

三次元境界要素法を用いた 擬似経験的グリーン関数法の検討

福井大学大学院 学生会員 法村 徹也
 福井大学大学院 学生会員 Teuku Khairuman
 福井大学大学院 正会員 福井 卓雄

1. 序論

強震動予測手法の一つである経験的グリーン関数法¹⁾は、適切な地震観測記録が存在する場合には、震源断層の破壊伝播やすべりの不均質性、震源からサイト近傍までの伝播経路特性、サイト増幅特性を考慮できるため、最も信頼性の高い強震動予測手法であるといわれている。しかしながら、この手法は対象とするサイトでの地震観測記録がない場合には適用することが難しく、また地震計が設置されていないと観測記録が得られないためその地点での強震動予測が行えないという欠点がある。これらの理由により、統計的グリーン関数法のように地表面のメッシュ分割を行い面的な地震動予測を行うことは困難となっている。

この欠点を克服する方法として高橋により提案されている擬似経験的グリーン関数法²⁾がある。この手法は高密度強震観測記録と浅部及び深部の地盤モデルを活用することで、任意地点の地震動を推定し、その波形を経験的グリーン関数法で用いる小地震波形とし、強震動予測を行うものである。高橋による擬似経験的グリーン関数法では、長周期域における任意地点の理論波形をシミュレートするために三次元有限差分法を用いて行っているが、本報告では三次元境界要素法を用いることとする。この理論波形を用い2地点間の伝達関数を求め、任意地点での推定波形を導き、観測波形との比較・検討を行う。

2. 長周期域の地震動の推定

2つの地震観測点A, Bにおいて、地震aによる地震動記録が存在するとき、これらの観測波形のスペクトルは下記のように表記される。

$$\begin{aligned} O_{Aa}(\omega) &= S_a(\omega) \cdot PG_{Aa}(\omega) \\ O_{Ba}(\omega) &= S_a(\omega) \cdot PG_{Ba}(\omega) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $S_a(\omega)$ は震源の影響、 $PG_{Aa}(\omega)$ 及び $PG_{Ba}(\omega)$ は震源から地点A, Bまでの伝播特性とサイト増幅特性の影響を示す。更に地点A, B間の伝達関数 $R_{ABa}(\omega)$ は、以下のように表記できる。

$$R_{ABa}(\omega) = PG_{Aa}(\omega)/PG_{Ba}(\omega) = O_{Aa}(\omega)/O_{Ba}(\omega) \quad (2)$$

別の地震bが地震aの震源の近傍で発生したとすると、地震bでの地点A, B間の伝達関数 $R_{ABb}(\omega)$ は、図-1に示すように近似が可能であり、地震bによる地点Aの地震動

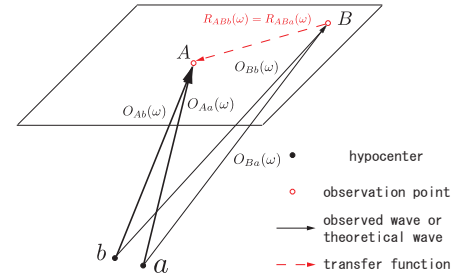


図-1 地震 a, b による 2 地点間の伝達関数

スペクトルは以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} O_{Ab}(\omega) &= S_b(\omega) \cdot R_{ABb}(\omega) \cdot PG_{Bb}(\omega) \\ &\cong R_{ABa}(\omega) \cdot O_{Ba}(\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

地震bによる地点Aの波形を推定するには、地点Bでの観測波形と伝達関数 R_{ABa} が必要となる。今、地震bによる地点Bの観測波形は得られているとする。ここで、地震aの波形を三次元境界要素法によりシミュレートした理論波形とし、(2)式よりA, B間の伝達関数を推定する。理論波形は任意の地点で得られるため(3)式を用いることで任意地点の波形の推定が可能である。この伝達関数を適用するには、理論波形と観測波形による伝達関数が同等とみなせることが必要であるため、検討を行う必要がある。

(1) 三次元境界要素法による理論波形

境界要素法は、対象領域全体を分割して行う差分法や有限要素法と異なり、対象領域の境界上の離散化のみで解析が行えるため無限領域の問題の扱いに適している。特に、本報告のような点震源と地表面のみを考える半無限領域の波動問題の解析においては、より適切な理論波形の作成が可能であるといえる。

具体的には、時間領域において三次元境界要素法を用い理論波形をシミュレートする。震源時間関数にはコサイン型の時間関数を用いる。まずは一層地盤を対象とし、それから多層地盤に拡張を行っていく。震源位置、震源メカニズムは防災科学研究所による推定結果を用いる。

(2) 伝達関数

地点A, B間の伝達関数の算出にはノイズが出力共に存在すると仮定したHv推定法³⁾を用いる。伝達関数は、ある一点の波形を基準とし、他の地点の波形から推定することを念頭に置き、他の地点を式(2)の右辺の分母として伝達関数を求める。その概念図を図-2に示す。観測波形につ

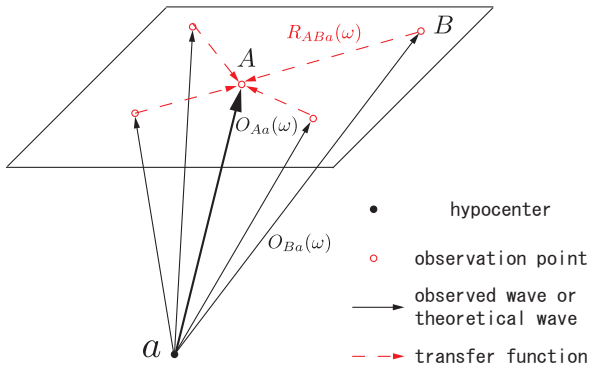


図-2 伝達関数の推定方法の概念図

いては全ての地点でS波速度の主要動部分を含むように切り出し開始時間と切り出し長さを決定する。また、クロススペクトル、エネルギースペクトルに対して0.1HzのParzen Windowによる平滑化により平均的特性を求める。伝達関数に各地震観測点における観測波形のフーリエスペクトルを乗じ、フーリエ逆変換を行い波形の推定を行う。

