セルラー・オートマトン法による地震波の
一次元伝播シミュレーションに関する研究*河 村 庄 造^{*1}, 寺 井 靖 典^{*2}, 岩 壺 卓 三^{*3}Simulation of One Dimensional Seismic Wave Propagation
Using Cellular AutomataShozo KAWAMURA^{*4}, Yasunori TERAJ and Takuzo IWATSUBO^{*4} Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology,
1-1 Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

In this study, a simulation method of seismic wave propagation was constructed using the Cellular Automaton method. A ground, which is an analytical domain, was divided into cells and the local rules to update state parameters between cells were constructed as well as the local rules about the reflection and transmission between grounds. The intermittent update method was also proposed to adjust the difference of propagation speed of wave. The validity of the method was checked by the comparison of the simulation result with the theoretical one and the measured one and the results agreed well. It was considered that the method constructed in this study was efficient for actual applications.

Key Words: Computational Mechanics, Seismic Motion, Computer Aided Analysis, Discrete Computation Method, Cellular Automaton Method, Local Rules, Wave Propagation

1. 緒 言

地震が多く発生する日本では、構造物や機械の耐震設計が重要なので、それに関する多くの研究がなされ、また設計基準も定められている。耐震設計を行う際に構造物に作用させる外力は地震による地表面近くの振動であるが、その振動は震源から地盤内部を伝播してきた結果である。従って種々のタイプの地震による地表面の振動を考慮するためには、震源から地表面までの地震波の伝播シミュレーションが必要である。

これまでの地震波の伝播シミュレーションは有限要素法によるものが多い。そこでは地盤の動的特性を表現する構成式に基づいて要素特性マトリックスを導出し、それらを重ね合わせて地盤全体の特性マトリックスを構築する。そしてその微分方程式を数値積分して地表面の振動を求めることになる。その方法では、解析領域が広くなるとコンピュータの記憶容量及び計算時間の問題が発生し、現実的なシミュレーションが困難になる。

難になる。

一方、近年、離散数値解析手法の一つであるセルラー・オートマトン(CA)法を用いて様々な現象を再現する試みがなされている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。CA法は、解析空間をセルと称する小領域に分割し、各セルに定義された状態量を、セル間に設定された局所近傍則に従って時間を追って更新させていくシミュレーション手法である。本研究に関連する波動伝播現象に関しては、Chen らが、近傍セル間の状態量のやりとりに基づく局所近傍則の基本的な考え方を提案しており⁽⁴⁾、それを利用してChen ら⁽⁵⁾、Lavallee⁽⁶⁾、Sudo ら^{(7),(8)}、小松崎ら^{(9),(10)}は音響問題のシミュレーションを行っている。著者の一部らも、Chen らが提案している局所近傍則⁽⁴⁾を利用して、弦の非線形波動伝播シミュレーション^{(11),(12)}及び地震波の伝播シミュレーション^{(13),(14)}を行っている。一方、波動伝播現象をシミュレーションする局所近傍則として Chopard らはセルの移動に基づく局所近傍則を提案している⁽¹⁵⁾。

本研究では、セルの移動に基づく局所近傍則を用いたCA法によって、震源から地表面までの地震波の伝播シミュレーションを行う手法を構築する。近傍セル

* 原稿受付 2004年6月18日。

^{*1} 正員、豊橋技術科学大学機械システム工学系(☎441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。^{*2} 島津製作所(株)(☎604-8511 京都市中央区西の京桑原町1)。^{*3} 正員、関西大学工学部(☎564-8680 吹田市山手町3-3-35)。

E-mail: kawamura@mech.tut.ac.jp

間の状態量のやりとりに基づく局所近傍則を用いた場合、状態更新則は波動方程式の差分表現と一致するので、CA 法の特徴が見えにくいと思われる。そこで本研究では、セルの移動のみで波動現象をシミュレーションすることにする。ここでは解析対象を、震源を含み地表面に垂直な一次元モデルで考える。垂直方向にセルを配置し、局所近傍則に従って状態量を更新する。そして異なる特性を有する地盤間の反射や透過現象についても局所近傍則で記述する。特に特性が異なる地盤では伝播速度が異なるので、CA 法の状態更新に工夫が必要である。本研究では伝播速度に応じて間欠的に更新を行う方法を提案する。

