

経験的グリーン関数の包絡特性を考慮した地震動の合成方法

小鹿 健平

正会員 工博 東電設計(株) 技術開発本部 地震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

半経験的グリーン関数法は、相似則により大地震の断層面を複数の小断層に分割し、適切な地震観測記録をグリーン関数として大地震の地震動を合成する手法である。現状では、個々の小断層による評価地点の地震動振幅が幾何減衰により異なるが、包絡特性は同じである。本研究では、地震観測記録を複数の波群に分解し、各波群の到達時間と震源距離を用いて等価群速度分散曲線を求め、求めた等価群速度分散曲線を用いて評価地点と小断層の距離により各波群の到達時間を計算し、個々の小断層に対して波群の足し合わせによりグリーン関数を作成する方法を提案した。この方法により評価地点における深部構造の影響を含めた伝播経路の影響が合成された大地震の波形に反映できると考えられる。

Key Words : *Semi-empirical Green function method, envelope characteristics, group velocity, dispersion curve*

1. まえがき

半経験的グリーン関数法(ex. Hartzell, 1978; Irikura, 1983)を用いて大地震の地震動を合成する方法は、設計用入力地震動の設定や地震防災に必要なシナリオ地震に対する地震動の推定において有効な手法の一つである。半経験的グリーン関数法は、相似則に基づき大地震の断層面を複数の小断層に分割し、小断層の地震動をグリーン関数として大地震の地震動を合成する手法である。経験的グリーン関数として、地震観測記録を用いることが一般的であるが、地震動の統計的な特性を用いて人工的に合成した地震動をグリーン関数とする手法も提案されている(ex. 原田ら, 1995)。地震観測記録を経験的グリーン関数とする場合、合成しようとする大地震と同じ伝播経路の地震観測記録を用いることにより震源から評価地点までの伝播経路の影響が考慮できるのが特徴である。

大地震の地震動を合成する際には、個々の小断層による評価地点の地震動の振幅、周波数特性、包絡特性が小断層の震源距離により変化する必要があると考えられる。しかし、人工的に合成した地震動をグリーン関数とする場合はそれを満足することができ、地震観測記録をグリーン関数とする場合は振幅の幾何減衰を考慮するが、周波数特性、包絡特性の変化を考慮していないのが現状であり、観測記録に含まれている伝播経路の影響が合成した大地震の波形に十分反映されたとはいえない。経験的グリーン関数の周波数特性については、Lu(2000)によりQ値を用いて地震波伝播の非線形減衰を考慮するこ

とと地震動応答スペクトルの距離減衰式を用いてグリーン関数の周波数特性を震源距離に応じて補正する方法を提案した。

本研究では、グリーン関数の包絡特性の変化を考慮するため、まず、エネルギー伝播の観点から地震観測記録を複数の波群に分解し、各波群の到達時間と震源距離を用いて観測地点における等価群速度分散曲線を求めた。次に、求めた等価群速度分散曲線を用いて評価地点と小断層間の距離により各波群の到達時間を計算し、個々の小断層に対して波群の到達時間を考慮して波群を足し合わせるによりグリーン関数を作成する方法を提案した。この方法は、個々の小断層のグリーン関数の包絡特性が異なり、合成地点の深部構造の影響を含めた伝播経路の影響が合成された大地震の波形に反映できると考えられる。

2. 包絡特性の補正方法

大地震の地震波形は半経験的グリーン関数法により下式を用いて合成される。

$$A(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r_e}{r_{ij}} [a(t - t_{ij})] \quad (1)$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{V_s} + \frac{d_{ij}}{V_r} \quad (2)$$

ここで、

- $A(t)$: 合成しようとする大地震の地震動
- $a(t)$: 経験的グリーン関数とする地震観測記録
- $N \times N$: 大地震の断層面の分割数
- r_e : 観測記録の震源距離
- r_0 : 破壊開始点から評価地点までの距離
- r_{ij} : 小断層(i, j)の震源距離
- V_s : S波伝播速度
- V_r : 断層破壊速度

