

移動点加振源からの波動入射を受ける複数の構造物周辺の地表面振動

Numerical Analysis of Ground Vibrations around Multiple Structures due to Waves Radiated from Moving Excitation

山本和宏*, 北村泰寿**

Kazuhiro Yamamoto, Yasutoshi Kitamura

* 修士(工学), 静岡県, 下田土木事務所 (〒410-3624 静岡県下田市中 531-1)

** 工博 神戸大学教授, 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

This paper deals with a simulation method of the ground vibration around multiple structures resting on a visco-elastic ground excited by waves radiated from a moving source. Based on 2.5-D analysis, the simulation method consists of two methods. The one is for obtaining the driving force of structures due to the moving source in the frequency domain and the other is for calculating the ground vibration caused by the vibration of structures excited by the driving force. The ground vibration is obtained as the sum of the vibration due to the moving source in the free wave field and the vibration due to waves radiated from structures in the scattered wave field in the frequency domain and it is transformed into the time domain. The effect of the movement of excitation on the vertical ground vibration is evaluated by observing time series of the vibration.

Key Words: moving excitation, dynamic interaction, ground vibration, numerical method

1. はじめに

道路交通振動は微振動問題であるが, 沿道の住民や建物内に設置された精密機器類に影響を与える。建物周辺の地盤振動が建物の存在によってどのような影響を受けるかは, 振動予測や防振対策上からも重要である。筆者らは, 点加振源による構造物周辺の地盤振動の数値シミュレーションを行い, 構造物近傍に設けた測線における地盤振動の距離減衰特性, 構造物を介した地盤振動の伝達特性などを調べてきた。しかし, これらの研究では加振源を固定しており, 加振源が移動することによって生じる影響を考慮していない。本研究では, 数値シミュレーションによって, 構造物近傍を移動する点加振源によって引き起こされる構造物周辺の地表面振動の時刻歴応答を調べる。

移動加振源による構造物-地盤系の振動解析には 2.5 次元解析が利用されており, 竹宮らによって高速鉄道による地盤振動の予測や対策問題への適用が積極的に図られている¹⁾。構造物が加振源の走行方向に連続する場合には, 走行方向を波数領域に変換し, 横断面に対して BEM, FEM 等の数値解析法が用いられる。一方, 構造物が連続していない場合には, 移動加振源による構造物への入射波動を周波数領域で求め, 構造物-地盤系の解析を実空間で行なうことになる。広瀬²⁾は, この手法を高速鉄道による地

盤振動の有限長の溝による遮断問題へ適用している。構造物-地盤系の 3 次元解析には, BEM が適用されている。

筆者らは, 三次元半無限弾性体の表面を一定周波数・等振幅の振動荷重が等速移動する場合に対する理論解を展開した³⁾。薄層要素法を適用して, 多層地盤表面を振動荷重が移動する場合の数値シミュレーションも既に発表した⁴⁾が, 理論解は数値シミュレーション法を検証する上で重要な役割を果たす。一方, 近接加振源からの波動入射を受ける構造物およびその周辺の地盤振動のシミュレーションについては, 多くの研究成果を発表してきた^{4),5)}。本研究では, 文献 3) で展開した理論解の誘導手順を見直し, 近接加振源からの波動入射を受ける複数構造物-地盤系の数値解析法との融合を行なった。

2. 移動点加振源に対する理論解

三次元半無限弾性体において, 図-1 に示すように x, y 平面を地表面, z 軸を深さ方向にとる。いま, 円振動数 p , 振幅 Q の調和振動荷重が一定速度 V で x 軸の正方向に移動するとき, 移動点加振源は次式で与えられる。

$$Q(x, y, t) = Qe^{ipx} \delta(x - Vt) \delta(y) \quad (1)$$

ここに, $\delta(\)$ はディラックのデルタ関数である。式

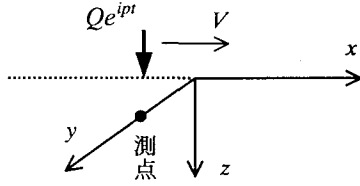


図-1 座標系

(1)の x, y, t に関する三重フーリエ変換は次式のように表される.

$$\tilde{Q}(\xi, \eta, \omega) = 2\pi Q \delta(\omega - p - \xi V) \quad (2)$$

フーリエ変換領域で式(2)のように与えられる鉛直荷重に対する変位解は, Lamb の解の誘導を参照すれば容易に導ける. これより, 実空間における表面の鉛直変位 w および水平変位 u, v は次式のように書ける.

$$w(x, y, 0, t) = -\frac{Q}{4\pi^2 \mu} \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha k_s^2}{F(k)} \cdot \delta(\omega - p - \xi V) e^{i\omega t} e^{-i(\xi x + \eta y)} d\omega d\xi d\eta \quad (3)$$

$$u(x, y, 0, t) = -\frac{iQ}{4\pi^2 \mu} \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi \{(2k^2 - k_s^2) - 2\alpha\beta\}}{F(k)} \cdot \delta(\omega - p - \xi V) e^{i\omega t} e^{-i(\xi x + \eta y)} d\omega d\xi d\eta \quad (4)$$

$$v(x, y, 0, t) = -\frac{iQ}{4\pi^2 \mu} \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta \{(2k^2 - k_s^2) - 2\alpha\beta\}}{F(k)} \cdot \delta(\omega - p - \xi V) e^{i\omega t} e^{-i(\xi x + \eta y)} d\omega d\xi d\eta \quad (5)$$

ただし,

$$F(k) = (2k^2 - k_s^2)^2 - 4k^2 \alpha\beta$$

$$\alpha^2 = k^2 - k_p^2, \beta^2 = k^2 - k_s^2, k^2 = \xi^2 + \eta^2$$

$$k_s = \omega / V_s, k_p = \omega / V_p$$

ここに, μ はせん断弾性係数, V_p は P 波速度, V_s は S 波速度である. また, x, y は時間 $t=0$ における加振源の位置を原点とする座標である.

式(3)~(5)における ω に関する無限積分を次式のように離散近似する.

$$w(x, y, 0, t) = \sum_{n=-N}^N I_w e^{i\omega_n t} \Delta\omega \quad (6)$$

$$u(x, y, 0, t) = \sum_{n=-N}^N I_u e^{i\omega_n t} \Delta\omega \quad (7)$$

$$v(x, y, 0, t) = \sum_{n=-N}^N I_v e^{i\omega_n t} \Delta\omega \quad (8)$$

$$I_w = -\frac{Q e^{-i\lambda X}}{2\pi^2 \mu V} \int_0^a \frac{\Omega^2 \alpha}{F(\xi)} (\cos \xi Y) d\xi + \frac{1}{2(1-\gamma^2)} Ci(aY) - i\pi \left[\frac{\Omega^2 \alpha}{F'(\xi)} \cos(\xi Y) \right]_{\xi=\xi_R} \quad (9)$$

$$I_u = -\frac{iQ e^{-i\lambda X}}{2\pi^2 \mu V} \int_0^a \left\{ \frac{\lambda(\Gamma - 2\alpha\beta)}{F^*(\xi)} \right\} (\cos \xi Y) d\xi - \frac{\lambda\gamma^2}{2(1-\gamma^2)} \left\{ \frac{\cos aY}{a} + \frac{Si(aY)}{Y} - \frac{\pi}{2Y} \right\} - i\pi \left[\left\{ \frac{\lambda(\Gamma - 2\alpha\beta)}{F^*(\xi)} \right\} (\cos \xi Y) \right]_{\xi=\xi_R} \quad (10)$$

$$I_v = -\frac{Q e^{-i\lambda X}}{2\pi^2 \mu V} \int_0^a \left\{ \frac{\xi(\Gamma - 2\alpha\beta)}{F^*(\xi)} \right\} (\sin \xi Y) d\xi + \frac{\gamma^2}{2(1-\gamma^2)} \left\{ Si(aY) - \frac{\pi}{2} \right\} - i\pi \left[\left\{ \frac{\xi(\Gamma - 2\alpha\beta)}{F^*(\xi)} \right\} (\sin \xi Y) \right]_{\xi=\xi_R} \quad (11)$$