構築する手法の検証のため、基礎地盤が調和振動する場合の地震波の伝播をシミュレーションし、基礎地盤と地表面の振動の増幅率を求め、理論解析結果と比較・検討する。次に地盤特性、地震による基礎地盤の振動、地表面での増幅率が実測によって既知の地震をシミュレーションし、結果を比較・検討する。そのようにして本研究で構築する手法の有効性を検討する。

2. 地震波の伝播を表現する局所近傍則

2.1 伝播特性の局所近傍則 地震波の伝播特性を CA 法における局所近傍則で表現することを考える。解析空間を図 1 のように白・黒二色のセルを交互に配する一次元モデルでモデル化する⁽¹⁵⁾。各セルには状態量 x を定義する。この状態量は物理的には一つのセルの水平方向の変位を表している。一般的な CA 法では状態量は整数値で定義されるが、実数値を用いても本質的には問題が無いので、本研究においては状態量は実数で定義する。このセルの状態量は、二段階に分けて更新される。第一段階は、黒いセルが固定され、白いセルがある局所近傍則に従って移動し、その後、白いセルが固定され、白いセルの移動と同じ局所近傍則に従って黒いセルが動く。

Fig.1 Distribution of cells

初めに文献⁽¹⁵⁾に基づいて、最も基本となる局所近傍則を説明する。説明の簡単のために、黒いセルが固定され白いセルが移動する場合について考える。図 2 のように中央の白いセル(i 番目のセル)の時間ステップ t における状態量を $x(i, t)$ とし、中央の白いセルと両側の黒いセルとの相対変位を以下のようにそれぞれ f_1, f_2 と定義すると、

$$\begin{aligned} f_1(i, t) &= x(i, t) - x(i-1, t) \\ f_2(i, t) &= x(i+1, t) - x(i, t) \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここで白いセルが動く局所近傍則としては、セル同士の反発によりセルは隣り合う二つのセルの重心に対して対称に移動するとする。

ここで両側の黒いセルの重心と白いセルの相対変位 X_{CM} を白いセルを基準に表すと

$$X_{CM} = \frac{1}{2}(x(i-1, t) + x(i+1, t)) - x(i, t) \quad (2)$$

となり、新しい白いセルの位置は

$$x(i, t+1) = 2X_{CM} + x(i, t) \quad (3)$$

となる。次に、新しく定義された白いセルの位置に対する黒いセルの相対変位 $f_1(i+1, t+1)$ を求めると、

$$\begin{aligned} f_1(i+1, t+1) &= x(i+1, t+1) - x(i, t+1) \\ &= x(i+1, t) - (2X_{CM} + x(i, t)) \\ &= x(i, t) - x(i-1, t) \\ &= f_1(i, t) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。上式の 2 行目右辺第 1 項は、 $i+1$ の位置にある黒セルは時間ステップ t においては移動しておらず $t+1$ での位置は t の時と同じであることを示している。同様にして $f_2(i-1, t+1)$ を求めることができる。これより黒いセルと白いセルの相対変位の更新法則を次式

Fig.2 Definition of state parameters

で得ることができる。

$$\begin{Bmatrix} f_1(i+1, t+1) \\ f_2(i-1, t+1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1(i, t) \\ f_2(i, t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