S波伝播速度と断層破壊速度は定数であるので、異なる震源距離を有する小断層のグリーン関数の波形が時間軸上でずれるだけで、周波数特性、包絡特性の変化はない。ここでは、地震波伝播の分散性を考慮できるように地震観測記録を波群に分解する。つまり、

$$a(t) = \sum_{l=1}^M a(\omega_l, t) \quad (3)$$

ここで、Mは分解した波群の数、 $a(\omega_l, t)$ は中心円振動数 ω_l の波群の時刻歴である。観測記録の震源距離が r_e 、発震時刻から波群 $a(\omega_l, t)$ が観測地点に至るまでの時間が $t_e(\omega_l)$ とすると、観測記録における等価群速度は以下のように求められる。

$$U(\omega_l) = \frac{r_e}{t_e(\omega_l)} \quad (4)$$

(3)と(4)式を用いて、大地震の合成式(1)と(2)を以下のように書き直しすることができる。

$$A(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \frac{r_e}{r_{ij}} [a(\omega_l, t - t_{ij}(\omega_l))] \quad (5)$$

$$t_{ij}(\omega_l) = \frac{r_{ij} - r_0}{U(\omega_l)} + \frac{d_{ij}}{V_r} \quad (6)$$

(5)と(6)式を用いて大地震の地震波形を合成する場合、個々の小断層の地震波形が震源距離に応じて変化し、地震動の包絡特性に対する震源距離の影響が考慮できると考えられる。

3. 計算例

経験的グリーン関数の包絡特性を補正して大地震の地震動を合成する方法を仮想地震に対して適用した。仮想地震の断層モデル及び合成に関するパラメータを表-1に示す。評価地点は断層の端から50kmの位置にした(図-1)。経験的グリーン関数として千葉県東方沖地震(1987, M=6.7, H=57km)の東京大学千

表-1 合成パラメータ一覧

マグニチュード M	7.8
断層長さ L(km)	100
断層幅 W(km)	50
スリップ量 U(m)	3.2
断層上端深さ H(km)	10
傾斜 δ (°)	20
立ち上がり時間 τ (s)	3.2
地震波伝播速度 V_S (km/s)	4.5
破壊伝播速度 V_R (km/s)	3.5
破壊開始点	左上端
破壊形式	等方円
合成倍率	4×4×4

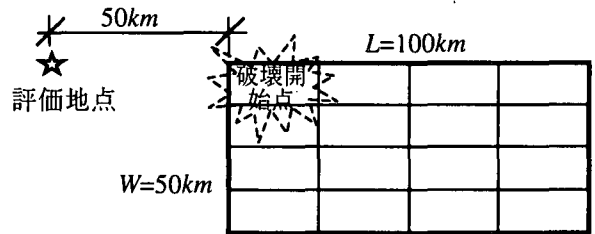


図-1 評価地点と断層面の位置関係図

葉実験所の記録(Katayama et al., 1990, $\Delta=45$ km)を用いた。この記録を波群に分解する際、分解に用いる周波数のバンド幅はフィルターした波形を目視して決定した。今回の場合、0.1-20.1Hzの周波数範囲で0.2Hzのバンド幅を用いて100個の波群に分解することとした。例として、10個の波群の時刻歴を図-2に示す。

等価群速度を求めるために、波群の到達時間を求める必要がある。波群の到達時間は図-2を用いて波群包絡の最大値に対応する時間を用いることができるが、ここでは、解析的に求めるため群遅延時間を用いることとした。和泉・勝倉(1983)によると、群遅延時間の平均値は時刻歴の包絡関数の重心の位置、つまり、波群の到達時間に対応する性質がある。観測記録により求めた平均群遅延時間を図-3の細線で示す。図-3の細線はFFT変換のすべての周波数に対して求めた平均群遅延時間である。この平均群遅延時間を用いて波群分解に用いた0.2Hz周波数範囲の平均を計算し、各波群の到達時間を求めた。それを図-3の太線で示す。これを見ると、周期0.1秒以下では、波群の到達時間は平均的に周期による変化は見られない。周期0.1秒以上において波群の到達時間が平均的に長周期になるほど到達時間が遅くなる傾向が見られる。

