

地盤特性の不連続部における管状構造物の地震応答

京都大学防災研究所 正員 土岐恵三
 神戸大学工学部 正員 高田至郎

1. まえがき

地中にある管状構造物の地震時における振動性状は、とくに長手方向部などでの運動の拘束がない限りは、周辺地盤の挙動と同様であると考えられる。ゆえに、地表面に沿って地震波が伝播する場合や、埋設地盤の特性が構造物の長手方向で変化する場合には地盤各点の運動に位相差を生じ、地盤の相対変位に伴って構造物の変形が増大し、耐震的に不利な状況におかれる。本又は地盤層の厚さ、あるいは堅さが急変する部位に埋設された管状構造物の動的挙動を明らかにする目的で実施された模型振動実験の結果について報告したものである。同時に、管状構造物の地震時挙動が埋設地点の地盤運動で近似されるものを見なし、剛性あるいは層厚が一様でない地盤層の解析モデルを設定して、その振動伝播特性の理論解析の結果をも示した。

2. 模型振動実験

本実験においては模型全体の寸法、地盤材料なども考慮して相似律を検討した結果、長さ比1/50、密度比2.0、弾性定数比7.000を用いた。地盤材料には複雑な地盤条件を作製しうること、地盤内の構造物変位を測定しうる透明度ももつことなどを考慮してゼラチンを使用した。剛性変化地盤の実験(CASE1)ではゼラチンは軟部0.25、硬部0.53 kg/cm²の弾性定数Eを有し、層厚変化地盤の実験(CASE2)では基礎部0.80、表層部0.40 kg/cm²である。一方、構造物模型材料にはE=51 kg/cm²の合成ゴムを用いて、相似律から計算される曲げ剛性比より断面寸法を決定してφ30×1200 mmの丸棒としている。

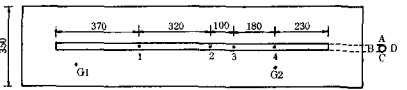


Fig.1 Experimental Model

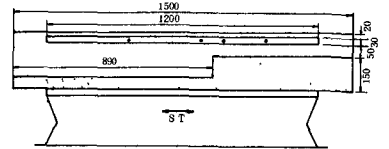


Fig.2 Experimental Model

Fig.1, Fig.2にCASE1, CASE2の実験概略図を示した。振動台上には小型加速度計と変位計を取り付け、図中のG1, G2の位置には地盤内の2方向振動成分を計測するため、それぞれ2個の加速度計を埋め込んだ。構造物模型についてはFig.1に示す長手方向の1~4の4箇所について、それぞれ構造物断面の円周方向A~Dの4点における合計16点でのひずみを計測した。さらに、ゼラチンの透明性を利用して、その中に埋設された合成ゴム棒の動きを計測するために非接触型変位計を利用した。実験は大別して定常加振と衝撃波による2種類の振動実験を実施したが、本文では主に後者の結果を述べる。衝撃波の実験では構造物の長手方向およびそれに直交する方向に地盤の端部より衝撃を加えて、それぞれ縦波、横波を発生させて、その際の加速度、ひずみの応答を計測した。

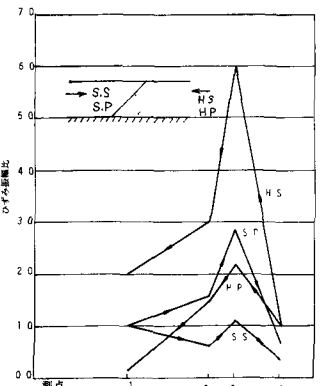


Fig.3 はCASE1のS.P., H.P.(地盤層の軟、硬部衝撃でP波発生) Fig.3 Distribution of strains

S.S, H.S (軟, 硬部衝撃でS波発生) の場合についての長さ方向4点での最大ひずみ量を 衝撃を加えた箇所に近い測点でのひずみ量で除して増幅率も求めたものである。硬, 軟両地盤における境界近傍でひずみがとくに大きくなっているのが注目される。