この更新法則によって、均質な媒体の波動伝播問題がシミュレーションされている⁽¹⁵⁾。

上式の局所近傍則は減衰が考慮されていないので、以下のように減衰の影響を考慮する。即ち減衰があると、減衰がないときよりもセルの変化の幅が少なくなると考えられる。そこで式(3)を次のように書き直す。

$$x(i, t+1) = (1-\alpha)X_{CM} + x(i, t) \quad (6)$$

ここで α は減衰の程度を表す $-1 \leq \alpha \leq 1$ の実数の係数である。特定の値として $\alpha=1$ の時はセルが全く動かないことを表し、 $\alpha=0$ の時はセルが重心に移動することを表し、 $\alpha=-1$ の時は減衰が無いことを表す。式(4)同様に新しく定義された白いセルの位置に対する黒いセルの相対変位を求めると、

$$\begin{aligned} f_1(i+1, t+1) &= x(i, t+1) - x(i+1, t) \\ &= \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)f_1(i, t) + \left(\frac{1+\alpha}{2}\right)f_2(i, t) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。同様にして $f_2(i-1, t+1)$ を求めることができ、これより黒いセルと白いセルの相対変位の更新法則を次式で得ることができる。

$$\begin{Bmatrix} f_1(i+1, t+1) \\ f_2(i-1, t+1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\alpha}{2} & \frac{1+\alpha}{2} \\ \frac{1+\alpha}{2} & \frac{1-\alpha}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1(i, t) \\ f_2(i, t) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここで定義した減衰は、波の振動数に依存しない減衰である。一般的に地盤には波の振動数とは無関係な材料減衰と、波の振動数に逆比例する散乱減衰が存在する。後者の減衰を考えるために、速度により減衰の大きさを変化させることを考える。そこで式(6)を次のように書き換える。

$$\begin{aligned} x(i, t+1) &= (1-\gamma)X_{CM} + x(i, t) \\ \gamma &= \alpha + \beta \cdot \left| \frac{x(i, t) - x(i, t-1)}{\Delta t} \right| \end{aligned} \quad (9)$$

β は α と同様に減衰の程度を表す実数の係数、 Δt はCA法の1タイムステップを実時間に対応させたときの時間刻みである。これより減衰を考慮した時の、黒いセルと白いセルの相対変位の更新法則は次式のようになる。

$$\begin{Bmatrix} f_1(i+1, t+1) \\ f_2(i-1, t+1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\gamma}{2} & \frac{1+\gamma}{2} \\ \frac{1+\gamma}{2} & \frac{1-\gamma}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1(i, t) \\ f_2(i, t) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ただし γ は式(9)に示されるとおりである。

2.2 反射・透過を考慮した局所近傍則 前節の局所近傍則は均質な媒体に対して成立するが、実際の地盤はいくつかの物性を持つ媒体から構成されている。そのような境界で生じる波動の反射、透過を再現できる局所近傍則を以下のように構築する。

図3に示すように各セルに重みを設定する。前節と同様、時間ステップ t において、黒いセルが固定され白いセルが移動する場合について考える。ここで上下の黒いセルの重みを表すパラメータをそれぞれ m_1 、 m_2 とすると、重みを考慮した重心位置は

$$X_{CM} = \frac{1}{m_1 + m_2} (m_1 x(i-1, t) + m_2 x(i+1, t)) - x(i, t) \quad (11)$$

となり、新しい白いセルの位置は式(3)と同様となる。そして新しく定義された白いセルの位置に対する黒いセルの相対変位を求めると、

$$\begin{aligned} f_1(i+1, t+1) &= x(i+1, t+1) - x(i, t+1) \\ &= \frac{2m_1}{m_1 + m_2} f_1(i, t) + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} f_2(i, t) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} f_2(i-1, t+1) &= x(i, t+1) - x(i-1, t+1) \\ &= \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} f_1(i, t) + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} f_2(i, t) \end{aligned} \quad (13)$$

となるので、両式より黒いセルと白いセルの相対変位の更新法則を次式で得ることができる。

Fig.3 Ground which consists of two layers

$$\begin{Bmatrix} f_1(i+1, t+1) \\ f_2(i-1, t+1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2m_1}{m_1+m_2} & \frac{m_1-m_2}{m_1+m_2} \\ \frac{m_2-m_1}{m_1+m_2} & \frac{2m_2}{m_1+m_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1(i, t) \\ f_2(i, t) \end{Bmatrix} \quad (14)$$

