

不整形地盤の地震応答における 短周期表面波の工学的重要性に関する研究

神山 眞¹・佐藤 勉²・鈴木猛康³

¹正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982-0381 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

²正会員 工修 (株) システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台3-25-3)

³正会員 工博 中央復建コンサルタンツ (株) 東京支社 (〒103-0011 東京都日本橋大伝馬町2-11)

不整形地盤の地震応答における短周期表面波の工学的重要性が応答シミュレーションとアレー観測による実測に基づき論ぜられる。短周期表面波の工学的重要性は加速度などの震動の特異増幅とひずみや応力などのテンソル挙動に表れることから、これらの解析に有効な擬似スペクトル法が地震応答シミュレーション手法として用いられる。最初に、典型的な不整形モデル地盤の応答シミュレーションから震動増幅と地盤ひずみ挙動が短周期表面波の発生に密接に関係することが明らかにされる。次に、アレー観測が実施されている実際の不整形地盤における地震動記録にみられる震動増幅と地盤ひずみが応答シミュレーションと比較され、擬似スペクトル法の有効性が示されると同時に、短周期表面波の重要性が論証される。

Key Words : short-period surface waves, irregular ground, earthquake response, acceleration strain, pseud-spectral method, array observation

1. はじめに

地盤構造が水平方向に不規則ないわゆる不整形地盤では地震被害が多く発生することが過去の被害経験から知られている。この機構を明らかにするため、主に理論的な応答シミュレーションにより不整形地盤の地震時挙動に関する非常に多くの研究がなされてきた¹⁾。このような研究を通して、不整形地盤では表面波が二次的に生成され、これが不整形地盤における特異な地震動の大きな原因であることが明らかにされている²⁾。

これまでの不整形地盤に関する研究では堆積盆地のような平野の規模の不整形を対象に、周期 1~2 秒から 10 数秒の「やや長周期」とよばれる周期帯における地震動振幅(加速度, 速度, 変位)の大きさを論じたものが圧倒的に多く、この周期帯での地震動振幅の変動を説明するカギとして表面波の励起と伝播が主に議論されてきたと言える。逆に、工学で一般に問題となる周期 0.1 秒~2 秒程度の周期帯域での不整形地盤の地震動に関する研究は相対的に少ない。やや長周期帯は地震学と地震工学の狭間で従来から盲点となってきた帯域であり、その意味からそのよ

うな周期帯域の地震動問題が明らかにされてきたことの意義は大きい。しかし、一方では工学で主流の周期帯域(周期 0.1 秒~2 秒程度)での不整形地盤の研究が相対的に少ない事実はこの帯域での規模の構造物が大半であることや我が国では深さ数 10m の規模の地盤構造においても不整形が著しいことなどを考えると看過できないことと思われる。

そもそも、不整形地盤の地震応答は地盤構造の空間的な変化に対応して地震動が大幅に空間的な変動を示すことにその特徴がある。この場合の地震動の空間的な変動は原理的に大別して二つの工学的課題を提起する。一つは震動振幅の絶対的な大きさの空間的な分布であり、他は震動振幅の空間的な変動に伴うひずみの大きさの分布である。前者は 1 階のテンソル量からの問題、後者は 2 階のテンソル量からの問題ととらえることができる。上述のように既往の研究の大半は前者の問題提起に対応するものと考えられる。これに対して、不整形地盤における震害解明に照らして後者の問題を扱った研究は筆者らの知るかぎり相対的に少ない。周知のように土木構造物は平面的に広がりをもつものが大半であることを考えると、この分野の耐震問題では後者の視点にたつ

た不整形地盤における地震応答がむしろ肝要のように思われる。例えば、地盤の液化化や土構造物、地下ライフラインなどの地震被害が地盤の不整形地点で多い現象³⁾は後者の視点を導入しないかぎり十分な説明は困難と考えられる。さらに言えば、震動振幅の絶対的な大きさが不整形地盤の主たる被害要因とする既往の研究の根幹をなしてきた考えも場合によっては後者の視点を加味して再考する必要もでてくる。

以上のような不整形地盤の地震応答においてやや長周期での地震動振幅に関する研究が主流であったことと空間微分の視点にたった不整形地盤の地震応答研究がなされてこなかったことは密接に関係していると思われる。すなわち、表面波の分散特性を参酌すれば、やや長周期での震動変位の空間微分(ひずみ)は小さいという論理が背景にあるものと考えられる。このことは、逆に地震動振幅の空間微分を重要視する立場にたてば、やや長周期よりずっと短い周期で、かつ平野の規模よりずっと小さい寸法の不整形地盤での表面波の挙動を中心課題とすべきことを意味する。ここでは、地震動振幅の空間微分に占める重要性を強調して、数10m規模の不整形地盤の存在により生成される周期0.1秒～2秒程度の周期帯での表面波を「短周期表面波」とよぼう。

本研究は不整形地盤における震害解明の一助とするため、このような短周期表面波のダイナミックスを理論的な数値シミュレーションとアレー強震観測に基づく実測により考察したものである。その際の数値シミュレーションの手法として、本研究では震害メカニズム考察の観点から短周期表面波のダイナミックスを明らかにすることを重要視して、加速度、速度、変位などのベクトル量はもちろん、ひずみ、応力などのテンソル量の算定が自動的にアルゴリズムに組み込まれ、かつ時間領域の応答数値シミュレーション法である擬似スペクトル法 (Pseudo-Spectral Method, PSM) を用いる。また、本研究では高密度アレー観測システム KASSEM による実測記録を用いて不整形地盤での短周期表面波の存在を確認するとともに、それに関連する地盤ひずみの算定を試みる。さらに、これらのアレー観測による実測加速度記録およびひずみ記録を当該地点の不整形地盤を考慮した理論応答シミュレーションによる加速度波形、ひずみ波形と比較して、実測、理論の両面から短周期表面波のダイナミックスを考察する。

2. 理論応答シミュレーション

本研究では短周期表面波の基本的な特性を明らかにするため二次元不整形地盤の地震応答を対象とす

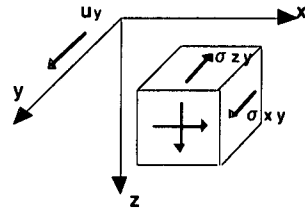


図-1 座標系 (面外震動問題)

る。二次元における地震応答では面外震動問題 (SH波問題) と面内震動問題 (P-SV波問題) が別途に扱える。以下では両者の問題に適用される擬似スペクトル法 (Pseudo-Spectral Method, PSM) のアルゴリズム、境界処理などについて述べる。

(1) Pseudo-Spectral Method

擬似スペクトル法 (Pseudo-Spectral Method, PSM) は地盤震動を支配する運動方程式の空間微分をフーリエ変換およびフーリエ逆変換の利用により空間領域から波数領域に変換して解くとともに、時間微分を中央差分で近似して、各種の運動パラメータの時刻歴を時々刻々と求める数値計算法である。

PSMはKosloff and Baysal⁴⁾, Kosloff et al.⁵⁾が地震波動場の時間領域での解を求めるために用いて以来、多くの研究者⁶⁾により研究されてきた。当初は、物理探査を専門とする研究者によって好んで用いられてきたが、時間領域での数値計算法としての有効性から地震工学の分野でも用いられてきている。

PSMの最大の利点はFDM, FEM, BEMなどと比較して空間座標の離散化を粗くすることができ、計算時間、計算メモリの面で経済的なことである。空間微分に関して、PSMは理論的に無限精度の差分近似に相当する⁷⁾。また、PSMの第二の利点は加速度、速度、変位、ひずみ、応力の時刻歴を同時に与えるmulti attribute⁸⁾な解析法であるということである。逆に、PSMは加速度の時刻歴を求めるためには必然的に速度、変位、ひずみ、応力の時刻歴も算定しなければならないという「手間のかかる」計算法と位置づけることもできる。PSMのアルゴリズム(定式化)は種々考えられるが、本研究ではPSMの仮想境界処理を効果的に行なうため、運動方程式(波動方程式)を支配するパラメータのうち、速度(粒子速度)と応力を主パラメータとした定式化を行なう。

(2) SH波を対象とした定式化とアルゴリズム

図-1を参照して、SH波の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + f_y \quad (1)$$

ここに、 $u_y = y$ 方向の変位、 $\rho =$ 密度、 σ_{xy} 、 σ_{zy} は
 図-1 の応力成分、 $f_y = y$ 方向の単位質量当たりの物
 体力、 $t =$ 時間、 x, z は図-1 の座標軸。

式(1)の応力成分は変位 u_y から次のように与えら
 れる。

$$\sigma_{xy} = \mu \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (2)$$

$$\sigma_{zy} = \mu \frac{\partial u_y}{\partial z} \quad (3)$$

ここに、 μ はせん断剛性。

ここで、式(1)、(2)、(3)に粒子速度 $\partial u_y / \partial t = \dot{u}_y$ 、応
 力の速度 $\partial \sigma_{xy} / \partial t = \dot{\sigma}_{xy}$ 、 $\partial \sigma_{zy} / \partial t = \dot{\sigma}_{zy}$ を導入すると、
 式(1)の運動方程式は次のような連立の運動方程式に
 変形される。

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{u}_y}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + f_y \\ \dot{\sigma}_{xy} = \mu \frac{\partial \dot{u}_y}{\partial x} \\ \dot{\sigma}_{zy} = \mu \frac{\partial \dot{u}_y}{\partial z} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)は次のようにもマトリックス表示される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & 1/\rho & 0 \\ \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/\rho \\ 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{u} + f_y \quad (5)$$

ここに、

$$\mathbf{u} = [\dot{u}_y \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{zy}]^T \quad (6)$$

PSM は式(4)もしくは式(5)を空間的および時間的に
 離散化して数値的に解く。ここで、空間微分は高速
 フーリエ変換 (FFT) によって計算され、時間微分
 は中央差分によって求められる。

いま、 x, z 方向をそれぞれグリッド長 $\Delta x, \Delta z$
 で離散化して、時間 t はステップ長 Δt で離散化する。
 さらに、フーリエ変換を \mathbf{F} 、フーリエ逆変換を \mathbf{F}^{-1} と
 表示すると、変数 $A(x, z)$ の空間微分 $\partial A / \partial x, \partial A / \partial z$ は
 次のように数値的に算定できる。

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial x} = \mathbf{F}_x^{-1} [ik_x \mathbf{F}_x \{A(x, z)\}] \\ \frac{\partial A}{\partial z} = \mathbf{F}_z^{-1} [ik_z \mathbf{F}_z \{A(x, z)\}] \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 $k_x = n\Delta k_x$ ($n=0, 1, 2, \dots, N_x$),
 $k_z = n\Delta k_z$ ($n=0, 1, 2, \dots, N_z$), $\Delta k_x = 2\pi / L_x$,

