



水平2方向連成を有する地盤による地震動の オービット特性に関する基本的検討

山本優¹⁾、源栄正人²⁾、大野晋³⁾

- 1) 非会員 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター、大学院生
e-mail : y-yama@tjogi.pln.archi.tohoku.ac.jp
- 2) 正会員 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター、教授 工博
e-mail : motosaka@saigai.str.archi.tohoku.ac.jp
- 3) 正会員 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター、助教授 博士(工学)
e-mail : ohnos@saigai.str.archi.tohoku.ac.jp

要 約

地震動を受けるときの構造物の多次元挙動は非常に複雑であり、入力地震動も多次元的な評価を行うことは重要である。地震動の水平2方向のオービット特性は、構造物への入力地震動の多次元性を表す重要な要素であると考えられるが、それがどのような原因で生じるのかについての検討は必ずしも十分とはいえない。これを踏まえ本研究では、地盤が水平2方向連成を有する場合にオービット特性に与える影響について、基本的な検討を行った。

キーワード： オービット、地震動、地盤、水平2方向連成

1. はじめに

地震動を受けるときの構造物の多次元挙動は非常に複雑である。一般的に構造物の応答を考える場合、水平成分に関して言えば1方向入力よりも2方向入力を考慮した場合の方が、構造物の応答や必要耐力は大きくなり、構造物の隅柱の柱軸力変動や2軸曲げ・せん断などに大きな影響を及ぼす¹⁾。これを受けて、例えば1978年のATC規準²⁾においては、ある方向の地震荷重に対して直交方向の±30%分の加算係数を加えるという、所謂“orthogonal effects”を考慮した条項が導入された。このような考え方は、その後多くの国で取り入れられ、日本においても1982年の建築センター指針や1988年の建築学会RC終局型設計指針で直交方向分の加算係数を定めている^{3,4)}。

水平2方向入力に関して、構造物に対する実験的検討や解析的検討は多く行われてきている。実験的検討に関しては、例えば小川ら(1994)⁵⁾は1978年宮城県沖地震の際に、東北大学建築系研究棟及び住友生命ビルの建物内(基礎階)で得られた地震観測記録の変位オービットが楕円形や円形になることを踏まえ、PCa柱及びRC柱に対し水平方向の静的1軸載荷実験及び2軸円形パス繰返載荷試験を行い、2軸

円形載荷を行った場合の方が一軸載荷試験と比較して小さな変位履歴でも大きな損傷を受けることを示している。水平2方向加力の解析的な研究に関しても、例えば井上(1985)⁶⁾、小野ら(2004)⁷⁾などによってなされている。

その一方で、地震動そのものが持つオービット特性については、方向性の検討は数多くなされているものの^{例えは8)}、オービットが楕円形や円形となる現象や、それらがどのようなパラメータによって規定されるのか検討した例は決して多いとは言えない。野津ら(2001)⁹⁾や澤田ら(2002)¹⁰⁾などは震源特性に関連した水平成分のオービット特性の検討を行っている。野津ら(2001)⁹⁾は、断層のメカニズム解や破壊伝播方向、サイトの位置関係が地震動の方向性に及ぼす影響について、理論的手法によりパラメトリックスタディを行っている。その結果、大地震の震源近傍で最も振幅の大きい地震動は断層直交方向に発生する性質があり、この性質は震源パラメータを変化させても変わりにくいとしている。また、澤田ら(2002)¹⁰⁾は、水平2方向成分の位相ずれはオービットによって表現されるとし、震源近傍のオービットの特性について、全無限地盤解析及び水平成層地盤解析によって調べた。その結果、オービットの回転は、破壊伝播の影響、グリーン関数の近地項と中間項、地盤構造の影響によって生じていることを示した。

これらの研究から見られるように、震源近傍においては震源・伝播・地盤特性全てがオービット特性に大きな影響を与えていると考えられる。グリーン関数の近地項や中間項が無視できる振動数帯域や、断層あるいはアスペリティの大きさに比べて十分に遠距離の地震においては、理論的にはFar-Field S波項のみが卓越し、オービットはほぼ線状となる。つまり、震源距離が大きい場合のオービットの変化は震源特性では説明が難しいと考えられる。多方面からのPathの影響や地盤中の重複反射現象は、後続波には影響を与えうるが、S波の初動部分や振幅の大きいパルス地震動のオービットが楕円形や円形のオービットを描く理由としては不十分であると思われる。実際の遠方の地震による観測記録においても、オービットが楕円形や円形になるものが、前述の1978年宮城県沖地震の場合など数多く見られる¹¹⁾。

一方、地盤特性がオービット特性に変化をもたらす原因としては、媒質の異方性や不均質性、地形の不整形性が考えられる。それに伴い、地震波の異なる成分への連成振動が励起されることが考えられる。例えば和泉ら(1989)¹²⁾は、鉛直アレー観測記録の解析から、異なる方向の入出力関係に相関性、伝達関係が存在し、独立ではないことを示唆している。またPaolucci(1999)¹³⁾は、不整形な地形に対して、水平・上下3成分の連成を考慮した3次元のサイト特性を評価し、3次元の連成を考慮した伝達関数と、スペクトル比やH/Vスペクトルとの比較を行った。その結果、1次元による伝達関数と、3次元の連成を考慮した伝達関数は大きく異なることを示した。Ghayamghamian and Motosaka(2003)¹⁴⁾は、源栄ら(1997)¹⁵⁾や竹中(1998)¹⁶⁾による構造物の水平2方向連成モデルの連続体置換による応答解析を地盤震動に応用し、地盤の水平成分と回転成分の連成を考慮した地盤の応答評価の定式化を行っている。さらに、水平・鉛直アレーにおける観測記録を用いて連成パラメータを同定し、通常の1次元波動論と比較して伝達関数の再現性がよいことを示している。ただし、このような連成振動がオービット特性に与える影響についての検討は、ほとんど行われていない。

オービットが楕円形や円形を描く地震動は、極端な方向性を示す地震動と比べて、多次元的な加振となり、建物の応答もしくは崩壊メカニズムも異なってくると予想される。しかし、現在の地震動評価法や設計入力地震動に、水平2方向のオービット特性が十分に反映されているとは言い難い。今後、構造物の実験的検討や解析的検討に対する入力地震波の設定、あるいは設計入力地震動の設定を行うにあたって、このようなオービット特性を反映していくことが望ましい。

以上のような背景を踏まえ本研究では、水平2方向連成を有する地盤に波動が入射したときに、オービット形状に与える影響を明らかにすることを目的とする。ここでは、現実の地盤に対するパラメータの定量化についての検討は行わず、水平2方向の連成を表すパラメータが水平成分のオービットに与える影響について、理論的なアプローチや数値実験を通じた検討を行う。具体的には、2層地盤モデルに対する応答を理論的に導いた上で、各連成パラメータが地表面応答のオービットに与える影響について解析的な検討を行う。

2. 水平 2 方向連成を考慮した地盤モデルの基礎理論

2.1 解析モデル概要

3次元の地盤震動問題を解く場合は、微小領域に対して構成則を定義し、初期条件や境界条件を与えることにより変位と応力が求められる。本研究では文献(14)~(16)に基づき、図1左に示すような領域 D 、高さ H の地盤構造を考え、地盤の不整形・不均質性の効果を水平2方向の連成パラメータとして導入し、1次元に簡略化したモデルを用いる。座標系は図のように z 軸を下向きとした左手系の座標とする。図1右に、本研究で用いる水平2方向連成を考慮した地盤モデルの概念図を示す。 μ_{xi} は点 S から y_i 離れた部分の x 方向の剛性率、 μ_{yi} は点 S から x_i 離れた部分の y 方向の剛性率を示している。 z 方向に関する微小領域 dz を考え、釣り合い式を導くと、次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \rho & 0 & 0 \\ 0 & \rho & 0 \\ 0 & 0 & \rho \end{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\theta \end{Bmatrix} = \frac{\partial}{\partial z} \begin{Bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_\theta \end{Bmatrix} \quad (1)$$

さらに、次式で示される構成則を導入する。

$$\begin{Bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_\theta \end{Bmatrix} = \rho V_x^2 \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \bar{e}_y \\ -\alpha & \gamma^2 & \bar{e}_x \\ \bar{e}_y & \bar{e}_x & \beta^2 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial z} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

(2)式を(1)式に代入し、周波数領域に変換すると、(3)式のような運動方程式が得られる。

$$\rho V_x^2 \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \bar{e}_y \\ -\alpha & \gamma^2 & \bar{e}_x \\ \bar{e}_y & \bar{e}_x & \beta^2 \end{bmatrix} \frac{d^2}{dz^2} \begin{Bmatrix} \bar{u}_x \\ \bar{u}_y \\ \bar{u}_\theta \end{Bmatrix} = -\rho \omega^2 \begin{Bmatrix} \bar{u}_x \\ \bar{u}_y \\ \bar{u}_\theta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_\theta$ は x, y, θ 成分の周波数領域における変位である ($\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_\theta$ の上付きバーは周波数領域であることを示す)。 \bar{u}_θ は、回転量 θ に回転半径 i_r を掛け合わせて、点 S から i_r の距離の変位に変換した量として表している。 ρ は地盤の質量密度、 V_x は x 方向におけるS波速度、 ω は円振動数を表している。 α は水平方向の並進成分(x と y)間の連成を表すパラメータ、 \bar{e}_x, \bar{e}_y は偏心比であり、並進と回転の連成を表すパラメータである。 γ は x 方向に対する y 方向のS波速度比、 β は x 方向に対する回転成分のS波速度比である。 γ や β は媒質の異方性に相当しており、S波スプリッティング現象として多くの観測例や研究例^(例えば17)がある。S波スプリッティングは、異方性を持つ媒質中を伝播するS波が伝播速度の異なる2つの直交した振動方向の波に分離する現象であり、上部地殻においては配列したクラックによって生じるとされている¹⁷⁾。