次に式(14)の更新法則の重みに関するパラメータ m_i ($i=1,2$)の決定方法について述べる。図3のように i 番目と $i+1$ 番目のセルの間に地盤の境界がある場合を考え、 i 番目側を地盤 A, $i+1$ 番目側を地盤 B とする。式(12)の右辺第1項は、 $f_1(i, t)$ を地盤 A から地盤 B へ向かう入射波と考えたとき、地盤 A から地盤 B への透過波であると考えられ、式(13)の右辺第1項は地盤 A への反射波であると考えられる。一方、式(12)の右辺第2項は、 $f_2(i, t)$ を地盤 B から地盤 A へ向かう入射波と考えたとき、地盤 B から地盤 A への透過波であると考えられ、式(13)の右辺第2項は地盤 B への反射波であると考えられる。

境界における波の反射、透過を定式化する。地盤 A, B のせん断弾性係数と密度をそれぞれ G_A, ρ_A, G_B, ρ_B とし、地盤 A から地盤 B へ向かって入射波 w_{in} が進み、境界を通過した後に反射波 w_{ref} と透過波 w_{th} に分かれる場合を考える。入射波と反射波、透過波の関係は以下ようになる。

$$w_{th} = \frac{2\kappa}{\kappa+1} w_{in}, \quad w_{ref} = \frac{\kappa-1}{\kappa+1} w_{in}, \quad \kappa = \frac{\sqrt{\rho_B G_B}}{\sqrt{\rho_A G_A}} \quad (15)$$

また逆に地盤 B から地盤 A に向かう波を考える場合は、以下の式が成り立つ。

$$w_{th} = \frac{2}{\kappa+1} w_{in}, \quad w_{ref} = \frac{1-\kappa}{\kappa+1} w_{in}, \quad \kappa = \frac{\sqrt{\rho_B G_B}}{\sqrt{\rho_A G_A}} \quad (16)$$

そして式(12)の右辺第1項と式(15)の w_{th} 、式(13)の右辺第1項と式(15)の w_{ref} 、及び式(12)の右辺第2項と式(16)の w_{ref} 、式(13)の右辺第2項は式(16)の w_{th} に対応する。従って次の関係を得ることができる。

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\sqrt{\rho_B G_B}}{\sqrt{\rho_A G_A}} \quad (17)$$

この関係は異なる地盤の境界でのみ必要となるものであり、 m_1 と m_2 の比が決まれば用いることができる。

2.3 端部における局所近傍例 本研究で扱っているのは一次元問題であるが、地表面は自由端となる。固定端及び自由端では、波が異符号及び同符号で反射するので、それらの状態を表す状態量の更新法則は次

式となる。

$$\begin{Bmatrix} f_1(i+1, t+1) \\ f_2(i-1, t+1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \pm 1 \\ \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1(i, t) \\ f_2(i, t) \end{Bmatrix} \quad (18)$$

ここで正の符号は自由端を表現し、負の符号は固定端を表現する。

2.4 伝播速度の表現方法 CA 法では、1 タイムステップで1セルの距離だけ情報が伝播するので、伝播速度は 1 cell/time step で一定である。しかし実際の地盤は、異なる特性の地盤が重なっており、地盤ごとに異なる伝播速度を持っている。この問題は、均質ではない媒体の波動伝播問題を CA 法で扱う際に生じる問題であり、Huang らは領域をセルに分割する際に、伝播速度の違いに応じてセルの配置の密度を調整している⁽¹⁶⁾。また著者らは、CA 法で計算した結果を実際のサイズに変換する際に時間を調整して伝播速度の違いを考慮している⁽¹²⁾。著者らの別の研究では、伝播速度の違いに対応して状態量を更新する間隔を調整する方法を採用している^{(13),(14)}。この考え方は、生体骨の適応的再構築シミュレーションにおいて生体組織の反応速度の違いを表現するときにも採用されている⁽¹⁷⁾。本研究では、文献^{(13),(14)}の考え方を採用することとする。その方法は具体的には以下のように説明されるが、二種類のセルを用いる本研究の方法では、異なる地盤間で状態量を更新する際に不都合が生じるので、その解決方法も示す。

