

# サイトの非線形パラメタを取り込んだ 経験的Green関数法

野津 厚<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部  
(〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

2000年鳥取県西部地震について経験的 Green 関数法による本震地動のフォワードモデリングを試みたところ、地盤が比較的堅固であるにもかかわらず、本震波形の後半部分が周辺地盤の非線形挙動の影響を受けていると見られるサイトが存在した。本研究では周辺地盤の非線形挙動を表現するための非線形パラメタを新たに定義し、これを用いて経験的 Green 関数を補正することを提案する。補正後の経験的 Green 関数を用いて本震地動のフォワードモデリングをあらためて実施し、良好な結果が得られることを示す。また、経験的 Green 関数を用いて震源インバージョンを行う場合にも上述の非線形パラメタが有効であることを示す。

**Key Words :** Empirical Green's function, Soil nonlinearity, The 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake, Forward modeling, Inversion

## 1. はじめに

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震について、経験的 Green 関数法による本震地動のフォワードモデリングを試みたところ、本震地動の比較的低い振動数成分をある程度説明できるモデルを求めることができたが<sup>1)</sup>、このとき、一部のサイトで合成波の後半部分が観測波と比較して位相が系統的に早く、また振幅が系統的に大きくなる現象が見られた。これは周辺地盤の非線形挙動によるものと考えられる。本研究ではこのような現象を再現するため、周辺地盤の非線形挙動を表現するための非線形パラメタを新たに定義し、これを用いて経験的 Green 関数を補正することを提案する。補正後の経験的 Green 関数を用いてフォワードモデリングおよびインバージョンを行い、ここで定義する非線形パラメタが有効であることを示す。

## 2. 非線形パラメタの必要性

まず、非線形パラメタを用いずに実施したフォワードモデリングの結果<sup>1)</sup>について述べる。

図-1に本震の震央と推定断層面を示す。また11月3日の余震の震央を同時に示す(震源深さは

5km)。モデリングの対象には図-1に示す5つのサイトを選択した。これらのサイトは震源のメカニズム(ほぼ鉛直な横ずれ断層)から判断して比較的SH波のradiationが大きいと考えられるサイトを選択したものである。また、本来経験的 Green 関数法では周辺地盤の線形的な挙動を前提とするので、サイトの非線形挙動の影響を避けるため、できるだけ堅固な地盤条件のサイトを選択した。ここでは原則としてtransverse成分をモデル化の対象とした。ただし震源近傍のサイトであるTTRH02については断層直交成分を対象とした。余震波形を周波数領域で積分し、0.1-2.0Hzの帯域通過フィルタに通した速度波形をGreen関数として用いた(図-2)。また本震波形に同様の処理をほどこして得た速度波形をモデリングのターゲットとした(図-3)。本震波形の合成にはIrikura<sup>2)</sup>の方法を用いた。ラディエーションパターンの補正は行っていない。

フォワードモデリングの結果、観測結果をある程度説明できるモデルとして、図-4および表-1に示すモデルを得た。図-3に同モデルに対する合成波と観測波の比較を示す。両者の一致はおおむね良好である。ここで図-3を子細に見ると、SMN001及びSMNH10の後半部分において合成波は観測波と比較して位相が系統的に早く、また振幅が系統的に