ただし,

$$\Omega = \frac{\omega}{p}, \lambda = (\Omega - 1) \left(\frac{V_s}{V} \right), \gamma = \frac{V_s}{V_p},$$

$$X = \frac{px}{V_s}, Y = \frac{py}{V_s}, F'(\xi) = \frac{dF(\xi)}{d\xi},$$

$$\alpha^2 = \xi^2 + \lambda^2 - \gamma^2 \Omega^2, \beta^2 = \xi^2 + \lambda^2 - \Omega^2$$

$$\Gamma = 2\xi^2 + 2\lambda^2 - \Omega^2, F(\xi) = \Gamma^2 - 4(\xi^2 + \lambda^2)\alpha\beta$$

ここに, ω_n は ω の離散値, ξ_R は $F(\xi)=0$ の根, $Ci()$ は余弦積分, $Si()$ は正弦積分である. a は数値積分の有限な上限値で, 田治見ら⁶⁾が Lamb の解の数値積分の収束を早めるために用いた方法に準拠して設定している. すなわち, 式(9)~(11)の被積分関数から被積分関数の $\xi \gg 0$ の近似式を差引いた関数が 0 と見なし得る値に達したときを積分上限としている. また, $\Delta\omega$ は T を有限な解析時間長とすれば, $\Delta\omega = 2\pi/T$ で与えられ, N は設定した周波数範囲を $\Delta\omega$ で分割した個数である. 式(9)~(11)の I_w, I_u, I_v が周波数領域 (ω_n) における変位解を与える.

3. 構造物-地盤系の数値解析

図-2 に示すように, 移動点加振源によって発生する波動が地表剛構造物に入射する場合を考えるため, 波動場を構造物が存在しない自由波動場と構造物の振動によって生じる散乱波動場に分ける. 自由

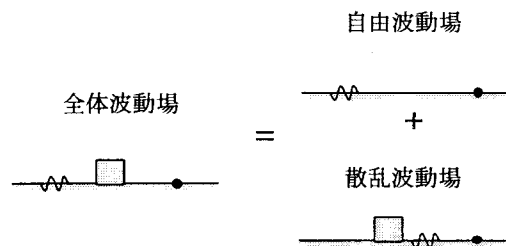


図-2 波動場の分解

波動場の変位ベクトル $u^I(x)$ は、式(9)～(11)の I_w , I_U , I_V で与えられる。いま、 n 個の構造物が存在し、その底面と地表面が完全密着であると仮定すれば、次式の混合境界条件を満足する散乱波動場が生じる。

$$u^I(x) + u^S(x) = U^R(x) \quad x \in S_i \quad (12)$$

$$\sigma(x) = 0 \quad x \notin S_i \quad (13)$$

ここに、 $u^S(x)$ は散乱波動場の変位ベクトル、 $U^R(x)$ は構造物底面の任意点の変位、 $\sigma(x)$ は表面力、 S_i は構造物 i ($i=1 \sim n$) の底面領域を表す。

つぎに、構造物 i の底面中央点に関する運動方程式は次式で表される。

$$M_i \ddot{U}_{0i} + Q_i^S = 0 \quad (14)$$

ここに、 M_i は質量マトリックス、 U_{0i} は底面中央点の変位ベクトル、 Q_i^S は底面の接触圧 $\sigma_i^S(x)$ の合力と合モーメントで構成される荷重ベクトルである。

いま、Thau⁷⁾ の提案に基づいて、構造物底面領域の変位ベクトル $u^S(x)$ を次式のように 2 つの変位ベクトルに分ける。

$$u^S(x) = u^D(x) + u^R(x) \quad x \in S_i \quad (15)$$

このとき、 $u^D(x)$ は構造物が不動であると仮定した場合の変位ベクトルで、次式の条件を満たす。

$$u^I(x) + u^D(x) = 0 \quad x \in S_i \quad (16)$$

一方、式(12)と式(15)、(16)より、 $u^R(x)$ は次式のように構造物底面の変位ベクトルとなる。

$$u^R(x) = U^R(x) \quad x \in S_i \quad (17)$$

$u^S(x)$ を 2 つの変位に分解したことに伴い、 Q_i^S を次式のように分解する。

$$Q_i^S = Q_i^D + K_{ij} U_{0j} \quad (j=1 \sim n) \quad (18)$$

ここに、 K_{ij} は複素剛性マトリックスである。また、 Q_i^D は次式の境界条件で表される混合境界値問題を解いて得られる。

$$u^D(x) = -u^I(x) \quad x \in S_i \quad (19)$$

$$\sigma(x) = 0 \quad x \notin S_i \quad (20)$$

このとき、構造物 i の底面の接触圧を $\sigma_i^D(x)$ とすると、この合力と合モーメントで構成される荷重ベクトルが Q_i^D で、ドライビングフォースと呼ばれ、次式で与えられる。

$$Q_i^D = \int_{S_i} B_i \sigma_i^D(x) dS_i \quad x \in S_i \quad (21)$$

ここに、 B_i は構造物底面の中央点と底面の任意点を関係づける幾何学的な係数マトリックスである。

式(18)を式(14)に代入し、 n 個の構造物群全体に対する運動方程式を書き表すと次式ようになる。

$$M \ddot{U}_0 + K U_0 = -Q^D \quad (22)$$

ただし、

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & & 0 \\ & M_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & M_n \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & \cdots & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix},$$

$$Q^D = \begin{bmatrix} Q_1^D \\ Q_2^D \\ \vdots \\ Q_n^D \end{bmatrix}, \quad U_0 = \begin{bmatrix} U_{0,1} \\ U_{0,2} \\ \vdots \\ U_{0,n} \end{bmatrix}$$

式(22)より U_0 が求まれば、構造物の振動を加振源とする散乱波動場の加振力を決定できる。すなわち、ドライビングフォースおよび複素剛性のそれぞれ対応する接触圧に対して式(18)の計算を行えば、構造物の周辺地盤に散乱波動場を発生させる各構造物底面に相当する領域内の分布加振力を決定できる。したがって、この分布加振力を境界条件とする応力境界値問題を解けば地表面の任意点における変位ベクトル $u^S(x)$ が求まり、次式によって全体波動場の変位ベクトル $u(x)$ を得ることができる。

$$u(x) = u^I(x) + u^S(x) \quad (23)$$

上式の変位 $u(x)$ は 1 つの周波数 ω_n に対するもので、式(6)～(8)の考え方に基づいて各周波数 ω_n ($n = -N \sim N$) に対する変位 $u(x)$ を重ね合わせることで、移動点加振源による構造物周辺の地表面振動の時刻歴を計算することができる。