例えば図4のようにセル番号 $i=1$ が地盤 A, $i=2, 3$ が地盤 B, $i=4, 5$ が地盤 C であり、各地盤の伝播速度比が地盤 A : 地盤 B : 地盤 C = 1 : 1/3 : 1/4 であるとする。図5は図4に示された5個のセルの状態量更新の順番を★印で示している。地盤 A に対して地盤 B は伝播速度が3倍遅いので、状態量の更新を行う時間が3倍長くなっているのがわかる。

ここで、 $i=3$ と $i=4$ のセルに着目する。 $i=3$ のセ

Fig.4 Ground which consists of three layers

Fig.5 Schedule of update

		time step (t)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Num. of cell (i)	1		★		★		★		★		★		★		★		★		★		★
	2	★						★						★						★	
	3				★						★						★				
	4	★								★									★		
	5					★									★						

ルの状態量が更新される $t=10$ と $t=16$ の間には $i=4$ のセルの状態量は更新されず、 $i=3$ のセルを続けて2回更新している。CA 法においてセルの状態量の更新は隣合う2つのセルの状態量を用いて行うため $i=3$ 、 $t=16$ の更新の際には、時間ステップ $t=10$ と $t=16$ の間に状態量が更新されない $i=4$ のセルは一時的に固定端の働きをしてしまう。そこで $i=3$ のセルで $t=16$ のような更新の際の特別な更新法則を考える。

$i=3$ のセルの状態量の更新は式(12)、(13)を用いて行われる。ここで、式(12)の右辺第2項は地盤 C の反射波であり、式(13)の右辺第2項は地盤 C からの透過波である。 $i=4$ のセルは時間ステップ $t=10$ と $t=16$ の間に状態量が更新されないで、地盤 C による透過波も反射波も時間ステップ $t=16$ の際には存在しないと考えられ、 $i=3$ のセルで $t=16$ のような更新の際には状態量の更新法則は以下になる。

$$\begin{cases} f_1(i+1, t+1) \\ f_2(i-1, t+1) \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{2m_1}{m_1+m_2} & 0 \\ \frac{m_1-m_2}{m_1+m_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} f_1(i, t) \\ f_2(i, t) \end{cases} \quad (19)$$

これを一時的に固定端の働きをしてしまうセルを片側に持つセルの状態量の更新法則とする。

2.5 理論的な増幅率の導出 CA 法で導出した結果の検証のため、理論的に導出された増幅率を用いる。導出課程⁽¹⁸⁾を簡単に示す。

質量密度 ρ 、せん断弾性係数 G 、減衰定数 h 、円振動数 ω が一定の場合の均質地盤の運動方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial^3 \xi(z, t)}{\partial t^3} + 2h\omega \frac{\partial^2 \xi(z, t)}{\partial t^2} - \frac{G}{\rho} \frac{\partial^3 \xi(z, t)}{\partial t \partial z^2} = 0 \quad (20)$$

地盤全体が一定の円振動数 ω で調和振動しているものとする、調和振動解は次式となる。

$$\xi(z, t) = (Ae^{ipz} + Be^{-ipz})e^{j\omega t}, \quad p = \sqrt{\frac{\rho}{G(1+2jh)}} \quad (21)$$

ここで水平な境界を持って層を成した成層地盤を考え、第 i 層の物性値を添え字 i で表す。地盤全体が一定の円振動数 ω で調和振動しているものとする、 $\xi_i(z_i, t)$ を層内の変位とすれば、調和振動解(21)は層ごとに成り立ち

$$\xi_i(z_i, t) = (A_i e^{ip_i z_i} + B_i e^{-ip_i z_i})e^{j\omega t}, \quad p_i = \sqrt{\frac{\rho_i}{G_i(1+2jh_i)}} \quad (22)$$