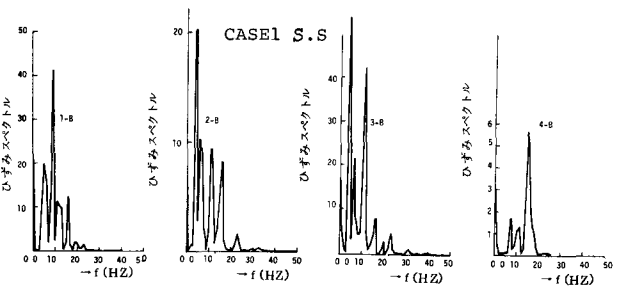


Fig.4 Fourier Spectra of Strains

Fig.4 はCASE1のS.Sの場合について各測点でのひずみのフーリエスペクトルを求めたものである。硬地盤内にある4Bのスペクトルでは軟地盤内の1B, 2Bのスペクトルに見られる低周波域でのピークがcutされており, 地盤の動特性がそのまゝ構造物の応答に反映されているのが知られる。Fig.5は同上的場合の測点2Bでの変位のスペクトルを示したものである。ひずみスペクトルに見られる高周波部分でのピークが変位スペクトルには見られない。ゆげひずみが地盤の運動加速度に比例的な量であることを考えれば上述の結果は納得される。

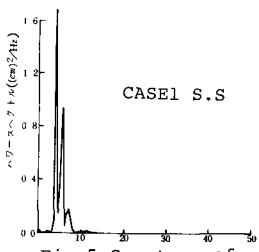


Fig.5 Spectrum of Displacement

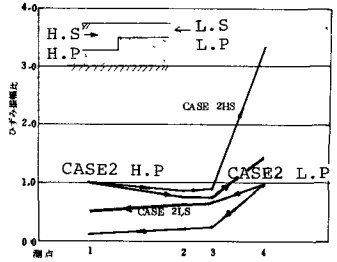


Fig.6 Distribution of Strains

Fig.6 はCASE2の実験でL.P, H.P (層厚小, 大地盤に衝撃を加えてP波発生), L.S, H.S (同上でS波発生) の場合のひずみ増幅率を示したものである。CASE1の実験結果と異なって, 層厚急変部でひずみがとくに増幅されることはない。H.P, H.Sの場合, 層厚小の地盤内でのひずみがいずれも大きくなっている。伝播してきたエネルギーが層厚の小さい地盤内へと閉じ込められ, 運動変位も大きく, しかも固有周期も短いために地盤の変形が増大せられ, ひずみが大きくなると考えられる。Fig.7はCASE2のH.S, L.Sの場合の応答加速度のパワースペクトルを示したものである。両者の場合ともスペクトルがピークを示す振動数には大差がない。しかし, L.Sの場合にはG1の値がG2に比較して着しく減少しているのに対し, H.Sの場合には同様の値を有している。この結果は前述した地盤運動を引き起こすエネルギー伝達の説明と対応するものである。

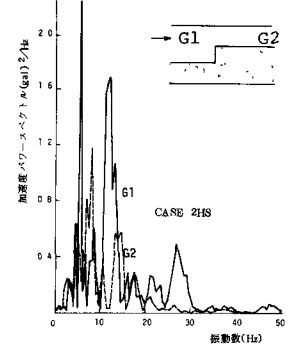
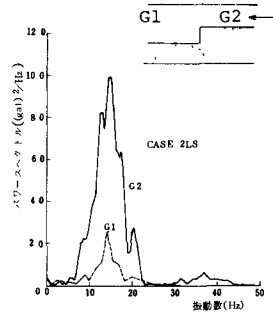


Fig.7 Power Spectra of Accelerations

3.波動伝播に関する理論解析

これまでの研究結果から知られるように, 管状構造物は埋設地点の地盤とほとんど同様の挙動を示す。すなわち, 地盤の動きより構造物の動特性も推定できることになる。ここではSH波型の波動が地盤特性の不連続部を伝播する際の地盤運動も弾性波動論で解析し, 逆フーリエ変換手法を用いて地震応答計算を実施した。