ところで、式(22)に現れる複素剛性およびドライビンググフォースを求めなければならないが、これは構造物底面の接触圧を未知量とする次式の積分方程式を解く問題となる。

$$\sum_{j=1}^n \int_{S_j} G_{ij}(x|y) \sigma_j(y) dS_j = U_i(x) \quad x \in S_i, y \in S_j \quad (24)$$

ここに、 $\sigma_j(x)$ は構造物 j の底面の接触圧、 $U_i(x)$ はドライビングフォースの場合には式(19)から求まる値、複素剛性の場合には単位変位の剛体変形量の値をとる。また、 $G_{ij}(x|y)$ はグリーン関数である。式(24)の解を解析的に得ることはできないため、ここでは文献 8) のグリーン関数の離散化手法を利用する。

4. 移動加振源の周波数特性

図-3 は、自由波動場において点加振源が 60km/h で走行しているとき、加振源の周波数 10Hz, 20Hz について、測点の距離(y)が地表面の鉛直変位の周波数特性に及ぼす影響を調べたものである。図-4 は、2m 測点において、加振源の移動速度が鉛直変位の周波数特性に及ぼす影響を調べたものである。

図-3 より、加振源の周波数が高くなるほど、分

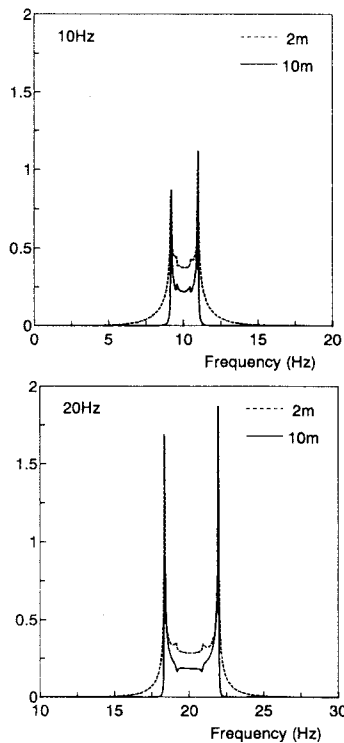


図-3 測点の距離が鉛直変位の周波数特性に及ぼす影響 (60km/h)

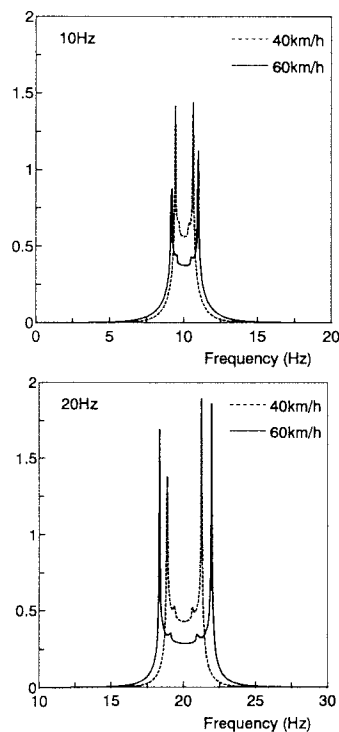


図-4 移動速度が鉛直変位の周波数特性に及ぼす影響 (2m 地点)

解される周波数成分の幅は広がっていることがわかる。測点の距離が遠くなれば、周波数範囲が狭くなる様子を示しているが、鋭いピーク間の周波数幅は変わっていない。道路交通振動の最高周波数として 25Hz 程度を考えており、式(6)～(8)における個数 N

の決定には設定周波数範囲を加振周波数の前後 5Hz 程度に取っておけば十分であることが分かる。

図-4 より、移動速度が遅くなれば周波数範囲は少し狭くなり、加振周波数が高くなると差が大きくなる傾向を示しているが、一般道路を対象とするような移動速度の範囲では設定周波数範囲に影響を及ぼすことはない。

5. 解析モデル

図-5 に解析モデルを模式的に示す。移動加振源の走行路を x 軸とする。構造物 1 (Str.1) の側壁から x 軸の負の方向に 2m の位置に y 軸を設け、これを測線として加振源の移動が測線上の鉛直変位に及ぼす影響を調べる。構造物の位置は図-6 に示す 5 ケースを取り上げた。また、構造物を横断する測線における振動伝達特性を見るため、図-7 に示す構造物配置の 2 ケースを取り上げた。構造物は、簡単

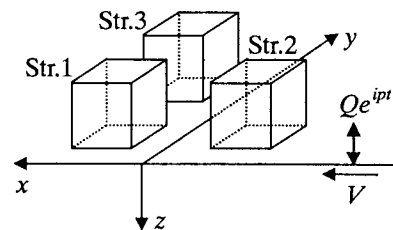


図-5 構造物-地盤系モデル

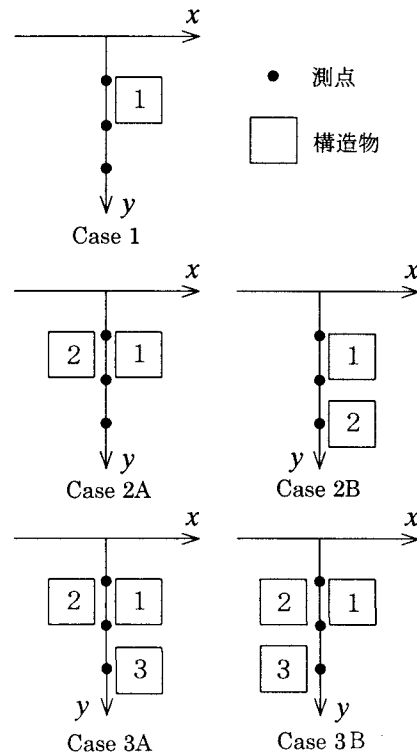


図-6 構造物の配置と測点

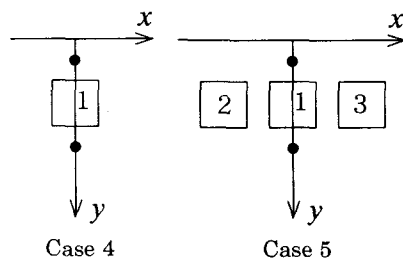


図-7 構造物を横断する測点

のため、とくに断らない限り $10\text{m} \times 10\text{m} \times 10\text{m}$ の剛体とし、密度は地盤、構造物ともに 18kN/m^3 、地盤のせん断波速度は $V_s=200\text{m/s}$ とした。また、式(6)～(8)の $\Delta\omega$ は解析時間長を $T=20\text{sec}$ として決めているため、地盤に減衰(2%)を付与してこの時間領域外からの波動の影響を減じた。構造物底面に作用する複素剛性およびドライビングフォースの計算にグリーン関数の離散化手法を利用するため、構造物底面を $1\text{m} \times 1\text{m}$ の小領域に分割している。