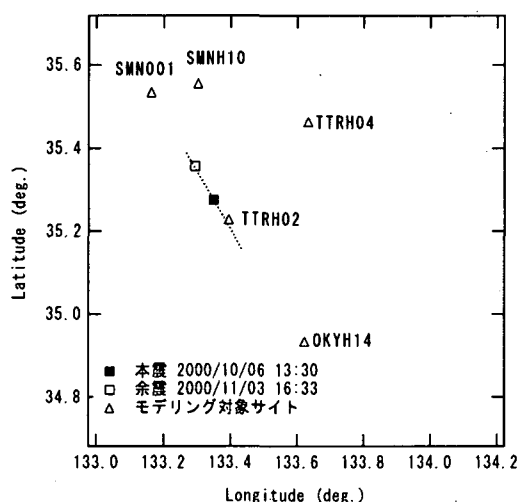


図-1 本震・余震の震源とサイトの位置関係

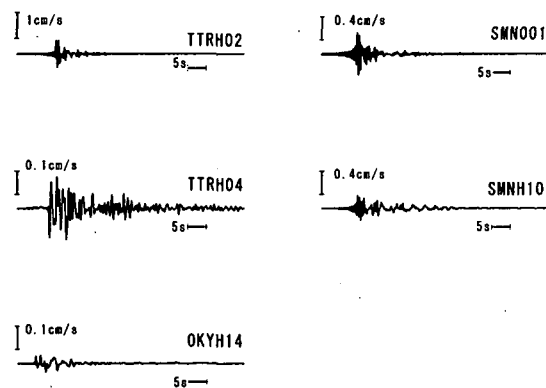


図-2 経験的 Green 関数として用いた余震波形

表-1 複数アスペリティーモデルのパラメータ

| asperity | L  | W  | $t_0$ | $V_r$ | $\tau_r$ | N | $M_0$                 |
|----------|----|----|-------|-------|----------|---|-----------------------|
|          | km | km | s     | km/s  | s        |   | dyne-cm               |
| 1        | 7  | 4  | 0     | 2.8   | 0.6      | 8 | $2.57 \times 10^{25}$ |
| 2        | 2  | 2  | 0     | 2.8   | 0.4      | 4 | $3.21 \times 10^{24}$ |
| 3        | 4  | 2  | 3     | 2.8   | 0.4      | 5 | $6.26 \times 10^{24}$ |
| total    |    |    |       |       |          |   | $3.51 \times 10^{25}$ |

注)  $t_0$  は asperity 1 に対する相対的な破壊開始時刻を示す。

大きくなっている。この点について以下に考察を行う。

図-5 に SMN001 および SMNH10 の地盤条件を示す。同図に示すようにこれらのサイトは比較的堅固であり、SMNH10 表層の 4m がやや軟弱ではあるが、なくとも 2Hz 以下の比較的低い振動数成分がサイト直下の非線形挙動の影響を受けているとは考えにくい。ここで、これらのサイトの地形的特徴について考察する。図-6 に示すように、いずれのサイトも島根半島と米子平野との境に位置しており、震源とサイトは堆積盆地を挟んで向き合う関係にある。