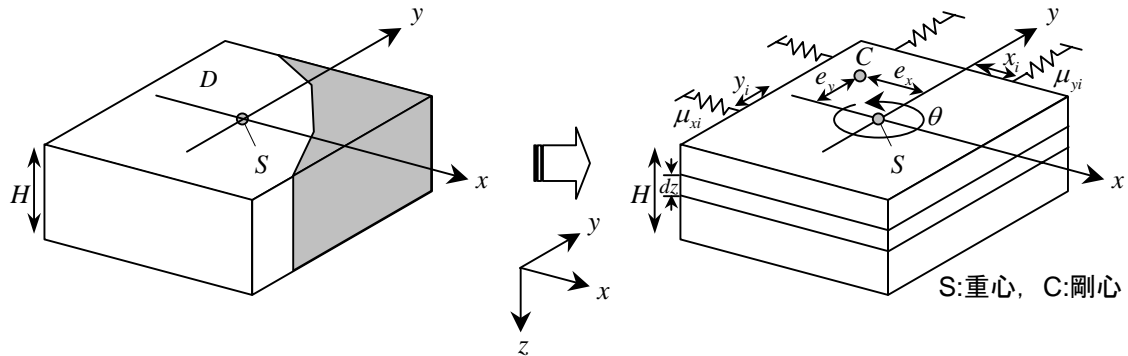


図1 不均質・不整形モデルから水平2方向連成地盤モデルへの置換

2.2 連成パラメータの物理的な意味

それぞれの連成パラメータの物理的な意味について考察する。図2に示すように、高さ H の層の上端($z = z_1$)と下端($z = z_2$)の面積 A の領域にかかる表面力 P と変位 u の関係を考える。

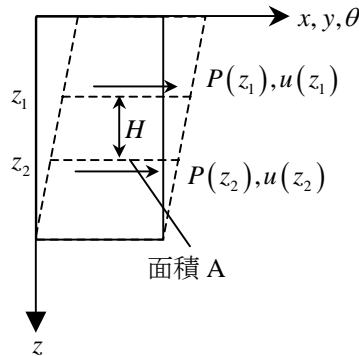


図2 弾性体における力の釣り合い

図2の層を線形要素と考えると、層内の変位は上端と下端の変位を用いて次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} u_x(z) \\ u_y(z) \\ u_\theta(z) \end{Bmatrix} = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} z_2 - z & & -z_1 + z \\ & z_2 - z & \\ & & z_2 - z & -z_1 + z \\ & & & -z_1 + z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x(z_1) \\ u_y(z_1) \\ u_\theta(z_1) \\ u_x(z_2) \\ u_y(z_2) \\ u_\theta(z_2) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式(2)と式(4)を用いて、 P と u の関係を導くと、次式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} P_x(z_1) \\ P_y(z_1) \\ P_\theta(z_1) \\ P_x(z_2) \\ P_y(z_2) \\ P_\theta(z_2) \end{Bmatrix} = \frac{A\rho V_x^2}{H} \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \bar{e}_y & -1 & \alpha & -\bar{e}_y \\ & \gamma^2 & \bar{e}_x & \alpha & -\gamma^2 & -\bar{e}_x \\ & & \beta^2 & -\bar{e}_y & -\bar{e}_x & -\beta^2 \\ & & & 1 & -\alpha & \bar{e}_y \\ & sym. & & & \gamma^2 & \bar{e}_x \\ & & & & & \beta^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x(z_1) \\ u_y(z_1) \\ u_\theta(z_1) \\ u_x(z_2) \\ u_y(z_2) \\ u_\theta(z_2) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

(5)式で定義される右辺のマトリクスが、図2の層における要素剛性マトリクスとなる。ここで、 $z = z_1$ における変位を単に $u_x(z_1) = u_x$, $u_y(z_1) = u_y$, $u_\theta(z_1) = u_\theta$, 表面力を $P_x(z_1) = P_x$, $P_y(z_1) = P_y$, $P_\theta(z_1) = P_\theta$ とおき、層の下側($z = z_2$)を固定して上側に表面力をかけた状態を考えると、次式が導かれる。

$$\begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_\theta \end{Bmatrix} = \frac{A\rho V_x^2}{H} \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \bar{e}_y \\ -\alpha & \gamma^2 & \bar{e}_x \\ \bar{e}_y & \bar{e}_x & \beta^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\theta \end{Bmatrix} \quad (6)$$

(6)式の関係から、剛性マトリクス $[K]$ を、次のようにおく。

$$[K] = \frac{A\rho V_x^2}{H} \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \bar{e}_y \\ -\alpha & \gamma^2 & \bar{e}_x \\ \bar{e}_y & \bar{e}_x & \beta^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7)式の逆行列である柔性マトリクス $[K]^{-1}$ は、次のように表される。

$$[K]^{-1} = \frac{H}{A\rho V_x^2} \cdot \frac{1}{-\bar{e}_x^2 - 2\bar{e}_x\bar{e}_y\alpha - \alpha^2\beta^2 - \bar{e}_y^2\gamma^2 + \beta^2\gamma^2} \begin{bmatrix} -\bar{e}_x^2 + \beta^2\gamma^2 & \bar{e}_x\bar{e}_y + \alpha\beta^2 & -\bar{e}_x\alpha - \bar{e}_y\gamma^2 \\ \bar{e}_x\bar{e}_y + \alpha\beta^2 & -\bar{e}_y^2 + \beta^2 & -\bar{e}_x - \bar{e}_y\alpha \\ -\bar{e}_x\alpha - \bar{e}_y\gamma^2 & -\bar{e}_x - \bar{e}_y\alpha & -\alpha^2 + \gamma^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8)式を用いると、 P と変位の関係は次のようにも表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\theta \end{Bmatrix} = [K]^{-1} \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_\theta \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここで例えば、 $\bar{e}_x = \bar{e}_y = 0$ とおくと、 $[K]^{-1}$ は次のように表される。

$$[K]^{-1} = \frac{H}{A\rho V_x^2} \cdot \frac{1}{-\alpha^2 + \gamma^2} \begin{bmatrix} \gamma^2 & \alpha & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (-\alpha^2 + \gamma^2)/\beta^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

よって、(9)式、(10)式から次の式が導かれる。

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \frac{H}{A\rho V_x^2} \cdot \frac{1}{-\alpha^2 + \gamma^2} \begin{bmatrix} \gamma^2 & \alpha \\ \alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 x 方向にのみ力を加えた状態を考える。つまり、 $P_x = 1$ 、 $P_y = 0$ のときは、

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \frac{H}{A\rho V_x^2} \cdot \frac{1}{-\alpha^2 + \gamma^2} \begin{Bmatrix} \gamma^2 \\ \alpha \end{Bmatrix} \quad (12)$$

さらに、簡単のため、 $\gamma = 1$ のときに対しては、

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \frac{H}{A\rho V_x^2} \cdot \frac{1}{-\alpha^2 + 1} \begin{Bmatrix} 1 \\ \alpha \end{Bmatrix} \quad (13)$$

となる。この式から、 α という連成パラメータを持つ地盤を x 方向に静的に押すと、 x 方向の変位と y 方向の変位には、 $1:\alpha$ の関係があることが分かる（図3参照）。同様に、 $\alpha = \bar{e}_y = 0$ 、 $\gamma = \beta = 1$ 、 $P_y = 1$ 、 $P_\theta = 0$ のときは、

$$\begin{Bmatrix} u_y \\ u_\theta \end{Bmatrix} = \frac{H}{A\rho V_x^2} \cdot \frac{1}{-\bar{e}_x^2 + 1} \begin{Bmatrix} 1 \\ -\bar{e}_x \end{Bmatrix} \quad (14)$$

となり、 y 方向に静的に押すと $u_y : u_\theta = 1 : -\bar{e}_x$ となる。 $x-\theta$ 連成の場合も、同様に考えることができる。

図1左のような連続体に対し、ある方向に分布荷重を与えたとき、領域 D に対する変位分布 $u_x(x, y)$ 、 $u_y(x, y)$ 、 $u_\theta(x, y)$ が求められる。剛性に偏りがあるため、領域内の変位は一様とはならないが、この変位分布に対する代表変位（平均変位など）が水平2方向連成地盤モデルの変位応答に相当すると考えられる。言い換えれば、本モデルによって得られた点 S における変位応答は、点 S 周辺の不整形・不均質の影響が含まれた領域 D の代表変位と考えられる。代表変位は加力方向と異なる方向の変位に対しても求められ、(13)式や(14)式の関係を考えて、加力方向とそれに対して異なる方向の代表変位の比が連成パラメータに対応している。

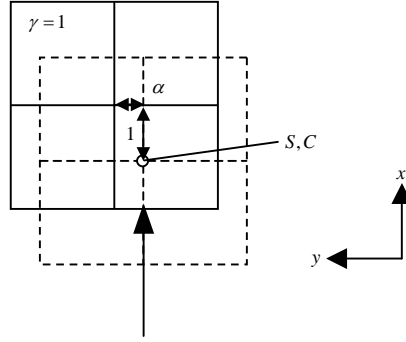


図3 連成パラメータの物理的意味 (α の例, 文献 16)に加筆)