図-6では、構造物1の底面中央点の座標を(7m, 15m)として、構造物間の離隔距離の影響を調べる場合以外は、他の構造物は底面中央点の離隔距離が15mとなるように配置した。応答を示す測点はy軸上の $y=10\text{m}$, 20m , 30m の3測点とした。また、図-7では、構造物1の底面中央点の座標を(0m, 15m)として、測点はy軸上の $y=5\text{m}$, 25m の2測点とした。移動加振源は、 60km/h で走行する調和振動型の点加振源とし、加振力振幅は 9.8kN とした。加振源の周波数については、道路交通によって沿道に発生する振動が自動車のばね下振動数(10数Hz)成分に関わりが深いことから、 10Hz と 20Hz の2ケースとした。

文献8)にも記されているが、グリーン関数の離散化手法を利用する場合、構造物底面の分割精度が問題となる。本研究では、地盤のせん断波速度が $V_s=200\text{m/s}$ 、図-3から式(6)～(8)の ω_n に係わる周波数の上限が 25Hz であるから、分割長はせん断波の波長の $1/8$ となる。 25Hz ではやや精度が低下するが、移動加振源の加振周波数 20Hz を中心周波数として考えると、分割長はせん断波の波長の $1/10$ となるため、十分であろうと判断した。なお、移動加振源の加振周波数が 10Hz , 20Hz のいずれに対しても、 $1\text{m} \times 1\text{m}$ の小領域に分割している。

6. 構造物横の測点における時刻歴応答

6.1 自由波動場の応答

図-8は、構造物の存在が地表面の振動に及ぼす影響を把握するための基準として、自由波動場における鉛直変位の時刻歴を示したものである。図中の

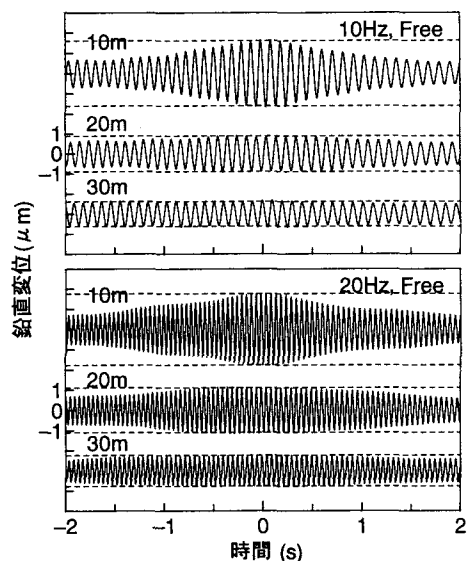


図-8 自由波動場

10m , 20m , 30m は測線上(y軸)の3測点を表しており、時間 $t=0\text{s}$ のとき加振源の位置が原点で、加振源は測線に最接近している。また、図中の2直線の破線は、加振源を原点に固定したときの鉛直変位の振幅を示したものである。この場合、時刻歴は2直線間を振れ幅とする調和振動波形となる。

図からは分かり難いが、加振源が接近する側の周波数が遠ざかる側の周波数より高くなっている。図-3の周波数特性で、高い方のピーク周波数が接近側、低い方のピーク周波数が遠ざかる側の周波数に対応している。この周波数はドップラー効果による周波数と一致している。また、走行路(x軸)から離れるとともに、移動加振源による応答の時刻歴は、固定した加振源による2直線の破線間を振れ幅とする調和振動波形に近づいていることが分かる。

6.2 単構造物のときの応答

図-9, 10は、Case 1の3測点($y=10\text{m}$, 20m , 30m)における全体波動場の鉛直変位の時刻歴と、式(23)に表れる散乱波動の鉛直変位の時刻歴を示したものである。図-10において、Str.1は構造物1の振動を加振源とした3測点の応答であることを表している。また、図-11は構造物のサイズが $16\text{m} \times 16\text{m} \times 10\text{m}$ の場合の結果で、走行路(x軸)と構造物側壁の離隔距離は 10m 、測線(y軸)と構造物側壁の離隔距離は 2m で、Case 1の場合と同じである。

図-9から、加振源が接近する側で応答が大きく、遠ざかる側では小さくなる様相を呈している。図-8の自由波動場の時刻歴と図-10の散乱波動場の時刻歴において、両端の $t=-2\text{s}$ と 2s 付近の波形を詳細に比べると、接近側(-2s)ではほぼ同位相、遠ざかる側(2s)ではほぼ逆位相となっていることが分かる。これより、図-9に示すように接近側で応答

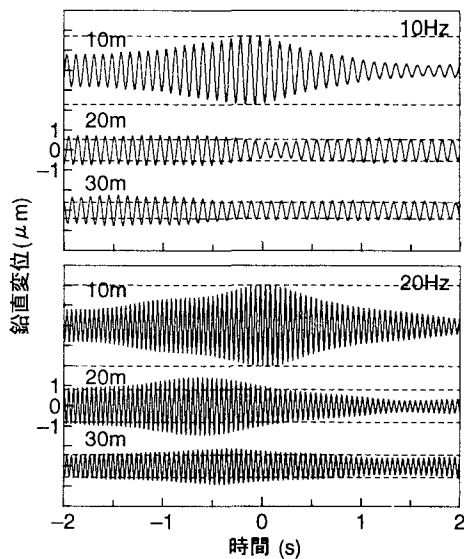


図-9 Case 1 の全体波動場

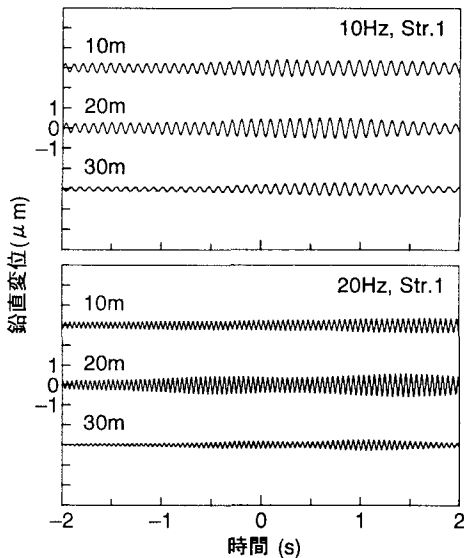


図-10 Case 1 の散乱波動場

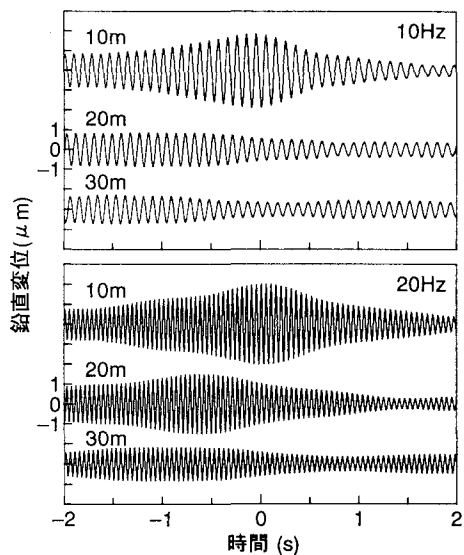


図-11 Case 1 で構造物サイズが大きいときの全体波動場

が大きく、遠ざかる側で小さくなる現象が生じたものと考えられる。また、構造物から離れた 30m 測点においては、散乱波動による応答が小さく、全体波動場の応答に与える影響は小さいことがわかる。