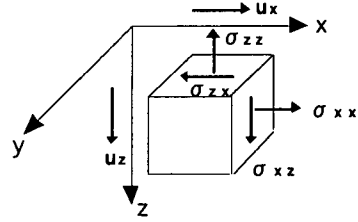


図-2 座標系 (面内震動問題)

$\Delta k_z = 2\pi / L_z$, $L_x = x$ 方向の領域の長さ、

$L_z = z$ 方向の領域の長さ、 $N_x = x$ 方向のグリッド総
 数、 $N_z = z$ 方向のグリッド総数、 $\mathbf{F}_x = i$ 方向のフーリ
 エ変換、 $\mathbf{F}_x^{-1} = i$ 方向のフーリエ逆変換。

以上のフーリエ変換法を用いると、式(4)もしくは
 式(5)は次のフローで時間ステップをチドリ
 (staggered) に進めながら逐次数値的に解くことが
 できる。

① 粒子速度 $\dot{u}_y(t + \Delta t / 2)$ が既知のとき、式(7)により
 ひずみ速度 $\partial \dot{u}_y / \partial x, \partial \dot{u}_y / \partial z$ を求め、式(4)の第2式、
 第3式から応力速度 $\dot{\sigma}_{xy}(t + \Delta t / 2)$ 、 $\dot{\sigma}_{zy}(t + \Delta t / 2)$ を算
 定する。

② 次の中央差分式から応力 $\sigma_{xy}(t + \Delta t)$ 、 $\sigma_{zy}(t + \Delta t)$ を
 算定する。

$$\begin{cases} \sigma_{xy}(t + \Delta t) = \sigma_{xy}(t) + \dot{\sigma}_{xy}(t + \Delta t / 2)\Delta t \\ \sigma_{zy}(t + \Delta t) = \sigma_{zy}(t) + \dot{\sigma}_{zy}(t + \Delta t / 2)\Delta t \end{cases} \quad (8)$$

なお、ひずみ $e_{xy}(t + \Delta t)$ 、 $e_{zy}(t + \Delta t)$ が必要なとき同様
 な中央差分式から算定する。

③ 応力 $\sigma_{xy}(t + \Delta t)$ 、 $\sigma_{zy}(t + \Delta t)$ の空間微分 $\partial \sigma_{xy} / \partial x$ 、
 $\partial \sigma_{zy} / \partial z$ を式(7)の方式で求め、さらに式(4)の第1
 式から加速度 $\ddot{u}_y(t + \Delta t)$ を算定する。

④ 次の中央差分式から粒子速度 $\dot{u}_y(t + 3\Delta t / 2)$ を算定
 する。

$$\dot{u}_y(t + 3\Delta t / 2) = \dot{u}_y(t + \Delta t / 2) + \ddot{u}_y(t + \Delta t)\Delta t \quad (9)$$

⑤ 変位 $u_y(t + 2\Delta t)$ の時刻歴が必要なとき、次の中央
 差分式で算定する。

$$u_y(t + 2\Delta t) = u_y(t + \Delta t) + \dot{u}_y(t + 3\Delta t / 2)\Delta t \quad (10)$$

以上のステップ①～⑤を繰り返すことにより、タ
 イムステップ Δt を進めながら、加速度、速度、変位、
 ひずみ、応力の時刻歴が数値的に求められる。なお、
 上のフローから知れるように、加速度、速度などの
 タイムステップは $\Delta t / 2$ だけ違って進められることに
 注意されたい。

(3) P-SV 波を対象とした定式化とアルゴリズム

図-2 を参照して、P-SV 波の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_x \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z \quad (12)$$

ここに、 $u_x = x$ 方向の変位、 $u_z = z$ 方向の変位、 $\rho =$ 密度、 σ_{xx} 、 $\sigma_{zz} = \sigma_{zz}$ 、 σ_{xz} は図-2 の応力成分、 f_x 、 f_z は各々 x 、 z 方向の単位質量当たりの物体力、 $t =$ 時間、 x 、 z は図-2 の座標軸。

式(11)、(12)の応力成分は次のように与えられる。

$$\sigma_{xx} = \lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (13)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{xx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_{xz} = \lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (15)$$

ここに、 λ は Lamé の定数。

式(11)、(12)は粒子速度を導入すると次のような連立方程式に変形される。

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{u}_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_x \\ \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z \\ \dot{\sigma}_{xx} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \dot{u}_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} \\ \dot{\sigma}_{zz} = \lambda \frac{\partial \dot{u}_x}{\partial z} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} \\ \dot{\sigma}_{xz} = \mu \frac{\partial \dot{u}_x}{\partial z} + \mu \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial x} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)は次のようなマトリックス表示ができる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/\rho & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho \\ \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho \\ 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (17)$$

ここに、 $\mathbf{u} = [\dot{u}_x \quad \dot{u}_z \quad \sigma_{xx} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xz}]^T$ 、

$$\mathbf{f} = [f_x \quad f_z \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

式(17)のようにマトリックス表示すると固有値解析を可能にして、伝播処理が容易となり、仮想境界での吸収境界条件が適用しやすくなる。これについては後節でふれる。

式(16)もしくは式(17)は SH 波の場合と同様に、時間ステップ Δt をチドリ (staggered) に進めながら数値的に解くことができる。

(4) PSM における非弾性減衰の処理

前節で述べた面外震動問題 (SH 波)、面内震動問題 (P-SV 波) では地盤媒質は弾性体を仮定して、これらの数値計算のための定式化を試みた。しかし、実際には地盤は純粋に弾性体ではなく種々の原因に由来する減衰を有する。特に、地盤の不整形構造により二次的に生成される短周期表面波にとってその生成増大は媒質の減衰に大きく依存することが考えられるので、数値計算における非弾性減衰の導入は重要な課題である。周波数領域では媒質の非弾性による減衰の導入は Q 値を用いることにより容易にされるが、ここで用いる PSM のような時間領域での数値計算ではやっかいな問題の一つである。前節で述べたように、PSM では地盤媒質の物性は応力—ひずみ関係を通して用いられるので、非弾性減衰の導入も本来ならひずみから応力を算定する過程においてなされる必要がある。しかし、この過程は一種の合積問題 (convolution) であり、厳密にこの処理を行なうには計算時間、精度、計算メモリの諸点から困難が伴う。このような時間領域での非弾性減衰問題を打開する問題に対して Graves⁹⁾ は非常に巧みでかつ簡易的な方法を提案した。

Graves⁹⁾ は周波数領域での Q 値の考察より、ある基準周波数 f_0 (対象問題の中心周波数) を設定すれば、時間領域での震動問題の時間ステップ Δt の経過による減衰係数 $A(x, y, z)$ は次で近似的に与えられることを示した。

$$A(x, y, z) = \exp \left[\frac{-\pi f_0}{Q_s(x, y, z)} \Delta t \right] \quad (18)$$

ここに、 Q_s は S 波の Q 値、 x, y, z は座標。

Graves は FDM による数値実験を行ない、種々の周波数に一律に式(18)の減衰を与えると f_0 より非常に大きい周波数、非常に小さな周波数ではそれぞれ過小減衰、過剰減衰となることを確認したものの、 f_0 周辺の周波数帯域では周波数非依存の減衰特性を十分近似できることを示した。一般に、PSM を含めた離散化数値シミュレーションでは分散、発散などの運動場の離散化にともなう数値誤差が生じるので、これを避けるためシミュレーション対象の周波数帯

域も一定のバンド幅を設けてなされるのが普通である。このことを考慮すると、式(18)による減衰の導入は離散化シミュレーションでは十分使用に耐えることのできる方法と考えられる。本研究においても、対象とする周波数帯域での中心周期（もしくは卓越周期）を f_0 に対応させて、式(18)による減衰を導入して数値シミュレーションを行なうこととした。

(5) PSMにおける境界条件の処理と安定性問題

PSMに限らず波動場の離散化シミュレーション法では二つの境界条件の処理が必要である。一つは自由表面境界の処理（自由境界条件）であり、他は有限領域で計算を行なうことにより出現する仮想の境界の処理（仮想境界条件）である。

本研究では自由境界条件として自由表面の上部に仮想のグリッド点を設けて、それらのグリッド点での媒質定数（Lame の定数や密度など）をゼロと設定する方法を用いた。また、仮想境界条件としては Cerjan et al.¹⁰⁾ のスポンジフィルターならびに Dai et al.¹¹⁾ の合成吸収境界の考えにならい、式(5)や式(17)のような SH 波、P-SV 波の問題に対するマトリクス表示の運動方程式について固有値解析を行った上で、仮想境界から計算領域の内部方向へ伝播する波動のみを吸収する吸収境界条件を PSM 専用導き、これを用いた。

一方、PSM はあくまで離散化による数値計算法であるから、FDM や FEM と同じく、離散化のメッシュ間隔および時間ステップの大きさに依存する分散と安定性の問題が生じる。本研究では Kosloff et al.⁹⁾ を参考に両者の問題を避けるための空間離散化のメッシュ間隔と時間ステップの大きさの組み合わせ条件を設定した。さらに、空間的なメッシュ間隔に依存するカットオフ波数を保証するため、本研究では空間エイリアジングによる数値エラー防御の条件として、メッシュ間隔の2倍以上の波長のみを計算対象とするように入力波の周期帯域を限定することとした。これらの条件は次のようにまとめられる。

$$\Delta x \leq \text{Min}[V_s] \times \text{Min}[T] / 2 \quad (19)$$

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\text{Max}[V_p]} \times 0.2 \quad (20)$$

ここに、 $\text{Min}[V_s]$ は対象とする地盤媒質の S 波速度のうち最小値、 $\text{Min}[T]$ は入力波動の最小周期、 $\text{Max}[V_p]$ は対象とする地盤媒質の P 波速度のうち最大値。