(i) 地盤剛性急変部の波動伝播解析

Fig.8が解析モデルである。剛性

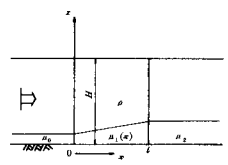


Fig.8 Analytical Model

の異なる地盤層が $x=0$, z で鉛直な境界面をもって接合している。 $x < 0$, $x > z$ では剛性 μ_0, μ_2 が一定であり, $0 \leq x \leq z$ では剛性 $\mu(x)$ が直線的に変化するモデルである。このような地盤に x の正の方向に伝播し, y 方向のみの運動成分をもつ SH 波型の定常正弦波が入射する場合を考える。運動の釣合より導かれる振動方程式を適当な変数変換を用いて Whittaker の微分方程式に帰着させることにより境界条件を満足するような解が得られる。⁽¹⁾ とくに, 剛性が μ_0 から μ_2 へと急変する場合の解を示せば以下のとおりである。

$$\frac{v_0}{u_g} = e^{i(\omega t - k_1 x)} \cdot \sin \delta_1 z + \frac{1 - (\mu_2 k_1 / \mu_0 k_1)}{1 + (\mu_2 k_1 / \mu_0 k_1)} \cdot e^{i(\omega t + k_1 x)} \cdot \sin \delta_1 z$$

$$\frac{v_2}{u_g} = \frac{z}{1 + (\mu_2 k_1 / \mu_0 k_1)} \cdot e^{i(\omega t - k_1 x)} \cdot \sin \delta_1 z$$

ここに u_g, ω は入射波の振幅と円振動数, v_0, v_2 は剛性 μ_0, μ_2 の地盤変位, $\delta_1 H = \pi/2$, $(k_1)^2 = \rho \omega^2 / \mu_0 - \delta_1^2$ である。

式(1)の左辺を $H(i\omega)$ とすれば, これは単位の入力変位に対する地盤応答の周波数伝達関数であると見なされる。したがって, 任意の地震入力 $u(t)$ に対する時間応答は, $u(t)$ のフーリエ変換 $F(i\omega)$ と $H(i\omega)$ の積を逆フーリエ変換した結果として得られる。

Fig. 9 は $H=30m$, $v_{t0}, v_{t2}=100, 200$ m/sec, $\rho=1.7$ gr/cm³, $\mu_0/\mu_2=0.25$ の場合の共振曲線である。剛性 μ_0 の地盤層のせん断1次固有振動数 ω_0 は 6 rad/sec である。 $\omega/\omega_0=1.3, 2.0$ 付近にピークをもち, 互いに他の地盤の存在することの影響によって軟地盤では固有振動数が増大し, 逆に硬地盤では減少し, それぞれ独自の振動性状を示すことが分かる。 Fig. 10 は $H(i\omega)=|H(i\omega)| \cdot e^{i\psi}$ として位相特性と振動数の関係を見にものである。 $\omega/\omega_0 \leq 1.0$ では剛性 μ_0 の地盤層の cut off frequency 以下であるので位相差がゼロとなっている。 Fig. 11 には地震応答計算に用いた入力地震波形とそのスペクトルを示した。 Fig. 12 は境界面からそれぞれ 30m 離れた軟, 硬両地盤の地表面での応答加速度波形を示したものである。それぞれ波形のスペクトルは Fig. 13 に示すようである。 Fig. 13 に見られる 6.5, 10.5 rad/sec のピークは地盤の固有振動数に対応するものである。 A_2 の波形には cut off frequency 以下の周波数成分が切り捨てられ, μ_0 の地盤層はハイパスフィルターの役割を果たしているとも考えられる。