図-10 からは分かり難いが、散乱波動による応答においても、加振源が接近する側の周波数が遠ざかる側の周波数より高くなっている。したがって、散乱波動場においてもドップラー効果が認められるが、ドップラー効果と応答振幅や位相特性との関係を見出すには更に検討が必要である。

図-9 と図-11 の比較では、応答波形はほとんど差異が無いことが分かる。構造物底面のサイズに大きな差が無いためと考えられるが、構造物サイズの影響を調べる場合、入射波動の波長と構造物底面サイズの比、質量および構造物高さの違いに伴う慣性力の変化などが関与するため、ケース・バイ・ケースで散乱波動場の影響を把握する必要がある。

6.3 双構造物のときの応答

図-12~14 は、Case 2A の 3 測点における全体波動場の鉛直変位の時刻歴と構造物 1 (Str.1) と構造物 2 (Str.2) からの散乱波動の鉛直変位の時刻歴を示したものである。図-9 の単構造物の場合と比べて、接近側でも応答が減少していることが分かる。図-13, 14 から、構造物 2 からの散乱波動は接近側の応答に、構造物 1 からの散乱波動は遠ざかる側の応答に影響を与えていることが分かる。自由波動場の時刻歴と散乱波動場の時刻歴の位相差については、両構造物からの波形が重畳されるため把握し難い。

そこで、Case 2A の構造物中心間の離隔距離は 15m であるが、この離隔距離 (sd) を 20m, 25m とした場合の 3 測点における全体波動場の鉛直変位の時刻歴を示したものが図-15, 16 である。図-12, 15, 16 から、離隔距離が大きくなるとともに、時刻

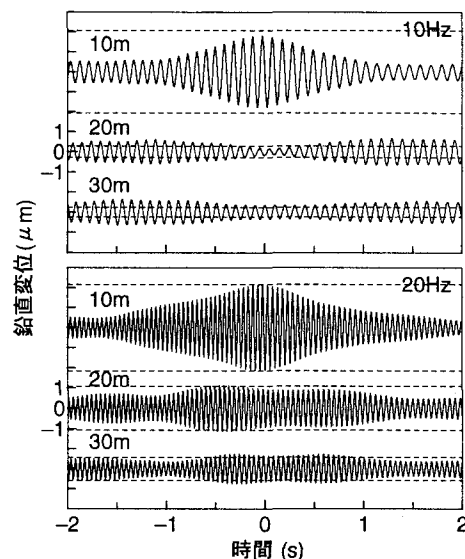


図-12 Case 2A の全体波動場

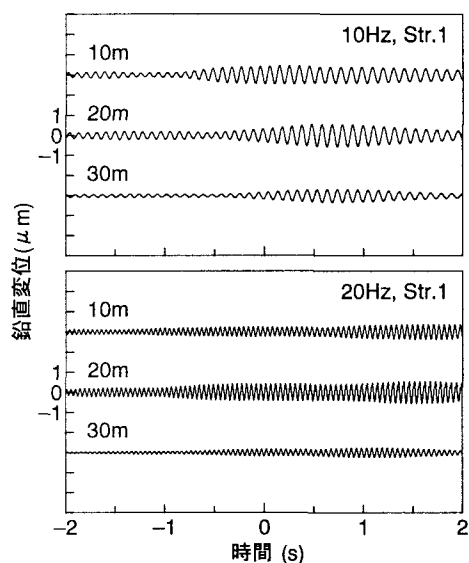


図-13 Case 2A の散乱波動場 (Str.1)

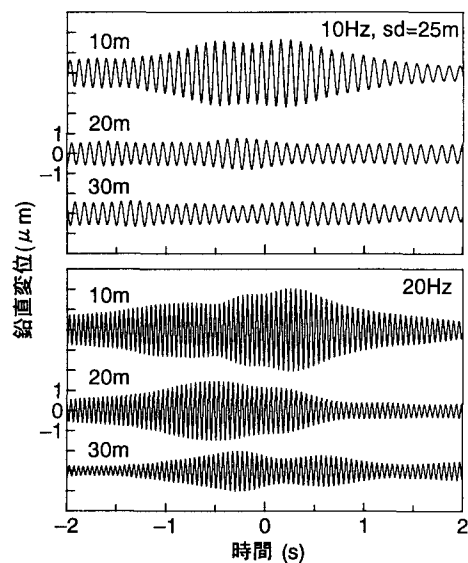


図-16 Case 2A で $sd=25m$ のときの全体波動場

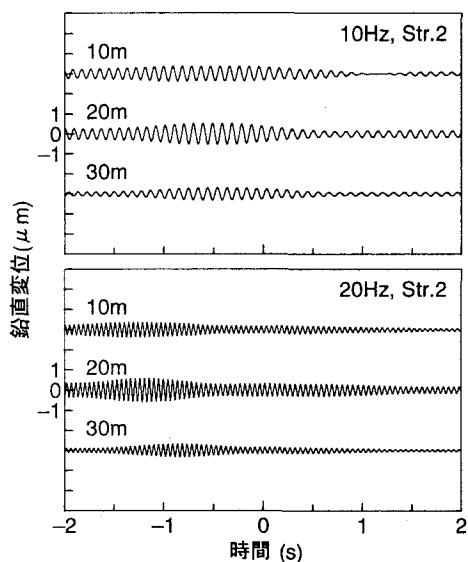


図-14 Case 2A の散乱波動場 (Str.2)

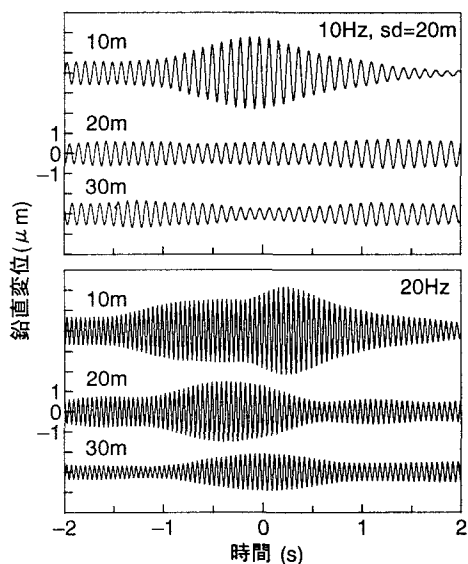


図-15 Case 2A で $sd=20m$ のときの全体波動場

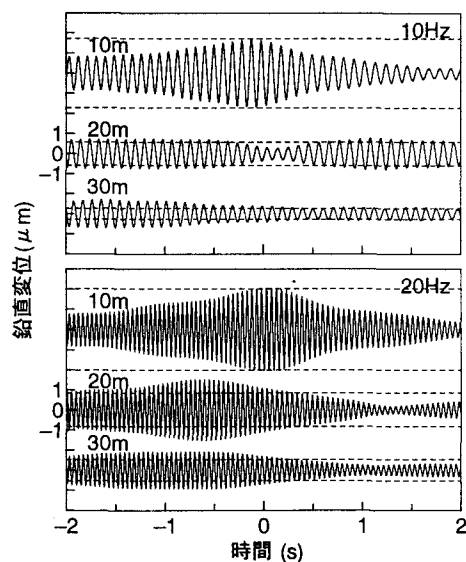


図-17 Case 2B の全体波動場

歴には違いが生じており、20Hz の時刻歴においては顕著である。散乱波動の時刻歴は省略したが、離隔距離が大きくなるとともに、構造物 2 は測点から接近側（マイナスの時間側）へ離れていくため、散乱波動の時刻歴に表れる振幅の大きい部分はマイナスの時間方向へシフトする。離隔距離が 25m は構造物 1 と構造物 2 の側壁間に構造物 1 つ分が入る距離であるが、図-9 の単構造物の場合に近づく様相は見られない。