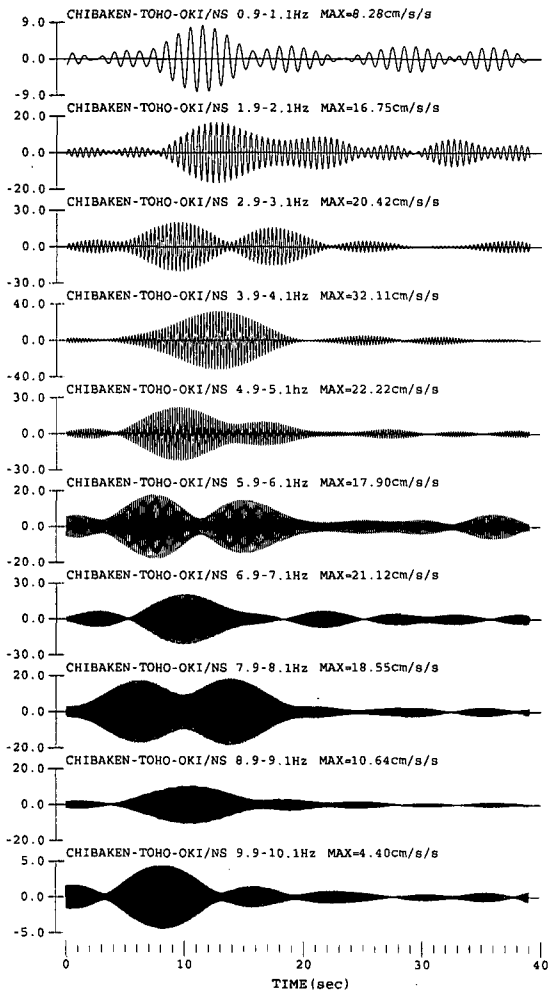


図-2 分解した波群の例

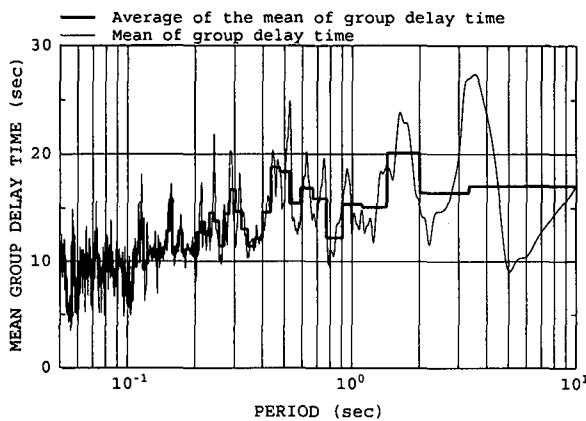


図-3 観測記録により求めた群遅延時間

図-3で示した到達時間は地震計のトリガー時刻からの時間である。等価群速度を求める際には発震からトリガーまでの11秒を足して用いた。等価群速度を図-4に示す。等価群速度は全体的に周期が長いほど遅い傾向があり、おおよそ2.5km/sec-4.5km/secの

