

震源から地表地盤に至る地震波伝播計算における部分解析法の応用

An Application of Substructure Method into Computation of Seismic Waves
Propagating from Source to Free Field Ground Surface

原田 隆典¹・松尾聡一郎²

Takanori HARADA and Souichiro MATSUO

¹正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

²正会員 工修 大日本コンサルタント株式会社 (〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1)

A substructure method is introduced into the theoretical synthesis of free field ground motions resulting from the propagating seismic waves in earth crustal and surface soil layers, which originate from an extended fault rupturing. The proposed method is derived from the stiffness based formulation of the synthesis of seismic ground motions. The proposed method will make it possible to drastically reduce the high capacity computer memory that is often required in the high quality synthesis of ground motion accelerations at frequency beyond about 1.0 Hz.

KeyWords : substructure method, ground motions synthesis, seismic waves

1. まえがき

地表の地震動は、震源断層で発生した地震波が地層を伝播し、地表まで到達した結果として現われる地盤の揺れである。したがって構造物の耐震設計や都市の地震防災対策で必要とされる強震動波形やその特性を算定する際には、震源断層を考慮した地層中の地震波伝播に関する現実的モデルの開発が極めて重要となる。

本論文では、震源断層から地表に至る地層・地質構造の全体系をモデル化して取り扱う全体解析法に関する簡単なレビューをする。次に、現状の計算機能力や地層・地質構造の不確定性という条件を考慮する時、全体解析法の適用には限界があるように思われるので、全体解析法を補完する方法として、震源断層から地表に至る地震波計算を分割して実施する部分解析法を導入する。

部分解析法の考え方は、構造工学分野においては目新しいものではないが、震源断層から地表に至る地震波の合成法に部分解析法を応用した研究はこれまで見あたらないと思われる。本論文で述べる地震波合成法に部分解析法を適用することが可能になった主な理由は、次章の研

究レビューで述べられているように、新たに剛性マトリックス法に基づく地震波合成法が導入されたことによるといえる。

2. 全体解析法に関する簡単なレビュー

震源断層を含む地盤の応答計算法に関する研究状況は、瀬戸ら(1989)の論文に詳しく述べられているが、ここでは震源断層を含む地盤応答解析において最も基本となる水平成層地盤の解析に関する既往の研究を簡単に整理しておく。

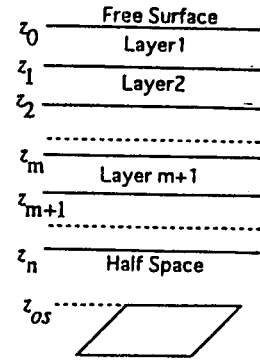
従来の論文に共通する手順は、Bouchon(1979)やChouet(1987)が整理しているように、無限地盤中に変位の食い違いを仮定する、いわゆる運動学的断層モデルから放射される地震波に、水平成層地盤の影響を考慮して地表面の応答を計算するというものである。これらの研究において水平成層地盤の影響は、Thomson(1950)やHaskell(1953)の伝達マトリックス法によって考慮され、この伝達マトリックスをDunkin(1965)法を使って分割し、数値計算の安定性が計られている。しかしこの方法でも依然として伝達マトリックス計算の数値安定化に関して問題点が残っているが、Kennetら(1979)、Lucoら(1983)、Hisada(1995)に

よる反射・透過マトリックス法は伝達マトリックス法の数値安定化問題を完全に解決した方法として知られている(瀬戸ら,1989)。ただしこれらの方法の演算は伝達マトリックス法によるものより複雑化している。

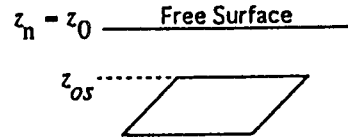
上述したように地震波におよぼす水平成層地盤の影響は、これまで伝達マトリックス法または反射・透過マトリックス法によって取り扱われることが主流であるが、この他に工学分野の研究者には剛性マトリックス法が馴染み深い。Kauselら(1981)は、水平成層地盤における剛性マトリックス法の定式化を示したが、断層からの地震波入射に対する具体的な解析解や解析例は示していない。Wolfら(1982)も剛性マトリックス法による水平成層地盤の応答を扱っているが、平面波入射による地盤の増幅特性を検討したもので、震源断層から発生した地震波による地盤応答問題は検討していない。大角ら(1997)や原田ら(1998,1999)は、震源断層で生じた地震波による水平成層地盤の応答を、剛性マトリックス法により計算している。