図-17~19 は、Case 2B の 3 測点における全体波動場の鉛直変位の時刻歴と構造物 1 (Str.1) と構造物 2 (Str.2) からの散乱波動の鉛直変位の時刻歴を示したものである。図-9 の単構造物の場合と比べると、走行路 (x 軸) から離れるとともに遠ざかる側で僅かな差異はあるが、良く似た応答を示して

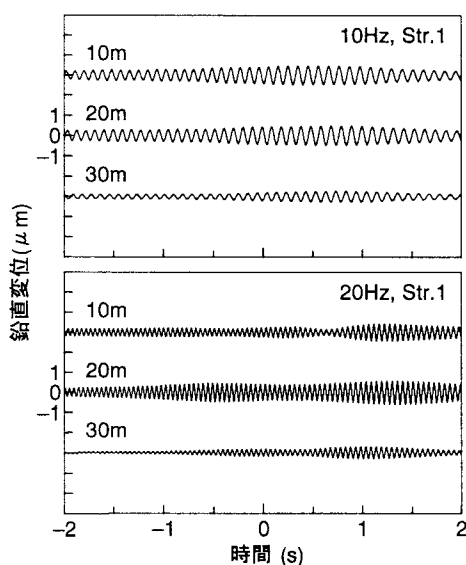


図-18 Case 2B の散乱波動場 (Str.1)

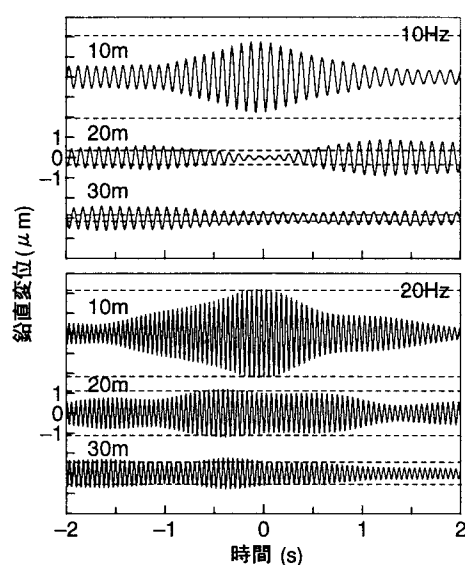


図-20 Case 3A の全体波動場

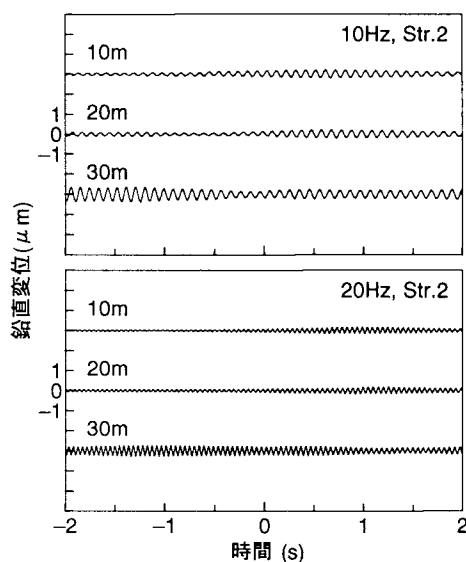


図-19 Case 2B の散乱波動場 (Str.2)

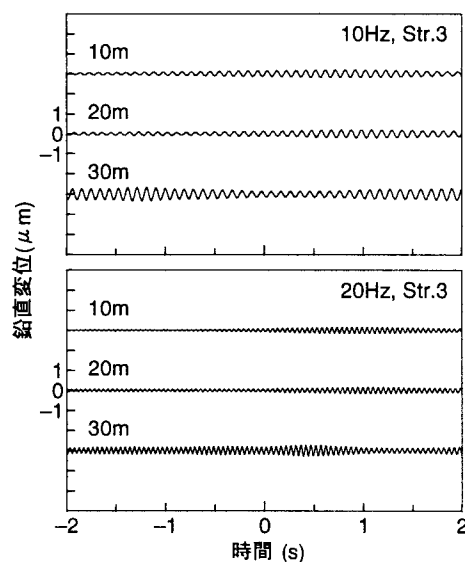


図-21 Case 3A の散乱波動場 (Str.3)

いることが分かる。図-19に見られるように、構造物 2 からの散乱波動による応答は小さい。また、図-18における構造物 1 からの散乱波動の時刻歴は図-10の時刻歴と良く似ている。このことから、Case 2B の構造物配置の場合、構造物 2 からの散乱波動は走行路から離れた測点の応答には多少の影響を与えるが、単構造物の場合でも現象を把握できることを示唆している。

Case 2B で構造物中心間の離隔距離を 20m と 25m にした場合についても調べたが、構造物 2 からの散乱波動による測点の応答は徐々に小さくなっており、離隔距離が 25m の場合の時刻歴は図-9の時刻歴とほぼ同じものとなっていることが分かった。

6.4 三構造物のときの応答

図-20, 21 は、Case 3A の 3 測点における全体波動場の鉛直変位の時刻歴と構造物 3 (Str.3) から

の散乱波動の鉛直変位の時刻歴を示したものである。また、図-22, 23 は、Case 3B の 3 測点における全体波動場の鉛直変位の時刻歴と構造物 3 (Str.3) からの散乱波動の鉛直変位の時刻歴を示したものである。なお、構造物 1 および構造物 2 からの散乱波動による 3 測点の応答は、Case 2A における構造物 1 および構造物 2 からの散乱波動による応答を示した図-13, 14 と良く似た時刻歴となっているので省略した。

Case 2B における構造物 2 からの散乱波動の影響に対する考察から、Case 3A, Case 3B における構造物 3 からの散乱波動の影響は小さいものと考えられた。しかし、図-20, 22 を詳細に見ると、30m 測点の時刻歴に大きくはないが、構造物 3 の配置の違いが及ぼす影響が表れている。3 つの構造物からの散乱波動の重ね合わせになるため、位相に関する考察は難しいが、図-21, 23 に示す構造物 3 からの