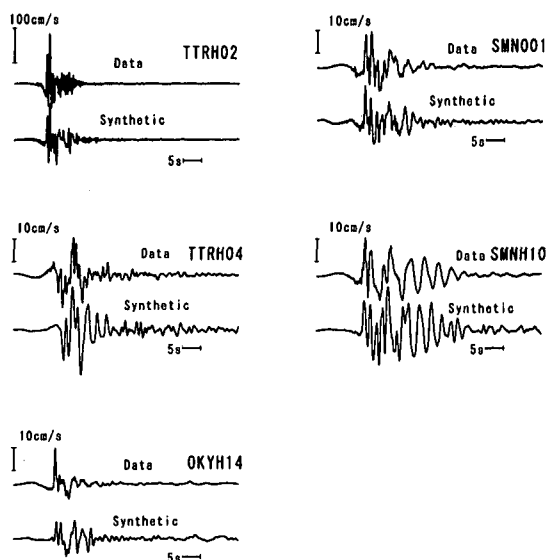


図-3 フォワードモデリング結果 (1) 線形

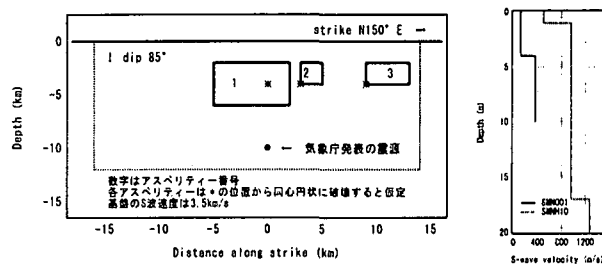


図-4 複数アスペリティーモデル

図-5 地盤条件

このような地形的特徴から、堆積盆地を重複反射しながら伝播する S 波もしくは Love 波が盆地端部の SMN001 や SMNH10 といったサイトに影響を及ぼすものと考えられる (図-7)。事実、これらのサイトでは観測波の後半部分に S 波の重複反射もしくは Love 波によると見られる顕著な位相が見られる。S 波にせよ Love 波にせよ堆積盆地内を伝播する間には表層地盤の非線形挙動の影響を受けると考えられる。地盤の非線形挙動としては、通常、剛性の低下 (すなわち S 波速度の低下) と減衰定数の増加が想定される。この結果、観測波の後半部分の位相が線形時と比較して系統的に遅く、また振幅が系統的に小さくなったと考えれば、観測波と合成波の差異を合理的に説明できる。本研究では、SMN001 および SMNH10 における観測波が上述の意味で周辺地盤の非線形挙動の影響を受けていると考え、以下においては経験的 Green 関数法に周辺地盤の非線形挙動を取り込む方法を検討する。

### 3. 非線形パラメタの定義と物理的意味

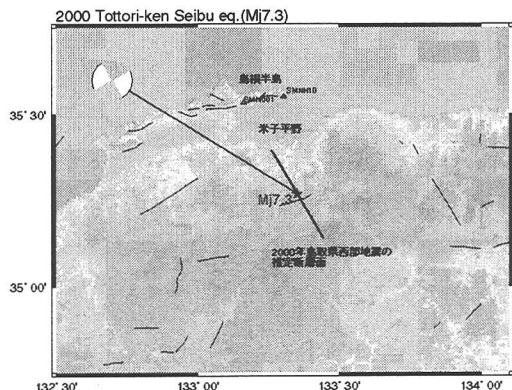


図-6 SMN001 と SMNH10 の周辺の地形的特徴

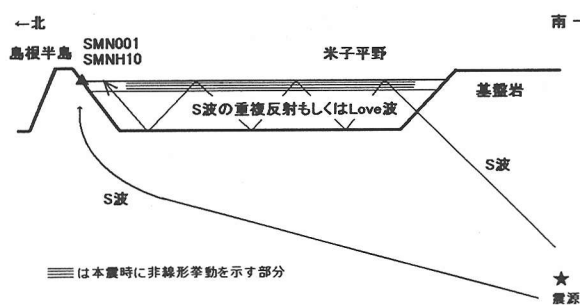


図-7 SMN001 等に到来する地震波の経路

経験的 Green 関数法の最大の利点は、震源からサイトに至る地下構造についての知識を前提としないことである。経験的 Green 関数法に周辺地盤の非線形挙動を取り込む際には、上述のような利点が失われることのないよう、できるだけ簡便な方法を用いることが望ましい。そこで、ここでは以下の2つの非線形パラメータ $\nu_1$ と $\nu_2$ を用いることを提案する。

$\nu_1$ は堆積盆地内の媒質の平均的なS波速度の低下率を示すパラメータである。すなわち $\nu_1 = V_s/V_{s0}$ である。ここに $V_s$ は非線形時のS波速度、 $V_{s0}$ は線形時のS波速度である。経験的 Green 関数(余震記録)の直達S波の到来時刻を $t_0$ 、波形後半のある位相の到来時刻を $t$ としたとき、 $t-t_0$ は近似的には当該位相が堆積層内に留まっていた時間を示すと考えることができる。非線形時にはS波速度が $\nu_1$ 倍になるのであるから、当該位相の到来時刻は $t_0 + (t-t_0)/\nu_1$ となるはずである。このような考え方で経験的 Green 関数の時刻 $t_0$ 以降の部分を $1/\nu_1$ 倍に引き延ばす。