2.3 変位-応力ベクトルの導出

(3)式において、並進成分間の連成を無視して $\alpha=0$ とおき、さらに1軸偏心の場合($\bar{e}_y=0$)を考えると、次式のように、2つの独立な運動方程式に記述できる。

$$\rho V_x^2 \frac{d^2}{dz^2} \bar{u}_x = -\rho \omega^2 \bar{u}_x \quad (15)$$

$$\rho V_x^2 \begin{bmatrix} \gamma^2 & \bar{e}_x \\ \bar{e}_x & \beta^2 \end{bmatrix} \frac{d^2}{dz^2} \begin{Bmatrix} \bar{u}_y \\ \bar{u}_\theta \end{Bmatrix} = -\rho \omega^2 \begin{Bmatrix} \bar{u}_y \\ \bar{u}_\theta \end{Bmatrix} \quad (16)$$

(15)式は、連成を考慮しない1次元波動方程式と同一である。(16)式は、 \bar{e}_x を介して、y成分と θ 成分が連成した形となっている。ここで、状態ベクトル $\{q\}$ (縦ベクトル) を次のように定義する。

$$\{q\} = \left\{ \bar{u}_y, \bar{u}_\theta, \frac{d}{dz} \bar{u}_y, \frac{d}{dz} \bar{u}_\theta \right\}^T \quad (17)$$

(16)式を(17)式を用いて書き換えると、次の1階の常微分方程式を得る。

$$\frac{d}{dz} \{q\} - [A] \{q\} = \{0\} \quad (18)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-\beta^2 \omega^2}{(\beta^2 \gamma^2 - \bar{e}_x^2) V_x^2} & \frac{\omega^2 \bar{e}_x}{(\beta^2 \gamma^2 - \bar{e}_x^2) V_x^2} & 0 & 0 \\ \frac{\omega^2 \bar{e}_x}{(\beta^2 \gamma^2 - \bar{e}_x^2) V_x^2} & \frac{-\gamma^2 \omega^2}{(\beta^2 \gamma^2 - \bar{e}_x^2) V_x^2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

(18)式において、次の(20)式を代入し、固有値問題を解く。

$$\{q\} = \{w\} e^{\lambda z} \quad (20)$$

固有値は次式で与えられる。

$$\lambda^2 = - \frac{\omega^2 \left(\beta^2 + \gamma^2 \pm \sqrt{(\beta^2 - \gamma^2)^2 + 4\bar{e}_x^2} \right)}{2(\beta^2 \gamma^2 - \bar{e}_x^2) V_x^2} \quad (21)$$

また、(21)式より、パラメータ間の拘束条件として、次式が成り立つ。

$$\beta^2 \gamma^2 - \bar{e}_x^2 > 0 \quad (22)$$

(22)式を満たすときに λ はいずれも虚数となり、(20)式は振動解となる。

次に、ある振動方向に対する z 方向の伝播速度を表す特性速度を求める。(20)式を考慮すると、固有値と特性速度 Γ の関係は $i = \sqrt{-1}$ として次のように表される。

$$\lambda = \pm \frac{i\omega}{\Gamma} \quad (23)$$

特性速度の遅い方を第1種特性速度、速い方を第2種特性速度^{14)~16)}とおくと、次式が得られる。

$$\Gamma_1 = \sqrt{\frac{2V_x^2(\beta^2\gamma^2 - \bar{e}_x^2)}{\beta^2 + \gamma^2 + \sqrt{(\beta^2 - \gamma^2)^2 + 4\bar{e}_x^2}}} \quad (24)$$

$$\Gamma_2 = \sqrt{\frac{2V_x^2(\beta^2\gamma^2 - \bar{e}_x^2)}{\beta^2 + \gamma^2 - \sqrt{(\beta^2 - \gamma^2)^2 + 4\bar{e}_x^2}}} \quad (25)$$

$\gamma=1, \beta=1$ のとき、第1種特性速度は $\Gamma_1 = V_x \sqrt{1 - \bar{e}_x}$ で V_x よりも遅くなり、第2種特性速度は $\Gamma_2 = V_x \sqrt{1 + \bar{e}_x}$ で速くなるのがわかる。

固有マトリクスは次のように表される。

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \bar{e}_x \Gamma_1^3 & \bar{e}_x \Gamma_2^3 & \bar{e}_x \Gamma_1^3 & \bar{e}_x \Gamma_2^3 \\ -\Gamma_1 \Lambda_1 & -\Gamma_2 \Lambda_2 & -\Gamma_1 \Lambda_1 & -\Gamma_2 \Lambda_2 \\ -i\omega \bar{e}_x \Gamma_1^2 & -i\omega \bar{e}_x \Gamma_2^2 & i\omega \bar{e}_x \Gamma_1^2 & i\omega \bar{e}_x \Gamma_2^2 \\ i\omega \Lambda_1 & i\omega \Lambda_2 & -i\omega \Lambda_1 & -i\omega \Lambda_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

ここで、

$$\Lambda_1 = V_x^2 (\beta^2 \gamma^2 - \bar{e}_x^2) - \beta^2 \Gamma_1^2 \quad (27)$$

$$\Lambda_2 = V_x^2 (\beta^2 \gamma^2 - \bar{e}_x^2) - \beta^2 \Gamma_2^2 \quad (28)$$

(16)式の運動方程式の同次解は、第1種および第2種の特性速度を持つ波それぞれに対して、上昇波と下降波を考慮すると、次式で与えられる。

$$\{q\} = [\Phi][E(z)]\{C\} \quad (29)$$

ここに、 $[\Phi]$ は(26)式で示される固有マトリクスである。 $[E]$ は固有値マトリクス、 $\{C\}$ は未知係数ベクトルであり、それぞれ次式で与えられる。

$$[E(z)] = \text{diag.} [e^{\frac{i\omega}{\Gamma_1} z}, e^{\frac{i\omega}{\Gamma_2} z}, e^{\frac{i\omega}{\Gamma_1} z}, e^{\frac{i\omega}{\Gamma_2} z}] \quad (30)$$

$$\{C\} = \{C_1^d, C_2^d, C_1^u, C_2^u\} \quad (31)$$

ここで、状態ベクトル $\{q\}$ を変位・応力ベクトル $\{\hat{q}\}$ (波動ベクトル) に変換する。すなわち、

$$\{\hat{q}\} = [L]\{q\} \quad (32)$$

ここで、

$$[L] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho V_x^2 \gamma^2 & \rho V_x^2 \bar{e}_x \\ 0 & 0 & \rho V_x^2 \bar{e}_x & \rho V_x^2 \beta^2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

(32)式に(29)式を適用し、 $z=0$ および $z=H$ における変位・応力ベクトルは次のように表される。

$$\{\hat{q}\}_{z=0} = [L][\Phi]\{C\} \quad (34)$$

$$\{\hat{q}\}_{z=H} = [L][\Phi][E(H)]\{C\} \quad (35)$$

(34)式、(35)式よりベクトル $\{C\}$ を消去すると、 $z=0$ および $z=H$ における変位・応力ベクトルの関係式が次のように得られる。

$$\{\hat{q}\}_{z=H} = [G]\{\hat{q}\}_{z=0} \quad (36)$$

$$[G] = [L][\Phi][E(H)][\Phi]^{-1}[L]^{-1} \quad (37)$$

あとは、(35)式の上昇波成分（入射波）が既知であることを考慮し、境界条件を適用すれば、地表面の変位・応力ベクトルを求めることができる。媒質の不均質性が深さ方向に異なる場合も、通常の1次元波動論と同様に多層にモデル化し、(37)式の層剛性マトリクス $[G]$ を逐次適用していくことにより解析を行うことができる。

以上の式の誘導は、 $\bar{e}_y = 0$ とし、剛心が x 軸上に存在する場合のみを扱ってきたが、 $\bar{e}_x = 0$ とし、剛心が y 軸上に存在する一軸偏心モデルを考慮しても、（この場合、 $x-\theta$ 成分が連成する）記号が変わるだけで全く同じ形の式が出てくる。また、偏心を無視（ $\bar{e}_x = 0, \bar{e}_y = 0$ ）し、並進成分間の連成パラメータ α が0以外の値を持つときは、 $x-y$ 成分の連成式となり、上と同様の誘導が可能である。このようにして、各連成パラメータが地表面の応答に与える影響を理論的に検討することができる。

3. 水平2方向連成を有する地盤がオービット特性に与える影響

3.1 偏心を有する地盤モデルによる応答のオービット特性

偏心比 \bar{e}_x が地表面の水平2方向の応答とそのオービット特性に及ぼす影響を調べるため、2層地盤モデル（図4）を用いた検討を行う。まず、第2層（下層）の連成に関するパラメータは全て無視し（第2層の $\bar{e}_x = 0, \bar{e}_y = 0, \alpha = 0$ ）、さらに第1層（上層）の y 方向の偏心及び並進成分間の連成を無視する（第1層の $\bar{e}_y = 0, \alpha = 0$ ）。さらに、上下層ともに $\gamma = 1, \beta = 1$ とする。つまり、第1層にのみ偏心が存在するモデルを考える。 y 方向の単位振幅入力に対する2層地盤の周波数領域における地表面の応答 $\bar{u}_y, \bar{u}_\theta$ を求めると、(34)式～(37)式に弾性基盤の境界条件を適用して解くことで、次式のように表される。

$$\bar{u}_y = \frac{1}{\cos f_1 + iA\sqrt{1-\bar{e}_x} \sin f_1} + \frac{1}{\cos f_2 + iA\sqrt{1+\bar{e}_x} \sin f_2} \quad (38)$$

$$\bar{u}_\theta = -\frac{1}{\cos f_1 + iA\sqrt{1-\bar{e}_x} \sin f_1} + \frac{1}{\cos f_2 + iA\sqrt{1+\bar{e}_x} \sin f_2} \quad (39)$$