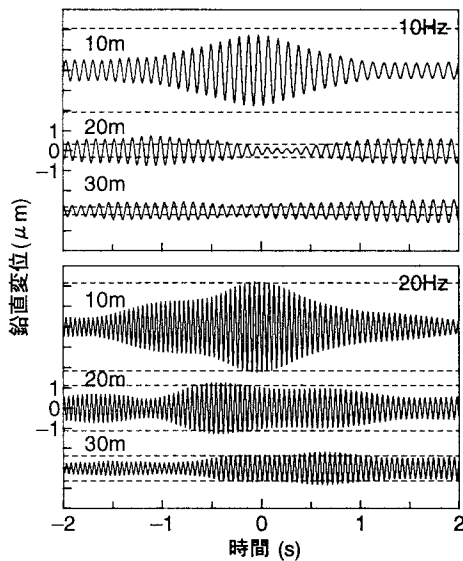


図-22 Case 3B の全体波動場

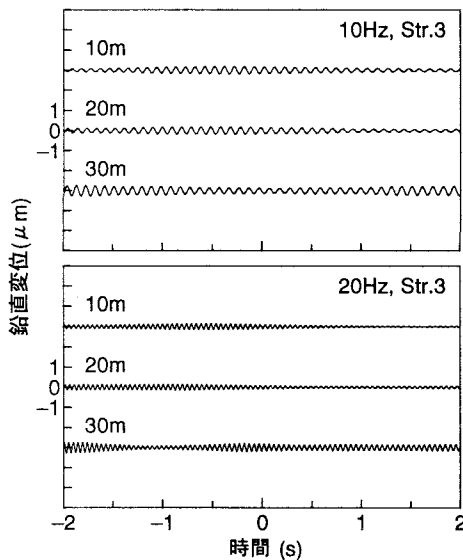


図-23 Case 3B の散乱波動場 (Str.3)

散乱波動による時刻歴の位相に違いが見られる。例えば、図-20, 22 の 30m 測点における時刻歴の両端の $t = -2s$ と $2s$ 付近の波形に見られる振幅の違いは、図-21, 23 の波形で逆位相の関係になっていることなどが関係しているものと推定される。

6.5 3 測点における応答に対するまとめ

時間が $t = -2 \sim 2s$ の間では、移動加振源から 10m 測点を見通す線上には構造物は入らないが、20m, 30m 測点の場合、構造物によって波動の伝播経路が遮断されている。10m 測点では、接近側の応答が遠ざかる側の応答より多少大きくなる傾向を示している。一方、20m 測点では、特徴的な現象が生じている。10Hz の応答では、時間 $t = 0s$ 付近で応答は小さくなる傾向を示しており、各構造物からの散乱波動の影響と考えられる。また、20Hz では、加振源が接近する側と遠ざかる側で応答波形に大きな変化が

表れている。30m 測点の応答は小さくなっているが、20m 測点の応答に近い現象が窺われる。

構造物配置と応答波形について、加振源が接近する側に構造物が存在しない Case 1 と Case 2B はよく似た応答波形となっている。構造物配置が測線を挟んでほぼ対称となる Case 2A では、応答波形も時間 $t = 0s$ に関してほぼ対称波形となっている。また、Case 3A と Case 3B の 10m と 20m 測点の応答波形は似ている。この場合、構造物配置と測点の関係から、10m, 20m 測点の応答波形には構造物 1 と構造物 2 は関係するが、構造物 3 の存在は小さな影響しか与えていない。

地盤の S 波速度が 200m/s であるから、加振周波数が 10Hz のとき S 波の波長は 20m, 20Hz のとき 10m となる。したがって、S 波の波長が構造物底面の辺長と同じとなる 20Hz では、20m, 30m 測点における応答波形に見られるように、構造物による振動遮断の現象が時間的な経過として把握できる。

7. 構造物 1 の横断測線における時刻歴応答

図-24 は、構造物の存在が地表面の振動に及ぼす影響を把握するための基準として、自由波動場における鉛直変位の時刻歴を示したものである。図中の 5m は構造物が存在するときの構造物前方 5m の測点、25m は構造物後方 5m の測点に対応している。また、図中の 2 直線の破線は、加振源を原点に固定したときの鉛直変位の振幅を示したものである。現象に対する考察は、図-8 に対するものと同じである。

図-25 は、Case 4 の構造物 (Str.1) の中心点を通る測線において、構造物を介した振動の伝達特性を調べために、全体波動場の鉛直変位の時刻歴を示したものである。図-26 は、構造物 1 (Str.1) からの散乱波動による測点の鉛直変位の時刻歴である。図

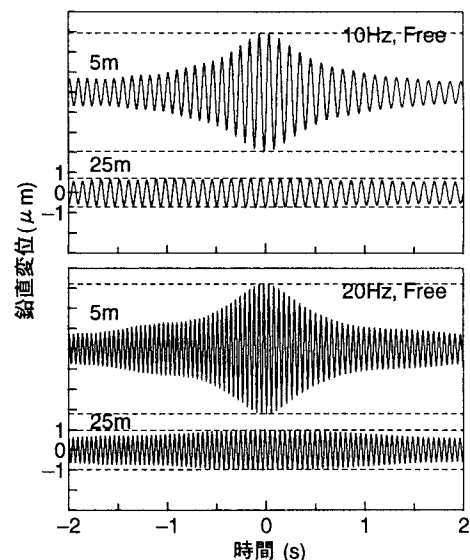


図-24 自由波動場

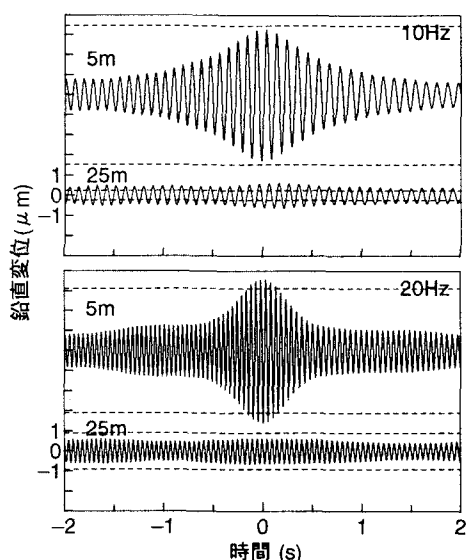


図-25 Case 4 の全体波動場

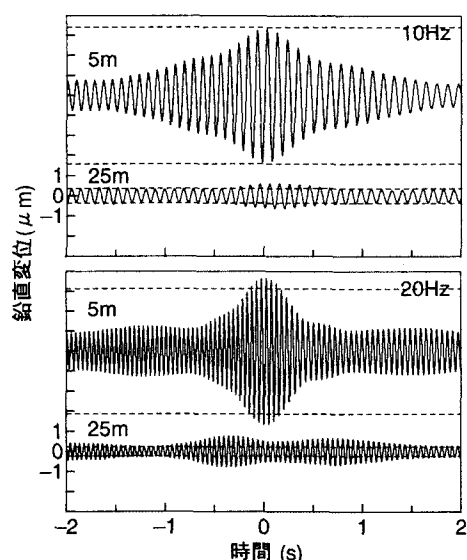


図-27 Case 5 の全体波動場

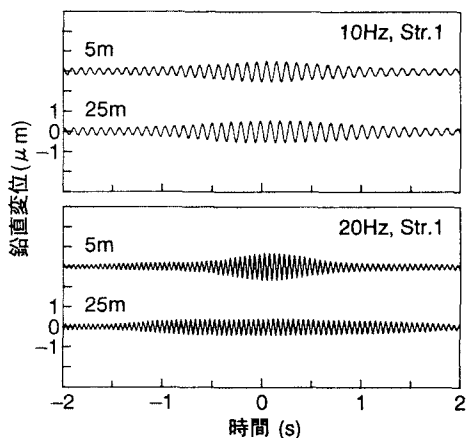


図-26 Case 4 の散乱波動場 (Str.1)