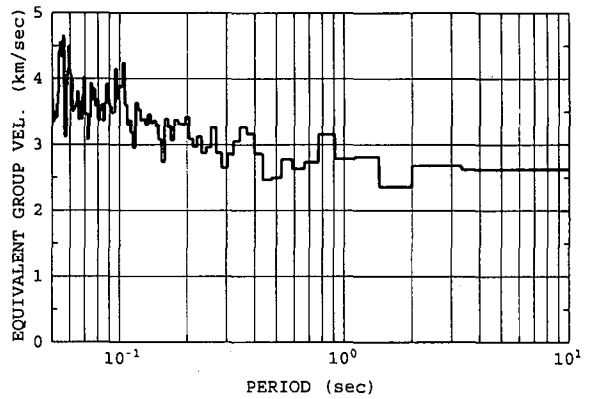


図-4 等価群速度分散曲線

間で変動する。

経験的グリーン関数の包絡特性を補正したと補正しない場合において仮想地震の地震波形を合成した。補正した場合の16個の小断層の地震波形を図-5に示す。個々の小断層の波形が震源距離により異なることが確認された。補正しないと補正した両者の合成波形を図-6に示す。包絡特性を補正した場合の波形は補正しない場合の波形と比べ、継続時間はさほど大きな差がないが、若干長い。継続時間が大きな差が見られないことは合成地震波形の継続時間に対して断層破壊の時間が支配的であると考えられるが、若干長いことは包絡特性を補正した影響である。補正しない場合、合成波形の継続時間は観測記録の震源距離と無関係であるが、補正した場合、観測記録の震源距離によって合成波形の継続時間が変化する。

合成地震波形の加速度応答スペクトルを図-7に示す。周期0.1秒から0.4秒の間と1秒以上の周期範囲では包絡特性が補正した場合の応答スペクトルが補正しない場合の応答スペクトルより大きい、それ以外の周期に対しては両者がほぼ同じである。補正した場合の波形の最大値が補正しない場合の最大値より若干小さいにもかかわらず、補正した場合の応答スペクトルが特に長周期範囲において大きい。

4. あとがき

地震観測記録を経験的グリーン関数として大地震の地震波形を合成する場合、観測記録に含まれている深部構造を反映した伝播特性を用いて個々の小断層の地震動の包絡特性を補正する方法を提案した。この方法により個々の小断層のグリーン関数の包絡特性が異なり、評価地点の深部構造の影響を含めた伝播経路の影響が合成された大地震の波形に反映できると考えられる。ただし、観測記録を波群に分解する際の適当な周波数バンド幅の選択方法はこれからの課題である。

5. 参考文献

- Hartzell, S.H. (1978), "Earthquake aftershocks as Green's function", *Geophysical Research Letters*, Vol.5, pp.1-4.
- Irikura, K. (1983). Semi-empirical estimation of strong ground motions during a large earthquake, *Bull. Disaster Prevention Research Inst., Kyoto University*, 33:2, 63-104.
- Katayama T., F. Yamazaki, S. Nagata, L. Lu and T. Turker (1990). A strong motion database for the Chiba seismometer array and its engineering analysis. *Earthq. Engrg. Struct. Dyn.* 19, 1089-1106.
- Lu, L. (2000). A procedure to modify the frequency and envelope characteristics of empirical Green's function. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- 和泉正哲・勝倉裕 (1983). 地震動の位相情報に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、327、20-26.
- 原田隆典・田中 剛・田村好文 (1995). 震源特性を考慮した地震動のシミュレーション手法、土木学会論文集、No.507/I-30, pp. 209-217.