なお、上記の自由境界条件、仮想境界条件、および安定性問題の詳細は神山¹²⁾を参照されたい。また、入力地震動（入力波）の付与の仕方についても同文献を参照されたい。

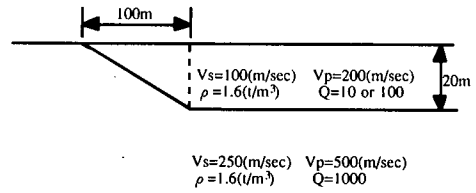


図-3 開放型不整形地盤モデル

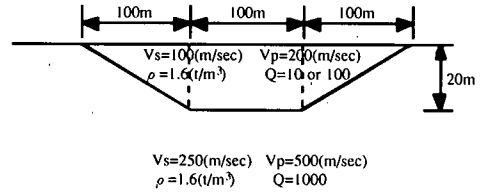


図-4 盆状不整形地盤モデル

3. 典型的な不整形モデル地盤における応答シミュレーション

PSM のような時間領域での離散化数値シミュレーションでは種々のタイプの不整形地盤を包括し、かつ代表的寸法で無次元化した形で地震応答特性を考察することは困難である。そこで、本研究では種々のタイプの不整形地盤をモデル化して、種々の入射波を対象に応答シミュレーションを実施し、その時刻歴応答について考察した。紙数の関係からそれらのすべてを示すことはできないので、ここでは面外震動問題（SH 波）、面内震動問題（P-SV 波）を別けて、代表的なモデル地盤における応答結果を例示し、短周期表面波の特性を分析する。なお、本章で例示する応答シミュレーション結果は地盤の不整形性により二次的に発生される短周期表面波の特徴を明確に把握するため、その目的に適った Ricker wavelet を入射波として与えたときのものである。また、地表面近傍の浅い不整形地盤構造を対象とすることに大きく矛盾しない入力地震波の条件として、S 波が鉛直下方から入射するものとした。

(1) モデル地盤構造と応答シミュレーション条件

地震応答シミュレーション結果の典型的な例として示す不整形モデル地盤構造を図-3、4 に示す。両者とも自然地盤、人工的造成地盤などに一般にみられる不整形構造を代表的にモデル化したものである。図-3 は相対的に軟弱な表面層が基盤に平行に堆積し、部分的に基盤が傾斜構造をもつ地盤を一般化したものである。一方、図-4 は盆状構造をもつ不整形地盤

をモデル化したものである。以下、図-3を「開放型不整形地盤」、図-4を「盆状不整形地盤」と便宜的に称する。二つのモデルの表面層、基盤の物性値はそれぞれ図に与えられている。ここで、表面層の減衰の大きさを表す指標のQ値は10、100と変化させて、表面層の減衰における影響を解析するように設定している。なお、物性値は面内震動問題(P-SV波)を対象に与えられているが、このうちP波構造は面外震動問題(SH波)では関与しないことを了解されたい。

ここでは図-3、4のモデル地盤を対象に、基盤に鉛直下方から中心周期0.3秒、最大振幅100ガルのRicker wave型の水平加速度波(S波)を入射させた。空間、時間の離散化はそれぞれ $\Delta x = \Delta z = 5m$ 、 $\Delta t = 0.001sec$ として式(19)および式(20)の安定条件を満足させた。また、水平方向のグリッド点は128、鉛直方向のグリッド点は64として128×64の離散点を対象に応答計算を行った。なお、中心周期0.3秒のRicker waveの周波数振幅特性は周期0.1secのスペクトル振幅がほぼ0となる帯域限定の特性を呈するので上記の Δx 、 Δz 、 Δt の設定によってほとんど数値分散のない結果を得ることができる。

(2) 面外震動問題の地震応答

ここでは、加速度応答とひずみ応答の代表的結果を示す。面外震動問題(SH波)のひずみ成分は図-1に示す応力成分に対応する二つのせん断ひずみ成分が生じることに留意されたい。ただし、式(4)から不整形性の影響はひずみ成分 e_{xy} に強く現れるので、以下ではひずみ e_{xy} の応答結果のみを示す。

図-5および図-6はそれぞれ開放型不整形地盤、盆状不整形地盤の地表における代表的地点の加速度およびひずみ e_{xy} の応答時刻歴を示したものである。なお、ひずみ e_{xy} は地表でもゼロとならないことに注意されたい。これらの結果から、次のようなことが指摘できる。

- 1) 垂直入射による鉛直方向伝播の重複反射の応答に加え、基盤傾斜地点から二次的な波動が発生して、これが水平方向に伝播する。このような鉛直方向伝播の波と水平方向伝播の波が位相が一致して重なる地点と時刻で加速度振幅の最大が現れる。
- 2) 二次的に生成される波動の加速度振幅の大きさは表面層の減衰の大きさに強く支配され、Q=100程度の減衰の場合、鉛直伝播の重複反射による振幅に匹敵する振幅を有する。ただし、表面層がQ=10の減衰をもつとき、傾斜基盤近傍の地点を除き、かなり小さくなる。
- 3) ひずみ e_{xy} 成分は上記の二次的波動に伴い生じ、その振幅は地表でかなり大きくなる。最大振幅100ガル程度の入射波でも $10^{-4} \sim 10^{-3}$ のオーダーの非常

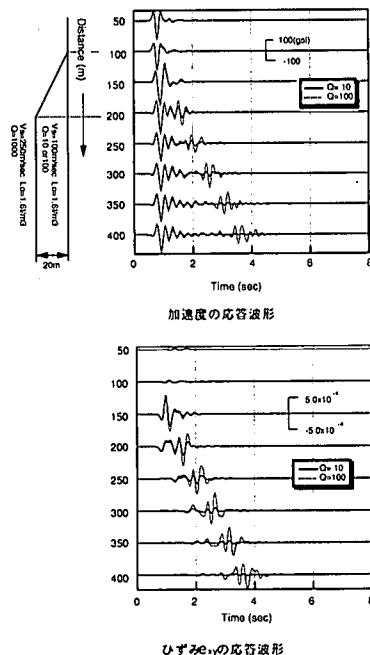


図-5 地表における加速度およびひずみの応答時刻歴 (SH波, 開放型不整形)

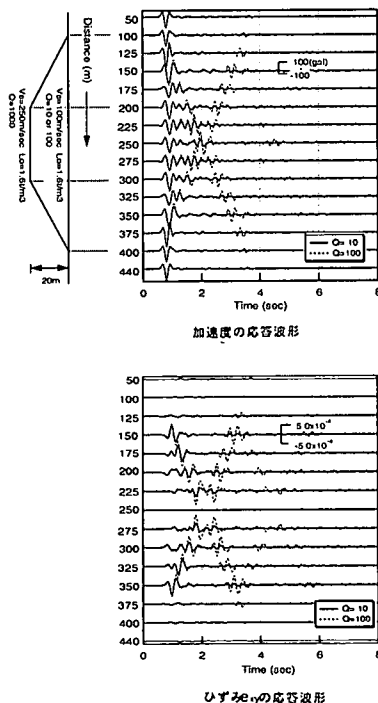


図-6 地表における加速度およびひずみの応答時刻歴 (SH波, 盆状不整形)

に大きな値となる。このオーダーは地盤の破壊や非

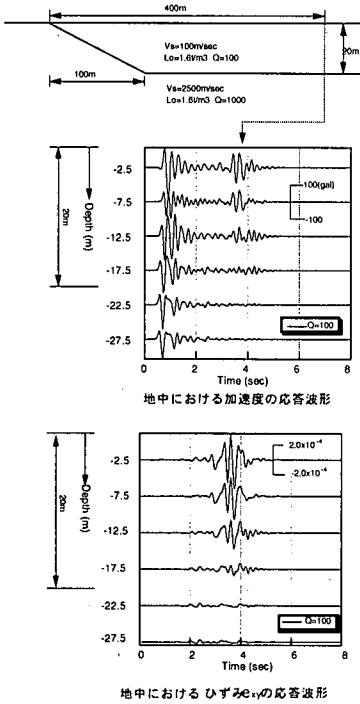


図-7 地中における加速度およびひずみの応答時刻歴 (SH波, 開放型不整形)

線形状態に至るのに十分な大きさである。ただし、傾斜基盤近傍を除き、このひずみ成分も表面層の減衰の大きさによる影響を強く受ける。

4) 開放型不整形地盤と盆状不整形地盤では加速度、ひずみ e_{xy} とも異なった応答を呈する。特に不整形の形状が対称な盆状不整形地盤では加速度は盆状中央に対して対称で、中央点で二次的な生成波動による振幅は最大となる特徴を示す。逆に、盆状不整形地盤のひずみ e_{xy} は盆状中央に対して逆対称で盆状中央では相殺される性状を示す。

一方、二次的に生成される応答の波動特性をみるため、開放型不整形地盤について基盤傾斜の基点から 400m 離れた地点における代表的深さの加速度、ひずみ e_{xy} の応答波形を示したのが図-7 である。ここでは、表面層の Q は $Q=100$ としている。図-7 から、後続の相を構成する二次的な波動による加速度、ひずみ e_{xy} は表面層のみで振幅が大きく、かつ表面層の各深さの位相が同じであり、表面波の基本モードの特徴¹³⁾を明瞭に示していることがわかる。また、ひずみ e_{xy} は拘束圧の小さい地盤浅部ほど大きく、地中構造物の耐震解析や地盤の液化化解析に大きな影響を及ぼすものであることが指摘できる。

以上の不整形地盤における短周期表面波の発生は地盤断面における瞬間的な振幅分布の図 (スナップショット) を連続的に観察することにより明瞭に理

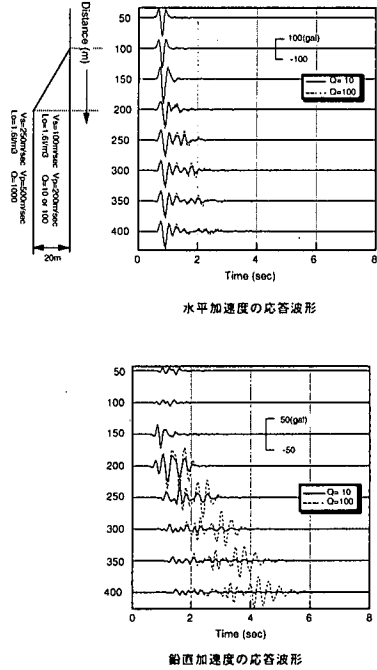


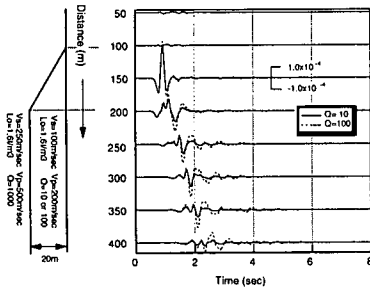
図-8 地表における水平加速度および鉛直加速度の応答時刻歴 (P-SV波, 開放型不整形)

解できる。ここでは、これらのスナップショットは紙数の関係およびカラー表示の関係から示しえないが、これらの一部は神山¹²⁾を参照されたい。また、このようなスナップショットの連続的な動画 (アニメーション) は別途 CD-ROM の形で利用に供されているので参考にされたい¹⁴⁾。これらにより、鉛直下方から入射してきた波動が不整形個所で変形を受け、水平方向へ表面波として伝播しながら成長していくダイナミズム、鉛直方向への重複反射による波動と表面波として水平方向へ伝播していく波動との干渉現象、ひずみ e_{xy} が不整形個所の表面層内で生起して表面層内に閉じ込められて水平方向へ伝播していく過程、などが明瞭にかつ視覚的に理解できる。