ここで、

$A = (\rho_1 V_{x1}) / (\rho_2 V_{x2})$: 波動インピーダンス比、

ω : 円振動数、 H : 第1層の層厚、 V_{x1} : 第1層のS波速度、 V_{x2} : 第2層のS波速度、

ρ_1 : 第1層の質量密度、 ρ_2 : 第2層の質量密度、 \bar{e}_x : 第1層の偏心比

$$f_1 = \frac{\omega H}{V_{x1} \sqrt{1-\bar{e}_x}} \quad f_2 = \frac{\omega H}{V_{x1} \sqrt{1+\bar{e}_x}}$$

(38)式、(39)式の各項は、連成を考慮しない通常の1次元波動論を解いたときの2層地盤の応答とほとんど同じ形をしている。第1項は特性速度 $\Gamma_1 = V_{x1} \sqrt{1-\bar{e}_x}$ 、第2項は特性速度 $\Gamma_2 = V_{x1} \sqrt{1+\bar{e}_x}$ に関する式となっており、それぞれを1次モード項、2次モード項と呼ぶこととする。各項の応答のピーク値は \bar{e}_x によって変動し、 \bar{e}_x が大きくなるほど1次モード項が2次モード項よりも寄与が大きくなる。(38)式、(39)式より、1次モード項のピークは、2次モード項の持つピークよりも $\sqrt{1+\bar{e}_x}/\sqrt{1-\bar{e}_x}$ 倍大きくなる。

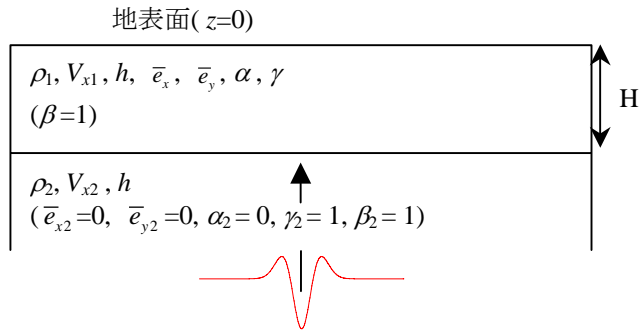


図4 2層地盤モデル

図5は、y方向の単位振幅入射に対して、第1層と第2層の波動インピーダンス比と偏心率(\bar{e}_x)を変化させたときのy方向の地表面応答（伝達関数）を求めたものである。波動インピーダンス比は1/1.5及び1/5.0としている（波動インピーダンス比については、上層が下層より軟らかい場合を考え、 $A \leq 1$ の範囲で検討を行うものとする）。第1層の層厚 H は50m、第1層のS波速度 V_{x1} は400m/s、質量密度 ρ_1 、 ρ_2 は上下層ともに 2.0g/cm^3 としている。減衰は $h=3\%$ としている。表1には上記の条件による場合の特性速度と、特性速度から得られる1次卓越振動数を示す。波動インピーダンス比が大きい場合（ $A=1/1.5$ 、図5(a)）、1次モード項によるピークが表1に対応する振動数で現れているが、2次モード項によるピークはほとんど目立たないことがわかる。逆に、波動インピーダンス比が小さい場合（ $A=1/5.0$ 、図5(b)）、2次モード項のピークも卓越し伝達関数のピークがスプリッティングした形状の伝達関数が見られる。この現象は、Ghayamghamian and Motosaka(2003)¹⁴⁾の検討でも確認されている。このように、波動インピーダンス比が大きい場合には、1次モード項の影響が相対的に強くなり、偏心率なしの場合よりも見かけ上長周期側にピークが動いたような伝達関数となる。

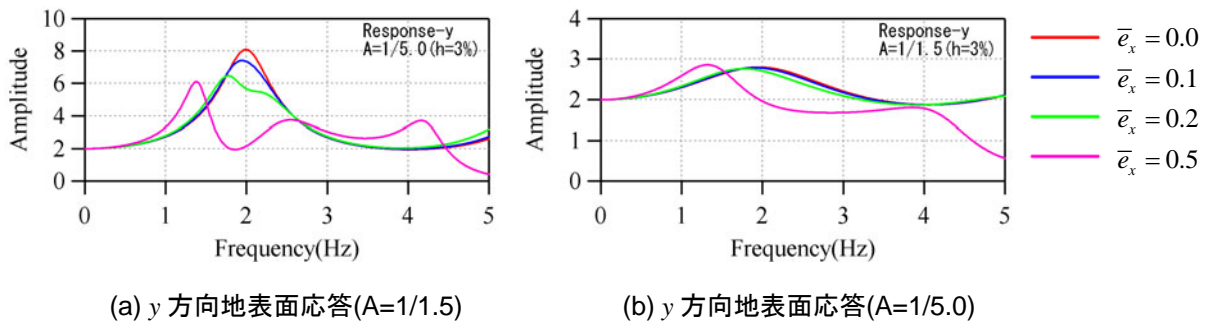
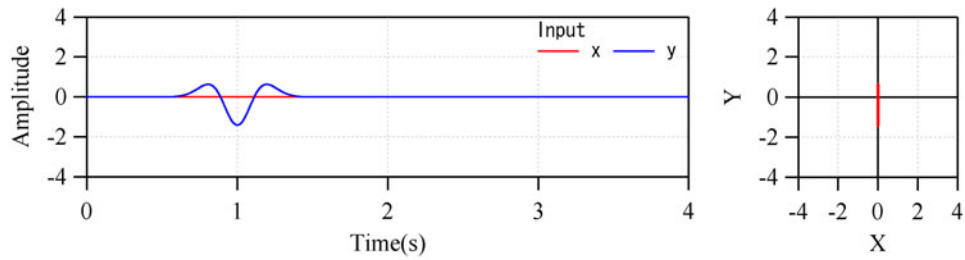


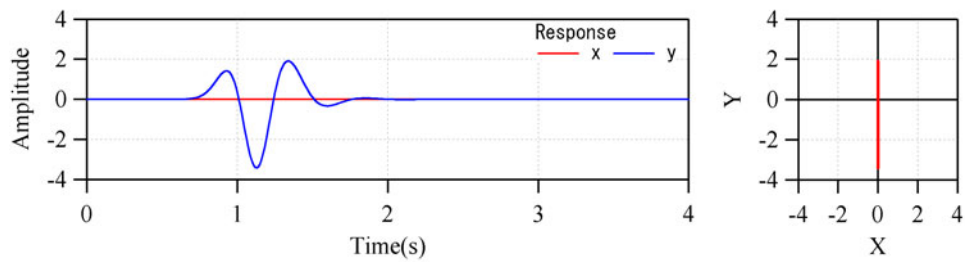
図5 y方向の単位入力に対する地表面応答（伝達関数）

表1 偏心率の変化による特性速度と1次卓越振動数 ($\Gamma/4H$)

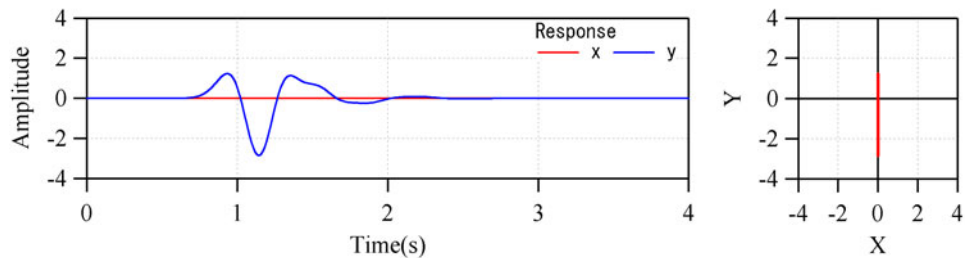
	1次モード項		2次モード項	
	特性速度 (m/s)	卓越振動数 (Hz)	特性速度 (m/s)	卓越振動数 (Hz)
$\bar{e}_x = 0.0$	400	2	400	2
$\bar{e}_x = 0.1$	380	1.9	420	2.1
$\bar{e}_x = 0.2$	358	1.8	439	2.19
$\bar{e}_x = 0.5$	283	1.41	490	2.45



(a) 入射波

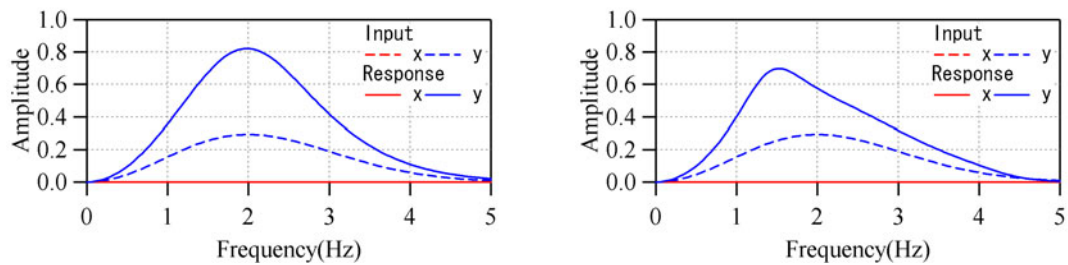


(b) 応答：偏心なし



(c) 応答： $\bar{e}_x=0.5$

図6 波形とオービット（一軸偏心、 $A=1/1.5$ ）



(a) 偏心なし

(b) $\bar{e}_x=0.5$

図7 入射波と応答のフーリエスペクトル（一軸偏心、 $A=1/1.5$ ）

以上の検討を踏まえ、2層地盤に Ricker 波を入射した場合の応答波形とオービットについて検討を行う。図4に示される地盤モデルの第2層に図6(a)の Ricker 波を入射し、地表面の応答波形とそのオービットを求める。Ricker 波は次式により求めている。

$$f(t) = (2\pi^2 f_c^2 t^2 - 1) \exp(-\pi^2 f_c^2 t^2) \quad (40)$$

t は時間であり、 f_c はRicker波の卓越振動数である。図4の第1層の1次卓越振動数は2Hzとなっており、入射Ricker波の卓越振動数も2Hzに設定している。波動インピーダンス比 A は1/1.5とする（第2層のS