一方 $\nu_2$ は堆積盆地内の媒質の平均的な減衰定数の増加を意味するパラメータである。一般に減衰定数 $h$ の地盤を角振動数 $\omega$ の地震波が時間 $t$ だけ伝播する間に振幅は $\exp(-h\omega t)$ 倍となる。地盤の非線形性により減衰定

数が $h_0$ から $h$ に変わったとすれば、堆積層内を時間 $t-t_0$ だけ伝播した後では地震波の振幅は線形時と比較して $\exp(-\nu_2(t-t_0))$ 倍となる。ここに $\nu_2 = \omega(h-h_0)$ である。

実際には堆積盆地内の媒質のうち非線形挙動を示すのは地表に近い部分だけであると考えられるが(図-7)、 $\nu_1$ 、 $\nu_2$ といったパラメータは深さ方向に平均化された値である。これら2つの非線形パラメータを用いて経験的 Green 関数は次式により補正される。

$$g'(t) = g(t) \quad (t < t_0)$$

$$g'(t) = g(t_0 + \nu_1(t-t_0)) \exp(-\nu_2(t-t_0)) \quad (t > t_0) \quad (5)$$

ここに $g'(t)$ は補正後の経験的 Green 関数、 $g(t)$ は補正前の経験的 Green 関数である。

#### 4. 非線形パラメータを用いたフォワードモデリング

上述の非線形パラメータを SMN001 および SMNH10 の経験的 Green 関数に適用して補正し、2.で述べた震源モデルに基づいて重ね合わせ、改めて SMN001 および SMNH10 における本震波形を合成した。非線形パラメータは試行錯誤により $\nu_1=0.9$ 、 $\nu_2=0.02$ を用いることとした。図-8に結果を示す。同図に示すように、非線形パラメータを用いることにより、SMN001 および SMNH10 の波形の後半部分の位相と振幅が良好に再現できた。なお、 $\nu_1=0.9$ はS波速度が線形時の90%程度であることを意味し、 $\nu_2=0.02$ は、対象周期を5秒程度とすれば、減衰定数が線形時より2%ほど大きいことを意味する。

#### 5. 非線形パラメータを用いたインバージョン

一般に、近地の記録を用いて震源インバージョンを行う際、経験的 Green 関数を用いれば、地下構造の情報不足に伴う不確実性を回避することができる。その際、本震波形のS波部分だけをターゲットとすることも選択肢の一つではあるが、このとき、本震波形の後半部分が、遅れて破壊したサブイベントからの直達S波であるか、あるいはなんらかのサイト効果によって遅れてきた波であるかについて人為的な判断を下すことになり、任意性が残る。そこで、後半部分を含む本震波形全体をターゲットとすることができれば、そのメリットは大きい。このとき、本震波形の後半が非線形挙動の影響を受けているとすれば、3.で述べた非線形パラメータの適用が有効である。

ここでは実際にインバージョンを実行して、非線形パ

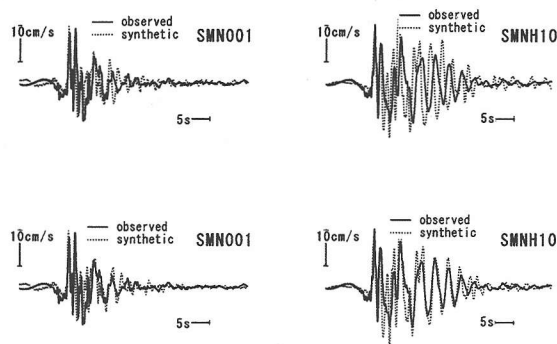


図-8 フォワードモデリング結果 (2)  
非線形パラメタ無し (上) と有り (下)