(ii) 層厚急変部の振動伝播解析 Fig. 14 に示すように, 段をもつ剛な基礎面上に, $x \leq 0$ には層厚 H_1 , $x > 0$ には H_2 の地盤層があって両者ともに剛性 μ , 密度 ρ , 横波速度 c とする。 x の正の方

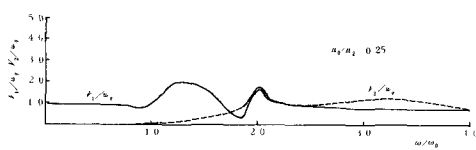


Fig.9 Resonance Curves of Surface Displacements

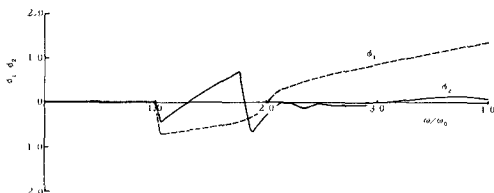


Fig.10 Phase Characteristics

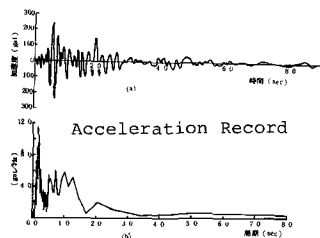


Fig.11 Fourier Spectrum

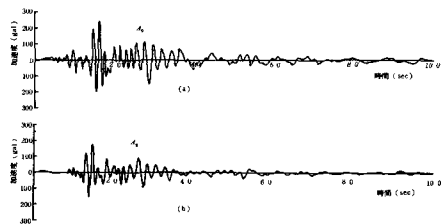


Fig.12 Response Acceleration

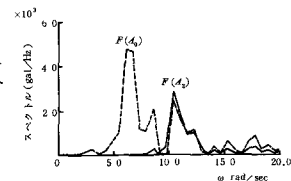


Fig.13 Fourier Spectra

向に \$x-z\$ 平面に直交する運動成分をもつ \$SH\$ 波型入射波動 \$v_i\$ を次式で与える。

$$v_i = e^{-i(\omega t - \alpha_1^j z)} \cdot \sin \alpha_1^j(z + H_1) \quad \dots (2)$$

境界面における反射波 \$v_r\$, 屈折波 \$v_t\$ がそれぞれ(1)の地盤層での固有モードの重ね合わせで表示できるものとして次式で示す。

$$\left. \begin{aligned} v_r &= \sum_{l=1}^{\infty} A_l e^{-i(\omega t + \alpha_1^l z)} \cdot \sin \alpha_1^l(z + H_1) \\ v_t &= \sum_{j=1}^{\infty} B_j e^{-i(\omega t - \alpha_2^j z)} \cdot \sin \alpha_2^j(z + H_2) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

\$A_l, B_j\$ を基盤面, 地表面, 地盤層接合面における境界条件を満足するように決定するが, モード重ね合わせの近似的性より最小二乗近似法によって計算すれば次の連立方程式が得られる。

$$\sum_{s=1}^{\infty} B_s \left\{ \frac{H_2}{z} \delta_{js} + \sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha_1^l}{\alpha_1^j} \cdot \frac{\alpha_2^s}{\alpha_1^j} + \frac{\alpha_1^l + \alpha_1^s}{\alpha_1^j} \right) \frac{z}{H_1} T_{lj} T_{ls} \right\} \\ = \left(1 + \frac{\alpha_1^j}{\alpha_1^j} \right) T_{ij} + \sum_{l=1}^{\infty} \left\{ \left(\frac{\alpha_1^l}{\alpha_1^j} + \frac{\alpha_1^l \alpha_2^j}{\alpha_1^j \alpha_1^l} \right) \frac{z}{H_1} T_{lj} T_{il} \right\}$$

$$\therefore \quad T_{ij} = \int_{-H_1}^0 \sin \alpha_1^j(z + H_1) \cdot \sin \alpha_2^j(z + H_2) dz \quad \dots (4)$$