波速度=600m/s)。図 6(a)を見ても分かるように、y方向のみの入射としており、オービットは線状である。これは、前述のように遠方からFar-Field S波がある地点の地盤に入射した状態に相当する。

まず一軸偏心の場合の波形の変化をみるため、偏心なしの場合と $\bar{e}_x=0.5$ の場合について求めた地表面応答波形とオービットを図 6(b)及び(c)に示す。一軸偏心状態のため、オービットが膨らむ(楕円形や円形になる)ことはないが、偏心のある場合とない場合を比較すると、偏心がある場合の方が応答がやや長周期化している。これは図 7に示す、地表面応答のフーリエスペクトルを見ると明らかである。波動インピーダンス比が1/1.5であるので、図 5の伝達関数の検討で示したように1次モード項が卓越し、2次モード項はほとんど現れていないことがわかる。当然、波動インピーダンス比が小さくなれば、2次モード項の影響も波形に現れる。

次に、図 6、図 7の検討と同じ地盤条件で、二軸偏心状態になったときの地表面応答とオービット特性について検討した。図 8(a)に示されるように、今度はx方向とy方向に全く同じRicker波を入射し(線状のオービットが斜め45度方向に向く)、剛心をx軸上に置くことで二軸偏心状態とした。 $\bar{e}_x=0.5$ としたときの応答を図 8(b)に示す。図 9には入射波と地表面応答のフーリエスペクトルを示す。この場合、重心と剛心を結ぶ線(重心-剛心線)はx軸となっているが、x方向の応答には偏心のない場合の応答が現れている。一方、y方向は重心-剛心線と直角方向であり、地表面応答には、一軸偏心の検討で示されたような見かけ上長周期化した応答が現れていることがわかる。その結果、x方向とy方向の卓越振動数がずれることによって位相ずれが発生し、オービットが楕円状になっていることがわかる。オービットがどの程度膨らむか(楕円から円に近づくか)は、直交する方向の卓越振動数のずれがどの程度大きいかにによって決まり、卓越振動数のずれそのものは \bar{e}_x によって決まると考えられる。

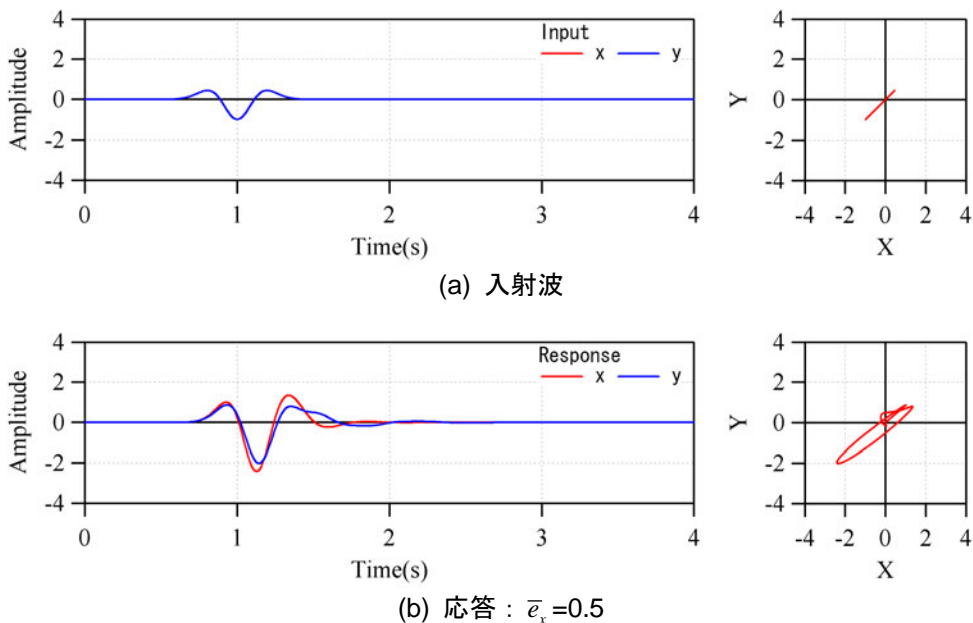


図 8 波形とオービット (二軸偏心、 $A=1/1.5$)

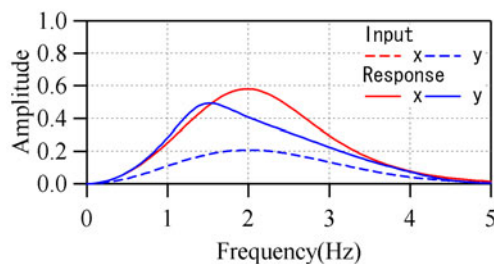


図 9 入射波と応答のフーリエスペクトル (二軸偏心、 $A=1/1.5$)

ここまでの検討では、位相ずれのない線状のオービットを示す波形を入力波としてきたが、図 10(a)に示すように入力波の時点で既に位相ずれを持たせた波形を入射した。これは、震源特性の影響、あるいは伝播の過程で既にオービットに位相差が生じた波形が、ある地点の地盤に入射したことを想定している。図 10(b)には $\bar{e}_x=0.5$ としたときの、図 10(c)には $\bar{e}_y=0.5$ としたときの地表面応答を示す。このように、線状のオービットが入射したときと異なり、オービットが膨らむ場合と、逆に縮む（線状に近づく）場合が存在する。図 10(a)の入力波は x 方向が最初に到達し y 方向が遅れてくることで位相ずれが発生し、オービットが楕円状になっている波形である。 $\bar{e}_x=0.5$ の場合（図 10(b)）は、遅れてきた方向の波、つまり y 方向の波が \bar{e}_x の影響を受けて卓越振動数が変化（見かけ上長周期化）するので、オービットはさらに膨らむが、逆に y 方向に偏心を持つ場合（図 10(c)）は、 x 方向の波が偏心の影響を受ける。これにより、入力時点で存在した位相ずれが、 x 方向の波が長周期化することによりキャンセルさせるため、オービットが縮む現象が起こる。

以上の検討のように、オービットが地盤の偏心の影響を受けて変化する場合は、入力波の卓越している方向やオービット特性、偏心位置との関係により、楕円形や円形となったり、あるいは逆に縮むことで線状のオービットとなるなどの変化を起こすことがわかる。

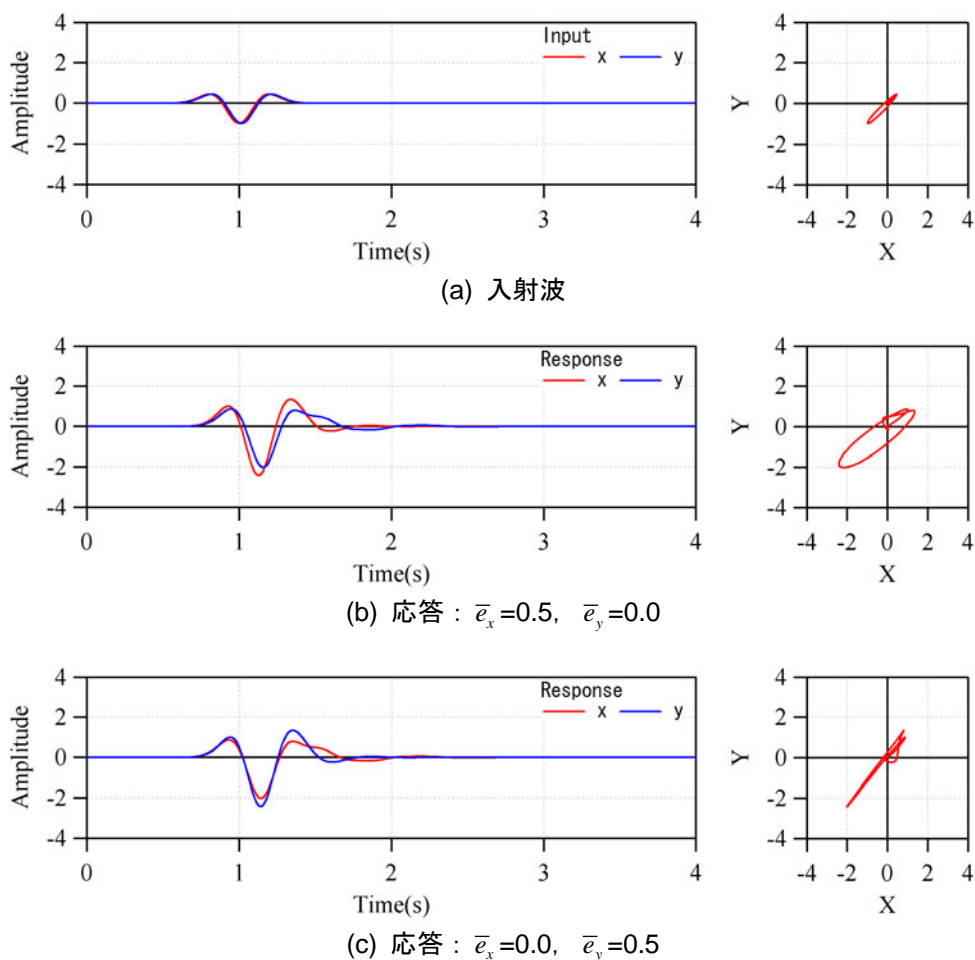


図 10 波形とオービット（二軸偏心、 $A=1/1.5$ 、入射波に位相ずれを含む場合）

3.2 並進成分の連成を有する地盤モデルによる応答のオービット特性

次に、水平 2 方向の並進成分(x, y)の連成パラメータ α が地表面応答とそのオービット特性に及ぼす影

響について検討する。x方向の入射波 \bar{u}_{xE} 、y方向の入射波 \bar{u}_{yE} が下層に入射し、偏心比を無視($\bar{e}_x = \bar{e}_y = 0$)としたときの2層地盤の地表面応答は、3.1節のときと同様な手順で式を導くと、次のように表される(詳しい誘導過程は割愛する)。

$$\bar{u}_x = \frac{\bar{u}_{xE} + \bar{u}_{yE}}{\cos f_1 + iA \cdot \sqrt{1-\alpha} \cdot \sin f_1} + \frac{\bar{u}_{xE} - \bar{u}_{yE}}{\cos f_2 + iA \cdot \sqrt{1+\alpha} \cdot \sin f_2} \quad (41)$$

$$\bar{u}_y = \frac{\bar{u}_{xE} + \bar{u}_{yE}}{\cos f_1 + iA \cdot \sqrt{1-\alpha} \cdot \sin f_1} - \frac{\bar{u}_{xE} - \bar{u}_{yE}}{\cos f_2 + iA \cdot \sqrt{1+\alpha} \cdot \sin f_2} \quad (42)$$