ここで重要であると思われる点は、震源断層から発生した地震波による地盤応答問題を剛性マトリックス法で定式化することによって、剛性マトリックス法ではよく知られている部分解析の技法を、本論文で新しく紹介するように地震波伝播問題に適用できるということである。この部分解析法を使うと、現状の計算機能力や地層・地質構造の不確定性という条件を考慮する時に必然的に生じる、これまでの全体解析法の適用限界が改善できるものと思われる。

なお数値安定性に関して剛性マトリックスでは、高振動数、高波数、軟らかい厚い層などの条件下で現われる伝達マトリックス法における指数関数の桁あふれ(overflow)問題は生じないという特徴(Kausel,1981)がある。したがって剛性マトリックス法では、伝達マトリックスにDunkin(1965)法を使う方法や反射・透過マトリックスを用いる方法に比べると、極めて簡単な操作によって数値計算上での解の安定性が確保される。ただし剛性方程式を解いて地震動波形を計算する際に剛性マトリックスの逆行列を計算しなければならない、この計算に時間がかかるという難点を有する。この計算時間に関しては、水平成層地盤を非常に薄い要素としてモデル化する薄層要素法を用いると剛性マトリックス



図一 1 断層を含む半無限地盤上の水平成層地盤



図一 2 断層を含む半無限地盤

スの逆行列が不用となり、計算効率がよい。竹宮ら(1997)や永野(1998)は、薄層要素法を用いて震源断層を含む地盤応答計算を行なっている。

3. 厳密な部分解析法

ここでは原田ら(1998,1999)の剛性マトリックス法による全体解析の定式化に基づいて、部分解析法について説明する。

図一 1 のように震源断層を含む半無限地盤上にのる n 層 (z_m は第 $m+1$ 層の上面の深さを示す座標を表す) からなる水平成層地盤の応答を考える。断層が水平成層地盤中に存在する場合も取り扱えるが、簡単のため、ここでは図一 1 を対象とし $n=2$ の場合を例として説明するが、ここで示す全体解析法での剛性方程式の詳細は、文献 14 に述べられている。

全体解析法における剛性方程式は、次式のように与えられる。

$$K(\kappa, \omega) u_0(\kappa, \omega) = q_0(\kappa, \omega). \quad (1a)$$

ここに、 κ, ω は波数と振動数を意味する。また剛性マトリックスを具体的に記述すると、以下のようになる。

$$K(\kappa, \omega) = \begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 & & \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 + K_{11}^2 & K_{12}^2 & \\ & K_{21}^2 & K_{22}^2 + K_{Half} & \end{bmatrix}, \quad (1b)$$

Output	$u(z_0)$	Step1($u_{free}(z_1)$)	Step2($K^{(c)}$)	Step3($u(z_0)$)
System	$Z_0 \xrightarrow{u(z_0)}$ Layer 1	$Z_1 \xrightarrow{u_{free}(z_1)}$ Layer 2	$Z_1 \xrightarrow{q^{(c)}(z_1) = K^{(c)}u^{(c)}(z_1)}$ Layer 2	$Z_0 \xrightarrow{u(z_0)}$ Layer 1
	Z_1 Layer 2	Z_1 Layer 2	Z_1 Layer 2	Z_1 Layer 2
	Z_2 Half u_{in} u_{out} Source	Z_2 u_{in} u'_{out} Source	Z_2 u''_{out}	Z_2 $u_{free}(z_1)$ $K^{(c)}$
Input	u_{in}	u_{in}	$q^{(c)}(z_1)$	$u_{free}(z_1), K^{(c)}$
	(a) Free Field Response Analysis of Entire Ground	(b) Free Field Response Analysis of Lower Ground	(c) Forced Vibration of Lower Ground	(d) Free Field Response Analysis of Upper Ground

図-3 全体解析法と3段階部分解析法の説明図

Free-Field Response Analysis of Entire Ground (a)