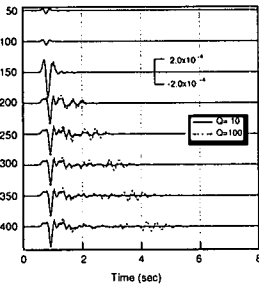
(3) 面内震動問題の地震応答

面内震動問題を対象に図-3, 4 の典型的な不整形地盤モデルの加速度、ひずみの応答時刻歴を示す。本節での面内震動問題では水平加速度に加え、鉛直加速度も応答として生じることに注意されたい。また、ひずみも図-2 の応力成分に対応したひずみ成分が生じる。

図-8 は開放型不整形地盤モデルにおける地表の代表的地点における水平加速度と鉛直加速度の応答波形を示したものである。また、図-9 に開放型不整形地盤モデルにおける地表のひずみ e_{xx} の応答波形と深さ 2.5m のひずみ e_{xx} の応答波形を示す。ここで、ひずみ e_{xx} は地表でゼロであるが、ひずみ e_{xx} は地表でも

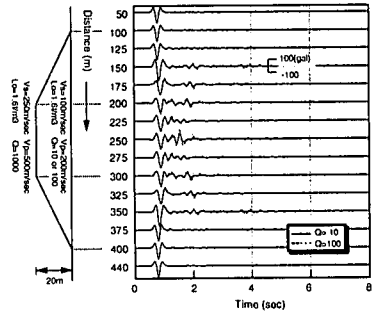


ひずみ ϵ_{xx} の応答波形

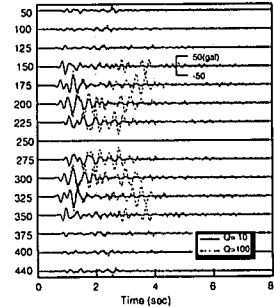


ひずみ ϵ_{zz} の応答波形

図-9 地表および深さ2.5mにおけるひずみの応答時刻歴 (P-SV波, 開放型不整形)



水平加速度の応答波形



鉛直加速度の応答波形

図-10 地表における水平加速度および鉛直加速度応答時刻歴 (P-SV波, 盆状不整形)

ゼロとならないことに注意されたい。同様な加速度応答とひずみ応答の時刻歴が盆状不整形地盤モデルを対象にそれぞれ図-10および図-11に示されている。これらの図-8~図-11では表面層の Q 値を $Q=10$, $Q=100$ とした二つの例が与えられている。これらの図から次のようなことが指摘できる。

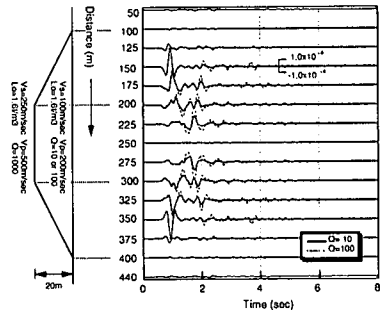
1) 水平動のみの入射波を加えたにも拘らず、不整形性の存在により鉛直動が応答として生じる。

2) 水平動と鉛直動の応答履歴には大きな違いがみられる。すなわち、水平動ではSH波型の応答と異なり、不整形個所から二次的に発して水平方向に伝播する成分が相対的に小さい。これは、SH波型の水平加速度の応答結果の図-5と本節の図-8を比較すれば明瞭である。S波の速度などの構造、入射条件は両者で同一なので、このことは面外震動問題と面内震動問題の差異を表す典型的な例と考えられる。

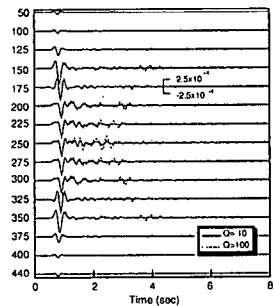
3) 水平動の応答に対して、鉛直動の応答は明瞭に不整形個所より発生されて、水平方向へ伝播する性質をもつ。

4) ここで対象としている不整形地盤の形状では水平動と鉛直動の応答波形の違いからP-SV波の面内震動問題では不整形性から生じる波動の擾乱は大半が鉛直動に転化されることがわかる。したがって、対象としている不整形地盤の形状では鉛直動の応答は水平動に比し、表面層の減衰の影響を強く受けている。

5) 盆状不整形地盤の水平動、鉛直動の加速度応



ひずみ ϵ_{xx} の応答波形



ひずみ ϵ_{zz} の応答波形

図-11 地表および深さ2.5mにおけるひずみの応答時刻歴 (P-SV波, 盆状不整形)

答から水平動は盆状中央を中心として対称、鉛直動は逆対称の震動性状を示す。

6) ひずみ e_{xx} は主に表面層内での鉛直方向伝播の重複反射によって生じるのに対して、ひずみ e_{zz} は大半が不整形個所で発せられ、水平方向に伝播する特性をもつ。

7) ひずみ成分のうち注目すべきは e_{zz} の挙動である。これは直ひずみであり、圧縮、引張りの交番作用を伴う。その振幅の大きさは不整形個所の近傍で大きく、しかも不整形近傍では減衰の大きさの影響は小さい。単純に言えば、100 ガル程度の最大振幅の入射波でも 2×10^{-4} ほどの引張りひずみが生じる勘定になる。一般に地盤は引張りに頗る弱いので、この程度の入射レベルでも地盤が引張り破壊を起こす可能性がある。

一方、加速度、ひずみの地中での応答履歴を表す例として表面層の Q 値を $Q=100$ とした場合の開放型不整形地盤モデルの代表的地点における地盤深さに依存した変化が図-12 に示されている。鉛直動、ひずみ e_{zz} 成分は表面層内で振幅が大きく、水平方向に伝播している性状を勘案しても表面波 (Rayleigh 波) であることがわかる。

以上の面内震動問題の応答シミュレーションについても鉛直下方から入射してきた波動が不整形個所で変形を受け、水平方向へ表面波として成長していく加速度応答やひずみ応答、粒子軌跡などのダイナミズムがアニメーションとして CD-ROM の形で利用に供されているので参考にされたい¹⁴⁾。

4. 短周期表面波の生成に及ぼす地盤構造の影響とその干渉効果

前章における典型的な不整形モデル地盤の応答シミュレーションから深さ数 10m 規模の不整形地盤で発生する短周期表面波の特性が大略把握できた。面外震動問題、面内震動問題のいずれでも短周期表面波の効果は震動振幅の干渉と成層地盤では生じえないひずみ (応力) 成分の発生として現れる。特に、ひずみ成分の挙動は短周期表面波独自の工学的重要性を明瞭に示唆している。一方、震動振幅については直達波との干渉の形でその重要性がクローズアップされる。そこで、本章では、この震動振幅の干渉問題に焦点をしばって地盤構造の影響などについて検討する。

図-3 の面外震動問題 (SH 波) を対象に基盤、表面層ともに $Q=\infty$ の非減衰を条件に速度コントラストのみを変えた応答シミュレーション例を図-13 に示す (入射波は前章に同じ)。図-13 は表面層の S 波速度を $V_s=100$ m/sec に保ち、基盤の S 波速度のみを

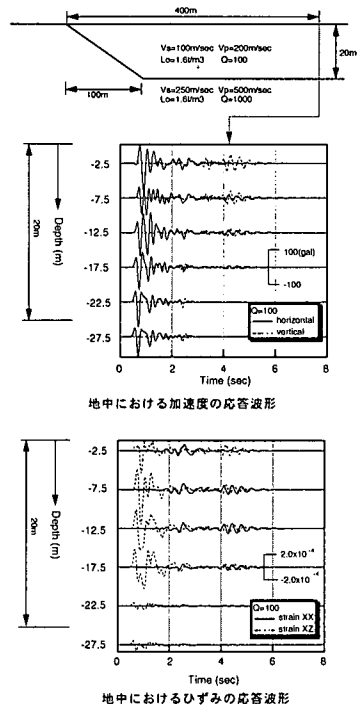


図-12 地中における加速度およびひずみの応答時刻歴 (P-SV 波、開放型不整形)

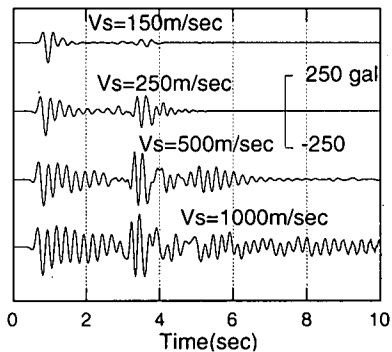
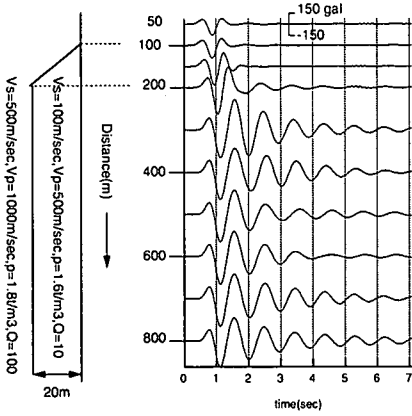
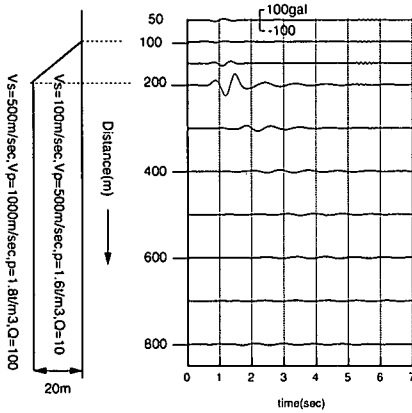


図-13 基盤の S 波速度の違いによる加速度応答の差 (水平距離 300m の地表)

$V_s=150$ m/sec から $V_s=1000$ m/sec に適宜変えて求めた加速度応答波形を傾斜基盤と平行基盤が交差する地点から水平に 300m だけ平行層側に離れた地点の地表で比較して示したものである。この図から、基盤と表面層の速度コントラストが大きくなるにつれ、後続の相の勢力が最初の鉛直方向重複反射に起因する相と比較して相対的に大きくなることが明瞭に理解できる。しかも、後続の相の振幅が大きくなる理由として二つの原因が寄与していることが図-13 からみてとれる。一つは、表面層と基盤の速度コント



水平加速度



鉛直加速度

図-14 地表における水平および鉛直加速度応答（中心周期0.8秒のRicker wave, P-SV波）

ラストが大きくなるにつれて表面波そのものの励起が大きくなることである。二つは、表面層と基盤の速度コントラストに比例して、最初の鉛直方向重複反射による相の継続時間が長くなるので、重複反射の相と表面波の相が重なることである。明らかに、この二つの異なる相の干渉の可能性は直達波（鉛直方向重複反射）の継続時間が長いほど可能性が高まる。