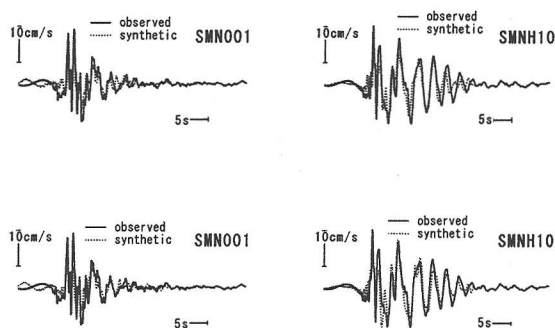


図-9 インバージョン結果  
非線形パラメタ無し (上) と有り (下)

ラメタを用いる場合と用いない場合を比較し、非線形パラメタの有効性を確認することとした。

インバージョンは Harzell and Heaton<sup>3)</sup> の方法で行った。図-1 に破線で示す 30km × 12km の領域を 30 × 12 に分割し、それぞれの領域では、破壊フロント通過後の 2.4 秒間に 4 回のすべりが許されるものとした。破壊フロントは気象庁発表の震源から同心円状に速度 2.8km/s で広がるものとし、基盤の S 波速度は 3.5km/s とした。インバージョンには非負の最小自乗解を求めるためのサブルーチン<sup>4)</sup> を用いた。また、すべりの時空間分布を滑らかにするための拘束条件を設けた。

図-9 は Green 関数を非線形パラメタで補正する場合としない場合の観測波と合成波の一致度を比較したものである。非線形パラメタを用いない場合、SMN001 と SMNH10 では、合成波の第 1 波の振幅が過小評価されるなど観測波と合成波の一致度は劣化する。このように、経験的 Green 関数を用いて震源インバージョンを行う際にも、3.で提案した非線形パラメタは有効である。

図-10 に、非線形パラメタを用いたインバージョンで得られた最終すべり量の分布を示す。同図によれば、本震は複数のサブイベントからなる。1 つ目のサブイベントは震源のやや南の深い位置で生じており、2 つ目のサブイベントは震源の真上の浅い位置で生じている。すべり量は最大で 2.5m となっている。

## 6. 結論

本研究では、経験的 Green 関数法に周辺地盤の非線形挙動を取り込むための非線形パラメタを新たに提案した。非線形パラメタにより補正された経験的 Green 関数を用いて鳥取県西部地震の本震地動のフォワードモデリングを実施したところ良好な結果が得られた。経験的 Green 関数を用いて震源インバージョンを行う場合にも上述の非線形パラメタは有効である。

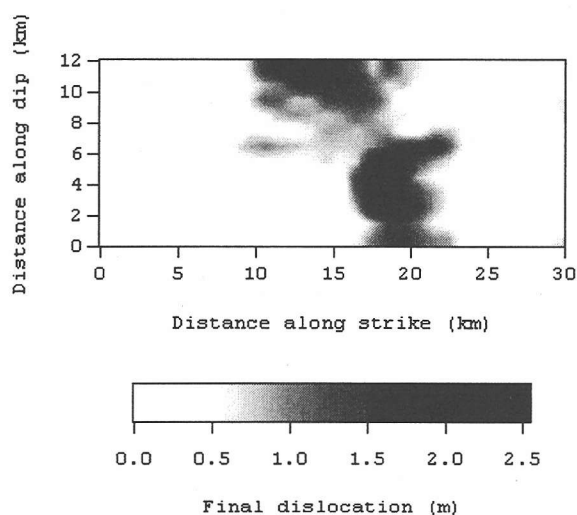


図-10 インバージョンで得られた最終すべり量の分布

謝辞：本研究には k-net 及び kik-net の記録を用いました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 野津厚：経験的 Green 関数法による鳥取県西部地震の本震地動のモデル化，第 36 回地盤工学研究発表会，2001 年 6 月（印刷中）。
- 2) Irikura, K. : Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquakes, *Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol.32, 1983, pp.63-104.
- 3) Hartzell, S.H. and Heaton, T.H.: Inversion of Strong Ground Motion and Teleseismic Waveform Data for the Fault Rupture History of the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vo.73, No.6, 1983, pp.1553-1583.
- 4) Lowson, C.L. and Hanson, R.J.: Solving Least Squares Problems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.