(a) Free-Field Response Analysis of Entire Ground ($u(z_0)$)

$$\begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 & 0 \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 + K_{11}^2 & K_{12}^2 \\ 0 & K_{21}^2 & K_{22}^2 + K_{Half} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u(z_0) \\ u(z_1) \\ u(z_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{Half} u_{free}(z_2) \end{pmatrix}$$

3-Step Method of Analysis of Entire Ground

(b) Free-Field Response Analysis of Lower-Ground (Step 1: $u_{free}(z_1)$)

$$\begin{bmatrix} K_{11}^2 & K_{12}^2 \\ K_{21}^2 & K_{22}^2 + K_{Half} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_{free}(z_1) \\ u^{(b)}(z_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ K_{Half} u_{free}(z_2) \end{pmatrix}$$

(c) Forced Vibration Analysis of Lower-Ground (Step 2: $K^{(c)}$)

$$\begin{bmatrix} K_{11}^2 & K_{12}^2 \\ K_{21}^2 & K_{22}^2 + K_{Half} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u^{(c)}(z_1) \\ u^{(c)}(z_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q^{(c)}(z_1) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$q^{(c)}(z_1) = K^{(c)}u^{(c)}(z_1)$$

(d) Free-Field Response Analysis of Upper-Ground (Step 3: $u(z_0)$)

$$\begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 + K^{(c)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u(z_0) \\ u(z_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ K^{(c)}u_{free}(z_1) \end{pmatrix}$$

図-4 全体解析法と3段階部分解析法の基本式

$$\mathbf{u}_0(\kappa, \omega) = (\mathbf{u}_0(z_0), \mathbf{u}_0(z_1), \mathbf{u}_0(z_2))^T, \quad (1c)$$

$$\mathbf{q}_0(\kappa, \omega) = (\mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{K}_{Half} \mathbf{u}_0 \text{ free}(z_2 = z_0))^T. \quad (1d)$$

ここに、 $\mathbf{u}_0 \text{ free}(z_2 = z_0)$ は、図-2に示すような断層を含む半無限地盤の地表面変位を表わすが、以下に図-2における $z_n = z_0$ (式(1d)では、 $n = 2$ の場合なので、 $z_2 = z_0$ となっている) の意味を説明しておく。すなわち、 z_0 は地表面を、また z_n は半無限地盤の上面の深さを表すので、 $z_n = z_0$ とは、半無限地盤の上面が地表面となるような地盤を意味している。また、 $\mathbf{K}_{Half}$ は半無限地盤の剛性マトリックスを、 $\mathbf{K}_{ij}^{m+1}$ は水平成層地盤の第 $m+1$ 層の剛性マトリックスを表わし、 $i, j = 1, 2$ は第 $m+1$ 層の上面と下面における応力と変位に対応する第 $m+1$ 層の剛性マトリックスの行と列を表す。ここで剛性マトリックスの解析解が与えられその逆マトリックスも解析的に求められるため、層数が多くない場合には、式(1a)の剛性方程式の解($\mathbf{u}_0$)は、解析的表現として与えられることを注釈しておく。

ここで、図-1の全体系を図-3に示すように深さ $z = z_1$ のところで分割した部分系を考えると、図-3に示すような3段階の計算によって地表の応答 $\mathbf{u}(z_0)$ が計算できることになる。図-4に各段階の剛性方程式を記述するが、その手順を述べると以下ようになる。

(第1段階): 第2層の上面が地表面となるような深部地盤の応答計算から第2層地盤の地表面変位 $\mathbf{u}_{free}(z_1)$ を求める (図-3の(b) または図-4の(b)の式)。

(第2段階): 深部地盤から震源断層を取り除いた地盤系の地表面に外力 $\mathbf{q}^e(z_1)$ を作用させ作用点の変位から地盤系の剛性マトリックス $\mathbf{K}^e$ を求める (図-3の(c) または図-4の(c)の式)。

(第3段階): 第1層の下面 $z = z_1$ に、第2段階で求めた深部地盤の剛性マトリックス $\mathbf{K}^e$ を介して第1段階で求めた深部地盤の地表面変位 $\mathbf{u}_{free}(z_1)$ を作用させて、浅部地盤の応答解析より地表面変位 $\mathbf{u}(z_0)$ を求める (図-3の(d) または図-4の(d)の式)。

