4 Velocity and Displacement Records

しかし、 $a=5 \text{ m}$  の場合には  $18 \text{ cycle}$  付近にピークを有し、管状構造物の振動特性があらわれてくることが同図中より分かる。Fig. 3には入力加速度波形および構造物の応答軸ひずみ、曲げひずみを示した。軸ひずみ波形は入力加速度波形に見られる高周波成分が cut されており、運動速度に比例的であることを示している。一方曲げひずみは加速度波形と非常に良く似ており、構造物が地盤とほとんど同様の動きをしていることが知られる。

### 5. 地震記録の積分による応答ひずみの推定

地盤の運動速度、加速度をそれぞれ  $V, A$  と書けば、式(1)より  $\varepsilon_A, \varepsilon_B$  は次のように表示される。

$$\varepsilon_A = -(\nu/C^*) \cdot (U_0^p/U_0^s), \quad \varepsilon_B = (a \cdot A/C^*) \cdot (U_0^p/U_0^s) \quad (6)$$

ここで地震時における管状構造物の変形が地盤変形によって近似されるものとするれば  $U_0^p/U_0^s \rightarrow 1.0$ ,  $U_0^p/U_0^s \rightarrow 1.0$  となり、 $V, A$  を知れば  $\varepsilon_A, \varepsilon_B$  を推定することが可能である。そこで加速度波形をフーリエ級数に展開し、しかる後、その各項を積分して初期条件として変位、速度が零であるとの条件を用いて計算した速度、変位波形が Fig. 4 である。これらの波形は管状構造物の振動特性も考慮して低周波成分 ( $f \leq 0.01 \text{ cycle}$ ) を cut してハイパスフィルター処理を行なって求めた結果である。速度波形は Fig. 3 に示した軸ひずみ応答波形と良好一致を示している。この結果より式(6)によって求めた軸ひずみ、曲げひずみの最大値はそれぞれ  $5.15 \times 10^{-4}$ ,  $3.52 \times 10^{-4}$  となり、一方、Fig. 3 より求められるそれぞれの最大応答ひずみは  $2.25 \times 10^{-4}$ ,  $2.0 \times 10^{-4}$  となっている。すなわち地盤変形と同等の変形が生じるものとした場合にはひずみを過大に評価していることが知られる。

(1) 後藤尚男、坂島三、高田至郎：地中埋設管の動特性について、土木学会第12回地震工学研究発表会、1972. 7. pp. 103~106.