以上の直達波と二次的表面波の干渉問題は波の周期と位相に関係すると考えられるので、基盤入力地震波の卓越周期がこれまでのシミュレーションと異なるケースを対象として干渉問題をやや詳細に検討してみる。ここでは面内震動問題（P-SV波）としてSV波型の水平動加速度波が鉛直下方から入射するものとして表面層のせん断震動の卓越周期0.8秒に等しい中心周期をもつ最大振幅100ガルのRicker waveletを考える。図-14は地盤構造とともに代表的な地表地点における水平加速度、鉛直加速度の応答波

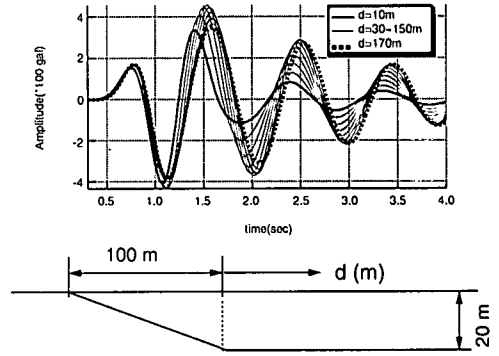


図-15 水平距離による水平加速度応答の違い

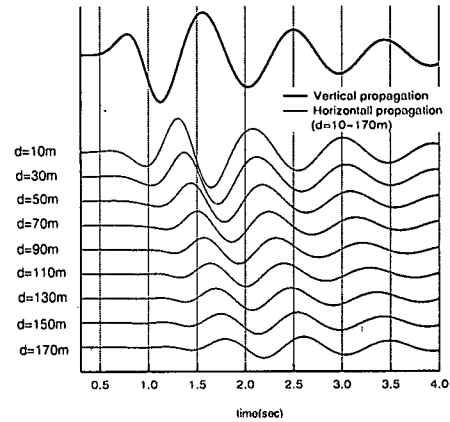


図-16 鉛直動応答と水平動応答の分離

形を示したものである。既に、前章で指摘しているように両成分の応答は異なるが、表面層のQ値は $Q=10$ と大きな減衰を有することから鉛直加速度の水平方向伝播による成分は不整形近傍を除き小さい、一方、水平加速度の振幅はすべての地点で表層による増幅を受けて鉛直加速度ほど地点差がみられない。しかし、水平動についても詳細にみると、最大振幅は地点によりかなり変動しており、図-14ではdistance=300m（傾斜基盤と水平基盤の交差する点から水平方向に100mの地点）で極大となっている。そこで、この付近の水平動振幅の変動をさらに詳しくみるために傾斜基盤と水平基盤の交差点から水平側への距離をdとしてd=10mからd=170mまでの地点の水平加速度波形を重ねてプロットしてのが図-15である。図-15から、このような短い距離でも波形と振幅が大幅に変動することがわかる。そこで、この変動の理由を明らかにするため用意したのが図-16である。図-16は先に述べたPSMの計算スキームを利用して、水平成層構造の鉛直方向伝播だけに起因する応答（鉛直伝播応答）と基盤傾斜の存在により

二次的に生成される水平伝播の応答（水平伝播応答）を分離して計算して、これを同じ時間軸でプロットしたものである。ここに、鉛直伝播応答は地点によらず一定であるが、水平伝播応答は傾斜基盤と水平基盤の交差点からの距離 d によって異なる。図-16では $d=10\text{m}$ から $d=170\text{m}$ の範囲に 20m 間隔で水平伝播応答結果がプロットされている。同図の鉛直伝播応答と水平伝播応答の重ね合わせ和が不整形地盤全体の応答を与えることになる。図-16 から鉛直動応答と水平動応答は異なった位相をもって出現するので、この位相が一致したところで最大振幅が生じることがわかる。以上のように、不整形地盤の応答では異なる伝播形態の応答の位相、すなわち直達波による重複反射の位相と短周期表面波の位相とが重要な役割を演じること、位相の一致はかなり限定された区間に集中することが理解できる。このような位相の一致は不整形の形状、入射波の周期特性、継続時間などの組み合わせにより複雑に変化すると考えられる。

5. アレー観測の実測による短周期表面波の影響に関する考察

前章までは不整形モデル地盤の地震応答シミュレーションにより短周期表面波の基本的特性について分析した。これらの基本的な特性の信憑性を立証するためには、さらに実際の不整形地盤での記録、とりわけアレー記録に即して検討することが必要であると考えられる。本章ではこの視点に立って、アレー強震観測システム KASSEM の観測記録を用いて実測と理論応答シミュレーションの相関に焦点を合わせて短周期表面波のダイナミクスについて考察する。

(1) アレー観測システム KASSEM

アレー観測システム KASSEM は宮城県から福島県にかけて展開する大規模な観測ネットである¹⁵⁾。このシステムは 1986 年から実質的な観測に入っており、これまで多くの記録を得ている。このシステムのうち「センターアレー」と称するサブアレーは宮城県柴田町船岡に設置されている。

KASSEM は多くの目的をもって構築されたものであるが、不整形地盤の地震時挙動の把握も大きな目的の一つとなっている。図-17 は KASSEM の宮城県柴田町船岡に位置するセンターアレー付近の地表における観測点配置を示したものである。図-17 に示す観測点 (WS9, H1, H3, H5, V1, WS10, S2) は異なる地盤構造を有する地点に設置されており、このうち、観測点 S2 はこの付近の第一次基盤と目される軟岩の槻木層 (S 波速度 500m/sec 程度) の露出している地

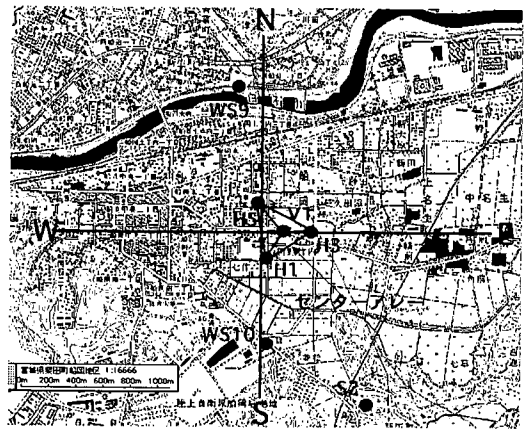


図-17 センターアレーの観測点配置 (●観測点)

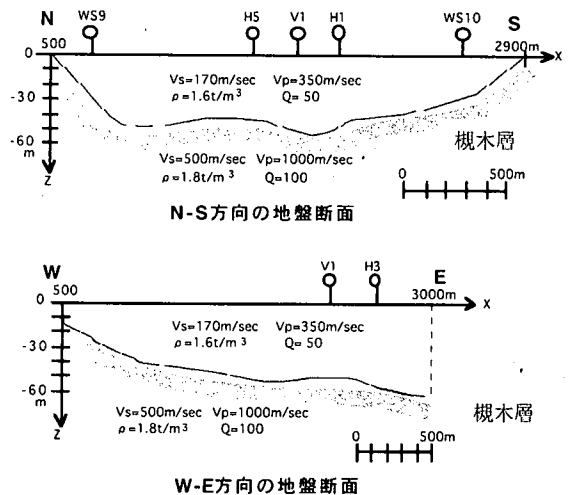


図-18 KASSEM センターアレー地盤断面

点に位置している。これに対して他の観測点はこの槻木層の上に何らかの堆積層を有する地点にある。また、観測点 H1, H3, H5 は一辺が 400m の正三角形を構成しており、観測点 V1 はその正三角形の重心に位置している。図-18 は図-17 に示す南北方向 (N-S)、東西方向 (W-E) の線に沿っての地盤構造断面をほぼ線上に位置する観測点とともに示したものである。この付近ではボーリング調査、PS 検層が多く実施されており、槻木層より浅い地盤構造が明らかになっている。図-18 はこれらの調査を総合した地盤断面であり、槻木層より浅い P 波速度、S 波速度、密度、 Q 値が示されている。ここで、 Q 値については S 波速度から推定された値である。図-18 に示すように、ここでの観測点は典型的な不整形地盤に分布しており、N-S 断面は先に述べた盆状不整形地盤、W-E 断面は開放型不整形地盤に相当することが

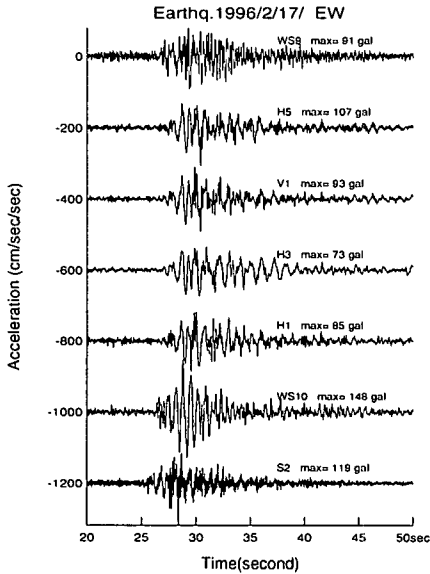


図-19 水平動加速度記録 (E-W 成分)

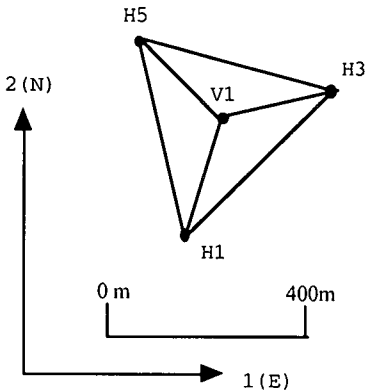


図-20 KASSEM センターアレー小三角形図

わかる。

センターアレーの全観測点で 1996 年 2 月 17 日午前 0 時 22 分に発生した福島県沖 (北緯 37° 18.3', 東経 142° 33.0') を震源とする M=6.5 の地震により完全な記録が得られている。この地震の震源深さは 58km, 震央距離は 177km であり, 地震波の基盤からの鉛直入射仮定が成立しやすい地震と考えられる。本章ではこれらの記録を例に実測と理論応答シミュレーションの結果を比較する。図-19 にこれらの観測点における加速度記録の例として EW 成分の記録を示す。図-19 からわかるように, ここでの観測点はわずかな距離しか離れていないにも拘らず, それらの加速度記録は振幅, 波形とも大幅に異なる。この違いはこれらの観測点の地盤構造が図-18 に示すような著しい不整形な形状をもつことに原因して