以上のような3段階の方法から求められる地表の変位が全体系の解析から求められる地表の変位と等しいことは、図-3または図-4の剛性方程式から容易に確かめられる。

ここで注釈しておかなければならない点は、震

源断層からの地震波の特性は、第1段階の計算で求められる深部地盤の地表面変位に含まれるという点である。例えば、震源断層を含む地盤が半無限地盤あるいは水平成層地盤としてモデル化される場合には、剛性マトリックス法により深部地盤地表面の振動数-波数領域での厳密解が得られ、そのフーリエ変換によって時間-空間領域における波動場を計算することができる (Harada *et al.*, 1999)。しかし、震源断層を含む地盤が不整形地盤としてモデル化される場合には、震源断層から放射される無限地盤における地震波動場 (例えば、Harada *et al.*, 1999) に境界要素法などの数値計算手法を組み合わせる不整形地盤の地表面変位を計算するか、あるいは震源断層を含む深部不整形地盤の地表面変位を差分法などの数値計算手法で求めるか等が考えられる。

したがって部分解析法で重要な点は、上述したような第1段階における深部地盤の地表面変位並びに第2段階での深部地盤の剛性マトリックスという2つの物理量を第3段階のように組み込んで浅部地盤のみの応答計算から全体系の地表面変位が計算されるという計算手順の考え方にある。水平成層地盤の場合には、各段階での剛性マトリックスは解析的に与えられるので、部分解析法を使ったとしても各段階での行列の次元が小さくなることの利点はあまりない。しかし不整形地盤のような場合には、これら2つの物理量の計算および浅部地盤の応答計算を有限要素法、境界要素法、差分法などの数値計算手法によって実施せざるを得ないので各部分の行列の次元が小さくなることは決定的に優位な点となる。

上に述べた部分解析法では簡単のため、震源断層を含む深部地盤とその上に堆積する浅部地盤というように全体地盤系を2つに分割する方法によって部分解析法の手順を説明した。しかし上述の3段階手順を順次繰り返して用いると全体地盤系をもっと小さな部分系に分割して解析することができることをここに注釈しておく。

4. 近似的な部分解析法

上述した厳密な部分解析法の第2段階で必要となる深部地盤の地表面剛性マトリックスの計算をせずに、これを半無限地盤の地表面剛性マト

リックスで代用するという近似をここで導入する。なお第1と第3段階の計算手順は変わらない。

半無限地盤の地表面剛性マトリックスは、振動数 ω —波数 κ 領域 ($\exp[i(\kappa x - \omega t)]$) の平面波を仮定) において以下のような解析解として与えられる (例えば, Harada *et al.*, 1999)。

P-SV 波では：

$$\begin{pmatrix} P_1(z_n = z_0) \\ iR_1(z_n = z_0) \end{pmatrix} = \frac{1 + \frac{\gamma^2}{\kappa^2}}{1 + \frac{\nu^2}{\kappa^2}} \mu \kappa$$

$$\begin{pmatrix} -i\frac{\nu}{\kappa} & B_0 - A_0\frac{\nu\gamma}{\kappa^2} \\ B_0 - A_0\frac{\nu\gamma}{\kappa^2} & -i\frac{\gamma}{\kappa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(z_n = z_0) \\ iw_1(z_n = z_0) \end{pmatrix} \quad (2a)$$

ここに、 μ は半無限地盤のせん断弾性定数である。またPSV波問題において、半無限地盤の地表面に作用する水平、鉛直方向の応力を P_1, R_1 とし、それに対応する変位成分を u_1, w_1 として表している。したがって上式右辺の変位ベクトルの係数マトリックスが、PSV波問題における半無限地盤の剛性マトリックスを表す。また、

$$A_0 = 2 \left(C_S \frac{\kappa}{\omega} \right)^2, \quad B_0 = 1 - A_0. \quad (2b)$$

SH波では：

$$K_{SH}^{Half} = -i\mu\gamma. \quad (2c)$$

ここに、 K_{SH}^{Half} はSH波問題における半無限地盤の剛性マトリックスを表す。

$$\begin{aligned} \nu &= \sqrt{\left(\frac{\omega}{C_P} \right)^2 - \kappa^2}, \quad \text{Im}(\nu) \geq 0, \\ \gamma &= \sqrt{\left(\frac{\omega}{C_S} \right)^2 - \kappa^2}, \quad \text{Im}(\gamma) \geq 0. \end{aligned} \quad (2d)$$