を得る。

境界条件を考えると、地表面 $z_1=0$ ではせん断応力が零であるので次式が成り立つ。

$$A_1 = B_1 = 0 \quad (23)$$

次に相重なる層の境界、即ち $z_i = H_i$ 、 $z_{i+1} = 0$ では上下層の変位とせん断応力が等しくなくてはならないことから次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} A_{i+1} &= \frac{1}{2} \left[(1+R_i) A_i e^{ip_i z_i} + (1-R_i) B_i e^{-ip_i z_i} \right], \\ B_{i+1} &= \frac{1}{2} \left[(1-R_i) A_i e^{ip_i z_i} + (1+R_i) B_i e^{-ip_i z_i} \right], \\ R_i &= \sqrt{\frac{\rho_i G_i (1+2jh_i)}{\rho_{i+1} G_{i+1} (1+2jh_{i+1})}} \end{aligned} \quad (24)$$

式(22)-(24)より、第 r 層の上端面における変位 $\xi_r(0, t)$ と、第 s 層の上端面における変位 $\xi_s(0, t)$ の比の絶対値 $Z_{r/s}$ をとると

$$Z_{r/s} = \frac{|\xi_r(0, t)|}{|\xi_s(0, t)|} = \frac{|(A_r + B_r)e^{j\omega t}|}{|(A_s + B_s)e^{j\omega t}|} = \frac{|A_r + B_r|}{|A_s + B_s|} \quad (25)$$

となり、これは増幅率と呼ばれている。

3. 数値例による検証

一調和振動する基礎地盤に対する応答

構築した手法を数値例によって検証する。まず初めに基礎地盤が調和振動したときの地表面の応答をシミュレーションして増幅率を求め、理論結果と比較・検討する。

3.1 解析条件の設定 解析対象は、軟弱地盤とその下に存在する硬い基礎地盤からなる地盤である。軟弱地盤の厚さを 10.8m とし、それが一層、二層、三層で構成されている場合を想定する。各層の厚さ、特性値を表 1 に示す。層の厚さや物性値は、伝播速度が整数比になるように便宜的に定めたものである。基礎地盤は一定周波数 (0.2Hz ~ 20.0Hz) を持つ振幅 $A_{in} = 1.0 \times 10^{-5}$ m の正弦波状に振動するものとする。

地盤の垂直方向に白と黒のセルを交互に配置する。このとき空間刻みは 0.01925m とし、562 個のセルを用いる。セルの番号と層の対応も表 1 に示す。いずれの場合も第 1 番目のセルが基礎地盤を、第 562 番目のセルが地表面を表す。

基礎地盤を表す第 1 番目のセルを正弦波状に水平方向に振動させる。そして本研究で構築した局所近傍則

に基づいてセルの状態を更新する。十分時間が経過し、地表面の振動が定常状態になったときの振幅 A_{out} を求める。そして A_{out}/A_{in} によって増幅率を求める。なお式(9)に現れるパラメータは、実際の現象にあうように $\alpha = 2.5 \times 10^{-4}$ 、 $\beta = 2.5 \times 10^{-3}$ と定める。また実際の時間刻みは、基礎地盤の最も速い伝播速度 501.3m/sec で一セルを通過する時間から $\Delta t = 3.8 \times 10^{-5}$ とする。そして 2.5 節に現れる減衰定数 h はすべての層において一定で

$$h = a/\omega + b \quad (26)$$

によるものとし、 $a=2.0$ 、 $b=0.014$ とする。

Fig.6 Amplification ratio for the case of Table 1(a)

Fig.7 Amplification ratio for the case of Table 1(b)

Fig.8 Amplification ratio for the case of Table 1(c)

Table 1 Properties of stratum

(a) Ground which consists of one layer

layer	depth (m)	unit mass (ton/m ³)	shearing modulus (MPa)	ratio of propagation speed	cell number
2	10.8	1.85	51.7	1/3	2 - 562
1	—	1.95	490	1	1