ここで、

$A = (\rho_1 V_{x1}) / (\rho_2 V_{x2})$: 波動インピーダンス比、

ω : 円振動数、 H : 第1層の層厚、 V_{x1} : 第1層のS波速度、 V_{x2} : 第2層のS波速度、

ρ_1 : 第1層の質量密度、 ρ_2 : 第2層の質量密度、 α : 第1層のx-y連成に関する連成パラメータ

$$f_1 = \frac{\omega H}{V_{x1} \sqrt{1-\alpha}} \quad f_2 = \frac{\omega H}{V_{x1} \sqrt{1+\alpha}}$$

\bar{u}_{xE} 、 \bar{u}_{yE} のどちらかを0とすれば、(41)式、(42)式の形は記号を変えただけで(38)式、(39)式とほとんど同じ形の式となる。3.1節と同様に第1項を1次モード項、第2項を2次モード項と呼ぶことにすると、 $\bar{u}_{xE} = \bar{u}_{yE}$ のときは1次モード項のみの伝達関数で表され、x方向とy方向の応答は等しくなることがわかる。つまり、オービットは線状になる。 $\bar{u}_{xE} = -\bar{u}_{yE}$ のとき、2次モード項のみの伝達関数で表され、この場合もx方向とy方向の応答は符号が逆になることを除けば等しくなる。それ以外の場合はx方向とy方向の応答は異なり、オービットに変化が現れることが予測される。1次モード項、2次モード項のピーク値は、波動インピーダンス比と連成パラメータ α によって決まり、1次モード項のピーク値の方が2次モード項のピーク値よりも $\sqrt{1+\alpha}/\sqrt{1-\alpha}$ 倍となることがわかる。

偏心比の検討のときと同様に、Ricker波入射に対する2層地盤の地表面応答のオービットについて検討を行った。地盤条件は3.1節と同様に、 $H=50\text{m}$ 、 $V_{x1}=400\text{m/s}$ 、 $\rho_1, \rho_2 = 2.0\text{g/cm}^3$ 、 $h=3\%$ とした。波動インピーダンスは、 $A=1/1.5$ としている。入力波はy方向のみ($\bar{u}_{xE}=0$ 、 $\bar{u}_{yE}=1$)とし、 $\alpha=0.1$ 、 0.5 の場合についての応答を求めた。図11に応答波形とオービットを、図12にフーリエスペクトルを示す。この場合、 α の値が大きくなるほど、オービットが膨らんでいることが分かる。x方向の波形は、y方向の入力により生成された応答であるが、波形の形状を見ると、y方向の振幅が大きくなるとx方向が小さくなり、逆にx方向が大きくなるとy方向が小さくなっていることが分かる。そこで、 $\alpha=0.1$ と $\alpha=0.5$ の場合について、y方向単位入力ときの伝達関数とy方向に対するx方向の位相差(xの位相角-yの位相角)を振動数ごとにプロットした(図13)。ここで、横軸は第1層の層厚 H と第1層のS波速度 V_{x1} により無次元化された振動数($\omega H/V_{x1}$)としており、減衰は0%としている。

伝達関数を見ると、y方向入射のみにも関わらず、x方向がy方向と同程度の振幅、あるいは大きくなっている振動数帯域が現れるのが特徴的である(図13(b))。また、波動インピーダンス比が小さいときは、3.1節と同様にピークのスプリットングが見られる(図13(c))。位相差については、1次卓越振動数より低振動数側では位相差は小さい。 $\alpha=0.1$ のとき(図13(a),(c))、より高振動数側では位相差は-90度を中心に変動しているような形となっている。 $\alpha=0.5$ のとき(図13(b))は、xあるいはy方向の振幅が大きくなるところ($\omega H/V=5,10$ 付近)を境に位相差の符号が逆となっている。位相差の符号が反転するのは、オービットの回る軌跡が逆になることを意味している。波動インピーダンス比が小さいときは位相差の変動幅が大きくなる(図13(c))。x方向とy方向の振幅が同程度で、さらに位相差が±90度となるときに、オービットが最も円形に近づくと考えられる。

今、y方向のみの入射に対する応答を扱ったが、それ以外の任意の方向の応答性状を調べるために、y方向のRicker波を図14左図の①、②に示すような方向に回転して入射したときのオービットと位相差

を求めたものを図 14 に示す。(a)が入力波を y 軸から x 軸に向かって 15 度回転させたとき、(b)が 30 度回転させたときであるが、y 軸から遠ざかるに従ってオービットが縮まり、位相差も小さくなっていくことがわかる。回転角が 45 度 (図 14 左図の点線) になったときは、前述のように $\bar{u}_{xE} = \bar{u}_{yE}$ の場合となるので、地表面の応答も一致し、オービットは線状になる。よって、(3)式で示されるようなシステムを持つ地盤の場合、オービットの形状は入射方向に依存し、x 軸上のみあるいは y 軸上のみに入射した場合 (x 軸あるいは y 軸に主軸を持つ場合) に位相差が ± 90 度に近づくため、オービットが円形になると考えられる。

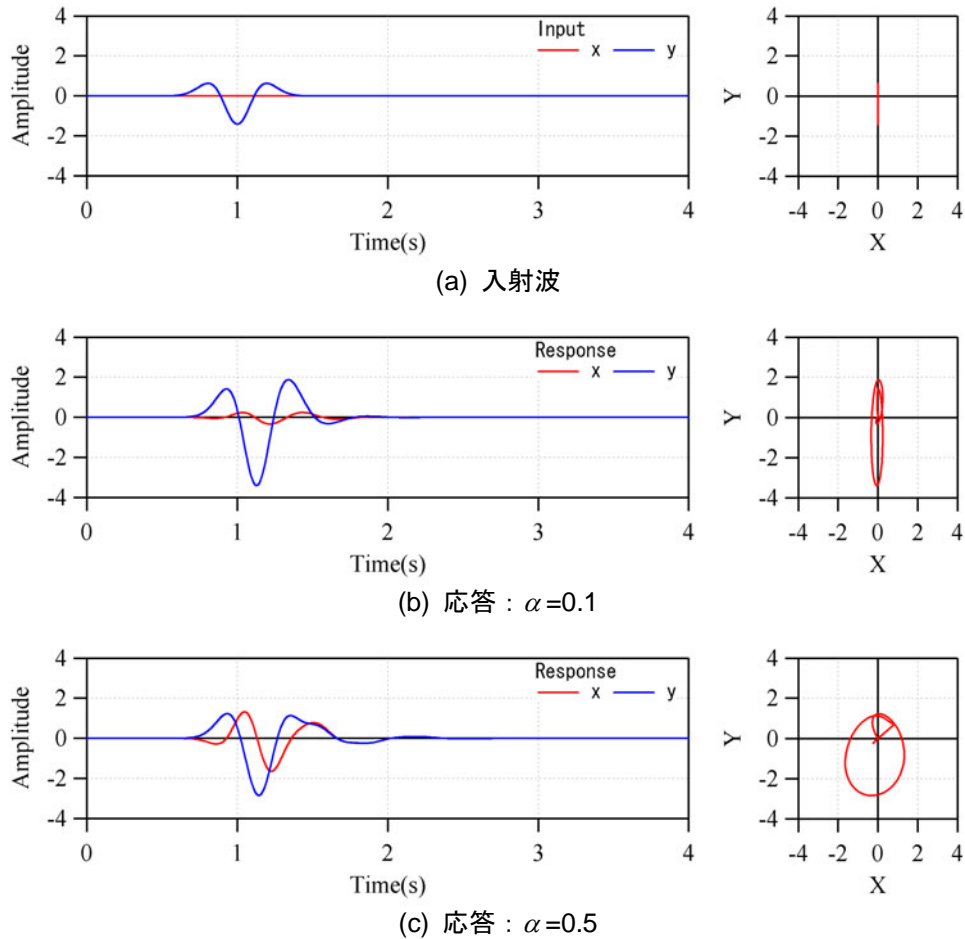


図 11 波形とオービット (並進成分連成、 $A=1/1.5$)

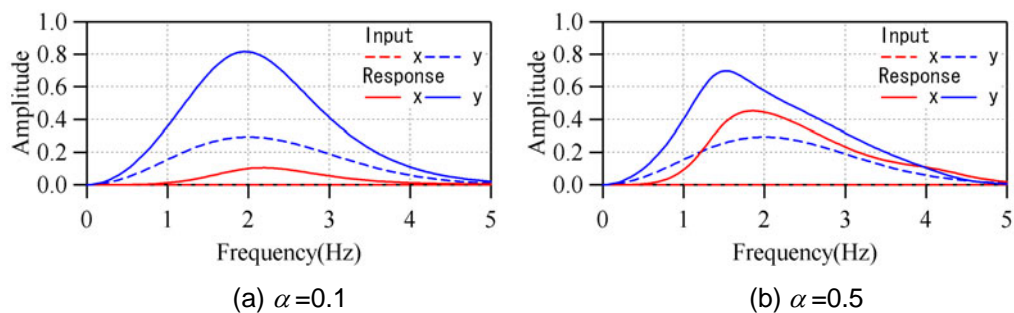


図 12 入射波と応答のフーリエスペクトル (並進成分連成、 $A=1/1.5$)