なお、 C_S, C_P は半無限地盤のS波とP波の速度を意味する。

ここで、平面波の進行方向が地盤の深さ方向 (鉛直下方) であると仮定すると水平方向 (x 軸) の変化はないので、上式において水平方向の波数 κ は零となる。この条件では、以下ようになる。

P-SV 波 ($\omega > 0, \kappa = 0$) では：

$$\begin{pmatrix} P_1(z_n = z_0) \\ iR_1(z_n = z_0) \end{pmatrix} =$$

表—1 半無限地盤上の3層水平成層地盤の物性値

層番号	S波速度 C_S (m/s)	地盤密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 D	層厚さ (m)
1	250	1.80	0.05	35
2	370	2.00	0.05	40
3	C_s	2.32	0.05	d
4	800	2.56	0.05	∞

$$\begin{pmatrix} -i\rho C_S \omega & 0 \\ 0 & -i\rho C_P \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(z_n = z_0) \\ iw_1(z_n = z_0) \end{pmatrix} \quad (3a)$$

SH波 ($\omega > 0, \kappa = 0$) では：

$$K_{SH}^{Half} = -i\rho C_S \omega \quad (3b)$$

式(3)は、減衰係数が $\rho C_S, \rho C_P$ のダッシュポットで表わされる速度比例型の抵抗として半無限地盤の地表面剛性マトリックスが表わされることを意味する。すなわち半無限地盤は、減衰係数が $\rho C_S, \rho C_P$ のダッシュポットで近似的にモデル化できることを意味する。この近似モデルは、有限要素法などの数値計算法における半無限地盤の近似としてよく用いられているものである。このことは、厳密な部分解析法の第2段階の計算をせずに、断層を含む深部地盤の地表面変位 $u_{free}(z_1)$ を第1段階の計算で求め、この変位をダッシュポットを介して浅部地盤に入射し、地表面変位 $u(z_0)$ が求められることを意味している。そしてこの浅部地盤応答解析には、半無限地盤の近似としてダッシュポットを組み込んだ既存の有限要素法の解析コードが利用できることを意味している。

5. 部分解析法での半無限地盤の条件

ここでは、3章の厳密な部分解析法の説明で用いた半無限地盤上の3層の水平成層地盤 (図—1で $n=3$ の場合) を使って、第3層を半無限地盤と仮定してその剛性マトリックスを評価する近似的な部分解析法 (4章で説明) 並びに、厳密な部分解析法 (3章で説明) によって全体地盤系の地表面応答を計算し、両者の比較から、どのような地盤条件の場合に近似的な部分解析法が適用できるかについて以下のような検討を行った。

SH波の鉛直入射を仮定して、第3層の層厚 (d) とS波速度 (C_S) を色々変化させて、単位入射振幅に対する地表面での振動数伝達関数の違

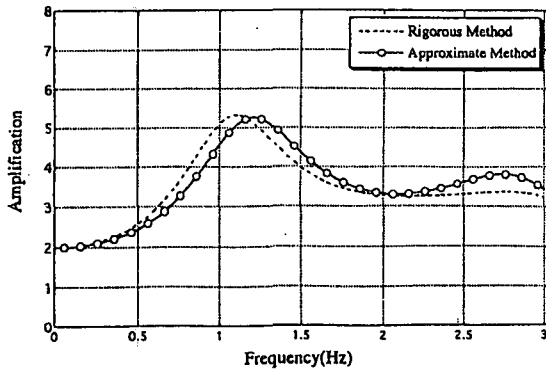


図-5 単位入射振幅に対する地表面の振動数伝達関数 ($C_S=700(\text{m/s}), d=75(\text{m})$)