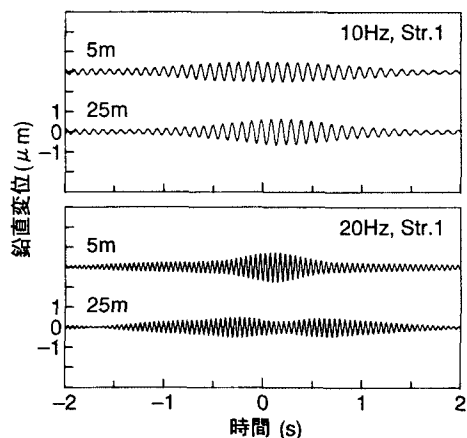


図-28 Case 5 の散乱波動場 (Str.1)

図-24 の自由波動場の時刻歴と図-26 の散乱波動場の時刻歴において、10Hz の波形に注目するとき、時間 $t=0$ s でははっきりしないが、時間 $t=-2$ s と 2s 付近の波形では、5m 測点の波形は同位相、25m 測点の波形は逆位相の関係になっている。したがって、図-25 の全体波動場の応答は、構造物前方で自由波動場の応答より増幅し、後方では減少するものと考えられる。20Hz の時刻歴については位相関係が見つからないが、同様の現象により、構造物後方では自由波動場より振動が減少していると推定される。

また、図-25 から、構造物後方の 25m 測点では、構造物中心位置から加振源が離れても(2秒で約 33m 移動)、振幅に大きな変化はなく構造物の存在による振動遮断効果が継続していることが時間的な経過として把握できる。

図-27 は、Case 5 の構造物 1 (Str.1) の中心点を通る測線において、構造物を介した振動の伝達特性を調べたものである。図-28~30 は、構造物 1、構造物 2 (Str.2) および構造物 3 (Str.3) からの散乱波動による測点の応答波形を示したものである。図-

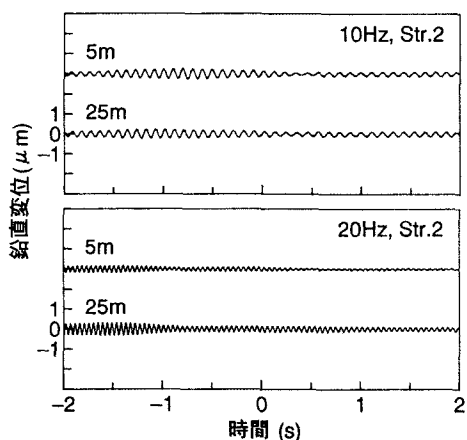


図-29 Case 5 の散乱波動場 (Str.2)

25 と図-27 の時刻歴の比較から、波形がよく似ていることが分かる。図-29、30 の構造物 2 および構造物 3 からの散乱波動による応答は小さい。一方、図-26 と図-28 の構造物 1 からの散乱波動による応答波形では、時間 $t=0$ s 付近で振幅は大きくなっており、波形も似ている。このことから、構造物 1 を

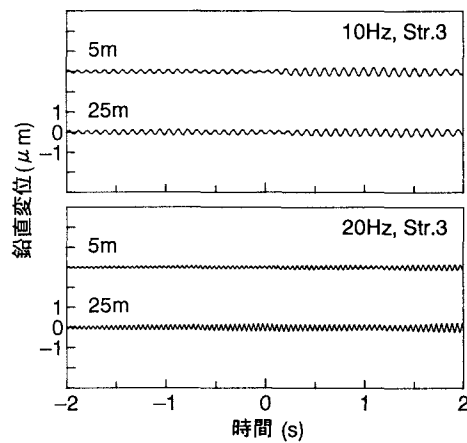


図-30 Case 5 の散乱波動場 (Str.3)

介した振動の伝達特性は、自構造物の振動の影響を強く受けるものと考えられる。

8. おわりに

本研究では、半無限弾性体表面に複数の構造物が存在するとき、構造物の近傍を通過する点加振源によって、構造物周辺の地表面振動が構造物の存在によって時間的にどのような変化を示すか調べた。ここでは単一周波数の点加振源が走行する場合を取り扱ったが、文献 3) で提案した手法を用いて、自動車が走行するときの地盤振動のシミュレーションに拡張する必要がある。これによって、道路交通振動問題において、構造物の存在がその周辺の地盤振動に及ぼす影響を時間的な経過の中で的確に把握できる。

また、筆者らは薄層要素法を適用して、固定加振源に対する多層地盤上の構造物の周辺地盤の応答解析、多層地盤表面を振動荷重が走行する場合の数値解析などを手掛けており、本研究を多層地盤上に複数の構造物が存在する場合に拡張したいと考えている。これによって、より現実的な問題に近づけて、

構造物間の連成振動、地層構成などが構造物周辺の地盤振動に及ぼす影響を時間的な経過の中で把握できる。

参考文献

- 1) Takemiya, H. and Kojima, M. : 2.5-D FEM simulation for vibration prediction and mitigation of track and ground interaction under high-speed trains, Proc. of International Seminar on Environmental Vibration, Hangzhou, China, pp.130-138, 2003.
- 2) Hirose, H. : Efficient numerical approach for the analysis of vibrations due to moving load, International Workshop Wave 2002 on Wave Propagation, Moving Load and Vibration Reduction, Okayama, Japan, pp.113-119, 2002.
- 3) 北村泰寿：走行変動荷重による地盤振動解析，神戸大学大学院自然科学研究科紀要，第 16 号 B，pp.53-59, 1998.
- 4) 北村泰寿：近接加振源からの波動入射を受ける矩形剛構造物周辺の地表面振動，土木学会論文集，第 368 号 / I-8，pp.369-375, 1987.
- 5) Pezeshki, H., 北村泰寿：近接加振源からの波動入射を受ける複数剛構造物周辺の地盤振動解析，地盤環境振動の評価・予測・対策に関するシンポジウム，地盤工学会，pp.65-68, 2001.
- 6) 野嶋治，田治見宏，市川修三：建物と地盤の相互作用に関する基礎的研究，竹中技術研究報告，第 9 号，pp.38-51, 1973.
- 7) Thau, S. A. : Radiation and scattering from a rigid inclusion in an elastic medium, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol.34, pp.509-511, 1967.
- 8) 北村泰寿，櫻井春輔：剛基礎底面の複素剛性に関する一解析法，土木学会論文報告集，第 290 号，pp.43-52, 1979.

(2004 年 4 月 16 日 受付)