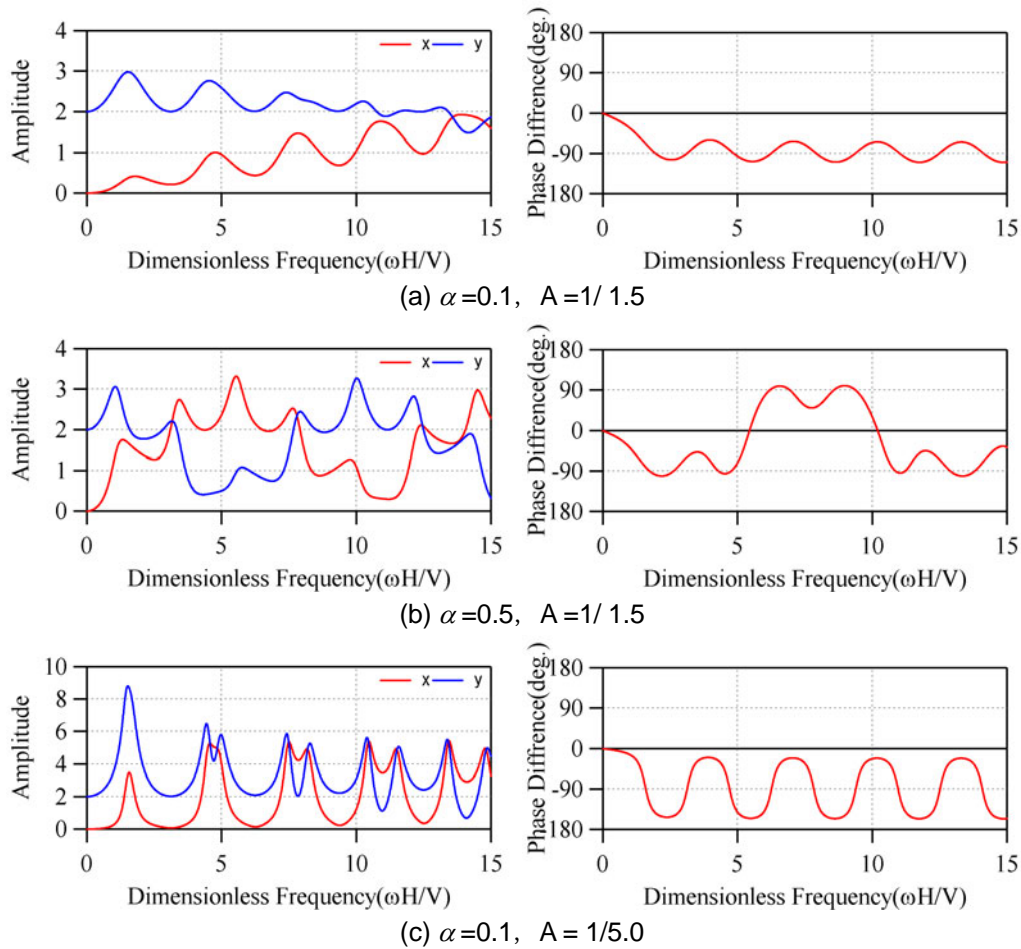


図 13 水平 2 方向連成の影響による 2 層地盤応答と位相差

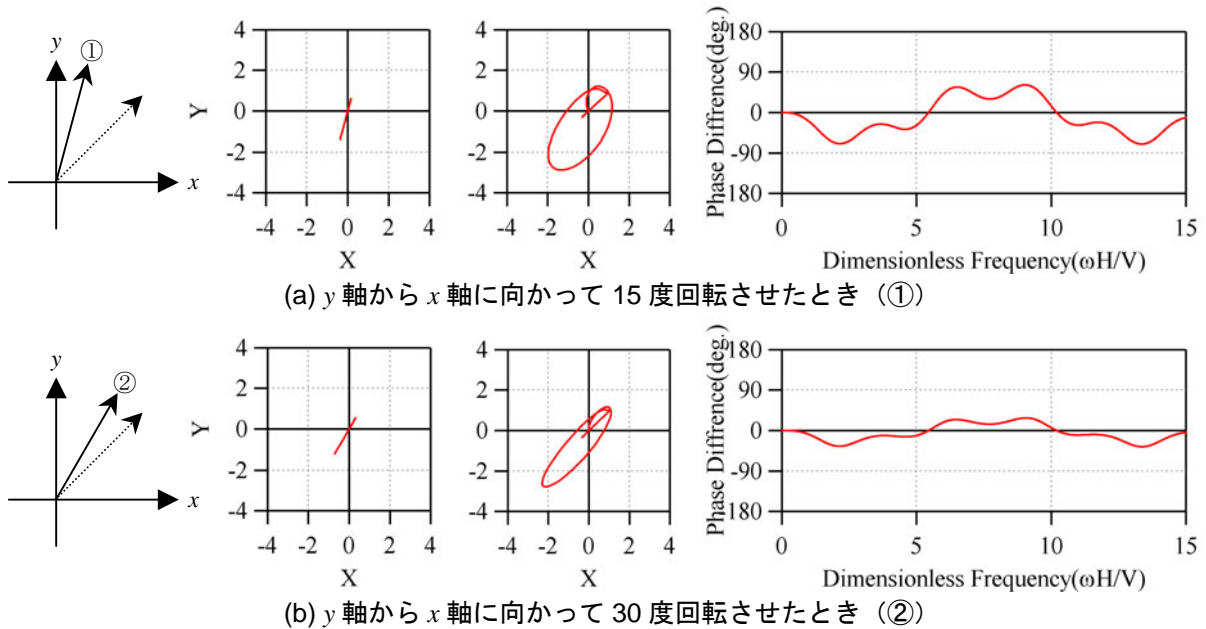


図 14 任意の方向の入力に対するオービットと位相差 ($\alpha=0.5, A=1/1.5$)
 左から入力方向、入力波のオービット、応答波のオービット、位相差

3.3 S波速度比 γ とオービット特性の関係

γ は x 方向に対する y 方向のS波速度の比であり、連成とは異なるパラメータではあるが、オービットに与える影響を調べた。 γ は媒質の伝播速度に対する異方性を与えていることに相当する。2層地盤モデルにおいて、全ての連成パラメータを0（第1層、第2層ともに $\alpha=\bar{e}_x=\bar{e}_y=0$ ）とし、 $\gamma=0.95$ のときに対して層厚を変えたとき（ $H=50\text{m}, 200\text{m}$ ）の応答とオービットを図15に示す。その他の地盤条件は3.1節、3.2節と同じとしている。 γ は距離が大きくなるほど、地表面への到達時間に差がつくため、波形がずれてオービットを変化させていることがわかる。また、3.1節や3.2節の検討とは異なり、周期は変化しているものの、 γ の値が1に近いので y 方向の波形の形状にほとんど変化が現れていないことがわかる。

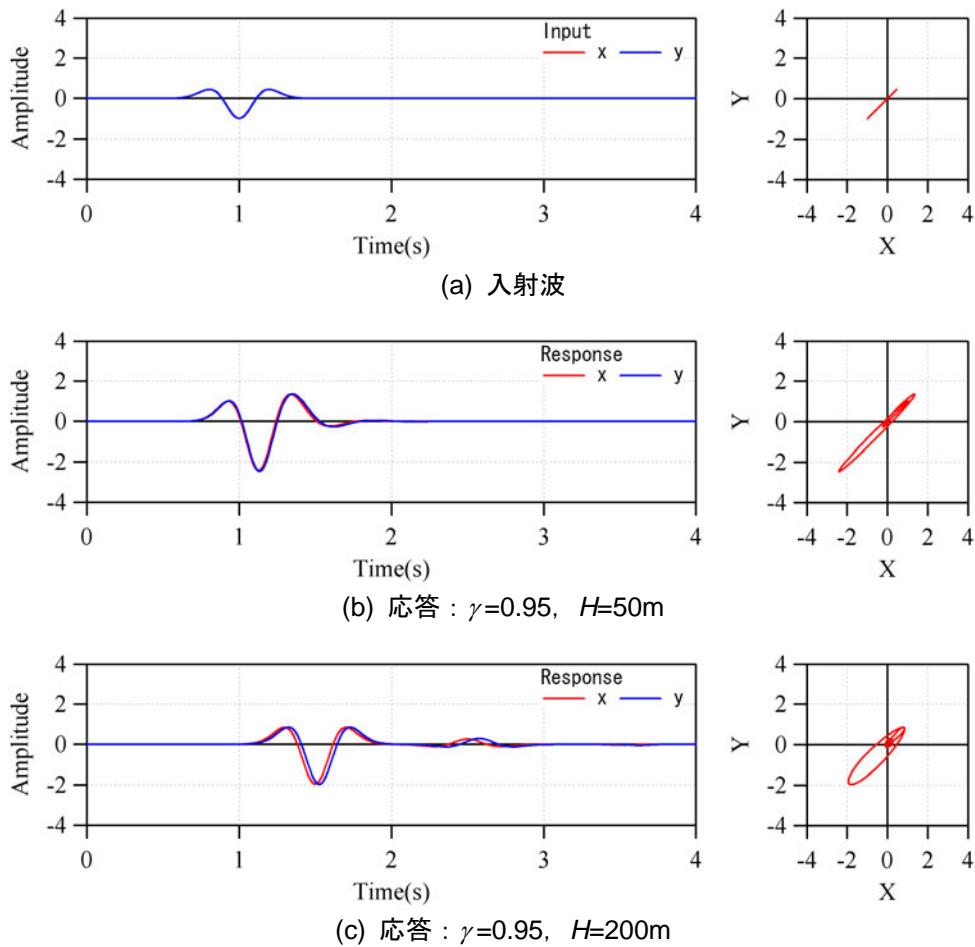


図15 波形とオービット（ $A=1/1.5$ 、S波速度比 γ を変化させたとき）

4. 地盤物性と連成パラメータの関係に関する考察

偏心比 \bar{e}_x, \bar{e}_y については、地盤物性の不整形性から直接連成パラメータの意味を考えると、次のように考えることができる。通常の構造物のねじれモデルにおける偏心距離の定義から、連続極限の場合の偏心距離の定義式を導くと、偏心距離 e_x は次のように表される。

$$e_x = \frac{\int \mu_y(x) dx}{\int \mu_y(x) dx} \quad (43)$$

y方向についても(43)式の記号が変わるだけで同じ式となる。もし、 μ_x, μ_y が定数であれば、剛心は重心(座標原点を重心におけば偏心距離は0)に一致する。 e_x, e_y を回転半径 i_r で除することで、偏心比 \bar{e}_x, \bar{e}_y が得られる。