3. 短周期域の地震動の推定

短周期域の地震動推定には、浅部地盤構造の影響が大きいとし、平行成層仮定の下、一次元の増幅特性の比を求めることとする。ただし、震源とサイトの幾何学的位置関係に伴う放射特性、方位角、入射角、P波、SV波、SH波の波動種別による増幅特性の補正を行う。地震aによる地震動を地点Aで観測したときのスペクトルは以下のように表現される。

$$O_{Aa}(\omega) = S_a(\omega) \cdot P_{Aa}(\omega) \cdot G_A(\omega) \quad (4)$$

ここで、 $S_a(\omega)$ は震源特性、 $P_{Aa}(\omega)$ は震源からサイトまでの伝播経路特性、 $G_A(\omega)$ はサイト増幅特性であり、それぞれ以下のように表現できる。

$$S_a(\omega) = F(\theta, \varphi_{Aa}) \cdot M_o(\omega) / 4\pi\rho\beta^3 \quad (5)$$

$$P_{Aa}(\omega) = \exp(-\pi f R_{Aa} / Q_s \beta) / R_{Aa} \quad (6)$$

$$G_A(\omega) = G(\omega, \psi_{Aa}, \varphi_{Aa}) \quad (7)$$

ここで、 $F(\theta, \varphi_{Aa})$ は放射特性、 $M_o(\omega)$ は震源スペクトルで、 $M_o(0)$ は地震モーメントに一致する。 ρ は媒質の密度、 β はせん断波速度、 R_{Aa} は震源距離、 Q_s は媒質の減衰、 ψ_{Aa} は入射角、 φ_{Aa} は方位角である。式(4)は式(1)に対して伝播経路特性とサイト増幅特性を分けたものとなっている。これらのパラメータのうち $F(\theta, \varphi_{Aa})$ 、 R_{Aa} 、 ψ_{Aa} 、 φ_{Aa} は震源からサイトまでの幾何学的な位置関係に基づいている。

地点Bで観測された地震aによる地震動 $O_{Ba}(\omega)$ と $O_{Aa}(\omega)$ との関係をこれらの式を用いて表すと以下のように表現される。

$$O_{Ba}(\omega) = \left[\frac{F(\theta, \varphi_{Ba})}{F(\theta, \varphi_{Aa})} \cdot \frac{R_{Ba}}{R_{Aa}} \cdot \exp\left(\frac{-\pi f(R_{Ba} - R_{Aa})}{Q_s \beta}\right) \right] \times \frac{G(\omega, \psi_{Ba}, \varphi_{Ba})}{G(\omega, \psi_{Aa}, \varphi_{Aa})} \cdot O_{Aa}(\omega) \quad (8)$$

ここで、式(8)の右辺の大括弧内は、2地点A、B間の伝達関数を示しており、式(8)と式(3)は同義である。式(3)では伝達関数に三次元境界要素法による理論波形を用い、式(8)では2地点に対してそれぞれ震源の放射係数、伝播経路特性及びサイト増幅特性を乗じて求めたスペクトルを用いている。

(1) 増幅係数

増幅係数として、放射特性、伝播経路特性、サイトの増幅特性があり、それぞれ以下の通りである。震源からサイト近傍までの伝播経路でのQ値は、 $Q = 100f^{0.7}$ とする。なお、表層地盤の減衰は土質別の周波数依存型のQ値を設定する。放射特性は、0.5Hz未満は理論放射特性、2Hz以上を等方的な特性とし、その間を線形的に変化する周波数依存型の放射特性とする。サイトの増幅特性の算出に関しては、レイトレーシングに基づく地震基盤への入射角を考慮した各波動成分毎の増幅特性を考慮する方法を用いる。

(2) 伝達関数

伝達関数の算出には長周期域の検討と同様にHv推定法を用いる。伝達関数の算出方法は長周期域の場合と同様のもので、クロススペクトル、エネルギースペクトルに対しては0.2HzのParzen Windowによる平滑化により平均的特性を求めることとする。

4. 推定波形のハイブリッド合成

長周期域と短周期域の推定波形のハイブリッド合成は3方向の各成分に対して行う。振幅特性については、接続周期 T_c を2.0秒とし、周期 $T_c/1.4$ から $T_c/0.6$ 秒の間でコサイン型のマッチングフィルターを適用する。また時期領域において、長周期域と短周期域の推定波形の互いのS波初動が合うように調整して、時間軸上で重ね合わせる。

5. 解析結果・結論

解析結果と結論については発表当日に報告を行う。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所のK-Netの観測波形、F-Netのメカニズム解を使用させていただきました。最後に記して謝意を表します。

References

- 1) K. Irikura: Prediction of strong acceleration motion using Empirical Green's Function, Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.151-156, (1986)
- 2) 高橋・福和・林・飛田: 地盤モデルに基づく2地点間の伝達関数と地震観測記録を用いた任意地点における地震動の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, 2006
- 3) 理論地震動研究会編著: 地震動 - その合成と波形処理 -, 鹿島出版社, 1994