(b) Ground which consists of two layer

layer	depth (m)	unit mass (ton/m ³)	shearing modulus (MPa)	ratio of propagation speed	cell number
3	7.0	1.67	26.2	1/4	198 - 562
2	3.8	1.85	51.7	1/3	2 - 197
1	—	1.95	490	1	1

(c) Ground which consists of three layer

layer	depth (m)	unit mass (ton/m ³)	shearing modulus (MPa)	ratio of propagation speed	cell number
4	3.8	1.50	10.5	1/6	366 - 562
3	3.2	1.67	26.2	1/4	198 - 365
2	3.8	1.85	51.7	1/3	2 - 197
1	—	1.95	490	1	1

3.2 解析結果 表1の三種類の地盤に対応する増幅率をそれぞれ図6, 7, 8に示す。図中の実線は本研究で提案するCA法によって求めた結果、破線は2.5節の方法による結果である。図7, 8の場合は、2.4節で示した状態量更新の間隔を調整する方法を用いている。

いずれも場合も、本研究で提案するCA法によって求めた増幅率と2.5節の理論的に求めた増幅率はほぼ一致しており、提案した手法の有効性を示すことができたと考えられる。

4. 数値例による検証

一実地震波で振動する基礎地盤に対する応答一

次に基礎地盤が実際に計測された振動をしたときの地表面の応答をシミュレーションして増幅率を求め、計測結果⁽¹⁹⁾と比較・検討する。

4.1 解析条件の設定 文献⁽¹⁹⁾を参考にして解析条件を以下のように設定する。解析対象は、軟弱地盤とその下に存在する硬い基礎地盤からなる地盤である。軟弱地盤の厚さを10.9mであり、それが三層で構成されている。各層の厚さ、特性値を表2に示す。基礎地盤は図9で示される加速度で水平方向に振動するものとする。この入力地震波は水平方向加速度であるがCA法で取り扱うのは振幅値であるため、加速度波形を積分して変位に変換し、入力データとする。

地盤の垂直方向に白と黒のセルを交互に配置する。このとき空間刻みは0.02mとし、545個のセルを用いる。セルの番号と層の対応も表2に示す。第1番目のセルが基礎地盤を、第545番目のセルが地表面を表す。

その他のパラメータは前章と同様に設定する。

4.2 解析結果 地表面の振動状態(水平方向加速度)を図10に示す。また増幅率の結果を図11に示す。図11においては、本研究で提案するCA法によって求めた結果と文献⁽¹⁹⁾に記載された結果の両方を示す。ここでCA法による計算はすべて振幅値を扱っているが、地震波は加速度で議論されることが多いことと、比較している文献⁽¹⁹⁾のデータが加速度で表現されていることから、図10, 11では、CA法で得られた振幅値を数値的に微分して加速度で表している。

図11より、増幅率が大きくなる周波数は実測結果とほぼ一致していること、約8Hzに存在する二次の増幅率は実測結果とほぼ一致しているが、約3Hzに存在する一次の増幅率、約14Hzに存在する三次の増幅率の大きさは実測結果と異なっていることがわかる。

本解析の結果は、表2のデータをそのまま使用したものである。本来ならば実測値にあうように局所近傍則のパラメータを定めることになるので、各層の厚さ

Table 2 Properties of stratum

layer	depth (m)	unit mass (ton/m ³)	shearing modulus (MPa)	ratio of propagation speed	cell number
4	3.8	1.50	11.8	1/6	359 - 545
3	3.2	1.67	28.4	1/4	198 - 358
2	3.9	1.85	55.9	1/3	2 - 197
1	—	1.95	490	1	1

Fig.9 Acceleration of fundamental ground

Fig.10 Acceleration of ground surface

Fig.11 Amplification ratio

や物性値を調整すればさらに実測値にあわせることはできるが、本研究では行っていない。なぜなら実際の現象は三次元空間で生じていることや、地震波の測定精度の影響を考慮すると、文献に示されている実測データに一致するように各種パラメータを調整することが、必ずしも最も重要なこととは考えられないからである。むしろ、地盤の標準的な物性値やパラメータを用いて、一次元伝播シミュレーションによってこのように一致させることができたと言える。