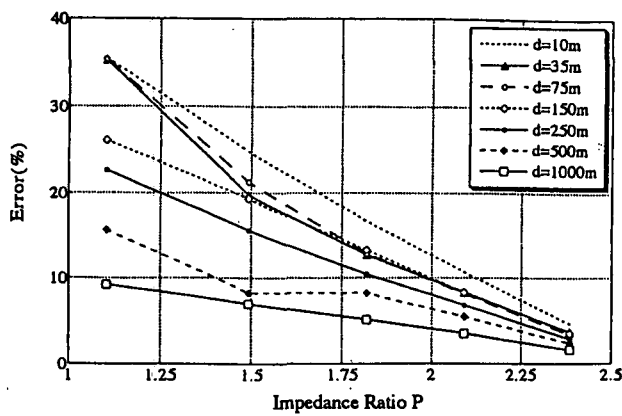


図-6 誤差パラメータの特性

いを検討した。なお表-1に、ここで用いた地盤物性値を示す。

図-5にその振動数伝達関数の違いの例を示す。このような厳密解と近似解による伝達関数の違いを式(4)で評価し、この誤差と第2層と第3層のインピーダンス比 P および第3層の層厚 d の関係を整理した。ただし、 ρ は密度、 C_S は S 波速度であり、添字2,3は層番号を示す。

$$Error = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (|v_R| - |v_A|)^2}{\sum_{i=1}^k |v_R|^2}} \quad (4a)$$

$$P = \frac{\rho_3 C_{S3}}{\rho_2 C_{S2}} \quad (4b)$$

ここに、 v_R と v_A は厳密解と近似解による振動数伝達関数であり、総和記号は各振動数毎に総和することを意味する。

図-6にインピーダンス比 P と誤差パラメー

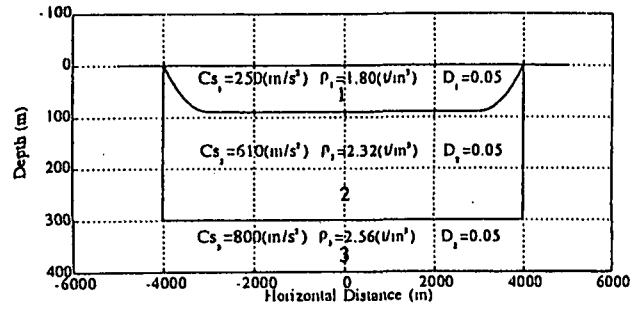


図-7 不整形境界を有する3層地盤モデル

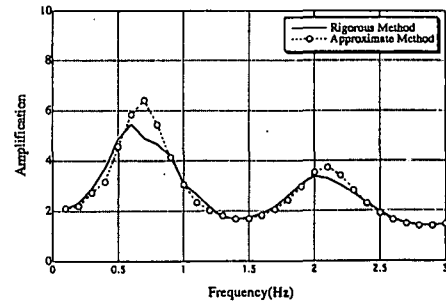


図-8 a $x = 20\text{m}$ 地点における振動数伝達関数

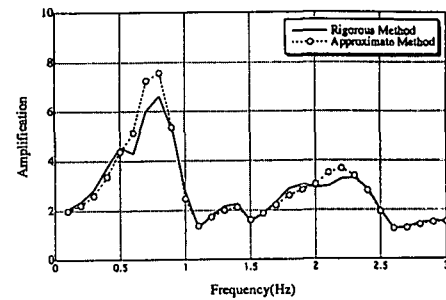


図-8 b $x = 3020\text{m}$ 地点における振動数伝達関数

タ $Error$ の関係をプロットした。この図-6から、誤差パラメータ $Error$ には、層厚 d の影響よりもインピーダンス比 P の影響の方が大きく、 $P \geq 2$ では、層厚によらず $Error$ は10%以下となることがわかる。このように図-6から、近似部分解析法の適用性の目安を判断することができよう。なおこの図は、簡単な数値計算例から求められたものであるため、半無限地盤の条件をもっと理論的かつ厳密に検討する必要があるが、この点は今後の課題としたい。