いると考えられる。

(2) ひずみ時刻歴の算定

これまで再三述べているように不整形地盤における短周期表面波の重要性はひずみの挙動に特徴的に表れる。そこで, ここでのアレー観測システムの記録による考察でもひずみ算定を試みる。アレー観測点により得られた加速度記録から変位記録を数値計算により求め, これを利用して地盤のひずみを算定した。ここでの各観測点の記録は 3 成分のアレー観測により時刻が同期されて得られているので各種の成分のひずみを数値的に求めることが可能である。変位記録からのひずみ算定方法は種々考えられるが, ここでは地震測地学 (Seismo-Geodetic) 原理¹⁶⁾を用いた。

いま, 全部で N 個の観測点で 3 方向の変位記録が同時に得られたとする。このとき, N 個の中の一つの基準観測点を 0 とすれば, この基準観測点に対する任意観測点 n の i 方向の変位差分は変位の空間微分と j 方向での観測点間距離から次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta u_i^{(n)} &= u_i^{(n)} - u_i^{(0)} = (\partial u_i / \partial x_j) \Delta x_j^{(n)} \\ \Delta x_j^{(n)} &= x_j^{(n)} - x_j^{(0)} \end{aligned} \quad (21)$$

ここに, $x_j^{(n)}$ は観測点 n の j 方向の座標, $u_i^{(n)}$ は観測点 n の i 方向の変位。

式(21)の変位差分は観測変位記録から求められるので, これを用いて式(21)の連立方程式を解けば, 空間微分係数は算定可能である。このように算定される空間微分係数からひずみの各成分は次のように与えられる。

$$e_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2 \quad (22)$$

本研究では図-20 に示すようにセンターアレーの地表観測点 (H1, H3, H5, V1) から構成される三つの小三角形 (V1-H1-H3), (V1-H5-H1), (V1-H3-H5) ごとにそれぞれの小三角形内のひずみ成分を求めた。ここで, 地表面のみにある観測点から地表でのひずみ成分を求めるので, 地表での自由表面の境界条件から, 与えられるひずみは次の 4 成分である。

$$\begin{aligned} e_{11} &= e_{EE} && \text{(東西方向の直ひずみ)} \\ e_{22} &= e_{NN} && \text{(南北方向の直ひずみ)} \\ e_{12} &= e_{21} = e_{NE} = e_{EN} && \text{(南北-東西方向のせん断ひずみ)} \\ e_{33} &= e_{VV} && \text{(鉛直方向の直ひずみ)} \end{aligned}$$

本研究では空間エイリアジングによる誤差を避けるため, 観測点間の距離と地盤の波動伝播速度を考慮して, 0.5~5.0 秒のバンドパスフィルターを原加

1996 2.17 0:22:58 M=6.5 D=58Km L=177Km

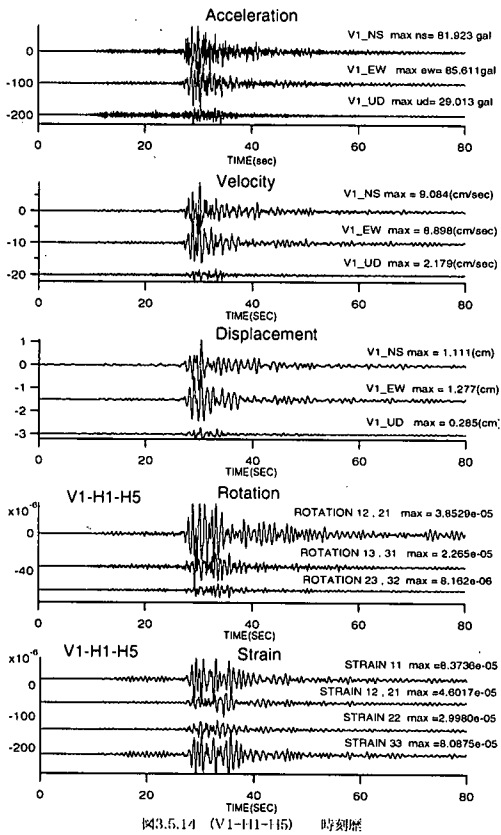


図-21 三角形 V1-H1-H5 で算定されたひずみ成分

速度記録に適用し、これから求まる変位記録によりひずみを算定した。その一例として図-21 に (V1-H5-H1) の小三角形で算定されたひずみの時刻歴を示す。図-21 では参考までに式(21)の空間微分を用いて算定された回転成分も示されている。また、加速度、速度、変位の時刻歴との比較を示すため、V1 点での各成分 (NS,EW,UD) の加速度、速度、変位が併せてプロットされている。図-21 から明らかなように、ひずみの時刻歴は加速度のそれと異なり、加速度の主要動とひずみの主要動は時間的に対応せず、ひずみは加速度より時間的に遅れて大きな振幅を示す。

(3) KASSEM 地点の応答シミュレーション

図-18 の KASSEM 不整形地盤に対して二次元応答シミュレーションを PSM により行なった。ここでは、両地盤断面に対して面外震動問題 (SH 波)、面内震動問題 (P-SV 波) の応答シミュレーションを別途実施した。空間の離散化は $\Delta x=10m$, $\Delta z=5m$, 時間の離散化は $\Delta t=0.0005sec$ とした。