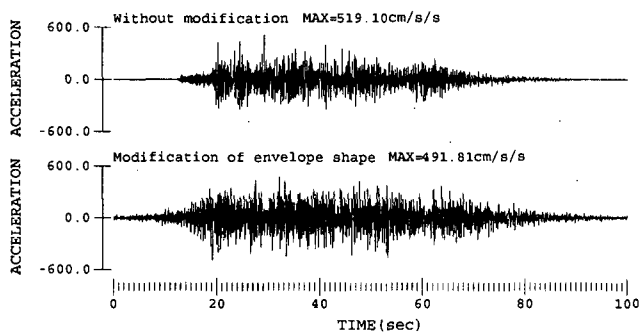


図-6 合成波形

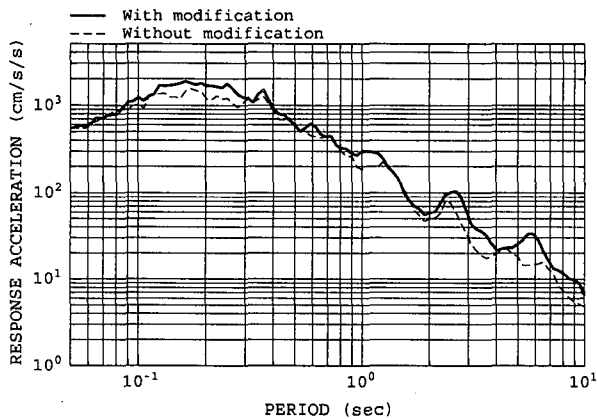


図-7 合成波形の加速度応答スペクトル

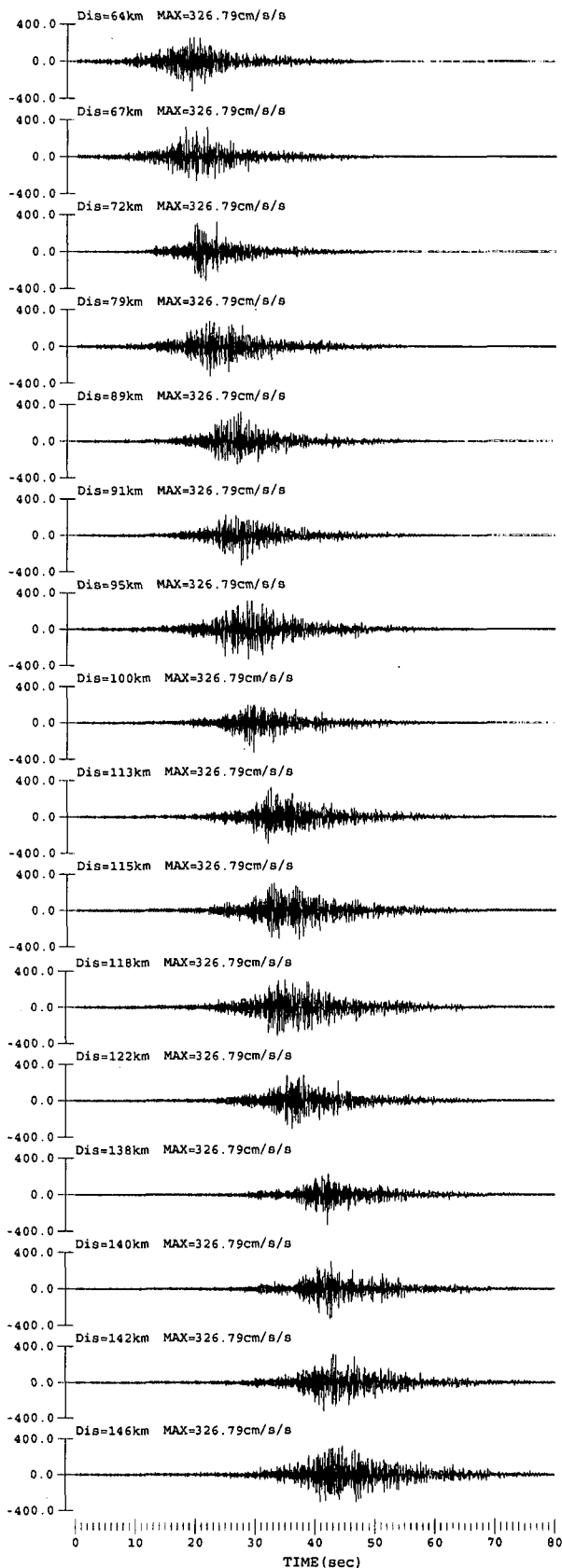


図-5 個々の小断層による評価地点の波形