例えば、図16のようなある境界($x=x_b$)で媒質の性質が異なる連続体を考える。図16は、x方向に偏心をもつ一軸偏心の地盤といえる。

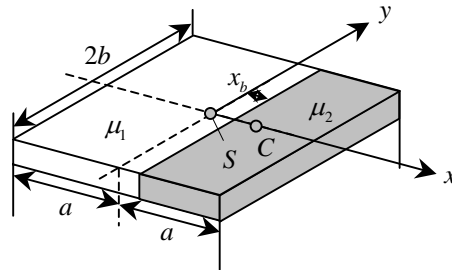


図16 x方向に物性が偏った地盤

このとき、

$$\mu_y(x) = \begin{cases} \mu_1 & x < x_b \\ \mu_2 & x \geq x_b \end{cases} \quad (44)$$

となるので、定義に従って偏心距離を求めると、次のように表される。

$$e_x = \frac{\int_{-a}^a \mu_y(x) x dx}{\int_{-a}^a \mu_y(x) dx} = (a - x_b) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} R_a + 1 \right) \cdot \frac{1}{2} \left\{ \frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right\} \quad (45)$$

ここで $R_a = (a - x_b)/(a + x_b)$ は、図16に示す領域を μ_1, μ_2 の領域が占める面積の比である。y方向に物性の偏りがある場合でも同様な考え方ができる。

一方、領域全体では物性の偏りがない(重心と剛心が一致する)場合においても、水平2方向で異なる波動が生成される場合もある。例えば図17のように領域内の媒質に不均質性が含まれる場合や、水平2方向で剛性が異なり、座標を地盤の主軸方向から傾けたような不整形地盤の場合などが挙げられる。このような場合、散乱効果などにより異なる方向の波動が励起される¹⁸⁾と考えられる。このときの入射波の振動方向と直交する方向の応答の度合は、連成パラメータ α で表現することが可能であると思われる。

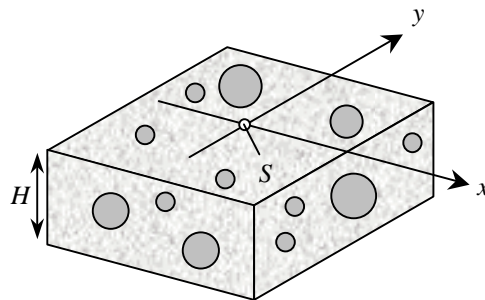


図17 領域全体に偏心がない地盤例(不均質地盤)

5. まとめ

本研究では、水平2方向連成を有する地盤モデルを用いて地表面応答のオービット特性に成分間の連成パラメータが及ぼす影響について検討を行った。オービットが楕円あるいは円を描くときは、水平2方向成分の波形に何らかの位相ずれが起こっているものと考えられるが、成分間の各連成パラメータがそれぞれ下記のようにオービット特性に影響することが明らかとなった。

1) 偏心を有する場合（並進成分と回転成分の連成が存在する場合）、図8のように重心-剛心線と直交する成分の卓越周期が変化し、位相ずれが生じることによりオービットに変化を及ぼす。位相ずれの度合は、並進と回転の連成を表すパラメータである偏心比 \bar{e}_x 、 \bar{e}_y に影響される。波動インピーダンス比が小さい場合は、2次モード項の影響が小さく、1次モード項の影響が支配的となり、応答波形は見かけ上長周期化する。また、図10に見られるように入力の時点で既に位相ずれが含まれている場合、偏心位置との関係によってオービットが膨らむだけでなく、縮むこともあり得る。

2) 並進成分間の連成の影響は(3)式の α によって表される。 $\alpha \neq 0$ のとき、図11などに見られるように、水平2方向の応答波形は位相がずれたものとなり、オービットが楕円形あるいは円形となる。位相ずれの大きさは、入射方向に大きく依存する。また、 α の値によってどの振動数において各方向の応答が大きくなるかが決まる。

3) S波速度比 γ は、当然ではあるが、伝播距離が長いほど波形に到達時間差を生じさせ、結果的にオービットに変化を及ぼす。

今後は、2節において考察した代表変位による評価が概ね計算点の周辺の挙動を表現できている範囲はどの程度か、あるいは連成パラメータは現実の地盤においてどの程度の値となっているかについて、観測記録や3次元解析の結果と比較しながら、詳しく検討していく予定である。

なお、本研究で行った検討は、地盤だけではなく構造物の応答にも適用ができる。例えば、下層を剛基盤と置けば、基礎固定の構造物の応答を考えることに相当する。下層を弾性地盤と考えたときは、相互作用問題に適用が可能であると思われる。

謝辞

3名の査読者には、非常に有益なご意見を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：多次元入力地震動と構造物の応答、1998年。
- 2) Applied Technology Council：Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, ATC 3-06, U.S. National Bureau of Standards, 1978.
- 3) 日本建築センター：高層建築耐震計算指針、1982年。
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局型耐震設計指針（案）・同解説、1988年（案）、1999年（制定）。
- 5) 小川淳二、渋谷純一、阿部良洋、星道夫：二軸の水平力を受けるPCa柱及びRC柱の破壊挙動に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第460号、1994年、pp.103-112.
- 6) 井上範夫：二軸曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート柱の3次元弾塑性FEM解析、日本建築学会構造系論文集、第350号、1985年、pp.67-76.
- 7) 小野英雄、北田義夫、新谷耕平、西川孝夫：水平2方向同時加力を受けるRC造立体耐震壁のせん断耐力・変形性能に関する解析的研究、日本建築学会構造系論文集、第585号、2004年、pp.139-146.
- 8) 久保哲夫：三次元地震動の模擬作成に関する研究（その1）、日本建築学会論文報告集、第265号、1978年、pp.81-92.
- 9) 野津厚、井合進、Wilfred D.Iwan：震源近傍の地震動の方向性に関する研究とその応用、港湾技術研究所報告、第40巻、第1号、2001年、pp.107-167.

- 10) 澤田純男、仲村万紀子、野津厚：断層近傍における地震動の粒子軌跡特性、土木学会第 57 回年次学術講演会、2002 年。
- 11) 武藤清、菅野忠、宮村正光、花島実、源栄正人：1978 年の宮城県沖地震で観測された波形の分析 第 1 報 近接 3 地点の波形比較、日本建築学会構造系論文集、291、1980 年、pp.45-52.
- 12) 和泉正哲、栗田哲、飯塚節夫、佐藤智美、相羽朋紀：統計解析に基づく地震波の多次元波動伝播特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 398 号、1989 年、pp.31-41.
- 13) Paolucci R. : Numerical evaluation of the effect of cross-coupling of different components of ground motion in site response analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, 1999, pp.877-887.
- 14) Mohammad R. Ghayamghamian and Masato Motosaka : The effects of torsion and motion coupling in site response estimation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 2003, pp.691-709.
- 15) 源栄正人、竹中宏明、柴田明德：直下型地震動の方向性と構造物の水平 2 方向連成応答、第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム、1997 年、pp.159-162.
- 16) 竹中宏明：直下型地震における地震動特性と構造物の応答に関する研究、平成 9 年度東北大学修士学位論文、1998 年。
- 17) Crampin, S.,: Seismic-wave propagation through a cracked solid : polarization as a possible dilatancy diagnostic, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 53, 1978, pp.467-496.
- 18) Sato, H. and M. Fehler : Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous earth, Springer-Verlag, New York, 1998.

(受理：2006 年 10 月 3 日)
(掲載決定：2007 年 1 月 22 日)

Particle Orbit Characteristics of Site Response Considering Horizontal Motion Coupling

YAMAMOTO Yu¹⁾, MOTOSAKA Masato²⁾ and OHNO Susumu³⁾

- 1) Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University
- 2) Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.
- 3) Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

ABSTRACT

Ground motion inputs to building structures are multidimensional and cause complex responses. In this paper, particle orbit characteristics of horizontal ground motion are described. A 2-layer subsurface structure model is used for analysis based on the 1-dimensional wave propagation theory. Shear torsional motions and motion coupling between translational and torsional motion are considered. The site response and the horizontal particle orbit of ground motion are characterized by the coupling parameters. The effects of the coupling parameters to the ground motion are investigated through a theoretical approach and numerical experiments.

Keywords : Particle Orbit, Ground Motion, Subsurface Structure, Horizontal Motion Coupling