ここでの応答シミュレーションはアレー観測によ

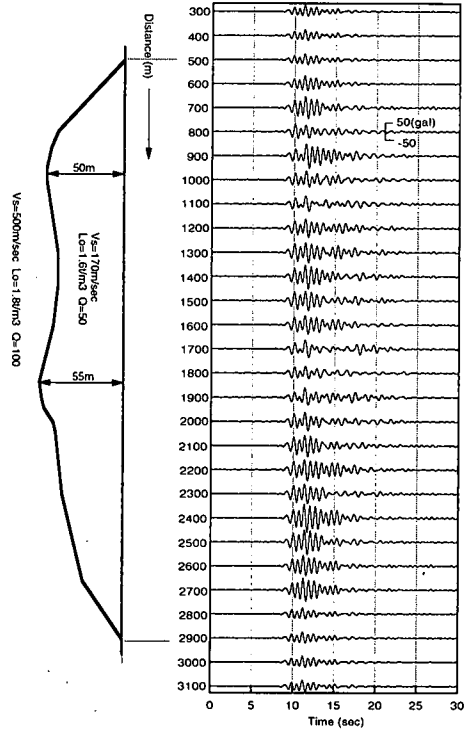


図-22 N-S 方向断面における面外震動問題の加速度応答波形

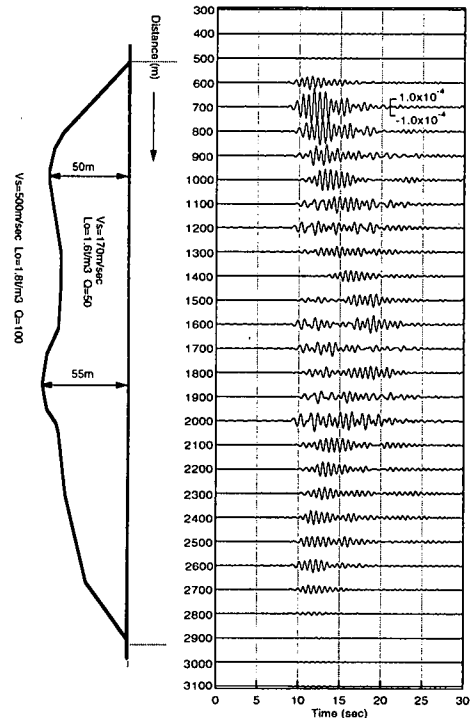


図-23 N-S 方向断面における面外震動問題のひずみ e_{xy} の応答波形

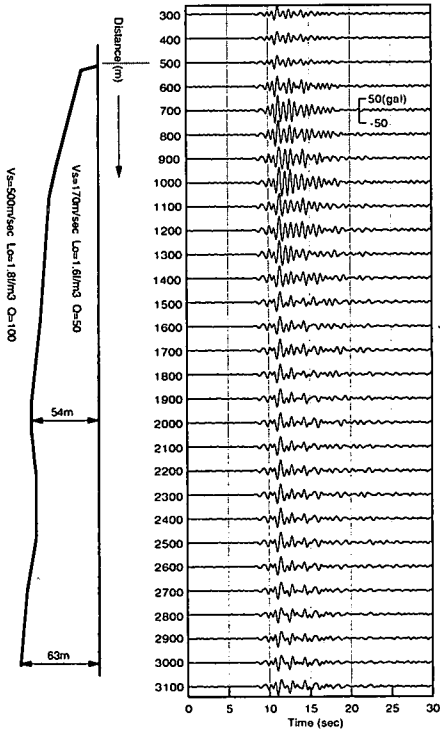


図-24 E-W 方向断面における面外震動問題の加速度応答波形

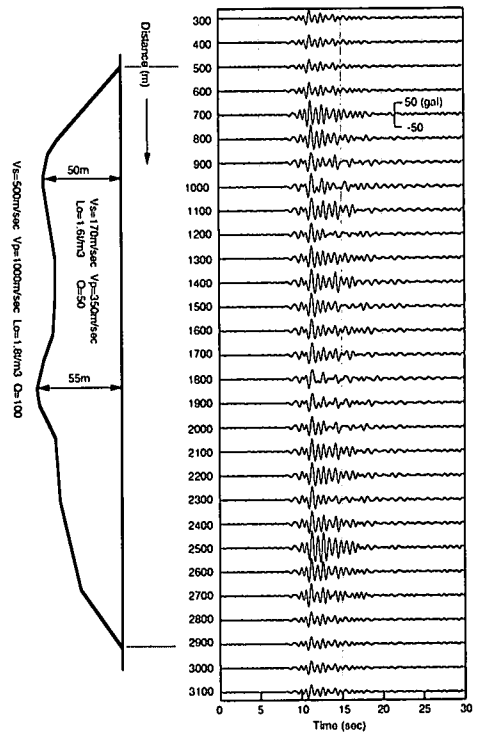


図-26 N-S 方向断面における面内震動問題の水平加速度応答波形

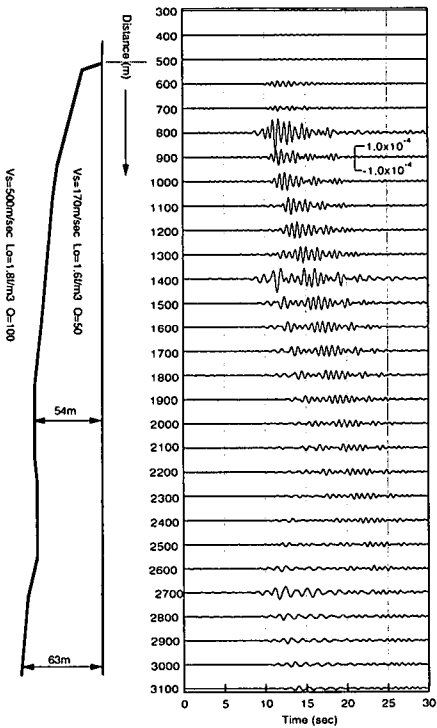


図-25 E-W 方向断面における面外震動問題のひずみ e_v の応答波形

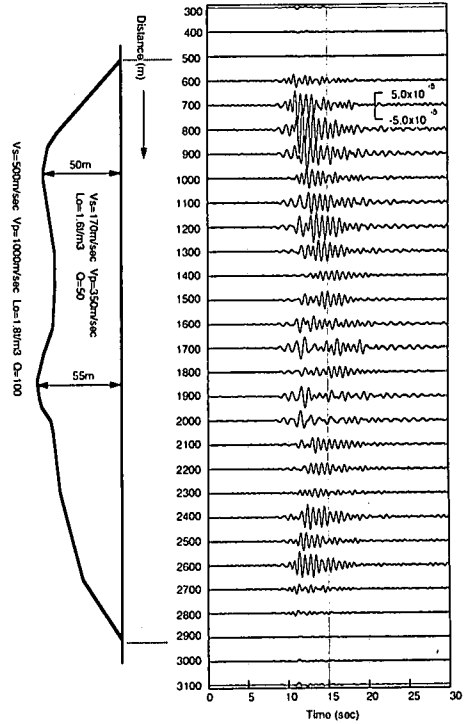


図-27 N-S 方向断面における面内震動問題のひずみ e_{xx} の応答波形

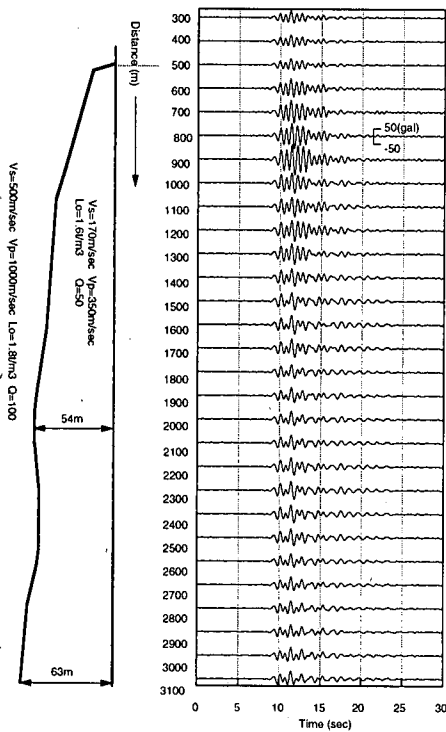


図-28 W-E 方向断面における面内震動問題の水平加速度応答波形

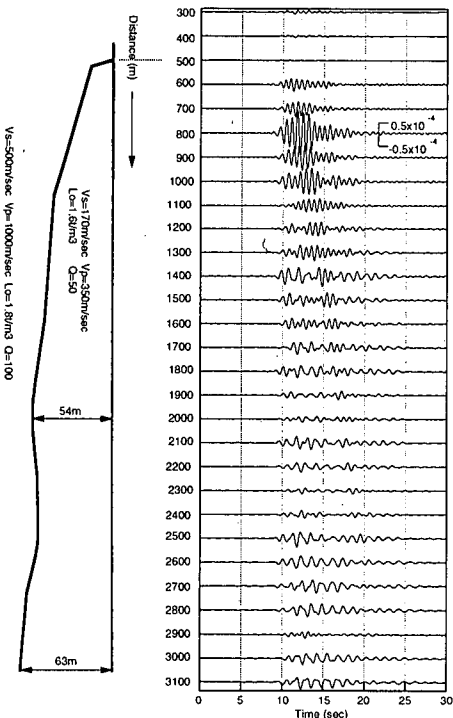


図-29 W-E 方向断面における面内震動問題のひずみ e_{xx} の応答波形

り得られた実測記録を入射波として用いて実施した。すなわち、図-17 に示すように観測点 S2 は図-18 の不整形地盤の基盤を構成する樅木層が露出する地点に位置している。そこで、ここでは S 波の垂直入射を仮定して、観測点 S2 で得られた加速度記録の振幅を半分にして、これを 図-18 の基盤に垂直入射させて応答シミュレーションを実施した。なお、このときの入射加速度波形は応答シミュレーションの安定性の条件を満足させるため、かつ前述の実測ひずみとの比較に整合性をとるため、0.5~5.0sec のバンドパスフィルターを原加速度記録に適用して、帯域限定の周期特性をもつようにした。また、図-18 の両地盤断面はそれぞれ南北(N-S) 方向、東西(W-E) 方向にとられているが、それぞれの地盤断面の面外震動問題、面内震動問題に応じて、適宜観測点 S2 の NS 成分加速度、EW 成分加速度を用いて、上記の方法で入射波を作成した。例えば、南北(N-S) 地盤断面のシミュレーションでは面外震動問題に対して EW 成分加速度、面内震動問題に対して NS 成分加速度を用いた。

面外震動問題における南北断面、東西断面の代表的地点の地表での水平加速度、ひずみ e_{xy} の応答時刻歴を図-22~図-25 に示す。ここで、ひずみ e_{xy} は既に述べたように地表でもゼロとまらないことに注意されたい。図-22~図-25 をみると、既にモデル不整形地盤で明らかにされた特徴がここでの実地盤の応答シミュレーションでも現れていることがわかる。図-22~図-25 では特に基盤の複雑な形状変化に対応して加速度、ひずみとも地点により大幅に変動することが明瞭にみとれる。すなわち、ここで扱っているサイズの不整形地盤では周期 2 秒程度以下の短周期表面波が基盤不整形箇所強く発生しており、この影響で 100m 程度のわずかな距離の違いの地点でも加速度、ひずみに大きな差異がでることが理解できる。

面内震動問題における南北断面、東西断面の代表的地点の地表での水平加速度、ひずみ e_{xx} の応答時刻歴を図-26~図-29 に示す。ここで、ひずみ e_{xx} は地表でもゼロとまらない。図-26~図-29 をみると、面内震動問題でも地点により大幅に加速度、ひずみが増加することがわかる。

(4) 実測記録とシミュレーションの比較

ここでの実測記録は地盤の不整形構造の 3 次元的效果を含んだものと考えられる。これに対して、ここで実施している応答シミュレーションは 2 次元不整形地盤を対象としたものであり、厳密な意味では実測と応答シミュレーションの比較の合理性は成立しない。特に、面外震動問題 (SH 波) のひずみ e_{xy} のようなせん断ひずみは直交する断面のせん断ひ

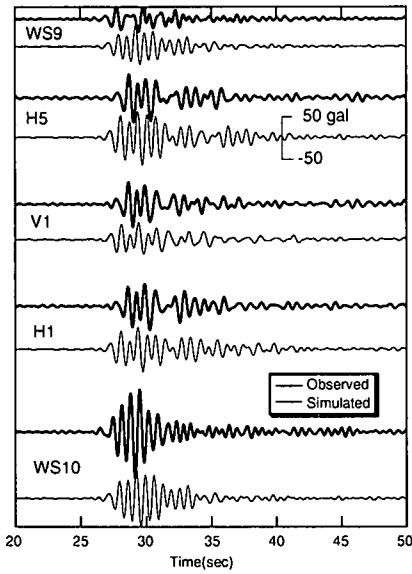


図-30 N-S 方向断面における面外震動問題の理論加速度と実測加速度 (EW 成分) の比較

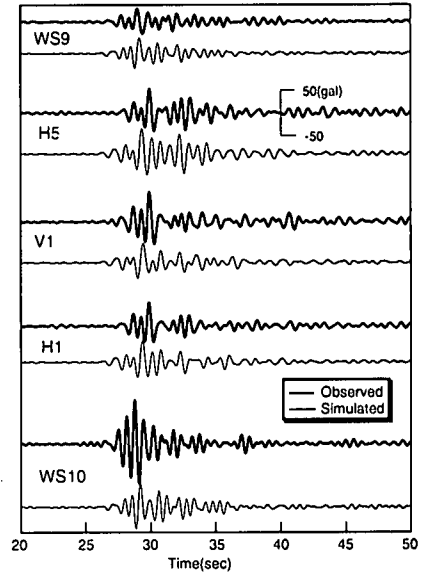


図-32 N-S 方向断面における面内震動問題の理論加速度と実測加速度 (NS 成分) の比較

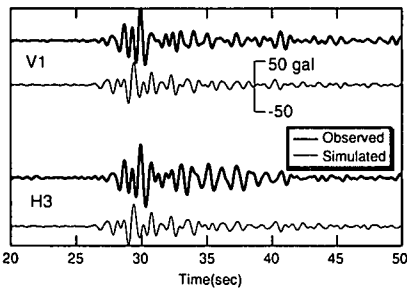


図-31 W-E 方向断面における面外震動問題の理論加速度と実測加速度 (NS 成分) の比較

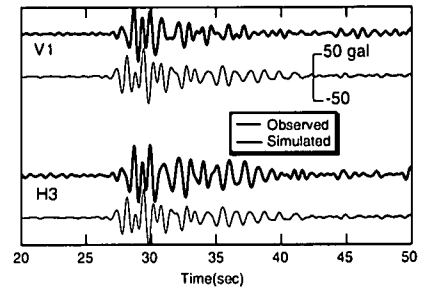


図-33 W-E 方向断面における面内震動問題の理論加速度と実測加速度 (EW 成分) の比較

ずみが互いに干渉するので、ここでの実測と応答シミュレーションを単純に比較するには無理がある。一方、ここで対象としている地盤における不整形性の大きさは直交する2次元断面で異なるので、水平加速度、直ひずみ e_{xx} などの実測記録と応答シミュレーションの比較にはある程度の合理性が成立すると考えられる。そのようなことから、以下の実測と応答シミュレーションの比較では水平加速度と直ひずみ e_{xx} に限定することにする。

図-30は南北断面(N-S方向断面)におけるSH波応答シミュレーション(面外震動問題)の地表での水平加速度応答と同断面の位置する観測点WS9, H5, V1, H1, WS10でのEW方向の実測加速度記録を比較したものである。ここに、応答シミュレーション波形はそれぞれの観測点の位置に対応して算定されたものであり、実測加速度記録は応答シミュレーション

の条件に合わせて周期0.5~5.0secのバンドパスフィルターで処理したものである。また、図-31は東西断面におけるSH波応答シミュレーション(面外震動問題)の地表での加速度応答と同断面の位置する観測点V1, H3でのNS方向実測加速度記録を比較したものである。図-30, 31の加速度波形の比較ではWS10で振幅の大きさが若干異なることを除き、実測結果と応答シミュレーションとは振幅レベル、波形ともよく対応していることがわかる。