式(4)より \$A_l, B_j\$ が求まり地盤応答が計算される。

Fig. 15 は \$H_1/H_2 = 0.5\$ の場合の変位共振曲線である。層厚大の地盤変位 \$v_2\$ は層厚小の \$v_1\$ に比較して小さく, 層厚大の地盤内で波動が分散していることが知られる。Fig. 16 は変位分布を示したもので, 基盤面付近の層厚小の地盤変位は層厚大の地盤の運動に引きずられて, 1次モードとは異なった分布形状を示している。Fig. 17, Fig. 18 は \$H_1/H_2 = 2.0, 0.5\$ の場合の地表面加速度応答を示したもので, 層厚大より小の地盤へ

波動が伝播する場合には, 応答の差異は小さく, 逆方向に伝播するときは小さな応答値となってくる。Fig. 19 は波動進行方向での両者の場合の最大加速度応答分布を調べたもので上述と同様の分布特性を示している。これらの応答計算結果は前述の実験の結果を定性的に説明しうるものと考えられる。なお, 実験に際し, 角南 進君にお世話になったことを記し謝意を表する。

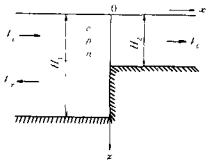


Fig. 14 Analytical Model

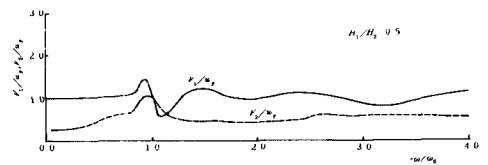


Fig. 15 Resonance Curves

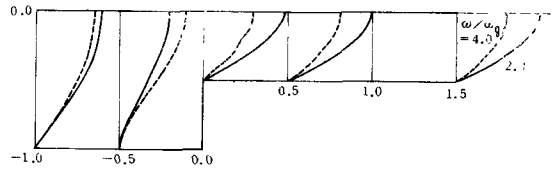
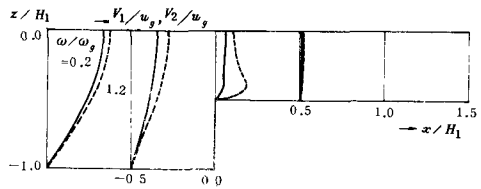


Fig. 16 Distribution of Ground Displacement

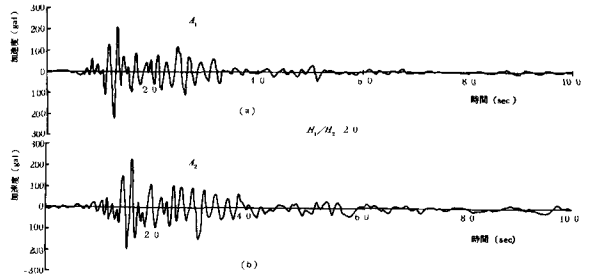


Fig. 17 Response Acceleration

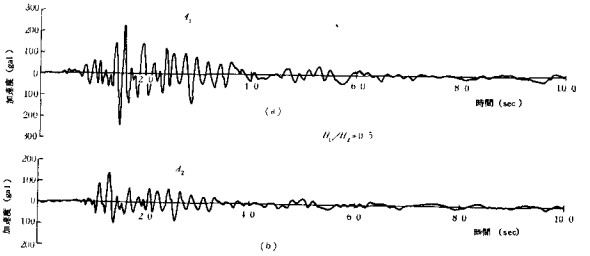


Fig. 18 Response Acceleration

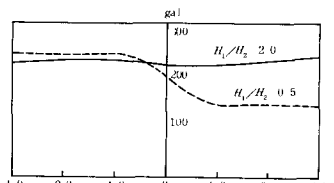


Fig. 19 Distribution of Accelerations

(1) 土佐三・高田至郎: 弾性率の急変部における地表層の震動, 球学会第21回年次学術講演会 講演集第(1)巻, pp. 507-508.