5. 結 言

本研究では、セルの移動に基づく局所近傍則を用いた CA 法によって、震源から地表面までの地震波の伝播シミュレーションを行う手法を構築した。そのため解析対象である地盤を一次元モデルでモデル化し、垂直方向にセルを配置した。そしてセル間の相互作用、異なる特性を有する地盤間の反射や透過現象を表現する局所近傍則を構築した。さらに地盤によって伝播速度が異なる場合に、間欠的に地盤の状態量を更新する方法を提案した。

数値例によって提案した手法を検証した。初めに、基礎地盤が調和振動する場合の地震波の伝播をシミュレーションし、基礎地盤と地表面の振動の増幅率を理論解析結果と比較したところ十分に一致する結果が得られた。次に基礎地盤と地表面の振動が測定されている地震波の伝播をシミュレーションしたところ、計測結果とよく一致した結果を得ることができた。

従って本研究で構築した CA 法を用いたシミュレーション手法は、有効な方法であるといえる。

文 献

- (1) Bastien Chopard and Michel Droz, Cellular Automata Modeling of Physical Systems, (1998), Cambridge University Press.
- (2) 加藤恭義・光成友孝・築山洋, セルオートマトン法, (1998), 森北出版.
- (3) 森下信, セルオートマトン, (2003), 養賢堂.
- (4) H.Chen, S.Chen, G.Doolen and Y.C.Lee, Simple Lattice Gas Models for Waves, Complex Systems, 2, (1988), 259-267.
- (5) H.Chen, S.Chen and G.Doolen, Sound wave propagation in FHP lattice gas automata, Physics Letters A, 140(4), (1989), 161-165.
- (6) P.Lavallee, Attenuation of sound waves in lattice gases, Physics Letters A, 163(5-6), (1992), 392-396.
- (7) Y.Sudo and V.W.Sparrow, A new lattice gas model for 1-D sound propagation, Journal of Computational Acoustics, 1(4), (1993), 423-454.
- (8) Y.Sudo and V.W.Sparrow, Sound Propagation Simulation Using Lattice Gas Methods, AIAA J., 33, (1995), 1582-1589.
- (9) 小松崎俊彦他三名, CA 法による波動伝播解析, 機構論, No.98-8I(1998-8), 472-475.
- (10) 小松崎俊彦他三名, CA法を用いた2次元音場解析, 機構論, No.99-7(1999-3), 451-454.
- (11) S.Kawamura, M.Shirashige and T.Iwatsubo, Nonlinear Dynamic Analysis of a String by Using Cellular Automata Method, Proc. the Asia-Pacific Vibration Conference'99, 2, (1999), 1118-1123.
- (12) S.Kawamura, M.Shirashige and T.Iwatsubo, Simulation of the nonlinear vibration of a string using the Cellular Automaton method, Applied Acoustics, 66(1), (2005), 77-87.
- (13) S.Kawamura, M.Shirashige and T.Iwatsubo, Simulation of Seismic Wave Propagation Using Cellular Automata Method, Proc. the Asia-Pacific Vibration Conference 2001, 2, (2001), 570-574.
- (14) 河村庄造・白重匡貴・寺井靖典・岩壺卓三, セルラー・オートマトン法による地震波の伝播シミュレーションに関する研究, 機論, 71-703, C(2005), 792-798.
- (15) 文献(1)の256-258.
- (16) J.Huang, Y.Chu and C.Yin, Lattice Gas Automata for Modeling Acoustic Wave Propagation in Inhomogeneous Media, Geophysical Research Letters, 15(11), (1988), 1239-1241.
- (17) 河村庄造・神谷一徳・岩壺卓三・松田光正・黒坂昌弘・吉矢晋一・山口基, セルラーオートマトン法を用いた生体骨の適応的再構築に関する研究, 機論, 68-675, A(2002), 1600-1606.
- (18) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, (1994), 186-190, 鹿島出版会.
- (19) (9)の190-193.