次に、図-32は南北方向断面におけるP-SV波応答シミュレーション(面内震動問題)の地表での水平加速度応答と同断面に位置するWS9, H5, V1, H1, WS10でのNS方向の実測加速度を同様に比較したものである。また、図-33は東西方向断面におけるP-SV波応答シミュレーション(面内震動問題)の地表での加速度応答と同断面に位置する観測点V1,

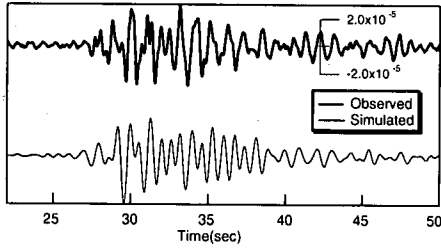


図-34 N-S 方向断面における面内震動問題のひずみ e_{xx} の応答と三角形 H5-H1-V1 の実測ひずみ e_{NN} の比較

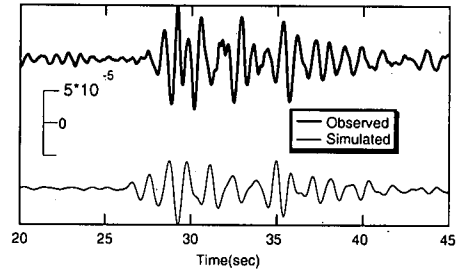


図-36 W-E 方向断面における面内震動問題のひずみ e_{xx} の応答と三角形 H5-H1-V1 の実測ひずみ e_{EE} の比較

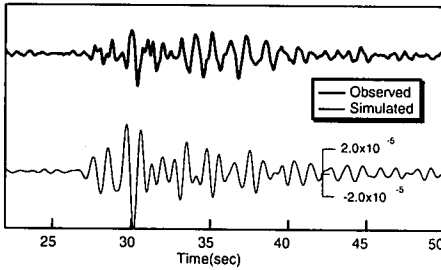


図-35 N-S 方向断面における面内震動問題のひずみ e_{xx} の応答と三角形 V1-H1-H3 の実測ひずみ e_{NN} の比較

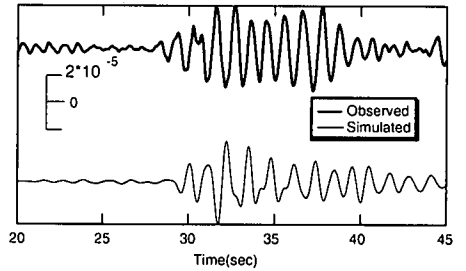


図-37 W-E 方向断面における面内震動問題のひずみ e_{xx} の応答と三角形 V1-H1-H3 の実測ひずみ e_{EE} の比較

H3 での EW 方向の実測加速度記録を比較したものである。図-32, 33 の面内震動問題を対象とした応答シミュレーションも実測加速度記録とよく対応していることがわかる。

一方、P-SV 波応答（面内震動問題）によるひずみ応答 e_{xx} を対応する地点での実測ひずみ e_{11} 、 e_{22} と比較したものが、図-34～図-37 である。ここに、座標の位置関係から実測ひずみ e_{11} は東西方向の直ひずみであり、東西方向断面の P-SV 波による直ひずみ e_{xx} に対応し、実測ひずみ e_{22} は南北方向断面の P-SV 波による直ひずみ e_{xx} に相当する。

図-34 は実測ひずみ e_{22} (e_{NN} で南北方向の直ひずみ) と南北方向の断面 (N-S 断面) の面内震動問題 (P-SV 波) による直ひずみ e_{xx} の応答シミュレーションとを三角形 H5-VI-H3 について比較したものである。また、図-35 は同様な比較を三角形 VI-H1-H3 について示したものである。これらで応答シミュレーションの位置は実測ひずみ算定の三角形重心位置に一致したものをを用いている。これを見ると、両図の比較においてひずみ振幅の大きさ、ひずみの時間変動とも実測、応答シミュレーションは比較的よく対応していることがわかる。また、二つの三角形は隣接したものであり、わずかな距離しか離れていないにも関わらず、実測ひずみは大きく異なっているが、

この状況は応答シミュレーションでも再現されており、このひずみ成分は近距離でも不整形性があれば大きさが急激に変化する特性を有することが実測と応答シミュレーションから立証される。

一方、図-36 は実測ひずみ e_{11} (e_{EE} で東西方向の直ひずみ) と東西方向断面 (W-E 断面) の面内震動問題 (P-SV 波) による直ひずみ e_{xx} の応答シミュレーションを三角形 H5-H1-V1 について比較したものである。また、図-37 は同様な比較を三角形 V1-H1-H3 について示したものである。この比較においても実測と応答シミュレーションはよく対応しており、この実測ひずみ e_{11} が P-SV 波の不整形地盤による短周期表面波に起因するものであることが理解される。

6. むすび

本論文では不整形地盤の地震応答における短周期表面波の工学的重要性を応答シミュレーションとアレー観測による実測に基づき議論した。ここでは特に、加速度などの震動の特異増幅のみならずひずみや応力などのテンソル挙動に着目し、それらの解析に有効な地震応答シミュレーション手法として擬似スペクトル法を用いた。最初に、「開放型不整形地

盤」, 「盆状不整形地盤」と分類された典型的な不整形モデル地盤を対象とした面外震動問題 (SH 波), 面内震動問題 (P-SV 波) の応答シミュレーションから短周期表面波の基本的特性が明らかにされた。それによれば, 短周期表面波は数 10m 規模の地盤不整形の存在により入射実体波から二次的に生成され, 大きく次のように要約される特性を有する。一つは, 直ひずみ, せん断ひずみ など各種の成分のひずみ(応力)を表面層内に発生させることである。これらのひずみ(応力)は浅いほど小さい実体波によるそれと対照的に浅い深さほど大きい表面波独特の性質¹³⁾を有するとともに, 不整形地点の近傍では地盤の減衰量の大きさには無関係に大きな値を示す。このように, テンソル量からみたとき, たとえ二次的に発生されるとはいえ, 短周期表面波は地震被害を直接左右する要因となる可能性を有する。二つは, 短周期表面波は入射実体波から時間的に遅れて二次的に発生されることから, 直達実体波の重複反射成分と干渉して大きな震動振幅がある特定の場所でもたらず可能性を有していることである。この干渉は不整形地盤の構造(基盤と表層の速度コントラスト, 不整形の形状, 地盤の非弾性減衰の大きさなど), 入射波の継続時間, 周期特性などが複雑に関与して生じる。

以上の短周期表面波の基本特性は実際の不整形地盤でのアレー地震動記録と応答シミュレーションに基づきさらに検証された。その検証では加速度振幅のみならず, 従来ほとんど試みられていないひずみ成分についても実記録と応答シミュレーションが比較された。その比較考察からモデル地盤の地震応答シミュレーションから明らかにされた短周期表面波の基本特性が実際の不整形地盤で存在することが実証されると同時に, 実際の不整形地盤では基盤不整形の複雑性を反映したさらに複雑な短周期表面波の発生がありうることが示唆された。

本論文では不整形地盤にまつわる短周期表面波の工学的な重要性, とりわけひずみ(応力)からみた重要性が地盤内の成分に限定されて考察されたが, 平面的な広がり有する土木構造物では地上構造物にあっても同様に短周期表面波によるひずみ(応力)が重要になると考えられる。これについては今後の課題としたい。また, 短周期表面波の性質に鑑み, 地盤物性の非線形性の影響が重要なのは明らかであるが, これについても今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 藤原一紀: 不整形地盤における地震動, 土木学会論文集, 437/1-17, pp.1-18, 1991.
- 2) Vidale, J. E. and Helmberger, D. V.: Elastic finite-difference modeling for the 1971 San Fernando, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.78, pp.122-141, 1988.
- 3) Nishio, N., Hamura, A. and Sase, T.: Earthquake observation of a buried pipeline in a non-uniform ground, *Proceedings of the Ninth Conference on Earthquake Engi.*, Vol.VII, pp.23-28, 1988.
- 4) Kosloff, D. and Baysal, E.: Forward modeling by a Fourier method, *Geophysics*, 47, pp.1402-1412, 1982.
- 5) Kosloff, D. M., Reshel, M. and Loewental, D.: Elastic wave calculation by the Fourier method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.74, pp.875-891, 1984.
- 6) Couté, F. and Mora, P.: Simulation-based comparison of four-site-response estimation techniques, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.88, pp.30-42, 1998.
- 7) Fornberg, B.: The pseudospectral method; Comparison with finite differences for the elastic wave equation, *Geophysics*, 52, pp.483-501, 1987.
- 8) Chen, H. W. and McMechan, G. A.: Computation of multi-attribute seismic wavefields by solution of the elastodynamic equations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.82, pp.1134-1143, 1992.
- 9) Graves, R. W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.86, pp.1091-1106, 1996.
- 10) Cerjan, C., Kosloff, R. and Reshel, M.: A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations, *Geophysics*, 50, pp.705-708, 1985.
- 11) Dai, N., Vafidis, A. and Kanasewich, E.: Composite absorbing boundaries for the numerical simulation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.185-191, 1994.
- 12) 神山 眞: 短周期表面波による構造ダイナミクスと震害メカニズムに関する研究, 平成11年度科学研究補助金研究報告書, 2000.
- 13) 神山 眞: 地震時における地盤内の応力, ひずみの評価, 土木学会論文報告集, 第250号, pp.9-23, 1976.
- 14) 神山 眞: 目で見えるローカルサイトエフェクト, ローカルサイトエフェクトシンポジウム論文集, 付録CD-ROM, 2000.
- 15) 鈴木猛康, 金子巻: 熊谷組強震観測アレー観測システムKASSEMのテレメータ化, 熊谷組技術研究報告, 第56号, pp.119-125, 1997.
- 16) Spudich, P. L. and Steck, K.: Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: Observation from the UPSAR dense seismograph array, *Journal of Geophysical Research*, Vol.100, pp.675-690, 1996.

(2000. 8. 30 受付)

ENGINEERING EFFECTS OF SHORT-PERIOD SURFACE WAVES IN LATERALLY INHOMOGENEOUS GROUND

Makoto KAMIYAMA, Tsutomu SATOH and Takeyasu SUZUKI

This paper discusses engineering effects of the short-period surface waves caused by the lateral inhomogeneity of ground from both viewpoints of vector and tensor. The former viewpoint focuses on the irregular amplification of ground motions and the latter the behaviors of strains. First numerical simulations of earthquake response are carried out for model grounds with typically lateral inhomogeneity using the Pseudo-Spectral Method. Basic effects of the short-period surface waves are made clear by these simulations. Next an array observation system of earthquake motions, which has been deployed at a site characterized by lateral inhomogeneity, is used to confirm such effects resulting from the simulations. Finally it is concluded that the short-period surface waves play possibly an important role in earthquake damage.