6. 部分解析法の不整形地盤への適用

次に不整形地盤における近似的な部分解析法の適用例として、 SH 波入射において図-7に示すような不整形境界面を有する矩形谷の地表面

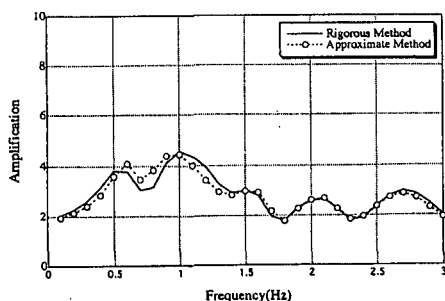


図-8 c $x = 3500\text{m}$ 地点における振動数伝達関数

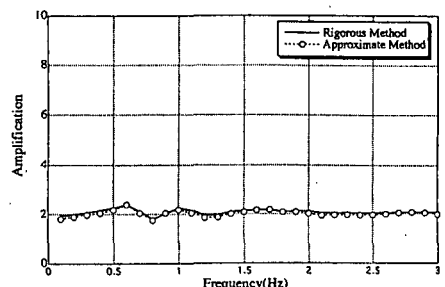


図-8 d $x = 3980\text{m}$ 地点における振動数伝達関数

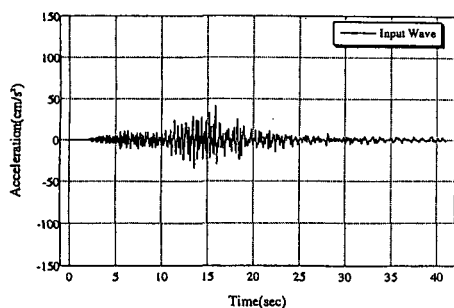


図-9 鉛直下方から入射する加速度波形（振幅は2倍）

応答を考える。すなわち、3層地盤を一括して解析する全体解析法並びに、全体地盤系を第2層と第3層の境界で浅層部と深層部の2つの地盤系に分割し、そして3層地盤を半無限地盤とみなして浅部地盤の応答計算をする近似部分解析法の2つの方法によって不整形地盤の地表面応答を計算し、両者を比較する。

ここでは、直接境界要素法を用い応答計算を行うが、近似部分解析法においては、次のような手順によって応答計算を行うものとする。まず初めに、直接境界要素によって深部地盤の地表面応答変位波形を計算する。次にこの波形を、ダッシュポットを介して有限要素法でモデル化した浅部地盤に入射し、浅部地盤の地表面変位波形を計算するのであるが、本論文では、有限

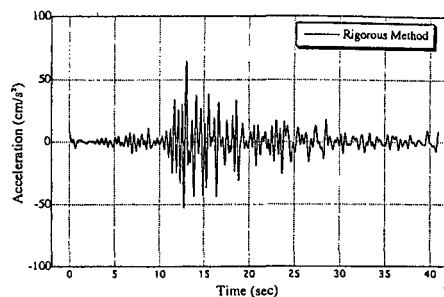


図-10 a 全体解析法による $x = 3020\text{m}$ 地点の加速度波形

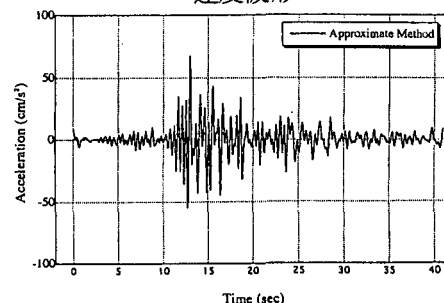


図-10 b 近似部分解析法による $x = 3020\text{m}$ 地点の加速度波形

要素法を使用せずに、深部地盤の地表面波形を半分にして半無限地盤上における浅部地盤への入射波形として用い、直接境界要素法によって浅部地盤の応答波形を計算している。本計算例では、図-7に示す地盤物性値から計算すると、分割層間のインピーダンス比は $P = 3.14$ となり、5章の検討（図-6）から近似部分解析法が十分に有効である地盤条件であることが推察される。

図-8に $x = 20, 3020, 3500, 3980\text{m}$ の地表の4地点における全体解析法と近似部分解析法による振動数伝達関数の比較を示す。この比較から、4地点全てにおいて 0.7Hz 付近にある地盤の一次固有振動数周辺では、両者に多少違いが見られるが、近似部分解析法と全体解析法の結果はよく一致していることがわかる。

以上は、振動数伝達関数での比較であるが、図-9に示すような時刻歴加速度波形の振幅を半にした波形が鉛直下方から入射された時の地表の加速度波形について比較したものを図-10に示す。この波形は、 $x = 3020\text{m}$ 地点のもので、この地点の振動数伝達関数では図-8bに示すように 0.7Hz 付近で多少違いが見られた。しかし図-10の加速度波形の比較では、ほとんど両者は一致しているように思われる。図は

省略するが、その他の地点についてもよい一致が得られている。

7. まとめ

本論文では、震源断層から地表に至る地層・地質構造の全体系をモデル化して取り扱う全体解析法に関する地震学分野の簡単なレビューを行なって、工学分野で馴染み深い剛性マトリックス法および薄層要素法による震源断層を考慮した地震動波形の計算法を紹介した。

次に、現状の計算機能力や地層・地質構造の不確定性という条件を考慮する時、全体解析法の適用には限界があるように思われるので、全体解析法を補完する方法として、剛性マトリックス法に基づいて、震源断層から地表に至る地震波計算を分割して実施する部分解析法を新しく紹介した。

最後に、近似的な部分解析法を導入し、既往の有限要素法で用いられる半無限地盤をダッシュポットによって近似するモデル化との関係を明らかにした。また、数値計算例によって半無限地盤の条件を評価する目安として図-6を提案した。そして境界要素法を用いて、不整形地盤を対象に全体解析法と近似部分解析法による応答計算を行い、両者の適用性を検討した。

本論文で述べた近似部分解析法の計算手順を用いると、まず、震源断層を考慮した深部地盤の地表面応答波形を計算し、次に、この波形をダッシュポットを介して浅部地盤モデルに入射し、浅部地盤の地表面波形が求められるため、浅部地盤の応答解析には、既存の有限要素法などのコンピュータコードがそのまま利用できることになり、震源断層を考慮した不整形地盤などの現実的な地盤における地震動の効率的な計算手順が示されたことになる。

しかし本論文では、厳密な部分解析法の考え方、近似的部分解析法の考え方並びに既存の数値計算手法との関係について述べたが、現時点で著者らは3次元地盤応答解析例の一つも行っていないので、震源断層を考慮した不整形地盤などの現実的な地盤における地震動の効率的な計算法として、厳密な部分解析法と近似部分解析法のどちらが、どの程度優れているのか、またどちらが推奨できるのかに関しては、計算例の蓄積によって結論を導きたいと思う。

参考文献

- 1) Chouet, B. (1987), Representation of an extended seismic source in a propagator-based formalism, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No.1, pp.14-27.
- 2) Dunkin, J.W. (1965), Computation of modal solutions in layered, elastic media at high frequencies, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 55, No.2, pp.335-358.
- 3) Hisada, Y. (1994), An efficient method for computing Green's functions for a layered half space with sources and receivers at close depths, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.84, pp.1456-1472.
- 4) Kausel, E. and Roesset, J.M. (1981), Stiffness matrices for layered soils, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No.6, pp.1743-1761.
- 5) Kennett, B.L.N. and Kerry, N.J. (1979), Seismic waves in a stratified half space, *Geophys. J.R. astr. Society*, Vol.57, pp.557-583.
- 6) 瀧澤一、竹中博士 (1989), 近地地震波の伝播に関する理論, 地震 第2号, 第42巻, pp.391-403.
- 7) Luco, J.E. and Apsel, R.J. (1983), On the Green's functions for layered half space, Part 1, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.909-929.
- 8) 竹宮宏和, 合田和哉 (1997), ディスロケーションモデルによる層状地盤内の波動伝播特性, 第24回地震工学研究発表会論文集, 土木学会, Vol.1, pp.21-24.
- 9) Wolf, J.P. and Obernhuber, P. (1982a), Free field response from inclined SH waves and Love waves, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, pp.823-845.
- 10) Wolf, J.P. and Obernhuber, P. (1982b), Free field response from inclined SV and P waves and Rayleigh waves, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, pp.847-869.
- 11) 永野正行 (1988), 移動震源による段差状不整形地盤の地震動増幅特性, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.897-902.
- 12) 大角恒雄, 原田隆典, 奥倉英世, (1997), 地震断層を考慮した強震動加速度波形の作成, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, pp.73-76.
- 13) 原田隆典, 大角恒雄, 黒川丈史, (1998), 断層近傍の強震動特性と地盤増幅特性, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.845-850.
- 14) 原田隆典, 大角恒雄, 奥倉英世, (1999), 3次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形作成への応用, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.99-108.

(1999年4月23日受付)